

# 3次元地盤／地下水連成解析プログラム「GRASP-3D」の 解析理論と粘土の力学挙動解析への応用

杉江 茂彦

## Use of Newly Developed 3-Dimensional Soil/Water Coupled FEM Program "GRASP-3D" in Analyzing Mechanical Behaviour of Clay Deposits

Shigehiko Sugie

### Abstract

The accurate evaluation of ground deformation and the behaviour of ground water are of vital importance when considering the design and construction of structures on soft clayey subsoils. The soil/water coupled FEM analysis is an effective numerical analysis method for evaluating these parameters. The 3-dimensional analysis program developed by Obayashi corporation "GRASP-3D" has already been applied for practical use.

Discussed in this report are the theoretical frame work of "GRASP-3D" and its practical analysis system aided by super computer. The problem of friction generated between a soil specimen and plate in plane strain shear test is used to demonstrated 3-dimensional analysis. Some new observations are made regarding the effects of friction on test results.

### 概 要

構造物を安全かつ効率良く施工するためには、設計・施工の各段階を通して、地盤の変形と地下水の挙動を的確に把握する必要がある。そのための先端数値解析技術として、地盤／地下水連成 FEM 解析が有効であり、自社開発による 3次元プログラム「GRASP-3D」が実用されている。本報告では、「GRASP-3D」の解析理論、ならびに実務使用を念頭とした解析システムの概要を紹介している。また「GRASP-3D」の土質基礎研究分野への応用として、粘土のせん断試験における、端面摩擦の影響の問題を取り上げ、新たに得られた知見を述べている。

## 1. はじめに

軟弱地盤を対象とした盛土や掘削工事では、工事を安全かつ効率的に施工するために、地盤の応力・変形特性ならびに地下水挙動を精度良く予測する必要がある。標記の地盤／地下水連成解析は、そのための先端数値解析技術であり、従来別々に行われていた地盤の応力・変形計算と地下水の浸透流計算とを、同時に連立させて行うところに特徴がある。これにより、工事の重要なファクターである、揚水に伴う地下水環境の変化を、地盤の応力・変形予測の中に取り込むことができる。また、地下水挙動の予測においても、盛土や掘削による地盤の境界条件の変化を逐次考慮することができる。

3次元プログラム：GRASP-3D (Grasp Real Action of Subsoils and Pore-water) は自社開発による地盤／地下水連成解析プログラムであり、いくつかの工事での

適用を経て、実用段階に入っている。本報告では、先ず GRASP-3D の解析理論の概要を述べる。次に GRASP-3D を核とした解析システムの構成、ならびにシステム上でのスーパーコンピュータ使用による解析プログラムの計算精度・計算効率について述べる。最後に、土質基礎研究分野の 3次元問題への応用として、粘土の平面ひずみせん断試験における、端面摩擦の影響解析を取り上げ、新たに得られた知見を述べる。

## 2. 地盤と地下水の連成挙動の表現

### 2.1 支配方程式と境界・初期条件

飽和土の問題に限定している。また、GRASP-3D は掘削や盛土の施工の問題を対象としているので、準静的場の問題に限定している。Biot の理論にもとづく、地盤内部 (領域：V、境界：S) の支配方程式を、増分型で図-1<sup>1)</sup>に示す。ここで応力とひずみ、間隙水圧の符号は、伸

支配方程式	
土の骨格	釣り合い式 $\dot{\sigma}_{ij,j} = 0$ (1)
	構成式 $\dot{\sigma}_{ij}^I = D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\sigma}_{ij}^R$ (2)
間隙水	ひずみ～変位 $\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i})$ (3)
	有効応力の原理 $\dot{\sigma}_{ij} = \dot{\sigma}_{ij}^I + \dot{p}_w \delta_{ij}$ (4)
間隙水	連続条件式 $\dot{\epsilon}_v = -v_{i,i}$ (5)
	Darcy 則 $v_i = -k_{ij} \cdot h_{,j}$ (6)
	$(h = \frac{p_w}{\gamma_w} + \Omega)$ , $\Omega$ : 位置水頭

図-1 地盤/地下水連成問題の支配方程式

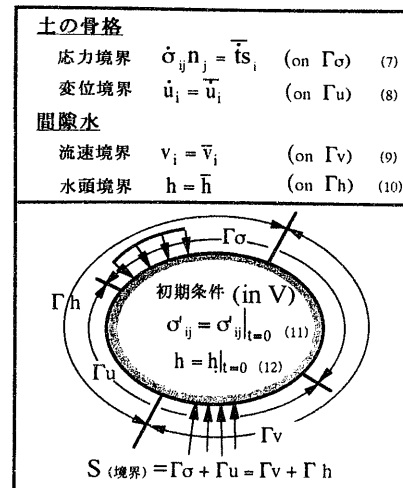


図-2 境界条件と初期条件

張側を正、圧縮側を負と定義している。

ここに、 $\dot{\sigma}_{ij}$ : 全応力テンソル,  $\dot{\sigma}_{ij}$ : 有効応力テンソル,  $D_{ijkl}$ : 剛性テンソル,  $\dot{\epsilon}_{ij}$ : ひずみテンソル,  $\dot{u}_{ij}$ : 変位ベクトル,  $\delta_{ij}$ : Kronecker のデルタ,  $\dot{\epsilon}_v$ : 体積ひずみ (=  $\delta_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}$ ),  $p_w$ : 間隙水圧,  $v_i$ : 流速ベクトル,  $k_{ij}$ : 透水係数テンソル,  $h$ : 全水頭,  $\Omega$ : 位置水頭,  $\gamma_w$ : 間隙水の単位体積重量, である。また、 $\dot{\sigma}_{ij}^R$ は関口と太田の提案<sup>2)</sup>による弾・粘塑性構成を用いた場合の粘性項 (応力緩和項) である。

