

III-9 既設トンネルの合理的な改築法に関する調査

研究予算：運営費交付金（道路勘定）

研究期間：平 10～平 14

担当チーム：トンネルチーム

研究担当者：真下 英人、石村利明、森本 智

【要旨】

車両の大型化、交通量の増大、老朽化などの要因により、既設トンネルの断面を供用中のまま拡大するケースが増えてきている。しかし、現状ではコストが高い、工期がかかる、長期間にわたって車線規制が必要になるなどの課題がある。本調査は、こうした課題を解決するために合理的かつ経済的に既設トンネルの断面拡大を行うための検討を行った。その結果、交通を確保した状態（最低でも1車線、場合によっては2車線）で経済的に既設トンネルの断面拡大が行える施工方法を複数案提案するとともに、既設トンネルの大きさ、覆工状態などから対象トンネルに適した断面形状を選定するフロー図および断面拡大トンネルの特徴（地山の安定性、施工性等）を考慮した断面拡大トンネル用の支保構造の提案を行った。

キーワード：既設トンネル、活線トンネル改築、断面拡大工法

1. はじめに

車両の大型化、交通量の増大、老朽化などの要因により、既設トンネルの断面を供用中のまま拡大するケースが増えてきている。しかしながら、現状ではコストが高い、工期がかかる、長期間にわたって車線規制が必要になるなどの課題がある。また、計画、設計に際しては、既設トンネルの断面形状や健全度に応じた合理的な断面形状、トンネル構造の選定する方法が確立されていないのが現状である。本調査はこうした課題を解決するために、合理的かつ経済的に既設トンネルの断面拡大を行うため、現状のトンネル断面拡大工法に比べてコスト縮減、工期短縮の図れる施工法、車線規制期間を極力短くできる施工法の開発・提案を行うとともに、既設トンネルを断面拡大する場合のトンネルの断面形状・支保構造の提案を行うことを目的とする。なお、施工法の開発・提案については、(財)先端建設技術センターおよび民間17社との共同研究により実施した。

2. 合理的な断面拡大施工法の検討

現状のトンネル断面拡大工法に比べてコスト縮減、工期短縮の図れる施工法を検討するにあたって、これまでのトンネル断面拡大の実績調査を実施し、現状施工法の課題を整理し、課題を解決できる施工法の開発を行った。さらに、断面拡大時の防護範囲を把握するための三次元解析および現場計測を行った。

2.1 既設トンネルの断面拡大の実態および課題

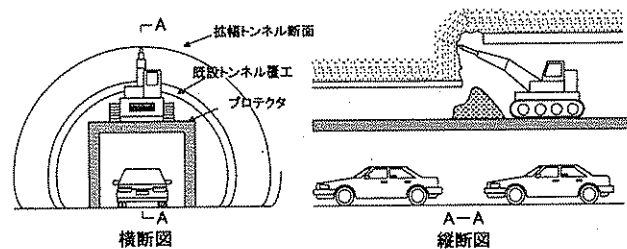


図-1 従来の断面拡大施工法の概要

既設の道路トンネルの断面拡大あるいは改築を、車両を通しながら行う活線施工（部分通行止め、夜間通行止めを含む）の実績は約40例あった。施工実績から次のことが分かった¹⁾。

- ① トンネル延長と拡幅規模は、既設トンネルの幅員2m～9m程度を6m～15m程度へ拡幅する事例が多く、トンネル延長は比較的短く、最大でも約330mである。
- ② 交通確保の方法は図-1に示すような剛性の高いプロテクタをトンネル全線に設置して1車線を確保している。
- ③ 施工法は、約8割の事例がプロテクタ上部および両側の限られた空間内で小型の汎用機械を用いた方法を採用している。

上記の現状の断面拡大施工法の実績調査をもとに課題を整理すると以下の項目が考えられる。

- ① プロテクタによって作業空間が狭くなり、掘削、土砂搬出、支保工設置の各工程に合わせて各種

機械をトンネル出口まで出し入れする必要がある。このため、従来に増して十分な作業空間を確保でき、効率性・経済性の高いプロテクタ構造の開発が必要である。

- ② 工事規制期間が長いと社会的コストが大きくなるため、車線規制を極力行わない施工法の開発が必要である。
- ③ 狭隘な作業空間での機械の入れ替えに時間を要するため、この入れ替え時間を短縮する方法、掘削から吹付けコンクリートの施工までの一連の作業をシステム化して急速施工ができる専用機械等による方法の開発が必要である。

2. 2 既設トンネルの断面拡大施工法の開発

現状施工法の課題を踏まえ、既設トンネルの断面拡大施工法の開発を行った。表-1に開発した断面拡大施工法の8工法について一覧を示す。また、各工法分類の対象地盤とトンネル延長の概略の適用範囲を図-2に示す。以下に開発した工法の主な概要を記述する。

(1) ハイブリッドTWS工法

本工法は、図-3に示すように活線拡大専用の門型掘削機と移動式プロテクタを組合わせたハイブリッドTWS（トンネル・ワーク・ステーション）により、安全かつ急速施工を可能にする工法であり、従来難しかったトンネル延長が1,000m以上のトンネルでも施工可能な工法である。主な特徴は、以下に示すとおりである。

- ① 対象地山は主に軟岩から中硬岩とした。
- ② 活線拡大専用の門型掘削機と一般車両防護のための移動式プロテクタを組合わせた工法である。
- ③ 専用の掘削機で機械の入れ替えが少なくなるので急速施工が可能である。
- ④ 掘削等による発生粉じんは集じん機により処理し、ずり出しには排出ガスや走行粉じんが発生しないベルトコンベヤ方式を採用し、トンネル内の環境を保つこととした。

(2) ナポレオンハット型ステージ工法

本工法は、図-4に示すように移動式プロテクタ上をスライドする作業架台（ナポレオンハット型構造）を用いた爆破掘削を主体とした工法である。主な特徴は、以下に示すとおりである。

