

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

高谷 富也*・前野 賀彦**

1. はじめに

兵庫県南部地震により阪神地区の港湾が被害を被る中で、特に神戸港がその後の阪神地区の災害復旧や物流の停止という形で中部地区や西日本地区の産業にまで影響を及ぼす甚大な被害を受けたことは記憶に新しいところである。従来より言われている通り、外洋波浪に対する耐波設計を行っていない港湾施設が耐震性に乏しいことは予測されたところであるが、外洋波浪に対して耐波設計を行っている防波堤などの外郭施設も、今回のような激しい地震時には被災を免れないことも震災後の調査で明らかになっている(例えば、運輸省港湾局;1995)。港湾施設が道路・鉄道を含む交通・輸送に関する社会基盤の被災に対して有力な代替大量輸送交通手段であることを考えるとき、復旧・修復の容易な構造形式が考慮されるべきである。

そこで、前野ら(1995)は、サクシヨンの効果を有効に発揮させるためスカートにより仕切られたコンパートメントを有する鋼ケーソンの形式を提案し、軟弱地盤への直置きを想定して、その周辺地盤を含む波浪応答特性の検討を行っている。また、前野ら(1997)は先端拡底杭が有する把駐性に着目して、先端拡底杭基礎上にケーソンを設置する海岸構造物形式を考え、ケーソン及びその杭基礎の波浪応答特性を検討した。その結果によれば、先端拡底杭を用いることにより杭拡底部周辺に間隙水圧の上昇域が集中し、ケーソン直下の基礎表層部分の間隙水圧の発生が抑制されることから、ケーソンの不同沈下を防ぐことが可能であることが確認された。

さらに、耐震性能と耐波性能共に優れた構造形式の検討を行うため、本研究では修復が困難であり被災後の耐波性能が著しく低下すると考えられる防波堤等の外郭施設について、実際に兵庫県南部地震に際して観測された加速度記に基づいて得られた先端拡底杭基礎およびその上に設置されるケーソンの応答特性を求めた。

具体的には、ケーソン防波堤に対して有限要素法を用いた有効応力による地震時液状化解析を行い、ケーソン

下部における杭基礎や滑りの有無などが先端拡底杭基礎及びその上に設置されるケーソンの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防波堤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、その上にケーソン防波堤の設置を想定するが、ケーソン防波堤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、ケーソン防波堤を対象とし、図-1に示すような先端拡底部を有する杭基礎に直接接続している場合(Type A)と杭基礎を有しない場合(Type B)について応答解析を行い、先端拡底杭基礎上のケーソン防波堤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防波堤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

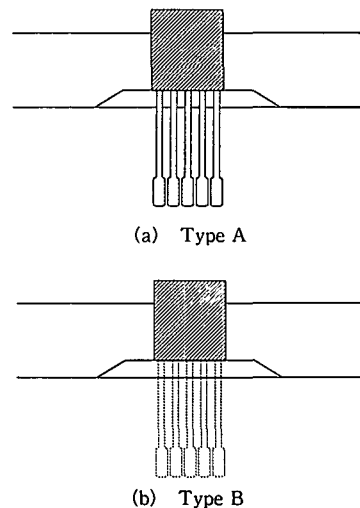


図-1 ケーソン防波堤モデル

* 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
** 正会員 農博 日本大学短期大学部教授 建設学科

