

FINITE ELEMENT COMPUTATION OF THE GROUND INSTALLED VERTICAL DRAINS

熊本直樹* (Naoki Kumamoto)

吉国洋** (Hiroshi Yoshikuni)

キーワード：圧密／応力／沈下／軟弱地盤／パーティカルドレーン／盛土／有限要素法 (IGC : E2/D5)

1. まえがき

サンドレーンなどのパーティカルドレーンは一般に柱状であるので、これを打設した地盤の有限要素法解析を行うためには、厳密に言えば、三次元的な取り扱いを必要とする。しかし、平面ひずみ条件による解析が一般的であるので、パーティカルドレーンを打設した地盤を解析する場合は、何らかの近似的取り扱いを必要とする。この近似的取り扱い方法の一つとして、著者らは柱状のパーティカルドレーンを壁状のドレーンに置き換える方法を従来から用いている¹⁾。また、関口らは、Barronの(近似)解をベースにしたマクロエレメント法という有限要素解析手法を、提案している²⁾。これらはいずれも、厳密には三次元的取り扱いを必要とする地盤を、平面ひずみ条件で解析するための便法であり、近似計算である。しかし、これらの方法は近似方法が異なるので、それぞれの計算結果にどのような特徴があるか、興味のあるところである。また、計算結果から実際の地盤の挙動を推定するときにも、おのおのの近似方法の特徴を知っておく必要がある。

そこでここでは、従来から著者らが用いている有限要素プログラムにマクロエレメントを組み込み、壁状のドレーンを用いたものとの比較計算を行った。この論文では、まず、壁状のドレーンを用いた計算方法、および、関口らが提案したマクロエレメント法を概説する。次に、マクロエレメントを組み込んだ有限要素プログラムのテストラン結果を示す。最後に、壁状のドレーンを用いた計算とマクロエレメントを用いた計算とを比較し、それぞれの特徴を考察する。

2. 壁状のドレーンを用いた計算とマクロエレメント法

2.1 壁状のドレーンを用いる計算

壁状のドレーンを用いる計算方法は、図 2.1 に示すように、地盤の中に壁状のドレーンがあるものとして計算する方法で、ドレーン間の間隙水の流れを適切に表現するために、ドレーンとドレーンの間を細かく分割する。図 2.2 に壁状のドレーンの要素分割の例を示す。実際に壁状のドレーンを打設している場合はこの計算方法で問題はないが、柱状のドレーンが普通であるので、その場合には柱状のドレーンの周りの放射流れを、計算では水平流れで近似することになる。放射流れによる圧密と水平流れによる圧密(一次元圧密)は、圧密速度が異なるし、圧密曲線形状も異なる。そこで著者らは放射流れによる圧密と水平流れによる圧密の、圧密度50%に達する時間が一致するように、壁状のドレーンで計算するときの水平方向透水係数、または、壁状のドレーンの間隔を操作している。例えば、水平方向透

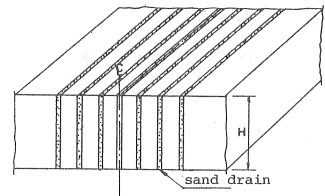


図 2.1 壁状のドレーン

* 三菱重工業株式会社 技術本部 広島研究所 鉄構・土木研究室

** 工博, 広島大学 工学部 教授 (第四類)

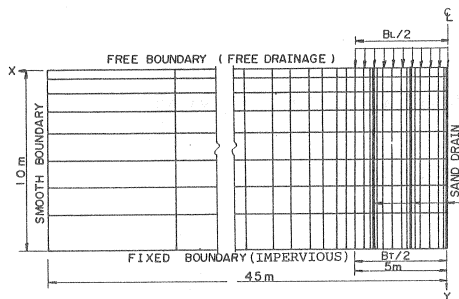


図 2.2 壁状のドレーンの要素分割例

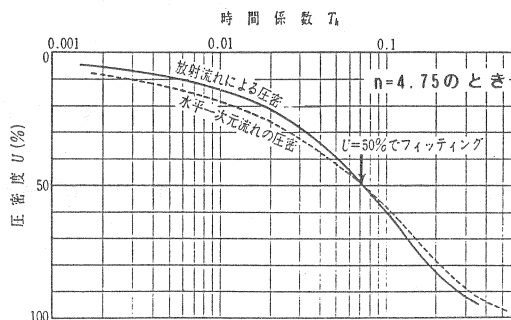


図 2.3 柱状ドレーンと壁状ドレーンのフィッティング

水係数を操作する場合は、式(2.1)で壁状のドレーンで計算するときの水平方向透水係数を定める。

$$k_h = k \cdot \frac{L^2 T_{v50}}{d_e^2 T_{h50}} \tag{2.1}$$

ここに、 k_h 、 k 、 L 、 d_e 、 T_{h50} 、 T_{v50} は、それぞれ、壁状のドレーンで計算するときの水平方向透水係数、実際の水平方向透水係数、壁状のドレーンで計算するときのドレーン間隔の1/2、柱状ドレーンの等価有効円径、放射流れによる圧密の圧密度50%の時間係数（いわゆるBarronの解）、一次元圧密の圧密度50%の時間係数（いわゆるTerzaghiの解）である。この場合は、壁状のドレーン間隔 $2L$ はあらかじめ決めておく。逆に、壁状のドレーンで計算するときの水平方向透水係数 k_h が決められているときは、壁状のドレーン間隔 $2L$ を式(2.1)で定める。このような操作を行うと、圧密曲線は図 2.3 のようになり、圧密度50%の時間は一致する。しかし、図 2.3 から分かるように、放射流れと水平流れによる圧密曲線の形状は一致せず、放射流れによる曲線が水平流れによる曲線より立った形になる。壁状のドレーンで計算する場合は、この曲線形状の違いを、近似計算上のやむをえない誤差と考えて、無視している。

