

18. 下水道施設への新素材の活用技術に関する調査

新材料チーム 上席研究員 西崎 到
研究員 富山 禎仁

1. はじめに

本研究は、耐食性に優れた新素材とその性能評価方法を検討し、これらを活用した既設下水道施設の新しいコンクリート補修技術の確立を目的とし、平成 13 年度より開始された。平成 14 年度からは研究をより効率的に実施するため、要求性能を満たす材料・補修技術が開発できる組織・機関を公募し、民間 11 社と公益法人 1 団体の参加を得て「下水処理施設のコンクリート補修材料に関する共同研究」を実施した。

平成 16 年度は、これまでに試作した耐食性新材料について、適切な性能評価手法に基づき下水道環境における耐食性・適用性を評価するとともに、これらの現場施工性に関する調査を実施した。

2. 研究の概要

本研究で研究対象とした、コンクリート補修用防食材料を以下に示す。

(1) 耐酸性モルタル

耐酸性モルタルの下水道施設のコンクリート補修への適用には、防食材料として無塗装で利用される場合と、塗布型ライニング材の下地材として用いられる場合がある。前者は、穏やかな腐食環境条件に対する比較的安価な防食材料としての用途であり、平成 15 年度にはその耐食性についての検討結果を報告した。後者は、塗布型ライニング材の表面に傷やピンホールが発生しても、膨れ・はがれへの進行を抑制することができる材料である。ここでは、その施工条件および膨れ・はがれ抑制効果について報告する。

(2) 塗布型ライニング材

塗布型ライニング材は多種製品が販売され、最も普及している補修材料である。過年度までに、塗布型ライニング材の主な劣化現象である“膨れ”を抑制する新しい塗装系と、膨れ抑制能力の指標となる新しい付着能力試験方法（引き剥がし試験）について検討し、平成 15 年度にその結果を報告済みである。

(3) 炭素繊維シート

炭素繊維シート工法は、炭素繊維を一方向に引き揃えた一方向シートまたは縦横二方向に織り込んだ二方向シートを、室温で硬化する樹脂を用いてコンクリート表面に含浸させながら接着させ、構造物を補修・補強する工法である。本工法は下水道環境においても優れた耐食性を示す可能性があり、防食効果と補強効果を兼ね備えたコンクリート補修工法として活用できるものと期待される。

(4) シートライニング材

シートライニング材は防食効果が高いため、腐食環境が厳しく点検・補修が困難な場所に使われる工法である。しかし、従来のシートライニング材は塗布型ライニング材と比較すると高価である上に、施工性が劣る場合もある。そこで本研究では、FRP 引抜成形材あるいは金属被覆材料（チタン板）を活用し、より経済的かつ施工性に優れた新しいシートライニング工法の開発に取り組んだ。

3. 耐酸性モルタルの施工条件に関する検討

3.1 概要

モルタルの凝結・硬化は、配合されたセメントの水和反応によって起こる。水和反応の進行は、温度や湿

度などの環境条件に左右されやすい。そこで、耐酸性モルタルの適切な養生条件の把握を目的として、耐酸性モルタルの成形時および養生時の温度や湿度条件が、その水分率や表層引張強さに及ぼす影響を確認した。

3.2 試験方法

耐酸性モルタル3種類（SBR系、アクリル系、エポキシ系ポリマーセメントモルタル）および汎用モルタル3種類（セメントモルタル）を、それぞれ300×300×60のコンクリート平板上に20mmの厚さで塗布し、表-1に示す環境で養生後、表面水分率およびモルタルの表層引張強さを求めた。

表-1 モルタルの養生条件

養生条件	成形および養生環境		表層引張試験の材齢	備考
	温度	湿度		
1	5℃	60±5%RH	2, 3, 7日	
2	20℃	40±5%RH	1, 3, 7日	ビニール袋封緘養生
3		60±5%RH		
4		90%RH以上		
5	30℃	60±5%RH		ビニール袋封緘養生
6		90%RH以上		

3.3 試験結果

一部のモルタルを除き、養生期間の経過と共に表面水分率は低下し、モルタルの表層引張強さは向上した。表面水分率は養生温度が高く、湿度が低いほど小さくなる傾向となった。また、低温環境では十分な表層引張強さが得られるまでに長時間を要することが明らかとなった。

