

トンネル覆工への新たな 技術導入の取り組み

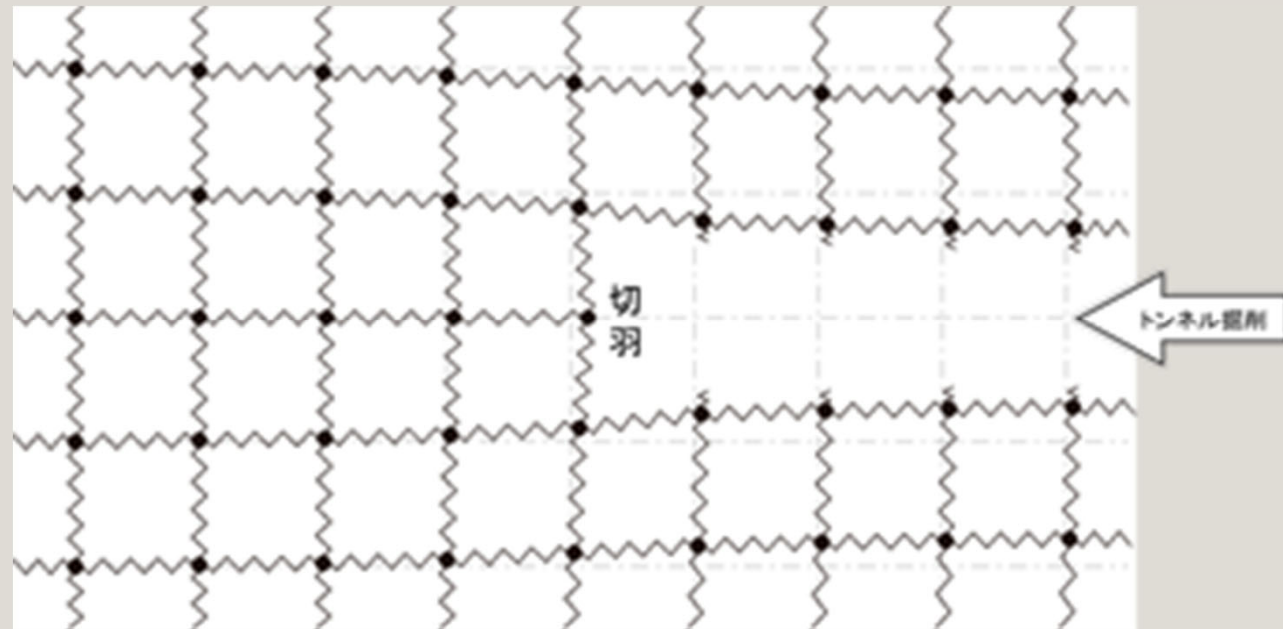
道路技術研究グループ

久保 和幸

トンネル工事の特徴

「トンネルは掘削時が最も不安定」

- 掘削前は地山の土砂がお互いに支え合い安定性を発揮
- 掘削時に支え合っていた反力が喪失することで地山が不安定に
- 解放された応力に対してトンネルの壁が支えきれなくなると崩落

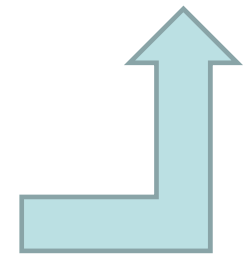


トンネル工事の特徴 「地山の不確実性」



- 調査時点ですべてが分かるわけではない
- 施工時に得られる情報による臨機の対応

- 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



トンネル技術の歴史は施工技術の歴史

- 最初は、掘っても崩れない強固な岩盤を掘削
- 木製支保工によりトンネルの壁を支えることで、より軟弱な地盤にも対応
- 鋼製支保工の開発により、より大断面なトンネルを掘削することが可能に
- 地山の支持力を最大限活用することで、安全性や施工効率が飛躍的に向上（NATM）

出典: 「トンネルの話」 日本道路公団福岡建設局

トンネルの壁はどうして崩れないのかな。

掘ったばかりのトンネルの穴は、周囲の土や岩の力、またアーチアクションにより崩れないようにふんばっています。ところが土や岩が弱っている力にも限界があって、持ちこたえられずに崩れることもあります。そこで力を発揮するのが支保工とよばれる壁の支えです。

1 昔はしっかりとした硬い岩にしかトンネルはつくれませんでした。



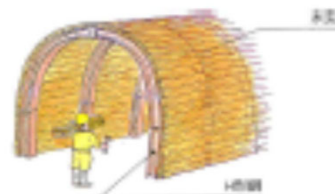
トンネルを掘るためのしっかりとした硬い岩がなかった時代は今のようには崩れないように支えをするという技術はありませんでした。それで、トンネルを掘る時は、崩れる心配のない硬い岩にトンネルを掘っていました。トンネルの断面は小さく、掘った断面はそのままだ（裸壁）で、周囲の土やトンネルでした。

