

凍害劣化したコンクリート表面に対する 表面強化材の修復効果検証実験

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○内藤 勲
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 安中 新太郎

コンクリート表面が凍害劣化により徐々に剥がれ落ちるスケーリングの補修には、現在、主に断面修復対策が実施されている。しかし事前に劣化範囲を正確に把握できず劣化部が十分に除去されなかったり、劣化部を破砕器等で除去する際に健全なコンクリート部位を損傷させている可能性がある。そこで本研究では、表面を劣化させた供試体に種々の表面強化材を塗布し劣化部を修復する実験を行い、超音波や曲げ試験により、その修復効果の検証を行った。その結果、表面強化材の塗布後の超音波伝播速度がコンクリートの劣化の程度にかかわらず増加すること及び、エポキシ樹脂系の表面強化材に関しては塗布面近縁の強度が増加する効果があり、これらのことから表面強化材の修復効果が確認できた。

キーワード：凍害劣化、スケーリング、補修対策、表面強化材

1. はじめに

積雪寒冷地域のコンクリート構造物は、凍結融解作用による凍害劣化が生じやすい。主に多く見られる凍害の劣化状態は、コンクリート表面が徐々に剥がれ落ちていくスケーリングである。スケーリングが進行するとコンクリートに大きなひび割れが生じたり、鋼材のかぶり高が減少して中性化や塩害による劣化が進行し鋼材の腐食が発生しやすくなり、最終的に耐力低下に至る。一般に新設のコンクリート表面に対しスケーリングの発生を予防・抑制するためには、表面被覆工法や表面含浸工法が行われることが多いが、スケーリングが生じてしまったコンクリート表面にはこうした工法は適用されず、破砕器等でスケーリングした劣化部を除去し断面を修復する工法が通常、実施されている。しかし、コンクリート表面からの深さ方向の劣化程度を評価する手法の精度が低いため、劣化部分が十分に除去されなかったり、破砕器等の打撃による劣化部除去の際に健全部に微細ひび割れを生じること等により、断面修復後に再劣化が発生するケースもある¹⁾。

このような背景から本研究では、コンクリート表面やはつり面における微細ひび割れ等の微小な空隙に浸透し硬化する表面強化材に着目し、凍害劣化によりスケーリングを生じさせた供試体に対し種々の表面強化材を塗布し、劣化部を破壊せずに修復する実験を行った。

修復効果の検証については、超音波測定と曲げ試験を実施し、表面からの凍害劣化深さと劣化の改善度を確認した。

2. 試験概要

(1)劣化供試体の作製

凍害劣化によるスケーリングを模擬した供試体（以下、劣化供試体）は次のように作成した。

表-1の配合のコンクリートを打設し100×100×400mmの角柱供試体を作製し、これを28日間水中養生。②図-1に示すように、試験面および試験面から20mm厚までの側面を除き水の浸透を防止する保護コーティング（エポキシ樹脂接着剤で被覆）を施す。保護コーティングを施さない部分は劣化層に見立てた部分。③JIS A 1148（A法）に準じた凍結融解試験により、試験面にスケーリング等の凍害劣化を生じさせる。

劣化供試体は、異なるコンクリート表面の劣化程度を想定し、凍結融解回数を100、200、300サイクルで終了させて異なる相対動弾性係数とした。各々の供試体のサイクル終了時に共鳴振動法による相対動弾性係数を測定した。

表-1 コンクリートの配合

セメントの種類	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				Slump (cm)	Air (%)
				W	C	S	G		
普通ポルト	20	55	45	175	318	846	1137	9.3	1.5

※ AE剤未使用 (non-AE)

