

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

大津宏康¹・尾ノ井芳樹²・大本俊彦³・大西有三⁴・西山哲⁵・黄瀬周作⁶

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 博士(工学) MSc.(建設法/仲裁) 英国・米国仲裁士(〒182-0023 調布市染地2-8-3)

⁴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)

⁵正会員 工修 京都大学大学院 助手 工学研究科(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁶正会員 工学士 浅沼組 土木部(〒543-8688 大阪市天王寺区高津町12-6)

本研究の目的は、民間資本活用方式(PFI)による建設プロジェクトで議論される様々なリスク要因の内で、地下の地盤・岩盤の幾何学および力学的条件の不確実性に起因するリスク(以下地下リスクと称する)に着目し、その評価方法および分担方法について検討を加えるものである。具体的には、従来の建設請負契約での地下リスクの分担法について示すと共に、PFIでは地下リスクを請負者が負担する可能性があることを示した。また、建設プロジェクトでの地下リスクを評価するためには、地盤条件の変動に関する平均値および、そのまわりの変動幅を定量化する手法が不可欠であることを明らかにし、その手法としてのクリジング手法の適用性について、実際のボーリングデータを用いて検討を加えた。

Key Words : PFI, geotechnical risk, risk management, contract administration, geo-statistics

1. はじめに

昨今の経済不況に加えて、今後の高齢化・少子化に伴う税収の減少が予想される状況の下で、インフラストラクチャーの建設および運営に対して、民間資本活用方式(Private Finance Initiative, 以下PFI方式と称する)の導入が注目されている。PFI方式の特徴は、従来の公共団体である発注者主導の実施形態に代わり、プロジェクトの建設だけでなく運営も民营企业に包括して発注されるものである。このため、PFI方式を導入した場合には、プロジェクト推進のための基本的構造が、従来は発注者と請負者との二者で成立していたのに対して、公共団体から権限を委譲されるプロジェクト会社(Single Purpose Company, SPC)、EPC(Engineering Procurement Construction)コントラクター、OM(Operation and Maintenance)コントラクター、金融機関および、下請負者(建設・据付等)等の様々な参加者により構成されるものとなる¹⁾。また、従来の発注方式では、公共団体が原則的に負ってきたプロジ

ジェクト全体(完工・操業)のリスクが、原則的にはプロジェクト会社、EPCコントラクターおよびOMコントラクターにより負担されることになるため、プロジェクト自体のリスク評価および対応が重要な検討課題となる。

現状では、PFI方式のプロジェクトのリスクマネジメントに関する研究としては、主としてプロジェクトの事業評価としての採算性を議論するため、操業後のファイナンシャル・リスクに対する評価および対応についての検討が報告されつつある²⁾。しかし、採算性を論じる上での初期条件となる、完工までに要する建設費に含まれるリスクについての検討は必ずしも十分とはいえない。中でも、建設工事で対象とする地下の地盤・岩盤の幾何学および力学的条件の不確実性に起因するリスク(以下地下リスクと称する)は、建設費用および建設工期に多大な影響を与えるリスク要因であるにも関わらず、これまでに十分な検討がなされているとはいえない。

この理由は、従来の日本での建設契約では、地下リ

表-1 代表的建設契約約款における地下リスクの分担ルール

契約約款	発注形式	地下リスク分担	
		発注者	請負者
公共工事標準請負契約約款	設計・施工分離	○	
FIDIC Red	設計・施工分離	○	
FIDIC Yellow	設計・施工一括	○	
FIDIC Silver	EPC/ターンキー		○

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てきたことによると推察される。すなわち、地下リスクのような予見することが困難なリスク要因に起因する設計変更は、数量精算や新工種単価設定がなされることで、請負者のリスクが基本的には回避されてきた。ただし、これは、発注者である公共団体の財務体力が大きいため、精算数量が当初契約数量より増大しても、その増額精算が可能な環境にあったことに留意する必要がある。

これに対して、PFI方式での発注者となるプロジェクト会社が、定量化することが困難な予期しない地盤条件に起因する地下リスクを負担することは、スポンサーおよび金融機関からの出融資が単独プロジェクトのみに限定されるプロジェクト・ファイナンスの枠組みでは、プロジェクトの実行可能性にかかわる。このため、建設段階で発生する地下リスクは、その建設契約の構造から、プロジェクト会社からEPCコントラクターへ、そしてEPCコントラクターから建設・据付等の下請負者へと分配・転嫁されることになる。

しかし、これまでの建設プロジェクトを対象としたリスク分析に関する事例研究³⁾にも示されているように、リスク分担能力の低いプロジェクト参加者への不適切なリスク分配・転嫁は、新たなリスク連鎖を引き起こし、プロジェクトを遂行する上で重大な支障となる危険性を含んでいる。PFI方式のプロジェクトでは、プロジェクト会社およびEPCコントラクターは、従来の公共団体に比べてリスク分担能力の低いプロジェクト参加者であるため、両者の間での地下リスクの分配ルールは、極めて慎重に立案する必要がある。

また、筆者ら⁴⁾が示したように、昨今欧米の建設マネジメント分野では、従来の契約管理に基づくリスク対応への反省からPartnering⁵⁾という対処方法の有効性が指摘され始めている。この基本概念は、発注者と請負者の両者が分担しなければならないリスク要因については、発注者と請負者の両者が協力し、そのリスク要因による変動が発生する危険性を出来るだけ少なくするものである。

このPartneringの概念を地下リスクに適用すれば、地質調査の精度を高めることはもちろんのこと、設計・施工両面から発注者・請負者共に地下リスクの評価・低減に対する新しい試みが必要不可欠な事項となる。また同時に、プロジェクト会社、EPCコントラクターおよび下請負者の3者が、工事前・工事中を通じて、地下リスクの評価および対応について、共通の認識を形成することが不可欠な事項となる。

このような観点から、本研究ではPFI方式による建設プロジェクトにおける地下リスクの取り扱いについて検討を加えるため、以下の事項について示す。

- ① 代表的な建設契約約款における地下リスクの分担ルール
- ② PFI方式による建設プロジェクトにおける地下リスクの取り扱い
- ③ 地下リスクの評価方法としての地盤統計学の適用性

最後に、これらの事項を踏まえて、今後建設プロジェクトに内蔵される地下リスクに対して、合理的に対応する方策についても考察を加える。

2. 代表的建設契約約款における地下リスク分担ルール

本章では、建設プロジェクトを推進する上で重要な課題となる地下リスクについて、代表的な建設契約約款でのリスク分担の基本概念について述べる。

(1) 代表的な建設契約における地下リスクの分担ルール

ここでは、代表的な建設請負契約の事例として、国内建設工事に適用されている公共工事標準請負契約約款⁶⁾および、海外工事において通常適用されているFIDIC^{7), 8), 9)}を取り上げる。これらの契約約款における地下リスク分担ルールの要約を表-1に示すと共に、その内容について以下に示す。

