論文　道路橋 RC 床版上面の断面修復に用いる浸透性エポキシ樹脂接着剤の付着強度改善に及ぼす影響と疲労耐久性に関する実験的研究

和田　吉憲[*1]・横山　貴志[*2]・渡邉　晋也[*3]・谷倉　泉[*4]

要旨：道路橋 RC 床版を対象とした上面断面修復工法における浸透性エポキシ樹脂接着剤の有効性を調査するために，下地材の異なる条件による付着強度の改善効果や温水負荷および水浸引張疲労試験を用いた耐久性について実験的に検討を行った。その結果，浸透性接着剤は，はつり処理で生じた微細ひび割れや脆弱部を補修する方法として有効であるが，既設コンクリートの状態で「水」や「粉塵」がある場合には，その効果が発揮しないことが判明した。また，耐久性能については，高ｐH，温水によりエポキシ樹脂が加水分解されず，水浸引張疲労においても接着剤なしと比較し，1400～1500 倍の疲労回数を満足する結果となった。

キーワード：RC 床版，上面断面修復，浸透性エポキシ樹脂，付着強度，耐久性

1. はじめに

道路橋 RC 床版は，交通荷重の影響等を受け，床版上面が砂利化（骨材化）する現象が確認されている。RC 床版の上面が砂利化することにより，アスファルト舗装にポットホールが発生する確率が増すことが知られている。アスファルト舗装にポットホールがあると，走行に支障をきたし道路利用者を危険にさらすことが考えられる。そこで，道路管理者は，ポットホールが発生したら早急にアスファルトコンクリートを補修するとともに，RC 床版も同時に補修する作業が行われている。

しかしながら，補修を施した RC 床版において，早々に再劣化が生じることが確認され，補修工事が絶えず行われているのが実態である。この問題は，緊急補修などの小規模補修時に多く生じていることが判明している。

そこで，筆者らは RC 床版の維持管理で重要度が高い床版上面の補修における再劣化のメカニズムを検討してきた。その結果，緊急補修時のはつり処理として，手持式動力工具（以下ブレーカと称す）を用いて補修が行われていることが判明した。ブレーカを用いた場合，既設コンクリートに微細なひび割れや脆弱部が発生することが知られており，その微細ひび割れや脆弱部が断面修復材と既設 RC 床版の一体化を阻害していることについて実験的に確認し報告[1)]を行っている。

本研究では，ブレーカで生じた微細ひび割れや脆弱部の補修方法としての浸透性エポキシ樹脂接着剤について検討を行った。検討項目としては，補修面の状態が断面修復材と下地材に与える影響について検討を行った。また，エポキシ樹脂接着剤は高耐久性であることが知られているが，コンクリート中の高アルカリ環境下で加水分解が生じ，付着強度が低下しないかについて検討を行った。さらに，道路橋 RC 床版の補修は，直接荷重が加わることから，疲労を受けた場合の耐久性について確認をすることを目的として検討した。

本論文は，上述した検討項目について検討した結果を取りまとめ，RC 床版上面補修における浸透性エポキシ樹脂接着剤の適用の可能性について考察を行ったものである。

2. 実験概要

本研究では，大別して 4 項目の試験を行った。試験シリーズごとに詳細を記載する。なお，共通する項目について以下に示す。

2.1 共通項目実験概要

(1) 下地材概要

本実験で用いた下地材のコンクリート配合を**表－1** に示す。付着試験などを実施する際に下地材で破壊しないように呼び強度 40 のコンクリートを用いている。

下地材の寸法は，40cm×40cm×11cm とし，養生後にピックハンマー（7.3kg 級）を用いて，30cm×30cm×1cm の

表－1　下地材のコンクリート配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m^3) 水 W	セメント C	細骨材 S1	細骨材 S2	粗骨材 G	混和剤 Ad
25	8	25	37.8	39.9	170	450	404	269	1024	4.5

備考
C：普通ポルトランドセメント(3.16g/cm^3)、S1：富士川産川砂(2.64g/cm^3)、
S2：富士宮産山砂(2.62g/cm^3)、G：富士川産川砂利(2.66g/cm^3)、Ad：AE減水剤

