

論文

[1056] 無機系ひびわれ注入材料による梁の補修効果

正会員○加藤利美 (矢作建設工業土木本部)

菊地憲司 (名古屋工業大学大学院)

正会員 梅原秀哲 (名古屋工業大学社会開発工学科)

正会員 吉田彌智 (名古屋工業大学)

1. はじめに

コンクリート構造物に発生したひびわれを注入工法で補修する場合、その使用材料にはエポキシ樹脂に代表される有機系注入材料と、超微粒子高炉スラグセメントスラリーに代表される無機系注入材料とがある。有機系注入材料として従来から最も多く用いられてきているエポキシ樹脂においては、その注入性能や接着性能は、施工実績および研究実績などから十分信頼できると考えられる。しかし、施工時のコンクリート表面の状態や現場の温度条件の違いによる補修効果のばらつきが生じることも事実であり、コストが高いという状況も考慮すると必ずしも最適な材料とは言えない。一方、無機系ひびわれ注入材料の1つである超微粒子高炉スラグセメントスラリーにおいては、施工条件の違いによる補修効果の違いはそれほど認められないものの、その補修効果はエポキシ樹脂に比べてかなり小さい。その要因の1つとして、無機系ひびわれ注入材料では樹脂並みの注入性を得るために水セメント比を大きく設定していることが挙げられている [1]。これらの事から、無機系ひびわれ注入材料の使用に当たっては、ある程度の制約を考えなければならぬのが現実と言えるが、コストの安さや施工条件の広範囲さを生かした利用の拡大を図ることも必要であると思われる。

本研究では、無機系ひびわれ注入材料による補修効果を向上させるために、注入特性を極力損なわない範囲で水セメント比の低減を主とした配合の改善を試みた。そしてひびわれモデルを用いた注入実験および鉄筋コンクリート梁の補修実験から、無機系ひびわれ注入材料の注入特性とコンクリート梁に対する補修効果を明らかにし、併せてエポキシ樹脂との比較も行った。

2. 注入材料の流動性改善

2.1 試験の目的

無機系ひびわれ注入材料の注入特性を損なわずに水セメント比を低減させるためには、その配合において何らかの工夫が必要である。本試験においては、流動化剤の添加による水セメント比の改善を試み、従来配合のスラリーと同程度の流動性を得ることが可能かどうかを明らかにすることを目的とした。

2.2 試験概要

試験に用いた無機系ひびわれ注入材料は、超微粒子高炉スラグセメントを主体とするスラリーである。このセメントの物理・化学的性質は表-1に示すとおりである。この注入材料は、ひびわれ条件による違いはあるが、一般に水セメント比60%以上で用いられており、特に微細なひびわれ注入に対しては水

表-1 無機系ひびわれ注入材料諸元

平均粒径 (μm)	比重	主要化学成分 (%)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	So ₂
2.8	2.97	28.9	12.4	48.1	5.0	2.3

セメント比80%程度で用いられる場合が多い。そこで、本試験においては、水セメント比の低減目標を50%に設定し、流動性の改善を試みた。

まず、表-2に示すような配合の各スラリーの流動性をJAロートの流下時間で評価した。流下時間の測定は、実際の可使時間についても把握するという観点に立ち、スラリー練り混ぜ直後、10分後、20分後、30分後、60分後の5回とした。次に各配合のスラリーの強度特性について評価した。強度特性の評価は、セメントの物理試験法(JIS R 5201)に準じ、圧縮強度試験、曲げ強度試験により行った。

2. 3 試験結果と考察

表-3に各配合におけるJAロートの流下時間の経時変化を示す。この表から、JAロートでの流下時間に関しては、水セメント比80%のプレーン配合の場合が最も良い流動性を示している。水セメント比50%の配合においては、流動化剤を添加しないプレーン配合の場合、練り混ぜ後10分程度で計測不能となり、ひびわれ注入材料としての流動性が維持できなくなるのが明らかとなった。

一方、流動化剤を添加した配合においては、全体的に練り混ぜ後60分程度までは当初の流動性が維持されており、特に流動化剤0.6%添加の場合が最も良い流動性を示した。この流動性試験より、水セメント比50%の配合でもひびわれ注入材料として十分実用的な流動性を得られることが明らかとなった。また、その流動性が、施工に際し十分な時間維持されることも明らかとなった。