図-1は養生材齢とモルタルの表層引張強さの関係の一例として、養生温度20℃での試験結果を示したものである。汎用モルタルの結果を見ると、低湿度ほど強度が低く、水分の蒸発による表層部分の脆弱化現象（ドライアウト）が発生しているものと推察される。この場合、時間が経過しても大幅な強度の向上は認められなかった。一方、耐酸性モルタルは短時間で強度が向上し、養生期間1日で1N/mm²以上、7日では2~4N/mm²程度の表層引張強さが得られた。耐酸性モルタルは低湿度環境においても乾燥の影響を受けにくく、高い強度が得られることが明らかとなった。

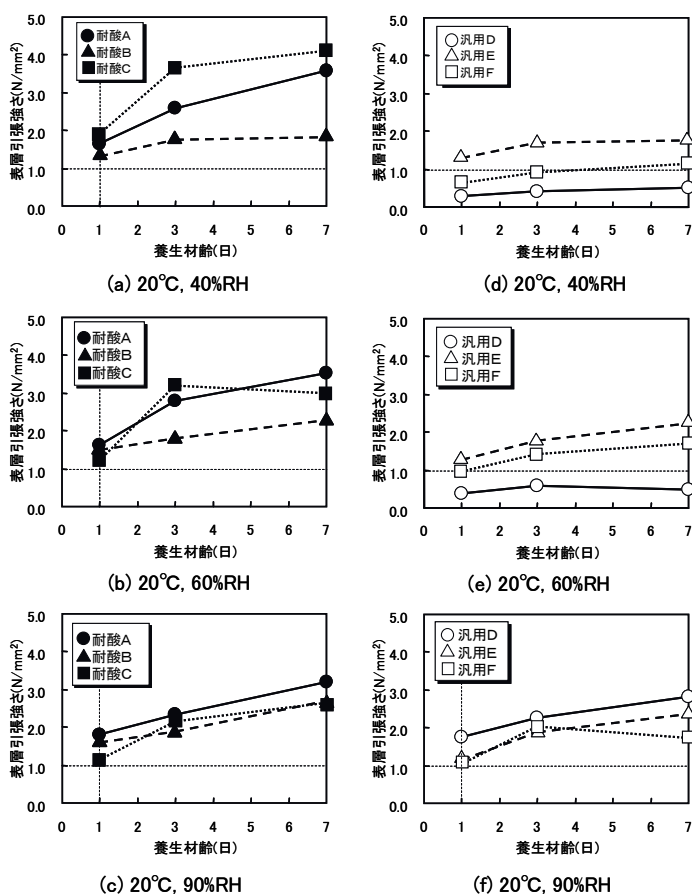


図-1 養生材齢とモルタルの表層引張強さの関係

4. 塗布型ライニング材の施工管理条件に関する検討

4.1 概要

下水道施設の補修工事において塗布型ライニング材を使用する場合、劣化部を除去して断面修復を行った後、ライニング材を施工するのが通常である。塗布型ライニング材の性能を最大限発揮させるためには、断面修復材施工後、どのタイミングでライニング材を施工するのが重要なポイントとなる。そこで、塗布型ライニング材を施工する時点での断面修復材の表層水分率と引張強さが、塗布型ライニング材塗膜の付着強さに及ぼす影響について検討した。

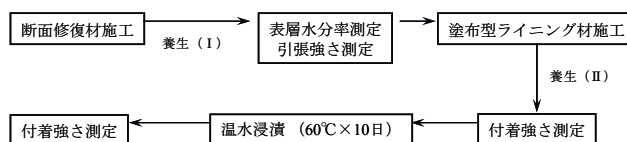


図-2 試験のフロー

4.2 試験方法

試験は断面修復材 4 種類（耐酸性モルタル 3 種類、汎用モルタル 1 種類）と塗布型ライニング材 2 種類（汎用エポキシ、FRP）を用いて行った。供試体の作製から付着力試験までのフローを図 - 2 に示す。まず、5℃および 20℃の環境下でコンクリート基板上に断面修復材を 20mm の厚さで施工し、同一条件下で一