*1　（株）高速道路総合技術研究所　道路研究部 橋梁研究室　研究員　（正会員）
*2　（株）高速道路総合技術研究所　道路研究部 橋梁研究室　主任研究員　（正会員）
*3　（一社）日本建設機械施工協会　施工技術総合研究所　研究第二部　研究員　博士（工学）　（正会員）
*4　（一社）日本建設機械施工協会　施工技術総合研究所　研究第二部　部長　（正会員）

はつり処理を施したものを下地材として使用した。

（2）浸透性エポキシ樹脂接着剤

2 液混合型の浸透性エポキシ樹脂接着剤を用いた。2 液混合時の粘度は 200mPa・s であり，低粘度が特徴のエポキシ樹脂接着剤である。標準塗布量は 0.5kg/m^2 のものである。

（3）打継用エポキシ樹脂接着剤

浸透性接着剤と断面修復材の付着改善を目的に塗布するエポキシ樹脂接着剤である。粘度はダレ性などを考慮し，5000mPa・s 以上のものを使用した。接着剤の単体における硬化後の引張強度は、JIS K 6850 で 10N/mm^2 以上の接着剤である。標準塗布量は 0.9kg/m^2 のものである。

（4）試験体作製方法

下地材に浸透性接着剤を塗布した後，5 分間静置した。その後，打継用接着剤を塗布し，断面修復材を打継いでいる。

（5）付着強度試験に用いた断面修復材

本試験で使用した断面修復材は，床版上面用の専用補修材として新たに開発された材料を用いた。断面修復材の種類としては，ポリマーセメントコンクリートと超速硬プレミックスコンクリートの 2 種類を使用している。

ポリマーセメントモルタルは、SBR（スチレンブタジエンゴム）樹脂を用いていることから、防水性に優れ、曲げ引張強度が高くひび割れが生じにくい。また接着性に優れているため、接着材やずれ止め無しで床版を補修することが可能な材料である。P/C は 18%である。

超速硬プレミックスコンクリートは、最大骨材寸法を 13mm とし、有機繊維を混入することによりひび割れ抵抗性の高い補修材料となっている超速硬セメントを用いた補修材である。

（6）付着強度試験

コンクリートの一体性を確認する目的で付着強度試験を行った。試験体からφ100mm のコアを採取した後，打継界面が中央となるように整形した。その後鋼製治具を接着し，直接引張試験を行い，新旧コンクリートの付着強度を測定した。なお，付着強度試験は実現場の交通解放時間と同様にするため材齢 6 時間で実施している。

2.2 施工面の状態が浸透性に及ぼす影響

実施工現場を模擬した場合，施工面がいろいろな状態になる。たとえば，はつり処理を行った後，適切な清掃を行わないと粉塵が残った状態になる。また，前日に降雨があった場合，既設コンクリートが湿潤の状態になっていることも考えられる。そこで，本試験では「水」や「粉塵」がある場合の浸透性エポキシ樹脂接着剤の浸透量や付着強度に及ぼす影響について検討を行った。

（1）浸透量の確認試験方法

浸透量の確認試験は，既報の試験方法[1)] に準拠し画像解析法を用いて検討を行った。浸透性エポキシ樹脂接着剤に蛍光染料を混ぜたものを，所定の量を塗布した。硬化後に下地材を切断し，紫外線ライトを照射しながら画像を撮影した。測定回数は，5 側線とし，1 側線あたり 3 箇所の評価を行っている。したがって，下地材 1 枚あたり 15 箇所データが得られる。評価方法としては，表面の凹凸具合が異なる試験体を同一に評価する目的で表面長さにおける pixel 数として単位は pixel/㎝で評価を行った。

（2）下地材の条件

下地材の条件は，1.乾燥条件，2，湿潤条件，3.粉塵条件の計 3 種類とした。

乾燥条件は，はつり処理を行った後，エアーブローで表面に粉塵などが残らないようにしたものを指す。

湿潤条件は，乾燥条件の試験体を施工前日に水中に浸漬し，浸透性接着剤塗布前に水から引き出したものを指す。なお，表面水はウエスを用いて除去している。

粉塵条件は，乾燥条件の試験体に水 40g を散布し，粗粒率 5.22 のコンクリートガラを 5㎜ふるいにかけながら下地材に 80g 散布した。その後，吸引器を用いて 20g になるように吸引処理を行い 23℃の恒温室で 24 時間以上乾燥させたものを指す。粉塵の量は, 0.025g/㎝^{2} である。この粉塵の量は、コンクリートの切削を再現した際に、取りきれない量であったがバラつきが多いため、試験版の作製に再現性があることを確認、0.025g/㎝^{2} とした。

