

継続時間の違いによるケーソン式岸壁の 振動台実験

山崎 浩之¹・金田 一広²・永野 賢次³

¹ (独) 港湾空港技術研究所 地盤構造部動土質研究室室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:yamazaki@pari.go.jp

² (独) 港湾空港技術研究所 地盤構造部動土質研究室研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:kaneda@pari.go.jp

³ (独) 港湾空港技術研究所 地盤構造部動土質研究室研究員 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:nagano-k89ag@pari.go.jp

海溝型地震の特徴は地震動の継続時間が長いことが挙げられる。本研究はケーソン式岸壁の振動台実験を行い、裏埋め土（ゆるい地盤と密な地盤）の液状化およびケーソンの変位に着目して継続時間の影響について検討した。規則波（正弦波）を用いて載荷回数を変えて継続時間の影響を調べ、さらに従来のものよりも長い不規則波（シナリオ波）についても検討した。ゆるい地盤は比較的小さな入力加速度では継続時間の影響が見られ、裏埋め土が液状化した後しばらく高い間隙水圧を保つ。密な地盤はゆるい地盤に比べて継続時間の影響は少なく、裏埋め土は液状化した後すぐに間隙水圧の消散が見られる。シナリオ波については密度によってケーソンの変位が異なり、シナリオ波を規則波で換算する場合は密度も考慮する必要があることを示した。

Key Words : *Shaking table test, Liquefaction, Caisson type quaywall, Continuation time*

1. はじめに

海溝型地震の特徴として地震動の継続時間が長いことが挙げられる。ケーソン式岸壁など海洋構造物が、このような継続時間の長い地震に見舞われたときどのような被害を受けるかが問題となっている。継続時間が長くなると波数が増加するためケーソンに与える地震動の影響が大きくなるが、その一方でケーソン式護岸の裏埋め土では加振中に排水による強度増加も期待される^{1), 2), 3)}。本研究は、小型振動台を用いて、ケーソン式岸壁の模型実験を行い、裏埋め土の液状化およびケーソンの変位に着目して継続時間の影響について検討した。また、シナリオ波のような不規則波の影響についても検討した。

2. 振動台実験の概要

(1) 用いた試料

用いた試料は、相馬6号砂で、物理特性は表-1に示す。土粒子密度 $\rho_s=2.656 \text{ g/cm}^3$ 、最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.513 \text{ g/cm}^3$

(最小間隙比 $e_{min}=0.755$)、最小乾燥密度 $\rho_{dmin}=1.147 \text{ g/cm}^3$ (最大間隙比 $e_{max}=1.316$)である。また、透水係数は地盤密度の影響をやや受けるが、 $k=1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ である。図-1に粒径加積曲線を示す。

表-1 相馬6号砂の物理特性

土粒子密度 $\rho_s \text{ (g/cm}^3\text{)}$	最大乾燥密度 $\rho_{dmax} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	最小間隙比 e_{min}
2.656	1.513	0.755
	最小乾燥密度 $\rho_{dmin} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	最大間隙比 e_{max}
	1.147	1.316

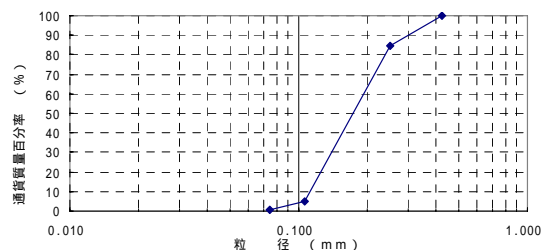


図-1 粒径加積曲線

(2) 試験方法

振動台実験装置を図-2に示す。振動台箱の下部に層厚15cmの碎石層を基盤層として設けその上に砂を十分に締め固めて20cmの基礎地盤を作成した。基礎地盤の上に、ケーソン模型を設置した。ケーソン模型は幅10cm、高さ20cmで奥行き方向に3分割されており、中央のケーソンが計測用である。ケーソン模型はアルミ製で、総質量は14.5kg、重心はケーソンの中央になるように作っている。ケーソンの底面もアルミできており、砂との摩擦係数は0.51である。また、このように奥行き方向に3分割したのは、計測用ケーソンの両側にダミーケーソンを置き、計測に対する土槽側壁の摩擦の影響を低減するためである。裏埋め土は20cmの層厚で、Dr（相対密度）40及び80%の地盤を作成した。作成方法は各相対密度で5cmごとに堆積させるのに必要な砂の重量をあらかじめ計算し、それを水中落下法で堆積させ、密な地盤では水平方向に振動を与えて砂の層厚が5cmになるようにした。その工程を4回行い、20cmの裏埋め地盤を作成した。図-2に示すように裏埋め部に間隙水圧計9個、加速度計8個、さらにケーソン上部、基礎地盤、振動台に加速度計を各1個設置した。ケーソンの変位はレーザー変位計を用いて、水平方向、鉛直方向について測定した。入力地震動は次の2つのケースについて行った。

