

岸壁挙動への長周期・長継続時間地震動の影響に関する模型実験および解析

MODEL TEST AND ANALYSIS ON THE EFFECT OF LONG-PERIOD AND LONG-DURATION GROUND MOTION TO BEHAVIOR OF QUAY WALLS

菅野高弘¹・小濱英司²・塩崎禎郎³・宮田正史⁴・野口孝俊⁵
Takahiro SUGANO, Eiji KOHAMA, Yoshio Shiozaki, Masafumi MIYATA
and Takatoshi NOGUCHI

¹正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所 構造振動研究室長 (〒239-0831 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工博 関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所 (〒221-0053 横浜市神奈川区橋本町2-1-4)

³正会員 工修 J F E 技研(株)土木・建築研究部 (〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-1)

⁴正会員 工修 国土技術政策総合研究所港湾研究部 主任研究官 (〒239-0831 横須賀市長瀬3-1-1)

⁵正会員 関東地方整備局東京空港整備事務所 設計監理課長 (〒144-0041 東京都大田区羽田空港3-5-7)

Design input earthquake motions considering influence of characteristics of earthquake source fault and soil deposit are being used in seismic design of structures in recent years. It is becoming necessary to examine the behavior of the structure under ground motions with period and duration property which had hardly been taken into consideration. A series of gravitational and centrifugal model tests was conducted in this study, to investigate influence of long-period and long-duration earthquake motion on gravity type quay walls. Applicability of the finite element analysis, FLIP, to long-period and long-duration earthquake motions is examined by comparing the results of analysis and tests.

Key Words : *Finite element analysis, centrifuge test, shake table test, gravity type quay wall, long-period and long-duration ground motion*

1. はじめに

重要構造物に関する耐震設計では、地震動レベルを2段階とした耐震設計が一般的となっており、施設の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を有する地震動(レベル2地震動)による耐震設計が求められている。また、耐震設計で用いられる地震動に関する研究は近年進歩し、任意の地点における設計入力地震動を想定することが可能となった。そして、この想定された地震動には震源断層や堆積地盤等の影響が考慮されており、場所によっては非常に長い周期成分や長い継続時間を有した地震動が想定されることもある。長尾ら¹⁾はレベル1地震を対象として、地震動の周波数特性および岸壁の応答特性を考慮して重力式岸壁の設計に用いる震度を算出する手法を提案している。

本研究では極大のレベル2地震動を対象とし、長継続時間および長周期成分の岸壁変形への影響を検討した。従来より設計に用いられてきた八戸波と、震源断層や構造物建設地点の深部堆積地盤の影響等を考慮したレベル2地震動(シナリオ波)の2種類

の地震動を用いて模型振動実験を行い、入力地震動の特性の違いによる岸壁挙動への影響を確認する。また FLIP²⁾による数値解析では、解析パラメータに着目し、同じ条件でのそれぞれの地震動による実験結果の再現を試みるにより、長周期・長継続時間地震動への適用性を検討する。

表-1 使用した縮尺比

パラメータ	実物/模型	
	重力場	遠心力場
長さ	20	50
密度	1	1
時間	20 ^{0.75}	50
応力	20	1
加速度	1	1/50
速度	20 ^{0.75}	1
変位	20 ^{1.5}	50

