

1次元有効応力解析のパラメタ感度解析

小堤 治¹・井合 進²・岡 由剛³

¹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)

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

1次元地盤モデルを用いて、有効応力解析プログラムFLIPの各種パラメタの感度解析を行った。初期せん断剛性の変動は、層境界での波動の透過・反射に影響を与えて、液状化の進行を左右する場合があることが分かった。それに比べて、せん断抵抗角の変動の影響は比較的小さい。また、時間積分間隔の違いは、変位等の応答値にはあまり影響しないが、加速度時刻歴のスパイク状のピークの発生には関係があることが分かった。レーン減衰行列 ($\alpha M + \beta K; \alpha = 0$) のパラメタ β の変動の応答値に対する影響は比較的大きいが、1次元の場合は、 β をより小さくしても、変位や過剰間隙水圧比の応答値がそれ以上増大しないような臨界点があるので、それを用いて β を決める方法を検討した。

Key Words : Finite Element Analysis, Effective Stress, Liquefaction, Parametric Study, 1Dimension

1. はじめに

釧路港中央部の地震観測施設では、港湾地域強震観測の一環として二層観測(地表および地中GL-77m)が実施されている。当該施設周辺地盤の1次元モデルおよび観測された加速度記録を用いて、有効応力法に基づく構造物被害予測プログラムFLIP¹⁾の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。本論文はその結果の一部を報告するものである。

2. 感度解析の概要

(1) 1次元地盤モデル

筆者の一人は、既に、1993釧路沖地震の際の地中

での記録を用いて、FLIPが地表での記録を再現することを確認している²⁾。本研究では、この時に使用された1次元地盤モデル(表-1)を感度解析のための基本モデルとして用いた。

なお、このモデルでは、Layer2と3の2層については液状化する可能性があるとして、FLIPの液状化パラメタが設定されている。これらに基づく液状化抵抗曲線を図-1に示す。

(2) 感度解析対象パラメタと基本モデル

FLIPの解析では、表-1に示す解析地盤定数の他に、時間積分法等の各種パラメタを指定する必要がある。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

表-1 FLIP解析用釧路港1次元地盤モデル(基本モデル) (文献2)の表を一部加筆修正した)

Layer No.	層厚 (m)	土質等	ρ (t/m ³)	Vs (m/s)	G_{ma} (kPa)	σ_{ma} (kPa)	ϕ_r (度)	ϕ_p (度)	液状化パラメタ				
									wl	pl	p2	cl	sl
1	2.0	粗砂;地下水面上	1.54	249	106600	37	40	—	—	—	—	—	—
2	7.0	粗砂	1.72	249	106600	37	40	28	7.0	0.50	0.65	3.97	0.01
3	14.0	粗砂	1.98	326	210400	98	48	28	3.5	0.50	0.40	3.68	0.01
4	9.0	細砂	1.73	265	121500	164	37	—	—	—	—	—	—
5	4.0	細砂	1.76	341	204700	195	44	—	—	—	—	—	—
6	8.0	シルト他	1.70	286	139100	224	44	—	—	—	—	—	—
7	8.0	礫混り砂等	2.00	302	182400	269	45	—	—	—	—	—	—
8	25.0	細砂・シルト互層	1.73	341	201200	354	44	—	—	—	—	—	—

※Layer2と3については、液状化の可能性を考慮する。Layer8の下端はGL-77mで地中地震計設置深度に相当する。
任意の平均有効応力 σ_m' に対する初期せん断剛性 G_0 は、 $G_0 = G_{ma} (\sigma_m' / \sigma_{ma}')^{0.5}$ で与えられる。

