

# 個別要素法を用いた1995年兵庫県南部地震の阪神高速3号神戸線高架橋被害シミュレーション

神戸大学 高田至郎\*

神戸大学 Nemat Hassani\*\*

神戸大学 中島健司\*\*

本論では、兵庫県南部地震により甚大な被害を受けたピルツ高架橋の被災メカニズムに迫るため個別要素法を用いてモデル化を行い、橋脚破壊のシミュレーションを行った。その結果、ピルツ高架橋の倒壊に至る過程を追跡することができた。著者らの考案したモデル化によりコンクリート構造物の破壊解析が可能であることが示された。

## 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震により、阪神地区の東西を結ぶ道路、鉄道などの多くの高架橋が甚大な被害を受けた。本論では、阪神高速道路3号神戸線の深江地区で倒壊に至った橋長635mの18径間PCゲルバー橋の被害を対象をしばり、コンクリート特有の脆性的な破壊現象を追跡する手法として個別要素法を用い、被害のシミュレーションを行う。

## 2. 被害の概要

本解析対象の高架橋は一般国道43号線上に建設された阪神高速道路3号神戸線の橋長635mの高架橋である。周辺地域への景観を配慮したピルツ構造となっており、鋼板に比べて走行時の振動が少ない、同一企画のため製品化しやすく、工期を短縮し、経費も短縮できる、などの大きなメリットをもって採用された。しかし、先の兵庫県南部地震によってその全てが山側に横倒しになるという大被害を被った(写真-1)。横倒しになったのは阪神高速全線の被害において、この区間だけである。

当時の新聞記事による目撃証言<sup>1)</sup>では、「ふっと顔を上げると、高速道路がセンターラインを見せながら、目の前にゆっくりと倒れてきた。端から順番

に、というのではなく、一気に、同時に倒れてきた。」或いは、「ピルツ高架橋の倒壊は大阪よりの方から始まり、順次西側に続く橋脚が引きずられて“ふぁーと”全径間にわたっての倒壊となった<sup>2)</sup>。」など、様々な証言があり、その後の解析的検討においても、いまだ倒壊の全貌が解明されたわけではないように思われる。以下にこのPCゲルバー橋区間の被災メカニズムに関するいくつかの論文報告の概要を示す。



写真-1 阪神高速道路3号神戸線被害

## 3. レビュー

土木学会の阪神淡路大震災調査研究特別委員会WG報告<sup>3)</sup>では、検討方法として、2次元FEM地震応答解析を中心に解析的検討を行い、主鉄筋段落とし部での曲げ降伏後のせん断破壊という実際の被害の特徴とよく対応した結果を得ている。さらに、上下動はピルツ橋脚の倒壊を決定づける主要因ではないが、構造物のダメージに影響を及ぼしうると付け

キーワード：個別要素法、高架橋、地震応答、破壊解析

\* 神戸大学工学部, 078-803-1031

\*\* 神戸大学大学院, 078-803-1050

加えている。

金子ら<sup>4)</sup>は、ピルツ区間の全橋モデルおよび単柱モデルで周期 0.05sec 以上を対象としたモーダル法による時刻歴応答解析を行い、隣接橋脚間で比較的大きく周期が異なるのはピルツ橋脚内で断面寸法が変わる区間であることを示している。また、加速度応答も全橋モデルと単柱モデルで差が現れるのは断面寸法が変わるところであり、隣接する橋脚間の剛性が変化する場合、相対的に柔な橋脚に大きな断面力が集中することを述べ、最後にこのような事項の検討は今回行った線形解析では不十分であり、非線形解析を行うことが望ましいと結んでいる。

竹宮ら<sup>5)</sup>も同じく全橋を 3 次元フレームモデルを用いてモデル化し、低次の 1 次から 3 次までの固有振動モードは主に東端（大阪側）の数スパンのねじれ応答に関係したものであり、4 次モードは中央数スパンのねじれ応答に、そして 5 次、6 次の振動モードは西端の数スパンのねじれ応答関係しており、対象橋梁の橋軸直角方向の振動モードは多スパンにわたって全体系がねじれ振動をするような応答性状を示していると述べている。そして線形解析ではあるが、地震時の発生断面力の場所的な差から東端スパンから西側へ橋軸直角方向への倒壊の状況を推論できたと結んでいる。

これらの解析手法は対象を連続体として取り扱う連続体解析法の中に属するものである。連続体解析法の代表的な解析手法として有限要素法が挙げられるが、有限要素法は要素間の適合条件を満たす定式化となっているため、隣接要素どうしは基本的に連続条件を満足しなければならない。ジョイント要素などを用いて解析する方法もあるが、破壊面の形状や亀裂の進展方向は要素分割などの形状に依存し、耐力後の破壊現象を追跡するには困難を伴う<sup>6)</sup>。

一方、破壊解析の手法には連続体解析法の他に非連続体解析法として Cundall による個別要素法が挙げられる。モデルを粒状体に離散化し、非連続体として個々の要素の運動方程式を満足し、要素の接触時における力の伝達によって集合体の動力学挙動を解析する方法である。目黒・伯野<sup>7)</sup>は、モルタルを間隙パネで表現し、要素の回転やモーメントの伝達

