

まえがき

建設材料としてあまねく使用され、今後もその重要性は変わらないであろうと考えられるコンクリートの普及の歴史は、言いかえれば先達の研究・技術開発の歴史である。常に、より高性能で耐久性に優れるコンクリートの開発を要求され、その時代の英知を結集して要求に応え続けてきた結果として、現在の多種多様なコンクリート材料およびコンクリート工法・構造物がある。今後は、これまでの要求に加え、環境に調和するとか低環境負荷であることが開発規範の根底に据えられ、これらを満足するものとして、次世代のコンクリートのあり方が形作られていくに違いない。

この研究・技術開発の歴史を概観すると、そこには様々なアプローチの仕方があることはいうまでもない。例えば、開発の動機の観点から、材料物性や施工性の向上を目的としてとか、構造・工法の合理化の必要に迫られて、といった分類をすることができるかもしれない。また、ミクロな視点からの研究に重点を置くサイエンス的アプローチもあれば、施工や構造・材料全体をマクロなシステムととらえ、技術に重点を置くエンジニアリング的発想に基づくアプローチという考え方も成り立つ。コンクリートのように非常に長い歴史を持つ材料では、突然新たな材料として創成されるのではなく、この地道なアプローチの過程で、それまで何気なく観察、認知されていた現象や事実が、その後の工学的展開の端緒となり、結果として技術として確立していくのが普通である。本研究専門委員会が検討の対象とした「コンクリートの自己修復性」も、まさにその一つの例である。すなわち、古くから自己癒着として知られていた現象が、高性能なコンクリートの開発過程で工学的発展の方向性が明確に見えてきて、そこに他分野で先行していた知的材料／構造の概念が融合し、現在では、自己修復機能を備えた新たなコンクリート構造システムとして具体化しそうなところまでこぎつけたのである。自己治癒／修復性を技術という形で確立し、材料や構造に内在させた修復性能を自発的に発揮させることができれば、新たな外的作用や環境負荷を生じることなくコンクリートの性能は改善され、コンクリート構造物の長寿命化に寄与するであろう。従来は、コンクリートの性能に重大な影響を及ぼさないとしてその存在が許容されていたような微細なひび割れも、現代ではコンクリートの耐久性に影響を及ぼすことが懸念されるようになってきている。そのような微細なひび割れを本機能によって修復することを、設計体系の中に具体的数値規準をもって組み込むことができれば、自己治癒／修復性は耐久性設計の一端を担う重要な機能発現となりうると期待できる。

本研究専門委員会は、コンクリートの自己修復性に関する国内外の既往の研究と、最先端の研究動向を総括し、今後の研究展開の方向性を明確にすることを目的として、平成 19 年度よりその活動を開始した。土木、建築、材料各分野から集まった 13 名の委員により構成され、コンクリートの自己修復性を個人の研究テーマとしている、いないにかかわらず、この現象や機能に興味を持つ研究者が、自由に議論を重ねた平成 19～20 年度の 2 年間の活動の成果を、ここに報告書として上梓する次第である。本報告書が、多くの方々がコンクリート構造の自己修復性に興味を持つきっかけとなり、新たな材料、システム開発に資する資料となれば、委員会としては望外の喜びである。

本委員会活動中には、多くの方々にご協力をいただいた。横浜国立大学高橋宏治先生には、委員会にて自己修復性に関してご講演いただき、さらには本報告書に対しても、セラミックス研究

者の立場から、材料の自己修復性に関わる解説のご寄稿をいただいた。さらに、本研究専門委員会が主催した 2008 年コンクリート工学年次大会（福岡）期間中の研究集会のパネルディスカッションにおいては、パネリストの東北大学三橋博三先生、京都大学宮川豊章先生、東京大学岸利治先生、太平洋セメント株式会社山田一夫氏より貴重な助言を賜り、フロアの皆様からも委員会活動の将来展望に関わる建設的なご意見を多数いただいた。ここに、改めて深甚の御礼を申し上げながら、本報告書が皆様の期待に沿うものであることを心から願わざるをえない。

また、本報告書は、委員会の各委員が本務の間に時間を見つけては既往の研究を丁寧にレビューしていただいた成果である。限られた時間のなかで、重要な研究をもれなく精査して、おまとめいただいた委員の皆様には感謝申し上げたい。特に、委員会幹事を務めていただいた名古屋大学国枝稔先生、山形大学西脇智哉先生、両先生の熱意に満ちた牽引的取り組みには、ただただ頭を下げることしか思いつかない。

さて、本委員会は平成 20 年度末をもってひとたびその活動を終える。しかし、コンクリートの自己修復性に関する研究は、国内外でまだ活発な進行過程ある。むしろ本委員会同様に今やっと既往の研究の総括を終えたところで、今後により大きな展開、研究潮流がやってくると確信する状況にある。幸いにして、本委員会は、平成 21 年度から日本コンクリート工学協会研究専門委員会（A 種）として再スタートすることが承認されている。近い将来、コンクリートの自己修復性を我が国の独創的な技術として世界に発信できるよう、新たな目標をもって活発な委員会活動を行いたいと考えている。本報告書は、その新たな取り組みを開始するにあたっての基礎をなす資料と位置づけられる。本報告書が伝えようとする研究開発の流れを多くの方々が汲んでくださり、通読後には、新たな委員会に委員として参画してみよう、もしくは本委員会の活動の今後を注視していこうと思わせる内容であることを祈りたい。

JCI-TC075B セメント系材料の自己修復性とその利用法研究専門委員会
委員長 五十嵐心一

JCI-TC075B

セメント系材料の自己修復性とその利用法研究専門委員会

委員長 Chairman	五十嵐 心一 Shin-ichi Igarashi mailto: igarashi@t.kanazawa-u.ac.jp	金沢大学 Kanazawa University
幹事 Secretary	国枝 稔 Minoru Kunieda mailto: kunieda@civil.nagoya-u.ac.jp	名古屋大学 Nagoya University
幹事 Secretary	西脇 智哉 Tomoya Nishiwaki mailto: ty@e.yamagata-u.ac.jp	山形大学 Yamagata University
委員 Member	浅野 幸男 Yukio Asano	岐阜大学 Gifu University
委員 Member	安 台浩 Tae-Ho Ahn	東京大学 University of Tokyo
委員 Member	稲田 裕 Hiroshi Inada	清水建設 Shimizu Corporation
委員 Member	閑田 徹志 Tetsushi Kanda	鹿島建設 Kajima Corporation
委員 Member	佐川 孝広 Takahiro Sagawa	日鐵セメント Nittetsu Cement
委員 Member	白坂 徳彦 (平成 20 年度) Tokuhiko Shirasaka	太平洋セメント Taiheiyo Cement Corporation
委員 Member	濱田 秀則 Hidenori Hamada	九州大学 Kyushu University
委員 Member	平尾 宙 (平成 19 年度) Hiroshi Hirao	太平洋セメント Taiheiyo Cement Corporation
委員 Member	細田 暁 Akira Hosoda	横浜国立大学 Yokohama National University
委員 Member	丸山 一平 Ippei Maruyama	名古屋大学 Nagoya University
事務局 Representative	福林 幸雄 Yukio Fukubayashi	日本コンクリート工学協会 Japan Concrete Institute

目 次

1.	序論.....	1
1.1	背景.....	1
1.2	本報告書の内容	3
2.	自己治癒／修復現象.....	5
2.1	機能回復現象.....	5
2.2	定義（terminology）	6
3.	自己治癒／修復機構と技術の現状.....	11
3.1	コンクリートに見られる自然治癒現象.....	11
3.1.1	自然治癒に関する既往の研究.....	11
3.1.2	自然治癒をもたらすセメントの再水和の可能性の画像からの理解.....	13
3.1.3	海洋環境下における長期暴露試験より得られた知見	22
3.1.4	漏水環境下における自然治癒.....	36
3.2	自律的な治癒機能の付与.....	39
3.2.1	高炉スラグ、フライアッシュを用いた自律治癒コンクリート	39
3.2.2	膨張材を利用した自己治癒コンクリート	52
3.2.3	ECC の自律治癒	63
3.2.4	バクテリアを利用したコンクリートの自己治癒メカニズム.....	73
3.3	自動的な修復機構の導入.....	78
3.3.1	パッシブ型自動修復コンクリート	79
3.3.2	アクティブ型自動修復コンクリート.....	84
3.3.3	モニタリング（センシング）技術との融合.....	88
4.	自己治癒／修復の材料科学的モデル	98
4.1	水和反応に基づくモデル.....	98
4.1.1	セメントの未反応量による自己治癒ポテンシャル予測	98
4.1.2	セメントの未反応量予測を可能とするモデル.....	98
4.2	破壊に基づくモデル	101
4.2.1	力学性能と自己治癒／修復に期待されるもの.....	101
4.2.2	ひび割れ構成則とひび割れ治癒現象の表現の可能性.....	101
5.	自己治癒／修復効果の実験的評価.....	107
5.1	実験的評価の特徴.....	107
5.2	対象とするひび割れの種類.....	108

5.3	評価指標	109
5.3.1	直接的なひび割れの観察	109
5.3.2	力学性能	111
5.3.3	物質移動抵抗性	112
5.4	今後の課題	113
6.	自己治癒/修復機能の設計への取り込みと適用事例	116
6.1	トンネル覆工コンクリートへの自己治癒コンクリートの適用事例	116
6.1.1	適用した経緯	116
6.1.2	自己治癒コンクリートの施工性	117
6.1.3	自己治癒コンクリートの治癒状況	118
6.2	自己修復機能を取り入れた部材設計例	120
6.2.1	設計の概要	120
6.2.2	設計における検討方法	122
6.3	フライアッシュを用いた自律治癒コンクリートの材料設計例	124
6.3.1	設計における検討方法	124
6.3.2	フライアッシュ混和量の検討	126
7.	他分野における自己治癒（自己修復）現象	129
7.1	セラミックス材料（構造セラミックス）	129
7.2	ポリマー材料（防水分野の応用）	130
7.3	金属材料（高性能複合体の応用）	132
8.	セラミックスの自己き裂治癒現象	134
8.1	はじめに	134
8.2	セラミックスの自己き裂治癒のメカニズム	134
8.3	き裂治癒挙動に及ぼす治癒温度と治癒時間の影響	135
8.4	き裂治癒挙動に及ぼす雰囲気の影響	136
8.5	き裂治癒材の高温強度特性	137
8.6	おわりに	138
9.	研究集会 in 福岡	139
10.	まとめと今後の課題	157

1. 序論

1.1 背景

コンクリート構造物に生じる比較的小さなひび割れが、水分の供給を受ける環境下において自然に閉塞する、いわゆる「自己治癒」若しくは「自己修復」の現象は、教科書にも記載が見られるような古くから知られた現象である。例えば Nevill の著書[1]にも **Autogenous Healing** として掲載され、日本語版では「ゆ（癒）着」と訳されて「破壊したコンクリート中の細かいひび割れは、接線方向の変位を与えずに閉じたままにすれば、湿潤状態で完全に癒える」とある。すなわち、コンクリートは本来的に自己治癒／修復機能を有する材料であるといえる。特に高強度コンクリートなどの、水セメント比が小さいセメント系材料では、硬化コンクリート中にも未水和セメントが本来的に残留しており、ひび割れ等の発生により追加的な水和反応が生じると、特に補修などを行わなくてもひび割れが閉塞する。例えば水セメント比が 40% の場合、約 30% のセメントが未水和のまま残るとされており、水分の供給を受ける構造物のひび割れが自然に閉塞することは、古くはセメントが現在の形となって間もない 1836 年にも既に報告があるとされている[2]。このようなセメント系材料に特有の自己治癒／修復現象に関して、ひび割れの閉塞状況を詳細に観察、機構を解明し、自己治癒／修復現象が発現するため条件を特定するための研究が成果を上げつつある。

この一方で、自己治癒／修復機能を取り込んだ先端材料としての「インテリジェント材料」若しくは「知的材料」の開発が多くの分野で取り組まれている。これは日本発の概念であり、情報の概念を材料の中に取り込み、環境変化に自ら適応可能な材料、もしくは、センサ、プロセッサ、アクチュエータの 3 つの機能を兼ね備えた新しい材料と、1989 年の科学技術庁（当時）の第 13 号答申[3]においてなされた定義がはじまりである。ここで示されたインテリジェント材料の概念図を図-1.1.1 に示す。また、これとほぼ同じ時期に、欧米では「スマート材料（構造）」の言葉で、同様の概念が打ち出された。これは、インテリジェント材料が新たな材料創製を目指すのに対し、各種の機能をデバイスの組み合わせにより、同等の機能を与えることを目的としている[4]。コンクリート以外の多くの分野では、「再水和」のような機構が期待できないために、このように新たな機能を追加することによる自己治癒／修復機構の付与が主流となっている。

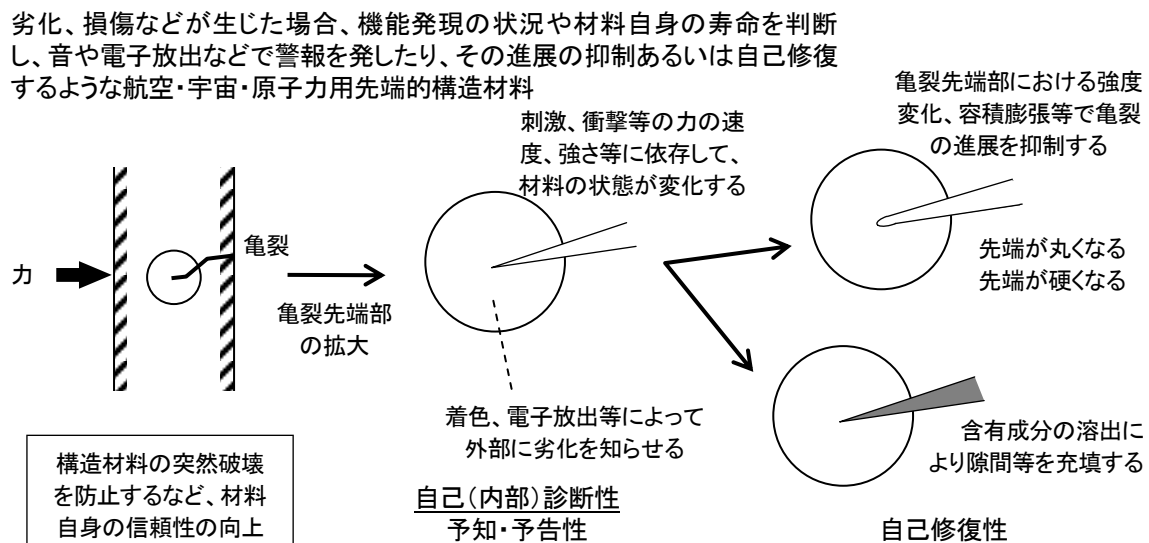


図-1.1.1 航空・電子等技術審議会第 13 号答申が描く構造材料のインテリジェント化の姿[4]

このような「知的材料」は、ナノ技術を駆使した原子レベルからの材料設計といった、「小さな」材料のイメージが強いが、コンクリート構造物のような重厚長大な構造物にこそ有効であるとも考えられる。すなわち、社会基盤構造物等に代表される巨大な構造物は、維持管理に膨大な手間とコストが必要であるとともに、使用停止期間の存在は望ましくない。材料や構造物自体が発生した異変を察知し、自ら適切に対処できれば、著しく信頼性や耐久性が向上するものと期待される。コンクリートの分野でも、上述のような機能付与を目的とした材料をコンクリートに追加することで、自己治癒／修復現象のポテンシャルを高める検討も行われている。例えば膨張材やフライアッシュ等の混和材を適切に混入する手法や、繊維補強によってひび割れ幅の拡大を抑制することによって、自己治癒／修復現象を促進させる新しい技術が提案されている。また、通常の人的なひび割れ補修作業に代替するものとして、人工的なセンサおよびアクチュエータ等を配置して新たな追加機能として自動的に修復を行うものも提案されつつある。

海外に目を向けても、セメント系分野を含めて自己治癒／修復材料は注目を集める研究トピックとなっている。RILEM には自己治癒／修復現象を対象とした研究委員会(TC SHC: Self-healing phenomena in cement-based materials、座長：E. Schlangen・デルフト工科大学)が2006年度に設置された。また、2007年度には第1回の自己治癒／修復材料全般に関する国際会議(ICSHM: International Conference on Self-Healing Materials)が開催され、セメント系材料分野からも発表が行われた。「コンクリート工学」誌上でも、この会議の報告が行われており、2009年度には第2回会議が開催される。

このような研究が注目を集めるようになった背景には、環境問題に代表される持続可能な社会の構築という時代の要請がある。コンクリート構造物の早期劣化の顕在化が社会問題になった一方で、従来のスクラップ・アンド・ビルドによらない、持続可能なコンクリート構造物が強く求められている。コンクリートの劣化がひび割れとして顕在化すると、水などを媒介とする劣化外力の浸入を許し、早期劣化の原因となるが、コンクリートのひび割れの発生を、完全に抑止することは様々な条件から現実的な手段とはならないことが多い。そのため、コンクリート構造物の耐久性を高めるためにはひび割れが有害なものとして顕在化する前に、ひび割れの補修などの対策を取る必要がある。しかし、コンクリート構造物はあらゆる用途・場所で使用されており、大規模構造物が数多くあることから、補修は勿論、その必要性を判断するための検査だけでも、経済的・時間的・人的なコストは莫大なものにならざるを得ない。すなわち、コンクリート自身が持つ機能によって、不可避免的に発生するひび割れを積極的に制御し、補修という本来はひび割れの発生後に実施する事後対策を、コンクリート構造物に計画・施工の段階か

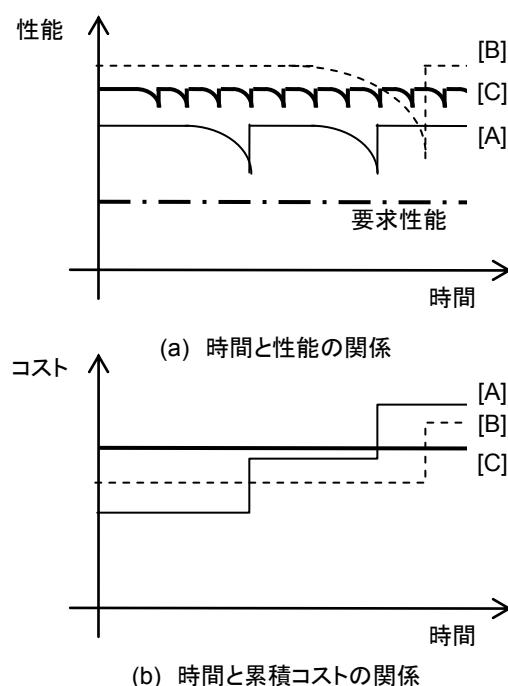


図-1.1.2 時間と性能・コストの模式図 [A] 通常材料、[B]高性能材料、[C]自己治癒／修復材料の場合 [2]より改変

ら事前対策として取り入れることが可能となれば、より計画的な耐久設計に寄与できるものと期待される。近年は国・地方を問わず財政の逼迫が叫ばれ、コンクリート構造物の長寿命化に大きな寄与が期待できるこの技術に注目が集まりつつあることは驚くに値しない。例えば、図－1.1.2のグラフ[2]に示されるように、ある程度イニシャルコストの増加が伴うものであっても、検査や補修のコストを大幅に削減することが可能となれば、LCCの観点からも優位に立つポテンシャルを持った材料になるものと期待される。

しかし、新たに提案されている技術の実用化のみならず、古くから知られた現象である点も含めて、設計段階で予め考慮できるほどのデータの蓄積および定量的な評価がなされているとはいえない。本委員会では、これらコンクリートの自己治癒／修復機能に関する既往の研究を再整理し、セメント系材料の自己修復機能の定量化を試みてきた。各スケールでの自己治癒／修復機能の定量化を目指すことを目的として、各委員の最新の研究動向を含めた文献調査を行い、議論を重ねてきた。また、2008年度のJCI年次大会で行われた研究集会・パネルディスカッションでは各分野の識者から貴重な知見を集積し、今後求められる研究の方向性などについて議論を行った。さらに、数値解析による予測技術の確立、自己治癒／修復機能のポテンシャルを高めた高機能材料開発の可能性について提案を試みており、これらを本報告書で紹介するものである。

1.2 本報告書の内容

本報告書は、セメント系材料の自己治癒／修復現象について、これまでの研究の経緯と現段階での到達地点を纏めたものである。以下に、各章ごとの概略を示す。

2章では、本報告書で対象とする自己治癒／修復現象の範囲と、用語の定義について紹介している。セメント系材料が本来的に持つ自己治癒現象から、自己治癒を目的とした混和材の利用、自動的な修復を行うための機能要素を追加するものまで、自己治癒／修復効果を得るための手段ごとに分類した上でそれぞれの現象・手法について用語を定義している。3章では、2章で定義されたそれぞれの機能回復現象ごとに、現在取り組まれている研究について、最新の研究動向を紹介している。4章では、自己治癒／修復を材料科学的にモデル化することを試みている。5章では、自己治癒／修復効果を評価するための実験的な検討について紹介している。6章では、自己治癒／修復現象を設計段階へ取り込むための取り組みについて、適用事例を含めて紹介している。7章では、自己治癒／修復現象に関するコンクリート・セメント系材料以外の分野での取り組みについて紹介している。特にセラミックス分野に関しては、先端的な研究に取り組んでおられる高橋宏治・横浜国立大学准教授に寄稿をいただき、8章に紹介している。9章では、2008年度のコンクリート工学協会年次大会において、本研究委員会が主催した研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」から、特に関連が深いと思われる分野の第一線でご活躍されているパネリストをお迎えしたパネルディスカッションでの議論を詳報している。その他、付録として「コンクリート工学」にて既に掲載された自己治癒／修復に関する記事を再録している。更に、セラミックス分野の資料も添付した。

<参考文献>

- [1] Neville A.M.著・三浦尚訳：ネビルのコンクリートバイブル、技報堂出版、p. 413、2004
- [2] van Breugel K.: Is there a market for self-healing cement-based materials?, Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials, pp. 1-9, 2007

1 章 序論

- [3] 科学技術庁年報、大蔵省印刷局、Vol.35、pp.130-131、1991
- [4] 柳田博明・山吉恵子：テクノデモクラシー宣言、丸善ライブラリー、pp.54-60、1996
- [5] 細田暁・岸利治：ひび割れ自己治癒コンクリートの国内外の研究動向、コンクリート工学、Vol.45、No.11、pp.3-6、2007.11

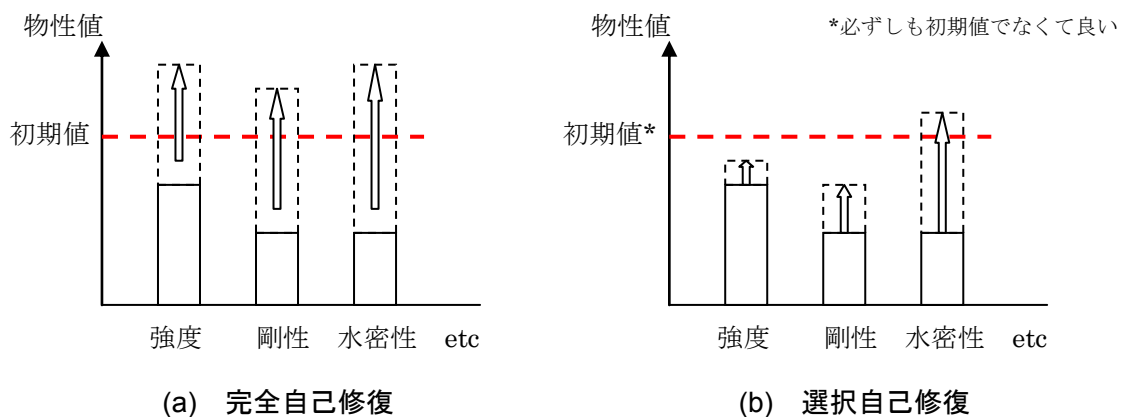
[担当 西脇智哉]

2. 自己治癒／修復現象

2.1 機能回復現象

ここでは、本報告書で取り上げる自己治癒／修復の範囲について述べる。コンクリートが「治癒する」若しくはコンクリートを「修復する」といっても、生じる劣化は様々であり、その全てを修復可能な自己治癒／修復コンクリートは、最終的な目標ではあっても現時点で現実的なものではない。この一方で、自己治癒／修復の言葉のイメージからは、SFの世界に登場するようなあらゆる変状や劣化を元の状態まで修復可能なものを連想させる。コンクリートの場合であれば、**図－2.1.1(a)[1]**に示されるように、力学特性を始めとしたあらゆる性能が漏れなく、少なくとも初期値まで回復するようなものであろう。

通常のコンクリート構造物に、ひび割れ等の劣化が生じた場合には、コンクリート診断士などによる検査を経て、適切な補修・補強が行われて機能・性能が回復される。このような場合でも、あらゆる性能が初期段階まで、あるいはそれ以上の水準にまで回復させることは必ずしも現実的ではない。また、力学的な性能低下を回復または向上させることを目的とした補強とは異なり、一般に補修では、耐荷性の回復・向上は目的とせず、それ以外の耐久性や防水性などの機能を回復させることを期待している[2]。自己治癒／修復機能は、材料自体の変状や劣化を対象としていることから、補強よりも補修に近い考え方であると考えられる。そのため例えば**図－2.1.1(b)**のように、強度や剛性の回復が見られない場合でも、水密性など少なくとも1つの機能回復が見られる、若しくは、この回復が初期値に満たない場合や、性能自体の回復がなく劣化の進展を遅らせるだけであっても補修を行う意味がある。すなわち、自己治癒／修復コンクリートも、力学特性も含めた完全な機能回復を必ずしも目指す必要はなく、対象を明確にした対策を盛り込むことで、現実的な技術にできるものと期待される。

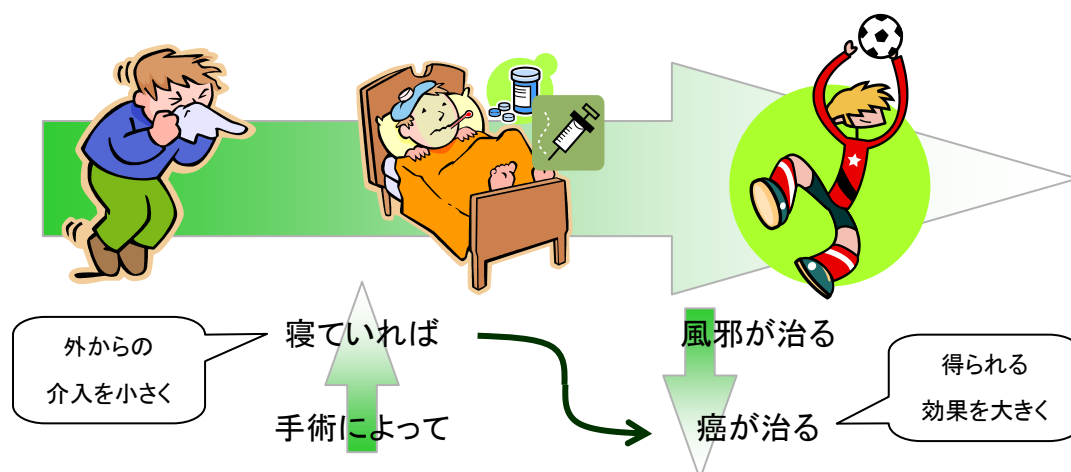


図－2.1.1 機能回復のイメージ[1]

生物に見られる自然治癒の現象は、様々な病気や怪我に対応することが可能である。しかし、自然治癒の不可能な疾病や状態変化も当然存在し、最終的には死に至ることは避けられない。**図－2.1.2**に示すイメージのように、人間が風邪を引いた場合ならば、寝ていることで完治するのは通常のことだが、寝ているだけで癌のような深刻なものも含めたあらゆる病が完治するものではない。また、静養によって風邪が完治する場合にも、滋養のある食べ物や、場合によっては薬などの外部からの入力が必要となる。コンクリートの自己治癒／修復についても、永久機関が不可能であることと同様に、外部からの介入が全くないまま実現されることはない。例えば、ひび割れに対する水分の供給や、内蔵アクチュエータの起動・駆動のための電気信号等の、最小限の外

部からの介入がある場合であっても、人間の手による直接の補修作業を伴わないものについては、自己治癒／修復に分類することが妥当であると考えられる。また、セメント系材料以外の分野では、「再水和」の機構を期待できないため、アクチュエータ等も含めた追加デバイスによって、新たな機能としての自己治癒／修復を追加する手法が一般的である。再水和による機能回復と、新たな機能の付加は考え方が異なるため、それぞれを区別するために適した用語を設定する必要がある。既往の研究例は、いずれもコンクリートに生じたひび割れを対象としたものが多く、修復のための手法やターゲットとするひび割れの程度などがそれぞれ異なっており、どのような事象が確認されたことによって「自己治癒」「自己修復」が行われたと見做すか、その時の修復度合いや回復率の評価方法、どの範囲までを自動化とするのかといった、「自己修復」の定義に関わるような範囲まで含めて研究例ごとに違いが見られる。次節では、これらの自己治癒／修復を機構によって分類・整理し、それぞれに用語を定義して議論を整理する。

これらの議論を踏まえて、本報告書で取り扱う自己治癒／修復現象は、何らかの性能低下に対して、人間の手による直接の補修作業を必要とせず、コンクリートに予め用意された機構によって、少なくとも 1 つの性能が回復するもの全てとする。コンクリートの分野における「知的」の形容詞を冠しての研究開発は、特に光ファイバを始めとするセンサ材料を利用した構造物のヘルスマonitoringの研究例が多く、既に橋梁などの実構造物に適用されている例も見られる。これらは人間の目による網羅的な検査を経ることなく、コンクリート構造物自身がひび割れ発生などの異常を検知し、知らせるという意味で、「スマート」な構造物である。自律的なモニタリングによって検査の手間やコストが大幅に削減されることは十分に「知的」であるが、本報告書の対象は、あくまで機能を回復させることのできる自己治癒／修復であるために、モニタリング技術そのものについてはここでは取り扱わない。



図－2.1.2 目指す自己治癒／修復コンクリートのイメージ

2.2 定義 (terminology)

前節の議論を踏まえ、本研究委員会では図－2.2.1 に示すように自己治癒／修復のそれぞれの現象に対して用語の定義を行い、表－2.2.1 に示されるように各用語に対する現象とメカニズムの分類を行った。また、表－2.2.2 には、それぞれの用語に対応する研究事例を示している。以下に、それぞれの用語についての説明、各用語間の差異および当て嵌まる研究事例について述べる。また、英語表記(案)も併記する。

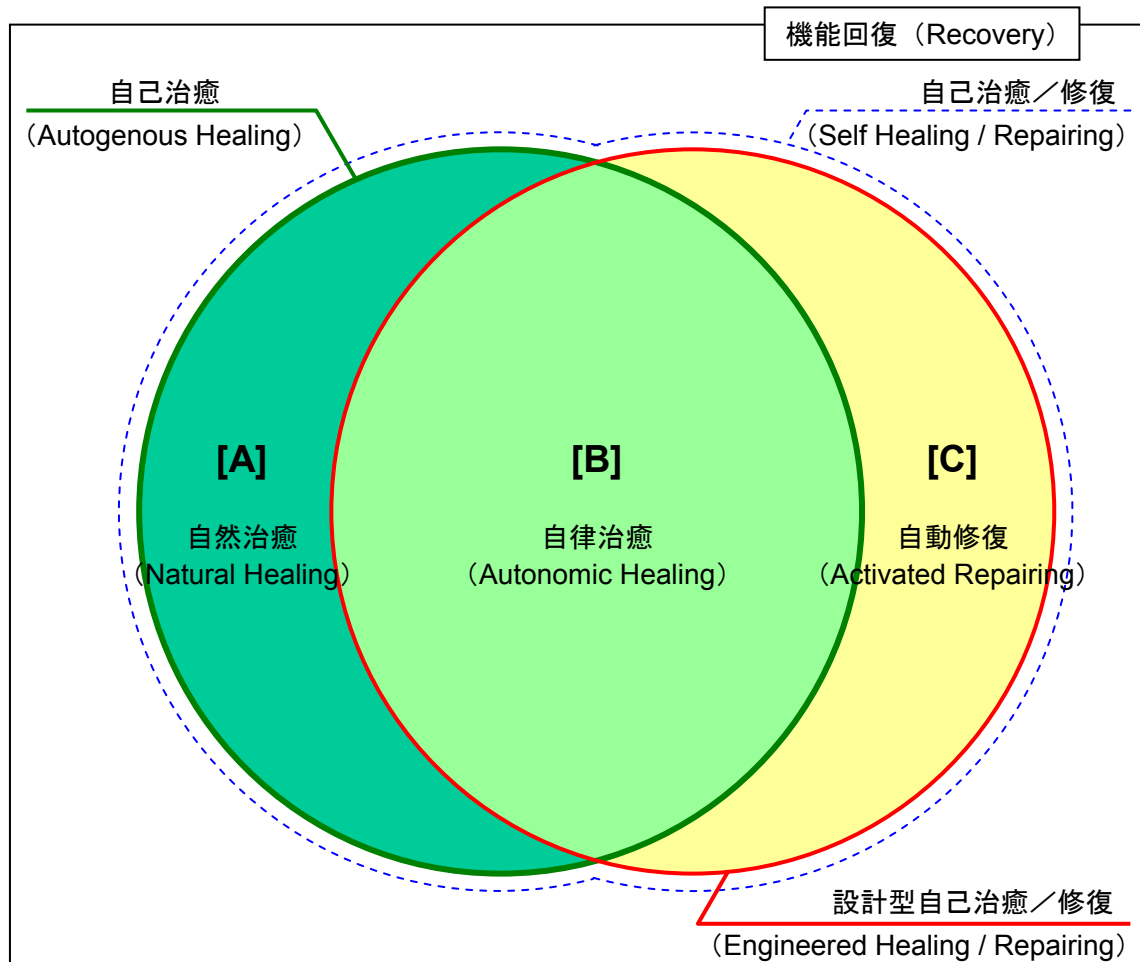


図-2.2.1 自己治癒／修復コンクリートの定義

表-2.2.1 各現象のメカニズムと分類

自然治癒(Natural healing) : 材料設計などに特別な配慮を講じずとも、例えば水分などが存在する環境下でコンクリートのひび割れが自然に閉塞する現象

自律治癒(Autonomic healing) : 水分などが存在する環境下でコンクリートのひび割れを閉塞、あるいはそれを促進させることを期待し、適切な混和材の使用などの材料設計を行ったコンクリートにおいて、ひび割れが閉塞する現象

自動修復(Activated healing) : 自動的な補修作業を行うことを目的としたデバイス類があらかじめ埋設されたコンクリートにおいて、その機構によってひび割れが閉塞する現象

自己治癒(Autogenous healing) : 自然治癒と自律治癒を包含する概念で、水分などが存在する環境下でコンクリートのひび割れが閉塞する現象全体

設計型自己治癒／修復(Engineered healing/repairing) : 自律治癒と自動修復を包含する概念で、ひび割れの閉塞・補修を目的として材料設計が行われたコンクリートを用いることにより、ひび割れが閉塞する現象

自己治癒／修復(Self healing/repairing) : これらの人間の手に拠らないひび割れ閉塞現象の全体

【参考】 Healing, autogenous --- a natural process of filling and sealing cracks in concrete or in mortar when kept damp. (ACI の定義より)

表－2.2.2 各用語に対応する研究事例

	用語	研究事例（掲載章）	治癒／修復	発現の種類
[A]	自然治癒	低水セメント比の残存未水和セメントの再水和（3.1.2） 水理構造物に見られるひび割れの再水和（3.1.3）	治癒	潜在型
[B]	自律治癒	フライアッシュの利用（3.2.1） 特殊混和材（膨張材）の利用（3.2.2） ECC 材料に見られる治癒現象（3.2.3） バクテリアの利用（3.2.4）		設計型
[C]	自動修復	マイクロカプセル等の混入（3.3.1） 脆性パイプネットワークの利用（3.3.1） 発熱デバイスの利用（3.3.2） 形状記憶合金の利用（3.3.2） モニタリング技術との融合（3.3.3）	修復	

図－2.2.1 の範囲全体となる「機能回復（Recovery）」とは、前節で述べたように、手段を問わず、コンクリートの機能について少なくとも1つ以上が回復される事象全般と定義する。従来どおりの補修・補強がここに該当し、本報告書で取り扱う自己治癒／修復コンクリートは、その手段の一つと位置付けられる。この「自己治癒／修復（Self Healing/Repairing）」は、従来の人間の手による補修や補強の作業を必要とせず、コンクリート内部に予め用意されている機構によって、少なくとも1つ以上の機能回復が行われる事象全体と定義する。

ここでは「治癒（Healing）」と「修復（Repairing）」が併記されているが、前者はセメントの再水和や炭酸カルシウムの析出などの従来のコンクリートにおいても見られる現象によってひび割れが閉塞する現象を、後者は人工的なデバイス等の追加によって従来の補修・補強に代わる手段を導入してひび割れの補修を目指すものとして用語を使い分けている。すなわち、セメント系材料が生得機能として有する、水分と接触してひび割れを自ら閉塞させる機構が「治癒」に当たり、従来から用いられている混和材を適切な配合で混入してこの機構を促進するものも「治癒」に含まれる。その一方で「修復」とは、新たな機能としてのひび割れの充填・補修機能が付与するために、従来の混和材の範疇には含まれないようなデバイス類（例えばマイクロカプセルや発熱デバイス、バクテリア等）が追加されるものとして分類している。この点について、例えば文献[3]では、「Autogenic Healing」と「Autonomic Healing」に分類されており、いずれにも「Healing」の語が用いられている。それぞれの形容詞はジーニアス英和大辞典によると、Autogenic は「自己の体内より生ずる、自生の」、Autonomic は「自律（性）の」と日本語に訳されている。しかしここでは、コンクリートが自ら「治癒する」ものと、コンクリートに内蔵されたデバイス等によってコンクリートが自動的に「修復される」ものというように、機能回復の主体が異なる点を強調する意図から、動詞の部分に別の用語を当てて分類することを提案している。この定義に従えば、図－2.2.2 に示すように図－2.2.1 のベン図の[A]と[B]を併せた部分が「治癒（Healing）」、[C]の部分が「修復（Repairing）」に該当する。また、これは1章で言及した「インテリジェント材料」と「スマート構造」の定義から考えると、材料自身の「治癒」を意図したものが「インテリジェント材料」に、追加デバイスによる「修復」を目指すものが「スマート構造」に対応すると考えることができる。

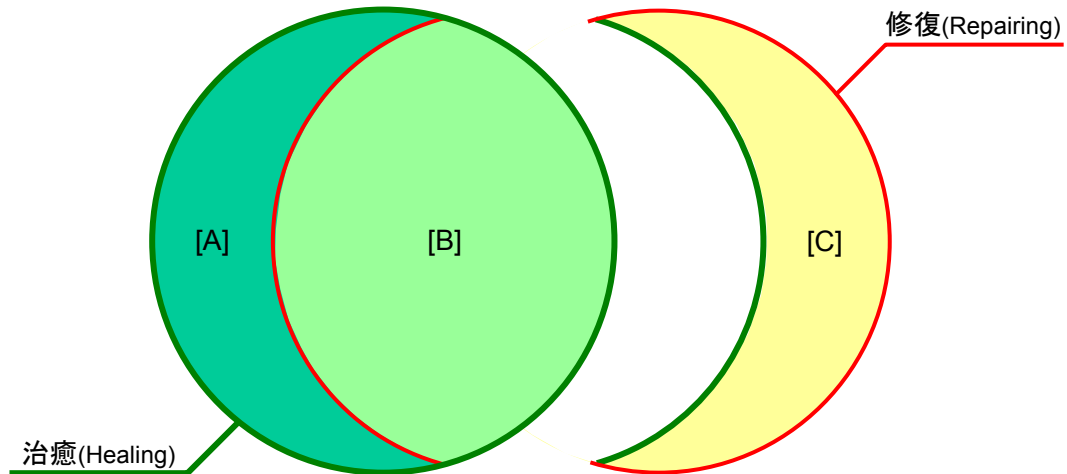
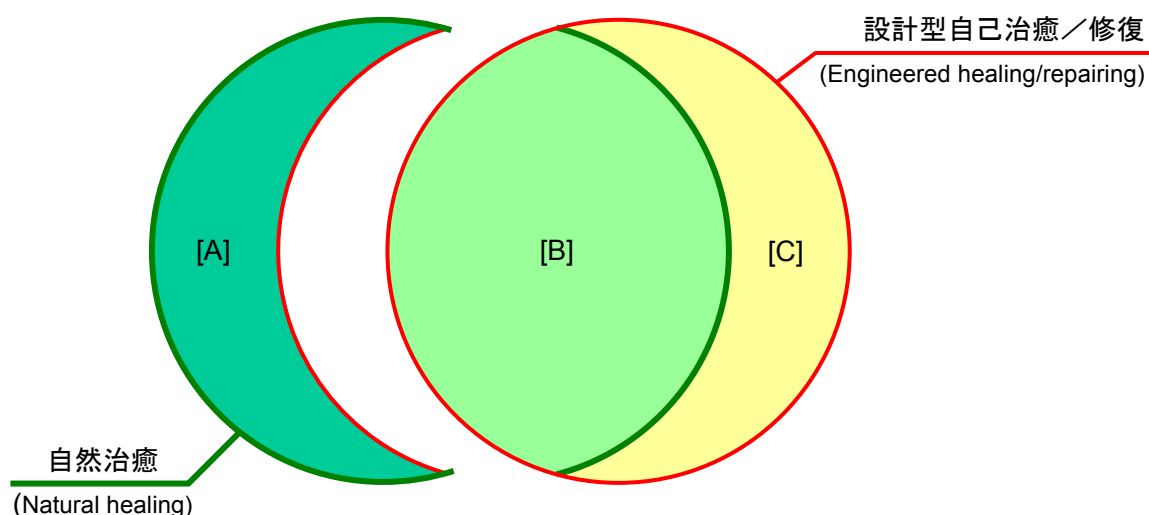


図-2.2.2 「治癒」と「修復」による分類

その一方で、「治癒」の範囲には2つの方向性が内包されている。すなわち、通常のコンクリートに見られる、従来から知られた現象としてのセメントの再水和や、水理構造物等に炭酸カルシウムの析出によるひび割れの閉塞現象と、これらのポテンシャルを引き出すことを目的として、膨張材やフライアッシュ、未硬化エポキシ樹脂等の混和材（剤）、若しくはひび割れ幅の拡大を抑制する目的で短繊維を混入させたコンクリートによる自己治癒である。前者に関して、自己治癒に対して何ら特別な配慮をせずとも、コンクリートが生得に持つ特徴であることを意図し、ここでは「自然治癒（Natural Healing）」と定義している。これは、図-2.2.1中の[A]の領域に当たり、3.1節にてその機構について詳述する。後者に関しては、上述のような混和材や補強繊維が添加されたコンクリートではあるものの、従来から自己治癒／修復以外の目的でコンクリートへの混入が試みられてきたものであり、コンクリートを構成する組織の一部となるものであることを意図して、「自律治癒（Autonomic Healing）」と定義している。すなわち、コンクリートの組織自体がひび割れの閉塞を促すものであることから、コンクリートによる「自律的（Autonomic）」な治癒効果として、この用語を当てている。これは図中の[B]の部分に該当し、研究事例について3.2節において紹介する。これらの2つを包含する概念として、「自己治癒（Autogenous Healing）」を定義する。すなわち、混和材（剤）等の添加の有無に関わらず、コンクリートの組織自体が持つ機構・能力によって、ひび割れが閉塞する現象全体を指している。

これらの「治癒（Healing）」の範疇に含まれない部分が「修復（Repairing）」であり、図中の[C]の部分、外部からの刺激を受けて機能が発現する点を強調して「自動修復（Activated Repairing）」と定義する。ここには、新しい機能としての自己修復効果を積極的に付与するために、人為的なものを含めた特定のトリガーによって、自動的な補修作業を行うためのデバイスが埋設されたコンクリート等の、従来のコンクリート組織ではないものを組み込んでひび割れの自動的な閉塞を試みる研究事例が含まれる。具体的には、上述の補修剤を内包したマイクロカプセル化やガラスパイプを埋設したものや、これらと発熱デバイスを組み合わせる稼働させるものなどが含まれる。更には、生物であるバクテリアを利用することで、ひび割れ中に炭酸カルシウムを析出させてこれを塞ぐ方法も提案されている。これもコンクリートから独立したデバイス（バクテリア）を利用しているという点から、「自動修復（Activated Repairing）」に分類することが適当なものと考えられる。これらについては、3.4節で紹介する。図-2.2.3は、このようにコン

クリートが生得から持つひび割れ閉塞の機構と、通常のコンクリートに自己治癒／修復を意図して新たな要素を付与する観点から、図－2.2.1 を改めて分類したものである。「自律治癒 (Autonomic Healing)」と「自動修復 (Activated Repairing)」は、新たに機能を付与するという共通の方向性で検討が行われていることから、この2つの部分を併せた領域として、「設計型自己治癒／修復 (Engineered Healing/Repairing)」の用語を定義する。



図－2.2.3 「潜在型」と「設計型」による自己治癒／修復の分類

従来からある「自然治癒」は発現の条件や効果が限られるが、混和材等の適切な追加によってそのポテンシャルを高めたものが「自律治癒」といえる。更に、様々な手段を以って補修作業の自動化を目指すものが「自動修復」であり、後者ほど適用の範囲や選択肢が広がるものと考えられる点を踏まえて、図中の領域の大きさを変化させている。具体的には、未水和セメントのひび割れ表面での再水和や、水理構造物での炭酸カルシウムの析出などの、従来から知られていたひび割れの閉塞の他、その現象の利用し、更にポテンシャルを引き出すために新たに混和剤・混和材等を追加したコンクリートに生じるひび割れが閉塞する現象が含まれる。「修復 (Repairing)」には、従来の補修作業に代わるものとして、コンクリート内部に予め用意された補修剤内包のマイクロカプセルやガラスパイプ、センサやアクチュエータ等の新たな機能要素をものによるひび割れの充填・補修機構が含まれる。

<参考文献>

- [1] T. Morimoto, M. Kunieda, N. Ueda and H. Nakamura: Self-healing Properties of Ultra High Performance Strain Hardening Cementitious Composites (UHP-SHCC), Proceedings of ConMat'09, 2009 (in press)
- [2] 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針、p.14、2009
- [3] Joseph C. and Jefferson A.D.: State of the art report on self-healing materials, *Cardiff School of Engineering, Internal report*, no. 3131, 2006

[担当 西脇智哉]

3. 自己治癒／修復機構と技術の現状

3.1 コンクリートに見られる自然治癒現象

従来のコンクリートの自己治癒の概念では、例えば Neville [1] のテキストに示されているように、コンクリート中に未反応のまま残っていたセメントが、ひび割れの発生にともない水分と接触できるようになり、再び水和反応を生じることによって、その周囲の微細なひび割れを閉じる（癒着する）作用を自己治癒性と考えている。実際には、セメントが未反応のまま残存していれば、長期材齢においてもわずかながらにも水和反応が進行して、周囲の空隙を充填していくと考えられる。このような継続的な水和反応と自己治癒は、その充填対象が空隙なのか、ひび割れであるのかという点において、概念的にも、コンクリートの性能に及ぼす効果においても異なると考えられる。実際、この自己治癒という現象は古くから知られており、わが国でも 1952 年に、村田[2]によりセメントペーストの癒着として報告がなされている。

さらに、通常のコンクリートにおいて自然に生じる化学反応に基づいたもう一つの治癒機構として考えられるのが、セメント硬化体中から供給されるカルシウムイオン Ca^{2+} と外部から供給される二酸化炭素 (CO_2) もしくは炭酸イオン (CO_3^{2-}) 等が反応することにより炭酸カルシウム (CaCO_3) をひび割れ面に生成し、これによってひび割れを閉塞するものである[3]。上述の未反応セメントによる治癒は、反応しうるセメントの残存に左右されるのに対して、炭酸カルシウム析出は残存セメントに影響されることなく期待できる。実際、非常に多くのコンクリート構造物のひび割れ中に炭酸カルシウムが観測されることから[3]、Neville [4] は未反応セメントの再水和よりもこちらの機構の方が、卓越した治癒機構であると述べている。この炭酸カルシウムの析出によるひび割れの治癒を生じるためには、その反応のもととなるカルシウムイオンと炭酸イオンの供給が条件となる。コンクリート中には水酸化カルシウムが存在するので、これがカルシウムイオンの供給源となり得て、炭酸イオン CO_3^{2-} や炭酸水素イオン HCO_3^- は水中から供給される。また、二酸化炭素は水中からも供給されうるが、ひび割れ面が気中にあれば、気体の二酸化炭素が供給されることになる。しかし、気体の二酸化炭素が水酸化カルシウムと直接反応するわけではなく、反応を生じるためには水分が必要である [4]。

未水和の残存セメントが反応する場合も炭酸カルシウムを析出する場合も、人間の手をとらせることなく、そして人間がそれを事前に意図したわけではなく、コンクリートが本来有する性質によってひび割れを閉塞する。これは第 2 章のコンクリートの自己修復性の概念を表すベン図(第 2 章図-2.2.1)において、意図的な行為の主体がなく行われる修復機構として“自然治癒”として分類されている。本節においては、この自然治癒に関する既往の研究を概観し、さらに硬化セメントペーストの電子顕微鏡観察像から理解される微視的構造の特徴とセメントの水和反応の対応から、そのような自然治癒の発生の可能性について考えてみることにする。

3.1.1 自然治癒に関する既往の研究

コンクリートの自然治癒に関しては、これまでも少なからず報告がなされており、決して新しいトピックではない。これに関するレビューは Hearn [5] および Hearn and Morley [6] の文献に詳しいが、Neville の解説[4]も自然治癒に関して非常に示唆的である。

Reinhardt ら[7]は、水密性の要求されるコンクリート製貯水タンク内において、内部の水温の上昇がひび割れの自然治癒へ及ぼす影響を、透水性の変化から明らかにしている。水セメント比が 0.37 で、28 日強度が 90MPa レベルの高強度コンクリートに事前にひびわれを導入し、これ

を所定温度の水中において養生を行い、ひび割れの治癒による透水性の変化を測定している。その結果、水温が高いほど早期に透水性の低下が認められ、例えばひび割れ幅が 0.05mm の場合、80℃の温水中では 75 時間後には流速は初期の 3%にまで低下することを示している。そして、そのような高強度コンクリートでは、水圧の圧力勾配が 1MPa/m 程度のときは、幅 0.10mm 以下のひび割れは、自己治癒により閉塞しうるとしている。

Jacobsen ら[8]は、自然治癒が塩化物イオン透過性に及ぼす影響を検討している。水セメント比が 0.40 のコンクリートに、ASTM C 666 に従って所定数の凍結融解サイクルを与え、内部にひび割れを導入している。この凍結融解サイクルの負荷により、超音波パルス速度は 78-45%、圧縮強度は 68-40%にまで低下し、塩化物イオン透過性は 2.5-8 倍にまで増大する。このような内部ひび割れを導入した供試体を、再び 20℃の水中にて 4 週間保存すると、超音波パルス速度は 50-100%の回復が認められるが、圧縮強度の回復は高々10%程度であると報告している。また、ひび割れの導入によりいったん増大した塩化物イオン透過速度は、この自然治癒により 28-35%程度減少するとしている。さらに Jacobsen ら[9]は水セメント比が 0.30 から 0.40 の種々の配合のコンクリートに対しても同様の検討を行い、ひび割れを導入した後に水中養生により自然治癒させると、相対動弾性係数はほぼ元の値にまで回復しうるが、圧縮強度の回復は 4-5%に過ぎないと報告している。

Granger ら[10,11]は水セメント比が 0.20 の超高強度コンクリートの自然治癒特性を実験的に検討している。切り欠きはりの 3 点曲げ載荷によりひび割れを導入し、それを再び高温下で養生して、荷重－きれつ開口端変位 (CMOD) の変化やアコースティックエミッション特性の変化から自然治癒を確認している。さらにはそのような超高強度コンクリートでは修復されたひび割れ面には、結晶性の C-S-H 系の反応生成物が確認されたと報告している。しかし、同じ試験を水セメント比が 0.3 から 0.54 程度のコンクリートに行ったところ、10 週間の水中養生という治癒時間を与えたとしても、剛性の回復はほんのわずかでしかなく、強度にいたっては、回復は認められないとしている。

Schlangen ら[12,13]は水セメント比が 0.50 の普通コンクリートの自然治癒を検討している。この場合、ひび割れの導入は材齢 20 時間程度から 3 日という、早期材齢の期間に行っている。その後水中にて養生を行うと曲げ強度はかなり回復し、特に、ひび割れ面に圧縮力を作用させておくと、わずか 1 日程度の治癒期間で大きな改善効果が得られるとしている。普通コンクリートであっても、水和があまり進行していない段階では未水和セメントが多量に残存するためひび割れの修復は期待できるが、水和がかなり進行してしまうとひび割れの修復は望めないようである。

以上のように、自然治癒を検討している既往の研究におけるコンクリートの水セメント比は主に 0.30-0.40 程度であり、高強度コンクリートのレベルにある。また、普通コンクリートの自然治癒を検討する場合は、ごく初期材齢にて内部損傷の導入を行っている。本機構による治癒では、ひび割れが発生したとき内部にどれだけ未水和物が残存しているかに左右されるため、おのずと検討対象とするコンクリートの水セメント比や材齢には制約を生じることになる。ここで例えば、Powers の水和反応モデル[14]を用い、外部からの水分が供給されない場合、完全水和を生じるための最小水セメント比は 0.42 程度であることを考え合わせれば、検討対象となりうるコンクリートの水セメント比の範囲もおおよそ見当がつけられるであろう。

一方、未反応セメントに頼らない自然治癒である炭酸化にしても、これに関わる反応物質の存在が重要なことは同じで、Nijland ら[15]は非常に古いコンクリート構造物や組積構造に使用さ

れるモルタルの薄片観察を行い、水酸化カルシウム Ca(OH)_2 の生成状況が治癒のための重要な要因であることを指摘している。

以上の研究において導入されたひび割れは、開口幅の小さい微細なひび割れであり、それでも完全に修復されない場合も多い。よって自然治癒により閉塞を期待するひび割れは、かなり微細なひび割れであることは明らかである。このことを逆に考えると、ひび割れが発生してもその開口を制限するような技術と組み合わせれば、自然治癒による修復が可能になる場合もありうることを示唆する。実際、Schlangen ら[11]は、大きな圧縮力でなくてもいいから圧縮力を作用させてひび割れ面を近接させておくと、修復効果が大きく異なることを示している。

3.1.2 自然治癒をもたらすセメントの再水和の可能性の画像からの理解

図-3.1.2.1は温度 20°C にて 90 日間水中養生を行った、水セメント比が 0.60 の普通ポルトランドセメントペースト研磨面の反射電子像（図-3.1.2.1(a)）を示している。このいわゆる白黒写真のような反射電子像においては、その物質の平均原子番号が画像のグレイレベルに反映されて表示されている。すなわち、平均原子番号の一番大きい未水和セメント粒子が白色として現れ、平均原子番号 0 の毛細管空隙が黒色として現われている（実際には、研磨試料作成過程において、含浸材として使用されて空隙を充填している樹脂の原子番号を考えるべきであるが、その平均原子番号は小さい）。その中間色として、暗灰色の相として C-S-H が、明灰色の部分として水酸化カルシウムが現れていると考えればよい[16]。一般に市販されている汎用の画像解析ソフトウェアもしくはインターネット上で無償入手できる画像解析ソフトウェア（例えば、NIH SCION IMAGE ; <http://www.scioncorp.com/>、ImageMagick; <http://www.imagemagick.org/index.html>）などを使えば、画像内の様々な幾何学的特徴量を簡単に計測することができる。その基本的な計測機能の一つとして、面積を評価するコマンドがどのようなソフトウェアにも必ず備わっており、これを使えば任意の着色部分の面積を求めることができる。各色相間の境界値（閾値）を適当に定めて、2 値化（白から灰色を経て黒までの色で表されたグレイレベル原画像を、あるグレイレベルを境界にして、単純に白と黒の 2 色で表示する）という作業を行うことにより、面積を測定したい着目相だけを黒色もしくは白色として抽出することができる。図-3.1.2.1(b)~(d)は、それぞれ着目相として未水和セメント粒子、水酸化カルシウムおよび毛細管空隙を抽出した 2 値像である。図-3.1.2.1(a)の原画像と比較すれば、原画像のどのグレイレベル部分が抽出されているかが確認できると思う。なお図-3.1.2.1(b)~(c)では、構成相として異なる粒子を抽出しているので、抽出された粒子を黒色ではなく、セメントペーストの色に関する一般的な感覚に合わせ、疑似的な色付けして示してある。以下に、これらの像を用いながら、コンクリート中に残存する未水和セメントの再水和による自然治癒を考えることにする。

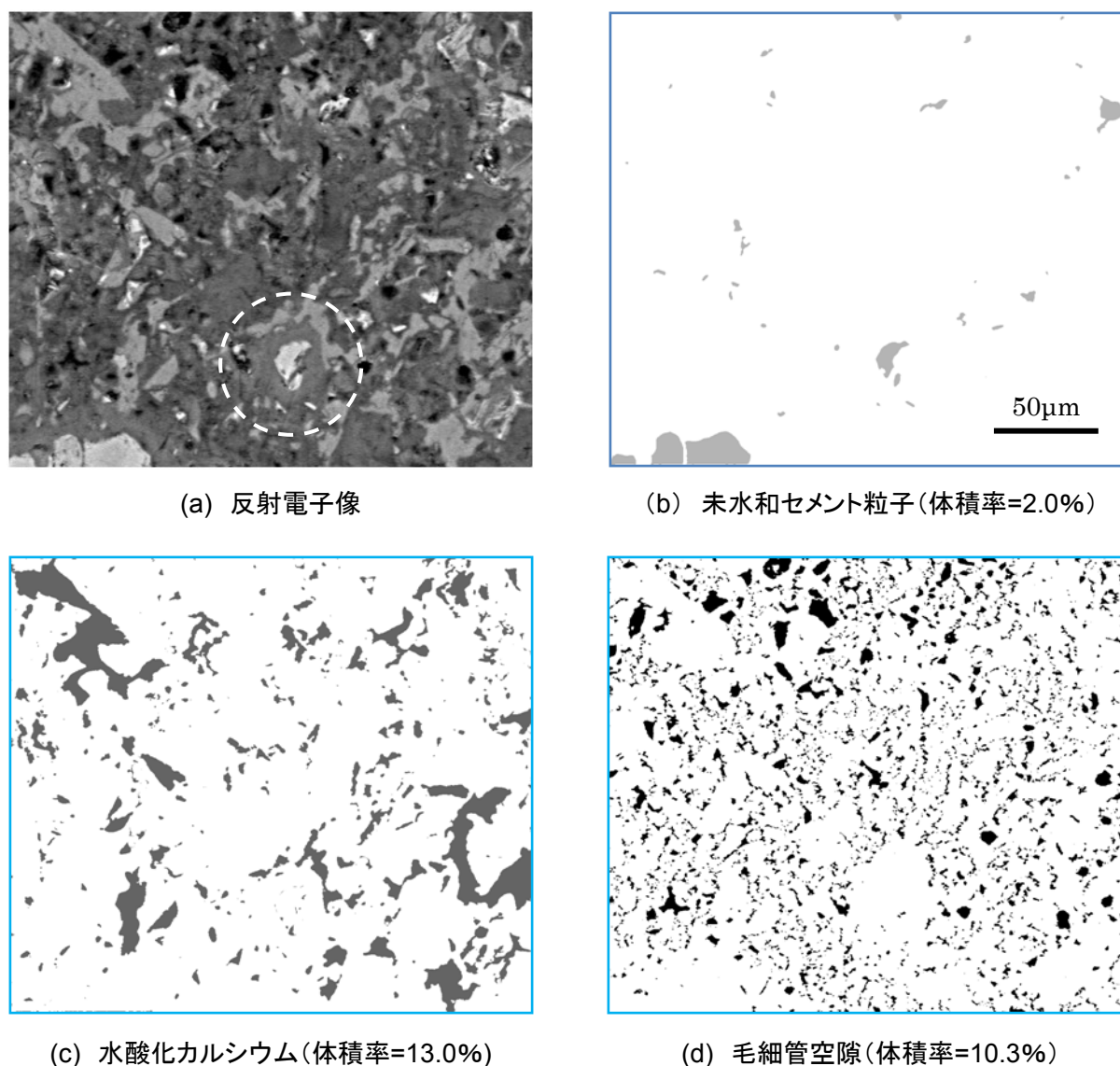


図-3.1.2.1 水セメント比=0.60 の普通セメントペーストの反射電子像と2 値像

(1) 未水和セメントの再水和

画像解析ソフトウェアに付随の計測機能を用いて図-3.1.2.1(b)の未水和セメントの面積率を求めると、約 2%と評価される。ここではセメントペーストの空間構造に関して、等方性、均質性およびランダム性を仮定しているので、この評価された面積率 (A_A) は体積率 (V_V) に等しいことになる ($A_A = V_V$:Delesse の法則) [17]。つまり、もしこの程度の水セメント比のコンクリート構造物があり、それが十分に材齢を経ているとすれば、残存しているセメントはセメントペーストの体積の数%に過ぎないことになる。さらに骨材の存在(体積率で 70%程度)も考慮すれば、コンクリート構造物全体では微々たる量のセメントしか残存していないことになる。よってこれが再水和することで、コンクリート構造物全体の大幅な性能改善が期待できると考えることには無理がある。

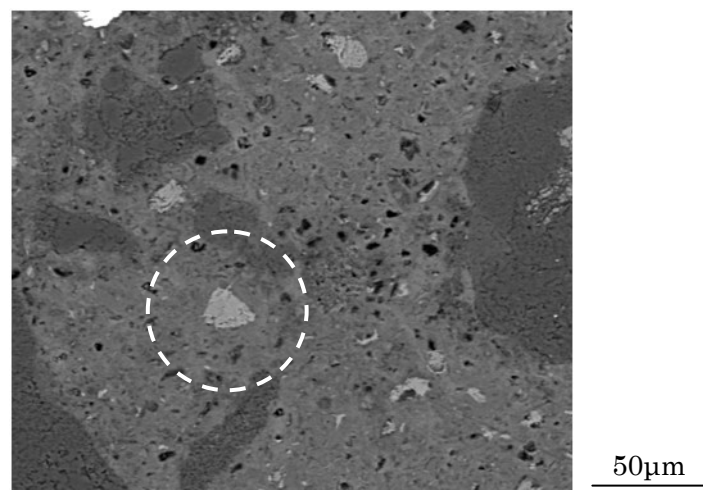
さらに、例えば、図-3.1.2.1(a)の中央下部(白い破線で囲んだ部分)に残存している比較的大きなセメント粒子に着目すると、この白色の粒子の外側には濃いグレーの環状の領域が存在して

いる。注意してその環状部分を観察し、その形状および寸法を考慮すれば、これがもともと一つのセメント粒子であったことが推察される。これは初めに比較的大きなセメント粒子が存在していて、水和反応の進行にともない、元のセメント粒子表面よりも内側の領域部分、すなわち元はセメント粒子が占めていた空間に水和反応生成物が生成した場合の特徴であり、グレーの環状部分は一般に内側生成物と称される部分である。市販のセメント粒子の平均径（質量中位径）は $10\text{--}15\mu\text{m}$ 程度[18]であり、小さなセメント粒子は水和反応とともに消失していく。しかし、実際には数 $10\mu\text{m}$ にも達するようなこのような粒子が存在し、これが水和反応の進行にともなう微視的構造の形成に及ぼす影響は大きいとする見方もある[19]。さて、内側生成物は非常に緻密な組織を持つと考えられ、この層がいわゆる拡散律速の条件となっている状況下で、内部に残存している未反応セメント部分が、長期材齢にて新たに水和反応を生じる可能性はかなり低いと考えられる[20]。よって、このような未反応核として残存していた未水和セメントが水和反応することによる自然治癒を期待するとしたら、それが反応しうる状況が作り出されねばならないことになる。もしここで、この未水和セメント粒子周囲に微細なひび割れが発生し、未水和セメントがそのひび割れを浸入してきた水分と容易に接触できるようになったとすれば、結果として、その微細ひび割れが反応生成物で充填される可能性が生まれることになる。言い換えれば、残存する未水和セメントの再反応による自然治癒は、ひび割れとの相互作用により生じうる機能という一面を持つということになる。

ここで、先ほどの未水和セメント面積率（=体積率）を確率的に考えることにする。コンクリート全体に対する残存未水和セメントの体積率を p とする。このとき、局所的に発生したもしくは進展してきた任意のひび割れ位置で、残存未水和セメントに遭遇する確率は p ということになる。換言すれば、コンクリート中の任意の位置をランダムに指定したときに、そこが未水和セメントである確率が p ということである。よって、どこに発生するかわからない微細なひび割れを自己修復するためには、この残存確率 p をある程度大きくしておく必要があり、さらにはそれが全体に均質に分散していなければならない。

図-3.1.2.2 は実際のコンクリート構造物から採取したコア試料の反射電子像の例を示したものである。本コンクリート構造物は、供用後約9年を経た構造上は全く健全な道路橋のコンクリート橋脚であり、水セメント比は0.50である。骨材粒子間に存在するセメントペースト相には、比較的大きな空隙が認められるが、セメントペースト自体はかなり緻密である。この図-3.1.2.2において、残存未水和セメントとして確認できる粒子は数個程度しかなく、かつ、やはり大きな残存粒子の表面は、より緻密な組織である内側生成物に覆われている様子が認められる（破線囲み部）。実際のコンクリート中にどれぐらいの未水和セメントが残存するかは、配合に加えてそのコンクリート構造物が置かれた環境条件により変化するが、少なくとも、実際のコンクリート構造物が高水セメント比である場合は、残存セメントは多くはないと考えてよい。逆に、未水和セメントの再水和反応（遅延反応）によるコンクリートの自己修復性が機能回復の一機構として注目されるようになった背景には、コンクリートの高強度化、すなわち低水セメント比化により、コンクリート中により多くの未水和セメントが残存するようになってきたことにあることが、これらの画像からも理解される。さらに、そのような未水和セメントが残存しないような系では、任意の位置にひび割れが生じたとき、そのひび割れと遭遇するか、もしくは直接ひび割れ面に存在しなくとも、ひび割れ面に反応生成物を析出させることのできる供給範囲内に存在する確率がある値以上になるように、自己修復のための反応物質を内在、分散させておくことが必要である

といってもよいであろう。これは、ちょうど AE 剤による空気連行において、気泡をある間隔以下で導入すれば、セメントペーストの任意の位置が、必ず近傍の気泡により保護された領域内にあるようになることと類似の考え方で理解される。



図－3.1.2.2 コンクリート橋脚コアの反射電子像(水セメント比 0.50、材齢約 9 年)

(2) 水酸化カルシウム

図－3.1.2.1(c)に示したように、比較的多量の水酸化カルシウムがセメントペースト中に存在している。その形状を見ると、非常に不規則であり、寸法も微細なものから差し渡し最大径で数 $10\mu\text{m}$ にも達する大きなものまでである。これは、水酸化カルシウムが液相に析出して固体相間の隙間を埋めるようにして生成されるためであり、不規則形状は、画像上で水酸化カルシウムを識別するときの一つの手がかりにもなる[21]。水酸化カルシウムはセメントの水和反応生成物であるので、セメントペースト中のいたるところに存在し、セメントペーストの強熱減量後の質量の約 15-20%の質量を占め、その体積は反応生成物固体の体積の 20%以上にも達する。実際のコンクリート全体でどれほどの水酸化カルシウムが存在するかは、単位セメント量と水和度によって異なる[22,23]。高水セメント比の場合は、到達しうる水和度は高く、それに対応して水酸化カルシウムは生成されるが、本来単位セメント量が少ないので、水酸化カルシウム量もあまり大きくはならない。一方、低水セメント比の系では、単位セメント量が多くても、水和度があまり大きくはならないので、存在しうる水酸化カルシウムの量が極端に多くなることもない。また、ポゾラン材料が混入されている場合は、水酸化カルシウムはポゾラン反応により消費されるので、その量は減少する。さらに、低水セメント比では初期の毛細管空隙空間(水で満たされていた空間)は小さいため、差し渡し径(粒子径)が非常に大きな水酸化カルシウム結晶は観察されにくい。

