

論文

[2189] サブストラクチャー仮動的実験による RC 2層ラーメン橋脚の地震時弾塑性応答

貞末和宏\*1 睦好宏史\*2 William TANZO\*3 町田篤彦\*4

1. はじめに

近年、RC ラーメン橋脚が道路橋あるいは、鉄道橋等に数多く建設されている。地震力を受ける RC ラーメン橋脚は、独立柱式橋脚の場合とは異なり、一部材の破壊が構造物全体の崩壊につながることはない。しかしながら、大地震時において、各構成部材の力学的特性（耐力、剛性、靱性等）が構造物全体の応答性状に与える影響、あるいは各構成部材の破壊に至るまでの応答性状は十分に解明されていない。本研究は、RC 2層ラーメン橋脚を対象構造物とするサブストラクチャー仮動的実験を行い、RC ラーメン橋脚の大地震時における構造物全体系とその構成部材の地震時応答性状を明らかとし、合理的な耐震設計法を確立する事を目的として行われた。

2. サブストラクチャー仮動的実験システム概要

2. 1 システム構成

サブストラクチャー仮動的実験手法は、一般に行われている仮動的実験手法の一種で、構造系全体をそのまま実験するのではなく、ある一部分を実験部材として取り出して载荷し、他の部材の応答はコンピューター内で計算して、これらを A/D 及び D/A 変換を行うインターフェースを通してオンラインで結び付け、構成部材の地震応答性状を逐一直接実験からコンピューター内に取り込みながら地震波継続時間にわたって自動的に構造物全体系の応答計算を行うものである。Fig. 1 にシステム構成図を示す。システムを構成するハードウェアは、応答計算用コンピュータ

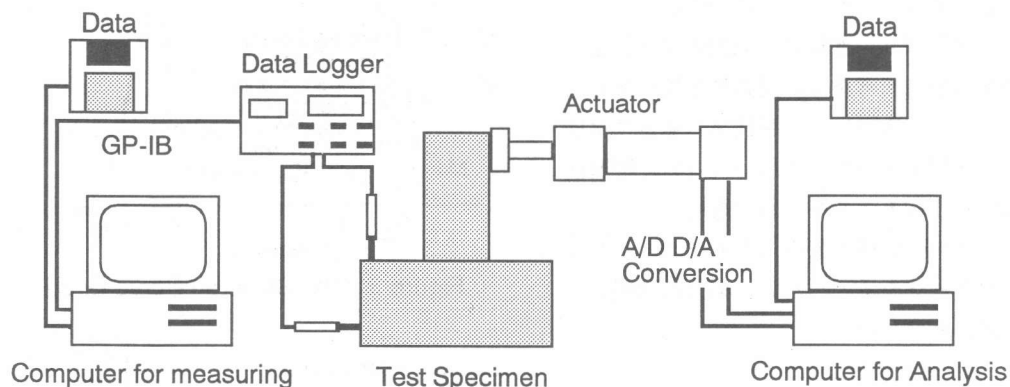


Figure 1 Substructure Pseudo-dynamic Test System

- \*1 鹿島建設（株）、工修（正会員）
- \*2 埼玉大学助教授 工学部建設工学科、工博（正会員）
- \*3 埼玉大学助手 工学部建設工学科、工博（正会員）
- \*4 埼玉大学教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

一、計測用コンピューター、載荷装置、各変位計、それらを結ぶインターフェースとケーブルである。また、供試体に取り付けられた歪ゲージ、変位計等の計測機器からのデータは、計測用コンピューターをGP-IBを用いて計測装置と接続し、計算用コンピューターとは別の系統で計測を行った。計測方法はスタートから一定時間刻みで自動的に計測できるものである。本実験では、中層梁の塑性変形能が構造物全体に大きく影響するという既往の研究[1]から、中層梁部材を対象部材として、この応答性状が構造物全体系へどのように影響するかを実験的に明らかにした。

## 2.2 応答計算手法

RC 2層ラーメン橋脚を部材レベルから応答解析を行うために、各部材ごとに力学的モデルを仮定する方法を採用した。この場合、減衰マトリクスはモードごと一律2%の減衰を与えて作成し、質量マトリクスは整合質量マトリクスとした。数値積分法はオペレーター・スプリッティング(OS)法を用いた[2]。従来、仮動的実験には、陽的な方法で中央差分法、陰的な方法ではNewmarkのβ法、あるいは陽的な方法と陰的な方法を組み合わせた混合積分法が用いられてきたが、本システムでは、1) 従来のもより積分条件を大幅に緩和できるといこと、2) アルゴリズムが非常に簡単であることからOS法を採用した。数値積分のアルゴリズムを含む応答計算の一連のフローチャートをFig. 2に示す。

