

地質・地盤リスクマネジメント 技術の開発

—アセスメントからマネジメントへ—

土木研究所
地質・地盤研究グループ 地質チーム
上席研究員 阿南 修司

地質・地盤に起因する事故や不具合の顕在化



【博多駅前地下鉄陥没事故】

平成28年11月8日早朝

- ・未固結層下の古第三紀の岩盤を大断面で掘削し(岩被り2-3m)、土砂流入・陥没
- ・設計時の想定より岩被りが薄く、岩盤自体も風化や亀裂のため部分的に弱部あり

出典：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検討委員会報告書（土木研究所HP）、福岡市交通局撮影

○地質・地盤に起因する事故や不具合に至る「地質・地盤リスク」への対応が重要

○事業者、調査実施者、設計者、施工者、管理者のいずれにとつても重要な課題

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

類似する条件下での都市NATM及び地下空間での工事における留意事項

- ボーリング等の地質に関するデータは地下空間の限定的な情報であり、たとえ多くの調査を実施しても地下空間を詳らかに把握することには限界があることから、施工の安全性を事前に完璧に確保することには自ずと限界がある。

しかしながら、今回の事故の規模や影響を鑑みると、地下空間の安全な利活用を図るためには、地下空間に関する情報を出来るだけ収集するとともに、その時々最新の技術を用いて、リスクを可能な限り低減させた、より安全性を確保した設計・施工に努めるべきである。

そのため、地下空間に関する調査については効果的・効率的に行うとともに、その目的に照らして必要かつ十分なものでなければならない。加えて、過去において周辺部で実施された地質調査等を官民間問わず情報収集し、利活用できるようにすること

類似する条件下での都市NATM及び地下空間での工事における留意事項

- 地下工事の安全性を確保するためには、地質の持つ不均質性を適切に捉え、危険側とならないような物性値の採用や、物性値を変化させた複数の計算を行って結果を評価するパラメトリックスタディの採用を検討するなどの取り組みを設計及び施工に反映させるとともに、今回のような不規則で複雑な地質構造や高い地下水位などの安全性に対するリスクを可能な限り把握し低減するよう努める必要があること。

また、数値解析によって得られる結果は必ずしも万能ではないとの認識に立ち、十分な知見・経験等も加えて総合的な工学的判断を行うこと

- 地下水位が高い場合には、水圧による影響をあらかじめ最小化できるように、工法の選定、水位の低下や地盤改良等の必要な措置について十分に検討すること

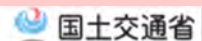
類似する条件下での都市NATM及び地下空間での工事における留意事項

- 特に、トンネル工事においては、地下空間の情報が限定的であるなど不確定要素が多いことから、発注者、設計者、施工者等の関係者が協力し、互いに知恵を出し合いながら困難を乗り越えていくべきであり、調査、設計、施工の各段階で得られた情報や知見については関係者間で十分共有するとともに、適切に調査から設計、設計から施工といった次の段階に引き継ぐこと
- 変状の発生を敏感に捉え、非常時を想定した詳細なモニタリング計画を作成するなど、体制を充実させること
- 難易度が高くリスクを多く包含する工事においては総合的な判断も求められることから、日頃の関係する技術者の技術力向上はもとより、工事中においても然るべき場を設け、関係者間における現場状況の共有と真摯な技術的議論、その結果のフィードバックにより、高度な技術的知見を設計・施工に反映させるとともに、地質・地盤条件が複雑な我が国においては、関連する知見等を全国的に収集・活用できるしくみが必要であること

地下空間の利活用に関する安全技術の確立について(答申)

平成29年9月 社会資本整備審議会・交通政策審議会

答申: 今後の方向性と対応策



○官民が所有する地盤・地下水等に関する情報の共有化

- ・国は、**官民が所有する地盤情報等の収集・共有、品質確保、オープン化**等の仕組みを構築。
- ・全ての地盤情報について、公共工事は、原則として収集・共有を徹底。ライフライン工事は、例えば、占用手続きにあわせて、民間工事は、依頼者の同意を得た上で収集・共有する仕組み等を構築。
- ・地盤情報等の品質を確保するため、地質調査等の実施に際して技術者の資格要件を付与。
- ・収集した情報のプラットフォームを構築、オープン化する仕組みを構築。

○計画・設計・施工・維持管理の各段階における地盤リスクアセスメントの実施

- ・国は、関係する学界等の協力を得て、**地盤リスクアセスメントの技術的手法を確立。**
- ・維持管理段階へ移行する際に、施設管理者が留意すべき事項をとりまとめた“取扱説明書”を作成し引き継ぐ。

