

岸壁背後地盤の液状化対策による 地震時変形防止について

兵頭武志¹・秋吉卓²・淵田邦彦³・松本英敏⁴

¹正会員 博士(工学) 若築建設株式会社 土木本部 技術研究所 (〒153-0064 目黒区下目黒2丁目23-18)

²正会員 工博 熊本大学教授 工学部 環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1)

³正会員 博士(工学) 八代工業高等専門学校助教授 土木建築工学科 (〒866-0074 八代市平山新町2627)

⁴正会員 熊本大学技官 工学部 環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1)

岸壁の地震時変形の要因の一つに背後地盤の液状化に伴う土圧の増加がある。本研究では、構造形式として一般的な矢板式および重力式ケーソン岸壁に対し、背後地盤の液状化対策として締固め工法およびグラベルドレーン工法を施工した場合の岸壁の変形防止について、振動砂槽と有効応力解析法を用いて調べた。その結果、背後を締め固めた重力式ケーソン岸壁では、ケーソンの水平変位はケーソンに作用する土圧増加と過剰間隙水圧に良く対応しており、土圧や水圧の増加が大きいほどケーソンの変位が大きくなることが分かった。矢板式岸壁では、入力動が大きい場合、ドレーンの即効性は期待できないが、時間の経過とともに徐々に水圧消散効果が現れ、結果として矢板の変形防止に有効であることが確認された。

Key Words : *quaywall, liquefaction, countermeasure, shaking table test, effective stress analysis*

1. はじめに

重力式ケーソン岸壁の地震時変形に影響を及ぼす主な要因には、ケーソン本体の慣性力、背後地盤の土圧増加、ケーソン直下地盤の軟化の3点があげられる。矢板式岸壁の場合は、重力式ケーソン岸壁に比べて本体の慣性力が小さいため、背後地盤の土圧増加、矢板支持地盤の軟化の2点が要因として考えられる。本研究では、岸壁背後地盤の液状化防止策として締固め工法とグラベルドレーン工法を施工した場合の岸壁変形防止について、振動砂槽実験と有効応力法による液状化解析を実施し、液状化対策工法による岸壁変形防止効果について検討した。その結果を以下に報告する。

2. 振動砂槽実験概要

本研究で行った重力場の振動砂槽実験では、構造形式として一般的な重力式ケーソン岸壁(以下、重力式と略記)と矢板式岸壁(以下、矢板式と略記)を対象として、モデル化した。背後地盤の液状化対策としては、重力式では締固めを適用し、矢板式ではグラベルドレーンを採用して模型地盤を作成した。重力式および矢板式の実験模型の概要をそれぞれ図-1, 2に示す。

試料砂には豊浦砂を用い、ゆる詰め地盤を水中落下法で作成した。出来上がりの相対密度は約50%である。重力式における締固め地盤は、相対密度が80%程度にまで木製のタンパーで締固めた。矢板式の実験のグラベルドレーン材には7号砕石を用い、ナイロンメッシュで砕石内の目詰まりを防止して、杭径30mm、杭長250mm、砂槽奥行き方向に80mm間隔で1列あたり5本設置した。なお、グラベルドレーン杭下端は支持層に根入れせず、自由端とした。

重力場の相似則¹⁾を適用し、長さの比を1/100(模型/実物)に設定して、間隙水にメチルセルローズ水溶液を用いて透水係数を調整し、模型地盤を作成した。

重力式の実験では、図-1(a)に示すように、砂槽奥行き方向に3等分しており、背後地盤の土圧が直接ケーソン本体に作用するPattern-A、ケーソンの背後40mmに設けた土留め固定壁に作用するようにしたPattern-Bを設け、ほぼ同じ改良条件で、2種類の実験が同時に行えるようにした。

センサーは、図-1, 2に示すように、重力式の実験では、加速度計(ac)7カ所、土圧計(sp)2カ所、間隙水圧計(wp)2カ所、矢板式ではそれぞれ7カ所、4カ所、3カ所と矢板天端の水平変位を計測するために変位計を1カ所設置し、さらに砂槽側壁内側にうどんを取り

