

矩形シールドトンネル覆工としての オープンサンドイッチ構造の開発と 実施工による有効性の検証

吉川 正¹・三井 隆²・田中 耕一³・柳井 修司⁴・中川 浩二⁵

¹正会員 工修 鹿島建設(株)東京支店 (〒107-8477 東京都港区元赤坂1-3-8)

²正会員 工修 鹿島建設(株)土木技術本部 (〒107-8477 東京都港区元赤坂1-2-7)

³正会員 鹿島建設(株)土木設計本部 (〒107-8477 東京都港区赤坂6-5-30)

⁴正会員 工修 鹿島建設(株)技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

⁵正会員 工博 山口大学工学部社会建設学科教授 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2557)

矩形断面シールドトンネルに対する需要とその大断面化, 低土被り・構造物との近接条件下でのシールド施工の要求にともない断面寸法, 経済性を考慮した有効なセグメント構造の開発が必要とされてきた。

今回, サンドイッチ構造の応用として, 鋼殻を組立て後, その内側に配筋してコンクリートを打ち込み, 外側の鋼殻を引張および圧縮補強材として本体利用したSC構造と内側のRC構造を一体構造化する, いわゆるオープンサンドイッチ構造をシールド覆工に適用できるように, 主として継手構造の選定と施工管理方法, 高流動コンクリートの配合と充てん方法, 解析モデルに関する開発を行った。その結果を矩形シールドトンネルとしては世界最大規模となる地下通路の躯体へ適用しその有効性を検証した。

Key Words: open-sandwich composite structure, high fluidity concrete, shield, segmental lining, box shield

1. はじめに

シールドトンネル工法においては, 掘削時の施工性のみならずセグメントの組立性あるいは土圧水圧などの外力に対して構造上有利であることからほとんどのケースで円筒状のシールドマシンおよび円形の覆工構造が用いられてきた。

しかし, 最近では, 複円形あるいは3連の円形を組み合わせたいわゆるマルチフェースタイプのシールドトンネル, さらに矩形に近いタイプのシールドトンネルもシールドマシンの掘削機構およびセグメント構造などの技術の向上により開発・実用化されてきている。

その中で円形を主とするシールドトンネルの覆工についてはコスト面からRCセグメントが主に用いられ, 急曲線部や特殊断面については鋼製あるいはダクタイルセグメントが使われてきた。一方, 矩形断面の場合には軸力が卓越する円形断面とは異なり, 大きな曲げモーメントが覆工断面に発生し, 特に大断面の場合にはその傾向が強くなる。そのためセグメントもRCセグメントでは適用が困難となり, 鋼製セグメントおよびダクタイルセ

グメントを使うことになるが, 技術面およびコスト面で課題が多く残されていた。また, セグメントのピース間継手も剛性が高く, 耐力の高い構造が必要とされる傾向にある。

筆者らは上述の課題解決のため, 鋼殻(完成段階で場所打ちコンクリート覆工の引張および圧縮補強鋼材(以下補強鋼材と略す)として用いるので, セグメントの呼称を用いない)と仮設の支柱を併用した覆工構造を一次覆工として用いるだけでなく, 完成時には鋼殻と鉄筋コンクリートの組み合わせによるオープンサンドイッチ構造を用いる二次覆工構造を開発した。具体的には, 剛性の高い鋼殻継手構造の選定と施工管理方法, 高流動コンクリートの配合と充てん方法, さらに施工時, 完成時の覆工の解析モデルなどについて解析および基礎実験を実施してオープンサンドイッチ覆工技術を実現した。

実際のところ, 地中構造物は, 地上構造物と異なって往々にして机上の設計どおりにいかない場合がある。本件でも特に鋼殻の継手部において, 本設構造物としての適用に不確定要素が多かったため, 安全率を大きめにとって設計施工し, 実測結果を評価しながらその安全性を

確認し、新形式の構造物の構築を行った。

本論文はその開発内容および実施工における検証について報告するものである。

2. 矩形シールドトンネルにおけるオープンサンドイッチ覆工の考え方と問題点

(1) 新しい矩形断面シールド覆工の考え方

シールドトンネルの覆工としては、鋼製、RC製、ダクタイル製のセグメントなど既成のものを組み立てたものあるいはECL工法などの場所打ちRC構造体を用いられてきた。そのうち、矩形断面のシールドトンネルの覆工としては鋼製セグメントを一次覆工として仮設にのみ利用し、内側に別途場所打ちのRC部材を本設の覆工として用いた事例がある¹⁾。

これらの事例を考慮し、軸力、せん断力に加えて大きな曲げモーメントが部材に発生する矩形断面のシールドトンネルにおいて覆工厚を最小限に抑え、掘削断面を小さくする方法を検討した結果、以下に示す方針に至った。

①一次覆工施工時、仮設の支柱の設置により、覆工に発生する曲げモーメントおよびせん断力を小さくする。

②仮設時および完成時のトータルの覆工厚を最小限とするため、鋼殻を補強鋼材として有効利用し、内側に配筋してコンクリートを打ち込むことにより、外側のSC構造と内側のRC構造を一体化する、いわゆるオープンサンドイッチ覆工構造を用いる。

オープンサンドイッチ覆工の構築手順としては主に図-1に示す4ステップを想定した。

ステップ1：鋼殻をボルトで接合しながら組み立てて、頂版と底版を仮設の中柱で支保する。

ステップ2：鋼殻の内側に主筋と配力筋を配筋する。なお、スターラップは鋼殻と接続する。

ステップ3：底版コンクリート、側壁コンクリートおよび頂版コンクリートを打ち込む。

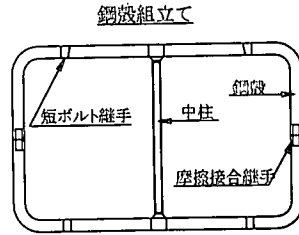
ステップ4：中柱を撤去し、化粧工を行う。

(2) オープンサンドイッチ構造実現のための問題点

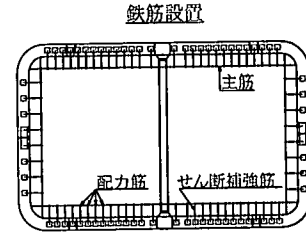
シールドトンネル覆工としてオープンサンドイッチ構造を実現する際の主な問題点を以下に示す。

①鋼殻の継手構造の選定と施工時における継手性能の管理：オープンサンドイッチ構造の場合、ボルトなどで組み立てて連続した鋼殻を補強鋼材として用いる。外側引張り領域において鋼殻を接続する場合、継手部でも補強鋼材として鋼殻部と同等の断面性能が求められる。その対応として母材と同等の強度を有するいわゆる全強継手を採用する必要がある。

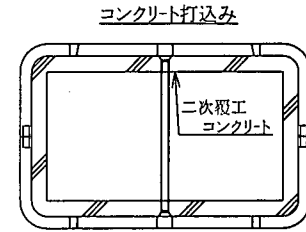
ステップ1



ステップ2



ステップ3



ステップ4

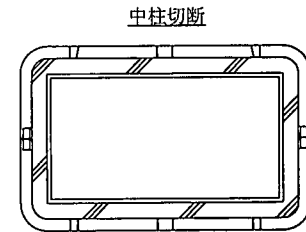


図-1 矩形断面オープンサンドイッチ覆工の構築手順

②頂版部へ密実に充てんするための流動性の高いコンクリートの配合選定と打込み方法：側壁および底版には普通コンクリートを用いた通常の施工方法で密実にコンクリートを打ち込むことができる。しかし、頂版については密閉された空間にコンクリートを密実に充てんしなければならない。そこで、流動性の高いコンクリートを用い、かつ鋼殻の中にエアが溜まらないように打ち込み管理する必要がある。

③解析モデルの設定と断面力評価を含めた設計法：コンクリートを打ち込む前の一次覆工段階とコンクリート硬化後の二次覆工段階では、構造および外力に抵抗する部材が異なる。そのため、解析モデルで実構造物を模擬して解析評価する必要がある。

