

動的有効応力解析プログラム「EFECT」(その2)

—構成モデルパラメータの感度解析—

松田 隆

EFECT : The Code of Dynamic Effective Stress Analysis (Part 2)

—Investigation for the Sensitivity of the Constitutive Model Parameters—

Takashi Matsuda

Abstract

A dynamic effective stress analysis code named EFECT was developed for precise evaluation of ground liquefaction problems during strong earthquake motion. The constitutive model has several parameters that can be defined by using the results of conventional soil element test, while the sensitivities of the constitutive model parameters affect on a results of computational analysis. A simulation analysis for the large shaking table test for liquefiable sandy ground was conducted to investigate the sensitivities of the constitutive model and to analyze the experimental results using EFECT. As a result of the simulation analysis, the following results were obtained. EFECT can represent the experimental result of the shaking table test when the constitutive model parameters are determined by the element test data under the same confining pressure of the target ground. Accumulation of excess pore water pressure is primarily influenced by the hardening parameter, while residual settlement is influenced by soil permeability.

概 要

動的有効応力解析法 EFECT は、地盤液状化現象の詳細な予測手法であり、微小変形領域から液状化のような破壊に至る領域まで連続した変形挙動を表現できる構成式を有している。この構成式に含まれる各パラメータはほぼ通常の要素試験から求められるが、解析結果に与える影響度は異なる。そこで、これら構成式パラメータの影響度を把握するため、大型模型地盤による液状化実験を対象としたシミュレーション解析を実施した。この報告は、実験結果を良好に再現し得る構成式パラメータの範囲と解析結果に与える感度を述べるものである。検討の結果、現地盤に近い拘束圧下で行われた要素試験を用いることによって、良好なシミュレーションができること、過剰間隙水圧の上昇には拘束圧依存性を考慮した硬化パラメータが最も影響し、残留沈下量に関しては透水係数が大きく影響することが分かった。

1. まえがき

動的有効応力解析法 EFECT は、地震時の液状化現象を詳細に予測する手法として開発が進められてきた。この EFECT には、弾性状態から破壊状態に至る幅広いひずみ領域での非線形な応力～ひずみ関係を規定する構成式として修正松岡モデルを採用している¹⁾。

修正松岡モデルに関するパラメータは、基本的に、圧密試験や静的三軸圧縮試験など、通常の土質試験の結果から設定することが可能である。ただし、他の液状化解析コードと同様に構成式パラメータの種類は多く、それ

らの設定には独特な試験結果の整理が必要なものもある。このとき、各深度での不攪乱サンプリング試料による土質試験が必要となる。しかし、このような詳細な土質試験がない場合でも、実測あるいは想定液状化強度を基に構成式パラメータを決定しなければならない。すなわち、目標となる液状化強度を再現するよう、要素試験のシミュレーション解析を実施することになる。この際、多くのパラメータを同時に推定することは困難であり、解析結果に対して支配的なパラメータを選定することになる。そのためには、事前に各構成則パラメータの影響度を明確にしておくことが重要である。

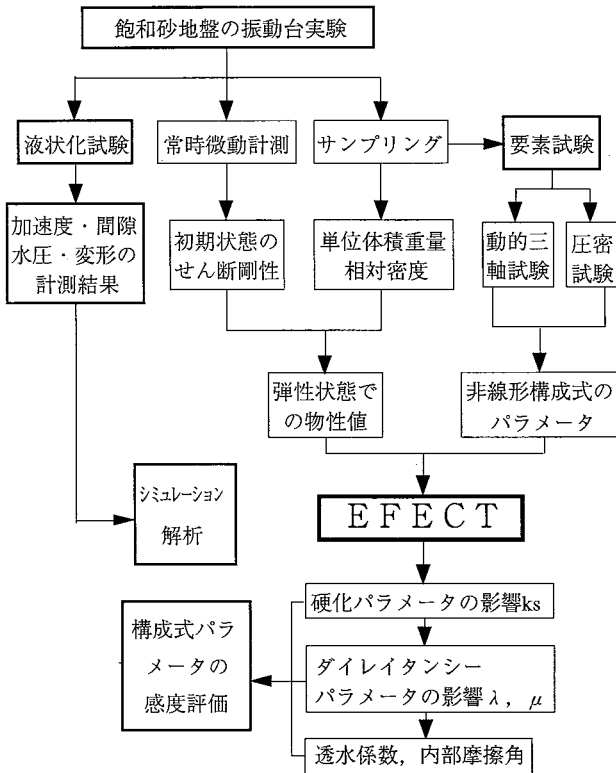


図-1 検討フロー

そこで、振動台上の模型地盤を用いた液状化実験を対象にしたシミュレーション解析を行い、実験結果の再現性の確認と EFECT の構成式パラメータの影響度に関する検討を行った。このとき、構成則パラメータは模型地盤を対象とした要素試験によって設定した。本報告は、その結果を述べるものである。

