

大断面分割シールド工法における継手の評価

－設計手法と継手性能実験－

湯口 正樹^{*1}・金子 研一^{*2}・大畑 裕^{*3}・植田 堅朗^{*1}・小柳 善郎^{*3}・服部 佳文^{*4}・真柴 浩^{*4}

Keywords : *underpass, traffic jam, interchange, shield, SRC*

アンダーパス, 交通渋滞, 地下立体交差, シールド, SRC 構造

1. はじめに

都市再生事業の一つに交通渋滞の解消があげられ、その対策として、道路と道路、あるいは道路と鉄道の地下立体交差（アンダーパス）を合理的に施工する技術が望まれている。従来、行われている推進系の技術ではトンネル延長が 50m、技術によっては 100m に限界があるだけでなく、曲線施工、あるいは地下水に対しても不向きであり、ここをターゲットとして技術開発を行った。

通常、アンダーパスは(1)大断面である(2)距離が短い(3)浅い土かぶり、といった条件を有する。このため、大断面を一気に掘進するシールド工法は、距離、曲線施工、地下水に関してはクリアしているが、経済性および土かぶりの面から適さないことが多い。

これに対し、著者らが提案する方式は大断面の道路トンネルを小断面に分割して施工することで掘削機のコストを安価にするだけでなく、トンネル周囲の地盤に与える影響を小さく、浅い土被りのトンネルに対応しようというものである。

本文では、設計の考え方と継手に関して行った実験について述べる。

2. 施工法の概要

大断面トンネルの掘削に際し、全体を格子状に等分割し、それぞれのトンネルを小型の矩形シールドで、地中にブロックを積み上げるように隣り合うトンネルに接しながら掘進し、大空間を掘削する。引き続き、トンネルの覆工に使用した鋼製セグメント（鋼殻）を外側の型枠

として代用し、掘削された空間の内部に躯体を構築する。養生後、トンネル内空断面内に残置された鋼殻を撤去し、表面を仕上げることで完成する。

図-1 に大断面分割シールド工法の概念図を示す。横断面部の両脇に立坑を設け、状況に応じて 1 台または複数のシールドで掘進する。四隅が直角の矩形断面を掘削するためシールドのカッタは揺動方式とした。また、隣り合うトンネル同士が接する構造になるために、施工方式はシールド工法ではなく推進工法とした。掘削機の断面と同寸法の鋼殻を立坑で組み立て、油圧ジャッキで推進する。

さらに、鋼殻間にガイドを設けることで掘進精度を上げることにした（図-4、図-9 で詳述する）。ガイドはレールと溝の組み合わせで設計し、離隔ゼロでは掘進に支障があるので最大 4cm の余裕をもたせている。先行するトンネル外側に設置する溝は立坑間で貫通しているが、レールは連続する必要は無い。ただし、距離が短く、止水構造として利用する場合、連続させる場合がある。



図-1 大断面シールド工法の概念図
Image

*1 東京支店土木工事作業所
*2 技術センター土木技術開発部地下空間開発室
*3 土木本部土木技術開発部
*4 土木本部土木設計部

3. 鋼殻の設計手法

3.1 構造の特徴

3.1.1 構造形式

本工法は、小断面の単体トンネルを逐次隣接させながら構築した後、鋼殻内に躯体を構築し、内部に残置される鋼殻を撤去し大断面トンネルを構築する工法である。このため、構造は、単体トンネルを構築したときに使用する鋼殻を本体利用したSRC構造を有する。(図-2)

ここでは、大断面分割シールド工法が有する施工上の特徴およびトンネル構造の特徴を整理し、その設計手法についてまとめる。

本工法は、図-2 に示すように小断面の単体トンネルを構築するステップと本体構造を構築するステップに分けられる。

単体トンネル時の構造は、施工時荷重（土水圧、裏込め注入圧、隣接掘進時の影響など）に耐えられる主桁、継手、スキムプレート、縦リブからなる鋼殻構造である。

完成段階では、単体トンネル時の鋼殻を本体利用し、内側には、鉄筋および鋼殻の一部を転用し、コンクリートを打設し、SRC構造を形成している。鋼殻は、シアコネクタ（単体トンネル掘進に使用する縦リブを利用）を介してコンクリートと一体化させている。また、せん断補強筋は縦リブを利用し、主桁および主筋を拘束するように配置している。(図-3)

