

論文

[2032] エポキシ樹脂注入補修後の付着割裂強度

田才 晃*1・小谷 俊介*2・青山 博之*3

1. はじめに

逆対称曲げにより付着割裂破壊した鉄筋コンクリート部材をエポキシ樹脂注入で補修すると、補修後の加力では付着割裂破壊が生じず、他の破壊モードに移行することが実験的に確認されている [1]。この理由として補修により主筋とコンクリートの間の付着強度が高くなることが推定される。しかし補修後の最大耐力に有意な差の生じないタイプの部材実験では付着強度の上昇を直接確認できない。そこで、この補修法の適用性の判定に資するよう、付着割裂破壊をエポキシ樹脂注入で補修した後の付着強度を実験的に確認し、強度発現の要因を考察した。

2. 実験方法

補修後においても主筋定着部で高い付着応力が生じるように、主筋を直接引抜くタイプの試験体を3体作成した。バッチ別試験体名をNo1、No2、No3とした。試験体の形状と配筋を図1に、試験体の主変数を表1に示す。各試験体の形状寸法と主筋は全て同じである。幅100mmの中に定着長さが300mmとなるようD19を2本配した。主筋中心の被り厚さは側面で25mm、上面で40mmとし全割裂（サイドスプリット）で破壊するようにした。試験体の主変数は横補強筋量のみで、試験体No1には横補強筋はなく、試験体No2では2-6φ@100mm、試験体No3では2-9φ@100mmである。

コンクリートは普通強度のコンクリートを用い、打設は試験体の上方から行った。主筋は付着挙動の把握を容易とするために、補修前後の加力で降伏が生じないよう高強度(SD80相当)とした。材料特性を表2に示す。加力は、主筋定着部に曲げやせん断による応力の不均等が生じないように配慮し、図2に示す装置を用いて主筋に単調な引張力を与えた。すなわちセンターホルツァッキにより、P C鋼棒と引張力分配具を介して2本の主筋に均等な引張力を与えた。引張力分配具の下はすべり支承とし、加力時に摩擦が生じないようにするとともに、P C鋼棒と引張力分配具の重量が主筋にかからないようにした。全引張力の計測はセンターホルツァッキとP C鋼棒の間のロードセル

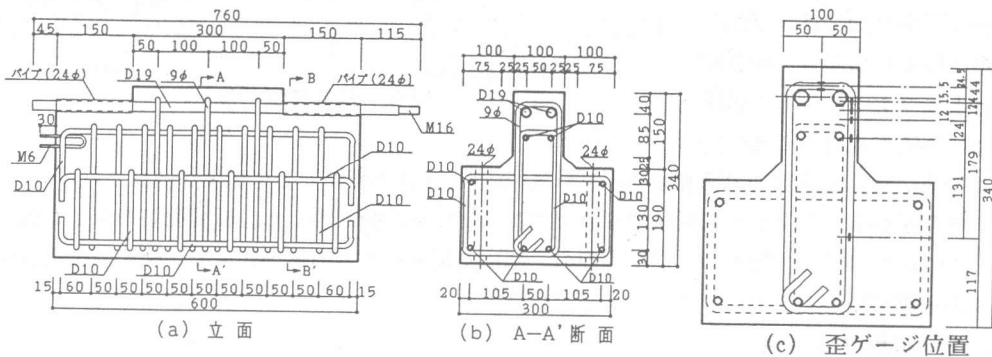


図1 試験体の形状・寸法・配筋

- *1 東京大学助手 工学部建築学科、工博（正会員）
- *2 東京大学助教授 工学部建築学科、工博（正会員）
- *3 日本大学教授 総合科学研究所、工博（正会員）

表1 試験体の変数

リジン試験体名	No1	No2	No3
横補強筋	無	2-6φ@100	2-9φ@100
主筋	2-D19 (共通)		
定着長さ	300mm (共通)		
補修方法	ひびわれにエポキシ樹脂注入 (共通)		
補修後試験体名	No1R	No2R	No3R

