

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

Seismic Behavior of a Caisson Type Quay Wall Resting on Pile Foundation with Expanded Base

高谷 富也*・前野 賀彦**・児玉 洋介***

Tomiya Takatani, Yoshihiko Maeno and Hirotsuke Kodama

Dynamic behavior of a caisson type quay wall resting on pile foundation with expanded base was numerically evaluated by a liquefaction analysis based on effective stress model during 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. The effective stress model used for the liquefaction analysis during earthquake motion was a strain space multiple mechanism model. The deformation during the earthquake ground motion induced due to pore water pressure in the soil behind the caisson quay wall. Though the displacement response of the caisson quay wall with pile foundation was smaller than that of the caisson without pile foundation, the deformation was mainly induced by the increase of pore water pressure.

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

1. はじめに

兵庫県南部地震による阪神地区の海岸構造物・港湾施設の被害については、被災後の調査検討を経て多く報告されている（例えば、運輸省港湾局、1995）。外洋波浪に対する耐波設計を行っていない港湾施設が地震により被災することは十分予想されるところである。しかしながら、頻度の少ない地震に対する耐震設計を全ての港湾施設に行うことは経済的条件から非現実的である。災害復旧や経済活動に重要な役割を有する港湾施設に対しては集中的な投資は必要であり論を待たないところであるが、その際にも経済的合理性を有する耐震設計が求められる。また、万が一の被災に対しても復旧・修復が容易な構造形式についても十分検討されるべきである。多くの被災報告の中に、短杭ではあるが先端に拡大球根を有する杭が耐震性を発揮したとされる事例や杭を用いた係船岸や栈橋が周辺における他の形式の構造物に比べて比較的被害が軽度であったとの報告も認められた。地盤条件や施工状態など他の要因も考えられることから、これらの報告を先端拡底杭の耐震性を肯定するものと即断することは危険であるが、検討する必要があると考えられる。このような背景から、前野ら（1997）は、まず先端拡底杭をケーソン基礎に配した構造を考え、外洋波浪に対して十分な耐波性能を有する場合には耐震性を満足する場合が多いとの経験に基づき、その波浪に対する基礎地盤の応答特性を検討した。それによれば、先端拡底杭を用いることにより海底地盤表面付近における繰り返し波浪により生じる過剰間隙水圧の消散に伴うケーソン前面法先部の沈下やケーソン直下における沈下による空洞の発生が抑制されることが確認できた。

このような状況を考慮して、本研究では実際に兵庫県南部地震において観測された沿岸部での加速度記録を入力波形として、従来より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（係船岸）の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の検討を行った。

2. 解析方法

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を用いて行う（Iai, S. et al., 1992）。軟弱地盤に群杭基礎を設け、その上にケーソン式係船岸の設置を想定するが、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』（1985）に指示されている。そこで、本研究では、被災したケーソン岸壁を対象とし、通常の直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応答解析を行い、両者の比較・検討を行う。また、これらの結果を踏まえて、先端拡底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式係船岸モデルに作用させる加速度波形は、兵庫県南部地震時に記録されたものを用いる。

図-1は、神戸ポートアイランドにおける解析対象としたケーソン岸壁（PC-1）の位置および解析に用いた加速度波形が測定された地震計の設置場所を示したものである。また、ケーソン岸壁（PC-1）の標準断面を図-2に示す。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の沈下となっている（稲森ら、1997）。また、図-3には図

* 正会員 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科
〒625-8511 京都府舞鶴市白屋234番地