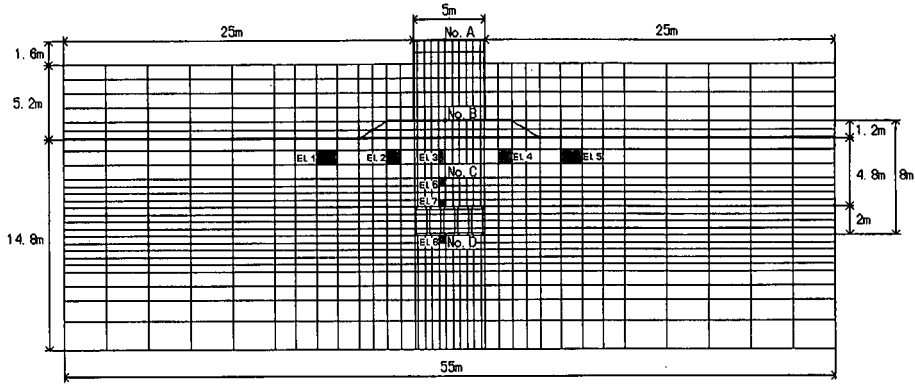


図-2 ケーソン防波堤の解析モデルとFEMメッシュ図

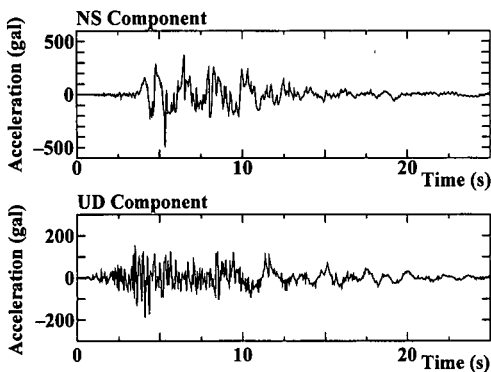


図-3 加速度波形記録 (K. P. -32 m 地点)

のを参考とした。

図-2は、本研究で行った液状化解析に用いたケーソン防波堤モデルおよびFEMメッシュ図を示したものである。本研究で用いたケーソンの寸法は幅5m、高さ6.8mである。先端拡底杭は長さ8mおよび直径0.5mのもので、拡底部の長さおよび直径はそれぞれ2mおよび0.8mである。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図示しておいた。節点No. A～Dについては変位および加速度の時刻歴応答を、また要素1～8については応力およびひずみの時刻歴応答を調べる。解析対象断面は、ケーソン防波堤法線より左側25m、右側25m、海面より-20mの範囲となっている。また、入力地震動としては、図-3に示す神戸ポートアイランドの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25秒間を参考にした波形を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。なお、この加速度波形を基にして、森田(1997)および稲垣・井合(1997)らは神戸ポートアイランド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。また、図-2に示す解析モデルに用いる地盤条件としては、14.8mの海底地盤層厚を上より2.8mの砂層、6.5mの粘土層および5.5mの砂礫層とした。

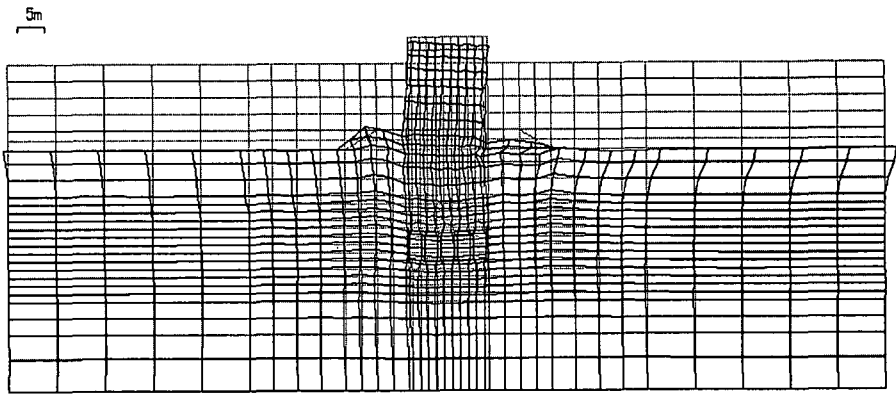
3. 解析結果とその考察

本研究では、ケーソン岸壁を先端拡底杭基礎に直接接続している場合(Type A)および海底地盤上に捨て石マウンドを設置したケーソン防波堤の場合(Type B)の2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や要素における変位や応力の時刻歴応答について調べる。

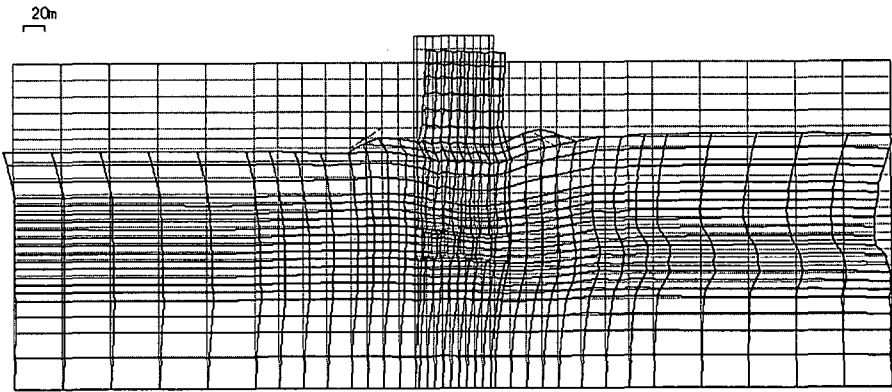
図-4は、Type AおよびType Bに対する地震応答解析結果の残留変形量を示したものである。この図から明らかのように、海底地盤最上層の砂層の液状化による側方流動が生じており、Type Aの場合にはケーソン防波堤下の杭基礎の存在により側方流動が抑制されていることがわかる。また、ケーソン防波堤を先端拡底杭基礎に直接接続したType Aの場合におけるケーソン防波堤天端の変位量は、Type Bの場合に比べて小さくなっており、杭基礎の存在によりケーソン防波堤の傾斜も抑制されていることがわかる。一方、杭基礎を有しないType Bの場合には、捨て石マウンド内部へのケーソン防波堤の沈下および傾斜が顕著なものとなっている。

