

小断面・複雑形状トンネルにおける 設計・施工の取り組み

塩見 武¹・飛弾野 大介²・山上 道晶³・小林 一樹⁴・中村 順一⁵

¹正会員 荒井建設株式会社 土木事業本部 土木技術部
(〒070-0054 北海道旭川市4条西2丁目2番2号)

E-mail: tshiomi@araikensetsu.co.jp

²荒井建設株式会社 土木事業本部 土木部 (〒070-0054 北海道旭川市4条西2丁目2番2号)

E-mail: dhidano@araikensetsu.co.jp

³荒井建設株式会社 土木事業本部 土木部 (〒070-0054 北海道旭川市4条西2丁目2番2号)

E-mail: myamagami@araikensetsu.co.jp

⁴荒井建設株式会社 土木事業本部 土木部 (〒070-0054 北海道旭川市4条西2丁目2番2号)

E-mail: kkobayashi@araikensetsu.co.jp

⁵国土交通省 北海道開発局 旭川開発建設部 (〒078-8513 北海道旭川市宮前1条4丁目3番15号)

E-mail: nakamura-j22ab@mlit.go.jp

計測トンネルは、延長 99.9m (掘削延長 92.0m) の地震地殻変動を観測するためのトンネルである。当該トンネルは、掘削断面積 20m² 程度の小断面トンネルを主体とし、交差部・屈曲部が連続する複雑な線形を NATM により施工するものであり、施工例の少ない特殊な条件であったことから、文献・論文などを参考にさまざまな設計・施工の検討を行った。本稿では、①施工機械を踏まえたトンネル掘削断面の見直し、②安全性・施工性を考慮した交差部・屈曲部の支保工計画、③交差部の扁平断面での安定検討、④発破振動の影響を考慮した交差部・屈曲部の掘削計画、⑤交差部・屈曲部の防水シート施工、⑥覆工コンクリート補強計画、⑦セントル計画、⑧覆工コンクリート配合計画などの取り組みを報告する。

Key Words: seismic crustal deformation observatory, small cross section, complex linear, crossing and bending sections, flat cross section

1. はじめに

計測トンネルは、北海道北部の中川郡中川町に位置する延長 99.9m (掘削延長 92.0m) の地震地殻変動を観測するためのトンネルである。北海道大学で現在使用している同様の施設が、北海道開発局で整備中の音威子府バイパス (高規格幹線道路) の建設にともない移転が必要になったことから、北海道開発局で施設を補償整備し、完成後は北海道大学所有の施設となる (図-1)。

本稿では掘削断面積 20m² 程度の小断面トンネルを主体とし、交差部・屈曲部が連続する複雑形状という特殊な条件下での掘削・支保工、防水・覆工コンクリートの設計・施工の取り組みについて報告する。



図-1 工事位置図

2. 工事概要

工事名：中川町 計測トンネル工事
 発注者：国土交通省 北海道開発局 旭川開発建設部
 施工者：荒井建設株式会社
 工事場所：北海道中川郡中川町字中川
 工期：2020年5月1日～2021年7月30日
 工事内容：トンネル延長 L=99.9m
 内空断面積 19.28～23.76m²
 NATM, 発破掘削（一部機械掘削）

3. 地質概要

当該箇所周辺の地形は天塩川支流銅蘭川によって形成された氾濫原低地と山頂標高 100～150m の山地地形からなる。周辺の地質は、中生代白亜紀の中部蝦夷層群の佐久層および佐久川層からなり、この基盤岩を被覆して完新世の地すべり土塊・崖錐堆積物が分布している。当該トンネルの基盤構成地層は佐久層で砂岩優勢の岩盤を主体としており、硬質（一軸圧縮強度 $q_u=71.6\sim81.7\text{N/mm}^2$ 、弾性波速度 $2.0\sim2.5\text{km/s}$ ）だが割れ目が多く亀裂質で、地山等級は D I と判定されている（図-2）。坑奥の最大土被りは 30m 程度で、坑口周辺 1km 圏内に住宅地やスキー場があり、坑口斜面上方約 100m に北海道電力所有の送電線鉄塔が存在する。

