

# 地盤の不確定性を考慮した 埋立地盤の圧密に伴う不同沈下解析法

Reliability analysis method of differential settlement of  
a submarine clayey deposit

宮田喜壽\* 木暮敬二\*\* 本城勇介\*\*\*

Yoshihisa MIYAYA, Keiji KOGURE and Yusuke HONJO

In reclaiming a wide tract from the sea, the evaluation of the differential settlement is important problem. As a factor of the differential settlement, the spatial variation of soil profiles can be considered. Authors developed a numerical method of the differential settlement. The developed numerical method, which is based on FOSM (First Order Second Moment), can evaluate the reliability of estimating of the spatial variation of soil profiles. In this paper, contents of the numerical method are shown, its utility is examined by applying for a submarine clayey deposit in Iwakuni.

Keywords: differential settlement, soil profiles, reliability, consolidation parameter

## 1. はじめに

海底粘性土地盤を埋め立てる場合、土質定数の空間変動に伴う不同沈下が問題になる。この場合、土質定数の空間変動を不確定要素として確率論的に扱い、沈下解析を行えば、施工、追加調査などに有益な統計情報を得る事ができる。以上の解析を合理的に行うためには、土質定数の空間変動の推定と、その結果を有効に活用できる沈下解析の妥当性について検討する必要がある。著者らは先に、実地盤のサンプルデータを用いた地盤統計学的検討<sup>1)</sup>より、AIC<sup>2)</sup>を基準にトレンド関数とランダム成分を推定し、異方的な相関性を考慮したクリギングを行えば、精度の良い空間変動の推定が可能になることを確認した<sup>3)</sup>。本研究は、その推定結果を入力値とする沈下解析法について検討を行った。本論文においては、上述の解析法の概要と実地盤の問題に適用した計算結果を示し、その妥当性を考察する。

## 2. 解析の概要

### (1) 解析の基本的な流れ

本研究が提案する解析手順を図-1に示す。まず解析対象を図-2に示すようにボーリングが行われた地点を頂点とする3角形要素で平面的に分割し、任意の平面位置における深さ方向の地盤構造(層構成、深さなど)を線形補間で推定できるようにする。次に、図-3に示すように、沈下量を推定したい領域を平面的にメッシュ分割した後、地盤を深さ方向に等分割する。続いて、各立体要素の重心座標における土質定数をクリギングで推定する。そのクリギングの推定結果から、各立体要素における土質定数の不確定性を表す統計量を評価して、沈下解析を行う。次節以降において、以上の流れで特に重要となる以下の事項を説明する。1)クリギングの推定結果から、各要素における土質定数の不確定性を表す統計量を評価する方法、2)粘性土の沈下解析モデル、3)不確定性を考慮する沈下解析法。

\* 正会員 防衛大学校土木工学教室 助手 (239 横須賀市走水 1-10-20)

