

# 山岳トンネル工事における リスク低減に向けた研究

平成30年度 土木研究所講演会  
平成30年10月11日  
於:一橋講堂

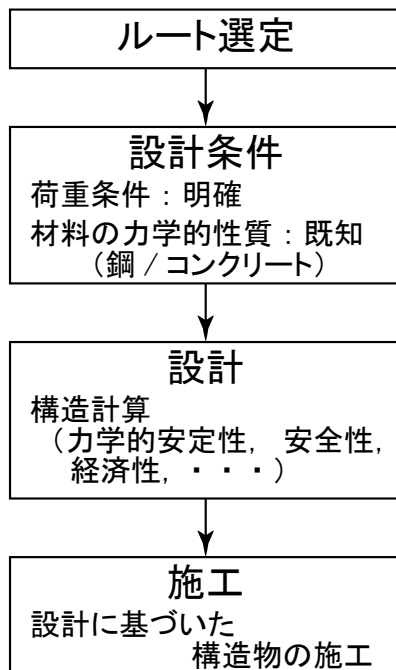
(国研)土木研究所 道路技術研究グループ  
上席研究員 日下 敦

## 本日の発表の構成

1. はじめに
2. トンネルプロジェクトにおけるリスク共有の考え方
3. 山岳トンネル工事における不確実性
  3. 1 地山の不確実性
  3. 2 施工の不確実性
  3. 3 施工時の調査や補助工法による地山崩落の低減
  3. 4 山岳トンネル工事におけるリスク低減に関する考え方
4. 山岳トンネルの耐震対策に関する考え方
  4. 1 活断層に対する考え方
  4. 2 致命的な被害の低減に資する対策
5. おわりに

# 1. はじめに

## ■一般的な土木構造物の計画・設計・施工の流れの例

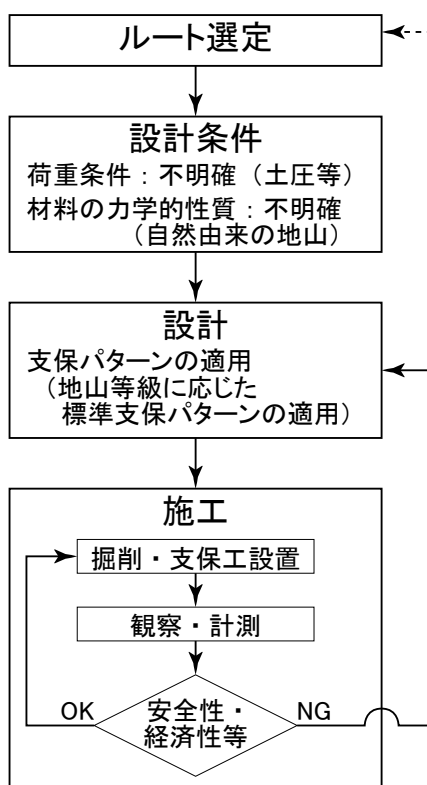


山岳トンネルと比較すると、荷重条件や材料の力学的特性が明確



# 1. はじめに

## ■山岳トンネルの計画・設計・施工の流れの例



- トンネル構造に作用する荷重を明確に算定するのはまず不可能
- 地山の力学的特性は事前には「ある程度」しか分からない

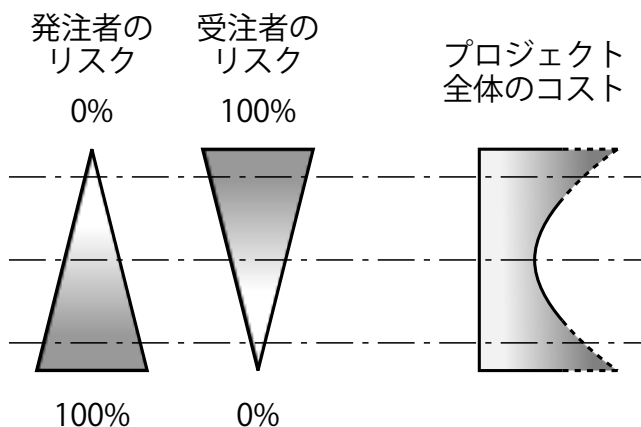
→ 不確実性を多分に有する

山岳トンネルは「掘ってみるまで分からない」と言われる

(掘削後も完全には明確にならない)



