2次元地盤解析システム

FEM すいすい 一圧 密 一 マニュアル

Ver.1.0

for Windows Vista/7/8

http://www.fem-suisui.com/

2次元地盤解析システム「FEM すいすい一圧密一」は有限要素法(FEM)による2次元圧密解析ソフトウェアです。ダムなどに関係する分野において、威力を発揮する汎用 FEM 製品です。

本マニュアルの内容は概ね以下のようになっています.

第1章 始める前に

「FEM すいすい一圧密一」の特長や、操作の流れ、注意点ついて.

第2章 プログラムのセットアップ

必要な機器、インストール方法などについて

第3章 プリプロセッサー

データの作成方法について.

第4章 ポストプロセッサー

解析結果の表示, 印刷, エクセルへの出力方法について.

第5章 解析例

実務に即した例題を操作の手順を追って説明します.

第6章

本解析システムの解析理論について説明します.

2次元地盤解析システム「FEM すいすい―圧密―」は初心者からベテラン技術者まで、すいすいと使えるように工夫されたソフトです。ある程度、解析に慣れ親しんでいる方々なら、第5章解析例から始めてもよいでしょう。

目 次

第 1 章	章 はじめる前に	6
1-1	「FEM すいすい―圧密―」とは	6
1-2	「FEM すいすい―圧密―」の操作の流れ	7
1-3	FEM 解析にあたっての注意点	8
	1-3-1 単位系 8	
	1-3-2 メッシュの分割方法 8	
第2章	章 セットアップ	9
2-1	インストール方法	9
	2-1-1 製品版のダウンロード 9	-
	2-1-2 「FEM すいすい―圧密―」のインストール 9	
a -		
	章 プリプロセッサー	
3-1	起動と終了	
3-2	データ作成手順について	14
3-3	解析方法の設定	24
3-4	材料特性の設定	25
	3-4-1 不飽和特性曲線 26	
	3-4-2 材料特性値の入力 27	
3-5	解析対象の作図	28
	3-5-1 作図とは 28	
	3-5-2 作図に役立つ機能 30 3-5-3 作図コマンド 31	
3-6		41
3-1	メッシュ分割	42
3-8	水頭条件の設定	4.4
3-9		
3-10) 解析ステージの設定 3-10-1 解析ステージとは 46	46
	3-10-1 解析ステーンとは 40 3-10-2 解析ステージの設定 47	
3-11	解析の実行	48
- U I I		

第 4 章	章 ポストプロセッサー	49
4-1	起動と終了	49
	解析結果の表示	
	4-2-1 役立つ機能 50	
	4-2-2 解析結果の表示 51	
	4-2-3 表示の設定 54	
4-3	解析結果の利用	58
	4-3-1 変位量 58	
	4-3-2 コンター図 58	
第5章	章 解 析 例	60
5-1	盛土による圧密沈下	61
	5-1-1 解析条件 61	
	5-1-2 解析手順 61	
	5-1-3 解析結果 81	
第6章	章 弾・粘塑性カップリング解析	86
6-1	応力 - ひずみ関係	86
	6-1-1 記号の定義 86	
	6-1-2 弾・粘塑性理論(関口のモデル) 86	
	6-1-3 弾・粘塑性構成式 87	
	6-1-4 破壊条件式 87	
	6-1-5 弾性の Lamé の定数 88	
6-2	有限要素定式法	88
	6-2-1 記号の定義 88	
	6-2-2 基礎方程式 88	
	6-2-3 支配方程式 89	
	6-2-4 初期条件と境界条件 89	
	6-2-5 変分原理 89	
	6-2-6 有限要素定式化 89	
6-3		91
	6-3-1 不飽和浸透特性 91	
	6-3-2 収束条件式 92	
	6-3-3 浸出面の取扱い 92	
	6-3-4 進入不可境界とその取扱い 93	

第1章 はじめる前に

2次元地盤解析スシテム「FEM すいすい―圧密―」を始めるにあたってその特徴、操作の流れ、解析にあたっての注意点について説明します.

1-1 「FEMすいすい— F密— | とは

「FEM すいすい―圧密―」は解析種別として圧密解析(平面ひずみ解析、軸対称解析)に対応した有限要素法(FEM)解析ソフトです.

「FEM すいすい一圧密一」は、前田建設工業(株)で開発され長年使用されている実績ある FEM 解析ソフトのプリポスト部分を、さらに機能強化して使い易く改良したものです。

「FEM すいすい―圧密―」の特徴としては次の点が挙げられます.

①モデル作成機能

分割数指定による自動分割(要素細分化)機能を搭載し、自動分割後の細部のマニュアル修正も可能です。また、モデル作成(プリプロセッサー)から解析(ソルバー)および結果の確認(ポストプロセッサー)までを1つのソフトウェアに搭載し、解析作業を効率的に行えます。

② UNDO 機能

モデル作成時、直前に行った動作を無制限に元に戻す機能を搭載

③施工段階を追う解析が簡単

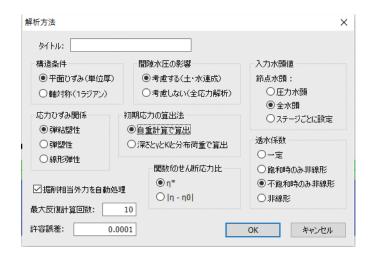
地盤の掘削,盛土などのステージ解析を実施することができます. ステージ ごとに、材料定数の変更、境界条件の変更が可能です.

④結果図の貼付け

モデルや解析結果を様々な表現方法で表示でき、報告書への貼り付けが簡単 に行えます.

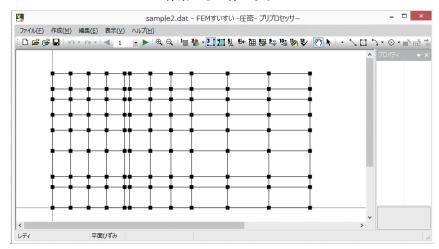
解析の種類としては、以下の2種類があります.

- ①平面ひずみ(単位厚)
- ②軸対称(1ラジアン)



1-2 「FEMすいすい―圧密―」の操作の流れ

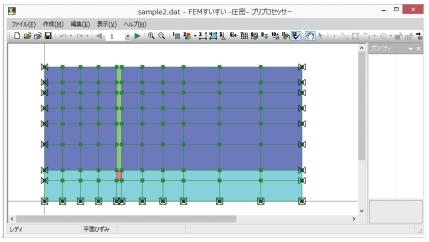
まず、(プリプロセッサー)で解析対象の作図とメッシュ分割、解析条件の入力など、解析の前に必要な処理を行います。次に(ソルバー)にて解析、そして、(ポストプロセッサー)にて数値で出された結果を分かりやすく伝えるため、ディスプレイ上にグラフィックなどを使って表示して結果の確認・出力までを一連の作業として行います。



① (プリプロセッサー)

解析対象の作図 メッシュ分割 解析諸条件の入力

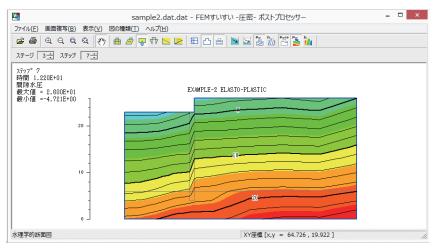
作図の画面



② (ソルバー)

解析実行

条件入力の画面



③ (ポストプロセッサー)

グラフィック表示 結果の確認・出力

結果の確認画面(例:変位コンタ)

1-3 FEM解析にあたっての注意点

1-3-1 単位系

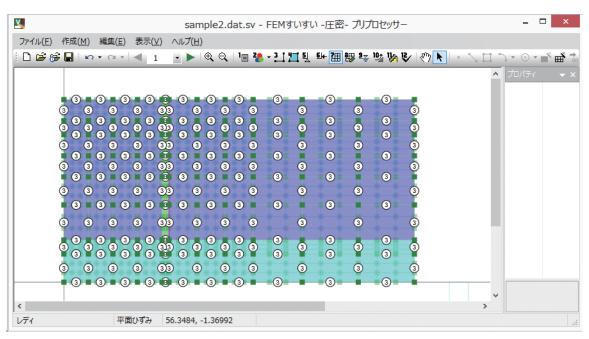
FEM 解析では一般に単位系の指定はされてはなく、ユーザーが各自で設定する必要があります.

2次元地盤解析「FEM すいすい一圧密一」でも、ユーザーが設定した単位系が出力の単位系となります。決めなければいけない単位は力と長さと時間で、出力する量は変位、水頭、流量、応力、ひずみ、断面力です。これらの単位は解析を始める前に明確にしておく必要があります。ただし、間隙水の単位体積重量が1になる単位系にする必要があります。

1-3-2 メッシュの分割方法

FEM 解析はメッシュを細かく切った方が、精度は高くなります. しかし、メッシュを細かく切るのには限界があります. また計算時間や作業効率を考えると、メッシュをいかに効率的に切るかということが重要となります. 一般的にいえることは、

- ①応力集中部や評価点はメッシュを細かく切る.
- ②アスペクト比(長辺と短辺の比率)が低いメッシュにする.
- ③四角形要素を多用し、三角形要素はなるべく作らない.
- ④メッシュのサイズの急変を避ける.
- ことです.メッシュを切るにはこれらのことを考慮する必要があります.



メッシュ分割例

第2章 セットアップ

2-1 インストール方法

2-1-1 製品版のダウンロード

2 次元地盤解析システム「FEM すいすい―圧密―」はホームページより ダウンロードしてください.

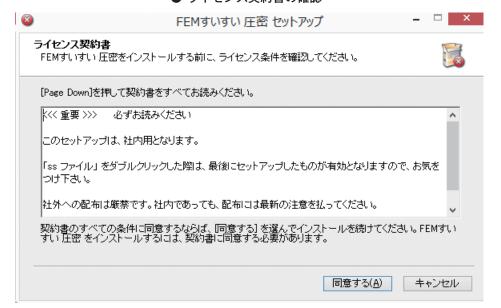
「FEM すいすい一圧密一」を使用するためにはレンタル申し込みしていただくことが必要です。申し込みののち、郵送される「USB プロテクトキー」をご使用いただくことで、レンタル契約期間に応じてご利用いただけます。

「FEM すいすい―圧密―」は同時に1台のパソコンでのみ、お使いいただけます.「USB プロテクトキー」は複数のパソコンで同時に「FEM すいすい―圧密―」が使用されることを制限するためのものです.

2-1-2 「FEMすいすい―圧密―」 のインストール

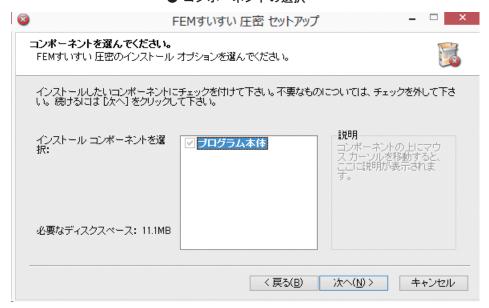
Microsoft® Windows® (以下 Windows) を搭載する PC のデスクトップに, 「FEM すいすい―圧密―」 [setup.exe] がダウンロードされていることを前提に説明します.

● ライセンス契約書の確認



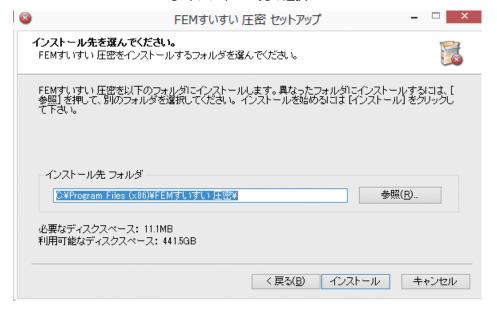
[setup.exe] を実行するとライセンス契約書画面が表示されます. 内容をよくお読みになり、同意される場合は[同意する]をクリックしてください.

● コンポーネントの選択



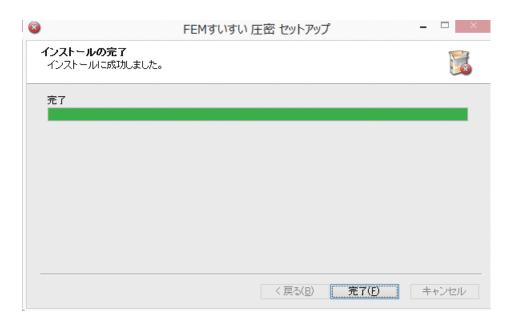
各コンポーネントの文字の上にカーソルを移動すると、各コンポーネントの 説明が表示されます. 使用するコンポーネントにチェックを入れて、[次へ] を クリックします.

● インストール先の選択



インストールするフォルダの指定をします.

フォルダ指定しない場合は、[C: \Program Files \FEM すいすい圧密] にインストールされます。変更する場合は [参照] をクリックし、インストール先のフォルダを指定してください。[次へ] をクリックします。



インストールの完了画面が表示されますので、[完了]をクリックしてください. これで、パソコンに **2 次元地盤解析システム「FEM すいすい―圧密―」**がインストールされました.

●「FEM すいすい―圧密―」の起動

Windows のスタートメニューより [FEMすいすい圧密] を選択し、下の [プリプロセッサ] をクリックして実行します.

「FEM すいすい一圧密一」のプリプロセッサが起動します.

また、Windows のスタートメニューより [FEMすいすい圧密] を選択し、下の [ポストプロセッサ] をクリックして実行すると、「FEM すいすい一圧密一」のポストプロセッサが起動します.

● USB キーの使用方法

- ① USB キーをパソコンの USB ポートに正しく取り付けます.
- ②「FEM すいすい―圧密―」を起動します.

第3章 プリプロセッサー

3-1 起動と終了

起動の方法

パソコンには USB キーを付けておきます.

- ① Windows を起動して、タスクバーの「スタート」をクリックします.
- ②「プログラム」にカーソルを合わせます.
- ③サブメニューから「**FEM すいすい一圧密一」**のプリプロセッサーを選択してクリックします.

画面構成

メニューバーとツールバーを利用した標準的な画面構成になっています. なお, プロパティウィンドウが右側にドッキングされて表示されますがフローティングウィンドウに設定することもできます. 以下の様な画面が表示されます.



プリプロセッサー画面構成

データ保存

メニューバーのファイル内にある「上書き保存」か「名前を付けて保存」または、ツールバーの [保存 ■] をクリックします.



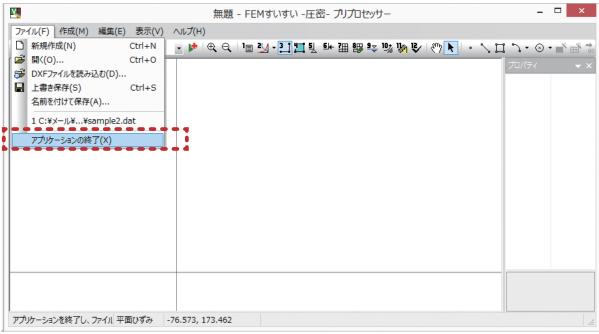
メニューバー 「ファイル」―「名前を付けて保存」



ツールバー [保存 📙]

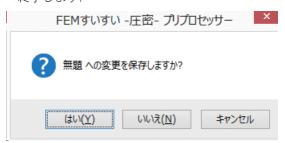
終了方法

①ファイルメニューから「アプリケーションの終了」を選択してクリックします.



メニューバー 「ファイル」―「アプリケーションの終了」

②データを保存する場合は「はい」を、しない場合は「いいえ」をクリックして終了します.



3-2 データ作成手順について

解析の基本的な手順は概ね以下の様な流れで行います. 必ずしも順番どおりに 行わなくても良いのですが, 効率よくすすめるためには各段階をおって操作する ことをお勧めします.

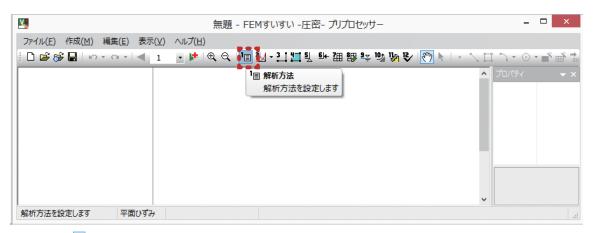
場合によっては入力を行った後でなければ操作ができないものもあります.

①解析方法の設定

解析方法を指定します.



メニューバー「ファイル」―「新規作成」



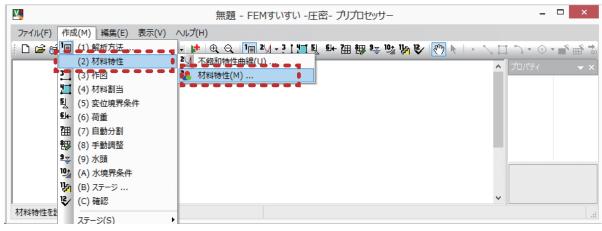
ツールバー [😉 解析方法]



解析方法 設定ウィンドウ

②材料特性の設定

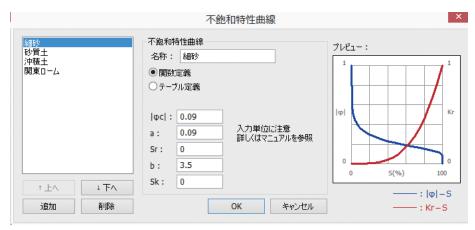
材料特性の設定を行います.



