

トンネルの更新技術に関する
共同研究報告書
ーリペアーチ 設計・施工マニュアル(案)ー

令和4年6月

国立研究開発法人土木研究所
株式会社大林組

Copyright © (2022) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

トンネルの更新技術に関する 共同研究報告書

—リペアーチ 設計・施工マニュアル(案)—

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
	主任研究員	巽	義知
	専門研究員	石村	利明
	元上席研究員	砂金	伸治
	元主任研究員	小出	孝明

株式会社大林組	土木本部生産技術本部		
トンネル技術部	上級主席技師	秋好	賢治
	課長	伊藤	哲
	担当課長	磐田	吾郎

要 旨

老朽化トンネルの更新工法では経済性や通行規制等の施工時の制約への対応等に課題があり、これらの解消には新たな技術の開発や従来の技術の改良等が必要である。また、その過程では更新時の地山の力学的特性に適応した支保構造の検討が重要となる。

本報告書では、2車線道路トンネルを対象に1車線の通行を確保しながら、覆工コンクリートを経済的に改修するために考案した工法「リペアーチ」の設計・施工マニュアル(案)を報告する。トンネル中央に設置する内部支保工で、トンネル安定性を確保し、その左右を一般車両通行帯と作業帯に分離して、既設覆工コンクリートの撤去と覆工(鉄筋コンクリート構造)の新設を行うものである。

工法概要・特徴、新設覆工完成時構造の設計および施工時トンネル構造設計(内部支保工含む)および施工方法・留意点を説明し、巻末には標準的なトンネルを想定した設計例、既設覆工コンクリート撤去に関する実証実験の結果を紹介する。

キーワード：トンネル更新， 活線施工， ドラムカッター， 鉄筋コンクリート覆工

はじめに

老朽化したトンネルでは、覆工コンクリートの変状や断面の狭隘化が課題となっている。全国の道路トンネルは、約 1.1 万本が供用されており、そのうち約 23%は建設後 50 年以上がすでに経過している（「令和 2 年度 道路メンテナンス年報」国土交通省道路局）。さらに 10 年後にはそれが約 37%へと増加することが想定されており、今後もトンネル更新への対応の増加が見込まれる。

従来の更新工法では経済性や施工時の制約への対応等に課題があり、これらの解消には新たな技術の開発や従来の技術の改良等が必要である。そこで、(国研)土木研究所では、(株)大林組との平成 29 年 4 月から令和 4 年 3 月の間に実施した共同研究により、より経済的なトンネル活線更新技術の机上検討・実証実験による開発を行ってきた。その結果、本共同研究では、トンネル中央に設置する内部支保工で、トンネル安定性を確保し、その左右を一般車両通行帯と作業帯に分離して、既設覆工コンクリートの撤去と覆工(鉄筋コンクリート構造)の新設を行う工法「リペアーチ」を提案した。本共同研究報告書は、これまでの検討結果を、「リペアーチ 設計・施工マニュアル(案)」として取りまとめたものである。

実現場への適用にあたっては、検討対象となる個別のトンネルの諸条件をもとに詳細な検討・調査が必要となるが、本報告書が今後のトンネル更新の施工法を検討する際の参考資料として活用されるとともに、本報告書で提案した工法が実施工に適用されれば幸いである。

目 次

1. 工法の概要.....	1
2. 工法の特徴.....	4
3. 設計.....	5
3. 1 適用条件.....	5
3. 1. 1 適用可能な既設トンネルおよび新設トンネルの断面規模.....	5
3. 1. 2 トンネル延長.....	6
3. 1. 3 地山条件.....	6
3. 1. 4 既設トンネル条件.....	6
3. 2 設計.....	6
3. 2. 1 構造設計.....	6
3. 2. 2 構造仕様.....	8
4. 施工方法.....	9
4. 1 施工フロー.....	9
4. 2 施工手順.....	10
4. 2. 1 準備工.....	10
4. 2. 2 トンネル更新工.....	12
4. 3 通行規制.....	23
4. 4 主要使用機械.....	24
4. 5 施工上の留意点.....	25
参考資料.....	26
1. 構造計算例.....	26
1. 1 完成時の構造安定性.....	26
1. 2 施工時の構造安定性.....	37
2. 覆工コンクリート切削試験結果.....	48
2. 1 切削速度.....	48
2. 2 切削振動.....	48
3. 概算工程.....	49
4. 特許出願.....	53
5. 商標出願.....	53

1. 工法の概要

本工法は、大掛りなプロテクタを使用せず、左右片側ずつ活線施工でアーチ構造を更新する工法である。

2車線道路トンネルを対象とし、片側交互通行で1車線の一般車両通行帯を確保するものとする。

図-1.1 に示すように、左右半断面ごとに内空断面が不足する肩部を切削して拡大する。その際、トンネル中央部に内部支保工を設置して、天端部の安定性を確保することで、活線施工を実現する。左右の新設覆工構築後、天端部は既設覆工の内側に新設覆工を接続して、健全なアーチ構造を構築する（図-1.2）。図-1.3 のように、盤下げと肩部の薄肉化を図ることで、肩部の建築限界高さの拡大にも対応できる。

本工法の施工ステップを図-1.4、図-1.5 および以下に示す。

- ① 片側車線を規制して、肩部に側壁補強ロックボルトを打設する。完了後、規制車線を切り替えて、反対側も同様に補強する。なお、背面空洞がある場合は事前に充填作業を行う。
- ② 通行止めを行ってトンネル中央部に内部支保工を設置する。
- ③ 片側車線を規制して作業帯とし、既設覆工コンクリートを切削する。
- ④⑤⑥ 既設覆工コンクリートの切削完了後、既設と新設コンクリートの接続部に差筋アンカーを打設する。鉄筋の組立てを行い、新設コンクリートを打設する。既設覆工コンクリートのブロック境界を考慮して、安定性を確保しながら必要に応じて分割して施工する。
- ⑦ 片側施工完了後、内部支保工を盛替え、反対側の既設覆工の切削～新設覆工の構築を行う。
- ⑧ 内部支保工を撤去し、足場兼簡易プロテクタを使用して、左右の覆工コンクリートを接続する形で、天端部覆工コンクリートを既設覆工内側に構築する。施工を完了し、車線規制を解除する。

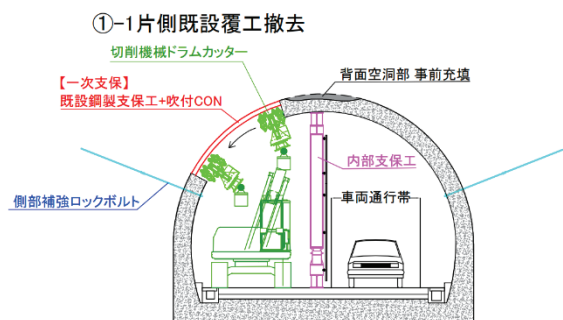


図-1.1 施工時の構造

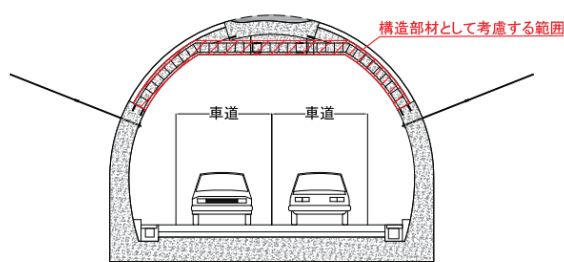


図-1.2 完成時の構造

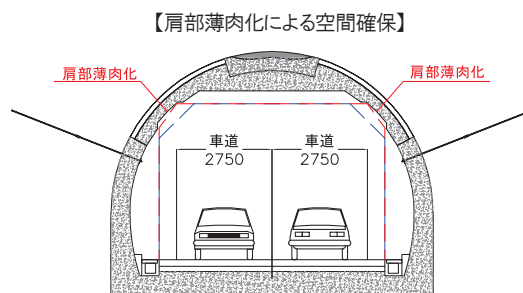
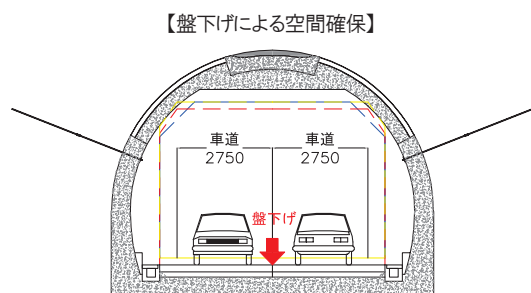
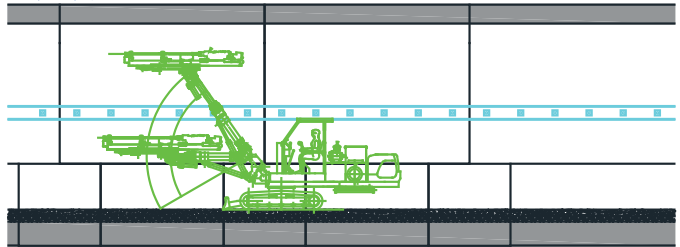
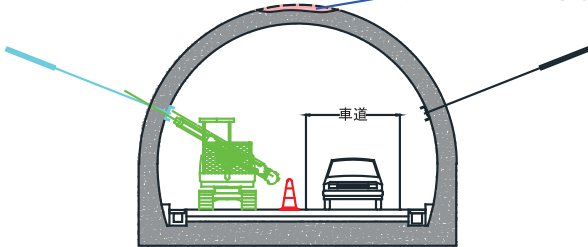


図-1.3 肩部の建築限界高さを拡大する場合

施工ステップ①

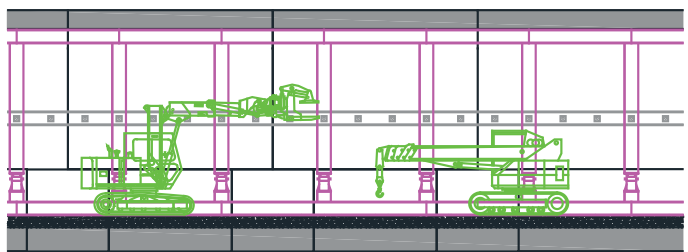
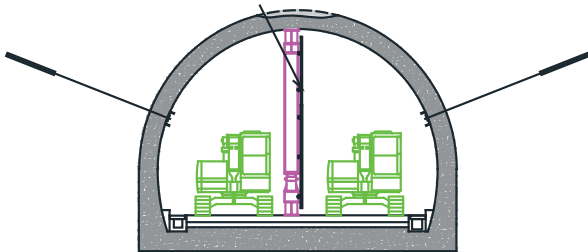
①片側占用 + 側壁補強ロックボルト打設(左右切替施工)

背面空洞は事前に充填



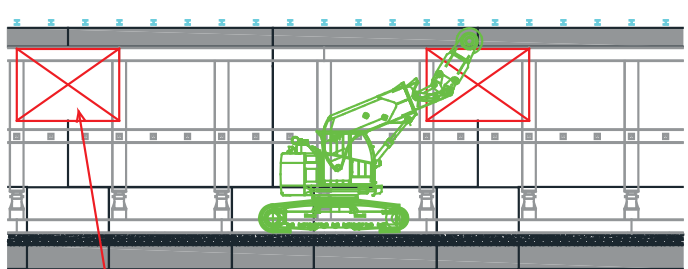
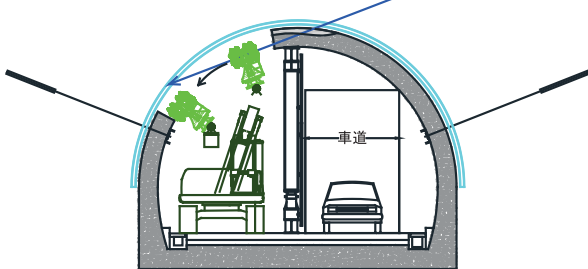
②通行止め + 内部支保工設置

隔壁設置



③肩部既設コンクリート切削(足付け 奇数ブロック)

既設鋼アーチ支保工を利用して一次覆工(吹付け)



内部支保工応力・側壁補強ロックボルト軸力を計測しながら、
構造安定性を維持できる範囲まで撤去

④新設覆工コンクリート構築(足付け 奇数ブロック)

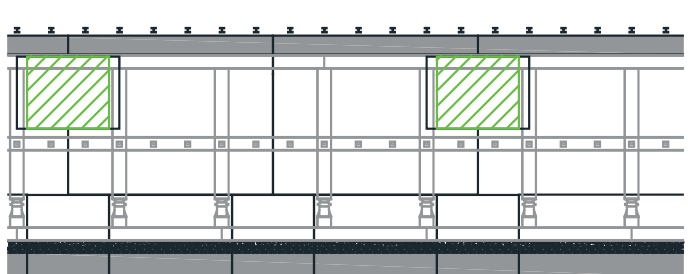
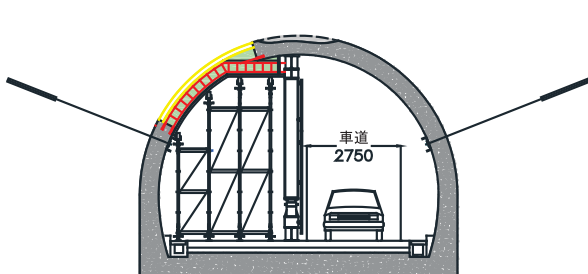
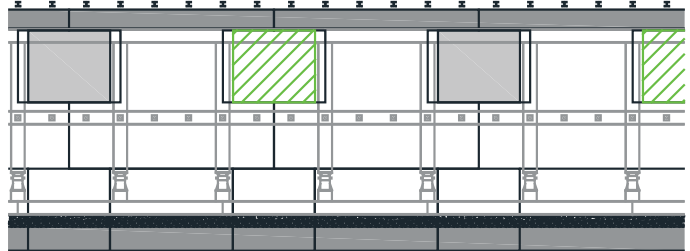
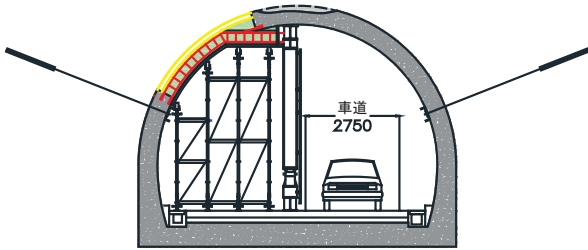


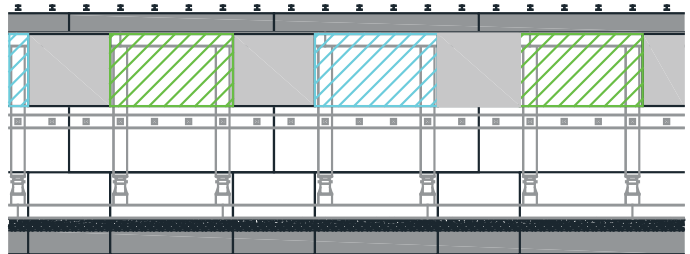
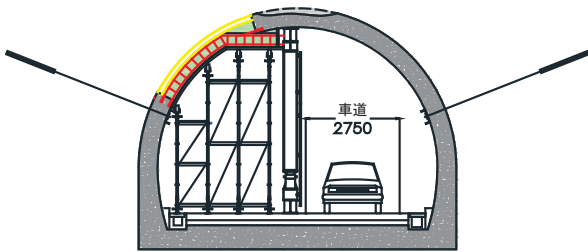
図-1.4 施工ステップ①

施工ステップ②

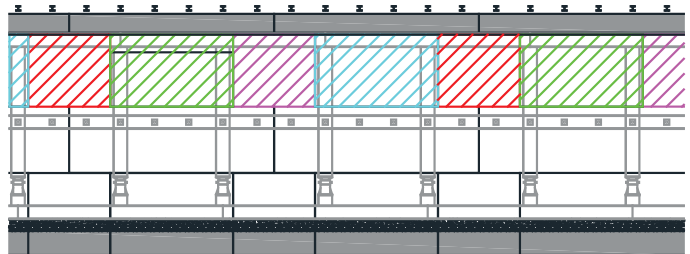
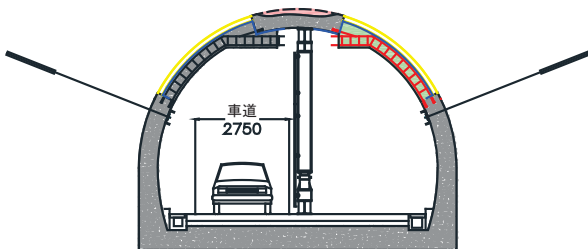
⑤足付け 偶数ブロック ③・④繰り返し



⑥大間 奇数・偶数ブロック ③・④繰り返し



⑦内部支保工盛替え(通行止め)～占用切替 + ③～⑥



⑧内部支保工撤去～天端部覆工接続
簡易移動式プロテクタ

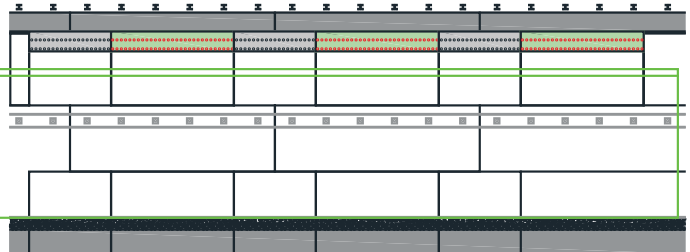
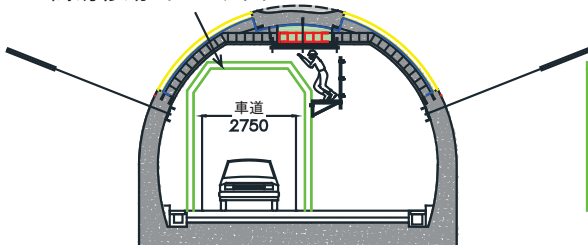


図-1.5 施工ステップ②

2. 工法の特徴

本工法は、既設の2車線道路トンネルの更新工事で、一般車両通行帯の安全性を確保しながら、残された狭い空間でトンネル覆工コンクリートを更新する工法である。トンネル中央に内部支保工を設置して、既設覆工コンクリートの切削から新設コンクリートの打設までを行う。

従来工法に比べて、以下の特徴がある。

(1) 交通の確保

- ・片側1車線分の一般車両通行帯を確保して通行止め作業を削減する。
- ・大掛りなプロテクタを用いないため、それらの設置撤去に要する交通規制の期間が短く、一般交通への影響が小さい。

(2) コスト削減

- ・大掛りなプロテクタが不要であり、コストを削減できる。
- ・切削機械は、汎用機に装備可能なドラムカッターであり、特殊専用重機等の製作は不要である。

(3) 工程短縮

- ・空間に余裕がある天端部は、既設トンネル内に新設覆工を構築することで、天端部の撤去作業に要する工程を省略できる。
- ・大掛りなプロテクタを用いないため、それらの設置撤去に要する期間が短く、工程への影響が小さい。

(4) 安全性

- ・一般車両通行帯直上での既設覆工撤去・掘削作業を行わないため、一般通行車両の安全性を確保できる。
- ・アーチ部切削に用いるドラムカッターは振動が小さく、既設覆工のはく落を起こさない。
- ・既設コンクリート撤去時のトンネル構造安定性を内部支保工で確保する。
- ・左右分割での覆工構築中においては、既設覆工と新設覆工を接続してアーチ構造を維持することでトンネル安定性を確保する。
- ・覆工新設部を鉄筋コンクリート構造とすることで、完成時扁平断面のトンネル安定性を確保する。

(5) 坑内環境

- ・隔壁および給気ファン・集塵機を設置することで、施工区間内から一般車両通行帯側への粉塵飛散を防止する。
- ・切削機械に散水装置を取り付けることで、粉塵の発生を抑制する。

3. 設計

3. 1 適用条件

3. 1. 1 適用可能な既設トンネルおよび新設トンネルの断面規模

(1) 既設トンネルの規模

道路構造令の制定前に矢板工法で施工された第三種・第四種の道路トンネルは、現行の道路構造令に示される建築限界を満たさないものが多く、特に余裕が無い肩部のトンネル更新のニーズが高いことから、本工法では図-3.1.1 に示す既設トンネル断面を検討対象とする。なお、既設トンネルの幅員が 6.5m 以上、かつ天端にフラットな鉄筋コンクリート覆工（図-3.1.2）を追加設置する空間余裕（巻厚分）を確保できる断面であれば、本工法を適用可能である。

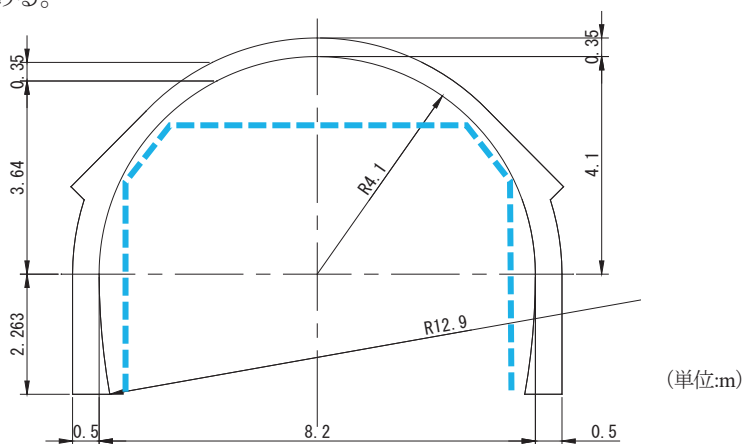


図-3.1.1 既設トンネル断面

(2) 更新後のトンネルの規模

更新工費を抑えるため、大掛りなプロテクタを使用せずに、天端の既設覆工は残置しつつ、その内側に新設覆工を構築することから、本工法では図-3.1.2 に示す更新後のトンネル断面を検討対象とする。なお、更新後のトンネル断面では天端部内空が小さくなるため、換気設備や道路標識などを設置するトンネルにおいては、空間条件に注意を要するとともに、必要に応じて換気設計を見直す必要がある。

