

[184] 地震力を受ける鉄筋コンクリートラーメン構造物の 弾塑性応答に関する研究

正会員 ○鶴田和久(首都高速道路公団)
 正会員 陸好宏史(埼玉大学工学部)
 正会員 町田篤彦(埼玉大学工学部)

1. はじめに

宮城県沖地震の際、鉄筋コンクリート(以下、RC)ラーメン高架橋に被害が生じた事例が報告されている。しかし、このような報告があるにもかかわらず、土木分野で用いられるラーメン構造物の地震時の挙動を明らかにしようとする研究は、極めて少ないのが現状である。しかも、これまでの数少ない研究^{1),2)}では静的外力下におけるラーメン構造物の挙動を対象としており、実際の地震を受ける場合について詳細に検討したものはほとんどない。従って、現状ではラーメン構造物の耐震性状は十分に解明されているとは言いがたい。そこで、本研究はまず、RCラーメン構造物が地震力を受ける場合に、破壊に至るまでの各部材の挙動が構造物全体の応答に及ぼす影響に関して振動実験および擬似動的実験によって明らかにし、ついで、部材の復元力特性から構造物全体の弾塑性応答を解析する手法³⁾について、実験結果と比較検討し、これの妥当性および適用範囲について明確にしたものである。

2. 実験の概要

1) 供試体の概要：東北新幹線に使用されているRC2層ラーメン橋脚を対象にして、中層梁の耐力および変形性能だけを変化させた3種類の供試体を作製して実験に用いた。供試体の形状寸法および断面寸法を図-1に、その種類と諸元を表-1に各々示す。これらの供試体のうち、RD-1、RD-3 およびRD-4の3体は模擬地震波入力破壊実験に供し、RP-1およびRP-4の2体は1質点系擬似動的実験に用いた。RD-1およびRP-1は1層柱下端より曲げ降伏する場合、RD-3は中層梁より曲げ降伏する場合、RD-4およびRP-4は中層梁より曲げ降伏し、変形が増大した後せん断破壊を生ずる場合を各々想定して設計したものである。

2) 模擬地震波入力破壊実験：振動実験を行うにあたって、供試体の各柱の頭部に963kgfのおもりを緊結した。これによる1層柱下端の軸応力度は9.63kg/cm²である。この応力度は、実際のRC2層ラーメン橋脚に生じるものとほぼ同程度である。入力地震波は、El-Centro 1940 N-S成分の最初の10秒間を3回繰り返して合成し、時間軸を実地震波の1/2に縮小し、最大加速度振幅を800galに拡大したものである。振動実験に先立って、Common Members

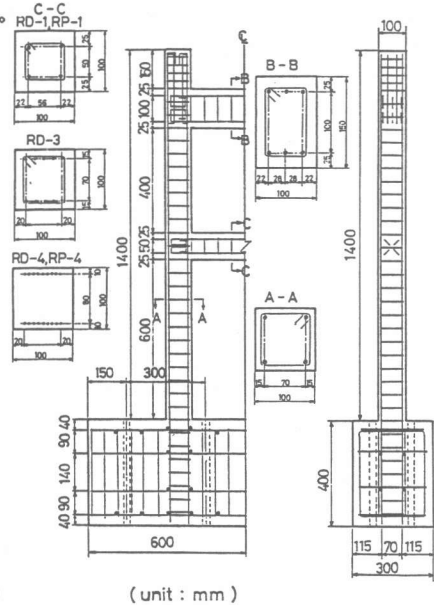


図-1 供試体の形状寸法

表-1 供試体各部材の諸元

弾性固有周期と初期減衰定数を求めるため自由振動実験を行い、その後、各供試体につき上記の模擬地震波を1回入力した。測定項目は、各層の加速度と変位、フーチング中心位置の加速度、フーチングと柱の界面および柱-梁接合部界面の主鉄筋のひずみ⁴⁾である。

3) 1質点系擬似動的実験：本実験は、動的外力下と静的外力下におけるラ-

Common Members				First-Level Beam			
Member Name	Tensile Reinforcement Ratio (%)	Web Reinforcement Ratio (%)	Relative Stiffness Ratio (※)	Specimen Name	Tensile Reinforcement Ratio (%)	Web Reinforcement Ratio (%)	Relative Stiffness Ratio (※)
First-Level Column	0.75(D6X2)	0.29(D3)	1.00	RD-1	0.85(D6X2)	0.29(D3)	1.24
			1.24	RP-1	0.85(D6X2)	0.29(D3)	1.24
Second-Level Column	0.75(D6X2)	0.29(D3)	1.24	RD-3	0.43(D3X5)	0.058(D2)	1.21
Second-Level Beam	0.76(D6X2)	0.29(D3)	4.35	RD-4	0.73(D3X9)	0.0	1.26
			1.26	RP-4	0.73(D3X9)	0.0	1.26

Note (※): The stiffness of the first-level column is the standard value (1.0).