4. 掘削・支保工の取り組み

(1) トンネル掘削断面の見直し

当初設計は掘削断面積 10m^2 程度を主体とした断面設定になっており、このような小断面では特殊な機械の使用を余儀なくされることから、施工時期や地域性によって調達できる機械が限定されるため、施工機械に合わせたトンネル掘削断面を検討した。使用機械のうちもっとも作業スペースが必要なドリルジャンボによるロックボルト打設を想定し検討した結果、当初設計のトンネル掘削断面ではガイドセルが干渉するため、調達可能なドリルジャンボでは施工が不可能であり、ガイドセルの改造によるコスト増が問題となった。調達可能なドリルジャンボで施工可能なトンネル掘削断面を検討した結果、施工余裕 30cm を考慮すると、幅、高さともに 4.5m（吹付け後）への断面変更が必要となった（図-3）。

コスト比較を行った結果、ガイドセル改造費と断面変更による掘削費用の増加は同等であったことから、施工性に優れた断面変更を採用した（写真-1、図-4）。また、新たに設定した断面での走行軌跡による交差部進入につ

いて検討を行った。使用機械の中で全長が最長となるドリルジャンボ（全長 10.85m）で検討した結果、標準部の吹付け内幅 4.5m（変更設計寸法）、拡幅部の吹付け内幅 5.9m の条件で 20～40cm の断面余裕が確保できることを確認した（図-5）。結果として、断面の統一が図られたことでセントル費用が軽減し、全体コストでも有利になった（図-6）。

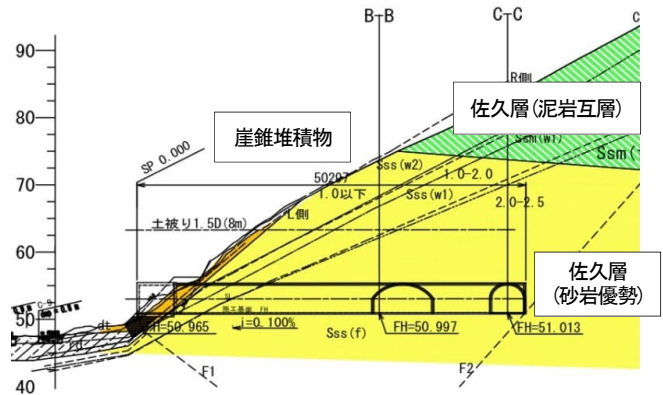


図-2 地質縦断面図

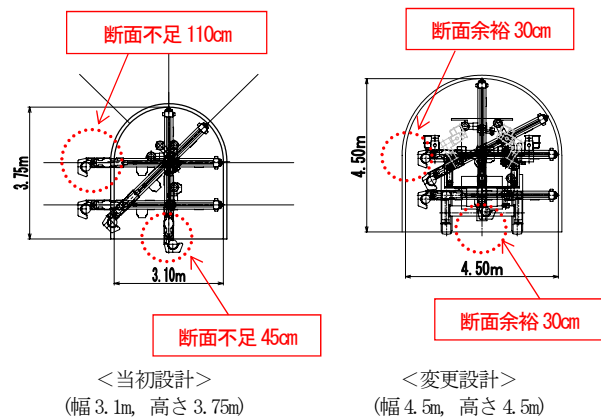


図-3 ロックボルト打設時の断面検討



※施工時期・地域性を踏まえた施工機械(ドリルジャンボ)

機種・規格		寸法
ドリルジャンボ THMJ2400	27- μ 1バケット ドリフク重量 135kg	幅 2.0m×高さ 2.8m (ガイドセル長 4.13m)
ショットボルト仕様	ホイール式	

