

ケーソン岸壁を対象とした液状化対策範囲の検討に関する模型振動台試験

SHAKING TABLE TESTS ON AREA OF LIQUEFACTION COUNTERMEASURES FOR CAISSON TYPE QUAY WALLS

山崎浩之¹・永野賢次²

Hiroyuki YAMAZAKI and Kenji NAGANO

¹正会員 工修 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²非会員 同上

Soil improvement area as liquefaction countermeasures is determined considering the strength reduction of a portion adjacent to the unimproved area. The strength reduction is caused by the transmission of the excess pore water pressure from the unimproved area to the portion. Therefore, the improvement area is designed widely enough to keep the stability of structures ignoring the strength of the strength reduction area. However, the consideration of the strength reduction may not be necessary if the soil contains many fines, because the permeability is low and the excess pore pressure transmission may be small. In this paper the effect of the permeability of the improved area on its strength reduction is investigated by shaking table tests. The tests are conducted on a caisson type quay wall and the behavior of the backfill and the caisson are investigated. In the tests cellulose solution is used to control the permeability of soil. The test results show the caisson displacement is smaller in the case of low permeable backfill without consideration of the strength reduction area than in the case of high permeable backfill with consideration of the strength reduction area. However, the pore pressure behavior does not clearly show the difference.

Key Words : Liquefaction, Countermeasures, Caisson type quay wall, Fines, Permeability Improved area

1. はじめに

岸壁背後地盤を対象とした液状化対策範囲の設定法が提案されており¹⁾, これは, 細粒分を多く含まない, いわゆるきれいな砂を対象に振動台試験などに基づき提案されたものである。しかしながら, 近年, 細粒分を多く含む砂地盤に対しても液状化対策を講じるケースが増えている。このような細粒分を多く含む砂地盤に対して同設定法が適用される場合には次のような課題があると思われる。

同設定法においては, 液状化する地盤(無対策地盤)から対策地盤に対して伝播する過剰間隙水圧の影響(いわゆる2次液状化)を考慮するための余裕域が図-1の30°の範囲で示すように設けられ, ケーソンの安定性が検討される。また, 上層部の非液状化層も過剰間隙水圧の伝播により液状化すると考えている。細粒分が多い場合には透水係数が小さいので, きれいな砂のように震動中には過剰間隙水圧の伝播は起こりにくいと考えられ, 対策範囲の設定において余裕域の考慮は必要でない可能性がある。

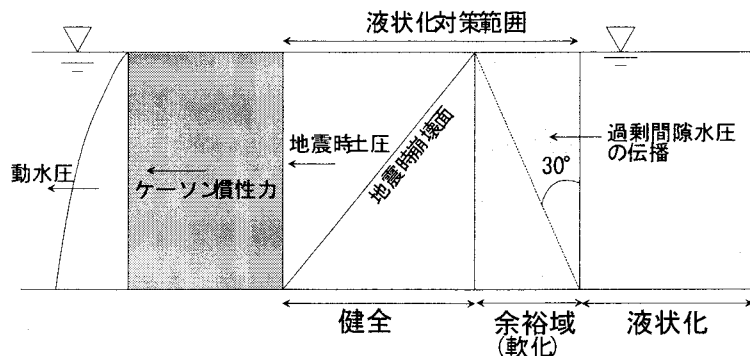


図-1 現行の液状化対策範囲の設定の模式図

本報告は、ケーソン岸壁を対象とした模型振動台試験を行い、このような対策範囲に関する課題について基礎的検討を行うことを目的としている。

2. 振動台試験概要

振動台試験は細粒分を多く含む地盤と細粒分を含まないきれいな砂地盤の2種類について行い、両者の比較を目的に行った。ただし、細粒分を多く含む地盤の作成は困難であり、また細粒分の混入により粒度特性が異なり液状化強度などの力学特性自体が異なったものとなる。そこで、ここでは2次液状化の大きな要因となる透水性に着目することとして、セルロース水溶液を間隙水に用いて細粒分を多く含む地盤とした。

