

## 一次元圧密試験における逆解析手法の適用

## Application of an inverse analysis method to one-dimensional consolidation tests

清水正喜 Masayoshi SHIMIZU (鳥取大学工学部)  
石飛善行 Yoshiyuki ISHITOBI ((株)大林組, 元鳥取大学大学院)

圧密試験の結果から圧密に関する構成パラメータを決定する問題において、主観的判断に伴う曖昧さの入らない、より客観的な方法を確立する目的で、最小二乗法に基礎をおく逆解析手法の適用性を検討した。テルツァーギの圧密理論に基づく理論沈下量と実測沈下量との残差の二乗和を目的関数とした。目的関数の最小化には直接探査法と Newton-Raphson 法による非線形反復解法を適用した。その結果、逆解析手法は、JIS の方法に比較して実測沈下量を良く再現できる構成パラメータを同定することができる、非線形反復法ではデータ数が多いほど実測沈下量をより良く再現できる、直接探査法によって最適化したパラメータは、非線形反復法によるものに比べて、一次圧密に関する圧密現象をより良く表現することができる、等の知見を得た。

キーワード: 圧密, 段階載荷, 逆解析, 最小二乗法, (IGC: D05, E13)

## 1. 序論

逆解析を以下のように定義することができる<sup>1),2),3)</sup>。

工学の問題では、対象とする系の物理モデルが構成できれば、その応答を推定することが可能である(順解析)。物理モデルを構成するのに必要な情報として次のようなものが考えられる。

- (1) 対象領域と境界の形状と位置
- (2) 物理量に関する支配方程式
- (3) 物理量に関する境界条件および初期条件
- (4) 系に作用する負荷
- (5) 系を構成している材料の力学特性とその分布性

これらのいずれかが欠落している場合には、順解析を行なうことができなくなり、そのすべてを逆解析の範疇に含めることができる。

逆解析では情報の一部が未知であるために、そのままでは解析を行なうことができない。逆解析では、観測値(順解析における系の応答値)が、未知量を推定するための情報として与えられることになる。観測値として与えられるものは、境界上や領域内の特定点、特定時刻における系の応答値ならびにそれらの組み合わせである。

圧密の問題においては、例えばテルツァーギの理論を適用する場合、上記(1)から(4)は既知であるが、(5)が欠落している。系の応答(沈下量と時間の関係)から材料特性を決定する必要がある。このプロセスは逆解析に他ならない。段階載荷圧密試験の結果から力学特性の一つである圧密係数を決定するために一般的に適用されている曲線定規法あるいは $\sqrt{t}$ 法は逆解析の手法である。

上に挙げた曲線定規法あるいは $\sqrt{t}$ 法は、周知のように、

主観的判断に伴う曖昧さを含むことがある。そのような曖昧さを含まないより客観的な方法として逆解析手法の適用性を検討することが本研究の目的である。

逆解析手法を種々の圧密問題に適用して構成パラメータを同定し、それをを用いて現象をさらに解明することを試みた研究は少なくない。例えば、多次元圧密解析<sup>4),5)</sup>、一次元圧密における二次圧密<sup>6)</sup>、一次元自重圧密<sup>7)</sup>など、その適用範囲は広い。本研究では、下に述べるように標準的な圧密試験結果にテルツァーギ理論を適用して圧密係数などを決定するという、最も基本的な問題を対象としている。この基本的な問題を逆解析手法であらためて検討した研究は行われていないようである。

本論文では、最小二乗法に基づいて定式化した一つの逆解析手法を段階載荷圧密試験の結果に適用して試料の構成パラメータを同定し、手法の適用性を検討する。

飽和粘性土に対する段階載荷圧密試験の結果である実測沈下量と、Terzaghi の圧密理論による理論沈下量との残差の二乗和を目的関数とした。目的関数を最小化するために、二通りの方法を適用した。一つは直接探査法で、目的関数の変数(同定すべきパラメータ)の値を順次変化させて目的関数を最小にする値を試行錯誤的に推定する方法である。他は、目的関数を最小化するための必要条件を導き、それらを連立させた方程式を Newton-Raphson 法<sup>8)</sup>(以下 N-R 法と言う)によって反復的に解く方法である。方程式は非線形であるので本論文ではこの方法を非線形反復手法と呼ぶことにする。

