

# 護岸近傍に設置された水路横断橋ケーソン基礎の 液状化対策工の耐震性照査

神戸市\* 岡下勝彦, 渋谷光宣  
鹿島建設\*\* 清水保明, 砂坂善雄  
大澤一郎, 仙波 克

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震により、神戸新交通ポートアイランド線のポートピア大橋（新港第4突堤とポートアイランド間の水路横断橋）も被害を受けた。被害は、支承の一部と橋桁の端部の損傷であり、護岸近傍に設置された主橋脚ケーソン基礎が周辺の液状化した地盤における側方流動により傾斜し、鋼製橋脚に変形を生じたためであると推測される。このため、復旧工事は、鋼製橋脚・橋桁等の補修だけでなく、橋脚基礎周辺を地盤改良することによる液状化対策工も併せて行うことが計画された。

本報告では、神戸新交通ポートアイランド線災害復旧工事のうち、ポートピア大橋主橋脚ケーソン基礎の液状化対策工の概要及び動的解析による耐震性照査について述べる。

## 1. はじめに

1995年1月17日午前5時46分、兵庫県淡路島の北端付近を震源とするマグニチュード7.2の地震が発生し、近畿地方を中心に西日本から東日本にかけての広い範囲で強い揺れを記録した。気象庁による震度階は神戸市及び淡路島の一部で震度7（激震）であったと判定された。

この地震による被害は、死者6,000人、家屋損壊193,000棟に達し、1948年福井地震を上回る戦後最悪の大震災となった。都市機能が高度に集中した近代的都市圏を襲った初めての大地震となり、建物の損壊だけでなく、新幹線や高速道路の高架橋の倒壊、埋立地盤の液状化、ライフラインの断絶など都市の中核をなす土木関連施設に致命的な打撃を与えた。

本地震は、淡路島の北東約3km、震源深さ約14kmの直下型地震であり、地震入力の特徴としては水平振動のみならず大きな鉛直振動が発生したことが特筆される。高架橋に関しては、桁の重量が大きいトップヘビー構造の橋を中心として橋脚の座屈などにより未曾有の被害が発生した。また、従来から地震に

対して安全視されてきた地下構造物も大きな被害を受けた。港湾施設も全域で壊滅的な打撃を受けた。ポートアイランドでは液状化により平均で約60cmの沈下が発生し、これに伴う側方流動により岸壁が傾斜、転倒及び海側への大きなはらみだしなどの甚大な被害を受けた。

神戸市の市街地と海上都市ポートアイランド、六甲アイランドを結ぶ新交通システム（神戸新交通ポートアイランド線、六甲アイランド線）もこの大地震により大きな被害を受けて運休を余儀なくされた。

神戸港の新港第4突堤とポートアイランド間の水路を横断する神戸新交通ポートアイランド線のポートピア大橋は、支承の一部と橋桁の端部が損傷した。この被害は、護岸近傍に設置された主橋脚ケーソン基礎が周辺地盤の液状化によると考えられる側方流動により傾斜し、鋼製橋脚に変形が生じたためであると考えられる。

復旧工事は、鋼製橋脚・橋桁等の補修だけでなく、橋脚基礎周辺を地盤改良することによる液状化対策工も併せて行うことが計画された。

本報告では、神戸新交通ポートアイランド線災害復旧工事のうち、ポートピア大橋主橋脚ケーソン基礎の液状化対策工の概要及び動的解析による耐震性照査について述べる。

キーワード：橋梁下部工，ケーソン基礎，

液状化対策工，時刻歴応答解析

\* 神戸市港湾局，078-331-8181

\*\* 鹿島建設土木設計本部，03-5561-2111

## 2. 被害の概要

図-1にポートピア大橋の橋梁一般図を示す。ポートピア大橋は、側径間の一部に曲線桁を持つ全長約520mの連続箱桁橋であり、中央径間250mは鋼製単弦ローゼ桁橋である。主橋脚は高さ約24mの鋼製橋脚であり、埋立地盤中に設置された断面16m×16m、高さ33mのニューマチックケーソンにより支持されている。

地震直後の橋脚ケーソン基礎周辺の被害状況調査によれば、橋脚ケーソンの周辺地盤に液状化による沈下が認められた。また、ケーソン天端の四隅のレベルを測量した結果、ケーソン本体の相対的な傾きは、表-1のように推定された。

なお、ケーソン側壁にそれぞれ2ヵ所のコアボーリングを行い、ボーリング孔にボアホールカメラを挿入してひび割れ調査を行った結果、橋脚ケーソンにはひび割れは認められず、健全であると判定された。