前述のように、この水酸化カルシウムに関わる自然治癒としては 2 つの機構が挙げられ、ひとつは二酸化炭素と反応することで不溶性の炭酸カルシウム (CaCO_3) の結晶をひび割れ面に生成して、ひび割れを塞ぐ機構である。これは二酸化炭素の供給を前提とするので、基本的にコンクリートの表面付近から進行する。しかし、ひび割れが存在して、二酸化炭素が内部にまで供給されるならば、この炭酸化はコンクリート内部にても生ずることも可能である。もう一つの機構としては、水溶性である水酸化カルシウム自身が細孔溶液中に溶出し、それがひび割れや物質移動

経路に沿うようにして析出する機構である[5]。

前述のように、水酸化カルシウムはコンクリート内部のいたるところに存在し、その体積率もかなり高いということは、コンクリートにひび割れが発生しても、そのひび割れ近傍にはかなりの確率で自己修復材料として使える水酸化カルシウムが存在するということを意味する。例えば、北海道立北方建築研究所を中心とするグループが、積極的に検討を行っているフライアッシュの継続的な水和反応を活用した自己修復コンクリートの開発では[24-26]、フライアッシュを細骨材と置換する形で混入したとき、長期的に継続するポゾラン反応が、凍結融解作用や乾燥収縮により発生した微細なひび割れを修復することを示している[27]。これらの研究では、予め自己修復を目的として多量のフライアッシュを混入しておくものであり、図-2.2.1において自律治癒として分類される機構を積極的に活用している。この機構においては、上述の炭酸化機構を利用していないが、水酸化カルシウムの反応性を利用している点では同一である。また、見方を変えると、コンクリート内に多量に存在する水酸化カルシウムとそれに見合うフライアッシュを導入して、不特定位置に発生する微細ひび割れを高い確率を持って捕捉し、それらを充填することを意図したものとも考えることもできる。実際、フライアッシュの混入率を増大させるほど、自己治癒効果はより顕著に現れるようである[24-26]。

(3) 毛細管空隙

図-3.1.2.1(d)の毛細管空隙を観察すると、特徴的な形状はなく、大きなものでは10-20 μm 程度の差し渡し径（細孔径）を持ち、最小のものはほぼ画素寸法（本画像の場合：1画素 $\approx 0.2\mu\text{m}$ ）程度のものまである。毛細管空隙はコンクリート中の物質移動経路であり、セメントの再水和の観点からは、水分の供給路となる。また、同時に反応生成物の析出空間でもあるため、未水和セメントがあってもそのような空間がなければ、再水和も起こり得ないことになる。さらには、自律修復や自動修復といった自己修復機能の発現においても、これらの空隙は水分供給経路や析出空間としての役割を果たすことにもなる。このような空隙構造中に、ひび割れという連続性が高いと考えられる空間が形成され、そのひび割れと本来の毛細管空隙構造の相互作用に応じて、自己修復効果の発現は影響を受けると考えられる。しかし、この図-3.1.2.1(d)に示されたような顕微鏡画像をもとにして毛細管空隙構造を考える場合には、以下の点に留意しなければならない。

- (a) この分布図は、本来3次元的に形成されている空隙構造を、ある特定の2次元断面で切断したときの断面図である。したがって、別の断面で切断する、もしくは断面内で異なる視野を採れば、空隙の2次元的な空間分布の様子は異なる。また、空隙を不規則断面形状の管路のように考えたとしても（単位厚さの仮定を行ったとしても）、必ずしも図-3.1.2.1(d)の紙面直角方向（つまり紙面手前 $\leftrightarrow$ 奥行き方向）に管路があるというわけではない。
- (b) ここで毛細管空隙として観察されているものは、本観察倍率で検出できた空隙だけである。したがって、2値画像中の黒色で表された空隙のまわりの白色部分にも、顕微鏡観察では検出できない微細な毛細管空隙が存在していると考えられ、それらが観察されている粗大な空隙を連結する役目を果たしていることも考えられる。さらに、前述の内側生成物との関連でいうと、観察されている毛細管空隙は、外側生成物の析出空間（本来は水が存在していた部分）にて、反応生成物により充填されることなく残存した空隙である。
- (c) ここで画像解析において毛細管空隙と称して抽出された空隙の中には、Hadley 粒子(セメ

ントが水和反応過程で溶出したものの、元のセメント粒子が占めていた空間が完全には反応生成物で充填されず、空隙として残った部分）も含まれている[28,29]。よって、これを毛細管空隙と呼ぶことはできないが、それらを個々に画像解析で弁別して抽出することは困難である。

ひび割れは平面状に進展してくると考えると、そのひび割れ面を面の法線方向から眺めたのが図-3.1.2.1(a)～(d)であると模式的に考えることができる。自己修復によるひび割れ面の充填は、ひび割れ面表面に反応生成物が生成（造膜）して、その厚さが増していくことにより生じるとすれば、図-3.1.2.1(b)の残存セメント粒子はその面内に存在して直接の反応生成物の充填をもたらす反応物である。また、図-3.1.2.1(d)の空隙は、ひび割れを浸入してきた水分が、内部に存在する未反応セメントや自己修復をもたらすその他の材料に到達するための経路であり、反応後にはひび割れ同様に充填されることも期待される空隙と考えることができる。前述のように図-3.1.2.1(d)に示した空隙間には、顕微鏡の分解能以下の微細な毛細管空隙が存在して、大きな空隙はそれより小さな空隙で連結しているようなネットワーク構造を持つと考えると、多孔質性の大きいもの、すなわち水セメント比の高いものほど反応物への到達は容易と考えられるので、セメントの再反応は生じ易いことになる。特に、図-3.1.2.1(d)に現れているような大きな空隙の特性を把握することで、コンクリート中の物質移動特性を推定できるとする考え方もあり[30]、これを考慮すると、粗大毛細管空隙は、自己修復性能発現にも重大な影響を及ぼしうる空隙構造といえる。しかし、ここで注意すべきは、必ずしもすべての空隙が連結するようなネットワーク構造を持つとは限らないことや、上述(c)の Hadley 粒子はその形成のメカニズムから考えると、周囲を内側生成物という緻密なセメントゲルで囲まれた空隙であり、毛細管空隙構造のネットワークに連結しない孤立した空隙と考えられることである。従って、Hadley 粒子は空隙径としては大きい場合もあるが、毛細管空隙とは、セメントの再水和などの反応物質による自己修復への関与の仕方が異なる空隙ということになる。

(4) 再水和（遅延水和）にともなう体積変化

セメントの水和反応過程における体積変化に関する Powers モデル[14]の教えるところによれば、セメントの水和反応が進行するためには、セメントおよび水に加えて、その水和に関わったセメント体積の 1.2 倍の自由空間がなければならない。コンクリートが低水セメント比である場合は、組織は緻密でありそのような反応生成物の析出空間は確保されないため、水和反応は停止すると考えられる。しかし、その一方において、そのような低水セメント比の緻密な組織下で、水分の侵入によりセメントの水和反応を生じた場合は、体積膨張を生じる場合があることが報告されている[31]。Hillemerier and Schroder[32]は、水セメント比が 0.3 以下の低水セメント比系では、未水和セメントの遅延水和反応生成物によりコンクリート内部にひび割れが発生し、これが耐久性に影響を及ぼすことを指摘している。実際、緻密な組織が形成された水セメント比が 0.24 のモルタルを、継続して水中養生を行うと体積膨張が観測され、モルタル内部に微細なひび割れが発生することも報告されている[33,34]。このメカニズムについては、必ずしも明らかではないが、自然治癒機構としてのセメントの再水和が、系の膨張をもたらしうることにに関して、検討の余地は残されているものと思われる。

<参考文献>

- [1] Neville, A. M.: Properties of Concrete, Fourth Edition, Longman, 1998
- [2] 村田二郎 : セメントペーストの癒着について、土木学会誌、Vol. 37、No. 1、pp.22-24、1952
- [3] Edvardsen, C.: Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete, ACI Materials Journal, Vol.96, No.4, pp.448-454, 1999
- [4] Neville, A.: Autogenous healing – A concrete miracle?, Concrete International, Vol.24, No.11, pp.76-82, 2002
- [5] Hearn, N.: Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference?, Materials and Structures, Vol.31, pp.563-567, 1998
- [6] Hearn, N. and Morley, C.T.: Self-sealing property of concrete – Experimental evidence, Materials and Structures, Vol.30, pp.404-411, 1997
- [7] Reinhardt, H.S. and Joos, M.: Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width, Cement and Concrete Research, Vol.33, No.7, pp.981-985, 2003
- [8] Jacobsen, S., Marchand, J. and Boisvert, L.: Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete, Cement and Concrete Research, Vol.26, No.6, pp.869-881, 1996
- [9] Jacobsen, S. and Sellevold, E.J.: Self healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw, Cement and Concrete Research, Vol.26, No.1, pp.55-62, 1996
- [10] Granger, S., Loukili, A., Pijaudier-Cabot, G. and Chanvillard, G.: Mechanical characterization of the self-healing effect of cracks in Ultra High Performance Concrete (UHPC), Pre-print, Construction Materials, p.49, 2005
- [11] Granger, S., Loukili, A., Pijaudier-Cabot, G. and Behloul, M.: Self healing of cracks in concrete: from a model material to usual concrete, Proc. 2nd Intl. Symp. On Advances in Concrete through Science and Engineering, 11-13, Sept. 2006, Quebec City, Canada.
- [12] Schlangen, E., Heide, N. and Breugel, K.: Crack healing of early age cracks in concrete, Proc. ECF 16 Alexandroupolis, 2006
- [13] Heide, N., Schlangen, E. and Breugel, K.: Experimental study of crack healing of early age cracks, Proc. Knud Hojgaard Conference on Advanced Cement-Based Materials, Technical University of Denmark, 2005
- [14] Powers, T.C. and Brownnyard, T.L.: Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste (Bull.22), pp.992, Portland Cement Association, Chicago, 1948; reprinted from Journal of the American Concrete Institute, Proc. Vol.43, p.101, 249, 469, 549, 669, 845, 993, 1947
- [15] Nijland, T.G., Larbi, J.A., Hees, R.P.J., Lubelli, B. and Rooji, M.: Self healing phenomena in concrete and masonry mortars: A microscopic study, Proc. 1st Intl. Conf. on Self healing materials, Noordwijk, pp.1-9, 2007
- [16] Scrivener, K.L. and Pratt, P.L.: Back-scattered electron images of polished cement sections in scanning electron microscope, Proceedings of 6th International Conference on

- Cement Microscopy, New Mexico, pp.145-155, 1984
- [17] Baddeley, A. and Jensen, E.B.V.: Stereology for Statisticians, Chapman & Hall, 2005.
 - [18] 2002-OC セメント共同試験報告、セメント協会、2003
 - [19] Diamond, S.: Particle arrangement in freshly-mixed mortars: basis for modeling, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.5, No.3, pp.277-283, 2007
 - [20] Diamond, S.: An "unmodel" of Portland cement hydration, Proc. 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, Quebec City, pp.15-29, 2006
 - [21] Diamond S. : Calcium hydroxide in cement paste and concrete – a microstructural appraisal, Materials Science of Concrete, Special Volume: Calcium Hydroxide in Concrete, (Skalny J.P, ed.), Westerfield, OH, American Ceramic Society, pp.37-58, 2001
 - [22] Mounanga, P., Khelidj, A., Loukili, A. and Baroghel-Bouny, V. : Predicting Ca(OH)_2 content and chemical shrinkage of hydrating cement pastes using analytical approach, Cement and Concrete Research, Vol.34, No.2, pp.255-265, 2004
 - [23] Taylor, H.F.W.: Cement Chemistry, 2nd edition, Thomas Telford, 1997
 - [24] 藤原佑美・濱幸雄・山城洋一・斎藤敏樹：フライアッシュを用いたモルタルの自己修復効果、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.1、pp.303-308、2007
 - [25] 藤原佑美・濱幸雄・山城洋一・斎藤敏樹：モルタルの自己修復性能に及ぼすフライアッシュの種類・置換率の影響、日本建築学会学術講演梗概集（九州）、pp.1241-1242、2007
 - [26] Termkhajornkit, P., Nawa, T., Yamashiro, Y. and Saito, T.: Self-healing ability of fly ash-cement systems, Cement and Concrete Composites, Vol.31, No.3, pp.195-203, 2009.
 - [27] Şahmaran, M, Keskin, S.B., Ozerkan, G. and Yaman, I.O.: Self-healing of mechanically - loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash, Cement and Concrete Composites, Vol.30, No. 10, pp.872-879, 2008
 - [28] Kjellsen, K.O., Lagerblad, B. and Jennings, H.M.: Hollow-shell formation - an important mode in the hydration of Portland cement, Journal of Materials Science, Vol.32, No.11, pp.2921-2927, 1997
 - [29] Hadley, D.W., Dolch, W.L. and Diamond, S.: On the occurrence of hollow-shell hydration grains in hydrated cement paste, Cement and Concrete Research, Vol.30, No.1, pp.1-6, 2000
 - [30] Wong, H.S., Buenfeld, N.R. and Head, M.K.: Estimating transport properties of mortars using image analysis on backscattered electron images, Cement and Concrete Research, Vol.36, No.8, pp.1556-1566, 2006
 - [31] Odler, I., Yudenfreund, M., Skalny, J. and Brunauer, S.: Hydrated Portland cement paste of low porosityⅢ: Degree of hydration, expansion of paste, total porosity, Cement and Concrete Research, Vol.2, No.4, pp.463-480, 1972
 - [32] Hillemerier, B. and Schroder, M.: Poor durability of high performance concrete with water-cement ratio ≤ 0.30 ?, Proc. RILEM Workshop, RILEM, pp.70-75, 1995
 - [33] Igarashi, S., Kubo, H.R. and Kawamura, M.: Long-term volume changes and microcracks formation in high strength mortars, Cement and Concrete Research, Vol. 30,

No. 6, pp.943-951, 2000

- [34] 久保ホベルト洋・五十嵐心一・川村満紀：高強度モルタルの体積変化と微細ひびわれ発生機構、コンクリート工学論文集、Vol.11、No.3、pp.71-76、2000

[担当 五十嵐心一]

3.1.3 海洋環境下における長期暴露試験より得られた知見

この節においては、コンクリート試験体の海洋環境下における長期暴露試験結果より得られた知見を示す。暴露期間が10年、20年という長期間になると、コンクリートの様々な欠陥の自然治癒が観察されるようになる。この詳しいメカニズムを明確に示すまでには至っていないが、コンクリートの潜在能力である自然治癒現象をいくつかの視点から観察することができる。なお、本節の記述は参考文献[1]および[2]において取りまとめている内容を再度整理して再掲したものである。

(1) 序

コンクリートのひび割れなどの欠陥が時間の経過とともに何らかの物質で充てんされていく現象をここでは“自然治癒”と称する。この現象は、時間をかけて少しずつ進行して行く。ここでは、コンクリートの空隙、ひび割れおよび打継ぎ目の自然治癒に関するいくつかの観察結果を示す。

また、コンクリート中の鉄筋の腐食は、塩化物イオンによって引き起こされる場合と中性化によって引き起こされる場合に大別される。鉄筋の腐食に関しても、自然治癒は大きな影響を及ぼしている。ここでは、コンクリート中の鉄筋の腐食を観察する中で得られた、鉄筋腐食に及ぼす自然治癒の影響についても観察結果を示す。

(2) 空隙の自然治癒

コンクリート中にはナノメートルからミリメートルのサイズまでの空隙が存在する[3]。非常に小さなゲル空隙はコンクリート中の物質の拡散には影響を及ぼさないと言われている。また、コンクリートにとって有害な物質の拡散に影響を及ぼす空隙は、 $0.01\sim 1\mu\text{m}$ のサイズのキャピラリー空隙であるとされている[3]。

海洋環境下における長期暴露試験を行った供試体の観察によると、コンクリート中の空隙にエトリンサイト、水酸化マグネシウム、あるいはフリーデル氏塩が充てんされることによりキャピラリー空隙量が減少していることがわかった。そして、筆者らの実験結果の範囲内では、この傾向は置換率の大きなスラグセメントを用いた際に特に顕著であった。図-3.1.3.1は、高炉セメントC種を用いた供試体の切断面と割裂面の一例である。干満帯に15年間暴露した後のコンクリートであるが、コンクリートの表層部に黒色系に変色した堅固な部分が生成されていることがわかる。図-3.1.3.2は、表層の部分のSEM写真である。この中のポーラスな箇所において、カルシウム・アルミナ・水酸化物(C-A-H)が観察される。また、エトリンサイトおよびC-S-H化合物も確認された。さらに、X線回折の結果より、表層部分においてエトリンサイトとフリーデル氏塩($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$)が生成されていることも確認された。このように、供試体の表層部分は緻密で堅固な組織に変化していた。特に、スラグ置換率の大きな高炉スラグセメントコンクリートにおいてその現象は顕著であった。スラグセメントコンクリートにおいて、塩化物イオンの拡散が表層部分で遮断されている傾向にあるのは、この緻密な組織の生成と関係があるものと考えられる[4,5]。



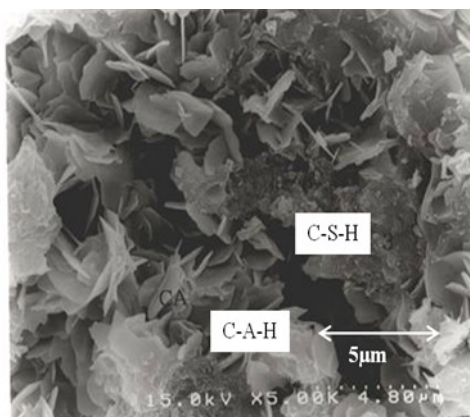
(a)切断面



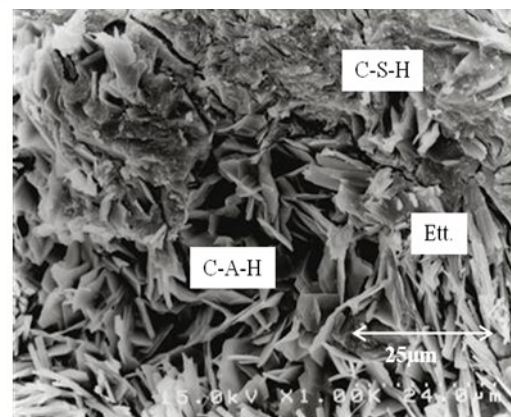
(b)割裂面

図－3.1.3.1 円柱供試体の切断面[30]

干満帯暴露 15 年: 表面から 15-25mm の深さ



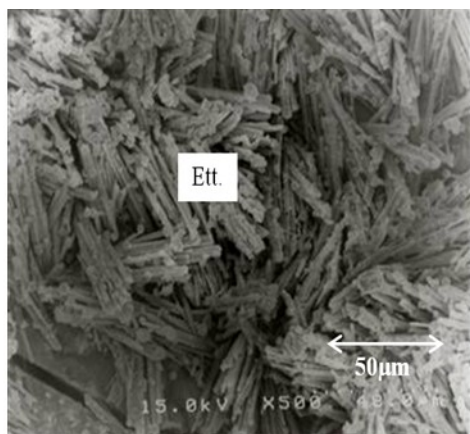
飛沫部暴露 10 年: 表面から 15-25mm の深さ



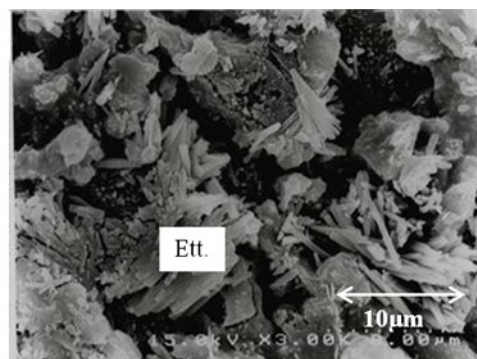
図－3.1.3.2 SEM による拡大写真の一例（高炉セメント C 種使用）[30]

コンクリート中の細孔と同様に、コンクリート中の遷移帯も耐久性の観点からは極めて重要である。コンクリート中の骨材－セメントマトリックス界面の詳細な分析結果では、界面に塩化物と水酸化カルシウムが集積している傾向を示した[4,5]。鉄筋－コンクリート界面においてはエトリンガイトが生成されていたが、骨材－セメントマトリックス界面ではエトリンガイトは確認されなかった。図－3.1.3.3 は、鉄筋－コンクリート界面周辺部分の SEM 写真を示している。円柱供試体の割裂面の鉄筋周辺、および鉄筋－コンクリート界面において、エトリンガイトの針状結晶を確認した。なお、全般的な傾向として、鉄筋－コンクリート界面の方が、骨材－セメントマトリックス界面よりも空隙が大きくなる傾向にあった。そのために、鉄筋－コンクリート界面においてエトリンガイトが生成されやすいとも考えられる。なお、鉄筋－コンクリート界面の方が、空隙が大きくなる理由としては、鉄筋は固定されており全く動くことができないが骨材は動くことができる（微細な動き）ことの影響、あるいは、骨材表面に比べて鉄筋表面の方が平滑であることなどが考えられるが明確ではない[6]。

干満帯暴露 10 年：鉄筋コンクリート界面



飛沫部暴露 10 年：鉄筋周辺の割裂面

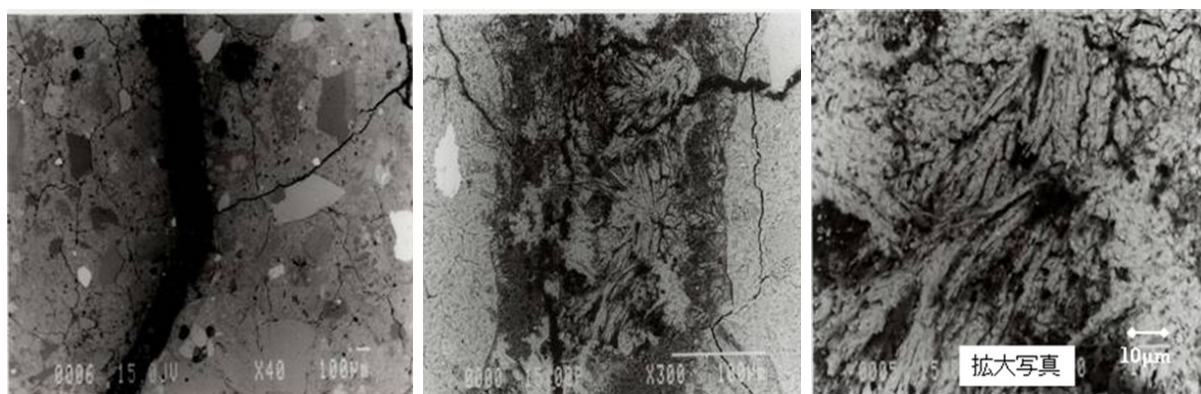


図－3.1.3.3 鉄筋－コンクリート界面の SEM 写真の一例[30]

(3) ひびわれの自然治癒

本節においては、暴露開始前にひび割れを導入したコンクリート供試体を 15 年間干満帯に暴露した供試体の観察結果を示す[7]。供試体の形状・寸法は 100×100×600 mm の角柱型であり、100×100mm 断面の中央部に $\phi 9\text{mm}$ の丸鋼が埋設されている。使用したセメントは、普通ポルトランドセメント、高炉セメント（A種、B種、C種）およびフライアッシュセメント（B種のみ）である。練混ぜ水は海水および水道水である。

図－3.1.3.4 および図－3.1.3.5 は、ひび割れ断面およびひび割れ面の SEM 写真である。15 年間の暴露後の観察において、幅の小さなひび割れ(0.5mm 以下程度)はほとんどが自然治癒され、ひび割れが閉塞していることが確認された。X 線回折および SEM 写真の結果、ひび割れに充てんされている物質はおもにエトリンガイトと水酸化マグネシウムであることを確認した。エトリンガイトは大部分が針状の結晶であった。

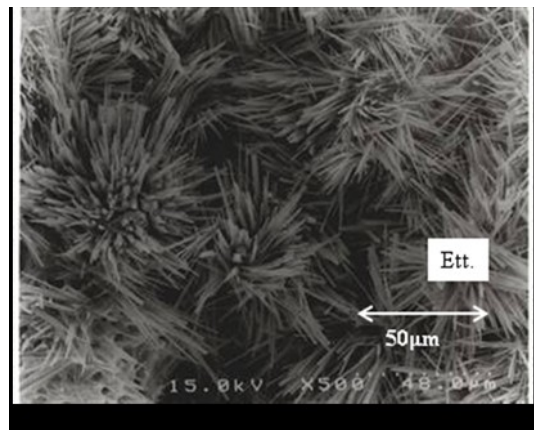


(a) 自然治癒したひび割れ

(b) 拡大写真

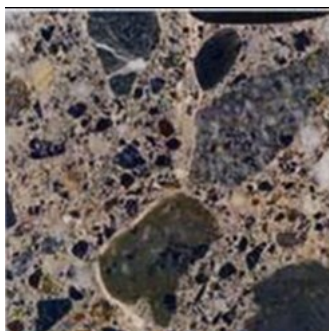
(c) 拡大写真

図－3.1.3.4 打ち継ぎ部における析出物の SEM 写真の一例[30]

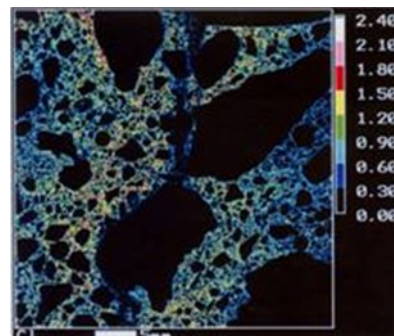


図－3.1.3.5 ひび割れ面に生成されたエトリンガイトの針状結晶[30]

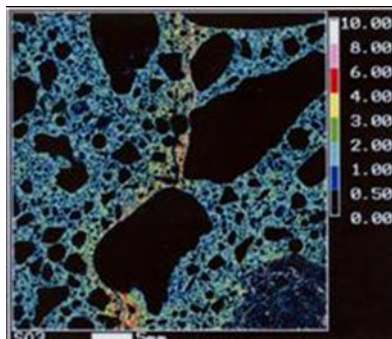
図－3.1.3.6 は、塩素、硫黄、マグネシウムを対象として、自然治癒されたひび割れ部分を計測した EPMA の結果を示している。ひび割れ近傍で塩素が高濃度になっている部分があることがわかる。さらに、自然治癒されたひび割れの部分に硫黄とマグネシウムが観察される。この析出物によりひび割れ箇所の鉄筋の腐食が抑制されていることも確認した。また、暴露初期に生成されたと判断される錆の上、および鉄筋－コンクリート界面のはく離部分でも析出物が確認された[8]。一方で、幅の大きなひび割れの場合、自然治癒は確認されず、著しい鉄筋の腐食が生じていた[8]。



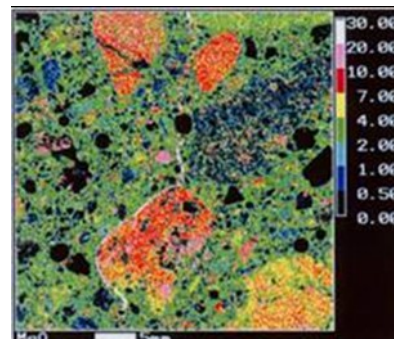
(a) ひび割れ部



(b) 塩素分析結果



(c) 硫黄分析結果



(d) マグネシウム分析結果

図－3.1.3.6 自然治癒したひび割れの EPMA 結果[30]

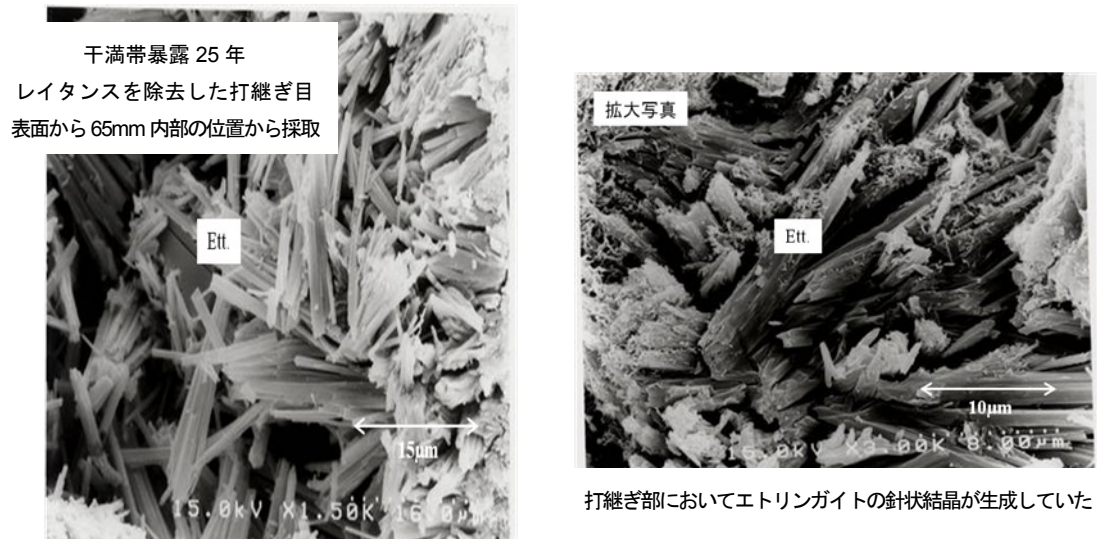
これらの実験データより、海洋環境下においてひび割れが自然治癒されることにより、ひび割れ部分における腐食が抑制されることが明らかとなった。また、ひび割れが存在しない箇所においては、鉄筋—コンクリート界面に空隙の存在が内部鉄筋の腐食に大きく影響を及ぼし、空隙が存在することにより部分的に鉄筋が腐食することが確認された[9,10]。なお、鉄筋—コンクリート界面の空隙が自然治癒されることはなかった[8]。このことから、コンクリート構造物の長期耐久性を確保するために、この界面の空隙を除去する必要があることを改めて確認した[11]。

(4) 打継ぎ部分の自然治癒

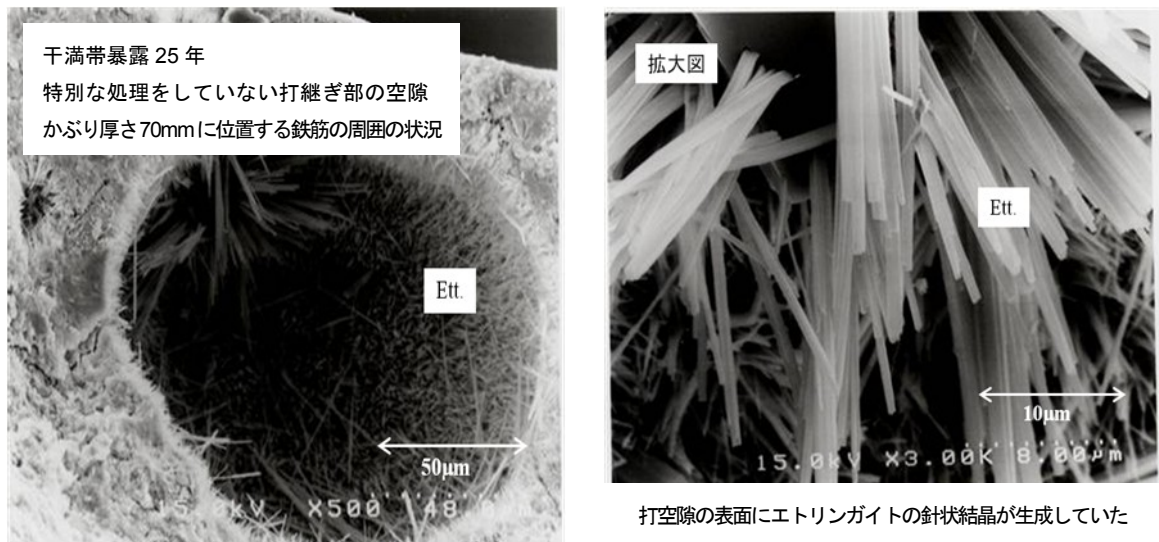
数種類の異なる（例えば、レイトランスの除去の有無の違いなど）打継ぎ部分を有する鉄筋コンクリート供試体の暴露 25 年試験を実施した。打継ぎ処理の方法として、モルタルを塗布したもの、エポキシ樹脂を塗布したもの、ラテックスペーストを塗布したもの、無塗布のものなどがある。供試体の暴露環境は、海上大気中および干満帯である[12,13]。本節では、これらの供試体の観察結果を示す。

図—3.1.3.7 は干満帯に暴露した試験体の打継ぎ部分に生成されたエトリングaitを、また、図—3.1.3.8 は鉄筋近傍において生成されたエトリングaitを示している。図—3.1.3.9 は打継ぎ面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した状況を示している。これらの結果より、打継ぎ面はアルカリ性を残していると同時に、エトリングaitなどが生成されていることが明らかとなった。干満帯に暴露した供試体の状況より、セメント質量に対して2%以上程度の、比較的高濃度の塩化物イオンの存在下にあっても、析出物により腐食が抑制されていることがわかった。エポキシ樹脂あるいはラテックスペーストを塗布した打継ぎの場合、打継ぎ部分に腐食が発生していることが確認された。しかし、エポキシ樹脂を塗布した打継ぎは、他の打継ぎよりも新旧コンクリートの付着強度は大きかった。内部鉄筋の腐食を抑制する観点からは、モルタルを被覆する打継ぎ目が最も効果的であった。一方、海上大気中に暴露していた供試体においては、いずれの打継ぎ処理を行った場合でも打継ぎ部分において中性化による腐食が生じていた。干満帯に暴露していた供試体においては、打継ぎ部分近傍の鉄筋—コンクリートの界面において孔食が生じていた。海洋環境下において 40 年間供用されていたコンクリート岸壁の調査結果では、比較的内部の領域においてエトリングaitが確認されたが、表面近傍において中性化が進行していた領域ではエトリングaitは確認されなかった。この結果から、エトリングaitはアルカリ環境下で安定している物質であると思われ、干満帯に暴露した供試体において、ひび割れ部あるいは打継ぎ目においてエトリングaitが確認されたことは、この周辺がアルカリ環境にあることを示唆しており、このことが内部鉄筋の腐食を抑制していたとも考えられる。本稿においては、物理的あるいは化学的な硫酸塩劣化については言及していない。これについては、最近発表されている参考文献[14]～[18]に詳しいので参照していただければ幸いである。15 年間の干満帯（硫酸イオン濃度：2380ppm）暴露を行った供試体の観察結果では、エトリングaitの生成が悪影響を及ぼしていることはなかった。

現時点で暴露を継続している供試体については、さらに長期間の暴露を継続した後に試験を行う予定であることを付記する。

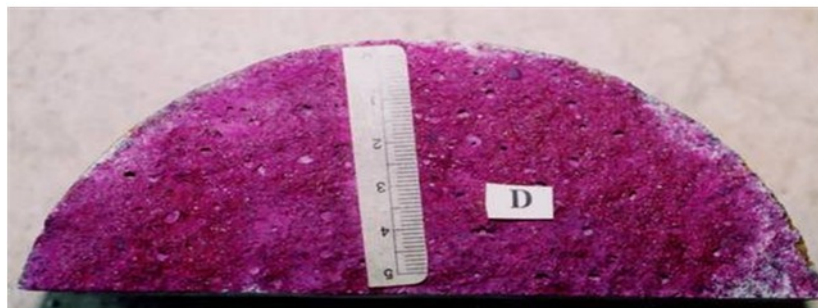


図－3.1.3.7 打継ぎ部における析出物の SEM 写真の一例[30]



図－3.1.3.8 鉄筋と打継ぎ面が交わる部分の SEM 写真の一例[30]

干満帯暴露 25 年
レイタンスを除去した後にモルタルをコーティングする打継ぎ方法



打継ぎ方法面において中性化がほとんど進行していない

図－3.1.3.9 打継ぎ面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した状況[30]

(5) 中性化に起因するコンクリート中の鉄筋の腐食

ここでは、以下の2つの異なるケースについて考察した結果を示す。

- ・ かぶりコンクリートの中性化が鉄筋に到達している場合の腐食、
- ・ かぶりコンクリート中に存在するひび割れもしくは継ぎ目を通した中性化が鉄筋に到達している場合の腐食、である。

暴露試験を実施した環境は、上記の2ケースで、海岸線からの距離が10m程度に位置する“海洋大気中”である。この環境は、海洋環境に含まれるが、海水飛沫を受けることは稀であり、塩分を含んだ潮風の影響を常時受ける環境である。また、中性化も進行しやすい環境である。結果から総括すると、中性化フロントが鉄筋に到達している場合は、中性化している部分の鉄筋は全面にわたって不動態を失った状態であり、いわゆる“全面腐食”がほぼ鉄筋の表面全体で観察された。腐食形態としては“マイクロセル”型であり、アノードとカソードの距離はかなり小さなものであると推定された。鉄筋が発錆する際に生じる膨張圧によるかぶりコンクリートの“はく落”現象も観察された。図-3.1.3.10は、23年間暴露したはり供試体より取り出したスターラップの状況を示している。写真に示されるように、中性化による内部鉄筋の腐食が進行していた。また、同図に干満帯に暴露した結果も併せて示すが、コンクリート中の可溶性塩化物含有量が1%（対セメント質量比）を超えていても、ほとんど腐食は発生していなかった。外部から侵入してくる塩化物イオンによる鉄筋腐食を抑制するためにはかぶり厚さを十分に確保することが重要であるが、中性化による鉄筋腐食を抑制する場合でもかぶり厚さを十分に確保することが重要であることを改めて確認する結果であった[19]。

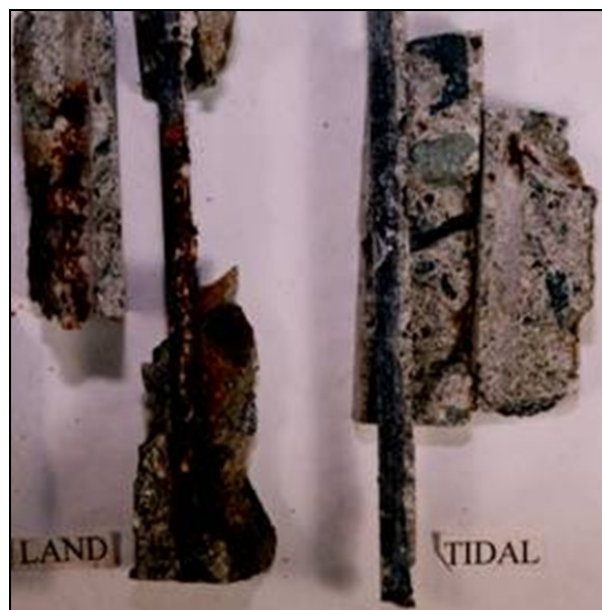


図-3.1.3.10 海洋大気中と干満部に23年間暴露したRCはり供試体のスターラップの腐食状況の一例 (左)海洋大気中暴露 (右)干満部暴露[30]

また、あらかじめひび割れを導入した供試体の観察結果では、ひび割れ面を通して中性化が進行し、ひび割れと鉄筋が交わる部分で中性化フロントが鉄筋に到達していた。鉄筋の腐食は主にひび割れが発生している部分の周囲で生じていた。また、ひび割れが鉄筋と交わる部分から、鉄筋とコンクリートの付着が低下している部分およびコンクリートの中性化が進行している部分において鉄筋の腐食は進行していた。図-3.1.3.11は、23年間暴露されたはり供試体の圧縮側およ

び引張側鉄筋に見られた典型的な腐食状況である。引張側鉄筋においては、ひび割れ部分において表面的な腐食が認められた。圧縮側鉄筋においても、鉄筋下部の空隙の存在に起因すると考えられる腐食が認められた。この供試体の場合、コンクリートのひび割れは少し汚れた物質で充てん（自然治癒）されていた。



図－3.1.3.11 23 年間暴露した RC はり供試体中の主鉄筋の腐食状況の一例
(上) 引張側鉄筋 (下) 圧縮側鉄筋[30]

打継ぎ目を有するコンクリートにおいては、打継ぎ目を通して中性化が進行し、さらに鉄筋に沿って中性化が進行していくのが確認された。しかし、図－3.1.3.10 に示す腐食状況に比べた場合、鉄筋の腐食は軽微であった。図－3.1.3.12 は、種々の異なる打継ぎ目を有する円柱供試体の暴露 25 年時における、打継ぎ目部における鉄筋の腐食状況を示している。なお、各打継ぎ方法についての詳細は同図に示すとおりである。23 年間もしくは 25 年間暴露した供試体の観察から確認された範囲では、ひび割れあるいは打継ぎ目部における中性化に起因する鉄筋の腐食は全体的に軽微であった[20]。



図－3.1.3.12 海洋大気中に 25 年間暴露された打継ぎ目部を有する供試体中の鉄筋の腐食状況[30]

打継ぎ目の処理方法：A-レイトンス処理なし、B-モルタル塗布、C-レイトンス処理あり、D-レイトンス処理後モルタル塗布、E-エポキシ樹脂塗布、F-レイトンス処理後エポキシ樹脂塗布、G-レイトンス処理後ラテックスペースト塗布（鉄筋中央部の変色（茶色、黒色）している箇所が打継ぎ目の位置に相当、かぶり厚さ＝20mm（左）、40mm（中）、70mm（右））

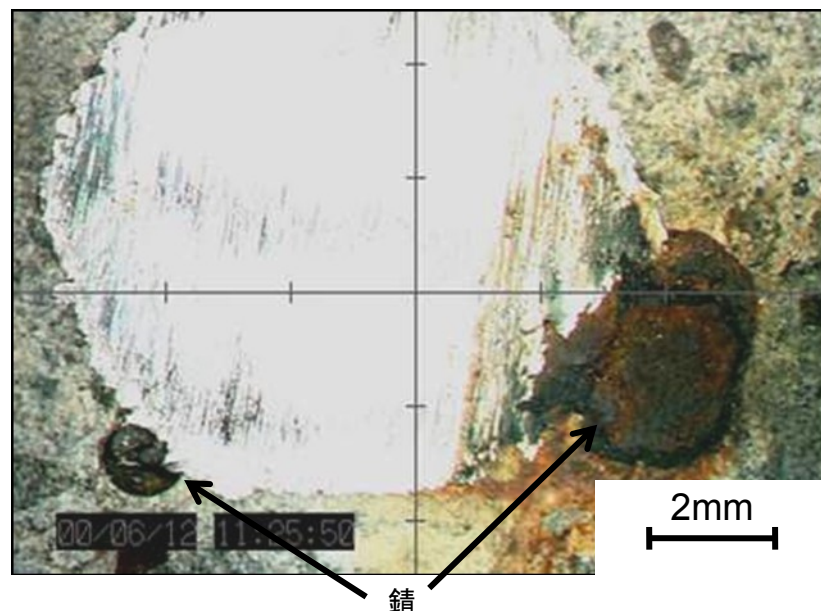
(6) 塩化物イオンに起因するコンクリート中の鉄筋の腐食

塩化物イオンを対象とした実験では、以下に示す4つの異なるシリーズの実験を行った。

- ・ ひび割れが生じていないコンクリートにおける腐食。
- ・ ひび割れが生じているコンクリートにおける腐食。ここでは、自然治癒が生じていないひび割れを対象とした。
- ・ ひび割れが生じているコンクリートにおける腐食。ここでは、自然治癒が生じているひび割れを対象とした。
- ・ 打継ぎ部における腐食。暴露環境は“干満部”である。

ひび割れを有しないコンクリートにおいては、塩化物イオンが鉄筋表面に到達すると鉄筋の腐食が開始された。特に、鉄筋とコンクリート界面に空隙が存在すると腐食が生じ易くなる結果であった。また、ミクロセル腐食とマクロセル腐食が同時に進行するような場合には、腐食速度はかなり大きくなるようであった。なお、マクロセル腐食とは、アノードとカソードの間隔が比較的大きな腐食セルのことである。

参考文献[21]において、腐食発生限界塩化物イオン濃度は、鉄筋－コンクリート界面に生成される空隙によって影響を受けることを述べた。図－3.1.3.13は15年間暴露した供試体において観察した鉄筋の腐食状況である。鉄筋－コンクリート界面に空隙が存在する場合は、一般的に局所的な集中腐食が観察される傾向にあった。海洋環境に建設されるコンクリート構造物の長期の耐久性を確保するためには、コンクリートの打設時において界面の空隙を除去する技術、あるいは空隙の存在下で腐食の進行を抑止する技術を確立することが極めて大切であることを改めて確認する結果となった[22-24]。



図－3.1.3.13 干満部に15年間暴露された供試体中の鉄筋に生じた腐食の一例[30]
(かぶり=20mm)

異なるセメントを用いた供試体の暴露15年時における試験結果より、概ね0.5mmより小さなひび割れは自然治癒されていたが、0.5mm以上の幅の大きなひび割れは治癒されていなかった。自然治癒がなされていないひび割れにおいては、ひび割れと鉄筋が交わる近傍において、マクロセル腐食とミクロセル腐食が継続して進行するようであった[25]。

ひび割れ部分とひび割れが生じていない部分の塩化物イオン含有量の差は、スラグセメントを用いた場合の方がポルトランドセメントを用いた場合よりも大きく、特に自然治癒が生じていないひび割れにおいてその違いが顕著であった。一般的に、スラグ含有率の大きなスラグセメントを用いた場合、コンクリートの細孔構造が大きく改善され、その結果、かぶりコンクリートの表面部分において塩化物イオンが遮断される結果となった[26,27]。しかし、自然治癒が生じていないひび割れの場合、ひび割れ面もコンクリート表面と考えられる。それゆえ、スラグセメントを用いている場合には特に、ひび割れ部分において塩化物含有量が大きくなる結果であった。したがって、スラグセメントを使用して、ひび割れが生じている場合は、この点に注意をする必要がある。図-3.1.3.14 はその典型的なケースを示している。図中、右側の鉄筋がスラグセメントを用いて、ひび割れが発生していた供試体から取り出したものである。この観察結果では、ひび割れの自然治癒が生じていない場合には、普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べてスラグセメントを用いた場合の方が腐食速度は大きくなる傾向であった。

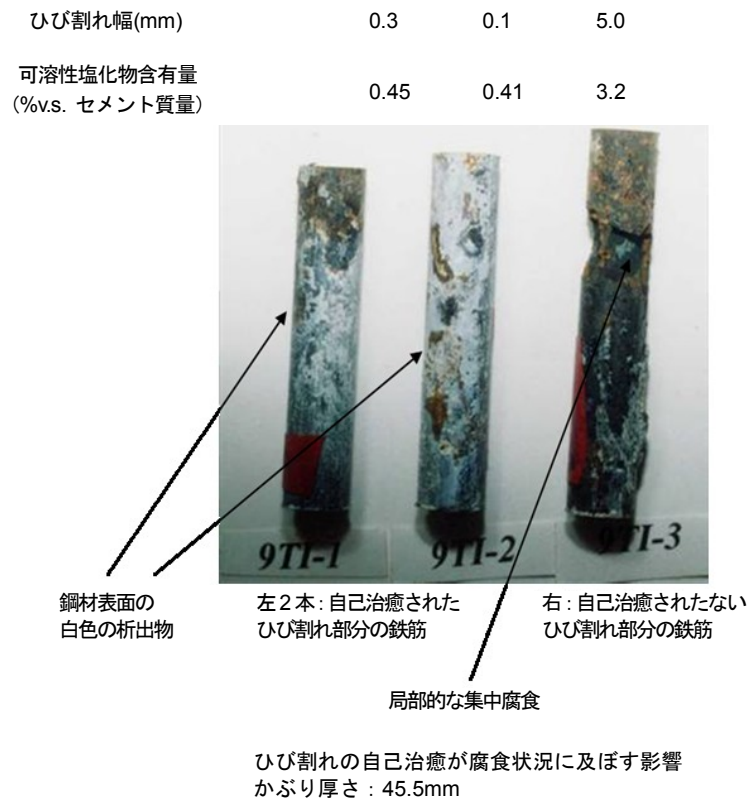


図-3.1.3.14 干満部に15年間暴露されたRCはり供試体におけるひび割れ治癒された部分とされていない部分の鉄筋の腐食状況の一例[30]

一方、別のシリーズの供試体の観察結果では、普通セメントを用いた方が腐食による断面減少が大きくなるという結果も得られた。自然治癒が生じているひび割れの場合、15年の暴露後において、ひび割れ部分とひび割れが生じていない部分での塩化物含有量の差は認められなかった。このことは、ひび割れが自然治癒することにより、ひび割れ箇所の鉄筋の再不動態化が進行し、腐食が抑制されたものと考えられる。この現象は、セメントの種類によらずに観察された。図-3.1.3.15 は、23年間の暴露を行ったRCはりの鉄筋の腐食状況を示している。この図に示すように、ひび割れの自然治癒が生じていない場合は、腐食により鉄筋断面が著しく減少する場合もあった。



図－3.1.3.15 干満部に 23 年間暴露した RC はり供試体の内部鉄筋の腐食状況の一例（治癒が生じていないひび割れ箇所が発生した著しい断面欠損、かぶり＝20mm）[30]

干満帯に 25 年間暴露されていた供試体の打継ぎ目部分の鉄筋の腐食状況の観察も行った。打継ぎ部分の塩化物含有量は、健全部分（一体部分）に比べて若干大きくなる傾向にあった。また、打継ぎ面に自然沈殿物が観察された。このことより、鉄筋表面に高いアルカリ環境が形成されたことが考えられ、このアルカリ環境により打継ぎ部分の鉄筋腐食が抑制されていたものと推定された。打継ぎ部分にエポキシ樹脂あるいはラテックスペーストを塗布した場合は、打継ぎ部分において腐食が生じていたが、その他の打継ぎ方法を採用した場合には腐食は生じていなかった[28]。

(7) 海生生物の付着による自然治癒について[29-31]

海洋環境下においてコンクリート供試体の暴露試験を行うと、実に様々な生物が表面に付着する。これらの付着生物は、自然が付与するバリアとしての役割を果たすのである。このような生物付着がコンクリートの耐久性向上に寄与しているとすれば、この現象も一つの意味で“自然治癒”とも考えられる。

港湾空港技術研究所を中心とする研究チームで実施した、各種のコンクリート供試体の暴露試験の概要および結果を簡潔に紹介する。2000 年 1 月～2 月より、静岡県清水港および熊本県本渡港において供試体の暴露を開始し、生物の付着状況の推移を観察したものである。暴露期間中、本渡港が位置する有明海において大規模な赤潮が発生したため、本渡港に暴露した供試体への生物付着量が極端に少なくなった。一方、清水港においては順調に生物付着が進み、ほぼ供試体の全面に生物が付着した。暴露期間が約 20 ヶ月経過した 2001 年 10 月に、両港より供試体を引き上げた。図－3.1.3.16 は、100×100×400mm の角柱型供試体表面にフジツボおよびカキが付着している様子である。このコンクリート表面に付着しているフジツボおよびカキの殻を取り除いた状況が図－3.1.3.17 である。これより、表面のわずかな空隙に貝殻と同様の物質が密着している様子がよくわかる。以後、本稿においてはこの物質を底殻と称する。コンクリート表面にフジツボおよびカキが付着している場合は、すべての供試体においてほぼ表面の全面にこの底殻が付着していることを確認した。この底殻の断面を電子顕微鏡で観察した結果が図－3.1.3.18 である。写真に示されるとおり、底殻の厚さはわずか 0.05mm 程度であるが、セメントペーストに比べてかなり緻密な構造をしていることがわかる。この底殻は、炭酸カルシウムが主体であるが、それに加えて数パーセント程度の有機物を含んでおり、極めて固く、物質遮へい性に優れていると考えられる。このような物質を人工的に作り出すことは不可能であるが、フジツボのような海生生物は、海水中のミネラルからいとも簡単にこのような物質を作り出している。

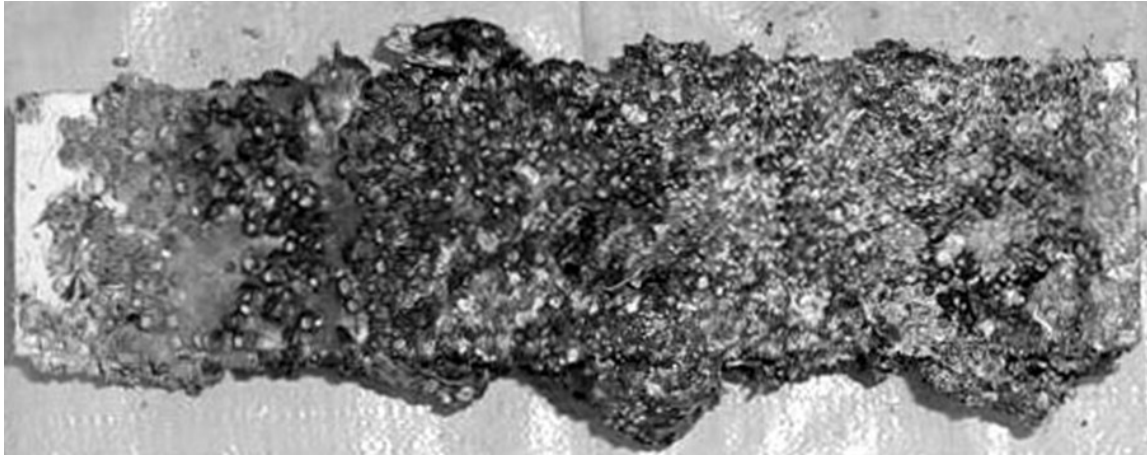


図-3.1.3.16 供試体に付着した生物の状況[30]

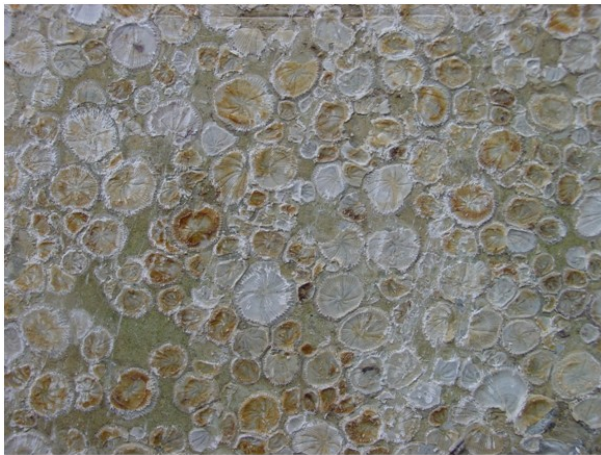


図-3.1.3.17 コンクリート表面に付着したフジツボの底殻[30]

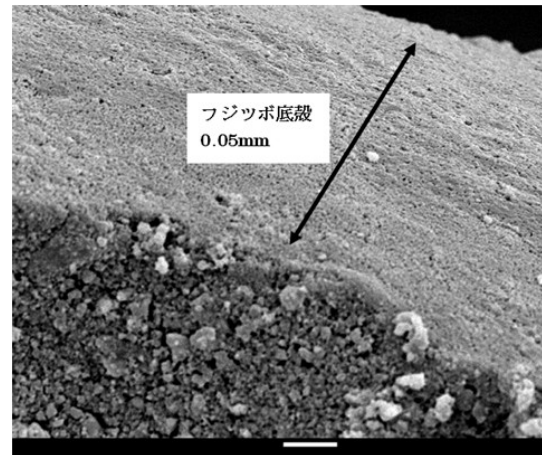


図-3.1.3.18 フジツボの付着層の電子顕微鏡観察写真[30]

この底殻の効果を、1) コンクリート中への塩化物イオンの浸透抑制、2) コンクリート中への酸素の浸透抑制、3) コンクリート中鉄筋の腐食抑制、の観点から検討した。試験はいずれも、20ヶ月の暴露が終了し、その表面に底殻が付着している供試体(100×100×400mm)を利用して行った。その結果の詳細の説明は本稿においては割愛するが、生物付着面積率が大きくなるほど塩化物イオン拡散係数は小さくなること、生物付着量が多くなるほど酸素拡散係数が小さくなること、さらに、生物の付着面積率が大きくなると内部鉄筋の腐食速度が小さくなることが明らかとなった。

以上、コンクリート表面に海生生物が作り出してくれるこの非常に薄い被膜(底殻)が、塩化物イオンの浸透抑制、酸素の透過抑制、およびコンクリート中鉄筋の腐食抑制に対して効果があることがわかった。この現象はまさに自然がもたらす「自然治癒」と呼んでもよいかもしれない。

<参考文献>

- [1] Tarek Uddin Mohammed・濱田秀則：海洋環境に暴露されたコンクリートの空隙、ひび割れおよび打継ぎ目の自然治癒について ―長期暴露試験より観察されたこと―、コンクリート工学、Vol.46、No.3、p.25-30、2008.3

- [2] Tarek Uddin Mohammed・濱田秀則：コンクリート中の鉄筋の腐食について、一長期暴露試験より観察されたことー、コンクリート工学、Vol.46、No.4、p.23-26、2008.4
- [3] Mehta, P.K.: Concrete in the Marine Environment, Ed. Bentur, A., and Mindess, S., Elsevier Applied Science, 1991
- [4] Mohammed, T.U., Yamaji, T., and Hamada, H.: Chloride Diffusion, Microstructures and Mineralogy of Concrete after 15 Years of Exposure in the Tidal Environment, ACI Materials Journal, Vol. 99, No. 3, pp. 256-263, May - June 2002
- [5] Mohammed, T.U., Yamaji, T., and Hamada, H.: Microstructures and Interfaces in Concrete after 15 Years of Exposure in the Tidal Environment, ACI Materials Journal, Vol. 99, No. 4, pp. 352-360, July - August 2002
- [6] Otsuki, N, Hisada, M., Diola, N. B., Mohammed, T.U.: Experimental Study on Interfacial Transition Zones in Reinforced Concrete, Journal of Materials, Concrete, Structures and Pavements, JSCE, No. 592/V-39, pp.155-167, May 1998
- [7] Mohammed, T.U., Yamaji, T., Toshiyuki, A., and Hamada, H.: Corrosion of Steel Bars in Cracked Concrete Made with Ordinary Portland, Slag and Fly Ash Cements, ACI SP 199-40, Vol. 2, pp. 699-718, 2001
- [8] Mohammed, T.U. and Hamada, H.: Corrosion of Steel Bars in Concrete - Facts from the Long-term Exposure Tests (submitted)
- [9] Mohammed, T.U., Otsuki, N., and Hisada, M.: Corrosion of Steel Bars With Respect to Orientation in Concrete, ACI Materials Journal, Vol.96, No.2, pp.154-159, March-April 1999
- [10] Mohammed, T.U., Otsuki, N., Hamada, H., and Toru, Y.: Chloride Ion Induced Corrosion of Steel Bars in Concrete with the Presence of Gap at the Steel-concrete Interface, ACI Materials Journal, Vol. 99, No. 2, pp. 149-156, March - April 2002
- [11] Mohammed, T.U., Otsuki, N., and Hamada, H.: Issues in Designing Durable Structures, ACI Concrete International, pp. 46-48, 2001
- [12] Mohammed, T.U., Hamada, H.: Corrosion of Steel Bars in Concrete at Joints Under Tidal Environment, ACI Materials Journal, Vol. 100, No. 4, pp. 265-273, July - August 2003
- [13] Mohammed, T.U., Hamada, H.: Micro-cell and Macro-cell Corrosion of Steel Bars in Concrete with Various Joints Under Atmospheric Environment, ACI SP 212-17, pp. 259-278, June 2003
- [14] Collepardi, M.: Ettringite Formation and Sulfate Attack on Concrete, Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, Supplementary Volume, pp. 25-41, 2000
- [15] Mehta, P.K.: Sulfate Attack on Concrete, Separating Myths from Reality, ACI Concrete International, pp. 57-61, August 2000
- [16] Taylor, H.F.W., Famy, C., and Scrivener, K.L.: Review - Delayed Ettringite Formation, Cement and Concrete Research, Vo. 31, pp. 683-693, 2001
- [17] Santhanam, M., Cohen, M. D., and Olek, J.: Sulfate Attack Research - Whither Now?,

- Review Report, Cement and Concrete Research Journal, Vol. 31, pp. 845-851, 2001
- [18] Famy, C., Scrivener, K.L., Atkinson, A., and Brough, A.R.: Influence of the Storage Conditions on the Dimensional Changes of Heat-Cured Mortars, Cement and Concrete Research Journal, Vol. 31, pp. 795-803, 2001
- [19] Mohammed, T.U., Otsuki, N., Hisada, M., Hamada, H.: Marine Durability of 23-Year Old Reinforced Concrete Beams, ACI SP 192-65, pp. 1071-1088, June 2000
- [20] Mohammed, T.U., Hamada, H.: Micro-cell and Macro-cell Corrosion of Steel Bars in Concrete with Various Joints Under Atmospheric Environment, ACI SP 212-17, pp. 259-278, June 2003
- [21] Mohammed, T.U., Otsuki, N., and Hamada, H.: Issues in Designing Durable Structures, ACI Concrete International, pp. 46-48, 2001
- [22] Mohammed, T.U., Yamaji, T., Toshiyuki, A., and Hamada, H.: Marine Durability of 15-Year Old Concrete Specimens Made With Ordinary Portland, Slag and Fly Ash Cement, ACI SP 199-30, Vol. 2, pp. 541-560, 2001
- [23] Mohammed, T.U., Otsuki, N., and Hisada, M.: Corrosion of Steel Bars With Respect to Orientation in Concrete, ACI Materials Journal, Vol.96, No.2, pp.154-159, March-April 1999
- [24] Mohammed, T.U., Otsuki, N., Hamada, H., and Toru, Y.: Chloride-Induced Corrosion of Steel Bars in Concrete with the Presence of Gap at the Steel-concrete Interface, ACI Materials Journal, Vol. 99, No. 2, pp. 149-156, March - April 2002
- [25] Mohammed, T.U., Otsuki, N., Hisada, M., Tsunenori, S.: Effect of Crack Width and Bar Types on Corrosion of Steel in Concrete, ASCE Materials Journal, Vol. 13, No. 3, pp. 194-201, May - June 2001
- [26] Mohammed, T.U., Yamaji, T., and Hamada, H.: Chloride Diffusion, Microstructures and Mineralogy of Concrete after 15 Years of Exposure in the Tidal Environment, ACI Materials Journal, Vo. 99, No. 3, pp. 256-263, May - June 2002
- [27] Mohammed, T.U., Yamaji, T., Toshiyuki, A., and Hamada, H.: Corrosion of Steel Bars in Cracked Concrete Made with Ordinary Portland, Slag and Fly Ash Cements, ACI SP 199-40, Volume 2, pp. 699-718, 2001
- [28] Mohammed, T.U., Hamada, H.: Corrosion of Steel Bars in Concrete at Joints Under Tidal Environment, ACI Materials Journal, Vol. 100, No. 4, pp. 265-273, July - August 2003
- [29] 濱田秀則・岩波光保・丸屋剛・横田弘：海生生物付着による海洋構造物の耐久性向上について，コンクリート工学年次論文集，Vol.24、No.1、2002
- [30] 渡邊弘子・岩波光保・濱田秀則・横田弘：海生生物付着による海洋構造物の耐久性向上に関する研究、港湾空港技術研究所報告、Vol. 41、No. 3、2002.9
- [31] 濱田秀則・横田弘・岩波光保・渡邊弘子：海生生物の付着を利用した RC 港湾・海洋構造物の耐久性向上の試み，セメント・コンクリート，No.670，2002.12

3.1.4 漏水環境下における自然治癒

防水性、水密性が要求される構造物や部材において、ひび割れは機能を損ねる重大な欠陥となる可能性がある。土木構造物においては、漏水環境下の地下構造物や、水理構造物、貯蔵のための構造物、スラブの下を店舗等が利用している場合などが該当するであろうし、そもそもひび割れの発生を許されないほどに物質移動の高い遮蔽能力が要求される超重要構造物もあるであろう。我が国の建築構造物においては、通常時だけでなく、台風による暴風雨時の厳しい条件においても漏水が許容されない場合もある。

土木構造物の漏水の場合、漏水を処理するための下水道の多額のコストがかかること、漏水が構造物の貯蔵機能が直接的に損ねることなどが問題であった。近年では、高架橋等の接合部での漏水が、支承部の変状に大きく影響を与えることもあって、接合部での防水工に性能契約をする発注者も出てきている[1]。今後、設計段階で漏水の制御を検討する必要性が高まる可能性もある。

防水性・水密性に対する許容ひび割れ幅については、過去に数多くの研究がなされている。過去の研究結果を見ても、防水性は特にひび割れ幅の影響を強く受けることが分かる。高圧下でのひび割れ漏水実験において、長期間の漏水によるひび割れの間詰まりによる漏水量の低減を考慮する閉塞係数が各研究で示されており[2,3]、これが、漏水環境下での自然治癒に相当するものである。図-3.1.4.1は、ひび割れ間の目詰まりにより、漏水量が減少することを示している。目詰まりの影響だけでなく、条件によっては未水和セメントの持続的な反応が影響することもある。3.2 節で詳説しているいくつかの自己治癒コンクリートは、まさにこの漏水環境下での治癒機能を飛躍的に高めようとするものである。

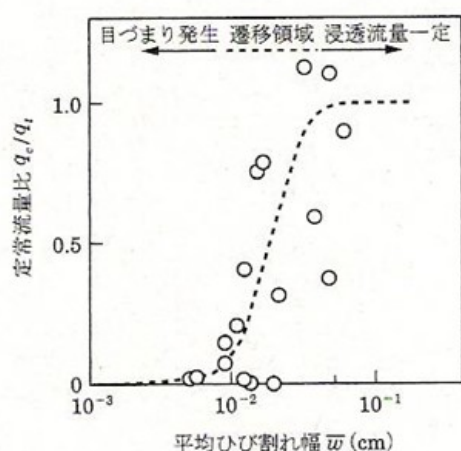


図-3.1.4.1 ひび割れ幅と目詰まりによる自然治癒[2]

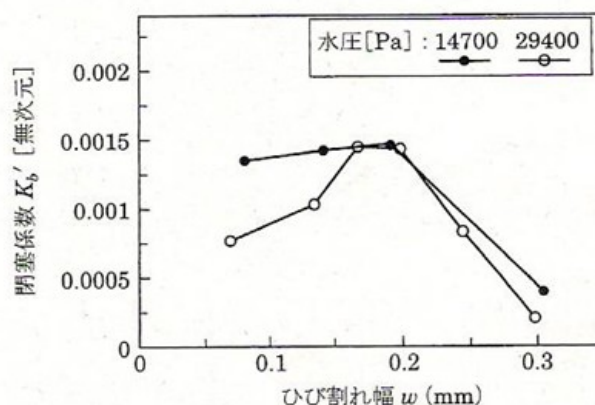
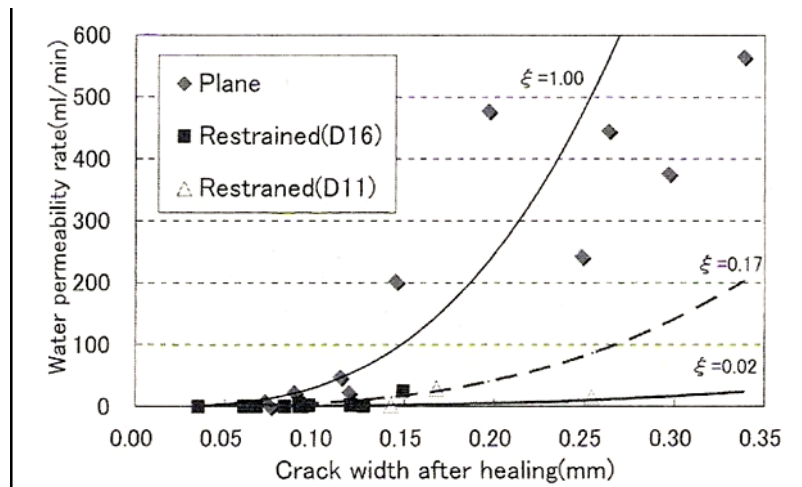