メニューバー 「作成」―「(2) 材料特性」―「🔠 材料特性」



あるいは、ツールバー [材料特性]



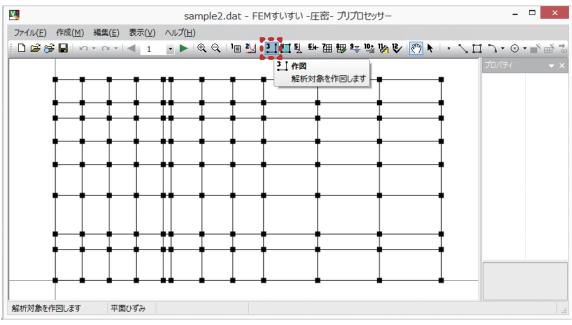
②不飽和特性曲線の設定画面



②材料特性の設定画面

③解析対象の作図

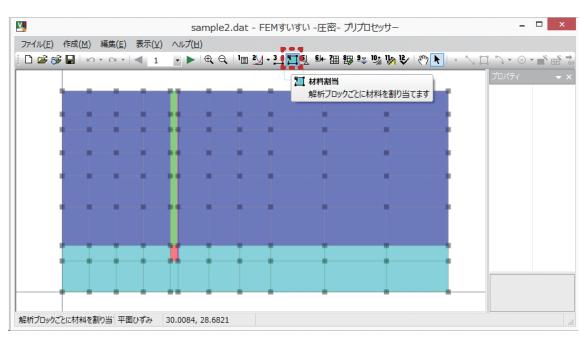
解析対象を作図します.



ツールバー [二 作図]

④材料特性の割当て

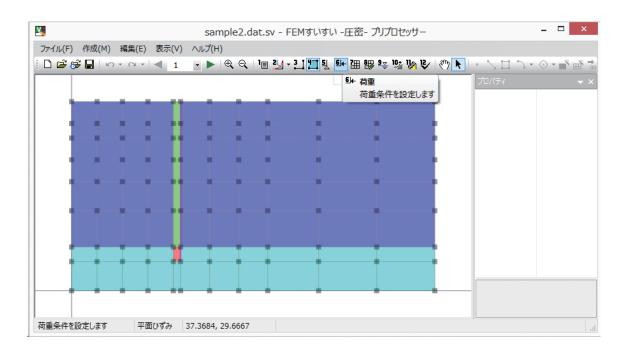
解析ブロック毎に材料を割り当てます.



ツールバー [対料割当]

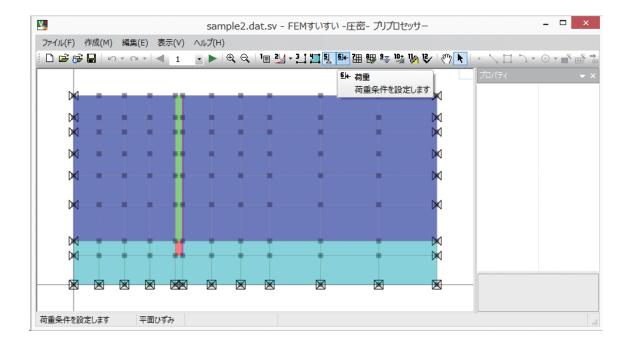
⑤変位境界条件の設定

拘束する場合は変位を [0] として入力する.



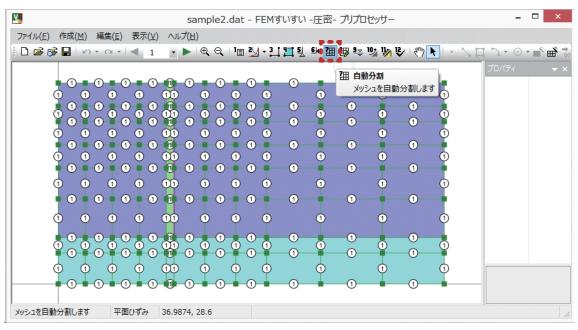
⑥荷重条件の設定

荷重を入力します. 荷重設定方法としては集中荷重があります.



⑦メッシュ自動分割

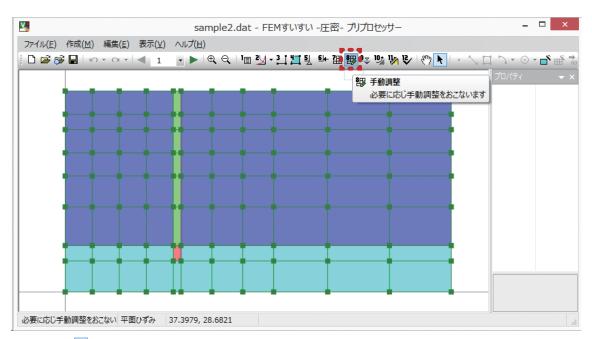
メッシュを自動分割します.



ツールバー [1 自動分割]

⑧手動調整

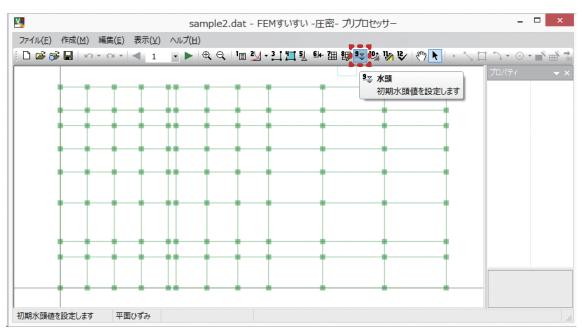
自動分割後,必要に応じ手動調整します.



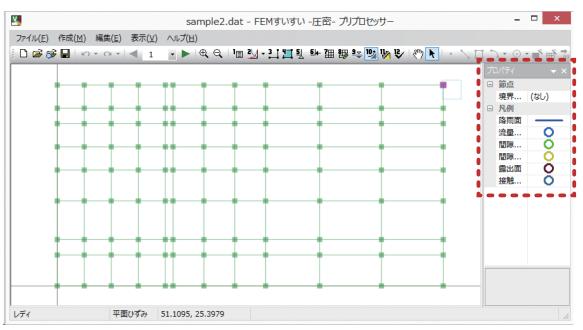
ツールバー [手動調整]

⑨水頭の設定

水頭を設定します.



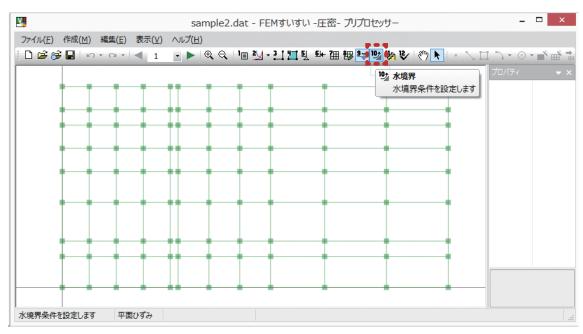
ツールバー [- 水頭]

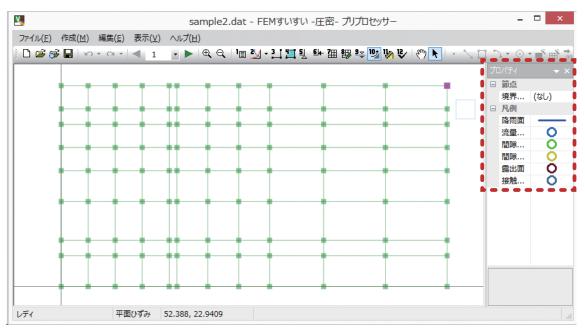


水頭の設定画面

⑩水境界条件の設定

水境界条件を設定します.

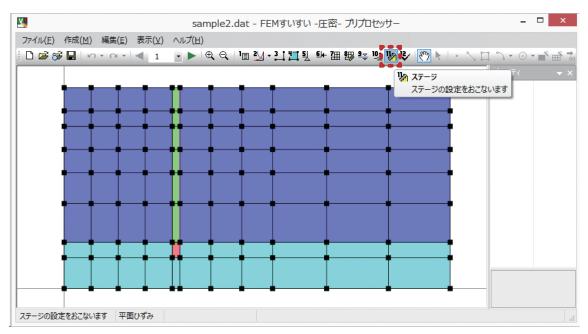




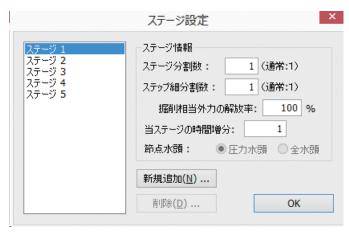
水境界条件の設定画面

⑪ステージの設定

掘削や盛土などのステージを設定します.



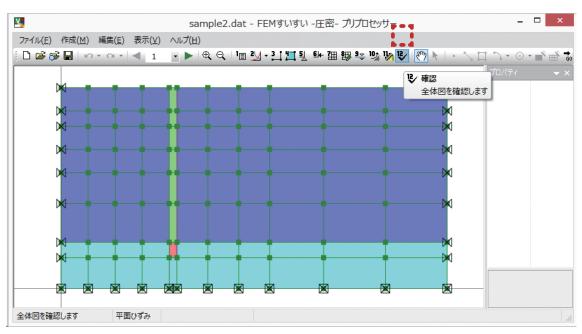
ツールバー [🥍 ステージ]



ステージ設定 ウィンドウ

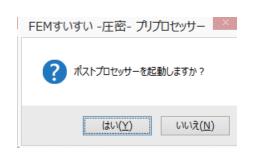
⑫解析の実行

データを確認し、データを保存して解析を実行します.



ツールバー [峰 確認]

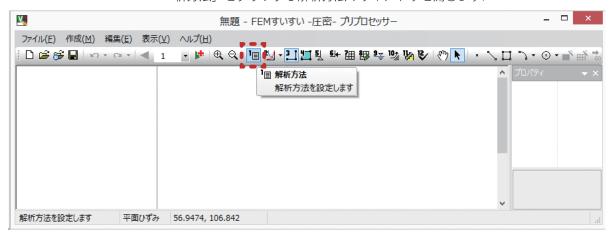




3-3 解析方法の設定

解析方法の設定をおこないます.

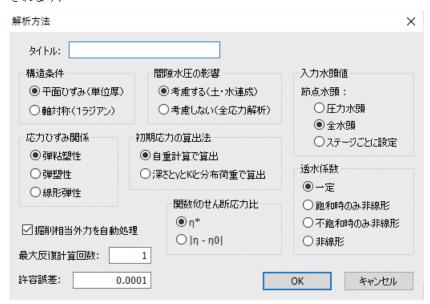
①メニューバーの「作成」の中の「解析方法」かまたは、ツールバーの [**1** 解析方法] をクリックし解析方法のウィンドウを開きます.



ツールバー [国 解析方法]

②ウィンドウ内で以下の解析方法の設定を行います.

ここで入力したタイトルはポストプロセッサーで出力する図の表題として出力 されます.



解析方法 設定ウィンドウ

まず、タイトルを入力します. ついで、解析方法を以下に示す各条件からラジ オボタンにより選択します.

構造条件 間隙水圧の影響 ○平面ひずみ(単位幅) 考慮する(土・水練線) ○軸対称(ラジアン) 考慮しない(全応力解析) 応力ひずみ関係 初期応力の算出法 ○弾粘塑性 ○自重計算で算出 ○線形弾性 ○深さと y と K と分布荷重で算出 ○線形弾性

関数のせん断応力比

- $\bigcirc \eta^*$
- $\bigcirc \mid \eta \eta^0 \mid$

入力水頭値

- 節点水頭:
 - ○圧力水頭
 - ○全水頭
 - ○ステージごとに設定

透水係数

- ○飽和時のみ非線形
- ○不飽和時のみ非線形
- ○非線形

さらに、以下の項目をチェックまたは数値を入力してせっていします.

□掘削相当外力を自動処理

掘削相当外力を自動処理するかどうかをチェックマークで選択します.

最大計算反復回数:

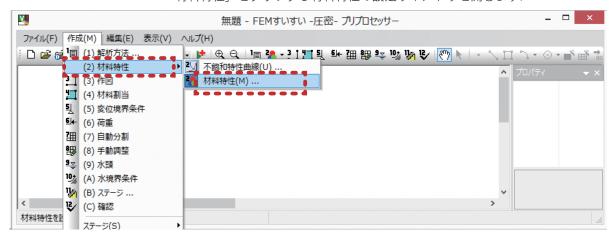
最大反復計算回数を設定します. 反復回数を超えても解が収束しない場合は,強制的に計算を打ち切ります. デフォルトとして1(推奨値)を与えています.

許容誤差:

収束の度合いを設定します. 大きいほど精度が悪くなりますが速く収束します. 小さすぎると過剰な反復計算が行われ、累積誤差を生じます. デフォルトとして $1e^{-005}$ (推奨値) を与えています.

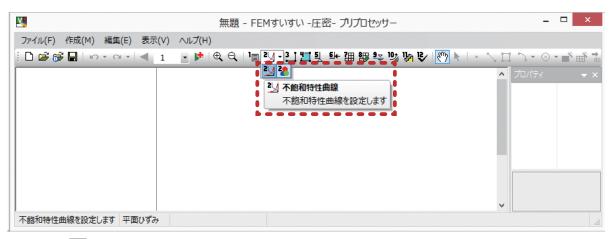
3-4 材料特性の設定

材料特性の設定をおこないます.

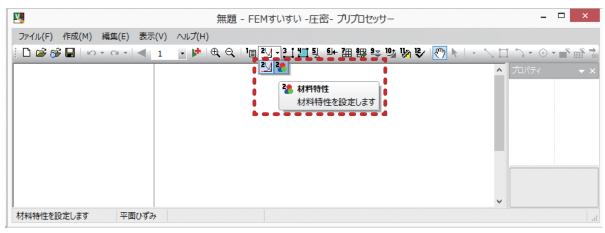


メニュバー「作成」-「(2) 材料特性」-「🔼 材料特性」

②材料特性の設定項目としては、不飽和特性曲線と材料特性の2種類があり、各々選択して設定を行います.



ツールバー [🛂 不飽和特性曲線]



ツールバー [🍱 材料特性]

3-4-1 不飽和特性曲線

不飽和特性曲線としては

- ①関数定義
- ②テーブル定義
- の2種類から選択できます.
- 不飽和特性入力ウィンドウ・



不飽和特性曲線 設定ウィンドウ

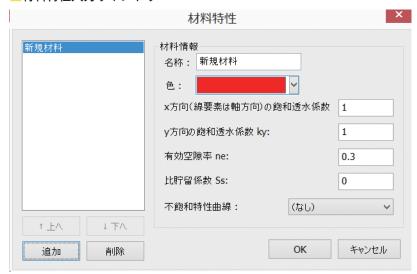
不飽和特性曲線は対象物ごとに実験等で求めるべきですが、それができないときのために、4種類の代表的な不飽和特性曲線をプログラム内部に用意しあります。しかし、これらは、ある特定の地盤の不飽和特性であり、汎用的に当てはまるものでないことに注意する必要があります。

用意してある不飽和特性曲線番号			1	2	3	4
想定している地質			細砂	砂質土	沖積土	関東ローム
	$ \phi c $	(m)	0.09	0.3	0.1	0
	а	(m)	0.09	0.3	0.5	1.5
物質値	Sr	(%)	0	40	62	50
	Sk	(%)	0	38	62	50
	b	(-)	3.5	3.5	4.5	10

参考文献:「根切り工事と地下水一調査・設計から施工まで一, 土質工学会, pp.356-374」

3-4-2 材料特性値の入力

必要な入力項目が表示されます. ここで,表示された材料(物性)値として透水係数,有効間隙率,比貯留係数を入力します. また,不飽和特性曲線の有無を指定します.



材料特性 設定ウィンドウ

3-5 解析対象の作図

3-5-1 作図とは

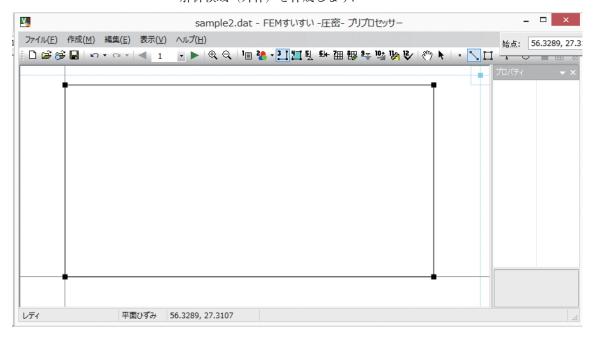
解析をおこなうに当たり、解析対象の形状を作図する必要があります.

作図とは、解析の対象とする物体の幾何学的形状を図に表していく作業のことです。この図は、基本的に2つの点とそれらの間の直線または曲線で構成されます。

どんな複雑な図面を作図するときも、基本的には幾つかの単純な図形を組み合わせて作図していきます。この単純な図形として、点、線分、BOX (四角形)、円弧、円の5 種類があります。

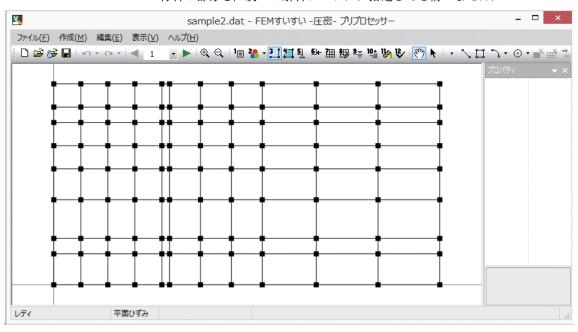
作図をするには以上の五つの作図コマンドを使用し、概ね以下の手順で進めます.

①解析領域(外枠)の作成 解析領域(外枠)を作成します.



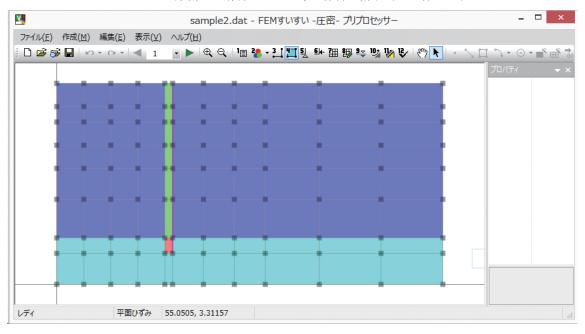
②解析ブロックの分割

①で作成した解析領域に材料の違う範囲(地層線等)を入れ、解析領域を複数のブロック(解析ブロックと呼ぶ)に分割します。ただし、同じ施工範囲や同じ材料の部分を、別々の解析ブロックに指定しても構いません。



③材料特性の割り当て

分割した解析ブロック毎に材料の割り当てを行います.