表2 材料特性

コンクリート		注入エポキシ樹脂 (JIS)	
圧縮強度σ _B	266	圧縮強度	757
1/4σ _B 割線弾性係数	195×10 ⁸	圧縮弾性係数	27×10 ⁸
割裂強度	21	引張強度	449
1/4σ _B ポアゾン比	0.154	引張弾性係数	20×10 ⁸
鉄筋 (*:0.2%オフセット)			
	D19	6φ	9φ
降伏点強度	7933	4890*	3430
弾性係数	1931×10 ⁸	2025×10 ⁸	2109×10 ⁸
引張強度	8549	5742	4761

によった。2本の主筋の自由端の試験体コンクリートに対する相対水平変位を変位計(ストローク10mm、感度1000μ/m)でモニターした(図2)。各試験体主筋の歪分布および試験体No2とNo3では横補強筋の軸方向歪分布と曲率分布を各点2枚ずつ貼った歪ゲージにより計測した。歪ゲージ位置は図1(c)に示した。1回目の加力で生じたひび割れに、エポキシ樹脂を注入する補修を行った。注入したエポキシ樹脂の特性は表2に示した。補修後、リジン試験体と同様主筋に単調な引張力を与える加力を行った。

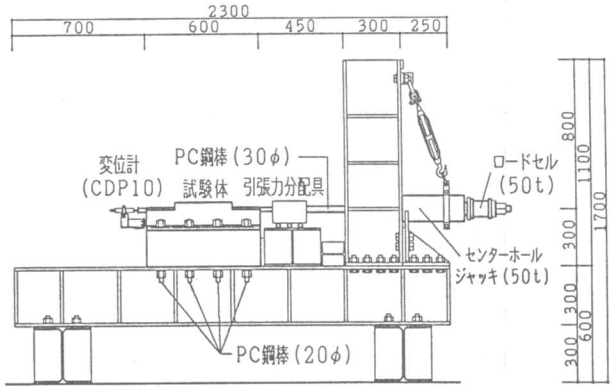


図2 加力方法

3. 実験結果

3.1 破壊状況

リジン加力終了後および補修後加力終了後のひび割れ状態を図3に示す。リジン試験体は3体とも主筋配列面で全割裂き破壊した。横補強筋量の多い試験体No.3はひび割れの数と領域が広がり、補強筋を介してコンクリートに伝達される応力が大きいことが観察された。

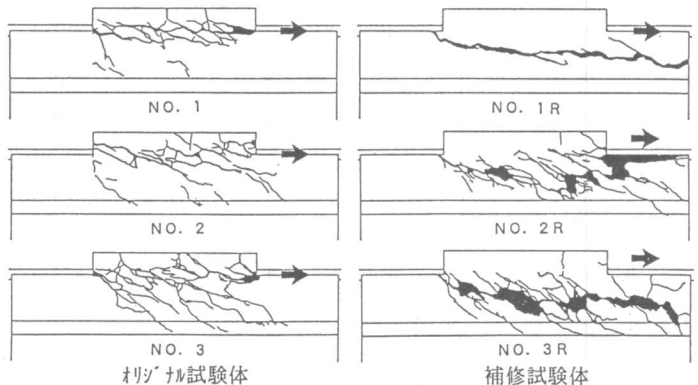


図3 最終破壊状況

補修後の加力で横補強筋の無い試験体No.1Rは主筋配列面に損傷が観察されないうちに、主筋配列面より下のせん断伝達領域で瞬時に直接せん断破壊した。横補強筋を配した試験体No.2RとNo.3Rは、加力端側の主筋配列面の一部に割裂きによる損傷を伴って、せん断伝達領域でせん断圧縮破壊した。

3.2 付着強度

2本の主筋の定着部分に生じた付着応力度の平均値と自由端水平変位の平均値の関係を補修前後で比較して図4に示す。補修後の関係はリジン試験体の加力による残留点からプロットした。リジン試験体では横補強筋量が多いほど最大引張力とその時の変位が大きかった。補修後はどの試験体も剛性が完全に回復した。補強筋のあるNo.2RとNo.3Rは、高い剛性を維持したままリジン

