

杭基礎上のケーソン岸壁の地震時応答に及ぼす 杭長の影響について

EFFECT OF PILE LENGTH ON SEISMIC RESPONSE OF CAISSON TYPE QUAY WALL
RESTING ON PILE FOUNDATION

高谷富也¹・前野賀彦²

Tomiya TAKATANI and Yoshi-hiko MAENO

¹ 正会員 学博 舞鶴工業高等専門学校助教授 建設システム工学科 (〒625-8511 京都府舞鶴市白屋 234)

² 正会員 農博 日本大学短期大学部教授 建設学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

Dynamic behavior of a caisson type quay wall resting on pile foundation against the 1995 Hyogoken Nambu Earthquake was numerically evaluated by a liquefaction analysis based on effective stress model. The effect of pile length on seismic response of caisson type quay wall against earthquake motion was investigated through some numerical examples. The displacement response of the caisson quay wall with pile foundation was smaller than that of the caisson without pile foundation. When the pile length becomes longer, the displacement response of caisson type quay wall becomes smaller. As the deformation was mainly induced by the increase of pore water pressure in the soil behind the caisson type quay wall, it is indispensable to reduce the pore water pressure in case of applying longer pile to the caisson type quay wall.

Key words: Caisson type quay wall, liquefaction, pile length, deformation, pile foundation

1. はじめに

常に外洋波浪の来襲を受ける海岸構造物とそうでない港湾施設の耐震設計を同一に取り扱うことには問題があることは論を待たないところである。特に海岸構造物ではその耐用年数と地震の頻度の関係や耐波設計との関係が重要な判断材料と考えられる。他方、外洋波浪に対する耐波設計を行っていない港湾施設については、従来行われてきた震度法による耐波設計を行ったとしても、250Galを遥かに超える地表面加速度を伴う地震に対して抵抗力を発揮することは困難であることは、兵庫県地震による阪神地区の被害調査¹⁾によっても明らかになっているところである。被災後の物流に甚大な影響をもたらし、その災害復旧に際しても重大な役割を果たすと考えられる港湾施設の耐震設計の在り方は重要な問題である。一つの考え方は、港湾施設の重要性に応じた集中的投資を行い耐震性を高めることである。また、他の考え方として、例えば被災したとしても復旧・修復が容易である構造または被災後も機能が維持され施設の供用が可能である構造も検討される必要がある。そこで、高谷ら^{2),3)}は軟弱地盤の沈下予測に用

いられている弾塑性有限要素法を用いた先端拡底杭を基礎に有するケーソン岸壁や防波堤について地震応答解析を行い、ケーソン構造物基礎への先端拡底杭の適用性を検討した。それによれば、杭基礎を設置することによりケーソン構造物の滑り出しや傾斜を抑制することができるものの、ケーソン構造物およびその周辺地盤の変形はケーソン背面の地盤内部に発生する液状化の影響を顕著に受けることが確認された。

本研究では、軟弱地盤における杭基礎上に設置されたケーソン岸壁の地震時応答特性に及ぼす杭長の影響についての検討を行い、杭基礎のケーソン底面に対する接続の有無および杭長の違いがケーソン岸壁およびその周辺地盤の地震時応答特性に及ぼす影響について調べる。

2. 解析手法

本研究では、軟弱地盤における先端拡底杭基礎上に設置されたケーソン式係船岸の地震時応答特性の検討を有効応力に基づく液状化解析法⁴⁾を用いて行う。軟弱地盤に群杭基礎を設け、その上にケーソン

