

ボルトレス鋼殻セグメントの開発

New Mechanically-jointed Segment Tunnel Lining

中 村 稔⁽¹⁾
Minoru NAKAMURA

山 口 隆 志⁽¹⁾
Takashi YAMAGUCHI

広 沢 規 行⁽²⁾
Noriyuki HIROSAWA

西 田 清⁽³⁾
Kiyoshi NISHIDA

抄 録

第二次世界大戦後、都市域の拡大につれ上下水道、通信ケーブル、鉄道網及び道路など社会基盤の整備が充足されるに伴い、都市部の浅部地下では輻輳化が進み、今後のトンネル建設は深部地下の活用へと進んでいる。これらの建設環境の変化に対応するため、トンネル覆工部材の高強度化と水密性の確保、及びセグメント組立作業の自動化を容易とする新しい一次覆工方式のセグメント—世界初のボルトレス方式(NMセグメント)—を開発した。NMセグメントは、大阪府寝屋川地下河川の建設でその技術特性が実証された結果、地下河川から鉄道トンネルへと採用の広がりを見せている。NMセグメントの構造開発と施工による特性評価について報告した。

Abstract

After the Second World War, as the construction of social infrastructure such as service water and sewage systems, communications cables, railway and road networks has advanced with urban sprawl, shallow underground installations have become congested, necessitating the use of greater-depth underground tunnels. To meet such a change in construction environment, we have developed a new primary-lining segment system, namely, the world's first boltless, new mechanical joint segment (NM segment) system, which strengthens tunnel lining materials, secures water-tightness and facilitates automatic segment assembly. As the technical performance of NM segment was demonstrated in the Neyagawa Underground River Construction Project, its application is expanding from underground rivers to railway tunnels. This paper reports on the development of the NM segment structure and the performance evaluation obtained from actual application.

1. 緒 言

わが国の国土は、約80%が山岳、丘陵から成り、20%の低地にオフィスや居住区が集中した市街化が見られる。また、これらの市街地の多くは、扇状地を形成する沖積層上に存在する。

一方、市街化とその周辺部への生活圏の拡大に伴い、上下水道、通信設備、鉄道網の整備など社会資本の構築が進められてきた。これらの建設は、当初は、地上からの開削施工によっていたが、近來、地上の交通事情やビル群の建設により次第に地上からの建設が困難となり、特に都市部ではトンネル工法が採用されるようになった。都市NATM(New Australia Tunnel Method)やシールドがその範疇にあり、これらの工法を総称して都市トンネル工法という。一般的には、都市NATMは自立性の高い地盤に、シールドは軟質な地盤に採用されることが多く、いずれの工法もヨーロッパの技術を導入後、日本の環境に適合する技術へと改良されてきた。

シールド工法とは、シールドと称するマシンで掘進しながら進行に合わせてセグメントと称するブロック体を相互に締結し、覆工体を形成する手法でトンネルを構築する工法である。これまで、このブロック体相互の締結にはボルトとナットが使用されてきた。

シールド工法は、掘削面に圧気をかけながら人力等で全面土砂を掘削する工法がその原型であり、1818年にフランス人のブルネイが発明し、ロンドンのテムズ川底トンネルで初めて施工された。その後、掘削面(切羽)に地下水圧に対抗する圧力をシールドでかけることにより土砂の崩壊を防ぐ、現在の密閉シールド工法へと発展している。更に最近の工事では、施工の自動化が進み、マシンの制御やセグメントの搬送、組立、掘削土砂の搬送まで一連の作業をコンピュータ管理するまでに至っている。

2. シールドトンネル建設の動向と技術課題

都市部では、ビルの基礎やインフラストラクチャの整備により浅部地下の輻輳化が進んでいる。このため深部地下の有効利用が提唱され、大深度地下利用法案の整備が準備されつつあり、国土庁により“臨時大深度地下利用調査会中間とりまとめ(1997年度)”が報告された。これらの動向から今後のシールド工事には、深部地下の利用によるトンネルの大深度化、長距離化が予測される。

一方、財政構造改革の取組みとして公共工事コストの縮減が提唱され、建設省は1997年度に“公共工事コスト縮減に関する行動計画”を公表し、数値目標として、公共工事のコストを少なくとも10

