[2045] 震害を受けた鉄筋コンクリート造部材のエポキシ樹脂による補修に関する実験的研究

正会員 ○境 有紀（東京大学大学院）
正会員 田才 晃（東京大学工学部）
正会員 小谷 俊介（東京大学工学部）
正会員 青山 博之（東京大学工学部）

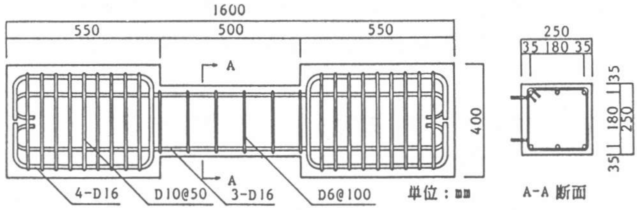
1．はじめに

地震によって被害を受けた鉄筋コンクリート造部材に対して、建物を再利用するための補修方法としては様々なものが提案されている。一方、補修方法は被害を受けた鉄筋コンクリート部材の破壊モード、被害の程度、あるいは部材の形状等によって変えなければならない。しかしながら、現在の段階では実験データが少なく、補修方法と有効性に関する適切な判断がなされているとは言い難い。

そこで本研究では、付着割裂破壊に対して効果が見られた[1]施工が比較的容易なエポキシ樹脂の注入による補修方法により、付着割裂破壊あるいはせん断破壊した鉄筋コンクリート部材の補修の効果およびその適用範囲について実験的に検討した。

2．実験方法

2.1 試験体　処女試験体は縮尺 1/2の柱を想定した形状、寸法、配筋が全く同じ３体である（ＳＴ１、ＳＴ２、ＳＴ３）。図－１にその配筋図を示す。中央部の長さ50cmの区間が試験部分で、せん断スパン比は１、断面寸法は250mm×250mm、かぶり厚は35mm、主筋は一段配筋で3-D16、引張り鉄筋比は0.88％、せん断補強筋比は0.26％である。



図－１　配筋図

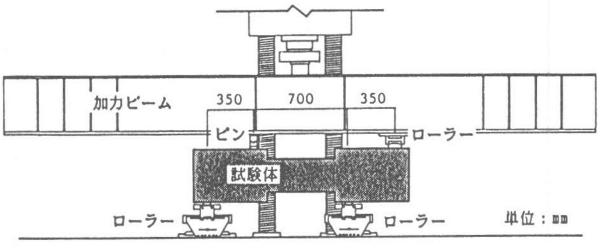
2.2 材料特性　試験体および補修に用いた諸材料の特性を表－１に示す。尚、コンクリート打設は横打ちで実施した。

2.3 加力方法　変形制御型の試験機により、試験部分に逆対称モーメントを生じさせる正負交番加力を行なった。加力装置を図－２に示す。外力の反転は、支承を入れ替えて行なった。図－２に示した支承の位置は、負方向の加力である。また、軸力は導入しなかった。加力履歴を図－３に示す。ＳＴ１、ＳＴ３については変形制御、ＳＴ２については６サイクルまでを荷重で制御し、それ以降を変形制御とした。

表－１　材料特性

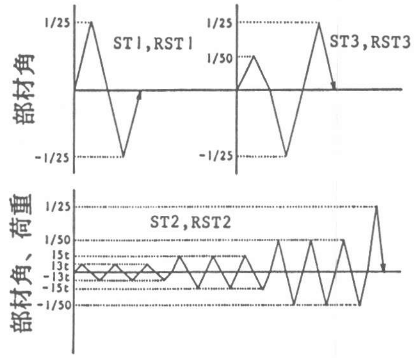
(1) コンクリート　材令 48日	
圧縮強度	330 kg/cm²
割裂引張強度	33 kg/cm²
(2) 鉄筋　D16 (SD30)	
降伏点強度	3.56 ton/cm²
引張強度	4.68 ton/cm²
(3) エポキシ樹脂	
圧縮強度	784 kg/cm²
圧縮弾性係数	2.33×10^4 kg/cm²
引張強度	502 kg/cm²

