

2次元有効応力解析のパラメタ感度解析(その1)

岡 由剛¹・井合 進²・小堤 治³

¹正会員 (財) 沿岸開発技術研究センター(〒102-0092 千代田区隼町 3-16)

²正会員 運輸省港湾技術研究所構造部(〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

³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)

前報「1次元有効応力解析のパラメタ感度解析」に引き続き、ケーソン式岸壁を対象として2次元有効応力解析のパラメタ感度解析を行った。その中から、置換砂及び基礎捨石の初期せん断剛性、せん断抵抗角等についてのパラメタ感度解析結果を示す。解析結果によれば、置換砂のせん断抵抗角は応答値に大きな影響を及ぼすが、初期せん断剛性の影響は比較的小さいことがわかった。また基礎捨石の初期せん断剛性あるいはせん断抵抗角を大きくすると、予想に反してケーソンの残留変位が大きくなる結果が得られた。

Key Words: Finite Element Analysis, Effective Stress, Liquefaction, Parametric Study, 2-Dimension

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震の際に被災した神戸港六甲アイランドRF3岸壁(重力式岸壁)の2次元モデルを利用して、有効応力法に基づく構造物被害予測プログラムFLIP¹⁾による解析を行う上で設定すべき各種パラメタの感度解析を実施した。

本論文では解析モデルの概要と置換砂及び基礎捨石の初期せん断剛性、せん断抵抗角についての感度解析結果について報告する。

2. 感度解析の概要

今回解析の対象とした六甲アイランド北西部に位置するRF3岸壁は、被災時には水深-8.5m、設計震度0.15の重力式岸壁であった。岸壁の断面図を図-1に示す。

この岸壁の被災時のシミュレーション解析は別にFLIPを用いて実施され、解析結果は概ね被災状況を説明するものであった。本研究では、この2次元の解析モデルを基本モデルとして、FLIPの諸パラメタの感度解析を行った。

(1) 基本モデル

a) 土層区分と各土層の物性値

有限要素分割、土層区分および各土層の物性番号を図-2に示す。また、表-1には各土層の解析定数を示す。

六甲アイランドでは、被災後に凍結サンプリングやPS検層等の各種調査が実施された。各土層の各物性値は、これらの試験結果等から算定した。

埋立土および置換砂の単位体積質量は、六甲アイランドで実施された密度検層の結果より 1.8t/m^3 とした。

埋立土、置換土および粘性土の初期せん断剛性は、PS検層の結果より算定した。なお、初期せん断剛性は平均有効拘束圧の $1/2$ 乗に比例するものとした。

埋立土および置換砂の内部摩擦角は、N値よりマイヤホフの提案式を用いて相対密度を求め、別に実験により得られている、まさ土の相対密度～せん断抵抗角の

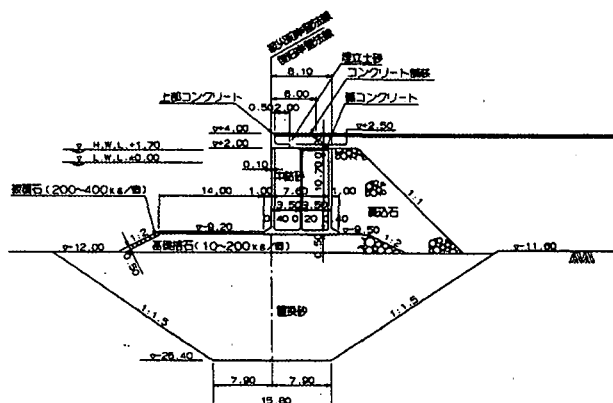


図-1 六甲アイランド RF3 岸壁断面図(被災時)

