

応用地質

第 48 卷 第 6 号

2008年 2月

3次元モデルを用いた地盤調査リスク評価事例

日本応用地質学会

3次元モデルを用いた地盤調査リスク評価事例

林 義隆*・太田英将**

要旨

地盤モデルを作成する場合、地質技術者は地質学の基本原理と彼らの調査経験を基にして作成する。一方、近年のIT化により3次元地質モデルを作成するソフトウェアが発達し、実用に具されることになった。これらソフトウェアは地質技術者により区部された地層境界や岩盤区分を柱状図から直接3次元で自動補間するばかりでなく、地球統計学的手法を使って、統計的な確からしさ(または不確実性)まで数値で表現できるようになった。筆者らは、この地球統計学的手法を利用し、①地質調査におけるリスク評価を行った事例を示し、さらに②リスクの階層性、③リスクコミュニケーションの事例について紹介する。

Key words : リスク risk, 不確実性 uncertainty, クリギング kriging, ボーリング調査 boring survey

1. はじめに

「リスク」という言葉は、使用する立場や対象によって異なる意味で用いられるので、大津¹⁾はリスクについて議論する場合、事前にその定義を行っておく必要があると述べている。

一般にリスクは図-1のように、A.主観リスクとB.客観リスクに区分され、さらに客観リスクは、B-1.土木工学などの分野で用いられてきた定義とB-2.金融工学の分野で用いられてきた定義とに細分される。

A. 主観リスク

主観リスクとは、定量化できないリスクである。たとえば斜面崩壊の危険度は、技術者の定性的な判断によって点

数化することにより、定義される。

B. 客観リスク

客観リスクとは定量化できるリスクであり、土木工学分野での定義と、金融工学分野での定義とではその内容が異なるので注意が必要である。

B-1. 土木工学分野での客観リスク

「リスク=発生確率×被害額の大きさ」によって定義される。たとえば、落石被害リスクでは対象となる落石の発生確率と落石が発生した場合の被害想定額の積で表される。

B-2. 金融工学分野での客観リスク

「リスク=期待値からの離れ量」によって定義される。たとえば、株価の変動予測において、統計処理をした予測値からのばらつきがリスクとして定義され、数学的には標準偏差 σ に相当する。つまり、金融工学分野においては、金融商品の変動が期待値(リターン)どおりであるならば誰にも損失は発生しないため、その期待値からのはずれ量がどの程度となるかがリスクとして定義される。

2. リスク評価の事例

2.1 工学的リスク評価の例

モデルは、建築物基礎地盤の評価にかかわるものである。地盤は塊状の花崗岩類からなり、基礎部分は電研式岩盤分類によるCL級以上の岩盤が必要である。概略設計段階の調査では計画地盤付近で一部DM~DH級の岩盤が推定された。このため、当初設計に加えてDM級の岩盤についてコンクリートで置き換える計画となっていた。

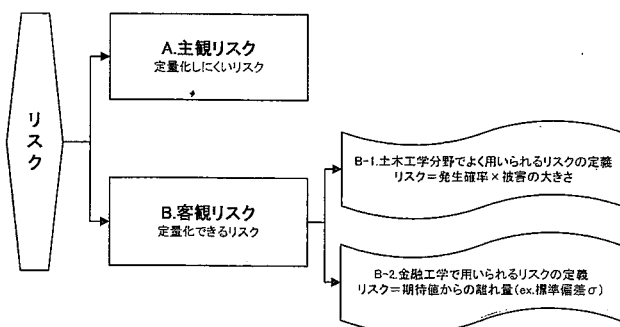


図-1 リスクの定義

* (有)太田ジオリサーチ Ohta Geo Research Co.,Ltd.(会員)
 E-mail : hayashi@ohta-geo.co.jp

** (有)太田ジオリサーチ Ohta Geo Research Co.,Ltd.(会員)

今回の検討では、この置き換え範囲が適当であるかどうかの、リスク評価を行った。評価は、3次元的に岩盤区分を地球統計学的手法で推定し、その的中確率の算出を行う手法をとった。