1) 公共工事標準請負契約約款

従来の日本における公共工事の発注形態では、公共団体の実施機関が発注者となり、設計・施工分離の原則の下で、コンサルタントが発注者に対して入札、契約および施工監理等を補佐し、施工は請負者により実施される。この公共工事での発注者と請負者の間で採用される建設請負契約が、公共工事標準請負契約約款である。この請負契約は、原則的には総価一括契約である。この契約では、地下リスクのような予見することが困難なリスク要因に対する設計変更は、草柳¹⁰⁾が指摘しているように、当契約約款に記載されている、「信義則」に基づき甲乙が友好的に問題の解決を図るという精神に則り対処される。実際には、発注者の判断により、数量精算や新工種単価設定がなされることで、請負者のリスクは基本的には回避される。ただし、設計変更を実施する決定は発注者の判断に基づくものであるため、請負者のリスクがすべて回避されてきたものではないことに留意する必要がある。また、不完全ながらも地下リスクは発注者により負担されるというリスク対応の基本条件は、精算数量が当初契約数量から増大しても、発注者の財務体力がその増額変更に対応可能であることに留意する必要がある。

2) FIDIC

海外工事において通常適用される建設請負契約は FIDIC と総称され、その約款は発注形式により、以下のように分類される。

- ・ FIDIC Red⁷⁾ (設計・施工分離方式)
- ・ FIDIC Yellow⁸⁾ (設計・施工一括方式)
- ・ FIDIC Silver⁹⁾ (EPC/ターンキー方式)

この内、FIDIC Red は、設計・施工分離の建設工事に適用される数量精算契約 (Re-measurement 契約) に基づく請負契約約款である。この契約では、入札段階で発注者側から工事単価数量表 (Bill of Quantities ; 以下 BOQ と称する) が提示され、請負者がその数量表に示される各項目の単価を設定し、それを集計することで入札価格を定め応札するものである。このため、予期しない地盤条件の出現により、例えば掘削土量あるいは支保部材の数量が当初見積りから増加したとしても、その数量に対する工事費の増加は、発注者により負担される。すなわち、地下リスクは基本的には発注者が負担することとなる。ただし、この方法では数量増減は精算されるが、単価は変更されないこともあり、請負者が地下リスクを負う可能性があることに留意する必要がある。

次に、FIDIC Yellow は設計・施工一括方式の工事に適用される請負契約約款である。ただし、この契約の

基本概念は、数量精算契約 (Re-measurement 契約) に基づく請負契約約款であり、その記述は FIDIC Red と同じ記述が用いられている。したがって、FIDIC Yellow での地下リスクの分担ルールは、FIDIC Red と同様である。

これに対して、FIDIC Silver は、いわゆる EPC/ターンキープロジェクトに対する契約約款である。その特徴は、発注者すなわちプロジェクトオーナーは、完成物の要求性能を明示すると共に、地下条件を含めて保有するすべての情報を入札者に提示するが、応札者は必要があれば自己の負担で追加調査を行い、その結果に基づき設計・施工計画を立案し入札することである。この前提条件では、請負者すなわち EPC コントラクターが、地下リスクを負うことになる。もちろん、FIDIC Silver のガイドラインは、この約款を適用することが不相当である場合に関する記述もあり、条件が整わない場合でもすべてのリスクを請負者に分担させることを戒めているが、事業規模が公共団体に比べて小さいプロジェクト会社にとっては、リスク転嫁を行う上で有効な契約約款であるといえる。現状では、FIDIC Silver が適用された事例はほとんど報告されていないようであるが、EPC/ターンキープロジェクトに対する契約約款となる、FIDIC Silver における地下リスクの取扱いについては、今後重要な検討課題になる可能性があるものと推察される。

(2) 地下リスク分担に関する考察

一般に、地盤・岩盤を対象とした建設工事では、地下リスクは予見することが困難なリスク要因として認識されているが、このリスク要因への対応は、以下のように大別される。

- ・ 調査工事 (ボーリング調査・地盤試験等)
- ・ 施工段階での設計変更 (数量精算)

なお、従来調査工事は発注者の負担により実施されるため、調査工事は地下リスクの回避策と認識されないことが多いが、ここではプロジェクトの地盤条件に関する不確定要素を減じるという解釈の下で、調査工事をリスク対応の一方策として取り上げる。

(1) で述べたように、公共工事標準請負契約約款、FIDIC Red および FIDIC Yellow に基づく建設プロジェクトでは、発注者の実施した調査工事に基づく情報が応札者に提供されることが前提条件であるため、請負者は調査によるリスク対応とは無関係である。

これに対して、FIDIC Silver に基づくプロジェクトでは、地下条件は発注者により入札者に提示されるが、請負者 (EPC/コントラクター) は必要があれば自己の負担で追加調査を行い、その結果に基づき設計・施工計画を立案するため、請負者も調査によるリスク対

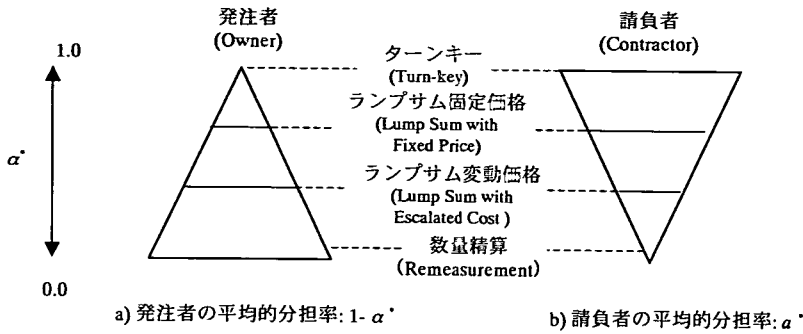


図-1 契約による発注者と請負者のリスク分担率の変動 (模式図)

応を図ることが必要となる可能性がある。

次に、施工段階での地下リスクは、(1)で述べたように、FIDIC SilverのようなEPC/ターンキー契約を除いて、原則的には通常の建設請負では、建設工事に実施される数量精算により、発注者が負担すると解釈される。しかし、前述のように、既存の方法では数量増減は精算されるが、単価は変更されないこともあり、請負者が地下リスクを負う可能性があることに留意すべきである。

