

沈下管理システムとその適用法に関する研究

脇田英治*・松尾 稔**

本論文は軟弱地盤上に土構造物を築く場合の沈下管理法に関するものである。「沈下状態方程式」、「適応観測器による同定法」に基づく沈下管理システムを提案する。そして、従来からの方法も含めて、沈下管理法を3つに大別して、施工前設計におけるそれらの適用性判定法、および土質諸係数の定量的・確率的な設定法を合わせて提案する。

Key Words : consolidation, prediction, settlement, soft ground, earthfill

1. はじめに

本論文は軟弱地盤上に盛土を行う場合の沈下管理法に関するものである。なかでも、盛土の施工および所定の沈下終了までの工期が限定されており、工期を過ぎてからの残留沈下は原則的には許容されない場合を対象とする。実務の設計・施工において、沈下が設計どおり進行することはまれで、沈下量、沈下速度に関してばらつきを示すのが通常である。その場合、どのような設計条件・設計値の設定を行えば、沈下が工期におさまるのかについては、従来、定量的・確率的な検討法として確立されたものはない。ここではそのような問題に対処するための方法を提案する。

まず、最初に本論文に関連する著者による既発表の論文について述べる。文献1)では軟弱地盤上に施工中の盛土の沈下を支配する方程式として「沈下状態方程式」を提案している。文献2)では、その「沈下状態方程式」のパラメータ同定法として、「適応観測器による方法」を提案している。それに対して、本論文ではまず2)で「沈下状態方程式」、「適応観測器による同定法」を基礎として、それを発展させた沈下管理システムについて検討する。次に、3)で沈下量、沈下速度をランダムに変化させた弾塑性圧密FEM解析の結果を用いたモンテカルロ・シミュレーションについて述べる。そして、4)でそのシミュレーションの結果を施工中の現場における観測データに見立てて、3種類の沈下管理法を適用し、それらの適用範囲と経済性について解析を行う。そして、その結果を実際の設計・施工に利用できる判別図および適用性判定法として示す。

2. 沈下管理システムの提案

(1) 沈下の状態方程式表現について¹⁾

沈下量や盛土荷重の観測を一定時間間隔 Δ で行くと、離散時間状態量が得られる。その時、 j 番目の沈下量の観測値 $Y(j)$ をそれより以前の $(j-1)$, $(j-2)$, ……番目の観測値を用いて、離散系沈下状態方程式で表わすと次式となる。

$$X(j) = A_d X(j-1) + B_d u(j-1) \dots \dots \dots (1)$$

$$Y(j) = C_d X(j) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $X(j)$ は沈下状態量ベクトル、 $u(j)$ は盛土荷重であり、 $j=1, 2, \dots$ と変化する j のことをタイムステップと呼ぶ。また、 A_d , B_d , C_d は係数行列であり、それぞれ次のような内容である。

$$X(j) = [X_1(j) \ X_2(j) \ \dots \ X_k(j)]^T$$

$$A_d = \begin{bmatrix} a(1) & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ a(2) & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ a(3) & 0 & 0 & 1 & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & & & & \ddots & 1 \\ a(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_d = [b(1) \ b(2) \ \dots \ b(k)]^T$$

$$C_d = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ \dots \ 0]$$

k はモデルの次数であり、 $k=2, 3, \dots$ のいろいろなモデルが考えられる。また、式(1)、(2)は圧密理論式(三笠, Biot等)と等価であることが明らかにされている¹⁾。

(2) 適応観測器によるシステム同定法

観測データを用いる適応観測器³⁾(Adaptive Observer)による沈下状態方程式のシステム同定法については文献2)で示した。文献2)では二次圧密を考慮した定式化

* 正会員 技術士 清水建設(株) 大崎研究室 主任研究員
(〒100 千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル 27 F)
** 正会員 工博 名古屋大学教授 地圏環境工学専攻

がなされているが、本論文の目的は施工前期における早期予測なので、二次圧密項をゼロと置き、二次圧密非考慮の場合の適応観測器を扱う。さらに、本論文では非線形性を示す観測データに対して、適応観測器により安定した解を得るために次のアルゴリズムを提案する。

盛土施工中や施工後しばらくは特に、沈下観測データの非線形によりパラメータ同定値が時間的に変化する。沈下の早期予測のためにはその中から将来沈下の予測に用いる最適なパラメータを選ぶ必要がある。同定によってタイムステップ毎に得られる多くのパラメータに対して、次式を適用することにより、沈下予測に用いる最適なパラメータを決定することができる。

$$q(j) = \frac{\{\beta(j) - \alpha(j)\}q(j-1) + p(j)\alpha(j)}{\beta(j)} \dots\dots (3)$$

$$\beta(j) = w \cdot \beta(j-1) + \alpha(j) \dots\dots (4)$$

$$\alpha(j) = \{1 + L_{\max} - L(j)\}^{-1} \dots\dots (5)$$

$$p(0) = 0, q(0) = 0, j = 1, 2, 3, \dots$$

ここで、 $p(j)$ はタイムステップ j における処理前のパラメータ同定値であり、 $q(j)$ はこのプロセスによって得られるパラメータ採用値である。 $L(j)$ はタイムステップ j における最大対数尤度である。最大対数尤度は同定によって得られたモデルが、観測データに対して真に適合性の高いモデルにどれだけ近いかを表わす尺度である⁵⁾。式(5)の $L(j)$ およびその限界値 L_{\max} は次式により与えられる¹²⁾。

$$L(j) = -\frac{N}{2} \ln(2\pi V_0) - \frac{N}{2} \ln \left[\frac{2\pi}{N} \left\{ 3NV_0 + \sum_{i=is}^{j} (y(i) - z(j) \cdot \xi(i))^2 \right\} \right] - N \dots\dots (6)$$

$$L_{\max} = -\frac{N}{2} \ln(12\pi^2 V_0^2) \dots\dots (7)$$

$$is = j - \frac{N+1}{2}, \quad jf = j + \frac{N+1}{2}$$

ここで、 $y(j)$ は沈下量の観測値、 V_0 は観測誤差の分散、 $z(j)$ はタイムステップ j における処理前のパラメータ・ベクトル、 $\xi(i)$ は状態変数フィルタである。そして、 $z(j) \cdot \xi(i)$ は観測値 $y(j)$ の推定値に相当する。 $L(j)$ はタイムステップ j の前後の N 個の観測値を用いて計算される (N は任意の数)。 $\alpha(j)$ の値は $L(j)$ の値に応じて $0 < \alpha(j) < 1$ の範囲で変化する。そして、その値が大きいくほど、パラメータ同定値がその付近の N 個の観測値に関してより適合性が高いことを意味する。したがって、式(3)~(5)のプロセスにより、対数尤度の値に応じて、より真値に近い値をより大きな割合で採用し、その逆に真値から遠い値は小さな割合の採用に留めることができる。

