

(152) 地震応答実験による修復 R C 部材の損傷

京都大学工学部 伊津野 和行
京都大学工学部 山田 善一

1. はじめに

地震によって軽微な被害を受けた構造物を、修復・補強して再利用することも多い。特にエポキシ樹脂を用いた修復工法が、損傷を受けた R C 構造物に対してよく用いられている。しかし、修復・補強された構造物が再度の地震に対してどのような挙動を示すのかは、必ずしも明らかではない。本研究では、まず、修復 R C 部材が地震応答によってどのような損傷を受けるのか、地震応答載荷実験の結果を用いて検討した。履歴ループや損傷程度を表わす指標を用い、あるいは実験後に部材を切断し、修復部材の損傷を総合的に解析を行った。その上で、地震応答解析手法に関して基礎的な考察を行った。

2. 実験概要

本実験は、十数体の R C 梁模型を用い、ハイブリッド実験の手法によって実施された。¹⁾ ハイブリッド実験は、計算機による動的応答計算に、実験から得られる履歴復元力特性をオンラインで取り入れるシステムである。修復された R C 部材など複雑な力学的特性を持つ対象を取り扱うのに適した手法である。

供試体断面を Fig. 1 に示す。コンクリート強度は 300 kgf/cm^2 (29MN/m^2) で、主鉄筋には D16 異形鋼棒を使用した。この供試体に軸力を 2.7 tonf (27 kN) ($\sigma_{\text{CN}} = 18 \text{ kgf/cm}^2 = 1.8 \text{ MN}$) 加え、スパン長 150 cm の単純支持で、スパン中央に載荷した。計算に用いた入力地震波は El Centro NS 記録の強震部分 30 秒間で、最大値を 300 gal に補正して使用した。なお、部材の降伏加速度は約 90 gal と推定されている。実験システムなど詳しくは文献 1) を参照されたい。

3. 修復再載荷実験による部材の損傷

1 度あるいは 2 度の載荷実験で損傷を受けた供試体を、エポキシ樹脂の注入工法によって修復した。本研究では、ゴム製の注入器を用いてひび割れ部分に低圧で長時間にわたって注入する工法を採用した。この工法は、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できると言われている。修復された供試体は、修復前と同じ入力地震波を用いて再載荷された。

修復前後の履歴ループを Fig. 2 に示す。修復前に行われた 1 回目の載荷で部材は大きな損傷を受け、特に部材中央部において断面の欠落が激しかった。このためエポキシ樹脂と細骨材を混合したエポキシモルタルによって断面形状を修復し、その後エポキシ樹脂の注入を行った。修復後の載荷でも修復前と同様あるいはより安定したともいえる履歴ループを描き、修復効果の

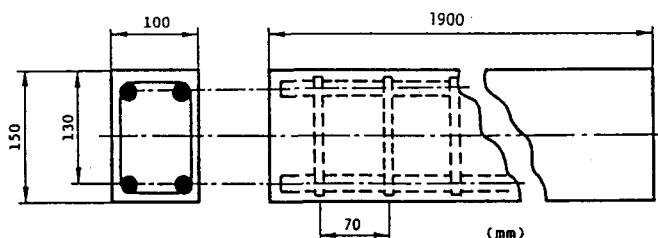


Fig. 1 Cross section of the specimen.

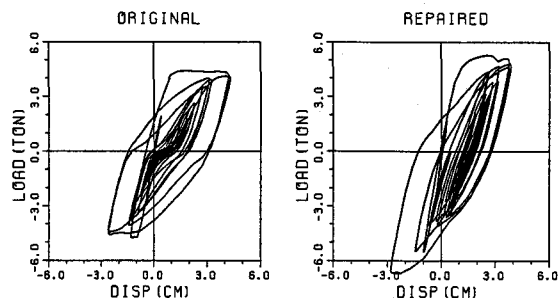


Fig. 2 Hysteresis loops of original and damaged specimens.