表-4、5は各配合におけるスラリーの強度特性を示したものである。これらの表より水セメント比50%の中で最も良い流動性を示した流動化剤0.6%添加の配合において、圧縮強度で水セメント比80%配合の約1.5倍、曲げ強度で約2倍の強度が得られることがわかる。

以上、流動性試験と強度試験より総合的に判断して、超微粒子高炉スラグセメントにおいて実用的な範囲で流動化剤による水セメント比の低減は可能と言え、その添加量は対セメント重量比で0.6%程度が最も有効であるとの結果を得た。

表-2 流動性試験配合表

使用材料	配合比率(重量比)	
	W/C=50%	W/C=80%
超微粒子高炉スラグセメント	100	100
水	50	80
収縮低減剤	2	2
流動化剤	0.0~1.0	—

表-3 JAロート流下時間 (秒)

測定時間(分)	水セメント比50%・流動化剤混入率(%)						80%プレーン
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	
0	55	21	20	17	19	20	11
10	140	24	25	19	21	21	13
20	—	29	27	19	22	22	15
30	—	30	29	19	22	22	15
60	—	36	33	20	23	23	16

表-4 スラリー圧縮強度 (kgf/cm²)

材令(日)	水セメント比50%・流動化剤混入率(%)						80%プレーン
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	
3	199.6	153.2	211.7	163.4	174.6	156.3	88.0
7	331.2	365.8	323.8	277.7	282.7	310.4	191.4
28	514.6	520.0	562.5	500.6	441.5	477.9	324.4

表-5 スラリー曲げ強度 (kgf/cm²)

材令(日)	水セメント比50%・流動化剤混入率(%)						80%プレーン
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	
3	66.7	56.4	54.1	60.6	52.1	47.8	23.1
7	65.4	74.2	47.1	78.9	60.7	60.7	37.0
28	72.2	88.6	71.9	80.8	80.4	73.2	37.0

3. 注入性試験

3. 1 試験の目的

無機系注入材料において、流動化剤により水セメント比を低減させた場合には、実用的な範囲の流動性が確保できることが明らかとなったが、直ちにそれが微細なひびわれに対する注入性能の評価には結びつかないと思われる。そこで、流動化剤により水セメントを低減させたスラリーの注入性を従来配合のスラリーと比較することを目的として、実際のひびわれを想定したモデルに対する注入試験を行った。

3. 2 試験概要

注入性試験に用いるひびわれモデルの概要は図-1に示すとおりである。ひびわれモデルは幅50cm×100cmのコンクリートパネルにガラス板を重ねたもので、コンクリートパネルとガラス板との間に金属製のスペーサーを挟み、注入側が所定の幅に開くように設定したものである。なお、ガラス板の周囲には、注入材の漏れがないようにシール材を施し、コンクリート板の表面には、注入面積を測定し易いように10cm×10cmのメッシュを表示した。また、注入側には空気穴を設け、空気圧による注入障害が生じないようにした。注入材の注入は、注入口に圧力計を取り付けた専用の手動式ポンプを用いて行った。注入性試験の実験条件等は、表-6に示すとおりである。使用材料は、前項の試験において総合的に最も良いとの結論を得た、水セメント比50%で流動化剤0.6%添加配合のスラリー（以下50%スラリーと呼ぶ）と従来の水セメント比80%プレーン配合のスラリー（以下80%スラリーと呼ぶ）の2種類である。

注入試験で設定したひびわれ幅は、0.3mm、0.5mm、1.0mmの3種類である。注入条件として注入圧力とひびわれ内の前処理状況を設定した。注入圧力については、施工時に採用されている範囲で0.5kgf/cm²、1.0kgf/cm²、1.5kgf/cm²の3種類を設定した。ひびわれ内の前処理状況として、ひびわれ注入前にひびわれ内を予め水洗いして前処理した場合と、前処理しない場合の2種類を設定した。試験では、注入開始直後から5秒毎に注入状況を写真撮影し（写真-1）、その時点における注入

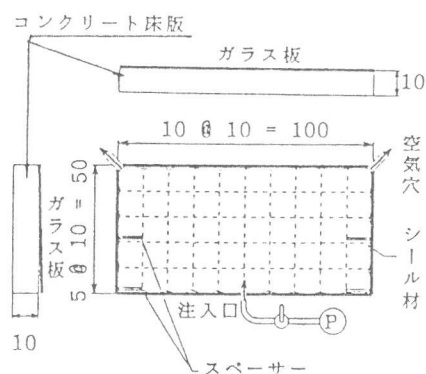


図-1 注入性試験ひびわれモデル

表-6 注入性試験設定条件

設定条件	使用材料	
	超微粒子高炉スラグセメント 80%	50% 流動化剤0.6% 添加
注入幅(mm)	0.3, 0.5, 1.0	
注入圧(kgf/cm ²)	0.5, 1.0, 1.5	
前処理	あり, なし	