ここで、地下リスクに起因する変動額 ΔP を発注者と請負者の両者が分担するという仮定条件の下で、それぞれの変動額の負担額すなわちリスク分担は、以下のように表される³⁾。

1) 発注者の負担額

$$\Delta P_o = (1 - \alpha^*) \Delta P \quad (1)$$

2) 請負者の分担額

$$\Delta P_c = \alpha^* \Delta P \quad (2)$$

ここに、 α^* は全地下リスク要因に対する平均的なリスク分配率を表し、0から1の間の値となる。

式(1)~式(2)に示す関係で、EPC/ターンキー契約(EPC契約と称す)および数量精算契約(RM契約と称す)での、最も簡単な場合のリスク分配は次のように表される。すなわち、請負者のリスク分担が大きいEPC契約では分配率 α^* は1.0に近くなり、一方請負者のリスク分担が小さくなるRM契約では分配率 α^* が0.0に近くなる。もちろん、変動額 ΔP は多様なリスク要因によるコスト変動の集合であるため、上記のような単純な関係にはならない。しかし、EPC契約での平均的なリスク分配率 α^* は1.0に近い値となるはずであ

り、一方RM契約での平均的なリスク分配率 α^* は0.0に近い値となる。なお、実際には、ここに示す2つの方式を何らかの形に修正した契約方式が採用されるケースが多いが、どのような契約を用いたとしても、図-1の模式図に示すように、平均的なリスク分配率 α^* は0と1の間となるため、ここに示す議論の基本思想は変化しない。

したがって、地下リスクはいずれの契約方式を用いた場合にも、発注者と請負者によって負担されるものであり、そしてPFI方式を導入することにより請負者のリスク分配率 α^* が大きくなるだけである。このため、地下リスクに起因する変動額 ΔP 自体を低減することが根本的な解決方法となる。このためには、地盤調査の精度を高めることはもちろんのこと、設計・施工両面からは発注者・請負者共に地下リスク評価の新しい試みが必要不可欠な事項となる。

3. PFI方式の建設プロジェクトにおける地下リスクの取り扱い

本章では、PFI方式による土木工事を主体とする建設プロジェクトの執行形態について示すとともに、地下リスクに対応する上での課題について検討を加える⁴⁾。

(1) PFIによる建設プロジェクトの実施形態

PFIによる建設プロジェクトの実施形態は、従来の公共事業の場合と異なり、プロジェクト会社、EPCコントラクター、金融機関および、下請負者(建設・据付等)等の様々な参加者により構成される。現在日本で計画・実施中のPFI方式の建設プロジェクトは、建設段階での不確定要因が比較的に少ない建築構造物が主体であるが、世界的にはPFI方式が土木工事主体の建設プロジェクトへ適用された事例も数多く挙げられ

表-2 海外における水力 PFI (BOT) 事業の事例

プロジェクト名	国	(MW)	レイアウト	契約	備考
Cascanan	フィリピン	150	地下発電所	EPC	Construction (00)
San Roque	フィリピン	345	ダム(200m)・トンネル	EPC	Finance closed (99)
Bakun	フィリピン	70	地上施設	EPC	Operation (01)
Theun Hinboun	ラオス	210	地上施設・トンネル	Non EPC	Operation (98)
Houay Ho	ラオス	150	ダム(77m)・トンネル	Non EPC	Operation (00)
Khimti I	ネパール	60	地下発電所	Non EPC	Construction (00)
Birecik	トルコ	672	ダム(62m)	EPC	Construction (00)
Ita	ブラジル	1,450	ダム(125m)	EPC	Construction (00)
Guilman-Amorin	ブラジル1	140	ダム(41m)・トンネル	EPC	Operation (98)

注) レイアウト欄および備考欄の()内数字は、それぞれダム堤体高および西暦を表す。

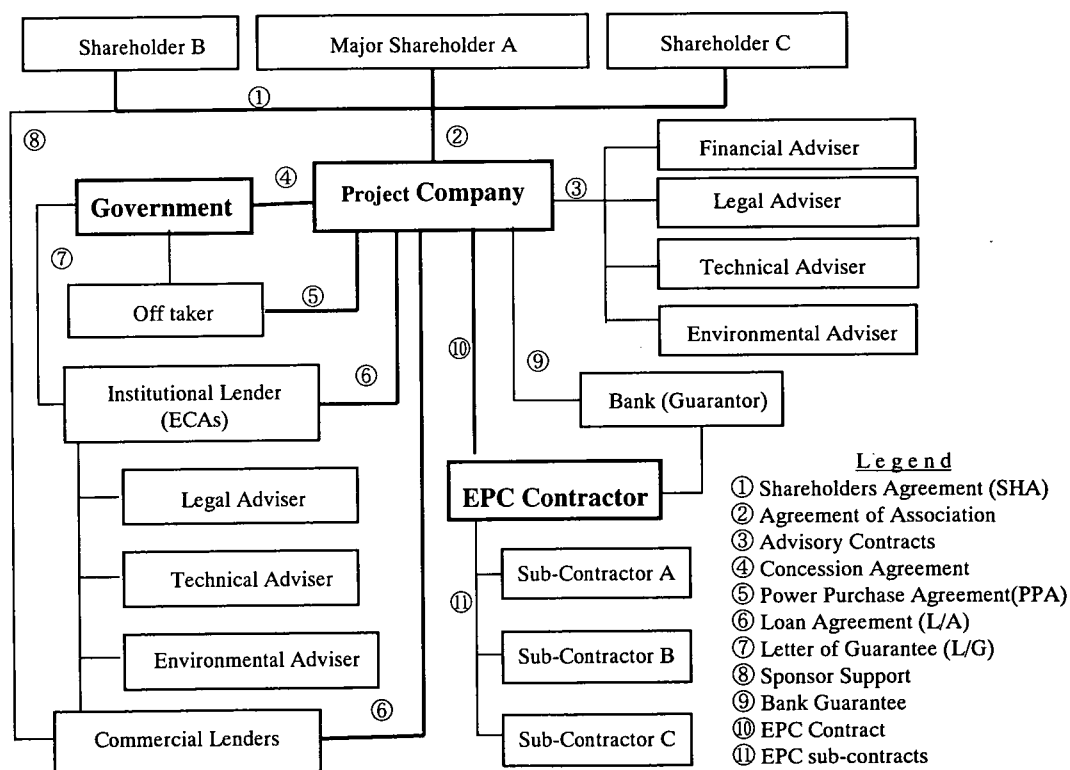


図-2 PFI方式による建設プロジェクトの契約形態例

る。例えば、表-2 に示すように、ダム基礎の遮水性あるいは、地下発電所での周辺岩盤の安定性等の、地下リスクを含む土木工事である、水力発電所建設プロジェクトが PFI (BOT) 事業として現在進行中である。なお、同表に示した事例は、筆者らの調査および世界

