

(82) 地震応答実験システム (HYLSER) による RC 柱模型の修復・補強効果の検討

京都大学工学部 伊津野和行
 京都大学工学部 山田善一
 京都大学工学部 家村浩和
 阪神高速道路公団 水元義久

1. はじめに

地震によって構造物が損傷を受けた際、被害の程度がそれほど大きくなければ、被災箇所を修復・補強して再利用するという事も多い。その場合問題となるのは、修復・補強効果であるが、静的な強度はもちろん、動的な強度についても、検討を加えることがぜひとも必要である。本研究は、著者らの研究室で開発した実験システム HYLSEER (HYbrid Loading System of Earthquake Response) [1] を用いて、軸力作用下における修復・補強 RC 部材の地震応答実験を行ない、その弾塑性挙動について、検討・考察を行なったものである。

2. 実験概要

本研究での想定構造物は、Fig.1 に示す一柱式の RC 橋脚である。橋脚下端での応力状態が、供試体スパン中央部に再現されるよう、軸力および曲げモーメントの値を決定した。供試体の形状は Fig.2 に示すように 10×15cm の矩形断面複鉄筋柱で、載荷スパン長は 150cm である。鉄筋比 p が 1.1% でコンクリートの軸圧縮応力 σ_c が 10,20kg/cm² のものと、 p が 3.1% で σ_c が 10kg/cm² のものを採用した。

供試体中央部での変位を x 、復元力を $F(x)$ とすると 1 自由度としての運動方程式は次式で表わされる。

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + F(x) = -m \ddot{z}$$

ハイブリッド実験のシステム HYLSEER は、上式をマイクロコンピューターで数値積分する際に、履歴復元力特性 $F(x)$ を実験供試体から直接取り込むというものである。このシステムの特徴は、地震応答が部材の損傷に及ぼす影響、および部材の損傷が構造物の地震応答に及ぼす影響の両者を、同時に精度よく解明できる点にある。システム概要を Fig.3 に示す。なお入力地震波形としては El Centro NS 記録 (1940) および八戸 NS 記録 (1988) の強震部分 30 秒間を、実際の時間を 80 倍に引きのばして使用した。

本研究では、Table 1 に示す計 13 体の供試体を用い

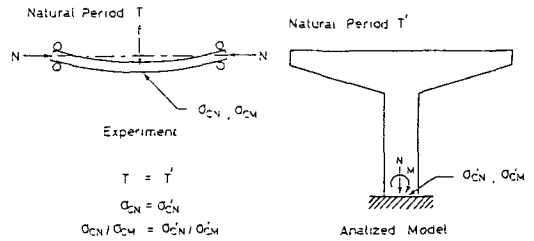


Fig.1 Relationship between an Experimental Model and a Bridge Pier

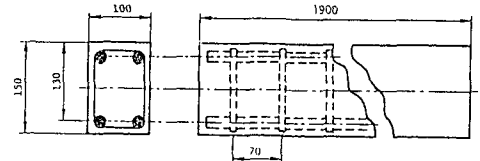


Fig.2 Dimensions of a Test Piece

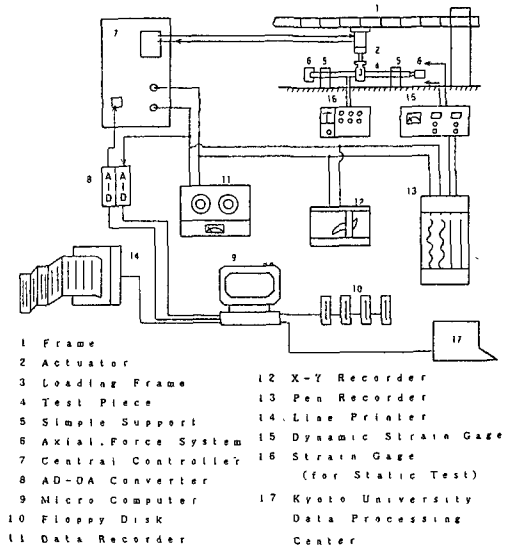


Fig.3 HYLSEER (Hybrid Loading System of Earthquake Response)