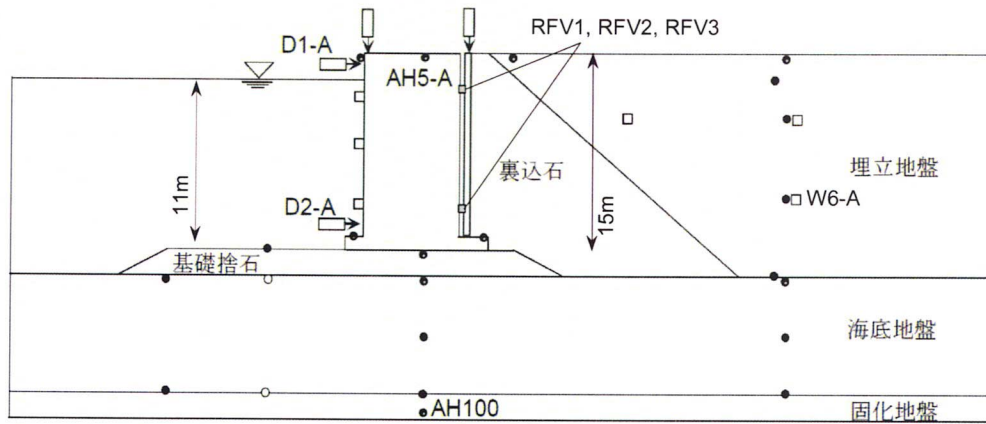


図-1 検討断面

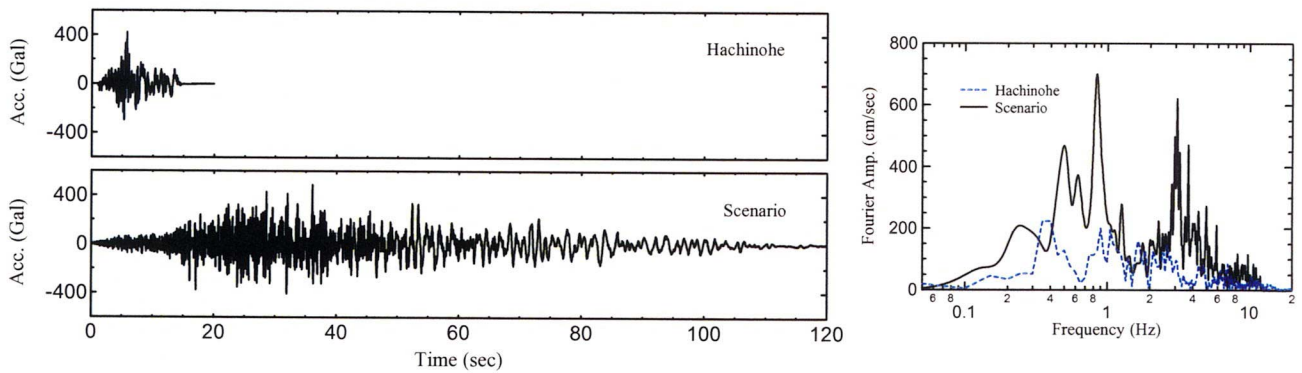
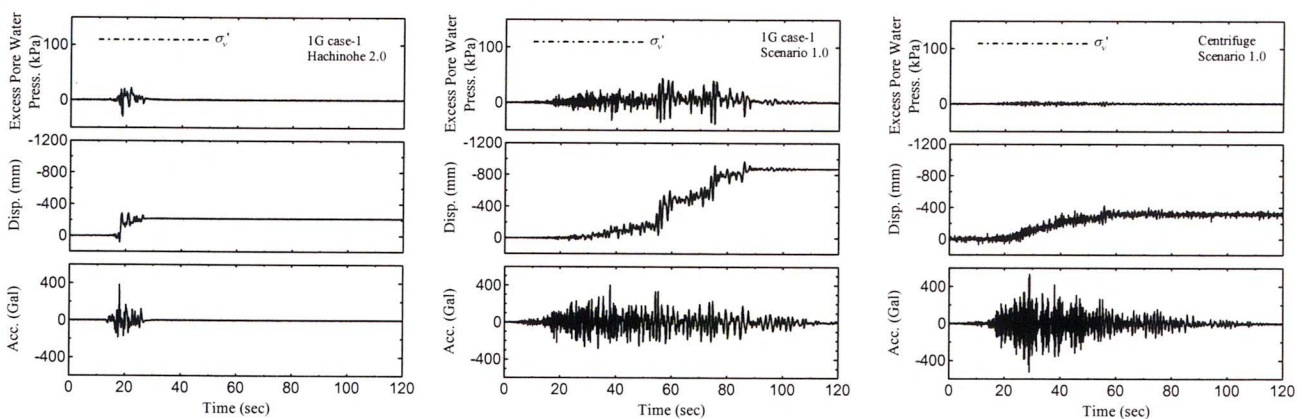


