

GeoFem による圧密沈下解析手法マニュアル

平成 17 年 12 月

独立行政法人 港湾空港技術研究所

地盤・構造部土質研究室

目 次

第 1 章 概要	1
1.1 概要	1
1.2 目的	1
1.3 検討項目	1
第 2 章 定ひずみ速度載荷試験の要素シミュレーション	2
2.1 実験概要	2
2.2 実験結果	3
2.3 FEM 解析	5
(1)有限要素メッシュ	5
(2)境界条件	5
(3)土質定数	6
2.4 GeoFem 入力データの作成手順	7
2.5 FEM 解析結果	16
2.6 除荷の解析	19
2.7 除荷後再載荷の解析	26
第 3 章 実地盤の一次元圧密沈下解析	
3.1 解析モデルおよび有限要素メッシュ	33
3.2 土質定数	35
3.3 GeoFem 入力データの作成手順	36
3.4 解析結果	48
3.5 プレロード工法の解析	49

参考文献

付録 A 入力データ

- A1 定ひずみ速度載荷試験の要素シミュレーション(単調載荷,File=crs2cm-ep1.dat)
- A2 定ひずみ速度載荷試験の要素シミュレーション(載荷 + 除荷,File=crs2cm-ep2.dat)
- A3 定ひずみ速度載荷試験の要素シミュレーション(載荷 + 除荷 + 再載荷,File=crs2cm-ep3.dat)
- A4 実地盤の 1 次元圧密沈下解析(載荷,File=1d-saika.dat)
- A5 実地盤の 1 次元圧密沈下解析(載荷 + 除荷,File=1d-jyoka.dat)
- A6 実地盤の 1 次元圧密沈下解析(載荷 + 除荷 + 再載荷,File=1d-saisaika.dat)
- A7 プレロード工法の解析(載荷 + 除荷 + 再載荷,File=1d-preload2.dat)

第1章 概要

1.1 概要

本解説書は、地盤解析汎用プログラム **GeoFem** を用いて、軟弱粘性土地盤の圧密沈下解析を行う場合のモデル化の方法や解析データの作成方法などをまとめたものである。

1.2 目的

有限要素法による圧密変形解析は、現在多くの市販ソフトが販売され、実務設計において一般的に行われる段階に入っている。計算環境が進歩し、ソフトウェアのユーザーインターフェースがよりユーザーフレンドリーになるにつれて、初級の設計者でも有限要素解析が手軽にできるようになっている。しかしその反面、解析条件や地盤定数の設定が適切に行われていないために、非線形計算が収束しなかったり、間違った入力条件で計算された結果によって実際の物理現象を評価してしまったりする場面が多く見られる。有限要素解析を使って実務設計を行う場合には、使用する解析コードが備えている機能や個々の問題に対する適用性をユーザーが十分に把握しておくが極めて重要である。

本解説書は、このような有限要素解析の現況を踏まえて、沿岸域の軟弱地盤の圧密変形解析に多くの実績を持つ **GeoFem** について、要素シミュレーションと実地盤の圧密沈下解析を取り上げ、それぞれの問題に対応するためのモデル化の方法や計算条件、地盤定数などの入力データの作成方法についてをマニュアルとしてまとめ、今後の解析業務の効率化に帰することを目的としている。

1.3 検討項目

2章では、定ひずみ速度圧密試験（CRS 試験）の要素シミュレーションを **GeoFem** で再現する方法について解説する。ここでは、載荷、除荷、再載荷の要素シミュレーションをひずみ制御解析で行う方法を説明し、**GeoFem** が一次元圧密の載荷・除荷・再載荷過程の e - $\log p'$ 曲線を表現可能であることを示す。

3章では、実地盤スケールの盛土モデル(仮想地盤)に対する圧密沈下解析手法について解説する。今回、対象とした解析モデルは一次元圧密モデルとし、(1)単調載荷を行うケース、(2)載荷後の地下水位の上昇（有効土被り圧の減少）を模擬した載荷・除荷ケース、(3)再び地下水位が低下すること（有効土被り圧の増加）を模擬した載荷・除荷・再載荷ケースの3ケースを想定し、それぞれの解析モデルを再現するための **GeoFem** データの入力方法と解析結果について解説する。さらに応用ケースとして、プレロード工法の解析例を示す。

第2章 定ひずみ速度載荷試験の要素シミュレーション

2.1 実験概要

定ひずみ速度載荷による圧密試験は、「土の片面からの排水を許しながら連続的に一次元圧密し、圧縮性と圧密速度に関する定数を求める試験」である¹⁾。

実験には、含水比調整を行った南本牧(横浜)粘土を鉛直圧密圧力 98kPa で再圧密させた再構成試料を用いた。再構成試料の物理特性を表-2.1 に、供試体の形状寸法を図-2.1 に示す。試験条件を表-2.2 に示す。

表-2.1 再構成試料の物理特性

土粒子比重 G_s (g/cm ³)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	初期含水比 w_o (%)	初期間隙比 e_0
2.7	1.503	79.4	2.30

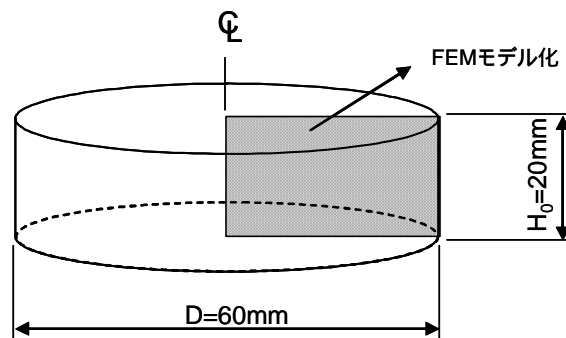


図-2.1 CRS 試験の供試体寸法

表-2.2 試験条件

ひずみ速度 (%/min)	背圧 (kPa)
0.02	98.0

2.2 実験結果

試験によって得られた e - $\log p$ 曲線を図-2.2 に、 C_c - $\log p$ 曲線を図-2.3 に示す。図-2.2 より圧密降伏応力は概ね再構成試料作成時の圧密圧力（98kPa）となっていることがわかる。また、正規圧密領域の圧縮指数 C_c は、 $p=170.6\text{kPa}$ のときの 0.95 をピークに徐々に小さくなっている。図-2.4 は軸方向の変位と底面で測定した間隙水圧の関係を示したものである（背圧 98kPa 分を減じて表示している）。図-2.5 は間隙比と透水係数の関係を示したものである。図-2.5 より間隙比 e と $\log k$ の関係が概ね直線的であることがわかる。

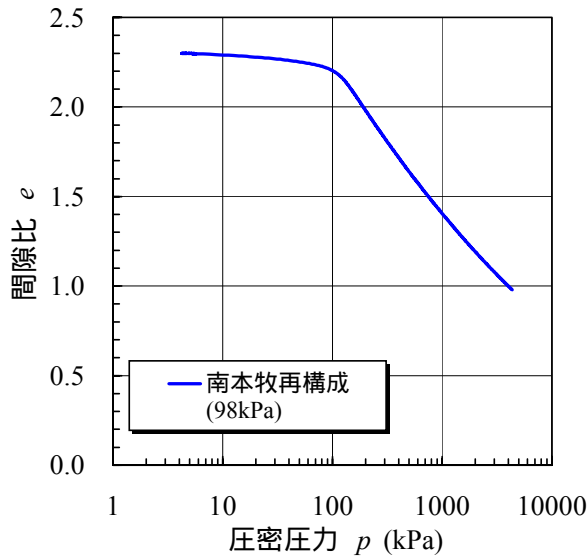


図-2.2 e - $\log p$ 曲線

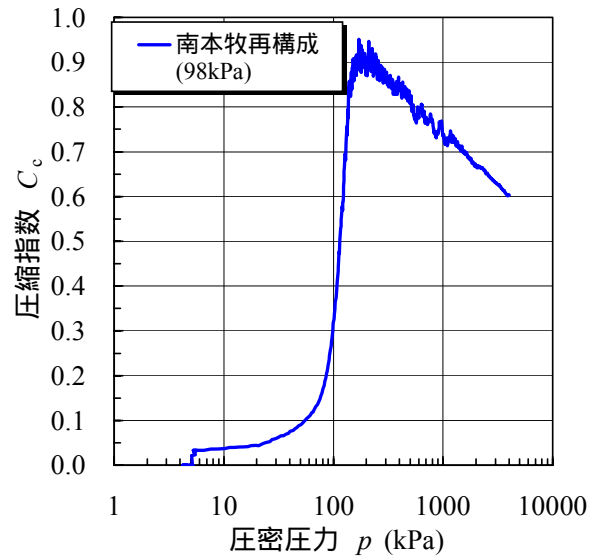


図-2.3 C_c - $\log p$ 曲線

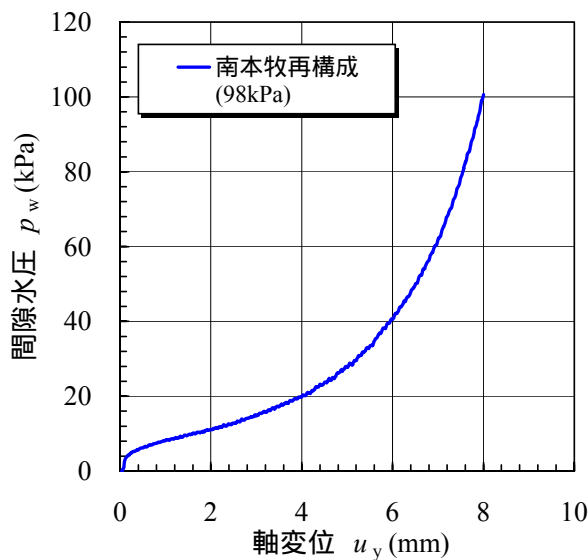


図-2.4 変位 - 間隙水圧曲線

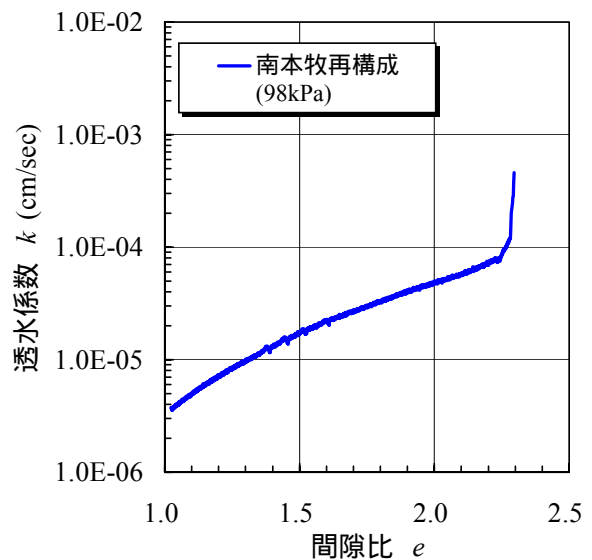


図-2.5 e - $\log k$ 曲線

図-2.6 は圧密圧力と圧密係数 c_v の関係を示したもので、図-2.7 は圧密圧力と体積圧縮係数 m_v の関係を示したものである。表-2.3 に実験により得られた圧密定数の一覧を示す。

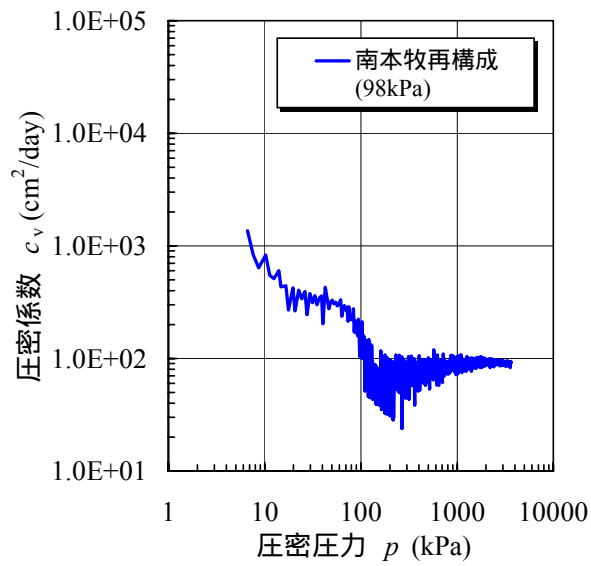


図-2.6 $\log c_v - \log p$ 曲線

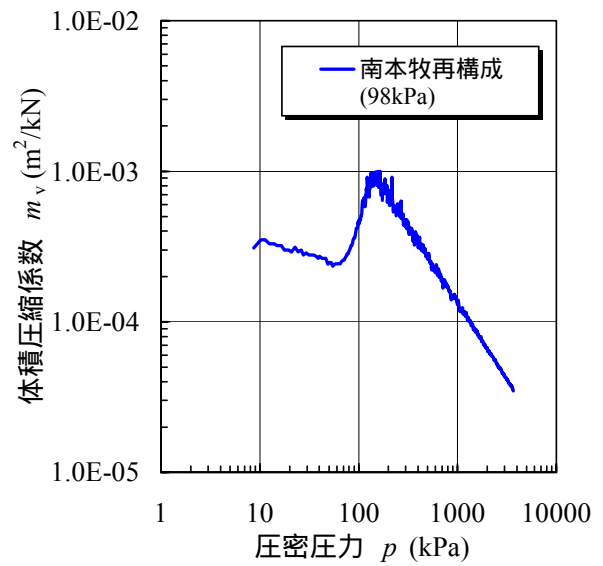


図-2.7 $\log m_v - \log p$ 曲線

表-2.3 実験により得られた圧密定数一覧

圧密降伏応力 p_c (kPa)	圧縮指数 C_c	膨張指数 C_s	圧密係数 c_v (cm ² /d)	体積圧縮係数 m_v (m ² /kN)
98	0.90	0.05	104	4.19×10^{-4}

* c_v 、 m_v は p_c 時の値を採用した。

2.3 FEM 解析

(1)有限要素メッシュ

定ひずみ速度載荷による圧密試験結果を GeoFem による二次元有限要素解析モデルで再現する。解析モデルは軸対象モデルとし、側方方向の変位を拘束することによって、鉛直方向の一次元方向のみしか変位しないモデルとする。

図-2.8 にメッシュ分割図を示す。図-2.9 に節点番号と要素番号を示す。具体的な入力データの作成方法は、[2.4 GeoFem 入力データの作成手順]で解説する。

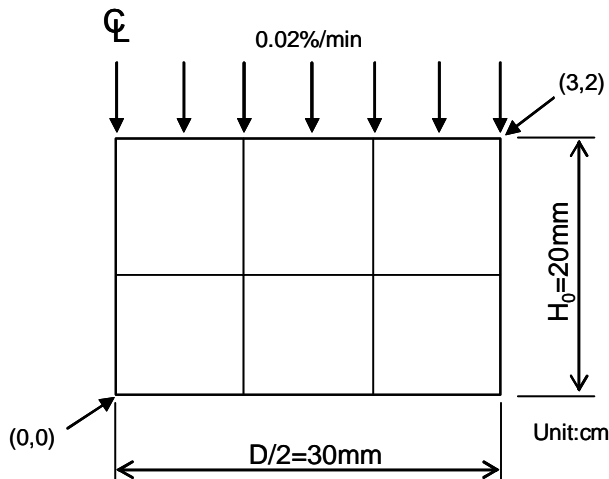


図-2.8 メッシュ分割図

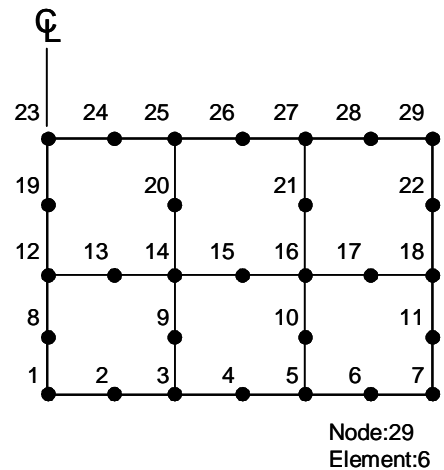


図-2.9 節点番号と要素番号

(2)境界条件

図-2.10 に境界条件を示す。変位の境界条件は、側面(対称軸も含む)について水平変位を拘束し、底面について水平変位および鉛直変位を固定する。上面は変位制御による強制変位が与えられるので、GeoFem によるコマンド BOUN と FORC による境界条件の制御(図-2.11)が必要である。水理境界条件は、定ひずみ速度載荷による圧密試験では、底面で間隙水圧の測定を行う構成となっており、試験時の排水条件は上面の片面排水となっている。