各種の修復工法を実施したが、ここではその中の数体について報告する。

3. エポキシ樹脂による修復

まず修復工法について述べる。[2] ひび割れ部に対しては、注入器を用いてエポキシ樹脂を注入した。この工法は、比較的低い圧力（約3kg/cm²）で長時間にわたって注入を行なうため、ひび割れの奥深くまでエポキシ樹脂を浸透させることが可能である。また、欠損部に対しては、エポキシ樹脂と細骨材の混合物によって断面を修復した。Fig.4 に、入力強度の違う3体（No.7, 8, 9）について、一度めの載荷（1st Loading; 処女載荷）と、修復後の載荷と、それぞれの履歴曲線を示す。どの場合も最大復元力は、処女載荷時とほぼ同じである。軸力が作用しない場合は、エポキシ樹脂を注入した部分としなかった部分との境界がクリティカルになったが[3] 今回の実験では、部材中央部においてひび割れ、圧壊がおこっている。これはおもに部材中央部の鉄筋の損傷が、かなり大きかったためだと考えられる。また、El Centro 300 gal を入力した供試体（No.9）は最大復元力こそ処女載荷時と同程度の値を示したが、処女載荷によって主鉄筋が座屈してしまっていたため、じん性は非常に小さく、すぐに破壊にいたっている。供試体数が少ないのではっきりとしたことは言えないが、主鉄筋が座屈したRC部材を、エポキシ樹脂のみで修復した場合、もとの部材と同程度の動的強度は期待できないようである。このように、エポキシ樹脂を用いて修復する場合には、主鉄筋の状態に十分な注意を要する。

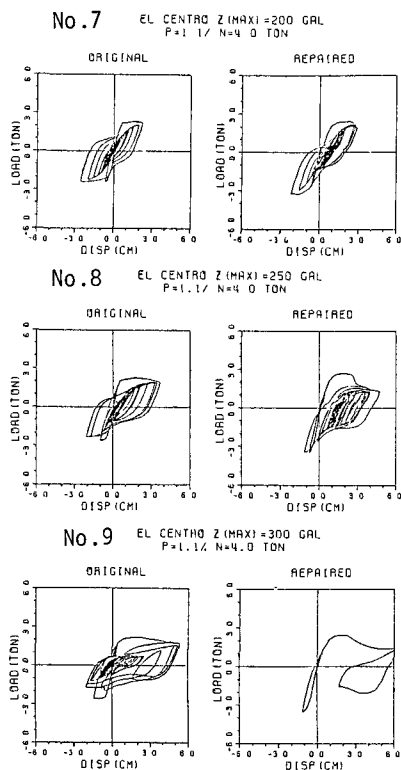


Fig.4 Hysteresis Loop of Original and Repaired Specimen

Table 1 Sequences of Loading

試体番号	鉄筋比 p	軸力 N	処女載荷	再載荷試験 (未修復)	修復部材の載荷試験		鋼板接着部材 の破壊試験		
					エポキシ注入	主鉄筋添接 鋼板接着			
1	1.1 %	4.0 t $\sigma_c = 20 \text{ kg/cm}^2$	100 HCN	→ 250 ELT			→ 100 HCN	→ 250 ELT	
2			150 HCN	→ 200 ELT	→ 150 HCN				
3			200 HCN	→ 200 HCN					
4			250 HCN	→ 250 HCN					
5			300 HCN	→ 300 HCN					
6			150 ELT	→ 300 ELT				→ 150 ELT	→ 300 ELT
7			200 ELT	→ 200 ELT					
8			250 ELT	→ 250 ELT					
9			300 ELT	→ 300 ELT					
10			2.0 t $\sigma_c = 10 \text{ kg/cm}^2$	150 ELT	→ 300 ELT (N=4.0t)		→ 150 ELT		
11	3.1 %	2.7 t $\sigma_c = 10 \text{ kg/cm}^2$	150 ELT	→ 250 ELT (N=4.0t)			→ 150 ELT	→ 300 ELT	
12			200 ELT	→ 200 ELT					
13			300 ELT	→ 300 ELT		→ 300 ELT			

digits ; maximum value of accelerogram (gal) ELT ; El Centro NS HCN ; Hachinohe NS

4. 鋼板接着による修復

a) 未修復再載荷実験 (2nd Loading)