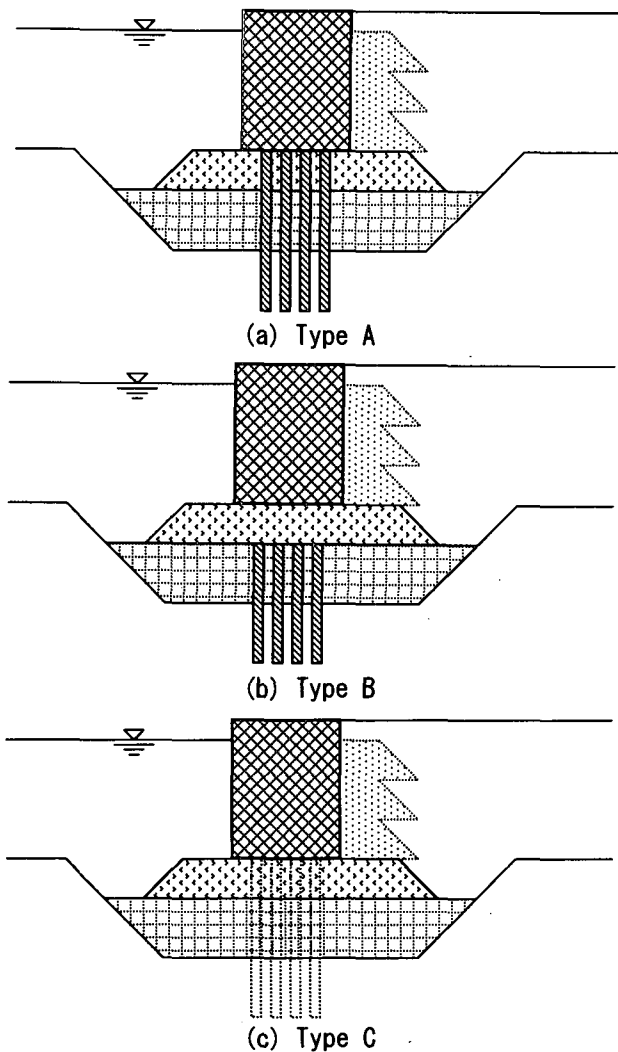


図-1 ケーソン岸壁モデル（杭基礎の有無）

式係船岸を設置することを想定するが、係船岸底面を杭頭に直接載せた場合には杭の沈下によりケーソン壁体底面に空洞が生じる可能性があることから、施工に際しては杭頭を捨て石層で覆った後に壁体を設置するように『港湾の施設の技術上の基準・同解説』⁵⁾に指示されている。そこで、本研究では、被

災した神戸ポートアイランドにおけるケーソン岸壁（PC-1）を対象とし、図-1に示すように通常の直杭基礎に直接接続している場合、杭頭を捨て石層で覆いケーソンとの接続を行わない場合および杭基礎を有しない場合について杭長の違いを考慮した応答解析を行い、これらの比較・検討を行う。なお、このケーソン岸壁の地震後の変形量は岸壁上部工天端が海側水平方向に2.6~3.2m、鉛直方向に0.8~1.0mの沈下となっており、この実測結果を踏まえて、杭基礎上のケーソン岸壁の地震時応答特性について調べる。なお、杭基礎上に設置されるケーソン岸壁モデルに作用させる加速度波形は、兵庫県南部地震時にポートアイランドのK.P.-32mにおける地震計で実測されたものを用いる²⁾。稲垣ら⁶⁾は、この加速度波形を基にして、ケーソン岸壁を対象とした地震時変形挙動解析を行い、解析結果と被災資料との比較・検討を行っている。本研究ではケーソン構造物底面への杭基礎の適用に関する検討が主眼のため、杭長が長くなれば長尺杭としての座屈現象が問題となるが、本研究ではこれを無視しており、また杭の非線形性を考慮せず、線形として取り扱っている。

本研究で用いたケーソン岸壁周辺地盤のFEM解析メッシュ図を図-2に示す。なお、ケーソンと周辺地盤の間にはジョイント要素を設けている。また、同図中には地震時の時刻歴応答評価を行うためのいくつかの節点および要素を明示した。この図より、解析対象断面はケーソン岸壁法線より海側37m、陸側41.5m、地表面(K.P.+4m)、海面よりK.P.-32mの範囲となっている。また、入力地震動として、K.P.-32mにおける観測波形の水平動および上下動成分の主要動を含む30秒間を用い、FEM解析メッシュの最下層に入力した。なお、水平動成分についてはNS成分のものを用いて、非排水条件下で時刻歴応答解析を行った。