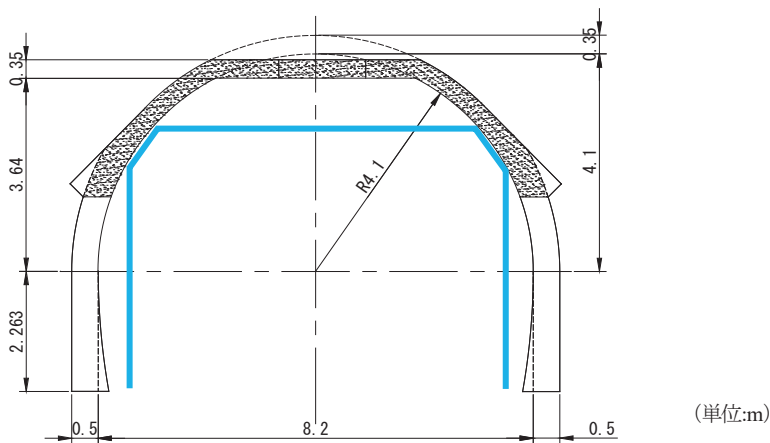


図-3.1.2 更新後のトンネル断面

3. 1. 2 トンネル延長

本工法が対象とするトンネル施工延長は任意である。

3. 1. 3 地山条件

本工法では、主としてCⅡ～DⅠ等級の地山を対象とする。偏圧や特殊地山が想定される場合は、地形・地盤条件を考慮して、別途追加検討を行い、工法適用の妥当性を検証する必要がある。

3. 1. 4 既設トンネル条件

本工法が対象とする既設トンネル覆工は、無筋構造であり、外力による変状が無いことを基本とする。

3. 2 設計

当該トンネル更新工法は、トンネル中央に内部支保工・防護壁兼用の隔壁を設置して、一般車両通行帯を一車線分確保しながら、既設アーチコンクリートの左右を半分ずつ切削し、天端にフラットな鉄筋コンクリート覆工を新設するものである（図-3.2.1）。本工法の構造設計を以下に示す。

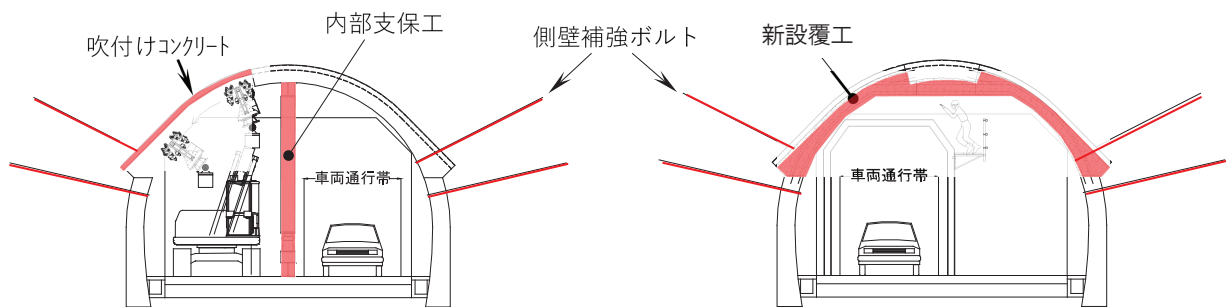


図-3.2.1 構造断面図

3. 2. 1 構造設計

本工法によるトンネル更新に際しては、完成時および施工時にトンネル構造の安定性が確保される必要があるため、それぞれ数値解析により構造設計を行うものとする。

(1) 完成時

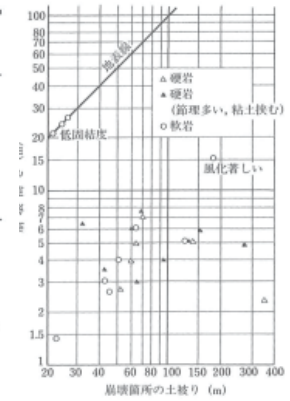
完成時は、緩み高さに応じた土荷重を考慮した骨組構造解析を行う。既往の文献^リによると、トンネル掘削に伴う緩み高さは実績的に表-3.2.1 に示す値となることが分かっている。トンネル内空断面および地盤条件に応じて、適切な緩み高さを選定する。ただし、更新工事では、既設トンネル撤去に伴う緩みの進展も想定されるため、表-3.2.1 に記載の緩み高さに加えて、土荷重を設定（1D程度）することが確実である。また、既設覆工の限界荷重を算出し、それを基準値として緩み高さを設定することも、既設覆工と同等以上の構造安定性を確保する上で有効である。

なお、偏圧や特殊地山が想定される場合は、地形・地盤条件を考慮して、有限要素解析等で別途トンネルの構造安定性を検証する。

表-3.2.1 トンネル鋼製支保工に作用する地山の緩み高さ¹⁾

内空断面の幅 (m)	土圧があると推定される場合 (m)	土圧が大きいと推定される場合 (m)
3	1.0	2.0
5	2.5	5.0
10	3.0	6.0

- 注1) この表は、土被りが1~2D (Dはトンネル掘削半径) 程度以上の場合の鋼製支保工の天端に作用する地山の緩み高さを示す。
 2) この表は、トンネル天端が地下水位以上にあるものを対象とする。
 3) この表は、幅5mについては全断面、幅10mについては上部半断面の施工例から推定したものである。



トンネルの崩壊高さ (S44-50年調査)

(2) 施工時

施工時は、地形・地盤条件および施工ステップを考慮した逐次有限要素解析により構造設計を行う。

3. 2. 2 構造仕様

覆工構造、内部支保工および側壁補強ロックボルトの構造の一例を下記に示す。標準的なトンネル断面、地盤条件、荷重条件、覆工物性値を設定して、構造検討を行った結果である。実際の工事に当たっては、現地の諸条件に則り本検討を参考に各構造仕様を設計する必要がある。

以下に、覆工巻厚 500 mm の 2 車線道路トンネルを対象に肩部より上部の更新を行う場合を想定した試算結果の構造仕様を示す。周辺地山は地山等級 DI を想定し、緩み高さは $1D=9.2\text{m}$ 、側方土圧係数 0.0 とした場合の検討結果である。完成時の構造検討は骨組構造解析、施工時の構造検討は有限要素法解析を用いている。巻末の参考資料 1. 構造計算例に完成時、施工時それぞれの具体的な検討内容を記す。

(1) 鉄筋コンクリート覆工

図-3.2.1 に示した鉄筋コンクリート覆工の仕様は図-3.2.2 の通りである。

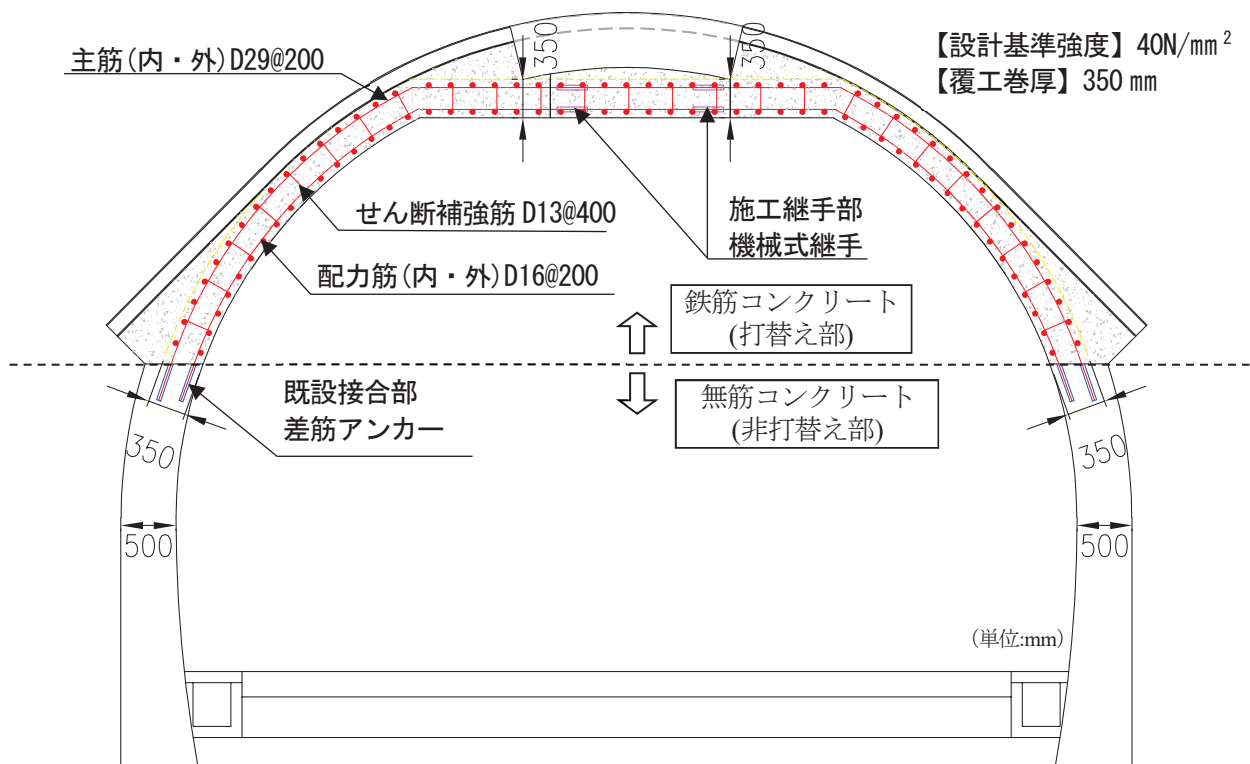


図-3.2.2 更新後の覆工構造の例

(2) 内部支保工

図-3.2.1 に示した内部支保工の仕様は「H-400×400×13×21@3m」である。

(3) 側壁補強ロックボルト

図-3.2.1 に示した側壁補強ロックボルトの仕様は「長さ 4m、径 D25、材質 SD345、延長方向 3m 間隔」である。

参考文献

- 1) 2016 年制定 トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説、土木学会、平成 28 年 8 月 20 日

4. 施工方法

4.1 施工フロー

本工法の施工フローを図4.1.1 に示す。

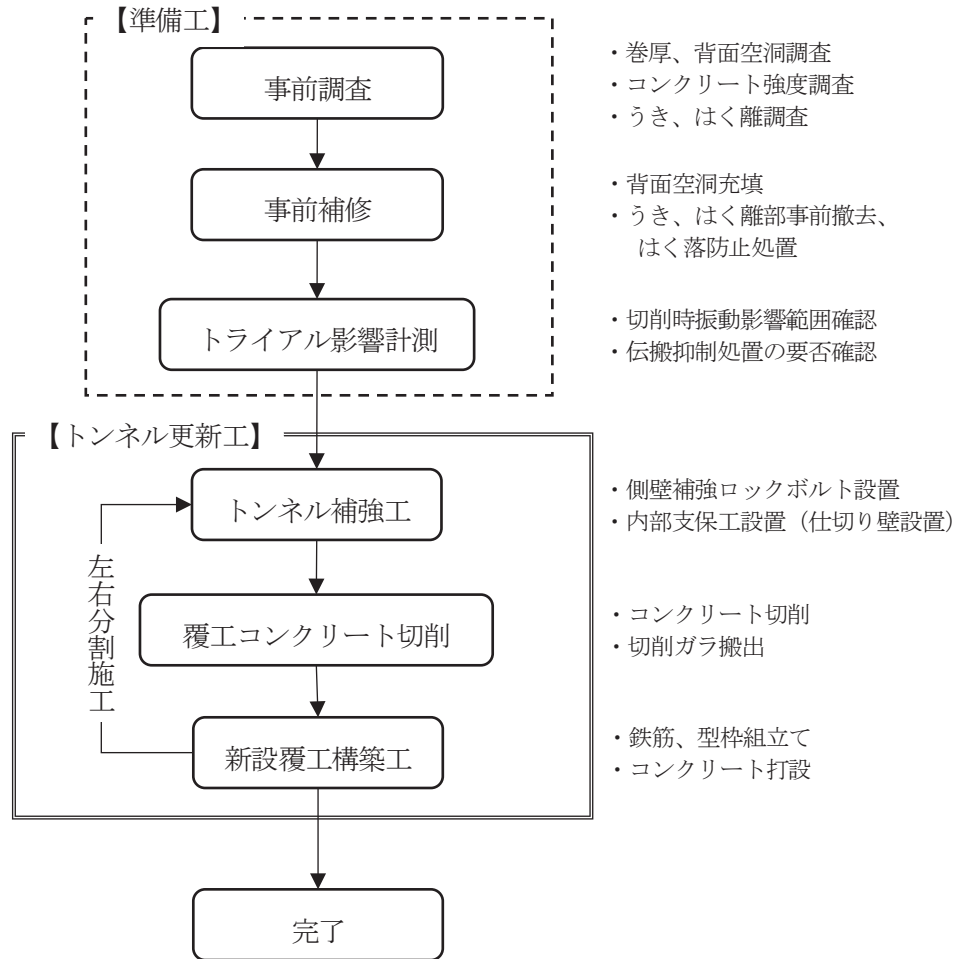


図4.1.1 施工フロー

4. 2 施工手順

4. 2. 1 準備工

(1) 事前調査

本工法では、側壁補強ロックボルトおよび内部支保工で、既設覆工コンクリート切削時のトンネル安定性を確保し、既設覆工に新設覆工を接続して、施工段階のアーチ構造を維持しながら外荷重を支持する。そのため、既設覆工コンクリートの巻厚や強度が不足すると構造安定性を維持できない可能性がある。また、施工中はトンネル内を一般車両が通過するため、軽微な振動ではく落するよううき・はく離がないか事前に確認する必要がある。このため、道路トンネル定期点検要領（国土交通省 道路局）に準じた点検および覆工巻厚等の調査を実施し、更新工事に影響する変状の有無を確認する。主要な点検項目を下記に示す。

①覆工巻厚、背面空洞調査

建設年代の古いトンネルの覆工コンクリートは、吹上げ打設で施工されるため、特に天端部で背面空洞や巻厚不足が発生している場合が多い。そのため、天端部を中心として、コアボーリングや電磁波レーダー探査等により、巻厚・背面空洞調査を事前に実施する。

②コンクリート強度確認

更新対象となる老朽化したトンネルは、施工時の品質管理記録も十分に残っていない場合が多く、配合・設計強度が不明な場合も想定される。そのため、既設覆工コンクリートの強度をコア採取による圧縮強度試験や非破壊強度推定試験等により確認して、完成時構造および施工時構造の設計に反映する。

③うき・はく離調査

既設覆工コンクリートの切削作業では、有意な振動（2kine 以上）を発生させない施工方法を計画することが前提であるが、うき・はく離が既に存在していると、軽微な振動でも一般車両通行帯上でコンクリートがはく落する危険がある。老朽化トンネルでは、ひび割れの進展や覆工目地部の施工不良に伴うはく落などが懸念されることから近接目視・打音検査や赤外線調査などの事前調査を行う。

④漏水調査

覆工表面等に漏水箇所や漏水の跡がある場合は、ひび割れや施工不良（充填不良・豆板等）があり、そこから水が流れ出ている場合が多い。近接目視による漏水調査を実施し、漏水もしくは漏水の跡が見られる場合は、付近の覆工コンクリートについて、背面空洞およびうき・はく離の調査を重点的に実施する。

⑤外力による変状有無の確認

外力による変状が確認された場合には、変状の原因を究明して、工法の適用性を検証する。覆工目地部の段差や側壁部水平方向のひび割れなど、外力による明らかな変状が確認された場合には、他工法の適用を検討する必要がある。

(2) 事前補修

①背面空洞充填

事前調査で、覆工背面空洞が確認された場合は、事前に背面を充填する。覆工コンクリートの巻厚が不足する場合には、覆工コンクリートと同等以上の強度のモルタル材料を充填する。ただし、充填モルタルと既設覆工コンクリートの完全な一体化は困難であることから、既設覆工の巻厚の不足状況から内部補強の可否を別途検討する。

②うき・はく離の撤去等

事前調査で、うき・はく離が確認された箇所については、はく落の恐れがあるコンクリート塊を事前に撤去する。撤去範囲が大きく、覆工構造耐力に影響を与える場合には、別途補修の可否等を検討する。ひび割れの集中箇所など、はく落の危険性が高い部分には限定的にはく落防止シートなどの設置を検討する。

(3) トライアル影響計測

施工に先立ち更新対象トンネルの一部において、覆工コンクリートの切削を行い、振動の伝搬状況を確認する。実際のトンネルは、周囲を地山に拘束されているものの、矢板や防水シートで地山と縁切りされ、完全には拘束されていない状態が想定される。回転ドラムカッターERC650（表-4.4.2 参照）相当を使用する場合、離隔によっては 2kin 以上の有意な振動の発生も懸念される（参考資料2．覆工コンクリート切削試験結果）ため、実際に更新工事を行うトンネルの代表区間を使用して、事前に切削振動計測試験を行うことが有効である。トンネル壁面に振動計を設置して、切削位置との離隔と発生振動の関係を把握する。試験結果から、有意な振動が計測された場合には、測定結果から低減策（小型機械の適用、スリットの設置等）の可否、一般車両通行帯側のはく落防護措置の設置範囲等について検討を行う（図-4.2.1）。

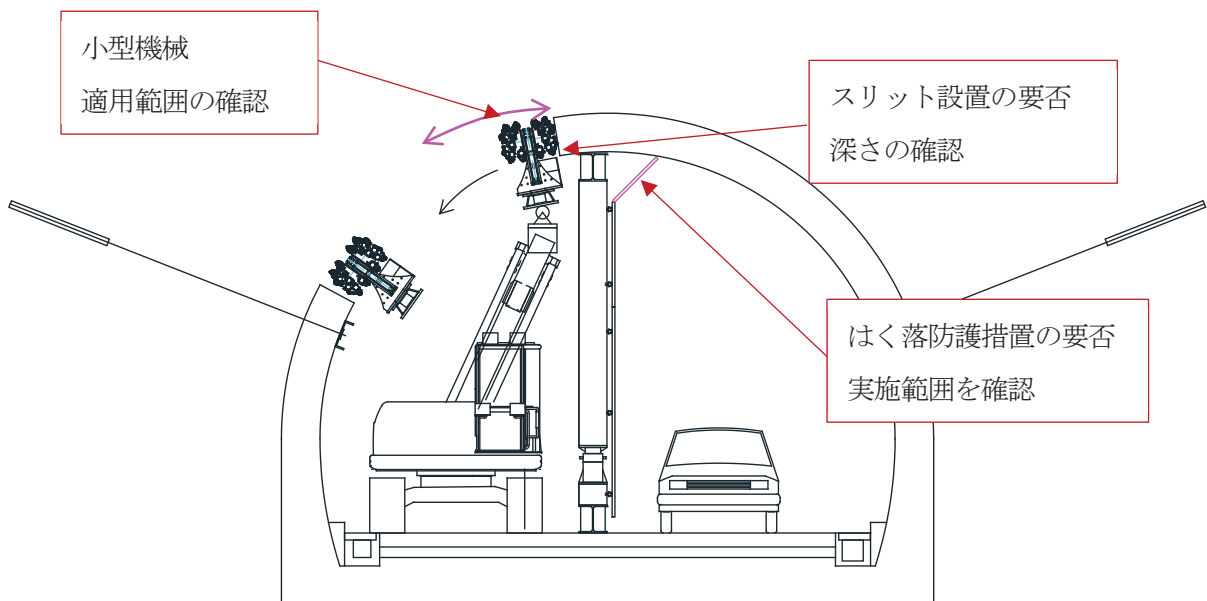


図-4.2.1 振動影響計測後の処置実施案

4. 2. 2 トンネル更新工

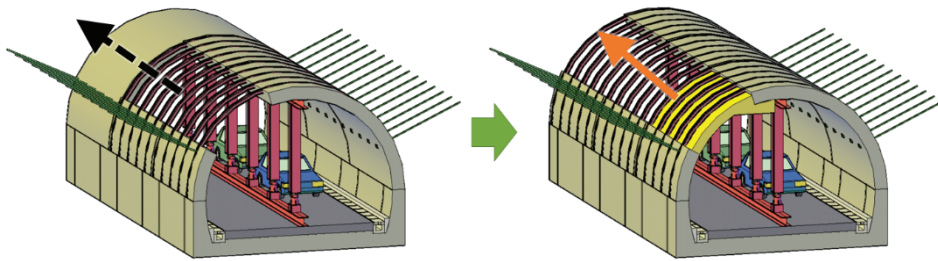
(1) 全体施工手順

既設覆工コンクリートの切削から新設コンクリート打設までの工程については、地山の安定状況によって、片押し施工と分割施工の2種類の施工ステップを選択する(図4.2.2)。片押し施工は、通常のトンネル掘削と同様に、既設コンクリートの切削を片側から連続的に施工し、新設覆工コンクリートの構築をその後方から追従する施工手順である。分割施工は、覆工コンクリートの切削を部分的に施工し、撤去部の新設覆工コンクリートの構築が完了してから、その間の覆工コンクリートを切削・新設するものである。既設覆工コンクリート側壁部およびアーチ部の施工ブロックを確認し、適切な分割を検討する。

