

震害補修されたRC橋脚の再来地震に対する応答予測

ESTIMATION FOR RESPONSE TO SECOND COMING EARTHQUAKE
OF REPAIRED REINFORCED CONCRETE BRIDGE PIERS

島 弘* 水口裕之** 神原紀仁*** 横井克則****

By Hiroshi SHIMA, Hiroyuki MIZUGUCHI, Norihito KANBARA and Katsunori YOKOI

A method for estimating the response to second coming earthquake of repaired reinforced concrete bridge piers damaged by a primary earthquake was proposed. This method is based on the earthquake response analysis consisting of the degree of damage-plasticity ratio-hysteretic characteristics relationship. Experiments were carried out to determine the relationship between the degree of damage and plasticity ratio using a shaking table. It was found that the degree of damage can be represented by summation of crack length and number of buckled reinforcing bar. The hysteresis model taking the effect of the damage into consideration proposed by the authors before was used. The accuracy of the method was verified by comparing the responses obtained from analysis and experiments.

1. まえがき

鉄筋コンクリート橋脚が地震により被災した場合には、復旧物資運搬の要請から、早期の復旧が望まれる。また、再建設することに比べた経済性の面から、軽微な被害に対しては補修が行われる。震災補修のマニュアルとして、道路震災対策便覧¹⁾では、鉄筋コンクリート橋脚の被災の程度に応じた補修・補強等の方法を示している。しかし、これでは再来する地震の大きさに対する考慮はなされていない。地震の発生確率を考えると、極大地震が続けて発生することはない。したがって、耐用年数とその期間に再来する地震の大きさに応じた方法の補修・補強を行うのが合理的である。そのため、震害補修された鉄筋コンクリート橋脚の再来する地震時における応答あるいは損傷程度が予測できなければならない。

震害補修された鉄筋コンクリート橋脚の再来地震時における応答を計算するためには、その補修橋脚の復元力特性を知る必要がある。今までに、震害補修された鉄筋コンクリート部材の挙動に関する研究としては、田才ら²⁾、尾坂ら³⁾、山田ら⁴⁾、小林ら⁵⁾、石橋ら⁶⁾などのものがあるが、その復元力特性まで検討したものはない。

著者ら⁷⁾は、これまでに、震害をエポキシ樹脂を用いて補修した鉄筋コンクリート橋脚の再来地震に対す

*	工博	徳島大学助教授	工学部 建設工学科	(〒770 徳島市南常三島町2-1)
**	工博	徳島大学教授	工業短期大学部土木工学科	(〒770 徳島市南常三島町2-1)
***		徳島大学助手	工業短期大学部土木工学科	(〒770 徳島市南常三島町2-1)
****		徳島大学大学院	工学研究科土木工学専攻	(〒770 徳島市南常三島町2-1)

る応答は、その1次地震による損傷の程度によって異なり、損傷程度が大きいほど同じ再来地震力に対する応答変位が大となることを実験的に明らかにした。すなわち、1次地震による損傷の程度によって、補修後の復元力特性は異なるのである。

したがって、補修橋脚の再来地震に対する応答を予測するためには、さらに、1次地震による損傷程度と補修後の復元力特性との関係を明らかにする必要がある。また、実用的な予測手法とするためには、損傷程度を表す指標として、被災後の外観から判断されるものを用いて復元力特性を求められるようにしなければならない。

本研究は、エポキシ樹脂をひびわれおよびかぶりコンクリート剥落部に注入・充填して補修した鉄筋コンクリート橋脚模型を対象として、損傷度と復元力特性との関係を実験的に調べ、外観から判断した損傷度を表す指標を用いて、再来地震に対する地震応答を予測する方法について検討するものである。

2. 予測方法

地震によって損傷を受け、エポキシ補修された鉄筋コンクリート橋脚の再来地震に対する応答を予測するためには、その橋脚の補修前の損傷程度を判断し、損傷によって劣化した復元力特性を決定しなければならない。すなわち、損傷の程度と復元力特性との関係を知る必要がある。この問題に対して、過去に著者ら⁸⁾は、損傷の程度が復元力特性に及ぼす影響の調査を行った。その結果として、復元力特性の違いを表すために適する損傷度指標は、1次地震における塑性率 μ ($\mu = \delta_{\max} / \delta_y$; ここで、 δ_{\max} = 最大応答変位、 δ_y = 降伏変位)であることを示し、塑性率をパラメータとして剛性が低下する劣化型復元力モデルを提案した。しかし、問題点としては、1次地震における塑性率はそれを地震後に求めるのは困難であり、外観から判断できる損傷の程度を表す指標とはならないということがある。

