

# 液状化解析で用いる地盤構成モデルに関する提案と解析

伊藤 浩二 表 佑太郎

## Study on Constitutive Relationships of Granular Materials in Liquefaction Analysis

Koji Ito Yutaro Omote

### Abstract

In offshore areas, some of the structures (for example, life-line facilities) supported by very soft ground may possibly be damaged by liquefaction.

Therefore, to predict analytically the liquefaction problem, firstly, the Multi-mechanism model which is often used as a constitutive model of granular materials under monotonic and cyclic loads was newly modified to enable evaluation of the effect of principal stress axis rotation and was checked by simulating undrained cyclic simple shear tests.

Secondly, a two-dimensional effective stress analysis using this model was performed to simulate the shaking table test of the soil-underground structure interaction problem and was confirmed to predict precisely the excess pore water pressure and the permanent deformation resulting in a soil deposit in liquefaction.

### 概 要

本研究は、軟弱地盤で支持される護岸施設、地中構造物などの安定問題のうち、地震時の液状化ならびに残留変形について解析的に予測する手法を確立することを目的とする。本報では、液状化解析で用いる地盤材料の非線形特性をモデル化した構成則に関する提案とその解析例について述べる。また、主たる結論を以下に列挙する。

①地震時の応力状態として顕著である主応力軸の回転によって生じる塑性変形成分を、従来用いられていた地盤構成モデルに新たに導入することにより、室内試験で得られる液状化強度特性を定量的に表現できる。

②提案モデルを用いた二次元有効応力解析により、地盤—地中構造物系において液状化により生じる地盤の過剰間隙水圧ならびに残留変形、構造物の挙動を適切に予測できる。

## 1. はじめに

近年臨海部への地域開発に伴い、大規模な護岸施設や共同溝等が、若令地盤あるいは軟弱地盤において施工されつつある。従って、このような構造物に対しては、地震時の液状化に関する安全性の照査が必要となる場合があり、それぞれの設計指針においても液状化を考慮した簡便な設計手法が列挙されている。

一方実際の地盤では、盛土構造物にみられるような不整形性を有したり、他構造物との相互作用が問題となる場合があり、このような複雑な条件下の液状化問題に対しては、数値解析により境界値問題を解かざるをえない。

ここで一般の飽和地盤は、土粒子骨格と空隙の間隙水から構成され、その変形挙動は骨格に作用する有効応力（＝全応力－間隙水圧）に支配される。また液状化・圧密問題のように、過剰間隙水圧が時々刻々変動する現象では、有効応力と透水力により外荷重に抵抗する。

このように有効応力原理に基づいて、土粒子骨格と間隙水の連成を考慮して地盤の変形挙動を逐次評価する解析手

法は有効応力解析と呼ばれ、液状化により発生する過剰間隙水圧・残留変形を厳密に予測できると考えられている。また地盤の変形問題では、地盤材料特有のダイレタンシー（せん断等により生じる塑性体積ひずみ）特性を適切に評価した地盤構成モデルを用いることが重要となる。

そこで本研究では、有効応力法による地盤の液状化解析において、従来用いられていた地盤構成モデルの一つである Multi-mechanism モデルに対し、地震時の応力状態として顕著である主応力軸の回転によって生じる塑性変形成分を新たに導入し、より適切なモデルへの拡張を試みる。

さらに、非排水繰り返し単純せん断試験に相当する要素シミュレーション解析を行ない、従来モデルと提案モデルにおける過剰間隙水圧量、ならびに有効応力経路を比較することによりその妥当性を検証する。

次に、二次元有効応力解析プログラム DIANA-J の材料構成則として提案モデルを組み込み、地盤—地中構造物系の模型振動実験に対する液状化解析から、提案モデルを用いた有効応力解析の適用性を検討する。

## 2. 有効応力原理に基づく液状化解析手法

### 2.1 飽和多孔質体の釣り合い式

一般に有効応力解析で用いられる基礎式は、Biot により提案された地盤を構成する土粒子骨格と間隙水との連成効果を厳密に評価した飽和多孔質体の釣り合い式と間隙水の連続式である。従って、液状化・圧密等の二相系地盤の境界値問題は、Biot の式と土粒子骨格に対する適切な構成モデルを用いることにより解かれる。