## 2. トンネルプロジェクトにおけるリスク共有の考え方



(出典: Kleivan (1989)の図をもとに作成)

- 受注者が全てのリスクを負う場合  
→ 受注者が安全を見て高額な契約を要求
  - 発注者が全てのリスクを負う場合  
→ 受注者があらゆる変更契約を要求
  - 受発注者間でリスクを共有する場合  
→ 不明確だった事象が明らかとなった時点で協議
- プロジェクト全体のコストは高止まり
- コストの極端な増加を抑制



## 3. 山岳トンネル工事における不確実性

### 3. 山岳トンネル工事における不確実性

#### 3.1 地山の不確実性

→ ボーリング調査や弾性波探査の限界に関する例示

#### 3.2 施工の不確実性

→ 補助工法の限界に関する例示

#### 3.3 施工時の調査や補助工法による地山崩落の低減

→ リスク低減に関する分析事例

#### 3.4 山岳トンネル工事におけるリスク低減に関する考え方

→ 不確実性への対応の考え方



## 3.1 地山の不確実性

### ■例1:ボーリング調査の不確実性



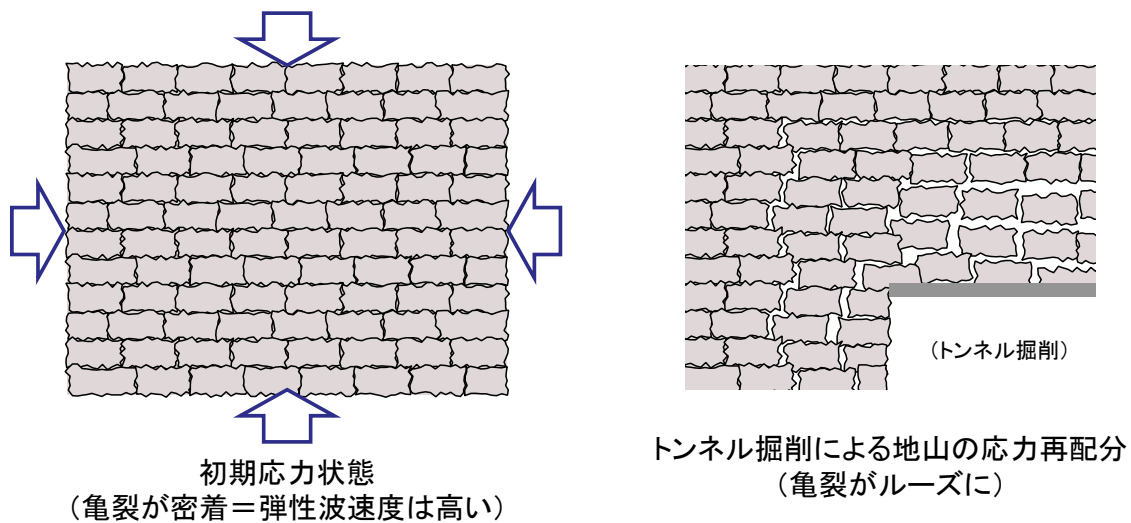
- ボーリング調査の数を増やせば、情報量が増加し、予測精度の向上に貢献
- しかし、限界があるということをよく認識すべき
  - ・ 局在する地質をボーリング孔が貫く場合がある
  - ・ トンネル掘削断面の全体像を把握しきれない場合がある
  - ・ 局所的な地層の凹凸を把握するのは困難である