** 正会員 日本大学短期大学部 建設学科

*** 正会員 児玉コンクリート（株）

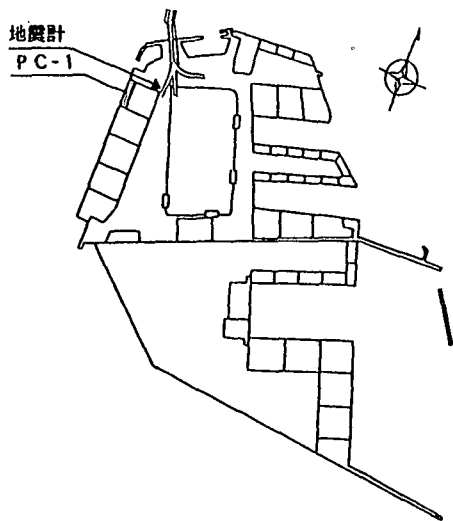


図-1 ケーソン岸壁(PC-1)および地震計の設置位置

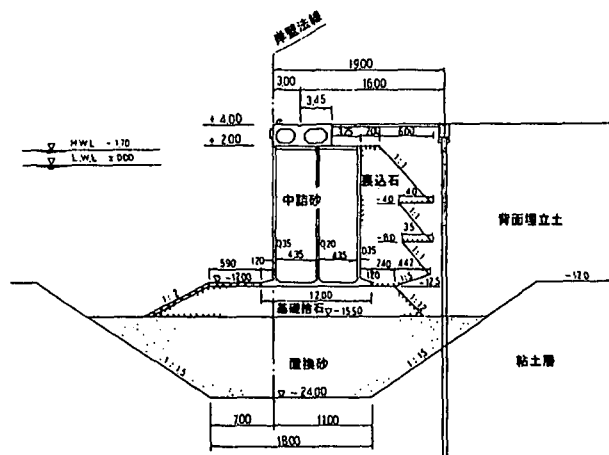


図-2 ケーソン岸壁の標準断面 (PC-1)

ー1に示す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加速度波形を示しておく。この加速度波形を基にして、森田(1997)および稲垣・井合(1997)らはこの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。

本研究で用いたケーソン岸壁周辺地盤のFEM解析メッシュ図を図-4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いくつかの節点および要素を明示しておく。

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の範囲となっており、図-2に示すケーソン岸壁の標準断面を基にしてメッシュ化したものである。また、入力地震動として、図-3に示す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、ケーソン岸壁を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)および図-2に見られるように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-4に見られるいくつかの節点における

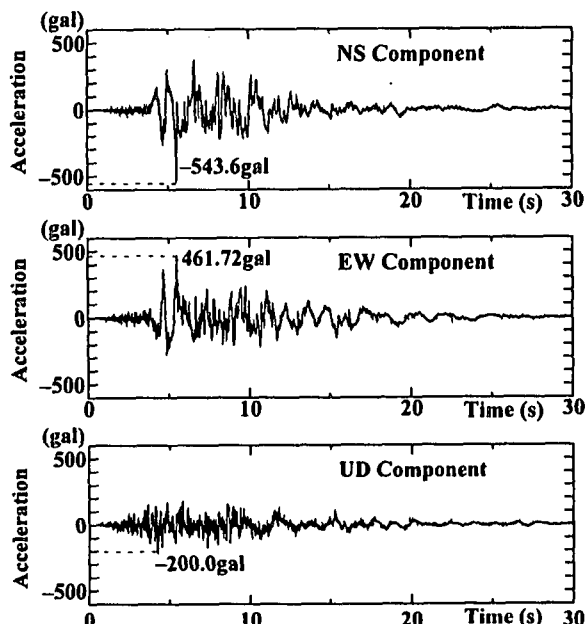


図-3 加速度波形記録 (K. P. -32m 地点)