を考慮した改良個別要素法による鉄筋コンクリート構造物の破壊現象をはじめて解析し、定性的ではあるが弾性体のような連続体における動的破壊への有用な結果を示した。本論ではこれと同様の手法で、間隙パネをコンクリートと鉄筋の 2 種類の特性で表現し、兵庫県南部地震におけるピルツ橋脚の破壊挙動のシミュレーションを行い、考察してゆく。

## 4. 解析理論

### 4.1 運動方程式

質量  $M_i$  のある円盤要素  $i$  について、次の運動方程式が成り立つ。

$$M_i \cdot \ddot{U} + C_i \cdot \dot{U} + F_i = 0 \quad (1)$$

ただし、 $F_i$  は要素  $i$  に働く合力、 $C_i$  は減衰定数である。要素間に働く接線方向と法線方向の力はそのパネ定数により決定される。今回鉄筋コンクリート構造物をモデル化するにあたり、図-1 のように 2 次元のモデル化を行った。図-2 は図-1 をもとにした個別要素法における間隙パネのモデルである。鉄筋の位置するエリアには鉄筋の特性を持つ間隙パネが配置されている。

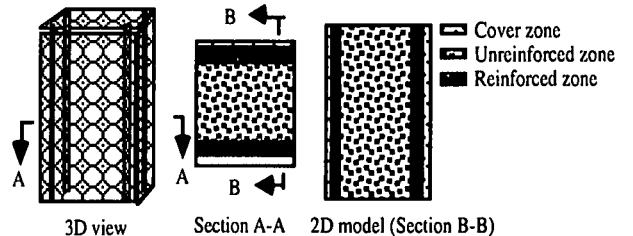


図-1 鉄筋コンクリートのモデル化

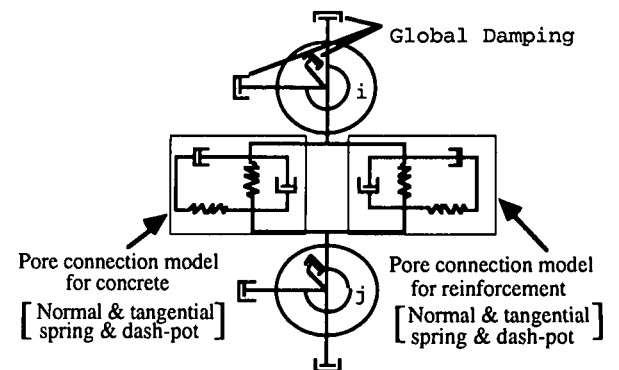


図-2 要素間の間隙パネのモデル

また、要素に掛かる力とモーメントは(2)式より算出する<sup>9)</sup>。ここに、Mは要素にかかるモーメント、Unrは結合している要素間の法線方向の相対変位、Utrは接線方向の相対変位である。Aは要素の接触面積、Lは要素間の初期の相対距離、E、Gはそれぞれヤング係数とせん断剛性、Rは要素の半径である。

$$F_n = \frac{EA}{L} U_{nr}$$

$$F_t = \frac{GA}{L} U_{tr}$$

$$M = -RF_s \quad (2)$$

解析では図-3のようなアルゴリズムに従って計算を進めてゆく<sup>9)</sup>。

また、要素間をつなぐダッシュポットξは0.03とする。これにより、減衰定数は以下の式で求める。

$$C = 2\xi\sqrt{mK} \quad (3)$$

ここに、Kはバネ剛性で接線方向、法線方向ともに同じ値とする。

時間ステップは個別要素法において解を安定させる重要なファクターである。この時間増分のステップを以下の式に基づいて算出する<sup>10)</sup>。

$$\Delta t \leq \frac{\sqrt{(1+\xi^2)} - \xi}{2} \sqrt{\frac{2m(1+\nu)(1-2\nu)}{\pi(3-4\nu)E}} \quad (4)$$

#### 4.2 解析モデルと解析パラメータ

本解析で用いた解析諸条件を以下に示す。まず、コンクリートの特性を表-1に示す<sup>9)</sup>。ここでは、現場から採取されたコアの強度試験結果より、コンクリートの強度を推定したものを示す。コア試験は、P126橋脚について、3供試体に対して行われたもの

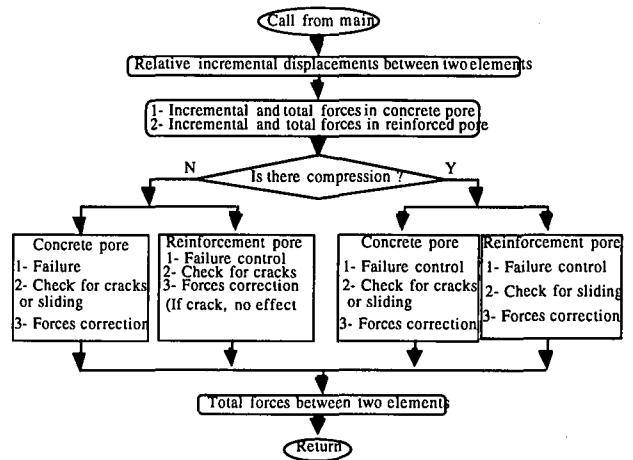


図-3 個別要素法による鉄筋コンクリート解析の流れである。また鉄筋の特性を表-2に示す。主鉄筋についてはP126橋脚のデータがないため、他のピルツ橋脚について行われた引張強度試験結果の平均値を用いることにする。

