論文 断面修復コンクリートにおける水分移動に関する実験的研究

金 侖美*1·千歩 修*2·谷口 誠*3·福山 智子*4

要旨:積雪寒冷地において断面修復を行ったコンクリートの中に早期に劣化が発生した事例が多く見られる。 本研究では、積雪寒冷地の断面修復コンクリートにおけるエフロレッセンスの析出の原因に躯体コンクリー トの凍害劣化程度や断面修復界面からの物質移動が要因になると想定している。なお、これらの原因を明ら かにするため断面修復コンクリートを模擬した試験体を用いて片面吸水試験を行い、試験体中の水分移動状 況について検討を行った。その結果、コンクリートの凍害劣化程度に関わらずに修復界面からの水分吸水や 拡散が著しくなることが分かった。

キーワード:断面修復工法,再劣化,水分移動,ポリマーセメントモルタル,凍害

1. はじめに

積雪寒冷地においてコンクリート構造物が凍害を受けた場合は、コンクリート表面のスケーリングや剥落に よってコンクリートの部材断面が減少し、微細ひび割れ が発生するためコンクリート自体の性能が低下する。こ のような場合、コンクリートの劣化部分をはつり取り、 補修材を施工する断面修復工法が採用される。

しかし、断面修復した鉄筋コンクリート構造物が補修 後の目標とした耐用年数に達する前に再び劣化するとい う事例が多く報告されている¹⁾。断面修復コンクリート の劣化現象は修復界面におけるエフロレッセンスの析出 が挙げられる²⁾。これは、コンクリートの耐久性への直 接的な影響は少ないと考えられるが、水分などの劣化要 因の浸透経路になると考えられる。なお、断面修復コン クリートの早期劣化は維持管理コストを増大させ、莫大 な経済的損失をもたらすため、その原因を明らかにし効 果的な対策を講じる必要がある。さらに、断面修復工法 では既存コンクリートと断面修復材の一体性を確保する 必要があるが、凍害を受けたコンクリート部材の凍害深 さの判断に明確な基準がなく、劣化したコンクリートが 残っているはつり不足の状態で断面修復する可能性も排 除できない。

現在,コンクリートの劣化に関する研究は,多くの研 究者によって成果が得られており³⁾⁴⁾,耐凍害性に優れた 断面修復材の開発も盛んに行われてきた⁵⁾。しかし,コ ンクリートと断面修復材の複合体の劣化メカニズムにつ いては,ほとんど行われていない。

本研究では、断面修復コンクリートの修復界面におけ るエフロレッセンスの析出およびコンクリートのはつり 不足に着目し、断面修復材と躯体コンクリートかつこれ らの界面における水分移動状況について検討を行い、断 面修復コンクリートの早期劣化の原因を明らかにするこ とを目的としている。

2. 実験概要

2.1 実験計画

表-1 に実験計画を,表-2 にコンクリート,表-3 に 断面修復材の調合および基礎性状を示し,図-1 には実 験フローを示す。

コンクリートは□75×400mmの寸法で作製して JIS A 1148-A 法に準じて水中促進凍結融解試験((5℃・2.5 時間 /-18℃・2 時間)/1 サイクル)を行ったものを用いた。ここ で,目標の相対動弾性係数になったコンクリートは水中 養生を行ったが,水中養生中には相対動弾性係数が上が ったため,再度水中促進凍結融解試験を行って相対動弾 性係数を調整した。この過程には 8 週間を要した。

コンクリートの劣化グレード (DM) は,相対動弾性係 数で区分し,DM 100,90,80,70,60(%) である。劣 化グレードの相対動弾性係数の範囲は,DM 100 が 100%, DM 90 のものが 95~86%,DM 80 が 85~76%,DM 70 が 75~66%,DM 60 が 65~56%である。DM 100 は断面修 復時にはつり作業が完全に行われた健全な状態を想定し, DM 90~60 ははつり作業が不十分な状態で断面修復材を 施工したものを想定している。