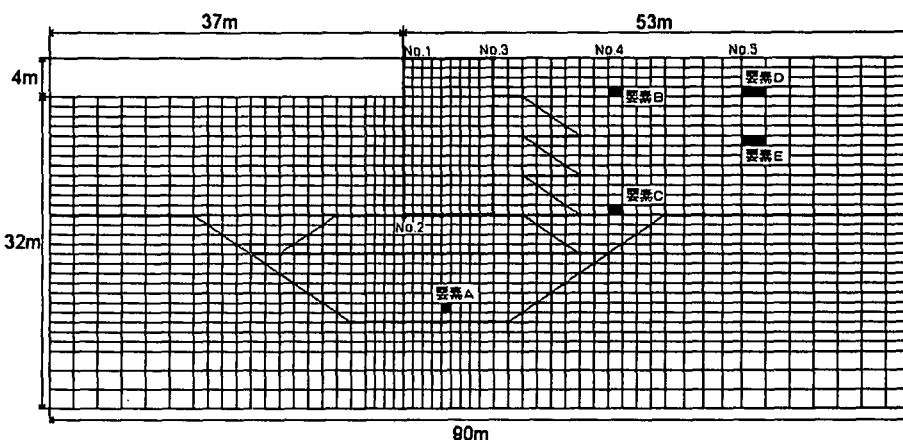


図-4 FEM解析メッシュ図

変位および要素の過剰間隙水圧比について調べる。

図-5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量を示したものである。この図から明らかなように、ケーソン岸壁を杭基礎に直接接続したType Aの場合におけるケーソン岸壁天端の変位量は、Type BおよびType Cの場合に比べて小さくなっており、杭基礎の存在によりケーソン岸壁の海側への滑り出しおよび傾斜が抑制されていることがわかる。一方、杭基礎を有しないType Cの場合には、岸壁背面の埋め立て地盤の液状化の影響を受けて、捨て石マウンド内部への沈下および

海側への滑り出しおよび傾斜が顕著なものとなっている。なお、杭頭を捨て石層で覆いケーソンとの接続を行わない Type B の場合については、捨て石マウンド直下に杭基礎が存在するため、置換砂の変形および捨て石マウンドの不等沈下を抑制する効果を有しているため、杭基礎を有しない Type C の場合に比べて上述の傾向は小さなものとなっていることがわかる。

表-1 は図-4 に示す節点 No.1~5 の 30 秒後の最終変位量を示したものである。また、図-6 はこれら 5 つの節点変位の時刻歴応答を Type A、Type B および Type C について図示したものである。表-1 および図-6 から明らかなように、杭基礎を有しない Type C の場合におけるケーソン岸壁天端の節点 No.1 の変位量が最も大きくなっている。また、いずれの節点においても、水平変位量は捨て石マウンド直下に杭基礎を設置した Type B と杭基礎を有しない Type C がほぼ同じものとなっており、杭基礎と直接接続した Type A の場合の水平変位は Type B と Type C に比べて小さな値となっていることがわかる。したがって、捨て石マウンド直下での杭基礎の存在が水平方向変位に及ぼす影響は小さいことを示唆しているものと考えられる。また、ケーソン岸壁から離れるにつれてそれぞれのタイプの違いによる水平変位への影響は小さくなっている。

一方、杭基礎と直接接続した Type A の場合におけるケーソン岸壁の沈下は Type B および Type C に比べてかなり小さくなっており、杭基礎のケーソン岸壁との接続の効果はケーソンの沈下抑制に関して有効であることがわかる。また、ケーソン岸壁背面における No.4 および No.5 の変位については、杭基礎の存在により埋め立て地盤の液状化による側方流動を抑制する効果を有していることがわかる。したがって、ケーソン岸壁直下に杭基礎を設置する Type A の場合は、ケーソン岸壁の海側への滑り出しおよび傾斜量をかなり抑制することがわかる。また、捨て石マウンド

