

モルタル継手鋼枠トンネルライニング (MS ライニング) 工法

MORTAR-JOINTED STEEL FRAME TUNNEL LINING

松本嘉司*・安原 明**・宮田弘之介***・新見吉和****

By Yoshiji MATSUMOTO, Akira YASUHARA, Konosuke MIYATA and Yoshikazu SHIMMI

In shield tunnels the lining is generally constructed by bolting reinforced concrete or steel segments to each other.

In the newly developed lining method, lining elements in which concrete are placed in I-shaped steel frames are used. After lining elements are installed with the horizontal joints staggered to the mid-length of the adjacent lining elements, they are jointed into a body by pouring mortar into the space between adjacent steel frames.

In the paper, several loading tests of the lining in the laboratory and its application to an actual shield tunnel are presented.

Keywords : shield tunnel, newly developed lining method, lining element mortar-jointed

1. ま え が き

現在のシールドトンネルの一次覆工には、鉄筋コンクリート系または鋼製系のセグメントをボルト継手で組み立てる方式のものが用いられている。このボルトの締結作業は主として人力で行われており、このことがトンネルを自動化施工するうえでの大きな障害になっている。最近シールドトンネル工事では、その掘削技術が著しく進歩し、掘削作業の自動化が急速に進められているが、それに対してセグメント組立て作業のロボット化はかなり遅れているといつてよい。さらに、従来のセグメントは相互にボルトで接合されているため、継目の間からの漏水を完全に防止することができない、というトンネルとしての基本的な欠陥をもっている。本研究で開発した工法はコンクリートを組み込んだ鋼枠の覆工部材を用い、その接合面の間にモルタルを注入して覆工部材を一

体化するもので、継目間の漏水がなく、かつ覆工作業の自動化を可能にする工法である。さらに従来ボルト継手を用いる工法では、相互のセグメントの接合面が平行していなければならない、ということのため、高い製作精度が要求されていた。このため、セグメントの製作は高度の設備を整備した専門工場で行う必要があり、したがってセグメントの製作費がかなり高くなっていたが、本研究の工法では、接合面の平行度の精度を従来ほど必要としないので、覆工部材の製作費を大幅に低減することができる。場合によっては、覆工部材を工場で作るのではなく、鋼枠のみを現場に搬入し、そこでコンクリートを打設して覆工部材とすることも可能である。

以下、本工法の設計方法およびそれに伴って行った実験結果と、日本鉄道建設公団が現在建設を進めているJR京葉線の隅田川鉄道トンネルでの施工実績および今後のMSライニング工法についての検討結果を示す。

2. 設 計 方 法

本工法は、図-1に示すようにI型鋼を従来のセグメントと同程度の大きさの枠状に接合した鋼枠を製作し、その内側に無筋コンクリートを中詰めし、覆工部材を製作する。トンネル内では、この覆工部材を先行する覆工部材の鋼枠に突き合わせて組み立て、鋼枠相互の空隙に

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科
(〒113 文京区本郷 7-3-1)

