

論文 コンクリート打継面の内部に生じた脆弱部および微細ひび割れの補修方法に関する研究

渡邊 晋也*1・堀井 久一*2・谷倉 泉*3・後藤 昭彦*4

要旨: 本研究では、ハンドブレーカのはつり処理で生じたコンクリート内部の脆弱部および微細ひび割れの補修方法として、新たに開発した低粘度 1 液型エポキシ樹脂系接着剤を用いた補修効果について検討した結果、模擬ひび割れを想定した試験体では、材齢 5 日以降でひび割れ導入前の曲げ強度と比較して 10%増加した。また、新旧コンクリートの付着強度を検討した結果、開発したエポキシ樹脂系接着剤だけでは付着強度の改善はできなかったが、コンクリート打継用エポキシ樹脂系接着剤と組み合わせることで、コンクリート表層部の脆弱部および微細ひび割れを有していても良好な付着強度が得られることが判明した。

キーワード: エポキシ樹脂系接着剤, 微細ひび割れ, 含浸深さ, 付着強度, 上面部分打換え工

1. はじめに

高速道路等のコンクリート床版では、塩害や凍害および輪荷重による疲労などの複合的要因で、コンクリート床版上面が砂利化する事例が多く報告されている。この劣化の特徴として、床版上面のかぶりコンクリートの砂利化のみの変状が多く、コンクリート床版の内部までは劣化していないことである。この砂利化したコンクリートを放置すると、アスファルト舗装にポットホールなどの損傷を与え、走行車両への安全性および快適性という道路機能を阻害することが考えられる。したがって、道路管理者は損傷を受けたコンクリート床版を補修する必要がある。損傷を受けたコンクリートの補修方法としては、砂利化した部分をはつり取り、補修材で断面修復するのが一般的である。この補修方法で問題になるのが損傷したコンクリート部分のはつり手法である。

コンクリートのはつり処理は、ウォータージェット工法を用いることで既設コンクリートに損傷を与えることなく良好な新旧コンクリートの打継が可能になることが既往の研究¹⁾で判明している。このことから、コンクリートのはつり処理はウォータージェット工法が適切であると考えられるが、本研究で対象としているコンクリート床版上面の砂利化部のはつり処理については、施工面積が小さいことや規制時間の制限等があることなどからウォータージェット工法を適用することが経済的・時間的に難しいのが現状である。したがって、現状ではコンクリート床版上面部分補修のはつり処理は、手軽で経済的なハンドブレーカを用いて実施されることが多い。その結果、既設コンクリート床版に微細ひび割れや浮石などの脆弱部が生じ、新旧コンクリートの付着力が低下

し、断面修復を施した部分が再度損傷することが考えられる。

そこで本研究は、ハンドブレーカで生じた脆弱部および微細ひび割れを補修する方法について検討を行った。

脆弱部や微細ひび割れを補修するには、脆弱部および微細ひび割れを他の材料で充填固化する方法が考えられる。この充填固化剤としては、無機系および有機系の材料が考えられるが、無機系の材料は粒子が大きいことコンクリートへの浸透性が低いことから本研究では、低粘度の液体で浸透性の高い有機系の材料に着目し検討を行った。特に有機系の材料の中で土木分野での利用が多く、ひび割れ注入工法などの使用実績が多いエポキシ樹脂に着目し検討することとした。

本論文は、コンクリート内部に生じた脆弱部および微細ひび割れを補修するエポキシ樹脂系接着剤を開発し、そのエポキシ樹脂系接着剤の浸透性能、ひび割れ接着効果および新旧コンクリートの付着強度に与える影響について基礎的な検討を行い取りまとめたものである。なお、本論文での微細ひび割れの定義は 0.15mm 以下のひび割れ幅を有し、外観から目視によるひび割れが確認できないものとした。

2. エポキシ樹脂系接着剤の概要

一般的にエポキシ樹脂系接着剤は、主剤と硬化剤の 2 種類を練混ぜて使用する 2 液型のものが一般的である。2 液型の特徴として、物性、可使時間および硬化時間などを設計するのが簡易なことやエポキシ樹脂系接着剤の単価が安いことが上げられえる。一方で、練混ぜに手間が