そこで、本研究における予測方法としては、1次地震における塑性率を中間パラメータとし、外観から判断できる損傷程度と復元力特性とを結びつける方法を考える。すなわち、損傷程度－塑性率関係および先に提案した塑性率－復元力モデル関係を用いるのである。そのため、外観から損傷程度を定量的に判断するのに適した損傷度指標を決定し、損傷程度－塑性率関係を定式化する必要がある。以下に、この方法を用いた応答予測と適用例を述べるが、式については一つの条件に対するものであり一般的ではないことを断っておきたい。

3. 損傷度－塑性率関係

(1) 実験

a) 実験条件

R/C橋脚模型9体を用いて損傷の程度を変化させる実験を行い、その結果から、外観から判断できる損傷の程度と塑性率との関係を求めた。

天端変位(塑性率)とひびわれ本数および鉄筋座屈の時期との関係は、載荷速度によって異なる⁹⁾ため、実験は動的荷重で行わなければならない。さらに、軸力による影響に対して現実を模擬するための最適な方法を考えて、振動台を用いた実験とした。

損傷の程度は、作用させる地震力の大きさを変えて変化させた。したがって、これら9体の供試体における断面およびせん断スパン比などの条件は同一であり、本研究ではこの一条件下について検討するものである。

入力地震波の繰返し特性によってひびわれあるいは座屈性状が変わる可能性があるが、本研究では入力波にEl Centro波(NS成分)と時間軸および加速度が相似形のものを用いた。各供試体に入力した最大加速度を表-1に示す。

表-1 1次地震载荷における各供試体への入力加速度

供試体番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
最大入力加速度, m/s ²	13.8	14.9	15.9	16.3	16.7	17.1	17.5	18.2	18.9

b) 供試体

供試体は、単一柱式RC橋脚の模型である。橋脚の実物大実験は困難であるため、現実には縮小模型実験となる。今までに、RC橋脚の実験として種々の寸法の供試体が用いられているが、いずれの大きさにしても縮小実験による寸法効果を考慮しなければならない¹⁰⁾。本実験では、模型の実物に対する縮尺率を1/10に想定して、相似則および寸法効果を考慮した。

材料的寸法効果としては、せん断、定着鉄筋の引抜け、主鉄筋の座屈などの挙動への寸法の影響がある。このため、使用材料の寸法を縮尺率と同じく原寸の1/10として、実物の挙動を忠実に再現できるようにした。

供試体の形状および断面を図-1に示す。軸方向鉄筋比およびせん断スパン比は一般的な2.21%および4.3のものとした。せん断補強量については、本研究の目的である震害補修を考慮して、過去に建設されている比較的少ないものを想定し、帯鉄筋比を0.05%とした。

主鉄筋には実物でD32に相当する直径3mmの異形棒鋼（降伏強度=355MPa, 引張強度=530MPa）を使用し、帯鉄筋には直径0.9mmの鉄線（引張強度=395MPa）を用いた。コンクリートとしては、骨材の最大寸法を2.5mmとした。各供試体のコンクリート強度を表-2に示す。

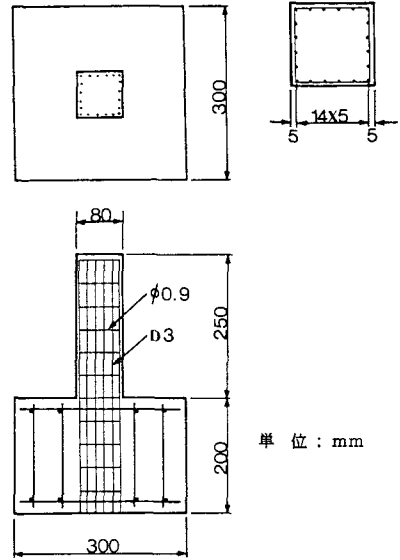


図-1 供試体

表-2 各供試体のコンクリートの圧縮強度

供試体番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
コンクリートの圧縮強度, MPa	45.1	39.8	36.4	31.5	31.5	37.0	38.6	39.9	39.8

c) 载荷方法

柱頭部に600kgの重錘を取り付け、軸応力を0.92MPaとして、振動台を用いて载荷した。入力地震波の周期は、運動方程式に基づく相似則を考慮して、時間縮尺を実測された波形の $1/\sqrt{10}$ とした。