2 丸木を組み合わせてトンネルの壁を支えることを考え出しました。（木製支保工）



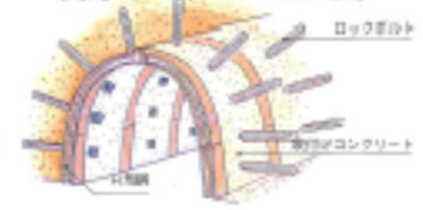
昔は硬い岩にトンネルを掘っていましたが、いくつも掘ればいつともその強度には限界があります。上の土などの重さには耐えられなくなり崩れることもありました。そこで丸木と丸木（木の根）で支えることが考え出されました（木製支保工）。これにより、安全でしかも大きな断面のトンネルをつくることできるようになりました。

3 H形鋼の開発で、トンネルの壁はますます安定。（鋼製支保工）



木製支保工はやがて、アーチ状に掘られたH形鋼と木製で支える、鋼製支保工時代へ移っていました。木製支保工に比べ構造が単純で作業の容易となり、しかも断面もより大きなものがつくられるようになりました。

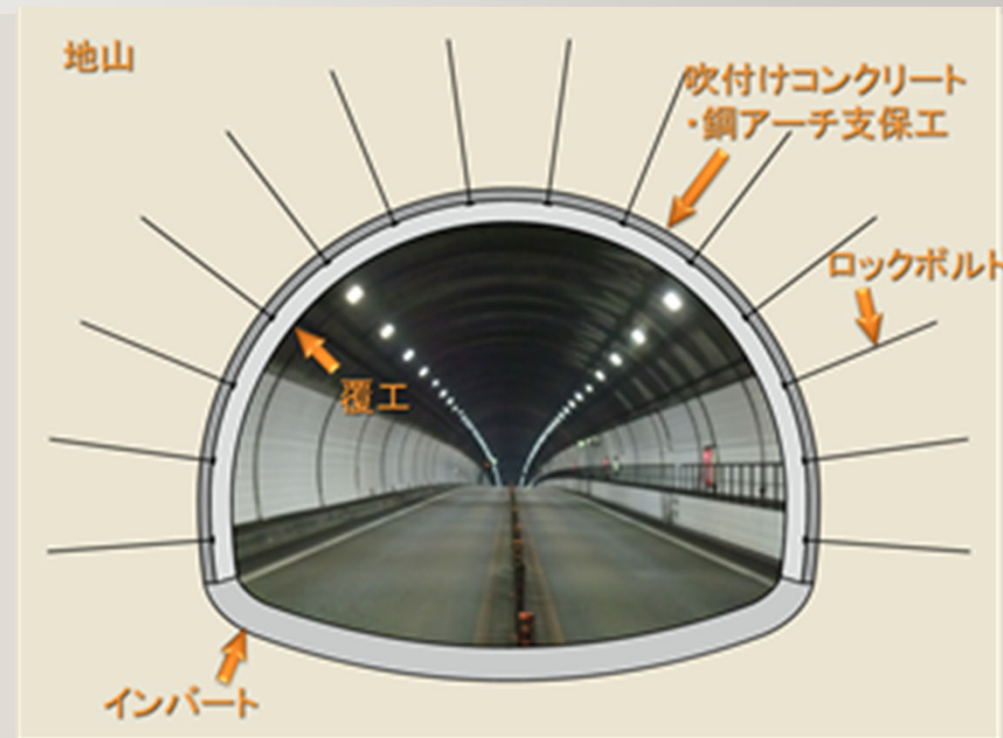
4 吹付けコンクリートとロックボルト（鉄筋）でトンネルの壁を支える。（NATM工法）



現在盛んに行われている支保工に吹付けコンクリートとロックボルトで壁を支える方法があります。これはオーストリアで開発された方法で、NATM工法と呼ばれています。まず掘削直後の壁にコンクリートを5～15cm吹付けて壁の強度の増大を図り、3～4mのロックボルトでトンネルの壁面を支える方法です。岩の強さによっては鉄筋なども併用することもあります。現在はほぼトンネルではほとんどの支保工が使われています。