2.2 マクロエレメント法

マクロエレメント法は、関口らによって提案されたバーチカルドレーン打設地盤のFEM解析方法で、その詳細は文献2)に述べられている。マクロエレメント法の概要は次のとおりである。

いま、直径 $2a$ のバーチカルドレーンが格子状に、ピッチ $s_x = s_y$ で打設されているものとする。このとき、基本となるマクロエレメントは、その中心に一本のバーチカルドレーン（直径 $2a$ 、長さ s_z ）を有する、平面寸法 $s_x \times s_y$ ($=s_x$)、高さ s_z の角柱となる。関口らは、この格子配列 ($s_x=s_y$) のバーチカルドレーンに対して、その任意の一本の流出係数 β_{vD} をつぎのように与えている。流出係数とは、圧密の基礎方

$$\beta_{vD} = \frac{2\sqrt{\pi} \cdot k_h \cdot \Delta t}{\gamma_w} \cdot \frac{s_z}{b} \cdot \left[\frac{1 - \frac{1}{n^2}}{\ln(n) - \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \left(3 - \frac{1}{n^2}\right) / 4} \right] \tag{2.2}$$

程式のひとつである連続条件式を考慮するために、いま考えている要素の4

つの境界面から流出する正味の水量を、いま考えている要素の代表間隙水圧 p_w と、その周辺要素の代表間隙水圧 p_{wi} ($i=1,4$) とで表わすための係数である。式(2.2)で、 k_h 、 Δt 、 s_z 、 γ_w は、それぞれ、水平方向透水係数、時間増分、バーチカルドレーンの長さ、間隙水の単位体積重量である。また、式(2.2)の b は有効集

$$b = s_x / \sqrt{\pi} \tag{2.3}$$

水半径で、ドレーンピッチ $s_x = s_y$ と式(2.3)の関係がある。

また、式(2.2)の n は、 $n=b/a$ である。通常用いている記号で表わせば、 $a=d_w/2$ 、 $b=d_e/2$ である。式(2.2)は、Barronの解を参考にして定められたもので、ドレーン内では水頭損失がなくいたるところで間隙水圧が

ゼロという仮定を置き、 $r=b$ （ドレーンとドレーンの境界）では間隙水圧の勾配がゼロとしている。いわゆる Barronの解には2種類あって、等ひずみの厳密解（これをBarronは自由ひずみの解と呼んでいる）と Barronが等ひずみの解と呼んでいるもの（実際にはこれは等ひずみの解ではなく近似解）である。式(2.2)は、後述するように、近似解のほうで決められており、等ひずみの圧密を忠実に再現するものではない。しかし、Barronの近似解は、実際の設計ではよく用いられており、この場合もパーチカルドレーンを打設した地盤を平面ひずみ条件で計算するための近似的な便法であるので、近似解を用いたということはそう問題ではない。さて、式(2.2)を具体的に適用するときは、間隙水の連続条件式を式(2.4)のようにするだけで、FEMプログラムに簡単に組み込むことができる。

$$\int \Delta v \, dx \, dy \, dz = Q \Delta t + Q_{rD} \cdot \Delta t = \left[\left(\beta_{rD} + \sum_{i=1}^4 \beta_i \right) \cdot \bar{p}_w - \sum_{i=1}^4 \left(\beta_i \bar{p}_{wi} \right) \right] \cdot S_y \quad (2.4)$$

ここで、 Δv 、 $Q \Delta t$ 、 \bar{p}_w は、それぞれ、時間増分 Δt の間に生じる有限要素の体積ひずみ、要素から流出する水量、平均間隙水圧である。また、 $r=b$ （ドレーンとドレーンの境界）では間隙水圧の勾配がゼロという条件との整合をとるためには、式(2.4)において、 $\beta_1 \rightarrow 0$ および $\beta_3 \rightarrow 0$ とする（サフィックス1はいま考えているマクロエレメントの左側の要素、サフィックス3は右側の要素を意味する）。 β_2 と β_4 はいま考えているマクロエレメントの上下に位置する要素への流出係数である。

このマクロエレメントは、一つの要素でパーチカルドレーンのモデルである中空円柱の圧密を表わすことができるという利点があるが、要素内の間隙水圧の分布特性を仮定し、間隙水の流出特性をBarronの近似解に一致するよう決め込んでいるという点に注意する必要がある。

3. マクロエレメントを組み込んだプログラムのテストラン

この節では、マクロエレメントを組み込んだプログラムのテストラン結果を説明する。計算モデルは、図3.1に示すように、4節点の等ひずみ長方形要素で、使用した構成式は線形弾性である。土質は、 $c_v=100\text{cm}^2/\text{day}$ 、 $m_v=0.01\text{m}^2/\text{tf}$ （ c_v :圧密係数、 m_v :体積圧縮係数）とした。変位や応力が正しく計算できているかどうかをチェックするために、表3.1に示す4ケースについて計算した。 $m_v=0.01\text{m}^2/\text{tf}$ 、 $H=1\text{m}$ 、 $q=1\text{tf}/\text{m}^2$ であるので、最終沈下量 S_f は0.1mである。また、 $q=1\text{tf}/\text{m}^2$ であるので、初期間隙水圧 u_0 は $u_0 = 1.0\text{tf}/\text{m}^2$ である。計算結果を図3.2～図3.5に示す。図中の実線は、式(3.1)で求めたものである。（注、ここから以降ではY座標を下方方向へとる）

$$U(T) = S/S_f = 1 - u/u_0 = 1 - \exp[-8T/F(n)] \quad (3.1)$$

$$F(n) = n^2/(n^2-1) \log_e - (3n^2-1)/(4n^2)$$

ここに、 U は圧密度（この節では線形弾性としているので応力およびひずみに関する）で、 $T(=c_v t/d_e^2)$ は時間係数である。これらの図から、マクロエレメントが正しく組み込まれていることが分かる。また、マクロエレメントでは、Barronの近似解に従って圧密過程が計算されることが以上から分かる。

