

道路トンネル分岐合流部の合理的施工法の開発 DEVELOPMENT OF RATIONAL CONSTRUCTION METHOD FOR BISECTING/MERGING SECTION OF HIGHWAY TUNNEL

小林 正典¹・磯 陽夫²・伊藤 忠彦³・石山 宏二⁴
Masanori KOBAYASHI・Akio ISO・Tadahiko ITO・Koji ISHIYAMA

This paper presents proposed “Couple Bird Method” as a rational construction using non-open excavation method for bisecting/merging section of highway tunnel, which allow us to achieve safe and sound construction together with shortening work period and reducing costs.

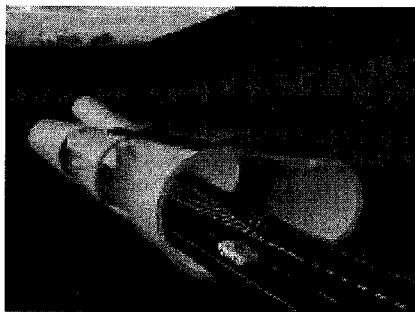
This proposed construction method is to build a bisecting/merging section of main and ramp tunnels by shield tunneling method. After ejecting the expansion segments at bisecting/merging section, the mountain tunneling method is employed to excavate soils between the main and ramp tunnels connecting them with metal shell beams.

Excavation mechanism at outbreak that is a challenge for construction and test results for the verification of workability at ejection of expansion segment and of reliability of lining structure are reported in this paper.

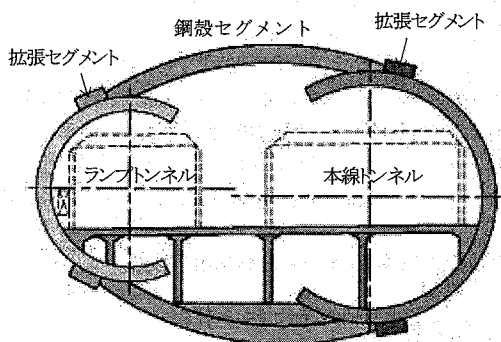
Key Words: Shield Tunnel, NATM, Bisecting/Merging

1. はじめに

カップルバード工法は，大断面・大深度を対象とした道路トンネルの分岐合流部を非開削で合理的に施工するシールド技術である（図－1 参照）．本工法は，分岐合流部で本線トンネルとランプトンネルの外部に拡張セグメントを張り出し，両トンネル間を NATM で掘削することにより空間を確保し，拡張セグメントの間を鋼殻セグメントで接合する技術である（図－2 参照）．なお，拡張セグメントと鋼殻セグメントの接続部には，場所打ち RC 構造を採用している．



図－1 道路トンネル分岐合流部



図－2 道路トンネル分岐合流部覆工構造

キーワード：シールドトンネル，NATM，分岐合流

¹正会員 西松建設株式会社 技術研究所

²正会員 西松建設株式会社 技術研究所

³正会員 西松建設株式会社 技術研究所

⁴正会員 西松建設株式会社 技術研究所

2. カップルバード工法の概要

(1) 拡張セグメント施工方法

あらかじめ収納セグメントに組み込まれている拡張セグメントを押し出す時期により、シールド掘進時に余掘りした後に押し出す方法とトンネル間を山岳工法で切抜ける際に押し出す方法の2つに大別される。

余掘り掘削機構は、拡張セグメントの押し出し量や押し出す位置に応じて、親機シールドに円形シールドを内蔵し斜めに押し出し・引戻しが可能な構造を有するリトラクタブル型（図-3）と、コピーカッタ型（図-4）がある。