(a) 段階的に加速度を上げていくケース

入力地震動は図-3に示す周期20Hzの正弦波で、継続時間が0.25秒（繰返し回数5回）、1.0秒（繰返し回数20回）および5.0秒（繰返し回数100回）の3つである。加振は水平一方向の加速度振幅を段階的に50Gal、100Gal、200Gal、400Gal、800Galとした。すなわち、継続時間の影響を調べるため3つのモデル地盤を作成し、継続時間を一定にして、加速度を段階的に上げていった。なお、各加振段階の間は十分な排水間隔を取っている。

(b) 段階的に加速度を上げないケース

入力地震動は図-4に示す周期20Hzの正弦波で、継続時間が0.25秒（繰返し回数5回）および5秒（繰返し回数100回）の2ケースと、シナリオ波で加振を行っている。また、正弦波は水平一方向に加速度振幅200Gal、シナリオ波は不規則波で最大加速度振幅500Galで実施している。図-5は、シナリオ波の振幅特性で、縦軸は最大加速度の60%以上の加速度振幅の波数を示している。開始2.0秒から大きな波形が多く、3.0秒後に落ち着き始める波形である。

(a) のケースは、段階的に加速度を上げていく試験で、前の加振による影響を受けている。一方、(b)のケースは、加振の履歴の影響のない試験として継続時間の影響による裏埋め土の液状化特性およびケーソン変位について検討する。また、不規則波の影響を検討する方法として、液状化時に、不規則波の最大加速度と規則波の最大加速度の比で評価することが行われる⁴⁾。本研究ではシナリオ波とほぼ同じの継続時間の規則波（正弦波）と比