図-3 の(1)は、外側の鋼殻を躯体の外側の鋼材として本体利用している設計の断面図であり、(2)は撤去する鋼殻を、さらに内側の鋼材として利用する例を示す。

3.1.2 断面変化部

単体トンネル間は、レール構造により鋼殻間の離隔を制御できるように考慮しているが、施工上の特徴から最大 40mm 程度の離隔が発生する可能性がある。ここを断面変化部と呼ぶ。この部分は、ボルトにより結合することも可能であるが、鉄筋により補強することを考えている。このため、SRC構造とRC構造が複合する構造となり、本部分は、一般断面部と異なった挙動を示すことが考えられる。(図-4)

本部分の耐力、変形特性、ひびわれ性状については、第5節の実験により確認を行っており、その特性を設計に反映させている。

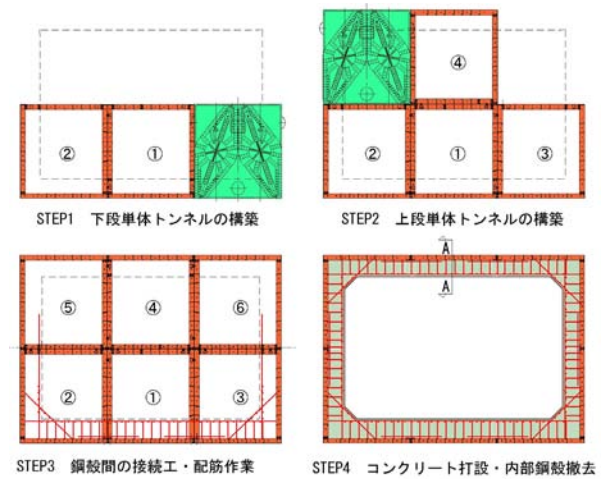
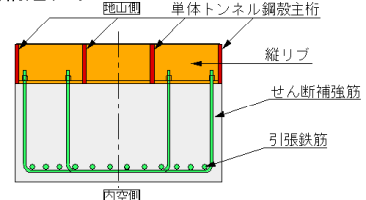


図-2 施工手順
Excavation Plan

(1)内側鉄筋構造タイプ



(2)内側転用鋼殻構造タイプ

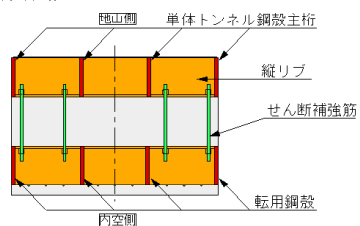


図-3 構造の特徴 (図-2 の A-A 断面)
Structural Feature

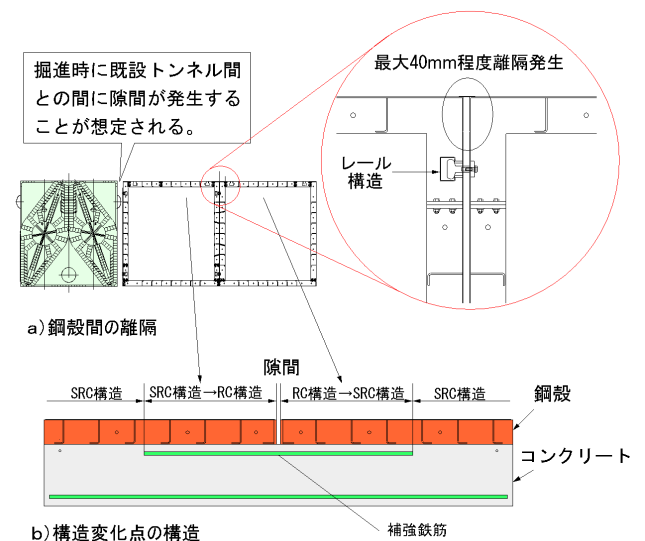


図-4 断面変化部
Sectional Design of Joint

3.2 設計手法

設計手法については、単体トンネルを構築する段階とハーモニカ本体の構造完成段階に分け、それぞれの段階の荷重を考慮し、設計を行う。設計フローを図-5に示す。

3.2.1 トンネル時の設計

設計は、単体トンネルの各施工段階の荷重（土水圧、裏込め注入圧、隣接掘進時の影響など）、隣接鋼殻間の相互作用を考慮し、剛性一様の骨組みモデルにより断面力を算定し、断面設計を行う。図-6にモデル化の考え方を示す。

