

論文

[1220] 無機系ひびわれ注入材料の基礎的研究

正会員○加藤利美（矢作建設工業土木本部）

正会員 飯坂武男（名城大学理工学部）

正会員 梅原秀哲（名古屋工業大学工学部）

正会員 吉田弥智（名古屋工業大学工学部）

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化を考える場合、ひびわれ自体が欠陥となったり、ひびわれが二次的に欠陥を招くなど、その劣化要因のほとんどは、ひびわれを伴うものである。したがって、コンクリート構造物の補修の多くの場合において、ひびわれ注入やひびわれ充填が主要且つ重要な行為である。このように、コンクリート構造物の補修の中で大きなウエイトを占めるひびわれ補修の材料はエポキシ樹脂に代表されるような有機系液状高分子材料の応用により著しく進歩し、その方面の研究も多くなされ、施工実績も豊富である。しかし、有機系液状高分子材料では、その接着性能や注入性能が優れている反面、材料の取扱い易さや湿潤面での接着性能及び長期耐久性において問題があると言われている¹⁾。一方近年では、セメント材料の微粉加工技術が進歩し、超微粒子セメントが開発され、これらが補修用ひびわれ注入材料としても用いられるようになった。超微粒子セメント系ひびわれ注入材料（以下、本文では無機系注入材料と総称する。）は、その注入性において有機系液状高分子材料に匹敵し、その取扱い易さや価格の安さにおいては、むしろ優れていると言われている。しかし、その接着性能、強度、耐久性などの諸性能は、研究や施工の実績が少なく、十分に解明されているとは言えない。

従来から行われているひびわれ補修工法では、有機系材料（樹脂系材料）と無機系材料（セメント系材料）が使用されているが、概ね次のような使い分けがなされている。有機系材料は、主に微細ひびわれへの注入や構造補強を伴うひびわれ注入に用いられている。それは、有機系材料の注入性能の良さや接着性能の良さによるものである。また、一般にその価格が高く多量に使用できないことや、粘度が小さいことによるダレ現象があることなどの理由で大きなひびわれにはあまり用いられないようである。無機系材料は、主に幅の広いひびわれへの注入や隙間への充填に用いられている。それは、有機系材料とは対照的に、その注入性は劣るが、一般に価格が安く大量に使用でき、粘度の制御も容易であるからと言える。

しかし、以上に述べたように、ひびわれ注入材料が施工性や経済性だけによる理由で選定されてきたことによって、被着部材の状態や構造物の環境に適切に対応できない場合、次のような問題点も指摘されている。エポキシ樹脂のような有機系材料では、強度は大きい、熱膨張係数がコンクリートに比べ大きく、温度変化をうける箇所での付着性能に問題がある²⁾。また、接着界面が湿潤状態の場合には、接着界面における正常な化学的結合が阻害されるため、十分な接着強度が期待できない³⁾。このような状況のもと、無機系のひびわれ注入材料においても優れた注入性能が得られつつある今日、材料の選択に対し、より慎重な判断が求められている。

本研究では、現在補修用注入材料として使用されている有機系液状高分子材料と無機系ひびわれ注入材料を用いて、コンクリートのひびわれモデルの補修実験を行い、その補修効果を比較するとともに、これらの実験結果により無機系ひびわれ注入材料の特徴や実用上の問題点を明らか

にし、今後の利用に向けての改善点の検討を行うことを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 実験の目的

この実験は、前項において現状の問題点の要因として述べた、①補修時の接着界面の状態、②補修後の温度環境の2つに着目し、各材料の補修効果が、これらの要因の違いによりどの程度の影響を受けるかを明らかにするために行った。

2. 2 供試体

実験に用いた供試体の寸法・形状は図-1の通りである。母材コンクリートには、道路用コンクリート地先ブロックA種(12cm×12cm×60cm, JIS A 5307)を用いた。このコンクリートブロックの配合表及び強度試験結果を表-1、表-2に示す。実験に用いた製品は材令が3ヶ月以上に達しており、強度は安定していると思われる。