較することで、継続時間の長いシナリオ波を規則波で換算する場合について基礎的な検討をしている。

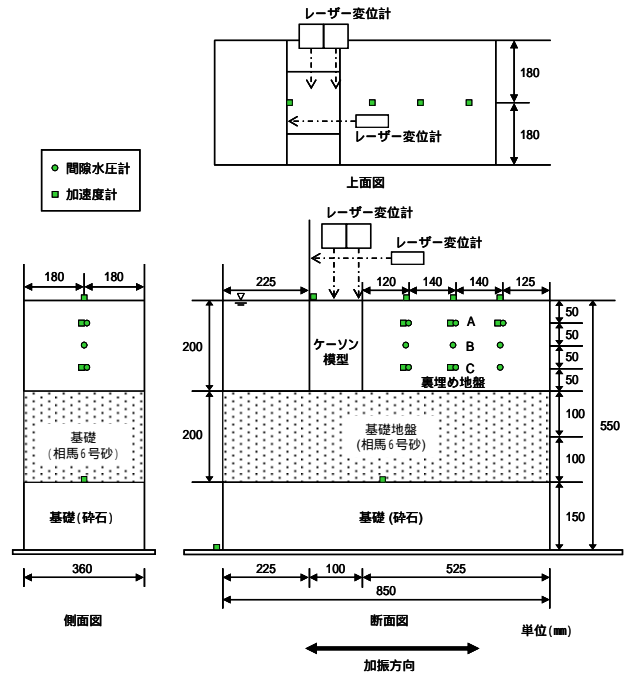


図-2 振動台実験装置

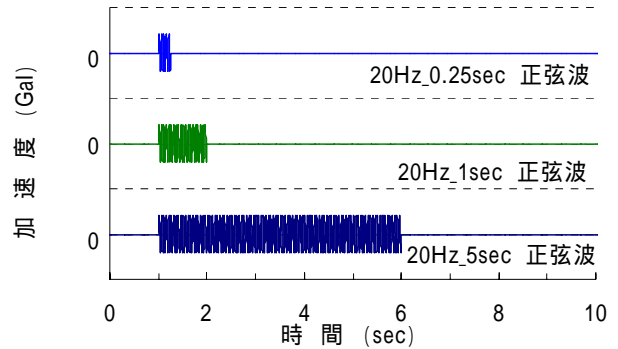


図-3 入力加速度 (a)段階的に加速度を上げていくケース

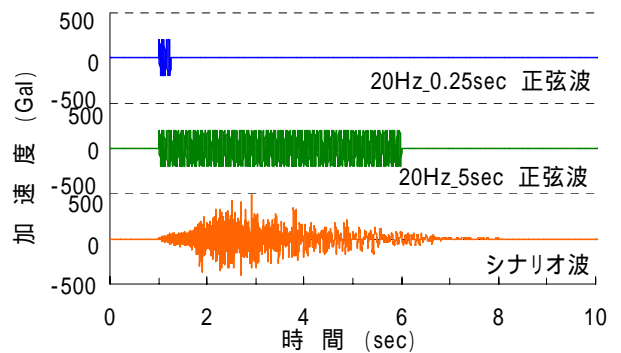


図-4 入力加速度 (b)段階的に加速度を上げないケース

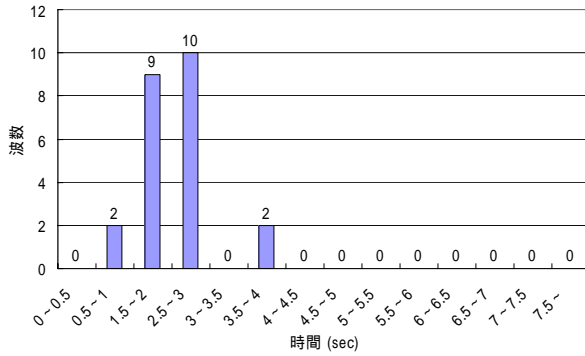


図-5 シナリオ波の振幅特性

(3) 実験ケース

表-2 に試験ケース、表-3 に相似則⁵⁾を示す。

表-2 試験ケース

(a) 段階的に加速度を上げていくケース

ケース番号	裏埋めの状態	継続時間	周波数	入力加速度	入力波
ケース1-1	Dr 相対密度 40%	0.25秒	20Hz	段階載荷	正弦波
ケース1-2	Dr 相対密度 40%	1.0秒	20Hz	段階載荷	正弦波
ケース1-3	Dr 相対密度 40%	5.0秒	20Hz	段階載荷	正弦波
ケース1-4	Dr 相対密度 80%	0.25秒	20Hz	段階載荷	正弦波
ケース1-5	Dr 相対密度 80%	1.0秒	20Hz	段階載荷	正弦波
ケース1-6	Dr 相対密度 80%	5.0秒	20Hz	段階載荷	正弦波

(注) 段階載荷の最大加速度は 50, 100, 200, 400, 800 Gal

(b) 段階的に加速度を上げないケース

ケース番号	裏埋めの状態	継続時間	周波数	最大入力加速度	入力波
ケース2-1	Dr 相対密度 40%	0.25秒	20Hz	200 Gal	正弦波
ケース2-2	Dr 相対密度 40%	5.0秒	20Hz	200 Gal	正弦波
ケース2-3	Dr 相対密度 40%	約5.0秒		500 Gal	シナリオ波
ケース2-4	Dr 相対密度 80%	0.25秒	20Hz	200 Gal	正弦波
ケース2-5	Dr 相対密度 80%	5.0秒	20Hz	200 Gal	正弦波
ケース2-6	Dr 相対密度 80%	約5.0秒		500 Gal	シナリオ波

表-3 相似則

	実物 / 模型
距離	50
時間	$50^{3/4}$
加速度	1
質量密度	1

表-3から模型縮尺は1/50である。したがって、ケーソン模型は高さが20cmであるが実物では10mのケーソン岸壁を想定した実験となっている。また、シナリオ波の継続時間については実験では5秒であるが実物では約90秒の継続時間になり、正弦波の周波数については実際では約1Hzとなる。

3. 振動台実験の結果と考察

本章では、段階的に加速度を上げたケース、上げないケースについてそれぞれ結果と考察を行う。

(1) 段階的に加速度を上げたケース

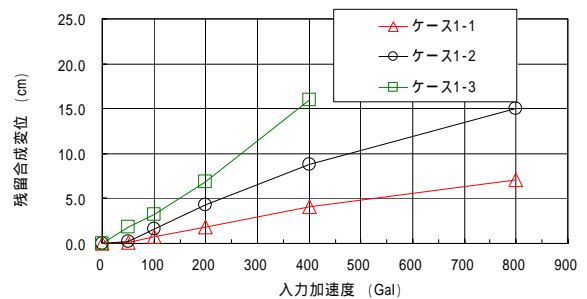
(a) 実験結果

図-6にケーソン天端での残留合成変位と入力加速度の関係を示す。(a)はDr 40%、(b)はDr 80%の場合である。ここで残留合成変位は次式である。

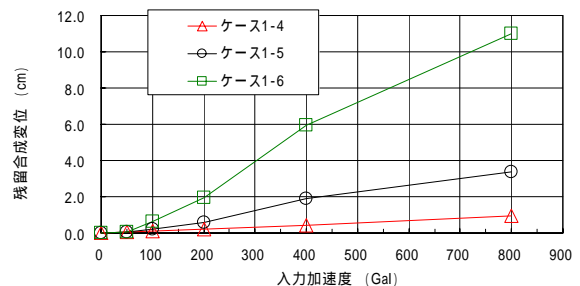
$$\delta_{vh} = \sqrt{\delta_h^2 + \delta_v^2} \quad (1)$$

δ_{vh} は残留合成変位、 δ_h 、 δ_v はそれぞれ模型ケーソン

天端の水平変位、鉛直変位である。ケーソンの加振時の挙動は海側への水平移動と、ゆすりこみ沈下による鉛直移動が発生するが、初期に設置した位置から水平移動、鉛直移動をあわせた上記の残留合成変位でケーソンの挙動を大局的にまず把握することにする。また、図-6で段階的に加速度を上げていった場合の残留合成変位は、ケーソンを初期に設置した時からの累積残留合成変位を示している。

