

動的有効応力解析プログラム「EFECT」(その1)

—基礎理論と地盤構成モデル—

伊藤 浩 二

EFECT: The Code of Effective Stress Analysis (Part 1)

—Basic Theory and Constitutive Model of Soils—

Koji Ito

Abstract

In the design of some structures, like a quay-wall and energy storage facilities in offshore areas, the effects of earthquakes and wave loadings should be considered. To predict the response of these structures under such loadings, EFECT, the code based on effective stress theory, was developed. Firstly, EFECT was verified from the theoretical value of a sea-bed response under traveling wave loading. Secondly, the constitutive model for soil which expresses the characteristics of soil under cyclic loadings was presented and confirmed for its applicability to problems concerning liquefaction. Thirdly, the method of determining the model parameters for real soil deposits was presented. These parameters were determined to reflect the deformation characteristics observed in the laboratory soil test.

概 要

臨海部の護岸施設, エネルギー施設等の設計, 施工技術として, 地震・波浪等の変動荷重に対する基礎地盤一構造物一水連成系の動的有効応力解析プログラム EFECT を開発した。本研究では, EFECT の基礎理論を示し, 等方弾性体の飽和地盤応答の理論解との比較からその基本的な機能特性を検証した。次に, EFECT による液状化解析を行うための繰返し載荷に適用可能な地盤構成モデルを提案し, その適用性を示すとともに, 要素試験で観測される液状化強度特性を適切に反映する実地盤のモデルパラメータの設定法を提案した。

1. はじめに

近年臨海部の開発に伴い, 護岸施設やエネルギー施設が軟弱地盤で施工されつつある。このような構造物では, 地震時や高波浪時の液状化やそれに伴う側方流動に対する安全性が要求される場合がある。

有効応力原理に基づいて, 軟弱地盤の土粒子骨格と空隙の間隙水の挙動を逐次評価する解析手法は, 有効応力解析と呼ばれ, 液状化に至る過剰間隙水圧, 残留変形等を厳密に予測できると考えられている。

本研究では, 新たに開発した動的有効応力解析プログラム EFECT の概要を示すとともに, 進行性の波浪による等方弾性体の飽和地盤応答の理論解との比較から, その基本的な機能特性を検証する。

さらに, EFECT による液状化解析で用いる地盤構成モデルとして, 松岡が提案した構成モデル¹⁾を応用した繰返し載荷におけるモデル化を行い, 非排水単純せん断条件の解析からその適用性を示す。また本モデルを実地盤に適用する際の要素試験で設定したモデルパラメータから実地盤で用いるパラメータの設定法の提案を行う。

2. EFECT の概要

2.1 基礎式

EFECT では, 骨格と間隙水の連成効果を厳密に評価した飽和多孔質体の Biot の多次元圧密式を基礎式とする。骨格ならびに間隙水の釣り合い式と連続式を(1)~(3)式に示す。

$$(1-n)\rho_s\dot{u}_i + \left(\frac{n^2\rho_t g}{k}\right)\dot{u}_i - \left(\frac{n^2\rho_t g}{k}\right)\dot{U}_i - \sigma'_{j,i,j} + (\alpha-n)p_{,i} + b_{si} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$n\rho_t\dot{U}_i - \left(\frac{n^2\rho_t g}{k}\right)\dot{u}_i + \left(\frac{n^2\rho_t g}{k}\right)\dot{U}_i + np_{,i} + b_{ni} = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$-n\varepsilon_{ii}^u = (\alpha-n)\varepsilon_{ii}^s + \left(\frac{P}{Q}\right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\left(\because \frac{1}{Q} = \frac{n}{K_r} + \frac{\alpha-n}{K_s}, \alpha = 1 - \frac{K_r}{K_s}\right)$$

ここに u_i と U_i , \dot{u}_i と \dot{U}_i , \ddot{u}_i と \ddot{U}_i , ε_{ii}^u と ε_{ii}^s , b_{si} と b_{ni} は, 骨格ならびに間隙水の変位, 速度, 加速度, 体積ひずみと物体力, ρ_s と ρ_t , K_s と K_r は, 土粒子ならびに間隙

表-1 物理, 力学定数

土粒子体積弾性係数	K_s	1.0×10^{10} kPa
土粒子質量密度	ρ_s	0.0
骨格レーリー減衰係数	α_s	0.0
	β_s	0.0
骨格弾性係数	E	26,600 kPa
骨格ポアソン比	ν	0.33
間隙率	n	0.5
透水係数	k	5.0×10^{-4} m/sec
間隙水体積弾性係数	K_f	2.0×10^9 kPa
間隙水質量密度	ρ_f	1.0 Mg/m ³