中層梁以外の部材の復元力モデルには、部材の靱性を考慮した耐力低下型の復元力モデル[3]を用いた。靱性率の算定には既往の研究によるものを用いた[4]。履歴法則には武田モデル系のものを用いた。

Fig. 3に耐力低下型復元力モデルのスケルトンカーブを示す。なお、積分時間刻みは0.001secとした。

## 3. 実験概要

### 3.1 供試体

Fig. 4aは、取り出した供試体と2層ラーメン構造物全体の関係を示したものである。供試体は2層ラーメン橋脚の中層梁を模したもので、対象ラーメン構造物の形状が対称な場合、中層梁の曲げモーメント分布は

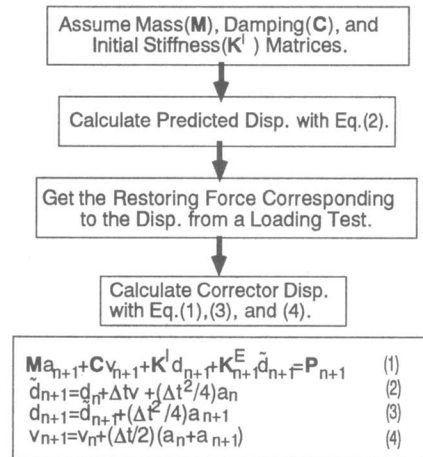


Figure 2 Flow Chart

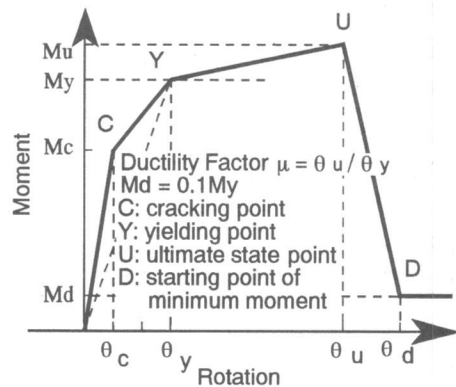


Figure 3 The Skeleton Curve Used

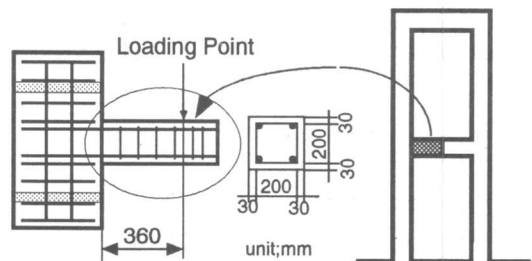


Figure 4a Test Specimen (PD-2)

部材中央で反曲点を持つ逆対称モーメント分布となることから、供試体はカンチレバー形式とした。作製した供試体数は計5体で、形状寸法はすべて同じであるが、部材の靱性のみを帯鉄筋量を変えることで変化した。各部材の靱性率はCL-1、PD-1、PD-3が5.3で、PD-2、PD-4は3.6である。これらの靱性率は石橋らの算定方法 [4]により、計算されたものである。また、Table 1は使用した材料特性を示したものである。

実験で対象とした構造物の各部材の耐力比、剛比等は現在供用されている実RC2層ラーメン構造物を参考にして、実構造物とかけ離れないように配慮して設計された。上層梁部材については、この上部に橋桁が架設されることから、その応答性状は弾性範囲におさまるようした。崩壊形式は、計5体の全構造物に対して1層柱下端、2層柱上端、中層梁両端の計6ヶ所で降伏し、中層梁から崩壊するように各供試体を設計した。これは、降伏ヒンジができる箇所は、RC2層ラーメン橋脚の場合、かなり限定され、中層梁、1層柱下端がまず必然的に決まり、中層梁両端に近い1層柱上端、2層柱下端は中層梁が降伏し塑性変形するために降伏せず、その結果2層柱上端が降伏することになるからである。降伏順序は、各供試体ともに1層柱、2層柱、中層梁の順番である。各供試体の実験要因をTable 2に示す。なお、加力はアクチュエーターを反力壁側を固定、供試体側をピンとして、Fig. 4bに示すように緊結して載荷した。

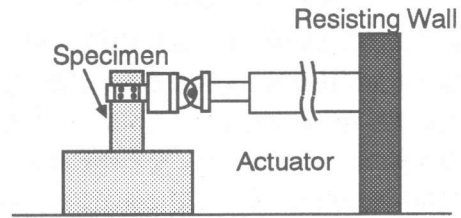


Figure 4b Setup of Test Specimen (CL-1, PD-1, 2, 3, 4)

