

軟弱地盤逆解析における間隙水圧の有効性

岡山大学大学院自然科学研究科 正会員 西村伸一

1. はじめに

本研究は、圧密逆解析手法に基づいて、軟弱地盤の将来挙動予測を行っている。とくにここでは、逆解析に間隙水圧の計測結果を利用する方法とその有効性について重点的に考察を行っている。一般に、圧密沈下曲線の形状は、地盤の変形特性と透水性の微妙なバランスの上に成立する。したがって、比較的短期間の変形計測結果のみを用いて逆解析を行った場合、同定を誤る場合も多い。そこで、著者らは、変形計測結果を中心に捉えるが、補助的な情報として間隙水圧の計測結果を利用する方法を示してきた¹⁾。本研究では第一に、一次元圧密理論を用いて、間隙水圧の理論的な有効性を示す。第二に、関口・太田モデルに基づく弾塑性有限要素法²⁾に基づいて模擬計測データを作成し、これを用いて逆解析を実施し、二次元境界値問題における間隙水圧計測値の有効性を示している。

2. 間隙水圧の有効性とパラメータの同定法

ここでは、瞬時載荷、片面排水の一次元圧密理論を基に考察する。ここで、時間 t における基準化および空間的に平均化した間隙水圧 $u'(t)$ と沈下量 $S(t)$ を(1),(2)式で定義する。また、式(3)は基準化された沈下量 $S'(t)$ である。

$$u'(t) = \frac{\int_0^H u(t, z) dz}{H \cdot u_0} \quad (1) \quad S(t) = S_f \{1 - u'(t)\} \quad (2) \quad S'(t) = S(t)/S_f \quad (3) \quad \frac{\partial S'(t)}{\partial c_v} = -\frac{\partial u'(t)}{\partial c_v} \quad (4)$$

ここで、 $u(t, z)$ は、時間 t 、深度 z における間隙水圧、 H は層厚、 u_0 は初期間隙水圧、 S_f は最終沈下量、 c_v は圧密係数である。 $u'(t)$ と $S'(t)$ に含まれる材料定数は圧密係数 c_v のみで、明らかに、式(4)が成立する。すなわち、圧密係数は、基準化された間隙水圧と沈下量に対して同じ大きさの感度を有する。すなわち、実測された $t-u(t, z)$ もしくは $t-S(t)$ 関係から圧密係数を同定しようとする場合、 $H \cdot u_0$ と S_f が既知であれば、どちらの計測結果を用いても同じ精度で圧密係数を同定することができる。しかし実際は、 $H \cdot u_0$ が圧密の初期段階で既知となるのに対して、 S_f に関する情報は圧密初期では信頼性が低い。したがって、圧密係数の同定は、理論上、間隙水圧を用いて行うのが正確である。最小二乗法を用いて圧密のパラメータ(c_v, S_f)を同定する場合、方程式(5),(6)を用いるのが最も正確ということになる。

$$\frac{\partial J_s}{\partial S_f} = 0 \quad (5) \quad \frac{\partial J_u}{\partial c_v} = 0 \quad (6) \quad \text{ここで、} \quad J_s = \sum_{i=1}^{NT} (S_i - \bar{S}_i)^2 \quad (7) \quad J_u = \sum_{i=1}^{NT} (u_i - \bar{u}_i)^2 \quad (8) \quad NT: \text{タイムステップ数}$$

現実的には、間隙水圧の計測値は誤差が大きく、地盤の不均質性の影響を受けやすい。それに対して、沈下量は比較的正確に計測できるデータである。これらを考慮すると、沈下量と間隙水圧の欠点を互いに補完すべく、式(9)の様な折衷的な目的関数を最小化して、パラメータを同定するのが現実的と考えられる。

$$J_1 = J_s + J_u/\lambda \quad (9) \quad J_2 = J_s J_u \quad (10) \quad \lambda: \text{間隙水圧影響調整パラメータ}$$

