

# 論文 寒冷地環境におけるエポキシ樹脂ひび割れ注入材の接着強度特性

黒島 美男<sup>\*1</sup>・大沼 博志<sup>\*2</sup>・寺村 直子<sup>\*3</sup>

要旨：この研究は、供用期間が長期化したコンクリート構造物のひび割れの補修に用いられるエポキシ樹脂注入材について、主としてエポキシ樹脂注入材と既設コンクリートとの接着強度に及ぼす注入材の材齢、ひび割れ幅、寒冷地の低温環境および接着面の湿潤状態の影響を検討した。その結果、注入材の材齢の増加に伴い接着強度は増大すること、セメント系ひび割れ注入材とは異なりエポキシ樹脂注入材はひび割れ幅の影響を受けひび割れ幅が小さいほど接着強度は高いこと、低温環境における接着強度は室温環境と比べて低い値を示すこと、乾燥面と比較して湿潤面の接着強度は低いことを明らかにした。

キーワード：エポキシ樹脂、ひび割れ注入材、接着強度、充填性評価、寒冷地環境、湿潤状態、ひび割れ幅

## 1. はじめに

コンクリートの維持管理にあたり、“コンクリートに発生するひび割れの補修”は最重要課題である。ひび割れ補修を適切かつ効率的に行うためには、ひび割れの調査結果に基づき、ひび割れの原因、ひび割れの状況を十分に把握し、補修の目的に最も適した方法および材料を採用する必要がある<sup>1)</sup>。

本研究では、ひび割れの補修工法の中で最も広く普及している注入工法<sup>2)</sup>を対象とした。注入工法に用いられる注入材には、有機系注入材と無機系注入材の2種類があり、接着強度に優れ、微細なひび割れへの注入も容易であるという理由から、従来からエポキシ樹脂に代表される有機系注入材が多く使用されてきた。

しかし、そのようなエポキシ樹脂であっても、寒冷地の低温環境下における研究実績は十分であるとは言えないのが現状である。本研究は、このような現状を踏まえて、低温環境さらには接着面の湿潤状態が市販されているエポキシ樹脂の接着強度に及ぼす影響について検討を行ったものである。また、注入材の注入性能確認試験についても同時に記述した。

## 2. 実験の概要

### 2.1 実験に用いた材料

#### (1) 既設コンクリート

前半の一般条件試験では建築構造物を、また後半の湿潤面試験では土木地下構造物を対象としているので、既設コンクリートは、多少異なっている。ただし、比較しやすいように、割裂引張強度はほぼ同一とした。それぞれの配合を表 1 に示す。

前半の一般条件試験に用いた既設コンクリートは、ス

ランプが 18 cm、空気量が 4.5%、材齢 28 日の割裂引張強度は 3.54N/mm<sup>2</sup>であった。また、粗骨材には最大寸法が 25 mm の由仁産の砂利を、細骨材には富川産と幌延産の砂を、混和剤としては AE 減水剤（標準形 I 種）を使用した。

後半の湿潤面試験に用いた既設コンクリートは、スランプが 12 cm、空気量が 4.5%、材齢 28 日の割裂引張強度は 3.34N/mm<sup>2</sup>であった。また、粗骨材には最大寸法が 25 mm の由仁産の砂利を、細骨材には由仁産と幌延産の砂を、混和剤には AE 減水剤（標準形 I 種）を使用した。

表 1 既設コンクリートの配合  
(一般条件接着強度試験用)

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	混和剤
42.0	41.0	167	398	721	1024	3.980

(湿潤面における接着強度試験用)

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	混和剤
48.8	40.3	152	311	746	1099	0.622

#### (2) 使用注入材の基本性状

本研究には、市販されている3種類のエポキシ樹脂注入材を使用した。以後、それぞれを注入材 A、注入材 B および注入材 C と呼ぶことにする。各注入材の基本性状を表 2 に示す。

\*1 (株)砂子組 建築課 (正会員)

\*2 北海道大学 大学院工学研究科教授 北方圏環境政策工学専攻 工博 (正会員)

\*3 北海道大学 大学院工学研究科 北方圏環境政策工学専攻

表 2 使用注入材の基本性状  
(注入材 A)

項目	主剤	硬化剤
主成分	エポキシ樹脂	脂環式ポリアミン
外観	淡黄色透明液	淡黄色透明液
混合比	主剤：硬化剤 = 3 : 1 (質量比)	
混合粘度	100 ± 50mPa・s (20 )	
可使時間	45 ± 10 分 (20 、 500g)	

