

重力式岸壁の地震時変形に対する 振動締め改良域の効果

兵頭武志¹・善功企²・秋吉卓³・前田健一⁴

¹正会員 若築建設株式会社 (〒153 東京都目黒区下目黒二丁目 23-18)

²正会員 工博 運輸省 港湾技術研究所土質部長 (〒239 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

³正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860 熊本県熊本市黒髪 2 丁目 39-1)

⁴正会員 工博 運輸省 港湾技術研究所土質部 (〒239 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

本研究では、既設の重力式ケーソン岸壁の地震時変形抑止について、基礎地盤前面側と背後地盤をSCP改良した場合のケーソンの変位抑制効果を模型振動台実験および有効応力解析を実施して調べた。その結果、実験では、SCP改良域のせん断変形抑制による過剰間隙水圧の低減は確認できたが、ケーソンの残留変位に関しては背後地盤の液状化による主働土圧の増大の影響が大きく、背後地盤を締め固めた方がより効果的であるとの結果が得られた。一方、有効応力解析では、SCP改良域を液状化層に設定するとケーソンの残留変位に差はないが、背後地盤を非液状化SCP改良域とするとケーソンの変位は低減され、実験結果と同じく、背後地盤の改良が有効であるとの結論が得られた。

Key Words : gravity quay wall , sand compaction pile , liquefaction , shake table test , effective stress analysis

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震で大きな被害を受けたポートアイランドや六甲アイランドでは、重力式ケーソン構造の岸壁が主流で全体の9割を占めていた。ケーソン式岸壁の地震被害は、ケーソン本体が海側へ変位し、それに伴って背後地盤が陥没・沈下することが多く、今回の地震についても、岸壁の被災形態はほぼそのような傾向であったことが報告されている^{1), 2)}。

一般に、岸壁基礎地盤に振動系の地盤改良を施すと、密度の増大によって液状化抵抗が増し、岸壁の変形抑止に効果があることは知られている。この工法は比較的安価に施工できるため実績も多い。しかし、既設岸壁の場合は、打設時の振動によって岸壁本体に有害な変位をもたらすため、直下地盤を改良することは実用的ではなく、岸壁の地震時安定には背後地盤を締め固めるか、あるいは化学的安定処理などにより対策を施すことが多い。

本研究では、振動締め固め工法、特にサンドコンパクションパイル(SCP)工法に注目し、岸壁基礎地盤の海側に改良域を設けた場合の地震時の岸壁の変形抑制効果について、模型振動台実験と有効応力解析を実施して検証した。

2. 模型実験概要

実験概要を図-1に示す。実験に用いた振動台は動電駆動方式と呼ばれる電磁力による駆動方式を採用しており、広い振動数範囲で振動波形にひずみが含まれない点で優れている。砂槽(長さ×幅×高さ; 900×360×600mm)は加振時の挙動を観察できるように全面アクリル製で、加振方向に垂直な側壁内面には加振時のせん断変形を拘束しないように厚さ25mmのフォームラバーを貼り付けた。同図には加速度計、水圧計の設置箇所も示しているが、これらのセンサー設置に際してはアクリル製のセンサー固定板を作成し、固定板をテグスで引張することで地盤作成時のセンサーの移動を防止した。なお、砂槽加振前にはテグスを切り離し、引張力を取り除いて実験した。

背後および基礎地盤には豊浦砂を用い、水中落下法により相対密度約60%の飽和砂地盤を作成した。ケーソン模型を実物に換算した場合の滑動および転倒に関する安全率 F_s は、それぞれ常時3.93, 5.50, 地震時(設計震度 $k_h=0.15$) 1.59, 1.97である。振動締め固め改良域に関しては密詰めの砂壁と見なし、相対密度80%を目標としてタンパーで締め固めた。