3-5-2 作図に役立つ機能

作図にあたって役立つ機能を紹介します.

グリッドとは、図面を作図するにあたり方眼紙のような任意の間隔で点(方眼)を表示する機能で、メニューバーの表示の中のグリッドをクリックして表示/非表示を選択します。また、メニューバーの「表示」の中の「オプション」を選択して表示される画面から有効/無効および間隔を設定します。



ツールバー [6] グリッド]



メニューバー 「表示」 - 「オプション (O)」



オプション 設定ウィンドウ

拡大・縮小・

マウスホイールを前に回転させると拡大、後ろに回転させると縮小されます。 また、ツールバーの �� をクリックすると、それぞれ拡大または縮小されます。 さらに、メニューバーの「表示」の中の拡大表示(+)または縮小表示(-)を 選択しても同様です。



移動

ツールバーの
できます。また、マウスホイールを押したままドラッグすることでも同様のことができます。



ツールバー [移動]

選択

点,線分,解析ブロックを選択するためにはツールバーの ▶ をクリック後,対象物をクリックするとそれらを選択することができます. [Ctrl] キーを押しながらクリックすると、複数の対象物を選択できます. また、マウスの左ボタンを押しながらドラッグして広範囲の対象物を一度に選択することもできます. 選択された対象物は、ピンク色で表示されます.



ツールバー「 🕨 選択」

UNDO · REDO · · · · · · · · ·

ツールバーの が か が 、それぞれ UNDO・REDO に対応しています。また、メニューバーの「編集」の中の「元に戻す」「やりなおし」をクリックすることでも同様です。



ツールバー「 rar ar UNDO・REDO」

数値入力が可能な場合は、ウィンドウが自動的に開き数値入力ができます.このウィンドウが開いている状態で、キーボードより入力します.データを2個入れるときは(例えば XY 座標など)数値の間に「スペースか、(カンマ)」を入れます.

座標: 100,100 確定

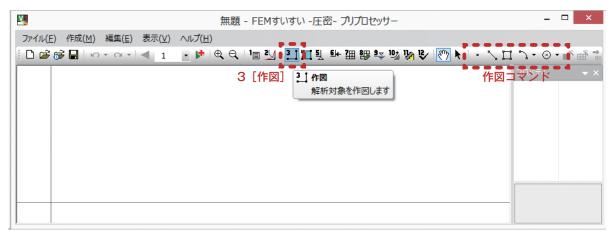
3-5-3 作図コマンド

(1) 作図コマンドについて

作図とは、解析の対象とする物体の幾何学的形状を図に表していく作業のことです。この図は、基本的に2つの点とそれらの間の直線または曲線で構成されます。

どんな複雑な図面を作図するときも、基本的には幾つかの単純な図形を組み合わせて作図していきます。この単純な図形として、点、線分、BOX (四角形)、円弧、円の5種類があります。

作図をするには、ツールバーの [作図] をクリックし作図モードに切り替え、次いで5種類の作図コマンドの中から選択してクリックします.

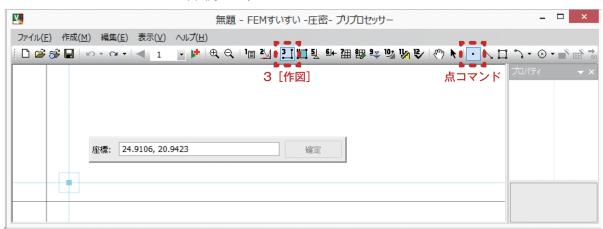


ツールバー [作図] - [節点・線・矩形・円弧・円]

(2) 作図コマンド

点 点を作図します.

- ①メニューバーの「作成」の中の「作図」かまたは、ツールバーの[1]作図]をクリックし画面を作図モードに切り替え、次いで[・点]をクリックします.
- ②数値入力のウィンドウが表示されます.
- ③ X 座標, Y 座標をスペースまたは「,」で区切って各々の座標値をキーボードより入力します.



ツールバー [作図] - [・ 点]

- ①メニューバーの「作成」の中の「作図」かまたは、ツールバーの[11作図]をクリックし画面を作図モードに切り替え、次いで[13線]をクリックします.
- ②数値入力のウィンドウが表示されます.
- ③ X 座標, Y 座標をスペースまたは「,」で区切って各々の座標値をキーボード より入力します.
- ④続けて入力を繰り返します.
- ⑤終了したいときは別のコマンドを選択すれば、そちらへ移行します.

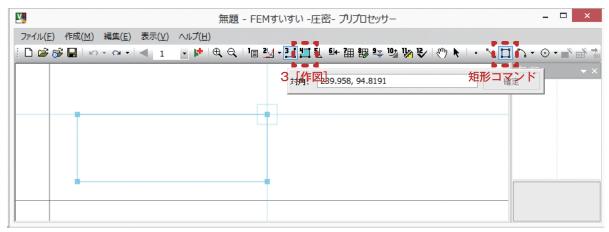


ツールバー [作図] - [線]

矩形 …………

矩形を作図します.

- ①メニューバーの「作成」の中の「作図」かまたは、ツールバーの[**!**]作図]をクリックし画面を作図モードに切り替え、次いで[**ロ**矩形]をクリックします.
- ②数値入力のウィンドウが表示されます.
- ③ X 座標、Y 座標をスペースまたは「、」で区切って各々の座標値をキーボードより入力します。
- ④続けて入力を繰り返します.
- ⑤終了したいときは別のコマンドを選択すれば、そちらへ移行します.

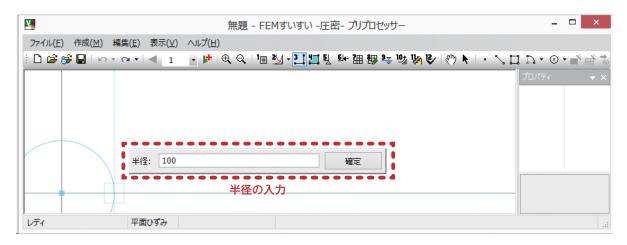


ツールバー [作図] - [矩形 🗀]

中心, 半径, 角度で円弧を作図します.

- ①メニューバーの「作成」の中の「作図」かまたは、ツールバーの[11作図]をクリックし画面を作図モードに切り替え、次いで[11円弧]の中から中心/半径/角度をクリックします。
- ②数値入力のウィンドウが表示されます.
- ③中心の X 座標, Y 座標をスペースまたは「,」で区切って各々の座標値をキーボードより入力します.
- ④続けて半径,角度の順に入力します.
- ⑤終了したいときは別のコマンドを選択すれば、そちらへ移行します.



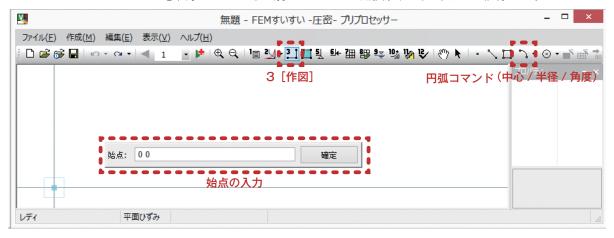




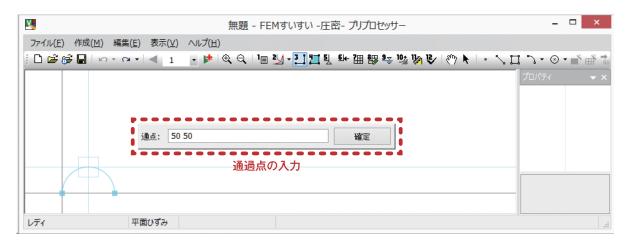


始点,終点,通過点で円弧を作図します.

- ①メニューバーの「作成」の中の「作図」かまたは、ツールバーの[11作図]をクリックし画面を作図モードに切り替え、次いで[11円弧]の中から11始点/終点/通過点をクリックします。
- ②数値入力のウィンドウが表示されます.
- ③始点の X 座標、 Y 座標をスペースまたは「,」で区切って各々の座標値をキーボードより入力します.
- ④続けて終点、通過点の順に入力します.
- ⑤終了したいときは別のコマンドを選択すれば、そちらへ移行します.

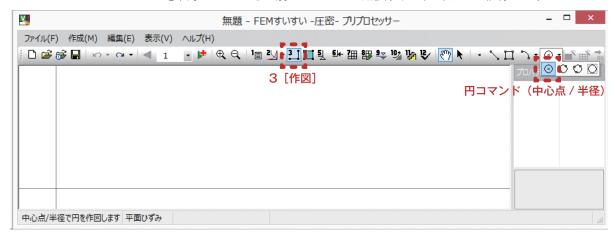






中心点, 半径で円を作図します.

- ①メニューバーの「作成」の中の「作図」かまたは、ツールバーの[**!**]作図]をクリックし画面を作図モードに切り替え、次いで[②円]の中から③中心点/半径をクリックします。
- ②数値入力のウィンドウが表示されます.
- ③中心点の \times 座標、 \times 座標をスペースまたは \cdot 、」で区切って各々の座標値をキーボードより入力します.
- ④続けて半径を入力します.
- ⑤終了したいときは別のコマンドを選択すれば、そちらへ移行します.



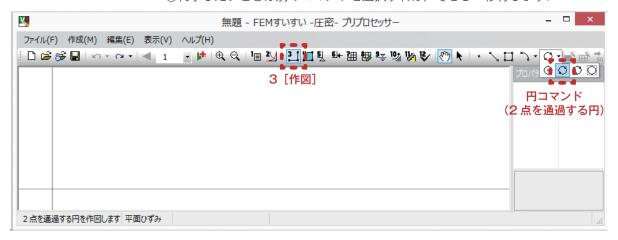




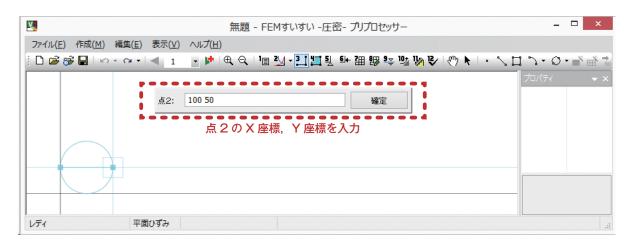
円(方法2) …………

2点を通過する円を作図します.

- ①メニューバーの「作成」の中の「作図」かまたは、ツールバーの[11作図]をクリックし画面を作図モードに切り替え、次いで [②円] の中から ② 2 点を通過する円をクリックします.
- ②数値入力のウィンドウが表示されます.
- ③点 1 の X 座標, Y 座標をスペースまたは「、」で区切って各々の座標値をキーボードより入力します.
- ④続けて点2を入力します.
- ⑤終了したいときは別のコマンドを選択すれば、そちらへ移行します.

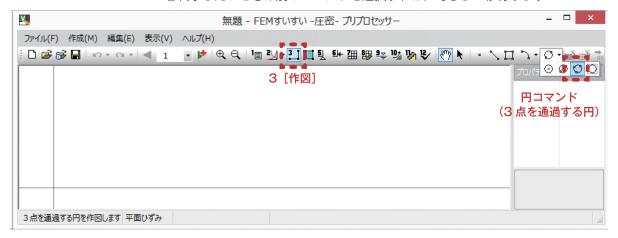


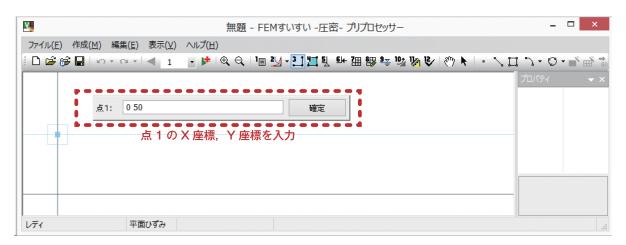


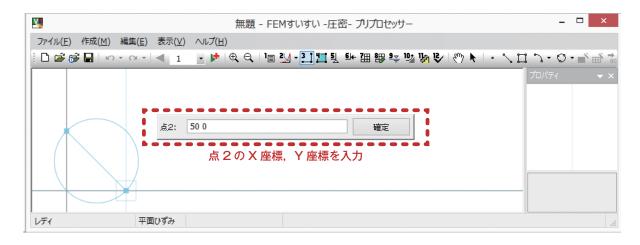


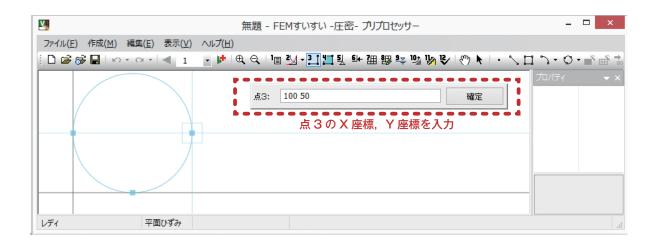
3点を通過する円を作図します.

- ①メニューバーの「作成」の中の「作図」かまたは、ツールバーの[1]作図]をクリックし画面を作図モードに切り替え、次いで[②円]の中から②3点を通過する円をクリックします。
- ②数値入力のウィンドウが表示されます.
- ③点1のX座標, Y座標を入力します.
- ④点2の X 座標, Y 座標をスペースまたは「,」で区切って各々の座標値をキーボードより入力します.
- ⑤続けて点3を入力します.
- ⑥終了したいときは別のコマンドを選択すれば、そちらへ移行します.





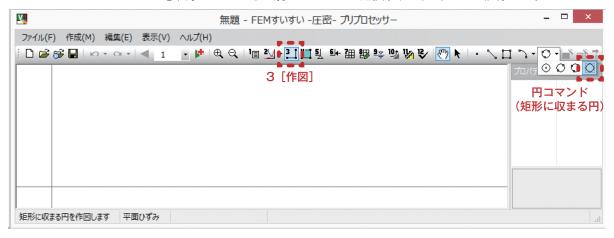




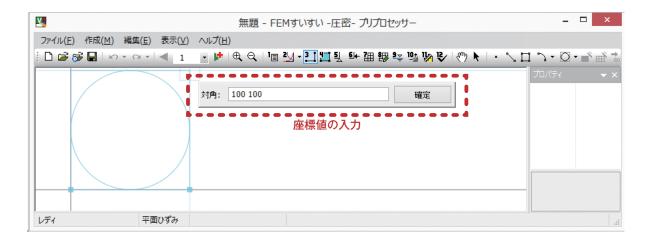
円 (方法4)

矩形に収まる円を作図します.

- ①メニューバーの「作成」の中の「作図」かまたは、ツールバーの [1]作図] をクリックし作図モードに切り替え、次いで [③円] の中から ②矩形に収まる円をクリックします.
- ②数値入力のウィンドウが表示されます.
- ③点 1 の X 座標、Y 座標をスペースまたは「,」で区切って各々の座標値をキーボードより入力します.
- ④続けて点2を入力します.
- ⑤終了したいときは別のコマンドを選択すれば、そちらへ移行します.





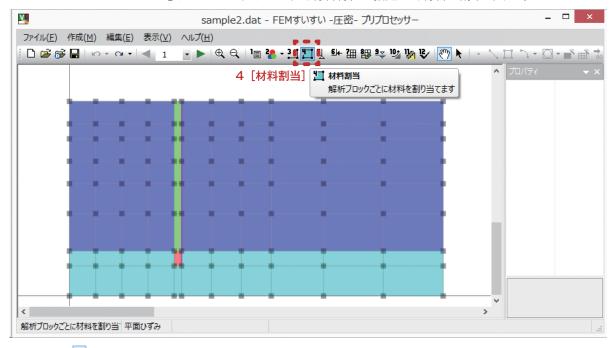


3-6 材料特性の割り当て

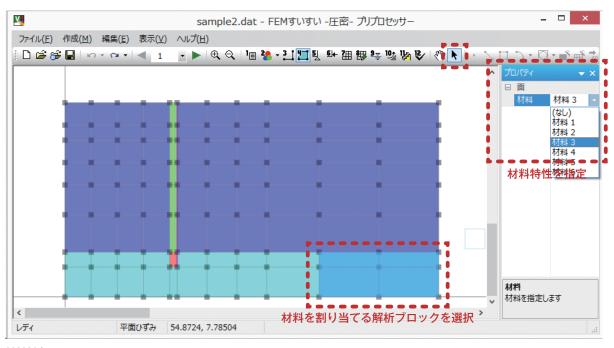
あらかじめ「3-4 材料特性の設定」で定義しておいた材料特性を当該位置の解析ブロックに割り当てます.

解析ブロック毎に面要素および線要素の材料特性を割り当てます.

- ①メニューバーの「作成」の中の「材料割当」かまたは、ツールバーの [**1**] 材料割当]をクリックし画面を材料割り当てモードに切り替えます.
- ②ツールバーの [選択 ►] をクリック後、材料特性を割り当てる解析ブロックをクリックします.
- ③プロパティウィンドウで材料特性を指定して材料を割り当てます.