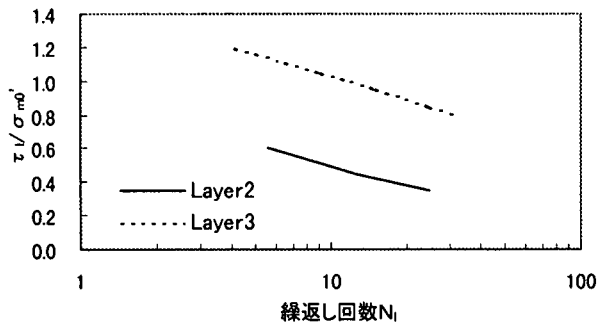


図-1 Layer2,3の液状化抵抗曲線（要素シミュレーション結果）

表-2 感度解析対象パラメータと基本モデルでの値

種別	パラメータ	基本モデルでの値
地盤定数	★初期せん断剛性 G_0	表-1(G_{m0})参照
	★せん断抵抗角 ϕ_f	表-1(ϕ_f)参照
要素関係	要素の上下幅	1 m
	要素の種類(形状)	4 節点四角形平面要素
	要素積分法	1 次のガウス積分
要素SIM*	1 荷重サイクルの分割数	100分割
	初期拘束圧 σ'_{m0}	98kPa
地震応答解析	★時間積分間隔 Δt	0.01秒
	★時間積分法	Wilson θ 法 ($\theta=1.4$)
	非線形反復収束判定	初期不平衡力の1/1000
	★レーレ減衰パラメータ β	0.0005
その他	K ₀ 圧密時剛性低下	補正無し
	初期自重解析実行法	静的解析

* 液状化パラメータ決定のための要素シミュレーション

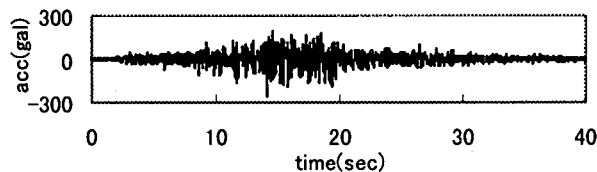


図-2 入力地震動(1993釧路沖地震：地中地震計の記録)

げた。本論文では、紙数の関係で、表-2に★印で示したパラメータの感度解析結果を報告する。

表-2には、基本モデルのパラメータ値も表示した。一つのパラメータの感度を検討する場合には、原則として、残りのパラメータには基本モデルの値を与えた。

なお、基本モデルの有限要素分割では、一辺が1mの正方形平面要素を縦に77個配置した。また、左右の同一レベルの節点には循環境界の条件を課した。

(3) 入力地震動

感度解析に用いた入力地震動は、1993釧路沖地震の際に地中地震計(GL-77m)で記録されたNS成分の加速度時刻歴(最大加速度204gal)とした。比較対照のために、一部の検討では、1992年11月30日に観測された地中地震計による加速度記録(NS成分：最大加速

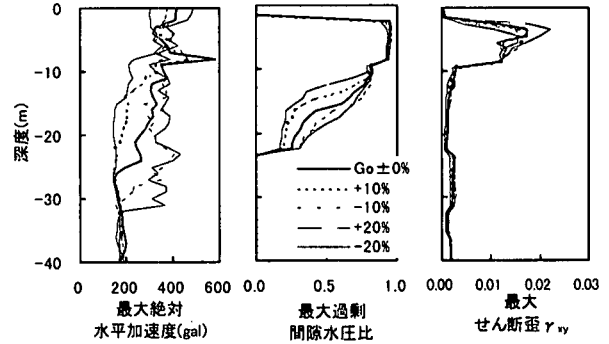


図-3 Layer2の初期せん断剛性をパラメータとした場合の水平加速度、過剰間隙水圧比、せん断歪の最大値分布

表-3 Layer2と3の間のインピーダンス比 $\alpha (= \rho_2 G_2 / \rho_3 G_3)$ 、反射係数 β 、透過係数 γ

G_0	α	β	γ
-20%	0.35	0.48	1.48
$\pm 0\%$	0.44	0.39	1.39
+20%	0.53	0.31	1.31

度4.3gal)を用いた解析も実施した。1993釧路沖地震の際の地中での記録波形(NS成分)を図-2に示す。

感度解析では、地中地震計(GL-77m)での観測記録を、固定境界条件とした解析モデル底面に与えた。

3. 感度解析の結果

(1) 初期せん断剛性

Layer2(GL-3m~-10m)のみ初期せん断剛性 $G_0 (= G_{m0})$ を $\pm 10\%$ および $\pm 20\%$ 変動させた。なお、液状化抵抗が一定に保たれるよう、各ケースで液状化パラメータを決め直した。

