

## 圧密沈下解析手法に関する研究（その3）

——バーチカルドレーン工法における多次元圧密現象のFEM二次元近似解析——

西林 清 茂      細 谷 芳 己  
小日向 隆

### Study on Analysis of Settlement due to Consolidation (Part 3)

——FEM Two-dimensional Approximate Analysis of Multi-dimensional Consolidation on Vertical Drain Method——

Kiyoshige Nishibayashi      Yoshimi Hosoya  
Takashi Kohinata

#### Abstract

The two-dimensional approximate method in which columnar drains are replaced by wall drains is generally used for analyzing deformation behavior of ground where vertical drains have been driven and are subjected to linear loads. In the study reported in this paper, the authors investigated the proper method of selecting drain width in two-dimensional considerations, and the accuracy and applicability of the method through comparisons with the results of the more rigorous three-dimensional analyses. The results were as follows: (1) A former method in which width of wall drain is made equal to diameter of columnar drain results in large error. (2) The authors proposed two new methods, I and II, in which area ratio and draining distance, respectively, are equal to axial symmetry problems. Approximation is better at the initial stage of consolidation with I and at the latter stage with II. (3) It is possible to replace a multi-dimensional consolidation problem with a two-dimensional plane strain problem and perform analysis with good accuracy using the two methods.

#### 概 要

帯状荷重下にあるバーチカルドレーンが打設された地盤の変形挙動の解析は、円柱ドレーンを壁状ドレーンに置き換えて二次元化する近似法が一般的である。この報告は、二次元化する際のドレーン幅の適切な選定方法、精度、適用性について、より厳密な三次元解析結果との比較を通して検討したものである。その結果以下のことが明らかとなった。

(1) 壁状ドレーンの幅を円柱ドレーンの直径と等しくする従来の方法は誤差が大きい。

(2) 壁状ドレーンの幅を①面積比、②排水距離が軸対称問題と等しくなるように設定する新たな方法を提案したが、圧密初期においては①の方法が、圧密後期においては②の方法が近似性は良い。

(3) 上記の①、②の方法によれば、多次元圧密問題を二次元平面ひずみ問題として良い精度で解析できる。

#### 1. まえがき

一般に軟弱地盤の圧密解析は、一次元圧密では Terzaghi の圧密理論、ドレーン圧密では Barron の圧密理論に基づいて行なわれている。これらの手法は、圧密沈下解析のみを対象とする場合には、簡便で有用な方法であるが、圧密沈下とせん断変形を伴う多次元圧密解析には

適用できない。

このため、圧密沈下解析とせん断変形解析を併せた形で解析する手段として、有限要素法 (FEM) を利用することが多く、二次元圧密解析が従来からこの手法で行なわれている。しかし、圧密促進のためにドレーンを打設した地盤の圧密解析では、間隙水の流れがドレーンに向う軸対称の放射流れとなるために、厳密には三次元解析

としなければならない。ところが、三次元解析は膨大な計算時間と労力を要するため、一般には二次元平面ひずみ問題として近似解析されている。この時、円柱ドレーンは壁状のドレーンで置き換えることになるが、この壁状ドレーンの幅の適切な選定方法や、精度、適用性などについては十分解明されていないのが現状である。

ここでは、三次元ドレーン圧密問題を二次元平面ひずみ問題として FEM 解析する場合のいくつかの手法について、その精度、適用性を比較検討した結果について報告する。

## 2. 解析方法

### 2.1. 解析手順

この報文の目的は、ドレーンが打設された地盤の変形挙動を二次元平面ひずみ問題として FEM 解析するための手法を検討することである。その際、二次元解析の精度・適用性の検討は、より厳密解に近い三次元解析結果との比較を通して行なうのが望ましい。従って、二次元平面ひずみ問題としての解析法の検討と併せて、三次元解析の精度、適用性について検討しておく必要がある。また、圧密解析における FEM そのものの精度・適用性についての確認も必要である。