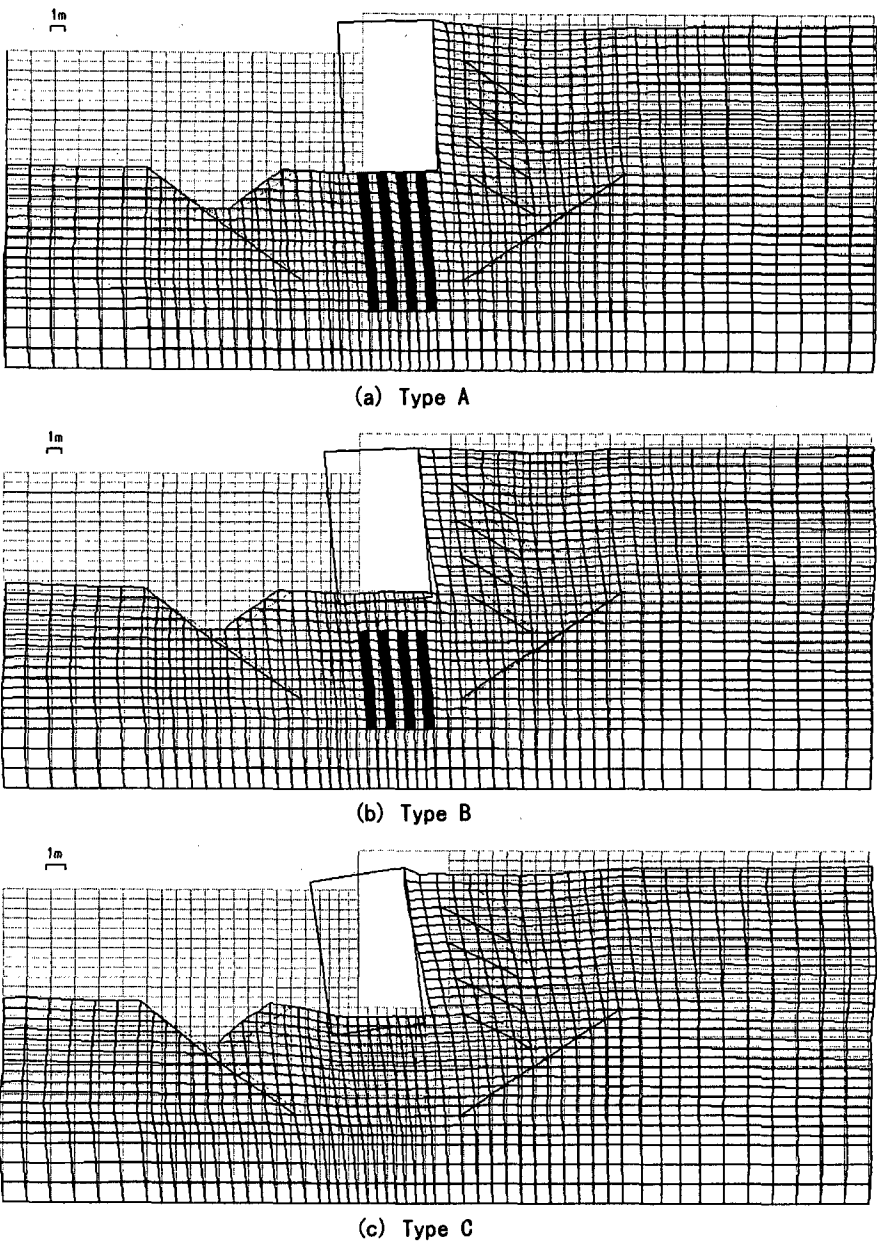


図-5 残留変形

表-1 最終節点変位 (単位: m)

	Type A		Type B		Type C	
	水平方向変位	鉛直方向変位	水平方向変位	鉛直方向変位	水平方向変位	鉛直方向変位
No.1	-1.691	-0.600	-2.426	-1.164	-2.461	-1.583
No.2	-0.944	-0.191	-1.019	-0.226	-1.062	-0.471
No.3	-0.933	-0.047	-0.845	-0.217	-0.831	-0.438
No.4	-0.969	-1.066	-1.430	-1.219	-1.502	-1.200
No.5	-0.413	-0.793	-0.611	-0.883	-0.623	-0.809

直下に杭基礎を設置し、ケーソンとの接続をしない Type B の場合には、杭基礎を有しない Type C の場合とあまり顕著な差異は現れないことがわかる。このことは、杭基礎を用いる際、ケーソン岸壁との接続をしない Type B の場合にはあまり耐震性が向上しないことを示唆しているものと考えられる。

図-7 は、要素 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 (Iai, S. et al., 1992, 稲垣・井合, 1997)。これらの図より、杭と杭に挟まれた要素 A の過剰間隙水圧比 p については、Type A、Type B および Type C ともに最初の 10 秒間は過剰間隙水圧比 p の値が異なるものの、ほぼ同じ傾向を示している。また、ケーソン岸壁直下に杭基礎を有する Type A および Type B では杭基礎の存在により杭間の地盤が拘束を受けているため、過剰間隙水圧 p が杭基礎を有しない Type C の場合に比べて大きくなっていることがわかる。しかしながら、10 秒前後を過ぎると杭基礎の存在により、Type A および Type B の過剰間隙水圧比 p の履歴傾向は Type C の過剰間隙水圧比 p が示す液状化の傾向とは異なっていることがわかる。要素 B における過剰間隙水圧比 p の履歴傾向はいずれのタイプも液状化傾向を示していることがわかる。