以下に実験の概要を示す。

(1) 振動箱・模型ケーソン・模型地盤・試験ケース

a) 振動箱

図-2に示すように余裕域に関する振動台試験を行った。振動箱は長さ85cm、高さ60cm、奥行き36cmあり、その中に模型ケーソン、模型地盤を各々設置作成した。

b) 模型ケーソン

模型ケーソンは、計測用1個とダミー函2個の計3個用意して法線方向に並べ、中央に計測用を置いて計測を行った。両端のダミーは振動箱側面との摩擦の影響を除くためのものである。模型ケーソンの単位体積重量は $\gamma_{ct}=19.8\text{kN/m}^3$ である。

c) 模型地盤

模型地盤は碎石を用いた基盤層を層厚15cmで作成し、その上に相馬6号砂を用いて十分締固めた基礎地盤を設けた。基礎地盤の上に、前述したケーソンを設置し、その背後に基礎地盤と同じ相馬6号砂を用いて裏埋めを作成した。相馬6号砂の物理特性および水道水、セルロース水溶液を用いた場合の相馬6号砂の透水係数を表-1に示す。

表-1 相馬6号砂の物性値

試料名:相馬6号砂	
土粒子密度: $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.647
最小間隙比: e_{\min}	0.664
最大間隙比: e_{\max}	1.121
均等係数: U_c	2.31
中央粒径: $d_{50}(\text{cm})$	0.06
透水係数:水(cm/s)	0.9×10^{-2}
透水係数:セルロース水溶液(cm/s)	0.6×10^{-4}

裏埋めは、A地盤、B地盤、C地盤からなっている。A地盤は、図-1で示した地震時崩壊面から定まる液状化対策範囲で、設計で想定された地震時土圧に対してケーソンが抵抗するために確保されなければならない範囲である。B地盤は余裕域でここでの検討

の対象となり、実験ではB地盤を改良した場合と改良しない場合について比較している。余裕域は現行設計法では、図-1で示したように 30° の範囲で定まる。C地盤は無改良域に相当するものである。A地盤、B地盤の地盤改良は締固めで行っている。無改良域の相対密度は $Dr \approx 15\%$ ($\gamma' = 7.87\text{kN/m}^2$)、改良域は $Dr \approx 80\%$ ($\gamma' = 9.19\text{kN/m}^2$)である。

地下水位は、条件を簡単にするためにケーソン前面の水位をケーソン天端と同じ位置として、地下水位が地表面と一致するようにした。

地盤の透水係数については、表-1に示したように、水を用いたものは $k=0.9 \times 10^{-2}\text{cm/s}$ 、セルロース水溶液を用いたものは $k=0.6 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ と両者で2オーダーの違いがある。

d) 試験ケース

模型実験はケーソン背後の裏埋めを、余裕域を改良した場合と改良しない場合について、間隙を水道水とした場合とセルロース水溶液とした場合の計4ケース行った。

表-2 試験ケース

ケース番号	地盤条件(相対密度%)			間隙
	A地盤	B地盤:余裕域	C地盤	
ケース35	改良(80)	改良(80)	未改良(15)	水
ケース36	改良(80)	未改良(15)	未改良(15)	水
ケース40	改良(80)	改良(80)	未改良(15)	セルロース水溶液
ケース45	改良(80)	未改良(15)	未改良(15)	セルロース水溶液

(2) 加振と計測

加振は水平一方向に正弦波で加速度振幅を50, 100, 150Galと50Galきざみで上げていく段階载荷で行った。各载荷段階での加振振動数は20Hz、回数は20回で、加振時間は1秒である。

図-2のように加速度計と間隙水圧計を地盤に設置し、加振中の加速度と間隙水圧を計測している。間隙水圧計はA~Cの各地盤内の左右に設置している。模型ケーソンにはレーザー変位計を取り付け、ケーソンの鉛直方向と水平方向の変位を計測している。

(3) 相似則

井合の提案する相似則²⁾の一部は表-3に示すとおりで、これを利用すると以下のとおりとなる。

表-3 相似則

項目	相似比:実物/模型
長さ	λ
密度	1
時間	$\lambda^{0.75}$
変位	$\lambda^{1.5}$
ひずみ	$\lambda^{0.5}$
応力	λ
加速度	1
透水係数	$\lambda^{0.75}$

