

論文 道路橋コンクリート床版の補修方法が再劣化に及ぼす影響

佐藤陽介^{*1}・武田三弘^{*2}・軍司翔太^{*3}

要旨： 道路橋コンクリート床版の再劣化の要因として、補修コンクリートが硬化中に振動が加わる条件、既設部と補修部に剛性の違いが生じる条件等に着眼し、これらが再劣化の原因となるひび割れ等を発生させるか、小型供試体を用いた実験を行った。その結果、硬化中に振動が加わる条件の場合では補修部内部に、既設部と補修部に剛性の違いが生じている条件の場合では既設部側に、ひび割れが生じる傾向が見られた。また、コンクリート面をチップング等ではつった際に生じるひび割れに対し、浸透性プライマーおよびボンドを用いることで、打継面周辺のひび割れを充填させ、既設部との一体性を確保できていることが確認できた。

キーワード： 道路橋コンクリート床版, X線造影撮影法, 再劣化, 微細ひび割れ, 浸透性プライマー

1. はじめに

補修後の道路橋コンクリート床版上層部において、再劣化が発生するケースが数多く報告されている。この原因としては、道路橋独自の補修条件が考えられる。例えば、道路橋床版の補修工事が行われる際は、一般に規制時間内に補修工事を終わらせることが求められている。そのため、コンクリート床版上層部の劣化部においては、エアブレーカーによるはつり作業が行われた後、十分な清掃や表乾状態にされないままコンクリートが打ち継がれることが現場によっては行われている(写真-1参照)。また、エアブレーカーによる強力な振動は、コンクリート床版上層部にひび割れを発生させ、乾燥面への打込みは、新旧コンクリートの一体性を失わせる原因になるものと考えられる。さらに、補修工事は片側通行による車両規制下で行われることが多く、補修コンクリートが硬化中に通行車両による振動を受けることによって、新旧コンクリートの一体性に影響を与えることも考えられる。河野¹⁾等は、超速硬コンクリートが硬化過程で圧縮疲労を受けた場合、未載荷供試体の圧縮強度に比べ高くなるとの報告をしている。しかし、実際に再劣化が生じている箇所は、補修されたコンクリートからではなく、新旧コンクリートの境界付近からである。境界部が振動を受けることによってどのような影響を受けるのかを調べることで、再劣化の原因を調べるためにも重要と思われる。

また、道路橋における補修工事においては、規制時間が短く、短時間で必要強度まで発現する必要があるため、超速硬セメントを用いた水セメント比の小さい配合のコンクリートが用いられることが多い。その為、補修から一定期間が経つと補修部と既設部の剛性に大きな差が生じ、そこに輪荷重が加わることで一体性が失われること



写真-1: ジョイント交換の状況

も考えられる。

以上のことから、本研究の目的は、特殊な施工条件であるコンクリート床版補修工事において、施工時に受ける振動や新旧コンクリートの剛性比等が、コンクリートの一体性に与える影響について調べることである。実験では各種補修条件を変えた小型供試体を作製し、50万回の繰り返し载荷を行った後、新旧コンクリートの一体性やその周辺の微細ひび割れの発生状況を、X線造影撮影法を用いて調べた。さらに、新旧コンクリートの一体性を確保する目的でプライマーやボンドを使用する補修方法が提案されているが、その効果についてX線造影撮影法を用いた確認および、打継面の接着性の確認を凍結融解試験により行った。

2. 供用中の補修条件がコンクリートの一体性に与える影響

*1 東北学院大学 大学院 工学研究科環境建設工学専攻 (学生会員)

*2 東北学院大学 工学部環境建設工学科教授 博士(工) (正会員)

*3 東北学院大学 大学院 工学研究科環境建設工学専攻

表-1:梁型供試体の配合表

組骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメン ト比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
20	8	53.2	4	44.0	186	348	733	988	0.01

表-2:補修コンクリートの配合表

組骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメン ト比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						目標強度 (N/mm)
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 減水剤 A1	凝結 遅延剤 A2	
20	12	22	42	88	400	784	1110	4	3	60
20	12	41	44	163	400	801	1037	4	3	30