供試体の大きさが、実構造物に比べてかなり小さく、実験結果のばらつきへの影響が懸念されるが、母材の均一性と試験装置による形状・寸法の制約を考慮して本製品を用いることとした。

このブロックの中央下半断面に、図-1に示すようにコンクリートカッターで切り込みを施し、ひびわれモデルとした。切り込みの幅は約3mmである。3mmというひびわれ幅は、一般に考えられるひびわれとしてはかなり大きな幅であり、ここで対象とするひびわれ注入材料の適用範囲を越えるものかもしれない。しかし、均一な微細ひびわれのモデルを作成することは困難であるので、あえてこの方法を用いた。

補修用注入材料として用いた材料は無機系注入材料1種類、エポキシ系注入材料2種類の合計3種類である。各注入材料の主要諸元は表-3に示す通りである。本実験に用いた無機系注入材料は、超微粒子高炉スラグを主成分としたものである。超微粒子高炉スラグが使用される理由は、粒径が小さいことと水和反応速度が遅く低粘度が長時間維持できることにより良い注入性が得られる為である。湿潤接着用エポキシは汎用液状エポキシ樹脂に

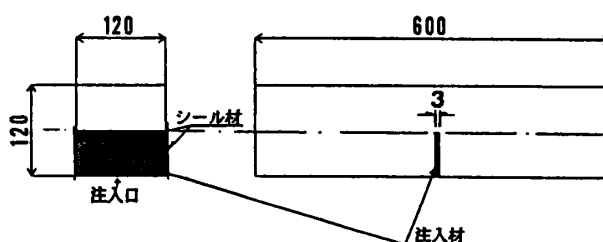


図-1 実験供試体寸法・形状

表-1 供試体ブロック配合表

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランパ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)
25	10.0 ± 2.5	—	47.0	38.0
単 位 量 (kg/m³)				
水 W	セメント C	細骨材 s	粗骨材 G	混和剤
170	362	696	1152	3.620

表-2 供試体ブロック曲げ強度

供試体 N0.	供試体重量 (kg)	破壊荷重 (kg)	曲げ強度 (kgf/cm²)
1	20.14	1240	34.72
2	20.17	1200	33.60
3	20.18	1300	36.40
平均	20.16	1247	34.92

表-3 注入材料主要諸元

材料名	項目	材料種別	使用配合 (重量比)	使用粘度 (dpas, 20°C)
無機系注入材料		超微粒子高炉スラグセメント	セメント 100 水 80 収縮低減剤 2	36
湿潤接着用 エポキシ注入材料		熱硬化性樹脂	主剤 100 硬化剤 40 希釈剤 15	75
一般用 エポキシ注入材料		熱硬化性樹脂	主剤 100 硬化剤 50	17

湿潤硬化性の変性脂肪族ポリアミンを硬化剤として混合したものである。希釈剤は硬化樹脂の物性をあまり低下させることのない反応性希釈剤で、脱泡効果と粘度調整を目的とし仕様に基づき混合した。一般用エポキシは同じく変性脂肪族ポリアミンを硬化剤としているが、希釈剤を用いることなく非常に低粘度を示し、湿潤硬化性はあまりない。各材料の配合は、メーカーの仕様に基づくものである。また、使用粘度の値は実測結果によるものである。

測定には単一円筒回転粘度計を使用した。各材料ともかなりの低粘度を示しており、微細なひびわれにも十分対応できる粘度と言えよう。

作成した供試体の種類は表-4に示す通りである。実験要因には、先に述べたように、注入材料の補修効果に大きな影響を与えると思われる被着体の接着条件と補修後の温度条件の2つを選んだ。

各要因の水準とその詳細は、表-5に示す通りである。被着体の接着条件において、乾燥状態と湿潤状態とでは含水率の差は0.6%程度であるが、使用したコンクリートブロックは水密性が高いことが予想されるので、表層部分だけが湿潤状態になったと思われる。また、養生条件の50℃気中という水準は、夏季におけるコンクリートの表面温度が最高50℃程度まで上昇することを想定し設定したものである。

