

金融工学理論に基づく地盤リスク評価に関する一考察

大津宏康¹・尾ノ井芳樹²・大西有三³・李圭太⁴

¹正会員 博士（工学） 京都大学大学院 助教授 工学研究科（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

²正会員 工学士 電源開発株式会社 新事業戦略室（〒104-8165 東京都中央区銀座六丁目15-1）

³正会員 工博 Ph.D. 京都大学大学院 教授 工学研究科（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

⁴工修 建設技術研究所 大阪支店環境都市部（〒540-0008 大阪市中央区大手前1-2-15）

本研究の目的は、金融工学理論に基づき、従来の地盤リスクに関する対応策について、簡易な数学モデルを用いて解説を加えると共に、地盤リスクが建設コストに及ぼす影響を評価する方法論について検討を加えるものである。具体的には、従来の数量精算を基本として地盤リスク対応は、公共事業数が多い場合には、広義のポートフォリオ理論に準ずるものと解釈できることを明らかにした。しかし、今後の公共事業の動向を踏まえた場合には、新たな検討方法として、リスク期待値平面を用いた地盤リスクの建設コストに及ぼす影響を評価する方法が有効であることを提案する共に、その方法に基づき、実際の地盤構造物の建設プロジェクトでの、地盤リスクが建設コストに及ぼす影響を評価した事例について示した。

Key Words : geotechnical risk, finance engineering, contract administration, geo-statistics theory, port folio theory

1. はじめに

建設プロジェクトには、本質的に建設コストに影響を与える様々なリスク要因が含まれていることは、これまでにも多くの研究により指摘されている^{1), 2)}。その様々なリスク要因の中で、地下工事を含む建設プロジェクトにおいては、地下の地盤・岩盤の幾何学的および力学的条件の不確実性に起因するリスク（以下地盤リスクと称する）は事前に予測することが困難であるため、その建設コストおよび建設工期に影響を及ぼす重要なリスク要因の一つである。しかし、この地盤リスクについては、筆者ら^{3), 4)}がこれまでの研究において指摘して来たように、従来の日本での建設契約では、地盤リスクによる変動は原則的にはディープポケットを持つ公共団体等の発注者により負担され、請負者のリスク分担が基本的には回避されてきた。このような対応の下では、発注者および請負者のいずれにも設計条件に含まれる地盤リスクに対する基本概念が、構築されにくかったといえよう。

しかし、近年の国民の資産（アセット）となる社会基盤整備を取り巻く環境は厳しさを増しており、建設コストの精度あるいは妥当性に関する議論は、これま

で以上に重要となる。さらに、設計・施工一括方式、PFI 方式等の新たな調達方式の導入は、本質的に建設プロジェクトでの発注者と請負者間のリスク分担ルールに変化をもたらすこととなる。このような状況の下で、地盤リスクに対する基本概念を構築することは、極めて重要な検討課題といえよう。

ここで、昨今様々な分野でリスクという用語が用いられると共に、リスク工学という概念が注目されている。このリスク工学に関して、リスクを計量化するための基礎理論となるものが、金融工学であると推察される。なお、金融工学とは、ボラティリティー（将来的な不確実性）の高い金融の分野で、投資家が「at your own risk」で投資に対する損失を、数学的根拠に基づき出来るだけ小さくすること（リスクヘッジ）を目的とした理論と位置付けられる。具体的には、マコーピツのポートフォリオ理論⁵⁾に端を発し、その理論を拡張した β -CAPM モデル⁶⁾および、金融オプション理論⁷⁾と複合したブラック・ショールズモデル⁸⁾等が提案されており、これらの理論は現状での金融分野の中核をなすものとなっている。

このような観点から、本研究では、これまでに充分には基本概念が構築されていない地盤リスクの評価・

対応に関して、金融工学理論を援用し体系化することを試みる。この試みは、PFIによるインフラストラクチャーの調達方式の導入に伴い、工学を専門としない投資家あるいは金融関係者（銀行・保険会社）等の参画が予想される中で、非エンジニアとのリスクコミュニケーションを図る上でも極めて有効である。

以上のような背景から、本研究においては、金融工学理論に基づき、従来の地盤リスクに関する対応策について、簡易な数学モデルを用いて解説を加えると共に、地盤リスクの建設コストに及ぼす影響を評価する方法論を提案する。さらに、その方法論に基づき、実際の地盤構造物の建設プロジェクトでの、その地盤リスクが建設コストに及ぼす影響を評価した事例についても示すものとする。

2. 簡易な数学モデルを用いた地盤リスク対応に関する検討

(1) 現状での地盤リスク対応に関する考察

本節では、従来の地盤リスクに対する、それぞれ発注者および請負者の立場からの、現状での対応策およびその課題について、筆者らが提案する簡易な数学モデル⁹⁾を用いて解説を加える。

まず、建設請負契約が成立した時点での建設プロジェクトでの、そのプロジェクトを実施することにより、発注者が建設により受ける便益 B_O および、請負者の利益 B_C は、それぞれ次式に示すように定義される。

$$B_O = V - (C_p + I_O) \quad (1)$$

$$B_C = C_p - (C + I_C) \quad (2)$$

ここに、式(1)～式(2)に含まれ各変数は、それぞれ以下のように定義される。

- ・ V は建設プロジェクトを実施することにより得られる効用を貨幣価値で表した社会的便益を表す。なお、この変数は F/S 段階で当該建設プロジェクトの妥当性を判定する指標となる、内部収益率 IRR (Internal Rate of Return) を算定するための基礎データとなるものである。

- ・ C_p は、発注者と請負者の間で締結される建設プロジェクトの請負契約金額を表す。

- ・ I_O は、建設請負契約金額を除く、地盤調査費および土地取得費等の当該プロジェクトのためのみに必要

となる発注者の支出額を表す。

- ・ C は、請負者が当該プロジェクトを遂行するために要する建設コストを表す。

- ・ I_C は、入札準備費等の当該プロジェクトのためのみに必要となる請負者の支出額を表す。

なお、上記の変数の内、請負者の要する建設コスト C は、本研究での主眼とする地盤リスク等の影響を受けるため、小林ら¹⁰⁾が指摘しているように、請負契約成立段階では不確定量であるとともに、本来発注者と締結される請負契約に基づき算定されるものであるため、請負契約金額 C_p と連動するものである。