つぎに、解析に用いた破壊基準を示す。表-3は間隙パネの破壊基準である。

表-2 鉄筋の材料特性

主鉄筋(D35)の引張強度試験結果(母材強度)

橋脚No	降伏強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )
126	3,590	5,600

帯鉄筋(D16)の引張強度試験結果

橋脚No	鉄筋 No	降伏荷重 (tf)	降伏強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )	最大荷重 (tf)	引張強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )
126	1		降伏点なし	11.07	5,574
126	2		降伏点なし	11.51	5,796

表-3 破壊基準

Pore condition	Direction			
	Normal		Tangential	
	Mode	Condition	Mode	Condition
Before failure	Compression	Fn > 0	Active	Fs ≤ C + μFn
			Crack-slide	Fs > C + μFn → Fs = μFn
	Tension	Fn < 0	Active (No friction)	Fs ≤ C
			Crack (separation)	Fs > C → Fn = 0 Fs = 0
After failure	Compression	Fn > 0 L0 < Lt < Lut	Active (only friction)	Fs ≤ μFn
			Slide	Fs > μFn → Fs = μFn
	Separation	Lt > Lut	Crack Separation	Fn = 0 Fs = 0

表-1 コンクリートの材料特性

橋脚No.	コアNo.	コア高さ (cm)	コア平均直径 (cm)	圧縮荷重 (tf)	圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> )			弾性係数(*10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )		備考
					測定値	補正值	平均値	測定値	平均値	
P126	1	19.9	9.92	23.68	306	307	359	2.09	2.64	U
	2	18.9	9.91	31.23	405	402		2.88		U
	3	19.6	9.92	28.57	370	369		2.96		U

圧縮による破壊は全てせん断破壊で起こるものとし、要素間の引張強さは一般的なコンクリートの純引張強度とする。表-3の  $F_s, F_n, \mu$ , そして  $C$  はそれぞれ要素間に働く法線方向、接線方向の力、要素間の摩擦係数、そして粘着力である。  $L_0$  は初期の要素間の距離で、  $L_t$  は時刻  $t$  における要素間の相対距離、そして  $L_{ut}$  は要素間に働く間隙パネの引張破壊基準となる。つまり要素間距離が  $L_{ut}$  に達すると間隙パネは切れるということである。解析プログラムのアルゴリズムは以下の図-4に示すとおりである。このような基準に基づいてシミュレーションを行った。