尚、供試体の作成段階においては、ひびわれ内面の汚れによる付着強度の低下を無くする為、ひびわれ内面の前処理として、コンクリートカッターによる切り込み直後に水洗いを行った。さらに湿潤接着条件の供試体においては、水槽内で付着した浮遊物を取り除く為に、注入直前にも水洗いを行った。

以上のように、供試体の種類として、2つの要因を組合せ、各材料毎に4つのシリーズを設定した。供試体の本数は、1シリーズ毎に各材令当た

表-4 供試体の種類

使用補修剤	接着条件	養生条件	供試体材令	シリーズ
無機系注入材 (高炉スラグ微粉末) 水比80% 2%収縮低減剤配合	乾燥	標準 (20℃気中)	3日, 7日, 28日 (各3本)	1
		高温 (50℃気中)	"	2
	湿潤	標準	"	3
		高温	"	4
湿潤用エポキシ樹脂 注入材	乾燥	標準	"	1
		高温	"	2
	湿潤	標準	"	3
		高温	"	4
一般用エポキシ樹脂 注入材	乾燥	標準	"	1
		高温	"	2
	湿潤	標準	"	3
		高温	"	4

表-5 要因の水準と詳細

要因	水準	詳細
接着条件	乾燥接着	供試体製作後屋外にて放置された状態。
	湿潤接着	ひびわれ補修材注入前、1日水槽に漬けた状態。
養生条件	恒温養生 (20℃気中)	注入後20℃恒温室にて養生。
	高温養生 (50℃気中)	注入後1日20℃恒温室にて養生し、ビニール袋にてくるみ50℃温水に浸す。

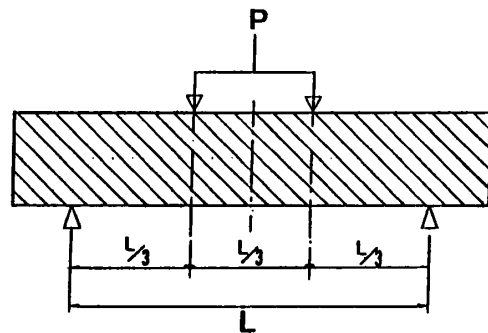


図-2 曲げ破壊試験

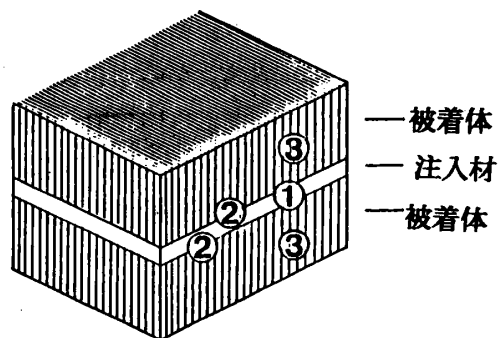


図-3 破壊のパターン

り3本ずつ計9本で、3つの注入材料分を合わせて合計108本である。

2. 3 測定項目

各供試体が補修材令3日、7日、28日に達した時点で、図-2に示すようにJIS A 1106に準じて曲げ試験を行い、補修後の曲げ破壊荷重を測定した。曲げ試験により補修効果の比較を行った理由は、曲げ部材のみを対象としたのではなく、補修材料の「接着性能」を評価する1つの方法と考えたからである。

3. 実験結果と考察

3. 1 破壊のパターン

供試体の破壊のパターンには、その破壊箇所(図-3)の違いにより次の3パターンがあると言われている³⁾。

①凝集破壊

図中の①において破壊が起こる場合で、注入材自体が破壊する。

②界面破壊

図中の②において破壊が起こる場合で、注入材と被着体の接着界面が剥がれて破壊する。

③被着体破壊

図中の③において破壊が起こる場合で注入材料の凝集力および接着力が母材の曲げ強度を上回り、母材が破壊する。

3. 2 曲げ破壊試験

ここでは、補修効果の比較を「曲げ強度」ではなく「曲げ破壊荷重」により行うことにした。それは、実験供試体が母材と補修材との複合体であること、さらに破壊パターンが一律でないことにより、弾性理論の適用が難しいからである。