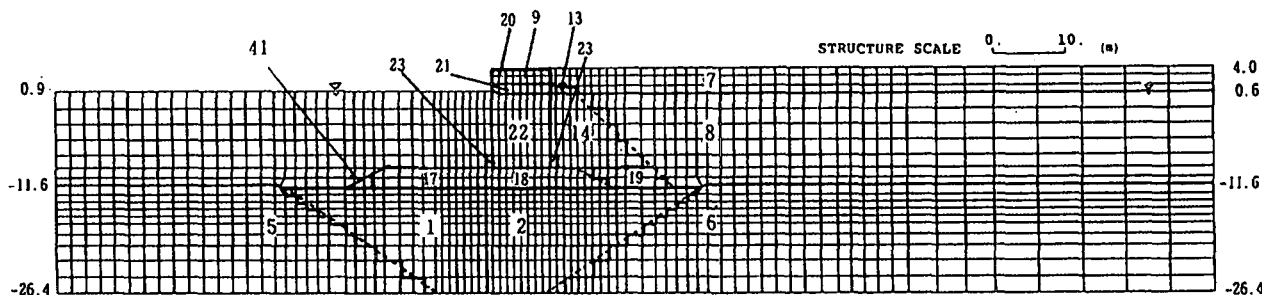


図-2 有限要素分割、土層区分および物性番号

表-1 地盤の解析定数

物性 番号	地 盤	質量 密度 ρ (t/m ³)	間隙率 n	最大減衰 h_{max}	粘着力 C (KPa)	内部 摩擦角 ϕ_r'	初期せん 断弾性係 数 G_{ma} (KPa)	初期体積 弾性係数 K_{ma} (KPa)	G_{ma}, K_{ma} に 対応する 平均有効 応力 σ_{m0}' (KPa)	G_0, K_0 に 関するパ ラメータ		要素 積分法
										m_c	m_k	
7,9	埋立土 (地下水面上)	1.8	0.45	0.3	0	36	79380	207000	63	0.5	0.5	2x2
8	埋立土	1.8	0.45	0.3	0	36	79380	207000	63	0.5	0.5	SRI(1/2)
1,2	置換砂	1.8	0.45	0.3	0	37	58320	152000	44	0.5	0.5	SRI(1/2)
5,6	粘性土	1.7	0.45	0.3	0	30	74970	195500	143	0.5	0.5	SRI(1/2)
17,18,41	基礎捨石	2.0	0.45	0.3	0	40	180000	469000	98	0.5	0.5	SRI(1/2)
13,14,19	裏込石	2.0	0.45	0.3	0	40	180000	469000	98	0.5	0.5	SRI(1/2)

※ $G_0=G_{ma}(\sigma_m'/\sigma_{ma}')^{m_c}$, $K_0=K_{ma}(\sigma_m'/\sigma_{ma}')^{m_k}$

関係図²⁾から推定した。また、粘着力Cは0とした。

粘性土は正規圧密粘土として、 $C=0$ 、 $\phi_r'=30$ 度とした。

b) 液状化特性

六甲アイランドの別の岸壁で置換砂および埋立土から採取された凍結サンプリングによる非排水繰返しせん断試験結果に基づく液状化抵抗曲線から、液状化パラメータを設定した。液状化抵抗曲線を図-3に示す。

c) ケーソン等のモデル化

ケーソンのフーチングの存在はモデル化の際に考慮した。ケーソン底面と基礎捨石の間の接触面では、滑りおよび剥離が生じるものとして、これをジョイント要素を用いて表現した。ケーソン背面と裏込石との間の接触面も同様にモデル化した。なお、ケーソン底面と基礎捨石の間の摩擦角は31度、ケーソン背面と裏込石の間の摩擦角は15度とした。

d) 解析条件

レーレー減衰パラメタ β は六甲アイランドの別の岸壁の検討で得られた $\beta=0.002$ とした。

地下水面以下のマルチスプリング要素の要素積分次数は平均成分1次、偏差成分2次のSRI法を用いた。

(2) 入力地震動

本研究では神戸市開発局が設置したポートアイランドの鉛直アレー地震観測網による1995年兵庫県南部地震の際のGL-32mの地震計のNS成分とUD成分の記録波形を用いた。