写真-1 ロックボルト施工状況

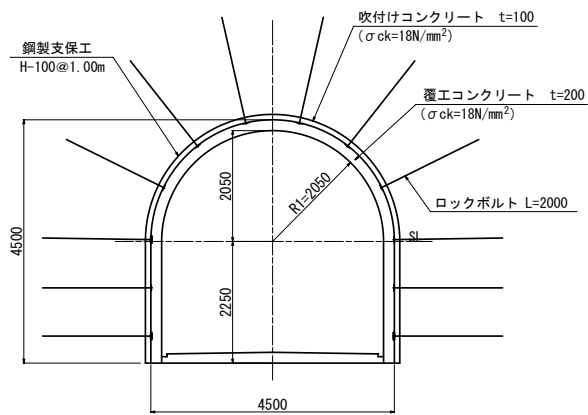


図-4 標準部断面図D I (変更設計)

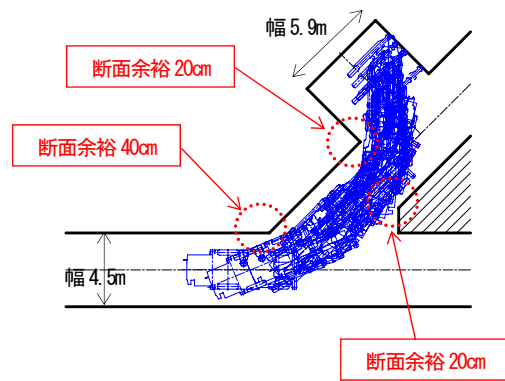


図-5 交差部でのドリルジャンボ走行軌跡

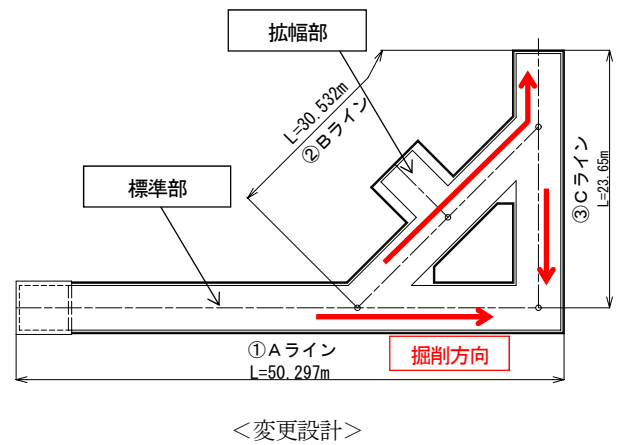
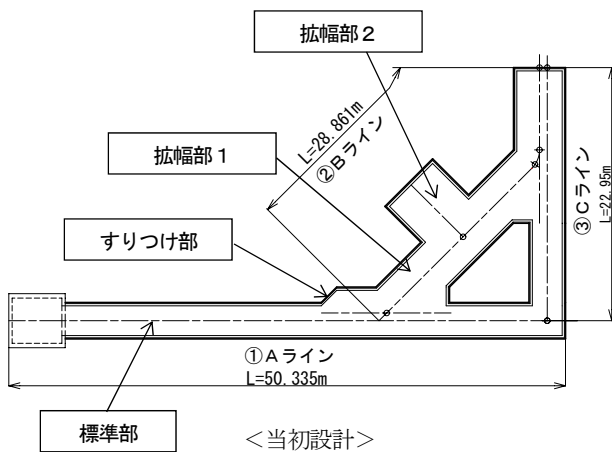


図-6 当初設計と変更設計の平面図

(2) 交差部・屈曲部の支保工計画

掘削順序は、Aライン→Bライン→Cラインの順序とした(図-6)。交差部・屈曲部では支保工の取り壊しを行うため、安全性を確保しながら作業できる設計が求められた。変更設計の標準部断面は上半が円形のため支保工の撤去面積が大きくなり上面の取り壊しが発生することから危険性が高いと考えた(図-7上図)。対策として、交差部・屈曲部の先行掘削箇所については側面の取り壊しのみで後行施工が可能な特殊断面(片側矩形)を採用した(図-7下図)。また取り壊しを行う側面のロックボルトにはFRP製ロックボルトを採用し、切断した鋼製支保工は補強プレートと補強ボルトで補強する構造とした(図-8、図-9)。実施工では、吹付けコンクリートに亀裂などの変状がないことを確認しながら掘削を進め、変位の増大や支保工の変状などは発生せず問題なく施工を完了した。

