

シールドトンネルの路線地質評価における

3次元地盤構造解析の適用

The estimation of the shield tunnel geological conditions using three dimensional geostatistical analysis

村山秀幸¹⁾・斉藤悦郎²⁾・長岡廣一³⁾・吉野広一⁴⁾・國枝紀⁴⁾

Hideyuki MURAYAMA, Eturo SAITOU, Koichi NAGAOKA, Hiroichi YOSHINO, Osamu KUNIEDA

It is most popular way to estimate the underground geological conditions of the tunnel based on the boring surveys or some geophysical explorations at the just points of the tunnel route or around the route. Thus, the design and build of the tunnel is based on the results of these surveys and explorations which document determines two dimensional tunnel section. But, it is sometimes to define the difference between the prediction about the tunnel underground conditions and the results from the observations and samples at the tunnel face. It seems that the reason would be the technical limits of the survey sensitivity and the applicability or the economical limits at the step of the planning or the geological anomaly. It is naturally the underground has the three dimensional geological structure, to be more getting up the predictions of the underground conditions is the three dimensional survey positioning and the way to estimate the three dimensional geostatistical analysis.

This paper describes the summaries of the way to estimate the three dimensional geostatistical analysis using the results of the boring survey around the tunnel rout drilled under the another constructions to be more getting up the geological predictions of the shield tunnel rout.

Key Word: shield tunnel, boring survey, geological condition, three dimensional geostatistical analysis

1. はじめに

従来、トンネル経過地における地盤・地質状況は、路線直上あるいは路線ごく近傍で実施するボーリング調査あるいは弾性波探査などの物理探査結果に基づき想定されており、トンネル路線の計画、構造物の設計・施工は、これらの路線に沿った二次元平面的な調査結果に基づき実施されている。しかしながら、設計時に想定された地盤状況と施工時に切羽や掘削土などから確認される地盤状況が異なる状況にしばしば遭遇する。その原因は、調査手法の精度・適用の限界や調査・計画・設計における経済的な制約あるいは、地質条件の複雑さなどさまざまな要因が考えられる。当然ながら地盤は3次元構造を有しており、トンネル路線の地盤・地質想定信頼性をより向上させるためには、3次元的な調査の実施と地盤構造推定手法による評価が有効な手段であると考えられる。

本研究は、シールドトンネル経過地における路線地盤・地質状況をより信頼性高く推定するために、路線付近の既存ボーリングデータを活用して3次元的に地盤・地質状況を推定し、設計・施工時における地盤の不確定要素を低減させることを目的とする。

-
- 1) 正会員 博士(工学) 株式会社フジタ 技術研究所土木研究部
 - 2) フェロー 工学博士 株式会社フジタ 技術研究所土木研究部
 - 3) 株式会社フジタ大阪支店 フジタ・住友・大本特定建設工事共同企業体
 - 4) 株式会社日本総合研究所 サイエンス事業部

2. 現場概要と地盤状況¹⁾

表-1 路線の地質区分と地盤物性（新長田工区）

本報告で対象としたシールドトンネルは、神戸市交通局高速鉄道海岸線新長田工区（複円形シールドトンネル（DOT），全長約 550m，DOT 延長約 300m）である。表-1 に付近の地質層序を示す。トンネル経過地の地質は、発進側（新長田駅側）から主に洪積砂礫層（Dg）と洪積粘土層（Dc）を通過し、到達側（駒ヶ林駅側）の手前で天端部が上位の沖積砂層（As2）をかすめると想定されている。表より、トンネル経過値の地盤物性は比較的良好であり、切羽の自立性にはさほど問題がないと考えられる。

本研究では、シールドトンネル路線（路線延長約 550m）の 1.5 km 四方に分布するボーリングデータ（本シールドトンネル構築以外を目的として実施した調査ボーリングが主である）を活用し、地層境界や物性境界（N 値）を地盤統計学的手法であるクリギング法によって補間する 3 次元地盤構造解析を適用して、地質構成ならびに地盤物性（N 値）の分布状況を 3 次元的に把握・評価すると同時に地盤の可視化を試みた。

3. 三次元地盤構造解析^{2)~5)}

地層構造の推定および地盤物性の推定には、地盤統計学的手法であるクリギング法を適用した。まず、ボーリング調査における地層境界情報から地層境界線および境界面の推定を行い、次に、地盤物性情報（N 値）の空間分布推定を行った。一般にクリギング法では、サンプル点間の相関性の強弱を評価するバリオグラムモデルの推定を行う必要がある。しかしながら、本報告ではデータサンプル数に比べ地層境界に関する情報がかかなり少ないことから、地層構造推定にはバリオグラムモデルを用いずに予め与えられたパラメータ値による指数型の相関係数関数を用いた。