表-1 ケーソン傾斜測定結果

	P72(新港4突側)	P73(ポ-7アイランド側)
南北方向	北へ0.072° 傾斜	北へ0.394° 傾斜
東西方向	東へ0.390° 傾斜	東へ0.451° 傾斜

## 3. 液状化対策工

### (1) 液状化対策の考え方

ポートピア大橋主橋脚基礎の災害復旧工事については、基礎本体の損傷度状況調査及び周辺地盤の土質調査の結果に基づき工法の検討を行った。

土質調査の結果から現行基準に従い検討した結果、液状化の可能性があり、このままの状態では設計荷重が作用した場合、基礎の水平変位量が許容値(50mm)を超えるため、基礎の水平変位を抑制する対策が必要であることが判明した。

新交通システムの災害復旧における液状化対策については、基礎タイプ別に対策効果、施工性及び経済性を考慮して決定されている。

すなわち、液状化対策として下記の工法が採用されている。

- i) 基礎自身で液状化に抵抗する工法
- ii) 基礎周辺地盤を地盤改良することにより液状化を抑制する工法
- iii) 両者の併用工法

ポートピア大橋主橋脚基礎の液状化対策を検討するにあたっては、下記の条件を考慮し、基礎周辺地盤を地盤改良することにより液状化を抑制することとした。

- i) 対象となる基礎がニューマチックケーソン基礎である。

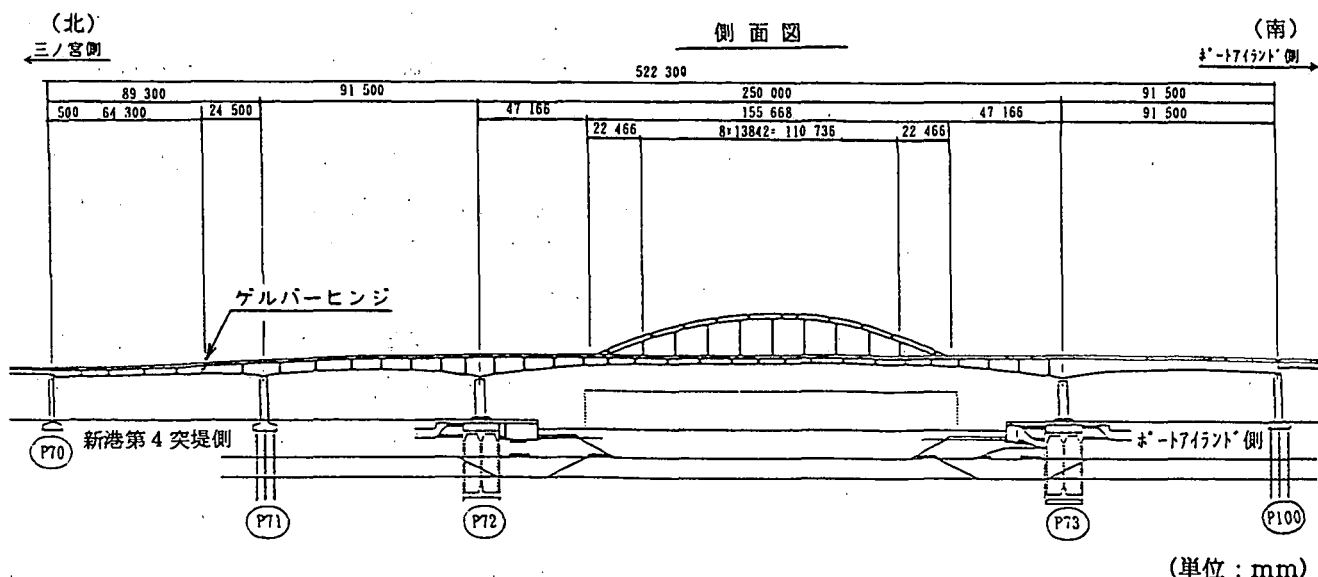


図-1 ポートピア大橋の橋梁一般図

- ii) 施工条件に制約がある。
- iii) 出来る限り早期に復旧する必要がある。

(2) 設計の基本方針

工法検討にあたっては、

- ・ポートピア大橋主橋脚基礎に隣接して同様に液状化の影響を受けた神戸大橋主橋脚基礎（ニューマチックケーソン基礎）があることから両方の基礎に対して一体的な対策を講じる必要があること。
- ・埋立護岸近傍に当該基礎が位置すること。
- ・桁下の限られた空間で作業を行わなければならないこと。