断面修復材は、ビニロン繊維や軽量骨材が含有されて いるプレミックスセメントにエマルションタイプのカチ オン性 SBR 系樹脂を混合したポリマーセメントモルタ ルを用いた。

試験体の形状は単一体である A タイプおよび, コンク リートと断面修復材の複合体である B タイプのものを用 いた。これは, コンクリートおよび断面修復材の表層部 からの水分移動と断面修復コンクリートの界面からの水

*1 立命館大学 理工学部 客員研究員 博士(工学) (正会員)

*2 北海道大学 大学院工学研究院空間性能システム部門 教授 工学博士 (正会員)

*3 北海道大学 大学院工学院空間性能システム専攻 修士課程 (学生会員)

*4 立命館大学 理工学部建築都市デザイン学科 准教授 博士(工学) (正会員)

表-1 実験計画

試験体条件						封殿士注	測定高さ	測定
区分	劣化方法	劣化グレード	形状	吸水面	轮燥力伝	武映万伝	(mm)	項目
コンクリート	JIS A 1148-A 法 水中促進凍結融解試験 (5℃・2.5h/-18℃・2h)	DM 100 90	A タイプ	下面	60°C 乾燥 (1 週間)	片面吸水試験 (20℃, R.H 60%)	50	質量 比抵抗
断面修復コンクリート		80 70 60	Bタイプ	界面				
断面修復材	PCM		Aタイプ	下面				

*DM:相対動弾性係数, PCM:ポリマーセメントモルタル

表-2 コンクリートの調合及び各種性状

(%) (%) W C S G (%) (MPa) 40 45.3 180 450 804 979 2 54.7	W/C	s/a	単位量(kg/m ³)			空気量	圧縮強度 28		
40 45.3 180 450 804 979 2 54.7	(%)	(%)	W	С	S	G	(%)	(MPa)	
TO T3.5 180 T30 80T 979 2 5T.7	40	45.3	180	450	804	979	2	54.7	

*C:セメント(普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm³), S:陸砂(表乾密度: 2.67g/cm³), G:砕石(表乾密度: 2.68g/cm³)

表-3 断面修復材(ポリマーセメントモルタル)の調合及び各種性状

区分	主成分	混合比 (質量比)	圧縮強度 [※] (MPa)	密度 (kg/m ³)	透水量 [※] (ml/h)	吸水量 [※] (g)
主材	ビニロン繊維,軽量骨材配合プレミックスセメント(粉体)	20	27.2	1 2 1 5	0.1	17.9
硬化剤	カチオン性 SBR 系樹脂(エマルション)	5	57.2	1,315	0.1	17.0

※製品の技術データから参照した。



図-1 実験フロー

分移動を把握するため作製したものである。なお,両 タイプとも 60°C の環境で1週間乾燥させたものを片 面吸水試験に用い,この時の含水率を0%とした。

片面吸水試験は、20°C, R.H 60%の恒温恒湿条件で行った。測定項目は、試験体の質量および高さ 50mm 部の比抵抗である。これは、片面吸水試験時の試験体全体の含水率変化や断面修復深さを 50mm と想定した修復界面の含水率変化を比較するために実施したものである。なお、測定は片面吸水開始時点から8日まで24時間間隔で行った。

2.2 実験方法

試験体の様子および片面吸水試験の概念図を図-2 および図-3に示す。

A タイプの試験体は、□75×400mmのコンクリート の端部から 50mm までの部分を切断し、切断面から□ 75×100mm の寸法になるように切り出したものであ る。断面修復材は 4 週間気中養生を行い、コンクリー トと同様に切り出したものを用いた。電極は吸水面の 平行方向に高さ 50mm 部に固定した。比抵抗は押さえ られる力によって変わるため、測定期間中に一定の力 を維持するよう絶縁処理したクランプで電極を固定し た。なお、試験体表面に防水処理をすると比抵抗の測 定ができないため、防水処理は行っていない。片面