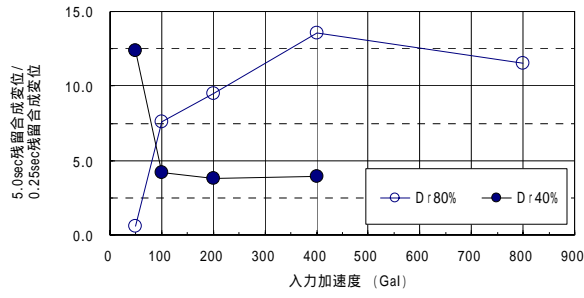


(a) Dr40%のケース

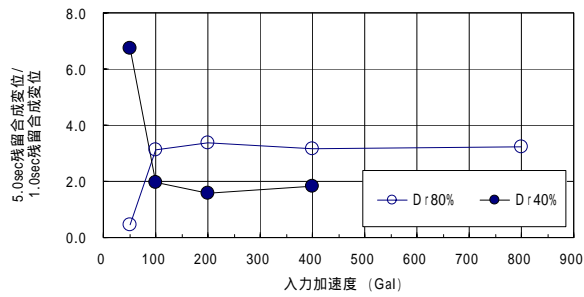


(b) Dr80%のケース

図-6 残留変位と入力加速度の関係

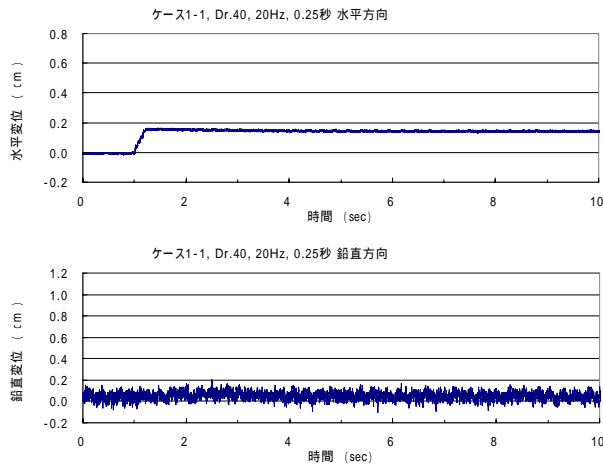


(a) 5.0秒 / 0.25秒の残留合成変位と入力加速度の関係

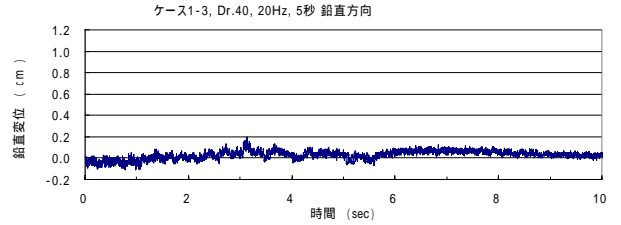
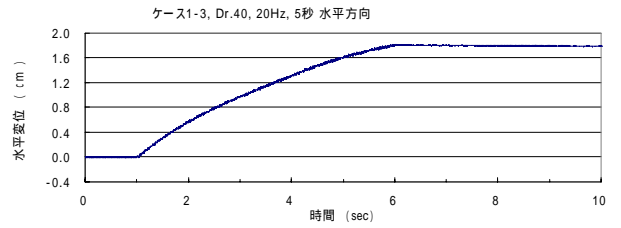


(b) 5.0秒 / 1.0秒の残留合成変位と入力加速度の関係

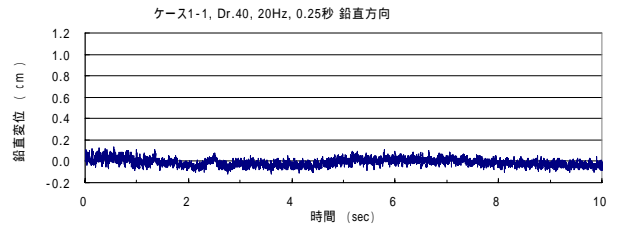
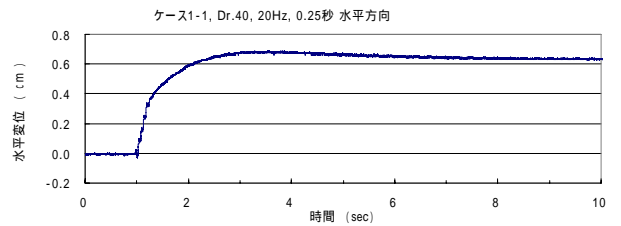
図-7 残留合成変位と入力加速度



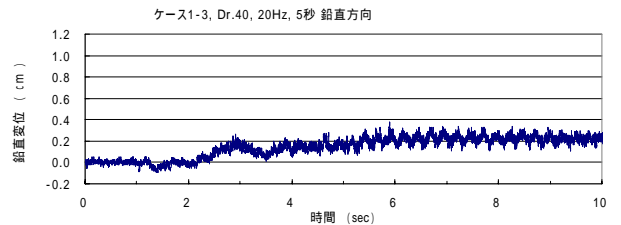
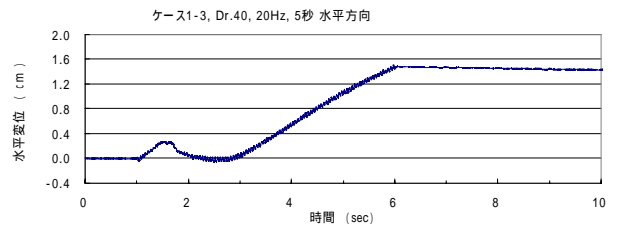
(a) Dr40%のケース (0.25秒、50Gal加振時)