最初に、Biot の飽和多孔質体の釣り合い式と連続式を(1)~(4)式に示す。

- 土粒子骨格の釣り合い式
 
$$(1-n)\rho_s\ddot{u}_i + (n^2/k)\dot{u}_i - (n^2/k)\dot{U}_i - \sigma'_{ij,j} + (1-n)p_{,i} + f_{si} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$
- 間隙水の釣り合い式
 
$$(n)\rho_f\ddot{U}_i - (n^2/k)\dot{u}_i + (n^2/k)\dot{U}_i + (n)p_{,i} + f_{fi} = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$
- 間隙水の連続式
 
$$-(n)\epsilon^u_{ii} = (1-n)\epsilon^u_{ii} + (p/Q) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$1/Q = (n)/K_f + (1-n)/K_s \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに  $u_i, \dot{u}_i, \ddot{u}_i, U_i, \dot{U}_i, \ddot{U}_i$  : 土粒子骨格, 間隙水の変位, 速度, 加速度,  $\epsilon^u_{ii}, \epsilon^u_{ii}$  : 土粒子骨格, 間隙水の体積ひずみ,  $f_{si}, f_{fi}$  : 土粒子骨格, 間隙水の物体力,  $\rho_s, \rho_f$  : 土粒子, 間隙水の質量密度,  $K_s, K_f$  : 土粒子, 間隙水の体積弾性係数,  $n$  : 間隙率,  $k$  : 透水係数,  $\sigma'_{ij}$  : 有効応力テンソル,  $p$  : 間隙水圧である。また(1)~(3)式において,  $\sigma'_{ij}$  は引張応力,  $p$  は圧縮応力を正と定義している。

以上(3)式の  $p$  を(1), (2)式に代入し, 一般の離散化手法に基づき展開することにより, 土粒子骨格ならびに間隙水の節点変位  $\{u^u\}, \{U^u\}$  を未知量としてマトリクス表示される<sup>1)</sup>。また過剰間隙水圧  $u$  は,  $\{u^u\}, \{U^u\}$  から(3)式により得られる。このように, 土粒子骨格, 間隙水の節点変位を未知量とする形式は,  $u-U$  定式化と呼ばれ, 二次元有効応力解析プログラム DIANA-J の基礎式として採用されている。

### 2.2 Multi-mechanism モデルの概要

地盤の液状化・残留変形等を解析的に予測する場合, 地盤材料の非線形特性を適切に表現した構成モデルの選択が重要となる。またこの構成モデルについては, 現在研究途上分野であり種々の提案が行なわれている。

そのなかで本研究では, 単調ならびに繰り返し荷重下における粒状材料の非線形特性 (ヒステリシス, サイクリック・モビリティ, ダイレタンシー等) を適切に表現できるモデルとして, 石原・Kabilamany により提案された Multi-mechanism モデルを取り上げる<sup>2)</sup>。以下にこのモデルの概要を示す。

Multi-mechanism モデルは, 粒状材料に対して一般的に用いられる非関連流れ則に基づいた弾・塑性構成モデルである。

このモデルでは, 全塑性ひずみ増分  $\{d\epsilon^p\}$  は, 主応力比の変化により生じるせん断成分と平均有効応力の変化によ

り生じる圧密成分の和で表現される。

また  $\{d\epsilon^p\}$  は, CMP 理論 (複合滑動面 : 3 主応力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  の異なる 2 主応力間で生じるひずみの線形和で全塑性ひずみ増分を評価する) に基づいており, その結果降伏関数, 応力-ダイレタンシー関係, 硬化関数は, それぞれ  $(\sigma_2, \sigma_3), (\sigma_3, \sigma_1), (\sigma_1, \sigma_2)$  平面の各メカニズム ( $k = 1, 2, 3$ ) で定義される<sup>3)</sup>。

以下降伏関数を(5), (6)式, 応力-ダイレタンシー関係を(9)式, 硬化関数  $h$  を(14), (15)式に示す。また添字  $k, m, c, p, e$  は, それぞれメカニズム, 単調荷重, 繰り返し荷重, 塑性成分, 弾性成分を意味する。

$$f_k^m = q_k \cdot \zeta_k - p_k \cdot \sin \phi_f \cdot h_k^m \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$f_k^c = (q_k - C_k) \cdot \zeta_k - p_k \cdot \sin \phi_f \cdot h_k^c \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$p_k = (\sigma_1 + \sigma_j) / 2 \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$q_k = (\sigma_i - \sigma_j) / 2 \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\dot{\epsilon}_v^{p_k} / \dot{\epsilon}_d^{p_k} = \mu_k - (q_k / p_k) \cdot \zeta_k \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\dot{\epsilon}_v^{p_k} = (\dot{\epsilon}_i^p + \dot{\epsilon}_j^p) \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\dot{\epsilon}_d^{p_k} = (\dot{\epsilon}_i^p - \dot{\epsilon}_j^p) \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\mu_k = 3\mu / (6 + \mu) \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$\mu = C + 2/\pi \cdot (\mu_{max} - C) \cdot \tan^{-1} (\epsilon_d^p / S_c) \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$h_k^m = \Omega_k / (a^m + \Omega_k) \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$h_k^c = \Omega_k / (a^c + \Omega_k) \quad \dots\dots\dots(15)$$

