

3.3.6 側方流動に対する基礎の三次元数値シミュレーションの研究(その1)

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 3カ年の年次実施計画
- (e) 平成14年度業務目的

(2) 平成14年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 現有の三次元有効応力解析手法による振動台実験の事前予測
 - 2) 関連流動則に基づく繰返し弾塑性構成式の基本性能の把握
- (c) 業務の成果
 - 1) 現有の三次元有効応力解析手法による振動台実験の事前予測
 - 2) 関連流動則に基づく繰返し弾塑性構成式の基本性能の把握
- (d) 結論ならびに今後の課題
 - 1) 現有の三次元有効応力解析手法による振動台実験の事前予測
 - 2) 関連流動則に基づく繰返し弾塑性構成式の基本性能の把握
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

(3) 平成15年度業務計画案

- (a) 現有の三次元有効応力解析手法による振動台実験の事前予測
- (b) 新しい弾塑性構成式を用いた三次元有効応力解析手法の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 側方流動に対する基礎の三次元数値シミュレーションの研究(その1)

(b) 担当者

所 属	役 職	氏 名
東北大学 大学院 工学研究科	教 授	風間 基樹
	教 授	池田 清宏
	講 師	渦岡 良介
	助 手	堤成 一郎
	修士課程	芝崎 水無子

(c) 業務の目的

本業務では、液状化に起因した側方流動地盤中の基礎の破壊を高精度に予測できる手法を確立することを目的とする。地盤-基礎の相互作用を扱う三次元有効応力解析手法を用い、模型振動台実験データとの詳細な比較を行うことで、液状化地盤と構造物の挙動をより詳細に考察し、手法の問題点・改良点を明らかにする。

(d) 3 ヶ年の年次実施計画

1) 平成14年度：

現有の三次元有効応力解析手法を用い、当該年度実施予定の側方流動に対する基礎の破壊メカニズム解明のための模型実験の事前予測を行う。地盤-基礎の有限要素モデル作成、地盤の材料パラメータの設定、三次元数値シミュレーション、解析結果の整理および考察を行う。

関連流動則に基づく繰返し弾塑性構成式の要素シミュレーションを行い、構成則の基本的性能を把握する。

2) 平成15年度：

引き続き、現有の三次元有効応力解析手法を用い、当該年度実施予定の側方流動に対する基礎の破壊メカニズム解明のための模型実験の事前予測を行う。地盤-基礎の有限要素モデル作成、地盤の材料パラメータの設定、三次元数値シミュレーション、解析結果の整理および考察を行う。

関連流動則に基づく繰返し弾塑性構成式を導入した三次元有効応力解析手法を用い、一次元土柱モデルの応答解析など基本的な境界値問題の解析を通じて、手法の確立を図る。地盤の有限要素モデル作成、地盤の材料パラメータの設定、三次元数値シミュレーション、解析結果の整理および考察を行う。

3) 平成16年度：

総合評価を行う。

全体のまとめを行う。

(e) 平成14年度業務目的

現有の三次元有効応力解析手法を用い、当該年度実施予定の側方流動に対する基礎の破壊メカニズム解明のための模型実験の事前予測を行う。実験結果と解析結果の比較を通じて、解析手法の適用性を明らかにする。

関連流動則に基づく繰返し弾塑性構成式の要素シミュレーションを通じて、構成則の基本的性能を把握する。

(2) 平成14年度の成果

(a) 業務の要約

平成14年度は次の各項目を実施した。

1) 現有の三次元有効応力解析手法による振動台実験の事前予測

現有の三次元有効応力解析手法を用い、土木研究所で実施された振動台実験の事前予測を行った。地盤-基礎の有限要素モデル作成、地盤の材料パラメータの設定、三次元数値シミュレーション、解析結果の整理および考察を行った。

2) 関連流動則に基づく繰返し弾塑性構成式の基本性能の把握

はじめに繰返し弾塑性構成式に関するレビューを行った。次に関連流動則に基づく弾塑性構成式の要素シミュレーションを通じて、構成式の繰返し载荷に対する基本的挙動の把握、パラメータ設定法の確立を行った。

(b) 業務の実施方法

1) 現有の三次元有効応力解析手法による振動台実験の事前予測

土木研究所で実施された実験ケース 1-3 (杭頭回転自由、護岸平行方向加振)(土研、2003)を対象として、LIQCA による事前予測を実施した。模型実験での境界条件、豊浦砂の材料特性、模型実験での振動台波形を既知の情報として解析を実施した。

2) 関連流動則に基づく繰返し弾塑性構成式の基本性能の把握

繰返し弾塑性構成式に関するレビューの結果から、粘土から砂にわたる土の大変形、繰返し負荷、初期ならびに誘導異方性に適応でき、塑性不安定現象および時間依存性挙動の解析への適用など、その後の発展も期待される拡張下負荷面モデルを取り上げ、その応答特性の把握を試みる。要素シミュレーションの対象として、非排水条件下における繰返しせん断試験の計算を行った。

(c) 業務の成果

1) 現有の三次元有効応力解析手法による振動台実験の事前予測

a) 解析手法

解析には Oka ら (1999) の砂の繰返し弾塑性モデルを組み込んだ 3次元有効応力解析コード LIQCA を用いた。場の方程式の定式化には、2相混合体理論に基づいた土骨

格の変位と間隙水圧を未知数とする $u-p$ formulation (Oka ら、1994) を用いており、力のつりあい式と連続式が連成したものとなっている。有限要素法 (固相の変位) と有限差分法 (要素重心での過剰間隙水圧) を適用し、空間離散化を行う。また、時間積分には Newmark の法を用いる。

筆者らは、本解析手法を用いて飽和傾斜地盤を流動直交方向に加振した模型振動台実験のシミュレーション (渦岡ら、2000 ; 文ら、2001) や、護岸背後の杭基礎建物の被災シミュレーション (渦岡ら、2002) を実施しており、本解析手法が実験値を概ね再現できることを確認している。

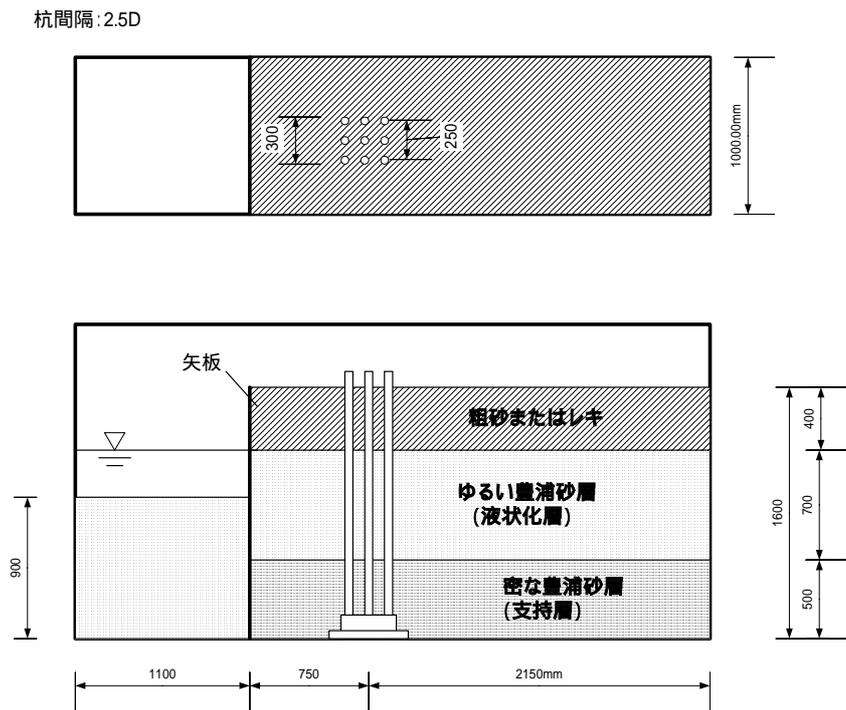


図1 実験模型 (土研, 2003)