模型実験では加振周期が $T=0.05\text{s}$ (振動数20Hz)で、実際の地震では周期が $T=1\text{s}$ 程度の周期の揺れが卓越していることが多いので実スケールでは周期 $T=1\text{s}$ と考えると、本模型実験の時間に関する相似比は $\lambda^{0.75}=20$ となる。これから $\lambda \approx 54$ が得られる。したがって、模型ケーソンの前面水深が20cmであるの

で、実物スケールに直すと前面水深が約11mの岸壁となる。また、表-3の相似則から、実験での変位を実物スケールに変換するには約400倍すれば良いことになり、模型実験での1cmの変位は実物スケールでは4mの変位に相当する。

透水係数については、水を用いた模型実験の透水係数 $k=1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ は実物スケールで $k=2.0 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 、セルロース水溶液を用いた模型実験の透水係数 $k=5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ は実物スケールで $k=1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ となる。この透水係数に対応する土をCreagerによる土の代表粒径および土質分類で表すと、まず模型実験のスケールでは水の場合 $d_{20} \approx 0.2 \text{mm}$ で微粒砂、セルロース水溶液の場合 $d_{20} \approx 0.02 \text{mm}$ で粗砂シルトになる。実物スケールでは水の場合 $d_{20} \approx 0.8 \text{mm}$ で粗粒砂、セルロース水溶液の場合 $d_{20} \approx 0.08 \text{mm}$ で極微粒砂になる。したがって、水圧の伝播に関して今回の実験は模型スケールの挙動では細粒分の多い地盤に対応するが、実物スケールに換算する場合には、細粒分を多く含む地盤とは必ずしもいえない。このようなことから、ここでの実験は水圧伝播に関して、小さな実物、あ

るいは透水係数が2オーダー違う場合の液状化対策範囲に関する比較実験と考えるのには問題ないと思われるが、実物換算の場合には注意が必要である。

(4) 破壊震度

図-2で示される断面について、裏埋めのせん断抵抗角を通常の設計で用いる $\phi=30^\circ$ と設定すると、震度 $k_h=0.1$ (見かけの震度が0.2)で転倒安全率が $F_s=1.1$ を下回る事となる。この場合、対応する地震時崩壊角は 45° で、崩壊面が地表面に到達する位置は、ケーソン背後20cmの位置で図-1のA地盤のやや内側となっている。転倒安全率が $F_s=1.0$ を下回るのは震度 $k_h=0.125$ (見かけの震度が0.25)で、この場合崩壊角は 41° となり、崩壊面が地表面に到達する位置はケーソン背後23cmの位置で図-1のA地盤とB地盤の境界位置なる。したがって、震度0.1に対応する100Gal程度の加速度が作用した場合に模型岸壁は破壊することになる。なお、滑動安全率は $F_s=1.5$ 以上である。