ここに  $p_k, q_k$  : 応力パラメータ,  $\dot{\epsilon}_v^{p_k}, \dot{\epsilon}_d^{p_k}$  : ひずみ増分パラメータ,  $\sigma_i, \sigma_j$  : 主応力,  $\dot{\epsilon}_i^p, \dot{\epsilon}_j^p$  : 主ひずみ増分,  $\Omega_k$  : 正規化塑性仕事,  $C_k$  : 移動硬化パラメータ,  $\zeta_k$  : 圧縮・伸張荷重の判定パラメータ ( $\pm 1$ ),  $\phi_f$  : 内部摩擦角,  $C, S_c$  : ダイレタンシーパラメータ,  $\mu_{max}$  : 変相線における応力比,  $a^m, a^c$  : 硬化パラメータである。

以上(5)~(15)式を用いて, 一般の塑性理論で行なわれる連続条件からせん断による  $k$  メカニズムの塑性ひずみ増分  $\{d\epsilon_s^p\}_k$  は算定される。また  $\{d\epsilon_s^p\}_k$  の算定に必要なパラメータは,  $\phi_f, C, S_c, \mu_{max}, a^m, a^c$  の 6 個である。

圧密成分については, 等方圧密による塑性ひずみ増分  $\{d\epsilon_c^p\}_k$  を考慮する。

$$\{d\epsilon_c^p\}_k = \frac{(\lambda_c - \lambda_s) \cdot d\sigma'_m}{(1 + e_0) \cdot \sigma'_m} \quad \dots\dots\dots(16)$$

ここに  $\lambda_c, \lambda_s$  : 体積圧縮, 膨張指数,  $e_0$  : 初期間隙比,  $\sigma'_m$  : 平均有効応力,  $d\sigma'_m$  : 平均有効応力増分である。このように  $\{d\epsilon_c^p\}_k$  を算定するのに必要なパラメータは,  $\lambda_c, \lambda_s, e_0$  の 3 個であり, 直ひずみ成分のみに等しく生じるものとする。

以上  $k$  メカニズムの全塑性ひずみ増分  $\{d\epsilon^p\}_k$  は, せん断成分と圧密成分の和として(17)式で表現される。

$$\{d\epsilon^p\}_k = \{d\epsilon_s^p\}_k + \{d\epsilon_c^p\}_k \quad \dots\dots\dots(17)$$

次に, 弾性ひずみ増分  $\{d\epsilon^e\}$  は通常の等方弾性体として算定される。但しせん断弾性係数  $G$ , 体積弾性係数  $K$  は, (18), (19)式に示すように  $\sigma'_m$  の関数と仮定していることから,  $\sigma'_m$  の減少により弾性係数が低下する等方非線形弾性

体に相当する。

$$G = G_0 (\sigma'_m / \sigma'_{ref})^{0.5} \quad \dots\dots\dots(18)$$

$$K = K_0 (\sigma'_m / \sigma'_{ref})^{0.5} \quad \dots\dots\dots(19)$$

ここに  $\sigma'_{ref}$  : 規準平均有効応力,  $G_0, K_0$  :  $\sigma'_m = \sigma'_{ref}$  における  $G, K$  である。また  $\{d\epsilon^p\}$  を算定するのに必要なパラメータは,  $G_0, K_0, \sigma'_{ref}$  の 3 個である。

### 3. 地盤構成モデルに関する提案

#### 3.1 主応力軸の回転による塑性変形

Multi-mechanism モデルのような粒状材料の弾・塑性構成モデルでは, 一般に, 降伏関数  $f$  が応力の不変量で表示されることから, その変化がなければ塑性変形が生じないことになる。一方室内試験においては, 主応力値が一定の下で, 一般応力  $\sigma_{ij}$  が変化する载荷条件(たとえばモールの円周に沿う回転応力経路)においても, 粒子構造が変化するために塑性変形が生じることが確認されている<sup>3), 4)</sup>。

また一般の地盤では, 初期有効応力が異方圧密状態 ( $\sigma'_x \neq \sigma'_y$ ) であるため, この応力状態で地震力が作用する場合には, 主応力軸の連続的な回転が生じることになり, その変形成分は無視できないと考えられる。

#### 3.2 主応力軸の回転効果の導入

液状化解析で用いる地盤構成モデルとして, 2.2節の Multi-mechanism モデル中に, 松岡等により提案されている二次元応力条件下での主応力軸の回転による塑性変形成分の導入を行なった<sup>3)</sup>。これは, Multi-mechanism モデルで採用している CMP 理論が松岡により提案されたものであり, また応力-ダイレタンシー関係, 硬化関数は松岡による構成則とは異なるものの, 整合性をもって主応力軸の回転効果の導入が可能と考えたからである。

従って, 主応力軸の回転を考慮した Multi-mechanism モデルの  $k$  メカニズムの全塑性ひずみ増分  $\{d\epsilon^p\}_k$  は, (17)式と異なり, せん断成分, 圧密成分, 主応力軸の回転成分の和として(20)式で表現される。