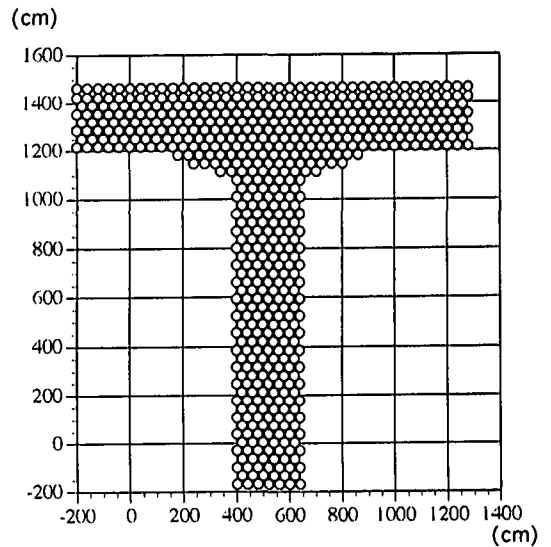


図-5 解析モデル図

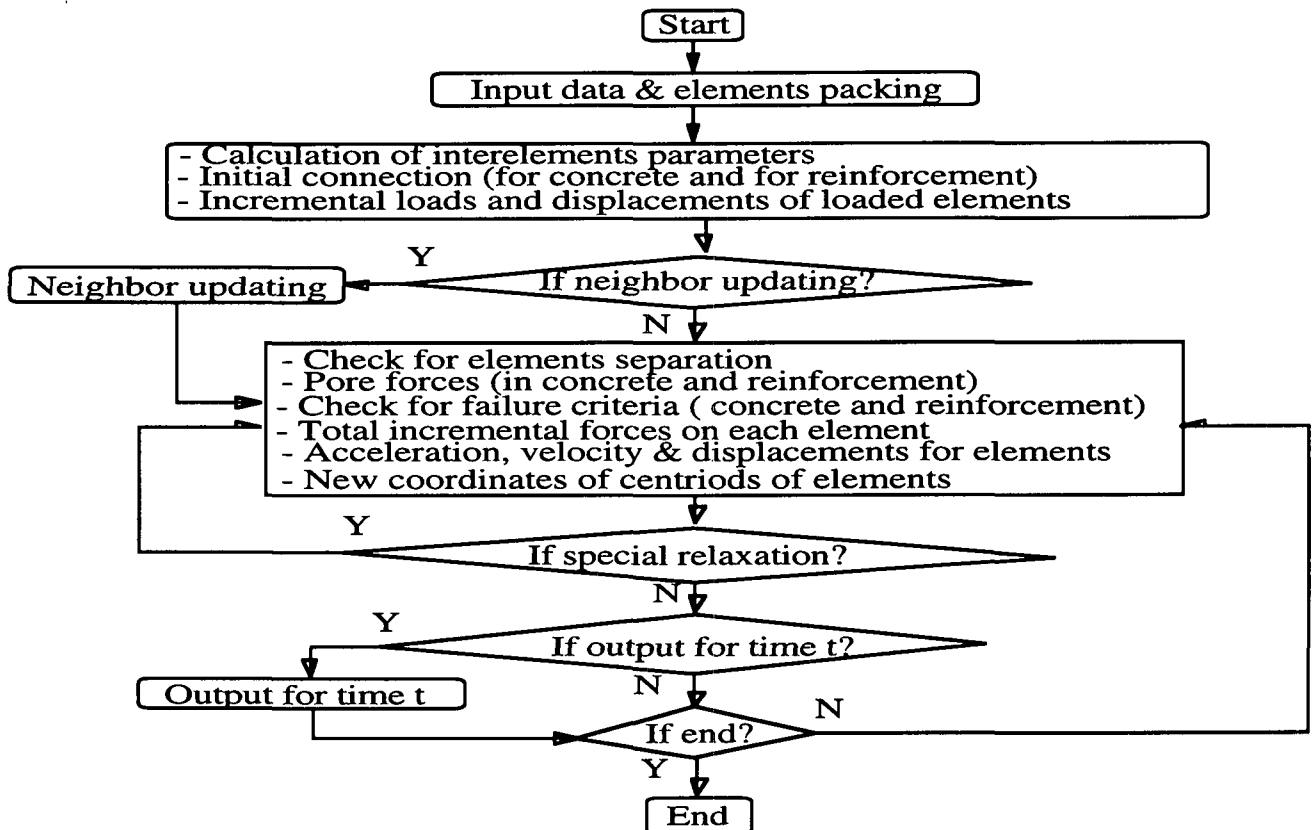
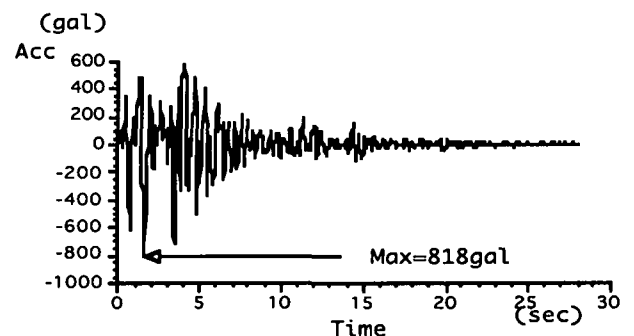


図-4 解析アルゴリズム

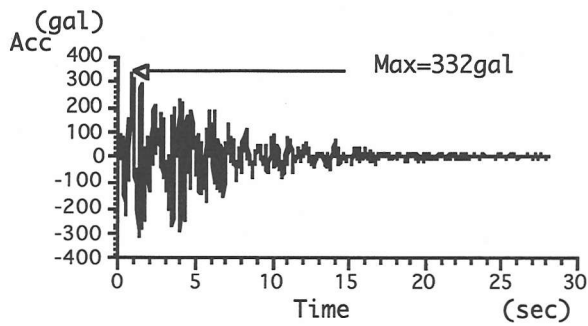
## 5. 解析モデルと結果

### 5.1 解析モデル

図-5に解析モデル図を示す。モデルはP126橋脚であり、また入力加速度は図-6に示すように神戸海洋気象台で得られたNSおよびUD成分の加速度データを入力した。



神戸海洋気象台(NS)加速度波形



神戸海洋気象台(UD)加速度波形

図-6 神戸海洋気象台加速度波形

### 5.2 解析ケース

今回行った解析ケースを表-4 に示す。

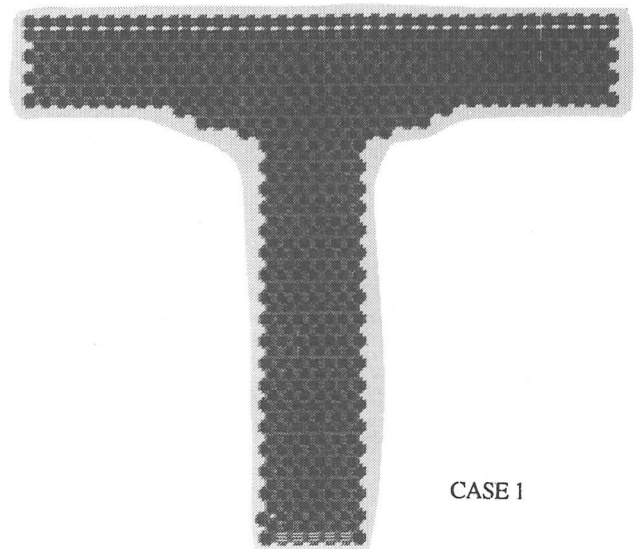
CASE 1 は加速度，材料強度ともにそのままの値，具体的にはコンクリート強度を  $350\text{kg/cm}^2$  を入力している。CASE 2 は加速度の NS 成分を 2 倍に，そして CASE 3 は加速度はそのまま材料強度を 0.5 倍，具体的には  $200\text{kg/cm}^2$  に低下させたものを入力している。