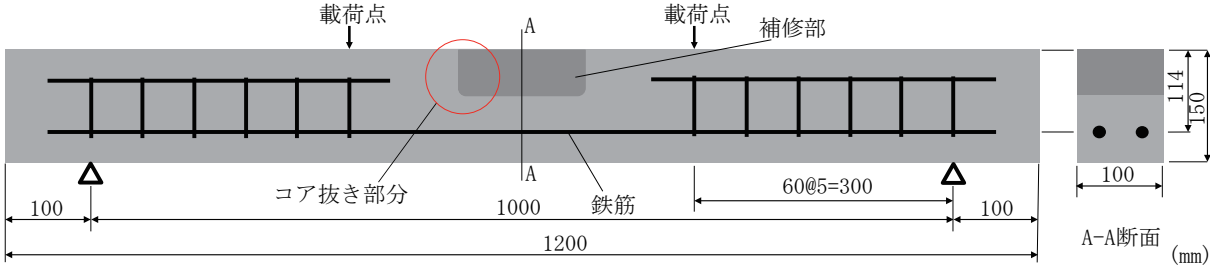


図-1: 梁型供試体概要

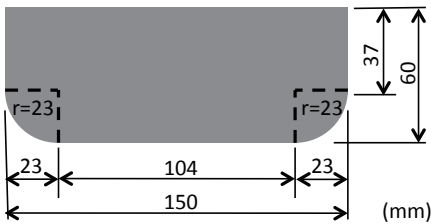


図-2: 補修部分寸法

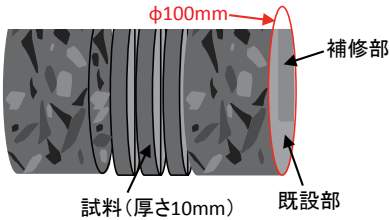


図-3: コア採取後のスライス方法

道路橋コンクリート床版の補修工事を想定した小型の梁型供試体を作製し、補修面をチップングした後、補修箇所を十分に湿らせた状態にして補修コンクリートが打ち込まれた条件（以後、条件①とする）、補修箇所が乾燥している状態で補修コンクリートが打ち込まれた条件（以後、条件②とする）、供試体が振動している状態で補修コンクリートが打ち込まれた条件（以後、条件③とする）、剛性が異なるコンクリートが打ち込まれた条件（以後、条件④とする）について、確認実験を行った。

2.1 実験方法

図-1 に供試体の概要を示す。実験には梁型供試体 (150mm×100mm×1200mm, 主鉄筋 SD295, D13×2 本, 有効高さ d=114mm, 実強度 $f_c=30\text{N/mm}^2$) を 4 体用いた。これらの供試体には、型枠を使用し補修部分を想定した窪み(60×100×150mm)を中央部上面に設けており(図-2), その窪みの表面は現場の補修状況を想定して、鑿でチップング処理した条件のものを使用した。供試体に用いた配合表を、表-1 に示す。

条件①については、窪み部の表面をチップングし、表層部を清掃および表乾状態にした後、供試体と同程度の

表-3:X 線造影撮影法の撮影条件

X 線発生装置 据置型工場用 X 線発生装置 WS-1	管電圧 (V)	100kV
	管電流 (i)	2mA
	焦点距離 (r)	900mm
	撮影時間 (t)	70sec
フィルム	焦点寸法	0.8×0.8mm
	工業用 X 線 (f) 富士フィルム	#50
増感紙	鉛箔増感紙 (3mm)	

強度の超速硬コンクリートを打ち込み、繰返し载荷を行わないものを基準として以下の条件②から条件④の条件と比較した。条件②については、窪み部の表面のチップングおよび表層部を清掃し、乾燥している状態で供試体と同程度の超速硬コンクリートを打ち込み、硬化後、静的曲げ強度の上限 25%, 下限 20%の範囲で、sin 波 2Hz による繰返し载荷を 50 万回行った。条件③については、窪み部の表面をチップングし、表層部を清掃および表乾状態にした後、上記と同様の繰返し载荷を行った状態において、供試体と同程度の超速硬コンクリートを打ち



