

道路トンネルの覆工崩落とその対応

土木研究所講演会
令和6年10月22日
於：一橋講堂

国立研究開発法人 土木研究所
道路技術研究グループ トンネルチーム
上席研究員 日下 敦

道路トンネルの覆工崩落とその対応

1. 道路トンネルの耐震対策に関するこれまでの取り組み
2. 能登半島地震発生直後の情報収集
3. 能登半島でのトンネル調査
4. 道路トンネルの被害の概要
5. 被害の総括と今後の展望

トンネルの耐震性に関する経験的な知見

- 山岳トンネルは一般に地震に強い
ただし、比較的被害を受けやすい特殊な箇所もある
例：坑口部、断層・破砕帯、不安定な斜面内
→ 覆工の標準仕様として：
一般部では無筋コン，坑口部等では単鉄筋補強(用心筋)コン
- 一方で、いわゆる一般部でも覆工の崩落を伴う地震被害の事例あり



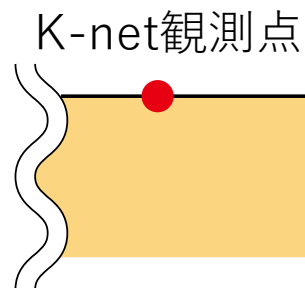
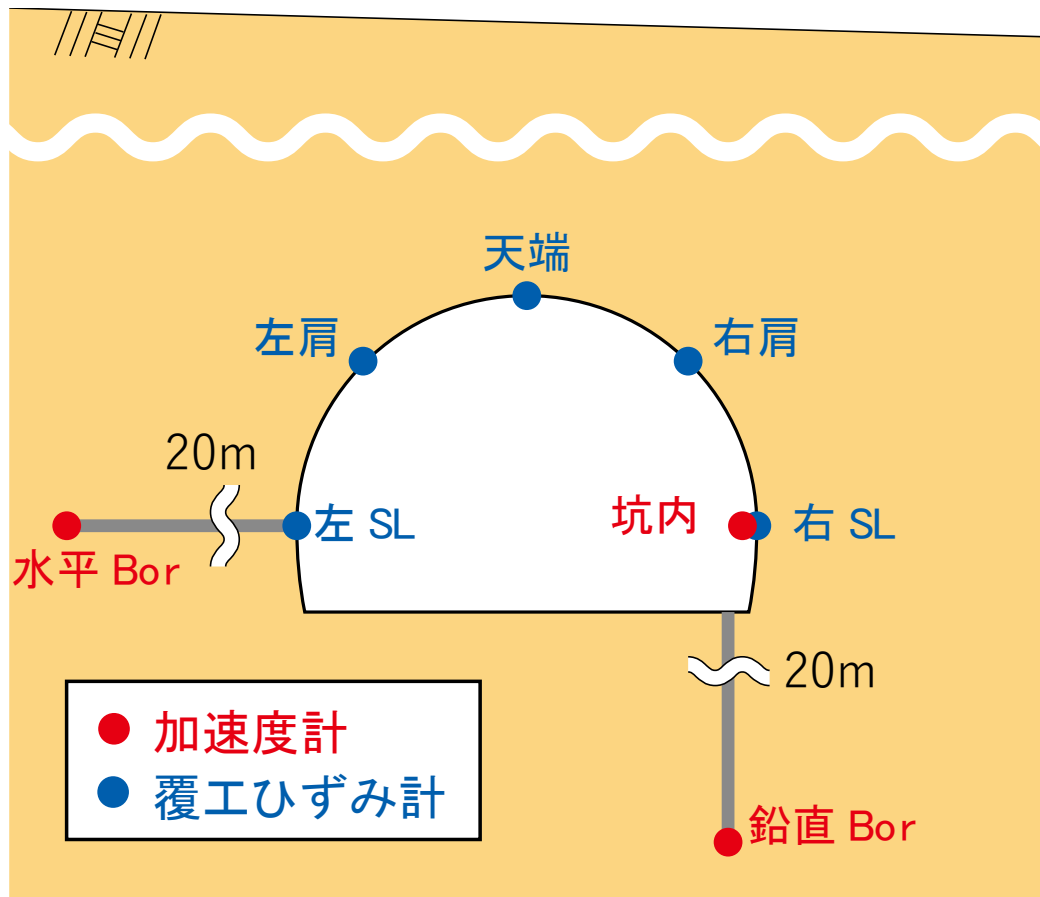
写真：国土交通省



山岳トンネルはなぜ地震に強いのか

- そもそも堅硬な岩盤の中にある
 - 地山の中は地表と比べて揺れが小さい
 - トンネルは周辺の地山と一体となって動くため振動の増幅がない
- ・・・ただし経験則による部分が多く、定量的な評価の事例は僅少
- 実トンネルにおいて動的計測を実施して確認
(次スライド以降で紹介)