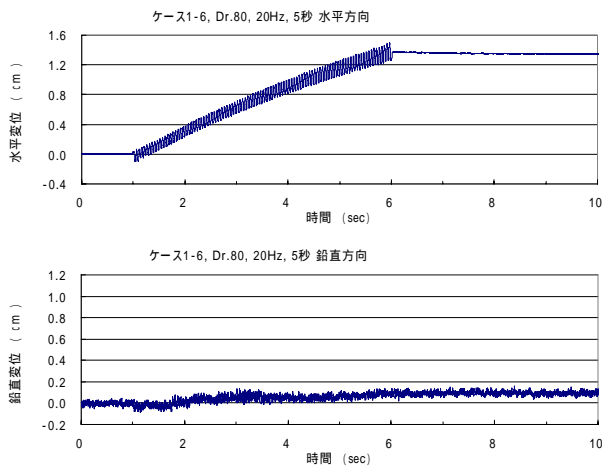
(b) Dr40%のケース(5.0秒、50Gal加振時)



(c) Dr40%のケース (0.25秒、100Gal加振時)



(d) Dr40%のケース (5.0秒、100Gal加振時)



(e) Dr 80%のケース(5.0秒、200 Gal加振時)

図-8 ケーソン水平変位と入力加速度の関係

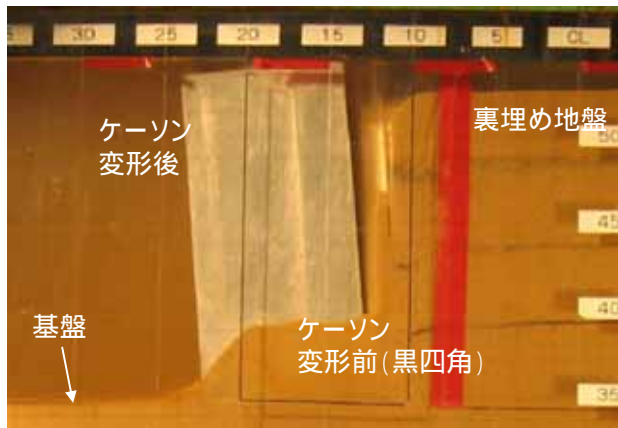
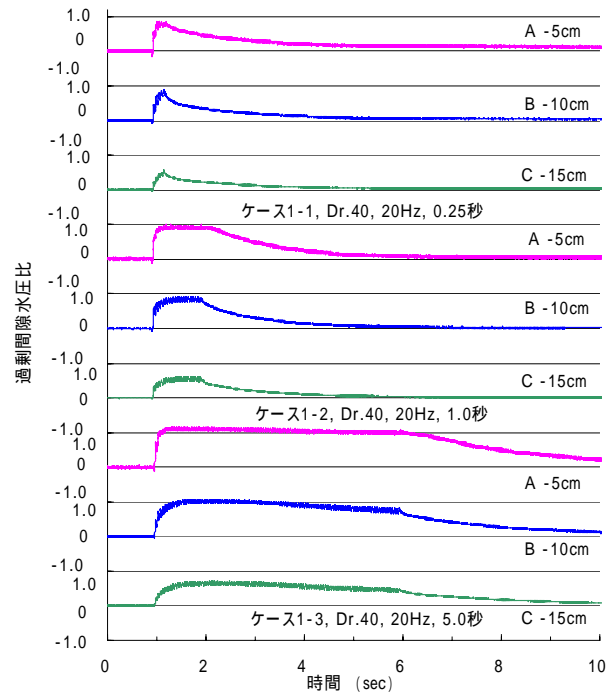


図-9 加振後のケーソンの様子(ケース1-3)

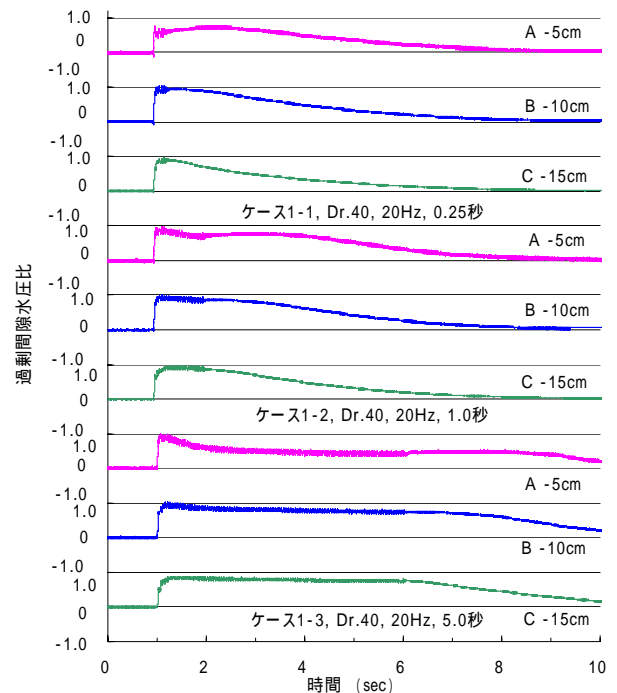
図-7(a) に縦軸を5.0秒の時の残留合成変位を0.25秒の残留合成変位で、(b)に1.0秒の時の残留合成変位で割ったものを示す。図-8は(a)にケース1-1の入力加速度50 Gal、(b)にケース1-3の50 Gal、(c)にケース1-1の100 Gal、(d)にケース1-3の100 Gal、(e)にケース1-6の200 Galの時の水平変位と鉛直変位を示す。すべて、1秒後から加振が始まっている。(以下のグラフも同様) 図-9はケーソンの変位状態の一例としてケース1-3 (Dr 40%、5秒加振、正弦波)のケーソン部分の写真を示す。図-9の写真から加振後のケーソンは傾いている。ケーソンの地震時の挙動では回転運動の影響もあるが、本研究では基盤層は十分締め固めた地盤であり、図-8より水平変位が鉛直変位よりも卓越していることから、回転運動については考慮していない。