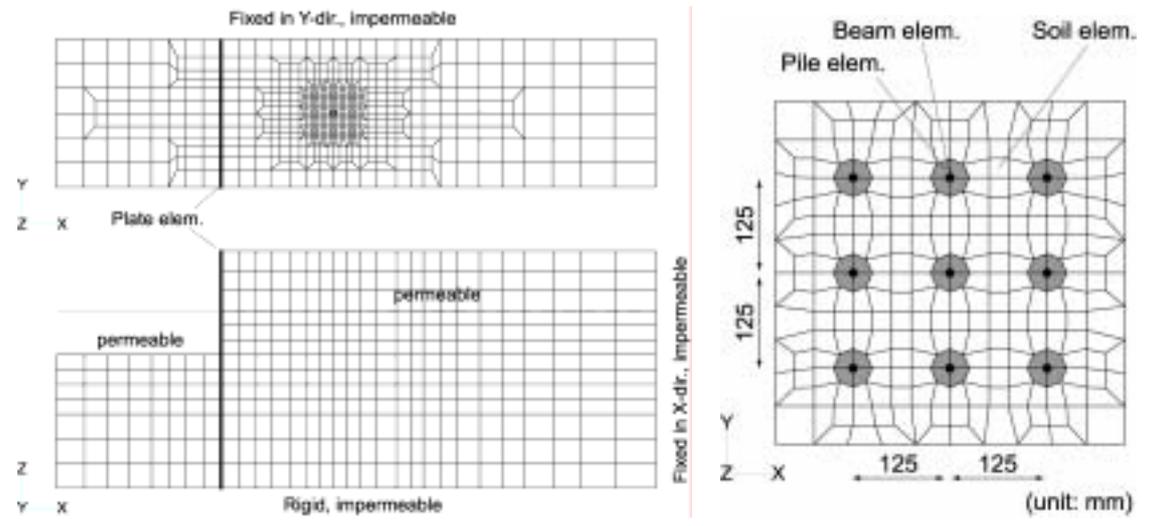


図2 FEM モデル

b) 解析条件

(i) 解析モデル

解析モデルは土木研究所の模型仕様（土研、2003）に基づき作成した。土層構成および杭構成を図 1 に示す。この土層構成をもとに、作成した FEM モデルを図 2 に示す。豊浦砂および粗砂（珪砂 2 号）からなる地盤はアイソパラメトリックソリッド要素、矢板はプレート要素、杭はビーム要素とソリッド要素からなるハイブリッド要素でモデル化した。また、水位以下の地盤要素については、過剰間隙水圧を考慮したが、矢板前面の水は考慮していない。

杭のハイブリッド要素は杭自体の体積を再現するための一手法（Zhang ら、2000）であり、ここでは杭のヤング率の 9 割をビーム要素に 1 割をその周辺のソリッド要素（弾性）に持たせている。杭のヤング率は地盤のそれに比べて 3 オーダー程度大きいことから、ビーム要素周辺のソリッド要素のヤング率は地盤のそれより 2 オーダー程度大きくなる。これによって、ビーム要素周辺のソリッド要素は杭の曲げ変形にさほど影響を与えないと同時に、地盤のように大きく変形せず、杭体の大きさを表現することが可能となる。

(ii) パラメータの設定

(イ) 地盤材料

模型地盤を構成している全ての材料（珪砂、豊浦砂）について、砂の弾塑性モデルを適用した。各土層に対して設定したパラメータを表 1 に示す。パラメータ設定においては、以下に示す豊浦砂に対する既往の室内試験結果および土木研究所で別途実施された珪砂に対する室内試験結果を参考とした。

- ・ 豊浦砂の密な砂に対する中空ねじり試験（Tatsuoka ら、1982）： $Dr=90\%$ （模型地盤では 89% ）の豊浦砂の液状化強度の設定。 $R_{L10}=0.60$ （ $DA=7.5\%$ ）程度。
- ・ 豊浦砂の低拘束圧下における中空ねじり試験（河上ら、1998；古関・河上、1999；古田・古関、2001）： $Dr=50\%$ （模型地盤では 49% ）の豊浦砂の液状化強度の設定。 $R_{L10}=0.23$ （ $DA=7.5\%$ ）程度。
- ・ 豊浦砂のせん断剛性と間隙比の関係（Iwasaki and Tatsuoka、1977）：豊浦砂の初期せん断剛性の設定。
- ・ 豊浦砂の等方圧密膨潤試験（Pradhan ら、1989）：豊浦砂の膨潤指数、圧縮指数の設定。
- ・ 豊浦砂のストレス - ダイレイタンスー関係（Pradhan ら、1989）：豊浦砂の変相角の設定。
- ・ 豊浦砂の CD 試験（Fukushima and Tatsuoka、1984）：豊浦砂の内部摩擦角の設定。
- ・ 珪砂 2 号に対する CD 試験（土木研究所実施）：珪砂 2 号の内部摩擦角の設定。

表 1 モデルパラメータ

土層名		珪砂2号	豊浦砂 Dr=50%	豊浦砂 Dr=90%
密度	ρ (t/m ³)	1.92	1.92	2.00
透水係数	k (m/s)	1.1×10^{-2}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}
初期間隙比	e_0	0.791	0.791	0.642
せん断波速度	V_s (m/s)	105	105	130
液状化強度 (N=10)	R_{L10}	0.23	0.23	0.60
圧縮指数	λ	0.0039	0.0039	0.0036
膨潤指数	κ	0.0002	0.0002	0.0002
擬似過圧密比	OCR	1.0	1.5	1.5
初期せん断係数比	G_0/σ'_m	3108	3108	3243
破壊応力比	M_f	1.229	1.229	1.406
変相応力比	M_m	0.909	0.909	0.909
硬化関数中のパラメータ	B_0	6600	6600	15000
"	B_1	120	120	100
規準ひずみ (塑性剛性)	γ_r^p	-	0.003	0.010
規準ひずみ (弾性剛性)	γ_r^e	-	0.006	0.030
ダレイタジ-係数	D_0	0.5	0.5	0.5
ダレイタジ-係数	n	5.0	5.0	5.0

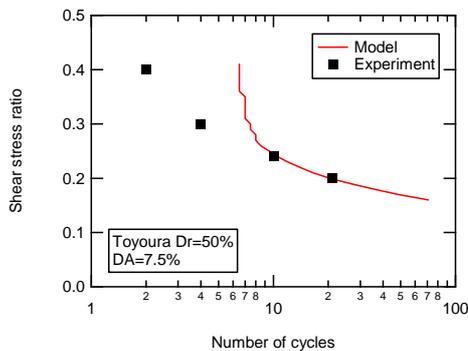


図 3(a) 液状化強度曲線
(豊浦砂 Dr=50%)

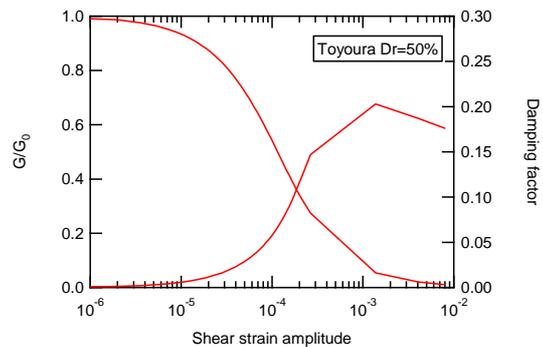


図 3(b) 動的変形特性
(豊浦砂 Dr=50%)

