

損傷を受けた RC 梁部材の地震応答特性

山田 善一・伊津野和行

SEISMIC BEHAVIOR OF DAMAGED RC MEMBERS

By *Yoshikazu* YAMADA and *Kazuyuki* IZUNO

Synopsis

Damaged RC members are often repaired and reused after earthquakes. But there is some risk that damaged structures are left unrepaired if damage is not so serious. This paper shows seismic behavior of damaged RC members using hybrid (pseudo-dynamic) testing method. Obtained hysteretic loops of the damaged specimens were quite different from those of new specimens even if the previous behavior of damaged ones had been almost elastic. Repaired RC members were also used in the hybrid loading tests and cut after the tests to see the damaged segments. New cracks were found in unrepaired region and the numbers of them were less than those of old cracks which had been made before repair works. Analytical method to estimate seismic behavior of repaired specimens are also discussed in this paper.

1. はじめに

地震によって軽微な被害を受けた構造物が修復あるいは補強されて再利用されることは少なくない。しかし、修復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。また、1度めの地震で軽微な被害を受けたにもかかわらず、その構造物が未修復のまま放置された場合、再度の地震に対する応答が、無被害の物とどの程度異なるかという問題もある。

構造物の修復あるいは補強に関しては、実際の修復例や実験例などが報告されている^{1)~5)}。1988年に行なわれた第9回世界地震工学会議でも、修復・補強に関して28編もの論文が発表されている⁶⁾。しかしながら修復構造物を扱う研究では、損傷箇所や修復量などがそれぞれのケースで異なり、まったく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。損傷を受けた構造や修復された構造を取り扱うことのできる地震計算手法の確立が望まれる。

以上のことをふまえて本研究では、損傷を受けた RC 梁部材を対象として、損傷部分を修復した場合と未修復の場合における再度の地震に対する応答特性について、ハイブリッド実験の手法を用いて検討した。また、修復供試体を再載荷実験後に切断し、修復前後の地震応答による各断面の損傷を調査した。さらに、修復 RC 部材の地震応答解析計算手法について、基礎的な考察を行なった。

2. 実験概要

本実験は、十数体の RC 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⁵⁾。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

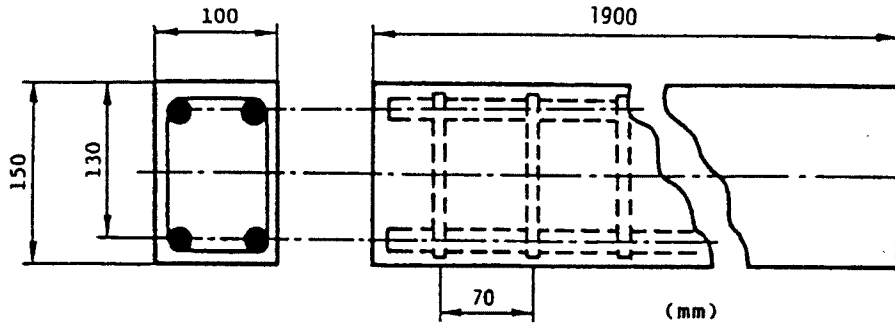


Fig. 1. Cross section of the specimen.

テムである。修復されたRC部材という複雑な力学的特性をも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 (29 MN/m^2) で、主鉄筋には D 10 および D 16 異形鋼棒を使用した。

この供試体に軸力を 4 tonf ($\sigma_{CN} = 27 \text{ kgf/cm}^2$) 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 (1940 年 Imperial Valley 地震, U. S. A.) と八戸 NS 記録 (1968 年 十勝沖地震, 日本) の強震部分 30 秒間で、それぞれ最大値を $100 \sim 300 \text{ gal}$ に補正して使用した。載荷順序を Table 1 に示す。なお、部材の降伏加速度は約 90 gal と推定されている。

3. 未修復再載荷実験

修復された供試体の地震応答特性について検討する前に、未修復で放置された物の地震応答特性について検討した。

Table 1 の Nos. 1, 3, 5 の各供試体は、1 度地震応答実験を行ったのち、続いてもう 1 度地震応答載荷実験を行ったものである。それに対し、Nos. 2, 4, 6 の各供試体は、それぞれ Nos. 1, 3, 5 の 2 度めの載荷に用いた入力地震波を、は