数年前行なった軸力を作用させない場合の修復実験[3]により、損傷がきわめて小さい供試体は、修復後かなりの強度であることが予想される。そこで、ひび割れが少し入った程度の供試体は、部材が完全に破壊する過程の観察もかねて、入力強度の大きな地震波を用いて破壊実験を行なった。その結果どの供試体も、二度めの载荷にはほとんど耐えなかった。その履歴曲線をFig.5に示す。最初の大きな変形で供試体はほぼ完全に塑性域に入ってしまう、くの字型に曲がったままになった。履歴曲線を見ても、すぐに偏平型のループへ移行しているのがわかる。つまり各供試体によって程度の差こそあれ、一度めの载荷(処女载荷)ですでに部材抵抗力は、ほとんどなくなっていたということである。鉄筋の降伏加速度が、計算によると90~120 galであることを考慮すると、処女载荷によって主鉄筋は降伏状態を越えていたと考えられる。このことは、鉄筋コンクリートの弾塑性挙動における鉄筋の役割の大きさを示しているとともに、もう1つ重要な意味を含んでいる。部材の復元力特性と地震応答解析とを直結して同時に実施するハイブリッド実験においてのみ、部材の損傷が地震応答に及ぼす影響と、地震応答により部材が破壊される過程とを、正確に評価できるのである。地震によって外見上軽微な被害しか受けなかったRC部材でも、そのまま放置することは非常に危険だといえよう。なおどの供試体も、破壊位置は部材中央部であった。

b) 鋼板接着による修復載荷実験 (3rd Loading)

未修復再載荷実験によって破壊した部材を、鋼板接着工法によって修復した。Fig.6(a)のような破損部材に対し、エポキシ樹脂と細骨材とを混ぜたもので欠損部分を修復する。(Fig.6(b))そして、その外周に鋼板を配置し、すきまからエポキシ樹脂を注入して接着した。(Fig.6(c))鉄筋比1.1%の部材のうち1本(No.6)はひび割れ部のみを覆う長さとし、他の2本はひび割れ部の約2倍の長さとした。鋼板の厚さは、断面2次モーメントが主鉄筋と同じ値になるよう決定した。この工法は①現場施工が容易に行なえる ②軸力がある程度作用した状態でも修復・補強ができる、などの特長がある。修復後、処女载荷時と同じ地震波形を入力した。履歴ループ(Fig.5)を見るとわかるように、強度が処女载荷時よりかなり増加しており、いずれの場合もあまり塑性域に入っていない。これは主鉄筋がまったく働かないと仮定して鋼板厚を計算したが、実際にはまだかなり有効に働いていたためと考えられる。また鋼板をエポキシ樹脂で接着することにより、塑性ヒンジの発生位置が、部材中央部から鋼板端部へと移動することも大きな要因であろう。

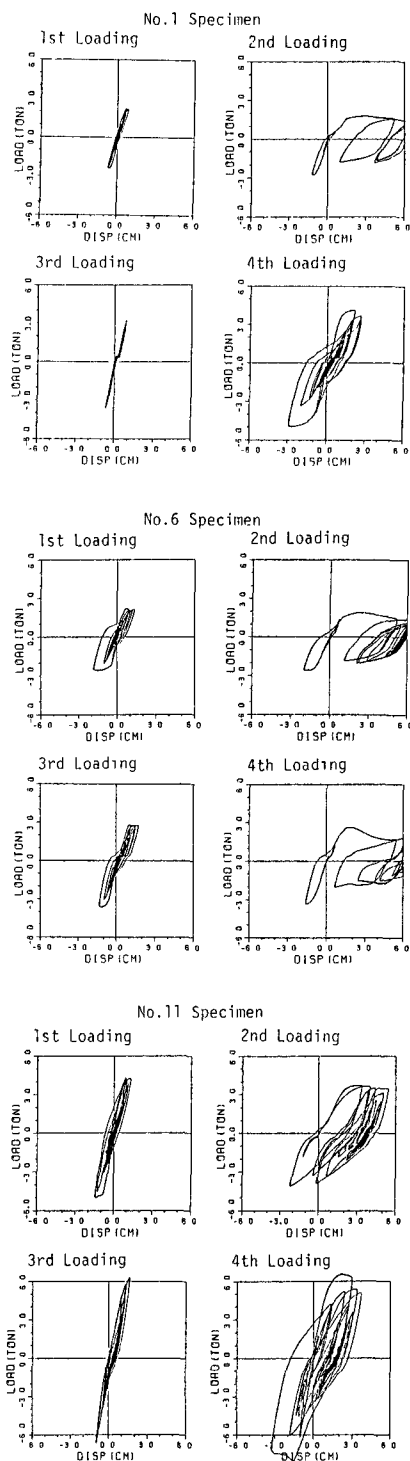


Fig.5 Hysteresis Loops of 1st(virgin), 2nd(unrepaired), 3rd(repaired) and 4th Loading

c) 再載荷破壊実験 (4th Loading)

