

カップルバード工法の開発 Development of Couple Bird Method

小林 正典* 磯 陽夫*
Masanori Kobayashi Akio Iso

要 約

本開発は、道路トンネルの分岐合流部を非開削により合理的な断面として構築する工法として、安全性が高く確実な施工が可能で、工期短縮・コスト縮減を図る「カップルバード工法」に関するものである。本工法は、道路本線トンネルとランプトンネルの分岐合流部をシールド工法で構築する技術である。道路分岐合流部では、部分的に余掘りした空間に拡張セグメントを押し出した後、本線トンネルとランプトンネル間を山岳工法で掘削して、鋼殻による梁材で両トンネルを接合する。

本報告では、施工上の課題である余掘り掘削機構、拡張セグメントの押し出し施工性を検証する実験結果および分岐合流部の覆工構造の確実性を検証したものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. カップルバード工法の概要
- § 3. 余掘り掘削機構の施工性に関する実験
- § 4. 拡張セグメントの押し出し施工性に関する実験
- § 5. 覆工構造の確実性に関する実験
- § 6. おわりに

§ 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。

§ 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（図-3）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（図-4）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



図-1 道路トンネル分岐合流部

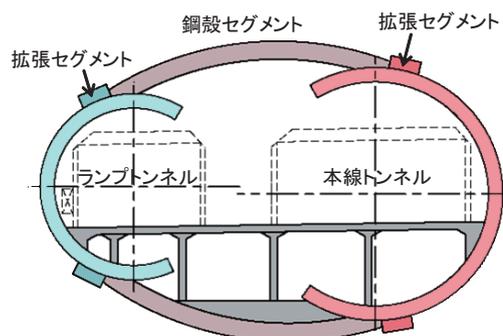


図-2 道路トンネル分岐合流部覆工構造

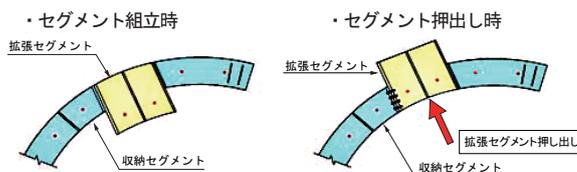
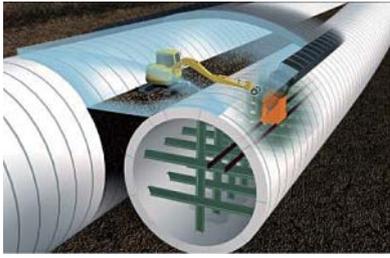
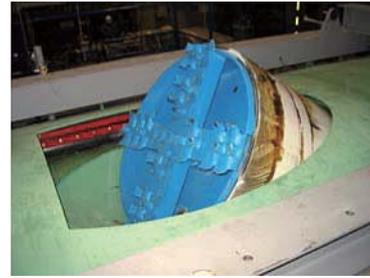


図-3 拡張セグメント

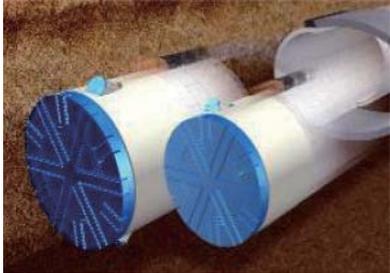
*技術研究所技術研究部土木技術研究課



図一4 切上げ時拡張セグメント押し出し状況



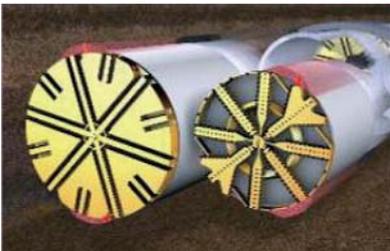
写真一1 リトラクタブルシールド押し出し状況



図一5 リトラクタブル型



写真二2 リトラクタブルシールド掘削状況



図一6 コピーカッター型

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(図一5)と、コピーカッター型(図一6)がある。

(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

両トンネル間の切上げは、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

- ・高水圧下で矩形断面の拡張セグメントを押し出す際に止水性を確保するシール構造
- ・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φ1,000mmとし、模擬地盤はエアモルタル($\sigma_7=0.5\text{ N/mm}^2$)で作製した。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, 50 mm/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(写真一1)、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二2に示す。

§ 4. 拡張セグメントの押し出し施工性に関する実験

(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 1.5 m、拡張セグメント押し出し量 1 m 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 0.75 m × 幅 0.67 m × 高さ 0.9 m (押し出し量 0.5 m) 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)。

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 50 mm/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、押し出し時間 1 箇所 20 min 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 0.5 MPa を作用させた。実験装置の概要を 図—7 に示す。