写真-2: 条件①の X 線フィルム画像

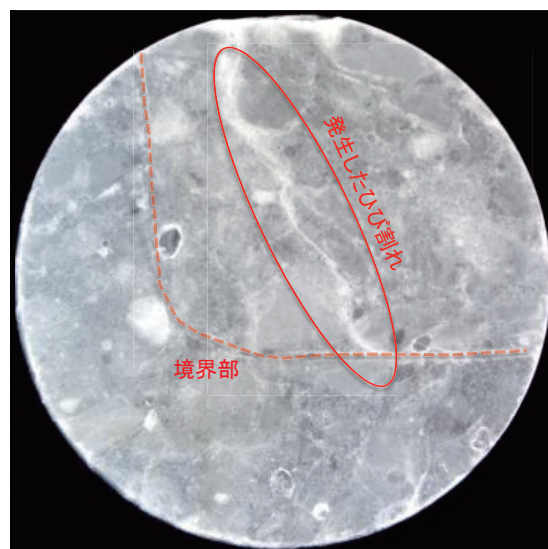


写真-5: 条件③の X 線フィルム画像
(ワイヤーブラシによる境界部の処理)

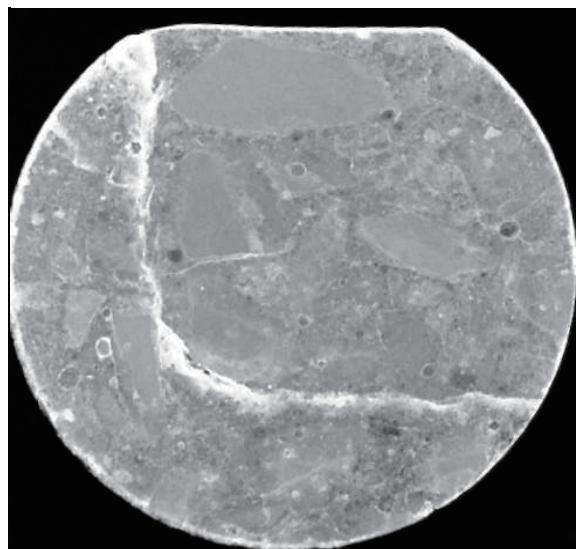


写真-3: 条件②の X 線フィルム画像

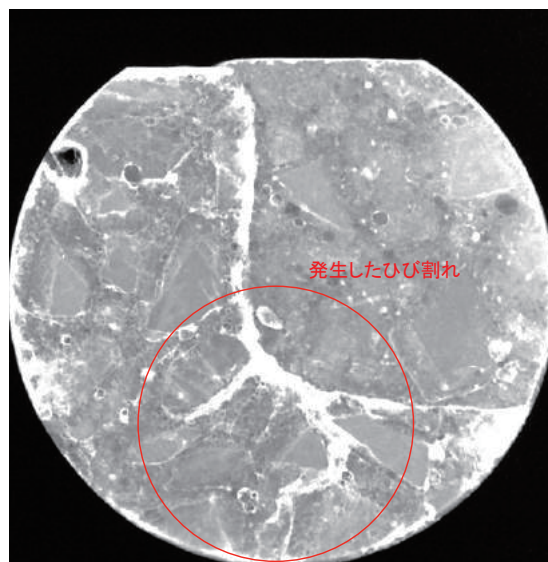


写真-6: 条件④の X 線フィルム画像

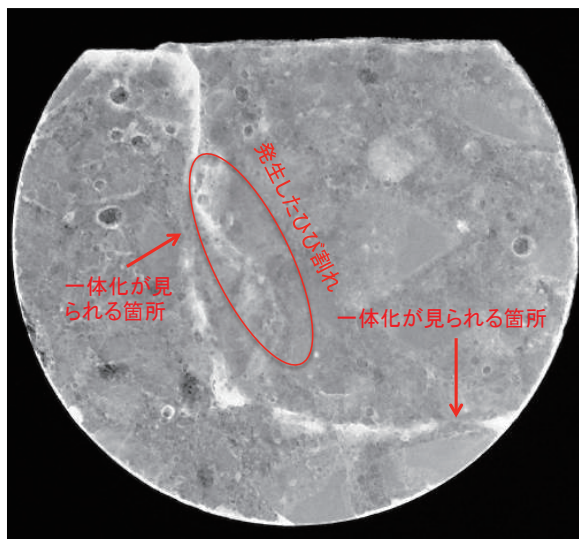


写真-4: 条件③の X 線フィルム画像

込み、50 万回の繰返し载荷を行った。条件④については、窪み部の表面をチップングし、表層部を清掃および表乾状態にした後、供試体との剛性比が 1.44 倍（実強度 $f'_c=60\text{N/mm}^2$ ）の超速硬コンクリートを打ち込み、硬化後、50 万回の繰返し载荷を行った。補修部の配合を表-2 に示す。なお、剛性比とは試験時における梁型供試体のコンクリート (E_b) と補修部のコンクリート (E_r) との弾性係数比 (E_r/E_b) を意味する。

繰返し载荷終了後、いずれの供試体についても、供試体と補修した窪みとの境界部のコア ($\phi 100\text{mm}$) を側面方向から採取し、厚さ 10mm 毎にスライスし、X 線造影撮影法²⁾を用いて境界部付近のひび割れ状況の確認を行った。コアの採取後のスライス方法は図-3 に、X 線造影撮影法の撮影条件は、表-3 に示す。

2.2 実験結果及び考察

写真-2 は、条件①のX線造影撮影結果を示したものである。この写真から、供試体と補修部との境界部は、表乾状態の効果も関係なく、白く太いひび割れが確認できた(写真中赤矢印の部分)。これはチッピングによって発生した微細ひび割れであり、チッピングをした状態のものに、コンクリートをそのまま打ち込んでも、その一体性は確保できていないことがこの写真からも分かる。

