

論文 RC 橋脚の動的応答解析による損傷評価

松浦 靖治^{*1}・沢野 嘉延^{*2}・金好 昭彦^{*3}・宮本 文穂^{*4}

要旨：1995年1月17日の淡路島北部を震源とした、兵庫県南部地震 ($M=7.2$) により、鉄筋コンクリート構造物も、多数被害を受け、落橋といった甚大な被害も見受けられた。

本論文は、被災した都市内高速道路高架橋の中で、鉄筋コンクリート製橋脚に着目し、部材の非線形性を考慮した2次元多質点ばねモデルによる時刻歴動的応答解析を行うことによって、その損傷および破壊メカニズムを検討したものである。種々の検討の結果、本解析手法により、RC 製橋脚の実際の損傷（曲げ破壊およびせん断破壊）や、そのメカニズムをほぼ再現することができた。

キーワード：兵庫県南部地震、道路高架橋、RC 製橋脚、動的応答解析、損傷メカニズム

1. はじめに

兵庫県南部地震により、道路、鉄道、港湾、電力、水道、ガスといったライフライン施設にも、多数かつ甚大な被害が発生した。今回の被害に対して、その損傷の要因やメカニズムを解明することは、今後の耐震設計あるいは補強法を確立していく上でも極めて重要なことである。

そこで、本研究では都市内道路高架橋の鉄筋コンクリート (RC) 製橋脚に着目して、部材の非線形特性を考慮した時刻歴動的応答解析を行い、部材に発生する最大断面力と保有耐力を比較することによって、RC 製橋脚の損傷および破壊のメカニズムの検討を行った。

2. 解析概要

2. 1 解析対象および解析モデル

解析対象構造物は、兵庫県南部地震により被害を受けた都市内高速道路高架橋（尼崎市～神戸市須磨区）のRC 製橋脚のうち、約73%がT型単柱橋脚であり、橋脚高さは約10mが標準的となっていることから、写真-1(a)、(b) に示すRC 製丸単柱とRC 製角単柱の2種類と

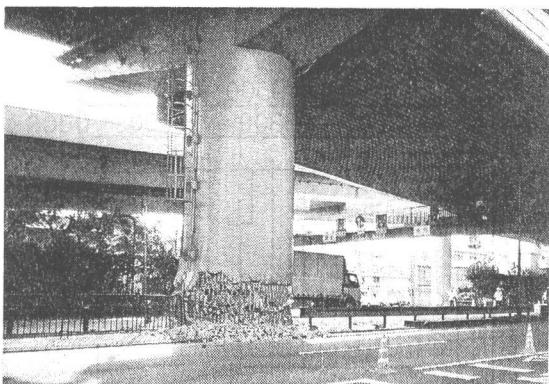


写真-1(a) RC 製丸単柱橋脚の曲げ破壊状況

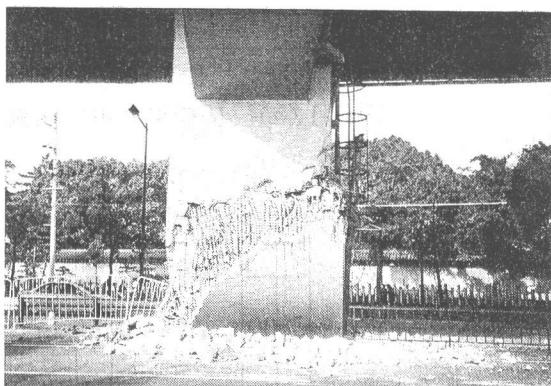


写真-1(b) RC 製角単柱橋脚のせん断破壊状況

* 1 中央復建コンサルタンツ（株）第二設計部、工学士（正会員）

* 2 中央復建コンサルタンツ（株）第二設計部、工学士

* 3 (株)鴻池組土木本部第一技術部調査課課長、工修（正会員）

* 4 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科、工博（正会員）

した。これらの橋脚は、R C 製丸単柱（写真-1(a)）では柱下端部での曲げ破壊、R C 製角単柱（写真-1(b)）では、せん断破壊が生じている。本論文では、写真-1に示す破壊状況を考慮して、R C 製丸単柱は橋軸直角方向断面、R C 製角単柱は橋軸方向断面の2次元モデルで解析を行った。また、橋脚下端部には、フーチングおよび基礎杭を考慮した鉛直、水平および回転ばねを設置し、上部工の影響は、質量に置き換え、解析モデルの各質点に作用させた。図-1(a)、(b) に解析対象としたR C 製橋脚の形状寸法とその解析モデルを、また、表-1に材料定数および地盤ばね定数を示した[1]。

