模型振動実験を対象とした地震応答解析 における初期地盤モデルの検討

大矢 陽介1・小濱 英司2

¹正会員 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1) E-mail: ooya-y@p.mpat.go.jp (Corresponding Author)

²正会員 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1) E-mail: kohama-e83ab@p.mpat.go.jp

地盤・構造物の非線形地震応答解析における妥当性確認の基礎検討として、ケーソン式岸壁の振動実験 模型の初期地盤モデルについて検討を行った.実地盤の水平成層地盤(1次元モデル)を対象とした場合、 鉛直アレー記録をもとに、主に伝達関数に着目した初期地盤モデル(弾性定数)の妥当性確認が行われて いる.本研究では、1次元モデルの方法を参考に、模型振動実験を対象とした初期地盤モデルの検討を行 った.小規模地震動を対象に伝達関数の再現性を高めた初期地盤モデルを用いることで、中規模・大規模 地震動において各種地震動評価指標や、着目のケーソン式岸壁の水平変位における効果を確認した.

Key Words: seismic response analysis, shake table test, finite element method, validation

1. はじめに

土木学会地震工学委員会では 2017 年より「地盤・構造物の非線形地震応答解析法の妥当性確認/検証方法」 の体系化に関する研究委員会では、地盤・構造物の非線 形地震応答解析を対象として、その妥当性確認のための 手法の体系化を目的とした取り組みを行っている¹⁾. そ の検討の中で妥当性確認の実施手順の初めとして、初期 地盤・構造物確認(線形)を行うものとし、実地盤(水 平成層地盤)を対象に鉛直アレー記録を用いた初期地盤 モデルの妥当性確認が検討されている.

本研究では、1次元モデルの方法を参考に、模型振動 実験を対象とした初期地盤モデルの検討を行った.小規 模地震動を対象に伝達関数の再現性を高めた最適モデル を用いることで、中規模・大規模において各種地震動評 価指標や、着目のケーソン式岸壁の水平変位に及ぼす影 響を確認した.

2. 検討対象

(1) 模型振動実験の概要

本検討では、耐震設計の対象となるレベル2地震動に ついて、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するために実施した模型振動実験^{2,3)}を対象と した.また,有効応力解析コード FLIP⁴を用いて,同じ 解析条件で入力地震動が異なる模型実験の結果の差異を 再現できるか確認された.本研究では,この時の模型実 験および数値解析のデータを用いた.

縮尺比 1/50 のケーソン式岸壁の模型断面を図-1 に示す. 実験は 1g 場の振動実験であり,実験の詳細は,文献 2) および 3)を参照されたい.

模型実験で入力した地震波形は、図-2に示す2波である.一つは、港湾の設計で用いられていた 1968 年十勝 沖地震の際に八戸港で記録された地震記録(以降,八戸 波と呼ぶ)である.もう一つは、南関東地震を想定した シナリオ地震動で、関東の空港の設計実務で使われてい た地震波形(以後、シナリオ波と呼ぶ)である.シナリ オ波は八戸波より 10 倍程度継続時間が長く、フーリエ 振幅もほぼ全ての周波数帯で八戸波より大きい特徴を有 している.

(2) 模型地盤の初期地盤モデル

模型地盤の力学特性を把握するには、模型地盤に合わ せた条件で力学試験を実施すれば良いと言える.しかし、 特に大型模型実験では、地盤を目標の相対密度通り製作 することは困難な場合が多く、模型の寸法を投入試料の 重量から求めた相対密度は、目標値との差が大きく乖離 している場合も少なくない.模型地盤が目標通り製作で







図-2 入力地震動の比較²⁾

表-1 加振実験の内容

名称

P1

P2

P3

八戸波0.5倍

八戸波2.0倍

シナリオ波1.0倍

加振実験内容

パルス波(50Gal)

パルス波(50Gal)

パルス波(50Gal)

本加振(八戸波0.5倍)

本加振(八戸波1.0倍) 本加振(八戸波1.5倍) 本加振(八戸波2.0倍)

本加振(シナリオ波0.5倍)

本加振(シナリオ波0.5倍)