(注入材 B)

項目	主剤	硬化剤
主成分	エポキシ樹脂	変性脂環式ポリアミン 変性脂肪族ポリアミン ポリチオール
外観	無色透明液	淡褐色透明液
混合比	主剤：硬化剤 = 2 : 1 (質量比)	
混合粘度	500 ± 200mPa・s (20 )	
可使時間	55 ± 10 分 (15 、 500g)	

(注入材 C)

項目	主剤	硬化剤
主成分	エポキシ樹脂	変性脂肪族アミン
外観	淡黄色透明液	淡褐色透明液
混合比	主剤：硬化剤 = 2 : 1 (質量比)	
混合粘度	470mPa・s (23 ± 0.5 )	
可使時間	約 30 分 (20 、 500g)	

注入材 A は、従来注入の困難であった微細なひび割れへの注入に対応可能な超低粘度形エポキシ樹脂である。注入材 B は、注入材 A と同じ製造元の注入材であり、有機系注入材では従来不向きとされていた湿潤面においても高い接着性を示すとされる低粘度形エポキシ樹脂である。注入材 C は、注入材 B 程ではないが湿潤面においても良好な接着性が期待できる低粘度形エポキシ樹脂である。なお、注入材 A、注入材 B および注入材 C は全て 5 以上の施工環境下での使用が奨励されている。

## 2.2 注入材の注入性評価試験

### (1) 試験目的

表 - 2 の混合粘度の項目から明らかなように、3 種の注入材は混合粘度が異なっており、注入の容易さにも違いがあると推定された。また、コンクリートのひび割れに注入材を用いた場合、注入状態の把握が難しく、実構造物の補修の際には、施工状況等で充填状態が判定されているのが現状である。そこで、本試験では、既往の文

献<sup>3)</sup>で行われた方法を参考に、ガラス板をコンクリートのひび割れに見立てたひび割れモデル(以下、模擬ひび割れと呼ぶ。)を作製し、経過を観察することで各注入材の注入性を把握、比較することを目的とした。

### (2) 使用した注入材

注入材 B と注入材 C の粘度にはほとんど差がないと考えられることから、本試験では注入材 A と注入材 C を使用した。

### (3) 試験方法

長さ 800 mm、幅 500 mm のガラス板を対にし、上部間隔が 1.2 mm のくさび型になるようにスペーサーを挟み、両端部と下部をシールした後、垂直に設置する。これを注入性評価試験用の模擬ひび割れとした(図 1 参照)。

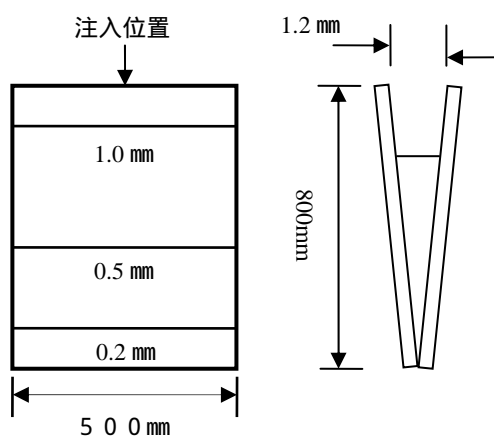


図 1 模擬ひび割れ

間隔が 1.0 mm、0.5 mm、0.2 mm となる位置に印を付けた後、模擬ひび割れ上部中央の注入位置(間隔 1.2 mm)から所定の混合比で主剤と硬化剤を混ぜ合わせた各注入材 20ml を注射器で圧力を加えずに注入した。その後、印を付けた位置への到達時間および状況を測定・観察した。なお、観察しやすいよう、注入材は食紅で着色した。注入材 A の完了時の状況を写真 1 に示す。なお、試験時の環境温度は 20 であった。



写真 1 注入完了時の状況(注入材 A)

## 2.3 一般条件の接着強度試験

### (1) 試験目的

低温環境下における注入材の接着強度に関する研究は少ないのが現状である。また、市販されている多くのエポキシ樹脂注入材の場合、製造元のデータは標準養生で材齢7日の時点での接着強度しか示されていない上に、注入を行ったひび割れの状態が明記されていないという問題点がある。さらに、通常、接着強度としては、JIS A 6024 に準拠して求められるモルタル曲げ接着強さ、もしくは JIS K 6850 に準拠して求められる引張せん断接着強さである場合が多い。しかし、これらの試験では、平滑面に注入・塗布するため、実構造物に発生する不規則なひび割れへ注入する状況を再現しているとは言えず、施工を行った際の正確な接着強度が求められているとは考えにくい。