表-1 材料定数および地盤ばね定数

		R C 丸単柱	R C 角単柱
柱体コンクリート	単位体積重量 γ_c (tf/m ³)	2.5	2.5
	設計基準強度 σ_{ck} (kgf/cm ²)	270	270
	弾性係数 E_c (kgf/cm ²)	2.65×10^5	2.65×10^5
鉄筋	材質	SD295	SD295
	弾性係数 E_s (kgf/cm ²)	2.1×10^6	2.1×10^6
上部工重量 (tf)		623	3256
形式		鋼単純合成I桁	鋼連続非合成箱桁
地盤ばね定数	鉛直方向(tf/m)	6.97×10^5	1.15×10^6
	水平方向(tf/m)	6.73×10^5	6.64×10^5
	回転方向(tf·m/rad)	4.63×10^6	2.83×10^7

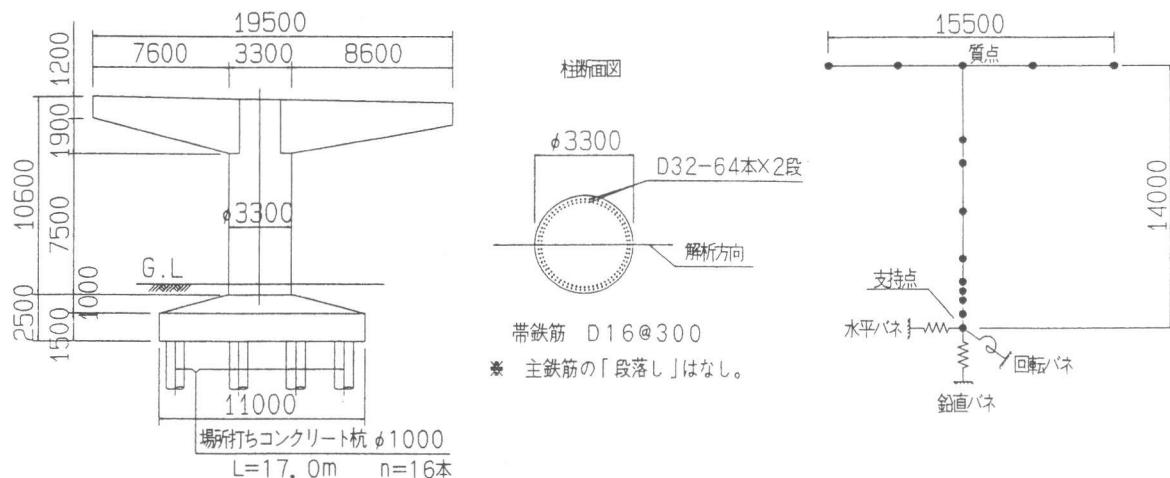


図-1(a) R C 製丸単柱橋軸直角方向断面図とその多質点ばねモデル

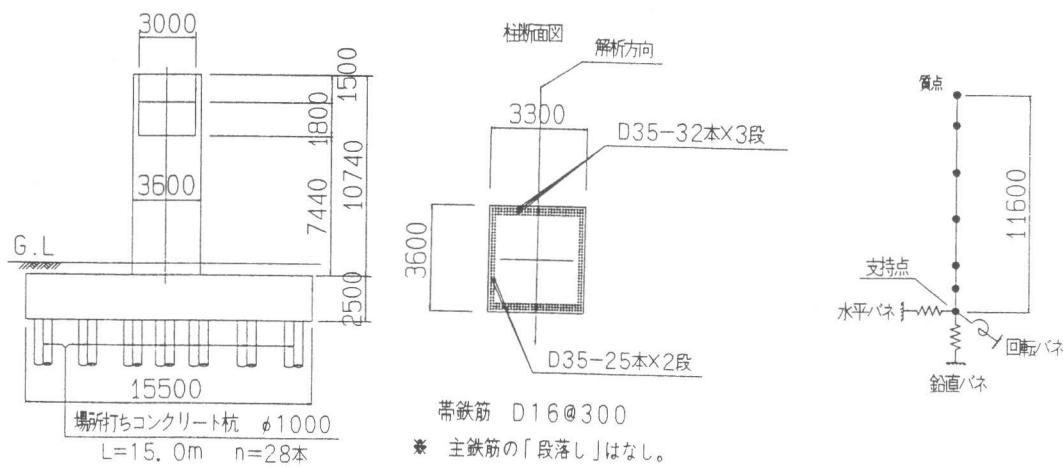


図-1(b) R C 製角単柱橋軸方向断面図とその多質点ばねモデル

