

論文 若材齢期に力学的損傷を導入したコンクリートの自己修復性の評価に関する基礎研究

大地 正紘*¹・内藤 大輔*²・五十嵐 心一*³・柴山 舞*⁴

要旨: 若材齢期において力学的損傷を受けたコンクリートの再養生過程における力学特性および物質移動抵抗性の変化を、割裂引張試験および電気伝導率の測定により明らかにした。さらに、2次のステレオロジー関数により定量化した未水和セメント粒子の空間配置の観点から、コンクリートの自己修復性を論じた。損傷の導入後、再び水中養生を行うことによりコンクリートの物質移動抵抗性は回復するが、力学特性の回復は顕著ではない。また、コンクリート中の残存未水和セメント粒子からひび割れまでの距離が 15 μm 程度以下であれば、部分的な治癒により連続している物質移動経路の遮断が出来るようである。

キーワード: 自己修復性, 電気伝導率, 引張強度, 静弾性係数, 物質移動抵抗性, 連続経路

1. 序論

コンクリート構造物は、温度変化や乾燥収縮などの要因、あるいは塩害や中性化などの劣化現象によりひび割れを発生する。ひび割れの発生にともない、コンクリートの劣化は急速に進展しうるため、耐久性の観点から、早急に対策を講じる必要がある。一方、コンクリートのひび割れが自然に治癒する現象も確認されており、これは自己修復と呼ばれる。自己修復現象にはいくつかの機構があるが、その1つとして、残存していた未反応のセメントや混和材が再反応することにより生じる自然治癒が古くから知られている。今日、一般的に用いられる低水セメント比の高強度コンクリートは、本質的に内部に多量の未反応結合材を含んでいるため、これの再反応を効果的に行わせることができれば、コンクリートのひび割れは自然に治癒させることができる。これらの点に着目し、現在、自己治癒コンクリートの開発が国内外で積極的に進められている¹⁾。たとえば、Schlangenら²⁾は損傷を受けたコンクリートに対して一定期間の再養生を行い、早期材齢に損傷を受け、かつ水中養生を行った場合に曲げ強度の回復が著しいことを指摘しており、さらに彼らは、損傷により発生する新たな水分供給路(ひび割れ)が残存未水和セメントの水和反応を促進しているとも述べている。また、Jacobsenら^{3,4)}は、凍結融解サイクルにより損傷を受けたコンクリートにおいて再養生を実施し、超音波パルス伝播速度と相対動弾性係数はほぼ完全に性能を取り戻したことを示している。しかし、このとき、塩化物イオン透過性は若干しか回復しておらず、また、圧縮強度の回復は認められなかったと述べている。

以上のように、コンクリートの自己修復現象は、配合

や環境、劣化要因により様々な挙動を示し、また力学的挙動と物質移動特性では異なった傾向を示すことも多く、回復する性能を単純に論ずるのは困難なようである。このため JCI セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究専門委員会¹⁾では、自己修復に関する技術を取りまとめて論点を整理し、自己修復技術を確立していく上で基礎となる材料性能評価試験を行うにあたって、(1) 損傷の導入方法、(2) 試験方法(試験条件)、(3) 確認方法(評価方法)を考慮する必要があることを指摘している。たとえばこれまで用いられてきた損傷の導入方法としては、凍結融解サイクルや温度変化を用いた手法も用いられている^{5,6)}が、一般には曲げ試験や圧縮試験、あるいは引張試験といった力学試験による導入が用いられることが多い^{2,7,8)}。また、そのようにして導入された損傷の確認方法としては電子顕微鏡や光学顕微鏡を用いた観察に基づく定性的な判断や、力学試験に基づく強度特性の測定などが行われてきた⁹⁾。しかし、損傷の導入をひび割れという連続性の大きな空隙の導入、もしくは空隙間の連結経路の導入であることを考えると、空間の連続性を簡便に評価しうる電気伝導率の測定も有用であるように思われる¹⁰⁾。

本研究では若材齢期に力学的な損傷を導入したコンクリートを対象に、その再養生過程での力学特性の回復を強度や剛性の測定により明らかにする。また、物質移動の連続経路の存在を評価すべく、電気伝導率の測定を行い、損傷導入時期による修復性の相違を明らかにすることを目的とする。さらに、セメントの再水和反応による修復は、未水和セメント粒子の空間配置とひび割れ位置の相互関係により影響を受けると考えられることか