以上のことから、外観上は杭基礎を有する場合の方がケーソン防波堤の変形・移動量が小さいことが確認された。しかしながら、杭基礎への被害や基礎を含む全構造物の安定性について精査する必要があるため、杭基礎を有する場合(Type A)とそうでない場合(Type B)の両者について変位応答を調べることにする。

図-5は、図-2に示す節点No. A～Dの水平変位および鉛直変位の時刻歴応答をType AおよびType Bについて図示したものである。これらの図からも明らかのように、杭基礎を有するType Aの場合におけるケーソン防

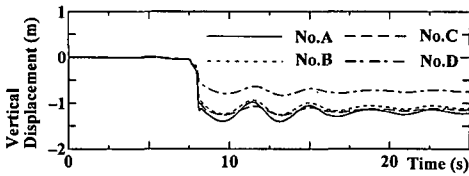
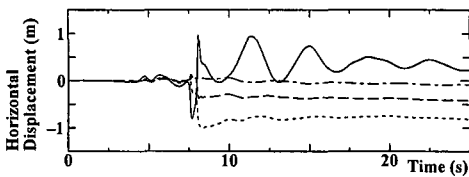


(a) Type A

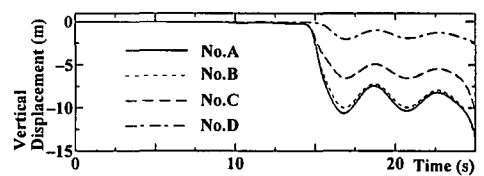
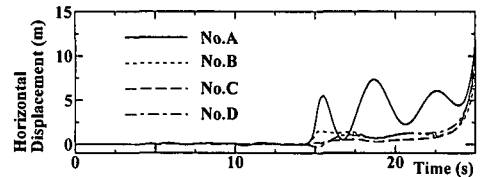


(b) Type B

図-4 最終残留変形量



(a) Type A



(b) Type B

図-5 節点変位の時刻歴応答

波堤天端の節点 No. A, B および C の鉛直変位量はほぼ同じ程度となっているが、水平変位についてはケーソン防波堤の傾斜および杭基礎の存在の影響を強く受けていることがわかる。また、杭基礎の存在により節点 No. D の水平変位は鉛直変位に比べてかなり小さな応答値となっており、水平方向の運動に対する拘束が大きいことを示唆しているものと考えられる。

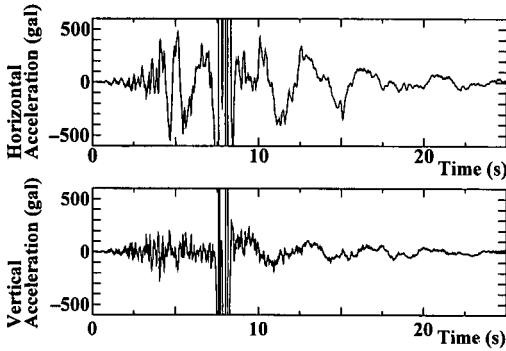
一方、杭基礎を有しない Type B の場合については、約 14s 後より 4 つの節点における変位が大きな変動を示していることがわかる。また、ケーソン防波堤天端の節点 No. A および B の鉛直変位量がほぼ同じ程度で最も大きくなっており、深くなるにつれて変位量は小さくなっている。水平変位については No. A を除く 3 つの節点の変位はほぼ同じような挙動を示しているが、No. A

の変位は Type A の場合と同様に大きな変動を示している。この現象はケーソン防波堤下の砂層地盤の液状化による影響が現れているものと考えられる。なお、この Type B の場合については 25 s を過ぎれば変位が大きくなる発散傾向を示しており、これ以上応答解析を継続することはできないため、本研究では時刻歴応答解析を打ち切ったものである。