図-2 Aタイプ試験体の様子及び片面吸水の概念図

吸水試験は切断面を吸水面とし,吸水面から 10mm ま で浸漬した。これらの試験体は,コンクリートの劣化 グレード毎に3体ずつ計15体,断面修復材は1体を作 製した。

B タイプの試験体は、コンクリートを図-3 の(a)の ように 75×37.5×100mm の寸法で切り出したものに、 切断前の外側であった面に断面修復材を□75×100mm になるよう型枠を取付けて打込んだものである。ここ で、プライマーは絶縁性があると考えられたため、使 用していない。電極は吸水面から 50mm の高さに補修 界面の平行方向に固定させた。これらの試験体は、20℃、 RH60%の恒温恒湿室で1週間養生した。なお、修復界 面がある側面からの水分浸透を防ぐため、エポキシを 塗布して防水処理した。片面吸水試験は、図-3 の(b) のように吸水面を□75mm の面とし、A タイプと同様 に吸水面から 10mm まで浸漬して 20℃、R.H 60%の恒 温恒湿に静置した。これらの試験体は、劣化グレード 毎に 3 体ずつ計 15 体を作製した。

2.3 測定方法およびデータ処理方法

交流2電極法のは、形状係数が分かる電極を測定対象のコンクリートに設置し、電気抵抗を測定することで含水状態を推定する方法である。電気抵抗はコンクリートの含水状態によって変わるが、コンクリートに水分がない場合は不導体になる。なお、電気抵抗はイオンの量に影響を受けるため、同様の調合でもイオンの含有量が異なると電気抵抗も大きく変わる。

本実験の片面吸水試験によるコンクリートの含水状 態の測定は,各試験体に図-4のような電極を設置し, 試験体の比抵抗の測定と同時に質量も測定した。測定 した比抵抗および質量は飽和率および比抵抗変化率と まとめたが,60℃の環境で1週間乾燥した状態を0, 片面吸水試験後1週間水に浸した状態を100となるよ うに式(1)と式(2)を用いて算出し,劣化グレード毎に3 体の値を平均した。

飽和率(%) =
$$\frac{W_n - W_d}{W_w - W_d} \times 100$$
 (1)

比抵抗変化率(%)=
$$\frac{\rho_d - \rho_n}{\rho_d - \rho_w} \times 100$$
 (2)



図-3 Bタイプ試験体の様子及び片面吸水の概念図



図-5 絶対乾燥状態の比抵抗(p_d)推定

ただし、コンクリートに水分がない場合は比抵抗の 測定ができないため、図-5のような時間経過(横軸) と比抵抗(縦軸)の関係(決定係数 R²が 0.9±0.1 範囲 のもの)から絶対乾燥状態の比抵抗(ρ_d)を推定した。 なお、比抵抗の測定は試験体の温度が 20±5℃の条件で 測定を行い、温度の影響については考慮していない。

3. 実験結果および考察

3.1 飽和率

図-6 に片面吸水試験による含水状態の経時変化を 示す。グラフの横軸は片面吸水開始時点から経過した 時間であり,縦軸は1週間水に浸漬した後の含水状態 を100%,60°Cで1週間乾燥した後の含水状態を0%と した飽和率を示したものである。

A タイプのコンクリートにおける含水状態の経時変 化は、2日目までに急激な上昇を示し、全ての試験体で 2日目の飽和率が70%を上回っている。以後、飽和率 は緩やかに上昇する傾向を示した。これは、コンクリ ートの含水率勾配により拡散速度が異なることから⁷、 片面吸水開始直後では試験体がほぼ絶対乾燥状態であ ったため水分の吸水が速くなり、その後試験体の吸水 面と内部の含水率勾配が徐々に小さくなって水分の拡 散が遅くなったためと考えられる。また、劣化グレー ドの異なる試験体の飽和率の経時変化には明確な差異 が見られずに全ての試験体が同様な傾向を示した。こ れは、劣化したコンクリートに生じているひび割れは、 片面吸水試験の質量変化に影響するほどのものではな いと思われる。