ツールバー [| 材料割当]

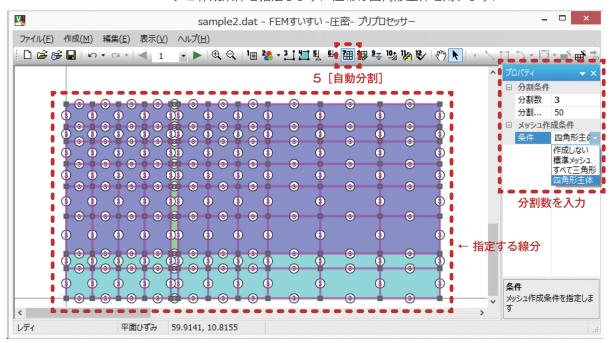


材料割当 画面

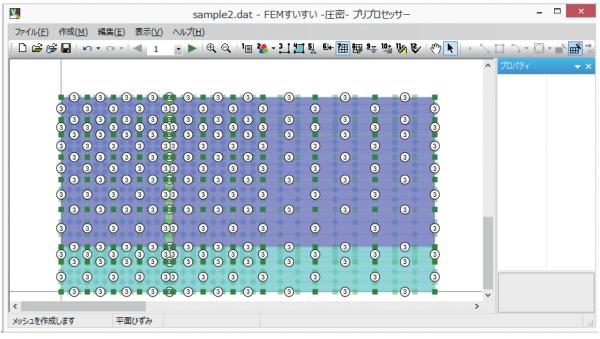
3-7 メッシュ分割

3-7-1 分割数指定による自動分割

- ②分割数を指定する線分をクリックしてから、プロパティウィンドウで分割数を 指定します.
- ③自動分割する解析ブロックをクリックしてから、プロパティウィンドウでメッシュ作成条件を指定します。通常は四角形主体を用います。



自動分割 設定画面



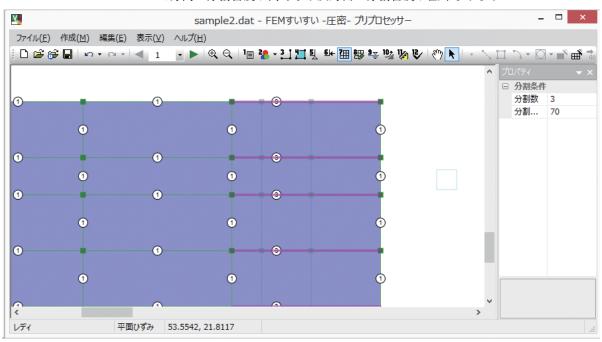
メッシュ作成条件 設定画面

④ツールバーの [★メッシュ作成] をクリックします.

分割比率でメッシュ密度を調整する方法

初期状態では分割比率は線分の中心 (50%) にあり、この場合メッシュは等間隔に生成されます。メッシュを徐々に細かくしたり粗くしたりしたい場合は、この分割比率により調整します。

分割比率はプロパティウィンドウに直接入力するか、または線分上の分割数表示をドラッグして動かすことによって変えることもできます。その場合、動かした方向の分割密度が高くなり反対側の分割密度が低くなります。



メッシュ作成条件 設定画面

分割数表示のサイズ変更

メニューバーの「表示」の中の「オプション」を選択して表示される画面から 設定します.

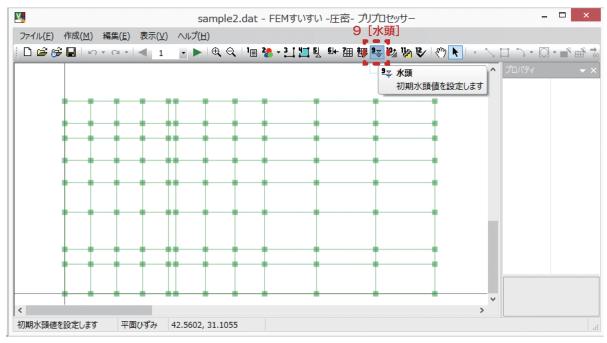


オプション 設定画面

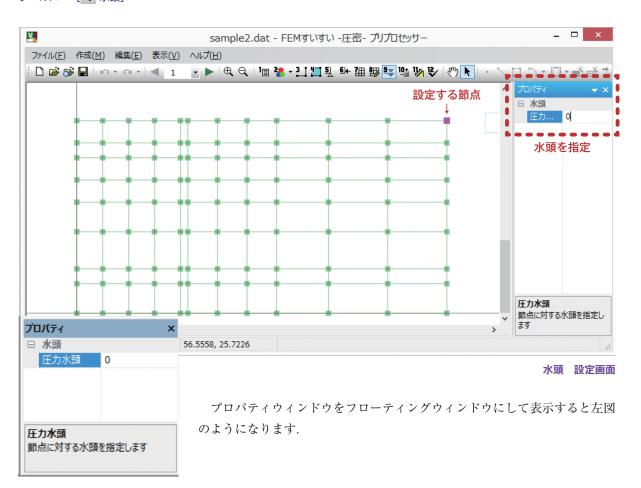
3-8 水頭条件の設定

水頭は各節点に設定します.

- ①メニューバーの「作成」の中の「水頭」かまたは、ツールバーの [** 水頭] をクリックし画面を水頭入力モードに切り替えます.
- ②図面中で水頭を与える点をクリックします.
- ③プロパティウィンドウで水頭の値を入力します.



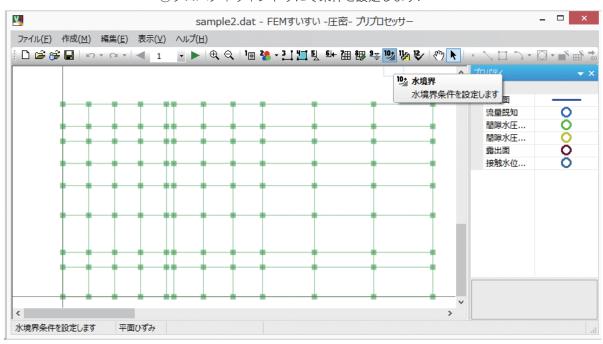
ツールバー [🛂 水頭]

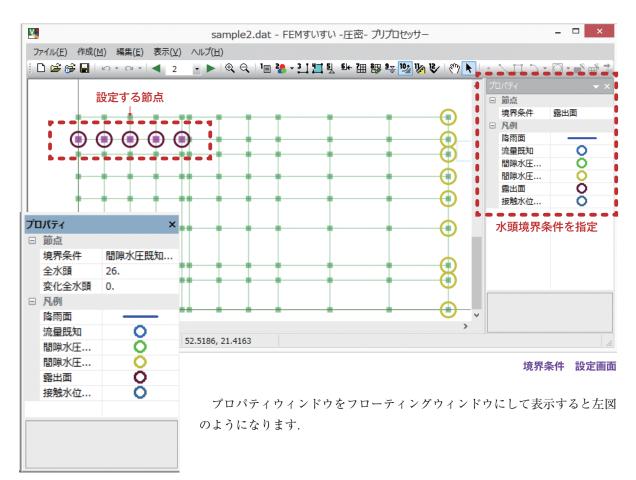


3-9 水境界条件の設定

水境界条件の指定方法として点に指定する方法と線分に指定する方法があります.

- ①メニューバーの「作成」中の「水境界」または、ツールバーの [*** 水境界] をクリックし画面を境界モードに切り替えます.
- ②画面上で設定したい点および線をクリックします.
- ③プロパティウィンドウにて条件を設定します.



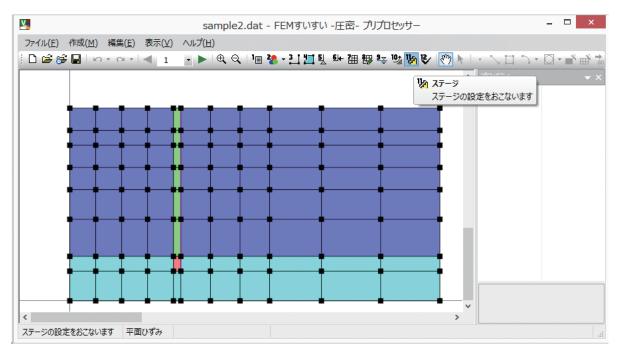


3-10 解析ステージの設定

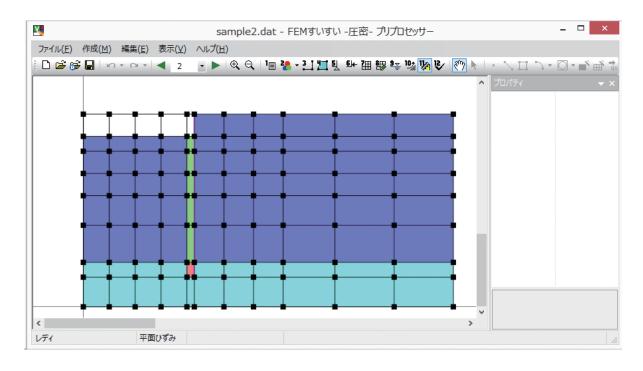
3-10-1 解析ステージとは

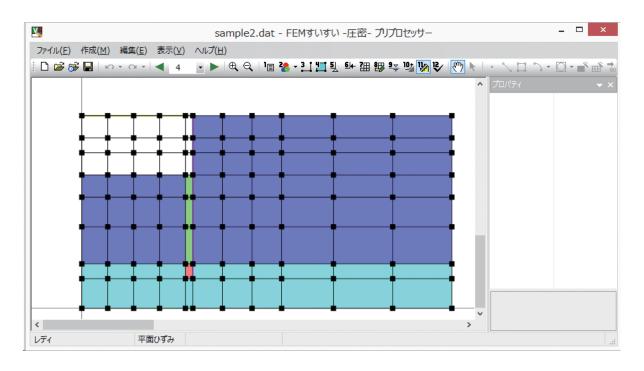
建設工事では掘削や盛土等がよく行われますが、**2次元地盤解析システム** 「FEM すいすい一圧密一」では、そのような施工をしたときの圧密解析を簡単に行うことができます。ここで、施工前のいわゆる初期状態が必要になりますので、施工段階の解析を行う前には先ず初期状態解析を行う必要があります。

初期状態解析を行ったら、次ステージ以降で解析対象に加えられる施工の内容を設定し、その施工による応力・変形・浸透流の変化を伴う圧密挙動を追跡することになります。これをステージ解析と言います。ステージ解析で設定できる施工は、要素削除による掘削、要素追加による盛土や材料特性の変更による地盤改良などです。



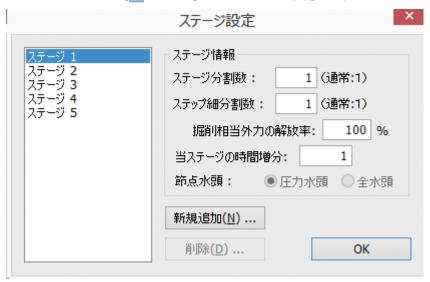
メニューバー「作成」-「(9) ステージ 🧞」





3-10-2 解析ステージの設定

解析ステージの設定は、メニューバーの「作成」の中の [**№** (9) ステージ] かまたはツールバーの [**№** ステージ] をクリックして設定します.

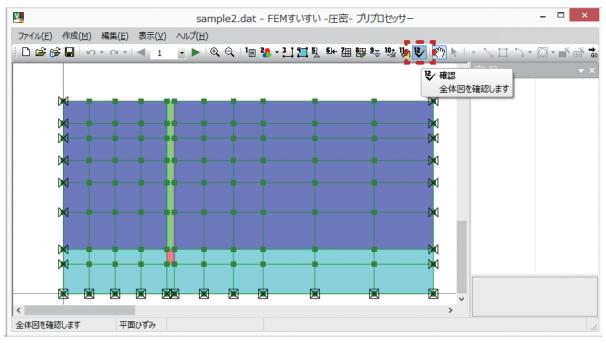


ステージ設定 ウィンドウ

解析結果出力の時間間隔=当ステージの時間増分/ステージ分割数 解析ステップの時間間隔=解析結果出力の時間間隔/ステップ細分割数

3-11 解析の実行

- ①メニューバーの「作成」の中の「確認」かまたは、ツールバーの [**♥** 確認] をクリックし画面を確認モードに切り換えます.
- ②ツールバーの [GO!] をクリックします.
- ③図面保存の確認ウィンドウが表示されるので、「OK」をクリックします.
- ④解析が実行され、「はい」をクリックするとポストプロセッサーが起動します.



ツールバー「作成」- 「(10) 確認 🕓 📗

第4章 ポストプロセッサー

解析結果をビジュアルに表現し、また解析結果の数値情報を取得しエクセルな どへの出力をします.

4-1 起動と終了

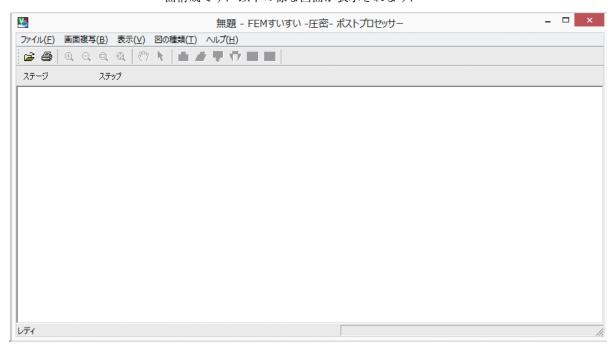
起動の方法

パソコンには USB プロテクトキーを付けておきます.

- ① Windows を起動して、タスクバーの「スタート」をクリックします.
- ②「プログラム」にカーソルを合わせます.
- ③サブメニューから「**FEM すいすい一圧密一**」のポストプロセッサーを選択してクリックします.

画面構成

プリプロセッサーと同様に、メニューバーとツールバーを利用した標準的な画 面構成です.以下の様な画面が表示されます.



標準的な画面構成

終了方法

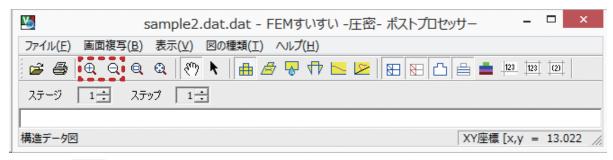
①ファイルメニューから「終了」を選択してクリックします.

4-2 解析結果の表示

4-2-1 役立つ機能

解析結果の表示にあたって役立つ機能を紹介します.

マウスホイールを前に回転させると拡大、後ろに回転させると縮小されます。 また、ツールバーの [\oplus \ominus] をクリックすると、それぞれ拡大または縮小されます。



ツールバー [① 〇 拡大・縮小]

■移動⋯⋯⋯

ツールバーの [⑦] をクリック後、ドラッグすることにより図面、タイトル表示、凡例表示、注釈表示を移動することができます。また、マウスホイールを押したままドラッグすることでも同様のことができます。



ツールバー [(***) 移動]

表示中の画面の画角を保存したい場合には、メニューバーの「表示」の中の「画角の保存」を選択します.次に、保存した画角を読み込むには「画角の読込」を選択します.

報告書用に各種結果図の画角を揃えたい場合には便利な機能です.



メニューバー「表示 (V)」-「画角の保存 (V)」

4-2-2 解析結果の表示

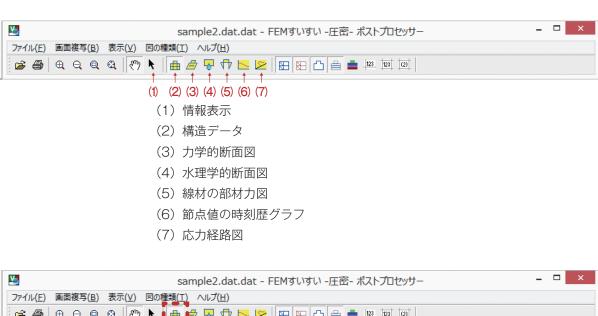
「FEM すいすい一圧密一」のポストプロセッサーでは以下の解析結果図を表示することができます。

解析結果の表示手順は以下の通りです.

- ①ツールバーより表示したい結果の種類をクリックします
- ②ツールバーより表示したいステップを選択します.

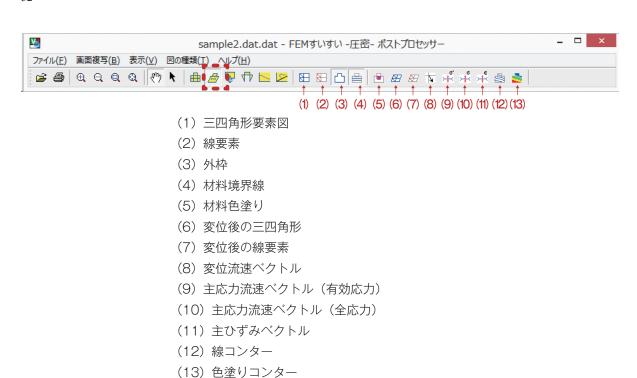


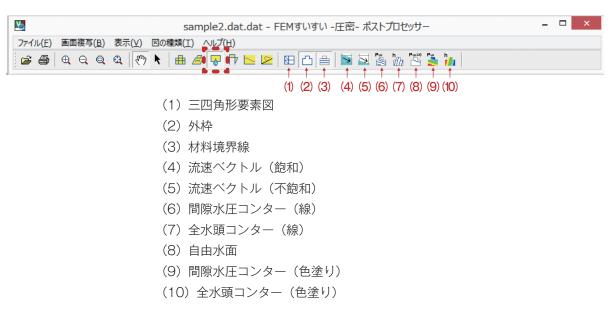
表示する項目はアイコン順に以下のようになります.





- (2) 線要素
- (3) 外枠
- (4) 材料境界線
- (5) 材料色塗り
- (6) 節点番号
- (7) 要素番号
- (8) 材料番号







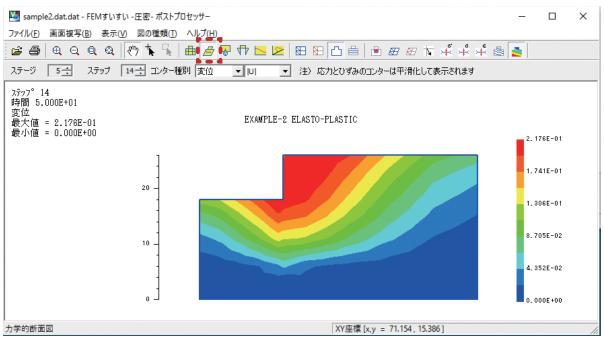




圧密解析計算結果の出力例を示します.

メニューバーの「図面の種類」の「力学的断面図 (S)」またはツールバーの「力学的断面図 \triangle 」をクリックします.

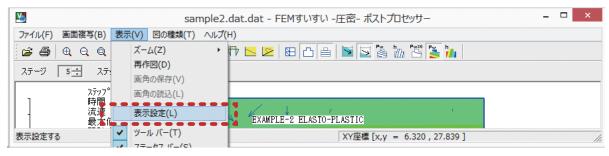
ここでは、ステージ 9 (ステップ 26) の変位量を色塗りコンター図にて表示してみます.