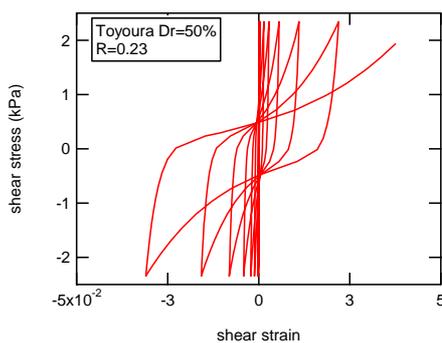


図 4(a) せん断応力 - せん断ひずみ関係
(豊浦砂 Dr=50%)

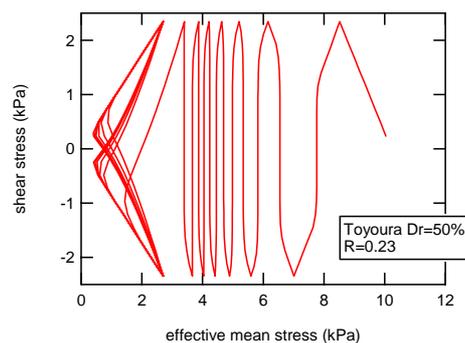


図 4(b) 有効応力経路
(豊浦砂 Dr=50%)

表-1 に示すパラメータのうち、密度から変相応力比までは、上記の既往の室内試験結果から直接設定したものである。このうち、

- ・ 透水係数については、粒度分布から Creager の経験式より推定している。
- ・ 擬似過圧密比については、水位以深の層は水浸により過圧密の状態となることから 1.5 と設定した。この条件は当初の実験条件 (土研、2002) によるものであり、実

際の条件（豊浦砂 $Dr=50\%$ は水中落下により作成）とはやや異なっている。

- ・初期せん断係数比については、間隙比から経験式で算定される微小ひずみ域でのせん断弾性係数を各土層の中央深度での平均有効応力で除して算定した。

一方、表-1 に示すパラメータのうち、硬化パラメータからダイレイタンス係数までのパラメータは、液状化強度を目標として、中空ねじり試験のシミュレーションを実施して、試行錯誤で設定した。設定したパラメータによる豊浦砂（ $Dr=50\%$ ）の液状化強度曲線および動的変形特性を図 3 に示す。図中には目標とした液状化強度も示している。目標繰返し回数 10 回のシミュレーションにおけるせん断応力～せん断ひずみ関係と有効応力経路を図 4 に示す。なお、豊浦砂（ $Dr=90\%$ ）については、目標の液状化強度を正確に再現することが困難であったため、目標値よりも強い液状化強度を有するパラメータ値とした。

珪砂 2 号については、内部摩擦角が豊浦砂（ $Dr=50\%$ ）と同程度（36-37 度）であったこと、CD 試験以外の試験結果が不足していることから、珪砂 2 号のパラメータは豊浦砂（ $Dr=50\%$ ）と同一とした。

(口) 杭、矢板材料

杭、矢板はともに弾性材料とした。鋼材のヤング率は 200GPa、密度は 7.85t/m^3 とした。実験模型の諸元から、杭径は 50mm、肉厚は 1mm として、ビーム要素の断面積、断面 2 次モーメントを算定した。実験模型の諸元から、矢板は板厚 6mm として、断面積を算定した。

(iii) 初期条件、境界条件および入力動

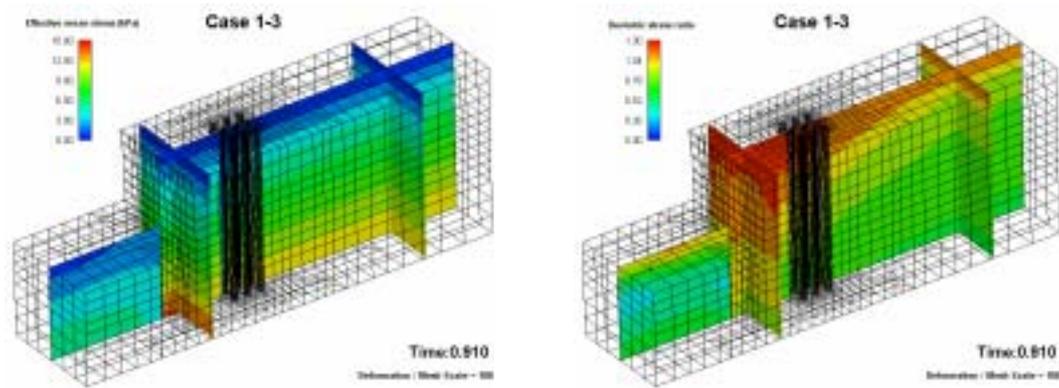
土骨格に対する境界条件として、底面は水平・鉛直方向を固定、側方は土槽壁面法線方向を固定した。ハイブリッド要素である杭のビーム要素については、最下端のみ全方向固定した。杭のソリッド要素については、ビーム要素とは同一節点を共有し、周辺の地盤要素とは鉛直方向のすべり（水平成分は杭・地盤同一変位）を考慮した。これは初期応力解析において、杭周辺地盤に不自然なせん断応力を発生させないためである。矢板のプレート要素については、最下端のみ鉛直方向を固定した。なお、模型実験では矢板最下端の水平方向は拘束されていないが、加振後の矢板最下端の水平変位は小さいこと、解析で矢板最下端の水平変位を非拘束とするとジョイント要素（土槽底面と地盤間）が必要となり煩雑となること、などから解析では矢板最下端の水平変位も拘束した。また、地盤との境界部はすべり（矢板法線方向は矢板・地盤同一変位）を考慮した。

間隙水に対する境界条件として、水位面を水頭 0 の排水境界、その他の要素面は全て流量 0 の非排水境界とした。また、矢板の両面も非排水とした。

地盤の初期有効応力状態を算定するため、動的解析と同一の FEM モデルを用いて静的排水自重解析を実施した。その際、模型実験での模型作成手順をできるだけ模擬するため、以下の二段階で初期応力解析を実施した。

矢板上端の水平成分を固定し、地盤の有効重量を考慮して、自重解析を行った。解析後に矢板上端で固定した水平成分での節点力を得た。

矢板上端の水平成分を自由とし、の応力状態のもと、で得た節点力を作用させ、加振前の応力状態を算定した。



(a) 平均有効応力 (b) 偏差応力比

図 5 初期応力解析の結果

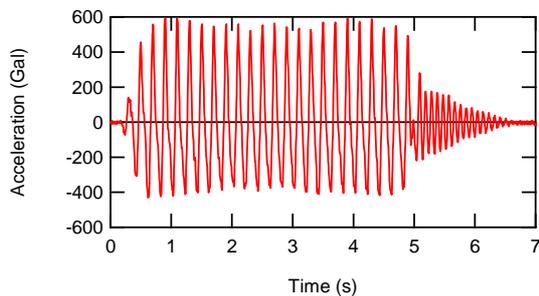


図 6 入力加速度

上記のステップでは地盤は簡易な弾完全塑性モデルとし、のステップでは動的解析と同じ弾塑性モデル（表 1 に示したパラメータを使用）とした。初期応力解析の結果、得られた地盤内の(a)平均有効応力および(b)偏差応力比（ $\sqrt{s_{ij}s_{ij}}/\sigma'_m$ ）の分布図を図 5 に