** 正会員 日本鉄道建設公団東京支社長
(〒108 港区芝 5-33-8)

*** 正会員 佐藤工業(株) 常務取締役土木副部長
(〒103 中央区日本橋本町 4-12-20)

**** 正会員 新日本製鐵(株) 技術本部建材開発技術部長
(〒100-71 千代田区大手町 2-6-3)

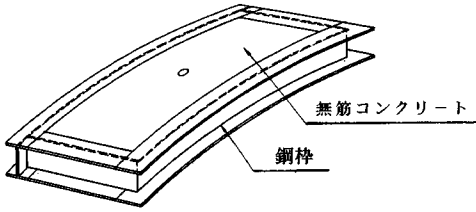


図-1 覆工部材の構造

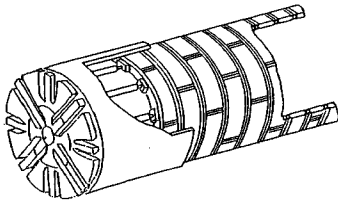


図-2 MS ライニング概要図

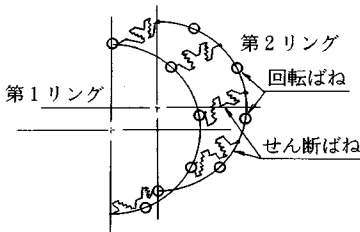


図-3 2リング構造モデル

はモルタルを注入してライニングを一体化する。この場合、各覆工部材は隣接リングの覆工部材に対し、相互に1/2ずつずらして組み立てる(図-2)。

このように、覆工部材は鋼棒の中にコンクリートが中詰めされた構造になっているため、その両者が一体となって外力に抵抗するので、次のような考え方によって構造設計する。

① リング構造モデル

i) 曲げモーメント、軸力、せん断力などは、周辺より土圧および水圧が作用する2リング弾性体構造モデルとして図-3に示すはり～ばねモデルで解析する¹⁾。

ii) 覆工部材の突き合わせ継手部は、モルタル注入により軸圧縮力とせん断力のみを伝達し、はり～ばねモデルにおける回転ばねはヒンジとし、 $k_m=0$ とする。

iii) リング相互の突き合わせ継手部は、モルタル注入によりせん断拘束性が高いため、せん断ばねは剛結とし、 $k_r=\infty$ とする。

② 覆工部材の構造設計

部材断面の耐力の検定には、応用力学で仮定するHookeの法則、平面保持の法則以外に、次のことを仮定する。

i) コンクリートは引張力に抵抗できないものとし、コンクリートに作用する引張応力は無視する。

ii) 鋼棒とコンクリートとは一体になっていて、コンクリートと鋼棒との間の相対的な位置変化はない。

iii) 鋼材(SM50)の許容曲げ応力、許容せん断力はそれぞれ1900 kgf/cm²、1100 kgf/cm²とする。コンクリート($\sigma_{ck}=450$ kgf/cm²)の許容圧縮応力度は $\sigma_{ca}=160$ kgf/cm² ($\sigma_{ck}/\sigma_{ca}=2.8$)とする。

③ 覆工部材の破壊安全度

トンネルの覆工に作用する外力のうち、垂直土圧はトンネル完成後もあまり大きな変化はないが、水平土圧は地震時とか周辺建物の根掘などによって、推定した値より大きくなることが考えられる。したがって、軸力の影響を無視して破壊曲げモーメントを求め、覆工の安全度を検討する。

以上の構造設計上の仮定と隅田川鉄道トンネルの荷重を用いて、I-300×200×9×12の鋼材と80 cm×30 cmのコンクリートから成る覆工部材に対して2リング解析モデルで計算を行ってみた。その結果、覆工部材に作用する最大曲げモーメント： $M=26.57$ tfm、軸力： $N=176.8$ tfとなり、覆工部材に発生する最大応力度は、鋼材には1542 kgf/cm²、コンクリートには124 kgf/cm²となった。いずれも許容応力度の範囲内である。この場合の破壊曲げモーメントは $M_{ru}=58.5$ tfmで、安全率は2.2である。

3. 覆工部材の載荷試験と継手部のせん断試験

前述した覆工部材の構造と設計方法を確かめるため、模型試験体による覆工部材の載荷試験、継手部の部材としてのせん断試験、および実物大に組み立てた覆工部材の載荷試験を行った。

(1) 覆工部材の模型試験体による載荷試験

覆工部材の模型試験体による載荷試験では、2リングモデルにおいて継手部の有無、およびその継手部を鉄筋で補強した場合の剛性の変化を確認した。載荷試験の方法は図-4に示すように3等分2点載荷で鉛直に線荷重を加え、スパン中央部のひずみとたわみを測定した。図-5、図-6に模型試験体の形状および、鉄筋による補強方法を示す。