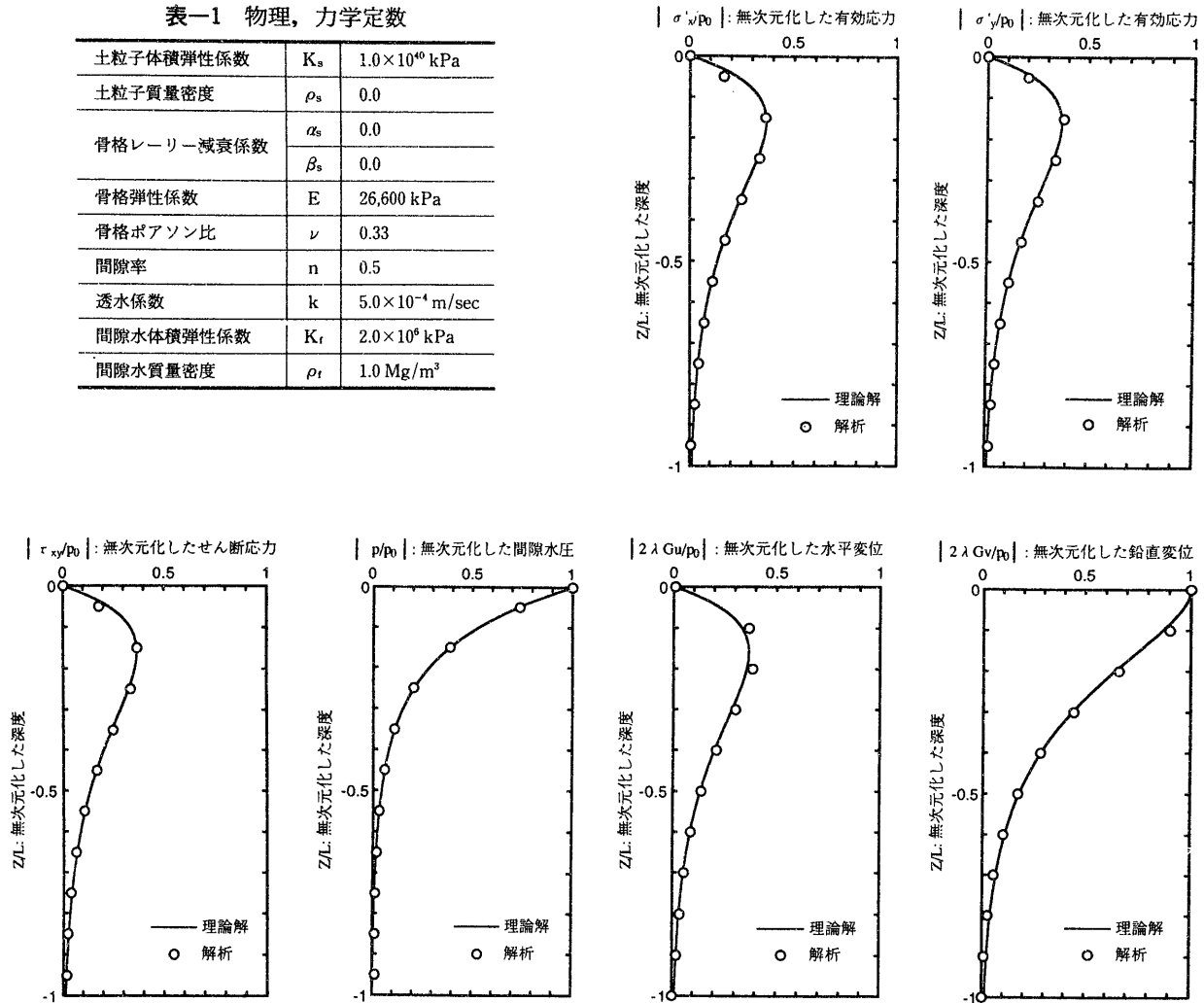


図-1 有効応力, 間隙水圧, 骨格変位の最大振幅深度分布の比較

水の質量密度と体積弾性係数, K_f は骨格体積弾性係数, n は間隙率, k は透水係数, g は重力加速度, σ'_{ij} は有効応力テンソル, p は間隙水圧である。(1)~(3)式は, σ'_{ij} は引張りを正, p は圧縮を正と定義している。

2.2 有限要素法表示

EFECT では, (3)式で(1), (2)式の p を消去して得られる骨格変位 u と間隙水変位 U を未知量とする $u-U$ 形式を採用し, ガラーキン法に基づく FEM 離散化の結果, 骨格変位ベクトル $\{u\}$ と間隙水変位ベクトル $\{U\}$ を未知量とした(4)式のマトリクス表示が得られる²⁾。

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{U} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_R + C_1 & C_2 \\ C_2^T & C_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{U} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K + K_1 & K_2 \\ K_2^T & K_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ U \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} f_s^b \\ f_r^b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} f_s^s \\ f_r^s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \dots(4)$$

ここに $[M_s]$, $[M_r]$ は質量マトリクス, $[C_1]$ ~ $[C_3]$, $[C_R]$ は連成, レーリー減衰マトリクス, $[K]$, $[K_1]$ ~ $[K_3]$ は(1)~(3)式から誘導される剛性マト

リクス, $\{f^b\}$, $\{f^s\}$ は物体力, 表面力ベクトルである。

2.3 時間積分, 非線形解法

時間積分法はニューマーク-β法, 非線形解法は修正ニュートン-ラプソン法を導入している。

2.4 境界条件

多点拘束機能 (MPC 機能) により, 飽和地盤の非排水条件や周期境界, 流体と飽和地盤との境界等を表現する。

2.5 解析機能

地震応答解析の他に, 慣性項を考慮しない Biot 式による圧密解析や波浪応答解析が可能である。

2.6 検証解析

EFECT の適用性を検証するために, 陽な理論解のある等方弾性体の飽和地盤の境界値問題として, 進行波による変動水圧 ($L=40$ m, $T=7$ 秒, $P_0=11.42$ kPa, L : 波長, T : 周期, P_0 : 変動水圧振幅) が海底地盤表面に作用する二次元波浪応答解析を行った。解析で用いた物理, 力学定数を表-1に示す。

変動水圧振幅 P_0 , 骨格せん断弾性係数 G , 波数 $\lambda (=2\pi/$

L)で正規化した有効応力, 間隙水圧, 骨格変位の最大振幅深度分布の理論曲線³⁾との比較を図-1に示す。理論曲線と解析結果は概ね一致し, 適切な地盤構成モデルをEFFECTに導入することにより, 飽和地盤の液状化問題等への適用が可能である。