*1 (株)中日本ハイウェイエンジニアリング名古屋

(正会員)

*2 (株)JFE エンジニアリング 修 (工)

(正会員)

*3 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 博 (工)

(正会員)

*4 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻

(正会員)

表-1 コンクリートの示方配合

スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(cc/m ³)	
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤	AE助剤
12±2	50	5±0.5	43	168	336	755	993	403	1108

ら、残存未水とセメント粒子の空間分布特性の観点から自己修復性を論ずることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

セメントには普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm³, 比表面積: 3310cm²/g)を使用し, JIS A 1138に準拠し, 水セメント比が0.50の普通コンクリートを練り混ぜ, 直径100mm, 高さ200mmの円柱供試体を作製した。このとき, 骨材には川砂(密度: 2.60g/cm³, 吸水率: 2.03 g/cm³)および川砂利(密度: 2.58g/cm³, 吸水率: 1.98 g/cm³, G_{max}: 25mm)を用い, AE減水剤をセメント質量に対して0.12%, AE助剤を3.3%添加した。コンクリートの配合を表-1に示す。さらに, セメントの水和反応過程を調べる目的で, 水セメント比が0.50の普通セメントペーストも作製した。これらの供試体を打設後24時間にて脱型し, 所定材齢まで20℃の水中養生を行った。

2.2 反射電子像観察試料の作製

材齢1, 3, 7, 28および91日にてセメントペースト中央部から角柱型の試料を切り出し, エタノールに24時間浸漬することによって内部水との置換を行った。さらに, t-ブチルアルコールとの置換を行い, 凍結乾燥装置を用いて試料内部から完全に水分を取り除いた後, 真空樹脂含浸装置を用いて低粘度エポキシ樹脂を含浸させた。樹脂の硬化後, 耐水研磨紙を用いて試料表面を注意深く研磨し, さらにダイヤモンドスラリーを用いた仕上げ研磨を行い, 金-パラジウム蒸着処理を施し, 反射電子像観察試料を得た。

2.3 反射電子像観察および画像解析

走査型電子顕微鏡を用いて, 観察倍率500倍にて無作為に10枚の反射電子像をパーソナルコンピューターに取り込んだ。1画像は1148×1000画素からなり, 1画素

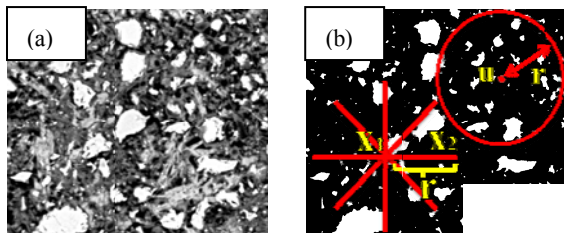


図-1 セメントペースト(W/C=0.50, 材齢3日)の反射電子像の例と未水和セメント粒子抽出画像および2点相関関数計算テンプレートと接触分布関数の模式図

は約0.22μmに相当する。取得した反射電子像に対し, グレースケールに基づく2値化処理を施し, 残存未水とセメント粒子を抽出した2値化画像を得た(図-1)。取得した2値画像の面積率を求め, 対象材料の組織のランダム性を仮定した, モデルベースのステレオロジーの原則に従い, これを体積率に等しいとした。得られた未水とセメント粒子の体積率(V_{CBEI})と配合時のセメントの体積率(V_{C0})との差から水と度α_{BEI}を式(1)により算出した。

$$\alpha_{BEI} = \frac{V_{CBEI}}{V_{C0}} \quad (1)$$

本研究において, 骨材の存在はセメントの水和反応の進行に影響しないと仮定し, コンクリート中のセメントペーストマトリックス相とセメントペーストの組織は同一であるとみなした。所定材齢にて得られた水と度を補完して, 再養生時におけるそれぞれの材齢での水と度を求めた。