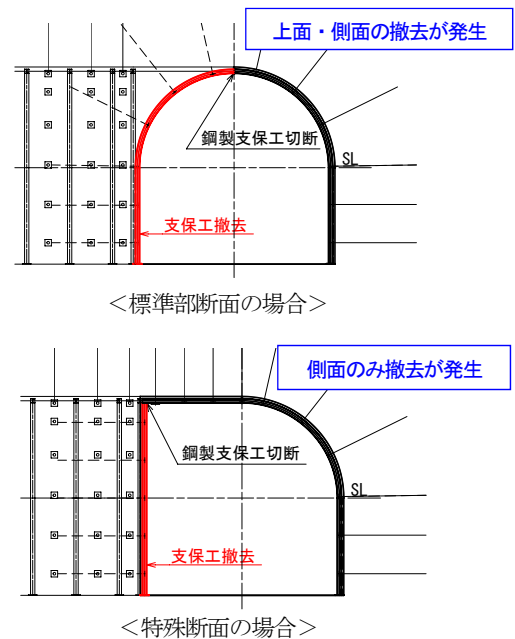


図-7 支保工の取り壊し詳細図

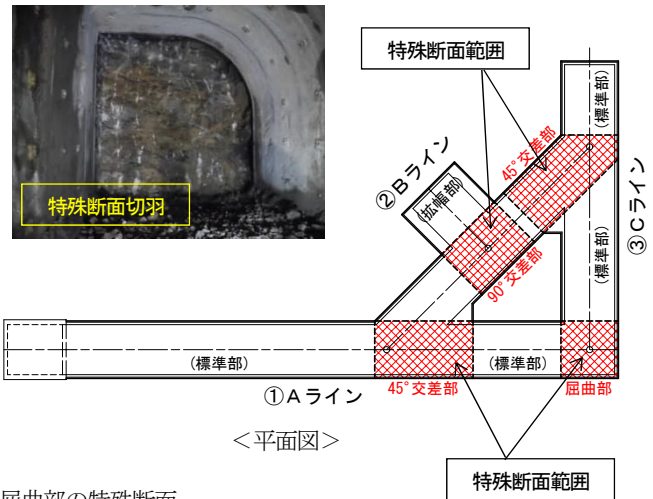
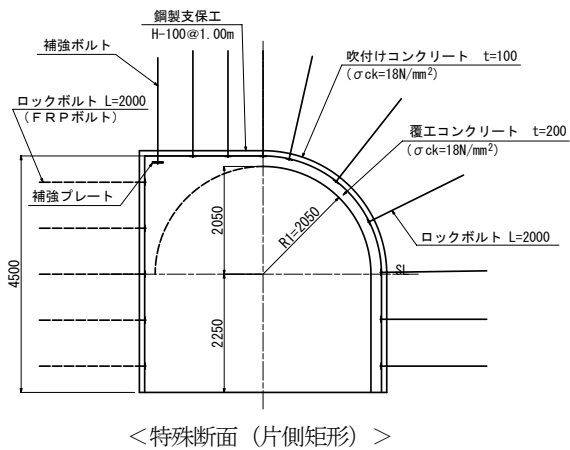


