

不均質粘土層の圧密沈下予測と実測

Prediction and Measurement of Consolidation for Nonhomogeneous Clay Layers

三 笠 正 人 (みかさ まさと)

土質基礎工学センター

大 島 昭 彦 (おおしま あきひこ)

大阪市立大学助手 工学部土木工学科

高 田 直 俊 (たかだ なおとし)

大阪市立大学教授 工学部土木工学科

木 山 正 明 (きやま まさあき)

大阪市港湾局 建設部長

1. はじめに

沖積粘土層は堆積中の海水準変化によって、一般に層中央部が高塑性、上下部が低塑性の土性分布を示す。本報告は、図-1に示す大阪南港の2地区の深度方向に連続的に土性が変化する沖積粘土層に対して、一次元圧密過程の計算を行い、実測と対照した。南港中地区は1965年から'69年に浚渫粘土で埋め立てられ、調査時点の'80年に再盛土が行われてから層別沈下観測が行われている。南港東地区は1961年から浚渫粘土で埋め立てられ、ペーパードレーンが打設されて盛土が開始された'67年から地表面沈下観測が続けられている。

2. 圧密方程式

圧密過程の計算には、均質な正規圧密粘土層に適用する次の圧密方程式¹⁾(1)を基礎式とし、不均質粘土層の有限変形の圧密に拡張して用いた^{2),3)}。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} + \frac{dc_v}{d\varepsilon} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right)^2 - \frac{d}{d\varepsilon} (c_v m_v \gamma') \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \quad \dots (1)$$

上式で、 ε : 自然ひずみ ($d\varepsilon = -df/f$, f は体積比),
 t : 時間, z : 深さ, c_v : 圧密係数, m_v : 体積圧縮係数, γ' : 粘土の水中単位体積重量である。

この方程式を圧縮性が深度方向に異なる粘土層に適用するために、次の相対体積比でひずみを正規化する。

$$F_r = \frac{f - f_2}{f_1 - f_2} \quad \dots (2)$$

ここに f_1 と f_2 は図-2に示すように、各 $f - \log p$ 線上に適当に選んだ低圧 p_1 と高圧 p_2 に対する体積比である。これによって F_r は $f - \log p$ 線の位置、勾配によらず、 p のみの関数となる。この F_r を用いて次の各量を定義する。いずれも p のみの関数である。

$$\text{相対ひずみ } \varepsilon_r = \int d\varepsilon_r = \int -\frac{dF_r}{F_r} \quad \dots (3)$$

$$\text{相対体積圧縮係数 } m_{vr} = \frac{d\varepsilon_r}{dp} \quad \dots (4)$$

$$\text{相対圧密係数 } c_{vr} = \frac{k}{m_{vr} \gamma_w} \quad \dots (5)$$

式(1)で用いる諸量とこれらとの関係は、

$$\frac{d\varepsilon_r}{d\varepsilon} = \frac{m_{vr}}{m_v} = \frac{c_v}{c_{vr}} = \frac{f}{f - f_2}$$

これらの諸量を用い、かつ圧密中の粘土層厚減少を考慮

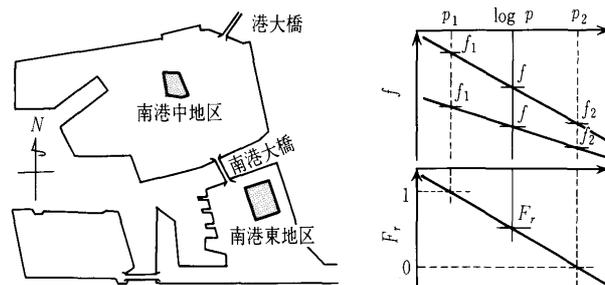


図-1 対象とした地区 図-2 $f - \log p$ 関係の正規化

すると、次の原始座標 z_0 を用いた有限変形圧密方程式が得られる。方程式の詳細は文献3)を参照されたい。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = c_{vr} \left[\left(\frac{f_0}{f} \right)^2 \left(\frac{\partial^2 \varepsilon_r}{\partial z_0^2} + \frac{f - f_2}{f} \left(\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial z_0} \right)^2 \right) - \left(\frac{f_0}{f} \right) \frac{d(m_{vr} \gamma')}{d\varepsilon_r} \cdot \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial z_0} \right] + \left(\frac{f_0}{f} \right) \frac{\partial c_{vr}}{\partial z_0} \left(\left(\frac{f_0}{f} \right) \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial z_0} - m_{vr} \gamma' \right) \quad \dots (6)$$