ここで、建設プロジェクトの実施に伴い、地盤リスクにより、請負者の負担する建設コストが ΔC だけ増加し、それに伴い請負価格が ΔC_p だけ変動したと仮定する。

上記の仮定条件の下で、発注者の得る便益 B_O および請負者の得る利益 B_C は、それぞれ次式のように変動する。

$$B_O = V - (C_p + \Delta C_p) - I_O \quad (3)$$

$$B_C = C_p + \Delta C_p - (C + \Delta C) - I_C \quad (4)$$

以上の式(3)～式(4)に示す関係で、注意すべき事項は、式(3)に示した発注者の得る便益 B_O は、地盤リスクにより自動的に減少するのに対して、請負者の得る利益 B_C は、建設コストの変動額 ΔC と請負価格の変動額 ΔC_p の大小関係により異なる可能性があることである。例えば、 $\Delta C = \Delta C_p$ の場合には、請負者は全く損失を被らないことになり、また $\Delta C > \Delta C_p$ の場合には、請負者は建設条件の変化に対する設計変更により損失を被ることになる。

建設コストの変動額 ΔC は、本来請負価格の変動額 ΔC_p に連動するものであり、一般的には工事単価数量表 (Bills of Quantities, 以下 BOQ と称する) に基づき数量精算されるものであるが、議論を単純化すれば建設コストの変動額 ΔC と請負価格の変動額 ΔC_p の間に、以下の関係が成立するものと解釈される。

$$\Delta C_p = \alpha \cdot \Delta C \quad (5)$$

ここに、係数 α は 0 から 1 の間の値となるものであり、建設コストの変動額 ΔC に対する発注者の平均的リスク分配率に相当するものと解釈される。

なお、筆者ら^{3), 4)}が指摘してきたように、FIDIC silver¹⁰⁾のようなEPC／ターンキー契約を除き、地盤リスクに対しては一般的には式(5)に含まれる係数 α^* はほぼ1に相当すると解釈される。すなわち、建設コストの増分 ΔC は、請負価格の増分 ΔC_p とほぼ等しくなり、1.において述べたように、そのコスト変動は発注者によって負担され、請負者のリスク分担は基本的には回避されることになる。なお、EPC／ターンキー契約の下では、係数 α^* はほぼ0に相当する値となると解釈されるため、建設コストの増分 ΔC は請負者のリスク分担となることはいうまでもない。

次に、上述の発注者によって負担される地盤リスクによるコスト変動について考察する。このコスト変動を低減させる方策としては、様々なものが想定されるが、代表的な方策は追加調査を実施することにより、地盤条件の不確定性を減少されることであろう。この追加調査を設計段階で実施する場合には、式(3)に示した発注者の得る便益 B_O は、次式のように変化すると解釈される。

$$B_O = V - (C_p + \Delta C_p^*) - I_O - \Delta I_G \quad (6)$$

ここに、 ΔC_p^* は地盤リスクに起因する請負価格の変動額、 ΔI_G は追加調査費用を表わす。なお、この場合での請負価格の変動額 ΔC_p^* は、式(3)との比較において、追加調査が地盤条件の不確定性を減少することに寄与するものと仮定すれば、以下の関係式を満足するものと解釈される。

$$\Delta C_p^* < \Delta C_p \quad (7)$$

したがって、式(7)の右辺と左辺の差 ($\Delta C_p - \Delta C_p^*$) が、追加調査費用 ΔI_G の投資効果に相当する。

ただし、建設コストの変動額 ΔC は請負者のみが知り得る情報であり、発注者には知り得ないものである。このため、現状では、式(6)～式(7)に示すような追加調査と地盤リスクに起因するコスト変動との関係については、定性的には理解されているが、定量的な議論はほとんどなされていない。

しかし、地盤リスクのように予測不可能と考えられるリスク要因に対しては、前述のように従来の建設契約では変動額 ΔC のほとんどは、式(6)の関係式に示すように ΔC_p^* として請負額の変動として分担されるものである。したがって、今後建設コストの妥当性を議論するためには、請負契約金額 C_p も変動する値と捉え

と共に、その変動量 ΔC_p と追加調査費用 ΔI_G との関係についても議論することが必要となる。

このような観点から、次節では金融工学理論の一つであるポートフォリオ理論を援用し、請負契約金額の変動量と追加調査費用の関係について考察を加える。

(2) ポートフォリオ理論に基づく従来の地盤リスク対応に関する考察

本節では、金融工学理論におけるリスクの定義を述べると共に、従来の建設プロジェクトにおける地盤リスク対応について、ポートフォリオ理論に基づき考察を加える。

a) リスクの定義

まず、以下に従来の地盤リスク対応に関して議論するため、リスクについて定義する。

従来工学分野では、古典的な工学分野でのリスクの定義に基づき、リスクは次式に示す期待値として定義されることが一般的であった¹²⁾。

$$R = P \times C \quad (8)$$

ここで、 R はリスク、 P は発生確率、 C は帰結を表わす。

一方、金融工学分野では、リスクは式(8)に示す期待値からのはずれ量として定義されることが一般的である。具体的には、確率分布を表わす指標である標準偏差 σ （分散 σ^2 ）、VaR¹³⁾（バリューアットリスク）等が用いられる。

例えば、図-1(a)に示すように、2つの金融商品 X_1 および X_2 の予測価格の分布が、それぞれ $N(\mu_1, \sigma_1)$ および $N(\mu_2, \sigma_2)$ の正規分布に従うと仮定する。この場合での、リスクを標準偏差と設定すれば、2つの金融商品 X_1 および X_2 は、図-1(b)に示すように、リスクー期待値平面上での2点として表示される。なお、金融工学分野では、期待値はリターンと呼ばれるものである。したがって、図-1(b)に示す事例では、金融商品 X_1 は、ローリスク・ローリターンな商品、一方金融商品 X_2 は、ハイリスク・ハイリターンな商品と解釈される。

本研究では、地盤リスクに関する建設コストの変動についても、金融工学分野の定義に順ずるものとする。すなわち、請負契約金額 C_p が期待値、また地盤リスクに起因する変動量 ΔC_p がリスクに準ずるものと定義する。この定義の下で検討すべき手順は、地盤条件に含まれる不確実性を確率モデル等の数学モデルを用いて表現し、そのモデルに基づき、建設コストの期待値周りの変動を確率量として算定することに帰着する。