各シリーズ毎の補修材令と曲げ破壊荷重の関係を図-4～7に示す。図中にプロットされている各点は3本の供試体の平均値を示している。また、上下に示した破線はそれぞれ、ひびわれの無い健全な供試体と無補修の供試体の平均曲げ破壊荷重を表している。

材料別に破壊のパターンを見ると、無機系注入材料では、すべての破壊が凝集破壊(図中○印)であった。また、湿潤用エポキシ樹脂及び一般用エポキシ樹脂注入材料においては、凝集破壊は見られず、界面破壊(図中△、□印)または被着体破壊(図中▲、■印)であった。

無機系注入材料では、条件の違いによる曲げ破壊荷重の差は、それほど認められず全体に低い値であった。しかし、その中でシリーズ2(乾燥-高温)が比較的大きな値を示した。補修材令7日において、各シリーズともほぼ同程度の破壊荷重を示すが、それ以後シリーズ2のみ破壊荷重が増進し、他のシリーズでは破壊荷重が低下している。特にシリーズ3(湿潤-標準)においては、補修材令28日の破壊荷重が無補修の場合と同程度まで低下した。補修材令7日以後の破壊荷重の低下は、高炉スラグの水和反応が遅いことに起因すると考えられる。事前に行った注入材料単体の曲げ試験では、水中標準養生下において強度は順調に増進しており、ここでの荷重低下は水和が十分に進行しない内に乾燥によって反応水が失われ、強度の増進が止まったことによると言える。また、破断面を観察した結果、すべてのシリーズで注入材内部に空隙が見られた。この空隙は溝状の細長いもので、硬化初期のブリージングによる空隙であると考えられ、このような空隙は補修箇所の強度低下と共に水密性の低下の原因にもなりうる。シリーズ2(乾燥-高温)の場合は唯一破壊荷重の低下が見られなかったが、その理由として注入中における接着界面からの吸水作用が余剰水の減少に寄与し、その結果相対的に密実な硬化体を形成したこと、また、

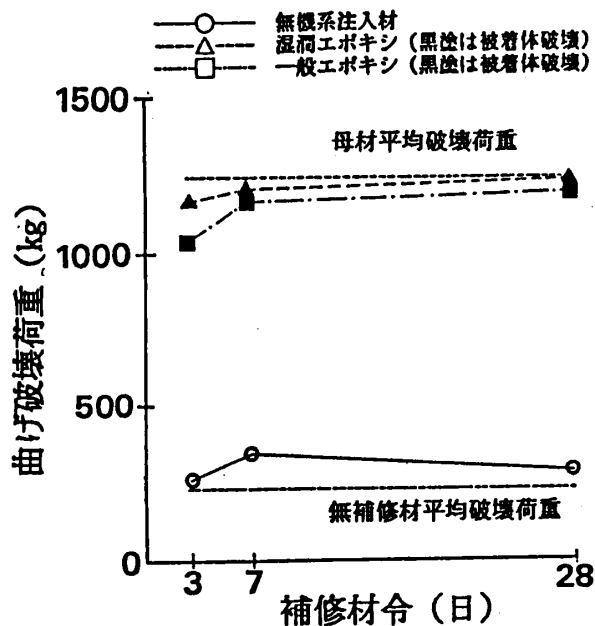


図-4 材令～曲げ破壊荷重(シリーズ 1)