(2) 拡張セグメント用シール材

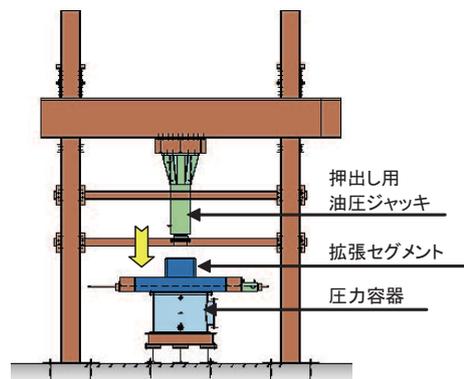
製作における加工性および費用等を考慮して、シール溝隅部を R25 mm とした。内張りとなるシール材が、拡張セグメント押し出しにおいても、0.5 MPa の作用下でも止水性を確保することが、施工の安全上重要である。

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

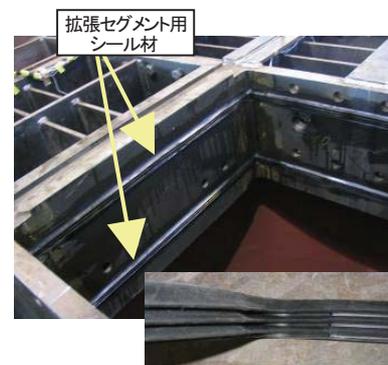
押し出し速度 50、100 mm/min においても、0.5 MPa の条件下で止水性を確保した。また、押し出しに伴う充填材の回収が確実に行われた。押し出し力は、ほぼ拡張セグメントに作用する充填材圧相当荷重 (251 kN) であった (図—8 参照)。



図—7 実験装置概要



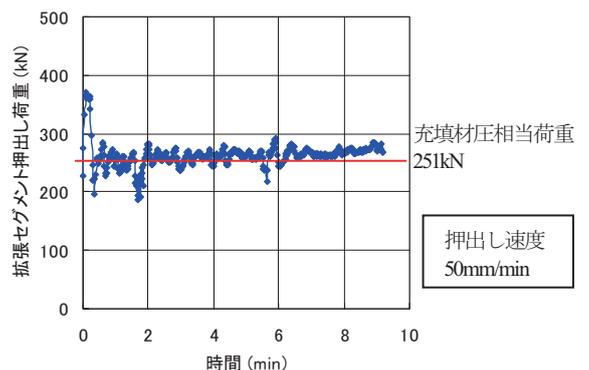
写真—3 実験用拡張セグメント、収納セグメント



写真—5 拡張セグメント用シール材



写真—4 拡張セグメントセット状況



図—8 拡張セグメント押し出し実験結果例

§ 5. 覆工構造の確実性に関する実験

(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（図一9 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。

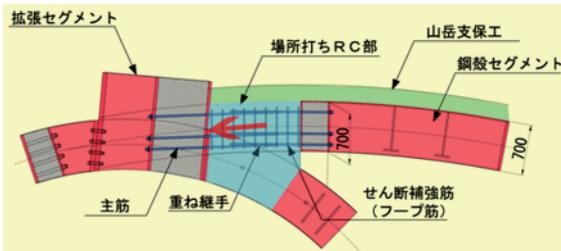
(2) 接続部構造の基本概念

カップルバード工法は、完成形が卵形のため（図一2 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。

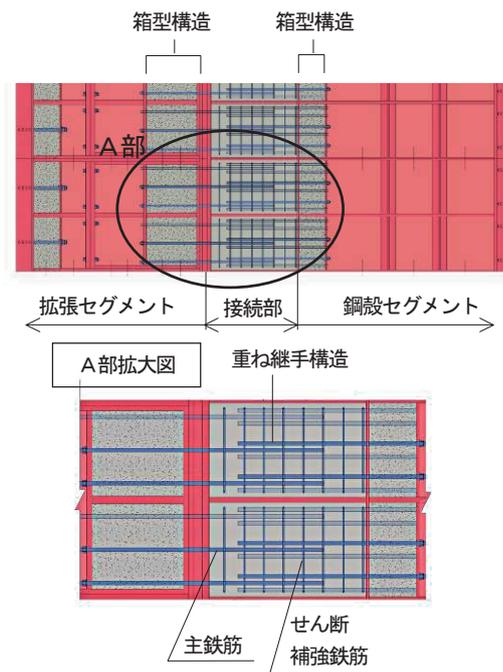
以上の点を考慮し、当該構造部の基本概念として下記対策を講じている（図一10 参照）。

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



図一9 検討箇所



図一10 接続部の平面構造

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。

(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）が施工誤差によるズレ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が耐荷性能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。