* (1) 建材開発技術部 マネジャー
東京都千代田区大手町2-6-3 ☎100-8071 ☎(03)3275-7759

* (2) 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員
* (3) 鉄鋼研究所 表面処理研究部 主任研究員

%程度縮減するとしている。

これらの動向からも、今後の公共工事においては、工事工期の短縮化、施工の自動化及びメンテナンスフリー化(長期耐久性の確保)が要求されるであろう。更に工事コストの縮減を実現できる技術の提案が不可欠になることが予測される。

3. ボルトレス鋼殻セグメント(NMセグメント)の構造特性

NMセグメントは、一次覆工方式による高品質のトンネル築造を目標に開発された。ここで高品質とはトンネルの“長期耐久性”と考える。その構造特性は、組立作業の効率化、省人化、安全施工に対する自動化仕様であり、また、高強度性、高水密性及び重防食の仕様を成している。

NMセグメントの構造は、(1)ボルトレス、(2)合成構造、(3)止水溝付きNM形鋼、及び(4)鋼面の重防食を仕様の特長とする。(1)は自動組立が容易であり、(2)は鋼とコンクリートの特性を生かした高強度部材であり、(3)は鋼枠相互の嵌合による高せん断性と高水密性を発揮する。また、(4)は長期の耐久性を成すものである。図1に構造概要を示す。

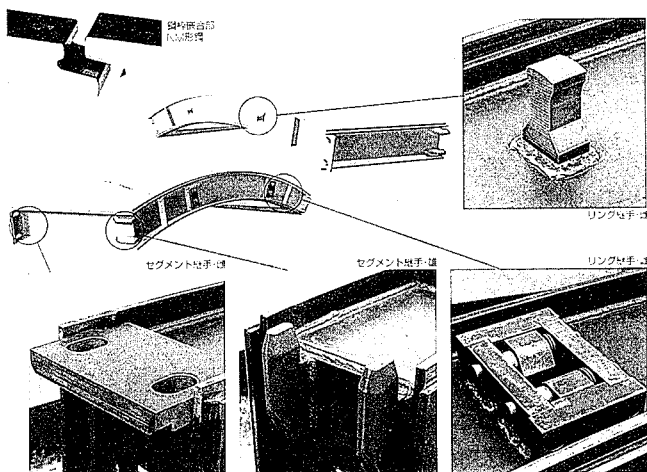


図1 二次覆工省略型のセグメント：ボルトレスNMセグメント(New Mechanically-jointed Segment)の構造概要

4. セグメントの本体構造と継手の開発

4.1 セグメント本体の合成構造梁部材としての力学挙動

NMセグメントは、(1)四辺のH形状鋼枠による中詰めコンクリートの拘束効果、及び(2)鋼枠及びスキムプレートに溶接した縦リブのずれ止め効果により、合成構造化が図られている構造である。本報告では、鋼材とコンクリートが一体として挙動することの検証として、比較的薄肉(厚さ250mm)の実大試験体を用いた単体曲げ試験の一例を紹介する。

試験体及び試験方法を図2に示す。試験結果として、耐荷力比較表を表1に、荷重-たわみ関係を図3に、荷重-ひずみ関係を図4に示す。実験はじん性に富んだ挙動を示し、その時の最大荷重は合成構造としての終局曲げ耐力計算値を16%以上上回った。曲げ剛性、鋼材ひずみ共、合成構造モデルの計算値によく一致した。

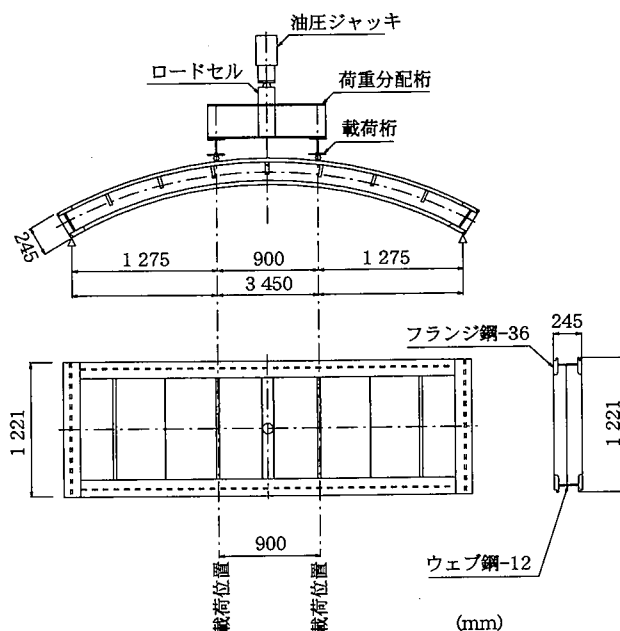


図2 単体曲げ試験概要

表1 単体曲げ試験耐荷力比較

実験値：P1 (kN)	計算値		P1/P2	P1/P3
	合成構造モデル：P2 (kN)	鋼構造モデル：P3 (kN)		
1 617	1 396	1 239	1.16	1.31