地盤は、土の粒子が組重なって、構造物および地盤の自重を支持している。この土粒子の組重なった構造は、土の骨格と呼ばれている。間隙水は、土の骨格のすき間を満たす水である。主に土骨格の変形を支配する式は、釣り合い式と構成式 (図-1 の(1)式と(2)式) である。また間隙水の流れを支配する式は連続条件式(5)式と Darcy 則(6)式である。残る、ひずみと変位の関係(3)式と有効応力の原理(4)式は、土の骨格の変形と間隙水の流れの両方に関与して、相互の作用を関連付ける式である。通常、金属・コンクリートなどの計算では、釣り合い式(1)式と構成式(2)式、ひずみと変位の関係(3)式のみを用いる。地盤の計算でも、このような取り扱いをすることがある。全応力計算と呼ばれるものであるが、施工による複雑な排水条件を取り扱うことができない。地下水に大きく左右される地盤挙動の特殊性を考慮するためには、間隙水の連続条件式(5)式と Darcy 則(6)式を加える必要がある。

境界条件と初期条件を図-2<sup>1)</sup>に示す。ここに、 $\bar{t}_s$ : 既知応力ベクトル,  $\bar{u}_i$ : 既知変位ベクトル,  $\bar{v}_i$ : 既知流速ベクトル,  $\bar{h}$ : 既知全水頭, である。(7)式の  $n_j$ は境界  $S$ 上の単位外向き法線ベクトルである。

さらに初期条件として、載荷前 ( $t=0$ ) の有効応力(11)式と全水頭(12)式を与える必要がある。これらの境界・初期条件のもとで、支配方程式を連立させて解くことにより、地盤の変位・応力、地下水の全水頭・流速の分布とその時間的变化が求められる。

## 2.2 弱形式の誘導と有限要素定式化

解析プログラム「GRASP-3D」の開発では、先ず釣り合い式と連続条件式 (図-1 の(1)式と(5)式) の弱形式を誘導している。弱形式の誘導は離散化の前処理にあたる。図-3<sup>1)</sup>に誘導過程を示す。釣り合い式(1)式と連続条件式(5)式に、試験関数  $\hat{u}_i$ (13)式と  $\hat{h}$ (14)式を乗じ、領域  $V$  で部分積分することで得られる。ここで境界条件(7)式、(9)式を代入している。試験関数は任意の微分可能な関数である。ただし変位境界、水頭境界上 (図-2 参照) で値 0 となる条件だけを与えている。釣り合い式の弱形式(15)式は、加えて、ひずみと変位の関係(3)式と有効応力の原理(4)式が代入されている。良く知られた仮想仕事の原理に他ならないが、有効応力と間隙水圧を用いて表現されている。

弱形式 (図-3 の(15)式と(16)式) を空間領域で離散化する。ここで、材料特性を表す構成式(2)式と Darcy 則(6)式を与える。つづいて全水頭の時間変化を差分近似で表すことにより、地盤/地下水連成解析の連立マトリックス方程式 (図-4<sup>1)</sup>の(18)式) を得る。

ここで、 $m$  は個々の要素を、 $*$  は各要素の代表位置での値を示す。 $N, N_h$  は各々変位と全水頭の内挿関数を示す。 $B, C$  は各々節点変位からひずみ、体積ひずみを求めるための行列を示す。 $D$  は土骨格の構成関係を表す行列である。「GRASP-3D」では、 $N$  と  $N_h$  にともに、1 次のセレンディピティ族の内挿関数を用い、形状関数も同次 (アイソパラメトリック要素) とした。数値積分にはガウスの求積法の 8 点 ( $2 \times 2 \times 2$ ) 積分を用いた。

また、時間  $t=t$  から  $t=t+\Delta t$  の間の全水頭の時間差分近似に、計算の安定上有利 (赤井; 田村<sup>3)</sup>) な後退差分 (17)式の  $\theta=1$  の場合) を用いた。