3. 地盤構成モデル

EFFECTで用いる構成モデルは, 松岡が提案した構成モデルに,

- ① 土粒子骨格の弾性ひずみ増分
- ② 繰返し载荷の応力-ひずみ特性を表現する応力回転時のパラメータ

を導入したモデルである。概要を以下に示す。

3.1 塑性ひずみ増分の算定法

塑性ひずみ増分は, 図-2の一般応力の定義において, 図-3のモールの応力円に示すせん断, 主応力回転, 異方圧密, 等方圧密の降伏関数に相当する各応力変動による塑性ひずみ増分の総和として, (5)式で評価される。

$$d\epsilon_{ij}^p = d\epsilon_{ij,s}^p + d\epsilon_{ij,r}^p + d\epsilon_{ij,ac}^p + d\epsilon_{ij,ic}^p \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに, $d\epsilon_{ij}^p$ は塑性ひずみ増分テンソル, $d\epsilon_{ij,s}^p$, $d\epsilon_{ij,r}^p$, $d\epsilon_{ij,ac}^p$, $d\epsilon_{ij,ic}^p$ はせん断, 主応力回転, 異方圧密, 等方圧密による塑性ひずみ増分テンソルである。

以下添字 s, r, ac, ic は, せん断, 主応力回転, 異方圧密, 等方圧密を意味する。

(5)式の各 $d\epsilon_{ij}^p$ の流れ則を(6)~(9)式に示す。

$$d\epsilon_{ij,s}^p = \lambda_s \frac{\partial g_s}{\partial \sigma_{ij}} = d\epsilon_{1,s}^p \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_{ij}} + d\epsilon_{3,s}^p \frac{\partial \sigma_3}{\partial \sigma_{ij}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$d\epsilon_{ij,r}^p = \lambda_r \frac{\partial g_r}{\partial \sigma_{ij}} = d\epsilon_{1,r}^p \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_{ij}} + d\epsilon_{3,r}^p \frac{\partial \sigma_3}{\partial \sigma_{ij}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$d\epsilon_{ij,ac}^p = \lambda_{ac} \frac{\partial g_{ac}}{\partial \sigma_{ij}} = d\epsilon_{1,ac}^p \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_{ij}} + d\epsilon_{3,ac}^p \frac{\partial \sigma_3}{\partial \sigma_{ij}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$d\epsilon_{ij,ic}^p = \lambda_{ic} \delta_{ij} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここに λ_s , λ_r , λ_{ac} , λ_{ic} は比例定数, g_s , g_r , g_{ac} は塑性ポテンシャル, δ_{ij} はクロネッカーのデルタ, $d\epsilon_{1,s}^p$, $d\epsilon_{3,s}^p$ は塑性主ひずみ増分, σ_1 , σ_3 は主応力, σ_{ij} は応力テンソルである。

s, r, ac の $d\epsilon_{1,s}^p$, $d\epsilon_{3,s}^p$ は, (6)~(8)式の各々の比例定数 λ と後述の応力-ダイレイタンスー係を用いて決定され, 後述の偏微分は, 後述の $d\epsilon_{1,s}^p$, $d\epsilon_{3,s}^p$ の方向を仮定して決定される。

s, r, ac, ic の λ を(10)~(13)式に示す。

$$\lambda_s = \frac{k_s \sin^2 \phi_r \cos \phi_{mo}}{(\sin \phi_r - \sin \phi_{mo})^2} d\phi_{mo} \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\lambda_r = \frac{2k_s \sin \phi_r \sin \phi_{mo}}{(\sin \phi_r - \sin \phi_{mo})} d\alpha \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\lambda_{ac} = \frac{k_c \sin \phi_r \sin \phi_{mo}}{(\sin \phi_r - \sin \phi_{mo}) \sigma_m} d\sigma_m \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$\lambda_{ic} = \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{\sigma_m^{m-1}}{\sigma_a^m}\right) \left(\frac{C_c - C_s}{1 + e_0}\right) d\sigma_m \quad \dots\dots\dots(13)$$

ここに ϕ_r は内部摩擦角, C_c , C_s は圧縮指数と膨張指数, e_0 は初期間隙比, k_s , $k_c (= 0.44 C_c / (1 + e_0))$ は硬化パラメータ, ϕ_{mo} はモービライズド角, α は図-2の一般軸と主応力

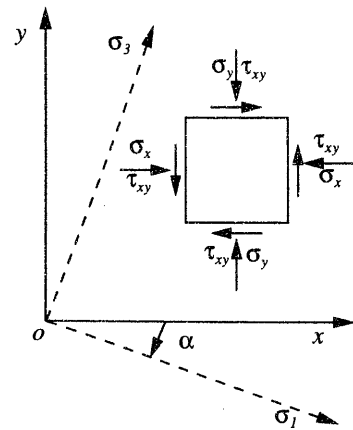
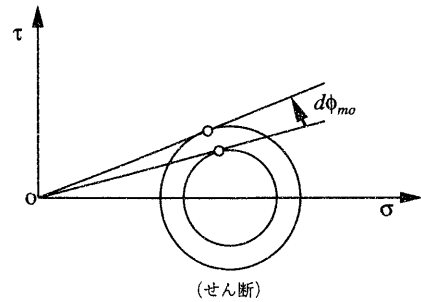
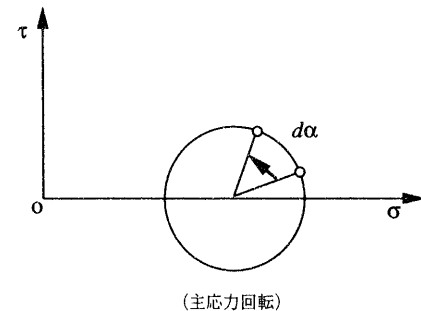


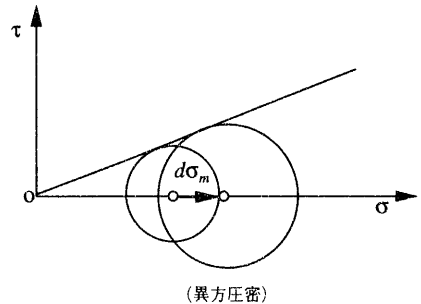
図-2 一般応力の定義



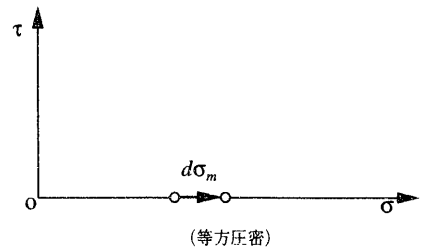
(せん断)