2.3 施工面の状態が付着強度に与える影響

2.2 で検討した下地材を用いて，2 種類の断面修復材で新旧コンクリートの一体化を付着強度で評価を行った。

2.4 温水負荷を加えた場合の付着強度

実際の環境で計測された床版路面温度を参考にして水温 50℃の環境に 10 日間浸漬した場合の付着強度について検討をおこなった。下地材の条件は乾燥条件のみで実施している。

2.5 水浸引張疲労試験

温水負荷後の試験体を用いて，水浸引張疲労試験を行った。水浸引張疲労試験の条件として, 下限値 0.1N/mm^2, 上限値 1.5N/mm^2（振幅 1.4N/mm^2）として，10Hz の繰返し載荷を行っている。上限値を 1.5N/mm^2 にした理由として，静的に 215ｋN（設計荷重の 2 倍程度）の輪荷重で静的に載荷した際に桁直上にある打継界面に 0.8N/mm^2 の引張応力が発生することが事前検討した FEM 解析から得られている。したがって，実際の荷重では衝撃が加わることから，衝撃係数を 1.25，安全係数を 1.5 とした場合の引張応力としている。

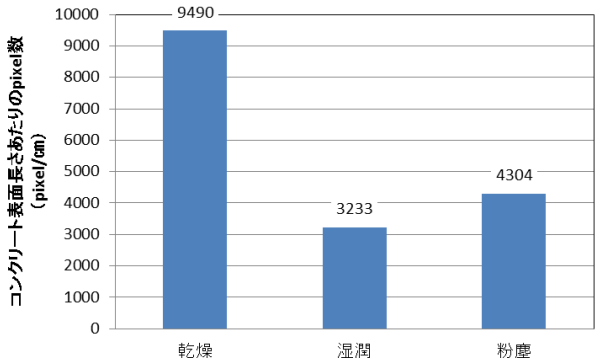
水浸引張疲労試験はコンクリートが破壊するまでの回数を求めた。

3. 実験結果

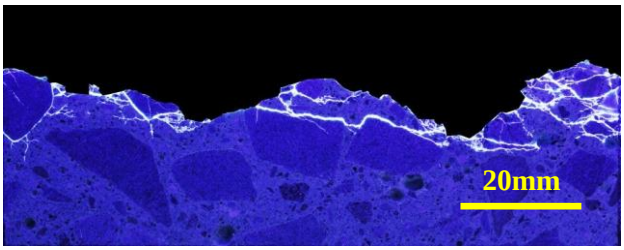
本研究で得られた実験結果を以下に示す。

3.1 施工面の状態が浸透性に及ぼす影響

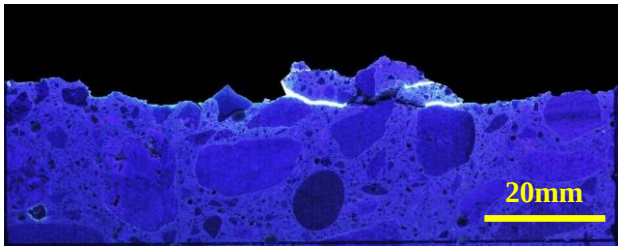
下地コンクリートの条件を 1.乾燥条件，2.湿潤条件，3.粉塵条件の計 3 種類を用いて，標準塗布量の浸透性エポキシ接着剤を塗布した結果を**図－1** に，代表的な写真を**写真－1～3** に示す。その結果，乾燥条件が最も浸透することが判明した。また，「水」や「粉塵」があることで浸透量が著しく低下し，乾燥条件と比べて湿潤条件では 0.34 倍，粉塵条件では 0.45 倍程度しかコンクリート内部の微細ひび割れや脆弱部に浸透しないことが判明した。したがって，浸透性能を向上するために粘度を低下させても，微細ひび割れや脆弱部に「水」があることで，コンクリート内部まで浸透しにくくなる。また，表面に粉塵があることで，粉塵に浸透性エポキシ樹脂接着剤が吸収され，コンクリート内部まで浸透できないことがわかった。このことから，浸透性能を向上させても，既設コンクリート床版に「水」や「粉塵」があることで，ブレーカで発生した微細ひび割れや脆弱部を補修することは困難になる。