Table 1. Sequences of loading

	Input Record (Maximum Acceleration)		
No. 1	Hachinohe	(100 gal)	→ El Centro (250 gal)
No. 2	El Centro	(250 gal)	
No. 3	Hachinohe	(150 gal)	→ El Centro (200 gal)
No. 4	El Centro	(200 gal)	
No. 5	El Centro	(150 gal)	→ El Centro (300 gal)
No. 6	El Centro	(300 gal)	
No. 7	El Centro	(150 gal)	→ El Centro (300 gal)

じめから入力したものである。これら、No. 1 と 2, 3 と 4, 5 と 6 を各々比較することによって、損傷を受けた供試体を未修復のまま放置した場合の地震応答特性に与える影響が把握できると考えられる。

Fig. 2 に Nos. 1 ~ 6 供試体の履歴ループを示す。同じ入力のもの进行比较すると (図の b と c, e と f, h と i) 1 度損傷を受けた部材 (つまり b, e, h) の方が、応答が大きくなっている。ループも不安定である。特に No. 1 の 2 度めの載荷 (Fig. 2-b) では、実験途中で部材が破壊してしまった。このように、1 度めの地震応答がほとんど弾性範囲内であっても、2 度めの応答に及ぼす影響が大きい場合がある。

各ケースにおける最大変位を Table 2 に示す。損傷を受けた部材の最大応答変位は、同じ入力波で 1 度めの載荷を行なった部材の $1.2 \sim 3.4$ 倍になっている。El Centro 記録の最大値を 300 gal にして入力した No. 5 の 2 度めの載荷と、No. 6 の載荷を比較した場合、他の 2 ケースに比べて差が小さい。これは、2 回めの入力が大きい場合、それ以前の損傷程度はあまり関係しないことを示唆している。