*1 社団法人日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 研究第二部 研究員 博士 (工学) (正会員)

*2 コニシ株式会社 大阪研究所 研究第四部 リーダー (正会員)

*3 社団法人日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 研究第二部 部長 工学修士 (正会員)

*4 株式会社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)

かかることや主剤と硬化剤の計量を間違えることにより硬化不良が生じるなどの人為的な問題が生じたり、施工工程が遅れたりすることによる可使時間の超過により、ロスが生じるなどの経済的な問題がある。これらの問題を解決するために、筆者らは1液型のエポキシ樹脂系接着剤に着目した。1液型の特徴として、計量や練混ぜが必要ないことや可使時間の制約を受けないことが挙げられる。一方で、2液型に比べると硬化が遅いことや自己収縮が大きいこと、エポキシ樹脂系接着剤の単価が高いなどのデメリットも挙げられるが、使い勝手やエポキシ樹脂系接着剤のロスを考えると、1液型の方が良いと考えられる。このことから、コンクリート内部に生じた脆弱部および微細ひび割れの補修材として1液型エポキシ樹脂系接着剤を開発することを目標とし検討を行った。

開発したエポキシ樹脂系接着剤の基本的な性質を表-1に示す。また、表中には、市販されている1液型エポキシ樹脂系接着剤と樹脂注入工法に用いられる2液型エポキシ樹脂系接着剤および2液型コンクリート打継用エポキシ樹脂系接着剤を付記する。本研究で開発した接着剤の特徴としては、他の接着剤と比較して極めて低粘度であることが言える。低粘度とした理由として、予備的に多数のエポキシ樹脂系接着剤を配合し、コンクリートへの浸透性を検証した結果、浸透深さはエポキシ樹脂系接着剤の粘度に依存していることが考えられたからである。したがって、開発したエポキシ樹脂系接着剤は『粘度』に着目している。粘度を下げることは、ひび割れに浸透しやすくなるだけでなく、脆弱部への浸透もしやすくなると考えられる。そのため、大きなひび割れでは、ひび割れに充填されたエポキシ樹脂系接着剤が躯体に浸透し、ひび割れにエポキシ樹脂系接着剤が残りにくいことなどから、大きなひび割れには不向きである。また、極端な低粘度化はエポキシ樹脂系接着剤の物性を低下させることが一般的に知られている。しかし、本研究が対象としている脆弱部や微細ひび割れへの接着効果は発揮できると考えられることから、本研究で開発した1液型エポキシ樹脂系接着剤は、接着剤の物性に影響を及ぼさないことを確認した上で最大限まで粘度を下げた。加えて、無溶剤系とすることで、自己収縮を小さくしエポキシ樹脂系接着剤のひび割れを生じにくくした。また、粘度を下げることでエポキシ樹脂系接着剤の施工についても簡易になり、特殊な道具を用いずに刷毛、ローラおよびエアースプレーを使用して施工することが可能となる。本研究で開発したエポキシ樹脂系接着剤は、外部圧力を利用したコンクリート内部への注入に頼らない、自己浸透力のみでコンクリート内部に浸透させることを特徴としている。

3. 試験概要

本研究では、開発したエポキシ樹脂系接着剤がコンクリート内部に生じた微細ひび割れおよび脆弱部の補修効果を有するか否かを検討するために、次の2シリーズより検討を行った。シリーズ1：ひび割れを模擬した試験体へのひび割れ充填効果および補修効果等の確認。シリーズ2：ハンドブレイカで表面処理を行ったコンクリートを用いた新旧コンクリートの付着性状についての確認である。本論文では、各シリーズ事に試験概要および試験結果について論じることとする。

