

圧密沈下解析手法に関する研究 (その1)

西林 清 茂 細 谷 芳 己
小日向 隆 高 橋 真 一

Study on Analysis of Settlement Due to Consolidation (Part 1)

Kiyoshige Nishibayashi Yoshimi Hosoya
Takashi Kohinata Shin-ichi Takahashi

Abstract

Recently, when soil improvement works have been adopted on soft alluvial sea-bed clay layers, it has been demanded that exact consolidation settlement analysis be made. For example, analysis in case changes in m_v , k , c_v , and layer thickness during consolidation cannot be ignored, and analysis of ground with multiple layers of different soil characteristics, etc., in case of vertical drain wells, analysis of unimproved layers below the drain wells, and analysis of delays in consolidation conceivable when using very long or small-diameter drain wells.

In this report are described fundamental investigations on the abovementioned troublesome consolidation by means of analysis using the finite difference method on simple models.

概 要

最近、軟弱な沖積海底粘土層を地盤改良する場合、圧密沈下予測に対して従来にないほど精度の高い圧密沈下解析が求められている。たとえば、圧密中の粘土の m_v , k , c_v , および層厚の変化が無視しえない場合の解析、土性の異なる多層地盤の解析などである。また、地盤改良対象の軟弱層にドレーンを打設した場合は、上記の問題の他に、ドレーン打設を軟弱地盤の途中までで止める未貫通ドレーンの解析、長尺なドレーンや小口径ドレーンを使用した場合に考えられる粘土層深部での圧密遅延に関する問題などである。

本報告は、差分を用いて行なった単純なモデルによる数値解析結果を基に、前述のような複雑な圧密問題に対する基本的な検討を行なったものである。

1. まえがき

平野の乏しい我国では、埋立てなどによる臨海部の有効利用が積極的に行なわれている。臨海部の海底地盤は、軟弱な粘土層が厚く堆積していることが多く、埋立てによる土地造成あるいは構造物の建設に伴い、大きな圧密沈下を生ずる。その対策として圧密促進による地盤改良工法が用いられる場合が多い。

一般に、この工法による地盤改良効果を評価する手段として、理論沈下解析結果と実際の沈下測定結果の比較検討や、改良前後におけるボーリング調査結果の比較検討が行なわれている。そして施工管理においては、理論沈下解析結果と沈下測定結果との比較検討が有用であり多用されている。

ところが、粘土層が厚く堆積している海底軟弱地盤は、土性が深さによって複雑に変化しており、その上、圧密沈下量が大きいため、これに伴う土性 (k , m_v , c_v) や層厚の変化が大きく、その影響を無視できない場合が多い。一方、ドレーンによる地盤改良では、軟弱層が非常に厚い場合には、長尺なドレーンを打設したり、ドレーン打設を粘土層の途中で止めたり (未貫通ドレーン) することが行なわれる。またドレーン工法は、理論上小口径のドレーンを密に打設して改良する方が得策である上に、資源の節約といった経済性を考慮して、小口径ドレーン (小口径サンドドレーン、プラスチックボードドレーン) を使用する例が増えている。このような場合には、複雑な境界条件の評価や、粘土層深部での圧密遅延の評価など多くの解決しなければならない問題を含んでおり、

これらに対するより高度な解析手法の検討が必要とされている。このような要求に対しては、FEM 解析による方法が考えられるが、採用する土質定数の選定に配慮が必要である。一般に行なわれている土質試験から得られる土性値を、そのまま生かすことのできる解析法であることが望ましい。

本文は、以上のようなことを踏まえ、間ゲキ水圧を中心とした Terzaghi の一次元圧密理論、ひずみを中心とした三笠の一次元圧密理論、またドレーン圧密に対しては、Barron の圧密理論を基にして差分法による圧密解析プログラムを開発し、簡単なモデルの数値解析結果を基に、前述のような複雑な圧密問題に対する基本的な検討を行なった結果について報告するものである。

2. 解析方法

2.1. 基礎方程式

2.1.1. 一次元圧密

(1) 間ゲキ水圧を中心とした方程式 Terzaghi は、種々の仮定のもとに過剰間ゲキ水圧 u に関するつぎのような熱伝導型の圧密方程式を導いた。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 u : 過剰間ゲキ水圧、 c_v : 圧密係数、 t : 時間、 z : 深度