また、式(4)の w が、 $w=1$ の時、過去から現在までのすべての値を一様な重みで評価したことになる。そ

表-1 予測精度の比較に用いた沈下予測法

	予測モデル	パラメータ同定法
Case 1	沈下状態方程式	適応観測器
Case 2	沈下状態方程式	カルマンフィルタ ⁴⁾
Case 3	浅岡モデル ⁷⁾	最小二乗法
Case 4	双曲線モデル ¹⁶⁾	最小二乗法

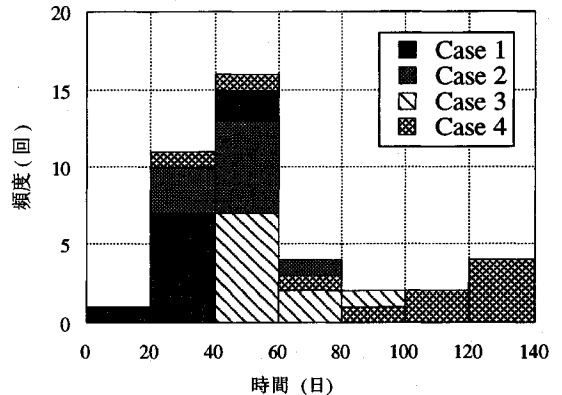


図-1 最終沈下量の予測精度が±10%以内となる予測時期の比較

れに対して、 $w=0$ の時、過去の値は全く無視して、現時点の値のみを採用したことになる。 $0 < w < 1$ の範囲で w を設定することにより、現在により近い値を重視した重み付き平均値を得ることができる。

(3) 沈下予測モデルとパラメータ同定法

ほとんどの沈下予測法に共通して言えることであるが、沈下予測モデルとパラメータ同定法は別であり、いろいろな組み合わせが可能である。表-1はその例である。沈下予測モデルの1つである沈下状態方程式の場合も適応観測器の他にカルマンフィルタ(オンライン最小二乗法)やオフライン最小二乗法などによる、パラメータ同定が可能である。表-1のCase 2は沈下状態方程式に対する、パラメータ同定法を「拡張カルマンフィルタ」⁴⁾により定式化したものである。その内容は本論文の構成上、重要なものではないので、ここでは紙面の都合で省略する。

(4) 他の沈下予測法との精度比較

ここでは、前述の沈下予測法他に従来法も含めて、表-1に示す4つの沈下予測法を取り上げる。そして、後述3.(1)の弾塑性圧密FEM解析によるデータを現場における観測データに見立てて、これら沈下予測法を適用し、将来沈下の予測精度および予測時期を調べる。ただし、FEM解析結果の時間~沈下曲線をそのまま観測データとするのではなく、それに観測誤差の分散 $V_0 = 0.015 \text{ cm}^2$ の正規乱数を付加した、データを観測データとする。弾塑性圧密FEM解析は、盛土高さを2.0~3.0 m、土質を表-2のa, b, c、地盤改良部の透水係

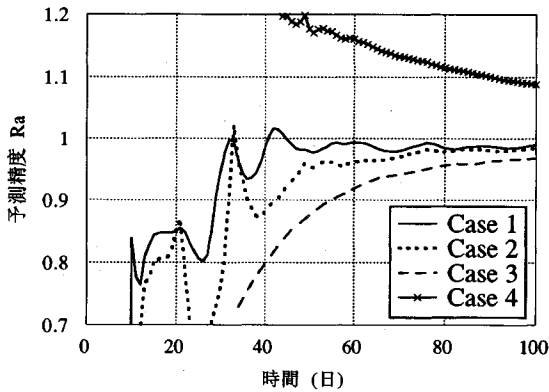


図-2 最終沈下量予測精度の経時変化

数を $0.9 \sim 1.5 \times 10^{-5}$ cm/sec の間で変化させた 10 case を用いた。図-1 は沈下予測の結果をまとめたもので、各沈下予測法による最終沈下量の予測精度が実際の $\pm 10\%$ 以内となる時期の頻度分布を表わしている。その結果によると、適応観測器を用いると、最も早い時期の予測が可能で、双曲線法を用いると、最も予測が遅い。予測精度に影響する主な要因は弾塑性パラメータ、透水係数などである。また、圧密度が高くなるほど予測精度は向上するが、盛土高さが変化する期間の長さが影響するので、圧密度だけでは論じられない。ちなみに、図-1 の $t=120$ 日は圧密度 $U=66 \sim 88\%$ に相当する。

図-2 はこれらの内、表-1 の土質 a, 盛土高さ 2.3 m の場合の最終沈下量の予測精度 (予測最終沈下量/真の最終沈下量) の経時変化を表わしたものである。なお、図-1, 2 における適応観測器による解析では、式 (4) の w の値は $w=0.8$ に、式 (6), (7) の N の値は $N=9$, V_0 の値は $V_0=0.015 \text{ cm}^2$ に設定した。

(5) 圧密係数の逆算法

a) 連続系沈下状態方程式

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$y = Cx \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_k]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & \dots & \dots & a_{kk} \end{bmatrix}$$

$$B = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_k]^T$$

$$C = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$$

ここで、 x, y, u はそれぞれ沈下の状態量、沈下の観測値、盛土荷重を表わすベクトルである。離散系方程式 (式 (1), (2)) から連続系方程式 (式 (8), (9)) への変換については文献 1) に示されている。図-3 は、これらの方程式を用いた動的設計法のフローチャートである。

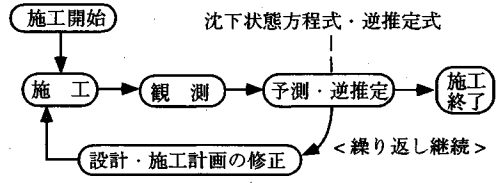


図-3 沈下に関する動的設計法

式 (8), (9) は座標変換により、さらに、三等の圧密方程式に変換できるので、それらの係数を対応させることにより、現場の沈下観測データを用いて圧密係数の逆算を行うことができる。以下にその方法を示す。

b) 圧密係数逆算の計算手順

1) 係数行列 A の固有値に関する特性方程式の係数 $\alpha_0, \alpha_1, \dots$ を求める。

$$\begin{bmatrix} a_{11}-\lambda & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22}-\lambda & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & \dots & \dots & a_{kk}-\lambda \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

