

委員会報告 セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究委員会

五十嵐 心一^{*1}・国枝 稔^{*2}・西脇 智哉^{*3}

要旨: セメント系自己修復性の評価とその利用法研究委員会(委員長:五十嵐心一 金沢大学教授)は、平成19~20年度の2年間をかけて、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するための活動を行ってきた。各委員の最新の研究動向を含めた文献調査を行い、特にメカニズムに着目し、自己治癒/修復を分類、定義した。また、平成20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。

キーワード: ひび割れ, 自然治癒, 自律治癒, 自動修復, 補修技術

1. はじめに

コンクリートのひび割れの自己修復とは、未水和セメントの再水和などをはじめとする現象の総称であり、Nevillの著書¹⁾にも Autogenous Healing として掲載されるなど、現象としては古くから認知されている。しかし、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おらず、補修方法の1つとして設計し、利用できるには至っていないのが現状である。

「JCI-TC075B セメント系自己修復性の評価とその利用法研究委員会(委員長:五十嵐心一 金沢大学教授)」は、平成19~20年度の2年間をかけて、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するための活動を行ってきた。研究委員会の構成を表-1に示す。具体的には、マイクロレベル(セメントの水和モデルによるモデル化)、メゾレベル(構成則レベルでの評価)およびマクロレベル(部材レベルでの利用法)など、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、平成20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も議論を行った。

表-2に報告書の目次案を示す。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を定義した。セメント系材料が潜在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(メカニズム)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た。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

動向を紹介した。4章では、自己治癒/修復のモデル化の可能性について述べるとともに、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た。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組みについて、適用事例を含めて紹介し

表-1 委員会の構成

委員長	五十嵐 心一	金沢大学
幹事	国枝 稔	名古屋大学
	西脇 智哉	山形大学
委員	浅野 幸男	岐阜大学
	安 台浩	東京大学
	稲田 裕	清水建設(株)
	閑田 徹志	鹿島建設(株)
	佐川 孝広	日鐵セメント(株)
	白坂 徳彦	太平洋セメント(株)
	濱田 秀則	九州大学
	細田 暁	横浜国立大学
	丸山 一平	名古屋大学
	平尾 宙	太平洋セメント(株) (H19年度まで)
事務局	福林 幸雄	

表-2 報告書目次案

第1章	序論
第2章	自己治癒/修復現象と定義
第3章	自己治癒/修復機構と技術の現状
第4章	自己治癒/修復の材料科学的モデル
第5章	自己治癒/修復効果の実験的評価
第6章	自己治癒/修復機能の適用事例
第7章	他分野における自己治癒/修復現象の取扱い
第8章	セラミックス材料の自己修復現象(特別寄稿)
第9章	JCI研究集会 in 福岡
第10章	結論
	付録

*1 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 教授 博士(工学) (正会員)

*2 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 山形大学 地域教育文化学部生活総合学科 准教授 博士(工学) (正会員)

た。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組みについて紹介しており、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先生（横浜国立大学准教授）に寄稿をいただき、8章に紹介した。9章では、平成20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「ここまで来たコンクリートの自己修復」について紹介している。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た。

2. 現象の分類と用語の定義

本研究委員会では図-1 および表-3 に示すように自己治癒／修復をそれぞれの現象に着目して分類した。また、表-4 には、それぞれの分類に対応する研究事例を示している。以下に、それぞれの分類についての説明、各メカニズムの差異について述べる。

図-1 の範囲全体となる「機能回復 (Recovery)」とは、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。従来からの補修・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とが期待される。

表-3 各現象のメカニズムと分類

<p>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</p> <p>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</p> <p>自動修復 (Activated Repairing) : 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</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>自己治癒／修復 (Self Healing / Repairing) : 人間の手に拠らないひび割れ閉塞現象の全体</p>
--