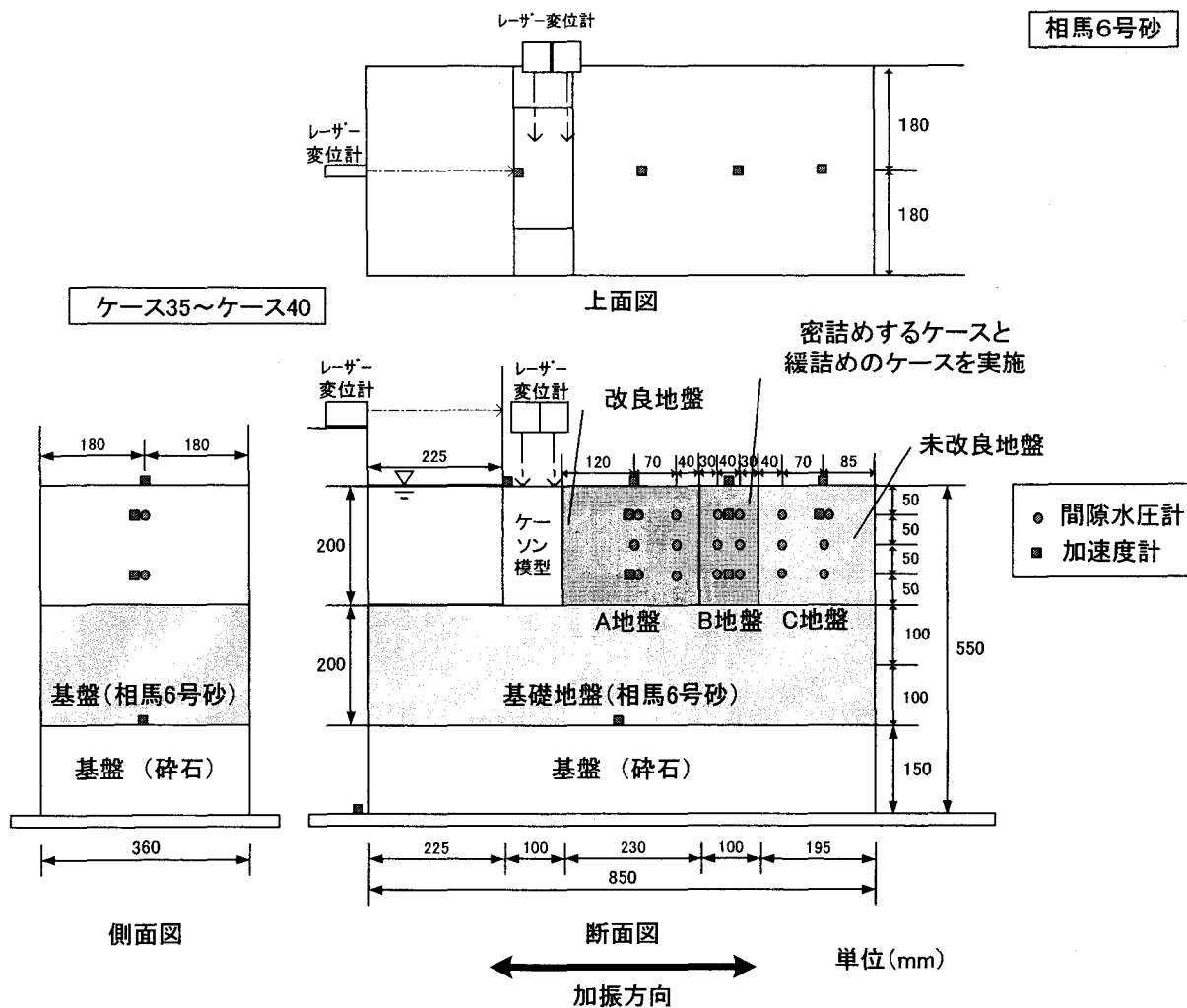


図-2 模型振動台試験の概要図

3. 振動台試験結果

(1) 加速度の時刻歴

図-3に、入力加速度が100Galのときの加振テーブルおよびA地盤地表面での加速度時刻歴を示す（入力加速度は公称値で、振動台の台加速度とほぼ等しい値である）。図-3から加振テーブルではほぼ100Galの振幅で規則的な加振がなされているが、A地盤地表面では300Galを超える加速度が記録され、波形が乱れていることがわかる。このことから、地盤内では入力加速度が増幅されていることがわかる。

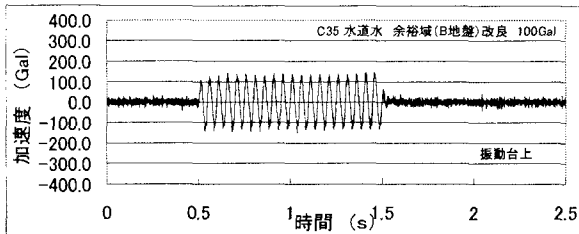


図-3(a) 加振テーブル上の加速度(入力100Gal)

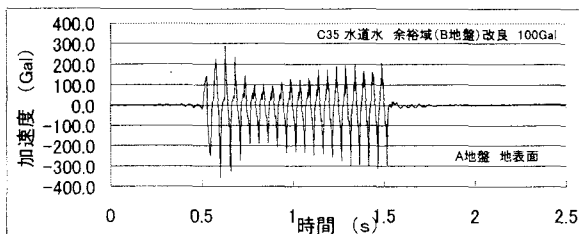


図-3(b) A地盤地表面の加速度(入力100Gal)