(主応力回転)



(異方圧密)



(等方圧密)

図-3 降伏関数

軸のなす角, σ_m は平均応力, σ_a は大気圧, m は σ_m のべき係数で0.5を仮定する。

また繰返しせん断特性を表現するために, (10)式に Masing 則を導入し, (13)式は既往の研究⁴⁾から仮定した。各 λ の降伏関数は, 一般応力増分を用いて, (14)~(16)式で表現される。

$$d\phi_{mo} = \frac{1}{\cos \phi_{mo}} \frac{\partial}{\partial \sigma_{ij}} \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right) d\sigma_{ij} \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$d\alpha = \frac{1}{\sigma_1 - \sigma_3} \beta_{11} \beta_{3j} d\sigma_{ij} \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$d\sigma_m = \frac{1}{2} d\sigma_{11} \quad \dots\dots\dots(16)$$

ここに β_{ij} は, i, j 軸の方向余弦である。

応力-ダイレイタンス-関係は, 図-4のモールの応力円と図-5のモールのひずみ増分円に示されるモービライズド面のせん断応力比(τ/σ_m)と塑性ひずみ増分比($-d\varepsilon_N^p/d\gamma^p$)の線形関係から誘導される(17), (18)式を用いる。ここで s は, 繰返しせん断のダイレイタンス-特性を表現するために荷重パラメータ $\zeta(=\pm 1)$ を導入し, r, ac は $\zeta=1$ である。

$$\frac{d\varepsilon_1^p + d\varepsilon_3^p}{d\varepsilon_1^p - d\varepsilon_3^p} = \frac{2\mu}{\lambda} \cos \phi_{mo} \cdot \zeta - \frac{2-\lambda}{\lambda} \sin \phi_{mo} \dots\dots\dots(17)$$

$$\lambda_s, \lambda_r, \lambda_{ac} = (d\varepsilon_1^p - d\varepsilon_3^p) \cdot \zeta \quad \dots\dots\dots(18)$$

ここに λ, μ は, ダイレイタンス-パラメータである。(17), (18)式から誘導される s, r, ac の $d\varepsilon_1^p, d\varepsilon_3^p$ を(19)~(24)式に示す。

$$d\varepsilon_{1,s}^p = \frac{\lambda_s}{2} \left(\zeta + \frac{2\mu}{\lambda} \cos \phi_{mo} - \frac{2-\lambda}{\lambda} \sin \phi_{mo} \cdot \zeta \right) \dots\dots\dots(19)$$

$$d\varepsilon_{3,s}^p = \frac{\lambda_s}{2} \left(-\zeta + \frac{2\mu}{\lambda} \cos \phi_{mo} - \frac{2-\lambda}{\lambda} \sin \phi_{mo} \cdot \zeta \right) \dots\dots\dots(20)$$

$$d\varepsilon_{1,r}^p = \frac{\lambda_r}{2} \left(1 + \frac{2\mu}{\lambda} \cos \phi_{mo} - \frac{2-\lambda}{\lambda} \sin \phi_{mo} \right) \dots\dots\dots(21)$$

$$d\varepsilon_{3,r}^p = \frac{\lambda_r}{2} \left(-1 + \frac{2\mu}{\lambda} \cos \phi_{mo} - \frac{2-\lambda}{\lambda} \sin \phi_{mo} \right) \dots\dots\dots(22)$$

$$d\varepsilon_{1,ac}^p = \frac{\lambda_{ac}}{2} \left(1 + \frac{2\mu}{\lambda} \cos \phi_{mo} - \frac{2-\lambda}{\lambda} \sin \phi_{mo} \right) \dots\dots\dots(23)$$

$$d\varepsilon_{3,ac}^p = \frac{\lambda_{ac}}{2} \left(-1 + \frac{2\mu}{\lambda} \cos \phi_{mo} - \frac{2-\lambda}{\lambda} \sin \phi_{mo} \right) \dots\dots\dots(24)$$

$d\varepsilon_1^p, d\varepsilon_3^p$ の方向は, s, ac, ic で共軸性, r で非共軸性を仮定し, 各々(25)~(28)式で表現される。

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_{ij}} = \beta_{11} \beta_{1j} = \begin{cases} \cos^2 \alpha \\ \sin^2 \alpha \\ \cos \alpha \cos \alpha \end{cases} \quad \dots\dots\dots(25)$$

$$\frac{\partial \sigma_3}{\partial \sigma_{ij}} = \beta_{31} \beta_{3j} = \begin{cases} \sin^2 \alpha \\ \cos^2 \alpha \\ -\sin \alpha \cos \alpha \end{cases} \quad \dots\dots\dots(26)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial \sigma_{ij}} = \beta_{r1} \beta_{rj} = \begin{cases} \cos^2(\alpha + \delta) \\ \sin^2(\alpha + \delta) \\ \sin(\alpha + \delta) \cos(\alpha + \delta) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(27)$$

$$\frac{\partial \sigma_{ic}}{\partial \sigma_{ij}} = \beta_{ic1} \beta_{icj} = \begin{cases} \sin^2(\alpha + \delta) \\ \cos^2(\alpha + \delta) \\ -\sin(\alpha + \delta) \cos(\alpha + \delta) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(28)$$