Table 1 Strength of Reinforcement & Concrete

Concrete compressive strength (MPa)		34.6
yielding strength of reinforcements (MPa)	D13	372.8
	D6	399.2
	D3	235.6

Table 2 Experimental Variables

specimen	test type	tensile reinfo.	transverse reinfo.	pitch (cm)	calculated ductility factor	max. inp. accel. (cm/sec <sup>2</sup> )	1st nat. period (sec)
CL-1	cyclic load.	D13	D6	8	5.3	—	—
PD-1	PSD test		D6	8	5.3	400	0.148
PD-2			D3	10	3.6	530	
PD-3			D6	8	5.3		
PD-4			D3	10	3.6		

### 3. 2 載荷計画

実験は、供試体CL-1については正負交番繰り返し載荷実験を行い、供試体PD-1からPD-4はサブストラクチャー仮動的実験を入力地震波を変えて行った。正負交番繰り返し載荷実験は、降伏するときの計算荷重時の荷重載荷点付近の水平変位を降伏変位 $\delta y$ と定義し、 $\delta y$ の整数倍の振幅で交番載荷を行った。各振幅の繰り返し回数は5回とした。サブストラクチャー仮動的実験に用いた入力地震波はエルセントロ1940NS成分の最初の20秒間を実時間刻みで、最大加速度を拡大または縮小して用いた。各供試体の入力地震波の大きさをTable 2に示す。

#### 4. 実験結果

##### 4. 1 正負交番繰り返し载荷実験結果

Fig. 5は正負交番繰り返し载荷実験から得られた荷重-変位関係を示す。図を見ると正側と負側で部材の塑性変形能が異なることが認められる。これは部材の終局時において、せん断破壊が負方向载荷時に生じたため、正側では安定した靱性を示しているにも拘らず、負側での急激なせん断破壊により、正側と負側では非対称な包絡線を描いた。また、部材の靱性率は、正側で5、負側で2.5であった。なお、終局変位は、荷重が最大荷重の80%まで低下したとき、降伏変位は引張側鉄筋が降伏し傾きが明らかに変化したときとした。

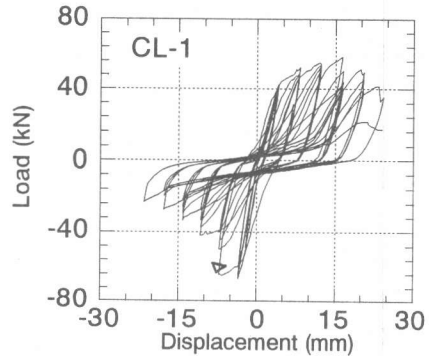


Figure 5 Load-Displacement Curve

##### 4. 2 サブストラクチャー仮動的実験結果

Fig. 6(a)、(b)は、サブストラクチャー仮動的実験結果から得られた供試体PD-1、PD-2の中層梁のモーメント-回転角関係を示す。両者を比較すると、2つの供試体には同一の地震波を入力したが、供試体PD-1は降伏するものの十分耐力を保持しているが、供試体PD-2は部材の靱性率が小さかったため、負側でせん断破壊により部材が崩壊した。最大曲げモーメントは両供試体共にほぼ同じレベルであった。また、供試体PD-2は正負交番载荷実験に供された供試体CL-1と同様に、負側で崩壊したため、正負で対称な包絡線とはならなかった。供試体PD-2の靱性率をみると、あらかじめ算定された値より低い部材靱性率(2.5)となっていることがわかる。

Fig. 7(a)、(b)は供試体PD-1とPD-2の1層柱下部のモーメント-回転角関係を示したものである。同一地震波を入力したにも拘らず、耐力低下は共に見られないものの、中層梁が破壊した供試体PD-2の場合は供試体PD-1に比べて応答塑性率が大きくなっている。Table 3はサブストラクチャー仮動的実験を行った各構造物の構成部材の応答塑性率を示したものである。2層柱上部も1層柱下部と同様に供試体PD-2の方が応答塑性率が大きい結果となった。応答塑性率は中層梁の取付位置がほぼ中央であるために、供試体PD-1とPD-2で同程度の値となっている。もし1、2層の柱の靱性率がこれらの応答塑性率より小さい場合には柱が崩壊するものと思われる。したがって、中層梁が崩壊する場合は、しない場合に比べて1層柱に大きな靱性率を与えるか、中層梁を破壊させないようにする必要がある。