以上の式を $\lambda^k + \alpha_{k-1}\lambda^{k-1} + \dots + \alpha_1\lambda + \alpha_0 = 0$ の形に整理することにより、係数 $\alpha_0, \alpha_1, \dots$ の値を求めることができる。

2) 座標変換行列 H を次式により計算する。

$$H = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{k-1}B]$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \dots & \dots & \alpha_{k-1} & 1 \\ \alpha_2 & \alpha_3 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{k-1} & 1 & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

3) 座標変換後の係数行列 A_h, B_h, C_h を計算する。

$$A_h = H^{-1}AH, \ B_h = H^{-1}B, \ C_h = CH$$

以上により、次の形の状態方程式が導かれる。

$$\dot{z} = A_h z + B_h u \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$y = C_h z \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$A_h = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & & 0 \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & & 1 \\ -\alpha_0 & -\alpha_1 & \dots & \dots & -\alpha_{k-1} \end{bmatrix}$$

$$B_h = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]^T$$

$$C_h = [\beta_0 \ \beta_1 \ \dots \ \beta_{k-1}]^T$$

4) 式 (12), (13) を展開することにより、次の三等の圧密方程式と等価な式⁶⁾が得られる。

$$\rho + c_1\dot{\rho} + c_2\ddot{\rho} + \dots + c_k\rho^{(k)} + \dots = c_k u \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 $c_j = \alpha_{k-j}$, ($j=1, 2, \dots, k$) である。

5) 式 (14) の係数と圧密係数の間には次の関係のあることが Asaoka⁷⁾ により示されている。(両面排水の式もあるが、ここでは省略する。)

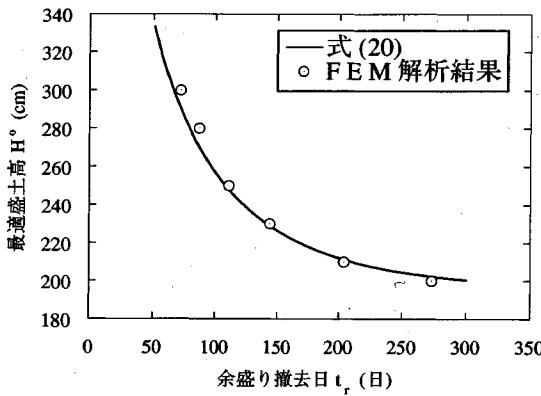


図-4 最適盛土高推定式の FEM による検証

$$c_j = \frac{1}{(2j)!} \left(\frac{D^2}{c_v} \right)^j \quad (\text{片面排水の場合}) \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 D は排水層の層厚である。そこで、4) で得られた c_j の値を式 (15) に代入することにより、圧密係数 c_v を求めることができる。

c) 次数 $k=2$ の場合の計算式

この場合、以上の計算は単純になり、係数行列 A を、

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

とすると、逆算 c_v は次式により求めることができる。

$$c_v = \frac{a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22}}{2(a_{11} + a_{22})} D^2 \dots\dots\dots (16)$$

また、沈下促進工法として、バーチカルドレーン工法を用いる場合は、逆算 c_{vh} は次式により求めることができる。

$$c_{vh} = \frac{a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22}}{2(a_{11} + a_{22})} d_e^2 \frac{T_h}{T_v} \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 T_v は鉛直方向時間係数、 T_h は水平方向時間係数、 d_e はドレーンの有効円直径である。

d) 実測データへの適用例

文献1) に示されたバーチカルドレーンによる施工例の観測データに本解析法を適用し、圧密係数を逆算してみる。適用例では文献中に示されているように、係数行列 A の値は観測データから次のように同定されている (文献1) の表-3)。

$$A = \begin{bmatrix} 0.1389 & 0.4937 \\ -0.1546 & -0.4706 \end{bmatrix}$$

そこで、式 (17) を用いて、水平方向圧密係数 c_{vh} を逆算すると次のようになる。

$$c_{vh} = \frac{-0.494 \cdot 0.155 + 0.139 \cdot 0.471}{2(0.139 - 0.471)} \times 130^2 \frac{0.476}{0.848} = 156 \text{ (cm}^2/\text{day)} \dots\dots\dots (18)$$

一方、Asaoka 他⁹⁾により提案された方法に式 (17)

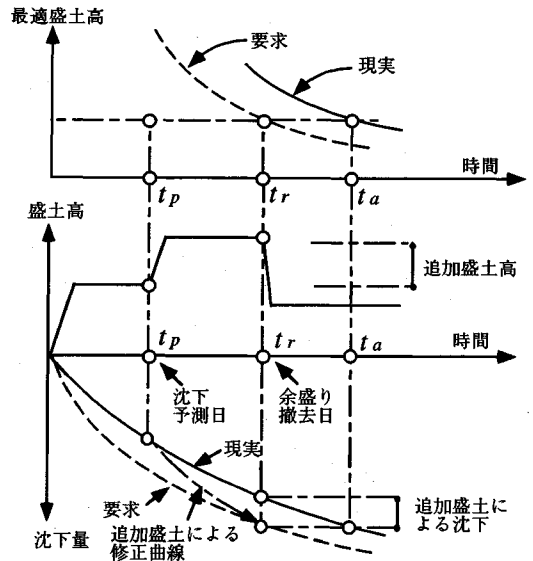


図-5 追加盛土の必要性の判定

に示したドレーンを考慮した修正を加えて、水平方向圧密係数 c_{vh} を逆算すると次のようになる。

$$c_{vh} = \frac{-4 \ln(\lambda_1)}{\pi^2 \Delta} d_e^2 \frac{T_h}{T_v} = \frac{-4 \ln(0.878)}{\pi^2 3.5} 130^2 \frac{0.476}{0.848} = 122 \text{ (cm}^2/\text{day)} \dots\dots\dots (19)$$

ここに、 λ_1 は沈下予測に浅岡法⁷⁾を適用した場合に得られる差分方程式の第一固有値、 Δ は観測データのピッチである。その他多くの観測例への適用の結果、本逆算法と浅岡法とは同オーダーの逆算結果が得られた。なお、事前の室内土質試験による圧密係数 c_v の対数平均値は $170 \text{ cm}^2/\text{day}$ (文献1) の表-1) であり、式 (18), (19) と近い値を示している。