2.4 2点相関関数¹¹⁾

(1) 定義

2点相関関数とは, 画像にランダムに落とした線分の両端が同一相に載る確率関数である。今, 着目相である未水とセメント相をCとし, 任意の点(x_i=1,2)に関して次のような指示関数I(x_i)を定義する。

$$I = \begin{cases} 1 & (x_i \in P) \\ 0 & (x_i \notin P) \end{cases} \quad (2)$$

x_i∈Cである確率をP{I(x_i)=1}と書くことにすると, 任意の長さの線分rの両端x₁, x₂が同一相に載るということは, 同時確率P{I(x₁)=1, I(x₂)=1}で与えられ, これより2点相関関数S₂^(C)(r)は式(2)で定義される。

$$\begin{aligned} S_2^{(C)}(r) &= \langle I(x_1) \cdot I(x_2) \rangle \\ &= P\{I(x_1) = 1, I(x_2) = 1\} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに, r = |x₂ - x₁|であり, <>は期待値を表わす。また, 2点相関関数は距離とともに低下し, ある一定の値に収束する。しかし, 統計的変動により収束するまでの距離を決定しにくい場合もある。そこで本研究では, 関数値の変化がおおよそ認められなくなる距離をもって収束距離とした¹²⁾。

(2) 計算方法

本研究においては, 2点相関関数を求めるため, 放射線テンプレートを用いた(図-1(b))。抽出した未水とセメント粒子の2値画像に対し, 任意の位置に所定の長さrを持ったテンプレートを載せ, 原点と各方向の放射線の先端が同一相に載るか否かを判定した。この操作

を画像上の複数の箇所にて総点数 10000 点となるまで繰り返し、放射線の長さを 0 から最大 350 画素まで変化させ、それぞれの距離に対応する 2 点相関関数を求めた。

2.5 接触分布関数の計算¹³⁾

(1) 定義

接触分布関数 $H(r)$ とは、視野内に任意に点が分布しているような点過程 $X = \{x_i; i = 1, \dots, n\}$ が与えられたとき¹⁴⁾、画像内の任意の点 $u \notin X$ から最も近い点過程の点 $x_i \in X$ までの距離に関する確率関数であり、その定義は式(4)に示すとおりである。

$$\hat{H}(r) = P\{N(b(u, r)) > 0\} \quad (4)$$

ここに、 $b(u, r)$ は点 u と中心とする半径 r の円、 $N(B)$ は領域 B の観察視野中にある点の数を表わす。

(2) 計算方法

本研究においては、未水和セメント粒子表面を点過程の点の集合とみなし、未水和セメント相を相 C とし、ランダムに点 $u \notin C$ を落とした。その点から距離 r 離れた領域内に未水和セメント粒子表面が存在するか否かを判定した(図-1(b))。また、その確率を累積し、接触分布関数を求めた。

2.6 損傷の導入方法および再養生

材齢 3 日および材齢 7 日にて、円柱供試体から直径 100mm、高さ 50mm 程度の円盤型試料を切り出し、JIS A 1113 に準拠して割裂引張試験を行い、引張強度を得た。得られた引張強度の 50% の応力レベルまで载荷して、コンクリート供試体に力学的な損傷を導入した。また、割裂引張試験および損傷導入の際に、载荷速度は全ての供試体に対し 0.5mm/min とした。

損傷の導入後、再び 20°C の水中養生を行った。このときの再養生期間は、1、7、14、28、49 および 91 日間とした。なお、比較用として損傷を導入せず、水中養生を継続した供試体も作製した。

2.7 引張強度、静弾性係数の測定

2.6 にて作製したコンクリート供試体に対し、再養生後、ひずみゲージを張り付け再び割裂引張試験を行い、引張強度および静弾性係数を求めた。このときの载荷は、損傷導入時と同じ方向に対して行った。なお、損傷を導入していない供試体についても、载荷した供試体と同材齢において、同様の測定を実施した。このとき、損傷の導入のばらつきによる試験結果の変動を考慮して、5 試料の測定を行い、最大値、最小値を除いた 3 試料の平均値をとって、これを再養生後の引張強度および静弾性係数とした。

2.8 蛍光顕微鏡観察

2.6 の損傷導入直後および再養生後 28 日において、供試体の中央部から 40mm×40mm×10mm 程度の試料を切り出し、これをエタノールに 24 時間浸漬して、水分とエ