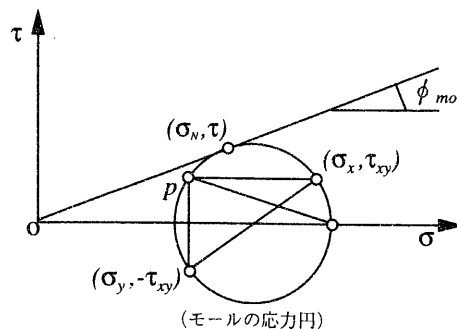


図-4 モービライズド面のせん断応力比

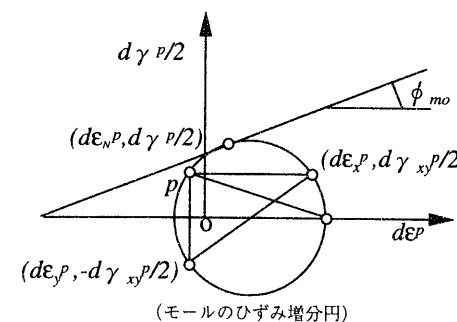


図-5 モービライズド面のひずみ増分比

ここに δ は, 主応力軸からの逸脱角であり, $d\alpha$ の符号と一致した符号を有する。

構成モデルでは, 弾性ひずみ増分を考慮することから, (13)式から誘導される骨格弾性係数は(29)式で設定される。

$$E = \left(\frac{1}{m} \right) \left(\frac{\sigma_a^m}{\sigma_m^{m-1}} \right) \frac{3(1-2\nu)(1+e_0)}{c_s} \quad \dots\dots\dots(29)$$

ここに ν は, ポアソン比である。

構成モデルの陽な応力-ひずみ関係は, 以下の手法で誘導される。弾性応力増分-弾性ひずみ増分関係は, (30)式で表現される。

$$\{d\sigma_{ij}\} = [D^e] \{d\varepsilon_{ij} - d\varepsilon_{1,s}^p - d\varepsilon_{1,r}^p - d\varepsilon_{1,ac}^p - d\varepsilon_{1,ic}^p\} \quad \dots\dots\dots(30)$$

ここに, $\{d\sigma_{ij}\}$ は応力増分ベクトル, $\{d\varepsilon_{ij}\}$ はひずみ増分ベクトル, $[D^e]$ は弾性マトリクスである。

(6)~(9)式を(30)式に代入し, さらに(14)~(16)式, (10)~(13)式に代入することにより, 4個の比例定数 λ を有する(31)~(34)式が得られる。

$$\lambda_s = \{A\}^T [D^e] \left\{ d\varepsilon_{1j} - \lambda_s \frac{\partial g_s}{\partial \sigma_{1j}} - \lambda_r \frac{\partial g_r}{\partial \sigma_{1j}} - \lambda_{ac} \frac{\partial g_{ac}}{\partial \sigma_{1j}} - \lambda_{ic} \delta_{1j} \right\} \quad \dots\dots\dots(31)$$

$$\lambda_r = \{B\}^T [D^e] \left\{ d\varepsilon_{1j} - \lambda_s \frac{\partial g_s}{\partial \sigma_{1j}} - \lambda_r \frac{\partial g_r}{\partial \sigma_{1j}} - \lambda_{ac} \frac{\partial g_{ac}}{\partial \sigma_{1j}} - \lambda_{ic} \delta_{1j} \right\} \quad \dots\dots\dots(32)$$

$$\lambda_{ac} = \{C\}^T [D^e] \left\{ d\varepsilon_{1j} - \lambda_s \frac{\partial g_s}{\partial \sigma_{1j}} - \lambda_r \frac{\partial g_r}{\partial \sigma_{1j}} - \lambda_{ac} \frac{\partial g_{ac}}{\partial \sigma_{1j}} - \lambda_{ic} \delta_{1j} \right\} \quad \dots\dots\dots(33)$$

$$\lambda_{ic} = \{D\}^T \{D^e\} \left\{ d\epsilon_{ij} - \lambda_s \frac{\partial g_s}{\partial \sigma_{ij}} - \lambda_r \frac{\partial g_r}{\partial \sigma_{ij}} - \lambda_{ac} \frac{\partial g_{ac}}{\partial \sigma_{ij}} - \lambda_{ic} \delta_{ij} \right\} \dots\dots\dots(34)$$

ここに{A}, {B}, {C}, {D}は、 $\lambda_s, \lambda_r, \lambda_{ac}, \lambda_{ic}$ と{d ϵ_{ij} }の線形関係から誘導される係数ベクトルである。{d ϵ_{ij} }が与えられた場合、s, r, ac, icの{d ϵ_{ij} }は、(31)~(34)式を整理した(35)式のマトリクス解の4個の λ を(6)~(9)式に代入して得られる。また{d σ_{ij} }は、各々の{d ϵ_{ij} }を(30)式に代入して得られる。

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \\ \lambda_{ac} \\ \lambda_{ic} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ F_r \\ F_{ac} \\ F_{ic} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(35)$$

3.2 応力反転時の λ^r, μ^r と k_s^r の導入

3.1節の構成モデルでは、表一2のパラメータを用いた緩砂の非排水単純せん断条件の解析($\tau_{xy}/\sigma'_0=0.14, \tau_{xy}$:せん断応力, σ'_0 :初期平均有効応力)を行った場合、図一6, 7の有効応力経路、応力一ひずみ関係が得られる。ここで3.1節の構成モデルでは、ダイレイタンスパラメータ λ, μ と硬化パラメータ k_s を応力経路に係わらず一定としているため、

- ① 有効応力経路を表現するために、単調荷の排水試験から決定した $k_s (=0.1\%)$ を低減する必要がある。
 - ② 変相角近傍の有効応力経路、応力一ひずみ関係が定常となり、ひずみが数%まで漸増しながら液状化に至る挙動が表現できない。
- という特性が認められた。