3.1 クリギング法による地層構造の推定

(a) クリギング法の定式化

クリギングにより求められる空間分布の推定値 $Z(X)$ は、確定値として与えられるトレンド成分 $m(X)$ とランダム成分 $W(X)$ の線形和として表現できると仮定する。

$$Z(X) = m(X) + W(X) \tag{式-1}$$

ここで、 X は座標を表すベクトルであり、ランダム成分 $W(X)$ の平均値が 0 となる定常（エルゴード）確率過程となるようにトレンド成分 $m(X)$ を考える。

まず、トレンド成分 $m(X)$ は X に関する多項式によって表現できると仮定する。

$$m(X) = \sum \beta_i f_i(X) = \{f(X)\}^T \{\beta\} \tag{式-2}$$

ここで、 $f_i(X)$ ($i = 1, 2, \sim, L$) は X に関する多項式で β はその係数、 $\{f(X)\}^T = \{f_1(X), f_2(X), \sim, f_L(X)\}$ 、 $\{\beta(X)\}^T = \{\beta_1, \beta_2, \sim, \beta_L\}$ であり、 X は 2 次元座標 (x, y) とする。

次に、 N 個のサンプル点 $x_i(X)$ ($i = 1, 2, \sim, N$) においてサンプル値が $Z(X_i)$ として与えられていると任意

地質年代	地質区分	記号	主相・分布・特徴・物性(平均値)	シールド経路地	
新 生 代	第四紀	盛土	Fg	沿岸部の埋立地を構成し、主に砂質土よりなる。 N値: 1~2 (1), 変形係数(kgf/cm ²): 7	終点側のトンネル天端部に出現
		粘性土	Ac	西部に主に分布し、砂質土、腐質土を挟む。やや硬質で厚層最大8m。N値: 2~19 (8), 変形係数(kgf/cm ²): 56	
		砂質土	As	総じて中細砂を主体とし、Ag層の下位に分布する。和田平付近では細粒砂となる。上位をAs1, 下位をAs2に区分。 <As1> N値: 3~18 (12), 変形係数(kgf/cm ²): 84 <As2> N値: 22~60+ (47), 変形係数(kgf/cm ²): 329 透水性係数(cm/s): 3*10 ⁻³	
		腐質土	Ag	西部では中細砂と互層を成し、層厚は70~100mm。東部では乾石を含む泥状堆積物となるが厚みは薄い。N値: 25~60+ (51), 変形係数(kgf/cm ²): 357, 透水性係数(cm/s): 3*10 ⁻²	
	洪積層	粘性土	Dc	硬質で、砂質土、腐質土と互層をなす。最大層厚約6m。N値: 3~37 (17), 変形係数(kgf/cm ²): 119	発進側〜終点側
		砂質土	Ds	粘性土と細粒砂となり、新生田川沿いで腐質土と混在して分布し、乾石を混じえる。N値: 13~41 (24), 変形係数(kgf/cm ²): 168, 透水性係数(cm/s): 7*10 ⁻⁴	
		腐質土	Dg	砂質土と混在して分布し、新生田川沿いで乾石を混じりの局状地生段丘堆積物から成る。神戸湾付近は、約200mm程度の乾石が混じる。N値: 12~60+ (51), 変形係数(kgf/cm ²): 357, 透水性係数(cm/s): 1*10 ⁻²	発進側〜終点側
	新第三紀	大阪層群	O	粘性土、砂質土および腐質土から成り、半固結で硬質である。山麓谷の斜面面や山下大倉山などの地台を構成する。	

点の推定値 $Z^*(X)$ はサンプル値 $Z(X_i)$ の線形和として次のように表せると仮定する。

$$Z^*(X) = \sum \lambda_i Z(X_i) = \{Z_N\}^T \{\lambda\} \quad (i=1, N) \quad (\text{式-3})$$

ここで、 $\{Z_N\}^T = \{Z(X_1), Z(X_2), \sim Z(X_N)\}$, $\{\lambda\}^T = \{\lambda_1, \lambda_2, \sim, \lambda_N\}$ であり、(式-3)の重み係数 $\{\lambda\}$ は次の2つの条件を満足する必要がある。