変位量(コンター・色塗り)

4-2-3 表示の設定

力学的断面図や水理学的断面図の出力に対応した表示設定を行います.

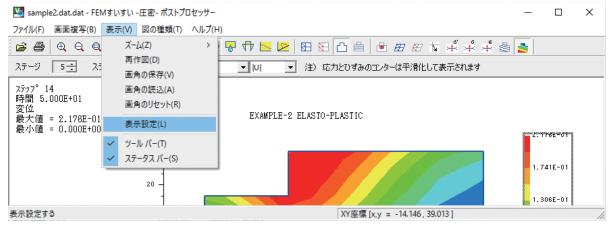


メニューバー「表示 (<u>V</u>)」 - 「表示設定 (L)」

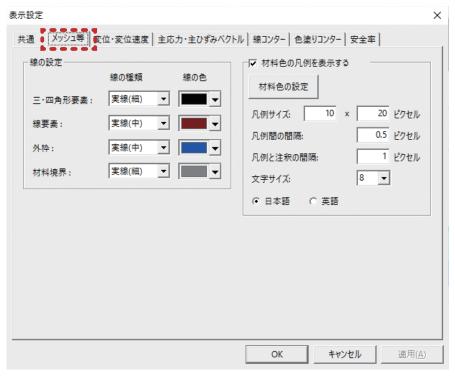
タイトルや座標目盛の表示など全結果図に「共通」の表示項目の他,「メッシュ等」「変位・変位速度」「主応力・主ひずみベクトル」「線コンター」「色塗りコンター」「安全率」の設定項目がありあます.



共通



表示設定



メッシュ等



変位・変位速度

表示設定	×
共通 メッシュ等 変位・変位速度 主応力・主びずみベクトル 第コンター 日	5塗りコンター 安全率
線の種類 線の色 実線(細) ▼ 主ひずみの. 引張: 実線(細) ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼	Rケール目盛を表示する スケール目盛を表示する スケール文字サイズ: 9 ▼
OK	キャンセル 適用(A)

主応力・主ひずみベクトル

表示設定	×
共通 メッシュ等 変位・変位速度 主応力・主ひずみベクトル 禁コンター 色塗りコンター 安全率	
共通 線の種類 線の色	
線の種類 線の色	
主線: ▼ 実線(中) ▼ ■■■ ▼	
補助線: ▼ 東線(細) ▼	
種別: - 変位 ▼	
主線数値の小数点以下表示桁数: 1 :	
表示範囲(最大値~最小値): 0 ~ 0	
コンター値の間隔 主線: 0.5	
補助線: 0.1	
OK キャンセル 適用(A	D (

線コンター



色塗りコンター



安全率

4-3 解析結果の利用

4-3-1 変位量

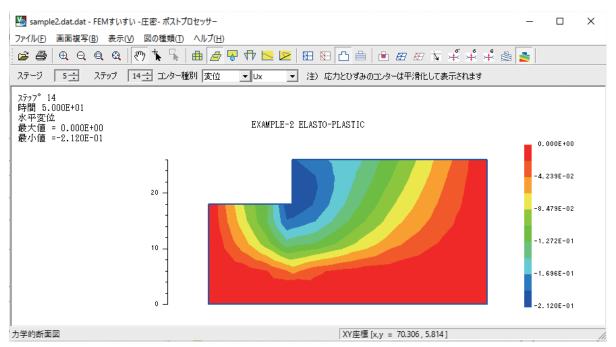
変位図は直感的に理解しやすいので非常に有効です。データの入力ミスなどの チェックにも役立ちます.

まず、前述した表示の設定から行いますが、「変位・変位速度」の設定で線やスケールの設定を行います。さらに、「線コンター」「色塗りコンター」の設定で表示する種別(変位、ひずになど)に対応して線や色を設定します。

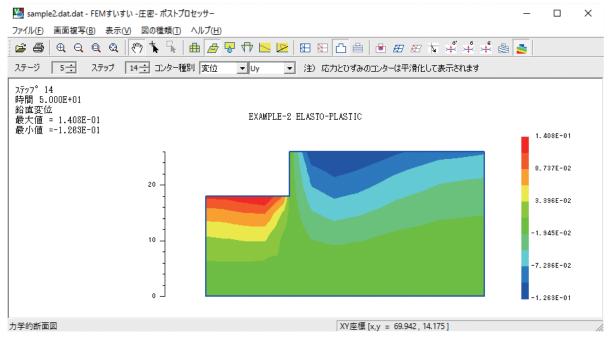
4-3-2 コンター図

コンター図は線コンター図と色塗りコンター図があります。補間を多用して表示しているため精度には欠けますが、変位やひずみおよび安全率などの分布を定量的に捉えることが出来ます。解析のチェックにも有効です。コンター図は目盛りを区切りの良い値にしておくと値を定量的に捉え易くなります。

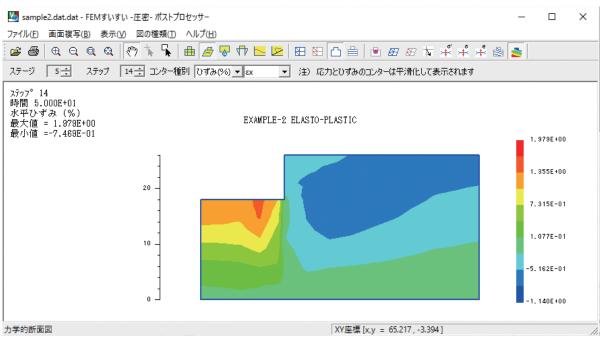
以下に変位量,色塗りコンター図の x 方向, y 方向およびひずみを示す.



変位量コンター図(Ux)



変位量コンター図(Uy)



ひずみコンター図

第5章解析例

解析手順はおおむね以下に示すような流れによって行います.必ずしも手順通りに行う必要はありませんが、場合によっては入力を行った後でなければ操作ができない場合もあります.

- ①解析方法の設定
- ②材料特性の設定
- ③解析対象の作図
- ④材料特性の割り当て
- ⑤変位境界条件の設定
- ⑥荷重の設定
- ⑦メッシュ分割
- ⑧初期水頭値の設定
- ⑨水境界条件の設定
- ⑩解析ステージの設定
- ⑪解析の実行

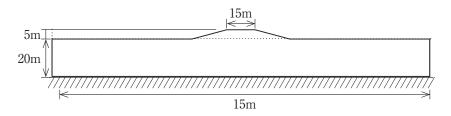
例としては、盛土施工に伴う圧密沈下を取り上げて説明します.

5-1 盛土による圧密沈下

盛土による圧密沈下量を求めます.

5-1-1 解析条件

ここでは下図 に示すような盛土について 4 段階にて施工を行う場合の圧密沈 下計算をします.

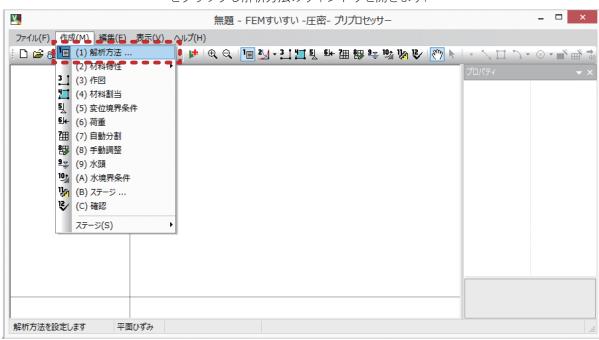


5-1-2 解析手順

(1)解析方法の設定

解析方法の設定をおこないます.

①メニューバーの「作成」の中の「解析方法」かまたは、ツールバーの [解析方法] をクリックし解析方法のウィンドウを開きます.



メニューバー 「作成」―「🔳 (1)解析方法」

②解析方法を以下のように設定します.

まず、タイトルを「盛土施工圧密沈下」と入力して、「平面ひずみ」応力ひず み関係を「弾粘塑性」間隙水圧の影響を「考慮する」

- ○初期応力の算出法を「深さとyと Ki と分布荷重で算出」に入力水頭値を「全水頭」
- ○透水係数を「不飽和時のみ非線形」に関数のせん断応力比を「 η *」掘削相 当外力を自動処理にチェックを入力
 - ○最大反復回数を「10」に許容誤差を「0.0001」と入力します.

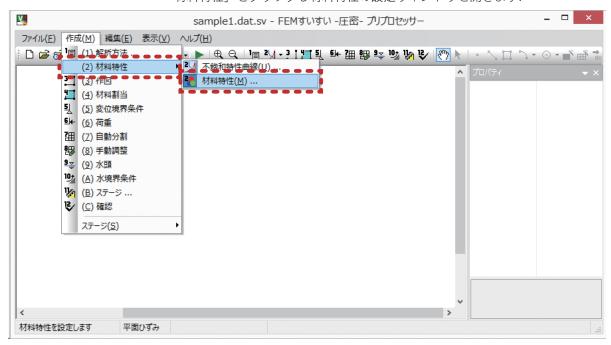


解析方法設定 ウィンドウ

(2) 材料特性の設定

材料特性の設定をおこないます.

①メニューバーの「作成」の中の「材料特性の設定」かまたは、ツールバーの [*****] 材料特性 をクリックし材料特性の設定ウィンドウを開きます.



メニューバー 「作成」―「(2) 材料特性」―「🛂 材料特性」

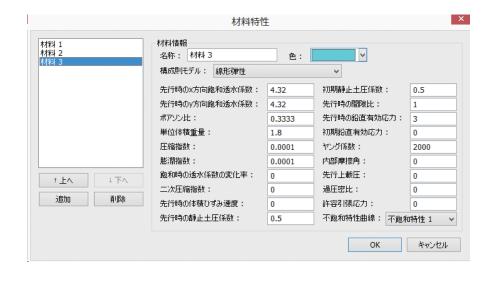
②材料特性を以下のように設定します.

ここでは、材料名を「材料 1」「材料 2」「材料 3」とし、3 種類の材料を 0 を入力して OK をクリックします。



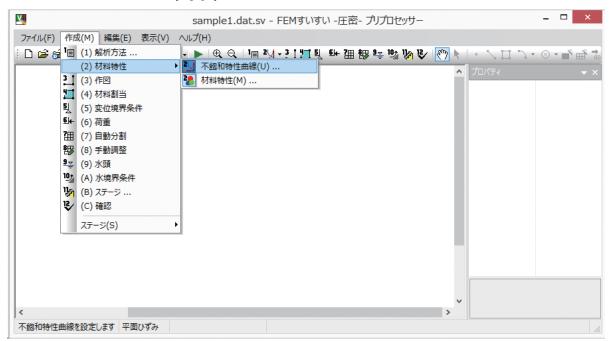
材料特性設定 ウィンドウ

	材料特性	±		
材料 1 材料 2 材料 3	材料情報 名称: 村料 2 構成則モデル: 引料を担性または	色: [V	
†上へ よ下へ 追加 削除	先行時のx方向飽和透水係数:	0.00864	初期静止土圧係数:	0.5
	先行時のy方向飽和透水係数:	0.00864	先行時の間隙比:	1.2
	ポアソン比:	0.3333	先行時の鉛直有効応力:	5.5
	単位体積重量:	1.6	初期鉛直有効応力:	1.5
	圧縮指数:	0.32	ヤング係数:	100
	膨潤指数:	0.06	内部摩擦角:	40
	飽和時の透水係数の変化率:	0	先行上載圧:	4
	二次圧縮指数:	0.003	過圧密比:	0
	先行時の体積ひずみ速度:	1e-006	許容引張応力:	0
	先行時の静止土圧係数:	0.5	不飽和特性曲線:(なし)	~
			OK	キャンセル



③不飽和特性曲線の値を入力します.

ここでは、「不飽和特性 1」という名称で下図のように入力して OK をクリックします。

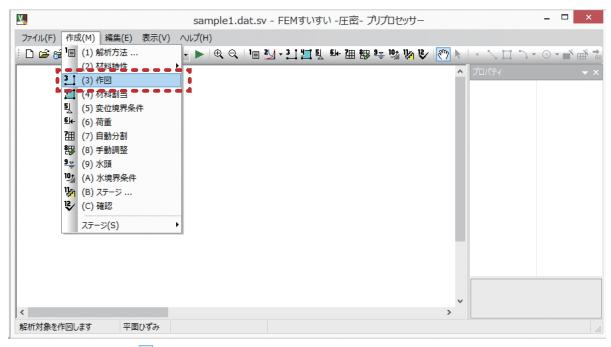




(3) 解析対象の作図

ここからは、解析対象の地盤や盛土を作図します。左右対称となっているため 右側半分のみをモデル化します。

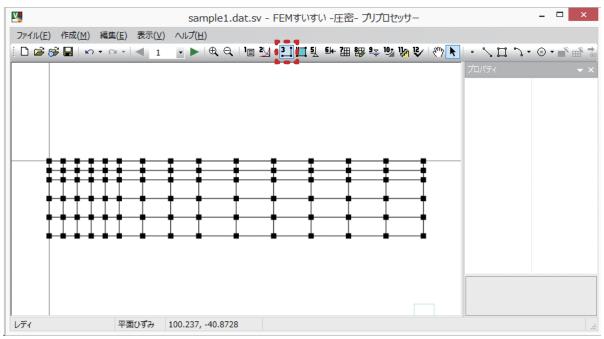
①メニューバーの「作成」の中の「作図」かまたは、ツールバーの [1] 作図] をクリックして作図モードに切り替えた後に作図コマンドを用いて解析対象を作図していきます.



メニューバー 「作成」 — 「 11 (3) 作図」

②基礎部の作図

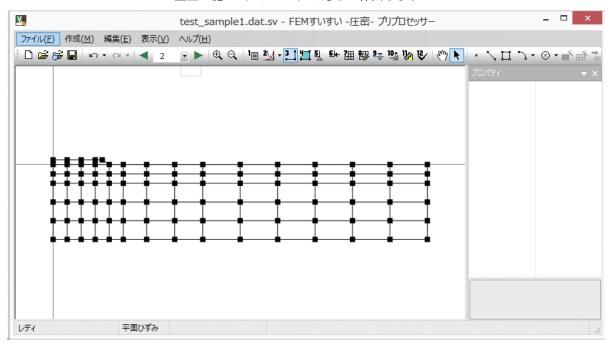
盛土に近い部分は小さめに離れた部分は荒くします.



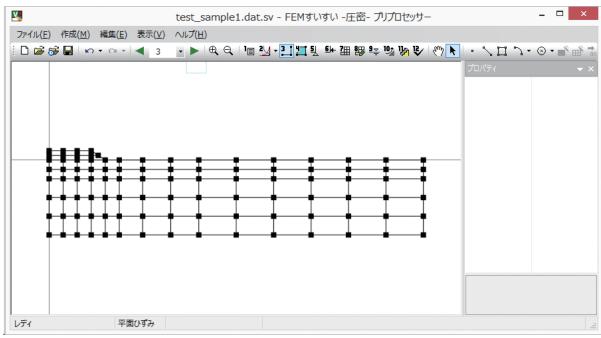
ステップ 1

③盛土部の作図

盛土の施工 (ステップ) に応じて作図します.

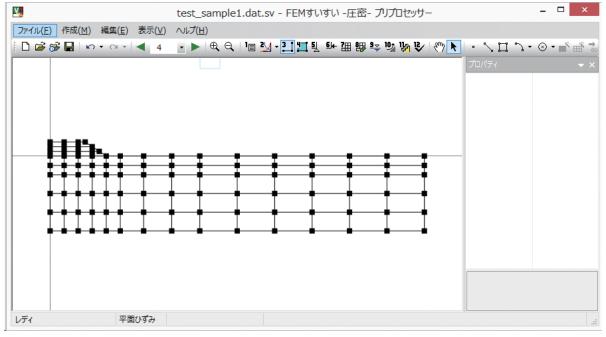


ステップ 2

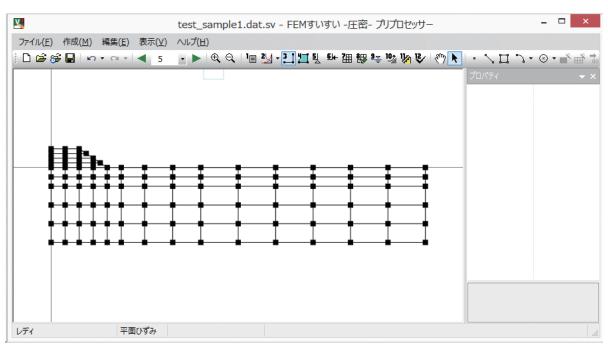


ステップ 3

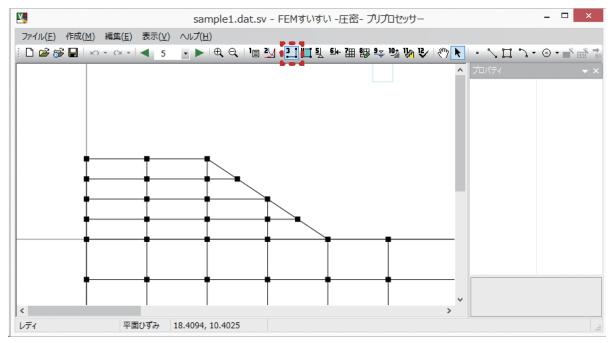




ステップ 4



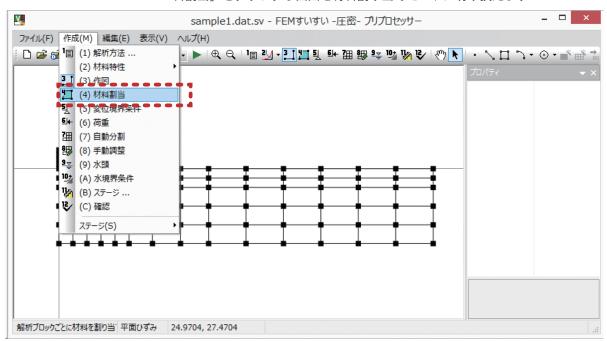
ステップ 5



ステップ 5

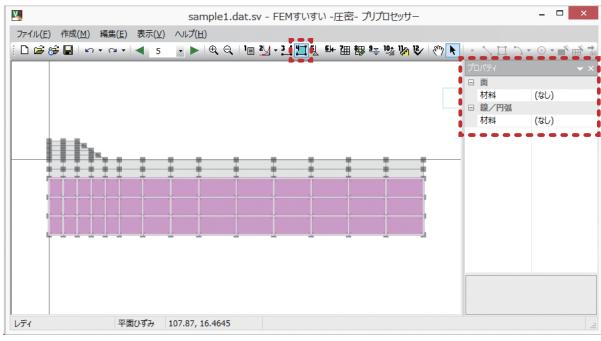
(4) 材料特性の割り当て

地盤,構造物の材料特性をそれぞれの位置の解析ブロックに割り当てます。 ①メニューバーの「作成」の中の「材料割当」かまたは、ツールバーの [] 材料割当]をクリックし画面を材料割り当てモードに切り換えます。



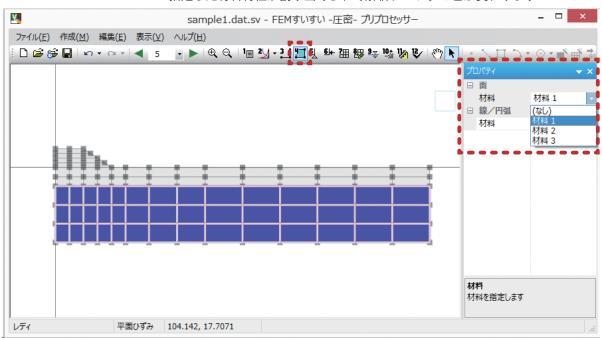
メニューバー 「作成」―「🍱 (4) 材料割当」

②材料特性の割り当てを行う解析ブロックをドラックします. すると, 選択されたブロックが赤く色が変わります.