昨今、圧密試験データはデータロガーで収録するのが一般的で、データ収録時間間隔は JIS で推奨されたものより短く、したがってデータ数も多いのが実情であると

思われる。逆解析は用いるデータの量と質に左右されるので、逆解析におけるデータ数の影響について検討する。

また、N-R法では、未知量の初期値を設定する必要があるが、解が初期値に依存したり、場合によっては解が得られない、即ち反復計算が収束しないことがある。そこで初期値の影響についても調べる。

## 2. 逆解析の方法

### 2.1 Terzaghi 圧密理論による沈下量

Terzaghi の圧密理論における支配方程式は：

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

で与えられる。ここに、 $u$  は過剰間隙水圧、 $c_v$  は圧密係数で次式で定義される。

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (2)$$

ここに、 $m_v$  は体積圧縮係数、 $k$  は透水係数、 $\gamma_w$  は間隙水の単位体積重量である。

層厚  $H$  で両面排水、初期過剰間隙水圧一定の条件では、境界条件は

$$u(z=0, t) = 0, \quad u(z=H, t) = 0 \quad (t > 0) \quad (3)$$

初期条件は

$$u(z, t=0) = u_0 (= \text{const}) \quad (0 < z < H) \quad (4)$$

となる。このとき解は次式で与えられる。

$$u = \frac{4u_0 H}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{2n-1} \sin \left( (2n-1) \pi \frac{z}{H} \right) \exp \left\{ -((2n-1)\pi)^2 \frac{c_v t}{H^2} \right\} \right] \quad (5)$$

時間  $t$  までに生じた沈下量  $\hat{S}$  は、その間のひずみ増分を  $\Delta \varepsilon$ 、有効応力増分を  $\Delta \sigma'$  とすると

$$\hat{S} = \int_0^H \Delta \varepsilon \cdot dz = m_v \cdot \int_0^H \Delta \sigma' \cdot dz = m_v \cdot \left( \int_0^H u_0 \cdot dz - \int_0^H u \cdot dz \right) \quad (6)$$

で表される。式(5)の解を適用して積分を実行すると

$$\hat{S} = m_v u_0 H \cdot \left( 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left\{ -((2n-1)\pi)^2 \frac{c_v t}{H^2} \right\} \right] \right) \quad (7)$$

を得る。 $\hat{S}$  は  $m_v$  と  $c_v$  の関数であり、それらを次節で述べる方法で決定する。

### 2.2 目的関数とその最適化

#### (1) 目的関数

式(7)の理論沈下量と実測沈下量の残差の二乗和を目的関数  $J$  に設定した。すなわち、

$$J = \sum_{i=1}^N (S_i - \hat{S}_i)^2 \quad (8)$$

ここに、

$S_i$  :  $t=t_i$  における実測沈下量、

$\hat{S}_i$  :  $t=t_i$  における理論沈下量で式(7)で  $t=t_i$  とおいたもの、

$N$  : 解析データ数。

#### (2) 最適化

最適化とは目的関数を最小にするパラメータの値を決定することであり、本研究では二通りの方法、即ち、直接探索法と非線形反復手法を適用した。ここでは非線形反復手法の理論的基礎のみに触れる。各方法の詳細は次節で述べる。

目的関数  $J$  を独立変数  $m_v$  および  $c_v$  の関数と考える。 $J$  を最小化するための必要条件は

$$\frac{\partial J}{\partial m_v} = \sum_{i=1}^N \left[ -2 \frac{\partial \hat{S}_i}{\partial m_v} \cdot (S_i - \hat{S}_i) \right] = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial J}{\partial c_v} = \sum_{i=1}^N \left[ -2 \frac{\partial \hat{S}_i}{\partial c_v} \cdot (S_i - \hat{S}_i) \right] = 0 \quad (10)$$

で与えることができる。この連立方程式を N-R 法<sup>8)</sup>で反復的に解く。

### 2.3 データ

飽和カオリン粘土に対して行われた段階荷重圧密試験の結果<sup>9)</sup>を解析した。圧密圧力  $p$  を  $p=0 \rightarrow 10 \rightarrow 20 \rightarrow 39 \rightarrow 79 \rightarrow 157 \rightarrow 314 \rightarrow 628 \rightarrow 10$  (kPa) と段階的に荷重および除荷されたが、除荷段階を除く段階を対象とした。

