

自動組立てに適した新しいボルトレスセグメント NEW MECHANICALLY-JOINTED SEGMENT TUNNEL LINING

松本 嘉司* 新見 吉和**中村 稔*** 吉住 俊彦****
Yoshiji MATSUMOTO, Yoshikazu SHIMMI, Minoru NAKAMURA and Toshihiko YOSHIZUMI

In recent shield tunnels the projects is expected to be constructed at greater depths and with larger cross sectional areas. But the lining is generally constructed by bolting reinforced concrete or steel segments to each other.

A new boltless segments in which concrete are placed in special H-shaped frames, called NM lining, has been developed. The lining is automatically assembled with steel-concrete segments mechanically connected each other, and is integrated by filling mortar into the space between adjacent steel frames. The applicability of automatic welding to its joint so as to maintain waterproofing at greater depth was also studied.

In this paper, several loading tests of the lining using full-sized segments and its workability and waterproofing are presented.

Keywords: shield tunneling, boltless segment, mechanically-jointed, automatic welding

1. まえがき

都市内輸送の増強をめざした鉄道、道路などの新設計画では、既設路線や道路の直下地下の活用が検討されている。これらの建設にはトンネルの大規模化に伴うセグメントの自動組立や環境保全のための地下水漏洩の防止対策など解決すべき不可欠な技術課題となっている。

一方、建設における3K問題や若年労働力の不足、さらに工期の短縮など作業の省力化や急速化施工が要求されている。最近のシールドトンネル工事では掘削技術の進歩が著しく、急速にその自動化が進められている。これに対してセグメントの組立は、従前どおり専ら人力主体のボルト締結により行われている。一部この作業へのロボットの導入も試みられているものの、自動化には煩雑な作業が伴うため未だ実用の域には到っていない。また、既往のセグメント間を連結する構造では、継手部からの漏水を生じやすいという課題も抱えていた。

筆者らは、これらの抜本的な解決策としてボルト締結を排したボルトレスセグメントの開発に取り組んできた。ここでは、その構造とこれまでに実施してきた実験結果について報告する。

* 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部

** 正会員 新日本製鐵㈱ 参与 建材開発技術部

*** 正会員 新日本製鐵㈱ 建材開発技術部

**** 正会員 新日本製鐵㈱ 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター

2. ボルトレスセグメントの開発

セグメントの自動組立ての実用化を効率面および装置面から遅らせている要因のひとつに、セグメント相互のボルト連結があげられる。すなわち、油圧装置の特性を利用したエレクターによるボルト孔位置合わせの困難さと複数のボルト孔へのボルトの挿入やナットへのトルクの導入などの煩雑な作業が自動組立ての実用化を阻んでいる。このため、抜本的な解決策としてボルト締結を排しセグメントの自動組立ての効率化をめざした軸挿入方式によるボルトレスセグメントによる新覆工構造 (New Mechanically-jointed Segment Tunnel Lining: 以下「NMライニング」という) を開発した。

2・1 構造上の特徴

(a) 本体部

NMライニングは鋼材の引張強度とコンクリートの圧縮強度を活用した合成構造をなす。図-1に示すように、本体部は特殊なH形状の鋼材で4辺を形成し、その内部にコンクリートを組み込んでいる。また、背面部は鋼板(スキムプレート)を配し、完全な止水構造としている。この構造は、従来のボルト締結用継手ボックスなどの断面欠損部が無く、全断面を有効に活用できるものである。

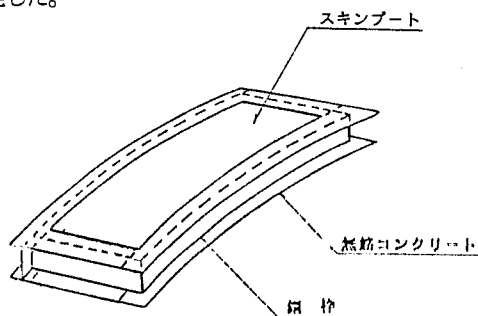


図-1 セグメントの本体構造

(b) 連結部

リングとしての覆工は、図-2に示すように特殊なH形状のフランジ部相互をセグメント間およびリング間の連結部で契合させることにより形成される。本契合方式により①リング真円度の保持、②連結部せん断力の確保、③ジャッキ推力の確実な伝達が可能となる。また、連結部にはそれぞれ雄・雌の嵌合部材が配置されている。