- i) 重み係数 $\{\lambda\}$ 条件1: 多くの推定値に対して誤差は平均的に0

$$E [Z(X) - Z^*(X)] = 0 \quad (\text{式-4})$$

このためには以下を満足することになる。

$$\{\lambda\}^T [F] = \{f(X)\}^T \quad (\text{式-5})$$

- ii) 重み係数 $\{\lambda\}$ 条件2: 推定誤差の分散 $\sigma_e^2(X)$ が最小

$$\begin{aligned} \sigma_e^2(X) &= \min E [\{ZZ(X) - Z^*(X)\}^2] \\ &= \min [\text{Var}\{W(X)\} - 2 \{\lambda\}^T \{k(X)\} + \{\lambda\}^T [K] \{\lambda\}] \quad (\text{式-6}) \end{aligned}$$

ここで、 $\{k(X)\}$, $[K]$ はサンプル値よりトレンド成分を除いた $W(X_i)$ から共分散関数を求め、この共分散関数を用いて求める。

$$\{k(X)\} = \begin{bmatrix} \text{Cov}\{W(X), W(X_1)\} \\ \dots \\ \text{Cov}\{W(X), W(X_N)\} \end{bmatrix} \quad (\text{式-7})$$

$$[K] = \begin{bmatrix} \text{Var}\{W(X_1)\} & \dots & \text{Cov}\{W(X_1), W(X_N)\} \\ \dots & \dots & \dots \\ \text{Cov}\{W(X_N), W(X_1)\} & \dots & \text{Var}\{W(X_N)\} \end{bmatrix} \quad (\text{式-8})$$

$\sigma_e^2(X)$ を求めるためには、(式-5)の条件下で(式-6)を最小としなければならない。そこで、ラグランジュの未定乗数法を用いて用いて重み係数 $\{\lambda\}$ を求めることになる。

以後は上式に基づくマトリクス式を定義しこれを解く。

- iii) 共分散マトリクスを求めるための相関係数

共分散マトリクス $[K]$, およびベクトル $\{k(X)\}$ を求めるために、つぎのような相関係数を用いた。

$$\rho(x, y, \theta) = \exp \left[- \left\{ \left(\frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{a} \right)^2 + \left(\frac{-x \sin \theta + y \cos \theta}{b} \right)^2 \right\} \right] \quad (\text{式-9})$$

3.2 クリギング法による地盤物性の推定

指数モデルのバリオグラム式を(式-10)に示す。ここで γ がバリオグラム、 h が距離、 a, b, c がパラメータである。 a はレンジ、 c はナゲット、 $b+c$ はシルと呼ばれている。なお、バリオグラムは等方性であると仮定する。

$$\gamma(h) = c + b [1 - \exp(-h/a)] \quad (\text{式-10})$$

各モデルのパラメータ a, b, c は、計測データから計算されたバリオグラムを用いて推定される。サンプルによるバリオグラムと推定曲線の関係性を $\gamma-h$ グラフに表現すると図-1のように

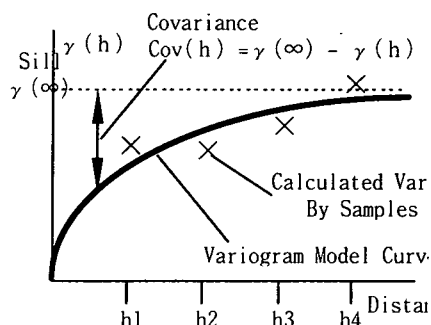


図-1 バリオグラム計算値と推定曲線

なる。地層構造の推定では、(式-7) (式-8)に共分散関数を用いていたが、ここでは、図-1に示される $\text{Cov}(h)$ を使用する。クリギングの理論については地層構造の推定とはほぼ同じであるがトレンド成分は考慮しないものとした。

4. 適用

4.1 地層構造推定（全体推定）

図-2 に本報告で対象とした解析領域を航空写真で示す。地層構造の推定は、路線全体を図-2 のように 1.0km メッシュに区分し、隣接する領域との整合性を確保するために東西南北方向に各 250m のマージンを設け 1.5km 四方を実質的な解析領域と設定した。図-3 にボーリング位置図を示す。解析には、領域内(1.0km 四方)31 本、領域近傍 213 本、計 244 本のボーリングデータを用いた。図-4 に地質構造推定処理フローを示す。3 次元地層構造モデルを推定するために、まず、適切な位置に地層断面を設定し断面内の地層境界線をボーリングデータから推定する。3 次元位置が離散的に与えられているボーリングデータから直接 3 次元データを推定することは、解析領域が比較的小さくかつ層序が一定である場合には充分適用できると考えられるが、本ケースのように広域の推定を行う際には、ドーム形状の地層の作成など困難な点が多い。したがってここでは、ボーリングデータから地層境界線の推定をクリギング法により行う過程を加えている。次に、作成された地層境界線を基に、3 次元データである地層境界面を推定する手順となる。推定手法には同じくクリギング法を用い、最後に地層境界面から地層構造を作成する。