示す。偏差応力比の分布図にみられるように、杭前面から矢板背後地盤では高い偏差応力比となっており、この領域では初期状態からすでに地盤がせん断破壊状態に近い状態にある。実際、実験でも矢板上端の拘束をはずしたとき、矢板は約 35mm 前面に変位しており、矢板背面地盤は加振前から既に大きなひずみ履歴を受けていると考えられる。なお、今回行った初期応力解析では、正確には実験条件（土研、2003）を再現できていない。実験ではステップにおいて、矢板深度方向の二カ所（砂層上面から 10cm および 40cm の深度）で矢板変位を拘束しているが、解析では矢板上端および下端で矢板変位を拘束している。このような理由もあって、上記のステップにおいて、35mm もの矢板の水平変位を再現することはできなかった。より精度の高い初期応力解析を実施するには、実験条件の正確な再現、さらには地盤の材料パラメータの見直しなどが必要となるが、今後の課題としたい。

入力動として、振動台で計測された護岸平行方向の加速度波形を用いた。この加速度を剛基盤での加速度とした。入力加速度を図 6 に示す。

数値解析上の解析条件として、計算時間増分は 0.00125 秒、Newmark 法の係数は $\alpha=0.3025$ 、 $\beta=0.6$ とした。Rayleigh 減衰として、初期剛性比例型を用いた。その係数は、矢板背後地盤の 1 次固有周期 0.06 秒に減衰定数 3%を仮定して、0.00055 とした。動的解析時間は 7 秒である。

c) 解析結果

(i) 地盤の過剰間隙水圧

液状化発生の可能性が高い豊浦砂 ($Dr=50\%$) の代表点での過剰間隙水圧比の時刻歴を図 7 に示す。出力した要素位置は図 8 に示す P1 から P4 の 4 点である。これらの点の実験での間隙水圧計の位置と概ね対応している。ここで、過剰間隙水圧比は加振で発生した地震時増分間隙水圧を初期有効土被り圧で除した値である。図 7 に示すように矢板前面 P1 では完全液状化に達しているが、矢板背面の P2 から P4 ではいずれの点でも完全液状化に至っていない。矢板背後の P2 では負圧が発生しているが、これは矢板背後地盤のせん断破壊によって有効応力が減少できないことに起因している。杭と土槽壁面の中間に位置する P3 では、加振の影響により全応力の変化分が過剰間隙水圧比の変動に表れている。P4 では完全液状化に至らず、加振終了直後から消散している。これらの傾向は、P4 での解析値が実験値よりやや小さい点を除いて、実験結果 (土研、2003) とよく整合している。

次に模型全体に着目する。加振開始後 5 秒後の過剰間隙水圧比分布を図 9 に示す。なお、図には加振後の変形状況 (実際の変形量を 5 倍に拡大) も併せて示している。図 9 に示すように、矢板前面の豊浦砂 ($Dr=50\%$) はほぼ全域で過剰間隙水圧比が 1 に達しているのに対して、矢板背面の豊浦砂 ($Dr=50\%$) では、杭周辺で 0.5 程度の過剰間隙水圧比、その他は 0.2 未満の過剰間隙水圧比となっている。また、加振方向に直交する土槽面付近で過剰間隙水圧比がやや高くなっているのは、加振による全応力の変化の影響によるものである。

(ii) 地盤の変位

図 9 に示した矢板および地盤の変形モードは実験結果 (土研、2003) と定性的にはよく一致している。矢板上端における背後地盤の護岸法線方向および鉛直方向の変位の時刻歴を図 10 に示す。出力した節点は図 8 に示したとおりである。図に示すように、解析は実験での矢板の護岸法線方向への変位量を過小に評価している。また、実験では加振初期の段階で比較的大きな変形が生じているが、解析ではその傾向がみられない。地盤変位の定量的な予測に関しては、先に述べたような初期応力解析の見直しも含めて、さらに検討が必要である。

(iii) 杭の断面力

加振後の杭の曲げモーメントの深度分布図を図 11 に示す。ここでは、図 12 に示す 6 本の杭を対象として出力した。実験、解析とも矢板に近いほど杭下端での曲げモーメントが大きくなる傾向を示しており、この点では解析は実験をよく再現している。手前側の No.1 ~ No.3 と中央列の No.4 ~ No.6 の最大曲げモーメントを比較すると、解析では手前側の No.1 ~ No.3 の方が中央列の No.4 ~ No.6 よりやや大きな値を示しているが、実験では海側と山側で異なる傾向を示している。

最大曲げモーメントについては、解析は実験値をやや過小に評価している。この結果は杭周辺の地盤変位分布を反映したものと考えられ、図 10 に示したように地盤の変形を解析は過小評価したことが一因となっている。ただし、杭位置での地盤変位の予測精

度については、さらに詳しい検討が必要である。つぎに、曲げモーメントの深度分布形状に着目すると、解析では豊浦砂($Dr=50\%$)と豊浦砂($Dr=90\%$)の境界付近(深度-1.1m)で最大値が発生しているが、実験ではやや深い部分で最大値が発生している。

