

論文

[2149] RC 2層ラーメン橋脚における中層梁に着目した仮動的実験  
に関する研究

正会員○貞末 和宏 (埼玉大学大学院)  
大場 新哉 (首都高速道路公団)  
正会員 睦好 宏史 (埼玉大学建設工学科)  
正会員 町田 篤彦 (埼玉大学建設工学科)

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート (RC) ラーメン構造物が、土木分野において、鉄道や道路橋等の高架橋によく用いられるようになってきた。しかし、このようなラーメン構造物の地震時における構造物全体の応答性状及び各部材の挙動は明確にされているとは言い難い。さらに、大地震において、ラーメン構造物を耐震的に設計するために、各部材の耐力及び靱性をどのように設計するか等についてはほとんど解明されていない。1978年に起きた宮城県沖地震で、RCラーメン橋脚に被害が生じたことは記憶に新しい。既往の研究[1]によれば、RCラーメン構造物における各部材の靱性能が構造物全体の応答挙動に大きな影響を及ぼすことが報告されている。

本研究は、RC 2層ラーメン橋脚を対象として、中層梁に着目し、地震時における中層梁の応答挙動を、材端弾塑性バネモデルによる非線形応答解析と載荷実験とを組み合わせた仮動的実験 (Pseudo-dynamic Test) によって明らかにしようとしたものである。

2. 実験概要

2-1. 供試体

RC 2層ラーメン橋脚を対象とし、中層梁の塑性変形能がラーメン橋脚全体の塑性変形性能に大きな影響を及ぼすことから中層梁を模した供試体を作製した。作製した供試体は計2体 (SP-2、SP-3) で、両者ともに片持ち梁形式の供試体である。SP-2、SP-3の供試体共に形状寸法は同一であるので、例として、図-1にSP-2の供試体の形状寸法を示す。供試体は中層梁の曲げモーメント分布が逆対称モーメント分布になると仮定し、中層梁の部材中央でモーメントが0となることから一端を自由端とした。

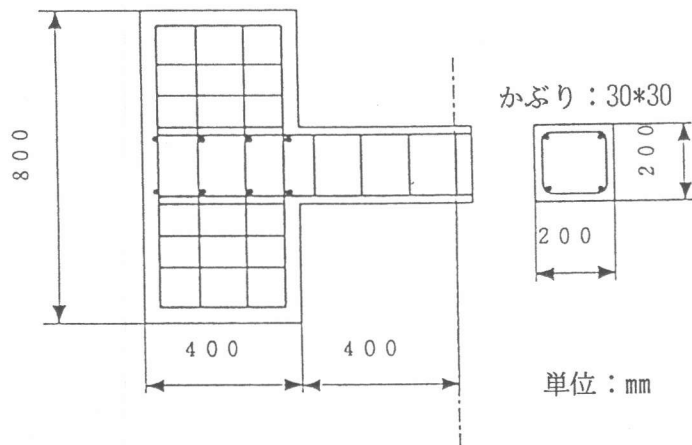


図-1 供試体形状寸法 (SP-2)

表-1 供試体の帯鉄筋量

	SP-2	SP-3
使用鉄筋種	D 6	D 3
ピッチ (mm)	240	120
帯鉄筋比 %	0.15	0.07

実験に用いた2体の供試体は断面は同一にし、帯鉄筋量のみ変化させた。そして、帯鉄筋量を変えることによって、中層梁の靱性率を変化させた。実際に配した帯鉄筋量は表-1に示す。

部材の靱性率 ( $\mu$ ) は部材の限界の塑性変形量を  $\delta_u$ 、部材の降伏変形量を  $\delta_y$  とし、

$$\mu = \delta_u / \delta_y \quad (1)$$

で定義した。RC部材の靱性率は、いくつかの算定方法が提案されているが、文献[2]の算定方法によれば、SP-2、SP-3の靱性率はそれぞれ9.0、5.0となった。この場合、それぞれの破壊形式は靱性率が9.0の時、柱から崩壊し、靱性率が5.0の時、中層梁から崩壊するようにRC2層ラーメンの各部材を設計した。また、各部材の曲げ耐力比は実際に供用されている橋脚のそれと近いものとなるようにした。