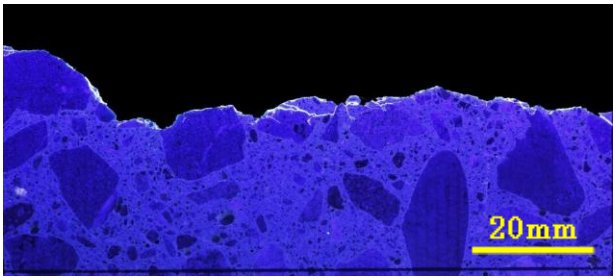
図－1　下地条件ごとの浸透性エポキシ樹脂接着剤の浸透量



写真－1　乾燥条件の浸透状況



写真－2　湿潤条件の浸透状況



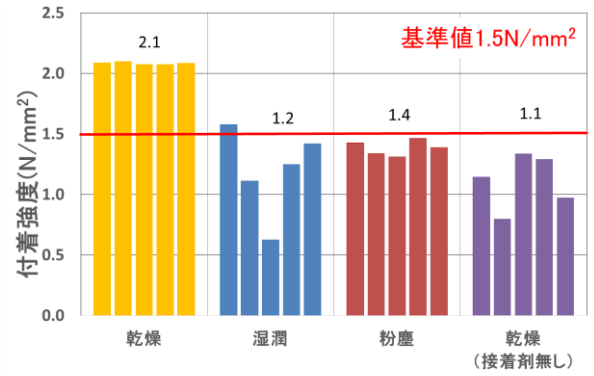
写真－3　粉塵条件の浸透状況

以上のことから，水がある状態では，バーナーなどを用いて乾燥させる必要があり，粉塵対策としては丁寧な清掃作業が必要となることが考えられる。

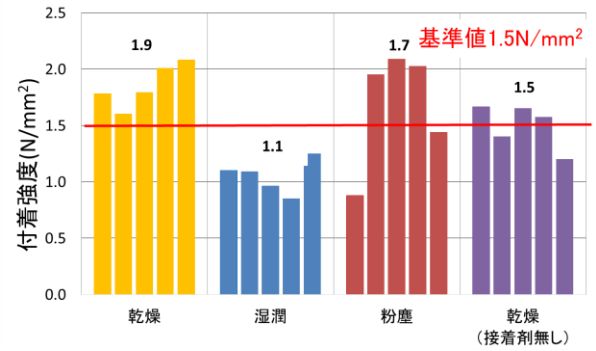
3.2 施工面の状態が付着強度に与える影響

浸透性試験と同様の下地条件で断面修復を行った結果を**図－2，図－3** に示す。断面修復材はポリマーセメントコンクリートと超速硬プレミックスコンクリートの 2 種類である。両者とも比較のために浸透性エポキシ樹脂接着剤と打継用エポキシ樹脂接着剤を塗布していない試験体も作製した。その結果，接着剤を用いていない試験体は，ポリマーセメントコンクリートでは平均 1.1N/mm^2，超速硬プレミックスコンクリートでは平均 1.5N/mm^2 となった。断面修復材と下地材の付着強度は 1.5N/mm^2 以上で一体性を担保できることから，ポリマーセメントコンクリートでは，全ての試験体で下回っている結果となった。一方で，超速硬プレミックスコンクリートでは，平均値は 1.5N/mm^2 を満足したが，基準値を超えられない試験体も 2 本あった。下地材が乾燥状態で浸透性エポキシ樹脂接着剤を用いて，下地材の微細ひび割れや脆弱部を補修した試験体は，ポリマーセメントコンクリートでは平均 2.1N/mm^2，超速硬プレミックスコンクリートでは，平均 1.9N/mm^2 と接着剤無しと比較して付着強度が大きくなる結果となった。また，5 本の試験体全てで基準値としている 1.5N/mm^2 を満足する結果となった。一方で，浸透性が低かった湿潤条件と粉塵条件の試験体では，ポリマーセメントコンクリートでは 1.5N/mm^2 を下回る結果となった。超速硬プレミックスコンクリートでは，粉塵が平均 1.5N/mm^2 を満足したものの，2 本の試験体で 1.5N/mm^2 を満足できない結果となった。