○地下埋設物の正確な位置の把握と共有化

- ・国は、施設管理者の協力を得て、**地下埋設物の正確な位置情報の把握・記録と共有**できる仕組みを構築。

○施設管理者における老朽化状況の把握と対策の実施、関係者間の連携

- ・国は、施設管理者の協力を得て、**地下空間にある公共施設等の維持管理状況等に関するデータベースを構築**

○地下工事の安全対策、液状化対策等の地下空間の安全に係る技術開発

- ・国は、過去の事故等から得られた**知見や教訓を全国的に蓄積・継承**する仕組みを強化。
- ・液状化予測、3次元地盤モデル構築、高精度な地盤情報を活用したi-Constructionの推進等、**技術開発を推進。**

地下空間の利活用に関する安全技術の確立について(答申)

平成29年9月 社会資本整備審議会・交通政策審議会

計画・設計・施工・維持管理の各段階における地盤リスクアセスメント 【今後の方向性と対応策】

- 地下工事においては、以前より地盤の安定性を欠いた事故が発生し、ひとたび事故が発生した際には、多くの死傷者を伴う甚大な被害となることが多い。
今般の福岡市における道路陥没事故では幸いにも死傷者は出なかったものの、社会的影響は甚大であった。
これらに鑑みて、国は、関係する学界等の協力を得て、地下工事における地盤リスクアセスメントの技術的手法を確立させる必要がある。
- 特に都市部におけるトンネル工事については、計画・設計・施工・維持管理の各段階において、地盤リスクアセスメントを実施できるよう、関係する技術体系の確立、手続きの明確化、専門家の育成等を行う必要がある。

地下空間の利活用に関する安全技術の確立について(答申)

平成29年9月 社会資本整備審議会・交通政策審議会

- 具体的には計画から設計、設計から施工といった次の段階に進む際には、いわゆる“3者会議”(発注者、前段階の実施者及び後段階の実施者)を設置し、前段階で得られた技術的知見や情報等を確実に伝達する必要がある。

また、維持管理段階へ移行する際にも、当該施設の管理者が留意すべき事項をとりまとめた、いわゆる“取扱説明書”を作成し引き継ぐことも必要である。

- 更に、地盤リスクアセスメントに基づくモニタリング計画の作成と実施、受発注者間における即時的な情報把握を可能とする情報共有システムの導入等にも努める必要がある。

土木研究所における地質・地盤リスクマネジメントに対する取り組み

- H29.4 所内勉強会で「地質・地盤リスクにいかに対応するか」について議論
- H29.6～所内の関係チーム等による「地質・地盤リスクマネジメント研究会」本省とも地質・地盤リスクマネジメント体系の確立について議論
- H30.4.24 土木研究所の記者発表

平成30年度の土木研究所の新たな取り組み

地質・地盤リスクマネジメント技術の開発

—安全で経済的な土木事業を目指して—

工事中のトンネルによる陥没事故等の地盤に起因する事故やトラブルを未然に防ぎ、安全で経済的な土木事業を進めるため、事業の各段階で適切にリスク評価する技術的な手法、地質・地盤リスクに強い工法やその選定手法等、地質・地盤リスクマネジメント技術の開発を開始します。

【地質・地盤リスクマネジメントの基本体系の構築に関する研究】

地質・地盤リスクの種別や発現機構の事例分析に基づく解析、事業の各段階でのリスク特定と評価の課題の抽出、引き継ぐべきリスクの情報の項目と表現方法の検討を行い、地質・地盤リスクを見逃さず適切にリスクを評価するための手順や技術的な手法の提案を行います。

地質・地盤リスクマネジメントの基本体系の構築に関する研究

□重点研究:H30～34

(地質チーム, 特命上席(道路防災), 土質・振動, 施工技術, トンネル, CAESER)

- 事業における地質・地盤リスクマネジメントの望ましい体系の提案
- 地質・地盤リスクマネジメント体系を支援する技術の開発

① 事例分析によるリスク発現機構の解明

- 「好ましくない結果」のパターン分析
- リスクの種別、事業種別ごとのリスクデータベースの構築

② 事業段階に応じたリスクマネジメント手順の提案

- 既往の枠組みでのリスクマネジメントの事例分析と課題の抽出
- 事業段階ごとに必要なリスクの「特定」と「分析」・「評価」の手法(=リスクアセスメント手法)の提案

③ リスクの分析・評価のためのリスク表現手法の提案

- 調査段階から他の段階へと引き継ぐべきリスクの情報の項目と表現の方法の課題整理
- 地質調査資料におけるリスクの表現手法の提案

地質・地盤リスクの概念

- 地質に関するリスクの定義はさまざま
- ここでの定義
「当該事業の目的に対する地質・地盤の不確かさの影響」
- 不確かさとなにか？
 - 自然的要因
 - 人為的要因

