

論文

[2147] 鉄筋腐食ひびわれの生じたRC梁の樹脂注入補修効果について

正会員○末岡英二（東洋建設技術研究所）

正会員 佐野清史（東洋建設技術研究所）

1. まえがき

中性化や塩害等によって鉄筋腐食ひびわれを生じたRC部材を補修する場合、補修後の耐久性を確保する上で、劣化したかぶりコンクリートをはつきり取り、劣化鉄筋の防錆処理や健全鉄筋との交換を行うことが必要とされている[1]。そのため、注入工法は構造ひびわれ等の鉄筋腐食を伴わない場合のひびわれ補修に限定されており、腐食進行性のあるひびわれへの適用は、そのみでは補修後の耐久性に問題があるとされている。しかし、この工法は簡易な方法であり、鉄筋腐食をとまなわなひびわれに対しては補修時の耐荷力および剛性の回復は十分に期待でき[2]、既に鉄筋腐食が生じている場合でも、鉄筋防食を期待することは困難であるが[3]、近年その高い防食効果が期待されている電気防食を適用する際の準備工として有効に用いることができると考えられる。

そこで本研究では、鉄筋腐食ひびわれの生じたRC梁への注入工法の適用を試み、基本的な力学特性に注目した各種力学試験の結果から補修効果を検討した。

2. 実験内容

健全、劣化、樹脂注入補修（以下、注入と称す）体のそれぞれについて力学特性を把握するため、静的載荷試験、鉄筋とコンクリートの付着試験、鉄筋の引張試験を行った。実験ケースを表-1に、コンクリートの配合および供試体諸元をそれぞれ表-2、図-1に示す。ここで、劣化体および注入体における鉄筋腐食の程度を、目標平均ひびわれ幅0.8mm、

表-1 実験ケース

NO	供試体の種類	試験名	劣化度	本数	
1	健全供試体 (健全体)	静的載荷試験	—	1	
2		付着力試験	—	2	
3		鉄筋引張試験	—	5	
4	劣化供試体 (劣化体)	静的載荷試験	小	1	
5			中	1	
6			大	1	
7		付着試験	小	3	
8			中	3	
9			大	3	
10		鉄筋引張試験	小	6	
11			中	6	
12			大	6	
13		注入供試体 (注入体)	静的載荷試験	小(乾燥)	1
14				中(乾燥)	1
15				中(湿潤)	1
16	付着試験		大(乾燥)	1	
17			小(乾燥)	3	
18			中(乾燥)	3	
19		中(湿潤)	3		
20		大(乾燥)	3		

表-2 コンクリート配合

G _{max} (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)		
				水	セメント	細骨材
1.5	10±2.5	5.0	4.3	175	350	772
						1039

※ 湿潤, 乾燥: 樹脂注入時における供試体の水分状態
劣化度小: 目標平均ひびわれ幅 0.3 mm
劣化度中: " 0.5 mm
劣化度大: " 0.8 mm

0.5mm、0.3mmの3水準とした。また、注入体については、通常行われるコンクリート表面乾燥後の注入を標準とし（乾燥供試体）、海洋環境における補修の場合に想定される湿潤状態での注入のケース（湿潤供試体）を設けて比較検討した。