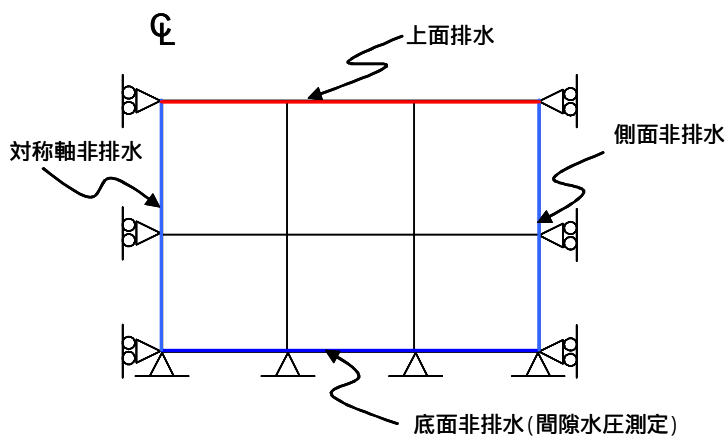


図-2.10 変位境界条件と水理境界条件

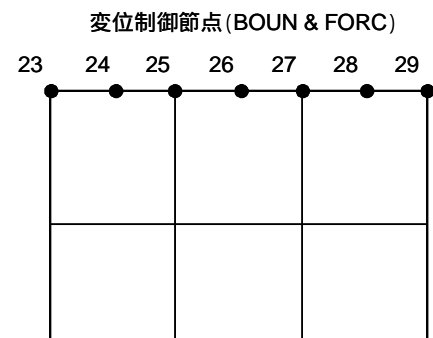


図-2.11 強制変位を与える節点

(3)土質条件

本解析では、関口・太田の弾塑性構成モデルを用いる。表-2.4 に解析に用いた土質パラメータと各パラメータの算定方法を示す。

表-2.3 土質パラメーター一覧

構成モデル (IRT)	ポアソン比 ²⁾ ν'	限界応力比 ³⁾ M	圧縮指数 ⁴⁾ λ	膨張指数 ⁵⁾ κ	初期間隙比 e_0	異方性指数 ⁶⁾ η_0
弾塑性 (315100)	0.333	1.20	0.391	0.022	2.30	0.25
圧密降伏応力 p_c (kPa)	二次圧縮指数 ⁷⁾ α	粘塑性ひずみ 速度 ⁸⁾ $\dot{\nu}_0$	静止土圧係数 ¹⁾ K_0	内部摩擦角 ϕ' (度)	圧密係数 c_{vx} (cm ² /day)	圧密係数 c_{vy} (cm ² /day)
98.0	-	-	0.50	30	104	104

1) $K_0=1 - \sin\phi'$

2) $\nu'=K_0/(1+K_0)$

3) $M=6 \sin\phi' / (3 - \sin\phi')$

4) $\lambda=0.434C_c$

5) $\kappa=0.434C_s$

6) $\eta_0=(1 - K_0) / (1 + 2K_0)$

7) $\alpha=0.434C_\alpha / (1+e_0)=0.434 \cdot 0.05C_c / (1+e_0)$

8) $\dot{\nu}_0=\alpha/t_c, t_c=10^6(\text{day})$

2.4 GeoFem 入力データの作成手順

要素シミュレーションのための GeoFem 入力データの具体的な作成方法を以下に説明する。以下の説明で で囲んだ箇所が GeoFem 入力データである。なお、完成された入力データファイルは、crs2cm-ep1.dat として付録 A1 に収録している。

(1) 単位系

GeoFem で使用する単位系は、重力単位系である。その組み合わせとして、(tf, m) (gf, cm) などがあるが、要素シミュレーションを行う場合は、(gf, cm) でデータを作成すると良い。また、時間に関する単位は秒 (sec) を使用する。

(2) 入力データ作成フロー

図-2.12 に GeoFem 入力データの作成フローを示す。これは入力データの記述順序でもある。

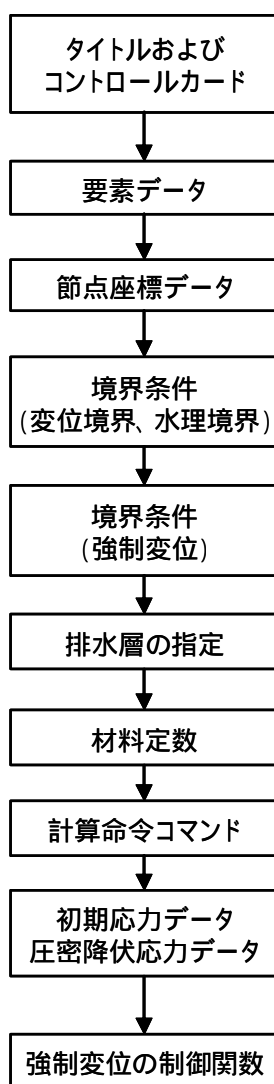


図-2.12 入力データ作成フロー

(3) タイトルおよびコントロールカード

FEAP	CRS(Minami-Honmoku, 98kPa)								
	29	6	1	2	3	8	3	1	1

一行目 (FEAP): コントロールカードの宣言、その後にデータファイルのタイトルを記述する。

二行目 (NP, NE, NMAT, NDM, NDF, NEN, KIND, IFLAG, NFORC): コントロールカード (9 データ)

NP	: 節点数	= 29	(図-2.9)
NE	: 要素数	= 6	(図-2.9)
NMAT	: 材料数	= 1	
NDM	: 次元数	= 2	(2 次元)
NDF	: 節点自由度数	= 3	(x 変位、y 変位、間隙水圧)
NEN	: 要素最大節点数	= 8	(8 節点アイソパラメトリック要素)
KIND	: 応力状態フラグ	= 3	(軸対称解析)
IFLAG	: 圧密解析フラグ	= 1	(圧密を考慮)
NFORC	: 境界条件制御数	= 1	(強制変位を与える制御関数 PROP の数)

(4) 要素データ

ELEM										
	1	1	1	3	14	12	2	9	13	8
	2	1	3	5	16	14	4	10	15	9
	3	1	5	7	18	16	6	11	17	10
	4	1	12	14	25	23	13	20	24	19
	5	1	14	16	27	25	15	21	26	20
	6	1	16	18	29	27	17	22	28	21

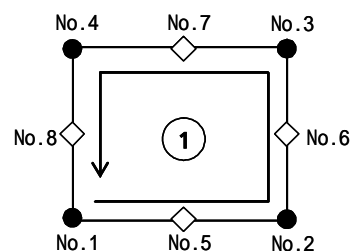


図-2.13 節点番号の対応

一行目 (ELEM): 要素カードの宣言

二行目以降 (要素番号, 増分値, 節点 No.1, No.2, No.3, No.4, No.5, No.6, No.7, No.8)

要素構成節点の節点 No. は、ある端点(No.1)から 4 つの端点 を半時計回りに記述し、次いで No.1 端点と No.2 端点の中間節点を No.5 として、反時計回りに 4 つの中間節点 を記述する(図-2.13)。すべてのレコードを記述する場合は、増分値は 1 としておけばよい。

(5) 節点座標データ

COOR		
1	0	0.000000 0.000000
2	0	0.500000 0.000000
3	0	1.000000 0.000000
4	0	1.500000 0.000000
5	0	2.000000 0.000000
6	0	2.500000 0.000000
7	0	3.000000 0.000000
8	0	0.000000 0.500000
9	0	1.000000 0.500000
10	0	2.000000 0.500000
11	0	3.000000 0.500000
12	0	0.000000 1.000000
13	0	0.500000 1.000000
14	0	1.000000 1.000000
15	0	1.500000 1.000000
16	0	2.000000 1.000000
17	0	2.500000 1.000000
18	0	3.000000 1.000000
19	0	0.000000 1.500000
20	0	1.000000 1.500000
21	0	2.000000 1.500000
22	0	3.000000 1.500000
23	0	0.000000 2.000000
24	0	0.500000 2.000000
25	0	1.000000 2.000000
26	0	1.500000 2.000000
27	0	2.000000 2.000000
28	0	2.500000 2.000000
29	0	3.000000 2.000000

一行目 (COOR): 節点座標カードの宣言

二行目以降 (節点番号, 増分値, x座標, y座標)

(1) 単位系で説明したように、ここでは cm 単位で座標を定義している。

(6)境界条件

STB0 0.0,0.0,3.00,0.0,1,1,0,	底面
STB0 0.0,0.0,0.0,2.00,1,0,0,	対称軸非排水
STB0 3.00,0.0,3.00,2.00,1,0,0,	側面
STB0 0.0,2.00,3.00,2.00,0,0,1,	上面

- 一行目 (STB0): 直線 (座標定義) による境界条件の入力宣言
 - 二行目 (始点 x, 始点 y, 終点 x, 終点 y, x 変位拘束条件, y 変位拘束条件, 排水条件)
 - 変位拘束条件: 拘束 = 1、自由 = 0
 - 水理条件: 排水 = 1、非排水 = 0
- それぞれの STB0 間は 1 行以上の空白行を入れること。

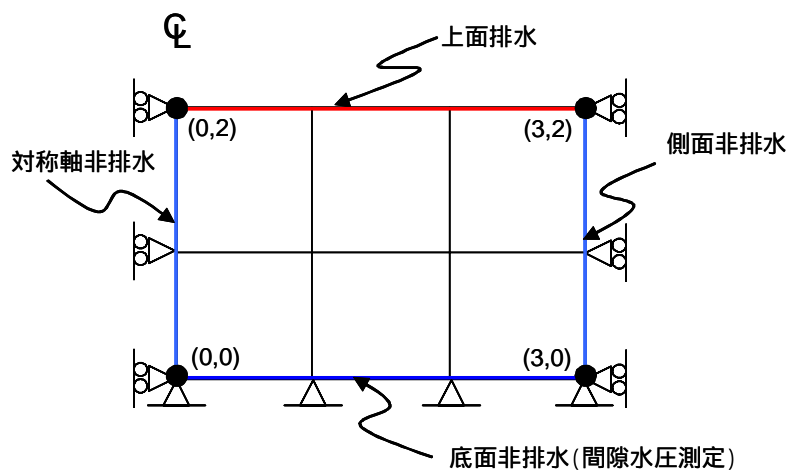


図-2.14 境界条件

(7)境界条件 (強制変位)

BOUN	
23,0,1,1,0,	
24,0,1,1,0,	
25,0,1,1,0,	
26,0,1,1,0,	
27,0,1,1,0,	
28,0,1,1,0,	
29,0,1,1,0,	
FORC	
23,0,0.0,-1.0,0.0,	
24,0,0.0,-1.0,0.0,	
25,0,0.0,-1.0,0.0,	
26,0,0.0,-1.0,0.0,	
27,0,0.0,-1.0,0.0,	
28,0,0.0,-1.0,0.0,	
29,0,0.0,-1.0,0.0,	

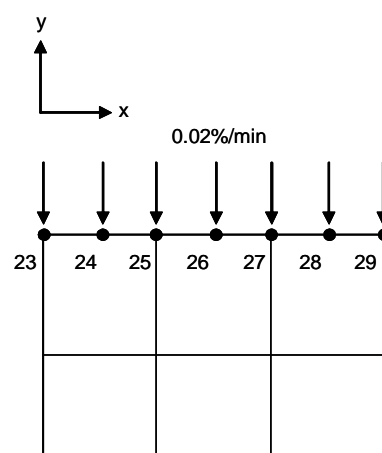


図-2.15 境界条件 (強制変位)

一行目 (BOUN): 節点 No. 指定による境界条件の入力

二行目以降 (節点番号, 増分値, x 変位拘束条件, y 変位拘束条件, 排水条件)

変位拘束条件: 拘束 = 1、自由 = 0

水理条件: 排水 = 1、非排水 = 0

一行目 (FORC): 境界条件の値の入力。変位を拘束した場合は既知の強制変位の値、排水条件を固定した場合は既知の間隙水圧の値である。

二行目以降 (節点番号, 増分値, x 方向の強制変位値, y 方向の強制変位値, 間隙水圧値)

この例題では、一次関数によって徐々に y 方向に強制変位を与えている。すなわち、FORC の入力では強制変位のベクトル方向「-1」を入力しておき、具体的な強制変位の値は、後述の制御関数 PROP で与えている。なお、制御関数を導入しているため、コントロールカードの NFORC は「1」となっている。

(8)排水層の指定

DRAI

一行目 (DRAI): 排水層の入力宣言

二行目: 排水層の数

三行目以降: 排水層として定義する材料 No.

この例題では、排水層としてする定義する材料がないので、二行目がゼロ (ブランク) となっている。このコマンド自体が無くて良い。

(9)材料定数（関口・太田の弾塑性構成モデルを適用した場合）

MATE								
1	1							
315100		0	0.3330000	0.00000	2	0	0	1.20
0.3910	0.0220	2.300	0.00000	0.250	1.0	1.0	-1.20E-3	
-1.20E-3								

一行目（MATE）：材料定数の入力宣言

二行目（材料No.，要素種類番号）：平面ひずみの場合、要素種類番号 = 1

三行目（IRT, 0, v' , γ' , NI, ρ , 0, M）

四行目（ λ , κ , e_0 , 0, η_0 , \dot{v}_0 , α , c_{vx} ）

五行目（ c_{vy} ）

IRT	: 315100（関口・太田の弾・粘塑性モデルの場合は 315200）
v'	: ポアソン比
γ'	: 有効単位体積重量 = 0、初期応力データで入力するため、ここではゼロとする。
NI	: 積分次数 = 2
ρ	: 動解オプション = 0
M	: 限界応力比
λ	: 圧縮指数（ $\lambda=0.434C_c$ ）
κ	: 膨張指数（ $\kappa=0.434C_s$ ）
e_0	: 初期間隙比
η_0	: 異方性指数（ $\eta_0=(1-K_0)/(1+2K_0)$ ）
\dot{v}_0	: 初期体積ひずみ速度、弾塑性モデルの場合は 1.0 とする。
α	: 二次圧縮指数（ $\alpha=0.434C_\alpha/(1+e_0)$ ） 弾塑性モデルの場合は 1.0 とする。
c_{vx}	: x 方向圧密係数（負の値で入力する）。 $104\text{cm}^2/\text{day}=1.20 \times 10^{-3}\text{cm}^2/\text{sec}$ となる。
c_{vy}	: y 方向圧密係数（負の値で入力する）。

弾塑性構成モデルに使用する計算モデルについて

IRT=315100 は、

IRT1=3：線形・非線形・塑性等の種類は、「弾・粘塑性」

IRT2=1：弾性の種類は、「線形弾性」

IRT3=5：塑性の種類は、「二次元の関口・太田モデル」

IRT4=1：粘性の種類は、「線形粘性（仮想粘性）」

IRT5=0：透水係数で入力する場合に有効なオプション

IRT6=0：使用していないので常に 0

関口・太田の弾・粘塑性構成モデルを使用する場合には IRT4=2 とし、関口・太田の弾塑性構成モデルを使用する場合には IRT4=1 とする。IRT4=1 は、仮想粘性法に基づいて弾塑性状態の超過応力の再配分計算を行うためのものである。

IRT の使用法は、「GeoFem マニュアル p.76」あるいは、「修正版 GeoFem を用いた地盤の変形解析に関する業務報告書 p.17～p.18」を参考にすると良い。

(10) 計算命令コマンド

END		データ入力コマンドの終了
MACR		計算命令コマンドの開始
INIT		初期応力の読込。計算命令終了(END)の次の行を参照。
PROP	1.0	境界条件(強制変位)の制御関数の読込
DT	10.0	計算時間ステップ $\Delta t = 10 \text{ sec}$
LOOP	3000.0	計算繰り返し回数 3,000 回、 $10 \times 3000 = 30,000 \text{ sec}$
NTIM		新しい時刻の設定
FORM		外力ベクトルと残差ベクトルの計算
UTAN		剛性マトリックスの計算(非対称マトリックスの場合)
SOLV		連立方程式を解いて未知変位ベクトルを計算
INCR		新しい応力と変位に設定
STRE	30.0	応力を log ファイルに出力(30 ステップおき)
DISP	30.0	変位を log ファイルに出力(30 ステップおき)
STRF	30.0	応力を str ファイルに出力(30 ステップおき)
DISF	30.0	変位を dsp ファイルに出力(30 ステップおき)
NEXT		LOOP に対応する NEXT
DT	10.0	計算時間ステップ $\Delta t = 10 \text{ sec}$
LOOP	8000.0	
NTIM		
FORM		
UTAN		
SOLV		
INCR		
STRE	80.0	
DISP	80.0	
STRF	80.0	
DISF	80.0	
NEXT		
END		計算命令コマンドの終了
→ 1, -10.0, 0.00, 0.50, -1000.0, 0.0, 0.50,		初期応力、圧密降伏応力(11)
→ 0, 0, 0.0, 120000.0, 0.0, 6.67E-6, ,		強制変位の制御関数(12)
END		全ての入力コマンドの終了
STOP		

