

セメント系補修材の耐久性評価

上田 洋* 工藤 輝大* 玉井 譲*

Evaluation of Durability on Cement Based Repair Materials

Horoshi UEDA Teruhiro KUDO Yuzuru TAMAI

Cement based repair materials are generally used as a restoration material of section concrete structures. However, repairing materials likely generate cracks and exfoliation, and it derives decreased durability of concrete structures and also exfoliation of repairing materials. In this study, we conducted some experiments intended to improve the durability of the concrete structures repaired by the foregoing materials. It was consequently apparent that the water movement resistance in the interface of concrete and repairing materials was important.

キーワード：コンクリート，補修材，接着強度，水分挙動，耐久性

1. はじめに

セメント系補修材は、劣化したコンクリート構造物の断面修復等に広く用いられており、その耐久性を高めることは鉄道構造物の維持管理に大きな効果がある。セメント系補修材を用いて断面修復を行ったコンクリート構造物は、その多くが健全に使用されているが、施工後にひび割れやはく離等の変状を生じ、その後の維持管理に手間を要する例もしばしば見受けられる。

コンクリート構造物の断面修復に広く用いられているセメント系補修材として、セメントモルタルにポリマーディスパージョンまたは再乳化形粉末樹脂を混和したポリマーセメントモルタル（以下PCMと呼ぶ）がある。このPCMの試験方法は、JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に規定されており、フレッシュ性状試験としてフロー試験、スランプ試験、単位容積質量試験、空気量試験、硬化時間試験が、また硬化後の試験として曲げ強さ及び圧縮強さ試験、接着強さ試験、吸水率試験、透水量試験、長さ変化率試験、中性化深さ試験、塩化物イオン浸透深さ試験、接着耐久性試験、凍結融解に対する抵抗性試験、透湿度試験が記述されている。

これらの試験方法は主にPCM単体の性能を評価するものであり、コンクリート構造物への施工後に生じる特性を評価する試験は接着強さ試験および接着耐久性試験の2つである。これは、コンクリート構造物に施工した後の評価がコンクリートの性状に左右され、PCM製品の評価手法として適切ではないと判断されたためであろう。しかしながら、実構造物においては、コンクリートとPCMとの界面ではく離を生じたり、界面に水が浸透

して鋼材腐食を生じたりする例がみられ、これらの現象はPCM単体の性能評価では捉えることができない。

そこで、本研究ではセメント系補修材として汎用的に使用されているPCMを対象として、その耐久性を評価するための一環としてコンクリートとPCMとの界面に着目し、界面の存在に起因する諸特性を明らかにすることを目的とした。

2. 本研究における検討項目と試験体の作製

2.1 検討項目

本研究では、図1に示す項目について試験体を用いた実験により検討した。各項目の詳細を以下に示す。

① (i) ひび割れ発生の特徴

補修材を施工した試験体は、その一部においてひび割れの発生が認められたことから、これらのひび割れの特徴について調べた。

① (ii) コンクリートと補修材との接着特性

コンクリートと補修材との界面における強度性状を明らかにするため、補修材の接着強度試験を行った。

① (iii) 補修材の長さ変化特性

補修材の反りがはく離に及ぼす影響を明らかにするため、補修材の長さ変化特性について調べた。

② 補修材の侵食特性

トンネル覆工への施工を想定し、背面から硫酸ナトリウム(Na_2SO_4)を含む地下水が作用した時の、コンクリートと補修材との界面付近における侵食特性について調べた。

