

ボルトレスセグメントの実施工の結果と考察

NEW MECHANICALLY-JOINTED SEGMENT TUNNEL LINING

安田和雄* 中川 貢** 太田博昭** 中村 稔***

Kazuo YASUDA, Mitsugu NAKAGAWA, Hiroaki OTA, Minoru NAKAMURA

In recent years, it is required to develop a new type of tunnel lining segment that is suitable for rapid construction and automatic operation of shield tunneling.

New Mechanically-jointed Segment, that is one of a boltless segment of tunnel lining, is developed for this purpose.

This paper describes the result of efficiency of New Mechanically-jointed Segment Tunnel Lining, that is applied to the Tokyo Metropolitan Subway project line #12 in actual first use with automatic assembly system for tunnel lining segment, comparing with other two conventional segment types.

Keywords: shield tunneling, boltless segment, mechanically-jointed, automatic assembly system

1. まえがき

最近、セグメントの形状や連結を従来の方式によらない新しい構造とし、シールド施工の急速化や自動化に対応したセグメントの研究が進められている。このような状況の中で、東京理科大学松本教授と新日本製鐵(株)が鋼棒とコンクリートを合成し継手ボルトを必要としない新しい連結構造を持ったセグメント(以下、NMセグメントと呼称する)を開発した。東京都交通局は、このNMセグメントに着目し、単体曲げ試験や添接曲げ試験等により覆工としての信頼性を確認するとともに都営地下鉄12号線新宿第二工区建設工事に初めて本格的に採用した。

本論文では、松本らによる第1回トンネル工学研究発表会の論文¹⁾に続いて、NMセグメントの実施工への適用に当たって検討した内容とその結果について述べる。

2. NMセグメントの概要^{1) 2)}

2・1 開発経緯

シールドトンネルの一次覆工は、一般的にセグメント相互を継手ボルトで連結することによりリング状に

* 正会員 東京都交通局

** 正会員 (株)奥村組東京支社 土木部

*** 正会員 新日本製鐵(株) 建材開発技術部

組立て構成されている。最近のシールド工事では熟練労働者の不足や高齢化に備え、かつ施工の急速化や安全性の向上を図ることを目的にセグメントの自動組立装置の開発が進められ一部実工事への適用も試みられている。しかし、現状のセグメント自動組立装置は従来通りのボルト継手のセグメントを対象としているため、継手ボルトの自動締結機構が複雑となり、装置全体のコストアップを招くとともに組立時間の短縮を阻害しているのが実状である。

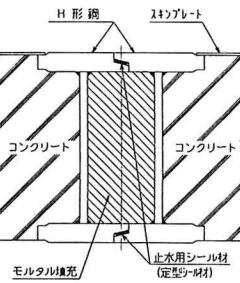
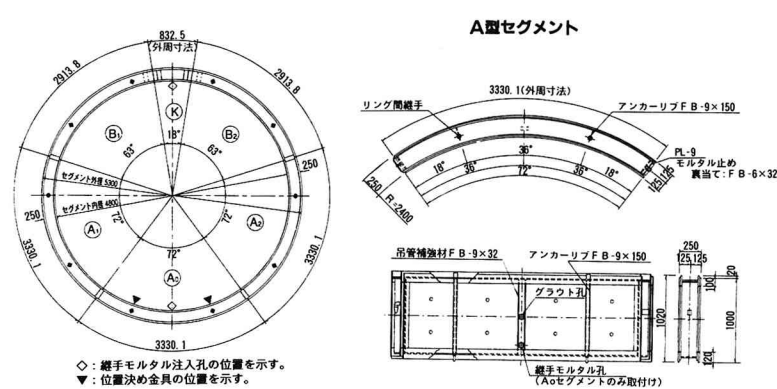
また従来のセグメントの継手ボルトは継手部材として、曲げ引張力やせん断力に対する十分な強度が要求され、作用荷重が大きい場合には太径の高張力ボルトを用い継手剛性の強化が図られている。