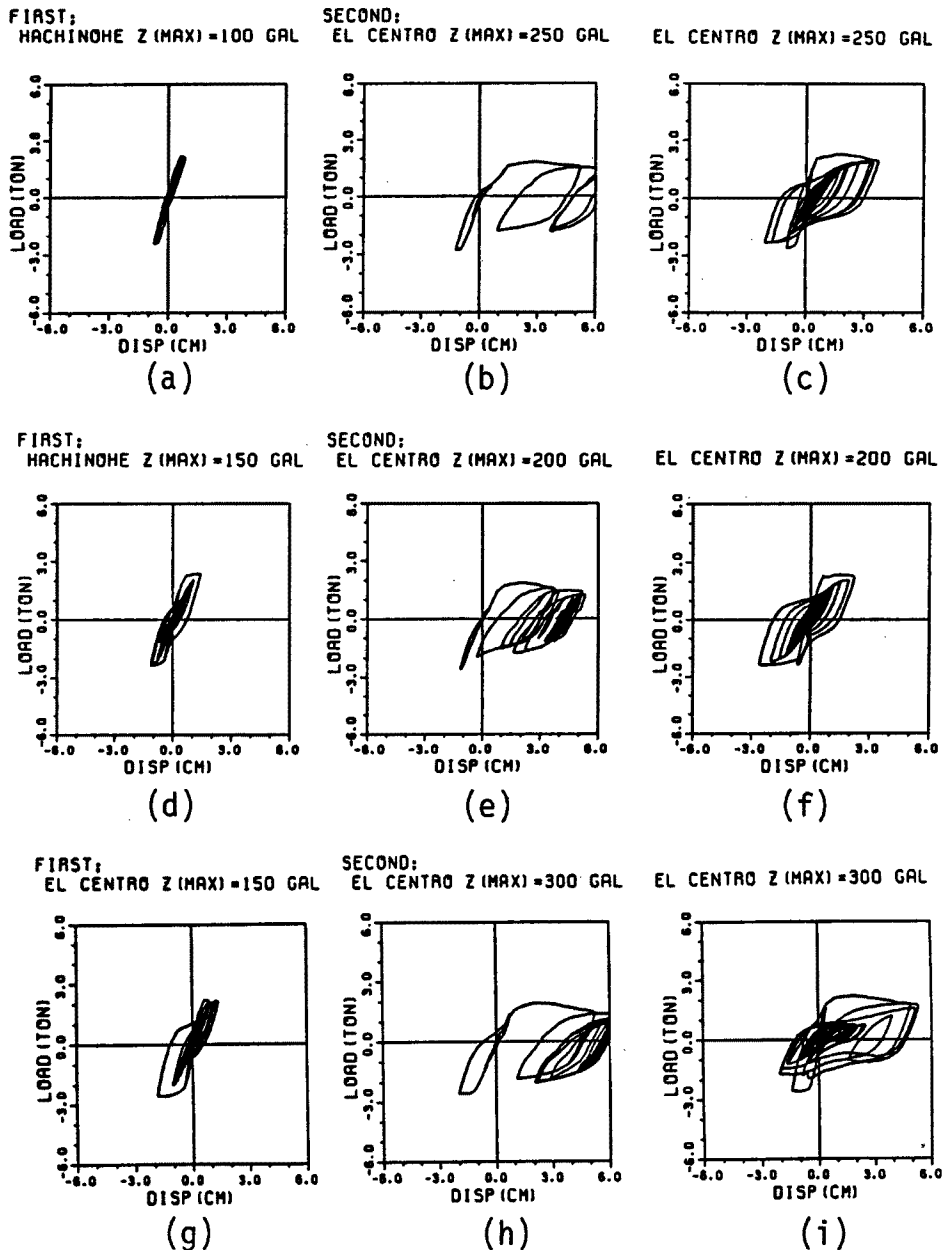


Fig. 2. Hysteresis loops of original and damaged specimens. (a) No. 1 specimen 1st loading (b) No. 1 specimen 2nd loading (c) No. 2 specimen (d) No. 3 specimen 1st loading (e) No. 3 specimen 2nd loading (f) No. 4 specimen (g) No. 5 specimen 1st loading (h) No. 5 specimen 2nd loading (i) No. 6 specimen

次に、各ケースにおける部材の損傷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らによって提案された。⁷⁾ これは次式で定義されている。

Table 2. Maximum displacement response of each test cases

	1st loading	2nd loading
No. 1	0.71 cm	10.6 cm
No. 2	3.13 cm	
No. 3	1.18 cm	4.54 cm
No. 4	2.24 cm	
No. 5	1.59 cm	5.37 cm
No. 6	4.54 cm	

$$D = \frac{\delta M}{\delta U} + \frac{\beta}{P_Y \delta U} \int dE \quad \dots (1)$$

ここに、 D : ダメージインデックス、 δM : 最大応答変位、 δU : 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、 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、 δU に関しては、静的載荷実験または動的載荷実験のスケルトンカーブより、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 ~ 5 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。各供試体の破壊過程を知るために、(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どころ (El Centro 波形では2秒前後、八戸波形では10秒前後) において大变形をおこし、第1項の値は急増している。そして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。どのケースもダメージインデックスは最終的に1を越えており、全体的

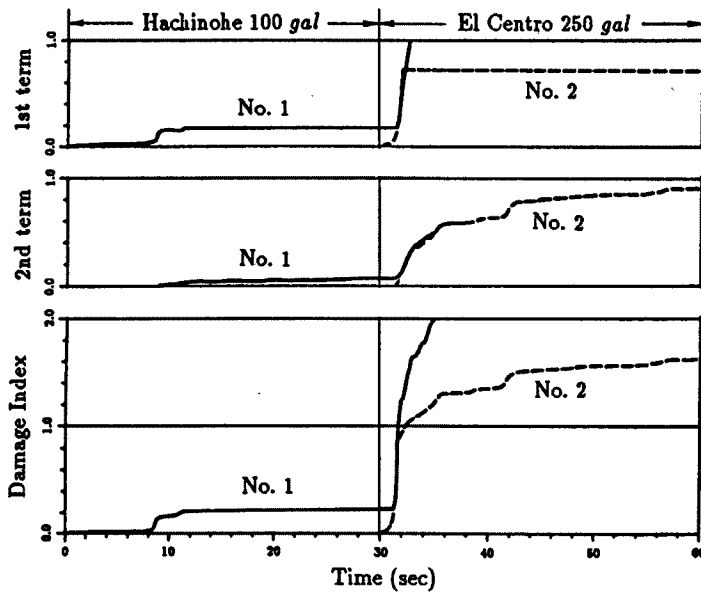


Fig. 3. Damage indices-time histories of Nos. 1 and 2 specimens.