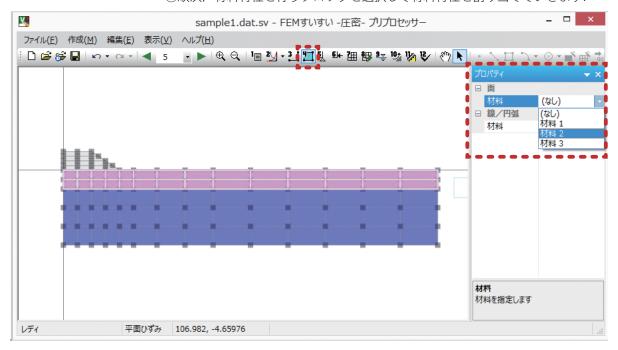
材料設定画面

③プロパティウィンドウで材料特性 [材料 1] を指定して材料を割り当てると、 指定した材料特性が割り当てられて解析ブロックの色が変わります。

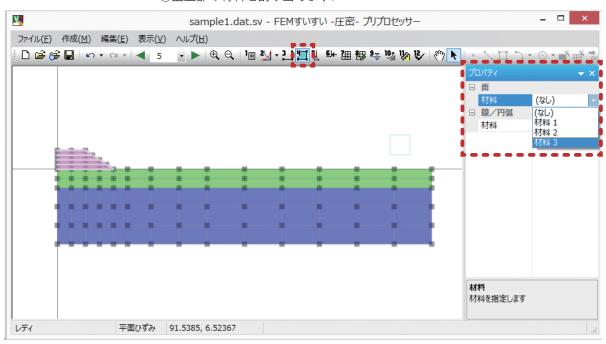


材料設定 終了

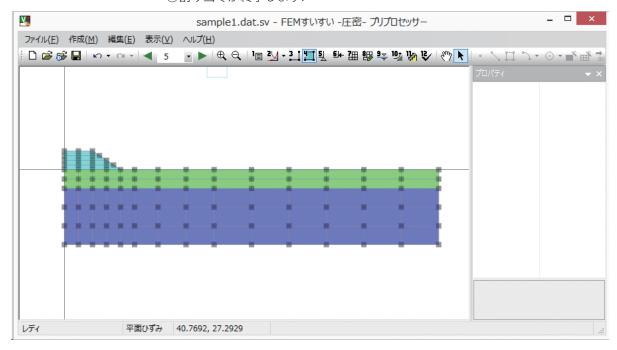
④順次、材料特性を行うブロックを選択して材料特性を割り当てていきます.



⑤盛土部の材料を割り当てます.

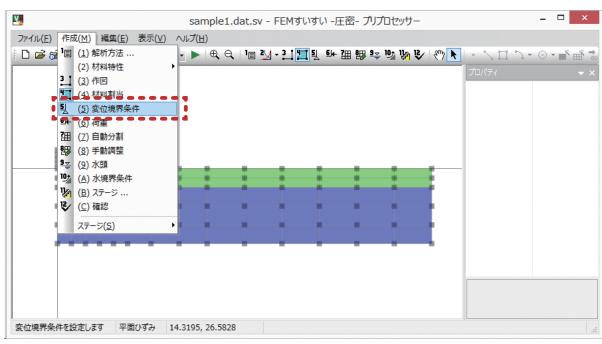


⑥割り当てが終了します.



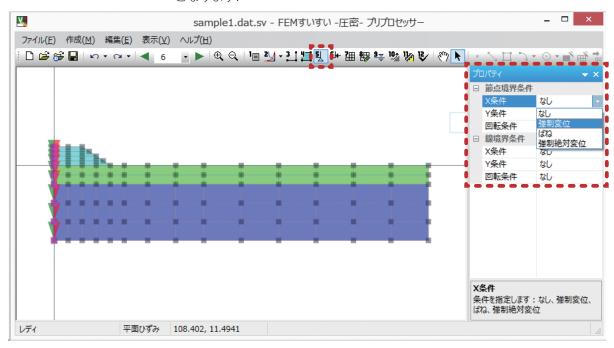
(5) 変位境界条件

①メニューバーの [作成]の [(5)変位境界条件]を選択するかツールバーの [**!**]変位境界条件]をクリックします.

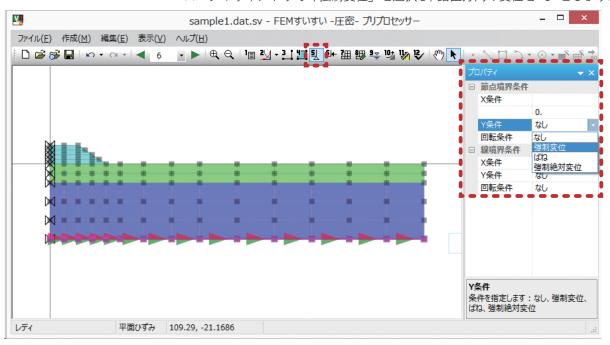


メニューバー 「作成」―「氢(5)変位境界条件」

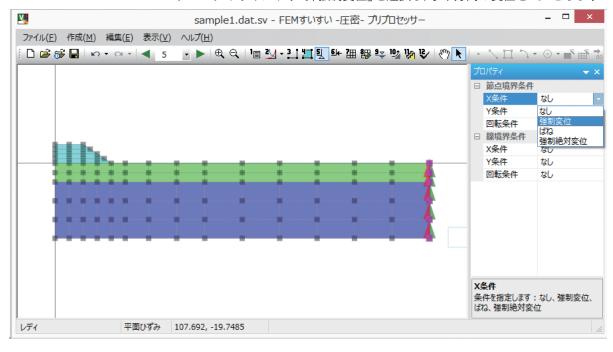
②マウスでドラッグして境界条件を指定する場所を選択します. プロパティウインドウで矯正変位を選択します. ここでは左右対称であり水平方向の変位は "O"となります.



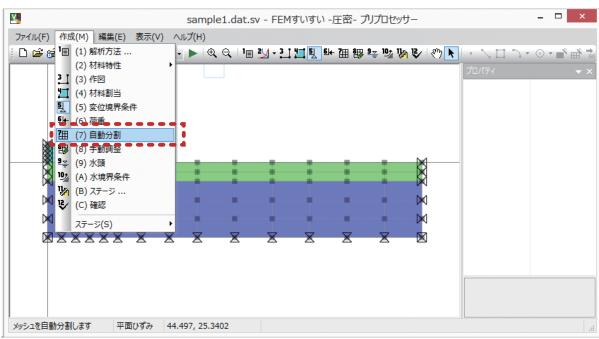
③同様にして、マウスでドラッグして境界条件を指定する場所を選択します. プロパティウインドウで「強制変位」を選択し、鉛直方向の変位を "O" とします.



④さらに同様に、マウスでドラッグして境界条件を指定する場所を選択します。 プロパティウインドウで「強制変位」を選択し、水平方向の変位を"O"とします。



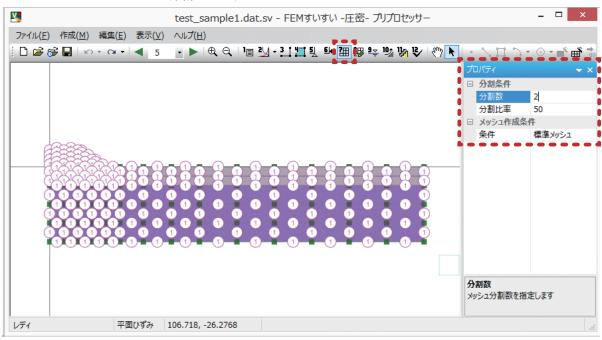
(6) メッシュ分割



メニューバー 「作成」―「 温 (7) 自動分割」

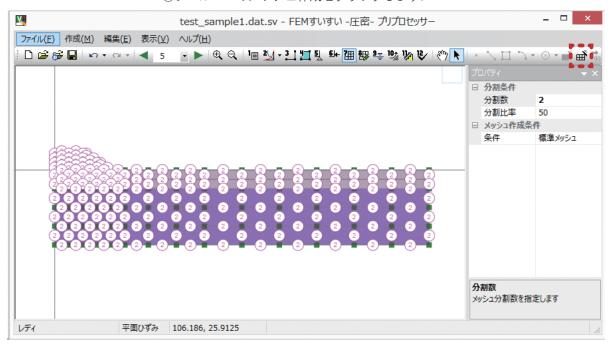
②分割数を指定する線分をクリックしてから、プロパティウィンドウで分割数を指定します.

ここでは, 分割数を 2, 分割比率を 50 とします. 分割比率は 50 のとき, 均等 に分割されます.



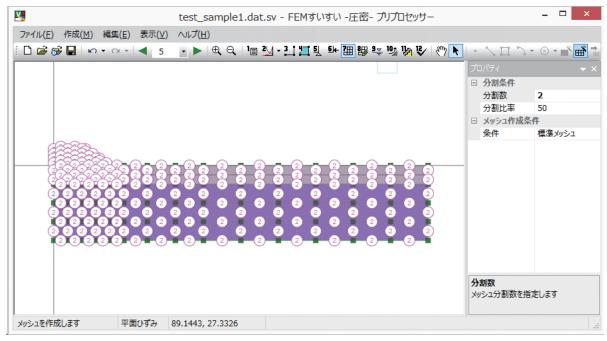
分割数入力画面-1

③ツールバーのメッシュ作成をクリックします.



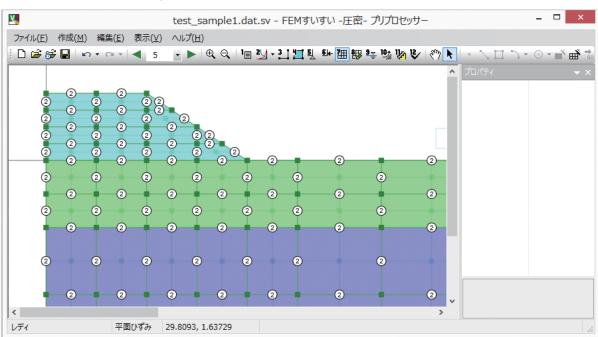
分割数入力画面-2

④円内の数字の数だけ分割されます.分割数を増やしたりする場合は円をクリックしてプロパティウィンドウの数字を入力することで変更できます.



分割数入力画面-3

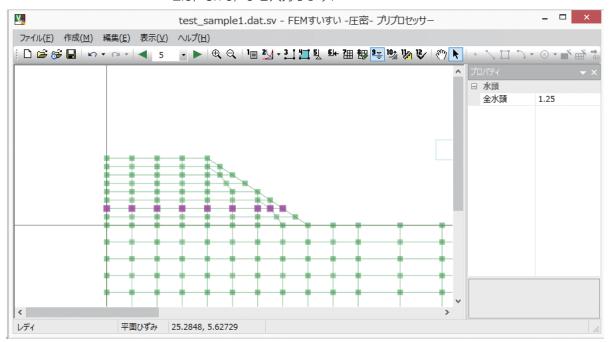
⑤メッシュ分割されました.



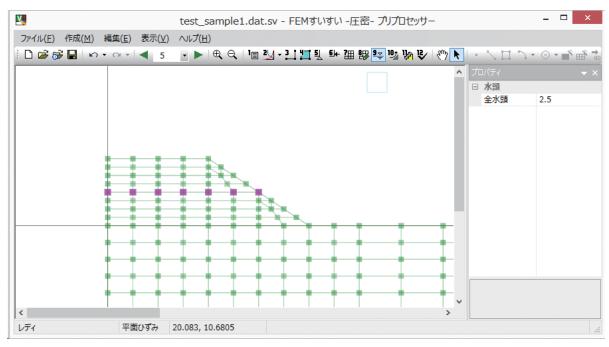
分割数入力画面-4

(7) 水頭の入力

- ①メニューバーの [作成] の [水頭] かまたは、ツールバーの [♥水頭] をクリックします.
- ②マウスでドラックして水頭を入力する節点を選択します. 順次, 全水頭を 1.25, 2.5, 3.75, 5 と入力します.

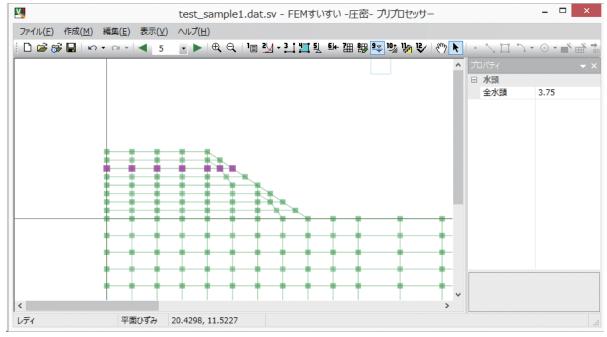


メニューバー 「作成」 — 「♣♀ (9) 水頭」

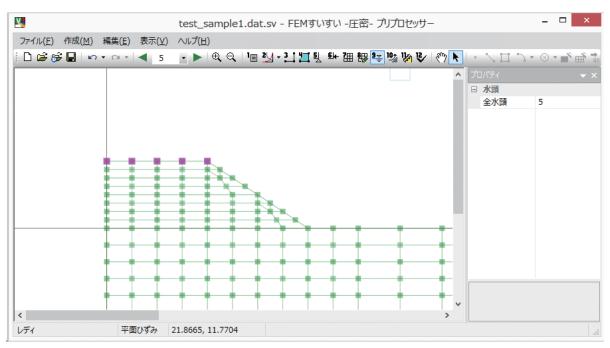


水頭入力画面-1





水頭入力画面-2

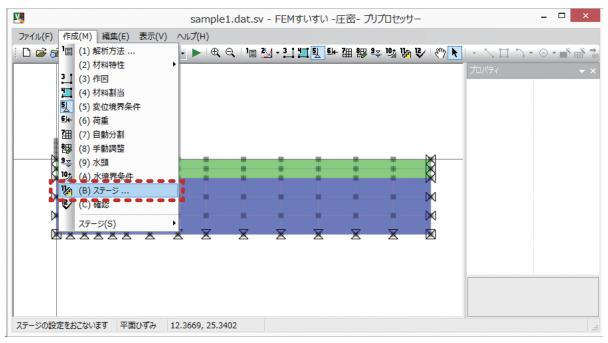


水頭入力画面-3

(8) 解析ステージの設定

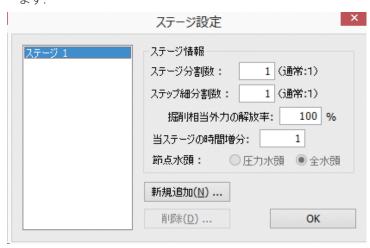
ステージ2を追加します.

①メニューバーの「作成」の中の「ステージ」かまたは、ツールバーの [***** ステージ] をクリックします.



メニューバー 「作成」―「🌇 (11) ステージ」

②「ステージ設定」ウィンドウが表示されます. ここでステージの追加を指定します.

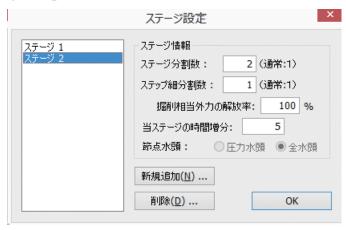


ステージ設定ウィンドウ

③「新規追加」をクリックすると以下のウィンドウが表示されますので「OK」をクリックします.



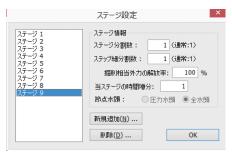
④「OK」をクリックするとステージ2追加されます.