【片押し施工】

①既設覆工切削

②新設覆工コンクリート構築



【分割施工】

①アーチブロック境界部切削

②撤去部構築～境界部切削

③境界部構築～ブロック中央切削

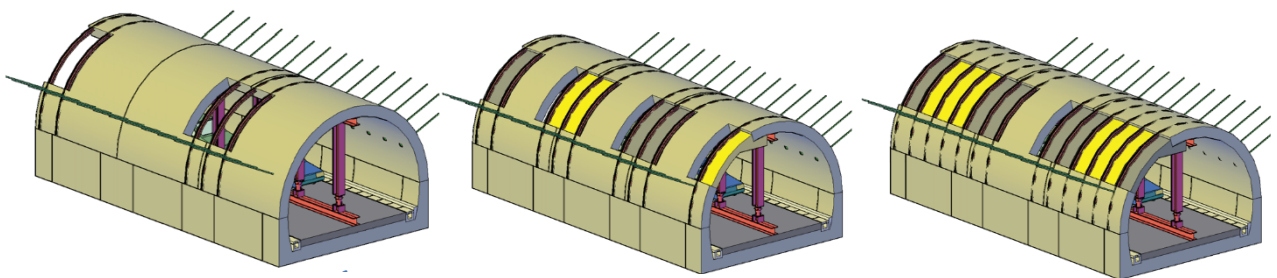
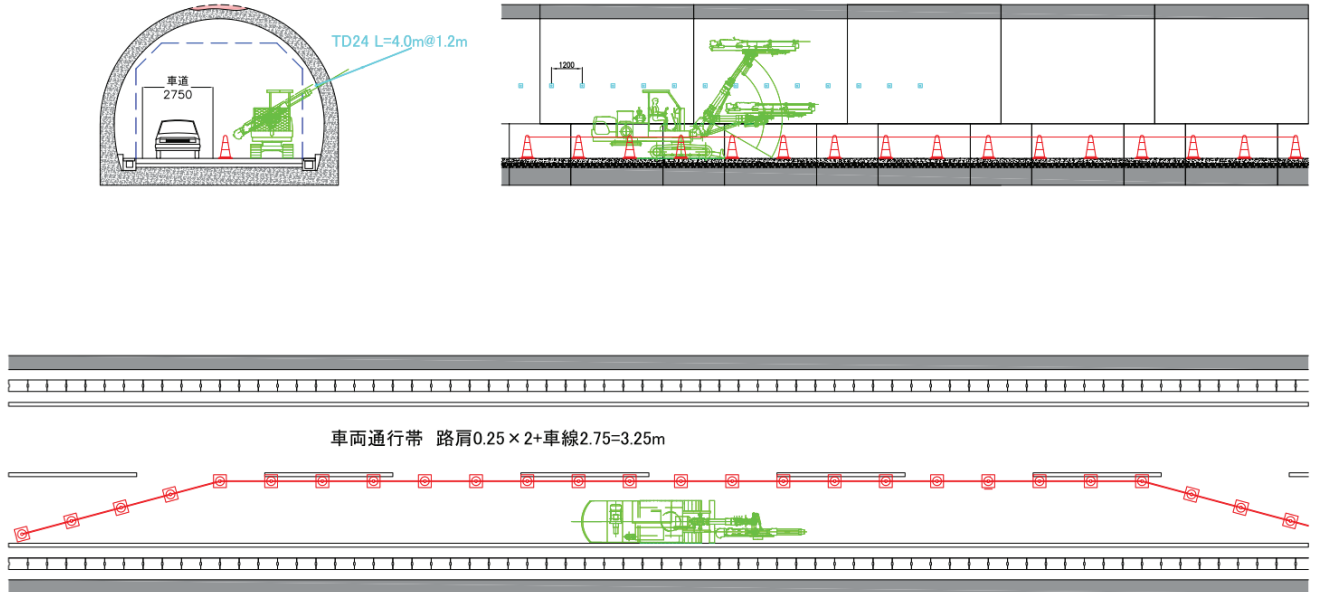


図4.2.2 片押し施工と分割施工

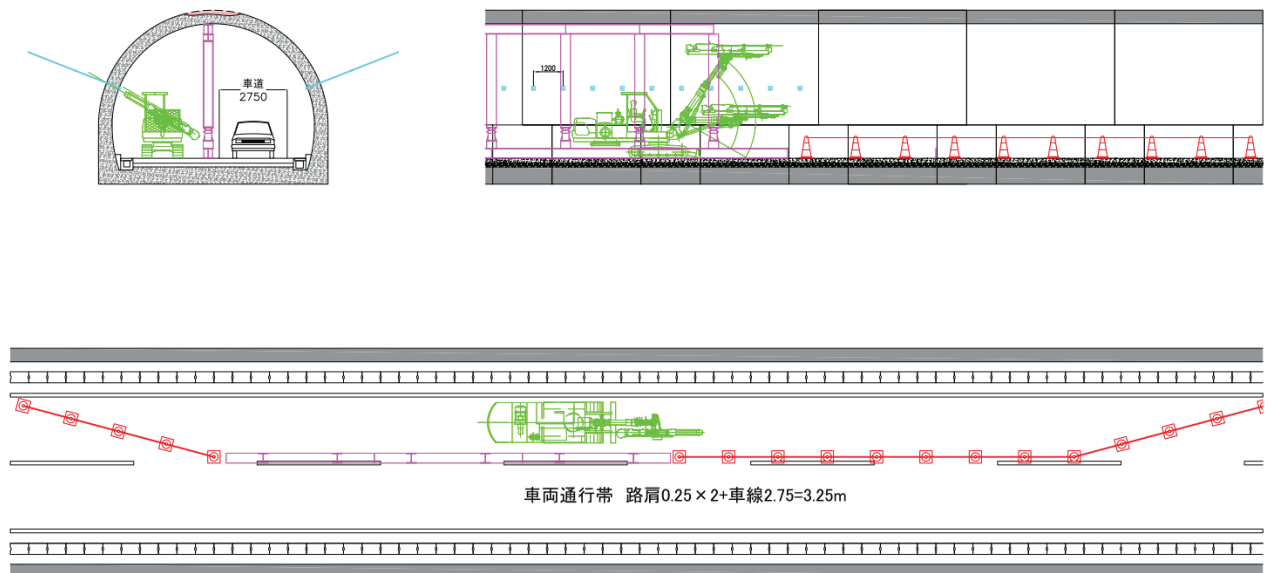
(2) 施工ステップ

更新工の施工ステップ(例)を次頁以降に示す。分割施工で実施した場合を示している。

STEP 1 側壁補強ロックボルト打設（後行施工側から先行施工）

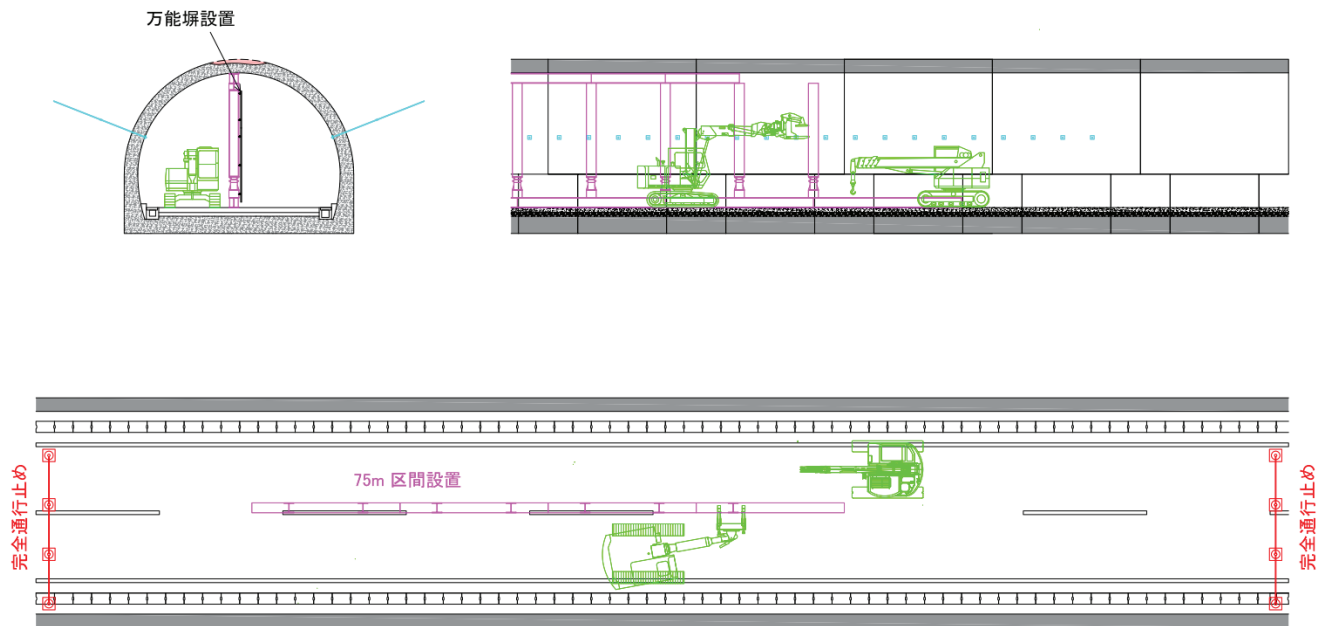


STEP 2 先行施工側 側壁補強ロックボルト打設～内部支保工設置



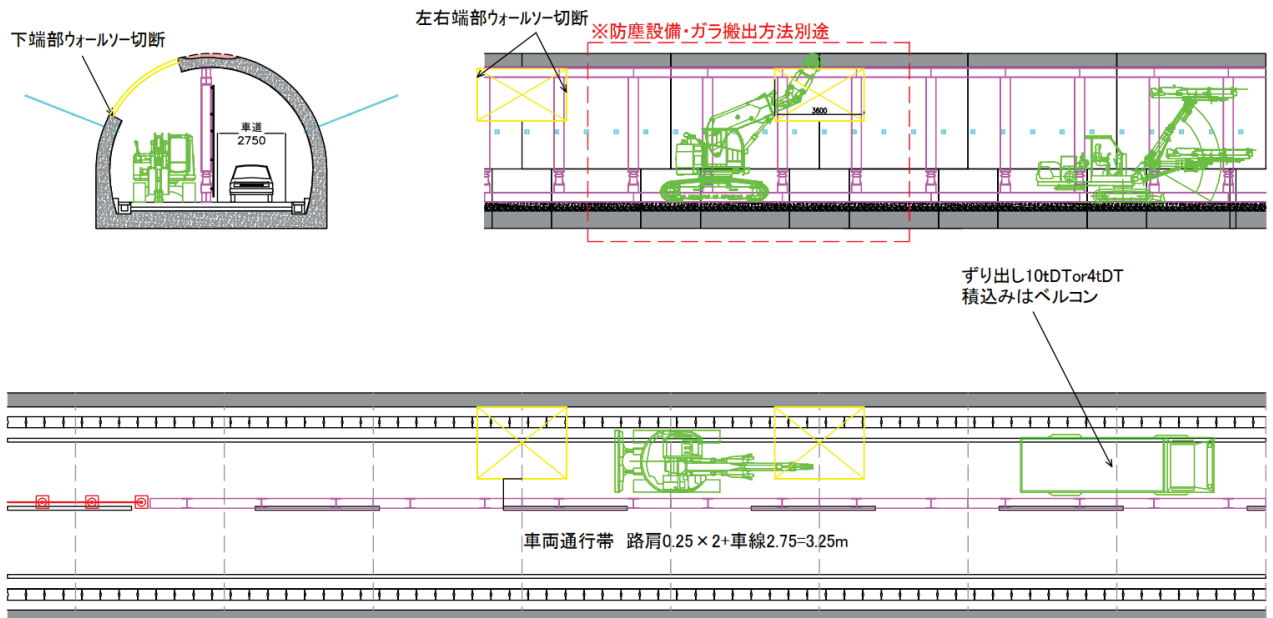
※内部支保工の設置が片側車線内で施工できない場合は、側壁補強ロックボルト打設のみ施工して STEP2'（次頁）

STEP 2' 先行施工側 内部支保工設置

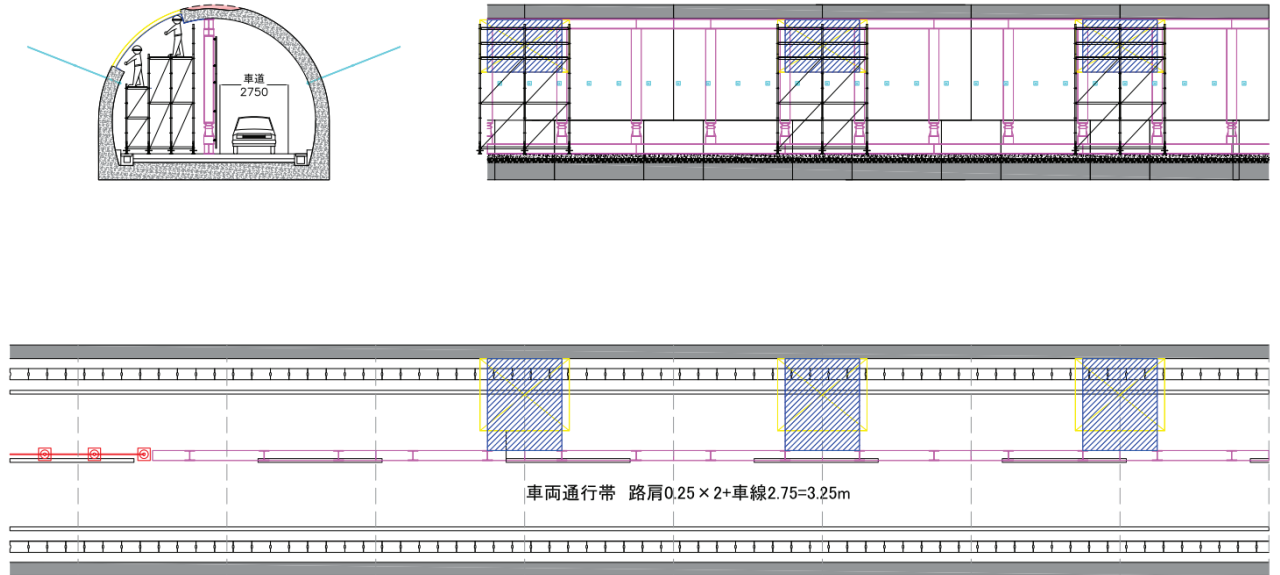


※緊急車両の通行が必要な際、内部支保工設置機械を先行施工側車線へ退避させて通行路を確保する。

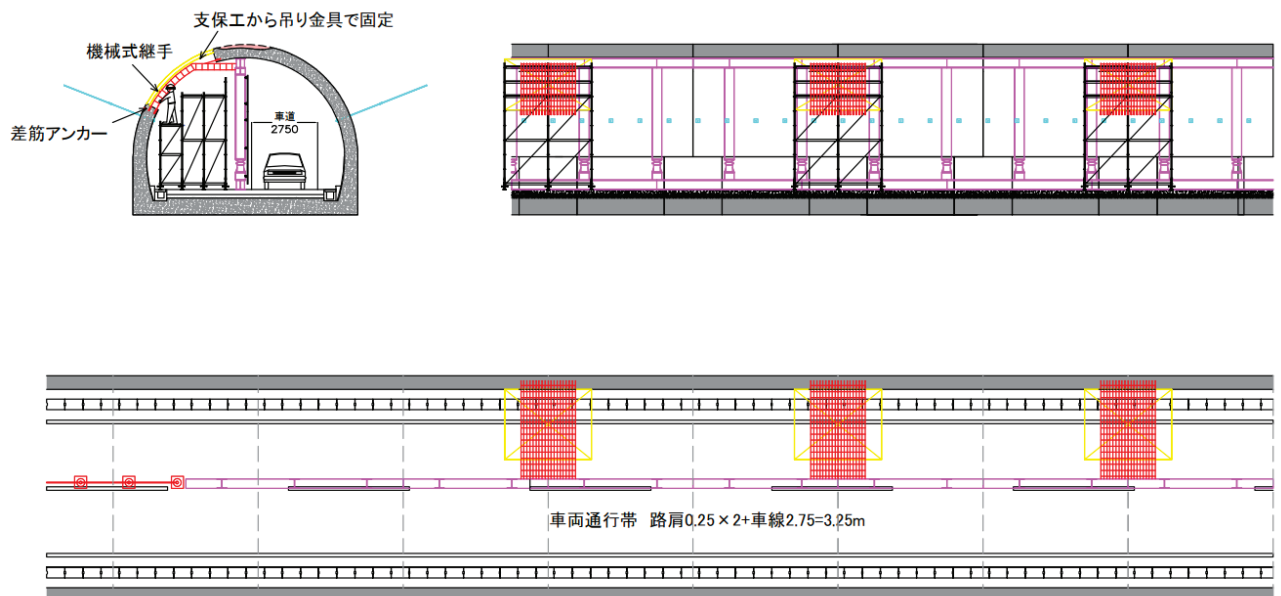
STEP 3 既設覆工施工ブロック境界部① 既設覆工コンクリート切削~モルタル吹付け