4. 壁状のドレーンを用いた計算とマクロエレメント法の比較

4.1 計算モデルおよび計算方法

パーチカルドレーンを打設した地盤の解析を、壁状のドレーンを用いる方法とマクロエレメント法とで行い、それぞれの計算方法の特徴を考察する。壁状のドレーンを用いた計算としては、文献1)に示すシリーズ

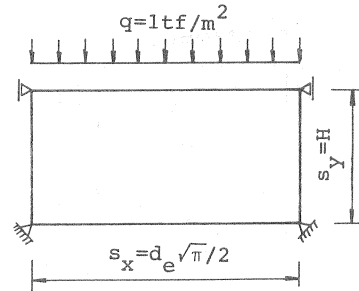


図3.1 計算モデル

表3.1 計算ケース

ケース No	d_e (m)	d_w (m)
T-1	2.0	0.2
T-2	4.0	0.4
T-3	1.0	0.1
T-4	1.0	0.2

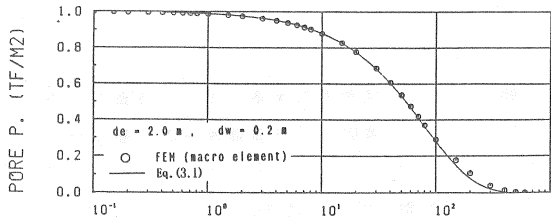
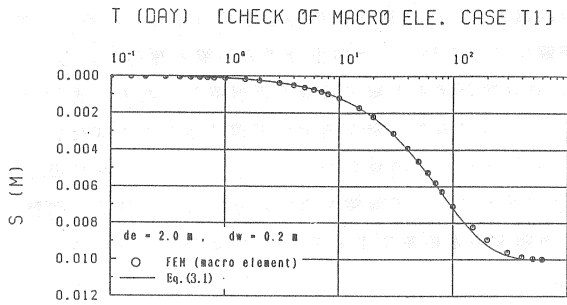


図3.2 マクロエレメントのチェック (CASE T-1)

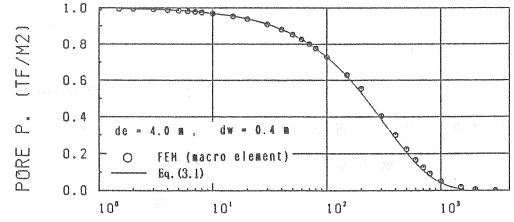
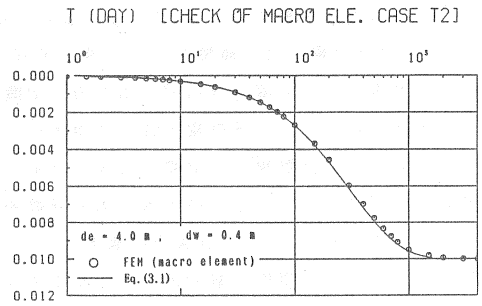


図3.3 マクロエレメントのチェック (CASE T-2)

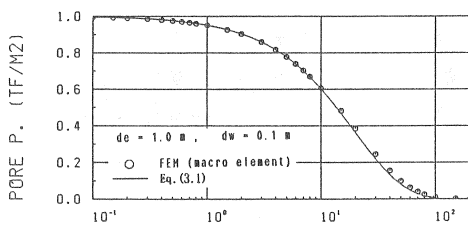
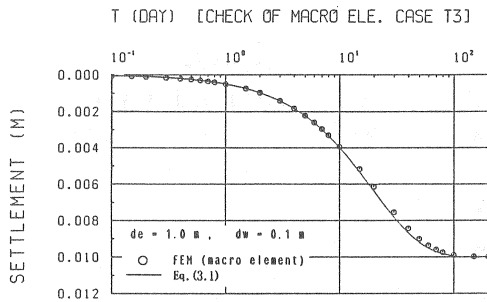


図3.4 マクロエレメントのチェック (CASE T-3)

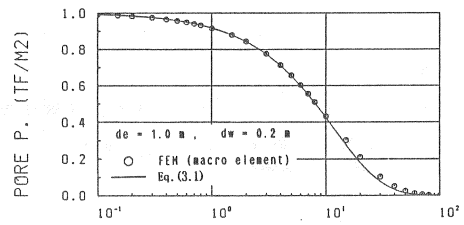
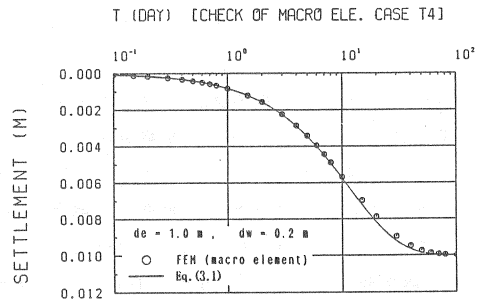


図3.5 マクロエレメントのチェック (CASE T-4)

計算結果の一部を流用した。また、マクロエレメント法による計算は、引用したシリーズ計算の改良仕様に近い条件で行った。以下にその解析方法を説明する。

(1) 土質

「壁状のドレーンによる計算」, 「マクロエレメント法による計算」とともに海成粘土を想定し, 層厚 10 m の正規圧密粘土地盤とした。使用した構成式は修正カムクレイモデルで, 定数は福山粘土と広島粘土を参考にして, つぎのとおりとした。