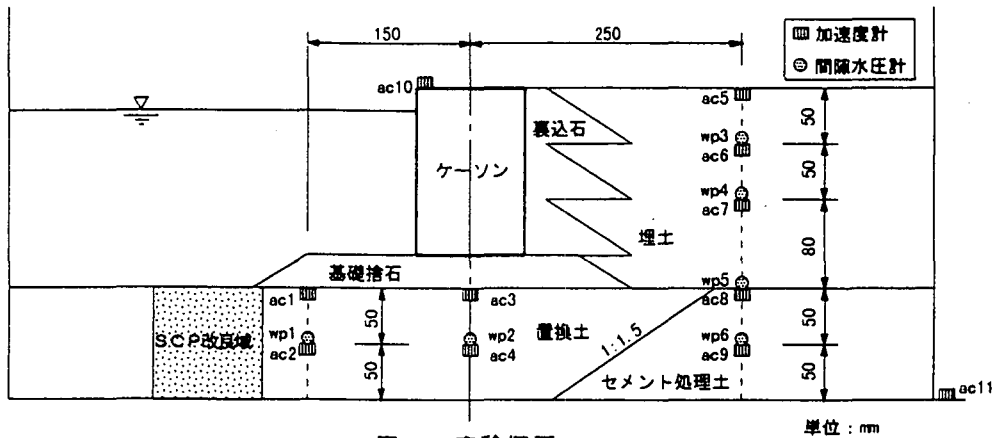


図-1 実験概要

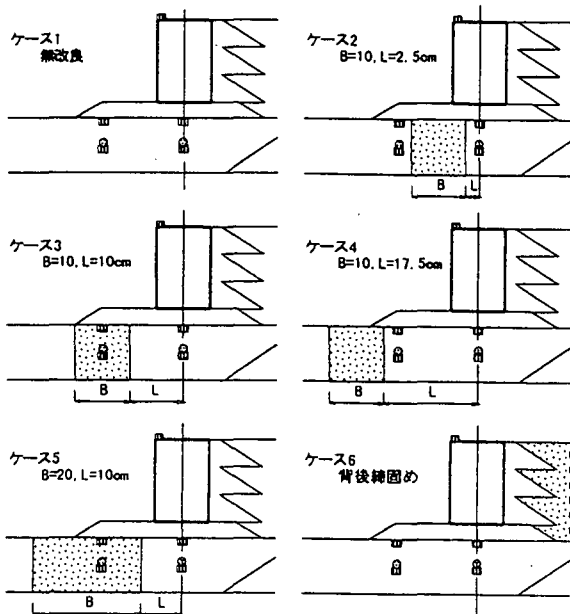


図-2 実験ケース

模型に関する相似則は、井合³⁾が提案した1g場での地盤—構造物—流体系の模型振動実験の相似則を適用し、長さの縮尺を1/100 (模型/実物) に設定した。この場合、透水係数に対する相似則も満足する必要があるため、間隙水にはメチルセルロース水溶液を用いて粘度を高めた。

入力波は兵庫県南部地震時のポートアイランドでの観測波 (GL-32m, NS成分; 神戸市開発局提供) を用い、砂槽長尺方向に一次元入力した。実験は図-2に示すように、改良位置や改良幅を変え、また無改良および背後地盤を改良したものを含めて6ケース行っており、全ケースについて最大加速度100, 250, 544galの3段階ステージ加振とした。なお、各ステージ間は約30分放置し、過剰間隙水圧が残留しないように配慮した。地盤変位は砂槽側壁に鉛直に立てたうどんにより計測し、実スケールに換算して示すことにした。

3. 有効応力解析

模型実験に対する地震時変形解析には、井合らが開

表-1 動的変形特性パラメータ

	γ (t/m ³)	G_0 (kPa)	σ_{m0} (kPa)	h_{max}	Φ_f
基礎地盤	1.8	79292	98	0.24	37
背後地盤	1.8	79292	98	0.24	37
SCP改良部	1.9	92208	98	0.24	40
基礎捨石	1.8	79292	98	0.24	37
裏込め石	1.8	79292	98	0.24	37

表-2 液状化特性パラメータ

	Φ_p	ゲイタンジパラメータ
基礎地盤	28	$w_1=10.9, p_1=0.5, p_2=1.27, c_1=1.0, S_1=0.005$
背後地盤	28	$w_1=10.9, p_1=0.5, p_2=1.27, c_1=1.0, S_1=0.005$
SCP改良部	28	$w_1=28.1, p_1=0.5, p_2=0.60, c_1=1.0, S_1=0.005$