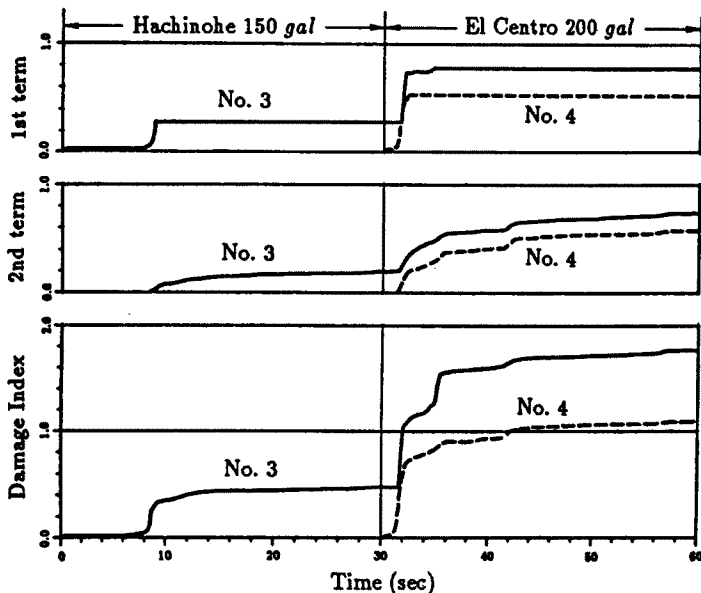


Fig. 4. Damage indices-time histories of Nos. 3 and 4 specimens.

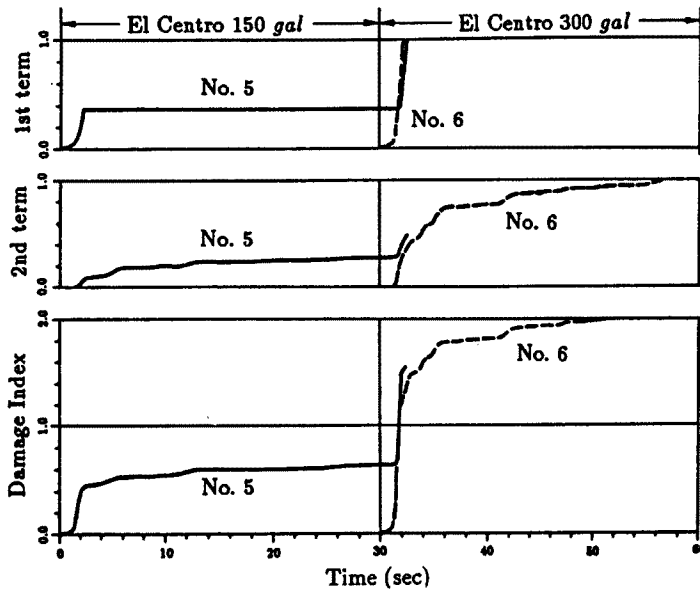


Fig. 5. Damage indices-time histories of Nos. 5 and 6 specimens.

な損傷を受けたという実験結果をよく表現している。

Fig. 4を見ると、No. 4 供試体のダメージインデックスは載荷後 10 秒付近でようやく 1 を越え、最終的にも約 1 である。これに対して同図の実線で表わされる No. 3 のダメージインデックスは、再載荷後すぐに 1 を越えている。また、Fig. 3 の No. 1 と 2 の比較では、 $D \geq 1$ となる時点は同じだが、その後の値の増加傾向がまったく違う。このように、ダメージインデックスの時刻歴を比較することから、地震を受けた場合にそれ

までの損傷が大きな影響を与えるということを数値的に表現することができた。

Figs. 3～5 のすべての図に共通していることは、変形による損傷を表す第 1 項が極めて大きなウェイトを占めていることである。これは特に Fig. 3 で顕著であり、この場合履歴エネルギー吸収量を表す第 2 項は実線も破線もほぼ同じである。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小さくなっているためだと考えられる。また、Fig. 5 の No. 5 と 6 の比較では、No. 5 の 1 度めの載荷の影響があまり出ていない。これは最大変位の項で述べたように、地震が大きすぎるとそれまでの履歴に関係なく構造物が破壊するという例である。