バーチカルドレーンを打設した地盤の有限要素法による計算方法

- $\lambda = 0.291$ (λ : 圧縮指数 [自然対数])
- $\kappa = 0.0304$ (κ : 膨潤指数 [自然対数])
- $M = 1.40$ (M : 限界状態線の傾き)
- $\sigma_{v0} = 2 + 0.5z$ (tf/m²) (σ_{v0} : 初期鉛直有効応力, z は地表面からの深度で, mの単位)
- $K_0 = 0.597$ (K_0 : 静止土圧係数)
- $e_0 = 2.011 - 0.291 \log_e\{(1+2k_0)\sigma_{v0}/3\}$ (e_0 : 初期間隙比)
- $k_0 = c_v m_v \gamma_w$ (k_0 : 初期透水係数, 水平方向透水係数 = 鉛直方向透水係数)
- $c_v = 100 \text{ cm}^2/\text{day}$ (c_v : 圧密係数 [圧密過程中一定とした。つまり, 圧密過程中 $k = k_0 \exp[-(1+e_0)\varepsilon_v/\lambda]$, ε_v : 体積ひずみ とした。])
- $m_v = \lambda / \{(1+e_0)\sigma_{v0}\}$ (m²/tf) (m_v : 体積圧縮係数)
- $\gamma_w = 1.0 \text{ tf/m}^3$ (γ_w : 間隙水の単位体積重量)

(2) 要素分割

(ア) 壁状のドレーンの場合

図 4.1 に示す分割とした。これは、文献1)に示すシリーズ計算の中の分割のひとつで、節点数 486、要素数 424 である。壁状のドレーンは 3m ピッチで入れ、ドレーン間は間隙水圧分布をできるだけ忠実に表現するために 8 要素に分割している。改良域の半幅(B_r/2)

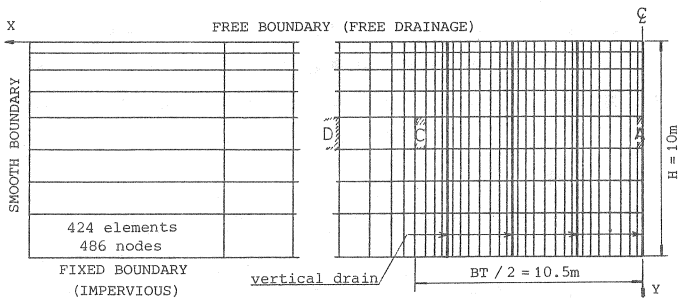


図 4.1 壁状ドレーンの場合の要素分割図

は 10.5 m で、この改良仕様では、平均圧密度50%に達すると期待される日数は、44.3日である。但し、これはあくまで設計理論上の話で、実際には、非改良域の影響や載荷条件によって、必ずしも設計理論どおりには圧密は進行しない。この点については、文献1)や文献3)を参照されたい。なお、解析領域の左右端面は横方向の変位を拘束、下端面は上下方向・横方向ともに変位を拘束、上端面の変位は拘束無しとした。また、下端面は非排水面で、上端面は排水面である。壁状ドレーンのウェルレジスタンスや、剛性は無視している。

(イ) マクロエレメントの場合

マクロエレメントを用いたときの計算の分割は、図 4.2 に示すとおりで、252節点、216要素である。ひとつのマクロエレメントの幅は 2m で、これを中心線から5列横方向に並べている。したがって、改良域の半幅(B_r/2)は 10 m である。マクロエレメントの幅は 2m であるので、 $d_e = 2.256 \text{ m}$ であり、 $n = 5$ 、つまり、 $d_w = 0.4514 \text{ m}$

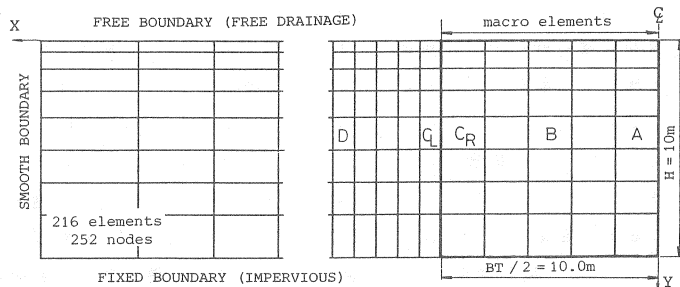


図 4.2 マクロエレメントの場合の要素分割図

の改良仕様とした。したがって、平均圧密度50%に達すると期待される日数は、41.3日である。壁状ドレーンによる計算の44.3日とはすこし異なるが、ほぼ同じ改良速度を狙った仕様と考えてよい。なお、解析領域の拘束条件や排水条件は、壁状ドレーンによる計算のときと全く同じである。また、マクロエレメントの定式化の前提条件より、ドレーンのウェルレジスタンスや剛性は無視されている。改良域の要素数でいえば、壁状ドレーンの場合 224要素、マクロエレメントの場合は 40要素であり、マクロエレメントを用いと

要素数をかなり節減できる。

(3) 荷重

モデル地盤に作用させた荷重は 5tf/m^2 の帯状荷重である。このモデル地盤に非排水状態で荷重を加えていくと、今回の計算に使用したプログラムでは $q=5.5\text{tf/m}^2$ 程度から変形が急増し、 $q=5.8\text{tf/m}^2$ より大きな荷重では計算できなかった。したがって、モデル地盤に作用させた $q=5\text{tf/m}^2$ という荷重は破壊荷重にかなり近く、安全率は 1.1~1.2 程度と思われる。荷重の幅は 2 種類で、ひとつは改良幅と同一 ($B_L/B_T=1.0$, B_L : 載荷幅, B_T : 改良幅) で、他のひとつは改良幅の 1.5 倍の幅 ($B_L/B_T=1.5$) である。載荷幅と改良幅の関係と沈下速度の関係については、文献1) または文献3) を参照されたい。計算では、荷重の剛性は無視している。