3.1 シリーズ1の試験概要

開発したエポキシ樹脂系接着剤のひび割れへの充填効果、補修効果、適正塗布量および湿潤面への適用性について検討する目的で試験を行った。試験体は、材齢26週以上のISOモルタルを用い、JIS R 5201のセメントの物理試験方法に準拠し曲げ試験を実施し、破壊した試験片の破壊断面を再度組み合わせ、載荷面を除く3面をシール材でコーティングしたものとした。3面をコーティングしたことにより、内部ひび割れを模擬している。エポキシ樹脂系接着剤は、載荷面から各条件で塗布し試験体とした。試験体の状況を写真-1に示す。シリーズ1の試験項目を表-2に示す。浸透性の確認試験は、エポキシ樹脂系接着剤に蛍光顔料を混入し、硬化後にコンクリートカッターを用いて切断し、紫外線ライトより目視観察を行った。補修効果の確認試験は、エポキ

表-1 開発したエポキシ樹脂系接着剤の基本的な性質

種類	エポキシ樹脂系接着剤			
	開発品	市販の1液型	ひび割れ充填用	コンクリート打継用
配合比 (主剤:硬化剤)	-	-	2:1	4:1
粘度 (mPa・s(20℃時))	15	95	690	3500
比重	1.15	1.15	1.15	1.36
可使時間 (分(20℃時))	-	-	82	33
硬化開始時間	-	15時間	11時間	-
引張強度 (MPa)	39	36	43.8	22



a) 試験体上面の状況



b) 試験体側面の状況

写真-1 試験体の状況

表-2 シリーズ1の試験項目

確認項目	塗布量 (g/m ²)	試験日, その他
浸透性確認	∞ (入るだけ)	蛍光顔料を混合し 紫外線ライトで目視確認
	500	
	300	
	100	
補強効果の確認	∞ (入るだけ)	試験実施日は, 塗布後 1・2・3・5・7・28日
	500	試験実施日は, 塗布後7日
	300	
	100	
湿潤面での 補強効果の確認	∞ (入るだけ)	試験実施日は, 塗布後7日

表-3 鋼繊維補強超硬コンクリートの配合

W/C	S/a	単位量 (kg/m ³)					減水剤 (C×%)	スランプ (cm)	3時間強度 (MPa)
		W	C	S	G	SF			
(%)	(%)								
37.1	50.4	155	418	866	901	100	1.5	3.5	29.5

C:超硬セメント

表-4 各エポキシ樹脂接着剤の塗布量と塗布後のコンクリート打設時間

条件 No.	塗布量 (g/m ²)		エポキシ樹脂接着剤 の塗布間隔 (分)	コンクリート打継ぎ までの時間 (分)
	開発したエポキシ 樹脂接着剤	一般的な打継ぎ用 エポキシ樹脂接着剤	開発した接着剤塗布 後からの打継ぎ用接着剤 までの時間	最終エポキシ樹脂系 接着剤塗布後
1	500	-	-	20
2	-	1000	-	15
3	500	800	3	15

シ樹脂系接着剤を各塗布量で塗布した後, 所定の材齢で JIS R 5201 に準拠し曲げ試験を実施した。試験体数は, 各材齢で5体とし, 曲げ強度の最大値および最小値を除外した3体の平均値を用いて評価している。湿潤面での補修効果確認試験では, エポキシ樹脂系接着剤を塗布する前に, 60分間水中養生を行い, 30分間室温 23℃湿度 60%の室内で自然乾燥させた試験体を用いた。エポキシ樹脂系接着剤を塗布し材齢7日で補修効果の確認試験と同様に JIS R 5201 に準拠し曲げ試験により評価を行った。

3.2 シリーズ2の試験概要

縦 30cm×横 30cm×厚さ 10cm のコンクリート板に 20kg 級のハンドブレードで 5cm 程度はつきり処理を施したコンクリート板を旧コンクリートとした。その旧コンクリート試験体に表-3に示す配合の鋼繊維補強超硬コンクリートを打継ぎ, 付着強度の確認を行った。本試験では打継ぎ界面の条件として, 条件1: 開発したエポキシ樹脂系接着剤, 条件2: 一般的な打継ぎ用エポキシ樹脂系接着剤, 条件3: 開発したエポキシ樹脂系接着