銀行の資料¹¹⁾から作成したものであり、その他にも電源開発事業のコンセッションが付与された案件も多く報告されているが、ここではファイナンス・クローズしたとされる案件例のみを示した。また、既設買収により民間プロジェクトとなった案件も除外している。

同表に示す事例では、ラオスおよびネパールでのプロジェクトを除いて、その他のプロジェクトでは EPC 契約が採用されており、EPC コントラクターが、地下リスクを含む多様なリスクを負担するプロジェクト形態となっている。

次に、表-2 に示す PFI (BOT) 方式のプロジェクト事例を対象として、その実施形態について筆者らが調査した結果を図-2 に示す。同図に示す実施形態での主要な契約としては、以下の契約が挙げられる。

- 1) 政府機関とプロジェクト会社間で締結されるコンセッション契約 (図-2 の④)
- 2) プロジェクト会社と金融機関 (レンダー) の間で締結される Loan Agreement (図-2 の⑥)
- 3) プロジェクト会社と EPC コントラクター間で締結される EPC 契約 (図-2 の⑨)
- 4) EPC コントラクターと下請け会社との間で締結される建設・据付等に関する契約 (図-2 の⑩)

この内、地下リスク関連する契約は、プロジェクト会社と EPC コントラクターの間で締結される EPC 契約と、EPC コントラクターと下請け会社との間で締結される建設契約である。プロジェクト会社と金融機関の間で締結される Loan Agreement 契約 (以下 L/A と称する) は、プロジェクトの地下リスクとは直接には関連しないが、そのリスク分担の基本概念には大きな影響を与える。

PFI 方式でのプロジェクトでは、これまでのコーポレート・ファイナンスに代わり、プロジェクト・ファイナンスが検討される。プロジェクト・ファイナンスでは、投資家に加え金融関係者も貸し手責任を負うことになるため、事業投資家および金融関係者は、プロジェクト会社が、プロジェクトが内包するリスクを厳しく評価し、キャッシュフロー・モデルに基づき配当収益率やデットサービスカバーレシオ(DSCR)等の事業収益性に関わる指標を正確に算出することを要求することになる。仮に、プロジェクトが内包するリスクが大きく、その事業収益性に不確定性が多い場合には、プロジェクト・ファイナンスによる融資が決定されないケースも想定される。

このような課題に対して、詳細設計および建設工事をあわせて分担することで合理的にプロジェクトのリスク管理する方策として、プロジェクト会社と EPC コントラクターの間に EPC/ターンキー契約が締結されることになる。なお、この EPC/ターンキー契約の下では、プロジェクト会社のリスクが EPC コントラクターへと転嫁されることになるため、EPC コントラクターがプロジェクトの最大のリスク分担者になるケースがあることに留意する必要がある。

しかし、地下リスクのように予見することが困難な

リスクに対しても、EPC/ターンキー契約において、上記のような解釈が可能か否かは重大な課題を含んでいる。2. に示したように、FIDIC Silver の適用事例がほとんどないことおよび、そのガイドラインで、条件が整わない場合でもすべてのリスクを請負者に分担させることを戒めていることから、現状では EPC/ターンキー契約での地下リスク分担ルールは確定していないことに留意する必要がある。すなわち、安直なリスク分配ルールの適用は、その分配されたリスクがプロジェクト会社～EPC コントラクター～建設・据付等の下請負者へと転嫁されることで新たなリスク連鎖を誘発し、プロジェクトを遂行する上で重大な支障となる危険性を含んでいる。したがって、地下リスクについては、EPC コントラクターだけではなく、プロジェクト会社、あるいは何らかの公益性が認められる場合には一部を公共団体も分担する方策について検討する必要があると推察される。

このような観点から、地下リスクが支配的となる土木工事において PFI 方式を導入するためには、プロジェクト会社および EPC コントラクターは、完工までリスク評価の精度および、その対応策について検討することすなわち、リスク管理能力を高めることが不可欠な課題となる。中でも、プロジェクト・ファイナンスの基本思想から、出資者・金融関係者の合意を得るため、プロジェクト会社および EPC コントラクターの協力による、地下リスクの定量化に関する検討も緊急の課題となる。

(2) 地下リスク対応の課題

2. において述べたように、地下リスクに対する対応の基本は、ボーリング調査および試験等による地盤・岩盤調査である。いうまでもなく、地盤・岩盤調査費用は、従来の公共工事では実施母体の公共団体により負担されてきた。PFI 方式のプロジェクトでは、様々な実施形態となることが予測されるが、この調査費用は原則的にはプロジェクト会社により負担される。

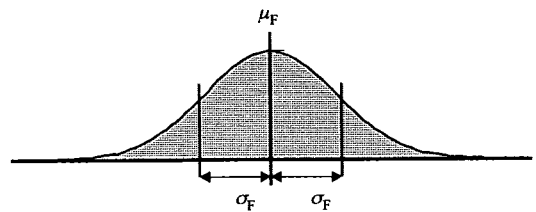
ただし、一般に地下の地盤条件は、空間的分布特性等に代表される多くの不確実な要素を含んでいる。これに対して、実際にボーリング調査結果より得られるデータは点情報の集積である。このため、その点情報の単純な内挿あるいは外挿により推定される地盤条件の信頼性には課題があることは、これまでにも認識はされてきた。しかし、従来の公共団体主導の建設プロジェクトでは、この地質調査に関する信頼性を高めることよりは、その地下リスクに起因する施工条件の変化は設計変更により対処することが主であった。すなわち、従来の日本での建設契約では、地下リスクによる変動は、原則的にはディープポケットを持つ公共団

体等の発注者が数量精算や新工種単価設定を行うことで負担され、請負者のリスクが基本的には回避されてきた。これは、1. で述べたように、発注者である公共団体の財務体力が大きいため、精算数量が当初契約数量より増大しても、その増額精算が可能な環境にあったことによる。これに対して、スポンサーおよび金融機関からの出融資が単独プロジェクトのみに限定されるプロジェクト・ファイナンスの枠組みでは、定量化することが困難な予期しない地盤条件に起因する地下リスクを負担することは、プロジェクトの実行可能性にかかわる。したがって、ポーリング調査等の結果より得られる地盤条件の信頼性に関する検討が、これまで以上に重要になるものと推定される。

