

上下動を考慮したケーソン式岸壁の 地震時挙動に関する実験

中川浩明¹・宮島昌克²・小林 亨³・北浦 勝⁴

¹学生会員 金沢大学大学院自然科学研究科後期課程 (〒920 石川県金沢市小立野 2 丁目 40-20)

²正会員 工博 金沢大学助教授 大学院自然科学研究科 (〒920 石川県金沢市小立野 2 丁目 40-20)

³金沢大学大学院自然科学研究科前期課程 (〒920 石川県金沢市小立野 2 丁目 40-20)

⁴正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920 石川県金沢市小立野 2 丁目 40-20)

1995 年兵庫県南部地震においては港湾施設が大被害を受け、神戸港で大半の岸壁が被災し、港湾機能が麻痺状態に陥った。被災した岸壁においては、背後地盤で液状化が発生し、側方流動が生じていた。また、都市直下地震であったために過大な上下地震動が記録されている。本研究では、上下・水平両方向に同時加振できる振動台を用いてケーソン式岸壁の被災原因について検討した。背後地盤が液状化する場合としない場合や、ケーソン法線に直角方向の水平動が卓越する場合とそれと平行方向に卓越する場合、水平動だけを入力した場合と上下動も同時に加わる場合など、種々の実験ケースについてケーソン式岸壁の挙動を測定した。その結果から、上下地震動がケーソン式岸壁の挙動に及ぼす影響について検討した。

Key Words : caisson type quaywall, vertical ground motion, soil liquefaction, lateral flow, shaking table test

1. はじめに

1995 年 1 月 17 日、淡路島・明石海峡付近を震源とするマグニチュード 7.2 の地震が発生した。神戸市直下の活断層の破壊を誘発したことも重なり、震度 7 という未曾有の災害を受けるに至った。ポートアイランドなどの人工島の地盤は液状化により大きく変動し、護岸や港湾施設が破壊した。

我が国の重要港の一つである神戸港は、その大半の港湾施設が被災し、そのほとんどは麻痺状態に陥った。神戸港の 90% を占めるケーソン式岸壁は、滑動、前傾、沈下を伴う被害を受けた¹⁾。

神戸港のケーソン式岸壁は、床掘置換工法により基礎地盤が改良されていた。このような岸壁が、設計地震動を大幅に上回る地震動によって、非常に大きな被害を受けた。被災変形状況は、岸壁法線が最大 5m 程度はらみ出し、岸壁天端が 1~2.5m 沈下するといった状況であり、岸壁背後にも 1~4m 程度の段差が発生した。ケーソンの背後地盤ではその移動に追従できず、陥没・亀裂が生じた²⁾。

以上のような被害を受けた神戸港のケーソン式構造形式は、全国的にも広く採用されている。このよ

うなケーソン式岸壁の地震時挙動を理解することは、今後の岸壁の耐震設計において非常に重要であると思われる。

特に、今回の地震は直下型地震ということもあり、上下地震動が非常に大きかった。その上下動が、ケーソンの挙動そのものや、直下の置換砂層や背後地盤の液状化に影響をおよぼしたことが考えられる。そこで本研究では、上下地震動がケーソン式岸壁に及ぼす影響について検討する。

2. 実験概要

実験装置の概要を図-1 に示す。実験に用いた砂箱は長さ 2000 mm、幅 900 mm、高さ 1200 mm であり、これを上下・水平両方向に同時加振可能な振動台に設置した。砂箱内に作成した模型は、兵庫県南部地震で被災した六甲アイランドの岸壁の長さの縮尺比を 1/50 としたものである。ケーソン模型は、高さ 23 cm・幅 10 cm・長さ 40 cm のコンクリート製で、比重は約 2.3 であり、実際の重力式ケーソンと同程度にした。