表-1 締め付け実験ケースとトルク係数

CASE	実験内容	トルク係数
1	新しいボルト（潤滑油有）の締め付け	0.099
2	新しいボルト（潤滑油有）をゆるめて再締め付け	0.092
3	新しいボルト（潤滑油無）の締め付け	0.205
4	新しいボルト（潤滑油無）をゆるめて再締め付け	0.217
5	締め付け後現場（シールド立坑内）放置ボルトをゆるめて再締め付け（潤滑油有）	0.377

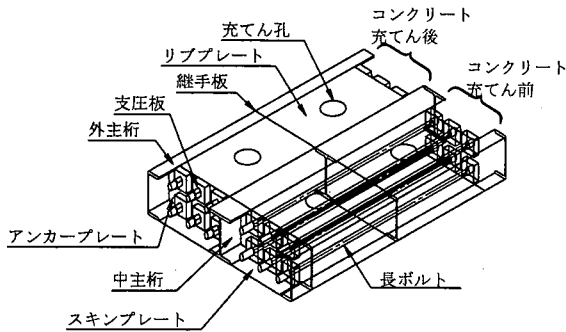


図-2 長ボルト継手の例

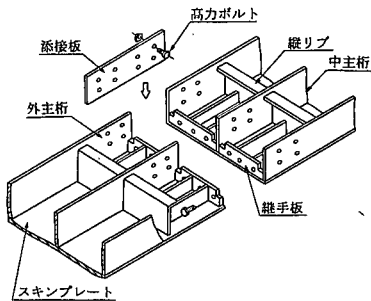


図-3 鋼殻の全強継手として採用する摩擦接合継手

3. オープンサンドイッチ構造実現のための問題点の検討

前述のオープンサンドイッチ構造を実現するための問題点に関して項目ごとの実験および机上での検討結果を述べる。

(1) 鋼殻の継手

鋼殻をボルトで接合する場合、次に示す問題がある。

a) 継手構造の選定

一次覆工段階では図-1のステップ1のように鋼殻を組み合わせて、中間の支柱で支保する構造を考える。

この場合、外側の鋼殻を補強鋼材として機能させる必要がある側壁部の継手については主桁相互を全強継手で接続し、その他の圧縮状態となる継手は通常のボルト継手とする。なお、鋼殻相互の全強継手としては摩擦接合継手^{2)・3)}、長ボルト継手⁴⁾が提案され、モデル実験でその性能評価が実施されている。

オープンサンドイッチ構造の場合、図-2に示す長ボルト継手を採用するには以下の課題が残る。

- ①継手部の剛性を上げるため、組み立て前に継手部に先行して充てんしたコンクリートと後打ちのRC部材として打込むコンクリートとの一体化が不完

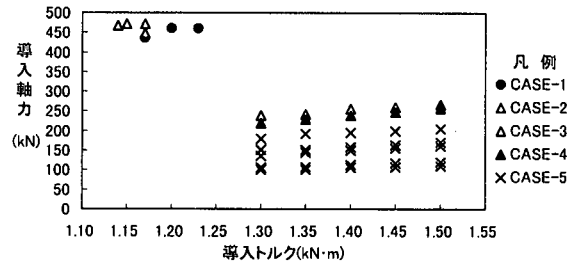


図-4 導入トルクと導入軸力の関係

全となる（特に頂版部は新旧コンクリートの打ち継ぎ面の空隙を無くすことは現実的に困難である）。

- ②各ボルトの負担軸力のバラツキが大きいいため、使用するボルトを割り増す必要がある。

そこで、橋梁あるいは建築構造物などで実績のある摩擦接合継手を図-3に示すように鋼殻の継手として工夫して採用することとした。

これにより、上記の問題の解決が期待される。

b) トルクと導入軸力の変化の確認

鋼殻の継手の場合、一次覆工組立て・締め付け後、シールド掘進に伴う鋼殻への推力の作用などの要因によって、ゆるみが生じることが考えられる。そこで、それらのゆるみの要因が無くなった段階で再度、トルクを加えて再締め付けを行って対処する必要がある。再締め付け効果の確認のため、初期締め付け時と再締め付け時のボルト、ナット、座金の表面状態の変化に伴う導入ボルト軸力と導入トルクの関係の変化を室内実験で把握した。

実験には、ダクロライズド処理した高力ボルト（F10T, M27x125）を用い、実験のケースとしては表-1に示す5ケースを考えた。

実験の結果を図-4に示す。CASE-1, 2とCASE-3, 4を比較すると、潤滑油の有無で同じトルクを掛けても導入軸力は大きく異なることが改めて示された。

また、通常の施工状態に対応するCASE-5の現場（シールド立坑内）で作業員がボルトを締め付けて放置した状態では、導入軸力値がかなりばらついており、CASE-3, 4と比べても導入軸力が小さいことが確認された。

表-2 実験結果から実施工のために選定した高流動コンクリートの配合

スラブ厚 (mm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	単体量(kg/m ³)						
			W	C	LP	S	G	SP	VIS
650	4.5	55.0	185	337	239	681	834	13.82	0.37

C：普通ポルトランドセメント，LP：石灰石微粉末，S：海砂，G：石灰岩砕石(2005)，SP：ナフタレン系高性能AE減水剤，

VIS：特殊増粘水剤（主成分：ウェランガム）

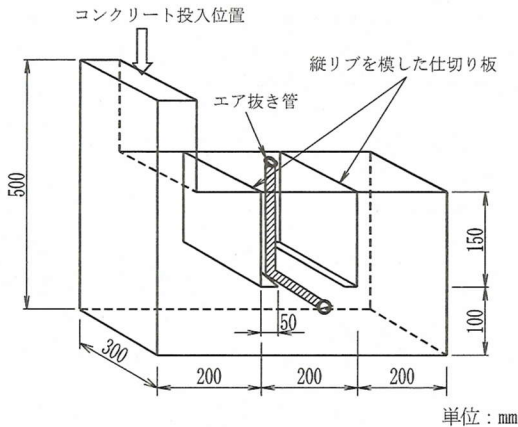


図-5 密閉空間充てん試験装置

その原因として、実際の現場（シールド立坑内）では、締め付けによるネジ部打痕、防錆油の変化、気温の変化、錆の発生により性状が変化したものとする。

図-4のCASE-1,2とCASE-5から現場で再締め付けする場合には、導入トルクをかなり大きくしないと所定のボルト軸力が得られないことが確認された。

なお、管理のための参考値として各ケースのトルク係数（トルク係数＝トルク（N・m）／ボルトネジ部外径／導入ボルト軸力×1000）の平均値を表-1に示す。

実施工においては、ボルトの設計軸力として許容軸力を低減した値を用いることとし、施工の初期段階に設計軸力を導入できるトルク値の確認および施工方法の確立を図ることとした。

(2) 鋼殻へのコンクリートの充てん

オープンサンドイッチ構造の場合、内側のRC部と外側のSC部が一体化して作用外力に抵抗する必要がある。また、SC部については補強鋼材となる主桁とコンクリートを確実に一体化する必要がある。

底版部と側壁については一般のレディーミクストコンクリートを用いて振動締固めを行うことで一体化が可能である。これに対して、頂版部は鋼殻のスキンプレートと主桁および下型枠に囲まれた密閉空間となるため、振動締固め作業による充てんが困難である。したがって、振動締固めを行わないで密実にコンクリートを充てんすること、製作誤差、施工誤差、変形などで若干の高低差

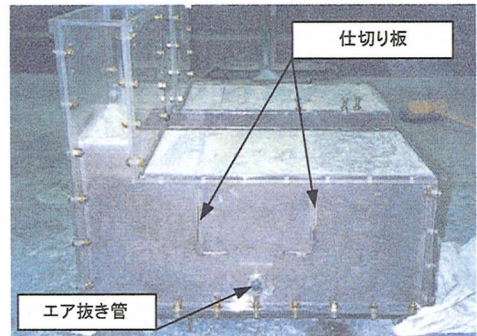


写真-1 コンクリートの充てん性確認実験

があるスキンプレートとコンクリートの打ち上げ面との間にエア溜まりを残さないようにすることが課題である。

これらの課題に対応するために、自己充てん性を有する高流動コンクリートの配合と閉塞空間における天蓋部（鋼殻の場合、スキンプレートと主桁で囲まれた部分）のエア抜きの方法について室内試験により検討した。

a) 高流動コンクリートの配合試験

頂版部へのコンクリートの自己充てん性を評価するため、コンクリートの配合試験では図-5に示すような実覆工の頂版部鋼殻のスキンプレート、主桁および縦リブを模したアクリル製のコンクリート自己充てん性試験装置を用いた。なお、自己充てん性の比較が主目的であるため、この実験では天蓋およびエア抜き管を取り除いた。