3. 解析結果とその考察

本研究では、図-1に示すようにケーソン岸壁を

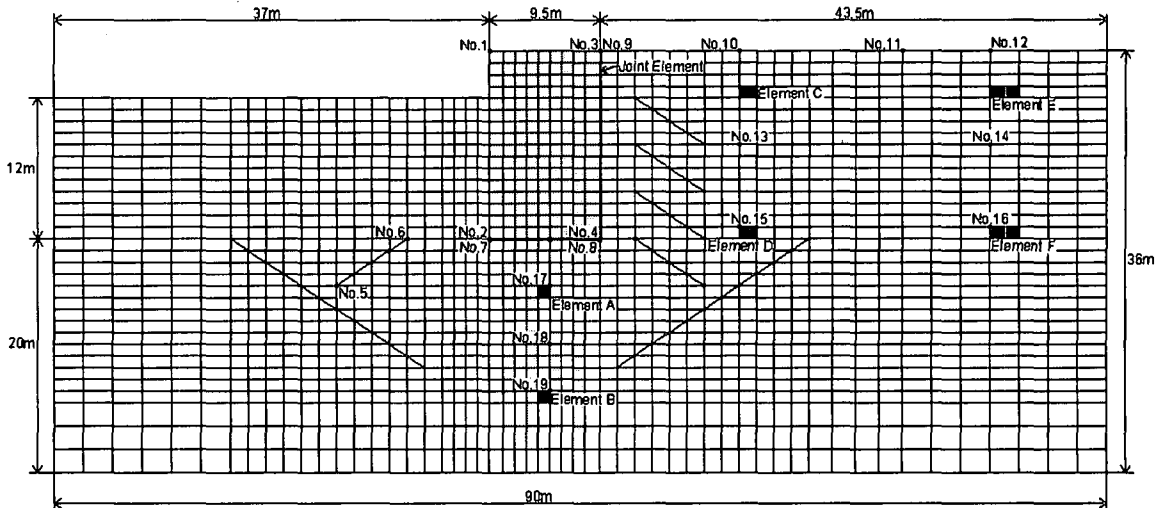
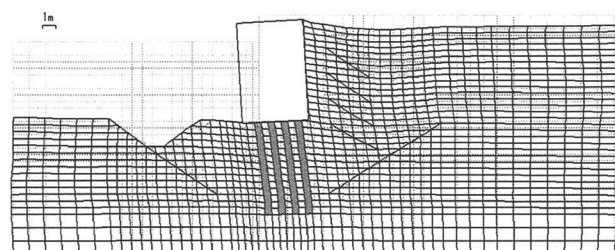


図-2 FEM解析メッシュ図

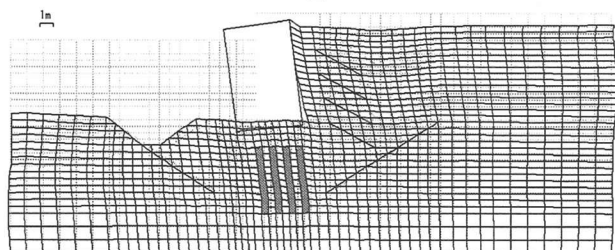
直杭基礎に直接接続している場合 (Type A)、杭頭を捨て石層で覆いケーソンとの接続を行わない場合 (Type B) および置換砂の上に捨て石マウンドを設置した通常のケーソン岸壁の場合 (Type C) の3つの場合について地震時応答解析を行い、図-2に見られるいくつかの節点における変位および要素の過

剰間隙水圧比について調べる。また、Type A (杭長 14m) および Type B (杭長 10m) については、杭長を 4m 長くした場合を Type A(Long、杭長 18m) および Type B(Long、杭長 14m) として応答解析を行った。

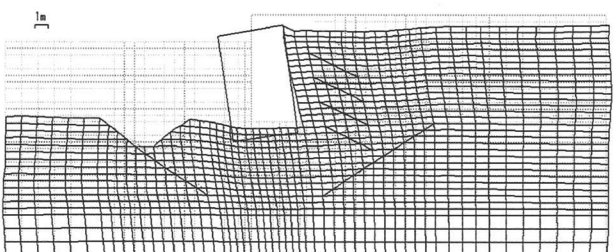
図-3は、Type A、Type B および Type C に対する地震応答解析結果の残留変形を、図-4は Type A(Long) および Type B(Long) に対する残留変形を示したものである。また、表-1に図-2に示す各節点 No. 1~No. 19 の最終残留変位量を示した。これらの図より、ケーソン岸壁の背面の埋め立て地盤内部における液状化現象による側方流動によってケーソン岸壁を含む周辺地盤が海側へ押し出されている様子が見られる。杭基礎を直接ケーソン底面に接続した Type A の場合には杭基礎を用いない続した Type A の場合には杭基礎を用いない Type C に比べて残