2.4 測定　　歪ゲージ式変位計を用いて、柱の層間変位に対応する両スタブ間の相対変位、せん断補強筋の伸びを測定した。せん断補強筋については、ビニールテープを巻いて付着を切り、M6ボルトを２本溶接してその相対すべり量を変位計を用いて測定した。尚、ボルトが被りコンクリートに当らないように、コンクリート打設前にボルトに発泡スチロールを巻いておいた。また、危険断面位置から 5cmおきに主筋の全長に渡って貼った塑性歪ゲージによって主筋の歪度を測定した。



図－２　加力装置

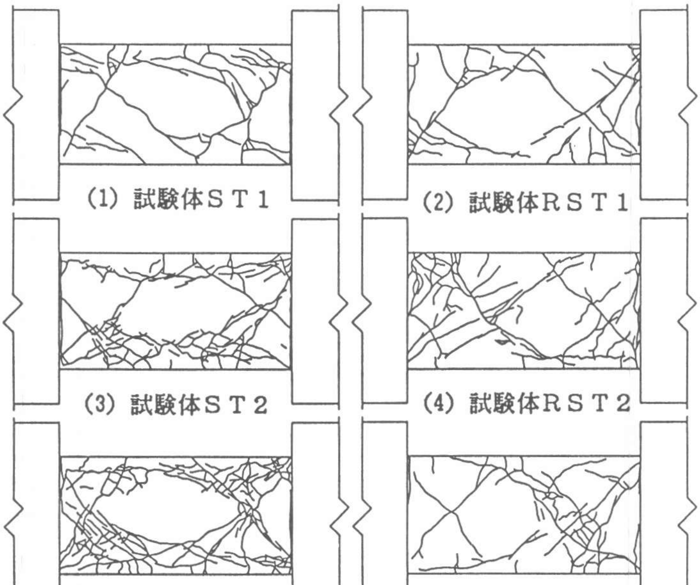
2.5 補修方法　　処女試験体は加力の後、残留変形を加力の前の状態に戻し、補修を行なって再加力した。補修後の試験体の名称は、処女試験体の名称の先頭にＲを付けて、ＲＳＴ１、ＲＳＴ２、ＲＳＴ３とする。補修方法は、すべてのひび割れを微細骨材を混入したパテ状のエポキシモルタルで塞ぎ、ゴム製のチューブを介して液状のエポキシ樹脂を低圧でゆっくりと注入する方法をとった。尚、補修後の試験体の加力履歴は処女試験体と同じである。



図－３　加力履歴

３．実験結果

3.1 破壊性状および復元力特性　　各試験体の加力終了後のひび割れ状態を図－４に示す。また、各試験体の部材変位とせん断力の関係を補修前（破線）と補修後（実線）と比較して図－５に示す。以下、処女試験体を補修前、補修して加力した試験体を補修後と呼ぶ。ＳＴ１は、正方向の大変形で曲げ降伏したものの、負方向にはいると間もなく付着割裂ひび割れがはいり、その後部材中央部に大きなせん断ひび割れがはいって剛性が低下し、加力が進むにつれてせん断ひび割れ幅が広がり、耐力低下を起こして破壊した。ＳＴ２、ＳＴ３は、最初の正方向の大変形（ＳＴ