剤に一般的な打継ぎ用エポキシ樹脂系接着剤を組み合わせさせた方法の3条件について検討を行った。各エポキシ樹脂系接着剤の塗布量と塗布後からのコンクリート打設時間を表-4に示す。

付着強度の評価方法として, 打継ぎコンクリートの材齢3日でφ100mm×高さ100mmのコア試験体を採取した後, 材齢7日で直接引張試験により付着強度を求めた。なお, 試験体は打継ぎ界面が試験体の中央になるように試験体を整形している。付着強度試験の載荷速度は 0.06 ± 0.04MPa/秒とし, 評価は各5本の平均値を用いて評価を行った。

4. 試験結果

4.1 シリーズ1の試験結果

(1) 浸透性確認試験の結果

開発したエポキシ樹脂系接着剤に蛍光塗料を混ぜたものを, ひび割れを導入した ISO モルタルに塗布し, 紫外線ライトを照射した結果を写真-2に示す。本実験で用いた ISO モルタルのひび割れ幅は, 画像解析ソフトから算出した結果, 平均 0.15mm 程度であった。浸透性確認試験の結果, 塗布量が 100g/m² で深さ 4cm まで浸透することができず, 表層の 1cm 程度でとどまっていることが確認できた。また, 300g/m² 以上では, 深さ 4cm まで浸透し, ひび割れをエポキシ樹脂系接着剤で充填・固

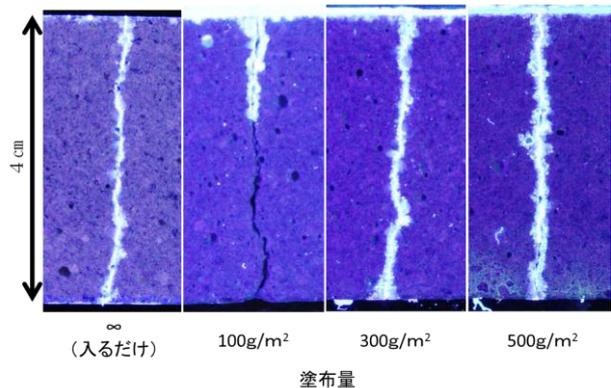
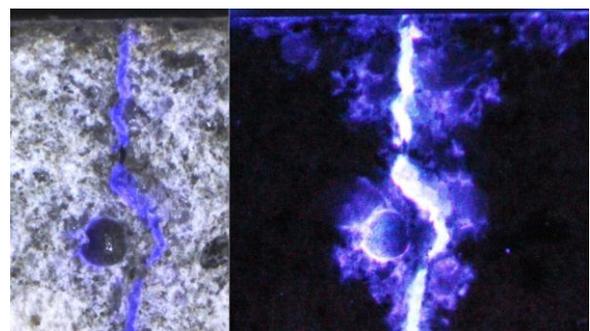


写真-2 塗布量と浸透深さの関係



1) ひび割れへの充填状況 2) ひび割れ周囲への浸透状況

写真-3 ひび割れ充填部の拡大状況

化していることが確認できた。また、ひび割れを40倍の顕微鏡で観察した結果を写真-3に示す。写真のように、エポキシ樹脂系接着剤がひび割れのみならず、周囲のモルタル部まで浸透していることが確認できた。このことから、微細ひび割れの充填と脆弱部への浸透が、開発したエポキシ樹脂系接着剤で可能であると考えられる。

(2) 補修効果確認試験の結果

ひび割れを導入したISOモルタルを用いて、開発したエポキシ樹脂系接着剤を塗布した試験体を曲げ試験により検討を行った。塗布量は∞(入るだけ)の試験体とした。曲げ強度比と材齢の関係を図-1に示す。なお、曲げ強度比は、以下の式(1)を用いて算出している。

$$\text{曲げ強度比 (\%)} = \frac{\text{各材齢における曲げ強度 (MPa)}}{\text{ひび割れ導入時の曲げ強度 (MPa)}} \times 100 \quad (1)$$