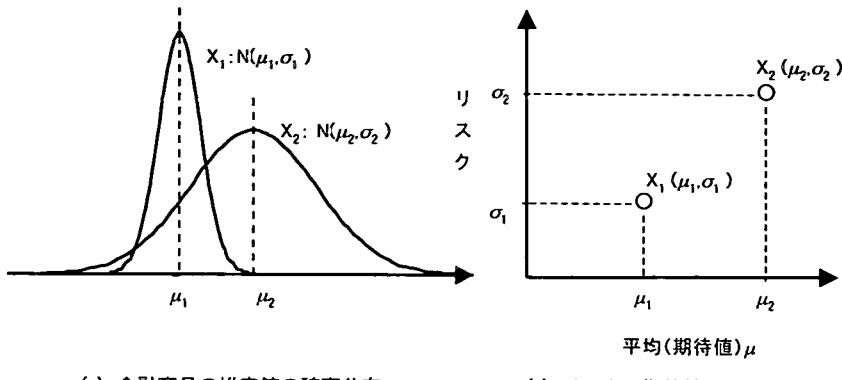


図-1 金融工学分野におけるリスクの表示

b) ポートフォリオ理論との関連性

ポートフォリオとは、金融工学分野で様々な株式に分散投資する事で、期待収益に対するリスク最小化を図ることを意味する用語として用いられる。数学的には、リターン一定の下でのリスク最小化問題と定義されるため、以下のように定式化される¹³⁾。

$$\min \sigma^2(s_1, s_2, \dots, s_n) = \min \sum \sum s_i s_j \text{Cov}(\xi_i, \xi_j) \quad (9)$$

$$\mu_p = \sum \mu_i s_i \quad (10)$$

ここに、 (s_1, s_2, \dots, s_n) は各資産の資産比率、 $\sigma^2(s_1, s_2, \dots, s_n)$ はポートフォリオ (s_1, s_2, \dots, s_n) の収益率分布に関する分散、 μ_i は資産*i*の期待収益率、 μ_p はポートフォリオの期待収益率、 $\text{Cov}(\xi_i, \xi_j)$ は2つの資産*i*と資産*j*の間での収益率の共分散を表わす。

ここで、上記の理論に関する議論を簡素化するため、2つの資産を対象とした場合のポートフォリオ理論に基づくリスク分析について、以下に概説する。

まず、2つの資産 X_1, X_2 の変動特性が、それぞれ以下に示すような平均 μ 、標準偏差 σ を有する正規分布をするものと仮定する。

- ・ 資産 X_1 の分布特性： $N(\mu_1, \sigma_1)$
- ・ 資産 X_2 の分布特性： $N(\mu_2, \sigma_2)$

ここで、2つの資産によりポートフォリオを形成する場合での資産の組合せ比率 $(1-\alpha, \alpha)$ とすると、そのポートフォリオの平均 μ_p および分散 σ_p^2 は、それぞれ次式のように表わされる。

$$\mu_p = (1-\alpha)\mu_1 + \alpha\mu_2 \quad (11)$$

$$\sigma_p^2 = (1-\alpha)^2 \sigma_1^2 + \alpha^2 \sigma_2^2 + 2\rho\alpha(1-\alpha)\sigma_1\sigma_2 \quad (12)$$

ここに、 ρ は2つの資産間の変動に関する相関係数を表し、-1から+1の間の値となる。

式(11)および式(12)に示す関係式において、4つの相関係数 $\rho = -1.0, -0.5, 0.0, 0.5, 1.0$ に対して、それぞれ組合せ比率 α を0から1まで変化させた場合の、ポートフォリオのリターンとリスクの関係は、図-2の模式図のように表される。なお、図-2に示した関係において、図中のABより下の領域は、式(11)および式(12)に示す関係より理論的には算定されるものであるが、同じリスクに対して小さいリターンを与えるものとなるため、実際の投資では意味の無いものである。

図-2に示すポートフォリオのリターン-リスク関係は、以下のように要約される。

- 1) 2つの資産間の相関係数 ρ が減少するに連れて、リターンとリスクの関係は変化する。
- 2) 所定のリターン μ_{p1} を設定した場合に、相関係数 ρ が小さい資産を組み合わせることにより、図中の $(\sigma_{p1})_0$ から $(\sigma_{p1})_4$ の関係に見られるようにリスクは減少する。つまり、この関係が、投資を分散させることで、危険分散を図ることに相当する。
- 3) 期待するリターンを μ_{p1} から μ_{p2} に上昇されると、図中の $(\sigma_{p2})_i$ と $(\sigma_{p2})_j$ の関係に認められるように、いずれの相関係数 ρ の場合にもリスクは増加する。つまり、この関係は、投資における、ハイリスク・ハイリターン、ローリスク・ローリターンの関係を表わすことに相当する。

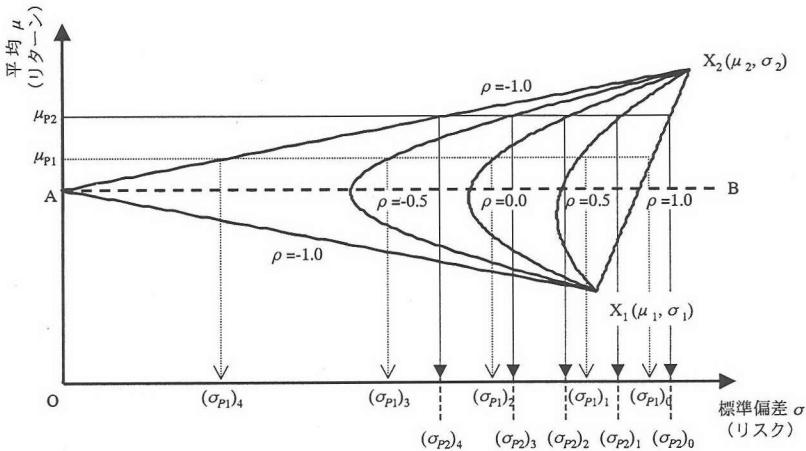


図-2 2つの資産に対するポートフォリオの変動特性（模式図）

以上の結果より、ポートフォリオにおいて最も重要な事項は、投資家がどのように「所定のリターンレベル」を設定するかに加えて、「組み合わせる資産間の相関性を」どのように評価するかという課題に集約されることが明らかとなる。

以上の議論は、2つの資産に対するものであり、次に式(9)および式(10)に示すように、多数の資産を組み合わせた場合に、ポートフォリオのリスクがどのように変化するかについて解説を加える。この資産数とリスクの関係は、図-3に示す模式図を用いて、以下のように説明される。すなわち、図-2の模式図に示したように、2つの資産を組み合わせることで、そのポートフォリオのリスクは、資産間の変動が完全相関でない限りは、単一資産が有するリスク（以下 Unique Risk と称す）よりも低減される。同様の数学的根拠により、様々な資産を組み合わせることにより、図-3に示すようにポートフォリオのリスクは更に低減し、ある一定値に収束する。この収束値は、金融市場全体が有するリスク（以下 Systematic Risk と称す）に相当するものである。なお、ここで留意すべきことは、図-2に関する説明で述べたように、図-3に示す関係は資産間の相関関係（式(10)での共分散 $\text{Cov}(\mu_1, \mu_2)$ の項と等価）が、無相関である場合にも成立つことである。