ステージ2



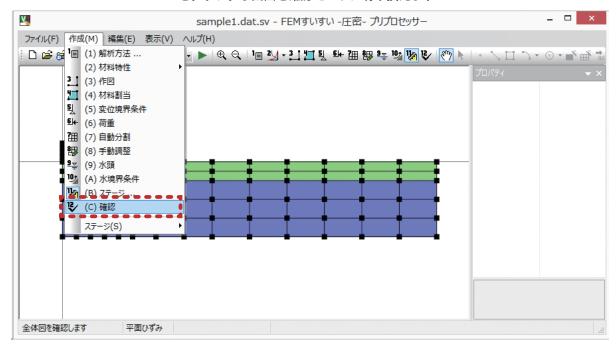
ステージ7 ステージ8



ステージ9

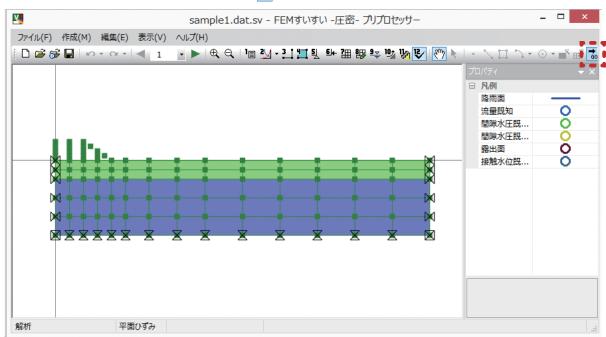
(9) 解析の実行

①メニューバーの「作成」の中の「確認」かまたは、ツールバーの [**V** 確認] をクリックし画面を確認モードに切り換えます。



メニューバー 「作成」─「♥ (12) 確認」

②ツールバーの [GO!] をクリックします.



ツールバー [📩 解析]

④解析が実行され、「OK」をクリックするとポストプロセッサーが起動します。



第5章 解析例

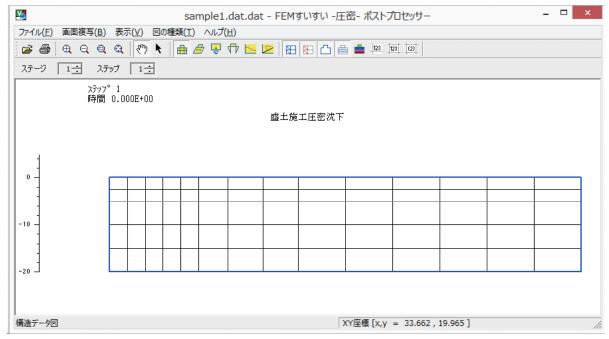
5-1-3 解析結果

ポストプロセッサーが起動して以下のような結果が表示されます.

- 1)情報表示
- 2) 構造データ
 - (1) 三四角形要素図
 - (2) 線要素
 - (3) 外枠
 - (4) 材料境界線
 - (5) 材料色塗り
 - (6) 節点番号
 - (7) 要素番号
 - (8) 材料番号
- 3) 力学的断面図
 - (1) 三四角形要素図
 - (2) 線要素
 - (3) 外枠
 - (4) 材料境界線
 - (5) 材料色塗り
 - (6) 変位後の三四角形
 - (7) 変位後の線要素
 - (8) 変位流速ベクトル
 - (9) 主応力流速ベクトル(有効応力)
 - (10) 主応力流速ベクトル(全応力)
 - (11) 主ひずみベクトル
 - (12) 線コンター
 - (13) 色塗りコンター
- 4) 水理学的断面図
 - (1) 三四角形要素図
 - (2) 外枠
 - (3) 材料境界線
 - (4) 流速ベクトル (飽和)
 - (5) 流速ベクトル (不飽和)
 - (6) 間隙水圧コンター(線)
 - (7) 全水頭コンター(線)
 - (8) 自由水面
 - (9) 間隙水圧コンター(色塗り)
 - (10) 全水頭コンター(色塗り)

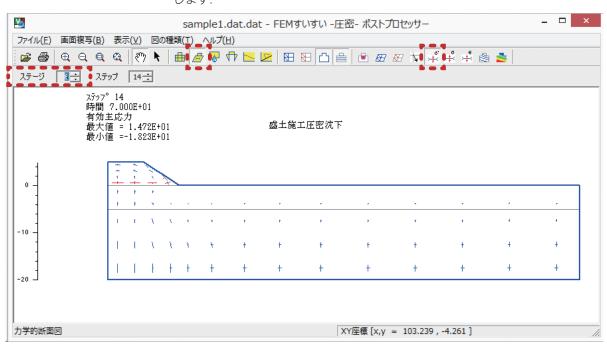
- 5) 線材の部材力図
 - (1) 線要素
 - (2) 外枠
 - (3) 材料境界線
 - (4) 軸力図
 - (5) せん断力図
 - (6) 曲げモーメント図
 - (7) 圧縮縁応力図
 - (8) 引張縁応力図
 - (9) 部材変位図
- 6) 節点値の時刻歴グラフ
 - (1) 水平変位
 - (2) 鉛直変位
 - (3) 間隙水圧
 - (4) 流量
 - (5) 合計流量
 - (6) 全節点合計流出入量
- 7) 応力経路図
 - (1) q p'図
 - $(2) q p \boxtimes$
 - (3) $\tau_{\text{oct}} p' \boxtimes$
 - (4) $\tau_{\text{oct}} p \boxtimes$

①ツールバーより表示したい結果の種類をクリックします.



解析結果表示画面

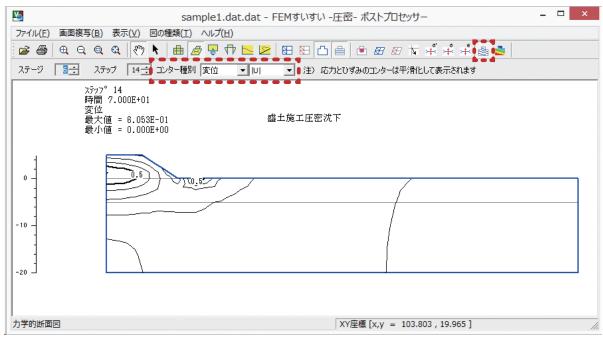
②ツールバーより表示したいステージを選択します. ここではツールバーの [力学的断面] をクリックして [主応力ベクトル] を選択 します.



力学的断面

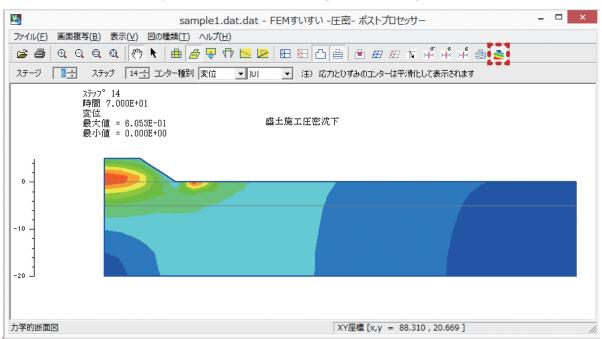
第5章 解析例

③今度はツールバーの [線コンター] を選択しツールバーのコンター種別でプルダウンメニューより. 変位及び [U] を選択してみます.



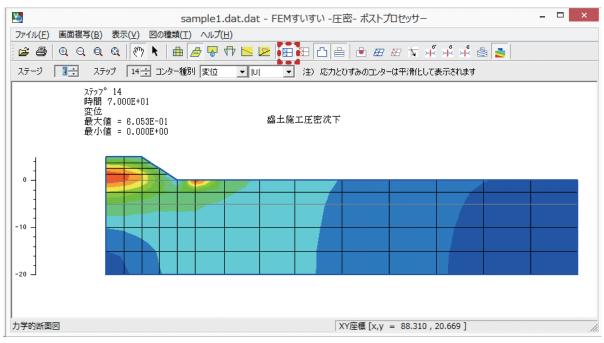
線コンター

④同様にして、ツールバーの [色塗りコンター] を表示してみました.



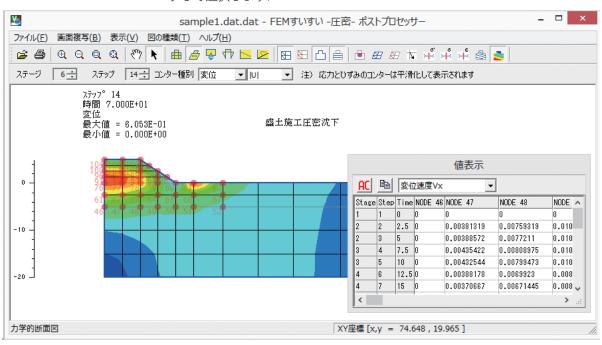
🏂 色塗りコンター

⑤変位量を見るために、まず、ツールバーの [► 三・四角形表示] をクリックします.



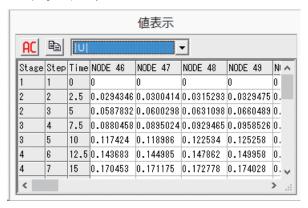
ツールバー [田 三・四角形要素]

⑥ツールバーの [情報表示] をクリックして、表示したい位置をマウスでドラックして選択します.



ツールバー [情報表示]

⑦そして値表示ウィンドウのプルダウンメニューより [U] を選択するとその値が表示されます.



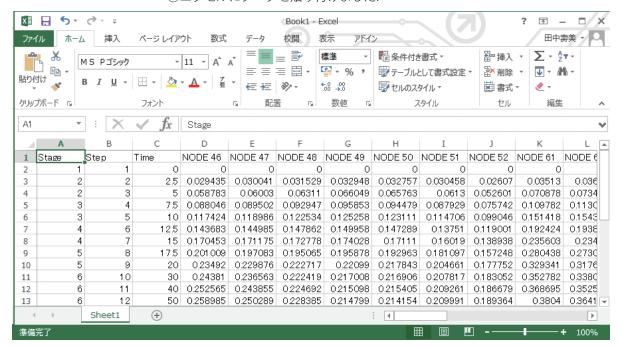
値表示ウィンドウ

⑧値表示ウィンドウのツールバーのコピーをクリックすると、同じ内容をエクセルに貼り付けることができます。



値表示 (流量)

⑨エクセルにデータを貼り付けました.

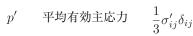


第6章 弾・粘塑性カップリング解析

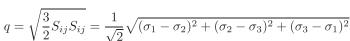
6-1 応力-ひずみ関係

6-1-1 記号の定義

- λ 圧縮指数 $(=C_c/ln_{10} = 0.434C_c)$
- 膨潤指数 $(=C_s/ln_{10} = 0.434C_s)$
- D 柴田のダイレタンシー係数



- $p_o{'}$ 先行時の平均有効主応力
- e 間隙比
- e_o $p' = p_o'$ のときの間隙比
- q 一般化された主応力差



- S_{ij} 偏差応力テンソル $S_{ij} = \sigma'_{ij} p' \delta_{ij}$
- η_o $p'=p'_o$ のときの有効応力比 $\eta_o=(q/p')$
- δ_{ij} クロネッカーのデルタ
- α 2次圧縮指数
- io 初期体積ひずみ速度
- v^P 体積ひずみの粘塑性成分
- ϵ_{ij} ひずみテンソル
- σ'_{ij} 有効応力テンソル
- σ_{ij}^r 緩和応力テンソル
- D^{EP} 弾・粘塑性係数マトリックス
- t. 時間
- F 粘塑性ポテンシャル関数

上に、を付けた変数は時間に関する導関数、すなわち、速度を表わす。

6-1-2 弾・粘塑性理論(関口のモデル)

粘塑性ポテンシャル関数

$$F \equiv \alpha \ln \left\{ 1 + \int \frac{\dot{\nu}_o}{\alpha} \exp\left(\frac{f}{\alpha}\right) dt \right\} = v^P \tag{1}$$

ここに,

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} ln \frac{p'}{p_o'} + D \left| \frac{q}{p'} - \eta_o \right| = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} ln \frac{p'}{p_o'} \pm D \left(\frac{q}{p'} - \eta_o \right)$$
 (2)

年塑性流動の継続条件式

$$\dot{F} \equiv \frac{\partial F}{\partial \sigma'_{ij}} \dot{\sigma}'_{ij} \frac{\partial F}{\partial t} = \dot{v}^P \tag{3}$$

ひずみ速度テンソルの弾性成分と粘塑性成分の独立性

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^E + \dot{\varepsilon}_{ij}^P \tag{4}$$

normality rule(垂直性)

等方線形性

$$\dot{\sigma}'_{ij} = \tilde{\lambda}\dot{v}^E \delta_{ij} + 2\tilde{\mu}\dot{\varepsilon}^E_{ij}$$
 $\tilde{\lambda}$, $\tilde{\mu}$ は Lamé の定数 (6)

比例定数 Λ

(3), (4), (5), (6)式より

$$\Lambda \frac{\tilde{\lambda} \frac{\partial F}{\partial p'} \dot{v} + 2\tilde{\mu} \frac{\partial F}{\partial \sigma'_{kl}} \dot{\varepsilon}_{kl} + \frac{\partial F}{\partial t}}{\tilde{\lambda} \left(\frac{\partial F}{\partial p'} \right)^2 + 2\tilde{\mu} \frac{\partial F}{\partial \sigma'_{mn}} \frac{\partial F}{\partial \sigma'_{mn}} + \frac{\partial F}{\partial p'}}$$

$$(7)$$

ここに

$$\frac{\partial F}{\partial p'} = \frac{\partial F}{\partial \sigma'_{ij}} = \frac{\partial F}{\partial \sigma'_{ij}} + \frac{\partial F}{\partial \sigma'_{ij}} + \frac{\partial F}{\partial \sigma'_{ij}}$$

6-1-3 弾・粘塑性構成式

(1), (4), (5), (6), (7)式より,有効応力速度テンソルとひずみ速度テンソルの関係式が得られ、例えば、2次元平面ひずみ条件(xy平面とする)では次式で表わされる.

 $\left\{ \dot{\sigma}_x' \quad \dot{\sigma}_y' \quad \dot{\sigma}_z' \quad \dot{\tau}_{xy} \right\}^T = \left[D^{EP} \right] \left\{ \dot{\varepsilon}_x^r \quad \dot{\varepsilon}_y^r \quad \dot{\gamma}_{xy}^r \right\}^T - \left\{ \dot{\sigma}_x^r \quad \dot{\sigma}_y^r \quad \dot{\sigma}_z^r \quad \dot{\tau}_{xy}^r \right\}^T$ $\Xi \Xi t \zeta$,

$$\begin{bmatrix} D^{EP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\lambda} + 2\tilde{\lambda} & \tilde{\lambda} & 0 \\ \tilde{\lambda} & \tilde{\lambda} + 2\tilde{\lambda} & 0 \\ \tilde{\lambda} & \tilde{\lambda} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\mu} \end{bmatrix} - \frac{C_5}{C_o} \begin{bmatrix} C_1^2 & C_1C_2 & C_1C_4 \\ C_1C_2 & C_2^2 & C_2C_4 \\ C_1C_3 & C_2C_3 & C_3C_4 \\ C_1C_4 & C_2C_4 & C_4 \end{bmatrix}$$

$$\left\{ \dot{\sigma}_x^r \quad \dot{\sigma}_y^r \quad \dot{\sigma}_z^r \quad \dot{\sigma}_{xy}^r \right\} = \frac{C_6}{C_o} \left\{ C_1 \quad C_2 \quad C_3 \quad C_4 \right\}$$

$$f_{ij} \equiv \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} = \frac{1}{3p'} \left(\frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} \mp D \frac{q}{p'} \right) S_{ij} \pm \frac{3}{2} \frac{D}{p'} \frac{s_{ij}}{q}$$

$$f_{kk} \equiv \frac{\partial f}{\partial p'} = \frac{1}{p'} \left(\frac{\lambda - \kappa}{1 + e_o} \mp D \frac{q}{p'} \right)$$

$$C_1 = \tilde{\lambda} f_{kk} + \tilde{\mu} f_{11}$$

$$C_2 = \tilde{\lambda} f_{kk} + \tilde{\mu} f_{22}$$

$$C_3 = \tilde{\lambda} f_{kk} + \tilde{\mu} f_{33}$$

$$C_o = \left\{ \tilde{\lambda} f_{kk}^2 + 2\tilde{\mu} \left(f_{11}^2 + f_{22}^2 + f_{33}^2 + 2f_{12}^2 \right) \right\} C_5 + f_{kk}$$

$$C_5 = 1 - \exp\left(-\frac{v^P}{\alpha}\right)$$

$$C_6 = \frac{\partial F}{\partial t} = \dot{\nu}_o \exp\left(\frac{f - v^P}{\alpha}\right)$$

6-1-4 破壊条件式

$$\frac{\lambda - \kappa}{(1 + e_o)D} = \pm \frac{q}{p'} \tag{9}$$

(9)式が成り立つとき.

$$\frac{\partial f}{\partial p'} = \frac{\partial F}{\partial p'} = 0$$

$$\dot{\gamma}^P = \infty$$

$$\begin{split} \dot{\gamma}^P &= \sqrt{\frac{2}{3}\dot{\gamma}_{ij}^P\dot{\gamma}_{ij}^P} \\ \dot{\gamma}_{ij}^P &= \dot{\epsilon}_{ij}^P - \frac{1}{3}\dot{\gamma}^P\delta_{ij} \end{split}$$

6-1-5 弾性のLaméの定数

弾性時の応力径路が過圧密(または膨潤)中の $e-\ln p'$ 曲線上をたどるようにするためポアソン比 $_{\nu}$ を一定にすると、弾性の Lamé の定数 $\tilde{\lambda}$ 、 $\tilde{\mu}$ は次式で表わされる。 e_i は初期間隙比。

$$\tilde{\lambda} = \frac{1 - e_i}{\kappa} p' - \frac{2}{3} \tilde{\mu}$$

$$\tilde{\mu} = \frac{3(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} \frac{1 + e_i}{\kappa} p'$$
(10)

6-2 有限要素定式法

6-2-1 記号の定義

- u_i 変位ベクトルの成分
- ϵ_{ij} ひずみテンソルの成分
- σ_{ij} 全応力テンソルの成分
- σ'_{ii} 有効応力テンソルの成分
- $\dot{\sigma}_{ij}^r$ 緩和応力テンソルの成分
- p 間隙水圧
- *q*_i 流量ベクトルの成分
- D_{ijkl} 弾・粘塑性係数テンソルの成分
- k_{ij} 透水係数テンソルの成分
- G_i 物体力ベクトルの成分
- μ 土の湿潤密度
- ρ 間隙水の密度
- γ_w 間隙水の単位体積重量 $\gamma_w = \rho g = -\rho G_3$
- n 間隙率
- s 飽和度 $(0 \le S \le 1)$ $s = S_r/100$
- χ Bishop のカイ $(0 \le \chi \le 1)$
- n_i 境界面の単位外向法線ベクトルの成分
- \hat{T}_i 境界面 S_1 上の既知外向応力ベクトルの成分
- ② 境界面S2上の既知流出量
- \hat{u}_i 境界面 S_3 上の既知変位ベクトルの成分 $(S_1 + S_3 = S)$
- \hat{p} 境界面 S_4 上の既知間隙水圧 $(S_2 + S_4 = S)$
- ,の後に添字を付したものは空間に関する偏微分を表わし.同じ添字が続くものは総和を意味する.例えば,

$$u_{i,j} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

6-2-2 基礎方程式

全応力の釣合条件式
$$\sigma_{ij,j} + \mu G_i = 0$$
 (11)

間隙水の連続条件式
$$q_{i,i} - S\dot{\epsilon}_{ii} + n\frac{dS}{dp}\dot{p} = 0$$
 (12)

間隙水の運動方程式
$$q_i = -\frac{k_{ij}}{\gamma_w} \left(p_{,i} - \rho G_i \right)$$
 (13)

有効応力式
$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \chi \delta_{ij} p$$
 (14)

応力・ひずみ関係式
$$\dot{\sigma}'_{ij} = D_{ijkl}\dot{\epsilon}_{kl} - \delta\dot{\sigma}^{v}_{ij}$$
 (15)

ひずみの適合条件式
$$\varepsilon_{ij} = -\frac{1}{2} \left(u_{i,j} + u_{j,i} \right) \equiv -u_{(i,j)}$$
 (16)

$$\delta = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & (彈・粘塑性状態) \\ 0 & (その他) \end{array} \right.$$

ここに、以下の対称性が成り立つ.