(2) 加振加速度と変位の関係

図-4に入力加速度とケーソン天端の合成変位の関係、水平変位と鉛直変位の関係を示す。プロットの種類は、ケース35●、ケース36▲、ケース40○、ケース45△である。合成変位は下式で定義されるものである。

$$\delta_{vh} = \sqrt{\delta_h^2 + \delta_v^2}$$

ここに、 δ_{vh} 、 δ_h 、 δ_v はケーソン天端の合成変位、水平変位、鉛直変位である。各変位は各加振段階において発生した残留変位である。

図-4(a)から、入力加速度が50Galではいずれのケースも大きな変位は発生していない。入力加速度が100Galで0.05~0.25cmの変位が発生している。これを実物スケールに換算すると20~100cmとなり、かなり大きな変位に相当する。変位は、ケース36、35、45、40の順番で小さくなっており、セルローズを用いた方が、水道水よりも小さくなっており、透水係数の影響が見られる。特に、水道水を用いた地盤で余裕域(B地盤)を改良したケースよりもセルローズ溶液地盤で余裕域未改良の方が小さくなっており、透水性が低い場合に余裕域を設ける必要がない可能性を示している。

図-4(b)から、鉛直変位よりも水平変位が卓越しており、前章の破壊震度の検討では転倒で破壊となっていたが実験では滑動モードが支配的である。

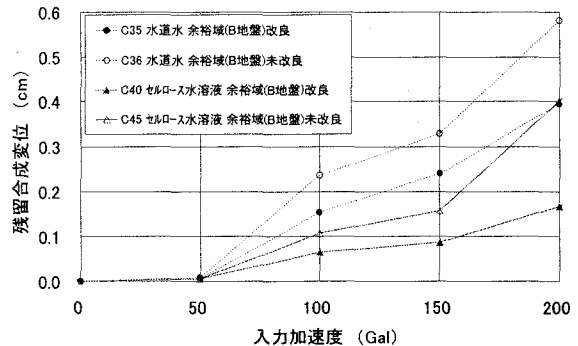


図-4(a) 入力加速度と残留合成変位の関係

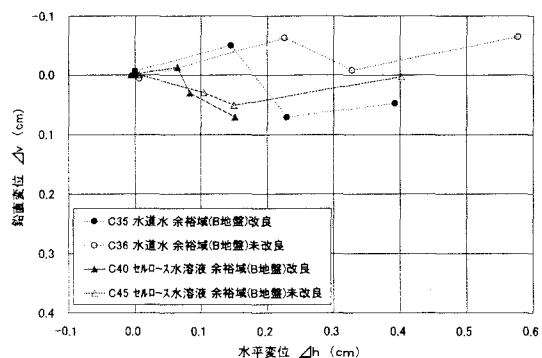


図-4(b) 水平変位と鉛直変位の関係

(3) 過剰間隙水圧

図-5に入力加速度が50Galと100GalのC地盤(未改良地盤)および入力加速度が100GalのA地盤(改良地盤)での深さ10cmにおける過剰間隙水圧の時刻歴を示す。また、図-5には深さ10cmにおける初期有効上載圧(未改良地盤 $\sigma_{v0}'=0.79\text{kN/m}^2$ 、改良地盤 $\sigma_{v0}'=0.92\text{kN/m}^2$)を直線で示す。未改良地盤の場合、入力加速度が50Galでは間隙水圧は初期有効上載圧に至っていないが、100Galでは初期有効上載圧と等しくなっている。したがって、100Gal加振のときに未改良地盤は液状化したといえる。改良地盤のA地盤の場合には100Gal加振でも過剰間隙水圧は有効上載圧に等しくはなっておらず、液状化には至っていない。また、正のダイレイタンスに起因した負圧の発生が見られる。

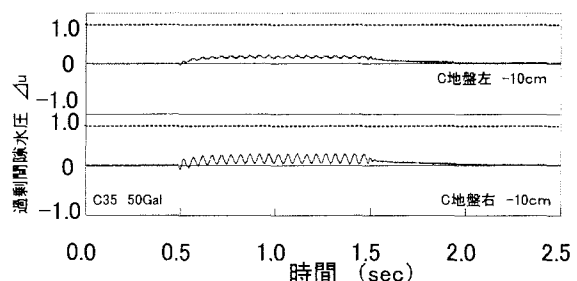


図-5(a) 未改良地盤の間隙水圧(50Gal)