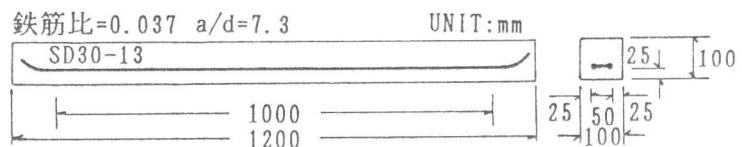


図-1 供試体諸元

実験における後者の方法は、ひびわれ部分を湿潤状態にし、コンクリート表面のみ乾燥させて注入したものである。

2. 1 劣化供試体の作成

鉄筋腐食ひびわれの発生は、炭酸ガスや塩化物による腐食促進試験によることが望ましいが、今回の実験では短時間でかつ劣化度の違いを容易に制御する必要性から、これに適した電食による方法を採用した[4][5]。電食は、図-2に示すように5%食塩水中に鉄板および供試体を設置し、鉄板に陰極、供試体中の鉄筋に陽極を接続し、一定の直流電流（電流:200mA、電圧:2~6V、公称電流密度=0.21mA/cm²）を流したものである。通電時間は事前に行った予備試験結果から、平均ひびわれ幅が概ね0.8mm、0.5mm、0.3mmとなるよう50日、30日、15日に設定し、それぞれ劣化度大、中、小とした。電食によるひびわれ発生状況は、図-3に示すように鉄筋に沿って発生し、最終的な平均ひびわれ幅は、劣化体において劣化度大、中、小でそれぞれ0.9mm、0.5mm、0.3mm、注入体の劣化時において劣化度大、中、小でそれぞれ0.7mm、0.6mm、0.4mmであった。なお、鉄筋の定着部は電食による腐食を防ぐため錆止めペイントを塗布した。

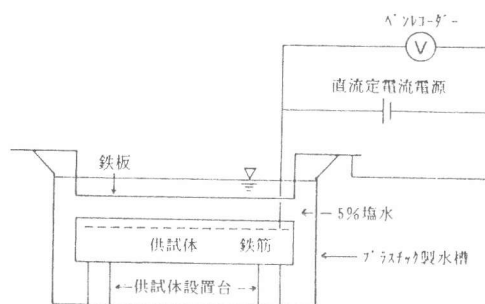


図-2 電食（試験）方法

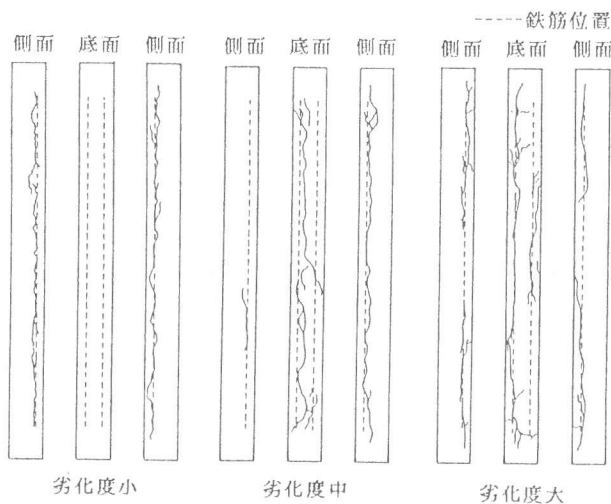


図-3 ひびわれ発生状況例

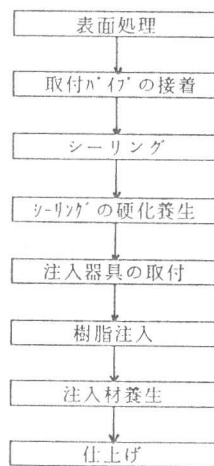


図-4 樹脂注入手順

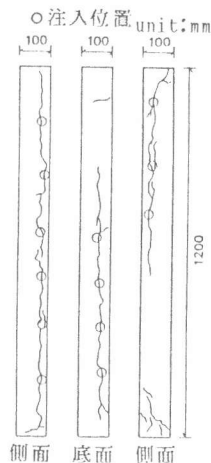


図-5 注入位置

2. 2 注入工法による補修

注入体は、電食により作成した劣化体にエポキシ樹脂をゴム風船タイプの器具を用いて、図-4に示す手順に従って注入を行い作成した。注入は、鉄筋腐食ひびわれに沿って図-5に示すような15cm~20cm間隔で行った。

表-3 注入樹脂の特性

試験項目	試験方法	単位	試験条件	BLグラウト	BLシール
比重(硬化物)	JIS K 7112	-	20°C, 7日間	1.15±0.05	1.70±0.10
粘度(混合物)	JIS K 6833	cP	20°C	500±200	(N ^o 7状)
圧縮降伏強度	JIS K 7208	kg/cm ²	20°C, 7日間	500以上	400以上
圧縮弾性係数	JIS K 7208	kg/cm ²	20°C, 7日間	1.0×10 ⁴	2.0×10 ⁴
引張せん断強度	JIS K 6850	kg/cm ²	20°C, 7日間	100以上	100以上