という条件を考慮して、下記の工法を採用することとした。

- ・基礎海側前面に対しては、ケーソン基礎前面地盤に高強度・高信頼性の地盤改良を行うことにより、造成改良体を通じて受働土圧の確保と変位の抑制を図る。
- ・基礎内陸側背面に対しては、ケーソン基礎背面側に液状化層からの圧力に十分抵抗し得るせん断抵抗を確保するために、比較的広い範囲を地盤改良することにより、ケーソン基礎の安定性を確保する。

(3) 工法の選定

前述の2つの工法について、具体的な工法選定を

行った。工法選定にあたっては、施工条件、経済性、信頼性及び工期を考慮した。

すなわち、基礎海側前面の地盤改良については、埋立護岸の捨石基礎以深の地盤改良を行うため、施工上の問題として、捨石基礎の撤去あるいは削孔を行う必要があった。このため、高強度の地盤改良が可能で、しかも捨石層以深の施工が可能な工法を比較検討した結果、経済性、信頼性にも優れ、埋立護岸近傍での施工でも海洋汚染への影響が比較的小さい高圧噴射置換工法（スーパージェット工法）を採用することとした。

一方、基礎内陸側背面については、改良区域が広範囲であることに加え、隣接する神戸大橋の桁下での作業となるという制約があった。このため、これらの条件を満足し、施工実績もある砕石置換工法を採用することとした。

(4) 設計方法

高圧噴射置換工は、図-2に示すようなフローに従って設計した。すなわち、改良体があることによる地盤ばね値の増加を考慮したケーソンの安定計算を行い、更にその反力に対する改良体の応力度の照査を行った。

砕石置換工は、電力中央研究所の方法<sup>1)</sup>によって設計した。すなわち、液状化の検討を行い、最大間隙水圧比を許容値以下にするよう砕石ドレーンの径とピッチを決定した。<sup>2)</sup>

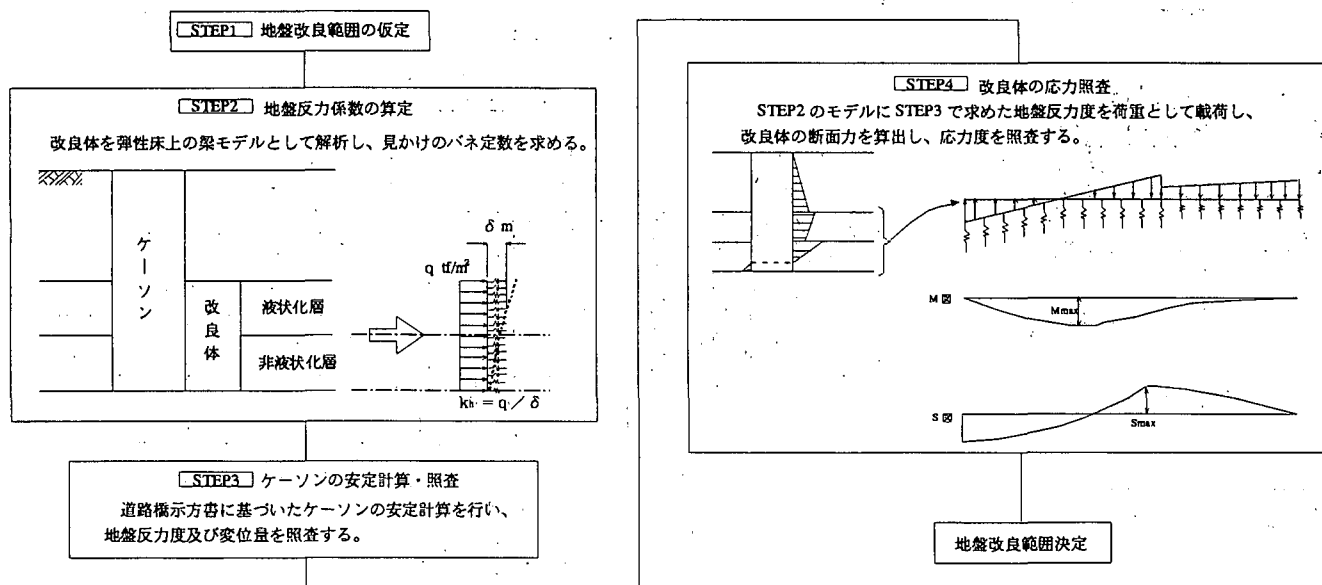


図-2 高圧噴射置換工の設計フロー

(5) 地盤改良範囲

ケーソン基礎周辺の地盤改良図の一部を図-3に示す。

4. 動的解析による耐震性照査

以下のような理由により、ポートピア大橋全体系の3次元動的解析を実施し、液状化対策後のケーソン基礎周辺地盤の耐震性を照査することとした。

- i) ポートピア大橋は側径間の一部に曲線桁を持ち、構造が複雑である。
- ii) 主橋脚は護岸に近接しており、埋立土層も厚く、基礎と地盤の動的相互作用の影響を考慮する必要がある。
- iii) 主橋脚ケーソン基礎の周辺地盤の被害は、橋軸方向、橋軸直角方向共に生じており、ケーソン基礎の安全性照査においては3次元的な挙動を考慮する必要がある。