3.2.2 本体構造の設計

本体構造完成段階では、一般部および断面変化部に分けてモデル化を行い、発生断面力に対し、SRC構造部は主桁を主鋼材とした鉄筋コンクリートの慣用設計法に従い、曲げモーメントおよび軸力に対する断面算定を行い、断面変化部は、通常のRC構造として設計を行う。せん断力に対しては、コンクリートとせん断補強鉄筋で抵抗する構造である。このように単体トンネル施工時に配置される鋼殻を極力利用しているため、後施工の主鉄筋や配力筋をできる限り省略でき、構造の合理化を図っている。

3.2.3 断面変化部の評価

断面変化部については、実験によりその挙動（耐力、変形特性、ひび割れ特性など）について確認を行った。その結果、実験における $P \sim \delta$ 関係は、FEM解析により、安全側にシミュレートできることが確認できた。したがって、本体構造設計時の解析モデルにおいて断面変化部は、FEM解析との対比により、回転ばねとモデル化し、その変形特性（ $M \sim \theta$ ）を評価し、本体構造の断面力算定を行うものとした。図-7、8は本体構造設計時のモデル化したものであり、図-8には荷重条件を示している。

3.2.4 まとめ

以上、大断面分割シールド工法におけるトンネル構造の施工上の特性、構造上の特性を考慮した設計手法について整理を行った。今後、実施に向けて更なる検討を行い、合理的な設計手法を提案していきたいと考えている。

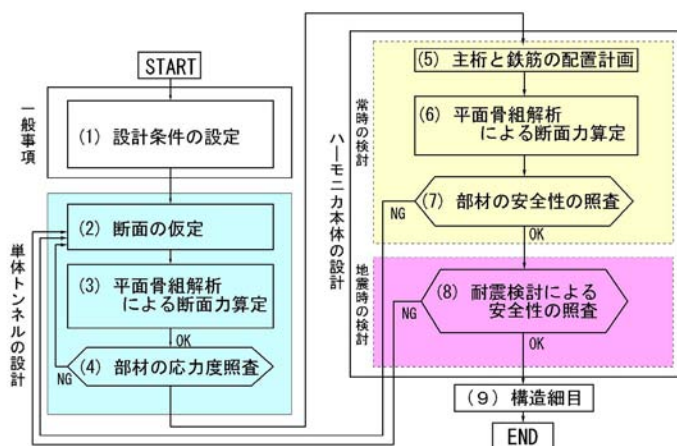


図-5 設計フロー
Flow Chart of Design

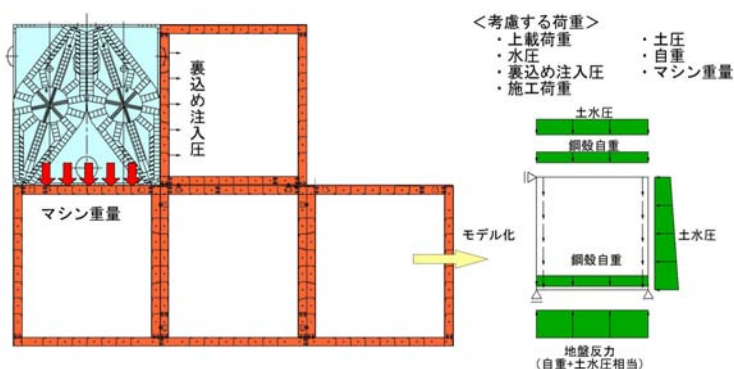
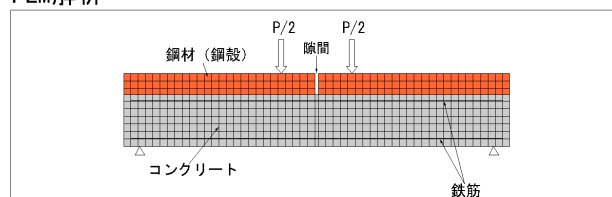