2. 検討方法

2.1 検討フロー

振動台試験の実施から構成式パラメータの評価法に至るまでの検討フローを図-1 に示す。振動台実験結果は、解析の比較対象としたほか、地盤物性の初期値の評価にも用いた。非線形構成則に関するパラメータは、土質試験結果を用いて設定した。

検討ケースを表-1 に示す。要素試験から構成則パラメータを単純に設定した要素試験モデル、振動台試験を最も良好に再現する再現モデルの2 ケースを実施した。

2.2 検討対象となる振動台実験

液状化実験の対象となる層厚 2.1 m の砂地盤は大型せん断土槽内に保持されている(図-2)。砂地盤には均等係数1.36の珪砂を使用し、地下水位を地表面にした飽和地盤の平均的な相対密度は48%であった。入力波形は時間軸を1/4に、最大加速度を 120 gal にした八戸波を用いた(図-3)。主要動が始まる2.9秒より前(以後、微小入力区間)では間隙水圧がほとんど上昇しないため初期状態のモデル化が確認できる。液状化を表す間隙水圧上昇のモデル化の確認に関しては、主要動区間が検討の対象となる。

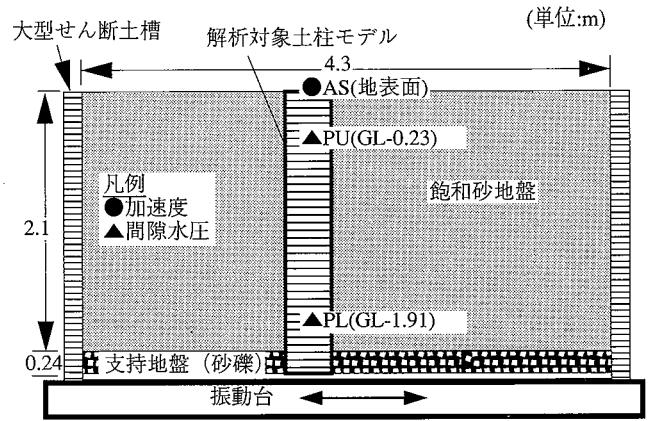


図-2 模型振動台実験

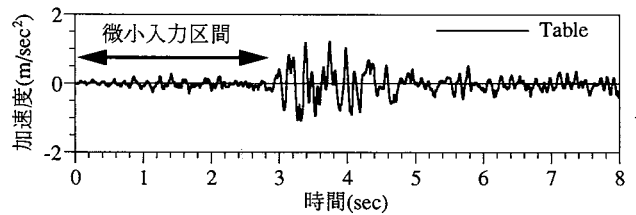


図-3 入力波形

表-1 検討ケース

検討ケース	パラメータ	備考
要素試験モデル (液状化解析)	表-2-(a)	複数の拘束圧下における要素試験結果から、回帰分析によりパラメータを設定
再現モデル (液状化解析)	表-2-(b)	シミュレーション解析
		ks の影響度解析
		λ, μ の影響度解析
		透水係数の影響度解析
		内部摩擦角の影響度解析
		主応力の回転の影響度解析

2.2 解析モデル

解析モデルは1次元状態の土柱モデルである(図-2 参照)。このモデルは同一深度の節点を連結することで、無限に広がる成層地盤が表現できる。飽和砂層には2相系非線形要素を、支持地盤には2相系線形要素を用いた。2.1 m 厚の飽和砂層の要素分割は12層とし、上層は 13 cm ピッチ、下層は 25 cm ピッチに分割した。