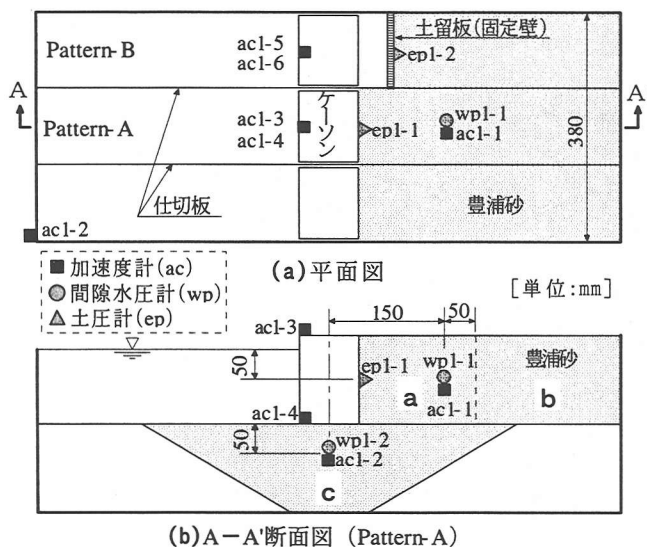


図-1 実験模型概要 (重力式)

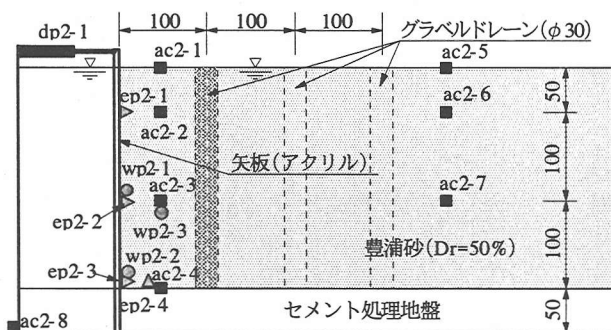


図-2 実験模型概要 (矢板式)

付けて、背後地盤の水平変位を観察した。

重力式は、振動数50Hzの正弦波を最大加速度0.1、0.2Gに調整して2ステージ加振し、加振時間は6秒とした。なお、ステージ間は約20分間放置して、過剰間隙水圧の残留がないようにした。矢板式では振動数30Hz、0.13Gの正弦波を8秒間加振した。

表-1に示すように、重力式は締固め箇所を変化させた4ケース、矢板式はグラベルドレーンの施工箇所を変化させた6ケース行った。簡単のため、以降において、重力式の場合、例えばCase1-1のPattern-AはCase1-1Aというように略記する。また、結果については岸壁の前面側(図-1,2の左側)を正とし、計測値を実量に換算して表すことにする。

3. 有効応力解析

振動台実験のシミュレーションにはFLIP²⁾を用いた。土の動的特性パラメータは文献³⁾を参考にし、液状化特性パラメータは事前に要素シミュレーションを行い、液状化抵抗曲線にフィッティングさせて求めた。矢板式の実験におけるグラベルドレーンの排水挙動や杭間

表-1 実験ケース

(a)重力式		(b)矢板式	
	締固め箇所		GD打設箇所(矢板からの距離[mm])
Case1-1	無改良	Case2-1	無改良
Case1-2	a	Case2-2	1
Case1-3	a,b	Case2-3	1
Case1-4	c	Case2-4	2
※締固め箇所a, b, cは図-1(b)に表示		Case2-5	2
		Case2-6	2

の砂のすり抜け、水圧の側方伝達については解析上考慮できないので、モデル化にあたってグラベルドレーンは非液状化層とし、平面ひずみ条件で計算した。グラベルドレーンの初期せん断剛性 G_0 は、杭径と杭間隔の関係から求められる置換率 A_s を用いて、次式により算定した。

$$G_0 = A_s \cdot G_{0s} + (1 - A_s) G_{0g} \quad (1)$$

ここに、 G_{0s} ：砂の初期せん断剛性、 G_{0g} ：碎石の初期せん断剛性、である。

4. 実験結果と解析結果

(1)重力式ケーソン岸壁

図-3は、Pattern-Aで計測された各ケースの最大応答値(ケーソン水平変位、過剰間隙水圧比(wp1-1)、土圧(ep1-1))をまとめたもので、Case1-1A(無改良)での最大応答値で除して表示している。したがって、同図は締固めによる応答値の低減率を示すことになる。同図より、ケーソンの水平変位は、いずれのステージにおいてもCase1-3A→1-2A→1-4A→1-1Aの順に小さく、ケーソン直下よりも背後地盤の締固めがケーソンの変位防止に効果的であることが分かる。