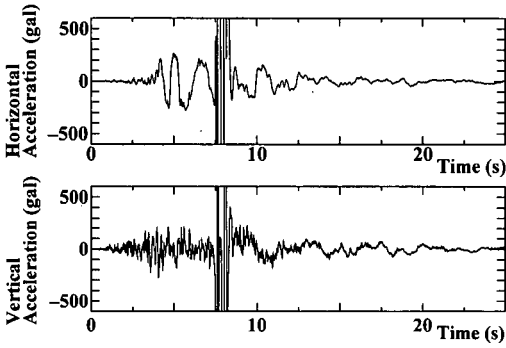
ところで、図-5 において明らかなように杭基礎を有する Type A と杭基礎を有しない Type B の場合における変位の時刻歴応答特性は異なる挙動をしていることがわかる。つまり、杭基礎を有する Type A の場合には、約 8 s 前後より各節点の変位応答量が大きな変動を示し

ており、各節点 No. A~D の加速度の時刻歴応答を検討することにした。

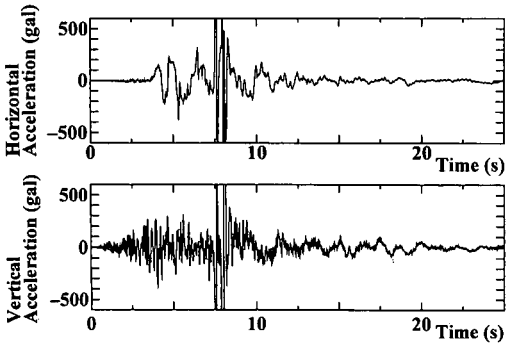
図-6 および図-7 は、それぞれ Type A および Type B における節点 No. A, B および D の加速度の時刻歴応答を杭基礎を有しない Type B の場合には、約 14 s 前後より各節点の変位応答量が大きな変動を示していることがわかる。これらの変位応答の原因を調べるため、次に示したものである。杭基礎を有する Type A の場合における加速度応答を示した図-6 には、約 7~8 s 間に非常に大きな加速度が各節点に生じており、図-5(a)に見られるように、この大きな加速度の発生時刻より各節点の変位応答が大きな変動を示し始めていることがわかる。



(a) No. A

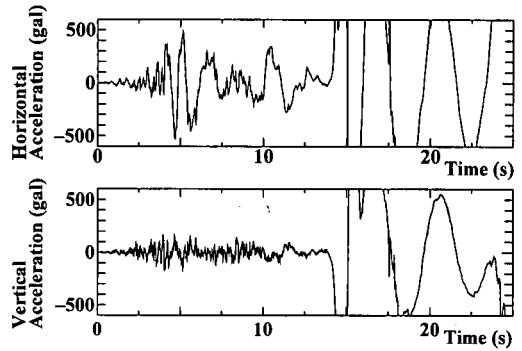


(b) No. B

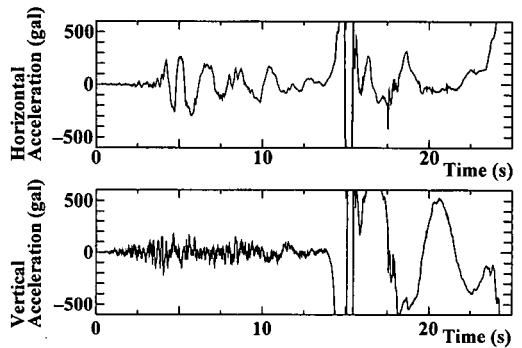


(c) No. D

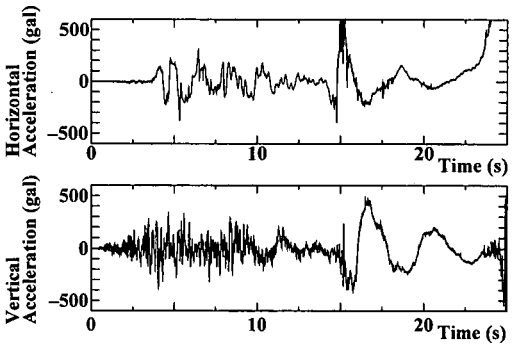
図-6 加速度応答 (Type A)