7

## 3.1 地山の不確実性

### ■例2:弾性波探査の不確実性



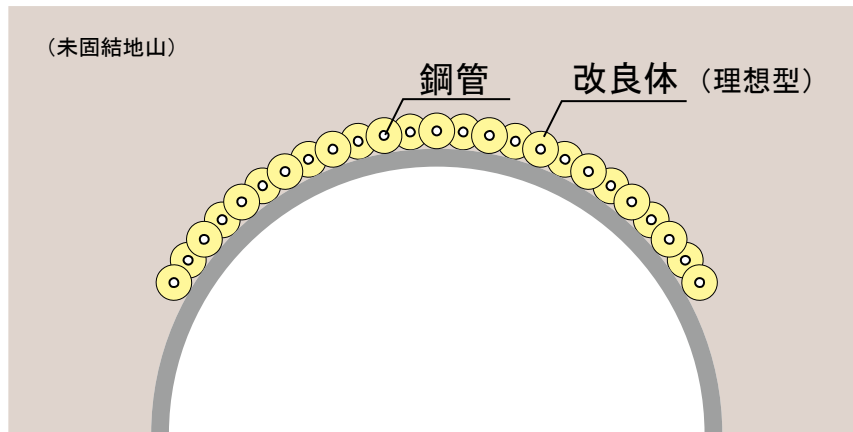
- 弾性波探査は地山の性状の把握に有効
- しかし、限界があるということをよく認識すべき
  - ・ 高速度層が存在すれば、それより深いところの弾性波速度は測れない
  - ・ トンネル掘削による地山の応力再配分により力学的性質が変化する場合がある



8

## 3.2 施工の不確実性

### ■例：補助工法の不確実性



- 長尺鋼管先受け工法は、未固結地山の掘削における天端の安定対策として有効
- しかし、限界があるということをよく認識すべき
  - ・ 注入材と地山の相性等によっては、想定通りに改良体が形成されない場合がある
  - ・ チェックボーリングは、新たな水みち形成の恐れもあり、必ずしも得策ではない



9

## 3.3 施工時の調査や補助工法による地山崩落の低減

### ■トンネル施工時のリスク低減に対する取り組みの効果に関する集計

リスク低減に対する取り組みの例：

- ・ 施工時の調査
- ・ 補助工法の採用



地山崩落といったトラブルに対するリスク低減にどの程度寄与するのか？



施工実績を集計して、大まかな傾向を分析

【本検討におけるエクスキューズ】

- ✓ 施工時調査の目的が不明確
  - ・ 切羽の崩落に関連する情報を事前に得ようとしたのか、それ以外の情報を得ようとしたのか等の情報を読み取ることができなかったため、施工時調査が直接的あるいは間接的にでも切羽の崩落を防ぐのにどの程度寄与したのかは不明確
- ✓ 本検討において施工時調査を行っている事例には地域的な偏りがある
  - ・ 崩落確率が施工時調査の有無による影響を受けているものなのか、地質的な地域特性を反映しているものなのかについて区別ができていない



10

### 3.3 施工時の調査や補助工法による地山崩落の低減

#### ■分析の方法

施工時の切羽観察表を集計：

$$\text{崩落確率} = \frac{\text{「崩落あり」の切羽観察枚数}}{\text{対象区間の切羽観察枚数}}$$

#### ■分析対象

1996年以降に竣工した道路トンネル

- ✓ トンネル数：約180
- ✓ 総延長：約160km
- ✓ 切羽観察記録の総数：約4,800枚

#### 【用語の補足】

- ✓ **崩落あり**：吹付けコンクリートによる充填で対応できるような小規模の崩落から、切羽を停止させて空洞充填や支保構造の増強といった対策が必要な比較的大規模の崩落までを画一的に「崩落あり」として区分
- ✓ **施工時調査**の実施：坑内より実施する切羽前方探査を取り扱い、その中でも比較的实施件数の多い先進ボーリングを対象とし、実施の有無のみで区分
- ✓ **補助工法**の採用：各種の補助工法が存在するが、実施の有無のみで区分