表-2 振動系モデルの固有周期

固有周期 SEC	SP-2	SP-3
1次モード	0.1187	0.1187
2次モード	0.0058	0.0058

## 2-2. 載荷方法

載荷状況を図-2に示す。供試体は、固定端を高力ボルトで反力床に固定し、自由端にアクチュエーターをヒンジを介して緊結して載荷実験を行った。

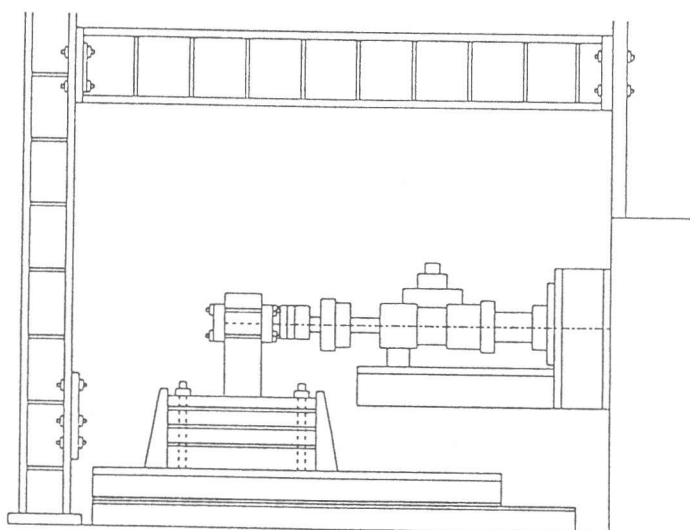


図-2 載荷方法

## 2-3. 中層梁に着目した仮動的実験システムの概要

仮動的実験システムの概略図を図-3に示す。システムは、供試体、載荷装置、計測装置、そしてデータの入出力及び計測装置を制御するための計算機、ならびに非線形地震応答解析を行う計算機から構成される。

仮動的実験は以下の手順で行われた。

- 1) NO.1コンピューターにより、中層梁を除く各部材のモデル化された弾塑性復元力モデル、実験から得られた中層梁の復元力、入力された地震波から、2層ラーメン橋脚の地震応答解析を行い、中層梁の回転角を算出する。
- 2) 計算された中層梁の回転角をD/A変換し、載荷システムに送り、アクチュエーターにより、目標回転角となるように供試体に載荷する。
- 3) 目標回転角に達したときのモーメントをロードセルで計測し、A/D変換してNO.2コンピューターに送り、データの収録を行う。
- 4) NO.2コンピューターからNO.1コンピューターに、中層梁のモーメントを送り、1)と同様の計算を行う。

なお、応答解析は、Newmark の  $\beta$ 法 ( $\beta=1/6$ )で、運動方程式を各微小時間毎にステップ・バイ・ステップで解いていく方法を取った。積分時間刻みは構造モデルの固有周期を考慮して0.0005秒とした。供試体の固有周期は表-2に示すとおりである。また、減衰定数は弾性時では一律に2%とし、部材降伏後は0%とした。上載荷重は現在実際に供用されている土木構造物のRCラーメン橋脚を参考として1層柱下部の軸圧縮応力度が $15\text{kgf/cm}^2$ となるように定めた。また、使用した鉄筋は主鉄筋にはD13(SD35)を用い、降伏点は $3804\text{kgf/cm}^2$ で、帯鉄筋にはD6とD3を用い、降伏点は、それぞれD6が $4073\text{kgf/cm}^2$ 、D3が $2404\text{kgf/cm}^2$ であった。コンクリートは、早強ポルトランドセメントを使用し、試験時における圧縮強度は $294\text{kgf/cm}^2$ であった。

実験から復元力が得られる中層梁以外の部材の復元力については通常の数値解析と同様、復元力モデルを仮定した。入力地震波はEL CENTRO 1940 NS成分で、時間刻みを時間軸を実時間の0.6倍に圧縮し、最大加速度をSP-2の場合550gal、SP-3の場合730galとした。