3. 南港中地区

図-3のように調査時点('80年10月~'81年4月)で沖積粘土層厚は23m, その下は礫質砂層である。粘土層の上は敷砂層を介して浚渫埋立粘土層, 最上部が建設残土の盛土である。液性限界は粘土層中央で高く, 上下で低い。塑性限界は25~30%, 土粒子比重は平均的に $G_s = 2.66$ である。同図の初期体積比 f_i は調査時の測定含水比から飽和状態を仮定して算出した。図-4に示す $f - \log p$ 関係群の正規圧密域を延長すると, $(p, f) = (500 \text{ tf/m}^2, 1.5)$ の1点にほぼ収束したので, この収束点を (p_2, f_2) とする。 p_1 は 5 tf/m^2 に選び, 正規圧密域の各 $f - \log p$ 線の延長上の p_1 に対応する f_1 を求めると図-3に示す分布が得られる。

圧密降伏応力 p_c の分布からみて, 粘土層下方は圧密が進んでいるが, 未圧密地盤のため, p_c の測定精度は高くない。 c_v は圧力増加に伴って減少傾向を示すが, 生じる応力範囲の平均的な値を採り, 圧密中一定とした。

初期条件項目は, 初期体積比 f_i , 初期有効応力, 粘土層厚である。初期有効応力は $f - \log p$ 関係の直線部の低応力側への延長線と f_i との交点から求めた。粘土層上面の圧密圧力は 10.7 tf/m^2 である。荷重条件はこの圧密圧力に調査時点の1年後に 5 tf/m^2 の盛土を追加する。

図-3は実座標 z 表示であるから, これを原始座標 z_0 表示へ次の手順で変換する。均質な粘土層の場合の

事例報告

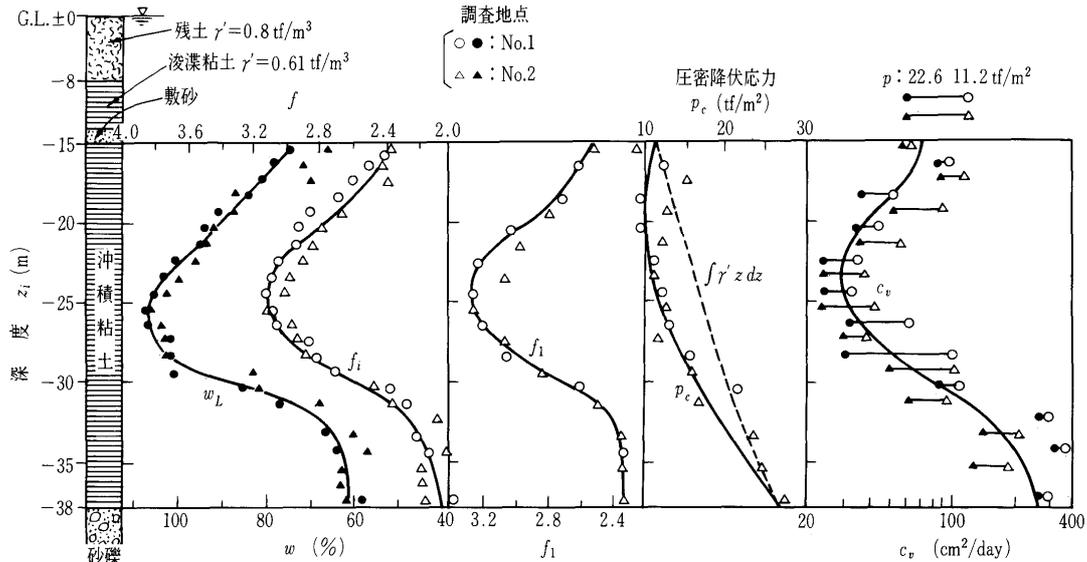


図-3 圧密特性の分布 (南港中地区, '80.10~'81.4調査, 実座標表示)