これらを背景にNMセグメントは、①省力化（自動組立）、②高強度化、③継手部のせん断耐力の強化、④継手部の止水性の向上を目標に開発されたセグメントで、図－１、２や写真－１に示すようにH型钢のフランジ部を嵌合（かみ合わせ）させる構造であり、①ボルトレス方式、②鋼枠コンクリート方式、③鋼枠間の全周嵌合方式とし、継手部の止水性向上のため、④嵌合部への水膨張性止水シール材張付と継手間へ無収縮モルタルを充填する方式とした。

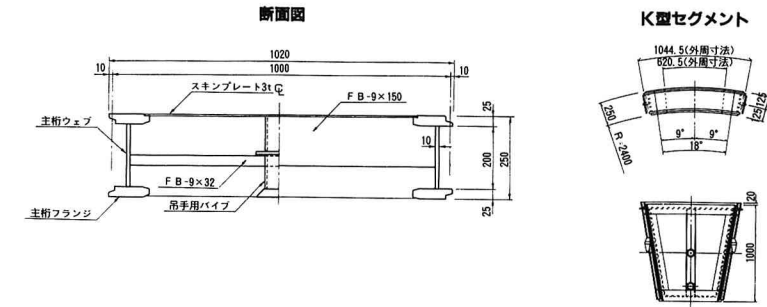
2・2 構造上の特徴

リングに組立てられたセグメントはセグメント間の継手部が構造上の弱点となる。このため、通常セグメントは千鳥状に組立てることを原則とし、セグメント継手に作用する曲げモーメントをリング間の継手ボルトを介して隣接セグメントに迂回させ、セグメント継手の剛性不足を補う構造となっている。ただし、セグメント継手に作用する曲げモーメントをすべて迂回させることはできずセグメント間には継手ボルトが必要となる。

NMセグメントは、この千鳥組立による添接効果をさらに高めるため、リング間をH型钢フランジ部で嵌合させることにより、従来の継手ボルトによる継手方式に比べ非常に高いせん断力の伝達機能を保有させ、



図－２ 嵌合部断面図



図－１ NMセグメント構造図



写真－１ 鋼枠構造

セグメント継手へ作用する曲げモーメントを隣接するセグメント本体が 100%負担可能な構造としている。このため、セグメント間やリング間の継手ボルトが不要となり、組立後のリングは高い強度と剛性を持ち、通常のRCセグメントに比べてはるかに大きい荷重にも耐え得ることができる。