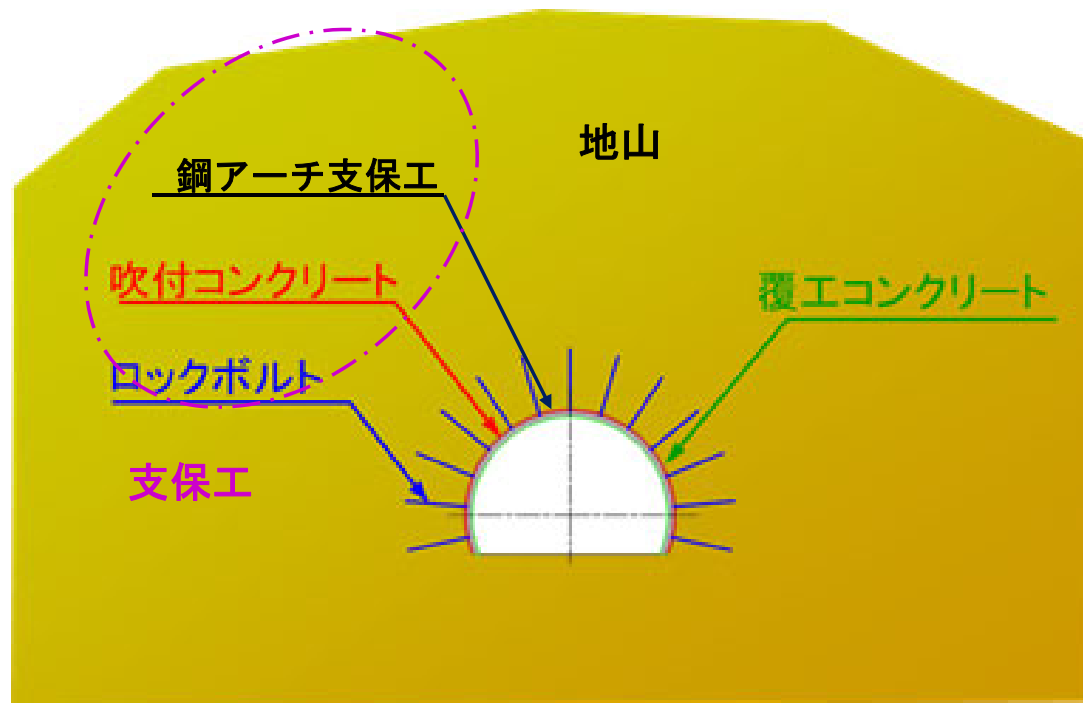
トンネルの構造 (NATM)

- 支保工
 - 鋼アーチ支保工
 - 吹付けコンクリート
 - ロックボルト
- 覆工
 - 覆工
 - インバート (地山が悪い場合)



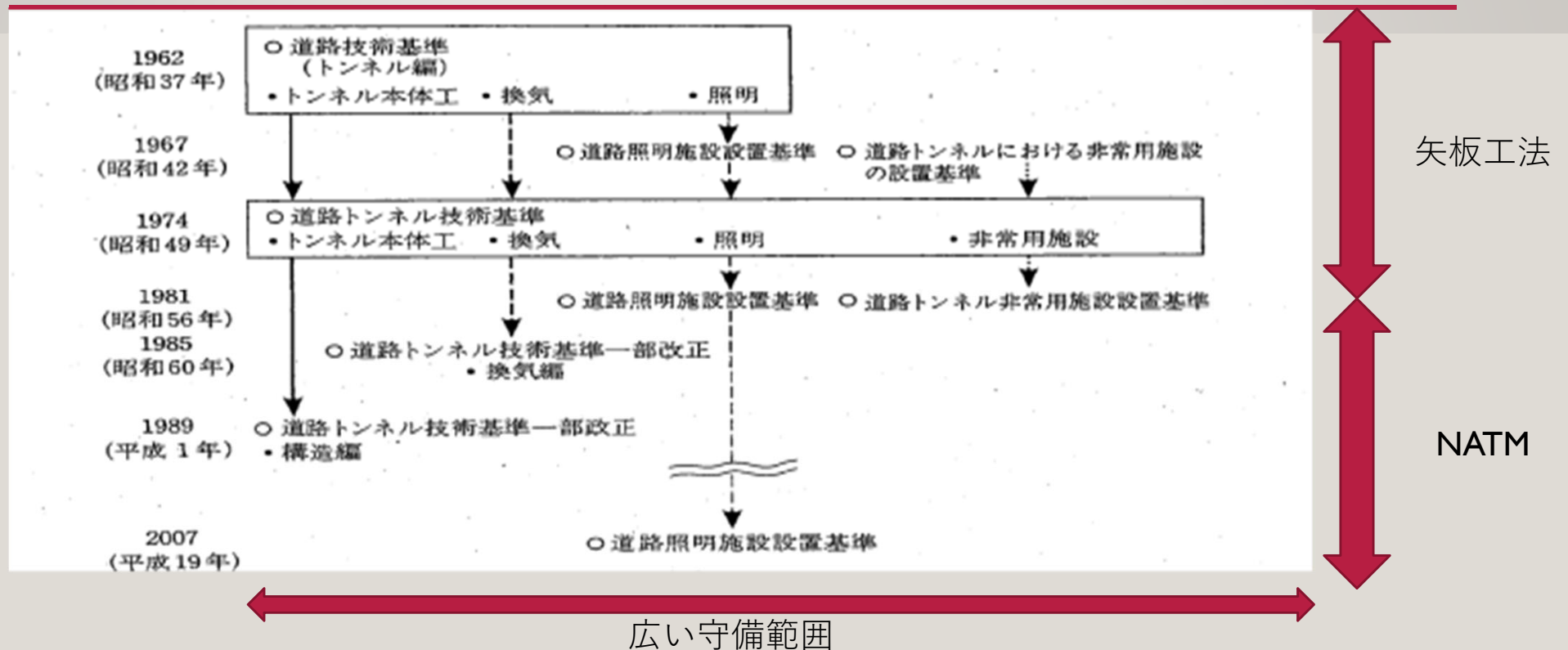
トンネルの構造

- トンネルの中を通ると、一般的には覆工コンクリートしか目につかないが、その背面には地山や支保工がある
 - ✓ 地山 地山条件により支保工や覆工の規模が決定
 - ✓ 支保工 掘削による地山からの荷重に対抗
 - ✓ 覆工 トンネルの最終的な安定性等を確保