3次元岩盤区分は、COPSEY²⁾によるジオロジックインジケータークリギング手法(Geologic Indicator Kriging 以下「GIK」と称す)を用いた。本手法は、離散値であるCH, CM, CL, D等の岩盤分類値を指標として、空間上でその値を補間するものである。同様の手法は大津ら³⁾によりリスク工学の分野で本邦に紹介されている。本手法を用いると解析メッシュごとに岩盤分類を行い、その岩盤分類の推定確率が算出される。この確率を用いて今回はリスク評価を行うこととした。

本項では、リスクを土木工学分野での客観リスクの定義「リスク=発生確率×被害額の大きさ」に従って次のように定義する。

$$\text{リスク} = \text{岩盤分類の推定確率(probability)} \times (\text{追加調査費用} + \text{当初想定以外の追加工事金額の大きさ}) \quad (1)$$

図-2は置き換え範囲周辺のGIKによる岩盤分類である。これによれば概略設計段階での置き換え範囲の外側にもさらにDM級の岩盤が推定され、置き換え範囲の拡大が懸念された。

次に、図-3に同じ範囲のDM級の存在確率を表示させると、現計画の置き換え範囲は確率が0.8~1.0であるの対し、その外側(図の右側)の存在確率は0.6と小さくなっている。言い換えれば、この範囲はDMでない確率が0.4ということであり、さらに追加ボーリングを行い、岩盤の性状を確認してから設計変更したほうがよいと考えられた。

追加ボーリングの必要性については、上記のような定性的な判断で行うことが一般的であるが、本稿では、これをリスクとして定量化することとした。

表-1には①このまま追加ボーリングをせず、置き換え範囲を拡大した場合の費用と、②追加ボーリングをしてその結果により設計変更する場合について比較した。

①追加ボーリングをしない場合とは、無条件で置き換え範囲を拡大することに等しく、事象の発生確率は1として扱うことであり、工事費用は当初から5,000千円が追加となる。

②追加ボーリングをする場合は、追加ボーリング費用750千円と追加工事費5,000千円が最悪の場合必要となるが、現在推定したDM級の存在確率が0.6であるから、工学的リスクの定義式(1)より、リスク(損失期待値)は3,450千円となり、①の5,000千円よりも小さくなる。