3. 構成式パラメータの設定法

3.1 構成式の構成

EFECT に採用されている構成式(修正松岡モデル)の特徴は、微小変形から破壊付近の大ひずみ状態に至る幅広い範囲において剛性の評価ができ、土特有の主応力の回転に伴うひずみの発生を含む種々のせん断およびダイレイタンス機構が明瞭に表現できることである¹⁾。

EFECT の解析パラメータは、非線形構成式に関連するもの(表-2)と、初期状態に関連するもの(表-3)とに分けられる。このうち、液状化解析に及ぼす影響が

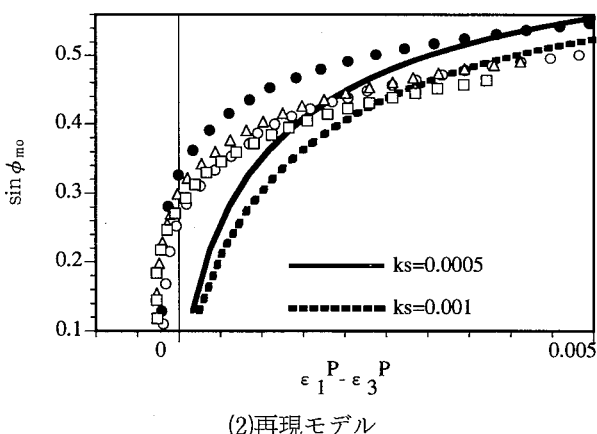
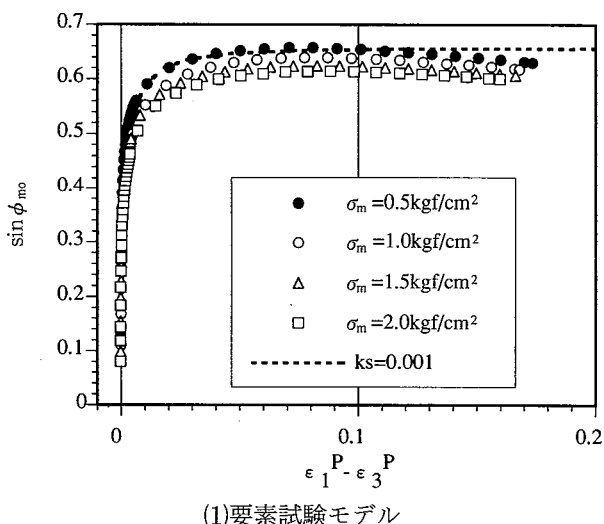


図-4 硬化パラメータの設定

重大と考えられるのは、塑性ひずみ増分を規定する硬化パラメータ ks と、ダイレイタンシーを規定する λ と μ である。

3.2 硬化パラメータ ks

硬化パラメータ ks は三軸試験結果の塑性主ひずみ増分を整理することによって求められる(図-4)。 ks が大きくなると過剰間隙水圧の発生は多くなり、液状化しやすい。また、同一な相対密度の砂の液状化強度比は一定である実験事実から、 ks はせん断剛性と同様の拘束圧依存性を有することになる。図-4(1)に模型地盤のサンプリング試料による試験結果を示す。図中のモービライズド角 ϕ_{mo} はせん断応力に關与するパラメータである。図中の点線は、拘束圧 $\sigma_m = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ 時のデータにフィッティングするように設定したもので、 $ks = 0.001$ (要素試験モデル) となった。図-4(2)は、同様の関係を初期値付近を拡大したもので、再現モデルでは試験結果の初期勾配に近づけるよう $ks = 0.0005$ (実線) に設定した。表-2 に各モデルで採用したパラメータの値を示す。ただし、表-2 中の ks は基準拘束圧となる 0.1 kgf/cm^2 時の値を示している。

表-2 非線形構成式パラメータ

パラメータ	記号	設定方法	(a)要素試験モデル	(b)再現モデル
硬化パラメータ*)	ks	三軸試験	0.000447	0.000223
ダイレイタンシーパラメータ	λ	三軸試験	1.07	1.7
	μ	三軸試験	0.25	0.11
内部摩擦角	ϕ	三軸試験	38°	38°
圧縮指数	C_c	圧密試験	0.017	0.017
膨張指数	C_s	圧密試験	0.01	0.01
非共軸パラメータ	δ		30°	30°