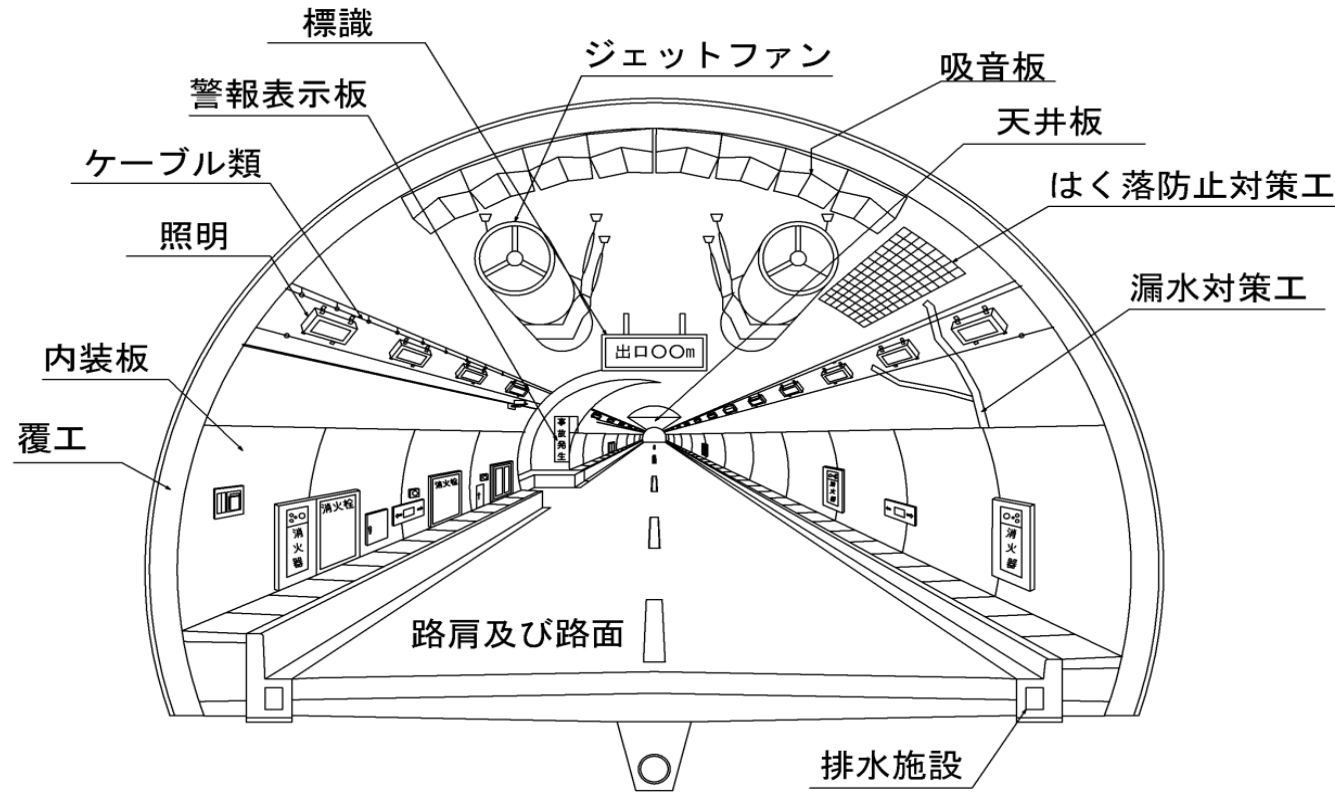
NATMによるトンネルの構造の例

道路トンネル技術および技術基準の変遷



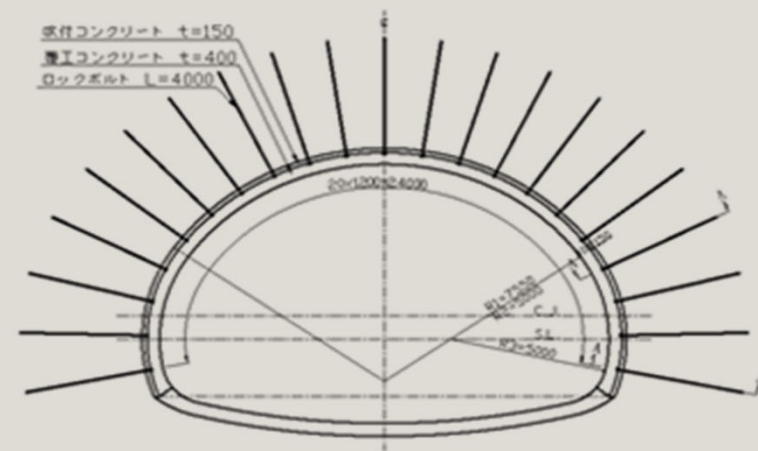
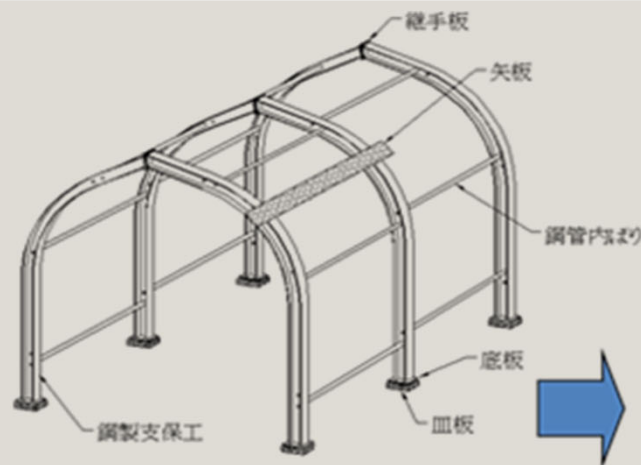
トンネルの付属施設等