③ コンクリートと補修材との界面に沿った水分移動抵抗性

コンクリートと補修材との界面における耐久性を評価するため、界面に沿った水分移動抵抗性を調べた。

* 材料技術研究部（コンクリート材料）

特集：材料技術

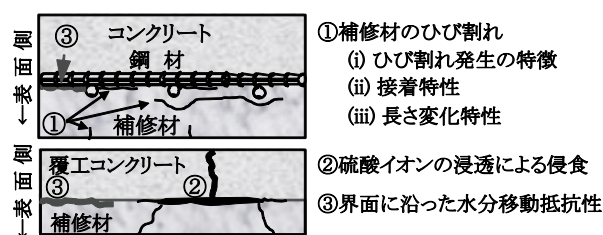


図1 本研究における検討項目

2.2 試験体の作製

作製した試験体の形状は、図2に示すとおりである。コンクリート板には表1に示す配合のレディーミクストコンクリートを使用し、PCMには使用ポリマーの種類や施工実績を考慮し、断面修復材として市販されている8メーカー9材料（本報告ではそれぞれ補修材A～補修材Iと呼ぶ）をコンクリート板の下面から湿式吹付け工法で施工した。PCMの配合や施工は各メーカーの仕様に基づくものとし、PCMを施工した試験体は屋外に約5年間静置した。一部の試験体では、その一部分を切断して断面性状を確認したのちに静置した。

なお、本研究ではPCMの種類による性能の優劣を見出すことは目指しておらず、PCMを施工したコンクリート構造物で一般的に生じ得る現象を明らかにすることを目的としている。

3. 試験結果および考察

3.1 ひび割れに関する検討

静置後の試験体を観察したところ、一部の試験体にひび割れの発生が認められた。代表的なひび割れは図3に示すとおりで、以下の4種類に大別される。

- (a) PCM表面の鋼材に沿ったひび割れ
- (b) PCM表面の微細ひび割れ
- (c) コンクリートとPCMとの界面に発生したひび割れ
- (d) PCM内部に発生したひび割れ

ここで、(c) および (d) のひび割れは一部を切断して静置した試験体の切断面において観察されたものであ

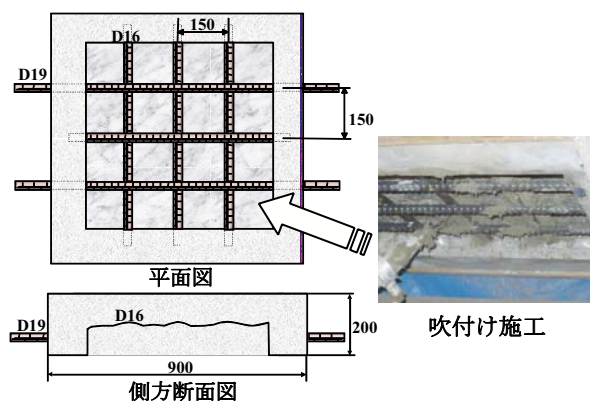


図2 試験体の概要

表1 コンクリートの配合

コンクリートの種類による記号	呼び強度	スランプ	粗骨材の最大寸法による記号	セメントの種類による記号		
普通	27	12	20	N		
水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
53.0	46.1	170	321	814	976	4.173

る。(a) および (b) のひび割れは、いずれもPCMの収縮が原因であると考えられ、(c) のひび割れはコンクリートとPCMとの間における膨張・収縮挙動の不一致が原因であると考えられる。(d) のひび割れは、その発生箇所がPCMを複数回施工する際の施工層間とほぼ一致したことから、各施工層における硬化性状の違い等に起因した膨張・収縮挙動の不一致が原因であると考えられる。

これらのひび割れのうち、(c) および (d) のひび割れは構造物表面からは確認することができず、これらのひび割れがコンクリート内部で進展すると、補修材のはく落に繋がることになるが、試験体を確認したところ、ひび割れのコンクリート内部への進展はわずかであった。したがって、これらのひび割れは大気に晒された箇所周辺での乾燥湿潤状態の違い等に起因した局所的なものであると推定される。