解析結果の出力に GeoFem プリ・ポストプログラム「FEM3」を使用する場合、表示可能なステップ数は最大 200 ステップである。したがって、要素シミュレーションのように細かい時間ステップで計算をしなければいけない場合、上記例のように出力する時間ステップを大きく取るなどの調整を行う必要がある。上記例での出力ステップ数は、 $3,000/30 + 8,000/80 = 200$ である。

str ファイルの出力バグ

出力ステップに 2 ステップ以上の値を指定したとき、以下に示すように、str ファイルには余分な TIME 情報が出力されてしまう（配布版 GeoFem のバグと考えられる）。この出力状態のまま FEM3 で結果を読み込むと、「FEM 計算の出力ファイルにエラーが見られます。チェックしてください。」というメッセージが表示される。したがって、計算終了後、テキストエディタで余分な TIME を削除する必要がある。

```
TIME .1000E+02
TIME .2000E+02
TIME .3000E+02
TIME .4000E+02
TIME .5000E+02
TIME .6000E+02
TIME .7000E+02
TIME .8000E+02
TIME .9000E+02
TIME .1000E+03
TIME .1100E+03
TIME .1200E+03
TIME .1300E+03
TIME .1400E+03
TIME .1500E+03
TIME .1600E+03
TIME .1700E+03
TIME .1800E+03
TIME .1900E+03
TIME .2000E+03
TIME .2100E+03
TIME .2200E+03
TIME .2300E+03
TIME .2400E+03
TIME .2500E+03
TIME .2600E+03
TIME .2700E+03
TIME .2800E+03
TIME .2900E+03
TIME .3000E+03
  1 1 .2113E+00 .2113E+00
    .5048E+01 .1010E+02 .5048E+01 .1868E-15 -.1696E+01 -.1396E+02
  1 2 .7887E+00 .2113E+00
    .5048E+01 .1010E+02 .5048E+01 .1041E-14 -.1696E+01 -.1396E+02
  1 3 .7887E+00 .7887E+00
    .5090E+01 .1018E+02 .5090E+01 .1677E-14 -.1693E+01 -.1387E+02
  1 4 .2113E+00 .7887E+00
    .5090E+01 .1018E+02 .5090E+01 -.7924E-15 -.1693E+01 -.1387E+02
  2 1 .1211E+01 .2113E+00
```

削除すべき TIME

(11) 初期応力および圧密降伏応力

1, -10.0, 0.00, 0.50, -1000.0, 0.0, 0.50,

初期応力、圧密降伏応力 (INIT の参照先)

材料番号, a, b, K_0 , α , β , K_{0y}

初期応力関数 : $P_v = a + b \cdot y$, $P_{vx} = K_0 \cdot P_v$

圧密降伏応力関数 : $P_c = \alpha + \beta \cdot y$, $P_{cx} = K_{0y} \cdot P_c$

ここに y は座標値、 K_0 は静止土圧係数、 K_{0y} は降伏時の静止土圧係数である。

P_v, P_c とともに負の値となるように入力する必要がある。

本例題の圧密降伏応力は、 $P_c = 98 \text{ kPa} (= 1000 \text{ gf/cm}^2)$ であるから、

$\alpha = -1000.0$, $\beta = 0$

とすればよい。

要素シミュレーションにおける初期応力については、あまり小さい値を設定すると計算上不安定となるので、 $P_v = 0.98 \text{ kPa} (= 10 \text{ gf/cm}^2)$ と仮定した。すなわち、

$a = -10.0$, $b = 0$

とした。

(12) 強制変位の制御関数

0, 0, 0.0, 120000.0, 0.0, 6.67E-6,

強制変位の制御関数 (NFORC=1 に対応、PROP の参照先)

K , n , t_{\min} , t_{\max} , A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_5 ,

制御関数の一般式 : $\text{PROP} = A_1 + A_2 t + A_3 \{ \sin(A_4 t + A_5) \}^n$

ここでは、 $0 < t < 120000 \text{ sec}$ の範囲で、 $\text{PROP} = 6.67 \times 10^{-6} t$ (cm/sec) が有効である。

ひずみ速度 $0.02\%/ \text{min}$ の強制変位を与える場合、GeoFem では PROP による制御関数を用いる。ひずみ速度は以下のように表される。

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{H_0} \cdot 100 = 0.02\% / \text{min}$$

ここに、 Δy は Δt 間の強制変位の値、 H_0 は供試体初期高さ (2cm) である。本例題における GeoFem 入力単位系は「cm/sec」であるから、強制変位 Δy は以下のように変換される。

$$\Delta y = 0.02 \cdot \frac{H_0}{100} = 0.02 \cdot \frac{2}{100} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ cm/min} = 6.67 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$$

2.5 FEM 解析結果

図-2.16 に解析結果の着目位置を示す。変位は供試体上面位置（節点 No.23） 間隙水圧は供試体下面位置（節点 No.1） 応力は供試体上面位置の積分点（要素 No.4）をそれぞれ着目点とした。時間 t における間隙比 e_t は次式によって計算した。

$$e_t = \frac{H_t}{H_s} - 1 \quad (2.1)$$

$$H_t = H_0 - d_t \quad (2.2)$$

$$H_s = \frac{m_s}{\rho_s A} \quad (2.3)$$

ここに、

H_t : 時間 t における供試体高さ (cm)

H_0 : 供試体初期高さ (cm)

d_t : 時間 t における供試体の圧縮量 (cm)

H_s : 供試体の実質高さ (cm)

ρ_s : 土粒子の密度 (g/cm^3) $\rho_s = 2.7\text{g}/\text{cm}^3$

A : 供試体断面積 (cm^2) $A = 28.27\text{cm}^2$

m_s : 供試体の炉乾燥質量 (g) $m_s = 46.27\text{g}$

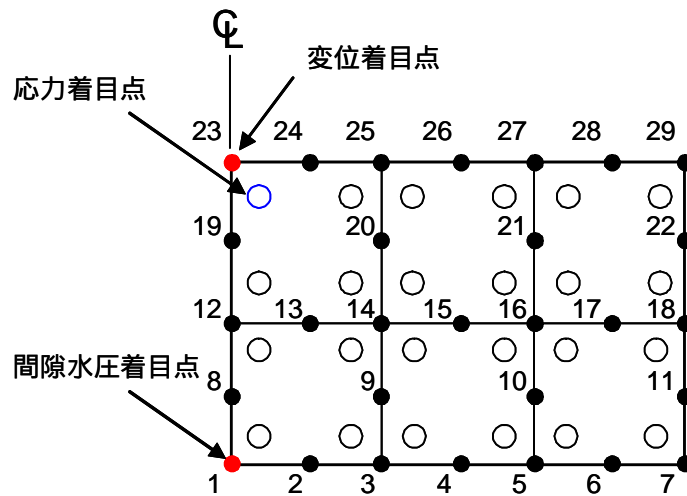


図-2.16 解析結果の着目点

図-2.17 に e - $\log p$ 曲線について、FEM 解析結果と CRS 試験結果の比較を示す。図-2.18 には、変位 - 間隙水圧曲線の比較を示す。なお、以降の図は重力単位で出力された GeoFem 解析結果を SI 単位系に変換したものである。

図-2.17 より、FEM 解析は過圧密領域で CRS 試験とのわずかな違いが見られるが、正規圧密領域では CRS 試験結果を概ね再現できていることが確認できる。図-2.18 より、過剰間隙水圧の発現傾向についても、FEM 解析は CRS 試験結果を概ね再現できていることが確認できる。

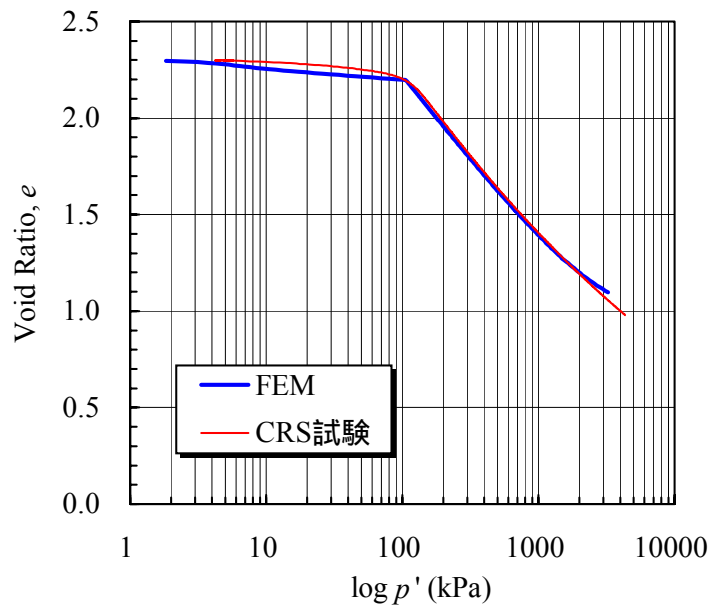


図-2.17 FEM 解析と CRS 試験の比較 (e - $\log p$ 曲線、初期応力 0.98kPa)

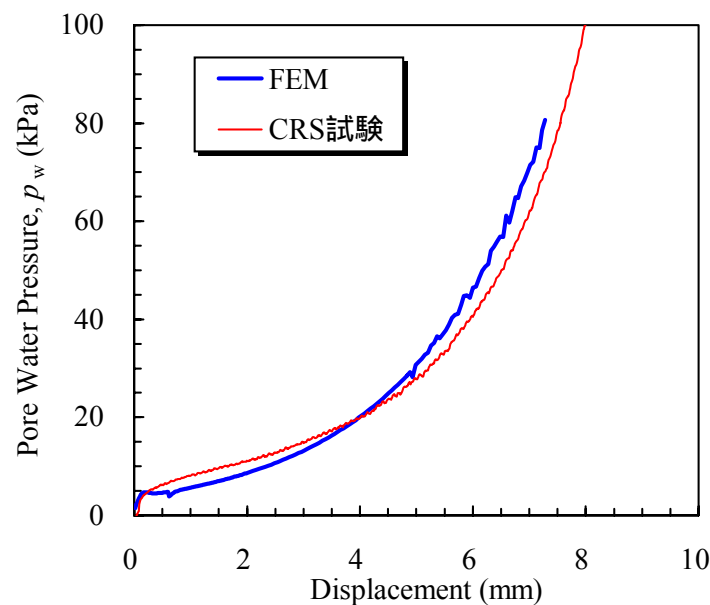


図-2.18 FEM 解析と CRS 試験の比較 (変位 - 間隙水圧曲線、初期応力 0.98kPa)

FEM 解析による要素シミュレーションにおいて、初期応力の設定値を 0.98kPa (10gf/cm^2) から 4.90kPa (50gf/cm^2) へ変更した場合の比較を図-2.19 および図-2.20 に示す。

初期応力をやや大きめに設定した場合、 e - $\log p$ 曲線については、過圧密領域、圧密降伏応力 (98kPa) をまたぐ範囲、 500kPa 付近までの正規圧密領域において、FEM 解析結果は CRS 試験結果を良く再現している。いっぽう過剰間隙水圧については、FEM 解析結果が CRS 試験の e - $\log p$ をトレースできていない範囲 ($e < 1.6, d_t > 4\text{mm}$) で、両者の差が大きくなっている。

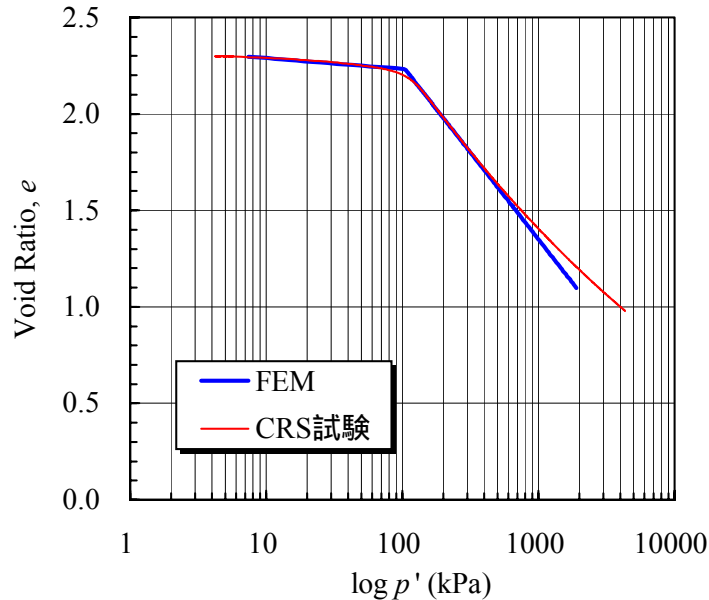


図-2.19 FEM 解析と CRS 試験の比較 (e - $\log p$ 曲線、初期応力 4.9kPa)

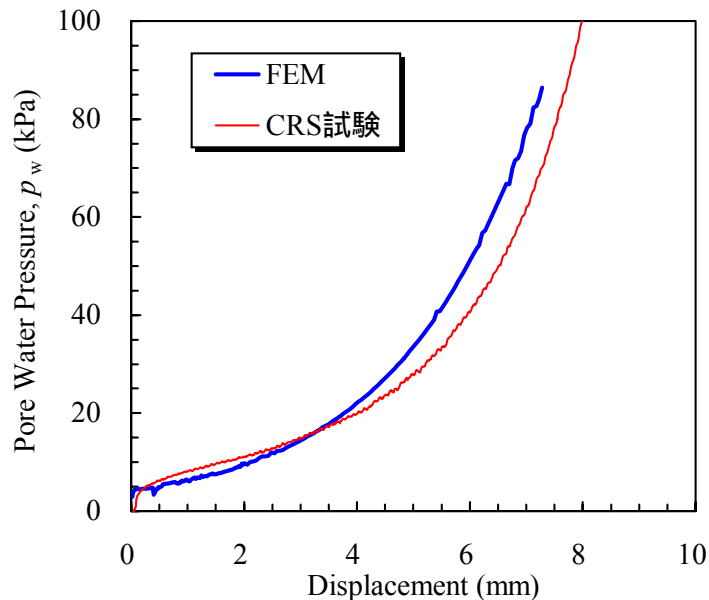


図-2.20 FEM 解析と CRS 試験の比較 (変位 - 間隙水圧曲線、初期応力 4.9kPa)

2.6 除荷の解析

次に、正規圧密領域のある段階で除荷を行う場合の解析例を示す。

圧密地盤における実際の除荷問題は、地下水位の上昇による有効応力の減少やサーチャージ荷重の撤去などが考えられる。これらの現象を有限要素解析で再現する場合は、除荷されるべき応力を境界条件に与えて、そのときの膨張量を予測する方法（荷重制御）が一般的である。しかしここでは、GeoFem によって除荷問題を再現できるかどうかに着目するため、強制変位を伸張方向に与えて、そのときの要素応力を求める方法（変位制御）を採用した。

入力データは単調荷重モデルのデータ（crs2cm-ep1.dat）を基本として作成する。以下では、単調荷重モデルからの変更点を解説する。以下の説明で□で囲んだ箇所が GeoFem 入力データで、赤字が変更箇所を示している。なお、完成された入力データファイルは、crs2cm-ep2.dat として付録 A2 に収録している。

(1) 単位系

単調荷重モデルの場合と同じ（gf, cm, sec）である

(2) 作成フロー

図-2.21 に GeoFem 入力データの作成フローを示す。ハッチングが変更を要する箇所である。

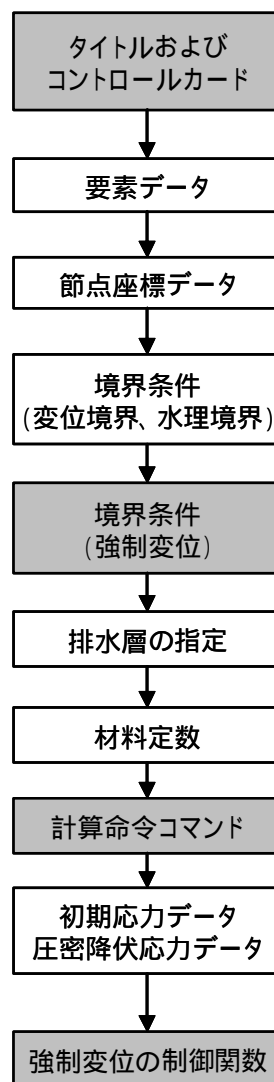


図-2.21 入力データ作成フロー（除荷）

(3) タイトルおよびコントロールカード

FEAP	CRS(Minami-Honmoku, 98kPa, jyoka)							
29	6	1	2	3	8	3	1	2

境界条件の制御関数の数を **NFORC=2** とする。関数 1 は単調載荷を制御する関数（圧縮方向の強制変位を与える時間関数）とし、関数 2 は除荷を制御する関数（伸張方向の強制変位を与える時間関数）とする。