柱部材の非線形特性は、図-2に示すひびわれ、降伏、終局状態を考慮したトリリニア型モデル[2]とし、 $M \sim \phi$ 曲線（軸力は死荷重状態で一定）で設定した。履歴法則は、鉄筋コンクリートの復元力特性を考慮した武田モデル[3]を採用した。なお、地盤ばねの非線形特性は考慮していない。

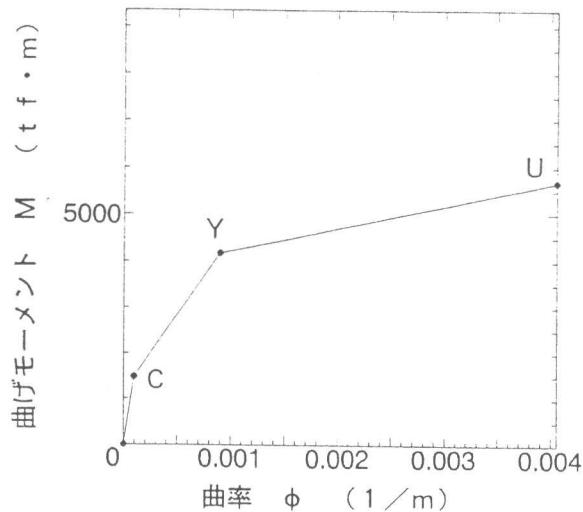


図-2(a) RC製丸単柱橋脚の $M \sim \phi$ 曲線

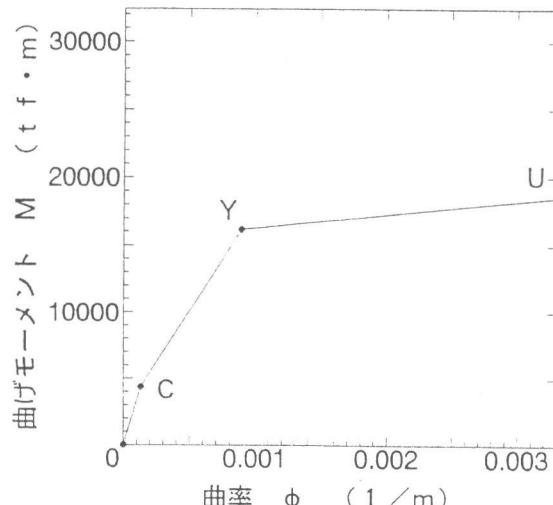


図-2(b) RC製角単柱橋脚の $M \sim \phi$ 曲線

2.2 解析方法

解析方法は、直接積分法による時刻歴動的応答解析とし、各時間ステップ毎の繰り返し計算は、Newmark β method ($\beta=0.25$)を用い、積分時間間隔は0.001 secとした。

なお、減衰定数は、橋脚躯体で5%、基礎～地盤系で20%とした。解析における入力地震動は、神戸海洋気象台記録のNS成分（最大加速度817.83 gal）とUD成分（最大加速度332.16 gal）の加速度記録波形とし、水平方向と鉛直方向の加速度波形を橋脚支持点に同時に入力した。図-3(a)、(b)に入力地震波形を、図-4に水平方向加速度応答スペクトル（h=5%）を示した。水平方向加速度応答スペクトルは、0.3～1 sec付近が卓越している。