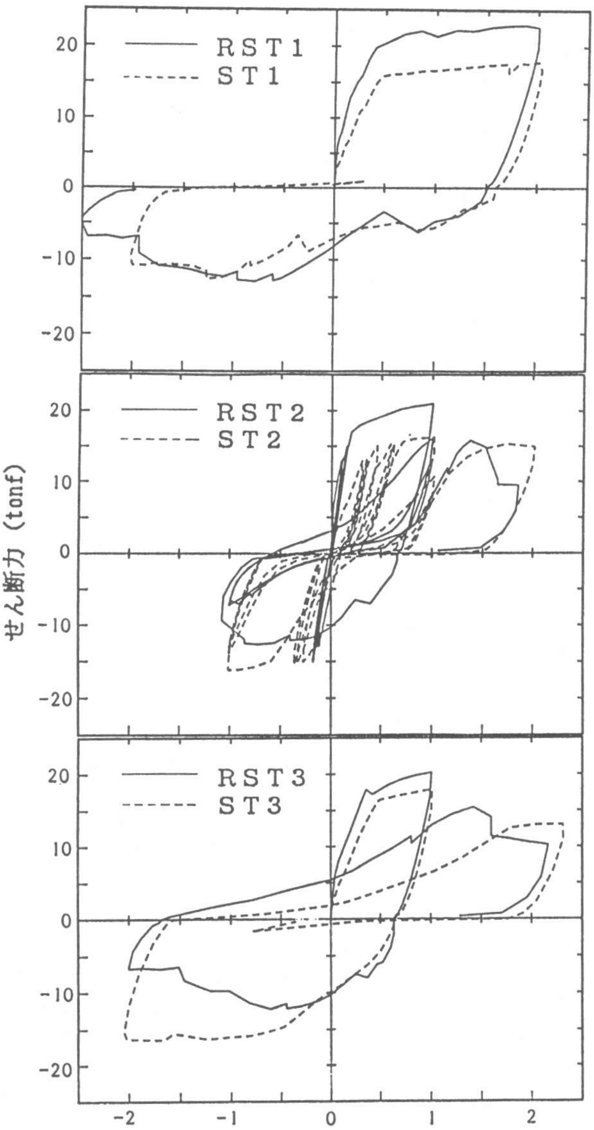

(1) 試験体ＳＴ１　(2) 試験体ＲＳＴ１
(3) 試験体ＳＴ２　(4) 試験体ＲＳＴ２
(5) 試験体ＳＴ３　(5) 試験体ＲＳＴ３

図－４　最終ひび割れ状況

２では７サイクル目、ＳＴ３では１サイクル目）で曲げ降伏したものの、負方向にはいると多数の付着割裂ひび割れがはいった。そしてその後の大変形では著しいスリップを起こし、逆Ｓ字形のエネルギー消費能の低い履歴性状を示した。これらの補修前の試験体について、最初の負方向の大変形の復元力特性と破壊性状を比較すると、それ以前の加力履歴の影響を受けることがわかる。即ち、直前の正方向で部材角1/25の大変形を受けたＳＴ１は、耐力低下が激しく、これに対して以前の変形の小さいＳＴ２、ＳＴ３は、付着破壊はしているものの、ＳＴ１に比べると脆性的な傾向は少ない。

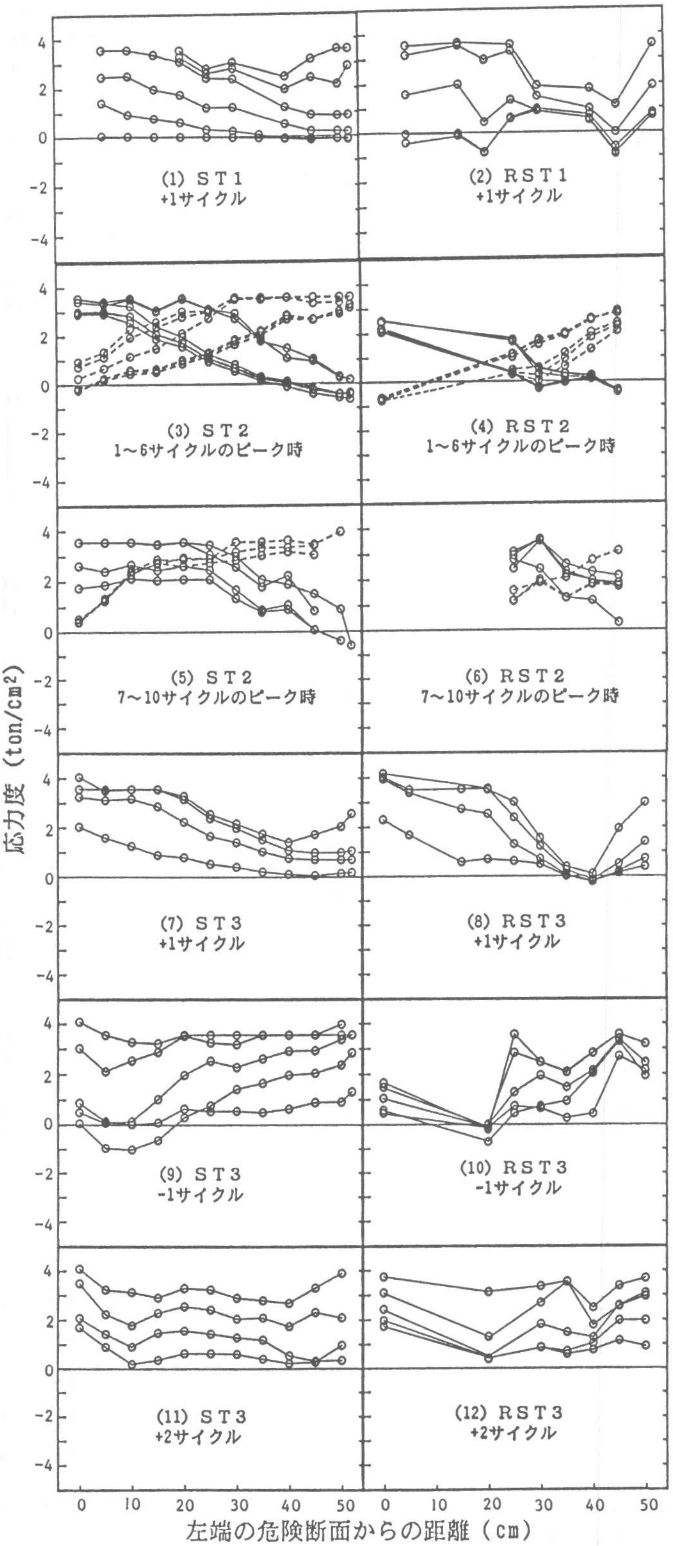
これらの補修前の試験体に対して、補修後は３体ともほぼ同じ様な破壊性状および履歴性状を示した。即ち、