このように、今後の調査費用と追加工事費を地盤の推定確率をパラメーターとしてリスク評価することにより、追加調査の意義を数量化することが可能である。

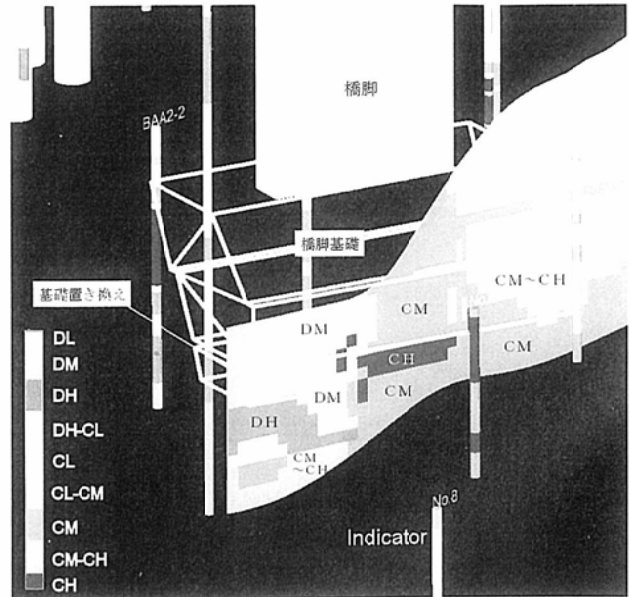


図-2 GIKによる岩盤分類

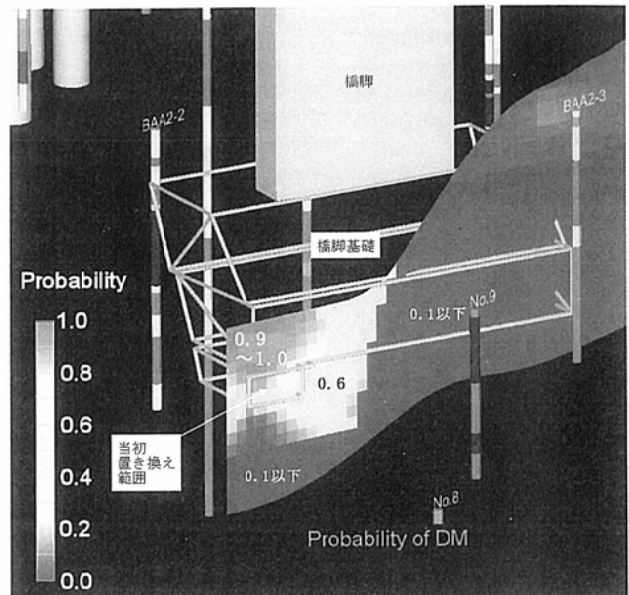


図-3 DM級の存在確率

表-1 工学的リスク算定

	リスク(千円) 損失期待値	調査費用 (千円)	追加工事費用 (千円)	発生確率
①	5,000	0	5,000	1
②	3,450	750	5,000	0.6

なお、実際に追加調査を行った結果、CL級の岩盤が確認され、最終費用は追加調査分のみとなり、経済的で施工時点の手戻りのない設計を行うことができた。

このように、岩盤分類にその存在確率という属性を持たせることにより、追加調査位置の効果的な選定やその意義の定量化を可能とし、最小調査費用で、最大の経済的な効果をあげることができる(リスクの低減)可能性を示した。

2.2 金融工学的リスク評価の例

前章ではリスク=追加工事費用×発生確率とし、追加調査を行った場合のリスク(損失期待値)は3,450千円となっ

表-2 金融工学的リスクの算定 追加調査前

最良シナリオとは、追加調査を行いその結果岩盤が良好で置き換え範囲は拡大しなかった場合に相当し、発生確率は調査前のDM級でない確率=1-0.6=0.4である。一方最悪シナリオとは追加調査を行わないで現在の調査結果をもとに、置き換え範囲を拡大した場合で発生確率はDM級の存在確率=0.6ある。

シナリオ r		調査費用 (千円)	追加工事費用 (千円)	発生確率p	$p \cdot r^2$	$(p \cdot r)$	期待値 μ	標準偏差 σ
最良	750	750	0	0.4	225000	300	3,300	2,082
最悪	5,000	0	5,000	0.6	1500000	3000		

表-3 金融工学的リスクの算定 追加調査後

最良シナリオとは、追加調査を行いその結果岩盤が良好で置き換え範囲は拡大しなかった場合に相当し、発生確率は追加調査後のDM級でない確率=1.0-0.1=0.9となる。一方最悪シナリオとは追加調査を行い置き換えが必要ないと判断したが、実際に工事の時点で岩盤が不良となり結果的に置き換え範囲が拡大となった場合に相当し、発生確率は追加調査後に追加置き換え範囲がDM級である確率0.1を用いる。

シナリオ r		調査費用 (千円)	追加工事費用 (千円)	発生確率p	$p \cdot r^2$	$(p \cdot r)$	期待値 μ	標準偏差 σ
最良	750	750	0	0.9	506250	675	1,250	1,500
最悪	5,750	750	5,000	0.1	3306250	575		

