

2次元有効応力解析のパラメタ感度解析 (その2)

井合 進¹・小堤 治²・岡 由剛³

¹ 正会員 運輸省港湾技術研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)
² 正会員 (株)日本科学技術研修所(〒151-0051 渋谷区千駄ヶ谷 5-10-9)
³ 正会員 (財)沿岸開発技術研究センター(〒102-0092 千代田区亀町 3-16)

前報 (その1) に引き続き、ケーソン式岸壁を対象としたパラメタ感度解析を行った。2次元有効応力解析によるケーソン式岸壁の変位については、時間積分間隔や時間積分法の相違の影響は無視し得る程度に小さいが、微小レーレー減衰行列 ($\alpha M + \beta K; \alpha = 0$) のパラメタ β の影響が著しいことがあきらかとなった。検討した β の範囲内では、それ以上 β を小さくしても応答値が変化しなくなるような臨界値は見られなかった。これらの解析結果と合わせ、自由地盤のパラメタ解析を実施し、 β の算定方針について考察した。

Key Words: Finite Element Analysis, Effective Stress, Liquefaction, Parametric Study, Two Dimension

1. はじめに

前報¹⁾に引き続き、ケーソン式岸壁断面を対象として、2次元有効応力解析のパラメタ解析を行った。検討に用いた解析モデル (有効応力法による構造物被害予測プログラム FLIP²⁾) および基本モデルのパラメタは前報に示すとおりとし、本論文では、時間積分に関するパラメタ解析を対象とした。

2. ケーソン式岸壁の感度解析結果

(1) 基本モデルと感度解析パラメタ

感度解析の基本モデルは、高さ 13m のケーソンを厚さ 14m の置換砂上に建設したもので、置換前の海底地盤は厚さ 14m の沖積粘土層で構成され、ケーソン背後はまさ土で埋立てられている²⁾。基本モデル解析による残留変位は図-1 に示すとおりケーソン背後から置換砂層の範囲に広がっており、ケーソンとその周辺の地盤との動的相互作用の結果としてケーソンの変形が発生している²⁾のが特徴である。

時間積分に関する主要なパラメタとして、本論文では、表-1 に示す3種類に注目した。このうち、レー

表-1 感度解析対象パラメタ

パラメタの種類	感度解析に使用したパラメタ
レーレー減衰 β	$\beta=0.01, 0.005, 0.002, 0.001, 0.0005$
時間積分法	Wilson($\theta=1.4$), Newmark($\alpha=0.25, \delta=0.5$)
積分時間間隔(s)	$\Delta t=0.01, 0.005$

レー減衰 β とは、数値解析の安定性を確保するために用いている微小レーレー減衰行列 ($\alpha M + \beta K; \alpha = 0$) のパラメタ β を意味する。感度解析は、これら3種類のパラメタの全ての組合わせに対して実施した。なお、同表で下線を付したパラメタ値が基本モデルのパラメタである。

(2) 感度解析結果

感度解析結果を、ケーソンの残留変位 (海側への変位を負とする) と最大加速度 (絶対値) について、図-2 にとりまとめた。同図に見られるとおり、ケーソンの残留変位については、積分時間間隔、積分方法の影響は無視し得る程度に小さいが、レーレー減衰パラメタ β の影響が著しい。残留変位の絶対値は β が小さくなるにつれて増大し、少なくとも今回検討した β の範囲内では、それ以上 β を小さくしても変化しなくなるような β の臨界値は見られなかった。この結果は、前報の1次元解析結果¹⁾とは対照的である。