(6) 最適盛土高推定式

沈下状態方程式と設計条件に関する制約条件式を連立方程式として、それを盛土高さについて解くことにより、次の最適盛土高推定式が誘導される¹⁾。最適盛土高とは、任意の t_r 時間放置した後に余盛部を撤去し、「計画地盤高」のレベルに地盤を仕上げると、その後の残留沈下はゼロとなる盛土高さのことである。

$$H^0 = \frac{\{(1 + ca^{-1}b)^{-1} - 1\} L}{CA^{-1} \{e^{At} B - B\}} \dots\dots\dots (20)$$

ここに、 L は [計画地盤高-原地盤高]、 A 、 B 、 C は沈下状態方程式のパラメータ、 t_r は所定の沈下終了までの工期である。なお、時刻0において瞬時に盛土高が最終盛土高に仕上がる場合は t_r の時間補正は不要であるが、実際の段階施工においては時間補正を行った t_r を用いる。時間補正法は文献1) に示されている。

式 (20) のパラメータ A 、 B 、 C の値は、事前設計段階においては、事前の沈下予測曲線を用いて同定することができ、さらに、施工中の観測データを用いた同定に

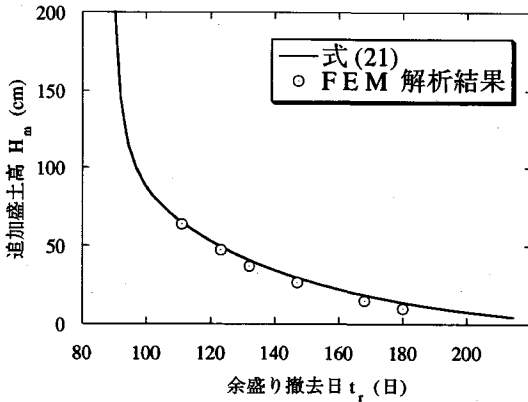


図-6 追加盛土高推定式のFEMによる検証

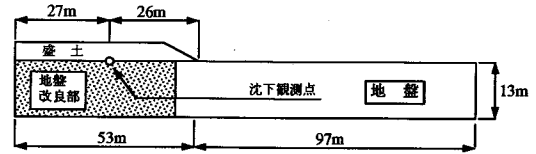


図-7 FEM 解析モデル

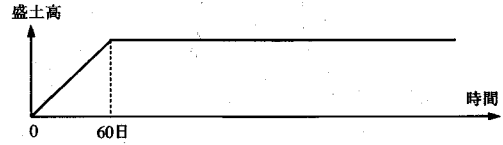


図-8 盛土荷重載荷パターン

表-2 解析に用いた弾塑性パラメータの例

	土質 a	土質 b	土質 c
圧縮係数 λ	3.04×10^{-1}	4.34×10^{-1}	1.74×10^{-1}
限界応力比 M	1.2	1.2	1.2
ゲイルクソン係数 D	2.63×10^{-2}	5.55×10^{-2}	1.67×10^{-2}
膨潤指数 κ	2.13×10^{-1}	2.13×10^{-1}	1.25×10^{-1}
初期間隙比 e_0	1.88	2.34	1.42
ポアソン比 ν	0.25	0.25	0.25
静止土圧係数 K_0	0.5	0.5	0.5
体積圧縮指数 C_c (参考)	0.7	1.0	0.4

より、値の修正を行うことができる。そして、図-5に示すように、式(20)で与えられる時間～最適盛土高の位置をプロットすることにより、工期以内に所定の沈下が終了するかどうかを判定することができる。

ここでは、式(20)の理論的な妥当性について検証を行う。3.(1)で後述する弾塑性圧密FEM解析は、現実の沈下挙動をシミュレートする手法としては、現在最も信頼性が高い解析法の1つであると思われる。そこで、この方法による沈下解析結果を現実の沈下挙動に見立てて、それと式(20)の適合性を調べる。

図-4中の曲線は盛土高さ $H=2.3$ m の場合のFEM解析による沈下曲線に式(20)を適用して推定された理論曲線である。一方、図中の○印はそれぞれ高さ $H=2.0, 2.1, 2.3, 2.5, 2.8, 3.0$ m の場合の式(20)によらないFEM解析結果である。両者はよく適合しており、式(20)の理論的妥当性が推察される。なお、時間補正の値は補正の対象とする時期により若干異なるが、ここでは余盛土の撤去時に対して時間補正法¹⁾を適用した。そのようにして求めた式(20)における t_r と t_p の差は $t_r - t_p = 24.2$ 日である。

(7) 追加盛土高推定式

施工中、図-5の t_p 点における観測データを用いた沈下予測の結果、そのままの盛土仕様では工期内に沈下を終了させることが不可能であることが明らかとなったとする。(図-5では所定の沈下終了までの工期は t_p であるのに、現実には時間 t_a が必要となっている。)

その場合、追加盛土を行い、沈下を工期内で終了させる必要がある。その時の追加盛土高は次式により推定することができる。誘導過程は紙面の都合で省略するが、式(20)と同様な考え方による。

$$H_m = \frac{\{(1+CA^{-1}B)^{-1}-1\}L-CA^{-1}\{e^{At_r}B-B\}H_1}{CA^{-1}\{e^{A(t_r-t_p)}B-B\}} \dots \dots \dots (21)$$

ここに、 H_1 は予測地点における盛土高、 t_p は沈下予

測時期であり、他の記号や時間補正法は式(20)と同一である。

次に、式(21)の理論的な妥当性について検証を行う。図-6中の曲線は盛土高さ $H=2.3$ m の場合のFEM解析による沈下曲線に式(21)を適用して推定された理論曲線である。一方、図中の○印はそれぞれ、追加盛土高さ $H=10, 15, 26.6, 37, 47.4, 63.8$ cm の場合の式(21)によらないFEM解析結果である。両者はよく適合しており、式(21)の理論的妥当性が推察される。なお、時間補正値 ($t_r - t_p$) の値は式(20)と同一の24.2日、予測時期 t_p の値は $t_p = 87$ 日である。