\*\* 正会員 防衛大学校土木工学教室 教授

\*\*\* 正会員 岐阜大学工学部土木工学科 助教授

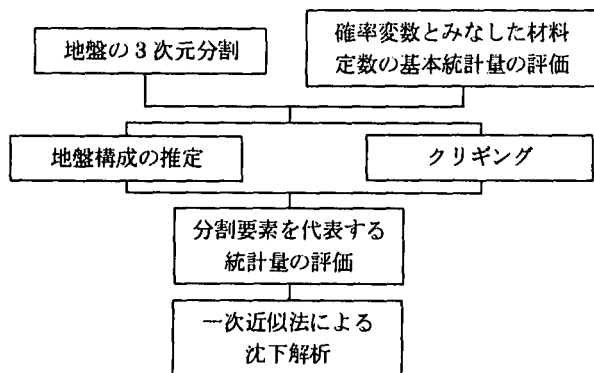


図-1 解析の基本的な流れ

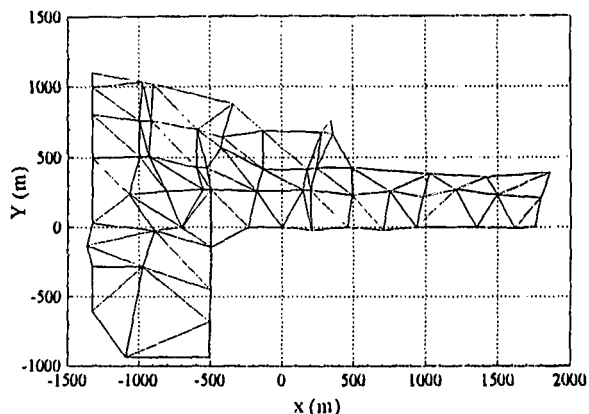


図-2 地盤構造推定のための要素分割

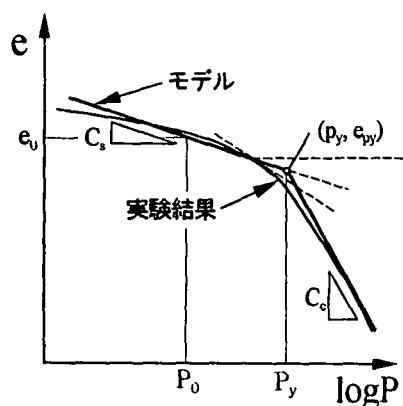


図-3 粘性土の沈下解析モデル

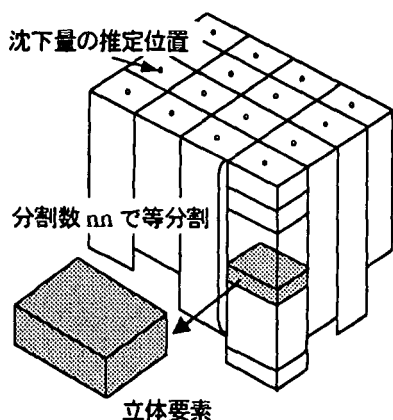


図-4 土質定数推定のための要素分割

なお、土質定数の空間変動の推定法に関する詳細は、文献3)に示したので省略する。

## (2) 各要素における土質定数の不確定性の評価

分割された立体要素の重心座標における粘性土の土質定数をクリギングで推定し、移動平均過程の概念に従って、要素を代表する統計量を評価する。Vanmarcke<sup>4)</sup>によれば、一次元の定常確率過程に従う確率変数  $X(u)$  の移動平均過程  $X_U(u)$  における期待値と分散は次式で評価できる。

$$E[X_U(u)] = \int_{-\infty}^{\infty} \left( \int_{-\infty}^{\infty} X(u) du / U \right) \cdot f_x(x) dx = \mu_x \quad (1)$$

$$\text{Var}[X_U(u)] = \frac{\sigma^2}{U^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(u_1 - u_2) du_1 du_2 = \sigma_x^2 P(U) \quad (2)$$

ここで、 $f_x(x)$  は  $X(u)$  の確率密度関数、 $\mu_x$  は  $X(u)$  の期待値、 $\sigma_x^2$  は  $X(u)$  の分散、 $\rho(u)$  は  $X(u)$  の自己相関関数、 $P(U)$  は、自己相関関数が式(3)で表されれば、 $\delta = \sqrt{\pi}b$  として、式(4)で表す事ができる。

$$\rho(u) = \exp[-(u/b)^2] \quad (3)$$

$$P(U) = \begin{cases} = 1 & (U \leq \delta) \\ = \delta/U & (U > \delta) \end{cases} \quad (4)$$

## (3) 粘性土の沈下解析モデル

従来の圧密沈下解析に従って、過圧密領域から正規圧密領域までの圧密挙動を説明するためには、最低でも膨潤指数  $C_e$ 、圧縮指数  $C_s$ 、圧密降伏応力  $P_y$ 、初期間隙比  $e_0$  が解析パラメータとして必要になる。著者らは、本研究の対象とするサイトで実施された400を超える標準圧密試験結果を整理して、以上4つのパラメータの基本統計量を評価した。その結果、 $C_e$  と  $P_y$  については、特定のトレンドを仮定して、比較的均質なランダム成分を推定できた。しかし、 $C_s$  と  $e_0$  については、試験結果のばらつきが大きく、ランダム成分の推定が困難という結果を得た。寺田<sup>5)</sup>は、室内試験より得られる  $C_s$  はばらつきが大きいことを指摘している。そこで  $C_s$  については、 $C_s = \alpha \cdot C_e$  ( $\alpha$ : 定数) として推定することにした。一方、 $e_0$  については、 $\gamma_1$  のばらつきが小さいために信頼性の高い  $P_0$  が推定できるとして、 $e$ - $\log P$  関係を表す関数に  $P_0$  を代入して推定することにした。本研究が用いた粘性土の沈下解析モデルとそのパラメータの説明を図-3に示す。図中点