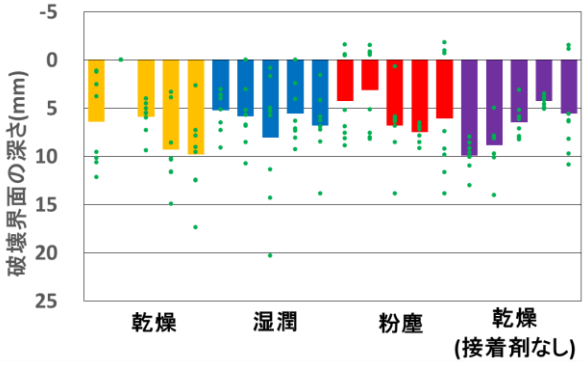
図－4，図－5 に打継界面からの破壊位置を示す。破壊位置の測定はノギスを用いて円周状の 8 点を測定した結果を示している。なお，打継界面を 0mm とし，下地材側を+，断面修復材側を-で表している。ポリマーセメントコンクリートではほとんどの試験体で下地材の 20mm ま



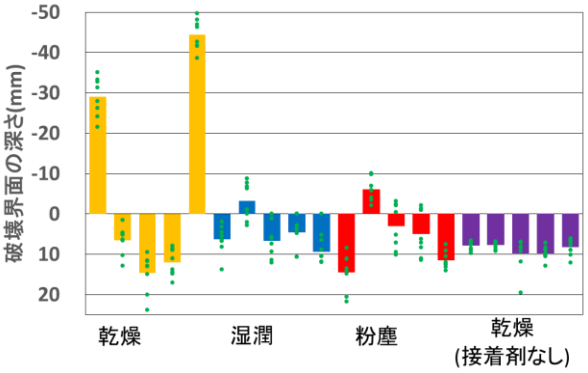
図－2　下地条件ごとの付着強度
（ポリマーセメントコンクリート）



図－3　下地条件ごとの付着強度
（超速硬プレミックスコンクリート）



図－4　付着強度試験の破壊位置
（ポリマーセメントコンクリート）



図－5　付着強度試験の破壊位置
（超速硬プレミックスコンクリート）

での間で破壊していることが判明した。一方で，超速硬コンクリートの場合，付着強度が大きかった試験体では，断面修復材が破壊しているものもあった。それ以外では，ポリマーセメントコンクリートと同様に打継界面から20mm 程度のところで破壊している。

筆者らが行った既往の研究[1]で，ブレーカによる微細ひび割れの発生位置は，打撃面からおおよそ 20mm まで発生することが確認されていることから，本実験での破壊箇所と類似することが判明した。

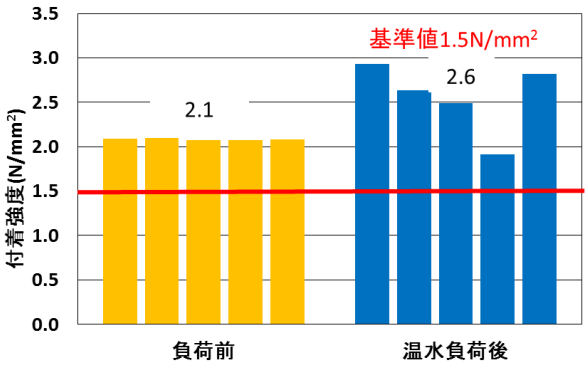
浸透性エポキシ樹脂接着剤を用いても，脆弱部は微細ひび割れ位置であることが言える。

3.3 温水負荷を加えた場合の付着強度

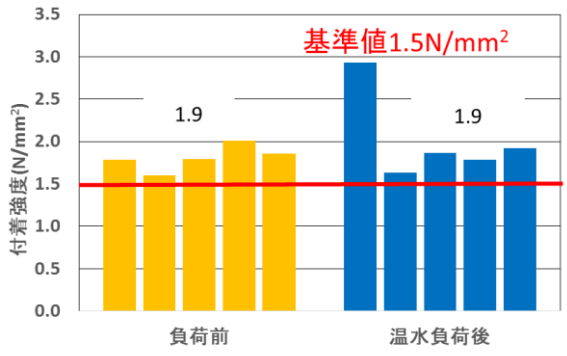
コンクリート中のエポキシ樹脂の劣化を検討した結果，紫外線などの有害因子は遮断されることなどから，高ｐH 環境と高温環境による劣化が考えられた。そこで，夏季の舗装面で生じる熱環境を NEXCO 試験法 434[3] に準拠した。温水負荷後に付着強度が低下しないかを検討した。