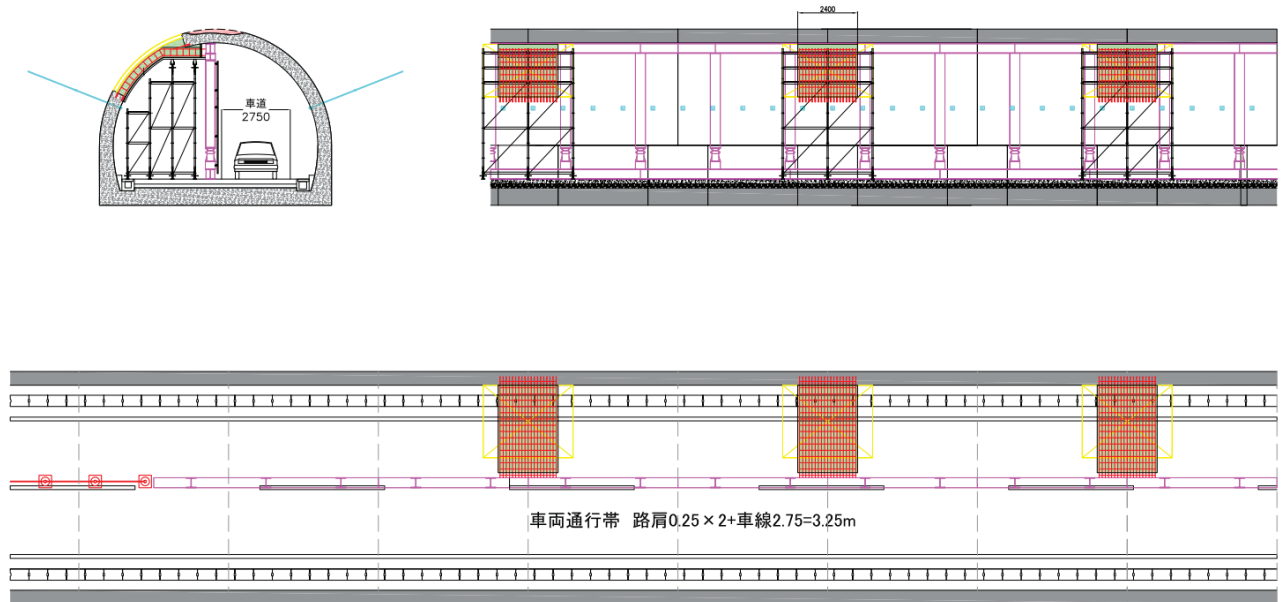
STEP 4 既設覆工施工ブロック境界部① 足場組立て～防水材設置



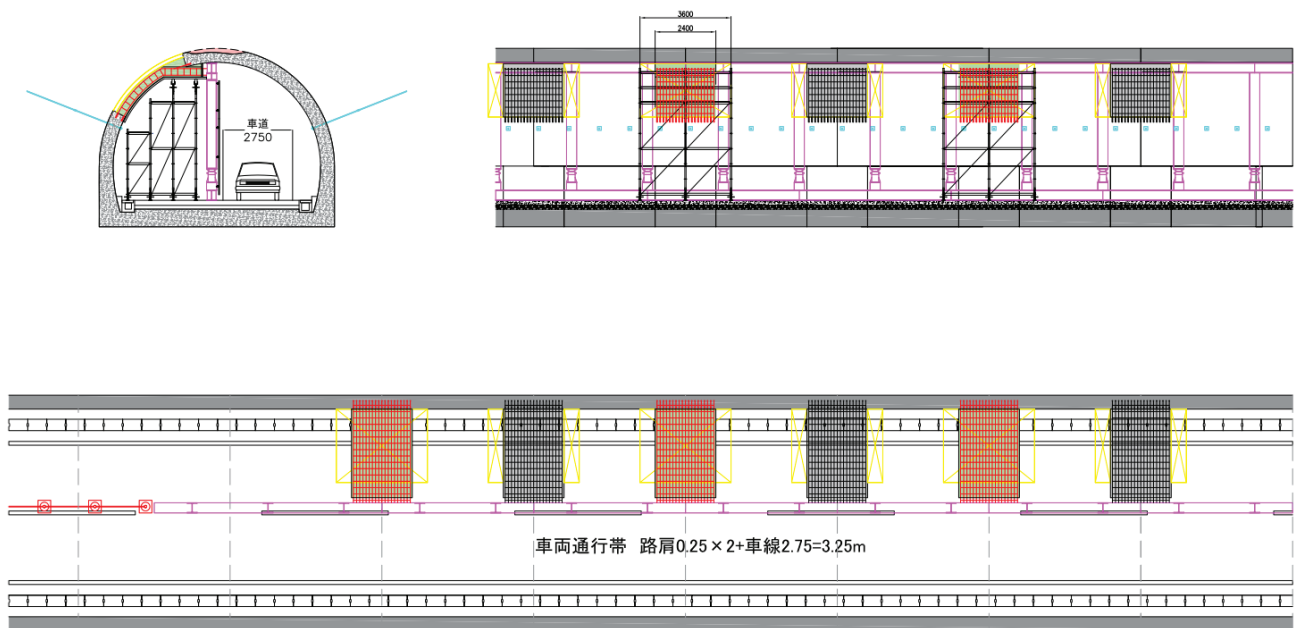
STEP 5 既設覆工施工ブロック境界部① 鉄筋組立て



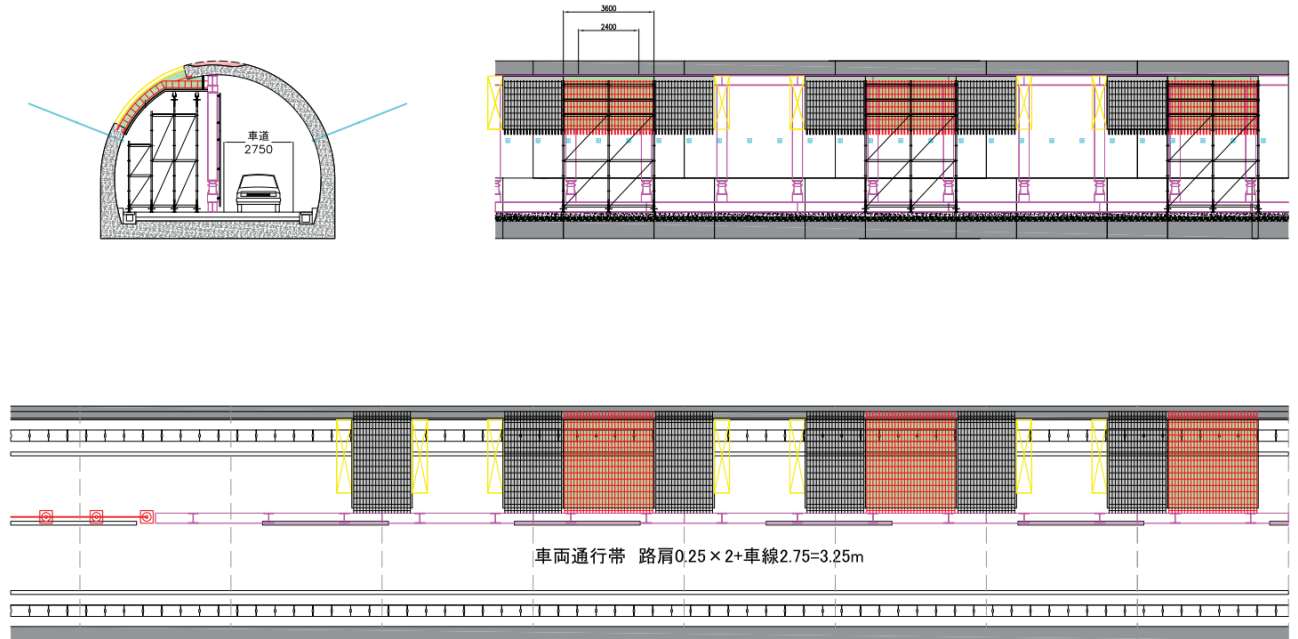
STEP 6 既設覆工施工ブロック境界部① 新設覆工コンクリート打設



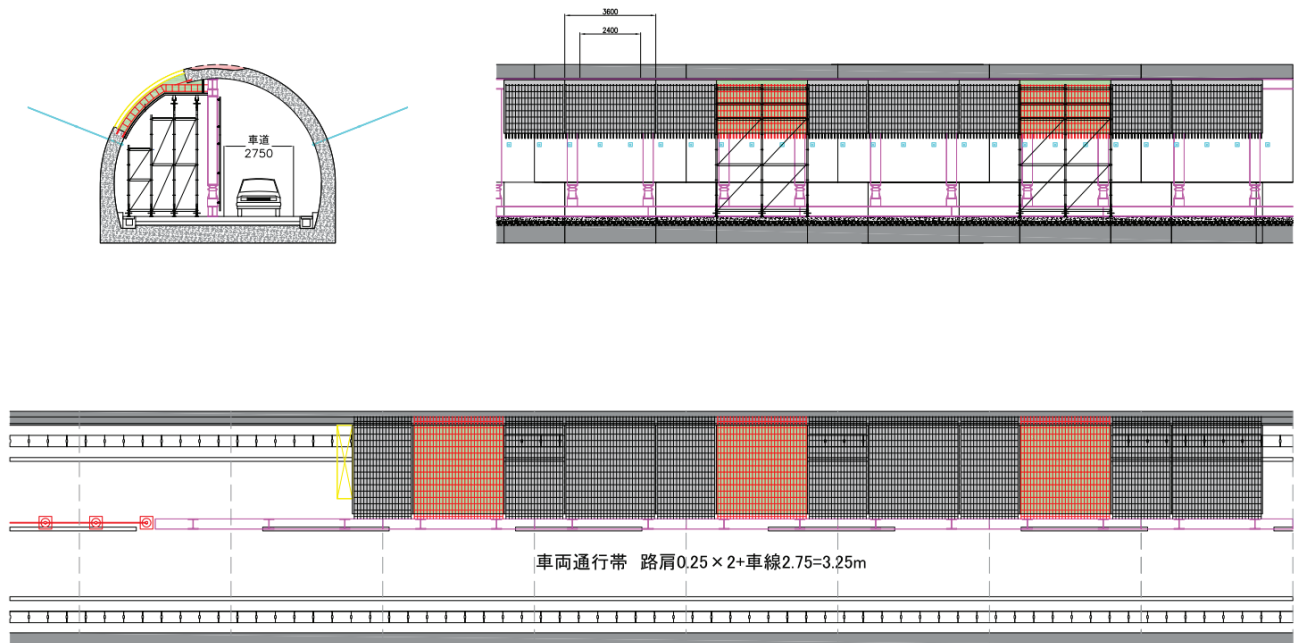
STEP 7 既設覆工施工ブロック境界部② STEP 3～6 繰返し



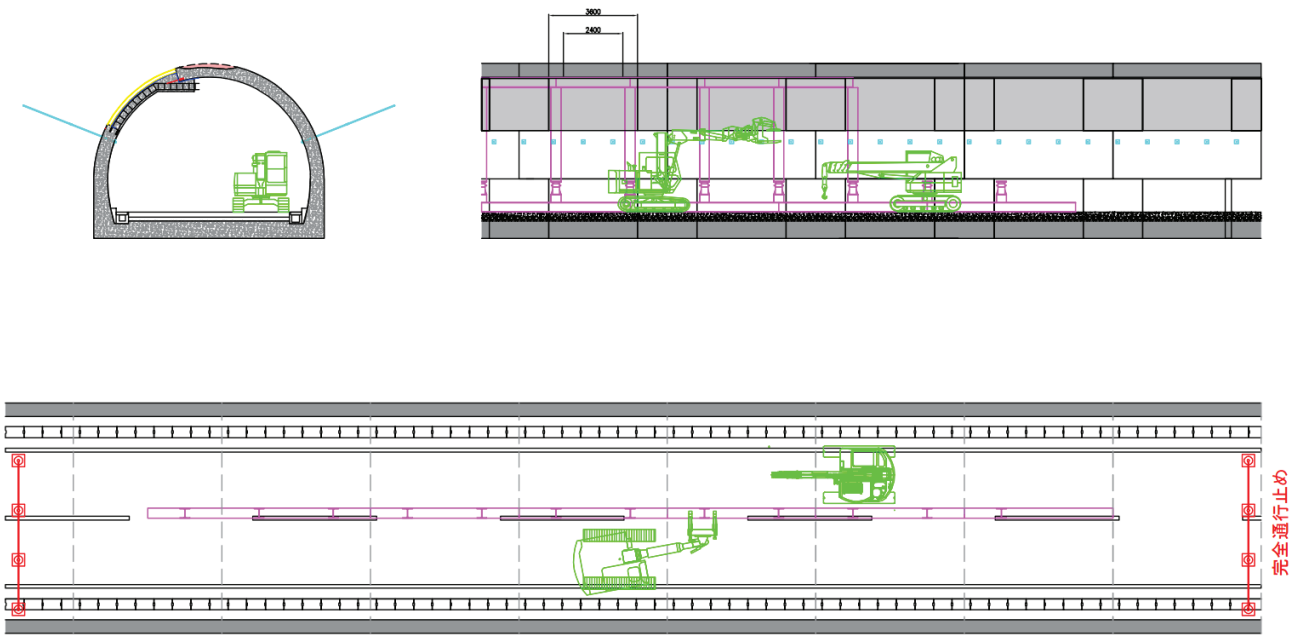
STEP 8 既設覆工施工ブロック中央部① STEP 3～6 繰返し



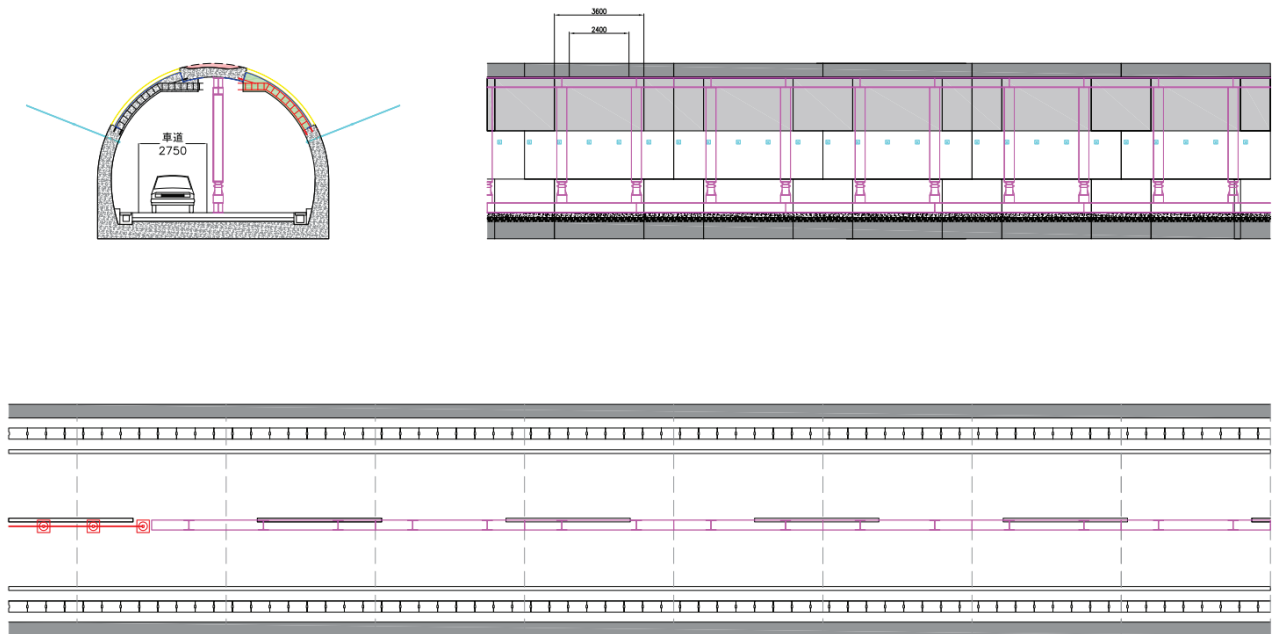
STEP 9 既設覆工施工ブロック中央部② STEP 3～6 繰返し



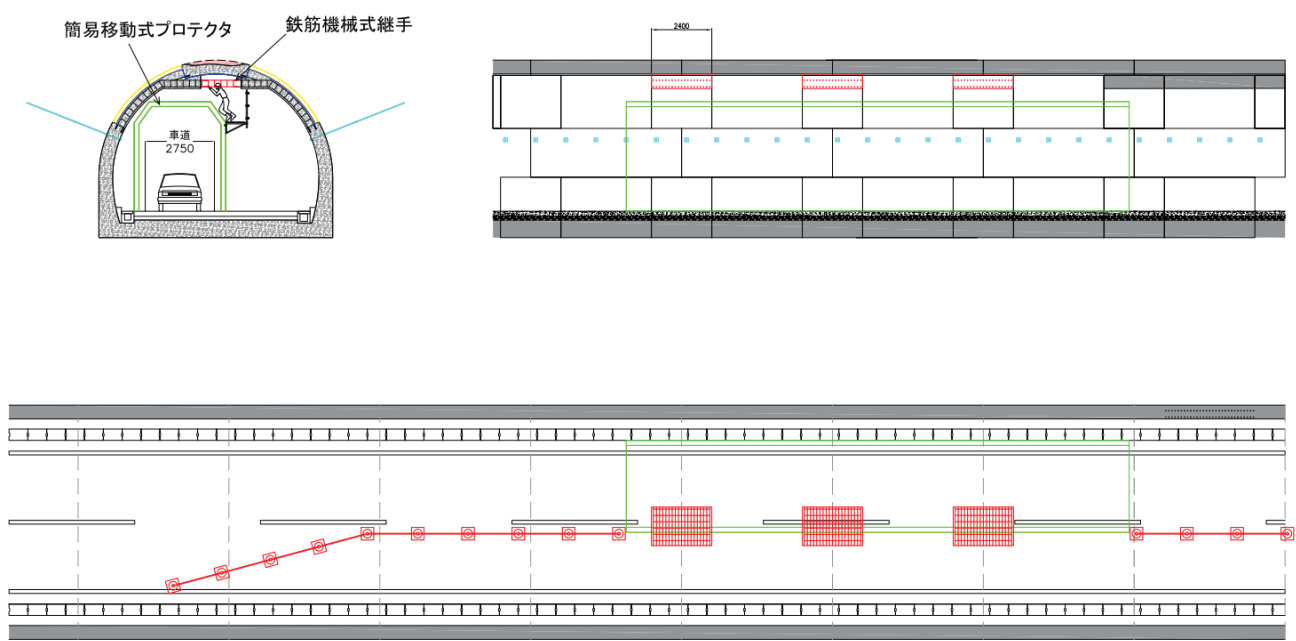
STEP10 内部支保工撤去



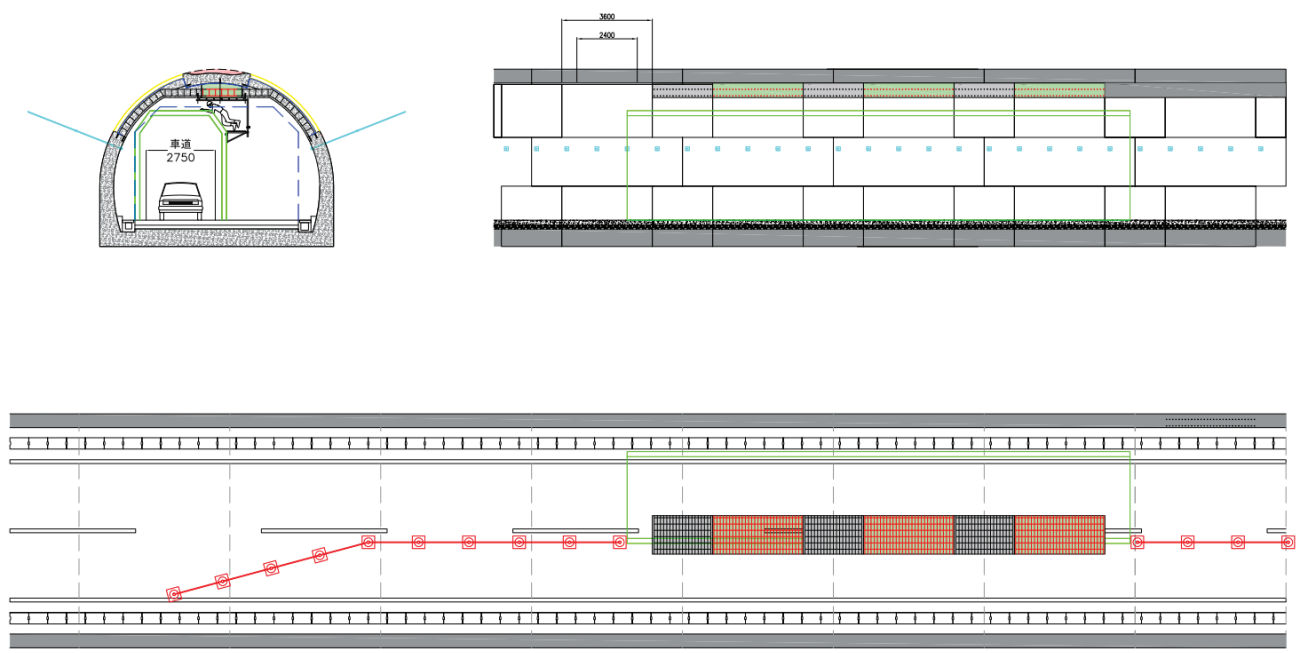
STEP11 後行施工側 STEP 2'~10 繰返し



STEP12 既設覆工施工ブロック境界部①② 覆工中央接続箇所 構築



STEP13 既設覆工施工ブロック中央部①② 覆工中央接続箇所 構築



(3) 側壁補強ロックボルト工

側壁コンクリートを残置して、アーチ部のみを更新する場合、アーチコンクリート切削時に側壁コンクリートが側圧を単独で支持する構造となるため、必要に応じて補強ロックボルトを打設する。側圧の発生状況を事前に把握することは困難なことから、施工初期段階は補強ロックボルトに軸力計を設置し、切削時の発生軸力を計測しながら施工することで、トンネル安定性およびロックボルト設置間隔の妥当性を確認する。なお、側壁補強ロックボルトの施工は、片押しで施工することが可能である。施工延長が長い場合には、複数個所で施工することで工程を短縮する。

(4) 内部支保工設置工

切削時のトンネル構造安定性を確保するため、トンネル中央部に内部支保工を設置する。設置する柱部材は、山留材 H-400×400×13×21 を想定している。脚部および天端部にはトンネル軸方向に敷桁・受桁を設置して、必要な間隔（3m を想定）で柱材を設置する。脚部の敷桁は不陸に馴染むようにモルタル等で路面に確実に接地させる。路面の地耐力を事前に確認し、接地圧に耐えられないと判断される場合には舗装の打替えや、補強等を検討する必要がある。天端部については、アーチ部覆工コンクリートと受桁がなじむように柱材に設置したジャッキ等で高さを調整するとともに、敷桁同様にモルタル等で覆工コンクリートに密着させる。

内部支保工の設置作業は、ハンドリングマシンおよび 4.9t クローラクレーンを用いた施工を想定しているが、片側車線での施工が空間的もしくは安全面から不可能と判断される場合は、夜間に通行止めを行って施工する。通行止め作業中においては、重機の移動のみで緊急車両の通行路を確保できるように、資機材等の配置に留意する。なお、前頁までに示した施工ステップ(例)では、片側更新完了後、STEP10 で内部支保工を一時撤去する工程を想定しているが、内部支保工両側に一般車両通行帯幅員・作業帯幅員を確保できる場合は、撤去の工程は必ずしも必要ではない。

(5) 既設覆工コンクリート切削工

内部支保工の設置完了後、既設覆工コンクリートを片押しもしくは、分割施工で切削する。2車線道路トンネル断面で用いる切削機械は、0.45m³ 級バックホウをベースマシンとして、回転ドラムカッターERC650（表-4.4.2 参照）相当を使用した施工を想定する。ベースマシンには、ドラムカッター専用の油圧ポンプを別途搭載することが施工速度向上・回転の安定化を図る上で有効である。切削に先立って、残置する既設覆工コンクリートとの境界部は、事前にワイヤーソー等により 50mm 程度のスリットを設置し、既設覆工コンクリートと新設覆工コンクリートの接続面を平滑にすることが望ましい。振動影響が懸念される場合は、低減効果が得られる深さまで切断する。

切削時の機械配置（案）を図-4.2.5 に示す。作業帯は切削機械 1 台の設置で離合不可能となることから、切削機械の前方に切削ずりの搬出設備を設置する。切削ずりの積込は、油圧ショベル等による施工も可能であるが、狭隘空間での旋回を考慮すると小型機械に限定されてしまう。そこで、切削区間直下に設置したずり積込ホッパーで切削ガラを直接受け、ベルトコンベアでさらに前方へ運搬してダンプトラックに直接積込を行うことが有効である。ダンプトラックは、切削区間の前方方向に走行して、ガラを搬出する。また、切削機械の後方では、切削した覆工背面の地

山を支保するために、既設鋼アーチ支保工の再利用とコンクリート吹付けによる一次覆工を行う。鋼アーチ支保工周辺および施工端部の覆工コンクリートを切削機械後方で手研りにより撤去し、吹付けコンクリートは、さらに後方より搬入してコンクリートポンプにより吹付け機械まで圧送する。なお、切削および吹付け時には粉塵が発生することから、換気・集塵設備が必要となる。そのため、施工両端には隔壁を設置することを想定している。隔壁は進行に合わせて移動する必要がある、バルーン式で車両・重機通行部をカーテンで閉塞するものが有効である。後方の隔壁には施工区間内に給気するための送風機を設置し、切削機械前方には集塵機を配置することで換気を行う。その際、集塵機の排気量を送風機の給気量よりも多くすることで、作業帯側部の仕切り壁から一般車両通行帯側への粉塵飛散を防止する。事前に試験を行って、適切な排気量・給気量および仕切り壁の間詰を確認する必要がある。また、切削機械には散水装置を取り付け、発生粉塵量の低減を図ることが望ましい。

(6) 新設覆工構築工

既設覆工コンクリート切削完了後、新設覆工コンクリートの構築を行う。まず、更新範囲にアーチ状の防水層を構築する(図-4.2.3)。既設覆工コンクリート撤去部分は、吹付けコンクリート面に、天端部は既設覆工コンクリート内面に吹付け塗膜防水等を行う。脚部既設覆工コンクリートとの接合部は、所定の定着長を確保する。左右分割施工に伴う防水接続部分は、必要なラップ長を確保する。漏水が多い場合は、裏面排水材で導水し、脚部の既設覆工コンクリート接続部から覆工内面へ排水するなどの処理が必要である。排水方法・流末処理については、道路管理者と協議の上、適切な処理方法を選定する。

防水層の施工完了後、端部に差筋アンカーを打設し、鉄筋の組立てを行う。主筋の継手は、機械式継手等で接続する(図-4.2.4)。

鉄筋組立て完了後、内面に型枠を組み立て、覆工コンクリートを打設する。片押し施工においては、移動式型枠セントルを使用することが有効であるが、分割施工では構築箇所が分散するため、費用及び工程面を考慮して適切な型枠方式を選択する必要がある。