線は Casagrande 法による  $P_y$  の決定のための補助曲線を表す。同図に示す  $e_{py}$  のランダム成分の推定は比較的容易に行うことができた。さらに、その結果は、 $C_c$  や  $P_y$  の推定結果と照らし合わせてみても、概ね妥当であると判断できた。以上の検討より、一連の沈下解析において、 $C_c$ 、 $P_y$ 、 $e_{py}$  の不確定性を考慮することにした。また、 $P_y$  の期待値、 $P_0$ 、 $\Delta P$  の相対関係より、3つのケースに対する沈下解析モデルとして、式(5)～(7)を用いることにした。

Case-A)  $P_0 < P_y$ ,  $P_0 + \Delta P < P_y$

$$d_i = \frac{\alpha \cdot C_c \cdot H}{1 + e_0} \cdot \log \frac{P_0 + dP}{P_0}, \quad e_0 = e_{py} - \alpha \cdot C_c \cdot \log \frac{P_0}{P_y} \quad (5)$$

Case-B)  $P_0 < P_y$ ,  $P_0 + \Delta P = P_y$

$$d_i = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \cdot \left( \alpha \cdot \log \frac{P_y}{P_0} + \frac{1 + e_0}{1 + e_{py}} \cdot \log \frac{P_0 + dP}{P_y} \right), \quad e_0 = e_{py} - \alpha \cdot C_c \cdot \log \frac{P_0}{P_y} \quad (6)$$

Case-C)  $P_0 > P_y$ ,  $P_0 + \Delta P < P_y$

$$d_i = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \cdot \log \frac{P_0 + dP}{P_0}, \quad e_0 = e_{py} - C_c \cdot \log \frac{P_0}{P_y} \quad (7)$$

#### (4) 土質定数の不確定性を考慮した沈下解析法

沈下解析に関わらず、一般的な構造解析には、材料定数、力学的・幾何学的・水理学的境界条件などの不確定要素が存在する<sup>6)</sup>。それらの不確定性を考慮した構造解析を行うためには、不確定性を含む構造系を確率構造系として扱い、その構造系が所定の荷重条件においてとりうる挙動を、統計量を用いて評価すべきである。その評価の手段として、モンテカルロ法、一次近似法などがある。奥村・土田<sup>7)</sup>、土田・小野<sup>8)</sup>はモンテカルロ法に基づく不同沈下解析法を確立している。本研究においては、土質定数の不確定性を考慮した不同沈下解析を、一次近似法をもとに検討する。ここで、一次近似法について簡単に記す。確率構造系の外力に対する挙動を表現できる数学モデルが、確率変数  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $\dots$ 、 $X_n$  の関数  $g$  として、式(8)で与えられた場合を考える。

$$Y = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (8)$$

式(1)を各確率変数の期待値まわりで一次の項までテーラー展開し、その期待値  $E[Y]$  と分散  $\text{Var}[Y]$  を評価すれば、それらは次式で表される。

$$E[Y] = g(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n) \quad (9)$$

$$\text{Var}[Y] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\bar{X}_i} \left( \frac{\partial g}{\partial X_j} \right)_{\bar{X}_j} \text{Cov}(X_i, X_j) \quad (10)$$

ここで、 $\bar{\phantom{x}}$  は期待値、 $\text{Cov}(X_i, X_j)$  は  $X_i$  と  $X_j$  の共分散を表す。今回の場合、3種類の土質定数について不確定性を考慮するから、 $n=3$  となり、先にも述べたように、 $P_0$ 、 $P_y$ 、 $P_0 + \Delta P$  の相対的な関係に応じて、式(5)～(7)の各モデルが上式における関数  $g$  となる。

地表面沈下量  $d$  は、各立体要素における  $d_i$  を鉛直方向ごとに重ね合わせて評価する。材料定数の不確定性に伴う推定分散は、各地盤物性値間、そして各要素間の相関を無視できると仮定して、次式で評価する。

$$\sigma_{d_i}^2 = \sum_{i=1}^{nn} \sum_{j=1}^{nn} \sum_{l=1}^{np} \sum_{m=1}^{np} F_{ijlm} \quad (11)$$