図-6 単体トンネル時の設計
Design at an Excavation of Each Tunnel

FEM解析



簡易モデル化

はりバネモデル

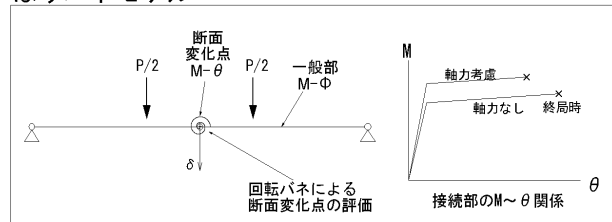


図-7 断面変化部の評価
Model of FEM Analysis

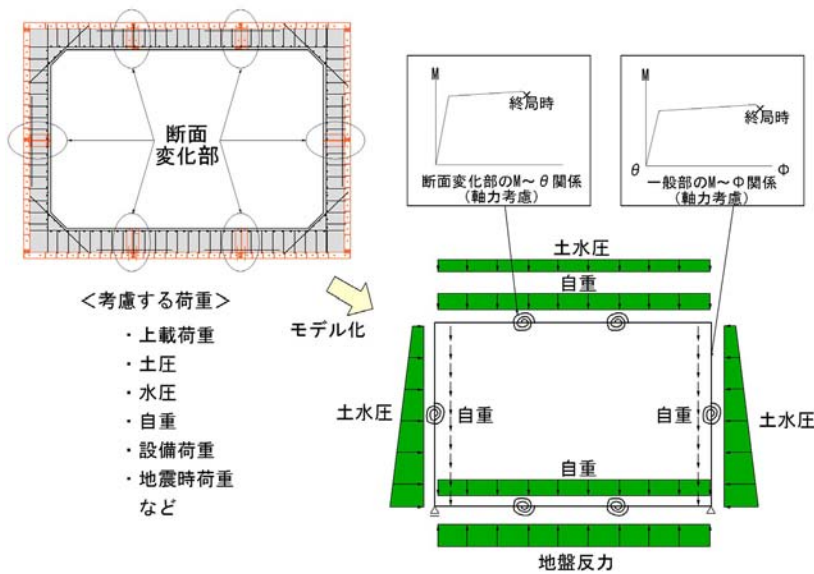


図-8 本体構造の設計
Model of FEM Analysis



写真-1 実験状況
Test Setup

4. トンネル間の継手（ガイド）

4.1 継手の耐力確認試験

4.1.1 目的

継手は接続の構造や止水のために設置するのではなく、あくまでもガイドとして使用する。先行するトンネルの溝は連続して設置され、後行するトンネルに設置するレールは長さ 40cm で検討している。試験は継手の製作性と耐力の確認のために行った。

4.1.2 試験条件と試験体寸法

ガイドに最大引張力として 333kN（推力が 40000kN 作用したとき 4.8m で 4cm 離れようとする力を想定）発生すると仮定して設計した。鋼殻は幅 1.2m、4 本主桁を想定し、試験体は主桁間を抜き出した寸法、40cm とした（図-9）。レールを溝に挿入した状態で、お互いを引張る。実験状況を写真-1 に示す。主桁の厚さは 22mm とし、3 ケース実施した。ただし CASE1 は後行トンネル（レール側）の主桁、CASE2 は先行トンネル（溝側）の主桁厚を 16mm にしている。

レールは 3 本のボルト（M24）で鋼殻に設置している。ボルトの許容応力は 290N/mm^2 であるため、3 本で 460 kN ($>333\text{ kN}$) まで破断しない。レールは M24 のタップ加工が可能な厚さということで 100kg 鋼（幅 39mm）に決めている。