図-8 交差部・屈曲部の特殊断面

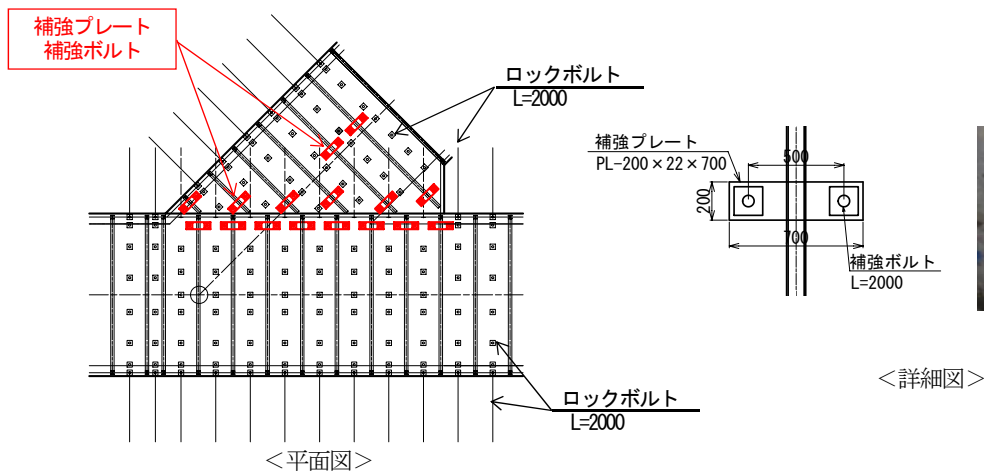


図-9 交差部詳細図

(3) 交差部の扁平断面の安定検討

交差部では掘削断面積が大きくなるとともに断面形状が扁平になるため、ゆるみ領域の拡大や変形の増大など支保工の安定性低下が懸念された。そこで交差部における支保工構造の安定性検証と具体的な支保工計画について数値解析による検討を行った。交差部について数値解析を実施した結果、変位は天端沈下で 6mm 程度と微小となり、ロックボルト軸力、支保工軸力とも問題ない値となったが、天端部周辺地山の安全率が 1 以下となる領域が確認された。安全率の低い領域は最大深度 2m 程度であり、この領域を確実に補強しつつ上部地山への定着を確保する目的から、アーチ天端部ロックボルト長を

2m から 3m とすることが望ましいという結果となった (図-10、写真-2)。数値解析による検証結果を踏まえ、断面形状が扁平で掘削断面積が大きくなる 45° 交差部について、図-8および図-9で示した天端部のロックボルトと補強ボルトの長さを 2m から 3m に変更した支保工構造を採用した (図-11)。また、初期のゆるみ変位を抑制する目的から、技術提案では交差部・屈曲部に高強度吹付けコンクリート ($\sigma_{3h}=2.0N/mm^2$) を提案し、施工を行った。実施工では、天端沈下で解析結果よりも若干大きく変位した箇所があったものの継続して変位が増大することなく収束した。