(a) Type A

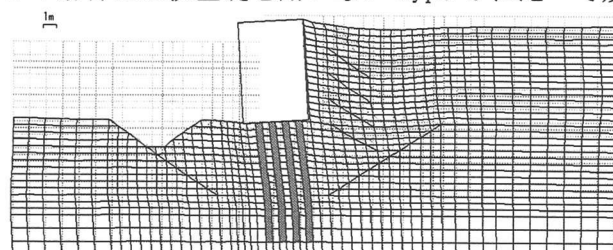


(b) Type B

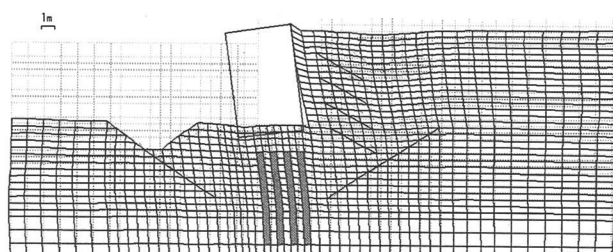


(c) Type C

図-3 最終残留変形



(a) Type A (Long Pile)



(b) Type B (Long Pile)

図-4 最終残留変形

表-1 最終残留変位量 (単位: m)

	Type A		Type A (Long)		Type B		Type B (Long)		Type C	
	x 方向	y 方向	x 方向	y 方向	x 方向	y 方向	x 方向	y 方向	x 方向	y 方向
No. 1	-1.691	-0.600	-1.616	-0.538	-2.426	-1.164	-2.425	-1.169	-2.461	-1.583
No. 2	-1.220	-0.193	-1.159	-0.164	-1.430	-0.926	-1.391	-0.956	-1.344	-1.464
No. 3	-1.445	-0.295	-1.504	-0.244	-2.293	-0.469	-2.322	-0.471	-2.399	-0.721
No. 4	-1.088	-0.082	-1.051	0.111	-1.297	-0.407	-1.288	-0.404	-1.283	-0.839
No. 5	-0.567	0.099	-0.536	0.098	-0.649	0.065	-0.580	0.090	-0.789	0.149
No. 6	-0.855	0.088	-0.821	0.091	-0.971	0.030	-0.922	0.065	-1.071	0.155
No. 7	-0.944	-0.191	-0.912	-0.176	-1.019	-0.226	-0.989	-0.204	-1.062	-0.471
No. 8	-0.933	-0.047	-0.905	-0.034	-0.845	-0.217	-0.823	-0.203	-0.830	-0.438
No. 9	-1.556	-0.292	-1.505	-0.222	-2.261	-0.443	-2.323	-0.429	-2.324	-0.810
No. 10	-0.969	-1.066	-0.944	-1.040	-1.430	-1.219	-1.422	-1.218	-1.502	-1.200
No. 11	-0.413	-0.793	-0.395	-0.784	-0.611	-0.883	-0.600	-0.881	-0.623	-0.809
No. 12	-0.066	-0.777	-0.066	-0.778	-0.187	-0.873	-0.172	-0.879	-0.210	-0.807
No. 13	-0.895	-0.760	-0.868	-0.747	-1.179	-0.733	-1.173	-0.730	-1.111	-0.658
No. 14	0.048	-0.475	0.056	-0.478	-0.028	-0.494	-0.019	-0.500	-0.018	-0.439
No. 15	-0.589	-0.406	-0.576	-0.404	-0.559	-0.353	-0.551	-0.353	-0.476	-0.295
No. 16	0.093	-0.243	0.105	-0.247	0.083	-0.233	0.092	-0.237	0.112	-0.197
No. 17	-0.693	-0.069	-0.669	-0.048	-0.656	-0.057	-0.635	-0.037	-0.713	-0.368
No. 18	-0.377	-0.062	-0.360	-0.039	-0.378	-0.062	-0.361	-0.041	-0.426	-0.172
No. 19	-0.169	-0.044	-0.155	-0.025	-0.175	-0.042	-0.158	-0.025	-0.177	-0.062