実トンネルにおける地震時の動的計測



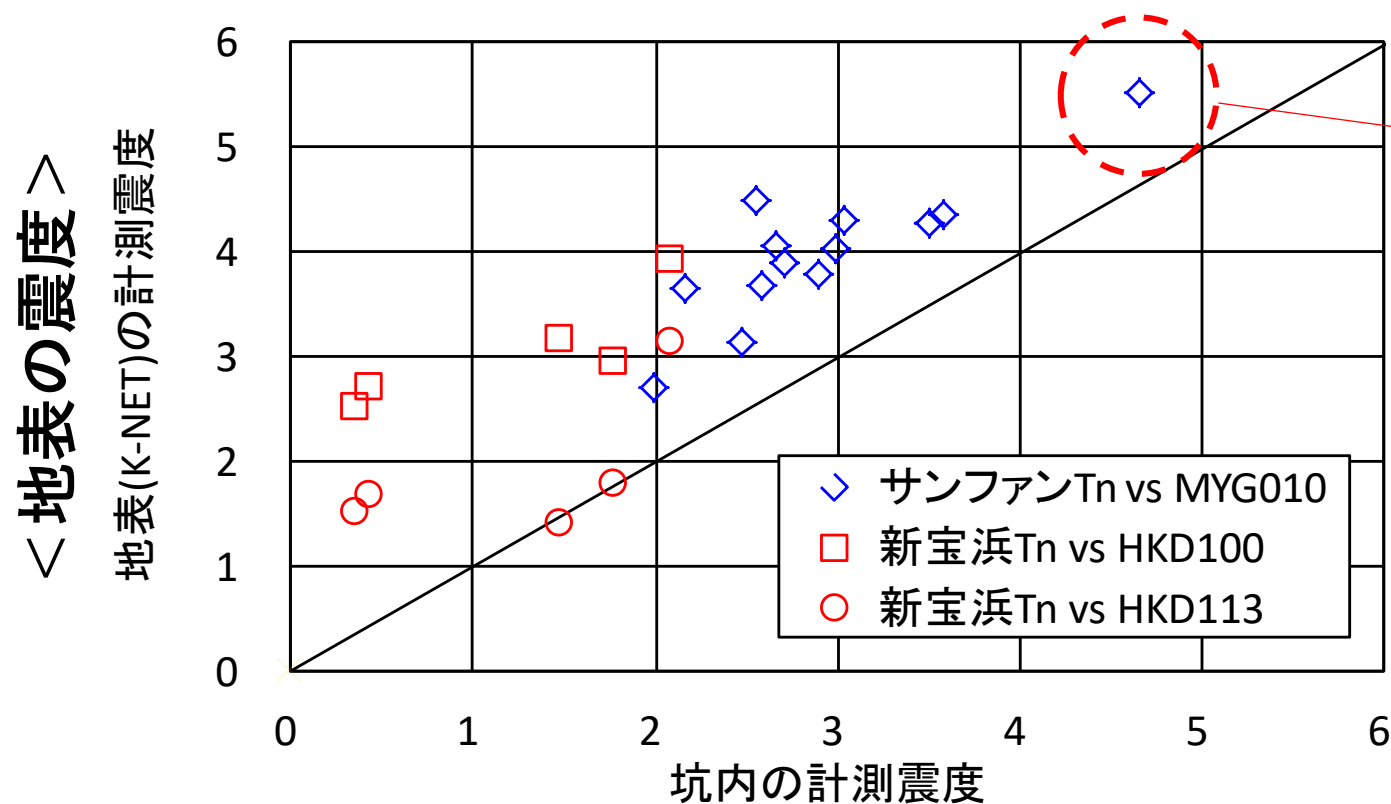
防災科研の強震観測網の
トンネル最寄りの観測点
を地表の揺れとして参照



地図出典：地理院地図

- NATMで建設された2車線道路トンネルの一般部で計測

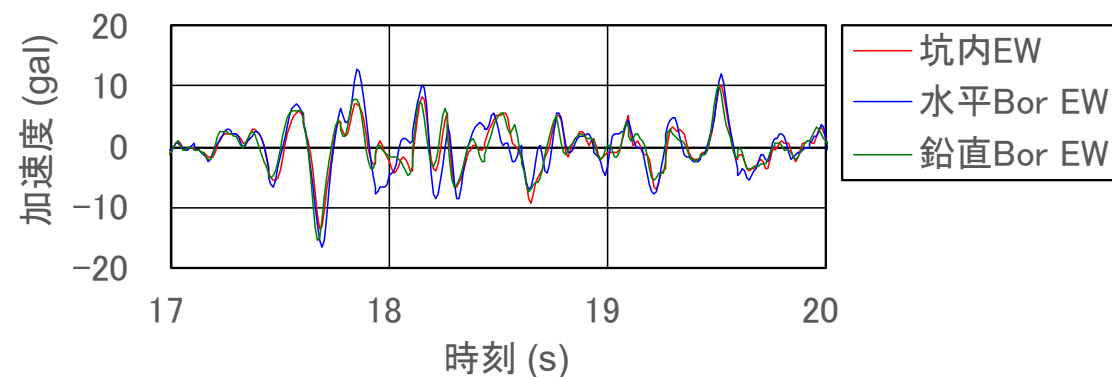
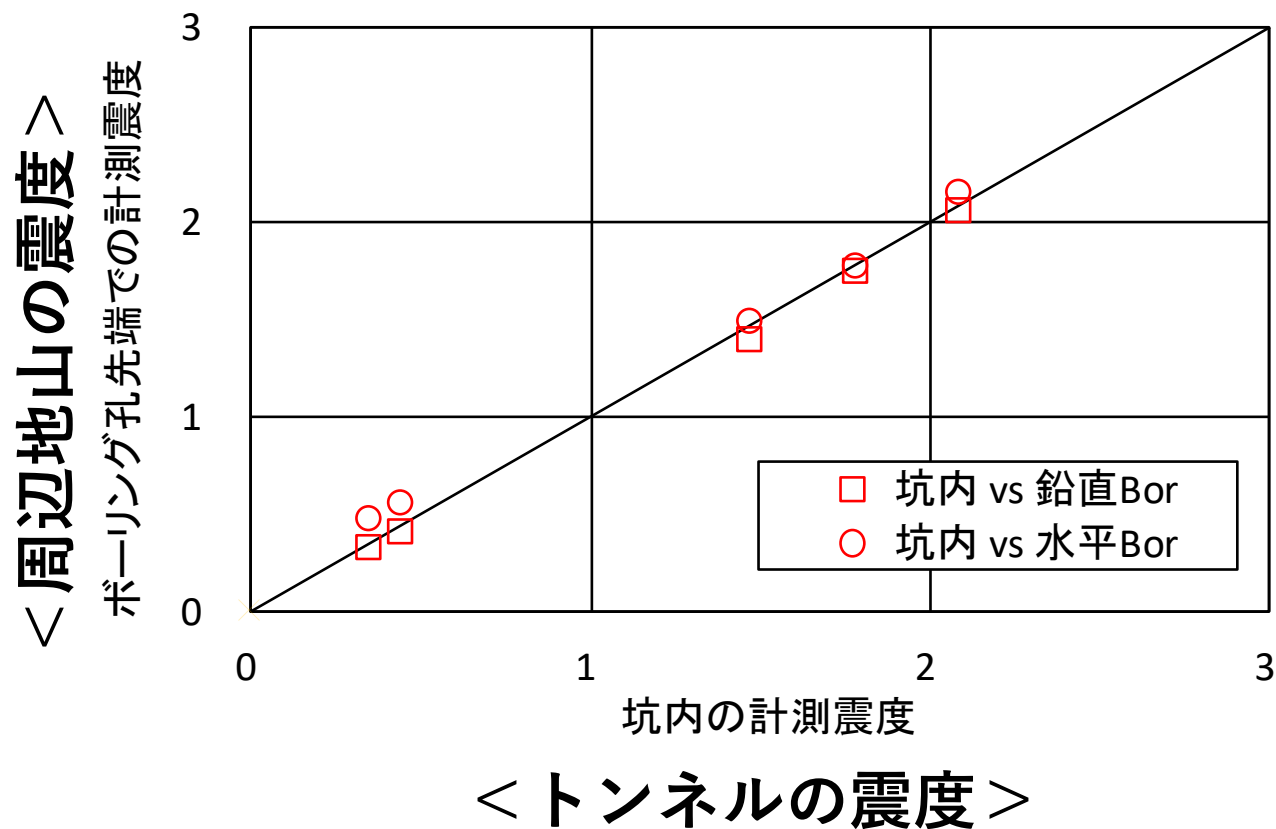
トンネルと地表の揺れの大きさ（計測震度による比較）



(例)
地表の揺れは震度6弱
V
トンネルの揺れは5弱

- ✓ トンネルは地表と比べて揺れが小さい
(これまでの経験的な知見を裏づけるデータ)