B タイプの断面修復コンクリートの場合,劣化グレ ードが DM 90~60 の断面修復コンクリートでは, DM 60の1日目の飽和率が75%で最も大きく、劣化グレー ドによって飽和率の差が大きかった。なお、時間経過 に従い全ての飽和率が高くなる傾向を示した。これは, コンクリート自体および断面修復材自体の飽和率の組 み合わせでは説明できないことから,断面修復コンク リートの水分移動にはコンクリートー断面修復材の界 面が影響しているものと考えられる。一方, DM 100 は 1日目に DM 60 の飽和率よりも若干大きい値を示して おり, A タイプのコンクリートの DM 100 よりも高い 値となった。これは、DM 100 の修復面にははつり作業 を想定したスクラッチ作業などを行わずに断面修復材 を施工したことが原因と考えられ、凍結融解作用によ って修復界面が凹凸になった DM 90~60 に比べて修復 界面が平滑だったと考えられる。

一方, A タイプの断面修復材の飽和率は, A タイプ のコンクリートと B タイプの断面修復コンクリートに 比べて非常に緩やかな増加傾向を示した。なお, A タ イプのコンクリートと B タイプの断面修復コンクリー トの 8 日目の飽和率が 90%程度まで上昇したのに対し, 断面修復材の飽和率は 30%にも到達しなかった。これ は, コンクリートに比べ断面修復材が緻密であり, 吸 水抵抗性が非常に高いためである⁸。



3.2 比抵抗変化率

図-7 に片面吸水試験による比抵抗変化率の経時変 化を示す。測定部は,試験体の吸水面から 50mm の高 さであり,試験体は絶対乾燥状態と想定したものを用 いた。グラフの横軸は片面吸水試験の開始時点から経 過した時間であり,縦軸は試験体の飽和状態の比抵抗 を100%,絶対乾燥状態の比抵抗を0%とした比抵抗変 化率を示した。比抵抗は飽和状態になるほど減少する 傾向を示すため、含水率が高くなるほど比抵抗の変化 率は大きくなる。なお、実験では15体すべての測定を 行ったが、測定電極の腐食劣化などにより結果の信頼 性に疑義があるものについてはグラフから棄却した。

図-7の(a)に示すようにAタイプのコンクリートの 比抵抗変化率は、2日目まで増加する傾向を示すが、以 後,若干減少している。本実験におけるコンクリート の導電性は下面からの吸水のみに依存すると考えられ るが、コンクリートの表層に防水処理をしていないた め表層からの乾燥も発生する %。試験体が飽水に達す るまでは吸水を続け同時に乾燥すると考えられること から、吸水と乾燥がバランスした結果が比抵抗の測定 結果に表れたものと考えられる。なお、2 日目以後に DM 90の比抵抗変化率が最も大きく、コンクリートの 劣化が激しいほど小さい比抵抗変化率を示している。 これは、凍結融解作用によって発生した微細ひび割れ が原因で表面からの乾燥が激しくなるためと考えられ る¹⁰⁾。一方, DM100 は著しく減少し, 絶対乾燥状態(0 日)の比抵抗変化率よりも小さい値を示しているが, 表層部の乾燥に加え,前述の理由による実験不備があ ったためと考えられる。

B タイプの断面修復コンクリートの界面における比 抵抗変化率は,経過時間に従って増加する傾向を示す が,2日目までは急激に増進し,以降は比抵抗変化率の 勾配が緩やかな傾向を示した。また,8日目で全ての値 が90%を上回っている比抵抗変化率を示している。こ れから,断面修復コンクリートの界面における水分の 拡散がコンクリート中の拡散よりも速く,持続的な水 分の供給により界面はほぼ飽和状態になっていること が考えられる。なお,1日目の比抵抗変化率は DM 60 が 55%を示し最も大きい値を示した。

一方, A タイプの断面修復材における比抵抗変化率 は,変化せずに0%を維持した。これから,片面吸水に より吸収された水分が測定部まで拡散されなかったと 考えられる。