(4) 計算ステップ

荷重は瞬時載荷とし、 $q=2.0\text{tf/m}^2$ までは 10 ステップで、 $q=2.0\text{tf/m}^2$ ~ $q=5.0\text{tf/m}^2$ までは 30 ステップで計算した。つまり、荷重は $t=0$ 日に合計 40 ステップで作用させた。圧密過程は 103 ステップで 20 000 日まで計算した。(つまり、1 ケースあたり合計 143 ステップで計算)

(5) 計算ケース

計算ケースを表 4.1 に示す。CASE M1, CASE M2, および, CASE M1-1

はマクロエレメントを使用したケースであるが、CASE M1, および, CASE M2 は全マクロエレメントで、横方向の水の流れを拘束したものである。(つまり、全マクロエレメントで、 $\beta_1 \rightarrow 0$ および $\beta_3 \rightarrow 0$ とした。2.2 マクロエレメントの項参照) 一方、CASE M1-1 はマクロエレメントの横方向の水の流れを許したもので、これは、後述するように、改良域と非改良域との境界付近で不連続現象が生じるというマクロエレメントの不具合点がどれほど改善されるかを調べるために行ったものである。

表 4.1 計算ケース

CASE No	改良域のモデル	$B_T/2$ (m)	B_L/B_T
CASE 38	壁状ドレーン	10.5	1.0
CASE M1	マクロエレメント	10.0	1.0
CASE 39	壁状ドレーン	10.5	1.5
CASE M2	マクロエレメント	10.0	1.5
CASE M1-1	マクロエレメント	10.0	1.0

B_T : 改良幅, B_L : 荷重幅

4.2 計算結果および考察

(1) 地表面沈下形状と側方変形

図 4.2 に地表面沈下形状を示す。図 4.2 (a) は、CASE 38 と CASE M1, つまり、改良幅と載荷幅が等しいとき ($B_L/B_T=1.0$) の地表面沈下形状を、図 4.2 (b) は、CASE 39 と CASE M2, つまり、載荷幅が改良幅の 1.5 倍のとき ($B_L/B_T=1.5$) の地表面沈下形状を示したものである。図 4.2 の横軸は X 座標、すなわち中心線から横方向へとった座標上の値を改良半幅 ($B_T/2$) で無次元化したものである。 $t=200$ 日のときの地表面沈下量が少し異なっているが、全体的には壁状ドレーンで計算した場合とマクロエレメント法とで大きな違いは認められない。どちらかと言えば、 $B_L/B_T=1.0$ のときのほうが、特に $X=B_L/2=B_T/2$ 付近で少し異なっている。 $B_L/B_T=1.5$ の場合は、よく一致していると言えよう。したがって、著者らは、文献1) に示すように、壁状ドレーンを用いたシリーズ計算のなかの $B_L/B_T=\infty$ のときの地表面沈下量を用いて、バーチカルドレーン打設範囲を提案しているが、マクロエレメント法を用いても同様の結果が得られるものと推察できる。

図 4.3 に、側方変位を示す。図 4.3 に示す正の側方変位は載荷域から外側へ向かう変位を示し、負の側方変位は載荷域の方へ向かう変位を示す。図 4.3 (a) は載荷幅と改良幅が等しいときの改良端 (= 荷重端) 位置の側方変位、図 4.3 (b) は載荷幅/改良幅 = 1.5 のときの改良端位置の側方変位、図 4.3 (c) は載荷幅/改良幅 = 1.5 のときの荷重端位置の側方変位である。載荷幅 = 改良幅のときの側方変位 (図 4.3 (a)) は幾分一致度が悪く、マクロエレメント法による側方変位が小さい。しかし、傾向はよく似ている。載荷幅/改良幅 = 1.5 のときの側方変位 (図 4.3 (b) および (c)) は、改良端位置 ($X=B_T/2$) において少しずれているが、荷重端位置 ($X=B_L/2$) ではほぼ一致している。

以上から、地表面沈下形状については、壁状ドレーンを用いた計算とマクロエレメント法とで大きな違い

はなく、側方変位は、 $\text{載荷幅} = \text{改良幅}$ のときは傾向は似ているが少しずれ、 $\text{載荷幅} / \text{改良幅} = 1.5$ のときはほぼ一致すると言える。