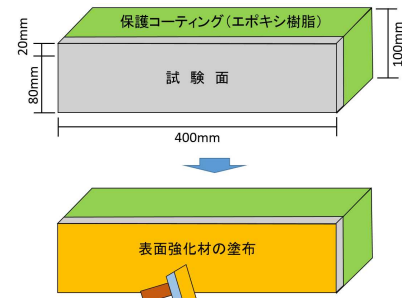


図-1 劣化供試体と表面強化材の塗布方法

(2) 表面強化材の種類と試験ケース

表-2に、使用した3種類の表面強化材とプライマーの品質諸元を示す。表面強化材Aはけい酸リチウム系、表面強化材BとCはエポキシ樹脂系である。今回使用した表面強化材は一般に使用されている製品で、各製品のメーカーカタログ等にはその効果として「粘性が低く、微細ひび割れや空隙に浸透・固化することでコンクリートを強化する」旨記載されているが、材料自体の成分割合や配合等は公表されていない。

試験ケースは、劣化なしの供試体（ブランク）、塗布なしの劣化供試体（劣化度別3ケース）および左記3ケース各々に対し3種類の表面強化材を塗布した9ケースの計13ケースとした（表-3）。

表面強化材の塗布方法は、図-1および写真-1に示すように、劣化供試体の試験面を横向きにし、各表面強化材の標準塗布量をハケで均一に塗布した。表面強化材AとBは2回塗り、Cは浸透の状態に応じて数回塗りて標準塗布量を塗布した。なお、表面強化材Bにおいては、塗布して1日おいた後、その上にプライマーを標準量塗布した。これは表面強化材Bが、断面修復工のはつり面下地のプライマーと併用することを標準としているためである。

なお、各表面強化材の塗布作業は、凍結融解作用後の劣化供試体をビニール袋で封緘し、20℃の恒温室に6ヶ月静置したのち行った。

表-2 表面強化材の品質諸元

表面強化材	A	B	C
主成分等	けい酸リチウム 一液型	エポキシ樹脂 一液型 二液型	
粘度 (mPa・s)	10以下	150±100 (23℃)	300±200 (20℃)
曲げ強さ (N/mm ²) (JIS K 7171)	—	2.6	70以上
標準塗布量 (m ² 当たり)	200~400g (固化前2回塗り)	150g (固化前2回塗り)	100~300g (固化前重ね塗り可)
プライマー	なし	エポキシ樹脂系	なし

※ 数値はカタログ値

表-3 試験ケース

試験ケース	1	2	3	4	5	6	7
表面強化材	なし			A			
相対動弾性係数 (%)	100	60.7	33.4	7.7	80.3	59.2	18.6
試験ケース	8	9	10	11	12	13	
表面強化材	B			C			
相対動弾性係数 (%)	70.2	44.9	10.9	62.1	46.0	9.6	



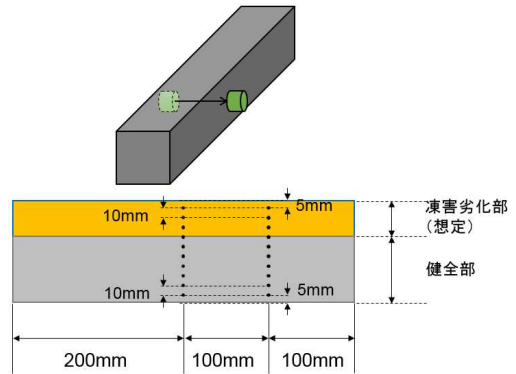
写真-1 表面強化材の塗布状況

(3) 超音波測定

表面強化材の浸透深さ方向における修復効果を検証するため、既往の研究等³⁾を参考に、図-2および写真-2に示すように超音波透過法を用いて表面強化材塗布前後の超音波伝播速度を測定した。測定点は供試体試験面から深さ方向に5、15、25mm、…と10mmピッチ、10箇所とした。表面強化材塗布前の測定は、凍結融解作用後に20℃の恒温室で12時間自然乾燥したあとのものである。表面強化材塗布後の測定は、塗布後に20℃の恒温室で7日間養生したあとのものである。

(4) 曲げ試験

表面強化材による強度面の修復効果を検証するため超音波測定のものち曲げ試験を行った。試験はJIS A 1106に準拠し図-3に示すように供試体の試験面を引張側とした4点载荷にて行った。またこの際、供試体側面の引張側にひずみゲージを1箇所設置し最大ひずみを測定した。