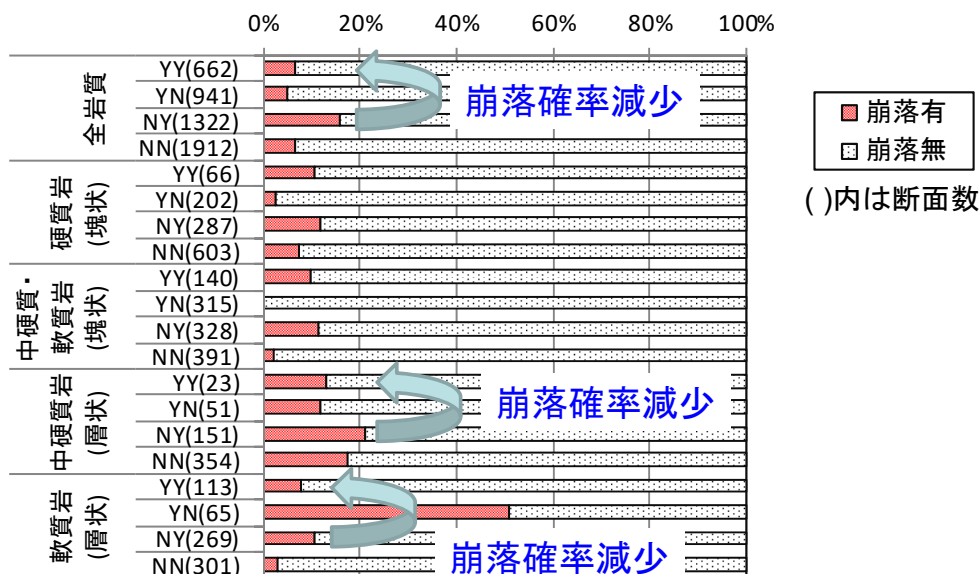
#### ■ケース設定

施工時調査の実施	補助工法の採用	ケース名
Yes	Yes	YY
	No	YN
No	Yes	NY
	No	NN



### 3.3 施工時の調査や補助工法による地山崩落の低減

#### ■集計結果の一例



➤ 施工時に補助工法が必要となるような不良地山が出現した場合に、施工時調査により事前に地山状態を把握しておくことでトラブルの発生を未然に防止できる場合と、その効果があまり期待できない場合があり、岩質によってもその傾向が現れる可能性がある



### 3.4 山岳トンネル工事におけるリスク低減に関する考え方

- 地山の調査を数多く行うことで、地山の不確実性を減少させることは、それに見合った費用を要する。一方で、厳密な調査を行ったとしても、トンネルを掘削して地山の状況を確認することでしか判断ができないこともある。
- 多種の補助工法を併用することで不確実な地山に対する崩落等のリスクを減少させることは可能であるが、採用する補助工法に見合った費用が必要となる。
- 費用を投じたとしてもリスクをゼロにすることはほぼ不可能  
→費用対効果の面も含めて**工学的な判断をせざるを得ない**場面も多い
- 実際のトンネル建設においては、計画段階、概略設計段階、詳細設計段階、施工段階とステップが進むにつれて調査の精度も向上し、**不確実性**も徐々に減少するが、それでも**完全には無くならない**。このような事情があることを、発注者、受注者双方が認識し、ステップが進んでも情報を共有し、施工段階においても完全に確実なことは無いという前提で事業を進めることが、より確実な施工を行うためには重要。



13

### 4. 山岳トンネルの耐震対策に関する考え方

- 山岳トンネルの施工完了後も不確実性として残るリスク  
→地震の影響 など



H28熊本地震 俵山トンネル



H16新潟県中越地震 和南津トンネル  
(写真提供: 北陸地整道路部)

- 道路トンネルにおける地震に対するリスク低減に向けた考え方  
→覆工の単鉄筋補強(用心筋)



14



## 4.1 活断層に対する考え方

- 活断層への対応の難しさ：
  - 地震により活動した活断層のごく近傍で、かつ特殊な地山条件が内在する箇所においても、地震による大きな被害が発生しなかった事例も見られる
  - トンネルの寿命というタイムスパンで考えた場合に、トンネルのごく近傍で今後活動する活断層を特定するのは、現在の技術的水準では困難
  - 活断層は面的な広がりをもつ一方で、トンネルは線状に建設されるため、トンネルの平面線形や縦断線形を多少変更したところで、多数の活断層が存在する我が国において完全に活断層を避けて通るのは困難
- 山岳トンネルの地震被害を低減させるために：
  - 計画・調査段階において活断層の位置の把握に努める
  - 可能な範囲でトンネルと活断層の離隔を確保する
  - 地震の影響を受けやすいと考えられる特殊条件を有する区間において十分な支保構造となるように設計・施工を行う