1992年11月30日地震では、どのケースでも最大応答値の地中分布はほぼ等しいが、Layer2の最大せん断歪は、せん断剛性が小さいほど大きい。

1993釧路沖地震の場合の水平加速度、過剰間隙水圧比およびせん断歪の最大値分布の比較を図-3に示す。同図によれば、Layer2の最大せん断歪の大きさは、1992年11月30日地震と逆順で、概ねせん断剛性が大きいほど大きい。また、剛性を変更していないLayer3(GL-10m~-23m)では、最大過剰間隙水圧比、最大水平加速度はLayer2の剛性が小さいほど大きい。

表-3にはLayer2と3の間のインピーダンス比 $\alpha (= \rho_2 G_2 / \rho_3 G_3)$ 、反射係数 β 、透過係数 γ を示す。いずれの場合も $\alpha < 1$ である(反射波は透過波と同符号)。従って、Layer2と3の境界での反射波はLayer2のせん断剛性を-20%とした場合が最も大きい。これによりLayer3の液状化の程度が一番進んだものと思われる。

逆に、Layer2のせん断歪等が逆順になったのは、透過係数の関係もあるが、Layer3の液状化の程度が激しければそれだけ地震波が減衰するためとも考えられる。

液状化する土層の初期せん断剛性の多少の変動は、通常、解析結果にあまり影響を与えないように思われるが、液状化抵抗が大きく、液状化に至るまでの間に繰り返してせん断される場合には、初期せん断剛性の変動は、層境界での波動の反射・透過に影響を与えて、液状化の進展に影響を及ぼす場合がある。

(2) せん断抵抗角

Layer2(GL-3m~-10m)のみせん断抵抗角を $\pm 10\%$ および $+20\%$ 変化させた。すなわち、 $\phi_r=36$ 度、40度、44度、48度の各ケースの解析を実施した。各ケースで液状化強度が等価になるようにLayer2の液状化パラメタを決め直した。なお、変相角はすべて28度とした。

解析結果では、Layer2と3付近の最大水平加速度や最大過剰間隙水圧比がケースごとに多少異なるが、 G_0 を変化させたほどには差は大きくない。また、これら加速度や過剰間隙水圧比と ϕ_r との間の相関は見られない。従って、1次元解析においては、この程度の地震では ϕ_r の精度はあまり重要ではないと思われる。この結果は、続報の「2次元有効応力解析のパラメタ感度解析(その1)」³⁾で示す結果と対照的である。

(3) 時間積分法および時間積分間隔

時間積分法として、Wilson θ 法($\theta=1.4$)およびNewmark法($\alpha=0.25$, $\delta=0.5$; 一定平均加速度法)を選び、これらに対して、それぞれ時間積分間隔 Δt を0.01秒、0.005秒、0.0025秒の3通りに変えて解析を行った。なお、入力地震動データは0.01秒間隔であり、それより Δt が小さい場合には、途中の時間積分点での入力加速度値は線形補間で求められる。

これら各ケースの最大応答値分布は、最大水平加速度を除いて概ね同等である。加速度時刻歴のスパイク状のピークは、 Δt が小さいほど多発し振幅も大きい(図-4)。また、地表面の加速度時刻歴のスパイク状のピークの高さは、Newmark法の方が高い。

スパイク状のピークは13秒付近から出現し始め、17秒付近で最も激しくなる。13秒は過剰間隙水圧が上昇を開始した時刻であり、17秒は過剰間隙水圧比が上がりきる直前である(図-4)。

一方、過剰間隙水圧が上昇しない条件にて解析を行った場合には、どのケースでも、各深度の水平加速度時刻歴および水平変位時刻歴はまったく同等で、また、スパイク状のピークも見られない。