過剰間隙水圧比は、Case1-4A(直下締固め、0.2G入力)でCase1-1A(無改良、0.2G入力)を上回っているが、ケーソン変位の場合とほぼ同じ傾向を示している。図中に示す土圧は、加振前の初期値からの増分をCase1-1A(無改良)の応答値で除した値であるが、土圧に関しても、ケーソン水平変位との相関は、ばらつきは見られるものの、良いと言える。ばらつきの原因はケーソンの前面側への断続的な変位によるものであり、負圧が働くことによって水圧や土圧が低減したと考えられる。その点について明確にするため、Pattern-Bの固定壁に設置した土圧計(ep1-2)の計測値とPattern-Aのケーソン水平変位とを比較してみると、図-4のような結果が得られた。同図より、Pattern-Bの土圧増加とケーソンの水平変位は非常に良く対応していることが見て取れる。Pattern-Bでは背後地盤が固定壁で拘束されているため、側方流動的な変位はほとんど生じないので、結局、液状化に伴う背後土圧の増加が

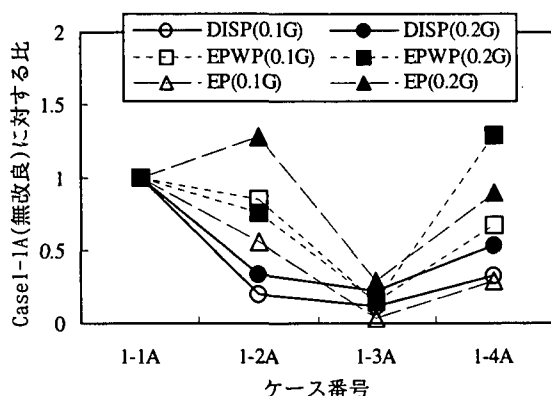


図-3 無改良(Case1-1A)に対する各ケース最大応答値の比
(水平変位(DISP), 過剰間隙水圧比(EPWP), 土圧(EP))

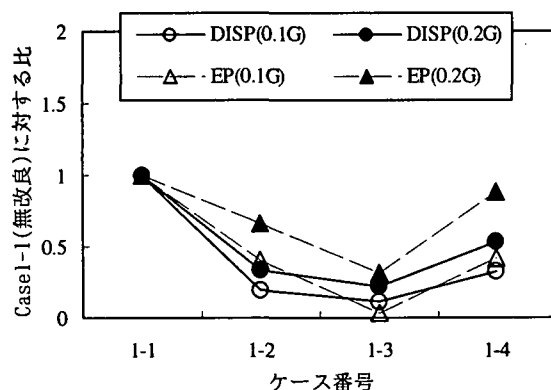


図-4 無改良(Case1-1)に対する各ケース最大応答値の比
(水平変位(DISP, Pattern-A), 土圧(EP, Pattern-B))

ケーソン変位の大きな要因と言える。

図-5はFLIPによるケーソンの変位状況を表したもので、同図を見ると締固めの有無に関わらず、ほぼ同程度である。しかし、図-6に示すケーソン直背後の最大過剰間隙水圧比の分布を見ると、0.75~0.95程度と高いものの、背後を締め固めた場合には水圧が低減されていることが分かる。

(2) 矢板式岸壁

図-7は、矢板式でのCase2-1とCase2-2の実験結果を示している。両ケースとも中層部の過剰間隙水圧(wp2-1, wp2-3)は加振開始から60秒で急上昇しており、また土圧や間隙水圧の最大値についても両者とも同程度で、大きな差は見られない。しかし、Case2-1では深層部の土圧(ep2-3)において、加振後半で緩やかながら徐々に増加する傾向が見られる。これは過剰間隙水圧(wp2-2)の増加によるもので、加振後半から間隙水圧消散傾向にあるCase2-2の場合とは傾向を異にしており、結果として、水平変位も徐々に増加している。ただし、今回の打設条件では、グラベルドレーンの排水効果が発揮されるのは加振開始から一定時間経過後のことであり、急激に大地震動を受けるような場合は、