(4) 要素データ

変更なし。

(5) 節点座標データ

変更なし。

(6) 境界条件

変更なし。

(7)境界条件（強制変位）

BOUN	
23,0,1,1,0,	
24,0,1,1,0,	
25,0,1,1,0,	
26,0,1,1,0,	
27,0,1,1,0,	
28,0,1,1,0,	
29,0,1,1,0,	
FORC	
23,0,0.0,-1.0,0.0,0.0,1.0,0.0,	
24,0,0.0,-1.0,0.0,0.0,1.0,0.0,	
25,0,0.0,-1.0,0.0,0.0,1.0,0.0,	
26,0,0.0,-1.0,0.0,0.0,1.0,0.0,	
27,0,0.0,-1.0,0.0,0.0,1.0,0.0,	
28,0,0.0,-1.0,0.0,0.0,1.0,0.0,	
29,0,0.0,-1.0,0.0,0.0,1.0,0.0,	

制御関数 1（载荷）に対応するベクトル方向
 制御関数 2（除荷）に対応するベクトル方向

BOUN コマンドに変更はない。

一行目（FORC）：境界条件の値の入力。変位を拘束した場合は既知の強制変位の値、排水条件を固定した場合は既知の間隙水圧の値である。

二行目以降（節点番号，増分値，x 方向の強制変位値[関数 1]，y 方向の強制変位値[関数 1]，間隙水圧値[関数 1]，x 方向の強制変位値[関数 2]，y 方向の強制変位値[関数 2]，間隙水圧値[関数 2]）

単調载荷では圧縮方向に、除荷では伸張方向に強制変位を与える。FORC の入力では具体的な値を入力するのではなく、強制変位のベクトル方向を圧縮方向は「-1」、伸張方向は「1」として与える。具体的な強制変位の値は、後述の制御関数で与える。

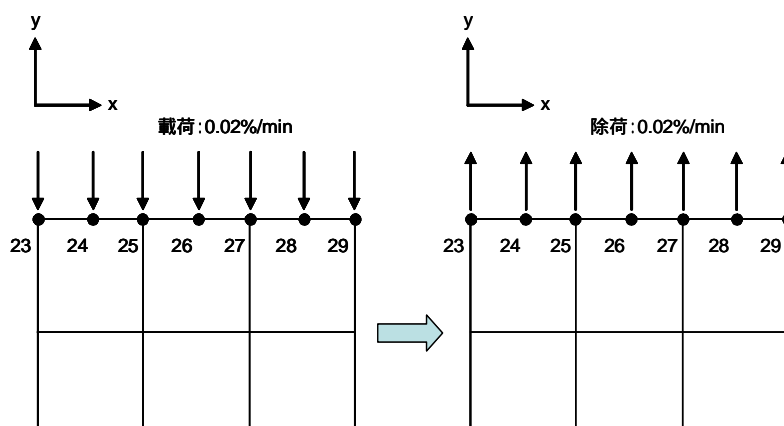


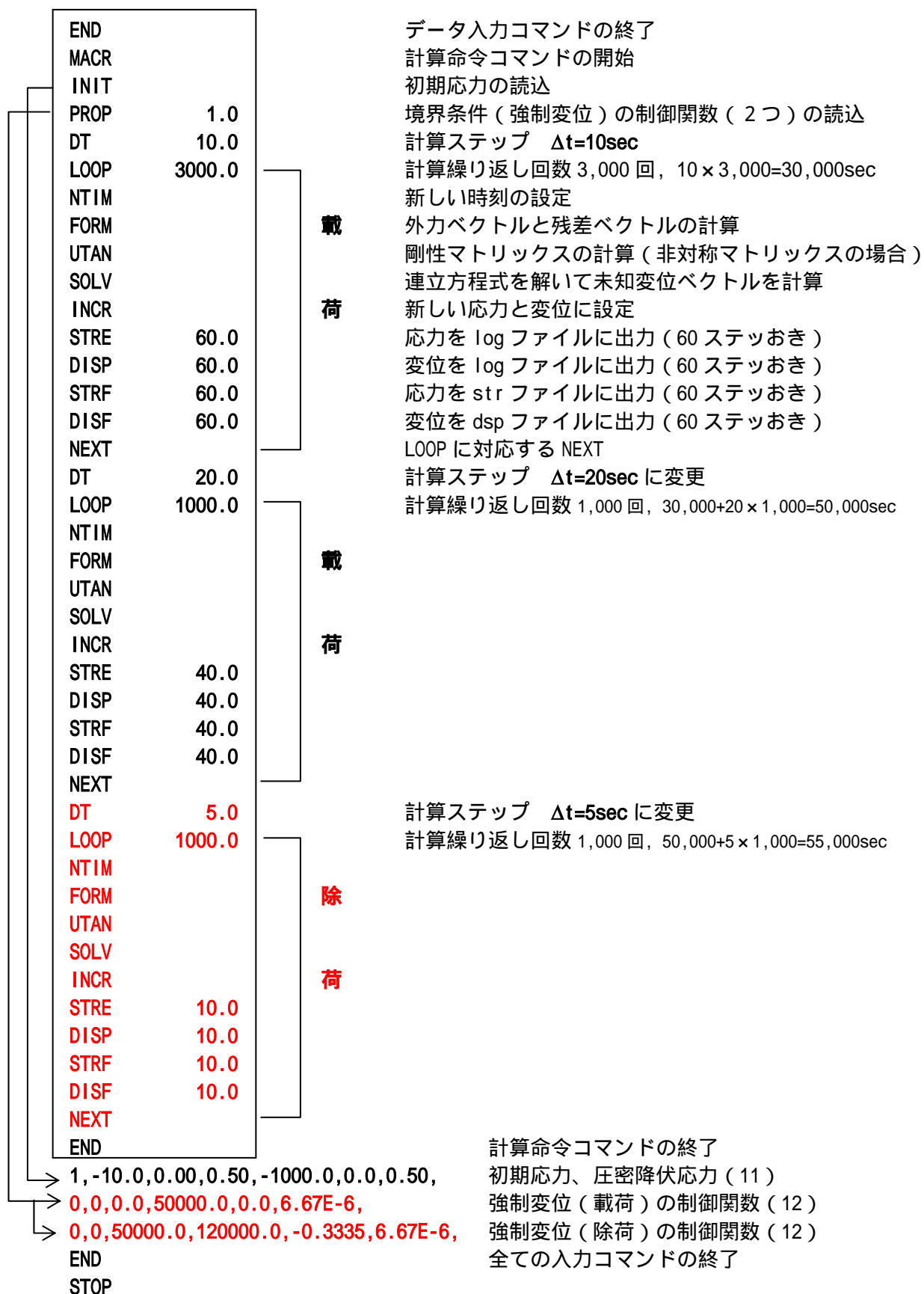
図-2.22 境界条件（強制変位）

(8)排水層の指定
変更なし。

(9)材料定数
変更なし。

(10) 計算命令コマンド

基本的なコマンドは変更なし。除荷の LOOP を追加記入している。



(11) 初期応力および圧密降伏応力
変更なし。

(12) 強制変位の制御関数

0,0,0.0,50000.0,0.0,6.67E-6,
0,0,50000.0,120000.0,-0.3335,6.67E-6,

強制変位（載荷）の制御関数

強制変位（除荷）の制御関数

$K, n, t_{min}, t_{max}, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5,$

制御関数の一般式： $PROP=A_1+A_2t+A_3\{\sin(A_4t+A_5)\}^n$

ひずみ速度（0.02%/min）は載荷、除荷とも同じとするので、単調載荷のデータと同様の算定方法により、 $A_2=6.67 \times 10^{-6}$ （cm/sec）とする。

t_{min}, t_{max} の指定は、計算命令コマンドで入力される時間データとつじつまが合うように作成する。

[載荷]

$0 < t < 50,000$ sec の範囲で載荷。

$PROP=6.67 \times 10^{-6}t$ （cm/sec）

とする。

[除荷]

$50,000 < t < 120,000$ sec の範囲で除荷。実際の除荷は、計算命令コマンドの繰り返し回数の指定により、 $t=55,000$ まで行われる。 $t=50,000$ のとき $PROP=0$ でなければいけないから、

$PROP=-0.3335 + 6.67 \times 10^{-6}t$ （cm/sec）

とする。

(13) 解析結果

図-2.23 に荷重後、正規圧密領域で除荷を行った FEM 解析結果と CRS 試験結果の比較を示す。ただし、CRS 試験では除荷を行っていない。また、図-2.24 に変位 - 間隙水圧曲線を示す。

図-2.23 より、FEM 解析では除荷過程もうまく再現できていることがわかる。図-2.24 より、除荷によって過剰間隙水圧が負圧に転じている様子が見られる。

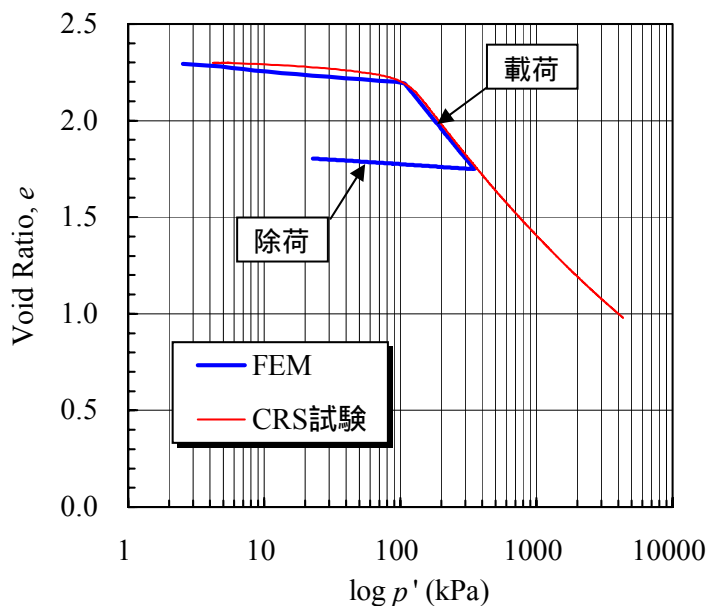


図-2.23 FEM 解析と CRS 試験の比較 (e - $\log p$ 曲線、荷重 + 除荷)

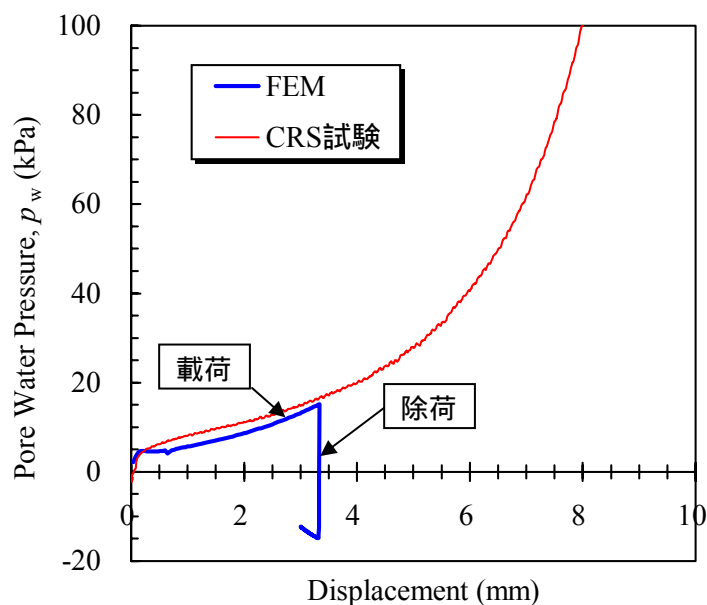


図-2.24 FEM 解析と CRS 試験の比較 (変位 - 間隙水圧曲線、荷重 + 除荷)

2.7 除荷後再載荷の解析

次に、除荷後に再載荷を行う場合の解析例を示す。

入力データは除荷モデルのデータ (crs2cm-ep2.dat) を基本として作成する。除荷モデルからの変更点を以下に解説する。以下の説明で で囲んだ箇所が GeoFem 入力データで、赤字が変更箇所を示している。なお、完成された入力データファイルは、crs2cm-ep3.dat として付録 A3 に収録している。

(1) 単位系

単調載荷モデルの場合と同じ (gf, cm, sec) である

(2) 作成フロー

図-2.25 に GeoFem 入力データの作成フローを示す。ハッチングが変更を要する箇所である。

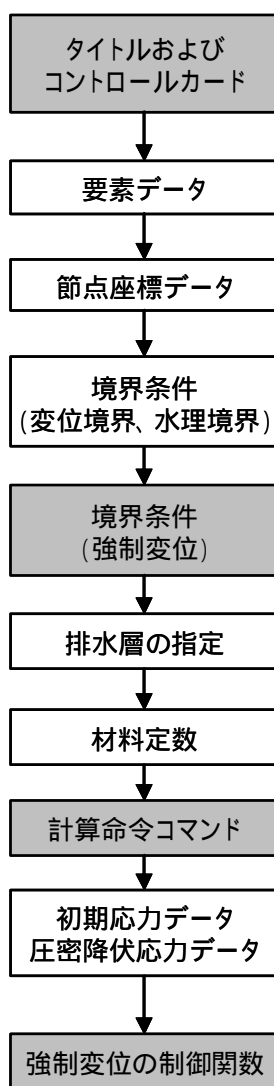


図-2.25 入力データ作成フロー (除荷後再載荷)

(3) タイトルおよびコントロールカード

FEAP	CRS(Minami-Honmoku, 98kPa, saisaika)							
29	6	1	2	3	8	3	1	3

境界条件の制御関数の数を **NFORC=3** とする。関数 1 は単調載荷を制御する関数（圧縮方向の強制変位を与える時間関数）、関数 2 は除荷を制御する関数（伸張方向の強制変位を与える時間関数）、関数 3 は再載荷を制御する関数（圧縮方向の強制変位を与える時間関数）とする。

(4) 要素データ

変更なし。

(5) 節点座標データ

変更なし。

(6) 境界条件

変更なし。

(7)境界条件 (強制変位)

```
BOUN
23,0,1,1,0,
24,0,1,1,0,
25,0,1,1,0,
26,0,1,1,0,
27,0,1,1,0,
28,0,1,1,0,
29,0,1,1,0,

FORC
23,0,0.0,-1.0,0.0,0.0,1.0,0.0,0.0,
-1.0,0.0,
24,0,0.0,-1.0,0.0,0.0,1.0,0.0,0.0,
-1.0,0.0,
25,0,0.0,-1.0,0.0,0.0,1.0,0.0,0.0,
-1.0,0.0,
26,0,0.0,-1.0,0.0,0.0,1.0,0.0,0.0,
-1.0,0.0,
27,0,0.0,-1.0,0.0,0.0,1.0,0.0, 0.0,
-1.0,0.0,
28,0,0.0,-1.0,0.0,0.0,1.0,0.0, 0.0,
-1.0,0.0,
29,0,0.0,-1.0,0.0,0.0,1.0,0.0, 0.0,
-1.0,0.0,
```

制御関数 1 (載荷) に対応するベクトル方向
制御関数 2 (除荷) に対応するベクトル方向
制御関数 3 (再載荷) に対応するベクトル方向

FORC の入力フォーマット
2I5,7F10.5 (関数 3 の 1 つ目のレコード まで)
9F10.5 (関数 3 の 2 つ目のレコード から)

BOUN コマンドに変更はない。

一行目 (FORC) : 境界条件の値の入力。変位を拘束した場合は既知の強制変位の値、排水条件を固定した場合は既知の間隙水圧の値である。

二行目 (節点番号, 増分値, x 方向の強制変位値 [関数 1], y 方向の強制変位値 [関数 1], 間隙水圧値 [関数 1], x 方向の強制変位値 [関数 2], y 方向の強制変位値 [関数 2], 間隙水圧値 [関数 2], x 方向の強制変位値 [関数 3])

三行目 (y 方向の強制変位値 [関数 3], 間隙水圧値 [関数 3])