装置は、桁高250mm、主桁間隔300mmで、長さ600mmのアクリル箱に高さ150mmの縦リブを200mm間隔で2箇所設けた構造で、投入口は、さらに250mm上とした。

試験では5秒間に約1リットルの割合で投入口からコンクリートを投入し、コンクリート自重に起因する圧力差による変形のみで装置内を充てんさせ、流動先端部（投入位置から最遠部位置）のコンクリート高さが最も高くなった表-2に示す配合を選定した^{5) 6) 7) 8)}。

b) 天蓋部のエア抜きの効果

密閉空間へコンクリートを打ち込む際のエア抜きの効果を確認するため、図-5においてアクリル製の天蓋およびエア抜き管を取り付けた充てん性試験装置を用いて表-2に示した配合のコンクリートで充てん試験を行った。

なお、エア抜き管としては図-5に示すL字形の内径φ12mmの硬質塩化ビニル管を用い、側部のアクリル材に貫通固定し、パテによりシールした。

エア抜き管有り(左) エア抜き管無し(右)

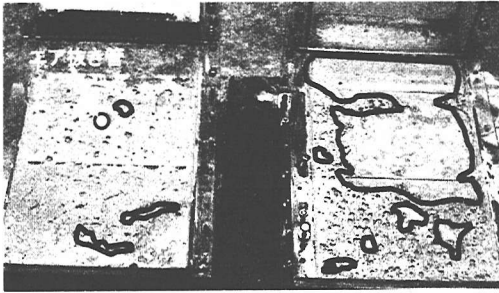


写真-2 天蓋部コンクリート充てん状況の比較

試験に際しては、エアの抜けに着目して以下の2ケースについて実施した。

- ケース①：図-5の装置からエア抜き管を取った場合
 - ケース②：図-5の装置のようにエア抜き管がある場合
- なお、コンクリートの投入方法は、自己充てんコンクリートの配合試験と同様である。

その結果、写真-1に示すようにエア抜き管を設置した場合には、最終的にはエア抜き管の下端からセメントペーストが漏れだし、かつ、天蓋部の残留気泡もほぼ無い状態で充てんできた。写真-2に天蓋から観察したケース①のエア抜き管無しとケース②のエア抜き管有りの充てん状況を並べて示す。

黒線で囲んだ部分は、天端からの深さが1mm以上の未充てん部を示す。エア抜き管が無いと未充てん部が全体の面積の1/2以上になっているのに対し、エア抜き管から自然排気することによって未充てん部がほとんどなくなることが確認された。

なお、ケース②のエア抜き管からの自然排気のみでエアの抜けが不十分な場合にはバキューム排気によるエア抜き、さらに未充てん部が発生する場合には、未充てん部へのセメントミルクの注入も検討対象としたが、ケース②の実験結果からエア抜き管による自然排気のみで十分な自己充てん性が得られると判断した。

実験は各1ケースずつであるがこれらの実験結果から、実工事においても、各鋼殻の主桁間の最高レベル部にエア抜き管を設置し、自然排気する方法でコンクリートを打ち込めば、空隙もなく鋼殻内部に充てんでき、セメントミルクなどの注入作業も必要ないものと判断した。

(3) オープンサンドイッチ覆工設計法の検討

a) 設計時の考え方と設計手順

設計については図-1に示したステップ1の鋼殻を中柱で支保した一次覆工完成時と、ステップ4の鋼殻の内側に配筋してコンクリートを打ち込み、中柱を撤去した二次覆工完成時について応力度照査が必要と考えた。

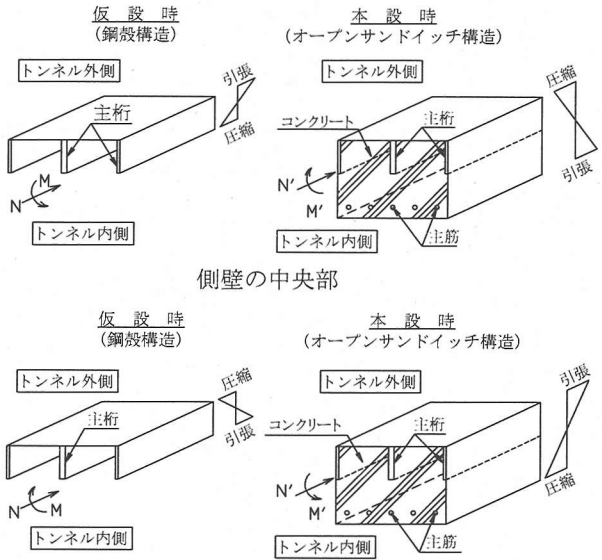
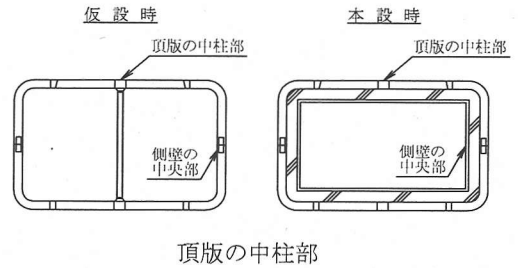


図-6 覆工構造と断面力の作用概念

一次覆工および二次覆工完成時における課題と設計の思想を以下に示す。

i) 一次覆工完成時

①検討課題

この段階では、それぞれの鋼殻はボルトで接合されており摩擦接合継手と短ボルト継手の配置と継手剛性の評価が検討課題である。

②設計思想

一次覆工の構造は摩擦接合継手と短ボルト継手で接続された鋼殻と中間に設置した中柱で土圧・水圧に抵抗するものである。断面力の算定において、継手剛性については、後述する理由により鋼殻と同等と考え、剛性一様のフレームモデルで算定する。

鋼殻の各部材および継手部に発生する応力度については、仮設時と判断し、短期の許容応力度以下に収まるように設計する。

ii) 二次覆工完成時

①検討課題

一次覆工時に発生する応力の二次覆工完成時における応力の残留の評価が検討課題である。

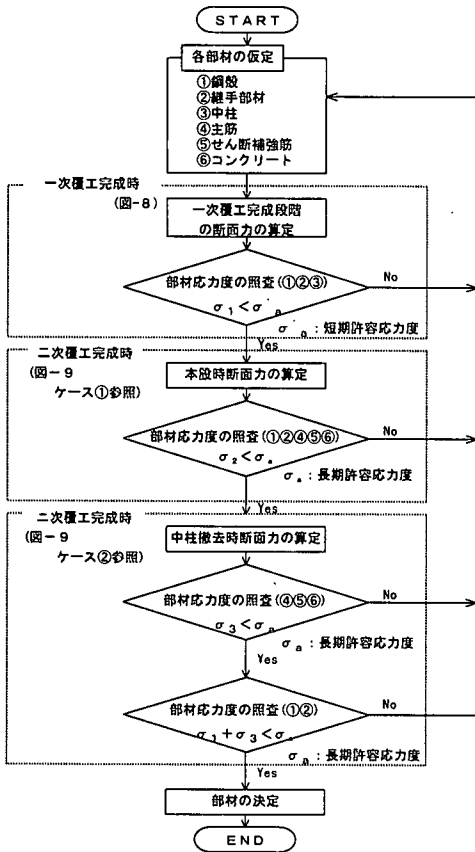


図-7 オープンサンドイッチ覆工の設計手順

②設計思想

一次覆工として機能している鋼殻と内側の鉄筋をコンクリートで一体化して二次覆工とする。これにより外側の鋼殻と内側の鉄筋を補強鋼材とするいわゆる外側のSC部材と内側のRC部材を一体化したオープンサンドイッチ構造で土圧・水圧に抵抗するものである。