図-7に示すスパン中央部での荷重-鉛直変位曲線に

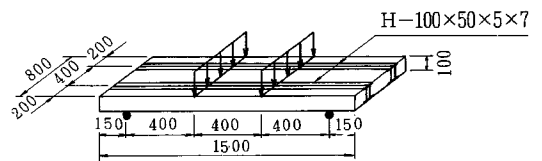


図-4 模型試験体載荷試験概要

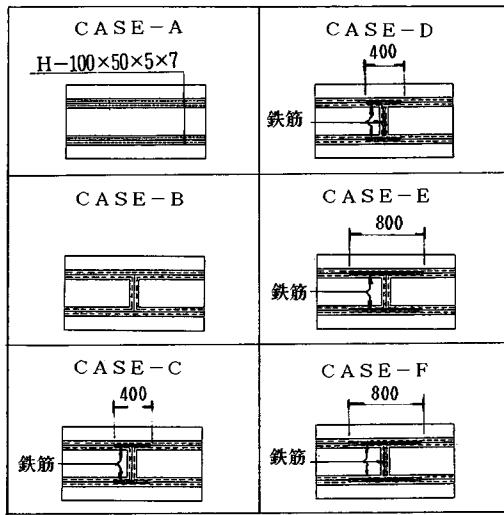


図-5 模型試験体の種類

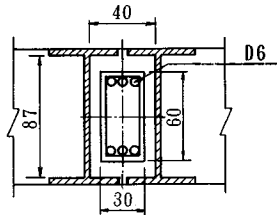


図-6 継手部補強鉄筋

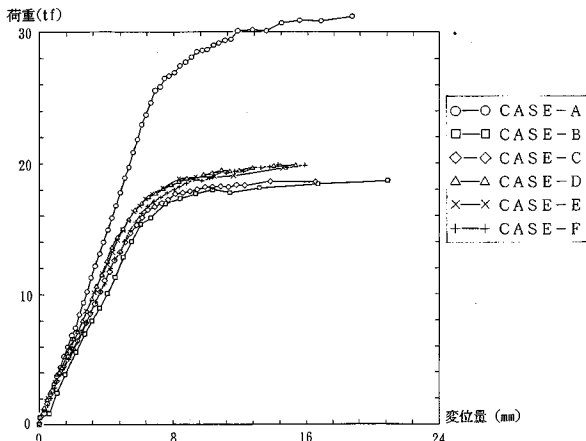


図-7 荷重-鉛直変位曲線

よると、継手の有無による剛性の低下率は破壊点付近で約60%になるが、設計荷重に相当する載荷荷重9.0tf付近では10%程度であって、モルタルのせん断力によってモーメントがよく伝達されることが確認された。また鉄筋の補強による剛性の増加はほとんどみられなかった。

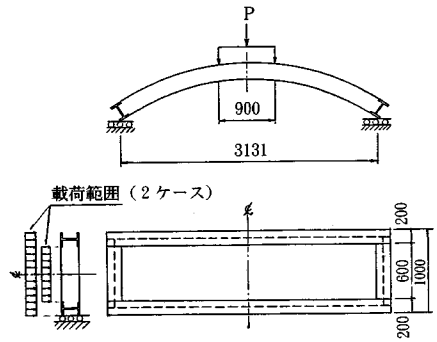


図-8 本体載荷試験概要

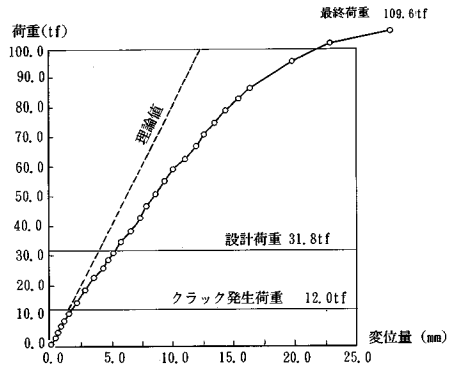


図-9 荷重-鉛直変位曲線

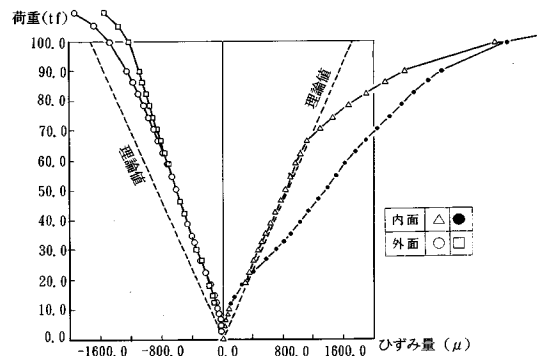


図-10 荷重-鋼材ひずみ曲線

(2) 覆工部材本体部の載荷試験

実物大に製作した鋼棒の中に無筋コンクリートを施工し図-8に示すような供試体を作り、これに従来からのセグメントの載荷試験装置を用いて2点集中荷重を加えて、スパン中央部のたわみと鋼材のひずみとを計測した。荷重の載荷点は鋼棒を含む全長にした場合とその中間の無筋コンクリートの上限定した場合の2ケースである。試験の結果は、2ケースとも同じ性状を示し、覆工部材中央部の無筋コンクリートと両側の鋼棒の間にはせ

ん断変形が認められず、一体構造になっていることが確認された。

図-9、図-10に、鋼枠を含む全長に集中荷重を載荷した場合の荷重-鉛直変位曲線と、荷重-鋼材ひずみ曲線を示す。ここに示した理論値はコンクリートの引張力を無視して求めたもので、前章で示した構造計算上の仮定②の妥当性を示している。また、最終荷重は109.6tfで、構造計算上の仮定③を使用したその理論値は88.4tfである。この値は従来のRCセグメントの値(62.0tf)に比べて約1.8倍にもなっており、非常に高い破壊安全度を示している。