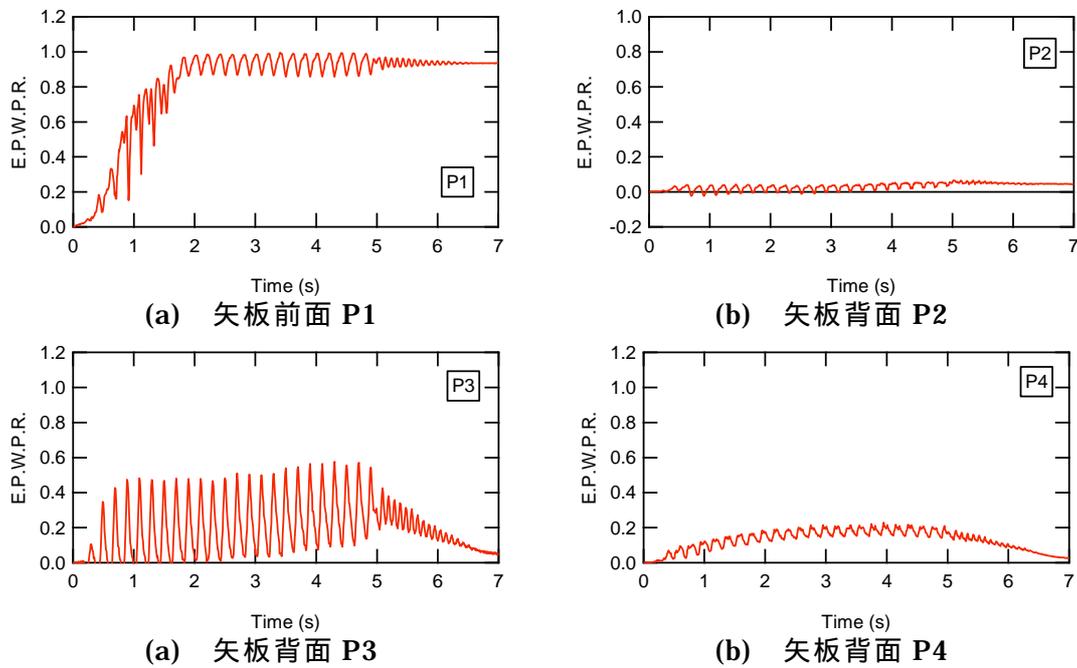


図7 過剰間隙水圧比の時刻歴

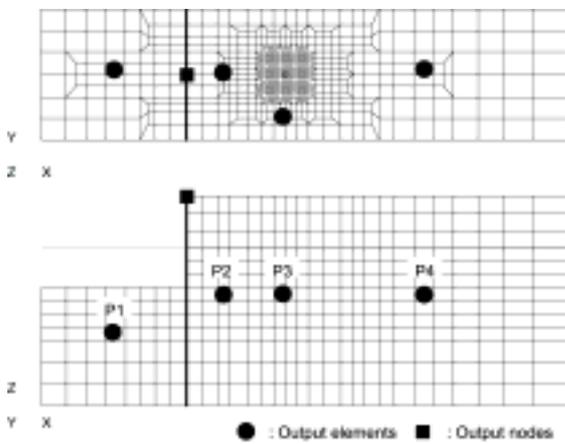


図8 出力要素・節点

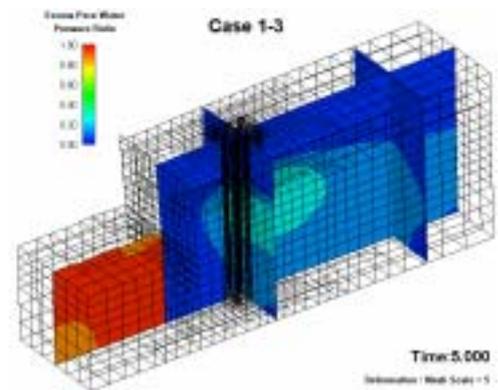


図9 加振後の変形と間隙水圧分布

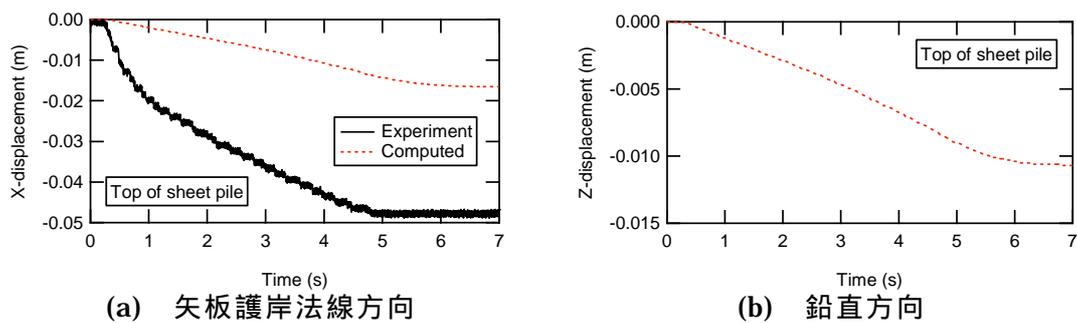


図10 矢板上端における背後地盤の変位の時刻歴

特に、矢板から離れるほど実験と解析の分布の違いが大きくなっている。本ケースは杭頭自由であるため、杭上端では曲げモーメントは発生せず、豊浦砂 ($D_r=90\%$) の下部層内で最大値が発生することになるが、最大値の発生位置は解析と実験でやや異なっている

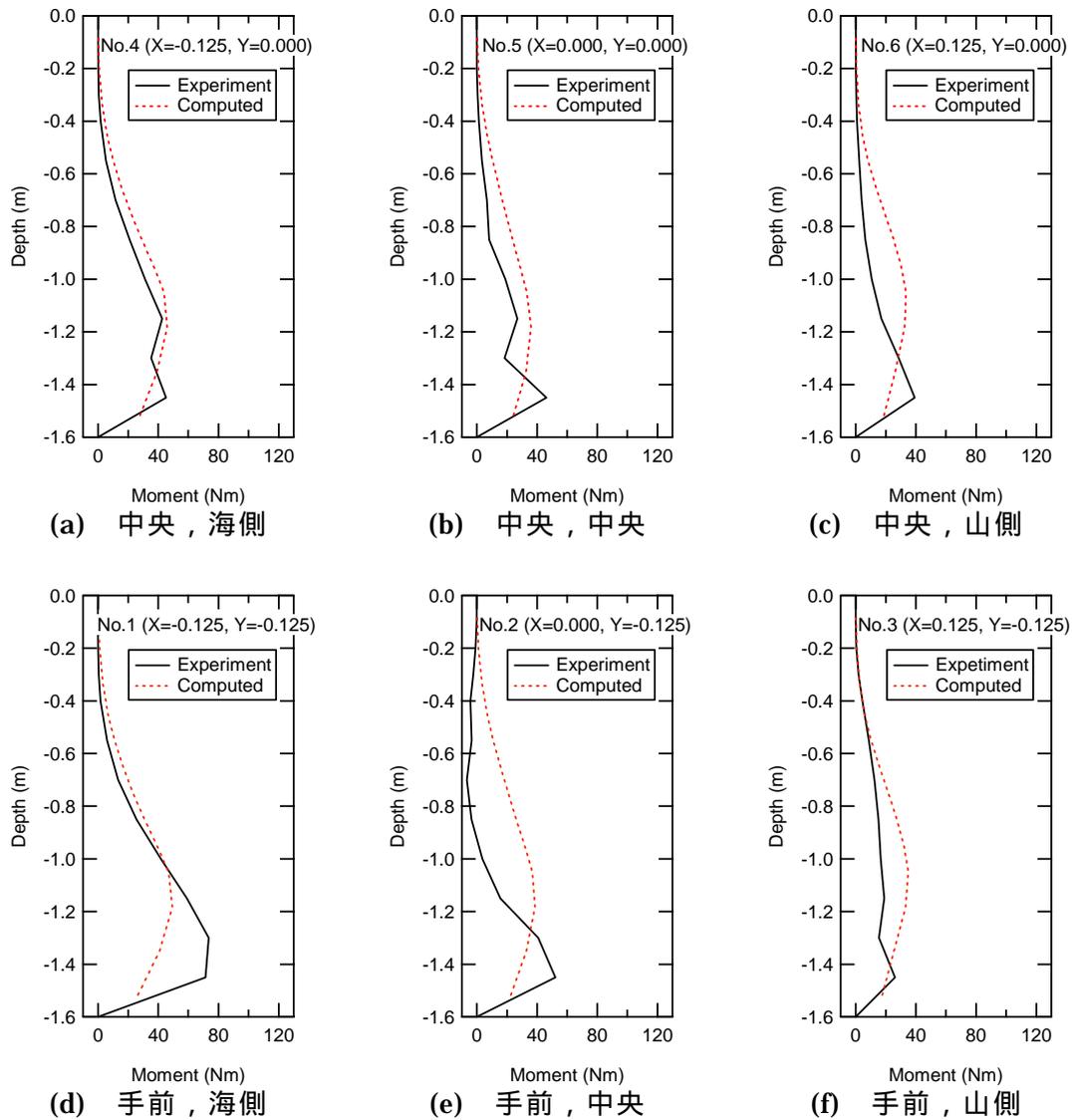


図 11 杭の曲げモーメントの深度分布

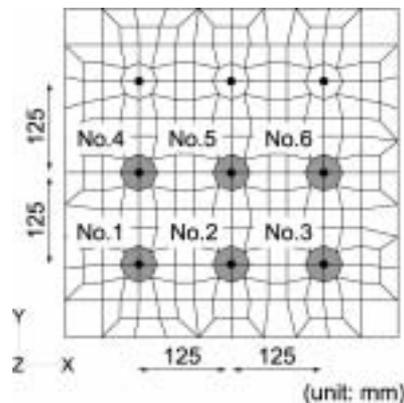


図 12 出力対象となる杭

いる。このような実験と解析の相違点については、杭周辺地盤の変形状況が関係していると考えられ、今後さらに考察が必要である。

2) 関連流動則に基づく繰返し弾塑性構成式の基本性能の把握

a) 既往の研究の整理

土木・建築構造物の耐震設計および機械構造物の耐振設計においては、繰返し負荷に対する材料の弾塑性挙動の表現が不可欠である。しかし、古典弾塑性論においては、降伏面の内部はいかなる応力変化によっても塑性変形を生じない“(純粹)弾性域”であると仮定するため、例えば、応力振幅一定の繰返し負荷に対して、初期負荷時のみ塑性変形を生じ、第2サイクル以降は弾性変形のみが繰り返されて、塑性変形の蓄積、つまり力学的ラチェット現象を表現できない。したがって、古典論は、構造物の耐震設計や機械・器具の耐振設計には適用できないと考えられる。