高かったことを示した。また、損傷程度も、修復後の方が断面の欠落などが少なかった。

次に、この修復供試体の損傷程度をダメージインデックスを用いて検討した。ダメージインデックスとは、エネルギー吸収による損傷と大変形による損傷とを重ね合わせた形で表現する指標で、Park, Ang, Wen らによって次式のような形で提案された。²⁾

$$D = \frac{\delta_M}{\delta_U} + \frac{\beta}{P_Y \delta_U} \int dE \quad \dots \dots (1)$$

ここに、D：ダメージインデックス、 δ_M ：最大応答変位、 δ_U ：単一方向荷重による終局変形能、 P_Y ：降伏強度、 $\int dE$ ：履歴エネルギー吸収量、 β ：正の定数、である。D \geq 1は破壊または全体的な損傷を意味する。また、右辺第2項の分母を分子の β で割ったものは終局的な履歴エネルギー吸収量を表わしている。ゆえに、 β が大きい場合は終局的な履歴エネルギー吸収能力が低いことを意味し、小さい場合は高いことを意味している。なお、 β の値としては、数多くの実験結果から回帰分析によって式が提案されており、その式を本実験にあてはめると、 $\beta = 0.25$ となった。また、 δ_U に関しては、静的載荷実験から、復元力が最大値から20%低下する点として求めた。

(1)式において、右辺第1項は最大応答変位によって受ける損傷を、右辺第2項は部材が繰り返し荷重下で履歴エネルギーを吸収することによって受ける損傷を表わしている。Fig.3は実験結果から得られたダメージインデックスの時刻歴である。(1)式の右辺第1項、第2項の値も同時に示した。第1項に注目すると、当然のことではあるが、入力地震加速度の大きくなる(2秒前後)において大変形をおこし、第1項の値は急増している。その後は小変形が続くため、値はほとんど変化しない。それに対して第2項は履歴エネルギー吸収量に比例するため、徐々に増加している。修復前の荷重でも、修復後の荷重でもダメージインデックスは最終的には1を越えており、全体的な損傷を受けたという実験結果をよく表現している。しかし、修復前には荷重後4秒程度で1以上になっているのに対し、修復後の供試体は約12秒後ようやく1を越え、最終的な値も約1.1と修復前(1.4)より小さい。これは、断面の欠落などは修復後の方が少ないという事実とよく符合している。また、修復前の部材の破壊には、ダメージインデックスの値で判断する限り、右辺第1項(変形に関する項)の影響が大きいといえる。ただし、ダメージインデックスが1を越えた時点で必ず破壊するとは限らない点には注意を要する。

他の供試体に関するダメージインデックスも検討した結果、本実験においては変形による損傷を表わす(1)式の右辺第1項が極めて大きなウェイトを占めていることがわかった。場合によっては、第2項の値が修復前後でほとんど同じであるにもかかわらず、第1項の値は大きく異なることもあった。入力地震強度が強く、継続時間が短いことによって、繰り返し荷重による影響が相対的に小さくなっていると考えられる。

4. 供試体の切断による損傷程度の検討

修復部材の動的挙動に大きな影響を与えられられるエポキシ樹脂の充填状況について考察するため、供試体の切断を行った。スパン中央部から左右10cm間隔で計7箇所を、ダイヤモンドカッターを使用

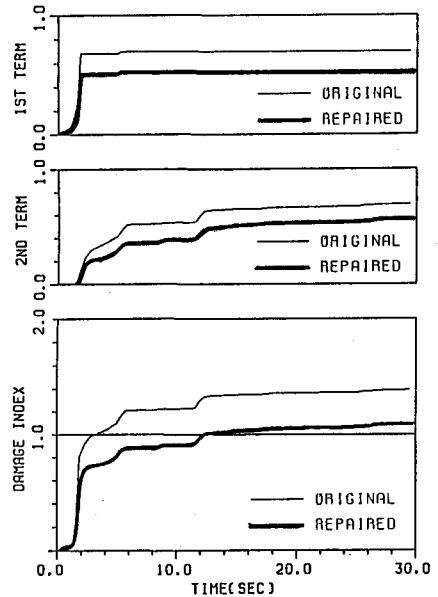


Fig. 3 Damage indices - time histories of original and repaired specimens.