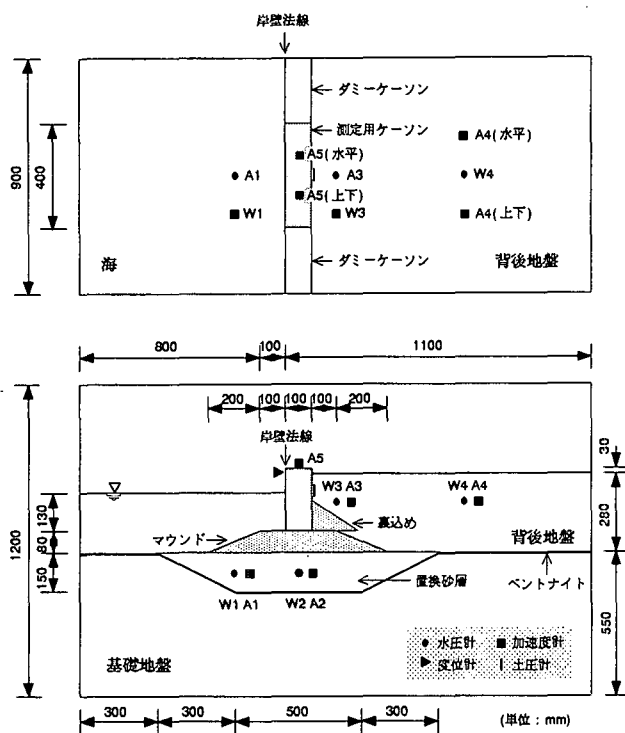


図-1 実験概要図

実験模型のケーソン背後地盤、置換砂層には珪砂 5 号（平均粒径 $D_{50}=0.4$ mm、均等係数 $U_c=1.7$ ）、マウンドおよび裏込めには砕石 5 号（最大粒径 $D_{max}=25$ mm）を用いた。基礎地盤は、砂と砕石を混合したものを十分締固め、液状化しないものを作成した。基礎地盤表面に不透水層としてベントナイトを使用した粘土層を作成し、その上をビニールシートで覆い、水が基礎地盤へ進入するのを防止した。

本実験に用いた入力波は 3Hz の正弦波で、加振時間は 5 秒間である。測定項目は、入力加速度、ケーソンの応答加速度、応答変位、置換砂層と背後地盤の応答加速度、間隙水圧、およびケーソン壁面に作用する土圧である。

本実験では水平動をケーソン法線に垂直、平行に加振した実験を行い、ケーソンの変位量にどのような違いがあるか検討する。また、背後地盤がゆるぎめの場合と締固めた場合の両者について実験を行い、背後地盤の液状化がケーソン変位に及ぼす影響を調べる。さらに、上下動と水平動の位相差により、ケーソン変位に与える影響を調べる。なお、実験では置換砂層および背後地盤が、ともにゆるぎめ地盤（ $D_r=0.31$ ）と締固め地盤（ $D_r=0.65$ ）の 2 種類の地盤を作成している。ゆるぎめ地盤は水中落下法により作成した地盤であり、締固め地盤は数十回突き固めを行った地盤である。