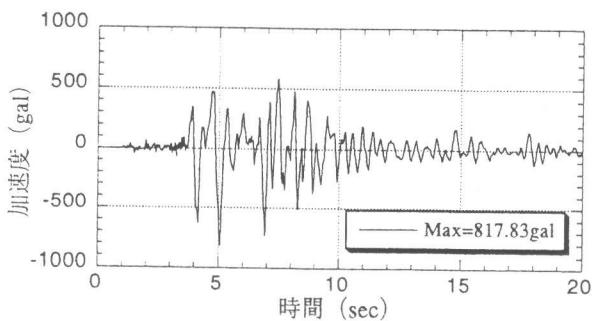


図-3(a) 神戸海洋気象台加速度波形NS成分

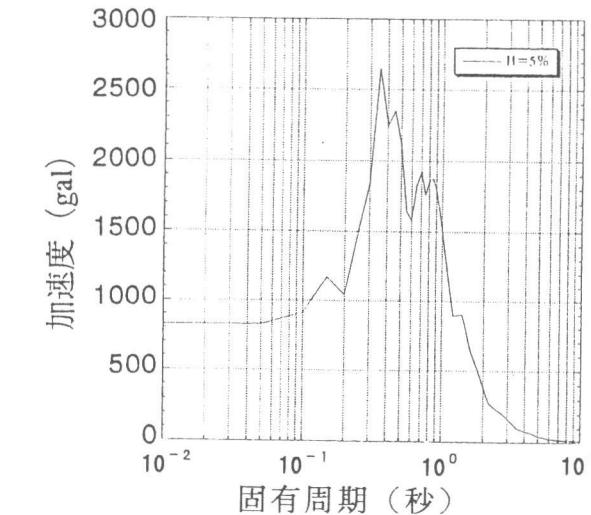


図-4 加速度応答スペクトル

（神戸海洋気象台 NS成分）

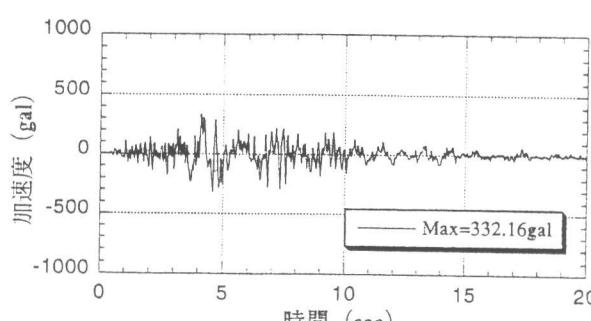


図-3(b) 神戸海洋気象台加速度波形UD成分

3. 解析結果

3. 1 固有値解析結果

水平地震動に対する1次の固有周期は、RC製丸単柱橋脚で0.61 sec、RC製角単柱橋脚で0.45 secである。これより、両橋脚の1次の固有周期は、入力地震動の卓越周期（0.3～1 sec付近）の範囲内に含まれている。

3. 2 時刻歴動的応答解析結果

橋脚天端の水平方向応答加速度、変位、橋脚下端の曲げモーメント、せん断力の時刻歴応答を図-5および6に、また、柱に生じる最大断面力分布を保有耐力（降伏曲げモーメント M_y 、終局曲げモーメント M_u 、抵抗せん断力 V_y ）とともに図-7に示した。これにより、RC製丸単柱およびRC製角単柱の橋脚天端での水平方向最大応答加速度は、入力地震動の最大加速度よりも小さくなっている（表-2参照）。また、柱に発生する最大曲げモーメントは、柱下端部で最大となる三角形分布となるが、せん断力は、柱上部から下部にかけてほぼ一様な分布となっている。