実験に用いた注入エポキシ樹脂の特性を表-3に示す。

2.3 静的載荷試験

静的載荷試験は中央1点繰り返し曲げ載荷試験とし、降伏開始までは0.5tonごとに、降伏開始後は降伏開始時のたわみの整数倍で載荷、除荷を繰り返し、破壊するまで行った。なお破壊は図-6に示すように降伏開始後に載荷荷重が降伏開始時の荷重を下回った時点あるいは降伏現象を示さずに耐荷力を急激に失った時点とした。測定は、中央点の荷重をロードセルで、中央変位および支点変位をひずみゲージ式変位計で行い、これらの測定値から最大曲げ荷重(耐荷力)、見かけの剛性、靱性を求めた。ただし、靱性は供試体が破壊までに吸収したエネルギーとし、荷重-たわみ曲線から求め[6]、見かけの剛性は式(1)から求めた。

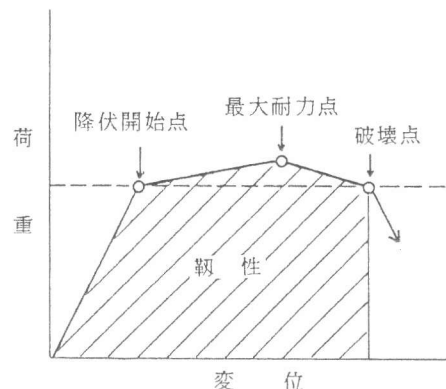


図-6 梁の破壊過程

$$EI = P \cdot L^3 / 48 \delta \quad (1)$$

- EI : 見かけの剛性 (ton・m²)
- L : スパン長さ (m)
- P : 載荷荷重 (ton)
- δ : 中央点のたわみ (m)

2.4 鉄筋の引張試験

健全鉄筋は供試体作成前に、劣化鉄筋は劣化体の静的載荷試験後は取り出し、10%クエン酸水素27770m溶液により錆落としをした後、重量を測定して鉄筋の有効平均断面積を算定した。また、それぞれの鉄筋について直接引張試験(JIS Z 2241)を行い、最大引張荷重、降伏荷重、伸びを測定した。

2.5 鉄筋とコンクリートの付着試験

鉄筋とコンクリートの付着力は、健全体、劣化体、注入体のそれぞれについて、コンクリートカッターを用いて切り出した図-7に示す試験体の直接引張試験によって求めた。

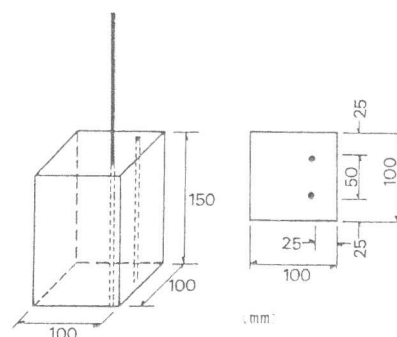


図-7 付着試験体

3. 実験結果

3.1 鉄筋の引張試験結果

図-8に試験結果を電食時間との関係で示す。健全鉄筋以外は静的載荷試験時に載荷履歴を受けているため、厳密な比較は困難であるものの概略次のような結果が得られた。鉄筋の品質は電食時間とともに低下し、健全鉄筋と比較すると劣化度大において、平均有効断面積で90%、最大引張荷重、降伏荷重で約85%、伸びにおいて60%まで低下した。最大引張荷重、降伏荷重

が平均有効断面積に比べて低下度合が大きいのは、引張試験において鉄筋が局部的な電食を受けた最も弱い部分で破断したためと思われる。また、伸びの低下度合が他に比較して著しく大きいのは、電食による鉄筋腐食促進手法における鉄筋そのものの材質に及ぼす影響、あるいは腐食部での切欠き効果の影響などによるものと思われる。