図-3.1.4.2 ひび割れ幅と閉塞係数[3]

Edvardsen[4]は、粗い表面を有するひび割れ間の漏水量を表す式として、式(3.1.4.1)を示している。ひび割れ幅の3乗に比例するものの、ひび割れ面の粗さによる低減係数 ξ について言及しており、鉄筋コンクリートのスラブでの実験[5]で0.02～0.17の値をとること、Michsnerの実験[6]で0.04～0.53の値をとること、を示している。また、Edvardsenは、溶液のpHが Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- の平衡濃度に影響を及ぼし、ひび割れ間の CaCO_3 の析出に影響を与える、と指摘している。

$$q_r = \xi \cdot \Delta p \cdot b \cdot w^3 / 12 \cdot \eta \cdot d \quad (3.1.4.1)$$

石渡・細田[7]らは、100mm×100mm のひび割れ面を鉄筋が貫通する試験体と、無筋の試験体に対して自己治癒コンクリートを用い、ひび割れがある程度治癒した後にひび割れ間の短期間の通水試験を行っている。その結果、無筋の試験体では、式(3.1.4.1)の低減係数をほとんど考慮しなくて良いのに対して、鉄筋が貫通する試験体では 0.02 程度の低減係数を考慮するのが適切であるとしている（図－3.1.3.3）。ひび割れ面の凹凸だけでなく、異形鉄筋の存在によるひび割れの内部形状の変化も、漏水量に大きく影響することを示している。



図－3.1.4.3 自己治癒後のひび割れ幅と透水速度に及ぼす鉄筋の影響[7]

Reinhardt ら[8]は、漏水環境下のひび割れ自己治癒は、ひび割れ幅と水温の影響を受けるとしている。漏水は時間の経過とともに低減し、ひび割れ幅が小さいほうが治癒速度も速く、20 度、50 度、80 度の水温で検討した結果、水温が高い方が漏水量の低減効果が大きかった。水セメント比は 37%で、フライアッシュ、シリカフュームも含む高性能コンクリートで実験を行っており、0.10mm までのひび割れが自己治癒する、と結論付けている。

漏水環境下での自己治癒には、コンクリートの配合、使用材料だけでなく、ひび割れ形状、鉄筋配置の影響、動水勾配、水温、水質、部材厚さ、など多くの影響因子があり、その機構が十分に解明されていると言えない。コンクリートが本来持っている自己治癒機能を陰な形で期待する状況では、機構が十分に解明される必要はないかもしれない。しかし、コンクリートに積極的に自己治癒機能を持たせようとする場合には、これらの影響を把握し、自己治癒コンクリートが使用される環境で、適切な効果を発揮させるための知見が蓄積される必要がある。

小松ら[9]は、Edvardsen らの示す自己治癒が生じる限界初期漏水速度を大きく上回る初期漏水速度において、自己治癒コンクリートの効果が十分に発揮されたことを報告している。その中で、試験体を養生する水の pH が自己治癒に大きく影響する可能性を指摘している。

栗田ら[10]は、1℃の水温で養生した場合でも、ひび割れ間の析出が見られ、自己治癒コンクリートの治癒性状に温度の影響が明確には見られなかったと報告している。

今後、さらなるデータの蓄積が必要である。

<参考文献>

- [1] 菅野貴浩：JR 東日本におけるコンクリート構造物の長寿命化への取り組み、コンクリート工学、Vol.40、No.5、pp.74-81、2002.5
- [2] 伊藤洋・坂口雄彦・西山勝栄・清水昭男：コンクリートクラック内の透水性に関する実験的研究、セメント技術年報 41、pp.217-220、1987
- [3] 壺岐直之・清宮理・山田昌郎・高野誠紀：沈埋トンネル側壁のひび割れからの漏水と自癒効果の確認実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、pp.737-742、1995.6
- [4] Carola Edvardsen: Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete, ACI Materials Journal, pp.448-455, July-August 1999
- [5] Ripphausen, B. et al.: Zur Wasserdurchlässigkeit von Stahlbetonbauteilen mit Trennrissen (Water Permeability of Concrete Structures with Separation Cracks), *Beton und Stahlbetonbau*, Berlin, 1989 (in German)
- [6] Meichsner, H.: Über die Selbstdichtung von Trennrissen in Beton (Autogenous Healing of Cracks in Concrete), *Beton und Stahlbetonbau*, Berlin, 1992 (in German)
- [7] 石渡大嗣・細田暁・平野勝彦・山田啓介：ひび割れ自己治癒コンクリートにおける膨張の拘束の影響、セメント・コンクリート論文集、No.61、pp.617-623、2007
- [8] Reinhardt, H., Jooss, M.: Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width, *Cement and Concrete Research* 33, pp.981-985, 2003
- [9] 小松怜史・細田暁・安台浩・池野誠司：ひび割れ間で通水する自己治癒コンクリートの治癒性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.1、pp.117-122、2008
- [10] 栗田淑乃・細田暁・小林薫・松田芳範：養生水の性質が自己治癒コンクリートの治癒効果に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、2009（掲載決定）

[担当 細田暁]

3.2 自律的な治癒機能の付与

本報告書の第2章において、自己治癒／修復のそれぞれの現象に対して用語の定義を行った。ここでは、通常のコングリートに見られる治癒現象のポテンシャルを引き出すことを目的として混和材や繊維を添加した「自律治癒」コンクリートについて紹介する（図-3.2.1）。自律治癒コンクリートに用いる混和材や繊維とは、フライアッシュやスラグ、膨張材、短繊維等であり、これらは従来から自己治癒／修復以外の目的で一般にコンクリートへ混和されてきたものである。

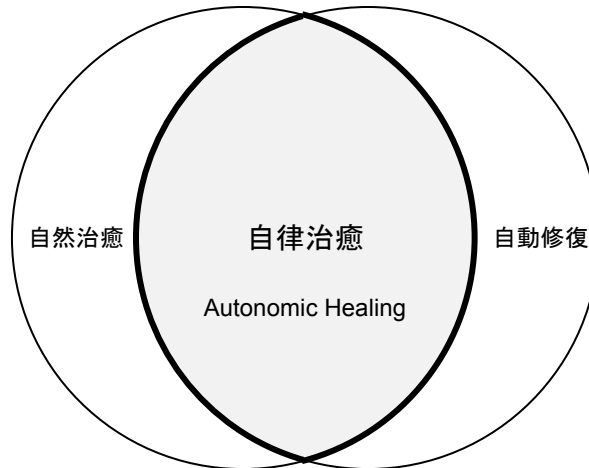


図-3.2.1 自律治癒

3.2.1 高炉スラグ、フライアッシュを用いた自律治癒コンクリート

自己治癒／修復性能をコンクリートに付与する手法のひとつとして、セメント系材料の再水和をそのメカニズムとするものが挙げられる。コンクリートに生じたひび割れが、未反応で残されたセメント系材料の水和生成物により閉塞する、という機構である。コンクリートに見られる自然治癒現象については3.1にて述べたが、未反応物をコンクリート中に長期にわたり残存させるためにはいくつかのアプローチがあり、コンクリートの水結合材比を低くすることで未反応セメント鉱物を残存させる方法や、セメント鉱物よりも反応速度の遅い混和材を混合する方法などが報告されている。ここでは、混和材に高炉スラグおよびフライアッシュを用いた自律治癒コンクリートに関するいくつかの報告について記述する。なお、ここで紹介する各研究事例は、「自己修復」の用語が用いられているものもあるが、以下では本報告書での用語の定義に従って「自律治癒」とする。

高炉スラグを用いたモルタル、コンクリートの自律治癒性能に関しては、松下ら[1-4]の研究グループにより報告されている。松下ら[1]は、普通セメントおよび高炉セメント（置換率50%、粉末度6000）コンクリート角柱供試体を用い、繰り返し载荷により発生させた微細ひび割れの閉塞について報告した。自律治癒性能は、超音波伝播速度および塩分浸透深さにて評価し、繰り返し载荷前の前養生期間（28、91日の水中養生）、および再養生期間、条件（7、30、90日の水中および気中養生）の影響について検討している。

図-3.2.1.1に普通セメントおよび高炉セメントの再養生による超音波伝播速度の変化を示す[1]。この図から、普通セメントに比較し、高炉セメントを用いたコンクリートで、再養生による超音波伝播速度の増大が顕著であることが示されている。

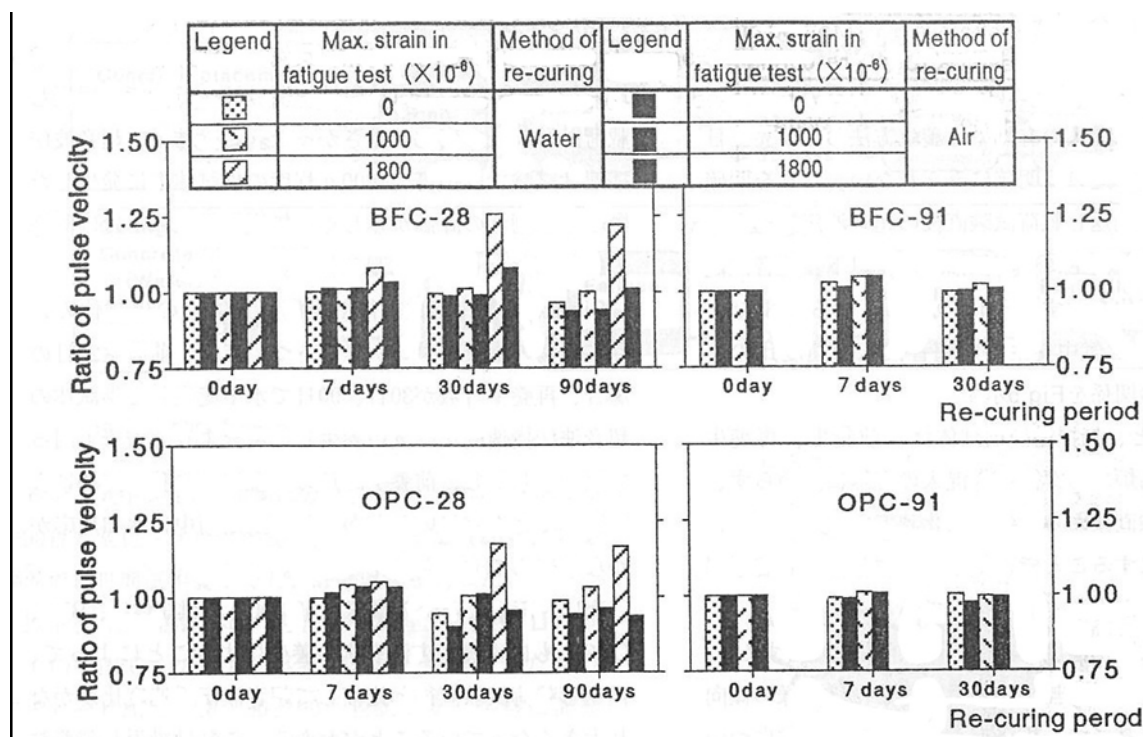


図-3.2.1.1 再養生による超音波伝播速度の変化[1]

また、前養生期間が水中養生 91 日では、セメントの水和反応がほぼ終了していることから再養生の効果は小さいこと、再養生期間は 30 日以降でその効果が大きいこと、普通セメントでは気中養生での再養生はほとんど効果がないものの、高炉セメントの場合は気中養生での再養生により超音波伝播速度の増大が認められること等が示されている。

高炉セメントの気中養生での自己修復性に関しては、名和ら[5]のスラグの水和反応は普通セメントに比べより低い相対湿度でも進展する可能性があるという指摘や、佐川ら[6]の高炉スラグの反応率は相対湿度の影響をあまり受けないという報告と関連していると考えられる。

塩分浸透深さについては、普通セメント、高炉セメントのいずれも水中養生による再養生で塩分浸透深さの低減が認められているが、ひび割れの閉塞に関しては明確ではないとしている。これらの実験結果は、自律治癒性能の評価は超音波伝播速度および塩分浸透性にて評価され、実際にひび割れの閉塞を観察していないこと、実験により得られた自律治癒性能は、再水和によるマトリックス全体の水和反応の促進も影響も含まれた形で評価されていること、等からより詳細な自律治癒性能の評価には今後の検討が必要であると考えられる。

松下ら[2]は、セメントの種類、ひび割れ発生時期および養生期間を要因として、初期ひび割れを導入したモルタルによる 3 点曲げ試験を実施し、強度回復特性について検討している。

供試体は、水セメント比 50%、質量比でセメント 1、標準砂 3 の配合とし、早強セメント、普通セメント、低熱セメント、高炉セメント B 種およびフライアッシュセメント B 種の 5 種類のセメントを使用している。

実験は、第一載荷試験時の材齢まで 20℃の水中養生後、図-3.2.1.2 に示すように供試体中央部に深さ 1cm、幅 1mm の切欠きを導入し、3 点曲げ試験を行い荷重とひび割れ開口変位 (CMOD) を測定している。図-3.2.1.3 に示すように、第一載荷試験は、荷重が最大荷重を超えて低下し、その際の CMOD が最大荷重時の値より 0.010mm 大きくなった時点で一旦除荷し試験を終了させ、

その供試体を 20℃ の水中養生(第二養生)した後、第二載荷試験を実施している。

実験結果は、強度上昇率および強度回復率により評価している。強度上昇率は、式(3.2.1.1)を用い、図-3.2.1.4 にその概略図を示す。

$$\text{強度上昇率} = P2 / P1 \quad (3.2.1.1)$$

ここで、式(3.2.1.1)に示される P1 とは、第一載荷試験における除荷荷重(kN)であり、P2 とは第二載荷試験における最大荷重(kN)である。

強度回復率は、式(3.2.1.2)を用い、図-3.2.1.5 にその概略図を示す。

$$\text{強度回復率} = P(i) / P(ii) \quad (3.2.1.2)$$

ここで、式(3.2.1.2)に示される P(i)とは、第二養生期間を有した供試体の第二載荷時最大荷重(kN)であり、P(ii)とは P(i)の第二載荷材齢と同一材齢で繰り返し載荷試験を行った供試体の第二載荷時最大荷重(kN)である。

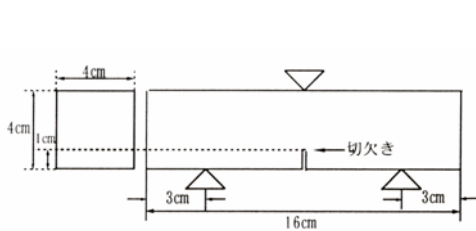


図-3.2.1.2 供試体形状[2]

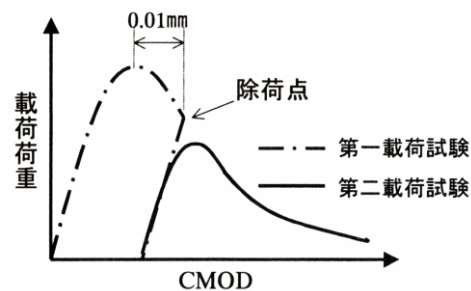


図-3.2.1.3 荷重とCMOD 関係図[2]

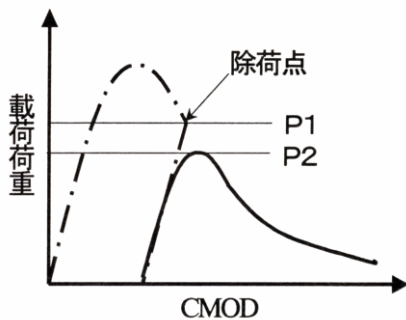


図-3.2.1.4 強度上昇率の概略図[2]

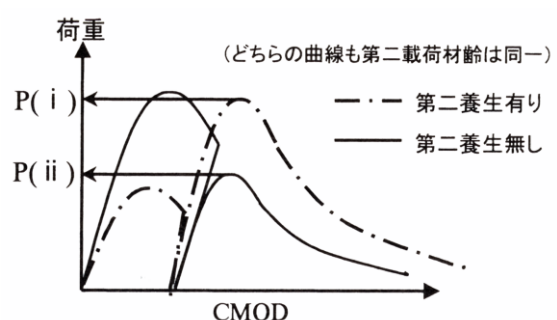


図-3.2.1.5 強度回復率の概略図[2]

各セメントにおける強度上昇率と第二載荷材齢の関係は、図-3.2.1.6 に示すようにセメントの種類により強度上昇率が異なり、硬化速度の遅いセメントほど強度上昇率が高くなる。他方、セメントの種類によらず、第一載荷試験から第二載荷試験までの養生期間を設けることで強度上昇率が1以上になることを報告している。

強度回復率は、第二養生期間を設けることで未水和セメントが新たに水和反応を起こし強度が回復する量を示す指標としており、強度回復率が1以上であれば未水和セメントの水和による強度増進としている。各セメントにおける強度回復率と第二載荷材齢の関係は、図-3.2.1.7 に示す

ように、全てのセメントに関して第二養生期間を設けることで、強度回復率が1以上になったと報告している。しかし、低熱セメント以外のセメントは、強度回復率の低下が認められる。これは、各材齢における強度発現量の違いおよび初期ひび割れ上方の健全部における材齢に伴う強度上昇と初期ひび割れ近傍で露呈した未水和セメントの新たな水和反応に伴う強度回復の2要因の占める割合がセメントの種類により異なるためと推測している。

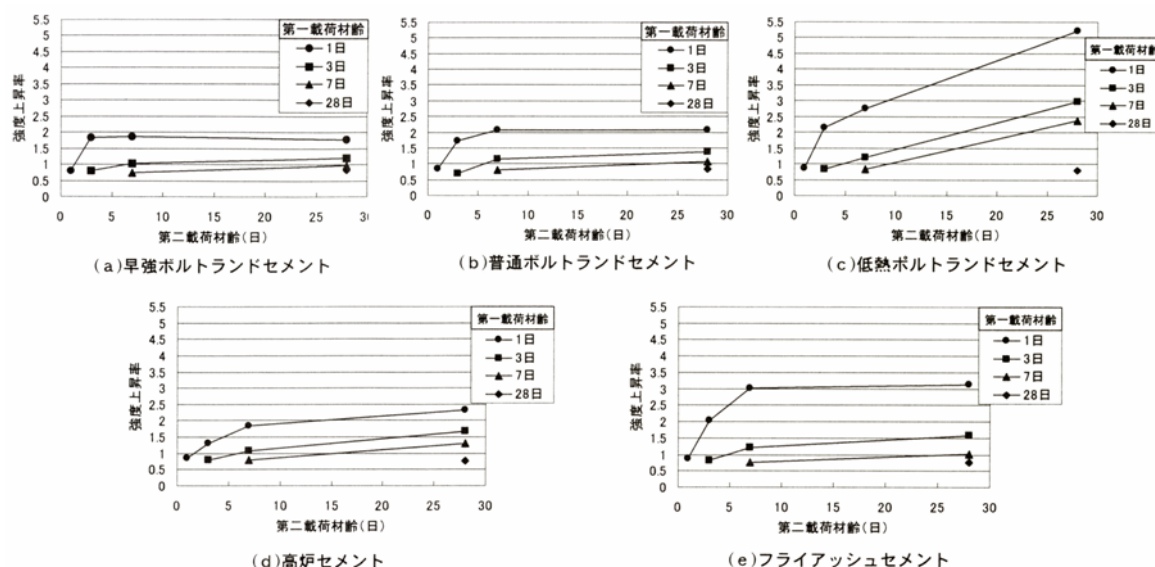


図-3.2.1.6 各セメントにおける強度上昇率と第二載荷材齢の関係[2]

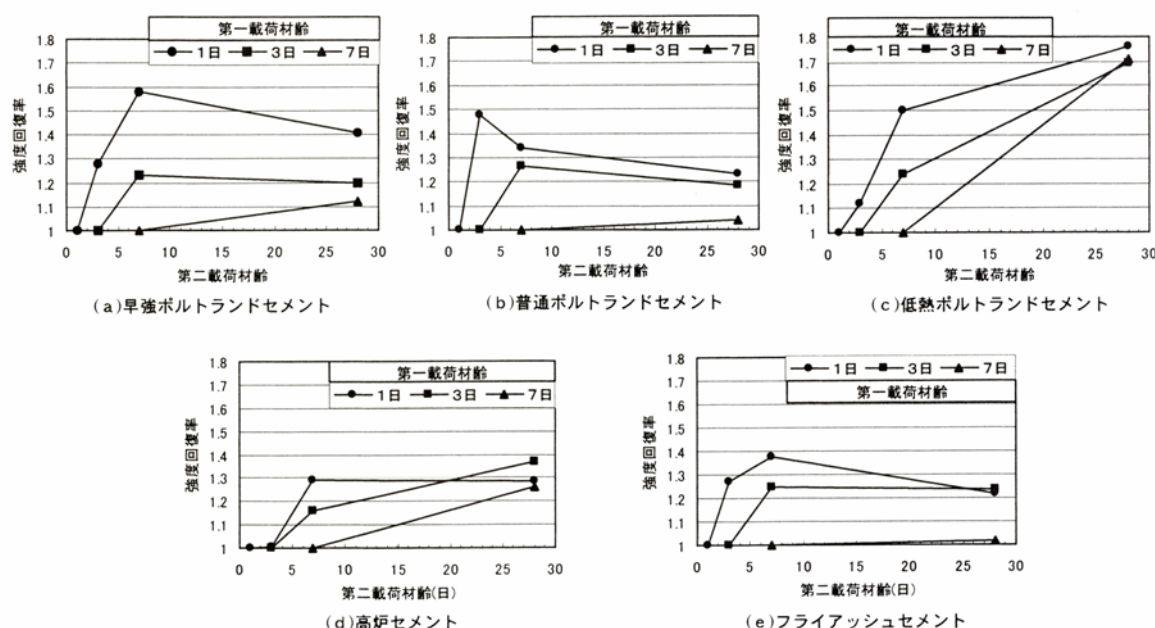


図-3.2.1.7 各セメントにおける強度回復率と第二載荷材齢の関係[2]

また、マイクロスコープにより第一載荷試験直後と第二養生後のひび割れ状態を観察した結果、図-3.2.1.8に示すように、初期ひび割れが未水和セメントの水和により充填されたことを確認している。すなわち、初期ひび割れを有したコンクリートは水和速度の遅いセメントほど水中養生により強度回復が可能であると報告している。

なお、上に述べた研究報告は、水和速度の遅いセメントという観点から、実験には普通・早強セ

メント、高炉セメント B 種以外にも低熱セメント、フライアッシュセメント B 種が用いられている。また、同様の検討を欧州規格の 32.5 クラスセメントを想定した石灰石フィラーセメント、石灰石・高炉スラグ混合 3 成分系セメントを用いて行った結果も報告されている[3,4]。高炉セメントのみならず、自己修復機能を有するセメントは、様々な鉱物組成や混和材の使用およびその組み合わせが考えられる。

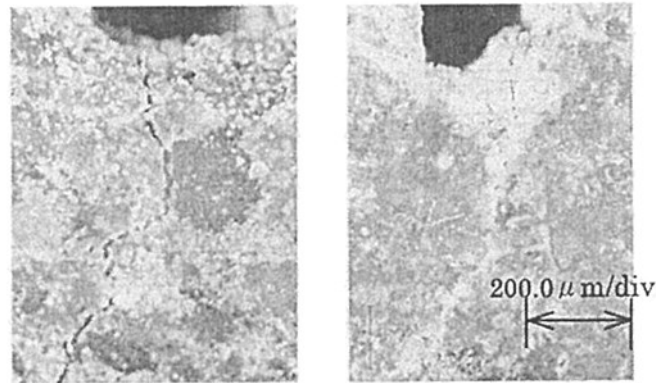


図-3.2.1.8 第一載荷直後(左)と第二養生後(右)のひび割れ状況[2]

一方、フライアッシュの継続的な水和反応を活用した、自律治癒コンクリートに関する検討がいくつか報告されている。Sahmaran ら[7]は、水結合材比 35%でフライアッシュを内割 35%、55%置換した自己充填コンクリートにおいて、終局強度の 70%および 90%の圧縮載荷を行うことでマイクロクラックを発生させ、その後の水中養生(飽和水酸化カルシウム溶液)での治癒性能について検討している。圧縮載荷により強度低下したフライアッシュ無混和のコンクリートは、その後の 28 日水中養生での強度回復は僅かであるのに対し、フライアッシュを混和したコンクリートの強度回復が著しいことを示している。超音波伝播速度や塩分浸透性、毛管吸水量の回復効果も同様であり、これは、多量に存在する未反応フライアッシュの再水和による治癒効果であると考察している。

一方、日本国内では、フライアッシュの継続的な水和反応を活用した、自律治癒コンクリートに関する検討が北海道立北方建築総合研究所、室蘭工業大学などの共同研究で行われている[8-14]。治癒の対象となるひび割れは、曲げひび割れほどの巨視的なものではなく、凍害や乾燥収縮により生じるマイクロクラックとしている。凍結融解作用による劣化が生じた後、圧縮強度、相対動弾性係数、中性化深さ、細孔容積、視覚的なひび割れの情報などから治癒性能の評価を行っている。フライアッシュのもつ潜在的な治癒能力の評価として 40°C4 週の再養生を行っており、フライアッシュセメントの高い治癒効果が示されている。さらに、実環境を想定した養生条件での治癒性能の評価や、暴露試験体による実環境での養生条件の評価、治癒性能を評価する促進試験法に関する検討がそれぞれ行われている。

コンクリートの配調合は、フライアッシュをセメントの内割として混合した場合、初期強度の低下や中性化の増大が懸念されることから、水ポルトランドセメント比はフライアッシュを混和しないコンクリートと同一とし、フライアッシュは外割混和を原則とすることとしている。自律治癒コンクリートの配調合の設計法を確立するためには、フライアッシュセメントの空隙充填の定量的評価、実環境下で考えられる治癒養生条件の評価が必要と考えられる。そこで、ポルトランドセメントおよびフライアッシュの水和反応の評価とモデル化に関する検討[15-20]、フライア

ッシュの水和反応と空隙構造の変化[21-23]、実環境でのコンクリート中の温湿度とセメントの水和反応[24-27]に関する検討がそれぞれ行われ、治癒性能を発揮するためのフライアッシュ混和量が算定されている[10]。また、フライアッシュを多量に混和した場合、長期材齢でフライアッシュの反応生成物によって気泡の一部が充填され、凍結融解抵抗性が低下することが報告されている[28]ことから、フライアッシュ置換率の上限が算定されている。その結果、水セメント比が50%の場合で、最適なフライアッシュ混和量はセメントの15%程度となり、JIS R5213に規定されるフライアッシュセメントB種相当とされている。従来、フライアッシュを使用するコンクリートには、一般にワーカビリティ、ポンパビリティの改善、長期強度の増進、水和熱の低減、アルカリ骨材反応の抑制等の効果が期待されていたが、これらに加えてコンクリートの自律治癒性能の付与が期待されるといえる。なお、フライアッシュの適切な混和量の算定に関しては、自律治癒コンクリートの材料設計例として、本報告書6.3にて詳述する。以下ではフライアッシュを用いた自律治癒コンクリートの治癒性能に関する実験結果について詳述する。

(1) ポテンシャルとしての治癒能力

図-3.2.1.9には水セメント比が55%の普通セメントおよびフライアッシュセメントを用いたモルタルの、凍結融解後および再養生後の相対動弾性係数の変化を示す[9]。フライアッシュはセメント質量に対して20%を細骨材置換し、促進劣化試験前の前養生期間は20℃4週の水中養生としている。普通セメント、フライアッシュセメントのいずれも、凍害劣化後の再養生で相対動弾性係数は回復し、治癒効果はフライアッシュセメントで高い。また、40℃4週水中養生での治癒効果は、フライアッシュセメントで著しく高かった。

図-3.2.1.10には、中性化速度係数にて評価した水セメント比55%で、凍害劣化させたモルタルの治癒効果に及ぼすフライアッシュ置換率の影響について示す。再養生後の中性化速度係数の低下は、フライアッシュ置換率が高いほど著しいことが示されている。

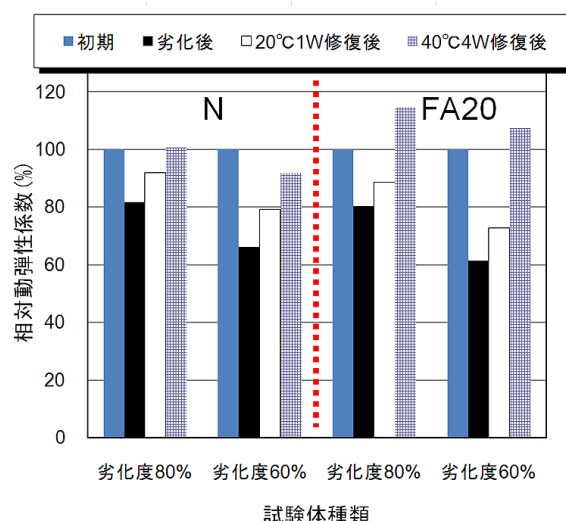


図-3.2.1.9 普通セメント及びフライアッシュセメントを用いたモルタルの相対動弾性係数の変化[9]

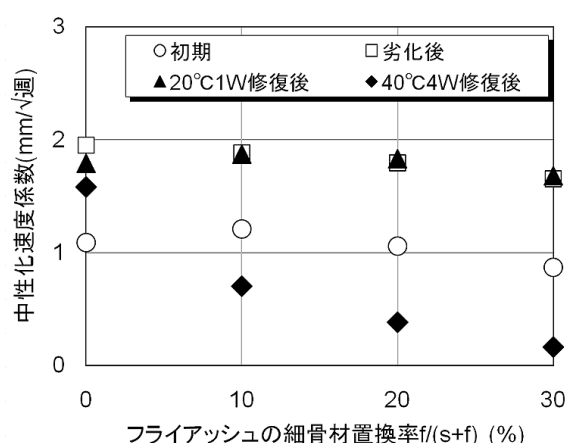


図-3.2.1.10 フライアッシュの細骨材置換率と中性化速度係数との関係[9]

これらフライアッシュによる治癒は、再養生時のフライアッシュの水和反応によってマイクロクラックが充填され、ひび割れを治癒していると考えられる。図-3.2.1.11には、治癒前後でのコンクリート表面のひび割れ状況を示す[8]。コンクリートは水セメント比 50%で、フライアッシュはセメント質量の約 30%を細骨材置換し、再養生条件は 30℃60%RH 環境において、コンクリート上面に水を滞留した条件で 3 ヶ月間の養生を行っている。凍結融解作用後にはマトリックス部分に網目状のひび割れが発生しているのに対して、再養生後には粗骨材界面のひび割れは残っているものの、それを結ぶひび割れは閉塞していることが確認できる。

図-3.2.1.12には、水銀圧入法により測定した治癒前後での細孔構造の変化を細孔範囲ごとの相対細孔容積の変化として表したものを示す[9]。試験体はモルタルであり、配合条件は図-3.2.1.9と同一である。劣化後および再養生後に細孔容積の変化が大きいのは 0.05 μm ~10 μm の細孔直径範囲である。凍害劣化により生じるマイクロクラックの大部分は 1 μm 以上であり、再養生により未水和セメントおよびフライアッシュが反応して生成される水和物の大部分は、このマイクロクラックを充填したものと考えられる。

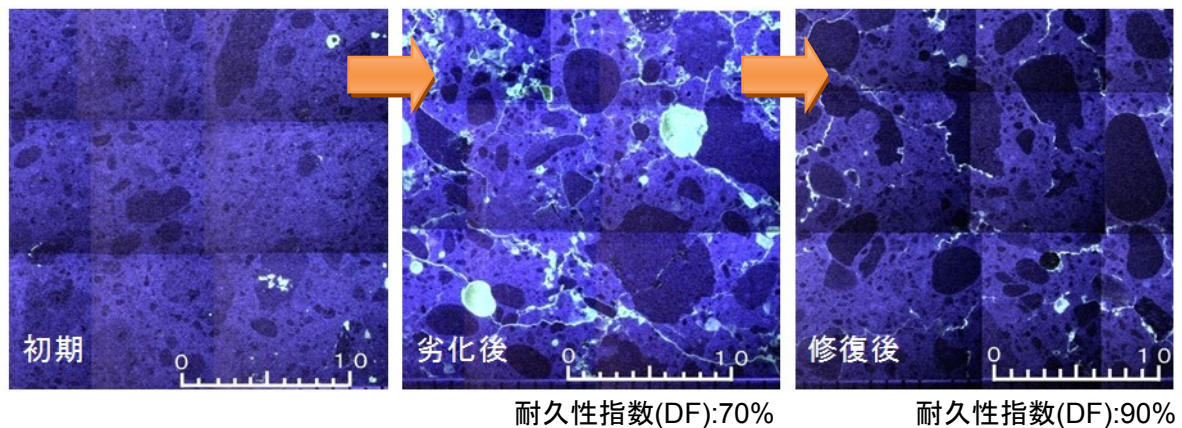


図-3.2.1.11 コンクリート表面のひび割れの観察[8]

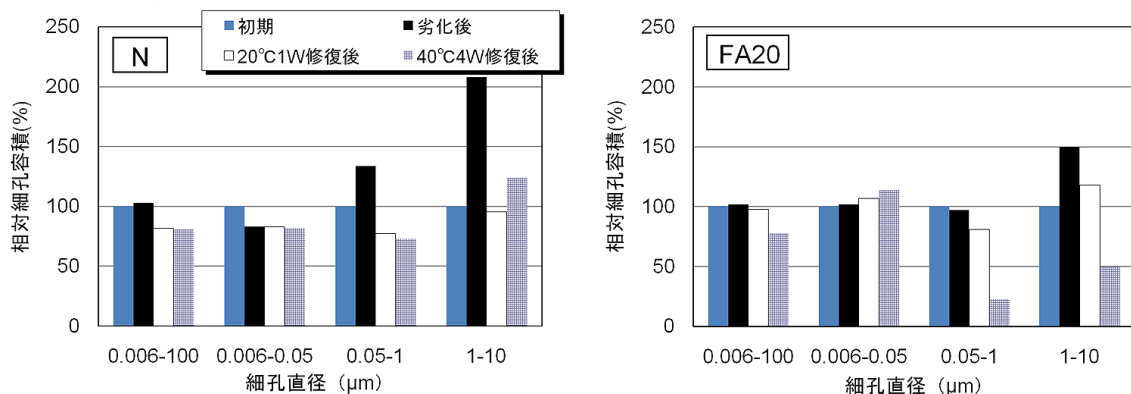


図-3.2.1.12 細孔範囲ごとの相対細孔容積の変化[9]

以上の相対動弾性係数や中性化速度係数の変化から検討している自律治癒性能は、フライアッシュセメントでの効果が卓越しているものの、一方で普通セメントを用いた場合にも認められる。未水和セメント鉱物による自癒作用は本来コンクリート自体が持つ性質ではあるが、本報告書の 3.1 にも示したように、低水セメント比ではない、一般的な水セメント比の長期間供用された実環境のコンクリート構造物中には、残存する未水和セメント鉱物はそう多くはないことは容易に

想像できる。

そこで、劣化前の前養生期間が、その後の修復に及ぼす影響を検討したものを図-3.2.1.13 および図-3.2.1.14 にそれぞれ示す。試験体は水セメント比 50%程度のコンクリートとし、フライアッシュはセメント質量の 15%を細骨材置換している。前養生期間は水中 4 週および 13 週または 1 年とし、凍結融解劣化後に 40℃4 週の水中養生を行い、相対動弾性係数と中性化速度係数の変化を測定している。図中の試験体記号は、N および F は普通セメントとフライアッシュセメントの non-AE コンクリート、NA および FA は AE コンクリートを表す。前養生水中 4 週では、普通セメントコンクリートにおいても再養生による相対動弾性係数の回復が認められるが、材齢 1 年の前養生ではほとんど認められない。また、前養生水中 13 週では、再養生による中性化速度係数の回復は普通セメントにおいても認められるが、フライアッシュセメントでの回復が著しい。したがって、フライアッシュセメントは、コンクリートが長期間供用後においても未水和物が多量に残存し、普通セメントに比較して卓越した自律治癒性能を有すると考えられる。

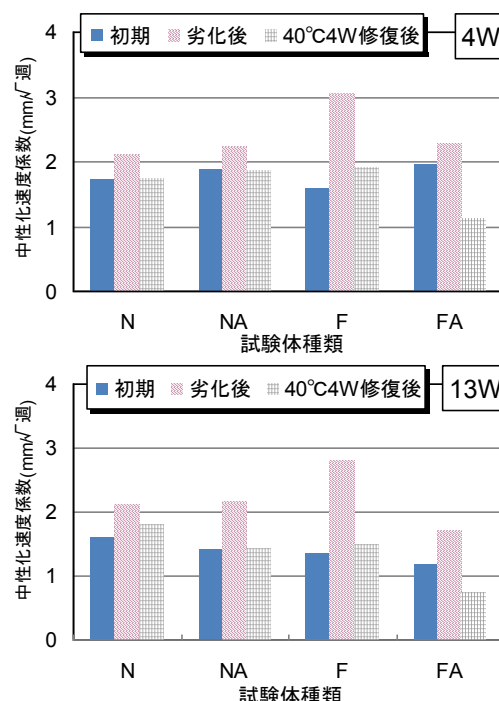
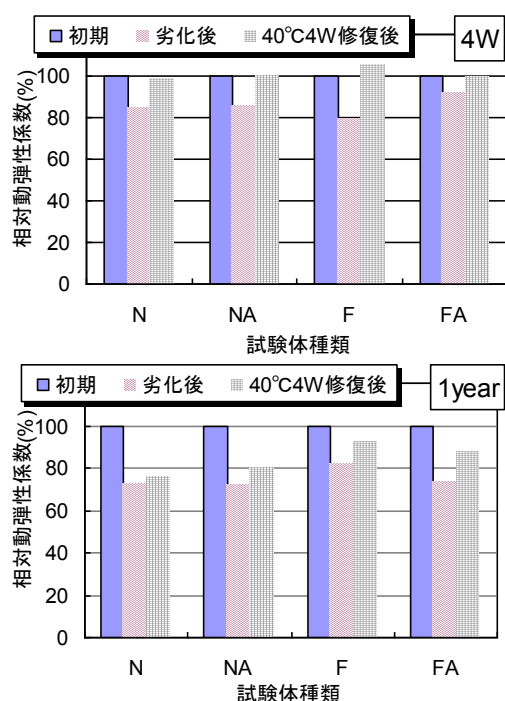


図-3.2.1.13 前養生 4 週および 1 年材齢での
相対動弾性係数の変化[13,14]

図-3.2.1.14 前養生 4 週および 13 週での中性
化速度係数の変化[13,14]

(2) 実環境での再養生

前項で示したフライアッシュの自律治癒性能は、主に 40℃4 週水中の修復養生にて評価を行っており、フライアッシュ自体の持つ潜在的な自律治癒能力を評価しているといえる。治癒、すなわちフライアッシュの水和反応には水の介在が不可欠であり、コンクリートの供用される実環境において、どの程度実際に養生が行われるのかは明らかでない。そこで、実環境におかれたコンクリート内部の温湿度を測定し、実環境でのコンクリートの養生条件に関する検討が行われている[24,25]。コンクリート表層部は、大幅な相対湿度の低下が観察されており、コンクリートの強度増進には温度だけでなく内部の相対湿度が大きく影響することから、詳細な検討は水分条件を適切に評価し、今後のデータの蓄積が必要であることが述べられている[25]。また、最新の検討

では、実環境におけるコンクリート試験体からコア採取し、春期から秋期での強度増進から、20℃水中養生換算した夏期における養生条件を評価している[14]。その結果、秋期～翌年の秋期までの1年間を通じた温湿度条件では、環境条件により異なるが、40～80日程度の20℃水中養生相当であること、そのうち夏期の養生は30～60日程度の20℃水中養生相当であることがそれぞれ示されている。

(3) 実環境を想定した養生条件での治癒性能
コンクリートの受ける劣化を凍害とした場合、1年間の環境変化を考慮すると冬季に劣化を受け、夏期に治癒すると想定できる。供用されたコンクリートは経年することで劣化と治癒が繰り返される。コンクリートが実環境下で治癒性能を発揮するためには、1年間に受ける劣化程度よりも治癒効果が大きくなければならない。そこで、実環境を想定した、劣化と治癒が繰り返される条件下での治癒性能に関して検討が行われている[13,14]。図-3.2.1.15には、劣化と治癒を繰り返した場合の相対動弾性係数の変化

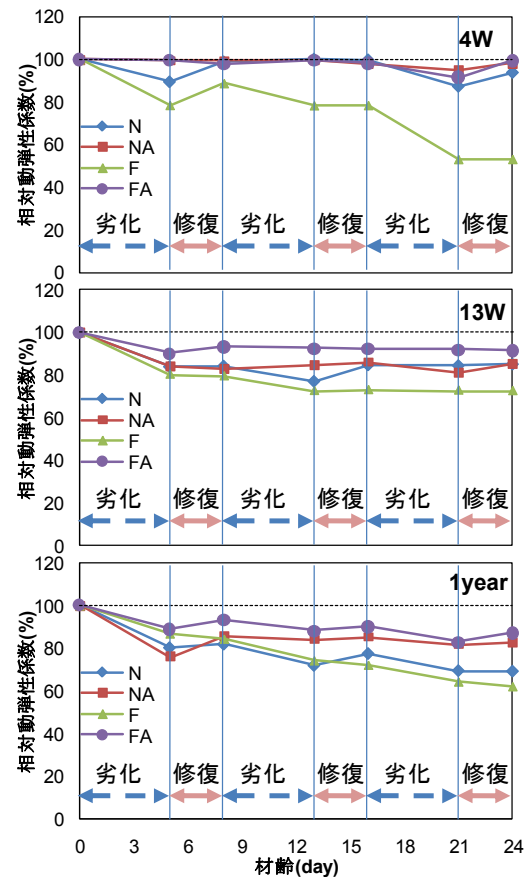


図-3.2.1.15 劣化と治癒を繰り返した場合の相対動弾性係数の変化[13,14]

を示す。コンクリートの種類は図-3.2.1.13 および図-3.2.1.14 と同一であり、前養生期間を水中4週、13週、1年としている。劣化条件は30サイクルの凍結融解、再養生条件は40℃水中3日養生としている。図より、全体的に最初の30サイクルの凍結融解で比較的大きく相対動弾性係数が低下した後、治癒と劣化を繰り返しながら徐々に劣化が進行していく傾向が認められた。また、non-AEコンクリートは凍結融解30サイクルでの相対動弾性係数の低下が大きかった。フライアッシュの混和により高い治癒性能を付与したとしても、コンクリート自体が耐凍害性に劣る場合はあまり意味をなさず、自律治癒コンクリートを実用するには、当然のことながら所定の空気量を確保したAEコンクリートが必須であるといえる。さらに、この実験条件ではいずれも治癒効果が劣化の程度を越えておらず、実環境を想定した劣化と治癒の養生条件は、今後の検討が必要であると考えられる。

(4) 治癒性能の評価手法と促進試験法

コンクリートの耐久性向上のために有効となる治癒効果は、劣化抵抗性と治癒効果のバランスを考慮して評価を行う必要があることを前項にて示した。そこで、コンクリートの劣化前、劣化後および治癒後のそれぞれの中性化速度係数をそれぞれ I(initial)、D(deteriorated)、S(self-healed) (mm/√週)とし、自律治癒効果を表す指標を(3.2.1.3)式で定義する。なお、実環境での劣化と再養生条件には今後の検討が必要であることから、ここでは指標の算定には40℃4週水中の再養生条件を用い、コンクリートのもつ潜在的な劣化抵抗性と自律治癒能力を評価する

こととした。

$$E_s = \frac{P_s}{D_I} \quad (3.2.1.3)$$

ここに、 E_s : 自律治癒効果

P_s : 潜在的自律治癒性能(=D・S)

D_I : 劣化指数(=D・I)

(3.2.1.3)式による自律治癒効果の評価結果を図-3.2.1.16に示す。コンクリートの条件および凡例は図-3.2.1.13および図-3.2.1.14と同一である。 E_s が1.0以上であれば、自律治癒によって初期以上の中性化速度係数の回復が期待できることを意味する。普通セメントのAEコンクリートであるNAに比較し、フライアッシュセメントAEコンクリートであるFAの E_s は著しく大きく、高い自律治癒効果を有するものとして評価できた。また、non-AEのフライアッシュセメントコンクリートであるFの E_s は1.0以下となり、明確な治癒性能が認められなかった。これは、コンクリート自体の耐凍害性が低いために治癒程度よりも劣化の度合いが卓越していることを意味する。

これまで示した自律治癒コンクリートの劣化形態は、凍害や乾燥収縮により生じるマイクロクラックを想定しており、実験での促進劣化法は凍結融解サイクルを履歴させるものであった。しかしながら、AEコンクリートの場合には、凍結融解試験で凍害劣化を受けにくく、治癒効果を明確に評価できない場合があった。そこで、凍結融解作用で生じるコンクリート内部のマイクロクラックと同様のひび割れ形態となるような、力学的手法によるマイクロクラックの導入について検討を行っている[13]。予備実験において、円柱供試体を用いて最大圧縮荷重の85%を数回繰り返し載荷し、載荷前に対する相対動弾性係数を90%まで低下させた。試験体断面に生じたマイクロクラックを観察した結果、促進凍結融解試験によって生じるコンクリート内部のマイクロクラックの形態とほぼ同様であることが確認された。したがって、凍結融解作用による相当するマイクロクラック導入手法として、繰り返し載荷を行った場合の治癒性能について検討した。

図-3.2.1.17には繰り返し載荷およびその後の20℃水中養生での相対動弾性係数の変化を示す[13]。試験に用いた供試体は材齢1年の水中養生のものとし、コンクリート条件および凡例は図-3.2.1.13および図-3.2.1.14と同一である。N、NA、Fでは載荷回数5回で、FAでは載荷回数8回で相対動弾性係数が90%を下回り、すべてのコンクリートにおいてその後の20℃水中養生で相対動弾性係数の回復が見られた。相対動弾性係数の回復は、コンクリート種類によらず再養生期間16日程度で一定となり、治癒の程度はFA、F、N、NAの順に大きくなっていた。

この繰り返し載荷法は、耐凍害性に優れたAEコンクリートのように凍結融解による劣化を与えるのが困難な場合の治癒効果を評価するための促進試験方法として適用可能であると考えられる。

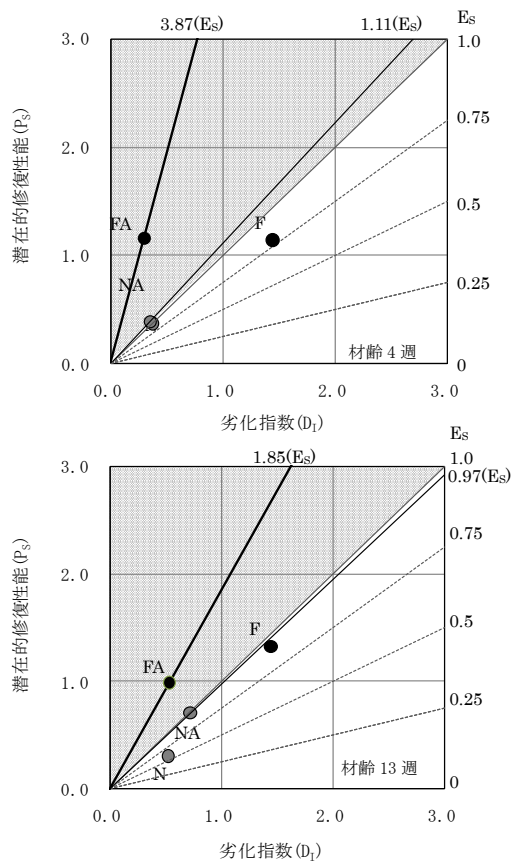
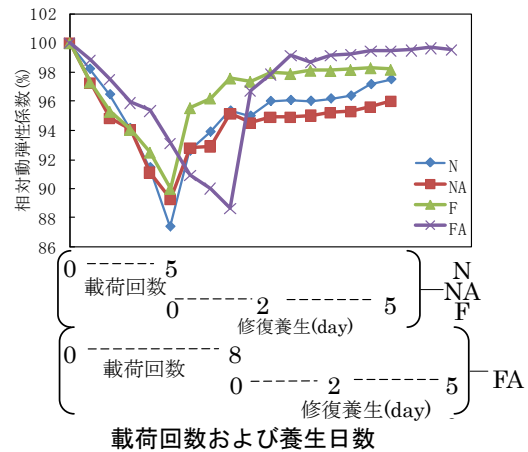


図-3.2.1.16 自己修復効果の提案指標[13]

図-3.2.1.17 繰り返し載荷後の
相対動弾性係数の変化[13]

<参考文献>

- [1] 松下博通ほか：高炉スラグ含有コンクリートの微細ひび割れの閉塞に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.52、pp.638-643、1998
- [2] 松下博通・陶佳宏・清崎里恵：初期ひび割れを導入したモルタルの強度回復特性、コンクリート工学論文集、Vol.14、No.1、pp.57-65、2003
- [3] 清崎里恵・松下博通・陶佳宏：強さ 32.5 クラスのセメントを用いたモルタルにおける初期ひび割れの強度回復特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、pp.605-610、2003
- [4] 内藤哉吉ほか：初期ひび割れ導入モルタルの自己修復特性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、pp.627-632、2004
- [5] 名和豊春ほか：モルタル硬化体中の湿度変化と自己収縮の関係、セメント・コンクリート論文集、No.55、pp.218-225、2001
- [6] 佐川孝広・名和豊春：高炉セメントの水和反応に及ぼす養生条件と炭酸化の影響、コンクリート工学論文集、Vol.18、No.3、pp.23-35、2007
- [7] Şahmaran M. et al.: Self-healing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash, Cem. Concr. Compos., Vol.30, No.10, pp.872-879, 2008
- [8] 濱幸雄・谷口円・桂修：早強・低熱系セメントおよびフライアッシュを用いたコンクリート

- の自己修復性能、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.515-516、2006
- [9] 藤原祐美ほか：フライアッシュを用いたモルタルの自己修復効果、コンクリート工学年次論文、Vol.29、No.1、pp.303-308、2007
- [10] 自己修復コンクリートの開発、北海道立北方建築総合研究所 調査研究報告書、2007
- [11] 日本コンクリート工学協会北海道支部、コンクリートのひび割れ修復技術の現状と課題、コンクリートのひび割れ修復に関する研究委員会成果報告書、2007
- [12] 藤原祐美ほか：フライアッシュを用いたコンクリートの耐凍害性と自己修復効果の検討、コンクリート工学年次論文、Vol.30、No.1、pp.873-877、2008
- [13] 村井洋公ほか：フライアッシュを混入した AE コンクリートの自己修復効果の検討、コンクリート工学年次論文、Vol.31、2009
- [14] 自己修復コンクリートの実用化、北海道立北方建築総合研究所 調査研究報告書、2009
- [15] 佐川孝広ほか：セメント鉱物の反応率に及ぼす水セメント比と養生条件の影響、セメント・コンクリート論文、No.58、pp.23-30、2004
- [16] 佐川孝広ほか：粒度分布を考慮したセメント鉱物の反応率と強度発現、セメント・コンクリート論文、No.59、pp.45-52、2005
- [17] 佐川孝広ほか：水和物の析出空間を考慮したセメント鉱物の水和反応モデル、第 61 回セメント技術大会講演要旨、pp.76-77、2007
- [18] Sagawa T., katsura O. and Taniguchi M.: Hydration Model of Cement Minerals Considering Available Space for Hydration, 4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications (ConMat'09)
- [19] 谷口円・佐川孝広・桂修：フライアッシュの反応速度に関する研究、コンクリート工学年次論文、Vol.29、No.1、pp.189-194、2007
- [20] 谷口円・佐川孝広・桂修：フライアッシュの反応性に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集 A-1、pp.405-406、2007
- [21] 山城洋一ほか：フライアッシュセメントの水和反応が微細構造および強度発現に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.271-272、2006
- [22] Pipat T., Nawa T and Kurumisawa K.: Effect of water curing conditions on the hydration degree and compressive strengths of fly ash-cement paste, Cem. Concr. Compos., Vol.28, pp.781-789, 2006
- [23] Pipat T. et al.: Self-healing ability of fly ash-cement systems, Cem. Concr. Compos., In press, 2009
- [24] 桂修ほか：コンクリート内部の相対湿度測定、日本非破壊検査協会シンポジウム、コンクリート構造物への非破壊検査の展開論文、Vol.2、pp.1-6、2006
- [25] 濱幸雄ほか：寒冷環境下に暴露したコンクリート内部の温湿度変化と等価積算温度、コンクリート工学年次論文、Vol.29、No.1、pp.819-824、2007
- [26] 佐川孝広ほか：寒冷環境下に暴露したコンクリートの水和反応解析、日本建築学会学術講演梗概集 A-1、pp.1115-1116、2007
- [27] 佐川孝広ほか：X 線回折リートベルト法によるコンクリートの水和反応解析、第 62 回セメント技術大会講演要旨、pp.202-203、2008

- [28] フライアッシュのコンクリート構造物への適用に関する研究、北海道立北方建築総合研究所
調査研究報告書、2003

[担当 佐川孝広]

3.2.2 膨張材を利用した自己治癒コンクリート

ひび割れに対して過剰とも思われる注意が払われる昨今、一時は奇異な材料としか見られていなかったひび割れ自己治癒コンクリートにも、注目が集まってきているようである。ひび割れと一言で表現しても、その発生要因や形態には多くの種類がある。膨張材を用いた自律治癒コンクリートも、現状ではどんなひび割れも治癒できるというわけではもちろんない。現在は主として、ひび割れからの漏水を防止することを主目的とした、混和材を添加するタイプの自律治癒コンクリートの研究が進められている。ここでは、膨張材を用いた自律系のひび割れ自己治癒コンクリートの研究について、その経緯と技術の現状、将来の方向性について述べる。

(1) 膨張材を使用した自律系ひび割れ自己治癒コンクリートの開発経緯

東京大学のコンクリート研究室で、1995年の修士論文（南部亮太氏）で膨張コンクリートを使用した部材のひび割れが見かけ上塞がった（ただし部材の剛性はひび割れ発生前には戻らず）という知見があった。これを受けて、岸らが、低水セメント比の膨張コンクリートの追加膨張によるひび割れ閉塞の研究を開始した[1]。下村らが、このアイデアを持続曲げ荷重を受ける部材に適用し、曲げひび割れ導入後に荷重を保持したまま水中養生したところ、膨張コンクリートにおいては、ひび割れの壁面同士が接近することと、ひび割れ間に析出物が発生し、ひび割れが閉塞する様子がマイクロ스코プにより観察された[2]。

この自己治癒コンクリートは、低水セメント比の膨張コンクリートであった。中庸熱セメントを用いて水結合材比を25%とし、単位膨張材量は 75kg/m^3 （標準が 30kg ）というものであった。予備試験で膨張破壊はしないことを確認して決められた配合である。図-3.2.2.1に、このプロトタイプのひび割れが閉じる様子を示した。治癒する間も、曲げ荷重は与え続けた。ひび割れ発生後に、液状水が供給されることにより、特にひび割れ近傍で追加膨張が起こってひび割れ壁面が接近した。また、ひび割れ間に析出物も認められた。

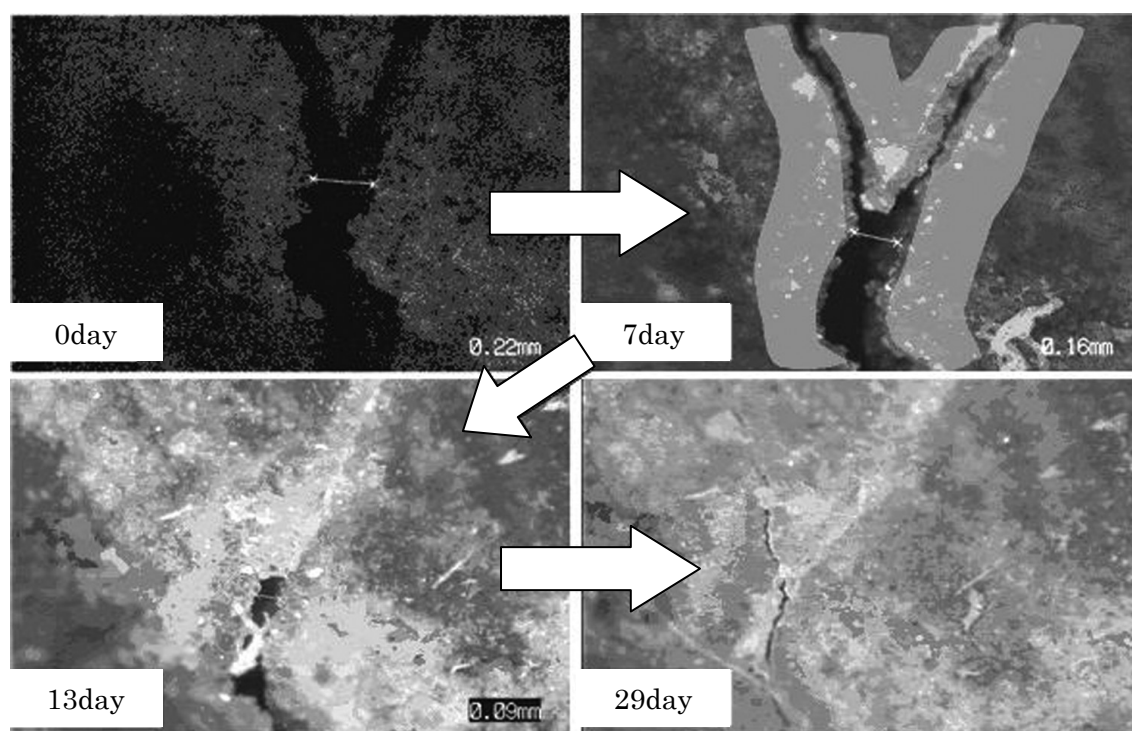


図-3.2.2.1 低水セメント比の膨張コンクリートのひび割れ閉塞[2]

図-3.2.2.2 に、漏水防止を目的とした自己治癒コンクリートのメリットを示す。施工時に損傷を受けるなどの理由で、必ずしも信頼性の高い防水工を縮小することができれば、材料としてのコストアップを吸収できる可能性がある。

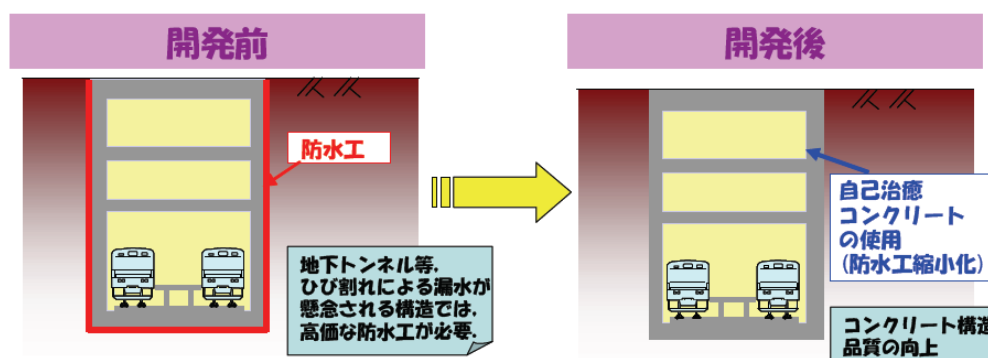


図-3.2.2.2 防水工を不要とする自己治癒コンクリート[13]

(2) 汎用的なコンクリートを目指した技術開発

前述の低水セメント比の膨張コンクリートは、実構造物に使用するには高コストであり、遅れ膨張破壊の懸念も払拭されていない。水セメント比、混和材の種類と量の観点で、実構造物に適用可能な自己治癒コンクリートの研究が行われている。

図-3.2.2.3 は、0.4mm のひび割れが閉じた自己治癒コンクリートである[3]。このコンクリートは、低発熱セメントで単位膨張材量は 50kg/m^3 であり、セメント結晶増殖材も含んでいる。図-3.2.2.1 との違いは、ひび割れ壁面の接近の効果もわずかにはあるものの、ひび割れ間の析出が治癒の主要因となったことである。図-3.2.2.4 に示すように、ひび割れ幅の減少の大部分は、ひび割れ間への析出物によるものである。

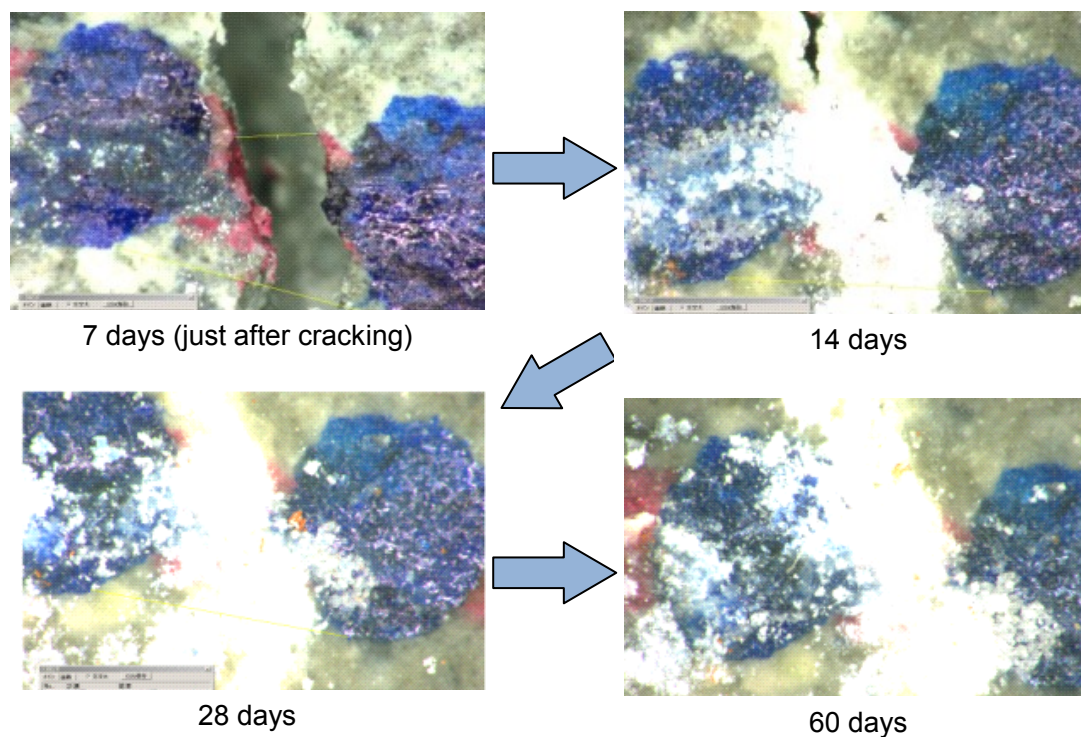


図-3.2.2.3 0.4mm 程度のひび割れの治癒[3]

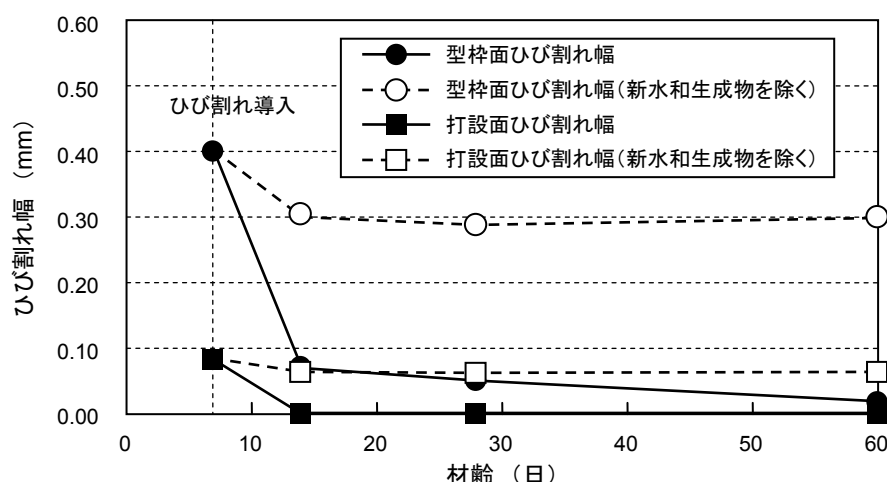


図-3.2.2.4 ひび割れ間への析出を中心とした治癒の状況[3]

この配合も、膨張材を多く含んでいたこと、ひび割れ導入後にひび割れ幅を固定する必要があったことにより、100×100×400mm の試験体のために大きな鋼製フレームが必要となった。試験体 13 個を水中養生した水槽の容量は 7.5m³であった。試験に多大な費用がかかることになる。しかし、結果として、水槽中の pH が中性に近く、析出効果が大きかったことが後で分かった[4]。試験費用の削減や試験の簡易化のために、試験方法を改善したが、小松らの研究[4]では、3 個の試験体を 70ℓ のバケツで養生したため、バケツ内の pH が高アルカリになり、ひび割れ間での析出が抑制された可能性が判明した。

その後、普通セメント、早強セメントにおいても効果が確認され、単位膨張材量を低減した場合や、膨張材やセメント結晶増殖材を用いない、アルカリ炭酸塩などを含むコンクリートでも治癒効果が確認された[5]。これらの自己治癒コンクリートの治癒機構はほぼひび割れ間での析出のみである。

汎用的な配合を目指した研究と同時に、コンクリートが使用される実際の環境を想定した条件での性能が検討されている。マスコンを想定した高温履歴を与えた場合、水結合材比が 60% の場合でも効果が確認された[6]。無筋コンクリートと鉄筋コンクリートではひび割れの内部形状が全く異なり、漏水に関しては、鉄筋の有無も大きな影響を与えることも報告されている[7]。岸・安らの開発したジオマテリアルも含む自己治癒コンクリートでは、ひび割れ導入後、ひび割れ間を常に水が流れる状態で、十分に治癒効果が発揮することも検証され[4]、むしろ、静止水中で養生するよりも、ひび割れ間で常時通水させた方が治癒効果が大きかった。

自己治癒コンクリートの耐久性についてもデータを取得し、アルカリ炭酸塩を添加した配合ではモルタルバー法での膨張がやや大きくなるが、耐凍害抵抗性にはほとんど影響がないこと、が分かった。

2007 年の秋に、実構造物への適用を想定して、生コンプラントでの練混ぜ、アジテータ車での運搬、大型の桁型試験体（内寸法が 1000mm の立方体）の作製を行い、フレッシュ性状に問題がないことを確認した上で、アルカリ炭酸塩を含む 2 種類の自己治癒コンクリートと、岸准教授らが開発した改良型の自己治癒コンクリートを、トンネルの覆工コンクリートに適用した。詳細は 6 章に記載されている。

(3) 鉱物混和材料を用いた自己治癒コンクリート

鈴木ら[3]は、鉱物混和材料によるセメント化学作用を利用した自己治癒に着目し、市販の無機表面改質材の反応メカニズムを基礎として、コンクリートひび割れ部位に AFt 相水和物を生成させてひび割れを治癒する研究を行った。炭酸塩には、表面改質材に入っているとされている Na_2CO_3 をはじめとして NaHCO_3 、 Li_2CO_3 を用いた。シリカの供給源としては、珪砂の他に、 MgSiO_4 、 Na_2SiO_4 、反応性骨材+ NaOH を用いた。反応性骨材+ NaOH の組み合わせについては、ASR ゲルを生成させ、ASR による影響を確認することを目的としている。S の供給源として、反応性の高い Na_2SO_4 を用いた。エトリンガイトが大量に生成すること、サルフォアルミネート系水和物の組成物質 Ca、Al、S が含まれていることから、膨張材、またその 1 成分であるアウイン $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4$ についても用いることとした。実験の結果、表面改質材による結晶生成物の検討から、ひび割れの自己治癒に効果があることと推定される組成を有する物質を作製した。幾つかの試製物質の試行の結果、表面改質材組成に Na_2CO_3 と少量の触媒を含んだ場合において、ひび割れ部に最も多く結晶が生成されることが確認された。