そこで本試験では、既往の文献<sup>3)</sup>で行われた方法を参考に、割裂引張強度試験(JIS A 1113)から接着強度を算出する方法を用いて、注入材の注入後の材齢、低温環境、およびひび割れ幅がエポキシ樹脂注入材の接着強度に及ぼす影響を把握することを目的とした。

### (2) 使用した注入材

本試験では、注入作業の容易さを考慮して、最も注入性が良いと考えられる注入材 A を使用した。

### (3) 試験条件

試験目的を踏まえて、以下の試験条件を定めた。

- ・注入後の注入材の材齢：3日、7日、28日
- ・養生温度：室温(20℃)、低温(約5℃)
- ・ひび割れ幅：0.2mm、0.5mm、1.0mm
- ・養生条件：湿潤養生

低温養生は、施工現場の低温環境により近づけるため外気を模擬した養生とした。また、湿潤養生は、注入後に供試体を濡れた布で覆い、プラスチック容器の中に静置した。

ひび割れ幅は、既往の文献<sup>2)</sup>に基づいて、注入工法が適当と考えられるひび割れ幅の範囲(0.2~1.0mm)とし、上記の3条件を設定した。

### (4) 試験方法

既設コンクリートには、表1上段の配合で作製した100×150mmの円柱供試体(材齢28日、水中養生)を用いた。この供試体を圧縮試験機で慎重に割裂することにより、自然状態に近いひび割れを作製した。ひび割れ幅0.2mmの試験に使用する供試体は、供試体を完全に割らず、発生したひび割れをクラックスケールで計測し、該当するものを使用した。ひび割れ幅0.5mm、1.0mmのものは、供試体を真二つに割裂した後、四つ角に各ひび割れ幅に応じてスペーサーをかませ、人工的にひび割れ幅を調整した。全ての供試体の側面を止水と固定を兼ねた

布テープで、底面をシール材でそれぞれ被覆した後、上面に注入用プラグを取り付けた。一日後、自動式低圧注入工法で注入材を注入し、各試験条件の下で養生した後、室温環境(20℃)にて、ひびわれが載荷面と一致する位置で供試体を圧縮試験機で再割裂し、破壊荷重から接着強度を算出した。また、本試験では各条件につき5本ずつ、計90本の供試体を作製した。自動低圧注入の模様を写真2に、注入後の割裂試験の状況を写真3にそれぞれ示す。



写真 2 自動低圧注入の模様



写真 3 注入後の割裂試験

## 2.4 湿潤面における接着強度試験

### (1) 試験目的

実構造物のひび割れを補修する場合、ひび割れ面の洗浄や、構造物が湿潤環境に置かれていることによる漏水等によって、ひび割れ部が湿潤状態にあることが考えられる。一般的に、エポキシ樹脂注入材は水との相性が悪く、湿潤面への接着強度が弱いとされているが、近年では湿潤面においても接着性に優れた注入材が開発されている。しかしながら、それらの注入材に関しても接着強度として明記されているのは、モルタル曲げ強さか引張せん断接着強さのどちらか一方、もしくは両方である場合が多い。

このような現状に着目して、本試験は、注入後の注入材の材齢、低温環境、および湿潤面が、湿潤面対応のエポキシ樹脂注入材の接着強度に及ぼす影響を把握することを目的とした。

### (2) 使用した注入材

本試験では、注入材 A と同じ製造元で、なおかつ湿潤

面接着性に優れている注入材 B を使用した。

### (3) 試験条件

試験目的を踏まえた上で、試験条件を以下のように設定した。

- ・注入材の注入後の材齢：3 日，7 日，28 日
- ・養生温度：室温（20 ），低温（約 5 ）」
- ・接着面の状態：湿潤状態，乾燥状態
- ・ひび割れ幅：0.5 mm
- ・養生条件：湿潤養生（湿潤状態）  
                  気中養生（乾燥状態）

### (4) 試験方法

既設コンクリートには、表 1 下段の配合で作製した 100×150 mm の円柱供試体（材齢 28 日，水中養生）を用いた。この供試体を JIS A 1113 の方法に基づきまず割裂した。その後は接着面の状態によって異なった試験方法となる。

