

地質の不均質性とリスク—過去の経験，今の動向—

佐々木靖人（国立研究開発法人土木研究所）

1. はじめに

平成 28 年の福岡地下鉄七隈線延伸工事にかかる陥没事故では地質の不均質性が事故原因の一つになった。そこで本講演では、土木事業の要改善点と地質・地盤リスクへの対応策について最近の動向を交えて論じる。

2. 福岡地下鉄七隈線の陥没事故の経緯と原因

2.1 経緯と原因

事故調査委員会報告書¹⁾及び著者のコア観察等をもとに経緯と地質的原因を振り返る。

平成 28 年 11 月 8 日に発生した陥没事故は、古第三紀の福岡層群中において NATM 工法で大断面部を掘削している途上、トンネル天端の強風化岩盤が崩れ、その直上部の更新世および完新世の未固結堆積物がトンネル内に流入したことにより発生した。

地質的原因は、当初トンネル天端の福岡層群の厚さ・強度・止水性が十分であると見込んでいたが、実際には厚さ 2m 程度、岩盤は亀裂質・強風化で強度・止水性が不十分であったことによる。また設計・施工についても、天端直上部の未固結層にあった水頭 12m 程度の地下水圧等が地圧とともにトンネル天端の岩盤にかかり、補助工法（AGF 工法）は実施していたものの崩壊に至ったものであり、止水を含めた補助工法の選定・設計・施工を見誤ったと結論づけられた。

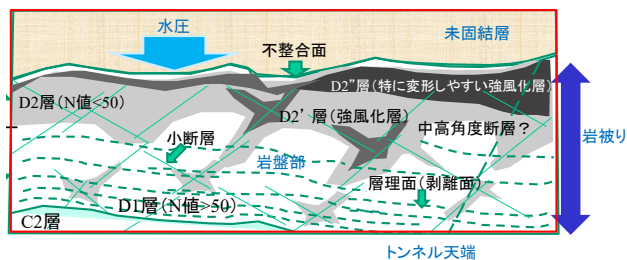


図-1 トンネル天端付近の岩盤状態の模式図

(文献 1) に追記。岩被りは 2m 程度)

設計時の地質調査量は通常の都市 NATM 工事と比較して極端に少ないとまではいえないことから、事故前に地質を正確に把握することは困難であったとしたが、地質の成り立ち、すなわち古第三紀の亀裂性岩盤（断層等の不均質性が想定される）、不整合（アンジュレーションが想定される）、地表での風化（風化の不均質性が想定される）等から考えると、不均質性を前提と

した安全側の対応（調査，設計，施工等）が望まれた。

2.2 地質上の教訓²⁾

2.2.1 早期から一連のリスクマネジメントの必要性

1 つ目の教訓は、事業の早期から施工までの一連のリスクマネジメントの必要性である。地質を正確に把握することは困難だとしても、地質の成り立ちから一定の不均質性が想定できる。事業の早期から地質が想定と異なる可能性に着目して何が起こりえるかを予測し、必要な調査と対策を段階的に検討していく地質・地盤リスクマネジメントの必要があった。これには、地質技術者だけでなく事業者、設計者、施工者の意識共有が必要であり、この意識共有が出来なかったことは大きな教訓である。

2.2.2 リスクを「知る」技術の必要性

2 つ目の教訓は、リスクを知る技術の必要性である。とくに事業者や設計・施工者は、少なくともこのようなリスクがあることを知る必要がある。福岡市の地下鉄工事の事案では小規模であるがそれまでに数件の陥没事故が発生していたようである。このため過去の事例からリスクを知り、注意深く対応していれば異なる結果となった可能性がある。たとえば事業種毎の「地質・地盤リスクカタログ」等の作成と、それを用いた事業者等への「地質・地盤リスク講習」等が効果的と考えられる。

2.2.3 リスクに「気づく」技術の必要性

また、今回の事故は、地質技術者なら気づく初歩的なミスのように思われるがリスクを楽観視するいくつかのポイントがあった。たとえば施工箇所周辺は未固結層内と岩盤中で地下水水位が異なる、いわゆる二重地下水であったことから、不整合面直下の強風化層は十分な難透水層と判断された。マクロな地下水水文学的には妥当な判断かもしれないが、ミクロな透水性（風化層中の亀裂や弱層の透水性）、施工時の透水性とその変化（止水改良の不確実性や掘削緩みによる透水性の変化）も考慮し、リスクに気づく必要があり、その判断には技術と経験を要する。また、気づく技術の確保は地質調査者だけでなく、設計・施工者にも必要である。気づく技術は経験が必要で難しいため、多様な地質リスクを DB 化した見逃しを減らすための「地質・地盤リスク気づき支援システム」や、リスク事例を用いた「地質・地盤リスク気づき講習」等が必要である。

2.2.4 リスクを「調べる」技術の必要性

気づく技術とも関係するが、3つ目の教訓としては、地質・地盤リスクを「調べる」技術が必要である。この作業は地質調査（リスク調査）とリスク評価の2つに分けられる。一般にリスクアセスメントではリスクの評価に視点が置かれがちである。しかし地質調査（リスク調査）という行為の中には不確実性の低減によるリスク回避・低減作業を含んでいるため、ある精度の地質調査を確保することが極めて重要となる。