(1)式は、圧密中 c_v , m_v , k が一定で変化しないという仮定がなされている。これに対して、圧密中 c_v が一定で m_v , k が変化するとした場合は、(1)'式となる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{m_v} \cdot \frac{\partial m_v}{\partial z} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) \dots\dots\dots(1)'$$

(2) ひずみを中心とした方程式 一方、三笠¹⁾は圧密中のひずみの変化に着目して、圧密中の土性 (c_v , m_v , k) の変化、層厚の変化および自重の影響を考慮した (2)式を与えている。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} + \frac{dc_v}{d\varepsilon} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right)^2 - \frac{d}{d\varepsilon} (c_v \cdot m_v \cdot \gamma') \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 ε : ひずみ、 m_v : 体積圧縮係数、 γ' : 粘土の水中単位体積重量

2.1.2. ドレーン圧密 Barron は、一次元流れに加えて、ドレーンに流入する放射流れを考慮して(4)式のような拡散型の圧密方程式を導いた²⁾。

$$\frac{\partial u}{\partial z} = c_v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 r : 半径

(1)式と同様に、圧密中 c_v が一定で m_v , k が変化するとした場合は(3)式となる。

$$\frac{\partial u}{\partial z} = c_v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{m_v} \cdot \frac{\partial m_v}{\partial r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{m_v} \cdot \frac{\partial m_v}{\partial z} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad \dots\dots\dots(3)'$$

本解析では、(1)'式、(2)式、(3)'式を基本式として用いている。

2.2. 数値解析手法

2.1. で示した圧密方程式を種々の条件のもとで解析的に解を求めることは困難である。そこでこれらの式を差分化して、初期条件、境界条件を与えて逐次計算する方法によって解を求めた。紙面の都合上、差分化については割愛する。他の文献³⁾を参照されたい。

2.3. 土性値の選定方法

圧密進行に伴う土性値の変化を以下のような方法で選定した。

2.3.1. 体積圧縮係数(m_v) m_v の変化は粘土の有効応力と間ゲキ比の変化によって(4)式のように表わされる。

$$m_v = - \frac{1}{1+e} \cdot \frac{de}{dp} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 e : 間ゲキ比、 p : 有効応力

一般に正規圧密領域においては、

$$e = e_0 - C_c \log p \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 e_0 : $p=1.0$ に対する間ゲキ比、 C_c : 圧縮指数なる関係が認められるから、(4)式は(6)式ようになる。

$$m_v = - \frac{1}{1+e} \cdot \frac{de}{dp} = \frac{C_c}{p(1+e)} \cdot \frac{1}{\ln 10} \quad \dots\dots\dots(6)$$

これが、圧密過程中的 m_v の変化を表わす式である。

2.3.2. 圧密係数 (c_v) 圧密進行に伴う c_v の変化に定まった形はない。しかし一般に、海成粘土では過圧密領域で有効応力 p の増加に伴って減少し、正規圧密領域で一定となる傾向が見られる。そこで図-1 に示すように、直線と2次曲線で近似する。

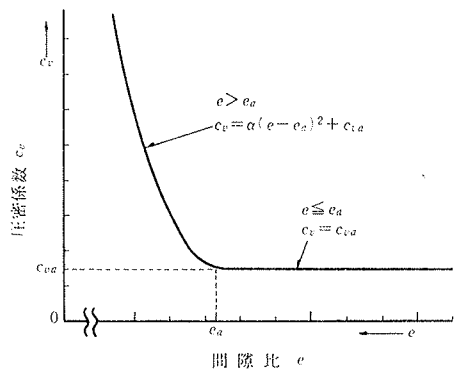


図-1 $e \sim c_v$ 関係

2.4. 境界条件

2.4.1. 排水、非排水境界 排水面では、間ゲキ水圧が発生しないものとして、時間に関係なく圧密期間を通

じて $u=0$ とする。一方、不透水層などに接する非排水面では、この点における間ゲキ水圧の変化がないものとして同様に、

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad \text{または} \quad \frac{\partial u}{\partial r} = 0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

とする。

2.4.2. 層境界 多層地盤の解析では図-2に示すように、層境界 i 点において間ゲキ水圧の連続性

$$u_i^{(l)} = u_i^{(l+1)} = u_i \dots\dots(8)$$

および間ゲキ水圧の鉛直方向の流れの連続性

$$k^{(l)} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^{(l)} = k^{(l+1)} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^{(l+1)} \dots\dots\dots(9)$$