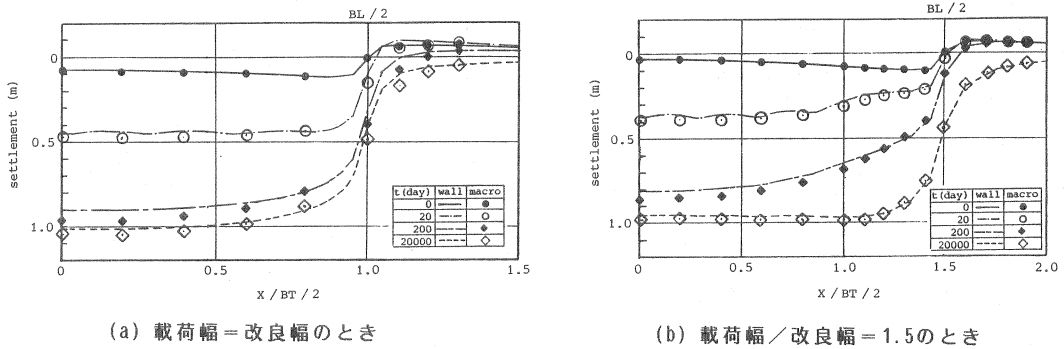


図 4.2 地表面沈下形状の比較

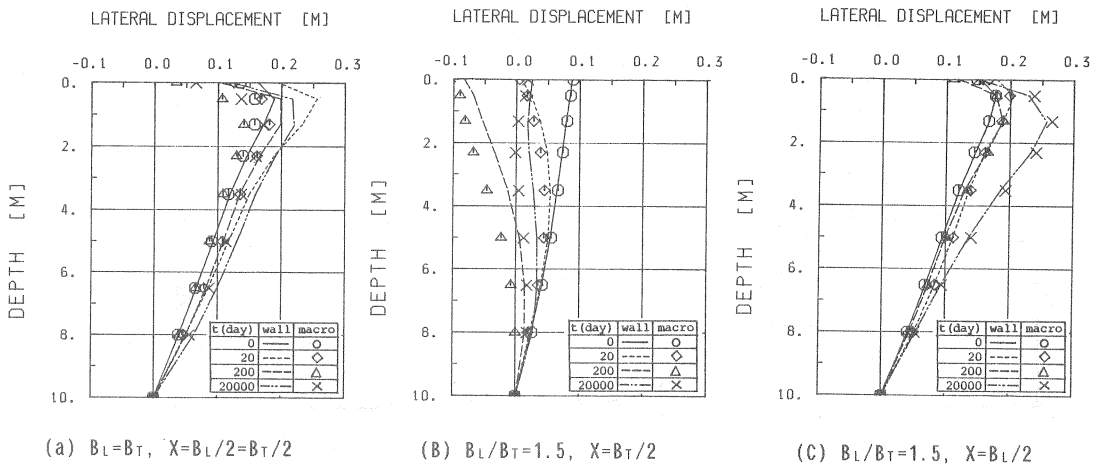
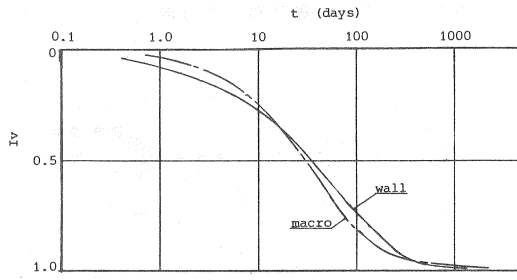


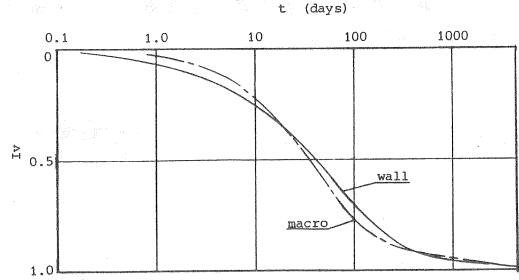
図 4.3 側方変位

(2) 沈下速度

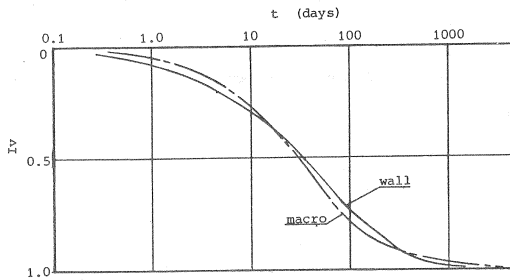
次に、地表面の沈下速度を比較してみよう。図 4.4 は、 $\text{載荷幅} = \text{改良幅}$ のときの (a) 中心線 ($X=0$)、(b) 改良端 (= 荷重端) から 2 割内側 ($X=0.8B_T/2=0.8B_L/2$)、(c) 改良端 (= 荷重端) ($X=B_T/2=B_L/2$) の位置の地表面の沈下度 I_v と時間の関係を示したものである。沈下度 I_v は、 $I_v = (S - S_0) / (S_f - S_0)$ [S : 沈下量, S_0 : 瞬時沈下量, S_f : 最終沈下量] で定義した量である。また、図 4.5 は、 $\text{載荷幅} / \text{改良幅} = 1.5$ のときの (a) 中心線 ($X=0$)、(b) 改良端から 2 割内側 ($X=0.8B_T/2$)、(c) 改良端 ($X=B_T/2$) の位置の地表面の沈下度 I_v と時間の関係を示したものである。本来、壁状ドレーンとマクロエレメントの間には、図 2.3 に示すような圧密曲線形状の違いがあるので、両者は完全には一致しない。このような圧密曲線形状の違いがあるということを念頭において図 4.4 および図 4.5 をみると、壁状ドレーンを使った計算とマクロエレメント法による計算の地表面沈下速度は、ほとんど一致しているといえよう。ただし、 $\text{改良幅} = \text{載荷幅}$ のときの改良端 (= 荷重端) の位置の地表面沈下速度 (図 4.4 (c)) は一致度が悪く、マクロエレメント法による計算のほうが速く進行している。したがって、地表面沈下速度については、壁状ドレーンとマクロエレメントの間に大きな差はないが、 載荷幅 と 改良幅 の組み合わせ次第では改良端付近の沈下速度が異なることもあると言える。



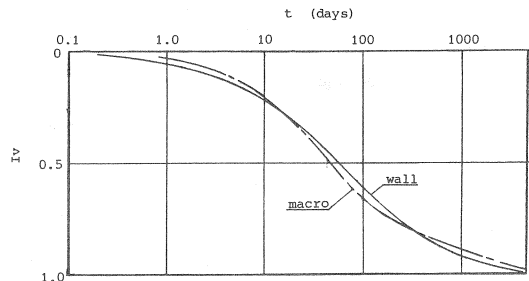
(a) $X = 0$



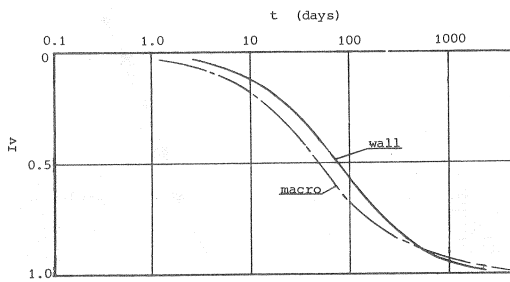
(a) $X = 0$



(b) $X = 0.8B_T/2 = 0.8B_L/2$

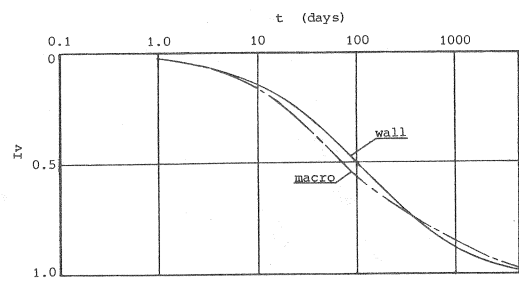


(b) $X = 0.8B_T/2$



(c) $X = B_T/2 = B_L/2$

図 4.4 沈下速度 (改良幅 = 載荷幅)