*)拘束圧 0.1 kgf/cm^2 時の基準値

表-3 初期状態に関する構成式パラメータ

パラメータ	記号	設定値評価法
骨格弾性係数	E_o	・ PS 検層での S 波速度から評価 ・ 常時微動での卓越振動数から評価
骨格ポアソン比	ν	0.2~0.44 (平均値0.35) 参考文献2) 参照
拘束圧依存性べき乗指数	m	0.4~0.8 (代表値0.5) 参考文献2) 参照
土粒子体積弾性係数	Ks	$3.69 \times 10^7 \text{ kPa}$, 参考文献3) 参照
間隙流体体積弾性係数	Kf	$2.22 \times 10^6 \text{ kPa}$, 参考文献3) 参照
土粒子密度	Gs	土粒子比重試験
間隙流体密度	Gf	1.0 g/cm^3
初期間隙率	n	間隙比試験
土骨格レーリー減衰	as βs	$h_n = as / (2 * \omega_n) + \beta s * \omega_n / 2$ h_n : n 次の減衰定数 (2~4%) ω_n : n 次の固有円振動数
水骨格レーリー減衰	af βf	通常, $af = \beta f = 0.0$
透水係数	k	透水試験

3.3 ダイレイタンシーパラメータ λ, μ

ダイレイタンシーパラメータ λ, μ は三軸試験の結果を整理するとが得られる(図-5 参照)。このモデルでのダイレイタンシーは式(1)で与えられる。また、 λ と μ の関係は式(2)で与えられる。

$$\tau / \sigma_N = \lambda (-d\epsilon_N / d\gamma) + \mu \dots\dots\dots(1)$$

$$\tan \phi_p = \mu / (1 - \lambda / 2) \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 τ / σ_N はせん断応力比を、 $d\epsilon_N / d\gamma$ は増分せん断ひずみ比の逆数を、 ϕ_p は変相角をそれぞれ表している。この関係式において、 λ が大きくなると体積変化は小さくなり、液状化しにくくなる。最終的には ($\lambda = 2, \mu = 0$) の時、せん断に伴う体積変化は起こらない。模型地盤のサンプリング試料を用いた各拘束圧における試験結果を図-5 に示す。図中の点線は要素試験モデルに、実線は再現モデルに採用したパラメータによる関係を示す。

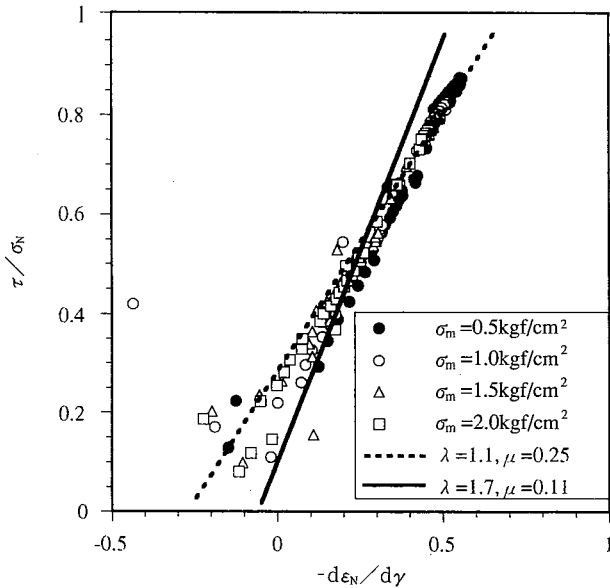


図-5 ダイレイタンシーパラメータの設定

ここで、要素試験モデルは、全試験結果を回帰するものとして、再現モデルは、拘束圧の最も低い 0.5 kgf/cm²時のデータを基本に設定したものである。

4. 解析結果

4.1 シミュレーション解析

図-6 に要素試験モデルの加速度応答波形と過剰間隙水圧比の経時変化を示す。加速度波形には液状化した場合の応答の低下と長周期化が現れており、最大加速度に関しては実験結果とほぼ同様である。過剰間隙水圧は、実験結果では3.5~4秒で液状化するのに対して解析では1.2秒で液状化している。すなわち、過剰間隙水圧の予測に関しては、仮定したパラメータを使用した場合、液状化しやすい状態になる。この原因としては、パラメータの設定に用いた土質試験が模型地盤の拘束圧より高い拘束圧で実施し、模型地盤の拘束圧状態でのパラメータとして外挿したことが考えられる。