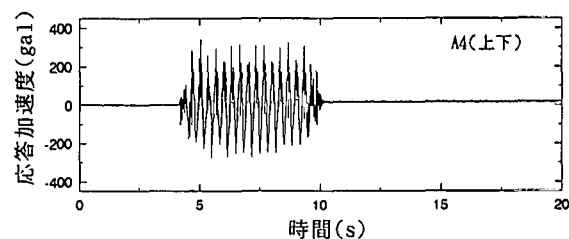
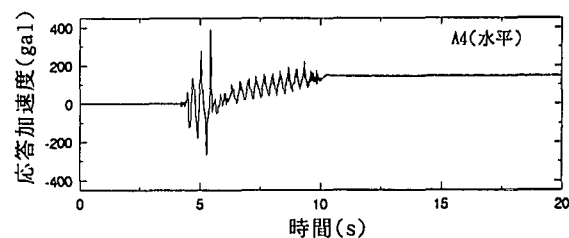
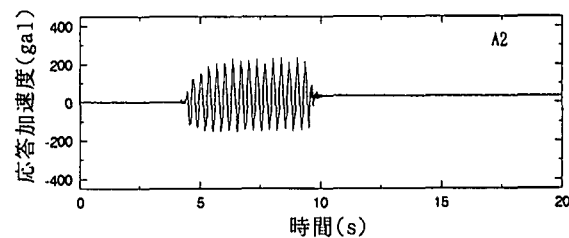
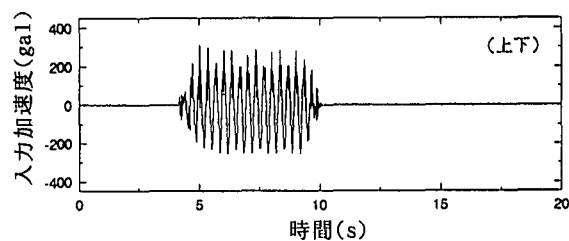
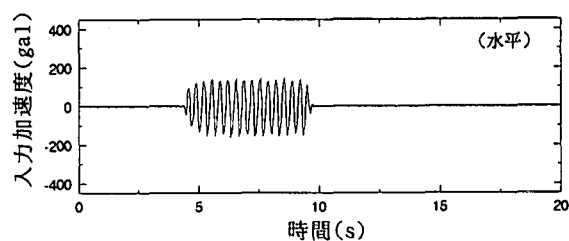


図-2 入力・応答加速度の時刻歴の一例

3. 実験結果及び考察

(1) 実験結果の一例

入力加速度およびケーソン直下の置換砂層（ A_2 ）、背後地盤（ A_4 ）の応答加速度時刻歴の一例を図-2 に示す。また、置換砂層（ W_2 ）、背後地盤（ W_4 ）における過剰間隙水圧の時刻歴を図-3 に示す。

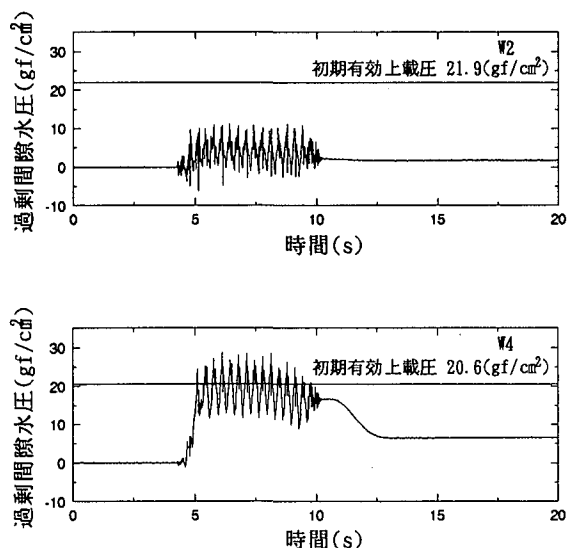


図-3 過剰間隙水圧の時刻歴の一例
(入力水平動 150gal, 入力上下動 300gal)

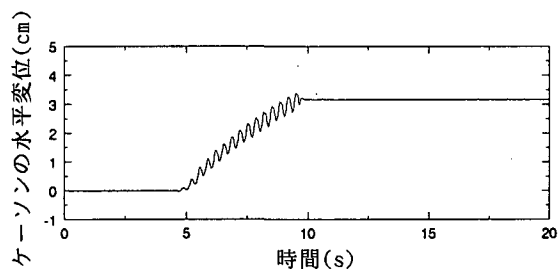


図-4 ケーソン水平変位の時刻歴の一例
(入力水平動 150gal, 入力上下動 300gal)

