

契約方法に起因する  
ジオリスク対応の相違に関する研究

平成 25 年 2 月 20 日

京都大学工学部地球工学科  
土木工学コース

袴田 薫

## 要旨

国際化する建設市場において、日本企業が海外で建設プロジェクトを実施する際には様々なリスク要因が顕在化し、それにより多大な損失を被る恐れがある。その中でも「予見できない地盤条件 (Unforeseeable Geological Condition)」と称される地盤条件の不確実性に起因するリスクは、コストオーバーラン、工期遅延などプロジェクトに多大な影響を及ぼす可能性がある。この地盤条件の不確実性に起因する損失の可能性は「地盤リスク (Georisk)」と称され、本研究では以下ジオリスクと呼ぶ。

本研究では、日本が海外建設プロジェクトに参入する際に起こり得るリスク要因、中でも問題となるジオリスク要因を調査事例より分析する。そして、日本と海外の契約方式の違いにより発注者と請負者間のリスク分配ルールが変動する基本概念について整理する。また、そのリスク分配ルールにより日本と海外では入札前に実施される地盤調査の質と量が異なり、それに対応して内在するジオリスクの大きさ及び建設プロジェクトの概算推定コストも変化する。それらの相違について事例検証によりコスト次元で定量的に考察する。

以上を踏まえて、契約方法によるリスク対応のあり方についてジオリスク及び概算推定コストの面から考えることを最終的な目的とする。

## 目次

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 第 1 章 序論 .....                              | 1  |
| 1.1 研究の背景 .....                             | 1  |
| 1.2 研究の目的 .....                             | 1  |
| 1.3 既往の研究との関連 .....                         | 2  |
| 1.4 本論文の構成 .....                            | 3  |
| 第 2 章 プロジェクトにおけるリスク要因及び契約方法 .....           | 4  |
| 2.1 プロジェクトリスクマネジメントとは .....                 | 4  |
| 2.1.1 リスクの定義 .....                          | 4  |
| 2.1.2 プロジェクトリスクマネジメントフロー .....              | 4  |
| 2.2 円借款事業事後評価結果に基づくリスク要因分析 .....            | 5  |
| 2.2.1 円借款事業において顕在化した一般リスク要因 .....           | 6  |
| 2.2.2 円借款事業において顕在化したジオリスク要因 .....           | 7  |
| 2.3 契約約款の違い .....                           | 8  |
| 2.3.1 公共工事標準請負契約約款 <sup>9)</sup> .....      | 8  |
| 2.3.2 FIDIC <sup>9)</sup> .....             | 8  |
| 第 3 章 日本と海外の契約方式によるリスク分配の変動及び各指標の位置づけ ..... | 10 |
| 3.1 契約方式によるリスク分担の変動 .....                   | 10 |
| 3.1.1 一般的リスク分配 .....                        | 10 |
| 3.1.2 ジオリスク分配 .....                         | 12 |
| 3.1.3 調査費とリスクプレミアムとの相関 .....                | 13 |
| 3.1.4 調査費と概算推定コストとの相関 .....                 | 13 |
| 3.2 トータルコストモデル .....                        | 14 |
| 3.2.1 一般的トータルコストモデル .....                   | 14 |
| 3.2.2 ジオリスクを考慮したトータルコストモデル .....            | 15 |
| 第 4 章 地盤統計学による事例検証 .....                    | 17 |
| 4.1 事例検証 1 .....                            | 17 |

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.1 対象プロジェクト概要 .....                          | 17        |
| 4.1.2 Phase1:円弧すべり計算を用いた斜面の安定解析による概算コスト推定 ..... | 18        |
| 4.1.3 Phase2:通常クリギング手法による概算コスト推定 .....          | 21        |
| 4.2 事例検証 2 .....                                | 22        |
| 4.2.1 対象プロジェクト概要 .....                          | 22        |
| 4.2.2 通常クリギング手法による概算コスト推定 .....                 | 23        |
| 4.3 事例検証 3 .....                                | 24        |
| 4.3.1 対象プロジェクト概要 .....                          | 24        |
| 4.3.2 通常クリギング手法による概算コスト推定 .....                 | 25        |
| <b>第 5 章 結論, 今後の課題 .....</b>                    | <b>27</b> |
| 5.1 結論 .....                                    | 27        |
| 5.2 今後の課題 .....                                 | 28        |
| <br>参考文献 .....                                  | <br>29    |
| 謝辞 .....                                        | 31        |

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

日本における建設投資<sup>1)</sup>は図 1.1 に示すように 90 年代前半の 80 兆円をピークとして 90 年代後半以降減少傾向が続いている。2010 年には 40.7 兆円と 90 年代以前の水準以下に下がっており、今後もこの傾向が続くと見通されている。このような国内の建設市場の縮小傾向に加え近年の建設市場の国際化により、海外建設プロジェクトの受注が拡大する傾向にある<sup>2)</sup>。

しかし、日本企業が海外でプロジェクトを実施する際には様々なリスク要因が含まれている<sup>3)</sup>。そして、国内のプロジェクトでは考えにくいリスク要因が顕在化する恐れがある。その中でも建設プロジェクトマネジメントの分野の研究<sup>4)</sup>において「予見できない地盤条件(Unforeseeable Geological Condition)」と称される地盤条件の不確実性に起因するリスクは、コストオーバーラン、工期遅延などプロジェクトに多大な影響を及ぼす可能性がある。この地盤条件の不確実性に起因するリスクは「地盤リスク(Georisk)」と称され、本研究では以下ジオリスクと呼ぶ。また、日本と海外のプロジェクトでは発注者と請負者間の契約方式すなわちリスク分担ルールも異なる。この相違により海外建設プロジェクトにおいて発注者と請負者の間でのリスク対応を巡る紛争が発生している。

このような背景により、日本が海外建設プロジェクトに参入する際に起こり得るリスク要因、中でも影響力のあるジオリスク要因を事例分析することが必要である。また、日本と海外における契約方式の違いを明らかにした上で、それによるリスク対応の違いを比較することが非常に重要な課題であると考えられる。

## 1.2 研究の目的

以上を踏まえて、日本の海外建設プロジェクトにおけるリスク要因を ODA 円借款事業の事例より抽出し明らかにする。そして、日本と海外の契約方法の違いにより発注者と請負者間のリスク分配ルールが変動する基本概念について整理する。

また、その契約方式の違いにより建設プロジェクトにおいて入札前に実施される地盤調査の質と量が異なる。それに対応して内在するジオリスクの大きさ及び建設プロジェクトの概算推定コストも変化する可能性がある。それらの相違につ

いてコスト次元で定量的に考察する。

以上の観点から、契約方法によるリスク対応のあり方についてジオリスク及び概算推定コストの変動を踏まえて検討する。

### 1.3 既往の研究との関連

本節では、海外建設プロジェクトにおけるリスクマネジメントに関する既往の研究について紹介する。また、それらの研究と本研究との関連から本研究で用いる具体的な手法について述べる。

- Flanagan and Norman<sup>5)</sup>らは、建設プロジェクトにおいて契約は、欧米型リスクマネジメントにおけるリスク対応の代表的手段であることを示している。また、発注者と請負者のリスク分担が契約方法によって異なることを示している。
- Kwak<sup>6)</sup>は、アジアの建設プロジェクトにおいてコストオーバーランや工期の遅延が起きた事例を取り上げ、国別または工種別に分類し分析した。
- 大津<sup>7)</sup>は、日本の海外建設プロジェクトにおけるリスク要因を事後評価により分類し、明らかにした。そして、リスク管理手法として従来の欧米型リスクマネジメント手法の適用性について検討することで、従来の欧米型リスクマネジメント手法の根幹は契約管理であることを示した。
- 大津<sup>8)</sup>らは、代表的建設契約約款及び契約方式によって変動する発注者と請負者のリスク分配ルールを示した。さらに、ジオリスクを評価するために調査結果より推定される地盤条件の信頼性を地盤統計学の代表的な手法であるクリギング手法を用いて考察した。

本節で取り上げた既往の研究では、海外建設プロジェクトにおけるリスク要因を明らかにし、契約方法によるリスク分担ルールの違いを示している。そして契約管理が欧米型リスクマネジメントにおける主たる手法であることを示している。また、クリギング手法を用いて事前調査の量と幾何学的不確実性によるリスクと

の関係进行考察している。

本研究はこれを受けて、近年の海外建設プロジェクトの事後評価結果により顕在化したリスク要因を抽出し検討を加えた上で日本と海外の契約方法の違いを整理する。次に、それらリスク要因が顕在化した場合の日本と海外の契約方法の違いによるリスク分配ルールの違いを整理し、リスク低減のための基本方針を比較する。そして、事前調査の量がジオリスク及び概算推定コストに及ぼす影響について事例分析によりコスト次元で定量的に評価する。

## 1.4 本論文の構成

本論文の構成は全5章からなる。各章の概要は以下の通りである。

1章では、序論として研究の背景、目的、及び既往の研究との関連を述べた。

2章では、本研究で用いられるリスクの定義を行い、欧米型リスクマネジメントフローについて説明する。次に、ODA円借款事業の事後評価結果を用い、顕在化したリスク要因及びジオリスク要因を分類し考察を加える。そして、日本と海外の代表的な契約約款及び契約方法の違いについて、公共工事標準請負契約約款とFIDICについて説明する。

3章では、契約約款及び契約方法による発注者と請負者のリスク分配ルールの変動について説明する。それを踏まえて、一般的リスク分配及びジオリスク分配モデルを示すとともに、調査費と各指標の位置づけを示す。そして、一般的リスク及びジオリスクを考慮したトータルコストモデルを示す。

4章では、円弧すべり計算による斜面の安定解析やクリギング手法を用いて、仮想軟弱地盤における調査費用と概算推定コストの関係を3つの事例より力学的・幾何学的解析から定量的に考察する。

5章では、本研究の結論及び今後の課題を示す。

## 第2章 プロジェクトにおけるリスク要因及び契約方法

本章では日本と海外の契約方法の違いと実際に顕在化したリスク要因について円借款事業事後評価結果を用いて説明する。まず、プロジェクトリスクマネジメントの基本概念に触れ、リスクをコスト次元で評価するにあたり用いるリスクの定義について説明する。次に、実際の建設プロジェクトとして円借款事業の事後評価結果を参照し顕在化したリスク要因を分類し考察する。それらを踏まえて、日本と海外の建設プロジェクトで用いられる契約方式について説明する。

### 2.1 プロジェクトリスクマネジメントとは

プロジェクトを実施するに当たっては、一般的に多様なリスク要因が内在することはいうまでもない。このため、言い換えれば、プロジェクトを円滑に実施することとはそのプロジェクトに内在するリスク要因をいかにマネジメントするかということになる。ここで以下に本研究で用いるリスクの定義及び具体的なプロジェクトリスクマネジメントにおける検討項目について示す。

#### 2.1.1 リスクの定義

本研究ではプロジェクトにおける損失の潜在的可能性をリスクとする。ここで、本研究で扱う建設プロジェクトにおける具体的な損失とは事前調査による推定コスト及び推定期間と実施工結果との乖離、つまり言い換えるとコストオーバーランと工期遅延である。

また、本研究におけるリスク要因とは、その要因が顕在化した場合に損失が発生する要因を表す。例えば、予見しない地盤条件やホストカントリーの複雑な許認可体制によりコストオーバーランや工期遅延が発生した場合、それらをリスク要因と呼ぶ。

#### 2.1.2 プロジェクトリスクマネジメントフロー

プロジェクトリスクマネジメントとは、 2.1 のフロー図の様に以下の4段階の検討項目からなるとされる。

##### 1. リスク同定

- 2. リスク分類
- 3. リスク評価
- 4. リスク対応

このうち、リスク対応は以下の様に大別される。

- ・ リスク制御
- ・ リスク転嫁

リスク制御はリスクそのものを低減する手法である。主な方法として事前調査やローカルスタッフ・カンパニーに依頼することが挙げられる。なお、従来事前調査工事は発注者の負担により実施されるため事前調査はジオリスクの回避策として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らすという観点から事前調査はリスク制御の一手法と解釈される。

次にリスク転嫁とは、リスクの大きさ自体は変化させず、その一部を他者に転嫁する手法である。主な手法として保険及び契約が挙げられる。前述の様に、契約とは発注者と請負者間のリスク分配率を決定するものであることから、リスク転嫁手法の一つと位置付けられることに留意されたい。

## 2.2 円借款事業事後評価結果に基づくリスク要因分析

前節で示したプロジェクトリスクマネジメントフローにおけるリスク分類を、実際の海外建設プロジェクトの事後評価により行う。本節では海外建設プロジェクトの事例として、JICA の円借款事業の事後評価結果<sup>10)</sup>を対象とする。ここで対象としたプロジェクトはいずれも設計・施行分離方式をとっており、建設工事の契約約款としては FIDIC Red が適用される。施行場所はアジアを主体とし、プロジェクトの種類は土木工事が主体である。これらのプロジェクトについては JICA により当初の融資計画に対する事後評価として、工期・工費及びその変動が生じた理由について報告されている。

本節では全てのリスク要因、及びジオリスクのみに着目したリスク要因について分析する。

### 2.2.1 円借款事業において顕在化した一般リスク要因

本項では 2006~2010 年の 5 年間に事後評価が行われた 208 件の借款案件を対象に分析した。その中で遅延またはコストオーバーランが起こった案件に着目し、それらが生じた理由を複数要因抽出可として分類した結果を **図 2.2** に示す。なお、**図 2.2** に示す結果より、**図 2.3** に示したリスク要因の階層区分においてカントリーレベルでの典型的なリスク要因となる為替変動等のマクロ経済に関連する事項及びコストアンダーランについては取り上げていないことに留意されたい。また、多くの事例で設計変更による遅延またはコストオーバーランが認められたが、これらを他の要因による副次的要因としてリスク要因に含めていない。

**図 2.2** より、支配的なリスク要因として以下の事項が抽出される。

- ・ 複雑な許認可体制
- ・ 実施母体の能力欠如
- ・ 入札・契約・設計の遅延

このうち、複雑な許認可体制及び実施母体の能力欠如については、請負者によるものでなく、ホストカントリーの政府機関及びローカルカンパニー・スタッフにより引き起こされるものである。例えば、複雑な許認可体制に相当する事項は、工事許可申請等の内部手続きの遅れ、中央政府と地方政府あるいは地方政府同士の乖離による遅れ、用地取得・住民移転の遅れ、などが挙げられる。これらは本来ホストカントリーの実施母体が回避を試みればできたものであるとされる。請負者からすると **図 2.3** に示すリスク要因の階層区分におけるカントリーレベルのリスク要因といえることができる。カントリーレベルはリスク要因の階層区分において最上位のものである。ここに国内プロジェクトではリスク要因としてプロジェクトレベルのみを考慮すればよいが、海外建設プロジェクトにおいてはプロジェクトレベルより上位の階層を重要視する必要がある。

次に、入札・契約・設計の遅延については発注者及び請負者両者の工事の前段階における不備により引き起こされるものである。中でも、発注者と請負者の連携がうまく取られず発生した要因が多い。例えば該当する事項として、入札手続き及び入札結果の承認の遅れ、事前審査の長期化、ホストカントリーの政府間・政府カンパニー間の合意の遅れ、国際的な手続きに不慣れなための遅れ、契約交

渉の長期化，詳細設計の遅延などが挙げられる．これら要因は両者の海外プロジェクトにおける経験の浅さ・連携不足から引き起こされるものであり，発注者・請負者が各々密な計画を立案することで対処可能であると考えられる．請負者からするとリスク要因の階層区分 **図 2.3** におけるマーケットレベルのリスク要因とすることができる．

また，**図 2.2** より予見できない地盤条件は上位要因とはなっていないものの，顕在化した事例においては多大なコストオーバーランや工期延長が認められた．このことからジオリスクのプロジェクトに与える影響力の大きさが伺える．

### 2.2.2 円借款事業において顕在化したジオリスク要因

本項では 1991～2010 年の 20 年間に事後評価が行われた借款案件の中で，ジオリスク要因の顕在化によって工期遅延またはコストオーバーランが引き起こされた 62 件の案件に着目し，検討を加える．案件を複数要因抽出可として工種別に分類したものを **図 2.4** に示し，要因別に分類したものを **図 2.5** に示す．

**図 2.4** の工種別の分類において件数の多かったものは道路，水力発電が挙げられる．道路建設事業においてジオリスク要因が顕在化した原因として広範囲な工事区間のうち設計基準に満たない軟弱な地盤が発見され設計変更が行われたことが挙げられる．また，水力発電においては水力発電所建設に必要となる各種土木構造物(導水路，ダム，沈砂池，発電所建屋等)の建設により当初予期しなかった地盤条件が発生したことによる設計変更が挙げられる．

次に，**図 2.5** の要因別の分類においては突出して軟弱地盤の件数が多く，続いて地下水となっている．軟弱地盤が顕在化した事例においてはいずれも予測以上の軟弱地盤への対応として地盤改良工事などの追加工事により工期遅延及びコストオーバーランが引き起こされている．また，地下水が顕在化した事例においては予測以上に地下水位が高かったために土木工事を追加したことによる．

以上を踏まえて海外建設プロジェクトにおけるジオリスク要因の多くは予測と実際の地盤条件の乖離によるものである．したがってこれらリスク要因は事前調査の量や質を増加させることによって回避することが可能なものが多い．

以上に示したように海外建設プロジェクトのリスク要因には，国内の建設プロジェクトでは考えにくい事前調査の不足によると考えられる事項が多数認められる．

## 2.3 契約約款の違い

前節に示した様な海外建設プロジェクトにおけるリスク要因が顕在化した場合のリスク転嫁手法の一つに契約が挙げられる。しかし、日本での公共建設工事と海外建設工事では契約方式が異なる。それは、日本は公共工事標準請負契約約款に、海外は FIDIC に従い契約を結んでいるためである。本節ではこれら代表的な契約約款である公共工事標準請負契約約款と FIDIC について説明する。