- 道路トンネルには、照明施設、換気施設、非常用施設、内装板等が設置されている



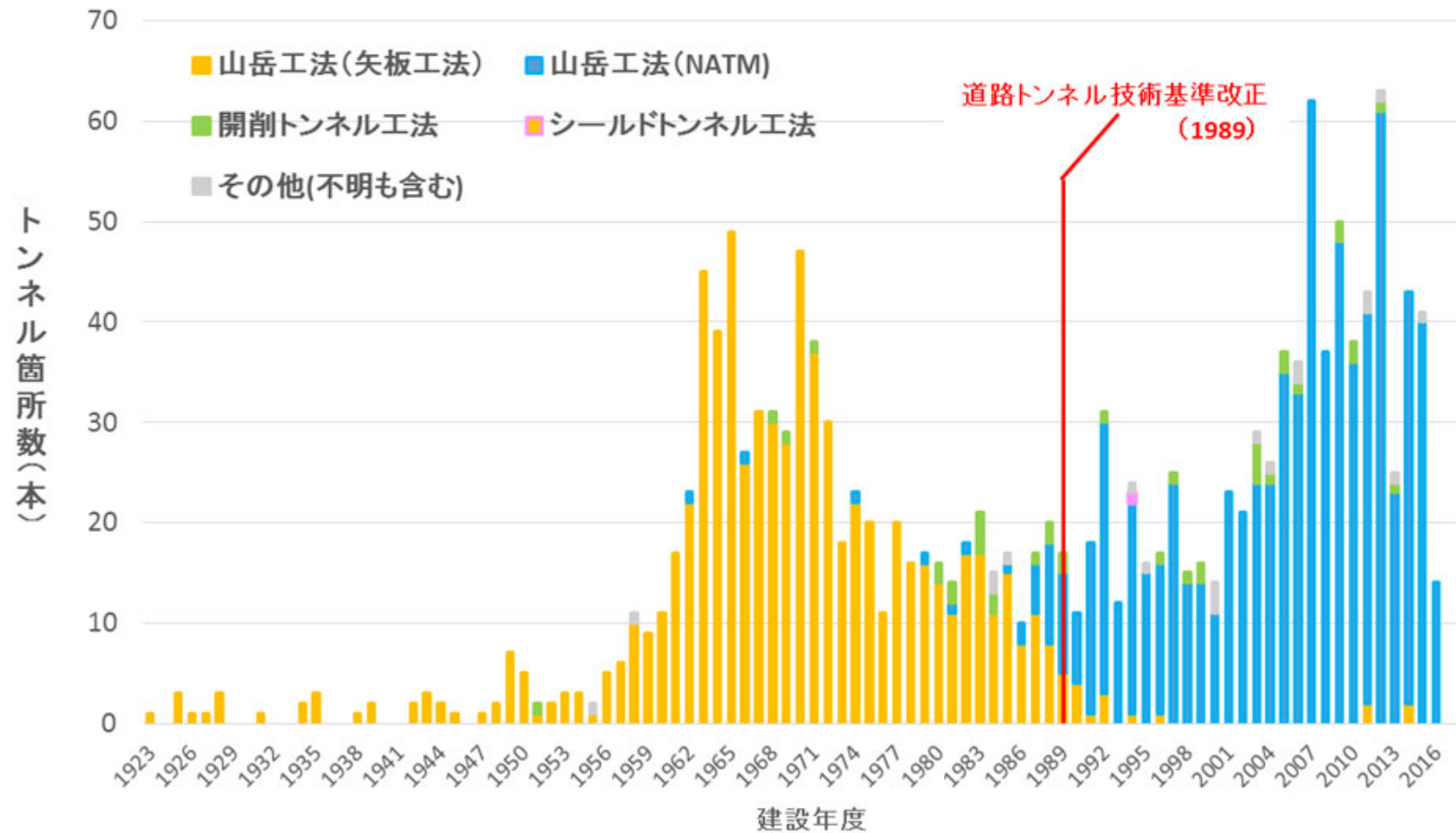
矢板工法とNATMにおける支保工と覆工の考え方

- 矢板工法においては
 - 支保工：掘削から覆工までの間、土圧を支持するための仮設構造物
 - 覆工：地山の荷重を支える主構造物
- NATMにおいては
 - 支保工：地山と一体となって土圧を支持
 - 覆工：原則として外力は作用しない