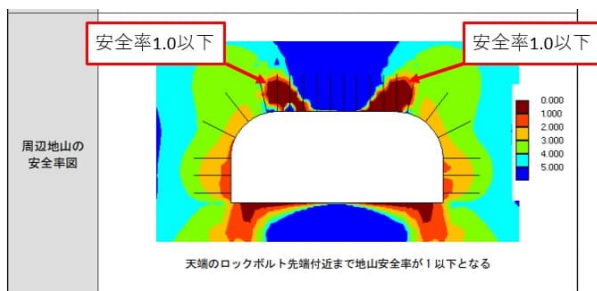


図-10 交差部の数値解析結果



写真-2 交差部施工状況

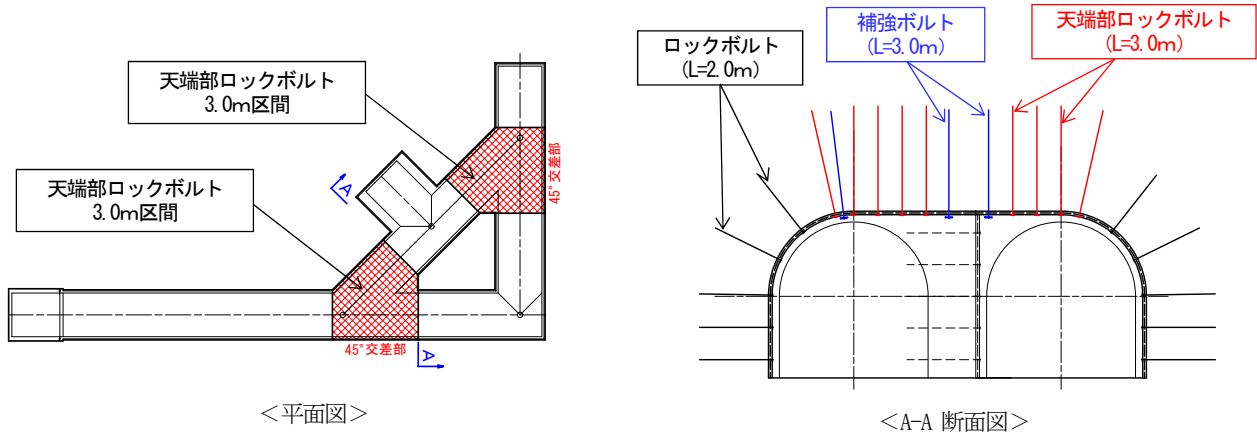


図-11 数値解析を踏まえた支保工計画

(4) 交差部・屈曲部の掘削計画

当初設計では、交差部・屈曲部を含むトンネル全線に発破掘削が計画されていた。交差部や屈曲部で発破掘削を行った場合、後行掘削の発破振動によって先行掘削箇所の吹付けコンクリートが破損することが懸念されたため、掘削方法を検討した。吹付けコンクリートにクラックが発生する限界値を変位速度 70cm/s^りとし、限界値 80%の変位速度 55cm/s を管理値として設定した(図-12)。発破振動の推定を行った結果、トンネル同士の壁面離れを 4.0m確保できるまでは機械掘削にて掘削作業を行うこととし、施工範囲を設定した(図-13、写真-3)。施工の際には発破掘削開始から1週間を試験発破期間として、振動、騒音、低周波音を測定し、対策範囲の評価を行った。実施工では、吹付けコンクリートにクラックなどの破損は発生せず、施工を進めることができた。

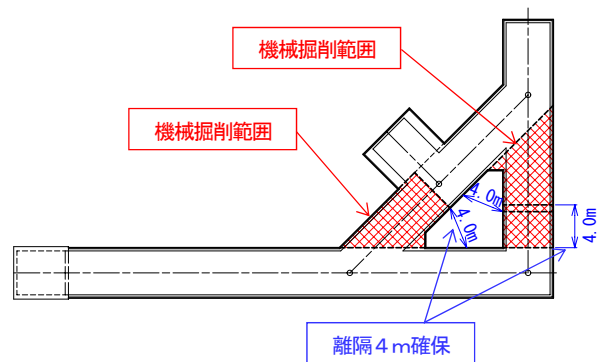


図-13 振動予測値にもとづく機械掘削範囲

表 1-10 覆工、吹付けコンクリートのクラック発生実験事例

工事名称	対象	限界値
己斐トンネル	覆工コンクリート	30cm/s 以上
小木津トンネル	覆工コンクリート	30~40cm/s 以上
若山トンネル	吹付けコンクリート	70cm/s 以上

[70cm/s × 0.8 = 55cm/s] を管理値として設定

【推定式： $V = K \times W^{2/3} \times D^{-2}$ 】

V：変位速度 (=55cm/s)
W：段あたり薬量 (=2.7kg 芯抜き, 3.0kg 払い)
K：係数 (=750 芯抜き, 350 払い)
D：発破場所からの距離 (m)

∴管理値を満たすために必要なトンネル壁面間距離
 $D = 3.7m \div 4m$

図-12 発破振動管理値と予測値^り



写真-3 交差部での機械掘削

5. 防水・覆エコンクリートの取り組み

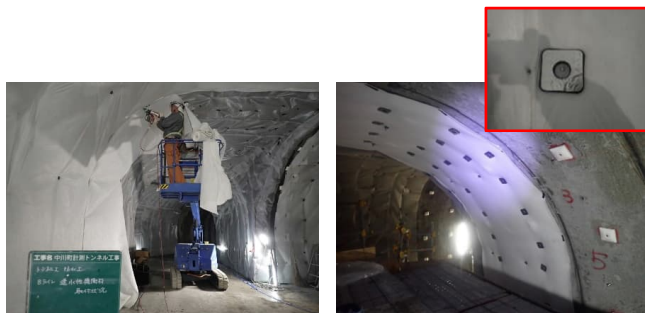
(1) 交差部・屈曲部の防水シート施工

交差部・屈曲部は扁平断面であり、湧水発生時の天端部の導水確保が課題となった。トンネル掘削中は湧水箇所のみ排水材による湧水処理を行っていたが、防水シートの施工に先立ち、湧水箇所だけでなく扁平断面となる交差部・屈曲部全体に排水材を設置した（写真-4）。