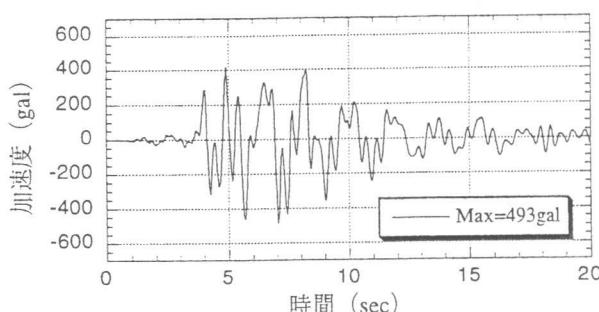


図-5 (a) RC丸単柱橋脚天端水平応答加速度

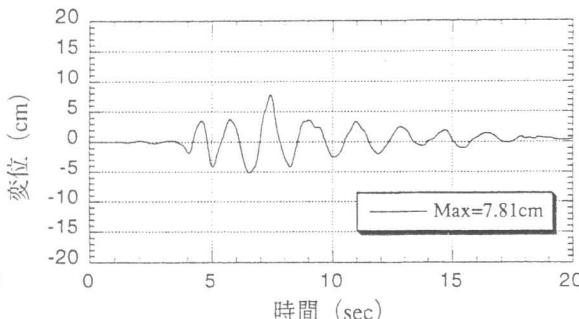


図-5 (b) RC丸単柱橋脚天端水平応答変位

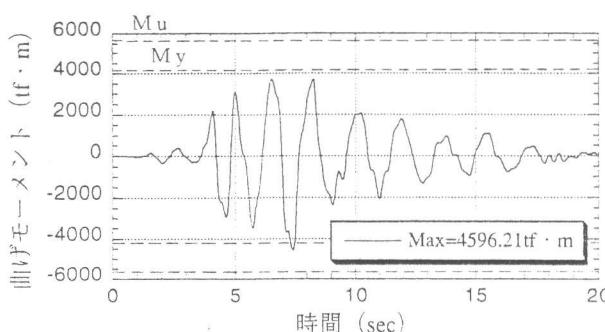


図-5 (c) RC丸単柱橋脚下端曲げモーメント

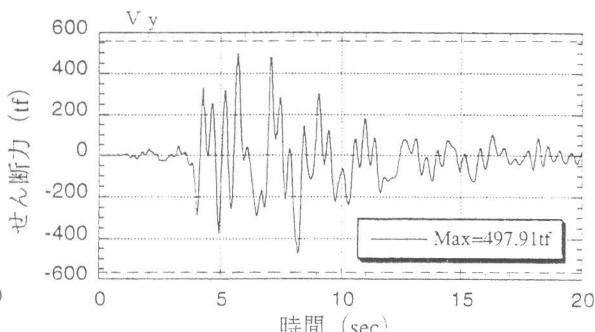


図-5 (d) RC丸単柱橋脚下端せん断力

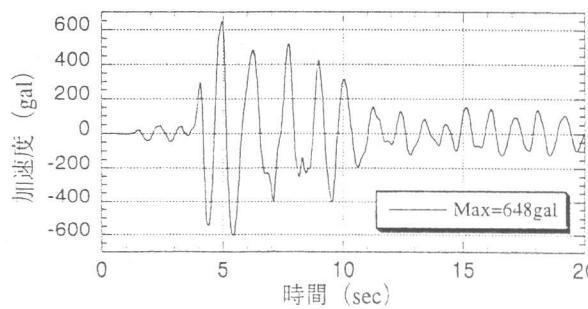


図-6 (a) RC角単柱橋脚天端水平応答加速度

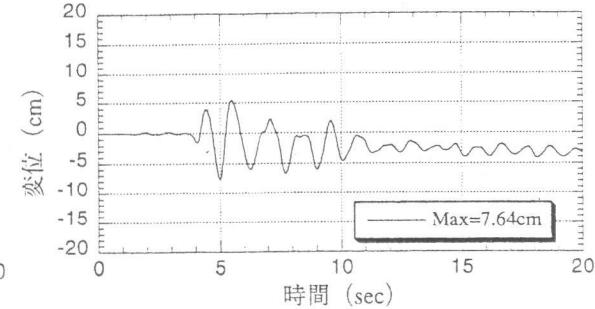
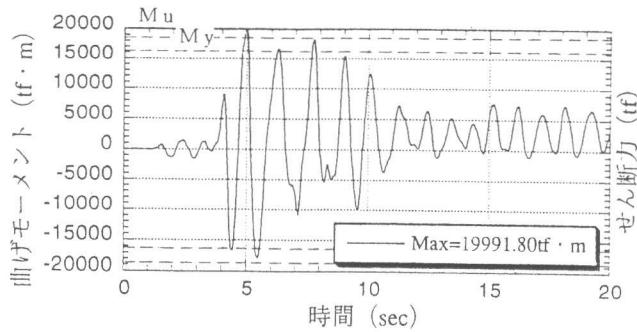
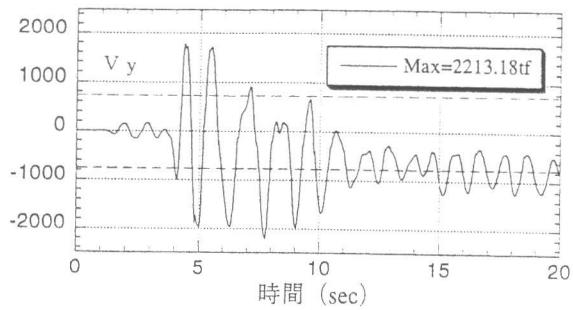