多次元問題に拡張することを考えると、同定すべきパラメータを地盤の剛性と透水性に分離した方が便利である。 $E=1/m_v$, $K=k/\gamma_w$ (m_v : 体積圧縮係数, k : 透水係数, γ_w : 水の単位体積重量, $c_v=E \cdot K$) を同定すべきパラメータとすると、最小二乗法として、方程式(11),(12)が導かれる。

$$\frac{1}{K} \frac{\partial J_1}{\partial E} = \frac{1}{K} \frac{\partial J_s}{\partial E} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial J_u}{\partial c_v} = 0 \quad (11) \quad \frac{1}{E} \frac{\partial J_1}{\partial K} = \frac{1}{E} \frac{\partial J_s}{\partial K} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial J_u}{\partial c_v} = 0 \quad (12)$$

(11),(12)式中、 λ の値を小さくしすぎると、事実上、両式は同一になり、方程式の数が不足する不適切問題が生じる。また、上記の方程式は λ を

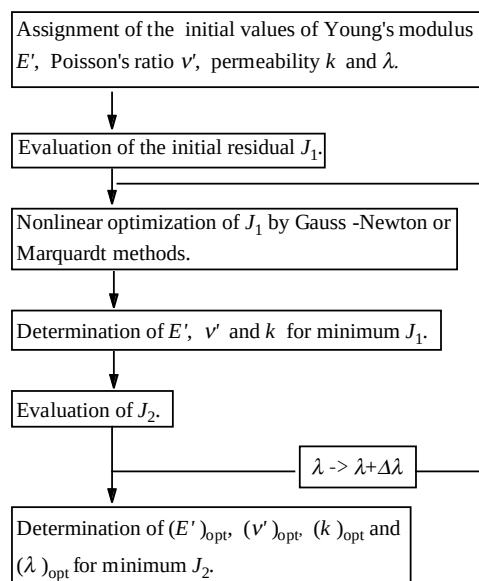


図-1 パラメータ同定アルゴリズム

キーワード：圧密 軟弱地盤 逆解析 変位予測 間隙水圧 有限要素法

連絡先 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1 岡山大学環境理工学部・TEL&FAX: 086-251-8353)

含むため、同定されるパラメータ (E と K) は λ の関数となる。したがって、適切な λ を決定するために、 λ を変化させて逆解析を繰り返し、式(10)の目的関数 J_2 を評価する。 J_2 を最小にする λ を採用し、それに対応して同定された地盤定数を最適パラメータとする。最終的に、問題を多次元に拡張するために、有限要素法を用い、同定すべきパラメータを有効ヤング率 E' 、有効ポアソン比 ν' 、透水係数 k とする。ここで、(7)、(8)式が(13)、(14)式に変更される。最終的な同定アルゴリズムが図-1の様に与えられる。

$$J_s = \sum_{i=1}^{NT} \sum_{j=1}^{NP} \|U_i^j - \bar{U}_i^j\|^2 \quad (13) \quad J_u = \sum_{i=1}^{NT} \sum_{j=1}^{NE} (u_i^j - \bar{u}_i^j)^2 \quad (14)$$

U_i^j , $\bar{U}_i^j$: 時間ステップ i , 節点 j の解析・観測変位ベクトル, u_i^j , $\bar{u}_i^j$: 時間ステップ i , 要素 j の解析・計測間隙水圧, NP : 同定に用いる変位観測節点数, NE : 同定に用いる間隙水圧計測要素数

3. 解析モデル

本報告では、弾塑性有限要素解析を実施し、それによって得られる解析結果を擬似的な変位および間隙水圧観測結果とする。境界条件および有限要素、観測点を図-2に示す。载荷は10日間で行なわれるものとする。解析に用いた弾塑性パラメータを表-1に示す。表では地盤を4層に分割して考えているが、逆解析に際しては、簡単化のため、L1, L2層およびL3, L4層をそれぞれ一つの層と考え、第1層、第2層とする。変位計測は、図中の節点1, 3, 11, 13, 16, 18で、間隙水圧計測が、要素1, 2, 3, 9, 10, 11で行なわれるものとする。

4. 解析結果および考察

ここでは、初期の20日間を同定期間として、それ以後の予測をしている。図-3は、 λ の変化に対する同定パラメータの変動を示している。 $5000 < \lambda < 20000$ の範囲では、同定されるパラメータに変動は少なく、正確なパラメータが同定されている。 $\lambda = 5000$ 近傍で J_2 は最小になっており、最適なパラメータが決定されている。また、 $\lambda < 5000$ では、逆問題が徐々に不適切化し、パラメータは同定されにくくなる。図-4は、節点1の鉛直変位に関して、変位計測結果のみを用いて予測を行った結果と、変位および間隙水圧計測結果を用いて行った結果を比較しているが、後者の方が正確な予測が行えることが明らかである。表-2に示した同定結果によると、同定された透水係数が与えたものと若干異なっている。これは、弾性モデルと弾塑性モデルの差に起因する誤差である。