3.3 飽和率と比抵抗変化率の関係

図-8にAタイプのコンクリートおよびBタイプの 断面修復コンクリートにおける飽和率と比抵抗変化率 の関係を示す。グラフの横軸は飽和率,縦軸は比抵抗 変化率であるが,飽和率と比抵抗変化率の経過時間の 違いはシンボルの大きさで現した。すなわち,シンボ ルが大きいほど経過時間が大きいことを意味する。

A タイプのコンクリートは、劣化グレードに関わら ずに飽和率が比抵抗変化率よりも高い傾向を示した。



このことから、コンクリートの表層では、水分の蒸発 による含水率勾配が生じ、導電性が減少しているため と考えられる。

B タイプの断面修復コンクリートでは、1 日目までには比抵抗変化率より飽和率のほうが高い値を示したが、以後、飽和率より比抵抗変化率のほうが高くなり、飽和率と比抵抗変化率が近い値に近づく傾向を示した。このことから、試験体内部の電極は、試験体内部および界面の含水状態を把握できているものと考えられ、界面の水分移動後、試験体全体の含水率が上昇しているものと思われる。

4. まとめ

本研究では、断面修復を行ったコンクリートの水分 経路をコンクリートと断面修復材の修復界面と想定し、 コンクリートのはつり不足状態の影響を想定した実験 を行った。その結果、本研究の範囲では次のような知 見を得ることができた。

- (1) コンクリートの片面吸水試験による飽和率変化は、 コンクリートの劣化グレードによる明確な差異は みられなかった。
- (2) 断面修復コンクリートの飽和率変化は、コンクリートの凍害劣化が激しいものの飽和率の変化が大きく、断面修復材一コンクリートの修復界面からの吸水移動速度ではコンクリートの劣化程度に関わらずに修復界面からの水分移動が著しい。
- (3) 断面修復材の飽和率変化および水分移動はコンク リートおよび断面修復コンクリートよりも顕著に 小さい。

参考文献

- Tilly, Graham : The Durability of Repaired Concrete Structures, IABSE Symposium Report, International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol.93, No.22, pp.1-8, 2007
- 2)積雪寒冷地におけるコンクリート補修工法の設計施工に関する研究委員会:積雪寒冷地におけるコンクリート補修工法の設計施工に関する研究委員会報告書,日本コンクリート工学会北海道支部,pp.1-54,2016
- SHISHENG, Shi. : Effect of Freezing-thawing Cycles on Mechanical Properties of Concrete, China Civil Engineering Journal, 1997
- 4) CAI, H.; LIU, X. : Freeze-thaw durability of concrete: ice formation process in pores, Cement and Concrete Research, Vol.28, No.9, pp.1281-1287, 1998
- 5) 宮川豊章,出村克宣: Polymers in Concrete-新しい動 向,材料, Vol.41, No.469, pp.1581-1587, 1992
- 6)鎌田英治,田畑雅幸,中野陽一郎:コンクリート内部の含水量の測定,セメント技術年報,No.30, pp.288-292,1978



(b) B タイプの断面修復コンクリート 図-8 飽和率と比抵抗変化率の相関

- 7) 佐藤伸行, 沼尾達弥, 舟川勲, 木村亨: セメント硬化 体中の水分移動および水分逸散に関する研究, 土木 学会第64回学術講演概要集, pp.859-860, 2009
- 8) 下田智也, 細田暁, 松田芳範, 小林薫: 含水率による 表層の吸水抵抗性と表面含浸材の効果の分析, コン クリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010
- 9)阪田憲次,蔵本修:乾燥に伴うコンクリート中の水 分の逸散と乾燥収縮に関する研究,土木学会論文報 告集, Vol.1981, No.316, pp.145-152, 1981
- 10) 榎本靖彦,大河内雄太,齋藤憲寿,加賀谷誠:凍結 融解作用を受けたコンクリートのひび割れ密度分 布に関する,土木学会東北支部技術研究発表会, 2011