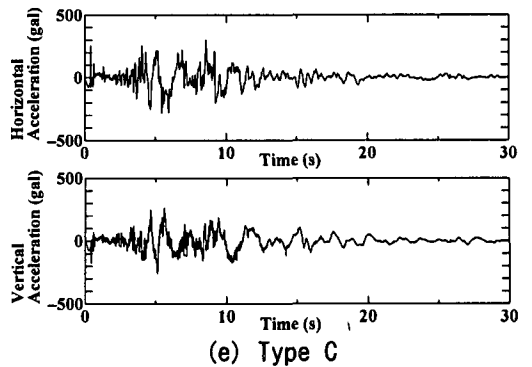
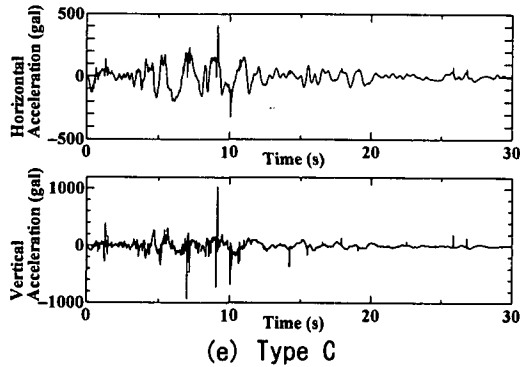
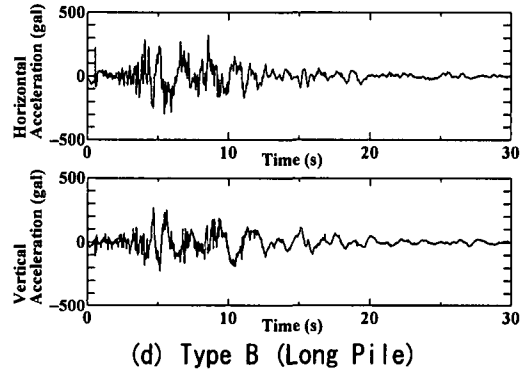
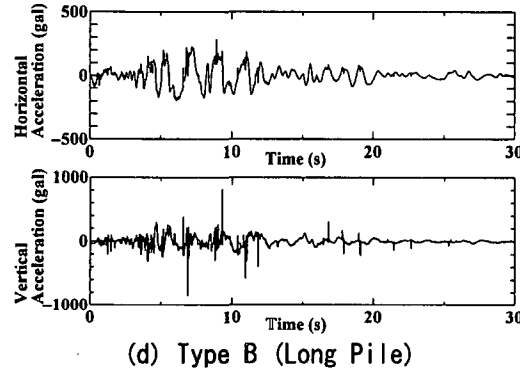
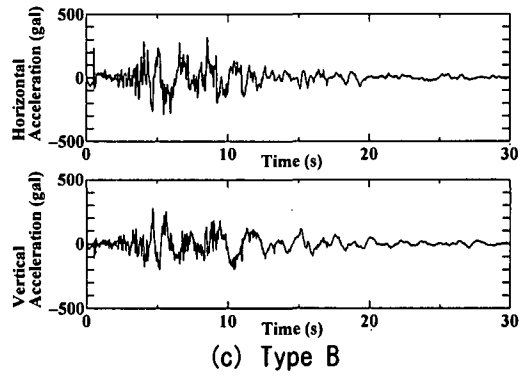
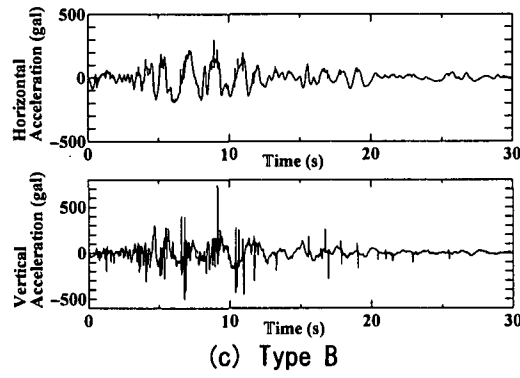
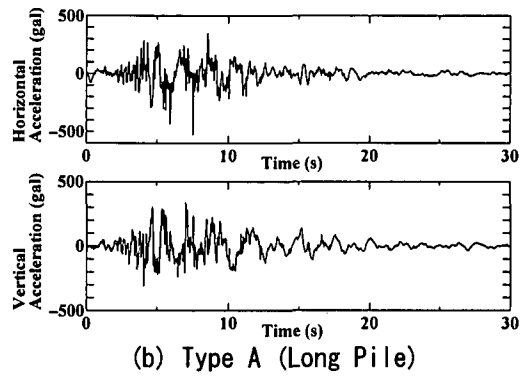
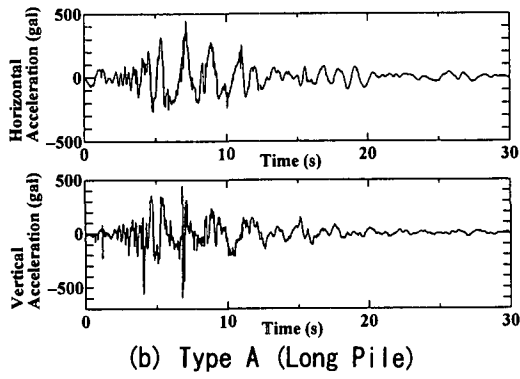
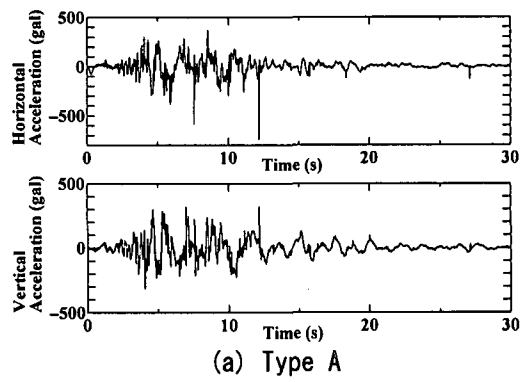
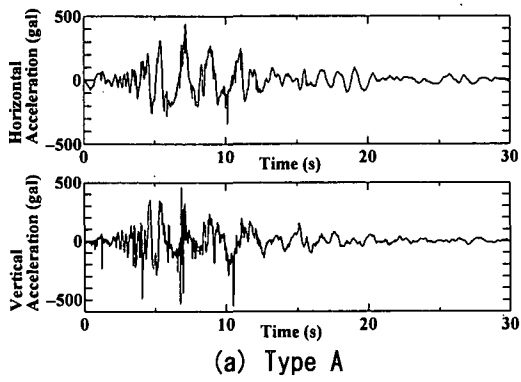