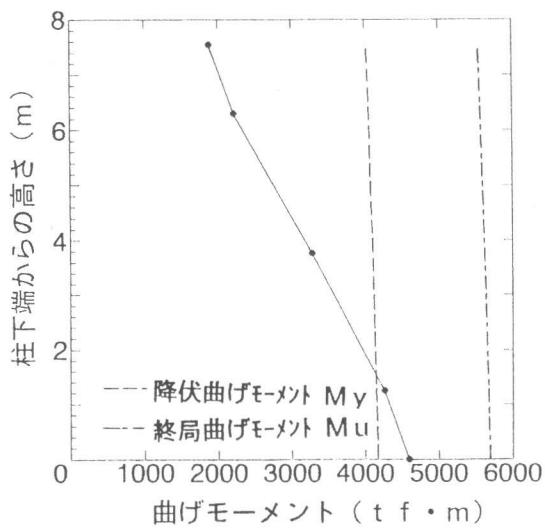
図-6 (b) RC角単柱橋脚天端水平応答変位



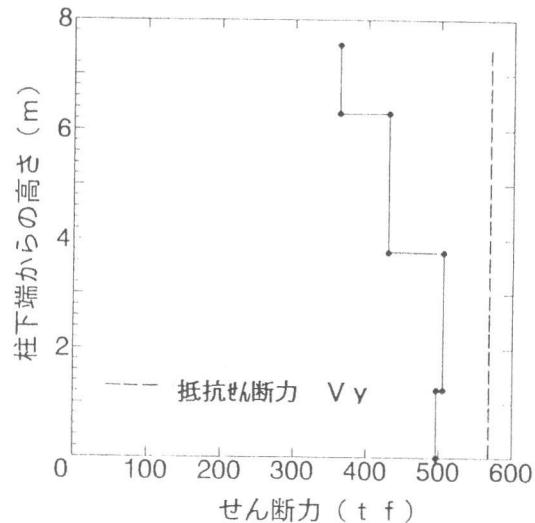
図－6(c) R C 角单柱橋脚下端曲げモーメント



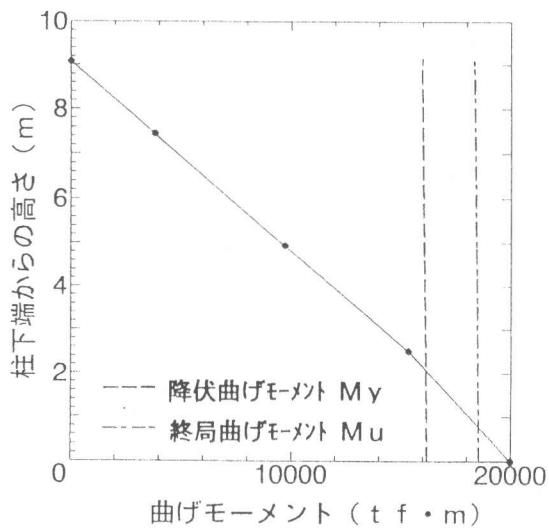
図－6(d) R C 角单柱橋脚下端せん断力



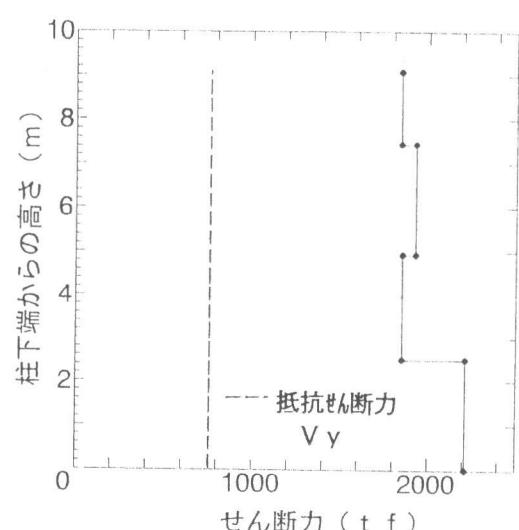
図－7(a) R C 丸单柱最大曲げモーメント図



図－7(b) R C 丸单柱最大せん断力図



図－7(c) R C 角单柱最大曲げモーメント図



図－7(d) R C 角单柱最大せん断力図

3. 3 解析結果の考察

柱に発生する最大断面力と保有耐力を比較して、損傷・破壊形態について検討を行った。なお、曲げ耐力およびせん断耐力は文献[4]に基づいて評価した。

R C 製丸単柱橋脚では、表-2に示すように、発生する最大曲げモーメントは、柱下端部で降伏曲げモーメント M_y を越えているが、発生する最大せん断力は、抵抗せん断力 V_y を越えない。このことから、R C 製丸単柱橋脚は柱下端部で曲げ損傷が先行し、柱が保有する変形性能により地震エネルギーを吸収することから、せん断破壊に至らないと考えられる。実橋脚においても写真-1(a)に示したように橋脚柱下端部に曲げ破壊が生じ、全周にわたり鉄筋がはらみ出し、コンクリートの剥落が見られた。

		R C 丸単柱	R C 角単柱
最大応答値 (橋脚天端)	最大加速度 A_{max} (cm/s ²)	493	648
	最大速度 V_{max} (cm/s)	71.9	90.7
	最大変位 X_{max} (cm)	7.81	7.64
	初期固有値(s)	0.61	0.45
曲げ耐力の 照査	最大曲げモーメント M_{max} (tf・m)	4596	19992