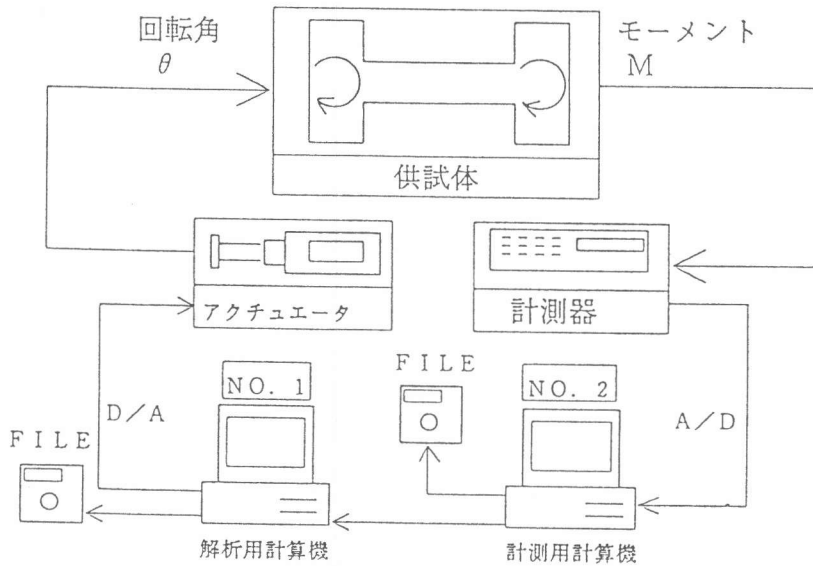


図-3 システム概略図

### 3. 材端弾塑性バネモデルに基づく応答解析

RC 2層ラーメン橋脚の弾塑性応答解析を行うためには、各部材の復元力モデルを仮定する必要がある。本研究では部材ごとに材端弾塑性バネモデルを採用した。なお、仮想的実験では、中層梁の復元力は実験から得られる値を使用した。部材の復元力モデルの履歴法則には実際の履歴を比較的良く表しているといわれる武田モデル系のもを使用した。すなわち、柱部材にはTAKEDA MODEL、梁部材には TAKEDA SLIP MODELを仮定し、

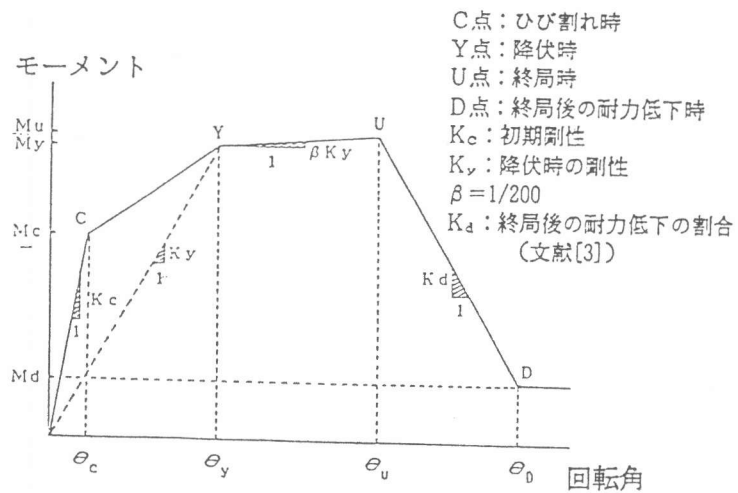


図-4 スケルトンカーブ

スケルトンカーブには図-4に示すような降伏後の耐力低下が考慮できる耐力低下型復元力モデル[3]を用いた。これにより構成部材の靱性率はパラメーターとして任意に与えることができる。

応答解析は、部材ごとに瞬間剛性マトリクスを作成し、重ね合わせの原理により構造物全体の瞬間剛性マトリクスを作成する。そして、このフレームを層位置に質量を集中した2質点系モデルに置換し、運動方程式を各時間刻みごとに解き、層位置での水平変位増分を計算する。求められた層位置の水平変位増分から各構成部材の変位を求め、復元力モデルから復元力を推定し、剛性の変化がある場合は次ステップのために再度部材の瞬間剛性マトリクスを作成するという手順で順次行った。