図-5 加速度の時刻歴応答 (No. 1)

図-6 加速度の時刻歴応答 (No. 2)

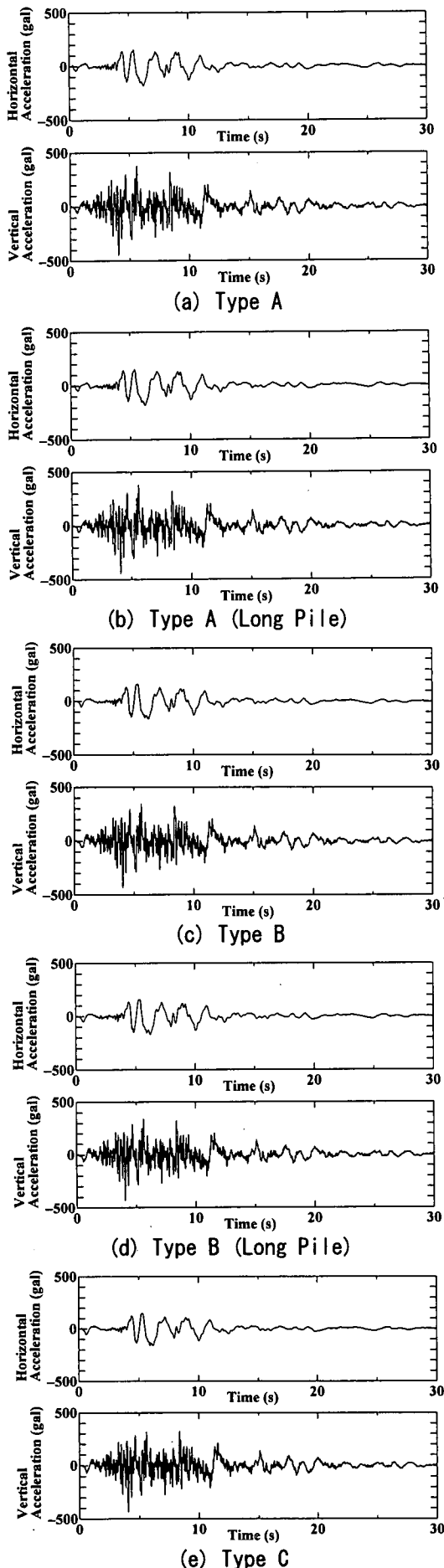


図-7 加速度の時刻歴応答 (No. 11)