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji}$$
 $\sigma'_{ij} = \sigma'_{ji}$ $\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ji}$ $\dot{\sigma}'_{ij} = \dot{\sigma}'_{ji}$
 $k_{ij} = k_{ji}$ $D_{ijkl} = D_{iikl} = D_{ijlk} = D_{klij}$

6-2-3 支配方程式

(11), (14), (15), (16)式より(18)式が導かれ, (12), (13), (16)式より(19)式が導かれる.

$$\left\{-D_{ijkl}\dot{u}_{(k,l)} + \chi \delta_{ij}\dot{p}\right\}_{,j} + \dot{\mu}G_i - \delta\dot{\sigma}_{ij,j}^r = 0$$
(18)

$$\left\{ \frac{k_{ij}}{\gamma_w} \left(p_{,j} - \rho G_i \right) \right\}_{,j} - s \dot{u}_{i,i} - n \frac{ds}{dp} \dot{p} = 0$$
(19)

6-2-4 初期条件と境界条件

初期条件
$$u_i = u_{i,j} = 0$$
 (20)

境界条件

応力境界
$$T_i \equiv \sigma_{ij} n_j = \hat{T}_i$$
 $\dot{T}_i = \hat{T}_i$ $(S_1 上 で)$ (21)

流量境界
$$Q = q_i n_i = \hat{Q}$$
 $\dot{Q} = \dot{\hat{Q}}$ (S₂上で) (22)

変位境界
$$u_i = \hat{u}_i \quad \dot{u}_i = \hat{u}_i \quad (S_3 上で)$$
 (23)

間隙水圧境界
$$p = \hat{p}$$
 $\dot{p} = \hat{p}$ (S₄上で) (24)

6-2-5 変分原理

初期条件(20)式と境界条件(21)~(24)式をもつ支配方程式(18), (19)の汎関数は(25)式で定義され、変数 \dot{u}_i と \dot{p} に関する(25)式の第 1 変分を 0 にすることと、任意の時間 $t \in [0,\infty)$ における解を得ることは同値である.

$$\Omega_{t} = \int_{V} \left[\frac{1}{2} D_{ijkl} \dot{u}_{(k,l)} * \dot{u}_{(i,j)} + \delta \dot{\sigma}_{ij}^{r} * \dot{u}_{(i,j)} + \dot{\mu} G_{i} * \dot{u}_{i} \right. \\
\left. - \chi \dot{p} * \dot{u}_{i,i} - \frac{1}{2} \frac{\chi}{S} n \frac{dS}{dp} \dot{p} * \dot{p} + 1 * \dot{p}_{,i} * \frac{\chi}{S} \frac{k_{ij}}{\gamma_{w}} \dot{\rho} G_{i} \right. \\
\left. - \frac{1}{2} * \dot{p}_{,i} * \frac{\chi}{S} \frac{k_{ij}}{\gamma_{w}} \dot{p}_{,i} \right] dV \\
+ \int_{S_{1}} \dot{T}_{i} * \dot{u}_{i} dS - \int_{S_{2}} 1 * \frac{\chi}{S} \dot{\hat{Q}} * \dot{p} dS \tag{25}$$

ここに、*はたたみ込み積分を表わし、

$$\eta(t) * \zeta(t) = \int_0^t \eta(t - \xi) \zeta(\xi) d\xi = \zeta(t) * \eta(t)$$

6-2-6 有限要素定式化

領域 V を M 個の小さな要素に分割し、ある要素 m 内の点 x=(x,y,z) における変位ベクトルと間隙水圧を

$$\{u^m\}_{(\boldsymbol{x},t)} = [N_u^m]_{(\boldsymbol{x})} \{u_e^m\}_{(t)} \quad p_{(\boldsymbol{x},t)}^m = [N_p^m]_{(\boldsymbol{x})} \{p_e^m\}_{(t)}$$
と定義すれば、ひずみベクトル、体積ひずみ、圧力勾配ベクトルは

$$\begin{split} &\{\epsilon^m\}_{(\boldsymbol{x},t)} = -\left[B^m\right]_{(\boldsymbol{x})} \left\{u_e^m\right\}_{(t)} \quad v_{(\boldsymbol{x},t)}^m = -\left[B_v^m\right]_{(\boldsymbol{x})} \left\{u_e^m\right\}_{(t)} \\ &\left\{p_{,i}^m\right\}_{(\boldsymbol{x},t)} = \left[B_d^m\right]_{(\boldsymbol{x})} \left\{\rho_e^m\right\}_{(t)} \end{split}$$

と表わされる.ここに, $\{u_e^m\}$ と $\{p_e^m\}$ はある時間 $t\in[0,\infty)$ における要素 m を構成する節点の変位ベクトル値と間隙水圧値を表わす.

 $[N_u^m]$: 要素 m 内の点 x における変位形状関数

 $\left[N_{p}^{m}
ight]$: u 間隙水圧形状関数

 $[B^m][B_v^m]:[N_u^m]$ を適当に微分し並べ換えたもの

 $[B_d^m]:[N_p^m]$

 $\{u_e^m\}$:要素 m を構成する節点の変位ベクトルの組

 $\{p_e^m\}$: $\qquad \qquad$ 間隙水圧の組

よって、全節点の変位ベクトルと間隙水圧の列ベクトルを $\{u\}$ と $\{P\}$ で表わせば、(25)式の替りに、空間的に離散化された汎関数(26)式を得る。

$$\Omega_{t} = \frac{1}{2} \left\{ \dot{u} \right\}^{T} \left[K \right] * \left\{ \dot{u} \right\} - \left\{ \dot{u} \right\}^{T} * \left\{ A_{1} \right\} + \left\{ \dot{u} \right\}^{T} \left[C \right] * \left\{ \dot{P} \right\} - \frac{1}{2} \left\{ \dot{P} \right\}^{T} \left[E \right] * \left\{ \dot{P} \right\}$$

$$-1 * \left\{ \dot{P} \right\}^{T} * \left\{ \dot{A}_{2} \right\} - \frac{1}{2} * \left\{ \dot{P} \right\}^{T} * \left[H \right] \left\{ \dot{P} \right\} - \left\{ \dot{P} \right\}^{T} * \left\{ A_{3} \right\}$$
(26)

(26)式に変分原理を適用し、 $\{\dot{u}\}$ と $\left\{\dot{P}\right\}$ に関する変分をともに0にすることにより、(27)、(28)式が得られる。

$$[K] \{\dot{u}\} + [C] \{\dot{P}\} = \{A_1\}$$
 (27)

$$[C]^{T} \{\dot{u}\} - [H] \{P\} - [E] \{\dot{P}\} = \{A_2\} + \{A_3\}$$
 (28)

ここに.

$$\{A_{1}\} = -\sum_{m=1}^{M} \int_{V_{m}} \left(b^{m} \left[B^{m}\right]^{T} \left\{\dot{\sigma}^{r^{m}}\right\} + \left[N_{u}^{m}\right]^{T} \left\{\dot{\mu}^{m}G\right\}\right) dV
-\sum_{m=1}^{M} \int_{S^{m}} \left[N_{u}^{m}\right] \left\{\hat{T}^{m}\right\} dS
\{A_{2}\} = -\sum_{m=1}^{M} \int_{V_{m}} \frac{\chi^{m}}{S^{m}} \left[B_{d}^{m}\right]^{T} \left[R^{m}\right] \left\{\rho^{m}G\right\} dV
\{A_{3}\} = \sum_{m=1}^{M_{2}} \int_{S^{m}} \frac{\chi^{m}}{S^{m}} \left[N_{P}^{m}\right]^{T} \left\{\hat{Q}^{m}\right\} dS$$

他の記号は後出を参照のこと.

ここで、数値計算し易いように、

$$\begin{aligned} &\{\dot{u}\} \doteq \frac{1}{\Delta t} \left(\{u\}_{t+\Delta t} - \{u\}_{t}\right) = \frac{1}{\Delta t} \left\{\Delta u\right\} \\ &\{\dot{P}\} \doteq \frac{1}{\Delta t} \left(\{P\}_{t+\Delta t} - \{P\}_{t}\right) \\ &\dot{\mu} \doteq \frac{1}{\Delta t} \left(\mu_{t+\Delta t} - \mu_{t}\right) = \frac{1}{\Delta t} \Delta \mu \\ &\{\dot{\hat{T}}\} \doteq \frac{1}{\Delta t} \left(\left\{\dot{\hat{T}}\right\}_{t+\Delta t} - \left\{\dot{\hat{T}}\right\}_{t}\right) = \frac{1}{\Delta t} \left\{\Delta \dot{\hat{T}}\right\} \\ &\{P\} \doteq \{P\}_{t} + \beta \left(\{P\}_{t+\Delta t} - \{P\}_{t}\right) = \beta \left\{P\}_{t+\Delta t} + (1-\beta) \left\{P\}_{t} \\ &\rho \doteq \beta \rho_{t+\Delta t} + (1-\beta) \rho_{t} \end{aligned}$$

$$\left\{\hat{Q}\right\} \doteq \beta \left\{\hat{Q}\right\}_{t+\Delta t} + (1-\beta) \left\{\hat{Q}\right\}_{t}$$

と近似すれば、最終的にマトリックス方程式(29)式が得られる.

$$\begin{bmatrix} K & C \\ C^T & -E - \beta \Delta t H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u \\ P_{t+\Delta t} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix} \qquad 0 \le \beta \le 1$$
 (29)

(29)式を step by step で解いて行けばよい.

$$[D^m]$$
 要素 m 内の点 x ,時間 t における弾・粘塑性係数マトリックス $[R^m]$ $rac{\sigma}{r}$ 透水係数マトリックス

 M_1 既知応力境界面 S_1 に含まれる有限要素面の数

 M_2 既知流量境界面 S_2

$$[K] = \sum_{m=1}^{M} \int_{V^{m}} [B^{m}]^{T} [D^{m}] [B^{m}] dV$$

$$[C] = -\sum_{m=1}^{M} \int_{V^{m}} \chi^{m} [B_{v}^{m}]^{T} [N_{P}^{m}] dV$$

$$[H] = \sum_{m=1}^{M} \int_{V^{m}} \frac{\chi^{m}}{S^{m}} [B_{d}^{m}]^{T} [R^{m}] [B_{d}^{m}] dV$$

$$[E] = \sum_{m=1}^{M} \int_{V^{m}} \frac{\chi^{m}}{S^{m}} n^{m} \left(\frac{dS}{dP}\right)^{m} [N_{P}^{m}]^{T} [N_{P}^{m}] dV$$

$$\{F\} = \Delta t \{F_{1}\} - \{F_{2}\} - \{F_{3}\} + [C] \{P\}_{t}$$

$$\{Q\} = \{Q_{1}\} + \{Q_{2}\}\}$$

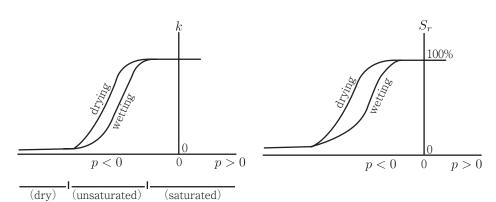
$$\{F_{1}\} = -\sum_{m=1}^{M} \int_{V^{m}} b^{m} [B^{m}]^{T} \{\dot{\sigma}^{r^{m}}\} dV$$

$$\{F_{2}\} = \sum_{m=1}^{M} \int_{V^{m}} [N_{u}^{m}]^{T} \{\Delta \mu^{m} G\} dV \qquad \Delta \mu = n\Delta S + \overline{\mathcal{E}} \overline{\mathcal{E}} \underline{\mathcal{E}} \underline{$$

6-3 繰返し計算

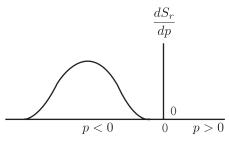
6-3-1 不飽和浸透特性

不飽和領域では下図の様な浸透特性を持つことが、実験的に知られている。ところが、応力・ひずみ関係は増分形で表わしたが、間隙水の流れについては割線で関係づけたため、下図の様な非線形性を忠実に表現するためには、ステップ毎に繰返し計算をして収束させる必要がある。ただし、粘性土では一般に限界の間隙水圧 p_c が極めて小さいため、pが負になっても飽和状態であることが通常である。

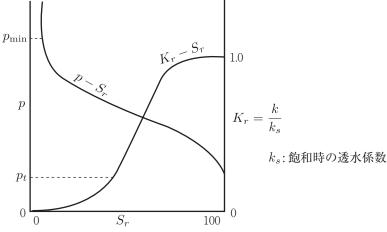


透水係数 - 間隙水圧

飽和度 - 間隙水圧



 (dS_r/dp) - 間隙水圧



不飽和浸透特性曲線

<u>6-3-2</u> 収束条件式

不飽和時の非線形浸透特性を表現するために繰返し計算を行なうとき、収束の 判定は次式で行なう.

$$\left|\dot{\delta}p\right|_{\text{max}}$$
 \leq 許容誤差(例えば, 10^{-4})

ここでの収束性の検討は間隙水圧の値についてのみであり、m回目の繰返し計算において、 δp は次式で定義する($m \ge 1$).

$$\delta p = \left\{ \begin{array}{l} p_{t+\Delta t}^m & (p_{t+\Delta t}^{m-1} = 0 \text{ obs}) \\ \left(p_{t+\Delta t}^m - p_{t+\Delta t}^{m-1}\right) / p_{t+\Delta t}^{m-1} & \end{array} \right.$$

 $z z t z, p_{t+\Delta t}^o = p_t$

ただし、浸出面や進入不可境界が存在する場合は、以下に示すような条件も満足する必要がある。

6-3-3 浸出面の取扱い

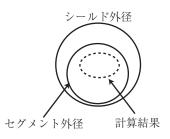
盛土斜面や掘削面に現われる浸出面においては、間隙水圧 p=0 かつ水の流入がないという特殊な水理境界条件を有している。間隙水圧境界と流量境界は本来、完全に区別されるべきものであるが、浸出面においては間隙水圧境界にも流量境界にもなり得る。

そこでここでは、以下のように取り扱っている.

- (i) p=0と設定した時に $Q \ge 0$ (流出) ならば間隙水圧境界 p=0 のままだが、Q<0 (流入) となる時には間隙水圧境界を解除して流量境界 Q=0 に変更する.
- (ii) 逆に、Q=0と設定した時にp<0ならば流量境界 Q=0 のままだが、 $p\geq 0$ となる時には間隙水圧境界 p=0 に変更する.
- (iii) そして、変更がなくなるまでこれらの手順を繰り返す.

6-3-4 進入不可境界とその取扱い

軟弱地盤のシールド掘削問題において、掘削面を単に応力境界として掘削相当外力をかけると、右図に示すように、テールボイド以上に変形してしまうことがある。これを避けるために、円形または長方形の領域(右図の例ではセグメント外径)を設定し、その領域の外部に節点が存在する場合には応力境界として自

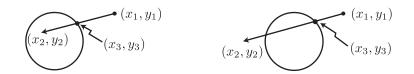


由に変位できるが、その領域の内部には節点は進入できないという特殊な幾何境 界条件を考えた、ここではこれを進入不可境界と呼び、以下に示すような繰返し 計算で取り扱っている.

(i) 応力境界であると設定した時, 前ステップの節点座標 (x_1,y_1) と増分変位 $(\Delta u_x,\Delta u_y)$ から変形後の節点座標

$$x_2 = x_1 + \Delta u_x, \quad y_2 = y_1 + \Delta u_y$$

を算出する. 点 (x_1,y_1) と点 (x_2,y_2) を結ぶ線分が進入不可境界と交差しなければ応力境界のままだが, 交差する場合にはその交点 (x_3,y_3) を求め変位境界 $(\Delta u_x=x_3-x_1,\ \Delta u_y=y_3-y_1)$ に変更する.



- (ii) 変位境界であると設定した時、増分節点力ベクトル ΔF を算出する。 ΔF が進入不可境界の外側に向いていれば変位境界のままだが、内側に向いている場合は応力境界に変更する。
- (iii) そして,変更がなくなるまでこれらの手順を繰り返す. ここでの図解は円形の場合だけにとどめたが,矩形の場合も同様である.