一方、埋め立て地盤の深い場所に位置にする要素 C に

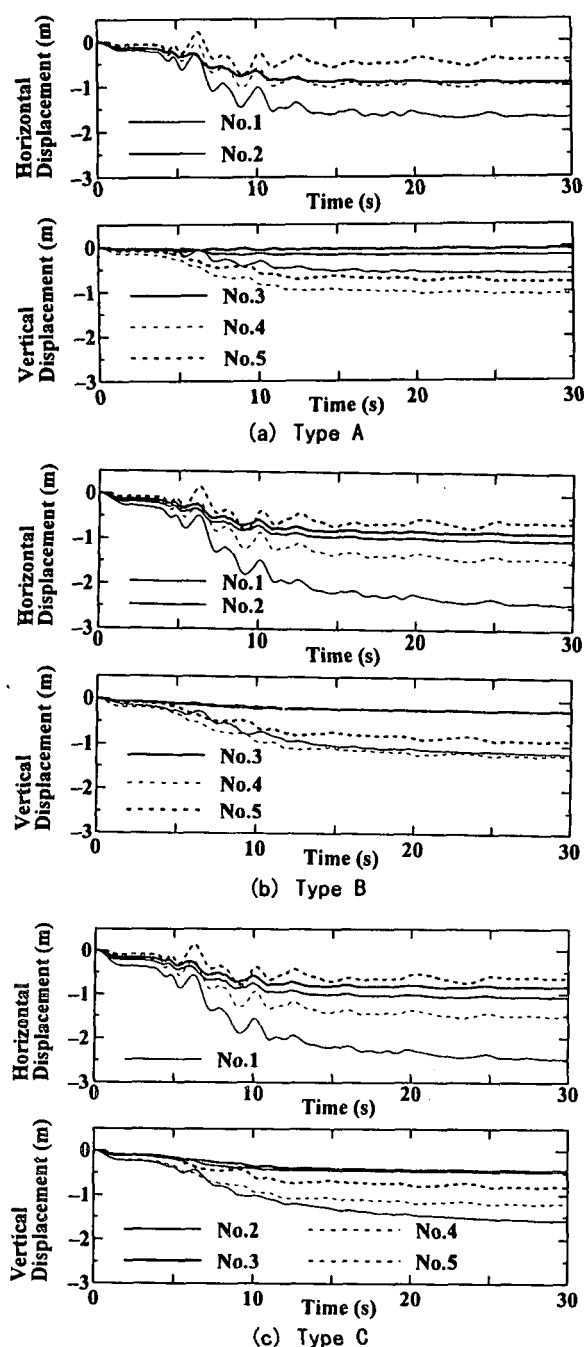


図-6 節点変位の時刻歴応答

おける過剰間隙水圧比 p はいずれのタイプも最初の 10 秒間は液状化の傾向を示しているが、図-3 に示す加速度波形からも明らかなように、主要動が終わりかける 10 秒前後を過ぎると液状化傾向が無くなっていることがわかる。さらに、ケーソン岸壁から離れた要素 D および E の過剰間隙水圧比 p はいずれのタイプもほぼ同じような液状化傾向を示しており、ケーソンと杭基礎を接続した Type A の過剰間隙水圧比 p が最も大きな値となっており、杭基礎を有しない Type C に比べて杭基礎の存在により Type A および Type B の場合には液状化がさらに進むことを示している。このことは、杭基礎を用いることは、ケーソン岸壁の変位量を押さえることができるものの、ケーソン岸壁背面の埋め立て地盤の液状化を一層進めることを示している。したがって、ケーソン岸壁直下に杭基礎を用いる際には、背面の埋め立て地盤の液状化対策も併せて行う必要があると考えられる。