矢板工法	NATM
1980年代までの標準的な山岳トンネル工法 鋼アーチ支保工等と矢板により地山を支持 地山からの荷重に対して支保工で対抗 覆工には外力が作用する	1980年代以降の標準的な山岳工法 吹付けとロックボルト等により地山を支持 地山が保有している支持力を活用 原則として覆工には外力が作用しない

矢板工法からNATMへ



道路トンネルの建設年度と施工方法の変遷

出典:土木技術資料 No.4 vol.61 April 2019

定期点検結果～矢板工法とNATMの比較(トンネルの変状の対策区分)

(平成26～30年度 国管理の道路トンネル)

道路トンネル技術基準改正(1989)

- 矢板工法に比べてNATMにより構築されたトンネルの変状は少ない
- NATM工法により構築されたトンネルの変状は新しいほど減少傾向

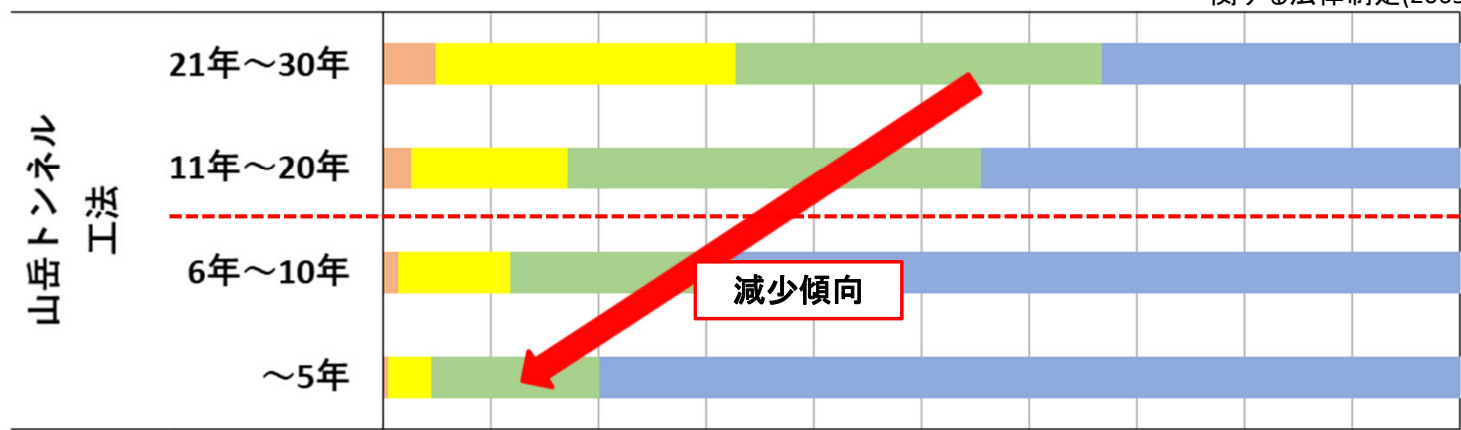
覆工コンクリートの品質向上?

(NATM)



0% 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% 100%
 ■ IV ■ III ■ II a ■ II b ■ I

公共事業の品質確保の促進に関する法律制定(2005)



0% 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% 100%
 ■ IV ■ III ■ II a ■ II b ■ I

減少傾向

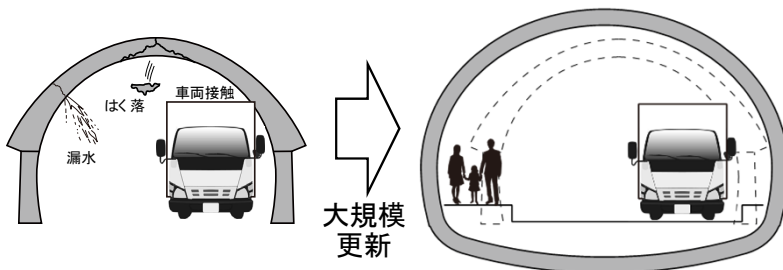
山岳トンネル覆工の合理的な設計手法に関する研究

【研究成果の応用(案)】

何が変わる？

①更新工法における覆工の設計の合理化

使い勝手が悪いと分かっているのに



大規模更新後も既往の30cm厚のプレーンコンクリートを覆工として設置するのが現状
→新たな覆工構造を採用することができれば、更新工法の設計・施工の合理化に資する可能性あり

薄肉化により内空断面を再構築

②過大な変形が生じたトンネルの縫返しリスクの低減

掘削時が最も不安定だと分かっているのに



トンネル掘削時に過大な変形が生じて所定の覆工巻厚が確保できない場合は、地山が再度不安定化するリスクや安全性に対するリスクを冒しても縫返しを実施する事例が多いのが現状
→薄肉化した覆工構造を採用できれば、縫返しが不要となり、施工時のリスク低減に資する可能性あり