次に、従来の建設プロジェクトにおける地盤リスク対応と、上述のポートフォリオ理論との関連性について以下に述べる。

まず、図-3に示すように、金融資産の数を公共団体等の発注者が同時に保有する建設プロジェクトの数と置き換るものとする。この場合には、発注者が保有する建設プロジェクト毎に、図-3の説明で述べた

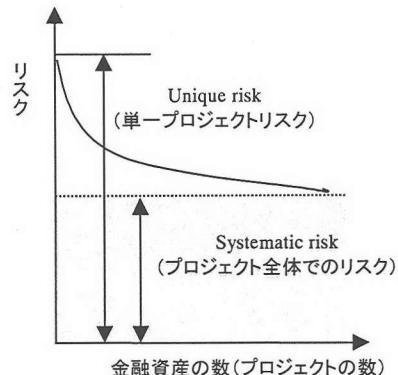


図-3 プロジェクト数とリスクの関係（模式図）¹⁴⁾

注) 参考文献 14) に加筆修正

各資産と同様に、それぞれ異なる期待値（請負契約金額）とリスクを有しているものと解釈される。なお、ここでの個々のリスクとは、具体的にはトンネル工、斜面工、橋梁基礎工等の工法あるいは、プロジェクトが実施される地域毎に、想定される不確実性の度合（式(12)における σ_i に相当）が異なることを意味する。また、ポートフォリオでの各資産に対する投資比率は、プロジェクト毎の請負金と、その発注者の全請負金額に占める比率に相当する。

このような仮定条件の下では、従来のように一つの発注者が、多くの建設プロジェクトを同時に実施する場合には、図-3に示すように発注者が被るプロジェクト全体でのリスクは、プロジェクト数の増加に伴い低減されて、結果的にはポートフォリオ理論での収束値となる Systematic Risk に相当していたものと解釈さ

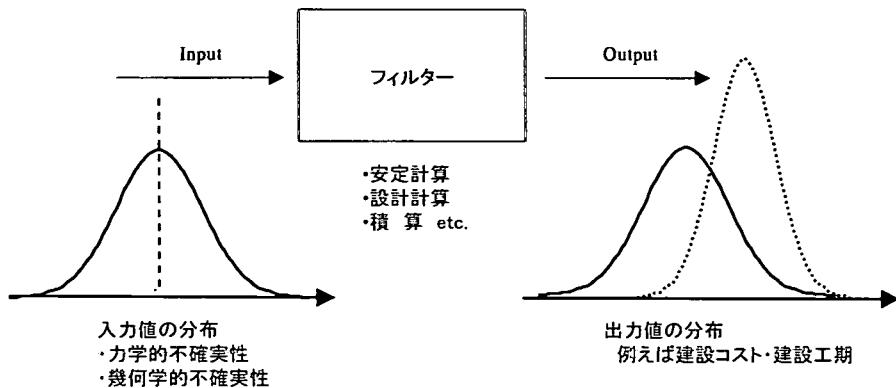


図-4 地盤リスクに起因する変動の評価方法（模式図）

れる。すなわち、このような条件の下では、地盤リスク対応として数量精算を実施することが一種の最適手法となり、式(6)に示した発注者の出費増となる追加的地質調査を行うインセンティブは発生しなくなる。

これに対して、PFI方式でのオーナー会社は Single Purpose Company と呼ばれるように単一プロジェクトを扱うことあるいは、今後公共団体等が発注するプロジェクト数が減少することを想定すれば、地盤リスクを有するプロジェクトでは、従来と異なり図-3に示す Unique Risk に曝される危険性が高くなる。このため、式(6)に示したような、追加的地質調査を実施することによるリスク低減の投資対効果について議論することの重要性が高くなるものと考えられる。

以上の議論において示したように、従来の数量精算を主体とした地盤リスク対応は、公共事業数が多い場合には、広義のポートフォリオ理論に準ずるものと解釈できることを明らかにした。なお、ポートフォリオ理論は資産価格の変動間の相関特性に基づき構築されたものである。これに対して、各建設プロジェクト間の建設コストに関する相関特性について明確には算定することは困難であるが、建設プロジェクト数が減少することにより、Unique Risk に曝される危険性が高まるという基本的な枠組みを理解する上では有効であると推察される。

3. 金融工学理論に基づく地盤リスクの建設コストに及ぼす影響の評価についての提案

本章では、2. に述べた金融工学理論に基づき、地盤リスクが建設コストに及ぼす影響を評価する手法について提案するものとする。

(1) 基本概念

2. において述べたように、金融工学理論でのリスクの定義に準じた場合には、検討すべき事項について確率モデルを用いて表現し、その分布での期待値（平均）からはずれる量を議論することとなる。この基本概念に準すれば、地盤リスクに起因する変動の評価方法は、図-4 の模式図に示すように、地盤リスクとして幾何学的・力学的な不確実性を表現した数学モデルを入力値とし、安定計算および積算等に相当する物理フィルターを通して、出力側の建設コストの分布を算定することとなる。また、この結果として、リスクを計量化する指標として、標準偏差（あるいは VaR）を用いたとすれば、入力値である地盤リスクに対する出力値となる建設コストのリスクを議論することが可能となる。なお、図-4 では議論を明確にするために、地盤リスクおよび建設コストの分布を正規分布モデルとして例示している。もちろん、実際にはこれらの変数の分布はより複雑なものになると推定されるが、調査段階で推定されるリスクを定量化する方策に関する、ここでの議論の基本思想は適用できると考えられる。

ここで、式(3)および式(4)に示す請負価格の変動額 ΔC_p を、この出力値のリスクとして設定することにより、発注者の建設プロジェクトでのコストオーバーランに対する、地盤リスクに起因する建設コストの Contingency（偶発的な要因によるコスト変動、以下予備費と称する）を定量的に把握することも可能となる。

なお、現状の日本の建設分野では、建設プロジェクトにおいて、発注者自身が予備費を計上するという考え方方は、公共工事に対する会計法上の課題もあり、あまり一般的ではないといえる。しかし、多くのリスク要因を多く含むことが知られている開発途上国建設プ