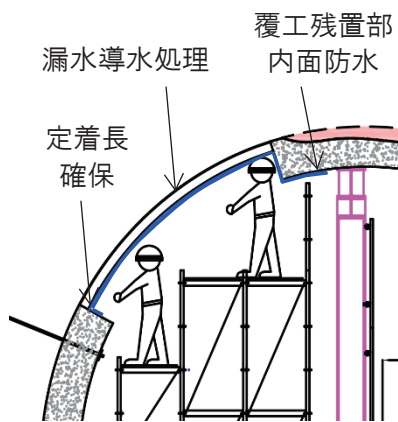


図-4.2.3 防水施工概要

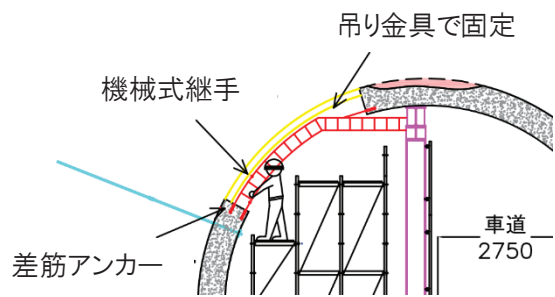


図-4.2.4 鉄筋工施工概要

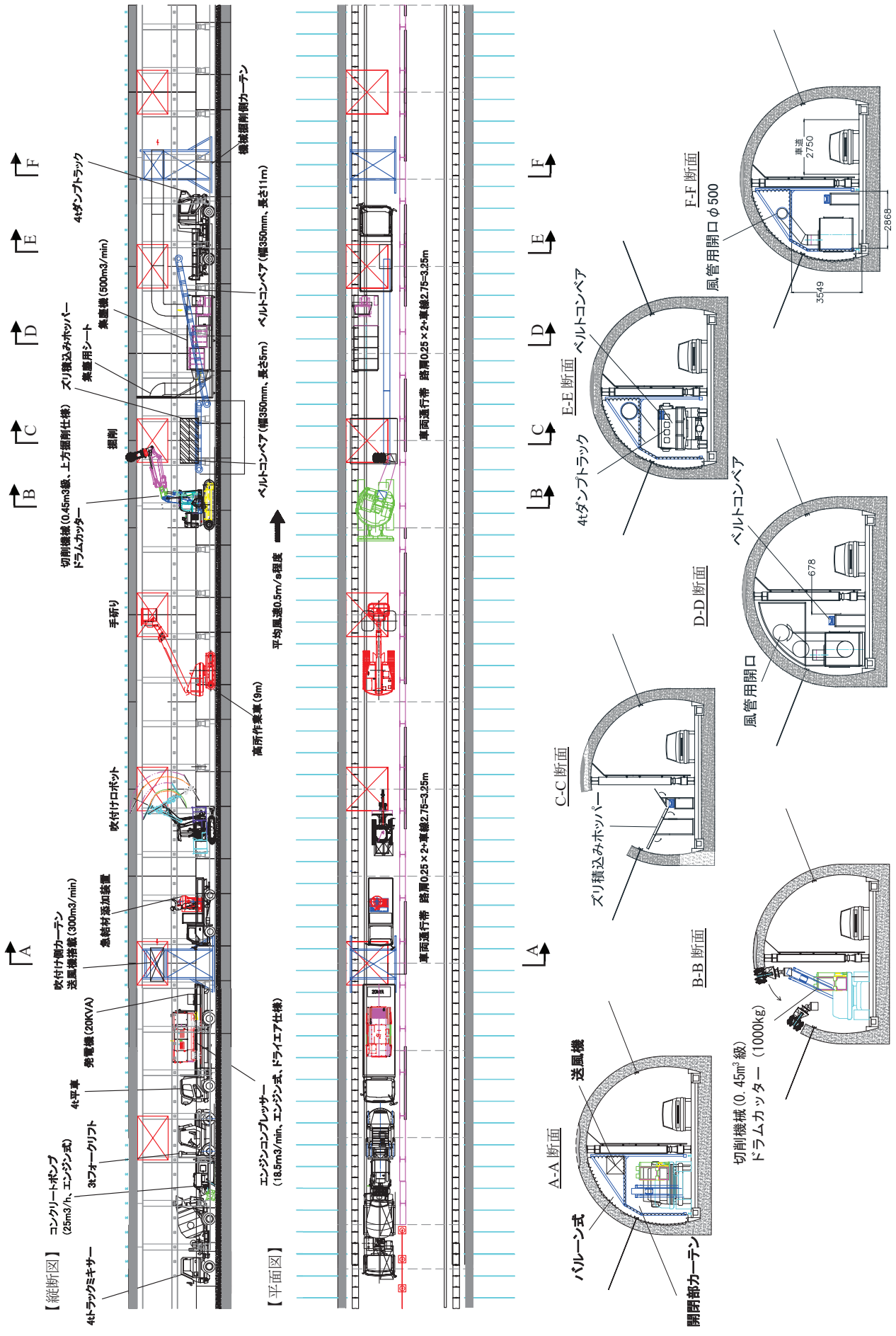


図-4.2.5 切削時設備配置計画 (案)

4. 3 通行規制

本工法で施工ステップ毎に想定される交通規制を表-4.3.1 に示す。トンネル更新工で記載している規制期間は、参考資料3. 概算工程の検討ケース①で想定している値を記載している。

表-4.3.1 交通規制内容の例

作業工程		交通規制	時間帯	緊急車両	期間 (参考)	備考
準備工	事前調査	一車線規制	夜間	通行可	—	
	事前補修	一車線規制	夜間	通行可	—	
	トライアル影響計測	通行止*	昼間* ¹	通行可	2日	夜間も可
トンネル更新工	側壁補強ロックボルト工	一車線規制	夜間	通行可	6日	
	内部支保工設置・撤去工	通行止	夜間	通行可	32日	
		一車線規制	昼夜間	通行可	13カ 月	一車線固定占用
	既設覆工コンクリート切削工	一車線規制	昼夜間	通行可		一車線固定占用
	新築覆工構築工(左右)	一車線規制	昼夜間	通行可		一車線固定占用
	簡易プロテクタ設置・撤去	通行止	夜間	通行不可* ²	2日	
新築覆工構築工(中央部)	一車線規制	昼夜間	通行可	4か月	一車線固定占用	

*1 トライアル影響計測は、一般車両通行帯側の既設コンクリートへの振動伝搬を確認するため、通行止めでの実施を基本とする。振動・騒音影響を考慮する必要がない場所での施工の場合は、夜間施工でも支障はない。

*2 簡易プロテクタは、坑外組立て～重量運搬車両による移動（撤去時は、移動～坑内解体）を行う場合、移動時のみ緊急車両の通行が一時的に不可（トンネル断面によっては可能）。一時的な通行止めも実施困難な場合は、プロテクタに自走性を持たせることで対応が必要。

4. 4 主要使用機械

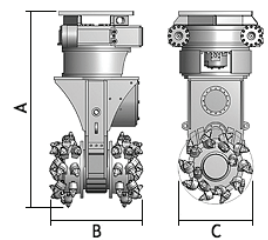
本工法で使用する標準機械を表-4.4.1 に示す。切削で用いるアタッチメントの仕様（例）を表-4.4.2 に示す。

表-4.4.1 標準使用機械一覧表

名称		仕様・規格	単位	数量	備考
切削機械	ドラムカッター	ベースマシン 0.45m ³ 級	台	1	2 ポンプ
		80kW	台	1	回転機能付
ガラ搬出	ズリ積込ホッパー		台	1	
	ベルトコンベア	幅 350 mm	式	1	
	ダンプトラック	4t	台	n	
吹付け	吹付けロボット		台	1	
	急結材添加装置		台	1	
	コンクリートポンプ	25m ³ /h	台	1	
	トラックミキサー車	4t	台	n	
	バッチャープラント	1m ³ /バッチ	式	1	
側壁補強	クローラドリル	1 ブーム	台	n	
	注入ポンプ		台	n	
覆工	コンクリートポンプ		台	1	
	簡易プロテクタ		台	n	
その他	高所作業車	9m	台	2	
	集塵機	500m ³ /min	台	1	
	換気ブロア	300m ³ /min	台	1	
	バルーン式隔壁カーテン		台	2	

表-4.4.2 切削アタッチメント（例）

	単位	ERC100	ERC650
推奨掘削重量	t	4-8	15-25
定格電力	kW	30	80
ドラムカッター長さ A	mm	1,120	1,560
標準カッターヘッド幅 B	mm	610	800
標準カッターヘッド直径 C	mm	370	585
推奨回転速度	rpm	110	85
推奨油流量	l/min	40-60	150-190
10bar 時の最大油流量	l/min	90	210
最大動作油圧	bar	400	400
350bar 時のトルク	Nm	2,100-3,150	9,300-14,000
350bar 時の切削力	N	17,800	50,400
重量	kg	490	1,470
ピック数	Pcs	64	44
標準ピック	Type	ER12/45/38/20K	ER17/75/70/30Q



4. 5 施工上の留意点

- ・トンネルの更新工事においては、既設覆工に作用している外荷重の把握が困難である。想定している設計荷重以上の外力が発生している場合は、切削時にトンネルの変形や崩壊の危険も考えられる。切削時は内部支保工を挟んで、一般車両を通過させるため、計測監視が重要となる。内部支保工の軸力を常に監視して、想定以上の応力発生が確認された場合は、ただちに切削作業を中断し、原因究明・施工サイクルの見直しを行う必要がある。
- ・既設覆工コンクリート切削時および新設覆工コンクリート構築時は、粉塵対策用の散水や、コンクリート洗い水等の排水が道路側溝等に流れることが懸念される。そのため、施工区間の排水側溝には施工区間端部でポンプアップして適切に排水を処理する必要がある。
- ・切削機械は、0.45m³ バックホウにドラムカッターを装着しての施工を基本とするが、狭隘空間での粉塵作業となるため、視認性も悪く旋回等により内部支保工との接触が懸念される。切削時の押し付け反力により重機の位置がズレることも想定されるため、施工基面上に重機のずれ止め材を設置し、重機には旋回時の接触防止センサーを設置するなどの対策を行う必要がある。また、オペレータの視認性・換気の観点から、遠隔操作が可能な重機の適用を検討することも必要である。

参考資料

1. 構造計算例

1. 1 完成時の構造安定性

(1) 検討断面

図-1.1.1 に示す2車線道路トンネルを検討断面とする。

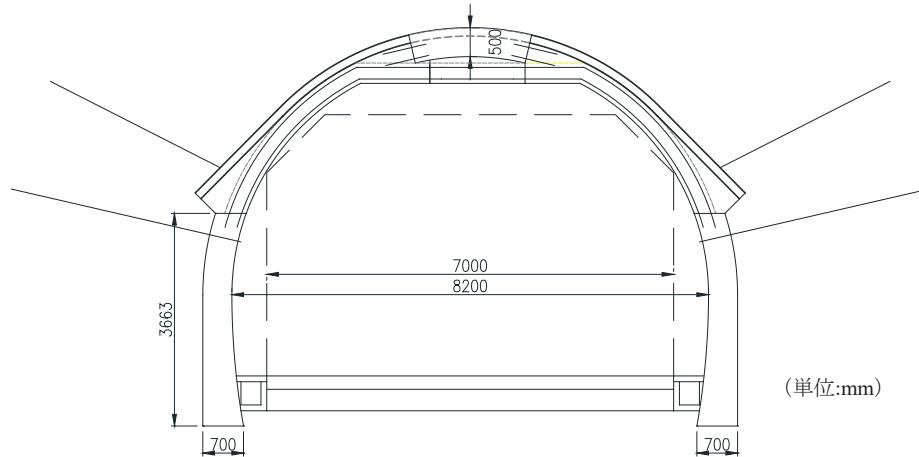


図-1.1.1 検討断面

(2) 解析モデル

- ・打替え部および非打替え部の覆工コンクリートを梁部材でモデル化する。
- ・覆工コンクリートが地山側に変位する場合は、地盤バネが覆工の変位を抑えるモデルとする。
- ・覆工コンクリート下端は水平および鉛直方向変位を拘束し、回転を自由としたピン支持とする。
- ・検討対象は左右対称構造とし、半断面をモデル化する。

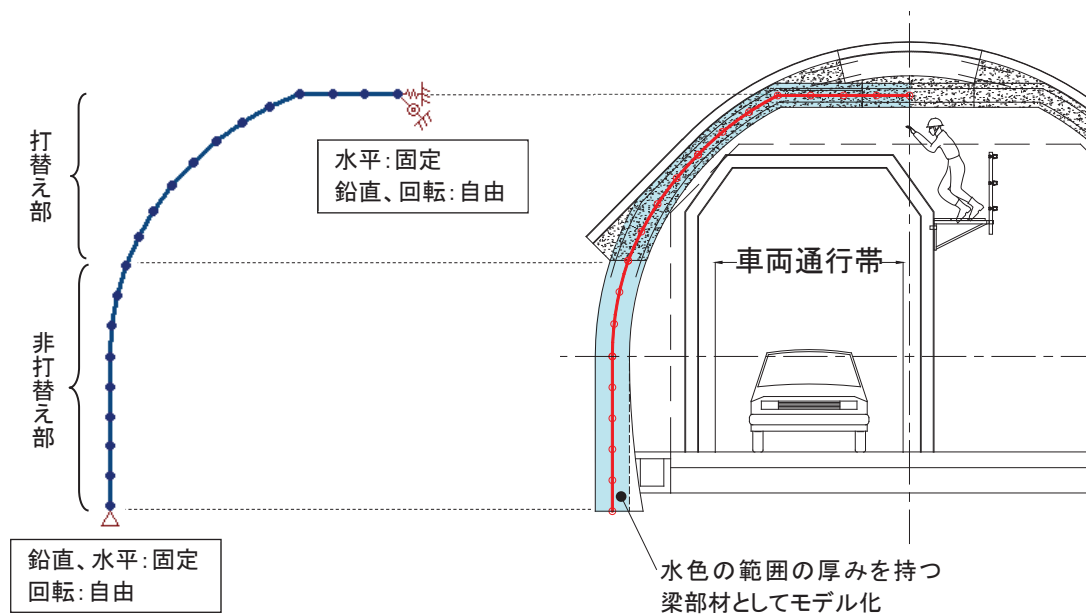


図-1.1.2 解析モデル

(3) 地盤条件

対象地山は地山等級 CII および DI 相当とし、地盤物性値は参考文献の下表から引用した。

①地山変形係数

CII のケース：地山変形係数 $E_o=1,000$ [MN/m²] = 1,000,000 [kN/m²]

DI のケース：地山変形係数 $E_o=500$ [MN/m²] = 500,000 [kN/m²]

②地山の単位体積重量

CII および DI 級地山を想定した場合、厳しい条件となるよう

地山の単位体積重量 $\gamma=23.0$ [kN/m³]

とする。

【参考文献：日本道路公団試験研究所、「技術資料第 358 号トンネル数値解析マニュアル」,平成 10 年 10 月】

断面	地山区分	変形係数	f_{dest}	初期ホ'アソソ比	最終ホ'アソソ比	弾性限界 パラメータ	非線形指数	粘着力	内部摩擦角	引張強度	単位重量
		D	f_{dest}	ν_0	ν_{dest}	k	a	C	ϕ	σ_t	γ_t
		N/mm ²						N/mm ²	deg	N/mm ²	t/m ³
B	G ₂	5,000	0.01	0.25	0.48	6.0	3.0	4.0	50	0.80	25.0
C ₁	G ₃	2,000	0.01	0.30	0.48	6.0	3.0	2.0	45	0.40	24.0
C ₁₁	G ₄	1,000	0.01	0.30	0.48	6.0	3.0	1.0	40	0.20	23.0
D ₁	G ₅	500	0.01	0.35	0.48	4.0	2.0	0.4	35	0.08	22.0
D ₁₁	G ₆	150	0.01	0.35	0.48	4.0	2.0	0.2	30	0.04	21.0

(4) 地盤反力係数の設定

地盤反力係数 K_v の算出には、「道路橋示方書・同解説（下部構造編）」の式を用いる。

$$K_v = \frac{1}{0.3} \cdot \alpha \cdot E_o \cdot \left(\frac{B_v}{0.3}\right)^{\frac{3}{4}}$$

K_v ：地盤反力係数(kN/m³)

α ：試験方法による係数

E_o ：変形係数(kN/m³)

B_v ：換算載荷幅(=10m)

表-1.1.1 E_o と α

次の試験方法による変形係数 E_o (kN/m ²)	α	
	常時	地震時
直径 30 cm の剛体円盤による平板載荷試験の繰返し曲線から求めた変形係数の 1/2	1	2
ボーリング孔内で測定した変形係数	4	8
供試体の一軸または三軸試験から求めた変形係数	4	8
標準貫入試験の N 値より $E_o = 28 N$ で推定した変形係数	1	2

【 地山等級 CII の地盤反力係数 K_v 】

$$\begin{aligned}
 K_v &= \frac{1}{0.3} \cdot \alpha \cdot E_o \cdot \left(\frac{B_v}{0.3}\right)^{\frac{3}{4}} \\
 &= \frac{1}{0.3} \cdot 4 \cdot 1,000,000 \cdot \left(\frac{10.0}{0.3}\right)^{\frac{3}{4}} \\
 &= 961,000
 \end{aligned}$$

以上より、地盤反力係数 $K_v = 961,000 \text{ kN/m}^3$ とする。

【 地山等級 DI の地盤反力係数 K_v 】

$$\begin{aligned}
 K_v &= \frac{1}{0.3} \cdot \alpha \cdot E_o \cdot \left(\frac{B_v}{0.3}\right)^{\frac{3}{4}} \\
 &= \frac{1}{0.3} \cdot 4 \cdot 500,000 \cdot \left(\frac{10.0}{0.3}\right)^{\frac{3}{4}} \\
 &= 481,000
 \end{aligned}$$

以上より、地盤反力係数 $K_v = 481,000 \text{ kN/m}^3$ とする。

(5) 荷重と検討ケースの設定

- ・ 覆工コンクリートに作用する荷重は、覆工コンクリートの自重および土圧とする。
- ・ 土圧は鉛直土圧および水平土圧を分布荷重として載荷する。
- ・ 鉛直土圧 σ_v は緩み土圧とし、緩み高さ $H=3\text{m}$ 、 6m 、 $1D(=9.2\text{m})$ の相当の 3 ケースの荷重について検討する。鉛直土圧は、次式で算出する。

$$\sigma_v = \gamma H$$

水平土圧 σ_h は、側方土圧係数 K_o から、

$$\sigma_h = K_o \cdot \sigma_v$$

とする。

$K_o=0.5$ と $K_o=0.0$ の 2 ケースを検討する。

以上をまとめ、検討ケースと荷重を表-1.1.2 に記す。

表-1.1.2 検討ケースと荷重

地山 等級	側圧 係数 K_o	ケース	緩み高さ (m)	単位体積 重量	鉛直土圧 σ_v	水平土圧 σ_h
			m	kN/m ³	kN/m ²	kN/m ²
C II	0.5	1-1-1	3.0	23.0	69.0	34.5
		1-1-2	6.0	23.0	138.0	69.0
		1-1-3	9.2	23.0	211.6	105.8
	0.0	1-2-1	3.0	23.0	69.0	0.0
		1-2-2	6.0	23.0	138.0	0.0
		1-2-3	9.2	23.0	211.6	0.0
DI	0.5	2-1-1	3.0	23.0	69.0	34.5
		2-1-2	6.0	23.0	138.0	69.0
		2-1-3	9.2	23.0	211.6	105.8
	0.0	2-2-1	3.0	23.0	69.0	0.0
		2-2-2	6.0	23.0	138.0	0.0
		2-2-3	9.2	23.0	211.6	0.0

(6) 覆工物性値の設定

表-1.1.3 覆工物性値

部位	有筋/無筋	設計 基準強度	単位 体積重量	弾性係数
		N/mm ²	kN/m ³	N/mm ²
打替え部	有筋	40	24.5	31,000
非打替え部	無筋	18	23.0	22,000

【 参考文献：土木学会、「コンクリート標準示方書 2017 年制定」 】

解説 表 5.3.1 コンクリートのヤング係数

E_c (kN/mm ²)	f'_{ck} (N/mm ²)	18	24	30	40	50	60	70	80
		普通コンクリート	22	25	28	31	33	35	37
	軽量骨材コンクリート*	13	15	16	19	-	-	-	-

* 骨材を全部軽量骨材とした場合。

解説 表 6.4.1 材料の単位重量

材 料	単位重量 (kN/m ³)	材 料	単位重量 (kN/m ³)
鋼・鋳鋼・鍛鋼	77	コンクリート	22.5~23.0
鋳 鉄	71	セメントモルタル	21.0
アルミニウム	27.5	木 材	8
鉄筋コンクリート	24.0~24.5	瀝 青 材	11
プレストレストコンクリート	24.5	アスファルトコンクリート舗装	22.5

(7) 断面力結果

表-1.1.2 に示した検討ケースの中で最も条件の厳しい「ケース 2-2-3」について、断面力の算出結果を以下に記す。

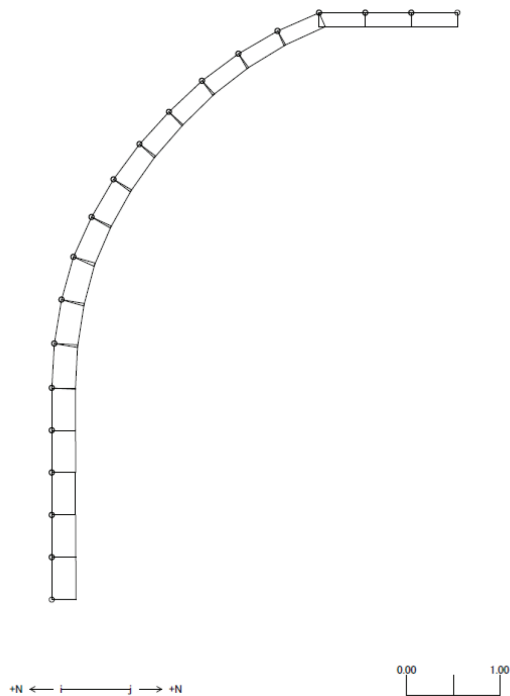
(ケース 2-2-3 : D I、Ko=0.0)

緩み土圧9.2m

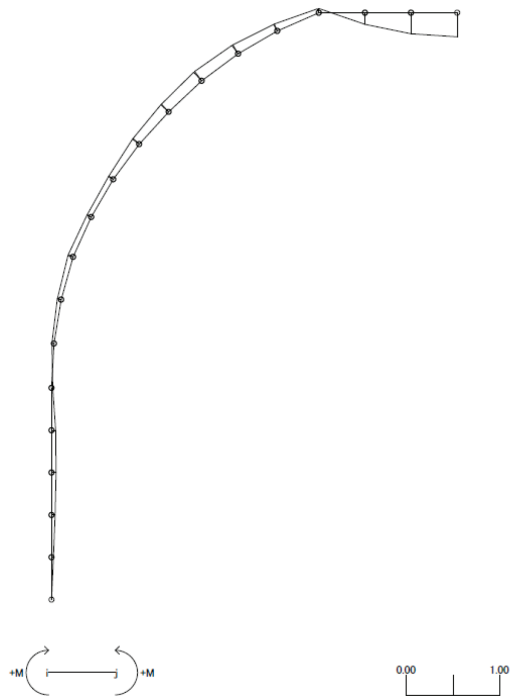
部材 番号		曲げ モーメント	軸力	せん断
		kNm (+:内引張)	kN (+:圧縮)	kN
9	i	-45.831	1170.873	84.608
9	j	-39.429	1128.295	-59.917
10	i	-39.429	1128.403	57.855
10	j	-47.122	1080.351	-92.457
11	i	-47.122	1084.091	21.326
11	j	-71.719	1032.816	-126.684
12	i	-71.719	1040.403	-17.848
12	j	-91.312	987.984	-65.861
13	i	-91.312	990.134	9.249
13	j	-100.818	936.045	-48.424
14	i	-100.818	935.383	59.871
14	j	-88.660	883.772	-9.777
15	i	-88.660	879.286	89.472
15	j	-64.754	832.523	8.788
16	i	-64.754	826.104	103.557
16	j	-36.359	786.810	13.425
17	i	-36.359	715.886	326.740
17	j	98.403	715.886	217.753
18	i	98.403	715.886	217.753
18	j	179.107	715.886	108.987
19	i	179.107	715.886	108.987
19	j	206.082	715.886	0.000