各荷重段階で、データは表-1 に示す時間間隔で収録された(このデータを実測データ系列と呼ぶ)。一方、データ数の影響を調べるために、JIS で推奨された測定間隔(表-2)のデータを用いた解析も行なった。実測データ系列から、その測定間隔に相当するデータのみを抽出した(このデータを JIS データ系列と呼ぶ)。

表-1 実測データ系列の測定時間間隔

$t$ (s)	0	300	600	1200	3600	7200
	~300	~600	~1200	~3600	~7200	
$\Delta t$ (s)	3	15	60	600	1800	3600

※全データ数  $N_{\max}=159$  ( $t=0$  のデータを含む)

表-2 JIS データ系列の測定時間

$t$	s	3, 6, 9, 12, 18, 30, 42
	min	1, 1.5, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40
	h	1, 1.5, 2, 3, 6, 12, 24

※全データ数  $N_{\max}=26$  ( $t=0$  のデータを含む)

テルツァーギの理論は一次圧密のみを対象としているが実測値は二次圧密を含む。そのため、各データ系列で全数のデータを使用することは理論の仮定を満足しないことになり、解析手法自体の適用性を適切に評価できない恐れがある。これを避けるために下に述べる方法でデータ数を制限した場合についても検討した。

各データ系列において、全数のデータを逆解析してパ

ラメータの最適値を決定し、その値を使って理論沈下曲線を求めた。理論沈下曲線から圧密度 99.9%を超えない範囲のデータを一次圧密データと仮定した。圧密度が 99.9%を超えないデータの個数を  $N(U<99.9\%)$  と書く。 $N(U<99.9\%)$  は同じデータ系列であっても载荷段階によって異なる。

## 2.4 解析の手順と解析内容

### (1) 非線形反復手法

次の手順で逆解析した。

1) 実験条件および初期条件の入力：供試体高さ、圧密圧力、データの個数など。

2)  $m_v$  および  $c_v$  の初期値の入力：N-R 法は初期値の影響を受ける。そこで  $m_v$  および  $c_v$  に範囲を設定し、その範囲を 100 分割した値を組み合わせたものを初期値とした。つまり、最大 10000 通りの初期値ということとなる。初期値の範囲は、JIS の方法 ( $\sqrt{t}$  法) により求めた  $m_v$  と  $c_v$  の値を含むようにして、

$$1.0 \times 10^{-4} < m_v < 1.0 \times 10^{-2} \text{ (m}^2/\text{kN)}$$

$$1.0 \times 10^{-7} < c_v < 1.0 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

と設定した。

3) N-R 法による反復計算によって  $m_v$  および  $c_v$  を決定：

■ 反復計算中に  $c_v$  が負になった場合、2) に戻って初期値を変更する。これは理論式の性質上  $c_v$  が負となると発散するためである。

■ 反復計算の収束を次式によって判定した。

$$\frac{|m_v(n+1) - m_v(n)|}{m_v(n)} \times 100 < \beta, \quad \frac{|c_v(n+1) - c_v(n)|}{c_v(n)} \times 100 < \beta$$

ここに、 $n$  は繰り返し計算  $n$  回目の値であることを表す。 $\beta$  は精度 (%) であり、 $\beta=0.1\%$  を採用した。この条件が満たされればそのときの初期値に対する計算を終了して、2) に戻る。

■ 反復計算回数が 50 回となった場合、収束不可能とみなし、2) に戻り初期値を変更する。

初期値は最大で 10000 通りに変えることができるが、実際は、後述するように初期値のある範囲で一定の値に収束するという性質があるので、変動幅を大きくして少ない数の初期値で解析した。

### (2) 直接探査

直接探査には 2.3 節で述べたデータ数  $N(U<99.9\%)$  を用いた。

次の手順で探査した。

1) 実験条件の入力：供試体高さ・圧密圧力・データの個数等。

2) 探査範囲の設定 (図-1 参照)：探査した  $m_v$  および  $c_v$  の範囲は次のようである。

$$n_1 \times 10^{-i} < m_v < n_1 \times 10^{-i+1} \text{ (m}^2/\text{kN)}$$

$$n_2 \times 10^j < c_v < n_2 \times 10^{j+1} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