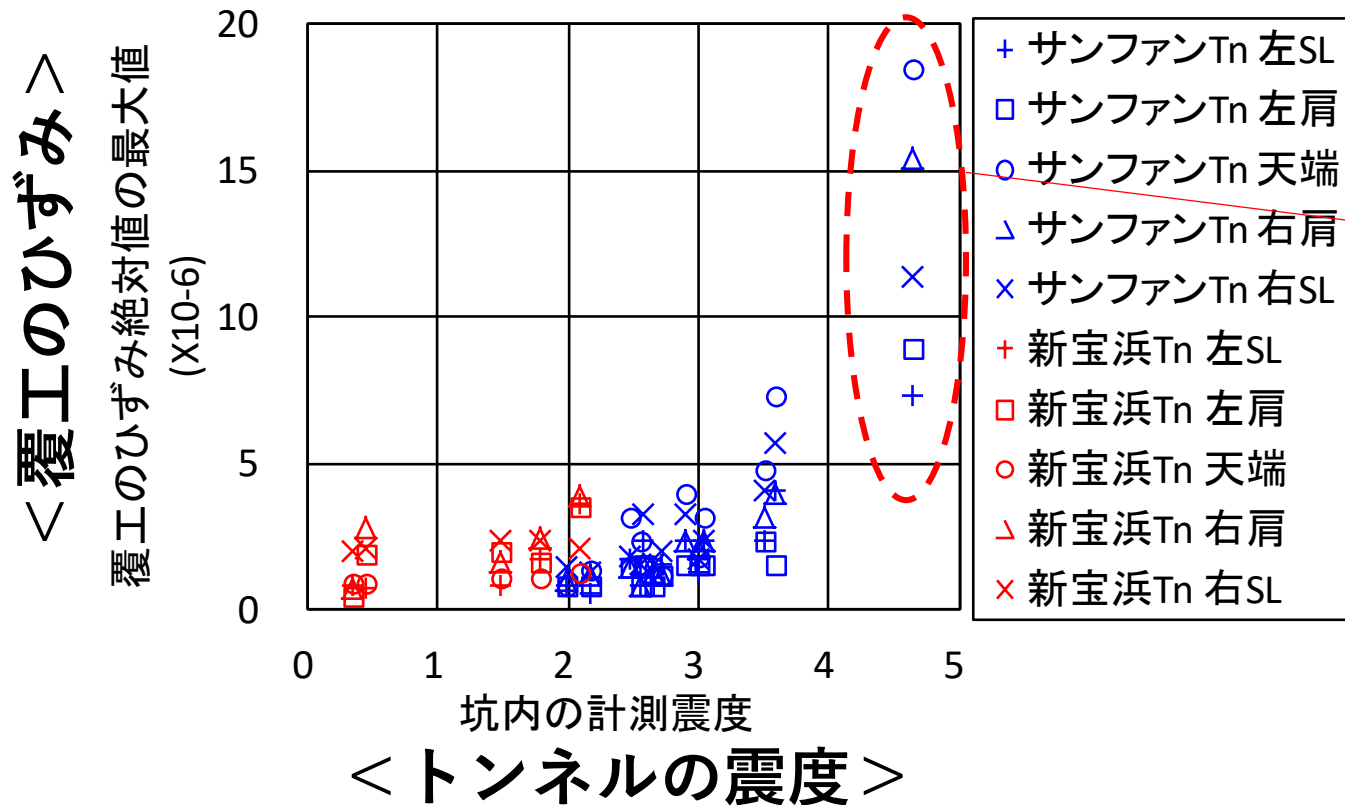
トンネルと周辺地山の揺れの比較



ある時刻の加速度波形

- ✓ トンネルは周辺の地山と一体となって動くため振動の増幅がない
(これまでの経験的な知見を裏づけるデータ)

地震時の覆工のひずみ



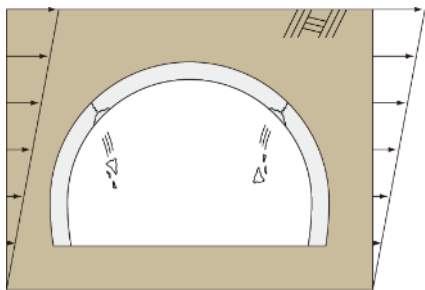
地表で震度6弱の地震における観測データ

- ✓ 地表で震度6弱の地震でも覆工ひずみは 20×10^{-6} 程度
 - 静的荷重に換算すると、鉛直荷重26kPa（土被り荷重約0.1D）相当
 - 覆工の破壊に対する設計荷重の設定根拠には至らず

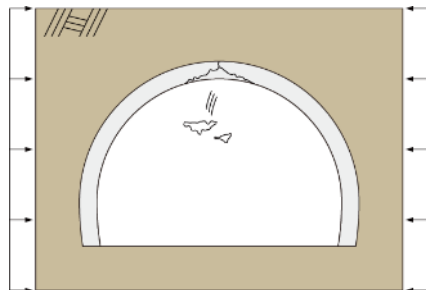
山岳トンネルの耐震設計の難しさ

- ① 計測して設計荷重を求めたら？
→ 設計に使えるデータは現時点で皆無
- ② 被害事例から設計荷重を求めたら？
→ 覆工厚は2倍以上になるか…やるとしても範囲を相当絞り込まねば
- ③ 覆工を増厚して地震に対抗しては？
→ 地山の変形に追従できず覆工に応力が集中して逆効果
- ④ 覆工を柔構造にして地震荷重をいなしては？
→ 常時の荷重に対抗する性能が低下
- ⑤ ロックボルトを追加設置したら？
→ ロックボルトを介して覆工作用荷重がかえって増加することもある
- ⑥ 繊維シートを貼ったり鉄筋で補強したりしては？
→ 引張材であり覆工の地震時の圧縮破壊に対して効果薄

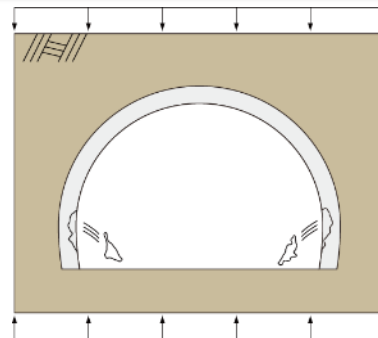
過去の地震でのトンネルの主な被害モード



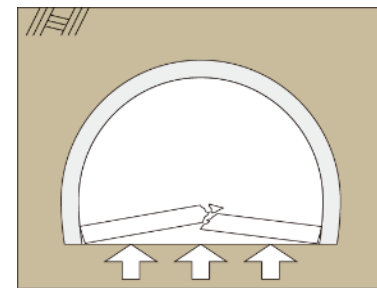
Type-I : 地山のせん断変形にともなう覆工両肩部の引張破壊または圧縮破壊



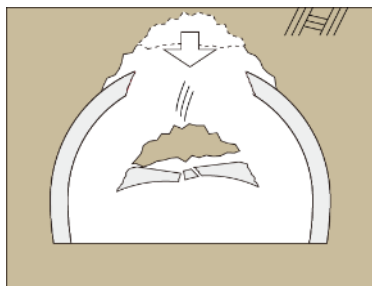
Type-II : 地山の水平圧縮変形にともなう覆工天端部の圧縮破壊



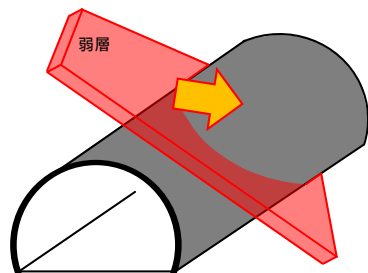
Type-III : 地山の鉛直圧縮変形にともなう覆工側壁部の圧縮破壊



Type-IV : 下方の地山の押し出しにともなう盤ぶくれ



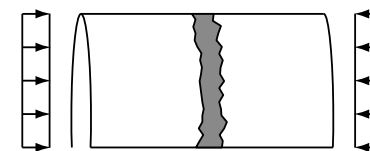
Type-V : 既往の変状に助長されて発生する覆工の破壊



Type-VI : 地山の弱層や断層に沿って発生する覆工の破壊



Type-VII : トンネル縦断方向の地山の引張変形にともなう覆工全周の引張破壊



Type-VIII : トンネル縦断方向の地山の圧縮変形にともなう覆工全周の圧縮破壊

※こういった条件でどのタイプの挙動をするのかは今後の研究課題

地震の被害を受けやすい地山条件

- ✓ 地震被害の多くは、規模の大きな地震の震源にごく近いなどの悪条件に加え、地山条件の厳しい箇所（下表）において限定的に発生

地震の影響を受けやすいと考えられる特殊条件

No.	条 件
1	突発的な大量の湧水により施工を長期間中断した箇所、またはこれに準ずる箇所.
2	切羽の著しい崩落により施工を長期間中断した箇所.
3	地山の不安定性に起因して大規模な補助工法を使用した箇所.
4	地質が急変して2パターン以上の支保パターンの変更を伴った箇所（ただし、坑口部支保パターンとの接続部を除く）.
5	縦断的・横断的に地質の剛性が大きく変化する箇所.
6	極端な偏圧を受ける箇所.
7	極端に土被りが小さい箇所.
8	地山等級DⅡおよびそれよりも不良と評価される箇所（断層・破碎帯等を含む）.