実験数が少なく定量的なことは言えないが、以上のことより、1 度地震による被害を受けた構造物の取扱いには注意を要することがわかった。

4. 修復再載荷実験 と供試体の切断

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。これは、BL インジェクターと呼ばれる注入器を用いて、ひび割れ部分に低圧で長時間にわたって注入する工法である⁸⁾。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。この実験に関しては詳細な報

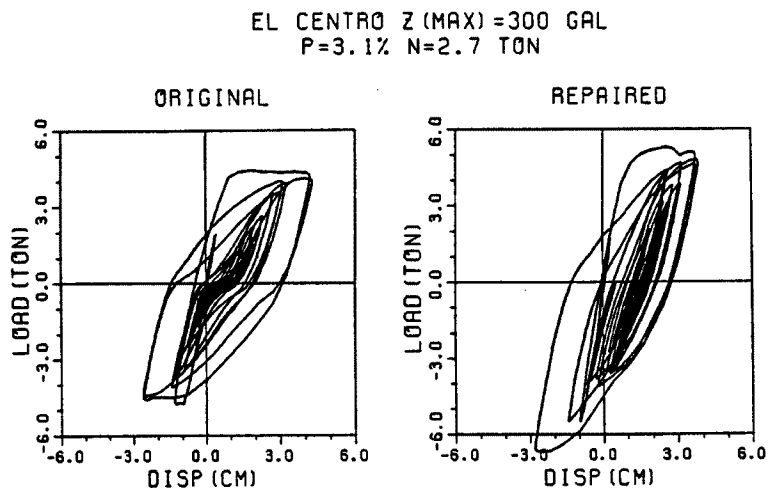


Fig. 6. Hysteresis loops of original and repaired No. 7 specimen.

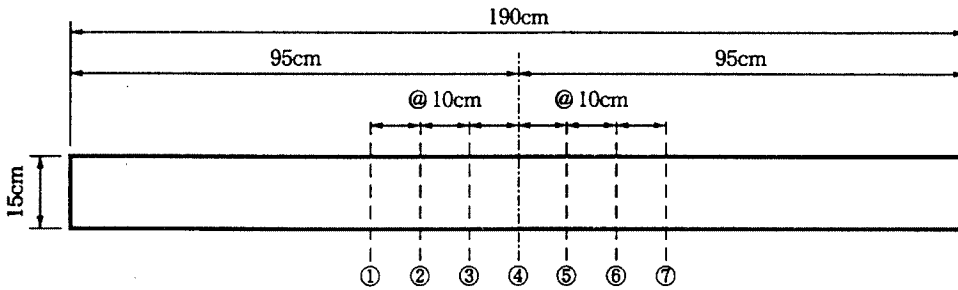


Fig. 7. Section numbers at which the specimen was cut.

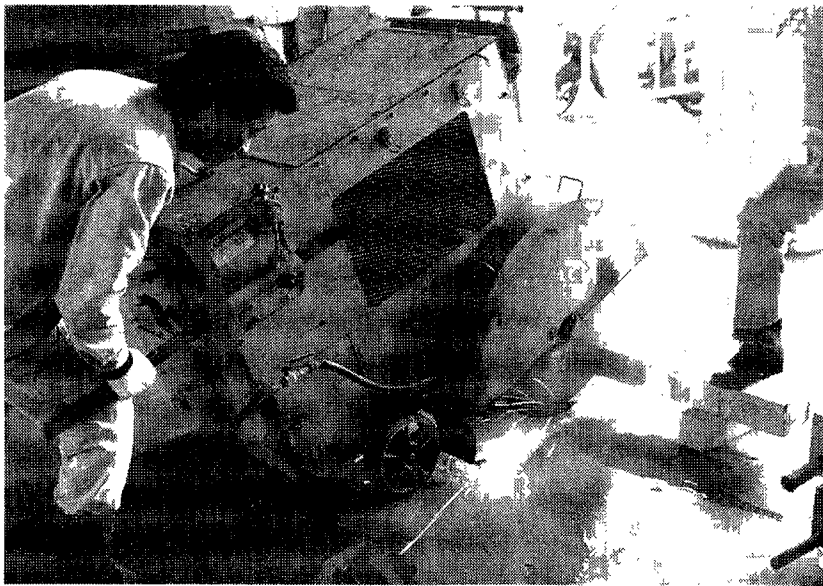


Photo. 1. Test specimen is cut into pieces using diamond cutter.