- ① 爆破掘削が可能であり、硬岩地山まで幅広い地質条件に対応できる。

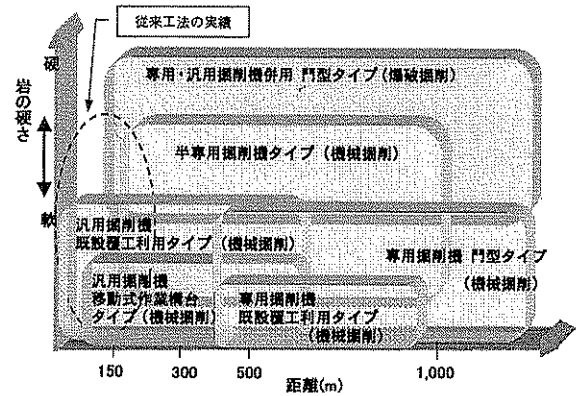


図-2 各工法の適用範囲

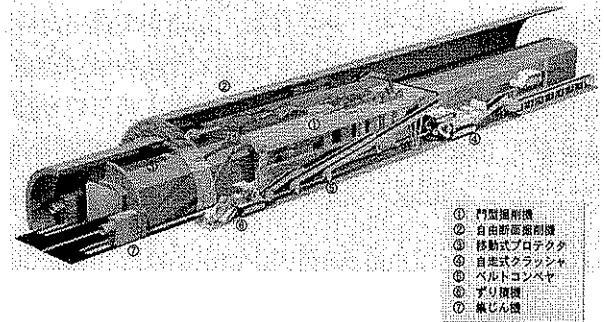


図-3 ハイブリッドTWS工法の概略

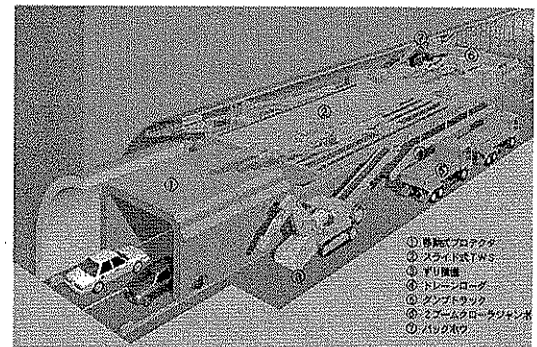


図-4 ナポレオンハット型ステージ工法の概略

表-1 開発工法一覧

開発工法名	工法分類	車線規制の有無	掘削方式	掘削方式	プロテクタ構造	断面拡大の方向	対象地山	対象延長
ハイブリッドTWS工法	専用掘削機門型タイプ (機械掘削)	1車線規制	専用機	機械掘削	移動式プロテクタ	両側	軟岩から中硬岩	中から長
ナポレオンハット型ステージ工法	専用掘削機、専用・汎用掘削機併用門型タイプ (爆破掘削)	2車線確保 ¹⁾	専用機・汎用機	爆破掘削	移動式プロテクタ	両側	土砂から硬岩	短から長
三日月形トンネル断面拡大工法	半専用掘削機タイプ (機械掘削)	1車線規制	半専用機	機械掘削	移動式プロテクタ	片側	中硬岩まで	短から長
アーチカット工法	専用掘削機既設覆工利用タイプ (機械掘削)	2車線確保 ²⁾	専用機	機械掘削	既設覆工を利用	両側	軟岩まで	中から長
側壁導坑先行両側拡大工法	汎用掘削機既設覆工利用タイプ (機械掘削)	2車線確保 ²⁾	汎用機	機械掘削	既設覆工を利用	両側	中硬岩まで	短から中
既設覆工を利用したノンプロテクタ拡大工法		2車線確保 ²⁾	汎用機	機械掘削	既設覆工を利用	片側	中硬岩まで	短から中
ステージ工法	汎用掘削機移動式作業機台タイプ (機械掘削)	1車線規制	汎用機	機械掘削	移動式プロテクタ	両側	軟岩	短から中
フラットステージ工法		2車線確保 ¹⁾	汎用機	機械掘削	既設覆工を利用+固定式(簡易プロテクタ)	両側	軟岩	短から中

注) 1) : 既設トンネルの断面が小さい場合は現況交通を確保できない場合がある。一時的な車線規制がある。

2) : 既設トンネルの断面に関係なく現況交通が確保できる。一時的な車線規制がある。

- ② 既設トンネルが大きい場合には、2車線を確保した状態で拡大作業が可能である。
- ③ 幅広い作業架台上に配置した機械で掘削から支保までの一連の作業が効率的に実施できるのでトンネル延長が1,000m以上でも適用が可能である。
- ④ 破時前後には、一時的な全面的通行規制が必要となる。

(3) 三日月形トンネル断面拡大工法

本工法は、図-5に示すように片側拡大とすることで広い作業スペースがとれ、様々な機能を1台のマシンに取り付けた大型のマルチタイプ掘削機（半専用自由断面掘削機）により掘削から支保までの作業を効率的な作業ができる工法である。主な特徴は、以下に示すとおりである。

- ① マルチタイプ掘削機により中硬岩までの掘削が可能である。
- ② 既設覆工の一部を拡大トンネルの一次支保部材として利用することで、覆工の取り壊しの省略や新設の支保部材の低減ができる。
- ③ 剛性の異なる（切羽周辺を高剛性）延長約130mの移動式プロテクタの採用によりプロテクタ費用の低減が図れる。

(4) アーチカット工法

本工法は、図-6に示すように既設トンネルの両側を先行して導坑掘削した後、既設覆工をプロテクタとして利用し、掘削、支保（吹付・ロックボルト・鋼製支保工の建込み）覆工解体などの一連の作業が、可能な多種の機能を装備した多機能型のアーチ型専用機により拡大掘削と既設覆工の取り壊しを効率的に施工できる工法である。主な特徴は、以下に示すとおりである。

- ① アーチ型の専用機により主に軟岩地山を対象とした。
- ② 既設覆工をプロテクタとして利用することで、2車線を確保した状態で拡大作業が可能である。
- ③ 既設トンネルの両側に予め導坑を施工し、その導坑を利用して、拡大掘削に伴うずりを進行方向に搬出しながら掘進する工法である。
- ④ 既設覆工撤去時には、移動式の簡易プロテクタを設置して、一般通行車輛の安全を確保する。