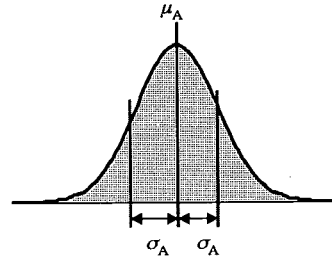
ここで、調査より得られる地盤条件の信頼性について考察する。先にも述べたように、地盤条件は本来地盤の幾何学特性（地層分布・層厚等）および、力学的特性（変形性・強度特性等）については変動幅を有するはずである。この変動幅を有することを認めた場合には、設計結果に基づく建設コストも幅を有する値となる。例えば、模式的に図-3の1)に示すように、発注者により実施された初期の調査結果から推定される建設コストは、本来平均値 μ_F と標準偏差 σ_F を有するものになると推察される。なお、図-3では議論を明確にするために、建設コストを正規分布モデルとして例示した。もちろん、実際のコスト分布はより複雑なものになると推定されるが、調査段階の地下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変化しない。

つまり、従来の建設プロジェクトでの設計およびコスト推定は、平均値 μ_F のみを用いて検討がなされ、その変動幅（標準偏差 σ_F と等価）について議論されることは極めて稀であった。しかし、PFI方式では、発注者となるプロジェクト会社は、地下リスクに起因するコストの変動幅を議論することが不可欠となる。例えば、平均値 μ_F まわりの変動幅（金融工学で定義されるアップサイドリスクと等価）を建設コストの予備費として設定することが、必ずしも十分に技術的な知識を有していない、出資者および金融関係者に地下リスクに関する合意を得る上で最も有効な情報になると推定される。

次に、地盤調査の信頼性と、調査費との関係について考察する。いうまでもなく、調査費用を掛けることで、地盤調査の信頼性を高めることは可能となるが、民間であるプロジェクト会社では、どの程度の費用を調査に割り当てるかが極めて重要になる。また、2. のEPC/ターンキー契約の契約約款となるFIDIC Silverのガイドラインにおいて示したように、発注者から提示される情報が不十分とした場合には、その追



1) 初期調査段階で想定されるコスト変動



2) 追加調査後に想定されるコスト変動

図-3 調査結果から推定されるコスト変動（模式図）

加調査費用はEPCコントラクターへの負担になる可能性もあるため、請負者にとっても調査費用とその信頼性の関係は極めて重要な検討課題となる。

ここで、追加調査を実施することにより、想定される建設コストのアップサイドリスクが減少すると仮定する。議論を明確にするため、追加調査後に想定されるコスト変動が、模式的に図-3の2)に示すように、平均値 μ_A および標準偏差 σ_A でモデル化されると仮定すれば、 σ_F と σ_A について以下の関係が成り立つものと推察される。

$$\sigma_F \geq \sigma_A \quad (3)$$

$$B = \sigma_F - \sigma_A$$

ここに、 B は追加調査を実施することによる建設コストの変動幅の低減量すなわち便益を表す。したがって、追加調査の投資対効果を考える場合には、理論的には便益 B と追加調査に必要な費用との大小関係から、詳細設計の有効性が示されることになる。

したがって、PFI方式による建設プロジェクトでの地下リスクを評価するためには、図-3および式(3)に示すような表現が可能となる。地盤条件の変動に関する平均値および、そのまわりの変動幅を定量化する手法を適用することが不可欠な事項となる。

4. 地盤構造リスク評価への地盤統計学の応用

本章では、ボーリング調査結果より推定される地盤条件の信頼性を定量化する手法として、地盤統計学の代表的な手法であるクリジグ手法の基本概念^{12), 13)}を示すと共に、実際の地盤での適用結果に基づき、その手法の適用性について考察を加える。

(1) クリジグ手法の基本概念

クリジグ手法は、不偏線形最適推定法 BLUE (Best Linear Unbiased Estimator) と呼ばれる方法の一種であり、推定すべき値 Z_0^* (不偏推定値) が、次式に示すような計測結果に基づく線形式により表されると仮定する。

$$Z_0^* = \sum_i \lambda_0^i Z_i \quad (4)$$

ここに、 λ_0^i および Z_i は、それぞれ計測点 i に対する計測値、重みを表す。

また、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すると、位置 x に存在する値 $z(x)$ 、その位置から h だけ離れた位置の値を $z(x+h)$ とする時、この 2 点間での計測値の空間的分布特性を表す、セミバリオグラム $\gamma(h)$ は以下のように定義される。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \{ [z(x+h) - z(x)]^2 \} \quad (5)$$

ここで、 $E\{\cdot\}$ は期待値を表す記号である。

なお、式(5)に示すセミバリオグラム $\gamma(h)$ の関数形としては、指数関数、球関数及び線形関数等の様々な関数形が提案されており、その計測結果に対する関数近似の最適化手法としては、最尤法、赤池情報基準 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。

次に、式(4)および式(5)の関係式において、未知数となる重みを合理的に算定する上で、不偏性と推定誤差最小化の仮定を導入する。ここで、誤差を最小化するためにラグランジュの未定係数 μ を導入する。

最終的には、以下に示す連立方程式を解くことによって、変数 λ_0^i および μ が得られる。

$$\sum_j \lambda_0^j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \lambda_0^i \gamma(x_i - x_0) \quad (6)$$

$$\sum_i \lambda_0^i = 1 \quad (7)$$

ここで得られる変数 λ_0^i を式(4)に代入することで、最尤推定値が算定される。

さらに、誤差推定分散 σ_E^2 は、以下のように算定される。

$$\sigma_E^2 = \mu + \sum_i \lambda_0^i \gamma(x_i - x_0) \quad (8)$$

ここで、 x_0 は最尤推定値を算定する箇所の位置座標を表す。

以上の定式化において、図-3 に示す地下リスク評価の基本条件となる、地盤条件の変動に関する平均値および、そのまわりの変動幅を定量化することが可能となる。具体的には、式(4)に基づき算定される最尤推定値が平均値に相当し、また式(8)に基づき算定される誤差推定分散が分散に相当する。

(2) クリジグの地下リスク評価方法としての適用性に関する考察

クリジグ手法の地下リスク評価手法としての適用性について検討する事例として、図-4 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。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。

当地点での洪積層は、一般に杭基礎および、山留め壁に支持層となっている。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。したがって、当地点に建設される地盤構造物の基本設計段階では、各層の強度特性に加えて、支持層の深度および各層の層厚等の幾何学的特性が重要な検討項目となる。

このような観点から、本検討では、図-4 に示す河川堤防基礎地盤に対して、設計上で幾何学的パラメータとなる、支持層となる洪積層の深度および沖積層(砂層・粘土層)の層厚についての空間的分布特性に着目する。