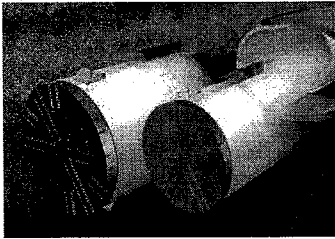


図-3 リトラクタブル型

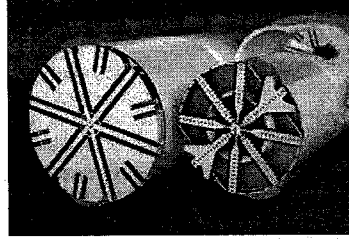


図-4 コピーカッタ型

(2) 工法の特徴

本工法の主な特徴を以下に示す。

① 経済的な覆工

覆工形状は外側に凸形状の横楕円形であるため、外圧に対して安定した合理的、経済的な覆工構造である。

② シンプルな施工法

両トンネル間の切抜けは、硬質地盤では施工実績のある NATM によって行うため、安全確実な施工が可能である。

③ 安全性の高い施工法

最終本体覆工の完成後に、本線、ランプシールドのセグメントを撤去するため、安全性が高い。

(3) 開発課題

本工法の施工性および構造上の課題について以下に示す。これらの課題については、実験により検証を行った。

① リトラクタブルシールドの掘削性

- ・土圧式ランプシールド内に収納可能な構造
- ・斜め方向に対する、親機シールド掘進速度での硬質地盤の掘削性

② 拡張セグメントの押し出し性

- ・ボックス構造を高水圧下で押し出す際の止水性を確保可能なシールド構造
- ・余掘り部の緩み防止を目的に注入する充填材を、押し出しとともに取り込みながら所定速度で押し込むことの可否
- ・押し出しに必要なジャッキ圧の確認

③ 拡張セグメントと鋼殻セグメントの接続部の構造

- ・拡張セグメントと鋼殻セグメントの施工に伴う相対的なズレに対して接続が可能で、所要耐力を有する覆工構造

3. 余掘り掘削機構の施工性に関する検証実験

(1) 実験概要

斜め掘進となるリトラクタブルシールドの地山掘削性を検証するため、シールド外径は1/2スケールの $\phi 1000\text{mm}$ とし、模擬地盤はエアモルタル ($\sigma_1 = 0.5\text{N/mm}^2$) で作成した。実験における掘進速度は、親機シールドの掘進速度を考慮し、30, 50mm/min とし、トンネル軸方向に1m掘進させた。

(2) 実験結果

模擬地盤へ親機内から斜めに押し出し（写真-1）、トンネル軸方向へ掘進させた結果、振動もなく、スムーズな掘削であった。リトラクタブルシールドによる模擬地盤の掘削状況を写真-2に示す。

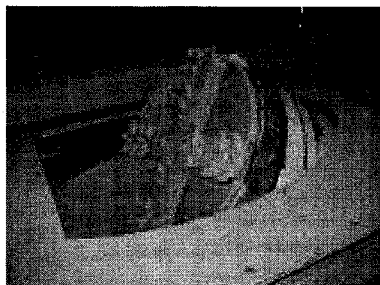


写真-1 リトラクタブルシールド押出し状況

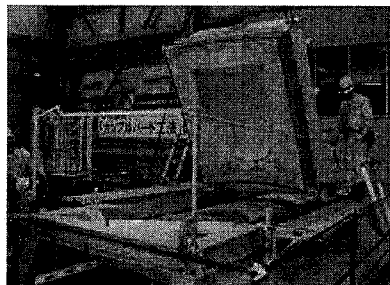


写真-2 リトラクタブルシールド掘削状況

4. 拡張セグメントの押出し施工性に関する検証実験

(1) 実験概要

矩形形状である拡張セグメントを、高水圧下で押し出す際の止水性、所要押し出し力等を確認した。

試験体は、実施工におけるセグメント幅 1.5m、拡張セグメント押出し量 1m の想定に対して、拡張セグメントサイズを 1/2 スケールの長さ 0.75m×幅 0.67m×高さ 0.9m (押出し量 0.5m) とし、拡張セグメント前後の 3 リング部を平板化した (写真-3、4 参照)。

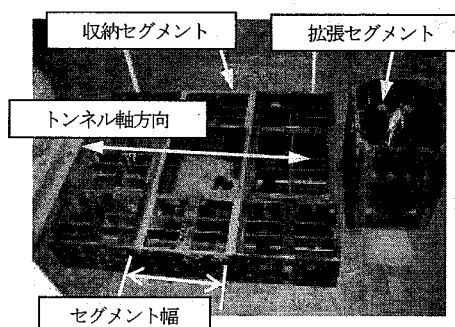


写真-3 実験用拡張セグメント、収納セグメント

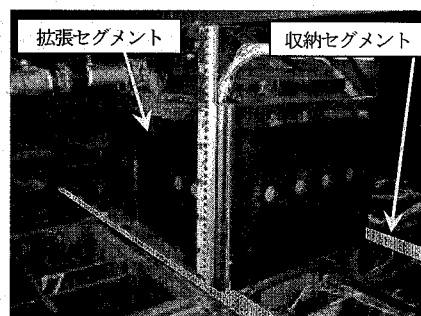


写真-4 拡張セグメントセット状況

押し出し速度は、テール内でのセグメント組立と並行し、掘進工程に支障を与えないよう 50mm/min とした。これは、実施工でのセグメント組立時間を 50 分とし、押し出し装置の移動等を考慮して、押し出し 1 箇所 20min として設定した。