して切断した。(Photo.1) ここで、Fig.4 に供試体の切断箇所を、Fig.5 に切断された断面の状況を示す。Fig.5 の断面図において、実線は注入されたエポキシ樹脂を、破線は再载荷によるひび割れを、黒く塗りつぶした部分は载荷による断面の欠落を修復するために使用したエポキシモルタルを示す。また、断面中4箇所は主鉄筋である。この図を描くにあたっては、0.1 mm 単位のメジャーがついた8倍のルーペを使用した。なお、ハイブリッド実験に当たっては、図の上下方向に载荷が行われた。この供試体切断により次のことが明らかになった。

- 1) 幅 0.1 mm 程度のひび割れや、鉄筋の付着切れの部分にまで、エポキシ樹脂は充填されていた。
- 2) 修復後のひび割れ発生箇所は、エポキシ樹脂量の少なかった部分に集中している。また、同じ入力を行ったにもかかわらず、ひび割れ発生本数は少なかった。エポキシモルタル部がほとんどそのまま残っていることから明らかなように、修復部材では断面の欠落も少なかった。これらは、樹脂の注入によって部材中央付近の引張強度が上がったことに起因すると考えられる。
- 3) 修復部材のひび割れ幅は、修復前のひび割れ（つまり樹脂注入された部分）の幅よりも大きいものが多かった。これは、ひび割れ発生本数が修復前より少ないことから、変形が集中した結果だと考えられる。

5. 修復部材の地震応答解析の試み

修復RC部材の動的挙動には、不確定な要素が数多く存在する。鉄筋コンクリートの履歴特性や個体差に関しては材料学の分野を中心として様々な研

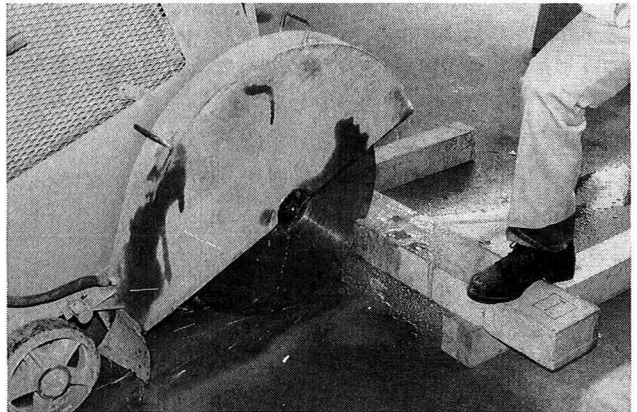


Photo. 1 Test specimen is cut into pieces using diamond cutter.

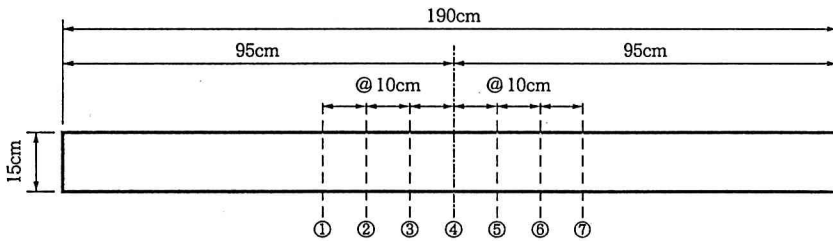


Fig. 4 Section numbers at which the specimen was cut.

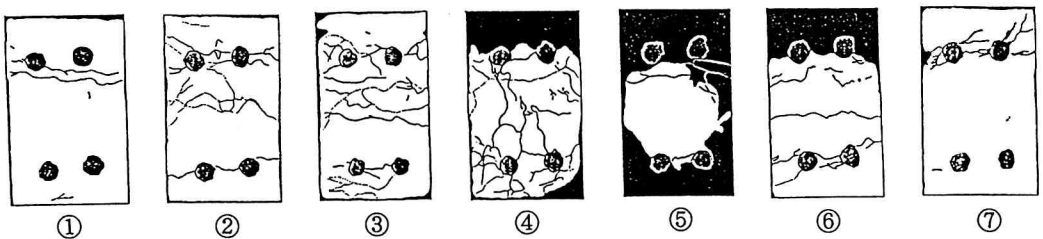


Fig. 5 Cross-sectional views of the test specimen.