(8) 最終沈下量および圧密度推定式

盛土高さが一定値 H で継続する場合の最終沈下量は次式により推定することができる¹⁾。

$$S_f = CA^{-1}BH \dots \dots \dots (22)$$

また任意の時間 t_i における圧密度は次式で推定することができる。(式の誘導の考え方は式(20)、(21)と同様である。)

$$U = \frac{-CA^{-1}\{e^{At_i}B-B\}}{CA^{-1}B} \dots \dots \dots (23)$$

3. 弾塑性圧密FEM解析を用いたモンテカルロ・シミュレーション

(1) 弾塑性圧密FEM解析

現実の地盤は弾塑性圧密変形をされると考えられる。このような地盤の沈下問題に対する各沈下予測法・管理法

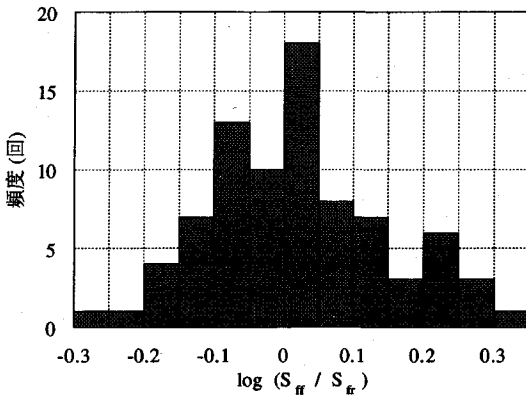


図-9 沈下量の比の分布

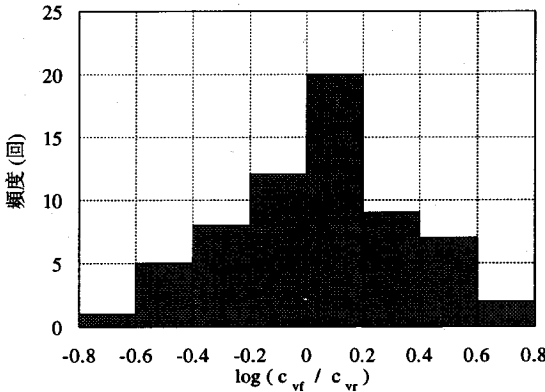


図-10 沈下速度の比の分布

の適用性を調べるために弾塑性圧密 FEM 解析を用いる。弾塑性圧密 FEM 解析の結果を現実の地盤の挙動に見立て、沈下予測法を適用する。

土の構成式として、関口・太田モデル⁹⁾を用いる。圧密については Biot の三次元圧密理論式に従い、土-水系の連成解析¹⁰⁾を行う。解析は二次元平面歪状態を仮定し、盛土の下部の地盤はバーチカドレーンにより、地盤改良された状態を想定し、未改良部よりも透水係数を大きくした。解析モデルおよび、沈下観測点の位置を図-7 に、解析に用いた弾塑性パラメータの例を表-2 に示す。また、実務の施工では盛土荷重の増加する期間を現場の規模や地盤の軟弱さの程度により (10 日～半年程度) の範囲で設定されることが多いが、ここでは一般的なケースとして荷重載荷パターンを図-8 のように設定する。

(2) 設計時沈下予測と事後の結果の関係

次の (3) で述べるモンテカルロ・シミュレーションにおいては沈下量、沈下速度の分布を仮定する必要がある。ここでは、それらの分布について考察する。

文献 11) は室内土質試験結果を統計処理して、設計 c_v 値と設計 m_v 値を設定し、施工前設計を行う方法を示

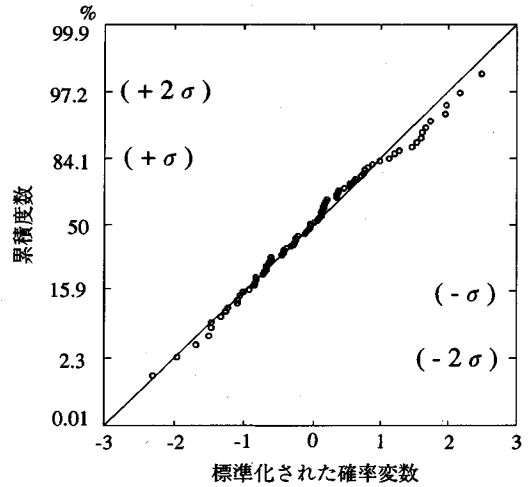


図-11 沈下量の比 $\log(S_{ff}/S_{fr})$ の分布

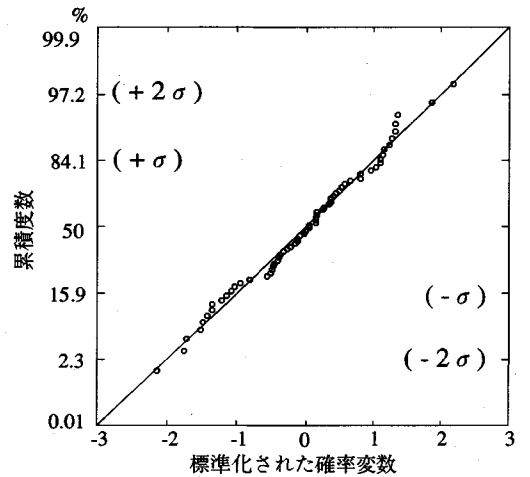


図-12 沈下速度の比 $\log(C_{vf}/C_{vr})$ の分布

し、バーチカドレーン工法の多くの施工例について実測と設計との対比結果を示している。その中で圧密試験結果から設計 c_v 値と設計 m_v 値の値を次のように設定している。

設計 m_v 値の設定法：圧密圧力 p と圧縮係数 m_v の関係を次式で近似し、最小二乗法により設計用の $p \sim m_v$ 関係を得る。

$$\log m_v = b \log p + a \dots\dots\dots (24)$$

設計 c_v 値の設定法：各圧密圧力毎の圧密係数 c_v の相乗平均値を結んで得られる折れ線と地層の中央深さ位置の荷重前後の平均応力 ($p_0 + \Delta P/2$) を表わす直線との交点を設計 c_v 値とする。

文献 11) では設計計算結果と沈下実測結果の対比結果が示されている。ここでは、そのデータにその後のデータを追加し、施工前設計計算結果と沈下実測結果の比に着目して、データの再整理を行う。

図-9, 10 はその結果を示している. このうち, 図-9 は \log (実測の沈下量 S_{ff} /施工前設計沈下量 S_{fr}) の値 (全 82 個のデータ) のヒストグラムである. また, 図-10 は \log (実測の沈下速度 C_{vr} /施工前設計沈下速度 C_{vr}) の値 (全 65 個のデータ) のヒストグラムである. また, これらの値を対数正規確率紙に整理したものが図-11, 12 である. 図-11, 12 においてデータは共にほぼ直線上に並んでおり, それらは次の対数正規分布に従っていると考えられる.