## 4.2 致命的な被害の低減に資する対策

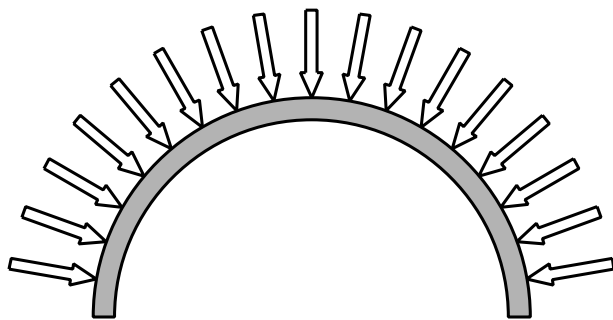
- 過去の地震被害や、数値解析・実験から得られた知見
  - これまでの地震による被害発生状況を踏まえると、地震により地山に大きな変形が発生し、その変形に覆工が追従できなかったことにより、覆工に圧縮破壊等の変状が発生したと想定される。
  - 数値解析により試算した結果によると、地震によるトンネルの被害を再現するための外力として、土被り荷重に換算して3D(Dはトンネル径)程度の荷重が想定される。
  - 上記のような荷重に対し、所定の安全率を確保するという前提で構造計算により覆工の設計を行うと、高強度コンクリートの採用や増厚等が必要となる。一方で、これらの対策を実施したとしても、地震時の地山の変形に覆工が追従できることにはならない。
  - 覆工の補強対策として鉄筋補強や繊維シート貼付を実施したとしても、これらは本来、引張部材として期待されるものであり、覆工の圧縮破壊そのものを抑制する効果までは期待し難い。
  - 以上のような観点から、トンネルの耐震対策の考え方として、覆工の破壊そのものを防止するのではなく、**覆工が破壊したとしても大規模なコンクリート塊の落下を抑制する**ことが重要と考えられる。





## 4.2 致命的な被害の低減に資する対策

### ■実大載荷実験による鉄筋の効果の検証



- ・覆工形状：外径9.7mの半円形、覆工厚30cm
- ・呼び強度：13.5 N/mm<sup>2</sup>(載荷能力の都合により低強度)
- ・載荷方法：10°ピッチ(1断面あたり2本)に配置した全ジャッキから均等に載荷(荷重10kN/本は約1mの土被り換算荷重に相当)

単鉄筋補強しても、最大荷重は増加しないが、覆工コンクリートの分離は抑制  
→単鉄筋補強により、破壊自体は防止できないものの、破壊後の大規模な覆工コンクリート塊の落下を防止できる可能性がある



単鉄筋補強のケースにおける終局時の写真



供試体内面側より撮影



供試体上面より撮影

- 覆工の断面破壊は発生したが鉄筋は破断せず、供試体の分離は抑制

17



## 4.2 致命的な被害の低減に資する対策

### ■新設トンネルにおける耐震対策の考え方

地震による影響を受けやすいとされる特殊条件を有する区間において：

- ① インバートを設置してトンネルをリング構造とし、力学的により安定な構造とする
- ② 吹付けコンクリート、鋼アーチ支保工、ロックボルトに代表される支保工を十分な構造とする

→ 維持管理段階におけるリスクを低減させるために、施工時に十分な支保構造を構築

- ③ 地震により覆工に破壊が生じたとしても、大規模な覆工コンクリート塊が崩落することのないよう、覆工に単鉄筋補強などの措置を講じる

→ 地震時の地山からの不確実な荷重や変形に対して、万が一覆工に破壊が生じたとしても、覆工コンクリート塊が大規模なブロックで落下しないよう対策

### ■既設トンネルにおける耐震対策の考え方

地震による影響を受けやすいとされる特殊条件を有する区間において：

- ① 覆工の背面に空洞が存在する場合は、優先的に裏込め注入工による対策を実施する
- ② 点検等により変状が確認された場合は、変状の原因及び進行状況等を考慮し、優先的に変状対策を実施する

→ 十分な維持管理により、地震の影響を低減



18

## 5. おわりに

- 本日の発表内容
  - 山岳トンネルの建設において不確実性を完全に除去することの困難さ
  - 不確実性に起因するリスクを低減させる取り組みの例
  
- 山岳トンネルの建設に従事する技術者の責務
  - トンネル工事における不確実性を極力除去する努力を惜しまない
  - 残された不確実性を関係者で共有し、その対策について全員で知恵を絞る
  
- 土木研究所での取り組み
  - 地山の探査方法
  - 施工時の観察・計測結果の評価方法
  - 補助工法の選定手法と留意事項