地質・地盤リスクの概念

「地質調査結果の不確実性(予見できない地質条件のズレやブレ)」
全地連(2007):地質リスクに関する調査・研究

「望ましくない地質現象の生起確率とその事象の大きさの組み合わせ」
脇坂(2008):土木地質におけるリスクとその管理

「地質・地盤条件の不確実性に起因する、建設コストの期待値からのはずれ量(変動幅)あるいはずれ(変動)の度合い」

土木学会岩盤力学委員会(2009)岩盤構造物のアセットマネジメント小委員会

「目的に対する“地盤に関連する”不確かさの影響」

地盤工学会(2013):役立つ!!地盤リスクの知識

「地質に起因する事業リスクで事業損失とその不確実性」

全地連(2016):地質リスク調査検討業務発注ガイド

「事業コスト増大や工期の延期等に結びつく地質や地下水に起因するリスク」

近畿地方整備局(2018):地質リスク低減のための調査・設計マニュアル

• ISO31000 Risk management- principles and guidelines -

– 目的に対する不確かさの影響

- 不確かさ: 事象、その結果またはその起こりやすさに関する、情報、理解または知識が、たとえ部分的にでも欠落している状態
- 影響: 期待されていることから、好ましい方向または好ましくない方向に乖離すること

地質・地盤のリスクに置き換えると

– 当該事業の目的に対する地質・地盤の不確かさの影響

目的	当該事業や工事を経済的、合理的かつ安全に進めること
不確かさ	地質・地盤の状態に関する『情報』や『理解』が一部欠落している状態
影響	当初の想定と設計条件が(好ましい方向にも好ましくない方向にも)乖離し、結果として工費や工期に変更が生じたり、最悪の場合事故が生じたりする

• 地質・地盤の不確かさ

- 地質・地盤の状態に関する『情報』や『理解』が一部欠落している状態
 - これまでの定義では、地質調査結果の不確実性、地質・地盤条件の不確実性、地盤に関連する不確かさとして表現されているもの

地質・地盤の不確かさの要因を、影響の面で整理すると

- 地質・地盤の本来持つ不均一性、不規則性という自然的要因
 - 調査の限界(情報の欠落あるいは不足)
 - 解釈のあたりはずれ(地質現象の理解の欠落あるいは不足?)
- 自然的要因に対する対処の過程で発生する人為的要因
 - 適切な調査が実施されない(理解・情報とも欠落することに)
 - 地質調査結果の不適切な取り扱い(理解・情報が欠落してしまう)

- 自然的要因

- 地質・地盤の不確実性をもたらすもの＝地質・地盤の成り立ち
 - 分布の複雑さ
 - 地質や地盤の空間的な分布や断層などによる変形
 - 物性値の不均一
 - 地質の成因や堆積時の環境の違い
- 地質・地盤の状態は本来、不均一で不規則なもの。
 - 地質学的な調査では、地質・地盤の構造や成り立ちをあきらかにすることが目的
 - 一方、土木地質では、構造物など目的の精度に応じた地質・地盤の状態を把握することが必要