→ 次ページの対策を適用する条件

- ✓ 覆工背面空洞や覆工巻厚不足等の構造上の弱部が存在すると被害を助長

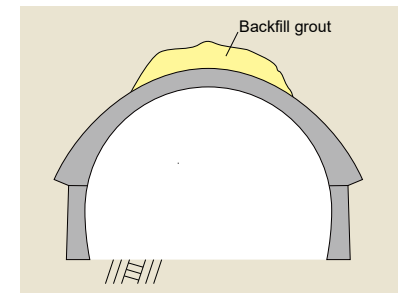
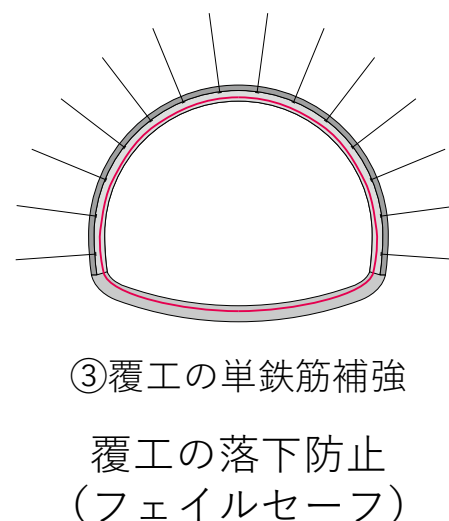
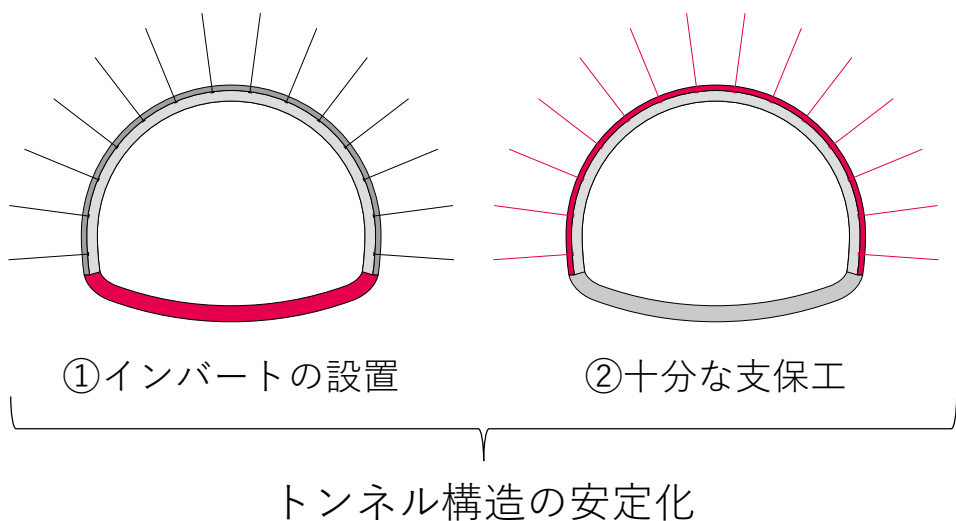
H28熊本地震以降に道路トンネルで導入した耐震対策の考え方

1. 地震の影響を受けやすいと考えられる特殊条件における設計・施工上の留意点

- 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
- 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、覆工に単鉄筋補強するなどの措置を講じる

2. 特殊条件を有する区間における維持管理の考え方

- ④ 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
- ⑤ 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



④覆工背面空洞の解消
トンネル構造の
安定化

道路トンネルの覆工崩落とその対応

1. 道路トンネルの耐震対策に関するこれまでの取り組み
2. 能登半島地震発生直後の情報収集
3. 能登半島でのトンネル調査
4. 道路トンネルの被害の概要
5. 被害の総括と今後の展望

能登半島の道路トンネル



震度6弱以上を観測した
7市町の道路トンネル数

$$64 + \alpha$$

(α = 農道のトンネルなど)

広い範囲にトンネルが点在し、
全体像の把握や、個別のトンネル
へのアクセスが困難を極める。

地図出典：地理院地図

トンネル位置出典：xRoad

トンネルの被害に関する情報収集

- 道路管理者からの情報提供
- SNSでの情報収集
- 地域の実情に詳しい技術者からの情報提供（現地状況，地質情報等）
- 航空写真や地震動データ

被害発生の疑いのあるトンネルについては・・・

- 施工時データ(公表された施工記事など)の収集，分析
- 過去の点検データの収集，分析
- 関係者へのヒアリング（施工当時の体験談等）

道路トンネルの覆工崩落とその対応

1. 道路トンネルの耐震対策に関するこれまでの取り組み
2. 能登半島地震発生直後の情報収集
3. 能登半島でのトンネル調査
4. 道路トンネルの被害の概要
5. 被害の総括と今後の展望

トンネルに関する最初の技術支援要請

- R6能登半島地震発生から1週間が経過し、道路の啓開(緊急復旧)を道路管理者や自衛隊が進める中で、トンネル崩落の情報あり。
- 自衛隊より国交省へ、トンネル内への立ち入りの可否等に関する専門家の知見に掛かる要請あり。可及的速やかに、とのこと。



- 東京都立大 教授(元 土研), 国総研・土研のトンネルの専門家を現地に即時派遣。
- 詳細な調査行程は移動中に後方支援部隊により調整。
- つくばに残ったトンネルチーム職員に、現地調査候補となっているトンネルの情報を収集・分析してもらい、予習用の資料に。

自衛隊と合流，現地へ

9:20 金沢駅前のホテル出発
自衛隊の車にて移動

途中，国交省北陸地整と合流
(平時は3時間の道のり)



15:50 大谷トンネル (珠洲市) 着
調査開始

(16:53 日没)

17:10 調査終了・現地発



現地調査の様子（1）



入坑前の打合せ



大谷Tnの様子（坑口から50m）

現地調査の様子（2）



大谷Tnの様子（覆工崩落部）



坑内での打合せ

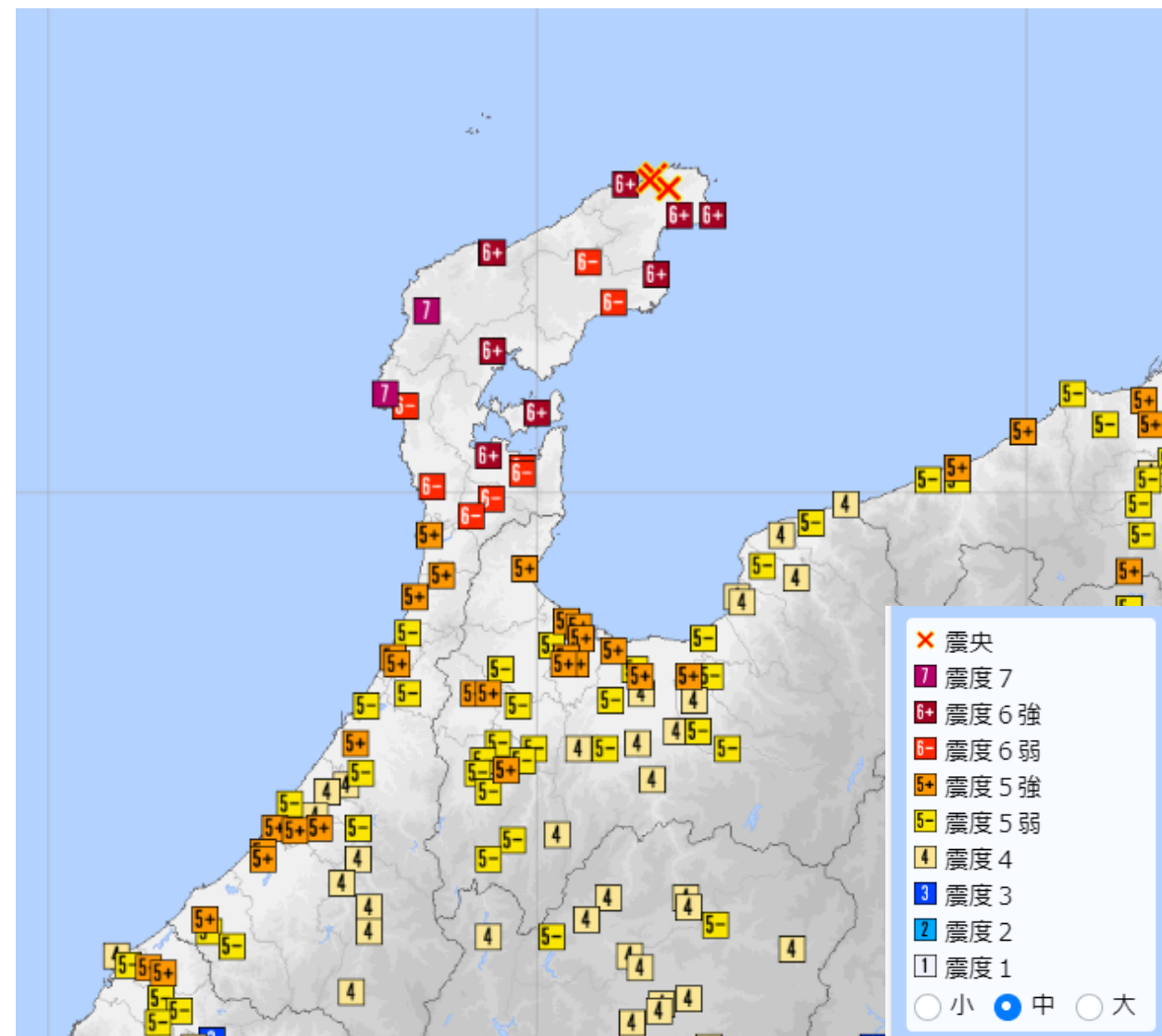
※調査の動画はYouTubeの国土交通省チャンネルにも！
（R6.7.7 NHKサイエンスZEROでも一部映像使用）