メン構造物の応答性状の相違点の解明ならびに、振動台を用いた実験では得られないような大きな地震力が作用した場合の構造物の応答性状の解明を目的として行ったものである。実験は、模擬地震波入力実験から得られた地盤加速度波形を入力地震波とし、これとある時刻において計測された荷重から応答計算を行い、次のステップの変位を逐一求めて、静的に変位を制御することにより行った。なお、用いた供試体の自重(95kgf)は、おもりの重量(1926kgf)に比べて無視し得る程度の重さであり、構造物全体では1次の変位モードが卓越することから、系全体を1質点系とした。

3. 構成部材の耐力および変形性能が構造物の応答に及ぼす影響

実験の結果、RD-1, RD-3 および RP-1 の中層梁は曲げ降伏は生じたがせん断破壊は生じず、RD-4 と RP-4 の中層梁は曲げ降伏後せん断破壊を生じた。

構成部材の耐力および変形性能の相違が構造物全体の応答にどのような影響を与えるかを調べるため、まず1例として、RD-1とRD-4のベースシャーシ応答変位(上層梁中心位置)曲線を図-2に各々示した。図から、中層梁が曲げ降伏するがせん断破壊を生じないRD-1のベースシャーシ応答変位曲線は、ややふくらみのある滑らかなループ形状を描き安定した応答性状を示しており、変形が進むにつれ履歴ループがやや逆S字形の傾向を増していることが分かる。これに対して、中層梁がせん断破壊したRD-4のベースシャーシ応答変位曲線は、変形の増大とともに履歴ループの囲む面積が少なくなっていく紡錘形に近い形状へと移行し、エネルギー吸収能力が極端に減少していることが認められる。上記のことは、1質点系擬動的実験に用いたRP-1とRP-4のベースシャーシ応答変位曲線からも認められた。図-3は、振動実験から得られた各供試体の応答変位波形の時刻歴を示したものである。図中に示したa点は各部材においてヒンジが発生して構造系が静定化する時刻を表し、b点は中層梁にせん断破壊が生じ耐力が低下した時刻を表している。図から中層梁が曲げ降伏するがせん断破壊を生じずかつ構造系が静定化した後のRD-1とRD-3の応答変位波形を比較すると、周期および変位は、中層梁の曲げ耐力に拘わらずほぼ等しくなっていることがわかる。これに対して、中層梁がせん断破壊したRD-4の応答変位波形は、RD-1またはRD-3の応答変位波形と比較して長周期で振動しており、最大応答変位も増大している。さらに大きな地震力が作用すると、変形が片側に残留する傾向が現れてくることが認められた。このことは構造物全体の応答性状は、中層梁がせん断破壊を生じた後に著しく変化することを示している以上のことから、RC2層ラーメン構造物を耐震的な構造とするためには、中層梁が降伏した後も耐力が低下することなく適度な変形性能を保有していることが必要であると言える。

4. ひずみ速度効果が応答特性におよぼす影響

地震力を受けるRC2層ラーメン構造物の応答性状が静的外力下におけるものと相違するか否かを明らかにするため、RD-1とRP-1のベースシャーシ応答変位曲線を比較した(図-4)。図-4中の破線は、外力分布を最上層に作用する水平集中外力のみと仮定し仮想仕事法により算出した保有ベースシャーシの計算値である。図から、RP-1の各ループに生ずる最大ベースシャーシは、正負とも計算値とよく一致しているがRD-1の各ループに生ずる最大ベースシャーシは、計算値を上回っていることがわかる。特に、RD-1の負側に生ずる第1ループの最大ベースシャーシは、計算値より20%程度大きな値を示している。この理由を解明す