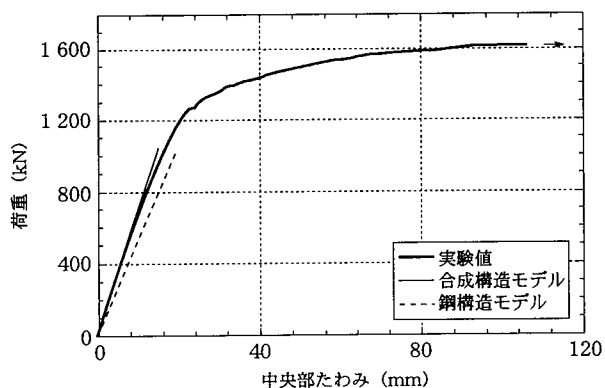


図3 単体曲げ試験：荷重-たわみ関係

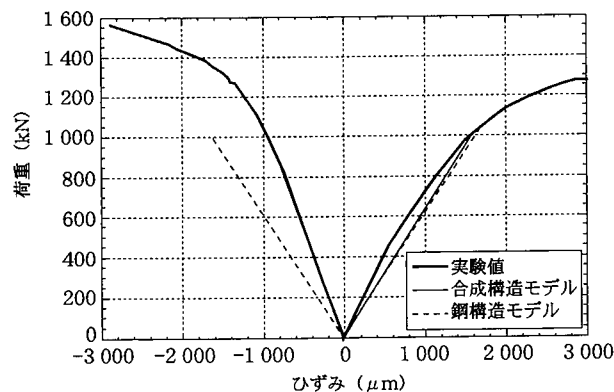


図4 単体曲げ試験：荷重-ひずみ関係

4.2 薄肉化、広幅化の開発—面圧に対する合成構造面材としての力学挙動

NMセグメントの下限対応(断面力の比較的小さいトンネルへの適用範囲を拡大)として薄肉化の開発に、また、急速施工、コスト低減を狙って広幅化の開発に取り組んだ。これまでに、セグメント厚250mm×セグメント幅1200mmまでの形状寸法に対して合成構造体としての耐荷挙動を確認しており、本開発では、セグメント厚200mm×セグメント幅1500mmの薄肉化、広幅化を目標とした。薄肉化、広幅化すると、H形状鋼枠による中詰めコンクリートの拘束効果の低下に伴い、(1)鋼殻とコンクリートとの一体性の低下、(2)面分布荷重(土水圧)に対する中詰めコンクリート面材としての耐荷力の低下が懸念された。

そこで、セグメント幅を1200mm及び1500mmの2ケース、鉄筋補強の有無の2ケース、合計4体のNMセグメント模擬平板試験体を用いて、土水圧を模擬した水圧チューブによる等分布面圧荷重曲げ試験(図5参照)を実施し、その合成構造体としての耐荷挙動を比較検討した。

耐荷力比較を表2に、荷重—たわみ関係を図6に示す。鉄筋補強無しの試験体(1.2Nと1.5N)では、荷重初期から主桁下フランジと中詰めコンクリートとの間で目開きと段差が発生し、荷重と共に増加した。そのため鋼殻とコンクリートとの一体性が低下し、主桁下フランジが降伏した直後に中詰めコンクリート塊が落下し、合成構造としての終局曲げ耐力を満足できなかった。

この目開き、段差の原因としては、主桁のねじれ、押し抜きせん断及び幅方向曲げ等が考えられる。鉄筋補強有りの試験体(1.2Dと1.5D)では、幅方向鉄筋の拘束により、主桁のねじれが抑制されると同時に、押し抜きせん断及び幅方向曲げに対する抵抗力も向上