RF3岸壁ではGL-26.4mでN値が10~30の砂質土層が現れるが、この土層と上記地震計が設置されている第1洪積砂礫層が対応すると考え、解析モデル底面をこの深度にとって固定境界条件を課し、そこに上記観測記録を入力地震動として与えた。解析時間区間は20秒間

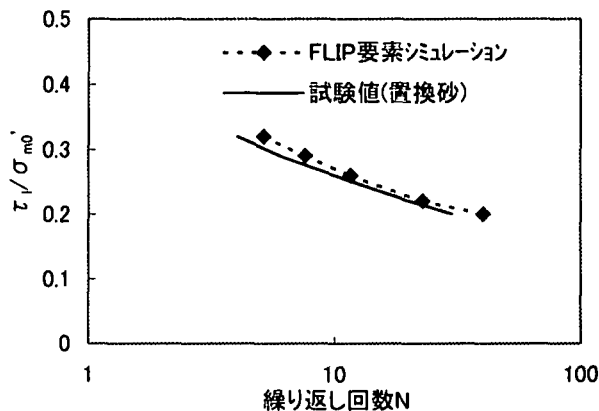
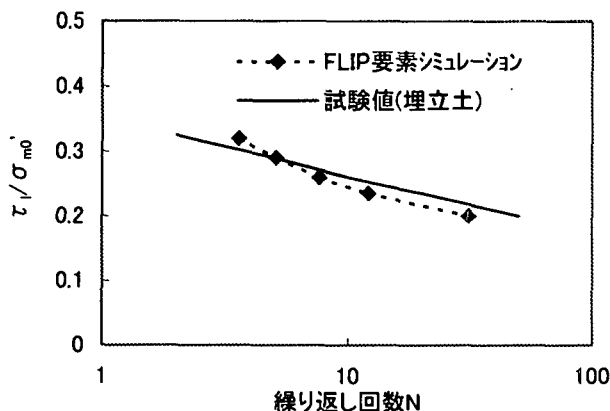


図-3 埋立土(左側)と置換砂(右側)の液状化抵抗曲線

表-2 感度解析対象パラメタ

種 別	パ ラ メ タ
要素積分法	要素積分の方法
置換砂・基礎捨石の特性	★初期せん断剛性 G_0
	★せん断抵抗角 ϕ_f'
	基礎捨石内の間隙水の体積剛性
ケーソン周囲の滑りのモデル化 (底面ジョイント, 背面ジョイント)	ジョイント要素の有無
	摩擦角 ϕ_j
	水平方向接線剛性 K_s
	参照垂直応力
地震応答解析 (自由地盤部, 不規則領域部)	レーレー減衰パラメタ β
	時間間隔 Δt
	時間積分手法

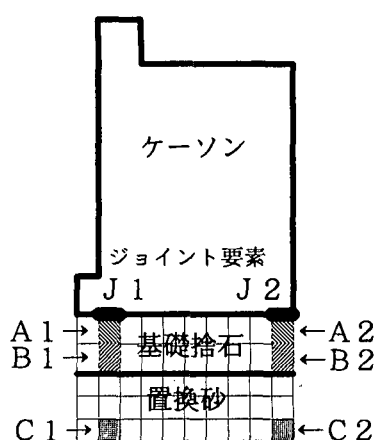


図-4 ケーソン直下の各種要素の配置

とした。

(3) 感度解析対象パラメタ

本研究では、地盤解析定数およびそれ以外のパラメタの中から表-2に示すパラメタを感度解析の対象として取り上げた。本論分では、★印で示したパラメタの感度解析結果を報告する。なお、一つのパラメタの感度を検討する場合には、残りのパラメタには原則として基本モデルの値を与えている。

3. 解析結果

(1) ケーソンとその周辺地盤の挙動について

ケーソン直下の各種要素の配置を図-4に示す。

ケーソン海側直下の基礎捨石要素A1の鉛直応力 σ_y' と陸側直下の要素A2の σ_y' との関係を図-5に示す。なお σ_y' は圧縮が負である。また、ケーソン海側底面のジョイント要素J1のせん断応力 τ (ケーソンの前出しが負) とその直下の要素A1の σ_y' の間の関係を図-6に示す。これらの図によれば、ケーソンはロッキング振動をして、ケーソンが前方に押し出されようとする時には同時にケーソンが前方に傾いて、ケーソン海側底部の拘束圧が上昇し、ケーソンの滑動が抑制される。