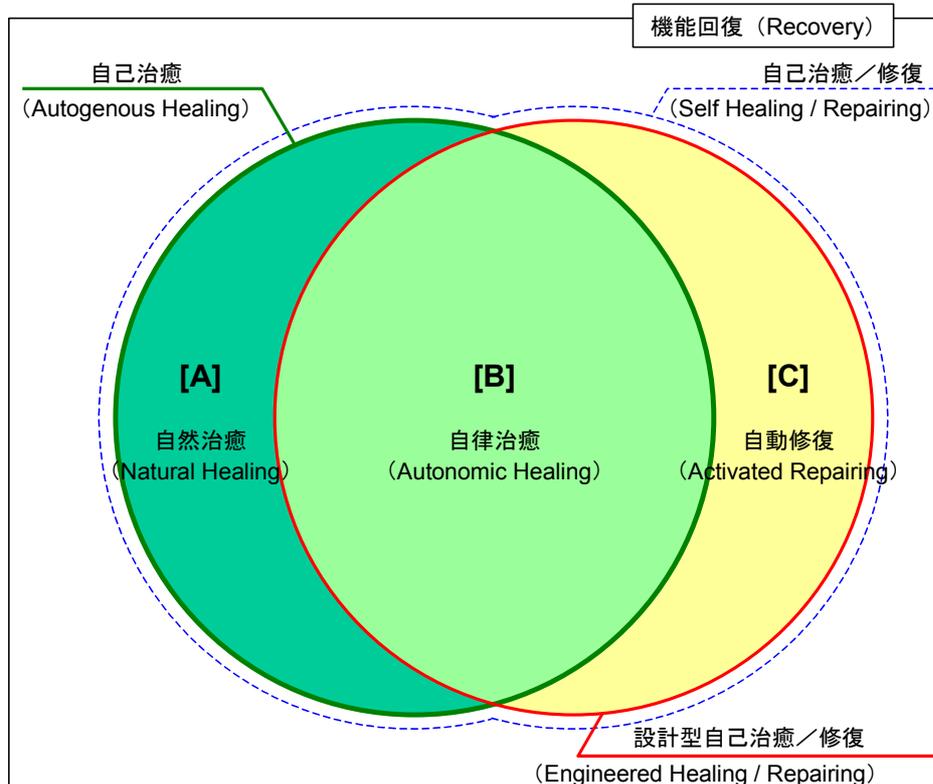


図-1 ひび割れの自己治癒／修復の分類とヴェン図

表-4 自己治癒／修復の分類に対応する研究事例

	分類	研究事例	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 ・水理構造物に見られるひび割れの再水和	治癒	潜在型
[B]	自律治癒	・フライアッシュの利用 ・フライアッシュを用いた ECC ・特殊混和材(膨張材)の利用 ・バクテリアの利用		修復
[C]	自動修復	・マイクロカプセル等の混入 ・脆性パイプネットワークの利用 ・発熱デバイスの利用 ・形状記憶合金の利用 ・モニタリング技術との融合		

「自己治癒／修復 (Self Healing/Repairing)」は、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。なお、「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閉塞を目指すものとして用語を使い分けている。すなわち、セメント系材料が潜在的に有する機構を利用してひび割れを自ら閉塞させることが「治癒」に当たり、ひび割れの閉塞機構を促進するために混和材等を適切な配合で混入したのも「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等）が追加されるものとして分類している。

先述のとおり、「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、水理構造物等における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治癒である。さらには、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。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、コンクリートが潜在的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-1中の[A]の領域にあたる。後者に関しては、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、上述の補修材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て稼働させるものなどが含まれる。

さらに、「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)」の用語を定義した。

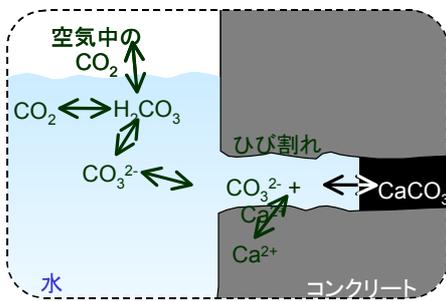
3. 自己治癒／修復の事例

3.1 自然治癒 (Natural Healing)

図-2 に、水理構造物における自然治癒の事例²⁾を示す。ひび割れを導入し 15 年間干満帯に暴露されたコンクリート供試体であり、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している。特に、ひび割れに充填されている物質はおもにエトリンガイト (針状結晶の) と水酸化マグネシウムであることが報告されている。



(a) ひび割れ周辺に析出したエトリンガイトおよび水酸化マグネシウム (濱田委員提供)



(b) 自然治癒のメカニズム³⁾

図-2 水理構造物での自然治癒の例

3.2 自律治癒 (Autonomic Healing)

自律治癒の代表例として、膨張材を使用したもの³⁾およびフライアッシュを使用したもの⁵⁾を紹介する。

図-3 は、通常の添加量よりやや多い膨張材を使用した自律治癒コンクリート⁴⁾のひび割れ閉塞状況を示したものである。0.4mm 程度のひび割れ幅であれば、材齢 28 日程度で十分に閉塞することが確認されており、特にひび割れの閉塞を通して、漏水を低減するという目的での研究が精力的に行われている。

図-4 に、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の例を示す。これは、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たものである⁵⁾。