そこで、繰返し荷の λ^r, μ^r と k_s^r を新たに定義し、応力反転毎に単調荷の λ, μ と k_s を更新するモデル化を試みた。

λ^r, μ^r は、(17)式で規定される変相角 $\tan\phi_p (=2\mu/(2-\lambda))$ が応力経路に係わらず一定という条件を仮定した場合、 $(2\lambda^r/\lambda) = (\text{factor})_{\lambda, \mu} (2\mu/\lambda)$ と $(2-\lambda^r)/\lambda^r = (\text{factor})_{\lambda, \mu} (2-\lambda)/\lambda$ の関係から(36), (37)式で表現される。

$$\lambda^r = \frac{2\lambda}{\lambda + (\text{factor})_{\lambda, \mu} (2-\lambda)} \dots\dots\dots(36)$$

$$\mu^r = \frac{2(\text{factor})_{\lambda, \mu} \mu}{\lambda + (\text{factor})_{\lambda, \mu} (2-\lambda)} \dots\dots\dots(37)$$

ここに、 $(\text{factor})_{\lambda, \mu}$ は低減係数で、単調荷で1、繰返し荷で応力反転が変相角より大きい場合に0.9、小さい場合に0.5を前応力反転の λ^{r-1}, μ^{r-1} に乗じて算定する(但し $(\text{factor})_{\lambda, \mu}$ の下限値は0.5⁴を仮定した。) k_s^r は(38)式で算定する。

$$k_s^r = (\text{factor})_{k_s} k_s \dots\dots\dots(38)$$

ここに、 $(\text{factor})_{k_s}$ は増幅係数で、単調荷で1、繰返し荷で応力反転が変相角より大きい場合に1.15を前応力反転の k_s^{r-1} に乗じて算定する。

$(\text{factor})_{k_s}$ の乗数は、(17), (18)式の塑性体積ひずみ増分 $d\epsilon_v^p (=d\epsilon_1^p + d\epsilon_3^p)$ の算定から理解されるように、変相角近傍の有効応力経路、応力一ひずみ関係を表現する(fac-

表一2 構成モデルのパラメータ

硬化パラメータ	k_s	0.1 %
ダイレイタンスパラメータ	λ	1.2
	μ	0.2
内部摩擦角	ϕ_t	35°
圧縮指数	$c_c/1+e_0$	0.0062
膨張指数	$c_s/1+e_0$	0.0012
非共軸パラメータ	δ	30°
骨格弾性係数	E	180,000 kPa
骨格ポアソン比	ν	0.3

$\text{tor})_{\lambda, \mu} \cdot (\text{factor})_{k_s} > 1$ を満足するように設定した。

3.3 パラメータ設定法

3.3.1 圧縮指数 C_c , 膨張指数 C_s C_c, C_s は、三軸等方圧縮・除荷試験において、 $e - (\sigma_m/\sigma_a)^m$ 関係の勾配から設定される。

3.3.2 骨格弾性係数E, 骨格ポアソン比 ν E, ν は、PS検層による V_s, V_p を用いて設定される。あるいは超音波パルス試験等による骨格せん断弾性係数Gと膨張指数 C_s から算定される骨格体積弾性係数Kを用いて設定される。

3.3.3 硬化パラメータ k_s , 内部摩擦角 ϕ_t k_s, ϕ_t の設定は、三軸圧縮試験から得られる主ひずみ増分から、3.3.2で設定したE, ν による弾性主ひずみ増分と等方圧密による塑性主ひずみ増分を差し引いた、せん断と異方圧密による塑性主ひずみ増分を用いる。

k_s, ϕ_t は、二次元主ひずみ増分の重ね合せの理論^りから、1つのモービライズド面におけるせん断応力比($\sin\phi_{mo}$)—最大塑性せん断ひずみ($\epsilon_1^p - \epsilon_3^p$)関係の初期勾配の逆数と漸近値から設定される。

3.3.4 ダイレイタンスパラメータ λ, μ λ, μ は、3.3.3で算定したせん断と異方圧密による塑性主ひずみ増分を用いて、1つのモービライズド面のせん断応力比(τ/σ_N)—塑性ひずみ増分比($-d\epsilon_N^p/d\gamma^p$)関係の勾配と切片から設定される。

4. 非排水単純せん断条件の解析

単調荷の排水試験から設定したパラメータによる緩砂($\tau_{xy}/\sigma'_0=0.14$)と密砂($\tau_{xy}/\sigma'_0=0.72$)の非排水単純せん断条件の解析から、3章の構成モデルの適用性を検討する。

緩砂と密砂の有効応力経路、応力一ひずみ関係を図一8~11に、応力反転毎の $(\text{factor})_{\lambda, \mu}$ と $(\text{factor})_{k_s}$ の変化を図一12, 13に示す。

繰返し荷の λ^r, μ^r と k_s^r を導入した構成モデルでは、図一6, 7の従来モデルと異なり、変相角近傍の有効応力経路やひずみが数%まで漸増しながら液状化に至る挙動の表現が可能である。また非排水ねじりせん断試験で観測される有効応力経路、応力一ひずみ関係⁵⁾と概ね対応する。

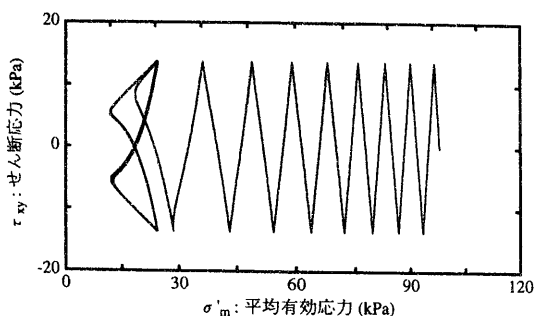


図-6 有効応力経路 (従来モデル)

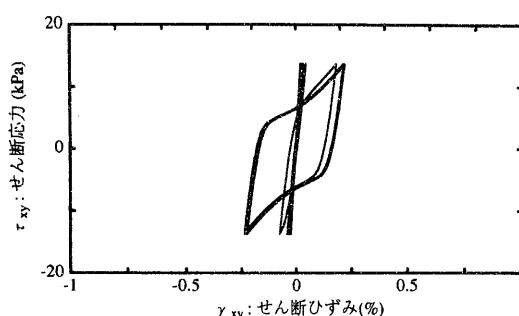


図-7 応力-ひずみ関係 (従来モデル)