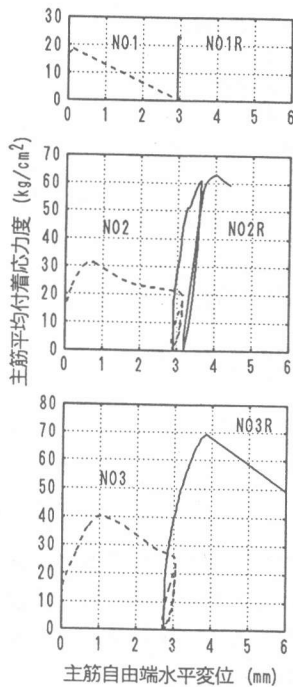


図4 付着応力とすべり

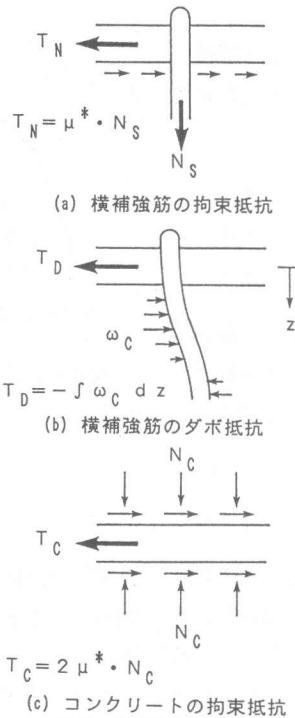


図5 付着抵抗成分

表3 付着強度

試験体	No1(R)	No2(R)	No3(R)
実験値			
補修前	18.6	31.4	40.9
補修後	23.7	65.1	71.8
計算値*	15.0	18.9	23.8
補修後/補修前	1.27	2.07	1.76

*鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説にしたがって梁上端筋として精算した値。

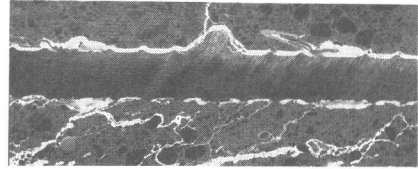


図6 主筋の軸方向切断

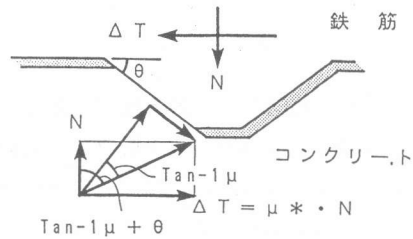


図7 ふしの抵抗作用

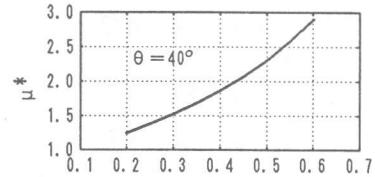


図8 μ - μ*関係

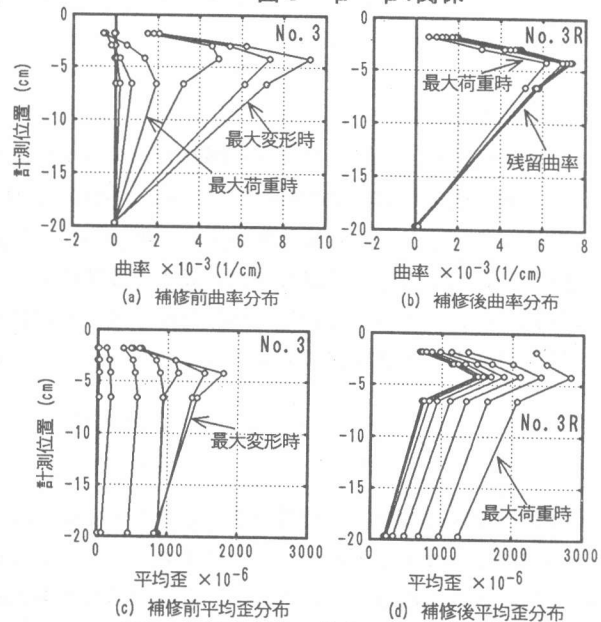


図9 横補強筋の曲率と歪の分布

試験体の2倍近い強度を発揮した。主筋定着区間の平均付着応力度の最大値を計算値とともに表3に示す。どのリジナル試験体の最大付着応力度も計算値より高く、付着性状に欠陥は無かった。したがって補修後の強度上昇は一般性のあるものと判断できる。補修後に全割裂きのみで強度が発揮された試験体は無かったので、表中に示した補修後の強度上昇率は下限値となる。