(1) 入力地震動

当該サイトでの最大規模の地震動を想定し、兵庫県南部地震時に神戸市により観測されたポートアイランドでの鉛直アレー地震記録のうち、KP-79mの地震記録を用いることとした。その理由は、以下のとおりである。

- ・観測地はポートピア大橋に近く、地盤条件も類似している。

- ・データが波形、観測地の地盤柱状図とも完備している。

KP-79mでの観測波形（NS成分、UD成分）を図-4に示す。

(2) 解析方法

立体骨組みモデルによる線形時刻歴応答解析を実施し、その結果に基づいてケーソン基礎周辺地盤の液状化対策工の耐震性を照査する。

解析フローを図-5に示す。主な手順は以下のとおりである。

- ・ポートアイランドでの強震記録（NS成分）を用いて、ケーソン基礎位置での地盤の地震応答解析（SHAKE）を実施し、地震時の地盤の収束物性値及び全体系骨組みモデルへの入力地震動を求める。
- ・上部工モデルに、地盤の収束物性値に基づいて算定した液状化対策後の基礎の地盤ばねを付加して全体系骨組みモデルを作成する。
- ・全体系骨組みモデルの橋脚方向、橋軸直角方向それぞれにケーソン下端での地震動（NS成分、UD成分）を同時入力し、線形時刻歴応答解析を実施する。
- ・解析結果に基づいて、兵庫県南部地震相当の大地震時におけるケーソン基礎周辺地盤の耐震性について検討する。