告⁵⁾があるので、ここではその中の1体の履歴ループを示す。

Fig. 6
に、前記
Table 1
の No.7 供
試体の、修
復前後の履
歴ループを
示す。修復
前に行われ
た1回めの
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なった。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、修復効果の高かったことを示した。

次に、修復部材の動的挙動に大きな影響を与えると考えられるエポキシ樹脂の充填状況について考察するため、供試体の切断を行なった。切断したのはNo.7 供試体である。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して切断した。(Photo. 1) Fig. 7 に供試体の切断箇所を、Fig. 8 に切断された断面の状況を示す。断面図において、実線はエポキシ樹脂を、破線は再載荷によるひび割れを、塗りつぶした部分は載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、0.1mm 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あたっては、図の上下方向に載荷が行われた。この供試体切断により、次のことが明らかになった。

- 1) 幅0.1mm 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、修復前と同じ人力を行なったにもかかわらず、ひび割れ発生本数が少なかった。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

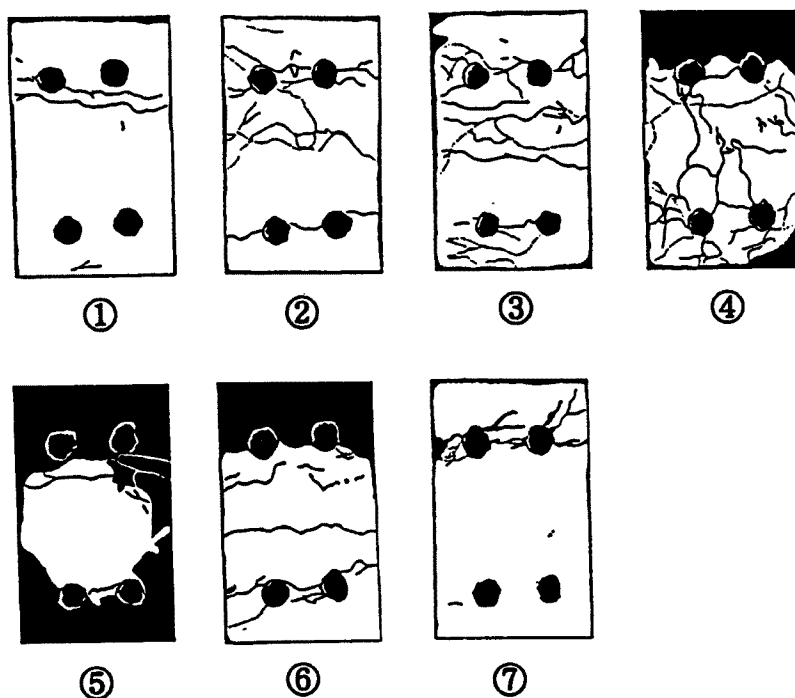


Fig. 8. Cross-sectional views of the test specimen.

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分野で様々な研究が行なわれているが、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。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って計算機で地震応答計

算をする手法について検討した。

部材のモデル化には有限要素法を用いた。まず、部材の切断結果を参考にして、エポキシ樹脂の存在確率を決定した。次に、その存在確率に一致するように、乱数を用いてエポキシ樹脂の存在場所を決める。そして、このモデルを用いて地震応答解析を行なった。モデルを決めて応答解析を行なう操作を繰り返すことによって、修復部材の地震応答の最大値を予測することが可能になるのではないかと考えた。

例として Table 1 の No.7 供試体のエポキシ樹脂量をもとにして樹脂の存在確率を決め、El Centro 記録の最大値を 300 gal にした波形を入力して地震応答計算を行なった。Fig. 9 に、最初の 5 秒間の応答変位を示す。図中実線は 40 回のシミュレーションの平均値を表し、破線は平均値 $\pm 3\sigma$ を表す。なお、この計算にあたっては、問題の簡単化のため、以下の仮定を設けた。