次に、上述したケーソン岸壁の直下に杭基礎を設置した場合の地震時応答結果を踏まえて、図-8 の FEM 解析メッシュ図に示すように、捨て石マウンド下の置換砂および

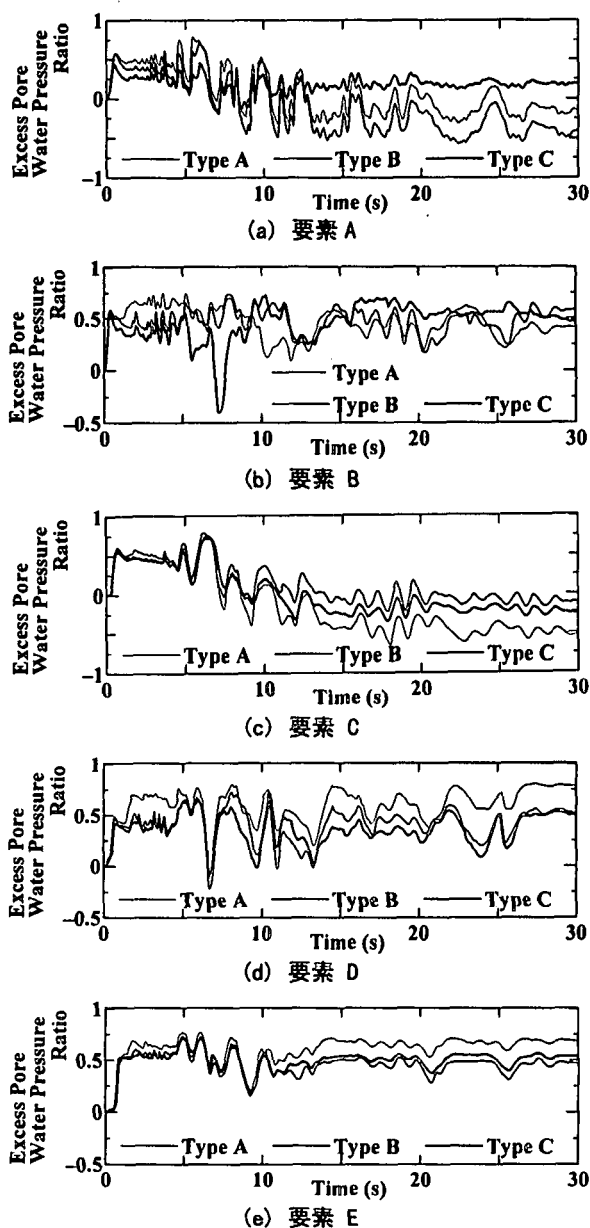


図-7 過剰間隙水圧比の時刻歴応答

ケーソン岸壁背面の裏込土を有しない捨て石マウンドのみを用いたケーソン岸壁に直接先端拡底杭基礎を接続した場合の地震時応答について調べる。なお、本研究ではケーソン岸壁直下に先端拡底杭およびストレート杭を用いた場合の応答結果について、図-8中に示すいくつかの節点および要素の応答量を調べる。なお、解析対象断面はケー

ソン岸壁法線より海側 25m、陸側 25m、海面より-20mの範囲となっている。なお、地盤条件も図-4の場合とは多少異なるものとなっている。また、入力地震動は図-3に示す水平動(NS成分)および上下動成分に基づいて、解析対象断面の最下層に換算し直したものをを用いた。

図-9は、ケーソン岸壁直下に先端拡底杭およびストレート杭を用いた場合の地震時応答解析結果の残留応答変形量を示したものである。これらの図より、ケーソン直下の捨て石マウンドおよびマウンド周辺地盤の変形が大きなものとなっており、先端拡底杭とストレート杭の違いによる残留変形量への影響は、ほとんど現れていないことがわかる。また、図-5に見られたように、ケーソン岸壁背面の埋め立て地盤においては、液状化による側方流動が見られていることがわかる。このため、捨て石マウンド直下の置換砂およびケーソン岸壁背面の裏込土を有しない捨て石マウンドのみを用いたケーソン岸壁の施工は、経済性の面からは有利なものとなるが、従来からのケーソン岸壁施工の場合と同様に、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の液状化対策が必要になるものと考えられる。

図-10は、先端拡底杭基礎に対する節点No.1~5の時刻歴応答を図示したものである。この図からも明らかなように、杭基礎の存在により、いずれの節点についても、水平変位量より鉛直変位量が小さな値となっていることがわかる。また、埋め立て地盤の液状化により他の節点の変位量に比べて、ケーソン天端の節点No.1およびNo.3の水平変位がほぼ同じ程度の大きな値となっており、ケーソン下端のNo.2のそれよりほぼ2倍程度の大きなものとなっていることがわかる。さらに、主要動が継続する10秒前後までは、杭基礎の存在によりケーソン背面の埋め立て地盤の液状化による側方流動に抵抗しているものの、10秒前後を過ぎればかなり大きな水平変位を生じていることがわかる。このため、ケーソン背面に位置する節点No.5の