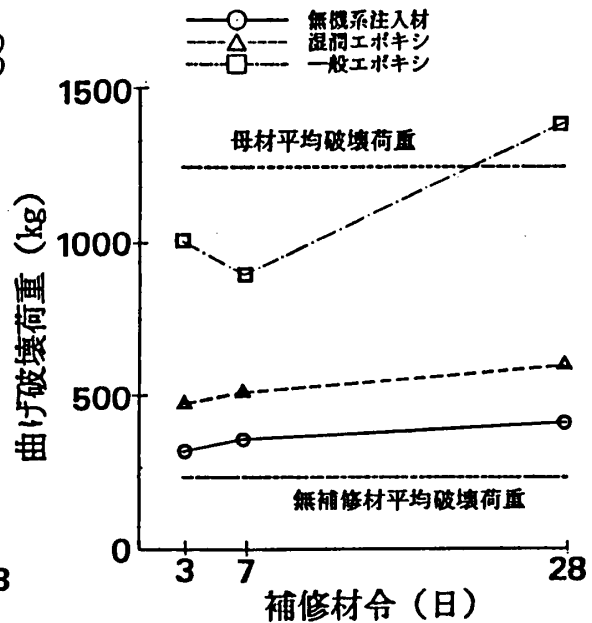


図-5 材令～曲げ破壊荷重(シリーズ 2)

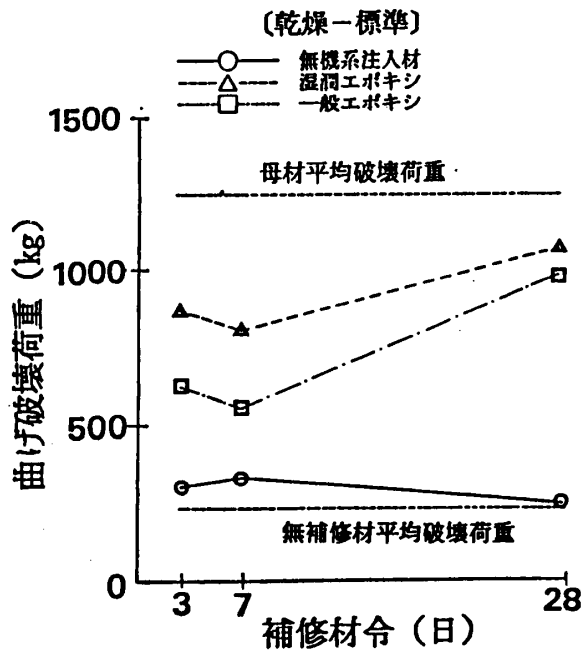


図-6 材令～曲げ破壊荷重(シリーズ 3)

(湿潤-標準)

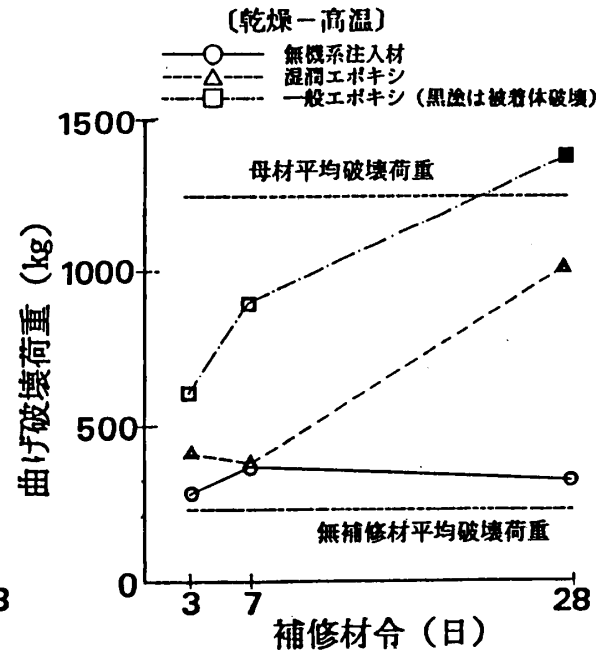


図-7 材令～曲げ破壊荷重(シリーズ 4)

(湿潤-高温)

適度の高温養生が水和反応を促進し、乾燥状態に至る前にある程度の凝集結合がなされたことなどが考えられる。さらに無機系注入材料では、界面破壊が生じなかったことも大きな特徴である。破壊荷重が凝集破壊によって支配されたことは、界面接着力が少なくとも注入材料の凝集力を上回ることを示している。また、その程度を確認した結果、軽微な打撃や研磨に対し十分に抵抗し得ることが認められた。これらの理由としては、接着界面では母材コンクリートからアルカリ分が供給され、高炉スラグの水和反応が促進されたことが考えられる。