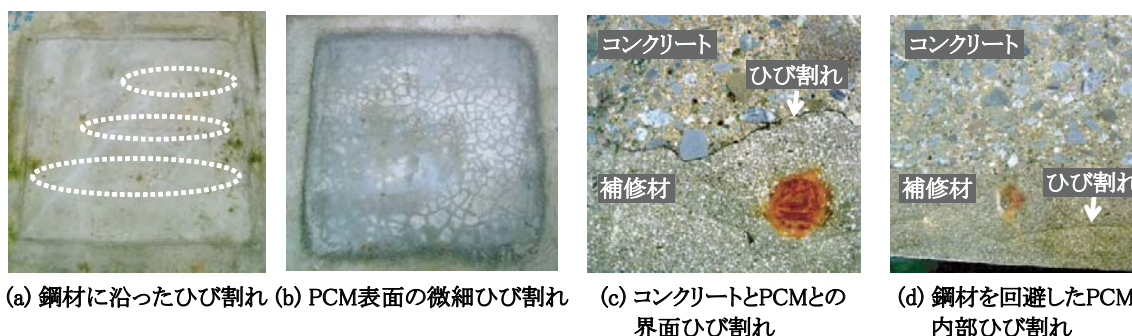


図3 試験体のひび割れ発生状況

3.2 接着特性に関する検討

次に、補修材のはく離に影響するコンクリートとPCMとの接着強度について検討する。接着強度試験は、補修材側からφ75mmの大きさをコンクリートまで切り込みを入れ、鋼製アタッチメントをエポキシ樹脂で接着させた後、建研式接着試験機を用いて行った。試験は一つの補修材につき原則として6箇所で行い、比較のためにコンクリート単体での試験も合わせて実施した。図4は、材齢28日の測定結果と材齢約5年の測定結果のそれぞれについて、各測定値を示したものである。接着強度にはばらつきがみられるが、全体的にみると図5に示すように、多くのPCMにおいて材齢5年の平均値が材齢28日と比べて高い。コンクリートとPCMとの間でひび割れが進展していれば、接着強度が低下するはずであるが、その傾向はみられない。このことは、コンクリートとPCMとの界面におけるひび割れがコンクリート内部に進展していなかったこととも合致する。これらのことから、本試験条件においてはひび割れによる接着強度の低下よりもPCMの水和が徐々に進行することによる強度増進が卓越したと考えられる。

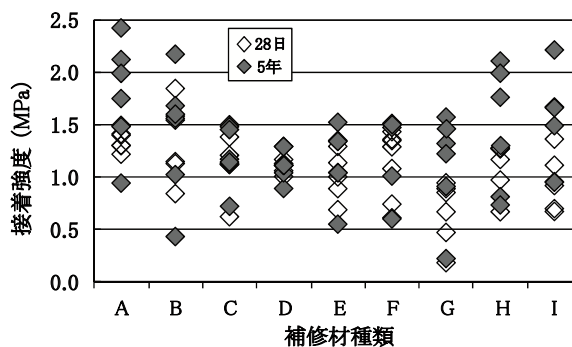


図4 補修材の接着試験結果（各測定値）

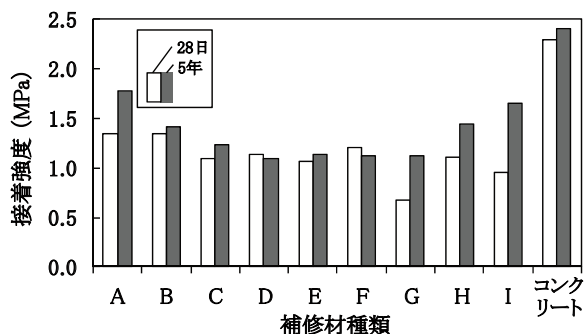


図5 補修材の接着試験結果（平均値）

3.3 コンクリートに施工した時の長さ変化特性に関する検討

3.1節における検討により、コンクリートとPCMとの界面に発生したひび割れが、大気に晒された箇所での乾燥湿潤状態の違い等に起因したものであると推定された。一般に、コンクリートに施工されたPCMはその表面側は乾燥と湿潤との繰返し（乾湿繰返し）を生じるが、コンクリートに接している側はその影響を受けにくくなり、PCM内部で乾湿繰返しによる膨張・収縮挙動が異なることが予想される。この影響を確認するために、コンクリートに施工した状態を模擬したPCMの長さ変化試験を実施した。試験に用いた試料は、吹付け施工試験体から20mm厚に切り出して作製し、表側の一面を残して被覆した上で水中に84日間浸漬し、その後乾燥させた。なお、試料側面の被覆は側面からの乾燥湿潤作用を防ぐためであり、裏面の被覆はコンクリートとの接着面を模擬したものである。測定は、試料の表面と裏面のそれぞれに設置したチップ間の長さを計測することに

より実施した。

図6に質量変化率の測定結果を示し、図7に非被覆面（表面）と被覆面（裏面）における長さ変化率の測定結果を示す。なお、補修材Aは2体の測定結果のそれぞれを示し、浸漬中に測定チップがはく離した試験体の測定結果については本図から除外した。質量変化率をみると、いずれのPCMでも水中浸漬によって質量が増加し、気中乾燥によって質量が減少するが、その程度はPCMの種類によって異なり補修材Aで大きい。