その結果、材齢1日では、平均曲げ強度比が33%程度しかないことが判明した。この理由として、開発したエポキシ樹脂系接着剤は、1液型のため硬化が遅いからと考えられる。材齢3日で100%程度となり、モルタル強度と同等の結果が得られた。その後、材齢5日以降では曲げ強度比が110%程度となり、モルタル強度より1割程度大きくなることが判明した。また、曲げ試験で破壊した面について、材齢毎に破壊面を観察した結果を図-2に示す。破壊面の状態はモルタル面とエポキシ樹脂系接着剤面の2通りある。エポキシ樹脂系接着剤面は樹脂を浸透させた初期ひび割れ面を示し、モルタル面は、新たにモルタルが破壊した面のことを示す。材齢1日では、エポキシ樹脂系接着剤が完全に硬化していないため、エポキシ樹脂系接着剤面で破壊している。その後、エポキシ樹脂系接着剤が硬化するとともに、材齢3日では87%程度、材齢5日では92%程度がモルタル面で破壊した。しかしながら、材齢7日以降でエポキシ樹脂系接着剤での破壊率が大きくなる結果が得られたがこの明確な理由はわからない。

次に、塗布量と曲げ強度比の関係を図-3に示す。この結果、塗布量が100g/m²の場合、補修効果がなく、曲げ強度は回復しなかった。この理由として、浸透性確認試験の結果からも判るように、ひび割れ面に十分なエポキシ樹脂系接着剤が充填できなかったからである。塗布量300g/m²および500g/m²の場合、塗布量が∞(入るまで)と比較した場合、10~20%程度の曲げ強度比が小さくなることが確認できた。また、塗布量が300g/m²および500g/m²を比較すると、塗布量を多くしても、曲げ強度比の増加は生じなかった。このことから、塗布量を300g/m²以上でひび割れ部の補修に効果が得られると考えられる。なお、ブレイク面は凹凸が大きいことなどから、安全を見て塗布量を500g/m²程度にする必