図-2 入力地震動 (a) 時刻歴, (b) フーリエスペクトル
スペクトルには, バンド幅0.1HzのParzenウィンドウを適用



2. 模型振動実験

(1) 実験模型および実験ケース

模型振動実験は, 図-1 に示されるように, 高さ15m, 水深-11m のケーソン式護岸構造物を対象として, 重力場および遠心場のそれぞれで行った. これは, 設計震度を 0.15 として設計されたものである. 重力場, 遠心場のそれぞれの相似則^{3, 4)}に則って

1/20, 1/50 としており (表-1), 実際の模型ケーソンの高さはそれぞれ 750mm, 300mm となる.

地盤材料には硅砂 (埋立, 海底地盤) および碎石 (基礎捨石, 裏込石) を用いた. 本実験では, 岸壁は液状化対策が施されているものと想定し, 液状化が発生しないよう考慮しており, 背後および海底の砂地盤での相対密度 D_r をそれぞれ 70%, 90% としている. さらに遠心実験では透水性を良くすることに

よって液状化を抑制することとし、粒径の比較的大きな珪砂4号を用いることとした。また重力場実験では、ケーソン模型背面の受圧板およびロードセルによって土圧を計測している。他にも加速度計、変位計、間隙水圧計を配置し、岸壁挙動を計測した。

加振波には、港湾の設計でよく用いられる1968年十勝沖地震の際に八戸港において記録された地震波（以下「八戸波」と呼ぶ）と、震源断層や堆積地盤の影響等が考慮された長周期・長継続時間のシナリオ L2 地震波（以下「シナリオ波」と呼ぶ）の、2種類を用いた（図-2）。シナリオ波は、検討サイトを羽田空港として南関東地震を想定したものであり、1923年関東地震（M7.9）の震源モデル⁵⁾および羽田空港における強震観測を基に経験的グリーン関数法により合成されたものである。強震観測結果より、羽田では長周期成分に対する増幅特性が強く、継続時間が長くなることが明らかにされており⁶⁾、シナリオ波にはそれらの特徴が含まれている。またここでの八戸波は実験で用いたものであり、加速度振幅がシナリオ波と同等になるように、振幅を2倍に調整している。図-2に示されるように、シナリオ波は八戸波より約10倍長い継続時間を有する。スペクトルにおいてもシナリオ波はほとんどの周波数域において八戸波よりも大きく、非常に大きなエネルギーを有している。

模型振動実験は、重力場においては八戸波およびシナリオ波による加振、遠心場においてはシナリオ波加振のみを行った。模型実験の詳細は参考文献⁷⁾を参照されたい。

(2) 実験結果

a) 岸壁挙動および入力地震動の比較

重力場、遠心力場における八戸波、シナリオ波による加振での背後埋立地盤内での過剰間隙水圧、振動台加速度、およびケーソン上端変位の時刻歴を図-3に示す。ここでは、それぞれの相似則に基づいて、実物スケールで値を示している。

間隙水圧については、加振とともに動的に変動したが、模型作成時の地盤密度から求められた有効土被り圧に比べてその蓄積量は小さく、どの実験においても液状化は発生していないと判断される。

ケーソン変位については、八戸波加振では残留変位量のほとんどが18sec付近で発生しており、その他の時間ではあまり変位が生じていない。重力場でのシナリオ波加振では55sec付近と75sec付近で大きな変位が生じている。重力場実験では、入力最大の加速度は八戸波とシナリオ波ではあまり差はないが、そのケーソンの残留変位は大きく異なる。また遠心力場の実験では、シナリオ波加振による残留変位量は重力場実験と比較して小さく、その半以下となったが、振動台最大加速度は遠心力場実験のほうが大きい。したがって、最大加速度だけでケーソンの残留変位を説明するのが難しく、八戸波およびシナリオ波加振の比較から継続時間の長さが残留変