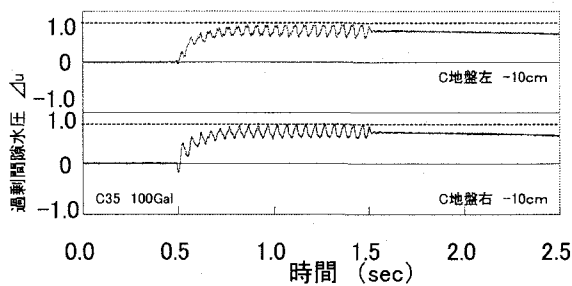


図-5(b) 未改良地盤の間隙水圧(100Gal)

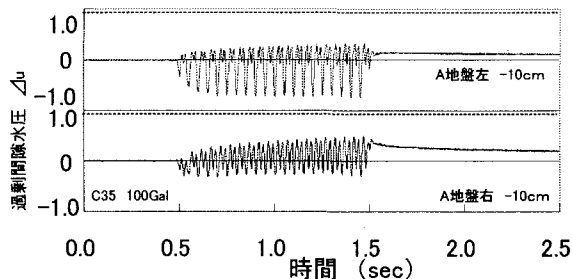


図-5(c) 改良地盤の間隙水圧(100Gal)

4. 振動台試験の考察

前章で示したように、入力加速度50Galでは未改良地盤で液状化は発生せず、ケーソンにもほとんど変位が計測されなかった。入力加速度100Galにおいて、未改良地盤で液状化が観察され、ケーソンにも変位が生じた。また、水道水を用いた場合とセルローズ水溶液を用いた場合の変位の発生量に違いがある。そこで、入力加速度100Galについて、対策範囲の効果に関する地盤の透水性の影響を考察する。

(1) 過剰間隙水圧の分布

図-6に入力加速度100Galの、深さ10cmにおける過剰間隙水圧の水平分布を示す。図-6(a)は水道水を用いた場合で余裕域改良(B地盤改良)、図-6(b)は水道水を用いた場合で余裕域未改良、図-6(c)はセルローズ水溶液を用いた場合で余裕域改良、図-6(d)はセルローズ水溶液を用いた場合で余裕域未改良、図-6の各図-には加振直前、加振開始後0.1秒、0.5秒、1.0秒(加振停止時)、および加振停止後1秒での水圧が示されている。

図-6から、余裕域を改良した場合の方が、水道水、セルローズ溶液のいずれにおいても改良地盤左側(A地盤)における過剰間隙水圧は小さくなっていることがわかる。また、間隙が水道水の場合には加振終了後の間隙水圧の消散が速く、セルローズ水溶液の場合には消散が遅いことがわかる。したがって、水圧の伝播はセルローズ水溶液の方が起きにくい。

加振中については、セルローズ溶液の方の圧力が上がりにくい傾向は認められるが、やや不明瞭である。また、透水性の違いによって、余裕域改良効果の違いが間隙水圧の分布形状に明確に表れているとはいえない。加振中の2次液状化については、余裕

域を設けた場合にはA地盤で発生していないのは明らかであるが、余裕域を設けない場合についてはセルローズおよび水道水のいずれのケースも水圧がかなり上がっており、2次液状化に近い状態である。

次に、ケーソン変位に最も影響を与えると考えられるA地盤の間隙水圧の時刻歴を次節で考察する。

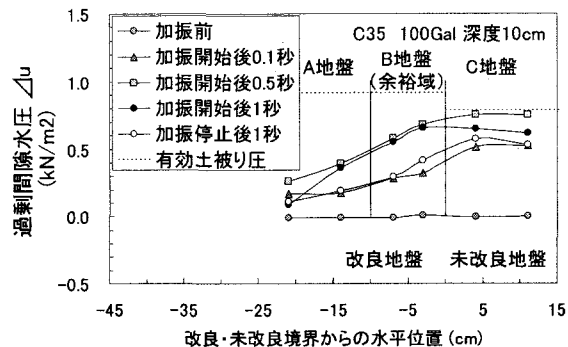


図-6(a) 間隙水圧(余裕域改良:水)