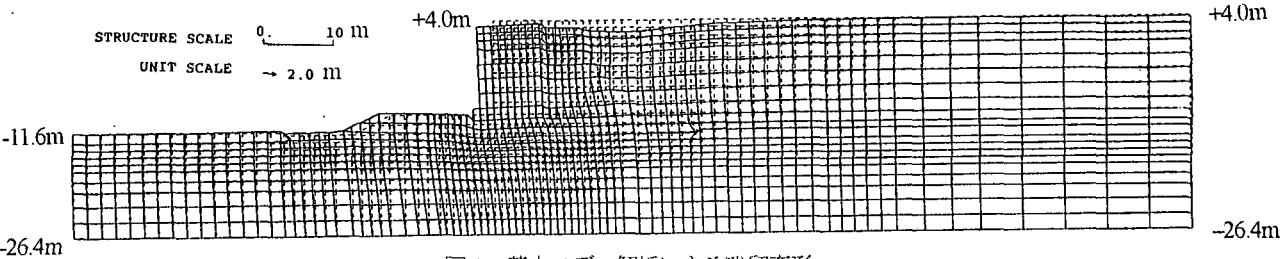
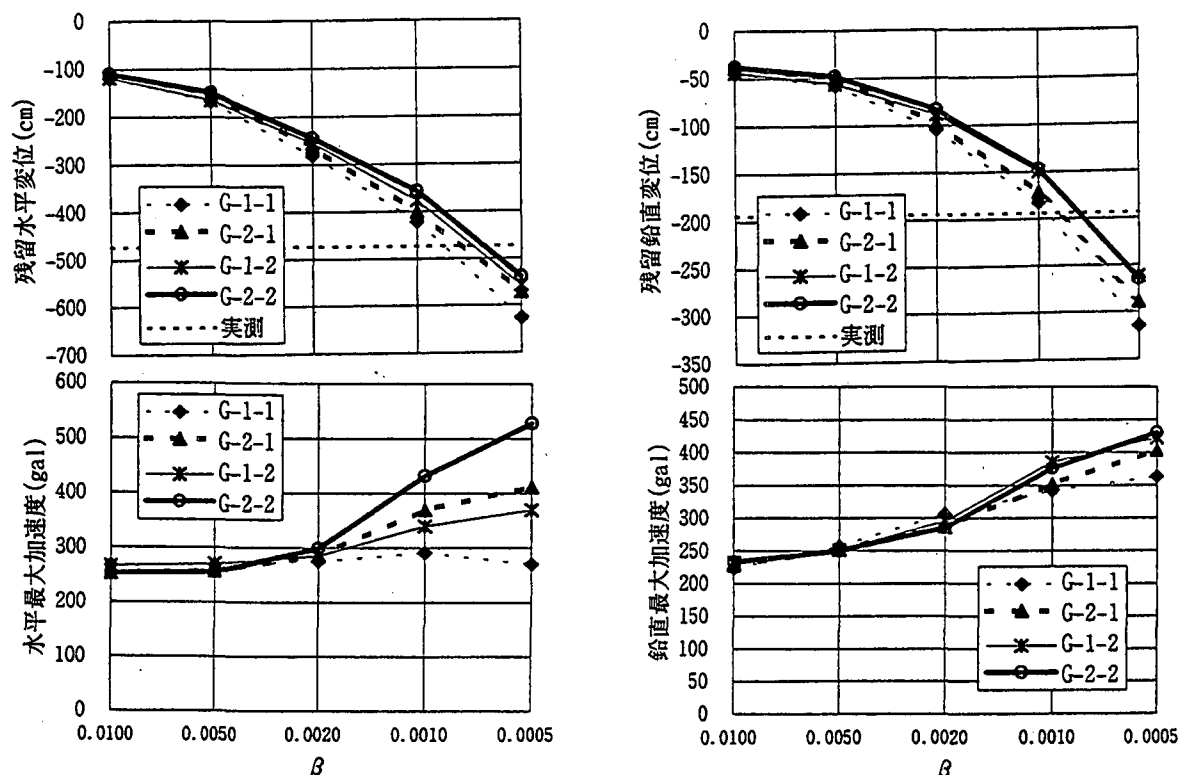


図-1 基本モデル解析による残留変形



[INDEX] G-1-1: $\Delta t=0.01s$ (Wilson- θ) / G-2-1: $\Delta t=0.005s$ (Wilson- θ) / G-1-2: $\Delta t=0.01s$ (Newmark) / G-2-2: $\Delta t=0.005s$ (Newmark)

図2 ケーソン式岸壁の地震応答解析結果に与える時間積分関連パラメタの影響

なお、試みに $\beta=0.0$ として解析したところ、解析途中で発散して解を得ることができなかった。

図2の残留変位に「実測」と示したものは、解析対象岸壁の地震後の残留変形レベルである。解析に用いた基本モデルのパラメタのうち、レーレー減衰以外のパラメタがすべて妥当であるとすれば、この解析例では、 $\beta=0.0005\sim0.001$ が適当であることとなる。

図2では、最大加速度も β が小さくなるにつれて増大し、積分時間間隔や積分法の影響も著しくなる傾向が見られる。しかし、加速度応答時刻歴に基づく比較では、これらの最大値が主にノイズ状の高振動数成分の最大値に対応しており、これらの高振動数成分を取除いた加速度成分を目視により比較した結果では、 β をはじめとする時間積分関連のパラメタの影響は無視し得る程度であった。