図-10にDr 40%の地盤の加振0.25秒、1.0秒および5.0秒の裏埋め中央部の過剰間隙水圧比(u/σ_v)の時刻歴を示す(A, B, Cは図-2に示す)。(a)は50 Gal、(b)は100 Gal加

振時の場合である。図-11は同じくDr 80%の地盤の200Gal加振時のものである。

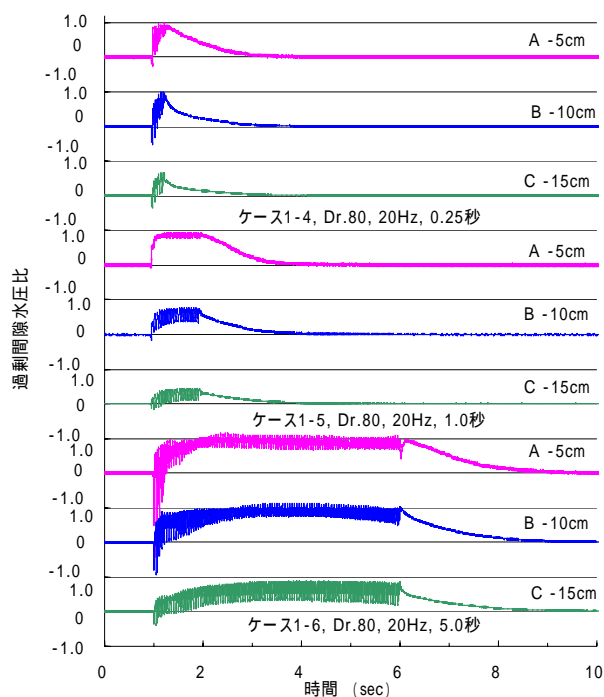


(a) Dr 40% 地盤, 50 Gal加振時



(b) Dr 40% 地盤, 100 Gal加振時

図-10 段階的に加速度を上げたケースの過剰間隙水圧比の時刻歴



Dr 80%地盤, 200 Gal加振時

図-11 段階的に加速度を上げたケースの過剰間隙水圧比の時刻歴

(b) 考察

図-6より、どちらの相対密度も入力加速度が大きくなるほど残留合成変位量が大きくなっている。継続時間の長いものほど大きくケーソンが移動している。

図-7では50 Galで加振したときDr 40%の地盤は残留合成変位の比が(a)では12、(b)では7となり、Dr 80%の地盤より大きくなっている。100 Galで加振したときは、(a)では4、(b)では2となりDr 40%の地盤の比がDr 80%の地盤より小さくなっている。これらの値は継続時間に比例した値とはなっていない。この理由の一つは次のことが考えられる。図-8(a)、(b)でDr 40%の地盤の入力加速度が50 Galの時の水平変位の比較をみると、継続時間が長くなると大きく水平変位が発生していて、加振後に水平変位は止まっている。図-8(c)はDr 40%の地盤に100 Galで0.25秒の加振をした水平変位であるが、水平変位は加振後に1秒程度続き、最終的には倍近く発生している。図-8(d)は、同じく5.0秒の加振時であるが、水平変位が一旦回復して、その後進み加振終了時に変位は止まっている。これは加振時にケーソンが傾きながら動いているためと考えられる。さらに、図-10(a)、(b)の過剰間隙水圧比で0.25秒加振時のB点を見ると、50 Galの時は加振後すぐに消散に向かうが、100 Galの時は1秒程度高い値を保つ。このため、ケーソン下部の基礎地盤の条件や間隙水の移動などによって、加振後に水平変位が発生したと考えら

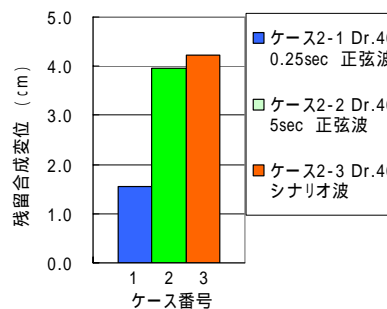
れる。5.0秒加振時は、加振中に過剰間隙水圧比が下がるため、加振後にケーソンの水平変位は発生しない。