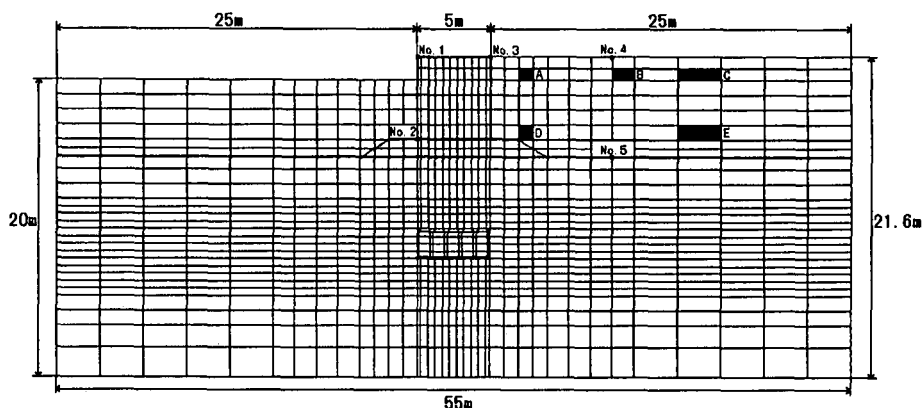
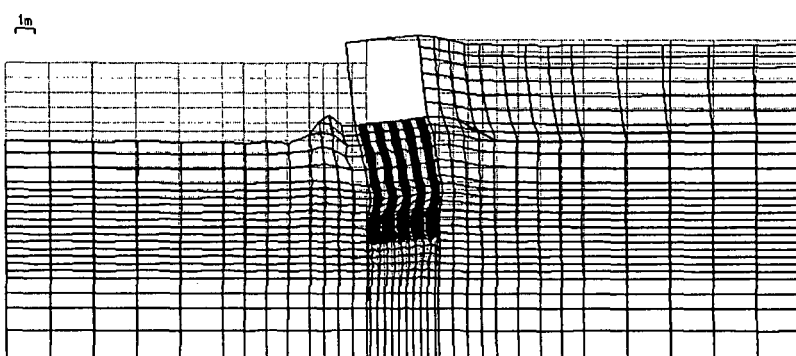
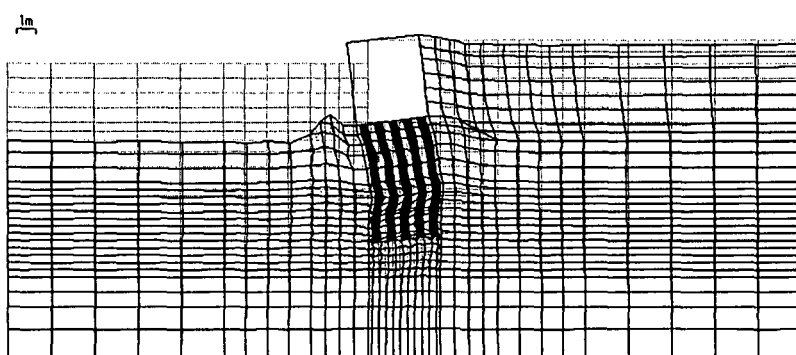


図-8 FEM解析メッシュ図



(a) 先端拡底杭



(b) ストレート杭

図-9 残留変形図

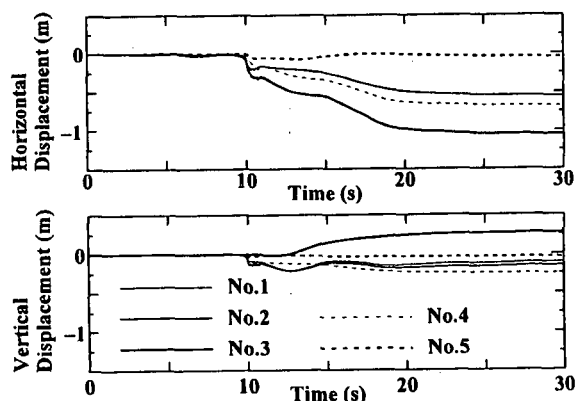


図-10 節点変位の時刻歴応答

変位量は他の節点に比べて小さな値となっている。

一方、図-11は図-8の解析メッシュ図に見られる地盤内部の要素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、これら5つの要素における過剰間隙水圧比 p は主要動が継続する約10秒間の液状化