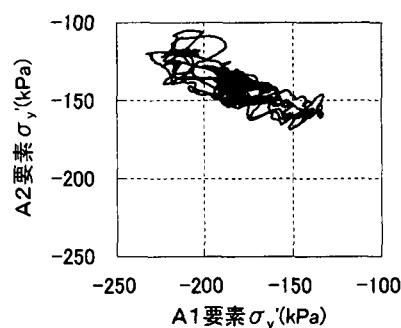


図-5 ケーソン海側直下と陸側直下の基礎捨石要素A1とA2の σ_y' の関係

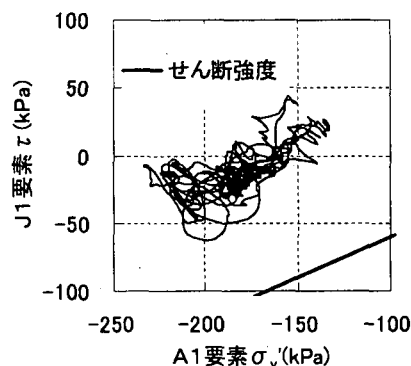


図-6 ケーソン海側底面のジョイント要素J1のせん断応力 τ とその直下の基礎捨石要素A1の σ_y' の関係

表-3 パラメタの種類と設定値(置換砂)

パラメタ	基本モデル	変動幅(%)
置換砂の初期せん断剛性 G_{ms}	58320kPa	-20,-10,0,+10,+20
置換砂のせん断抵抗角 ϕ_f'	37度	-10,0,+10,+20

一方、その直下の基礎捨石および置換砂は、海側に単純せん断されるとともに軸差せん断力も作用し、それらはせん断破壊条件を形成して、ロッキング振動のたびに単純せん断歪と軸差歪が共に蓄積され、ケーソンの前出しと傾斜を残留させると考えられる。

(2) 置換砂の特性

置換砂の初期せん断剛性 G_0 ($=G_{ms}$) とせん断抵抗角 ϕ_f' について、表-3に示すように値を変動させて応答値を比較した。図-7にケーソン海側天端の水平残留変位量と、ケーソン残留傾斜角の変化の様子を示す。

置換砂のせん断剛性またはせん断抵抗角を大きくするほど、ケーソン海側天端の前出し量は抑制されるが、せん断抵抗角の変動のほうが影響は大きい。これは1次元モデルの場合³⁾と異なり、構造物近傍では初期せん断の応力がせん断破壊条件に近いことが多く、そのため、地震時には応力経路が破壊線近傍を行き来するので、せん断抵抗角の変化は構造物の地震時挙動に大きな影響を及ぼすためであると考えられる。