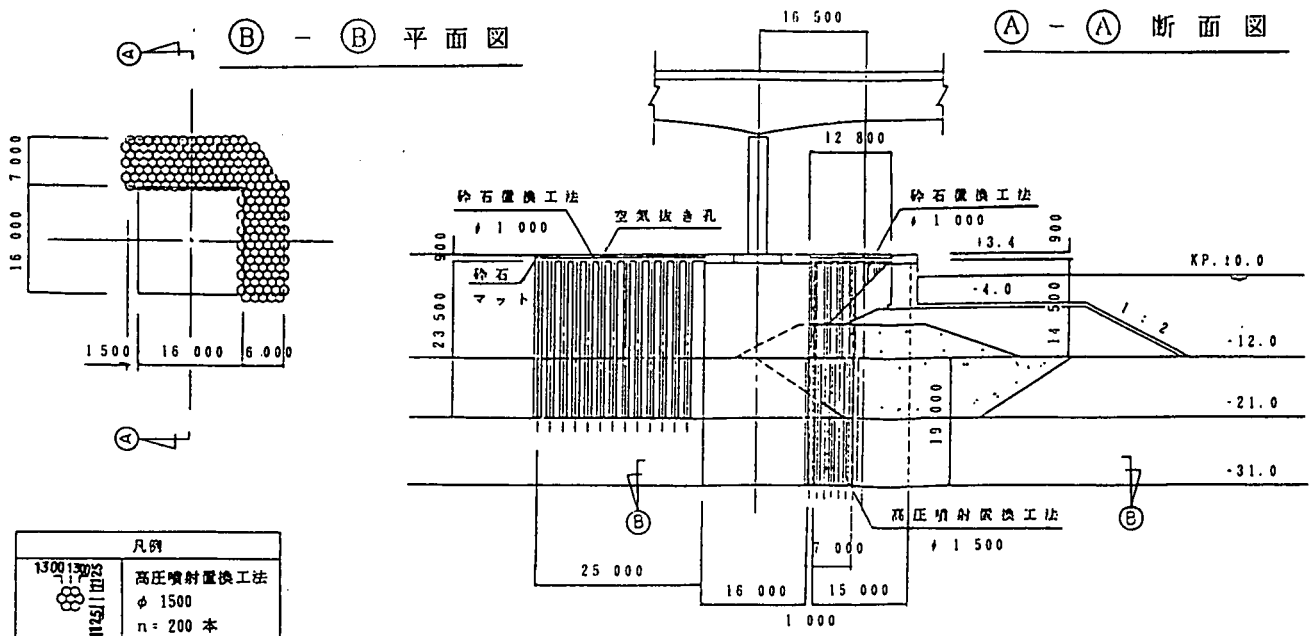


図-3 地盤改良図（P73基礎周辺）

（単位：mm）

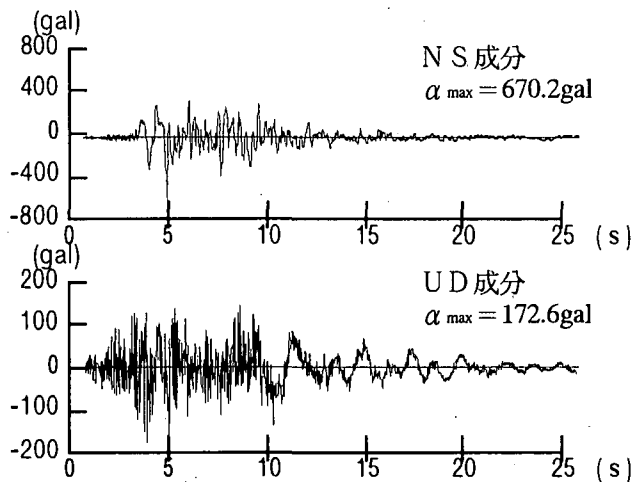


図-4 観測波形 (KP-79m)

### (3) 解析モデル

地盤の地震応答解析 (SHAKE) のための地盤モデルは、地震後のケーソン基礎周辺地盤でのボーリング結果及びP S検層結果に基づいて設定した。また、土の非線形性を表す剛性低下曲線及び減衰増加曲線は、砂質土に対してSeedの式<sup>3)</sup>、粘性土に対して原・大崎の式<sup>4)</sup>を用いた。地盤の解析モデルを図-6に示す。

全体系モデルは、図-7に示すように地盤ばねに支持された基礎を含む全体系の立体骨組みモデルとする。

#### a) 上部工及び橋脚のモデル化

上部工及び橋脚は鋼製であり、梁要素にモデル化する。

#### b) 主橋脚ケーソン基礎のモデル化

ケーソン基礎は梁要素にモデル化し、地震時の剛性低下を考慮した地盤ばねを付加する。地盤ばねは、道路橋示方書の方法によって求める。地震時の地盤の剛性低下は、地盤の地震応答解析 (SHAKE) により評価する。ただし、補強後のケーソン基礎は、図-2のステップ2と同様の方法によりケーソンに補強の効果を考慮した地盤ばねを付加することによってモデル化する。

なお、主橋脚以外の橋脚の基礎は杭基礎や直接基礎であるが、これらはフーチングに地盤ばねを付加したモデルとした。地盤ばねは道路橋示方書の方法によって求め、地震時の地盤の剛性低下は地盤の地震応答解析 (SHAKE) により評価した。

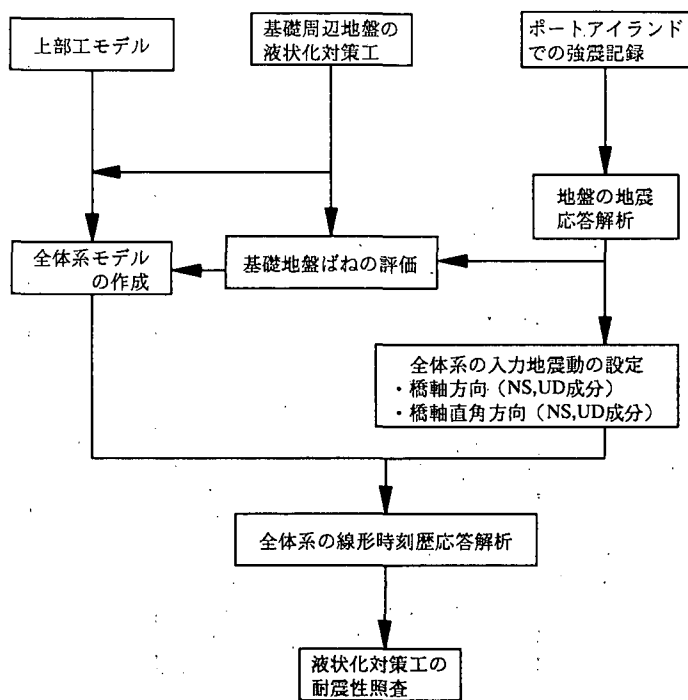


図-5 解析フロー

### (4) 解析結果

地盤モデルの地震応答解析 (SHAKE) を実施し、地盤の収束物性値を求めるとともに、橋梁の全体系骨組みモデルの地盤ばね端から入力する地震動を算定した。橋梁の全体系骨組みモデルへの入力地震動を図-8に示す。