ケーソンから約 70cm 離れた背後地盤における過剰間隙水圧 (W_4) の時刻歴から、加振後約 1 秒において過剰間隙水圧が最大となっていることがわかる。また、これと同時に、応答加速度の時刻歴において加速度波形の振幅が小さくなっていることから、地盤の支持力が急激に減少していることがわかる。すなわち、過剰間隙水圧が最大となっている時間は地盤の支持力が最も減少している時間と一致し、地盤中の液状化の程度が最も大きくなっている時間と考えられる。一方、置換砂層における過剰間隙水圧 (W_2) は、ほとんど上昇していない。本実験では、置換砂層厚が薄く、置換砂層上のマウンドおよびケーソンから加わる有効上載圧の影響によって、過剰間隙水圧が上昇しなかったのではないと思われる。

図-4 は、ケーソンの水平変位の時刻歴を示したものである。ケーソンは加振開始と同時に急激に変位するのではなく、徐々に水平方向に移動している。加振終了時の水平変位は約 3.2 cm を記録した。

ここで、ケーソンの水平変位の原因を検討する。図-3、図-4 より、ケーソン背後地盤では、ほぼ完

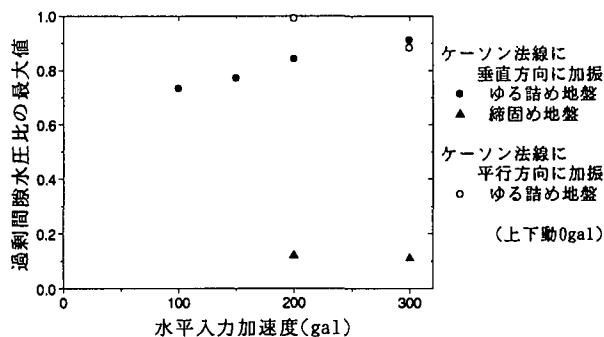


図-5 背後地盤 (W_4) での過剰間隙水圧の最大値

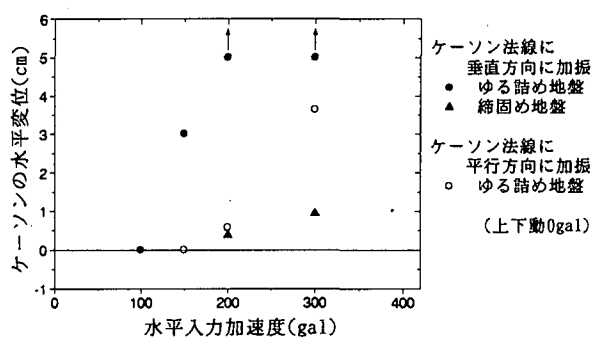


図-6 水平入力加速度とケーソン水平変位

全液状化が起っていることがわかる。したがって、ケーソンの水平変位を発生させた要因としては、ケーソンに作用する慣性力のみではなくケーソン背後地盤の過剰間隙水圧の上昇による側方流動も考えられる。

(2) 背後地盤における液状化の有無によるケーソン変位の比較

つぎに、背後地盤が液状化する場合としない場合について、ケーソン式岸壁の挙動を比較検討する。

図-5 は、背後地盤における過剰間隙水圧比の最大値を示している。●及び○で示すゆる詰めで作成した地盤は、加振方向に関わらず、過剰間隙水圧の最大値は大きく、ほぼ完全液状化している。一方、▲で示した締固め地盤では、過剰間隙水圧はほとんど上昇しておらず液状化していない。

図-6 に、このときのケーソン変位と入力加速度との関係を示す。

また、同図より背後地盤を締固めた実験、すなわち、背後地盤において液状化が起こらない実験においては 1 cm 程度の変位しか生じていないが、液状化の生ずる場合は、ケーソン法線に直角方向に加振すると、3 cm 以上の変位を生ずることがわかる。この