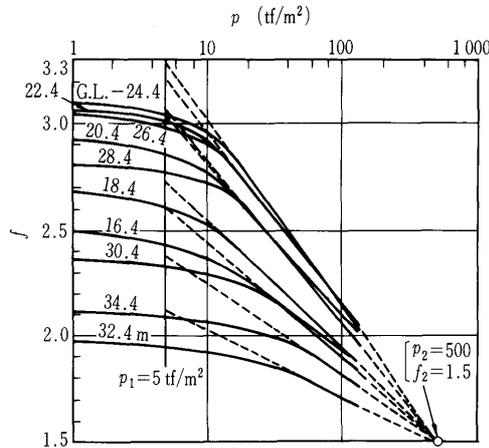


図-4 f-logp 群 (南港中地区)

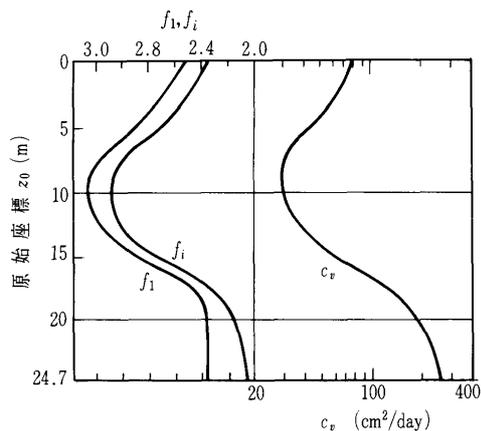


図-5 原始座標に変換した f_i, f_i, c_v (南港中地区)

原始状態は、粘土全層を同じ体積比 f_0 に選ぶが、式(6)を用いる場合は同じ有効応力 p_0 に選ぶ。原始状態はどんな応力に選んでも計算は可能であるが、ここではどの深度における初期有効応力よりも小さい $p_0 = 5 \text{ tf/m}^2 (=p_1)$ とした。粘土層厚 23 m を 46 分割 (1 分割 0.5 m) し、図-3 の $f_i (=f_0)$ と f_i を各分割中央点で読みとる。次いで $\Delta z = 0.5 \text{ m}$ を式 $\Delta z_0 = (f_0/f) \Delta z$ で Δz_0 に変換する。最後に Δz_0 を加算していき、各 Δz_0 の中央に $f_i, f_i,$