そこでまずドレーン 1 本について、圧密解析における FEM の精度・適用性および二次元、三次元問題への適用性を以下の手順で検討した。

(1) 軸対称問題として FEM 解析を行ない、入力定数の設定方法、FEM の圧密解析における精度・適用性について検討する。

(2) 三次元問題として解析する際に、円形断面のドレーンを多角形断面のドレーンに換算する方法について検討する。

(3) 二次元平面ひずみ問題として解析するための、適切なドレーン幅の設定方法について検討する。

次に、以上の結果を踏まえ、本題である帯状荷重下にあるドレーンが打設された地盤の変形挙動に対して、二次元平面ひずみ問題、三次元問題として解析を行ない、二次元解析の精度・適用性について検討を行なった。

解析手法	FEM三次元解析	軸対称解析
理論	Biot	Barron
土質定数	$E = 25.1 \text{ t/m}^2$	$e = 2.4 - 0.8 \log p$
	$\nu = 0.333$	$c_v = 0.0036 \text{ m}^2/\text{day}$
	$k = 9.4 \times 10^{-5} \text{ m/day}$	$m_v = 0.0261 \text{ m}^2/\text{t}$
荷重条件	初期応力 $P_0 = 1.0 \text{ t/m}^2$	
	載荷重 $\Delta p = 3.0 \text{ t/m}^2$	

表一 対象地盤の土性および荷重条件

### 2.2. FEM 解析のための入力定数

通常行なわれている標準圧密試験から得られる定数は、Terzaghi 理論、Barron 理論の圧密解析に用いる体積圧縮係数  $m_v$ 、圧密係数  $c_v$  などである。一方、ここで用いた FEM による圧密解析は、Biot の圧密理論に基づいており、解析に必要な土質定数は、弾性係数  $E$ 、ポアソン比  $\nu$ 、透水係数  $k$  である。そこで、標準圧密試験から得られる定数から、 $E$ 、 $\nu$ 、 $k$  を換算して求めることが必要となる。

(1) ポアソン比 圧密の対象となる地盤が軟弱であることから静止土圧係数を  $k_0 = 0.5$  とすると、

$$k_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$$

なる関係から  $\nu = 0.333$  が得られる。

(2) 弾性係数  $E$  一般に弾性係数  $E$  とポアソン比  $\nu$ 、体積圧縮係数  $m_v$  の間には、次のような関係がある。

$$E = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{m_v(1-\nu)}$$

従って、先に求めたポアソン比  $\nu$  と標準圧密試験から得られた体積圧縮係数  $m_v$  を用いて弾性係数  $E$  が求められる。

(3) 透水係数  $k$  一般に透水係数  $k$  は体積圧縮係数  $m_v$  と圧密係数  $c_v$ 、水の単位体積重量  $\gamma_w$  から次式で求められる。

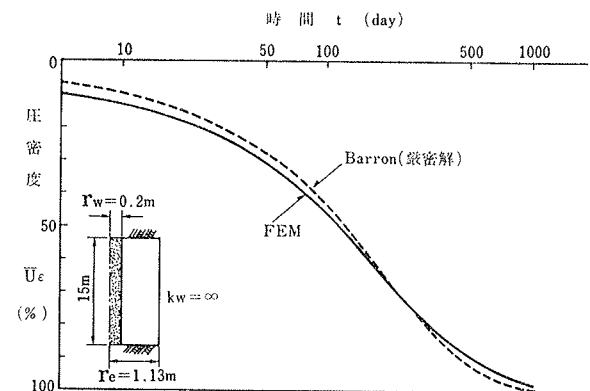
$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w$$

以上のようにして求めた土質定数を Barron の圧密理論に用いる定数、荷重条件と併せて表一に示す。

なお、ドレーンは粘土と同じ圧縮性を持つものとして  $E$ 、 $\nu$  を等しくし透水性 (透水係数  $k$ ) のみ異なる材料とした。

## 3. ドレーン圧密解析への FEM の適用性

まず、FEM のドレーン圧密解析への適用性を調べるために、ドレーン 1 本の軸対称放射流れの問題を解析した。直径  $d_e = 2.26 \text{ m}$  の等価有効円 ( $d_e = 1.13 \text{ d}$ ,  $d$ ;