2・3 NMセグメントの設計

NMセグメントの断面力算定にあたっては、その構造特性を考慮して、セグメント継手を回転ばねで、リング継手をせん断ばねで評価した2リングはりーばねモデルを用いた。

セグメント継手は、その構造上から弾性ヒンジ的な挙動を示すが、NMセグメントの継手構造から、設計上安全側を考慮して、回転ばね定数は0とした。

一方、せん断ばね定数は、リング全周にわたる嵌合構造を評価し、非常に大きな値とした。

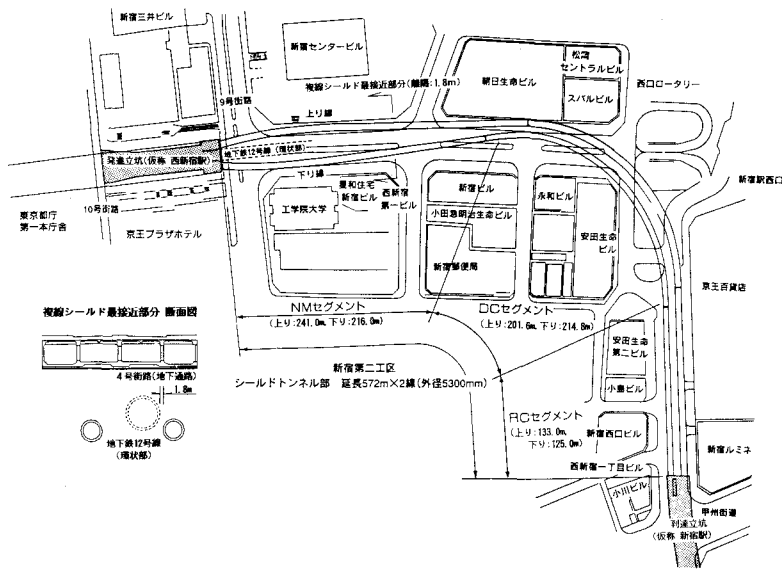
3. NMセグメントの実施工への適用計画

3・1 適用工事の概要と採用理由

都営地下鉄12号線新宿第二工区建設工事は、図－3に示すように西新宿駅（仮称）から新宿駅（仮称）を結ぶ、トンネル外径φ5300mm、延長 572mの単線並列の普通部トンネル工事であり、上り・下り線2つのシールドを西新宿駅（仮称）から発進させる計画とした。

NMセグメントは、従来のセグメントに比べて、省力化、急速施工、高強度化および高止水性が可能なセグメントであり、結果としてトータルコストの低減に寄与することから、発進部の区間（上下線合わせ延長 L＝457m）に採用することとした。

また曲線半径 R＝122mの曲線部に対応するためセグメント幅60cmのダクトイル鑄鉄セグメント（上下線合わせ延長 L＝416m）を、到達部となる新宿駅（仮称）までの区間には通常のRCセグメント（上下線合わせ延長 L＝258m）を用いる計画とし、自動組立に適したNMセグメントの特長を活かすためにセグメント自動組立装置を上り線トンネルに導入することとした。



図－3 工区路線平面図

3・2 NMセグメントの構造検討

今回が初めての本格的なNMセグメントの施工であり、NMセグメント本来の特性を活かすために施工上の課題を抽出し、以下の検討を行った。

(a) 継手金具

今回のNMセグメントの組立方法は、最初にセグメント継手を嵌合させ、その状態のまま、トンネル軸方向にセグメントをスライドさせリング継手を嵌合させる方式とし、この動作に適合し、組立精度や施工性を確保し、継手部の目開きを防止するセグメント間とリング間の継手金具の検討を行った。

①セグメント継手金具

組立精度を向上させ、自動組立に適し、位置決めを容易にするという要求品質を満足することに加えて、Kセグメントの軸挿入方式に対応できる構造で、組立時のセグメントの脱落を防止するとともにセグメント間に隙間の生じないように引き寄せ合う機能を備えた図-4に示すワンタッチ金具を採用した。

②リング継手金具

リング継手金具に求められる性能は、さらに、継手部へのモルタル注入圧に対抗し、リング間の設計引張力(5tf/本)を保有していること、かつ、再締めが不要なことであり、図-5に示す3つの継手について引張性能確認試験(図-6参照)を行い、リング間の目開きを抑制するために初期の緩みが少なく、引張力に対して十分な安全率を確保出来るアンカータイプを選定した。

(b) 継手部の止水

NMセグメントは、リング組立後、継手の空隙部にモルタルを注入・充填する。これにより覆工の一体化を図り、継手部の止水性を向上させ、嵌合部からの漏水を防ぐことが可能な構造となっている。しかし、今回のような滞水層では、鋼材とモルタル部との境界から漏水することが予想される。そのため、図-7に示すように嵌合部の一般部に定型、隅角部に不定型水膨張性止水シールを設置した。