一次覆工完成時に仮設として利用している鋼殻については、応力の履歴・残留の有無が不明であるため、応力がそのまま残留した場合と残留しない場合について検討した。すなわちSC部とRC部が一体化した構造としてRC計算により求めた鋼殻の各部材、継手、鉄筋およびコンクリートの各部材の発生応力度が長期の許容応力度以下に収まるように設計する。

例として、頂版の中柱上部と側壁の中央部における一次覆工および二次覆工の完成時の覆工構造と断面力の作用概念を図-6に示す。

上記の設計思想を反映したオープンサンドイッチ覆工の設計手順を図-7に示す。

なお、側壁部においては、覆工全体の幅、高さの比、中柱の有無によって曲げモーメントの正負が逆転するこ

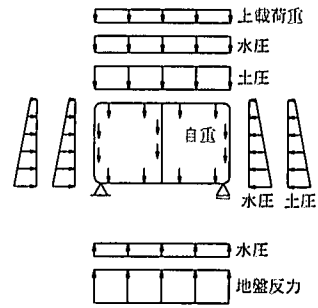


図-8 一次覆工完成時解析モデル

とが予想される。ここでは、負の曲げモーメント(外側引張り状態)の場合を示す。

b) 解析モデル

覆工構造の設計としては、図-1に示す施工ステップのうち通常のシールドと同様に i) 一次覆工完成時すなわち掘進段階で一次覆工である鋼殻を組み立てて土圧・水圧が作用した段階の鋼殻の検討と ii) 二次覆工完成時すなわち鉄筋組立後にコンクリートを打ち込んで硬化し、オープンサンドイッチ構造が成立した後に中柱を撤去した段階のSCとRCとの合成構造の検討が必要と考えた。

そこで、図-7に示した手順で両ステップの検討を実施することとし、一次覆工完成時を仮設時として、二次覆工施工後中柱撤去時を本設時として検討した。発生応力度の照査には許容応力度法を用いることとした。

各段階の解析モデルを以下に示す。

i) 一次覆工完成時

中柱で支保しながら鋼殻を組み立てた状態で、完成時も曲げ引張り状態で全強継手と評価できる摩擦接合継手が必要な側部以外は短ボルト継手を千鳥配置する構造を想定する。

解析モデルとしては円形シールドのセグメントの設計で慣用的に用いられている図-8に示すようなフレームモデルを基本とした。継手部の剛性については側部の継手集中部については、剛性の高い摩擦接合継手としており、その他の継手については短ボルト継手を千鳥に配置することによって継手部の剛性も鋼殻とほぼ等しくなると想定し、構造系全体が剛性一様と考えた。

梁ばねモデルについては鋼殻を用いた矩形断面の覆工構造での解析事例は少ないため、鋼殻継手部のせん断ばね・回転ばねの算定式が確立されていなく、実験での評価も成しえなかったため、解析モデルから除外した。

発生応力度については短期許容応力度に対して照査する。作用荷重については、低土被りであることを想定し、鉛直方向については全土被り圧と水圧を、水平方向については土水分離で土圧係数 $K_s=0.5$ の土圧と水圧を作用させることとした。

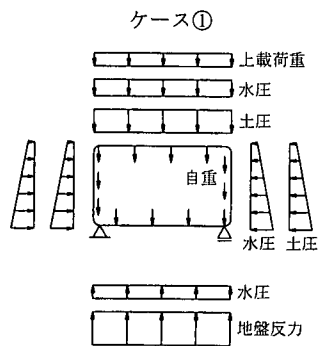


図-9 二次覆工完成時解析モデル

ii) 二次覆工完成時

本設時は外側のS C構造と内側のR C構造を一体化したいわゆるオープンサンドイッチ構造となる。そこで、剛性一様の二次元フレームモデルで発生断面力を求め、外側は鋼殻の主桁を補強鋼材に、内側は主筋を鉄筋とした鉄筋(鉄骨)コンクリート断面で応力度照査して主桁および主筋を設計する。なお、スキムプレートについては、本設時には補強鋼材として考慮していない。仮設時には土圧水圧への抵抗部材およびジャッキ推力への抵抗部材として設計する。検討モデルを図-9 に示す。

本設時の断面力の算定に際しては、2つのケースについて検討した。

その1は、施工に伴う鋼殻の応力の履歴について残留を考慮しないで完成段階の構造および荷重のみ考慮し、図-9 に示すケース①のように二点の支承で支持されたSRCの剛性を持ったフレームに土圧と水圧を作用させて求めた断面力で発生応力度が長期許容応力度に収まるように部材設計をした場合である。

その2は、施工に伴う鋼殻の応力履歴を考慮することとし、図-8 に示すケース②のように仮設時の主桁に発生している応力が残留し、中柱が受けている軸力を完成時のフレームモデルに作用させて求めた断面力を重ね合わせた場合である。

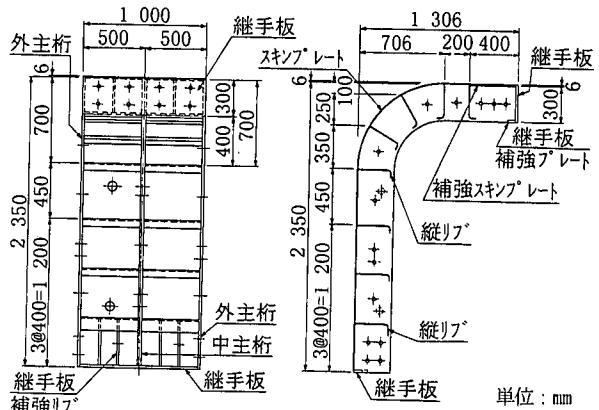


図-10 鋼殻の構造例

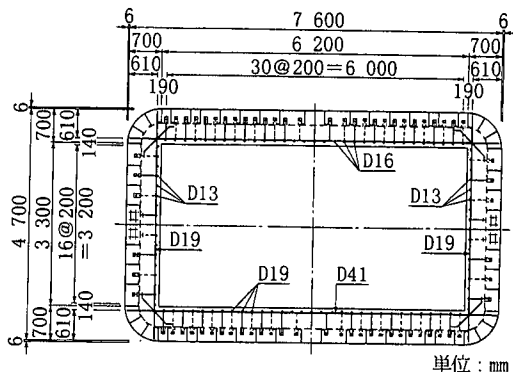


図-11 RC部の配筋例

作用荷重としては、一次覆工と同様に鉛直方向については全土被り荷重を、水平方向については土水分離で土圧係数 $K_s=0.5$ の土圧と水圧を作用させる。

一次覆工完成時および二次覆工完成時の両段階で鋼殻の発生応力度が許容値に納まるように鋼殻を設計する。

4. 実工事への適用と検証

(1) 工事内容

オープンサンドイッチ構造を矩形シールドの覆工として地下通路の建設工事に適用した。

主要工事内容を以下に示すが、工事は、1997年8月1日に着工し、1999年4月30日に大きな問題もなく完成している。

工事概要については文献¹²⁾を参照願いたい。

主要工事内容

トンネル工法：矩形揺動型泥土圧シールド工法

掘削形状：幅7,810mm×高さ4,980mm×延長119m

鋼 殻：幅7,612mm×高さ4,712mm×118 リング

(リング幅1,000mm, 桁高300mm)

二次覆工内空：幅6,200mm×高さ3,300mm

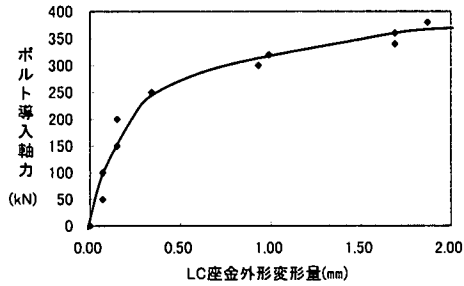


図-12 LC座金の外径変形量とボルト導入軸力の関係

表-3 再締め付けボルトの導入ボルト軸力と必要トルク

許容軸力との関係	導入ボルト軸力(N)	必要トルク(N・m)
許容軸力×100%	3100	31.6
許容軸力×80%	2480	25.2
許容軸力×75%	2325	23.7
許容軸力×70%	2170	22.1