### 2.3.1 公共工事標準請負契約約款<sup>9)</sup>

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・施行分離の原則の下で、コンサルタントが発注者に対して入札、契約及び施行管理等を補佐し、施行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、ジオリスクの様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、等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、不完全ながらもジオ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十分対応可能であることに留意する必要がある。

### 2.3.2 FIDIC<sup>9)</sup>

海外工事において通常適用される建設請負契約は国際コンサルティング・エンジニア連盟(FIDIC)と総称され、その約款は発注形式により以下の様に分類される。

- ・ FIDIC Red (設計・施行分離方式)
- ・ FIDIC Yellow (設計・施行一括方式)
- ・ FIDIC Silver (EPC/ターンキー方式)

このうち FIDIC Red は、設計・施行分離方式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表 2.1 に示すような工事単価数量表が提示され、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。この契約では、予見できない地盤条件の出現等により、建設費が当初見積もりより増加した場合は、その増加分は発注者により負担される。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、請負者がジオ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・施行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、この基本概念は、数量精算契約に基づく請負契約約款であり、FIDIC Red と同じ記述が用いられている。

これに対して、FIDIC Silver は、EPC/ターンキー方式の工事に適用される請負契約約款である。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ともに、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・施行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、全てのリスク要因に対するリスクコストを負うことになる。

次章では 2.2 節で明らかになったリスク要因により引き起こされるリスクの分配方法を 2.3 節で説明した契約方式の違いにより説明する。

## 第3章 日本と海外の契約方式によるリスク分配の変動及び各指標の位置づけ

本章では、前章で解説した契約方式の違いにより顕在化したリスク要因の分配方法が異なる基本構造を説明する。それを踏まえて前章で解説したようなリスク要因に対する日本と海外のリスク対応の違いを比較する。また、リスク対応の違いから標準的な事前調査の量・質が異なり、それに伴ってコストオーバーラン、リスクプレミアム、概算推定コストの各指標も変化する可能性について検討を加える。そして、日本と海外の建設プロジェクトにおける全ての費用を含めたトータルコストモデルを示すことで、日本と海外のリスク分配構造の違いを再考察する。

### 3.1 契約方式によるリスク分担の変動

本節では、契約方式による一般的リスク(ジオリスク以外のリスク)及びジオリスクのリスク分配の変動を説明する。そして、リスク分配ルールによる日本と海外のリスク対応の基本方針と事前調査の位置づけの違いを説明すると共に、事前調査費とコストオーバーラン・リスクプレミアム・概算推定コストの関係について考察する。

#### 3.1.1 一般的リスク分配

本項では一般的リスクについて言えるリスク分配ルールを説明する。2.3.1項で述べたように、公共工事標準請負約款は総価一括方式を採用している。総価一括契約においては原則的に入札時に提示された請負価格が最優先され、その建設工事にかかわる工事単価数量表は、あくまで補助資料として取り扱われるものである。ここで事前に想定されるリスク要因が顕在化しコストオーバーランが発生し、発注者から請負者にコストを支払う場合、補助資料として取り扱われる工事単価数量表に示されている単価を固定したままで数量のみ変動させる方式（ランプサム固定価格）、及び単価を変動させる方式（ランプサム変動価格）に分類される。

FIDIC Red 及び FIDIC Yellow は数量精算方式の契約方式を取るため、事前に想定されるリスク要因が顕在化しコストオーバーランが発生した場合、そのコストは発注者により負担される。つまりこれらは請負者が負担するリスクが総価一括

契約に比べて軽減される契約方式だということができる。

これらに対して FIDIC Silver の様な EPC／ターンキー契約においては，原則全てのリスクを請負者が分担することになる。

ここで，リスク要因が顕在化しコストオーバーラン  $\Delta P$  が発生した場合，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コストオーバーランの負担額すなわちリスク分担は以下の様に表される。

① 発注者の負担額  $\Delta P_o$

$$\begin{aligned}\Delta P_o &= \sum_i (1-\alpha_i) \Delta P_i \\ \Delta P_o &\cong (1-\alpha^*) \Delta P\end{aligned}\tag{3.1}$$

② 請負者の負担額  $\Delta P_C$

$$\begin{aligned}\Delta P_C &= \sum_i \alpha_i \Delta P_i \\ \Delta P_C &\cong \alpha^* \Delta P\end{aligned}\tag{3.2}$$

ここに， $i$  はリスク要因の種類を表し， $\Delta P_i$  はリスク要因  $i$  に起因するコストオーバーランを表す。 $\alpha^*$  は各リスク要因  $\alpha_i$  に対する平均的な分配率を表し，0 から 1 の間の値を取る。

なお，コストオーバーラン  $\Delta P$  は各リスク要因が複合して発生したものと仮定すれば，次式の様に表される。

$$\Delta P = \sum_i \Delta P_i\tag{3.3}$$

したがって，請負者のリスク分担が大きい EPC／ターンキー契約では分配率  $\alpha^*$  は 1.0 に近くなり，請負者のリスク分担が小さくなる数量精算契約では分配率  $\alpha^*$  が小さくなる。これら発注者と請負者のリスク要因の顕在化によるコストオーバ

ーランの分担の模式図を図 3.1 に示す．ここで，コストオーバーラン  $\Delta P$  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，式(3.3)の様な単純な関係にはならないことに留意されたい．

日本のリスク対応の基本方針は，コストオーバーランそのものの最小化を図ることである．それに対して海外では，コスト分配率の最小化を図る．そして，コストオーバーランが発生した場合数量精算で対応する．つまり，この方針ではコストオーバーランは依然として大きく，結局は発注者の負担が大きくなる．これら日本と海外の契約形態，及びリスク対応の基本方針を表 3.1 にまとめる．

以上を踏まえて，コストオーバーラン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，請負者の負担を減ずるリスク対応も異なることが示された．

### 3.1.2 ジオリスク分配

前項は一般的リスクにおけるものであったが，本項ではジオリスクにおけるリスク分配ルールについて説明する．

一般的に，地盤・岩盤を対象とした建設工事ではジオリスク要因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様に大別される．

- ・調査工事（ボーリング調査・物理探査等）
- ・施行段階での設計変更（数量精算）

ジオリスクに対しては，EPC/ターンキー契約を除き，日本でも海外でも基本的に発注者によって負担されることになっている．よってジオリスクを引き起こすリスク要因に対するリスク分配率を  $\alpha_g$  とすると，原則  $\alpha_g \cong 0$  ということができる．

これを踏まえて日本では，コストオーバーランの発生を抑制するために標準的に十分な事前調査が実施される．それに対して海外では，2.3.2 項で示したように，コストオーバーランは数量精算で対応するため事前調査が十分でないことが一般的である．すなわちジオリスク対応に関しても表 3.1 で示したような基本方針を取ることが分かる．

以上を踏まえて日本と海外では，調査費とジオリスクに起因するコストオーバ

ーランの金額の大きさが異なると考えられる．調査費をかけることによって地盤状況が明らかになり，ジオリスクに起因するコストオーバーランが減る関係を図 3.2 に示す．図 3.2 において，調査費の少ない  $(I_R)_0$  に対応するコストオーバーラン  $(\Delta P)_0$  と調査費の多い  $(I_R)_1$  に対応するコストオーバーラン  $(\Delta P)_1$  を比べると， $(\Delta P)_0 > (\Delta P)_1$  となり，調査費とコストオーバーランの関係が減少関数で示されていることが分かる．

### 3.1.3 調査費とリスクプレミアムとの相関

本項では調査費とリスクプレミアムの関係について考察する．金融工学分野においてリスクプレミアムとは，リスクの高い資産の期待収益率からそれよりもリスクの低い資産の期待収益率を差し引いた超過収益率のことをいう．したがってリスクプレミアムはリスクの大きさに対する市場の評価であり，リスクプレミアムの高い資産の取引においては大きな期待収益率が見込めなければ取引が成立しない．ここで資産を海外建設プロジェクトに置き換えると，リスクマネジメントの研究においてリスクプレミアムをプロジェクトの入札価格に付加することがリスクファイナンス手法の一つであると考えられる<sup>7)</sup>．すなわち調査費をかけるとリスクが減ると同時にリスクプレミアムも減ると考えられる<sup>11)</sup>．この関係を図 3.3 に示す．図 3.3 において調査費の少ない  $(I_R)_0$  に対応するリスクプレミアム  $(R_{premium})_0$  と調査費の多い  $(I_R)_1$  に対応するリスクプレミアム  $(R_{premium})_1$  を比べると， $(R_{premium})_0 > (R_{premium})_1$  となり，調査費とコストオーバーランの関係が減少関数で示されていることが分かる．契約において契約金額はリスクプレミアムを概算推定コストに乗せて算出されるため，一般的に調査費の投資による効果はリスクプレミアム部分の減少にのみ焦点が当てられている点に留意されたい．

### 3.1.4 調査費と概算推定コストとの相関

本項では調査費と建設プロジェクトの概算推定コストの関係について考察する．ジオリスクが発生する恐れのある地盤に対して事前調査を行うとすると，調査によりジオリスク要因を検出した場合概算推定コストが増えると考えられる一方で，ジオリスク要因を検出しなかった場合概算推定コストは減ると考えられる．したがって，建設プロジェクトにおける調査費と概算推定コストの関係は明らかでないため，4章で事例検証により定量的に考察する．

## 3.2 トータルコストモデル

前節ではコストオーバーランにおける発注者と請負者の分配ルールについて示したが，本節では調査費や契約金額など他費用も含めた全てのコストにおける分配ルールについて説明する．それらを踏まえて，トータルコスト(発注者と請負者のコストの和)を用いて一般的リスク及びジオリスクを考慮したトータルコストモデルを構築することで，日本と海外のリスク分配構造の違いを一層明らかにする．

### 3.2.1 一般的トータルコストモデル

建設プロジェクトにおける一般的リスクを考慮した発注者と請負者のコストの和をトータルコストとすると，以下の様に表される．

トータルコスト  $TC$

$$TC = I_R + C_P + \Delta P \quad (3.4)$$

ここに， $I_R$ は調査費， $C_P$ は契約金額である．

このうち発注者と請負者の分担コストはそれぞれ以下の様に表せる．

① 発注者の分担コスト  $C_o$

$$C_o = I_R + C_P + (1 - \alpha^*)\Delta P \quad (3.5)$$

② 請負者の分担コスト  $C_C$

$$C_C = \alpha^* \Delta P \quad (3.6)$$

式(3.5)，(3.6)において調査費は発注者の負担であり，コストオーバーランについては 3.1.1 項で示されたコスト分配率により分配されることに留意されたい．

### 3.2.2 ジオリスクを考慮したトータルコストモデル

前項に一般的リスクを考慮したトータルコストモデルを示したが、本項ではジオリスクを考慮した日本と海外の建設プロジェクトにおけるトータルコストモデルを検討する。日本及び海外のトータルコストはそれぞれ以下の様に表される。

① 日本のトータルコスト  $TC^J$

$$TC^J = I_R^J + C_P^J + \Delta P^J \quad (3.7)$$

② 海外のトータルコスト  $TC^O$

$$TC^O = I_R^O + C_P^O + \Delta P^O + C_T \quad (3.8)$$

ここに、 $I_R$ は調査費、 $C_P$ は契約金額、 $C_T$ はトランザクションコスト(取引費用)であり、添字  $J$ は日本、 $O$ は海外を表す。

ここでトランザクションコストとは、大西<sup>12)</sup>の研究によると取引を行う際に発生する副次的な費用のことであり、原則請負者が負担する。例えば、取引契約前にかかる探索と情報の費用、取引契約を交わすこと自体にかかる交渉と意思決定の費用、取引契約後にかかる監視と執行の費用などがある。

日本の建設プロジェクトにおいては交渉という概念が存在しない一方で、海外ではリスク要因が顕在化しコストオーバーランが発生した場合、請負者が発注者にコストを分担させるために交渉を行う。したがって、海外の建設プロジェクトにおいて請負者は発注者にクレームを承認させて初めてコストを負担させることができる。

ここで、3.1.2 項に示すようにジオリスクについてコスト分配率  $\alpha_g \cong 0$  といえるため、日本において式(3.7)に示されるトータルコストは原則発注者が負担するものといえる。したがって、ジオリスクを考慮した日本の発注者の分担コストについて以下の関係が導ける。

日本の発注者の分担コスト  $C_O^J$

$$C_O^J = I_R^J + C_P^J + \Delta P^J \quad (3.9)$$

ここに日本の請負者の分担コスト  $C_C^J$  は原則 0 であることに留意されたい。

一方で，海外において式(3.8)の内，ジオリスクを考慮した発注者と請負者の分担コストはクレームを考えるとそれぞれ以下の様に表される。

① 海外の発注者の分担コスト  $C_O^O$

$$C_O^O = I_R^O + C_P^O + (1-\delta)\Delta P^O \quad (3.10)$$

② 海外の請負者の分担コスト  $C_C^O$

$$C_C^O = \delta\Delta P^O + C_T \quad (3.11)$$

ここに， $\delta$ はクレームが成立した場合 0，クレームが不成立の場合 1 を取る．つまり，クレームにより発注者がコストオーバーランを負担することを受け入れた場合，クレーム成立とし請負者はクレームに要したトランザクションコストの負担のみである．それに対し，発注者がコストオーバーランを予見し難き事項と認めなかった場合，クレーム不成立とし請負者がトランザクションコストの上にコストオーバーランも負担するという構造になる．この場合，請負者は多大な負担を被る．

本章で説明したリスク対応の違いによる各指標の変動を受けて，次章では実際の建設プロジェクトに適用することで変動を定量的に評価する．

## 第4章 地盤統計学による事例検証

本章では，前章までで説明した契約方法によるリスク対応の違いから，調査費とジオリスク及び概算推定コストが変動する事象を定量的に考察する．具体的には，実際の建設プロジェクトにおける力学的及び幾何学的不確実性を考慮し，円弧すべり計算による斜面の安定解析やクリギング手法を用いて考察を行う．また，それら解析に必要な事前調査費を仮定することで，調査費とジオリスク及び推定建設コストの関係をコスト次元で定量的に評価する．

ここに事例検証による検討は，対象プロジェクトとプロジェクトサイトにおける地盤の不確実性の違いから3つの解析に分ける．そのうち1つ目は軟弱地盤における道路建設プロジェクトサイトにおける力学的不確実性に関する解析，2つ目は同プロジェクトサイトにおける幾何学的不確実性に関する解析，3つ目は開削トンネルの遮水壁プロジェクトサイトにおける幾何学的不確実性に関する解析とする．

### 4.1 事例検証 1

本節では，軟弱地盤における道路建設プロジェクトサイトを対象として力学的不確実性，ここでは非排水せん断強度の不確実性に対して，Phase1, Phase2の2つの検討を行う．これら検討の目的は，ボーリング調査による調査費の増加と推定建設コストの変動を調べ，またクリギング手法を用いた場合の推定建設コストと比較するところにある．Phase1ではボーリングデータの増加によるプロジェクトの概算推定コストの変動を調べ，Phase2ではクリギング手法を用いて内挿補間したボーリングデータの概算推定コストの変動を調べる．

#### 4.1.1 対象プロジェクト概要

対象とする建設地盤は，黄瀬の研究<sup>13)</sup>における軟弱地盤上の道路建設プロジェクトを参照した．プロジェクトの仮想軟弱地盤モデルを図4.1に示す．図4.1に示す様に6000mにわたる砂層の上に軟弱な粘土層を伴う沖積層が分布しており，ボーリング調査は縦断方向に100mピッチで実施されているとする．

なお，本検証ではこの100mピッチのボーリング検査で得られた非排水せん断強度結果をこの地盤における真値と仮定する．用いるせん断強度の値は，既往の

研究により得られた実際の建設サイトにおけるせん断強度の平均値，分散，及び正規乱数を用いて以下の式より仮定する．

$$C_u = \mu + \sigma \times R \quad (4.1)$$

ここに， $C_u$ は非排水せん断強度， $\mu$ と $\sigma$ は既往の研究により得られた平均と分散， $R$ は正規乱数である．

これによって得られた 100m ピッチのボーリングデータの非排水せん断強度分布を図 4.2 に示す．

さらに，地盤推定結果より概算建設コストを推定するために以下に示す仮定を設けた．

1. ボーリング調査の施行単価は 60,000(円/m)とする．
2. 地盤改良費は 20,000,000(円/1ヶ所)とする．
3. 地盤改良費以外の建設コストは 2,000,000,000 円とする．

以上の仮定を適用すれば，概算建設コストは以下のように表される．

$$C_{road} = 2,000,000,000 + 20,000,000 \times N_f \quad (4.2)$$

ここに， $C_{road}$ は概算建設コスト， $N_f$ は設計基準に満たなかったボーリングの本数である．

#### 4.1.2 Phase1:円弧すべり計算を用いた斜面の安定解析による概算コスト推定

Phase1で，調査費の増加と推定建設コストの変動を調べる．ボーリング調査は，調査段階が進むにつれて 500m, 200m, 100m ピッチで実施されたとする．そして，ボーリングデータより得られた非排水せん断強度より全てのデータに対して円弧すべり計算による斜面の安定解析を行い，建設基準である安全率 1.2 を満たしているか調査する．ここで，安全率 1.2 を満たしていなかった場合地盤改良が必要であるとする．以上を踏まえて式(4.2)より各調査段階におけるプロジェクトの概算推定コストを算出し，調査費と概算推定コストの変動を検討する．

ここに本研究で用いる円弧すべり計算による斜面の安定解析手法について説明する．円弧すべり面を仮定する場合の斜面の安定解析は，**図 4.3** に示すようにいくつかの斜面崩壊メカニズムについて最小安全率を見出し，斜面の安定性を評価する．本検証では簡易ビショップ法<sup>14)</sup>による計算が他の手法に比べて安全率を低く算出していたため簡易ビショップ法により安全率を算出する．以下に計算方法を示す．