ここに

$$n_1, n_2 = 1, 2, 3, \dots, 9; i, j = 1, 2, 3, \dots$$

その範囲内で 200 分割した値の組み合わせとした。つまり、40000 通りの  $m_v$  および  $c_v$  の値となる。探査範囲は  $i$  と  $j$  の値によって決まる。

3) 探査範囲内で目的関数を最小とする  $m_v$  および  $c_v$  を決定する。決定した  $m_v$  および  $c_v$  が、探査範囲の端にある場合、その傾向に従って手順 2) に戻って探査範囲を変更する。

4) 目的関数を最小化する、より高精度の  $m_v$  および  $c_v$  の値を求めるため、手順 3) までで求めた値を含む範囲で次のように新たに探査範囲を設定し、手順 3) に戻る。

$$n_1 \times 10^{-i} < m_v < (n_1+1) \times 10^{-i} \text{ (m}^2/\text{kN)}$$

$$n_2 \times 10^j < c_v < (n_2+1) \times 10^j \text{ (m}^2/\text{s)}$$

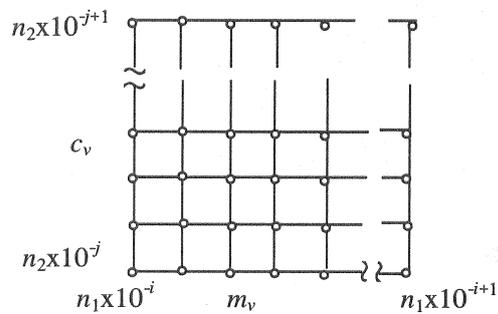


図-1 パラメータの探査範囲

## 3. 結果および考察

### 3.1 非線形反復手法の結果

#### (1) 初期値の影響

N-R 法では未知量の初期値を設定する必要がある。問題によっては、解が初期値に依存したり、場合によっては解が得られない、即ち反復計算が収束しないことがある。そこで初期値の影響について調べた。

未知量である  $m_v$  と  $c_v$  の設定範囲内のすべての初期値に対して N-R 法を適用してどのような値に収束するのかを調べた。载荷段階  $p=628$  (kPa) において、実測データ系列および JIS データ系列の各々全データを用いた場合について検討したが、結果は同じ傾向であったので、実測データ系列に対する結果のみを示す (図-2)。この図は 100 行 100 列の表になっていて、一つのセルは  $m_v$  と  $c_v$  の初期値の組に対応している。その初期値での収束値ごとにセルを色分けした。

図より、設定した初期値の範囲では、初期値によって収束しない場合があることと、収束する場合は収束値が 2 つ存在することがわかる。

収束値が唯一でないのは、目的関数の極値が唯一でな

いためである。最適な収束値は目的関数を最小にするものであるが、それは、実際に計算を行なって目的関数の値を比較して判断する以外に方法がないと思われる。本研究では、設定した範囲内の初期値に対する収束値のうち、目的関数を最小とする値を最適解と考えた。