## 3. 地盤の非線形挙動の表現

盛土や掘削によって生じる自然堆積粘土の非線形挙動を表現するため、関口と太田の提案による弾塑性構成式、

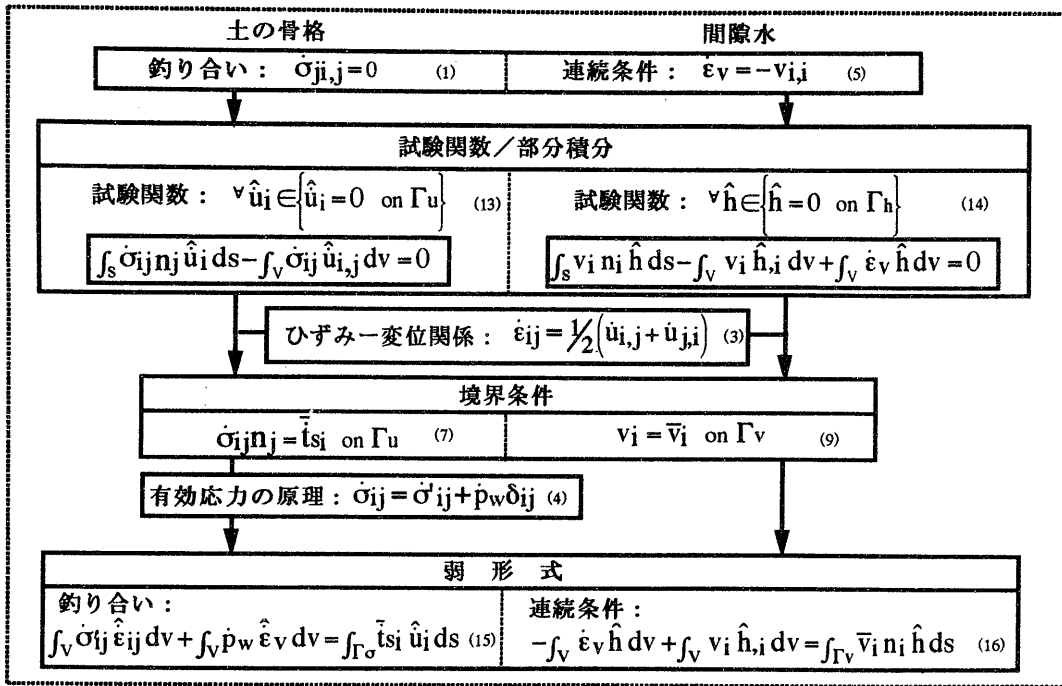


図-3 弱形式の誘導

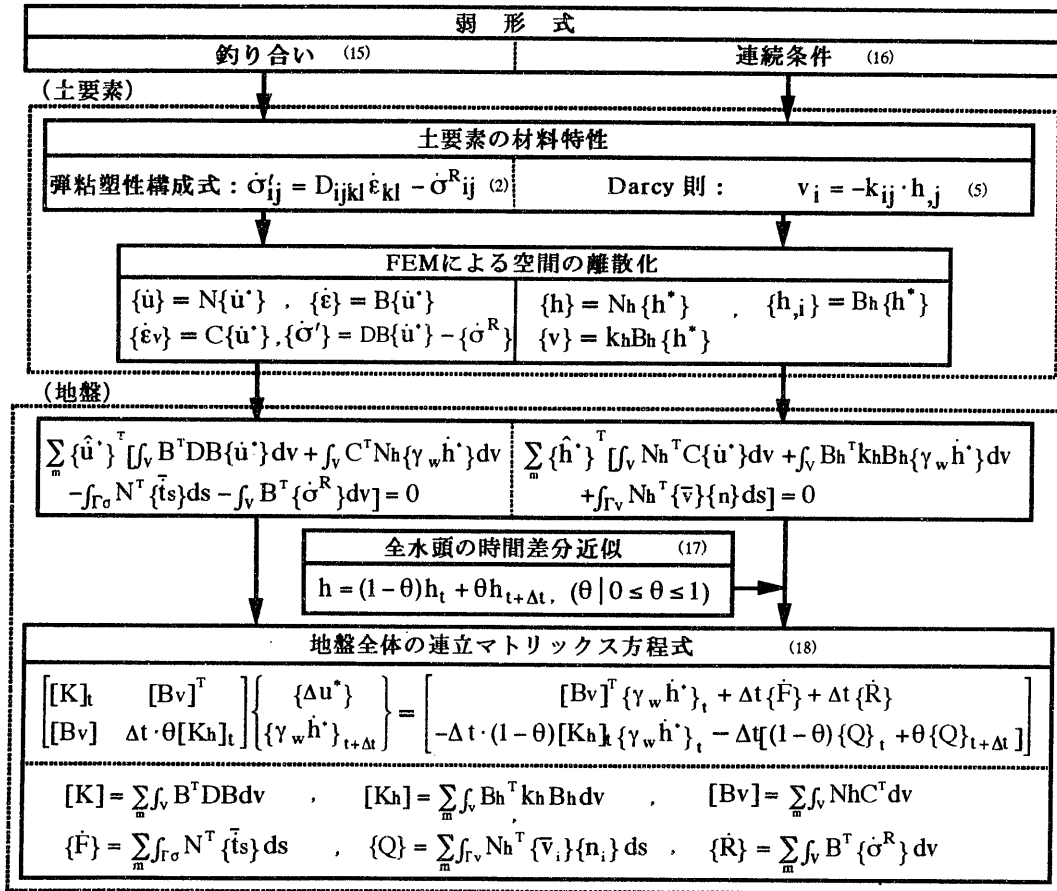


図-4 空間と時間の離散化

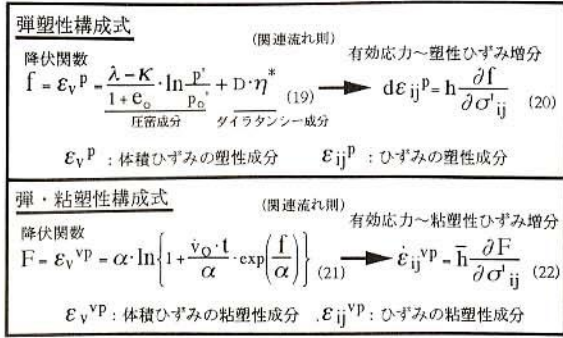


図-5 関口・太田の提案<sup>2)</sup>による非線形構成則

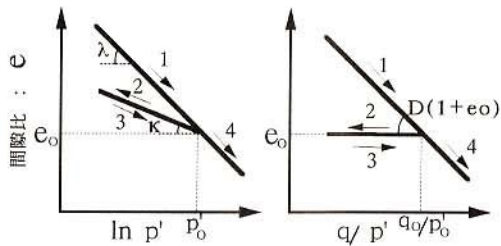


図-6 体積変化の近似

弾・粘塑性構成式を用いた。Roscoe, Schofield and Thurairajah<sup>4)</sup>による Original Cam Clay モデルの拡張型をした構成モデルであり、異方応力状態で堆積している自然地盤の異方的な強度・変形特性を表すことができる。図-5に関口と太田による構成式の定義を示す。用いる材料・応力パラメータを表-1に示す。