(2) 鋼殻の構造と配筋

3. に準じて設計した。詳細は省略するが、鋼殻は、図-10 に示すように平鋼による外主桁と中主桁を主部材とし、端部は、図-3 に示したように添接板で鋼殻ピース相互の主桁を摩擦接合できる構造とし、補強リブ、補強プレートで継手部を補強した。

また、RC部の配筋を図-11 に示す。

鋼殻の桁高が300mm、コンクリート打ち込み後、RC部が400mmで、SC部と合わせて厚さ700mmのオープンサンドイッチ構造の二次覆工体となる。なお、主筋および配力筋は、鋼殻にボルト接合したスターラップで鋼殻の主桁と主筋の一体化を図った構造とした。

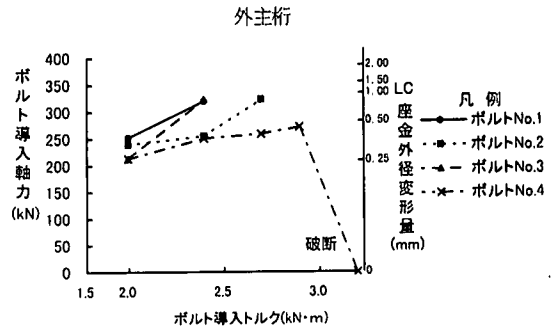
(3) 継手の施工管理

実施工において一度締め付けたボルトは、シールドマシンの推力でセグメントが押されることによって緩むので、再締め付けが必要である。

施工初期段階で当初締め付け時と再締め付け時のトルク係数すなわち導入トルクと導入軸力の関係の変化を以下に示す外径の変化でボルト導入軸力が求まる特殊な座金で測定し、再締め付け段階で所定の軸力を導入するために必要な導入トルク値を求め、以降のボルト再締め付け時の管理に用いた。

a) ボルトの導入軸力と導入トルクの関係

この方法は、凸状の皿形形状をした座金荷重の負荷によって塑性変形して平坦なドーナツ状になる特殊な座金、すなわちload control座金(通称LC座金)⁹⁾を用いるものである。ボルト導入軸力とLC座金の外径変形量(平坦



中主桁

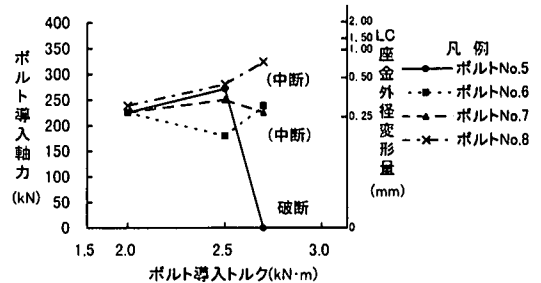


図-13 ボルトの導入トルクと導入軸力の関係

化の途中の座金外径と当初の座金外径の差)の関係については、室内試験で事前に求める。

次に、シールド掘進初期段階において、シールドマシンの推力で緩んだ摩擦継手部のボルトの座金をLC座金と取り替える。続いて、ボルトを締め付けて、LC座金の外径変形量から求まる導入軸力と導入したトルクの関係を求め、所定の軸力を導入するために必要なトルクの管理値を決める。

b) ボルト導入軸力とLC座金の外径変形量

事前に試験室において高力ボルト(F10T, M27x125)用のLC座金を用い、ノギスで測ったLC座金の外径変形量とボルト導入軸力の関係を図-12のように求めた。

c) 現場実験による導入トルクと導入軸力の関係

事前の室内実験の結果から、現場における再締め付けボルトにおいては、許容軸力3100Nを得るためにはかなり大きなトルクが必要となることが分かっている。

また、ボルトの破断も予想されるため、ボルトの設計軸力としては許容軸力の70%を目安と考えた。表-1のCASE-5のトルク係数0.377から表-3に示すようにボルトの導入軸力と導入トルクの関係を求め、現場実験用トルクレンチの仕様を決めた。

施工初期段階の摩擦接合継手において、LC座金を用い、図-12の関係に基づいてボルトの導入トルクと導入軸力の関係を測定した。実験に際しては、ボルトの導入軸力の最大目標値を許容軸力値3100Nとし、図-12か

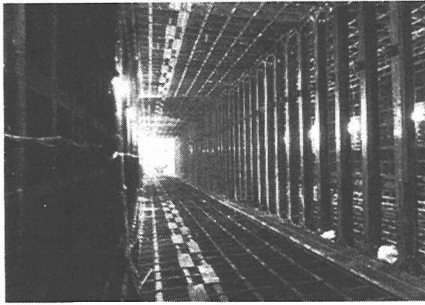


写真-3 組立完了後の鋼殻

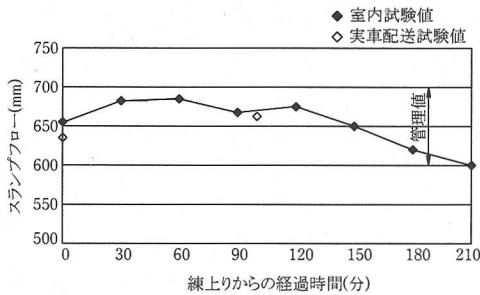


図-14 経過時間とコンクリートの流動性の変化

らLC座金の外形変形量 1 mmを管理値としてトルクを導入した。

なお、図-12 から、LC座金の外径変形量とボルト軸力の関係が読みやすくなるボルト導入軸力2000 N付近より測定を開始し、ボルトの導入トルクと導入軸力の代用変数であるLC座金の外径変形量の関係を用いてボルトの導入軸力を図-13 のように測定した。

外主桁における実験でNo 1~No 3は、所定の軸力を導入できたが、No 4は、軸力を2750Nまで導入した後、導入トルクを上げる途中で軸力が抜けはじめ、約34 N・mのトルクを導入した段階で破断した。

中主桁における実験でNo 5は、軸力を2750 Nまで導入した後、導入トルクを上げる途中で軸力が抜けはじめ、約27 N・mのトルクを導入した段階で破断した。また、No 6は、25 N・m付近で一旦導入軸力が降下し、27 N・mで軸力が2500 Nまで再上昇した。これは、トルクの導入途中でネジ山相互のガタが取れたか、あるいは添切板一箇所当たり8本の群ボルトであるため、ボルト間で軸力が再配分されたものと考えられる。No 6は、導入トルクが26~27 Nmを越える付近から軸力が抜けはじめたため、トルクの導入を中止した。No 8は所定の軸力を導入できた。

以上の結果から、ボルトを健全な状態で保持しながら導入できるトルクは24~25 N・mと判断される。

そこで、導入トルクの管理値としてはボルトを健全な状態に保持できる信頼性のある上記の範囲に安全を見て

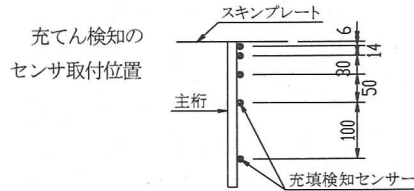
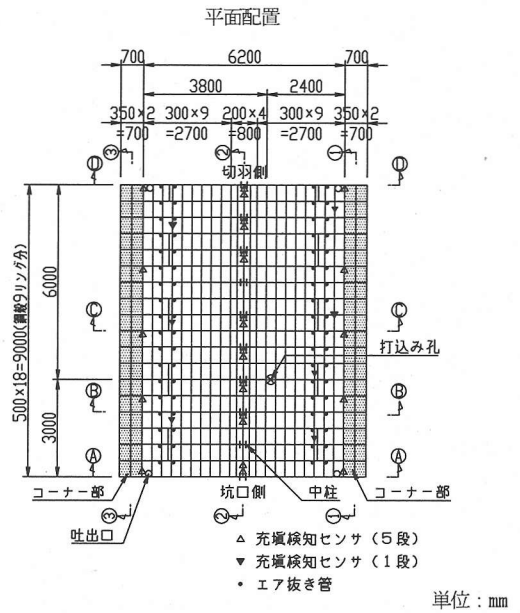