プロジェクトへの ODA 融資では、Contingency への対応としての予備費が計上されている¹⁹⁾。このように、非エンジニアである金融関係者（銀行・保険会社）と、建設プロジェクトに関するリスクコミュニケーションを図る上では、発注者自体が予備費について検討するという考え方は不可欠である。したがって、2. で述べたように、金融関係者（銀行・保険会社）のプロジェクトへの参画が不可欠となる PFI 方式のプロジェクトでは、そのコストオーバーランへの対応として、事業予算に予備費を計上することの必要性が高くなるものと推察される。また、その他の調達方式を用いた場合においても、今後建設プロジェクト数が減少することにより、Unique Risk に曝される危険性が高まる状況の下では、予備費に対する認識が必要となることは同様であると推察される。

(2) 地盤リスクの影響評価方法

(1) において述べたように、建設コストの期待値周りのばらつきが算定されたとした場合に、その評価結果は図-5 に示すように模式的に表現される。

同図に示すように、地盤条件に含まれる不確実性を考慮した場合には、適用する工法によって異なる建設コストの分布量は、リスク（標準偏差 σ あるいは VaR）－期待値平面にプロットすることが可能となる。例えば、図-5 に示す A 工法および B 工法を、それぞれシールド工法および都市 NATM とすれば、その意味が理解しやすいであろう。すなわち、シールド工法を適用した場合には、期待値は都市 NATM に比較して大きいがそのリスクは小さい。逆に、都市 NATM を適用した場合には、期待値は小さいが、地山条件が想定したものより悪い場合には多大な補助工法に対する金額増となるため、その想定されるリスクは大きくなるはずである。これに対して、従来の建設コストについての議論は、調査結果より設定される地盤条件を確定量としていることから、図-5 のリスク－期待値平面においては、リスクを考慮しない期待値のみを対象としたものであったことが明らかとなるであろう。このため、建設コストを期待値（請負契約金額）と予備費の和として評価するという概念が、形成されなかつたといえよう。

また、図-5 に併記したベクトルは、式(6)に示した追加調査費用 ΔI_G の投資効果について模式的に示したものである。すなわち、このベクトルの水平方向成分および鉛直方向成分は、それぞれ追加調査費用 ΔI_G および、追加調査を実施して得られた情報を得ることによるリスクの低減量に相当する。このように、図-4 に示した手順により、図-5 に示すリスク－期待値平

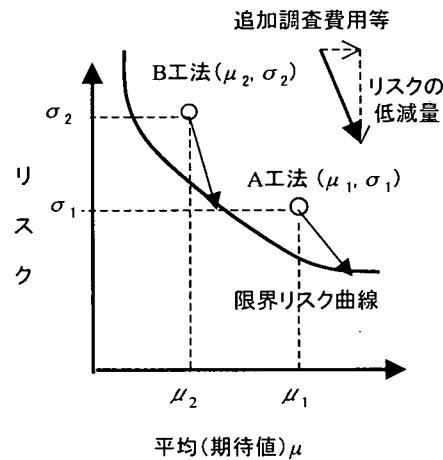


図-5 地盤リスク評価の模式図

面を用いることで、式(6)～式(7)に示した地盤リスク評価を基本とした、そのコスト変動の妥当性に関する定量的な検討が可能となる。

したがって、今後プロジェクトの遂行状況が、全体のプロジェクト数が減少することに伴い、発注者がプロジェクトの Unique Risk に曝される危険性が高まることが予想される中で、本節で提案する調査工事の妥当性を含め地盤リスクに起因するコスト変動について、総合的に評価する手法の有効性は極めて高いと推察される。

4. 試算結果および考察

3. において述べた、地盤リスクに起因するコスト変動について、リスク－期待値平面において議論することの基本条件は、入力値となる地盤条件に含まれる不確実性を確率モデルにより表現することになる。ただし、従来より地盤リスクについて、その不確実性をモデル化することは困難であると解釈され、そのモデル化について充分な議論がなされてきたとはいがたい。しかし、Einstein¹⁹⁾はトンネルの地質条件の不確実性が、建設コストおよび建設工期に及ぼす変動について議論することの重要性を唱えている。また、近藤¹⁷⁾は実際の施工事例を用いて、その事後評価結果を用いて、地質調査結果において一義的に解を求めるることは困難であり、その不確実性に対応するために、複数のシナリオを準備することの必要性を唱えている。このような観点から、地盤リスクをモデル化する必要性は高まりつつあると推察される。ただし、本研究で提唱する金融工学に基づき地盤リスクをモデル化するため

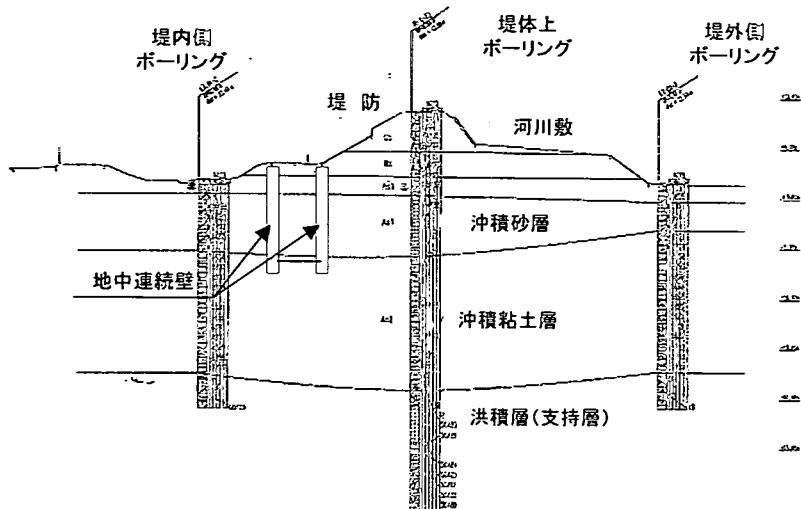


図-6 解析事例（河川堤防基礎地盤）

には、統計・確率等の数学的モデルを援用することが不可欠となる。しかし、一般的には、地盤リスクに関して得られる情報は、数が限定されている上に、その評価値が不連続量として取り扱われるため、連続性および統計的均一性が保証されない場合がほとんどである。例えば、トンネル・ダム等の岩盤構造物の設計を対象とした場合には、限定された数のボーリングデータに基づき、岩盤等級がC_H級・C_L級等の不連続量として与えられるのみであるため、統計・確率モデルを直接適用することは困難であると解釈される。このような複雑な地山条件を定量的にモデル化する方法としては、点情報として与えられるボーリング結果に対して、RMRあるいはQ値¹⁸⁾等の数値データを空間的に補完することで連続量とした検討を加える方法等も想定されるが、これらは今後の検討課題とする。