なお、目的関数の極値が唯一でない理由は明らかにできていないが、目的関数の一部として用いた圧密理論解が三角関数を含む級数解であることが関係していると思像される。

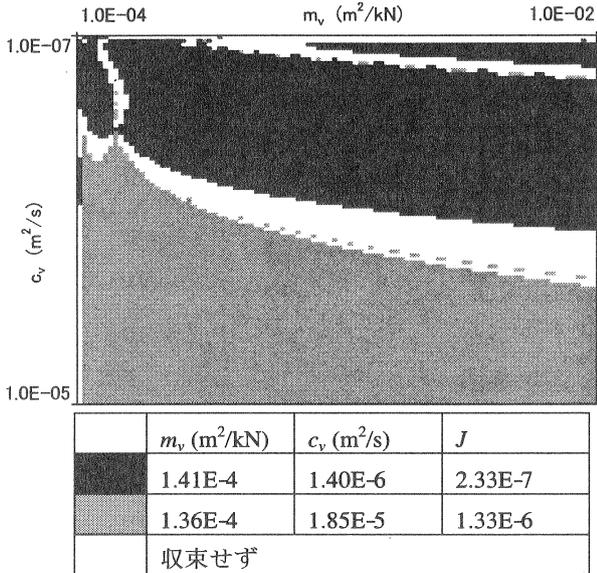


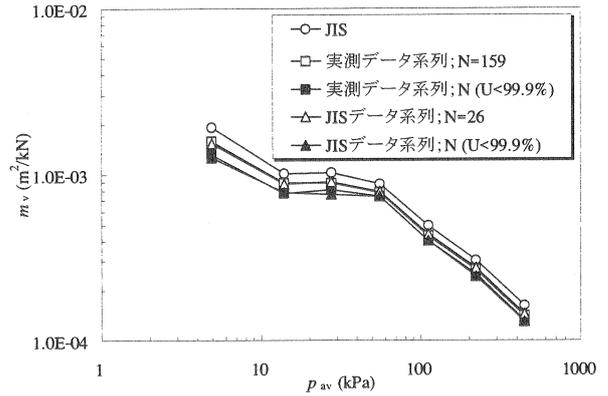
図-2 初期値の設定範囲における収束値

(2) 逆解析と JIS 法の比較

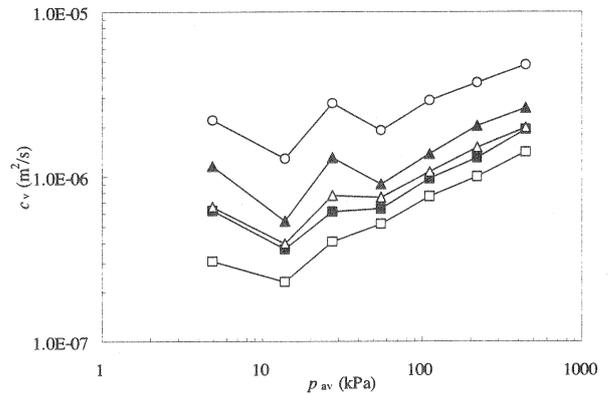
図-3(a)~(c)に非線形反復逆解析に基づいて決定したパラメータ：体積圧縮係数  $m_v$ 、圧密係数  $c_v$  および透水係数  $k$  を平均圧密圧力  $p_{av}$  に対してプロットした。比較のために JIS の方法によって決定した値も示した。逆解析では  $m_v$  と  $c_v$  が直接決定されるので、 $k$  はそれらより算定した。JIS の方法では、 $c_v$  を  $\sqrt{t}$  法で、 $m_v$  をひずみの実測値から、さらに  $k$  は  $c_v$  と  $m_v$  からそれぞれ算定した。 $m_v$  の実測値は各荷重段階で生じた全ひずみに基づいて算定したものでいわゆる一次圧密補正を行っていない。

まず圧密係数に着目する。どの荷重段階でも、 $\sqrt{t}$  法による  $c_v$  が最も大きいこと、逆解析値は JIS データ系列を使ったものが実測データ系列を使ったものより大きいこと、さらにデータ系列が同じであれば一次圧密部分のデータ、即ち、データ数が  $N(U<99.9\%)$  個の場合に大きいことがわかる。

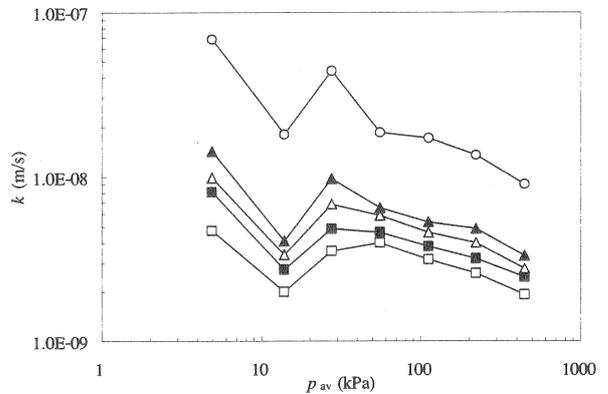
$\sqrt{t}$  法で求めた圧密係数が他より大きくなった理由について考える。 $\sqrt{t}$  法では圧密初期の直線の引き方によって圧密係数が変化する。序論で触れた主観的判断がこれである。よって図-3 の結果のみから適切な理由を見出すことに重要な意味がないと考えられる。ただし、本研究で