まず，**図 4.4** のような半径  $r$  の円弧すべり面を仮定する．すべり面に沿って土を任意に分割するとスライスに働く力は**図 4.5** の様になる．ここに**図 4.5** で， $H_i$ ， $V_i$ は側面に働く水平，鉛直の断面力， $S_i$ は破壊時のすべりせん断抵抗力， $N_i$ はすべり面に垂直な有効応力の合力である．一方 $U_i$ はすべり面に働く間隙水圧の合力， $W_i$ は*i*番目の土の自重であり，これら 2 つの指標は既知とする．ここで，すべり発生前の間隙水圧を考慮するという意味では有効応力が使われるが，せん断地の間隙水圧の発生量を考えない場合は，基本的に全応力解析となっていることに注意する必要がある．

簡易ビショップ法においてスライス側方の鉛直方向の断面力は釣り合っていると仮定する．つまり，水平方向の力の釣り合い式は以下の様になる．

$$V_i = 0, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (4.1)$$

次に，鉛直方向の力の釣り合い式は，以下の通りである．

$$U_i \cos \theta_i + N_i \cos \theta_i + S_i \sin \theta_i - W_i = 0 \quad (4.2)$$

また，モーメントの釣り合い式は，以下の様に表される．

$$r \sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i = r \sum_{i=1}^n S_i \quad (4.3)$$

ここで，安全率とせん断抵抗力を，すべりを起こさせる力で除したものであるから，すべり条件式は以下の様に表される．

$$S_i = \frac{(c_i' + \sigma_i' \tan \phi_i') L_i}{F_s} \quad (4.4)$$

ここに、 $c_i'$ は粘着力、 $\sigma_i'$ はすべり面に垂直な有効応力、 $\phi_i'$ は内部摩擦角、 $F_s$ は安全率である．式(4.4)にすべり条件式  $F_s S_i = (c_i' + \sigma_i' \tan \phi_i') L_i$ 、 $N_i = \sigma_i' L_i$ を代入すると、 $N_i$ は以下の様に求められる．

$$N_i = \frac{W_i - U_i \cos \theta_i - \frac{1}{F_s} c_i' L_i \sin \theta_i}{\cos \theta_i (1 + \frac{1}{F_s} \tan \theta_i \tan \phi_i')} \quad (4.5)$$

したがって、(4.1)～ (4.3)，(4.5)の条件式より、 $F_s$ は以下の様に表される．

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \{c_i' L_i \cos \theta_i + (W_i - U_i \cos \theta_i) \tan \phi_i'\} / m_{\alpha_i}}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} \quad (4.6)$$

$$m_{\alpha_i} = \cos \theta_i (1 + \frac{1}{F_s} \tan \theta_i \tan \phi_i') \quad (4.7)$$

図 4.6 に本節で行った円弧滑り解析の一結果を示す．円弧滑り解析に用いた各パラメータは既往の研究<sup>13)</sup>を参考にして設定している．

表 4.1 に各調査段階の総ボーリング本数と、円弧滑り解析を行った結果設計基準に満たなかったボーリング本数を示す．また、図 4.7 に各調査段階での調査費用と、概算推定コストの関係を示す．図 4.7 より、調査段階が進み調査費用が増加するにつれて設計基準を満たさない軟弱地盤を検出することができている．したがって、3.1.4 項において検討課題であった調査費の増加により概算推定コストが増加する関係が得られた．本検証では 100m ピッチの値を真値としているため

100m ピッチの概算推定コストとの乖離をジオリスクとする．すなわち，調査費用の増加によりジオリスクが減少する関係も定量的に示している．

#### 4.1.3 Phase2:通常クリギング手法による概算コスト推定

Phase2 では，クリギング手法を用いて内挿補間したボーリングデータにより調査費の増加と推定建設コストの変動を調べる．ボーリング調査は，Phase2 においても Phase1 と同じく調査段階が進むにつれて 500m, 200m, 100m ピッチで実施されたとする．そして 500m ピッチと 200m ピッチのデータについてそれぞれ通常クリギング手法より内挿補間することで 100m ピッチのデータとする．これらのデータが真値(100m ピッチのデータ)とどの程度の乖離があるかを検討する．この検討により，通常クリギング手法を用いることによる調査費と概算推定コスト関係の変動を定量的に考察する．

ここで，通常クリギング手法<sup>15)</sup>について説明する．クリギング手法とは，対象物性値の空間的分布を，観測値を用いて内挿補間法により確率変数として推定する手法である．この概念図を図 4.8 に示す．一般的なクリギング手法では，推定対象領域を 2 次固有定常確率場と仮定し，任意の 2 点  $\mathbf{x}$  と  $\mathbf{x}+\mathbf{h}$  において次式の関係が成り立つ．

$$E[Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})] = 0 \quad (4.8)$$

$$Var[Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})] = 2\gamma(\mathbf{h}) \quad (4.9)$$

ここで， $Z(\mathbf{x})$  は位置  $\mathbf{x}$  における物性値， $Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})$  は位置  $\mathbf{x}$  から距離  $\mathbf{h}$  離れた地点における物性値， $\gamma(\mathbf{h})$  はセミバリオグラムと呼ばれる分散により算出される値を表す．

2 次固有定常確率場において，推定点  $\mathbf{x}_0$  における推定物性値  $Z^*(\mathbf{x}_0)$  をその近傍における物性値  $Z(\mathbf{x}_\alpha)$  と重み係数  $\omega_\alpha$  を用いた線形結合によって推定する．また，重み係数の総和は 1 であるという条件がある．

$$Z^*(\mathbf{x}_0) = \sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha Z(\mathbf{x}_\alpha) \quad (4.10)$$

$$\sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha = 1 \quad (4.11)$$

セミバリオグラム  $\gamma(\mathbf{h})$  は，対象とする場が一般的な空間的相関関係を持つ場合は増加関数になると考えられ，距離の増加と共に  $\gamma(\mathbf{h})$  が増加する割合は減少する．このとき，共分散関数  $C(\mathbf{h})$  はセミバリオグラムを用いて以下のように算出される．

$$C(\mathbf{h}) = \gamma(\infty) - \gamma(\mathbf{h}) \quad (4.12)$$

図 4.9 にセミバリオグラムと共分散関数の関係の概念図を示す．本検証では，セミバリオグラムは指数型共分散関数を用いてモデル化した．本検証における 200m ピッチ，500m ピッチのボーリング調査より得られるセミバリオグラムを図 4.10.(a)，図 4.10.(b)に，関数形を表 4.2 に示す．

表 4.2 に示したフィッティング関数を用い，200m ピッチ，500m ピッチのデータを 100m ピッチのデータに内挿補間した結果を図 4.11(a)，図 4.11(b)に示す．

また，表 4.3 に各調査段階の総ボーリング本数と，クリギング手法により内挿補間し円弧滑り計算による斜面安定解析の結果設計基準に満たなかったボーリング本数を示す．図 4.12 に各調査段階での調査費用と，概算推定コストの関係を示す．図 4.12 より，Phase2 は Phase1 と異なり調査費用が増加により設計基準を満たさない軟弱地盤を検出することで概算推定コストも増加する現象は見られなかった．その原因として調査段階 1 において悪い地盤を多く検出したため，クリギング手法を用いると地盤をより悪く評価したことが挙げられる．これにより情報量の少ない時点ではボーリングの選択により地盤の評価は左右され，蓋然性による程度が大きいことと，事例によって調査費と概算推定コストの関係が異なることが示された．

## 4.2 事例検証 2

本節では，既往の研究<sup>16)</sup>の結果を用いて幾何学的不確実性，ここでは層厚の不確実性に対して前節と同様に調査費と概算推定コストの関係を再整理した．

### 4.2.1 対象プロジェクト概要

対象とする建設プロジェクトは，河川の堤防沿いに地下高速道路を施工するプロジェクトである．事前調査として縦断方向 200m ピッチの各断面に 3 つのボー

リングが存在し、本検証では 4800m の調査範囲を対象とした。

さらに、地盤推定結果より概算コストを推定するために以下に示す仮定を設けた。

1. ボーリング調査の施行単価は 60,000(円/m)とする。
2. 鋼矢板の根入れ長は粘土層 2m とする。
3. 鋼矢板の 1 ブロックの長さは 20m とする。
4. 鋼矢板の施行にかかる費用は、12,000(円/m)とする。

以上の仮定を適用すれば、概算建設コストは以下のように表される。

$$C_{road} = \sum_{k=1}^N (12,000 \times 20 \times L_i) \quad (4.13)$$

ここに、 $C_{road}$  は地下高速道路建設コスト、 $N$  は必要鋼矢板枚数、 $L_i$  は鋼矢板  $i$  の深度である。

以上の様に設定した仮定を模式図で表すと 図 4.13 のように表現される。本来鋼矢板を設置する費用は上記仮定より詳細な条件により決定される事は言うまでもない。

なお、用いるボーリングデータによっては地盤の幾何学的不確実性に起因するジオリスクが発生する可能性が予想される。

#### 4.2.2 通常クリギング手法による概算コスト推定

事後評価として調査段階が進むにつれてボーリングの本数を増やした時の概算推定コストの変動を検討する。検討するピッチは 2400m・1600m・1200m・600m・400m・200m とする。また、対象領域の地盤状況は得られたボーリングデータから通常クリギング手法を用いて推定するとする。

表 4.4 に各調査段階におけるボーリングピッチとそれにより得られた概算推定コストを式(4.13)より計算した結果を示す。それを調査費と概算推定コストの関係にまとめたグラフを 図 4.14 に示す。図 4.14 において矢印の方向は単純に情報

量が増加している方向を指す．単純な情報量の増加とは，**図 4.15**にあるように 2400m から 1600m ピッチの場合異なるボーリングを採用しているため単純な情報量の増加としないが，2400m から 1200m ピッチの場合同じボーリングを採用しているため単純な情報量の増加とする．

**図 4.14** から，情報量の少ない時点で傾き負の箇所があるが，他全ての段階で調査費と概算推定コストの関係が増加関数で表されていることが分かる．したがって，情報量の少ない時点ではボーリングデータ選択の蓋然性による概算推定コストの減少が見られたが，他全ての段階で調査費の増加による概算推定コストの増加が見られた．

### 4.3 事例検証 3

本節では，既往の研究<sup>17)</sup>の結果を用いて幾何学的不確実性，ここでは層厚の不確実性により **4.1 節**, **4.2 節**と同様に調査費と概算推定コストの関係を再整理した．

#### 4.3.1 対象プロジェクト概要

対象とする建設プロジェクトは，開削トンネル建設プロジェクト中の SMW を用いた遮水壁建設プロジェクトである．ここで，SMW とは土(Soil)とセメントスラリーを現位置で混合・攪拌(Mixing)し，地中に造成する壁体(Wall)である．事前調査として **図 4.16**の断面図に示すようなボーリング調査が行われている．

さらに，地盤推定結果より概算コストを推定するために以下に示す仮定を設けた．

1. ボーリング調査の施行単価は 60,000(円/m)とする．
2. SMW の根入れ長は Dc1 層上面レベルから 1m とする．
3. SMW の 1 ブロックの幅の長さは 20m とする．
4. SMW の施工単価は，SMW の型や打ち込みにかかる費用，切梁を考慮したうえで 29,000(円/m<sup>2</sup>)とする．

以上の仮定を適用すれば，SMW 建設コストは以下により算出される．

$$C_{SMW} = \sum_{k=1}^N (29,000 \times 20 \times L_i) \quad (4.14)$$

ここに、 $C_{SMW}$  は SMW 建設コスト、 $N$  は SMW 必要パネル枚数、 $L_i$  はパネル  $i$  の SMW パネル深度である。

以上の様に設定した仮定を模式図で表すと **図 4.17** のように表現される。本来 SMW の建設費用は上記仮定より詳細な条件により決定される事は言うまでもない。

なお、用いるボーリングデータによっては地盤の幾何学的不確実性に起因するジオリスクが発生する可能性が予想される。

#### 4.3.2 通常クリギング手法による概算コスト推定

事後評価としてボーリングを減らした時の各調査段階を仮定し、各調査段階における概算推定コストの変動を検討する。また、データの得られていない部分は通常クリギング手法を用いて推定する。

**表 4.5** に各調査段階におけるボーリングの本数、ボーリングピッチ、それにより得られた概算推定コストを式(4.14)により計算した結果を示す。それを調査費と概算推定コストの関係にまとめたグラフを **図 4.18** に示す。

**図 4.18** において、調査段階 2 から調査段階 3 の地点で僅かに減少しているが他全ての段階で調査費と概算推定コストの関係が増加関数で表されている。しかし実施工コストと比較すると調査段階 5 においても依然として大きな乖離があることが分かる。この原因として **図 4.19** に示すような地盤の削り込みエリアの出現が挙げられる。本事例において調査段階 4 以降は削り込みの存在を反映してはいるが、実施工データでは調査段階 5 までで捉えられない程度の削り込みが出現している。したがって調査費とジオリスクの関係は **図 4.20** の様になり、ボーリングの情報量の増加によってある程度までジオリスクを減らすことができるが、ボーリングの情報量の増加により低減することが不可能であったリスクが存在する。ここで地盤の削り込みは原則ボーリング調査では対応できないことに留意すると **図 4.20** において下側に示されるリスクは、ボーリングのみを事前調査に用いて地盤をモデル化し、コスト推定をしたことによるリスクであると考えられる。本研究ではこのリスクを外挿リスク(モデル化リスク)と呼ぶ。本事例においては電気

探査など他事前調査手法を用いたクロスチェックによって外挿リスクを低減することが可能であったと考えられる．これに対して図 4.20 において上側に示されるボーリング調査結果を用いた内挿により低減されたリスクを内挿リスクと呼ぶ．

3.2.2 項で示した通り海外建設プロジェクトにおいてジオリスクが発生した場合，請負者が発注者にコストを分担させるためにはクレームを承認させる必要がある．このクレームにおいて限られた事前調査によって低減することのできない外挿リスクが存在することを発注者・請負者が理解することは，クレームを承認させること，つまり請負者の負担を減らすことに繋がると思われる．

本章の事例検証において，事例検証 1 の Phase1 では調査費の増加に伴い概算推定コストが増加する関係が示された．その一方で Phase2 ではクリギング手法による内挿補間により，ボーリングデータによっては地盤の不確実性の発現を大きく捉え，調査費の増加に伴う概算推定コストの増加は見られなかった．これにより情報量の少ない時点ではボーリングの選択により地盤の評価は左右され，蓋然性による程度が大きいことと，事例によって調査費と概算推定コストの関係が異なることが示された．事例検証 2 では情報量の少ない時点でボーリング選択の蓋然性による傾き負の箇所があるが，他全ての段階で調査費と概算推定コストの関係が増加関数で示された．事例検証 3 では調査費の増加による概算推定コストの増加が見られたが，地盤の削り込みエリアの存在により外挿リスクの顕在化が見受けられた．これより想定されるリスク要因に対して適切な調査方法を採用することが外挿リスクの低減に繋がることを示した．また，海外建設プロジェクトにおいてジオリスクが発生した後，請負者が発注者にコストを分担させるためにはクレームを承認させる必要があるため，単に事前調査を増加させることで低減することのできない外挿リスク及び内挿リスクの構造を理解することは，クレームを承認させること，つまり請負者の負担を減らすことの観点から重要な課題だと思われる．

以上を踏まえて次章では，本研究の結論を述べ今後の検討課題を示す．

## 第5章 結論，今後の課題

### 5.1 結論

本研究では，まず第2章でプロジェクトリスクマネジメントの基本概念を説明し，円借款事業事後評価結果により実際に顕在化したリスク要因を検証した．そして，日本と海外の契約方法の違いを説明した．第3章では，第2章で説明した契約方法の違いによるリスク分配の変動を説明すると共に，日本と海外のリスク対応の基本方針を示した．また，調査費とコストオーバーラン，リスクプレミアム，プロジェクトの概算推定コストの関係について検討し，日本と海外における各指標の位置づけを示した．第4章では契約方法によるリスク対応の違いから，調査費とジオリスク及び概算推定コストが変動する事象を定量的に考察した．具体的には，実際の建設サイトの力学的及び幾何学的不確実性を考慮して円弧すべり解析やクリギング手法を用いることで解析し，それら解析に必要な事前調査費を仮定することで，調査費とコストオーバーランや概算推定コストの関係をコスト次元で評価した．得られた結論として以下が挙げられる．

- 1.実際に顕在化したジオリスク要因の検証により，ジオリスクに対する事前調査の有用性を示した．
- 2.調査費の増加により，コストオーバーランとリスクプレミアムが減少する基本概念を説明し調査費の必要性を示した．
- 3.事例検証により，情報量の少ない時点では情報選択の蓋然性に依るところが大きいため概算推定コストが変動する一方，調査段階が進むにつれ概算推定コストが増加することを示し，契約において調査費をかけコストオーバーラン  $\Delta P$  の最小化を図ることの有用性を示した．
- 4.事例によっては外挿リスクが存在することを明らかにし，想定されるリスク要因に対して適切な事前調査を行うことによりリスクが低減できる可能性を示した．

以上の結論をふまえて，本研究では契約方法によるリスク対応の在り方について，事前調査に投資しコストオーバーラン  $\Delta P$  の最小化を図ることと，想定されるリスク要因に対し適切な事前調査を採用することでリスクの低減が期待できることを示した．また発注者・請負者間でリスク構造を理解することが請負者のリス

ク負担やトラブル回避の観点から有益であることを示した。

## 5.2 今後の課題

最後に、本研究の今後の課題として、より多くの建設プロジェクト、特に対象としている海外建設プロジェクト事例により検証をすすめていくことがあげられる。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：平成 24 年度建設投資見直し，2012.
- 2) 木村亮：海外で活躍する地盤工学，地盤工学会誌 Vol60，No.9，Ser.No.656，2012.
- 3) Coface：THE HANDBOOK OF COUNTRY RISK 2002, Coface and Kogan Page Limited, 2002.
- 4) Zhi,H.：Risk Management for Overseas Construction Projects, International Journal of Projects Management, Vol.13, No.14, pp.231-237, 1995.
- 5) Flanagan,R.and Norman,G：Risk Management and Construction, Blackwell Science, 1993.
- 6) Kwak,Y.H.：Analyzing Asian Infrastructure Development Privatization Market, ASCE, Journal of Construction Engineering and Management, Vol.128, No.2, pp.110-116, 2002.
- 7) 大津宏康：建設分野におけるリスク工学の適用性とその展望，土木学会論文集 No.728/VI-58，pp.1-16，2003.
- 8) 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ジオ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.
- 9) 大津宏康：プロジェクトマネジメント，コロナ社，2011.
- 10) 独立行政法人国際協力機構：事後段階の評価(事後評価・事後モニタリング)，<http://www.jica.go.jp/activities/evaluation/after.html>，2013.
- 11) Bilal M. Ayyub：Risk Analysis in Engineering and Economics, CHAPMAN & HALL/CRC, 2003.
- 12) 大西正光：プロジェクト契約の不完備性と制度設計に関する契約，2003.
- 13) 黄瀬周作：地盤統計学を援用した地盤物性の空間的分布特性評価に関する研究，2002.
- 14) 岡二三生：土質力学，朝倉書店，2010.
- 15) Wackernagel, H. (原著)，地球統計学研究委員会（訳編）：地球統計学，森北出版，2003.
- 16) 大津宏康，尾ノ井芳樹，李圭太：金融工学理論に基づく地盤リスク評価に関

する一考察，土木学会論文集 No.742/VI-60，pp.101-113，2003.