た。しかし、このリスクの確からしさがどの程度のものであるかは、この式からだけではなかなか判断ができない。

本章では、リスクを金融工学で用いられる定義「リスク=期待値からの離れ量」に基づいて次のように定める。

$$\text{リスク} = \text{期待値の変動幅} \quad (2)$$

$$\text{期待値(リターン)} = \text{予想される追加工事費用} \quad (3)$$

金融工学的には、リスクとは期待値(リターン)からのはずれ量である。前章のモデルでは、予想される追加工事費の変動幅ととらえることができ、よりリスクが明確になるものと考えられる。

ここでは、先のモデルに対して、最良シナリオと最悪シナリオを想定し、それぞれの発生する確率を用いてリターン(追加工事費用)とリスク(変動幅)を算出する。

追加工事費用の期待値

$$\mu = P_1 \times R_1 + P_2 \times R_2 \quad (4)$$

リスク(標準偏差)

$$\sigma = \sqrt{(P_1 \times R_1 \times R_1) + (P_2 \times R_2 \times R_2) - \{ (P_1 \times R_1) + (P_2 \times R_2) \}^2} \quad (5)$$

P_1, P_2 ; 最悪および最良シナリオの発生する確率

R_1, R_2 ; 最悪および最良シナリオでの費用

上記式をモデルに適用した結果が表-2, 3である。

表-2は追加調査前のリスクとリターンの関係、表-3は追加調査後の関係を示す。この結果を縦軸にリスク、横軸にリターンをとって示したのが図-4である。図は金融工学の分野では一般にリスク平面と呼ばれているものであり、株価の変動などにたとえればプロット点が左下に行けば行くほどローリスク・ローリターン、右上に行くほどハイリスク・ハイリターンと言われるものである。ただし、本モデルでは、ローリターンは追加工事費の減少であり、事業者にとっての利益となることから、株価の変動とは感覚的に異なることに注意する必要がある。

この結果を見れば、追加調査を行った方が、よりリスク

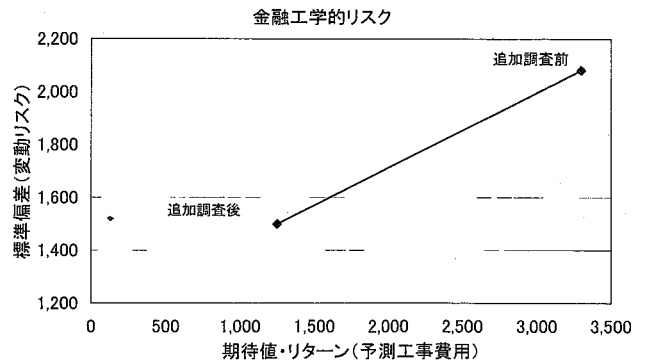


図-4 リスク平面

追加工事費用(リターン)とその変動幅(リスク)の関係を示す図。追加調査前は置き換え範囲の拡大の可能性が大きく、追加工事費(リターン)およびその変動幅(リスク)も大きい(ハイリスク・ハイリターン)、一方調査後は、置き換え範囲拡大の確率が低くなり追加工事費用とその変動幅も小さくなっている(ローリスク・ローリターン)

の少ない結果(期待値に対する変動幅が少ない)となることがわかる。すなわち、追加調査の実施によって予想される工事費とその変動幅が減少することになり、最小の費用で最大の効果を上げていることが定量的に示された。

3. リスクコミュニケーションの事例

3.1 リスクにおける階層性の認識

本項では、地盤汚染量調査を例にとり、調査手法の違いによるリスクのほかに、調査結果を基に汚染量を算出する計算上のリスクが発生することを示し、リスクには階層性があり、リスク評価をするうえでこの階層性についても理解する必要があることを指摘する。

著者らは、ある汚染現場においてメッシュ状にボーリング調査を行い汚染範囲を推定した場合と、ボーリング時にオンサイトで汚染量を測定し、調査精度の不確実性*を指標として汚染源を推定しながら調査を行った場合を比較した⁴⁾。その結果、図-5にあるように調査手法の違いによりその結果が大きく異なることが予想された。次に、3次元