要素試験を見直し、実験結果を良好に再現する構成則パラメータを設定した(再現モデル、3.2および3.3節参照)。図-7 に再現モデルの加速度応答波形と過剰間隙水圧比の経時変化を示す。過剰間隙水圧に関する実験結果と解析結果の一致は良好で、微小入力区間から主要動に至るまでの実験結果を再現している。ただし、3~5秒での主要動における加速度応答に関して、解析結果は、実験結果より大きな値を示している。これは、この時間領域において過剰間隙水圧は上昇過程にあり、過剰間隙水圧が実験結果と微妙に異なり、拘束圧の依存性による剛性の変化が正確に表現できていないことが原因として考えられる。この主要動以外の時間領域での解析結果と実験結果の一致は良好であり、解析によっても液状化後の長周期化および応答の極度の低下は表現できている。

4.2 構成式パラメータの感度分析

表-2 に示す構成則パラメータを変化させ、再現モデ

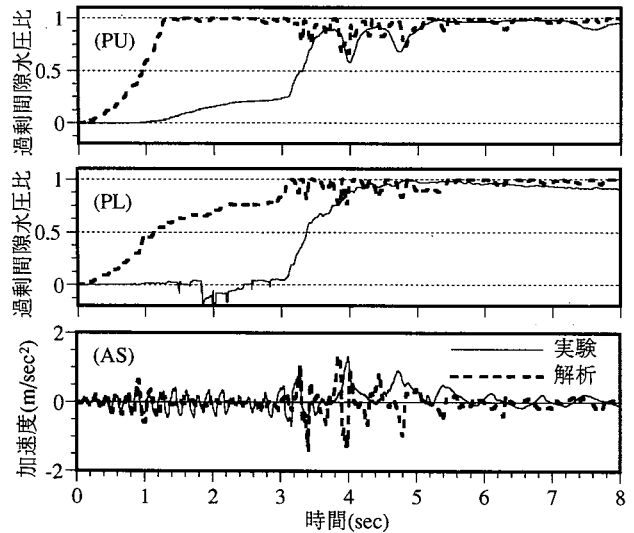


図-6 要素試験モデルの加速度と過剰間隙水圧

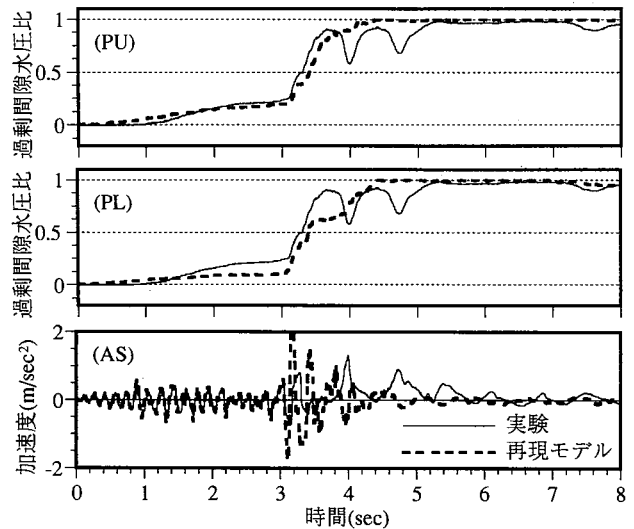


図-7 再現モデルの加速度と過剰間隙水圧

ルと比較することによって、その構成則パラメータの感度を分析した。

4.2.1 硬化パラメータ k_s (図-8, 9) 再現モデルの k_s を 2 倍, 1/2, および拘束圧の依存性を考慮せず各層の k_s を平均したケースを比較した。2 k_s にした場合の過剰間隙水圧比 (図-8) は、微小入力区間から過剰間隙水圧の上昇は大きく、主要動の開始と同時に液状化している。1/2 k_s にした場合は、過剰間隙水圧の上昇は小さく、上層 PU では液状化しない結果になった。拘束圧の依存性を考慮しない場合 (図-9), 下層 PL では液状化せず、上層 PU では実験結果より早く液状化した。このように、 k_s の影響は大きく、また、拘束圧依存性を考慮することの重要性が示された。ただし、詳細な土質試験結果がなく液状化強度が仮定できる場合、 k_s をパラメータとした要素試験シミュレーションにより k_s を決定する手法が有効と考えられる。