- 分布の複雑さの例



不整合 削りこまれた岩盤と充填された堆積物

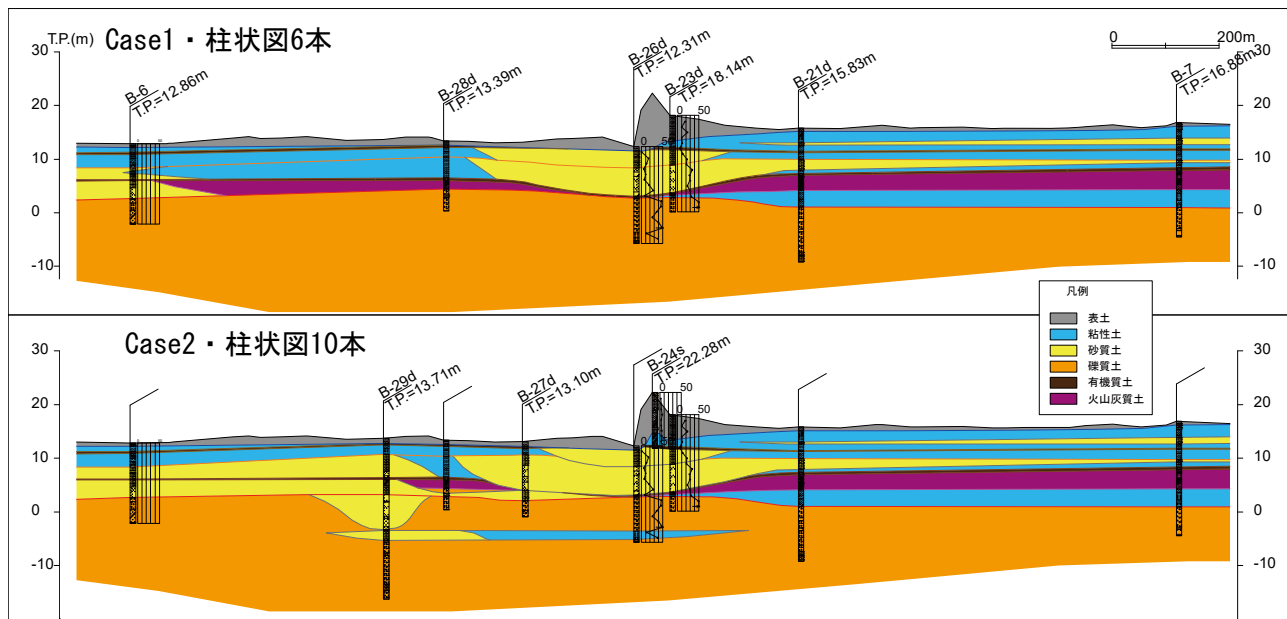


微細な褶曲 片麻岩中の褶曲構造



混在岩 孤立した砂岩や引きちぎられた砂岩泥岩互層

- 構造物など目的の精度に応じた地質・地盤の状態
⇒調査の質や量で描かれる地質・地盤の分布には大きな差が生じる



- 自然的要因

自然的要因による影響をできる限り減らすには

- 地質・地盤の調査においては、成り立ちや複雑さに対する理解とそれに応じた(設計・施工の要求精度?)調査の質と量が重要
- 既往の知見や地質調査結果からその箇所の地質・地盤の複雑さや不均一さをある程度把握し、それに応じた調査密度で「地質・地盤の不確かさ」を評価するという概念が必要。

とはいえ、「ボーリング等の地質に関するデータは地下空間の限定的な情報であり、たとえ多くの調査を実施しても地下空間を詳らかに把握することには限界がある(博多駅前事故報告書)」