(a) 体積圧縮係数



(b) 圧密係数 (凡例は(a)図を参照)



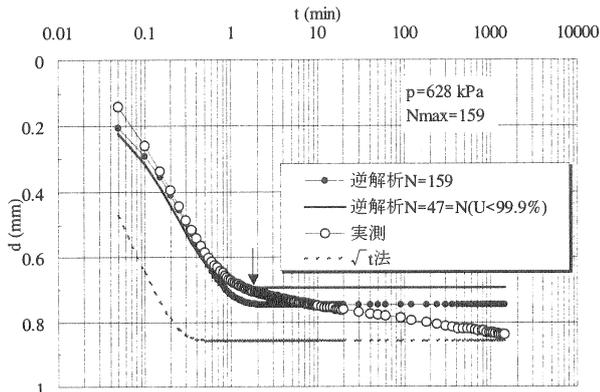
(c) 透水係数 (凡例は(a)図を参照)

図-3 パラメータと平均圧密圧力の関係

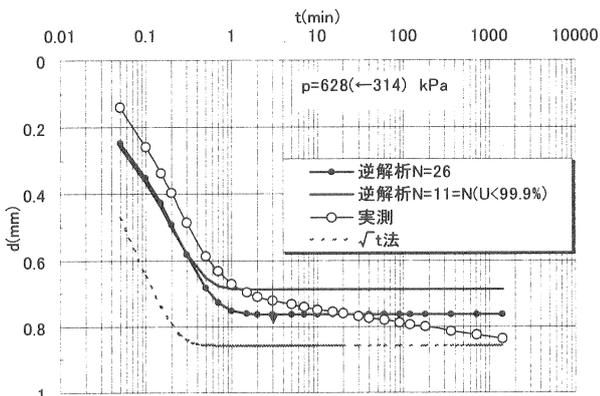
対象とした以外の多くの試験結果に対して同様の解析をして仮に同じ傾向を見出すことができれば、 $\sqrt{t}$  法の特長または逆解析手法の特長と見なすことは可能であろうと思われる。

データ数の多少が圧密係数に影響したことについては次のように考えられる。 $N(U<99.9\%)$  個の場合には、最終データが測定された時間が、全データを使った場合に比べて早い。即ち、より早い時間で圧密が終了することを意味し、その結果として圧密係数が大きくなったと考えられる。

体積圧縮係数は、逆解析値が実測値に比べてやや小さ



(a) 実測データ系列



(b) JIS データ系列

図-4 逆解析 (N-R 法) の結果と実測値の比較

いものの、その差は、圧密係数や透水係数における差と比較するとわずかである。

透水係数は上の考察から明らかのように  $c_v$  の傾向と一致している。

(3) 沈下曲線の比較

逆解析の結果に基づく理論沈下量と実測沈下量とを比較する。逆解析の結果に基づく理論沈下量とは N-R 法を適用してパラメータの値を同定し、それを理論式に用いて計算した沈下量である。代表的な例として荷重段階  $p=628\text{kPa}$  における結果を図-4(a)と(b)に示す。

図-4(a)は実測データ系列を用いた逆解析の場合である。データ全数を用いた場合 ( $N=159$ ) も一次圧密部分のみを用いた場合 ( $N(U<99.9\%)$ ) も、圧密終了時の沈下量を実測値に比べて過小評価している。先に図-3(a)で指摘したことを反映している。また、圧密は  $\sqrt{t}$  法の結果が速く進行している。これは先に図-3(b)で指摘したように  $\sqrt{t}$  法の  $c_v$  が逆解析値の  $c_v$  より大きいことを反映したものである。

図-4(b)は JIS データ系列の場合である。実測値と比較したときの特性は図-4(a)と同様である。

図-4(a)と(b)を比べると、実測データ系列を用いた方が実測沈下曲線に近いことがわかる。両データ系列の差異はデータ数にあることを考えるとデータ数が多いほど実測値との整合性が高くなる、換言すれば、データ数が多いほどより最適解に近い解が得られることを意味する。