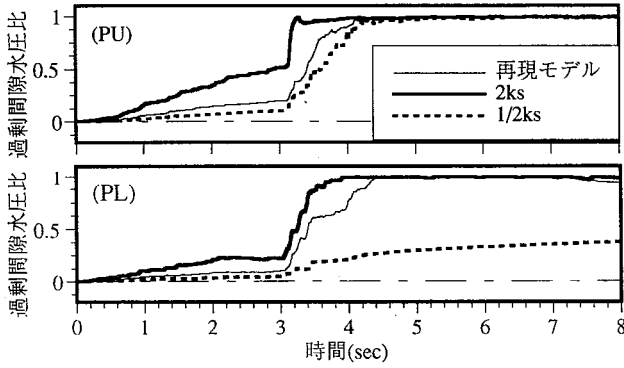


図-8 硬化パラメータの影響(1)

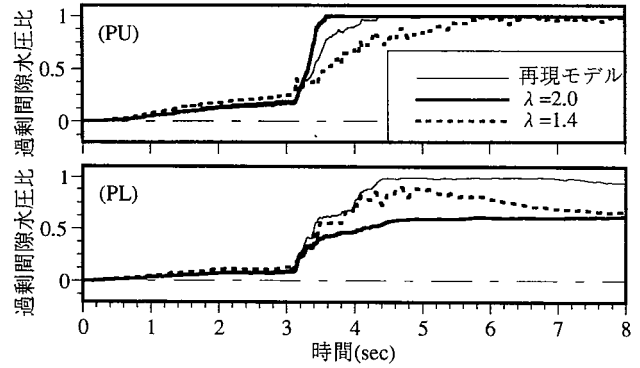


図-10 ダイレイタンスパラメータの影響(1)

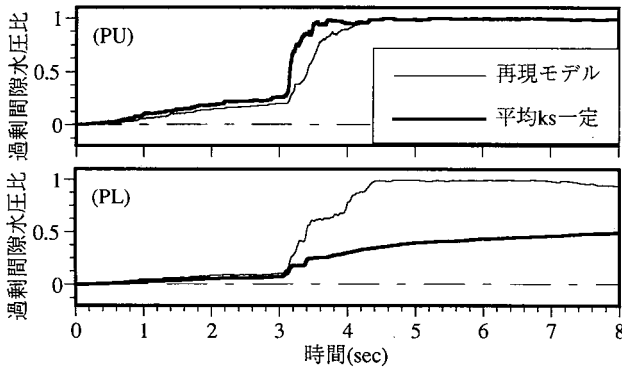


図-9 硬化パラメータの影響(2)

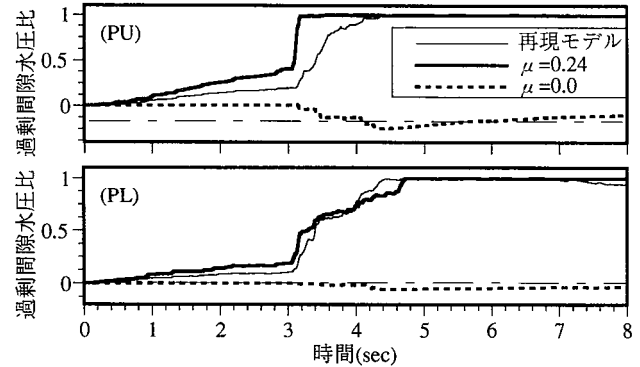


図-11 ダイレイタンスパラメータの影響(2)

4.2.2 ダイレイタンスパラメータ λ , μ (図-10, 11)

パラメータ λ は、大きくなればダイレイタンスが生じ難くなることを表しており、結果的に繰返しせん断応力による過剰間隙水圧の変動は少なくなることにつながる。 μ が大きくなることは変相角度が大きくなり正のダイレイタンスに移行せず過剰間隙水圧の発生は多くなる。これに対して、 μ が小さくなると正のダイレイタンスに移行しやすく、過剰間隙水圧の下降につながる。