- 17) 坂井一雄：地下構造物建設プロジェクトにおけるコスト変動リスク評価手法に関する研究，2006.

## 謝辞

最後になりましたが，本論文を作成する上で，本研究にご協力頂いた方々，お世話になった方々に感謝を表します．

京都大学工学研究科・大津宏康教授には，自身の関心に沿った興味深い研究テーマを与えて頂き，ご多忙の中においても度重なる質問に対して一つ一つ親身に答えて頂きました．また，研究を遂行すると共に，本分野の研究の奥深さ・おもしろさを教えて頂きました．先生のご指導のもとで研究ができたことを誇りに感じるとともに、心より感謝の意を表したいと思います．

京都大学工学研究科・木元小百合准教授には，副査を務めて頂き，丁寧で的確なご指摘を頂き大変勉強になりました．心より感謝致します．

京都大学工学研究科・塩谷智基准教授には，本研究に対して貴重な意見をして頂き，また気さくに話しかけて頂き研究生活をより一層円滑に進めることができました．深く感謝を申し上げます．

京都大学工学研究科・稲積真哉助教には，研究生活を手厚くサポートして頂き，非常にお世話になりました．心からお礼申し上げます．

(独)防災科学技術研究所・長谷川信介氏には，ご多忙の中，本研究を進める上で必要となる貴重なデータを提供して頂き，研究の方向性についてアドバイスして頂きました．心から感謝致します．

大八木智子秘書には，研究生活を様々な面でサポートして頂き，研究に集中できる環境を整えて頂きましたことに大変感謝致します．また，大津研究室の諸先輩方には左も右も分からない研究生活を1から教えて頂き，同回生の方々には研究生活を支えてもらうとともに多大な刺激を受けました．心よりお礼申し上げます．

皆様方の支えにより，自分の人生において大変有意義で貴重な経験が出来たことに心から感謝します．

最後に，このような機会を与えてくれ，遠く離れた地から私の生活を気遣ってくれた家族に深く感謝致します．

表2.1 工事単価数量表の例<sup>9)</sup>

| 項目          | 単価(US\$) | 数量    | 単位             | 計         |
|-------------|----------|-------|----------------|-----------|
| トンネル掘削      | 5085     | 12610 | m <sup>3</sup> | 64121850  |
| 覆工コンクリート    | 11850    | 6590  | m <sup>3</sup> | 78091500  |
| インバートコンクリート | 13480    | 90    | m <sup>3</sup> | 1213200   |
| 鋼製支保工       | 121300   | 20    | t              | 2426000   |
| 吹付コンクリート(Ⅰ) | 1500     | 1290  | m <sup>2</sup> | 1935000   |
| 吹付コンクリート(Ⅱ) | 1300     | 2680  | m <sup>2</sup> | 3484000   |
| ロックボルト      | 1300     | 1300  | 本              | 1690000   |
|             |          |       | 総計             | 152961550 |

表3.1 日本と海外の契約形態およびリスク対応の基本方針

| 区 分 | 契約約款             | 発注/調達形式 | 契約方式                  | リスク対応の基本方針                 |
|-----|------------------|---------|-----------------------|----------------------------|
| 日 本 | 公共工事標準<br>請負契約約款 | 設計・施工分離 | 総価一括方式<br>(ランプサム変動価格) | $\Delta P \Rightarrow$ 最小化 |
| 海 外 | FIDIC Red        | 設計・施工分離 | 数量精算方式                | $\alpha^* \Rightarrow$ 最小化 |
|     | FIDIC Yellow     | 設計・施工一括 | 数量精算方式                |                            |

表4.1 基準に満たなかったボーリング本数

| 調査段階 | ボーリング<br>ピッチ | 基準に満たな<br>かった本数 | ボーリング<br>総数 |
|------|--------------|-----------------|-------------|
| 1    | 500m         | 2本              | 12本         |
| 2    | 200m         | 3本              | 30本         |
| 3    | 100m         | 7本              | 60本         |

表4.2 セミバリオグラムの関数

関数形:  $\gamma = C_0 + C_1 \{1 - \exp(-\frac{3h}{a})\}$

| ボーリング<br>ピッチ | $C_0$ | $C_1$ | $a$  |
|--------------|-------|-------|------|
| 200m         | 0     | 0.010 | 3000 |
| 500m         | 0     | 0.015 | 4000 |

**表4.3 基準に満たなかったボーリング本数**

| 調査段階 | ボーリングピッチ | 基準に満たなかった本数 | ボーリング総数 |
|------|----------|-------------|---------|
| 1    | 500m     | 10本         | 12本     |
| 2    | 200m     | 5本          | 30本     |
| 3    | 100m     | 7本          | 60本     |

**表4.4 各調査段階における概算推定コスト**

| 調査段階 | ボーリングピッチ | 概算推定コスト<br>(百万円) |
|------|----------|------------------|
| 1    | 2400m    | 2097             |
| 2    | 1600m    | 2004             |
| 3    | 1200m    | 2050             |
| 4    | 800m     | 2054             |
| 5    | 600m     | 2059             |
| 6    | 400m     | 2096             |
| 7    | 200m     | 2210             |

表4.5 各調査段階における概算推定コスト

| 調査段階 | ボーリング<br>総数 | ボーリングピッチ<br>(約) | 概算推定コスト<br>(百万円) |
|------|-------------|-----------------|------------------|
| 1    | 7本          | 200m            | 1426.5           |
| 2    | 16本         | 70m             | 1428.0           |
| 3    | 17本         | 70m             | 1427.0           |
| 4    | 35本         | 50m             | 1437.5           |
| 5    | 52本         | 最短<br>15m       | 1439.0           |