このスパイク状のピークはFLIPの非線形反復計算で採用

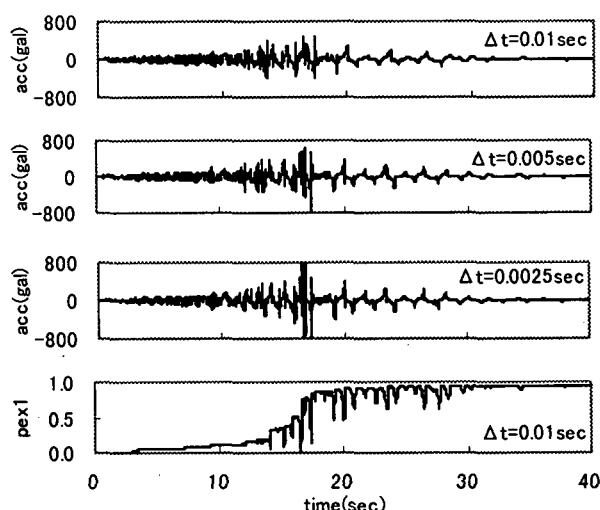


図-4 地表面での水平加速度応答(Newmark法)と過剰間隙水圧比時刻歴の例(最下段)

されている方法に起因するものである。すなわち、各時間ステップ内では土骨格曲線を不変としているので、液状化により有効応力が変動した場合には時間ステップを進める際に骨格曲線を乗り移る必要があるが、その際に不平衡力が発生する。使用した時間積分法では次ステップでの加速度は変位増分に $1/(\Delta t)^2$ に比例する項を乗じて評価するので、不平衡力状態を解消するために変位増分が発生するならば、それに対して大きな加速度が生じることになる。なお、FLIPは増分法を採用していないので、すなわち、常にトータルな要素力とトータルな荷重をバランスさせようとするので、ある程度の不平衡力が生じて、解が大きくずれると言うことは無いと思われる。また、一つの時間ステップ内でも土骨格曲線を更新するようにすれば、時間積分間隔を小さくしてもスパイク状のピークが多発する現象は見られない。しかし、この場合は、逆に時間積分間隔を非常に小さくしなければ解が安定しないと言う問題が生じる。現状では、現行方式を用い、スパイク状のピークは、後述のレーレー減衰パラメタ β により、適度に抑制して解析を実施している。

線形計算の場合は、Newmark法($\alpha=0.25$, $\delta=0.5$)では人工減衰は発揮されず、Wilson θ 法($\theta=1.4$)では、 $\Delta t=0.01$ 秒の時は10Hz以上の現象に対して発揮される。今回の非線形計算でも、加速度時刻歴のスパイク状のピークの出現状況を見ると、Wilson θ 法の方が抑制されていて、人工減衰の効果によるものと思われる。