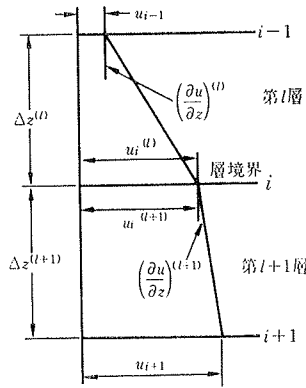


図-2 層境界の連続条件

を満足するようにする。

2.4.3. ドレーン境界 ドレーンの透水性が有限の場合に、ドレーンの脱水抵抗（一般にウェルレジスタンスと言う）が生じる。この影響を解析で考慮するため図-3に示すように、ドレーンの円柱要素について考える。この要素に粘土から流入する間ゲキ水 dV_1 と、鉛直方向に流入する量と流出する量の差 dV_2 が等しいものとすれば、

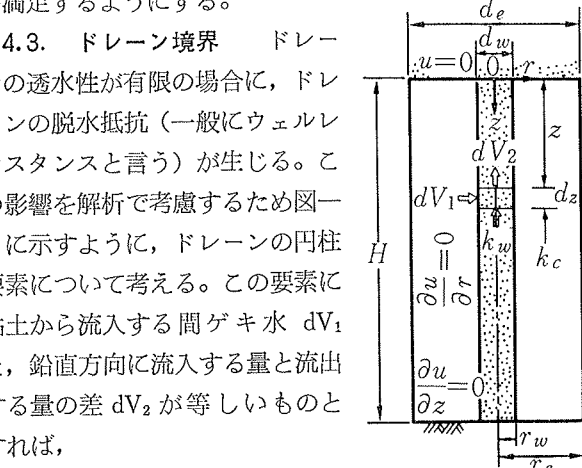


図-3 ドレーン内の水の動き

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)_{r=r_w} + Z \frac{k_c}{k_w} \frac{1}{r_w} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)_{r=r_w} = 0 \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 k_c : 粘土の透水係数、
 k_w : ドレーンの透水係数

が得られる。

2.5. 初期条件

時間 $t=0$ において、排水面以外のすべての点で載荷重と等値の過剰間ゲキ水圧が発生するものとして、

$$u_0 = q$$

ここに、 u_0 : 初期間ゲキ水圧、 q : 載荷重
とにおいて計算を始める。

3. 解析モデル

3.1. 一次元圧密

表-1 に一次元圧密の場合の解析モデルを示す。モデル1~3は地盤定数がすべて同じで荷重条件のみが異なる。

これは、圧密に伴う層厚の変化を考慮した場合に増加荷重、すなわち圧密沈下量の差が圧密速度に及ぼす影響を比較検討するものである。

またモデル4~6は、2層地盤モデルにおいて層の順序が異なる場合の圧密過程を比較検討するもので、モデル4、モデル5は層の順序を考慮したもの、モデル6は一般に行なわれている層厚換算法によるものである。

モデル7は、 c_v が圧密に伴って変化することを考慮した解析を行なうもので、 c_v は初期応力に対する $0.030 \text{ m}^2/\text{day}$ から最終応力に対する $0.003 \text{ m}^2/\text{day}$ まで $1/10$ に変化させている。

3.2. ドレーン圧密

モデル8~12は、地盤定数、荷重条件がすべて同一のドレーン圧密の解析モデルであるが、モデル8~11は貫通ドレーン、モデル12はドレーンが粘土層の途中で止められている未貫通ドレーンである。ドレーン長は、モデル8、9、12が $l=10 \text{ m}$ で、モデル10、11は、 $l=30 \text{ m}$ と

モデル	モデル概要	地盤定数		荷重条件	
		$e-p$ 関係	$c_v(\text{m}^2/\text{day})$	$p_0(\text{tf}/\text{m}^2)$	$\Delta p(\text{tf}/\text{m}^2)$
1	1層モデル	$e=2.4-0.81\log p$	0.003	1.0	19.0
2		"	"	"	0.66
3		"	"	"	131.4
4	2層モデル	A層 $e=2.4-0.81\log p$ B層 $e=1.6-0.41\log p$	A層 0.003 B層 0.012	3.0	12.0
5		"	"	"	"
6	1層モデル (層厚換算)	$e=2.4-0.81\log p$	0.003	"	"
7	1層モデル c_v 変化	$e=2.4-0.81\log p$	$c_v < 2.36$ $c_v = 0.025(e - 1.36)^2 + 0.003$ $e \geq 2.36, c_v = 0.003$	1.0	19.0