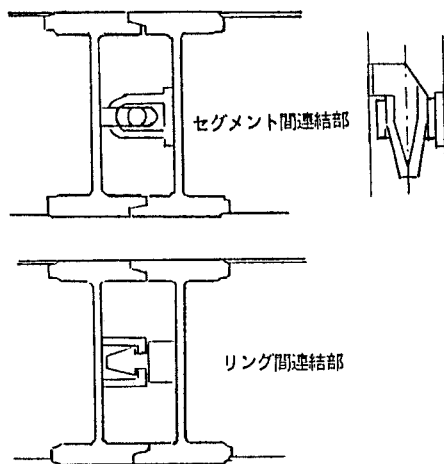


図-2 セグメントの連結構造

(c) 鋼材・コンクリートの一体化

本覆工構造に使用するセグメントは前述の通り4辺を特殊なH形状の鋼材で拘束された合成構造である。合成構造では一般に鋼とコンクリートの一体化のためジベルなどの機械的なズレ止めが必要となるが、NMライニングのセグメントでは4辺の鋼材とコンクリートとの支圧機能により鋼材・コンクリート間のズレを防止する形式をとっている。

(d) 連結部の止水処理

NMライニングではリング組み立て後、連結部空隙にモルタルを充填する。これにより覆工の一体化が図れ、かつかつ連結部の止水性が確保できる。室内試験ではモルタル未硬化時で 4 kg f/cm^2 、硬化後で 5 kg f/cm^2 までの止水性を確認している。また、フランジ契合面に水膨潤性止水材を併用することにより止水の信頼性を高めることができる。さらに高水圧下での連結部からの漏水を防止するため、シールを

目的とした溶接を連結部に施すための“自動シール溶接装置”の開発を行った。溶接法は、トンネル内での長時間の連続溶接性と高速での全姿勢溶接を可能とすることを条件にパルスMAGアーク溶接法を採用した。本装置は40 cm/分の溶接速度を有し連結部の目開き・目違い5 mmまでの溶接が可能である。また、環境対策として溶接時に発生するガスやヒュームを吸引する装置を装備しており75～90%のヒュームを吸収できる。なお、溶接管理はモニターにて行うことができる。外径5100 mmの実大リングモデルにてその溶接性能を検証後、10.5 kgf/cm²の水圧を付加したが漏洩は全く見られなかった。

2・2 荷重の伝達機構

本覆工構造では千鳥状に配置されるセグメント間の荷重伝達を先の隣接セグメント間の契合機構および連結部へ充填するモルタルを介して行う。セグメントリングに作用する断面力の内、軸力およびリング中心方向のせん断力はボルト締結と同様にリング間内のセグメント間連結部を経て隣接セグメントへと伝達される。一方、曲げモーメントの伝達は大部分が当該セグメントとは千鳥位置関係にある添接セグメントとのリング間連結部でのせん断力の授受を介した形態となる。従って、セグメントリングに作用する曲げモーメントの伝達に関しては、リング間連結部のせん断強度が大きな役割を担うことになる。

以上の特徴を有するNMライニングの構造強度の確認と本セグメントによる覆工構造の設計法の構築を目的として実大セグメントによる以下の強度試験を実施した。

- ①NMライニングの単体曲げ試験
- ②リング間連結部の曲げモーメント伝達性能を確認するための添接曲げ試験
- ③設計モデルを検証するための実大リング載荷試験

なお、①、②の試験と③の試験には仕様が異なるセグメントを使用している。

3. NMライニングの構造試験とその結果

3・1 単体曲げ強度試験

図-3に示す4辺を鋼枠で拘束しその内部にコンクリートを打設したNMライニングのセグメント（高さ：250 mm、幅：1000 mm）を用い、図-4に示すような2点載荷（支間：2704 mm、載荷点間：600 mm）により曲げ強度を確認した。表-1に試験体に用いた鋼材の降伏強度およびコンクリートの圧縮強度を示す。