粘土の体積変化を圧密によるものとせん断によるもの(ダイラタンシー)との和で近似することから出発している。図-6は体積変化を間隙比eと応力の関係で表したものであり、(a)に圧密の場合を、(b)にせん断の場合を示す。(a)の経路1と4は処女載荷(正規圧密領域)の過程であり、経路2と3は除荷・再載荷(過圧密領域)の過程である。圧密による体積変化の内の塑性成分(回復しない成分)は、処女載荷の勾配λに添って生じる体積変化から、除荷・再載荷過程の勾配κによる分を差し引いてもとまる。(b)のダイラタンシーは、土粒子の乗り上げや落ち込みによる、土の骨格構造のずれによって生じるものである。勾配D(1+e<sub>0</sub>)に沿って生じる体積変化は全て塑性成分であると考えられる。ここで、Dは柴田<sup>5)</sup>によるダイラタンシー係数である。

弾塑性構成式では、降伏関数fの硬化パラメータに塑性体積ひずみε<sub>v</sub><sup>p</sup>を選び(図-5の(19)式)、関連流れ則を用いて、応力と塑性ひずみε<sub>ij</sub><sup>p</sup>の増分関係(20)式を定義している。ここで、(19)式の右辺の第1項と第2項は、先に述べた圧密とせん断による体積変化の式である。第2項のη\* (表-1参照)は一般化された応力比であり、載荷による、応力比s<sub>ij</sub>/pの初期先行圧密時(応力比s<sub>ij0</sub>/p<sub>0</sub>)からの変化量である。η\*を用いることにより、初期

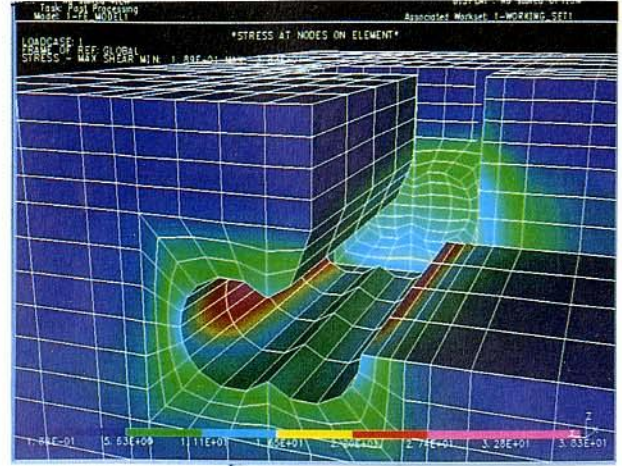


図-7 2連形シールド立坑取り合い部の地盤応力

表-1 材料・応力パラメータ

材料パラメータ	λ	= 0.43 Cc ; 圧縮指数
	k	= 0.43 Cs ; 膨潤指数
	A	= 1 - k/λ ; 非可逆比
	D	ダイラタンシー係数
応力パラメータ	M	= $\frac{6 \sin \phi'}{3 \sin \phi'} = \frac{\lambda - k}{D(1 + e_0)}$ ; 限界状態応力比
	K <sub>0</sub>	正規圧密時の静止土圧係数
	α	2次圧密係数
	v̇ <sub>0</sub>	初期体積ひずみ速度
応力パラメータ	p'	平均有効応力
	s <sub>ij</sub>	= σ'_{ij} - p' δ_{ij} ; 偏差応力の成分 (δ_{ij} ; Kronecker のデルタ)
	q	= $\sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}}$ ; 一般化された応力
	η*	= $\sqrt{\frac{3}{2} \left( \frac{s_{ij}}{p'} - \frac{s_{ij0}}{p'_0} \right) \left( \frac{s_{ij}}{p'} - \frac{s_{ij0}}{p'_0} \right)}$ ; 一般化された応力比 添字"0"は正規圧密時の値を示す
	σ'_{v0}	先行圧密時の有効土被り圧

異方圧密に伴う異方的な力学挙動を表現している。弾・粘塑性構成式では、さらに2次圧密の効果を加えた粘塑性体積ひずみ(21)式を定義し、これを硬化パラメータとしたスカラー関数Fに関連流れ則を用いて、応力と粘塑性ひずみの増分関係(22)式を定義している。応力～ひずみ関係と有効応力経路の具体的な形状を、平面ひずみ非排水せん断の場合について後章で示す。

### 3. 実用解析システム

#### 3.1 システム構成

3次元地盤/地下水連成解析では、3次元非線形計算と非定常計算とが重複するため、演算量・情報量ともに膨大となる。GRASP-3Dの実務使用にあたっては、スーパーコンピュータとエンジニアリング・ワークステーション(EWS)を援用した解析システムの構築により、大規模演算処理、解析データの前処理・後処理の短時間化をはかっている。図-7は、この解析システムによる計