① ひび割れ耐力が大きくなった、
② 補修前と同様に最初の正方向の大変形で曲げ降伏したが、塑性歪履歴を受けた鉄筋の時効効果を含んだ歪硬化[2] の影響のために曲げ降伏荷重は上昇した、 ③ そのサイクルの負方向にはいって、あまり付着割裂ひび割れがはいらずに、中央部に大きなせん断ひび割れがはいって剛性が低下し、 ④ 加力が進むにつれてせん断ひび割れ幅が広がり、耐力低下を起こして破壊した。ＲＳＴ２、ＲＳＴ３はその後、補修前と同様、逆Ｓ字形のエネルギー消費能の低い履歴性状を示した。各試験体について補修前後の破壊性状を比較すると、ＳＴ１、ＲＳＴ１はほぼ同じ、ＳＴ２、ＲＳＴ２あるいは、ＳＴ３、ＲＳＴ３については、補修前後で破壊モードが変わり、補修後の方が損傷が中央部のせん断ひび割れに集中して耐力低下が激しく、脆性的な壊れ方をした。このようにＳＴ２、ＳＴ３は、補修前後において付着割裂破壊からせん断破壊へと破壊モードが変化した。このことに関しては、3.2で述べる主筋の付着性状、3.3で述べるコンクリート、せん断補強筋にかかる力からも裏付けられる。



図－５　復元力特性

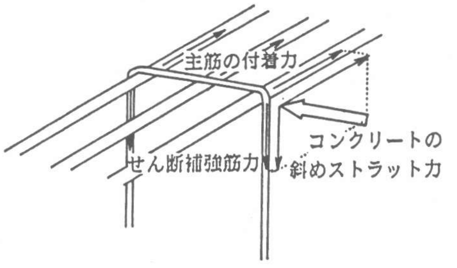
3.2 主筋の付着性状　主筋に貼った歪ゲージから求めた応力度分布を上端筋を例として図－６に示す。尚、歪度から応力度への変換は、降伏して最初の除荷が起こるまでは Bi-Linearモデルに従い、その後はRamberg-Osgoodモデルに従う復元力モデルを用いた。まず、弾性範囲の補修前後の主筋の付着性状の違いをみるために、ＳＴ２、ＲＳＴ２の６サイクルまでの各サイクルのピーク時の主筋の応力分布(3)(4)に着目する。実線は、正方向のピーク、破線は負方向のピークを示す。これを見るとＳＴ２では、-4サイクルから引張り側の引張応力が上昇し、圧縮域の応力度も引張りに転じている。つまり、補修前は弾性範囲から付着破壊が進んでいた。これに対してＲＳＴ２では、-4サイクルから引張域の引張応力が上昇している点は変わらないが、圧縮域の応力度が圧縮応力を維持して応力勾配を保っており、付着性状が良くなっている。また、ＳＴ１、ＲＳＴ１、ＳＴ３、ＲＳＴ３の+1サイクル(1)(2)(7)(8)についても同様に弾性範囲では、補修後の方が付着性状はよくなっている。次に、主筋降伏後の大変形時の補修前後の付着性状の違いを見るために、ＳＴ３、ＲＳＴ３の-1サイクル、+2サイクルの応力度分布 (9)(10)(11)(12)に着目する。こ