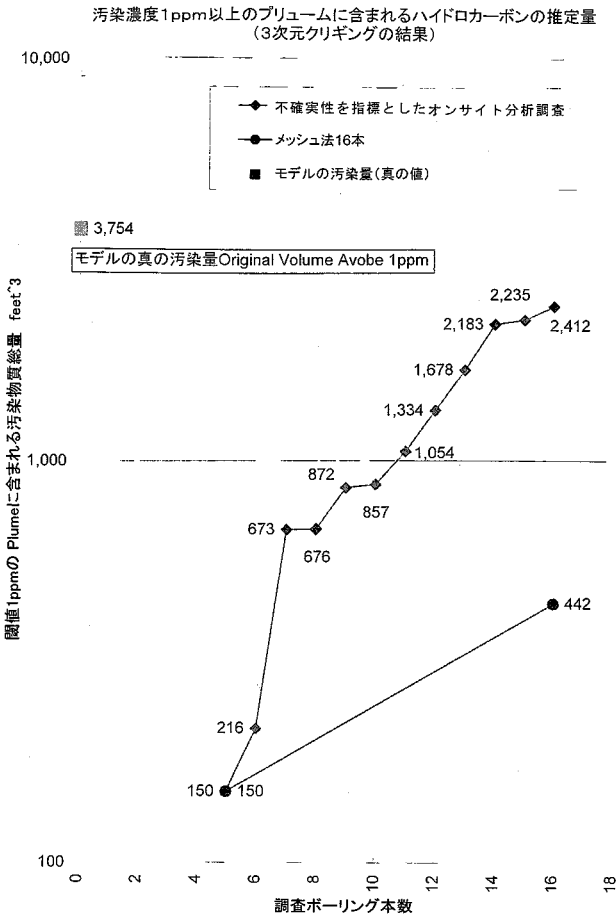


図-5 調査法の違いによる推定汚染量の相違
 1 ppm以上の濃度の汚染物質の総量を、100ft (30.5m)メッシュの16本のボーリングと、不確実性を指標としたオンサイト分析調査により推定した場合との違い。不確実性(uncertainty)は、クリギング手法によって推定された汚染地盤の濃度が高く、かつ、既存調査点から離れており、データの信頼度が低いことを数値化したもの。数値が高いと不確実性が高い(信頼性が低い)と定義される。

クリギングによる汚染量の推定方法によるリスクとして、汚染量推定値の最小値と最大値を算出し**、その振れ幅を図-6に示した。この結果、まず上位のリスクとして調査手法の違いによる調査リスクがあり、さらに下位のリスクとして、汚染量計算手法による解析上のリスクがあることが明らかとなった。

以上のように、リスク評価を開示するにあたってはその定義と使い方を明確にして説明し、一連の事業の中でどの段階でどのようなリスクが存在し、事業全体に与えるリスクの重要度をリスクの階層性を基に判断する必要があるも

*不確実性(uncertainty)：クリギング手法によって推定された汚染地盤の濃度が高くかつ、既存調査点から離れており、データの信頼度が低いことを数値化したもの。数値が高いと不確実性が高い(信頼性が低い)と定義される。
 **空間上の地点で計算した濃度の60%が設定した閾値以下である場合を非超過確率60%閾値、40%の場合を超過確率60%閾値と定義し、推定最大値および最小値とした。