温水負荷を 10 日間与えた試験体の付着強度を**図－6**，**図－7** に示す。下地材は，施工環境が最も良い乾燥状態の条件で実施している。ポリマーセメントコンクリートと超速硬プレミックスコンクリートの両試験体ともに付着強度の低下は確認されなく，付着強度が大きくなる結果となった。この理由としては，上述したように負荷前は材齢 6 時間で付着強度を行っており，完全に硬化が進んでいないことが考えられる。したがって，温水負荷などの時間が経過したことにより浸透性エポキシ樹脂接着剤の反応が進み硬化したことで，付着強度が大きくなったと考えられる。したがって、高ｐH・高温環境でも加水分解などの劣化が進行していないことが確認できた。

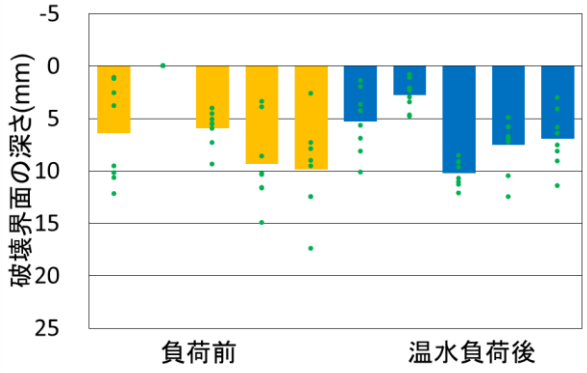
図－8，**図－9** に破壊位置の測定結果を示す。ポリマーセメントコンクリートでは，破壊位置が負荷前と変わらず下地材の 20mm までの間で破壊する結果となった。一方で超速硬プレミックスコンクリートでは，負荷前は断面修復材で破壊する試験体もあったが，負荷後では全て



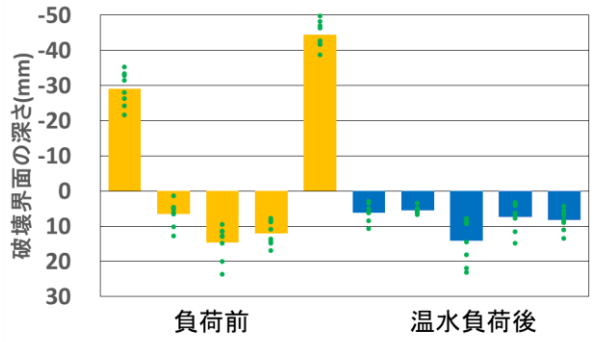
図－6　温水負荷後の付着強度
（ポリマーセメントコンクリート）



図－7　温水負荷後の付着強度
（超速硬プレミックスコンクリート）



図－8　温水負荷後の付着強度破壊位置
（ポリマーセメントコンクリート）



図－9　温水負荷後の付着強度破壊位置
（超速硬プレミックスコンクリート）

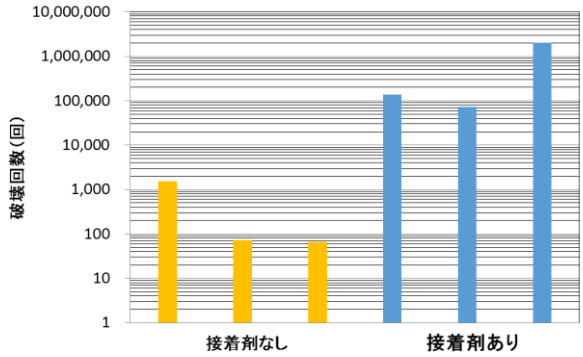
の試験体で地材の 20mm までの間で破壊する結果となった。この理由としては，断面修復材の引張強度が増したことにより，引張強度も大きくなったことが考えられる。

3.4 水浸引張疲労試験

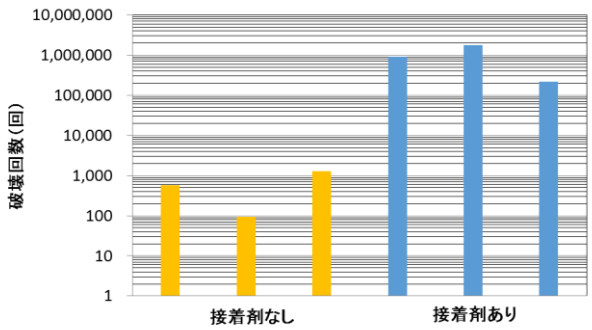
本工法に用いる部位は道路橋 RC 床版を想定していることから，断面修復後に交通荷重を直接受ける部位である。交通荷重を受けることにより，床版内部にせん断応力と引張応力が発生することは FEM 解析の結果から把握している。そこで，これらの発生応力に抵抗することが本工法では求められている。本実験では水浸引張疲労により浸透性接着剤なしと本工法とを比較した。