Fig. 8(a)、(b)に供試体PD-1、PD-2の構造物全体系のベースシャー-応答変位関係を示す。中層梁が崩壊することによって供試体PD-2はベースシャーは負側で低下するものの、柱が崩壊しない限り構造物全体の塑性変形能は十分保有されていることがわかる。

Fig. 9(a)、(b)に供試体PD-3、PD-4の中層梁のモーメント-回転角関係を示す。両供試体は、入力地震波の加速度が大きいため両供試体ともに耐力低下が見られた。両供試体の靱性率はPD-1およびPD-2と同一であるが、最大加速度が入力される時刻付近で変形が一気に終局点に達したために、比較的大きな応答塑性率を示す結果となった。供試体PD-4では、正側でせん断破壊した後、負側では最大変形点を指すことなく復元力は上昇しなかった。この2体は1層柱が大きく崩壊するような地震波を入力したものであるが、このように部材の応答性状が大きく変化する場合には、直接実験から部材の応答を得るサブストラクチャー仮動的実験手法

は有力な手法であると言える。

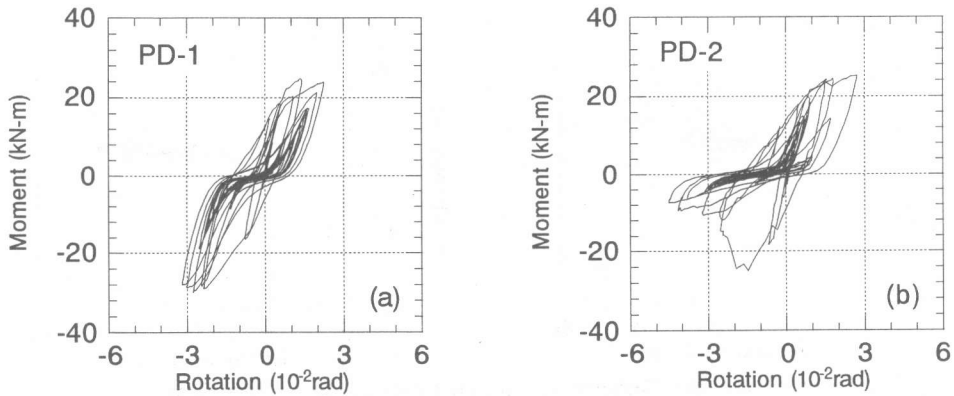


Figure 6 Moment-Rotation Curves on 1st Story Girder (PD-1&PD-2)

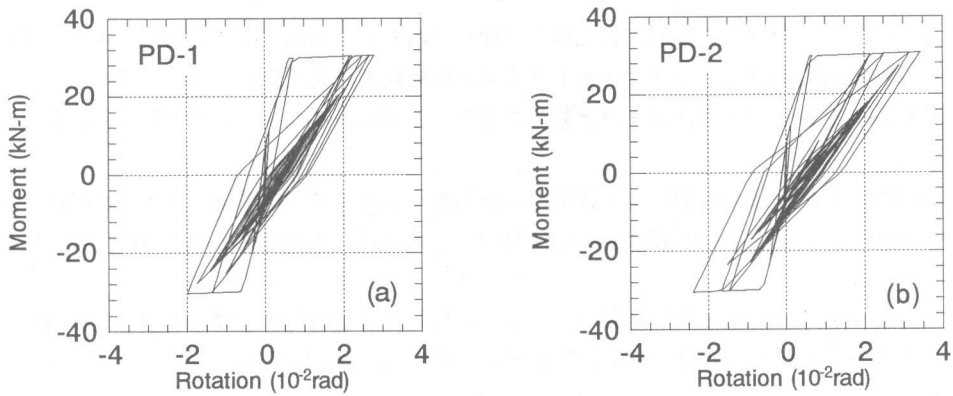


Figure 7 Moment-Rotation Curves on 1st Story column (PD-1&PD-2)