その結果, 地震時のように主応力軸の回転が顕著に生じる繰り返し荷重が作用する場合でも, 地盤の変形挙動の厳密な予測が可能となる。

$$\{d\epsilon^p\}_k = \{d\epsilon_s^p\}_k + \{d\epsilon_c^p\}_k + \{d\epsilon_r^p\}_k \quad \dots\dots\dots(20)$$

ここに  $\{d\epsilon_r^p\}_k$  : 主応力軸の回転による塑性ひずみ増分である。

次に, Multi-mechanism モデルに対して行なった  $\{d\epsilon_r^p\}_k$  の  $\{d\epsilon^p\}_k$  への導入手法を示す。

一般の塑性理論に基づけば, 塑性ひずみ増分  $\{d\epsilon^p\}_k$  は(21)式で表現される (但し, CMP 理論を用いることから  $k = 1, 2, 3$  毎に定義される。)

$$\{d\epsilon^p\}_k = \lambda_k \frac{\partial g_k}{\partial \sigma_{ij}} \quad \dots\dots\dots(21)$$

ここに,  $g_k$  は塑性ポテンシャルである。

ここで(20)式に示す Multi-mechanism モデルのせん断成分  $\{d\epsilon_s^p\}_k$  の比例定数  $\lambda_k$  は, 単調载荷条件に対して, (5)式の降伏関数と(14)式の硬化関数により決定され, (21)式の後続の偏微分は, (9)式の応力-ダイレタンシー関係と塑性主ひ

ずみ増分方向を仮定することにより決定される。

そこでせん断成分の  $\lambda_k$  を  $\lambda_{s,k}$  とおき, 単調载荷条件における Multi-mechanism モデルと松岡による構成モデルの  $\lambda_{s,k}$  を比較すると, それぞれ(22), (23)式で表現される。

$$\lambda_{s,k} = \frac{a^m \cdot \sin \phi_f \cdot \cos \phi_{mob}}{\mu_k \cdot (\sin \phi_f - \sin \phi_{mob})^2} d\phi_{mob} \quad \dots\dots\dots(22)$$

$$\lambda_{s,k} = \frac{k_s \cdot \sin^2 \phi_f \cdot \cos \phi_{mob}}{(\sin \phi_f - \sin \phi_{mob})^2} d\phi_{mob} \quad \dots\dots\dots(23)$$

$$\phi_{mob} = \sin^{-1}(q_k/p_k) \quad \dots\dots\dots(24)$$

ここに  $\phi_{mob}$  : mobilized angle,  $k_s$  : 硬化パラメータである。また(22)式と(23)式を比較すると, (25)式の関係が成り立つと仮定すれば両モデルにおける  $\lambda_{s,k}$  は等しくなる。

$$k_s = \frac{a^m}{\mu_k \cdot \sin \phi_f} \quad \dots\dots\dots(25)$$

次に, 松岡により提案されている二次元応力条件下の主応力軸の回転成分  $\{d\epsilon_r^p\}_k$  の  $\lambda_{r,k}$  は, (26)式で与えられる。

$$\lambda_{r,k} = \frac{2k_s \cdot \sin \phi_f \cdot \sin \phi_{mob}}{\sin \phi_f - \sin \phi_{mob}} d\alpha \quad \dots\dots\dots(26)$$

$$\tan 2\alpha = 2\tau_{xy} / (\sigma_x - \sigma_y) \quad \dots\dots\dots(27)$$

ここに  $\alpha$  : 最大主応力軸から一般軸への回転角である。

ここで(23)式, (26)式の  $\lambda_{s,k}, \lambda_{r,k}$  は, 松岡により理論的に誘導されたものであるが, 一試みとして, (26)式から主応力軸の回転による塑性ひずみ増分の算定を行なっている。また(26)式の  $k_s$  については, (25)式の関係より, Multi-mechanism モデルの硬化パラメータ  $a^m$  とダイレタンシーパラメータ  $\mu_k$ , 内部摩擦角  $\phi_f$  から算定するものとする。その結果, 従来のパラメータから主応力軸の回転効果の導入が可能となる。

次に, 塑性主ひずみ増分方向についても, 松岡モデルと同様に, せん断による塑性主ひずみ増分は主応力  $\alpha$  方向に, 主応力軸の回転による塑性主ひずみ増分は主応力方向から  $\delta$  だけ異なる  $(\alpha + \delta)$  方向に生じる非共軸性をもつものとしている。

## 4. 要素シミュレーション解析

### 4.1 解析手法

3章で提案した主応力軸の回転効果を導入した Multi-mechanism モデルについて, 一般の液状化解析において, 地盤構成モデルのパラメータを決定するために行なわれる非排水繰り返し単純せん断試験の要素シミュレーション解析からその妥当性を検証する。