そこで1960年代以降、繰返し負荷に対する塑性変形挙動を表現するためのモデル、つまり繰返し塑性モデルが種々提案されてきた(多面モデル: Mroz, 1966, 1967; Iwan, 1967; 二面モデル: Krieg, 1975; Dafalias and Popov, 1975; Hashiguchi, 1985 a; 無数面モデル: Mroz et al., 1981; 単面モデル: Dafalias and Popov, 1977; Mroz et al., 1979; Hashiguchi, 1985 b; 初期下負荷面モデル: Hashiguchi and Ueno, 1977; Dafalias and Herrmann, 1980; 拡張下負荷面モデル: Hashiguchi, 1986, 1989)。特に拡張下負荷面モデルは、繰返し塑性モデルとしての力学的要求条件、すなわち、連続性条件、滑らか条件、仕事率・剛性緩和およびMasing効果のすべてを満たす。また、本モデルは金属(Hashiguchi and Yoshimaru, 1995)ならびに土(Hashiguchi et al., 1989; Topolnicki, 1990)の繰返し負荷に対する適用性が高いことが示されている。さらに、関口(1993)は、拡張下負荷面モデルの概念が過圧密粘土の力学特性を簡明に表現するとともに、繰返し負荷特性の予測においては不可欠な概念であると指摘している。

一方、材料の異方性は、金属ではバウシinger効果をもたらす移動硬化則、すなわち、降伏面の偏差応力方向への平行移動によって簡明に表現し得るが、土では降伏面が常に原点(応力0点)をкаろうじて含んでいると考えられることから移動硬化は適用できない。特に、実際の地盤の変形解析においては、異方性は重要な土の特性であり、その力学特性に異方性がどのように関与しうるか具体的に評価する必要がある。Sekiguchi and Ohta (1977)は圧密地盤の初期異方性の表現を回転した降伏面によって表せることを示した。Hashiguchi (1977, 1979b)は、これを回転硬化と称して、その発展則の規定により、誘導異方性の表現も可能にしている(橋口他、1996; Hashiguchi and Chen, 1998)。その後、時間依存性弾塑性構成式への拡張も行われている(Hashiguchi et al., 1998; Hashiguchi, 2001; Hashiguchi and Okayasu, 2001)。

また、関連流動則による塑性流動方向の緩和およびせん断帯発生やバルジ型変形モードに代表される塑性不安定現象の解析を目的として、降伏面の接線方向応力速度成分のうち、偏差成分による非弾性変形を拡張下負荷面モデルに導入した接線塑性下負荷面モデルが提案されている(Hashiguchi and Tsutsumi, 2001; Tsutsumi et al., 2001)。このモデルを用いて、正規および過圧密材料の非排水平面ひずみ条件下におけるせん断帯発生を解析を行い、その発生メカニズムの解明が行われている(Hashiguchi and

Tsutsumi, in press)。また、車輪走行、潮流および地震等による繰返し載荷過程において、その支持地盤内では主応力軸方向が回転することが知られているが、室内実験により、この主応力方向の回転に伴って非弾性変形が生じることが明らかにされている。これは、塑性ひずみ速度が主応力およびその速度では表されないことを意味しているが、接線塑性 下負荷面モデルにより合理的に表現可能であることが示されている（堤他, 2002; Tsutsumi and Hashiguchi, submitted）。

ここでは粘土から砂にわたる土の大変形、繰返し負荷、初期ならびに誘導異方性に適応でき、塑性不安定現象および時間依存性挙動の解析への適用など、その後の発展も期待される拡張下負荷面モデル(橋口他、1996; Hashiguchi and Chen, 1998)を取り上げ、その応答特性の把握を試みる。

なお、用いた構成式の詳細はここでは省略するので、文献(橋口他、1996; Hashiguchi and Chen, 1998)を参照されたい。

b) 解析結果

本モデルの応答特性を把握するために、非排水平面ひずみ条件において、等方応力状態を初期状態とし、応力一定振幅による繰返しねじりせん断試験の計算を行う。対象とした材料は、豊浦砂 ($D_r=50\%$) である。なお、相似中心の移動およびせん断硬・軟化の影響に注目し、表 2 に示される 4 つのモデルを用いて計算を行った。計算に用いた初期値および材料定数を表 3 に示す。

表 2 計算に用いたモデルの分類

		せん断硬・軟化	
		無 ($\mu = 0$)	有 ($\mu \neq 0$)
相似中心 の移動	無 ($c = 0$)	A モデル	B モデル
	有 ($c \neq 0$)	C モデル	D モデル

表 3 初期値および材料定数

$\sigma_0 = 9.8 \text{ I}$	$\phi = 40$
	$u = 20$
$F_0 = 20$	$c = 10$
	$\mu = 0.2$
$\nu = 0.33$	$\phi_d = 33$
$\rho = 0.0025$	
$\gamma = 0.0018$	