表2 面圧荷重曲げ試験耐荷力比較

試験体名	幅(mm)	補強鉄筋の有無	実験値(kN)	合成構造計算値(kN)	実験値/計算値
1.2N	1200	無	512.2 [0.428]	633.1 [0.528]	0.81
1.5N	1500	無	518.2 [0.345]	645.8 [0.431]	0.80
1.2D	1200	有	784.2 [0.653]	675.5 [0.563]	1.16
1.5D	1500	有	784.8 [0.524]	713.4 [0.476]	1.10

注：[]内数値は面圧(MPa)を示す

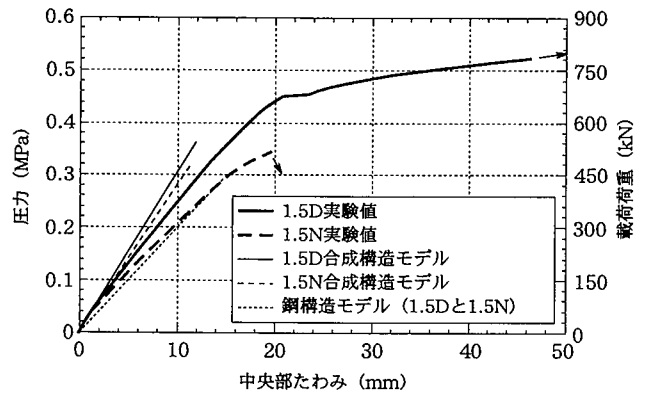


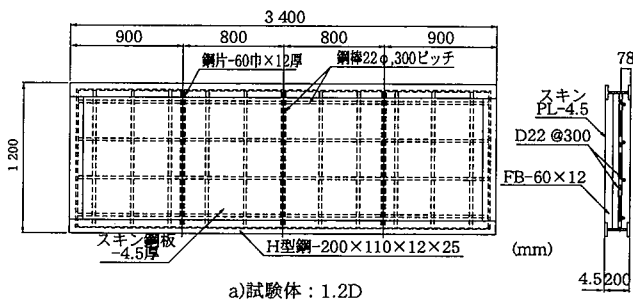
図6 面圧荷重曲げ試験：荷重—たわみ関係

し、上記の目開き、段差が生じなかった。そのため合成構造としての終局曲げ耐力値を10%以上越えた耐力を発現した。以上より、幅方向鉄筋で両主桁間を連結することにより、薄肉化(セグメント厚200mm)かつ広幅化(セグメント幅1500mm)しても、(1)一体性が確保され、(2)中詰めコンクリート面材として十分な耐荷力を発揮することが分かった。

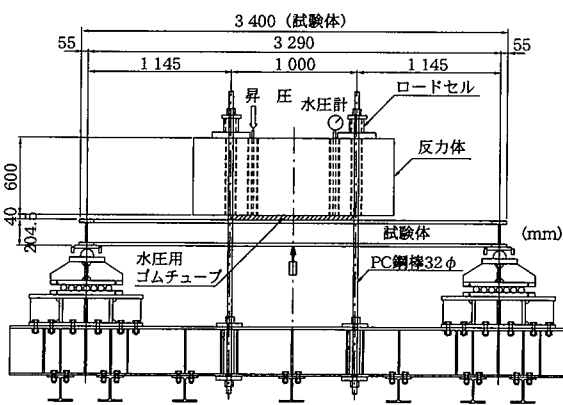
4.3 雌雄嵌合ピース間継手の軸力作用下の曲げ挙動

NMセグメントはボルトレスによる自動組立を大きな特徴としている。そのピース間継手は雌雄嵌合継手という独自の構造になっており、施工時、供用時のそれぞれの状況に応じた継手ばね定数の評価が設計上重要であった。特に、継手モルタル硬化前後の継手挙動の変化の確認、地下河川トンネルにおける内圧作用時(周方向引張軸力作用)の継手挙動の解明が求められたので、種々の軸力作用下での継手曲げ試験を実施した。