(2) 損傷状況および塑性率

各供試体のひびわれ、損傷の状況および塑性率 μ を図-2に示す。なお、塑性率を求めるための降伏変位は、3体の静的载荷試験の結果から1.0mmとした。入力加速度が最も小さい供試体No.1では、曲げひびわれのみが発生した。これよりも入力加速度が大きい供試体では、曲げひびわれに加えてせん断ひびわれが生じた。さらに入力加速度を大きくした供試体No.4, 6, 7, 8, 9では、かぶりコンクリートの剝離と共に、主鉄筋の座屈が生じた。

(3) 損傷度指標

外観から損傷程度を判定する指標としては、①ひびわれの種類（曲げ・せん断）、②ひびわれの幅・長さ・本数、③かぶりコンクリートの剝離量、④主鉄筋の座屈本数、などが考えられる。これらの指標のうちで損傷程度を定量的に評価しやすいものは、a)ひびわれ発生量、b)かぶりコンクリートの剝離量、c)主鉄筋の

座屈本数, と考えた。そこで, これらの3つの指標で表した損傷度と塑性率との関係について検討を行う。ただし, これらの関係の式そのものについては, 供試体の条件が変われば異なるものとなる。

(4) 損傷程度—塑性率関係

a) ひびわれ発生率—塑性率

実験から得られたかぶりコンクリートの剝離および主鉄筋の座屈を生じなかった供試体のひびわれ発生率 ν と塑性率との関係を図-3に示す。また, 図中には本実験とは供試体条件が異なる川島ら⁹⁾の実験結果(現実的な載荷速度: $V=100\text{cm/sec}$ のもの)も示す。ひびわれ発生率は, ひびわれがどの程度発生したかを表すものであり, 各ひびわれの長さを累加した総ひびわれ長さ(ΣL_o)を橋脚断面の外周(本実験供試体の場合は $2 \times (B+B)$, ここで B =断面幅)で除して無次元化して表した。

曲げひびわれ・せん断ひびわれの種類にかかわらず, ひびわれ発生率と塑性率とは一対一の関係がある結果を示した。この結果から, かぶりコンクリートの剝離および主鉄筋の座屈を生じない損傷範囲における損傷程度は, ひびわれ発生率で表すことができるといえる。また, 川島らの供試体(せん断スパン比が6.8, 主鉄筋比が0.87%)は本供試体に比べるとより曲げ卓越型であり, 供試体条件が違えば, ひびわれ発生率—塑性率関係は異なることを示している。

b) かぶりコンクリートの剝離量—塑性率

かぶりコンクリートの剝離量と塑性率との関係の本実験結果および川島ら⁹⁾の実験結果を図-4に示す。剝離量は, 橋脚側面の4面の総剝離表面積 A を高さ H を断面幅 B に取った基準表面積 S (本実験供試体の場合は $S=B \times 2 \times (B+B)$)で除して無次元化した剝離率で表した。この図から, 剝離率と塑性率との間には直線的な関係があることがわかる。したがって, かぶりコンクリートの剝離および主鉄筋の座屈を生じた橋脚の損傷程度は, かぶりコンクリートの剝離率で表せうるといえる。また, ひびわれ発生率と同様に, 供試体条件が違えば, かぶり剝離量—塑性率関係は異なることを示している。