深さ方向に10点の透過を2カ所測定

図-2 超音波透過法の測定方法



写真-2 超音波測定状況

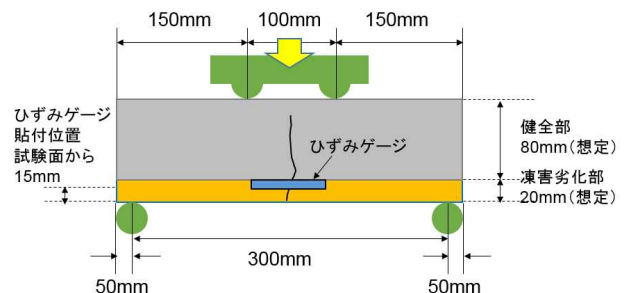


図-3 曲げ試験方法

3. 試験結果

(1) 超音波測定結果

図4は、表面強化材塗布前後の超音波伝播速度の比較である。劣化供試体は試験面から20mmの深さまで保護コーティングを施しておらず、凍結融解試験時に直接水が浸透して凍害劣化が生じる設定としている。

劣化していないブランク供試体（ケース1）と表面強化材を塗布していない劣化供試体（ケース2～4）のそれぞれを比較すると、相対動弾性係数が低い劣化供試体ほど超音波伝播速度が低下しており、また保護コーティングがない試験面に近いほど超音波伝播速度は低く、凍害劣化が進行していることが確認できる。

また表面強化材を塗布したケースすべてで、一部若しくは全測点において、塗布後、超音波伝播速度が増加していることが確認できる。

さらに相対動弾性係数が比較的大きい60～80%の劣化供試体（ケース5、8、11）では、試験面から約20～30mmの深さの範囲で、塗布後の超音波伝播速度が塗布前より増加し4km/secが確保されている。この数値は一般的に健全なコンクリートが示す値であることから、スケーリングが生じた表面から20～30mmの深さのコンクリートの浅い領域において、表面強化材の塗布による修復効果が期待できると考えられる。

一般に凍害劣化と判定される相対動弾性係数60%以下の劣化供試体（ケース7、10、13）は、表面強化材の塗布により、あらゆる深さで超音波伝播速度が増加している。これは、相対動弾性係数が10%前後の凍害劣化が大きく進行しているコンクリート内部には微細ひび割れや空隙が多数発生しており、それらのひび割れ等に表面強化材が全体的に浸透したためと推測できる。しかし、塗布後の超音波伝播速度は3km/sec前後であり、健

全なコンクリートになるまで修復されたとは言いがたい。

一方、相対動弾性係数が40～60%程度の劣化供試体では、表面強化材A（ケース6）においては、超音波伝播速度が全体的に増加しており、速度値も4km/sec付近まで回復している。これに対し、表面強化材C（ケース12）では、試験面から深さ40mm付近までは超音波伝播速度が4km/sec近くまで回復しているが、40mm以深の速度に増加は見られない。これは、表面強化材Aが粘度10mPa・s以下の水のような液体であるため劣化供試体内部の微細ひび割れに広く浸透したためと考えられ、表面強化材Cは粘度が300±100mPa・sのエポキシ樹脂の中でも粘性の低いものであるが、試験面から深さ40mm以降には浸透しなかったものと推測される。

以上の超音波測定結果から、表面強化材を塗布することによりコンクリートの表面劣化部がある程度修復されることを確認した。

(2) 曲げ試験結果

図5に曲げ試験結果から得られた表面強化材毎の曲げ強度とひずみの関係を示す。表面強化材の種類や有無にかかわらず相対動弾性係数が大きいほど曲げ強度は大きくなり、ひずみは相対動弾性係数が40～60%程度の劣化供試体で最も大きくなった。

また表面強化材なしの相対動弾性係数が大きい供試体（ケース1）はほとんどひずみの増加を伴わず破壊に至っており、無筋コンクリートの一般的な結果と同様となったが、相対動弾性係数が小さい劣化供試体（ケース3）では緩やかに曲げ強度が増加しほぼ一定値となり、ひずみが先の3倍弱まで伸びて終局状態を迎えた。ケース4ではほとんど応力がかからない状態で破壊に至った。