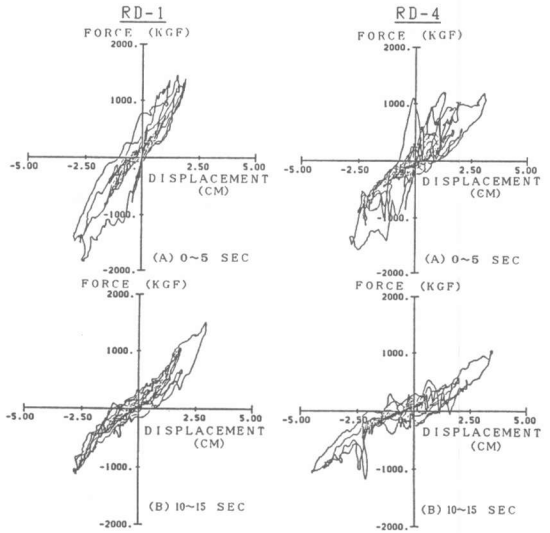


図-2 ベースシャーシ応答変位曲線

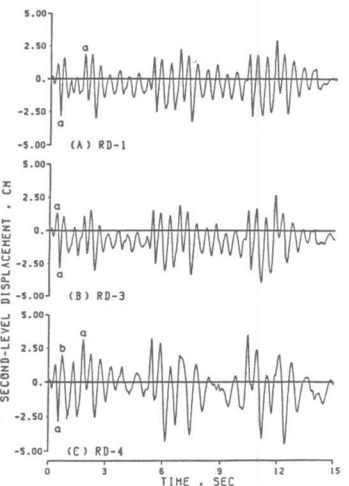


図-3 応答変位の時刻歴

るため各供試体の主鉄筋のひずみ変化を調べ、各箇所の鉄筋が降伏ひずみに達した点をRD-1のベースシャー—応答変位曲線に示した。これによると、第1ループにおいては負側で6箇所、正側では2箇所の主鉄筋が降伏していることがわかる。このことから、RD-1の構成部材の主鉄筋が降伏する時にある大きさのひずみ速度が生じ、これにより鉄筋の升降伏点が上昇し、このためRC部材の耐力も増大し、その結果第1ループの最大ベースシャー

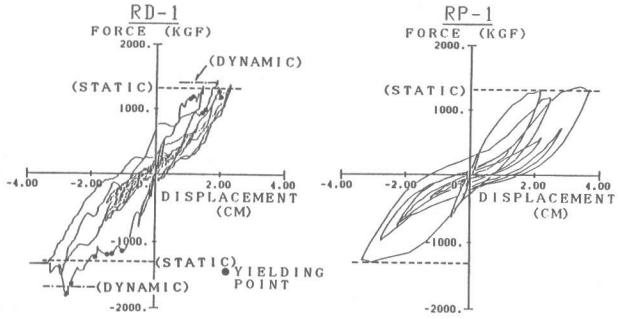


図-4 ベースシャー—応答変位曲線

も増大したものと考えられる。そこで、これを確かめるため、RD-1の第1ループにおけるひずみの測定結果より、主鉄筋が降伏する時のひずみ速度を求め、あらかじめ求めておいたひずみ速度と鉄筋の升降伏点の関係を用いて、部材端の降伏曲げモーメントを算出し、さらにこの結果を用いて仮想仕事法により保有ベースシャーを計算した。得られた値を図-4に示す。図から、この計算値はRD-1の第1ループに生ずる正負の最大ベースシャーと比較的よく一致していることがわかる。以上のことから、RCラーメン構造物が地震力を受ける場合、ベースシャー—応答変位曲線の各ループの最大ベースシャーは、ひずみ速度効果により増大することが明らかとなった。しかし、増大の程度は、各ループにおける主鉄筋の降伏箇所の数およびひずみ速度の大小に大きく依存し、特に、最初の1ループで部材がすべて降伏するような場合には、ひずみ速度効果の影響が顕著に現れる。従って、このような場合には、擬似動の実験によって真の挙動が把握されないことになる。