図-10に λ を変化させた場合の解析結果を示す。 λ を再現モデルの1.7から2に大きくした場合、下層 PL および微小入力区間での上層 PU では過剰間隙水圧の上昇は小さくなるが、主要動以後の上層 PU では逆の傾向になった。これは、過剰間隙水圧の上昇が少ない間はせん断剛性の変化は少なく、先に述べたダイレイタンスの影響が小さくなったことが反映したのに対して、過剰間隙水圧が大きく上昇した場合、地盤の動特性が大きく変わり、そのことによるせん断ひずみ量が大きくなることが影響したためと考えられる。 λ を1.4に小さくした場合、微小入力区間では再現モデルより過剰間隙水圧の上昇程度は大きくなる。主要動入力以後は、サイクリックモビリティが大きく現れるため、過剰間隙水圧の蓄積は少なくなる。このように、 λ を小さく見積ると、サイクリックモビリティが強く現れ、その結果、過剰間隙水圧の経時変化には振動成分が多くなる。

図-11に μ を変化させた場合の解析結果を示す。 μ を再現モデル0.14から0.24に大きくした場合、過剰間隙水

圧の上昇程度は大きく、液状化に至る時刻も再現モデルより早い。 μ を0.0にした場合、負の間隙水圧を示す。このように、過剰間隙水圧に与えるダイレイタンスパラメータ λ , μ の影響は大きい。詳細な土質試験結果がない場合、一般的な砂質土層に対しては λ を1.4~1.7の範囲で設定し、内部摩擦角より5度程度小さい変相角を仮定し²⁾、式(2)により μ を設定する方法が考えられる。

4.2.3 透水係数 k (図-12)

透水係数 k は、液状化に関しては過剰間隙水圧の消散現象と排水に伴う体積減少に大きく関与する。図-12に k を変化させた場合の過剰間隙水圧比の経時変化を示す。 k を再現モデルの10倍の $2 \times 10^{-3} \text{m/sec}$ にした場合、再現モデルより過剰間隙水圧の上昇程度は小さく、主要動部での変動は大きい。これは、大きな透水性により、過剰間隙水圧の蓄積より消散が勝るため液状化に至らないことを示している。逆に k を再現モデルの1/10の $2 \times 10^{-5} \text{m/sec}$ にした場合、過剰間隙水圧の上昇程度は大きくなる。ただし、上層 PU で液状化に至る時刻が遅れるのは、下層部の過剰間隙水圧が表層に伝達される時間が遅れるためである。すなわち、排水面となる上層部では、その部分で発生する過剰間隙水圧の他に下部からの浸透流による過剰間隙水圧が大きく影響する。

図-13に地表面沈下の経時変化を示す。実験結果に比べて再現モデルの方が小さい沈下となっている。図中の破線および点線は透水係数を変化させたもので、10倍にした場合再現モデルの沈下量のほぼ3.5倍であり、同様に