写真-3 は、条件②のX線造影撮影結果を示したものである。この写真から、供試体と補修部との境界部には白く太いひび割れが確認できた。これは乾燥による影響も含まれていると考えられるが、ほぼ条件①とひび割れの見え方が一緒なことから、チッピングによって発生した微細ひび割れの影響と考えられるが、繰り返し载荷による影響は小さいものと考えている。

写真-4 は、条件③のX線造影撮影結果を示したものである。この写真から、①および②に見られたようなひび割れよりも、所々ではあるが、一体化していることが分かる(写真の中赤矢印の部分)。これは、振動下においてコンクリートを打ち込んだため、繰り返し载荷による振動が締固めの効果をもたらし、チッピングによって生じたひび割れに馴染んだものと思われる。しかしながら、補修コンクリート内部において、一部ひび割れの発生が確認できる場所もあった(写真の赤丸部分)。この影響を明確にするため、③の実験について、同条件における追加の確認実験を行った。確認実験については、境界部のひび割れ発生状況を明確に確認するため、境界部の処理はチッピングではなく、ワイヤーブラシによる研磨を行った後、振動下において超速硬コンクリートを打ち込んだ。

写真-5 は、その確認実験の結果を示したものである。この写真より、補修コンクリート隅角部付近にひび割れの発生が確認できた(写真の赤丸の部分)。この様に、振動下においてコンクリートを打ち込んだ場合、既設側に発生したひび割れに補修コンクリートが馴染む傾向が確認できる一方、補修コンクリートの隅角部付近にひび割れの発生が確認できることから、振動下におけるコンクリートの打込みは、再劣化の原因となるひび割れの発生に繋がる可能性が考えられた。

写真-6 は、条件④のX線造影撮影結果を示したものである。この写真から、供試体側の隅角部周辺に、複数のひび割れが発生していることが確認できた(写真赤丸の部分)。これは、補修部の剛性が、供試体の剛性よりも高いことにより、繰り返し载荷時の変形性状が境界付近で大きく異なったために発生したものと考えられる。この結果より、既設コンクリートに対して極端に剛性比が異なるコンクリートを補修材として使用することは、補修後の繰り返し载荷によって、母材自