ここで、 $nn$  は深さ方向の地盤の分割数、 $np$  は平面方向の地盤の分割数、 $F_{ijlm}$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} F_{ijlm} = & \text{Cov}(\bar{C}_c^{ji}, \bar{C}_c^{km}) \cdot \frac{\partial d}{\partial C_c} \bigg|_{\bar{C}_c^{ji}} \cdot \frac{\partial d}{\partial C_c} \bigg|_{\bar{C}_c^{km}} + \text{Cov}(\bar{e}_{py}^{ji}, \bar{e}_{py}^{km}) \cdot \frac{\partial d}{\partial e_{py}} \bigg|_{\bar{e}_{py}^{ji}} \cdot \frac{\partial d}{\partial e_{py}} \bigg|_{\bar{e}_{py}^{km}} \\ & + \text{Cov}(\bar{P}_y^{ji}, \bar{P}_y^{km}) \cdot \frac{\partial d}{\partial P_y} \bigg|_{\bar{P}_y^{ji}} \cdot \frac{\partial d}{\partial P_y} \bigg|_{\bar{P}_y^{km}} \end{aligned} \quad (12)$$

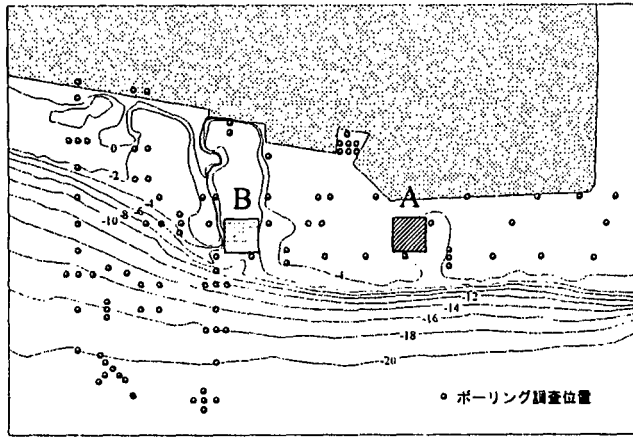


図-5 解析対象領域

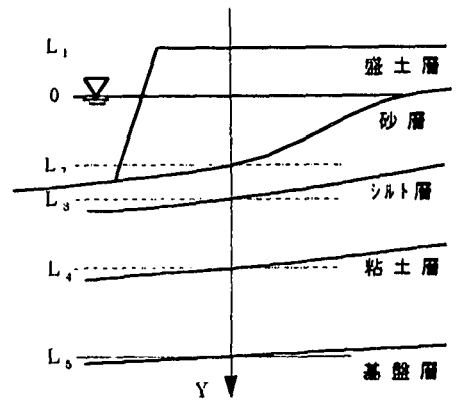


図-6 解析対象領域

### 3. 解析結果と考察

#### (1) 解析対象

上述の解析法を、飛行場移転工事が行われる岩国市沖の海底粘性土地盤の埋立て問題に適用した。解析領域を図-5に示す。このサイトでは、約120のボーリング調査が実施され、それに伴い実施された土質試験より得られた土質定数の基本的な統計的性質は既に検討されている<sup>3)</sup>。解析対象領域における地盤構成を図-6に示す。砂層上端の深さ  $L_2$ 、シルト層上端の深さ  $L_3$ 、粘土層上端の深さ  $L_4$ 、基盤層上端の深さ  $L_5$  を用いれば、このサイトの地盤構成を概ね表すことができる。沈下量を計算する位置において、以上のパラメータを、先に述べた方法で算定した。沈下計算の荷重条件は、海面から5mの高さまで瞬時に盛立てを行うと仮定して、沈下量を算定する各点で評価した。 $C_s$  と  $C_c$  の比  $\alpha$  については、一般的な粘性土について報告されている  $\alpha=1/10$  を採用した。各層の単位体積あたりの重さは、サンプリング結果より、盛土層において  $\gamma_d=1.8$ 、 $\gamma_i=1.0$ 、砂層において  $\gamma_i=1.0$ 、シルト層において  $\gamma_i=0.71$ 、粘土層において  $\gamma_i=0.59(\text{tf/m}^3)$  を仮定した。なお、砂層の沈下は無視して沈下計算を行った。不確定性を考慮する各土質定数の水平方向の相関距離が70~100(m)程度、鉛直方向のそれが0.5~1.0(m)程度であったことから、土質定数の空間変動の推定には二次元モデルを用いたが、沈下量に関する推定分散の計算においては、式(3)に示す一次元モデルを用いた。