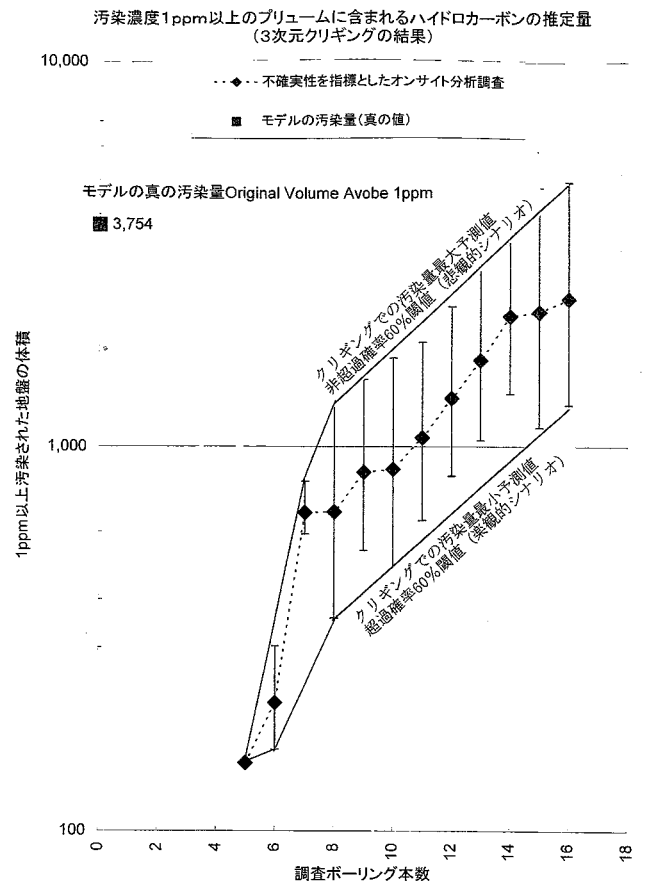


図-6 汚染量算出方法の違いによる推定汚染量の相違
 不確実性を指標としたオンサイト分析調査結果から1 ppm以上の汚染範囲を計算する手法において、クリギング手法により空間上の各地点で算出された濃度の60%が設定した閾値(この場合1 ppm)以下である場合を非超過確率60%閾値、40%の場合を超過確率60%閾値と定義し、推定最大値および最小値とした。すなわちクリギング手法により推定される最大汚染量と最小汚染量を表し、リスク工学的には前者を悲観シナリオ、後者を楽観シナリオととらえることができる。

のと考えられた。

3.2 リスクコミュニケーションの事例

著者の所属した委員会報告⁵⁾では、架空の地盤汚染現場を想定し、浄化対策を行った場合の金融工学的リスクの算出を行った(図-7)。汚染対策は、①「掘削除去」と②「原位置浄化」を想定し、それぞれにおける悲観的シナリオと楽観的シナリオを作成し、汚染量調査精度の違いを発生確率として費用期待値 μ と費用の変動幅 σ を算出し評価した。

その結果②「原位置浄化」は金融工学的にみるとハイリスク・ハイリターン型であり、①「掘削除去」よりもリスクが高く、事業主にとっては魅力の少ない工法であることがわかる。しかし、前項で述べたようなリスクを分析し、リスクの階層性でより上位の「調査方法の違いによるリスク」を低減することによって、図-7③「オンサイト調査による浄化」に示すような浄化費用とその変動幅の低減を実現し、掘削除去よりも魅力的な工法とする可能性もあると思われる。