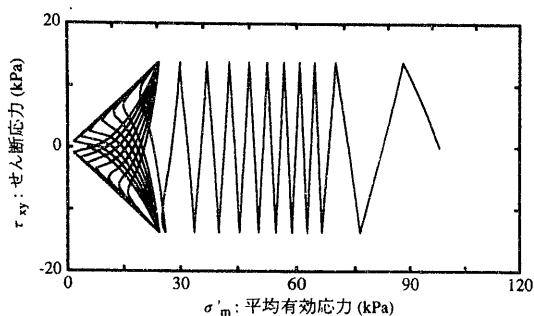


図-8 有効応力経路 (緩砂)

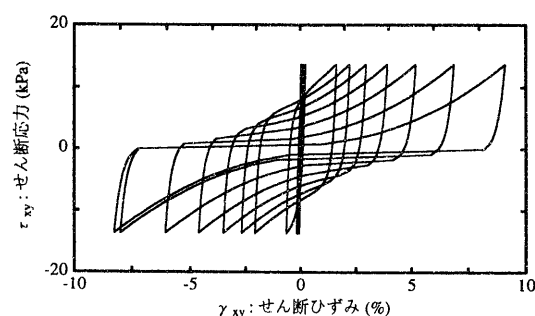


図-9 応力-ひずみ関係 (緩砂)

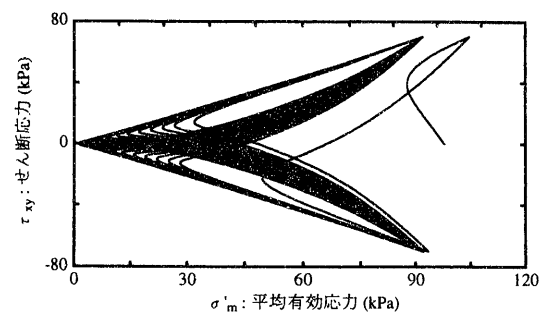


図-10 有効応力経路 (密砂)

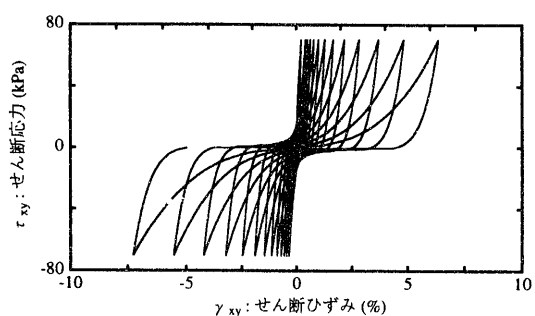


図-11 応力-ひずみ関係 (密砂)

5. 液状化解析で用いるモデルパラメータの設定

実地盤を対象とする液状化解析を行う場合、構成モデルのパラメータは、一般に、地盤を構成する土質材料による単調荷重の室内要素試験から設定される。

ここで、任意の初期有効応力を有する実地盤の液状化解析では、要素試験で得られる液状化強度特性を忠実に反映するために、単調荷重の要素試験で設定した構成モデルのパラメータを補正する必要がある。その手法を以下に示す。

5.1 非排水条件の要素釣り合い式

非排水条件の要素釣り合い式と残差不平衡力は、通常のFEMで用いるマトリクス表示により(39)~(41)式で表現される⁹⁾。

$$\begin{Bmatrix} dF \\ d\varepsilon_v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K & L \\ L^T & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\delta \\ dp \end{Bmatrix} \quad (\because d\varepsilon_v = 0) \quad \dots\dots\dots(39)$$

$$\{dQ\} = \int_{\Omega} [B]^T [D^e] \{d\varepsilon\} d\Omega \quad \dots\dots\dots(40)$$

$$\{L\} = L_i = \int_{\Omega} (B_{1i} + B_{2i} + B_{3i}) d\Omega \quad \dots\dots\dots(41)$$

ここに [K], [B] は剛性、ひずみマトリクス、{dF}, {dQ}, {dδ}, {L} は荷重増分、残差不平衡力増分、節点変位増分、影響係数ベクトル、dp は過剰間隙水圧増分である。また収束計算は、{dQ} を {dF} に代入し、所定の許容誤差が得られるまで行う。

5.2 パラメータ設定法

非排水条件で、初期平均有効応力σ'₀が異なる場合の有効応力経路のσ_d-σ'_m関係、応力-ひずみ関係のσ_d-ε_a関係の模式図を図-14, 15に示す。ここにσ'_m, σ_d, ε_aは、平均有効応力、軸差応力、軸ひずみである。

同じ相対密度の材料の液状化強度比σ_d/2σ'₀は、σ'₀がσ'₀₁, σ'₀₂と異なる場合でも同様という特性から、図-14の有効応力経路の相似関係と同様に、過剰間隙水圧増分dpも(42)式で表現されると仮定する。