図-15 コンクリートの打込み・充てん設備と充てん検知センサー

22 N・mまでとした。すなわちボルトの再締め付け時導入軸力の目標値としては結果的に設計軸力となる許容軸力の約70%である2150 Nとして以降の施工管理を実施した。組立完了後の鋼殻を写真-3 に示す。

(4) 高流動コンクリートの打込み管理と充填状況

a) コンクリートの配合と流動性の変化

施工に供したコンクリートの配合は表-2 に示したものをを用いた。

コンクリートは市中のレディーミクストコンクリート工場から出荷した。実施工における1ブロックの打込み要する時間は、最初のコンクリート出荷時間から約3時間を想定したが、事前の試験練りおよび実車配達試験では、図-14 に示すようにスランプフローの低下は非常に小さく、出荷後、約3.5時間までは所定の流動性を満足できることを確認した。

b) 頂版部の充てん性確認

頂版部のコンクリートの打込みは、図-15 に示すように9リング分の鋼殻すなわちトンネル軸方向 9mを1ブロックとし、コンクリートの打込み口は1箇所、コンクリートの最大流動距離は水平方向に約 6mとした。

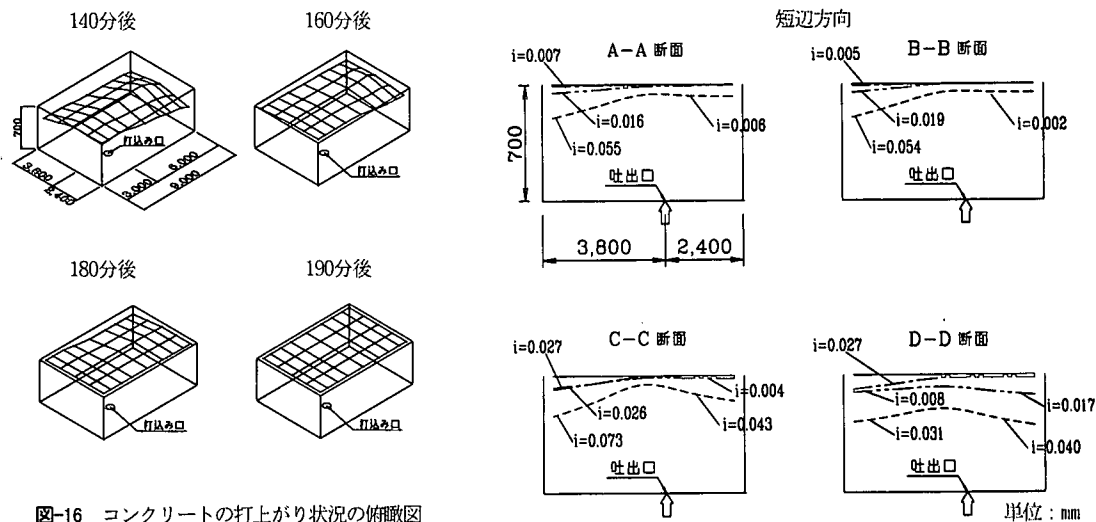


図-16 コンクリートの打上がり状況の俯瞰図

コンクリートの運搬は立坑地上部にコンクリートポンプ車を配置して鉛直下向きに約 12m, その後, 最大約110 mの水平圧送管を配置し, 打込み口下方で鉛直上向きに設置した圧送管からコンクリートを吹き上げるように型枠内へ打ち込んだ。

コンクリートの充てん性確保のため, 事前の実験でその効果を確認したエア抜き管を鋼殻1ピースにつき 2本と最終打ち上がり時に余分なコンクリートを外に放出して, 急激な内部の圧力増加による稜片棒などの損傷を防ぐためのコンクリートの吐出口(バルブ操作で開閉)を 1ブロックの4隅に配置した。

また, 流動状況を把握するため, 第1ブロック打込みの時点では図-15 に示すように平面には長辺方向に外側2列で 5地点, 中央列で 8地点の合計18地点に打上り状況確認用の光学式充てん検知センサ⁸⁾ (以下充てんセンサと略す) を配置した。これらの取付け深さは, スキムプレートから下方 $\sim 6\text{mm}$, 20mm , 50mm , 100mm , 200mm である。さらに中央列と外側に挟まれた2列の7地点に打上り確認用の充てんセンサを配置した。これらの取付け深さは, スキムプレートから下方 $\sim 6\text{mm}$ とした。これらの合計 97個のセンサを用い, 各鋼殻内部の充てん確認および打止め管理を実施したが, 最上段部の充てんセンサが全て反応し, かつ各鋼殻に配置したエア抜き管からセメントペーストが流出するのを目視確認した時点で打止めとした。

コンクリート打込み口は, ポンプ車に近い方の稜型枠から 3 mの距離に, また, 横断方向には鋼殻の継手位置を避けて中心から外側 $\sim 0.7\text{m}$ ずらした位置に配置した。なお, コンクリートの流動性が悪いときの補足として 7.5 mの位置にも予備のコンクリート打込み口を設けた。

打上がり状況の一例を俯瞰図的に図-16 に示す。

コンクリート打込み口としては, 稜壁からの距離3mに1箇所のみ設けたが, 打込み口の直上部をピークとし

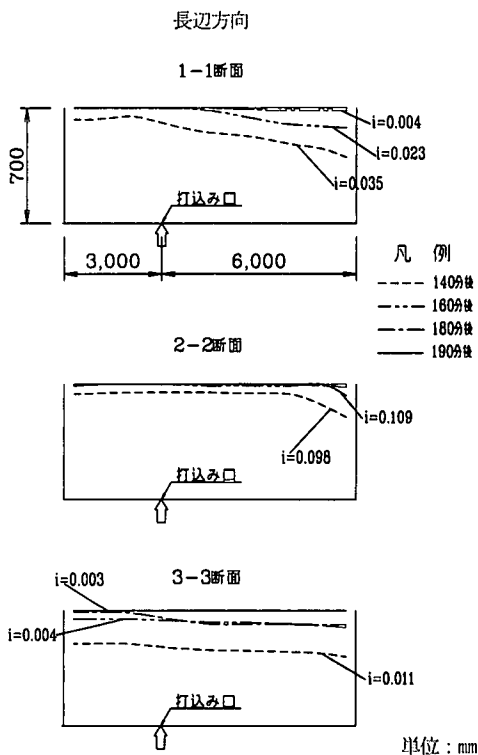
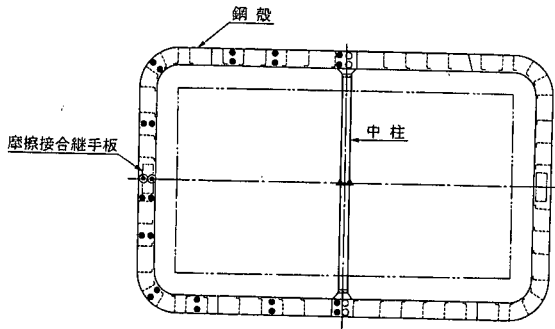


図-17 コンクリートの流動状況と流動勾配

てなだらかに流動し, 打込み開始後180分で, ほぼ全域が平面に近い状態で等レベルにコンクリートが打ち上がり, 190分後には, 最上部の充てんセンサが全て反応した。

また, それぞれのエア抜き管からセメントペーストの流出が目視確認され, コンクリートが鋼殻内に密実に充てんしたことを確認した。



計測項目	使用計器	凡例
鋼殻主桁の応力	ひずみ計	●
鋼殻主桁の温度	温度計	○
摩擦接合継手板の応力	ひずみ計	◎
中柱の応力	ひずみ計	▲

図-18 計器の取り付け位置

コンクリートの打上がり状況を図-15の平面配置に示された代表断面について見ると図-17 のようになり、以下に示す傾向が観測された。

なお、図中の充てんセンサ間および充てんセンサ以深の打上がり状況を示す線は、得られたデータを直線補間および延長したもので、数値は充てんセンサ間のコンクリート表面勾配を示すものである。