長さ変化率についても、水中浸漬時には補修材が膨張する傾向を示しており、その程度は補修材Aで大きく、質量変化率の傾向と比べると、膨張率の違いには補修材の吸水率が影響していると考えられる。気中乾燥時は、いずれの補修材も表側では長さ変化率が小さくなるのに対し内側ではその程度が小さい。これは、表側では乾燥によって収縮を生じるのに対し、裏側では乾燥が進みにくいため収縮を生じにくいことによる。このことは、乾

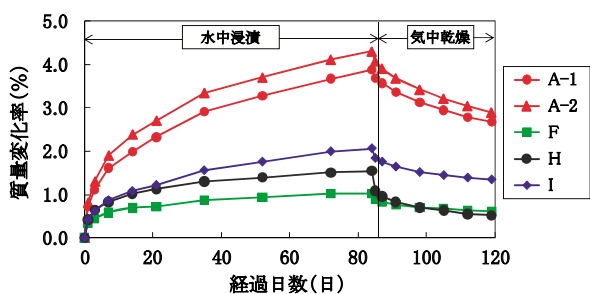


図6 質量変化率の測定結果

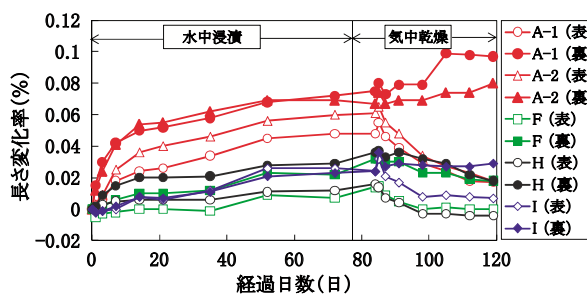


図7 長さ変化率の測定結果

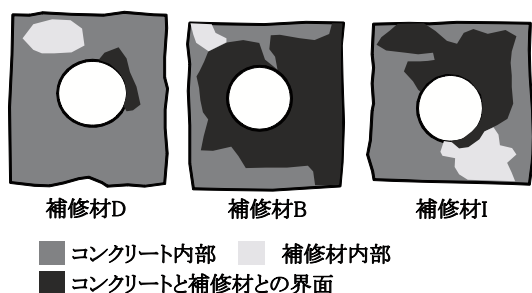


図8 破断位置の観察例

乾燥時において補修材に反りが生じやすくなることを示している。この長さ変化の差は、水中浸漬時に質量変化率が大きいPCMほど大きいことから、PCMの吸水率によってある程度推定できると考えられる。

3.4 補修材の侵食に関する検討

トンネルでは、覆工材料が劣化を生じた際の補修方法として、覆工表面にセメント系補修材を施工する工法がしばしば用いられる。この場合、覆工背面から漏水が作用すると、補修材が比較的密実であることから、漏水は覆工材料と補修材との間に滞留し界面に沿って広がることが考えられる。この時、漏水が硫酸イオンを含んでいると、界面に沿って硫酸イオンを含んだ水が広がり、補修材等が侵食されることによって補修材のはく離・はく落を生じることが懸念される。この現象を調べるため、PCMを施工したコンクリートにNa₂SO₄溶液を作用させ、コンクリートとPCMとの界面における性状を調べる実験を行った。

試験体は、PCMを吹付け施工した試験体から一辺が200mmの立方体となるように切り出し、その中央にφ75mmの孔を補修材側からコンクリート面に達するまで削孔したものを用いた。この孔の中に10%-Na₂SO₄溶液を入れて18箇月間静置した。静置後の試験体は界面付近で割裂し、破断面の性状を調べた。なお、いずれの試験体においても、本試験の範囲では侵食によって界面が容易にはく離するような状況には至らなかった。