道路トンネルの覆工崩落とその対応

1. 道路トンネルの耐震対策に関するこれまでの取り組み
2. 能登半島地震発生直後の情報収集
3. 能登半島でのトンネル調査
4. 道路トンネルの被害の概要
5. 被害の総括と今後の展望

R6能登半島地震の概要

- 名称：令和6年能登半島地震
- 発生時刻：令和6年(2024年)1月1日 16時10分
- マグニチュード(M)：7.6
- 発生場所：石川県能登地方
深さ約15km
- 最大震度：震度7



出典：気象庁

地震発生から2ヶ月間で調査したトンネル



(令和6年2月28日時点：国総研・土研調べ)

【凡例】

- ×：特大被害（覆工崩落） 2
- ×：大被害（覆工塊の落下） 2
- ×：中被害（圧さ/せん断ひび割れ） 1
- ▲：小被害（規模の大きなひび割れ） 2
- ：軽微※～被害なし【徒歩遠望目視】 18
- ：軽微※～被害なし【車上目視】 33
- ：未確認

※「軽微」には以下等を含む

- ・地震前から存在した変状が少し進展したと考えられるもの
- ・目地や打継ぎ目の小片のうき・はく離、はく落
- ・幅の小さなひび割れ

地図出典：
地理院地図

比較的大きな被害が確認されたトンネル

(令和6年2月8日時点)



【凡例】

- ×：特大被害（覆工崩落）
- ×：大被害（覆工塊の落下）
- ×：中被害（圧ざ/せん断ひび割れ）
- ▲：小被害（規模の大きなひび割れ）

地図出典：地理院地図

R6能登半島地震にともなう地殻変動

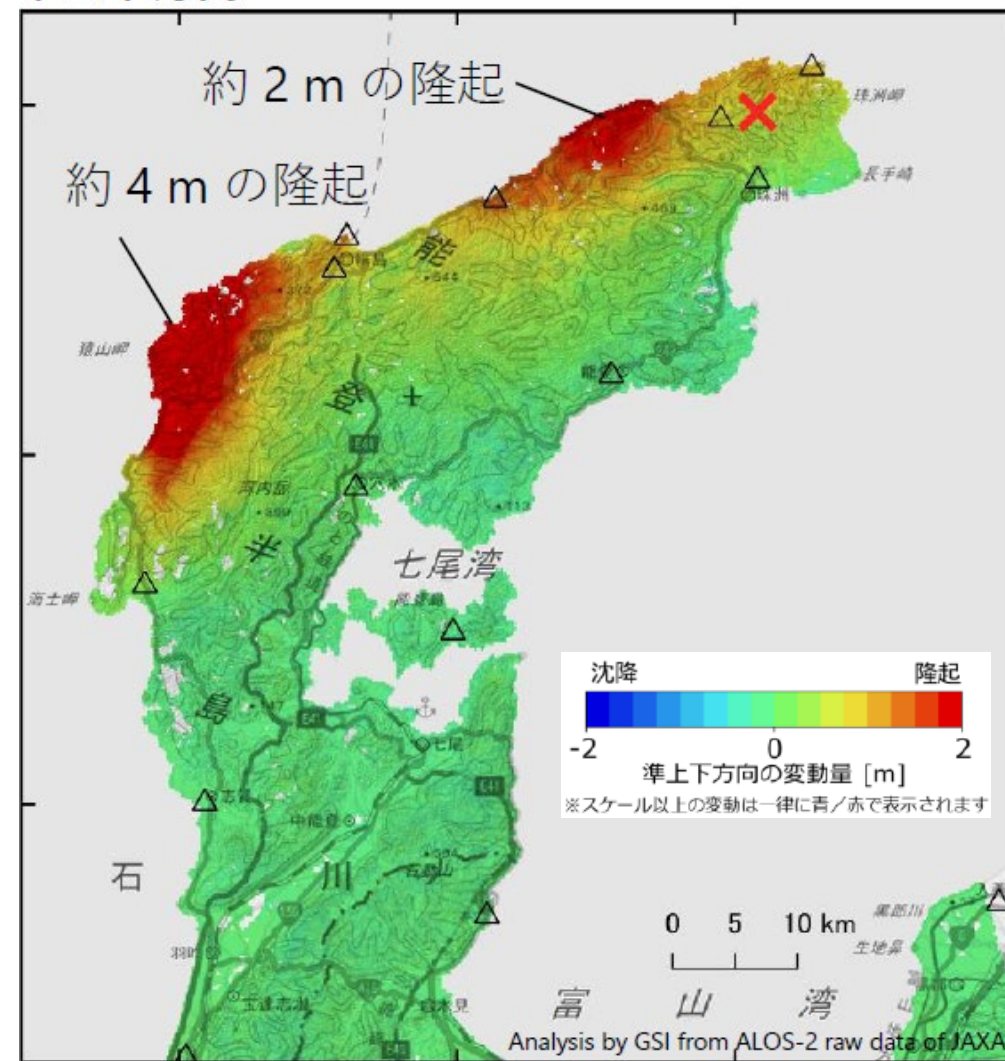
「だいち2号」観測データの2.5次元解析による地殻変動

- ・ 輪島市西部で最大約4mの隆起
 - ・ 珠洲市北部で最大約2mの隆起
- (値は暫定値)