さて、Dr80%の地盤は100 Galを超えるとこの比率は一定となっていて、密な地盤は入力加速度が増加しても継続時間の影響が少ない。これは図-8(e)のように加振時に変位の増減を繰り返す、変位量はあまり大きくなっていないためと考えられる。図-11の過剰間隙水圧の時刻歴でも加振後に液状化するが、すみやかに過剰間隙水圧の消散がみられる。なお、図-7(a)、(b)でDr 80%の地盤で50 Galの加振時の比が低下しているが、これは、この入力加速度では液状化せず、5秒の水平変位があまり出なかったことが原因で誤差と考えられる。

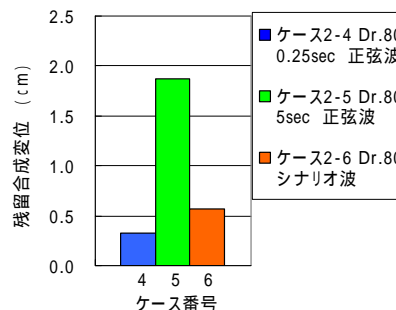
(2) 段階的に加速度を上げないケース

(a) 実験結果

図-12 (a)に Dr 40%、(b)にDr 80%のケーソン模型天端での残留合成変位を示す。図-13(a)、(b)に加振中のケーソン模型の水平変位および鉛直変位の時刻歴を示す。図-14に裏埋め中央部の深さ10cmの位置での過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。(a)はDr 40%、(b)はDr 80%の地盤である。

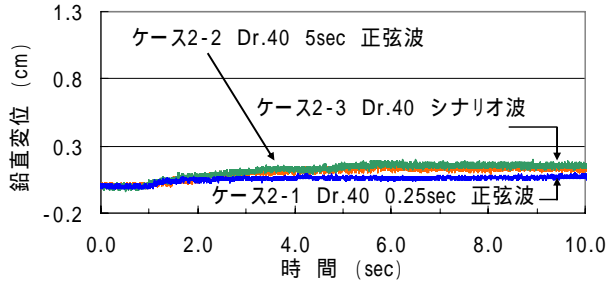
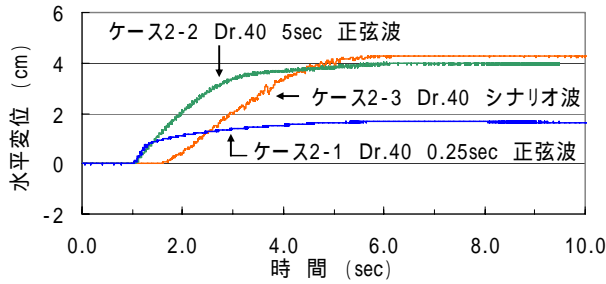


(a) Dr 40% の地盤のケース

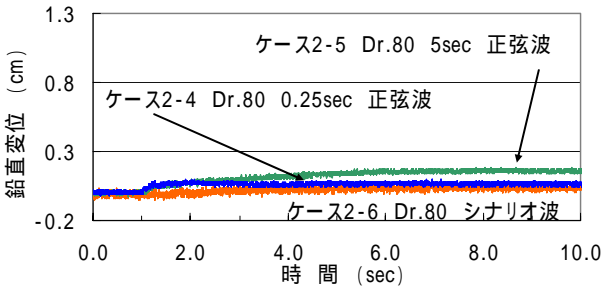
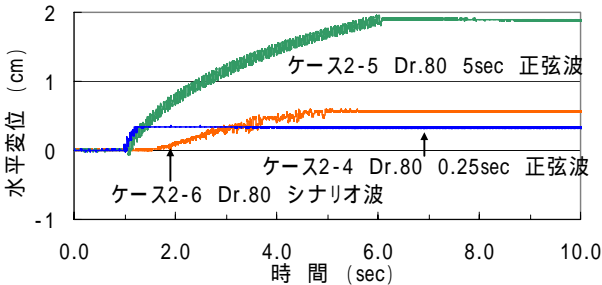


(b) Dr 80% の地盤のケース

図-12 残留合成変位

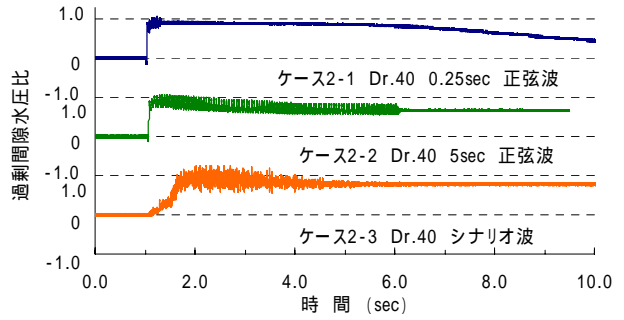


(a) Dr40%の地盤のケース

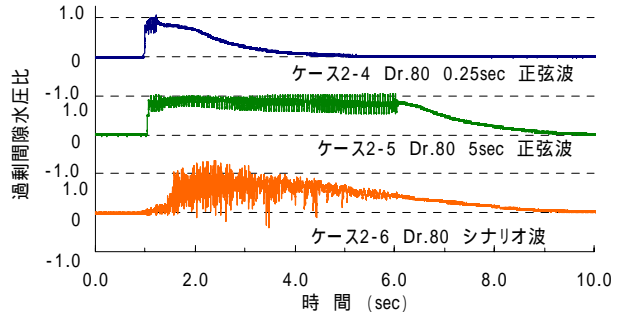


(b) Dr80%の地盤のケース

図-13 段階的に加速度を上げないケースの水平変位の時刻歴



(a) Dr40%の地盤のケース



(b) Dr80%の地盤のケース

図-14 段階的に加速度を上げないケースの過剰間隙水圧比の時刻歴 (図-2, B点)