一方、湿潤接着用エポキシ樹脂では、無機系注入材料と異なり、条件の違いが破壊荷重に大きく影響している。最も良い接着性を示す条件はシリーズ1（乾燥-標準）である。温度条件で比較した場合、標準養生の方が接着が良いと言える。特に乾燥接着では、標準養生の供試体がすべ

ての補修材令において被着体破壊を生じているのに対し、高温養生ではすべて界面破壊を生じている。この現象は、少なくとも材令初期においては、外部の温度環境が強度の発現に大きな影響を与える場合があることを表している。ただし、材令28日までしか実験を行っていないので、高温養生を継続した場合の強度の増加の程度を調べるには長期材令での試験を行う必要がある。接着条件に関しては、補修材令7日程度までの初期に限り、水分の介入により強度の発現が遅れる傾向が現れていると言えよう。

一般用エポキシ樹脂においても、条件の違いによる影響が現れている。接着条件に関しては、湿潤用同様に補修材令7日程度までの初期に限り、水分の介入により強度の発現が遅れる傾向が現れていると言えよう。しかし、それ以後の強度の発現には乾燥接着と湿潤接着とにおいてほとんど差は無い。一般にエポキシ樹脂は水分の介入により接着能力が発揮されないと言われているが、その傾向は接着初期に見られるのみで、材令7日以後では強度が増進している。このことはエポキシ樹脂の接着性能の低下が、水分の介入よりも水分の浸入とともにもたらされる埃やコンクリート表面のレイタンス等の影響に起因している可能性が高いことを示していると言えよう。

湿潤接着用及び一般用エポキシ樹脂のいずれにおいても、大半の供試体で界面破壊が生じた。その接着性において優れた性能を有するエポキシ樹脂において、少なくとも材令初期に良質なコンクリートの引張強度を上回することは数少ないと考えられる。このことにより、環境条件の複雑な実構造物の補修現場においては、エポキシ樹脂注入による補修効果の発揮がかなり難しい状況であることが予想される。したがって、十分な前処理のできないひびわれへの注入を行う場合には、ある程度の界面接着性が期待できる無機系注入材料の使用の可能性も十分に考えられる。

4. 結論

3種類のひびわれ注入材料による補修実験により得られた結論は以下の通りである。

- (1) 無機系注入材料は水比が大きい配合で用いられる為、フリージングが原因と思われる空隙が硬化体内部に形成され、その空隙により強度低下が生じること、また、乾燥により反応水が失われ、材令7日程度で強度の増進が止まる場合があることが明らかになった。
- (2) 無機系注入材料の破壊はすべて注入材内部で生じ、その界面接着力は、その材料自身の凝集力を上回ることが判明した。一方エポキシ系注入材料では多くの破壊が接着界面で生じ、その強度が母材コンクリートの曲げ強度をかなり下回る場合もあることが明らかになった。
- (3) 初期材令における高温環境は一部のエポキシ樹脂の強度の発現を阻害するが、直ちにそれが材料の劣化をもたらすものではないことが明らかになった。また、無機系注入材料では初期材令における高温環境は、強度の発現を促進し、悪影響を及ぼすことはほとんど無いと認められた。
- (4) エポキシ樹脂注入材料では被着体が湿潤状態の場合、7日程度までの材令初期に限り接着強度の発現が遅れる傾向にあるが、無機系注入材料は被着体の接着条件の影響をあまり受けないことが明らかになった。

今回の実験で確認できなかった長期材令における注入材料の耐久性は、今後野外暴露試験等を行うことによって検討していきたい。

- 1) 鶴田 康彦；「材料 ―合成樹脂を中心に―」，コンクリート工学，Vol. 14 No. 12, 1976 PP. 65-69
- 2) 片脇 清士；「道路橋における補修」，コンクリート工学，Vol. 25 No. 11, 1987, PP. 90-96
- 3) 井本 稔，黄 慶雲；「接着とはどういうことか」，岩波書店，1980