体に再劣化の原因となるひび割れを発生させる要因となることから、弾性係数を考慮した配合を検討すべきものと思われる。

3. はつり面の処理方法がコンクリートの一体性に与える効果

コンクリート面を鑿などでチッピングした場合、その面には微細なひび割れが発生することが分かったが、その様な箇所については、プライマーやボンドを接着剤として用いることによって、補修部との一体性を確保しようとする工法が提案されている。本実験では、無処理に対して、各種工法が、チッピングによって発生したひび割れを、どの程度まで補修し、一体性を確保しているのか確認を行った。

3.1 実験方法

実験には、角柱供試体(100×100×400mm)の上面を、電動ピックを用いて30mmほどチッピングした後、その面に対して、ケイ酸塩、エポキシ樹脂(潤滑面硬化型2液混合タイプ)、ゴム製プライマー(非加硫ブチルゴム系の反応接着剤)、浸透性接着剤工法用の浸透性プライマーおよびボンドをそれぞれ塗布したものと、何も塗布しないものについてコンクリートを打ち継いだものを供試体として使用した。写真-7は、各種プライマーを塗布した状況を示したものである。なお、今回の補修部にはチッピング厚さが30mm程度と小さいことから、コンクリートではなくモルタル(水:セメント:細骨材=1:2:3)を使用した。なお、施工方法については、ゴム製プライマーは打継面に塗布後15分間の静置時間を設けた後に打継ぎを行った。エポキシ系のプライマーおよびボンドについては、打継面にプライマーを塗布後、10分の静置時間を設けボンドを塗布し、更に5分間静置した上で打継ぎを行った。その他の塗布剤については、打継面に塗布後は特に静置時間を設けず、打継ぎを行った。

補修部が硬化した後、供試体を短冊状にスライスし、X線造影撮影法を用いて、供試体と補修部の境界周辺の状況の確認を行った。また、スライスした供試体(100×100×10mm)に対して、その一体性の確認を行うため、ASTM C 672 の温度履歴に従い 3%NaCl 水溶液中に試験体を水