表-1 供試体に用いた部材の強度

鋼材の	フランジ: 2,940 kgf/cm ²
降伏強度	ウェブ: 2,500 kgf/cm ²
コンクリートの圧縮強度	590 kgf/cm ²

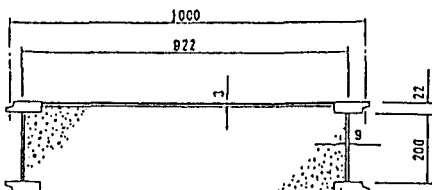


図-3 セグメントの断面

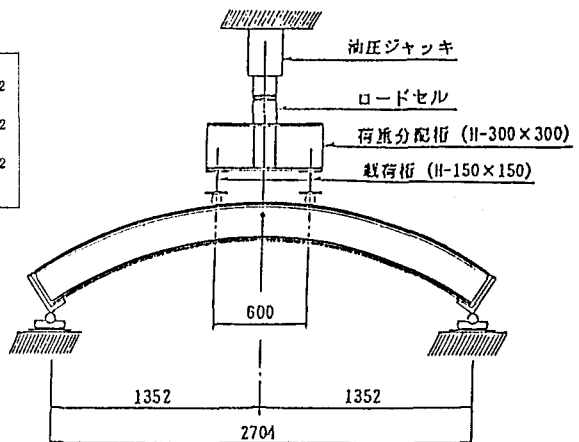


図-4 単体曲げ強度試験

図-5に試験で得られた支間中央のたわみと載荷荷重の関係を示す。図には鉄筋コンクリートの終局曲げ強度の評価法に準じ、鋼棒と内部コンクリートが完全に一体挙動するものとして算定した試験体の理論終局強度も併せてしめている。なお、強度は鋼棒のフランジ部とウェブ部、および厚さの50倍（ $2 \times 25 \times 3 = 150 \text{ mm}$ ）の範囲のスキンプレート部も含めて算定している。図に示すように試験体の曲げ強度は理論終局強度を確保している。

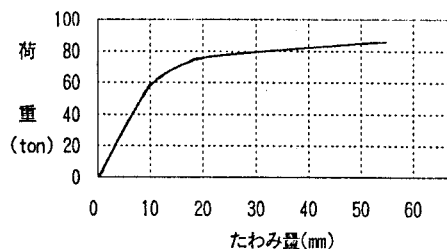


図-5 単体曲げ強度試験結果

鉄筋コンクリートでの鉄筋とコンクリートとの一体化について、昭和61年に制定された限界状態設計法に基づく土木学会「コンクリート標準示方書」では、鉄筋端部の定着が充分なされている場合には局部付着の影響は無視できるとして定着のみを規定としている。NMライニングのセグメントでは、セグメント端部での鋼棒とコンクリートとの支圧により鋼棒の定着がなされている限り、鋼棒とコンクリートとの一体化による荷重への抵抗が期待できると考えられる。

3-2 添接曲げ強度試験

セグメントが千鳥組される覆工の連結部をシミュレートする試験体として、図-6、図-7に示すセグメント間連結部を支間中央に位置させる桁高さ250mm、幅1000mmの2ピースのセグメントの両側に幅400mmの添接部材を組立て、連結部にモルタルを充填したものを準備した。試験体の両端支承ならびに載荷荷重の付与は中央部のセグメントのみに行った。このことは、リング間連結部のせん断抵抗が期待できなければ載荷荷重にほとんど抵抗できないことを意味する。なお、連結部へ充填するモルタルの試験時圧縮強度は 58.4 kgf/cm^2 であった。

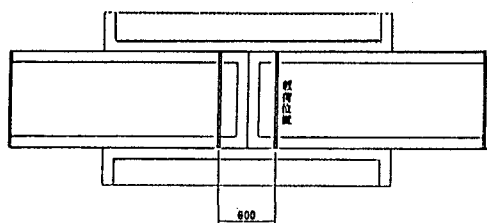


図-6 添接曲げ強度試験体

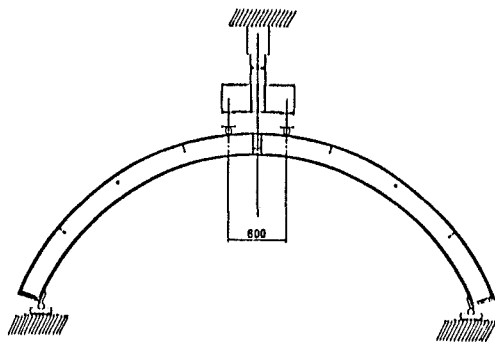


図-7 添接曲げ試験の方法

試験体は両側の部材が降伏するまで連結部になんら外見上の損傷も見られず載荷荷重に抵抗した。図-8に中央部のたわみと載荷荷重との関係を示す。図には支間中央の連結部をヒンジと見なした時に想定される両側の添接部材だけによる想定終局荷重も併せて示している。