(5) 側壁導坑先行両側拡大工法

本工法は、図-7に示すように既設トンネルの両側を先行して導坑掘削した後、既設覆工をプロテクタとして利用し、覆工用セントルを兼ねる作業架台を

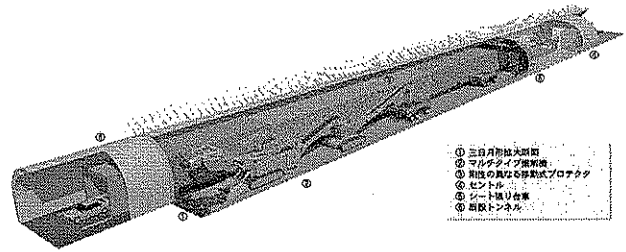


図-5 三日月形トンネル断面拡大工法の概略

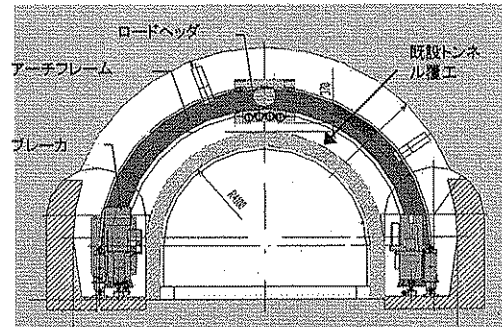


図-6 アーチカット工法の概略

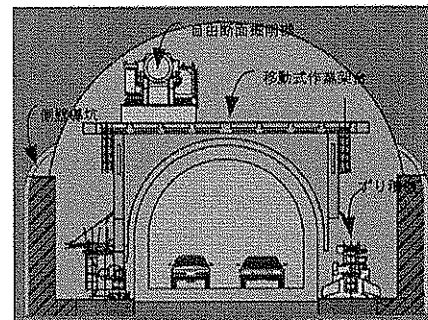


図-7 側壁導坑先行両側拡大工法の概略

利用して汎用機械により施工する。主な特徴は、以下に示すとおりである。

- ① 側壁導坑掘削と拡大掘削は、同じ汎用掘削機による施工が可能で、対象地山は中硬岩地山まで適用できる。
- ② 既設覆工をプロテクタとして利用することで、2車線を確保した状態で拡大作業が可能である。
- ③ 既設トンネルの両側に予め施工した導坑を利用して、拡大掘削に伴うずりを進行方向に搬出でき、効率的な施工ができる。
- ④ 拡大掘削時の作業架台は覆工用セントルのガントリと兼用することができ、移動用のレール自動送り機能を装備している。
- ⑤ 既設覆工撤去時には、移動式の簡易プロテクタを設置して、一般通行車輛の安全を確保する。
- ⑥ 既設覆工を利用したノンプロテクタ拡大工法

本工法は、図-8に示すように片側拡大とすることで広い作業スペースがとれ、既設トンネルの片側に先行して導坑を掘削し、その後、既設覆工をプロテクタとして利用して汎用機械を使って施工法するものである。主な特徴は、以下に示すとおりである。

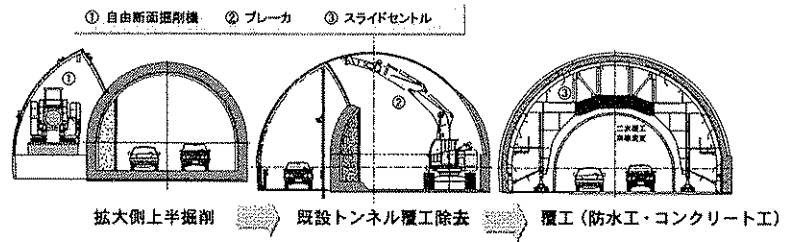


図-8 既設覆工を利用したノンプロテクタ拡大工法の概略

- ① 汎用機械・設備で施工が可能で、中硬岩まで適用できる。
- ② 既設覆工をプロテクタとして利用することで、2車線を確保した状態で拡大作業が可能である。
- ③ 既設覆工撤去時には、拡大側を掘削した後に既設トンネルと拡大側の間に関仕切壁を設けて、一般通行車輛の安全を確保する。

(7) π(パイ) ステージ工法

本工法は、図-9に示すように車両防護機能を備えた移動式の広い作業構台(πステージ)を用いて、作業構台上の汎用機械による既設トンネルの拡大掘削を行う方法である。主な特徴は、以下に示すとおりである。

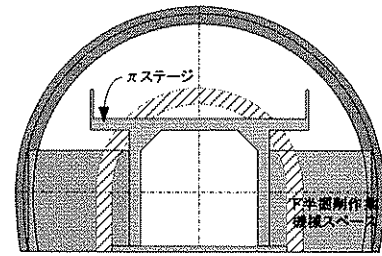


図-9 πステージ工法の概略

- ① 亀裂の程度によるが主に軟岩を対象とした。
- ② 作業構台に張り出し部を設けることで機械の離合が可能となり、機械の入替に伴うタイムロスが少なく効率的な施工が可能である。
- ③ 車両防護区間は移動式構台設置区間のみのため、道路利用者に与える圧迫感を軽減できる。
- ④ 施工手順や構台構造がシンプルなため、施工条件等により変更が可能である。

(8) フラットステージ工法

本工法は、図-10に示すように既設覆工の一部を利用して、掘削機械の作業足場としての平板型の移動式作業構台(フラットステージ)により車両防護設備と分離して簡易なプロテクタを用いた施工法である。主な特徴は、以下に示すとおりである。