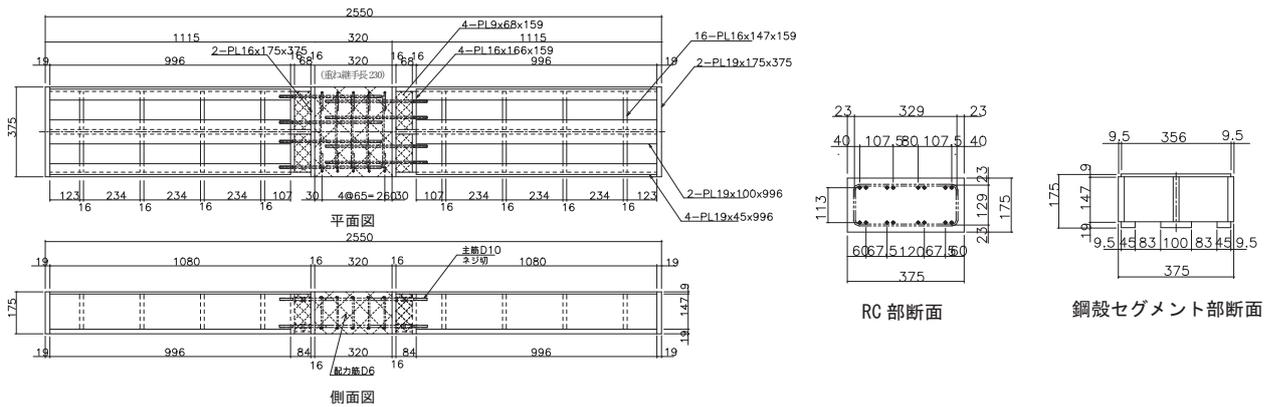
4) RC部の曲げ・せん断抵抗性の確認を検討項目とし、破壊形態が曲げおよびせん断となる試験体を製作し、終局抵抗モーメントおよび終局せん断力に対する照査を行う。

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。

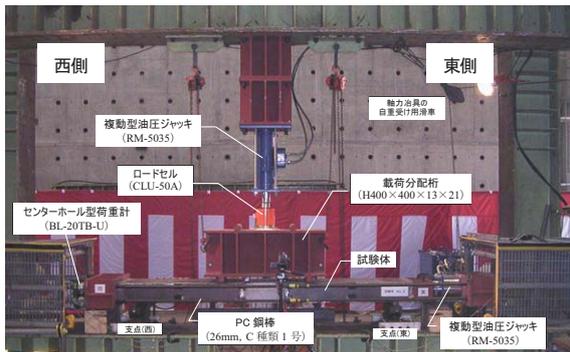
(4) 実験概要

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1/4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：1,000 kN）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一11に、実験装置全景を写真一6に示す。

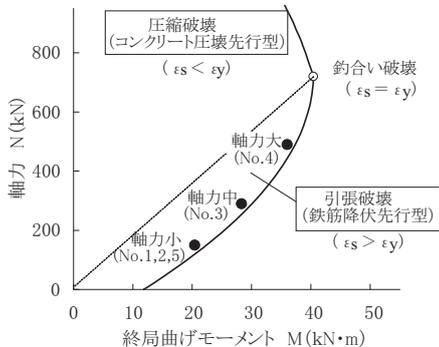
試験体の寸法形状は、幅（B）：375 mm×高さ（H）：175 mmの長方形断面で、曲げ試験体は全長2,550 mmの内、中央320 mm区間をRC部とし、せん断試験体は全長1,950 mmの内、片端部の541 mmをRC部とした。RC部の主鉄筋およびせん断補強鉄筋には、それぞれD10（SD295A、片端部M10ネジ加工55 mm）およびD6（SD295A）の異形鉄筋を使用し、鉄筋配置量は実大モデルの軸方向鉄筋量およびせん断補強鉄筋量と概ね等しくなるように調整し、その整合を図った。また、軸方向主鉄筋の重ね継手長（定着長）は、鉄筋の種類、コンクリ



図一 11 曲げ試験体構造例



写真一 6 実験装置全景 (曲げ載荷実験の場合)



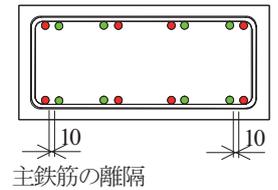
図一 12 相互作用図 (M - N 破壊包絡線)

ート強度、かぶり、横方向鉄筋の状態等を考慮して決める必要があるため、土木学会コンクリート標準示方書に記載された基本定着長算定式をもとに、230 mm とした。

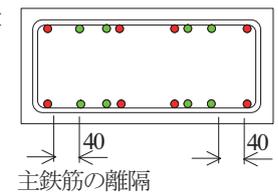
試験体の破壊形態に関しては、設計終局耐力付近での継手性能を確認するため、釣合い鉄筋比よりも鉄筋量を少なく配置し、鉄筋降伏先行型の引張破壊となるように許容応力度設計法により設計した (図一 12 参照)。