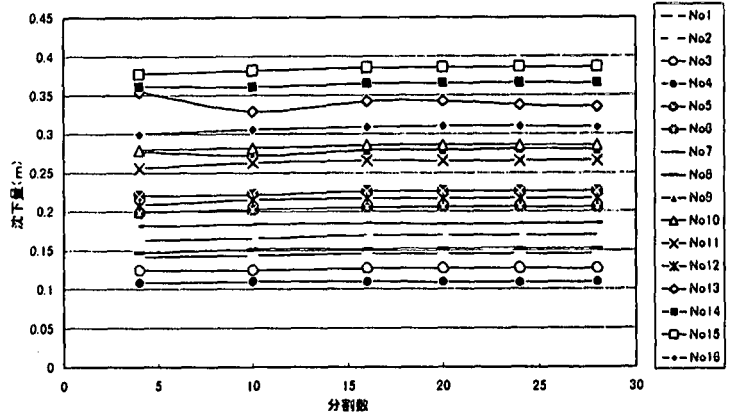


図-7 分割数の影響(沈下量)

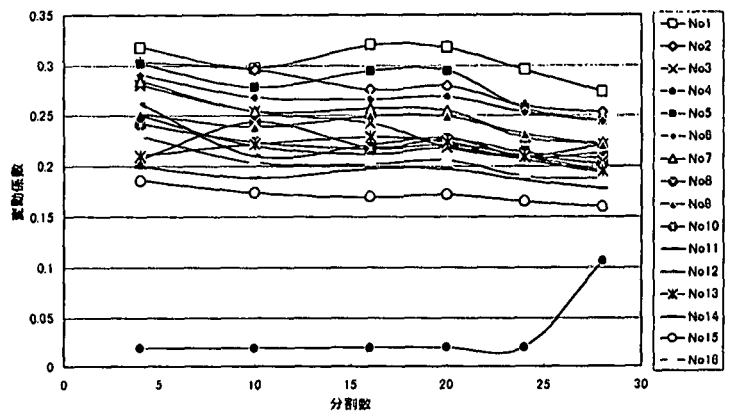
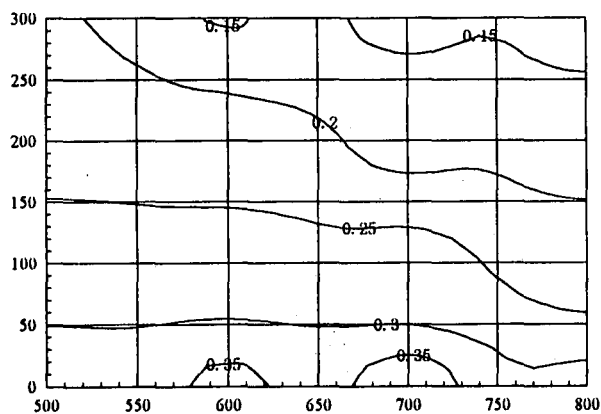


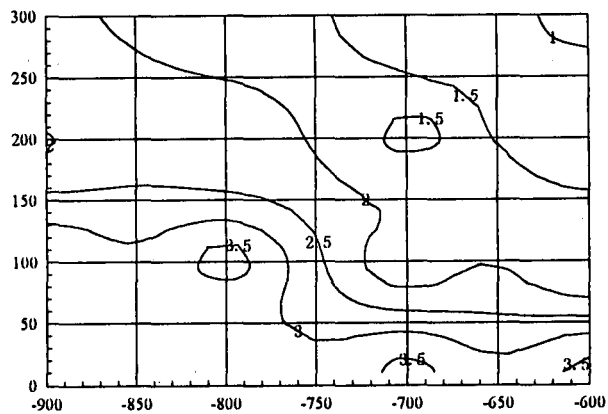
図-8 分割数の影響(推定分散)