発した有効応力解析プログラムFLIP⁴⁾を用いた。FLIPは、土の応力-ひずみモデルに双曲線モデルを組み合わせたマルチスプリングモデルを採用しており、非排水条件下での地盤の液状化を考慮した解析が可能である。解析メッシュを図-3に示す。土の動的変形特性については、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁵⁾より表-1のように設定した。また、液状化を規定するパラメータについては、繰り返し三軸試験結果を用いて要素シミュレーションすべきであるが、今回は簡便法⁶⁾により表-2のように設定した。また、レーレー減衰パラメータ β については、等価線形解析プログラムSHAKEより算出された最大加速度値の分布との比較を行って0.001とした。

ケーソンの変位量に関して、模型実験では3段階のステージ加振を行って、ステージごとに累積変位量を計測したが、各ステージ間で過剰間隙水圧を残留させなかったこと、また加振前後の相対密度に大きな変化が見られなかったことから、解析にあたっては、各ステージについて独立に加振したものとして計算し、累積変位量を求めて実験値と比較することにした。

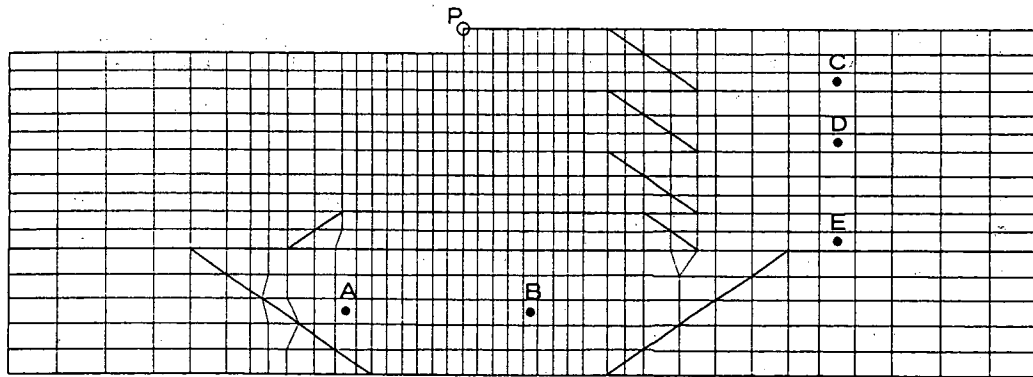


図-3 解析メッシュ

4. 結果と考察

(1) 実験結果

図-4はステージ3加振時の過剰間隙水圧比(WP1~4)の最大値をプロットしたものである。ケーソン直下(WP2)の過剰間隙水圧比はケース2~5について0.5程度であり、基礎地盤を改良していないケース1, 6と比較して過剰間隙水圧が抑えられている。ケーソン前面側(WP1)に注目すると、ケース1, 2, 6では過剰間隙水圧比が1.0に達しているが、SCP改良域内にセンサーを設置したケース3, 5では、ステージ3においても過剰間隙水圧比が0.6~0.8に抑えられており、改良域内は完全液状化には達していない。また、改良域外であっても改良域近傍(ケース4)では過剰間隙水圧比が0.8程度に抑えられている。これらはSCP改良域によるせん断変形抑制効果によるものと考えられる。

図-5はケーソン天端前面側の累積変位ベクトルを示しているが、ケース1~5に関しては、SCP改良の有無や改良位置も含めてケーソンの変位抑制に関する有意な差は見られなかった。一方、背後地盤を締め付けたケース6では、ケース1~5と比較して全ステージにわたって変位が小さく、明らかな変位抑制効果が見られた。図-6にケース3(ステージ3加振後)のうどん変位を示すが、ケーソン背面側の主働領域の変形が顕著であり、また円弧すべりのような地盤変形が見られないことから、今回の地盤条件の場合では、背後地盤の液状化に伴う主働土圧の増加により、ケーソンが前面側に変位したものと考えられる。