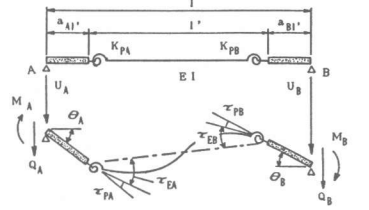


図-5 材端剛塑性バネモデル³⁾

5. 部材レベルの弾塑性地震応答解析法の検討

1) 解析モデルおよび地震応答解析: 本研究では、部材の力学モデルとして材端剛塑性バネモデルを使用した(図-5)。剛塑性バネの特性は既往の解析を参照し、実際に生ずるモーメント分布に近いと考えられる逆対称モーメント分布を柱および梁に仮定し、通常の曲げ理論の仮定に基づいて求まるモーメント—回転角関係に、柱—梁接合部からの主鉄筋の抜け出しによる付加回転角を考慮して定めた。このモデルを振動実験に用いた供試体の各部材に適用して、弾塑性曲げ変形および弾性せん断変形を考慮した。復元力モデルとして柱にはTakedaモデルを、梁にはTakeda-Slipモデルを用いた。数値計算には、Newmarkのβ法に基づく増分法を用い、 $\beta = 1/6$ とした。入力地震波には、振動実験から得られたフーチング部の加速度記録を用い、応答計算の時間刻みを0.0005secとした。減衰マトリックスは、各次のモードの減衰定数を与えるWilson, Penzienの方法¹¹⁾を用いた。この際、自由振動実験から得られた減衰定数(h)の値($h = 0.0194 \sim 0.0307$)を、1次の減衰定数としてどこかの部材が降伏するまで用い、その後は $h = 0.0$ とした。

2) 解析結果および解析法の適用範囲: 図-6は中層梁が曲げ降伏するかせん断破壊を生じなかったRD-3の応答波形の解析結果と実験結果を示したものである。図から解析結果は実験結果とよく

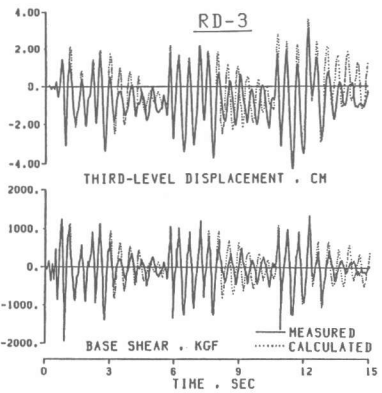


図-6 応答解析および実験結果 (RD-3)

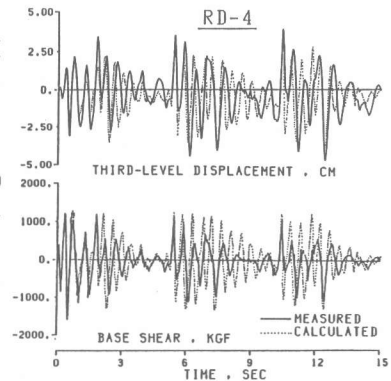


図-7 応答解析および実験結果 (RD-4)

一致していると言える。しかし、実験結果と解析結果から得られた最大応答値を比較すると（表-2）解析から求まる最大ベースシヤ-は実験結果より小さな値となっていることがわかる。これは、4. で述べたように、ひずみ速度効果により復元力が上昇したことによる。従って、最大応答値をより精度よく求めるためには、ひずみ速度を考慮した動的復元力モデルを用いる必要があると言える。図-7は、中層梁がせん断破壊したRD-4の解析から求まる応答波形と実験結果を示したものである。図から、中層梁がせん断破壊した以後の解析結果は、実験結果に比べ短周期で振動しており、解析結果は実験結果を満足に追跡していないことがわかる。また、図-8は実験から求まるRD-4のベースシヤ-応答変位曲線と解析結果を示したもので、同図より、実験では中層梁にせん断破壊が生じて耐力が低減したため、ベースシヤ-も著しく減少しているが、応答解析ではこのような現象を表現できていないことが分かる。

3. で述べたように、不静定ラーメン構造物の場合には、ある部材にせん断破壊が生じて耐力が低減すると、系全体は崩壊に至らなくても、その応答は著しく異なってくる。従って、構造物の耐震性状を終局状態に至るまで明確にするには、部材の耐力が低減する現象（靱性）をも考慮した復元力モデルを用いることが必要である。