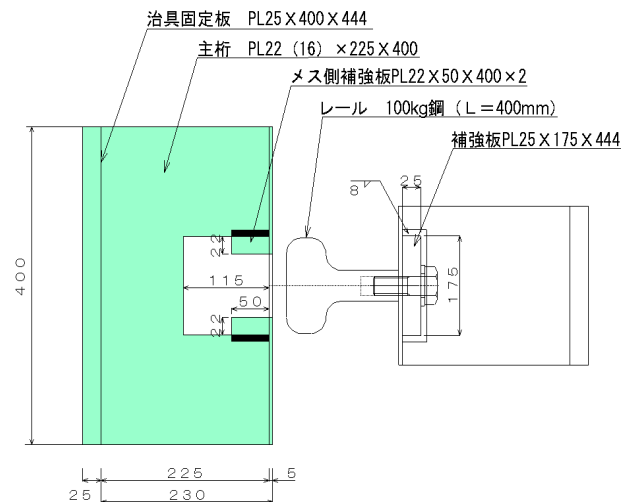


図-9 試験体（レールと溝）
Test Pieces of Joint

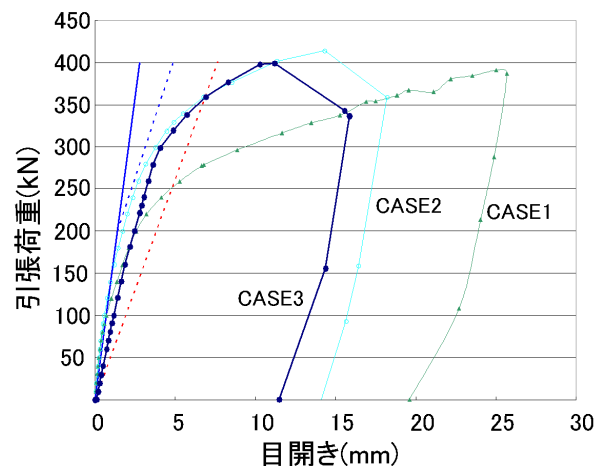


図-10 荷重と目開きの関係
Load-displacement Curves

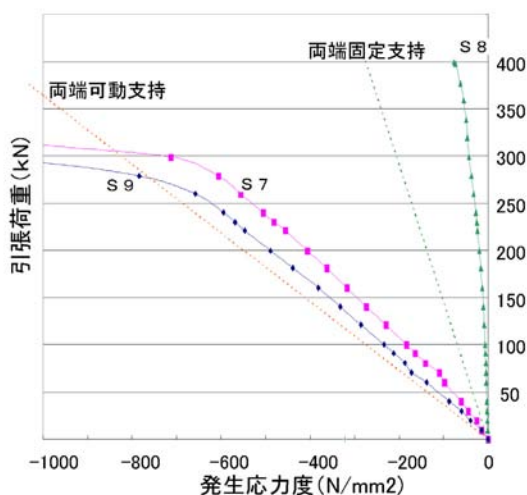


図-11 レール補強板に発生する応力
Load-Stress Curves at Ditch

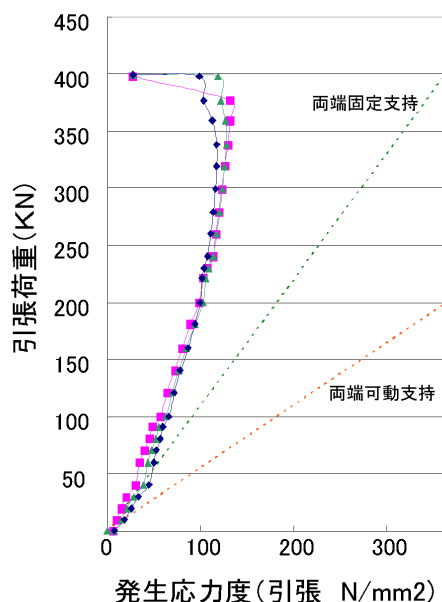


図-12 溝補強板に発生する応力
Load-Stress Curves at Ditch

4.1.3 継手試験の結果

荷重と目開きの関係を図-10 に示す。最終荷重はいずれも 390kN 以上であり、レールの補強板の変形により、端部の溶接が破壊した。主桁の厚さはあまり寄与していない。

CASE3 の荷重とレールの補強板に発生する応力度の関係を図-11 に示す。両側のボルトに発生する応力は、両端可動支持の計算値に近似しているが、中央のボルト (S8) にはほとんど発生していない。また、CASE3 の荷重と溝側補強版に発生する応力度の関係を図-12 に示す。計算値より低い応力を示している。

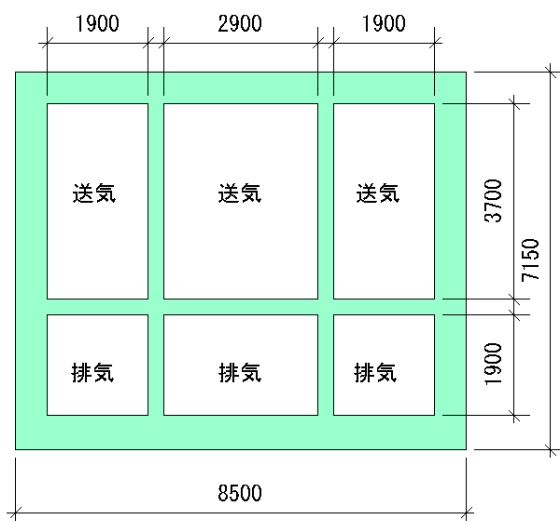


図-13 当初設計の換気ダクト断面
Original Plan of Ventilation Ducts

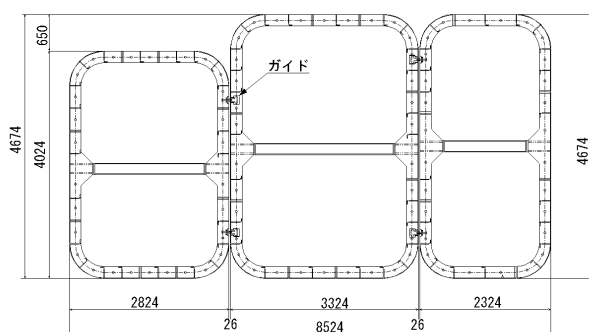


図-14 計画断面図
Final Plan of Ventilation Ducts

4.1.4 まとめ

継手の役割と実験結果について述べた。ボルト、およびレールの耐力確認が実証され、今後、小型化の可能性が見出せ、次の計画に反映させることにした。

4.2 実工事への適用

大阪の鉄道地下駅の換気ダクトが、当初、図-13 に示すボックスカルバートで計画されていた。これを開削で工事しようとする、施工区間の地下は埋設物が輻輳して地上から土留め壁の施工ができない状況であった。このため、ダクトを分割して非開削工法で施工することになった。