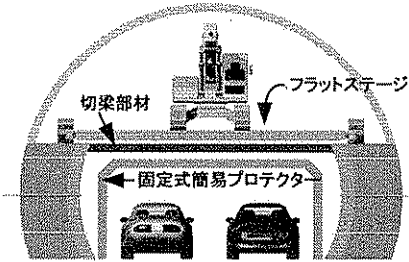


図-10 フラットステージ工法の概略

- ① 亀裂の程度によるが主に軟岩を対象としている。
- ② フラットステージを補強した既設トンネル側壁部周辺に載せ、走行車両と作業空間を分離することで既設トンネルが大きい場合には2車線を確保した状態で拡大作業が可能である。
- ③ 平板型の移動式作業構台を車両防護設備と分離することで、プロテクタは簡易な構造で対応できる。
- ④ フラットステージは、作業足場・機械待機場用の第1、第2フラットステージとずり出しや機械の搬出入用の第3フラットステージで構成され、効率的な施工が可能である。

2.3 断面拡大時の既設トンネルの防護範囲の検討

移動式プロテクタを用いた場合の防護範囲を把握することを目的として三次元有限要素解析および現場計測を行った。

(1) 三次元有限要素解析による既設トンネルへの影響把握²⁾

既設トンネルの残し方については、全周拡幅する方法を想定し、図-11に示すように拡大時に既設覆工を同時に壊して行くケースとした。

図-12に三次元解析の天端変位結果と切羽面との距離を示す。縦軸は最大変位量で無次元化した。断

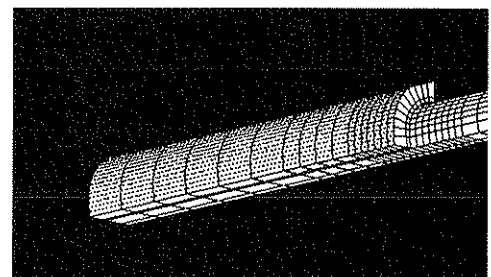


図-11 三次元解析モデル

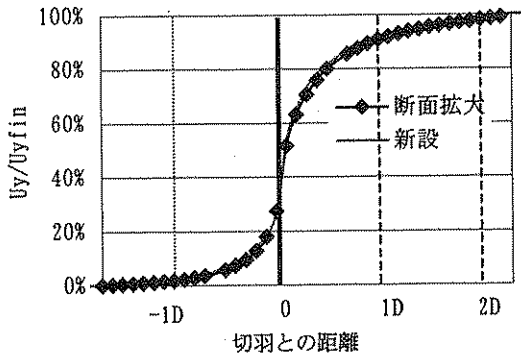


図-12 地山変位図 (天端変位)

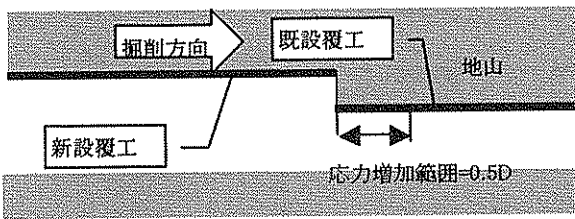


図-13 既設覆工影響範囲

面拡大時の先行変位が始める位置 (-1D)、収束距離 (2D) などが新設トンネルとほぼ同じであることが分かる。図-13 は、三次元解析により求めた掘削に伴う既設覆工の応力増加範囲を示したものであり、切羽から前方約 0.5D が影響範囲となった。

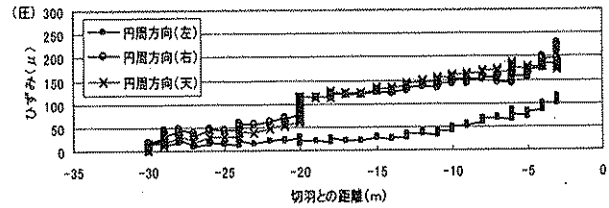
(2) 現場計測による既設トンネルへの影響把握

計測を実施したトンネルは、トンネルの一部区間を 2 車線 (トンネル幅約 9.6m) から 3 車線断面 (トンネル幅 15.5m) に拡幅するトンネルである。地質は、砂岩・頁岩・凝灰岩の互層である。計測項目は、既設トンネル覆工表面のひずみ、トンネルの内空変位である。計測結果を図-14 に示す。覆工表面の円周方向のひずみは切羽が約 25m まで近づいた時点から徐々に増加し、さらに約 3m まで切羽が近づくと急激に増加した。また、トンネル内空変位も最大で約 0.4mm と小さいが切羽が約 15m まで近づくと覆工表面の円周方向のひずみと同様に変化し始めた。

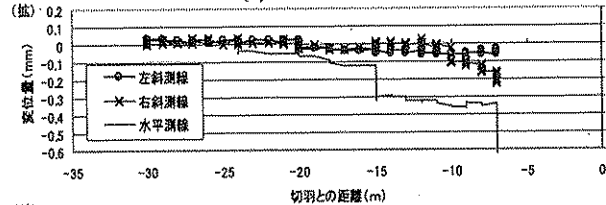
以上の解析および現場計測による検討結果より、断面拡大による既設トンネルへの影響は切羽が概ね 0.5~1.5D 程度まで近づいた時点であり、移動式プロテクタを用いる場合の前方防護範囲は 0.5D~1.5D 程度であることが明らかとなった。

3. 断面拡大時における断面形状・支保構造の検討

断面拡大時の支保構造は、これまでは新設トンネルとほぼ同じ規模のものを採用している事例が多いが、その根拠は明確になっていない。また、断面拡



(a) 覆工表面のひずみ



(b) トンネル内空変位

図-14 既設トンネルの挙動計測結果

大を行う際の断面形状の選定方法についても特に確立されたものがないのが現状である。既設トンネルの断面拡大にあたっては、断面拡大トンネル固有の特徴 (既設トンネルの施工によって天端やトンネル周辺が既にゆるんでいること、プロテクタの存在により限られた空間での施工となるため施工性が悪く、特にロックボルト打設の作業性が極めて悪いことなど) を考慮した、より合理的な拡大断面形状、トンネル構造の設計手法の確立が求められている。

本研究では、支保構造については、断面拡大時のトンネル挙動の実態把握として既設トンネルの断面拡大工事における支保構造およびトンネルの周辺挙動を、また、断面拡大の特殊性を考慮し、特にロックボルトに着目して、ロックボルトを斜めに打設するボルトの支保効果、ゆるみ域とロックボルトの支保効果に関する模型実験を行い、断面拡大時の支保構造の検討を行った。また、断面形状の選定については、断面拡大の要求性能と諸条件との関係について条件整理を行い、既設トンネルの大きさ、覆工状態などから対象トンネルに適した断面形状の選定方法について検討した。