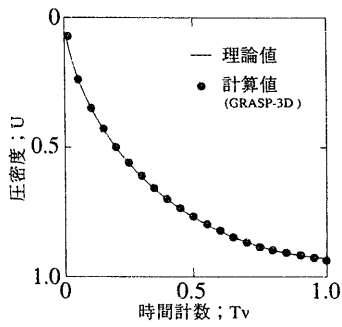


図-8 1次元圧密の圧密度～時間係数関係

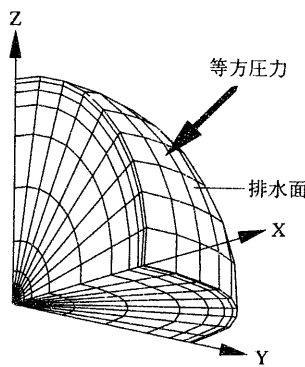


図-9 球体圧密の計算モデル

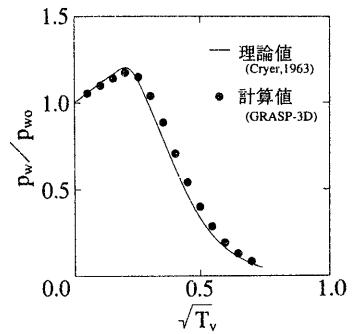


図-10 球中心の過剰水圧の挙動

算結果のビジュアル化例であり、2連形シールド発進部周辺地盤のせん断応力の発生状況を示したものである。コンピュータグラフィック (CG) によるビジュアル化は、地盤内部の力学状態をマクロにとらえるための有用な道具として、設計・施工検討の場で活用されている。

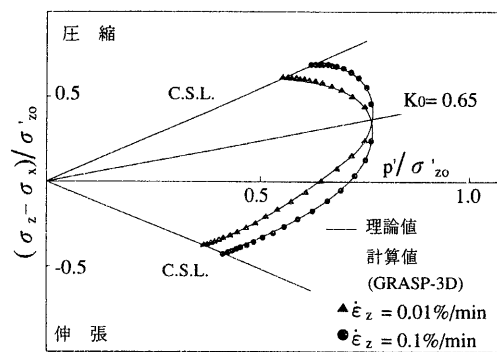
### 3.2 解析プログラム「GRASP-3D」の性能

#### 3.2.1 理論問題での計算精度

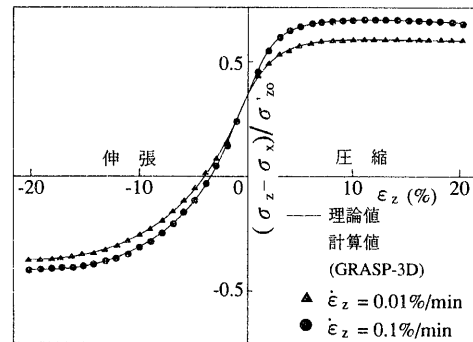
(1) 弾性構成式による圧密問題 1次元弾性圧密問題と球体弾性圧密問題を用いて、土骨格と間隙水の連成挙動の計算精度を調べた。図-8に1次元圧密計算の圧密度 (U) ～時間係数 (Tv) 関係を示す。材料定数にヤング率 100 tf/m<sup>2</sup>、ポアソン比 1/3、透水係数 10<sup>-6</sup> cm/sec を用いた。逐次計算の時間増分幅を ΔTv = 0.0001 (時間係数で表示) とした。GRASP-3D による計算結果は、Terzaghi の理論値と完全に一致している。圧密等時曲線についても同様に高い精度の結果が得られた。

図-9<sup>6)</sup>に球体圧密問題の計算モデルを示す。球形の土試料の表面に排水条件を設け、試料表面に等方圧を与える問題である。変形の対称性を考慮して、球形試料の8分の1をモデル化している。材料定数は先の1次元問題と同様である。時間増分幅は ΔTv = 0.05 とした。球の中心部における過剰間隙水圧の発生と消散の過程を、Cryer<sup>7)</sup>の理論値とともに図-10<sup>6)</sup>に示す。計算結果と理論値とに良い整合が得られている。圧密初期の過剰間隙水圧の上昇は、Gibson, Knight and Taylor<sup>8)</sup>の実験でも観察されている。圧密が先行して生じる表面付近の土試料の収縮により、その内部の試料に載荷重以上の水圧が発生するものであり、Mandel-Cryer 効果として知られる現象である。

(2) 非線形構成式による非排水せん断問題 前章で述べた弾塑性構成式、弾・粘塑性構成式を用いて、異方圧密粘土の平面ひずみせん断挙動を計算した。圧縮・伸張せん断における有効応力経路、応力～ひずみ関係が正しく計算されているかどうかを調べるために、理論値と比較して図-11<sup>6)</sup>に示す。ここで、弾・粘塑性構成式による結果のみを示している。ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_z = 0.01\%/min$ 、 $0.1\%/min$  の両ケースにおいて、有効応力経路、応力～ひずみ関係ともに、GRASP-3D による計算結果は理論値



(a) 有効応力経路



(b) 応力～ひずみ関係

図-11 平面ひずみ非排水せん断による挙動

と完全に一致している。弾塑性構成式においても、同様の結果であった。

#### 3.2.2 スーパーコンピュータ上での高速演算性能

スーパーコンピュータの高速演算性能を十分に引き出すためには、解析プログラムに90%近いベクトル化率(全てスカラー演算した場合の演算実行時間に占める、ベクトル化可能な演算部分の実行時間、の割合)が求められる。図-12<sup>6)</sup>に GRASP-3D のベクトル化率(左縦軸の値)を解く問題の規模(横軸)に対して示す。右縦軸には SX3/21R による CPU 時間を示す。用いた計算問題は、立方形状の地盤モデルでの1回載荷(連立方程式を