【 ケース 2-2-3 : DI、側方土圧係数 $K_0=0.0$ 、緩み高さ 9.2m 】

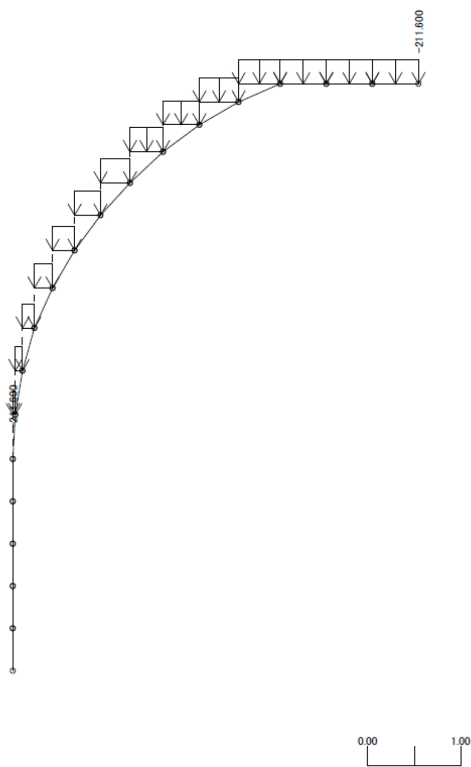
軸力



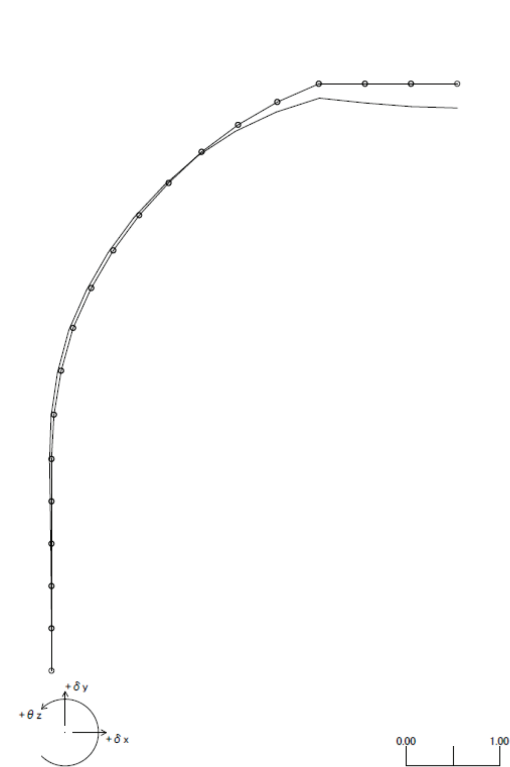
曲げモーメント



外力(分布荷重)



変位



(8) 応力照査結果

表-1.1.2 に示した検討ケースの中で最も条件の厳しい「ケース 2-2-3」について、肩部より上方の打替え部に発生する応力の算出結果を以下に記す。

【 ケース 2-2-3 : DI、側方土圧係数 $K_0=0.0$ 、緩み高さ 9.2m 】

緩み高さ 9.2m

部材 番号	位置	鉄筋仕様 外/内	σ_c (N/mm ²)	σ_{s1} (N/mm ²)	σ_{s1}' (N/mm ²)
9	i	D29@200/D29@200	2.8	-20.5	-38.5
9	j	D29@200/D29@200	2.6	-20.6	-36.1
10	i	D29@200/D29@200	2.6	-20.6	-36.1
10	j	D29@200/D29@200	2.9	-18.3	-38.2
11	i	D29@200/D29@200	2.9	-18.4	-38.3
11	j	D29@200/D29@200	4.4	-11.4	-52.8
12	i	D29@200/D29@200	4.4	-11.6	-53.1
12	j	D29@200/D29@200	6.0	4.1	-64.7
13	i	D29@200/D29@200	6.0	3.9	-64.7
13	j	D29@200/D29@200	6.5	15.9	-66.9
14	i	D29@200/D29@200	6.5	15.9	-66.9
14	j	D29@200/D29@200	5.8	9.2	-60.6
15	i	D29@200/D29@200	5.8	9.6	-60.5
15	j	D29@200/D29@200	4.4	-4.7	-49.8
16	i	D29@200/D29@200	4.4	-4.3	-49.6
16	j	D29@200/D29@200	3.2	-14.4	-38.5
17	i	D29@200/D29@200	3.0	-12.0	-36.1
17	j	D29@200/D29@200	6.3	34.1	-59.3
18	i	D29@200/D29@200	6.3	34.1	-59.3
18	j	D29@200/D29@200	11.3	135.0	-87.0
19	i	D29@200/D29@200	11.3	135.0	-87.0
19	j	D29@200/D29@200	13.0	170.6	-95.6
許容値			14	180	200

(9) 決定仕様

以上の検討結果より、各ケースで決定した打替え部の仕様を表-1.1.4 に示す。同表より、全ての検討ケースに対して無理なく施工可能な仕様であることから、完成時の構造安定性が確保できる。

表-1.1.4 決定仕様

地山 等級	側圧 係数 K_o	ケース	緩み高さ (m)	最大鉄筋量となる 箇所の鉄筋仕様		打ち替え部の コンクリートの仕様	
			m	外側	内側	設計基準 強度 (N/mm ²)	天端 厚さ (mm)
CII	0.5	1-1-1	3.0	D16@200	D16@200	40	350
		1-1-2	6.0	D19@200	D19@200	40	350
		1-1-3	9.2	D25@200	D25@200	40	350
	0.0	1-2-1	3.0	D16@200	D16@200	40	350
		1-2-2	6.0	D22@200	D22@200	40	350
		1-2-3	9.2	D29@200	D29@200	40	350
DI	0.5	2-1-1	3.0	D16@200	D16@200	40	350
		2-1-2	6.0	D19@200	D19@200	40	350
		2-1-3	9.2	D25@200	D25@200	40	350
	0.0	2-2-1	3.0	D16@200	D16@200	40	350
		2-2-2	6.0	D22@200	D22@200	40	350
		2-2-3	9.2	D29@200	D29@200	40	350

(10) 非打替え部の健全性の確認

全 12 ケースの中で打替え部の鉄筋量が大きな緩み高さ 9.2m の 4 ケース (表-1.1.4) の中で、最も条件の厳しい「ケース 2-2-3」について、肩部より下方の非打替え部の健全性判定結果を以下に記す。

【 ケース 2-2-3 : DI、側方土圧係数 $K_0=0.0$ 、緩み高さ 9.2m 】

	発生応力 (a)	強度 (b)	許容 応力	判定
	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2	
引張	-1.240	1.580	0.23	OK
圧縮	-3.440	-18.000	-4.50	OK
せん断	0.216	2.666	0.67	OK

緩み土圧9.2m

部材 番号	曲げ モーメント	軸力	せん断	覆工厚	断面係数	σ_{in}	σ_{out}	τ_m
	kNm (+:内引張)	kN (-:圧縮)	kN	m	m^3	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2
1 i	0.000	-1249.422	36.167	0.500	4.167E-02	-2.499	-2.499	0.072
1 j	16.077	-1244.212	34.080	0.500	4.167E-02	-2.103	-2.874	0.068
2 i	16.077	-1244.212	34.080	0.500	4.167E-02	-2.103	-2.874	0.068
2 j	29.998	-1239.014	26.275	0.500	4.167E-02	-1.758	-3.198	0.053
3 i	29.998	-1239.014	26.275	0.500	4.167E-02	-1.758	-3.198	0.053
3 j	38.315	-1233.805	8.235	0.500	4.167E-02	-1.548	-3.387	0.016
4 i	38.315	-1233.805	8.235	0.500	4.167E-02	-1.548	-3.387	0.016
4 j	34.939	-1228.607	-26.592	0.500	4.167E-02	-1.619	-3.296	-0.053
5 i	34.939	-1228.607	-26.592	0.500	4.167E-02	-1.619	-3.296	-0.053
5 j	10.576	-1223.397	-85.490	0.500	4.167E-02	-2.193	-2.701	-0.171
6 i	10.576	-1226.243	-18.356	0.500	4.167E-02	-2.199	-2.706	-0.037
6 j	-18.176	-1215.299	-108.203	0.500	4.167E-02	-2.867	-1.994	-0.216
7 i	-18.176	-1219.883	23.339	0.500	4.167E-02	-2.876	-2.004	0.047
7 j	-33.423	-1198.412	-92.486	0.500	4.167E-02	-3.199	-1.595	-0.185
8 i	-33.423	-1201.307	40.068	0.500	4.167E-02	-3.205	-1.600	0.080
8 j	-45.831	-1169.970	-96.282	0.500	4.167E-02	-3.440	-1.240	-0.193

(11) せん断補強筋照査

前掲の表-1.1.4 においてせん断応力度照査を行った結果、一部のケースで打替え部にせん断補強筋が必要（表-1.1.5, 図-1.1.3）であることが判明したため、せん断補強筋照査を行う。

表-1.1.5 せん断補強筋の要否

地山等級	側圧係数 K_0	ケース	緩み高さ (m)	打ち替え部のコンクリートの仕様		せん断補強筋
			m	設計基準強度 (N/mm ²)	天端厚さ (mm)	
CII	0.5	1-1-1	3.0	40	350	不要
		1-1-2	6.0	40	350	不要
		1-1-3	9.2	40	350	要
	0.0	1-2-1	3.0	40	350	不要
		1-2-2	6.0	40	350	不要
		1-2-3	9.2	40	350	不要
DI	0.5	2-1-1	3.0	40	350	不要
		2-1-2	6.0	40 </td <td>350</td> <td>不要</td>	350	不要
		2-1-3	9.2	40	350	要
	0.0	2-2-1	3.0	40	350	不要
		2-2-2	6.0	40	350	不要
		2-2-3	9.2	40	350	不要
DI	0.0	3-2-1	3.0	40	300	不要
		3-2-2	6.0	40	300	不要
		3-2-3	9.2	40	300	要

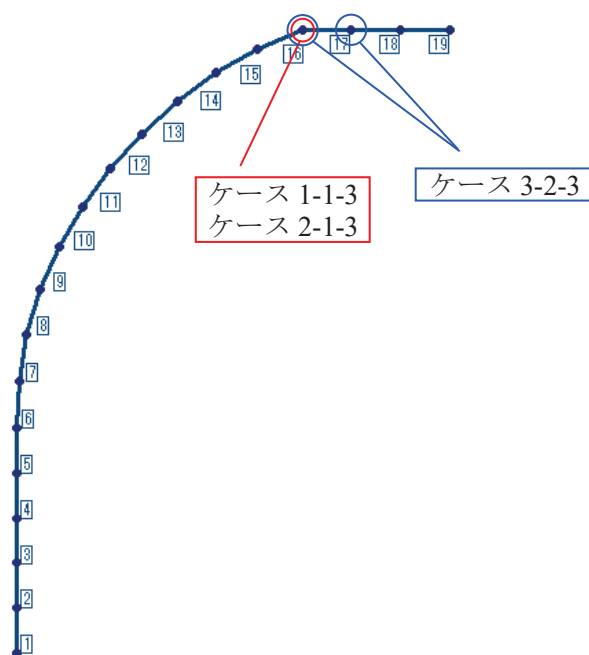


図-1.1.3 せん断補強筋の必要箇所

【 せん断補強筋の仕様 】

せん断補強筋量が最も多くなるケース 3-2-3 でのせん断補強筋の仕様は、

せん断補強筋の円周方向の設置間隔：400mm

単位奥行あたりの必要せん断補強筋量：2.569cm²

表-1.1.6 必要せん断補強筋量

形状名称 タイトル	矩形 17-i	
断面全幅 (m)		1.0000
断面全高 (m)		0.3000
配筋 1段 配筋 2段 合計 AS (cm ²)	D32 0.0750 D32 0.2250	63.536 63.536 127.072
鉄筋1 (cm ²)		127.072
断面力 M (kN.m) N (kN) S (kN)		-50.159 745.925 326.740
ウェブ幅 bw (m) 有効高さ d (m) せん断スパン s (m) ヤング係数比		1.0000 0.3000 0.0000 n = 15.00
応力度 (N/mm ²) σ c σ ca σ sl σ sal σ sl' σ sal		3.897 < 14.000 -3.633 < 200.000 -40.186 < 200.000 R0.2399
中立軸 X (m)		0.270
許容平均 τ a (N/mm ²) τ m (N/mm ²)		1.09 > 0.99
Ce Cpt CN Cdc		1.400 1.500 1.744 1.000
Aw(a) (cm ²) 斜引張鉄筋間隔a (cm)		2.569 40.000

(注1)R は、断面の反転を意味しています。

表-1.1.7 せん断補強筋の施工間隔と呼び径

施工間隔(mm)	400		
1m当たりの本数	2.5		
鉄筋呼び径	13	cm ²	3.168
	16	cm ²	4.965
	19	cm ²	7.163
	22	cm ²	9.678
	25	cm ²	12.668
	29	cm ²	16.060
	32	cm ²	19.855
	35	cm ²	23.915
	38	cm ²	28.500
	41	cm ²	33.500
51	cm ²	50.675	

表-1.1.6 より、単位奥行あたりの必要せん断補強筋量を 2.569cm²以上とするためには、D13 をトンネル延長方向 400 mm間隔（表-1.1.7）という施工上で無理の無い設置で対応可能である。

1. 2 施工時の構造安定性

(1) 検討断面

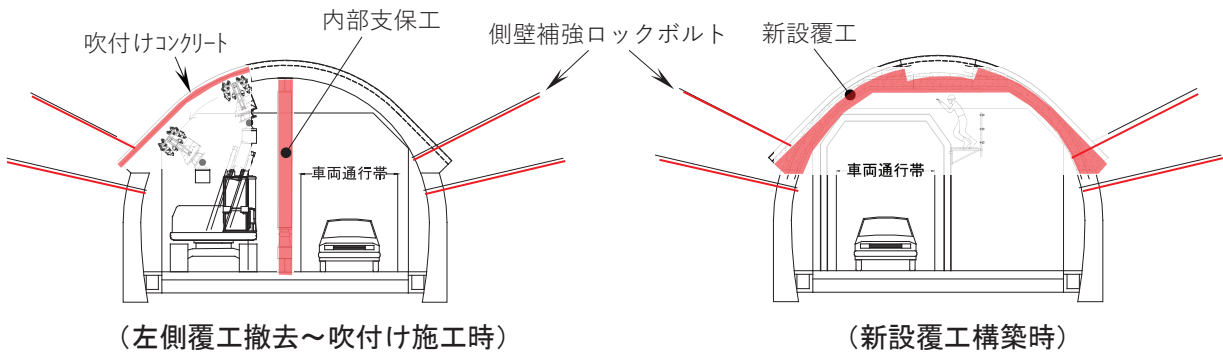


図-1.2.1 検討断面

(2) 解析モデル

- ・周辺地盤を含めたトンネル構造全体をモデル化し、施工順序を反映したステップ解析とする。
- ・厳密には解析モデルは三次元モデルであるが、奥行 1m とし正面および背面は法線方向変位を拘束した平面ひずみ状態の二次元モデルとする。
- ・覆工コンクリート（新設および既設）は設計断面の輪郭でモデル化する。
- ・既設コンクリートは無筋コンクリート、新設コンクリートは鉄筋コンクリートである。
- ・コンクリートは所定の強度を超えると剛性が 0 となる設定とする。
- ・鉄筋コンクリートの鉄筋はその断面積を持つ線要素（梁要素）でモデル化する。
- ・側方および上下境界までの離隔は 5D 以上とする（D は掘削幅、D=9.2m）。
- ・覆工に作用する鉛直土圧および水平土圧は、それぞれ初期応力 σ_y 、 σ_x として与える。

$$\sigma_y = \gamma H, \quad \sigma_x = K_0 \times \sigma_y$$

ここで、 γ ：地山の単位体積重量、H:緩み高さ、 K_0 ：側方土圧係数

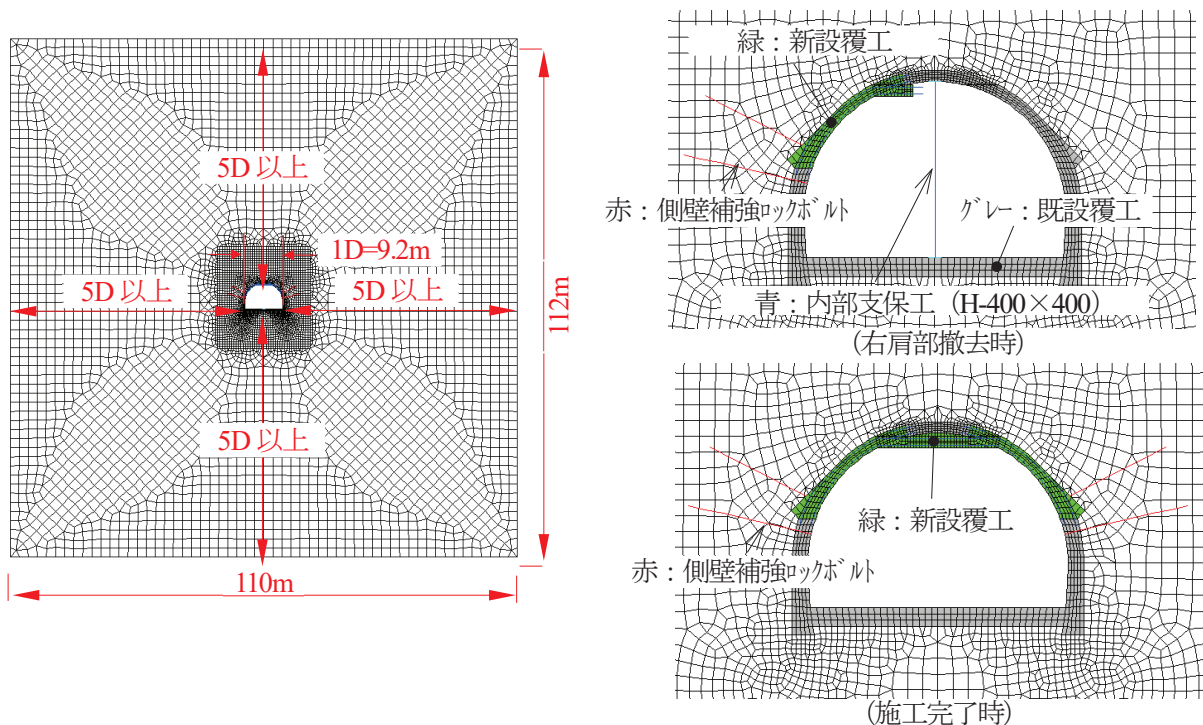


図-1.2.2 解析モデル

(3) 地盤条件

対象地山は地山等級 CII-DI 相当とし、安全側となるよう表-1.2.1 の値を用いる。

表-1.2.1 地盤物性値

変形係数	ポアソン比	単位 体積重量
MN/m ²	---	kN/m ³
500	0.35	23.0

【参考文献：日本道路公団試験研究所、「技術資料第 358 号トンネル数値解析マニュアル」,平成 10 年 10 月】

断面	地山 区分	変形 係数	f_{dest}	初期 ポアソン 比	最終 ポアソン 比	弾性限 界	非線形 指数	粘着力	内部 摩擦角	引張 強度	単位 重量
		D	f_{dest}	ν_0	ν_{dest}	k	a	C	ϕ	σ_t	γ_t
		N/mm ²						N/mm ²	deg	N/mm ²	t/m ³
B	G ₂	5,000	0.01	0.25	0.48	6.0	3.0	4.0	50	0.80	25.0
C ₁	G ₃	2,000	0.01	0.30	0.48	6.0	3.0	2.0	45	0.40	24.0
C ₁₁	G ₄	1,000	0.01	0.30	0.48	6.0	3.0	1.0	40	0.20	23.0
D ₁	G ₅	500	0.01	0.35	0.48	4.0	2.0	0.4	35	0.08	22.0
D ₁₁	G ₆	150	0.01	0.35	0.48	4.0	2.0	0.2	30	0.04	21.0

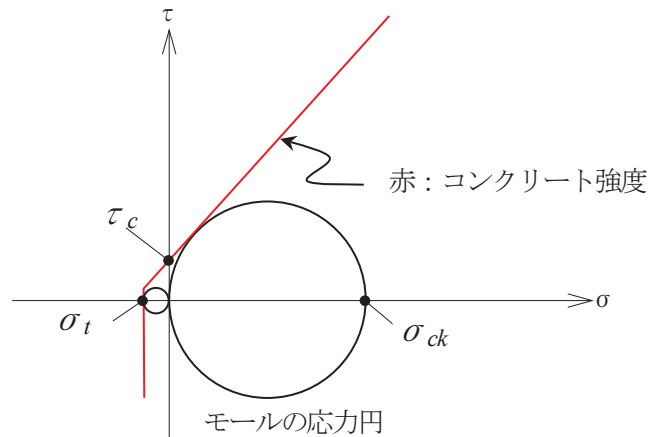
(4) 覆工物性値の設定

覆工コンクリートは設計基準強度 σ_{ck} に基づき設定した表-1.2.2 の物性を用いる。

表-1.2.2 覆工物性値

部位	設計 基準強度 σ_{ck}	単位 体積重量	弾性係数	せん断 強度 τ_c	内部 摩擦角	引張強度 $\sigma_t =$ $0.23 \sigma_{ck}^{2/3}$
	MN/m ²	kN/m ³	MN/m ²	MN/m ²	°	MN/m ²
打替え部	40	24.5	31,000	5.19	60.9	2.69
非打替え部	18	23.0	22,000	2.67	57.0	1.58

覆工コンクリートの強度は、モールの応力円に対して図-1.2.3 の強度を持つものとし、その強度を超えた場合は剛性と0とする。



【 参考文献：土木学会、「コンクリート標準示方書 2017 年制定」 】
 図-1.2.3 モールの円によるコンクリート強度

解説 表 5.3.1 コンクリートのヤング係数

f'_{ck} (N/mm ²)		18	24	30	40	50	60	70	80
E_c (kN/mm ²)	普通コンクリート	22	25	28	31	33	35	37	38
	軽量骨材コンクリート*	13	15	16	19	-	-	-	-