3. 自由地盤部の感度解析

2次元解析での変位に与えるレーレー減衰パラメタ β の影響が無視し得るようになる臨界値が見られなかった理由としては、以下の2つの可能性が考えられる。第1は、解析の対象とした地盤条件が前報で対象とした1次元解析¹⁾の地盤条件とは異なること、第2は、2次元解析での応力状態、特にケーソン周辺地盤の応力状態が、せん断破壊線近傍にあり、1次元解析での応力状態と著しく異なる点があること、である。このうち、第1の可

能性について検討するため、前報での1次元解析に準じて、2次元解析での側方自由地盤（海側・陸側）のパラメタ感度解析を実施した。感度解析対象パラメタは表-1と同じである。

解析結果は図-3,4に示すとおり、陸側自由地盤では、前報の釧路港地盤の1次元解析¹⁾と同様の結果が得られ、 $\beta=0.001\sim0.002$ 程度が臨界値と見られる。これに対して、海側自由地盤部の海底面（地盤面）における最大相対水平変位については、 β の臨界値が見られなかった。しかし、 $\beta=0.0$ として解析を行っても、海底面の最大値は無限大となることはなく、また、海底面（地盤面）を除く点での最大変位分布は $\beta=0.0005$ ないし 0.001 の場合の分布に近い。従って、地表を除く地中の変位分布に対しては、海側自由地盤部でも β の臨界値が存在すると見ることができる。

自由地盤の感度解析の応用編として、FLIPおよびSHAKE（1次元等価線形解析）で全応力法による地震応答解析を行い、結果を比較してみた。FLIPの解析では、過剰間隙水圧が全く上昇しないようにモデルパラメタを設定した。SHAKEの $G/G_0\sim\gamma$ 曲線等は、FLIPの構成則に合わせて、双曲線モデルから導いた拘束圧依存性のある曲線を使用した。FLIPの解析では β を $0.0005\sim0.01$ までの5通りに変化させ、SHAKEの解析では有効せん断ひずみ γ_{eff} を求めるために最大せん断ひずみ γ_{max} に乗じる係数 α を、 0.65 と 1.0 の2通りに変化させた。図-5に海側地盤の解析結果を示す。同図にも見られるとおり、

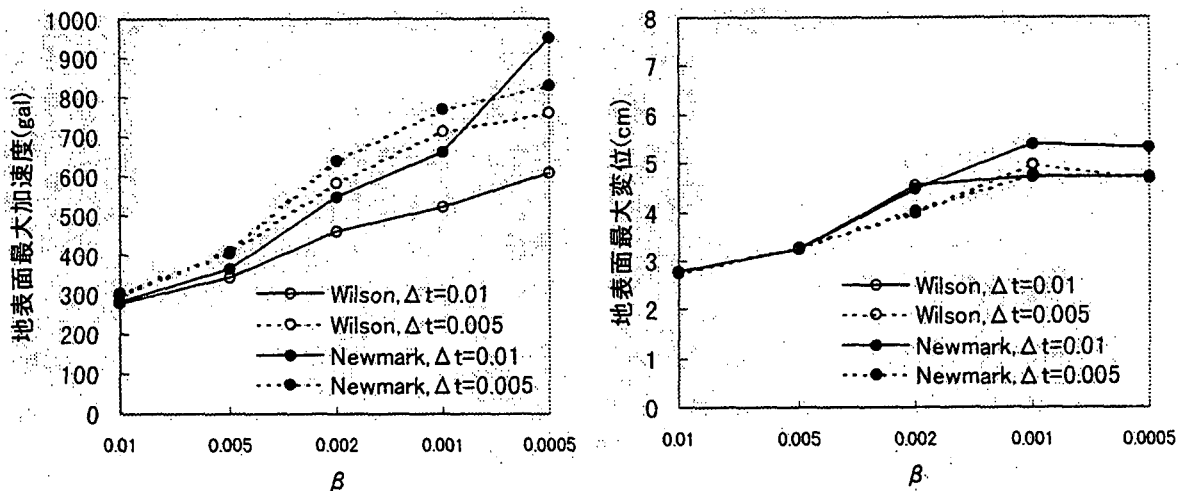


図-3 陸側自由地盤部の地表面の最大水平加速度と最大相対水平変位

$\alpha=0.65$ の場合の SHAKE の最大応答値分布は FLIP のどの結果とも整合的でないこと、 $\alpha=1.0$ の場合の SHAKE の最大変位分布は、海側自由地盤部では $\beta=0.0005$ の場合（陸側自由地盤では $\beta=0.005$ ）に FLIP の解析結果と一致するものとなった。なお、今回の解析条件のように、入力地震動レベルが著しく高く、地盤がせん断破壊状態となる場合には、 $\alpha=1.0$ とすると SHAKE が地盤の非線形最大応答値をよく近似するようになる点は興味深い点であり、今後さらに詳細に検討を進めるべき点であろう。