Table 1 Assumed elastic properties of the materials
in the specimen.

MATERIAL	Young's Modulus (kgf/cm^2)
CONCRETE	1.5×10^5
STEEL	2.1×10^6
EPOXY RESIN	2.1×10^4

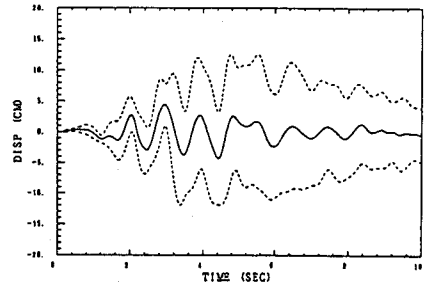


Fig. 6 Mean and $\pm 3\sigma$ - response
by the simulation.

究が行われているが、その他にも、修復場所と修復量に関する不確定要素がある。修復構造物を扱う研究では、修復箇所や修復量などがそれぞれのケースでまったく異なり、同じ状態を作り得ないことが、問題の一般的解決を妨げている。ここでは、

エポキシ樹脂の部材中に占める位置と量を確率的に取り扱う手法とについて検討した。なお、以下の計算に当たっては、問題の簡単化のため次の仮定を設け、有限要素法によって解析した。

- 1) 履歴復元力特性はすべて線形である。
- 2) 奥行きは無視して2次元問題として扱う。
- 3) エポキシ樹脂とコンクリートと鉄筋は、剛性のみが異なる。
(それぞれのヤング率を Table 1 に示す。)
- 4) 要素の破壊は考えない。

まず、存在場所を確率量だと考える前に、確定量だと仮定した場合の応答変位について検討した。スパン中央部 1/3、同 1/4、同 1/6 がエポキシ樹脂と仮定した場合を比較した。その結果、載荷方向にエポキシ樹脂の層が存在する場合、その量がスパン中央部 1/4 以下なら、樹脂量の多少の違いは応答に影響しないということが判明した。通常の修復量（エポキシ樹脂量）がこれほど多くなることはないので、線形解析を行う場合には、エポキシ樹脂の存在は無視し得ると考えられる。

次に、エポキシ樹脂の存在場所を確率量として取り扱い、数十回のシミュレーションから応答の平均値とばらつきを求めた例を Fig. 6 に示す。図中、実線が平均値で、破線が平均値 $\pm 3\sigma$ である。エポキシ樹脂の存在確率には、前章で述べた供試体の切断結果を参考にした。この手法により応答の最大値を予測することが可能だと考えた。しかし、本手法には次のような問題点がある。

- 1) 要素分割をかなり細かくしないと、現実的なモデル化ができない。
1つの要素内で特性は一定だと仮定しているため、ひび割れ部に充填されているエポキシ樹脂のように 0.1 mm 単位のをモデル化するのは困難である。要素間のバネとして樹脂を捉えるなどの工夫が必要であろう。
- 2) 計算時間が長い。シミュレーションの回数が少なくすむ方法も考慮すべきであろう。摂動法を用いた確率有限要素法の利用も考えられるが、エポキシ樹脂、コンクリート、鉄筋のそれぞれのヤング率が Table 1 に示したように異なりすぎており、そのままでは適用が困難である。

謝辞

供試体の切断に関して、ショーボンド建設㈱の重吉勝氏にお世話になった。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 山田善一・家村浩和・伊津野和行・大本修：ハイブリッド実験による修復・補強 R C 部材の地震時剛性劣化過程，土木学会論文集，第386号/1-8，pp.407~416，1987年10月。
- 2) Y. J. Park, A. H-S. Ang and Y. K. Wen : Seismic Damage Analysis and Damage Limiting Design, ICOSAR' 85, Vol. II, pp.197~205, 1985.