(4) レーレー減衰パラメタ β

FLIPの解析では、計算を安定させるために、レーレー減衰行列($\alpha M + \beta K$; $\alpha=0$)を考慮する。

レーレー減衰パラメタ β を0.01, 0.005, 0.001, 0.0005, 0.0001の5通りに変化させて解析を行った。その結

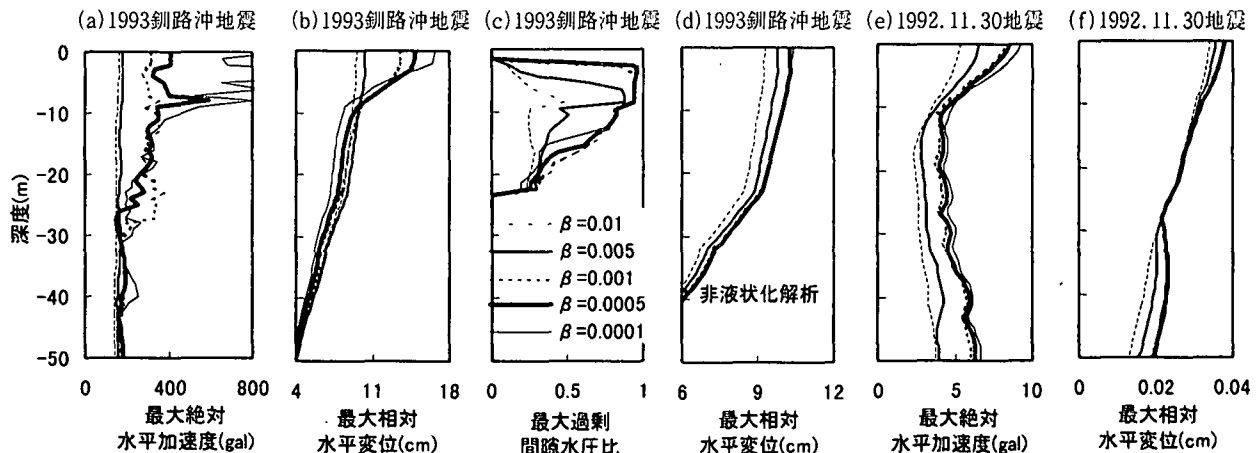


図-5 レー減衰パラメタ β の違いによる各種最大応答値の地中分布の比較

果である各種最大応答値分布を図-5に示す。

1993釧路沖地震の場合(図-5(a)~(c))、 $\beta=0.01$ と0.005ではLayer2,3層の過剰間隙水圧があまり上昇せず、地表面の水平加速度時刻歴にはスパイク状のピークは見られないが、 β が0.001以下では、Layer2,3層の過剰間隙水圧が大幅に上昇し、 β が小さいほど水平加速度時刻歴にスパイク状のピークの発生が著しい。また、 β が0.001以下では、最大過剰間隙水圧比の差異は小さい。地表面付近の変位分布は、過剰間隙水圧比分布を反映して、 $\beta=0.005$ 以上と0.001以下では傾向を異にしている。

過剰間隙水圧が上昇しない条件で解析した場合は(図-5(d))、 $\beta=0.001$ 以下の変位分布はほぼ同一になる。小さい加速度の1992年11月30日地震の場合でも(図-5(e)、(f))、加速度分布と変位分布は、 $\beta=0.001$ 以下では、ほぼ同一になる。

通常、レー減衰パラメタ β は高振動数の振動モードに関係するが、大きな β は過剰間隙水圧や変位等の比較的低い振動数が関係する応答値も抑制する。そして、既に見たように、1次元解析では、 β を小さくしていくと、もはや変位等があまり変化しなくなるような β の臨界値に到達する場合がある。原則として、変位応答値等は β に影響されないのが望ましいので、臨界値より小さい β を使用する必要がある。この地盤モデルでは、入力加速度に関係なく、 β を0.001以下にする必要がありそうである。

一方、前述のメカニズムにより生じる加速度時刻歴のスパイク状のピークを抑制するために、また、応力的により厳しい2次元解析の安定化のためにも、 β を与える必要がある。 β 決定の暫定的な方法として、臨界値を採用することが考えられる。この釧路港の地盤モデルについて言えば $\beta=0.001$ である。この値でも、基本モデルの $\beta=0.0005$ と同様、地表の観測記録を概ね再現するので、この基準は適当であると思われる。

4. まとめ

釧路港中央部の1次元地盤モデルを用いて、有効応力解析プログラムFLIPの各種パラメタの感度解析を行った。初期せん断剛性の変動は、層境界での波動の透過・反射に影響を与えて、液状化の進行を左右する場合がある。せん断抵抗角の変動の応答値に与える影響は比較的小さい。時間積分間隔 Δt の違いは、変位等の応答値にはあまり影響しないが、 Δt を小さくすると加速度時刻歴にスパイク状のピークが多発するようになる。これは、FLIPで採用している非線形反復法に起因する。レー減衰行列のパラメタ β の変動の応答値に与える影響は比較的大きい。 β をより小さくしても、変位等の応答値がそれ以上変動しないような臨界点があり、暫定的な β 決定法として、臨界値を使用することが考えられる。

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。

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) Iai, S., Morita, T., Kameoka, T., Matsunaga, Y. and Abiko, K.: Response of a Dense Sand Deposit During 1993 Kushiro-Okai Earthquake, Soils and Foundations, Vol.35, No.1, pp.115-131, 1995
- 3) 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)