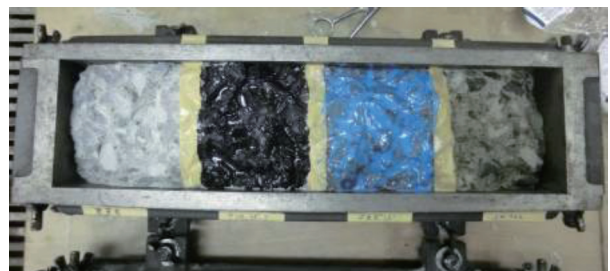


写真-7: プライマー塗布状況

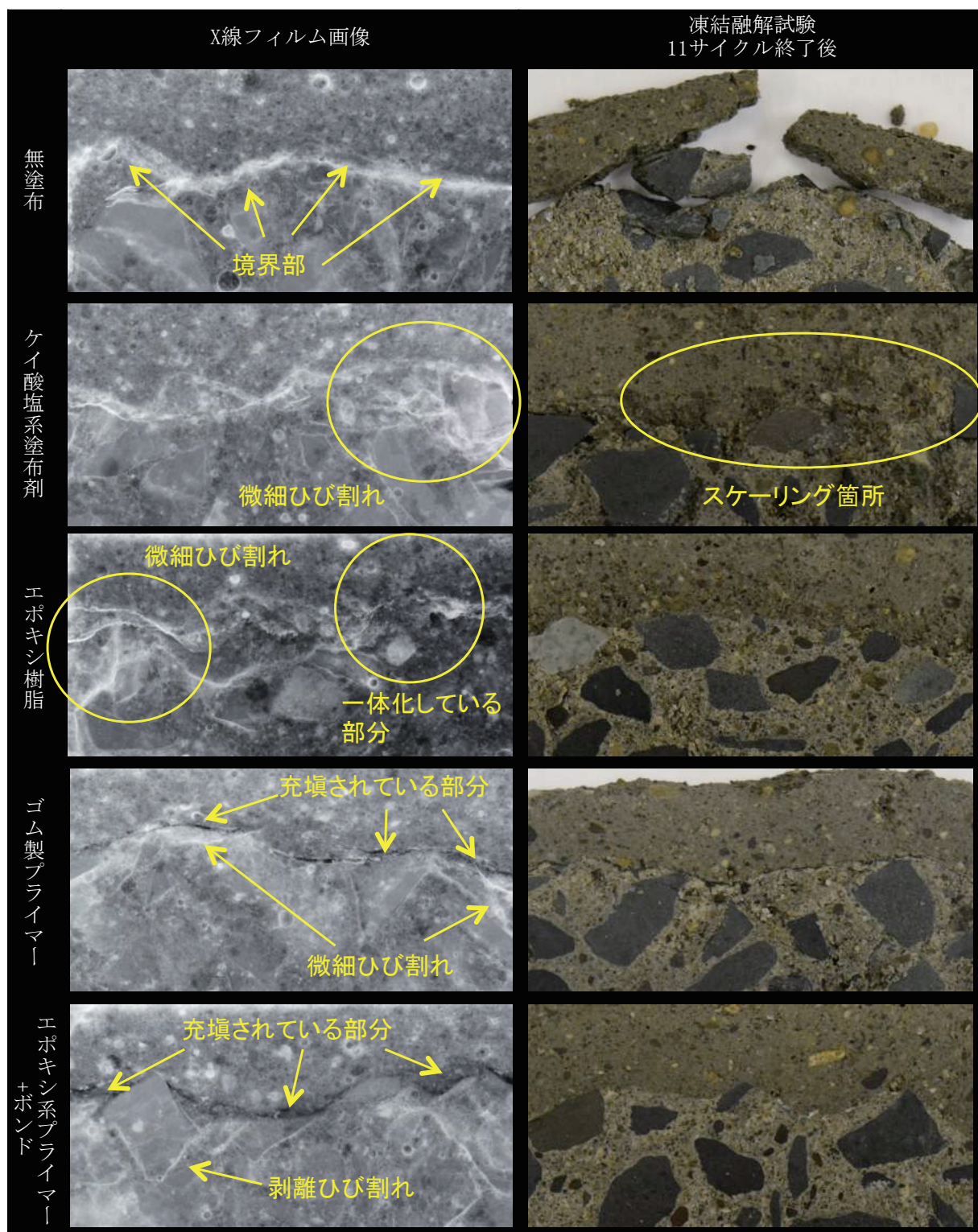


写真-8:X線フィルム画像及び凍結融解試験結果

没させた状態で凍結融解試験を 11 サイクル実施し、境界部の劣化状況を比較した。

3.2 実験結果及び考察

写真-8 は、X線造影撮影結果と凍結融解試験後の状態を示したものである。無塗布の場合、X線フィルム画像からみる打継ぎ箇所は、まったく一体化しておらず、凍

結融解試験後には破壊する結果となった。

一方、ケイ酸塩を塗布した場合、無塗布に比べ境界部が一部一体化している部分も見られるが、微細なひび割れは数多く残る結果となった。しかし、凍結融解試験後においても、境界部は破壊することは無かったが、剥離が目立つ結果となり、無塗布に比べ効果はあることが分

かったが、その程度は低いものとなった。エポキシ樹脂を使用した場合、ケイ酸塩よりも、更に一体化している箇所が多くはなっているが、塗布面周辺の微細ひび割れは残ったままであった。しかしながら、凍結融解試験においては、境界面は密着しており、無塗布に比べ効果はあることが分かった。一方、ゴム製プライマーを使用した場合、X線フィルム画像からは、黒いひび割れが確認できる。これは、X線が透過しやすいことを意味しており、ゴム製プライマーがこの箇所に充填していることを意味している。この写真より、一部骨材の下面にひび割れが見られるが、境界面はほぼ一体化していることが分かる。また、凍結融解試験においても、境界面はしっかりと密着しておりその効果が確認できた。最後にエポキシ系プライマーとボンドを組み合わせた場合、X線フィルム画像にはゴム製プライマーの時より、より太く黒い境界線が確認できる。そして、その周辺には微細ひび割れが確認できない領域が多くなっている。これは、浸透性が高いエポキシ系のプライマーを使用したことによって、チッピング面に発生した微細ひび割れにプライマーが浸透したためと思われる。しかしながら、チッピング面とは繋がっていないような骨材下面に発生した剥離ひび割れまでには浸透はしていないことが分かった。凍結融解試験においては、境界面はしっかりと密着しており、境界面周辺においてもスケーリングが見られず、その効果の高さが確認できた。