なお、2.3 節で述べた方法で決定した圧密度 99.9% の場所を示すが、実測沈下量から推定される一次圧密終了時点と大きな違いはない。

3.2 直接探査の結果

(1) 最適値と目的関数

図-5 は直接探査によって得た目的関数の値の分布を示したものである。代表例として、荷重段階  $p=628\text{kPa}$  において実測データ系列を用いた場合を示した。図の見方は先の図-2 と同様である。ただし、 $200\times 200$  のセルで構成されている。

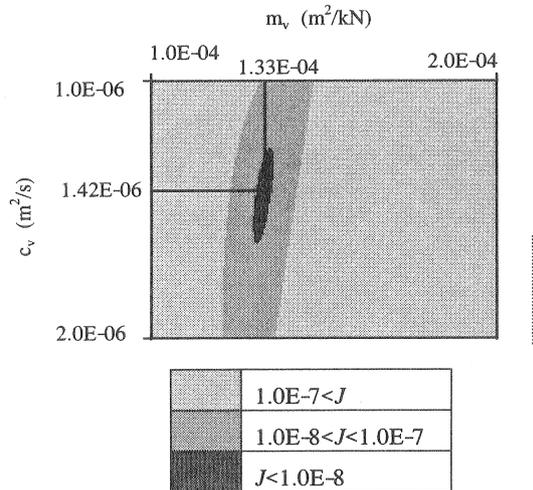


図-5 直接探査の結果。目的関数の値の分布 (実測データ系列)

この例の場合、 $m_v=1.33\times 10^{-4}\text{m}^2/\text{kN}$ 、 $c_v=1.42\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$  で目的関数は最小となった。厳密には変数の桁数を増すことによって最小値とそれを与える変数の値は変化する。表3に同じ荷重段階での、JIS データ系列を用いた場合の探査結果も示した。表より、データ系列の相異、したがってデータ数の多少によらず、目的関数の最小値およびそれを与える変数の値が極めて近いことがわかる。

表-3 直接探査の結果 ( $p=628\text{kPa}$ )

データ系列	$m_v$	$c_v$	$J_{\min}$
実測データ系列	1.33E-4	1.42E-6	4.86E-9
JIS データ系列	1.34E-4	1.40E-6	3.78E-9

表-3 では、実測データ系列から求めた圧密係数が JIS データ系列から求めたものよりわずかであるが大きい。これは、先に図-3 で指摘したことと矛盾している。しかしながら、表-3 において目的関数の最小値は実測データ系列の方が大きい、換言すれば実測データ系列ではさらに目的関数を小さくするような  $c_v$  や  $m_v$  が存在する可能性を示唆している。解析精度の限界を示しているとも言える。

(2) 沈下曲線

図-6(a)と(b)に表 3 に示した  $m_v$  と  $c_v$  の値を使って計算した理論沈下曲線を示した。比較のため実測沈下曲線も示している。

先に断わったように、直接探査は各データ系列の一次圧密部分のデータ、即ちデータ数  $N(U<99.9\%)$  のデータを対象としている。この観点から結果を観察すると理論曲線は実測曲線を高精度で再現していることがわかる。

4. 結論

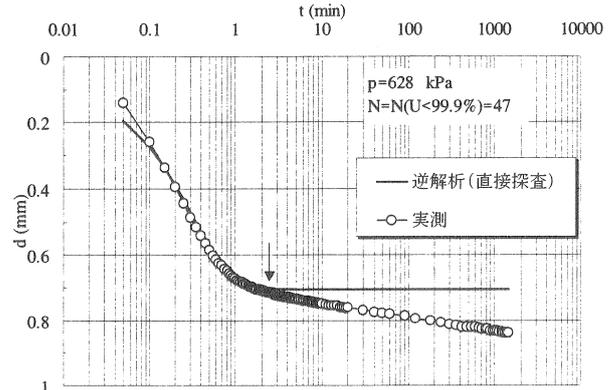
圧密試験の結果から圧密に関する構成パラメータを決定する問題において、主観的判断に伴う曖昧さの入らない、より客観的な方法を確立する目的で、最小二乗法に基礎をおく逆解析手法の適用性を検討した。テルツァーギの圧密理論に基づく理論沈下量と実測沈下量との残差の二乗和を目的関数とした。目的関数の最小化には直接探査法と Newton-Raphson 法による非線形反復解法を適用した。