高水圧下における押し出しを再現するため、押し出し方向は下とし、拡張セグメント部には、容器内に充填材を注入し 0.5MPa を作用させた。実験装置の概要を図-5 に示す。

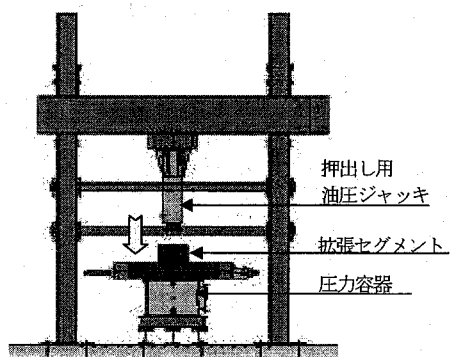


図-5 実験装置概要

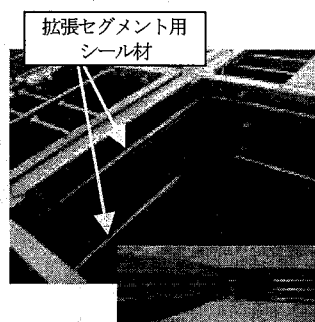


写真-5 拡張セグメント用シール材

(2) 拡張セグメント用シール材

製作における加工性および費用等を考慮して、隅部をR25mmとした。内張りとなるシール材が、拡張セグメント押出しにおいても、0.5MPaの作用下でも止水性を確保することが、施工の安全上重要である。

シールはリップが3段となっているものを、要素実験により耐圧経時変化をもとに、シール溝深さの設定および所要形状による清水での止水性を確認後、本実験に採用した（写真－5参照）。

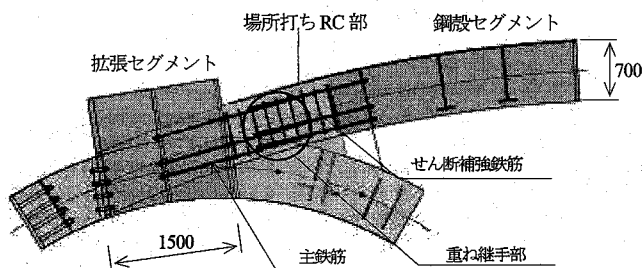
(3) 実験結果

押出し速度 50mm/min, 100mm/min においても、0.5MPa の条件下で止水性を確保した。また、押出しに伴う充填材の回収が確実に行われた。押出し力は、ほぼ拡張セグメントに作用する充填材圧相当であった。

5. 覆工構造の確実性に関する検証実験

(1) 検討箇所

本実験の検討箇所は、鋼殻セグメントと場所打ち RC 部の継手構造部である（図－6 参照）。継手部には、施工誤差によるズレの許容、および合理的な軸力伝達を可能にする構造が求められる。さらに、施工時および完成時に作用する発生断面力に対して、十分抵抗できる安定した構造耐力も必要となる。



図－6 検討箇所

(2) 接続部構造の基本概念

カップルバード工法は、完成形が卵形のため（図－1 参照）、外圧に対して安定した断面構造となる。しかし、セグメント部には大きな軸力が作用するため、特に、拡張セグメントと鋼殻セグメントの接続部（場所打ち RC 部）が、構造上の弱点にならないよう工夫が必要となる。

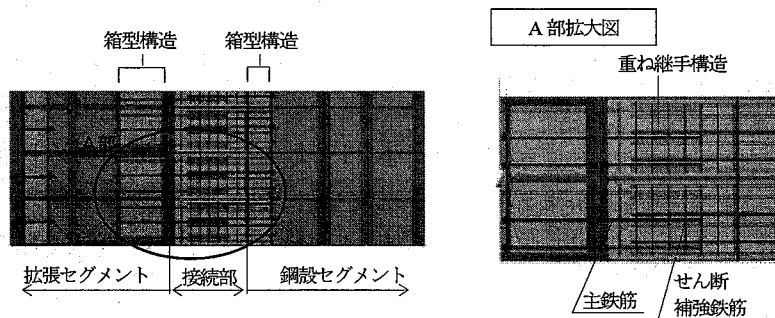
以上の点を考慮し、当該構造部の基本概念として下記対策を講じている（図－7 参照）。