ケーソン海側直下の置換砂(図-4:C1)では、せん断抵抗角が大きくなると、残留せん断歪 γ_{xy} は急減するが、

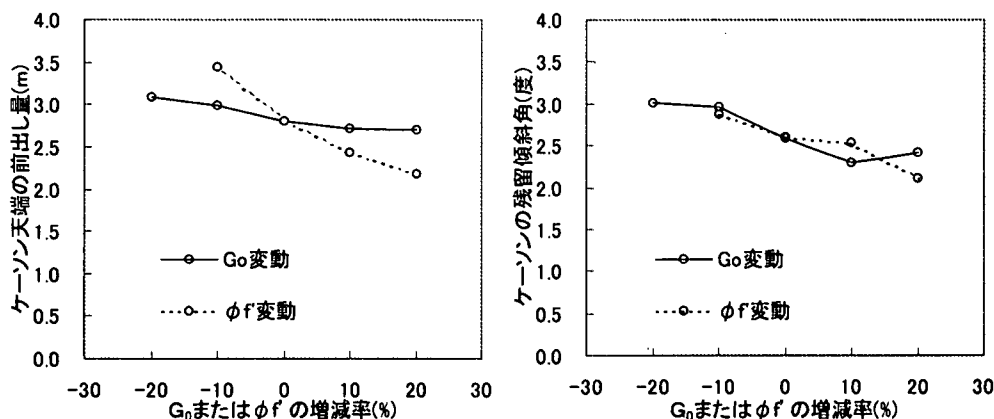


図-7 ケーソン天端の前出量と残留傾斜角(置換砂の G_0 と ϕ_f が変動した場合)

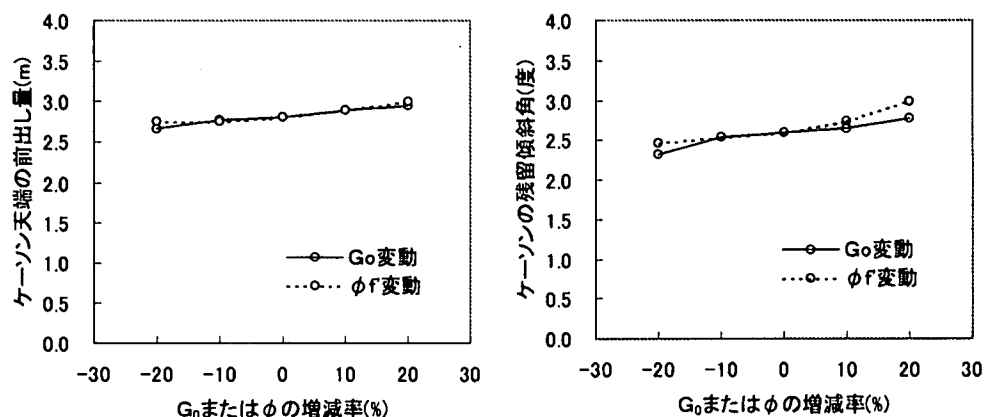


図-8 ケーソン天端の前出量と残留傾斜角(基礎捨石の G_0 と ϕ_f が変動した場合)

表-4 パラメタの種類と設定値(基礎捨石)

パラメタ	基本モデル	変動幅(%)
基礎捨石の初期せん断剛性 G_{m0}	180000kPa	-20,-10,0,+10,+20
基礎捨石のせん断抵抗角 ϕ_f	40 度	-10,0,+10,+20

その直上の基礎捨石(図-4:B1)の残留せん断歪 γ_{xy} は逆に大きくなる。これは、歪が弱い部分に生じるためであって、置換砂のせん断抵抗増大の効果が相殺される。

(3) 基礎捨石の特性

基礎捨石の初期せん断剛性とせん断抵抗角について、表-4に示すように値を変動させて応答値を比較した。図-8にケーソン海側天端の水平残留変位量と、ケーソン残留傾斜角の変化の様子を示す。

基礎捨石の初期せん断剛性 G_0 を大きくすると、かえってケーソンの残留水平変位および残留傾斜角はやや大きくなる。せん断抵抗角を大きくしても似たような傾向になる。基礎捨石の剛性を大きくすると、基礎捨石の歪は小さくなるものの、その直下の置換砂の歪は逆に大きくなるのでこのような逆転現象が生じたと考えられる。

4. まとめ

ケーソン式岸壁を対象として置換砂及び基礎捨石の初期せん断剛性、せん断抵抗角等について、パラメタ感

度解析を行った結果、置換砂のせん断抵抗角は応答値に大きな影響を及ぼすが、初期せん断剛性の影響は比較的小さいことがわかった。また基礎捨石の初期せん断剛性あるいはせん断抵抗角を大きくすると、予想に反してケーソンの残留変位が大きくなる結果が得られた。

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取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頂いた。

参考文献

- 1) 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
- 2) 善, 山崎, 佐藤: 事前混合処理工法による処理土の強度・変形特性, 港湾技術研究所報告, 第29巻, 第2号, 1990
- 3) 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)