	降伏曲げモーメント M_y (tf・m)	4176	16214
	終局曲げモーメント M_u (tf・m)	5696	18552
せん断耐力の 照査	M_u/M_{max}	1.24	0.93
	最大せん断力 V_{max} (tf)	506	2343
	抵抗せん断力 V_y (tf)	569	762
		V_y/V_{max}	1.13
破壊形式		曲げ降伏	せん断破壊
地震による実被害		曲げ破壊	せん断破壊

4. まとめ

兵庫県南部地震において被災した道路高架橋のR C 製橋脚に対して、部材の非線形特性を考慮した時刻歴動的応答解析を行い、橋脚に発生する断面力と保有耐力を比較することによって、その損傷および破壊メカニズムの検討を行った。その結果、実際の損傷（曲げ破壊およびせん断破壊）やそのメカニズムを、上記の解析手法によってほぼ再現できることがわかった。

今後は、構造システム全体系モデルによる動的解析を行うとともに、地盤ばねの非線形特性の影響、曲げ剛性低下によるせん断耐力の低下、等の影響を考慮することによって、より詳細に損傷および破壊メカニズムを検討する予定である。

なお、本論文は、J C I 近畿支部「土木コンクリート構造物の震災対策に関する研究委員会（委員長：藤井學）」での活動を基に作成したこと付記する。

参考文献

- [1] (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編、pp291-299、平成2年2月
- [2] (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、pp74-79、平成2年2月
- [3] 土木学会編：動的解析と耐震設計[第1巻]地震動・動的物性、技報堂出版、pp134、1989
- [4] (社) 日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料（案）、pp. II-19-20、平成7年6月