

[119] 樹脂により補修した RC 部材の挙動

正会員 森濱和正（建設省土木研究所）

1. まえがき

構造物が地震などにより被害を受けた場合、早期復旧し機能の回復が望まれる。そのための補修・補強実験はすでに報告¹⁾されている。しかし、それらは補修・補強前とその後の性状を比較し、初期剛性の低下することや鉄筋のひずみ硬化により耐力が増加する²⁾ことなどが明らかになっているが、定性的な性状把握にとどまっている。

本報告は、ひびわれに樹脂注入、断面欠損部を断面修復した補修部材について、力学的性状に影響を与える因子を考慮して耐力・変形の計算を試みた。考慮した因子は、断面修復材の物性、補修後の再載荷に伴う鉄筋の拔出しおよび鉄筋とコンクリートの応力-ひずみ関係の変化である。

2. 計算に使用した供試体

計算を試みた供試体は、文献3)、文献4)で報告されているものである。はりおよび柱部材をえらび、はりは一方向曲げ載荷、柱は一定軸力をかけ水平力の漸増正負繰返し載荷をおこなっている。破壊後、ひびわれには樹脂注入、断面欠損部には樹脂パテにより断面修復し、再度載荷実験をおこなったものである。それらの供試体の諸元、実験結果を表-1に示す。

この実験による補修部材の性状の特徴は補修前に比較し、①斜めひびわれ発生荷重の変化は小さい、②降伏および最大荷重は10~20%増加している、③ひびわれ時剛性は低下する。降伏時剛性は曲げ破壊した供試体は20~30%低下しているが、その他の供試体の変化は小さい。④いずれもじん性は向上している。

3. 補修部材の耐力、変形の計算方法

3. 1 補修前の計算方法

鉄筋の応力-ひずみ関係は、図-1の実線のようにひずみ硬化を考慮⁵⁾した。コンクリートは図-2の包絡線0ab(終局ひずみ $\varepsilon_{cu}=0.0035$)を使用して計算した。

柱軀体の曲げ変形 δ_1 は、曲率の積分で求められる。橋脚型式のようにフーチングに固定されている柱の変位は鉄筋の拔出しに伴う回転変位 δ_2 も考慮する必要がある。拔出量 S は、鉄筋のひずみ分布を図-3のように降伏までと降伏後は直線⁶⁾⁷⁾と仮定すると式(1)で求められる。

$$S = (\varepsilon_{sy} + \varepsilon_s) l_y / 2 + A_s \varepsilon_{sy} \sigma_{sy} / 2 U \tau_{bs} \quad (1)$$

ここに、 U :鉄筋の周長、 τ_{bs} :平均付着応力度(文献6)より求める)

表-1 供試体諸元および実験結果

供試体	概形 b×h (cm)	主 鉄 筋		荷 重(t)						降伏時剛性		じん性		破 壊 状 況		
		段落し位置 (cm)	鉄筋量林 (鉄筋比%)	補修前			補修後			補修前	補修後	補修前	補修後	補修前	補修後	
				DC	Y	U	DC	Y	U							
はり 供試体	1 40×40 #140	—	—	4-D19(0.82)	—	22.2	24.1	25.0 (—)	22.8 (1.03)	27.5 (1.14)	19.4	21.6 (1.11)		曲げ圧縮破壊	曲げせん断破壊	
	2 40×40 #140	—	—	4-D25(1.45)	30.1	—	30.1	31.2 (1.04)	—	31.2 (1.04)	28.8	30.3 (1.05)		斜引張破壊	補修前のひびわれを はずれ、斜引張破壊	
	3 40×40 #140	載荷点 1段	0 70.0	6-D19(1.23) 3-D19(0.61)	19.2	19.5	21.0	19.6 (1.02)	22.1 (1.13)	26.1 (1.24)	25.1 (0.95)	24.0		断落し破壊 (せん断圧縮破壊)	補修前に破壊した反 対側の断落し破壊	
	4 40×40 #140	載荷点 1段	0 70.0	6-D19(1.23) 3-D19(0.61)	20.6	23.7	23.7	21.0 (1.02)	24.1 (1.02)	28.3 (1.19)	20.3	21.3 (1.05)		断落し破壊 (せん断圧縮破壊)	補修前に破壊した反 対側の断落し破壊	
柱 供試体	A 60×60 #280	—	—	9-D16(0.53)	—	16.2	17.4	—	18.0 (1.11)	19.0 (1.09)	11.2	9.3 (0.83)	>3.2	4.6	曲げ圧縮破壊開始	圧縮破壊、はくり
	B 60×60 #280	柱下端 1段	0 95.0	9-D16(0.53) 5-D16(0.30)	16.0	16.0	16.4	16.0 (1.00)	15.3 (0.96)	16.9 (1.03)	9.8 (0.92)	9.0	1.1	1.6	断落し部斜めひびわ れ	断落し破壊
	E φ74 #302.7	柱下端 1段	0 162.2	36-D13(1.06) 24-D13(0.71)	—	15.3	19.4	—	18.0 (1.18)	21.0 (1.08)	13.3 (0.71)	9.5	6.5	7.6	曲げ圧縮破壊、 はくり	断面修復部の上部が はくり
	F φ74 #302.7	柱下端 1段 2段	0 66.7 133.3	36-D13(1.06) 24-D13(0.71) 12-D13(0.35)	15.1	15.1	17.1	18.3 (1.21)	17.4 (1.15)	18.5 (1.08)	12.6	11.8 (0.94)	2.7	4.7		段落し破壊