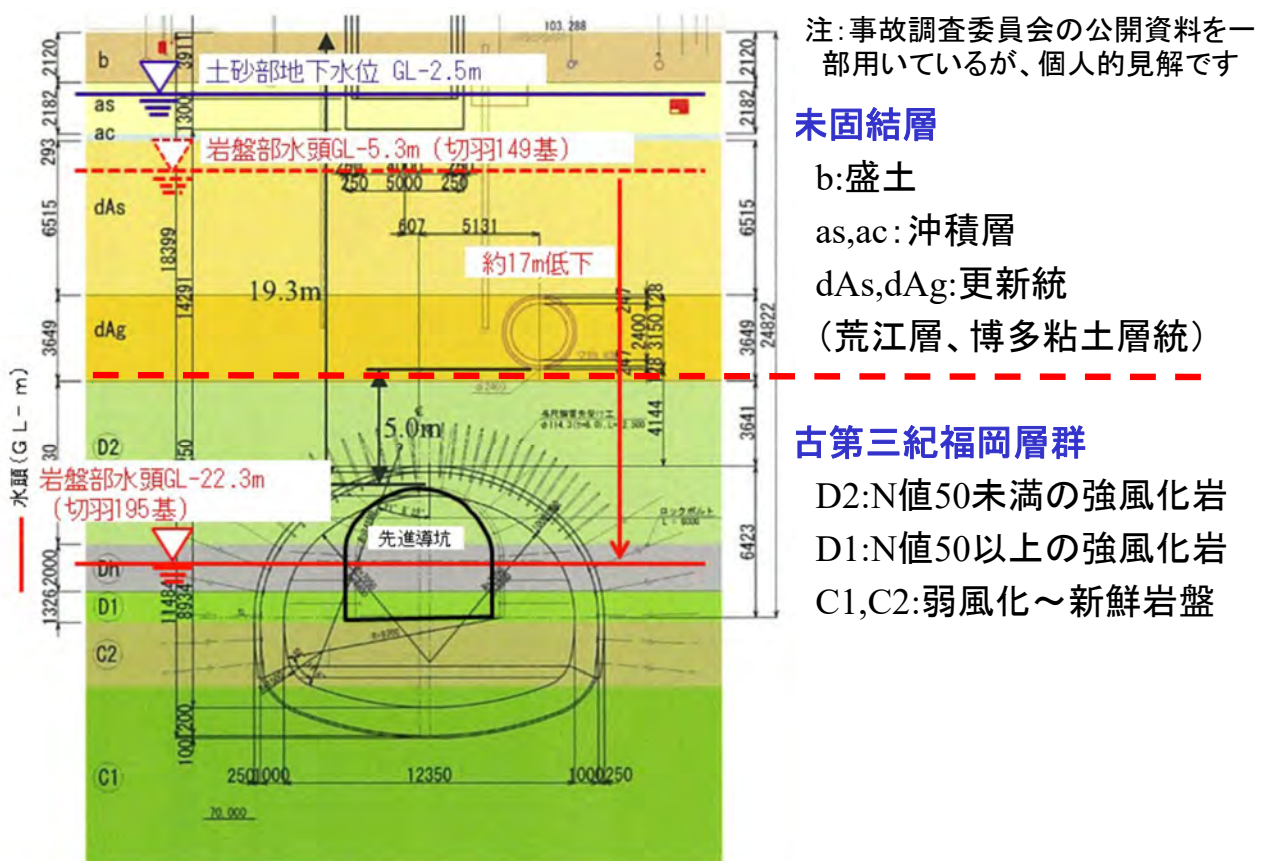
⇒自然的要因による影響を0にすることは不可能

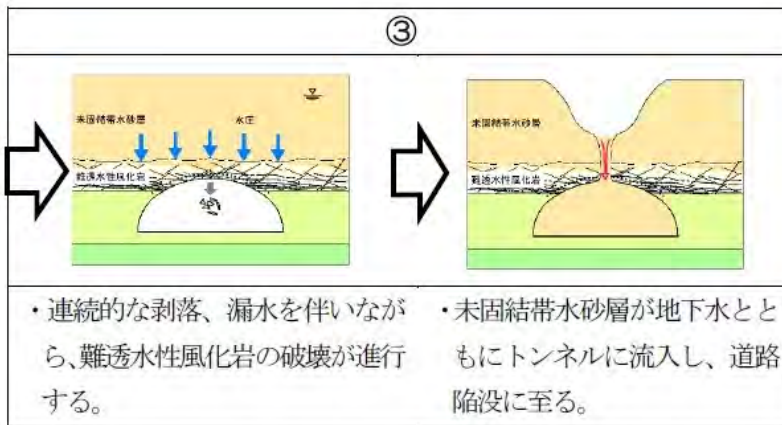
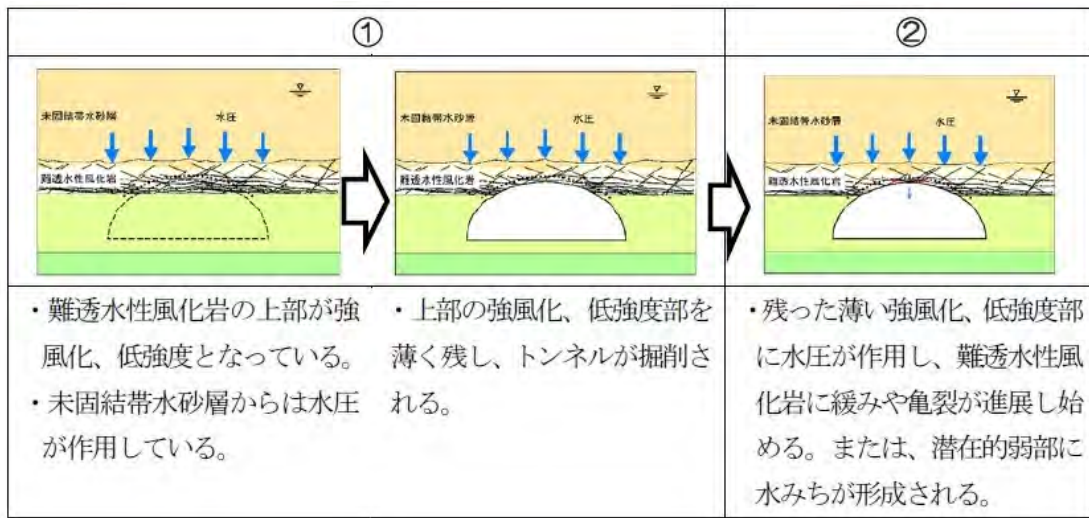
⇒自然的要因による不確かさを理解し、その影響に対し事業の中でどう対処するかという考え方・姿勢がさらに重要

• 人為的要因

- 事前の調査を怠ったり、地質調査の情報を軽視したりすること、各段階で自然的な要因の情報が正しく伝えられない、さらには地質・地盤の評価の過程で発生するなど、主に自然的な要因の取り扱いの過程で発生する要因
- 構造物の立地そのものを揺るがすような地質現象を見逃すことは致命的な結果をもたらす。
- 調査と設計、設計と施工の事業の段階において、地質の不均一さや不規則さという自然的要因に関する情報が適切に伝えられない状態や、地質調査における不確実性の理解が共有できていない状態は、自然的要因による影響よりもさらに大きな影響をもたらすことがある