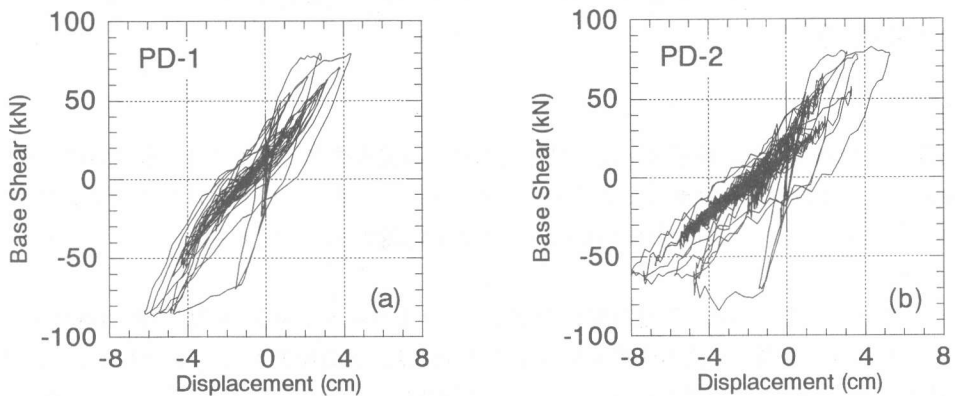


Figure 8 Base Shear-Displacement Curves (PD-1&PD-2)

Table 3 Ductility Demand on 1st & 2nd Story Columns and 1st Story Girder

specimen	1st story column (lower)		2nd story column (upper)		1st story girder	
	+	-	+	-	+	-
PD-1	4.60	3.29	4.20	2.89	2.04	2.88
PD-2	5.66	3.94	5.71	3.59	2.45	4.06
PD-3	6.20	5.66	6.17	5.51	5.28	5.91
PD-4	4.87	7.08	4.84	7.04	6.76	4.65

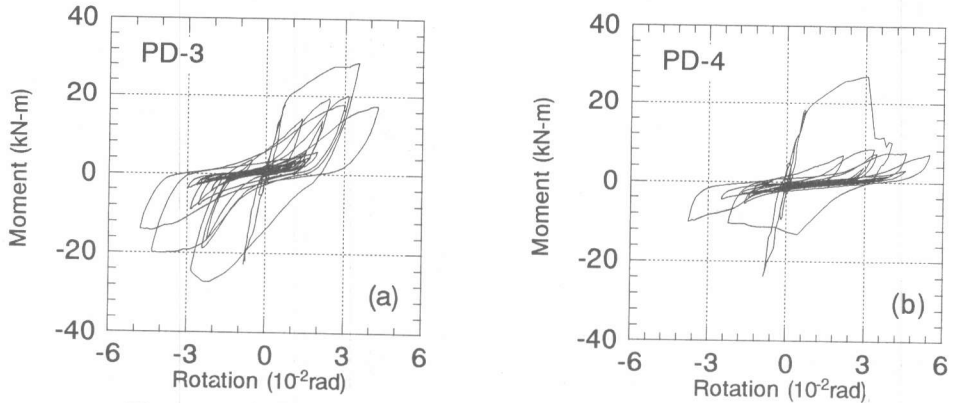


Figure 9 Moment-Rotation Curves on 1st Story Girder (PD-3&PD-4)

## 5. まとめ

RC 2層ラーメン橋脚の地震時応答性状を詳細に検討するために、構成部材レベルから構造物全体系の地震時応答計算を行うサブストラクチャー仮動的実験を開発し、RC 2層ラーメンの構成部材の応答性状を崩壊する過程まで実験的に追うことが可能となった。本研究の範囲から以下の結果が得られた。

1) 中層梁の破壊により柱部材の応答塑性率が大きくなるので、中層梁には十分な靱性を与える必要がある。また、中層梁が破壊する可能性がある場合は、柱の靱性率を大きくする必要がある。

2) 供試体PD-4で得られた結果のように、正負対称な崩壊とならない場合には、塑性変形能を含めた復元力のモデル化は困難で、実験的に応答性状を得る本実験システムは有効な手法であるといえる。

今後、中層梁の耐力、剛性、靱性、破壊性状を詳細に検討するため、さらに本システムで実験を行う必要がある。

## 謝辞

本実験を行うにあたり、埼玉大学建設材料研究室土澤英幸技官、東亜建設工業三島淳史君（元卒論生）、大成建設松野一之君（元卒論生）の協力を得た。また、益子直人君（大学院生）には供試体作製、結果処理等に多大の助力を得た。ここに感謝する次第である。

## 参考文献

- [1] 貞末・睦好・町田・高橋：“地震時におけるRC 2層ラーメン橋脚の部材の靱性が構造物全体の靱性に及ぼす影響”、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集 V、pp. 710-711、1992. 9
- [2] 中島・石田・安藤：“サブストラクチャー仮動的実験のための数値積分法”、日本建築学会構造系論文報告集 第417号、pp. 107-117、1990. 11
- [3] 町田・睦好・鶴田：“地震力を受ける鉄筋コンクリート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、1987. 2
- [4] 石橋・吉野：“鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究”、土木学会論文集 第390号/V-8、1988. 2