3.1 断面拡大時のトンネル挙動の実態把握

(1) 支保構造の実績調査³⁾

断面拡大トンネルの支保構造 (鋼製支保工、吹付けコンクリート、ロックボルト) を調査した結果、ほとんどのトンネルでは支保構造は新設トンネルと同程度の規模のものを採用していることが分かった。しかし、ロックボルトに関しては、新設と同様に地山に直角にパターンボルトを打設した事例はそれほど多くなく、施工性から新設に比べ変則的パターンを採用してきた事例が多い。例えば、上半先進工法の場合は、側壁

部のロックボルトのみで天端部を省略したり、斜めロックボルトを採用したりしている事例があり、側壁導坑先進工法の場合には、天端部も側壁部もロックボルトを打設していない事例などもあった。

(2) トンネルおよび周辺挙動の実態把握

これまでの既設トンネル拡大工事における天端変位の計測結果と地山分類（支保パターン）との関係を図-15 に示す。これより、坑口部や断層帯のような問題となるような場所では、新設トンネルと同様に比較的大きな変形が発生するものの、すべての支保パターンにおいて変形量が同程度で小さな値になっていることが分かる。このことは、特にDクラスの地山においてより支保工を軽減することが可能である場合があることを示していると考えられる。また、改築を行った既設トンネルでのゆるみ域に関する調査結果からは、天端周辺は緩んでいる場合があるが、側壁部のゆるみは小さいことが分かった。

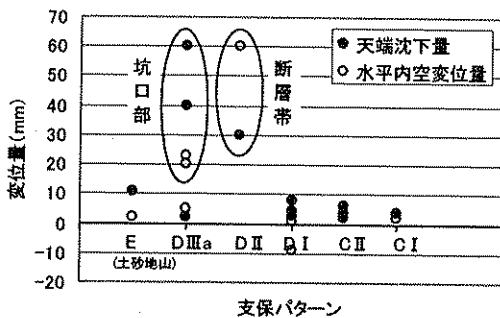


図-15 支保パターンと天端沈下の関係

3. 2 断面拡大時のロックボルトの支保効果に関する模型実験^{4) 5) 6)}

支保構造の実績調査から、断面拡大時における支保構造の特徴としてロックボルトは作業上の制約から斜めに打設、あるいは省略される場合が多いこと、また、既設トンネルの天端周辺は緩んでいる場合があり、支保構造の設計にはゆるみの発生を考慮する必要があることが明らかとなった。このため、特にロックボルトに着目して、作業上の制約からトンネル進行方向に対して斜めにロックボルトを打設する斜めボルトの支保効果を遠心力载荷模型実験により明らかにするとともに、ゆるみ域とロックボルトの支保効果との関係について落戸実験により調べた。

(1) 斜めボルトの支保効果に関する実験^{4) 5)}

1) 実験方法

実験装置は、図-16 に示すように内寸 140×500×400mm の模型容器に、アクリル製の半円筒の支保模型とトンネル掘削を模擬するためのトンネル掘削模

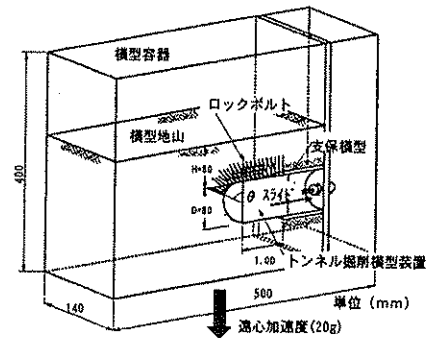


図-16 実験装置

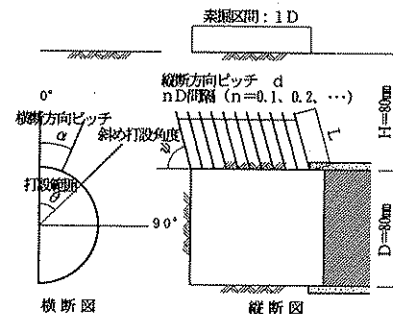


図-17 ボルト配置図

擬装置が設置してある。実験は、模型地山にロックボルト（1.6mm のりん青銅）と半円形トンネル模型（アクリル製、D=80mm）を設置し、所定の遠心加速度(20g)まで遠心载荷を行い、その状態でトンネル掘削模擬装置を引き抜いて 1.0D の素堀区間を設けることにより応力解放を行い、その時の地山安定状態を確認することで、ロックボルトの支保効果を調べた。模型地山は、少量の粘着力を確保した豊浦標準砂を 2cm 毎に締め固めて作成した。なお、土被り比 H/D (H:土被り、D:トンネル径) は 1 とした。図-17 にロックボルトの配置図を示す。

実験は、打設範囲 θ を 45° に固定して、ロックボルトの長さ L、横断方向ピッチ α 、斜め打設角度 ψ 、縦断方向ピッチ d を変化させた場合について行った。

2) 実験結果

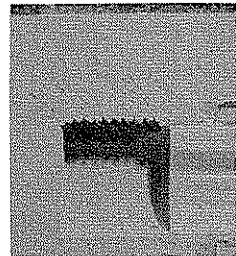
写真-1(a)に無対策時、(b)に天端部にロックボルトを $\psi=45^\circ$ で打設した時の実験結果を示す。無対策では、トンネル天端を底辺とした地表面にまで達する三角錐状の天端崩壊が発生しているのに対して、斜めボルトを打設した場合は天端崩壊が発生せず、支保（天端安定）効果があることが分かる。図-18 は、斜めの打設角度、横断方向の配置等を変化させた一連の実験結果（天端部崩壊状況のスケッチ図）をまとめたものである。これを見ると、全体に打設角度を小さくする（斜めに打設する）と天端安定が悪くなる傾向があるが、ある長さ以上のボルトを密