比較的大きな被害が確認されたトンネルは、隆起が大きい箇所や隆起量の変化が大きい箇所に集中。

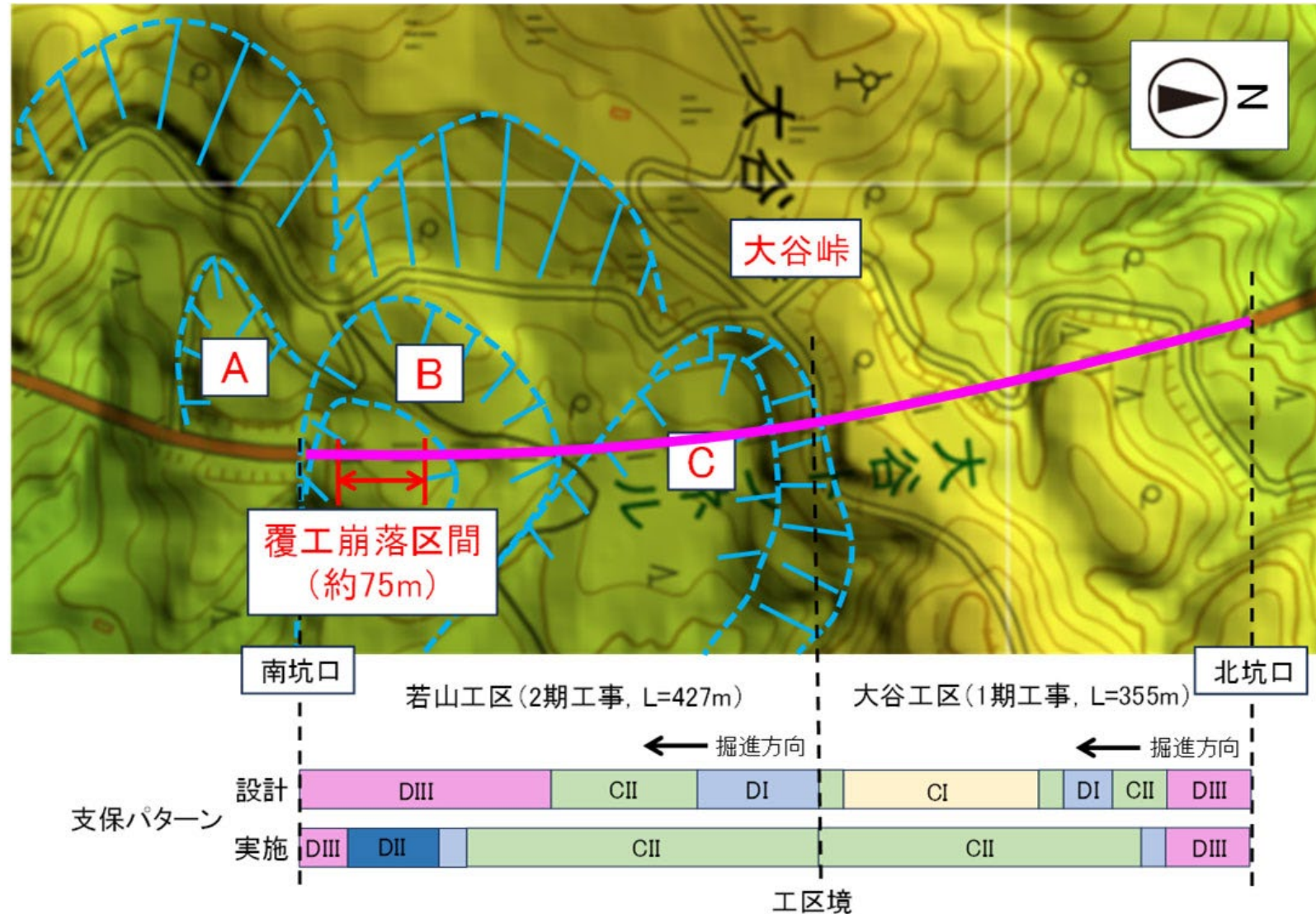
準上下方向



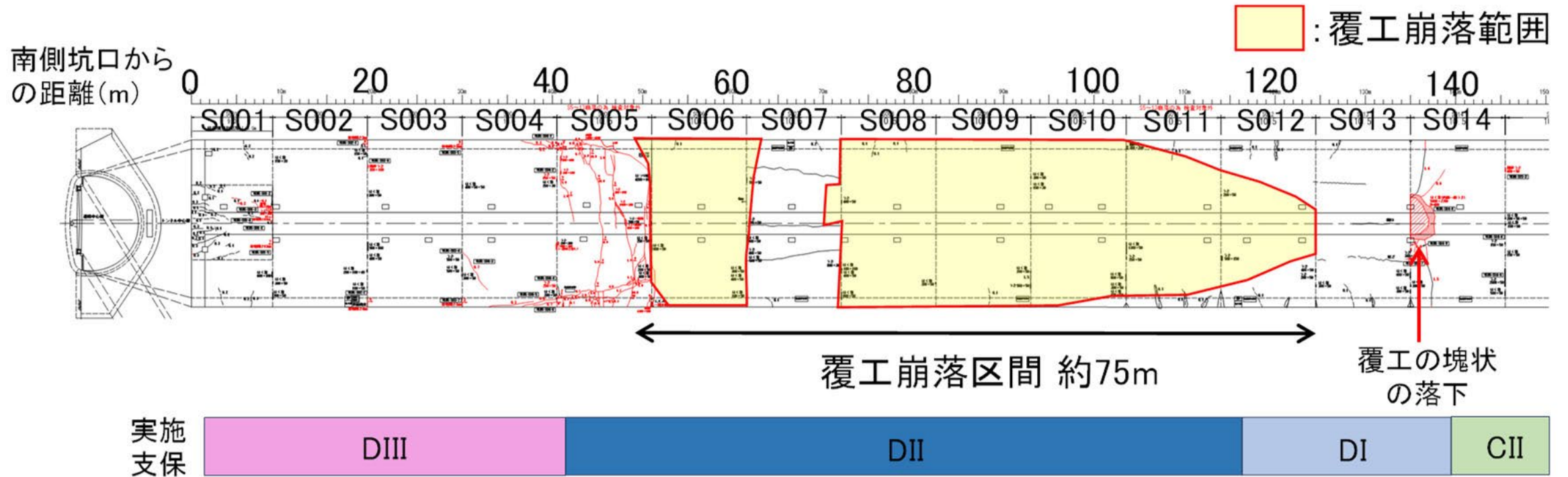
出典 国土地理院：「だいち2号」観測データの解析による令和6年能登半島地震に伴う地殻変動（2024年1月19日更新）一部加工 24

大谷トンネルの概要

- 建設年：1998年
- 延長：782 m
- 工法：NATM
- 規格：2車線道路
- 主な地質：新第三紀中新世の泥岩・凝灰岩
- 備考：南側坑口付近に地すべりブロックあり。トンネル掘削前に対策工施工済み。