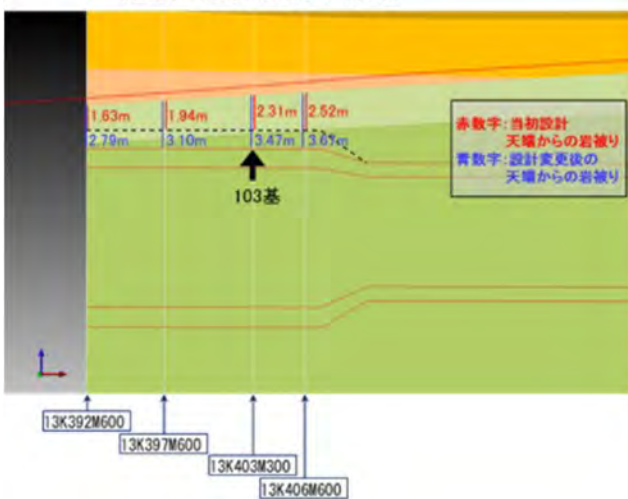
福岡地下鉄七隈線陥没事故をみてみると・・・



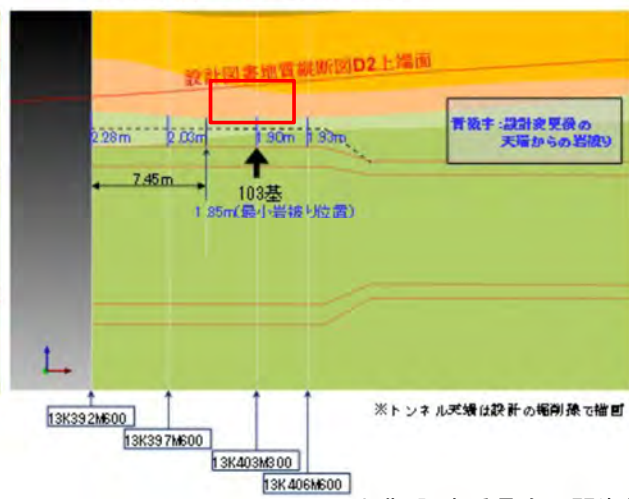


事故メカニズムの推定（出典：検討委員会報告書）

大断面トンネル施工時の地質モデル
(既往ボーリング+No. 27S-1 計9本)



現時点での地質モデル
(追加調査ボーリングを含めた全23本)

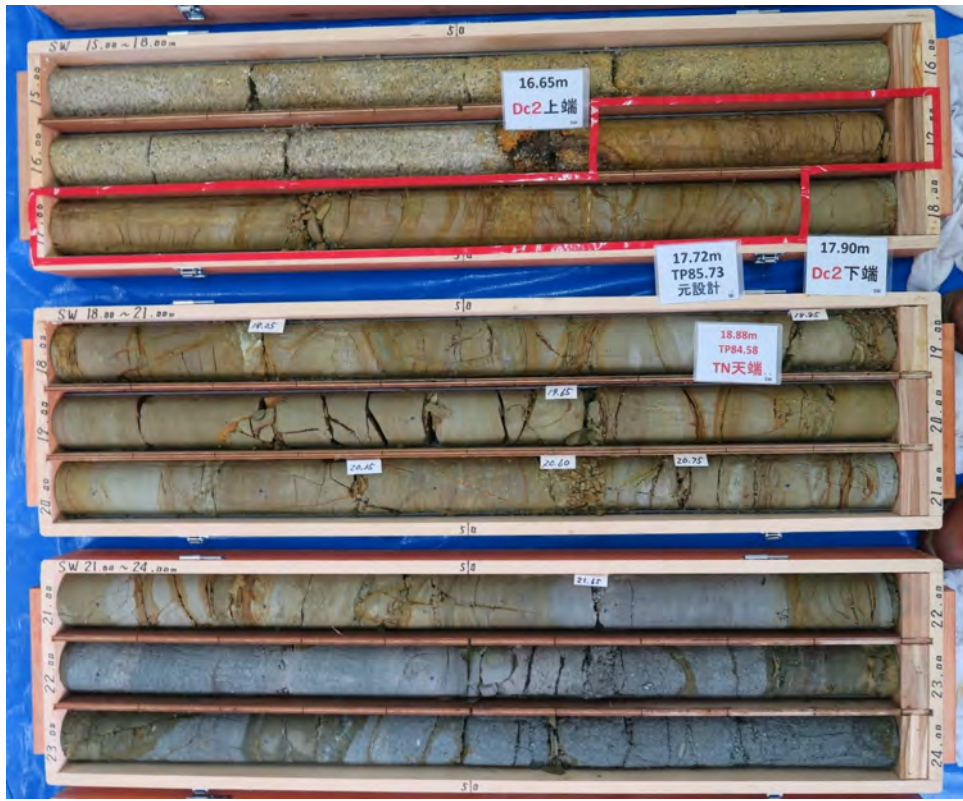


施工時: 地層が直線に描かれている

事故後調査: 地層境界に凹凸が判明

不整合面はある程度凹凸あるのが当たり前だが
⇒地質の成立ちを考慮した地質構造評価の不足か
(地質図の「不確実性」を関係者が共有できていない)