タノールとの置換を行った。真空樹脂含浸を行い蛍光染料含有エポキシ樹脂を含浸させた。樹脂の硬化後、試料表面を耐水研磨紙を用いて研磨し、蛍光顕微鏡観察試料を得た。落射型蛍光顕微鏡を用い、観察倍率 20 倍にて試料表面の観察を行うことで蛍光顕微鏡像を取得した。なお、比較用として、損傷導入材齢時に载荷を行っていない試料の観察も行った。

2.9 電気伝導率の測定¹⁵⁾

JSCE-G571 および ASTM C 1202 に準拠し、直流電源を用いた電気泳動法による電気伝導率の測定を行った。所定材齢前日、2.6 にて作製した円盤型供試体の円周面上にエポキシ樹脂を塗布し、硬化後、3 時間の真空飽水処理を施した。さらに 21 時間水中にて飽水処理を行い、直流電流により 30V の電圧を负荷した。このとき、通電開始 15 分後の電流値を測定することで、式(5)より電気伝導率 σ を算出した。ただし、材齢 1 日の試料に関しては、脱型後ただちにエポキシ樹脂の塗布を行い、毛細管空隙の完全飽和状態を仮定して、飽水処理を施さずに電気伝導率の測定を実施した。電気伝導率測定においても、2.7 と同様に、3 試料の平均値を再養生後の電気伝導率とした。

$$\sigma = \frac{I \cdot L}{V \cdot A} \quad (5)$$

ここに、 I は電流値(amperes), L は試料長さ(cm), V は電圧値(Volt), A は試料の投影面積(cm²)を表わす。

3. 結果および考察

3.1 セメントペーストの水和度の経時変化

図-2 は、反射電子像の画像解析により取得したセメントペーストの水和度の経時変化を示したものである。材齢の進行にともない、水和度は増加する。損傷導入時の水和度は、材齢 3 日においては 65% 程度、材齢 7 日においては 70% 程度である。材齢 91 日においては水和度はおよそ 90% まで達する。したがって、水セメント比が 0.50 と普通コンクリートレベルであっても損傷導入後の更なる水和反応の進行により、自己修復現象によるひび割れの充填が起こりうるものと考えられる。

3.2 コンクリート供試体への力学的損傷の導入の確認

図-3 は、損傷の有無による再養生後の応力-ひずみ曲

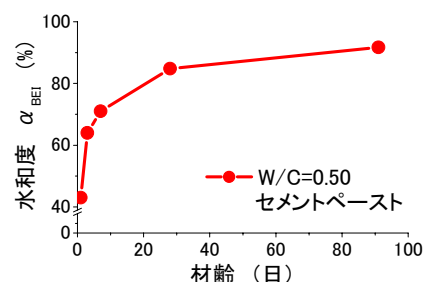


図-2 セメントペーストの水和度の経時変化

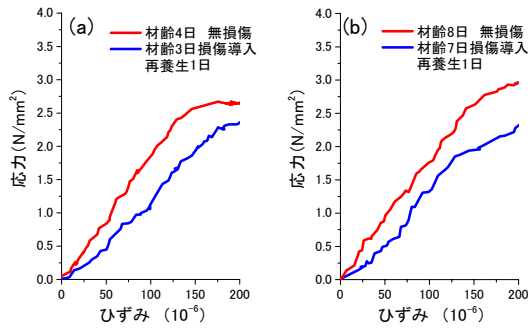


図-3 損傷の有無による応力-ひずみ曲線の相違
(a) : 材齢 3 日にて導入, (b) : 材齢 7 日にて導入)

線の相違を示したものである。いずれの材齢にて損傷を導入したコンクリートにおいても荷重を行っていないコンクリートに比べて、応力-ひずみ曲線の傾きが小さい。すなわち、静弾性係数が減少していることが明らかである。これより本研究で用いた、応力/強度比 50%レベルまでの荷重でコンクリート供試体にはある程度の損傷を生じていたことが明らかである。

図-4 は、損傷導入直後および所定期間の再養生を行った後の蛍光顕微鏡像を示したものである。損傷の導入を行わずに水中養生を継続したコンクリートは(図-4(a)および(b))、ペーストマトリックス中に蛍光領域が存在するが、明確なひび割れの存在は確認されなかった。一方、損傷を導入した直後においては(図-4(c)および(d))、損傷を導入した材齢にかかわらず、モルタル部分あるいは骨材界面領域からひび割れの発生が確認された。しかし、28 日間の再養生を行うと(図-4(e)および(f))、荷重直後と同様に、空隙周辺と界面領域付近にひび割れの存在が確認されるが、その量および長さは荷重直後に比べて減少している様子が観察された。

