グラウンドアンカーで補強された 矢板式岸壁の耐震性について

三好 俊康1・田代 聡一2・小竹 望3・清宮 理4

 ¹五洋建設株式会社技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail:Toshiyasu.Miyoshi@mail.penta-ocean.co.jp
²東亜建設工業株式会社土木事業本部設計部 (〒102-845 東京都千代田区四番町5)
E-mail:s_tashiro@toa-const.co.jp
³東洋建設株式会社技術本部土木エンジェアリング部 (〒135-0064 東京都江東区青海2-43青海フロンティアビル)
E-mail: kotake-nozomu@toyo-const.co.jp
⁴早稲田大学創造理工学部社会環境工学科教授 (〒169-8655 東京都新宿区大久保3-4-1)
E-mail:k9036@waseda.jp

控え工を有する矢板式岸壁を対象としたグラウンドアンカー設置による耐震補強工法の性能 評価・効果確認を目的として、模型振動台実験および二次元有効応力解析を実施した.入力地 震動として平成7年兵庫県南部地震によるポートアイランド観測波を使用した.振動台実験の 結果、アンカー補強により鋼矢板の残留水平変位が2~3割程度低減することを確認した.実験 結果と二次元有効応力解析結果を比較した結果、数値解析により実際の構造物の挙動をほぼ再 現できるが、過剰間隙水圧の上昇状況や排水状況などを十分に再現できなかった.

Key Words : Ground anchors, Seimic reinforcement, Shaking table test, 2D-FEM effective stress analysis

1. はじめに

平成7年1月に発生した兵庫県南部地震により, 神戸港の港湾施設などに多大な被害が生じた.同地 震後,被災時における最低限の物流確保のための耐 震強化施設を新たに計画するなど,全国の港湾で耐 震強化施設の整備が,これまで以上に促進されてい る.

また、平成19年4月に改訂された「港湾の施設の 技術上の基準」では、これまでの仕様設計から性能 設計に移行し、耐震設計においてはレベル1地震動 に対して、これまでの地域別震度による設計から、 材料非線形を考慮した一次元地盤応答解析を併用し た照査用震度の設定が必要となった。

耐震強化施設では建設地点毎に設計者がレベル2 地震動を作成の上、二次元有効応力解析(例えば 「FLIP」¹⁾)を実施して、変形量に関する性能照査 を実施することとなっている.こうした性能設計で の背景の下、模型振動台実験や動的解析結果を反映 し、適切な耐震補強が求められる場合が増大してき ている. 一方,既存岸壁の内,矢板式岸壁を対象としたグ ラウンドアンカー設置による耐震補強工法の採用事 例があり,耐震補強効果の解析的検討²⁾などもなさ れているが,耐震設計手法の設定など種々の課題が 残されている.本論文では,グラウンドアンカー設 置による耐震補強に関する基礎的データ取得を目的 とした模型振動台実験および二次元有効応力解析を 実施し,グラウンドアンカーの有効性の検討と併せ 「FLIP」の模型振動台実験への適用性について検討 を行ったものである.

2. 実験概要

控え矢板式護岸を対象として,前面鋼矢板と控え 矢板をタイワイヤで結んだ構造とした.模型縮尺は 1/17とし,1G場における相似則³⁾を適用している. 土槽は長さ2.5m,高さ1.5m,奥行き1.3mの箱型鋼製 枠とした.非液状化層である砂質土および液状化層 である埋土には,相馬硅砂5号を使用し,相対密度 をそれぞれ80%および60%となるように地盤を作製 した.前面鋼矢板と控え矢板として,それぞれ厚さ



6(mm),3(mm)の鋼板を用い,鋼製枠下端(基盤層と 見なした)に根入れさせないように設置した.

これらの鋼矢板を結ぶタイワイヤと耐震補強用の グラウンドアンカーには直径6(mm)の鋼棒を使用し, タイワイヤ取り付け位置(水面より上)を起点に時 計回り45度下方に配置して,鋼製枠下端に剛結した. これらグラウンドアンカーおよびタイワイヤは鋼製 枠奥行き方向に6本ずつ配置した.振動台実験用模 型を図-1に示す.

入力地震動は平成7年兵庫県南部地震においてポ ートアイランド地下-83mで観測されたNS成分を使 用し,時間軸を1/8.37に圧縮³⁾したものを使用した. 入力地震動波形を図-2に示す.

計測機器類は、図-1に示す配置で加速度計(22台), 間隙水圧計(15台),ひずみゲージ(7箇所×2枚),変 位計(7台),張力計(2箇所)を使用し、それぞれ鋼矢 板の変位および応答加速度、地盤の過剰間隙水圧, 鋼矢板の曲げひずみ、地盤の変位、グラウンドアン カーおよびタイワイヤの張力を計測した.

なお,実験はグラウンドアンカー無し(未対策) とグラウンドアンカー有り(耐震補強)の2ケース とした.