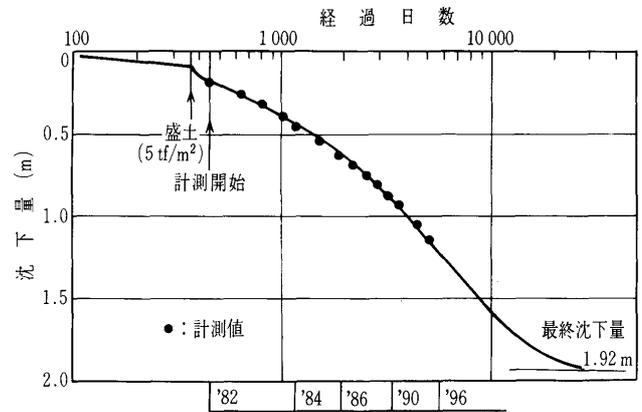


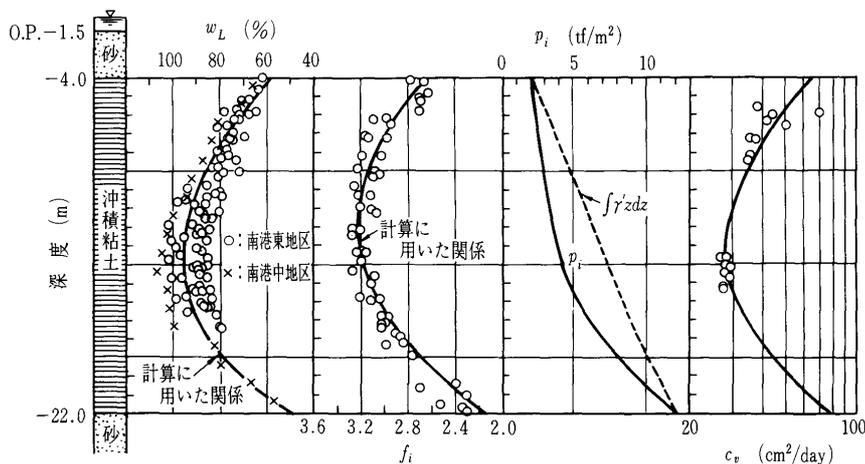
図-6 圧密量-時間曲線 (南港中地区)

c_v を落とし、 z_0 に対する分布図を作る (図-5)。 Δz_0 を加算して得る原始状態における粘土層厚 H_0 は 24.68 m となった。図-5 から計算に用いる Δz_0 ごとの f - $\log p$ 関係、 p_i, f_i, c_v が決定できる。差分計算では $\Delta t = 2$ 日、 $\Delta z_0 = 0.4936 \text{ m} (=24.68 \text{ m}/50)$ とした。

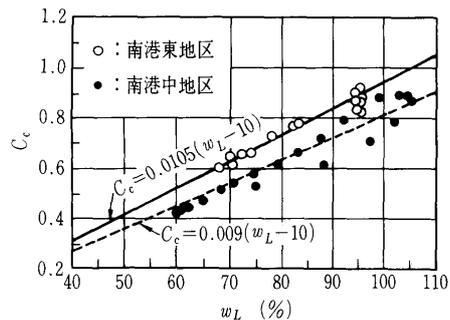
時間-沈下曲線 ('86年に計算²⁾) は図-6 で、層別沈下計で測定した実測沈下量と現在までよく一致している。

4. 南港東地区

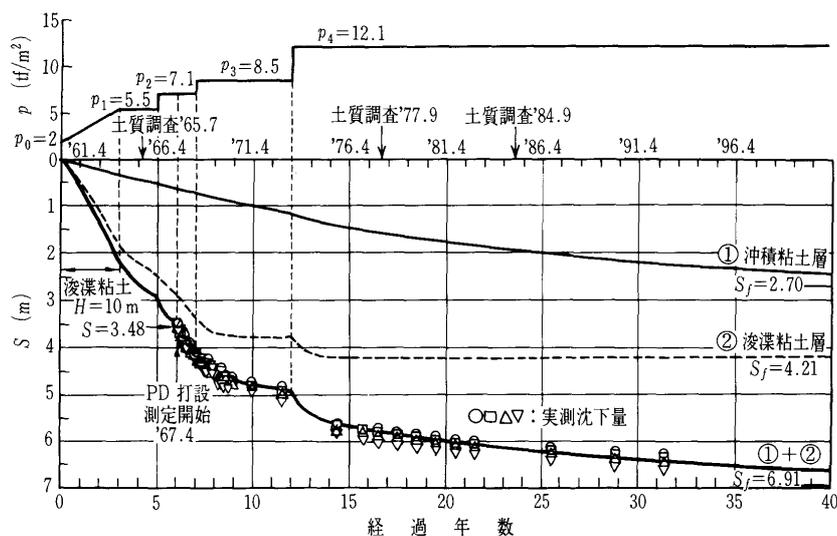
この地区は、海底の浚渫粘土を 10 m 厚に吹き込み、その後砂質土で 3 段階に盛り立てられた。図-7 に埋立前の地盤状況を示す。層厚 18 m の沖積粘土の下層は砂質土層、上方の層厚約 2.5 m の砂質土 (初期荷重 $p_0 = 2 \text{ tf/m}^2$) は捨土である。南港中地区に比べて下層の低塑性部が薄い。圧縮指数 C_c は図-8 に示すように w_L とよい相関を示す。 f - $\log p$ 関係は先の東地区と同様に 1 点 ($f_2 = 1.6, p_2 = 250 \text{ tf/m}^2$) に収束するので、深度ごとの f - $\log p$ 関係は収束点と w_L から求めた C_c で決定した。ただし、深度方向の調査データが十分ではなかったので、粘土層下方の w_L と c_v の分布形は南港中地区の分布形を参考にした。こうして求めた f - $\log p$ 関係と初期体積比 f_i から初期応力 p_i を求めると図-7 に示す分