そこで、第1号工事として図-14 に示す3つのトンネルを並列して施工する換気ダクトを提案し、工事に採用されることになった。距離が約 10m と短いことから機械掘削ではなく、刃口推進方式で施工する。レールの設置は溶接で行い、レールは 15kg 鋼を使用する。

5. 継手部曲げ試験

5.1 試験の目的

鋼殻を本体利用する方法として、3.1.1 で最外周の鋼殻の内側に鉄筋とコンクリートで補強する SC 構造の(1)内側鉄筋構造と、最終的にスクラップとなるトンネル内空に組み立てられた鋼殻を構造部材（鉄骨）として再利用する(2)内側転用鋼殻構造の2タイプを提案している。後者は再利用により、産業廃棄物の抑制を図ることが可能である。

本工法では小断面トンネルを積み重ね、大断面トンネルを構築するため、小断面トンネル同士の接合が必要となり、その接合部には施工の特徴から最大 40mm、微小な隙間が発生する。本試験は、地下水位が高くボルト接合が困難な場合、隙間に対し、せん断補強鉄筋で対処する設計手法の検証をするものであり、この断面変化部に関して耐力・ひずみ分布・変形特性・ひびわれ発生状況について確認を行った。

5.2 試験ケースと試験体

5.2.1 試験ケース

本試験は、土被り 4.2m、トンネル内空(7.80×10.80m)を想定し設計した(図-15)。トンネル掘進時の鋼殻は主桁厚 22mm×高さ 225mm×4 本、スキンプレート厚さは 6mm である。

計算によれば図-15 に示すように、正曲げは頂部と底部のトンネル間に発生し、負曲げは側面に発生する。そこで試験は(2)内側転用鋼殻構造の正曲げ（CASE1）と負曲げ（CASE2）、(1)内側鉄筋構造の正曲げ（CASE3）と負曲げ（CASE4）の合計 4 回行った。

5.2.2 試験体

試験体は幅 1200mm×高さ 800mm×長さ 4350mm とし、お互いのトンネル同士は 40mm の隙間を強制的に開けた構造にしてある。(2)内側転用鋼殻構造である CASE1、CASE2 の試験体は同一の鋼殻を 50mm の被りを確保して配置し、内側にはひびわれ防止鉄筋として D10 を 9 本配置した(図-16、写真-2)。また、(1)内側鉄筋構造の CASE3、CASE4 では D32 を 12 本配置した。各ケースの継手部は躯体の高さ 800mm から鋼殻の高さ 231mm を引いた桁高 569mm の RC 断面として求めた鉄筋 D29×12 本を配置した。(図-17、写真-3)

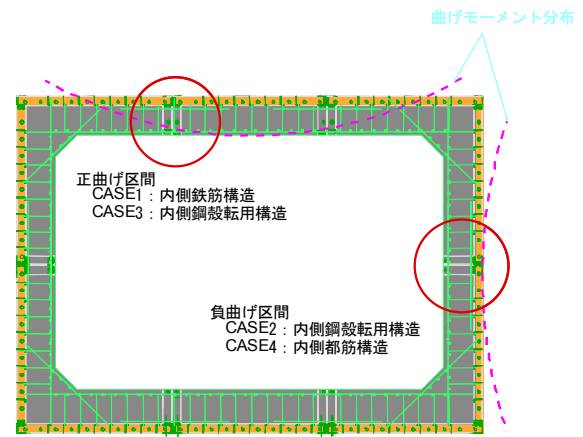


図-15 構造の概要図
Structural Concept

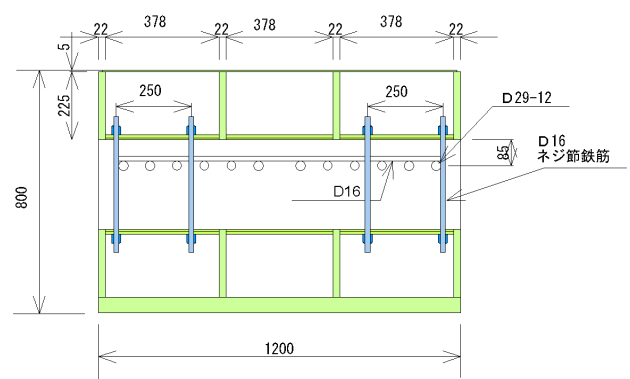


図-16 試験体 (CASE1, 2)
Sectional Plan (CASE1, 2)