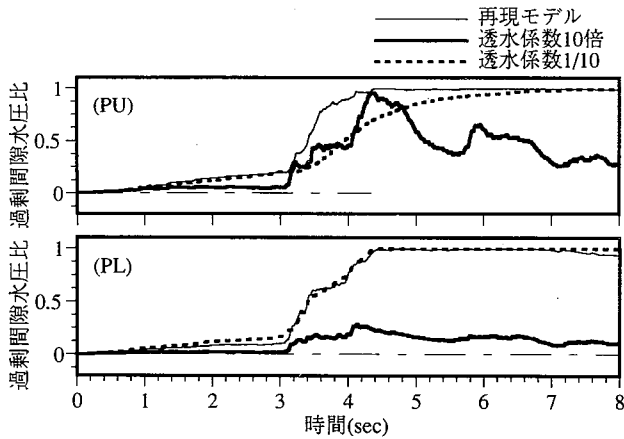


図-12 透水係数の影響

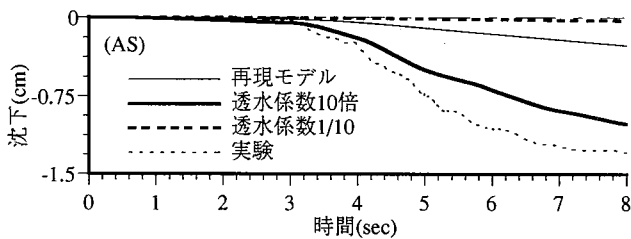


図-13 地盤沈下の経時変化

1/10にした場合再現モデルの沈下量の約1/10である。このように、沈下量は透水係数の影響を強く受ける。

4.2.4 内部摩擦角 ϕ ϕ を再現モデルから 5° 増減させた場合の過剰間隙水圧比の経時変化を図-14に示す。微小入力区間では内部摩擦角の変化は全く影響せず、主要動以降で内部摩擦角が小さい方が過剰間隙水圧の上昇が早い。これは、微小入力区間では砂層は破壊領域に達せず繰返しせん断力の影響で過剰間隙水圧が蓄積しているのに対して、主要動区間では破壊領域に接近し大きなせん断ひずみの発生とその影響による過剰間隙水圧の上昇がみられる。ただし、その影響度は硬化パラメータなどに比べ少ない。

4.2.5 主応力の回転の考慮の有無 主応力の回転の影響を考慮しないケースと、その影響を考慮している再現モデルとを比較した結果を図-15に示す。再現モデルより下層 PL の過剰間隙水圧の発生は小さい。この比較から、この層に発生する過剰間隙水圧の約半分は主応力の回転に依るものと考えられ、主応力の回転の考慮が重要であることが分かる。

5. まとめ

振動台実験を対象にしたシミュレーション解析を行い、要素試験を基にした構成則パラメータの評価に関する検討と液状化解析の適用性に関する検討を行った。検討の結果、以下のことがわかった。

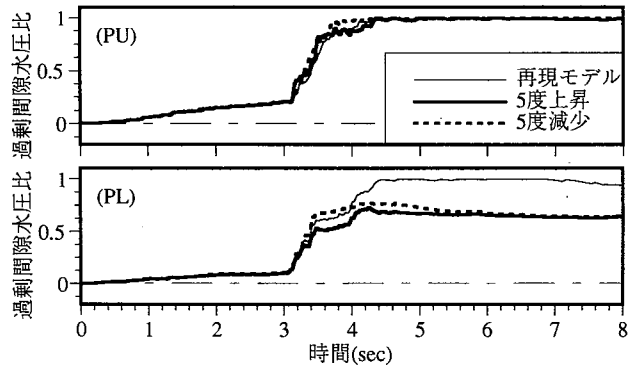


図-14 内部摩擦角の影響

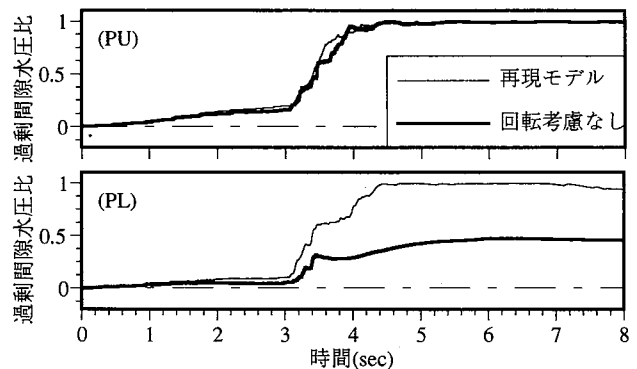


図-15 主応力の回転の影響

① 最も原位置に近い拘束圧での要素試験によって構成則パラメータを設定した場合、実験結果を再現することができた。ただし、最大加速度応答に関しては、解析結果は実験結果より大きい応答を示した。

② ダイレイタンスーパーパラメータ、硬化パラメータ、透水係数および主応力回転の考慮が液状化解析に与える影響は大きい。これに対して、内部摩擦角の影響は小さい。

③ 残留沈下の評価には、透水係数の値が大きく影響する。ただし、実験値との比較から、解析結果の方が小さくなる傾向になった。

最後に、本研究はプロジェクトテーマ「人工島・臨海地盤の耐震性評価に関する研究(その3)」で実施されたものであり、ご指導いただいた後藤室長、平間室長および協力いただいた伊藤研究員、鳥井原主任研究員、大井研究員に感謝いたします。

参考文献

- 1) 伊藤浩二：動的有効応力解析プログラム「EFFECT」(その1) -基礎理論と地盤構成モデル-, 大林組技術研究所報, No.51, p.7~14, (1995)
- 2) 石原研二：土質動力学の基礎, 鹿島出版会, p.141~205, (1976)
- 3) 東京天文台編纂：理科年表, 丸善, p.438~440, (1995)