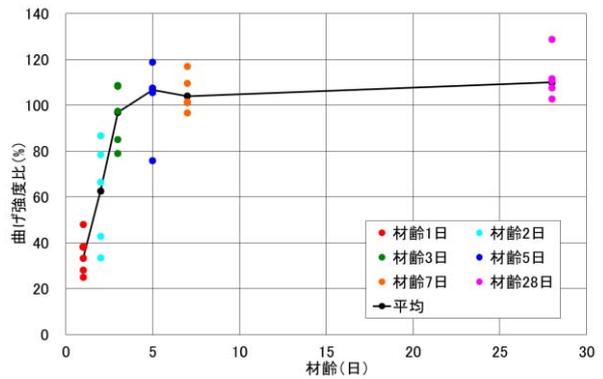


図-1 曲げ強度比と材齢の関係

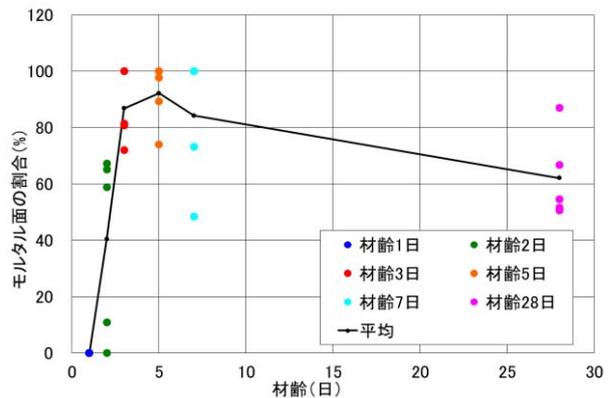


図-2 破壊面の状況と材齢の関係

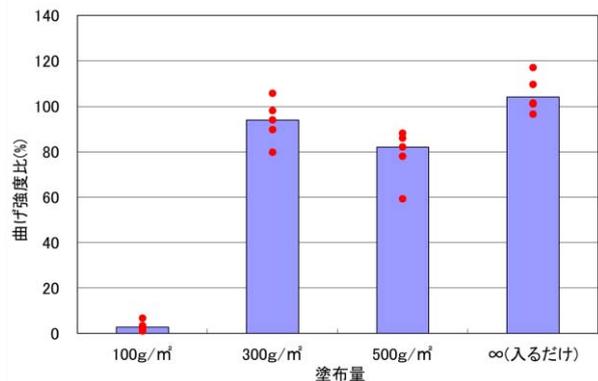


図-3 塗布量別の補修・補強効果

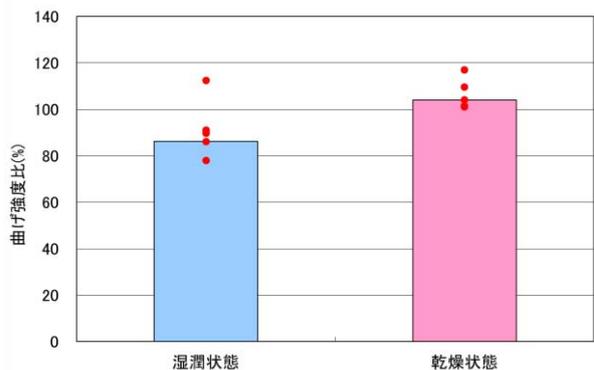


図-4 湿潤面における補修・補強効果

要があると考えられる。

(3) 湿潤面における補修効果確認試験の結果

湿潤面におけるエポキシ樹脂系接着剤の補修効果について確認を行った結果を図-4に示す。その結果、乾燥した面に対して湿潤面の場合 18%程度エポキシ樹脂系接着剤の補修効果が小さくなることが判明した。この結果から、湿潤面での施工を極力避けた方が良いと言える。

4.2 シリーズ2の試験結果

(1) ハンドブレードによる試験板の損傷確認の結果

ハンドブレードではつり処理を行った試験体にどの程度の微細ひび割れや脆弱部が生じているのかを確認した。確認方法は、はつり処理を施したコンクリート板からφ75mmのコアを採取し、蛍光エポキシ樹脂を低真空脱泡により強制的に微細ひび割れに充填した。その後、蛍光エポキシ樹脂が硬化した後、コンクリートカッターを用いて切断し、紫外線ライトを照射し目視にて確認を行った。その結果を写真-4に示す。目視観察の結果、表層から15mm程度まで所々に脆弱部が確認でき、表層部の粗骨材周囲には微細ひび割れが確認できた。この微細ひび割れを画像解析した結果、平均0.14mm程度であった。以上の結果、本試験で用いたコンクリート板(旧コンクリート)は、ハンドブレードによる微細ひび割れおよび脆弱部が発生した試験体であることが確認できた。

(2) 試験板への浸透性確認試験の結果

開発したエポキシ樹脂系接着剤をハンドブレードによりはつり処理を行った試験体に刷毛で500g/m²塗布し、コンクリート内部への浸透状況を確認した結果を写真-5に示す。その結果、粗骨材周りの微細ひび割れに開発したエポキシ樹脂系接着剤が充填されていることが確認できた。また、コンクリート表層部に生じていた脆弱部に、最大16.8mmまで開発したエポキシ樹脂系接着剤が浸透していた。このことから、開発したエポキシ樹脂系接着剤により、ハンドブレードのはつり処理で生じた微細ひび割れおよび脆弱部に浸透・充填しコンクリートを補修していると考えられる。

(3) 新旧コンクリートにおける付着性状の結果

新旧コンクリート界面の補修効果を確認する目的で、次の3種類の界面条件を設定した。条件1: 開発したエポキシ樹脂系接着剤, 条件2: コンクリート打継用エポキシ樹脂系接着剤, 条件3: 両者の組み合わせたものとした。

新旧コンクリートの付着強度を検討した結果を図-5に示す。開発したエポキシ樹脂系接着剤の単体では、新旧コンクリートの付着強度が平均0.34MPa(標準偏差0.09)であり新旧コンクリートの一体性が得られなかつ

た。また、破壊界面を確認した結果、全ての試験体でエポキシ樹脂系接着剤と打継コンクリート(新コンクリート)の界面破壊であることが確認できた。このことから、開発したエポキシ樹脂系接着剤とフレッシュコンクリートの接着効果は小さいことが考えられる。