図-3.2.2.5 において、本試製物質によるコンクリートのひび割れ部位において白色の結晶を生成してひび割れの閉塞が確認でき[(a)、(b)]、また骨材間においても多量の結晶が生成することによってひび割れの緻密化が確認できた[(c)、(d)]。このような析出物は SEM-EDS 分析によって、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、針状結晶、板状結晶のような形態で存在することが確認された(図-3.2.2.6)。特に、針状結晶と板状結晶の場合はひび割れを治癒する基本メカニズムとして、次のような過程を通じて水和物が生成すると考えることができる。

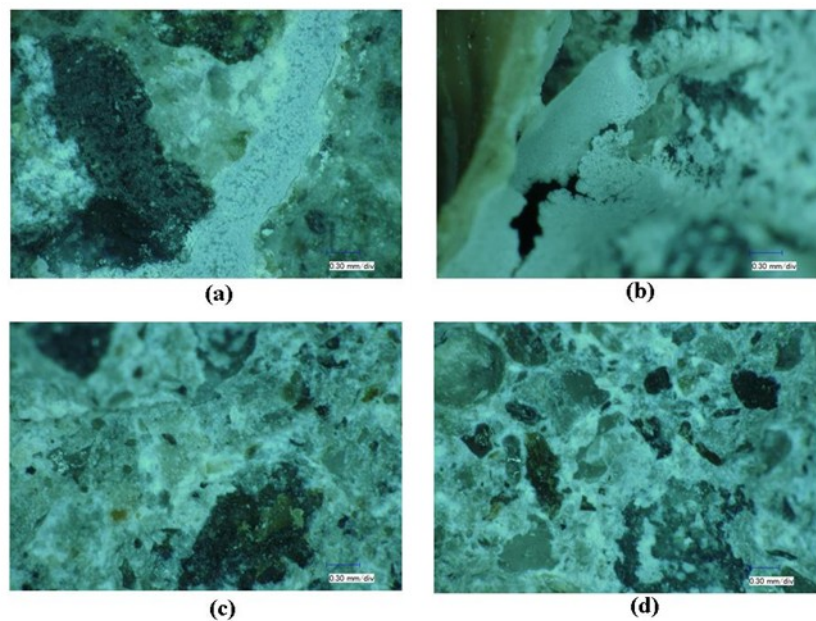
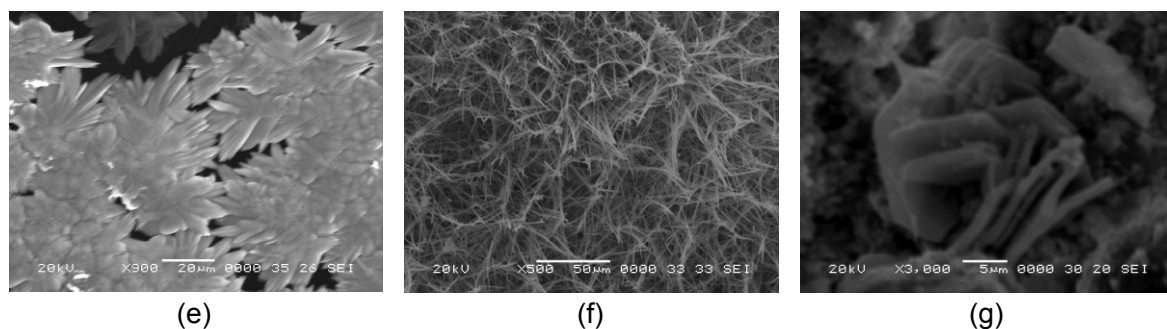


図-3.2.2.5 結晶生成物によるひび割れ自己治癒の効果[3]

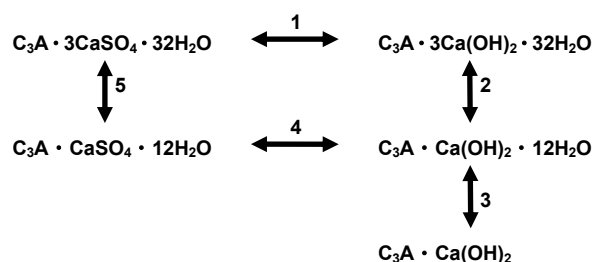


	結晶及び形態		CaO/SiO ₂	Al/Si	アルカリ量
(e)	板状結晶	Ca(OH) ₂	24.71	—	0.37
(f)	針状結晶	AF t	1.51	42.44	0.0
(g)	板状結晶	AFm	12.15	—	0.29

図－3.2.2.6 結晶生成物によるひび割れ自己治癒の効果[3]

試製された物質中において、触媒は弱酸性のカルボン酸であるので、pH12.5 の強塩基の細孔溶液では中和反応を起こし、細孔溶液の pH は減少する。pH が 12.23 を下回ると、水酸化カルシウム Ca(OH)_2 は分解し、細孔溶液は Ca^{2+} イオン、 OH^- イオンリッチになる。 Ca^{2+} イオンは、とても不安定なイオンであり、かつ反応性も高いものの pH が低く、 Ca(OH)_2 としては析出することができない。躯体深部になると炭酸イオン CO_3^{2-} が存在できないと考えられることから、炭酸塩 CaCO_3 として析出することができないので、水和物として存在すると考えられるのはエトリンガイト系水和物 $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ 、あるいは C-S-H と推察できる。これらはエトリンガイトに余分に付加した形で固溶体として存在していると考えられる。さらに OH^- は、サルフォアルミネート系水和物の石膏と置換し、 $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{Ca(OH)}_2 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ あるいはこの中間体の形で存在すると考えられる。 CaSO_4 と Ca(OH)_2 とを含む C_3A ペーストの水和過程を図－3.2.2.7 に示す。

これによると、反応は 3 段階で起こり、第 1 段階は C_3A と CaSO_4 との反応によるエトリンガイトの生成、次に第 2 段階は液相中の SO_4^{2-} が消費されたとき、未水和 C_3A とエトリンガイトとの反応によるモノサルフェートへ変化し、最終的に第 3 段階はモノサルフェートと $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ との固溶体が生成する。そしてこれによって石膏が空隙でエトリンガイト系水和物として生成されるのではないかと考えられる。したがって、セメント系材料を利用した自己治癒コンクリートの開発のためには上述のような治癒メカニズムを有することが重要であり、特に長期耐久性を評価する上で、生成された水和物の正確な水和相と化学的耐久性の検討を行うことが望ましいと考えられる。

図－3.2.2.7 CaSO_4 と Ca(OH)_2 とを含む C_3A ペーストの水和過程[3]

安らは[9,10]、経済性があり、かつ能動的水和反応を有する材料として、1) ポルトランドセメント(工業用)、2) CSA 系膨張材(工業用)、3) ジオマテリアル A(工業用)、4) ジオマテリアル B(工業用)として以下のものを選定した。図-3.2.2.8 に、選定した材料が既往のセメントに対してそれぞれどのような位置づけとして活用されているか図示したものを示す。

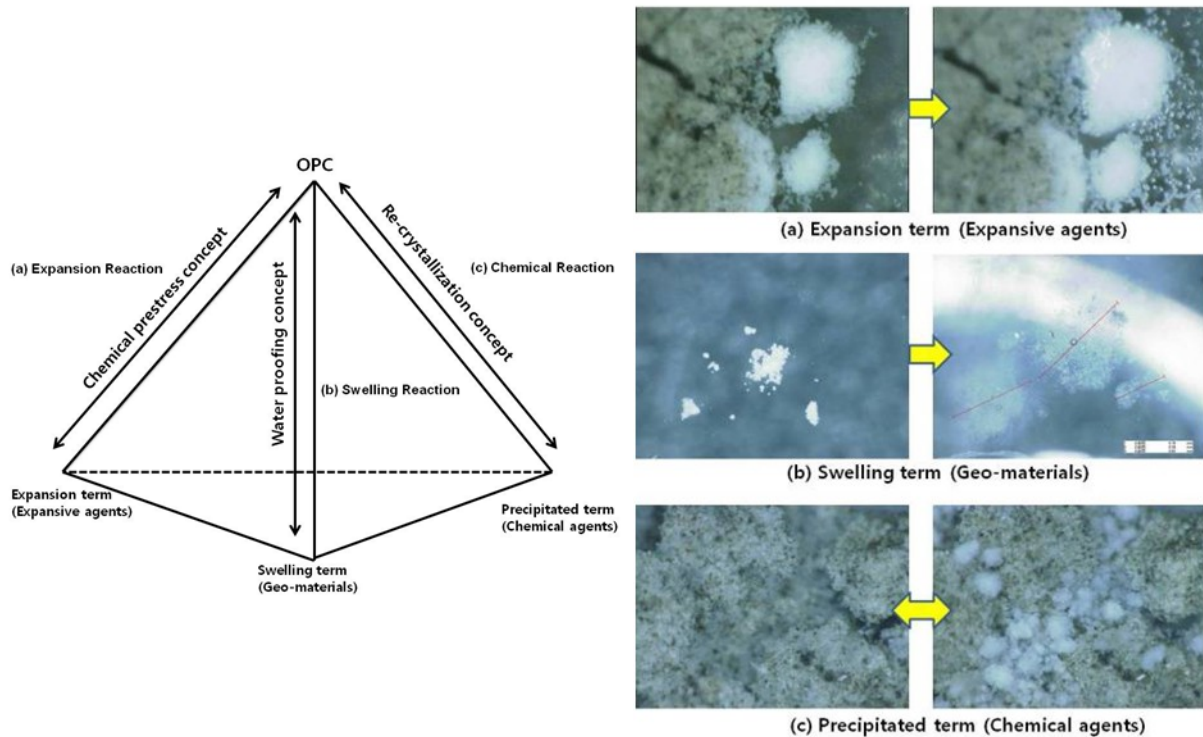


図-3.2.2.8 鉱物混和材料の使用例[9]

CSA 系膨張材は、OPC と混合して Chemical Prestress Concrete や収縮補償目的で使われている。ジオマテリアル A は、一部セメントと混合して建築物や構造物施工時地下防水材や地盤安定化材料として使われている。特に日本の場合、この材料を比較的多く埋蔵しているため、今後広く利用されることが期待されている。このような材料を基礎にして特殊なひび割れ治癒混和材料を製造した。硬化したコンクリートの自己治癒性能の検討のため、自己治癒の可能性を有すると考えられるセメント組成物を人工的に製造し、水/結合材比を 0.45 と比較的高い条件で作製した。未反応の水和物が最小化した後、水和がほとんど完全に終わったと判断される 120 日以後サンプルに、0.2~0.3mm ひび割れを発生させた後、再び水中条件化にて養生を行った。その後、サンプルのひび割れ部に生成される水和物について OM、SEM-EDS を利用して観察した。

開発された自己治癒成分を用いて実験室で特殊混和材料を製造した。図-3.2.2.9 に自己治癒混和材料の製造過程を簡単に示す。



図－3.2.2.9 自己治癒セメント組成物の製造[9]

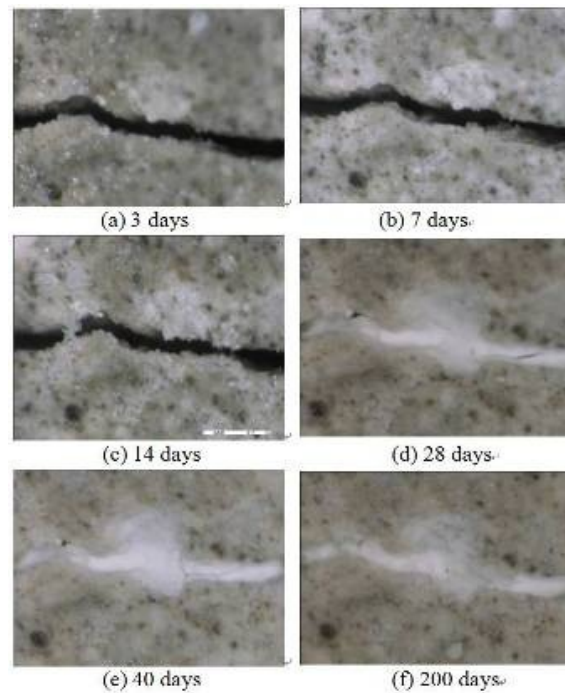
表－3.2.2.1 に本実験で使用したコンクリートの配合比を示す。 $W/B=47.3\%$ であり、 $S/A=46.6\%$ とした。コンクリートのスランプフローは練り混ぜ直後、30分、60分経過時に測定した。コンクリートの圧縮強度はJIS A 1108にしたがって、1、3、7、28日経過時に測定した。硬化コンクリート供試体は $10\times 20\text{cm}$ であり、硬化1ヶ月後に人為的にひび割れを導入した。ひび割れ幅は 0.1mm から 0.3mm までで、ひび割れ導入後、再び1ヶ月間水中養生を実施した。

表－3.2.2.1 自己治癒コンクリートの配合比[9]

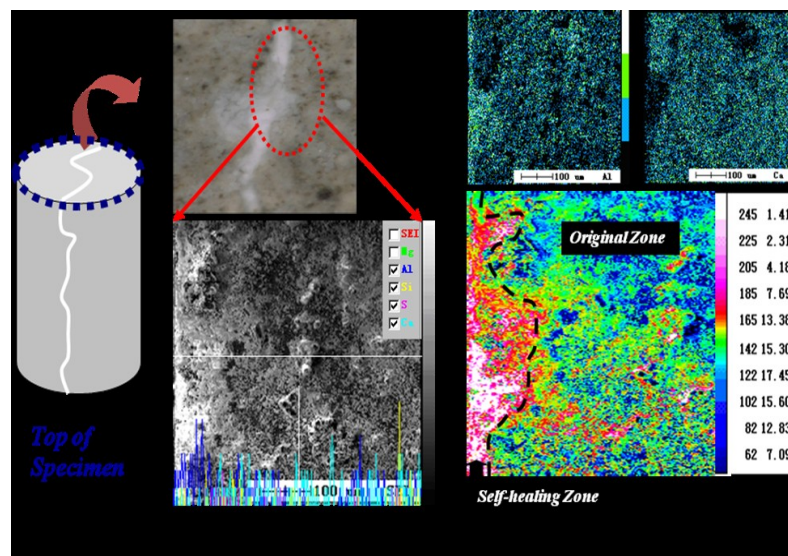
Binder(370)		Water/Binder $W/B=47.3\%$	Sand	Gravel	SP
OPC	Pre-mixed products				
93%	7%		809	920	Binder 1.15%~1.35%
344.1	25.9	175			4.26~4.99

図－3.2.2.10 に鉱物系混和材料を使って開発された自己治癒セメント組成物のひび割れ自己治癒過程を示す。この場合ひび割れの幅は 0.2mm であり、水が供給された条件下で28日以後にはほとんどひび割れが治癒されるのを確認することができた。ひび割れで生成された再水和物は再水和14日以後から生成され、約200日以後には再水和物にあった微細ひび割れまでも完全に治癒されるのを確認することができた。

図－3.2.2.11 にひび割れにおいて生成された再水和物の化学分析結果を示す。図－3.2.2.11(b)に示すように、SEM-EDS分析によるX-ray map分析結果として再水和物がアルミナ－シリケイト材料で構成されていることを確認することができた。このような結果からアルミナ－シリケイト材料がひび割れでの再水和物形成に多くの影響を及ぼすことが分かった。



図－3.2.2.10 自己治癒組成物のひび割れ自己治癒現象[9]



図－3.2.2.11 ひび割れに生成された自己治癒組成物の化学分析(SEM-EDS 分析、X-ray Map)[9]

図－3.2.2.12 にひび割れ部位の自己治癒領域と一般セメントペースト領域間の差を示す。自己治癒領域の場合には一般領域に比べて、アルミナ含有量がさらに高い変形 Gehelite (CASH) 相が生成されたことから、カルシウムイオンを持つアルミナシリケート結晶相の生成と関連があると判断される。特にこのような結晶は pH が高い一般セメントペースト領域からひび割れ間に湧出されて生成されることから、pH はひび割れにおける結晶の生成過程に重要な因子として作用することが分かる。したがって、このような研究を基礎として、化学的安全性が高く色々な結晶生成物を持つ自己治癒組成物を製造開発して[11]、次に示す自己治癒コンクリートを製造した。

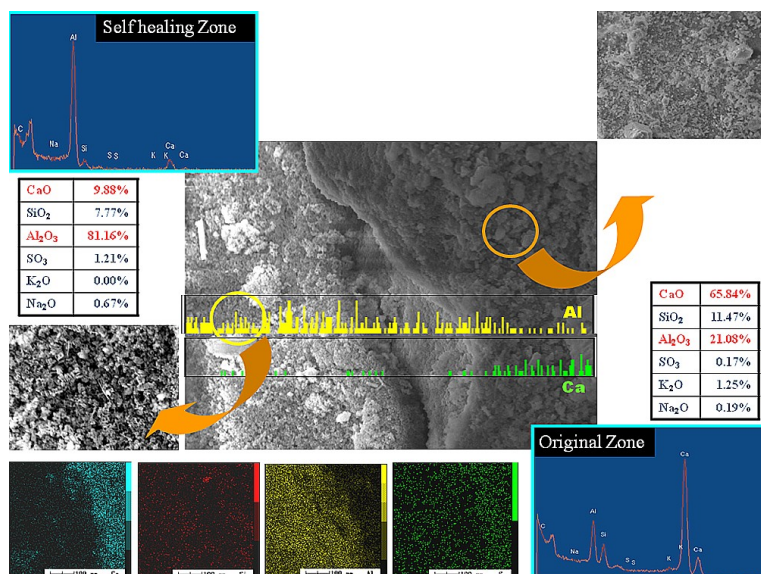


図-3.2.2.12 ひび割れで生成されたアルミナーシリケート水和物[11]

図-3.2.2.13 に、前述した自己治癒組成物を用いて製造した自己治癒コンクリートのひび割れ治癒過程を示す。自己治癒コンクリートの製造方法は、自己治癒組成物を添加していることを除けば一般のコンクリートの製造方法と同様である。図-3.2.2.12 に見られるように、0.15mm のひび割れが再水和 3 日目から治癒し始めることが確認できた。また再水和 7 日目には 0.22mm のひび割れが 0.16mm まで減少することが確認された。約 33 日後には、表面ではほとんどのひび割れが治癒した。また、ひび割れ間に通水する状態であっても、コンクリート中のひび割れが確実に自己治癒することを確認している[4,12]。

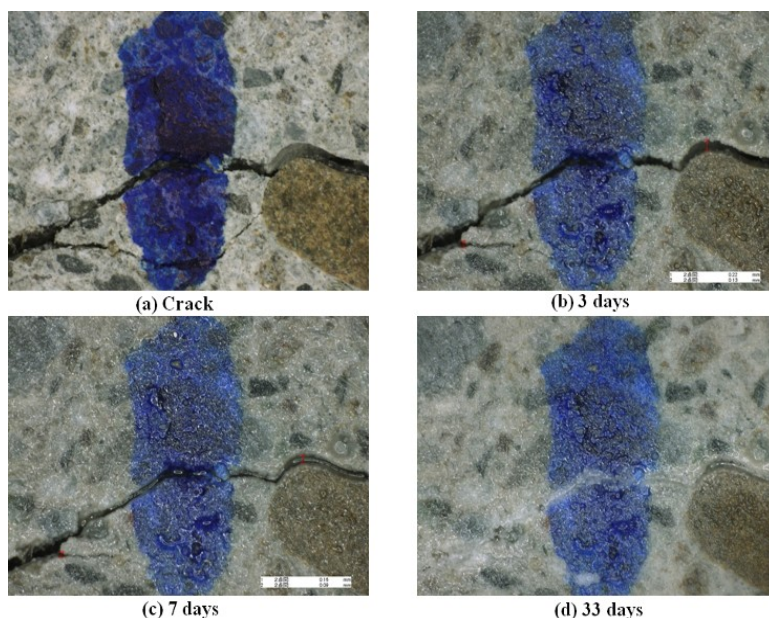
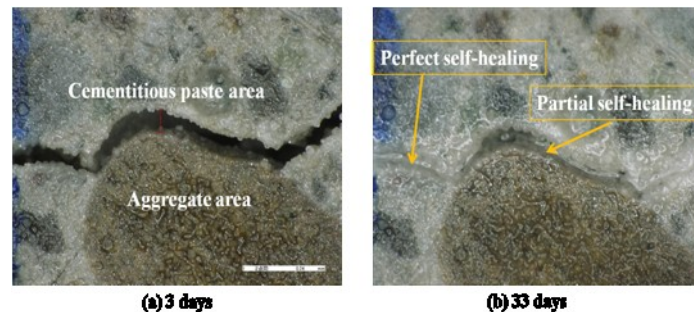


図-3.2.2.12 鉱物混和材料を含む自己治癒コンクリートにおけるひび割れ自己治癒過程(W/B=0.47) [13]

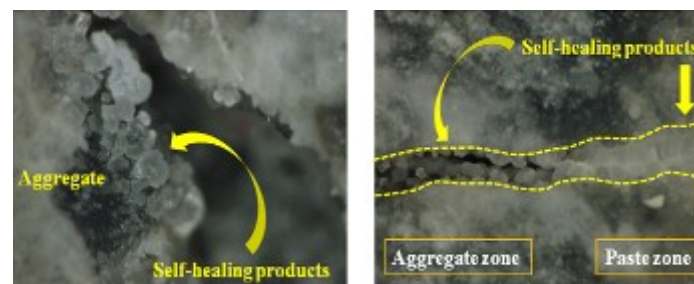
このように従来の研究で限界とされていたひび割れ幅を超える過大なひび割れ幅でも、自己治癒する高い性能を持った系の開発がなされている。このような自己治癒現象はひび割れ部位にお

いて、再結晶性、膨張性そして膨潤性などの効果が複合的に作用して現れると考えられている。また、このような配合では自己治癒組成物を持ったセメントペーストからのイオン拡散などによって、ペーストと骨材間のひび割れも一部治ることが確認できた（図－3.2.2.14）。



図－3.2.2.14 ペーストと骨材間のひび割れにおいて自己治癒組成物の効果(W/B=0.47) [12]

骨材と骨材間のひび割れでもこのような自己治癒組成物は拡散によって、骨材の表面に生成されるのを確認したが、このような部位はひび割れが治癒するのに必要な期間が他の部位に比べて長い（図－3.2.2.15）。



図－3.2.2.15 骨材間のひび割れにおいて自己治癒組成物の効果(W/B=0.47) [12]

本節で紹介した自律系のひび割れ自己治癒コンクリートは、漏水防止効果が期待される構造物以外にも、移動荷重による疲労損傷が問題となる床版などで適用効果が高いと考えられる。施工性、長期耐久性、安定性も含めた性能の確認と、性能の評価方法の確立が求められる。

<参考文献>

- [1] Liu, L. and Kishi, T. : Effects on Re-expansion of Restrained Expansive Concrete, IABSE Colloquium: Concrete Model Code for Asia, pp.139-144, Phuket, Thailand, 1999.3
- [2] 下村哲雄・細田暁・岸利治：低水粉体比の膨張コンクリートのひび割れ自己修復機能、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.2、pp.661-666、2001
- [3] 山田啓介・細田暁・在田浩之・岸利治：膨張材を用いたコンクリートのひび割れ自己治癒効果、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.1、pp.261-266、2007
- [4] 小松怜史・細田暁・安台浩・池野誠司：ひび割れ間で通水する自己治癒コンクリートの治癒性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.1、pp.117-122、2008.
- [5] Yamada, K., Hosoda, A., Kishi, T. and Nozawa, S.: Crack self healing properties of expansive concretes with various cements and admixtures, First International Conference on Self Healing Materials, Noordwijk, The Netherlands, 2007.4 (CD-ROM)

- [6] 平野勝彦・細田暁・石渡大嗣・山田啓介：水分供給条件や膨張作用の有無がひび割れ自己治癒効果に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.1、pp.267-272、2007
- [7] 石渡大嗣・細田暁・平野勝彦・山田啓介：ひび割れ自己治癒コンクリートにおける膨張の拘束の影響、セメント・コンクリート論文集、No.62、pp.617-623、2007
- [8] 安台浩・鈴木章子・高岡秀明・岸利治：自己治癒コンクリートのセメント系再結晶化における種々の炭酸塩と触媒反応の効果、*The Japan Society of Civil Engineering (JSCE)*、*Hiroshima, Japan*、Sept.12-14、2007
- [9] Ahn, T.H. : Development of self-healing concrete incorporating geo-materials : A study on its mechanism and behavior in cracked concrete, Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, University of Tokyo, Japan 2008.
- [10] Ahn, T.H. and Kishi, T.: The effect of geo-materials on the autogenous healing behavior of cracked concrete, Proceeding of 2nd ICCRRR2008, Cape town, South Africa, Nov. 2008
- [11] Kishi, T, Ahn, T.H., Hosoda, A., Suzuki, S. and Takaoka, H. :Self-healing behavior by cementitious recrystallization of cracked concrete incorporating expansive agent, 1st International Conference on Self-healing Materials, Noordwijk, The Netherlands, April 18-20, 2007
- [12] Hosoda, A., Komatsu, S., Kishi, T., Ahn, T.H. and Ikeno, S.: Self Healing Properties with Various Crack Widths under Continuous Water Leakage, 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR 2008), Cape Town, South Africa, Nov. 24-26, 2008
- [13] 自己修復するコンクリート、0.2mm 幅のひび割れを 46 日間で自ら「補修」(日経 BP 社ウェブサイト内)、<http://kenplatz.nikkeibp.co.jp/article/const/news/20080221/516333/> (2009 年 6 月 24 日アクセス確認)

[担当 細田暁、安台浩]

3.2.3 ECC の自律治癒

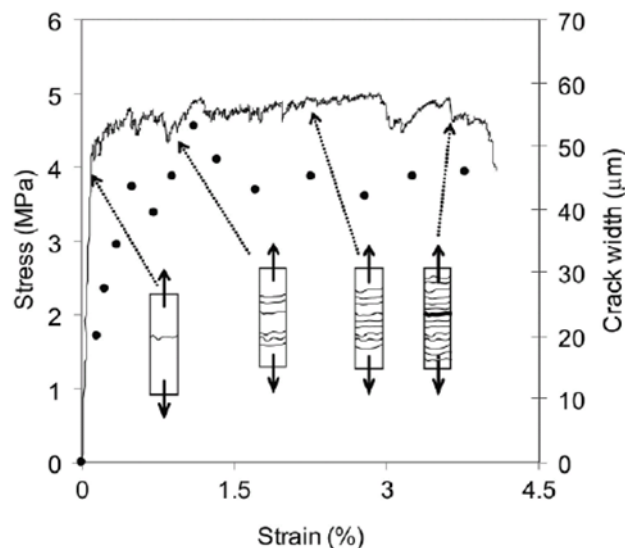
ECC は、高靱性を付与するために比較的少量の繊維を使った繊維補強セメントベースの複合材料である。

表－3.2.3.1 に基本的な ECC の配合例を示す。繊維体積比は 2%、ASTM type I セメントと低カルシウム ASTM class F フライアッシュを使用した。ECC 配合では骨材として粗骨材は用いず、細骨材だけが使われる。このシリカサンドは最大粒子サイズが 250 μm で、平均サイズは 110 μm である。PVA 繊維の直径は 39 μm で、長さは 12mm、そして繊維の弾性係数は 25.8GPa である。繊維の表面は 1.2% の特殊なオイルコーティング(Proprietary oil)が処理されている。

表－3.2.2.1 自己治癒コンクリートの配合比(kg/m³)

Cement	Sand	Class F Fly Ash	Water	Superplasticizer	PVA Fiber
583	467	700	298	19	26

図－3.2.3.1 は ECC の一軸引張応力ひずみ曲線の例であり、軟性金属の結果と似た降伏強度を持つことが分かる。ECC の最大引張ひずみは普通コンクリートの 400-500 倍程度で、ECC の破壊靱性はアルミナ合金と似ている[1,2]。ECC の圧縮強度は 40MPa-80MPa 程度であり、高強度コンクリートに似た強度を持つ。靱性変形によって約 1% のひずみが生じ、微細ひび割れは 0 から安定状態のひび割れ(steady-state value) : 約 50 μm までひび割れ幅が増加する。材料にさらにひずみが生じた場合、マイクロひび割れがさらに形成される。しかし、ひび割れ幅は一定になる。このような安定状態のひび割れ幅は ECC の固有特性であり、これは繊維と繊維/マトリックス界面特性に依存したものである[3]。



図－3.2.3.1 ECC の一般的な引張応力ひずみ曲線[2]

(1) 自己治癒の性能評価方法

従来、セメント系材料における自己治癒を定量化および定性評価するために、透水試験とアコースティックエミッション(AE)実験が行われ、数多くの報告がなされている。透水試験では多く

の研究で変水位または一定水位試験が用いられ、ひび割れた供試体を通過する流量を測定することにより評価を行っている。これは時間にもなうコンクリートの透水係数の変化を、自己治癒が発生する量の変化として考慮しているためである。しかし、このような実験方法では、浸透による移動特性(transport property)について自己治癒現象を説明することは困難であり、またひび割れを通した流体の流れ(水によって溶解した CO_2 の伝達)により発生する自己治癒の促進現象についても説明することは難しい点がある。超音波速度の測定を基礎にした AE もまたひび割れ自己治癒評価に使用されている。たとえ超音波速度測定によりひび割れの治癒現象が現れたことを検出することができたとしても、この方法で正確なひび割れ治癒範囲を広く確認することは難しい[4]。しかし、共振周波数または動弾性係数測定[5]とパルス反射法は、自己治癒定量化のために多くの応用がなされている[6]。最近では自己治癒評価の技術にも one-side stress wave transmission 測定が使用されている。これは実験的方法を基礎としたものであるが、この手法ではひび割れ幅が $100\mu\text{m}$ 以上では明確な区別が難しい点がある。しかし、これらの技術の長所として、ひび割れが相対的に変化したことを素早く検出できることが挙げられる。ただしこのような方法もまた自己治癒の力学的特性の回復と移動特性の間の明確な差を区別することは難しい。これらのことを踏まえて、ECC の自己治癒現象(力学的特性と移動特性)を把握する実験手法についてまとめると、以下ようになる。

- 1) 動弾性係数評価: 相対的に自己治癒の可能性を早く評価することができる。
- 2) 一軸引張試験: 力学的特性の回復を評価するのに使われる。
- 3) 透水性評価: 透水係数と物質移動特性を評価するために使われる。
- 4) 表面化学分析評価: Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM)と EDSは自己治癒生成物の化学組成物と形状を分析するために使われる。

(2) 自己治癒の性能評価のための環境条件

自己治癒の信頼性は、コンクリート構造物がさらされる多様な環境下での評価に基づかねばならない。ECC の自己治癒性能評価実験も、次のような色々な環境条件で評価されてきた。サンプルは周期的な乾湿、温度変化、水または塩水への浸漬を含んだ次の各項目の後に、様々な条件で暴露された。

- 1) CR1 (water/air サイクル)はひび割れた ECC 供試体を 24 時間 20°C の水に浸漬させた後、24 時間 RH $50\%\pm 5\%$ 、 $21^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$ で乾燥させた。温度はほぼ同一であるものと考えられる。このような条件は雨の日と晴れた日の繰り返しをシミュレーションすることになる。
- 2) CR2 (water/hot air サイクル)はひび割れた供試体を 24 時間 20°C の水に浸漬させた後、乾燥器で 55°C 、22 時間の乾燥、以後 2 時間の実験室で冷却された。この条件は降雨後に夏の高温を考慮したことになる。
- 3) CR3 (water permeation)はひび割れた ECC 供試体を 20°C の水に継続的に浸漬させる条件である。この条件は構造物が水槽、パイプライン、灌漑水路のような施設で水と継続的に接触している所を考慮した実験条件である。
- 4) CR4 (chloride solution submersion)はひび割れた ECC 供試体が高濃度の塩化ナトリウム水溶液に直接浸漬した場合である。これは凍結防止剤等が散布される交通施設または駐車構造物、または高塩化物イオン溶液を保存するコンクリートを考慮したことになる。

(3) 自己治癒によるひび割れ幅に及ぼす効果

Li ら[1]は実験において、まず自己治癒によるひび割れ幅の効果を検討するために 0.5% PVA 添加の ECC を製造した。この供試体は、一般的な繊維補強コンクリートの典型的な引張軟化特性であるひび割れが、単一となるように製作された。各供試体は先に単純引張下で 0~300 μm 程度のひび割れ幅が生成されるように载荷された。除荷後、供試体に 10 回の乾湿繰り返し(CR1 の条件)を行った。共振周波数は preloading と 10 回のサイクル後に測定し、それぞれのひび割れ幅によって供試体の自己治癒の可能性を検討した。

図-3.2.3.2 はひび割れ幅にともなう wetting/drying 実験前後の共振周波数変化を示す。y 軸は wetting/drying 条件前後の初期载荷供試体の共振周波数である。ここで、100%とは共振周波数が完全に回復したことを意味する。図-3.2.3.2 に示されるように、10 回の wetting/drying サイクルを受けたサンプルの共振周波数は、ひび割れが 50 μm 未満の供試体の場合は 100%まで回復した。しかし、ひび割れ幅の増加とともに共振周波数が減少することに示されるように、材料損傷の程度が増加することになり、自己治癒範囲は減少している。ひび割れ幅が 150 μm 以上の場合には、供試体の共振周波数が wetting/drying 試験後にも変化がないことから、このようなひび割れは回復しにくいことが示される。したがって、供試体のひび割れ幅が 150 μm 未満を保つ場合、あるいはもう少し小さい 50 μm 未満のひび割れが生じる場合には、環境条件により自己治癒現象が現れることが分かる。図-3.2.3.3 は共振周波数結果にともなう 10 回サイクル後に、供試体の透水性を評価した結果である。図-3.2.3.3 から、50 μm 未満のひび割れ幅を持つ供試体の透水性は、ひび割れを発生させない供試体の透水係数とほぼ一致することがわかる。これは移動特性と透水性の完全な回復を意味する。ひび割れ幅が増加することによって、透水性は指数的に増加する。したがって、共振周波数の測定と透水性の測定によって、セメント系材料を用いた自己治癒(力学的特性、移動特性)が評価できることが確認される。しかし、このような完全な自己治癒はひび割れ幅が 50 μm 未満の非常に小さいひび割れ幅の場合に限定される。このように非常に小さいひび割れ幅は、鉄筋を用いて制御することは困難であるが、微細ひび割れ幅を制御できるように設計された ECC 材料の場合は比較的容易に実現可能である。

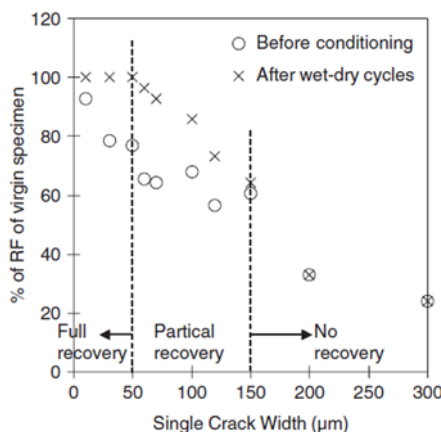


図-3.2.3.2 ひび割れ幅に対する
共振周波数の回復[1]

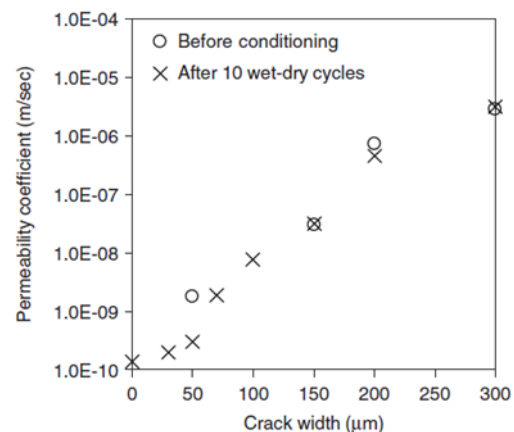


図-3.2.3.3 ひび割れ幅に対する
透水係数の変化[1]

(4) ECC における自律治癒特性

(a) 動弾性係数の回復

図-3.2.3.4 の(a)と(b)は各々 wetting/drying サイクル CR1 と CR2 の条件下において各 pre-damage レベル(0.3%-3%)が適用された ECC 供試体の共振周波数結果を示す。図-3.2.3.4 で灰色に示した領域は、同じ wetting/drying サイクル条件を経験した無損傷 ECC 供試体の共振周波数範囲を示す。初期载荷を受けたすべての ECC 供試体の共振周波数は次に示す 2 つの段階を経て回復することが分かる。すなわち、共振周波数は 4-5 回反復後に一定となり、約 4-5 回 wetting/drying サイクル後には、ひび割れた ECC 材料において適切に自己治癒現象が生じる。また、高い pre-tensioning strain を与えた供試体は、多くのひび割れのために初期载荷直後の共振周波数は低く、wetting/drying サイクル後の最終的な共振周波数の回復も低い。

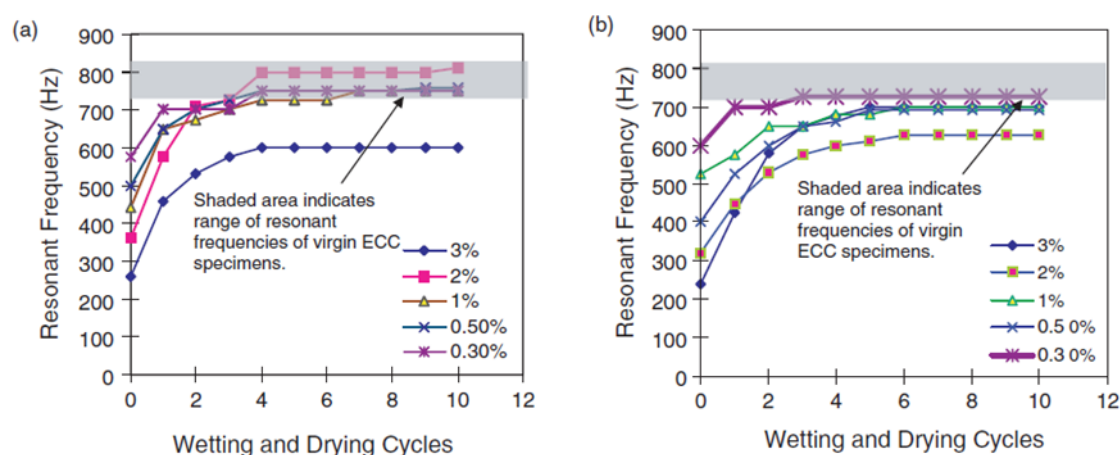
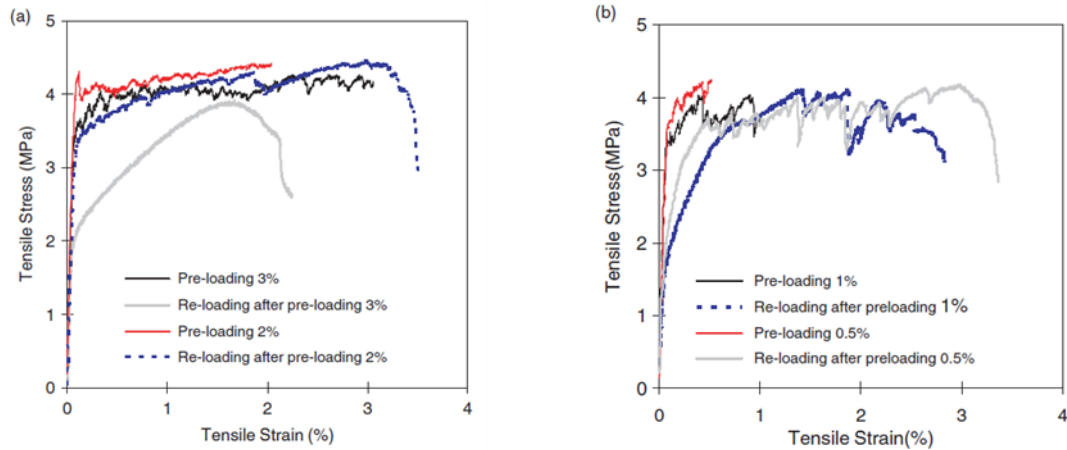


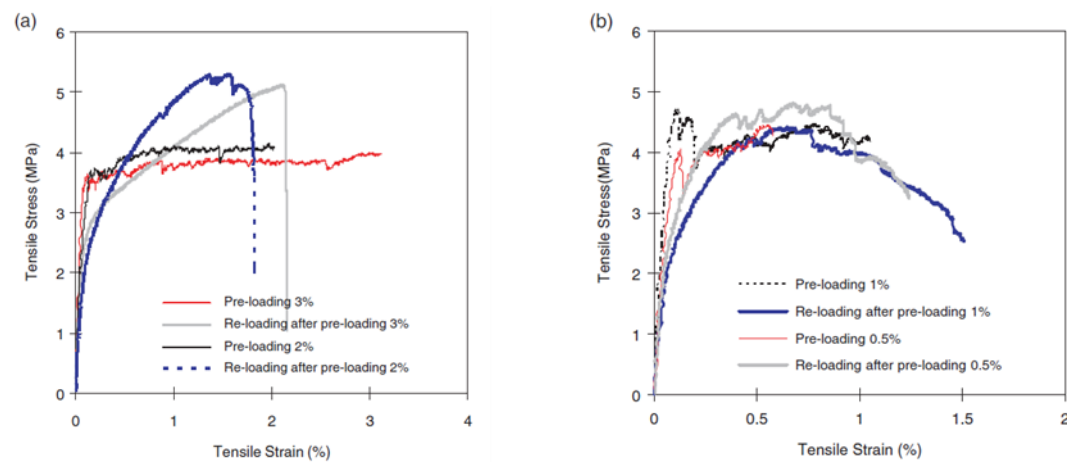
図-3.2.3.4 wetting/drying サイクル条件下での ECC の自律治癒率 (a) CR1 条件下での共振周波数の回復(water/air cycle) (b) CR2 条件下での共振周波数の回復 (water/hot air cycle) [1]

(b) 引張特性の修復

図-3.2.3.5 と図-3.2.3.6 は、各々 CR1 と CR2 サイクル後治癒された ECC 供試体の再载荷時引張応力ひずみ曲線と、治癒前 ECC 供試体の初期载荷時の引張応力ひずみ曲線を示す。CR1 供試体の場合、自己治癒後で最大引張ひずみは 1.7%から 3.1%まで分布し、CR2 供試体の場合には自己治癒後で引張ひずみが 0.8%から 2.2%まで分布している。しかし、CR2 供試体の場合は自己治癒後最大強度(ultimate strength)が、CR1 の場合よりさらに高い結果を示している。これは自己治癒後最大引張強度の差と最大引張ひずみが、他の治癒環境条件の影響を受けるためと考えられる。すなわち、CR2 の場合、供試体は水に浸漬させた後に 55℃で乾燥されたことが影響したものと考えられる。このような高温履歴は、供試体での水分蒸発が生じるとともに蒸気養生をした結果と似ていることが分かる。したがって、未水和セメントとフライアッシュの水和はこのような条件で促進され、このような現象は ECC マトリックスの強度と繊維／マトリックスの界面結合(PVA 繊維の強い親水性)の増加をもたらすことになる。すなわち、界面結合強度の増加により繊維の架橋効果は増大し、これによって、CR2 において最大引張強度がさらに高い値となる。その一方において、強い界面結合により繊維が破断する傾向が高くなる。このような二つのメカニズムは ECC における多数の微細ひび割れにおいてマイナスの影響を引き起こすために、結果的に CR2 供試体において低い引張延性(tensile ductility)を引き起こすことになる。

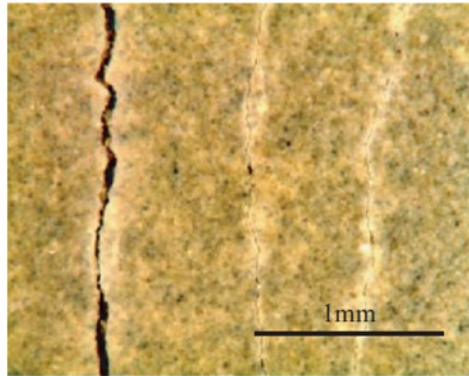


図－3.2.3.5 CR1における10サイクル後の引張応力－ひずみ関係[1]
(a) 1%以上 preloading した供試体 (b) 1%以下 preloading した供試体

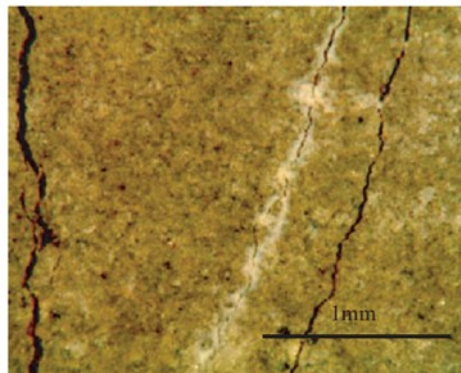


図－3.2.3.6 CR2における10サイクル後の引張応力－ひずみ関係[1]
(a) 1%以上 preloading した供試体 (b) 1%以下 preloading した供試体

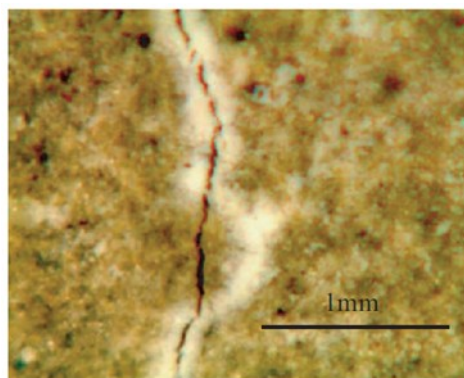
図－3.2.3.7 に CR1 条件で自己治癒された後に再載荷した ECC 供試体を示す。この供試体は wet/dry サイクルを受ける前に、初期ひずみとして 2%が与えられている。炭酸カルシウム結晶の特徴である白色物質が、供試体表面とひび割れ間面に生成され、また、このような現象は自己治癒された供試体のひび割れで多く見ることができる。このような場合、生成された炭酸カルシウムはセメント水化物より強度が弱いため、ひび割れが治癒したところで再び開くこともある。しかしまた図－3.2.3.8 と図－3.2.3.9 に見られるように、完全に自己治癒された場合においては、以前に治癒したひび割れ付近で新しいひび割れが生成されることになり、このような現象は ECC 材料の力学的自己治癒の実際の可能性を証明するものである。



図－3.2.3.7 wet-dry サイクル後自己治癒された ECC 供試体に再載荷した後に発生したひび割れ[1]



図－3.2.3.8 自己治癒されたひび割れ近傍で新しく生成されたひび割れ[1]



図－3.2.3.9 自己治癒されたひび割れで新しく生成されたひび割れ[1]

(c) 移動特性の回復

透水性試験では移動特性および透過係数を、非亀裂体、ひび割れ/損傷供試体および再治癒された供試体において測定された。透過試験には二種類の実験装置が使われた。低透水性を持つ供試体においては変水位試験を用い、ひび割れの幅が大きくて変水位試験をできない供試体においては低水位試験を行った。このような二つの装置の模式図を図－3.2.3.10に示す[7,8]。透水試験を実行した結果、ひび割れとひび割れ近傍で供試体の表面に白色物質が生成された。これを図－3.2.3.11に示す。図－3.2.3.11(a)は透水実験前の ECC 供試体であり、図－3.2.3.11(b)は透水実験後の供試体である。白色物質はひび割れ間と ECC 供試体表面の空隙で生成された。透水性にお

いてひび割れの自己治癒効果は他の研究者らによっても研究されているが、ひび割れた ECC の透水性測定にも意味がある。このような現象は多くの粉体を含有する ECC 配合にあつて、相対的な低水セメント比によって誘導される。相当量の未水和粉体の存在は、水にさらされた時、ひび割れの自発的な自己治癒を引き出す。このメカニズムは自己治癒しやすい小さいひび割れ幅を持つひび割れた ECC 材料において特に明白である。しかし、このような現象はひび割れた ECC 供試体を単純に水に浸漬した時には(CR5)観察されてない。透水実験以前に飽和された 14 日の間ひび割れた ECC 供試体では、ひび割れの自発的な治癒の効果を見出せなかった。透水実験装置で単純に 3 日後にて、自己治癒の現象が顕著に現れた。このような現象はひび割れた ECC が部分的に水に浸漬されたときにも観察された。ひび割れ治癒は単に水の表面付近で見られ、供試体の上下では治癒は観察されなかった。ESEM を使って、自己治癒された ECC 供試体の表面化学分析を行った結果、ひび割れ間とひび割れに近接した表面では結晶の生成が見られた。これは主に炭酸カルシウムと水和されたセメント生成物である(図-3.2.3.12)。

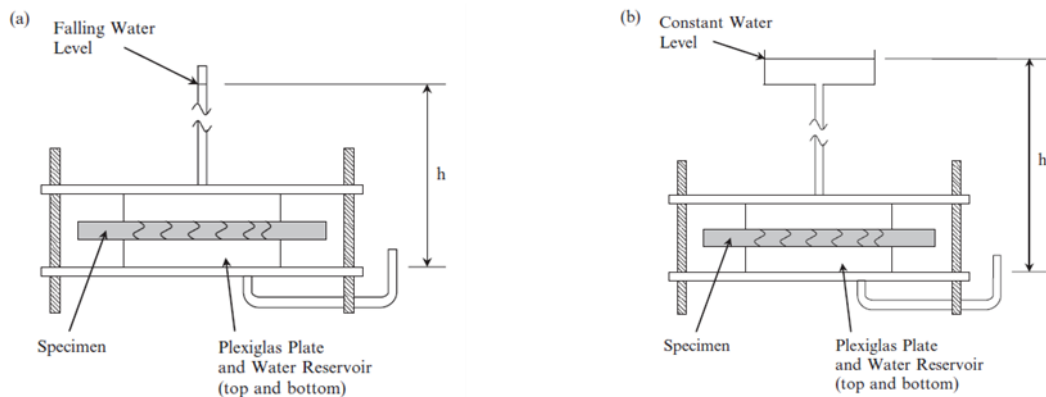


図-3.2.3.10 透水試験装置 (a) Falling head permeability test setup, (b) Constant head permeability test setup [7,8]

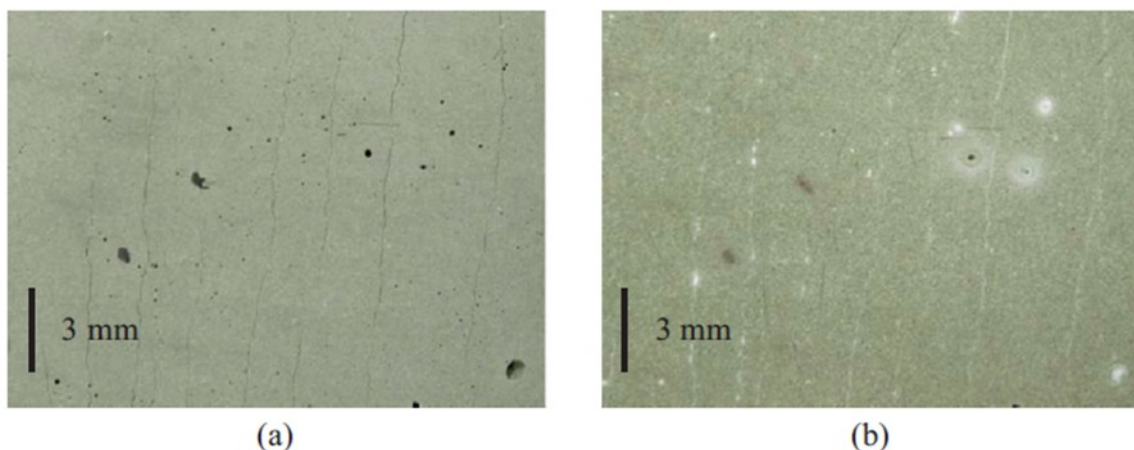
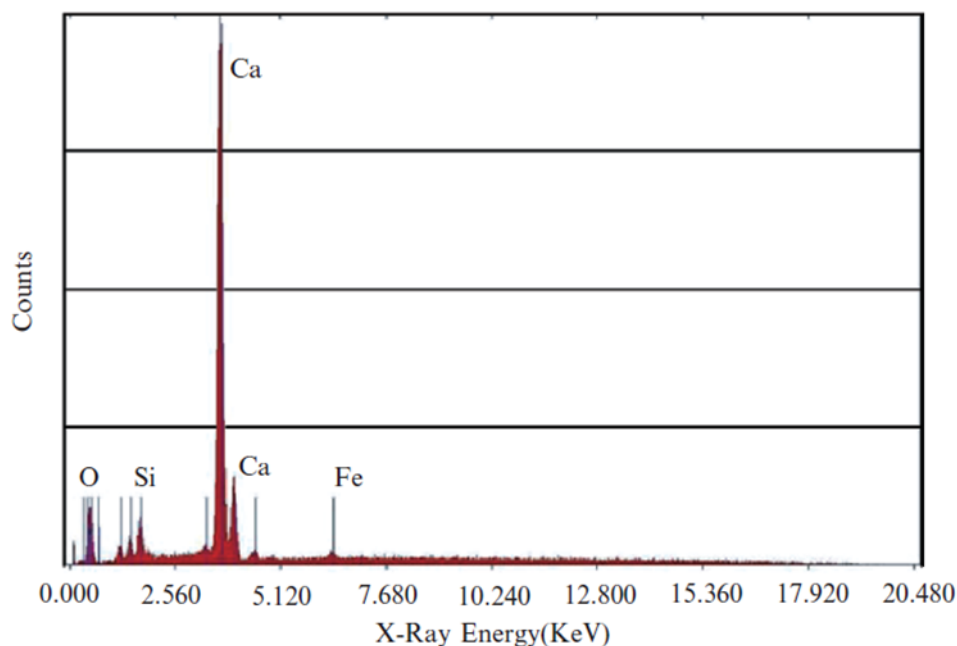
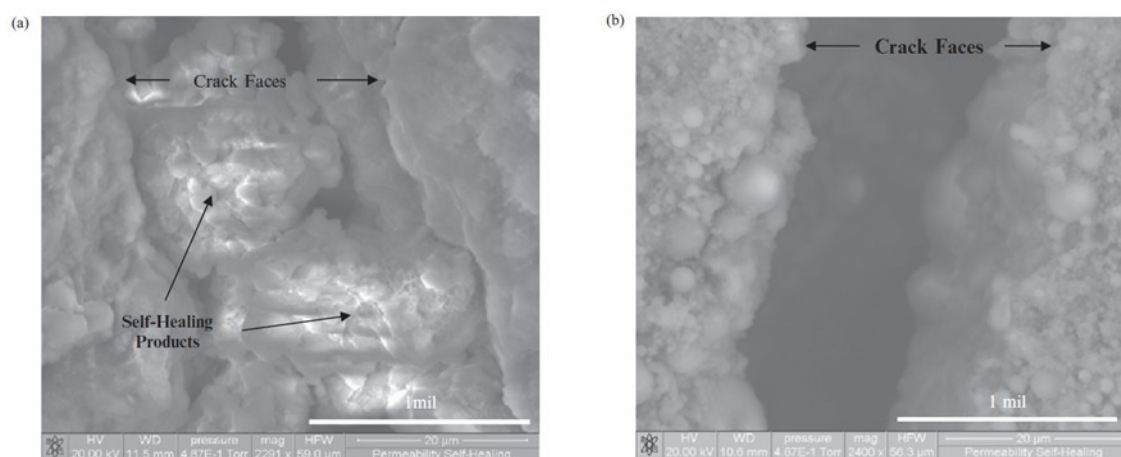


図-3.2.3.11 透水実験 ECC の外見 (a)透水実験前 (b)透水実験後 [1]



図－3.2.3.12 自己治癒生成物の ESEM 表面化学分析[1]

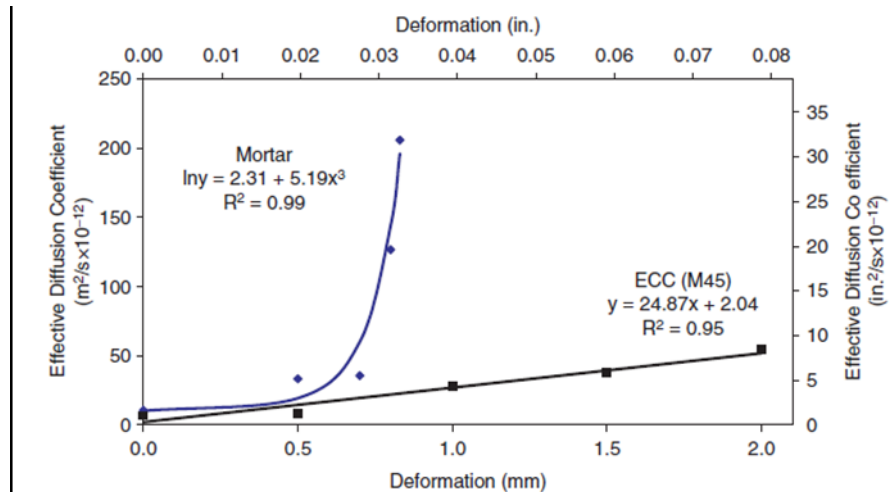
自己治癒されたひび割れでのこのような結晶生成物を図－3.2.3.13 に示す。一般的にひび割れの治癒を容易にして炭酸カルシウムの形成を促進するためには、二酸化炭素や炭酸塩を含有する水の流れが必要である。透水実験では空気中で溶解した CO_2 によって行われる。したがって、部分的に浸漬した供試体の場合には、少量の CO_2 が水に溶解して、自己治癒は制限的になるが、透水実験以前に飽和された状態にあった供試体は、連続的な炭酸塩の供給がないために ECC のマイクロひび割れもまた治癒しないと考えられる。このような結晶の形成により透水率は低くなり、さらに透水係数を減少させるのに影響を与える。



図－3.2.3.13 ECC 供試体のひび割れ部位形状 (a) 透水実験後でひび割れ部位に生成された自己治癒組成物 (b) 透水実験前の ECC のひび割れ[1]

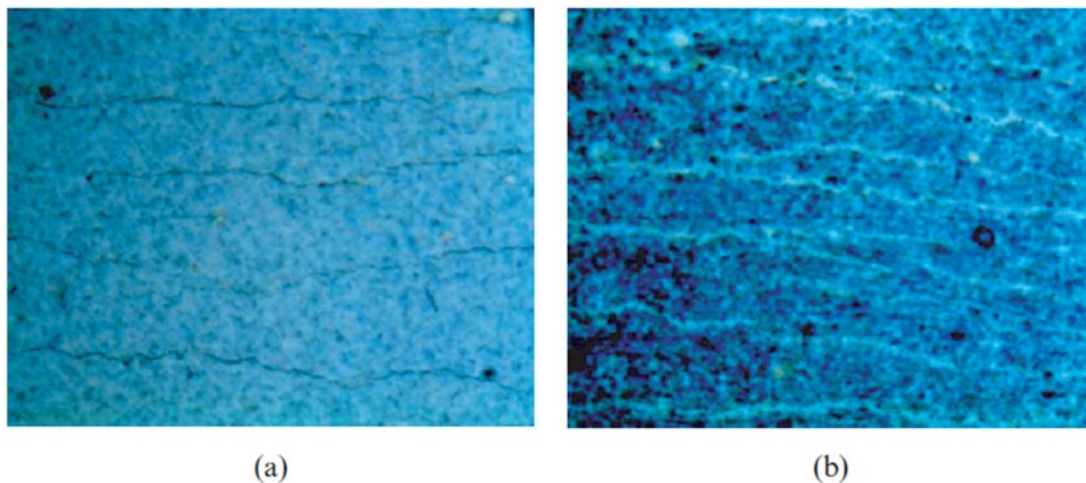
図－3.2.3.14 に普通モルタルと ECC 供試体での塩化物イオンの有効拡散係数と供試体のたわみの関係を示す。ECC 供試体は微細なひび割れ幅になるよう制御されるために、通常のモルタルよりも有効拡散係数が低いことが明らかになった。特に変形レベルが大きいほど、モルタルの有

効拡散係数はたわみとともに指数的に増加する。しかし ECC の有効拡散係数では、付与された変形量と共に線形的に増加する。なぜなら ECC の引張表面において微細ひび割れの数付与されたたわみに比例するためである。ECC 供試体においては、変形(2 mm)が大きい場合でも塩化物が浸透した現象が見られない。これは微細なひび割れ幅だけでなく、この微細なひび割れが自己治癒することによって生じたことを意味する。

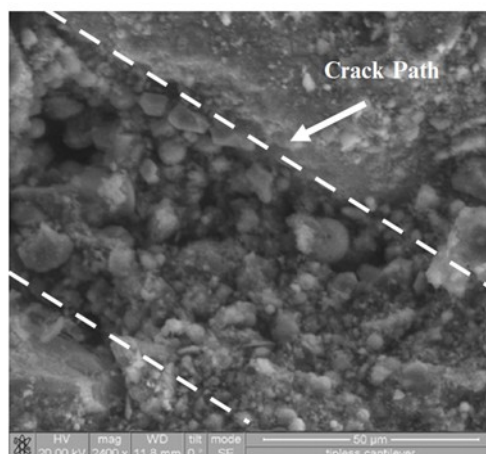


図－3.2.3.14 モルタルと ECC の変形にともなう拡散計数との関係[1]

ひび割れの自己治癒はひび割れ幅が小さくなるほど顕著に現れる。塩化物水溶液に浸漬した ECC の場合において、図－3.2.3.15 に示すように 1 ヶ月間浸漬させた後ひび割れ表面に明確な白色物質の生成が見られた。このようなひび割れ表面での白色物質により、ECC の微細なひび割れを容易に治癒できる。このような供試体の ECC 表面を、ESEM 観察を通じて確認した結果ひび割れ部位で C-S-H ゲルと同じ水化物が新しく形成されていることを観察することができた(図－3.2.3.16)。これは主に多量のフライアッシュを含有するために、相対的に ECC の配合が低水セメント比となることと相関関係がある。すなわち、フライアッシュの連続的なポゾラン反応は、ひび割れに塩素イオンが侵入することを減少させ、自己治癒に適切なものと判断される。



図－3.2.3.15 ECC の微細ひび割れに生成された自己治癒生成物[1]
(a)塩化物に 30 日の間浸漬前 (b)浸漬後



図－3.2.3.16 ECCの微細ひび割れに生成された自己治癒生成物(ESEM) [1]

<参考文献>

- [1] Li V.C. and Yang E.H.: Self-healing in concrete materials, *Self-healing materials (an alternative approach to 20 centuries of materials science)*, van der Zwaag S. (editor), Springer Series in MATERIALS SCIENCE, Dordrecht, The Netherlands, pp.161-193, 2007
- [2] Maalej M., Hashida T., and Li V.C. : Effect of fiber volume fraction on the off-crack plane energy in strain-hardening engineered cementitious composites, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.78, No.12, pp.3369-3375, 1995
- [3] Yang E. and Li V.C.: Numerical study on steady-state cracking of composites. *Composite Science Technology*, Vol. 67, pp.151-156, 2007
- [4] Aldea C., Song W., Popovics J.S., Shah S.P. :Extent of healing of cracked normal strength concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, No.12, No.1, pp.92-96, 2000
- [5] Jacobsen S., Sellevold E.J. :Self healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw, *Cement and Concrete Research*, Vol.26, No.1, pp.55-62, 1996
- [6] Farage M.C.R., Sercombe J., Galle C. :Rehydration and microstructure of cement paste after heating at temperatures up to 300°C, *Cement and Concrete Research*, Vol.33, No.7, pp.1047-1056, 2003
- [7] Wang K., Jansen D.C., Shah S.P., Karr A.F.: Permeability study of cracked concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.27, No.3, pp.381-393,1997
- [8] Cernica J.N.: *Geotechnical engineering*. Holt, Reinhart &Winston, New York, pp 97-99, 1982

[担当 安台浩]

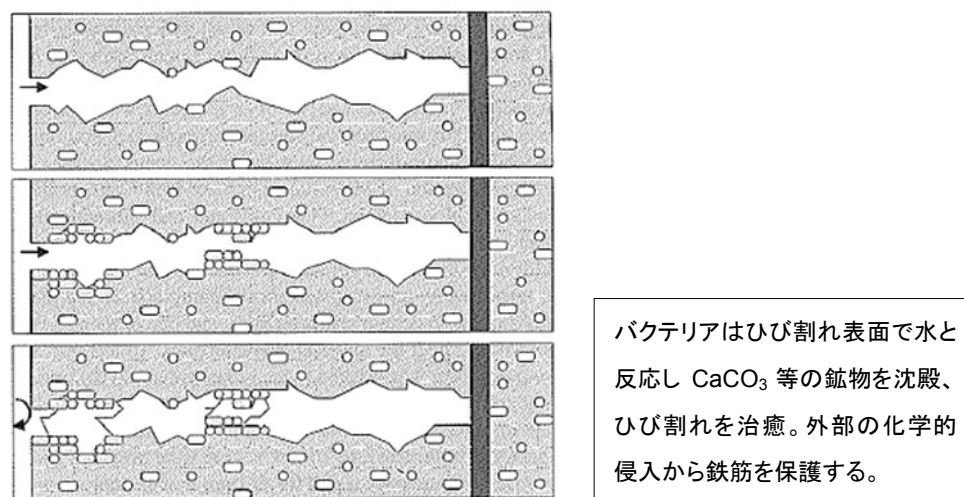
3.2.4 バクテリアを利用したコンクリートの自己治癒メカニズム

(1) バクテリアが適用されたコンクリートの自己治癒メカニズム

バクテリアによる生化学反応を利用して、コンクリートの改質や補修、そして自己治癒／修復機能を付与することを目指した新しい試みが行われている。これは、適切な環境下ではバクテリアの炭酸カルシウムが析出することを利用したものであり、従来は混和材として使用されていない要素を、自己修復を目的に追加したものとして、ここで取り上げる自動修復に分類できるものと考えられる。コンクリートの内部でもバクテリアが生存できるようにすることで、ひび割れに伴う水の浸入などをトリガーとしてバクテリア周囲での石灰石の析出が生じてひび割れを塞ぐことが可能になると期待される。もちろん、コンクリート内部は強アルカリ環境であり、乾燥状態などによってもバクテリアの生存に適した環境とならない場合も多い。しかし、地表より 1km 以上も深い地殻の岩石や砂漠からも活性バクテリア(active bacteria)が発見されたりもするなど、過酷な環境下で生存可能なバクテリアは存在している。このような乾燥状態またはアルカリ環境下でも生存可能なバクテリアは、一般的に種子(spore)を形成して新陳代謝を抑えることにより、200 年の生存が可能な種類も確認されている。

生物から石灰石という鉱物を作り出すプロセスは、バイオミネラリゼーション(biomineralization)と呼ばれる。これは耳慣れない言葉のように思えるが、様々な貝類にできる天然の真珠や貝殻、人間も含めた脊椎動物の持つ歯や骨など、数え切れないほどの種類の生物にバイオミネラリゼーションが起こっている。このようなバイオミネラリゼーションは生物制御起因のものと、生物誘発の2種類に分類される。前者は生物体に計画されたもので、貝殻や珊瑚の骨格形成などがこれにあてはまる。一方で後者は、生物活動に誘発されて、骨や歯のような硬組織ではなく、生物体表面を含めた生物体内外で鉱物が形成するものをいう。バクテリアなどによるバイオミネラリゼーションの大部分はこちらであり、ここで取り上げるバクテリアによる炭酸カルシウムの析出も、生物誘発のバイオミネラリゼーションである。[2]