- 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

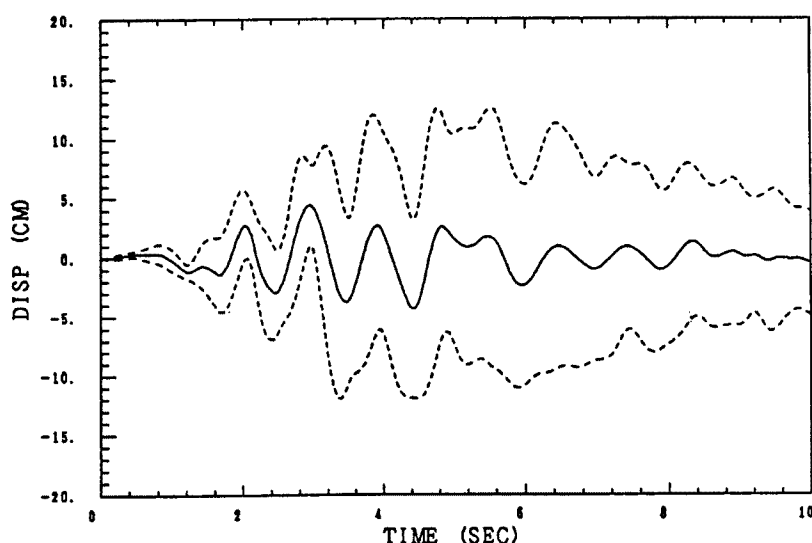


Fig. 9. Mean and $\pm 3\sigma$ -response by the present method.

Table 3. 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

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 3** に示す。

4) 要素の破壊は考えない。コンクリートは引張に対しても抵抗する。

このようにして平均値とばら

つきを推定する手法としては、摂動法を用いた確率有限要素法が有名である。しかし本研究で取り扱うエポキシ樹脂とコンクリートと鉄筋は、**Table 3** に示したようにヤング率が異なりすぎており適用が困難である。そこで前述したようなシミュレーションを行なったが、この手法には次のような問題がある。

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 単位のものモデル化するのには困難である。要素間のバネとして樹脂を把えるなどの工夫が必要であろう。

2) 計算時間が長い。ベクトル計算機の利用なども考えられるが、シミュレーションの回数が少なくてすむ方法も考慮すべきであろう。

6. 結 論

以上本研究では、RC梁部材のハイブリッド地震応答実験をもとに、損修を受けた部材の地震応答特性について検討を行なった。得られた主な結果は次のとおりである。

1) 地震によって損傷を受けた部材を未修復のまま放置した場合、再度の地震に対して示す応答は損傷のない場合の数倍大きくなることもある。

2) 修復された部材に再度載荷したのち、部材を切断して断面状況を調査した。幅 0.1 mm 程度のひび割れにもエポキシ樹脂が注入されていたことや、修復後の載荷によるひび割れが以前とは違う場所に入っていること、そしてそのひび割れ本数は修復前より少なく幅は広いこと、などが判明した。

3) 修復に用いたエポキシ樹脂の部材中の位置と量を確率的に表現した有限要素解析を行い、応答の平均値とばらつきを推定しようとした。

なお、本研究の実施にあたっては、京都大学工学部の家村浩和助教授に多くの有意義な御助言をいただいた。また、供試体の修復と切断には重吉勝氏を始めショーボンド建設株式会社の方々と、京都大学工学部の中西伸二技官ならびに同土木工学教室耐震工学研究室の学生諸君にお世話になった。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 小村敏・太田実: コンクリートの維持・補修・取壊し, 新体系土木工学 36, 技報堂出版, 1983.
- 2) 今井弘・近藤実・横山晶好: 地震被害を受けた宮城県泉高等学校の補修・補強方法とその裏付け, コンクリート工学, Vol. 17, No. 10, 1979, pp. 9~22.
- 3) 山本芳栄・今井弘: 震災を受けたRC建物のエポキシ樹脂注入による補修効果に関する解析的研究, 第30回構造工学シンポジウム, 1984, pp. 153~161.
- 4) Iemura, H., Kato, T. and Kawatani, Y.: Hybrid Experiment on Earthquake Response of Original and Repaired RC Members, Proc. of the 6th Japan Earthquake Engineering Symposium, 1982, pp. 825~832.
- 5) 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RC部材の地震

- 時剛性劣化過程, 土木学会論文集, 第 386 号 / I-8, 1987, pp. 407 ~ 416.
- 6) Proc. of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. VII, 1988, pp. 353 ~ 522.
 - 7) Park, Y.J., Ang, A.H-S. and Wen, Y.K.: Seismic Damage Analysis and Damage Limiting Design, ICOSSAR'85, Vol. II, 1985, pp. 197 ~ 205.
 - 8) ショーボンド建設株式会社: BICS 工法, 1981.