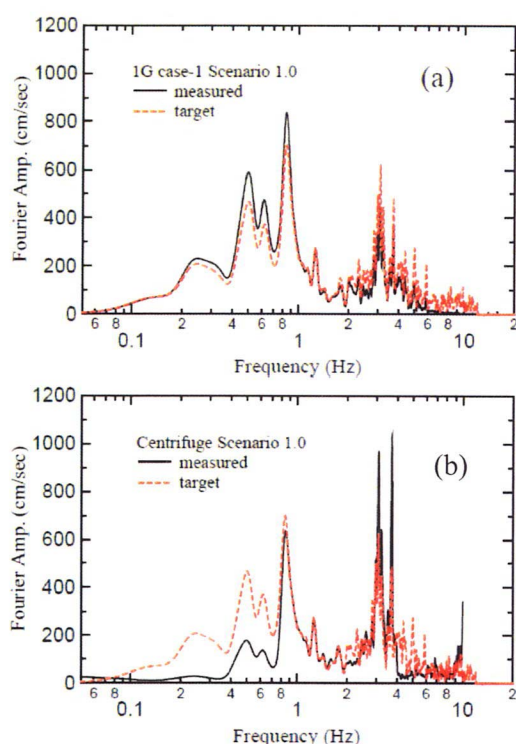


図-4 振動台加速度のフーリエスペクトル

(a) 重力場シナリオ波、
(b) 遠心力場シナリオ波

バンド幅0.1HzのParzenウィンドウを適用

位に影響することがわかる。また以下では特に重力場および遠心場でのシナリオ波加振に着目し、入力波形の成分の違いによる岸壁挙動への影響について検討する。

b) 重力場および遠心力場での入力シナリオ地震動の比較

本実験では所定の入力地震動により加振実験を行ったが、機械性能の都合上、振動台が完全に入力地震動を再現することは難しかった。図-2と図-3のシナリオ波加振時の振動台での加速度時刻歴を比較すると、重力場実験は目標に比べて振幅が小さく、遠心力場の実験では60sec以降で振幅が小さい。振動台加速度の差は、周波数領域でも見ることができ、遠心実験では重力場と比べて短周期成分は多く含まれているが、0.8Hzより小さい長周期域の成分があまり再現されていない（図-4）。これは、使用した油圧サーボ式の振動台が持つアキュミレーターの容量の限界により、シナリオ波の周期の長い揺れを再現することが困難であったためである。

このように、結果的に、実験でのシナリオ波は重力場、遠心場で異なるものとなった。これらの実験での入力地震波の時間領域での周波数分布の違い等の長周期成分の影響検討の詳細は別報⁷⁾に譲るが、残留変位は重力場実験のほうが大きく、重力場実験の波に多く含まれる長周期成分が残留変位に影響したことが確認された。

表-2 地盤の材料定数

	単位体積 重量 γ (t/m ³)	水中単位 体積重量 γ' (t/m ³)	基準有効 拘束圧力 σ_{v0}' (kPa)	基準初期 せん断弾性係数 G_0 (kPa)	基準体積弾 性係数 K_{v0} (kPa)	内部 摩擦角 ϕ_r (deg)	最大減衰	間隙率
基礎捨石 (水中)	1.936	0.936	8.0	25900	67543	55.1	0.16	0.423
裏込石 (水中)	1.772	0.772	4.0	9350	24383	53.9	0.20	0.517
裏込石 (気中)	1.255	—	4.0	9350	24383	53.9	0.20	0.517
埋立土 (水中)	1.901	0.901	20.0	45500	118657	41.1	0.30	0.454
埋立土 (気中)	1.447	—	20.0	45500	118657	41.1	0.30	0.454
海底地盤 (水中)	1.919	0.919	20.0	45500	118657	41.1	0.30	0.443