4. レーレー減衰パラメタ β の算定方針

レーレー減衰パラメタ β は、本来は土の力学的特性により定まる物理的意味合いを持つものと考えられるが、土の挙動に関する力学的考察に基づいてその素性を明らかにすることは、現状では困難である。しかし、2次元

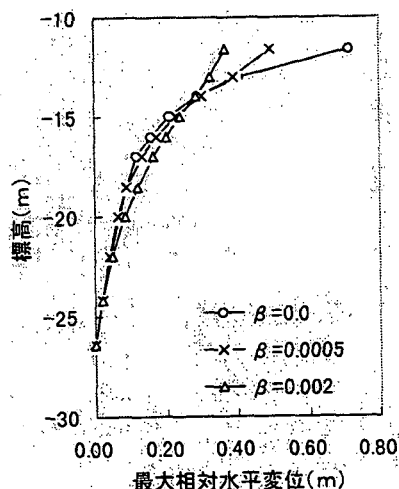


図-4 海側自由地盤部の変位分布 (Wilson, $\Delta t=0.01s$)

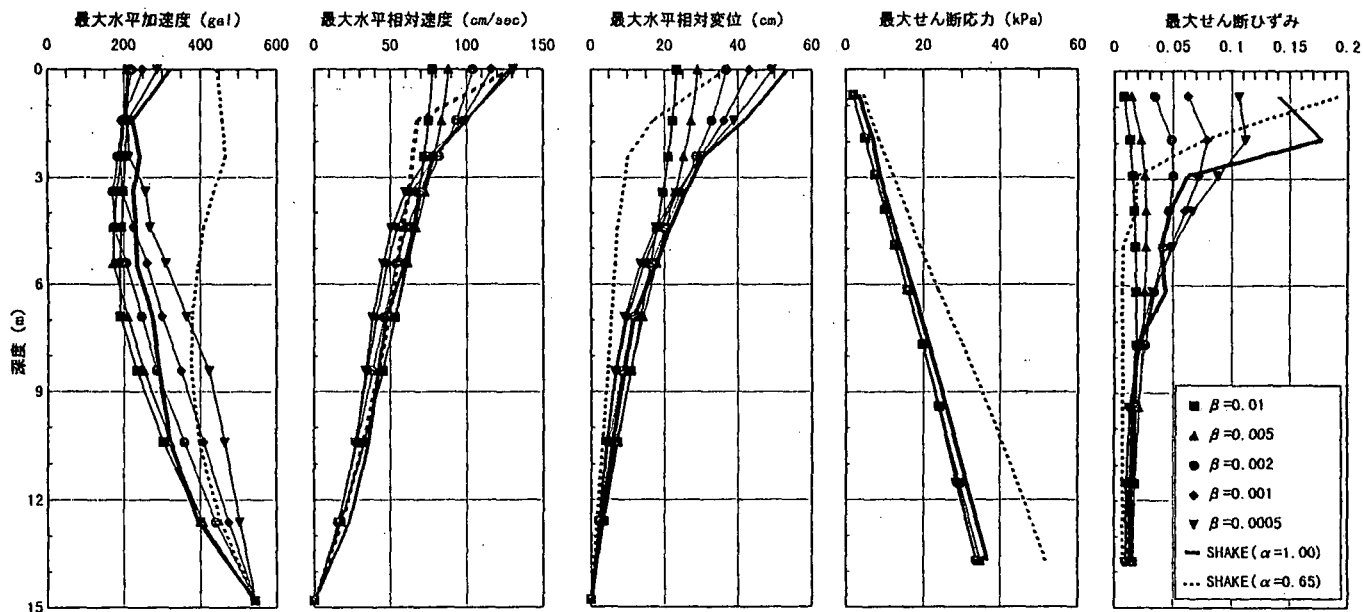


図-5 海側自由地盤部の FLIP と SHAKE による全応力解析結果の比較

有効応力解析により工学的に満足できる精度の解析結果を得るためには、何らかの方法で工学的に妥当性を有する β の値を算定しなければならない。数値解析の現状を踏まえ、それなりに現実性を有すると思われる算定方針をまとめれば、以下のとおりである。