(3) 覆工部材継手部の載荷試験

この試験は、モルタル注入部のリング間継手のせん断拘束による隣接覆工部材への応力伝達状態を確認するために行ったもので、2個の覆工部材の両側に覆工部材と同じ長さおよびその1/2の長さのI型鋼を相互に1/2ずつずらしてモルタル注入によって接合し、図-11に示すような供試体を製作した。この供試体を前節と同じようなセグメント試験装置を用いてスパン中央部に2点集中荷重を加え、スパン中央のたわみと鋼材のひずみとを計測した。

図-12、図-13は両側のI型鋼の間の2個の覆工部材の部分だけに集中荷重を載荷した場合の荷重-鉛直変

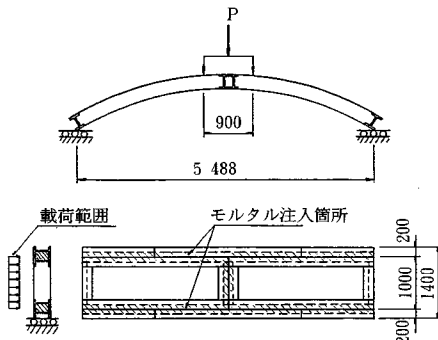


図-11 継手載荷試験概要

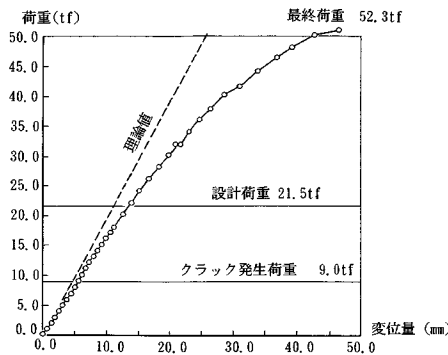


図-12 荷重-鉛直変位曲線

位曲線と、荷重-鋼材ひずみ曲線である。理論値は、図-3の2リング解析モデルを用い、コンクリートの引張力を無視して求めたものである。この結果は実験値とよく一致している。このことは、モルタル注入部のリング間継手のせん断拘束によって、曲げモーメントが隣接する添梁の鋼枠に伝達されたことを示している。また、この場合最終荷重の実測値は52.3tfであるが、鋼材の降伏応力度 3700 kgf/cm^2 を用いコンクリートの引張力を無視して求めた降伏荷重49.7tfとよく一致している。

(4) 継手部のせん断試験

この試験は、注入モルタルの若材齢時におけるせん断強度を確認するために行ったもので、3個のI型鋼をモルタル注入で接合し、図-14に示すような供試体を製作した。そして、中央のI型鋼に集中荷重を加え破壊時荷重を計測し、注入モルタルのせん断強度を算定した。

図-15、表-1にアルミナセメントを用いた場合の試験結果を示す。表-1において、せん断強度は破壊時の荷重を供試体の破壊部断面積(2A)で除したものであり、圧縮強度はせん断試験時と同じ材齢モルタルでの圧縮強度試験の結果である。

注入モルタルの強度については、シールド推進時にはジャッキ推力を受圧面積で除した支圧強度として 70 kgf/cm^2 以上の圧縮強度が必要である。またシールドのテール脱出時に、継手部がセグメントのリング継手ボルトと同等以上のせん断耐力をもたせるためには、せん断

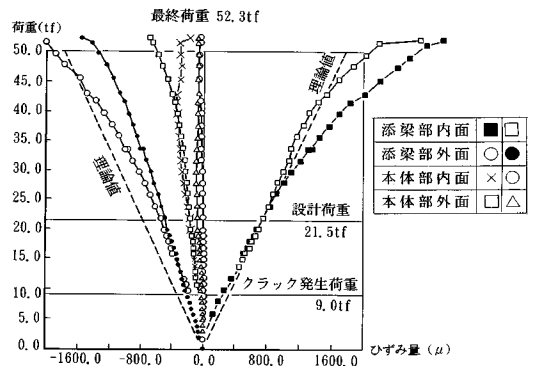


図-13 荷重-鋼材ひずみ曲線

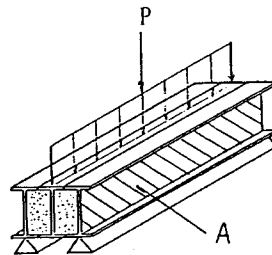
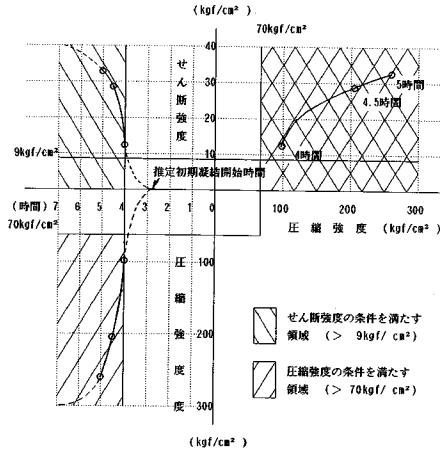