図一 時間～圧密度 (軸対称問題)

レーンピンチ) に対して、土中の間隙水がドレーンに向う半径方向放射流れのみを考え、鉛直方向の流れを無視し上端、下端を非排水条件としている。また、一般に行なわれているようにドレーンの透水性は無限大と仮定し、解析では  $k=10^5 \text{ m/day}$  と大きく設定した。結果を Barron の厳密解と比較して図-1 に示す。

FEM による解析結果は Barron の厳密解と良い対応を示している。このことから、一次元ドレーン圧密の FEM による解析は、十分な精度で解析可能であることが分かる。

#### 4. 軸対称解析と三次元解析の比較

次にドレーンを三次元的に表現する方法を検討するために、ドレーン 1 本について三次元解析を行なった。三次元解析では、円形のドレーンを多角形で表現することになるが、その際最も考えやすいのは正方形である。そこで円形の断面を有するドレーンを正方形断面のドレーンに換算する方法について検討する。

換算の方法としては、ドレーンの排水能力を考慮して面積を等しくする方法(等面積法)と、ドレーンの集水能力を考慮して周長を等しくする方法(等周長法)が考えられる。表-2 には、両手法の解析条件を軸対称解析と比較して示した。

図-2 は直径 40 cm のドレーンを、一辺  $a_w=35.4 \text{ cm}$  (等面積)、 $a_w=31.4 \text{ cm}$  (等周長) として三次元解析を行なった結果を、先の軸対称解析結果と比較したものである。ただしここでは、より実際に近い条件で解析を行なうために上端排水、下端非排水とし、ドレーンの透水係数を一般にサンドドレーンに用いられている砂の透水係数の最小値である、 $k=0.864 \text{ m/day}$  ( $k=1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ ) としている。(以下の解析はすべて同様) 三次元解析の場合はいずれも圧密の後期において速くなる傾向が見られるものの、軸対称解析結果と比べて大きな差は見られない。ただし、等周長法が軸対称解析に対する近似

水の流れ	放射流れ	三次元流れ
解析条件	軸対称解析	三次元解析
ドレーン形状		<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>(等面積法)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(等周長法)</p> </div> </div>
ドレーン断面積 $A_d$	1,256cm <sup>2</sup>	1,253cm <sup>2</sup> (等面積法) / 986cm <sup>2</sup> (等周長法)
全断面積 $A$	40,115cm <sup>2</sup>	40,000cm <sup>2</sup>
面積比 $A_d/A$	0.031	0.031 (等面積法) / 0.025 (等周長法)
ドレーン周長	126cm	142cm (等面積法) / 126cm (等周長法)
粘土透水係数	$9.4 \times 10^{-5} \text{ m/day}$	$9.4 \times 10^{-5} \text{ m/day}$

表-2 解析条件 (三次元解析)

性は若干良いことが分かる。

#### 5. 二次元解析手法の検討

##### 5.1. 壁状ドレーン幅の設定方法

ドレーンが打設された地盤のせん断変形も考えた多次元圧密挙動は、4章で述べた正方形ドレーンに換算する

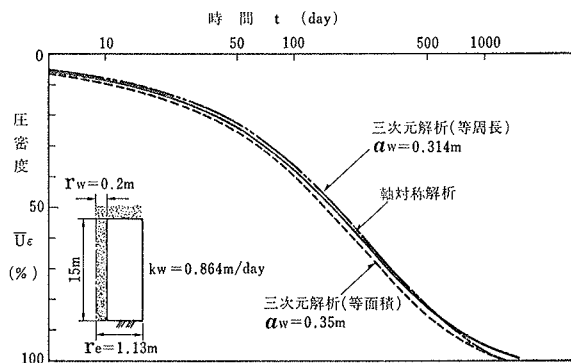


図-2 時間～圧密度 (三次元問題)