ここで、浸透性の高いプライマーについて、どの程度のひび割れ深さまで浸透するのかを確認するため、幅0.05mmのひび割れが入った供試体を用いて同様の実験を行った結果が、写真-9である。この写真の中央部ほぼ垂直に上から下まで貫通するひび割れが入っていたが、X線造影撮影後の画像からは、そのひび割れが明確に検出されているが、境界部周辺の箇所においては検出できていないことが分かる。これは、プライマーの浸透が境

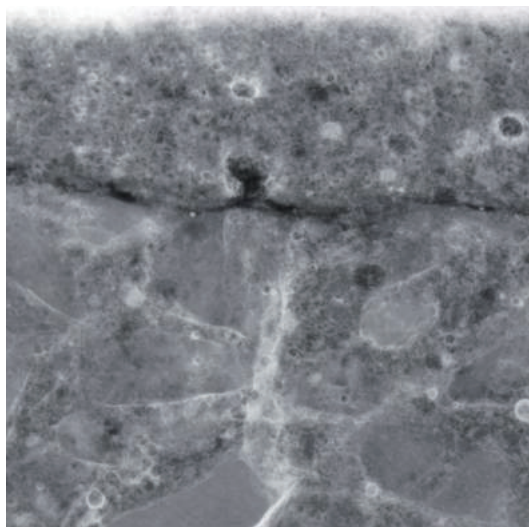


写真-9: エポキシ系プライマーの浸透状態

界部からの10mm程度までであることを意味しており、塗布面とひび割れが繋がっていても、ひび割れ全体に浸透していきわけではないことを留意すべきである。

4. 結論

本研究は、コンクリート床版補修工事において、施工時に受ける振動や新旧コンクリートの剛性比等が、コンクリートの一体性に与える影響について調べた。また、新旧コンクリートの一体性を確保する各種方法について比較検討を行った。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 脆弱部を取り除くためのチッピング作業は、コンクリート内部に微細なひび割れを発生させ、補修材との一体性を阻害することが本実験でも確認できた。
- (2) 振動下において打ち込まれたコンクリートは、その振動の効果で既設側のコンクリートと一体化する傾向が本実験でも見られる一方、隅角部では、補修コンクリート内部にひび割れを発生させることが分かった。
- (3) 剛性比が大きく異なる補修コンクリートを打ち込んだ場合、その後の疲労荷重によって、隅角部周辺の既設コンクリート側にひび割れを発生させる傾向が確認された。
- (4) 既設コンクリート床版と補修コンクリートとの一体性を確保するためには、浸透系のプライマーとボンドの組み合わせが効果的であるが、プライマーによるひび割れ充填性は塗布面周辺だけに限られることを留意すべきである。
- (5) コンクリート床版補修工事において、電動ピックやエアブレーカー等のチッピング作業および輪荷重の影響は極力避け、補修面には浸透性のプライマーとボンドを使用して補修コンクリートを打ち込むことが、耐久性を持たせるために重要と考えられる。

謝辞

この研究および論文の作成にあたり、ご協力頂いた東北学院大学工学部環境建設工学科の糟谷周平氏、宮城研太郎氏に、ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 河野伊知郎, 中嶋清実, 吉田弥智, 湯浅晃行: 超速硬コンクリートの若材齢における圧縮疲労強度特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, pp. 321-326, 1996
- 2) 武田三弘, 大塚浩司: X線造影撮影法によるコンクリートの性状評価手法の開発と応用, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol. 68, No. 3, pp146-156, 2012. 7. 20