交差部・屈曲部では複雑な形状での防水シート施工となることから、溶着不良を防止するため、防水シート固定ディスクシステムを採用し、EVAシートと不織布の別貼り施工を行った。不織布を貼り付けたあと、固定用ディスクを設置し電磁誘導加熱装置を用いて加熱することで、EVAシートと不織布を一体化させた（写真-5）。このシステムを採用したことで、任意の箇所でも確実な溶着が可能となり防水性が向上した。



写真4 交差部・屈曲部の湧水対策



<①不織布>

<②固定用ディスク>



<③防水シート>

<④施工完了>

写真5 防水シート固定ディスクシステム

(2) 覆エコンクリート補強計画

当初設計では、坑口部DⅢ区間で補強鉄筋が計画されていたが、交差部・屈曲部についても覆エコンクリートがアーチ部材として働かない構造になることから、単鉄筋による補強を計画した。補強区間を検討した結果、影響範囲は交差角度によって違いはあるものの、おおむねトンネル直径程度とされていることから、交差部・屈曲部から1D区間（D＝掘削径）を補強範囲と設定した²⁾（図-14、写真-6）。

(3) セントル計画

a) 標準部（直線部）のセントル計画

当初設計では、標準部（直線部）の型枠について、トンネル延長や複雑な線形を考慮しバラセントル L=6.0m で計画されていたが、スライドセントルの適用を検討した。一般的にスライドセントルの損料はバラセントルに比べて高価だが、取り扱いが容易で施工が速いことから全体コストを低減できる場合がある。トンネル断面の変更ともないバラセントルの費用に変更が生じたため、あらためてコストの比較検討を行った結果、スライドセントルを使用の方がコストを低減できる結果となったことからスライドセントル L=6.0m を採用した（写真-7、写真-8）。

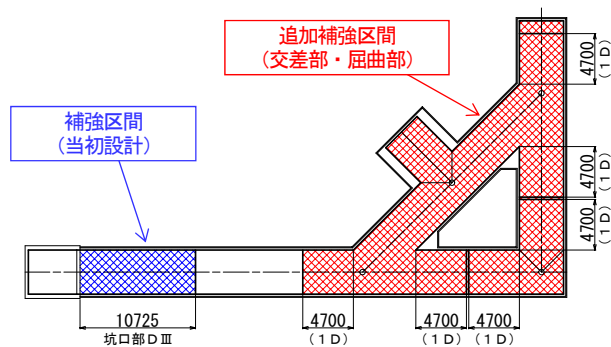


図-14 覆エコンクリート補強区間



写真6 覆エコンクリート補強鉄筋



写真7 スライドセントル



写真8 覆工 (標準部)

b) 交差部・屈曲部のセントル計画

当初設計では、交差部・屈曲部の型枠について、バラセントル L=6.0m を使用した分割打設で計画されていた。交差部・屈曲部の構造上の安定性、施工性、コストを検討した結果、極力分割せずに打設することが望ましいと

考え、バラセントル L=9.0m を主体とした一体打設を計画した(図-15, 写真-9)。また、面板には木製パネルを採用し、高精度な加工と細かい調整に対応した(写真-10, 写真-11)。