* 骨材を全部軽量骨材とした場合。

解説 表 6.4.1 材料の単位重量

材 料	単位重量 (kN/m ³)	材 料	単位重量 (kN/m ³)
鋼・ 鋳鋼・ 鍛鋼	77	コンクリート	22.5 → 23.0
鋳 鉄	71	セメントモルタル	21.0
アルミニウム	27.5	木 材	8
鉄筋コンクリート	24.0 → 24.5	瀝 青 材	11
プレストレストコンクリート	24.5	アスファルトコンクリート舗装	22.5

(5) 補強部材の設定

表-1.2.3 側壁補強ロックボルトの物性値

仕様	1本当たり		延長方向 施工間隔	1m当たり	
	断面積	耐力		断面積	耐力
	m ²	MN	m	m ²	MN
SD345、D25	5.070E-04	0.180	1.5	3.380E-04	0.120

表-1.2.4 内部支保工の物性値

仕様	1本当たり			延長方向 施工間隔	1m当たり		
	断面積	断面	断面		断面積	断面	断面
		m ²	2次モーメント (強軸)	2次モーメント (弱軸)		m ²	2次モーメント (強軸)
		MN	MN	m	MN	MN	
H-400x400x13x21	2.187E-02	6.660E-04	2.240E-04	3.0	7.290E-03	2.220E-04	7.467E-05

(6) 荷重と検討ケースの設定

- ・覆工コンクリートに作用する荷重は、覆工コンクリートの自重および土圧とする。
- ・土圧は鉛直土圧および水平土圧とし、それぞれ初期応力 σ_y および σ_x として設定する。
- ・鉛直土圧 σ_y は緩み土圧とし、緩み高さ $H=3\text{m}$ 、 6m 、 $1D(=9.2\text{m})$ 相当の3ケースの荷重について検討する。鉛直土圧は、次式で算出する。

$$\sigma_y = \gamma H$$

水平土圧 σ_x は、側方土圧係数 K_o から、

$$\sigma_x = K_o \cdot \sigma_y$$

とする。

$K_o=0.5$ と $K_o=0.0$ の2ケースを検討する。

以上をまとめた検討ケースと荷重を表-1.2.5 に記す。

表-1.2.5 検討ケースと荷重

側圧 係数 K_o	ケース	緩み高さ (m)	単位体積 重量	鉛直土圧 σ_y	水平土圧 σ_x
		m	kN/m ³	kN/m ²	kN/m ²
0.5	1-1-1	3.0	23.0	69.0	34.5
	1-1-2	6.0	23.0	138.0	69.0
	1-1-3	9.2	23.0	211.6	105.8
0.0	1-2-1	3.0	23.0	69.0	0.0
	1-2-2	6.0	23.0	138.0	0.0
	1-2-3	9.2	23.0	211.6	0.0

表-1.2.5 の検討ケースの中で、荷重が大きな「ケース 1-1-3」につき解析した結果を以下に記す。

(7) 解析ステップ

解析ステップを図-1.2.4 に示す。

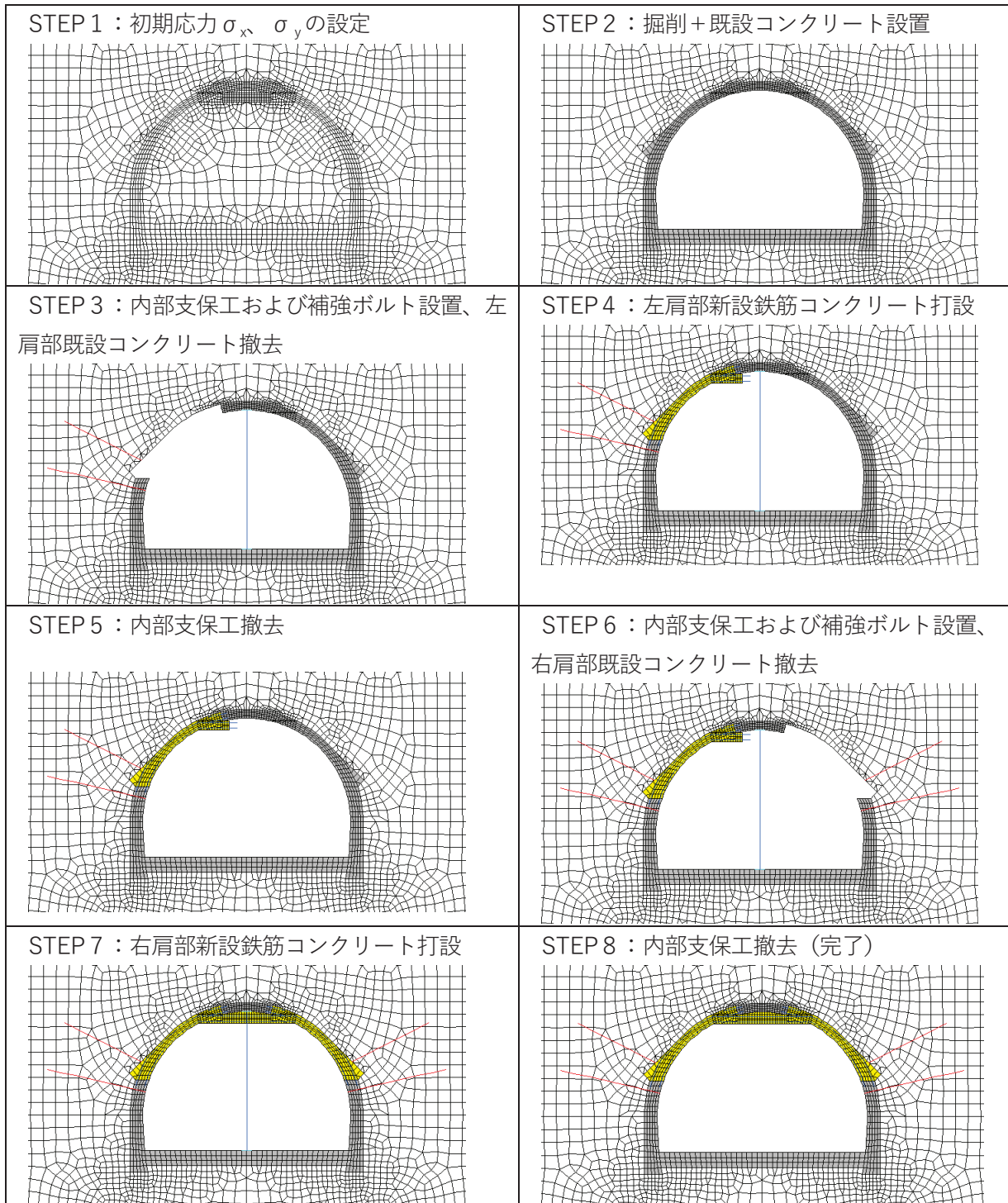


図-1.2.4 解析ステップ

(8) 解析結果

- ・ケース 1-1-3 (緩み高さ 9.2m、側方土圧係数 0.5)

※既設コンクリート撤去開始後の増分変位

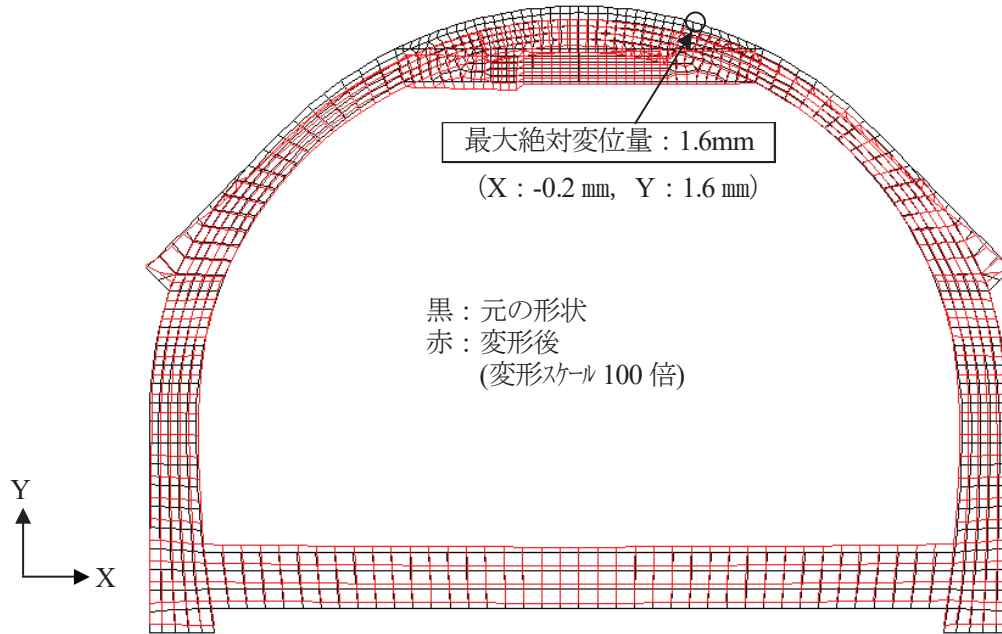
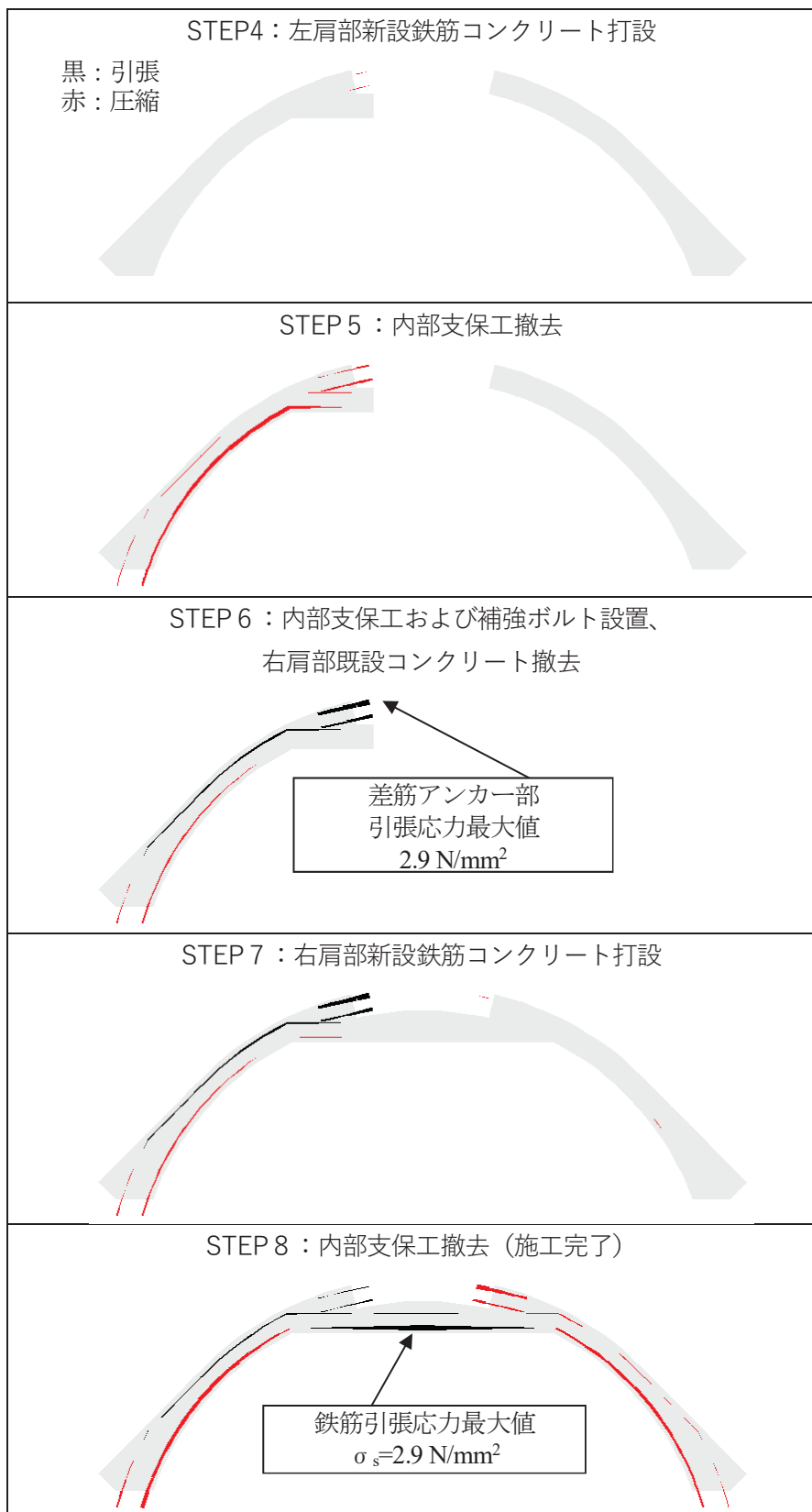


図-1.2.5 変形図 (施工完了時)



※応力値は絶対値を記載

図-1.2.6 鉄筋軸力分布図

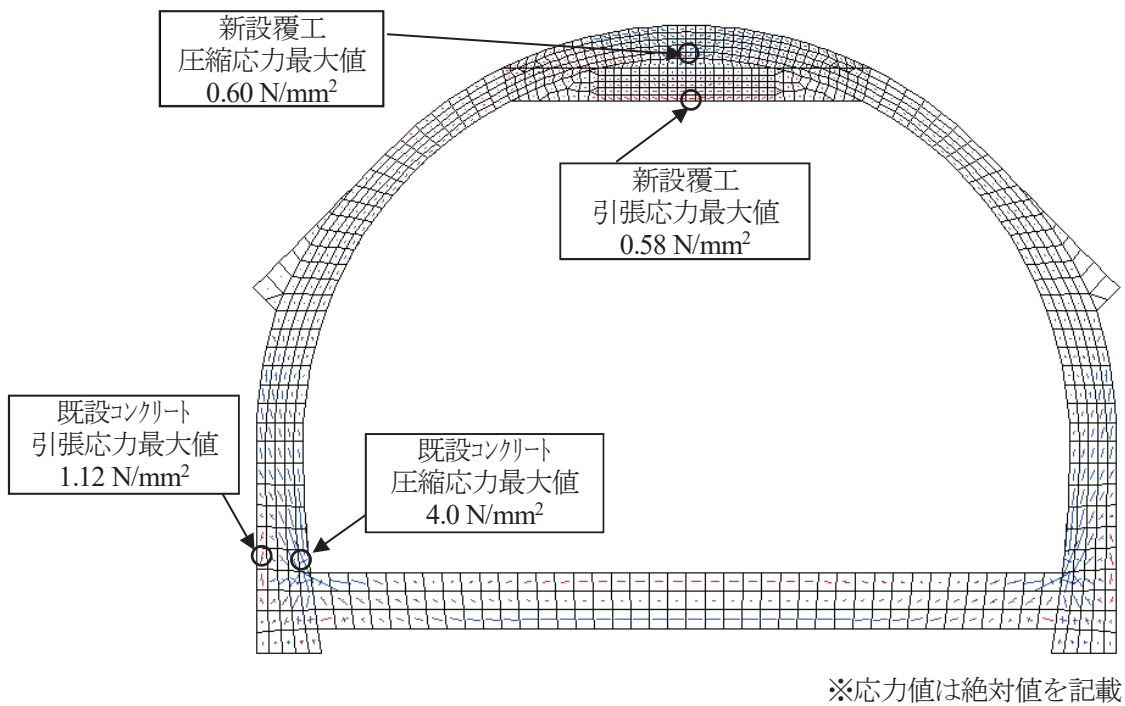
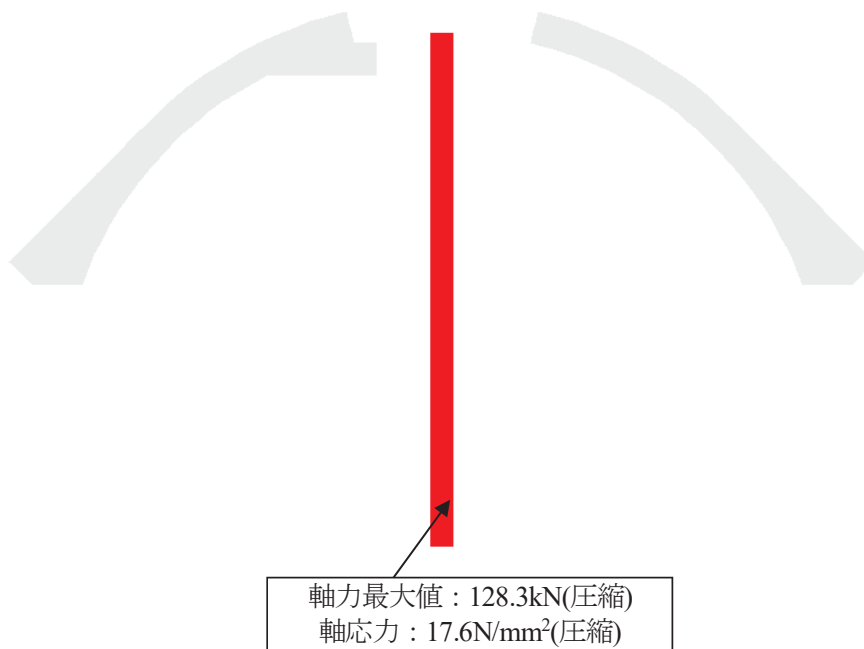


図-1.2.7 コンクリート応力図（施工完了時）



※軸力は単位奥行当たりの値（絶対値）を記載

図-1.2.8 内部支保工軸力図（最大値：右側肩部新設覆工打設時）

【内部支保工の座屈照査】

座屈を考慮した鋼材の許容応力度は、日本道路協会、「道路土工 仮設構造物指針（平成 11 年 3 月）」に準拠し、以下のように設定する。

l : 部材の座屈長さ (=5.04m)

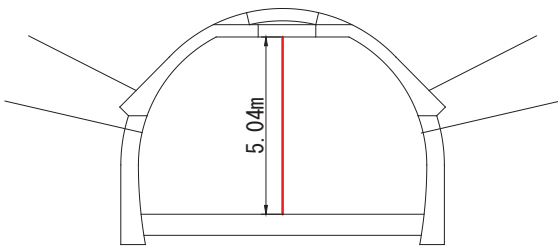
r : 断面 2 次半径(H-400x400x13x21 の r=10.1cm=0.101m)

$$l / r = 5.04 / 0.101 = 49.9$$

$$\begin{aligned} \text{座屈を考慮した鋼材の許容応力度 } \sigma_{sa} &= [140 - 0.82 (l/r - 18)] \times 1.5 \\ &= [140 - 0.82 (49.9 - 18)] \times 1.5 = 170.7 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

以上より

鋼材に作用する軸応力 17.6 [N/mm²] < 許容応力 170.7 [N/mm²] OK



形鋼標準断面表										
H 形 鋼 (JIS G 3192-2000)										
寸 法 (mm)		断面積 (cm ²)	単 位 質 量 (kg/m)	断面 2 次モーメント (cm ⁴)		断面 2 次半径 (cm)		断面係数 (cm ³)		
H × B	t ₁ t ₂ r			I _x	I _y	i _x	i _y	Z _x	Z _y	
400×200	8 13 16	84.12	66.0	23700	1740	16.8	4.54	1190	174	
390×300	10 16 22	136.0	107	38700	7210	16.9	7.28	1980	481	
400×400	13 21 22	218.7	172	66600	22400	17.5	10.1	3330	1120	
446×199	8 12 18	84.30	66.2	28700	1580	18.5	4.33	1290	159	
450×200	9 14 18	96.76	76.0	33500	1870	18.6	4.40	1490	187	

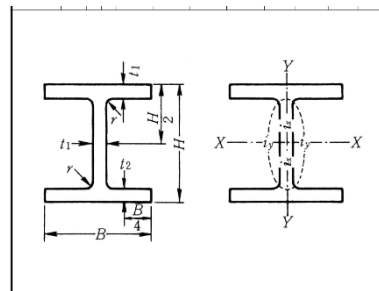
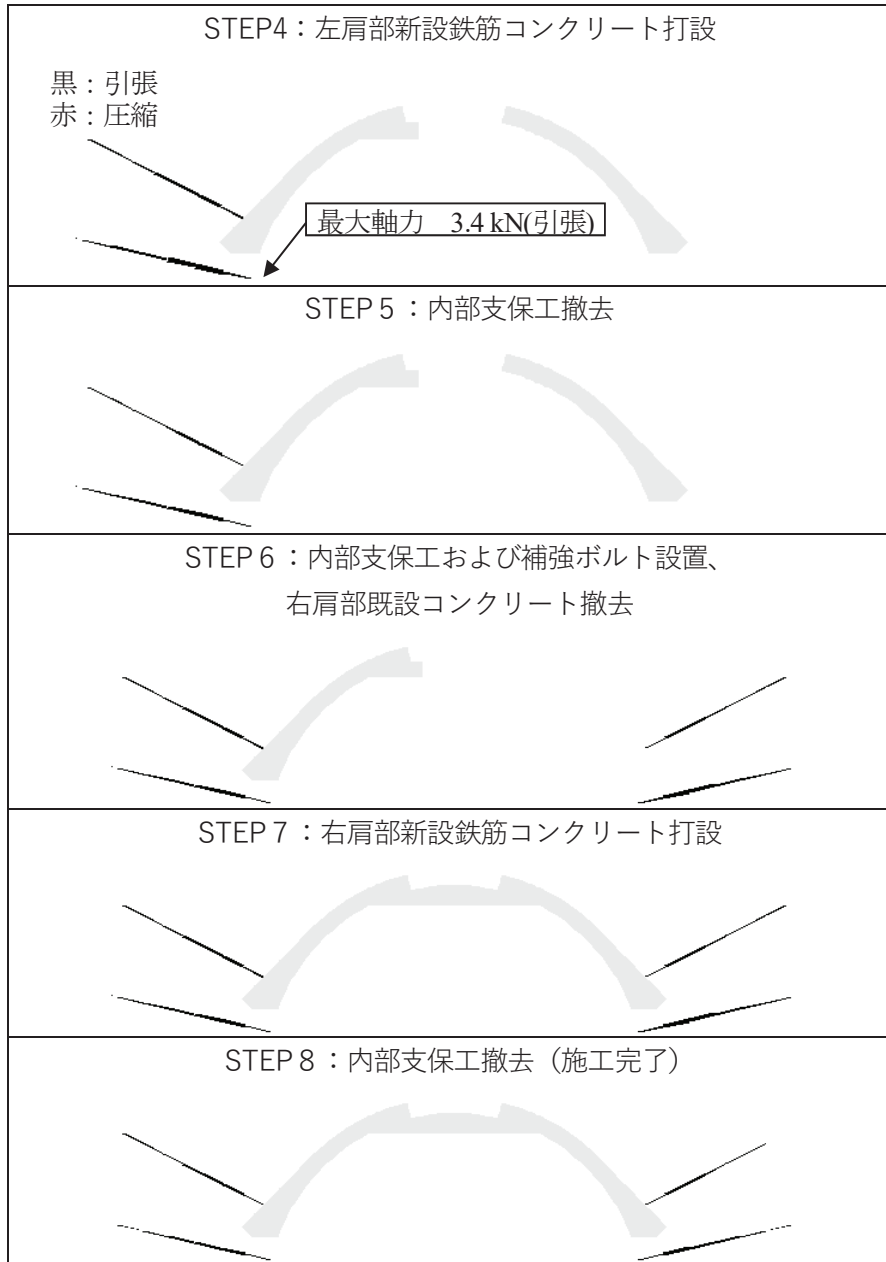