二行目、三行目を強制変位が与えられる節点の分だけ繰り返して記入する。

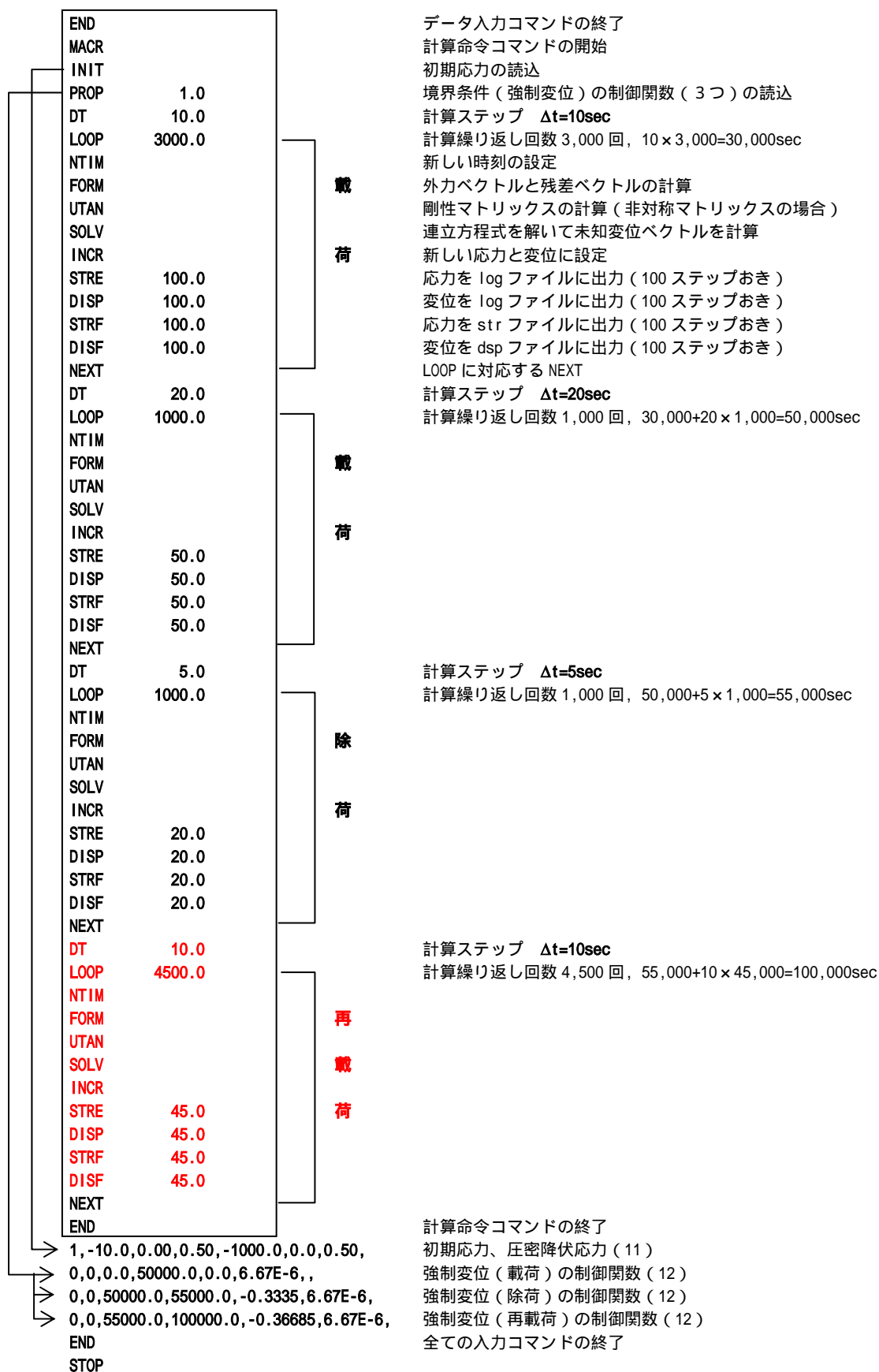
単調載荷では圧縮方向に、除荷では伸張方向に、再載荷では再び圧縮方向に強制変位を与える。FORC の入力では具体的な値を入力するのではなく、強制変位のベクトル方向を圧縮方向は「-1」、伸張方向は「1」として与える。具体的な強制変位の値は、後述の制御関数で与える。

(8)排水層の指定
変更なし。

(9)材料定数
変更なし。

(10) 計算命令コマンド

基本的なコマンドは変更なし。載荷、除荷、再載荷で LOOP を変えている。



(11)初期応力および圧密降伏応力
変更なし。

(12) 強制変位の制御関数

0,0,0.0,50000.0,0.0,6.67E-6,, 0,0,50000.0,55000.0,-0.3335,6.67E-6, 0,0,55000.0,100000.0,-0.36685,6.67E-6,

強制変位（載荷）の制御関数
強制変位（除荷）の制御関数
強制変位（再載荷）の制御関数

K, n, t_{min} , t_{max} , A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_5 ,

制御関数の一般式： $PROP=A_1+A_2t+A_3\{\sin(A_4t+A_5)\}^n$

ひずみ速度（0.02%/min）は載荷、除荷、再載荷とも同じとするので、単調載荷のデータと同様の算定方法により、 $A_2=6.67 \times 10^{-6}$ （cm/sec）とする。

t_{min} , t_{max} の指定は、計算命令コマンドで入力される時間データとつじつまが合うように作成する。

[載荷]

0<t<50,000secの範囲で載荷。

$PROP=6.67 \times 10^{-6}t$ （cm/sec）

とする。

[除荷]

50,000<t<55,000secの範囲で除荷。

t=50,000のとき PROP=0 でなければいけないから、

$PROP=-0.335 + 6.67 \times 10^{-6}t$ （cm/sec）

とする。

[再載荷]

55,000<t<100,000secの範囲で再載荷。

t=55,000のとき PROP=0 でなければいけないから、

$PROP=-0.36685 + 6.67 \times 10^{-6}t$ （cm/sec）

とする。

(13) 解析結果

図-2.26 に除荷後に再載荷を行った FEM 解析結果と CRS 試験結果の比較を示す。また、図-2.27 に変位 - 間隙水圧曲線を示す。

図-2.26 より、FEM 解析では再載荷もうまく再現できており、もとの e - $\log p$ 曲線に漸近していく様子がわかる。図-2.27 より、除荷によって負圧に転じていた過剰間隙水圧が再び正の過剰間隙水圧を生じ、もとの曲線に漸近していく様子がわかる。

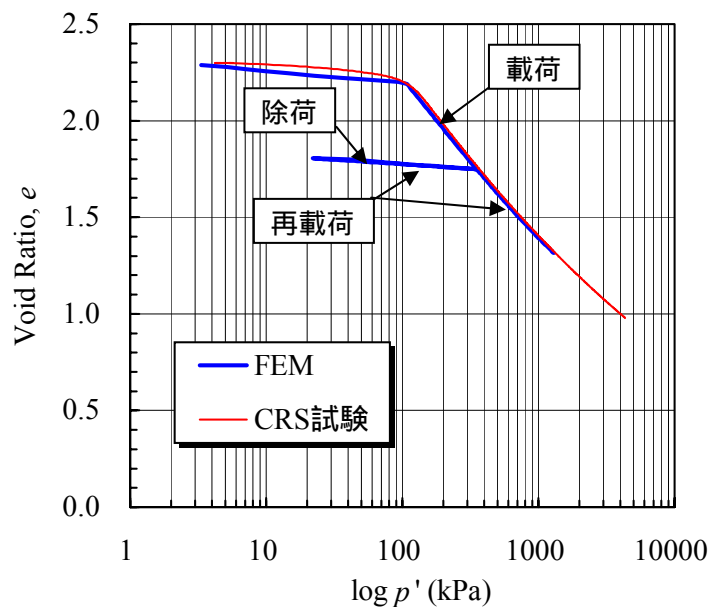


図-2.26 FEM 解析と CRS 試験の比較 (e - $\log p$ 曲線、載荷 + 除荷 + 再載荷)

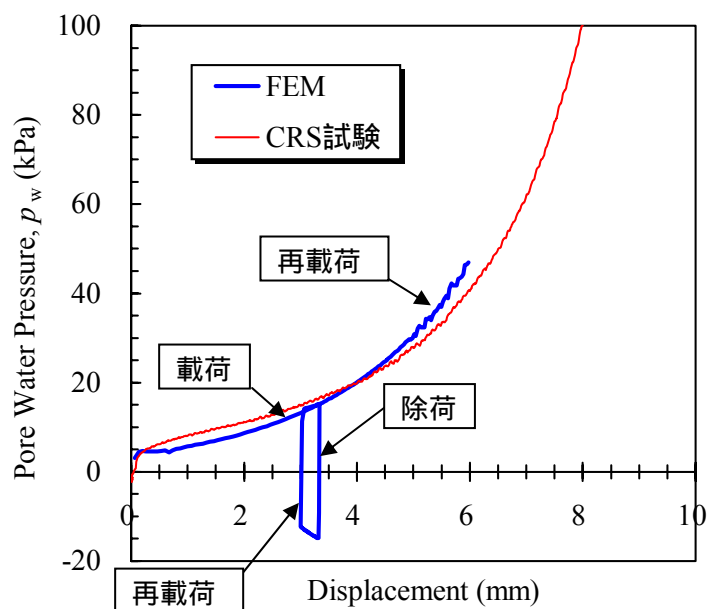


図-2.27 FEM 解析と CRS 試験の比較 (変位 - 間隙水圧曲線、載荷 + 除荷 + 再載荷)

第3章 実地盤の一次元圧密沈下解析

3.1 解析モデルおよび有限要素メッシュ

図-3.1 に一次元解析モデル（仮想地盤、正規圧密状態）を示す。対象モデルは、2m の上部砂層の下部に厚さ 18m の粘性土が堆積し、粘性土の下部は基盤層とする。排水条件は上下両面排水とし、上部砂層は排水層として扱い、間隙水圧の発生はないものとする。

解析ケースとしては、以下の3ケースを想定した。

ケース1（载荷モデル）： $H=5\text{m}$ の盛土（ $\Delta p = 9.0\text{tf/m}^2$ ）を50日間で载荷し、その後放置するケース。

ケース2（载荷+除荷モデル）：ケース1と同様に载荷を行った後、1200日目から1500日にかけて地下水位が初期水位の -6.0m から -3.0m まで 3.0m 上昇し、有効重量が減少する（ $-\Delta p = 2.7\text{tf/m}^2$ ）ケース。

ケース3（载荷+除荷+再载荷モデル）：ケース2の除荷後、5000日目から5300日にかけて地下水位が -3.0m から -6.0m まで 3.0m 低下し、有効重量が再び増加する（ $\Delta p = 2.7\text{tf/m}^2$ ）ケース。

盛土荷重は、上部砂層上面に盛土荷重に相当する分布荷重を作用させるものとする。また、除荷や再载荷は、 -3.0m の節点位置に除荷荷重、再载荷荷重に相当する分布荷重を作用させるものとする。

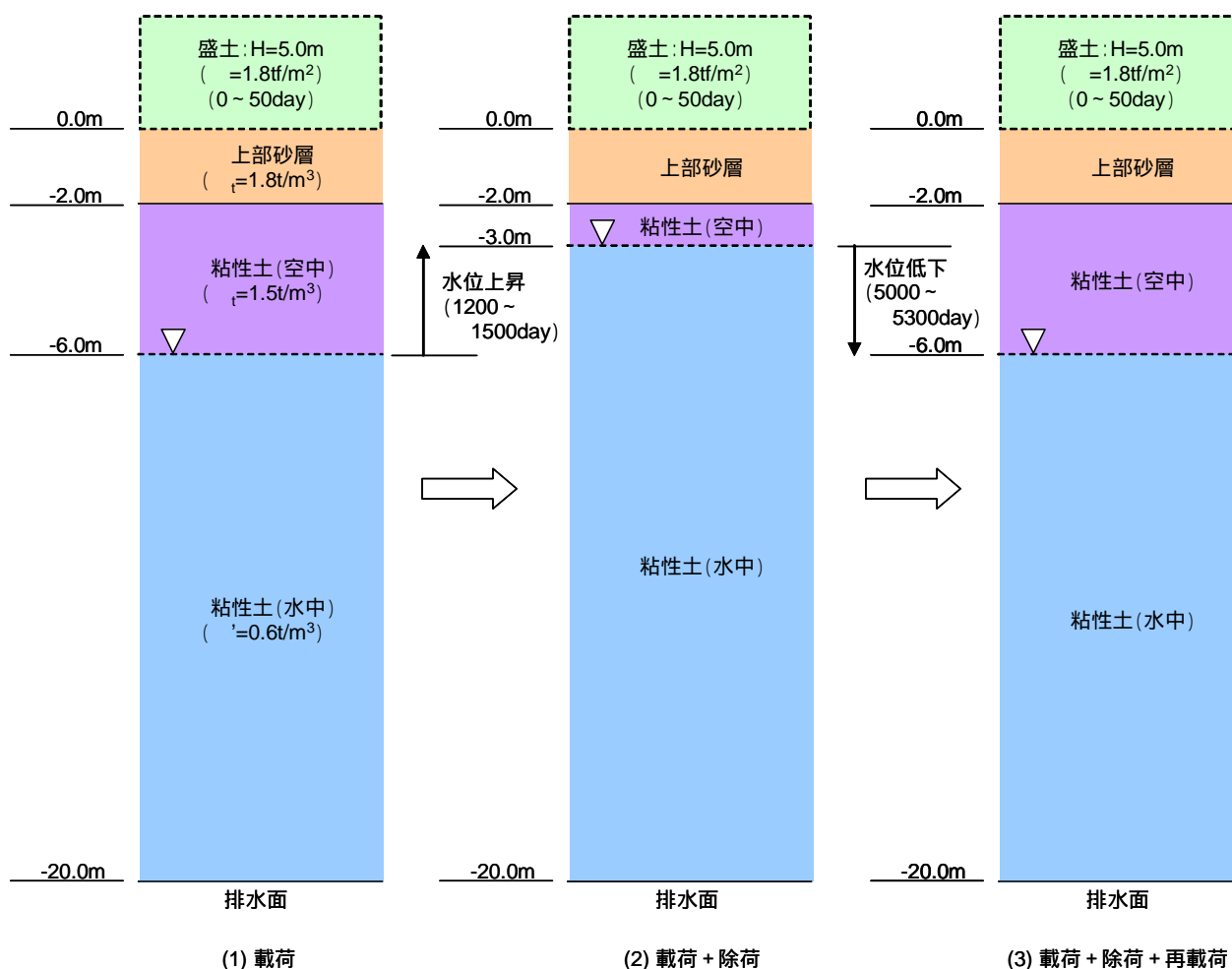


図-3.1 解析モデル

図-3.2 に有限要素メッシュ図、図-3.3 に境界条件図を示す。

有限要素メッシュは、1要素を 1m×1m として作成した。盛土荷重の作用する節点番号は、No.101, 102, 103 である。また、除荷や再載荷に相当する荷重が作用する節点番号は、No.86, 87, 88 である。