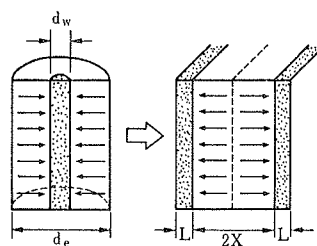


図-3 放射流れと水平一次元流れの概念図

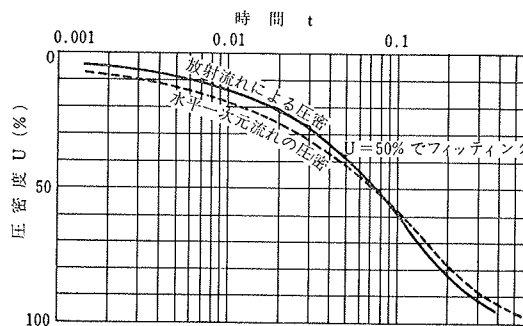


図-4 放射流れと水平一次元流れの圧密度に対する(一般的な)フィッティング方法

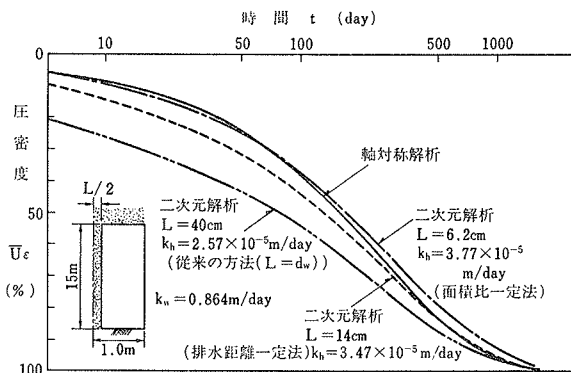


図-5 時間～圧密度 (二次元平面ひずみ問題)

方法を基にして三次元 FEM 解析によって知ることが出来る。しかし、このような地盤全体の三次元解析となると、次元の増加、要素数の増加によって計算時間が二次元に比べて莫大なものになる。そこで、ドレーンの放射流れによる圧密を等価な圧密速度を持つ二次元平面ひずみ問題として近似解が得られれば極めて有益である。

ここでは、ドレーン1本を二次元平面ひずみ問題として解析する方法について検討する。三次元問題を二次元平面ひずみ問題として考える場合には、円形断面のドレーンは、図-3のように壁状ドレーンに置き換え、地盤の水平方向の透水係数を、図-4のように放射流れによる圧密と水平一次元流れによる圧密が圧密度50%で一致するように換算する方法<sup>9)</sup>が一般に用いられている。この時、壁状ドレーンの幅Lは、従来は円柱ドレーンの直径  $d_w$  に等しくしている。

図-5には、このようにして換算した壁状ドレーンの二次元解析結果を軸対称解析結果と比較して示した。従来の二次元解析結果は、軸対称解析の結果に比べて圧密がかなり速いことが分かる。このように、壁状ドレーンの幅Lを直径  $d_w$  と等しくすると、ドレーンの断面積が円柱に比べて大きくなるため、排水能力を過大に評価することになる。

そこで次に、壁状ドレーンの幅Lの設定方法に工夫を凝らした以下の二つの方法を新たに提案する。

(1) 面積比一定法: ドレーン断面積  $A_d$  とドレーン1本が集水する断面積  $A$  の比  $A_d/A$  が軸対称問題と等しくなるようにドレーン幅Lを設定する方法。

(2) 排水距離一定法: ドレーンまでの最大排水距離が軸対称問題と等しくなるようにドレーン幅Lを設定する方法。

表-3には、3・4章で用いた軸対称解析モデルに対して、従来の方法およびここで新たに提案した2方法の解析条件をまとめた。また、図-5には、以上の三つの方法による二次元解析結果と軸対称解析の結果をまとめて比較した。面積比一定法は、圧密初期において近似性は良いが、後期において遅れる傾向にある。これに対して、排水距離一定法は、逆に圧密初期においては若干圧密進行が速いが、圧密後期においては近似性が良いことが分かる。

なおここでは、図-4で示したような圧密度  $U=50\%$  で放射流れと水平一次元流れの圧密時間が一致する結果になっていない。これは、今回の例では、間隙水の鉛直方向の流れや、ドレーンの透水性を考慮していることに