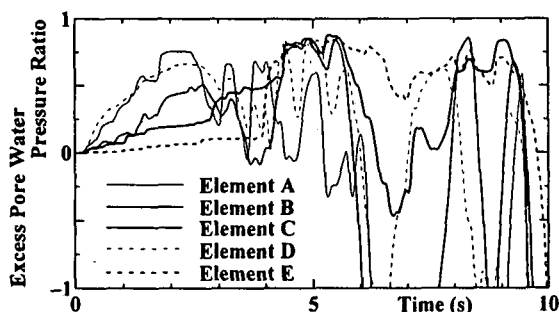


図-11 過剰間隙水圧比の時刻歴応答

傾向のものとなっており、10 秒以降については過剰間隙水圧比 p の値が負となっている。この図より、ケーソン岸壁に近い要素 A および要素 D の過剰間隙水圧比 p が他の要素に比べて大きな値へと変動しており、液状化の進行が早く進んでいることを示している。しかしながら、主要動が継続している間には、ケーソン岸壁から離れた要素 C および E の過剰間隙水圧比 p の方が徐々に液状化傾向を示していることがわかる。したがって、ケーソン岸壁の直下に杭基礎を設置すれば、ある程度までは主要動に抵抗し、背面の埋め立て地盤における液状化を抑える効果を有す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、杭基礎の設置がケーソン岸壁の地震時挙動に及ぼす影響について調べたものである。また、これらの解析結果を踏まえて、先端杭基礎上のケーソン岸壁の地震時応答も併せて検討した。

以下に、本研究で得られた主な結論を述べておく。

1. 杭基礎を有しないケーソン岸壁およびその周辺地盤の地震時応答について、ケーソン岸壁直下の捨て石マウンド、置換砂の上部およびケーソン背後の埋め立て地盤に大きな変形が見られる。
2. ケーソン直下の置換砂内部に杭基礎を設置し、ケーソンとの接続をしない場合、ケーソン岸壁の鉛直方向への沈下挙動は杭基礎がない場合に比較してかなり抑制されるものの、地震時変形挙動がケーソン直下、置換砂の上部およびケーソン背後の埋め立て地盤に限られるため、ケーソンの海側への傾斜を有効に抑制する効果は少ない。

3. ケーソン底面に杭基礎を直接接続した場合、ケーソン岸壁の鉛直および水平方向の変形挙動は、杭基礎を有しない場合に比べてかなり小さくなり、地震時については非常に有効であると考えられる。しかしながら、ケーソン背後の埋め立て地盤においてはケーソン下に設置される杭基礎の有無による影響は少なく、過剰間隙水圧の上昇により液状化する。

4. ケーソン岸壁直下に設置する杭基礎については、先端杭基礎やストレート杭の違いによる地震時挙動への影響はあまり顕著なものとなって現れず、ケーソン岸壁背後の埋め立て地盤においては、慣性力のみならず過剰間隙水圧の上昇によって生じる側方流動による大きな水平変位が見られる。

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ストレート杭や先端杭基礎の非線形性は考慮に入っていないため、今後これらの特性を考慮した地震時時刻歴応答解析を行う必要がある。この種の問題については、今後の検討課題としたい。

最後に、本研究で用いた兵庫県南部地震における加速度波形記録は、関西地震連絡協議会からの提供を受けたことを付記するとともに、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

- 稲垣紘史・井合 進 (1997)：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。
 稲森隆昌ら (1997)：1995 年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告、港湾技研資料、No.857。
 運輸省港湾局 (1995)：阪神・淡路大震災による港湾施設等被災状況報告書。
 社団法人日本港湾協会 (1985)：港湾施設の技術上の基準・同解説、p.77。
 前野賀彦・児玉洋介 (1995)：既成杭による地中杭基礎、特願平 7-78405。
 前野賀彦・高谷富也・高橋重雄・下迫健一郎 (1997)：先端杭基礎の沿岸域への適用に関する研究、海洋開発論文集、Vol.13、pp.399-404。
 森田年一 (1997)：強震時における重力式岸壁の被災におよぼす液状化の影響について、第 32 回地盤工学研究発表会概要、pp.1001-1002。
 Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1992): Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15。