表-2 最大応答値の比較

Specimen Name		Displacement (cm)				Base Shear (kg)	
		Second-Level		Third-Level		M	C
		M*	C*	M	C		
RD-1	Maximum	2.95	3.28	—	3.36	1549	1550
	Minimum	3.28	3.70	—	3.79	1898	1550
RD-3	Maximum	2.68	3.58	3.11	3.66	1405	1133
	Minimum	3.96	3.71	4.28	3.78	1975	1265
RD-4	Maximum	3.48	2.71	3.90	2.79	1215	1255
	Minimum	4.51	3.89	4.75	3.98	1595	1367

Note *)M: Measured **)C: Calculated

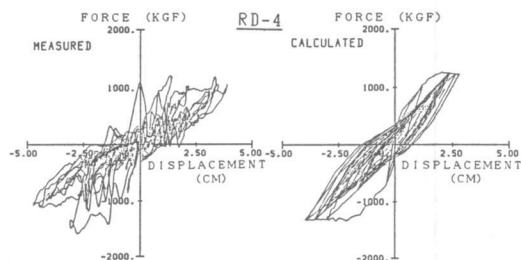


図-8 実験および解析から求まったベースシヤ-応答変位曲線

6. 結論

- 1) RC 2層ラーメン構造物を耐震的な構造とするためには、中層梁が降伏した後においても耐力が著しく低減することなく、適度な変形性能を保有していることが必要である。
- 2) RC 2層ラーメン構造物が地震力を受ける場合、ベースシヤ-応答変位曲線の各ループの最大ベースシヤ-は、ひずみ速度効果の影響を受けて増大することが明らかとなった。しかし、その程度は、各ループにおける主鉄筋の降伏箇所の数およびひずみ速度の大小に大きく左右される。
- 3) 部材レベルの弾塑性地震応答解析法を用いて解析した結果、ひずみ速度効果による復元力の上昇を無視すれば、構成部材がせん断破壊を生じて耐力が低下するまでの応答は、かなり満足できる精度で解析することができ、この解析法の有用性が示された。しかし、構成部材がせん断破壊した以後の解析結果は、実験結果を満足に表すことができなかった。従って、部材の耐力が低減する現象を考慮した復元力モデルが必要である。

本研究の一部は、電力中央研究所と協同で行われたものである。また、埼玉大学卒論生（昭和61年 2月当時）であった吉岡孝、横山雅美両氏に多大な協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 石橋忠良, 吉野伸一: "鉄筋コンクリートラーメン構造物の耐震性に関する実験", 第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集, PP.221-224, 1983.6
- 2) 菊池春海, 尾坂芳夫, 鈴木基行: "RC 2層ラーメン構造物の弾塑性解析", 土木学会第39回年次学術講演会講演概要集, PP.365-366, 1984.10
- 3) M.F.Giberson: "Two Nonlinear Beams with Definitions of Ductility", Proc. of ASCE, Vol.95, No.ST2, PP.137-157, 1969.2
- 4) 岡田恒男: "電算機-アークチュエータオンラインシステムによる構造物の地震応答解析", コンクリート工学, Vol.20, No.1, PP.31-37, 1982.1
- 5) 越好宏史, 町田篤彦: "動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究", 土木学会論文集, 第354号, PP.81-90, 1985.2
- 6) 越好宏史, 町田篤彦, 額田和久: "ひずみ速度を考慮した鉄筋コンクリート部材の動的非線形応答解析", 土木学会論文集, 第366号, PP.113-122, 1986.2
- 7) 北川良和, 長瀬廣明, 鹿嶋俊英: "変形速度および応力緩和効果を考慮した地震応答解析", 日本建築学会論文報告集, 第343号, PP.32-41, 1984.9
- 8) 志賀敏男, 柴田明德, 渋谷純一, 高橋純一: "東北大学工学部建設系研究棟における強震応答実測とその弾塑性応答解析", 日本建築学会論文報告集, 第301号, PP.119-129, 1981.3
- 9) T.Takeda, N.N.Nielson and M.A.Sozen: "Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquake", Proc. of ASCE, Vol.96, No.ST12, PP.2557-2573, 1970.12
- 10) 江戸宏彰, 武田寿一: "鉄筋コンクリート構造物の弾塑性地震応答フレーム解析", 日本建築学会学術講演梗概集(中国), PP.1877-1878, 1977.10
- 11) 柴田明德著: 最新建築学シリーズ9 最新耐震構造解析, 森北出版, PP.72, 1981