水の流れ	放射流れ	二次元流れ		
	軸対称解析	二次元解析 (平面ひずみ問題)		
ドレーン形状				
ドレーン断面積 $A_d$	1,256cm <sup>2</sup>	4,000cm <sup>2</sup>	620cm <sup>2</sup>	1,400cm <sup>2</sup>
全断面積 $A$	40,115cm <sup>2</sup>	20,000cm <sup>2</sup>	20,000cm <sup>2</sup>	20,000cm <sup>2</sup>
面積比 $A_d/A$	0.031	0.200	0.031	0.070
排水距離	93cm	80cm	96.9cm	93cm
粘土透水係数	$9.4 \times 10^{-5}$ m/day	$2.57 \times 10^{-5}$ m/day	$3.77 \times 10^{-5}$ m/day	$3.47 \times 10^{-5}$ m/day

表-3 解析条件 (二次元平面ひずみ問題)

ドレーンピッチ (cm)	等価有効円の直径 $d_e$ (cm)	ドレーン直径 $d_w$ (cm)	$n = \frac{d_e}{d_w}$	ドレーン幅 L (cm)	条件
150	170	40	4.2	8.4	面積比一定
				20.4	排水距離一定
200	226	40	5.7	6.2	面積比一定
				14.0	排水距離一定
250	283	40	7.1	5.0	面積比一定
				7.4	排水距離一定
200	226	30	7.5	4.0	排水距離一定

表-4 解析条件 (ドレーン径・ピッチの影響)

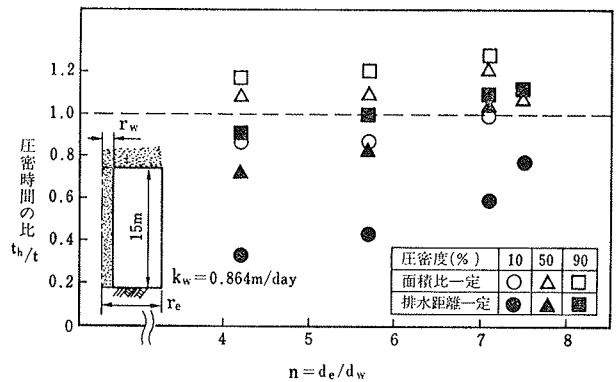


図-6  $n$  と圧密時間の関係

加えて、FEM 解析が Biot の圧密理論に基づいており、換算透水係数を求めるために用いた Barron や Terzaghi 理論とは基本的に異なっているためと考えられる。

### 5.2. ドレーン径・ピッチの影響

円柱ドレーンを壁状ドレーンに置き換えて解析した際の近似性に関しては、ドレーン径や打設ピッチなどによって変化することが考えられる。そこで、一般に用いられているサンドドレーンを例にとり、表-4に示す条件のもとで上記手法の適用性を検討した。

図-6は、圧密度  $U=10, 50, 90\%$  の場合の、軸対称解析による圧密時間  $t$  と二次元解析による圧密時間  $t_h$  の比  $t_h/t$  を  $n = d_e/d_w$  に対して示したものである。排

水距離一定法は  $n$  が小さいと圧密初期において近似性は良くないが、 $n$  が大きくなるに従って近似性は良くなる。これに対して、面積比一定法は  $n$  の影響が小さく全体的に近似性は良いことが分かる。

ところで、ここで注意すべきことは、排水距離一定法では、ドレーン幅  $L$  は  $n$  が大きくなるに従って小さくなり、 $n=8.7$  で  $L=0$  となることである。従って、この方法の実用的な適用範囲は、 $n=8$  程度までと考えられる。また、面積比一定法も図-6 に示したように  $n$  が大きくなるに従って近似性が次第に悪くなる傾向が見られる。

以上のことから、サンドドレーンのように  $n$  が小さい範囲では、両手法の持つ特性を考慮して適用すれば、十分近似性の良い結果が得られると考えられる。また、ペーパードレーンのように  $n$  が大きい場合については、さらに検討が必要である。