図-5 にボーリング層序から推定した地層境界線を示す。図には、複数の断面上に推定地層境界線が作成されている。図-6 に推定した 3 次元地層構造を示し、図-7 にトンネル縦断方向の推定地層構造とトンネルおよび駅部の構造を併記して示す。図-8 は 3 次元解析結果を動画像ナビゲーションファイル(VRML)に変換し、任意位置へのナビゲーションを行った例である。

以上より、トンネル路線の地層構造を 3 次元的に把握・評価することができ、解析結果の表示方法や可視化の利用形態がさまざまに広がることになる。

4.2 地層構造推定（詳細推定）

本地点のように地山が沖積あるいは洪積層から構成される場合、周囲と比較して地山強度と透水特性が異なる挟在砂層（レンズ状の薄層）の分布が不連続で複数のボーリングで確認できない場合が多く、トンネル施工上問題となることが多い。ここでは、詳細な地質構造の推定としてこの挟在砂層の分布位置を 3 次元的に推定した。詳細解析は新長田～駒ヶ林駅間周辺のボーリング 22 本を用いている。図-9 に詳細解析結果を路線縦断方向に示す。図より、挟在砂層（レンズ層）の分布位置も精度よく処理されていることがわかる。

以上より、本手法は同一のデータを目的別に精度よく解析することが容易であることがわかる。

4.3 地盤物性推定（全体推定）

地盤物性の推定には、ボーリング調査で実施された標準貫入試験データ(N 値)を用いた。解析領域および使用したボーリングは地層構造推定の場合と同一である。図-10 に処理フローを示す。ここではまず、N 値のバリオグラムモデルのパラメータ値を推定する。バリオグラムモデルは指数型の等方性モデルを用い、

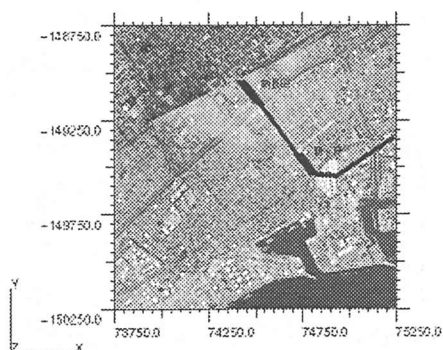


図-2 解析領域(新長田工区)

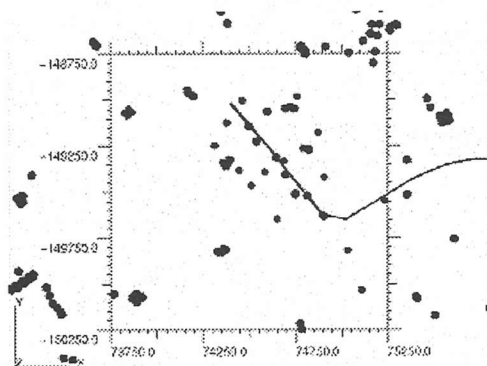


図-3 ボーリング位置図

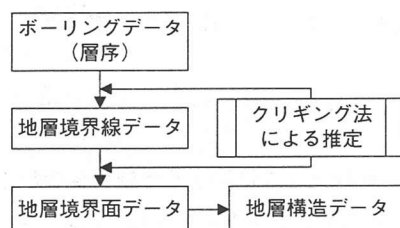


図-4 地層構造推定処理手順

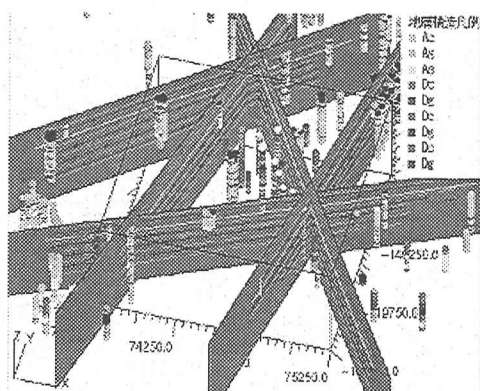


図-5 地層境界の推定結果(鳥瞰図)