沈下量 : $(\mu, \sigma) = (0.0241, 0.1240) \dots\dots\dots(25)$

沈下速度 : $(\mu, \sigma) = (0.0423, 0.3069) \dots\dots\dots(26)$

これらの関係は多くの現場施工例に対する結果として得られたものである. また, その時の設計値の決め方も前述したように, 設計者の勘や主観によらず, 室内試験の結果を統計処理して行っている. したがって, 式 (25), (26) の関係は一般的な施工前設計において適用できると考えられるので, 以下の解析に用いる.

(3) モンテカルロ・シミュレーション

設計時に想定した土質係数などの値が現実の地盤のそれと全く一致する場合, 施工前の沈下予測は実測結果と良く合うはずである. ところが, 実際にはこのようなことはまれであり, 設計値と実測からの逆算値は図-9~12 のようなばらつきを示す. そこで, ここでは前述した弾塑性圧密 FEM 解析の結果によるデータをそのまま現実の観測データに見立てるのでなく, 沈下量, 沈下速度に関して式 (25), (26) の分布に従うばらつきを与え, ランダムな観測データを発生させる. そして, それらを用いて, 沈下管理法の適用性について検討する. 具体的には, 沈下量・沈下速度に関するパラメータ, 盛土荷重を変化させた FEM 解析の個々の Case についてそれぞれ, 沈下量, 沈下速度が対数正規分布に従うモンテカルロ・シミュレーションを行う (200 回ずつ). そして, 前述の「追加盛土高推定式」を用いて, 必要追加盛土高の確率的な出現率を調べ, 各沈下管理法の適用範囲と経済性を解析する.

4. 沈下管理法の適用性の判定

(1) 沈下管理法の大別

軟弱地盤上に盛土を行う工事に関する沈下管理法をここでは次の 3 つのタイプに分類して扱う.

- a) 沈下管理第 1 法……施工時対処型
- b) 沈下管理第 2 法……設計時対処型
- c) 沈下管理第 3 法……試験工区型

以下にその概要を述べる.

沈下管理第 1 法

事前設計における沈下量, 沈下速度に関する設計値の決定は室内試験の平均値を採用し, 沈下に関する実際との相違に対しては施工中に観測データの解析により追加

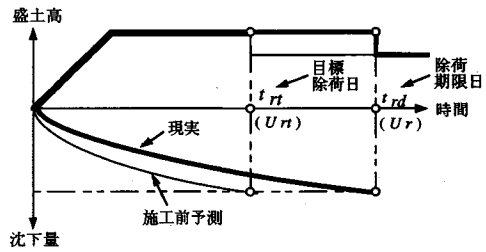


図-13 余盛り撤去日の設定

盛土を行い, 工期内に沈下を終了させる.

沈下管理第 2 法

沈下速度のばらつきに関して平均値を採用して設計を行った場合, 全くばらつきがなければ, 図-13 の目標沈下工期 t_{ri} で余盛り土を撤去可能である. しかし, 実際の工期を t_{ri} に設定すると, ばらつきにより, 追加盛土を行わない限り全体の半分のケースにおいて, 工期内に沈下を終了させることができない. したがって, 実務設計においては, これに関して余裕をみて設計値や設計条件を設定するのが通常である. この場合の設計を経験や勘に頼らず, 合理的に行う方法として, 次の方法が考えられる. つまり, 施工前設計では沈下速度に関して式 (26) の分布を考慮し, 予測値が規格を満足する確率が 95% となるように設計値を決定する. この管理法では設計 c_v 値は次式により決定される.

$$\log\left(\frac{c_{vd}}{c_{vr}}\right) = \mu - 1.65\sigma$$

$$= 0.0423 - 1.65 \times 0.307 = -0.464 \dots\dots (27)$$

$$c_{vd} = 10^{-0.464} \cdot c_{vr} = 0.343 c_{vr} \dots\dots\dots(28)$$

ここに, c_{vr} は室内試験平均値, c_{vd} は設計採用値である. ただし沈下量に関しては第 1 法と同様, 室内試験の平均値を採用する.

この場合に, 所定の工期内に沈下を終了させるための手段としては地盤改良工法と余盛り工法が考えられる. しかし, 施工途上に追加盛土が必要となる場合があるので, 盛土高さに余裕を残しておくためには, 余盛り工法は施工前設計段階にとるべき手段としては好ましくない. そこで, この場合, 取るべき手段は地盤改良工法に限定される. したがって, 沈下管理第 1 法を採用した場合との差は地盤改良の仕様の向上により, 対処することとなる.

沈下管理第 3 法

施工場所をいくつかの工区に分け, 順々に施工していく. 先行の工区を後行の工区に対する試験工区として利用できるので, 後行の工区の事前設計を高い精度で行うことができる. 根拠は後述するが, 沈下管理第 3 法は信頼性, 経済性の面で第 1, 2 法よりも優れている. この沈下管理法に関する適用性判定法は図-14 で示すことができる.

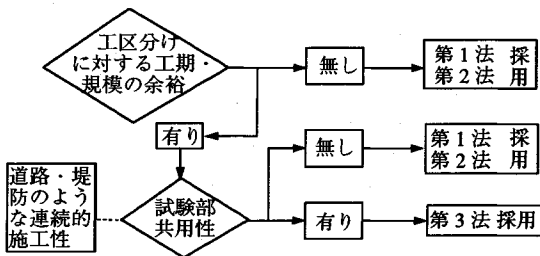


図-14 沈下管理第3法の適用性判定法

以上の1~3の沈下管理法で用いる沈下予測法は2.(3)で述べたいずれの方法でもよい。予測法としては早く、正確な予測が可能なのが最も望ましいのであるが、どの予測法がよいかは現場の状況や土質により異なる場合もある。したがって、文献12)の「ベイズ法」, 「AIC法」などの観測データを用いる沈下精度予測法により、その現場に最も適したものを施工中に選別するのが望ましいと考えられる。

ただし、沈下予測法の使命は最終沈下量の予測のみではなく、沈下速度や沈下時期、追加盛土高、最適盛土高の予測が正確にかつ簡便に行えるものが望ましい、その点では前述の「適応観測器による方法」が優れていると考えられる。

(2) 沈下管理法判別図

図-13に示すように、目標沈下工期 t_n (圧密度 U_n) に対して、余盛土撤去期限 t_r (圧密度 U_r) を $t_r > t_n$ (すなわち $U_r > U_n$) となるよう設定する。ここで、多くの実務における設計例にならって、 t_n に相当する圧密度を $U_n = 80\%$ とする。そこで、図-15の判別図の横軸 U_r を $80 < U_r < 100$ (%) の範囲で変化させる。