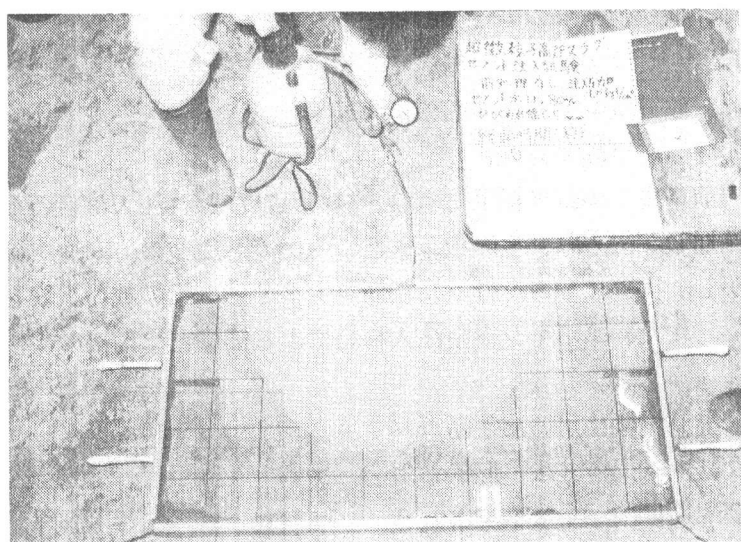


写真-1 注入性試験

試験では、注入開始直後から5秒毎に注入状況を写真撮影し（写真-1）、その時点における注入

面積を写真から算定した。試験は全面に注入が完了するまで継続した。注入性の評価は各配合における注入時の面積速度を比較することによって行った。ここでの面積拡大速度 V_a は次のように定義した。

$$V_a = \frac{\text{注入面積 (5000cm}^2\text{)}}{\text{注入完了に要した時間(sec.)}} \quad (1)$$

3. 3 試験結果と考察

各配合におけるひびわれ幅と注入面積速度との関係を図-2、3に示す。2つの図を比べると全体的な傾向として80%スラリーの方が注入性が良いことがわかる。しかし、ひびわれ幅 0.3mmの結果に着目した場合、注入圧 1.5kgf/cm²の前処理無しの条件以外では、大きな注入性の差異は認められない。また、80%スラリーでは、施工条件やひびわれ幅の違いによる注入性のばらつきが大きい傾向にあるが、50%スラリーではそれほど大きなばらつきは見られない。このことは、50%スラリーにおいては施工条件やひびわれ幅が異なっても比較的安定した注入特性が得られることを示していると言えよう。注入条件について着目した場合、必ずしも注入圧が高い方、あるいはひびわれの前処理を行った方が注入性が良いという結論にはならず、配合によって施工方法を考慮する必要があると思われる。その内の50%スラリーにおいて総合的に良い注入性が得られる施工条件は、試験の範囲内では注入圧 1.5kgf/cm²、前処理ありの場合である。

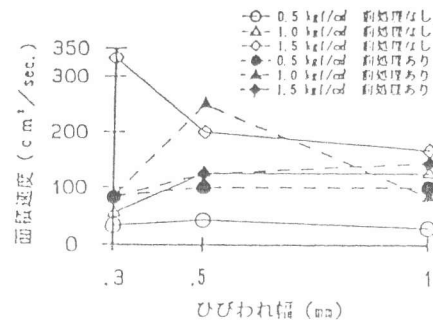


図-2 ひびわれ幅-面積拡大速度関係 (80%スラリー)

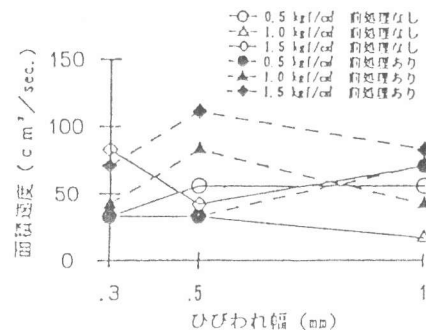


図-3 ひびわれ幅-面積拡大速度関係 (50%スラリー)