にして打設すれば、 $\psi = 30^\circ$ 程度までは斜めに打設しても直ボルトと同程度の支保効果が発揮される場合があることがわかる。

したがって、断面拡大時に作業空間などの関係上、直角にロックボルト打設できない場合には、ボルトを長くすることや縦断方向に密に打設することで、斜めに打設しても直ボルトと同程度の天端安定（支保）効果を確認できる場合があるものと考えられる。



(a)無対策



(b)斜ボルト

写真-1
天端崩壊状況

また、斜めボルトの支保効果は、ボルト直角方向の投影長さで評価されることが多いが、それを検証するために、斜めボルトの直角方向の投影長さとはほぼ等しくなる長さを有するボルトをトンネル壁面に直角に打設 ($\psi = 90^\circ$) した実験を行ったところ、斜めボルトの方が、投影長がほぼ等しいロックボルトを直角方向に打設した場合よりも効果が大きい場合が見られた。

(2) ゆるみ域でのロックボルトの効果に関する実験
6)

1) 実験方法

図-19 に実験装置を示す。矩形の落戸模型 (B:300×D:100×T:250(mm)) は、地山作成後にロックボルトが打設出来るよう側部に開口部を設けてある。地山材料は乾燥状態にある珪砂 4 号 ($\gamma = 15.7 \text{ kN/m}^3$) を使用し、密度が一定となるように 10cm の高さから

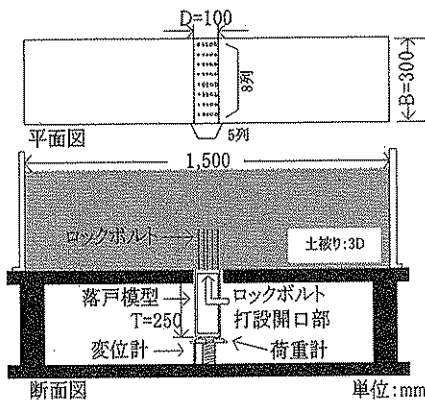


図-19 実験装置

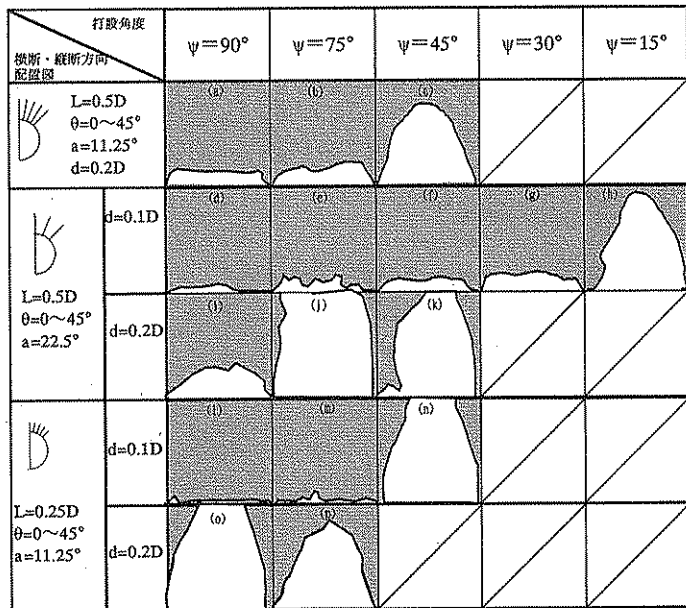


図-18 天端状況図一覧 (斜め打設角度および配置)

自由落下させて作成した。ロックボルトは表面に砂を付着させた $\phi = 1.6 \text{ mm}$ のリン青銅丸棒を使用し、縦断方向 8 列 (30mm 間隔) 横断方向 5 列 (18mm 間隔) を配置した。実験は、①地山作成直後に無対策で落戸を降下させるケース (無対策) ②地山作成直後にボルトを設置して、落戸を降下させるケース (降下前打設) ③無対策状態である程度落戸を降下させ、地山にゆるみを与えた後、降下床を一旦停止した状態でロックボルトを打設して、その後再度降下させるケース (降下後打設) について実施し、それぞれについて、土被りを 3D として、ボルト長さ (1.0D, 1.5D, 2.0D) を変化させた。

2) 実験結果

a) 降下前打設のロックボルト効果

図-20 に落戸降下量と落戸荷重の関係を示す。無対策での落戸模型にかかる荷重は降下開始後すぐに減少を始め、降下量約 3mm で最小荷重を示し、それ以降はほぼ一定値となった。図-21 は降下前と 20mm 降下後の写真から読み取ったデータを基に作成した鉛直変位量等高線図 (2mm ピッチ) であるが、最終形状として幅 10cm、高さ 10cm 程度の三角形のゆるみ領域 (落戸とほぼ同じ量だけ沈下する領域) が形成されているのが確認できる。ロックボルトの効果については、1.0D ボルトは降下量 6mm 程度までは荷重低減効果がみられるが、その後、降下量がさらに増加すると効果は徐々に減少し、最終的には無対策と同程度の荷重になった。一方、1.5D, 2.0D ボルトは 1.0D ボルトに比べ荷重低減効果が大きく、

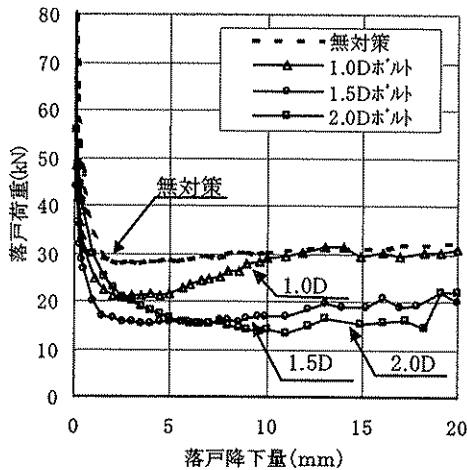


図-20 荷重降下量曲線 (降下前打設)