#### 4. 実験および解析結果とその考察

図-5に入力地震加速度波形を、図-6、7にそれぞれ弾塑性応答解析、仮動的実験から得られたSP-2、SP-3のラーメン頂部の水平応答変位の時刻歴を示す。太線、細線はそれぞれ解析結果、仮動的実験結果を示したものである。SP-2の応答変位は1.1秒程度まで実験値と解析値は位相が少しずつれてくるものの比較的良好な一致を見せた。その時刻以降は構造物が破壊したため、直接比較することはできなかった。SP-3の応答変位は2.0秒近くまで比較的解析値と実験値は一致しているが、降伏回転角の値が解析と実験では異なっていたため降伏時の時刻や降伏順序に違いが見られた。表-3に実験および解析結果から算定した降伏時および終局時の時刻を示す。表中の空欄は降伏または終局に達していない事を示す。このため、解析では起こらないような降伏が実験では起きたためにそれ以後の応答性状に差異がでたものと思われる。

図-8、9に、それぞれSP-2とSP-3の中層梁の回転角の時刻歴応答を示す。太線が解析結果、細線が仮動

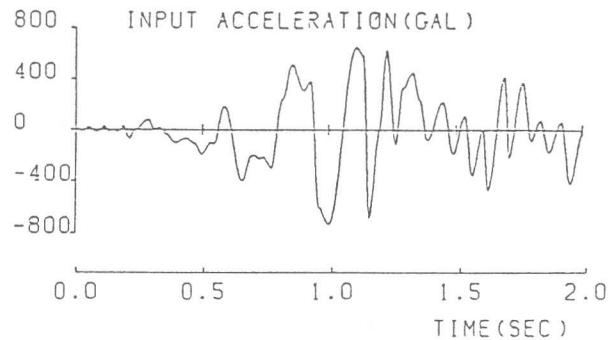


図-5 入力地震波形

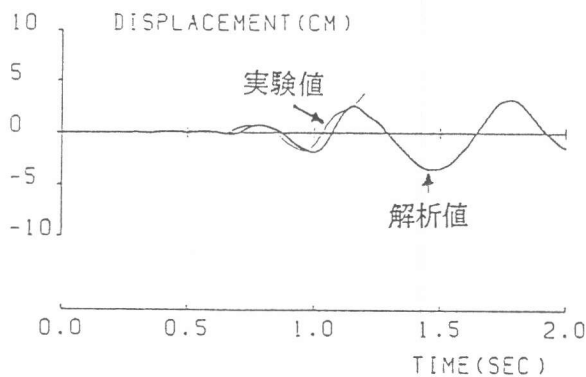


図-6 SP-2のラーメン頂部の水平応答変位時刻歴

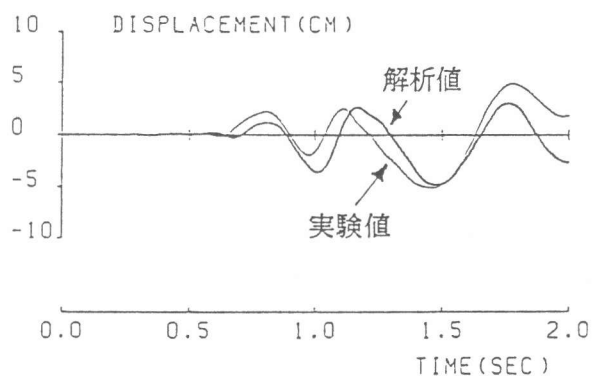


図-7 SP-3のラーメン頂部の水平応答変位時刻歴

的実験結果を示す。位相がややずれているものの、応答は比較的良く一致していると言える。

図-10、11にそれぞれSP-2とSP-3の中層梁の曲げモーメント-回転角関係を示す。(a)、(b)はそれぞれ仮動的実験結果と解析結果を示す。SP-2では中層梁の靱性率が大きいので、実験および、計算結果ともに中層梁の破壊は生ぜず、他の部材が終局に至った。SP-3では、中層梁から終局に至るように設計したが、中層梁も終局に至ったが、2層柱が先に終局に至る結果となった。実験での中層梁の靱性率を少なく見積もってしまったためと考えられる。しかしながら、計算結果は、実験値の傾向を表現しているといえる。