これに対して表面強化材を塗布したケースでは、表面強化材Aは脆性的に破壊に至ったが（ケース6、7）、エポキシ樹脂系の表面強化材BとCは、ひずみが小さいう

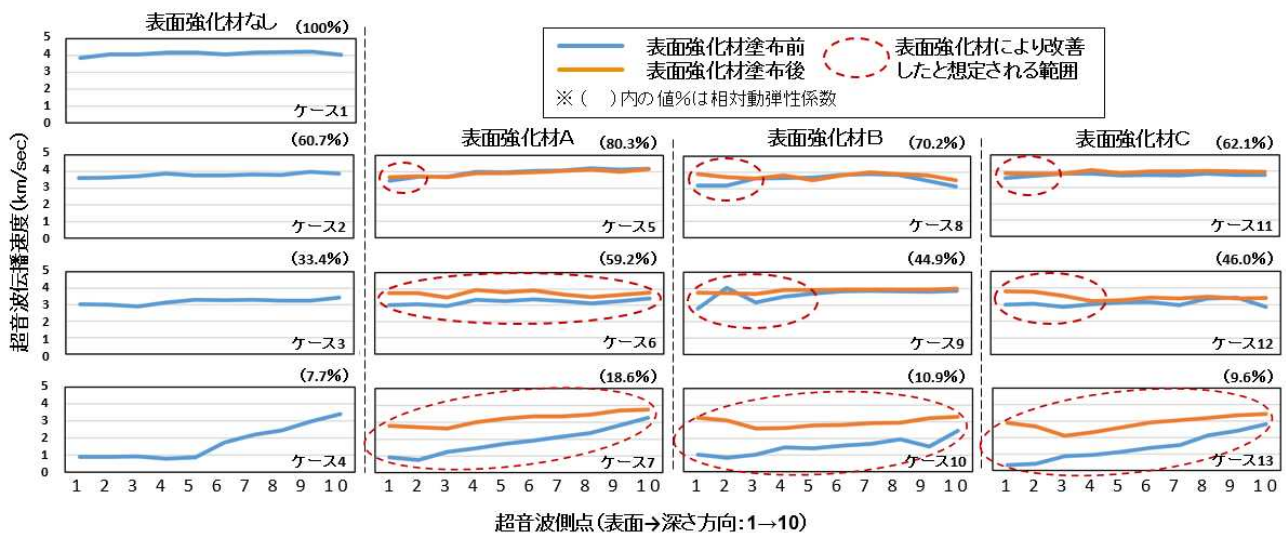


図4 各ケースにおける表面強化材塗布前後の超音波伝播速度結果

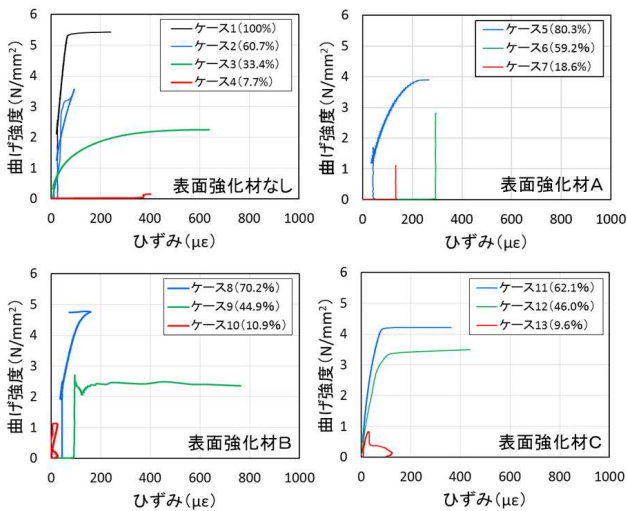


図5 曲げ強度とひずみの関係

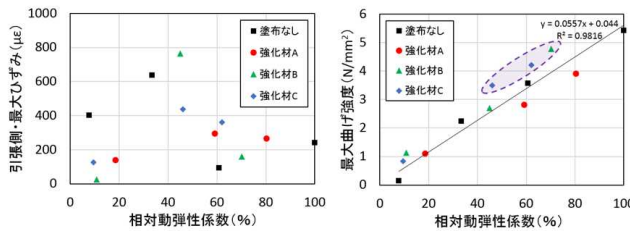


図6 相対動弾性係数と最大ひずみ
および最大曲げ強度の関係

ちに曲げ強度が大きく立ち上がり以降、曲げ強度の増加を伴わずにひずみが大きくなる傾向が見られた（ケース9、11、12）。これは試験面付近の劣化部に浸透したエポキシ樹脂の伸び特性が影響しているためと考えられる。また上述した超音波測定の結果では表面強化材による劣化の回復が確認できたが、表面強化材を塗布したいずれのケースにおいても健全コンクリートであるケース1の最大曲げ強度までは回復していない。

さらに、相対動弾性係数が非常に小さいケース10および13では、ひずみの値が安定しなかった。これは、供試体が劣化している面（試験面）の劣化が大きく骨材がむき出しになっており、この面に接している下側2点の支持点で載荷時にぶれが発生したことによるものと推測する。

図-6に相対動弾性係数と引張側・最大ひずみの関係、および相対動弾性係数と最大曲げ強度の関係を示す。表面強化材の有無にかかわらず相対動弾性係数と最大ひずみの間には特に相関はみられない。

次に、相対動弾性係数と最大曲げ強度の間には高い相関がみられた。特に、相対動弾性係数が供試体全体の劣化度の傾向を示し、最大曲げ強度が供試体試験面近縁の強度の傾向を示すとするとその比は、表面強化材Aを塗布したケースでは、塗布なしとほぼ同じか下回る分布と

なり、相対的に試験面近縁の強度は増加していない。一方で表面強化材BとCを塗布したケースでは、塗布なしとほぼ同じか若干上回る結果となり、特に図中の点線範囲のケースでは試験面近縁の強度が相対的に向上しており、上述した超音波測定の結果と同様に、表面強化材による修復効果が確認できると考えられる。