バクテリアによる石灰石析出のメカニズムは、基本的に酵素による尿素の加水分解である。このウレアーゼ(urease：尿素の加水分解を促進させる酵素)による加水分解プロセスにおいては、尿素($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)と水の反応によって CO_2 とアンモニア(NH_3)が発生する。 $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ システムのpK 値が大きい(約 9.2) ために、反応の結果 pH 値は大きくなり、また、炭酸塩の平衡状態の移動($\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$)が付随して起きる。その結果、カルシウムイオンが十分に存在する場合に石灰石が析出される。このようなバクテリアシステムによって実際に自己治癒を機能させる、若しくはこの目的に合わせたバクテリアの適用については、ウレアーゼ酵素の活性と培養基(尿素)が年単位の長期間に亘ってコンクリート中に埋設された場合に安定しない点が課題として残されている。また、ウレアーゼを利用するシステムでは、アンモニアが過大に発生してしまう点についても環境面から問題点の一つに挙げられる。そのため、バクテリアによる自己治癒コンクリートの場合には、バクテリアと共に、環境に親和的なバイオミネラル前駆化合物(biomineral precursor compound) が共に添加されることが望ましい。コンクリートに埋設されたバクテリアは、ひび割れが生じて水が浸入した際には直ちに析出を開始してひび割れを埋めることが望まれる。図-3.2.4.1 は、この一連の流れの概念図である。



図－3.2.4.1 バクテリアを含有したコンクリートのひび割れ自己治癒メカニズム[1]

(2) バクテリアを利用した自己治癒コンクリートの実験

既報の研究の多くは、コンクリートや石灰岩の表面の補修や耐久性向上のために、バクテリアによる石灰石析出の適用の可能性について検討している。しかし、このような研究は、コンクリートのマトリックスの一部としてバクテリアとバイオミネラル前駆化合物を使用するのではなく、損傷後の処置として外部から適用されたものである。このような研究に見られる改善メカニズムは、自己治癒現象として定義することはできない。

Jonkers は、バクテリアによる自己治癒コンクリートの可能性を検討するために、以下のような実験を行った。まず色々な潜在性がある適切なバクテリアを選択した。このようなバクテリアは *Bacillus* 系の *Alkalintolerant* (alkaliphilic) spore-forming バクテリアであり、4 種類をドイツから入手して培養した。コンクリートとバクテリアの適合性と、バクテリアによる鉱物生成が可能であることを確認するために、培養されたバクテリアをコンクリートとセメント硬化体 (cement stone) に適用した。理想的な自己治癒機能のためには、基本的な材料特性に悪影響を及ぼさないことが求められる。このことを実験するために、培養した *Sporosarcina Pasteurii* を水道水で二度洗浄し、これをコンクリートの練り混ぜ水に添加する前に、細胞懸濁液でバクテリアの数を顕微鏡観察により計算した。二つのシリーズ(バクテリア添加の有無)について、 $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}$ のコンクリート供試体が 9 個作製された。各々 3 個の供試体について、材齢 3、7、28 日の時点で曲げ強度と圧縮強度の測定を行った。

表－3.2.4.1 にコンクリートの配合を、図－3.2.4.2 に時間経過にともなう二つのタイプのコンクリート強度発現を示す。コンクリートとの適合性実験結果、 10^9 cm^{-3} までの濃度では、バクテリアの添加によって強度特性に影響は表れなかった。また、酵母エキスとペプトン(peptone)をバクテリアの餌として添加した培養基中でセメント硬化体を養生したところ、耐アルカリの芽胞を形成するバクテリア (alkali-resistant spore-forming bacteria) を混入した供試体では、図－3.2.4.3 に見られるような石灰石状の結晶が多くみられた。この一方でバクテリアを添加しないコントロール供試体では、このような結晶はみられなかった。すなわち、適切な栄養源が得られる状態において、適切なバクテリアを選択してコンクリートやセメントペーストに添加することで、その表面に鉱物を生成することが可能であると考えられる。

表-3.2.4.1 9個のコンクリートのバー実験で使われた配合比

Compound	Weight (g)
Cement (ENCI CEMI 32.5)	1,170
Water	585
Aggregate Size Fraction (mm):	
4-8	1,685
2-4	1,133
1-2	848
0.5-1	848
0.25-0.5	730
0.125-0.25	396

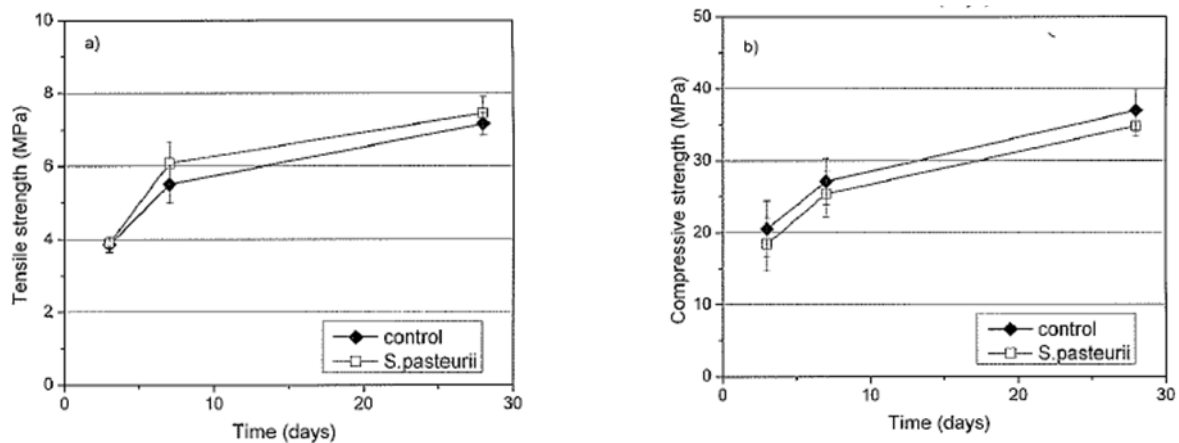


図-3.2.4.2 一般コンクリートとバクテリア混入コンクリートとの (a) 引張強度 (b) 圧縮強度[1]

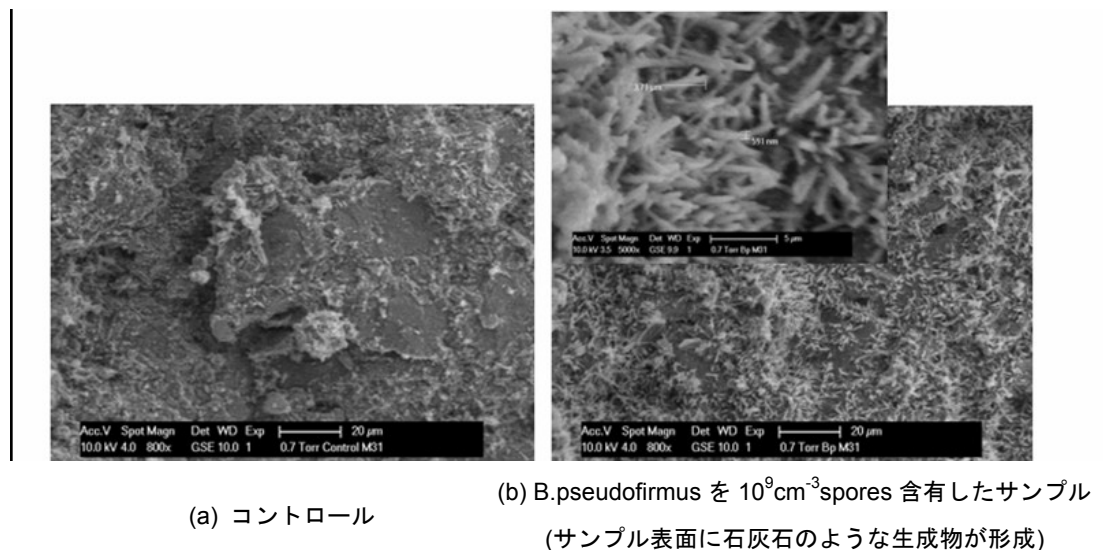


図-3.2.4.3 10日間養生後、酵母エキスとペプトンを含有した媒介体で硬化したセメント硬化体のサンプル[1]

バクテリアによる鉱物生成のメカニズムは新陳代謝である。すなわち、アルカリ環境下においてバクテリアが有機炭素源(酵母エキスとペプトン)により新陳代謝すると、コンクリート中に存在するカルシウムイオンと反応して炭酸イオンが生成される。生成された炭酸イオンは、バクテ

リア活性が局部的に高い地点で(hot spots)濃度が高まり、ここで石灰石が形成される。この実験ではバクテリアの栄養分は培養基の一部であり、コンクリートマトリックスの一部とはなっていない。しかし、自発的な自己治癒のためにはバクテリアと栄養分が材料のマトリックスに含まれることが必須であるため、コンクリートと色々な有機化合物との適合性を調査するため、追加の実験を行った。この実験で選択された化合物は、適用されたバクテリアに適した栄養分であり、セメント重量の0.5%濃度でコンクリートに添加された。材令28日後にいくつかの組成物はコンクリートと比較してより良い結果を表わした。(表-3.2.4.2)

表-3.2.4.2 コントロールおよび有機カーボンを含有したサンプルの
28日養生後曲強度と圧縮強度特性[1]

Type of Concrete	Tensile Strength (MPa)	Compressive Strength (MPa)
Control	7.78±0.38	31.92±1.98
Na-aspartate	7.73±0.37	33.69±1.89
Na-glutamate	7.16±0.19	28.52±3.56
Na-polyacrylate	6.42±0.47	20.53±4.50
Na-citrate	3.48±1.72	12.68±1.82
Na-gluconate	0	0
Na-ascorbate	0	0

コントロール(Control)と、アミノ酸(aspartic acid と glutamic acid)を含有したコンクリートとは曲げ強度と圧縮強度ともに大差ない結果を示した。Polycrylic acid と citric acid を含有した場合には相当な強度損失を見せ、gluconate と ascorbic acid が添加された場合は強度発現が全く見られなかった。アミノ酸のような特殊な有機化合物は、適切なバクテリアとともにコンクリートに埋設されることで、自己治癒発現のために使用できる可能性を見せた。

(3) 今後の研究方針

これらの研究では、コンクリートに固定化されたバクテリア、すなわち、コンクリートの一部としてバクテリアが使用された場合に、自己治癒が可能であるか検討を行った。実験結果からは、コンクリート内に固定されたバクテリアによって鉱物の析出が確認され、また、バクテリアとこれに必要な特定の栄養素をコンクリート中に混入しても強度特性に悪影響を及ぼさないことが確認された。すなわち、バクテリアによって鉱物を析出させるというひび割れ自己治癒機能は、実現に可能性があることが分かった。

しかし、このような概念はまださらなる研究開発が求められる。バクテリアによる鉱物析出が、効果的にひび割れを塞いでいるのか、鉄筋腐食を防止して耐久性に貢献できるだけの十分な透水性の減少とできるのかといった評価が必要となる。また、どのバクテリアがコンクリートに適しているのか、少なくとも構造物の耐用年数の間は生き残れるように考慮する必要がある。このような課題を解決することで、バクテリアの適用は、他の非生物の自己治癒メカニズムに匹敵する、理想的な自己治癒機能とできるものと考えられる。

<参考文献>

[1] Jonkers H.M.: Self-healing concrete: A biological Approach, *Self-healing materials (an*

alternative approach to 20 centuries of materials science), S. van der Zwaag (editor), Springer Series in MATERIALS SCIENCE, pp.195-204, 2007

- [2] 渡部哲光: バイオミネラリゼーション—生物が鉱物を作ることの不思議—、東海大学出版会、pp.1-8、1997
- [3] S. K. Ramachandran, V. Ramakrishnan, and S. S. Bang: Remediation of Concrete Using Micro-Organisms, ACI Material Journal, Vol. 98, No. 1, pp.3-9, 2001

[担当 安台浩、西脇智哉]

3.3 自動的な修復機構の導入

ここでは、図-3.3.1に示す「自動修復」として、自動的な修復作業を行う機能を、新たにコンクリートに付与する検討について紹介する。このために機能要素が追加されることとなるが、ここで扱う「自動修復」では、前述の「自律治癒」の項目で挙げられたフライアッシュや膨張材、短繊維のような従来から混和剤と使用されているものではなく、接着剤等に代表される修復のために特化されたものが用いられる点に特徴がある。この場合、補修に特化して機能要素を選択することが可能となるため、材料選択や使用環境に制限が少ない点がメリットとして挙げられる。自然治癒・自律治癒では外部からの水の供給が必須となるが、自動修復の場合は適切な補修剤を機能要素として選択することによって、様々な環境下で適用できる可能性がある。この反面、コンクリート内部に埋設して使用される実績がないものを追加することになるため、埋設されるデバイス自体がコンクリート内部で欠陥となったり、耐久性についての知見が乏しい、混練や埋設のための技術が不足するといった場合も考えられる。また、機能付加のために新たな追加要素を次々に加えることになると、修復機能を高められ一方で、複雑なシステムをコンクリート内部に取り込むことになり、「安い」材料であるコンクリートにとってコスト面で大きなデメリットとなる。また、複雑なシステムを維持するために、より複雑なシステムをフェイルセーフとして取り込まざるを得なくなる、いわゆる「スパゲッティ症候群」[1]に陥る危険性がある。

本節で調査対象とした自動修復コンクリートには、自動修復機能を付与するための手法によって、更に2種類に分類することができる。すなわち、ひび割れ（劣化）の発生自体が修復機能発現のトリガーとなるパッシブ型自動修復と、必要に応じて外部から何らかの入力を行うことでトリガーとするアクティブ型自動修復の2種類である。フライアッシュや膨張材も、機能要素を追加したものと捉えれば、パッシブ型自動修復と同じライン上の技術と考えられる。パッシブ型は外部入力を必要としないため、本来の意味での「自己修復」に沿うものと考えられるが、機能発現の確実性などに問題が残る危険性がある。この一方で、アクティブ型自動修復とは、外部からの入力をトリガーとして機能を発現させるもので、より確実に機能を発現させて信頼性の高い自動修復の機構を組み入れられる可能性がある。例えば、実際に補修を行うためのデバイスに加え

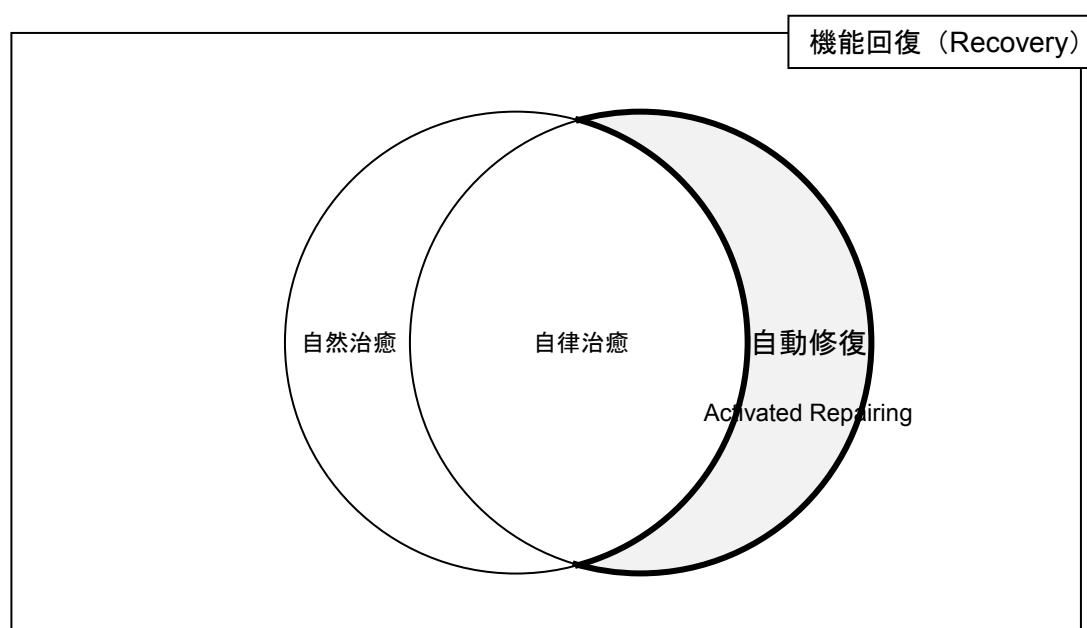


図-3.3.1 自動修復

て、このデバイスを確実に起動させるために外部からの入力によって機能を発揮するデバイスを併設することにより、ひび割れ発生箇所での選択的な駆動が可能となって、一層確実な自動修復機能の発現が期待される。

これらの手法は、追加された要素がそれぞれの機能を分担する、スマート構造の考え方による新機能の付加と考えられる。追加要素について多くの選択肢があるため、マイクロカプセルや脆性パイプに補修剤を封入したものから、センサ機能を併せ持つデバイス、電気信号などの外部入力によって機能するアクチュエータまで、幅広い選択肢を持つことが可能となる。また、既に実用段階に入りつつある、光ファイバ等を利用したヘルスマモニタリングもこの手法に位置づけられる。これらのセンシング技術を自動修復機能へと繋げる試みもあり、本節で紹介する。

3.3.1 パッシブ型自動修復コンクリート

ここで示すパッシブ型自動修復コンクリートとは、保護材によって未反応の状態を保持したままの補修材がコンクリート中に埋設されるものである。ポリマー材料の分野では、図-3.3.1.1の概念図[2]に示されるようにマイクロカプセルの他に触媒を母材中に分散させる手法が提案され成果を上げており、コンクリートの分野でも同じコンセプトでの検討が行われている。すなわち、ひび割れ等の発生に応じてこの保護材が破損することで、この変状の発生を材料自身が検知し、保護材料の破損やひび割れの程度によって補修剤が放出されることで補修の判断が行われ、放出された補修剤がコンクリートや空気などと接することで硬化してひび割れ箇所の補修を実行するものである。以下に具体的な検討例を示す。

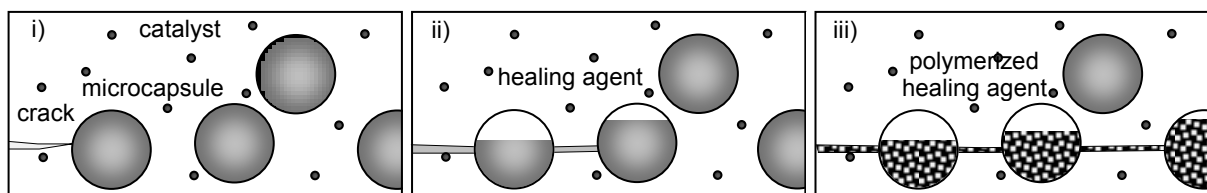


図-3.3.1.1 マイクロカプセルの利用[2]

(1) マイクロカプセル

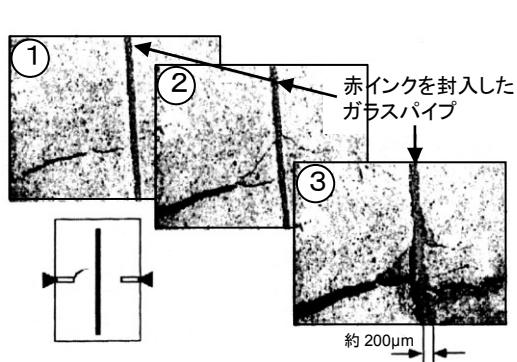
コンクリートの分野では、補修材を封入したカプセルを打設時に投入し、コンクリート中に配置する検討が複数のグループによって行われている。沼尾ら[3]は、短くカットした外径 3～5mm のガラスパイプ内部に補修材を充填し、そのパイプ両端を合成ゴム系接着剤で封じたカットガラス管をコンクリート打設時に分散させる手法を提案している。このようにして作製した供試体について、ひび割れへの補修材の放出状況や圧縮強度の回復を確認している。この補修材には 1 液型の水ガラス系補修剤と 2 液型のエポキシ補修剤が使用されており、水ガラス系のものを使用した場合に無混入のものと比較して繰り返し圧縮载荷を行った場合の圧縮強度が回復する結果が得られている。しかし、2 液型エポキシ樹脂を補修材とした場合には、硬化のために必要となる主剤と硬化剤の混練をひび割れ内で行うことが困難であるため、強度回復の効果は見られなかった。

Dry ら[4]は腐食防止化学物質を中空のポリプロピレン繊維内部に封入したものを、打設の際に設置する方法を提案している。コンクリートの硬化後に、この繊維の周囲の塩化物濃度がある一定値以上に達すると、ポリプロピレンが融解して封入されている薬剤を放出し、鉄筋の腐食を抑制することが可能となるとしている。同様に、接着剤の封入された長さ 6.4cm (2.5 インチ)、直

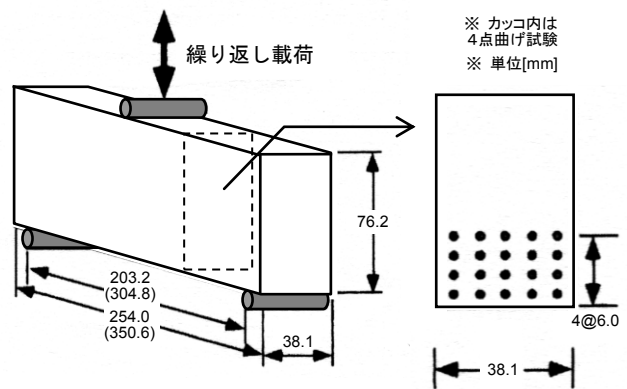
径 100 μm の繊維をコンクリートの打設中に配置しても破損させることなく埋設が可能であったとしている。

Li ら[5]は、繊維補強によって擬似ひずみ硬化の特徴を示す ECC の内部に、補修剤を封入した非常に細いガラスパイプを埋設することで、パッシブな自己修復機能を持つ PSS- ECC (Passive Smart Self-healing ECC) とすることができるとしている。ここでは、通常のコンクリートや繊維補強コンクリートではなく、微細なひび割れを多数生じさせる ECC の特徴こそが、自動修復機能にとって不可欠であるとしている。すなわち、通常のコンクリートではひび割れ幅の制御が困難であるため、ひび割れが過大に進展してしまい、パイプ内部にこのひび割れを充填するのに十分な補修剤量を確保することが困難となる。この一方で、補修剤量確保のために、強度特性に悪影響を及ぼすような大きなガラスパイプを埋設することは本末転倒である。更に、密封されたガラスパイプから、発生したひび割れに対して、外部からの圧力を必要とせずに補修剤を充填させるためには、毛細管現象を利用する必要がある。このためにひび割れ幅はガラスパイプの内径よりも細い必要があり、ECC のようなひび割れ幅の制御が可能な材料が必要であるとしている。

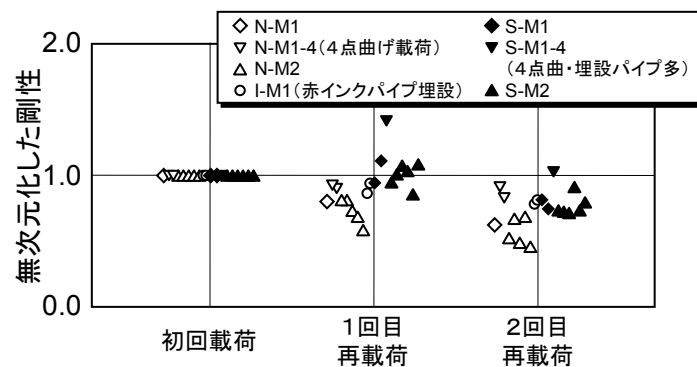
ここでは、2段階の実験によって自動修復機能の発現を確認している。まずは、非常に小さい供試体(10mm×10mm×1.5mm)に一本の細いガラスパイプ(外径 500 μm 、ガラス壁厚さ 60 μm)を埋設した供試体を用いて、これにひび割れを生じさせる。その過程を ESEM により観察し、ひび割れの検知と補修、すなわちガラスパイプの破損と補修剤の放出が行われていることを確認している。補修剤の代わりに、粘度が同程度の赤インクを封入した場合、図-3.3.1.2 のようにひび割れがガラスパイプに到達すると、ひび割れと、パイプと ECC マトリクス界面の剥離箇所に沿って、赤インクの流出が確認できる。また、図-3.3.1.3 に示される梁型の供試体を用いて3点曲げおよび4点曲げの繰り返し載荷試験を行い、力学特性の回復について検討している。供試体内のガラスパイプには、気硬性のエチルシアノアクリレート接着剤が封入されている。供試体に対して所定の変形が生じるまで載荷、その後 0.2kN まで除荷、この状態を5分間保持した後、再び載荷を繰り返す。自己修復効果を荷重と変位のグラフの傾きとして計算される剛性 (Stiffness) の回復率として評価している。最大荷重でなく、剛性を評価に用いるのは、ECC のような擬似ひずみ硬化を示す材料では、最大荷重の増大が、自己修復効果によるものなのか、ひずみ硬化によるものなのかの判別が困難であるためである。図-3.3.1.4 は、それぞれの供試体について、初回載荷の際に得られた剛性を基準として無次元化された剛性変化を示すグラフである。ただし、凡例にある N はガラスパイプを埋設していないもの、I は赤インクが封入されたガラスパイプ、S は補修剤封入ガラスパイプを埋設したものを、M1 および M2 は ECC マトリックスの調合の違いを、末尾の 4 は4点曲げ載荷試験を行った供試体であることを各々意味している。補修剤の封入されたガラスパイプを埋設していない供試体シリーズでは、全ての供試体で剛性が 10~40%程度低下しているのに対して、埋設しているシリーズでは、初回載荷よりも剛性が増大したものもあり、明らかな剛性の回復が確認された。すなわち、ひび割れの発生に伴って低下する剛性を、自己修復効果によって回復可能であったとしている。また、4点曲げ載荷試験を行ったシリーズで特に大きな回復が得られたのは、この供試体に埋設された、補修剤封入パイプの本数が多く、補修剤の量が十分であったためだとしている。



図－3.3.1.2 ひび割れの進展と
赤インクの流出[5]

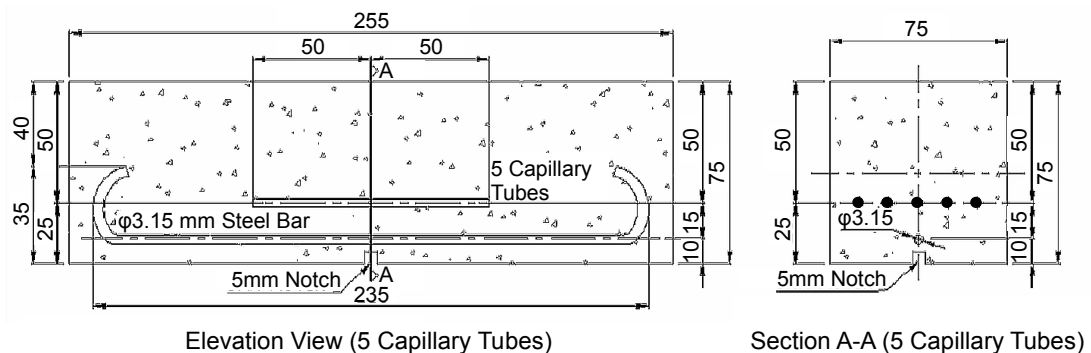


図－3.3.1.3 曲げ供試体の形状[5]



図－3.3.1.4 剛性の回復率[5]

Joseph ら[6,7]は、図－3.3.1.5 に示す複数の中空パイプを埋設した角柱型の供試体を用いて実験を行い、この手法の問題点について洗い出しを行っている。例えば、この図のような独立したパイプを使用する場合、ひび割れと反対側の口が塞がっている状態では補修剤がひび割れへと放出されない点が挙げられている。他にも、特にパイプが細い場合には、補修剤をひび割れ中へと放出させるための駆動力として期待される毛細管現象が、これとは反対にパイプ内部に引き込まれる方向に卓越してしまいひび割れに行きかない点や、打設時にガラスパイプを意図した位置に配置することが困難である点などについて触れられている。



図－3.3.1.5 供試体の形状[6]

これらの手法に共通する点として、ひび割れを充填するだけの補修剤量を確保することが困難で外部からの供給も受けられないことが挙げられる。図-3.3.1.1にも見られたように、補修材の体積が変わらないならば、放出した後のマイクロカプセルは空洞とならざるを得ない。独立したマイクロカプセルは母材中に分散する方法では、生じたひび割れを充填するのに十分な量の補修剤を予めその内部に封入しておく必要がある一方で、構造上の欠陥とならないようにこのカプセルは可能な限り小さい方が望ましい。また、成型の際に破損してしまわないように、マイクロカプセルの殻の部分にはなるべく強固なものの方が望ましいが、ひび割れに対して敏感に反応・破壊するためにはなるべく脆弱なものとしたい。このように、マイクロカプセルの強度や粒径と内包補修剤の量の適切な関係について、更に詳細な検討が望まれる。また、このことを回避するための手段として、外部からの補修材を供給することも検討されており、次項で述べる脆性パイプによるネットワークが提案されている。

対象をひび割れの修復に限らなければ、マスコンクリートの温度ひび割れ対策として、遅延剤を封入したパラフィン製のマイクロカプセルを用いた検討が三橋[8]や西山ら[9]によって行われている。これは、コンクリート温度が上昇して所定の温度に達するとカプセルが溶融して遅延剤が溶出し、自動的にセメントの水和反応が停滞して温度上昇を抑制するものである(図-3.3.1.6)。この方法により水和反応を必要以上に遅延させず、またパラフィンの材質を適切に選ぶことで最高到達温度をあらかじめ設定することが可能となる。図-3.3.1.7は、この手法によるコンクリートの温度履歴を示したものである。このグラフから、遅延剤を混練時に混入しても発熱のタイミングが遅れるのみで最高温度を抑制することができない一方で、カプセル化した遅延剤を混入した場合は急激な温度上昇や温度降下ならびに最高温度が抑制できることが確認できる。

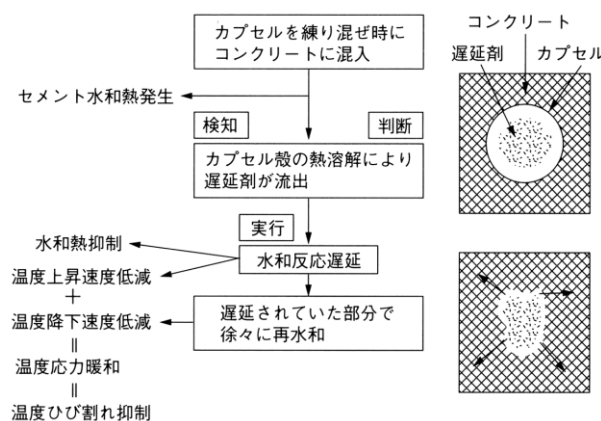


図-3.3.1.6 セメントの水和熱を利用したマイクロカプセルによる機能発現の概念図[8]

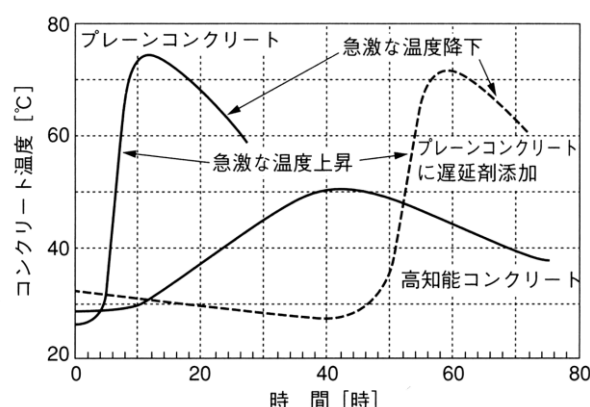


図-3.3.1.7 カプセル化遅延剤を利用したマスコンクリートの温度履歴[8]

(2) 脆性パイプネットワーク

ここでは外部から補修材の供給を受けることができるように繋げられた脆性パイプを用いる手法について紹介する。これらの研究例では、使用する脆性パイプや接着剤の材質は異なるものの、ひび割れの発生から自己修復を行うまでのプロセスは同様であり、上述のマイクロカプセルを脆性パイプに置き換えたものである。図-3.3.1.1と同様に、母材となるコンクリートにひび割れが発生すると、内部の脆性パイプもその箇所破損し、パイプ内の補修剤がひび割れ中に放出され

てこれを充填、補修を行うという機構が提案されている。マイクロカプセルではなくパイプ状にして外部からの補修材の供給を得ることで、発生するひび割れを充填するための接着剤量を確保することができる。

Nishiwaki ら[10]は、図-3.3.1.8 に示す供試体を用いて、補修材の供給を得られるガラスパイプを HPFRCC に埋設しての検討を行っている。ここでは、補修剤に水ガラス系のものが採用されており、補修効果の確認を目的として、力学特性の回復ではなく水密性の回復を主眼において透水試験を行っている。Li の検討[5]と同様に、通常のもルタルでなく HPFRCC によって複数ひび割れが生じ、ひび割れ表面の形状を複雑にすることでより高い自己修復効果が得られることを確認している。また、図-3.3.1.9 に示すように、補修剤の浸透し易さから最大ひび割れ幅が 0.2mm 以上の場合に補修効果が顕著になることを確認しており、通常時は HPFRCC によるひび割れ幅の進展の抑制が、ひび割れ幅の進展が卓越してしまった場合には自動修復が機能して水密性を確保できるものと考えられる。

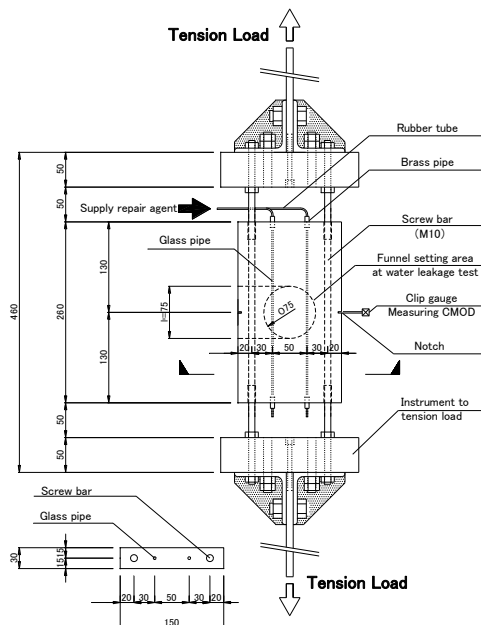


図-3.3.1.8 供試体の形状[10]

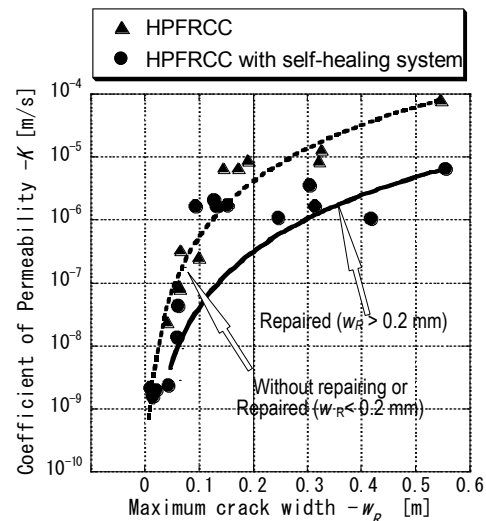


図-3.3.1.9 最大ひび割れ幅と透水係数の関係[10]

Dry[9-11]は、図-3.3.1.10 に示すような門型ラーメンの内部に、化学的に不活性な脆性パイプを埋設した供試体を作製して自動修復が可能であることを確認している。この脆性パイプの内部に供給される接着剤には、性質の異なる3種類が用いられている。すなわち、剛性の大きいシアノアクリレート系接着剤と、比較的柔らかく追随性が高い、2液型エポキシ接着剤とシリコン系接着剤の3種類である。この供試体に対して載荷試験を行い、ひび割れを発生させた後に除荷し、接着剤を供給して2週間の養生期間を経た後に再び載荷試験を行う。このときの自己修復効果の評価指標として、それぞれの載荷時に得られるひび割れの本数の変化と、荷重と変位のグラフの傾きから得られる剛性の変化を挙げている。表-3.3.1.1 は、ひび割れの本数の変化について示しており、2回目の載荷時に新たに発生したひび割れ(new crack)の本数を、1回目の載荷試験時に生じていたひび割れが再び開いたもの (re-open crack)の本数によって除して比を求め、この値が大きいものほど自己修復効果が大きいものとしている。ここで挙げたいずれの評価指標によって

も、シアノアクリレート系接着剤を用いた場合の自己修復効果が高くなり、他の2つの接着剤については、自己修復の効果は小さい。この一方で、追随性が高く柔らかい接着剤を用いることは、地震などのエネルギーを吸収するダンパーのような役割を与えることができるとしている。しかし、このことを示す具体的な実験結果は挙げられていなかった。ここで採用している自己修復の評価指標や、極端に小さい供試体などの試験方法も含めて、自己修復コンクリートとして適切なものであるかどうかは議論の余地が残る。

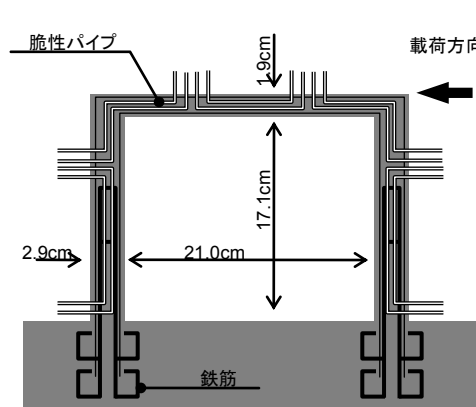


図-3.3.1.10 供試体の形状[11]

表-3.3.1.1 実験結果[11]

供試体	初回ひび割れ本数の平均	2回目载荷時		新規ひび割れ本数 再びひび割れ本数
		再びひび割れ本数の平均	新規ひび割れ本数の平均	
補修なし (Control)	3.67	3.67	2.0	0.55
シアノアクリレート	2.0	1.67	3.0	1.80 (接着剤先充填)
	2.67	0.67	1.67	2.50 (接着剤後充填)
エポキシ	3.0	1.67	1.33	0.80 (接着剤先充填)
	3.33	2.33	0.33	0.14 (接着剤後充填)
シリコン	3.67	3.0	0.67	0.22 (接着剤先充填)
	3.33	3.0	0.67	0.22 (接着剤後充填)

Ouら[14]も、脆性パイプを利用した自己修復手法を提案している。この報告では、使用する補修剤の粘性について触れられており、粘性が小さすぎる場合にはひび割れ中を充填することができずに流出して失われてしまい、粘性が高すぎる場合には脆性パイプからひび割れ中に補修剤が放出されないという問題点を挙げている。このことを解決する手段として、ポンプなどを使用して外部から一定の圧力をかけた状態で、粘性の高い補修剤を使用することが望ましいとしている。

西脇ら[15]は、脆性パイプを単独で使用しても、コンクリート構造物の様々な部位で断続的に発生するひび割れに対して、網羅的な自己修復を機能させることが困難である点を指摘し、パイプをコンクリート内部でネットワーク状に構築する手法を提案している。ここでは低融点の有機フィルムをパイプ状に成形したものをモルタル供試体中に埋設し、供試体全体を加熱することでパイプ表面のフィルムを融解させて、細孔ネットワークの作製が可能であることを確認している。ただし、この手法では内包補修剤をパイプで保護することができないため、補修剤の反応開始の条件や保存方法などに大きな制限を受けることとなる。

3.3.2 アクティブ型自動修復コンクリート

ここで取り上げるアクティブ型自動修復とは、先に述べたパッシブな自動修復機能の手法を更に進めた形として提案されるものである。すなわち、ガラスパイプや補修剤といった実際に補修を行うためのデバイスに加えて、これらのデバイスを確実に起動させるために、外部からの入力によって機能を発揮するデバイスを併設し、ひび割れ発生箇所での選択的な駆動により、一層確実な自己修復が可能となることが期待される。

(1) 発熱デバイスの利用

西脇ら[16-18]は、自己診断材料と呼ばれる炭素材料センサ（次節 3.3.3 にて詳述）を発熱デバ

イスとして利用し、熱可塑性パイプを併設して自動修復機能を付与することを提案している。この自己診断材料とは、ひずみを受けた場合にそのひずみ位置で局所的に抵抗値が上昇し、ひずみが除去された場合にもその抵抗上昇を保持することのできる特徴を持った材料である。そのため、ひずみの履歴を受けた自己診断材料に対して通電を行うと、抵抗の分布からそのひずみ箇所において発熱が集中する。すなわち、コンクリート中に埋設して利用することで、ひび割れ発生箇所を選択的に加熱することが可能である。この自己診断材料と、補修剤を内包する熱可塑性の材料で構成されたパイプを併せてコンクリート中に埋設することにより、図-3.3.2.1に示す概念図のように、母材であるコンクリートにひび割れが発生した場合、その周囲で選択的な加熱が可能となり、これと並行して埋設されたパイプを融解させて、補修剤がひび割れ中に放出させる、自動修復機能の付与が可能になるものと考えられる。

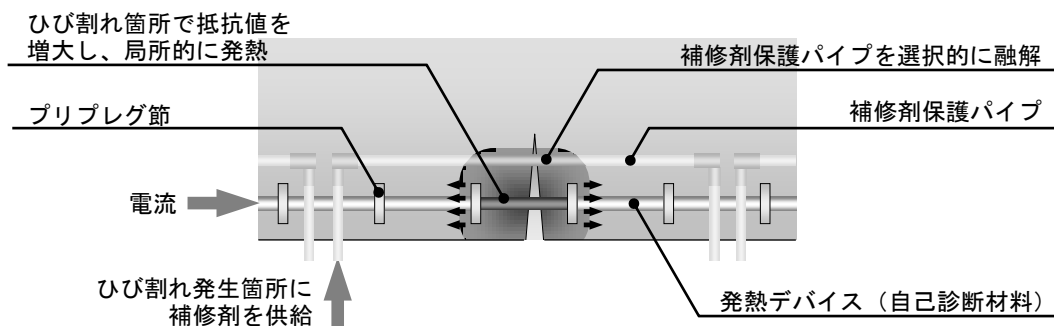
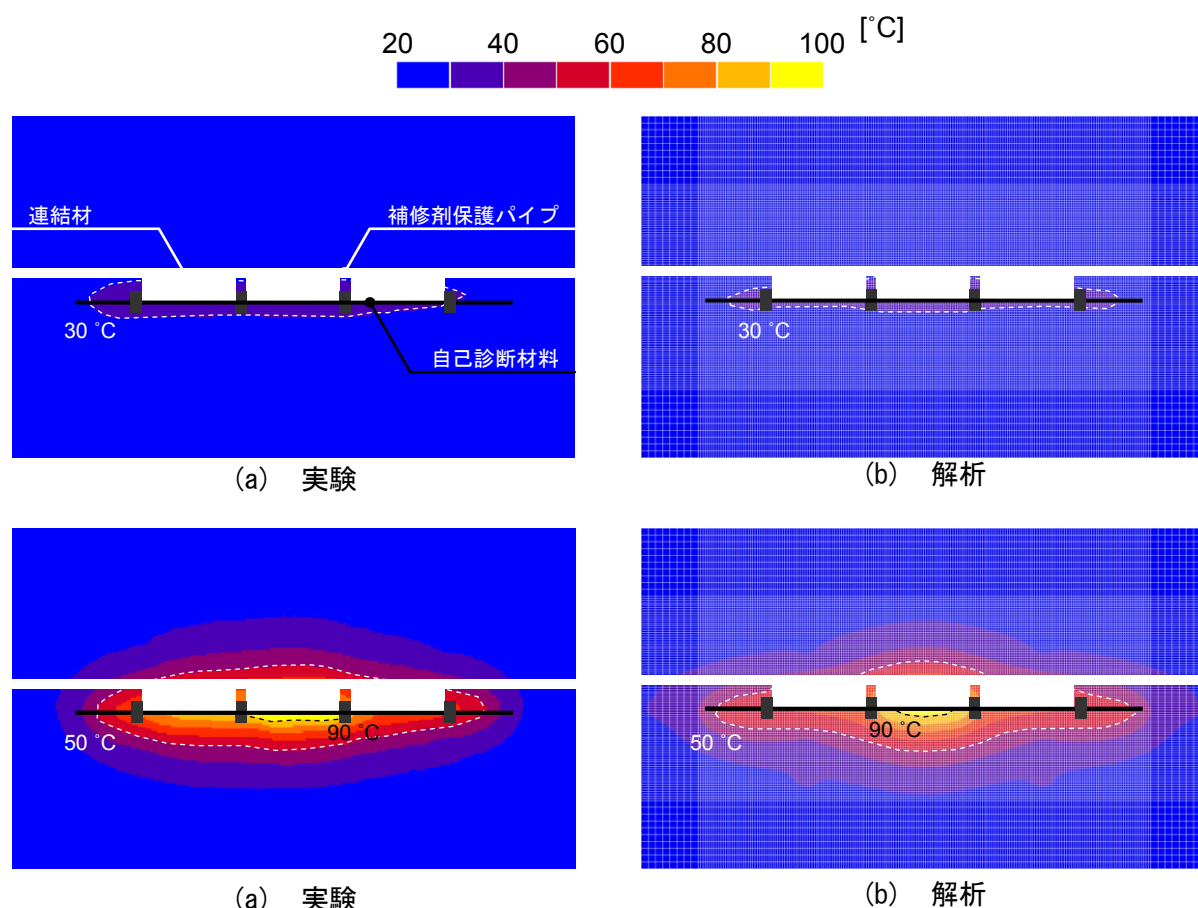


図-3.3.2.1 発熱デバイスを利用したアクティブ型自動修復の概念図[18]

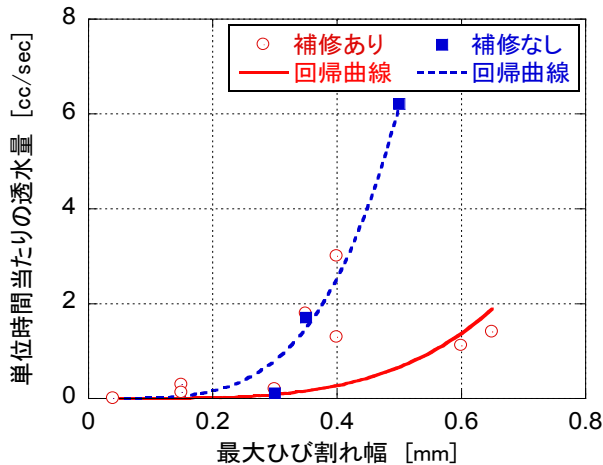
これまで実験室レベルでの検討が行われており、図-3.3.2.2に示すようにひび割れ周囲での発熱デバイスの抵抗上昇と、それに伴う選択的な発熱が実験および3次元熱伝導解析を通して確認されている[17-19]。これらの機能をより確実かつ効率よく発現させるために、各要素の熱特性や発熱量をパラメータとして熱伝導解析を行い、発熱デバイスと補修剤保護パイプの配置について検討が行われている[20]。コンクリートやモルタルを介して補修材保護パイプを融解させるのに十分な熱量を得ることは容易でないため、これらを金属板等によって互いをつなぐ連結材ユニットをして一体化することも提案されている。このことによって、各要素の配置精度の向上や、施工時のハンドリングについても改善が見られた[21,22]。また、コンクリート内部での配置計画ひび割れ幅と発熱増加量の関係を定量的に把握することを目的として、母材コンクリートに生じるひび割れの幅を自己診断材料のひずみに変換させるために、プリプレグ節の取り付けなどの自己診断材料自体の改良検討も行われている[23]。



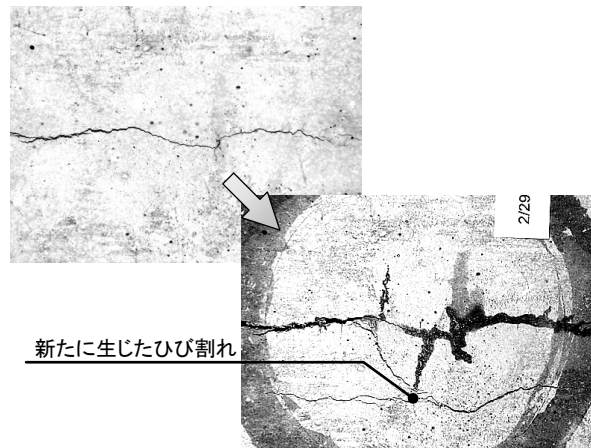
図－3.3.2.2 供試体表面の温度分布[19]

自動修復の効果を確認するためのパラメータには、水密性と力学性能の回復が取り上げられている。図－3.3.2.3は、提案されている自動修復機構を導入した供試体に対して透水試験を行った際の、供試体に生じた最大ひび割れ幅と単位時間当たりの透水量の関係である[19]。この図からは、自己修復による補修の行われた供試体（図中の「補修あり」）では、補修が行われなかった供試体（図中の「補修なし」）と比較して、特に最大ひび割れ幅が 0.6mm 以上の場合に単位時間当たりの透水量を小さくできることが確認できる。

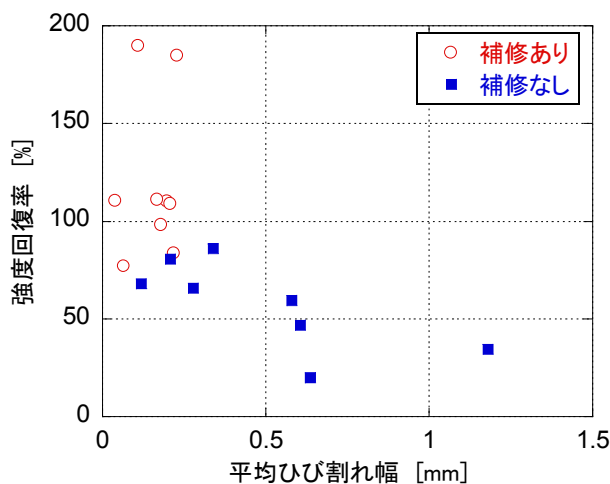
図－3.3.2.4は、通電の前後における供試体表面でのひび割れの様子である。ひび割れ周囲に対する加熱によって、補修剤保護パイプがこの近傍で選択的に融解し、補修剤がひび割れへと放出されていることが確認できる。また、自動修復が行われた供試体に対して再び載荷試験を行った際に得られた最大荷重を、1回目の載荷試験時に得られた最大荷重で除して比を求め、この比を強度回復率と定義し、また、これと同様に載荷試験の際の荷重と載荷点変位のグラフの傾きを剛性として定義し、再載荷の際の剛性を初回載荷時の剛性で除して得られる比を剛性回復率として定義して力学特性の回復の評価を試みている。図－3.3.2.5および図－3.3.2.6は、供試体表面で観察された平均ひび割れ幅と、強度回復率および剛性回復率の関係を示したグラフである。これらの図からは、強度と剛性いずれの場合も自動修復が行われた供試体で回復率が100%を超えるものが見られる一方で、修復の行われなかった供試体では強度回復率、剛性回復率とも100%を超えるものは見られない。[19]



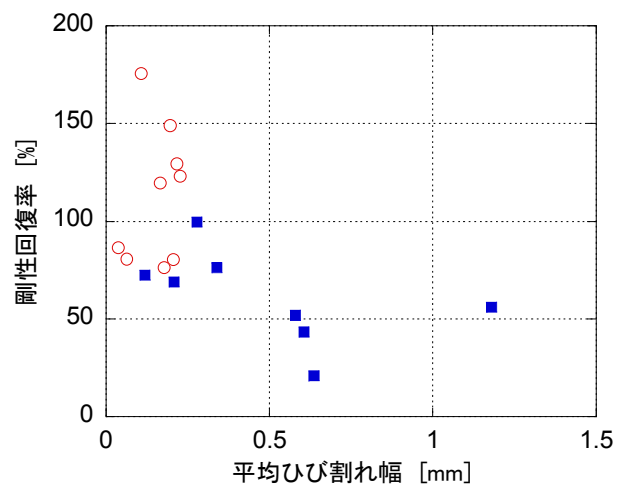
図－3.3.2.3 最大ひび割れ幅と単位時間当たりの透水量の関係[19]



図－3.3.2.4 供試体表面のひび割れ[19]



図－3.3.2.5 平均ひび割れ幅と強度回復率の関係[19]

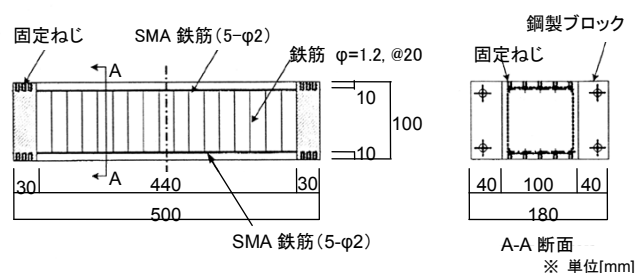


図－3.3.2.6 平均ひび割れ幅と剛性回復率の関係[19]

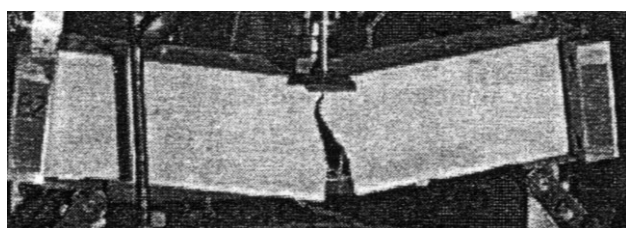
(2) SMA の利用

温度変化によって起こる相転移によって、塑性域に達する変形を受けた後でももとの形状に復元する形状記憶合金（Shape Memory Alloy、以下 SMA）を用いてコンクリートに自己修復機能を付与する検討も行われている。Sakai[24]は、図－3.3.2.7 に示すように、主筋に SMA を用いたモルタル供試体に対して曲げ載荷試験を行い、自己修復機能の付与が可能であることを確認している。供試体の上下には、主筋としてそれぞれ5本の Ti-Ni SMA（直径 2mm）が埋設されており、モルタルの両端に取り付けられた金属のブロックに、ねじを用いて固定されている。また、比較対象として、通常の炭素鋼を使用した供試体も用意し、同様の載荷試験を行っている。これらの供試体に対して3点曲げ載荷を行ったところ、SMA を使用した場合の変形量は、通常の鉄筋を用いた場合の 10 倍程度まで到達しても破断することはないことが確認されている。最大荷重時には図－3.3.2.8 に示す写真のような大きなひび割れが確認されたが、除荷後には図－3.3.2.9 のようにひび割れの復元が可能であることが示された。このように、ここでは最大荷重時のひび割れ幅と、除荷後のひび割れ幅の比較によって自己修復効果の評価を行っている。しかし、最大

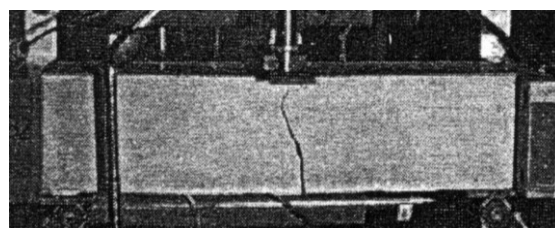
変形に至る過程で、SMA とモルタルの付着が完全に破壊されることも確認されている。ひび割れ幅が小さく閉じられたことで有効な自己修復効果と判断することが妥当かどうかは議論の余地があると考えられる。



図—3.3.2.7 供試体の形状[24]



図—3.3.2.8 最大荷重時の変形[24]



図—3.3.2.9 除荷後の変形[24]

3.3.3 モニタリング（センシング）技術との融合

ここでは、自動的な自己修復を行う過程でモニタリング（センシング）機能の活用を図り、損傷の発生の検知（予知）、またその場所の特定をモニタリングが担い、その情報を修復機能に伝えたり、修復機能のトリガーとしたりすることにより自己修復を図る技術に関して検討を行う。まず、モニタリングの基本的な情報を整理し、自己修復と関連の高い技術に関する技術の情報をまとめる。

(1) 対象となるモニタリング技術

スマート材料等を用いたヘルスモニタリングの研究は、機械・プラント分野や建築・土木分野において、国内外で比較的早くから進められてきている[25,26]。最近になって、社会基盤構造物の高経年化による劣化・損傷の発生が社会的問題となり、建築物・土木構造物の維持管理技術としてのヘルスモニタリングの利用が注目を集めている[27]。そして、様々な研究機関において精力的な研究が進められるようになってきた[28]。特に、コンクリート構造物のヘルスモニタリング技術については、土木学会の委員会等により調査、検討が進められ、その成果がまとめられている[29]。ここでは、その成果をもとに、ヘルスモニタリングの概要をまとめ、自己修復に関連があると考えられる情報を整理して示す。

ここで、ヘルスモニタリングという用語は、様々な定義で用いられることが少なくない。前出の Housner ら[25]によると、ヘルスモニタリングは「構造物に設置した（非破壊）センサにより、歪みや変位・変形、あるいは加速度等の物理量（応答）を計測し、その解析により構造物の特性や損傷や劣化を示す特性値の変化を検知する考え方であり、狭義にはそのための手段、方法、装置を指す」と定義されている。同様に、前述の土木学会の委員会報告[29]では、ヘルスモニタリング（SHM）を、「構造物の健康状態と挙動（健全性）を継続的に監視する調査や検査行為」と

定義し、「その思想により構築されたシステムを SHM システムと言う」としている。一般的には、センシングやデータ処理、評価手法等が含まれるが、ここでは主にセンサ材料／手法に関するまとめを行う。

さらに、モニタリングによる評価は、図－3.3.3.1 に示すように、モニタリングを適用する要求性能、構造物の種類、計測対象、計測する指標等により異なり、様々な技術が含まれる。また、構造物の全体レベルを見るか、部材レベルを見るか、さらには計測をどの程度の頻度により行うかによっても、適切な技術の分類、選定が求められる。なお、図中には本項での主な検討対象となると考えられる項目を丸で囲んで示している。

要求性能	対象構造物	対象材料	計測指標	その他
安全性能 使用性能 第三者影響度 <u>耐久性能</u>	<u>橋梁</u> トンネル ダム 港湾施設／他	<u>コンクリート</u> 鋼材・鉄筋 土・石 木材／他	<u>変形・ひずみ</u> <u>ひび割れ</u> 加速度 温度／他	構造レベル (全体・ <u>部材</u>) 計測頻度 (動的・ <u>静的</u>)

図－3.3.3.1 検討対象のモニタリング

前述のように、自動的な修復機能を担保しうるモニタリング技術としては、コンクリートのひび割れの発生を検知し、その場所を特定することが求められる。そして、その情報に基づいて、自律的あるいは選択的に治癒の機能を発揮させることとなる。また、評価対象は部材レベルとなるが、コンクリート部材にひび割れが発生しうるある程度の範囲をカバーできるような、面状、線上の計測が可能であることも重要である。さらに、自己修復として対応可能な微細なひび割れの検知の観点では、モニタリング手法のひずみ分解能についての検討も必要と考えられる。コンクリートの歪みやひび割れの計測に用いられるモニタリング技術は幾つか提案されているが、以下では自己修復への適用性可能性を有するものとして、光ファイバを用いた計測技術と、炭素材料を用いた技術について概説する。

(2) 光ファイバを用いた計測技術

構造ヘルスマニタリング技術としては様々な手法が提案されているが、近年最も注目を集めているものとして、光ファイバをセンサとして用いた計測手法がある。光ファイバを用いたモニタリング手法は、軽量であること、電磁波障害を受けないこと、1本の計測ケーブルで広い範囲の計測が可能であること等の特徴を有し、様々な対象構造物に適用が図られている。また温度、歪み、変形等の多くの物理量の計測に対しても適用が可能である。光ファイバを用いたモニタリング手法はその計測原理によって幾つかの方式に分類されるが、建築物・土木構造物の構造性能評価においては、損失変化形センサ、干渉計形センサ、FBG センサ、分布形センサ等の方式が一般に用いられている[30]。

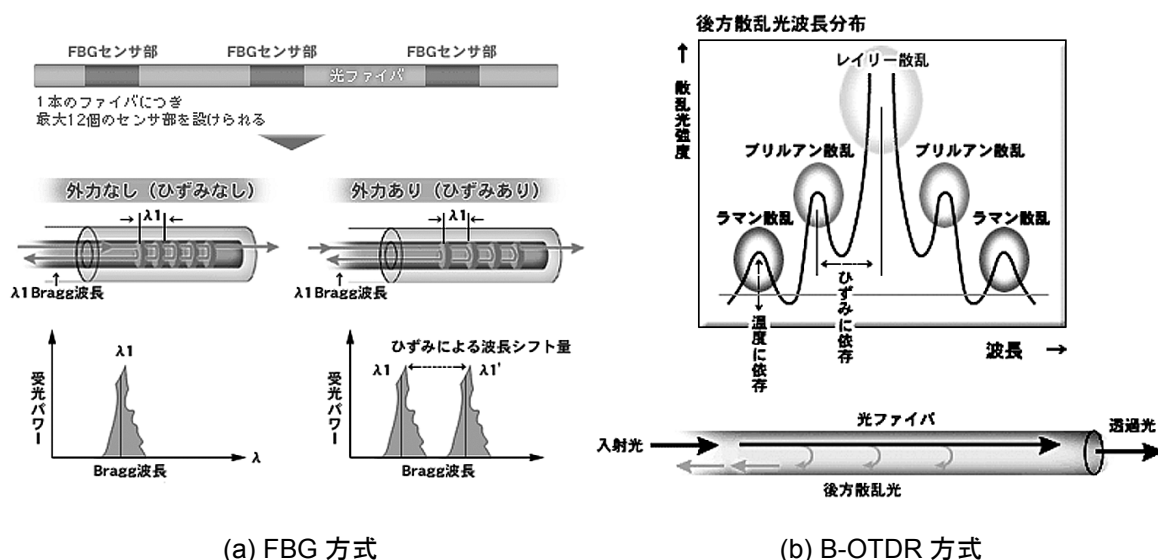


図-3.3.3.2 主な光ファイバ計測手法（NTT InfraNet ホームページより抜粋）

損失変形センサは、ファイバ内を伝播する光の強度変化を利用したものである。最もシンプルな方式としては、光ファイバの破断によって損傷検知を行う手法が用いられているが、一般的には損傷検知の感度が十分には高くない。これに対して、干渉計形センサは光の干渉を利用して、歪や温度によるファイバの長さや屈折率の変化を計測する手法であり、損失変形センサと比べて高感度な計測が可能となる。津田ら[31]は歪を精度良く計測することができる手法として、マイケルソン光干渉計型光ファイバセンサを用いた CFRP 損傷モニタリングの研究を行い、CFRP 構造体の微小損傷検知の可能性を示している。また、ファブリペロー干渉を利用して、光ファイバの先端部に 2 つのハーフミラーを対向させて置き、干渉した反射光を測定してハーフミラーの間隔変化を検出するひずみ／変位計も開発されており、実際の計測にも用いられている。

FBG センサは、図-3.3.3.2(a)に示すように、光ファイバのコアに格子を加工し、格子間隔により決まる特定の波長のみ反射する性質を利用した計測手法であり、1 本のファイバにより多点計測が可能となる特徴を持つ。FBG センサは近年最も注目されているヘルスモニタリング技術の一つであり、コンクリート構造、複合材料等への適用が広く進められている。また、FBG センサを用いた傾斜計、沈下計、加速度計などの各種の計測器が開発され、実用化が進められている[32]。コンクリート構造物への適用としては、RC セグメントの鉄筋に FBG センサを貼り付け、施工中のひずみ変動の計測を図った例がある[33]。また、岩城ら[34]は FBG センサを用いた変位計により、実際の建築物の制震部材の振動計測を行っている。さらに、FBG センサは他の光ファイバの計測方式に比べて、サンプリング周波数やひずみ計測精度などの面で優位性を持つため、供用下の実際の橋梁に適用を図り、計測されたひずみ履歴から交通荷重を算出する Weigh-In-Motion を実現した例も見られる[35]。ただし、FBG 方式は本来離散的な点を対象とする計測手法であるため、広範囲に広がるひび割れの計測への直接的な適用は難しい。最近になって、FBG センサの両端をチューブなどに通し両端を固定することによりロングゲージ化し、そのロングゲージセンサを連続的に配置することにより分布センシングを可能とした研究などが行われている[36]。このような対策により、自己修復への適用可能性もあると考えられる。

ここまで示した光ファイバ計測手法は、局所的、あるいは多点の離散的な箇所の損傷検知を

行うものであるが、分布形のセンサはファイバの経路に沿った連続的な位置の物理量の変化を計測するものである。分布型の計測手法の中で最も基本的な計測方式としては、OTDR (Optical Time-Domain Reflectometry) 法がある。ひずみ計測感度が低く、一般的にはケーブルの断線の検知等に用いられる手法である。最近の適用事例は少ないが、順次破断するように光ファイバを設置したセンシングユニットを作成し、コンクリート杭の損傷検知へ適用した研究などが見られる[37]。

近年実用化が進められている B-OTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) は、図-3.3.3.2(b)に示すように、光ファイバの経路中から戻ってくる後方散乱光のうち、ブリルアン散乱光の周波数が光ファイバのひずみに比例してシフトする特性を利用している。このシステムは、長距離（数 10km 程度）にわたる任意の位置のひずみが計測可能であるが、微小な散乱光のスペクトル解析に多くの時間を要するために、静的な歪み計測のみに適用されている。これまでに、河川堤体の地盤の変形計測、トンネル施工管理計測、地中埋設パイプラインの管理計測等、様々な構造物への適用が図られている。最近では、海外の長大橋梁に光ファイバケーブルの大規模な敷設を図り、施工時、供用時を通じたモニタリングの実現を図ったものが見られる[38]。

B-OTDR 方式では、空間分解能が 1m 程度にとどまることが実用上の課題となることが少なくないため、計測方法を改良して測定精度の向上を図ったシステムも近年開発されてきている。PPP-BOTDA (Pulse-Prepomp Brillouin Optical Time Domain Analysis) は、パルス光の入射の前に適当な幅のプリ・ポンプパルス (PPP) を注入し、スペクトル形状の最適化を図るとともに、パルス光の入射端とは反対側からもプローブ光を入射するものである。その結果、空間分解能は 10cm 程度、精度も 25 $\mu\epsilon$ オーダーと大幅な性能向上が図られている[39]。呉らは PPP-BOTDA 方式の計測システムを用いて、PC 梁に発生するひび割れの発生位置の特定とひび割れ発生前後のひずみ変動の検知が可能であることを実験により示している[40]。自己修復の対象となる微細なひび割れの検知に対して、適用の可能性があると考えられる。

欧州では光ファイバの信号計測手法を簡略化した変位計測技術の開発が進められ、様々な構造物に適用されるとともに、汎用的な計測技術として商業的にも成立するレベルとなっている。その一つに、経路中の曲がり（マイクロベンディング）において、光が外部に漏れファイバ内部を通過する光の強度が減少する原理を利用して、赤外線が減衰率から光学ストランド部の 2 点間に生じた相対変位を計測する OSMOS (Optical Strand Monitoring System) という手法がある。トンネル・ダム・橋梁等の社会基盤構造物に 100 例以上の実績を持ち、パリのエッフェル塔では 10 年近くの連続モニタリングを行っている事例もある[41]。また日本国内においても、免震構造物の基礎梁の乾燥収縮の計測に適用された研究[42]や、RC 建築物の壁部材に発生したひび割れを長期間にわたってモニタリングした研究[43]などが見られる。もう一つの SOFO (Surveillanced' Ouvrages par Fiber Optiques) という方式は、組み合わされた 2 本のファイバの干渉を利用した計測手法である[44]。20cm から 10m までの二点間の変位計測に対応可能で、分解能は 2mm と優れた特性を持ち、ビルやトンネル、ダムなどの構造物に適用が図られている[45]。元々は静的計測を対象とする計測手法であったが、最近は動的な計測が可能なシステムも開発されている。

(3) 炭素材料の導電性に基づくセンサ

上記のモニタリング技術は、いずれもセンシング機能を持たせる材料を構造物中に埋め込むことにより変形や損傷の検知の実現を図るものである。一方、部材を構成する材料自体の性質をセ