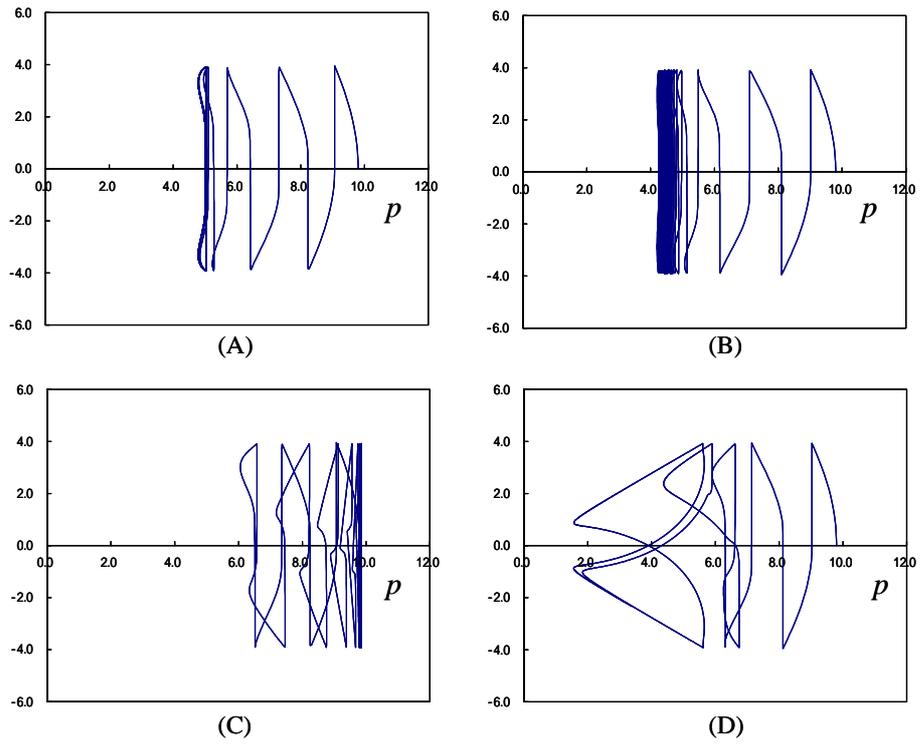


図12 各モデルによる繰返し負荷挙動 in the (p ,) plane

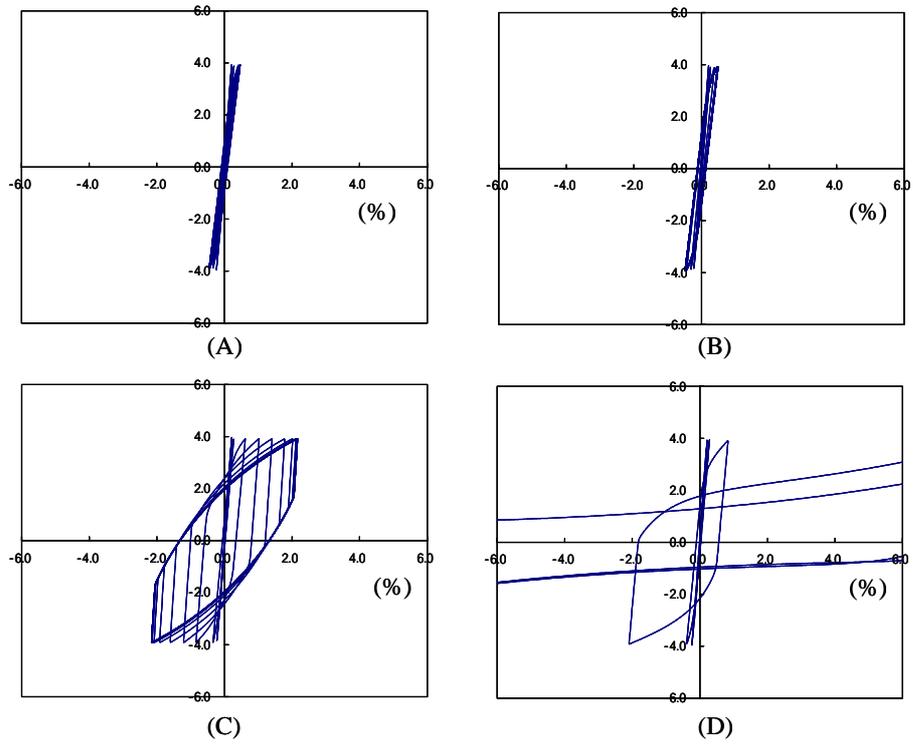


図13 各モデルによる繰返し負荷挙動 in the (, %) plane

A (下負荷面)、B (せん断硬・軟化を考慮した下負荷面)、C (相似中心の移動を考慮した拡張下負荷面)およびD (せん断硬・軟化および相似中心の移動を考慮した拡張下負荷面)モデルによる繰返しせん断試験結果を図 12 の (p ,) 空間および図 13 の (,) 空間に示す。まず、せん断硬・軟化および相似中心の移動を考慮しない A モデルの (p ,) 空間における応答は、繰返しせん断に伴って有効応力が低下していくが、一定の有効応力到達後は同じ経路を辿り、繰返しによる応力低下を表現し得ない。また、(,) 空間においても、ほぼ直線状に同じ経路を辿り、非弾性ひずみ増分はほとんど生じずに、繰返しに伴うヒステリシス・ループを表現していない。次に、A モデルへせん断硬・軟化を考慮した B モデルにおいては、載荷初期は A モデルとほぼ同様な応答を示しているが、有効応力の低下に伴って、軟化を伴いながら、非弾性変形を生じている。また、A モデルへ相似中心の移動を考慮した C モデルは、(,) 空間において実験で観測されるループを表現しているが、有効応力の低下を表現し得ていない。最後に、せん断硬・軟化および相似中心の移動の両者を考慮した D モデルは、(p ,) 空間における有効応力の低下および(,) 空間における軟化による大変位をよく再現しており、液状化現象を表現可能であることがわかる。

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 現有の三次元有効応力解析手法による振動台実験の事前予測

- ・ 矢板背後側の豊浦砂 ($Dr=50\%$) では液状化が発生しなかったこと、矢板近傍の背後地盤では負の過剰間隙水圧が発生したことなど、解析は実験値をよく再現した。
- ・ 初期応力解析に関して、ここで用いた方法では矢板上端の拘束解放時の矢板変位を適切に評価できていない。また、加振後の矢板の変位を解析は過小評価した。矢板の拘束条件など初期応力解析の見直しが必要である。
- ・ 杭に作用する曲げモーメントに関して、解析は各杭での深度分布を定性的には再現したが、最大値やその発生位置などにはやや違いがみられた。杭周辺の地盤の変形状況などにも着目した考察がさらに必要である。

2) 関連流動則に基づく繰返し弾塑性構成式の基本性能の把握

- ・ 繰返し載荷によるひずみ集積の表現には、相似中心の移動およびせん断硬・軟化の考慮が不可欠であることがわかった。今後、初期および誘導異方性の有無による繰返し応答特性の把握、さらに F E M への組み込みにより、繰返し載荷を含む具体的境界値問題での予測特性の把握が必要となる。

(e) 引用文献

- 1) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, pp.661-680, 1999.
- 2) Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M. and Uzuoka, R.: FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, *Applied Scientific Research*, Vol.52, pp.209-245, 1994.

- 3) 渦岡良介、久保哲夫、文龍、佐藤忠信: 三次元有効応力解析による地盤の液状化に伴う流動の予測, 第 35 回地盤工学研究発表会, pp.2233-2234、2000.
- 4) 文龍、佐藤忠信、渦岡良介: 砂の流弾塑性構成式による液状化した傾斜地盤の流動解析, 第 36 回地盤工学研究発表会, pp.1371-1372、2001.
- 5) 渦岡良介、仙頭紀明, 八嶋厚, 張鋒: 護岸近傍に位置する杭基礎建物の 3 次元有効応力解析, 日本地震工学会論文報告集, Vol.2, No.2, pp.1-14, 2002.
- 6) 土木研究所: 側方流動に対する基礎の破壊メカニズム解明の実験、実験計画案、2002.12.3.
- 7) 土木研究所: 側方流動に対する基礎の破壊メカニズム解明の実験、中間報告、2003.3.21.
- 8) Zhang, F., Kimura, M., Nakai, T. and Hoshikawa, T.: Mechanical behavior of pile foundations subjected to cyclic lateral loading up to the ultimate state, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.5, pp.1-17, 2000.
- 9) Tatsuoka, F., Muramatsu, M. and Sasaki, T.: Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear test, *Soils and Foundations*, Vol.22, No.2, pp.55-70, 1982.
- 10) 河上定弘、板倉大祐、佐藤剛司、古関潤一: 繰返し中空ねじり試験による低拘束圧下での砂の液状化特性、第 33 回地盤工学研究発表会、pp.725-726、1998.
- 11) 古関潤一、河上定弘: 繰返し中空ねじり試験による低拘束圧下での砂の液状化特性 (その 2)、第 55 回土木学会年次学術講演会、III-A78、1999.
- 12) 古田達也、古関潤一: 低拘束圧下における豊浦砂の軸変位固定非排水繰返し中空ねじり試験、第 56 回土木学会年次学術講演会、III-A024、2001.
- 13) Iwasaki, T. and Tatsuoka, F.: Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands, *Soils and Foundations*, Vol.17, No.3, pp.19-35, 1977.
- 14) Pradhan, T.B.S., Tatsuoka, F. and Sato, Y.: Experimental stress-dilatancy relations of sand subjected to cyclic loading, *Soils and Foundations*, Vol.29, No.1, pp.45-64, 1989.
- 15) Fukushima, S. and Tatsuoka, F.: Strength and deformation characteristics of saturated sand at extremely low pressures, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.4, pp.30-48, 1984.
- 16) Dafalias, Y. F. and Popov, E. P. (1975): A model of nonlinearly hardening materials for complex loading. *Acta Mech.*, 23, 173-192.
- 17) Dafalias Y. F. and Popov, E. P. (1977): Cyclic loading for materials with a vanishing elastic domain. *Nucl. Eng. Design*, 41, 293-302.
- 18) Dafalias, Y. F. and Herrmann, L. R. (1980): A bounding surface soil plasticity model. *Proc. Int. Symp. Soils under Cyclic Trans. Load.* (Pande, G. N. and Zienkiewicz, O. C. eds.) . Swansea, Balkema Publ. (Rotterdam). pp 335-345.
- 19) Hashiguchi, K. and Ueno, M. (1977): Elastoplastic constitutive laws of granular materials. *Constitutive Equations of Soils* (Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng , Spec. Ses.9), Tokyo, JSSMFE, pp. 73-82.