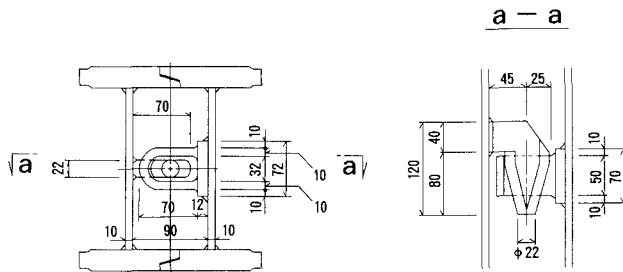


図-4 セグメント継手金具

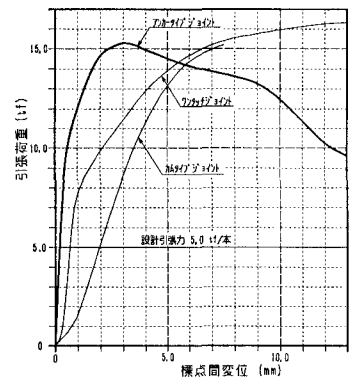
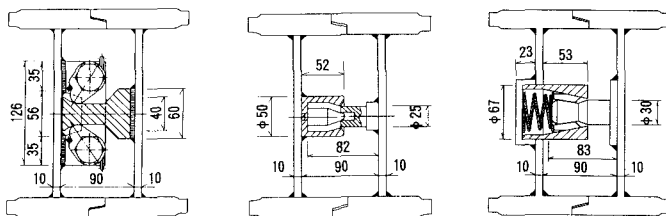


図-6 引張性能確認試験



カムタイプ

アンカータイプ

ワンタッチジョイント

図-5 各種リング継手金具

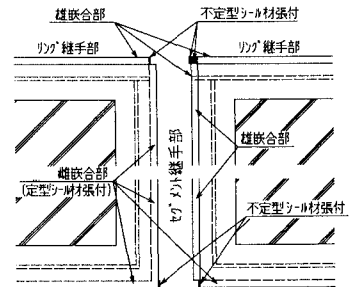


図-7 継手部シール材張付計画図

①止水シール

嵌合部は鋼棒の製作誤差（ $\pm 1.5\text{mm}$ ）から最大3mmの目開きが、また目違いも嵌合部の結合余裕から最大2mmが想定され、これらの間隙が生じてても止水効果が高く、しかも嵌合部本来の結合機能を損なわない止水シールの形状を特定する必要がある。このため、嵌合部を再現できる止水試験用治具を製作し、耐水圧 5.0 kgf/cm²で止水試験を実施した。

一方、前述のセグメント組立動作の面からシール材の嵌合施工性試験を実施した。これは、長さがセグメント幅の1/2である長さ50cmの実物嵌合試験体を用意し、形状、滑材塗布の有無、目違い量を変化させ、嵌合時およびスライド時荷重を測定し、シールドに搭載されているエレクターやシールドジャッキを用いてセグメントを組み立てることにシール材が支障とならないかを確認した。

試験データの一例が図-8、9であり、これらの試験結果から台形形状の幅18mm、高さ3.5mmのシール材を選定し、シール材表面にはシール特性を損なわない界面活性剤を主とする滑材塗布を行うこととした。

②注入モルタル

注入モルタルは、充填性が良く、止水効果があり、注入後の体積収縮が少ない配合が要求され、各種試験（一軸圧縮強度、ブリージング、分離・沈降、止水・抑水、流動性、可使時間）を実施して止水・抑水の高い逸泥防止材を用いた表-1に示す配合を選定した。

（c）シールド推力の伝達

シールド推進反力をスプレッダーを介してNMセグメントに伝達させるには、施工上、フランジ部が適しているが、フランジや覆工コンクリートに対する影響が懸念されたため、シールドジャッキ推力作用時をモデル化したFEM解析を行った。その結果、コンクリートに発生する圧縮応力度は120.1kgf/cm²、引張応力度は30.0kgf/cm²となった。引張応力は、引張強度55.2kgf/cm²（ $=0.9 \times \sigma_{ck}^{2/3}$, $\sigma_{ck}=480\text{kgf/cm}^2$ 、【コンクリート標準示方書】）を満足するものの大きな応力度であった。実物載荷試験では、解析結果とよい整合性を持ち、また、設計最大推力載荷時において鋼棒やコンクリートに変状はなく問題のないことを検証した。

3・3セグメント自動組立装置³⁾

自動組立への適用性に優れたNMセグメントを主体にセグメント自動組立装置の導入を検討した。NMセグメントはボルトレスセグメントであり継手ボルトの自動締結機構は必要としない。またNMセグメントの継手が嵌合構造なのでボルト孔の正確な置合わせが不要である。そのため作業効率を高めるためにNMセグメントの組立位置決め制御におけるセンシング機能は粗位置決めまでとした。

図-10に示すように今回のセグメント自動組立装置は、エレクターによるセグメントの自動位置決め機構、ダブルビームホイストによるセグメントの自動供給とエレクターへの自動空中受渡し機構、およびシー