#### (2) 解析結果

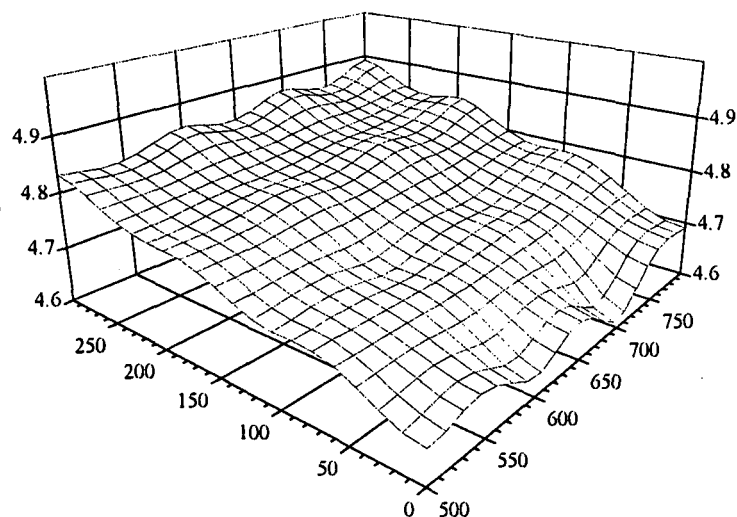
図-5中Aで示される400×400(m)の領域を16分割して、鉛直方向の分割数が解析結果に及ぼす影響を調べた。各要素における沈下量、推定分散の平方根を沈下量で除し



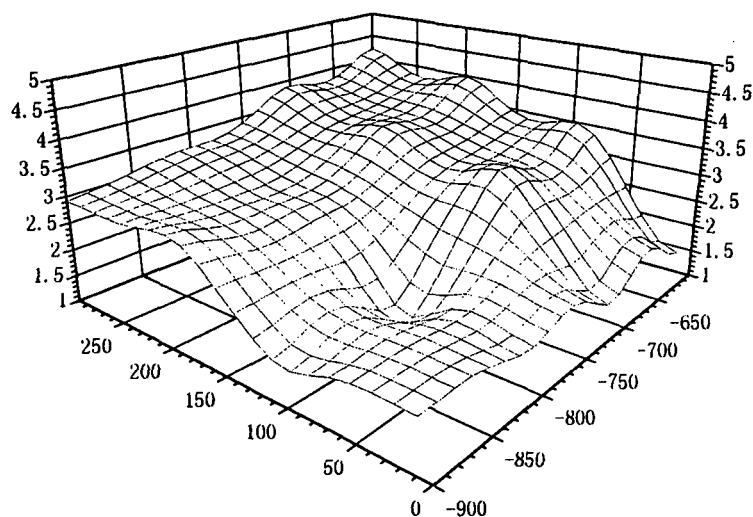
図－9 推定沈下量の分布（領域 A）



図－10 推定沈下量の分布（領域 B）



図－11 地表面形状の推定結果（領域 A）



図－12 地表面形状の推定結果（領域 B）

た変動係数と分割数の関係をそれぞれ図－7、8に示す。図－7より、分割数が沈下量の計算結果に及ぼす影響は無視できる事が分かる。一方、図－8より、分割数が20を超えると、各立体要素の高さが鉛直方向の相関距離より短くなるために、分割数が推定分散の計算結果に及ぼす影響が大きくなることが分かる。この結果より、本研究においては、分割数20で一連の計算を行った。

解析領域AとBにおける沈下量の推定結果を図－9、10に示す。これ以降、作図ソフトのソフトニング性能を考慮して、 $400 \times 400$  (m)のメッシュのうち、その中央の $300 \times 300$  (m)メッシュについて結果を示す。領域Aは、相当に深い位置の要素までが、過圧密領域で圧密が終了すると評価されるため、沈下量の絶対値は漁期Bより非常に小さくなる。一方、領域Bにおいては、南西方向に向かうにつれて粘性土の層圧が厚くなり、水深が深くなることを反映した計算結果を示している。この結果をもとに、一次圧密終了時の地表面の高さを推定した結果を図－10、11に示す。地表面の補正を行いながら施工が進むので、実際は、ここに示すような計測結果は得られ

ないと思われる。けれども、このような計算結果は、所定の地盤高さに調整するために必要となる土量の評価やスロープが生じ易い領域の推定に際して、有益な情報になると考える。