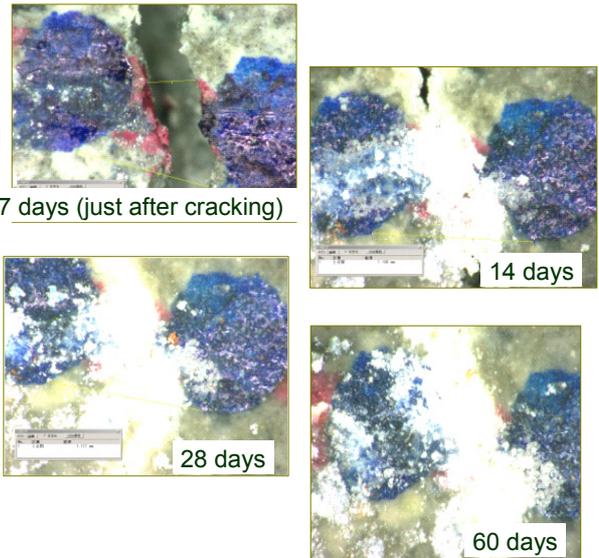


図-3 0.4mm 程度のひび割れの治癒の例 (細田委員提供)

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、凍害により生じるマイクロクラックとしている点にも特徴がある。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自律治癒の評価を行っている。フライアッシュのもつ潜在的な自律治癒能力の評価として 40°C 4 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自律治癒効果が示されている。

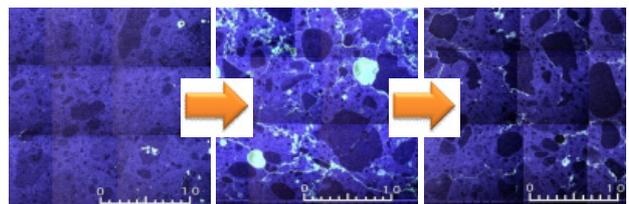


図-4 凍結融解による劣化と自律治癒との組合せ⁵⁾
 耐久性指数(DF):70% 耐久性指数(DF):90%
 フライアッシュの反応の遅さを積極的に利用し、コンクリートが受けた損傷を長期間継続するポズラン反応により自己修復する効果を付与
 長期材齢での凍結融解抵抗性を低下させない置換率を設定
 (水セメント比50-55%でFA置換率10-15%)

3.3 自動修復 (Activated Repairing)

自動修復の代表例としては、図-5 に示すように、補修材を封入したガラスパイプと発熱デバイスを埋設したコンクリート⁶⁾が挙げられる。メカニズムとしては、ひび割れの発生により、ひび割れの周囲を選択的に加熱することによりコンクリートの内部に予め埋設されたパイプから補修材をひび割れに対して自動的に供給するものである。

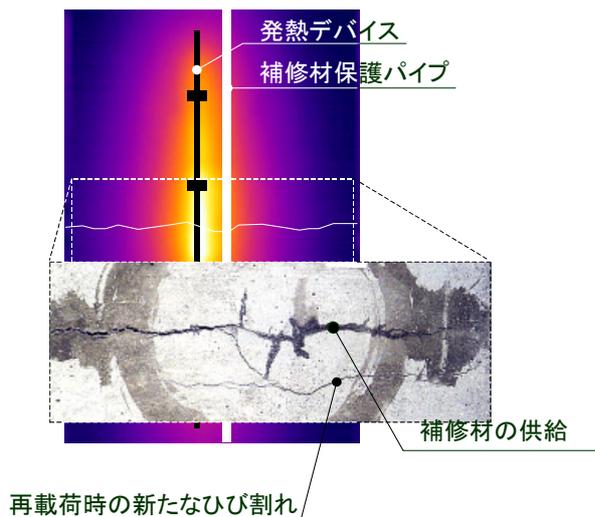


図-5 補修材を供給する自動修復（西脇幹事提供）

4. 実験的検討の整理

表-5 に、既往の研究の代表的な損傷の導入方法および評価方法、指標の例を示す。一般には、「ひび割れ」の治癒／修復であることから、引張あるいは曲げひび割れを所定のひび割れ幅となるまで生じさせ、その後再養生し、再び同様の試験を実施し、強度、剛性、吸収エネルギー（荷重-変位曲線下の面積）の回復を確認した実験が多い⁷⁻⁹⁾。また、凍結融解試験によって生じたコンクリート内部のマクロクラックを、例えば自律治癒により閉塞させ、相対動弾性係数によって評価した事例^{5, 10)}や、ひび割れ幅に応じて変化する透水量の変化を計測した事例^{3, 11)}も多い。水だけでなく、閉塞したひび割れ部での物質移動抵抗性を評価した事例としては、塩化物イオンの移動に対する抵抗性を評価した事例¹²⁾もある。しかしながら、実験室レベルでの検討に留まっているものが多いのが現状である。また、対象とする損傷の種類、模索や、既往の非破壊検査手法などの適用についても今後の検討が期待される。