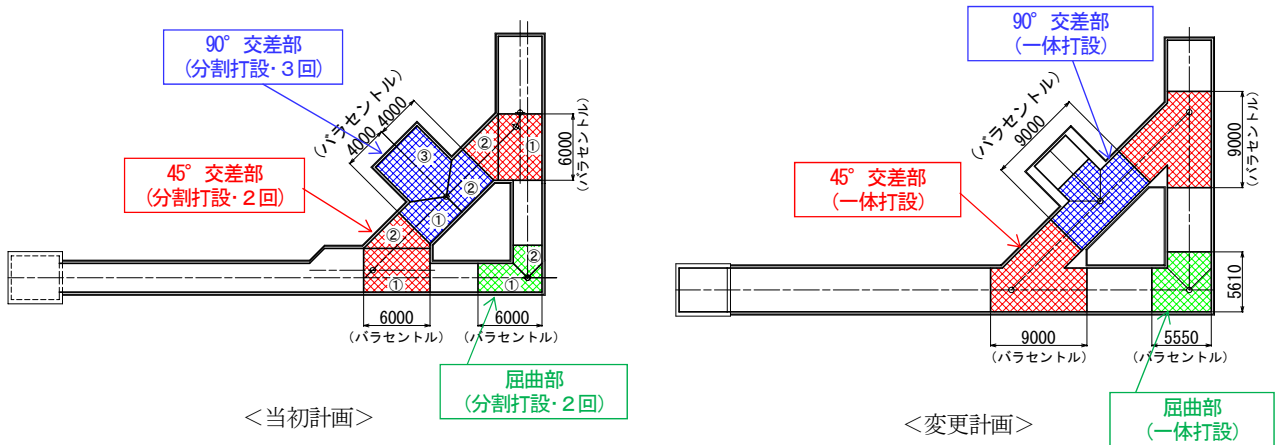


図-15 交差部・屈曲部のセントル計画



写真9 交差部バラセントル



写真10 木製パネル



写真11 覆工 (交差部)

(4) 覆工コンクリート配合

覆工コンクリートは、厚さ 20cm の補強鉄筋区間が主体となっており、コンクリートの締固め不足や充填不良が懸念されたことから、当初設計の配合（スランプ 15cm）に変えて、トンネル全区間でスランプ 21cm の中流動コンクリートを適用した（写真-12）。中流動コンクリートは増粘剤一液タイプの高性能 AE 減水剤を使用した配合とし、打設は棒状バイブレータと型枠バイブレータを併用した。



写真-12 中流動コンクリート



<標準部>



<交差部>

写真-13 覆工コンクリート打設完了

6. おわりに

計測トンネルは、小断面かつ複雑な線形という特殊な条件であったが、多くの文献・論文などを参考に設計・施工を進めてきたことから、今後の類似工事の参考となるよう広く施工報告を行うことは技術者としての責務であると考え、今回の報告に至った。工事は、2020年9月に掘削を開始して同年12月に貫通、2021年7月に竣工を迎えた。今回、施工だけでなく設計に関する取り組みについても施工者が参画したことで詳細な現場条件や地域特性を考慮した検討内容になり、本稿で報告した品質確保・安全性向上・施工効率改善・コスト低減などの成果に加え、計画が円滑に進捗できたことから工程確保にもつながった。

謝辞：発注者である北海道開発局および北海道大学をはじめ、関係各位に多大なご指導とご協力いただきましたことに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本火薬工業会：あんな発破こんな発破 発破事例集, pp.3-8, 2002.
- 2) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社：設計要領第三集トンネル建設編, pp.204-205, 2013.

(2022. 8. 26 受付)

Design and construction approaches for small cross section and complex shape tunnels

Takeshi SHIOMI, Daisuke HIDANO, Michiteru YAMAGAMI,
Kazuki KOBAYASHI and Junichi NAKAMURA

The measurement tunnel is 99.9 m long (92.0 m excavated) and is used to observe seismic crustal deformation. The tunnel was to be constructed by NATM with a small cross section of about 20 m² and a complex linear with a series of intersections and bends. In this paper, the following points are discussed: (1) review of tunnel excavation cross section based on construction machinery, (2) support plan for crossing and bending sections considering safety and workability, (3) stability study for flat cross section of crossing, (4) excavation plan for crossing and bending sections considering the effect of blasting vibration, (5) water-proof sheet construction for crossing and bending sections, (6) reinforcement plan for lining concrete, (7) The report includes the centering plan, and the mixing plan for the lining concrete.