表 2-6-1 鋼材の許容応力度 (N/mm² (kgf/cm²))

種 類	SS 400	SM 490
軸方向引張 (純断面)	210 (2,100)	280 (2,850)
軸方向圧縮 (総断面)	$l/r \leq 18$ (20) 210 (2,100) $18 < l/r \leq 92$ ($20 < l/r \leq 93$) $[140 - 0.82(l/r - 18)] \times 1.5$ $([1,400 - 8.4(l/r - 20)] \times 1.5)$ 92 (93) < l/r $\left[\frac{1,200,000}{6,700 + (l/r)^2} \right] \times 1.5$ $\left(\left[\frac{12,000,000}{6,700 + (l/r)^2} \right] \times 1.5 \right)$ ℓ : 部材の座屈長さ (mm) (cm) r : 断面二次半径 (mm) (cm)	$l/r \leq 16$ (15) 280 (2,850) $16 < l/r \leq 79$ ($15 < l/r \leq 80$) $[185 - 1.2(l/r - 16)] \times 1.5$ $([1,900 - 13(l/r - 15)] \times 1.5)$ 79 (80) < l/r $\left[\frac{1,200,000}{5,000 + (l/r)^2} \right] \times 1.5$ $\left(\left[\frac{12,000,000}{5,000 + (l/r)^2} \right] \times 1.5 \right)$ ℓ : 部材の座屈長さ (mm) (cm) r : 断面二次半径 (mm) (cm)



※軸力は単位奥行当たりの値（絶対値）を記載

図-1.2.9 補強ボルト軸力分布図

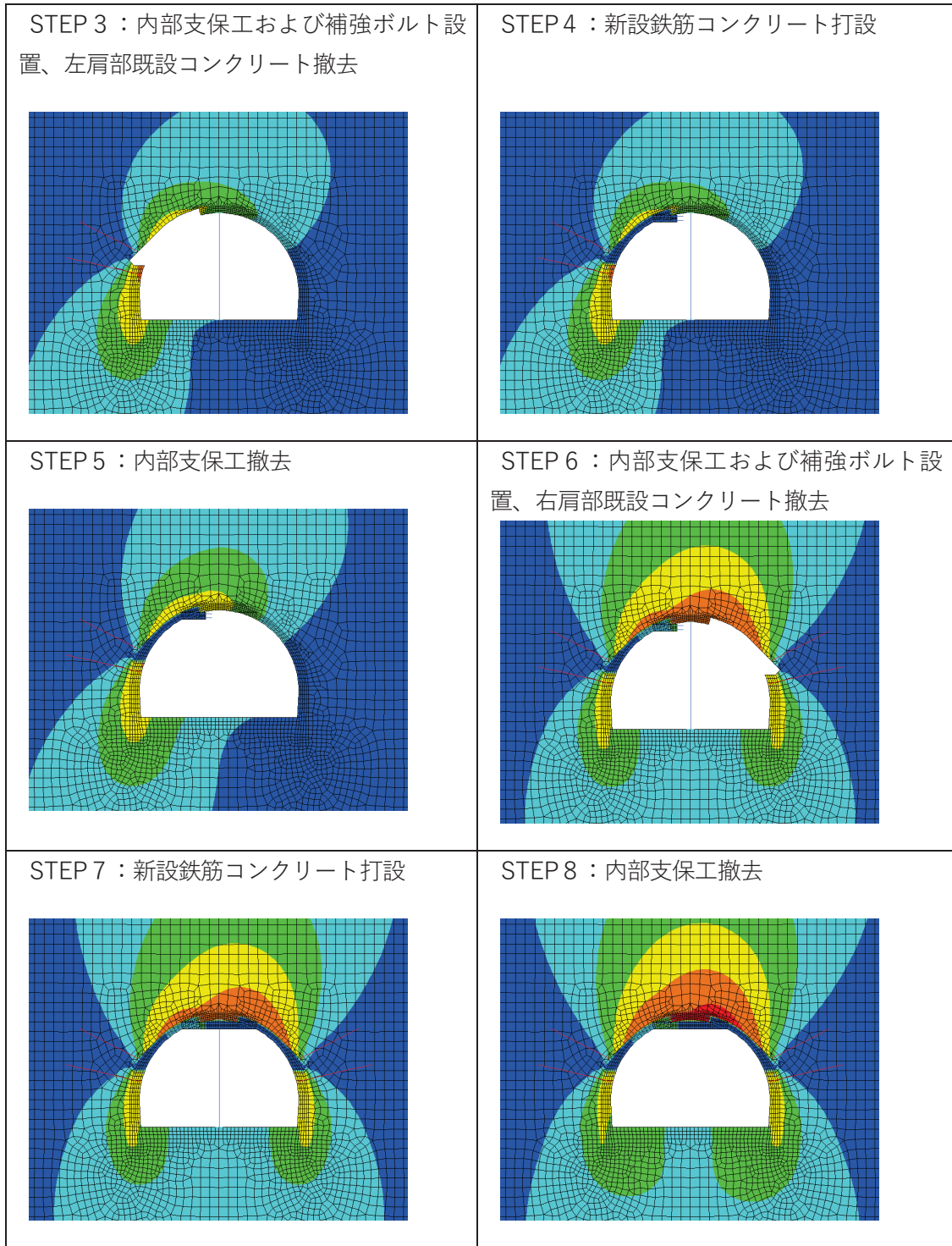


図-1.2.10 変位分布推移図 (絶対変位量)

2. 覆工コンクリート切削試験結果

ドラムカッターの切削速度と発生振動を確認するため、模擬トンネル切削試験を行った。覆工コンクリート（配合：24-15-20N）を地上に構築し、周囲無拘束の状態で試験した。0.45m³級バックホウにドラムカッター—ERC650、0.2m³級バックホウに ERC100 を装備して試験を行った。



図-2.1 切削試験実施状況

2. 1 切削速度

施工速度計測結果を表-2.1 に示す。トンネル側部から幅 3.25m を作業帯として、ベースマシンをトンネル軸方向に配置して、切削を行った。ERC650 では、ベースマシン搭載の油圧ポンプ（1 ポンプ施工）で駆動した場合と、ドラムカッター専用油圧ポンプで駆動（2 ポンプ施工）した場合の 2 通りで切削速度を確認した。

表-2.1 覆工コンクリート切削速度

切削機械		切削速度				
		脚部	側部	肩部	天端部	平均
ERC650	1 ポンプ施工	1.1 m ³ /h	1.0 m ³ /h	0.9 m ³ /h	1.1 m ³ /h	1.0 m ³ /h
	2 ポンプ施工	1.6m ³ /h	1.7 m ³ /h	1.4m ³ /h	1.3 m ³ /h	1.5 m ³ /h
ERC100	1 ポンプ施工	0.4 m ³ /h	0.4 m ³ /h	0.2 m ³ /h	0.1 m ³ /h	0.3 m ³ /h

2. 2 切削振動

ERC650 による発生振動を図-2.2 に示す。地山拘束がない模擬トンネルでは、距離減衰が発生せず、2kine を超える結果となったため、地山拘束を模擬して、土間コンクリート切削時の振動も計測した。1.5m 程度の離隔で、振動が 2kine 以下になることが分かった。また、振動対策として、スリットを 12 cm 入れることで、約 30%の低減効果が確認された。なお、ERC100 では、2kine を超える振動は発生しなかった。

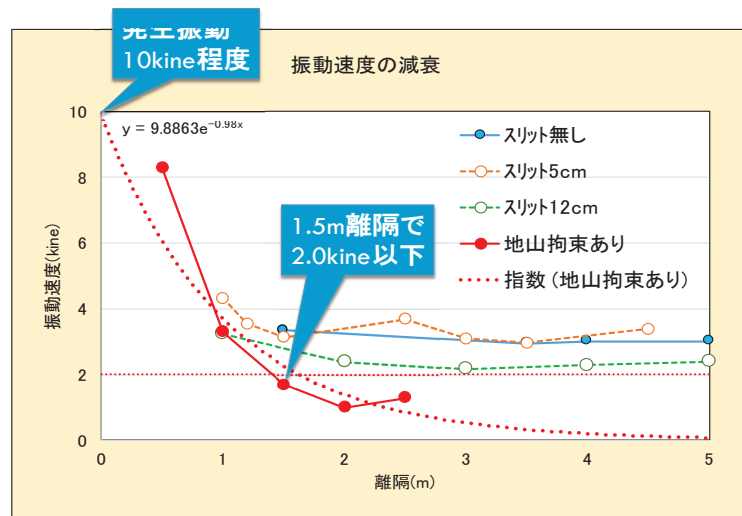


図-2.2 ERC650 振動計測結果

3. 概算工程

上記の切削速度および標準的なトンネル施工歩掛を考慮して、2車線道路トンネル（延長300m）の更新工事について、工程を試算した結果を以下に示す。

(1) 検討条件

【対象トンネル】 2車線道路トンネル（道路幅員6.5m、巻厚550mm）

更新延長300m（既設覆工施工ブロック長6m×50ブロックを想定）

※覆工コンクリートは巻厚550mmすべて撤去して新設

【検討ケース】

No.	更新範囲	全体施工手順
①	肩部～天端	片押し施工
②		分割施工
③	路面高～天端	片押し施工
④		分割施工

【施工条件】 300mを4分割し、2区間を同時施工で計画（図-3.1、図-3.2）

4週8閉所 昼夜施工（コンクリート打設は昼のみ）

夜間通行止め可能（内部支保工設置時等）

片側車線固定占用可能

事前調査・補修は含まない（完了した状態からの施工）

片押し施工は移動式型枠センター、分割施工は型枠支保工と型枠組立て解体を考慮

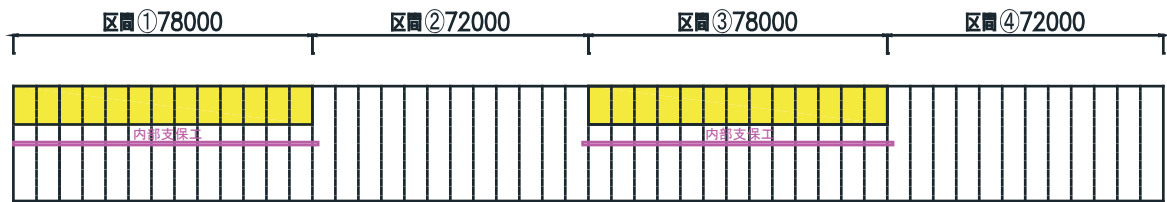
(2) 概算工程

概算工程の算出結果を表-3.1に示す。また、既設トンネル覆工切削作業について、想定したサイクルタイム（例）を表-3.2に示す。

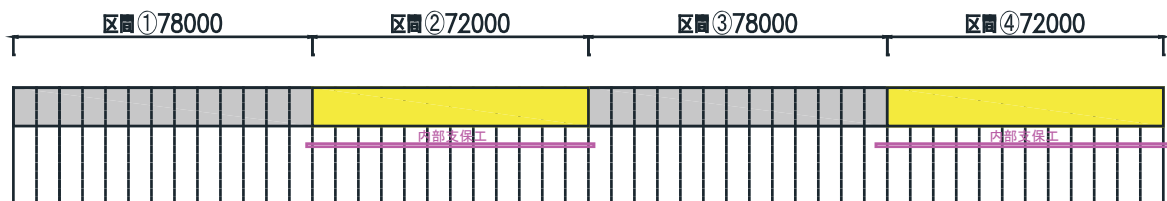
表-3.1 概算工程

No.	更新範囲	全体施工手順	概算工程	規制日数（夜間通行止）
①	肩部～天端	片押し施工	516日（17.2か月）	36日
②		分割施工	633日（21.1か月）	72日
③	路面高～天端	片押し施工	667日（22.2か月）	36日
④		分割施工	894日（29.8か月）	72日

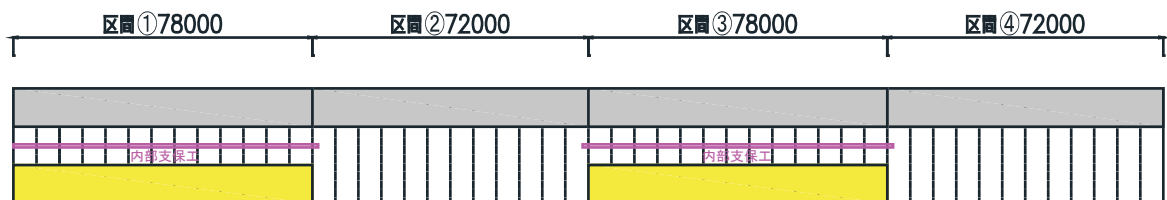
(1) 区間①・③ 左側 覆工切削～構築



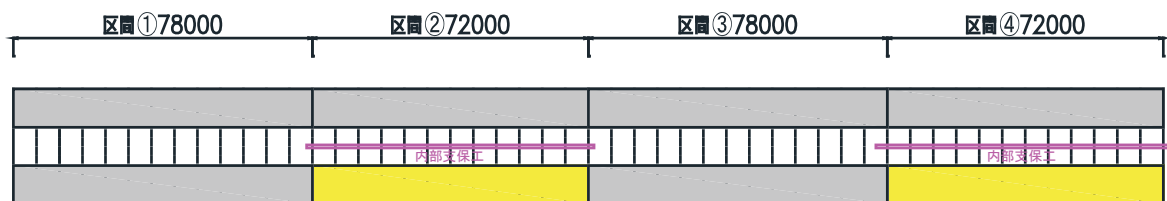
(2) 区間②・④ 左側 覆工切削～構築



(3) 区間①・③ 右側 覆工切削～構築



(4) 区間②・④ 右側 覆工切削～構築



(5) 区間①～④ 中央部 覆工構築

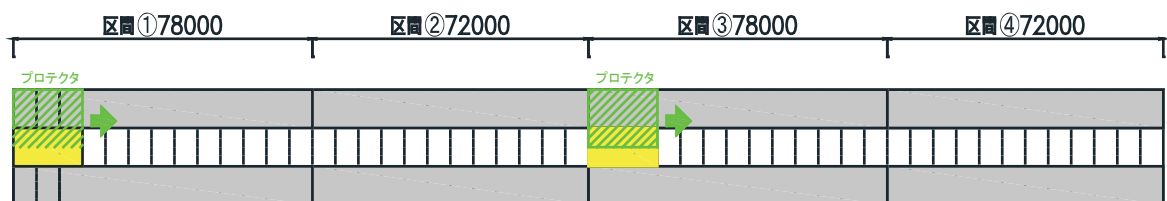


図-3.1 片押し施工 全体施工概要

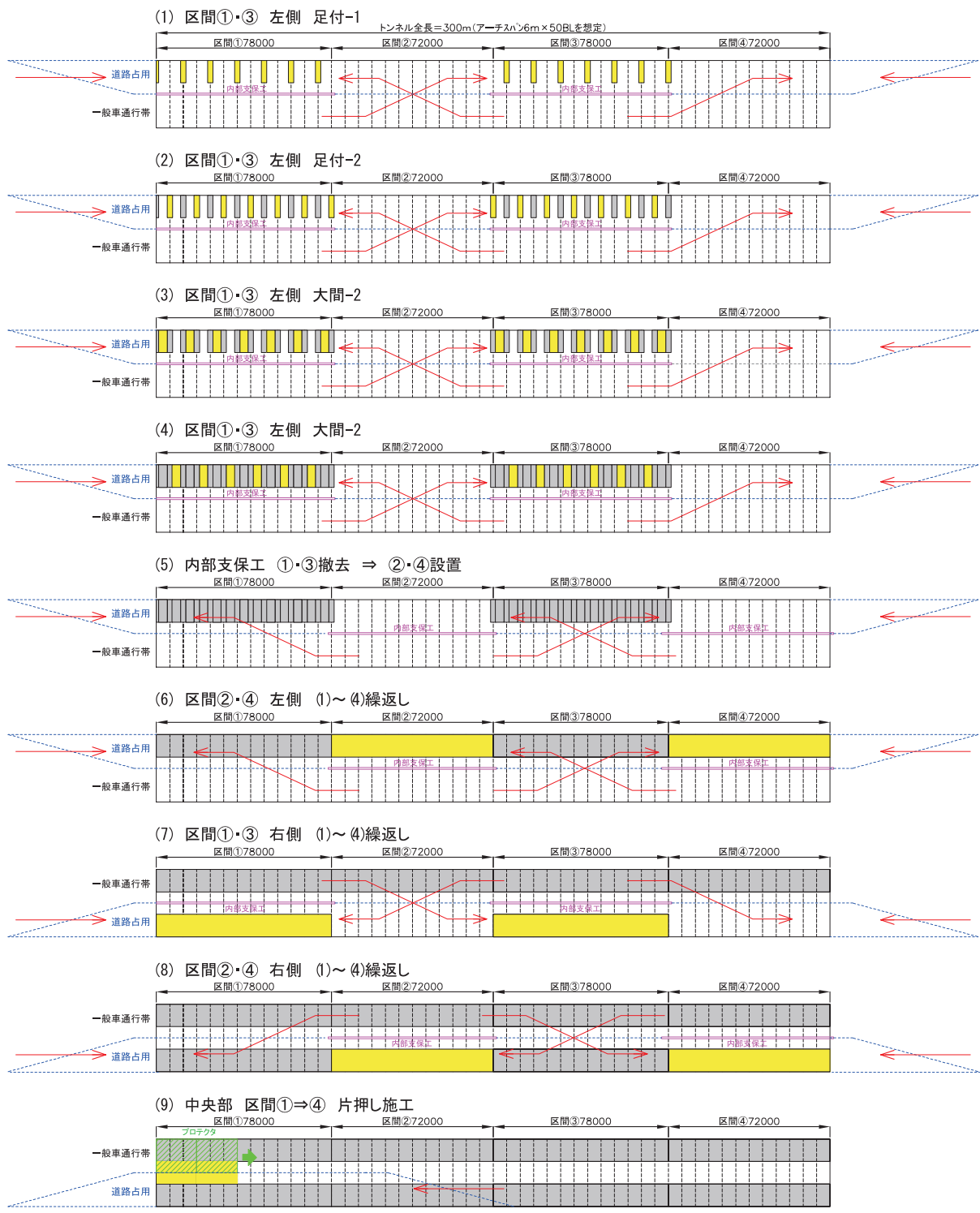


図-3.2 分割施工 全体施工概要

表-3.2 3mあたりの既設トンネル覆工切削サイクルタイム (例)

項目		単位	撤去範囲		備考		
			肩部~天端	路面高~天端			
サイ ク ル 検 討 条 件	片側切削断面積 (余巻含まず)	C1	m ²	1.879	3.759	巻厚550mm	
	片側切削断面積 (余巻20%考慮)	C2	m ²	2.255	4.510	C1×1.2	
	1サイクル当り進行長	D	m	3.000	3.000		
	切削コンクリート体積	E	m ³	6.764	13.531	C2×D	
	切削コンクリート重量	F	t	15.558	31.120	E×2.3	
	ドラムカッター切削能力	G	m ³ /h	1.500	1.500	2ポンプ施工	
	ずり出し4tダンプ台数	H	台	4.000	8.000	F÷4	
	吹付面積	I	m ²	10.718	21.387	1進行長当り	
	吹付厚さ	J	m	0.150	0.150	DI想定	
	補正係数	K		1.900	1.900	DI想定	
コンクリート切削		準備	分	10	11		
		切削	分	271	541	E÷G	
		ダンプ入替	分	15	35	5分/回×(H-1)	
		跡片付け	分	10	10		
		測量	分	10	10		
		その他損失	分	30	30		
		小計①	分	346	637		
後 方 作 業	切削仕上げ		準備	分	(10)	(10)	
			手すり	分	(30)	(30)	
			跡片付け	分	(10)	(10)	
	吹付け		準備	分	(10)	(10)	
			吹付け	分	(18)	(37)	I×J×K×6
			跡片付け	分	(10)	(11)	
		小計②	分	(78)	(98)	コンクリート切削と並行作業	
移 動	隔壁バルーン・集塵機移動		分	40	40		
	小型機械移動		分	15	15		
	各種配線・配管盛替		分	20	20		
			小計③	分	75	75	
サイクルタイム計			分	421	712	小計①+小計③	

4. 特許出願

申請特許名	出願人	発明者	申請年月日 (特許番号)	公開日
山岳トンネルの 更新方法及び 覆工構造体	国立研究開発法人 土木研究所 株式会社大林組	砂金 伸治 日下 敦 巽 義知 石村 利明 小出 孝明 秋好 賢治 伊藤 哲 阪口 雅信 磐田 吾郎	2020年9月18日 (特願 2020-157321)	2022年3月31日 (特開 2022-51059)

5. 商標出願

標章	出願人	出願国	申請年月日 (商標番号)
リペアーチ	株式会社大林組	日本	2021年12月22日 (商願 2021-159659)

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.562 June 2022

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754