ここで, 非排水条件での繰り返し単純せん断試験に相当する応力, 変形に関する試験条件は, 二次元平面ひずみ条件での変数である全応力増分  $d\sigma_x, d\sigma_y, d\sigma_z, d\tau_{xy}$ , 全ひずみ増分  $d\epsilon_x, d\epsilon_y, d\gamma_{xy}$  の内, 水平・鉛直方向の直ひずみ増分  $d\epsilon_x = d\epsilon_y = 0$ , 鉛直方向の全応力増分  $d\sigma_y = 0$  で表現され, また繰り返し荷重として,  $d\tau_{xy}$  あるいは  $d\gamma_{xy}$  を作用させる。

従って, このような応力条件の下では, 初期有効応力として異方圧密状態を仮定した場合, 主応力軸が固定される通常の三軸試験とは異なり, 主応力軸の連続的な回転が生

じる応力経路となる。

また要素シミュレーション解析は、 $d\tau_{xy}$  を強制力とする応力制御で行なっており、上記条件を満足するように過剰間隙水圧増分  $du$  が算定される。ここで、二次元平面ひずみ条件下の Multi-mechanism モデルの有効応力増分一ひずみ増分関係は、 $k=1\sim 3$  のメカニズムのうち、 $k=3$  のメカニズムのみ機能すると仮定している。

#### 4.2 解析ケース

従来の Multi-mechanism モデルに対し、主応力軸の回転による変形成分を新たに導入した効果を明確にする目的から、モデルパラメータ、初期平均有効応力  $\sigma'_{mi}$ 、作用せん断応力  $\tau_{xy,max}$  が等しい条件で、主応力軸の回転の有無、静止土圧係数  $K_0$  の異なる 4 ケースについて要素シミュレーション解析を行なった。

解析ケースと解析条件、ならびにモデルパラメータを表 1、2 に示す。

Case 1, 3, 4 は、主応力軸の回転効果を考慮したモデルを用いているが、Case 1 は  $K_0=1.0$  であるため主応力軸の連続的な回転が生じない載荷経路、Case 3, 4 は、それぞれ  $K_0=0.5, 0.75$  であるため連続的な回転が生じる載荷経路に相当する。

Case 2 は、主応力軸の回転効果を考慮しない従来モデルを用いており、Case 3 と同様に  $K_0=0.5$  であるため主応力軸の連続的な回転が生じる載荷経路である。

なお、Case 1 と Case 2~4 は、初期有効応力がそれぞれ等方圧密、異方圧密状態で異なるが、室内要素試験によれば、同じ  $\tau_{xy}/\sigma'_{mi}$  の下で液状化強度がほぼ等しくなることが確認されている。

ここでモデルパラメータは、5 章の模型振動実験の地盤試料である岐阜砂 (相対密度  $D_r=30\%$ ) に対して実施した中空ねじりせん断試験による液状化強度として、せん断応力比  $\tau_{xy}/\sigma'_{mi}=0.21$ 、液状化が生じるまでの繰り返し回数  $N_\ell=20$  をほぼ満足するように決定している。

#### 4.3 解析結果

Case 1~Case 4 の解析結果として、有効応力経路  $\tau_{xy}-\sigma'_m$  関係を図 1(a)~(d) に示す。ここで有効応力経路とは、繰り返しせん断応力の作用により過剰間隙水圧が上昇し、その結果減少することになる平均有効応力  $\sigma'_m$  と  $\tau_{xy}$  の経路を表示したものである。なお  $\sigma'_m=0$  は完全液状化に相当するが、解析結果では、完全液状化までの過剰間隙水圧の上昇は生じていない。

最初に Case 1 と Case 2 とを比較する。

Case 1 では、 $N=10$  波前後で明瞭なサイクリック・モビリティが生じるが、Case 2 では、繰り返しせん断応力が作用するにもかかわらずほとんど過剰間隙水圧が発生せず、液状化強度がかなり大きく算定されている。

このように Case 1, 2 の解析結果は、室内試験で確認されている等方・異方圧密状態にかかわらず、同じせん断応力比の下では、ほぼ同じ液状化強度を示すという実験事実と異なっている。

すなわちこの理由が、従来の Multi-mechanism モデル

表 1 解析ケースと解析条件

| (単位: kN/m <sup>2</sup> ) |    |               |               |               |                 |
|--------------------------|----|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| ケース                      | 回転 | $\sigma_{xi}$ | $\sigma_{yi}$ | $\sigma_{zi}$ | $\tau_{xy,max}$ |
| Case 1                   | あり | 98.0          | 98.0          | 98.0          | 20.58           |
| Case 2                   | なし | 73.5          | 147.0         | 73.5          | 20.58           |
| Case 3                   | あり | 73.5          | 147.0         | 73.5          | 20.58           |
| Case 4                   | あり | 88.2          | 117.6         | 88.2          | 20.58           |