(2) 解析結果

図-7はステージ3加振時の過剰間隙水圧比の最大値をプロットしたものである。なお、A~E(図-3参照)は、実験における間隙水圧計WP1~5の設置箇所にはほぼ対応している。図-7と図-4の実験結果を比較すると、B(実験ではWP2)における値が解析結果と実験結果とでは大きな違いが見られる。実験ではケース6を除いて0.5前後を推移しているのに対し、解析では全ケースとも

0.8程度まで上昇しており、完全液状化までには至らないものの、地盤が軟化してケーソンの変位に影響している可能性がある。

図-8はケーソン天端前面側(図-3の点P)における累積変位ベクトルを示している。この図を見ると、ステージ3加振後のケーソンの累積変位量は、全ケースについて水平方向に約2m程度のはらみ出しと鉛直方向に約0.5mの沈下であることが見て取れる。図-9にステージ3終了後の累積変位の解析値に対する実験値の比を表すが、水平方向については解析値と実験値との対応はよいことがわかる。しかし、鉛直方向については、上述したようにケーソン直下地盤の過剰間隙水圧比が0.8程度まで達しているにもかかわらず、解析値が実験値の1/3程度の変位となっている。この原因の一つとして、実験における捨石マウンドを水中落下で作成したため緩く堆積し、加振によってマウンドの圧縮沈下が大きく現れたことが考えられる。

以上の計算結果は、SCP改良域を液状化層として算出したものを示したが、背後地盤を相対密度100%の非液状化SCP改良域($G_0=106888\text{kPa}$)として試算すると、ケーソン点Pでの累積変位は1.36mのはらみ出しと0.34mの沈下となり、相対密度80%の液状化SCP改良域とした場合の約2/3程度まで低減する結果となった。このことは、実験結果と同じく、背後地盤の剛性や液状化の有無はケーソンの地震時変位に大きく影響を及ぼすことを示している。

5. 結論

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

模型実験について：

- ①ケーソン前面側にSCP改良域を設けることで周辺地盤のせん断変形が抑制され、ケーソン直下地盤の過剰間隙水圧を低減させる効果がある。
- ②ケーソンの残留変位については、背後地盤を改良した方が液状化に伴う主働土圧の増加を抑制できるため有効である。

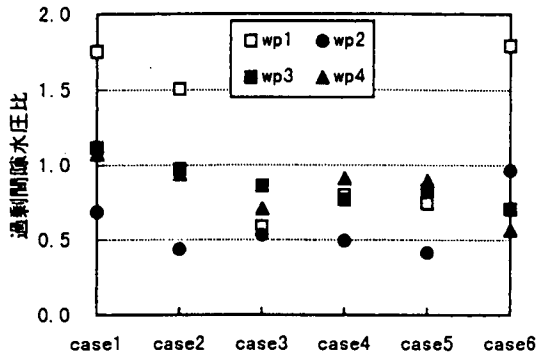


図-4 過剰間隙水圧比(実験)

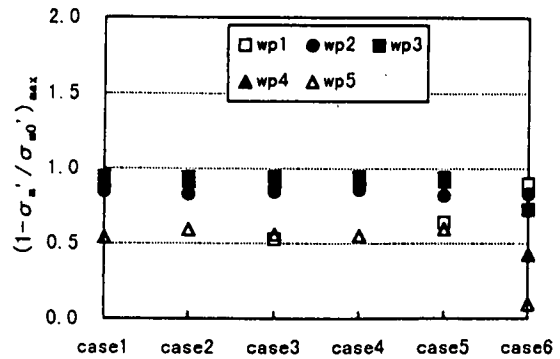


図-7 過剰間隙水圧比(解析)

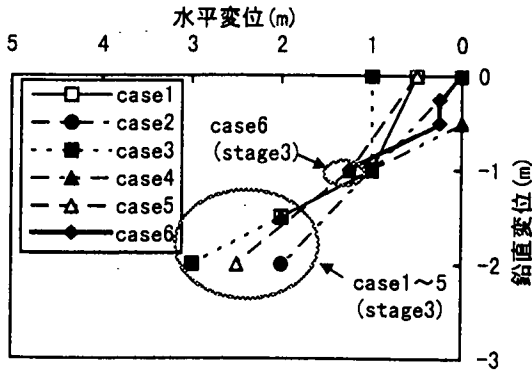


図-5 ケーソン天端の累積変位(実験)