表-1 一次元圧密モデル

モデル	モデル概要	地盤定数		荷重条件	
		$e-p$ 関係	$c_v(\text{m}^2/\text{day})$	$p_0(\text{tf}/\text{m}^2)$	$\Delta p(\text{tf}/\text{m}^2)$
8	貫通ドレーン	$e=2.4-0.81\log p$	0.0036	1.0	9.0
9	モデル8と同じ	"	"	"	"
10	モデル8と同じ	"	"	"	"
11	モデル10と同じ	"	"	"	"
12	未貫通ドレーン	"	"	"	"

表-2 ドレーン圧密モデル

長尺である。また、モデル 9, 11 は、ドレーンの透水性が圧密速度に及ぼす影響を検討するもので、ドレーンの透水係数は、サンドドレーン用の砂として一般的な値である $k_w=1.0 \times 10^{-3}$ cm/sec とした。

4. 解析結果

4.1. 一次元圧密

4.1.1. 圧密中の m_v, k の変化が圧密特性に及ぼす影響

図-4 にモデル 1 の時間一圧密度曲線を示す。応力に関する圧密度は、ひずみに関する圧密度に比べ大きく時間遅れを生じていることがわかる。これは土の圧縮性 ($e-p$ 関係) が非線形であるという特性によるもので、圧密中 m_v, k が一定という仮定を用いた Terzaghi 理論では表現できない現象である。一般に言われているように、Terzaghi 理論では、応力に関する圧密度を過大評価し

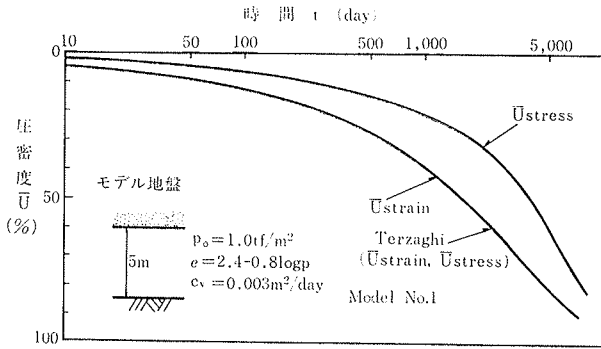


図-4 時間一圧密度曲線 (1層地盤)

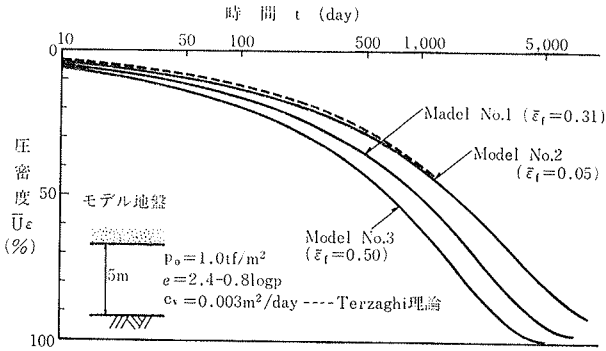


図-5 時間一圧密度曲線 (層厚の変化考慮)

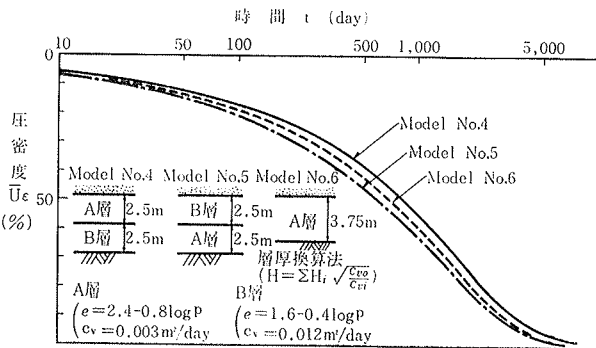


図-6 時間一圧密度曲線 (2層地盤)

ていることがわかる。

4.1.2. 層厚の変化が圧密特性に及ぼす影響 図-5 にモデル 1~3 の時間一圧密度曲線を示す。圧密沈下量の小さい場合 (モデル 2) は、Terzaghi の理論解と良い対応を示しているが、圧密沈下量が大きくなると層厚の変化の影響を受け、圧密沈下量が大きいほど圧密の進行は速くなることわかる。