3.3 若材齢期に力学的損傷を受けたコンクリートの自己修復現象による性能の回復

図-5 は、損傷導入時期の異なるコンクリートの引張強度の経時変化を、無荷重のコンクリートと比較したものである。いずれの材齢においても、損傷を導入したコンクリートの引張強度は無荷重のコンクリートに比べて小さく、特に材齢 7 日にて導入された供試体の強度低下が大きい。一方、再養生期間が長くなるにつれて、引張強度は増加していき、材齢 3 日において損傷を導入したコンクリートは、再養生期間 28 日において、無荷重のコンクリートと同程度にまで引張強度は回復している。しかし、材齢 7 日にて損傷を導入したコンクリートは、49 日間の再養生を行ったとしても、無荷重の供試体に比べて引張強度は小さいままである。これは、材齢 7 日にて未水和セメントが少ないこと、およびセメントマトリックスの緻密さが相違することに関係すると考えられる。

図-6 は、損傷導入時期の異なるコンクリートの静弾

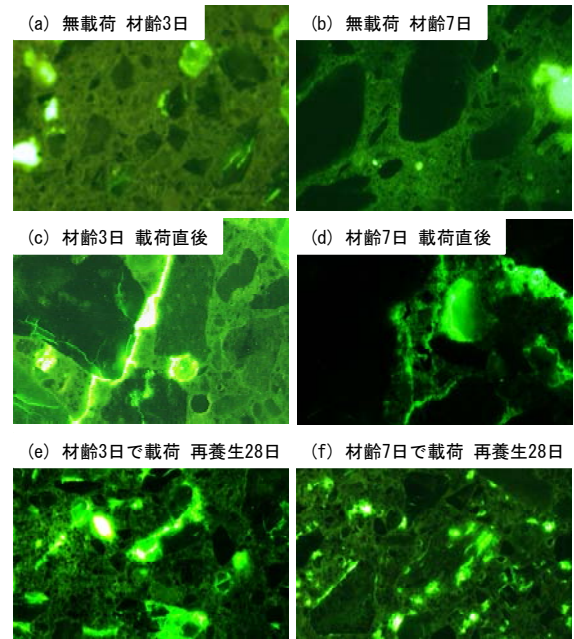


図-4 蛍光顕微鏡像 1mm

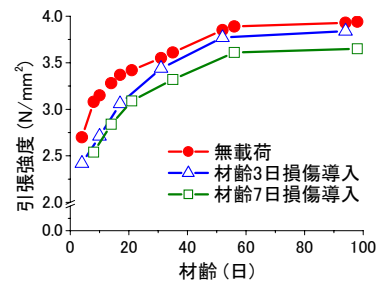


図-5 引張強度の経時変化

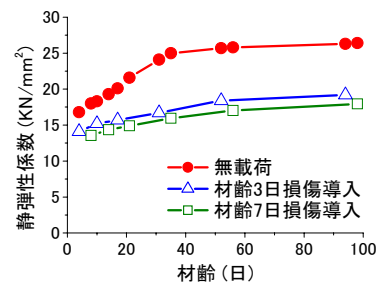


図-6 静弾性係数の経時変化

性係数の経時変化を、無荷重のコンクリートと比較して示したものである。図-3 にて示したように、損傷導入時における静弾性係数は、いずれの材齢においても、無荷重のものに比べて明らかに小さい。無荷重のコンクリートでは材齢の進行にともない静弾性係数は増加し、材齢 28 日以後はほぼ一定の値を示すが、損傷を導入されたコンクリートの静弾性係数の増大はわずかであり、長期間の再水中養生を行っても、剛性の回復は得られない。図-5 の結果と合わせて考えると、自己治癒における引張強度と剛性の回復メカニズムには相違があることを示唆している。