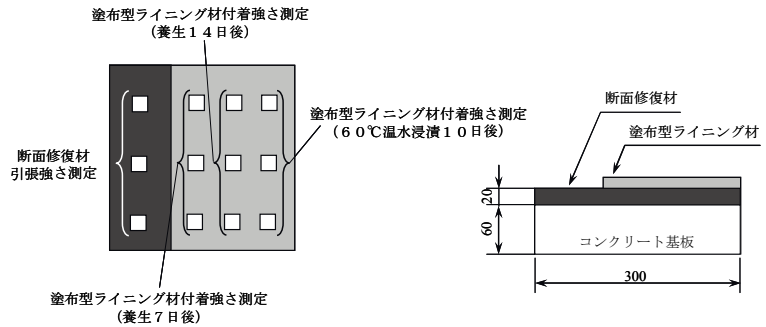


図 - 3 供試体の概略図

定期間養生（養生 I）後、断面修復材の引張強さと表層水分率を測定した。この直後に、塗布型ライニング材を図 - 3 のように塗布し、同一条件下で一定期間養生（養生 II）後、塗布型ライニング材塗膜の付着強さを測定した。この供試体をさらに、60℃温水に 10 日間浸漬した後、再び塗膜の付着強さを測定した。

4.3 試験結果

断面修復材と塗布型ライニング材との付着強さは、ライニング材被覆後の養生期間を長く取ることにより、概ね日本下水道事業団規格値（1.5N/mm²）を満足する結果となった。

一般に塗布型ライニング材の施工管理条件は、下地からの水蒸気による塗膜の膨れや付着性の低下を防止する観点から、下地含水率 8%以下とされている場合が多いが、塗布型ライニング材施工時における断面修復材表層水分率と塗布型ライニング材付着強さ（材齢 14 日）との関係（図 - 4）からは、これを裏付ける明確な相関は認められなかった。一方、塗布型ライニング材施工時における断面修復材の引張強さと塗布型ライニング材の付着強さ（材齢 14 日）との関係（図 - 5）から、断面修復材の引張強さ 0.5N/mm²を境に、それ以上の領域で塗布型ライニング材付着強さが規格値（1.5N/mm²）を満足することが明らかとなった。

本試験の結果から、次工程に塗布型ライニングを施工する場合の養生期間は、引張強さ 0.5N/mm²が得られるまでとし、目安として 5℃では養生期間 2~3 日以上、20℃および 30℃では養生期間 1 日以上確保することが望ましい、との結論が得られた。

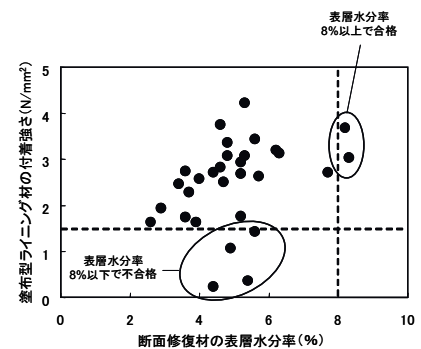


図 - 4 塗布型ライニング材の付着強さと断面修復材の表層水分率との関係

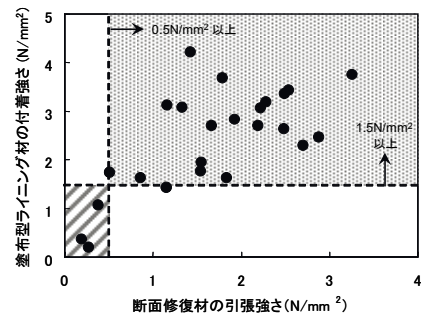


図 - 5 塗布型ライニング材の付着強さと断面修復材の引張強さとの関係

5. 耐酸性モルタルと塗布型ライニング材との併用効果に関する検討

5.1 概要

塗布型ライニング材によるコンクリートの防食工法では、何らかの原因により塗膜に欠損が生じる場合がある。その際、欠損部から浸透する硫酸により下地の断面修復材が腐食劣化し、塗布型ライニング材のはがれにつながる場合がある。そこで、下水環道境下においてライニング材塗膜に欠損が生じたと想定し、下地材の劣化挙動を調べた。