4.1.3. 多層地盤の層の順序が圧密特性に及ぼす影響

2層モデルの時間一圧密度曲線を図-6に、等時線を図-7に示す。圧密速度は層の順序により異なっており、等時線に見られるように、圧密の進行過程も特に初期において大きく異なっていることがわかる。また、層厚換算法では層の順序を考慮できず、その結果は、モデル 4, モデル 5 の中間にある。なお、層の順序により圧密速度に差が見られる傾向

は、各層間の土性 (c_v) の差が大きいほど顕著となる。

4.1.4. 圧密中の c_v の変化が圧密特性に及ぼす影響

図-8 に c_v の変化する場合の時間一圧密度曲線を示す。

c_v が変化する場合

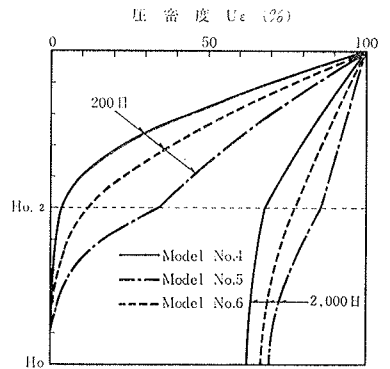


図-7 等時線 (2層地盤)

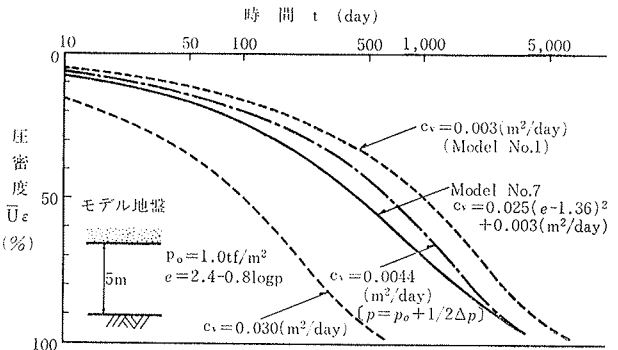


図-8 時間一圧密度曲線 (c_v 値変化)

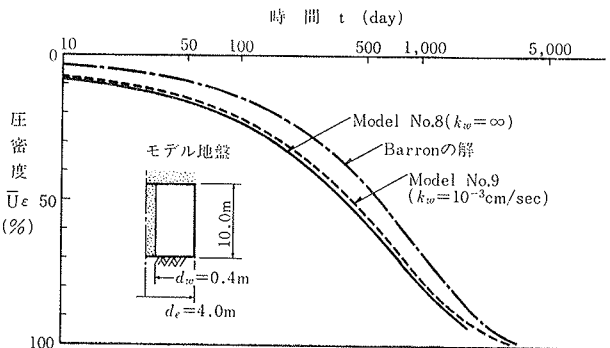


図-9 時間一圧密度曲線 (貫通ドレーン)

の曲線は、圧密開始時の $c_v=0.030 \text{ m}^2/\text{day}$ の曲線と、圧密終了時の $c_v=0.003 \text{ m}^2/\text{day}$ の曲線の間にあるが、 $c_v=0.003 \text{ m}^2/\text{day}$ の曲線に近い。また、図中には一般に行なわれている、初期応力と最終応力の平均値 ($p=p_0+1/2 \Delta p$) に対する一定の c_v を用いた解析結果も示しているが、 c_v の変化を考慮した場合に比べ圧密の遅れる傾向が見られる。任意の一定の c_v に対する時間一圧密度曲線は、図面上で曲線を平行移動することによって得られるが、 c_v を変化させた場合の曲線はその形状が異なっており、従来の方法では表現できないことがわかる。

4.2. パーチカル・ドレーン圧密

4.2.1. 鉛直方向の排水を考慮した貫通ドレーンの解析 図-9 にモデル8の時間一圧密度曲線を示す。Barronの解と比べると圧密の進行が速いが、これはBarronの解が鉛直方向の間ゲキ水の流れを無視しているためである。

4.2.2. ドレーンの透水性を考慮した解析 図-9, 図-10にドレーンの透水性を無限とした場合と有限とした場合の時間一圧密度曲線の比較を示す。図-9に示すようにドレーン長が10mの場合は、ドレーンの透水性の影響は大きくないが、図-10のようにドレーン長が30mと長尺になると影響は大きくなり、圧密進行はBarronの解よりも遅れる。図の時間一圧密度曲線は平均圧密度を示したものであるが、圧密度は深度によって異なり、深い位置ほど圧密の遅れは大きくなっている。また、ドレーン径が小さいほどドレーンの透水性の影響は大きくなる。