*(C)内は、補修後/補修前、**供試体E、Fの鉄筋量、鉄筋比は全断面積であらわしている。

DC:斜めせん断ひびわれ発生時、Y:降伏時、U:終局時。

3. 2 補修部材の計算方法

(a) 鉄筋の応力-ひずみ関係

図-1の破線のように補修前に受けた最大応力 σ_o まではヤング係数 $E_s=2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ で達し、その後はひずみ硬化に一致するものとした。

(b) コンクリートの応力-ひずみ関係

コンクリートが繰返し圧縮を受けた場合の応力-ひずみ関係が決められるよう、図-2の関係⁸⁾を使用した。補修前に受けた最大応力(たとえばb点)に対し、つぎに圧縮を受けた場合の応力-ひずみ包絡線はdefcとした。樹脂注入補修した部分は、コンクリートの弱部や鉄筋の付着が改善されるため ϵ_{cu} 以後も応力は低下しながらも終局ひずみは増加するものとした。未補修部分では終局ひずみは ϵ_{cu} までとし、応力-ひずみはdeとした。

(c) 断面修復部分

断面修復部分の応力分布は図-4のように仮定し、中立軸を求める式を導いた。修復材は、ここでは強度は高いがヤング係数の低いもの(エポキシ樹脂)を考え、応力-ひずみ関係は比例関係にあるものとした。コンクリートは(c)図のように台形と仮定した。ただし、図-2の包絡線0abの場合と計算結果がほぼ一致するよう σ_{cu} 、 ϵ_{cu} は同じとし、 $\sigma-\epsilon$ 曲線で囲まれる面積はほぼ一致するように決めた。

1) 弾性範囲

ひずみは中立軸から比例関係にあり、軸力N、ヤング係数 n などを式(2)とおく。

$$N = \alpha \sigma_s p b d$$

$$n_c = E_s / E_c, n_r = E_s / E_r, n'_s = E_s / E'_s \quad (2)$$

$$p = A_s / b d, p' = A'_s / b d$$

力のつり合より、中立軸は式(3)によって求められる。

$$a k^2 + b k + c = 0 \quad (3)$$

$$a = 1/2 n_c$$

$$b = p' / n'_s + r / n_r d + p(1 + \alpha) - d' / n_c d$$

$$c = (d' / d)^2 / 2 n_c - (r / d)^2 / 2 n_r - p(1 + \alpha)$$

$$-d' p' / n'_s d$$

中立軸が求まれば、応力分布よりモーメントMが計算でき、耐力が求められる。

圧縮鉄筋が引張鉄筋より先に降伏する場合は、圧縮鉄筋の降伏点 σ'_{sy} を式(4)とおけば、

$$\sigma'_{sy} = \gamma' \sigma_s \quad (4)$$

式(3)の係数b中の p' / n'_s を $-\gamma' p'$ 、係数c中の $-d' p' / n'_s d$ を $\gamma' p'$ とおきかえることにより求められる。