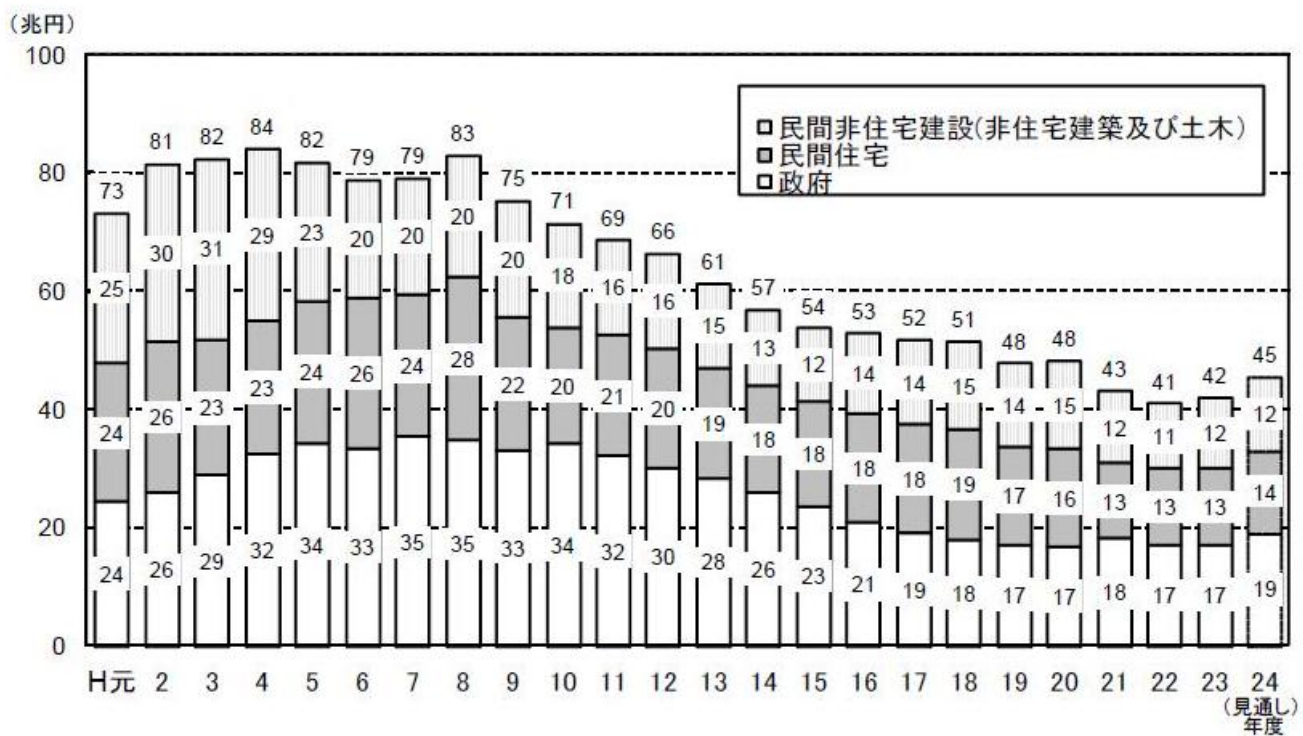


図1.1 日本における建設投資の推移

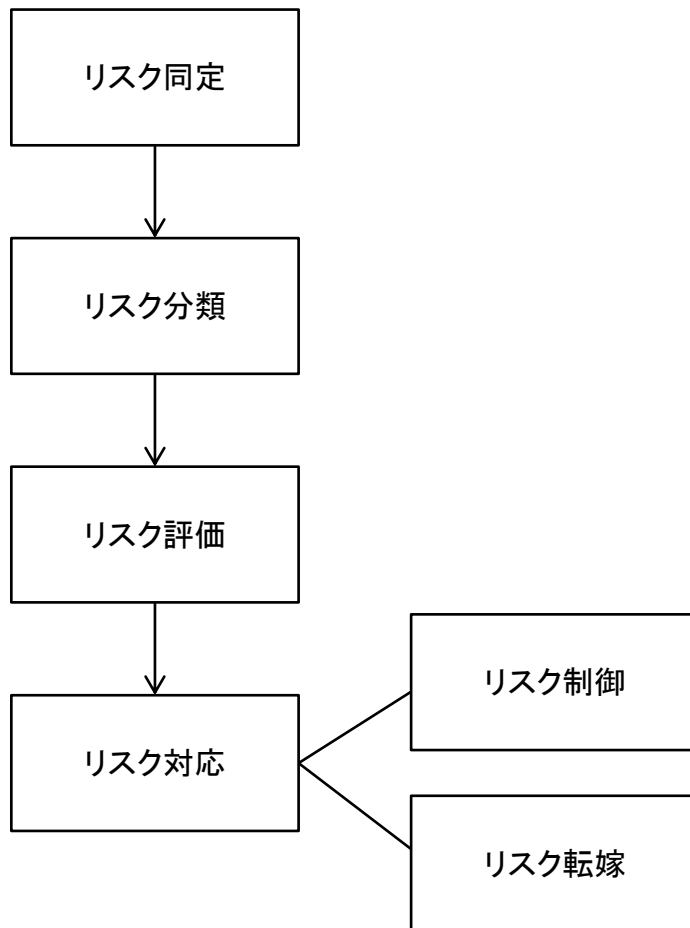


図2.1 プロジェクトリスクマネジメントフロー

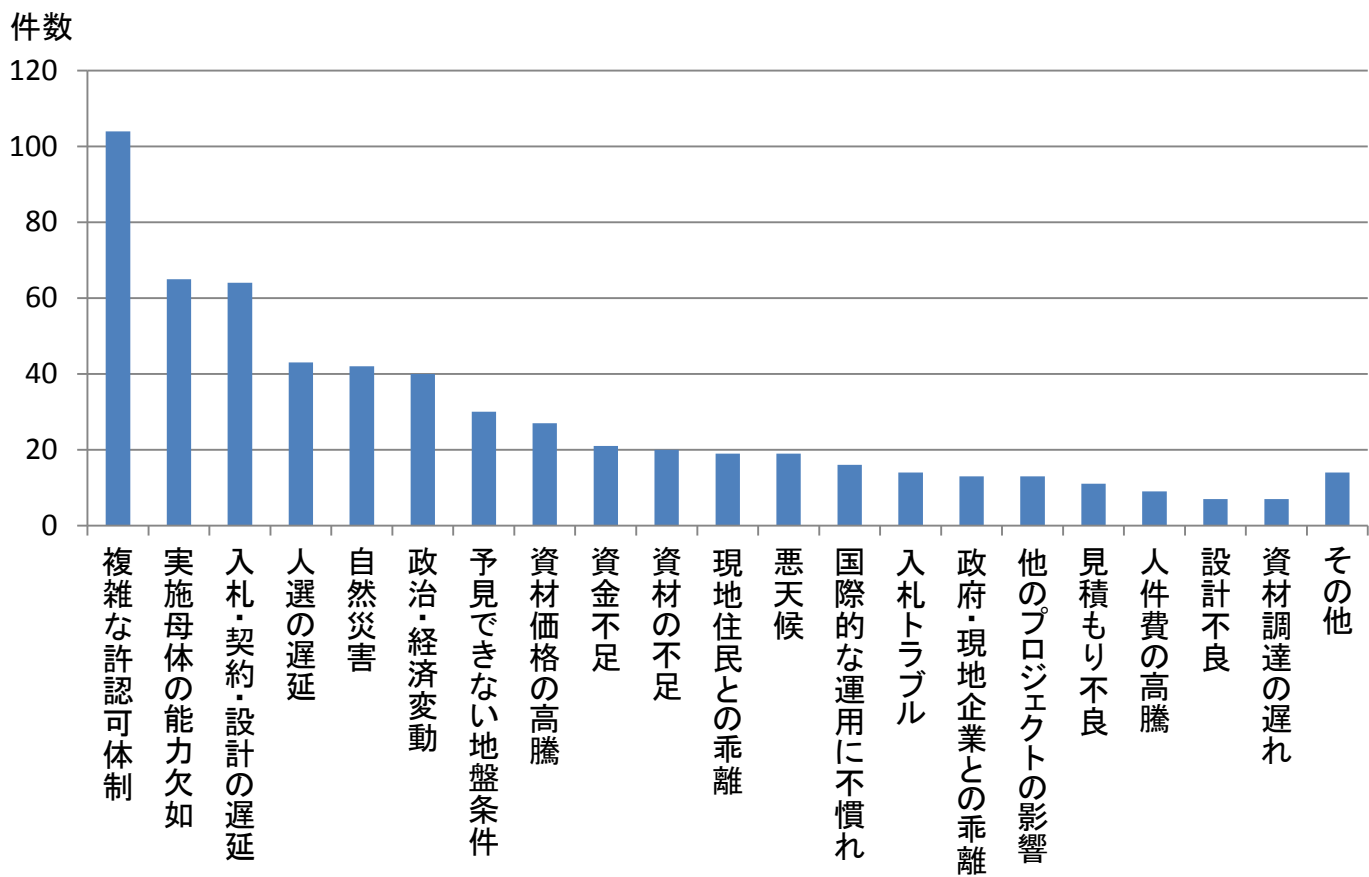


図2.2 顕在化した一般リスク要因

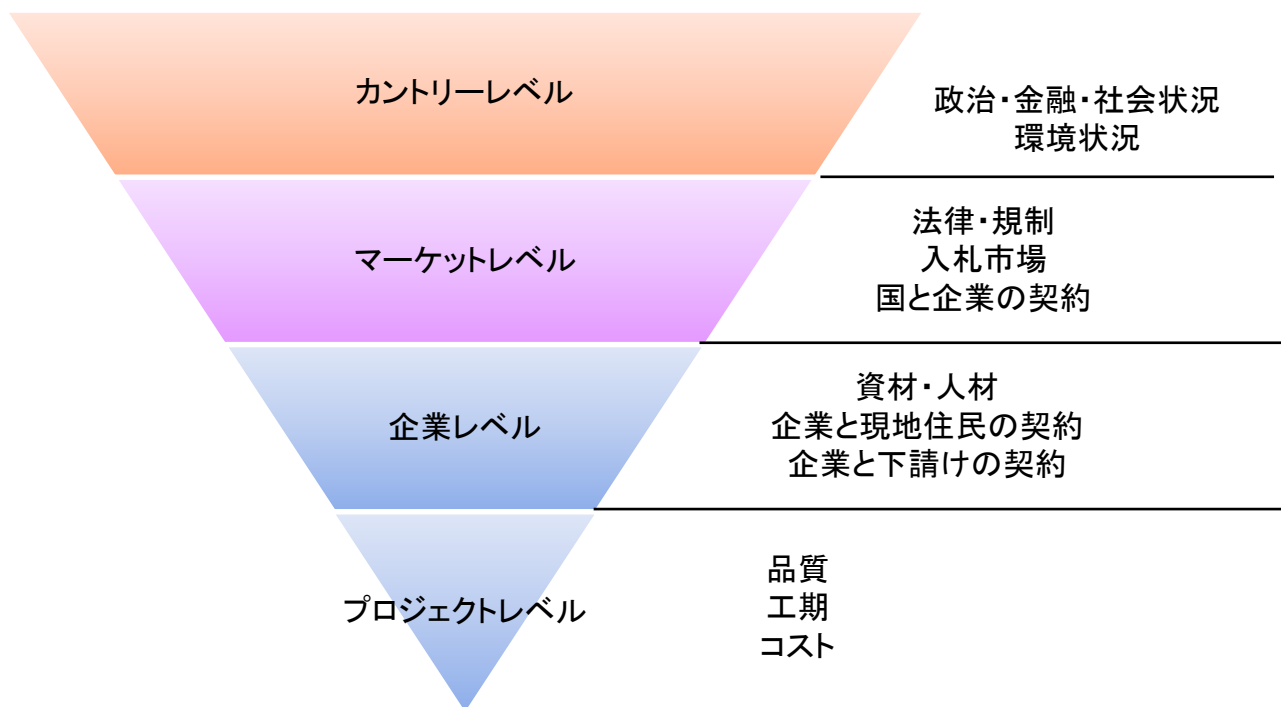


図2.3 海外建設プロジェクトのリスク要因階層

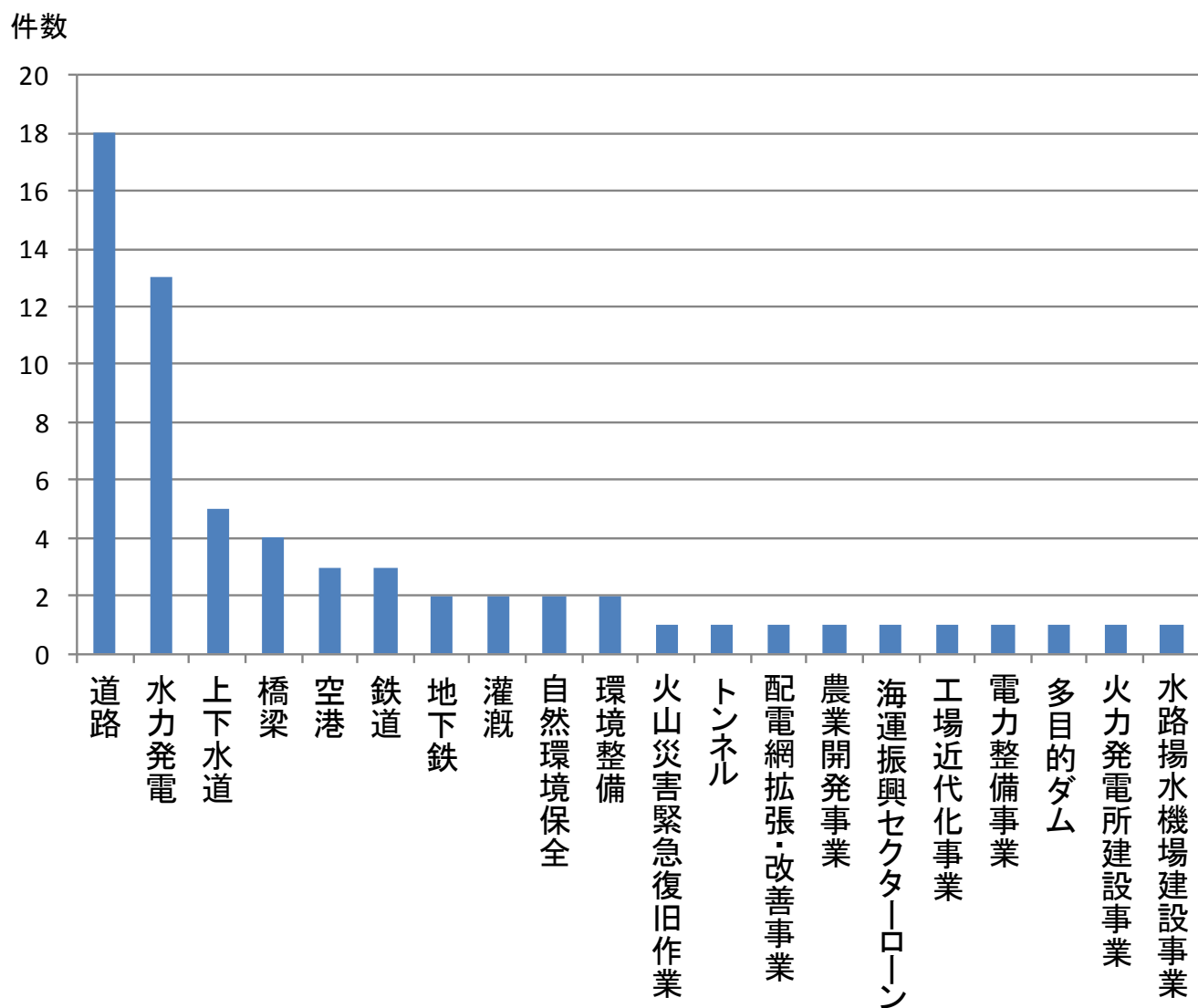


図2.4 ジオリスク要因が顕在化した案件 工種別

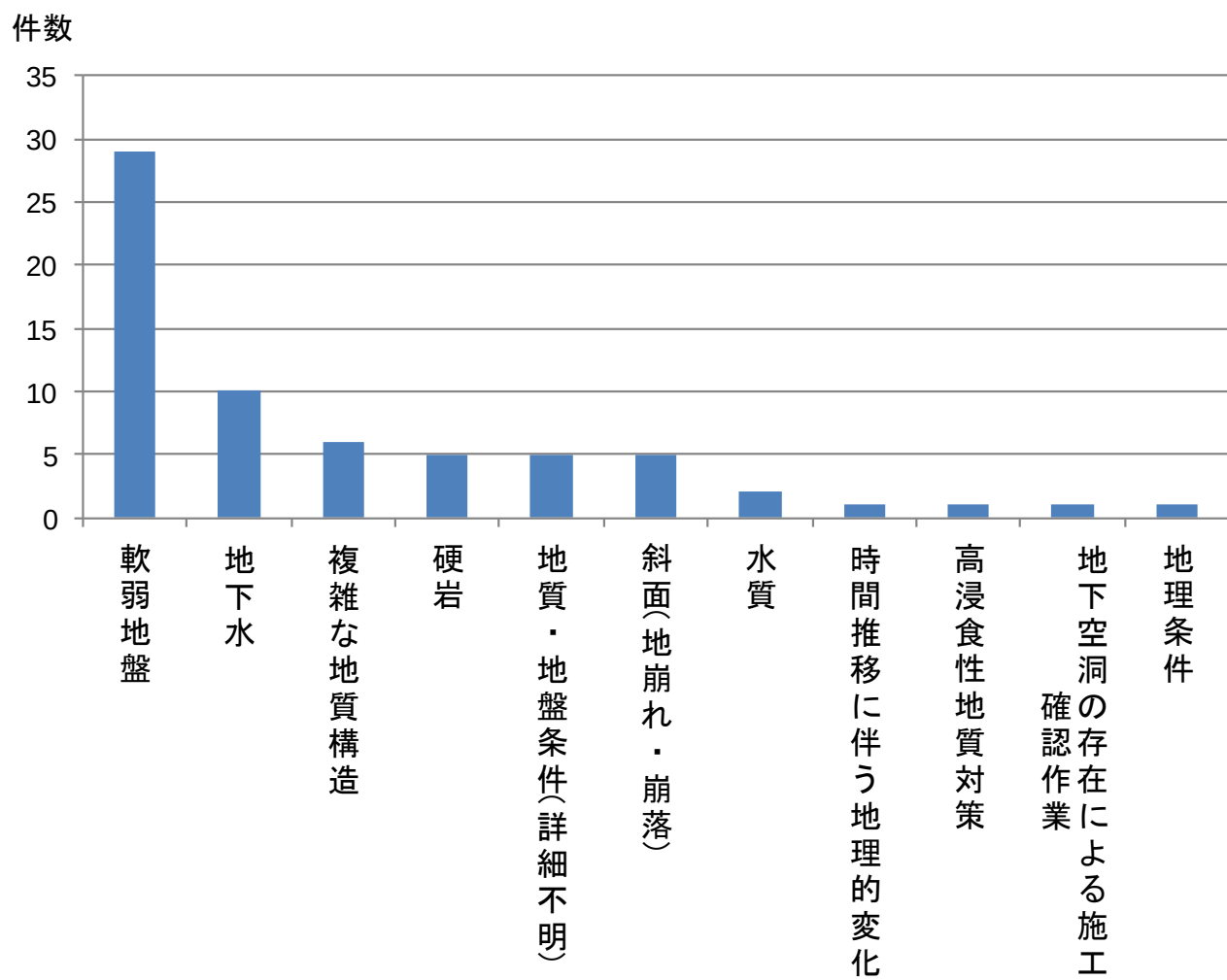


図2.5 ジオリスク要因が顕在化した案件 要因別

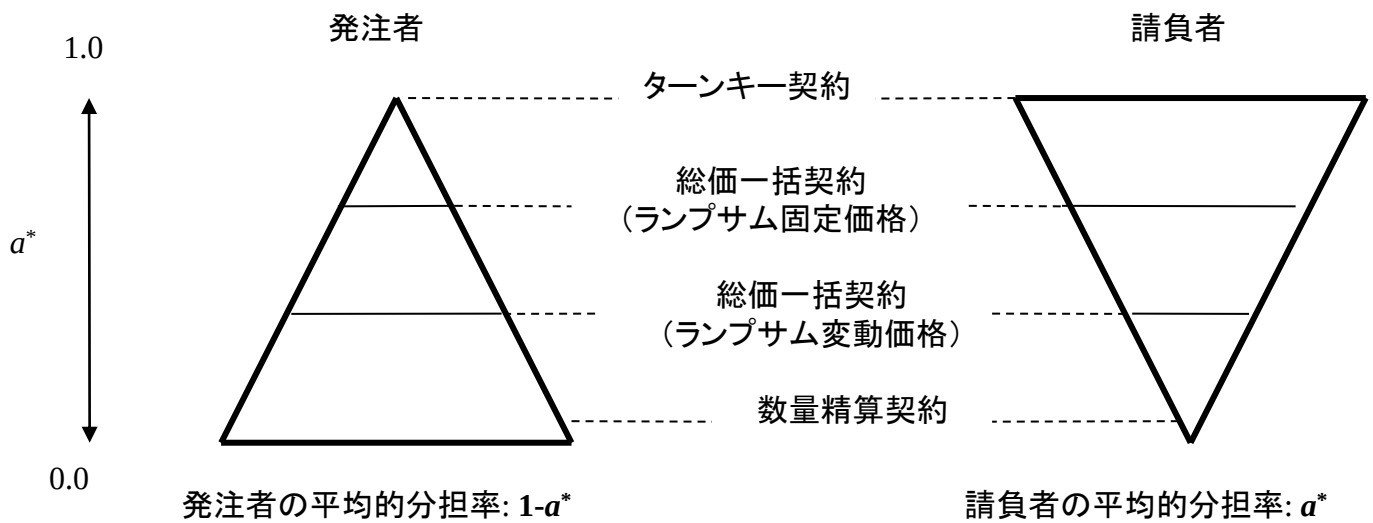


図3.1 コストオーバーランの分担構造

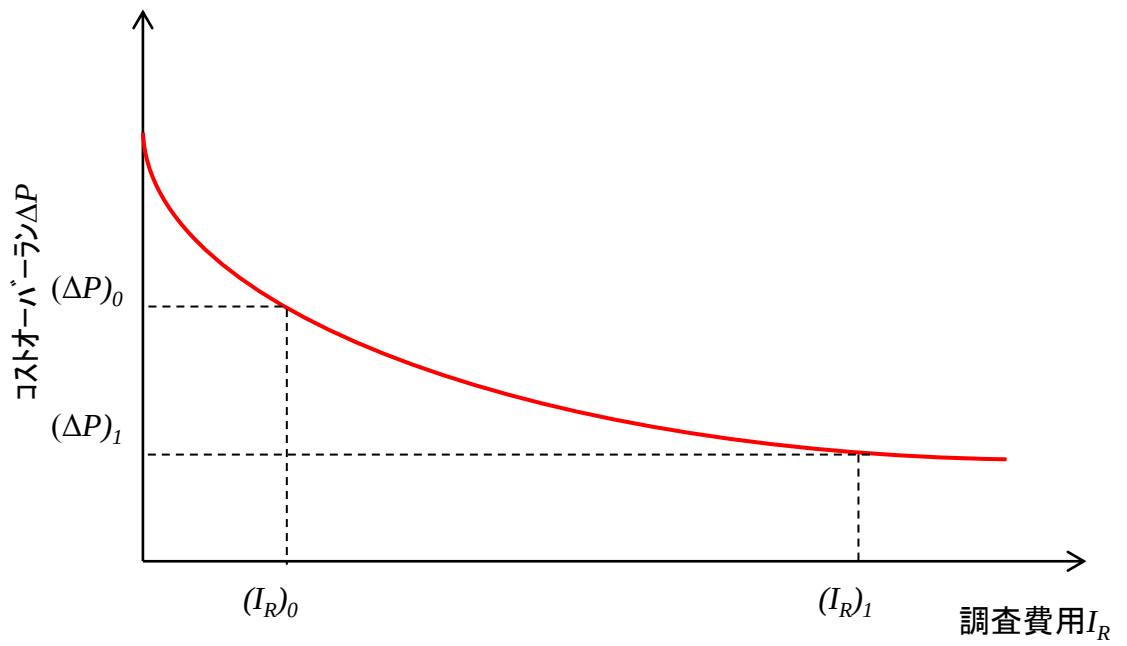


図3.2 調査費－コストオーバーラン関係

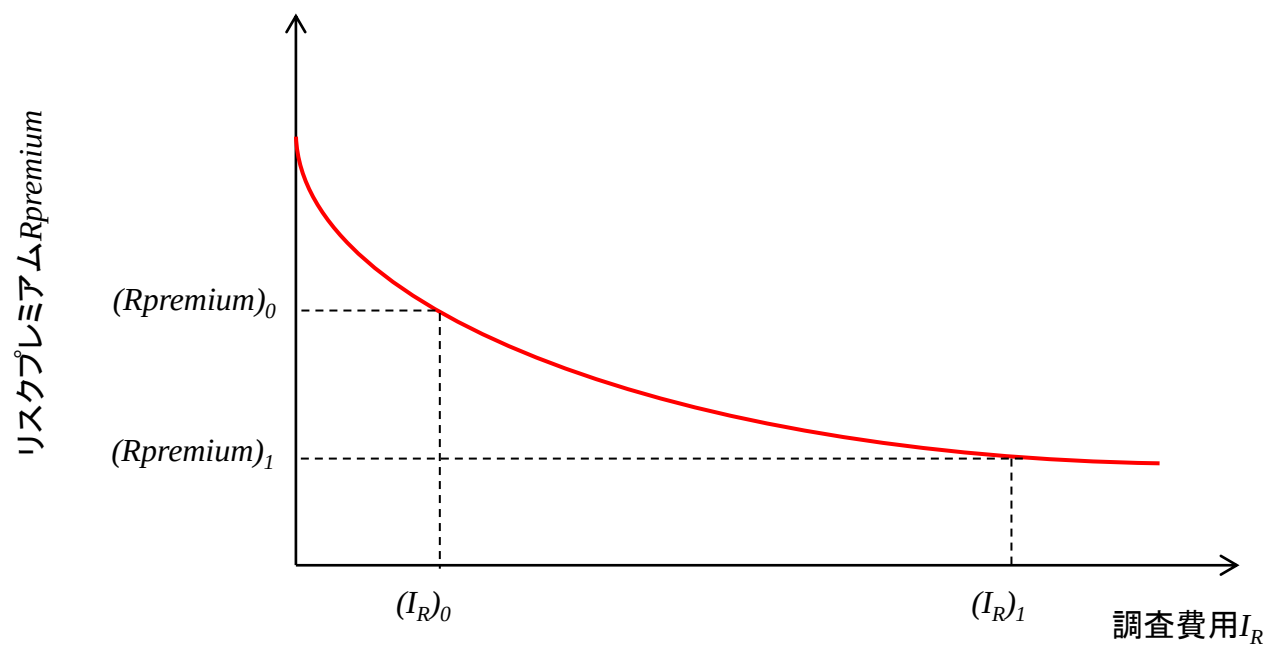


図3.3 調査費ーリスクプレミアム関係

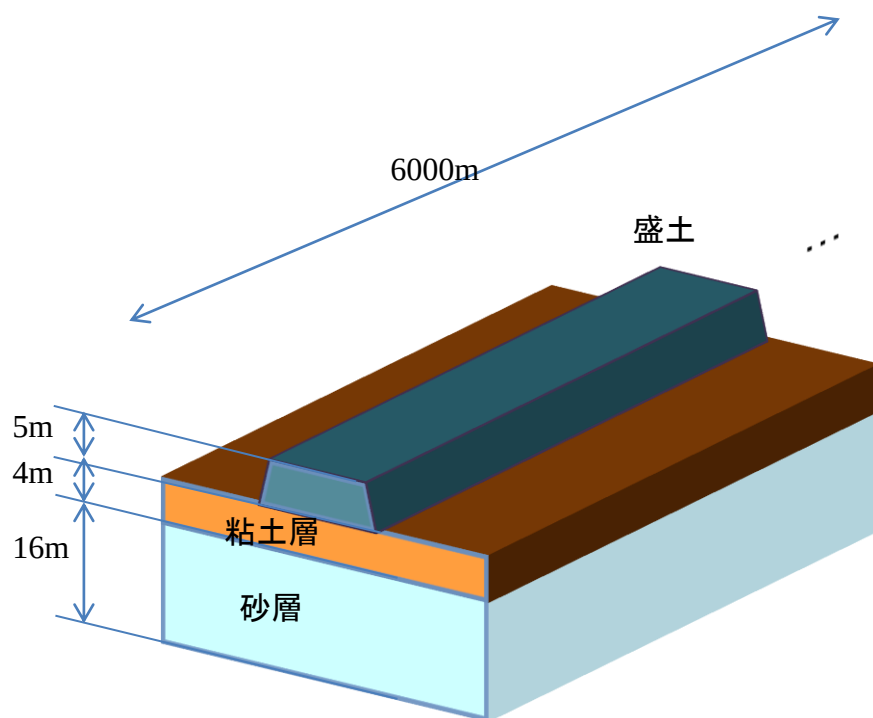


図4.1 調査サイト模式図

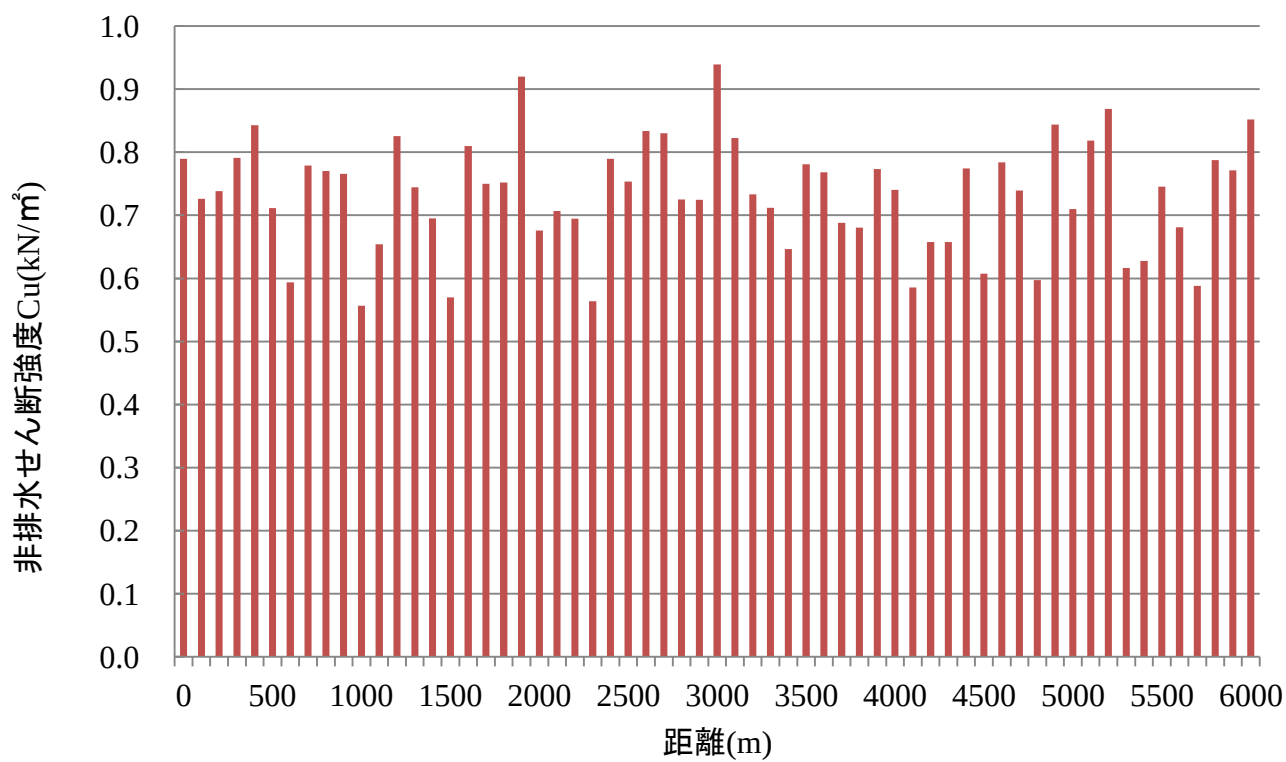


図4.2 非排水せん断強度分布

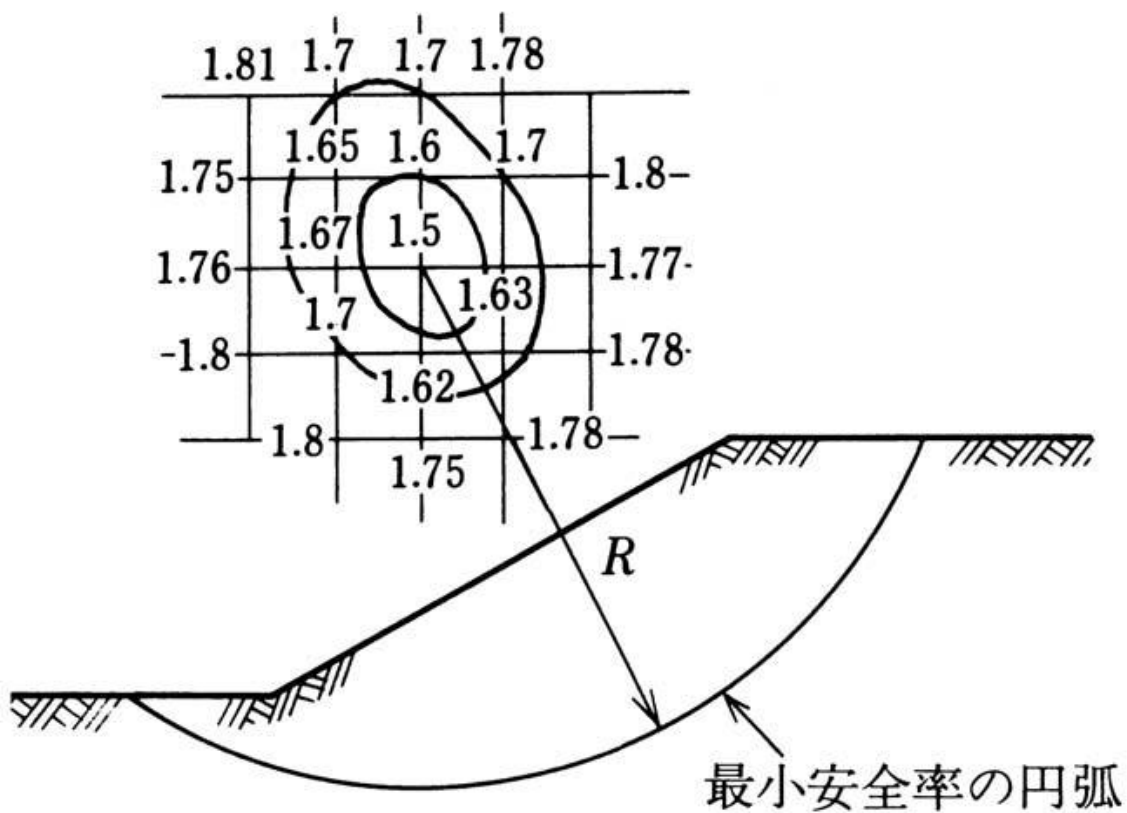


図4.3 安定解析のメカニズム

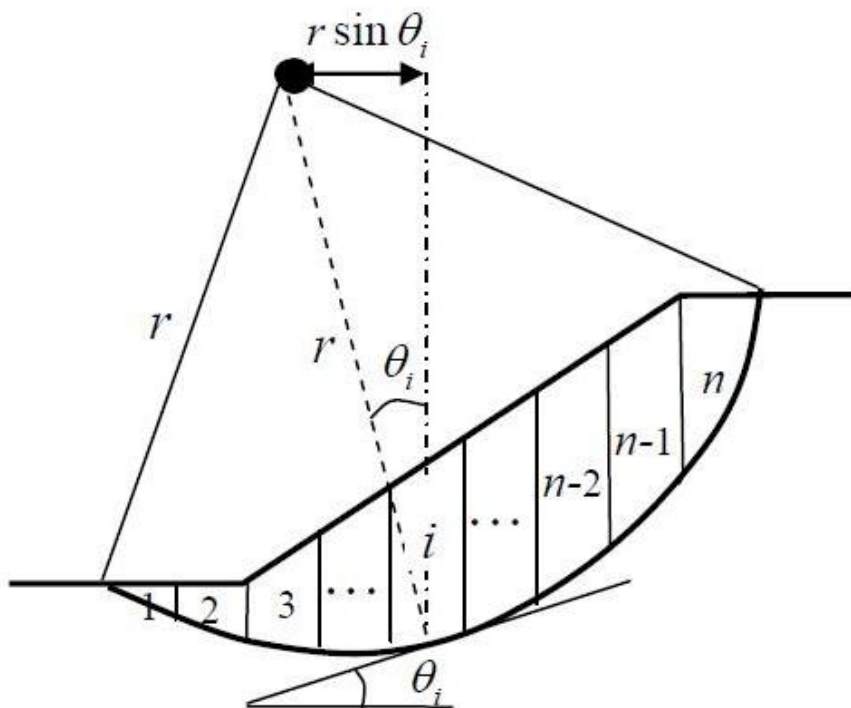


図4.4 円弧すべり面

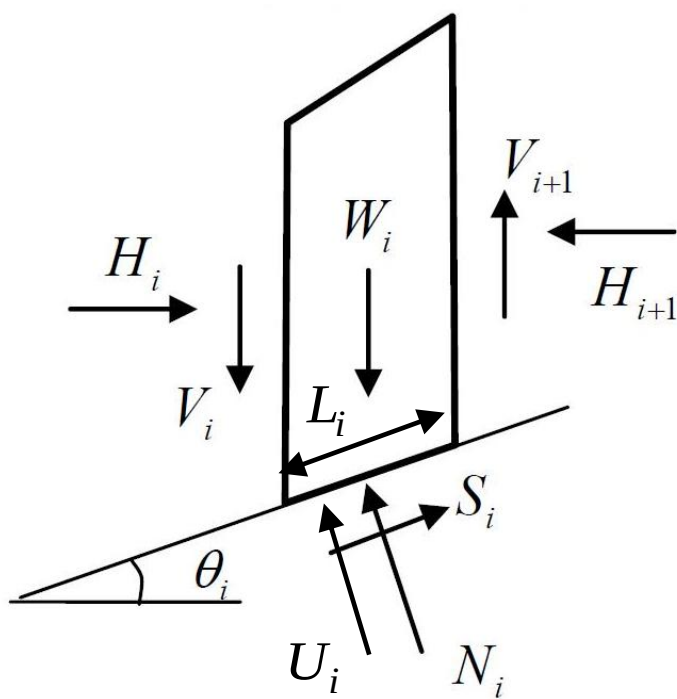


図4.5 各スライスに働く力

## パラメーター

### Materials

|            |                      |                |                                       |
|------------|----------------------|----------------|---------------------------------------|
| embankment | Cohesion = 10 (kPa)  | Phi = 28 (deg) | Unit Weight = 20 (kN/m <sup>3</sup> ) |
| layer 2    | Cohesion = 0.6 (kPa) | Phi = 20 (deg) | Unit Weight = 16 (kN/m <sup>3</sup> ) |
| layer 1    | Cohesion = 10 (kPa)  | Phi = 37 (deg) | Unit Weight = 17 (kN/m <sup>3</sup> ) |

Calculation Method: Bishop's  
 Search Method: Grid and Tangent  
 FOS: 1.201  
 Total Weight: 0.000E+000 kN  
 Total Volume: 0.000E+000 m<sup>3</sup>  
 Total Activating Moment: 2.478E+003 kNm  
 Total Resisting Moment: 3.005E+003 kNm  
 Total Activating Force: 0.000E+000 kN  
 Total Resisting Force: 0.000E+000 kN