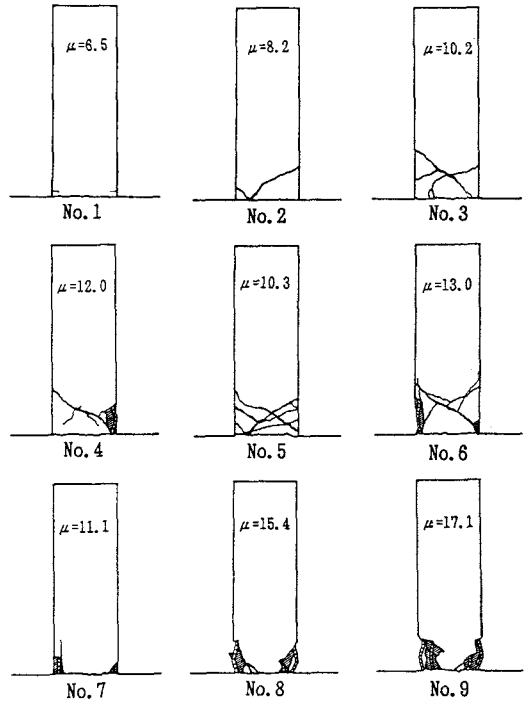


図-2 損傷の状況および塑性率

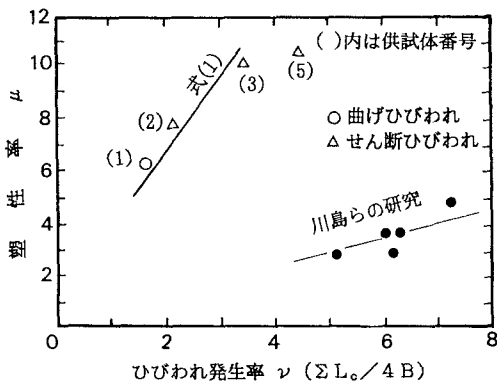


図-3 塑性率—ひびわれ発生率関係

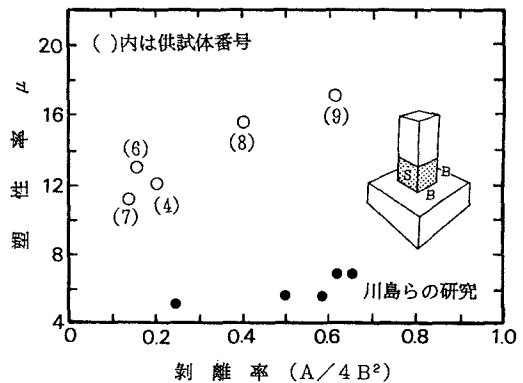


図-4 塑性率—かぶりコンクリートの剝離率関係

c) 主鉄筋の座屈本数－塑性率

同様に、かぶりコンクリートの剝離および主鉄筋の座屈を生じた供試体の主鉄筋の座屈本数と塑性率との関係を図-5に示す。ここで、座屈本数の判定は、かぶりコンクリートの剝離は鉄筋の座屈によって生じるとの報告¹¹⁾から、かぶりコンクリートが剝離した部分の鉄筋本数とした。座屈本数は、総主鉄筋本数で除して無次元化した座屈率 η で表した。座屈率と塑性率との間にも、剝離率と塑性率との関係と同様に、直線的な関係がみられる。すなわち、かぶりコンクリートの剝離および主鉄筋の座屈を生じた橋脚の損傷程度は、主鉄筋の座屈率で表せる。

(5) 定式化

以上の結果から、本研究では、損傷の程度を、かぶりコンクリートの剝離および主鉄筋の座屈を生じなかった橋脚についてはひびわれ発生率で、かぶりコンクリートの剝離および主鉄筋の座屈を生じた橋脚については主鉄筋の座屈率で表すことを提案する。

本研究の供試体条件においては、ひびわれ発生率 ν と塑性率 μ との関係は、図-3に示すように、

$$\mu = 3.5\nu \quad (1)$$

および主鉄筋の座屈率 η と塑性率 μ との関係は、図-5に示すように、

$$\mu = 8\eta + 10 \quad (2)$$

で表した。

これらの関係式と先に提案した塑性率－復元力特性関係⁸⁾を用いて、種々の度合の損傷を受けて補修されたRC橋脚の再来地震に対する地震応答が予測できる。

4. 解析結果および考察

(1) 解析

震害補修されたRC橋脚の応答解析に用いる復元力特性として、本研究では図-6および表-3に示す先に提案した補修橋脚に対するモデルを用いる。損傷の程度によって影響を受ける復元力特性の要因は、剛性劣化係数 β である。これは、図-7に示すように、損傷程度を示す塑性率の関数で表され、本供試体条件の場合、表-3中の(3)式で与えられる。それぞれの供試体の外観から判定した損傷度 ν 、 η と、それらから(1)式、(2)式を用いて求めた塑性率 μ およびその塑性率 μ から(3)式を用いて求めた剛性劣化係数 β を表-4