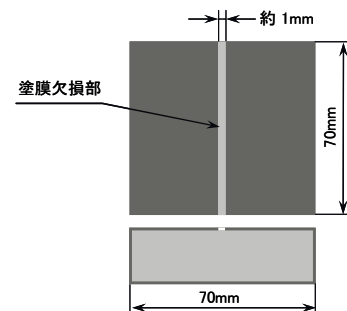


図 - 6 供試体の概略図

5.2 試験方法

3種類の耐酸性（ポリマーセメント）モルタルと、1種類の汎用（セメント）モルタルを試験に用いた。これらのモルタルをJIS A1171に基づき70×70×20mmの寸法に成形し、表面水分率が8%以下になった時点で、表面にエポキシ樹脂系ライニング材を塗布した。供試体上面のライニング材には、カッターで基材モルタル表面に達する切れ目を入れた（図-6）。この供試体を5wt%、20°Cの硫酸に28日間浸せきした後、外観観察、質量測定、供試体断面の観察等を行った。

5.3 試験結果

硫酸浸せき後の供試体断面に1%フェノールフタレイン溶液を噴霧し呈色状況を調べたところ（図-7、表-2）、汎用モルタルの塗膜欠損部は中性化領域が大きく、硫酸の浸透による腐食劣化の進行により塗布型ライニング材に膨れが発生していることがわかった。汎用モルタルは、水酸化カルシウムの生成量が耐酸性モルタルに比べて多く、硫酸との反応により二水石膏を生成しやすい。この二水石膏が欠損部の塗膜を押し広げ、硫酸劣化を助長したものと考えられる。

一方、耐酸性モルタルの塗膜欠損部は僅かに中性化領域が認められたが、ライニング材に膨れ、ひび割れ等の変状はなかった。耐酸性モルタルは、少ない水酸化カルシウム生成量や緻密な硬化体組織を意図した配合設計により耐酸性が付与されているため、欠損部に硫酸溶液が接触した場合においても二水石膏が生成されにくく、モルタル中に硫酸が拡散

しにくい。そのため、塗膜欠損部に変状が発生しなかったものと考えられる。以上の結果から、塗布型ライニング材の下地に用いる断面修復材として、耐酸性モルタルを適用することの優位性が確認された。

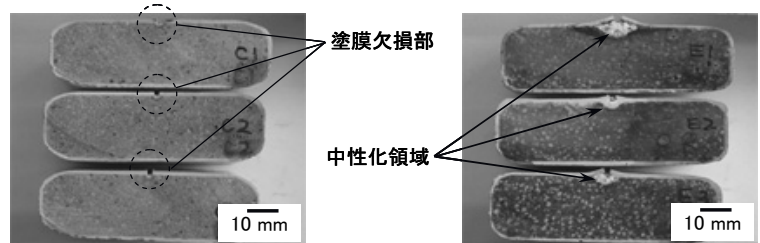


図-7 硫酸浸せき後の供試体断面（1%フェノールフタレイン溶液を噴霧）

表-2 硫酸浸せきによる供試体の質量変化率と中性化領域の面積

試験 No	外観観察	質量変化率 (%)	中性化領域 (mm ²)
耐酸モルタル A	変状なし	0.25 *	8.3
	変状なし	0.10	6.0
	変状なし	0.09	8.2
耐酸モルタル B	変状なし	0.11	3.8
	変状なし	0.12	4.6
	変状なし	0.12	3.1
耐酸モルタル C	変状なし	0.19	2.4
	変状なし	0.19	3.0
	変状なし	0.17	3.2
汎用モルタル E	欠損部に膨れ	0.76	37.6
	欠損部に膨れ	0.35	14.2
	欠損部に膨れ	0.40	21.1

6. 炭素繊維シートによるコンクリート補強工法の下水道施設施設への適用性に関する検討

6.1 概要

炭素繊維シートによる補修・補強工法を下水道環境下のコンクリート構造物に適用する場合には、補強効果と同時に補強材料の耐硫酸性も要求される。そこで、炭素繊維シートとコンクリートとの付着性能が特に要求される下水道施設施設の床スラブや梁の曲げ補強を想定し、小型供試体を用いた曲げ強度試験により硫酸環境下における炭素繊維シートの曲げ補強性能について検討した。