5. 研究会の概要

平成 20 年度 JCI 年次大会（福岡）の 2 日目に、研究会「ここまで来たコンクリートの自己修復」開催された。実行委員会の集計によると 123 名の参加者があり、盛況のうちに開催された（図-6 参照）。

はじめに、五十嵐（金沢大学）から委員会および研究会の意図や経緯の説明があり、続いて国枝（名古屋大学）から研究委員会がターゲットとする範囲、用語の定義など、委員会での議論の要約が紹介された。その後、各委員から個別の最新情報の紹介として、濱田委員（九州大学）からは海洋構造物等で見られるひび割れの「自然治癒」について、佐川委員（日鐵セメント）からはフ

表-5 自己治癒で対象としている損傷、回復メカニズムおよび評価方法、指標の種類（例）

損傷の導入方法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 載荷試験（引張，曲げ） ・ 凍結融解試験
回復メカニズム（前掲）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 自然治癒 ・ 自律治癒（フライアッシュ，膨張材，フライアッシュ＋短繊維補強など） ・ 自動修復（樹脂カプセル，ガラスパイプ＋補修材）
評価方法，指標	<ul style="list-style-type: none"> ・ マイクロスコープ ・ 透水性 ・ 超音波伝播速度 ・ 毛管吸水量 ・ 塩化物イオンの侵入深さ ・ 曲げ強度 ・ 吸収エネルギー ・ 剛性 ・ 相対動弾性係数

ライアッシュのポゾラン反応を利用したの、また、細田委員（横浜国立大学）、安委員（東京大学）からは膨張材を利用した自己治癒コンクリートによる「自律治癒」について、西脇からはガラスパイプや発熱デバイスを利用した「自動修復」を行う自己修復コンクリートについての研究事例が紹介された。この後、パネルディスカッションが東北大学教授の三橋博三先生をコーディネーターに、京都大学教授の宮川豊章先生、東京大学准教授の岸利治先生、太平洋セメント(株)中央研究所の山田一夫博士をパネリストにお迎えして行われた。冒頭に三橋先生から話題提供が行われた後、各パネリストからは研究や着想に至る経緯や定量評価を踏まえての指針化への期待、制御の重要性についてなどの発言があり、会場からの質疑も交えて活発なディスカッションが行われた。

6. おわりに

以上のように、自己治癒／修復に関する現状について取りまとめることで、自己治癒／修復技術を実用化するために今後必要な事項を明確にすることができた。本研究委員会の活動を発展的に継続するため、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（委員長：五十嵐心一 金沢大学教授）」が発足し、引き続き活動を行う予定である。特に、この委員会では、研究的な情報を発信し、自己治癒／修復技術のデータ蓄積を行っていく予定である。



(a) パネルディスカッションの様子 (その1)



(b) パネルディスカッションの様子 (その2)



(c) 会場の様子

図-6 研究集会の様子

参考文献

1) A. M. Neville : Properties of Concrete, Pitman , 1973
 2) T. U. 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, pp.25-30, 2008

3) C. Edvardsen: Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete, ACI Mat. J., Vol.96, pp.448-454, 1999.
 4) たとえば, A. Hosoda, T. Kishi, H. Arita, Y. Takakuwa : Self Healing of Crack and Water Permeability of Expansive Concrete, Proc. of the 1st International Conference on Self Healing Materials, 2007.
 5) たとえば, 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.
 6) たとえば, 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.
 7) N. ter Heide : Crack healing in hydrating concrete, MSc thesis, Delft University of Technology, 2005.
 8) N. ter Heide, E. Schlangen and K. van Breugel : Experimental study of crack healing of early age cracks, Proceedings Knud Højgaard conference on Advanced Cement-based Materials, Denmark, 2005.
 9) M. Li, M. Sahmaran and V. C. Li : Effect of cracking and healing on durability of engineered cementitious composites under marine environment, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC5) , RILEM PRO 53, pp. 313-322, 2007.
 10) S. Jacobsen and E.J. Sellevold : Self healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw, Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 1, pp. 55-62, 1996.
 11) H.W. Reinhardt and M. Jooss : 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.
 12) S. Jacobsen, J. Marchand and L. Boisvert : Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 6, pp.869-881, 1996.