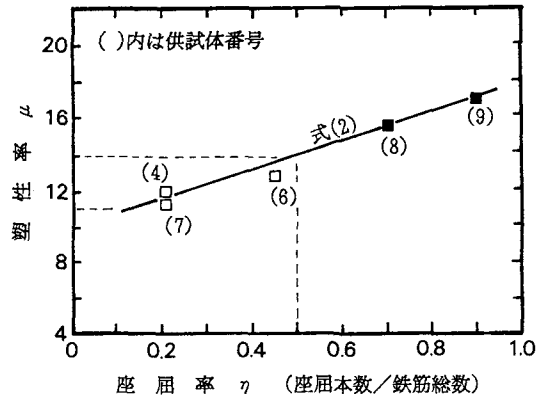


図-5 塑性率－主鉄筋の座屈率関係

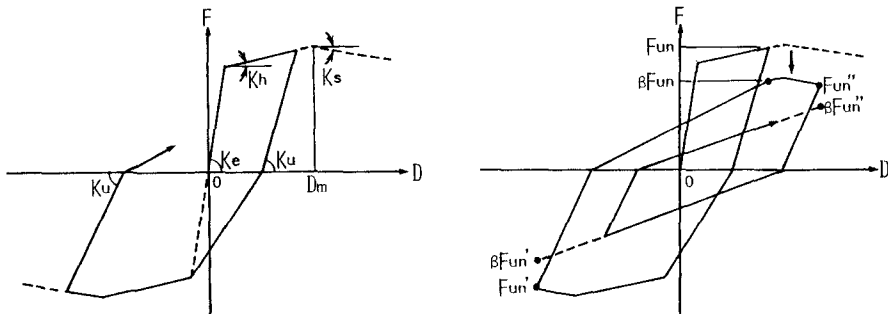


図-6 震害補修されたRC部材の損傷程度を考慮した劣化型復元力モデル⁸⁾

表-3 復元力モデルのパラメータと値⁸⁾

パラメータ	値	
Ky	4 MN/m	
Fy	7 kN	
Kh	150 kN/m	
Dm	7 mm	
Ks	-30 kN/m	
Ku	Dmax ≤ Dm	2.5 MN/m
	Dmax > Dm	1.5 MN/m
β	Dmax ≤ Dm	1
	Dmax > Dm	1-0.02(μ-4) 式(3) μ = 損傷程度(塑性率)

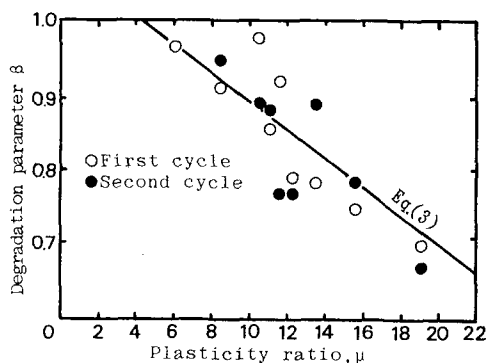


図-7 損傷程度と剛性劣化係数βとの関係⁸⁾

に示す。このβにより補修橋脚の損傷程度に応じた復元力特性が決定される。

それぞれの補修供試体の再来地震に対する応答を計算した。入力地震波は、先の実験と同様の波形で加速度の異なるものである。入力最大加速度と解析で得られた最大応答変位を表-4に示す。

応答計算は、16ビットパソコンを用いて、β=1/4、γ=1/2としたNewmark-β法により、1質点系構造物として行った。減衰係数は0とし、数値積分における計算時間間隔は5msとした。

(2) 実験

a) 実験条件

先の1次地震によって損傷を受けた供試体をエポキシ樹脂を用いて補修し、それらに1次地震と同様の方法を用いて再来地震を作用させ、その応答を測定した。損傷の程度のかかわらず補強は施していない。

b) 補修方法

補修方法は、まず、かぶりコンクリートの剝離による断面欠損部をパテ状エポキシ樹脂接着剤で補修した。その後すべてのひびわれにグラウト材として液状エポキシ樹脂接着剤を圧入するものである¹²⁾。この方法はすでに現場で実用されているものであり、補修は専門家に依頼して行い、その精度を維持・安定させた。用いた2種のエポキシ樹脂は、それぞれ圧縮強度が約80MPa、引張強度が約35MPa、圧縮弾性係数が約3GPaのものである。内部への注入は、ひびわれ幅が0.05mmまでは注入できることが確認されており、本実験においても、補修後の内部観察により、きわめて小さなひびわれまで注入できていることが観察された。

c) 載荷方法および結果

補修後、それぞれの供試体に1次地震と同様の波形の地震力を入力して、それらの応答を測定した。各供試体に入力した地震波は、応答解析に用いたものと同じであり、表-4に示す最大加速度のものである。実験による最大応答変位の結果を表-4に示す。