これに対して、平野部の沖積層あるいは、洪積層については、その幾何学的条件および力学的条件については、統計的に取り扱える可能性がある。このため、本研究では、平野部の沖積層あるいは洪積層を対象として、数学的モデルを援用して地盤リスクを評価することの適用性について検討を加えるものとする。

この地盤条件に含まれる不確実性をモデル化する手法としては、様々な方法が想定されるが、本研究では、地盤リスクを評価するための一手法として、地盤統計学の一つであるクリジング手法¹⁹⁾を適用し、その結果に基づき建設コストの変動に加えて、調査工事の妥当性についても評価した結果について示す。

(1) 解析条件

クリジング手法に基づき、建設コストの変動を評価

する事例として、図-6 に示す大阪湾河口付近の河川堤防基礎地盤を取り上げる²⁰⁾。同図に示すように、基礎地盤は、洪積層および沖積層（砂層・粘土層）から構成されている。この内、沖積砂層は、液状化に可能性があるゆるい砂であり、沖積粘土層は、大きな沈下・側方流動を生じる危険性のある軟弱粘土である。

ここで、この地点に図-6 に併記したように、堤体軸に沿って壁体の根入れ部を沖積粘土層とする、地中連続壁を施工するものと仮定する。この基本設計では、本来沖積砂層・沖積粘土層の強度特性に加えて、沖積粘土層の深度等の幾何学的特性が重要な検討項目となるが、本検討では、地中連続壁の数量を概略積算することを目的とし、沖積粘土層上面の幾何学的特性の不確実性のみに着目する。

この検討条件において、図-4 に示す地盤リスクの影響評価モデルに準拠すれば、入力値となるものは沖積粘土層の深度であり、出力値となるものは地中連続壁の数量である。このため、入力値となる沖積粘土層の深度に関する不確実性の分布については、ボーリングデータに基づくクリジング解析結果から算定される最尤推定値と、その推定値周りの推定誤差標準偏差を用いて評価する。また、出力値となる地中連続壁の数量については、地中連続壁の寸法にある設計条件を設定し、沖積粘土層深度が変動幅を有する場合に、その設計条件を満足する状況での概算積算の変動幅を評価する。

なお、この事例では、実際には河川堤防に沿って、平均間隔約200mでボーリング調査が実施されている。このため、平均間隔約200mのボーリング調査結果を用いてクリジング手法を適用し、地中連続壁の数量の

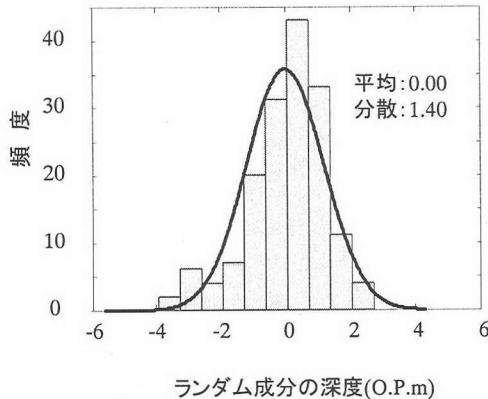


図-7 沖積粘土層深度のランダム成分のヒストグラム
(平均ボーリング間隔約 200m)

変動を推定する。さらに、平均間隔約200mよりボーリング間隔が粗い場合についても同様の検討を実施し、幾何学的パラメータのみに着目した場合の、精度の高い地盤調査を実施することの投資対効果についても検討を加えるものとする。

(2) 解析手法

沖積粘土層の深度をクリジング手法により推定するために、沖積粘土層の深度の推定値 $z(x)$ を、次式に示すようにトレンド成分 $\mu(x)$ とランダム成分 $\varepsilon(x)$ の和として表わす。

$$z(x) = \mu(x) + \varepsilon(x) \quad (13)$$

ここに、 x は推定値の位置ベクトルを表わす。トレンド成分 $\mu(x)$ は、既往のボーリング結果に対して最小自乗法に基づき算定されるものである。また、ランダム成分 $\varepsilon(x)$ は、平均値 0 の共分散関数を表わす。

次に、ランダム成分の空間的分布特性について検討するために、対象とする計測値に対して 2 次のモーメントまでの定常性を仮定し、次式に示すセミバリオグラム $\gamma(h)$ を算定する。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E\{\varepsilon(x+h) - \varepsilon(x)\}^2 \quad (14)$$

ここで、 $E\{\cdot\}$ は期待値を表す記号である。

なお、式(14)に示すセミバリオグラム $\gamma(h)$ の関数形としては、指數関數、球関數及び線形関數等の様々な関數形が提案されており、その計測結果に対する関數近似の最適化手法としては、最尤法、赤池情報基準

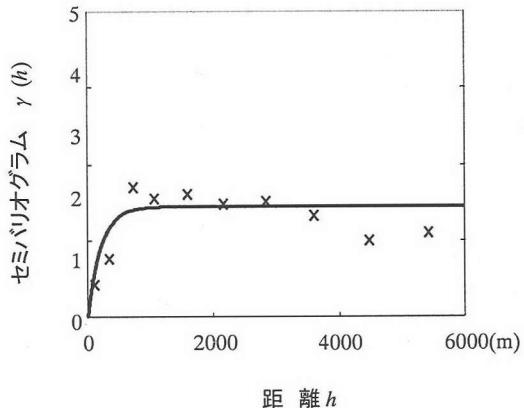


図-8 沖積粘土層深度のランダム成分のセミバリオグラム
(平均ボーリング間隔約 200m)

AIC を用いた方法あるいは、非線形最小自乗法等が適用される。また、本検討では式(14)に示すこのセミバリオグラムの関数形としては、次式に示す指數関數と仮定する。

$$\gamma(h) = C \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}}{a} \right) \right\} \quad (15)$$

ここに、係数 C および a は、本研究ではボーリング結果を式(14)に代入し、その結果に対して非線形最小自乗法を用いて算定する。

以上の解析条件の下で、沖積粘土層深度に対するクリジング解析を実施し、沖積粘土層深度の最尤推定値および推定誤差標準偏差を算定する。この具体的な手順については、参考文献 4)および 20)を参照されたい。

ここで、本研究においてクリジング手法を適用する沖積粘土層の深度のランダム成分に関する、統計的分布特性について検討を加える。まず、平均ボーリング間隔約 200m の場合でのランダム成分のヒストグラムを図-7 に示す。同図に示すように、ランダム成分はほぼ正規分布に従うことおよび、その標準偏差（分散）が比較的小さいことが明らかとなる。また、本事例での、平均ボーリング間隔約 200m でのランダム成分についてのセミバリオグラム $\gamma(h)$ の算定結果は、図-8 に示すように、ほぼ仮定した指數関數に従うことが明らかとなる。なお、ここでは平均ボーリング間隔約 200m の場合のみを示したが、平均ボーリング間隔約 800m についても、ほぼ同様な特性が得られている。