3. 数値解析による実験結果の検討

(1) 概要

ここでは重力場での振動台実験結果に対して、2次元有効応力解析プログラム FLIP による検討を行った。まず振動台実験を模擬した解析モデルを作成し、既往の研究等で実績のある八戸波により計算を行った上で、水中振動台実験結果と整合性のある最も適切な解析条件の同定を行った。その上でこれと同一条件下において長周期成分を含み、継続時間の長いシナリオ波による計算を行い、実験結果との整合性が八戸波のものと同等であるかを検討する。なお計算では、模型実験において振動台で実際に計測された加速度時刻歴を用いる。また、相似則による結果への影響を取り除くために、計算は模型スケールで行い、実験結果についても相似則を適用しないそのままの値で比較を行った。

有限要素分割においては、実験時のパルス加振より S 波速度 $V_s=100\text{m/s}$ 、繰返し中空ねじり試験よ

り $\gamma=5\%$ 時のせん断剛性低減率 $G/G_0=0.02$ 、また模型実験における加速度フーリエスペクトルから $f_{\max}=37\text{Hz}$ とし、次式により要素の鉛直方向幅の上限値 $d_{\max}$ を算定した。

$$d_{\max} = \frac{V_s \times \sqrt{G/G_0}}{5 \times f_{\max}} \quad (1)$$

これより $d_{\max}$ は 0.076m となり、鉛直方向のメッシュ分割はそれ以下となるようにした。FLIP における材料定数については、実際に作成された模型地盤の密度、室内試験より求められた結果を用いた (表-2)。また前述のように模型実験では液状化は発生していないため、ここでは液状化パラメータは設定せず、液状化が発生しない条件で計算した。

レイリー減衰 β については、自由地盤部を線形地盤と見なした場合の 1 次固有振動モードから求める方法がある。しかし八戸波加振に対する解析に対して、この方法では β が非常に小さな値となり、計算途中に発散が生じてしまった。そこで本検討では、FLIP 研究会で推奨されている、ジョイント要素の β