表 2 Multi-mechanism モデルのパラメータ

|     |             |         |                                   |                 |       |
|-----|-------------|---------|-----------------------------------|-----------------|-------|
| せん断 | $\phi f$    | 37.7°   | 圧密                                | $\lambda_c$     | 0.024 |
|     | C           | 1.0     |                                   | $\lambda_s$     | 0.005 |
|     | $\mu_{max}$ | 1.2     |                                   | $e_o$           | 1.056 |
|     | $S_c$       | 0.0035  | 弾性                                | $G_o$           | 27440 |
|     | $a^m$       | 0.00006 |                                   | $K_o$           | 73000 |
|     | $a^c$       | 0.00006 |                                   | $\sigma'_{ref}$ | 98.0  |
| 回転  | $\delta$    | 30°     | $G_o, K_o, \sigma'_{ref}: kN/m^2$ |                 |       |

では、主応力軸の回転による塑性変形成分が考慮されていないためと考えられる。

次に、主応力軸の回転効果を導入したモデルによる Case 3, 4 では、Case 2 と異なり、Case 1 と同様の有効応力経路を示しており、液状化強度がほぼ等しくなるという実験事実に対応した結果となっている。また主応力軸の回転効果は、サイクリック・モビリティが生じる応力状態に漸近するに伴い有効応力  $\sigma'_x$  と  $\sigma'_y$  が等しくなるためその効果が次第に減少し、その結果せん断成分のみが卓越する。この特性についても、Case 1 と Case 3, 4 のサイクリック・モビリティでの有効応力経路の形状がほぼ等しくなることから、精度よく主応力軸の回転効果が導入されていることがわかる。

以上従来の Multi-mechanism モデルに対し、主応力軸の回転効果を導入したモデルの妥当性を要素シミュレーション解析から検討した結果、室内試験で得られる液状化強度特性等を定量的に表現できるようである。

従って、地震時の液状化問題のように、地盤内で複雑な応力状態となる場合でも、提案モデルにより過剰間隙水圧、残留変形等の厳密な予測を行なうことが可能と考えられる。

### 5. 地盤—地中構造物系の液状化解析

#### 5.1 解析手法

一般の液状化問題に対して、3 章の主応力軸の回転を考慮した Multi-mechanism モデルを用いた有効応力解析の適用性を検討するために、二次元有効応力解析プログラム DIANA-J の材料構成則として提案モデルを組み込み、地盤—地中構造物系の模型振動実験に対するシミュレーションを行なった<sup>5)</sup>。なお、4 章の要素シミュレーション解析と同様に、 $k=1\sim 3$  のメカニズムのうち  $k=3$  のみ機能するモデルを仮定している。

#### 5.2 解析モデル

解析モデルを図 2 に示す。

ここで模型振動実験の構造物模型 (1470×440×530) は、見掛けの単位体積重量 1.02 tf/m<sup>3</sup> の鋼製の函体、模型地盤

は  $D_r=30\%$ 、飽和単位体積重量  $1.80 \text{ tf/m}^3$  の岐阜砂である。また水位は  $GL-0.15 \text{ m}$  に設定している。従って液状化が生じた場合は、構造物に対して浮き上がり、地盤に対して沈下等の残留変位が顕著に生じる試験条件である。

なお、このような構造物を含む地盤の問題では、その境界での剝離や滑動に関する厳密なモデル化も必要と考えられるが、図-2 においては特別な接触要素等の挿入は行っていない。

### 5.3 解析ケース

解析ケースとして、模型実験の振動台テーブルの最大入力加速度振幅  $50 \text{ gal}$  について行なっている。

ここで入力波は、振動数  $4 \text{ Hz}$ 、波数  $20$  波、加振時間  $5$  秒の正弦波であり、水平 1 方向に入力している。

### 5.4 入力定数

模型地盤に対する土粒子骨格ならびに間隙水の物理定数を表-3 に示す。ここで  $\alpha_s, \beta_s, \alpha_f, \beta_f$  は、それぞれ骨格、間隙水の Rayleigh damping の係数である。また構成モデルに関するパラメータは、表-2 の要素シミュレーション解析と同じである。

ここで、構造物直下の接地圧等の初期有効応力は、水位以深の有効重量として水中重量を用いた自重解析により設定している。その結果、初期有効応力が異方圧密状態であることから、地震力が作用した場合は主応力軸の回転が顕著に生じることになる。

### 5.5 解析結果

解析結果として、液状化により地盤内に発生する過剰間隙水圧と構造物に作用する浮上力、地盤ならびに構造物に生じる沈下・浮き上がり等の残留変位を模型振動実験と比較することにより、提案モデルによる有効応力解析の適用性を検討する。