①短辺方向の充てん状況

- ・短辺方向に見て、打込み口が中心から70cmずれており、打込み口付近および棲型枠に近いA-A断面からB-B断面にかけては、流動距離の短い方のエリアが先にほぼ水平面に打ち上がる。
- ・流動距離が長くなるC-C断面付近からD-D断面にかけては、なだらかな山状に打ち上がる傾向が見られる。
- ・各断面の流動勾配は、140分の段階では最大値が0.04～0.07の範囲に、160分の段階では最大値が0.01～0.03の範囲にある。180分の段階では、A-A断面からB-B断面にかけては、全域が0.01未満でほぼ水平に打ち上がり、C-C断面からD-D断面にかけては、流動距離の短い方においてはほぼ打ち上がっているが、反対方向は、0.02～0.03の範囲にある。

②長辺方向の充てん状況

- ・打込み口に近い2-2断面においては、140分の段階では流動距離4m付近まではほぼ水平で、その先で流動勾配は0.01と大きくなっている。160分の段階では流動距離5m付近で同様の傾向を示している。
- ・短辺方向の距離が打込み口から約2mの1-1断面においては140分～160分の段階の流動勾配は、0.02～0.04の範囲であるが、180分の段階ではほぼ水平である。

- ・短辺方向の距離が打込み口から約4mの3-3断面においては各段階とも流動勾配は、0.01以下である。

以上のことから、全体になだらかに打ち上がっていることが認められた。ただし、流動距離が4～5m程度になると、打上り途中では流動勾配が0.1程度と大きくなっている箇所も観測されているが、縦リブなどの流動の障害となる部分を潜り抜ける際の一時的な現象であり、エアを抜くことによって隅々までコンクリートを充てんできることが認められた。

高流動コンクリートにおける流動勾配の管理の目安値は、0.1 (10%)⁷⁾であり、今回の打込み方法および充てん設備が妥当であることが認められた。そこで、2ブロック以降については1ブロックの結果を反映して、コンクリートの打ち上がり確認用の充てんセンサは、高さ方向に2段で十分と判断し、スキンプレートから下方へ6mm、50mmの位置に取り付けて施工した。

地下通路全長の全13区間の頂部コンクリート打込みにおいて同様の充てん状況が確認され、自己充てん性の高い高流動コンクリートを使用し、エア抜き管で自然排気することによって、密閉空間である頂部の鋼殻内に密実にコンクリートを打ち込めることを検証した。

(5) 解析モデルの検証

3. に示した設計の思想あるいは解析モデルの妥当性について検証する目的で、鋼殻の各応力を計測し、その計測結果と設計値とを比較検証した。

a) 計測項目と計器配置

計測項目は以下の通りである。

- ①鋼殻主桁の応力
- ②中柱の応力
- ③摩擦継手添接板の応力

計測位置は発進立坑から25リング目で、1リングの片側半分には計器を配置した。計器の取付け位置を図-18に示す。

b) 設計値と計測結果の比較

計測結果についてはセグメント組立てから二次覆工コンクリート打込み後の中柱撤去の段階までを計測期間としていたが、コンクリート打込み時に計器が損傷し、以降のデータが十分に取れていないので、一次覆工完成時についてのみ設計モデルの検証を実施した。

一次覆工完成時の設計値と計測値から求めた曲げモーメントと軸力の分布を図-19に示す。

- ・曲げモーメントについては、分布形状は、設計値と計測値とも同じ傾向を示すが、その値については、隅角部付近ではほぼ等しく、側壁の支間モーメントと中柱部の支点モーメントは小さい。
- ・軸力については、頂版では計測値の方がやや少ない値である。底版部では、バラツキが大きい、単純平

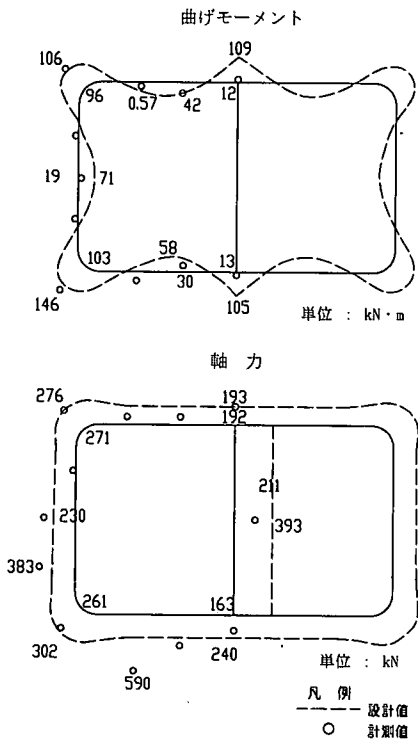


図-19 一次覆工段階の設計断面力と計測値の比較

均すと設計値の1.5倍程度、設計値の2倍以上の計測値を異常値として無視すると設計値と一致する。中柱では、設計値の約1/2の軸力が計測されている。

上記の傾向について、設計値と計測値が合わない要因を考察すると以下ようになる¹⁵⁾。

- ・H型鋼の中柱組立て時には、鋼殻をジャッキで押し広げた状態で中柱をエレクタで組み立てており、中柱と鋼殻の接ぎ面に空隙があり、荷重作用時にその空隙が無くなった時点で柱が支保工として機能したことになる。また、隣接する鋼殻相互が継ぎ手ボルトを介して作用荷重を分担し合っている可能性がある¹⁵⁾。
- ・土圧係数が設計値と異なっている可能性がある。
- ・鉛直土圧が小さいか、上載荷重は常時荷重でないので作用していない可能性がある。

c) 解析モデルの評価

設計に用いた図-8の剛性一様のフレームモデルによる設計値と計測値の違いの検証を以下のように実施した。

図-20に示すように、まず、ステップ1としては、実施工において鋼殻と中柱の空隙を約20mmにして中柱を組み立てている点に着目し、その空隙が無くなるまで、中柱の無い鋼殻だけのモデルで、鋼殻の鉛直方向変形量の合計が約20mmとなる時点の断面力を算定する。

次に、ステップ2として、中柱の軸力に着目し、計測値と等しくなるように、図-8の剛性一様のフレームモデルにおける鉛直方向荷重を低減させる。

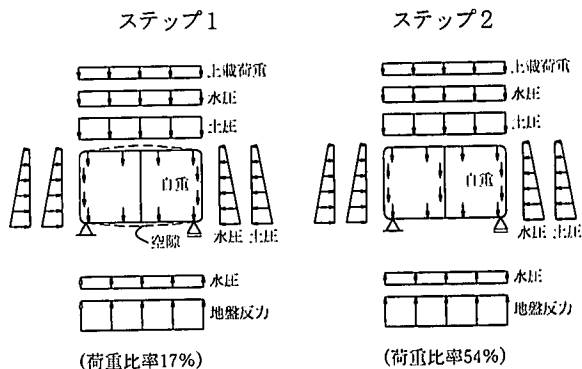


図-20 計測値に対する検証の解析モデル

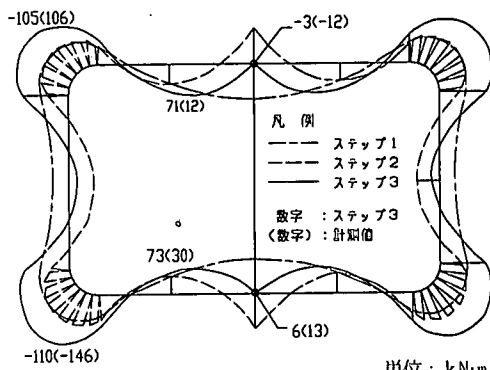


図-21 解析モデルの変更と計測値との比較

ステップ1とステップ2の断面力を重ね合わせた各部材の断面力と計測値を比較する。

覆工構造および継手構造の設計において影響度の大きい曲げモーメントに着目して解析結果を図-21に示す。

ステップ1では、作用荷重が設計値の17%で鉛直方向の内空変位量の合計が20mmとなったが、曲げモーメントの値は、頂版および底版は中央部が内側引張り状態に、側壁は外側引張り状態となった。

次に、ステップ2では、中柱の軸力が計測値と一致するのは作用荷重が設計値の54%の場合で、曲げモーメントは、頂版の中央部および隅角部が外側引張りで、頂版の支間部および側壁の中央部は内側引張りとなった。