4. まとめ

本報告では、軟弱地盤の逆解析における間隙水圧の有効性を示した。理論上、圧密係数の同定に関しては、間隙水圧計測値に基づくのが有効である。また、変位および間隙水圧の計測データを用いた場合は、変位のみを用いる場合と比較して、短期間の同定で高精度の変位予測が行えることが明らかとなった。

参考文献 (1) 西村伸一他: 間隙水圧の観測結果を利用した粘性土地盤の変形予測, 土と基礎, 第49巻11号, pp.10-12(2001)
(2) Iizuka, A. and Ohta, H.: A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, S&F, Vol.27, No.3, pp.71-97(1987)

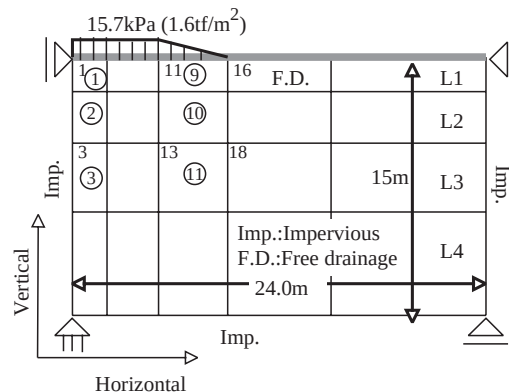


図-2 解析モデル

表-1 弾塑性解析パラメータ (関口・太田モデル)

Parameters	D	Λ	M	ν'	k (m/d)	p_c (kPa)	σ'_v (kPa)	K_0
Layer L1	0.075	0.75	1.2	0.32	0.01	9.8	4.9	0.7
L2	0.075	0.75	1.2	0.32	0.01	22.1	17.2	0.7
L3	0.063	0.6	1.2	0.32	0.02	39.2	34.3	0.7
L4	0.063	0.6	1.2	0.32	0.02	63.7	58.8	0.7

D : coefficient of dilatancy. Λ : irreversibility ratio.
 M : critical state parameter. ν' : effective Poisson's ratio.
 k : coefficient of permeability. p_c : consolidation yield stress.
 K_0 : coefficient of earth pressure at rest in-situ.
 σ'_v : effective overburden pressure.

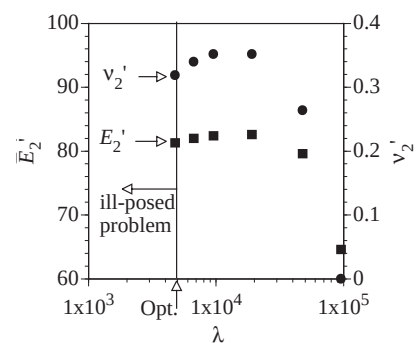


図-3 λ と同定パラメータの関係 (第2層のヤング率およびポアソン比)

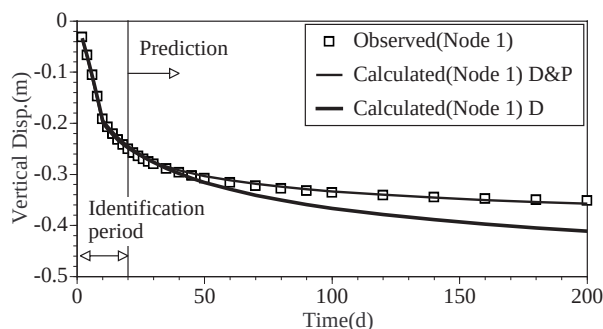


図-4 同定と予測結果 (節点1, 同定期間 20 d)

D&P: 変位および間隙水圧を用いた同定

D: 変位のみを用いた同定

表-2 同定されたパラメータ (図-4のD&Pに対応)

Parameters	E' (kPa)	ν'	k (m/d)
Layer 1	22.9	0.319	0.00635
Layer 2	79.7	0.319	0.0799