4. 鉄筋コンクリート梁の補修効果

4. 1 試験の目的

前章までの試験結果により、無機系ひびわれ注入材料の水セメント比の低減による性能改善の見通しが得られ、その施工条件についても1つの方向性が得られた。そこで、それらの結果を生かし、実際に補修を行った鉄筋コンクリート梁の載荷試験を行い、補修効果を検討することにした。また、エポキシ樹脂注入材料による補修との効果の比較も行うこととした。

4. 2 試験概要

補修実験に用いた鉄筋コンクリート梁の寸法・形状および配筋は図-4に示すとおりである。ここにS1~S5は、予めひびわれ発生が予想される箇所に埋設した鉄筋ひずみ

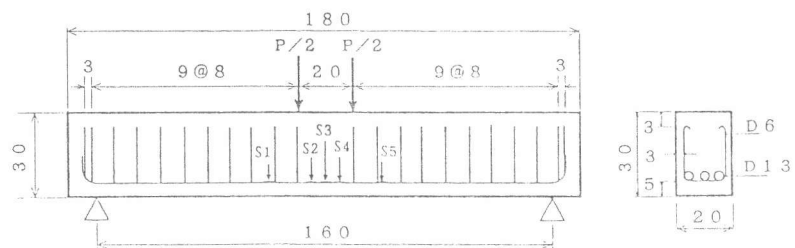


図-4 鉄筋コンクリート梁供試体

ゲージを示している。また、コンクリートの設計基準強度は $f'_{ck}=220\text{kgf/cm}^2$ でその配合は表-7に示すとおりである。作成した供試体は表-8に示すように、各補修材毎に1本ずつ計3本である。使用したひびわれ注入材料は、超微粒子高炉スラグセメント80%スラリー、同50%スラリー、エポキシ樹脂の3種類である。載荷方法は、図-4に示すように2点集中載荷とし、載荷点の間隔を20cmとした。供試体作成後7日にひびわれを導入させるために載荷を行う。この時に載荷を停止する基準は、最大ひびわれ幅が0.3mm以上に達した時とした。ひびわれ導入後直ちにひびわれ注入による補修を行った。補修の対象としたのは、0.3mm以上に達したひびわれとした。ひびわれ補修後は、補修材の養生期間を7日おいて再び載荷試験を行った。載荷試験における測定項目は、ひびわれ導入時および補修後それぞれの載荷荷重と鉄筋ひずみである。

表-7 コンクリート配合表

G _{max} (mm)	S L (cm)	air (%)	w/c (%)	s/a (%)
2.5	10 ± 2.5	1.5	50	40

単位量 Kg/m ³			
W	C	S	G
180	360	709	1105

4. 3 補修効果の確認方法

鉄筋コンクリート梁の補修効果を評価するに際して、ここではひびわれ導入時および補修後の再載荷時におけるひびわれ近傍の鉄筋ひずみの推移に着目した。その理由は、コンクリートにひびわれが発生することにより、梁に発生する曲げ応力の大半が鉄筋に集中し、その部分の鉄筋ひずみが増大すると考えられるからである。

表-8 供試体の種類

供試体 番号	使用鉄筋	使用補修材 (注入方法)	導入ひびわれ幅 (mm)
1	異形鉄筋	水比80%ブレン (手動式ポンプ注入)	0.3
2	異形鉄筋	水比50%流動化剤添加 (手動式ポンプ注入)	0.3
3	異形鉄筋	エポキシ樹脂 (インジェクター注入)	0.3

まず、それぞれの供試体において、ひびわれ導入時の載荷の際に最大ひびわれが発生した箇所の「荷重-鉄筋ひずみ」曲線から勾配変化点を読み取り、その時の載荷荷重を P_1 とする。すなわちこれが、ひびわれ導入時のひびわれ発生荷重である。次に、ひびわれ補修後も同様にしてひびわれ発生荷重 P_2 を求める。これらの結果から、 P_1 および P_2 を用い、梁のひびわれ耐力の回復率を次式のように定義して、補修効果の評価指標とした。

$$\text{ひびわれ耐力の回復率(\%)} = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \quad (2)$$