図8に、コンクリートとPCMとの境界付近で破断した面の観察例を示す。補修材Dでは主にコンクリート内部で破断したが、補修材Bおよび補修材IではコンクリートとPCMとの界面で破断した箇所が多い。補修材Dでは、孔内のNa₂SO₄溶液がほとんど減少しなかったことから、コンクリートやPCMへの溶液の浸透はわずかであったと考えられる。その一方で、補修材Bおよび補修材Iでは、孔内のNa₂SO₄溶液がほとんど漏出していったことから、コンクリートやPCMに溶液が浸透したと考えられ、溶液が浸透した試験体ではコンクリートとPCMとの界面において破断しやすい傾向にあることがわかる。補修材Bおよび補修材Iの破断状況をさらに詳しく



図9 溶液の浸透と破壊位置との関係

みると、コンクリートとPCMとの界面で破断した箇所は中央の削孔箇所近傍で目立つ。この箇所では白色の硫酸塩物質がみられ、Na₂SO₄溶液が浸透した箇所であるといえる(図9参照)。すなわち、コンクリート内部での破壊が卓越する試験体においてもNa₂SO₄溶液が浸透した箇所では主に界面破壊を生じており、このことは溶液が界面に沿って浸透しやすいこと、Na₂SO₄溶液の侵食によって界面が軟化しやすいことを示している。

3.5 コンクリートと補修材との界面に沿った水分移動抵抗性に関する検討

3.5.1 水分滲出試験

試験体は、侵食試験と同様のものを用い、この試験体にある中央の孔を水で満たして、試験体側面からの水分滲出状況を調べた。なお、試験体側面には水を検知すると赤色に着色する試薬を事前に噴霧した。

図10に試験結果の例を示す。図10(a)の例では、試験開始2分後にはコンクリートとPCMとの界面(左右中央付近)からわずかに水の滲出がみられ、試験開始5分後には水の滲出が明瞭に観察された。試験開始60分後になると、滲出した水が周辺に広がる結果となった。図10(b)は、試験開始10分後における試験体の観察例を示したものである。補修材B、C、Fは、いずれもコンクリートと補修材との界面から水が流れ出ており、流出箇所では粗大な空隙が存在することが推定される。補修材Iでは、水の滲出は認められなかった。

測定した試験体の各面について水分滲出の発生比率を

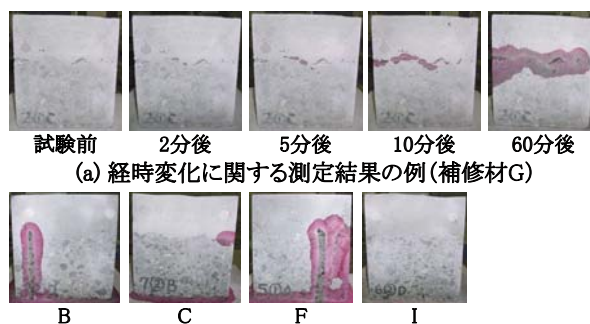


図10 水分滲出試験結果の例

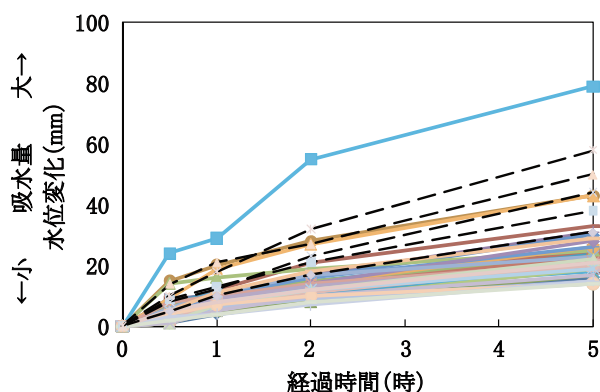


図 11 小孔からの吸水試験結果

注) 破線はコンクリート単体の測定結果を示し、その他は補修材を施工した試験体における各測定結果をまとめて示した。

まとめると、水分滲出がみられた試験面が全体の45%に達した。このような水の滲出は、試験体内部にいわゆる「水みち」が形成された際に発生するもので、コンクリートとPCMとの界面ではこのような水みちが発生しやすい、いいかえればコンクリートとPCMとの界面においては水分移動抵抗性が小さいことを示している。このような水みちの発生は、広義に捉えれば施工欠陥の一つとも解釈し得るが、慎重に施工された試験体の多くに発生していることから、いわゆる粗雑な施工によるものではなく、この補修システムが本質的に内在する課題であるといえる。