		P1	P2	P3	P2とP3の	I
					【半均值】	ļ
固化地盤	ケーソン下	51	68	102	85	
海底地盤	海側①	154	66	77	71	I
	海側②	307	-84	-92		
	ケーソン下	230	102	132	117	
	背後地盤①	184	132	154	143	
埋立地盤	背後地盤①	124	79	83	81	I
	背後地盤②	81	90	90	90	単位:m/s

表-2 パルス波加振による計測されたS波速度

*赤字は到達時刻が逆転した結果

きたか確認する目的にS波速度を測ることがある.砂地 盤であればベンダーエレメントを用いることができ、振 動実験では模型を加振することで、加速度センサー間の 波形の伝達速度からS波速度を求めることができる.本 研究が対象とする模型実験では、後者の方法によりS波 速度が計測された.

表-1 は加振実験の内容で、手順を示している。一つの 模型を対象に数回加振実験を行うステップ加振が行われ、 主要な加振実験の前後にはパルス波を用いた加振が行わ れている.図-1に示したセンサー同士の加速度記録から 求めたS波速度を表-2に示す.加振実験では液状化して いないことが確認されているが,回数を重ねることで地 盤が密実化し,S波速度が大きくなることは考えられる. しかし,パルス波PIの結果は、後に実施したP2やP3よ り極端に大きいことから、本検討ではP2とP3の平均値 を地盤のS波速度として後の検討の参考とした.なお, 試料の投入重量から求めた海底地盤の相対密度は74%, 埋立地盤は66%であったが、海底地盤(背後地盤)のS

表-3 地盤の材料定数(基本ケース) 99

	単位体積	水中単位	基準有効	基準せん断	基準体積	内部		
	重量	堆積重量	拘束圧	弾性係数	弾性係数	摩擦角	最大減衰比	間隙率
	γ (t/m ³)	γ' (t/m ³)	σ'_{m0} (kN/m ²)	G_{m0} (kN/m ²)	K_{m0} (kN/m ²)	ϕ_f (deg.)		
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

表-4 検討ケース一覧

検討ケース	パラメータβの値	地盤定数
Case1	0.0005	基本ケース
Case2	0.0005	海底地盤のせん断剛性を基本ケースの1.2倍
Case3	0.0015	海底地盤のせん断剛性を基本ケースの1.2倍





波速度は埋立地盤の1.5程度であった.

3. 検討内容

(1) 検討方針

初期地盤モデルの検討として、線形応答の範囲におけ る地盤材料の弾性定数を対象として、観測/実験との比 較による再現性の評価により、モデルの不確実性ととも に最適モデルの設定を行う⁾.本研究では、入力地震動 が最も小さな八戸波 0.5 倍においても残留変位が発生し たことから厳密には線形応答ではないが、その量は小さ く線形の範囲と考え、最適モデルの検討を行う.最適モ デルが、入力加速度が大きく非線形応答に与える影響、 地盤モデルの影響が構造側(ケーソン)に与える影響を 確認する. 逐次積分による非線形地震応答解析では、剛 性比例型減衰(レーリー減衰*β*項)の設定が地震時応答 の鍵となる.本研究では、弾性定数およびパラメータ*β* について検討した.

(2) 材料定数

解析には、既往の研究²⁾で実施された FLP のデータを 用いる.解析に用いた材料定数は、実際に作成した模型 地盤の密度、室内試験液化より求められた結果を用いた. 埋立地盤および海底地盤は相対密度 70%、有効拘束圧 20kPaの繰返しせん断試験結果等を用いた.

(3) 入力加速度

表-1 に示した加振実験のうち,八戸波 0.5 倍,2.0 倍, シナリオ波 1.0 倍を対象とした.解析の入力データとし て用いた加速度波形を図-3 に示す.なお,模型実験はス テップ加振として,一つの模型に対して連続して加振実 験を行うが,解析ではステップ加振を行わない.