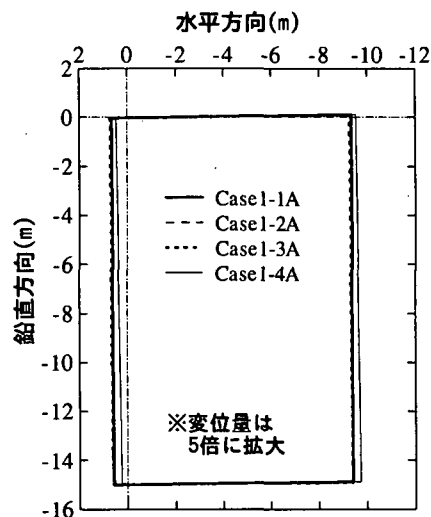


図-5 ケーソンの変位状況図(解析結果, 0.1G 入力)

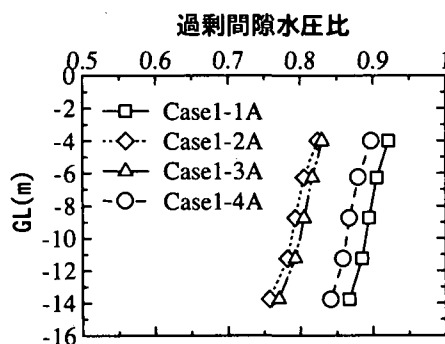


図-6 最大過剰間隙水圧比の分布(解析結果, 0.1G 入力)

即時消散は必ずしも期待できないと言える。

図-8は、砂槽側壁に設置したうどんから読みとった背後地盤の水平変位を示している。同図より、ばらつきはあるものの、グラベルドレーンを設置したCase2-2では、深層部および陸側の変位が小さいことが見て取れる。このことは、上述の時刻歴から得られた知見を裏付けるものであり、深層部の過剰間隙水圧の上昇に対するグラベルドレーンの排水効果が、地盤や矢板の変位に大きく影響することが明らかとなった。

図-9は、FLIPによるCase2-2の加振後の残留変形図を示している。FLIPでは初期自重解析で対象地盤の応力状態を算出した後、動的解析を実施するという手順を踏むが、今回対象とした矢板式岸壁では、自重解析を行ったときに背後地盤の主働崩壊が生じており、動的解析を行う前に地盤剛性が過度に低下した状態を示すことになり、それに伴って矢板は前面側に大きく変位している。図-9の結果は自重解析による変位も加算されているので、図-8と直接比較することはできないが、地盤の変形モードは実験結果にほぼ対応していると言える。動的解析のみの変位は矢板天端について図-10に示すとおりで、同図に示す実験結果と比較するとCase2-1(無改良)を除き、全ケースについて20~30%小さい変位量であるが、実験と同様にグラベルドレーンの変位低減効果が解析的にも確認された。