3. 予備実験に関する解析的検討

本検討では、将来的に地盤改良との組合せなど、 種々の耐震補強効果を確認する必要があると考えて、 砂質土を入れた小型土槽による予備実験を実施し、 実験結果に基づく有効応力解析用パラメータ同定⁴⁾ を実施している.



表-1 動的変形特性

| 地盤名称 | ρ | σ_{ma} ' | G _{ma} | K _{ma} | m _G | m _K | Ø _f | h |
|---------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|------|
| | (t/m^3) | (kN/m^2) | (kN/m^2) | (kN/m^2) | | | (deg) | max |
| 埋土(気中) | 1.87 | _ | 10,068 | 26,256 | 0.0 | 0.0 | 40 | 0.24 |
| 埋土(水中) | | 3.0 | 5,568 | 14,520 | 0.5 | 0.5 | | |
| 砂質土(水中) | 1.91 | 5.2 | 9.805 | 25.569 | | 0.5 | 42 | |

以降では、この同定したパラメータを使用して、 二次元有効応力解析プログラム「FLIP」により数値 解析を実施している.

(1)予備実験の方法

予備実験に使用した小型土槽は長さ1.1m,高さ 1.1m,奥行き1.5mの箱型鋼製枠で、図-1と比較する と高さ及び奥行きはほぼ同等で、幅は1/2以下とな る.模型縮尺ならびに相似則は図-1と同様である.

パラメータ同定に用いる加速度,間隙水圧,変位 などの計測器配置とともに,予備実験で用いた土槽 を図-3に示す.

非液状化層である砂質土および液状化層である埋 土には、相馬硅砂5号を使用し、相対密度をそれぞ れ80%および60%となるように地盤を作製した.

入力地震動として,予備実験ケースにおける埋土 および砂質土の「入力地震動最大加速度と過剰間隙 水圧比」関係から,図-2に示すポートアイランド観 測波NS成分と埋土および砂質土の液状化状態を確 認するため正弦波(f=10Hz)を適用⁴⁾することと した.

(2)パラメータ同定の結果

「FLIP」では動的変形特性と液状化特性をそれぞれ 設定する必要がある.動的変形特性に関しては加振 実験前に測定した「せん断弾性波速度」を基に, 「初期せん断弾性係数($\sigma_{ma'}$, $G_{ma,mG}$ で規定)」, 「初期体積弾性係数 $K_{ma}(\sigma_{ma'}, K_{ma,mK}, m_K で規定)」$ $を算出¹⁾し,「内部摩擦角<math>\phi_{f}$ 」,「最大減衰比 h max」については砂の標準的な値を使用した.設定し た動的変形特性パラメータを表-1に示す.

液状化特性パラメータ同定にあたり、二次元FEM モデルを基本的に用いることとし、「砂質土」に関 しては水平成層地盤と仮定した一次元FEMモデルを 用いた.



図-4 パラメータ同定用解析モデル





本論文では、砂質土層のほぼ中央におけるW2計 測点付近(図-3参照)にて実験と一次元FEMモデル の挙動が同様であるとの仮定に基づき、砂質土の液 状化特性を同定した.

パラメータ同定に用いた二次元FEMモデル,同定 した液状化特性をそれぞれ図-4,表-2に示す.

同定した液状化特性を用いて,解析モデル(図-4) による解析を実施した.図-2の波形を入力地震動と した解析結果より,埋土の過剰間隙水圧比を実験結 果と比較したものを図-5に示す.

液状化特性の同定にあたってW2計測点付近の挙動に関する仮定の下であるが、過剰間隙水圧比ならびに加速度は概ね実験結果を追跡できることが確認することができた.

同定したパラメータによる要素試験シミュレーションを実施して、本実験で使用した砂質土および埋土の液状化強度曲線と標準的な砂の液状化強度曲線が概ね整合している⁴⁾ことを確認している.

4. 実験結果と解析結果の比較

図-1の模型を用いた実験結果と併せて数値解析結 果を以下に示す.



図-7 応答加速度の比較(背後地盤地層境界付近)

(1)応答加速度について

前面鋼矢板背後の地盤応答加速度を未対策,耐震補 強について比較した結果を図-6,7に示す.図中の Max・Minは解析結果の最大値・最小値(以下,同 様)を示している.入力加速度となる土槽最下端 AH1計測点(図-1参照)記録は,未対策および耐震補 強ともにほぼ同等であったが,耐震補強の場合は背 後地盤上部へ移行するにつれ,応答加速度が増大す る傾向にある.アンカーによる鋼矢板変位の拘束な どの影響などが考えられるが,今後検討が必要であ る.実験結果と解析結果の比較では,加振開始から 主要動が開始する1(s)間の高周波成分が,実験結果



では非常に大きく,地表面に移行するにつれて増大 する傾向にある.解析結果についても同様の現象を 再現しており,時刻歴において高周波成分を除けば 実験結果をよく再現している.

(2) 鋼矢板変位について

前面鋼矢板頂部(D7)と水底面付近(D8)における水 平変位時刻歴を未対策・耐震補強について比較した 結果を図-8,9に示す.