(4) 検討ケース

既往の検討²では、レーリー減衰のパラメータβについて1次固有周期から求めたβを設定することで、解析が発散したケースがあったためβ=0.0015としている.解析が発散しやすい理由の一つとして、ケーソンとケーソン底面の基礎捨石およびケーソン背後の裏込石との境界に設けたジョイント要素が減衰力によって滑動することを抑制されることを避ける目的で、ジョイント要素には個別にレーリー減衰を設定し、減衰が働かないような設定をしていることが考えられる.本検討では、1次固有





周期(後述する八戸波0.5倍で0.05s)で減衰定数3%相当 であるβ=0.0005およびβ=0.0015について検討した.

また,前述のように埋立土と海底地盤の材料定数として,相対密度70%の結果を用いたが,S波速度で両者に1.5倍程度の差があったこと,八戸波0.5倍の検討より岸壁の変形量が大きかったことから,海底地盤のS波速度について,海底地盤中央深度でS波速度を約1.2倍としたケースについて検討した.

検討した地盤モデル3ケースを表4に示す.

4. 検討結果

3波(八戸波0.5倍,20倍,シナリオ波1.0倍)の検討 結果として、時刻歴波形および伝達関数をそれぞれ、図 -4、図-5および図-6に示す.

(1) 八戸波 0.5 倍の結果



図-5 八戸波 2.0 倍の解析結果

基本ケース Casel の岸壁背後地盤の伝達関数(b)に 着目すると、低周期側のピークが 20Hz となり、実験結 果の1次固有振動数と一致し、振幅比のおおよそ同じ値 となった.固有振動数より高振動数側の 30Hz までは振 幅比が一時小さくなるが、更に高振動数側で振幅比が過 大となった.地表面の加速度波形(a)は、実験結果と 類似の波形とったが、8.5s 付近や波形の山でスパイク状 の波形が確認でき、解析が不安定になっている可能性が 示唆される.岸壁天端の変位波形(c)は、加速度がス パイク状となったタイミングに変位が大きくなったこと から、ケーソンの滑動によりジョイント要素に相対変位 が発生したことが、スパイク状波形の原因と考えられる. 残留変位は0.4mmとなり、実験結果の2倍以上である.

海底地盤の S 波速度を 1.2 倍とした Case2 の伝達関数 (b)) は 1 次固有振動数の振幅比が Case1 よりもやや小



a)岸壁背後地盤(AH15)の地表面加速度時刻歴



b)岸壁背後地盤の伝達関数(AH15/AH100)



図-6シナリオ波 1.0 倍の解析結果

さくなったが、高振動数で増幅が実験より大きくなる傾向は Casel と同じである. 岸壁天端の残留変異は(c)) Casel の半分程度となり、実験結果と同程度となった. ケーソンの基礎地盤を含め海底地盤の剛性を大きくしたため、その上のケーソンの変形が小さくなったと考えられる.

S波速度の変更に加えてβを大きくした Case3 の伝達関数 (b)) は、Case2 よりも全体的に振幅比が小さくなり、 高振動数で振幅比が小さく抑えられて、実験結果に近づ いた.地表面の加速度波形 (a)) は、βが小さい Case1 や Case2 で見られたスパイク状の波形が無くなり、波形の 山がやや丸くなり、減衰が働いていることが分かる.

八戸波0.5倍のケースでは,βが小さいと伝達関数の高 振動数側で振幅比が過大となり,加速度のスパイク状の 応答が現れた,ケーソンの変形量も大きくなったと考え られる.1 次固有振動数でのスペクトル形状が一番実験 と乖離したのは Case3 であるが、加速度波形は安定し、 変形量は実験と近づいた.

(2) 八戸波2.0倍の結果

八戸波 20 倍の結果の傾向は、0.5 倍とおおよそ同じで ある. 伝達関数 (b)) は明瞭なピークが見られなくなり、 振幅比も小さくなったため、線形応答から非線形応答へ 移行したと考えられる. 加速度波形 (a)) ではスパイク 状の形状は見られなくなったが、3 ケースの差が小さく なった. 変位波形 (c)) は、0.5 倍で同程度の変位であっ た Case2 と Case3 で違いが現れ、Case2 が変位を過大評価 する結果に変わった.