写真-2 試験体 (CASE1, 2)
Tested Specimen (CASE1, 2)

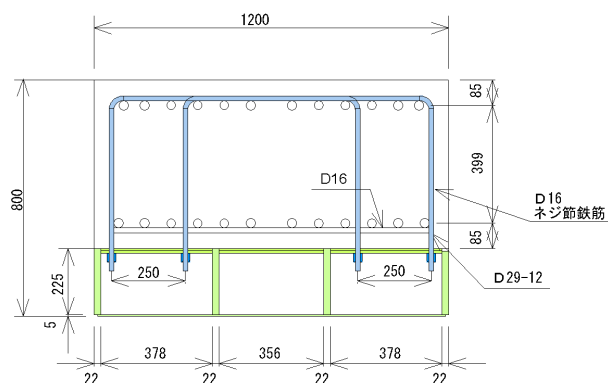


図-17 試験体(CASE3, CASE4)
Sectional Plan(CASE3, CASE4)



写真-3 試験体(CASE3, 4)
Tested Specimen(CASE3, 4)

表-1 試験ケース
CASES of Test

	CASE1	CASE3
正曲げ		
	CASE2	CASE4
負曲げ		



写真-4 試験装置
Test Machine

5.3 試験装置

実物大の平板試験体に、鉛直2点荷重、両端可動支持(荷重スパン4.2m×支持スパン0.8m)の試験装置を用いて、単純曲げ試験をおこない、変位・目開き、継手・鉄筋・コンクリートのひずみを計測した(写真-4)。

5.4 試験結果

5.4.1 変位量

図-18 は、供試体の荷重荷重と鉛直変位の関係を示す。グラフに示した直線は供試体を剛性一様のはりとした変位の理論値と、各要素を考慮したFEM解析での解析結果である。その結果、荷重初期は剛性一様の傾きを示し、設計曲げモーメントに達するまで各ケースとも、解析値と近似した傾きを示していることがわかる。

また、破壊荷重についても各部材を評価したRC計算による破壊抵抗曲げモーメントを超える結果となった。試験結果より解析値の妥当性・十分な耐力を有することが確認できた。

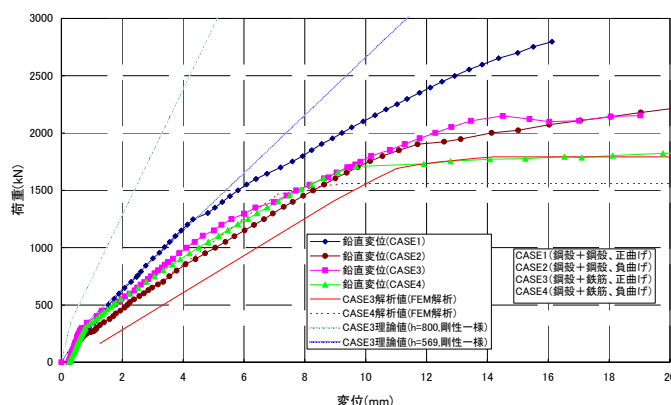


図-18 荷重と変位の関係
Load-Displacement Curves

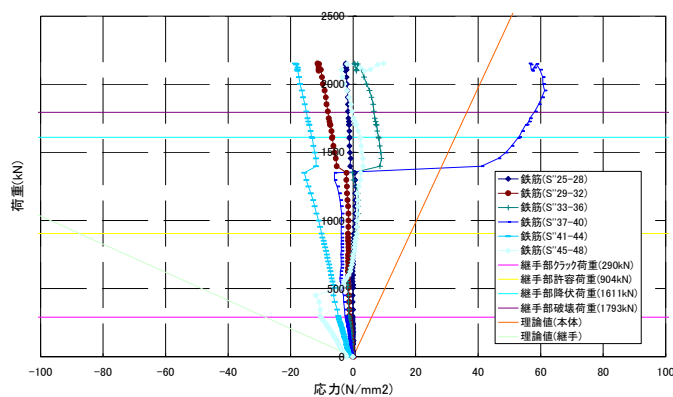


図-19 荷重と鉄筋応力の関係図(CASE3)
Load-Stress Curves(CASE3)