留変位量が小さくなっているが、ケーソン底面と杭基礎とを接続しない Type B の場合における残留変位量は、Type C に比べてあまり顕著な差異が現れていない。これは、ケーソン下のマウンドおよび置換砂上層部分が側方流動によって大きく変形しているためと考えられる。また、Type A の場合には、杭長が長くなればケーソン岸壁の変位量は小さくなっているものの、側方流動による周辺地盤への影響がマウンドおよび置換砂上層部分に生じるため、Type B の場合には杭長が長くなってもその効果は得られないことがわかる。

図-5~7は Type A、Type A(Long)、Type B、Type B(Long)および Type C の場合におけるそれぞれの各節点 No. 1、2 および 11 における加速度の時刻歴応答を示したものである。図-3、4に示す残留変形図からも明らかなように、図-5に示されているケーソン岸壁天端海側の節点 No. 1 の加速度応答については、Type A および Type A(Long)に対する水平および鉛直の両方向における加速度応答はほぼ同じような変動を示しており、Type B、Type B(Long)および Type C の加速度応答もほぼ同様な変動傾向を示していることがわかる。また、杭基礎との接続の有無による影響として、Type B、Type B(Long)および Type C の鉛直方向の加速度応答には大きな値が見られることがわかる。これにより、海側へのケーソン岸壁の滑り出しや傾斜が発生したものと考えられる。

一方、図-6に示されているケーソン海側下端の節点 No. 2 の加速度応答については、いずれの形式においてもほぼ同じような加速度応答の変動を示していることがわかる。また、Type A および Type A(Long)については、杭基礎と接続されているため、他の形式に比べて大きな加速度応答値を示している。したがって、杭基礎との接続の有無によるケーソンの加速度応答に及ぼす影響は、ケーソン天端部に比べてケーソン下端部の方が小さくなることがわかる。

図-7に示されているケーソン岸壁背面における埋め立て地盤表面の節点 No. 11 の加速度応答については、いずれの形式においてもケーソン背面の地盤内部で液状化現象が生じているため、ほぼ同じような加速度応答結果となっている。したがって、杭基礎の存在あるいは杭基礎とケーソン底面との接続の有無がケーソン背面の地盤における加速度応答に及ぼす影響は小さいことがわかる。

図-8は、Element A~Eにおける過剰間隙水圧比 p の時刻歴応答を示したものである。なお、過剰間隙水圧比 p は地盤内部の初期平均有効応力 σ_{m0} に対する地震時応答解析中の平均有効応力 σ_m の比を用いて $p = 1 - \sigma_m / \sigma_{m0}$ で定義されるものである⁴⁾。これらの図より、杭と杭に挟まれた Element B の過剰間隙水圧比については、Type A と Type B の過剰間隙比 p はほぼ同じような変動を示しているが、Type B と Type C においては杭の存在が無い Element A に関しては同じ変動傾向を示している。また、ケー

ソソ背面近傍の地盤では、拘束圧の違いから Element C における方が Element D に比べていずれの形式においても過剰間隙比 p の履歴は液状化傾向を示していることがわかる。さらに、ケーソン岸壁より離れた所に位置する Element E および Element F に関しては杭の存在によって側方流動の抑制効果が高くなるため、かえって Type A の方が Type C に比べて高い過剰間隙水圧比となっていることがわかる。なお、Type A (Long) および Type B (Long) の過剰間隙水圧比の履歴応答については図示されていないが、それらの変動はそれぞれ Type A および Type B の過剰間隙水圧比の履歴傾向とほぼ同じ変動となっている。したがって、杭基礎を用いる場合にはケーソン岸壁背面の埋め立て地盤に何らかの液状化防止対策を行

なわなければならないことを示唆しているものと考えられる。

4. おわりに

本研究は、兵庫県南部地震時に記録された加速度波形を用いて、ケーソン岸壁が杭基礎に直接接続している場合と杭頭を捨て石層で覆いケーソンとの接続を行わない場合について地震時応答解析を行い、杭基礎およびケーソンとの接続の有無や杭長の違いがケーソン岸壁およびその周辺地盤の地震時応答に及ぼす影響について調べた。その結果、杭長が長くなればケーソン岸壁およびその周辺地盤の最終残留変形量は小さくなるものの、ケーソン底面と杭基礎との接続をしない場合には杭基礎を用いない場合と顕著な差異が見られないことがわかった。このように、杭基礎を用いることによるケーソン岸壁の耐震性の向上は確認できたが、ケーソン背面の地盤における液状化防止対策が必要であることがわかった。なお、杭基礎上のケーソン岸壁背面の埋め立て地盤における液状化防止対策についての検討は既に実施しており、稿を改めて報告する予定である。