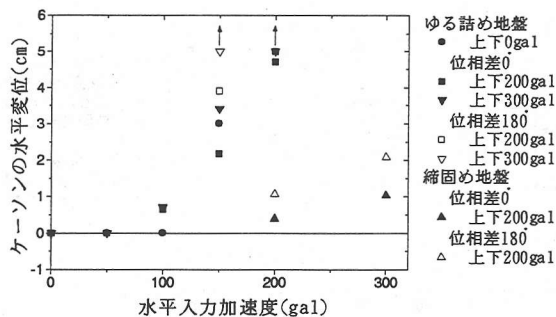


図-7 水平動と上下動の位相差によるケーソン変位

ことから、ケーソンを変位させる要因としては液状化の影響が大きいように思われる。しかし、ケーソン法線に平行方向に加振、すなわち、ケーソンが傾斜不可能な方向に慣性力を受ける様に加振した場合、ケーソン変位は比較的小さくなっている。以上より、ケーソンが傾斜するのは、背後地盤の液状化の影響だけではなく、ケーソンに作用する慣性力の影響も、ケーソンの水平変位増大の一因であると考えられる。

(3) 水平動と上下動の違いによるケーソン変位の比較

上下動の影響を考える上で、上下動と水平動の位相差がケーソンに与える影響について調べた。図-7は水平動と上下動の位相差の違いによるケーソンの変位量を表したものである。水平 100gal では入力加速度が小さいため顕著な差は見られない。水平 150gal では位相差により違いが見られ、位相差 0° に比べ位相差 180° の方がケーソンの変位量が大きくなっていることがわかる。本実験における位相差 180° の場合とは、図-8 に示すようにケーソンの重量を減らす方向に上下動が加わった時に、開放面である海側上方に慣性力が加わるものである。この場合に、重力式構造物であるケーソンは移動しやすくなるので、ケーソンの変位量が大きくなると考えられる。

また、背後地盤を締固めることにより液状化の影響をなくし、水平動と上下動の位相差の影響だけを調べた。この場合においても位相差 0° よりも位相差 180° の方がケーソンの変位量が大きい。したがって、上下動と水平動の位相差によりケーソンの変位量に違いがあることがわかった。すなわち、ケーソンに作用する慣性力の方向の影響を受けやすいということが明らかになった。

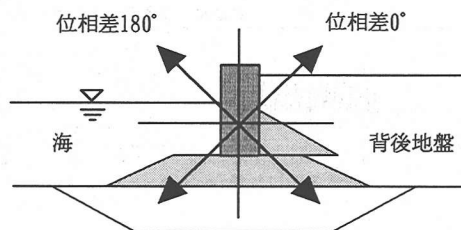


図-8 位相差の違いによる加振方向

4. 結論

ケーソン式岸壁の模型振動実験から以下の結論を得た。

- (1) 背後地盤がゆる詰めの場合は、締固めた場合より大きなケーソン水平変位が生じている。ケーソンは液状化の影響を強く受けるのでケーソン変位は大きくなったと思われる。
- (2) ケーソンが傾斜可能な方向に慣性力を受ける場合よりも、慣性力を受けない場合の方が、ケーソン水平変位は非常に小さいので、慣性力もケーソンに変位を及ぼす要因の一つである。
- (3) ケーソンの挙動には、上下動と水平動の位相差も影響があると思われ、上下動がケーソンの重量を軽くする方向に作用した時に水平動が作用する場合には、ケーソンの変位が増大する。

参考文献

- (1) (社)地盤工学会 阪神大震災調査委員会：阪神・淡路大震災調査報告書（解説編）1996.3.
- (2) 運輸省港湾技術研究所：阪神・淡路大震災による港湾施設等被害状況調査報告書（第2集），1995.10.
- (3) 井合 進：ケーソン式岸壁の被害の特徴，土木学会誌，vol.80，1995.6.
- (4) 建設省建築研究所：平成7年兵庫県南部地震被害報告（速報），1995.2.
- (5) 神戸市開発局：兵庫県南部地震による埋立地盤変状調査，1995.8.
- (6) 千葉工業大学：阪神・淡路大震災調査報告集，1995.12.
- (7) (株)大林組技術研究所：平成7年（1995年）兵庫県南部地震被害調査報告書，1995.3.