表-4 解析ケース

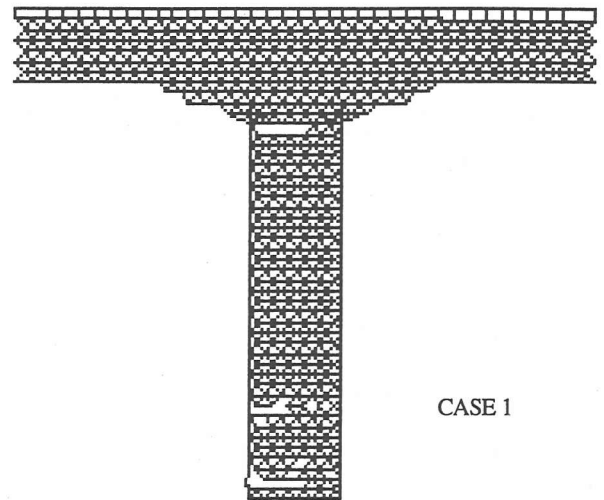
	加速度	コンクリートの材料強度
CASE 1	1倍	1倍
CASE 2	2倍	1倍
CASE 3	1倍	0.5倍

### 5.3 解析結果

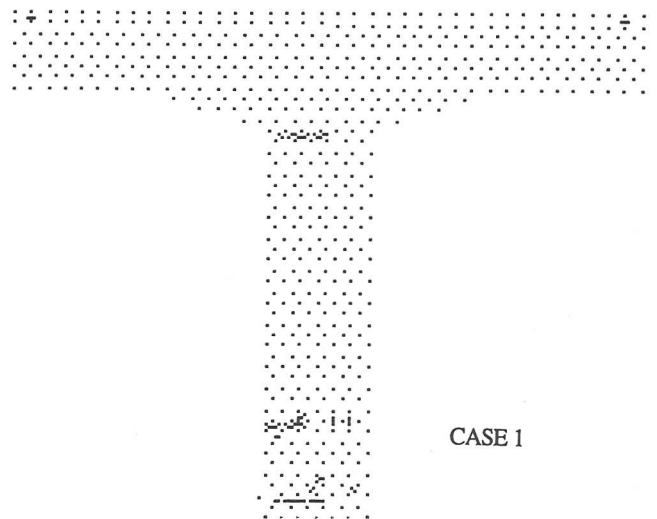
以下に各ケースの解析結果を示す。図-7 は CASE 1 の解析結果であるが，一般的なコンクリートの材料強度では神戸海洋気象台の加速度波形の入力により，橋脚基部，段落とし部および橋脚躯体上部にクラックは入るが倒壊には至らなかった。図-8 は CASE 2 の解析結果である。実際の P126 橋脚の破壊モードとよく対応した結果が得られた（写真-2）。図-9 は元の橋脚位置と倒壊の様子をラップさせたものである。実際のこの付近の表層地盤の加速度増幅特性によって表層地盤の加速度が海洋気象台で得られた加速度の 2 倍近くになるとは考えられないが，海洋気象台の加速度より大きな加速度を受けた可能性は十分あり得る。