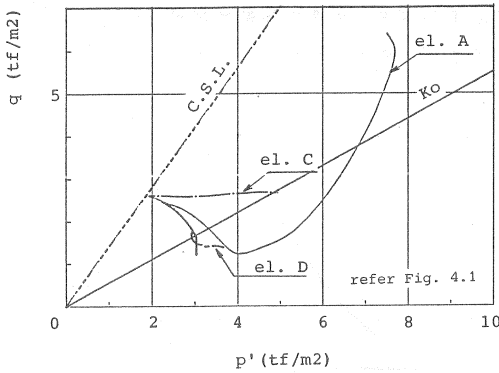


(c) $X = B_T/2$

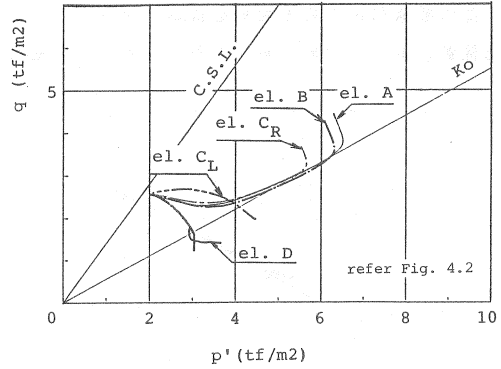
図 4.5 沈下速度 (載荷幅 / 改良幅 = 1.5)

(3) ストレスパス

壁状ドレーンによる計算とマクロエレメントによる計算のストレスパスの例を、図 4.6 に示す。図 4.6 は、載荷幅 = 改良幅のときの計算結果である。壁状ドレーンのときのストレスパス (図 4.6 (a)) は中心線付近の要素 (図 4.1 の A 要素)、改良端付近の要素 (図 4.1 の C 要素)、および、改良端から 50% 外側の要素 (図 4.1 の D 要素) のものを示している。また、マクロエレメントによる計算のストレスパスは、中心線付近の要素 (図 4.2 の A 要素)、改良端から 50% 内側の要素 (図 4.2 の B 要素)、改良端左右のマクロエレメントと通常の要素 (図 4.2 の C_R 要素および C_L 要素)、および、改良端から 50% 外側の要素 (図 4.2 の D 要素) のものを示している。ここで、A、B および C_R 要素はマクロエレメントで、 C_L および D 要素は通常の要素である。マクロエレメントの応力は一本のパーティカルドレーンが分担する柱の平均的な値であり、壁状ドレーンの応力は局所的な値であるので単純に比較するわけにはいかないが、(1) マクロエレメント (A、B および C_R 要素) の応力はほぼ同じ経路をたどり (勿論最終応力は場所によって異なるので、後半部は異なる)、(2) 改良端の左右 (C_R 要素と C_L 要素) でストレスパスが全く異なり、応力が不連続になっていることが分かる。改良端から 50% 外側の要素のストレスパスは、壁状ドレーン、マクロエレメントのいずれの計算でもほぼ同じである。中心線付近のマクロエレメントの要素の応力が K_0 線付近



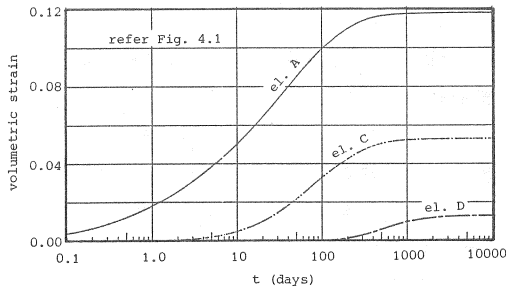
(a) 壁状ドレーンによる計算



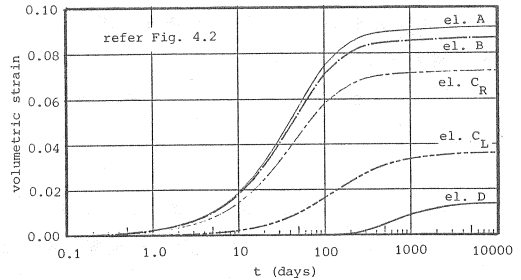
(b) マクロエレメントによる計算

図 4.6 ストレスパスの比較 (載荷幅=改良幅)

をたどって変化することはおかしくないが、荷重端付近の要素 (C_R 要素) の応力が中心線付近の要素の応力と同様に K_0 線をたどることは首肯しがたく、また、マクロエレメントと通常の要素の境界で、応力が完全に不連続になることも不合理である。この原因としては、(1) マクロエレメントの流出係数 β が Barron の近似解で規定されており、必然的に同じ経路をたどること、および、(2) 以上に示した計算ではマクロエレメントの左右の要素への水の流れを拘束していること ($\beta_1 \rightarrow 0$, $\beta_3 \rightarrow 0$ としていること) が考えられる。なお、壁状ドレーンの A 要素 (図 4.6 (a)) が K_0 線をたどらないのは、この A 要素はドレーンの集水範囲の中で最もドレーンに近い位置にあり他の部分よりも圧密が速く進行するので、初期には等方的に応力が変化し、後期には他の部分よりも硬くなっているために応力が集中して偏差応力が増加するためである。参考までに、体積ひずみの時間的変化の例を図 4.7 に示す。この場合もマクロエレメント (A, B, C_R 要素) の体積ひずみはほぼ同様の変化をし、マクロエレメントと通常の要素の間で現象が不連続になっている。