図－６　主筋の応力度分布

の図を見ると、-1サイクルでは若干補修後の方が付着性状が良くなっているが、+2サイクルになると補修前後とも、ほぼ主筋全長に渡って一様な引張応力となっており、付着応力はかなり失われている。全体的に見ると、補修後の方が若干付着性状が向上しているが、大きな差は見られない。ＳＴ２、ＲＳＴ２の(5)(6)についてもほぼ同様のことが言える。

以上のことから、主筋の付着性状は、弾性範囲では補修前より補修後の方が向上している。これに対して降伏後の大変形では、補修後も補修前と同様に付着性状は劣化するが、補修前の付着性状は維持できる。

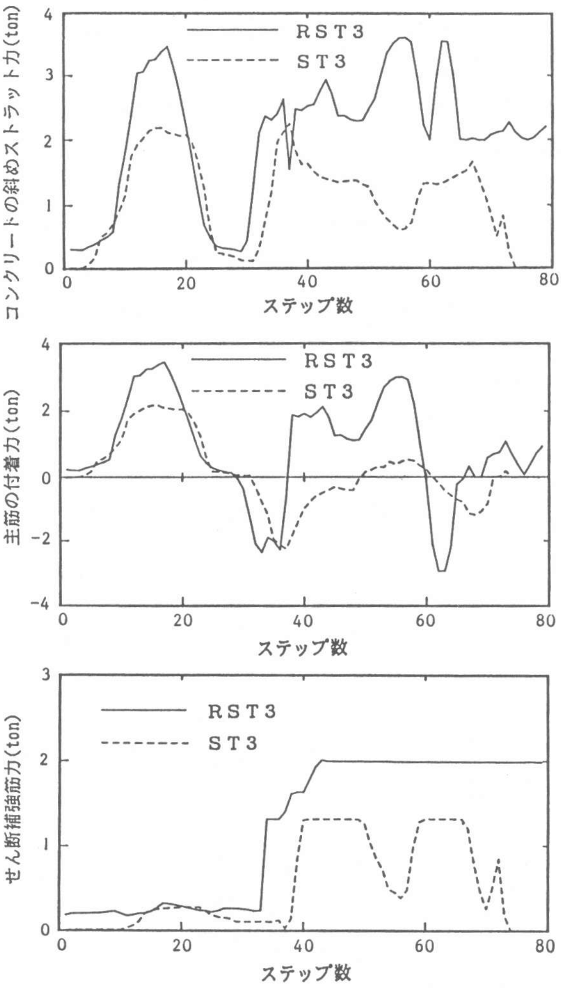


図－７　力の釣り合い

3.3 コンクリート、せん断補強筋にかかる力

図－７に示すような主筋とせん断補強筋が交わる場所においては、主筋の付着力、せん断補強筋力、コンクリートの斜めストラット力の間には力の釣り合いが成立っており、主筋の付着力とせん断補強筋力の合力の反力としてコンクリートの斜めストラット力が求まる。このような方法によって求めたコンクリートの斜めストラット力が加力が進むに従ってどのように変化していくかを、試験体ＳＴ３、ＲＳＴ３の右端の危険断面から20cmの位置の外側の主筋の上端の部分を例として、図－８に示す。横軸は加力履歴のステップ数で、1～30ステップが+1サイクル、30～55ステップが-1サイクル、55～80ステップが+2サイクルを指す。この図から補修後は、補修前に比べて全体的にコンクリートに大きな力が入力していたことがわかる。また付着力に関しては、全体に主筋の付着性状の良い補修後の方が付着力が大きくなっており、せん断補強筋力についても補修後の方が大きく、30ステップ以降の大変形時においてはついに破断に達し、コンクリートのせん断破壊が進んでいることを示している。