β の算定において、最も標準的な方法は、解析対象とする地盤・構造物系と類似する既往の地震被害事例に基づいて算定する方法であり、これが最も信頼性の高い β の値を与える。既往の被災事例が得られていない新形式の構造物などにおいては、既往の被災事例に代えて、模型振動実験を実施し、その結果に基づいて β を算定することにより、既往の被災事例に基づく方法に次いで信頼性の高い β の値を求めることができる。

耐震性能照査を目的とする解析実務においては、以上の標準ケースに該当しない場合もあり、これらの場合には、前報¹⁾および前章で検討してきたように、自由地盤部の土層構造を用いて β を算定する方法を採用することが現実的と思われる。この方法として、以下の3つが考えられる。

(1) 方法1：地盤応答に影響を与えなくなる臨界点に基づく方法

前章に準じて FLIP により自由地盤部の地震応答解析を行い、最大地震応答の地中分布が変わらなくなる β の臨界点をもって β を決定する。地盤の地震応答としては、加速度、速度、変位などがあるが、対象とする構造物の設計において、例えば地盤相対変位が支配的な影響を与えると考えられる場合には、 β の決定においても相対変位の地中分布に基づくことが適当である。

(2) 方法2：自由地盤部の固有周期と減衰定数（1%を目安）に基づく方法

自由地盤部の土層構造を用いて、その1次固有周期 T_0 を求め、それと微小ひずみ時の土に見られる小さな減衰定数 h （=1%程度）から、 $\beta=hT_0/\pi$ により算定する。

(3) 方法3：等価線形解析結果との比較による方法

前章に準じて、SHAKE と FLIP との比較により β を決定する。この際、 $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線等は FLIP の構成則と整合するように双曲線モデルに基づく曲線を使用、また、FLIP は SHAKE の条件と合わせるため、過剰間隙水圧の発生を考慮しない設定として解析することに注意したい。

以上の3方法を基本モデルに対して適用した結果、

表-2 に示すような β が得られた。この表によれば、(3)の方法による陸側自由地盤部を対象とする計算値がやや大きめであるのを除けば、どの方法でも同様の値が得られるようである。同表には、前報¹⁾に示した釧路港1次元地盤モデルに対して算定した β も合わせて示した。これら3方法は、その説明からも理解されたとおり、最大相対変位分布を用いる場合には、原理的にも概ね同等と考えられる。解析条件に応じて、適切な方法を選択することが望ましい。

表-5 種々の方法により算定したレーレー減衰パラメタ β

方法		ケーソン式岸壁		釧路港地盤モデル
		陸側自由地盤	海側自由地盤	
基本解析モデル		0.002	0.002	0.0005
方法1	液状化考慮	0.001 ~ 0.002	—	0.0005 ~ 0.001
	液状化無視	0.002	0.0005 ~ 0.001	0.001
方法2 (h=1%)		0.002	未検討	0.003
方法3 ($\alpha=1.0$)		0.005	0.0005	未検討

5. まとめ

2次元有効応力解析によるケーソン式岸壁の変位については、時間積分間隔や時間積分法の相違の影響は無視し得る程度に小さいが、微小レーレー減衰行列のパラメタ β の影響が著しく、それ以上 β を小さくしても応答値が変化しなくなるような臨界値は見られなかった。これらの解析結果と合わせ、自由地盤のパラメタ解析を実施し、 β の現実的な算定方針について考察した。

なお、本論文は、FLIP の改良と高度利用法の研究を推進する目的で設立された FLIP 研究会（事務局：（財）沿岸開発技術研究センター他）の活動の一環として実施された研究成果をとりまとめたものである。また、運輸省第三港湾建設局には、本解析に用いたデータの提供等でご協力いただいた。

参考文献

1) 小堤 治・井合 進・岡 由剛：1次元有効応力解析のパラメタ感度解析、第25回地震工学研究発表会講演論文集、1999（投稿中）
2) 岡 由剛・井合 進・小堤 治：2次元有効応力解析のパラメタ感度解析（その1）、第25回地震工学研究発表会講演論文集、1999（投稿中）
3) Iai, S., Y. Matsunaga, T. Kameoka: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992