- 20) Hashiguchi, K. (1977): An expression of anisotropy in a plastic constitutive equation of soils. *idem*, 302-305.
- 21) Hashiguchi, K. (1979 a): Constitutive equations of granular media. *Proc. 3rd Int. Conf. Numer. Meth. Geomech.*, pp. 435-439.
- 22) Hashiguchi, K. (1979 b): Constitutive equations of granular media with an anisotropic hardening. *Proc. 3rd Int. Conf. Numer Meth. Geomech.*, pp. 35-439.
- 23) Hashiguchi, K. (1986): Elastoplastic constitutive model with a subloading surface. *Proc. Int. Conf. Comput. Mech. (Atluri, S. N. and Yagawa, G. eds.)*. Tokyo, Springer-Verlag (Berlin), pp. V65-70.
- 24) Hashiguchi, K., Ueno, M. and Imamura, T. (1989): Prediction of deformation behavior of sands by the subloading surface model. *Proc. Int. Workshop on Constitutive Equations for Granular Noncohesive soils*, pp. 293-306.
- 25) Hashiguchi, K. (1989): Theoretical assessments on basic structures of constitutive models (Panel Report). *ibid.*, pp. 699-715.
- 26) Hashiguchi, K. (1989): Subloading surface model in unconventional plasticity, *Int. J. Solids Struct.*, 25(8), 917-945.
- 27) Hashiguchi, K. (1994): On the loading criterion, *Int. J. Plasticity*, 10(8), 871-878.
- 28) Hashiguchi, K. (1995): On the linear relations of $V\text{-ln}p$ and $\ln v\text{-ln}p$ for isotropic consolidation of soils, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 19, 367-376.
- 29) Hashiguchi, K. and Yoshimaru, T. (1995): A generalized formulation of the concept of nonhardening region. *Int. J. Plasticity*, Vol. 11, 347-365.
- 30) 橋口公一、上野正実、陳 忠平(1996) : 下負荷面および回転硬化の概念に基づく土の弾塑性構成式、*土木学会論文集*、No. 547/ -36、127-144.
- 31) Hashiguchi, K. and Chen, Z. P. (1998): Elastoplastic constitutive equation of soils with the subloading surface and the rotational hardening, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 22, 199-227.
- 32) Hashiguchi, K., Wu, X., Okayasu, T. and Tsutsumi, S. (1998): Time-dependent elastoplastic constitutive model, *Metals & Materials*, 4, 345-349.
- 33) Hashiguchi, K. (2000): Time-dependent Elastoplastic Constitutive Equation, *Archives Mechanics*, 52, 609-628.
- 34) Hashiguchi, K. and Okayasu, T. (2000): Time-dependent elastoplastic constitutive equation Based on subloading surface model and its application to soils, *Soils & Foundations*, 40(3), 21-36.
- 35) Hashiguchi, K. and Tsutsumi, S. (2001): Elastoplastic constitutive equation with tangential stress rate effect. *Int. J. Plasticity*, Vol.17, pp. 117-145.
- 36) Hashiguchi, K. and Tsutsumi, S. (in press): Shear band formation analysis in soils by the subloading surface model with tangential stress rate effect. *Int. J. Plasticity*.
- 37) Hill, R. (1958): A general theory of uniqueness and stability in elasto-plastic

- solids, *J. Mech. Phys. Solids*, 6, 236-249.
- 38) Hill, R. (1967): On the classical constitutive relations for elastic/plastic solids, *Recent Progress in Appl. Mech. (The Folke Odqvist Volume)*, John Wiley & Sons, 241-249.
- 39) Iwan, W. D. (1967): On a class of models for the yielding behavior of continuous and composite systems. *J Appl. Mech., ASME*, 34, 612-617.
- 40) Krieg, R. D. (1975): A practical two surface plasticity theory. *J Appl. Mech., ASME*, 42, 641-46.
- 41) Mroz, Z. (1966): On forms of constitutive laws for elastic-plastic solids. *Archiwum Mechaniki Stosowanej*, 18, 3-35.
- 42) Mroz, Z. (1967): On the description of anisotropic workhardening. *J Mech. Phys. Solids*, 15, 163-175.
- 43) Mroz, Z., Norris, V. A. and Zienkiewicz, O. C. (1979): Application of an anisotropic hardening model in the analysis of elasto-plastic deformation of soils. *Geotechnique*, 29, 1-34.
- 44) Mroz, Z., Norris, V. A. and Zienkiewicz, O. C. (1981): An anisotropic, critical state model for soils subject to cyclic loading. *Geotechnique*, 31, 451-469.
- 45) Sekiguchi, O. and Ohta, H. (1977): Induced anisotropy and time dependency in clays, *Constitutive Equations of Soils (Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Spec. Session 9)*, Tokyo, JSSMFE, 229-238.
- 46) 関口秀雄 (1993): カムクレイに学ぶ 6.カムクレイとその後の発展(2)、土と基礎、Vol. 41、No. 12、97-104.
- 47) Topolnicki, M. (1990): An elasto-plastic subloading surface model for clay with isotropic and kinematic mixed hardening parameters, *Soils and Foundations*, 30(2), 103-113.
- 48) Tsutsumi, S., Hashiguchi, K., Okayasu, Y., Saitoh, K. and Sugimoto, M. (2001): Mechanical response of subloading surface model with tangential plasticity. *J. Appl. Mech., JSCE*, Vol.4, pp. 375-382.
- 49) Tsutsumi, S. and Hashiguchi, K. (submitted): On the description of general non-proportional loading behaviour of soils. *Geotechnique*.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 論文発表

著者	題名	発表先	発表年月日
なし			

2) 口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
なし			

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 15 年度業務計画案

(a) 現有の三次元有効応力解析手法による振動台実験の事前予測

平成 14 年度に引き続き、現有の三次元有効応力解析手法を用い、当該年度実施予定の側方流動に対する基礎の破壊メカニズム解明のための模型実験の事前予測を行う。平成 14 年度は流動直交方向の加振のみを対象としたが、平成 15 年度は流動平行方向の加振も対象として、多方向入力時の地盤と基礎の挙動について検討する。

具体的には、平成 14 年度と同様に地盤-基礎の有限要素モデル作成、地盤の材料パラメータの設定、三次元数値シミュレーション、解析結果の整理および考察を行う。実験結果と解析結果の比較を通じて、解析手法の適用性を明らかにする。また、解析結果に基づき、多方向入力下での流動地盤の動的挙動や基礎の挙動のメカニズムを考察する。

(b) 新しい弾塑性構成式を用いた三次元有効応力解析手法の開発

関連流動則に基づく弾塑性構成式を導入した三次元有効応力解析手法を用い、一次元土柱モデルの応答解析など基本的な境界値問題の解析を通じて、手法の確立を図る。一次元土柱モデルには、検証のための実測値が得られている問題を対象とする。一例として、平成 14 年度に実施した振動台実験における矢板背後地盤の一次元土柱モデルなどがある。

具体的には、まず、平成 14 年度に要素シミュレーションで用いた構成式を現有の三次元有効応力解析手法に組み込む。その後、一次元土柱モデルを対象として、地盤の有限要素モデル作成、地盤の材料パラメータの設定、三次元数値シミュレーション、解析結果の整理および考察を行う。実験結果と解析結果の比較を通じて、解析手法の適用性を確認し、必要に応じてプログラムの改良を行う。