① 主鉄筋の重ね継手構造

本線トンネルとランプトンネルの相対施工誤差によるズレを許容し、軸力を伝達する合理的な構造とするため、両セグメントから挿入した主鉄筋による重ね継手構造を採用した。

② セグメント継手板を箱型構造

継手部での高い剛性を確保するため、拡張セグメントおよび鋼殻セグメントの継手板に箱型構造を採用した。



図－7 接続部の平面構造

(3) 検討項目および実験パラメータ

本実験における主な検討項目は、以下に示す4項目である。

- ① 想定した設計条件より算出した3ケースの発生断面力に対する応力照査を検討項目とし、各軸力を付加した時の抵抗モーメントが設計値（許容時、終局時）を満足するか確認する。
- ② セグメント接続部（RC部）が施工誤差によるずれをどの程度まで許容できるのか確認することを検討項目とし、RC継手部における主鉄筋の離隔を設計規準の最小幅もしくは最大幅まで離れた場合の抵抗モーメントへの影響を確認する。
- ③ RC部のせん断補強鉄筋による横方向拘束効果に与える影響を確認することを目的として、せん断補強鉄筋を最小鉄筋量の規準を満足する必要量もしくはその倍の量を配置した場合の抵抗モーメントへの影響を確認する。
- ④ RC部の曲げ・せん断抵抗性の確認を検討項目とし、破壊形態が曲げおよびせん断となる試験体を製作し、終局抵抗モーメントおよび終局せん断力に対する照査を行う。

本実験における実験パラメータは、①導入軸力量（3水準：小、中、大）、②主鉄筋の離隔（2水準：最小、最大）、

③せん断補強鉄筋量（2水準：少、多）、④破壊形態（2水準：曲げ、せん断）とした。

(4) 実験概要

実験の主目的は、拡張セグメントと鋼殻セグメントの接続部（場所打ちRC部）における力学的性能を確認することである。試験体は、継手構造部を実大の4分の1スケールの直線はり部材でモデル化したもので、導入軸力を一定保持した状態で、載荷試験を行い、所要の性能を確認した。鉛直荷重および部材軸力の導入には複動型油圧ジャッキ（最大能力：1000kN）を使用し、はり部材に対して一方向中央2点静的単調載荷し、その時の挙動を計測した。