4. 付着抵抗機構

異形鉄筋とコンクリートの界面の化学的膠着作用による付着抵抗は、载荷の初期の応力レベルで失われると考えられる。その後最大耐力に至るまでの付着抵抗機構は、鉄筋とコンクリートの摩擦抵抗作用に着目して、次の3つの機構の和としてとらえることができると仮定する。

- ① 横補強筋の拘束力による摩擦抵抗 T_N
- ② 横補強筋のダボ作用による抵抗 T_D
- ③ コンクリートの拘束による摩擦抵抗 T_C

これらの抵抗機構の概念図を図5に示す。主筋材軸方向に関する主筋とコンクリートの摩擦係数を μ^* とすると、各抵抗力は次式で表される。

$$T_N = \mu^* \cdot N_s \quad (1)$$

$$T_D = - \int \omega_c \, dz \quad (2)$$

$$T_c = 2 \mu^* \cdot N_c \quad (3)$$

ここに、 N_s ：全横補強筋の軸力の和、 ω_c ：横補強筋材軸と直交方向に働くコンクリートの分布反力、 z ：部材せい方向の座標、 N_c ：ふしによるリング張力の反力としてコンクリートから主筋に働く拘束力。

主筋の全引張力 T は次式となる。

$$T = T_N + T_D + T_c \quad (4)$$

実験の観察結果から最大耐力以後は上記①、②の抵抗機構が支配的となると考えられる。補修後加力終了後に試験体を主筋位置で垂直に切断した様子を図6に示す。主筋周囲の白く輝いた部分は補修により注入されたエポキシ樹脂である。主筋下側ではリッジ部加力の際、主筋のふしがコンクリートを乗り上げるように滑っていたことがわかる。すなわち主筋の付着抵抗はふしの斜面とコンクリートの摩擦抵抗による。主筋材軸と直交方向の拘束力 N とふし1コ当りの負担引張り力 ΔT を、ふしの斜面と直交方向に分解した図7を参照して、摩擦係数 μ^* は次式となる。

$$\mu^* = \tan(\tan^{-1} \mu + \theta) \quad (5)$$

ここに、 μ ：鉄とコンクリートの摩擦係数、 θ ：ふしの角度。

本実験で用いた主筋D19の θ を 40° とし、 μ を0.2から0.6まで変化させた場合の μ^* を式(5)で計算した結果を図8に示す。鉄とコンクリートの摩擦係数が0.4~0.5程度であれば、 μ^* は2前後の値となる。

5. 横補強筋の応力

横補強筋に貼った各点2枚ずつのひずみゲージにより得られた横補強筋の曲率分布と平均ひずみ分布の一例を、試験体N03とN03Rについて図9に示す。縦軸の計測位置は横補強筋上辺中心からの距離を表す。これらの計測結果から横補強筋の各点に生じた軸力とモーメントを求めた。平均ひずみは補修後加力の最大耐力付近まで弾性値を示しているが(図9c、d)、主筋に近い部分の横補強筋辺縁のひずみはリッジ部加力時の最大耐力付近で引張および圧縮の降伏を生じた。そこで鉄筋の応力歪関係を次式でモデル化した。

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_B}{k_0 \sigma_y} = \frac{\sigma - \sigma_B}{k_0 \sigma_y} \left(1 + \left| \frac{\sigma - \sigma_B}{k_0 \sigma_y} \right|^\alpha - 1 \right) \quad (6)$$

塑性域の曲線の形状と位置を決めるパラメータ ε_B 、 k_0 および α の値は、材料試験で得られた歪硬化開始点および曲線上の任意の2点の ε と σ の値を上式に代入して連立させて解くことにより、精度良く求めることができる。横補強筋6 ϕ を例に決定したモデルと試験値を比較して図10に示す。ひずみの計測値から、決定した応力歪関係のモデルを使って軸力とモーメントへの変換