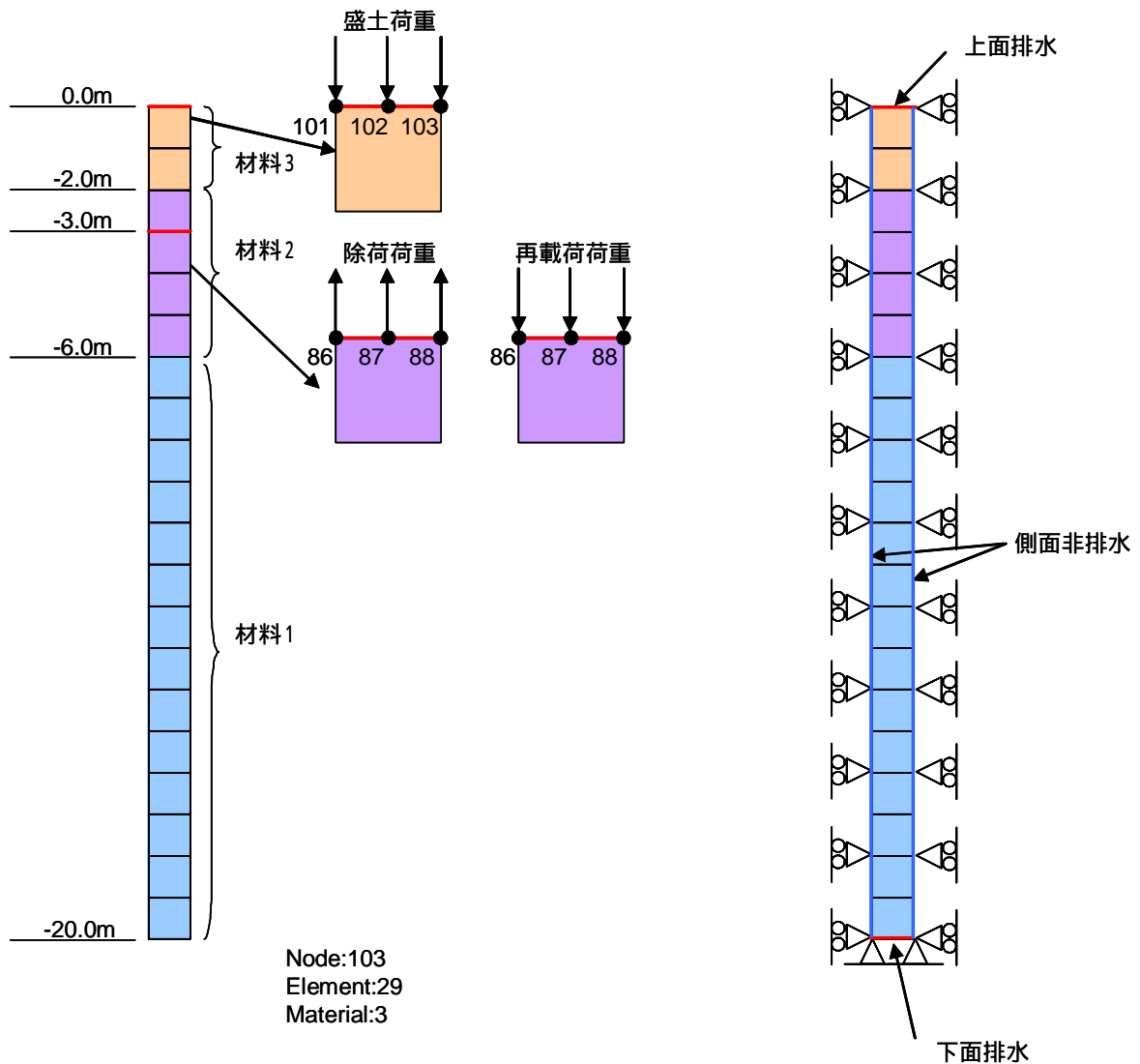


図-3.2 有限要素メッシュ図

図-3.3 境界条件

3.2 土質定数

本例では、関口・太田の弾・粘塑性構成モデルを用いる。表-3.1 に解析に用いた土質パラメータと各パラメータの算定方法を示す。粘性土は正規圧密土を仮定する ($p_c = \sigma_0$)

表-3.1 土質パラメーター一覧

構成モデル (IRT)	ポアソン比 ²⁾ ν'	限界応力比 ³⁾ M	圧縮指数 ⁴⁾ λ	膨張指数 ⁵⁾ κ	初期間隙比 e_0	異方性指数 ⁶⁾ η_0
弾・粘塑性 (313200)	0.333	1.20	0.391	0.022	2.30	0.25
圧密降伏応力 p_c (kPa)	二次圧縮指数 ⁷⁾ α	粘塑性ひずみ 速度 ⁸⁾ $\dot{\nu}_0$	静止土圧係数 ¹⁾ K_0	内部摩擦角 ϕ' (度)	圧密係数 c_{vx} (cm ² /day)	圧密係数 c_{vy} (cm ² /day)
OCR=1 (正規圧密)	0.0059	5.9×10^{-9}	0.50	30	104	104

1) $K_0 = 1 - \sin \phi'$

2) $\nu' = K_0 / (1 + K_0)$

3) $M = 6 \sin \phi' / (3 - \sin \phi')$

4) $\lambda = 0.434 C_c$

5) $\kappa = 0.434 C_s$

6) $\eta_0 = (1 - K_0) / (1 + 2K_0)$

7) $\alpha = 0.434 C_\alpha / (1 + e_0) = 0.434 \cdot 0.05 C_c / (1 + e_0)$

8) $\dot{\nu}_0 = \alpha / t_c$, $t_c = 10^6$ (day)

3.3 GeoFem 入力データの作成手順

以下では、ケース3(载荷 + 除荷 + 再载荷モデル)を例に、GeoFem 入力データの作成手順を説明する。以下の説明で□で囲んだ箇所が GeoFem 入力データである。なお、完成された各解析ケースの入力データファイルは、付録 A4 ~ A6 に収録している。

- 付録 A4: ケース 1 (载荷モデル) File=1d-saika.dat
付録 A5: ケース 2 (载荷 + 除荷モデル) File=1d-jyoka.dat
付録 A6: ケース 3 (载荷 + 除荷 + 再载荷モデル) File=1d-saisaika.dat

(1) 単位系

GeoFem で使用する単位系は、重力単位系である。その組み合わせとして、(tf, m) (gf, cm) などがあるが、実地盤の解析を行う場合は、(tf, m) でデータを作成すると良い。また、時間に関する単位は日 (day) を使用する。

(2) 作成フロー

図-3.4 に GeoFem 入力データの作成フローを示す。図-3.4 は入力データの記述順序でもある。

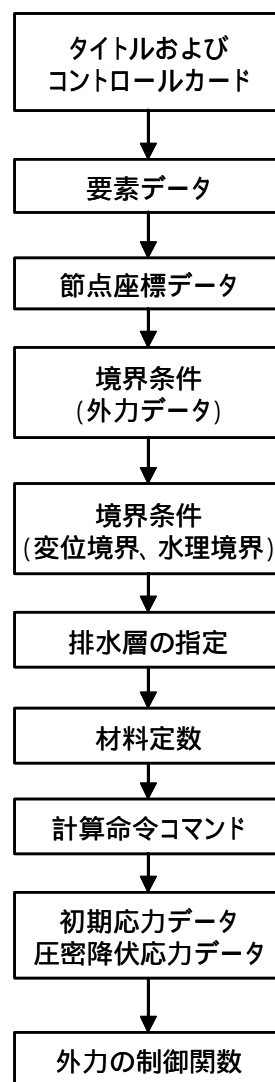


図-3.4 入力データ作成フロー

(3) タイトルおよびコントロールカード

FEAP (Genjiban-model sai-saika)								
103	20	3	2	3	8	0	1	3

一行目 (FEAP): コントロールカードの宣言、その後にデータファイルのタイトルを記述する。

二行目 (NP, NE, NMAT, NDM, NDF, NEN, KIND, IFLAG, NFORC): コントロールカード (9 データ)

NP	: 節点数	= 103	
NE	: 要素数	= 20	
NMAT	: 材料数	= 3	
NDM	: 次元数	= 2	(2 次元)
NDF	: 節点自由度数	= 3	(x 変位、 y 変位、 間隙水圧)
NEN	: 要素最大節点数	= 8	(8 節点アイソパラメトリック要素)
KIND	: 応力状態フラグ	= 0	(平面ひずみ)
IFLAG	: 圧密解析フラグ	= 1	(圧密を考慮)
NFORC	: 境界条件制御数	= 3	(節点荷重を与える制御関数 PROP の数)

(4) 要素データ

ELEM									
1	1	1	3	8	6	2	5	7	4
2	1	13	11	6	8	12	9	7	10
3	1	18	16	11	13	17	14	12	15
4	1	23	21	16	18	22	19	17	20
5	1	28	26	21	23	27	24	22	25
6	1	33	31	26	28	32	29	27	30
7	1	38	36	31	33	37	34	32	35
8	1	43	41	36	38	42	39	37	40
9	1	48	46	41	43	47	44	42	45
10	1	53	51	46	48	52	49	47	50
11	1	58	56	51	53	57	54	52	55
12	1	63	61	56	58	62	59	57	60
13	1	68	66	61	63	67	64	62	65
14	1	73	71	66	68	72	69	67	70
15	2	71	73	78	76	72	75	77	74
16	2	83	81	76	78	82	79	77	80
17	2	88	86	81	83	87	84	82	85
18	2	93	91	86	88	92	89	87	90
19	3	91	93	98	96	92	95	97	94
20	3	103	101	96	98	102	99	97	100

図-3.2 参照

一行目 (ELEM): 要素カードの宣言

二行目以降 (要素番号, 増分値, 節点 No.1, No.2, No.3, No.4, No.5, No.6, No.7, No.8)

(5) 節点座標データ

COOR	
1	0.000000-20.000000
2	0.500000-20.000000
3	1.000000-20.000000
4	0.000000-19.500000
5	1.000000-19.500000
6	0.000000-19.000000
7	0.500000-19.000000
8	1.000000-19.000000
9	0.000000-18.500000
10	1.000000-18.500000
11	0.000000-18.000000
12	0.500000-18.000000
13	1.000000-18.000000
14	0.000000-17.500000
15	1.000000-17.500000
16	0.000000-17.000000
17	0.500000-17.000000
18	1.000000-17.000000
19	0.000000-16.500000
20	1.000000-16.500000
21	0.000000-16.000000
22	0.500000-16.000000
23	1.000000-16.000000
24	0.000000-15.500000
25	1.000000-15.500000
26	0.000000-15.000000
27	0.500000-15.000000
28	1.000000-15.000000
29	0.000000-14.500000
30	1.000000-14.500000
31	0.000000-14.000000
32	0.500000-14.000000
33	1.000000-14.000000
34	0.000000-13.500000
35	1.000000-13.500000
36	0.000000-13.000000
37	0.500000-13.000000
38	1.000000-13.000000
39	0.000000-12.500000
40	1.000000-12.500000
41	0.000000-12.000000
42	0.500000-12.000000
43	1.000000-12.000000
44	0.000000-11.500000
45	1.000000-11.500000
46	0.000000-11.000000
47	0.500000-11.000000
48	1.000000-11.000000
49	0.000000-10.500000
50	1.000000-10.500000
51	0.000000-10.000000
52	0.500000-10.000000
53	1.000000-10.000000
54	0.000000-9.500000
55	1.000000-9.500000
56	0.000000-9.000000
57	0.500000-9.000000

58	1.0000000-9.0000000
59	0.0000000-8.5000000
60	1.0000000-8.5000000
61	0.0000000-8.0000000
62	0.5000000-8.0000000
63	1.0000000-8.0000000
64	0.0000000-7.5000000
65	1.0000000-7.5000000
66	0.0000000-7.0000000
67	0.5000000-7.0000000
68	1.0000000-7.0000000
69	0.0000000-6.5000000
70	1.0000000-6.5000000
71	0.0000000-6.0000000
72	0.5000000-6.0000000
73	1.0000000-6.0000000
74	0.0000000-5.5000000
75	1.0000000-5.5000000
76	0.0000000-5.0000000
77	0.5000000-5.0000000
78	1.0000000-5.0000000
79	0.0000000-4.5000000
80	1.0000000-4.5000000
81	0.0000000-4.0000000
82	0.5000000-4.0000000
83	1.0000000-4.0000000
84	0.0000000-3.5000000
85	1.0000000-3.5000000
86	0.0000000-3.0000000
87	0.5000000-3.0000000
88	1.0000000-3.0000000
89	0.0000000-2.5000000
90	1.0000000-2.5000000
91	0.0000000-2.0000000
92	0.5000000-2.0000000
93	1.0000000-2.0000000
94	0.0000000-1.5000000
95	1.0000000-1.5000000
96	0.0000000-1.0000000
97	0.5000000-1.0000000
98	1.0000000-1.0000000
99	0.0000000-0.5000000
100	1.0000000-0.5000000
101	0.0000000 0.0000000
102	0.5000000 0.0000000
103	1.0000000 0.0000000

一行目 (COOR) : 節点座標カードの宣言
 二行目以降 (節点番号, 増分値, x 座標, y 座標)

(1) 単位系で説明したように、ここでは m 単位で座標を定義している。

(6)境界条件 (外力データ)

DIST										}	載荷
101	103	102	0	0.00000	0.00000	0.00000	-1.00000000	-1.00000000	-1.00000000		
ブランク行											
ブランク行											
DIST										}	除荷
86	88	87	0	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000000	1.00000000	1.00000000		
ブランク行											
ブランク行											
DIST										}	再載荷
86	88	87	0	0.00000	0.00000	0.00000	-1.00000000	-1.00000000	-1.00000000		
ブランク行											
ブランク行											

一行目 (DIST): 節点指定による分布荷重 (外力) の入力宣言

二行目 (始点 x, 左節点, 右節点, 中間節点, 積分次数, 接線方向分布荷重 (左), 接線方向分布荷重 (右), 接線方向分布荷重 (中間), 法線方向分布荷重 (左), 法線方向分布荷重 (右), 法線方向分布荷重 (中間))

分布荷重の大きさは、PROP コマンドによる関数で制御する方が便利なので、DIST に入力するのは、方向ベクトルとする。Y 方向は上向きが正の方向であるから、荷重方向ベクトルは「-1」、除荷方向は「1」とする。

1 つ目の DIST カードが「載荷」、2 つ目の DIST カードが「除荷」、3 つ目の DIST カードが「再載荷」に対応しており、それぞれが後述の PROP による関数で独立に制御される。

それぞれの DIST 間を 3 行以上のブランク行を入れること。

(7)境界条件 (変位境界、水理境界)

STBO 0.0, -20.0, 1.0, -20.0, 1, 1, 1,	底面 (X 変位固定、Y 変位固定、排水)	図-3.3 参照
STBO 0.0, 0.0, 0.0, -20.0, 1, 0, 0,	左側面 (X 変位固定、Y 変位自由、非排水)	
STBO 1.0, 0.0, 1.0, -20.0, 1, 0, 0,	右側面 (X 変位固定、Y 変位自由、非排水)	
STBO 0.0, 0.0, 1.0, 0.0, 0, 0, 1,	上面 (X 変位自由、Y 変位固定、排水)	

一行目 (STBO): 直線 (座標定義) による境界条件の入力宣言

二行目 (始点 x, 始点 y, 終点 x, 終点 y, x 変位拘束条件, y 変位拘束条件, 排水条件)

変位拘束条件: 拘束 = 1、自由 = 0

水理条件: 排水 = 1、非排水 = 0

それぞれの STBO 間は 1 行以上のブランク行を入れること。

(8)排水層の指定

DRAI 1, 3,

一行目 (DRAI): 排水層の入力宣言

二行目: 排水層の数

三行目以降: 排水層として定義する材料 No.

この例では、上部砂層を排水層として定義する。したがって、二行目に定義される排水層の数「1」、三行目に上部砂層の材料番号「3」を入力する。

(9)材料定数 (関口・太田の弾・粘塑性構成モデルを適用した場合)

MATE									
1	1								粘性土 (水中)
313200		0	0.3330000	0.00000	2	0	0	1.4	
0.391	0.0022	2.30	0.00000	0.25	5.90E-09	0.0059	-0.0104		
-0.0104									
2	1								粘性土 (空中)
313200		0	0.3330000	0.00000	2	0	0	1.4	
0.391	0.0022	2.30	0.00000	0.25	5.90E-09	0.0059	-0.0104		
-0.0104									
3	1								上部砂層
0	500.00	0.3330000	0.00000	2					
0	0	0	0.00000	0	0	0	0		
0									

一行目 (MATE) : 材料定数の入力宣言

二行目 (材料 No. , 要素種類番号) : 平面ひずみの場合、要素種類番号 = 1

三行目 (IRT, 0, ν' , γ' , NI, ρ , 0, M)

四行目 (λ , κ , e_0 , 0, η_0 , $\dot{\nu}_0$, α , c_{vx})

五行目 (c_{vy})

IRT	:	313200
ν'	:	ポアソン比
γ'	:	有効単位体積重量 = 0、初期応力データで入力するため、ここではゼロとする。
NI	:	積分次数 = 2
ρ	:	動解オプション = 0
M	:	限界応力比
λ	:	圧縮指数 ($\lambda=0.434C_c$)
κ	:	膨張指数 ($\kappa=0.434C_s$)
e_0	:	初期間隙比
η_0	:	異方性指数 ($\eta_0=(1 - K_0) / (1 + 2K_0)$)
$\dot{\nu}_0$:	初期体積ひずみ速度、 $\dot{\nu}_0 = \alpha / 10^6$ とした。
α	:	二次圧縮指数 ($\alpha=0.434C_\alpha / (1+e_0)$)
c_{vx}	:	x 方向圧密係数 (負の値で入力する)。 104cm ² /day=0.0104m ² /day となる。
c_{vy}	:	y 方向圧密係数 (負の値で入力する)。

弾・粘塑性構成モデルに使用する計算モデルについて

IRT=313200 は、

- IRT1=3 : 線形・非線形・塑性等の種類は、「弾・粘塑性」
- IRT2=1 : 弾性の種類は、「線形弾性」
- IRT3=3 : 塑性の種類は、「一次元の関口・太田モデル (カムクレイ)」
- IRT4=2 : 粘性の種類は、「関口・太田の粘性」
- IRT5=0 : 透水係数で入力する場合に有効なオプション
- IRT6=0 : 使用していないので常に 0