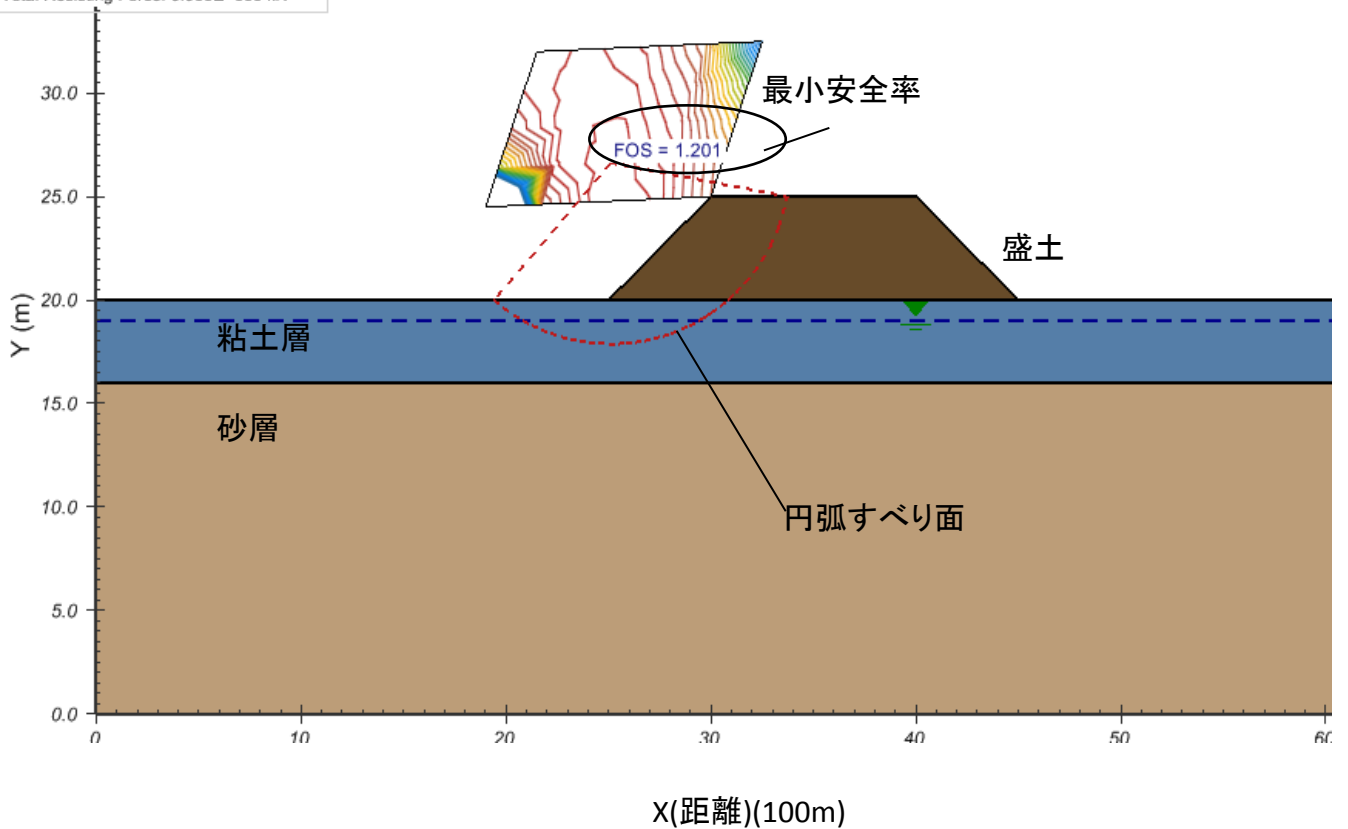


図4.6 円弧滑り解析結果

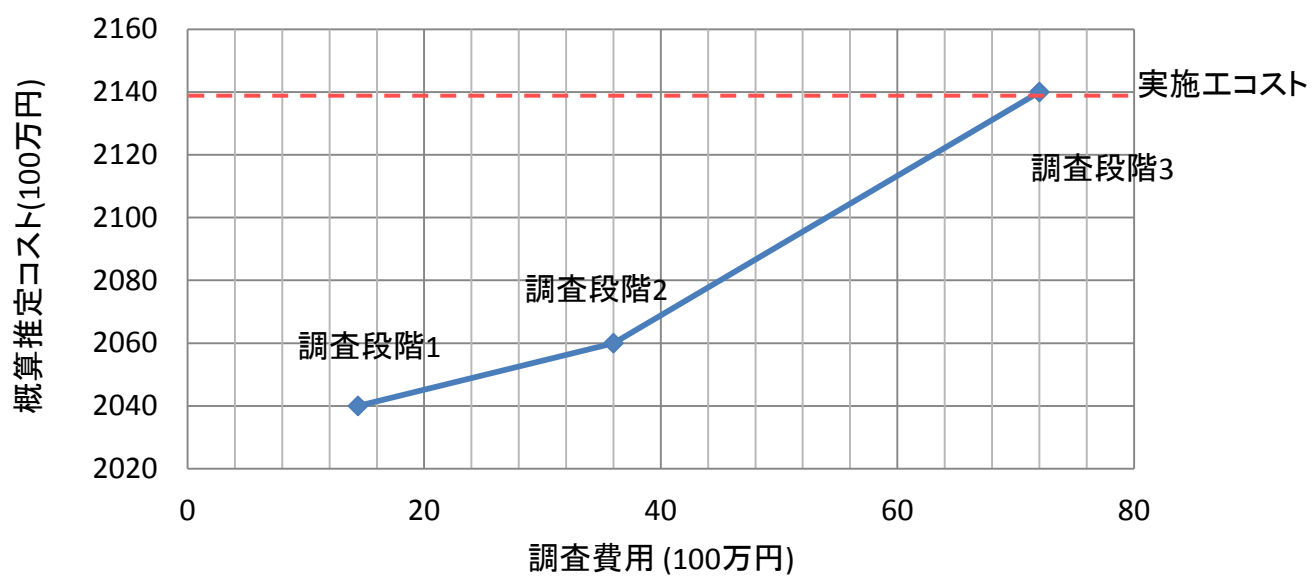


図4.7 調査費－概算推定コスト関係

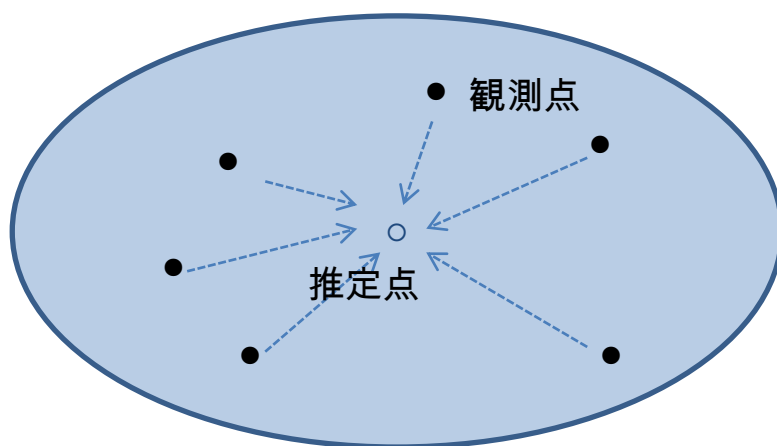


図4.8 クリギングの概念図

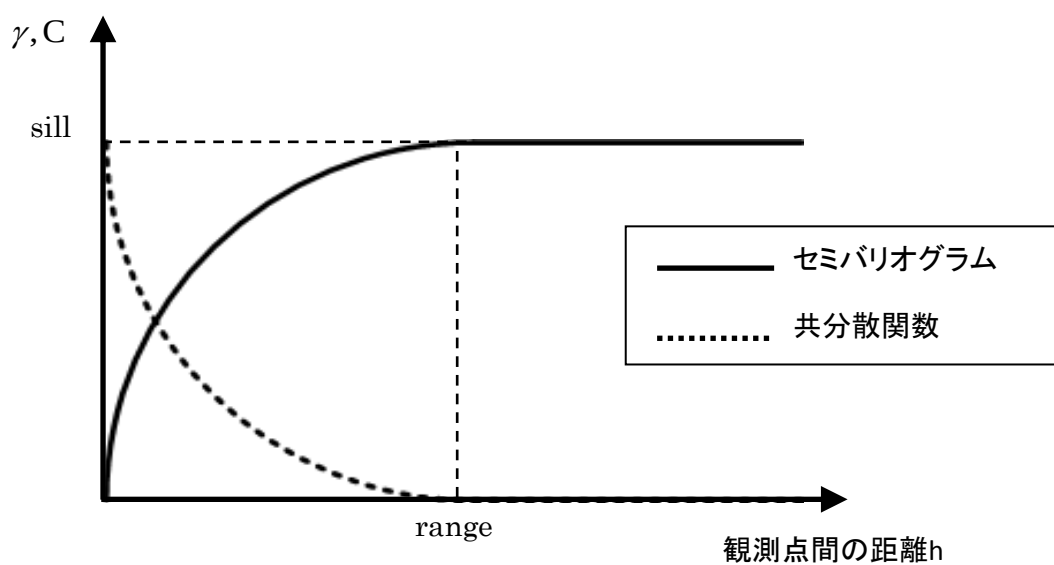


図4.9 セミバリオグラムと共分散関数の関係

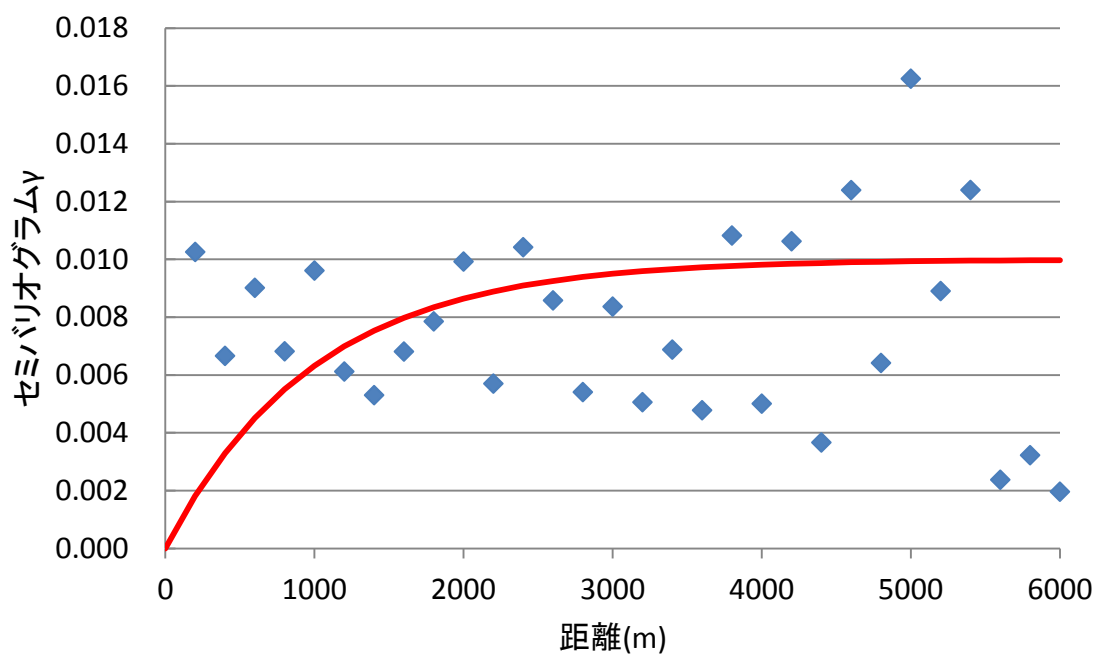


図4.10.(a) セミバリオグラム

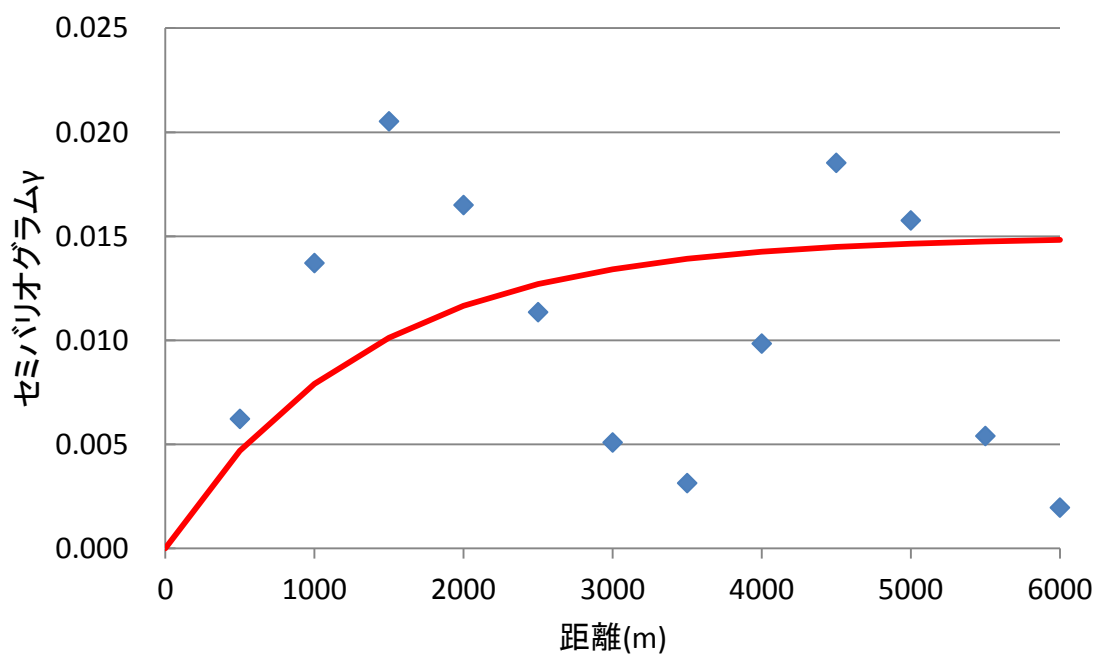


図4.10.(b) セミバリオグラム

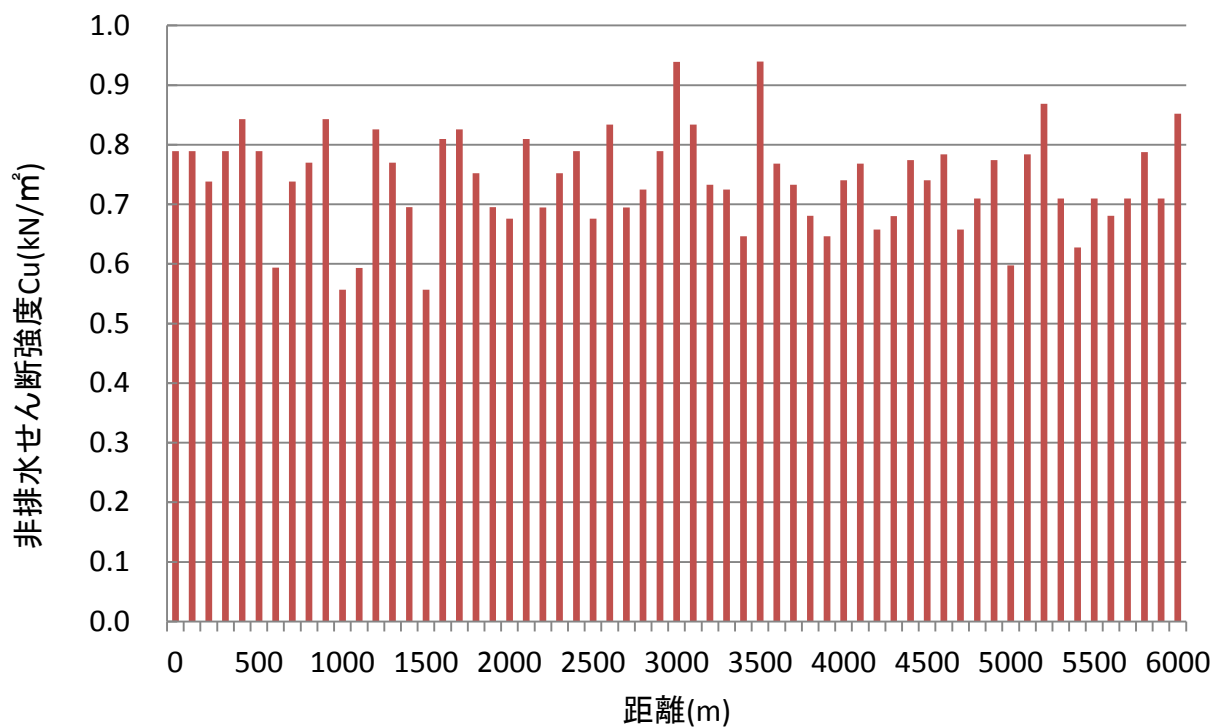


図4.11.(a) 内挿補間した100mピッチデータ

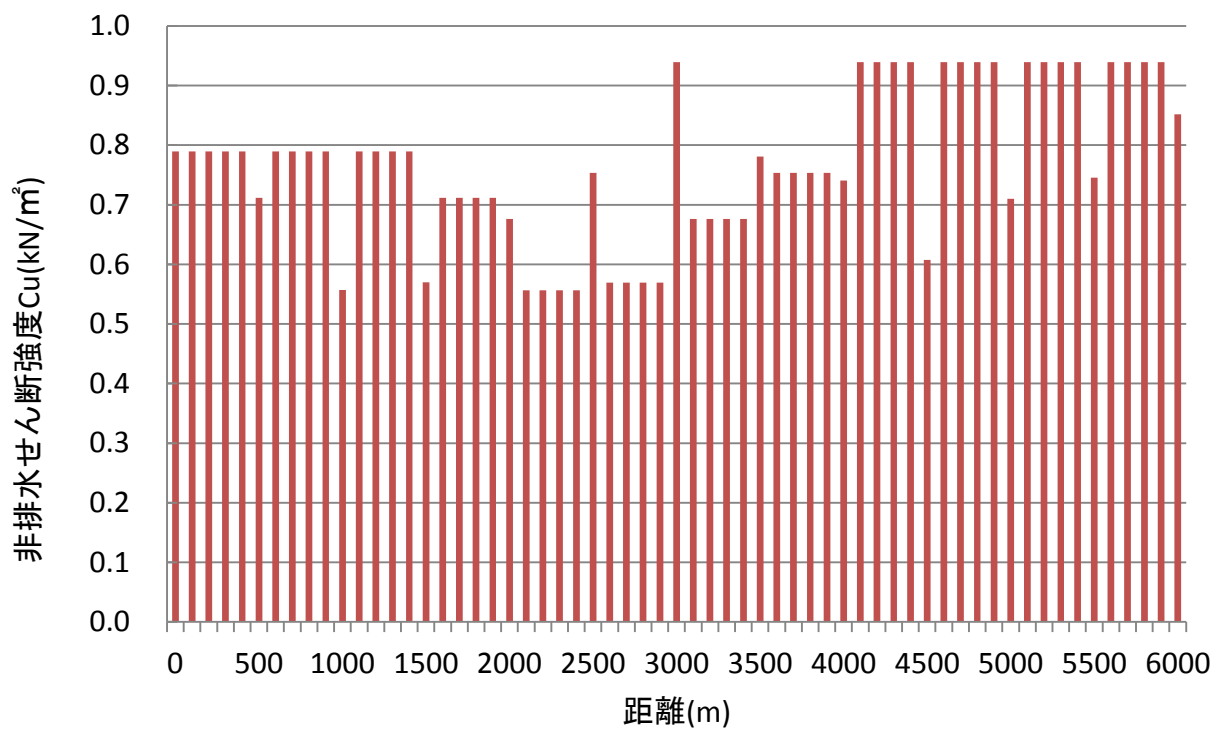


図4.11.(b) 内挿補間した100mピッチデータ

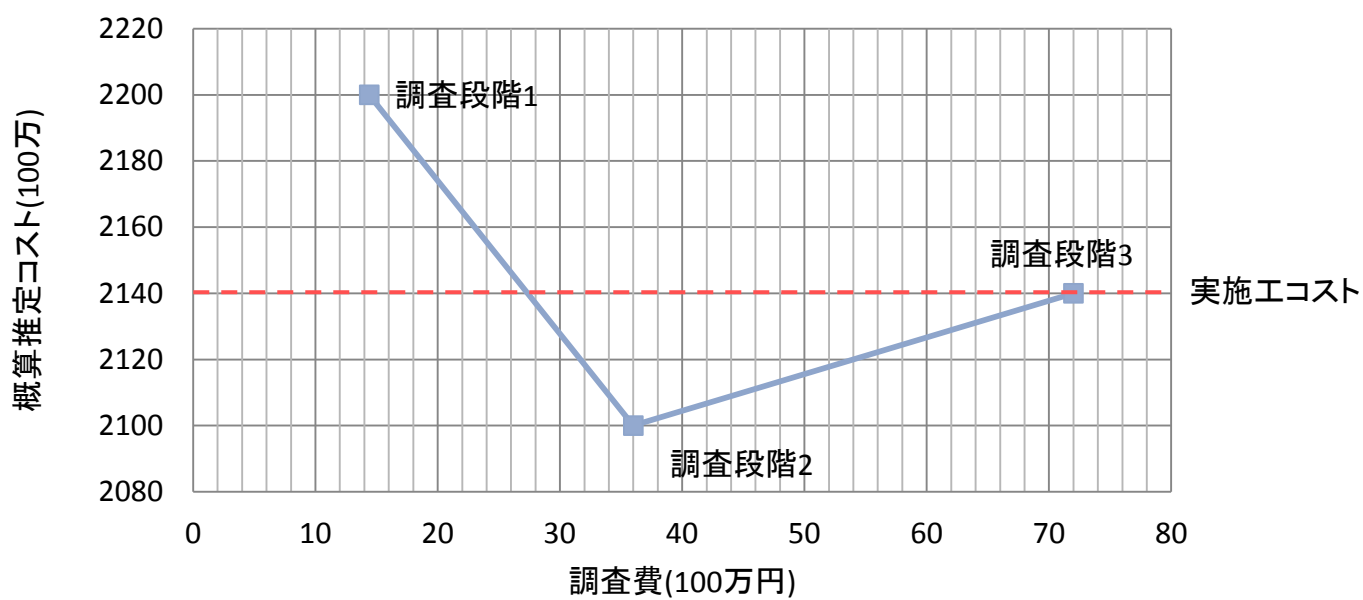