本覆工構造は、セグメント間・リング間でフランジ部が契合され、連結部空隙はモルタルが充填され連続した一体構造となっている。試験結果は、この連結部の連続性により曲げモーメントの両側添接部材への確実な伝達が行われていることを確認できる。

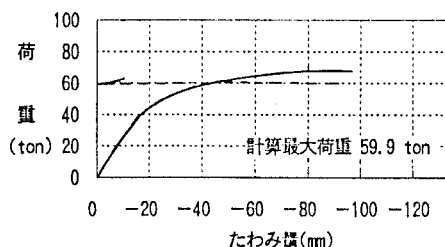
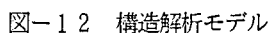
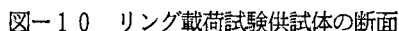
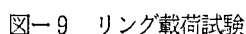


図-8 添接曲げ試験の結果

NMライニングの構造解析モデルの検証のため、基本構造であるH形鋼を鋼棒とするセグメントによる添接リング載荷試験を行った。試験体には図-9および図-10に示すようにリングを均等5分割(72°×5)によるセグメント幅1200mm、桁高さ150mm、外径5,100mmの中央リングと千鳥組に配置された幅500mm、桁高さ150mmの添接リングを準備した。連結部にはモルタルが充填されている。添接リングの寸法は合成が中央リングの1/2となるように設定した。載荷は荷重比(P_h/P_v)を一定に保持した状態で中央リングにのみ互いに90°ずらした2方向から行った。写真-1に載荷試験状況を示す。



以上、3つの試験から以下のことが言える。

- ①NMライニングは、円周方向の鋼棒に直交して端部に取りつける鋼棒とコンクリートとの支圧により、円周方向の鋼棒と内部コンクリートが完全に一体挙動するものとして算定される曲げ強度を発揮する。
- ②NMライニングは、セグメント間・リング間連結部が契合されるとともにモルタルが充填され連続、かつ均一な継手が形成されるため荷重に対する挙動が明快であり、高い覆工強度を実現する。
- ③NMライニングによるリングの挙動は、セグメントを梁、セグメント間連結部をヒンジ、リング間連結部を法線・接線方向の連続したせん断バネで構成する構造モデルにより評価可能である。

4. NMライニングによる組立て施工性

前記の実大リング載荷試験と同一のセグメントを利用して平組によるリング組立て性を調査した。試験でジャキに変わりチェインブロックで推力を付加したが、30分程度でリングを完成することができた。

今年8月にシールドトンネル現場での施工性を確認した。トンネルは外径4350mmであり、使用したNMライニングのセグメントは20リング、分割数は7分割で、軸挿入方式である。当現場で用いられるスチールセグメントによる組立て時間35～40分に対して、本セグメントは20分程度で組立てを完了でき、その優れた施工性を確認することができた。

5. まとめ

今後、シールドトンネルが大規模化・深部地下化するなかでセグメントの大型化に対処するための組立ての自動化ならびに高止水化に取り組んできた。このため従来のボルト締結による覆工構造が抱える課題を抜本的に解決するため、ボルトレス構造のNMライニングの開発に取り組んできた。

以下にNMライニングおよびそれに使用するセグメントの長所をまとめる。

- ①ボルトレス構造のため、組立て施工の自動化が容易であり省力化施工と作業の効率化が期待できる。
- ②ボルト締結による継手部での断面欠損部がなく、セグメントの全断面を有効に活用できる。
- ③ブランチ契合方式による連続した連結部を形成できるため高い覆工強度と覆工の真円度が確保できる。
- ④連結部にモルタルを充填することにより、リング構造の一体化が図れるとともに高い止水性が確保できる。また、大深度での高地下水圧環境下では、同時に開発を進めている“自動シール溶接装置”を用いた連結部シール溶接により完全な止水が確保できる。
- ⑤鋼とコンクリートの合成構造により覆工桁高さの低減が可能となるため、トンネル掘削断面の縮小化による産業廃棄物の低減、シールド機外径の縮小、専有用地の縮小など総合的な建設費の削減に寄与できる。

謝 辞：NMライニングの開発にあたっては、これまで多数の学識者および有識者の方々に数々のご指導・ご意見を賜ってきた。また、前記の強度試験の実施にあたっては(株)間組、佐藤工業(株)、前田建設工業(株)、清水建設(株)、(株)奥村組のご協力を戴いた。お礼申しあげる次第である。