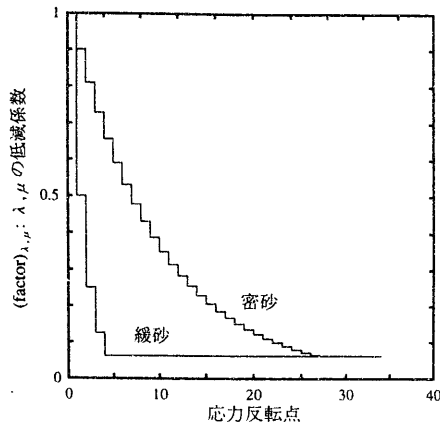


図-12 低減係数の変化

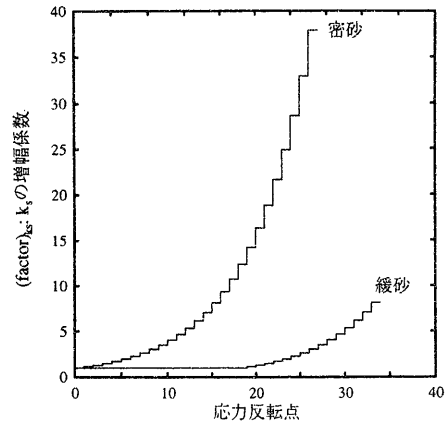


図-13 増幅係数の変化

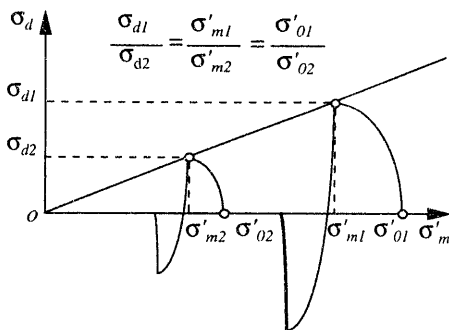


図-14 有効応力経路の模式図

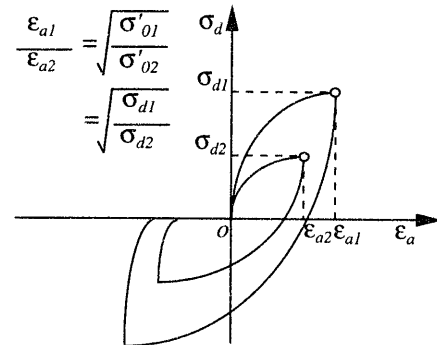


図-15 応力-ひずみ関係の模式図

$$\begin{pmatrix} \sigma'_{m1} \\ \sigma'_{m2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma'_{o1} \\ \sigma'_{o2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} dp_1 \\ dp_2 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(42)$$

(40)式の $\{dQ\}$ は, $[D^e]$ が骨格弾性係数 E , 非排水条件で, $\{de\}$ が硬化パラメータ k_s を比例定数とすることから, dp は(43), (44)式で表現される。

$$dp_1 = \alpha \sqrt{\sigma'_{m1}} k_{s1} \quad \dots\dots\dots(43)$$

$$dp_2 = \alpha \sqrt{\sigma'_{m2}} k_{s2} \quad \dots\dots\dots(44)$$

ここに α は, 同じ相対密度の材料で一定である。硬化パラメータ k_s は, (43), (44)式を(42)式に代入すると(45)式の関係が得られる。

$$k_{s1} = \sqrt{\frac{\sigma'_{o1}}{\sigma'_{o2}}} k_{s2} \quad \dots\dots\dots(45)$$

同じ相対密度の材料で σ'_o が異なる場合, (45)式の関係を用いることにより, 有効応力経路の相似関係が満足される。

軸ひずみ ϵ_a は, (45)式を用いた場合, ϵ_a が k_s を比例定数とすることから(46)式の関係が得られ, 図-15に示すように, σ'_o あるいは σ_d の平方根に比例する。

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{a1} \\ \epsilon_{a2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{s1} \\ k_{s2} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{\sigma'_{o1}}{\sigma'_{o2}}} = \sqrt{\frac{\sigma_{d1}}{\sigma_{d2}}} \quad \dots\dots\dots(46)$$

以上から, 液状化解析で用いる実地盤の硬化パラメータ k_{s1} は, 要素試験で設定した硬化パラメータ k_{s2} と初期平均有効応力 σ'_{o2} , 実地盤の初期平均有効応力 σ'_{o1} を用いて(45)式で設定することにより, 要素試験で得られる液状化強度特性を適切に反映した液状化解析が可能である。

6. まとめ

臨海部の軟弱地盤地域におけるエネルギー施設等の重要構造物やその関連施設の設計, 施工技術として, 地震時の液状化や残留変形を予測する地盤-構造物-水連成系の応答解析手法の開発により得られた結果を以下に列挙する。

① Biot の多次元圧密式を基礎式とする動的有効応力解析プログラム EFFECT を開発し, 線形飽和地盤の二次元波浪問題の理論解との比較から妥当性を検証した。

② 松岡により提案された構成モデルに, 繰返し載荷の応力-ひずみ関係を表現する応力反転時のダイレイタンスパラメータ λ^r , μ^r と硬化パラメータ k_s^r を導入することにより, 要素試験で観測される液状化強度特性を適切に表現できる。

③ 要素試験で観測される液状化強度特性を適切に反映した実地盤の液状化解析を行うために, 要素試験で設定したパラメータから実地盤のパラメータを設定する手法を提案した。

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)-地盤の動的解析手法の開発-」で実施したものであり, 貴重な御助言を頂いた表室長, 平間室長, 鳥井原主任研究員, 後藤室長, 松田主任研究員に深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 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)
- 2) Zienkiewicz, O. C. and Shiomi, T.: Dynamic Behavior of Saturated Porous Media; The Generalized Biot Formulation and Its Numerical Solution, *Proc. of International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 8, p. 71~96, (1984)
- 3) Gatmiri, B.: A Simplified Finite Element Analysis of Wave-Induced Effective Stresses and Pore Pressure in Permeable Sea Beds, *Geotechnique*, Vol. 40, No. 1, p. 15~30, (1990)
- 4) Nakai, T.: An isotropic hardening elastoplastic model for sand considering the stress path dependency in three-dimensional stresses, *Soils and Foundations*, Vol. 29, No. 1, p. 119~137, (1989)
- 5) 安田 進: 液状化の調査から対策工まで, 鹿島出版会, p. 76, (1988)
- 6) 赤井浩一, 田村 武: 弾塑性構成式による多次元圧密の数値解析, *土木学会論文報告集*, Vol. 269, p. 95~104, (1978)