曲げ試験体の構造例を図-8に示す。実験載荷装置の概略を図-9に示す。

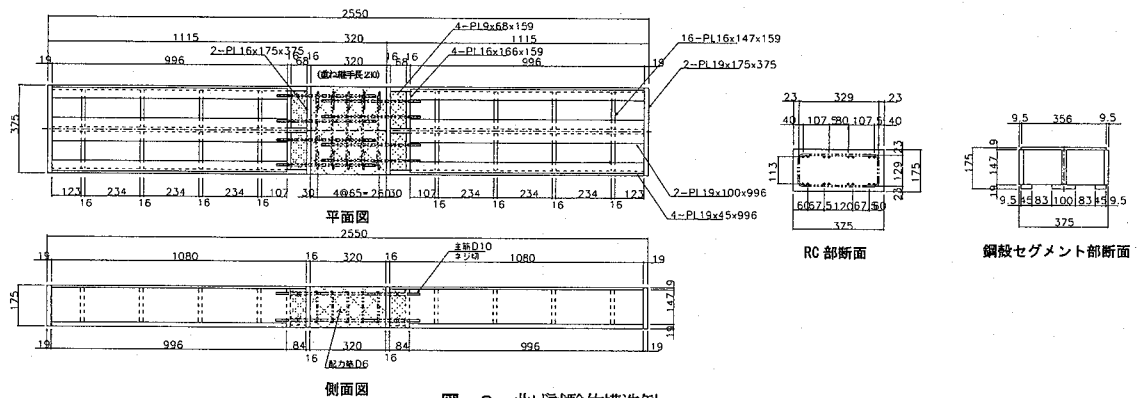


図-8 曲げ試験体構造例

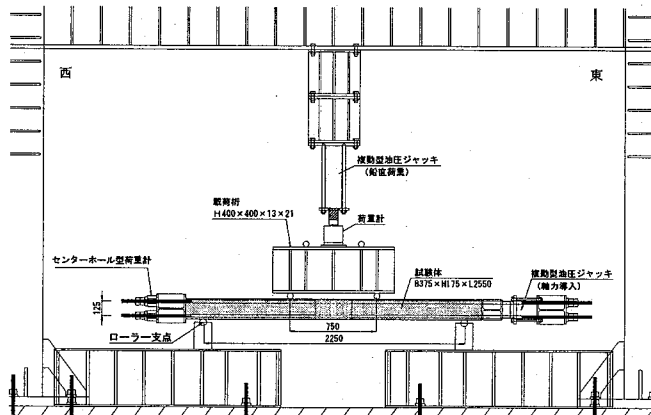
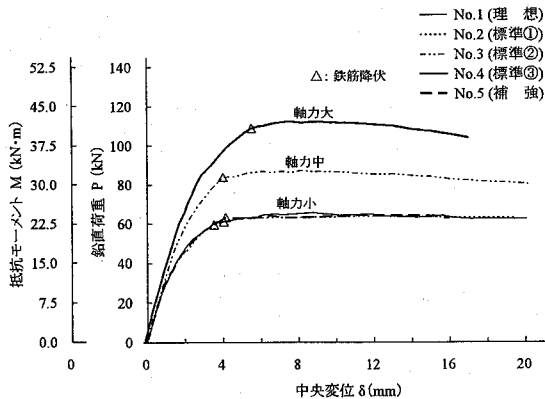


図-9 実験載荷装置の概略

(5) 実験結果

接続部（場所打ち RC 部）の力学的性能を確認するために実施した曲げ試験結果例（荷重－変位履歴図）を図－10 に示す。発生断面力作用時の各はり部材の破壊形式は、事前に相互作用図（M-N 破壊包絡線）から推測したとおり、鉄筋降伏先行型の曲げ引張破壊となった（図－11 参照）。



図－10 荷重－変位履歴図

また、当該接続部（場所打ち RC 部）構造が、軸力を伝達する合理的な構造であることを確認するために実施した接続部のひずみ分布計測結果例を図－12 に示す。

導入軸力量の大小によらず、中立軸の位置は、許容抵抗モーメント付近まで計算値と概ね等しい位置にあった。このため、許容抵抗モーメント付近まで平面保持の仮定が成立し、コンクリートと鉄筋が一体となって荷重に抵抗していることが確認できた。

本実験により得られた知見を以下に示す。

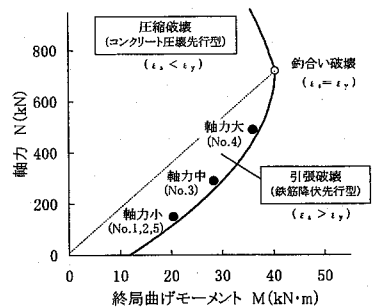
① 曲げ試験

- ・導入軸力量が増加すると、鉄筋降伏点ならびに最大荷重値は上昇した。また、すべての試験体において、抵抗モーメントの実験値（許容時、終局時）は、計算値を上回り、通常的设计理論が適用できることが確認された。
- ・導入軸力量が同一条件のもと、重ね継手部の主鉄筋離隔幅を最大 40mm とした場合でも耐荷性能への影響はみられなかった。このため、本継手構造では、日本建築学会規準で算定した最大離隔程度の相対施工誤差を許容できると考える。
- ・導入軸力量が同一条件のもと、重ね継手部のせん断補強筋量を倍に増やしても、耐荷性能に明確な差は認められなかった。これにより、せん断補強鉄筋は、土木学会規準の最小鉄筋量程度を配置することで要求性能を満足できると考える。
- ・全土被り荷重を考慮した場合でも、接続部（場所打ち RC 部）は、鉄筋降伏先行の曲げ引張破壊となることが確認された。

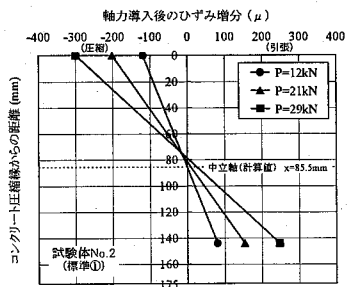
② せん断試験

- ・ゆるみ荷重（完成時）を想定した軸力条件下においても、部材せん断力は、土木学会規準のせん断力を十分満足する結果を得られた。

以上より、当該接続部（場所打ち RC 部）の構造耐力が十分にあることを確認した。



図－11 相互作用図（M-N 破壊包絡線）



図－12 接続部のひずみ分布例

6. おわりに

シールド工法による道路トンネルの分岐合流部を、非開削で合理的な断面を構築する「カップルバード工法」における施工上および構造上の課題に対して、実験により確実性を検証した。本工法が、今後の首都圏における道路整備事業に寄与できれば幸いである。