個別要素のパッキング

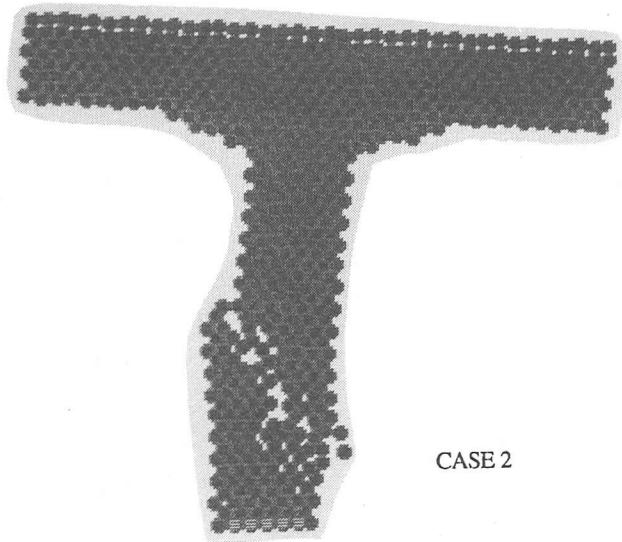


間隙バネの破壊状態



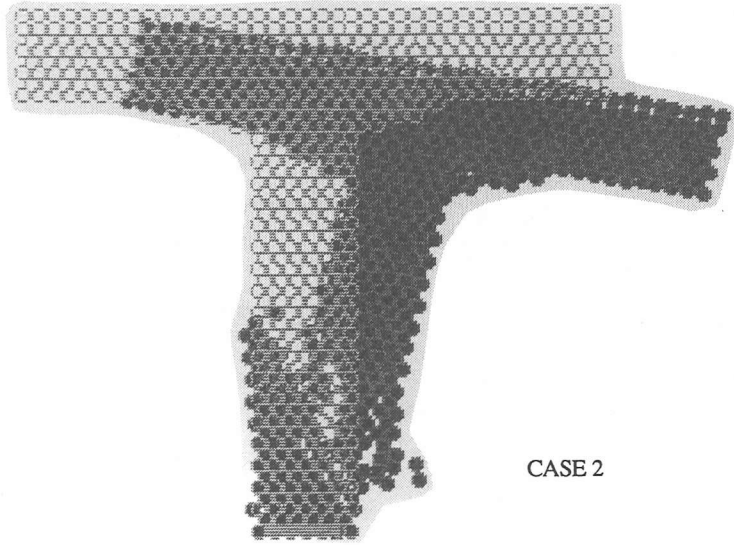
クラックパターン

図-7 CASE 1 の解析結果



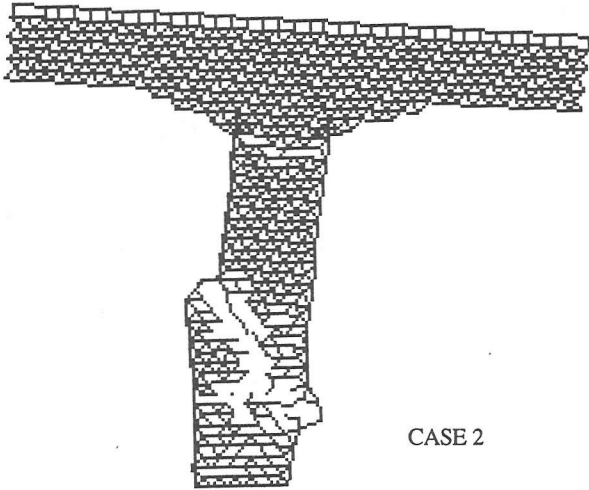
CASE 2

個別要素のパッキング



CASE 2

図-9 Final Image



CASE 2

間隙バネの破壊状態

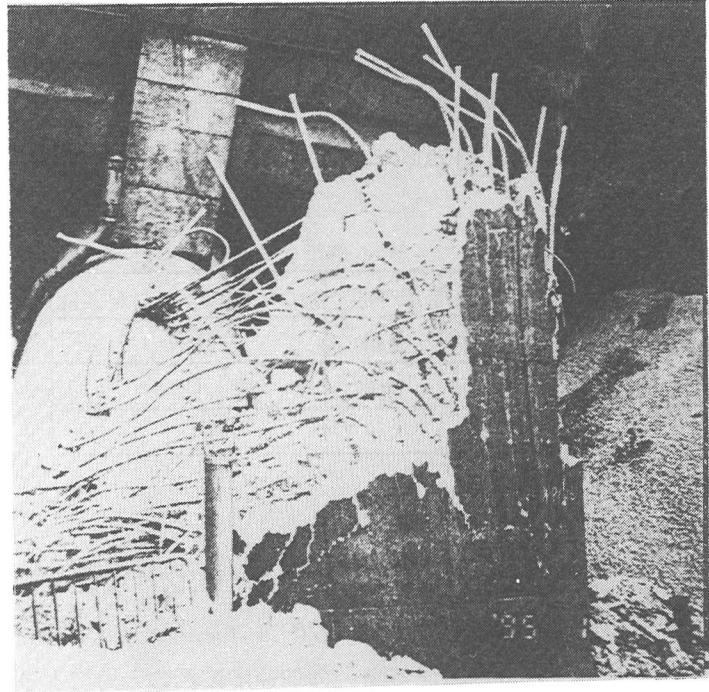
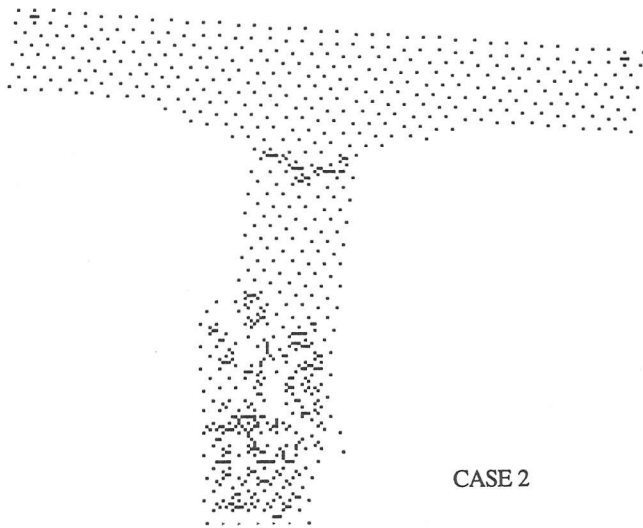


写真-2 ピルツ橋脚の破壊の様子



CASE 2

クラックパターン

図-8 CASE 2の解析結果

図-10はCASE 3の解析結果である。CASE 2とは違う橋脚基部でのせん断破壊のモードとなった。このような破壊性状はPC ゲルバー区間の中央付近で見られた破壊モードであり、言及はできないものの、実際の橋脚にも何らかの原因での部分的な材料劣化があった可能性もあると推測することもできる。