本実験で作製した試験体は全 6 体であり、曲げ載荷用試験体が 5 体、せん断載荷用試験体が 1 体である。なお、曲げ載荷用試験体については、配筋の違いにより 3 種類の試験体が製作され、①鉄筋配置が理想的な基準体 (1 体)、②主鉄筋の離隔が大きい試験体 (3 体)、③せん断補強鉄筋量が①の 2 倍の試験体 (1 体) とした。RC 継手

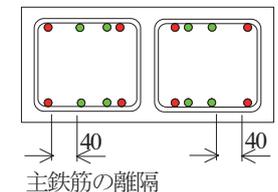
(理想) : No.1 試験体
 $p_w=0.26\%$



(標準) : No.2~No.4 試験体
 $p_w=0.26\%$



(補強) : No.5 試験体
 $p_w=0.52\%$



注) ● : 西側主筋, ● : 東側主筋

図一 13 RC 継手部の各断面形状の分類

部の各断面形状の分類を図一 13 に示す。

本実験の載荷制御方法は、最初に許容荷重まで荷重制御 (3 kN 間隔) とし、その後、主鉄筋が降伏わずみに達する手前 (剛性が変化する荷重) まで 5 kN 間隔で載荷した。それ以降、変位制御に切り替え、0.5 mm, 1.0 mm と適宜変位制御幅を変え、主鉄筋の降伏変位 (δ_y) に対して、 $3\delta_y$ 以上のデータ計測まで実験を継続した。

なお、導入軸力量が部材断面に対して大きいため、作業の安全性を考慮して、終局点 (コンクリート圧壊) までの載荷は実施していない。

(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) を図一

14 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。

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-15 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。

また、RC 部と鋼殻部の接続部における回転角 (θ) と曲げモーメント (M) との関係を図-16 に示す。全ての試験体に共通した傾向として、回転角 (θ) が許容抵抗モーメントのレベルで概ねゼロ値を示していることから、RC 部と鋼殻部の接続部引張側での目開きが、許容抵抗モーメント付近まで発生せず、剛性構造を保持していたと考える。その後、曲げモーメントの値が許容値を超えた辺りから回転角は緩やかな増加傾向を示し、計算上の終局抵抗モーメントを上回ったところで鉄筋が降伏点に達し、これ以降、回転角は急激に進展した。

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、全ての試験体で、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を確認した。
- ・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 40 mm 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軸力大の場合でも、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、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。

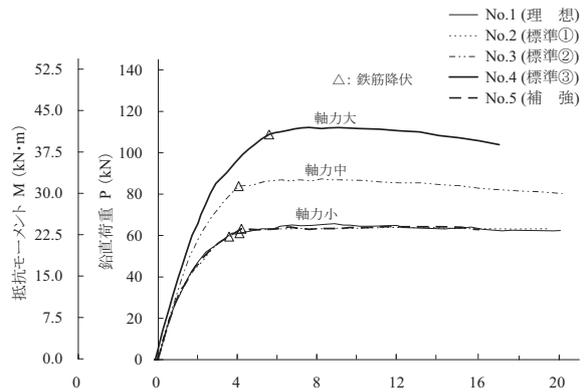


図-14 荷重-変位履歴図

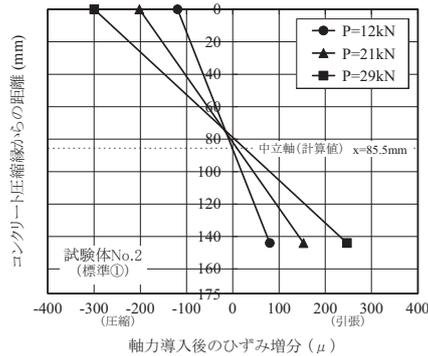


図-15 接続部のひずみ分布例

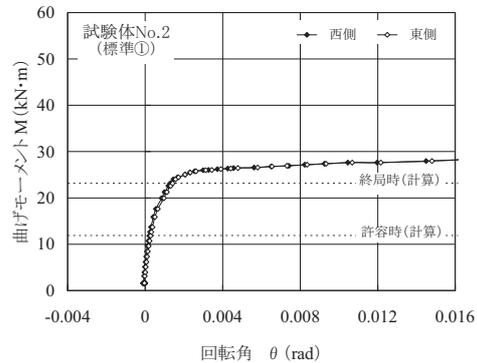


図-16 回転角と曲げモーメントの関係

§ 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として構築する「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、土木設計部、機材部、平塚製作所の多大なるご協力を頂き、実験により検証した結果、本工法の現実性を確認することができた。本工法が今後の道路整備事業に寄与できれば幸いです。

参考文献

- 1) 小林正典, 磯 陽夫: 道路トンネル分岐合流部の合理的施工法の開発, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第12巻, 土木学会, pp.267-272, 2007.1