コンクリート打継用エポキシ樹脂の場合、平均付着強度が1.45MPa(標準偏差0.54)であった。破壊位置は、旧コンクリートであり、打継界面から15mm程度の場所で破壊していた。この破壊箇所は、ハンドブレードによ

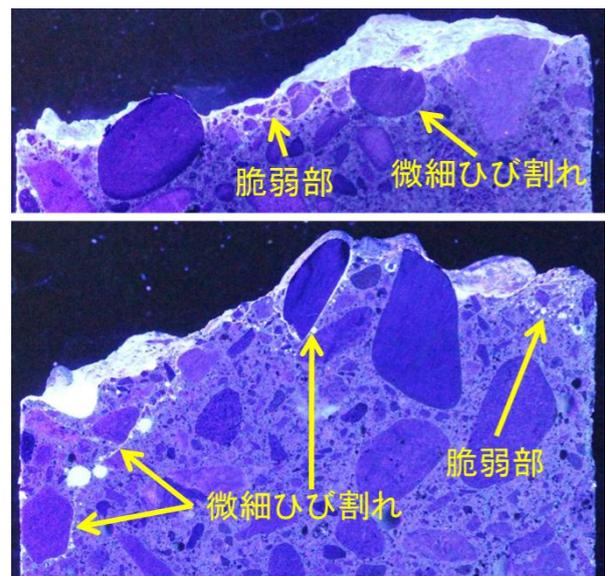


写真-4 ハンドブレードにより生じた脆弱部および微細クラックの状況

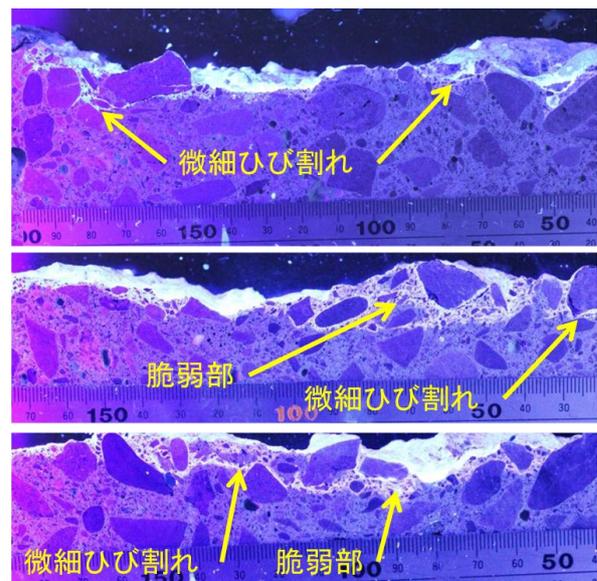


写真-5 開発したエポキシ樹脂接着剤の脆弱部および微細ひび割れへの浸透状況

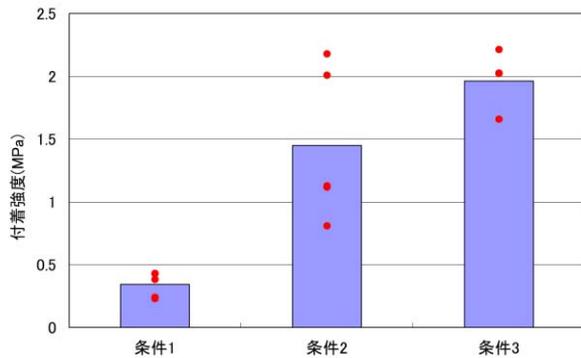


図-5 新旧コンクリートの付着強度

る脆弱部および微細ひび割れの位置と類似する結果となった。付着強度としては、良好な強度を有しているが、付着強度の結果にばらつきが大きかった。このばらつきの理由は、ハンドブレイカで生じた微細ひび割れおよび脆弱部がコンクリート板に均一に生じていないためと考えられる。したがって、微細ひび割れおよび脆弱部が多い場所では、付着強度が低い結果となること考えられる。このことから、付着強度が大きい2点を除けば、付着強度は約 1.0MPa となる、また、新旧コンクリートの一体性にばらつきが生じることが懸念される。この結果から、コンクリート打継用エポキシ樹脂系接着剤では、コンクリート内部に生じた微細ひび割れおよび脆弱部の補修効果は有していないと言えるが、フレッシュコンクリートとの接着効果は高いことが考えられる。