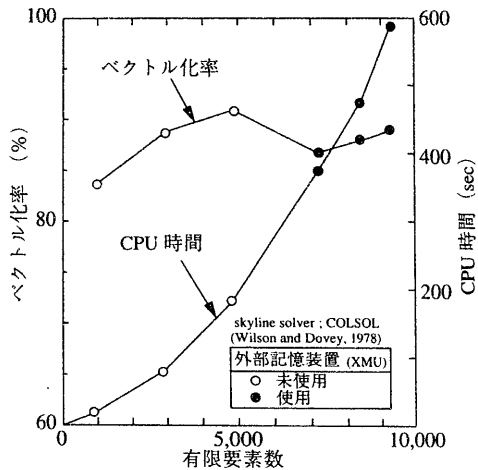


図-12 GRASP-3D のベクトル化率と計算時間

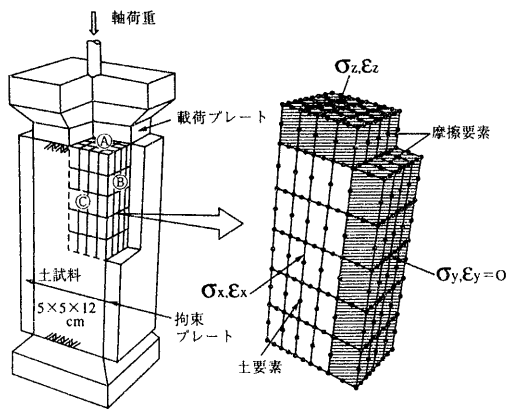


図-13 平面ひずみ試験と計算モデル

1回計算)の問題である。連立方程式の計算には、ブロック・スカイライン・ソルバーを用いている。

図-12中の白丸のプロットは、問題の規模が比較的小さく、求解で連立方程式の分割を必要としない場合の結果である。黒丸は問題の規模が大きくなったために、連立方程式を2個以上に分割して外部記憶装置に格納する必要が生じた場合の結果である。ここで、外部記憶装置には高速転送速度(1.1GB/秒)を有する、拡張記憶装置XMU(容量2GB)を用いている。GRASP-3Dのベクトル化率は90%近い値を確保しており、用いたスーパーコンピュータの高速演算性能(3.1GFLOPS)を十分に発揮できるコーディングであることがわかる。

#### 4. 平面ひずみせん断試験における端面摩擦の影響解析

##### 4.1 概要

円柱供試体によるせん断試験では、土試料と載荷プレート間の摩擦が、強度定数に少なからず影響を与えることが知られている。載荷面がさらに多い平面ひずみ試験では、端面摩擦の影響が、変形・応力・強度にどのように及ぶか、また圧縮荷重と伸張荷重でどのように異なる

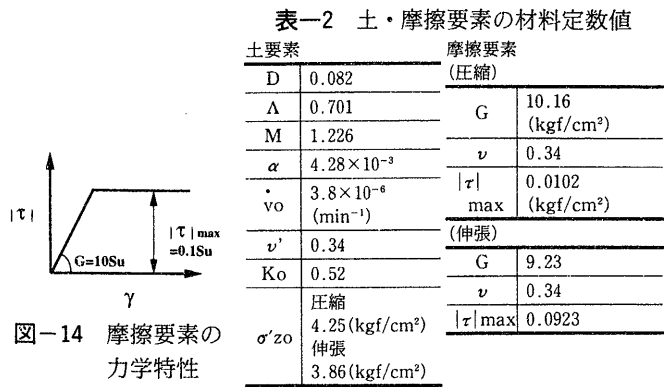


図-14 摩擦要素の力学特性

か等、疑問がある。平面ひずみ試験の端面摩擦の問題は、3次元問題であり実験的に調べるのが容易ではない。そこで、GRASP-3Dを用いて数値解析による検証を行った。まず、実験事例のシミュレーションを行い、採用した解析モデルで、粘土の挙動をうまく追跡できるかどうかを調べた。次に、粘土の物性を変化させたパラメトリック・スタディーにより、端面摩擦が強度に与える影響を調べた。

##### 4.2 実験事例のシミュレーション

図-13<sup>1)</sup>に三田地と北郷<sup>9)</sup>が用いた平面ひずみ試験機の概要と解析に用いた3次元有限要素メッシュを示す。変形の対称性を考慮して、供試体の8分の1をモデル化した。剛なプレートを介して載荷されるz軸方向の荷重は、供試体の上端面(図中のA面)上の各節点に、強制変位を均一に与えることで表現した。ここで実際の試験と同様に、ひずみ速度( $\dot{\epsilon}_z=0.05\%/min$ )とした。端面摩擦の影響を考慮するケースでは、載荷プレートと接触するA面とB面に、斜線で示す有限要素(以後、摩擦要素と呼称する)を設けて、A面とB面での面内方向の変形に対する摩擦抵抗を表現した。摩擦要素には、水との連成を考慮しない非連成の要素を用いて、非排水せん断を模擬した。C面は、ゴムスリーブを介して液圧が作用する面である。

繰り返した後、Ko正規圧密(側方拘束のもとで圧密)された土試料の異方的な力学挙動を表現するため、第2章の弾・粘塑性構成モデルを用いた。材料定数には、実験結果をもとに表-2(a)の値を用いた。

摩擦要素は、図-14<sup>1)</sup>に示す弾・完全塑性体とし、土試料の1面せん断強度Suをもとに、表-2(b)の材料定数値を用いた。ここで、ポアソン比については、土要素と同じ値 $\nu=0.34$ としている。