ところで、本研究で行ったケーソン岸壁の地震時応答解析では、ケーソン構造物底面への杭基礎の適用に関する検討が主眼のため、杭長が長くなれば長尺杭としての座屈現象が問題となるが、本研究ではこれを無視している。このため、今後これらの特性を考慮した地震時応答解析を行う予定である。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費補助金基盤研究(C) (研究代表者 高谷富也、課題番号 09650558) の補助を受けて遂行されたことを付記し、関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局：阪神・淡路大震災による港湾施設等被災状況報告書、1995。
- 2) 高谷富也・前野賀彦：先端拡底杭基礎上のケーソン岸壁の地震時挙動に関する一考察、海洋開発論文集、Vol.14、pp. 71~76、1998。
- 3) 高谷富也・前野賀彦：先端拡底杭基礎上のケーソン防波堤の地震時応答について、海岸工学論文集、第45巻、pp.866~870、1998。
- 4) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992。
- 5) 社団法人日本港湾協会：港湾施設の技術上の基準・同解説、p.77、1985。
- 6) 稲垣紘史・井合 進：地震時のケーソン岸壁の変形照査、海岸工学論文集、第44巻、pp.1006~1010、1997。

(1999.4.19 受付)

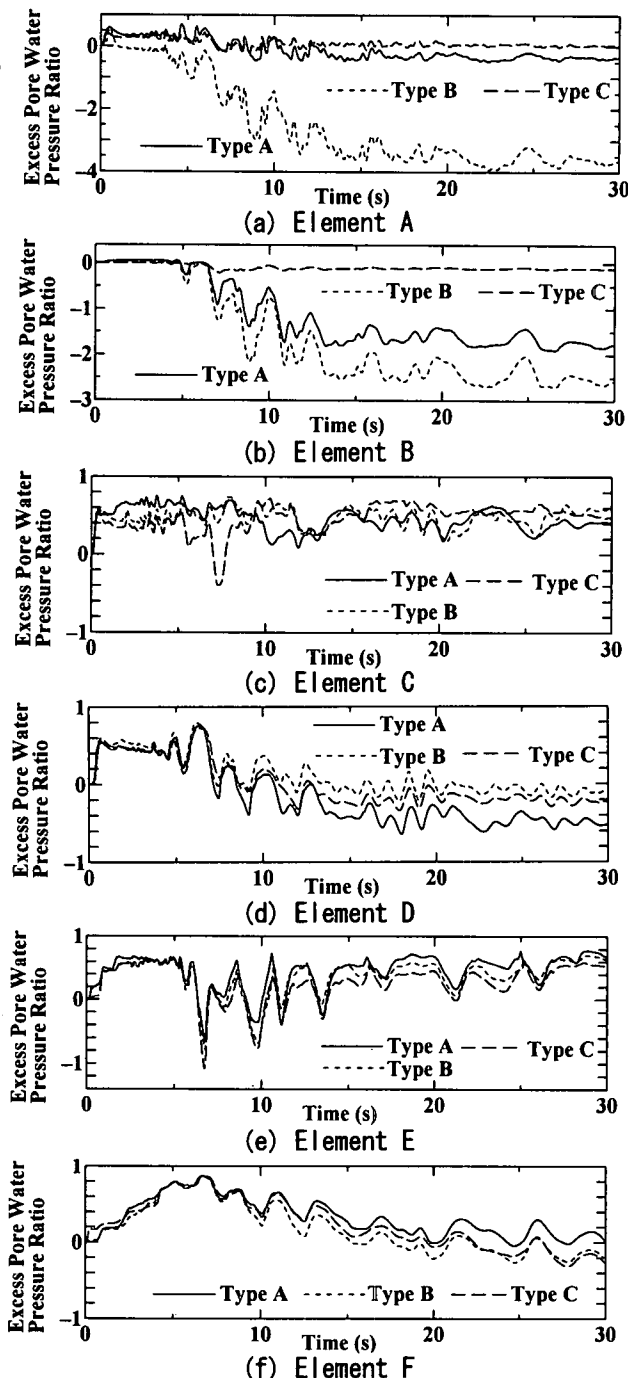


図-8 過剰間隙水圧比の時刻歴応答