開発したエポキシ樹脂系接着剤とコンクリート打継用エポキシ樹脂系接着剤を組み合わせた場合の平均付着強度は 1.96 MPa (標準偏差 0.18) であった。破壊位置は、旧コンクリートであり、打継界面から 20mm 程度の場所で破壊していた。3 つの条件の中で、最も付着強度が大きくなり、尚且つ標準偏差も小さい結果が得られた。このことから、ハンドブレイカによるはつり処理で生じた微細ひび割れおよび脆弱部に開発したエポキシ樹脂系接着剤が浸透・充填し補修したことにより付着強度のばらつきを小さくし、コンクリート打継用エポキシ樹脂系接着剤で、フレッシュコンクリートの付着を確保したと考えられる。したがって、両者の良い性能が発揮され新旧コンクリートの付着が良好になったと考えられる。

5. まとめ

コンクリート打継面の内部に生じた脆弱部および微細ひび割れの補修方法についてエポキシ樹脂系接着剤による方法を検討した結果、次のことが判明した。

1) ハンドブレイカによるはつり処理を行った結果、表層部に脆弱部および微細ひび割れの発生が再度確認できた。

- 2) 低粘度 1 液型エポキシ樹脂系接着剤を開発し、模擬ひび割れ部に充填した結果、材齢 3 日程度でモルタルの曲げ強度が回復した。また、材齢 5 日以降ではモルタルの曲げ強度が 10%程度大きくなる結果が得られた。
- 3) 開発したエポキシ樹脂系接着剤の塗布量を検討した結果、300 g/m²以上で良い結果が得られた。したがって、打継界面の凹凸度や脆弱部や微細ひび割れの量などを考慮した場合、500 g/m²が良いと考えられる。
- 4) 開発したエポキシ樹脂系接着剤の湿潤面への適用性を検討した結果、乾燥面に比べて 18%程度曲げ強度が小さくなる結果が得られた。
- 5) 開発したエポキシ樹脂系接着剤をハンドブレイカではつり処理を行ったコンクリート板に刷毛を用いて塗布した結果、ハンドブレイカにより生じた脆弱部および微細ひび割れに浸透・充填していることが確認できた。
- 6) 新旧コンクリート打継面に開発したエポキシ樹脂系接着剤のみ、打継用エポキシ樹脂系接着剤のみおよび両者を組み合わせた 3 条件で付着強度を検討した結果、両者のエポキシ樹脂系接着剤を組み合わせた条件が最も付着強度が大きい結果が得られた。

以上の結果、本研究で検討したコンクリート打継面の内部に生じた脆弱部および微細ひび割れの補修に、エポキシ樹脂系接着剤を浸透させることでコンクリート内部の脆弱部および微細ひび割れを補修することが可能であることが確認できた。しかしながら、本研究では、静的な検討のみを実施しているため、今後は動的な検討および各種耐久性についての検討や、打継用エポキシ樹脂系接着剤を使用しなくてもよい低粘度 1 液型エポキシ樹脂系接着剤を開発検討していきたいと考えている。

謝辞 本試験を行うにあたり、国立大学法人長岡技術科学大学の石川純平氏の協力を得た。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 迫田恵三：ウォータージェットで表面処理したコンクリートの打継目の付着性状，噴流工学 Vol. 22, No. 1, pp. 16-20,
- 2) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：ひび割れ含浸材の試験方法，NEXCO 試験法第 4 編構造関係試験方法，PP. 56-57
- 3) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：増厚コンクリート用エポキシ樹脂系接着剤の性能試験方法，NEXCO 試験法第 4 編構造関係試験方法，PP. 70-76