3.5.2 小孔を用いた吸水試験

図10(b)をみると、水の滲出箇所は界面全域ではないことから、界面の性状は場所によって異なると考えられる。そこで、界面の比較的小さい領域における性状を調べるため、吹付け施工した試験体に小孔を開け、その孔を用いた吸水試験を行った。

小孔は試験体端部から50mmの箇所からφ10mmの孔を1試験体あたり5箇所開け、水を注入した後に水位の時間変化を調べた。また、比較のためにコンクリート単体での試験も実施した。孔壁にある界面等からコンクリートやPCMに浸透する水が多いと、水位の時間変化が大きくなる。

試験結果は図11に示すとおりで、水位の時間変化は多くの削孔箇所でコンクリート単体の値よりも小さく、孔壁からの水分浸透は少なかった。ただし、5時間で約80mmの水位変化を示した孔もみられ、この孔では孔壁に空隙を生じている箇所があるといえる。水位変化が全体的にコンクリート単体よりも小さかったのは、削孔が小孔であったことから空隙に位置しない孔が多かったためであると考えられる。

3.5.3 界面を含む試料の透水試験

次に、このような水分移動抵抗性を定量的に評価するために、コンクリートとPCMとの界面に着目した透水試験を行った。試験には、吹付け施工試験体から界面を

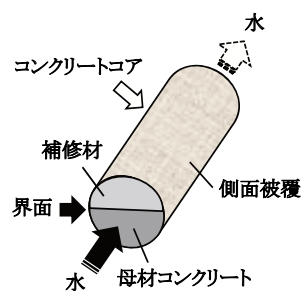


図 12 コアの透水試験

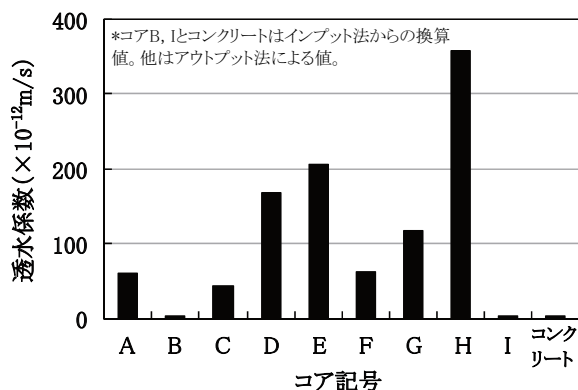


図 13 コアの透水試験結果

含むようにして採取したφ100mmのコアを用いた(図12参照)。また、比較用としてコンクリート単体での試験も実施した。試験は、コアを円筒容器に入れて周囲をエポキシ樹脂でシールした後、透水試験器に設置して水圧1MPaで48時間加圧し、その間に水の排出が認められた場合にはアウトプット法により透水係数を求め、水の排出が認められない場合にはインプット法により拡散係数を求めて透水係数に換算した。試験結果は図13に示すとおりで、コンクリートとほぼ同じ透水性を有する例もみられたが、そのほかのコアはいずれもコンクリート単体と比べて透水係数が約10~100倍と非常に大きくなり、界面における水分移動抵抗性が極めて低いことがわかった。

4. セメント系補修材を施工したコンクリートの耐久性に関する検討

4.1 評価項目に関する検討

前章で得られた結果から、セメント系補修材を施工したコンクリート構造物では、コンクリートと補修材との界面に起因した諸現象がみられ、補修材単体の性能のみならずコンクリートと補修材との界面における性能についても考慮する必要があることがわかった。

コンクリートと補修材との界面や補修材の施工層間に発生したひび割れは、本研究の範囲では躯体内部での進展はごくわずかであり、コンクリートと補修材との接着強度もひび割れ発生に伴う著しい強度低下はみられず、

特集：材料技術

表2 セメント系補修材の評価項目

PCM単体の評価		構造物への施工後の評価
強度性状	曲げ強さ試験及び圧縮強さ試験	接着強さ試験 接着耐久性試験
耐久性	吸水率試験 透水量試験 長さ変化率試験 中性化深さ試験 塩化物イオン浸透深さ試験 凍結融解に対する抵抗性試験 透湿度試験	界面に沿った 水分移動抵抗性評価 (透水試験等)《今回提案》