(3) シナリオ波1.0倍の結果

シナリオ波の結果は、八戸波の2つの結果と傾向が変わり、Casel・Case2と Case3で結果の差異が明らかである. Case3は伝達関数(b))の20Hz付近でCase1やCase2と比べて振幅が小さくなったが、高振動数側で実験と同程度の振幅比となった.加速度波形(a))も同様に、Case3の振幅が他のケースおよび実験結果より小さくなった.変位波形(c)はCase1とCase2は4s辺りから変位が増加し、実験結果の乖離が明瞭に現れた.一方、Case3の変位波形は、実験結果とおおよそ相似形で、残留値もほぼ同じとなった.

(4) 評価指標のレーダーチャート

ケース毎に各種地震動評価指標を求めて、レーダーチ ャートによる比較を行った.図-7に波形毎に各ケースの レーダーチャートを示す.レーダーチャートを用いるこ とで視覚的に分かりやすく、多面的に表示することで、 初期地盤モデルの性能について公平な視点で評価するこ とが可能になる.評価指標は、筆者らが地震応答解析手 法の適用性を比較した際 ⁹に用いた指標に加えて、アリ アス強度および岸壁の残留水平変位を用いた.ただし、 残留水平変位だけは岸壁位置での出力結果で、その他の 指標は地表面地盤での出力結果である.なお、値は解析 結果を実験結果で除した値である.

残留変位は、いずれの波形においても Casel, Case2, Case3 の順に小さくなり、Case3 は 1.0 に近く、すなわち 実験結果に最も近い結果となった. 残留変位と比べると、 他の指標の感度は小さい結果となり、その中で、加速度 に直接関係する指標である PGA、ARIAS、A0 について Case1・Case2 と Case3 の違いが明らかで、レーリー減衰 の影響が表れたと考えられる.

5. おわりに

岸壁の地震時変位については、岸壁背後の埋立土より も岸壁直下の基礎地盤の応答の方が影響が大きいことが 知られている.本検討では背後地盤の深さ方向の構造を



図-7 評価指標を比較したレーダーチャート PGA:最大加速度(Gal), ARIAS:アリアス強度(m/s), A0:震度用加速度(Gal), SI:スペクトル強度(m/s), PSI:PSI値(速度のパワースペクトル強度, m/s⁰⁵), PGV:最大速度(m/s), RESIDUAL DISP:ケーソンの残留水平変位

評価することで、結果的にケーソン直下地盤の評価にも 繋がり、地盤モデルの性能を向上することができた.

参考文献

- 中村晋,吉田望,末冨岩雄:非線形1次元地震応答 解析法の妥当性確認手法に関する一考察,第39回地 震工学研究発表会講演論文集,論文番号1462, 10pp.,2019.
- 2) 菅野高弘,小濱英司,塩崎禎郎,宮田正史,野口孝 俊: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,海洋開発論文集,第 24巻,pp.219-224,2008.
- 小濱英司,高野高弘,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,土木学会地震工学論文集,第 29巻,pp.396-405,2007.
- Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 5) 大矢陽介,野津厚,吉田望,小濱英司,菅野高弘: 地盤の地震応答解析の精度評価ツールとしてのレー ダーチャートの提案と各種解析手法の適用限界の検 証,日本地震工学会論文集,第14巻,第1号, pp.97-116,2014.

EXAMINATION OF INITIAL GROUND MODEL IN SEISMIC REESPONSE ANALYSIS FOR SHAKE TALBE TEST

Yousuke OHYA and Eiji KOHAMA

As a basic examination of the validation in the nonlinear seismic response analysis of the ground/structure, the initial ground model of the caisson type quay wall for shake table test model was examined. In the case of the real ground (one-dimensional model), the validation of the initial ground model (elastic constant), which mainly focuses on the transfer function, has been confirmed based on the vertical array record. In this study, the initial ground model for the shake table test was examined with reference to the one-dimensional model method. By using the initial ground model with improved reproducibility of transfer function for small-scale ground motions, we confirmed the effects of various ground motion evaluation indices and horizontal displacement of the caisson-type quay of interest in medium- and large-scale ground motions.