5. 4. 2 継手部補強部材

図-19に、長手方向の鉄筋、鋼殻の荷重-応力の関係を示す。各ケースとも、鉄筋・鋼殻共に、供試体の中心から外に行くに従い発生応力は小さい値を示した。許容荷重レベルで10%程度の応力となっており、継手部材としての鉄筋はコンクリート標準示方書に示されたもので十分である。また、図-20に示すひずみ分布からも、継手部から離れるにつれ中立軸が外面の鋼殻側に移動しており、継手部では圧縮力を鉄筋が受け持ち、本体部では鉄筋から上部鋼殻に移行しているのがわかる。

5. 5 まとめ

- (1) 各部材とも、想定する耐力を有することが確認できた。鋼殻を外周側に配した正曲げについては想定以上の耐力を有していることが確認できた。
- (2) FEMモデルによる解析値と近似した変形性能を有することが確認できたことで、今回提案したモデルで設計することが可能である。
- (3) 継手部を断面変化部として設計しているが、鉄筋により容易に補強できることが確認できた。今後、実施工への適用のなかで現場計測をおこない、施工性・覆工品質の確認を進めていく予定である。

6. おわりに

大断面を小断面に分割し、1台のシールドマシンで複数の断面を継続的に掘削し、最後に一体化する本工法は、掘削マシンを小型化でき、トンネル掘進時の鋼殻（セグ

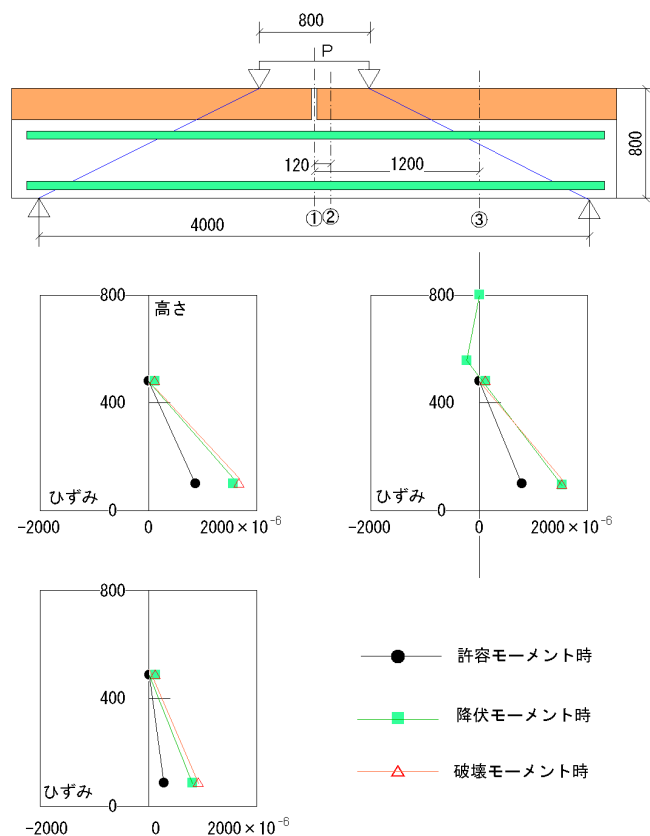


図-20 応力分布図(CASE3)
Distribution of Stress(CASE3)

メント)を薄肉化することで全体の工事費を抑えることが可能となる。

この鋼殻を単に仮設材として利用することも可能であるが、よりコストを追求するためには、鋼殻の本体利用することが望ましい。

本工法は石川島播磨重工業株式会社と石川島建材工業株式会社の共同研究で開発したものであり、本実験は石川島建材工業株式会社の綾瀬研究所で実施したものである。誌上を借りて、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木聡, 門田克美ほか: 大断面分割シールドの開発 (その1) - 施工法の概要と継手の曲げ性能実験 -, 第59回年次学術講演会講演概要集, VI部門, 2004.
- 2) 若林正憲, 進藤芳典ほか: 大断面分割シールドの開発 (その3) - 継手部曲げ試験 -, 第59回年次学術講演会講演概要集, VI部門, 2004.
- 3) 金子研一, 湯口正樹, 大畑裕, 門田克美, 若林正憲: 大断面分割シールド工法によるアンダーパスの施工, アーバンインフラ・テクノロジー推進会議第15回技術研究発表論文集, C-7, 2004.