最初に、図-2 の液状化による構造物の浮上力に相当する構造物直下 W1 と地盤 W2 での過剰間隙水圧  $u$  の経時変化ならびに有効応力経路  $\tau_{xy}-\sigma'_m$  関係を図-3, 4 に示す。以下、経時変化の図中に示す破線は実験結果を示す。

このように解析結果は、加振初期において、主応力軸の回転の効果により過剰間隙水圧の上昇が大きく、その後の加振に対しては、サイクリック・モビリティが顕著に生じると共に主応力軸の回転の効果が減少するためその増加が抑えられるという実験結果を適切に表現しており、提案モデルにより過剰間隙水圧量の厳密な予測が可能と考えられる。

次に液状化により生じる残留変位として、構造物の浮上量に相当する構造物天端 D1 と地盤の地表面沈下に相当する D2 の鉛直変位  $u_y$  の経時変化を図-5 に示す。

また、構造物の鉛直ならびに水平変位と周辺地盤の変位により生じる相対変位は、地中構造物と他構造物との接合部で過度の応力を発生させることになるため、地盤-構造物系全体での残留変形の一例として、加振終了後 ( $t=6$  秒) での平面分布を図-6 に示す。

解析では、構造物と地盤との境界での厳密なモデル化を行っていないため定量的な評価まで言及できないが、D1

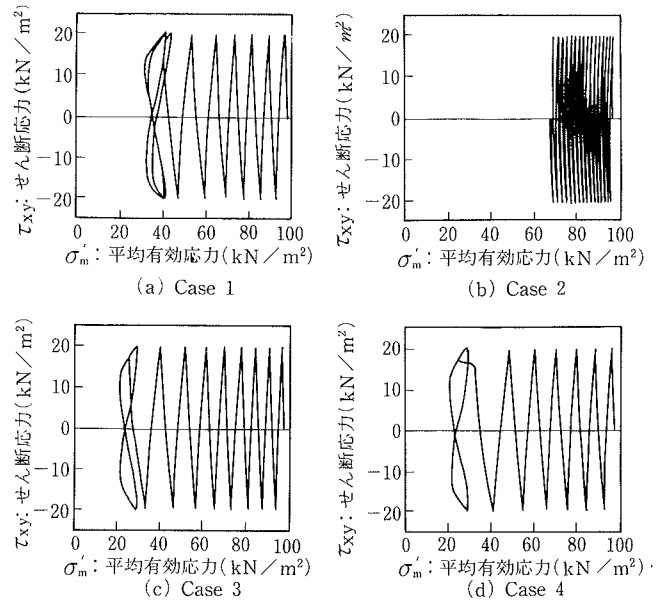


図-1  $\tau_{xy}-\sigma'_m$  関係

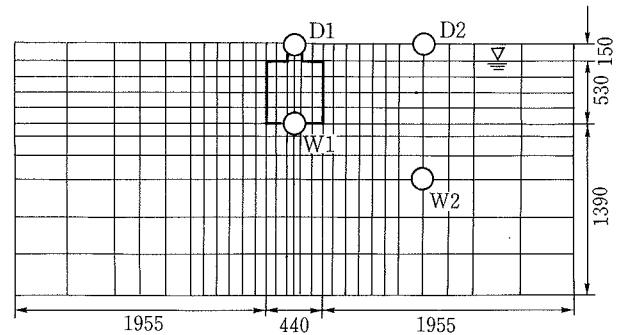


図-2 解析モデル

表-3 模型地盤の物理定数

|   |            |                       |     |                       |                    |
|---|------------|-----------------------|-----|-----------------------|--------------------|
| 土粒子骨格   | $K_s$      | $1.00 \times 10^{10}$ | 間隙水 | $K_f$                 | $2.25 \times 10^6$ |
|   | $\rho_s$   | 2.65                  |     | $\rho_f$              | 1.00               |
|   | $\alpha_s$ | 0.00                  |     | $\alpha_f$            | 0.00               |
|   | $\beta_s$  | $1.00 \times 10^{-2}$ |     | $\beta_f$             | 0.00               |
| $K_s, K_f$ : $\text{KN/m}^2$<br>$\rho_s, \rho_f$ : $\text{ton/m}^2$<br>$k$ : $\text{m/sec}$ |            |                       | $n$ | 0.513                 |                    |
|   |            |                       | $k$ | $8.00 \times 10^{-4}$ |                    |

では、実験結果にみられる構造物の挙動として、加振初期において周辺地盤と共に沈下し、その後の液状化に伴う浮上力の増加ならびに構造物側壁と地盤間での摩擦抵抗力の低下により浮上するという現象を定性的に表現していることが分かる。

また D2 についても、図-5 から分かるように、構造物との境界の影響により実験結果と比較して沈下量は小さく算定されているが、構造物周辺が遠方地盤に対して相対的に浮上するという変形形状を適切に表現しており、遠方地盤における沈下量については、提案モデルにより厳密な予測が可能と考えられる。