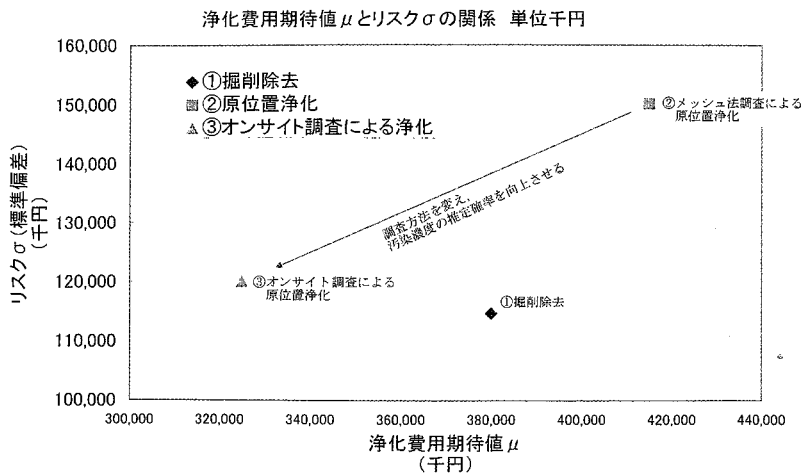


図-7 地盤汚染浄化事業におけるリスク平面

汚染現場の浄化費用(リターン)とその変動幅(リスク)の関係を示す図。メッシュ法による機械的な調査による原位置浄化対策は浄化費用(リターン)およびその変動幅(リスク)も大きい(ハイリスク・ハイリターン)、一方汚染濃度をオンサイトで計測して不確実性を指標にした調査に基づく浄化対策では、汚染範囲が的確に把握できるため浄化費用、とその変動幅も小さくなり(ローリスク・ローリターン)、掘削除去対策と比較できるまでになっている。

以上のように、汚染物質調査にリスク評価を適用することで、リスクの所在とその低減方法を特定するだけでなく、事業主とのリスクコミュニケーションにも活用できると考えられる。

4. ま と め

本稿では、建築物基礎地盤調査の事例において、土木工学的なリスク評価に加え、金融工学的なリスク評価の手法を紹介した。さらに、地盤汚染調査の事例で、リスクには階層性があり、この認識の上になってより上位の主要なリスクを特定し、その低減を図ることにより対策工法の評価が変わることを示し、事業主とのリスクコミュニケーションの一手段となることを示した。

リスク評価は今後ますます重要になってくると思われるが、大津¹⁾が指摘したように、土木工学や応用地質分野でリスクの概念を用いる場合も、最初に「誰にとってのリスクか」(リスクの主体)と、「リスクの算出方法」(リスクの定義)を明確にすることが必要であると思われる。また、本稿で扱ったようなリスクの定量化は対象事業を進めるうえで有益なものと思われるが、あくまで意志決定のための一つの手段であること、また、リスクは絶対不変の物ではなく、それぞれの事業段階や受益対象によって常に変化することを理解する必要のあるものと思われる。

引用文献

- 1) 大津宏泰(2004) : 5.ジオリスクエンジニアリング, リスク工学と地盤工学, 土と基礎, Vol. 52, No.7, pp.27-34.
- 2) Reed D. COPSEY (2005) : EVS and MVS Manuals Help and Tutorials version8.0 Workbook 10 Geostatistics in EVS/MVS,Ctech development. (http://www.ctech.com/publications/workbooks_and_help.htm参照)
- 3) 大津宏康・尾ノ井芳樹・大西有三・高橋徹・坪倉辰雄(2004) : 力学的地盤リスク要因による建設コスト変動の評価に関する研究, 土木学会論文集, No.756/VI-62, pp.117-129.
- 4) 林義隆・太田英将・國眼定(2003) : 3次元空間解析による汚染地盤の調査数量と汚染量の信頼性について, 地盤の環境計測技術に関するシンポジウム講演資料, 地盤工学会関西支部. (<http://www.ohta-geo.co.jp/x/hayashi/>参照)
- 5) 楠見晴重・地盤汚染の環境評価および拡散防止技術に関する研究委員会(2006) : 地盤汚染のリスク評価および調査対策, 第1章, (社)地盤工学会関西支部, pp.3-47.

(2007年8月2日受付, 2007年11月9日受理)

Risk Analysis of Geologic Survey using 3 Dimensional Modeling

Yoshitaka HAYASHI and Hidemasa OHTA

Abstract

Geologic Model is used to make by engineers on his own carriers based on Geologic principles. On the other hand, 3D automatic geologic modeling softwares are dramatically developed in recent years. The softwares directly generate geologic boundary or rock classification in three dimensional fields from borehole logs that have been classified by engineers. More over, some of them have GEO-STATISTIC features which indicate statistical probability or uncertainty. Authors present three case studies, 1.Risk analysis on geologic survey, 2. Hierarchy on risk and 3.Risk communication, by using these GEO-STATISTIC features.

Key words : risk, uncertainty, kriging, boring survey