なお、この事例では、実際には河川堤防右岸・左岸で堤体に沿って、平均間隔約 200m でボーリング調査が実施されている。このボーリング調査結果を用いて、200m よりボーリング間隔が大きい場合にクリジグ手法を用いて推定される幾何学的パラメータの信頼性および、ボーリング間隔を小さくすることによる信頼性の向上について定量的な検討を加えるものとする。また、本検討では式(5)に示すこのセミバリオグラムの関数形としては、次式に示す指数関数と仮定する。

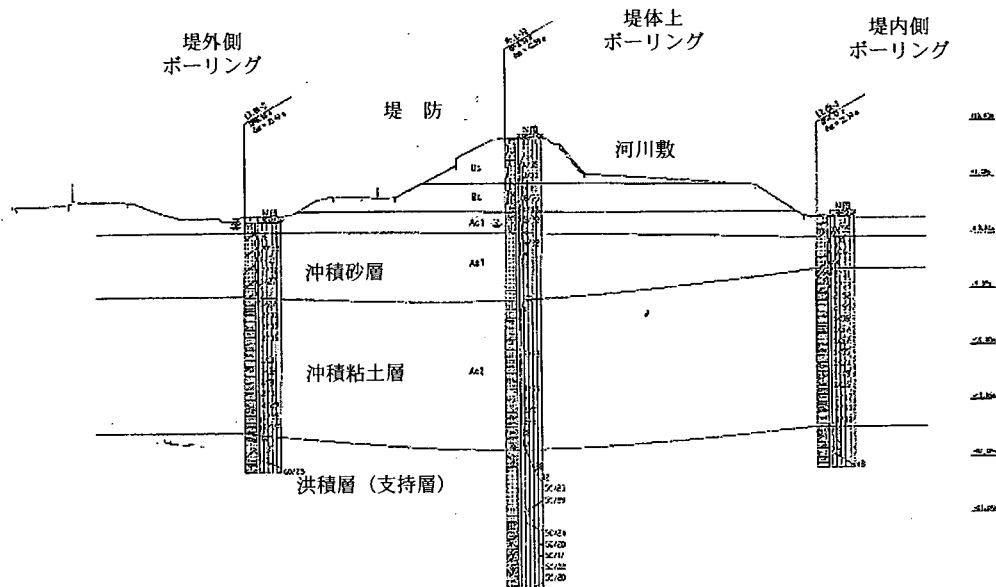


図-4 河川堤防の調査結果

$$\gamma(h) = C \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}}{a} \right) \right\} \quad (9)$$

ここに、 C はシル (理論的には対象とするデータの分散と等価) および、 a はレンジ (影響距離) を表す。また、 Δx 、 Δy 、 Δz はそれぞれ計測点間の三次元空間での距離を表す。なお、式(9)に含まれる係数は、対象とする洪積層表面の深度および各沖積層の層厚毎に、非線形最小乗法を用いて算定した。

クリジングによる算定結果の代表例として、クリジングに用いたボーリング間隔の平均値が、それぞれ約 200m および約 800m に対応する基盤深度の推定結果を図-5 に示す。なお、同図に示す結果は、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、その断面内での洪積層表面の深度分布の推定結果と計測値を併せて示したものである。なお、同図に示す実線はクリジング結果での基盤深度の最尤推定値を示し、破線はその最尤推定値土推定誤差分散を示す。また、図中の横軸は河口からの距離を表す。

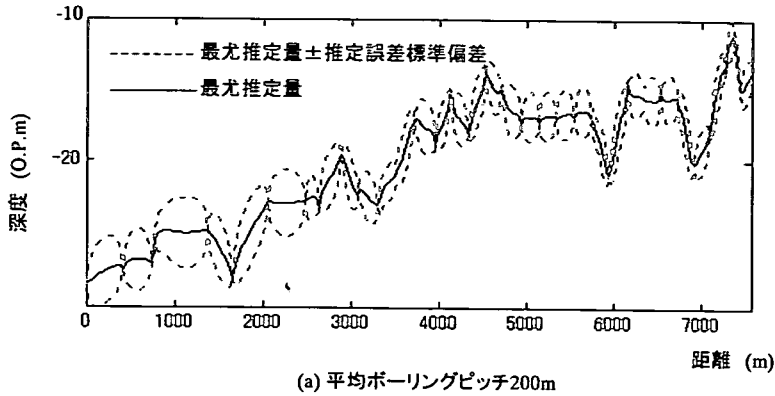
図-5 に示す結果で、クリジングに用いたボーリング間隔の平均値が約 200m の場合 (図-5 (a)) には、最尤推定値の分布で洪積層表面の微妙な地形の変動が表現されている。また、河口から 2,000m までの多少ボーリング間隔が長くなっている領域を除いて、推定誤差分散は 1m 程度であり、ここで推定された洪積層表面の深度に関する信頼性は十分高いものであると推

察される。

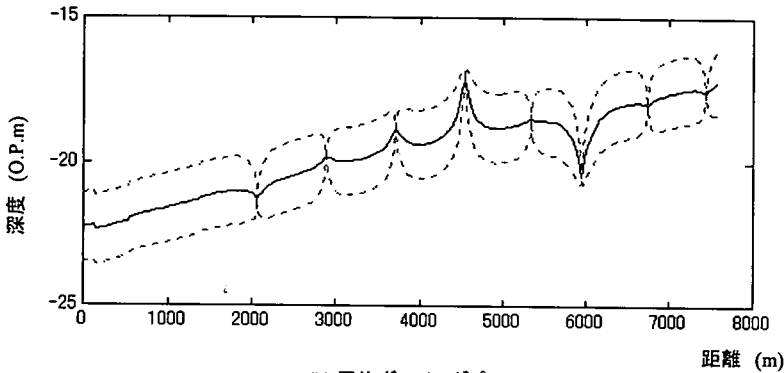
これに対して、クリジングに用いたボーリング間隔の平均値が約 800m の場合 (図-5 (b)) には、最尤推定値の分布形状は、ボーリング間隔が密な場合と比較して、平均的な分布となり微妙な地形の変動が表現されていない。また、実際のボーリング地点を除いて、推定誤差標準偏差は全体的に 2~3m 程度と、ボーリング間隔が密な場合に比べて大きくなっている。

この結果より、地層推定に用いるボーリング間隔が小さくなること、すなわち調査に対する投資額を大きくすることで、推定される結果の信頼性は高くなるという当然の帰結が、定量的に表現されることになる。すなわち、図-5 に示す河川軸に対する計測点を除く任意の断面を対象とした場合に、その対象断面での推定誤差標準偏差の差が、地盤調査に対する投資対効果を表す指標となる。