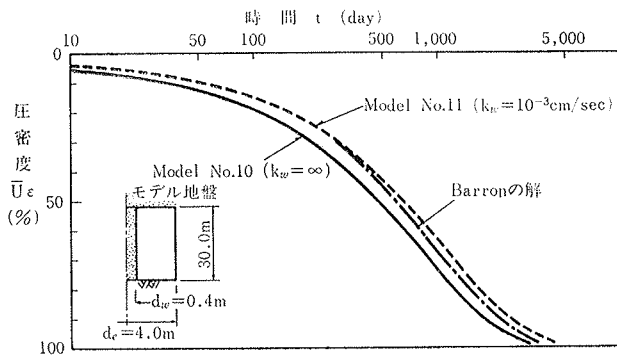


図-10 時間一圧密度曲線 (ドレーンの透水性考慮)

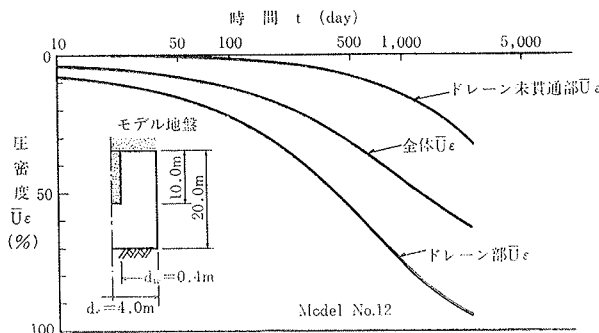


図-11 時間一圧密度曲線 (未貫通ドレーン)

4.2.3. 未貫通ドレーンの解析

未貫通ドレーンの時間一圧密度曲線を図-11に、等時線を図-12に示す。図-12には、比較のためにドレーン部と未貫通部を分けて、別々に解析を行なった結果を破線で示している。その

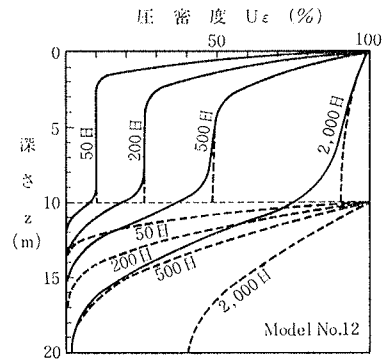


図-12 等時線 (未貫通ドレーン)

際、ドレーン部を下端面非排水の貫通ドレーン、未貫通部を上端面排水の一次元圧密問題として解析している。ドレーン部、未貫通部とも連続した形で解析した結果に比べ、圧密の進行が速いことがわかる。従来の方法では、ドレーン未貫通部の解析に十分なものがなかったが、今回の方法では、これをドレーン部と連続した形で解析できるため、精度の高い結果が得られる。

5. むすび

軟弱地盤改良工法の一つである圧密脱水工の改良効果を精度よく評価することを目的として、圧密進行に伴う土性値 (m_v, k, c_v)、層厚の変化が圧密特性に及ぼす影響や、未貫通ドレーンの問題、長尺ドレーンや小口径ドレーンにおける圧密遅延の問題などを考慮できる解析手法について検討してきた。一次元圧密に対しては、Terzaghi, 三笠の圧密理論、ドレーン圧密に対しては、Barronの圧密理論に基づく基礎方程式を差分法によって解く方法を試みた。その結果、圧密試験から得られた土性値をそのまま生かすことができる精度の高い圧密沈下解析が可能となった。

ところで、本報告は従来手法による解析結果と、本手法による解析結果を比較検討したものである。実際、現場での圧密問題に本解析手法を適用する場合の土性の評価、あるいは解析結果の評価方法など、今後継続研究して行く必要がある。

謝辞

本研究の遂行に際して、大阪市立大学工学部土木工学科の望月秋利先生に貴重な御教示を載せました。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 三笠 正人: 軟弱粘土の圧密, 鹿島出版会
- 2) 吉国 洋: パーチカルドレーン工法の設計と施工管理, 技報堂
- 3) 例えば, 土木学会編: 土木工学における数値解析—基礎編, サイエンス社