2) 終局まで

1)と同様、式(5)のようにおく。

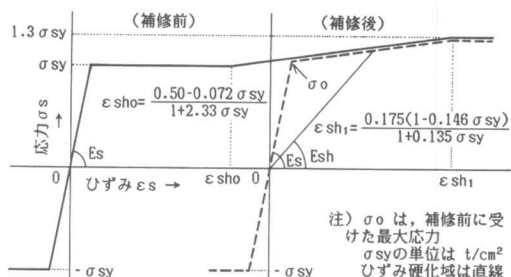


図-1 鉄筋の応力-ひずみ関係

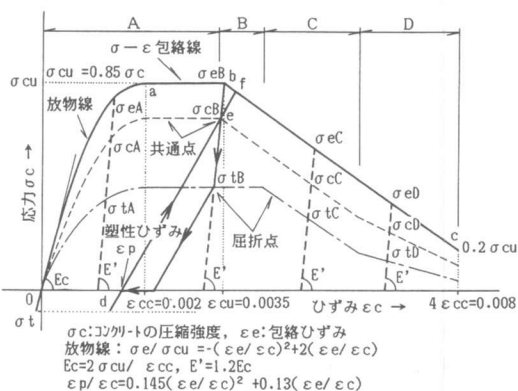


図-2 コンクリートの応力-ひずみ関係

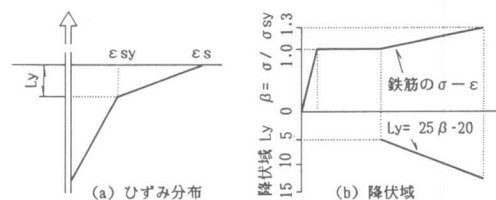


図-3 鉄筋の拔出し

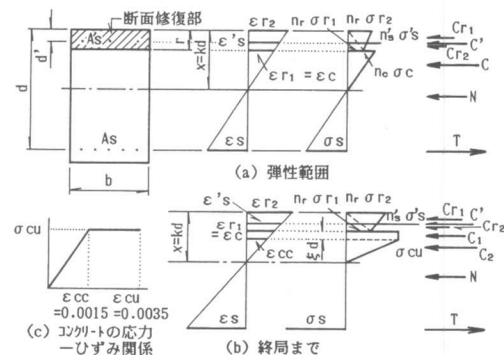


図-4 応力分布

$$N = \alpha \sigma_s p b d$$

$$n'_s = E_{sh}/E_s, n_r = E_{sh}/E_r, n_o = E_{sh}/E_c \quad (5)$$

$$\beta' = \sigma_{cu} / \sigma_s$$

ここに、 E_{sh} :鉄筋の降伏あるいはひずみ硬化時の見かけ上のヤング係数(図-1参照)

これより中立軸は式(6)によって求められる。

$$ak^2 + bk + c = 0 \quad (6)$$

$$a = (1 + n_o \beta' / 2) \beta'$$

$$b = -(1 + r/d + n_o \beta') \beta' - p'/n'_s - p(1 + \alpha) - r/n_r d$$

$$c = (r/d + n_o \beta' / 2) \beta' + (r/d)^2 / 2n_r + \alpha' p'/n'_s d + p(1 + \alpha)$$

圧縮鉄筋が降伏している場合、 σ'_{sy} を式(7)とおけば、

$$\sigma'_{sy} = \gamma' \sigma_s \quad (7)$$

式(6)の係数bの $-p'/n'_s$ を $\gamma' p'$ に、係数cの $d p'/n'_s d$ を $-\gamma' p'$ におきかえることによって計算できる。

(d) 変形

変位は補修前と同様、 $\delta_1 + \delta_2$ によって求める。ただし、鉄筋の拔出量は、補修前の荷重により定着強度は低下しているものと考え、図-5の破線のとおりとした。すなわち、補修前に受けた最大応力 σ_o に達するとき、最大拔出量 S_o に達するものとした。このとき、拔出量とひずみは比例関係にあるものとした。それ以後は補修前の拔出量に一致するとした。