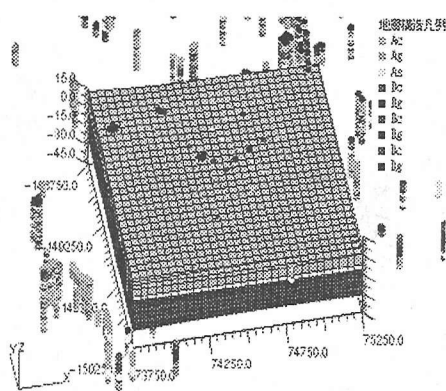


図-6 地層構造推定結果 (鳥瞰図)

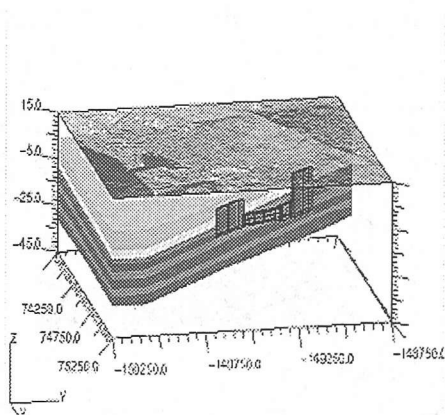


図-7 トンネル縦断面の地質構造

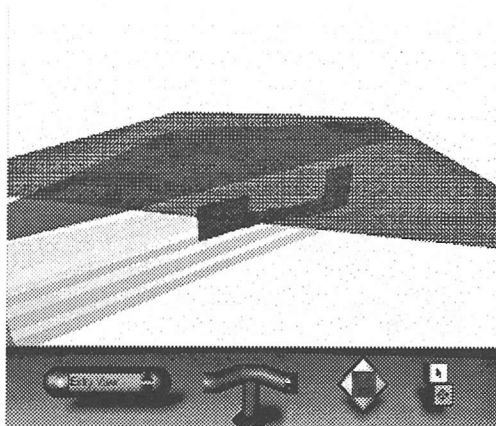


図-8 解析結果の動画像ナビゲーション (VRML ファイル)

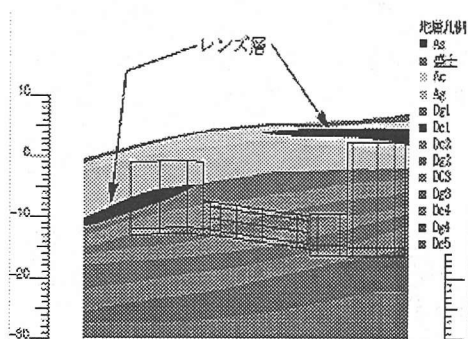


図-9 地質構造詳細推定結果 (レンズ層)
縦横比 10:1, 右側:新長田駅, 左側:駒ヶ林駅

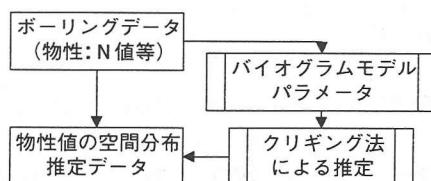


図-10 地盤物性推定処理フロー

N 値とバイオグラムモデルのパラメータのデータとから N 値の空間分布を推定する。推定にはクリギング法 (オーディナリ・クリギング法) を用いた。図-11, 図-12 に N 値の空間分布推定結果を示す。トンネル路線の N 値は、事前の調査結果による想定結果とほぼ同様でおおむね 40 以上であることがわかる。

4.4 地盤物性推定 (詳細推定)

最後に、路線上の追加ボーリング調査の実施効果について N 値の推定誤差から検討する。検討は、図-9 に示した新長田～駒ヶ林駅間の解析領域内に分布する 22 本のボーリングのうち、路線直上にボーリングがある場合(ケース 1)と無い場合(ケース 2)に対して N 値の推定誤差の相違を比較することで実施した。クリギング法では推定点における物性値のみならずその値の推定誤差も計算することが可能である。図-13, 14