(a) No. A

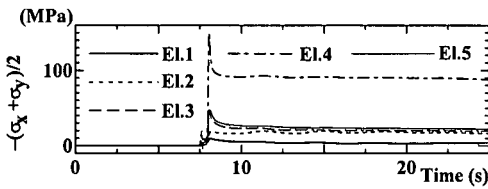


(b) No. B

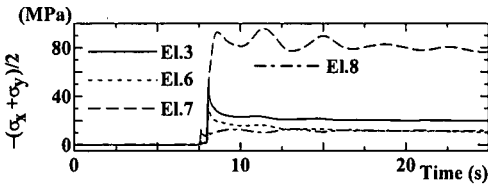


(c) No. D

図-7 加速度応答 (Type B)

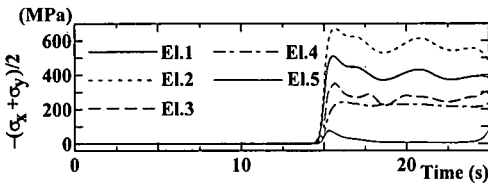


(a) 要素 1～5

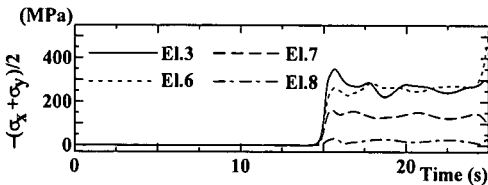


(b) 要素 3, 6～8

図-8 平均有効応力の時刻歴応答 (Type A)



(a) 要素 1～5



(b) 要素 3, 6～8

図-9 平均有効応力の時刻歴応答 (Type B)

この非常に大きな加速度の発生原因は、杭基礎と直接接続したケーソン防波堤の媒体内部を伝播する波動が複雑に影響し合った結果生じた一種の共振現象によるものと考えられる。一方、杭基礎を有しない Type B の場合における加速度応答を示した図-7 より明らかなように、主要動が過ぎた約 14s 前後から非常に大きな周期の長い加速度が各節点に生じているため、この加速度の発生時刻より各節点の変位応答が大きな変動を示し始めており、加速度波形の特徴から液状化による側方流動が発生していることがわかる。図-6 に示した杭基礎を有する場合 (Type A) に比べて図-7 に示した杭基礎を有しない場合 (Type B) では、一度、加速度が大きくなると水平・鉛直加速度の両者ともに大きな変動が継続しており、側方流動が継続して地震動の継続時間に対応して構造物全体が大きく移動することを示唆している。

杭基礎を有する Type A の場合における要素 1～8 における平均有効応力の時刻歴応答を図-8 に示しておく。この図より明らかなように、ケーソン防波堤の傾斜により捨て石マウンドへの沈下が生じる要素 6 における

応力が大きな応答値となっており、また杭の拡底部に囲まれる要素 7 も大きな値を示していることがわかる。

一方、図-9 は杭基礎を有しない Type B の場合における要素 1～8 における平均有効応力の時刻歴応答を示したものである。杭基礎が存在しないため、ケーソン直下に位置する要素 3, 6～8 における応力は深くなるにつれて小さな応答値となっており、海底地盤最上層の砂層に位置する要素 1～5 においては、ケーソン防波堤の傾斜により捨て石マウンドの滑り出しの影響を受ける要素 1, 2 の応力の応答値が大きな値となっていることがわかる。したがって、ケーソン防波堤直下に杭基礎を設置する Type A の場合は、杭基礎を有しない Type B の場合に比べてケーソン防波堤の傾斜量をかなり抑制するとともに、液状化層が存在する場合には側方流動をかなり抑えることがわかる。

4. おわりに

本研究は、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防波堤の地震時応答特性を有効応力に基づく液状化解析法を用いて調べ、杭基礎を有しない場合との比較・検討を行った。その結果、ケーソン防波堤下部に杭基礎が接続されている場合 (Type A)、杭基礎により主要動から数秒間は鉛直・水平変位はかなり小さく抑えられる。しかしながら、ケーソン防波堤の挙動が杭基礎を通じて直接地盤に伝達されるため、周辺地盤では液状化による側方流動が見られるとともに、ケーソン及び周辺地盤の残留変形は大きなものとなった。また、先端拡底杭を用いることは耐波性能及び耐震性能を向上させるが、水平加速度のみならず鉛直加速度も大きい直下型地震に対しては杭基礎周辺地盤での液状化による側方流動を防止する液状化防止策との併用が必要となる。

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): 既成杭による地中拡底杭, 特願平 7-78405.
- 前野賀彦・高谷富也・高橋重雄・下迫健一郎 (1997): 先端拡底杭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.