出典: 調査委員会公開資料



調査委員会による追加調査ボーリング例
(陥没部の南西)

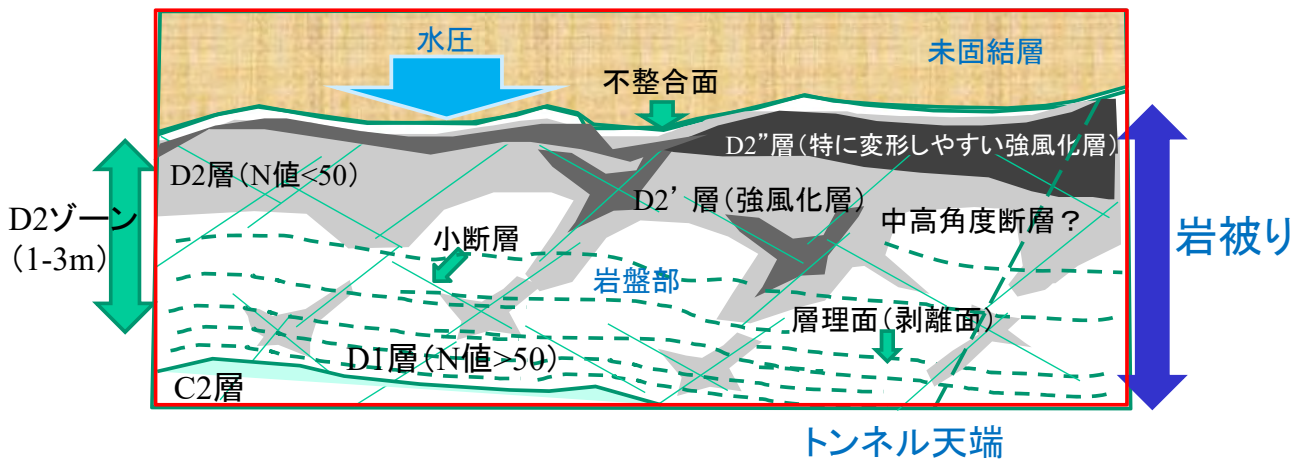


D2層中

古第三紀層で破碎質。
強度だけでなく、遮水性も心配な
地質
⇒弱層のある不均質体との認識
が欠如?



トンネル天端標高付近



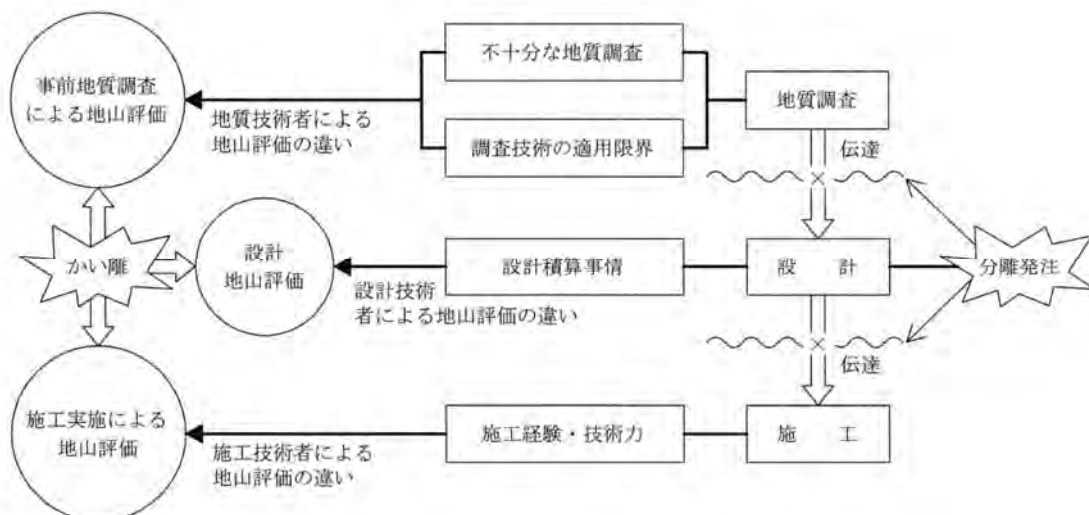
陥没箇所の天端部の岩盤状況のイメージ 出典:調査委員会公開資料

D2ゾーンをほぼ均質な難透水ゾーンとして設計したが違った

「岩被りが2～3mのトンネル」が求める地山要求性能(強度、遮水性等)に照らせば、**不整合面の凹凸、弱層の連続等の可能性のある不均質岩盤として、安全側の地質モデルで設計すべきであった。**