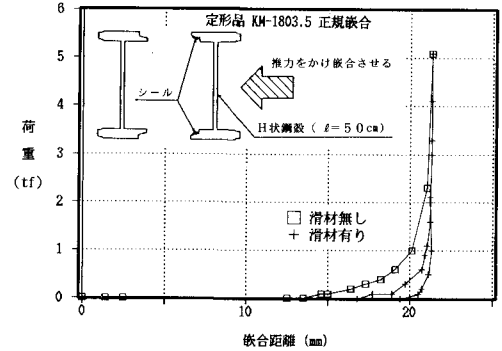


図-8 嵌合抵抗荷重試験

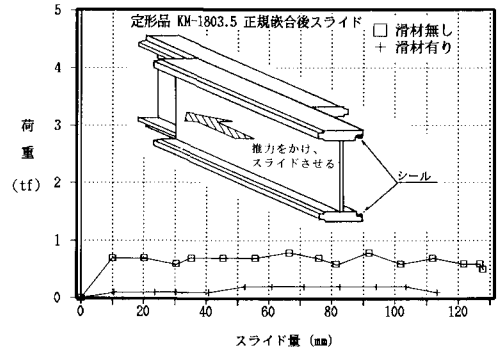


図-9 スライド抵抗荷重試験

表-1 注入モルタル配合表

1 m ³ 当たり (単位: kgf)				
固化材	添加材	安定材	逸泥防止材	水
650	60	4	30	749

約20～45％程度である。これは、掘進が円滑になされ、同時裏込注入により早期に地山の緩みを抑制しながら施工できた結果と考えることができる。

(c) 継手目開き

セグメント継手の目開き量の経時変化を図-13に示す。同図からセグメントがテールから脱出する際にテールシールパッキンの拘束や裏込注入圧の作用でセグメント継手の目開きが縮小しており、組立初期状態ではセグメント間の継手に目開きがあり、継手の嵌合が多少ゆるい状態であったことが分かる。これは、セグメント間の継手部には図-4に示した継手相互を引き寄せることができるワンタッチ金具を取付けたが、組立を円滑にするため金具の結合に余裕を見ていたためと考えられる。

また、図-14にリング継手の目開き量の経時変化を示す。同図からシールド推力によりリング間の目開きが縮小し、継手の嵌合が強固な状態に移行しているものと考えられる。通常のボルト締結方式ではシールド推力によりリング間の目開きが減少すればリング間の継手ボルトが緩む結果となるため再締めが必要となるが、NMセグメントではシールド推力などの施工時荷重がトンネル覆工の剛性を高めることに寄与していると考えられる。