未対策と耐震補強を比較すると,水平変位は実験 値および解析値ともに低減しており,グラウンドア ンカー打設による変位低減効果があるものと判断さ れる.

振動台実験結果と数値解析結果を比較すると,鋼 矢板頂部および下方ともに,変位の上昇傾向は概ね 一致している.しかしながら,未対策では残留水平 変位の値など実験値と解析値の対応関係は良くなか った.応答加速度とともに解析値と実験値の乖離に 関して,今後検討する必要があると考える.

図-10に,未対策・耐震補強時の前面鋼矢板残留水 平変位(実験結果)の分布を示す.鋼矢板上部(D7) の残留水平変位は,未対策で19(mm),耐震補強で 15(mm)となった.鋼矢板下方(D8)では未対策で 25(mm),耐震補強で17(mm)となったことから,グラ ウンドアンカー打設により,残留変位が2~3割程度 低減することを確認できた.

(3) 過剰間隙水圧比について

埋土層(W6)における過剰間隙水圧比の時刻歴を未 対策・耐震補強について比較した結果を図-11に示 す.未対策・耐震補強の場合ともに,過剰間隙水圧 比の応答性状を解析でほぼ再現できており,実験結 果および解析結果ともに過剰間隙水圧比が1.0近傍









図-10 前面鋼矢板残留水平変位

と液状化しているものの,前面鋼矢板の変形抑制効 果があることがわかる.ただし,過剰間隙水圧比が 1.0近くになる時間は解析・実験ともに1(s)付近で あったが,過剰間隙水圧の上昇は解析の方が実験よ りも早かった.実験では,一部排水により過剰間隙 水圧が3(s)以降で低減しているものの,解析では過 剰間隙水圧がほぼ一定となっており,排水による水 圧消散を再現することができなかった.

5. まとめ

グラウンドアンカーにより耐震補強された矢板式 岸壁の耐震性を検討するにあたり,模型振動台実験 および二次元有効応力解析を実施した.その結果, 以下のことがわかった.

①模型振動台実験および数値解析からアンカー設置 により2~3割程度の鋼矢板変形抑制効果を確認する ことができた.

②予備実験により「FLIP」の入力値を同定した後,

「FLIP」による振動台実験結果の再現解析を行った. 応答加速度の振幅値は,実験と解析で異なったもの となったが,応答性状はほぼ類似している.過剰間 隙水圧の応答性状はほぼ同様であったが,解析では 実験中の排水状況を十分再現することができなかっ た.

6. あとがき

本論文では、施工を想定してアンカーヘッドの位 置を水面上のタイワイヤ結合位置とした.アンカー ヘッド位置ならびにアンカー角度を固定しているた め、今後はアンカーヘッド位置ならびにアンカー角 度の最適値および組合せなどに関する検討をおこな うとともに、定着部の地震動に対する挙動の定量的 評価を初めとする種々の課題についても検討してい く必要があると考える.また「FLIP」の適用性につい て、今後は排水条件や振動台実験についてのパラメ ータ設定などに関して、さらに検討していきたいと 考えている.

【謝辞】

本研究は早稲田大学,五洋建設株式会社,東亜建 設工業株式会社,東洋建設株式会社の共同研究とし て実施された.振動台実験,数値解析などの実施に あたり,五洋建設技術研究所長の三藤正明氏,東亜 建設工業の土木事業本部設計部次長の浅沼丈夫氏, 東洋建設の土木本部土木技術部長の前田涼一氏には 種々のアドバイスを頂きました.ここに記して謝意 を表します.

参考文献

- 1) Iai,S.,Matsunaga,Y.and Kameoka,T.(1990):Strain space plas ticity model for cyclic mobility,Report of the Port and Harbour Research Institute,Vol.29,No.4,pp.27-56
- 2)神立佳広,清宮理:グランドアンカー工法による鋼矢 板式護岸の耐震補強効果,第29回土木学会地震工学論 文集,第29巻,2007.8,pp.1313-1318
- Susumu IAI:Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Filed, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.27, No.3, 1988.
- 4)田代聡一,小竹 望,三好俊康,清宮 理: グラウン ドアンカーで補強された鋼矢板式岸壁の振動台実験 (その1:予備実験),地盤工学研究発表会,2009年7 月(投稿中).

EARTHQUAKE RESISTANCE OF SHEET PILE QUAY REINFORCED BY GROUND ANCHORS

Toshiyasu MIYOSHI, Souichi TASHIRO, Nozomu KOTAKE and Osamu KIYOMIYA

In this study a method of antiseismic reinforcement is proposed for sheet pile quay by use of ground anchors. It's validity is studied by shaking table test and 2D-FEM effective stress analysis. The observed value at Port-Island in 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake is applied to input earthquake motion for the test and the analysis. In the shaking table test, residual horizontal displacement of the reinforced quay is reduced by 20 to 30 percent compared to the one of unreinforced quay, and by comparison with the experimental result and the analytical result, seismic behavior of full-scale sheet pile quay can be explained ,though the dissipation of excessive pore water pressure cannot be fully simulated.