6.2 試験方法

50×40×250mmのモルタル表面に炭素繊維シートを貼付して作製し

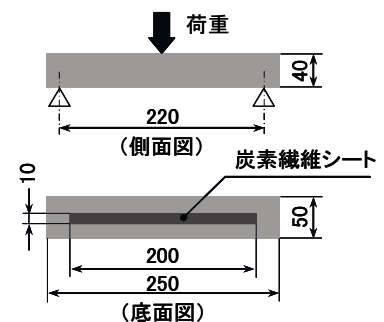


図-8 供試体載荷方法

た供試体を、40℃・10wt%の硫酸水溶液に所定の期間浸せきし、浸せき後の供試体曲げ強さを求めた。炭素繊維シートの上塗り材は3種類とした。曲げ強度試験は JIS R5201 に基づき、支持スパン 220mm の中央集中荷重（図 - 8）で行った。

6.3 試験結果

硫酸浸せき時における供試体の曲げ強度保持率の経時変化を図 - 9 に示す。供試体 HA と HC については炭素繊維の剥離によって、供試体 HB については炭素繊維の破断によって、それぞれ最大耐力に至った。各供試体とも浸せき時間が増加しても破壊モードが変化することはなかった。120 日のデータに関しては試験継続中であるが、56 日時点ではほぼ初期の曲げ強度を維持していることが確認された。供試体断面の元素分析結果から、120 日浸せき後においても硫酸は上塗り材塗膜内までしか浸入していなかったことから、本浸せき試験期間内においては、硫酸浸入による炭素繊維シート補強層の劣化は生じていないと考えられる。これらの結果から、本工法は硫酸環境下でも高いレベルで曲げ補強効果を維持することができることが明らかとなった。

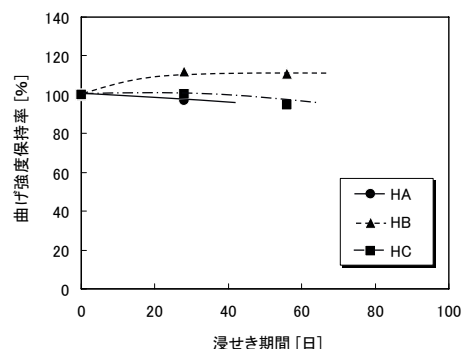


図 - 9 硫酸浸せき時における供試体曲げ強度保持率の経時変化

7. 新しいシートライニング工法の下水道施設施設への適用性に関する検討

本研究では、従来のシートライニング工法で問題となっている経済性と施工性を改善するために、FRP あるいはチタン板を利用した新たな工法の開発に取り組んだ。それぞれの工法の概要は次の通りである。

(1) FRP 引抜成形材によるシートライニング工法

FRP はこれまでもシートライニング材として用いられたことがある、耐食性に優れた素材である。単体でシートを作ることにより軽量化、施工性の向上が期待できる。本研究では引抜成形法により作製した FRP を使用することで、比較的安価で高品質なシートライニング工法の確立を目指した。開発したシートライニング用 FRP パネル（図 - 10）は、E ガラスのロービングをコンティニアスストランドマットで包んだ構造となっており、幅 600mm に 15 度傾斜した L 型アンカーを 4 本配置している。マトリックス樹脂にはビニルエステル樹脂と不飽和ポリエステル樹脂の 2 種類を用いた。

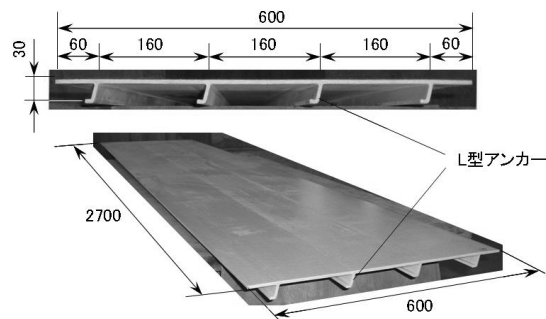


図 - 10 シートライニング用 FRP パネル

(2) 純チタンによるシートライニング工法

チタンは pH 1 程度の硫酸に侵されず、環境液の浸透もないため長寿命が期待できる。また薄板で用いれば十分に軽量であるため、施工性の向上も図れる。開発した工法では、適切に下地処理しプライマーを塗布したコンクリート面に、両面粘着シート（テープ）あるいは接着剤を使用してチタン板を貼付し施工する。チタン板と下地