図-14 せん断試験概要



図—15 せん断試験結果

表—1 せん断試験結果

経過時間	せん断強度: τ (Kgf/cm ²)	圧縮強度: f_c (Kgf/cm ²)	f_c / τ
4.0 時間	13.0	99	7.6
4.5 時間	28.8	205	7.1
5.0 時間	32.5	260	8.0

強度が 9 kgf/cm² 以上必要となる。試験結果によれば、このようなモルタルに要求される早期強度は、アルミナセメントを用いた場合には練り上がり後 4 時間で得られることが確認された。

4. 施工実績

以上のような設計、および各種試験の結果に基づいて、隅田川トンネルのライニングの一部に本工法が実施された。その概要と施工実績について述べる。

(1) 隅田川トンネルの概要

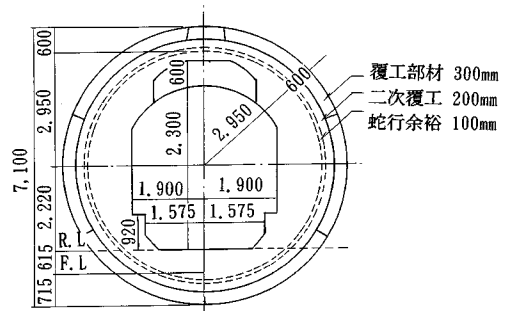
隅田川トンネルは、西越中島駅(仮称)と、隅田川立坑間延長 776.7 m の単線並列トンネルである。トンネ

ルは、建物(大蔵省関東財務局越中島住宅 2 棟, マンション 前仲町 1 棟), 河川(隅田川), 道路などの下に土被り 9~26 m で位置している。掘進は泥水式シールド 2 台で行い, 1 台は西越中島駅から, もう 1 台は隅田川立坑からそれぞれ発進し, 隅田川河底ですれ違う。平面線形は $R=1200$ m の曲線が 1 か所あり, また縦断線形は隅田川立坑からは全線 8/1000~32/1000 の上り勾配である(図—16)。

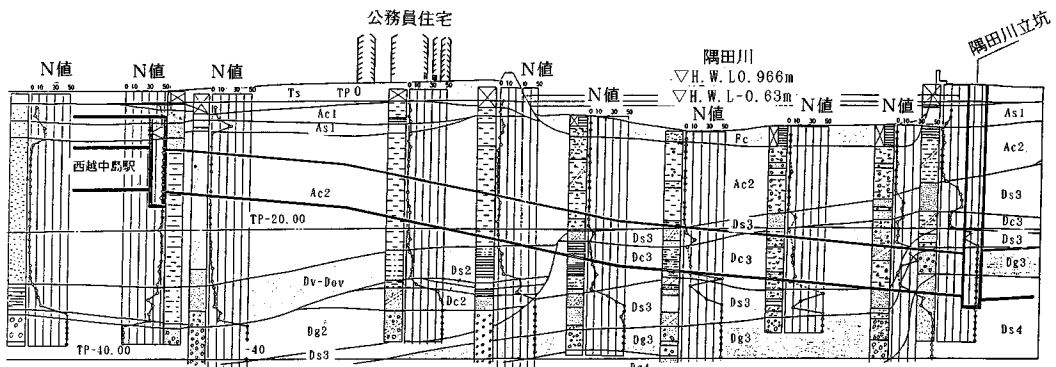
覆工構造は全線従来どおりの RC セグメントで設計されていたが, MS ライニング工法は, 上り線トンネルの隅田川右岸部分で施工された。施工を行った地点の土被りは 26 m, 地下水位は GL-14.5 m (被圧地下水), 地質は洪積層砂質土および砂礫(東京礫層)の互層, N 値=50 である。

(2) 覆工構造

施工設備は, 従来のセグメント区間で用いていたものをそのまま転用し, MS ライニング工法の施工のために特別な改造は行わなかった。そのため, 覆工部材は RC セグメントと同様の形状寸法とし, 外径が 7100 mm (幅 1 m, 厚さ 30 cm) の 7 分割とした(図—17)。また, RC セグメントによる覆工から MS ライニングへの移行部には, 接続リング(幅 90 mm)を使用し, リング継ぎボルトにより RC セグメントに固定した(図—18)。