ンサとして用いる手法の研究も行われている。その中でも、CFRP 部材の炭素繊維が持つ導電性に着目して、電気抵抗値の計測によって構造物の健全性をモニタリングする手法は良く知られている。炭素繊維の導電性を利用したセンサの考え方は比較的古くから提案されており、様々な研究が行われている。損傷検知性能を持つ材料自身をコンクリートの補強材、添加剤として用いることができるため、自己修復材料と連携する材料としては適用性が高いと考えられる。

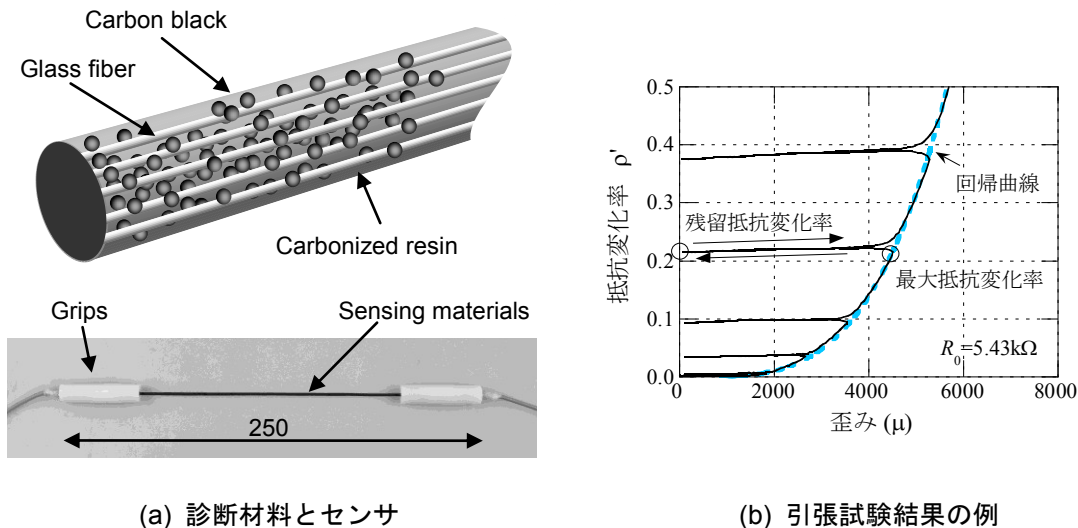
土木構造物、建築物を対象とした研究としては、柳田[46]が炭素繊維ガラス繊維強化プラスチック(CFGFRP)を鉄筋コンクリート構造物の鉄筋に代わる補強部材として用い、構造体として機能すると同時に、自ら損傷を検知する自己診断機能を持たせ、インテリジェント材料として提案したものがある。この材料では、導電性を持つ炭素繊維は強度が大きい一方で破断歪みが小さいため、ガラス繊維を加えることによって材料としての粘りを確保して、構造部材としての利用を可能とされている。また、歪みが除去された後も抵抗値が残留するため、過去の歪みの記憶性能を持つことが示されている[47]。CFGFRP 材はその特性を活用し、高層ビルの床版のひび割れ検知に適用された例や、防犯機能のためのセンサとして金庫の壁面の鉄筋の代わりに使用された例などが見られる[48]。インテリジェント材料はそのコンセプトは高く評価されたが、コスト面での制約が大きく、一般的な普及展開には至っていない。

炭素繊維を検知材としてコンクリート構造物の損傷検知に適用した研究としては、石井ら[49,50]がコンクリート杭の健全性モニタリングのためのセンサを開発し、部材試験や構造体試験によりその特性と損傷検知性能を明らかにしている。また、実構造物への適用を図り、その有効性を確認した結果が示されている[51]。Adachi らも CFRP のロッドをセンサとして利用し、RC 構造物の損傷検知への基本的な適用性を検討している[52]。また、特性の異なる線維種を複合することにより、広い歪み範囲に応答する HCFRP センサを開発した研究なども進められている[53]。このセンサは既設の PC ボックス橋に適用され、ひび割れの発生と進展が検知可能であることが確認されている[54]。ただし、炭素繊維を検知材として用いた場合は、一般的には低ひずみ領域での抵抗変化の立ち上がりが鈍く、ひずみ分解能が十分高くは無い傾向が見られる。また、繊維の破断状況にばらつきが生じやすく、性能の安定化が課題となることもある。

炭素材料としては、長繊維のみではなく短繊維や炭素粉末を利用したセンサ技術の提案も行われている。Chen and Chung[55]は、コンクリート中に炭素の短繊維を混入し、引っ張り、圧縮、曲げ試験を行い、電気抵抗計測によって材料の健全性評価のためのセンサとして活用することが可能であることを示している。それによると、繊維材料や他の混和材の混入によって、損傷検知性能とともに材料強度や疲労強度の改善を図ることができるとしている[56]。また、Xiao and Li[57]はカーボンブラックをコンクリート／モルタル中に混入することにより圧縮ひずみの検知能力を持つスマートコンクリート／モルタルを開発し、部材試験により有効性を確認している。また最近では、カーボンナノチューブのシートを層状に成型し、圧縮ひずみセンサや腐食センサとして利用を図った研究も見られる[58,59]。

奥原らは炭素粒子を用いた自己診断機能を持つ複合材料として、長繊維強化複合材料のマトリックス樹脂中に炭素粒子を分散させた材料を開発し、自己診断材料として提案している[60,61]。診断材料の概要と特性を図-3.4.4.3 に示す。図中(a)は診断材料とセンサの概要、(b)は引張試験時の抵抗変化の例である。彼らは FRP 中に分散させる炭素粒子の材料や分散方法について継続的に研究を進め、小さな歪み領域からの検知機能を持つ材料や、受けた歪みの最大値を記憶する機能(図-3.4.4.3(b)参照)を持つ材料などの開発成果を示している。最近の研究成果としては、

カーボンブラックを樹脂中に分散させ、ガラス繊維複合材料として成形した後、窒素雰囲気中で炭素化させることによって、優れたひずみ検知性能と記憶性能を達成している[62,63]。さらに、損傷検知センサとしての診断材料の利用を図り、土木構造物・建築物への適用性の実験的な検討が進められている[64]。また実用化に向けた検討として、性能の安定化と大量生産を可能とする引き抜き成形法による製造システムの構築や、各種の構造物に適用可能な計測デバイスの開発事例などが見られる[65]。なお、3.3.3(2)において示した発熱デバイスを利用した自動修復が、この診断材料と修復材料を連携して自己修復を図った研究の事例の1つである。



図－3.3.3.3 自己診断材料の概要[63]

<参考文献>

- [1] 柳田博明・山吉恵子：テクノデモクラシー宣言、丸善ライブラリー、pp.54-60、1996
- [2] Kessler, M. R. et al.: Self-healing structural composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 34(8), pp. 743-753, 2003
- [3] 沼尾達也・福沢公夫・三橋博三：補修剤封入による自己修復機能付加に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No.1、pp.97-102、1999
- [4] Dry C.M.: Design of Self-growing, Self-sensing and Self-repairing Materials for Engineering Applications, *Proceedings of SPIE*, Vol. 4234, pp.23-29, 2001
- [5] Li V. C. et al.: Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite. *Composites Part B: Engineering* 29(6), pp. 819-827, 1998
- [6] Joseph C., Jefferson A.D., Cantoni M.B.: Issues Relating to the Autonomic Healing of Cementitious Materials, *Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials*, 18-20 April 2007, Noordwijk aan Zee, The Netherlands, (eds. A.J.M. Schmetts & S. van der Zwaag) Springer 2007
- [7] Joseph C. and Jefferson A.D.: State of the art report on self-healing materials, *Cardiff School of Engineering, Internal report no. 3131*, 2006
- [8] 三橋博三：コンクリートの自己修復—事故を防ぐコンクリートのスマート化—、「ここまで

- きた自己修復材料」、pp.159-180、工業調査会、2003
- [9] 西山直洋・三橋博三・小林利充・花田南：インテリジェント材料によるセメントの水和熱制御に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.21、No.1、pp.79-84、1999
- [10] Nishiwaki T., Leite J.P. de B., Mihashi H.: Enhancement in Durability of Concrete Structures with Use of High-Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites, *Proceedings of the Fourth International Conference on Concrete under Severe Conditions: Environment & Loading; CONSEC'04*, Vol. 2, pp. 1524-1531, 2004.6
- [11] Dry C.M.: Design of Self-growing, Self-sensing and Self-repairing Materials for Engineering Applications, *Proceedings of SPIE*, Vol. 4234, pp.23-29, 2001
- [12] Dry C.M.: Preserving Performance of Concrete Members under Seismic Loading Conditions, *Proceedings of SPIE*, Vol. 3325, pp.74-80, 1998
- [13] Dry C.M.: Smart bridge and building materials in which cyclic motion is controlled by internally released adhesives, *Proceedings of SPIE*, Vol. 2719, pp.247-254, 1996
- [14] Ou J.P. and Li H.: Smart Concrete and Structure, Proc. Int. Workshop on Durability of Reinforced Concrete under Combined Mechanical and Climatic Loads, pp.83-91, 2005
- [15] 西脇智哉・水上卓也・三橋博三・杉田稔：コンクリートに対する自己修復機能付与のための細孔ネットワーク作製に関する実験的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、A-1 材料施工、pp.121-124、2005.9
- [16] Nishiwaki T., Mihashi H., Jang B.K., Miura K.: Development of Self-healing System for Concrete with Selective Heating around Crack, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 4, No. 2, pp.267-275, 2006.6
- [17] 西脇智哉・三橋博三・張炳國・杉田稔：発熱デバイスを利用した自己修復機能を有するインテリジェントコンクリートの開発に関する基礎的研究、コンクリート工学論文集、Vol. 16、No. 2、pp.81-88、2005.5
- [18] 西脇智哉・三橋博三・郡司幸弘・奥原芳樹：自己修復コンクリートの開発を目的とした機能要素の開発に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.29、No.2、pp.817-822、2007.7
- [19] 西脇智哉・三橋博三・奥原芳樹：自己修復コンクリートの性能回復評価に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文集、印刷中
- [20] 西脇智哉・三橋博三・三浦和晃・張炳國：コンクリートに対する自己修復機能付与のための解析的検討、セメント・コンクリート論文集、No.59/2005、pp.469-476、2006.2
- [21] T. Nishiwaki, H. Mihashi, Y. Gunji, Y. Okuhara: Development of smart concrete with self-healing system using selective heating device, *Proceedings of the Fifth International Conference on Concrete under Severe Conditions: Environment & Loading; CONSEC'07* (Tours, France), Vol. 1, pp. 665-672, 2007.6
- [22] 西脇智哉・三橋博三：連結材ユニットを利用した自己修復コンクリートの補修効果に関する実験的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、A-1 材料施工、pp.249-250、2008.9
- [23] 西脇智哉・三浦和晃・三橋博三・奥原芳樹：自己修復コンクリートの開発を目的とした発熱デバイスに関する検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.28、No.1、pp.2111-2116、2006.7

- [24] Y. Sakai, Y. Kitagawa, T. Fukuta, and M. Iiba: Experimental study on enhancement of self-restoration of concrete beams using SMA wire, *Proceedings of SPIE*, Vol. 5057, pp.178-186, 2003
- [25] Housner, G. W., et. al.: SPECIAL ISSUE: Structural Control: Past, Present, and Future, *J. of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.123, No.9, 1997.9
- [26] 山本鎮男編：ヘルスマニタリング、共立出版、1999.8
- [27] 藤野陽三：センシングから見た都市空間における安全安心問題への取り組み、システム／制御／情報、Vol.50、No.10、pp.371-375、2006
- [28] 土木学会メンテナンス工学連合小委員会編：社会基盤メンテナンス工学、東京大学出版会、2004.3
- [29] 土木学会コンクリート委員会：コンクリート構造物のヘルスマニタリング技術、土木学会コンクリート技術シリーズ No.76、2007.4
- [30] 武田展雄・岡部洋二：光ファイバセンサを用いた複合材料のヘルスマニタリング技術、日本機械学会論文集（A 編）、Vol.67、No.655、pp.24-29、2001.3
- [31] 津田浩・池口貴信・高橋淳・永井英幹・剣持潔：Michelson 光干渉型光ファイバセンサの CFRP 損傷モニタリングへの適用、日本複合材料学会誌、Vol.24、No.3、pp.96-105、1998
- [32] 藤橋一彦・藤川富夫・前田泰男・平田洋一・小松宏至：BOTDR・FBG・OTDR 各方式の光ファイバ変位計の開発、土木学会年次学術講演会講演概要集第 6 部、Vol. 59、2004.9
- [33] 藤橋一彦・前田泰男・大石敬司・小泉淳：RCセグメントを対象とした FBG センサによるひずみ計測の適用性について、土木学会年次学術講演会講演概要集、3-107、Vol. 61、2006.9.
- [34] 岩城英朗・山川裕司・柴慶治：FBG センサを用いた建築構造物のヘルスマニタリングシステム、第 2 回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集、pp.39-42、2000
- [35] 小林裕介・三木千壽・佐々木栄一：FBG 光ファイバセンサによる Weigh-In-Motion システムの構築、応用力学論文集、Vol.X、pp.1-8、2003.8
- [36] Yang, K., Araki, H., Yabe, A. and Wu, Z.: Load Identification of Flexural RC Structures Using Distributed FBG Sensing System, Proc. 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Vancouver, Canada, Paper-9, 2007.9
- [37] 加藤洋一・田村昌仁・勅使川原正臣・坂田光児：光ファイバーを利用した杭の損傷検知センサーの開発 その 1～その 2、日本建築学会学術講演梗概集、21004-21005、2005.9
- [38] 岩城英朗・稲田裕・若原敏裕：光ファイバ分布センサを用いた長大斜張橋モニタリング、土木学会年次学術講演会講演概要集、1-031、Vol. 63、2008.9
- [39] 岸田欣増・李哲賢・林縄績・西島憲一：パルス・プリポンプ方式を用いた高分解能ブリルアン計測の理論検討、信学技報、電子情報通信学会、pp.15-20、2004
- [40] 呉智深・岩下健太郎・薛松濤・張浩：高分解能分布型光ファイバセンサによる PC 構造物のひび割れモニタリングに関する実験的研究、コンクリート工学論文集、Vol.18、No.2、pp.49-57、2007.5
- [41] 門万寿男・佐藤拓哉：光ファイバによる構造モニタリングシステム、産業機械、Vol.614、pp.38-41、2001
- [42] 松浦恒久・酒井和三・若本武三・岩上寛次・島崎和司：大型免震構造物における乾燥収縮の

- 計測、コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム
論文集、日本コンクリート協会、pp.299-304、2001.7
- [43] 村瀬豊・加藤佳孝・勝木太・魚本健人：光ファイバセンサによるひび割れを有した壁部材の
長期モニタリング、土木学会年次学術講演会講演概要集、V-098、Vol. 58、2003.9
- [44] Inaudi, D.: State of the Art in Fiber Optic Sensing Technology and EU Structural
Monitoring Projects, Proc. of Structural Health Monitoring and Intelligent
Infrastructure, Vol.1, pp.191-198, 2003.11
- [45] Sumitro, S., Okada, Y., Saitoh, K., Takanashi, S. and Inaudi, D.: Long Gauge Optical
Fiber Sensors Monitoring on Deteriorated Structure Deformational Properties, Proc. of
Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Vol.2, pp.1277-1285,
2003.11
- [46] 柳田博明：次世代材料 インテリジェントマテリアル「賢い材料」が築く 21 世紀の技術、
講談社ブルーバックス、190p、1993
- [47] 杉田稔：建設分野における賢材の適用例、機能材料、Vol.15、No.1、pp.10-16、1995
- [48] Muto, N., Yanagida, H., Nakatsuji, T., Sugita, M. and Ohtsuka, Y.: Intelligent CFGFRP
Composites with Self-Diagnosis Function for Preventing Fatal Fracture, Sensors and
Materials, Vol.6, No.1, pp. 45-62, 1994
- [49] 石井清・稲田裕・杉村義広：炭素繊維束センサの開発と性能評価 杭の健全性モニタリング
手法の開発（その 1）、日本建築学会構造系論文集、No.557、pp.129-136、2002.7
- [50] 稲田裕・石井清・杉村義広・佐々木建一：炭素繊維束センサの杭損傷検知に対する性能評価
杭の健全性モニタリング手法の開発（その 2）、日本建築学会構造系論文集、No.563、pp.91-98、
2003.1
- [51] Inada, H., Ishii, K. and Sugimura, Y.: Application of carbon fiber sensor for monitoring
damage to concrete piles, Proc. 1st International Conference on Structural Health
Monitoring and Intelligent Infrastructures, Nov. 13-15, 2003
- [52] Adachi, Y., Unjoh, S., Kondoh, M. and Ohsumi, M.: Nondestructive Damage Detection
and Evaluation Techniques for Seismically Damaged Structures, Part of the SPIE
Conference on Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways III, Newport Beach,
CA, pp.60-71, 1999.3
- [53] Wu, Z.S. and Yang, C.Q.: Electrical and Mechanical Characterization of Hybrid CFRP
Sheets, Journal of Composite Materials, Vol.40, pp.227-244, 2006
- [54] Wu, Z.S. and Yang,: Distributed Sensing Technologies for Monitoring FRP-strengthened
Structures, Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring, pp.75-84, 2005
- [55] Chen, P.W. and Chung, D.D.L.: Carbon Fiber Reinforced Mortars for In-situ Health
Monitoring by Electrical Resistance Measurement, Symposium on Non-detective
Evaluation and Material Properties II, Pittsburgh, Pa., pp.13-20, 1994
- [56] Chen, P.W. and Chung, D.D.L.: Concrete as a New Strain / Stress Sensor, Composites;
Part B, Vol.27-B, pp. 11-23, 1996
- [57] Xiao, H. and Li, H.: A Study on the Application of CB-filled Cement-based Composite as
a Strain Sensor for Concrete Structures, Smart Structures and Materials, Proc. SPIE,

Vol.6174, 2006

- [58] Loh, K. J., Lynch, J. P. and Kotov, N. A.: Mechanical-electrical Characterization of Carbon-nanotube Thin Films for Structural Monitoring Applications, Smart Structures and Materials, Proc. SPIE, Vol.6174, 2006
- [59] Loh, K. J., Kim, J., Lynch, J. P. and Kotov, N. A.: Multifunctional Layer-by-layer Carbon Nanotube-polyelectrolyte Thin Films for Strain and corrosion Sensing, Smart Materials and Structures, Proc. Vol.16, 2007
- [60] 奥原芳樹・松原秀彰・柳田博昭: 損傷を自己診断する構造物、機能材料、Vol.21、No.6、pp.29-35、2001
- [61] Okuhara, Y., Shin, S-G., Y., Matsubara, H., Yanagida, H. and Takeda, N.: Development of Conductive FRP Containing Carbon Particle for Self-Diagnosis Structures, Proc. SPIE's Smart Structures and Materials, pp.314-322, 2001.3
- [62] Okuhara, Y. and Matsubara, H.: Carbon-matrix composites with continuous glass fiber and carbon black for maximum strain sensing, Carbon, Vol.45, pp.1152-1159, 2007
- [63] 奥原芳樹・松原秀彰: 最大歪記憶センサ、セラミックス、Vol.44、No.3、pp.139-143、2009
- [64] Inada, H., Kumagai, H. and Okuhara, Y.: Experimental Study on Structural Health Monitoring of RC Columns using Self-Diagnosis Materials, Proc. SPIE's Smart Structures and Materials, pp.609-617., 2004.3
- [65] Inada, H., Kumagai, H. Inada, Y. and Okuhara, Y.: Health Monitoring Techniques to Detect Damage to RC Structures Using Self-Diagnosis Materials, Proc. International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructures, CD-ROM, 2007.11

[担当 西脇智哉、稲田裕]

4. 自己治癒／修復の材料科学的モデル

4.1 水和反応に基づくモデル

4.1.1 セメントの未反応量による自己治癒ポテンシャル予測

セメントの自己治癒現象を水和モデル、あるいは水和メカニズムに基づくモデルとして表現しようとする試みが現在までに数例報告されているが、いずれもセメントマトリックスの外に析出する現象の表現、また、それらが力学的にひび割れ間を結合し、見かけの剛性や強度、あるいは物質移動性への影響を定量化するモデルには至っていない。

He らは[1]、コンクリートに生じる微小ひび割れが骨材周囲の遷移帯に生じるという前提のもと、骨材周囲のセメント粒子配置を数値シミュレーションによって評価し、水和反応モデルによって、未水和セメントがどの程度存在するかを計算することで、コンクリートの微細ひび割れの修復を可能とするポテンシャルに関する予測手法の提案を行った。このモデルは、骨材周囲の空間配置の決定に、各粒子に一次元、および回転ベクトルを与え、動的な粒子配置モデルを採用した点にオリジナリティがあるが、そのモデルの検証は実験的には行われておらず、骨材周囲のウォールエフェクトを適切に評価しうるものかについては未回答のままである。また、これらの配置が水和に及ぼす影響に関する考察が不十分であるので、ひび割れ修復性についての定量評価における重要性も未解決である上、水和反応における遷移帯での水酸化カルシウム結晶の疎密の影響も水和反応には考慮されておらず、今後の発展が望まれる。

Ye らは[2]、HYMOSTRUC[3]を用いてマスコンクリートの表層部などを想定したひび割れ修復性の検討を行った。これは、He らと同様のアプローチでランダム配置によって3次元的に粒子配置を行い、型枠面については固定、その他の部位については周期配置を採用してウォールエフェクトを再現したものと仮定して水和率を検討したものである。これは、HYMOSTRUCを用いたKoendersのリボンモデルの応用である[4]。解析の結果、表層から20 μm 以降については、未水和反応のセメントの存在が均一になることで、修復効果をこの領域において期待できるとの考察を行っている。

4.1.2 セメントの未反応量予測を可能とするモデル

セメントの水和反応を数式的に表現したモデルとしては、近藤によるモデル[5]が先駆けであり、水和初期の表面反応律速、潜伏期、拡散律速、および減衰期についてセメントの物理・化学的メカニズムに基づく反応速度式を提案している。この水和反応モデルを工学的に応用することを目指し、簡易な一つの式で表したものが友澤モデルである[6]。この友澤モデルは、温度依存性を考慮できること、平均的な化学量論的な取り扱いを可能としている点で、未反応量予測が可能である。

その後、コンピュータの性能上昇とともに、数値計算分野がコンクリート工学分野にも導入され、セメントの化学反応速度予測には、HYMOSTRUC[3]、CEMHYD3D[7-9]、DuCOM[10-12]、Naviのモデル[13]、CCBM[14,15]、佐川らのモデル[16]、De Shutterのモデル[17]、杉山らのモデル[18]、関らのモデル[19]などが提案されている。これらのうち、CEMHYD3D、関らのモデル以外は、メカニズムに基づく工学式と水和に影響を及ぼす各パラメータの相関を評価し、水和プロセス中の各状態にそれらの影響を加味することで水和反応速度を決定するモデルとなっている。

一方で、CEMHYD3Dは、3次元セル・オートマトンの概念を用いたものである。グリッド

上に区切った空間に各鉱物と水分を配置し、隣り合うグリッド同士が化学的な条件に従って溶解・拡散・水和生成物の析出を行うローカルルールを総体として、セメントの系全体の現象をモデル化している（図-4.1.2.1）。このモデルは、セル・オートマトンを拡張し、ステップ中に化学反応に対して実数分の自由度を許しているため、比較的詳細な化学反応を模擬できる点と、多成分系でも鉱物の相互依存性の問題を容易に表現できる点で優れているが、多成分系の場合で養生温度が変化する場合に関して、セル・オートマトンの1ステップに対する実時間の評価に問題を持つ。現状では、実験値に合う工学的な式を用いることで解決を図っている。

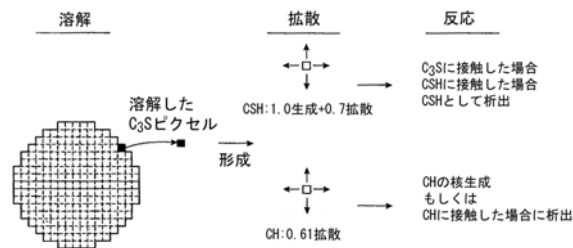


図-4.1.2.1 CEMHYD3Dにおけるセルの概念[7]

また、対象とする系を広げると(現状では一辺 500 μm の立方体で各セルは 1 μm 立方)シミュレーション時間が急激に増大する点や離散化するユニットが最小単位となるため、シリカヒュームの反応など、粒子の大きさが大きく影響を及ぼす現象のモデル化に関してモデル上の課題があるが、工学的なモデルを適用することで、現在までに水分移動も含めたセメントの水和反応の諸現象を表現してきた実績がある。

このような空間における析出の問題を取り扱うことのできるモデルについては、ひび割れ部への物質の析出プロセスを評価できるといった点で、自己修復性、あるいは空間構造の水和生成物の析出による変化を定量的に評価することが可能であると考えられ、今後、自己治癒／修復において利用されることが期待される。

<参考文献>

- [1] He H., et al: Computer Simulation Study of Concrete's Self-healing Capacity due to Unhydrated Cement Nuclei in Interfacial Transition Zones, Proc. 1st Int. Conf. Self Healing Materials, Noordwijk aan Zee, 2007
- [2] Ye G., and van Breugel K.: Potential use of HYMOSTRUC Cement Hydration Model For Self-Healing of Microcracks in Cementitious Materials, Proc. 1st Int. Conf. Self Healing Materials, Noordwijk aan Zee, 2007
- [3] van Breugel K.: Simulation of Hydration and Formation of Structure in Hardening Cement-Based Materials, Ph.D thesis, Delft University, The Netherlands, 1991
- [4] Koenders E.A.B.: Simulation of volume changes in hardening cement-based materials, Ph.D thesis, Delft University of Technology, 1997
- [5] 近藤連一・小玉正雄：水和反応速度に関する考察、セメント技術年報 XXI、pp.77-82、1967
- [6] 友澤史紀：セメントの水和反応モデル、セメント技術年報 XXVIII、pp. 53-57、1974
- [7] Bentz D.P., Coveney P.V., Garboczi E.J., Kleyan M.F., and Stutzman P.E.: Cellular

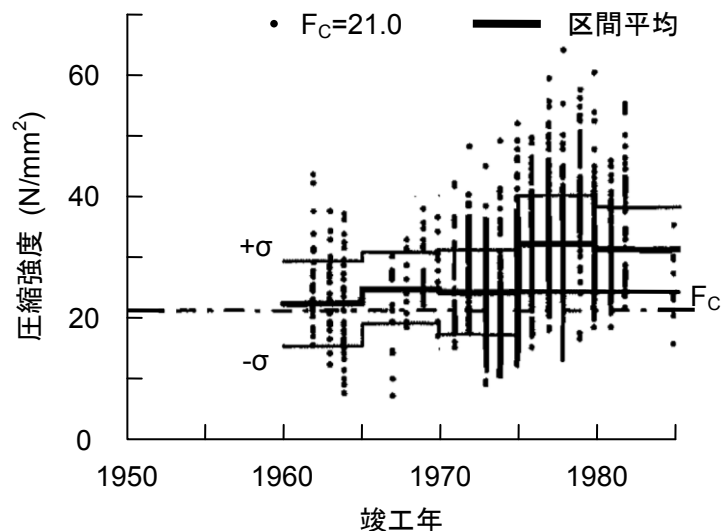
- automaton simulations of cement hydration and microstructure development, *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, 2, pp.783-808, 1994
- [8] Bentz D.P., Waller V., and de Larrard F.: Prediction of Adiabatic Temperature Rise in Conventional and High-Performance Concrete Using a 3-D Microstructural Model, *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No.2, pp. 285-297, 1998
- [9] Bentz D.P.: CEMHYD3D: A Three-Dimensional Cement Hydration and Microstructure Development Modelling Package. Version 2.0, NISTR 6485, National Institute of Standards and Technology, 2000
- [10] 岸利治・前川宏一：ポルトランドセメントの複合水和発熱モデル、土木学会論文集、No.526、V-29、pp. 97-109、1995
- [11] 岸利治・前川宏一：高炉スラグおよびフライアッシュを用いた混合セメントの複合水和発熱モデル、土木学会論文集、No.550、V-33、pp.131-143、1996.11
- [12] 岸利治・小田部裕一：主要鉱物間の反応相互依存性を考慮したポルトランドセメント複合水和発熱モデルの再構築、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、pp. 561-566、2004.
- [13] Navi P. and Pignat C.: Simulation of cement hydration and the connectivity of the capillary pore space, *Adv. Cem. Based Mater.* 4, pp. 58-67, 1996
- [14] 丸山一平・野口貴文・松下哲郎：水和反応モデル(CCBM)によるポルトランドセメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇予測、日本建築学会構造系論文集、Vol.600、pp.1-8、2006.2.
- [15] Maruyama I., Matsushita T., Noguchi T.: Numerical modeling of Portland cement hydration, *Concrete modeling - CONMOD'08*, Proc. of Int. RILEM Symp., edited by E. Schlangen, and G. D. Shutter, 58, pp.155-164, 2008.5
- [16] 佐川孝広ほか：水和物の析出空間を考慮したセメント鉱物の反応率と強度発現、セメント・コンクリート論文集、No.59、pp. 45-52、2005
- [17] De Schutter G., and Taerwe L.: General hydration model for Portland cement and blast furnace slag cement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 3, pp. 593-604, 1995
- [18] Sugiyama H., and Masuda Y.: Mathematical Model for the Hydration of Cement and the Formation of Microstructure Based on the Unsteady Diffusion Theory, *Proceedings of International Workshop on Control of Cracking in Early-Age Concrete*, pp.107-118, 2000
- [19] Sudjono A.S.・関博：セルオートマトン法を用いたポルトランドセメントの複合水和反応モデル、土木学会論文集、No.704、V-55、pp.81-100、2002.5

[担当 丸山一平]

4.2 破壊に基づくモデル

4.2.1 力学性能と自己治癒／修復に期待されるもの

RC 構造物を構成する構造体コンクリートの材料力学性能が長期的に発現不足となる、もしくは初期値から低下する場合があることが指摘されており[1]、構造物の供用期間中に当初の設計値を上回る材料力学性能を安定して確保する上で自己修復機能への期待は大きい。図－4.2.1.1 は、過去の建築物における構造体コンクリートの圧縮強度の確率分布を示した例である[1]。この図は、設計基準強度(図中 F_c で表記)が 21N/mm^2 の躯体から採取した構造体コンクリート (コア強度) のデータを集めたもので、コア強度の平均値は設計基準強度を上回っているが、標準偏差 (図中 σ で表記) を考慮すると、ある確率で同規準強度を下回る場合があることがわかる。この不良現象の原因は詳細には明らかでないが、原因のひとつには施工時の初期養生不足による水和増進の不良と細孔構造の粗大化 (粗大空隙) が関係していると推測される[2]。また、長期的には、アルカリ骨材反応、凍結融解作用、乾燥などにより微細クラックが生じ、材料力学性能の劣化が進むことが明らかとなっており、これらも不良現象の一因と考えられる[3]。これらの粗大空隙や微細クラックを材料の自己修復機能により修復できれば、図－4.2.1.1 に例示される材料力学性能の不良を回避し、より確実な構造安全性の実現に寄与できるものと期待される。



図－4.2.1.1 既存建物の構造体コンクリート強度の分布例[1]

4.2.2 ひび割れ構成則とひび割れ治癒現象の表現の可能性

(1) 自己治癒／修復を力学的に記述するためのモデル

セメントの再水和等によりひび割れを治癒させる自然治癒に関して、その力学的な回復を記述するモデルを構築するにあたり、いわゆる既存のひび割れ構成則との関連について検討することは有意義である。とりわけ、既存の構成則の中でも、内部の水和物の生成などに関連付けたひび割れ構成則は、今後自然治癒のモデルを構築するうえで重要となる。

ここでは、ひび割れの治癒現象を数値解析の構成則レベルで表現することを念頭におき、既往のひび割れ構成則のうち、特に若材齢コンクリートのひずみ軟化 (ひび割れ発生後) を対象としたものの概要を紹介する。

(2) 軟化域まで考慮した構成則

国枝らは[4]、コンクリートのマクロな挙動が、時間の経過に伴って生じる硬化体の挙動により表される Bazant ら[5]の Solidification 理論を拡張し、若材齢コンクリートのひずみ軟化域までを記述できるひび割れ構成則を提案している。ボリウムファンクションによって経時的に硬化体が発現し、各種物性の発現（圧縮強度、弾性係数や曲げ強度など）だけでなく、ひび割れ発生後の応力－ひずみ曲線を定義することができる。この構成則では、材齢毎に生成される硬化体を与えられるひずみ増分は同一であるという運動学的な制約条件を課している。このことにより、各ステップにおける応力の重合わせを可能にし、全体の応力ひずみ関係のモデル化を容易に可能としている。

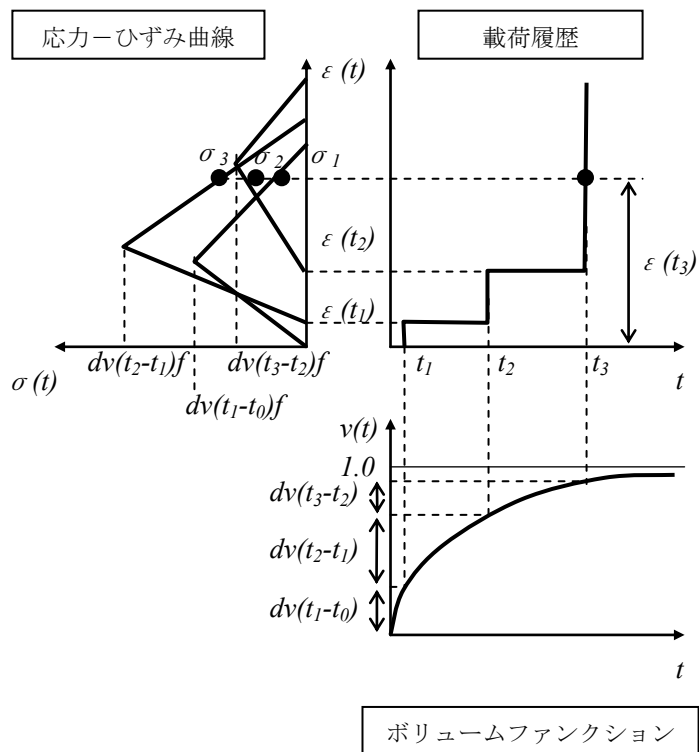
各々の時間ステップにおいて生成過程にある硬化体の材料特性は、逐次増加するボリウムファンクションの増加量に依存し、ある時間での応力－ひずみ関係は、各時間ステップでの各硬化体の応力－ひずみ関係の和として与えられる。

例えば、図－4.2.2.1 に示される時間 t_3 での全応力 $\sigma_g(t_3)$ は、 t_0 から t_1 、 t_1 から t_2 、 t_2 から t_3 の間に生成した硬化体の応力をそれぞれ、 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 とすると、式(4.2.2.1)のように計算される。

$$\begin{aligned}\sigma_g(t_3) &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ &= dv(t_1 - t_0) \sigma(\varepsilon(t_3) - \varepsilon(t_0)) \\ &\quad + dv(t_2 - t_1) \sigma(\varepsilon(t_3) - \varepsilon(t_1)) \\ &\quad + dv(t_3 - t_2) \sigma(\varepsilon(t_3) - \varepsilon(t_2))\end{aligned}\tag{4.2.2.1}$$

ここで、 $dv(t_i - t_{i-1})$ は時間 $t_i - t_{i-1}$ 間でのボリウムファンクションの増分、 $\varepsilon(t_i)$ は時間 t_i でのトータルのひずみ、 $\sigma(\varepsilon)$ は、載荷材齢 t_3 と過去に載荷された時間 t_i ($i=0 \sim 2$) との間に生じたひずみ増分から算出される各硬化体の応力である。なお、ひび割れ前において、これは逐次弾性係数法を表す。

ここで、コンクリート要素の引張試験を想定した具体例を図－4.2.2.2 に示す。載荷の概要は、材齢 1 日にて載荷を行い（1 次載荷）、除荷後、総材齢 28 日（総材齢とは 1 次載荷以降のすべての載荷時の材齢の和とする）まで再養生した後、再度載荷（2 次載荷）を行うものである。材齢 1 日では、コンクリート中に存在するセメントの一部のみが水和しているため、材齢 1 日までに生成された硬化体（硬化体 1 と呼ぶ）のみが負荷あるいは損傷を受けることになる。一方、除荷後の再養生時には、総材齢 28 日まで引続き水和が進行し、残りの硬化体（硬化体 28 と呼ぶ）を生成する。従って、総材齢 28 日での載荷時には、履歴を持った硬化体 1 と新たに生成された硬化体 28 がともに引張力を分担することになる。なお、硬化体 1 と硬化体 28 の量を決定するのがボリウムファンクション $v(t)$ であり、水和が全く生じていない状態を 0、水和が完全に終了した状態を 1 とする、逐次増加の関数である。



図－4.2.2.1 ボリュームファンクションと載荷履歴から決定される応力－ひずみ関係[4]

載荷履歴	(a) 材齢 1 日	(b) 材齢 1 日にて載荷、除荷 (1 次載荷)	(c) 再養生 (材齢 28 日まで)	(d) 材齢 28 日にて載荷 (2 次載荷)
硬化体*の状態	硬化体 1：水和物生成 硬化体 28：未生成	硬化体 1：損傷有 硬化体 28：未生成	硬化体 1：損傷有 硬化体 28：水和物生成	硬化体 1：損傷有 硬化体 28：損傷有
コンクリート要素のイメージ				

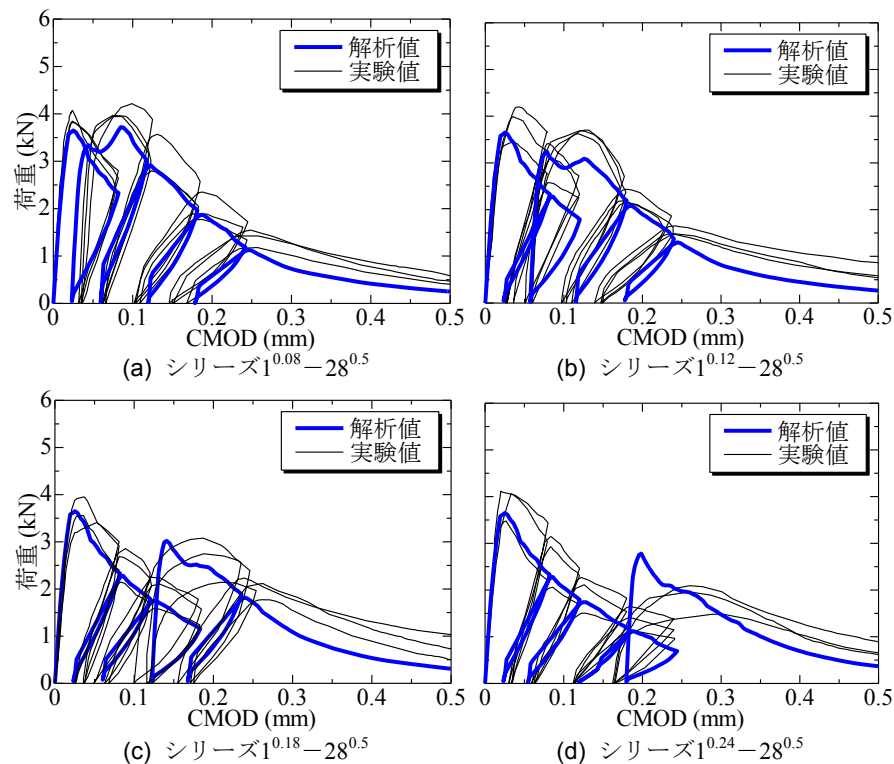
* 硬化体 1：材齢 1 日までに生成した硬化体
硬化体 28：材齢 1 日から 28 日までに生成した硬化体

図－4.2.2.2 硬化体の生成過程と載荷履歴の関係[4]

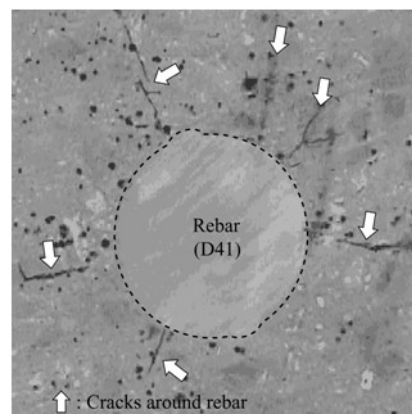
図－4.2.2.3 に本構成則を用いて、材齢 1 日で曲げ試験によりひび割れを導入後、再養生し、材齢 28 日で再載荷した場合の荷重－CMOD 曲線を示す。それぞれの時点での再養生によって、2 次載荷時のピークが大きくなるという挙動も含め、全体の荷重－CMOD 曲線の形状を概ね推定できているといえる。

丸山らは[7]、超高強度コンクリートを用いた RC プリズムを作製し、その鉄筋周囲に自己収縮に起因して放射状にひび割れが発生することを発見した (図－4.2.2.4、これは実大柱を切断した

もの)。この結果は、高耐久性が期待されている超高強度コンクリートではあるが、ひび割れによって有効となるかぶり厚さが減少すること、曲げひび割れが大きく成りうること、せん断耐力の低下などが起こりうることを示唆した。

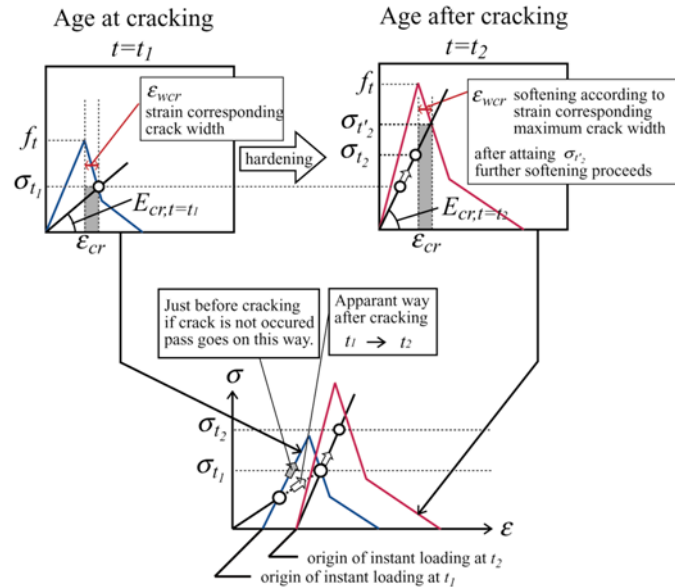


図－4.2.2.3 材齢1日で1次载荷、材齢28日で2次载荷した供試体の解析結果[7]



図－4.2.2.4 自己収縮による鉄筋周囲のひび割れ[7]

また、膨張材を混和した同一水セメント比の収縮応力計測や、同一の材料を用いた異なる水セメント比の収縮応力計測の結果、鉄筋周囲の微細ひび割れが付着を低下させることを指摘した。これらの結果に基づき、Bazant らの有限要素法におけるスmeアードモデル[8]、六郷らが提案した 1/4 モデルに[9]、水和による物性変化を評価する概念を加えた時間依存性微細ひび割れモデルを提案した (図－4.2.2.5) [10]。



図－4.2.6 時間依存性ひび割れモデルの概念図[10]

(3) ひび割れ治癒によって生じる力学性能の変化とその再現

コンクリートのひび割れの治癒を対象としたひび割れ構成則は現段階では構築されていないといつてよい。先述のように、既存の若材齢コンクリートを対象としたひび割れ構成則では、水和によって生成する物質およびそれが材料の挙動に与える影響を何らかの形でモデル化しているため、例えばひび割れ治癒を材料がもつポテンシャルの増加として結びつけることで、様々な条件下でのひび割れ発生およびひび割れを含む要素の外力に対する抵抗性（剛性の向上）も再現できる可能性があると考えられる。

<参考文献>

- [1] 日本建築学会：構造体コンクリートの品質に関する研究の動向と問題点、2008
- [2] 湯浅昇ほか：乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率、細孔構造の不均一性、日本建築学会構造系論文集、No.509、pp.9-16、1998
- [3] 武田三弘・大塚浩司：X線造影撮影によるコンクリートの劣化の数値化と凍結融解抵抗性の判定、土木学会論文集 E、Vol.62、No.4、pp.728-739、2006
- [4] 国枝稔・Srisoros, W.・岸山 雄多佳・中村 光・石川 靖晃：若材齢コンクリートの硬化過程および載荷履歴を考慮したひび割れ構成則に関する研究、土木学会論文集 E、Vol. 63、No. 1、pp.127-142、2007
- [5] Bazant, Z.P. and Prasannan, S. : Solidification theory for concrete creep: Formulation, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.115, No.8, pp.1691-1703, 1989
- [6] Maruyama, I., Kameta, S., Suzuki, M. and Sato R.: Cracking of High Strength Concrete around Deformed Reinforcing Bar due to Shrinkage, Int. RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability and Service Life Planning, RILEM Publications S. A. R. L., Ein-Bokek, Israel, pp.104-111, 2006
- [7] Bazant, Z.P. and Oh, B.H.: Crack band theory for fracture of concrete, Materials and

Structures, Vol.16, pp.155-177, 1983

- [8] Rokugo, K. et al.: Testing method to determine tensile strain softening curve and fracture energy of concrete, Fracture Toughness and Fracture Energy, pp.153-163, 1989
- [9] 丸山一平・亀田昭一・鈴木雅博・佐藤良一：RC プリズムにおける自己収縮による微細ひび割れ発生と収縮応力挙動、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.1、pp.587-592、2006

[担当 国枝稔、関田徹志、丸山一平]

5. 自己治癒／修復効果の実験的評価

5.1 実験的評価の特徴

コンクリートをはじめとする自己治癒／修復の効果を実験的に検討した研究事例が数多くある。なお、ここではひび割れの自己治癒／修復の実験的な検討事例を対象としながら、「今後、新たに研究する研究者が何に留意したら良いか？どのような情報が不足しているか？」などが分かるように、その内容を整理することを試みる。代表的な論文について、ひび割れの種類（導入方法）、自己治癒／修復を評価する指標、対象とする修復メカニズム、について取りまとめた結果を表－5.1.1 に示すとともに、次項にその概要を説明する。

表－5.1.1 各種実験方法の分類

著者等 [文献番号]	ひび割れの種類 (劣化の形態)	評価指標	修復メカニズム	備 考
Heide [5]	載荷試験	曲げ強度	自然治癒	・曲げ試験を中心に解析モデルの提案も行っている
Heide ら [6]	載荷試験	曲げ強度	自然治癒	・ひび割れ導入後に圧縮応力を作用させたが、応力レベルの違いによる影響は大きくない（ひび割れは閉じていれば十分）
Heide [9]	載荷試験	曲げ強度	自然治癒	・文献[11]と類似
Ivanov ら [17]	凍結融解	圧縮強度 曲げ強度 動弾性係数	自然治癒	
Wang ら [19]	凍結融解	圧縮強度 など	自動修復	・結晶質をコーティング（含浸）し、モルタルの空隙を充填する
Dry ら [16]	載荷試験	曲げ強度	自動修復	・鋼繊維補強コンクリート ・ガラスパイプによる接着剤放出
Li ら [14]	載荷試験	引張強度 ひずみ	自然治癒	・ECC の微細ひび割れを対象 ・NaCl 溶液に浸漬したところ、ひずみは回復するが強度は 10%程度低下する
Reinhardt ら [1]	載荷試験	透水性	自然治癒	・温度を 20、50、80℃に変化させた透水試験を実施 ・0.1mm 以下のひび割れ幅であれば、自己治癒可能
Edvardsen [15]	載荷試験	透水性	自然治癒	・静的、動的載荷を実施
Hosoda ら [10]	載荷試験	ひび割れ幅 透水性	自律治癒	・膨張材を使用した自律治癒
Yamada ら [11]	載荷試験	ひび割れ幅 透水性	自律治癒	・文献[10]と評価方法は類似。配合の種類等を変化させて効果の違いを検討
Wang ら [12]	なし	透水性 吸水量 塩化物イオンの侵入	自律治癒	・触媒系結晶？のコーティング材による効果
Youkun ら [13]	カルサイト の溶出	透水性	自律治癒	・カルボキシル酸による透水性を確認。カルボキシル酸の特性が、炭酸塩の分解や溶液の移動に影響
Nanayakkara [18]	載荷試験	透水性	自然治癒	
Nishiwaki ら [4]	載荷試験	透水性	自然治癒	・HPFRCC の微細ひび割れ対象
Jacobsen ら [2]	凍結融解 試験	塩化物イオンの侵入	自然治癒	・強度回復は極僅かであるが、塩化物イオンの侵入の抑制については効果がある
Jacobsen ら [3]	凍結融解 試験	塩化物イオンの侵入	自然治癒	・文献[2]の高強度版
Muynck [8]	なし	吸水量 透水性(効果なし) 中性化 塩化物イオンの侵入	自動治癒	・バクテリアによる表面処理

表－5.1.1 各種実験方法の分類（続き）

著者等 [文献番号]	ひび割れ の種類 (劣化の形態)	評価指標	修復メカ ニズム	備 考
Jonkers [7]	なし	圧縮強度 引張強度	自動治癒	・バクテリアがコンクリートの力学性能の悪影響を与えないことを確認
松下ら [20]	載荷試験	超音波伝播速度 塩分浸透深さ	自律治癒	・高炉スラグを使用した自律治癒
松下ら [21]	載荷試験	曲げ強度	自律治癒	・普通・早強・低熱セメント、高炉 B 種、フライアッシュ B 種を使用。水和速度の遅い低熱セメントが初期ひび割れの閉塞に有効
清崎ら [22]	載荷試験	曲げ強度	自律治癒	・普通・低熱セメント、高炉 B 種、石灰石フィラーセメント、石灰石・高炉スラグ 3 成分系セメント使用。水和速度の遅い石灰石・高炉スラグ 3 成分系セメントが初期ひび割れの閉塞に有効
内藤ら [23]	載荷試験	曲げ強度、中性化	自律治癒	・石灰石・高炉スラグ 3 成分系セメントは、ひび割れが中性化進行に与える影響が小さい
Şahmaran ら [24]	載荷試験	圧縮強度、超音波伝 播速度、塩分浸透深 さ、毛管吸水量	自律治癒	・終局強度の 70%、90%の圧縮載荷にてマイクロクラックの導入。フライアッシュを用いた自律治癒
濱ら [25]	凍結融解 試験	相対動弾性係数、 中性化、ひび割れ 観察・本数	自律治癒	・フライアッシュを使用した自律治癒
藤原ら [26]	凍結融解 試験	圧縮・曲げ強度、相 対動弾性係数、中 性化、細孔径分布、 ひび割れ本数	自律治癒	・フライアッシュを使用した自律治癒
藤原ら [27]	凍結融解 試験	相対動弾性係数、 中性化、細孔径分 布、ひび割れ本数	自律治癒	・フライアッシュを使用した自律治癒。実環境を想定した劣化－再養生の繰り返しでの評価
村井ら [28]	凍結融解 試験、 載荷試験	相対動弾性係数、 中性化	自律治癒	・フライアッシュを使用した自律治癒。劣化と治癒のバランスを示す評価指標を提案。圧縮繰り返し載荷により凍害劣化と同様のマイクロクラックを導入

5.2 対象とするひび割れの種類

過去の研究等で対象としているひび割れ（損傷）は、載荷試験等により外力を受けて生じたひび割れ（損傷）、凍結融解試験による損傷に大別できる。

載荷試験によるひび割れの導入に関しては、圧縮試験、引張試験、曲げ試験などに代表される。また、この載荷試験方法は、ひび割れの自己治癒／修復の程度を評価する後述の評価指標とも密接に関係する点に留意する必要がある。

ひび割れの自己治癒／修復現象を評価することを目的とした実験であることから、引張試験を行った方が直接的で、しかも理解されやすいと思われる。しかしながら、近年開発されている複数微細ひび割れ型の繊維補強材料を除けば、一般にはコンクリートの直接引張試験を行うことが難しいことから、曲げ試験により評価される場合が多い。また、鉄筋等の補強材を用いて引張試験を行うことも考えられるが、コンクリートと補強材の付着現象そのものが、ひび割れの発生を伴う場合があることから、ひび割れの自己治癒現象を把握する実験に用いるのが困難と推察される。

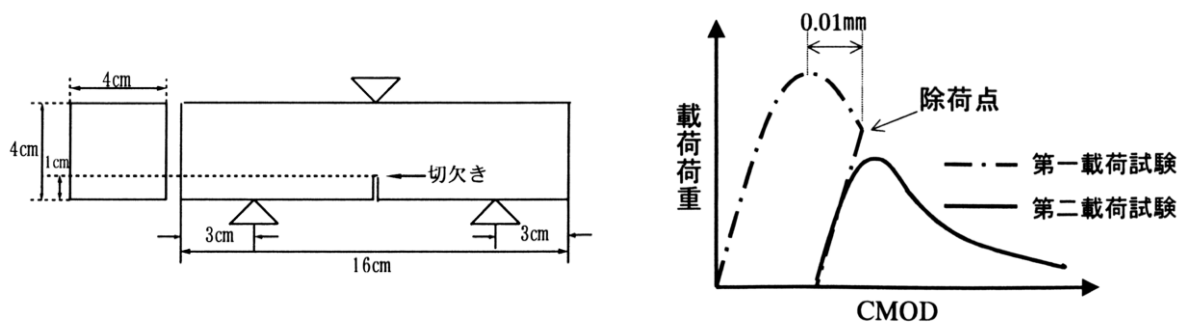
例えば、松下ら[21]は、図－5.2.1(a)に示すような切欠きを有する曲げ供試体を用いて、曲げ載荷試験を実施し、図－5.2.1(b)に示す荷重と切欠き肩口開口変位（CMOD）を計測している。なお、セメントの種類の違いによって、自己治癒の程度が異なることを明らかにしたものであり、例えば図－5.2.2 に示すように、ひび割れを導入していない供試体の材齢 28 日における曲げ強度

に第二載荷時の強度がどの程度近づくか（強度比と定義）を調べており、第一載荷試験の材齢が長期であるほど、強度回復が小さいことなどを示している。また、再養生による剛性の回復なども、荷重－CMOD 曲線から求めることも可能である。

また、載荷によりひび割れを導入した際に、その状態を保持するのか、除荷するのか、あるいは圧縮力を作用させるのかによっても、ひび割れの治癒の程度が異なることにも留意する必要がある[6]。

凍結融解試験により損傷を導入し、その回復程度をみる実験も多く、実際の対象とするひび割れ（損傷）を直接的に検証していることから、有益な情報が得られると思われる。

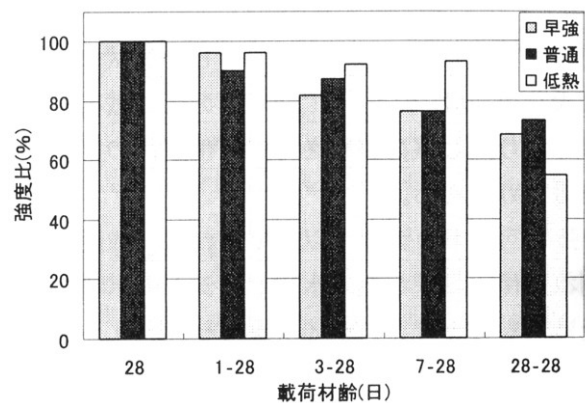
濱らはフライアッシュを混入したコンクリートにおいて、凍結融解により生じたマイクロクラックの自己治癒を確認する実験を行っている。マイクロクラックの検出には、強度などではなく例えば動弾性係数を測定する試験が有効である。



(a) 供試体形状

(b) 荷重－CMOD 曲線の概念図

図－5.2.1 切欠きばりを用いた曲げ載荷試験方法[21]



図－5.2.2 曲げ強度比[21]

5.3 評価指標

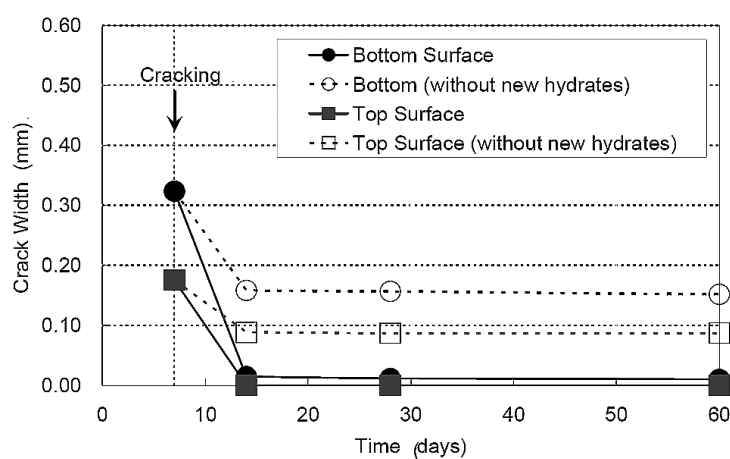
5.3.1 直接的なひび割れの観察

一番簡単な方法は、ひび割れが自己治癒／修復し、例えば閉塞したことを目視にて確認する方法である。目視といっても、通常は微細なひび割れを対象としている場合が多いため、マイクロスコープなどで数十倍から数百倍程度に拡大することで、ひび割れ部に発生した析出物などを確

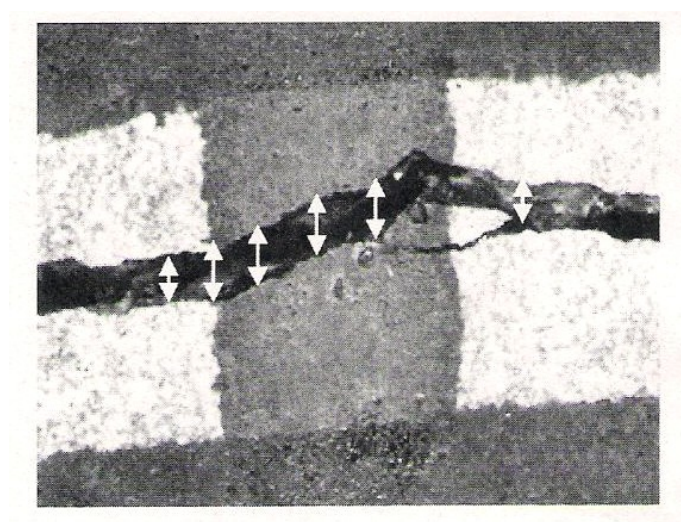
認することができる。Hosoda ら[10]も、膨張材を混入したコンクリートを対象に、導入したひび割れ幅が、経時的に閉じていく様子を直接的に計測しており、特に新しい添加材を用いた場合の方が、その閉口の効果が高いことを示している（図－5.3.1.1 参照）。また、ひび割れ長さ方向での計測結果（6箇所）[30]を図－5.3.1.2、図－5.3.1.3に示す。計測結果では、ばらつきが非常に大きく、治癒の判断はこれらのばらつきを考慮して行われる必要があることを示唆している。

栗田ら[31]は、自己治癒成分を含むモルタル試験体において、表面ひび割れの治癒と内部のひび割れ面での治癒の相関を調べている。ひび割れの内部においては、図－5.3.1.3に示すように偏って析出物が生成していたと報告している。

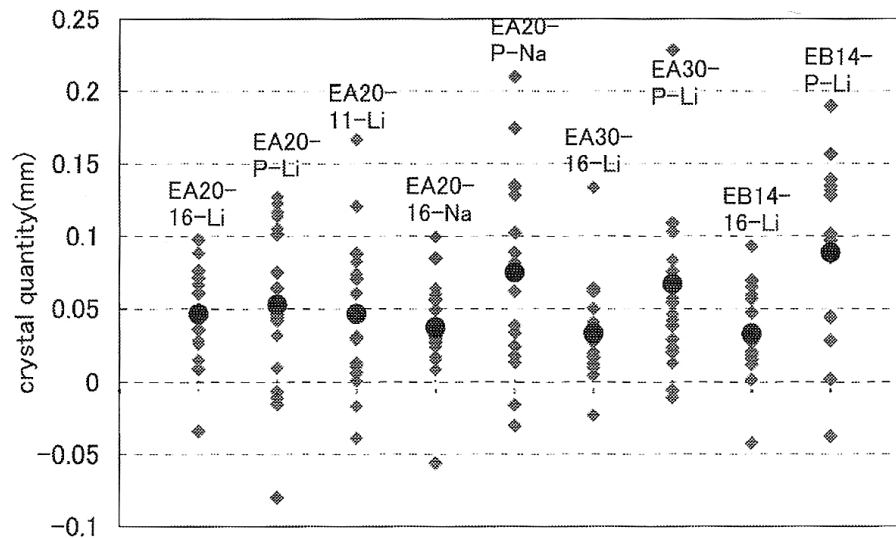
このように、ひび割れの治癒を直接的に示すことができれば、自己治癒／修復技術の信頼性を高める有効な情報の1つとなる。なお、目視により確認できるのは、表面に生じたひび割れ、内部に生じたひび割れのうち、切断等により取り出すことができるものに限られるのは容易に想像ができる。



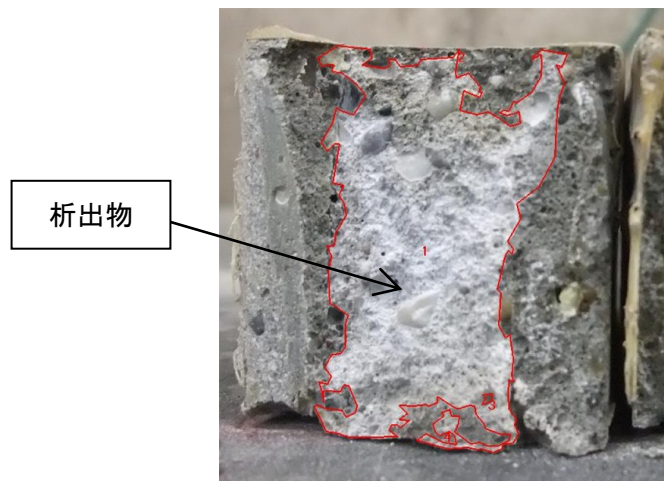
図－5.3.1.1 ひび割れ幅の減少の計測結果[10]



図－5.3.1.2 1測定箇所における6点でのひび割れ幅の計測[30]



図－5.3.1.3 自己治癒コンクリートのひび割れ幅の閉塞[30]



図－5.3.1.4 ひび割れ面における析出物の分布[31]

5.3.2 力学性能

前項のようにコンクリートにわずかなひび割れあるいは損傷を与えて自己治癒させ、再度同様の試験方法を実施し、強度、剛性が初期の载荷時と比較してどの程度回復するかを確認する事例が多い。例えば、Heide ら[5]は、図－5.2.1(b)のような曲げ応力－CMOD 関係を求めているが、曲げ強度による評価に留まっている場合が多い。一般に、強度などの指標に比べてエネルギーの方が、コンクリートのひび割れに依存した挙動の違いに対して感度の良い指標である場合が多い。コンクリート構造物の損傷評価においても剛性の低下に着目する場合や、コンクリートの破壊のモデル化に損傷理論が適用される事例を見ても分かるように、ひび割れの発生（増加）と剛性の低下とは密接な関係があり、比較的簡単に計測できる指標でもある。さらに、凍結融解などの微細なひび割れが生じる場合、あるいはその回復の程度を観察する場合には、载荷試験による荷重－変位関係よりも、超音波伝播速度や動弾性係数を用いて、例えば健全なものと相対的に比較する方が有効である。

5.3.3 物質移動抵抗性

自己治癒したコンクリートのひび割れ部に対して、水や塩化物イオンの移動抵抗性を評価した事例が数多くある。対象とする物質の移動に対する抵抗性を直接的に把握することが望ましい。

Reinhardt ら[1]は、ひび割れを有するコンクリートの透水試験を実施し、図-5.3.3.1に示すように、通水直後に得られた透水量が経時的に減少していくこと、ならびにその程度が温度などによって異なることを示している。

藤原ら[26]は、凍結融解試験を実施したフライアッシュ混入コンクリートを対象に、促進中性化試験を実施し、再養生を実施した場合には、中性化に対する抵抗性が改善することを示している。

また、図-5.3.3.2に示すように、森本ら[29]は、複数微細ひび割れ型高靱性セメント系複合材料を対象に、Torrent 透気試験を実施し、再養生によって表面の透気性が低くなることを示している。Torrent 透気試験は、図-5.3.3.2に示すようにコンクリートの極表層（かぶりコンクリート）の透気性を評価するものであり、一般的な物質移動抵抗性を評価する際に用いられる物質の一次元流れを模擬しているわけではない。しかし、非破壊で簡易的に透気性が計測できることから、相対的な評価が可能であると推察される。

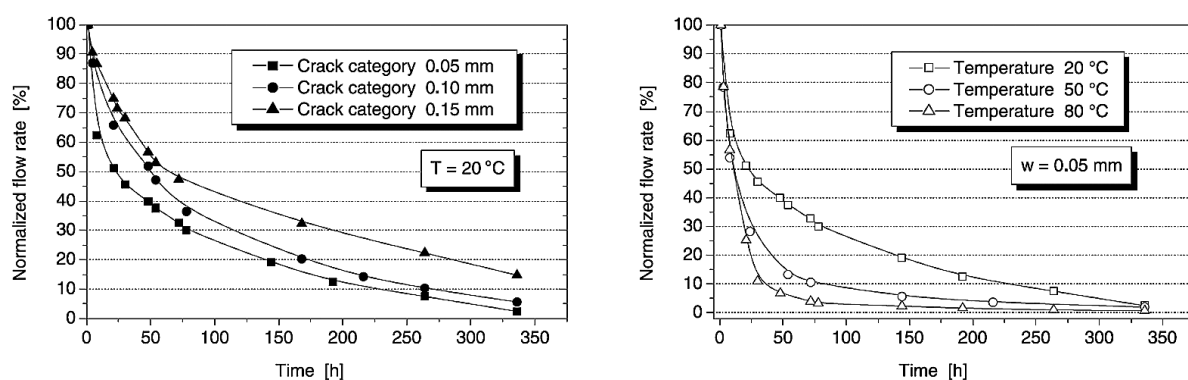


図-5.3.3.1 ひび割れ部における透水量[1]

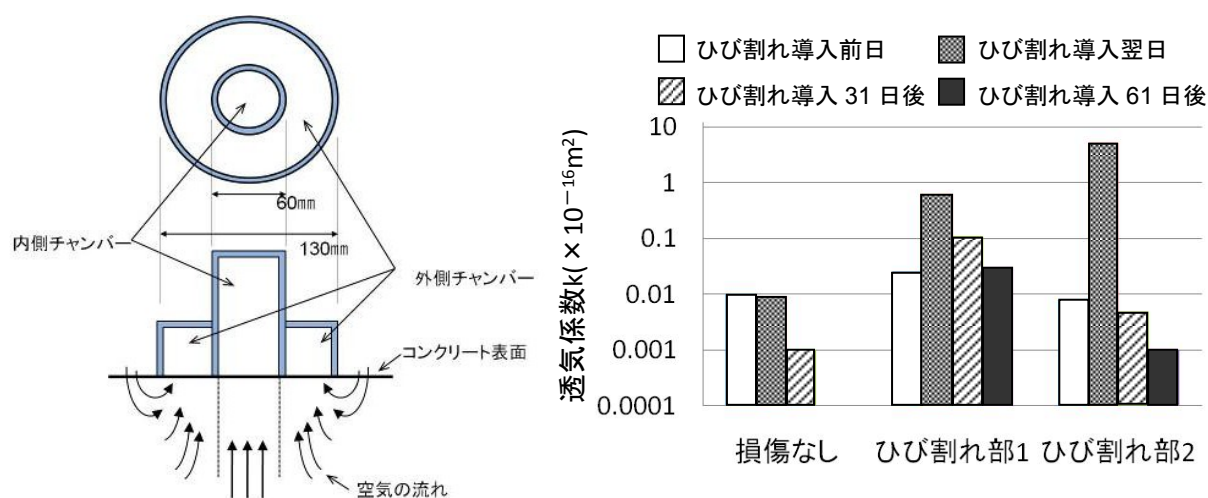
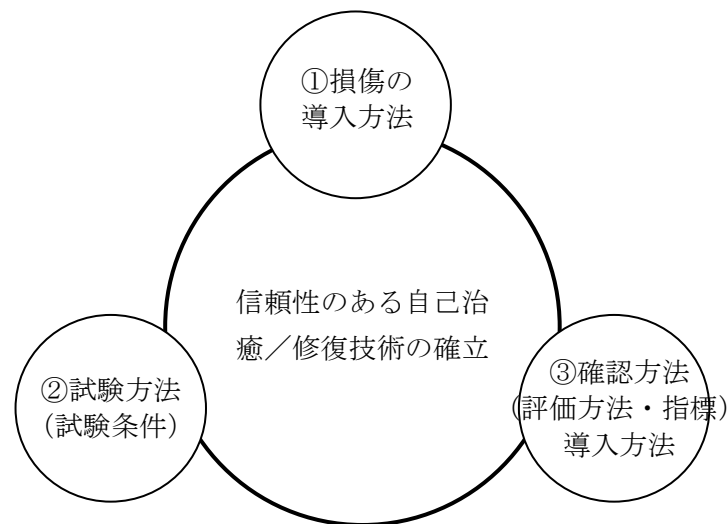