薄肉化により更新時の不安定化リスクを低減

③単鉄筋補強以外の耐震対策工法の開発

様々な耐震設計のアイデアがあるのに



H28熊本地震における俵山トンネルの覆工崩落を踏まえ、地震の影響を受けやすい特殊区間では、新設トンネルの耐震対策として覆工に単鉄筋補強(=大規模なコンクリート塊の落下防止)を実施しているのが現状
→新たな耐震対策の開発に資する可能性あり

耐震性能を向上させる新たな覆工技術の提案

覆工に求められる役割（性能）

● 道路トンネルの覆工に求められる機能

- 重要度の高い機能
 - 内空断面の保持機能、防水機能、耐火機能
 - 保守管理機能、内装機能、トンネル内施設の保持機能
- その他の機能
 - 余力保持機能、変形性能保持機能、構造的安定機能
 - 付加外力の支持機能、支保工の補完機能

「山岳トンネル覆工の現状と対策」（土木学会）より

表-1.3.1 覆工が果たしうる役割・機能

覆工の機能	主な用途				概 要	備 考
	道 路	新 水	水 道	上 水		
内空断面の保持機能	◎	◎	◎	◎	必要な内空断面を確保する。	
防水機能	◎	◎	○	◎	高い防水性を確保することで、漏水落下による視野障害、路面の摩耗変化の急激な変化、寒冷地におけるつらら・霜氷・路面凍結、側壁の汚れによる快適性の低下、坑内設備の絶縁不良・腐食などを防止する。水路トンネルの場合は内外の水の流通を防止する。	
耐火機能	◎	△			火災中の高温による地山や支保の著しい損傷を防ぎ、トンネル崩壊を起こさない。また、火災終了後におよぼすな補修補強によって再使用できる。	
保守管理機能	◎	◎	○		覆工表面を直接観察しやすく保つことで、換用中のトンネル変状の兆候を早期に発見する。水路の場合、維持管理を容易にする。	
内装機能	◎	△			内装工を設置し視認の視度を高く保つことで、前方の障害物の視認性向上、心理的圧迫感の軽減を図る。また、換気においては、通気抵抗を小さく抑え効率を上げる。	
トンネル内施設の保持機能	◎	◎			照明・換気・非常用などの諸設備、およびこれらを機能させるための電力・信号ケーブル類の取り付け性を確保する。	
不確定要素に關する機能					支保工の品質の不均一性や経時劣化、地山の経時劣化や破み、あるいは異常降圧に起因する水圧上昇など将来の不確定な要因により覆工に追加の荷重が作用することを想定して、荷重に耐えうる余力を保持する。また、あらかじめ想定することが難しい地質等の荷重に対しても余力を保持する機能を有する。	
変形性能保持機能	○	○	○	○	縦横に及ぶまでの変形が大きく、覆工構造の剛性が一気に通らない。また、あらかじめ想定することが難しい地質等の荷重が作用した場合についても変形保持機能を有する。	
構造的安定機能	○	○	○	○	インバートや安価コンクリートを設置することで、側圧の増大、側圧の作用、覆工脚部の支持力不足に対する構造的安全性を確保する。	地山劣化防止
力学的な機能					覆工施工後の水圧の加復、切土・盛土・深設トンネル・近接施工などの予め判明している要因により土圧や水圧が変化し、外力が作用する場合には、これを支持する。内水圧、外水圧、グラウト注入圧について構造物としての安定性を保持する。地震荷重を載荷して検討する場合に地盤の安定性を保持する。	都市部のトンネルや土壁の薄い土砂トンネル（特殊地山）また、圧力トンネルなど
支保工の補完機能	○	○	○	○	トンネルの変形が収束しない状態で覆工を施工し、支保工に追加してトンネルの安定に必要な拘束力を与える。	膨張性地山など変位や荷重の大きい地山（特殊地山）