図—17 覆工の構造



図—16 隅田川トンネル地質縦断図

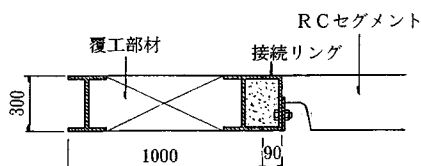


図-18 接続リングの構造



写真-1 組立て状況

(3) 覆工部材の組立て、推進

掘削は従来のセグメント区間と同様に行った。覆工部材はRCセグメントと同様に覆工部材中央に設けた裏込め注入口をエレクターで把持して組み立てた。その際、リング間の一体化を増強するため、ピース間結合部空間に鉄筋棒を配置した。また、覆工部材の継手部の注入モルタルが固結するまでの一時的な固定には、仮組み用の補助ピースを覆工部材に取り付け、これを組立て時にボルトで連結した(写真-1)。その後継手部にモルタルを注入し、モルタルの強度の発現を待って鋼枠フランジ部にジャッキ推力を加え、次のリングの推進を行った。

(4) 注入モルタル

MSライニング工法の継手部に注入するモルタルは、推進時の加圧力やテール脱出時の外力(せん断力)を若材令時に受けるため、早期強度を必要とする。このためのセメントとしては、アルミナセメント、超早強ポルトランドセメント、超速硬セメント(ジェットセメント、スーパーセメント)、またレジン系のものとしては、エポキシ、不飽和ポリエステル、ポリウレタンなどを使用することを検討したが、この場合にはアルミナセメントの使用が適当と判断した。

ここで使用したモルタルの配合を表-2に示す。

(5) モルタルの注入

覆工部材には1か所のモルタル注入口を設け、これによりモルタルを注入した。モルタルを注入する鋼枠の接合面間の空隙は、覆工部材のリング間とピース間の半リング分はすべてつながった構造となっている。そのため、全リングの空隙1.42m³の注入作業は、1か所からの注入口で行うことが可能であるが、今回の施工においては覆工の下部および上部の2か所から注入を行った。

表-2 モルタルの標準配合

W/C	W (kg)	C (kg)	S (kg)
0.475	393	827	827

表-3 実作業時間実績(1サイクル)

掘削(37A改良区間)	58 ~ 398分
覆工部材の組立て	62 ~ 88分
モルタル注入	55 ~ 77分
モルタル養生	240分

また、注入モルタルの漏出防止対策としては、接合部に厚さ3mmのブチルゴムを取り付けるとともに、組立て時のフランジ相互のずれをフランジ厚($t=12\text{mm}$)の1/2程度に収めた。その結果、注入時に継手部目地からのモルタルの漏出は、リング間接合面では認められなかった。今後は覆工部材の鋼枠のフランジを厚くすることで、より軽易な対応でモルタルの漏出を防げるものと考えている。

(6) サイクルタイム

実証施工での実作業時間の実績を表-3に示す。今回の施工は、従来のセグメントでの施工設備のままで実施したため、モルタルの注入および硬化時間をサイクルタイムから切り離すことができない。そのため前述のようにモルタルの強度発現を待って、次のリングの掘進を行った。また、施工区間の一部が到達部の地盤改良区間であったため、掘削時間が大幅に増大した。このような制約があったが、覆工部材の組立て、モルタルの注入等のおおの作業について本工法の施工性、有効性が確認できた。今後は、この施工方法を改良することによって、シールドトンネル工法の急速施工が可能になるものと考えている。

以下、このMSライニング工法の施工機構について検討した結果を示す。

5. 施工機構

MSライニング工法の施工にあたっては、対象とする工事の規模や地山条件、環境条件などに応じて施工設備の能力や性能を検討しなければならない。本工法を用いてシールドトンネルの急速施工を行うためには、従来の施工機構のほかに新たに次に示す主要機構を備える必要がある。

- ① 覆工部材の移動、組立て機構
- ② 仮受け支保工の解体、移動、組立て機構
- ③ モルタル注入機構

これらの機構は主にトンネル断面の大きさや施工方法などでさまざまな方式が考えられるが、中・大口徑を対

象とした場合の想定される設備例を以下に示す。

(1) 掘削、排土機構

シールドは、前面の構造により密閉型、全面開放型および部分開放型に大別され、それぞれ掘削、排土機構が確立している。MS ライニング工法はこれらのいずれの機構にも適用が可能である。この場合、本工法を採用することによって特別な掘削、排土機構を新たに考慮する必要はなく、従来と同様でよい。