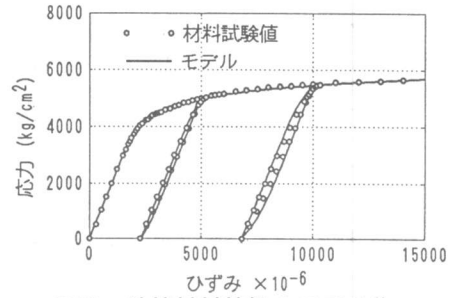


図10 鉄筋材料特性のモデル化

は、図11に示すように鉄筋断面を分割し、平面保持を仮定して行った。補修後については、リジナル加力終了時から補修を経て補修後の加力を開始するまでの試験体内部残留応力の減退に伴う残留ひずみの変化を考慮した。

こうして求めた横補強筋応力の分布の様子を、図9に示した鉄筋について図12に示す。せん断力はモーメントの変化率とした。補修後の

応力は残留応力からの増分とした。最大荷重時の軸力およびせん断力を補修前後で比較すると、最大荷重は補修後の方が非常に大きかったにもかかわらず、横補強筋の応力は小さかったことがわかる。この傾向は他の横補強筋についても同様であった。

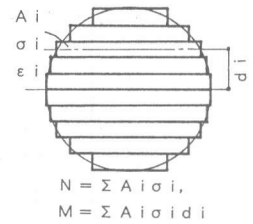


図11 鉄筋断面の分割

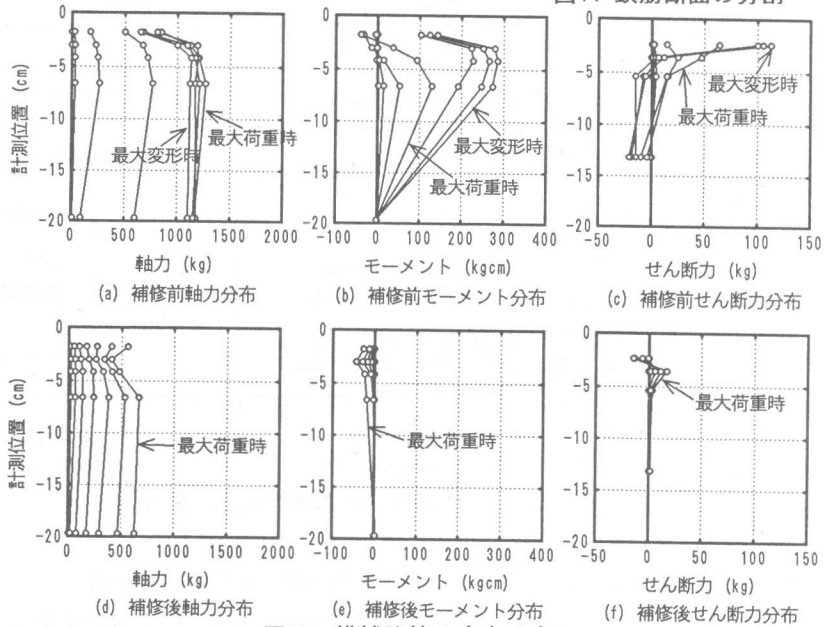


図12 横補強筋の応力分布

6. 付着抵抗成分の分解

横補強筋応力に

基づいて、4.で述べた各抵抗成分を求めることを試みた。まず、補修前の試験体について各横補強筋の各加力ステップにおける軸力の最大値およびせん断力の最大値を全横補強筋について加算し、それぞれその加力ステップにおける拘束力 N_s およびダボ作用による抵抗力 T_D とした。主筋材軸に関する見掛けの摩擦係数を $(T - T_D) / N_s$ として求めると、その変化の様子は図13のようになる。この見掛けの摩擦係数は、最大耐力に至るまでは横補強筋による拘束の効果とコンクリートによる拘束の効果を同時に含んだものであるが、最大耐力以後は横補強筋の拘束の効果を表現したものと考えられる。試験体N02およびN03とも最大耐力直後に見掛けの摩擦係数はほぼ2となっており、4.で予測した値と良く一致することはきわめて興味深い。

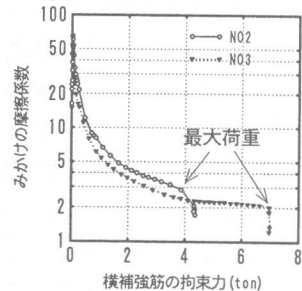


図13 見掛けの摩擦係数

以上により、摩擦係数 μ^* の値を2と特定した。この値を用いて、横補強筋の拘束による付着抵抗成分 T_N は式(1)で求めることができる。またコンクリートの拘束に抵抗成分 T_c は $T - T_D - T_N$ として求まる。補修後についても3つの抵抗機構が存在すると仮定した。