ただし、本来調査の精度は、その結果を用いる目的によって変動する。建設コストを積算する基本設計段階で要求される精度と、詳細設計段階で要求される精度は当然変化する。例えば、2. (1) で述べたように、FIDIC Silver に示されている内容からすれば、プロジェクト会社が必要とする調査の精度は、地質条件から見た立地可能性であり、建設コストの予備費を算定する上での数値的根拠となる地盤条件の変動幅である。これに対して、EPC コントラクターが必要とする情報は、詳細設計に用いる推定誤差分散が出来るだけ小さくなる、すなわち地下リスクの少ない調査結果である。



(a) 平均ボーリングピッチ200m



(b) 平均ボーリングピッチ800m

図-5 クリジングによる洪積層深度の推定結果

このため、PFI方式での建設プロジェクトでは、プロジェクト会社とEPCコントラクターとの間に発生する地盤調査の精度に対する要求には、大きな相違が生じる可能性がある。

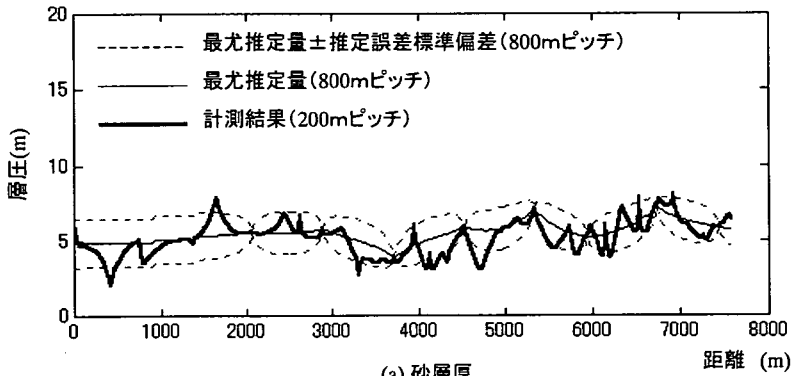
この課題に対処する一つの方策は、いうまでもなく調査費を増加させること、すなわち、ここでの事例ではボーリング本数を増やすことである。しかし、この場合には、プロジェクト会社とEPCコントラクターとともに民間会社であり調査費用には限界があることおよび、その費用を契約上はいずれが負担するかという問題が発生する。

上記の課題に対処する方策として、ここではボーリング間隔の粗いクリジング結果に基づき地下リスクを評価する手法の適用性について検討する。具体的には、ボーリング間隔の粗いデータ（平均間隔約800m）に基づくクリジング結果を確率量として取り扱うことで、ボーリング間隔の密なデータ（平均間隔約200m）がどの程度の信頼性で推定可能かについて検討を加える。

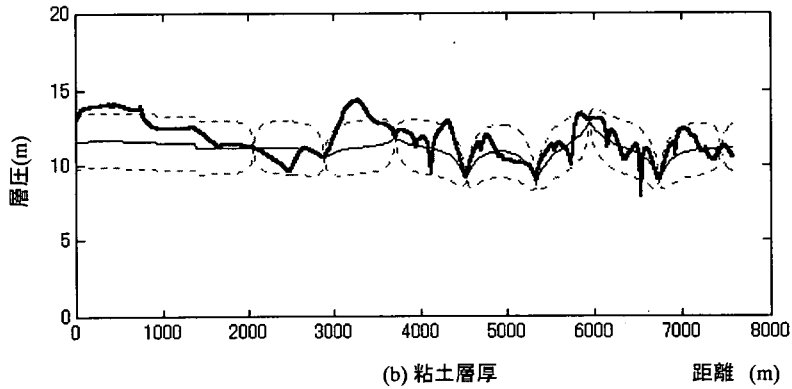
この検討結果として、図-6に図-5で示した洪積層表面の深度に加えて沖積層の層厚について、ボーリング間隔の粗いデータ（平均間隔約800m）に基づくクリジング結果と、ボーリング間隔の密なデータ（平均間隔約200m）との比較を示した。同図は、図-5と同様に河川堤防左岸の堤体軸に沿った断面を展開して取り出し、その断面内にクリジング結果と計測結果を併せてプロットしたものである。また、図中の実線、破線および太線は、それぞれ最尤推定値、最尤推定値±推定誤差標準偏差および計測結果を表す。

図-6に示す各幾何学的パラメータに対する比較結果より、以下の事項が明らかとなる。

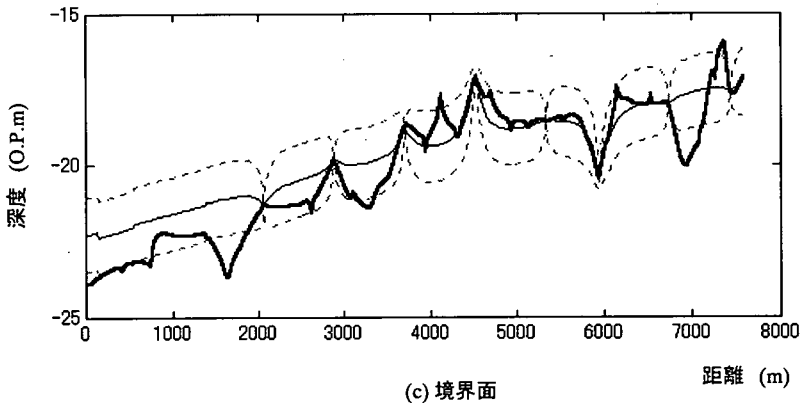
- 1) 平均ボーリング間隔800mのデータに基づく最尤推定値は、いずれのパラメータについても、平均ボーリング間隔200mの計測結果に比べて変化が緩やかな分布となっている。
- 2) 1)に対して、平均ボーリング間隔200mの計測結果は、ほぼ平均ボーリング間隔800mのデータに基づ



(a) 砂層厚



(b) 粘土層厚



(c) 境界面

図-6 クリジングによる推定結果との計測結果との比較

く最尤推定値±推定誤差標準偏差の範囲内で変動している。

このように、計測データの周辺における予測値を平均値において確定的に取り扱った基本設計には、多くの推定誤差が含まれているとともに、その誤差に対応する概念が構築できない。これに対して、平均ポーリング間隔が粗い場合の最尤推定値±推定誤差標準偏差の変動幅を有する値は、本検討で提案している、地盤

条件の変動幅を考慮した基本設計での基礎データとしての適用性が高いと推察される。その地盤条件の変動幅を具体的に設計に反映させる方法としては、以下のようなリスク評価手法が挙げられる。