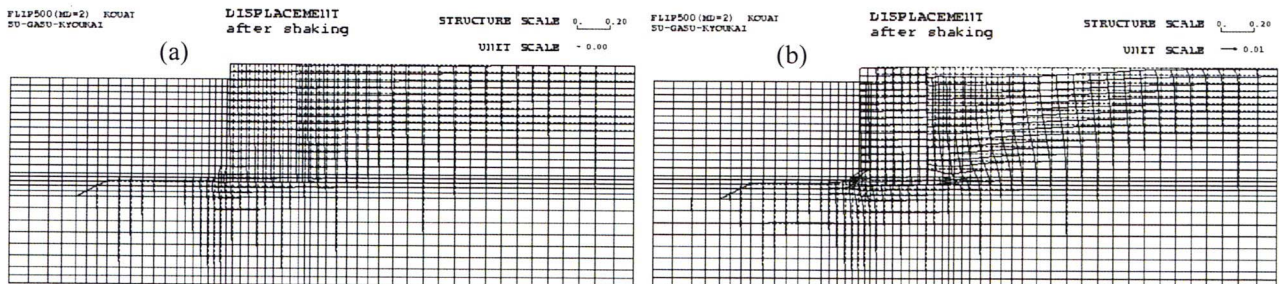


図-5 残留変形図 (a) 八戸波, (b) シナリオ波

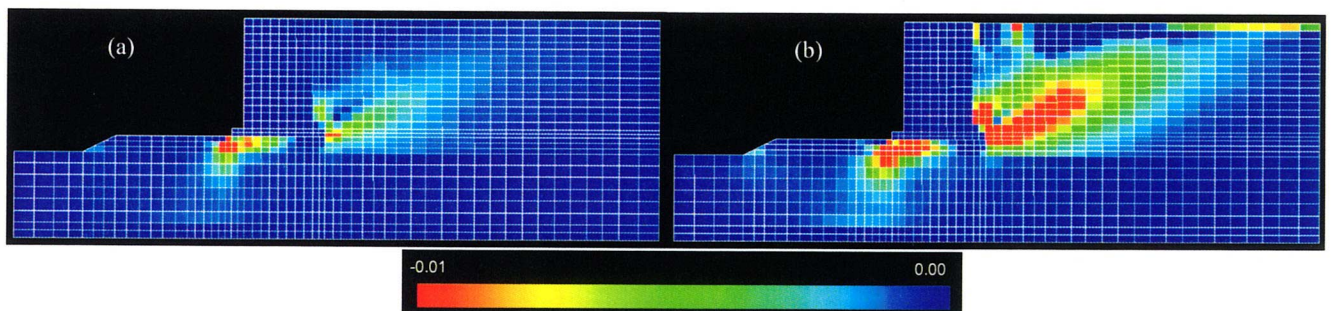


図-6 せん断ひずみ分布図 (解析終了後) (a) 八戸波, (b) シナリオ波

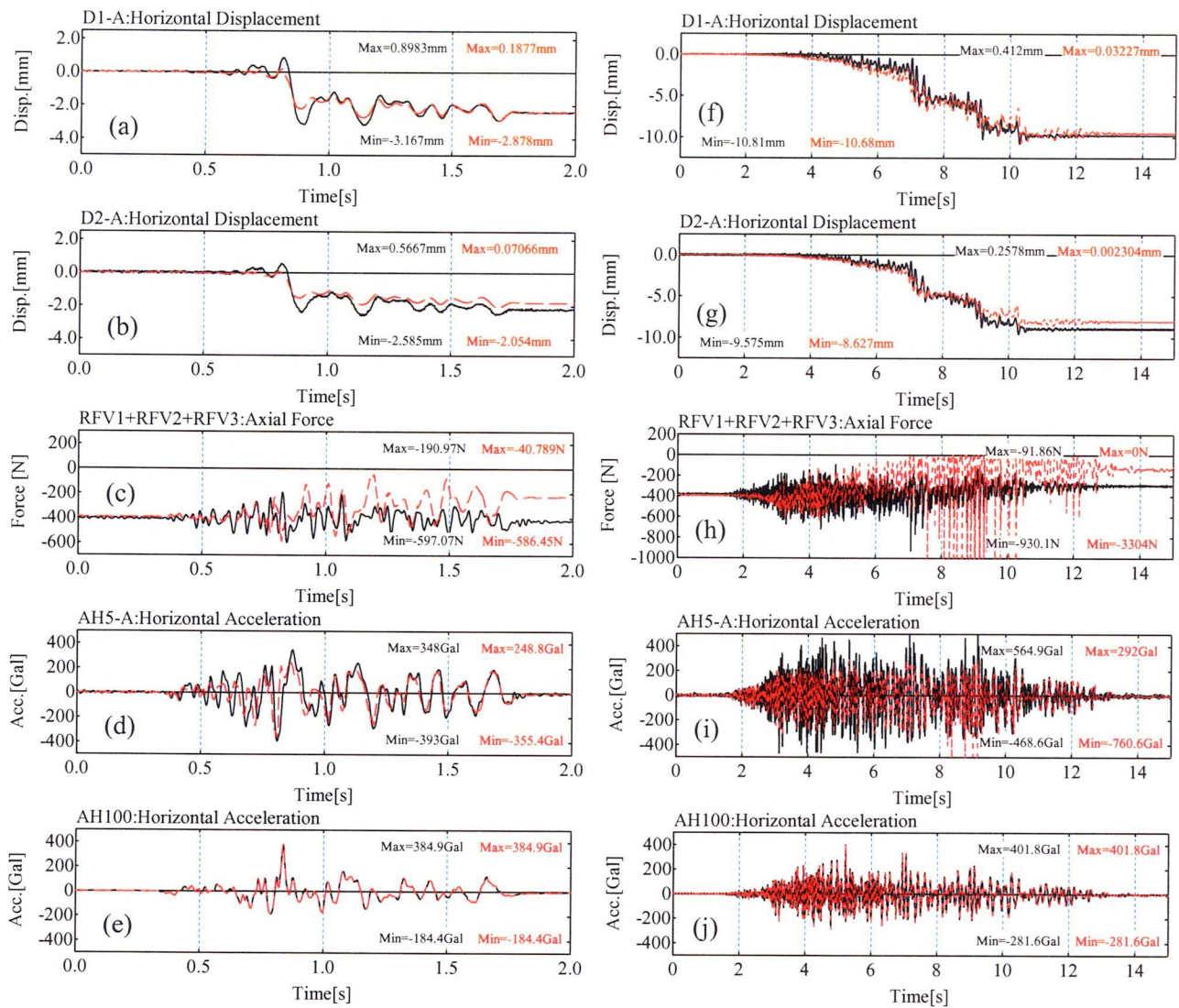


図-7 模型実験および有限要素解析の比較（実線：実験，破線：解析）

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| (a) 岸壁天端水平変位（八戸波加振） | (b) 岸壁下部水平変位（八戸波加振） |
| (c) 岸壁背面土圧（八戸波加振） | (d) 岸壁天端水平加速度（八戸波加振） |
| (e) 基盤加速度（八戸波加振） | (f) 岸壁天端水平変位（シナリオ波加振） |
| (g) 岸壁下部水平変位（シナリオ波加振） | (h) 岸壁背面土圧（シナリオ波加振） |
| (i) 基盤加速度（シナリオ波加振） | (j) 岸壁天端水平加速度（シナリオ波加振） |
- 計測位置は図-1を参照

をゼロとして解析ステップ Δt を小さくする手法⁸⁾を用いた．ここでは模型実験のサンプリング時間0.002secの半分の0.001secを Δt として用い，加振終了後に実験では見られない変位の振動が起らない最小の減衰として $\beta=0.0015$ を用いた．またシナリオ波加振に対する検討においても，同じ β および Δt を用いて計算を行い，同じ条件での長周期・長継続時間地震動へのFLIPの適用性について検討した．

(2) 解析結果