4. 4 試験結果と考察

80%スラリーによる補修梁では、ひびわれ導入時にS4ゲージ近傍において最も大きなひびわれが発生し、ひびわれ補修後も同じ位置で補修材にひびわれが発生した。図-5は、S4ゲージにおける補修前後のひずみ変化を示したものである。50%スラリーによる補修梁においても、ひびわれ導入時にはS4ゲージ近傍において最も大きなひびわれが見られ、補修後もやはり同様に同じ位置で補修材にひびわれが生じた。そのひずみの変化は図-6に示すとおりである。一方、エポキシ樹脂による補修梁では、ひびわれ導入時にはS2ゲージ近傍でひびわれが発生したが、補修後は補修箇所近傍(1

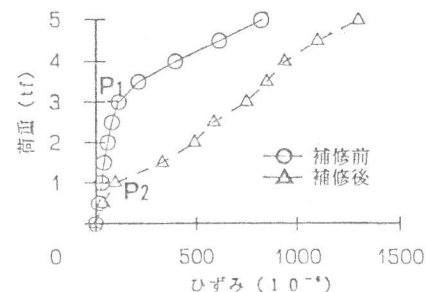


図-5 鉄筋ひずみ-荷重関係 (80%スラリー)

cm程度離れた位置)から新たなひびわれが生じた。ひずみゲージの変化は図-7に示すとおりである。この図では、明確な鉄筋ひずみの勾配変化点は見あたらないが、補修前に比べて補修後のひずみ増加率が大きい傾向にある。これらの結果から、80%スラリーによる補修では、補修によるひびわれ耐力の回復率は33.3%であったが、流動化剤の混入による注入材料の配合改善を行った場合、少なくとも50%程度の回復率まで高められることが明らかとなった。一方、エポキシ樹脂による補修では、補修後の鉄筋ひずみが補修前より大きく生じているという点において、完全にひびわれ耐力が回復されたとは思われない。

本試験から推測する限り、無機系ひびわれ注入材料による補修効果を補修前の強度水準にまで引き上げることは現時点では困難と思われる。しかし、構造補強を目的とするひびわれ補修ではなく、微細なひびわれを充填することにより、気密性や水密性などを向上させ耐久性を維持するための補修を目的とするならば、そのための機能は十分に高められたものとする。

5. 結論

本研究により得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 超微粒子高炉スラグセメント等を主体とした無機系ひびわれ注入材料では、流動化剤を混入することにより、実用的な流動性を損なわずに水セメント比が低減できることが、JAロートを用いた流動性試験より明らかとなった。
- 2) 流動化剤を用いて超微粒子高炉スラグセメントの水セメント比を50%に低減することにより、水セメント比が80%の配合に比べ、注入圧やひびわれ幅が変化しても比較的安定した注入性が得られることが、注入性試験より明らかとなった。
- 3) 超微粒子高炉スラグセメントスラリーを用いてひびわれの生じた鉄筋コンクリート梁を補修することにより、ひびわれ耐力が少なくとも50%程度に回復されることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 加藤利美・飯坂武男・梅原秀哲・吉田彌智：無機系ひびわれ注入材料の基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.12、No.1、pp.1263-1268、1990.6

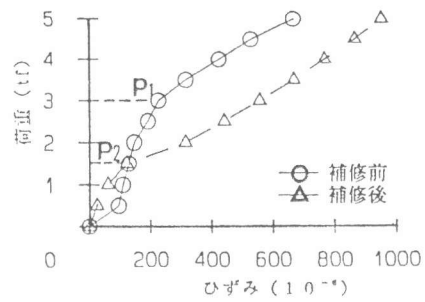


図-6 鉄筋ひずみ-荷重関係 (50%スラリー)

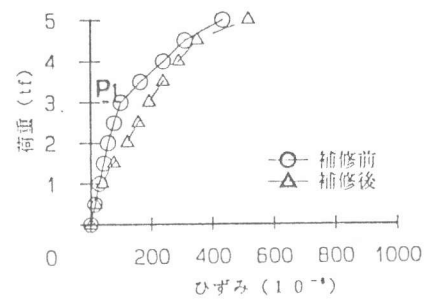


図-7 鉄筋ひずみ-荷重関係 (エポキシ樹脂)

表-9 ひびわれ耐力回復率

供試体 番号	ひびわれ発生荷重	ひびわれ発生荷重	ひびわれ 耐力回復率 (%)
	P1 (tf) 補修前	P2 (tf) 補修後	
1	3.0	1.0	33.3
2	3.0	1.5	50
3	3.0	発生なし	100