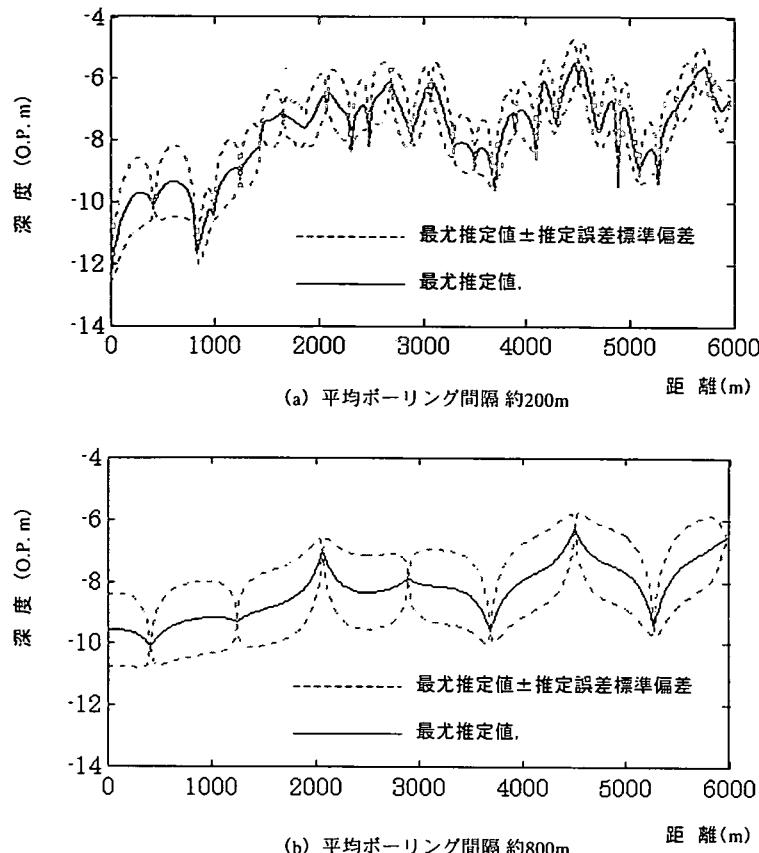


図-9 クリジングによる沖積粘土層上限レベルの推定結果

(3) 解析結果

(1) および(2)に述べた条件の下での解析結果として、図-9 にそれぞれボーリング間隔の粗いデータ（平均間隔約 800m）および、ボーリング間隔の密なデータ（平均間隔約 200m）に基づく、沖積粘土層上限のクリジング結果を示す。同図は、河川堤防左岸の堤体軸に沿った断面を展開して取り出し、その断面内にクリジング結果をプロットしたものであり、図中の実線、破線は、それぞれ推定結果での最尤推定値、最尤推定値土推定誤差標準偏差を表す。

図-9 に示すように、ボーリング間隔の粗いデータに基づくクリジング結果では、ボーリング間隔の密な場合に比べて、河口から上流側 2,000~4,000m 区間での複雑な起伏状況を表現されていない。しかし、最尤推定値+推定誤差標準偏差での沖積粘土層上限レベルに注目すると、ボーリング間隔の密な場合に比べて、河口から上流側 1,000m 付近で深度 O.P.-12m まで上限

面が低下している箇所を除いて、全般的にボーリング間隔の密な場合の結果を包絡する傾向があることが認められる。

次に、図-9 に示した結果に対して、以下の設計条件に基づき、地中連続壁の数量を算定する。

- ・地中連続壁の沖積粘土層への根入長 : 2m
- ・地中連続壁のパネル割 : 20m

上記の試算条件に基づき、平均的ボーリング間隔がそれぞれ約 200m および約 800m での、最尤推定値および最尤推定値+推定誤差標準偏差に対して、地中連続壁の表面積（壁厚を掛ける事で、概算として地中連続壁のコンクリート量・鉄筋量が算定可能となる量）を算定した結果を表-1 に示す。同表には、平均的ボーリング間隔約 200m での最尤推定値に対する地中連続壁の表面積を 1 とした場合の、その他のケースでの変動量を百分率で表示した。同表に示すように、平均的ボーリング間隔約 200m での最尤推定値に対するその他のケースでの変動率は、最大でも 5.3%程度

表-1 クリジング結果に基づく地中連続壁の表面積の算定結果の比較

	平均ボーリング間隔 200m		平均ボーリング間隔 800m	
	表面積 (m ²)	変動率(%)	表面積 (m ²)	変動率(%)
最尤推定値 +推定誤差標準偏差	110,000	3.0	112,460	5.3
最尤推定値	106,840	—	108,840	1.9

注) ここでの変動率は、平均的ボーリング間隔約 200m での最尤推定値に対する地中連続壁の表面積を 1 とした場合の、その他のケースでの変動量を百分率表示した数値を意味する。

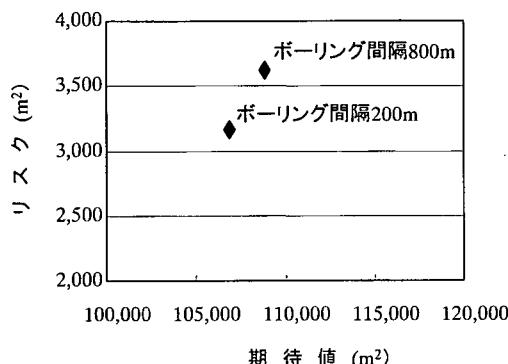


図-10 地中連続壁の試算結果

である。すなわち、本研究で取り上げた検討事例では、幾何学的不確実性のみに着目するのであれば、ボーリング間隔の粗いデータに基づくクリジング結果を用いても、ある程度の精度が得られることが明らかとなる。

次に、上記の結果結果に対して、図-5 に示したりスクー期待値平面モデルを用いて検討を加える。ここで、図-4 に示すモデルとの対応を図るために、それぞれクリジング結果での最尤推定値に基づく地中連続壁の表面積を期待値、最尤推定値+推定誤差標準偏差に基づく地中連続壁の表面積と期待値との差をリスクに準ずる量と仮定する。この仮定条件の下での、2 つのボーリング間隔に対する検討結果をそれぞれリスクー期待値平面へプロットした結果は、図-10 のように表される。同図に示すように、ボーリング間隔を細かくすることで、地中連続壁の表面積に関する期待値およびリスクに準ずる値は小さくなり、その推定精度が改善される傾向が認められる。しかし、その低減効果は最大でも 5% 程度であり、地中連続壁の建設コストの変動値も同程度であると推察される。これに対して、平均的ボーリング間隔を 800m から 200m にするとい