3. 2 鉄筋とコンクリートの付着試験結果

電食時間との関係で表わした図-9に示す試験結果から、付着力は鉄筋の発錆に伴って大きく低下する。その程度は劣化度小において健全体の約40%であり、劣化度大では健全体の約20%まで低下した。一方、注入体の付着力は劣化体からの大きな回復を示し、最も回復したもので健全体の約90%となった。また、試験後にコンクリートをはつて樹脂注入状況を調査した結果、コンクリートのひびわれ部への注入は確認できたが、鉄筋周辺部分は十分な樹脂の到達が確認できなかった。注入体が健全体までの付着力を完全回復出来なかった原因の一つと考えられる。また、注入供試体のうち湿潤供試体の付着力は乾燥供試体に比べて小さく、エポキシ樹脂を湿潤状態で注入した場合は乾燥状態に比べて接着力に劣ることが確認された。

3. 3 静的載荷試験結果

試験結果として得られた耐荷力、靱性、破壊形式を表-4に、供試体の最終的なひびわれ発生状況および試験時の荷重-たわみ曲線(包絡線)を図-10、図-11にそれぞれ示す。健全体は他の供試体に比べて靱性の大きい圧縮コンクリート部の破壊による曲げ破壊を示し、劣化体はいずれも降伏点

が不明瞭で、健全体に比較して靱性の小さな(約25~40%)付着破壊を示した。劣化体は鉄筋とコンクリートの付着力の低下のため曲げひびわれの発生数は少なかったが、その耐荷力は電食時間の増大とともに低下した。図-12に示すように、劣化度大において健全体の約70%まで低下し、その低下は鉄筋の最大引張荷重の低下以上であった。この原因は大幅な付着力の低下、および破壊形式の変化によるものと考えられる。注入体の耐荷力は、全ての劣化度において補修前の耐荷力を上回り、健全体以上の耐荷力を示すものもあった。これは、大幅な付着力の増大による鉄筋とコンクリートの一体化によるものと思われる。ただし、破壊形式は、劣化度大

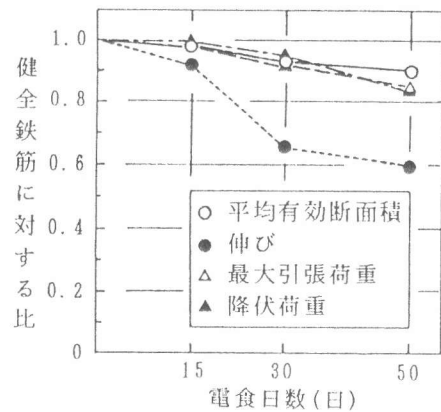


図-8 電食時間と鉄筋品質の関係

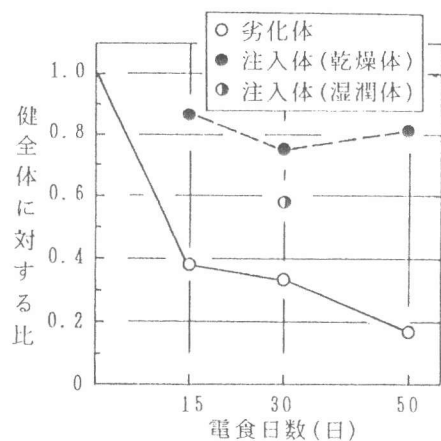


図-9 電食時間と付着力の関係

表-4 静的載荷試験結果

供試体の種類	劣化度	耐荷力 (ton)	対健全比	靱性 (ton·mm)	破壊形式
健全供試体	-	2.18	-	33.3	曲げ
劣化供試体	小	2.00	0.92	14.4	付着
	中	1.56	0.72	8.1	付着
	大	1.50	0.69	11.8	付着
注入供試体	小(乾燥)	2.37	1.09	7.3	せん断
	中(乾燥)	2.33	1.07	7.8	付着
	中(湿潤)	1.90	0.87	5.2	付着
	大(乾燥)	1.97	0.90	26.9	曲げ