橋梁全体系モデルの橋軸方向、橋軸直角方向に図-8の地震動 (NS成分、UD成分) を同時入力し、線形時刻歴応答解析を実施し、橋梁の応答及びケーソン基礎に作用する地震時荷重を求めた。

ポートピア大橋の代表的な位置における加速度波形及び変位波形を図-9及び図-10に示す。

また、主橋脚ケーソン基礎周辺地盤の耐震性検討結果を表-2に示す。これは、動的解析によって得られたケーソン基礎に作用する荷重を地震時増分荷重とし、静的な荷重と重ね合わせ、道路橋示方書<sup>5)</sup>に基づいたケーソンの安定計算を行ったものである。表-2より以下のことがわかる。

- ・ケーソン底面の地盤反力度及びせん断地盤反力は、許容値をかなり下回っており安全である。
- ・ケーソン前面の水平地盤反力度は、P72橋軸直角方向の一部で許容値をわずかに超えている。しかし、この地盤反力度の算定にあたって、加振方向に平行なケーソン側面にある改良体のばねの効果を無視しているため、十分安全であると考えられる。

(新港第4突堤側)				(ポートアイランド側)							
標高 K.P. (m)	単位体積 重 $\gamma$ ( $\text{t/m}^3$ )	せん断波 速 $V_s$ (m/s)	剛性低下曲線, 減衰増加曲線	標高 K.P. (m)	単位体積 重 $\gamma$ ( $\text{t/m}^3$ )	せん断波 速 $V_s$ (m/s)	剛性低下曲線, 減衰増加曲線				
+3.30	1.80	200	Seed	+4.10	1.80	200	Seed				
-12.50		227		-21.00		1.90		267			
-18.00		175		-23.10				220			
-23.80	205	-26.40		280							
-25.30	1.89	235		原・大崎	-30.85	1.90		260	Seed		
-30.60	1.87	235			-37.30			310			
-36.30	1.92	330			-43.20			290			
-40.70	1.99	360			-48.20	1.90		360			
-49.20	1.98	340			-51.50			300			
-54.60	1.72	280			-54.75			265			
-64.55	1.77	290			原・大崎	-73.50		1.88		370	Seed
-72.00	405	-76.20				485					
-79.70	1.99	405	-78.90			2.01	485				