特に土木構造物に対しては、構造物から基礎に求められる「要求性能」を意識した「土木地質学的リスク調査・アセスメント技術」が必要である。たとえば、被りの大きな山岳トンネルでは多少の地質的不確実性であっても（すなわち調査の品質が低くても）、支保パターンの変更や補助工法の追加でリスク回避できる。しかし岩被りが極めて小さい場合は、地質の小さな不均質性であっても鋭敏に影響する。しかも天端の局所的な崩落がすぐに大規模な陥没に結びつくような設計では、施工時のリスク対応（計測、支保パターンの変更、補助工法の追加）のみでリスク回避することは困難である。つまり地質の不確実性に対する構造物の鋭敏性を踏まえ、どの要求性能（強度、変形性等）がどの精度・安全率で満たされる必要があるか吟味し、要求性能やリスクに応じた品質の地質調査を行う必要がある。この点で、土木構造物・地質調査・リスク評価にまたがる知識を持つ人材の育成は大きな課題であり、たとえば地質リスク学会で育成している地質リスクエンジニア（GRE）等の活用も重要である。

2.2.5 リスクを「表現し伝える」技術の必要性

地質技術者が最も改善すべき点のひとつがリスクの表現と伝達である。表現し伝えるべき情報には、リスク評価の結果だけでなく、リスクの発生原因となる地質の不確実性を含む。たとえば地質図は、それが描かれて手渡されたら最後、設計者や施工者はそれが正しいと思って対応する。しかし地質技術者は自らが作った図面が100%正しいと考えている人はいない。ここに意識のずれがあり、そのずれ自体がリスクになる。ずれを修正できるのは地質技術者による地質リスクの表現と伝達だが、肝心のその方法が確立されていない。JIS A 0206「地質図－工学地質図に用いる記号、色、模様、用語及び地層・岩体区分の表示とコード群」では、断層、地層境界などの表示について、存在確実度と位置正確度を組み合わせる場合を規定しているが、審議中に問題となった事項として、工学地質図では「位置正確」、「位置推定」、「位置伏在」のみを用い、「位置ほぼ正確」という区分を用いないことにした経緯が述べられている。「ほぼ」の中にはリスクが存在しているため避けたものであろうが、たとえこの区分を用いないとしても、「位置推定」の地質図の持つリスクの表現と伝達方法の確立は、リスクマネジメントの必須条件

である。このようなリスクは物性試験結果の解釈等でも発生する。地質調査業務において生じる不確実性をいかに表現し、リスクとして伝えるかが重要である。形ばかり整えた「リスクランク表」によるリスクアセスメントから、根拠の明確なリスクアセスメントへの進化が必要である。このためには、全地連等が主体となって、「地質・地盤リスクに対応した地質調査業務報告書作成要領」を整備することが必要である。

このほかにも設計・施工上の教訓（補助工法の確実性等）や関係者間の情報共有等、事業システムに係わる教訓もあるが、詳細は文献1)を参照されたい。

3. 改善点の検討

3.1 リスクマネジメントの体系化

国等から発出されるべき基本指針に必要と思われる重要な事項の例として、表-1のような点が考えられる。

表-1 地質・地盤リスクマネジメントの重要事項の例

1.実効あるマネジメント体系 <ul style="list-style-type: none">・早期から継続的なマネジメント（計画から維持管理・更新までの最適な時期で対応）・導入しやすい体系（事業者、事業規模、構造物等の事情に配慮）・関係者に応じた重層的なマニュアル類の整備（基本指針、事業者マニュアル、実務者要領等の整備）
2.役割の明確化 <ul style="list-style-type: none">・関係者の役割・責任・リスク分担の明確化（事業者、地質調査者、設計者、施工者等）・重要事案への地質・地盤等の専門家の参画・支援
3.情報の活用 <ul style="list-style-type: none">・既往地質地盤情報の積極的活用（ボーリングDB等）・リスク事例等の知見の積極的参照（DB構築）
4.情報の共有 <ul style="list-style-type: none">・関係者が共有すべき情報（注）の共有注：共有すべき情報の例<ul style="list-style-type: none">・基礎地盤に求められる要求性能・要求性能に対する地質・地下水等の不確実性・施工や対策工等の不確実性・リスク（リスク項目、リスク分析・評価結果）・リスク対応（提案・選定したリスク対応と理由）・関係者協議の結果
5.実務的なリスクマネジメント手法 <ul style="list-style-type: none">・地質調査業務における不確実性と想定リスク明示の標準化・複数の専門によるリスク抽出（マルチオピニオン法）・実施しやすい定性的リスクアセスの活用・慣習的リスクマネジメントの活用（観測施工の活用等）
6.技術の確保 <ul style="list-style-type: none">・関係者のリスク啓発・講習の実施、資格・人材の活用等

3.2 土木地質学的リスクアセスメント技術の体系化

土木地質学的リスクアセスメントを適切に実施する要素技術として、見逃しのないリスク発見技術、リスクアセスメント技術、の2点が重要であるが、以下では紙面の関係で前者について述べる。