地質・地盤リスクの概念

- 人為的要因を生じさせるもの
 - 調査と設計・施工の地質・地盤に対する理解のギャップ
設計は地質・地盤の不確かさを単純化する作業
調査をする者or設計する者or事業者の結果に対する認識
 - 発注者や調査・設計・施工の各当事者の情報共有の不足?
 - 想定から変化していく地質・地盤条件への対応の仕組み



• 人為的要因

人為的要因ならば0にすることはできないまでも、低減することはできるのでは？

⇒どう対処すべきか？

- まずは、地質・地盤に対する理解を関係者が持つこと
- 地質調査の結果に不確実性について明確にすること
- 変化していく地質・地盤条件(の情報)への対応の方針をどのように決定するかという仕組み
- 3者会議(発注者、前段階の実施者及び後段階の実施者による合同会議)のような情報共有の場を設けるなど、コミュニケーションと協議が重要

地質・地盤リスクマネジメントの体系化にむけて

- これまでもリスクマネジメントは行われてきているが・・・
 - どちらかといえば、事業の初期の段階で調査を入念に行ない、事業の計画等に反映するというフロントローディングを重視？
 - 事業の進捗に伴って、想定と条件が異なった場合の考え方や、継続的なリスクの評価と対応の決定という視点が乏しいものでは？
- 提案されているリスクアセスメントの仕組み
 - 全地連の地質リスク調査検討業務
 - 事業の各段階で地質リスクアセスメントと合同会議を行って、必要に応じた地質調査の追加を含めた、アセスメントの結果を次の段階への引き継ぐというながれ
 - 小委員会答申
 - 国は、関係する学界等の協力を得て、地下工事における地盤リスクアセスメントの技術的手法を確立させる必要がある
 - 計画・設計・施工・維持管理の各段階において、地盤リスクアセスメントを実施できるよう、関係する技術体系の確立、手続きの明確化、専門家の育成等を行う必要がある
 - 設計、設計から施工といった次の段階に進む際には、いわゆる“3者会議”を設置し、前段階で得られた技術的知見や情報等を確実に伝達する必要がある

地質・地盤リスクマネジメントの体系化にむけて

- アセスメントに目を奪われると取りこぼしてしまうリスクがある
 - アセスメントしたから万全ではない
調査の質と量に応じた不確実さは残る(=0になるはずがない)
 - 不確実さを0にすることは不可能ならば、
その不確実さを適切に伝達していく必要
(事業の段階が進む際に、行方不明になるリスクがあってはならない)
 - 事業の進捗に伴って、不確実さも変化する
変化していくリスクの評価と対応を適切に進めることが重要
- 地質・地盤リスクマネジメントとは
 - 事業の各段階でその時点の最新の地質・地盤の情報に基づいて評価し、リスク対応の意思決定を行うというプロセスを繰り返していくこと
 - 事業者や受注者等の関係者全員で地質・地盤リスクを共通に理解
 - リスク対応のための意思決定を明確な役割分担のもと合理的に行う
 - 地質・地盤の不確実さの情報とリスク対応の関係を事業の各段階で引き継いでいく

地質・地盤リスクマネジメントの体系化にむけて

- 今後検討を進める項目
 - 基本理念や体系の全体像の提示に向けた検討
 - より早い段階から継続的なマネジメントを目指す(計画から維持管理・更新まで)
 - 事業者、事業規模、構造物種別等に応じた適用が可能となる手順・メニューの整備
 - 関係者の役割や共有すべき情報の内容・記録の考え方の検討
 - 事業者、地質調査者、設計者、施工者等の関係者の役割の明確化
 - たとえば、地質・地盤の不確実性、また施工や対策工等の不確実性の程度(地質図の精度や誤りの可能性、物性のばらつき、地山補強対策の不確実性等)の情報
各リスク項目とこれに対する分析・評価結果、対応後に残るリスク
リスク対応(提案・選定した対応、提案・選定理由、情報共有の経過等)の記録
 - CIMとの連携や地盤情報DBの活用
 - 実務的で見逃しの少ないリスクアセスメント手法やリスクの明示方法の検討
 - 一般地質調査業務(地質図作成を伴う業務)においても地質の不確実性とリスクを明示
 - 異なる専門技術者(地質と設計等)の合議によるリスクアセス(マルチオピニオン法)
 - 地質に適用しやすいリスクアセスメント手法(定性的リスクアセス法等)
 - 既往の慣習的リスクマネジメントや順応的管理手法の活用(観測施工、配合試験等)
 - 技術の確保や人材の活用
 - 関係者のリスク啓発、資格や人材の活用(啓発・教育のためのリスク対策連携体を組織)