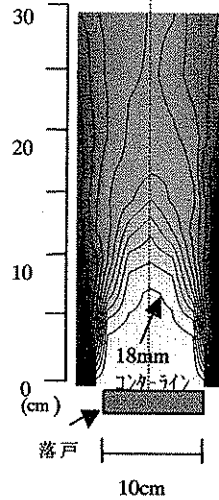


図-21 鉛直変位等高線

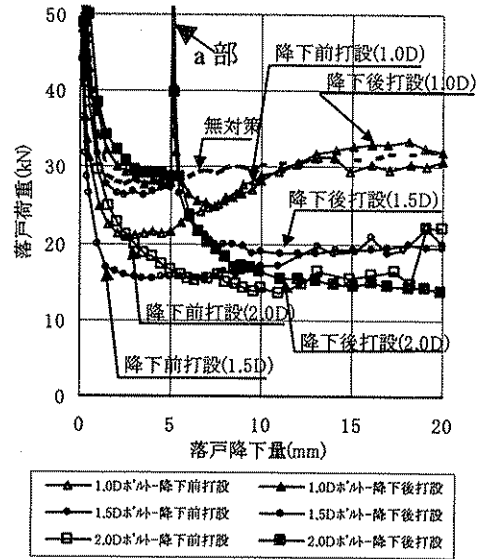


図-22 荷重降下量曲線 (降下後打設)

その後、降下量が増加してもその効果は変わらず、最終降下量 20mm までほぼ同じ荷重低減効果を示した。この結果はロックボルトが効果的に働くための最適な長さが存在することを示している。

b) 降下後打設のロックボルトの効果

無対策の状態では 5mm まで降下床を降下させることによりゆるみ領域を発生させてロックボルトを打設することで、ゆるみ領域に打設した場合 (降下後打設) のロックボルトの効果を確認した。図-22 に落戸降下量と落戸荷重の関係を示す。ゆるみ領域と同程度の長さ 1.0D について見てみると、既に発生しているゆるみ領域にロックボルトを打設することにより、一度形成されたアーチ効果が破壊され荷重が上昇するが (図中 a 部)、再度降下を開始すると急激に荷重が減少し、荷重低減効果が見られる。しかし、降下前打設の結果と比較すると降下後打設は荷重低減効果の絶対量は小さく、さらに降下量が増加すると降下前打設の曲線に重なり、最終的に荷重低減効果はなくなった。一方、ゆるみ領域よりも長い 1.5D、2.0D ボルトでは、降下前打設時とほぼ同程度の荷重低減効果を示した。

以上のことから、ゆるみ領域が既に発生している場合でも、ゆるみ領域よりある程度長いロックボルトを打設することで、ゆるみ領域ができる前に打設したロックボルトと同程度の効果が期待できることがわかった。

3. 3 断面拡大時の支保構造の提案

過去に実施された断面拡大トンネルの支保構造の実績調査、施工性が悪いロックボルトに着目した模型実験等から次のことが明らかとなった。

- ① ロックボルトに関しては変則的なパターンを採用している事例が多く、天端部あるいは側壁部での打設を省略する場合がある。
- ② 既設トンネルの天端部分は緩んでいる場合があるが、側壁部のゆるみは小さく、むしろ比較的締まっている場合が多いと考えられる。
- ③ ロックボルトの支保 (天端安定) 効果は、斜めにロックボルトを打設した場合でも、配置や長さを適切に設定することにより通常のパターンボルトと同程度の支保効果が期待できる場合がある。
- ④ ゆるみ領域が既に発生している場合でも、ゆるみ領域よりある程度長いロックボルトを打設することで、ゆるみ領域ができる前に打設したロックボルトと同程度の効果が期待できる。