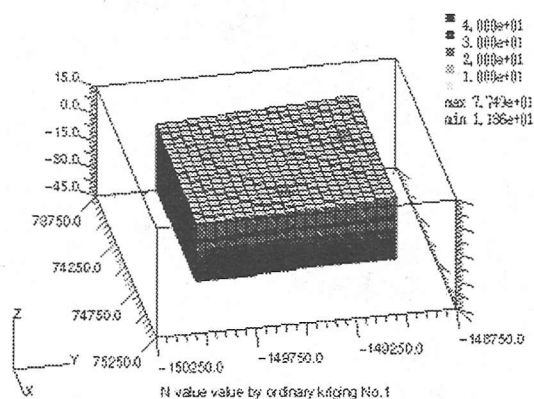


図-11 N値の空間分布推定結果

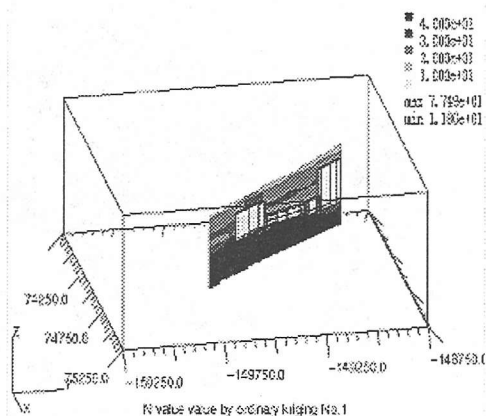


図-12 トンネル縦断面におけるN値分布

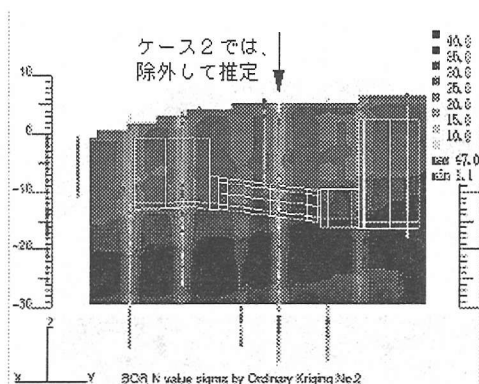


図-13 地盤物性詳細推定 (ケース1)

縦横比 10:1, 右側:新長田駅, 左側:駒ヶ林駅

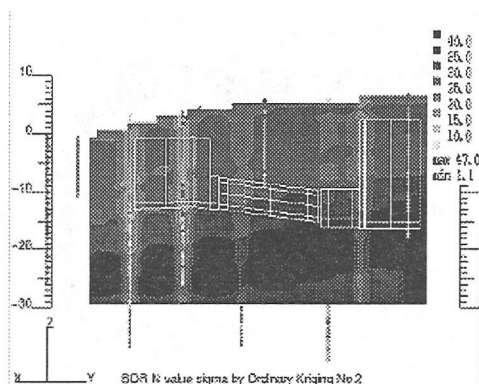


図-14 地盤物性詳細推定 (ケース2)

縦横比 10:1, 右側:新長田駅, 左側:駒ヶ林駅

にN値推定結果における誤差分布を示す。図より、路線直上の追加ボーリング結果を考慮したケース1の誤差分布がトンネル路線断面において低くなっており、追加ボーリングの実施効果が定量的に示されている。

5. おわりに

本報告は、シールドトンネル経過地の地質評価として3次元地盤構造解析を適用し、その有用性について述べた。本手法をトンネルの設計・施工に適用するメリットとしては以下を挙げることができる。

- 1) 既存ボーリングを考慮した適切な追加ボーリング計画の立案と実施が可能である。
- 2) 地質構造および地盤物性 (N値や透水係数の分布など) を3次的に把握・評価でき信頼性が高い。
- 3) 施工時に掘削土などで確認する地盤状況の変化を解析データにフィードバックし、より信頼性の高い地盤情報の予測が可能となり、施工性・安全性の向上に寄与することが期待できる。
- 4) 路線における施工前後の地盤情報をデジタル量として保管・管理し、今後の工事に容易に活用できる。

最後に、本研究を進めるにあたりご協力・ご助言を賜りました神戸市交通局佐保千載氏、水口和彦氏、新見達彦氏並びに、神戸大学都市安全研究センター田中泰雄助教授に深謝いたします。

【参考文献】

- 1) 兵庫県：兵庫の地質，1996。
- 2) Edward H. Isaaks, R. Mohan Srivastava: Applied Geostatistics, Oxford University Press, 1989.
- 3) 國枝紀, 吉野広一: 三次元地盤構造解析システム GEOSTANの開発, 第7回日本情報地質学会講演会予稿集 pp. 7-8, 1996
- 4) 鈴木 誠, 他: 三次元地質構造の推定と画像出力, 清水建設研究報告, 第48号, 1988
- 5) 大西有三, 田中誠, 大澤英昭: 不均質地盤内の地盤定数の推定に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 457号, pp. 51-58, 1992.