(10) 計算命令コマンド

END			データ入力コマンドの終了
MACR			計算命令コマンドの開始
INIT			初期応力の読込。計算命令終了(END)の次の行を参照。
PROP	1.0		境界条件(外力)の制御関数の読込
DT	0.5		計算時間ステップ $\Delta t = 0.5 \text{ day}$
LOOP	100.0		計算繰り返し回数 100 回、 $0.5 \times 100 = 50 \text{ day}$
NTIM		載	新しい時刻の設定
FORM			外力ベクトルと残差ベクトルの計算
UTAN			剛性マトリックスの計算(非対称マトリックスの場合)
SOLV			連立方程式を解いて未知変位ベクトルを計算
INCR		荷	新しい応力と変位に設定
STRE	2.0		応力を log ファイルに出力(2ステップ=1day おき)
DISP	2.0		変位を log ファイルに出力(2ステップ=1day おき)
STRF	2.0		応力を str ファイルに出力(2ステップ=1day おき)
DISF	2.0		変位を dsp ファイルに出力(2ステップ=1day おき)
NEXT			LOOP に対応する NEXT
DT	1.0		計算時間ステップ $\Delta t = 1 \text{ day}$
LOOP	50.0		計算繰り返し回数 50 回、 $50 + 1.0 \times 50 = 100 \text{ day}$
NTIM		放	
FORM			
UTAN			
SOLV			
INCR		置	
STRE	10.0		
DISP	10.0		
STRF	10.0		
DISF	10.0		
NEXT			
DT	10.0		計算時間ステップ $\Delta t = 10 \text{ day}$
LOOP	30.0		計算繰り返し回数 30 回、 $100 + 10.0 \times 30 = 400 \text{ day}$
NTIM		放	
FORM			
UTAN			
SOLV			
INCR		置	
STRE	3.0		
DISP	3.0		
STRF	3.0		
DISF	3.0		
NEXT			
DT	20.0		計算時間ステップ $\Delta t = 20 \text{ day}$
LOOP	40.0		計算繰り返し回数 40 回、 $400 + 20.0 \times 40 = 1,200 \text{ day}$
NTIM		放	
FORM			
UTAN			
SOLV			
INCR		置	
STRE	4.0		
DISP	4.0		
STRF	4.0		
DISF	4.0		
NEXT			
DT	1.0		計算時間ステップ $\Delta t = 1 \text{ day}$
LOOP	300.0		計算繰り返し回数 300 回、 $1,200 + 1.0 \times 300 = 1,500 \text{ day}$
NTIM		除	
FORM			
UTAN			
SOLV		荷	

INCR			
STRE	15.0		
DISP	15.0		
STRF	15.0		
DISF	15.0		
NEXT			
DT	2.0		
LOOP	250.0		
NTIM			放
FORM			
UTAN			
SOLV			
INCR			量
STRE	10.0		
DISP	10.0		
STRF	10.0		
DISF	10.0		
NEXT			
DT	10.0		
LOOP	300.0		
NTIM			放
FORM			
UTAN			
SOLV			
INCR			量
STRE	30.0		
DISP	30.0		
STRF	30.0		
DISF	30.0		
NEXT			
DT	1.0		
LOOP	300.0		
NTIM			再
FORM			載
UTAN			荷
SOLV			
INCR			
STRE	15.0		
DISP	15.0		
STRF	15.0		
DISF	15.0		
NEXT			
DT	2.0		
LOOP	100.0		
NTIM			放
FORM			
UTAN			
SOLV			
INCR			量
STRE	10.0		
DISP	10.0		
STRF	10.0		
DISF	10.0		
NEXT			
DT	10.0		
LOOP	50.0		
NTIM			放
FORM			
UTAN			
SOLV			量

計算時間ステップ $\Delta t = 2$ day
計算繰り返し回数 250 回、 $1,500 + 2.0 \times 250 = 2,000$ day

計算時間ステップ $\Delta t = 10$ day
計算繰り返し回数 300 回、 $2,000 + 10.0 \times 300 = 5,000$ day

計算時間ステップ $\Delta t = 1$ day
計算繰り返し回数 300 回、 $5,000 + 1.0 \times 300 = 5,300$ day

計算時間ステップ $\Delta t = 2$ day
計算繰り返し回数 100 回、 $5,300 + 2.0 \times 100 = 5,500$ day

計算時間ステップ $\Delta t = 10$ day
計算繰り返し回数 50 回、 $5,500 + 10.0 \times 50 = 6,000$ day

INCR			
STRE	5.0		
DISP	5.0		
STRF	5.0		
DISF	5.0		
NEXT			
DT	50.0		
LOOP	80.0		
NTIM			
FORM			
UTAN			
SOLV			
INCR			
STRE	10.0		
DISP	10.0		
STRF	10.0		
DISF	10.0		
NEXT			
DT	100.0		
LOOP	100.0		
NTIM			
FORM			
UTAN			
SOLV			
INCR			
STRE	10.0		
DISP	10.0		
STRF	10.0		
DISF	10.0		
NEXT			
END			
→	1,-6.0,0.6,0.50,-6.0,0.6,0.50,		材料1：初期応力、圧密降伏応力（11）
→	2,-0.6,1.5,0.50,-0.6,1.5,0.50,		材料2：初期応力、圧密降伏応力（11）
→	3,0.0,1.8,0.50,0.0,1.8,0.50,		材料3：初期応力、圧密降伏応力（11）
→	0,0,0.0,50.0,0.0,0.18,		分布荷重（載荷）の制御関数（12）
→	0,0,1200.0,1500.0,-10.80,0.009,		分布荷重（除荷）の制御関数（12）
→	0,0,5000.0,5300.0,-45.00,0.009,		分布荷重（再載荷）の制御関数（12）
END			全ての入力コマンドの終了
STOP			

計算時間ステップ $\Delta t = 50$ day
 計算繰り返し回数 80 回、 $6,000+50.0 \times 80=10,000$ day

放

置

計算時間ステップ $\Delta t = 100$ day
 計算繰り返し回数 100 回、 $10,000+100.0 \times 100=20,000$ day

放

置

計算命令コマンドの終了

材料1：初期応力、圧密降伏応力（11）

材料2：初期応力、圧密降伏応力（11）

材料3：初期応力、圧密降伏応力（11）

分布荷重（載荷）の制御関数（12）

分布荷重（除荷）の制御関数（12）

分布荷重（再載荷）の制御関数（12）

全ての入力コマンドの終了

DT と制御関数（PROP）で決まる荷重増分値が大きすぎると、計算上不安定になることがある。その場合は、DT を細かくするなどして、計算の安定を図る必要がある。

解析結果の出力に GeoFem プリ・ポストプログラム「FEM3」を使用する場合、表示可能なステップ数は最大 200 ステップである。したがって、放置期間を含む多くのステップで計算をしなければいけない場合、上記例のように出力する時間ステップを大きく取るなどの調整を行う必要がある。

上記例での出力ステップ数は、

$100/2+50/10+30/3+40/4+300/15+250/10+300/30+300/15+100/10+50/5+80/10+100/10=188$

である。

(11)初期応力および圧密降伏応力

1, -6.0, 0.6, 0.50, -6.0, 0.6, 0.50,
2, -0.6, 1.5, 0.50, -0.6, 1.5, 0.50,
3, 0.0, 1.8, 0.50, 0.0, 1.8, 0.50,

材料1：粘性土（水中）
 材料2：粘性土（空中）
 材料3：上部砂質土

材料番号, a, b, K_0 , α , β , K_{0y}

初期応力関数 : $P_v = a + b \cdot y$, $P_{vx} = K_0 \cdot P_v$

圧密降伏応力関数 : $P_c = \alpha + \beta \cdot y$, $P_{cx} = K_{0y} \cdot P_c$

ここに y は座標値、 K_0 は静止土圧係数、 K_{0y} は降伏時の静止土圧係数である。

P_v, P_c ともに負の値となるように入力する必要がある。

図-3.5 に初期状態における有効土被り圧の深度分布図と GeoFem で入力すべき有効土被り圧の関数を示す。本例では、正規圧密状態を仮定しているので、 $P_c = P_v$ 、 $K_{0y} = K_0$ としている。実地盤の解析では、標高をそのままメッシュの Y 座標とすることが多い。Y 座標は通常、負の値をとるため、 P_v 、 P_c の関数も負の値を取るように関数化する必要がある。

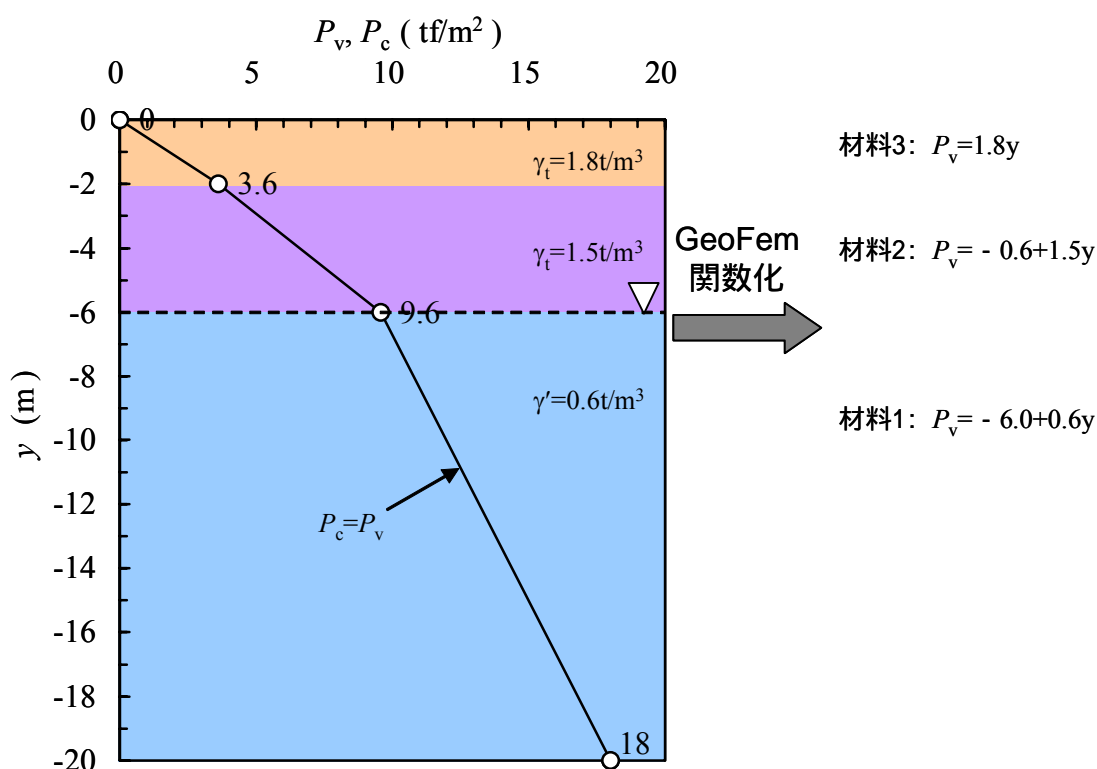


図-3.5 初期応力状態

(12) 分布荷重の制御関数

0,0,0.0,50.0,0.0,0.18,
0,0,1200.0,1500.0,-10.80,0.009,
0,0,5000.0,5300.0,-45.00,0.009,

分布荷重 1 (載荷) の制御関数
 分布荷重 2 (除荷) の制御関数
 分布荷重 3 (再載荷) の制御関数

$K, n, t_{min}, t_{max}, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5,$
 制御関数の一般式 : $PROP=A_1+A_2t+A_3\{\sin(A_4t+A_5)\}^n$

本解析例の載荷工程は以下を仮定している。載荷工程図を図-3.6 に示す。

$0 < t < 50\text{day}$: 載荷 $\Delta p = 9.0\text{tf/m}^2$	載荷速度 $v = 0.18$ ($\text{tf/m}^2/\text{day}$)
$1200 < t < 1500$: 除荷 $\Delta p = -2.7\text{tf/m}^2$	除荷速度 $v = 0.009$ ($\text{tf/m}^2/\text{day}$)
$5000 < t < 5300$: 再載荷 $\Delta p = 2.7\text{tf/m}^2$	再載荷速度 $v = 0.009$ ($\text{tf/m}^2/\text{day}$)

上記の載荷・除荷・再載荷速度式を GeoFem の制御関数 (PROP) にあてはめる。一定速度の載荷の場合は、制御関数 (PROP) を時間の一次関数と見ればよいから、 K, n, A_3, A_4, A_5 をゼロする。 A_2 が載荷速度 v を表し、 A_1 が関数の切片となる。荷重の作用方向は DIST カードで定義済であるから、PROP は荷重の絶対値の関数として定義すればよい。

- 載荷 : $K=0, n=0, t_{min}=0, t_{max}=50, A_1=0, A_2=0.18, A_3=A_4=A_5=0$ として、
 $PROP=0.18t$ (tf/m^2)
- 除荷 : $K=0, n=0, t_{min}=1200, t_{max}=1500, A_2=0.009, A_3=A_4=A_5=0,$
 $t_{min}=1200$ のとき、 $PROP=0$ とするためには、
 $PROP=A_1+0.009 \times 1200=0$ より、切片 $A_1=-10.8$ となる。よって、
 $PROP=-10.8+0.009t$ (tf/m^2)
- 再載荷 : $K=0, n=0, t_{min}=5000, t_{max}=5300, A_2=0.009, A_3=A_4=A_5=0,$
 $t_{min}=5000$ のとき、 $PROP=0$ とするためには、
 $PROP=A_1+0.009 \times 5000=0$ より、切片 $A_1=-45.0$ となる。よって、
 $PROP=-45.0+0.009t$ (tf/m^2)

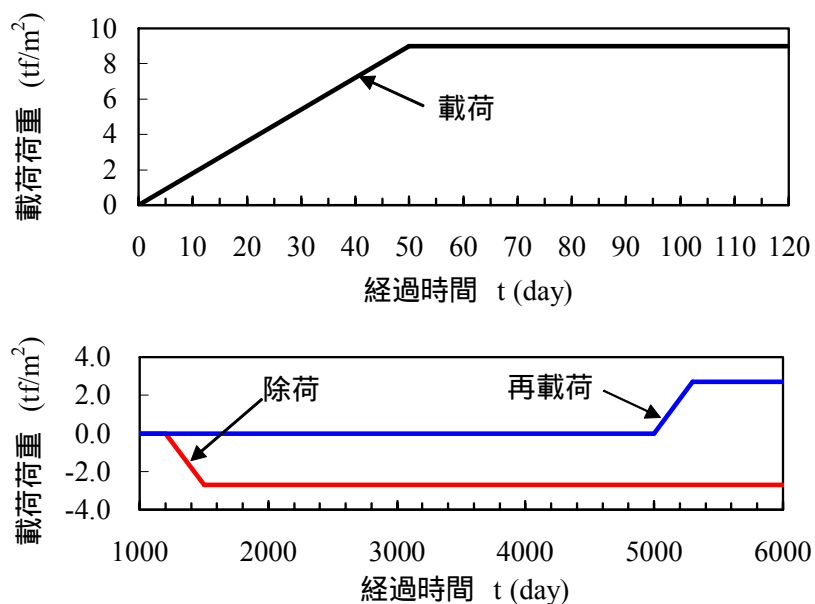


図-3.6 載荷工程図

3.4 解析結果

各ケースの時間～沈下曲線を図-3.7に、時間～過剰間隙水圧曲線を図-3.8に示す。

図-3.7より、荷重後除荷ケース（赤線）では有効応力の減少に伴い、時間～沈下曲線の勾配が緩くなっていることが判る。再び有効応力が増加する再載荷ケース（青線）では、時間沈下曲線の勾配が急になり荷重ケースの時間～沈下曲線（黒線）に漸近していく様子が判る。また、荷重の履歴差を反映してやや圧密が遅れる時間～沈下曲線となっている。