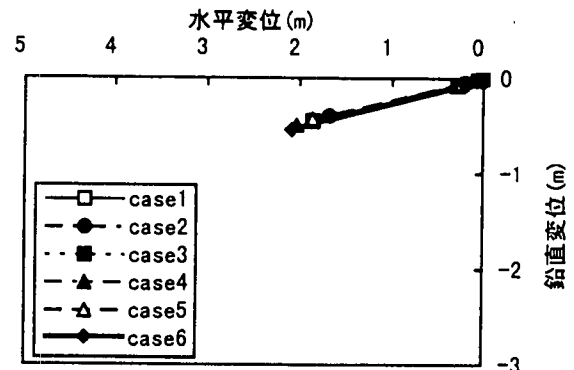


図-8 ケーソン天端の累積変位(解析)

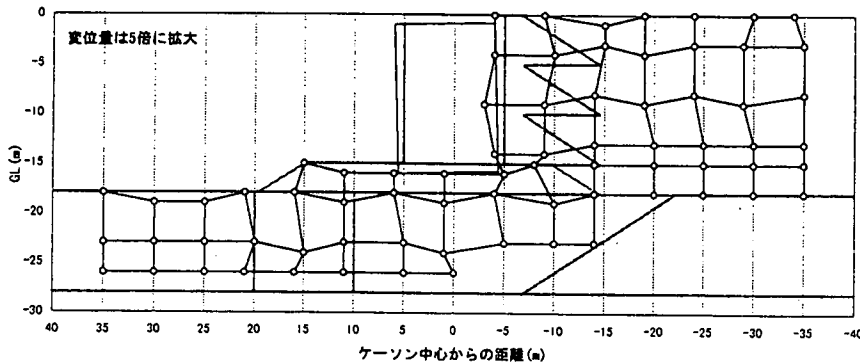


図-6 うどんによる地盤変位(ケース3, ステージ3)

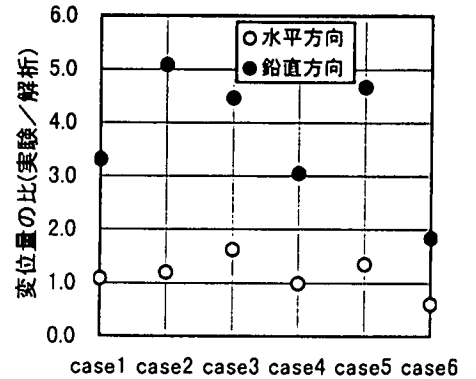


図-9 解析変位に対する実験変位の比

有効応力解析について：

- ③実験結果と比較すると、ケーソンの水平変位はほぼ対応したが、鉛直変位は実験値の1/3程度となった。これは実験時の捨石マウンドの沈下が影響したものと考えられる。
- ④SCP改良域を液状化層に設定すると、前面側や背後地盤にSCPを施しても、ケーソン変位抑制に関して明確な差は現れなかったが、背後地盤を相対密度100%の非液状化SCP改良域とすると約2/3程度まで変位が低減し、実験結果と同じく、背後地盤の改良はケーソンの変位抑制に有効である。

参考文献

1)外山進一・松永康男：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(その2)被災状況—岸壁，防波堤，海岸保全施設—，

港湾技研資料，No.813，1995.9.

2)上部達生・高野剛光・松永康男：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(その3)神戸港のケーソン式大型岸壁の被災分析，港湾技研資料，No.813，1995.9.

3)Susumu IAI：Similitude for Shaking Table Tests on Soil Structure-Field-Model in 1g Gravitational Field，REPORT OF THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE，Vol.27, No.3, 1988.

4)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.

5)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，運輸省港湾局監修，1989.

6)FLIP 講習会資料