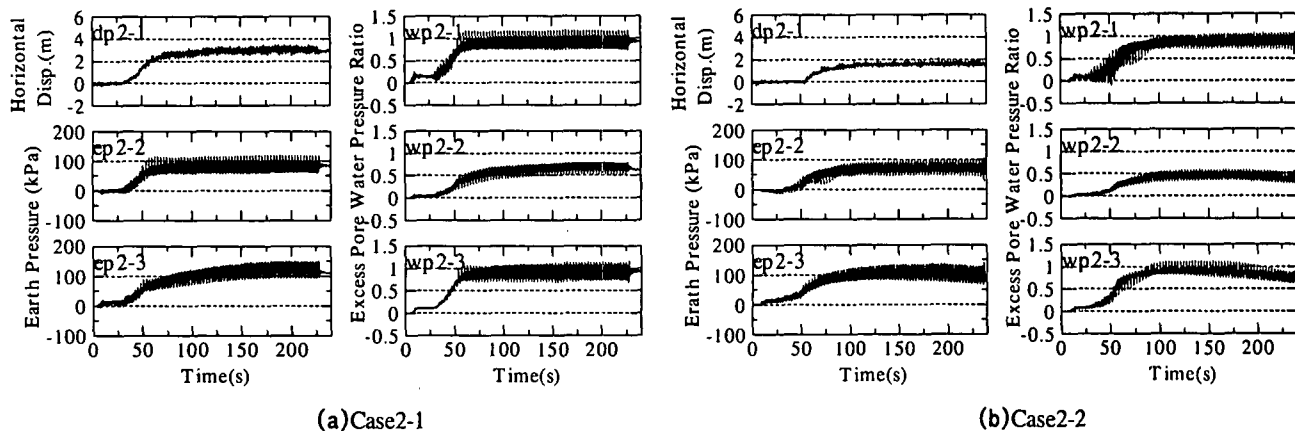


図-7 応答時刻歴（水平変位，水平土圧，過剰間隙水圧比）

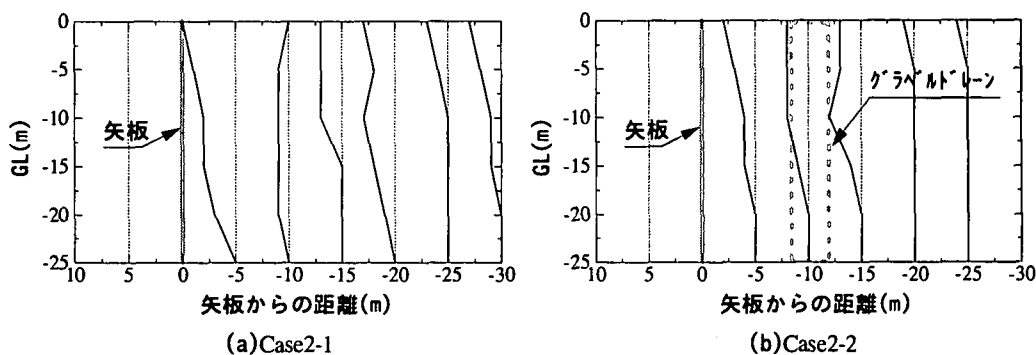


図-8 背後地盤の水平変位（実験結果，Case2-1,2-2）

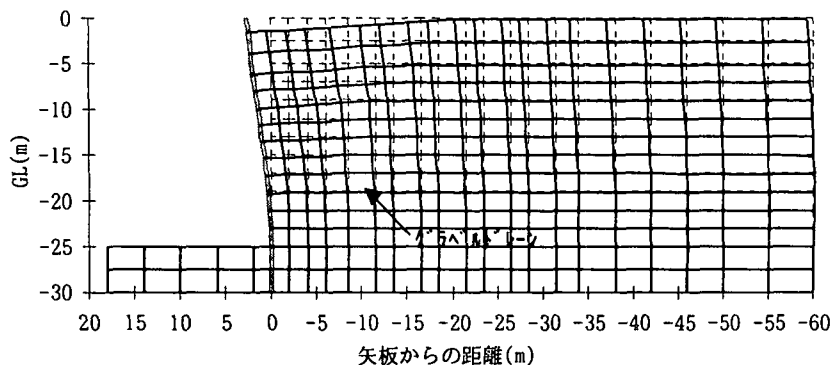


図-9 岸壁の変形図（解析結果，Case2-2）

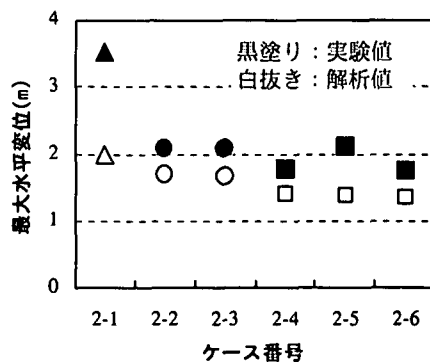


図-10 矢板天端の最大水平変位

5. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ①ケーソンの水平変位は，背後地盤の過剰間隙水圧や土圧増加に比例し，特に固定壁での土圧増加と非常に良く対応していた。
- ③背後地盤の締固め位置の違いによるケーソン変位の低減は解析的には明らかにできなかったが，過剰間隙水圧の抑制には締固めは有効である。
- ②グラベルドレーンによって，矢板の変位が低減されることが明らかとなったが，間隙水圧消散効果は加振開始よりも遅れるため，大地震の場合には即効性が期待できない。
- ④有効応力解析による矢板の水平変位は実験結果よりも20～30%小さかったが，変位低減効果については

実験と同様に効果が確認された。

参考文献

- 1) Susumu IAI : Similitude for Shaking Table Tests on Soil Structure-Fluid-Model in 1g Gravitational Field , Report of the port and harbour research institute , Vol.27 , No.3 , 1988.
- 2) 井合進・松永康男・亀岡知弘：ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティのモデル，港湾技術研究所報告，第29巻，第4号，pp.27-56.
- 3) 森田年一，井合進，Hanlong Liu，一井康二，佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法，港湾技研資料，No.869,1997.6.