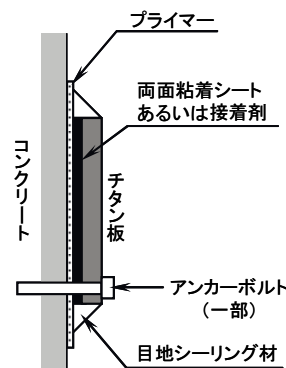


図 - 11 チタンシートライニング工法の概略図

コンクリートとの接着の安全率を向上させるために、チタン板端部に 500mm 程度の間隔で、接着剤を塗布したアンカーボルトを打設する。また、チタン板の端部、目地部およびボルトの外周をシリコン系シーリング材でシールすることにより環境液の遮水性を確保することとした。

開発したそれぞれのシートライニング工法について、日本下水道事業団編纂の「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術マニュアル(参考資料-3. 防食被覆層の品質試験方法)」を参考に試験項目および試験方法を設定し、コンクリートとの固着性、耐硫酸性、耐アルカリ性、透水性、硫酸遮断性などについて評価した。これらの結果から、いずれの工法も下水道環境へ十分適用可能であると判断された。

8. 現場施工性に関する検討

本研究において開発した各種補修材料・工法については、室内試験における性能評価により下水道施設のコンクリート補修への適用可否について検討し、良好な結果が得られた。しかし、その実用化に先立って、実大規模での施工性を検証し、施工技術に関する知見を得ておく必要がある。そこで、霞ヶ浦浄化センター内の実験用送水施設の壁面に各種補修材料を数㎡程度ずつ試験施工することにより、現場施工性や施工上の留意点等を検討した。

施工性試験は、既に広く普及し施工技術も確立している塗布型ライニング材を除き、耐酸性モルタル、FRP シートライニング、チタンシートライニングについて行った。実験用送水施設(吐出水槽)内部の劣化したコンクリート壁面をウォータージェットではつき取り(平均はつき深さ 20~30mm)、水洗、下地処理後、各補修材料を工法仕様に基づき施工した(図-12)。

一方、各補修材料の実環境下での耐久性試験を行うために、暴露供試体を作製し、吐出水槽および嫌気調整槽内部に設置した。現在、各水槽内部を実環境に近い状態に設定し、温度および硫化水素濃度のモニタリングを行っている。

暴露 5 ヶ月の時点で水槽内の下水を排出し、暴露供試体の外観調査および各種評価試験を行った。いずれも供試体に汚れの付着はあるものの、劣化を示す物性の変化は認められなかった。今後、最長で 5 年程度まで引き続き暴露し、追跡調査を行う予定である。

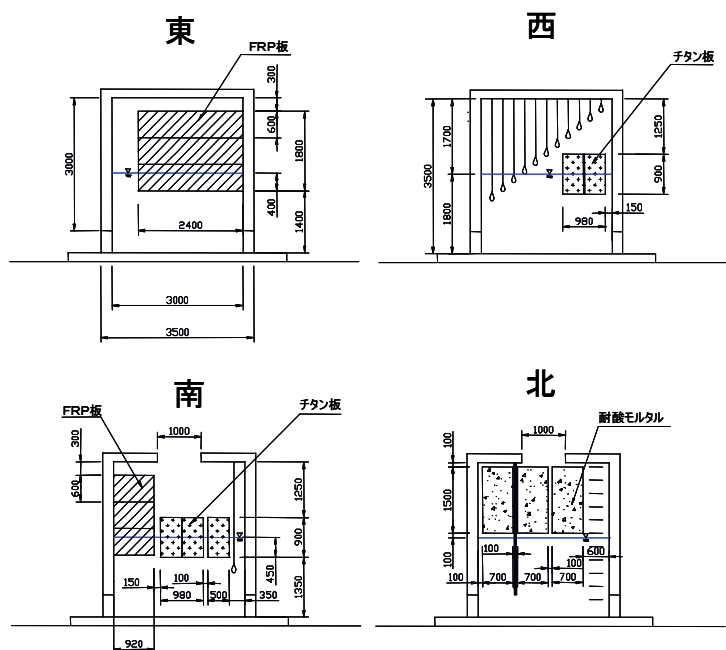


図 - 12 各補修材料の施工位置と寸法(吐出水槽)



(a) 吐出水槽

(b) 嫌気調整槽

図 - 13 暴露供試体設置状況

9. まとめ

平成 16 年度は、試作した耐食性新材料について、適切な手法に基づき下水道環境における耐食性・適用性を評価すると共に、これらを用いた補修工法の現場施工性に関する調査を実施した。