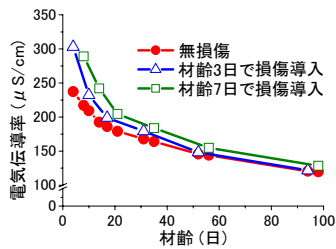


図-7 電気伝導率の経時変化

図-7は、損傷導入時期の相違したコンクリートにおける電気伝導率の経時変化を、無荷重のコンクリートと比較したものである。応力/強度比50%で損傷を導入された供試体は再養生1日材齢において、損傷を導入していない同材齢の供試体の約1.3倍の電気伝導率を示している。このことから、供試体には損傷が導入されていたことが確認され、また物質移動抵抗は大きく低下していたと考えられる。しかし、その後は、電気伝導率は材齢の進行にともない単調に低下していき、28日間の再養生を行うことで、損傷を加えていない供試体とほぼ同程度まで回復している様子が認められる。この再養生期間の初期(3日~20日)に相当する材齢では、損傷を導入していない供試体の電気伝導率の低下割合は急激に低下し、既に空隙の物質移動経路としての連続性は大きく失われた状態にあると考えられる¹⁶⁾。したがって、無荷重の供試体では水和反応の進行は主に空隙率の低下に寄与し、これが電気伝導率の減少をもたらしていると考えられる。これに対して、伝導面は両者とも損傷の集中する荷重軸近傍を含む全断面であり、損傷域以外での水和反応の進行は同程度と考えられるが、電気伝導率は大きな割合で低下していく。

3.4 微視的な観点から見たコンクリートの自己修復現象と物質移動抵抗性の回復

図-8は損傷を導入した材齢のセメントペーストにおける、残存未水和セメント粒子を対象とした2点相関関数を示したものである。なお、骨材の混入により、セメント粒子の配置が異なりうるが、セメント粒子配置のランダム性は維持されると考え、本研究においてはこれを考慮していない。水和反応の進行により、材齢7日の関数値の方が初期値(残存未水和セメント粒子の体積率)は小さくなる。一方、粒子分散の空間構造を特徴づける関数の収束距離は、材齢3日における収束距離は25μm程度であるのに対し、材齢7日においては40μm程度と大きくなっている。

図-9は、損傷を導入した材齢のセメントペーストにおける、残存未水和セメント粒子を対象とした接触分布関数を示したものである。接触分布関数は、観察視野内の未水和セメント粒子ではない任意の点から、距離r離れた位置に残存未水和セメント粒子が存在する累積確率

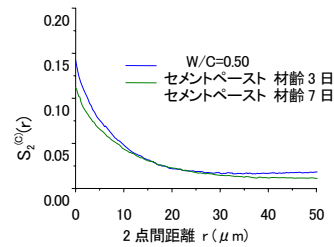


図-8 損傷導入材齢における残存未水和セメント粒子の2点相関関数の相違

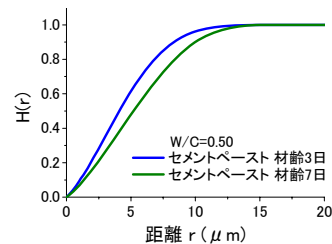


図-9 損傷導入材齢における残存未水和セメント粒子の接触分布関数の相違

として求めたものである。材齢の進行している7日の方が近距離における関数値が低くなっているが、材齢3日においては、任意の点から少なくともおよそ10μm以内、材齢7日に導入した場合でもおよそ13μm以内とかなり近接した位置に残存未水和セメント粒子表面は存在することになる。本質的に累積確率分布である接触分布関数の勾配から、粒子の存在確率が最も高いのは材齢3日では3μm程度、材齢7日では5μm程度であり、たとえ残存未水和セメント粒子量が異なり、それらの平均距離が離れたとしても(図-8)、任意の位置から最近傍のセメント粒子までの距離に大きな差はない。すなわち、活発な水和反応の進行過程と考えられる材齢3日と材齢7日における残存未水和セメント粒子の空間構造の差はあまり大きくはない。

前述のように、コンクリートの力学的特性については自己修復による性能回復は認められなかった(図-5および図-6)。本研究においては、割裂引張試験によりコンクリート供試体に損傷を導入しており、荷重軸近傍の領域に微細なひび割れが分布していると考えられる。図-9の接触分布関数より、そのような任意の位置のひび割れから最大でも距離15μm程度離れるまでの範囲内に確実に未水和セメント粒子が存在すると考えられるが、これを完全には修復できなかったことになる。一方、図-7より明らかなように、物質移動抵抗性はほぼ完全に回復している。このことは、前述のように、自己修復現象による性能回復は力学的特性と物質移動抵抗性を対象とする場合では回復の機構が異なることを示唆していると考えられる。すなわち、力学的特性の場合は損傷部全