(a) 壁状ドレーン



(b) マクロエレメント

図 4.7 体積ひずみの時間的変化 (載荷幅=改良幅)

(4) マクロエレメントの流出係数を $\beta_1 \neq 0$, $\beta_3 \neq 0$ としたときの計算結果

以上に示したマクロエレメントの応力の不合理な点が、マクロエレメントの左右の要素への水の移動を許したときに改善されるかどうかをみるために、マクロエレメントの流出係数を $\beta_1 \neq 0$, $\beta_3 \neq 0$ として計算してみた。 $\beta_1 \neq 0$, $\beta_3 \neq 0$ とすることは、マクロエレメントの定式化の条件との整合性がとれないが、いずれにしても近似計算であるから、このような取り扱いは許されよう。このような取り扱いをしたときのストレスパスを図 4.8 に、体積ひずみを図 4.9 に示す。図 4.6 と図 4.8 を比較すると、 C_L 要素のストレスパスが少し変化しているが、ほとんど違いはない。また、体積ひずみも、マクロエレメントと通常の要素の境界の不連続量が若干改善されてはいるが、全体的には大きな違いはない。したがって、マクロエレメント

の一部の要素の応力の不合理な点は、マクロエレメントの左右の要素への水の移動を拘束したことよりも、流出係数がBarronの解で規定されていることに起因しているものと考えられる。

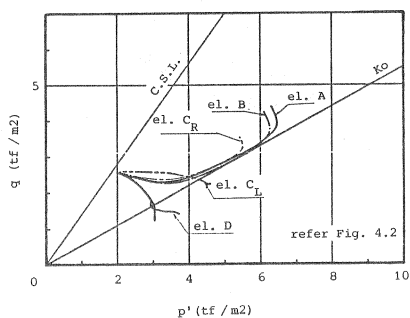


図 4.8 ストレスパス ($\beta_1 \neq 0, \beta_3 \neq 0$)

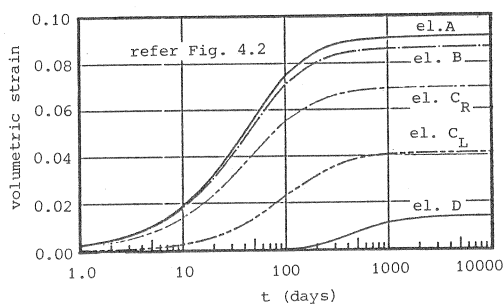


図 4.9 体積ひずみ ($\beta_1 \neq 0, \beta_3 \neq 0$)

5. 結論

- (1) 通常の柱状のバーチカルドレーンを平面ひずみ条件で解析する場合は、何らかの近似的取り扱いを必要とする。壁状ドレーンを用いる場合は一次元圧密理論を利用して、マクロエレメント法ではBarronの解を用いて二次元問題に置き換える。このように、単純なモデルの理論を利用して平面ひずみ条件で計算するという点、および、何かを犠牲にしているという点では両者は同じである。
- (2) マクロエレメント法および壁状ドレーンを用いた計算の地表面沈下形状は、载荷幅と改良幅の関係によっては改良端付近で少し異なることがあるが、大きな違いはない。また、側方変位は、地表面沈下よりも一致度が悪くなるが、これも大きな違いはない。また、沈下一時間関係も概ね一致する。
- (3) 地盤内部の応力(ひずみ)でみると、圧密に伴うマクロエレメントの応力の変化は改良域内で類似の経路をたどり、マクロエレメントと通常の要素の境界で不連続になる。これは、マクロエレメントの流出係数が、あらかじめ理論で規定されているためと考えられる。
- (4) 壁状ドレーンでは、ドレーンとドレーンの間を細かく分割する必要があるために要素数が増大することや、放射流れを水平流れに置き換えるために圧密曲線形状が少し異なる、などの短所がある。また、マクロエレメント法では、近似解と一致するように決められているために厳密解とは一致しないことのほかに、ドレーンが受け持つ中空円柱の挙動を一つの要素で扱うため局所の応力検討には適さないことや、改良域と非改良域の境界付近の挙動が不合理である場合があるなどの難点がある。
- (5) バーチカルドレーンを打設した地盤の地表面沈下や側方変位などを文字どおりマクロにみる場合は、マクロエレメント法を用いたほうが、計算の労力のはるかに少なくすむので、実用的であろう(本文の計算例の改良域の要素分割数は、壁状ドレーンで224要素、マクロエレメントで40要素)。しかし、マクロエレメント法を地盤内の応力やひずみの検討に用いるには問題があると考えられる。
- (6) この論文では触れなかったが、現状のマクロエレメントではドレーンの透水性や剛性を考慮することができない。このようなことを考慮したい場合は、二次元の計算を行う限り、壁状ドレーンを使って計算したほうがよい。要は、いずれにしても何等かの近似的取り扱いを必要とするので、計算の目的に応じて使い分けることが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 熊本, 他(1986); 部分改良地盤の余改良域の決定法について, 第31回土質工学シンポジウム, pp.141-146.
- 2) 関口, 他(1986); 局部载荷を受けるバーチカルドレーン打設地盤の変形解析, 同上, pp.111-116.
- 3) 熊本, 他(1986); 部分改良地盤の圧密沈下, 第21回土質工学研究発表会, pp.1079-1082.