図-5.3.3.2 Torrent 透気試験による透気性状[29]

5.4 今後の課題

自己治癒の効果を把握する実験的な検討を行う上で、供試体寸法の違い、養生をする環境条件の違いなどが今後の課題となりうる。

なお、図－5.4.1 に示すように、①損傷の導入方法、②試験方法（試験条件）および③確認方法（評価方法・指標）の適切な組合せによって、より信頼性の高い自己治癒／修復技術の確立が可能になると考えられる。



図－5.4.1 実験的な検討を行う際に留意すべき組合せの例

<参考文献>

- [1] Reinhardt, H.W. and Jooss, M.: Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width, Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 981-985, 2003
- [2] Jacobsen, S., Marchand, J. and Boisvert, L.: Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 6, pp.869-881, 1996
- [3] Jacobsen, S. and Sellevold, E.J.: Self healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw, Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 1, pp. 55-62, 1996
- [4] Nishiwaki, T., Leite, J. and Mihashi, H.: Enhancement in durability of concrete structures with use of high-performance fibre reinforced cementitious composites, Pre-print of Consec04, 2004
- [5] Heide, N.: Crack healing in hydrating concrete, MSc thesis, Delft University of Technology, 2005
- [6] Heide, N., Schlangen, E. and Breugel, K.: Experimental study of crack healing of early age cracks, Proceedings Knud Højgaard conference on Advanced Cement-based Materials, Denmark, 2005
- [7] Jonkers, H. and Schlangen, E.: Crack Repair by Concrete-immobilized Bacteria,

- Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials, Springer, 2007
- [8] Muynck, W., Belie, N. and Verstraete, W. :Improvement of Concrete Durability with the aid of Bacteria, Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials, Springer, 2007
 - [9] Heide, N. and Schlangen, E.: Selfhealing of Early Age Cracks in Concrete, Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials, Springer, 2007
 - [10] Hosoda, A., Kishi, T., Arita, H.and Takakuwa, Y.: Self Healing of Crack and Water Permeability of Expansive Concrete, Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials, Springer, 2007
 - [11] Yamada, K., Hosoda, A., Kishi, H., and Nozawa, S.: Crack Self Healing Properties of Expansive Concretes with Various Cements and Admixtures, Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials, Springer, 2007
 - [12] Wang, G., Guo, Z., Yu, J. and Shui, Z.: Effect of Self-healing Materials on Steel Reinforcement Corrosion of Concrete, Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials, Springer 2007
 - [13] You, Y., Qian, C., Miao, C., Ye, G. and Breugel, K.: Effect of Self Healing Promoted Materials Blended with Carboxylic Acid on Permeability, Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials, Springer, 2007
 - [14] Li, M., Sahmaran, M. and Li, V.C.: Effect of cracking and healing on durability of engineered cementitious composites under marine environment, Proc. of HPFRCC 5, RILEM Proceedings PRO 53, pp. 313-322, 2007
 - [15] Edvardsen, C.: Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete, ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 4, pp. 448-454, 1999
 - [16] Dry, C. and Corsaw, M.: A comparison of bending strength between adhesive and steel reinforced concrete with steel only reinforced concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 1723-1727, 2003
 - [17] Ivanov, F.M. and Polyakov, B.I.: Self-healing and durability of hydraulic concrete, Translated from *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*, No. 9, pp. 32-35, 1974
 - [18] Nanayakkara, A.: Self-healing of cracks in concrete subjected to water pressure, from *New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia*, pp. 125-132, 2003
 - [19] Wuhan, G. and Yu, J.: Self-healing action of permeable crystalline coating on pores and cracks in cement-based materials, *Journal of Wuhan University of Technology – Mater. Sci. Ed*, Vol. 20, No. 1, pp. 90-97, 2005
 - [20] 松下博通ほか：高炉スラグ含有コンクリートの微細ひび割れの閉塞に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.52、pp.638-643、1998
 - [21] 松下博通・陶佳宏・清崎里恵：初期ひび割れを導入したモルタルの強度回復特性、コンクリート工学論文集、Vol.14、No.1、pp.57-65、2003
 - [22] 清崎里恵・松下博通・陶佳宏：強さ 32.5 クラスのセメントを用いたモルタルにおける初期ひび割れの強度回復特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、pp.605-610、2003

- [23] 内藤哉吉ほか：初期ひび割れ導入モルタルの自己修復特性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、pp.627-632、2004
- [24] Şahmaran M. et al.: Self-healing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash, Cem. Concr. Compos., Vol.30, No.10, pp.872-879, 2008
- [25] 濱幸雄・谷口円・桂修：早強・低熱系セメントおよびフライアッシュを用いたコンクリートの自己修復性能、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.515-516、2006
- [26] 藤原祐美ほか：フライアッシュを用いたモルタルの自己修復効果、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.1、pp.303-308、2007
- [27] 藤原祐美ほか：フライアッシュを用いたコンクリートの耐凍害性と自己修復効果の検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.1、pp.873-877、2008
- [28] 村井洋公ほか：フライアッシュを混入した AE コンクリートの自己修復効果の検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、2009
- [29] 森本拓也ほか：超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料の自己修復性状の評価、土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集、V 部門、pp.683-684、2008
- [30] 石渡大嗣・細田暁・平野勝彦・山田啓介：ひび割れ自己治癒コンクリートにおける膨張の拘束の影響、セメント・コンクリート論文集、No.61、pp.617-623、2007
- [31] 栗田淑乃・細田暁・小林薫・松田芳範：養生水の性質が自己治癒コンクリートの治癒効果に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、2009（印刷中）

[担当 国枝稔，佐川孝広]

6. 自己治癒／修復機能の設計への取り込みと適用事例

6.1 トンネル覆工コンクリートへの自己治癒コンクリートの適用事例

6.1.1 適用した経緯

膨張材を混和した低水結合材比 25%～45%の膨張コンクリートは、ひび割れ発生後に外部から水分が供給される場合に、ひび割れ近傍のコンクリートの追加膨張及びひび割れ部に水和物が析出することによる自己治癒機能を有することが分かっていた[1,2]。しかし、粉体量が多い低水結合材比の膨張コンクリートは、製造コストが高く、未反応の膨張材が長期材齢まで残存することによる膨張破壊の可能性も指摘されていた。

より汎用的な配合で自己治癒機能を達するため、アルカリ炭酸塩を含む系についても検討がなされた。水結合材比 50%に設定し、炭酸水素ナトリウムや炭酸リチウムなどのアルカリ炭酸塩を混和した膨張コンクリートのひび割れ部において結晶の析出が確認されている[3]。さらに、エトリンサイト系膨張材とジオマテリアルなどを混和材として用いた、ひび割れ部への析出能力の高い自己治癒コンクリートも開発された[4]。

一般的な生コン工場でも製造可能で、遅れ膨張破壊の懸念もほとんどない自己治癒コンクリートが開発されてきたため、無筋のトンネル覆工コンクリートへの試験的な適用が計画された。実構造物レベルでの自己治癒機能を検証することと、自己治癒コンクリートの施工性に関する問題点を把握することが、試験施工の目的である。

トンネル覆工コンクリート（2次覆工）の裏側には、通常は防水シートが設置される（図-6.1.1.1）。防水シートの存在により、2次覆工コンクリートの背面の拘束が低減され、2次覆工コンクリートに発生するひび割れも抑制される。2次覆工コンクリートの背面の地下水が、漏水としてトンネル内側へ流れ出てくる箇所は、打込み後しばらくの間はひび割れが発生しにくいために、インバートコンクリートと覆工コンクリートの打継ぎ目などが主たる箇所となる（図-6.1.1.2）。これらの箇所からの漏水に対する治癒効果を、隣接区間と比較していくことになる。本来は、自己治癒コンクリートを適用した区間において、防水シートを取り除くことができれば、自己治癒コンクリートを使用するメリットが出てくると考えられる。今回の試験施工では、自己治癒コンクリートの適用区間においても防水シートを設置した。開発途上の自己治癒コンクリートであり、もし漏水が過多となった場合に、防水シートが無いことによるのか、治癒性能が十分でないことによるのか、判別がつかなくなると考えたからである。



図-6.1.1.1 打設区間に設置された防水シート



図-6.1.1.2 覆工コンクリートとインバートコンクリートの境目などからの漏水

6.1.2 自己治癒コンクリートの施工性

(1) 試験練りの概要

この試験施工における自己治癒コンクリートの施工性についての詳細を、別報に記しているので参考にされたい[5]。

2007年11月下旬に、アルカリ炭酸塩などを含む自己治癒コンクリートを実構造物への適用を視野に入れた打設試験を実施した。2007年9月上旬に生コンクリート工場で試験練りを実施した際に、炭酸水素ナトリウムを混和した膨張コンクリートに著しいこわばりが生じ、コンクリートのフレッシュ性状が低下した。

11月に予定されていた打設試験までに、工場の実機での練混ぜ、アジテータ車での運搬、現場での打込みが可能な自己治癒コンクリートの配合を検討した。2つの工場で試験をしたため、同様のスランプを示す配合でありながら、異なる骨材、セメントを用いた場合のフレッシュ性状を把握することもできた。

試験練りの過程で、アルカリ炭酸塩によるこわばりの原因と解決策を見つけ、実構造物に打込み可能なフレッシュ性状を有する自己治癒コンクリートの配合を見つけることができた。

(2) 試験練りで得られた知見と本打設に使用された配合

試験練り1回目（2007年9月上旬）で炭酸水素ナトリウムを混和したコンクリートにおいて著しいこわばりが生じ、フレッシュ性状の低下が生じた。試験練り2回目（9月下旬）のみ、他の試験練りとは異なる工場で実施され、異なるセメント・骨材・機材を使用した。混和材・高性能AE減水剤については、両工場で同一のものを使用した。試験練り3回目（10月上旬）では1回目と2回目の結果を踏まえて実機で練る配合の最終決定を行った。試験練り4回目（11月上旬）は生コンプラントの実機ミキサーで行われた。練混ぜ後に、アジテータ車で打設現場まで運搬し、枡型の試験体を作製した。試験練りの結果を踏まえ、11月下旬に、炭酸水素ナトリウム、炭酸リチウムなどを含む3種類のひび割れ自己治癒コンクリートを2次覆工コンクリートに打設した。

今回、自己治癒コンクリートを試験施工した構造物においては、先行する打設ブロックにおいて充填不良による不具合が生じたため、その後のコンクリートの配合が修正された。その結果、表-6.1.2.1に示すように、高性能AE減水剤を添加した、スランプの大きくなる配合となっている。また、本打設の際には、剥落対策として合成短繊維が添加された。

試験練り1、2、3回目では、生コン工場の試験室にて材料を強制二軸ミキサーに一度に投入した後5秒間空練りし、水を投入し90秒間練り混ぜる方法を基本とした。試験練り4回目では材料を実機に一度に投入し60秒間練り混ぜた。混和材を含むことを考慮して、その工場での通常の練混ぜ時間よりも20秒間長くした。

表-6.1.2.1 覆工コンクリートの標準配合と2種類の自己治癒コンクリートの配合

配合名	水結合材比	水	セメント	混和材（膨張成分）		細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤	アルカリ炭酸塩	短繊維
	W/P	W	C	E		S	G	Sp	CO ₃	F
	(%)			(kg/m ³)						(kg/m ³)
覆工コンクリート標準配合	47.3	175	370	0		809	920	4.26	4.26	0.455
自己治癒配合1 (炭酸リチウム)	47.3	175	343	20 (エトリンガイト系膨張材)	5 (超硬焼石灰)	809	920	4.26	2 (Li)	0.455
自己治癒配合2 (炭酸水素ナトリウム)	50	185	344	20 (エトリンガイト系膨張材)	5 (超硬焼石灰)	798	906	3.33	1 (NaH)	0.455

1～3 回目の試験練りにおいて、今回の試験練りに用いた配合の範囲で、以下の知見が得られた。

- (a) 炭酸水素ナトリウムを混和したコンクリートでは、凝結が促進されたものによると思われる著しいこわばりが生じた。こわばりは、高性能 AE 減水剤の量を増やすこと・後添加で追加することや、単位水量の増加で防ぐことができた。同程度のフレッシュ性状を有するコンクリートでも、使用する骨材、セメントが異なる場合、こわばりを生じる炭酸水素ナトリウムの量は大きく変動した。
- (b) 炭酸リチウムを混和することは、今回の試験練りの範囲内ではコンクリートのフレッシュ性状に悪影響を及ぼさなかった。
- (c) 材齢 18 時間程度の超若材齢において、炭酸水素ナトリウムを混和したコンクリートでは圧縮強度の発現が促進された。

以上の知見を踏まえ、表－6.1.2.1 に示す 2 種類の自己治癒コンクリートとジオマテリアルも活用した最新の自己治癒コンクリートを、4 回目の試験練りにおいて実機のみキサーで練混ぜ、現場まで運搬し、柵型の試験体を作製した。柵型の試験体については、材齢 2 日で脱型した後、ジャッキを用いてひび割れを導入し、柵の中に水を溜めた。ひび割れ箇所から漏水させて、経時変化を観察した。

2007 年 11 月下旬には、3 種類の自己治癒コンクリートが 2 次覆工コンクリートに打設された。



図-6.1.2.1 現場まで運搬された自己治癒コンクリート

6.1.3 自己治癒コンクリートの治癒状況

柵型試験体の貯水量が常に一定水位となるように自動給水装置をつけた。試験体表面のひび割れ幅については、ひび割れ導入時の制御がうまくできず、幅が数 mm となるひび割れも生じてしまった。確認試験結果の例を図－6.1.3.1 に示す。幅が数 mm あるひび割れでは漏水状況に変化は見られなかったが、閉塞を期待する 0.2mm 程度のひび割れやセパレータ箇所からの漏水が減少し、治癒効果を確認することができた。

2 次覆工コンクリートについても、打込み後 7 ヶ月経過した段階では、不具合は確認されていない。インバートコンクリートと覆工コンクリートの打継ぎ目や、覆工コンクリートに経時的に発生するひび割れからの漏水に着目して、治癒性能の観察を続ける予定である。

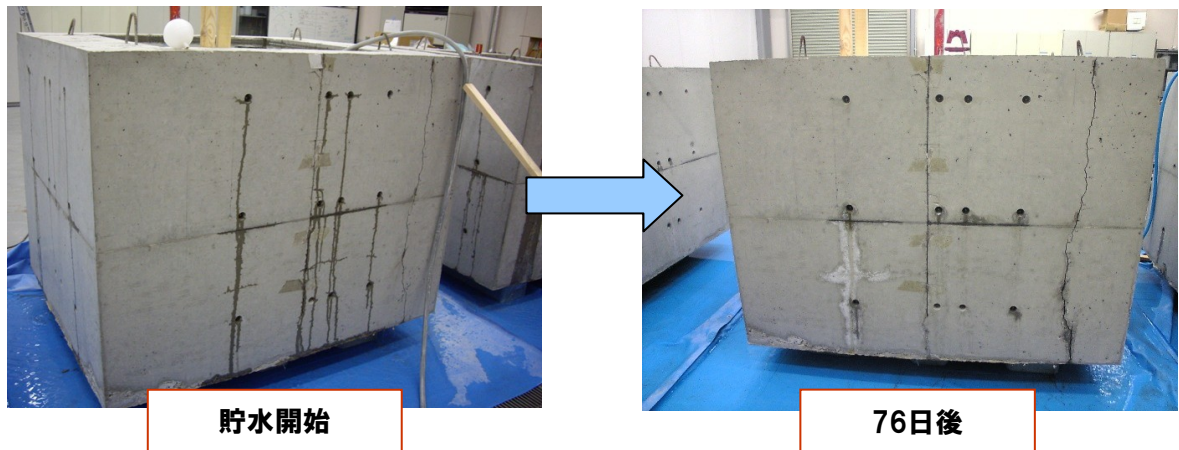


図-6.1.3.1 柵型試験体での治癒状況

<参考文献>

- [1] 下村哲雄・細田暁・岸利治：低水粉体比コンクリートのひび割れ自己治癒性能、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.2、pp.661-666、2001
- [2] 山田啓介・細田暁・在田浩之・岸利治：膨張材を用いたコンクリートのひび割れ自己治癒効果、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.1、pp.266-261、2007
- [3] 平野勝彦・細田暁・石渡大嗣・山田啓介：水分供給条件や膨張作用の有無がひび割れ自己治癒効果に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.1、pp.267-272、2007
- [4] T.H. Ahn, T. Kishi, “The effect of geo-materials on the autogenous healing behavior of cracked concrete”, Proceeding of 2nd ICCRRR2008, Cape town, South Africa, Nov. 2008
- [5] 細田暁・小林薫・松田芳範・石渡大嗣：アルカリ炭酸塩を含むひび割れ自己治癒コンクリートのフレッシュ性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、2009（掲載決定）

[担当 細田暁]

6.2 自己修復機能を取り入れた部材設計例

6.2.1 設計の概要

(1) 想定する部材、材料、設計条件

前節で述べた適用事例を念頭に、ここでは部材設計に自己修復機能をどのように反映するか土木学会標準示方書の体系に従い具体的な検討を試みる。対象として、水密性が要求されかつ使用状態で水圧が作用している部材である水路構造物を取り上げる。水密性に対する照査に関して、標準示方書設計編では、ひび割れにおける透水を防ぐことができない場合にはその影響を取り入れて透水性の評価を行うことが記されており、ひび割れ幅の限界値として条件別に表-6.2.1.1が示されている。表-6.2.1.1にて、卓越する断面力が軸引張力で、高い水密性を確保する場合には、コンクリート応力は全断面において圧縮状態とする必要があるとされている。本節では、これら断面力と水密性の設計条件に相当する場合に、圧縮力を作用させる代わりにひび割れの自己修復性を有する材料を使用するとの想定で検討を行う。また、軸引張力としては、主として温度収縮や乾燥収縮が拘束されて発生する断面力を考える。

水路構造物では要求性能として高い水密性が求められるが、実際にはコンクリートのひび割れによりこの水密性が十分に確保されていない例もある(図-6.2.1.1)。図-6.2.1.2に示すような水路構造物の部材設計において、水密性を担保するためのひび割れ制御は現状で必ずしも達成されていない側面もあり、解決すべき重要な問題と考えられる。従って、水路構造物の部材設計において、ひび割れ発生することを前提に、これを閉塞して水密性を確保可能な材料への期待は大きいと考えられる。前節で述べた自律治癒材料は、水密性を確保することを目的として開発されているものであり、これを本検討にて取り上げるものとする。

表-6.2.1.1 水密性に対するひび割れ幅の限界値の目安(標準示方書)

要求される水密性の程度		高い水密性を確保する場合	一般の水密性を確保する場合
卓越する断面力	軸引張力	—— ¹⁾	0.1
	曲げモーメント ²⁾	0.1	0.2

- 1) 断面力によるコンクリート応力は全断面において圧縮状態とし、最小圧縮応力度を 0.5N/mm^2 以上とする。なお、詳細解析により検討を行う場合には、別途定めるものとする。
- 2) 交番荷重を受ける場合には、軸引張力が卓越する場合に準じることとする。



図-6.2.1.1 水路構造物からの漏水

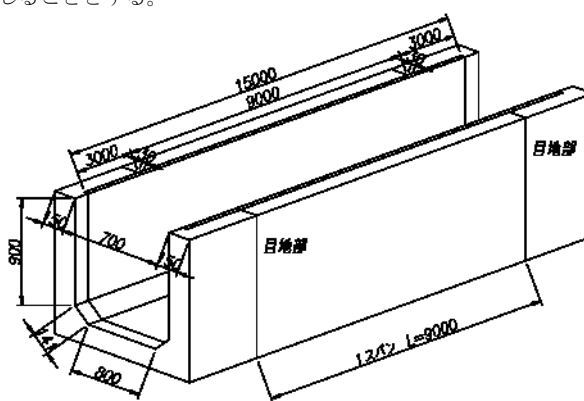


図-6.2.1.2 水路構造物の例

(2) 設計の基本方針

標準示方書 10.6 節では、水密性に対する照査を透水量によって行うとしている。

$$\gamma_i \frac{Q_d}{Q_{\max}} \leq 1.0 \quad (6.2.1.1)$$

ここに、 γ_i は構造物係数、 $Q_{\max}$ は単位時間あたりの許容等水量である。 Q_d は単位時間あたりの透水量の設計値で次式にて表される。

$$Q_d = \gamma_{pn} \left(K_d \cdot A \cdot \frac{h}{L} + Q_{cjd} \right) \quad (6.2.1.2)$$

ここに、 γ_{pn} は Q_d のばらつきを考慮した安全係数、 K_d はコンクリートの透水係数の設計値、 A は透水経路の断面に相当するコンクリートの全断面積、 h と L はそれぞれ構造物内面と外面の水頭差と透水経路長に相当する断面厚さの期待値、 Q_{cjd} は継ぎ目やひび割れ割れからの透水量の設計値である。

(6.2.1.2)式は、ひび割れのない健全部の透水量、および継ぎ目やひび割れからの透水量の和で表されており、一般に後者の影響が著しく大きい。ここでは、継ぎ目（目地）については止水板などにより適切に防水処置することを前提に、目地以外に発生するひび割れを前記自己修復材料の採用にて止水して、無視できる程度まで(6.2.1.2)式中の Q_{cjd} を抑制することを意図する。

(3) 設計手順

発生するひび割れを修復して Q_{cjd} を抑制するための設計手順の例を表－6.2.1.2に示す。表－6.2.1.2では、設計方法を実用に供することを想定し、非常に単純化した手順としている。同表にあるように、第一に設計ひび割れ幅 δ_d を算定する(Step 1)。 δ_d は、主として部材断面や境界条件などの設計条件から算定される。このとき想定される設計外力としては、自重や流水による曲げ荷重、セメントの水和熱、外気温の変動による温度収縮、乾燥収縮などが考えられる。次に、Step 2では自律治癒材料の材料性能と環境条件に支配される許容ひび割れ幅 δ_a を算定する。前記自律治癒材料では析出物によりひび割れを充填することから、充填すべきひび割れの幅が大きくなると析出物量が不足し充填が不十分となることが想定され、材料が有する性能と構造物が置かれる環境条件により止水性を発揮可能なひび割れ幅が制限されると考えられる。最後に、 $\delta_d \leq \delta_a$ を確認することで、ひび割れの自己修復が担保され、結果として $Q_{cjd} \approx 0$ の状態を確保することができると想定される。

表－6.2.1.2 設計手順の例

手順		作業
Step 1	設計ひび割れ幅 δ_d の算定	温度収縮、乾燥収縮などを設計外力とするひび割れ幅の算定
Step 2	許容ひび割れ幅 δ_a の算定	自己修復機能を確保するため主として材料性能から定められるひび割れ幅の算定
Step 3	ひび割れ幅の照査	$\delta_d \leq \delta_a$ を満足することを確認

6.2.2 設計における検討方法

(1) 設計ひび割れ幅の算定例

温度収縮や乾燥収縮を主たる設計外力と考えたときの設計ひび割れ幅の算定には文献[]の提案によるひび割れ幅算定値 w が参考となる（下式参照）。 w は、部材断面の鉄筋比、収縮ひずみ、拘束度が与えられれば以下により算定することができる。得られた w のばらつきを考慮し、さらに安全係数を乗じることで δ_d が算定される。ただし、式(6.2.2.1)～(6.2.2.4)による w の算定は、ひび割れ幅が主として鉄筋比により支配される領域（例えば鉄筋比 0.2%以上）に適用が限られることに注意されたい。

$$w = 2l \left(\frac{\sigma_s}{E_s} + \frac{\lambda \varepsilon_{sh}(t, t_0) - \varepsilon_t}{b \varepsilon_t} \right) \quad (6.2.2.1)$$

$$l = a \left(\frac{d_b}{\rho} \right) \quad (6.2.2.2)$$

$$m = 1 + \frac{Ln\rho}{2l} \left(\frac{\lambda \varepsilon_{sh}(t, t_0) - \varepsilon_t}{b \varepsilon_t} \right) \quad (6.2.2.3)$$

$$\sigma_s = E_s \left(\frac{\lambda \varepsilon_{sh}(t, t_0) - \varepsilon_t}{b} + \varepsilon_t \right) \cdot \left(\frac{L - 2ml}{Ln\rho + 2ml} \right) \quad (6.2.2.4)$$

ここに、 E_s は鉄筋のヤング係数、 λ は拘束度、 $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$ は材齢 t_0 で乾燥を開始したときの材齢 t における収縮ひずみ、 a と b はそれぞれ実験定数、 d_b は鉄筋径、 ρ は全鉄筋比、 n はヤング係数比、 ε_t は 0.0001、 L は部材長さである。

(2) 許容ひび割れ幅の算定

前記自律治癒材料については、析出物によるひび割れの閉塞効果がひび割れ幅および漏水量に与える影響に関し研究が続けられているが（例えば文献[3]）、 $Q_{cjd} \approx 0$ を実現するための許容ひび割れ幅の設定を行うには現状ではいくつかの課題がある。ここではその課題を簡単に整理する。

$$\delta_d = func.(\text{配合、初期漏水速度、水温、水質、.....}) \quad (6.2.2.5)$$

文献[3]では、ひび割れ間の通水（漏水）の経時による減少量は初期のひび割れ幅、初期通水量、水質と関係があることが示されている。 δ_d を設定するとき、自己修復を可能とする混和材の種類や混和量などを含め採用する配合条件が重要であることは言うまでもないが、このほか水圧（文献[3]の初期通水量を支配）や水質も大きな影響を与える。今後、これらの影響を定量化し、(6.2.2.5)式を確立することが望まれる。

<参考文献>

- [1] 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]、2007
- [2] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説、2006
- [3] 小松・細田・安・池野：ひび割れ間で通水する自己治癒コンクリートの治癒性状、コンクリ

ート工学年次論文集、Vol.30、No.1、pp.117-122、2008

[担当 閑田徹志、細田暁]

6.3 フライアッシュを用いた自律治癒コンクリートの材料設計例[1]

フライアッシュを使用するコンクリートの調合については、日本建築学会から「フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針（案）・同解説」[2]が出版されている。フライアッシュを使用することにより期待される効果としては、一般に次のような点が挙げられている。

- ・ワーカビリティ・ポンパビリティの改善
- ・長期強度の増進
- ・水和熱の低減
- ・アルカリ骨材反応の抑制

本報告書 3.2.1 にて紹介したフライアッシュを利用した自律治癒コンクリートは、これらの項目に加えて、フライアッシュの持つ反応の遅さを利用し、硬化したコンクリートが供用期間中に受けた損傷を、極めて長期間継続するポゾランに反応により治癒する効果の付与を目指した検討を行っている。ここでは、フライアッシュを用いた自律治癒コンクリートの材料設計例を紹介する。硬化後のコンクリートが受ける損傷を想定し、自律治癒機能を付与可能なフライアッシュコンクリートの調合方法を示している。具体的には、フライアッシュ置換率と水セメント比の考え方を整理し、初期強度の発現、中性化といった課題に対応した調合方法を示すこととする。

6.3.1 設計における検討方法

想定するコンクリートの自律治癒効果は、セメント硬化体に遍在したマイクログラックをポゾラン反応による生成物で充填し、治癒することにより得られる。

対象となるマイクログラックを生じる劣化因子として、乾燥収縮と凍害を想定する。いずれの劣化についても、構造体コンクリートの品質、置かれる環境、経過年数、劣化程度の関係が必ずしも明らかにされているとは言い難く、性能設計に当たってはこれらについて仮定を置く必要がある。ここでは、以下の3点を仮定する。

(1) 乾燥収縮

コンクリートの乾燥収縮は構造体施工中に型枠を解体した時点から開始し、拘束のない試験体では長さで約 0.7×10^{-3} から 1×10^{-3} の収縮となる。長さ変化を体積変化に換算すると 2.1×10^{-3} から 3×10^{-3} の収縮となり、外部拘束を受けた部材では可視的な収縮ひび割れとして観察される。これは歪みが集中して解放された結果起きる比較的大きなひび割れであり、今回のマイクログラックを充填することによる治癒作用の対象とはならない。それに対し、部材内外の相対湿度が大きく異なり、表面は乾燥しているが内部は湿潤な状態にある場合に、表面のみが収縮することによってマイクログラックが発生するのが内部拘束による乾燥収縮である。内部拘束の乾燥収縮ひび割れは型枠解体後の内外の相対湿度勾配が大きな初期材齢に発生するものの深くまでは進展しないことが報告されているが[3]、収縮量の詳細は明らかではない。ここでは、初期材齢において長さ変化で 1×10^{-3} 程度の収縮が表面に発生し、体積では 3×10^{-3} 程度の空隙を充填することを目標とする。未反応のセメント粒子も多く残っており、継続したセメントの反応による治癒も期待されるが、ここでは敢えて考慮しないこととする。

(2) 凍害

硬化後のコンクリートは内部に十分な水が存在する環境で凍結融解作用を受けると徐々にマイクロクラックが発生し、やがて膨張に似た長さ変化を起こす。相対動弾性係数で 80%程度までの劣化であれば長さ変化はほとんど観察されず、内部に閉じたマイクロクラックが累積された状態と考えられている[4]。劣化が進行した段階でも、相対動弾性係数が 60%で、圧縮強度は約半分[5]、長さ変化は 0.1%程度の増となる。凍害による長さ変化が 0.1%であり、それがクラックによるものとしたならば、体積で 0.3%の増加を見込むことが望まれる。長期性能を考慮すると、冬季には凍結融解作用を受け春から秋にかけて治癒養生を受けることとなり、経年の変化を予測することが必要となるが、凍害劣化の進行予測技術はまだその水準に達していない。ただし、経験的には凍害を受けたものの多くは 1 年目の春に劣化が顕在化し問題となることが多い。そこで、現段階では施工後初の冬を過ぎた時点から次に凍結するまでの期間を第 1 回目の治癒養生期間とし、この期間に体積で 0.3%の増加を見込むこととする。養生条件は、旭川市内に暴露したコンクリートの表面から 2mm のコンクリート温度・湿度を設定する。

(3) 空隙の過充填

フライアッシュを使用したコンクリートでは長期強度や水密性が高くなることが知られている。フライアッシュを砂と置換し大量に使用する可能性についても検討が行われている。フライアッシュ置換率約 40%とした水ポルトランドセメント比 60%のコンクリートを 40℃水中で 4 週間養生したものでは、20℃水中で 8 週間養生したもの及び 20℃水中で 4 週間養生したものより圧縮強度が高く、水銀圧入法により測定した空隙率が低いにもかかわらず、凍結融解抵抗性が低下することが報告されている[6]。これは、多量のフライアッシュの反応生成物によって毛細管空隙のみならず気泡の一部も充填されたことが原因で凍結融解抵抗性が低下したものと考えられている。

ここでは、過剰な空隙充填を避ける為に、調合時の水隙として存在する空隙を充填する範囲をフライアッシュの最大混和量の目標値として設定する。

乾燥収縮や凍害による長さ変化は鉄筋や周辺部材からの拘束がない状態の試験から得られた数値であること、乾燥では収縮、凍害では膨張と長さ変化の増減が逆となることに注意が必要である。乾燥収縮では、鉄筋や周辺部材からの拘束を受け実際の部材で顕在化する収縮率は、拘束を受けない試験体での値より小さくなることが考えられる。また、乾燥収縮と凍害ではコンクリート表面に顕在化したひび割れのパターンが大きく異なり、底やパラペット等の長手方向に発生する凍害特有のひび割れは鉄筋による拘束がほとんど無い方向に開き、鉄筋の腐食を防ぐかぶりコンクリートとしての性能を確保するための自己修復性が要求される。

上記(1)から(3)の他に、フライアッシュの使用上配慮すべき事項に、空気連行性、初期強度、中性化、フライアッシュの品質管理が挙げられる。AE 剤使用量に依存する空気連行性はフライアッシュの品質による影響を大きく受け、同一調合とした場合にも連行空気量が大きく異なる場合がある。現在では、フライアッシュの品質管理精度が向上し、さほど大きなばらつきなく、製品として供給が可能となっていることから、使用材料ごとに試し練りで混和材料を決定するこれまでの手法で対応可能と考えられる。しかしながら、異なる炭種から得られたフライアッシュでは改めて試し練りを行い、AE 剤使用量を確認する必要がある。

フライアッシュセメントとして使用し、水粉体比を水ポルトランドセメント比と同等にした場合、初期強度の低下が大きな問題となる。また、中性化については水ポルトランドセメント比フ

ライアッシュを混入したコンクリートでは水セメント比が同じであれば中性化の進行も同程度となることが示されている[2]。水ポルトランドセメント比はフライアッシュを混和しないコンクリートと同一とし、フライアッシュは外割で加えることを原則とすることにより、初期強度の問題、中性化の進行に対する懸念は払拭することができる。

6.3.2 フライアッシュ混和量の検討

フライアッシュ中でポゾラン反応に寄与するのは酸不溶性のガラス質であることが報告されている[7]。この量はフライアッシュの不溶残分(insol)から結晶質の量を除くことで得られ、使用するフライアッシュによって異なる値を持つ。実験に用いた5種類のフライアッシュでは約60%から80%の範囲にあった[7]。

セメントとフライアッシュを混合したペーストでは、混練時に水で占められていた水隙がセメントの水和生成物とフライアッシュのポゾラン反応生成物で充填されていく。セメントが全て反応すると約2倍の生成物が生じることが知られ、セメントのほぼ全てが反応した後もポゾラン反応は継続し、残った空隙を生成物で充填していく。水銀圧入法による空隙量変化に関する検討から、単位体積のセメントが反応した場合に生成する水和物体積は1.06、単位体積のフライアッシュが反応した場合の体積増は2.4という結果が示されている[1]。

一方、旭川市内のスラブ試験体内部の測定温湿度に基づき、セメント、フライアッシュの反応速度式[1,7]を用いて算定したC₃S、C₂S、フライアッシュの反応率を図-6.3.2.1に示す。フライアッシュ中のガラス質の反応率は、打設後最初の冬を過ぎ2度目の冬を迎えるまでの間に13.1%から25.6%へ増加する。最初の冬に相対動弾性係数で60%にまで劣化し、コンクリート中に発生した体積で約0.3%のマイクロクラックを、この反応率の増加に対応する生成物によって充填することが可能なフライアッシュ置換率を算定する。

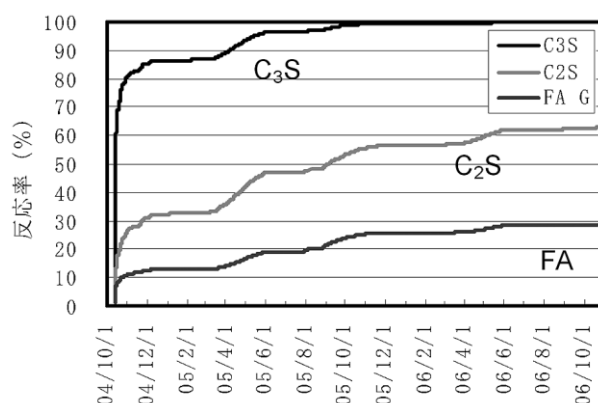


図-6.3.2.1 コンクリート内部の実測温湿度と水和反応モデルより算定した反応率[1]

0.3%の体積増はコンクリート 1m³ 中で 3 リットルに相当する。所要フライアッシュ量は(6.3.2.1)式で算定される。

$$3 = 2.4(25.6 - 13.1) / 100 \times F_w (F_{ins} - F_{cry}) / (100 \rho_f),$$

$$F_w = 3 / (2.4 \cdot 0.125 (F_{ins} - F_{cry}) / (100 \rho_f)) \quad (6.3.2.1)$$

ここに、 ρ_c, ρ_f : セメント、フライアッシュの密度(g/cm^3)
 W/C : 水セメント比(水ポルトランドセメント比)
 W_w : 単位水量(kg/m^3)
 C_w : 単位セメント量 (kg/m^3)
 F_w : フライアッシュ使用量(kg/m^3)
 F_{ins} : フライアッシュの不溶残分(%)
 F_{cry} : フライアッシュ中の結晶量(%)
 F/B : フライアッシュ置換率(%) = $F_w/(C_w+F_w) \times 100$
 F_{rv} : フライアッシュの反応体積 = $F_w(F_{ins}-F_{cry})/(100\rho_f)$

一例として、フライアッシュの不溶残分 $F_{ins}=90\%$ 、フライアッシュ中の結晶量 $F_{cry}=10\%$ 、フライアッシュの密度 $\rho_f=2.21$ では、所要フライアッシュ量は $28\text{kg}/\text{m}^3$ となる。

一方、空隙過充填を避けるためのフライアッシュ混入率の最大量は、セメント、フライアッシュ、水の体積比とフライアッシュ中の反応可能な割合から、(6.3.2.2)式により算定する。

$$W_w - (1.06 \cdot C_w / \rho_c + 2.4 \cdot F_{rv}) > 0 \quad F_w < (W_w - 1.06 \cdot C_w / \rho_c) / 2.4 \quad (6.3.2.2)$$

打設後最初の冬で相対動弾性係数 60%まで劣化したコンクリートを治癒するのに必要なフライアッシュ置換率と、長期材齢で水隙を充填するフライアッシュ置換率は、ともにフライアッシュの酸不溶性ガラス率と水セメント比で決定される。

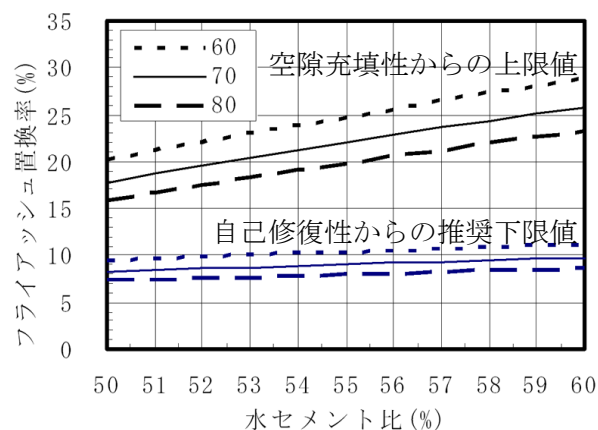
図-6.3.2.2 に示すように、打設後最初の冬で相対動弾性係数 60%まで劣化したコンクリートを修復するのに必要なフライアッシュ置換率は、水セメント比による違いは大きくなく、今回使用したフライアッシュのガラス質割合の範囲では約 7-11%の範囲となる。

それに対して、長期材齢で水隙を充填するフライアッシュ置換率は水セメント比とガラス質割合によって異なる結果が示されている。

図-6.3.2.2 から実用上のフライアッシュ置換率を概観すると、水ポルトランドセメント比 50 から 55%ではフライアッシュ置換率は 10 から 15%、水ポルトランドセメント比 55 から 60%ではフライアッシュ置換率 11 から 20%となる。

フライアッシュを使用した自律治癒コンクリートの配合（調合）設計にあたり、従来用いられてきたフライアッシュコンクリートと異なる点は、治癒効果を発揮しながらも、長期材齢での凍結融解抵抗性の低下に配慮してフライアッシュ置換率の範囲を規定したことである。

また、低温下での強度増進、初期強度の増進、中性化抵抗性に対してはフライアッシュを外割置換で扱い、水ポルトランドセメント比を試練により決定することで対応するものとする。他の配合（調合）手法は、既に示されている日本建築学会の方法[2]によることができる。



図ー6.3.2.2 フライアッシュ置換率の範囲[1]

(図中の 60, 70, 80%はフライアッシュの酸不溶性ガラス質割合)

<参考文献>

- [1] 自己修復コンクリートの開発、北海道立北方建築総合研究所 調査研究報告書、2007
- [2] 日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針（案）・同解説、1999
- [3] 桂修・松村宇・谷口円：コンクリート内部の相対湿度と内部拘束ひびわれ、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1005-1006、2004
- [4] 桂修・吉野利幸・鎌田英治：セメント硬化体の凍害機構モデル、コンクリート工学論文集、Vol.11、No.2、pp.49-62、2000
- [5] 松村宇・桂修・吉野利幸：凍害を受けたコンクリートの性状と劣化度評価法に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 563 号、pp.9-13、2003
- [6] フライアッシュのコンクリート構造物への適応に関する研究、北海道立北方建築総合研究所 調査研究報告書、2003
- [7] 谷口円・佐川孝広・桂修：フライアッシュの反応速度に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.1、pp.189-194、2007

[担当 佐川孝広]

7. 他分野における自己治癒（自己修復）現象

本章では、他分野における自己治癒現象に対して材料別に簡単に紹介する。まず材料的観点から分類を行い、セラミック、ポリマー、金属それぞれの場合に対して自己治癒研究の実例と工学的応用の可能性について紹介する。

7.1 セラミックス材料（構造セラミックス）[1]

セメント系材料以外のセラミック分野でも、特に構造セラミックス分野においてはひび割れ自己治癒に関する研究がすでに 20 年前から活発に研究されている。主にこのような材料は SiC 、 Si_3N_4 の複合体で、酸化物と共にひび割れ部位が治癒されることによって相対的に優秀なひび割れ治癒性能を有している。このような優秀な自己治癒性能は高温構造セラミック材料で活用されるので多くの信頼性と潜在性を持っていることから、大いなる関心を持たれている。反面アルミナやミュールライトのような酸化物セラミックはひび割れ自己治癒の性能がだいぶ落ちるものとされているが、このような酸化物セラミックスは焼結の間にセラミック材料の緻密化過程と似て、質量の熱拡散に依存するためにある。酸化によるひび割れ自己治癒の比率は酸化環境、温度、時間に多くの影響を受ける。すなわち、高温、長時間の酸化、ひび割れを治癒するのに十分な酸素などがその条件であり、このような条件とよく似た場合に優秀なひび割れ治癒性能を期待することができる。ここではこのような材料の中で Ti_3AlC_2 材料の自己治癒特性について簡略に紹介する。このような材料はセラミックと金属の 2 種類の特性が組み合わされた材料として、低密度 (4.2g/cm^3)、低熱膨張計数 ($9.0 \times 10^{-6}/\text{K}$)、高ヤング係数 (297GPa)、優秀な高温強度と高温酸化抵抗性、など典型的なセラミック特性を持っている。すなわち、このような材料は優秀な電気伝導性 ($2.9 \times 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)、優秀な熱衝撃抵抗性を持ち、金属と同様に高い耐損傷性能を持っている。したがって、エンジン、超音速運送手段、electrode、原子炉で広く応用されている。

図-7.1.1 に、ひび割れが生じた材料が 2 時間、1100 度で熱処理された後の表面を示す。周辺酸化層はひび割れの微細構造を露出させるために除去されている。酸化層下の表面観察を通じて、ひび割れ幅が新しい粒子で十分に満たされていることを確認することができる。ひび割れを充足している物質は EDS 分析を通じて Al と Ti の酸化物であることが判明した。

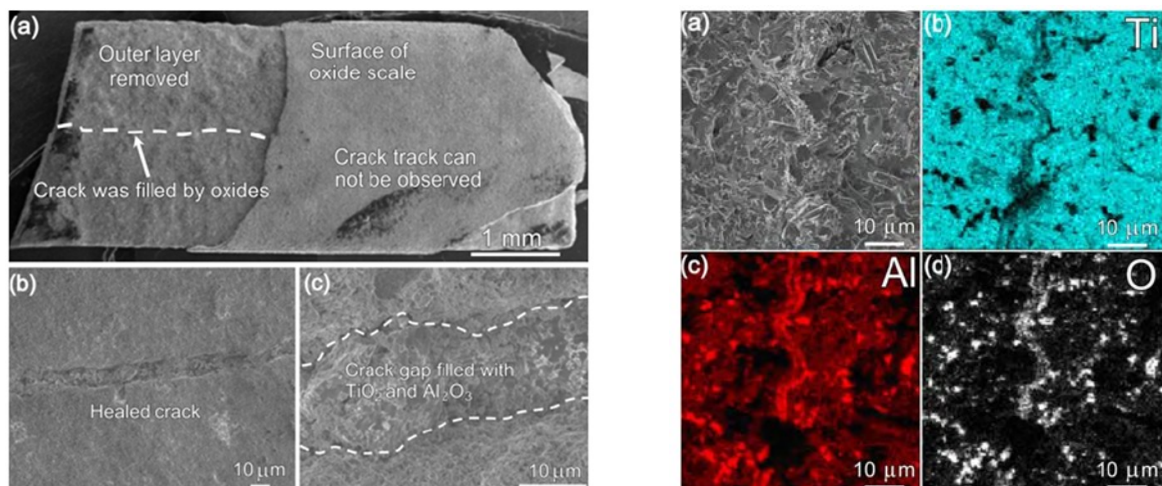


図-7.1.1 (左) 治癒された Ti_3AlC_2 のひび割れ表面 (右) 治癒された Ti_3AlC_2 の断面イメージ[1]

図-7.1.2 に、治癒したサンプルの断面にともなう全体ひび割れパスを示す。高解像度イメージではひび割れが微細な酸化物粒子で多く満たされていることが見られる。

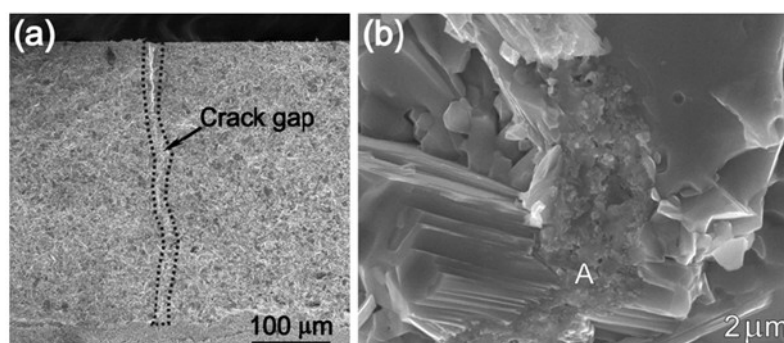


図-7.1.2 (a) 治癒された Ti_3AlC_2 の断面 (b) ひび割れを埋める微細粒子[1]

このような材料の自己治癒過程を図-7.1.3 に簡単に整理して示す。一般的にひび割れ表面で Al は酸素と反応して Al_2O_3 を生成する。このような Ti_3AlC_2 の破壊表面で薄い Al_2O_3 フィルムの層が生成されて、その後 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{O}_y$ に変化する。また、このような Ti の酸化によって TiO_2 が生成され、最終的にはひび割れ部位に $(\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 混合層が形成される。平均 $5\mu\text{m}$ 以下のひび割れは酸化によって完全に治癒されることが認められた。したがって、以後このような材料を用いた自己治癒性能を持つセラミック材料の構造セラミック分野への応用が多く期待される。

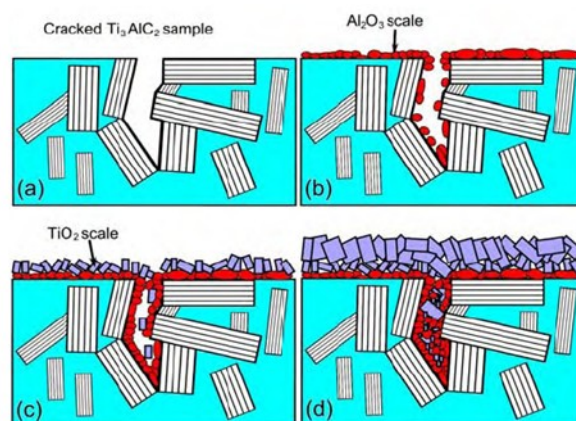


図-7.1.3 Ti_3AlC_2 のひび割れ治癒過程[1]

7.2 ポリマー材料（防水分野の応用）[2]

ポリマー材料の場合もまた多くの領域で自己治癒技術を利用することができる。特に防水分野においては次のような技術の応用が可能である。ポリマー材料の中で膨潤性を持つポリマーまたはハイドロゲル(hydrogels)は特に防水目的のために製造開発された材料である。このような材料はその高い膨潤性により自己防水システムの実現性を高める。この材料は水溶性液体と反応することによりポリマーが膨潤して、ハイドロゲルを生成する。ポリマー材料は圧力下でも水溶性液体を吸収してハイドロゲル生成し、乾燥重さの 1000 倍程度を吸収することができる。

図-7.2.1 に水溶性ポリマーの膨潤性を簡略に示す。乾燥された水溶性ポリマーは水と接触することにより直ちに膨潤過程を始め、大きく体積が増加する。膨潤圧力の駆動力は、混合エントロ

ピー(mixing entropy)として、ポリマーの3次元的な結合構造の変化によって膨潤力の増加または減少を制御できる。このような材料を用いて、予期できないひび割れなどの問題が発生する時や漏水に対する高い安全性が要求される所に適用する開発が成されている。膨潤ポリマーを基礎にした防水生成物の開発は相当な膨潤圧力が要求される。膨潤圧力は平衡膨潤体積より体積の膨張が制限される時に発生する。したがって、防水技術の概念において、用いる材料を設定するためにはポリマーの膨潤圧力を正しく知ることが必須である。(図-7.2.2)

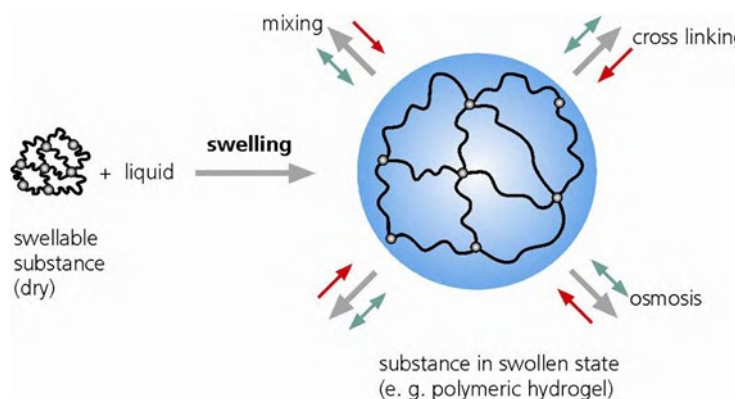


図-7.2.1 親水性ポリマーの膨潤特性[2]

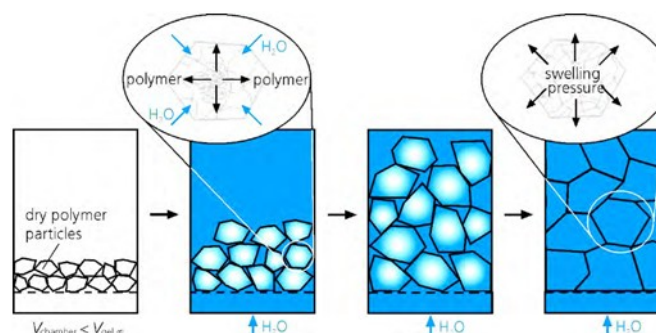
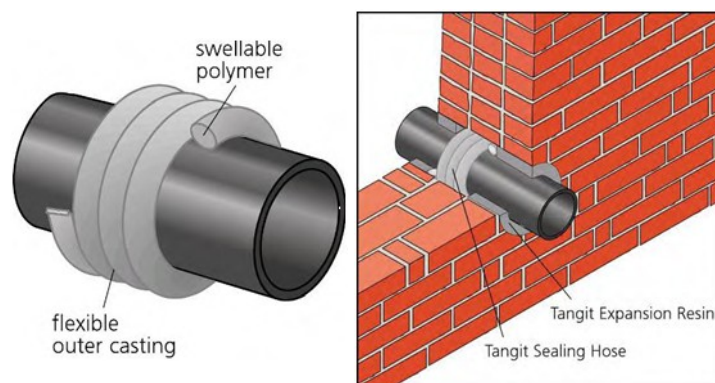


図-7.2.2 体積膨張が制限された場合における膨潤圧力[2]

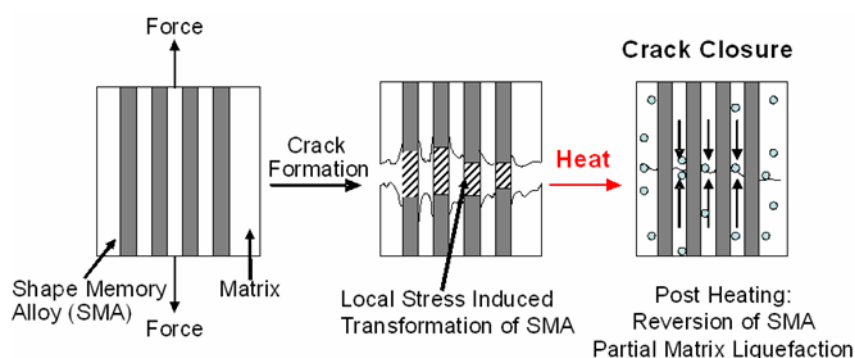
これまでのところ、防水技術のためにポリマーハイドロゲルの応用を研究した事例はそれほど多くはない。このような材料は大部分経験的に使用されてきた経緯があり、ポリマー構造における、防水体積と防水性能の間の相関関係やメカニズムの解明はいまだにも十分ではない。膨潤ポリマーを基礎にした防水生成物は建築物の外壁においてガス、水道、電力供給用管とのジョイントの部分に広く応用されるようになることもある。図-7.2.3 に、ポリマー粒子が巻かれた防水ホースの概念図を示す。ホースの外壁は外部から水の透過が柔軟なように製造される。このような材料はパイプで漏水発生時直ちに水と反応して、パイプの漏水を遮断できる特徴を持っていることが分かる。



図－7.2.3 防水ホースの概念と応用方法[2]

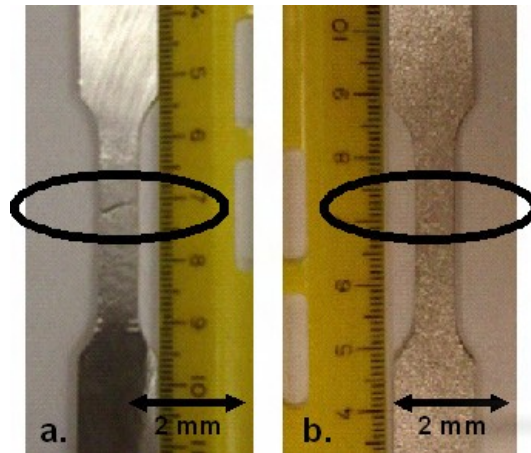
7.3 金属材料（高性能複合体の応用）[3]

金属材料においても自己治癒技術は多く用いられている。新しい合金複合体は自己治癒が可能な高強度構造材料に適合するようにデザインされる。このような材料は構造的な損傷を補修することができるように多機能性の生体模倣型の複合体と設計される。自己治癒複合体は熱力学的に融和性がある形状記憶合金(SMA)とひび割れを治癒できる制御された熔融金属などで構成される。すなわち、損傷後複合体に熱が加えられる場合、SMA ワイヤーは圧縮力を加えて、ひび割れを密閉する。以後母体の合金は部分的に治癒温度で熔融して、ひび割れ部位を治癒するように設計された。図－7.3.1 にこのような材料の自己治癒過程を簡略に示す。



図－7.3.1 金属材料の自己治癒過程[3]

研究者らはこのような自己治癒効率を評価するために引張試験を行い、破壊後 24 時間、169 度の熱処理を加えた後の自己治癒挙動を評価した。その結果このような材料はひび割れ治癒後で極限引張強度が 95%以上回復されたことが分かった。図－7.3.2 はこのような材料の自己治癒前と自己治癒後の結果を示す写真であり、このような材料を使うことによって高性能金属複合体の設計が可能になることが分かる。



図－7.3.2 自己治癒前後の金属材料 (a)治癒前 (b)治癒後[3]

<参考文献>

- [1] Song G.M., Sloof W.G., Li S.B., Zwaag S.: Crack healing of advanced machinable high temperature Ti_3AlC_2 Ceramics, Proceeding of the first international conference on self-healing materials, PDF No. 12, Noordwijk aan Zee, The Netherlands, 18-20 April 2007
- [2] Wack H., Bertling J.: Water-swellaable materials – application in self-healing sealing system, Proceeding of the first international conference on self-healing materials, PDF No. 51, Noordwijk aan Zee, The Netherlands, 18-20 April 2007
- [3] Manuel M.V., Olson G.B.: Biomimetic Self-healing metals, Proceeding of the first international conference on self-healing materials, PDF No. 17, Noordwijk aan Zee, The Netherlands, 18-20 April 2007

[担当 安台浩]

8. セラミックスの自己き裂治癒現象

8.1 はじめに

構造用セラミックスは、他の材料と比較して、特に高温強度および耐摩耗性が優れている。さらに、低比重、高耐食性、高熱伝導、絶縁性等の優れた特性がある。そのため、ガスタービン等のエネルギー機器、ベアリング等の耐摩耗摺動部品、切削工具等への応用が進んでいる。構造用セラミックスは、窒化ケイ素(Si_3N_4)や炭化ケイ素(SiC)といった非酸化物系と、アルミナ(Al_2O_3)やムライト($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)といった酸化物系のものに分類される。

しかし、構造用材料の主流を占めている金属材料と比較して、セラミックスは破壊靱性値が低いという弱点を有している。これが原因で、セラミックスは小さな欠陥が存在しても強度が大きく低下してしまう。この問題のため、加工後の部品の表面にき裂が残らないように丁寧に加工する必要がある、コストが極めて高くなる。さらには、使用中にき裂が発生した場合には、信頼性が大幅に低下する恐れがある。

これらの問題点を克服する手段としては、セラミックスに自己き裂治癒能力を持たせることが有用である。セラミックスに自己き裂治癒能力を発現させることができれば、次のような利点がある。(a)高能率な研削・研磨後に、き裂を自己治癒する。これにより加工能率および加工コスト面での利点が非常に大きくなる。(b)使用中に発生した表面き裂がすべて治癒されるので信頼性が大幅に向上する。この様な考え方から、横浜国立大学の安藤らの研究グループでは、構造用セラミックスに優れた自己き裂治癒能力を発現させる研究を実施している[1,2]。これまでに、優れた自己き裂治癒能力を持つ構造用セラミックスが開発されている[5-8]。

8.2 セラミックスの自己き裂治癒のメカニズム

表-8.2.1 に、これまでに開発された優れた自己き裂治癒能力を有するセラミックスを示す。これらの材料は、窒化ケイ素[3]、ムライト[4,5]、アルミナ[6,7]、および炭化ケイ素[8]に分類できる。特徴は、母材に対して10~30 vol. %の炭化ケイ素粒子(SiCp)および炭化ケイ素ウィスカー(SiCw)を複合させているという点である。炭化ケイ素を複合させることで優れた自己き裂治癒能力を発現できるとともに、高温強度特性や破壊靱性値を向上できる。

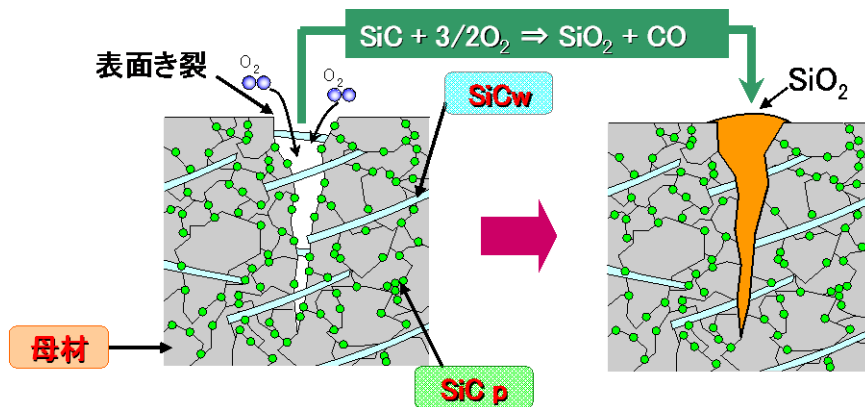
表-8.2.1 自己き裂治癒能力を有するセラミックス材料

材料名	代表的な成分
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiCp}$	$(\text{Si}_3\text{N}_4 + 20 \text{ wt. \% SiCp}) + 8 \text{ wt. \% Y}_2\text{O}_3$
ムライト/ SiCp	ムライト + 15 vol. % SiCp
ムライト/ SiCw	ムライト + 15 vol. % SiCw
ムライト/ SiCw/SiCp	ムライト + 25 vol. % SiCw + 10 vol. % SiCp
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiCp}$	Al_2O_3 + 15 vol. % SiCp
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiCw}$	Al_2O_3 + 20 vol. % SiCw
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiCw/SiCp}$	Al_2O_3 + 20 vol. % SiCw + 10 vol. % SiCp
SiC	$\text{SiC} + \text{Sc}_2\text{O}_3 + \text{AlN}$

図－8.2.1 に、自己き裂治癒のメカニズムを模式的に示す。自己治癒現象は、主として次のような炭化ケイ素の高温酸化反応によるものである。

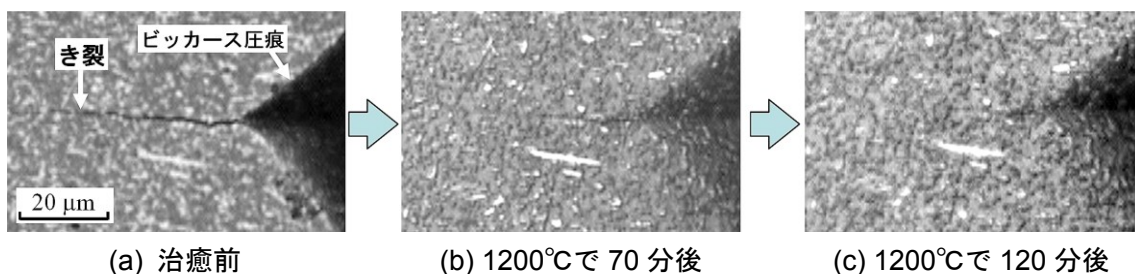


高温環境下において、セラミックス表面にき裂が発生した際、き裂内部に浸入してきた酸素がそこに存在している炭化ケイ素（SiC）の微粒子やウィスカーと反応して酸化ケイ素（SiO₂）を生成、その SiO₂ がき裂内に徐々に堆積して空間を埋め、き裂を強固に接合することによってき裂治癒が生じる。ところで、SiO₂ にはガラス相と結晶相がある。SiO₂ がガラス相の場合には、治癒材の高温強度は低くなってしまう。SiO₂ を結晶相とすることで、治癒材の高温強度を高くできることが明らかとなっている。



図－8.2.1 炭化ケイ素粒子(SiCp)および炭化ケイ素ウィスカー(SiCw)を複合したセラミックスのき裂治癒メカニズム[8]

自己き裂治癒中のき裂の変化を明らかにするために、光学顕微鏡を用いて、き裂治癒挙動のその場観察を行った。表面長さが 100μm の予き裂を導入した試験片を 1200℃の大気中において 120 分間加熱した。図－8.2.2 に、炭化ケイ素粒子と炭化ケイ素ウィスカーを複合したムライト[5]の自己き裂治癒挙動のその場観察の結果を示す。実験開始 70 分後には表面き裂の治癒の兆候が見られ、120 分後には光学顕微鏡で確認が難しいほどに自己治癒している。



図－8.2.2 ムライト/SiCw/SiCp の自己き裂治癒挙動(治癒条件:大気中、1200℃、2h)[5]

8.3 き裂治癒挙動に及ぼす治癒温度と治癒時間の影響

図－8.3.1 に、炭化ケイ素粒子を複合したアルミナ(Al₂O₃/SiCp)について、き裂治癒材の曲げ強

度に及ぼすき裂治癒温度の影響を示している[6]。●印は、平滑材の曲げ強度(σ_B)である。△印は、表面長さが $100\mu\text{m}$ の予き裂を導入した試験片の σ_B である。予き裂の導入により、 σ_B は約 180MPa まで低下した。予き裂を導入した試験片を、治癒温度と治癒時間を変化させて、き裂治癒を行った。図-8.3.1 より、治癒温度が上昇するにつれて、 σ_B が向上することが分かる。治癒材の σ_B が平滑材のそれと同等になる温度を、き裂治癒可能な最低温度として評価した。これより、1 時間、10 時間および 300 時間のき裂治癒により、表面長さが $100\mu\text{m}$ の予き裂を完全に治癒できる最低温度は、それぞれ 1300°C 、 1150°C および 1000°C であることが明らかとなった。以上のことより、き裂治癒は温度と時間の関数であり、高温になるほど短時間でき裂を治癒できることが明らかにされている。

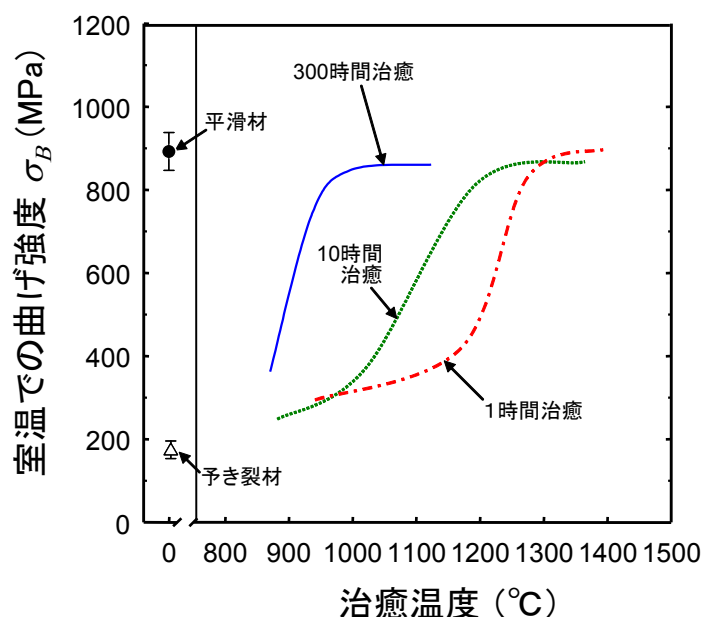


図-8.3.1 き裂治癒挙動に及ぼす治癒温度と治癒時間の影響[6]
($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiCp}$ 、大気中で熱処理)

8.4 き裂治癒挙動に及ぼす雰囲気の影響

ここでは、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiCp}$ のき裂治癒挙動に及ぼす雰囲気の影響について述べる。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiCp}$ の平滑材に表面長さが $100\mu\text{m}$ の予き裂を導入した後、大気中、真空中、アルゴンガス中および窒素ガス中において熱処理を行った。図-8.4.1 に、熱処理後の試験片を用いて曲げ試験を行い、強度回復の程度を評価した結果を示す[6]。予き裂材の σ_B は約 180MPa であり、平滑材のそれに対して大幅に減少している。一方、大気中において熱処理を行った試験片の σ_B は完全に回復していることから、き裂が完全に治癒されたことが分かる。しかし、真空中、アルゴンガス中および窒素ガス中において熱処理を行った試験片の σ_B は約 400MPa まで向上するだけであり、き裂はほとんど治癒されていない。これらの結果は、大気中における $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiCp}$ のき裂治癒は、式(8.2.1)において示した化学反応により生じた SiO_2 によるものであることを示唆している。表-8.1 に示した他の材料においても、き裂治癒は大気中の熱処理により生じ、不活性ガス中では生じないことが明らかとなっている。