(2) 推進機構

シールドの推進反力は、セグメントと同様に覆工部材で直接受ける。そのため、覆工部材に均等にシールドジャッキ推力が載荷されるようなスプレッダーを装備する。すなわち、シールドジャッキスプレッダーの形状を鋼枠の形状に合わせ、鋼枠のウェブ部で推進反力を受けるものとする。

(3) 覆工部材の移動、組立て機構

覆工部材をシールド掘削とともに、所定の位置に搬入し組み立てる装置として、一般的に組立用非走行エレクターと移動用ホイストクレーンの組合せが用いられているが、施工性の向上を図る場合には走行用エレクター機構を採用する。

この方法では、1ないし2基の走行用エレクターを装備し、それぞれに複数個の覆工部材把持装置を設ける。覆工部材はあらかじめシールド掘削中に本装置で所定の位置に搬入しておき、シールド掘進終了後同時に複数個を組み立てる。さらに覆工部材の組立ては嵌め込み方式とし、構造部材としてはボルトを使用しない。それにより、掘進作業サイクルの短縮に大きな影響を及ぼす覆工部材の組立て作業時間を短縮できる (図-19)。

(4) 仮受け支保工の解体、移動、組立て機構

従来に比べ覆工の急速施工を図るために、モルタルの注入および硬化時間を掘削・覆工組立て工程と切り離す。そのために、覆工部材の内側に仮受け支保工を設け、注入モルタルが固結してリング構造物として外圧に抵抗し得るまでの間は、これにより一時的に荷重を支える。仮受け支保工の設置数はモルタルの硬化時間と掘進サイクルによって決定される。これをモルタルの硬化部分より順次解体、移動、組立てと繰り返して使用する。そのための装置は覆工部材の移動、組立て設備と兼用とし、走行用エレクターを使用する (図-19)。

(5) モルタル注入機構

モルタル注入機構には、大別すると次の方法がある。

- ① 坑外にプラントを設け、ここで練り混ぜたものをアジテーターカー等により坑内のモルタルポンプまで運搬し注入する。
- ② 坑内の後続設備にモルタルプラントを設置し、専用台車で材料を搬入した後、計量、練り混ぜ、注入を坑内で行う (図-19)。
- ③ 材料をパイプ輸送により別々に坑内に搬入し、注入口の直前で連続的に練り混ぜながら注入する。