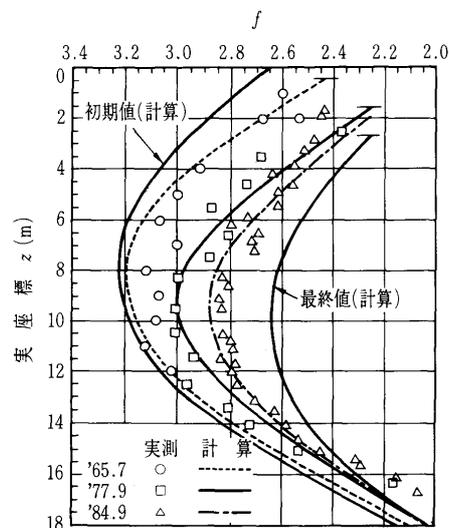
図一七 圧密特性の分布 (南港東地区, '59~'61年調査, 実座標表示)



図一八 液性限界と圧縮指数の関係



図一九 圧密量-時間曲線 (南港東地区)



図一十 体積比の等時線 (南港東地区)

布となる。中地区と同様に未圧密地盤である。

荷重条件は、図一九に示すように'61年4月から3年間で浚渫粘土を層厚10m投入して(初期含水比135%、底面の自重応力3.5tf/m²)2年間放置後、順次数砂1.2m(1.6tf/m²)、同0.8m(1.4tf/m²)、盛土2m(3.6tf/m²)が盛り立てられた。'67年4月に浚渫粘土層に対してペーパードレーン(PD、打設ピッチ1.5m)が打設され、沈下観測(地盤面の水準測量)が始められた。

沖積粘土層の圧密過程は南港中地区と同じ手法で計算した。浚渫粘土層の圧密過程は、均質粘土層を仮定して平均的な圧密特性 $f=3.4-0.8\log p$ 、 $c_v=32\text{cm}^2/\text{day}$ を用い、PD打設以前までは自重を考慮した漸増層厚粘土層の圧密⁴⁾として計算し、PD打設後は直径5cm相当のサンドドレーンとして水平流のみを考慮する慣用の計算法を用いた。

図一九に沖積粘土層、浚渫粘土層および両者を合算した沈下曲線を示した。計算によると浚渫粘土層は最終盛土後3年('76年4月)で圧密終了して層厚が半減する。それ以降の沈下は沖積粘土層によると見なせる。図に地表面の水準測量が開始された'67年4月から4測点の実測値を書き加えている。実測値には約40cmの幅があるが、両者はよく合っている。

図一十にこれまでに行われた地盤調査と計算による体積比の等時線の比較を示す。下部で実測の体積比がやや小さい傾向を示すが、全体としてよく対応している。

5. まとめ

深度方向に土性が変化する粘土層の圧密過程を、三笠の圧密理論を不均質粘土層に拡張して実施工手順を考慮に入れて計算し、実測沈下量とよい一致を見た。

参考文献

- 1) 三笠正人：軟弱粘土の圧密—新圧密理論とその応用—、鹿島出版会、1963.
- 2) 三笠正人・高田直俊・大島昭彦・加藤裕造・角 彰：未圧密粘土地盤の圧密—予測と実測—、土質工学会、第31回土質工学シンポジウム論文集、pp.47~52, 1986.
- 3) Mikasa, M. and Takada, N.: Nonlinear consolidation theory for nonhomogeneous soil layers, Proc. of Int. Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils (IS-Hiroshima), pp. 447~452, 1995.
- 4) 高田直俊：一次元圧密の数値計算例、土と基礎、Vol. 28, No. 9, pp. 35~39, 1980.

(原稿受理 1996.8.5)