(e) せん断ひびわれ

せん断ひびわれ発生荷重 V_c は、基本的には文献9)によった。補修後は、斜めひびわれに樹脂注入した場合回復できることから、補修前と同じとした。

$$V_c = 0.94 \sigma_c^{1/3} (0.75 + 1.40d/a) (1 + \beta_p + \beta_d + \beta_n) b d \quad (8)$$

ここに、 β_p :主鉄筋に関する係数 $= (100p)^{1/2} - 1$ 、 β_d :有効高さに関する係数 $= (100/d)^{1/4} - 1$ 、 β_n :軸力に関する係数 $= 2M_o/M_u$ 、 M_o :断面内に引張応力を生ずる限界の曲げモーメント、 M_u :終局曲げモーメント

4. 実験結果と計算値との比較

荷重の実測値と計算値の関係を図-6に示す。曲げ破壊した供試体の補修後の耐力は、補修前よりほぼ45度の傾きで上がっている。これは実測値と計算値がほぼ一致していることを示しており、補修後の荷重増加は鉄筋のひずみ硬化と破壊位置の上部移行によるところが大きい。

斜めひびわれに樹脂注入すれば、斜めひびわれ荷重はほぼ補修前にもどり、回復効果のあることがわかる。断面修復すれば(供試体E)斜めひびわれの発生は上部に移行し、斜めひびわれ荷重は増加する。それゆえ、段落しを有する供試体の降伏荷重の増加は小さいか、ひびわれ位置の変化による増加分程度である。最大荷重は図-6のように、計算値に向かって増加しており補修効果のあることがわかる。

降伏時剛性の実測値と計算値の関係は図-7に示すとおり、実測値と計算値はほぼ一致している。3.2の計算仮定により補修部材の降伏時変位も計算できる。図-7では、はりの剛性の変化は小さく、決まった傾向はないようである。しかし、柱の場合はいずれも減少傾向にある。柱の降伏時変位に与える影響を調べてみると、図-8のようであった。段落し破壊した供試体の補修後の変位は10%程度の増加

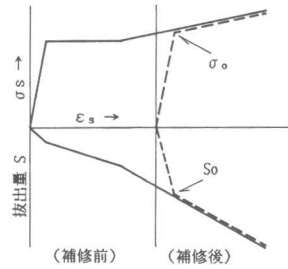


図-5 補修後の鉄筋の拔出し

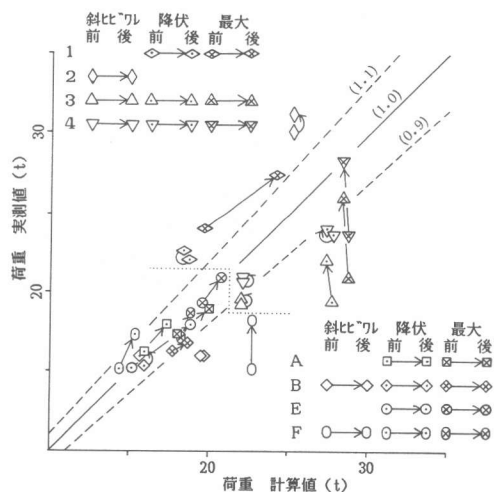


図-6 荷重の実測値と計算値

にとどまっているが、曲げ破壊した供試体は50~70%程度も増加している。この増加分の多くは鉄筋の抜出しによるものであることが図-8よりわかる。ヤング係数の小さい断面修復材による変位の増加は、3~4%とわずかである。これを曲率分布で表したのが図-9(a)である。これより、鉄筋のひずみ硬化により耐力が増加し、曲率の増加していることもわかる。

図-9(b)には終局時の曲率分布を示す。補修後の破壊位置は断面修復上部となっており、実験結果とも一致している。補修により破壊位置が上部に移行することによる耐力向上も考えられる。また、(b)図より補修後は柱下部に大きな塑性ヒンジを形成している。このため、補修部材はじん性も向上したものと考えられる。