八戸波およびシナリオ波加振による残留変形図および残留せん断ひずみ分布をそれぞれ図-5および図-6に示す．シナリオ波加振でのケーソン変位は

八戸波加振よりも大きく，基礎捨石マウンドとケーソンの接触面（ジョイント要素）で滑りが生じているのが確認できる．せん断ひずみもシナリオ波加振のほうが大きく，ケーソンの底面反力が大きくなる海側の下部地盤（基礎捨石，海底地盤）およびケーソン背後の主働崩壊線近傍でせん断変形が大きくなっている．

詳細に実験と解析の結果を比較するため，それぞれの各時刻歴応答を重ね併せて図-7に示す．ケーソン天端の水平加速度の時刻歴は，八戸波加振およびシナリオ波加振ともに波の一つ一つの振幅の違いや少しのずれは見られるが，その傾向は良く一致している．

ケーソン背面に作用する荷重（土圧）については，

ジョイント要素の応力をもとにケーソン背面全体に作用する合力として算定した（圧縮側が負）．実験結果についてはケーソン背面の受圧版に設置したロードセルの値を足し合わせたものを示している（RFV1+RFV2+RFV3）．これらは、変位が大きく生じるまでは比較的合っている．しかしケーソン変位の発生以降の解析値は、特にシナリオ波加振においてスパイク状の波形が生じるなど、変動が大きくなっており、ジョイント要素の減衰をゼロとしたことが影響したと考えられる．

ケーソン上部および下部の水平変位については、加速度や土圧の応答の違いにもかかわらず、八戸波加振とシナリオ波加振ともに、実験と解析は動的な変動の生じる時刻や残留変位などが良好に一致している．土圧における実験と解析の違いは比較的大きいことから、この解析においては土圧の岸壁変形に与える感度はそれほど大きくなく、ケーソン変位にはあまり影響していないことが分かる．実際の岸壁挙動においてはより詳細な検討が必要であるが、この結果から推測すると、同様に土圧の影響は他に比べて小さいかもしれない．