表-4 損傷度から計算した塑性率μ、剛性劣化係数βおよび再来地震載荷の結果

供試体番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9
損傷度	ひび割れ長(ν)	1.5	1.9	3.2	—	4.1	—	—	—	—
	座屈率(η)	—	—	—	0.20	—	0.45	0.20	0.70	0.90
μ	3.5ν (1)式	5.3	6.6	11.2	—	14.4	—	—	—	—
	8η+10 (2)式	—	—	—	11.6	—	13.6	11.6	15.6	17.2
β	1-0.02(μ-4) (3)式	0.97	0.95	0.86	0.85	0.83	0.81	0.85	0.76	0.74
再来地震の最大加速度, m/s ²		18.9	19.9	18.4	17.3	16.7	17.4	18.8	18.5	17.5
最大応答変位 mm	解析値	24.3	50.6	25.1	11.5	10.0	11.8	44.4	53.3	12.0
	実験値	23.0	45.9	28.0	12.3	10.7	11.1	46.6	62.1	16.3

(3) 結果の比較

解析精度を評価するために、それぞれの供試体における最大応答変位の実験結果に対する解析結果の比を図-8に示す。図中の白丸が本提案方法によるものである。また、黒丸は従来の方法、すなわち1次地震における損傷程度の違いによる復元力特性の変化を考慮しない場合を示す。本研究における解析結果は実験結果とよく一致しており、この解析方法は適当であることを示している。

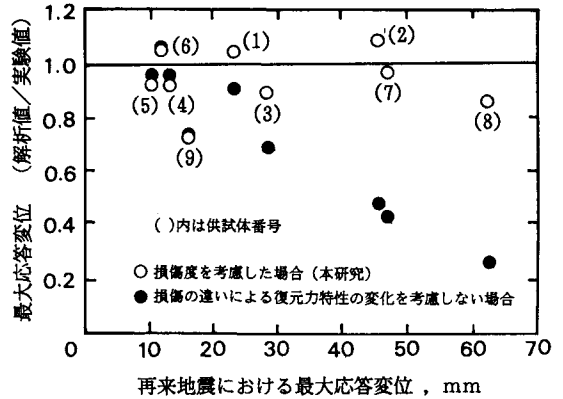


図-8 最大応答変位の解析結果と実験結果との比較

5. 適用例

前述の方法によって、震害を受けたRC橋脚のひびわれ長さおよび座屈鉄筋の本数を調査することにより、その橋脚の再来地震に対する応答を予測することができる。しかし、現実的には、ひびわれ一本一本の長さあるいは座屈した鉄筋の本数を詳細に調査することは必ずしも容易ではない。そこで、損傷の程度を数段階に分類し、外観検査からどの損傷段階に相当するかを判断できればより実用的な方法となる。そこで、本研究では、損傷の程度を座屈の有無を境にしてそれぞれ2段階、計4段階に分けることを考える。まず、主鉄筋の座屈が生じない範囲においては、図-3から、①曲げひびわれのみ発生したもの、②さらにせん断ひびわれが発生したものに分類する。また、主鉄筋の座屈が生じたものでは、図-5から、③座屈率が50%以下のもの、④座屈率が50%以上のものに分類する。この③④は、橋脚断面が正方形の場合には、側方鉄筋の座屈の有無として分類できるものである。

これらの損傷段階と塑性率 μ との関係は、今回の供試体の場合、図-3および図-5から、

- ① 曲げひびわれのみ発生したもの $\mu < 7$
- ② せん断ひびわれが発生したもの $7 \leq \mu < 11$
- ③ 座屈率が50%以下のもの $11 \leq \mu < 14$
- ④ 座屈率が50%以上のもの $14 \leq \mu$

とする。この関係を用いて、応答解析を行い、最大応答変位を先の実験結果と比較したものを図-9に示す。解析における入力波は、実験と同じものであり、図の横軸はその最大加速度を示す。図中における曲線による分割が解析結果であり、各プロットが実験結果を示す。損傷程度を外観から4段階に分類した実験結果は、それに相当する解析結果の範囲に入っている。この図の値は、今回の条件によるものであるが、同様の図は、損傷段階と再来地震力を決定したとき、その地震に対する最大応答変位、すなわち再来地震による損傷の程度を予測するのに応用できる。