4. まとめ

スケーリングによって劣化したコンクリート表面に表面強化材を塗布して劣化部の修復を検証する基礎実験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) コンクリート表面の浅いスケーリング劣化に表面強化材を塗布することで、超音波伝播速度が増加したため、修復効果が期待できる。
- (2) 相対動弾性係数が40%以下では、表面強化材の修復効果はあっても健全な状態までには回復しない。一方、相対動弾性係数が40%以上であれば、ある程度健全な状態まで回復する傾向がある。
- (3) 表面強化材の種類によって浸透深さは異なり、けい酸リチウム系は浸透しやすいが塗布面近縁の強度向上には寄与しない。一方、エポキシ樹脂系は浸透すれば強度が向上する。

今後、本研究で得られた結果を踏まえて、スケーリング劣化対策の非破壊修復方法や断面修復時の下地処理方法について、さらに研究を進めていく予定である。

謝辞

本研究において、表面強化材の塗布作業に際し、材料メーカー各社および北海道大学工学部環境社会工学科宇野剛志氏に多大なるご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案）：土木研究所資料，第4343号，V 不具合事例集，2016.8
- 2) 凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書（案）：寒地土木研究所，参考資料8，樋門の凍害劣化事例集，2016.1
- 3) 内藤勲，島多昭典，渡邊尚宏：樋門のゲート操作台・門柱部のコンクリートの凍害劣化診断に関する研究，寒地土木研究所月報第733号，pp2-12，2014.6
- 4) 魚本健人，加藤潔，広野進：コンクリート構造物の非破壊検査，森北出版，pp.37-39，1990.5
- 5) コンクリート診断技術'10：基礎編，公益社団法人日本コンクリート工学会，p.113，2010
- 6) コンクリート標準示方書：設計編，2012年版，土木学会，pp.157-160，2012.3