図-15<sup>1)</sup>に端面摩擦を考慮した計算結果を示す。z軸方向に圧縮荷重した場合と伸張荷重した場合のそれぞれについて、軸ひずみ $\epsilon_z=5\%$ 時の粘土試料の変形と間隙水圧のコンターを示している。ここで、粘土試料の変形の傾向を明確に示すために、変形のスケールをモデル・スケールの4倍に拡大して表している。間隙水圧のコンターは、色が濃い程、高い値が発生していることを示す。コンターの数値は、間隙水圧( $p_w$ )を初期圧密圧力( $\sigma'_{z0}$ )

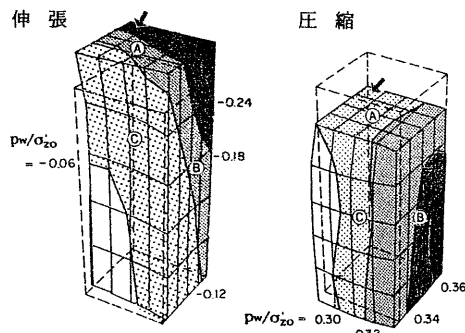


図-15 変形と間隙水圧の分布

で除して示している。

粘土試料とプレートとが接触するA・B面では、端面摩擦の影響によって面内方向の変形が拘束され、圧縮载荷ではバルジ型の変形が生じている。間隙水圧の発生は、圧縮载荷・伸張载荷ともに、サイド・プレートに接するB面付近で大きくなっている。間隙水圧値の幅は、圧縮载荷に比べて伸張载荷で広く、不均一の度合いが伸張载荷で特に大きい。

図-16<sup>1)</sup>に有効応力経路、図-17<sup>1)</sup>に応力(間隙水圧)～軸ひずみ  $\epsilon_z$  関係を示す。実験値を点で、計算結果を端面摩擦が無い場合と有る場合について、各々、実線と破線でプロットしている。ここで、全応力  $\sigma_z$  は、試験での測定方法を模擬して、载荷面(A面)上の各節点の等価節点力のz軸方向成分 ( $F_z = \int_V B^T \{\sigma\} dv$ ) の総和を、初期の载荷面積で除して求めた。ここに、 $\{\sigma\}$  はA面に接する粘土要素の応力である。全応力  $\sigma_z$  についても、同様の方法で求めた。全応力  $\sigma_z$  は、液圧に等しい。間隙水圧  $p_w$  は、A面の中央に接するポーラストンを介して測定されている。これを模擬するために、同位置(図-15の矢印の位置の土要素)の値を用いた。

実験値は、Ko圧密された粘土の圧縮载荷と伸張载荷における強度の異方性を示している。計算値においても、このことが良く表現されている。また、有効応力経路、応力(間隙水圧)～軸ひずみ  $\epsilon_z$  関係ともに、計算値(実線と破線が示す幅)は実験値と良く対応しており、解析モデルが妥当であることを確認できる。

#### 4.3 パラメトリック・スタディー

表-3に示す4ケース(塑性指数PI=20, 40, 60, 80)のKo正規圧密粘土を想定し、非排水強度に与える端面摩擦の影響を調べた。粘土の材料定数の値は、飯塚と太田<sup>10)</sup>によるパラメータ決定チャートを用いて、塑性指数から求めた。摩擦要素の材料定数は、粘土の物性値を用いて前節と同様の方法で求めた。

西原<sup>11)</sup>は、関口と太田の弾塑性構成式を用いて、平面ひずみ条件における粘土の非排水せん断強度を理論的に求め、図-18に示している。ここに、縦軸は非排水強度( $s_u$ )を初期の有効鉛直応力( $\sigma'_{z0}$ )で除した値、横軸は塑性指数PIである。圧縮载荷における理論値を実線、実験値を白丸で、また伸張载荷の理論値を鎖線、実験値を

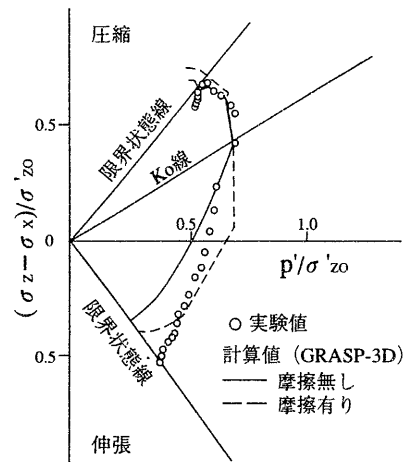


図-16 有効応力経路

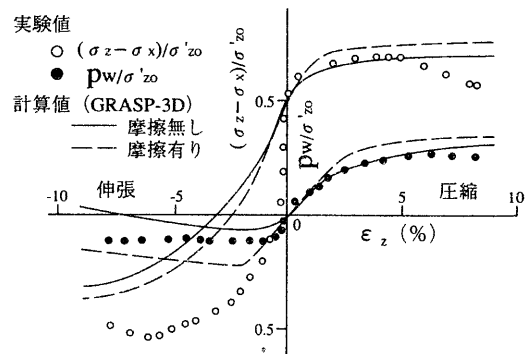


図-17 応力(間隙水圧)～ひずみ関係

黒丸でプロットしている。理論値は、端面摩擦と粘性の影響がない場合の強度を表しており、塑性指数が小さい粘土では圧縮载荷と伸張载荷で、強度に大きな差が生じている。また、塑性指数の増加とともに、強度の異方性の度合いが小さくなることを示している。