図-11 は今回の橋脚モデルの基部の要素にかかる反力の時刻歴を示したものであるが、この図からも分かるようにこの解析において5秒付近で倒壊に至ったと推測できる。図-12は各ケースの橋脚天端の相対変位応答の時刻歴である。

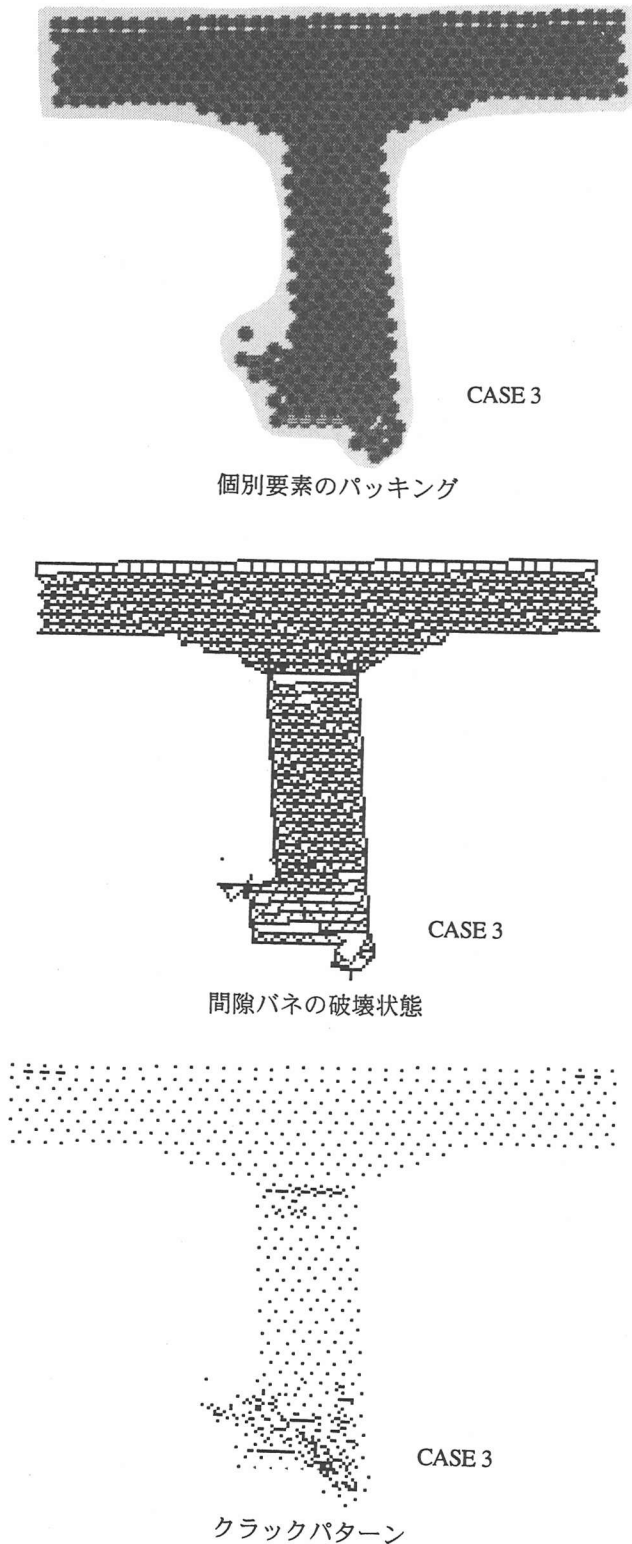


図-10 CASE 3の解析結果

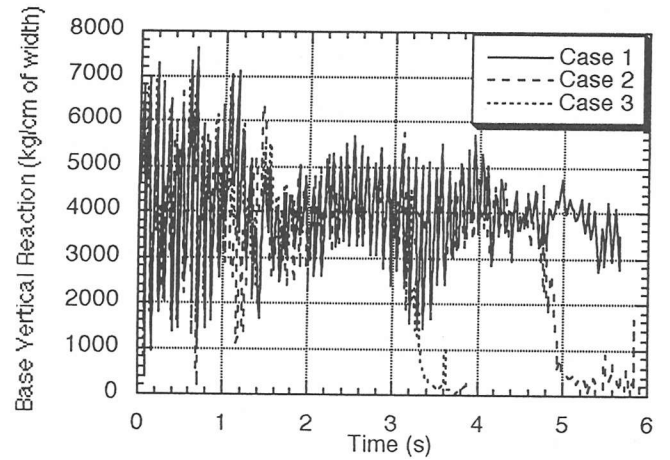


図-11 橋脚基部要素にかかる反力の時刻歴

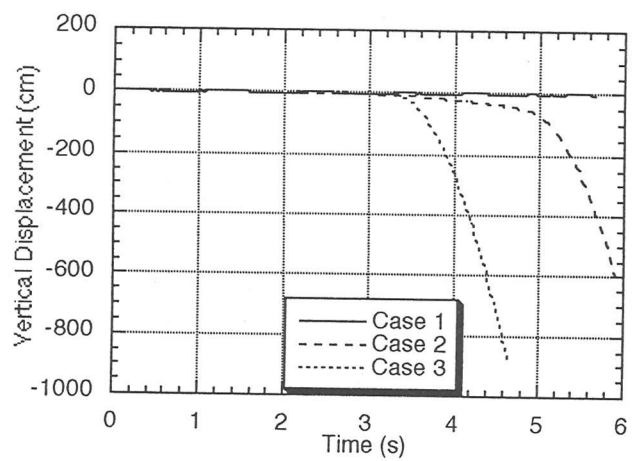
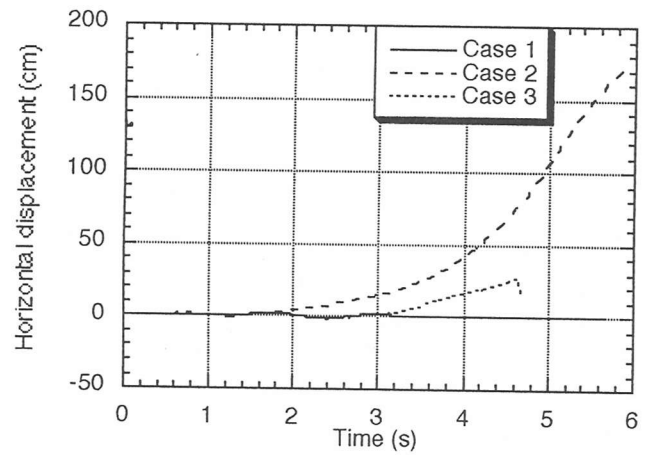


図-12 橋脚天端の相対変位

以上の結果を踏まえて、次のことがいえる。

- 提案のモデル化により、震災で破壊した橋脚モデルのシミュレーションを行うことが可能であることが分かった。
- 神戸海洋気象台の加速度レベルをそのまま入力した場合にはピルツ橋脚に亀裂は生じるが倒壊には至らない。また、入力加速度の倍率を2倍に上げると(CASE2)、実際の破壊モードに類似した現象が見られた。一方、コンクリート強度を $350\text{kg/cm}^2$ から $200\text{kg/cm}^2$ に低下させた場合(CASE3)には観測地震レベルでも倒壊に至った。
- 段落とし部付近は、DEM解析においても、ウィークポイントとして破壊現象に表現された。
- プログラムの破壊基準、具体的にはLutなどの見直しも含めて、今後さらに詳細に検討していく必要がある。

## 6. おわりに

本論では、1995年1月17日兵庫県南部を襲った直下型地震によって被災したピルツ橋脚の倒壊のメカニズムを究明するため、個別要素法を用いて破壊のシミュレーションを行った。その結果、P126橋脚についてその倒壊状況とよく似たシミュレーションの結果を得ることができた。

## 【参考文献】

- 1) 産経新聞 2/8 (水) 朝刊1面
- 2) 竹宮宏和ら、阪神淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.333-25~333-33, 1996.1
- 3) 土木学会、阪神淡路大震災被害分析と靱性評価式 [阪神淡路大震災調査研究特別委員会 WG 報告], pp.4~10
- 4) 金子・勝川ら、阪神淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.326-29~331-23, 1996.1
- 5) 竹宮宏和ら、阪神淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.334-17~338-46, 1996.1
- 6) 森川・澤本・小鹿ら、個別要素法を用いたコンクリートの破壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第473号 127-135, 1995.7
- 7) 目黒公郎, 伯野元彦, 粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析, 東京大学地震研究所報告, 第63号第4冊, pp.409-48, 1988