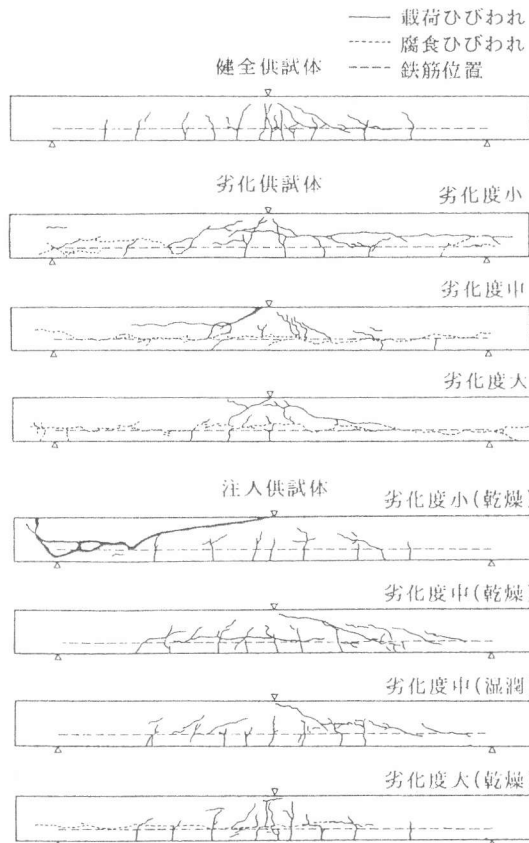


図-10 最終的なひびわれ発生状況

を除いて劣化体以上に靱性の小さな（健全体の約15～25％）脆性的なせん断または付着破壊を示した。また、湿潤供試体は乾燥供試体に比べて耐荷力、靱性ともに小さく注入効果が少なかった。次に、静的荷重試験におけるみかけの剛性変化について図-13に示す。概ね、注入体、健全体、劣化体の順で剛性が大きく、劣化体においては、荷重前の既存の軸方向ひびわれのために荷重初期の剛性が小さく、曲げひびわれの発生も少なかったためその後の変化も小さかった。一方、注入体は引張強度の大きいエポキシ樹脂によるひびわれ部の接着により、曲げひびわれの発生数は少なく、みかけの剛性が大きかったものと考えられる。注入体における湿潤供試体の剛性は、乾燥供試体に比較して小さく、エポキシ樹脂の付着力の違いに起因すると思われる。また、劣化度大、中、小による有意な差は、劣化体、注入体とも見られなかった。