計画段階や概査段階では事業の実現に関わる「致命的リスク」や大きなコスト・工期の変更を伴う「重大リスク」を、精査以降の段階では設計・施工・管理全

般に関わるリスクを発見・抽出する必要がある。また、リスクは構造物毎に整理する必要がある。しかし計画・概査段階では構造物・形状等が定まっていない場合もあり、全構造物に詳しい地質技術者もまれである。このため、とくに計画段階や概査段階では、複数の構造物を想定し、かつ少ない調査量でリスクを発見する必要がある。これは高度な技術が必要であり、一技術者の経験だけで容易にカバー出来ることではない。

このため、地質技術者のリスク発見を支援する体系が必要である。この体系としては、後述する技術者教育プログラムのほか、ダムで実施しているように多様な専門技術者が重層的に助言する方法（仮に「マルチオピニオン法」とよぶ）や、データベース等を活用してリスクを検索・確認できるエキスパートシステム的なリスク発見支援システム等が考えられる。いずれの方法も技術開発や体系化が必要である（図-2）。

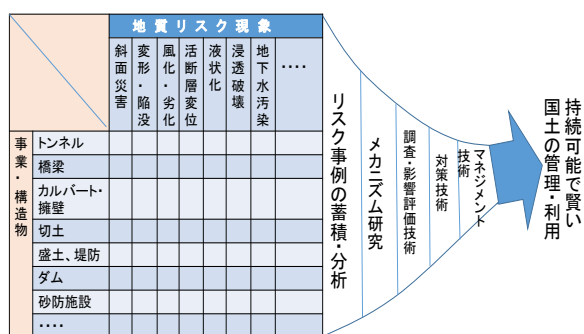


図-2 リスク発見支援システムの体系構築イメージ

3.3 地質・地盤リスク啓発プログラムの体系化

地質・地盤リスクは目に見えにくいリスクでありわかりにくい。このため、事業者を含めた関係者がリスクを学び適切に対応するための教育・啓発プログラムが必要である。教育プログラムは地質技術者、地盤技術者とそれ以外（一般・土木技術者）に分けたものが必要である。とくに後者には国・自治体等の事業者や施設管理者、設計者、施工者等があるが、役割も技術レベルも教育に割ける時間もまちまちであり、一律な教育プログラムでは難しく、状況に応じたプログラムが必要である。たとえば下記に述べたように、初級から専門家までの段階的な講習を行うことも考へる必要がある。

- ①地質・地盤リスクを「知る」講習
(事業者、土木技術者、初級地質技術者)
- ②地質・地盤リスクに「気づく」講習
(初級地質技術者、土木技術者)
- ③地質・地盤リスクを「調べる」講習
(地質技術者)
- ④地質・地盤リスクを「表現し伝える」講習
(地質技術者)
- ⑤地質・地盤リスクに「対応する」講習
(関係者全般)

このような教育プログラムの開発と実施には複数組織の連携が重要である。たとえば関係学会、全地連・建コン・日建連等の業界団体に連携し「地質・地盤リスク対策協議会」等を組織し、プログラムの開発、教育・啓発事業を実施することなどが考えられる。たとえば上述した、「地質・地盤リスクカタログ」等を用いた学習が考えられる。

このとき、①リスク発現事例や回避事例、②リスク評価事例、③リスクの定量化事例、④リスクカタログ等は重要な教材となるだけでなく、リスク発見支援システムのためのデータベースともなる。このためリスク事例等については、協議会メンバーで連携して収集・蓄積・分析・活用するスキームとすることが望ましい。

4. 最近の動向

リスクマネジメントの体系化は、①国等から発出されるリスクマネジメントの基本指針、②事業者・事業毎に手順を示したマニュアル、③構造物毎の調査・設計・施工基準類、④地質調査者等実務者の手引き、のようにそれぞれの立場から重層的に整備していく必要があると思われる。そこで国土交通省と土木研究所では、学会、関連業界と連携して上記①の基本指針の構築に取り組みたいと考えており、まずは、「土木事業における地質・地盤リスクマネジメントの基本的な考え方(案)」（仮称）の作成を検討予定である。なお、近畿地方整備局では既に同局における事業に適用するための「地質リスク低減のための調査・設計マニュアル(案)」（平成30年2月）を刊行しており、これは上記②のマニュアルに相当する。上記③や④についても順次整備していく必要がある。

5. まとめ

土木事業における地質・地盤リスクの発現を回避するための対策として、①事業へのリスクマネジメントの導入、②リスク発見・評価技術の開発、③事業関係者のリスク教育・啓発事業、等が必要である。これらは有機的に関連しつつ進める必要があり、またこれらの実現には様々な専門分野が連携して協力する必要がある。関係機関・関係者のご協力をお願いする。

文献

- 1)福岡地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する委員会（国立研究開発法人土木研究所）(2017):福岡地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する委員会報告書。
- 2)佐々木靖人(2017):トンネル陥没事例からみた地質リスク回避手法に関する考察,日本応用地質学会平成29年度研究発表会講演論文集,p.17-18.