(b) 考察

図-12より、Dr 40, 80%の地盤とも正弦波の加振によって、継続時間が長くなれば残留合成変位が大きくなる。しかし、継続時間0.25秒と5秒では、Dr 40%の地盤は約2倍、Dr 80%の地盤は約4倍の残留合成変位の増加比率となっている。このような密な地盤の方が大きくなる傾向は図-7(a)の200 Galの時と同様である。図-13(a), (b)からどちらのケースも0.25秒は5.0秒の水平変位の挙動を辿っている。しかし、Dr 40%及びDr 80%の正弦波(ケース2-1及びケース2-4)を比べると、Dr 40%の地盤は加振終了後も水平変位が出ているが、Dr 80%の地盤では出ていない。これは、図-14(a)を見ると0.25秒のものは加振が終了したのち、5秒ほど過剰間隙水圧比が高い状態のままであり、5.0秒加振する場合は、加振後に過剰間隙水圧比の低下がみられる。この過剰間隙水圧の発生に影響があると考えられる。これは加速度を上げていくケースで述べたことと同じである。

一方、シナリオ波と正弦波を比べるとDr 40%の地盤では5秒、Dr 80%の地盤では0.25秒の正弦波と同等の残留合成変位が出ている。このことから、シナリオ波(不規則波)を正弦波(規則波)に換算するときには、密度によって換算する繰り返し回数(継続時間)などを変える必

要があるといえる。シナリオ波は、大きな加速度が出て
いる時には間隙水圧の消散は見られないが、加振から3
秒後に加速度が小さくなると、間隙水圧の消散が始まる。
波の出現の仕方によって間隙水圧の消散は異なっている。

4. まとめ

段階的に加速度を上げていくケースおよび上げていか
ないケースの2つの加速度履歴について継続時間の違い
によるケーソン式岸壁の振動台実験を行い、下記の結論
を得た。

(1) Dr 40%の地盤は、比較的小さい加速度のときに
継続時間の影響が大きく出て、継続時間の長いほどケー
ソンの合成残留変位(水平変位)が大きくなる。加速度
が大きくなると、液状化後も高い過剰間隙水圧比を保ち、
加振後にケーソンの水平変位が発生する。

(2) Dr 80%の地盤は、入力加速度が増加しても継続時
間の影響があまり見られなかった。すなわち、継続時間
に比例したほどケーソンの変位は見られなかった。過剰
間隙水圧比は加振中は上昇するが、すぐに消散に向かう。

(3) シナリオ波のような実際の不規則波を正弦波のよ
うな規則波に換算する場合は、地盤の密度を考慮する必

要がある。なお、シナリオ波の振幅特性についてはさら
に検討が必要である。

ただし、本研究では模型実験での議論をしているが、
実際には透水係数が小さくなっていると考えられる。過
剰間隙水圧の消散過程も異なることも考えられる。

参考文献

- 1) 山崎浩之, 金田一広, 永野賢次: 地震動継続時間の影響に関
するケーソン式岸壁の模型振動台実験, 土木学会第61回
年次学術講演会, 3-292, 2006 .
- 2) 金田一広, 山崎浩之, 永野賢次: 継続時間の違いによる水平
地盤の液状化に関する振動台実験, 第42回地盤工学研究
発表会, 688, pp. 1375-1376, 2007 .
- 3) 永野賢次, 山崎浩之, 金田一広: 継続時間の違いによる岸壁
裏埋め土の液状化に関する振動台実験, 第42回地盤工学
研究発表会, 687, pp. 1373-1374, 2007 .
- 4) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版, 1978.
- 5) Susumu Iai: Similitude for Shaking Table Test on Soil-Structure Model
in 1G Gravitational Field, Report of the Port and Harbor Res. Inst., Vol.
27, No. 3, pp. 3-24, 1998.

(2007.4.6 受付)

SHAKING TABLE TESTS OF CAISSON TYPE QUAYWALL CONSIDERING DIFFERENT CONTINUATION TIMES

Hiroyuki YAMAZAKI, Kazuhiro KANEDA and Kenji NAGANO

There is the feature that an ocean type earthquake has the long continuation time of an earthquake motion. This research conducts the shaking table test of a caisson type quaywall, and the feature of liquefaction of a different continuation time is examined. With the small acceleration with loose sand, the influence of continuation time is great, and after liquefaction, the pore pressure keeps high. In the case of dense sand, influence of continuation time is small, and pore pressure disappears promptly. To convert the acceleration of a scenario wave with one of a rule wave, it is necessary to also take density into consideration.