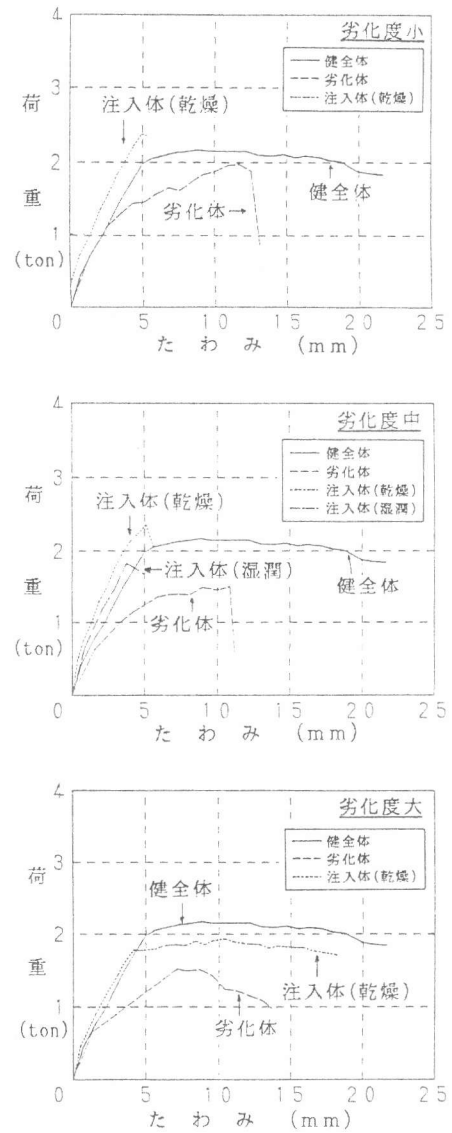


図-11 荷重-たわみ曲線

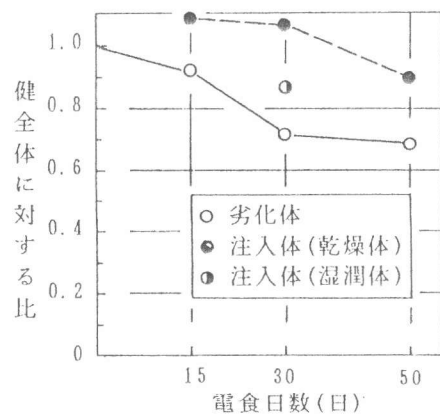


図-12 劣化度と耐荷力の関係

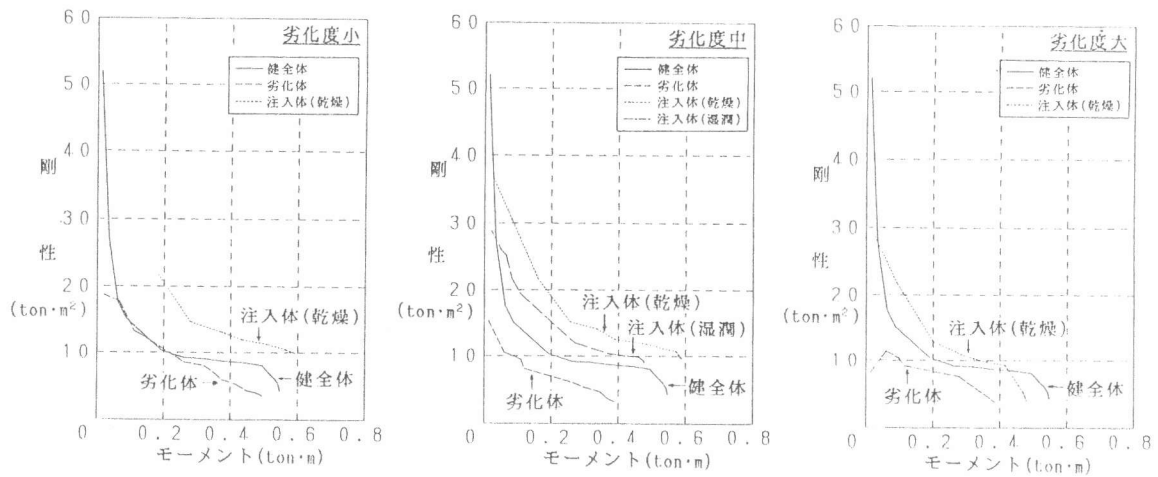


図-13 静的載荷試験における剛性変化

4. 結論

鉄筋腐食ひびわれを生じたRC梁へ樹脂注入工法を適用した場合の、注入時における補修効果について以下の事がわかった。

(1) エポキシ樹脂の浸透はコンクリートのひびわれ部分で確認されたが、コンクリートと鉄筋の境界部においては十分な確認ができなかった。

(2) エポキシ樹脂注入により鉄筋とコンクリートの付着力は最大で健全体の90%まで回復したが、完全な一体化はできなかった。

(3) エポキシ樹脂で注入補修を行うことにより、耐荷力は注入前に比較して大きな回復を示し十分な補修効果が確認された。しかし、靱性は注入前に比べて小さくなり破壊形式は脆性的なものが多かった。

(4) 引張強度の大きなエポキシ樹脂を注入することにより、みかけの剛性は大きくなった。

(5) エポキシ樹脂を湿潤状態で注入した場合は、乾燥状態のものに比べて注入効果が若干劣った。

参考文献

- [1] 鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術-技術の現状-, 日本コンクリート工学協会, 防食研究委員会.
- [2] 藤井 学, 宮本文穂, 小林秀恵: 樹脂注入によるRC部材の補修効果に関する研究, 建設工学研究所報告第27号, (財) 建設工学研究所, pp. 111~130, 1985
- [3] 岡田 清編: 最新コンクリート工学, 国民科学社, p. 296~297
- [4] 武若耕司, 松本 進: コンクリート中の鉄筋腐食がRC部材の力学的性状に及ぼす影響, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 177~180, 1984.
- [5] 橋 吉宏, 梶川康男, 川村満紀: 鉄筋腐食によって損傷を受けたRCばりの挙動に関する考察, 土木学会論文集, 第402号/V-10, pp. 105~114, 1989
- [6] 岡田 清編: 最新コンクリート工学, 国民科学社, p. 81