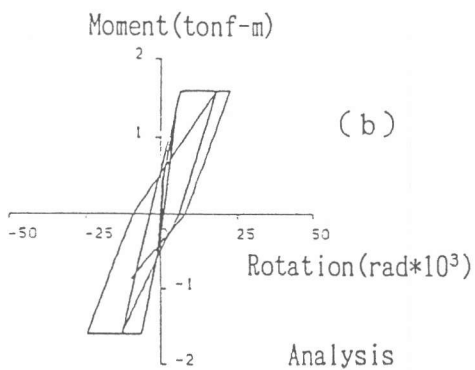
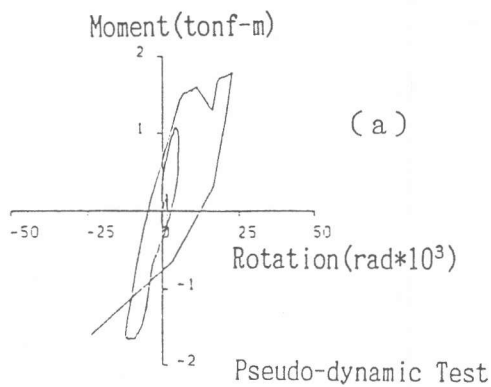
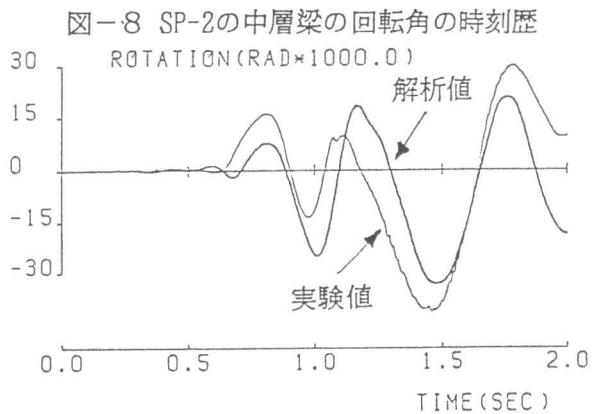
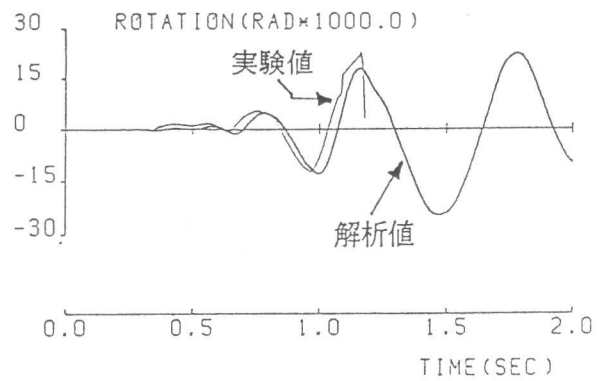


図-10 中層梁のモーメントと回転角の関係(SP-2)

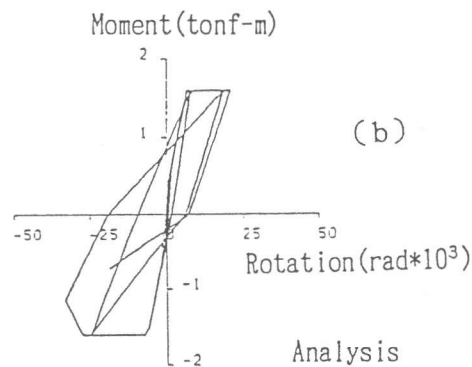
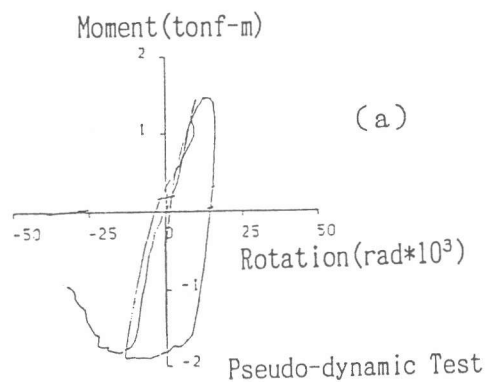