域での治癒を必要とするのに対して、物質移動抵抗性の場合、連続的な経路を再反応生成物で部分的に遮断できれば回復しうることを示している¹⁰⁾。換言すれば、反応生成物の液相析出に加えて、固体相上に造膜的に析出していくことで、そのような連続経路が残存未水和セメント粒子からの反応生成物の充填を受けやすい領域内にあれば、その一部の充填で物質移動抵抗性が改善されることを示唆し、本研究における両コンクリートともセメント配置は、そのような距離間隔であったものと考えられる¹⁷⁾。

4. 結論

- 1) 若材齢において、応力/強度比 50%まで載荷された供試体の静弾性係数は小さくなり、薄板を用いた本試験による損傷の導入が確認された。
- 2) 損傷を受けたコンクリートを再養生すると、モルタル部分および界面付近におけるひび割れが減少することが蛍光顕微鏡観察により明らかになった。
- 3) 若材齢期に力学的損傷を導入したコンクリートを再び水中養生することで、物質移動抵抗性を反映した電気伝導率の回復が認められた。一方、引張強度および静弾性係数の回復は顕著ではない。
- 4) 損傷によりランダムに発生するひび割れが、自己治癒をもたらす未水和セメント粒子の領域内に存在する場合、物質移動抵抗性は回復すると考えられ、本配合のコンクリートでは、その領域の大きさは15 μ m程度と推察される。

謝辞：

本研究を行うにあたり、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究 C，課題番号：21560482，研究代表者：五十嵐心一）の交付を受けた。ここに記し謝意を表す。

参考文献：

- 1) セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法 研究専門委員会報告書：社団法人日本コンクリート工学協会, 2009
- 2) Schlangen, E, Heide, N. and Breugel, K. : Crack healing of early age cracks in concrete, Prof. Kund Hojaad Conference on Advanced Cement-Based Material, Technical University of Denmark, 2005
- 3) 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
- 4) 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

- 5) 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
- 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) Zhong, W. and Yao, W. : Influence of damage degree on self-healing of concrete, Construction and Building Material, Vol.22, pp.1137-1142, 2008
- 8) Li, M., Sahmaran, M. and Li, V.C. : Effect of cracking and healing on durability of engineered cementitious composites under marine environment, proc. of HPRCC 5, RILEM Proceeding PRO 53, pp.313-322,2007.
- 9) Jacobsen, S., Marchand, J. and Hornain, H. : SEM observation of the microstructure of frost deteriorated and self-healed concrete, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.8, pp.1781-1790, 1995
- 10) Coverdale, R.T. , Christensen, H. M. , Jennings, T. O. and Mason, T. O. : Interpretation of impedance spectroscopy of cement paste via computer modeling, Journal of Materials Science 30, pp.712-719, 1995
- 11) Coker, D.A. and Torquato, S. : Extraction of morphological quantities from a digitized medium, Journal of Applied Physics , Vol.77 , No.12 , pp.6087-6099, 1995
- 12) Howard ,C. V. and Reed ,M. D. : Unbiased Stereology Three-Dimensional Measurement in Microscopy(2nd Ed.), BIOS Scientific Publishers, Oxon, U. K , 2005
- 13) Stoyan, D., Kendall, W.S. and Mecke, J. : Stochastic geometry and its applications (2nd ed.), JOHN WILEY & SONS, 1995
- 14) 島谷健一郎 : 点過程による樹木分布地図の解析とモデリング, 日本生態学会誌, No.51, pp.87-106, 2001.
- 15) Nokken, M.R. and Hooton, R.D. : Using pore parameters to estimate permeability or conductivity of concrete, Material and Structure, Vol.41, No.1, pp.1-16, 2008
- 16) Powers, T.C. and Mann, H. M. : Capillary Continuity or Discontinuity in Cement Paste, Journal of the PCA Research and Development Laboratories, Vol.1, No.2, 38-48, 1959
- 17) Bentz, D. P. and Snyder, K. A. : Protected paste volume in concrete Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate , Cement and Concrete Research, Vol.29, No.11, pp.1863-1867, 1999