修復部材の終局領域における挙動を調べるため、最大加速度が 250~ 300 galの地震波を再入力した。ひび割れ部の長さとはほぼ同じ長さの鋼板を接着した供試体 (No.6) は、完全な破壊をおこした。鋼板の端部においてコンクリートが圧壊をおこし、供試体がほぼ切断されるという大きな損傷を受けた。それに対して他の2体では、中央部において鋼板がはがれ、コンクリート中央部でひび割れがおこった。履歴ループの形状も安定しており、壊滅的な破壊には至っていない。このことから考えて、鋼板の長さの設定には十分な検討が必要であるといえよう。

5. 等価剛性およびエネルギー吸収量

鋼板接着による修復・補強効果についてさらに検討するため、No.6の供試体の載荷過程に対して、等価剛性とエネルギー吸収量を計算した。

応答時の各サイクルごとの等価剛性は、復元力がゼロになる2点の midpoint と、その絶対値が最大となる点とを結ぶ直線の傾きとした。その剛性の劣化過程を Fig.7 に示す。いずれの場合も、最初の大変形時に剛性が激しく劣化している。未修復再載荷実験 (2nd Loading) では、12秒付近でもう一度大きく劣化している。処女載荷時と、修復後と比較すると、初期剛性はほぼ完全に回復しているのがわかる。また、その後も同様な劣化過程を示している。

履歴エネルギー吸収量は、半サイクルごとの履歴曲線の囲む面積として求め、その累積値として、累積エネルギー吸収量を求めた。これを処女載荷時と修復後とで比較した図が、Fig.8 である。図からわかるように、処女載荷時と比べて、修復後もエネルギー吸収量は、あまり変わっていない。

このように鋼板接着による修復は、剛性、エネルギー吸収という面からみても、妥当な工法であるといえよう。

6. 参考文献 [1] 家村浩和：土木構造物の弾塑性耐震設計基準開発に関する研究，昭和58年度科学研究費補助金研究成果報告書，1984年 3月． [2] ショーボンド建設 K.K.：B I C S 注入工法，1981年 7月． [3] 山田善一：高架橋の弾塑性地震応答と設計レベルに関する研究 一高架橋 R C 橋脚のハイブリッド弾塑性地震応答実験と動的破壊規範一，阪神高速道路公団受託研究成果報告書，1982年 3月．

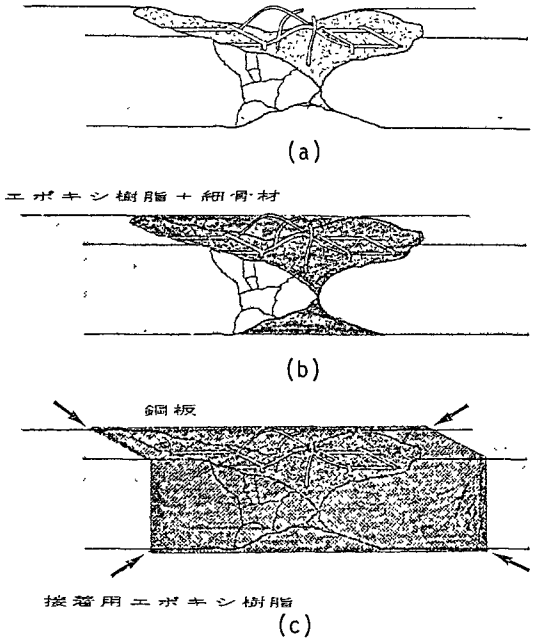


Fig.6 Process of Repairing by Steel Plate Covering

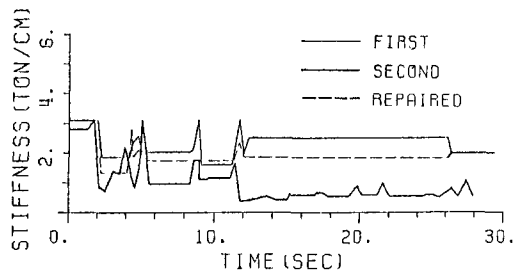


Fig.7 Stiffness Deterioration of 1st, 2nd and 3rd Loading

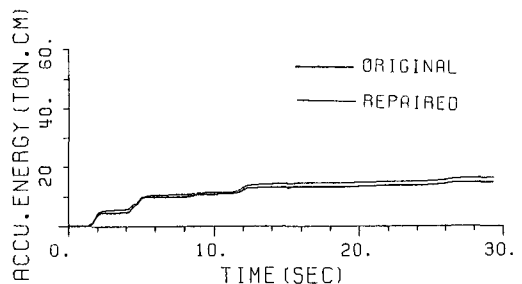


Fig.8 Accumulated Hysteretic Energy of Original and Repaired Specimens