図4.12 調査費－概算推定コスト関係

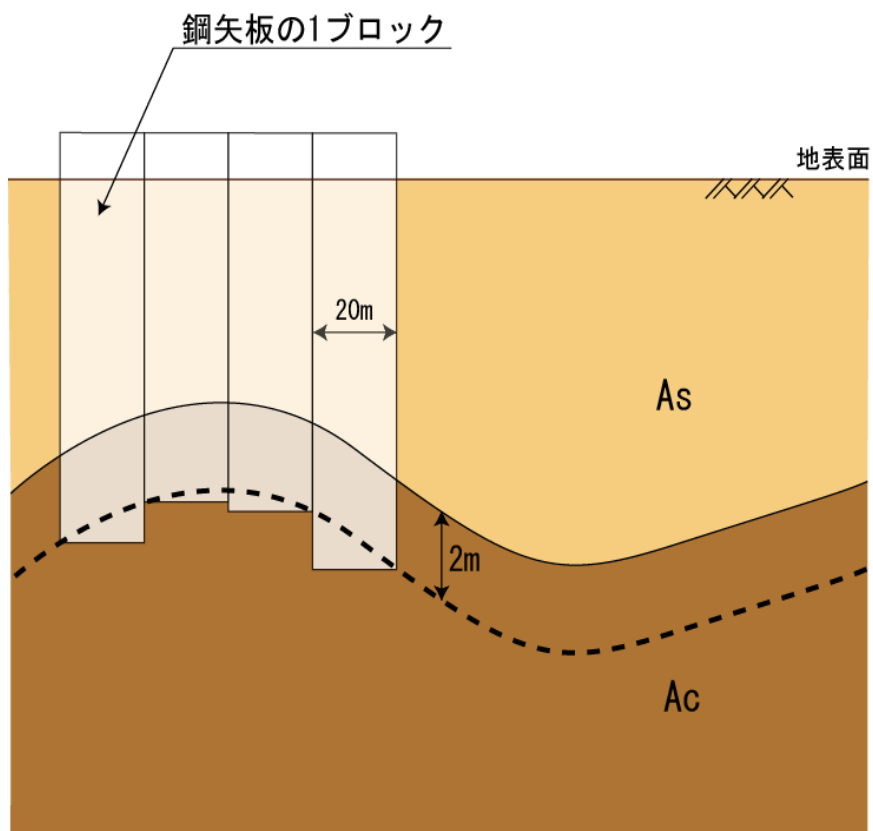


図4.13 高速道路施工方法模式図

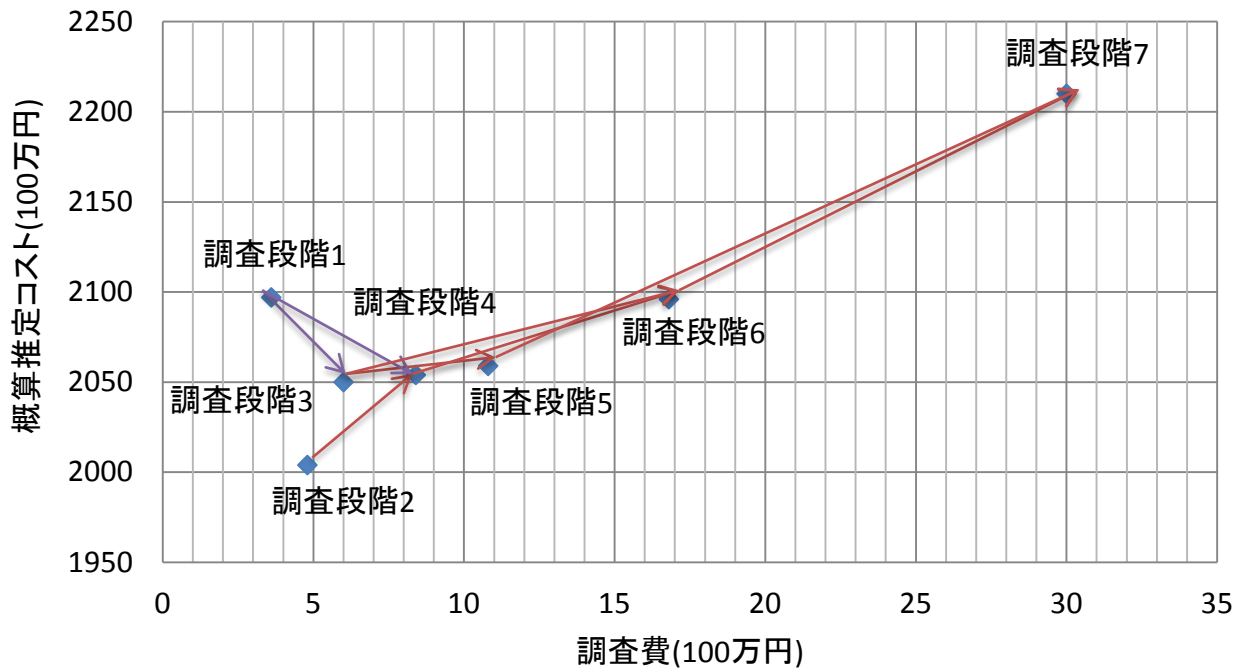


図4.14 調査費—概算推定コスト関係

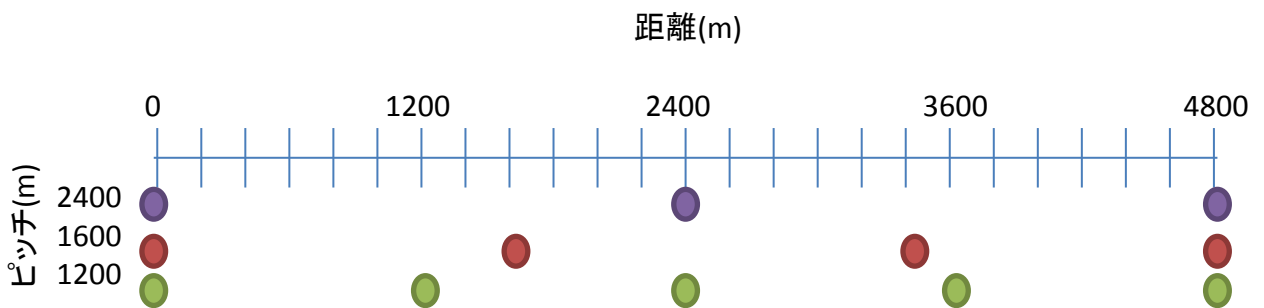


図4.15 情報量の増加関係

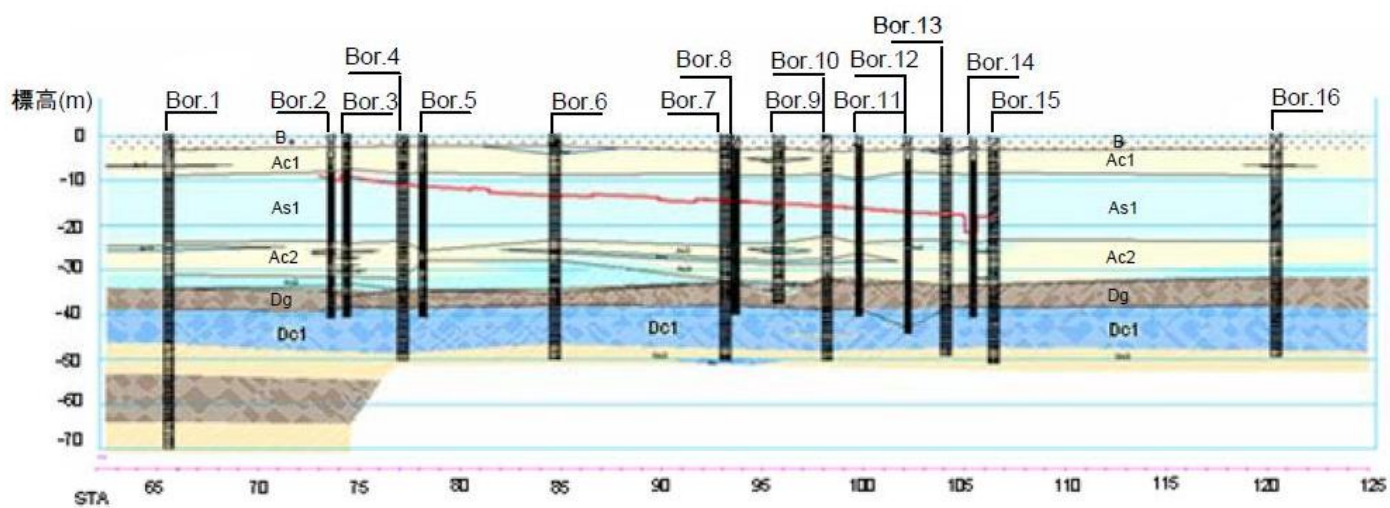


図4.16 ボーリング調査断面図

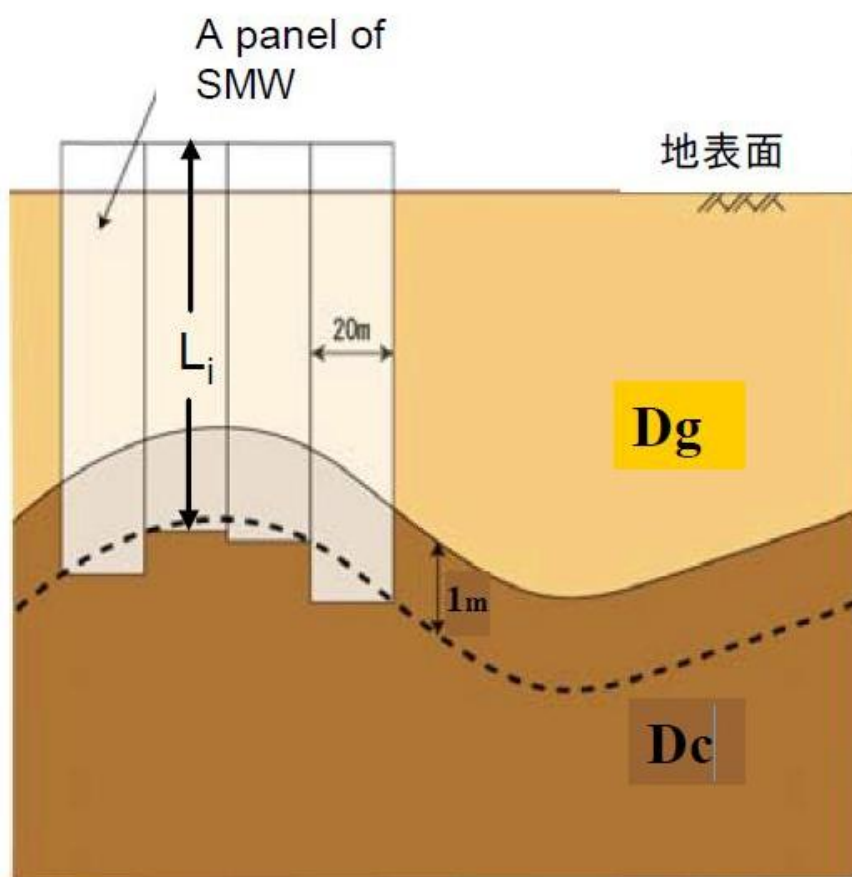


图4.17 SMW施工方法模式图

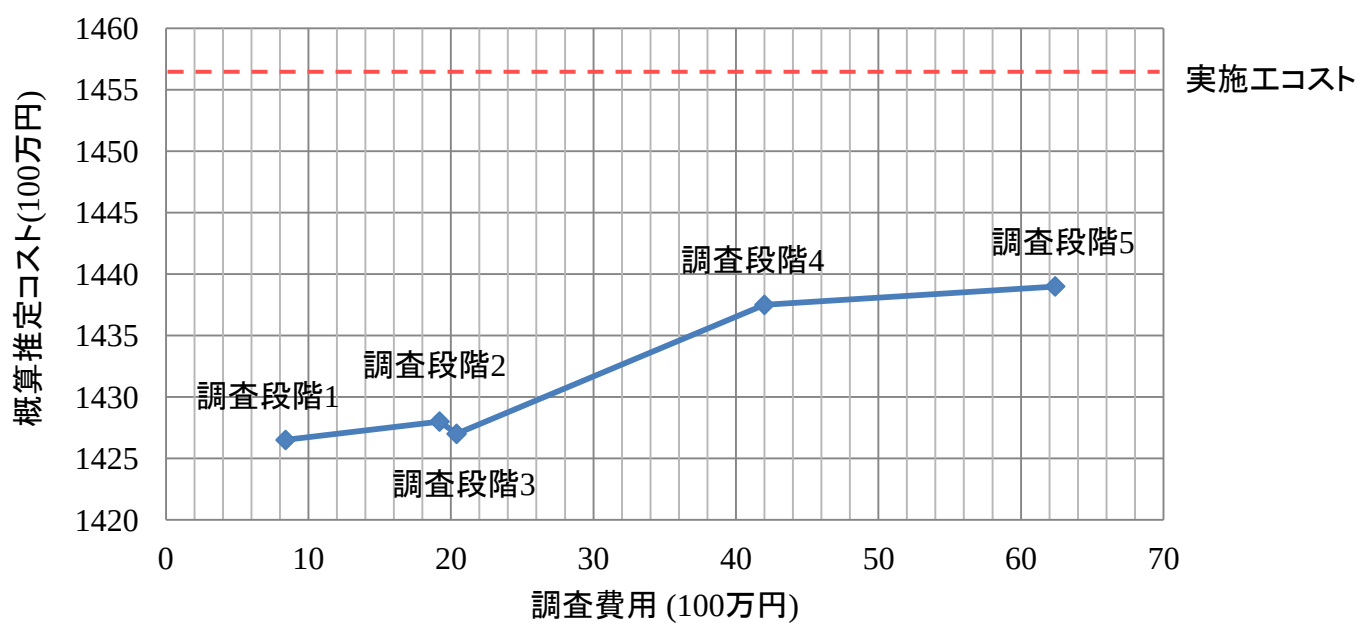


図4.18 調査費－概算推定コスト関係

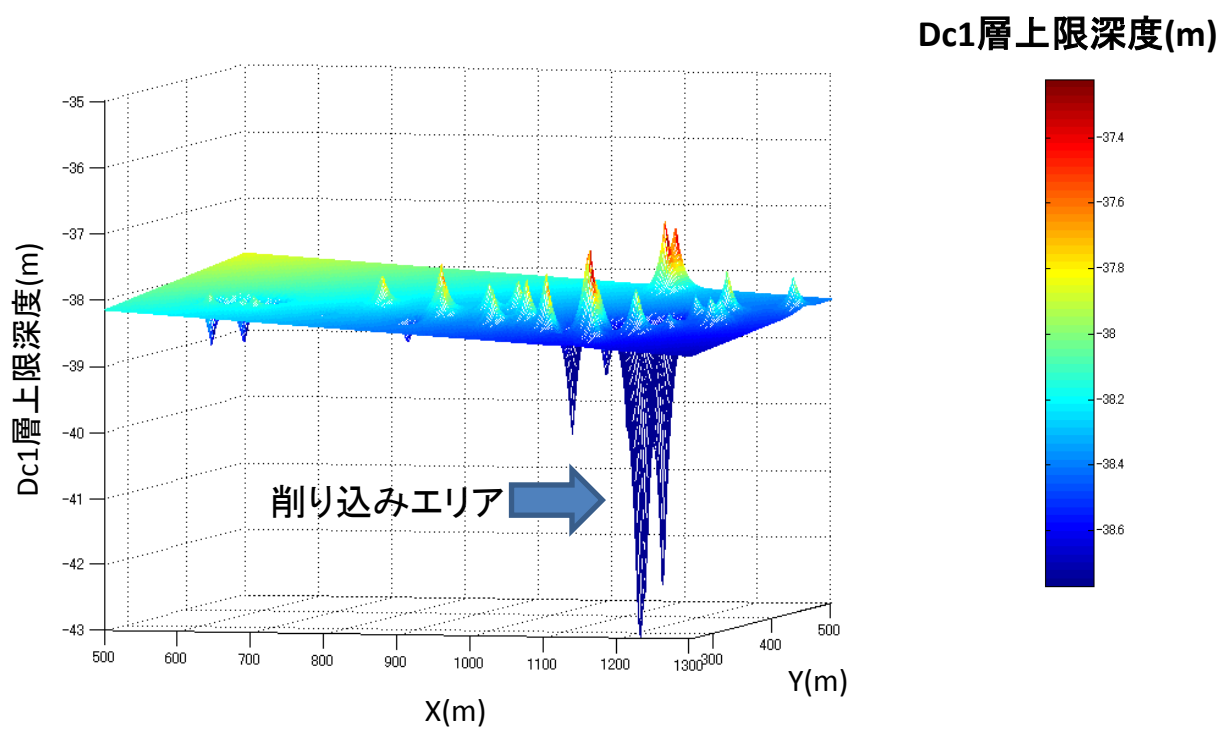


図4.19 Dc1層深度最尤推定結果3-D図

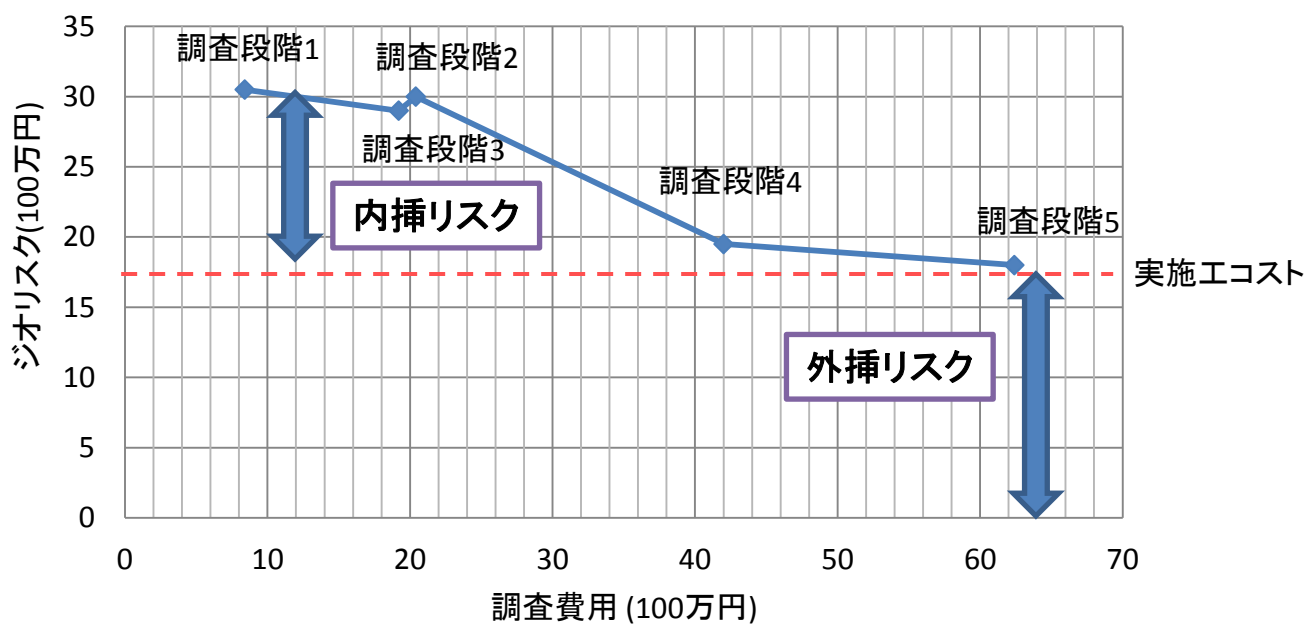


図4.20 調査費—ジオリスク関係