以上の様にコンクリートについては、部分的なサブストラットについてではあるが、補修後の方がコンクリートに大きな力が入力しており、せん断破壊を引き起こす原因となっており、それはせん断補強筋力からも裏付けられる。



図－８　コンクリートの斜めストラット力

3.4 まとめおよび考察　ここでは実験結果を総合的にまとめ、エポキシ樹脂の注入による補修によって文献[1] の試験体（せん断スパン比２、引張り鉄筋比1.02%、せん断補強筋比0.57%）が、補修後曲げ破壊し良好な性状を示したにもかかわらず、本報告の試験体が補修後脆性的にせん断破壊した原因について考察することにする。エポキシ樹脂注入の補修による部材の性状の変化としては、次の３つが挙げられる。即ち、①付着割裂ひび割れにエポキシ樹脂が注入されることによって補修後主筋の付着性状が向上し、付着割裂耐力が上昇した。②せん断ひび割れにエポキシ樹脂が注入されたにもかかわらず、補修後せん断耐力は上昇しなかった。③塑性歪履歴を受けた鉄筋の時効効果を含んだ歪硬化のために曲げ耐力が上昇した。本報告の試験体については、①、②によって付着割裂耐力がせん断耐力を上回り、③の曲げ耐力の上昇によってせん断耐力が曲げ耐力を下回り、更に曲げ耐力の上昇による大きなせん断力の入力のために、補修後せん断破壊した。これに対して、文献[1] の試験体では、本報告の試験体に比べて処女試験体のせん断耐力が曲げ耐力よりかなり大きく、補修後においてもこの大小関係が維持され、曲げ破壊した。つまり、補修によって付着割裂破壊が防止されることにより、補修前の試験体のせん断スパン比、引張り鉄筋比、せん断補強筋比の違いによるせん断耐力、曲げ耐力の大小関係の違いが補修後に現われたことになる。

尚、①と②について、付着割裂ひび割れに効果のあるエポキシ樹脂注入の補修が、せん断ひび割れにあまり効果がない理由としては、これらのひび割れが発生する応力場の広さの違いが原因である。即ち、付着割裂ひび割れが鉄筋の節の部分の非常に狭い応力場に発生するひび割れであるのに対して、せん断ひび割れは圧縮ストラットという比較的広い応力場に発生するひび割れであり、エポキシ樹脂の注入によってひび割れ部分は補強されても、その部分を避けてコンクリートの部分にせん断ひび割れが入ってしまうのである。このことは、補修前にせん断破壊したＳＴ１が補修後、性状が向上しなかったことからも裏付けられる。

４．結論

以上の実験および考察から以下の様なことがわかった；

① 付着割裂破壊した鉄筋コンクリート部材のエポキシ樹脂の注入による補修方法は、補修前より主筋の付着性状を向上させるため、付着割裂破壊を防止する効果がある。

② しかしながら、補修による付着割裂耐力の上昇のため、部材の形状、配筋などの条件によっては、補修後の破壊モードが曲げ破壊とならずせん断破壊となり、補修前の性状を下回ることもあるので、その適用範囲に注意する必要がある。

<謝辞>

実験実施に当り御協力頂いた、細川洋治氏を始め、東京大学工学部建築学科青山・小谷研究室の各位および、補修の材料および施工を提供して頂いたショーボンド建設株式会社の方々に深く感謝致します。

<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、p.p.2053-2058、1986

[2]田才　晃、山田　哲弥、小谷　俊介、青山　博之：鉄筋コンクリート造曲げ部材の補修後の耐力に関する研究、第７回コンクリート工学年次講演会論文集、p.p.653-656、1985