土質定数の不確定性による沈下量の推定分散に関する計算結果を図－12、13に示す。領域Aにおいては、領域の北東方向の端の近辺でボーリングが実施されていたため、

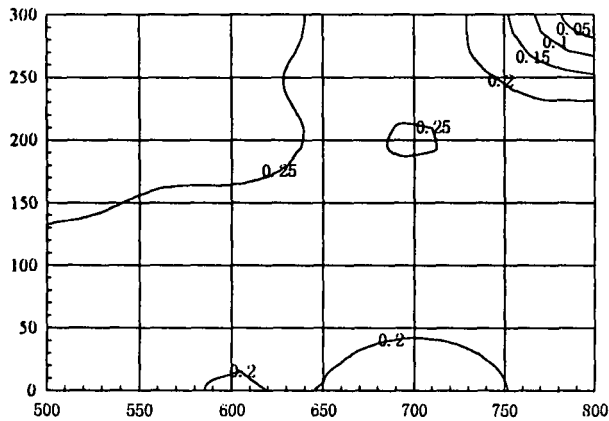


図-1-3 推定分散の平面分布（領域 A）

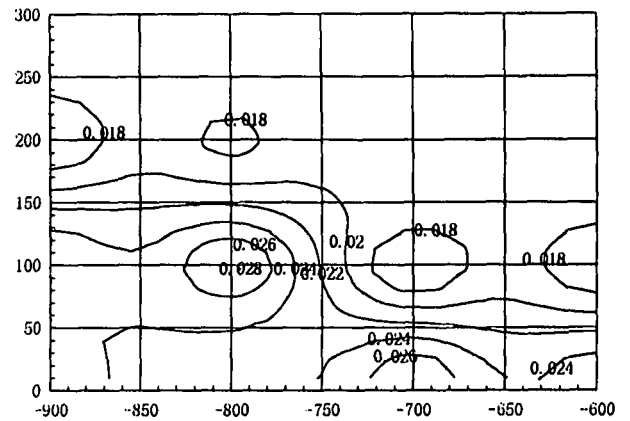


図-1-4 推定分散の平面分布（領域 B）

その位置に近くなるほど変動係数が小さくなる傾向を示している。一方、領域 B については、推定分散の絶対値、そして推定領域内の変動量も小さい。これは推定領域の 4 つの頂点付近で、ボーリングが実施されていたためであると考えられる。不同沈下を期待値  $\pm \sqrt{\text{推定分散}}$  で評価するなら、不確定性の影響はどちらの領域も期待値  $\pm 20 \sim 30$  (cm) 程度で評価される。計算の妥当性は、計測結果を待たねばならないけれども、以上に示したような計算結果は、追加調査や観測計画に有益な情報を与えると考ええる。

#### 4. まとめ

本論文における主要な結論は以下に示すとおりである。

- (1) 地盤の不確定性を考慮できる不同沈下の解析法として、クリギングと一次近似法に基づく沈下解析法を組み合わせた解析法、ならびに解析コードを確立した。
- (2) 土質定数の自己相関距離に注意して要素分割を行えば、要素分割が解析結果に及ぼす影響は概ね無視できることが分かった。
- (3) 実地盤の不同沈下予測を試みて、解析法の実用性を検討した。計算で得られる沈下量の期待値は土量計算などに、推定分散は観測点配置計画などに有益な情報となる可能性を確認した。

#### 参考文献

- 1) Ripley, R.D.: Spatial statistics, John Wiley and Sons, 1981.
- 2) 赤池：数理科学, No.153, pp.5-11, 1976.
- 3) 宮田・木暮・本城：海底粘性土地盤における地盤物性値の空間変動の推定, 海洋開発論文集, pp.441-446, 1997.
- 4) E.H.Vanmarcke: Probabilistic modeling of soil profiles, J. of the Geotech. Eng.Div., Proc. of ASCE, Vol.103, GT11, pp.1227-1238, 1977.
- 5) 寺田邦雄：二次回帰式による過圧密領域を考慮した圧密沈下計算方法の提案, 土と基礎, Vol.45, No.2, No.469, pp.21-23, 1997.
- 6) 中桐・久保：確率有限要素法入門－不確定構造の解析, 1985, 培風館.
- 7) 奥村・土田：土質定数のばらつきを考慮した不同沈下の推定, 港湾技術研究所報告, 第20巻, 第3号, 1981.
- 8) 土田・小野：数値シュミレーションによる不同沈下の予測とその空港舗装設計への適用, 港湾技術研究所報告, 第27巻, 第4号, 1988.