大谷トンネルの変状展開図

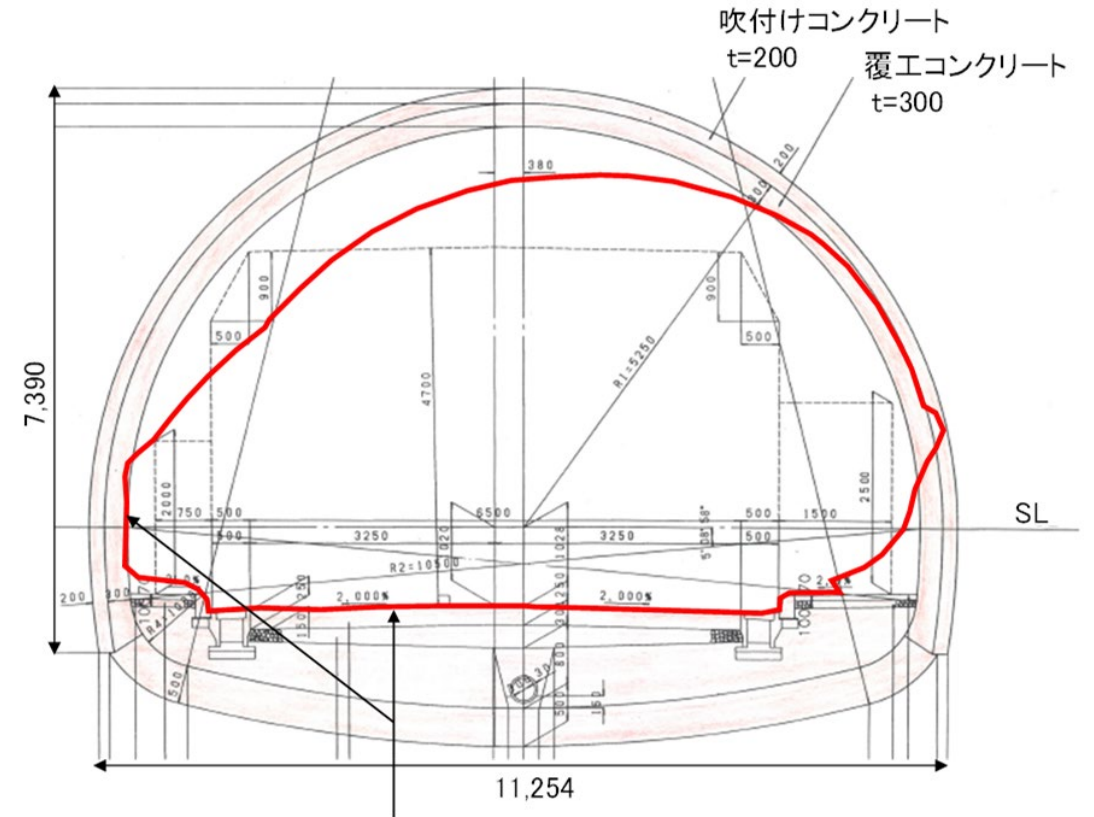


- 建設当時も掘削に苦勞した区間に被害が集中，地すべり対策区間とほぼ一致
- スパン15より北側の区間は大きな変状なし

大谷トンネルの被害の状況（１）



スパン7付近を南から北向きに撮影



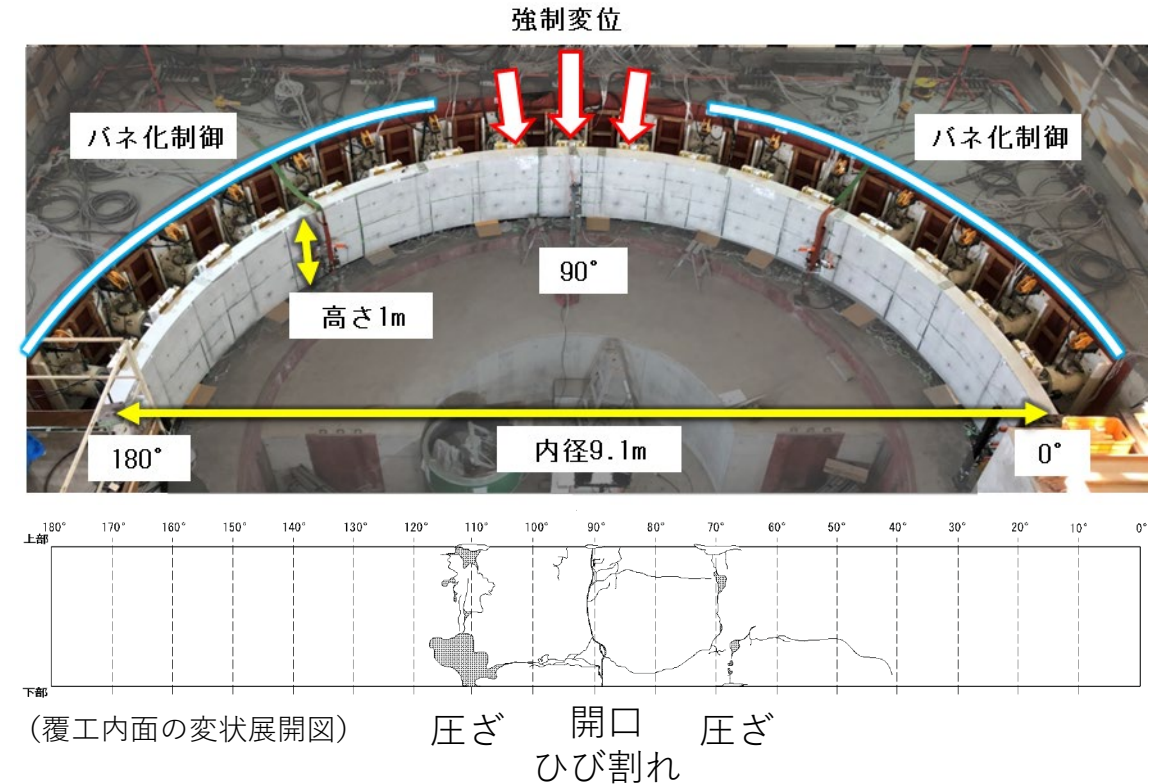
施工時の標準断面図：点群から抽出した覆工内面の形状と、左側壁と路面部分が重なるよう配置

- ・ 西(山側)から東(谷側)へ偏土圧を受けたような変形モードで一部覆工が残存
- ・ 北西から南東へ滑動する地すべりブロックの影響を受けたか

大谷トンネルの被害の状況（2）



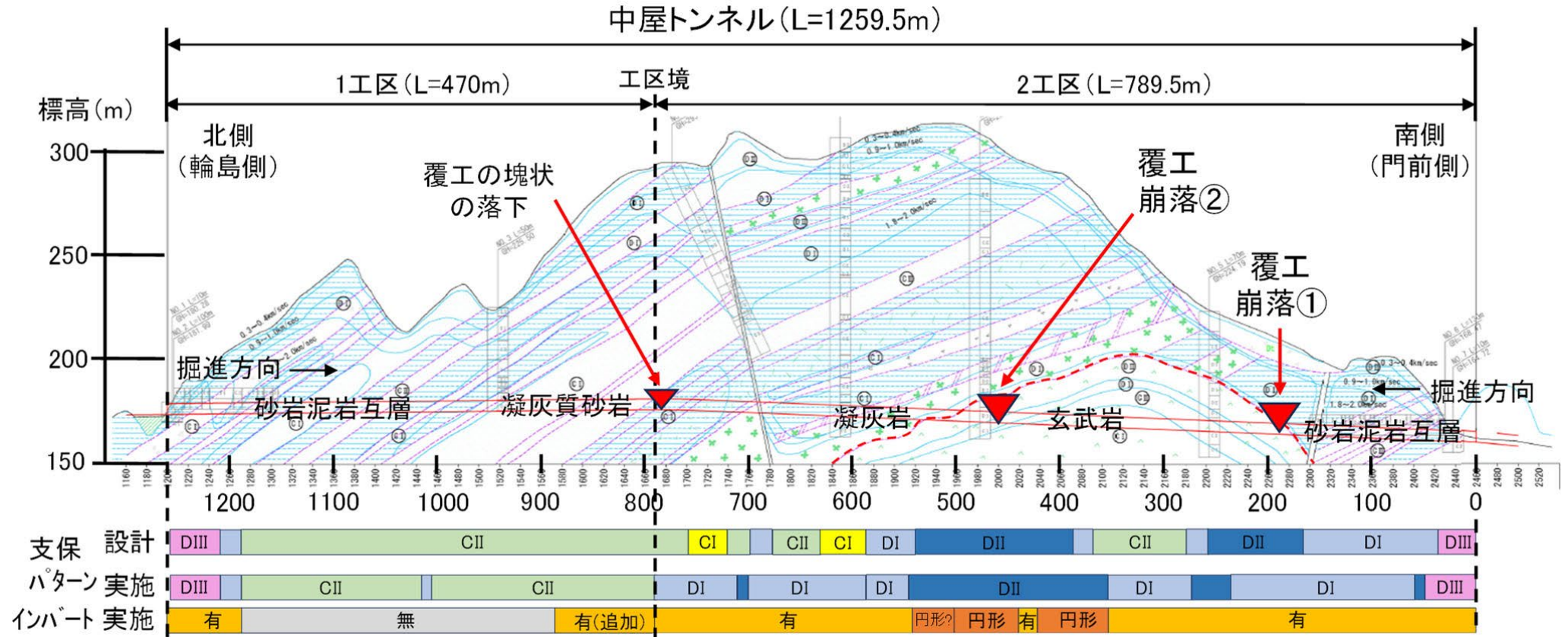
スパン13付近を北から南向きに撮影



土研で過去に実施した実大規模の覆工載荷実験

- 土研で過去実施した実験結果と現場の変状状況が一致
→土研に蓄積された知見が変状メカニズムの推定に大いに貢献

中屋トンネルの概要



- 建設年：1993年
- 延長：1,260 m
- 工法：NATM
- 規格：2車線道路
- 主な地質：新第三紀中新世の砂岩泥岩互層及び凝灰岩，一部の区間では玄武岩