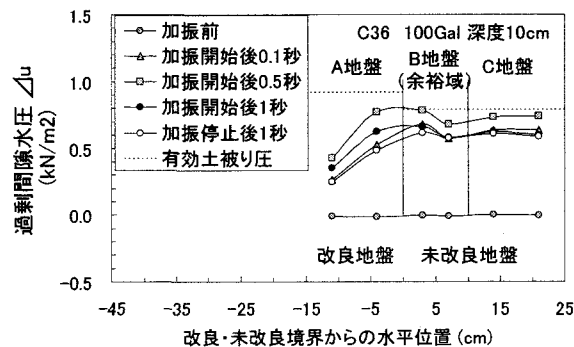


図-6(b) 間隙水圧分(余裕域未改良:水)

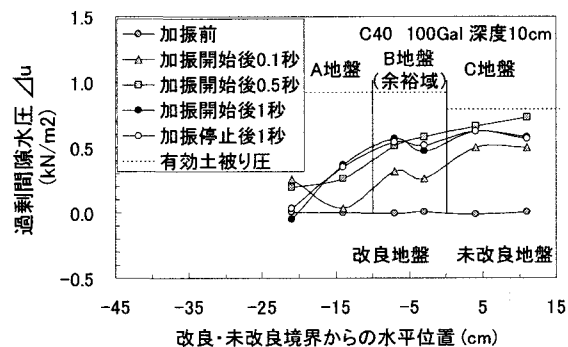


図-6(c) 間隙水圧(余裕域改良:セルローズ)

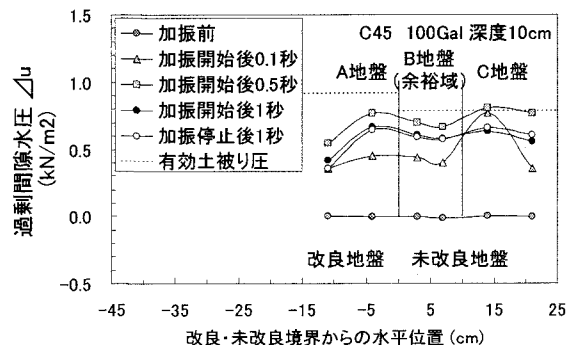


図-6(d) 間隙水圧(余裕域未改良:セルローズ)

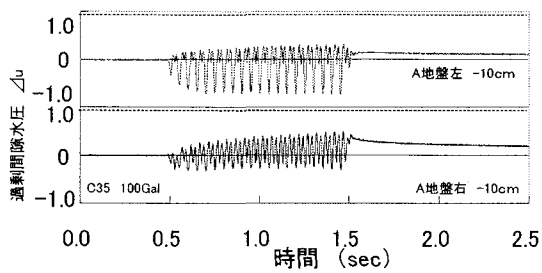


図-7(a) 間隙水圧時刻歴(余裕域改良:水)

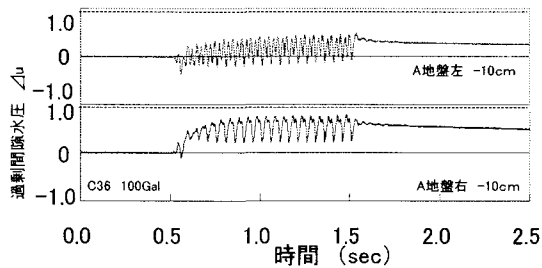


図-7(b) 間隙水圧時刻歴(余裕域未改良:水)

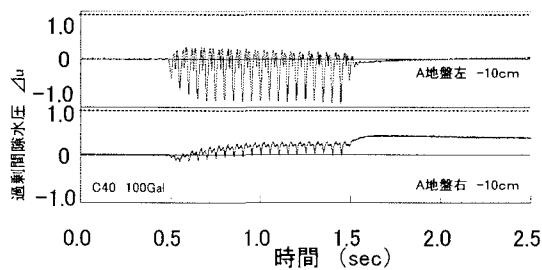


図-7(c) 間隙水圧時刻歴(余裕域改良:セルロース)