一方、軟弱地盤に盛土を行う場合、斜面安定上、盛土高さには限界がある。施工中、追加盛土が必要となった時、斜面安定上、盛土可能な高さを限界追加盛土高さ H_d とする。また、余盛時の盛土を仮に永久に放置した場合、予想される沈下量を S_u とする。そこで、図-15の判別図の縦軸を H_d/S_u とする。

次に、圧密度 U_r と H_d/S_u の値を任意に設定し、その条件の元で、各ケース毎に200回のシミュレーションを行い、その結果について、前述の「追加盛土高推定式」により必要追加盛土高を計算する。そして200回のうち90%以上が条件を満足し、工期 t_r (圧密度 U_r) 以内に予定の沈下を終了させることができるケースを○印、できないケースを×印で表示する。

図-15は沈下管理第1法について、このようにして作成された。図中の曲線(この場合、たまたま直線となる)は判別分析により、得られた判別関数である。つまり、直線より上側は工期超過10%以下、下側は工期超過10%以上を表わしている。この図により、施工前設

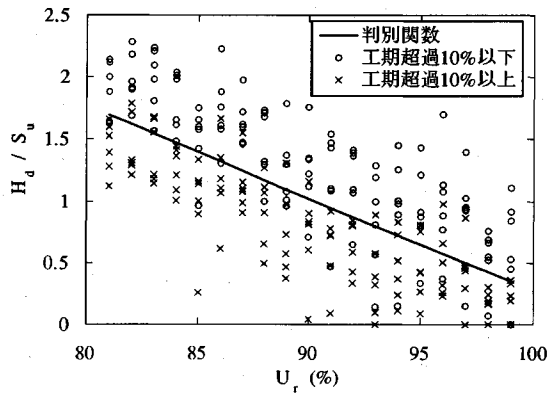


図-15 沈下管理第1法に関する判別分析

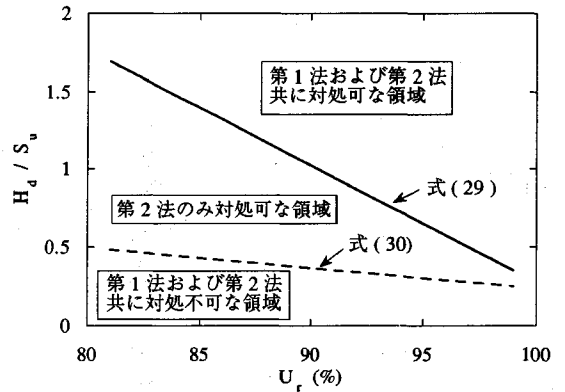


図-16 沈下管理法判別図

計段階において、設計値を図にプロットすることにより、工期超過の可能性を判定することができる。

図-15は沈下を予測し、追加盛土を行う時期の圧密度 U_j を $U_j = 70\%$ (実際にはこの程度のケースが多いと思われる) に設定した結果を整理したものである。次に、 U_j を変化させ、それに対する判別関数の変化を調べた。その結果、次の判別関数が得られた。

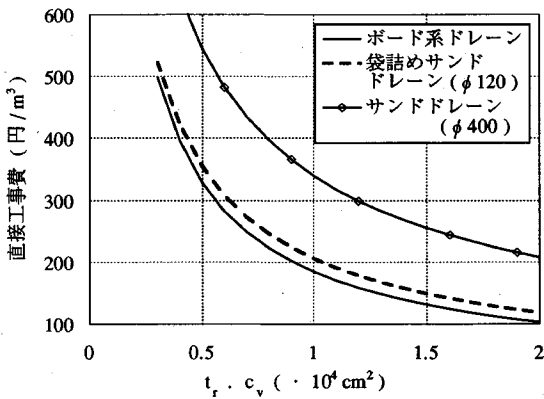
$$\frac{H_d}{S_u} = \frac{700 - 7.93U_j}{11800 - 140U_j} (99 - U_r) + 0.352 \dots \dots \dots (29)$$

同様に、沈下管理第2法について、 U_r と H_d/S_u の関係調べ、判別関数を求め、第1法の判別関数も含めて表示したものが図-16である。第2法の場合の判別関数は次式で与えられる。

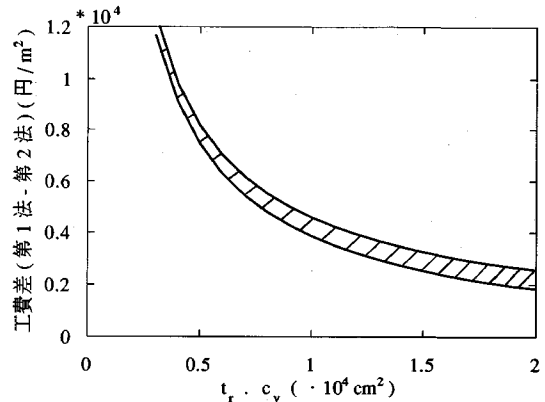
$$\frac{H_d}{S_u} = -0.0128U_r + 1.52 \dots \dots \dots (30)$$

第2法の場合は予測時期の影響はほとんど見受けられないので、式(30)ではそれを無視している。

施工前設計段階において設計値を図-16にプロットすることにより、工期超過の可能性を判定し、適する沈下管理法を選択することができる。



図—17 パーチカル・ドレーン工法の工費比較



図—18 沈下管理第1法と第2法の工費差

(3) 沈下管理第1法と第2法の経済比較

沈下管理第1法と第2法の経済性を比較する場合それらの工事費の差額に関する費目はドレーン柱と追加盛土の直接工事費である。そこで、まずこれらの工費算定について述べる。図—17は設計条件として、所定の沈下終了までの工期 t_r と圧密係数 c_v の積 $t_r \cdot c_v$ の値が設定された時、それらを満足するパーチカルドレーンによる改良対象土 1 m^3 あたりの直接工事費を工法別に比較したものである。なお、単価は文献13)による。ただし、図—17に示す各工法の圧密効果については現在、研究の途上であり、経済性のみで工法の優劣を判定できるものではない。ここでの目的は単に沈下管理第1法と第2法の経済比較であり、第1法の最も高価なケースと第2法の最も廉価なケースを比較し、それでも第1法の方が第2法よりも経済的であり、したがって、すべてのケースで経済的であることを証明することを試みている。