同図には、パラメトリック・スタディーの結果を、斜線で加筆している。斜線の上端は端面摩擦を考慮した場合、下端は端面摩擦が無い場合の結果である。圧縮载荷・伸張载荷ともに、斜線帯は実験値の分布の平均的な値を示している。また端面摩擦の影響により、圧縮载荷・伸張载荷ともに、強度が大きめに得られている。

端面摩擦の影響の度合いを、圧縮载荷と伸張载荷と比較して図-19<sup>1)</sup>に示す。縦軸に端面摩擦が有る場合と無い場合の強度の比を、横軸に塑性指数PIをとっている。圧縮载荷・伸張载荷ともに、強度への端面摩擦の影響が、塑性指数とともに増加している。また、伸張载荷では、圧縮载荷に比べて端面摩擦の影響が大きい。

#### 5. おわりに

この報告では、先ず自社開発による3次元地盤/地下水連成解析プログラム「GRASP-3D」の解析理論について、① 数学的な道具である弱形式を用いた支配方程式・境界条件の離散化法、② 自然堆積粘土の異方的な力学挙

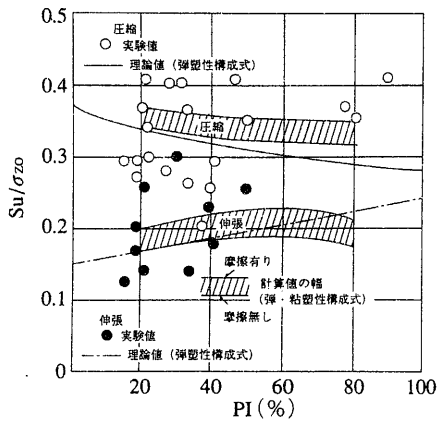


図-18 平面ひずみ強度と塑性指数の関係

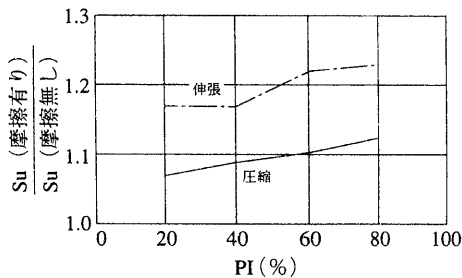


図-19 強度に与える端面摩擦の影響

動の表現に用いた関口と太田の非線形構成式の理論的枠組み、を述べた。次に「GRASP-3D」を核とした解析システムの構成、ならびにシステム上でのスーパーコンピュータ使用による解析プログラムの計算精度・効率について述べた。ここで、多次元圧密問題ならびに非線形構成式による非排水せん断問題において、理論値と整合する高精度の結果を示した。またスーパーコンピュータの高速演算性能が十分に活かせるコーディングであることを、ベクトル化率の検証結果をもとに示した。最後に、土質の基礎研究分野への応用として、平面ひずみせん断試験における端面摩擦の影響を調べた。先ず、実験事例のシミュレーションにより、解析モデルの妥当性を確認した。続くパラメトリック・スタディーでは、圧縮・伸張荷重ともに、端面摩擦の影響により強度が大きめに得られた。またその度合いは特に伸張荷重で大きかった。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、金沢大学工学部土木建設工学科教授太田秀樹博士、同助教授飯塚 敦博士より、多くのご指導とご助言をいただきました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

表-3 パラメトリック・スタディーの材料定数値

	PI=20	PI=40	PI=60	PI=80
M	1.220	1.022	0.912	0.835
Λ	0.697	0.584	0.521	0.477
D	0.051	0.074	0.089	0.099
v'	0.344	0.378	0.409	0.437
Ko	0.524	0.608	0.692	0.776
α	4.45×10 <sup>-3</sup>	6.50×10 <sup>-3</sup>	7.77×10 <sup>-3</sup>	8.63×10 <sup>-3</sup>
vo(1/min)	2.10×10 <sup>-5</sup>	9.70×10 <sup>-6</sup>	3.60×10 <sup>-6</sup>	1.20×10 <sup>-6</sup>

参考文献

- Ohta, H. Iizuka, A. Omote, Y. and Sugie, S.: 3-D analysis of soil/water coupling problems using elasto-viscoplastic constitutive relationships, Proc. 7th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Vol.2, p. 1191~1196, (1991)
- Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clay, 9th ICSMFE, Tokyo, Proc. Specialty session 9, p. 229~239, (1977)
- 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, 第269号, p. 95~104, (1978)
- Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Thurairajah, A.: Yielding of clays in states wetter than critical, Geotechnique, vol.13, No.3, p. 211~240, (1963)
- 柴田 徹: 粘土のダイラタンシーについて, 京大防災研究所年報, 第6号, p. 128~134, (1963)
- 杉江茂彦, 飯塚 敦, 太田秀樹: 3次元土/水連成解析における種々の離散化と計算精度・効率, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 第18巻, p. 33~38, (1994)
- Cryer, C.W.: A comparison of three dimensional consolidation by finite elements, Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol.16, part4, p. 401~414, (1963)
- Gibson, R. E., Knight, K. and Taylor, P. W.: Proc. Europ. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.1, p. 69~76, (1963)
- Mitachi, T. and Kitago, S.: Undrained triaxial and plane strain behaviour of saturated remoulded clay, Soils and Foundation, Vol.20, No. 1, p. 13~28, (1980)
- Iizuka, A and Ohta, H.: A determination procedure of input parameter in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundation, Vol.27, No. 3, p. 71~87, (1987)
- 西原 晃: 誘導異方性と主応力回転を考慮した自然堆積粘土地盤の短期安定解析, 京大博士論文, (1986)