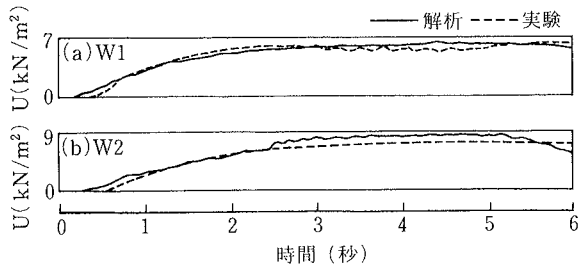


図-3 過剰間隙水圧の経時変化

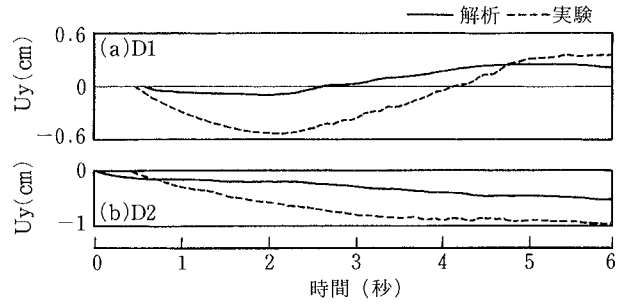


図-5 鉛直変位の経時変化

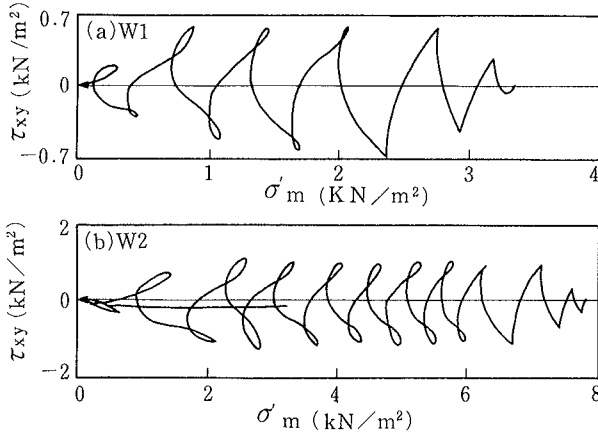


図-4  $\tau_{xy}$ - $\sigma'_m$  関係

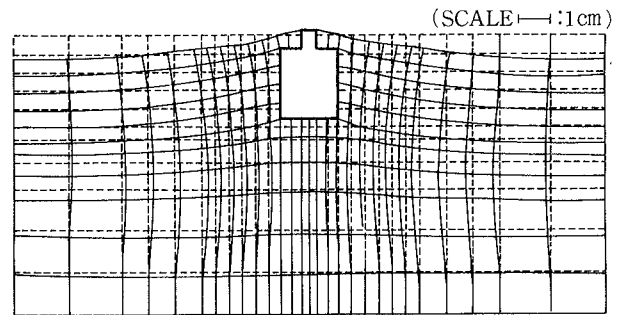


図-6 残留変形の平面分布

## 6. まとめ

臨海部の地域開発に伴う護岸施設や地中構造物等の大型構造物を含む地盤の安定問題のうち、地震時の液状化ならびに残留変形を解析的に予測する手法の検討により得られた結果を以下に列挙する。

①構造物、盛土等の支持地盤において、地震時の応力状態として顕著に生じる主応力軸の回転による塑性変形成分を従来の地盤構成モデルに新たに導入し、非排水繰返し単純せん断試験の要素シミュレーション解析から本モデルの妥当性を検討した結果、室内試験で得られる液状化強度特性を定量的に表現可能である。

②提案モデルを用いた二次元有効応力解析による地盤—地中構造物系の模型振動実験のシミュレーションから、液状化により地盤に生じる過剰間隙水圧、残留変形ならびに構造物の挙動を適切に予測可能である。

## 謝 辞

本研究は、佐藤工業(株)吉田氏から提供していただいた Multi-mechanism モデルの基本ルーチンに機能追加を行ない実施したものであり、ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) DIANA-J 概要書, ソフトウェアサイエンス研究所
- 2) Kabilamany, K.: Modelling of cyclic behaviour of sands and its application to seismic response analysis, Doctor Thesis, University of Tokyo, (1986)
- 3) Matsuoka, H. and Sakakibara, K.: A constitutive model for sands and clays evaluating principal stress rotation, Soils and Foundations, Vol. 27, No. 4, p. 73~88, (1987)
- 4) Ishihara, K. and Towhata, I.: Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads, Soils and Foundations, Vol. 23, No. 4, p. 11~26, (1983)
- 5) 杉本, 早川, 河村, 鳥井原, 伊藤: 地中構造物の液状化対策工法に関する研究, 第20回地震工学研究発表会講演概要, p. 293~296, (1989)