図—17の比較の結果、経済性に関してはボード系ドレーンが最も対効果コストが低い。一方、追加盛土の直接工事費は材料費、盛土施工費、余盛撤去工費から構成されている。ここで、材料費に関しては購入土を使用する場合最も高価であるが、転用土を使用する場合はゼロである。そこで、地盤改良工法としてボード系ドレーン工法、追加盛土材として購入土を使用する場合について経済比較を行う。

設計条件として、 $t_r \cdot c_v$ の値が設定された時、それらを満足するように、沈下管理第1法と第2法で設計・施工を行うとする。初期投資に関しては第2法の方が地盤改良に多くの工費を要する。しかし、沈下のばらつきにより、工期超過に対する対策工法として追加盛土が必要であり、施工中の投資は第1法の方が多い。図—18は施工面積 1 m^2 あたりの [第2法による工費-第1法による工費] の値を $t_r \cdot c_v$ 毎にプロットしたものである。なお、この図の作成には図—15, 16の判別図作成に用いたものと同じモンテカルロ・シミュレーションの結果

を用いた。この場合、すべてのケースは図—18の斜線部に入り、常に、第1法の方が第2法よりも経済的であることがわかる。しかし、図—16に示すように、適用範囲は第2法の方が第1法よりも広い。

(4) 沈下管理第3法の適用性

第3法が採用される場合、一般的に設計時の沈下予測に対して、実際の沈下特性のばらつきは第1, 2法の場合に比べて小さい。巨視的に同一と見なし得る地層が水平方向に連続している場合、定常確率過程に従うサンプル群 (平均 μ , 分散 σ) を想定すると、試験位置から L だけ本施工位置が離れている場合の予測誤差は次式で表わすことができると考えられる¹⁴⁾。

$$\sigma^2(L) = \sigma^2 \{1 - \exp(-2aL)\} \dots \dots \dots (31)$$

ここに、 a は係数であり、試験工区におけるデータ、あるいは付近の試験データを用いて推定することができる。また、試験位置が複数存在し、しかも、本施工の予測位置とそれらの距離がそれぞれ異なる時の予測値とその推定誤差分散の推定はクリギング (Kriging)¹⁵⁾において、式 (31) を仮定することにより、行うことができる¹⁴⁾。

そこで、この方法により、式 (25), (26) を用いて、試験工区の試験値が得られた場合の推定誤差分散 $\sigma_e^2(L)$ を求め、その値を用いて4. (2) に述べた判別分析を行えば、図—16の式 (29), (30) に相当する判別関数を推定することができる。 $\sigma_e^2(L) < \sigma^2$ の関係があるので、第3法に対する図—15上の判別関数は、 L と a の値に依存するが、つねに第1法の判別関数 (式 (29)) より下に位置する。しかも、経済性は第1法とほとんど変わらないので、第3法が採用できるならば、採用した方が信頼性、経済性の面で優れている。

5. ま と め

「沈下状態方程式」、[適応観測器によるパラメータ同定法] に基づく沈下管理システムを提案した。従来法も含めて、沈下管理法を3種類に大別し、設計条件に対す

る適用範囲，経済性を明らかにした。その中で示した沈下管理法の判別図，フローチャートなどは実務の設計・施工に広く適用できると考えられる。事前設計段階において設計条件や設計値をこれらの図に照らし合わせるにより，工期超過の可能性の判断と，沈下管理法の選択を行うことができる。

参 考 文 献

- 1) 脇田英治：観測データによる圧密沈下予測と設計へのフィードバック法，土木学会論文集，No. 457/Ⅲ-21，pp. 117～126，1992. 12.
- 2) 脇田英治：適応観測器による圧密沈下予測，土木学会論文集，No. 481/Ⅲ-25，pp. 49～58，1993. 12.
- 3) G. Kreisselmeier：Adaptive Observers with Exponential Rate of Convergence，IEEE，Trans，AC-22-1,2-8,1977.
- 4) 星谷勝・斉藤悦郎：建設技術者のためのデータ解析と応用，鹿島出版会，pp. 24～27，1991.
- 5) 坂本慶行他：情報量統計学，共立出版，pp. 33～37.
- 6) 松尾 稔：地盤工学—信頼性設計の理念と実際—，技報堂出版，pp. 354～357，1984.
- 7) A. Asaoka：Observational Procedure of Settlement Prediction，Soils and Foundations，Vol.18，No.4，pp.87～101，1978.
- 8) A. Asaoka, M. Matsuo and Y. Kanatani：Settlement

Prediction of Extensive Reclaimed Land, A Case Study, 4th International Conference on Structural Safety and Reliability, pp.331～340, 1985.

- 9) Sekiguchi, H. and H. Ohta：Induced Anisotropy and Time Dependency in Clays, Proc. Speciality Session 9, 9th. ICSMFE, pp.229～238, 1977.
- 10) Zienkiewicz, O.C. and G.N.Pande：Soils and Other Saturated Media under Transient Dynamic Condition, General Formulation and the Validity of Various Simplifying Assumptions, John Wiley and Sons Ltd., pp.1～16, 1982.
- 11) 脇田・竹内・相京：軟弱地盤上の盛土による圧密沈下の事前予測と現場測定例，土と基礎，Vol.36/No.7，pp. 57～62，1988.
- 12) 脇田英治：二次圧密を考慮した地下予測と予測精度推定法，土木学会論文集，No. 457/Ⅲ-21，pp. 97～105，1992. 12.
- 13) (財)建設物価調査会：建設物価，月刊.
- 14) 脇田英治：試験工区の観測値による本工区の観測値の予測，第28回土質工学研究発表会発表講演集，pp. 473～474，1993. 6.
- 15) T.M.Burgess et al.：Optimal Interporation and Isarithmic Mapping of Soil Properties，Journal of Soil Science，1980.
- 16) 宮川勇：軟弱地盤と盛土，土と基礎の設計法（その3），土質工学会，pp. 178～181，1963.

(1993. 2. 22 受付)

RESEARCH ON THE SETTLEMENT CONTROL SYSTEM AND ITS APPLICABILITY

Eiji WAKITA and Minoru MATSUO

This paper deals with a proposal for settlement control of the earthfill or the embankment that is constructed on soft ground. This system is based on the settlement state space equation, the system identification method by adaptive observer. Following this, the settlement control methods, that also include the existing methods, are classified into three types. This paper shows a discriminate chart to judge the applicability of these settlement control systems, that can be utilized with the practical construction design and the site's works. By using this chart, we can also judge whether settlement can be finished within the construction period or not.