- 8) Takada, S. & Hassani, N. " On Visco-Elastic parameters for the Distinct Element Simulation of Structural Media", (accepted for publishing in) The Construction Engineering Research Institute Foundation, report No. 38, 1996.
- 9) Takada, S. & Hassani, N., " Modeling of reinforcement using the DEM for failure monitoring of reinforced concrete structures during earthquake ", Submitted to the 4th. Int. Conf. on Civil Eng., Tehran, Iran, May 4-6, 1997.
- 10) Takada, S. & Hassani, N., " On determination of critical time-step in Distinct Element Method for continuous media", (accepted for publishing in) Memoirs of the Graduate School of Science and Technology, Kobe University, Vol.15., 1996.

## FRACTURE AND FAILURE ANALYSIS OF BRIDGE STRUCTURE OF KOBE ROUTE IN HANSHIN EXPRESSWAY, DURING THE 1995 HYOGO-KEN NANBU EARTHQUAKE, USING DISTINCT ELEMENT ALGORITHM.

SHIRO TAKADA, NEMAT HASSANI, KENJI NAKAJIMA

Focussing on the Hanshin Expressway viaduct at Fukae section which has been destroyed by Hyogo-ken Nanbu Earthquake, the authors investigated with the aid of dynamic response earthquake analysis, using Distinct Element Method. As the result, the present analysis explained the failure mechanism of Pirze viaduct. Moreover, our analysis method was proved to be able to analyze the failure mechanism of other concrete structures as well.