乾燥状態に用いる供試体は、割裂後、5 分間電子レンジにかけ、接着面の水分を蒸発させた（写真 4 参照）。その後供試体を重ね合わせ、四つ角にスペーサーをかませ、人工的にひび割れ幅（0.5mm）を作製した。止水と固定を兼ねて側面を布テープで、底面をシール材でそれぞれ被覆した後、上面に注入用プラグを取り付けた。一日後、自動式低圧注入工法で注入材を注入した。なお、本過程では、レンジにかける前後で供試体の重量を測定した結果、変化量は概ね 7gr となった。



写真 4 電子レンジによる供試体の乾燥

湿潤状態に用いる供試体は、割裂後、供試体を重ね合わせ、四つ角にスペーサーをかませて人工的にひび割れ幅を調整した。その後、乾燥状態と同様に、供試体の側面および底面を被覆した後、上面に注入用プラグと水抜き用プラグを取り付けた。一日後、注入用プラグから注射器を用いて水を注入した（写真 5 参照）。さらに一日置いた後、水抜き用プラグから水を抜き、注入用プラグから自動式低圧注入工法で注入材を注入した。また、本過程では、先行注入の前後で重量を測定し、供試体内部の水分量の変化を記録した。

その後は、全ての供試体を各試験条件の下で養生した

後、室温環境（20 ）」にて、再び圧縮試験機で割裂し、破壊荷重から接着強度を算出した。なお、本試験では各条件につき 5 本ずつ、計 60 本の供試体を作製した。



写真 5 水の先行注入

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 注入材の注入性評価

注入材 A および注入材 C の模擬ひび割れ幅までの到達時間を表 3 に示す。

表 - 3 各注入剤の模擬ひび割れ幅への到達時間

	注入材 A	注入材 C
1.0 mm 地点	15 秒	2 分 00 秒
0.5 mm 地点	2 分 10 秒	10 分 00 秒
0.2 mm 地点	6 分 40 秒	32 分 40 秒
最下点	約 30 分	

当初の予想通り、両注入材の到達時間は大きく異なることが分かった。注入材 A は、注入後 6 分 40 秒で間隔 0.2 mm の位置まで到達したのに対して、注入材 C は 32 分 40 秒もの時間を要した。さらに間隔 0.2 mm 地点を通過後も観察を続けた結果、注入材 A は約 30 分で最下点まで達したのに対し、注入材 C は間隔 0.2 mm 付近で硬化してしまい、最下点まで落下することはなかった。

以上のことから、超低粘度形エポキシ樹脂（注入材 A）は注入性能に優れており、0.2mm 以下のひび割れに対しても注入できることが推定された。

ちなみに、本研究の範囲では、注入材 C の間隔 0.2 mm、0.5 mm および 1.0 mm の経過時間は注入材 A の各間隔の経過時間のそれぞれ 8 倍、約 5 倍、約 5 倍であり、間隔 0.5 mm と間隔 0.2 mm に関しては、各注入材の混合粘度の比率（注入材 C の混合粘度値 ÷ 注入材 A の混合粘度値 = 約 4.7）とほぼ一致することが分かった。

### 3.2 一般条件試験における接着強度

注入材 A の既設コンクリートとの接着強度と、注入後の注入材の材齢、養生温度およびひび割れ幅の関係を



図 1 に示す。接着強度は割裂試験の破壊荷重から算定した。また、各試験条件における接着強度の値は、3本の供試体の平均値とした。

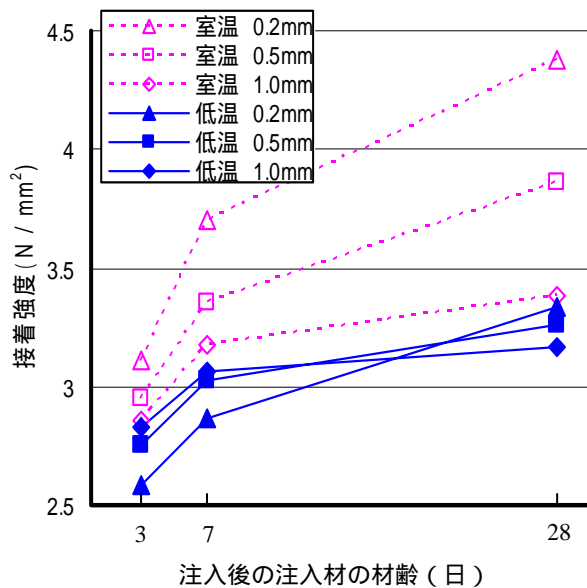


図 1 既設コンクリートとの接着強度試験

(1) 接着強度に及ぼす材齢の影響

全てのひび割れ幅および養生温度において、注入材の材齢の増加に伴い、接着強度は増大した。この接着強度の増加は注入材が若材齢であるほど、増加割合が大きく、エポキシ樹脂注入材の一般的な硬化特性の傾向と一致することが明らかになった。