凡例：◎：重要度の高い役割・機能，○：一般的に必要な役割・機能，△：場合により必要な役割・機能

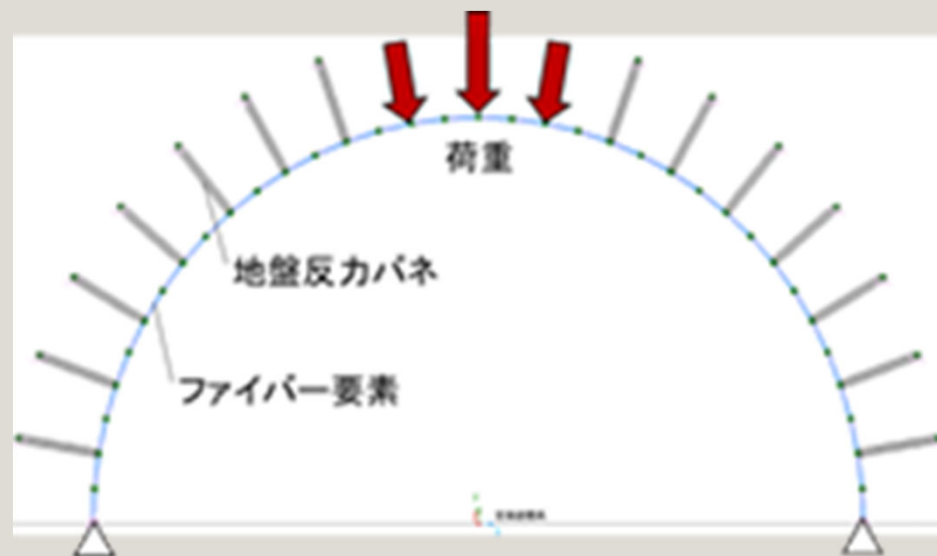
覆工の耐荷性能評価に関する研究

実物大の覆工（直径10m、高さ1m）を構築
理論モデルとの対比→理論モデルの耐荷性能評価方法としての妥当性を検証



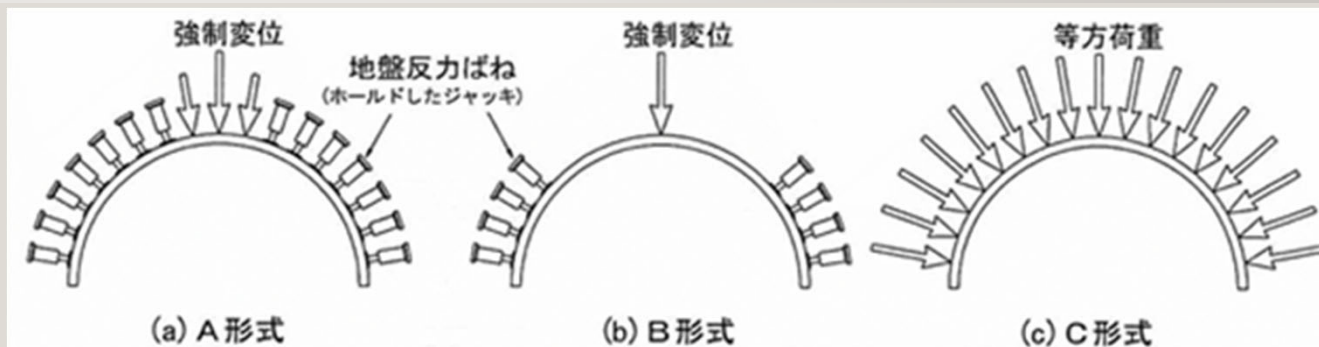
覆工载荷実験
施設（左）

解析モデルの
概念図（右）



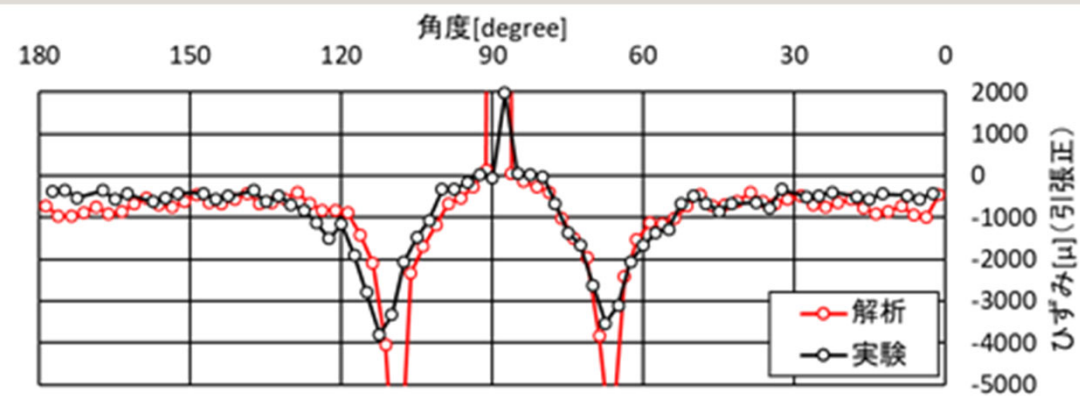
実験・解析結果

- 想定される主要な3パターンの载荷条件下で、発生するひずみを検証
 - 解析結果と実大実験による計測結果にある程度の相関が確認された
- 今回提案した解析モデルで、覆工の物理特性を評価できる可能性が示唆された



実大実験によらずに多様な覆工に関する新技術を簡便に評価できる環境整備

覆工に関する新技術の開発・実装を促進



おわりに

- トンネル技術≒施工技術であり、その妥当性は経験に基づき検証されてきた
- 地山の不確実性など、事前の調査でもすべてを完全には把握できず、施工中に発生する変状などを確認しながら、こうした不確実性への対応を臨機に行っているのが現状
- 施工後**50**年以上が経過する道路トンネルが増えてくる中、その更新が大きな課題
- 覆工については、補強した上での薄肉化など新技術の提案はされているが、その妥当性を検証する手段が十分でない
- 覆工に対する要求性能を明確にし、新技術の開発・実装を促進すべく土木研究所では共同研究も含め、検討を進めているところ



関係者のみなさまの引き続きのご協力を期待