中屋トンネルの被害状況（１） ～覆工崩落①～



覆工の崩落状況 写真：国土交通省



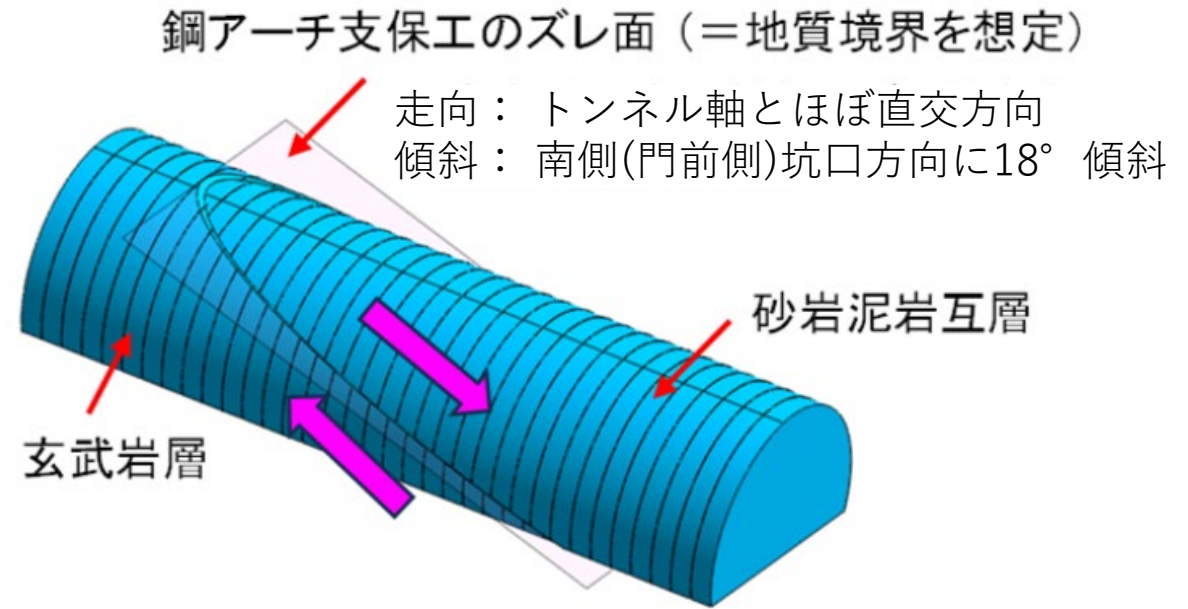
支保工の状況（防水シート撤去後）

- ・ 覆工崩落箇所の支保工も大きく変状

中屋トンネルの被害状況（２） ～覆工崩落①～



鋼アーチ支保工の約50cmの変形



- ・地層境界に沿うような形で鋼アーチ支保工のズレが発生

中屋トンネルの被害状況（３） ～覆工崩落②～



覆工の崩落状況

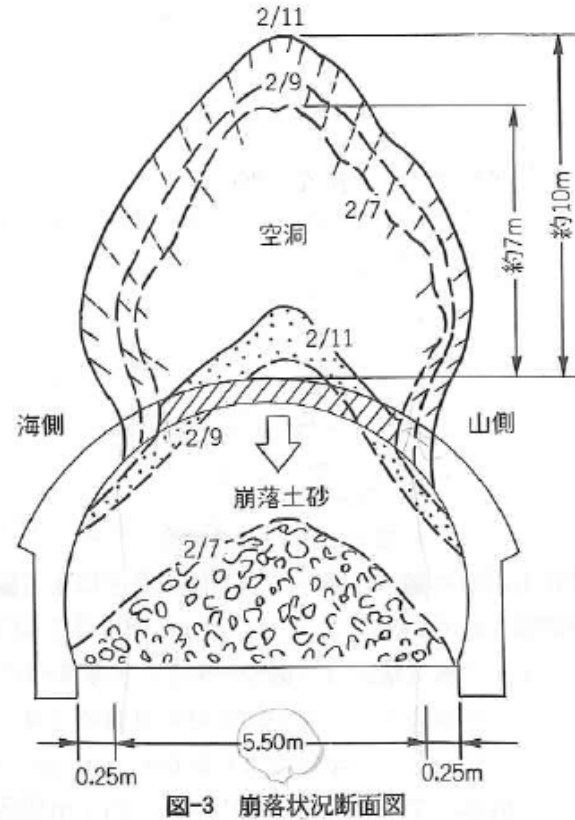


支保工の状況（防水シート撤去後）

- ・建設当時に膨張性地山で掘削に難渋した区間において被害が発生
- ・支保工は通常よりも相当重め

木の浦トンネルの概要

- 建設年：1965年
- 延長：76 m
- 工法：木製支保工を用いた矢板工法→地震後に改修
- 幅：約6m
- 過去の地震被害：
1993(H5)年能登半島沖地震によりアーチ部落盤・閉塞



出典：国田，竹俣，役田：
能登半島沖地震による被災トンネルを復旧，
トンネルと地下，
第24巻，11号，pp.7-13，1993.

H5能登半島地震における変状

その他のトンネルの状況



逢坂トンネル

斜面災害に巻き込まれたのは坑口のごく一部のみか？



木の葉隧道

覆工が設置されていないトンネルの耐震性は
どう評価すれば？



宇出津第3隧道

SNSでは「トンネルが崩壊」となっている
でも、外から坑口が見えないだけで
トンネルは比較的健全かも？

道路トンネルの覆工崩落とその対応

1. 道路トンネルの耐震対策に関するこれまでの取り組み
2. 能登半島地震発生直後の情報収集
3. 能登半島でのトンネル調査
4. 道路トンネルの被害の概要
5. 被害の総括と今後の展望

R6能登半島地震における道路トンネルの被害の主な特徴

- ① 大きな被害が発生したトンネルが広範囲に分布
(これまでの経験：規模の大きな被害は震央のごく近傍のみ)
- ② NATMで建設されたトンネルの被害が顕著
(これまでの経験：矢板工法のトンネルの被害が多い)
- ③ 地山の大きな変形に追従できずに覆工に大きな損傷が発生，程度によっては覆工の崩落に至る
(これまでの知見と概ね整合)
- ④ 覆工の崩落に至ったトンネルでも，地山は崩落しておらず空間は残存
(これまでの知見と概ね整合)
→覆工の落下が防げれば安全性向上（落下抑制のフェイルセーフ対策の重要性）
- ⑤ 多くのトンネルでは目立った変状なし。変状が発生したトンネルも区間は限定的
(これまでの知見と概ね整合)
→特殊な場合を除き一般にトンネルは地震に強い

今後の取り組みの方向性

- **【計画】** 地震の影響を受けやすい特殊条件に該当する箇所は計画段階で極力回避する。
- **【設計・施工】** 計画段階で回避できない場合や施工段階で判明した場合には、地山の大規模な変形を抑制する対策を行ったうえで、トンネル支保構造を十分なものにするとともに、覆工コンクリートに破壊が生じたとしても大規模な崩落を抑制する対策(例：鉄筋補強)を行う。
- **【維持管理】** 特殊条件に該当する箇所で供用開始後に変状が発生した場合は、優先的に変状対策を行う。

技術的な検討課題

- 地震の影響を受けやすい特殊条件(前述)の精査
(範囲を広げる／絞り込む)
- 特殊条件を特定する調査技術の高度化
(できれば計画段階で調査して評価できるように)
- 覆工の落下抑制対策＝フェイルセーフ機能＝の合理化・性能明確化
(単鉄筋はどこまで効果が期待できるか？他に方法は？)
- 既設トンネルにおける合理的なフェイルセーフ技術の開発
(単鉄筋は既設トンネルの覆工には設置できない)

主な参考文献

✓過去の地震における道路トンネルの被害の概要

- 土木研究所：山岳トンネルの地震時挙動と耐震対策に関する研究報告書，土木研究所資料，第4358号，2017.

✓地震時のトンネルの挙動に関する計測

- 日下敦，砂金伸治，北川洋平，河田皓介，原翔平：山岳トンネルの地震時挙動に関する動的計測結果に基づく一考察，土木学会論文集F1, Vol.74, No.2, pp.I_1-I-17, 2018.

✓覆工が破壊する荷重

- 日下敦，河田皓介，砂金伸治，真下英人：地震による地山の変形を想定した山岳トンネル覆工の耐荷力評価に関する数値解析的考察，トンネル工学報告集，Vol.24, No.I-14, pp.1-8, 2014.

✓変状対策工の耐震対策としての効果

- 日下敦，河田皓介，砂金伸治，真下英人：二次元静的載荷実験の再現解析による山岳トンネルの耐震対策工の効果に関する一考察，第43回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，講演番号17，pp.93-98，2015.

✓山岳トンネルの耐震対策としてのフェイルセーフ機能の考え方

- 日下敦，菊地浩貴，河田皓介，砂金伸治：フェイルセーフの観点を考慮した道路トンネルの耐震対策に関する一考察，第50回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，講演番号38，pp.208-213，2024.

✓R6能登半島地震における道路トンネルの被害

- 日下敦，小泉悠，藤田智弘：2024(令和6)年能登半島地震による道路トンネルの被害，トンネルと地下（2024年12月ごろ掲載予定）