5. まとめ

樹脂によって補修した部材の挙動を表すため、いくつかの仮定をもうけ計算を試みた。その結果、補修効果および補修部材の力学的性状にはつぎのような特徴がある。

- ① 斜めひびわれに対しては、回復効果がある。
- ② 降伏および最大荷重は回復あるいは増加する。荷重増加の要因は、初期の载荷による鉄筋のひずみ硬化および破壊位置が上部に移行するためである。
- ③ 変形は部材の種類、補修前に受けた载荷履歴および補修方法によって異なる。断面修復補修は、かぶり程度であればヤング係数の小さい材料を使用しても変形に与える影響は小さい。柱の場合は、フーチングからの鉄筋の抜出しによる影響が大きい。
- ④ 降伏時剛性は、③の変位に与える影響によって変化する。剛性低下の主因は、フーチングからの鉄筋の抜出しである。
- ⑤ 補修部材は大きな塑性ヒンジが形成されるため、じん性も向上する。

(文献)

- 1) 例えば、石橋忠良、古谷時春：橋脚の耐震補修、補強に関する実験的研究、第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1983, pp.241~244
- 2) 田才 晃、北山和宏、小谷俊介、青山博之：エポキシ樹脂で補修された鉄筋コンクリート梁の曲げ性状、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、1984.5, pp.625~628
- 3) 小林茂敏、森濱和正、高橋正志、高橋弘人：破壊形式の異なるRC梁の樹脂注入補修効果、セメント技術年報37, 1983, pp.549~552
- 4) 森濱和正、小林茂敏：震災を受けた柱状RC部材の補修効果、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、1984, pp.621~624
- 5) 広沢雅也：鉄筋コンクリート部材の強度とじん性、建築研究所報告No.76, 1977.3, pp.91~92
- 6) 太田 実：繰返し荷重下における鉄筋コンクリート橋脚の挙動に関する実験的研究、土木学会論文報告集第292号, pp.70, 1979.12
- 7) 森田司郎、角 徹三：鉄筋コンクリート柱・はり接合部域におけるはり主筋の付着性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、1977, pp.1977~1978
- 8) 森田司郎、須藤英司：繰返し曲げ応力下のコンクリートの履歴挙動に関する研究、第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1979, pp.325~328
- 9) 土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法試案、コンクリート・ライブラリー第48号、1981.4, pp.35~39

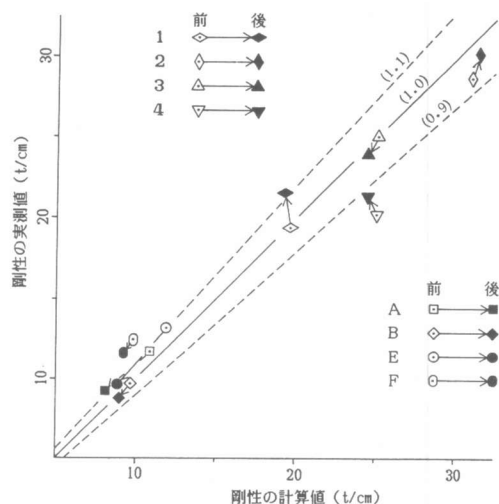
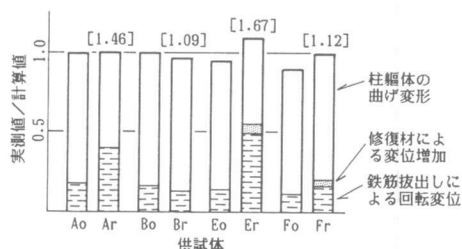


図-7 降伏時剛性の実測値と計算値



注) [] 内は、計算値の[補修後の変位/補修前の変位]
供試体の添字 o:original(補修前), r:repair(補修後)

図-8 柱の変位に与える影響

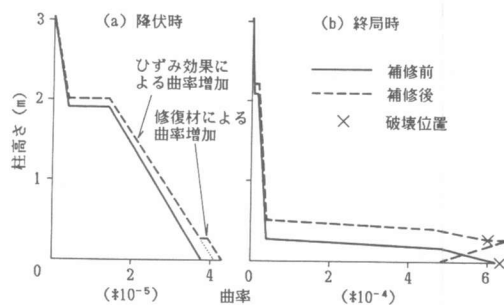


図-9 曲率分布(供試体E)