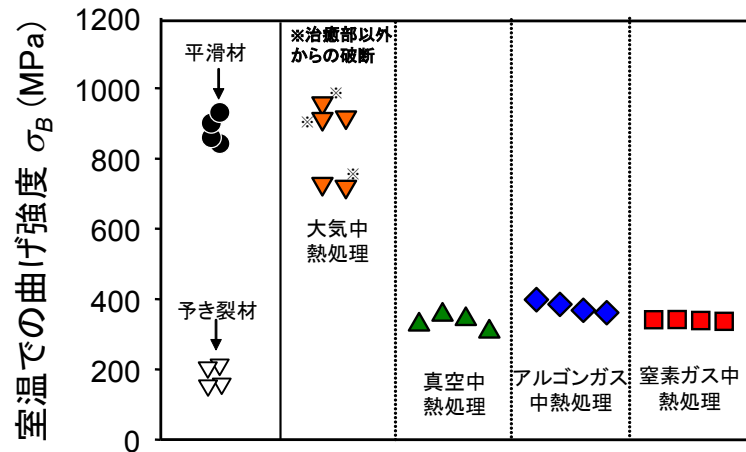


図-8.4.1 き裂治癒挙動に及ぼす雰囲気の影響[6]

($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiCp}$ 、熱処理条件: 1300°C 、1時間)

8.5 き裂治癒材の高温強度特性

図-8.5.1 に、き裂治癒材の高温強度特性を示す。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiCp}$ のき裂治癒材の高温曲げ強度は、 Al_2O_3 単体の曲げ強度よりも大幅に高い。すなわち、炭化ケイ素を複合させることで、優れた自己き裂治癒能力を発現できるだけでなく、特に高温における強度を向上できる。 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiCp}$ の高温強度は特に高く、 1400°C 程度の高温においても治癒部は母材部と同等の高い強度を有している。この強度向上は治癒物質の結晶化によってもたらされたと考えられる。以上のことから、これらの構造用セラミックスは高温エネルギー機器や自動車用の材料としての応用が期待される。

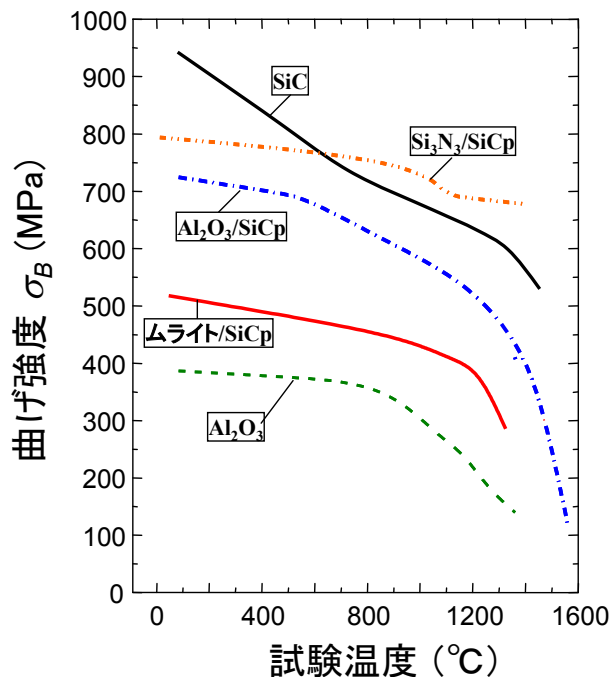


図-8.5.1 き裂治癒材の曲げ強度の温度依存性[6]

8.6 おわりに

本稿では、セラミックスの自己き裂治癒のメカニズム、き裂治癒挙動に及ぼす治癒温度と雰囲気の影響、き裂治癒材の高温強度特性について紹介した。これらのセラミックスは、使用中の温度、雰囲気および応力の条件によっては、使用中に発生したき裂を使用中に治癒でき、しかも、そのき裂治癒温度において、き裂治癒部が母材部と同等の高い疲労強度を有していることが最近の研究から明らかとなってきた[9,10]。今後はさらに高い破壊靱性値と優れたき裂治癒能力を有する材料の開発が望まれる。さらには、き裂治癒能力を活用したセラミックス部品の品質保証法の確立や、セラミックスの接触強度特性を向上させる新たな表面改質手法の開発が望まれる。これらにより、セラミックスの高温構造用部材等への応用が大いに進展するものと期待される。

<参考文献>

- [1] 自己修復材料研究会編：ここまできた自己修復材料 信頼性と経済性を高めるキーマテリアル、工業調査会、2003
- [2] Nakao W., Takahashi K. and Ando K.: Self-Healing of Surface Cracks in Structural Ceramics, S.K. Ghosh Ed., Self-healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications. WILEY-VCH, Weinheim, Germany, Chapter 6, pp.183-217, 2008
- [3] 安藤柱・秋ミンチョル・佐藤繁美・姚斐淵・小林康良：日本機械学会論文集(A編)、64-623、1936、1998
- [4] Chu M.C., Sato S., Kobayashi Y. and Ando K.: Fatigue Fract. Engng Mater. Struct., 18-9, 1019, 1995
- [5] Nakao W., Mori S., Nakamura J., Takahashi K., Ando K. and Yokouchi M.: J. Am. Ceram. Soc., 89, 1352, 2006
- [6] Ando K., Kim B.S., Chu M.C., Saito S. and Takahashi K.: Fatigue Fract. Engng Mater. Struct., 27, 533, 2004
- [7] K. Takahashi, M. Yokouchi, S.K. Lee, K. Ando: J. Am. Ceram. Soc., 86, 2143, 2003
- [8] Kim Y.W., Ando K. and Chu M.C.: J. Am. Ceram. Soc., 86, 465, 2003
- [9] Takahashi K., Ando K., Murase H., Nakayama S., Saito S.: J. Am. Ceram. Soc., 88, 645, 2005
- [10] Takahashi K., Uchiide K., Kimura Y., Nakao W., Ando K. and Yokouchi M.: J. Am. Ceram. Soc., 90, 2159, 2007

[担当 高橋宏治、安藤柱]

9. 研究集会 in 福岡

2008 年コンクリート工学年次大会（福岡）において、当研究委員会が主催する研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」が開催され、100 名を超える参加をいただいて盛会のうちに終えることができた。中でもパネルディスカッションでは、コーディネーターに東北大学三橋博三先生を、パネリストに京都大学宮川豊章先生、東京大学岸利治先生、太平洋セメント株式会社山田一夫氏を迎え、フロアからの活発な意見交換も含めて委員会活動や研究を進める上での将来展望について建設的なご意見を多数いただいた。ここでは、パネルディスカッションにて行われた議論の反訳を収録し、これから取り組まれる本分野の研究の指針としたい。なお、会場の雰囲気なるべくそのまま伝えるため、可能な限り編集を行わず、発言されたままの言葉で収録した。そのため、前後の繋がりなどが分かりにくい部分もあるかと思うがご了承ください。

JCI 年次大会 08 福岡大会 研究集会

パネルディスカッション「ここまできたコンクリートの自己修復」

平成 20 年 7 月 10 日（木）

主催：セメント系材料の自己修復性とその利用法研究専門委員会（JCI-TC075B）

コーディネーター：三橋博三（東北大学）

パネリスト：岸利治（東京大学）、宮川豊章（京都大学）、山田一夫（太平洋セメント）

司会：丸山一平（名古屋大学）



【丸山】 それでは、時間になりましたので始めたいと思います。これから 1 時間はパネルディスカッションということで、コーディネーターにインテリジェント・マテリアルに非常にご関心が高く、いろいろ研究されている三橋先生を迎え、実際に、いま研究をやられている東大の岸先生、また、コンクリート構造物のライフサイクル全般について造詣の深い宮川先生、セメント化学の立場から山田様をパネリストとしてお迎えして、パネルディスカッションを始めたいと思います。

それでは、三橋先生、どうぞよろしくお願いします。

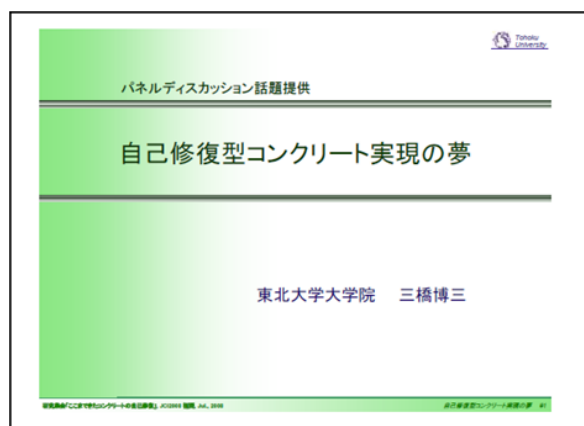
【三橋】 おはようございます。朝早くからこんなにたくさんの方にお集まりいただける研究集会を企画された五十嵐先生をはじめ、研究委員会の方々に敬意を表したいと思います。ただいま、ご紹介をいただきました東北大学の三橋でございますが、最初の話のきっかけをつくるのに幾つかスライドを西脇さんがつくってくれたのがありますので（スライド 1）、お手元の資料の一番後

ろに二、三ページ入っているものなのですが、ちょっと話題提供させていただいて、討論に入っていきたいと思います。

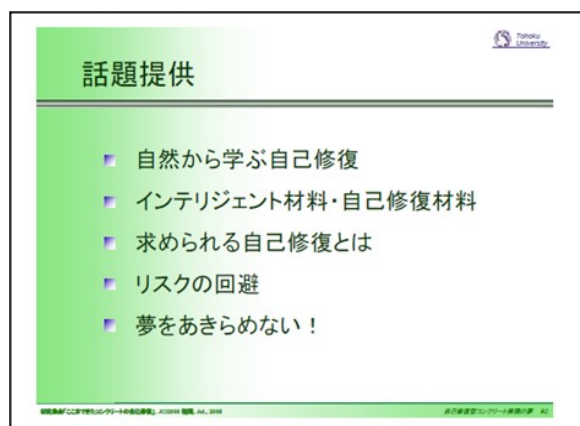
(スライド 2) 今日の私の最初のイントロの話題提供はここに示すような話題で進めたいと思いますが、先ほど国枝先生のスライドでもありましたように、人間に変調が起こったときにどういうふうに対処してそれを治すかという身近な例からすると、寝てれば治るというレベルで回復に向えるのが一番いいわけです(スライド 3)。それを可能にするのは、人間の中の免疫機構とか、回復力な訳です。それが足りない場合には、お薬の助けがやっぱりどうしても必要になったりします。あるいは、もっとしんどいときには、いろんな注射をうったり、手術を受けたりしなくてはいけなくなるわけですが、コンクリートの場合は、ひび割れが典型的な例で、このほかにもいろいろな変調があります。それをとにかく直して、求められる性能がちゃんと発揮できるように戻したいというのが、今、我々がやろうとしている自己治癒、自己修復の目的かと思います。

(スライド 4) 私がこの研究に関心を持ったのは、例えば木の研究なんかをやっていたときに、例えば、木は傷をつけられても自分でちゃんと修復する機能を持っていたりするんですね。それは先ほどの人間の場合もそうですし、動物の場合でも、生物は結構回復力を自分で備えております。では、何でも、どういうものでも自然治癒できるのかというと、そんなことはないわけで、非常に微小な損傷、例えば、人間の場合ですと皮膚に傷をつけてしまったとか、あるいは骨折したとか切り傷をつけてしまったとか、レベルに応じてそれなりにいろいろな回復力の機能を持っております。

工業材料についても、最近いろいろな自己治癒の研究が進められております。この辺のことに



スライド 1



スライド 2



スライド 3



スライド 4

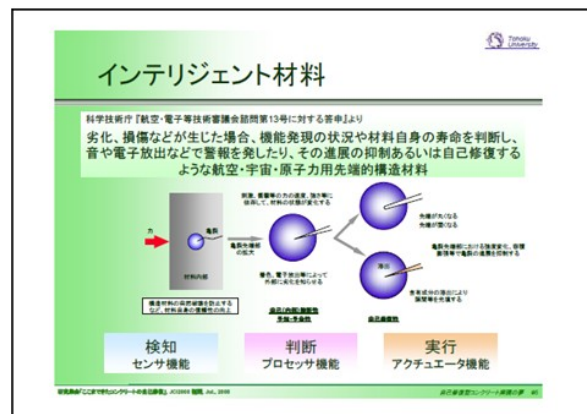
については、幾つか出版物もございますので話はそちらに譲りたいと思います。その中に示していますように、いろいろな損傷というのはありますけれども、それをちゃんと見きわめて、それに適切な対応をする手だてをどうやってつくり上げていくかということを考える必要があるかなと思うわけです。

木の研究をやっていて、非常におもしろいところに目が行ったと申し上げました。いろいろ考えたのは、コンクリートの構造物が造られるときに、いいコンクリートというのは初期性能をかなり上げておいて、それで例えば長い年月にわたってメンテナンスフリーできちんと要求性能を満たせるようにしておけば、それは確かに社会から求められる要求に対して応えていることになるとは思うのですが、そのためにはかなりのコストをかけて初期性能を上げていかないとはいけないわけです。けれども、本当に全部が全部、そういうことをやらないとだめなのかというと、必要になったときにそれに応じて要求されることをちゃんと補ってあげれば、初期性能をそんなにものすごく高くセットしなくてもいいんじゃないだろうか。それに見合ったコンクリート材料をどうやってつくるかというのが、新しい研究課題としておもしろいのではないかと取り組み始めたのが、90年代の半ばぐらいで、ちょうど西脇さんが学生でうちの研究室に来たころなんです。

(スライド 5) インテリジェント材料というのは、さっきちょっとご紹介にありましたけれども、日本発の言葉だと言われています。アメリカの文献なんか見ると、むしろスマートマテリアル (smart materials) とかスマートストラクチャー (smart structure) で、スマートストラクチャーのほうがよく皆さん目にしてらっしゃると思います。宇宙開発関係なんかでセンサーをいっぱい貼りつけておいて、変調の情報をキャッチして、それに対してあとはアクチュエーター (actuator) で保守していく、補っていくというスマートストラクチャーの研究が、一時期かなりやられていたのをごらんになっていらっしゃると思います。概念的にはそれと同じように、まず、問題が何なのかというのを検知して、それに対して例えば補修しなくてはいけいか、あるいはそのまま放っておいても大丈夫なのかということを、要求性能に比較しながら判断する必要があるわけです。

スマートストラクチャーの場合ですと、センサーから入ってきた情報をコンピュータで判断して、次のアクチュエーターに受け渡していくかどうかというのを判断しながら対応するわけです。この直さなくてはいけないという判断を、コンクリートの場合には埋め込まれたセンサーの中から出てきた情報を受け取って、その材料自らが判断して、それに対応して材料自体が補修しなくてはいけないところをちゃんと補修するということになります。まさに、コンクリートに生命を与えるようなことをやらないといけないわけで、これはなかなか大変なことになります。

おまけがありまして、人体の人工皮膚などもかなり研究が進んでおります。あるいは、宇宙開発などでも、かなりお金をかけることができるわけです。ところがコンクリートにそんな金をかけてだれが使ってくれるかという話になると、なかなか 100 年以内でも使ってくれそうもない研究をやらなくてはいけないことになります。最近はその非常に基礎的な研究には、お金は使



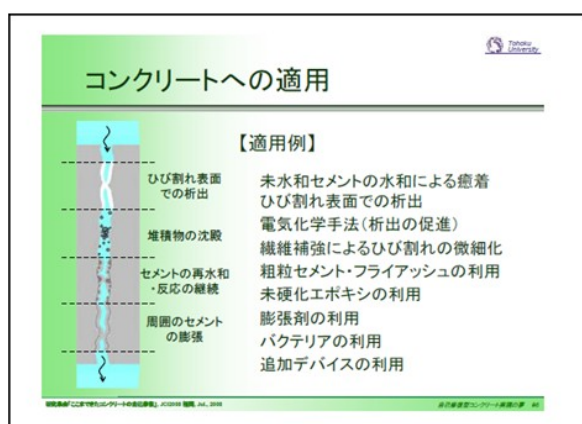
スライド 5

われないという悪循環がありますので、何とかして、あまりお金をかけなくても、ちゃんと知恵で実現できるようなものを考えなくてはいけないというところが、おもしろいといえばおもしろいし、悩みの種といえば悩みの種だと思います。

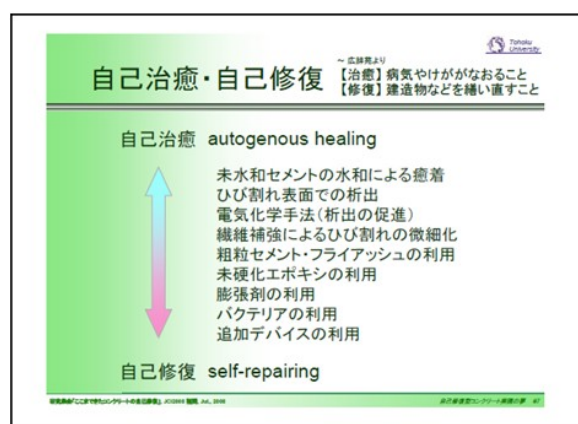
（スライド 6）今日のお話で、非常にたくさんの方々がいろいろな研究をなさって、蓄積がどんどん出来てきているということを改めて再認識して、非常に心強く思っているわけですが、例えば、コンクリートのひび割れを取り上げるにしても、それをどう補修していくのかというメカニズムに応じて、いろいろな手法とか材料が提案されつつあるわけです。

（スライド 7）言葉の定義というのが先ほどありましたけれども、コンクリートをやっている人たちには、いろいろな方々がおられますので、そんな定義はどうでもいいのではないかなという方がもしかすると多いかもしれません。ただ、メカニズムをきちんと考えて、それに対して適切な手段なり対応策を考えようということからすると、何が違っていて、その違いだけを強調するのではなくて、目的をどこへ向けているのか、またそれぞれの特徴をうまく生かすにはどうしたらいいのかという方向に行くには、それぞれの中身の性格づけをきちんとするというのは、それはそれで非常に意味があるのではないかと思います。（スライド 8）この絵は、昨日までなかなかよく理解できなかったのですが、今日の先ほどのご説明で、ようやく何となくわかってきました。

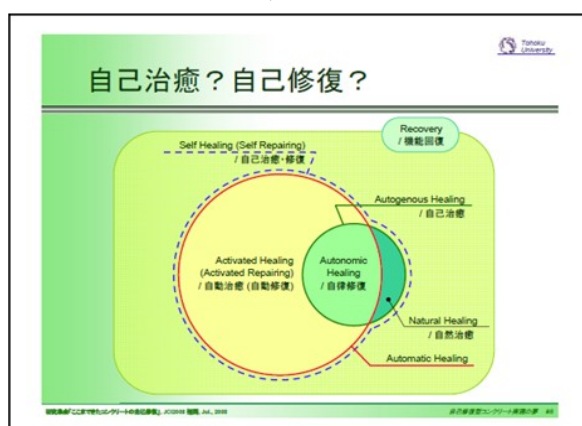
（スライド 9）技術開発というのは、一方で、研究者の宿命で、趣味と実益を兼ねてやっているわけです。そういうシーズを開発するという研究に対して、もう一方で、ではどういうところにニーズがあるのかというのを見きわめながらやらないと、せっかく頑張ってもなかなかその成果が生かされないということがあります。今日は宮川先生がいらっしゃると思いますので、ニーズというあたりからの視点で、どういうお話をしていただけるかなと非常に興味深いところでは



スライド 6



スライド7



スライド 8

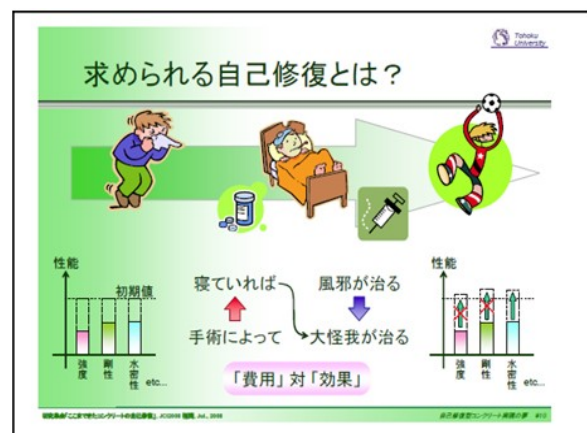


スライド 9

ございます。今、補修技術はかなり進んでいるから自己修復なんて必要ないのではないかという見方もあるかもしれません。しかし、それはあくまでも人海作戦で現状技術でやるということでカバーできる範囲と、それではなかなか手がつけられないところがあるわけです。例えば、足場を組んで補修工事ができるところはいいとしても、それができないところで、でもやっぱりできるだけ早い段階で補修しないといろいろな問題が起こるようなところに自己修復が使えるでしょう。あるいは、原子力発電施設関係のところで人間がなかなか近づけないとか、そういう問題もインフラストラクチャーの中にはいろいろあるでしょうから、そういうところを見きわめながら技術が適用できるところを探していきたいなと思っています。先ほどの地下構造物とか、トンネルなんかでもそういうことが言えるかもしれません。

(スライド 10) それから、どういうものが求められているのかという点があります。何でも、どういうものでも直せるというわけでも多分ないんだろうと思います。地震で壊れたのを自動修復で直せるかとよく言われるんですけども、ばらばらになったコンクリートの柱を自己修復技術で「エイヤッ。」と直すことはなかなか大変かとは思いますが。そういう意味では、寝てれば大けがでも治るよというところまでには、なかなかいかないかもしれません。相手を見きわめて、どういう性能が求められていて、それに対して適切な修復技術がどういうものかというシナリオを描きながら取り組んでいけば、非常に現実的な技術開発の研究課題になり得るのでないかと思っています。今日は、ぜひパネリストの先生方にいろいろご意見をいただきながら、今後の研究展開に発展させていただければと思います。よろしくお願いします。

(スライド 11) 先ほど、既に佐川さんのお話にあったかもしれませんが、そういうすぐれた技術、あるいはそういうすぐれた薬みたいなものができたからといってどんどん入れればいいのかという点と必ずしもそうではないわけで、あるときには非常にうまく効くんですけども、それをやり過ぎたりすると、実はかえってだめになることもあるでしょう。ひび割れを直すつもりで入れたものがむしろひび割れを促進してしまったとかにならないように、どこかで制御をうまくかけられるような仕組みもきちんと考えていかないといけないと思います。



スライド 10



スライド 11



スライド 12

(スライド 12) これで最後なんですけれども、自己修復コンクリートなんて夢のような話だと言われたことありますが、今日のお話なんかからすると、夢じゃなくて現実的にちゃんと確立に向かって展開できる新しい技術として、社会的にも貢献できるものになりつつあるなという感じがします。大体こういう新しい課題というのは、最初は非常に困難が大きいわけですから、夢を持って、あきらめしないで、ぜひ前進していったほしいなと思っております。じゃ、今日の議論をよろしくお願いします。

それでは、今の私の話はただのイントロでございますので、先生方に少しご自分のお仕事の紹介も含めて、お話をしていただきたいと思います。では、こちらから順に、岸先生からお願いいたします。

【岸】 すみません、ご指名があるとは思ってなかったのです。特に話す内容を考えてきたわけではないんですけれども、それでは、少し歴史的な経緯をご紹介させていただきます。私が研究に着手したのは、96～97 年ぐらいです。そのころは三橋先生がやられたご研究をインテリジェント・マテリアルということで拝見させていただいておりました。

やるきっかけは、前川宏一先生が修士の学生さんの南部君を指導されていて、膨張材を使って、そのあとで水を加えるとひび割れが閉じるということを南部君が言っているということで、ついてはそういうことができるのではないかということをおっしゃられました。実際、彼の修士論文の研究は、剛性が回復するかという観点でやられていたのですが、さすがに剛性までは回復しない、曲げ剛性は回復しないということで終わっていました。では、じゃあもうちょっと詰めていけば、自己修復できるのではないかということで、97 年から AIT に行きまして、そこで少し着手し始めたということでございます。

当時は、水セメント比が高いと、やはり未反応の成分が残ってなくて追加膨張ということが起こらないので、自己修復できないということがわかったのですが、水セメント比の低いところで使うと、膨張のみならずセメントの未反応の部分もあって追加膨張が起こるということがわかってきました。99 年に日本に戻りましてから、当時学生の細田先生と一緒に第一世代のコンセプトにたどり着いたということです。結果として水セメント比が低くないと追加膨張は期待できないということで、後から考えてみれば、細田先生が説明されたように、要は岡村先生が開発された自己充填コンクリートに膨張材をたっぷり入れてただけということでございます。

当時、2001 年に JCI で発表したときに、東工大の坂井先生から、「低水セメント比で膨張材をたくさん使うと、やはり自己崩壊する危険があるのではないか。」というご指摘いただきました。実際、無筋のものを実験室で養生しておきますと、いつのまにか知らないうちに砂山になっていたというご経験が坂井先生はおありだったということです。私どももさすがにそれはちょっと心配でしたので、先ほどの供試体を最近までずっと水の中で養生しておいたのですが、全く変状はございませんで、角も欠けないという状況でございますので、一応ご報告をさせていただきます。

鉄筋が入っておりませんと、硬化しましたセメントペーストが膨張材の膨張力を受け持たざるを得ないので崩壊しますけれども、コンクリートの中ですと、基本的に引張は鉄筋が受け持ってくれて、セメントマトリックスのほうは、圧縮力を受けてそれを鉄筋に伝達するという役割ですので、引張を受けるか圧縮を受けるかが大きな違いということで、ああいうものであっても自己崩壊することはない。角が欠けない理由はよくわからないんですが、一応健全なまま残っておりますので追加でご紹介をさせていただきます。

第二世代というのは、先ほど安さんが紹介しましたけれども、私どもは議論に参加していただ

けで、主に JR 東日本さんのほうで細田先生と一緒にやられていた研究でございます。今、私も第三世代のほうに入っております、もう少し短期間で効果的に治癒する系に入っております。コストを下げることに、長期的な信頼性を担保することが課題として残っております。ただ、これを行っておりますといろいろなアイデアが出てまいりますので、さらにいろいろな場合に展開をしていきたいというふうに思っております。以上でございます。

【三橋】 ありがとうございます。じゃあ、続いて宮川先生、お願いいたします。

【宮川】 宮川でございます。実は、このパネルディスカッションに参加しなさいという五十嵐委員長からのご下命をいただいたときに、何を話していいのかよくわからなかったわけですが、先ほど三橋先生が、宮川先生からニーズの方の話を聞けるだろうというお話だったんで、初めて中身がわかったような次第です。そういう意味では今ちょっと安心しているところでございます。一番最初に、この集会に参加させていただいたときに、国枝先生が、先ほどの定義を含めてまだ怪しいところがあるというお話でした。で、私は怪しいは楽しいだと思います。楽しいは、おいしいということで、皆さん、ぜひ栄養として吸収していただければまいしょうし、それからそのようにしなければいけないのではないかと私自身は考えております。

自己治癒、あるいは自己修復と言いますと、私自身が思い起こすことが 2 つございます。一つは許容ひび割れ幅という問題です。私は随分昔、塩害というのをやっておりました。今は実験から遠ざかって久しいんですけども、塩害関係の実験とか解析とかやっておりますと、許容ひび割れ幅というものが示方書等にある。これは一体どういう意味なのかというのが非常に気になった覚えがあります。

私自身は、まだ感触的なものですが、やはりそこには自己治癒できる範囲のひび割れというものがある、それにプラスアルファあるいはマイナスアルファというものが、許容ひび割れ幅になるのかなというのが随分前からの印象でした。しかも先ほどの Neville 先生のテキストにもありますように、セルフヒーリングという言葉が随分昔からコンクリートにはございます。言いかえますと、コンクリートは本質的には自己修復材料じゃないかなというのが私自身の印象ですし、願いでもあるわけでございます。ただ、問題は、その効果の範囲がいま一つ明確ではないような感じがいたしております。ですから、いままでのいろいろな示方書でありますとか指針にいたしましても、自己修復は内部に含まれていて、陽の形では外には出てこない。例えば許容ひび割れ幅もそうです。あるいは、私はよく、ひび割れ幅が意味を持つ水セメント比というのをお話しするのですが、そのような許容水セメント比についても、本来は内部組織の自己修復を含めた自己修復があるのだらうと。けれども、そういうものが陽な形で数字としては出てこない。まだ、そのような詰めがまだまだ残っているなという感じがいたします。

許容ひび割れ幅、あるいは許容水セメント比といま申し上げましたが、こういうものは、どちらかと言えば「自己修復が効いてるね。」という話になるわけです。一方、「効いていないね。」というのが、橋梁でよく見られます床版のひび割れ、あるいはその他のひび割れで、漏水が出てくる場所です。特に施工がようやく終わったというところに、うかつにも入ってしまったひび割れが、そのとき修復したはずなのだけれども、5 年後、10 年後やはりそこがおかしい。要するに自修復していないという例があって、そのような悩みを私も随分お聞きしたことがございます。

さらにもう一つ気になっておりますのが、先ほど指針とか、あるいは示方書というお話をしたわけですが、ああいうものはやはりどうしても時代の制約がございます。つまり今知っている範囲でしか作られない。逆に言いますと、今知っている範囲じゃない部分、このような部分につい

ては、無力なところがあるわけです。

(スライド 13) その一つの例が多分これだろうと思うわけですが、これは橋本道路垂井高架橋という橋梁です。ごらんいただきますと、このような形で桁が垂れ下がっている。これはまだ供用する前の段階です。供用する前の段階でこれほど垂れ下がるまでに、コンクリートが、実はどうも収縮したらしい。そのほかに多分施工時のいろいろなミスもあったのかもしれませんが、しかし少なくともこのような形のものが生じてしまった。表面上は、示方書、あるいは指針に従っているわけですが、やはりまだまだ時代の制約のために足りない部分があって、そのような部分が増幅されるところいうものが出てくる。逆に言いますと、ここまで大きいと自己修復はちょっと難しいわけですが。

(スライド 14) このような形でいろいろひび割れが入っています。チョーク等がありますのでひび割れとはわかりにくいわけですが、ここが何ミリになってますでしょうか、0.6 ミリですかね。こちらのほうでは 1.2 ミリぐらいになっているのでしょうか。このような非常に大きなひび割れが入っていて、ここまでくると自己修復は無理なのでしょう。しかし示方書、指針等に限界があって、その限界の先のちょっとした部分は、このような自己修復で、我々は随分救われているのではないかという気がいたします。

で、先ほどから何度もお話ししておりますように、特に今、阪田先生の目が光ったような感じがしますが、乾燥収縮によって、無筋でこのようなものが生じて、これを自己収縮でほんとうに直せるのかと私に聞かれますと、ちょっとしんどいですねと言わざるを得ないわけですが。

(スライド 15) こういう技術というのは、必ずこの上の二つのペアがないといけないと思います。つまり、造る技術と確かめる技術ですね。ここでいう造る技術というのは、自己修復をどのように行か、行わせるか、どのようなメカニズムになっているかをはっきりと理解した上で使うことだろうと思います。それに対して、確かめる技術というのは、それが本当に効果を発揮しているのかどうか、そしてそれは一体どの程度なのか、これを確かめる必要がある。しかし、わかっているようで、わかっていないところが随分あると思います。自己修復がその典型的なものではないかなと思っているわけですね。つまり、Neville 先生のころからセルフヒーリングなどという言葉があつて、だから何となくわかっているように思っていて、示方書等には陰の形で入



スライド 13



スライド 14

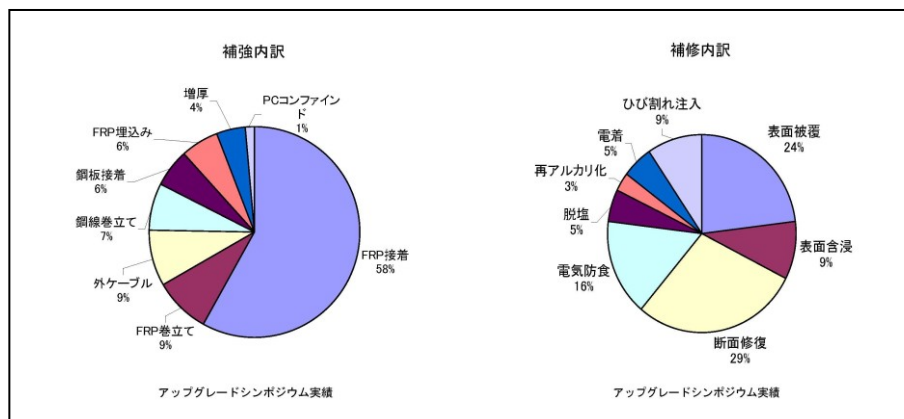
造る技術 確かめる技術

わかっているようでわかっていない。

スライド 15

っているのだろうと思っていたのだけれども、実は、私自身は勉強してこなかった。そういう部分について光を当てて、いろいろ研究していただけると、非常にありがたいなと思っているところです。

(スライド 16) 構造物が、例えば経年劣化する、あるいは初期欠陥があるということで、いろいろ補修、補強というのをやるわけですが、これは京都で毎年行っております補修・補強・アップグレードシンポジウムの論文を整理したものです。で、右側が補修、左側が補強ですね。補強は、FRP接着等をはじめとしていろいろあるわけですが、比較的、従来の知恵や腕力を使って解決できるような部分が非常に多いわけです。問題は、私は右側の補修だろうと思います。表面被覆、表面含浸等があって、電着、あるいは脱塩、いわば自動修復に近いようなものまで含まれているわけです。けれども、まだまだ補修技術というものの、あるいは補強技術というものは、やらなければいけないところが極めて多いと思っています。その中に非常に強力な、しかも伝統的な武器としての自己修復というものを位置づけていただけると非常にありがたい。そのためには、先ほども言いましたように、造る技術と確かめる技術を明確にする。しかもそれを数値化していただけると、指針、あるいは示方書等に取り込みやすい、構造物を管理する側としても非常にありがたいということになろうかと考えております。とりあえず、ここまでで一応私の話を終わらせていただきます。



スライド 16

【三橋】 ありがとうございます。委員の方々には非常に迫り風的なというか、大変力強いお話をいただきました。では、山田先生、続いてよろしくをお願いします。

【山田】 太平洋セメントの山田です。私も五十嵐委員長から坂井先生の代行ということで呼ばれて、何を話していいのかよくわかりません。が、今日のお話を聞いていて、ひび割れが入った後にいろいろなものが再水和して出てくる、ひび割れを充填していく、そういうことなのですが、直感的に、膨張材をたくさん入れて未水和で残しておくというのは、メーカーとしてはとんでもないなというのがまず第一印象です(笑)。自分自身もう十数年前にひび割れ制御をしなければいけないとか膨張圧を制御しなければいけないという仕事がありました。そのときに収縮補償作用を持つ膨張性の水和物を積極的に使うのですが、残っていると、後から予期せぬ水がくると膨れてしまうのですね。そうすると床が盛り上がったたり、構造物を押してドアが開かなくなったり、そういうことがあるのです。制御して使えばいいんですが、一般に売り出してしまうと、どういう使われ方をするかわからない。寒冷地で結露してサッシの下が水浸しになって、そのために膨れたみたいな事例がありました。こういうのを見ていると、膨張材を残すというのは、よ

く考えて使わないと大変かなという気が一つはしています。材料を自己修復するに当たって、膨張材を使うとそうなるのですね。エトリングライトもそうですし、鉄筋もさびると膨張して、ひび割れてコンクリートが落ちるということになるのです。ただ、膨張してできる水和物がひび割れの中にできるという話になるとちょっと話が別です。

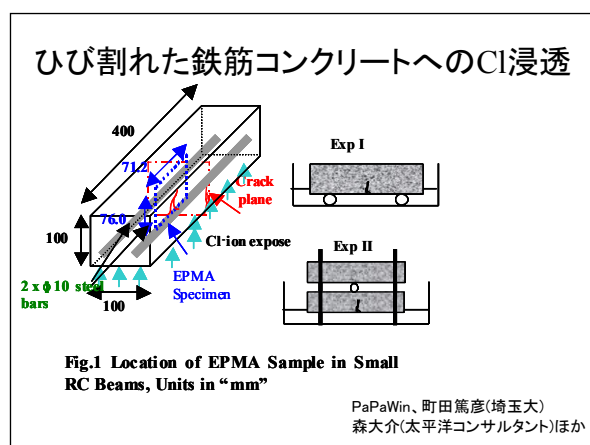
エトリングライトが生成してよく DEF (Delayed Ettringite Formation、遅延エトリングライト生成) で膨張破壊をするとか、アル骨を起こした構造物の中のクラックの中にアルカリシリカゲルとかエトリングライト生成で、ひび割れが埋まっているとかという状況をよく見ます。が、実はこれは膨張ではないんですね。エトリングライトというのは、溶解度が少し他の水和物よりも高く、容易に水の中を動けるといことがあります。クラックが水で充填されるとか、表面に水があるだけで動けると思うのですが、そうするとできたひび割れを埋めていくというのがエトリングライトなんかの特徴であります。エトリングライトがたくさん見つかること自体が、直接的に膨張に結びつくのではないと考えられています。

ですから、今回の件で、そういうひび割れの中にエトリングライトができるとか、炭酸カルシウムもそうなのですが、そういうものができると膨張性を持たずにひび割れを充填できるということがありますね。で、もう一つエーライトとかポゾランからできる CSH、これもどうして膨張しないのか私はよくわかりませんが、この人たちは非常にでしゃばらない、いい子でありまして、こういうのが水和するとうまくひび割れが閉じると思われます。

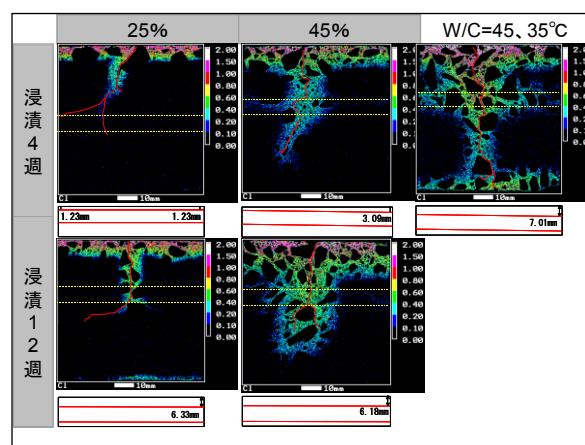
先ほど宮川先生の話にもあったのですが、塩害でひび割れが入ったときにどうなるかというのが、私も最近塩害の研究をやっているところでもあります。自分で直接やったわけではないのですが、少し事例を持ってきましたので、スライド5枚だけですが、ちょっとご紹介したいと思います。

(スライド 17) これは埼玉大に町田先生がおられたときにパパウィンさんというミャンマーからの女性の博士号の仕事です。この方はモデリングのほうメインで、ひび割れたコンクリートのひび割れ沿いにどういうふうに塩分が浸透していくかというのをモデル計算するというのが仕事でした。そのためにまずこちらの鉄筋コンクリートの供試体をつくりまして、ここにこういう載荷試験でひびを入れます。ひび割れたところに実際どういうふうに塩分浸透するかというのを、このひび割れた中から、試験体を切り出しまして、EPMA でこの塩分分布を測っています。

(スライド 18) こういうきれいな絵はあまりごらんになったことがないのではないかと思います。持ってきたのですが、こちらが暴露面ですね。ここに赤く示したのが、目に見える実体顕微



スライド 17



スライド 18

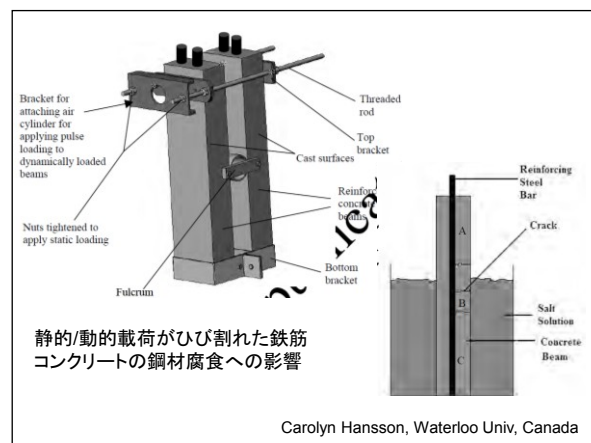
鏡で見えるぐらいの範囲のひび割れです。水セメント比が 25、45 で、これは 20℃で、こっちはもうちょっと温度を上げて早く動かしたものです。それで、4 週間と 12 週間です。ここに鉄筋が下のほうにあります。鉄筋の深さが 1 ミリとか 3 ミリで、こんなところにありますが、水セメント比が低い場合にひび割れが入ると、こういうふうに表面から浸透しますが、ひび割れに沿って浸透しまして、この 25%の場合、なぜか先っぽまでいきませんで、水セメント比がもう少し高くなってくると目に見えるひび割れを超えて塩分が浸透してきます。もう一つはこの鉄筋があるのですが、鉄筋のところにくると鉄筋から横に、多分鉄筋周りの遷移帯であるとかブリーディングのところを伝って動いているのが非常によく見えます。こっちだと貫通しているので、貫通していると、こっちはエポキシコーティングしてあるのですが、反対側のコーティングの層を伝ってこう横に広がる。鉄筋のところ非常によく行っているのがわかるかと思います。

材齢が 4 週から 12 週になりますと、より深く浸透していくのがわかります。こういうのは試験体不良ですね (25%、12 週)。供試体の周りを回って反対側に来たやつがいるということです。これもひび割れ周りに、こうどんどん入ってくる (45%、12 週)。実際には、ひび割れが 1 本、ひび割れ幅は 0.1 ミリ (開口部) に制御されていて、ひび割れはここが先端ですから、ここはほぼひび割れ開きゼロなんですけど、ひびがあれば、とにかく塩素というのは簡単に中まで入ってしまう。ここではおそらくは不動態皮膜が破壊されて鋼材腐食が始まる状況だと。こういう画を見ていて、とにかく始まるということだったらすぐ始まってしまわないとずっと思っていました。

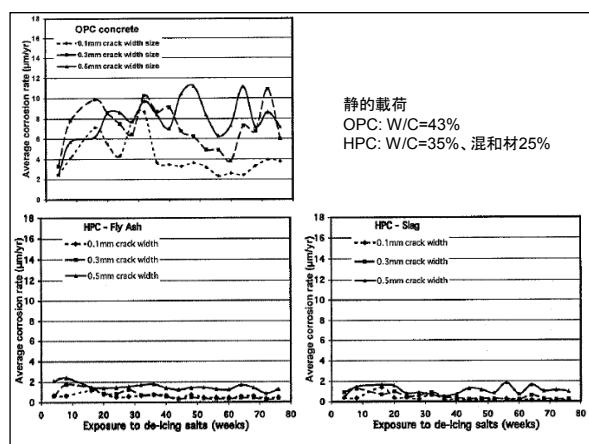
このようなひび割れが入って、塩分浸透が経時的にどうなるかというのはいくつか研究があるのですが、塩分が入った段階で腐食がどうなるかという話は多分あまりされてこなかったのではないかなと思います。いろいろ国際会議に行く機会があって聞いてみますと、カナダのウォータールー大学、トロントの西の 100 キロくらいのところにあるのですが、そのキャロリン・ハンソンさんという方が実験をされていました。まだ投稿中のペーパーなのですが、コピーをもらってきました。

(スライド 19) こういう鉄筋入りのビームをつくりまして、ここで下を固定して載荷して、ここにひび割れを入れます。で、これを塩水に浸漬させて、下はサブマージゾーン、浸漬したところでここにひび割れがあつて、上は気中ということで、この 3つの状況を分けて、腐食電流をはかっている実験です。曲げて、そのままスタティック (静的) に浸漬している場合と、動的載荷を与えて 0.5 ヘルツぐらいで振っているみたいなのですが、これをやったときにどうなるかというのを試験されています。

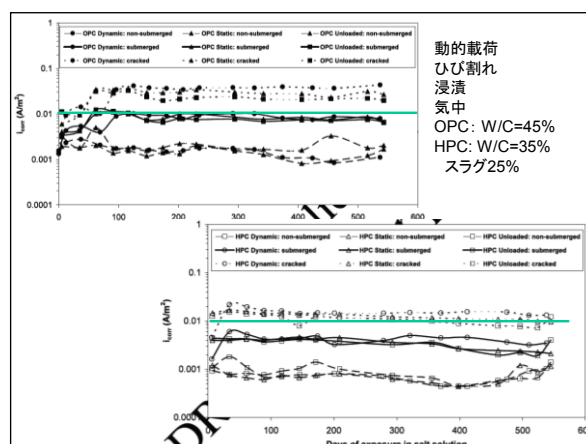
(スライド 20) セメント種類としては、普通セメントとフライアッシュセメントと高炉セメントです。置換率は 25%ぐらいで、水セメント比が若干違います。横軸が週でありまして、ここが 70 週ですね。普通セメントの場合は、腐食速度は初期からずっと上がります。これは静的載荷なのですが、開いているクラックの幅が 0.1、0.3、0.5 ミリぐらいです。腐食速度は大きいやつが高くて、0.1 ミリですと 1 回上がるのですが、ひび割れが閉じるみたいでまた落ちてきます。このマトリックスが普通セメントでは



スライド 19



スライド 20



スライド 21

なくて、こういうポゾラン系の材料になりますとコンクリートの電気抵抗が高いので、腐食環境にあるのですが腐食速度がずっと遅いという点がありまして、腐食電流が1けたぐらい違います。おもしろいのは、先ほど宮川先生のお話しにもあったのですが、どれぐらい開いていたらいいのか、大丈夫なのか、だめなのかというのがここに出ていまして、0.5 ミリだと、ひび割れた後、ずっと同じような腐食環境なのですが、0.1 とか 0.3 ミリになると、腐食速度が初期に早いのですが下がってくる。低い値の変化なので見にくいのですが、セルフヒーリングがあるのかなというようにことを思わせるデータで、気がついたのでこれを持ってきたわけです。

(スライド 21) 動的載荷をしたらどうなるかというのが、この新しいペーパーなのです。すべての試験体に一度はひび割れを導入し、塩水暴露時に、動的もしくは静的載荷もしくは無負荷としています。図からは、応力状態よりも環境条件が支配的です。塩水中ひび割れ部が最大で、気中部は非腐食です。ひび割れ部の腐食速度変化をみると、動的載荷以外ではいくらか低下しています。動的載荷では、普通セメントの場合にはヒーリング効果はないようですが、高炉セメントでは静的条件よりは小さいものの、腐食速度は経時的に低下しており、ヒーリング効果はあるようです。環境条件が支配的なので、ひび割れがこの場合はヒーリングするというのはあまり効かないという。こういうのがありましたので、ご紹介しました。

【三橋】 はい、大変貴重な情報のご提供、ありがとうございました。先生方の中で何かこの辺、まだちょっと聞き足りなかったとか、この辺もう少し明確にして、それから討論していった方がよいということはございませんでしょうか。

【三橋】 はい、では、せっかくだからあとはフロアのほうに。いろいろご質問とかご提案とかあると思いますので、遠慮なく手を挙げて。所属とお名前を伺ったほうがいいですよ。多分マイクがいきますので、所属とお名前をおっしゃってから、ご発言いただければと思いますが、いかがでしょうか。あるいは委員の方々の中からでもいろいろご発言いただければよろしいかと思ひますけど。はい、阪田先生。

【阪田 (フロア)】 質問が出ないようですので、皮切りに少しお話しさせていただきます。非常に目新しいトピックスのお話を聞きました。どうもありがとうございました。

年寄りの冷や水みたいなことをいうと、しかられそうなので、非常にプリミティブな質問をさせていただきますが、一つはお話を聞いておりまして、ターミノロジー (terminology) といひますか、そういう点で非常に気になったことがあります。自己修復とか自己治癒とかいうことで、自己という言葉がついてると、日本語に騙されてしまうといひますか、ひっばられて、ほっと

いたら何とかなるのかなという。私も、コンクリートに例えますともう劣化していますから、ほっといたら治ると非常にありがたいのですけども。そういう感じを受けました。それが正直な感想でございます。

もう少し技術という観点から、今日お話聞いていろいろな試みがあって、いろいろな蓄積があるということよくわかりました。それから、三橋先生がおっしゃったように、夢を持ち続けるということが重要であるということもよくわかりました。しかし、私の理解として、今の研究の段階とかあるいは状況というのが、ひび割れというものが自然にふさがったという非常に素朴な発見という段階なのか、失礼なことを言いますけども、それがこれから非常に重要になります補修という一つの分野の中に位置づけることができるのか、あるいはその可能性がどのぐらいあるのか、そういうことに非常に興味がありました。もしそういう補修技術の中でこういう問題が位置づけられるとするならば、私が非常に気になったのは、ひび割れがふさがったという、そのふさがったという評価、これはどういうものでできるのかなと。その辺の極めて基本的なところで、ぜひ五十嵐先生でも、岸先生でも、三橋先生でも、だれでもいいのですけど、教えていただくとありがたいと思います。よろしく願いいたします。

【三橋】 ありがとうございます。大変いいスターティングポイントで、ディスカッションができそうですけど、五十嵐先生ですかね。

【五十嵐（フロア）】 設立趣旨のところでは詳しくは説明しませんでした、先生が今言われたことを何とかしようと。補修という中に技術として組み込んでいけるか、もしくは定量的にそれが評価していけるかと、まさに先生が今指摘された事項をこの委員会でこれからやっていかなければいけないと。現時点で私どもが把握している技術の内容とか評価手法につきましても、今、例えば、ひび割れ幅だけでいいのか、透水性も測ったほうがいいのかとか、そのようなことも含めて、今一生懸命取り組んでいくところでございます。委員会のほうとしてもわからないことがあったりしたら、先生方にお伺いしたりしながらやっていきたいなということが、今の私どものテーマでございます。ありがとうございます。

【三橋】 ひび割れが閉じたという現象の報告が先ほど何人かの委員の先生方から紹介ございましたけど、そこをもう一歩突っ込んで、定量的な評価にはこういうのがありますよというご紹介はございますか。では、細田先生。

【細田（フロア）】 修復する技術によって対象としている機能が違いますので、我々はさっきから挙げているように漏水なのですね。それから止水性という意味でチェックしようと思っています。指標まではまだいっていませんが、今は完全にシャットアウトできるようにということです。水漏れがないということだと思います。

ちょっと今の阪田先生のお話とかを伺っていると、そもそもこの技術ではなくて、一般に例えばひび割れを補修しているものも確認できているのかと。それが入っているのか、もしくは何をターゲットにして補修していて、そして機能が回復していることをどう担保していくのかということも気になりました。この技術というよりも、補修技術そのものをちゃんと確認するというところで、さっき宮川先生も言われたと思うのですが、やることだらけで、その中に我々の技術も位置づけられている。ですからこの技術に限ることではないのかなと、そういう感じを今持ちましたが、いかがでしょうか。

【三橋】 何か投げ返されたような格好になっておりますが（笑）。補修をよくやってらっしゃる方々も今日おいでいただいているのではないかと思います、どなたか今の細田先生のご質問に

お答えいただける方いらっしゃいませんか。実際、ひび割れの補修はしていて、実績はかなりあるはずだと思うのですが。それがどう担保されているのか、あるいは確認されながらやられているのかというあたりは、改めて聞かれると、確かにあまり最近は見えてないかもしれない。もともと技術開発のところではやられたのではないかと思うのですが、いかがでしょう。いらっしゃいませんか。はい、じゃ。

【大友（フロア）】 大成建設の大友です。補修ではないのですけれども、ものをつくる立場のほうから、ちょっと一言教えていただきたいと思います。

今、細田先生、漏水と言われましたので、我々地下躯体、先ほど先生のパワーポイントで地下構造物が出てきましたけれども、やはり漏水の問題というのが一番大きいですね。引き渡す前に水が出ていれば容易にわかりますから、いいか悪いかという観点から言えば、水が出ていて排水しなければいけない状態は悪いと。だから地下大気の状態の蒸発水量に対して、浸透して出てくる水の量が多ければだめだし、少なければいいという、そこはある程度明確な判断があると思います。

あとひび割れ幅が、造った状態でコンマ何ミリあって、で、それを直すべきか直さないべきかというのは、工事の収支との関係もあって判断しなければいけない。そういうところで、私などは研究所にいるから駆り出されて、これはどうすべきかという議論になるわけです。今、指針レベルでいくと JCI のひび割れ制御補修補強指針が、0.2 から 0.05 です。0.2 以上は直す、0.05 以下は直さない、0.2 から 0.05 は技術者の判断によると。技術者の判断と言われて、呼ばれていって判断しないと、何のためにいるのかと言われますので。大体 0.2 ミリというのが、0.2 ミリを超えたものはすべて直してくださいと。今水が出てないかもしれないけれども、出る可能性があるから直してくださいというのが答えであって、その根拠を求められるとすれば、結局 0.2 ミリ以下ならばセルフヒーリングするでしょうと。もちろん、セルフヒーリングするでしょうなんていうことは発注者に言えないので、もっと別な言い方をしますけども。根拠を求められれば ACI の 207 委員会では 0.17 かな、0.19 かな、以下だとセルフヒーリングしますと、一応書いてあると。ACI に弱いような人がそういうことを言い出したら、それをこうコピーして渡せばいいと。

そうでないときは、ひび割れ補修補強指針で構造物の漏水の実験というのがあります。日本ではあまりやられてなくて、5つか6つぐらいしか事例がないのですけれども、あの結果をいろいろ分析すると 0.17 ミリぐらいだと水が漏らないという結果になります。

あと、実際に現場を見て、炭カルが析出して水がとまっているという状況があるかないかというところは、やっぱり 0.2 ミリぐらいが境なのかなと。だから 0.05 と 0.2 の間というのは、何の根拠もないけど、今までの技術者の感覚でそういうのを言っていて、結構いい線いっているのではないかと。0.05 と 0.2 の間というのが、非常にベーシックな自己修復ということではないのかなという気がしています。

【三橋】 どうもありがとうございました。

それでは、今の話題も含めて、ほかの疑問点でも結構ですので、何かご質問、ご意見がございましたらお願いいたします。どうぞ。

大変新しい話がいっぱい今日聞けていますので、ご遠慮なく食いついていただければ、よりおもしろい話が聞けるのではないかと思うんですけども、いかがでしょうか。パネリストの先生方以外でも委員の先生方にお聞きいただいてもよろしいと思うのですが。ございませんでしょうか。せっかくこれだけたくさんの方々においでいただいていますので。はい、ではどうぞ。関田さん

お願いします。

【閑田（フロア）】 鹿島建設の閑田と申します。この委員会の委員をやらせていただいています、委員会の中でも、今日ご発表のいろいろ新しい技術とかを勉強させていただいて、すごく刺激になっています。

今、大友さんが言われたことに関して、私が建築の立場から少し申し上げますと、建築学会で、収縮ひび割れ制御指針というのを三橋先生が主査として作られまして、それができたことでかなり施工のほうが変わっておりまして、ひび割れというのにかなり焦点が当たった形でいろいろな制御、対策をしているという状況があります。その中で、こういうこと申し上げるとお客様に非常に怒られるのですが、正直なところ、0.3 ミリぐらいのひび割れですと、建築の場合は中性化が主ですので、あまり耐久性に致命的な影響を与えないという場合がかなりございます。それでも 0.3 ミリぐらいから上は補修をするというのが通常です。もう一つ今、大友さんがおっしゃった防水の問題ですね。これは建築物にとっては致命傷でありまして、建築の最も大事な機能の一つが遮蔽性でございますので、どの方も水漏れがする建物に住みたいとは思わないわけです。ただこれは非常に難しいです。非常に難しいのは、ひび割れ幅が幾らあって、壁厚が幾らあってというので、大体 0.1 ミリ以下であれば多くは漏水しないであろうという目安はあるのですが、必ずしもそうではない。特に台風とかで漏水することもあります。あと仕上げがありますので、それでもまた違います。問題は、1 回漏水すると止まりません。非常に難しいです。なので、とにかく漏水だけはしないようにと、いろいろな手を尽くしてやるわけですが、それでもゼロにはならないというところがありますので、そこが一つ、建築がこういった材料に期待するところか思います。

もう一つ、岸先生、それから細田先生がやられている漏水をターゲットにしたものについては、非常に私ども興味がありまして、地下外壁なんかでは当然使えるというのがあります。ただし、その他多数の壁というのは、外側から水が供給されないのですね。なので、そういう状況でも何とか自己治癒するというのが建築にとっては非常に機能として重要なことということで、その水分の供給をどうするのかというところを、これからもし可能であればご検討いただけますと非常に大きな需要があるような気がいたしております。以上です。

【三橋】 ありがとうございます。大変貴重な情報をいただきました。ほかに何かございませんでしょうか。今、閑田さんが指摘された、確かに今日の自己治癒は、水分が補給されれば、あるいは海水中にある場合にはという前提条件で非常にきれいな修復が自然にできたという事例が出ていますけれども、いつもあるわけではないのではないかとというのは確かにそうで、建築の場合は屋根がかかっているから余計に水がないという。そのまま適用しようとすると確かに心配なのですが、その辺も含めて委員の先生方から、あるいはパネリストの先生に質問とかでも、ちょうどいい機会ではないかと思えますけど、いかがでしょうか。こういうことで困っているけれどもとか。はい、では先生。

【宮川】 どなたからもお話がないようなので、少しお話しさせていただきますと、まずは先ほど私、許容ひび割れ幅と漏水の話の二つをしたわけですが、今例えば土木学会のコンクリート標準示方書では、許容ひび割れ幅内であってもひび割れ幅の影響を考慮しているわけですね。要するに自己治癒の影響というものを少なくとも 100%は見えていない、あるいはどのあたりでほんとうに自己治癒するのかがわかっていない。実は、先ほどの一つ先のスライドの中で、確実にあることというのを出したわけですが、要するに自己治癒の効果が本当に確実にどこまで効

いているのかを早く明らかにしていただけると、例えば土木学会のひび割れ幅による塩化物イオン拡散係数の値を変えることができる。だとすると、随分設計そのものに対して影響を及ぼしてくるわけですね。これがまず一つなのです。

それからもう一つは、土木構造物は、建築構造物と違って人が住むわけではありませんので、いたるところに、妙なところにいっぱいあるわけで、言いかえますと、人がそこに行って維持管理できないような構造物が随分たくさんあるわけです。そのような構造物については、人が行かなくても補修できるようなシステム、あるいは診断できるようなシステムが欲しいわけです。人が行けないということは、診断だけではなくて、あとの補修までできると極めてありがたい。要するに私がこのような材料により大きな期待を寄せるのは、そのような構造物についてです。ぜひ提案していただくとありがたいなと思います。

【三橋】 どうも大変すばらしいご意見をありがとうございます。そうするとかなりニーズが広がりそうですね。(笑)

【宮川】 皆さんの努力次第だと思います。(笑)

【三橋】 はい、では米澤さんお願いします。

【米澤(フロア)】 竹中工務店米澤でございます。朝から聞かせていただきまして、この分野は従来から時々横目で見えてはいたのですが、技術になりつつあるなという印象を受けました。先生方からルールレベルになるのかという、いろいろかなりハイレベル、ハイグレードのリクエストもあったように思いますが、やはりヒーリングという現象があるということだけがわかっているときと、それを制御してコントロールして技術になるときというのは全く違うと思いますね。

昔、私どもが施工させていただいた下水処理場でひび割れが入るんですね。それは当然やがて目詰まりをして詰まるということは現象としてはわかっておりましたから、そういうことが起こりますよということは申し上げますけれども、それでそのひび割れを入れたことをお許しただけのわけではないですね。ところがそういうものを一つの機能として制御して説明できるようになると、多分話は少し違うと。ですから、将来そういうことになる可能性があると思いますので。ただし、現在はまだ、技術になり始めた揺籃期だと思いますから、あまり性急にすぐ標準的なものになるということではなくていいのではないかと思います。いろいろなことをたくさんトライしてみて、その中から生き残るものが出てくればいいのではないかなという感じがいたします。

それから、もう一つ受けた印象は、阪田先生がおっしゃったように、言葉とそれから概念といいますかコンセプトが、何回か見せていただいた絵が、やはり確かにわかりにくいように思います。今研究されているところだけではなくて、いろいろな既存の分野もこういう見方をすると、この領域の技術の中に入ってくるものもあるような感じがしますから、概念の整理をされて、技術としてブラッシュアップされるといいのではないかなと思いました。

【三橋】 ありがとうございます。ほかに何かコメントでも感想でもよろしいと思うんですが、いかがでしょうか。では、山田さん。

【山田】 先ほどの閑田さんのコメントで気になったのが、漏水が1回始まると止まりにくいというのはそうかと思うんですが。細田先生がされた、普通セメントで水セメント比 45 とかでマスつくって、ひび入れて水を張っておいてというのは止まらないんですか。

【細田(フロア)】 先ほど大友さんも言われたように、もともと持っている性能だと思いますので、それがアクティベイトされるというか、パワーアップされると理解していますけれども。

【山田】 多分建築の場合で止まらないのは、台風のとときだと水圧、風圧がかかるということと、もう一つはやはり水セメント比が高いので、未水和物が残っていないので、その後、なかなか閉じにくいということなんだと思うんですね。それから、アクティブに何か材料を入れてやる場合はともかく、普通の材料でもそういうのがカウントできる場合と、できない場合が多分明らかにあって、やはりポゾランを入れるとか未水和物を残しているとかというのを考えてあげると、ずっと性能はよくなる。もともとひびが入らないほうがいいわけですがけれども、多少入ってもそれは担保できるのかなという気はします。そういう点が明らかになってくると、より定量的に考えられるのではないかなと。建築だと降った雨が常に漏って困るんですねというのではなくて、どうしてそうなのかと。マスだと直ってくる、そこが何なのかという点も多分重要なと。

【細田（フロア）】 先ほど米澤さんからいただいたコメントもあるんですが、あのわかりにくい絵の自然治癒の部分に漏水が勝手にとまるというものも含めようと私は思っています、委員会報告の中に、そういうところもきちんとレビューする形で整理しようと思っています。

【三橋】 ありがとうございます。大体時間になりつつありますので、ほかにぜひという方は。では、お願いします。

【岸】 私のほうから、閑田さんの先ほどお話で、建築の場合は、壁があつてあまり水がこないので自己治癒が難しいというお話だったんですが、そういうところは逆に自己治癒する必要性がないというふうに考えるわけにはいかないでしょうか。やっぱり、今のほとんどは、ひび割れの間に物が析出するということを期待していますので、やっぱり水で飽和している状況が必要なので、水がこないところは、閉じる必要があれば水を与える必要があると思うんですが。むしろ、センサー機能として、水がくることによって初めて自己治癒が発現すると。逆に水がこなければ、治癒させる必要がないので動かない。パッシブかもしれませんけれどもセンサー機能だと思っていますので、水がこないところを治癒させる必要性がどのくらいあるのかというのも非常に興味を持っておりまして、少し教えていただけるとありがたいと思っています。

【閑田（フロア）】 建築で水を止めるというのは、やっぱり基本的には防水材とのペアなんですね。屋上には必ず防水をやりまして、基本的にはコンクリート以外に期待するというのが、悲しいかな実態でございまして。で、常に水がある屋上とかそういうところには、もう防水がしてあります。問題になるのはやはり壁でありまして、水がめったにこないんですが、来たときに漏ってしまうという場合が多いんですね。なので、常に水があるわけではないんですが、時々あると、雨が降ったりですね。そういう状況のところで、防水をするというのが一番多い事例です。従いまして、水が来ないんだけど全く来ないわけではないと。時々来てそれが困るというのが多いわけなので、そこを何とかしたいというのが、建築の多分一番解決したい部分かというふうに思っております。

【三橋】 どうもありがとうございました。予定の時間をちょっと過ぎてまいりましたので、大変興味深い議論が進みつつあるのですが、この辺でパネルディスカッションの部分を閉めてよろしいですか。では、パネリストの先生方どうもほんとうにありがとうございました。（拍手）

【丸山】 繰り返しになりますが、コーディネーターの三橋先生をはじめ、非常に著名な先生方にこうしたパネルディスカッションをしていただきまして、本当にありがとうございました。（拍手）

我々委員会が、このパネルディスカッションを踏まえ報告会をするということを先ほど委員長から初めて伺ったんですが。ぜひとも、本棚に並べたい報告書を作成して報告会に臨みた

いと思いますので、また次回の報告会についてもお集まりいただければと思います。

本日は朝早くからお集まりいただきまして、誠にどうもありがとうございました。以上で終わりたいと思います。(拍手)

—— 了 ——

10. まとめと今後の課題

本研究委員会は、2年間の活動を通してコンクリートの自己治癒／修復技術に関する現状を取りまとめ、その成果を本報告書として発行することができた。一方、これらの技術は2章のヴェン図に示したような形で、機能の回復技術の一つとして認知・利用されるまでには至っていないのが現状である。今後、例えば以下に挙げる事項に関する情報が蓄積され、整理されることで、実用化に一步でも近づくことができると期待される。なお、平成21～22年度に、「セメント系材料の自己治癒技術の体系化研究委員会」が発足し、引き続きコンクリートの自己治癒／修復に関する調査研究が行われる予定である。

①全自己治癒／修復ではなく、選択自己治癒／修復による回復

自己治癒／修復に期待される機能回復に関して、コンクリートの物性値がすべて元通りになる（完全自己治癒／修復）と考える必要は必ずしもない。機能の回復が要求される項目を限定し、例えば、ひび割れ部における水や塩化物イオンの移動のみを低減させるなど、その特定の機能のみを回復させることをあらかじめ期待することで、自己治癒／修復が利用できる可能性が増すと考えられる。

②評価のための指標と試験方法

そのためには、ターゲットとする性能およびそれを評価するための指標を明確にするとともに、そのための試験方法を確立しておく必要がある。これには、供試体寸法や養生条件の妥当性についての議論も含まれる。

③非破壊試験による検出

実験室レベルでの機能発現の確認のみならず、実構造物において設計どおりの治癒／修復が行われたかどうかを確認する手法の開発は必須である。例えば、非破壊試験によって簡単に確認することができれば、自己治癒／修復技術の普及が大きく前進するものと期待される。

④ひび割れ力学の克服

コンクリート分野への破壊力学の導入などによって、ひび割れ発生や進展について、汎用コードを用いて数値解析的に構造物の応答が予測できるようになった。しかし、あくまでも荷重－変位などグローバルな応答に対する適用性が向上したのであって、ローカルな応答に対しての信頼性は未だ十分な精度を有していない。つまり、ひび割れの発生位置や幅などを正確に予測することはできないのである。この点を十分に理解し、自己治癒／修復技術がセンサ機能を有していることをうまく利用する必要がある。

⑤再現回数とその履歴

自己治癒／修復の機構の再現回数についての情報を収集する必要がある。すなわち、ひび割れが発生するような環境条件においては、再度そのような環境下に曝される可能性が高くなる場合も多い。可能であれば、その履歴が確認できる手法の開発が望まれる。

⑥コスト

そもそもこのような自己治癒／修復機能に対して、いくら払うことができるかといった点についても議論を行う必要がある。通常の補修・補強技術において必要となる、検査、診断、補修・補強といったプロセスを、自己治癒／修復技術では一括で行うことができる。イニシャルコストだけでなく、ライフサイクルを見渡した観点からの比較が必要となる。

⑦安心感

非破壊試験による回復程度の確認にも関連するが、治癒／修復が行われた事実を自動的に周知する機能も望まれる。人体を例にとれば、切挫創（切り傷、すり傷など）には、いわゆる“かさぶた”ができ、今現在、正に治癒のプロセスが進んでいることが実感できる。このような安心感を第三者に与えることができることが期待される。

[担当 五十嵐心一、国枝稔、西脇智哉]