- ・クリジングにより算定される任意点での最尤推定値と誤差推定分散を、それぞれ設計パラメータでの平均値および分散（標準偏差）とした信頼性モデルにより、建設コストの変動幅を算定する方法

・最尤推定値を平均値，また最尤推定値±推定誤差標準偏差をそれぞれ，金融工学で用いられる上方 VaR（パリュアットリスク）¹⁹ および下方 VaR として適用し，建設コスト変動の VaR を算定する方法

なお，本検討では地盤条件の内，幾何学的パラメータについての結果のみを示したが，強度定数等の力学的パラメータについても，同様な議論が成立つものと推察される。

次に，上記の知見に基づく，PFI 方式の建設プロジェクトでの地下リスク分担の一試案として，以下のようない実施手順を提案する。

- 1) プロジェクト会社は，地盤調査結果については，クリジリング手法等により算定される変動幅を有する情報として提示するとともに，その変動幅に起因する建設コストの変動幅を推定する。
- 2) EPC コントラクターは，プロジェクト会社から提示される変動幅を有する情報に対して設計・施工計画を立案し，その建設コストの変動幅を推定する。この EPC コントラクターによる建設コスト変動幅は，プロジェクト会社との協議の基礎資料となる。そして，両者が合意した後，このリスクはプロジェクト会社により負担されるものとする。
- 3) EPC コントラクターは，プロジェクト会社との協議結果で認められた建設コスト変動幅を減少させることが可能であると判断した場合には，自己の負担で追加地盤調査を実施する。

なお，施工段階での地下リスクについては，2. の代表的契約における地下リスク分担において述べたように，本質的にはプロジェクト会社と EPC コントラクターの両者により分担されるものである。したがって，この課題については，第三者を含めたプロジェクト会社と EPC コントラクターの協議機関を設けて，早期に地下リスクによる両者の損失を低減する方策を検討・実施することが望まれる。また，このようなプロセスは金融機関など他のプロジェクト参加者との調整も必要となるものと推察される。

5. まとめ

本研究では，PFI 方式による建設プロジェクトにおける様々なリスク要因の内地下リスクに着目し，その評価方法および分担方法について検討を加えた。本研究により得られた知見は，以下のように要約される。

- 1) 従来の公共工事では，地下リスクの大部分が原則的には発注者により負担されてきたが，PFI 方

式では請負者となる EPC/コントラクターによる地下リスク負担が増大する可能性がある。

- 2) PFI に適用されるプロジェクト・ファイナンスの基本思想から，出資者・金融関係者の合意を得るため，プロジェクト会社および EPC コントラクターの協力による，地下リスクの定量化に関する検討が緊急の課題となる。
- 3) PFI 方式による建設プロジェクトでの地下リスクを評価するためには，地盤条件の変動に関する平均値および，そのまわりの変動幅を定量化する手法を適用することが不可欠な事項となる。
- 4) 2)および 3)の事項より，調査結果より推定される地盤条件の信頼性を定量化する手法として，地盤統計学の代表的な手法であるクリジリング手法を取り上げ，実際の地盤での適用結果に基づき，その手法の適用性について考察を加えた。その結果として，ボーリングデータを用いたクリジリングにより算定される，最尤推定値±推定誤差標準偏差の変動幅を有する値は，本検討で提案している，地盤条件の変動幅を考慮した基本設計での基礎データとしての適用性が高いことが明らかとなった。
- 5) 4)の結果より，クリジリング手法の適用を前提としたプロジェクト会社および EPC コントラクターの地下リスク分担方法についても提言した。

本研究においては，地下リスク要因として地盤の幾何学的パラメータのみに着目した理論的な検討を実施したが，今後地盤の力学的パラメータを含めた検討に加え，地下リスクに起因する建設コスト変動に関する検討をも実施する所存である。

謝辞：本研究を取りまとめるにあたり，貴重な議論をいただいた京都大学教授小林潔司氏および，建設技術研究所李圭太氏に感謝します。

参考文献

- 1) 大津宏康，尾ノ井芳樹：BOT事業のプロジェクト・マネジメントー水力発電ケースとしてー，土木学会建設マネジメント発表会講演概要集，pp.159-162，2001。
- 2) 織田澤利守，小林潔司：海外プロジェクトにおけるリスク分担と利潤構造，土木学会建設マネジメント発表会講演概要集，pp.175-178，2001。
- 3) Pipattapaniwong, J. and Watanabe, T.: Multi-party Risk Management Process(MRMP) for A Construction Project Financed by An International Lender, Proceeding of Construction Engineering and Management Symposium 2000 (CEMS2000), pp.85-92, 2000.

- 4) 大津宏康, 大西有三: 開発途上国建設プロジェクトでの請負者のリスク管理に関する研究, 土木学会論文集, No.707/VI-55, pp.207-218, 2002.
- 5) Harris, F. and McCaffer, R.: Modern Construction Management, Blackwell Science, 2001.
- 6) 中央建設業審議会: 公共工事標準請負契約約款, 改訂版, 1989.
- 7) FIDIC: Conditions of Contracts for Construction for Building and Engineering Works Designed by the Employer, First Edition, 1999.
- 8) FIDIC: Conditions of Contract for Plant and Design-Build for Electrical and Mechanical Plant, and for Building and Engineering Works, by the Contractor, First Edition, 1999.
- 9) FIDIC: Conditions of Contract for EPC Turnkey Projects, First Edition, 1999.
- 10) 草柳俊二: 定量的分析を基盤とした国際建設プロジェクトの契約管理, 土木学会論文集, No. 609/VI-41, pp. 87-98, 1998.
- 11) Head, C.: Financing of Private Hydropower Projects, World Bank - Discussion Paper No. 420, The World Bank, 2000.
- 12) 大西有三, 田中誠, 大沢英昭: 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, No.457/III-21, pp. 51-58, 1992.
- 13) 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.
- 14) 山下智志: 市場リスクの計量化と VaR, 朝倉書店, 2000.

(2002. 5. 1 受付)

A CONSIDERATION ON THE ASSESSMENT AND ALLOCATION OF GEOTECHNICAL RISK IN PFI CONSTRUCTION PROJECTS

Hiroyasu OHTSU, Yoshiki ONOI, Toshihiko OMOTO, Yuzo OHNISHI,
Satoshi NISUYAMA and Shuusaku KINOSE

This paper focuses on the basic concept how to rationally allocate geotechnical risk in construction projects. Firstly, risk allocation policies specified in each typical construction contract represented by FIDIC are investigated. Finally, conclusions make it obvious that both project owner and contractor principally share geotechnical risk in construction projects, and that both parties should cooperate to establish methodologies associated with the reduction of potential loss due to the geotechnical risk.