図-6 地盤の解析モデル

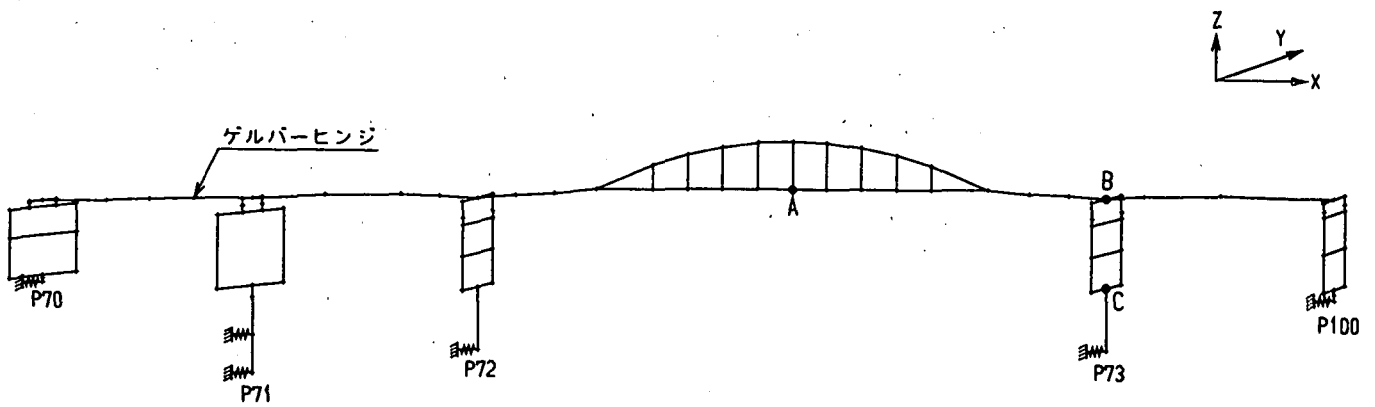


図-7 全体系モデル

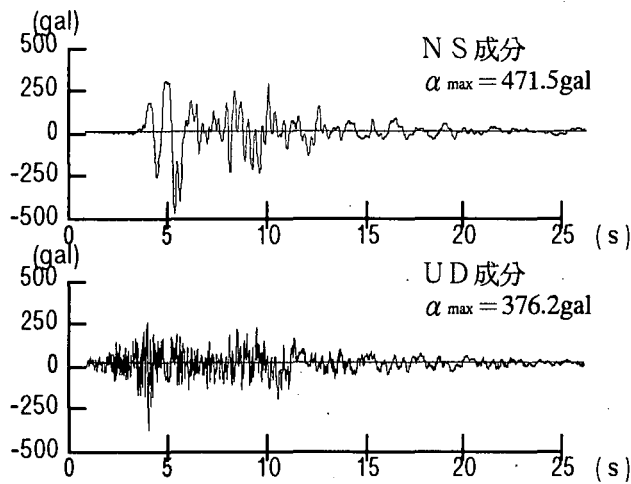


図-8 入力地震動

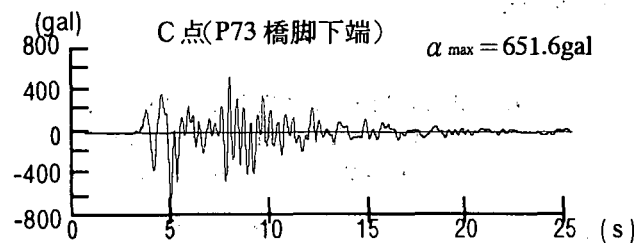
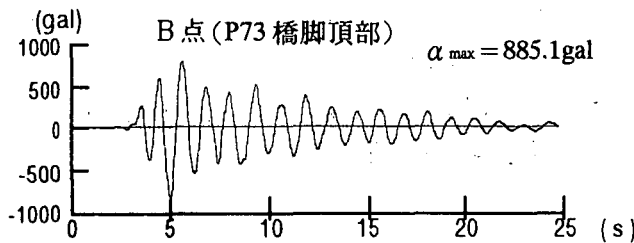
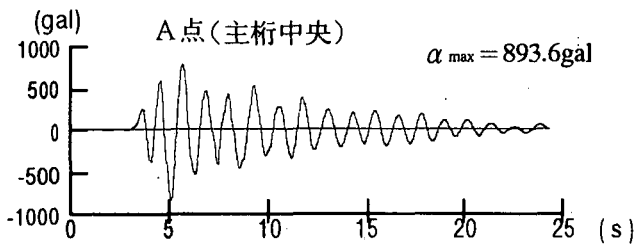


図-9 加速度波形(橋軸方向)

(A, B, Cは図-7のモデルにおける位置を示す。)

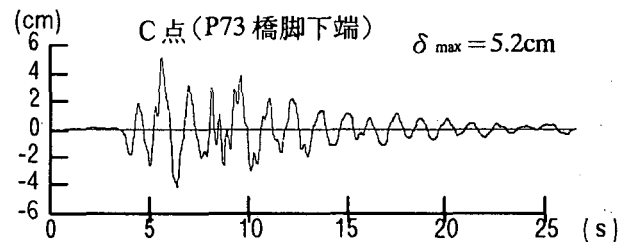
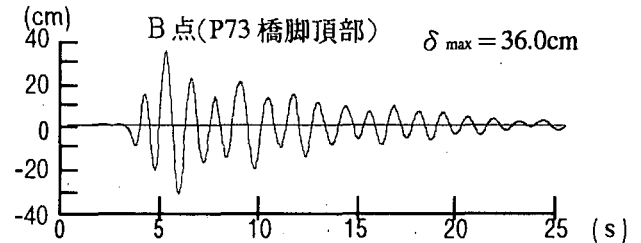
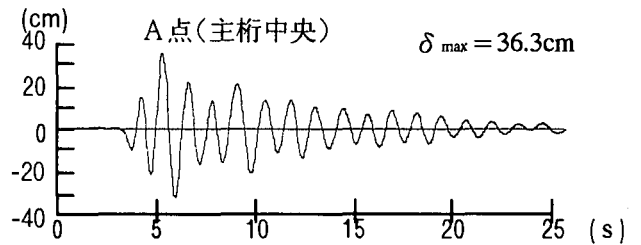


図-10 変位波形(橋軸方向)

(A, B, Cは図-7のモデルにおける位置を示す。)