図－10，図－11 に各断面修復材における浸透性接着剤の有無が引張疲労回数に与える影響を示す。ポリマーセメントコンクリートの場合，浸透性エポキシ樹脂接着剤なしでは 3 本の平均 561 回（最高 1,544 回，最低 67 回）に対して，浸透性エポキシ樹脂接着剤を用いることで平均 783,568 回（最高 2,008,941 回，最低 72,984 回）となった。超速硬プレミックスコンクリートでは，浸透性エポキシ樹脂接着剤なしでは平均 647 回（最高 1,278 回，最低 94 回）に対して浸透性エポキシ樹脂接着剤を用いることで平均 975,800 回（最高 1,799,492 回，最低 216,009 回）となった。浸透性エポキシ樹脂接着剤を用いた方が接着剤を用いないのに比べて約 1400～1500 倍の疲労回数を満足する結果となった。このことから，浸透性エポキシ樹脂接着剤を用いることで，交通荷重を繰返し受けても，耐久性があることが考えられる。疲労破断位置は，付着強度試験と同様に，下地材 20mm 程度であった。

以上のことから，本実験で得られた引張疲労回数と実交通量との換算を行い，浸透性エポキシ樹脂接着剤を用いた工法の耐久年数について検討を行っていきたいと考えている。



図－10　引張疲労回数
（ポリマーセメントコンクリート）



図－11　引張疲労回数
（超速硬プレミックスコンクリート）

4.まとめ

本研究では，はつり処理で生じた微細ひび割れや脆弱部の補修方法として浸透性エポキシ樹脂接着剤の効果を確認することを目的とし検討を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

1) 浸透性エポキシ樹脂接着剤は，下地コンクリートの状態により浸透性能が変わることが判明した。特に微細ひび割れや脆弱部に「水」がある場合や，コンクリート表面に「粉塵」がある場合，浸透性エポキシ樹脂接着剤がコンクリート内部に浸透できない結果となった。

2)浸透性エポキシ樹脂接着剤があまり浸透していない試験体では，付着性能が高い補修材を用いても，付着強度が改善されなかった。また，各試験体のばらつきも大きくなることが判明した。

3) 水温 50℃で 10 日間の温水負荷を行った結果，付着強度の低下は確認されなかった。

4) 水浸引張疲労試験を行った結果，浸透性エポキシ樹脂接着剤がない場合,疲労回数は 100 回程度であったが，浸透性接着剤を用いた場合では 80～100 万回まで疲労回数が大幅に増加した。

5)付着強度試験や引張疲労試験における試験体の破壊位置は，打継界面から 20mm 程度の下地材で発生しているのがほとんどであった。この位置は，ブレーカなどで生じる微細ひび割れ位置と類似している結果となった。

以上のことから，はつり処理で発生した微細ひび割れや脆弱部を補修する方法としての浸透性エポキシ樹脂接着剤を用いた工法についての有効性が確認できた。

今後は，上述したように，耐久性についても詳細に検討を行っていく予定である。

参考文献

1) 渡邉晋也，後藤昭彦，松本政徳，宮永憲一：打撃工法によるハツリ処理で生じた微細ひび割れの定量的評価方法と打継ぎ界面の付着強度に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.775-780，2013

2) 東・中・西日本高速道路：試験法　第 4 編　構造関係試験方法

3) 後藤昭彦，宮永憲一，松本政徳，渡邉晋也：道路橋 RC 床版の断面修復における打継ぎ界面付着強度と改善方法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.793-798，2013

4) 松本政徳，後藤昭彦，渡邉晋也，一瀬八洋：RC 床版における断面修復部の耐久性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.673-678，2013

5) 児玉孝喜：新しいコンクリート接着接合技術を用いた社会資本の補修工法の実用化に関する研究，東洋大学学位論文 p.255，2009