うことは、ボーリング長および施工条件が異なることで単純に比較できないが、平均的ボーリング間隔 800m での調査費が数倍になることを意味する。つまり、本研究での検討事例に限定すれば、幾何学的要因による地盤リスクに対しては、追加調査の投資対効果が極めて低いことが定量的に評価されることになる。

もちろん、実際の基本設計では、幾何学的要因だけではなく力学的要因に対する不確実性を評価する必要があるため、上述の追加調査の投資対効果に対する議論は、異なる結果になる可能性があると推察される。

しかし、その場合においても、本研究で提案した金融工学理論に基づく地盤リスク評価に関する検討手法が有効であると推察される。

5. まとめ

本研究では、金融工学理論に基づき、従来の地盤リスクに関する対応策について、簡易な数学モデルを用いて解説を加えると共に、地盤リスクが建設コストに及ぼす影響を評価する方法論について検討を加えた。この検討結果において得られた知見は、以下のように要約される。

- 1) 従来の数量精算を基本とした地盤リスク対応は、公共事業数が多い場合には、広義のポートフォリオ理論に準じたものと解釈することができるため、従来の状況では最適なリスク対応であったことを明らかにした。
- 2) ただし、今後の公共事業の動向として、非エンジニアのプロジェクトの参画あるいは、プロジェクトの遂行状況が、発注者にとって全体のプロジェクト数が減少することで、図-3 に示したように unique risk に曝される危険性が増す方向にある状況を踏まえた場合には、新たな検討方法として、リスクー期待値平面を用いた地盤リスクの建設コ

ストに及ぼす影響を評価する方法が有効である可能性を示した。さらに、そのリスク評価結果に基づき、建設プロジェクトでのコストオーバーランへの対応として、事業予算に予備費を計上することの重要性が高まることを示した。

3) 2)に述べた方法に基づき、実際の地盤構造物の建設プロジェクトでの、地盤リスクが建設コストに及ぼす影響を評価した事例について示した。この結果として、建設コストに及ぼす影響を定量的に評価可能となると共に、限定した条件での議論ではあるが、調査工事の投資対効果についても定量的に評価出来る可能性があることを示した。

本研究では、地盤リスクとして幾何学的な不確実性のみに着目し、そのリスクが建設コストに及ぼす影響を評価する手法について示した。今後は、力学的確実性についても評価する事例についても検討を加えていく所存である。

参考文献

- 1) 大本俊彦、小林潔司、若公崇敏：建設請負契約におけるリスク分担、土木学会論文集 No.693/VI-53, pp.205-218, 2001.
- 2) Flanagan, R. and Norman, G.: Risk Management and Construction, Blackwell Science, 1993.
- 3) Ohtsu, H., Ohnishi, Y., Lee, K. and Onoi, Y.: The Study on the Evaluation of Geotechnical Risk based on Geo-statistics Theory, Proc. of Probabilistics in GeoTechnics: Technical and Economic Risk Estimation, Graz, Austria, pp.113-120, 2002.
- 4) 大津宏康、尾ノ井芳樹、大本俊彦、大西有三、西山哲、黄瀬周作：PFI 建設プロジェクトでの地下リスク評価及び分担に関する研究、土木学会論文集、No.721/VI-57, pp.193-205, 2002.
- 5) 例えば、Milgrom, P. and Roberts, J. : 奥野正寛他訳：組織の経済学、NTT出版、1997.
- 6) Pollio, G.: International Project Analysis & Financing, The University of Michigan Press, 1999.
- 7) Bodie, Z. and Merton, R. C. 著、大前恵一郎訳：現代ファイナンス論、ピアソン・エデュケーション、2001.
- 8) 萩谷千鳳彦：ブラック・ショールズモデル、東洋経済社、2000.
- 9) 大津宏康、尾ノ井芳樹、大西有三、高橋徹：ODA建設プロジェクトにおけるリスク分析とその対応に関する一考察、土木学会論文集、No.714/VI-56, pp.155-162, 2002.
- 10) 小林潔司、大本俊彦、横松宗太、若公崇敏：建設請負契約の構造と社会的効率性、土木学会論文集、No. 688/IV-53, pp. 89-100, 2001.
- 11) FIDIC: Conditions of Contract for EPC Turnkey Projects, First Edition, 1999.
- 12) Benjamin, J. R. and Cornell, A. A.: Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, McGraw-Hill, pp. 578-580, 1970.
- 13) 山下智志：市場リスクの計量化とVaR、朝倉書店、2000.
- 14) 野口悠紀夫：金融工学、こんなに面白い、文春新書、pp. 42-109, 2000.
- 15) 海外経済協力基金開発援助研究所：円借款案件事後評価報告書 1998, 1998.
- 16) Einstein, H. H.: Risk and Risk Analysis in Rock Engineering, Tunnelling and Underground Technology, Vol. 11, No.2, pp.141-151, 1996.
- 17) 近藤達敏：地質調査の不確実性とトンネル工事のリスク要因評価、応用地質、第 40 卷、第 6 号、pp.340-345, 2000.
- 18) 日本材料学会編：ロックメカニクス、技報堂出版、2002.
- 19) 大津宏康、田中誠：不連続性岩盤の調査・解析と評価－不連続性岩盤における調査・解析事例（浸透問題）（その 2）、土と基礎、Vol.48, No.12 Ser.515, pp.61-66, 2000.
- 20) 大津宏康、大西有三、高橋徹、黄瀬周作：建設プロジェクトにおける地下リスクの評価に関する研究、土木学会第57回年次学術講演会概要集CSセッション、pp.263-264, 2002.

(2002. 10. 24受付)

A CONSIDERATION ON THE EVALUATION OF GEOTECHNICAL RISK
INVOLVED IN CONSTRUCTION PROJECTS BASED ON FINANCE
ENGINEERING THEORY

Hiroyasu OHTSU, Yoshiki ONOI, Yuzo OHNISHI and Kyu Tae LEE

In this paper, methodology associated with the evaluation of geotechnical risk based on finance engineering is presented. The discussion pointed out that current geotechnical risk response adopted by government bodies corresponds to risk response based on Port folio theory under the condition that numbers of public infrastructures projects are increasing, and that risk evaluation method adopting risk-return plane would be effective due to the change of construction markets. Finally, design risk of actual construction project, related to spatial variation of geometrical condition was discussed.