上記を参考に、断面拡大トンネルの支保構造としては、新設トンネルの支保構造に以下の点を考慮したものを選定することを提案した (図-23)。

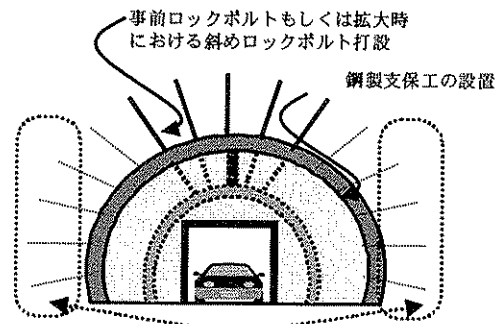


図-23 断面拡大トンネルの支保構造の例

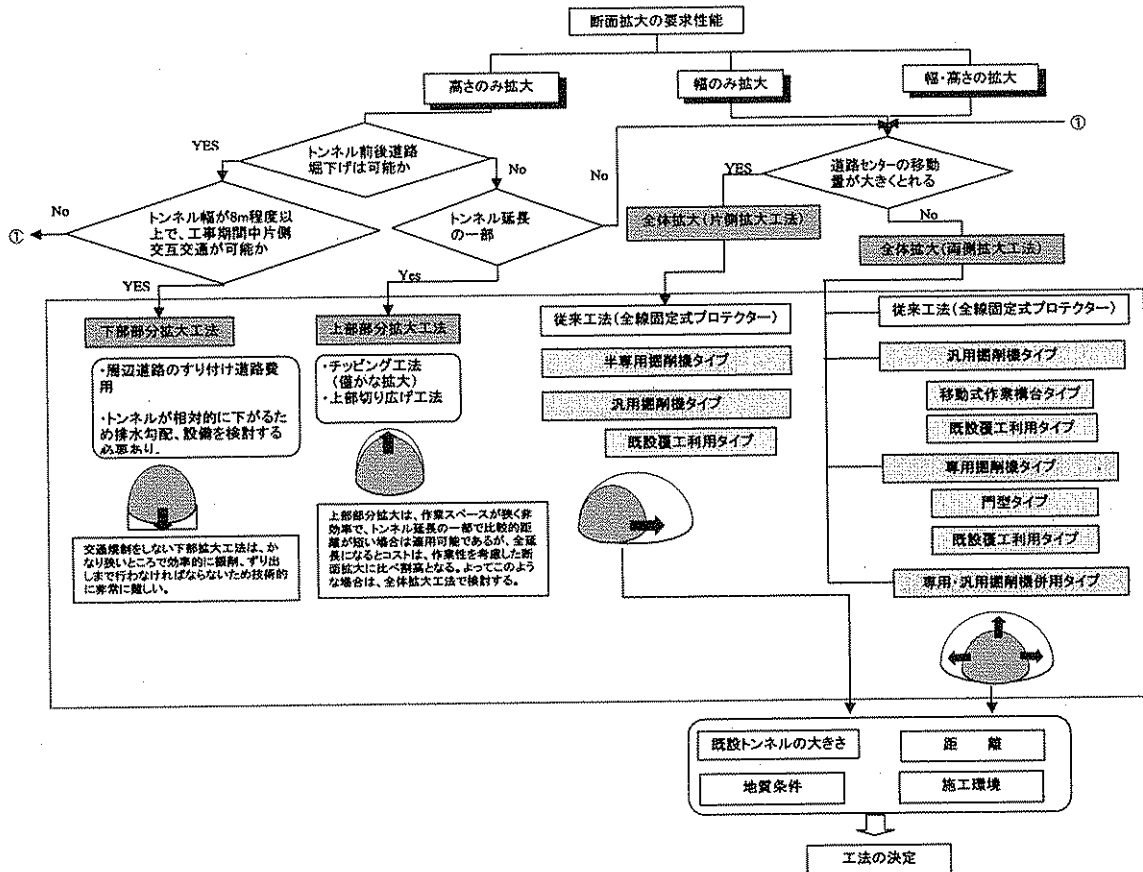


図-24 断面拡大選定のフロー図

- ① 天端部における事前ロックボルトもしくはロックボルトの斜め打設の適用
- ② 側壁部におけるロックボルト省略の検討
- ③ 覆工打設前にプロテクタなしで車両を通行させる場合には、通行車両の安全性の確保も兼ねた構造の検討（例えば、地山条件に拘わらず鋼製支保工を設置）

3. 4 断面拡大時の断面形状の選定方法

断面拡大時の断面形状は、断面拡大の要求性能（高さのみの拡大、幅のみの拡大、幅・高さの拡大）に応じた合理的な断面形状とすることが必要である。また、拡大トンネル前後の道路状況や断面拡大トンネルの平面線形の条件、既設トンネル覆工の条件等によっても合理的な断面形状が変わってくると考えられる。そこで、断面拡大の要求性能と諸条件との関係について整理を行い、前述の開発した施工法も含めて図-24 に示すように既設トンネルの大きさ、覆工状態などから対象トンネルに適した断面形状を選定するフロー図を作成した。

拡大後の断面形状は、図-24 に示すように必要な拡大量、拡大方向によって、大きく4パターンに分

類できる。上部部分拡大は、高さだけが足りない時に必要量を上方に拡大する方法であるが、作業空間が非常に狭く作業効率が悪くなり、結果的に全面拡大に比べコスト高になる場合がある。片側全面拡大は、拡幅を片側に集中することで作業空間を大きくして効率的に作業する方法であるが、道路線形などの制約条件を受けるほか、既設覆工の健全度も重要な要素となる。これらを総合的に判断して最適な拡大断面形状を決める必要がある。

4. まとめ

本研究では、交通を確保した状態で経済的に既設トンネルの断面拡大が行える施工方法の検討と既設トンネルの大きさ、覆工状態などから対象トンネルに適した断面形状の選定方法の検討、断面拡大トンネルの特徴（地山の安定性、施工性等）を考慮した断面拡大トンネル用の支保構造の検討を行った。本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 交通を確保した状態（最低でも1車線、場合によっては2車線）で経済的に既設トンネルの断面拡

大が行える施工方法を既設トンネルの諸条件（断面形状・覆工状態・地山条件・延長等）に応じて複数案提案した。

- 2) 解析および現場計測による検討結果より、断面拡大による既設トンネルへの影響は、切羽が概ね $0.5D \sim 1.5D$ 程度まで近づいた時点であり、移動式プロテクタを用いる場合の前方防護範囲は $0.5D \sim 1.5D$ 程度が必要である。
- 3) 斜めボルトの支保効果に関する模型実験より、斜めボルトでも配置や長さを適切に設定することにより、直ボルトと同程度の支保（天端安定）効果が期待できる場合がある。
- 4) ゆるみ域と支保効果の関係に関する模型実験より、ゆるみ域が発生している状態でも、ゆるみ域程度の長さのロックボルトを打設することにより、支保効果は認められる。
- 5) 断面拡大工事実績およびロックボルトに関する一連の実験より、断面拡大トンネルの支保構造として、坑口部および断層等の一部の特殊な地山を除いて、トンネル側壁部のロックボルト省略の可能性がある。
- 6) 既設トンネルの大きさ、覆工状態などから対象トンネルに適した断面形状を選定するフロー図を提案した。

今後は、提案した断面拡大施工法について随時現場に導入し、施工性・有効性を検証しながら普及を図っていく必要がある。

参考文献

- 1) 石村利明、真下英人：「既設トンネルの断面拡大技術の現状」、第23回日本道路会議論文集(B)、P208-217、1999.10
- 2) 蒲田浩久、真下英人：「既設トンネルの断面拡大時の地山変位について」、(社)土木学会第55回年次学術講演論文集第3部(B)、P208-209、2000.9
- 3) 蒲田浩久、真下英人、森本智：「既設トンネル断面拡大時の支保構造-ロックボルトに着目して-」、土木技術資料 Vol.44-12、P32-37、2002.12
- 4) 蒲田浩久、真下英人、長谷川哲也：「土砂地山におけるロックボルトの効果に関する基礎的研究」、(社)土木学会トンネル工学研究論文・報告集、Vol.11、P147-152、2001.11
- 5) 蒲田浩久・真下英人：「土砂地山におけるロックボルトの効果に関する基礎的研究」、土木技術資料 44-5、P62-67、2002. 5
- 6) 森本智、真下英人、蒲田浩久：「打設時期の違いによる

ロックボルト効果に関する基礎的研究」、(社)土木学会トンネル工学研究論文・報告集、Vol.12、P413-418、2002.11