主な結論は次の通りである：

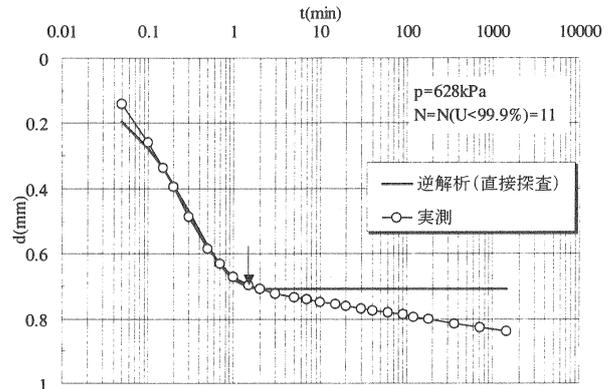
- ・本研究で採用した逆解析手法は、JIS の方法に比較して実測沈下量を良く再現できる構成パラメータを同定することができた。
- ・非線形反復法では、データ数が多いほど、実測沈下量をより良く再現できた。
- ・直接探査法によって最適化したパラメータは、非線形反復法によるものに比べて、一次圧密に関する圧密現象をより良く表現することができた。この意味で直接探査による最適化は非線形反復法より効果的であるといえる。

なお、上記 2 番目の結論に関して、序論でも触れたようにデータ収録の自動化が進んでいるので測定データ数を増やすことは容易であるが、データ数が多すぎると計算時間が増えるなどの弊害も出ると考えられる。最適なデータ数については今後の課題としたい。

さらに、本研究の目的は、圧密に関する構成パラメータを決定する問題において、主観的判断に伴う曖昧さの入らない、より客観的な方法を確立することであった。しかしながら、下に示すような課題も残されていて、本論文で提示した方法でこの目的を達成できたとは考えて



(a) 実測データ系列



(b) JIS データ系列

図-6 直接探査逆解析値に基づく沈下曲線

いない。

問題点と今後の課題を要約すると以下のようになる。

- ・ N-R 法による反復解法は、初期値依存性が強いので、初期値の選択には注意が必要である。本研究で扱った目的関数の数学的な特性をより深く検討する必要がある。
- ・ 直接探査は有効であるが計算に時間がかかる。計算時間を短縮するアルゴリズムを今後開発する必要がある。

なお本論文では段階载荷の問題のみを扱ったが、同じ逆解析手法を定ひずみ速度圧密試験にも適用している。別の機会に報告したいと考えている。

最後に、本論文は第二著者が鳥取大学大学院博士前期課程在学中に行った研究の一部を取りまとめたものであることを付記する。

参考文献

- 1) 登坂宜好・大西和榮・山本昌宏：逆問題の数理と解法—偏微分方程式の逆解析，東京大学出版会，1999.
- 2) 脇田英治：逆解析の理論と応用，技報堂，2000.
- 3) 佐藤忠信：逆解析の分類と定義，土と基礎，Vol.43, No.4, p.56, 1995.
- 4) Arai, K., Ohta, H. and Miyata, M.: Comparison of static and statistical methods for back-analysis of elastic consolidation problems, Proc. 7th Int. Conf. on Computer

- Methods and Advances in Geomechanics, Vol. 1, pp.949-954, 1991.
- 5) Hoshiya, M. and Sutoh, A. Identification of consolidation parameters and settlement prediction on peaty soft deposits, Proc. Int. Sym. on Compression and Consolidation of Clayey Soils, IS-Hiroshima, Vol. 1, pp.519-524, 1995.
  - 6) Imre, E. Model discrimination fro conventional step-loaded oedometer test, Proc. Int. Sym. on Compression and Consolidation of Clayey Soils, IS-Hiroshima, Vol. 1, pp.525-530, 1995.
  - 7) Yamagami, T. and Sakai, S. Back analysis of self-weight consolidation problems, Proc. Int. Sym. on Compression and Consolidation of Clayey Soils, IS-Hiroshima, Vol. 1, pp.603-608, 1995.
  - 8) 長嶋秀世：数値計算法（改訂 2 版），槇書店，1987.
  - 9) 南部啓太：不飽和土の一次元圧縮・圧密挙動に関する基礎的研究，鳥取大学大学院工学研究科土木工学専攻，修士論文，2003.

(2005 年 7 月 29 日 受付)