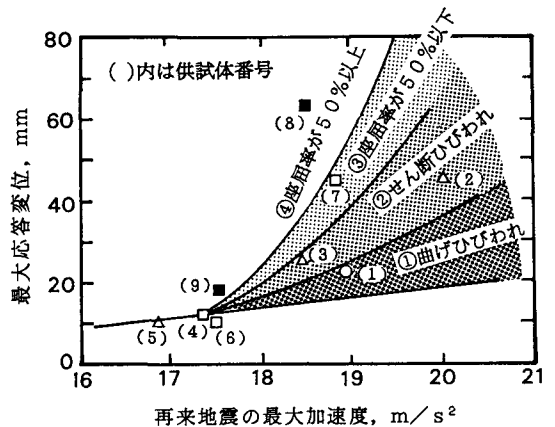


図-9 損傷段階-再来地震力-最大応答変位関係

今後の課題としては、条件の異なる橋脚における損傷段階-塑性率関係および塑性率-復元力特性関係の一般化が望まれる。

6. 結論

(1) 地震によって損傷を受け、補修されたRC橋脚の再来地震に対する応答を予測するための一方法を提案

した。再来地震に対する応答は1次地震による損傷の程度によって異なるものであり、本方法は、損傷程度—復元力特性の関係を用いた応答解析によるものである。

(2) 損傷程度は、地震後の外観から判断するものとして、ひびわれ発生率、かぶりコンクリートの剝離率あるいは主鉄筋の座屈本数によって表すことができる。ひびわれ発生率および主鉄筋の座屈率と塑性率との関係式の一例を示した。

(3) 最大応答変位の解析結果は実験結果とよく一致しており、本提案による解析方法は適当であることを示した。

(4) 応用例として、損傷程度を4段階に分類し、より簡単に再来地震に対する最大応答変位を予測する方法を示した。

謝辞：エポキシ補修はショーボンド建設(株)徳島営業所で行って頂いた。また、実験は卒論生大槻貴志君（現在：東洋建設(株)）に協力頂いた。ここに深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路震災対策便覧，1988.
- 2) 境，田才，小谷，青山：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研究，コンクリート工学年次講演会講演論文集，Vol. 9，pp. 263-268，1987.
- 3) 尾坂，鈴木，石田，宮本：RC部材の付着破壊とエポキシ樹脂注入による補修効果に関する研究，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.121-130，1986.
- 4) 山田，家村，伊津野，大本：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，No.386/I-8，pp.407-416，1987.
- 5) 森濱，小林：震災を受けた柱状RC部材の補修効果，コンクリート工学年次講演会講演論文集，Vol. 6，pp. 621-624，1984.
- 6) 石橋，古谷：橋脚の耐震補修，補強に関する実験的研究，コンクリート工学年次講演会講演論文集，Vol. 5，pp.241-244，1983.
- 7) H. Shima, H. Mizuguchi and N. Kanbara: Seismic Behavior of Repaired Reinforced Concrete Bridge Piers with Various Degree of Damage, Proc. of the Second East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Vol.2, pp.1653-1658, 1989.
- 8) H. Shima, H. Mizuguchi, N. Kanbara and V. Rungrojsaratis: Hysteresis Model of Repaired Reinforced Concrete Bridge Piers Damaged by Earthquake, Proc. of the Asia-Pacific Structural Analysis Conference, Malacca, pp. III-1-1~III-1-15, 1989.
- 9) 川島，長谷川，小山，吉田：橋脚の地震時特性に及ぼす載荷特性の影響，コンクリート構造物の靱性とその評価方法に関するコロキウム論文集，J C I，pp. II-181~II-192，1988.
- 10) 村山，野田：RC構造物の縮小実験に関する基礎的研究，鹿島建設技術研究所年報，Vol. 30，pp. 31-40，1982.
- 11) 島，北西，伊藤：繰返し荷重を受けるRC橋脚の靱性と鉄筋の座屈との関係，土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集，pp. 488-489，1989.
- 12) 水口，島，香川，神原：震害補修されたRC橋脚の動的荷重下での靱性評価，コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム論文集，J C I，pp. II-173~II-180，1988.

(1989年10月2日受付)