結果として、FLIP による解析結果は八戸波、シナリオ波ともに、加速度や荷重の応答は実験結果と少し差があるものの、被災程度の推定の観点から最も注目すべきケーソン変位については良好に再現できた．シナリオ波による計算は、これまで実績のある八戸波を対象とした減衰や時間刻み等の解析条件と等しくして行ったものであり、したがって、本検討程度の規模の重力式岸壁における長周期・長継続時間を有する地震動に関する検討について FLIP が有効であることが確認された．ただし本検討では液状化の発生を抑制しているため、過剰間隙水圧が蓄積する場合には注意が必要である．

4. まとめ

本研究では、長周期・長継続時間地震下における重力式岸壁の挙動を検討するため、現行の設計で用いられる従来型のレベル 2 地震動および、構造物の建設予定地点について個別に推定したレベル 2 地震動を用いて模型振動を行い、また、有限要素解析 FLIP の適用性を検討した．結果をまとめると、以下のとおりである．

- (1) 重力場および遠心力場において、液状化を発生させない条件で模型振動実験を行った．シナリオ波の入力加速度レベルは八戸波と同等であっても、ケーソン残留変位は大きく異なり、継続時間の長さの影響が見られた．またシナリオ波による加振では、振動台加速度は、用いた振動台の性能により遠心力場と重力場で異なり、遠心力場での入力加速度は短周期成分が大きく、長周期成分は小さくなった．

ケーソン残留変位は重力場のほうが大きく、重力場実験での入力加速度により多く含まれる長周期成分の影響が大きいことが確認された．

- (2) FLIP による検討は、実験時に収録された振動台加速度を基盤加速度として扱い、模型縮尺における解析を行った．また解析条件について、八戸波とシナリオ波のそれぞれのケースで減衰や計算時間刻み幅等を等しくして、比較検討した．その結果、八戸波と同じ解析条件で長周期・長継続時間地震動であるシナリオ波の実験結果を再現することができ、非液状化時の本検討の規模程度の重力式岸壁における長周期・長継続時間を有する地震動に対する岸壁変形について FLIP による検討が有効であることが確認された．

謝辞：本研究においては、電源開発(株)中山義紀氏、(株)大林組樋口俊一氏に多くの貴重なアドバイスを頂いた．また、元港空研構造振動研究室枝秀紀氏には模型実験の実施において多くの協力を頂いた．ここに記して謝意を表します．

参考文献

- 1) 長尾毅, 岩田直樹, 藤村公宜, 森下倫明, 佐藤秀政, 尾崎竜三: レベル 1 地震動に対する重力式および矢板式岸壁の耐震性能照査用震度の設定手法, 国土技術政策総合研究所資料, 第 310 号, 2006.
- 2) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.25-56, 1990.
- 3) 高田直俊, 日下部治: 遠心模型実験 3.原理, 土と基礎, 地盤工学会, Vol.35, No.12, pp.89-94, 1987.
- 4) Iai, S.: 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, pp.3-24, 1988.
- 5) Wald, D.J. and Somerville, P.G.: Variable-Slip Rupture Model of the Great 1923 Kanto, Japan, Earthquake: Geodetic and Body-Waveform Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.85, pp.159-177, 1995.
- 6) 野津厚, 佐藤陽子, 菅野高弘: 羽田空港の地震動特性に関する研究 (第 2 報) スペクトルインバージョンによるサイト特性, 港湾技術研究所報告, 第 42 巻, 第 2 号, pp.251-283, 2003.
- 7) 小濱英司, 菅野高弘, 宮田正史, 野口孝俊: 長周期・長継続時間地震動を受ける重力式岸壁の挙動に関する模型振動実験, 地震工学論文集, 土木学会, 第 29 巻, pp.396-405, 2007.
- 8) 森玄, 佐藤成, 小堤治, 一井康二, 塩崎禎郎, 井合進: 二次元有効応力解析法の解析精度向上に関する検討ー重力式係船岸を対象としてー, 第39回地盤工学研究発表会講演集, pp.1841-1842, 2004.