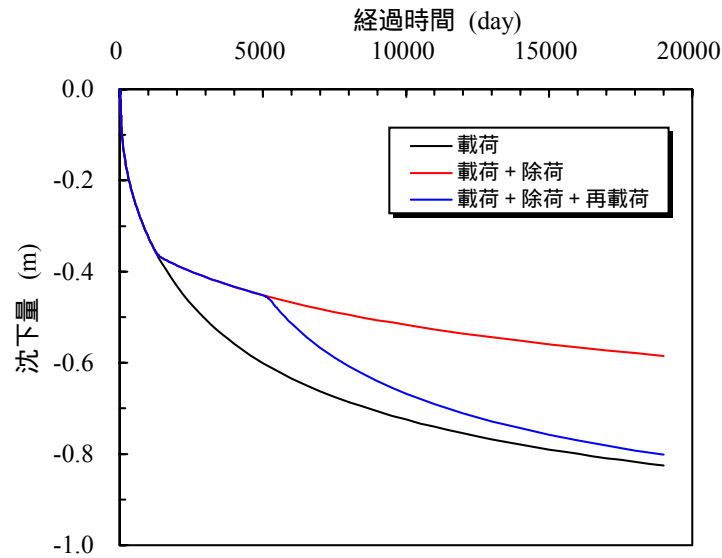


図-3.7 時間～沈下曲線

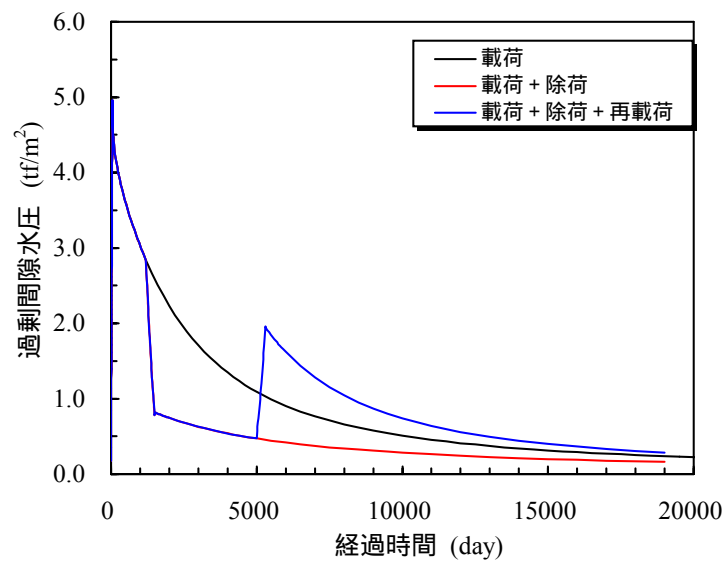


図-3.8 時間～過剰間隙水圧曲線

3.5 プレロード工法の解析

次に一次元圧密解析の応用例として、プレロード工法の解析例を示す。

(1) 解析モデル

解析モデルを図-3.9 に示す。地盤は正規圧密地盤でバーチカルドレーンで改良された地盤を想定する。ドレーン改良の効果は圧密係数 c_v を元の地盤の 50 倍で評価し ($c_v=104\text{cm}^2/\text{day}\rightarrow 5200\text{cm}^2/\text{day}$)、その他の解析パラメータは表-3.1 に示した値と同一とした。通常のプレロード工法では、プレロード荷重 > 構造物荷重とされるので、本解析例では、プレロード荷重を $P=9.0\text{tf}/\text{m}^2$ 、構造物荷重を $P=6.0\text{tf}/\text{m}^2$ とした。

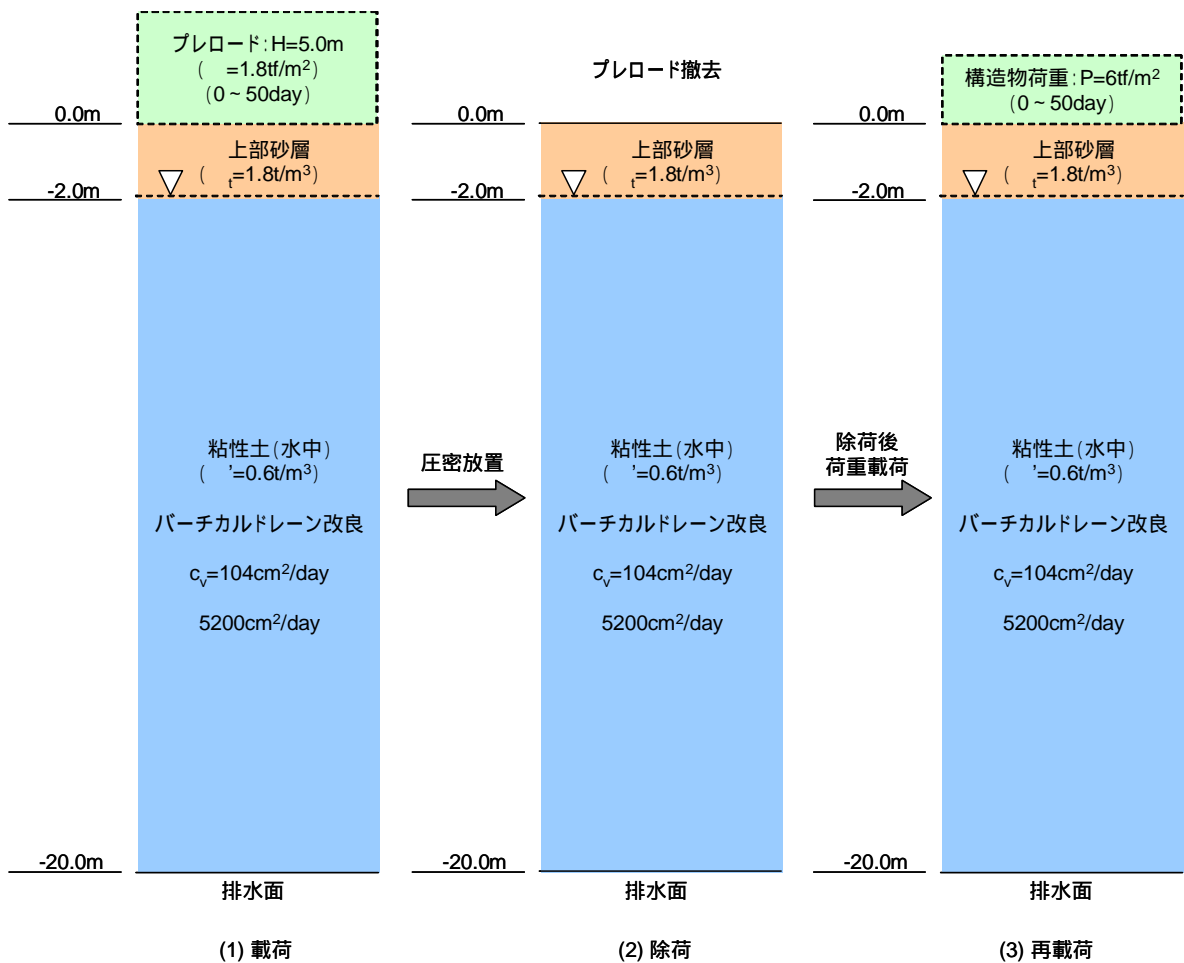


図-3.9 プレロード工法の解析モデル

図-3.10 に除荷、再載荷を行わなかった場合の時間～沈下曲線を示す。

除荷、再載荷を行わなかった場合の載荷直後（50day）における沈下量は 0.25m、載荷後 350 日経過後（400day）における沈下量は 0.73m であった。

図-3.10 を参考に、プレロード荷重の撤去は 400day～450day にかけて行うものとし、構造物荷重の再載荷は 600day～650day にかけて行うケースを考える。プレロード工法の入力データファイルは、付録 A7 に収録している。本節での GeoFem 入力データの作成方法の解説は省略するが、データの作成要領は「3.3 GeoFem 入力データの作成手順」とほぼ同じである。

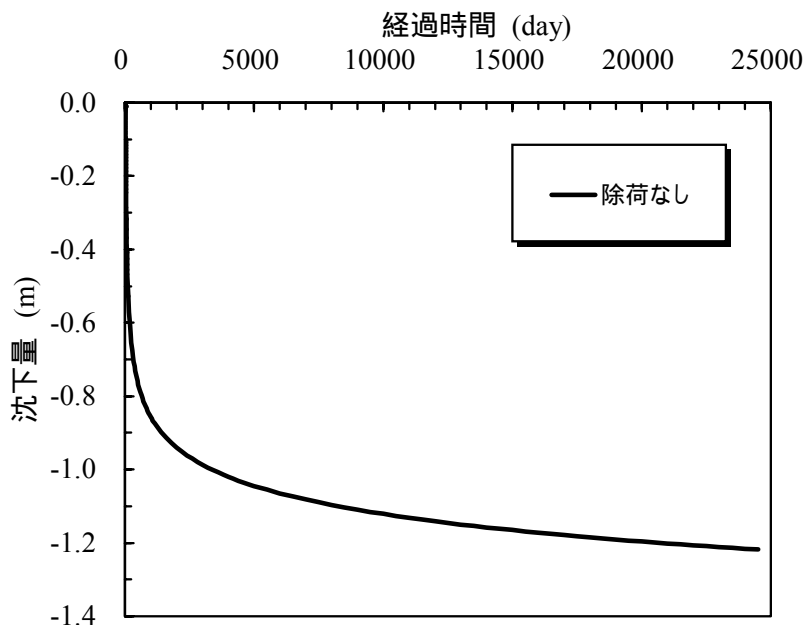


図-3.10 時間～沈下曲線（除荷なし）

表-3.2 載荷条件

工 程	載荷日・終了日	備 考
プレロード	0～50day	$P=9.0\text{tf/m}^2$
放置	50～400day	
プレロード撤去	400～450day	$P=-9.0\text{tf/m}^2$
放置	450～600day	
構造物荷重	600～650day	$P=6.0\text{tf/m}^2$

(2) 解析結果

[プレロード荷重載荷 (50 日)]→[放置 (350 日)]→[プレロード荷重撤去 (50 日)]→[放置 (150 日)] [構造物荷重載荷 (50 日)]の載荷工程で解析した本ケースの、時間～沈下曲線を図-3.11 に示す。図-3.12 は 0～1000 日までの時間～沈下曲線を示したものである。両図には、プレロード荷重の撤去 (除荷) と構造物荷重の載荷 (再載荷) が無いとしたときの解析結果も併せて示している。

図-3.11 および図-3.12 より、解析ではプレロード荷重撤去時にリバウンドによる隆起現象が表れているものの、除荷後の再載荷によって、沈下はあまり生じていない様子が判る。図-3.11 の再載荷後の時間～沈下曲線 (赤線) は、プレロード荷重によって地盤がある程度圧密沈下し、さらにプレロード荷重の撤去によって地盤が過圧密状態に移行したために、プレロード荷重以下の載荷荷重では、沈下量が抑制される現象を表していると解釈できる。すなわち、FEM 圧密解析に除荷・再載荷過程を取り入れることによって、プレロード工法の特長を再現可能であることを示している。

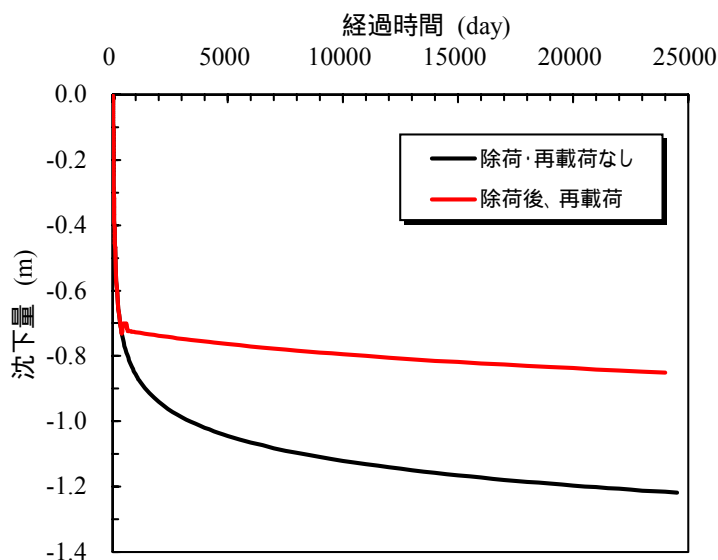


図-3.11 時間～沈下曲線 (全計算時間)

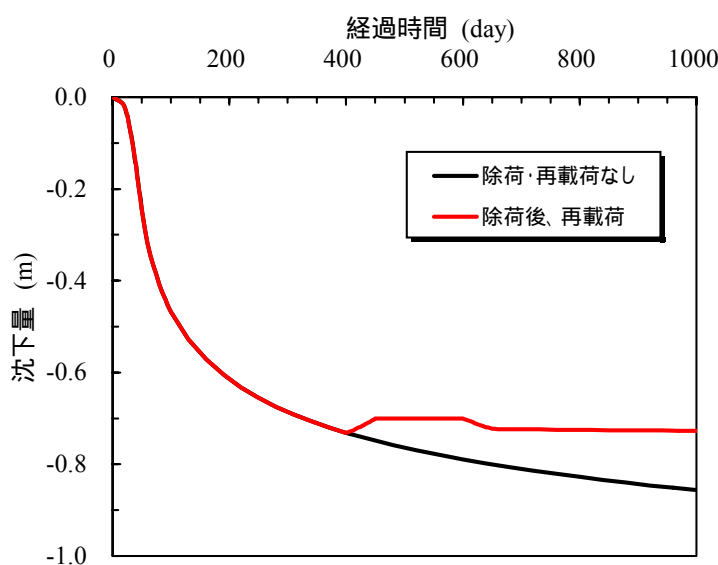


図-3.12 時間～沈下曲線 (0～1000 日)

プレロード載荷後の放置期間を 350 日から 150 日へ変更した場合の解析結果を図-3.13 および図-3.14 に示す。

本解析の計算時間の中では最終沈下量の大きさが一致していないが、計算時間を長くすれば、終局的には最終沈下量はほぼ一致すると考えられる。また、放置期間が 150 日と短いケースは、放置期間 350 日のケースと比較して再載荷後の残留変位が大きいことが判る。

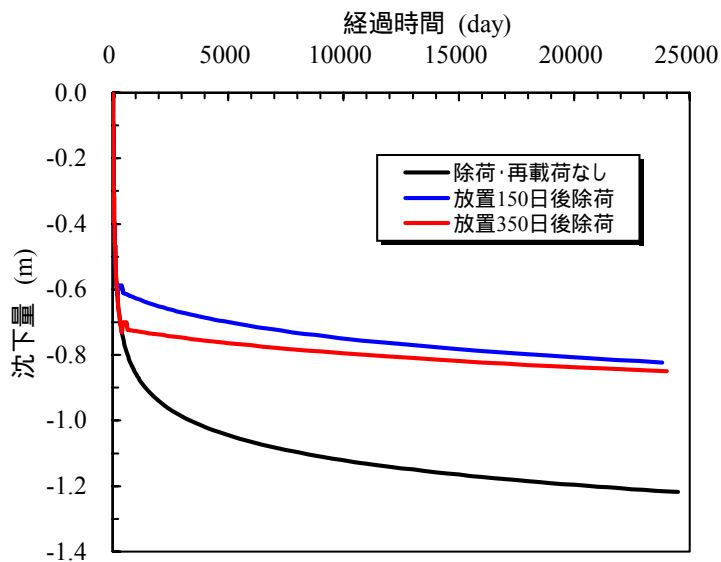


図-3.13 時間～沈下曲線（全計算時間、プレロード後放置期間 150 日）

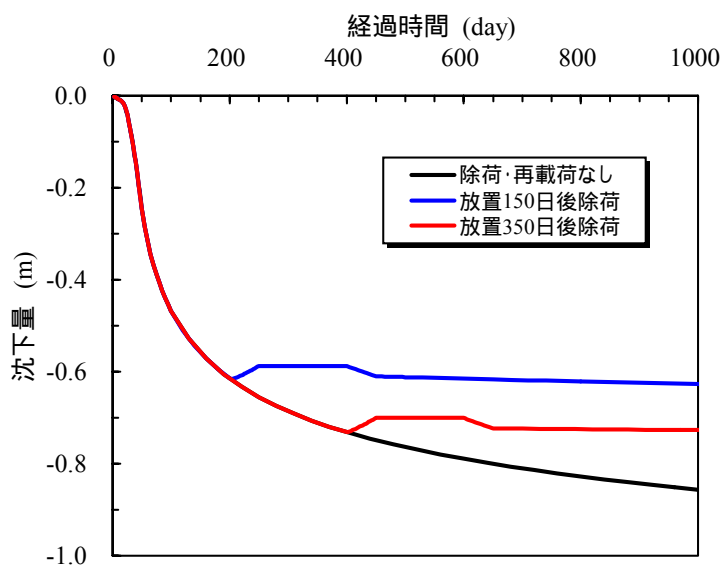


図-3.14 時間～沈下曲線（0～1000 日、プレロード後放置期間 150 日）

参考文献

- 1) 地盤工学会：土質試験の方法と解説（第一回改訂版），pp.390-409, 2000.