図-11 中層梁のモーメントと回転角の関係(SP-3)

表-3 各部材が降伏および終局に至る時間

	実験値		解析値		実験値		解析値	
	SP-2		SP-2		SP-3		SP-3	
	降伏	終局	降伏	終局	降伏	終局	降伏	終局
1層柱下+	0.895	—	0.920	—	0.930	—	0.920	—
1層柱下-	1.055	—	1.090	—	0.700	—	1.090	—
1層柱上+	1.085	—	—	—	0.855	—	—	—
1層柱上-	1.045	1.170	—	—	1.050	1.080	—	—
2層柱下+	0.900	—	—	—	0.670	—	—	—
2層柱下-	1.065	—	1.100	—	1.270	—	1.100	—
2層柱上+	0.855	0.895	0.880	0.920	0.910	0.930	0.880	—
2層柱上-	0.675	1.060	0.715	1.090	0.655	0.695	0.715	—
中層梁 +	1.055	—	1.085	—	0.685	1.260	1.085	1.410
中層梁 -	0.890	—	0.915	—	0.925	1.260	0.915	1.410
上層梁 +	—	—	—	—	—	—	—	—
上層梁 -	—	—	—	—	—	—	—	—

## 5. まとめ

RC2層ラーメン構造物を対象として、中層梁の地震時応答性状を詳細に検討するために、中層梁の載荷実験とラーメン全体の応答解析を組み合わせた仮動的実験手法を開発した。仮動的実験および材端弾塑性バネモデルに基づく応答解析結果から、以下のことが言える。(1) 中層梁の載荷実験とラーメン全体の弾塑性応答解析結果から成る仮動的実験システムにより、中層梁の地震時弾塑性応答性状を実験的に求めることが可能である。(2) 材端弾塑性バネモデルに基づく応答解析結果と仮動的実験結果から得られた、中層梁の復元力、ラーメン全体の応答性状は比較的良好一致し、これまで用いられてきた中層梁の復元力モデルの妥当性が示されたと言える。(3) 今後は、中層梁の破壊性状、靱性率、耐力がラーメン全体の耐震性状に及ぼす影響を明らかにしていくつもりである。

## 謝辞

本実験および解析を行うにあたり、埼玉大学建設材料研究室佐藤昭七郎・佐藤幸作両技官、益子直人・高橋康仁両君には多大な助力を得た。ここに謝意を表します。なお、本研究は、文部省科学研究費（試験研究（B）、一般研究（B））による成果の一部をとりまとめたものである。

## 参考文献

- [1] 貞末和宏・睦好宏史・町田篤彦：各部材の靱性を考慮したRC2層ラーメン橋脚の地震時弾塑性応答、土木学会第46回年次講演概要集V、pp.756-757、1991.9
- [2] 石橋忠良・吉野伸一・斉藤俊彦・渡邊忠朋：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形性能を考慮するためのノモグラム、土木学会論文集、Vol.414/V-12(ノト)、pp.217-220、1990.2
- [3] 町田篤彦・睦好宏史・鶴田和久：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、土木学会論文集、第378号/V-6、pp.117-126、1987.2
- [4] Yamada, Y., Iemura, H., Tanzo, W. and Endo, K.: Substructured Hybrid Loading of Structural Members under Combined Axial, Shear, and Bending Loads, 第8回日本地震工学シンポジウム、9.25、pp.265-270、1990
- [5] 岡田清：電算機-アクチュエーターオンラインシステムによる構造物の地震応答実験、コンクリート工学、Vol.20, No.1, pp.31-37、1982.1