材齢 7 日から材齢 28 日の間における強度増加率 (材齢 28 日接着強度 ÷ 材齢 7 日接着強度) を各養生温度で比較すると、ひび割れ幅が小さいほど強度増加率が大きかった。また、ひび割れ幅が同じ場合には、室温養生は低温養生よりも強度増加率が大きいことが分かった。破壊状況はほとんど界面剥離に因るものであった。

(2) 接着強度に及ぼす低温環境の影響

全ての材齢およびひび割れ幅において、低温養生の接着強度は、室温養生ものよりも低い値を示した。これは、寒冷地の低温環境において、エポキシ樹脂注入材の強度発現が小さくなることを意味しており、このような環境条件で使用する場合には注意しなければならない。しかしながら、軟質形エポキシ樹脂の品質<sup>4)</sup>は、標準環境では 3.0 N/mm<sup>2</sup> 以上、低温環境では 1.5 N/mm<sup>2</sup> 以上、湿潤環境では 1.5 N/mm<sup>2</sup> 以上と規定しており、注入材 A および B の接着強度はこの基準を十分満たしている。

(3) 接着強度に及ぼすひび割れ幅の影響

室温養生においては、ひび割れ幅が小さいほど接着強度は大きくなった。この原因は、自動低圧注入工法では、注入量が一定なため、ひび割れ幅が小さい程周辺への浸

透効果によって、空隙面が緻密化され強度が増進したものと考えられる。一方低温養生においては、硬化の初期段階である材齢 7 日まではひび割れ幅が小さいほど接着強度は小さかった。しかし、材齢 28 日においては逆転し、室温養生と同様に、ひび割れ幅が小さいほど接着強度は大きくなった。これは、エポキシ樹脂は主剤と硬化剤の化学反応による硬化発熱をおこすため、初期段階ではひび割れ幅の大きい、即ち注入量が多いほど、注入材自身の発熱の影響を受け、硬化が促進されたことによるものと考えられる。

(4) 補修後の接着強度の回復率

補修後の強度回復率を式(1)のように定義することとし、各条件における注入材 A の強度回復率を表 4 に示す。

$$\text{補修後の強度回復率 (\%)} = \frac{P_1}{P_2} \times 100 \quad (1)$$

ここに、P1：注入後の供試体の接着強度(N/mm<sup>2</sup>)

P2：既設コンクリートの割裂引張強度(N/mm<sup>2</sup>)

表 4 から注入材 A の同材齢における回復率は、養生温度およびひび割れ幅によって違いはあるものの、材齢 28 日時点では、低温環境でも 90%以上の回復率を示しており、十分な強度が発現していると言える。これは、エポキシ樹脂が割裂面のひび割れ周辺に浸透して接着強度を増加させているためである。

表 4 注入材 A の接着強度回復率 (%)

		3日	7日	28日
室温	0.2mm	88	104	123
	0.5mm	84	94	108
	1.0mm	81	90	99
		3日	7日	28日
低温	0.2mm	73	81	95
	0.5mm	78	85	92
	1.0mm	80	92	92

3.3 湿潤面試験における接着強度

注入材 B を用いた場合の、既設コンクリートとの接着強度に及ぼす注入後の注入材の材齢、養生温度および接着面状態の影響を図 2 に示す。

(1) 接着強度に及ぼす材齢の影響

養生温度および接着面の状態にかかわらず、注入材の材齢の増加に伴い、接着強度は増加した。

各材齢間における接着強度を比較すると、乾燥状態、湿潤状態ともに室温養生下では材齢と共に増加する傾向にある。しかし、低温養生の場合、接着強度は乾燥状

態において材齢と共に増加する傾向にあるが、湿潤状態においては材齢7日以降に強度が増加しないという結果が得られた。破壊状況は、一般条件の接着強度試験と同様に、ほとんど界面剥離を起こした。