これらの結果より、NMセグメントでは、鋼の靱性が大きいこと、全周嵌合構造であり、嵌合の倣いにより高い真円度が得やすく高精度の組立が可能であることが確認できた。

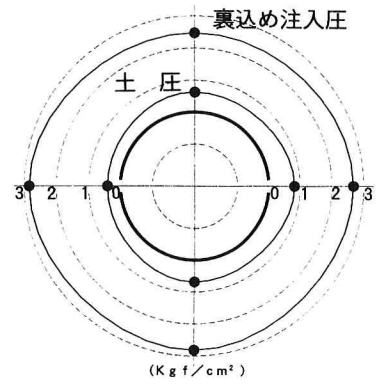


図-12 裏込注入圧，土圧分布図

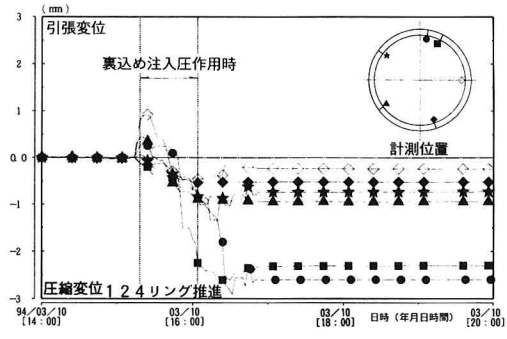


図-13 セグメント間目開き量の経時変化状況

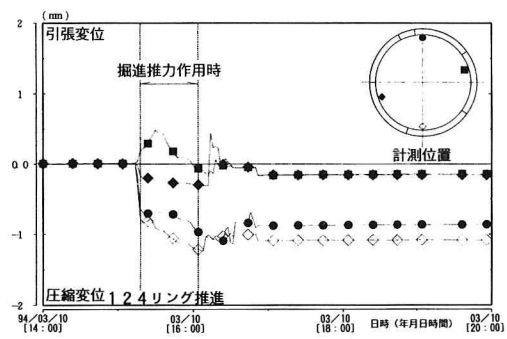


図-14 リング間目開き量の経時変化状況

4・2 止水効果

嵌合部の止水シール材張付、継手空隙部への逸泥防止材を用いたモルタル注入による止水効果があったと考えられる。シールドの初期掘進段階でNMセグメントの継手部から漏水が見られたが、継手空隙部へのモルタル再注入後は目立った漏水はなく、以後、写真-3に示すように良好な状況である。



写真-3 NMセグメント覆工仕上がり状況

4・3 セグメント組立サイクル

今回の工事は並列する上り線側でセグメントの自動組立を、下り線で従来どおりの手動によるセグメント組立を行った。表-3にセグメントの種別毎に組立方式の相違による組立サイクルの実績比較を示す。同表の内容や組立時の作業員配置状況から下記の内容が結論される。

①NMセグメントはRCやダクトイル鑄鉄セグメントより30%以上組立時間を短縮しており、NMセグメントが急速化施工に適したセグメントであることが立証された。

②NMセグメントでは自動組立方式が従来方式に比較し約3分程度組立時間を短縮しており、RCやダクトイル鑄鉄セグメントでは組立方式が異なっても組立時間に顕著な相違はない。これらの結果からNMセグメントは、自動組立に適したセグメントであることが確認できた。また、セグメント種別によらず、今後、自動組立方式でさらに時間短縮を図るためには、位置決めセンシング時間の短縮とシールドジャッキ押し引きの速度向上などが必要と考える。

③従来の組立方式では作業員の技能差によって組立時間のばらつきが大きい。一方、自動組立方式では作業員の技能に依存せずほぼ同様な組立時間であり、従来方式の半分の人員で施工が可能であった。したがって、自動組立方式の狙いである施工の標準化と省力化は十分達成されたものと考ええる。

5. おわりに

都営地下鉄12号線新宿第二工区にNMセグメントを適用した。この工事は平成5年11月末に下り線シールドが発進し平成6年6月に上り線が無事到達した。この施工を通じて、NMセグメントの覆工構造として信頼性が確認されるとともに、セグメント自動組立装置を用い同一施工条件下でダクトイル鑄鉄セグメントやRCセグメントとの組立性能の比較を行い、NMセグメントは組立時間が短く急速施工に有利なセグメントであることとともに施工の標準化や省力化に寄与することが立証された。

最後に、このNMセグメントの採用の段階から施工に至るまで終始熱心な御指導を頂いた松本嘉司 東京理科大学教授、西岡 隆 筑波大学教授、河田博之(財)鉄道総合技術研究所 総務部長、小山幸則 同トンネル研究室長に謝意を表します。

6. 参考文献

- 1) 松本嘉司・新見吉和・中村 稔・吉住俊彦：自動組立に適した新しいボルトレスセグメント，トンネル工学研究発表会論文・報告集第1巻 pp.107～112,1991.12.
- 2) 小山幸則・園田徹士・中村 稔：自動化・省力化に適したセグメントの開発，トンネルと地下，pp.223～232,1994.3.
- 3) 中川 貢：セグメント自動組立装置，建設機械，30-9(355)，pp.48～55,1994.9.

表-3 セグメント組立サイクル実績表

セグメント種類	セグメントの組立所要時間(分)	
	自動組立方式	従来方式
NMセグメント	24	27
DCセグメント	40	41
RCセグメント	34	34

注) DC, RCセグメントは、ボルト締結を含む