上記の方法で主筋付着応力を横補強筋の拘束抵抗、ダボ抵抗およびコンクリートの拘束抵抗に分解した結果を横軸に主筋自由端水平変位をとって図14に示す。まず、リジナル試験体について

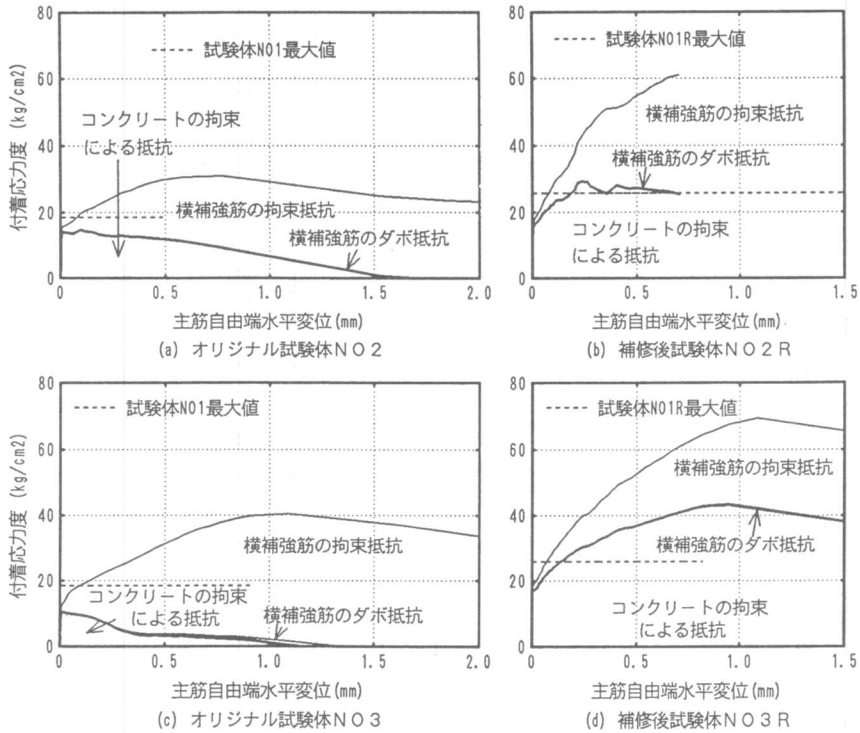


図14 付着抵抗成分の変化

みると（同図a、c）、コンクリートの拘束抵抗は、横補強筋量に拘らず最大耐力発現時よりはるか以前に最大値に達している。またその最大値は、横補強筋の無い試験体の付着割裂強度よりも低く、その傾向は横補強筋量が多いほど大きい。これに対して、補修後ではコンクリートの拘束抵抗による成分は最大耐力時にも大きな割合を占めた（同図b、d）。補修後の加力では主筋の付着強度に達する前にせん断破壊したことを考慮すると、ここで求めたコンクリートの抵抗成分は実際よりも過小評価と考えられる。補修後加力終了後の主筋の周囲の様子は図6に示した様に、注入エポキシ樹脂が主筋の周囲を覆ったまま破壊の様子が見られないことから、補修後の付着強度が樹脂の膠着力により発現し、その強度はここで求めたコンクリートの拘束による抵抗成分を上回っていたと考えられる。なお、横補強筋のダボ作用による抵抗成分は補修にかかわらず無視して差し支えない程度に小さかった。

7. まとめ

付着割裂破壊をエポキシ樹脂注入で補修すると補修後の付着強度がオリジナル部材の2倍程度まで上昇することを実験的に確認した。また実験結果の分析から、強度上昇の要因が注入された樹脂層を介した鉄筋とコンクリート界面間の膠着力の増大によるものであることを示した。

参考文献

「1」 田才 晃・境 有紀・青山 博之：付着破壊した鉄筋コンクリート部材のエポキシ樹脂による補修効果、第7回日本地震工学シンポジウム講演集、pp. 2053-2058、1986。