ステップ1とステップ2を重ね合わせた場合、解析値と計測値は、オーダー的にほぼ等しい値の曲げモーメントの分布が得られた。

今回の検証では、ステップ1とステップ2を重ねても設計で用いた荷重の残り約30%が作用していない結果となった。その原因としては以下のことが考えられる。

- ・作用荷重が設計値より小さい。特に、鉛直方向荷重として考慮した全土被り圧が実際には作用していない。
- ・中柱組立て時に鋼殻との空隙が場所ごとに一定していかなくて、かつなじみの具合も異なっており、中柱相

互の支保工としての効き具合が異なる。

- ・継手ボルトにより作用荷重が隣接鋼殻へ伝播した。
- ・継ぎ手部、特に短ボルト継ぎ手部の頂版部および底版部は鋼殻の部分より剛性が小さいため、発生断面力も小さくなる。

今回の計測では、隣接リングとの荷重分担も十分確認できておらず、中柱の支保工としての剛性の正確な評価も難しいが、現状の解析モデルは、全体的に安全側の値となるため、同種の解析では当面は原設計通りの解析モデルでの検討が現段階では現実的と考える。

今後、中柱の軸力分担を均等化する意味で、プレロードジャッキなどによる鋼殻と中柱間のなじみ取の必要性の検討が必要となる。

なお、二次覆工段階については信頼できる計測データが無いため、当面は原設計と同じ2ケースの検討を実施して、部材設計をしていくのが望ましいと考える。

5. まとめ

矩形シールドトンネルの覆工として鋼殻と鉄筋を組み合わせた場所打ちコンクリートによるオープンサンドイッチ覆工を開発し、矩形断面かつ壁厚を最小にできる特徴から4.5mの低土被りでかつ非開削のできる工法が求められた地下通路の覆工構造体として採用した。

開発の成果をまとめると以下のとおりである。

- ①鋼殻の継手としては短ボルトおよび摩擦接合継手を発生断面力の分布に合わせて使い分けることにより、鋼殻をオープンサンドイッチ構造の補強鋼材として本体利用できる。
- ②継手はシールドの掘進のための推力の影響などで組立て後に緩むことがあるが、Load Control座金などでボルトの再締め付け時の導入時軸力および導入トルクの管理値を設定することにより、摩擦接合としての品質を確保することができる。
- ③鋼殻の頂版部へのコンクリートの充てんは高流動コンクリートを用い、かつ各鋼殻のレベルが高い位置にエア抜き管を設置することにより、鋼殻内部を密実に充てんすることができる。
- ④光学式の充てん検知センサを各鋼殻に配置し、センサの反応状況で充てん状況を把握しながら、エア抜き管からのセメントペーストの流出を確認することで、充てんおよび打止めの管理が確実に行える。
- ⑤鋼殻の一次覆工の設計モデルとしては剛性一様のフレームモデルおよび梁バネモデルが考えられるが、梁バネモデルの場合、矩形断面での適用実績が少なく、かつ継手部のばねの評価ができなかったので、短ボルト継手を千鳥配置に、摩擦接合継手をイ

モ継ぎしたケースでは、剛性一様のフレームモデルで二点支承での設計が、現段階では現実的である。

- ⑥実工事における仮設時の計測から、モーメントおよび軸力の分布は設計値とほぼ同等となったが、中柱位置では両者に差が見られた。施工状況を考慮した解析から、仮設時においては中柱の支保状況の違いで発生断面力が変わるので、ジャッキによる調整などが必要と考える。

なお、今回の開発および実施工において継手の施工性ならびに鉄筋の組立て性についての改善などいくつかの要望が現場の方から出された。今後、より簡便で剛性が確保できる継手の開発を図るとともに、今回、計測において確認できなかった鋼殻の一次覆工から二次覆工に移行する段階の応力履歴を確認できる機会を作って、より妥当な解析モデルの提案を行っていきたい。

参考文献

- 1) 多田孝司, 谷口徹, 古川浩平, 中川浩二: ボックスシールド工法実証施工に関する考察, 土木学会論文集, No. 560/VI-34, pp. 31-42, 1997. 3.
- 2) 石原美光, 天野玲子, 三宅正人, 大澤一郎: 継手を有する鋼殻によるサンドイッチ部材の曲げ特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19/No2, pp. 1425-1430, 1997.
- 3) 山崎裕介, 大澤一郎, 山中宏之, 石原美光, 天野玲子: MMST工法における摩擦接合継手を有する合成構造の特性, 土木学会第52回年次学術講演会, V-235, pp. 470-471, 1997. 9.
- 4) 古市耕輔, 石原美光, 平陽兵, 大澤一郎, 三宅正人: MMST工法における長ボルト継手を有する合成構造部材の特性, 土木学会第53回年次学術講演会, V-415, pp. 830-831, 1997. 9.
- 5) 柳井修司, 坂田昇, 渡邊賢三, 岸田哲哉: 自己充填コンクリートの新しい充てん性評価試験方法に関する一実験, コンクリートの品質評価試験方法に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp. 109-116, 1998. 12.
- 6) 坂田昇, 丸山久一, 南昌義: 増粘剤ウレタンガムがフレッシュコンクリートの自己充てん性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No. 538/V-21, pp. 57-68, 1996. 5.
- 7) 高流動コンクリート施工指針, コンクリートライブラリー93, 土木学会, 1998. 7.
- 8) 坂井吾郎, 万木正弘, 坂田昇, 岩城実: 品質保証を考慮した高流動コンクリートの施工について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17/No1, pp. 233-238, 1995. 6.
- 9) 三木武司, 戸田正弘, 加田 修: 塑性座金によるボルト軸力の制御と振動外力の影響, 日本機会学会論文集, C編/63巻/614, pp. 286-291, 1997. 10.
- 10) 小坂琢郎, 吉川正, 田中耕一: 矩形シールドトンネル覆工構造の開発, 第33回地盤工学研究発表会, pp. 1933-1934,

1998. 7.

- 11) 小坂琢郎, 吉川正, 田中耕一: 揺動型シールドマシンによる矩形トンネル構築工法の開発, 土木学会第53回年次学術講演会, VI-75, pp. 150-151, 1998. 10.
- 12) 三井隆, 吉川正, 尾上順吉: 新しい矩形シールドトンネルの開発と施工, トンネルと地下, Vol. 30, pp. 37-46, 1999. 6.
- 13) 高橋秀樹, 西田徳行, 園山哲夫, 城代高明: サンドイッチ構造施工実験における高流動コンクリートの充てん性とその検査方法, 土木学会論文集, No. 651/VI-47, pp. 11-26, 2000. 6.
- 14) 請川誠, 谷口徹, 元木実, 中川浩二: 矩形断面スチールセグメントの合理的構造と設計に関する提案と検証, 土木学会論文集, No. 651/VI-47, pp. 47-60, 2000. 6.
- 15) 岸尾俊茂, 葛野恒夫, 高崎肇, 池松豊文, 中川雅由: 大阪ビジネスパーク停留場工事3心円シールド覆工構造の設計, 土木学会論文集, No. 540/VI-31, pp. 69-84, 1996. 6.

(2001. 4. 6 受付)

DEVELOPMENT OF A SEGMENTAL LINING OF OPEN-SANDWICH STRUCTURE FOR SHIELD DRIVEN TUNNELS OF RECTANGULAR CROSS SECTION AND VERIFICATION OF EFFECTIVENESS THROUGH ACTUAL CONSTRUCTION

Tadashi YOSHIKAWA, Takashi MITSUI, Koichi TANAKA,
Syuji YANAI and Koji NAKAGAWA

The demand for shield driven tunnels of rectangular cross section is increasing in recent years, and the development of an economical segmental lining structure has become necessary.

In order to be able to employ in segmental linings an open sandwich structure constructed by first erecting a steel segments and then placing reinforced within this segments, development activity was performed with respect to joint structure selection and tightening control method, high fluidity concrete mix design and placing method, and structural analysis models.

The results of this development were applied to a rectangular shield driven tunnel that is one of the largest in the world. Their effectiveness was verified through this construction.