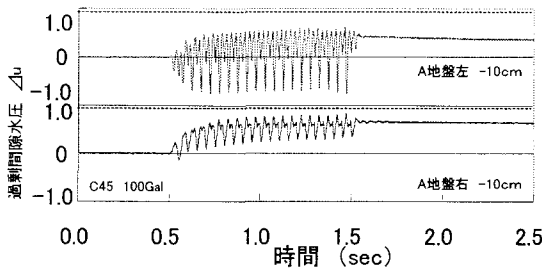


図-7(d) 間隙水圧時刻歴(余裕域未改良:セルロース)

(2) 過剰間隙水圧の時刻歴

図-7に入力加速度100Galの場合の、A地盤の深さ10cmにおける右側、左側の間隙水圧の時刻歴を示す。図-7(a)は水道水を用いた場合で余裕域(B地盤)改良、図-7(b)は水道水を用いた場合で余裕域未改良、図-7(c)はセルロース水溶液を用いた場合で余裕域改良、図-7(d)はセルロース水溶液を用いた場合で余裕域未改良である。

図-7(c)と図-7(a)を比較すると、特にA地盤右側の時刻歴に違いがあり、図-7(c)の方が間隙水圧の発生量が小さい。このことは、図-4(a)で余裕域が改良の場合においてセルロース溶液の方が小さなケーソン変位であったことに対応する。

図-7(b)と図-7(d)を比較すると、A地盤右側では時刻歴に大きな違いが見られない。しかし、A地盤左側では図-7(d)において負圧が発生しているが、

図-7(b)では発生していない。負圧は外力に対する抵抗に寄与し、図-4(a)で余裕域未改良の場合にセルロースの方が小さな変位であったことに対応する。

図-7(a)と図-7(d)を比較すると大きな違いは見られず、過剰間隙水圧の発生量は図-7(d)の方が大きくなっている。このことは、図-4(a)において余裕域改良の水道水地盤よりも、余裕域未改良のセルロース溶液地盤の方が小さなケーソン変位であったことを説明できない。したがって、間隙水圧挙動だけから変位の違いをすべて説明することはできない。

(3) 地盤の透水性の影響および余裕域

加振中の改良地盤における間隙水圧の時刻歴については、水道水よりもセルロース溶液を用いた方が間隙水圧の発生量が小さく、また負圧が発生しやすい傾向にあった。これらを透水性と関連付けて説明すると、セルロース溶液を用いた方が小さな透水係数であるために非排水条件が守られやすかったからであると説明できる。すなわち、周囲から過剰間隙水圧が伝播しにくく、ダイレイタンスーに起因した負圧も発生しやすかったということになる。このようなことから、透水性の低いセルロース溶液を用いた方が小さなケーソン変位になったと説明できる。

余裕域改良の効果と透水性に関しては、透水性の低いセルロース溶液地盤では余裕域を改良しなくても、水道水地盤で余裕域改良した地盤より小さなケーソン変位となった。この比較から、透水性の低い場合には余裕域を改良しなくても良いということになる。しかし、間隙水圧の挙動からは(2)節で述べたような矛盾が見られ、余裕域改良の必要性について水圧伝播の観点からは明確に説明できない。

5. おわりに

ケーソン岸壁裏埋めの液状化対策として締固めを行う場合、対策範囲の設定について細粒分を多く含む地盤と含まない地盤で透水性の違いから余裕域改良の必要性の違いがあると考え、振動台試験で違いを調べた。その結果、透水性の違いが改良後の耐震性に反映されることがわかった。また、透水性が低い地盤では余裕域が必要ないという実験結果であったが、その明確な理由および定量的評価を得ることができなかった。今後は、数値解析なども利用してこの点を明確にし、余裕域と透水性、細粒分含有率の関係について定量的な結論を出す必要がある。そのために、排水を考慮した液状化解析のできる2次元FEMを開発し、実験結果の解析を行う予定である。

参考文献

- 1) 井合進, 小泉勝彦, 倉田栄一: 液状化対策としての地盤の締固め範囲に関する基礎的検討, 港湾技研資料, No.590, pp.1~66, 1987.
- 2) 井合進: 1g場での地盤-構造物-流体系の模型実験の相似則, 港研報告, 第27巻, 第3号, pp.3~24, 1988.