* 斜字以外は JIS A 1171 に記述されている硬化体の試験方法。

全体的には材齢とともに増進する傾向にあった。乾燥湿潤作用に伴う表面側とコンクリート界面側との長さ変化の差は、補修材の反りやすさに影響するが、この差が大きい試験体は補修材の吸水性が高かったことから、吸水率試験によってある程度推定できると考えられる。

コンクリートと補修材との界面に沿った水分移動抵抗性は、全体的に非常に小さく、セメント系補修材を施工したコンクリート構造物の耐久性を向上させるためには、この点に着目することが重要である。このことは、硫酸イオンの浸透に対する抵抗性を高めるためにも有効である。

表2に、JIS A 1171 に記載されている硬化後の試験方法に水分移動抵抗性を加えて整理したものを示す。JIS A 1171 では、強度性状に関する試験はPCM単体および構造物への施工後のそれぞれについて記述されているが、耐久性に関する試験はPCM単体については数多いものの、構造物への施工後に着目した試験がみられない。本研究において得られたコンクリートと補修材との界面における水分移動抵抗性は、この空白部分を埋める役割を果たすものとして位置づけることができる。

コンクリートと補修材との界面における水分移動抵抗性を評価する方法として、界面を含むコアを採取して透水試験を行う等の方法があげられる。また、近年はコンクリート構造物の表層品質を非破壊で簡易に評価する技術が試行されつつあり¹⁾、これらの技術をコンクリートと補修材との界面における水分移動抵抗性の評価にも繋げていくことができると考えられる。

4.2 耐久性を向上させる方法に関する検討

コンクリートと補修材との界面に沿った水分移動は、その挙動にもよるが補修材のはく離や鋼材腐食に繋がりがやると考えられることから、今後は断面修復時にコンクリートと補修材との界面に沿って水分が移動しにくい材料や施工方法を開発していくことが求められる。

しかしながら、そのような補修材が開発され、補修方法が確立されるまでにはまだ時間を要するので、当面はコンクリートと補修材との界面が相対的に弱点になっていることを認識することが必要であり、この現状に対応

することが求められる。例えば、漏水がかかるような箇所では、鋼材位置に界面がなるべくこないようにしたり、界面に沿って防水材を帯状に施工したりする等の方法がある。

このように、コンクリート内部の水分移動を念頭に置いた補修を行うことにより、セメント系補修材を施工したコンクリート構造物の耐久性は大幅に向上すると考えられる。なお、コンクリート構造物内部の水分挙動については現時点では解明されていないことが非常に多く、これらの挙動を含めた補修方法については今後の課題としたい。

5. まとめ

本研究では、セメント系補修材として一般的なポリアマーセメントモルタル(PCM)を施工したコンクリートについて、コンクリートと補修材との界面における諸特性を明らかにしたものである。得られた成果の概要を以下に示す。

- ① 補修材の吹付け施工では、コンクリートとの界面および補修材の施工層間等にひび割れの発生がみられる事例があったが、本研究の範囲ではこれらのひび割れの躯体内部への進展はごくわずかである。
- ② コンクリートと補修材との界面での接着強度にはばらつきがみられるが、全体的には材齢とともに増進する傾向にある。
- ③ 乾燥湿潤作用に伴う補修材表面側とコンクリート界面側との長さ変化の差は、吸水性の高い補修材ほど大きい。
- ④ トンネル覆工への施工を念頭において硫酸イオンの作用に対する抵抗性を調べた結果、溶液はコンクリートと補修材との界面に沿って浸透しやすく、硫酸イオンの浸透範囲では界面で破壊を生じやすい。
- ⑤ 水分移動抵抗性は、コンクリートと補修材との界面に沿った箇所において小さい。界面における透水係数は、コンクリートと同程度のものもあったが、コンクリートの10~100倍程度になる例も多い。今後、セメント系補修材の評価にあたっては、界面に沿った水分移動抵抗性に着目した評価を行うことが重要である。

文献

1) 土木学会：歴代構造物品質評価／品質検査制度研究小委員会(216委員会) 成果報告書およびシンポジウム講演概要集、コンクリート技術シリーズNo.87 2009