これらいずれの方法においても、モルタルの注入作業は裏込注入作業と同様にシールド掘進と同時並行作業とし、作業サイクルの短縮化を図る。

(6) 作業サイクル

従来のシールドの施工機構に以上のような諸機構を増設すれば、かなりの急速施工が可能になる。

表-4に15リング/日の場合のサイクルタイムの一例を示す。この場合、1掘進サイクル約80分でシールド

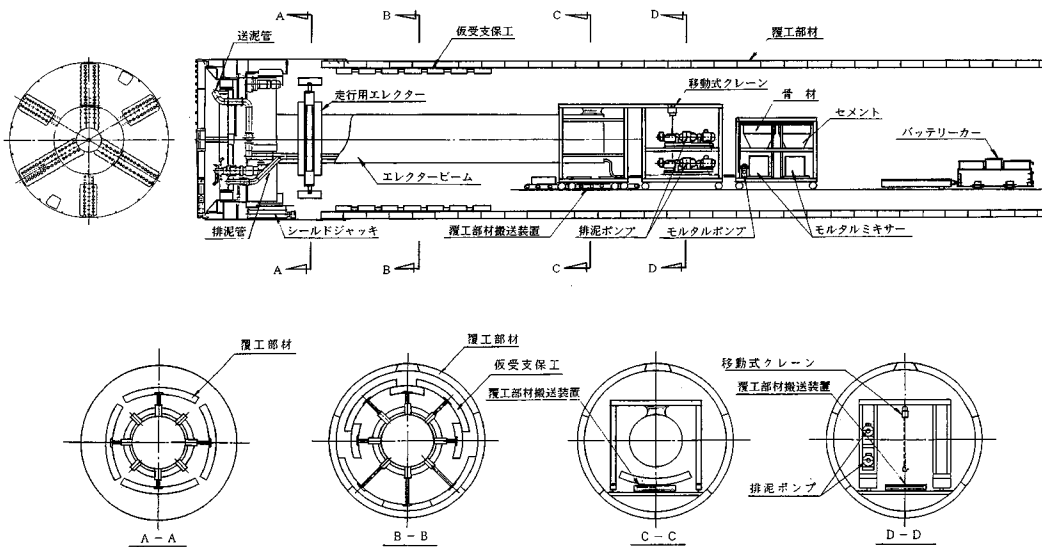
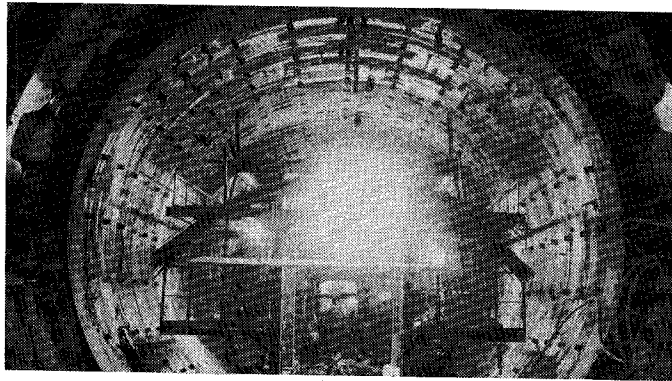
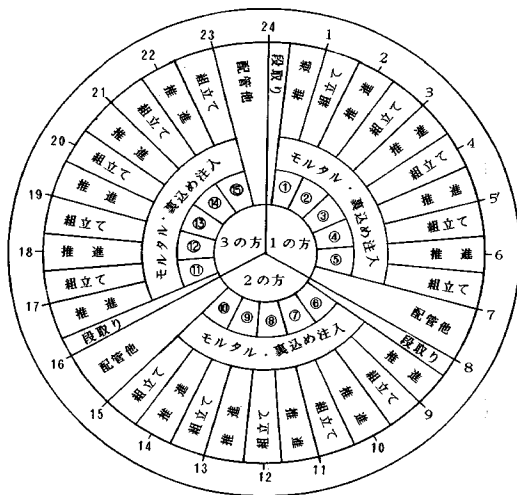


図-19 MS ライニング工法概要図



写真—2 MSライニングトンネル（京葉線隅田川トンネル）

表—4 サイクルタイム



推進、覆工部材の組立ておよび仮受け支保工の解体、移動、組立てを行い、モルタル注入および裏込め注入作業、さらに覆工部材の把持移動作業等はシールド掘進と同時並行作業としている。

最近のニュースとして、密閉型シールドトンネルの施工で月進 886 m の記録が紹介されている。掘削作業と覆工作業を合理化することによって、この程度の急速施工が実現するものと期待している。

6. ま と め

MSライニング工法による隅田川トンネルの施工はきわめて順調に行われた。また当初心配した継手部からのモルタルの漏出もほとんど発生しなかった。これらの施工結果およびこれまでの検討結果より、MSライニング工法の利点を示すと次のようになる。

- ① ボルト締結による継手構造を有しないため、構造解析が明確であり、合理的な設計ができる。
- ② 覆工部材の製作が簡単であるので、覆工費が低減

する。

③ ボルト締結作業を必要としないので、覆工の急速施工が可能となる。

④ 接合面にモルタルを注入して覆工部材相互を一体化するため、従来と比較して止水性が高い。さらに覆工部材背面を薄鋼板で覆い、継目部を溶接接合すれば完全な止水も可能となる。これによって、二次覆工が省略できればトンネル断面を小さくすることができる。

このような利点をふまえ、今後ますます多様化していくシールド工法において本工法が従来のセグメント工法と比較して特にその適用性が高く、その価値をよく発揮するのは次の点にあると考える。

- ① 円形断面における覆工部材として、従来のセグメント工法と同等の適応性がある。
- ② 完全な止水が可能のため、遮水性の要求が特に高い道路トンネルや貯水池用トンネル等への適応性がある。

③ 鉄道トンネル等で実績のある多円形断面シールドトンネルでは、覆工部材と中間柱との接合部などの構造を簡単にすることができる。また円形以外の特種断面シールドトンネルに対しての適用性も高い。

④ 設計の自由度が増加したことにより、今後ニーズの増大が期待できる大深度トンネル等において、覆工部材の設計を従来のセグメントに比べて合理的にすることができる。

謝 辞：このMSライニング工法の開発と隅田川トンネルでの施工にあたっては、多くの方々からご協力を賜った。この報告をまとめるにあたって、ご協力をいただいた方々に深く感謝の意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 半谷哲夫・河田博之・小山幸則：新しいセグメント設計手法の開発、トンネルと地下、日本トンネル技術協会、Vol. 18, pp. 17-26, 1987. 6.

(1989. 3. 31・受付)