### 6. 台形盛土による変形挙動の解析

これまでの解析結果を踏まえて、ドレーンが打設された地盤上に台形盛土を行なった場合の変形挙動を、二次元平面ひずみ問題として解析し、三次元解析結果と比較した。

解析対象としたモデル地盤を図-7 に示す。ここで、二次元解析では圧密後期に重点を置き、5章の結果を基に直径 40 cm の円柱ドレーンを幅 14 cm (排水距離一定) の壁状ドレーンに置き換えた。一方、三次元解析では、4章の結果を基にして、周長が等しくなるように一辺 31.4 cm の正方形ドレーンに置き換えている。

図-8 は、沈下量・側方変位量を二次元解析結果と三次元解析結果で比較したものである。5章に示した結果と同様、圧密初期においては、二次元解析の方が若干圧密は速いが、圧密後期においては地表面沈下量、側方変位量とも両者は良く一致している。なお、今回の計算では三次元解析は二次元解析の19倍のcpu timeを要した。

### 7. まとめ

今回行なった一連の解析により、円柱ドレーンへの放射流れを近似的に壁状ドレーンへの水平流れと置き換えて多次元圧密問題を二次元平面ひずみ問題として十分な精度で解析可能であることが分かった。その際ドレーン幅は、圧密初期に重点を置く場合は面積比  $Ad/A$ 、後期

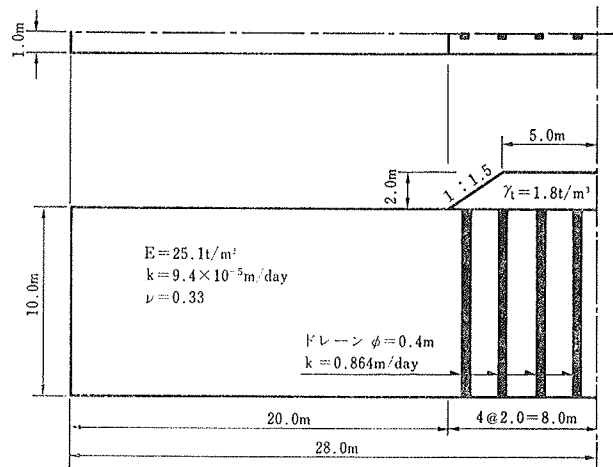


図-7 解析モデル地盤

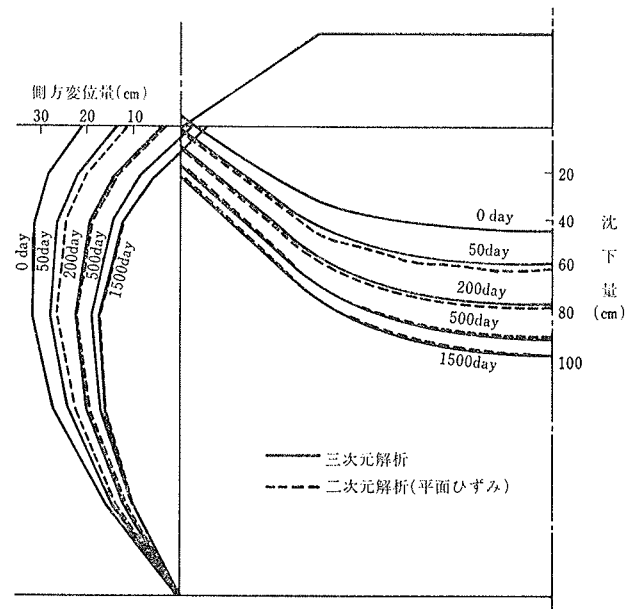


図-8 沈下量・側方変位量の比較

に重点を置く場合は排水距離が軸対称問題と等しくなるように選定することが妥当と考える。ただし、これらの方法は  $n$  が小さい場合に適用すべきであり、 $n$  の大きな小口径ドレーンについては、今後の検討課題である。

### 参考文献

- 1) 新舎, 他: サンドドレーンによる部分改良地盤の圧密沈下と側方変位, 土と基礎, Vol. 30, No. 5 (1982. 5), pp. 7~12