以上より、主橋脚ケーソン基礎周辺地盤は、兵庫県南部地震レベルの大地震に対して安全であると考えられる。

### 5. まとめ

兵庫県南部地震により、ポートピア大橋の主橋脚ケーソン基礎周辺地盤に液状化による沈下が認められた。また、ケーソンにはひび割れは認められず、健全であると判定されたものの、ケーソン天端四隅のレベルを測量した結果、ケーソン本体の相対的な傾きが確認された。

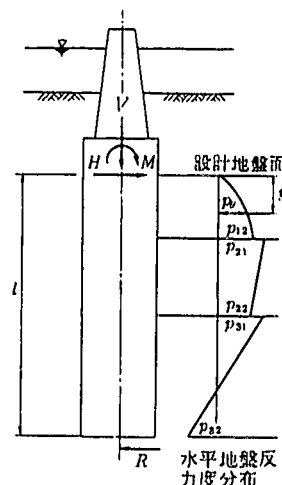
復旧工事の1つとして、主橋脚ケーソン基礎周辺地盤の液状化対策が計画された。埋立護岸の捨石層以深あるいは隣接する神戸大橋の桁下等の施工条件、経済性、信頼性及び工期を考慮して、高圧噴射置換工法と砕石置換工法を併用することとした。

主橋脚ケーソン基礎の液状化対策工の効果を考慮して、ポートピア大橋の3次元骨組みモデルによる線形時刻歴応答解析を実施した。入力地震動は、当

表-2 主橋脚ケーソン基礎周辺地盤の耐震性検討結果

		底面の 地盤反力度 q (tf/m <sup>2</sup> )	底面のせん断 地盤反力 H (tf)	前面の水平地盤反力度 (右図参照) (tf/m <sup>2</sup> )				
				P 12	P 21	P 22	P 31	
P 7 2 橋軸方向	計算値	78	686	5.1	*	*	22.8	
	許容値	210	4644	11.6	*	*	27.8	
P 7 2 橋軸直角方向	計算値	102	1882	8.0	12.0	5.2	31.2	
	許容値	210	4644	11.6	11.6	17.8	80.1	
P 7 3 橋軸方向	海側	計算値	88	1448	7.3	*	*	24.4
		許容値	210	4659	28.0	*	*	27.8
	陸側	計算値	74	1620	11.7	14.1	5.8	14.3
		許容値	210	4659	40.7	40.7	62.3	80.1
P 7 3 橋軸直角方向	海側	計算値	80	1285	4.9	*	*	20.0
		許容値	210	4659	11.6	*	*	27.8
	陸側	計算値	65	1363	10.2	10.2	3.9	9.6
		許容値	210	4659	40.7	40.7	62.3	80.1

\* ) 地盤改良体で支持するため、地盤反力度の照査不要



該サイトでの最大規模の地震動を想定し、ポートアイランドでの鉛直アレー地震記録のうち、NS成分とUD成分を採用した。動的解析によって得られたケーソン基礎に作用する荷重を地震時増分荷重とし、静的な荷重と重ね合わせ、道路橋示方書<sup>5)</sup>に基づいてケーソン基礎の安定計算を行った。その結果、液状化対策後の主橋脚ケーソン基礎周辺地盤は、兵庫県南部地震レベルの大地震に対して安全であると判断された。

【参考文献】

1) 田中幸久：グラベルパイルによる改良地盤内の過剰間隙水圧，体積変化量の計算方法，土

木学会論文集 第388号/Ⅲ-8, PP.23~32, 1987年.

- 2) グラベルドレーン工法研究会：グラベルドレーン工法技術資料，1990年.
- 3) Seed, H.B. and Idriss, I.M. : Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis, Report No.EERC70-10, University of California, 1970年.
- 4) 原昭夫：地盤の動力学的性質とその応用，第2回地盤震動シンポジウム資料集，日本建築学会，PP.33~39, 1973年.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，1990年.

The seismic safety of the Portpia Bridge restored by countermeasures for liquefaction around caissons of main bents

Katsuhiko Okashita, Mitsunobu Shibuya  
Yasuaki Shimizu, Yoshio Sunasaka  
Ichiro Ohsawa, Masaru Senba

The Hyogoken-Nanbu Earthquake slightly damaged some shoes and girders of the Portpia Bridge which crosses a waterway between Shinko Pier No.4 and Port Island. Also the earthquake caused liquefaction and settlement of ground around the bridge and decline of caissons of two main bents of the bridge. As the restoration, countermeasures for liquefaction are planned to take. In this paper, design concepts of countermeasures for liquefaction are described. Furthermore, the safety of caissons reinforced by countermeasures for liquefaction is confirmed based on the three-dimensional dynamic analyses of the Portpia Bridge during the Hyogoken-Nanbu Earthquake.