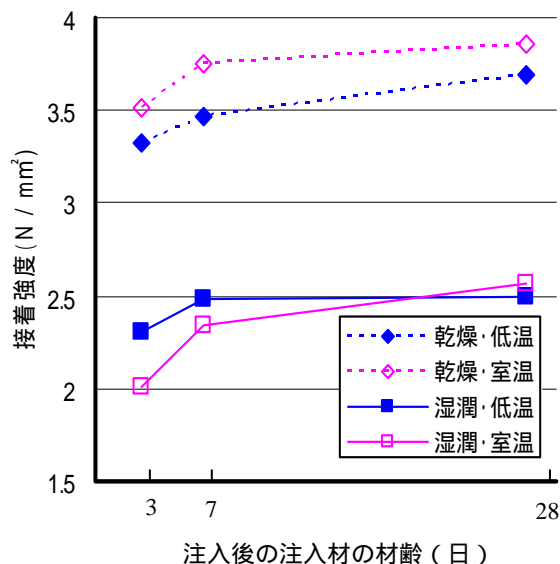


図 2 湿潤面における既設コンクリートとの接着強度試験

(2) 接着強度に及ぼす低温環境の影響

乾燥状態においては、全ての材齢において室温養生の接着強度が低温養生の接着強度を上回った。しかし、湿潤状態においては、材齢7日までは低温養生の接着強度が室温養生の接着強度を上回り、その後材齢28日になると室温養生の接着強度が低温養生の接着強度を上回るという実験結果が得られた。この原因は、供試体内部の残留水が初期材齢の接着強度に何らかの影響を与えたものと推測される。

(3) 接着強度に及ぼす接着面状態の影響

全ての材齢および養生温度において、乾燥状態の接着強度は湿潤状態の接着強度を上回った。また、同じ養生温度で見ると、乾燥状態、湿潤状態ともに最も強度差が小さい材齢は28日であった。ちなみに、材齢28日における乾燥状態の接着強度の平均値は約 3.78N/mm<sup>2</sup>、湿潤状態においては約 2.54N/mm<sup>2</sup>であり、乾燥状態と湿潤状態の間では 1.24 N/mm<sup>2</sup>の差があることが分かった。

また、いずれの接着強度も有機系被覆材システムの性能基準を十分満足していることが明らかになった。

(4) 補修後の接着強度の回復率

注入材 B の接着強度回復率を表 5 に示す。表 5 から、注入材 B の回復率は環境温度にはほとんど影響を受けられないものの、接着面の状態によって回復率に大きな差が生じることが分かった。注入材 B は湿潤面接着性に優れるとはいえ、乾燥状態と比較すると低い接着強度およ

び回復率を示すことが分かった。

表 5 注入材 B の接着強度回復率 (%)

		3日	7日	28日
乾燥	低温	106	116	110
	室温	111	116	117
		3日	7日	28日
湿潤	低温	65	67	71
	室温	60	70	72

4. まとめ

- 1) 模擬ひび割れを用いた注入性評価試験から、0.2mm までの模擬ひび割れ幅に対してエポキシ樹脂注入材は十分な注入性能を有することが明らかになった。とくに、超低粘度形エポキシ樹脂（注入材 A）は注入性能に優れており、0.2mm 以下のひび割れ幅に対しても注入できることが示唆された。
- 2) エポキシ樹脂注入材と既設コンクリートの接着強度に及ぼす注入材の材齢、ひび割れ幅、寒冷地の低温環境および接着面の湿潤状態の影響を検討した。その結果、注入材の材齢の増加に伴い接着強度は増大すること、セメント系ひび割れ注入材<sup>5)</sup>とは異なりエポキシ樹脂注入材はひび割れ幅の影響を受けひび割れ幅が小さいほど接着強度は高いこと、低温環境における接着強度は室温環境と比べて低い値を示すこと、乾燥状態と比較して湿潤状態の接着強度は低いことを明らかにした。
- 3) 寒冷地の低温環境<sup>(5)</sup>および接着面が湿潤状態の接着強度は低いという実験結果であったが、有機系被覆材システムの性能レベルは、一般環境では標準形で 1.0 N/mm<sup>2</sup>、没水環境では 1.5 N/mm<sup>2</sup>と定められており、本研究で得られた接着強度はこの基準を十分満たしている。

参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針，pp.85，2003
- 2) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術，pp.244-245，2007
- 3) 飯坂武男，鷲見高典，梅原秀哲：無機系補修材料の注入性に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.599，40，pp.49-57，1998.8
- 4) 建築補修用注入エポキシ樹脂 JIS A 6024:1988
- 5) 藤本拓也，大沼博志，黒島美男：寒冷地環境におけるセメント系ひび割れ注入材の強度特性、コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.565-570，2007.7