本試験は、図7に示すように、油圧ジャッキにより軸力導入鋼桁を介して一定軸力を作用させた後に4点曲げを行った。曲げモーメント—継手回転角関係の試験結果を図8に示す。圧縮軸力作用下のピース間継手は充填モルタルの有無に関わらず剛結合に近い高い回転剛性を示していること、また、引張軸力作用下のピース間継手の回転剛性は無次元化した回転ばね定数を用いて評価可能であることが分かった。荷重—たわみ関係を図9に示す。軸力作用下のピース間継手の終局曲げ耐力は、雌雄嵌合ピース間継手を引張ばねに置き換え鉄筋コンクリート構造とみなしたモデルによる計算値と良く一致した。



a)試験体：1.2D



b)荷重方法

図5 面圧荷重曲げ試験概要

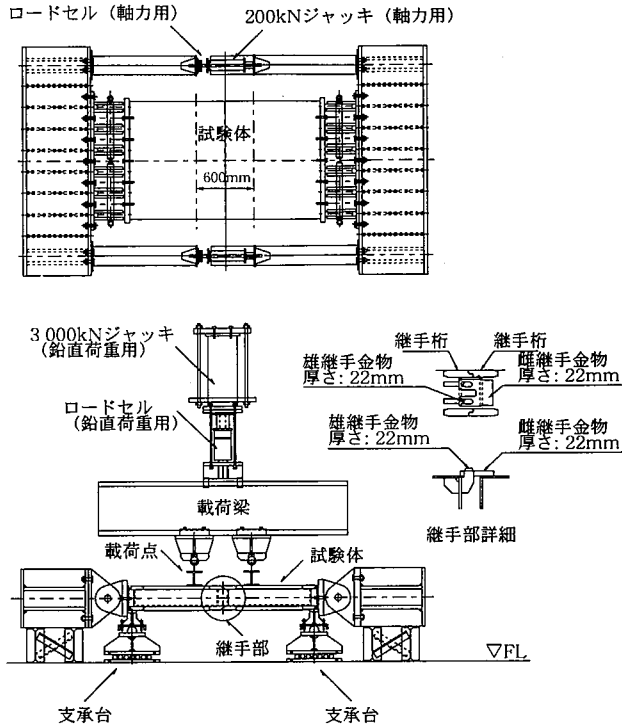


図7 一定軸力下の継手曲げ試験概要

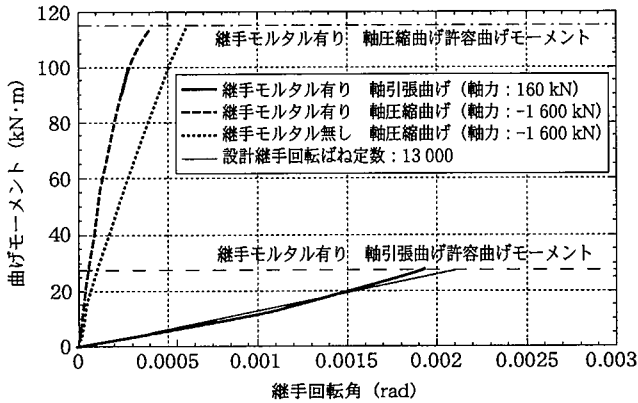


図8 一定軸力下の継手曲げ試験：モーメントー継手回転角関係

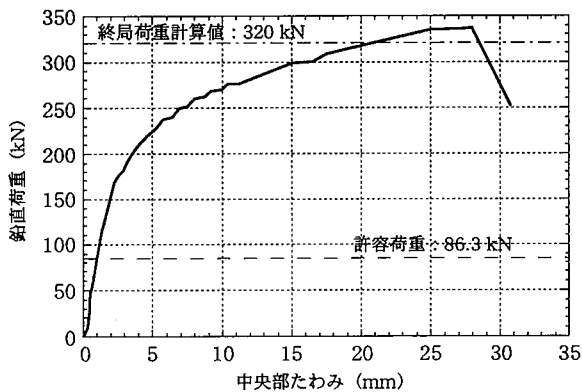


図9 一定軸力下の継手曲げ試験：荷重ーたわみ関係

5. トンネル内空鋼面の防食仕様の開発

5.1 防食技術の必要性

地下河川トンネルは、将来的には雨水放水路としての河川機能を期待するものであるが、トンネル築造工事が完了した区間は、随時、河川の水位調整のための貯留池として供用さえる。従来、地下河川トンネルの覆工仕様は一次と二次の覆工方式が取られてきたが、次章で述べるように、NMセグメントは一次と二次の覆工機能を同時に備えた新しい一次覆工方式であるため、直接、貯留水の影響を受けることになる。

5.2 トンネル内空の鋼材面の防食

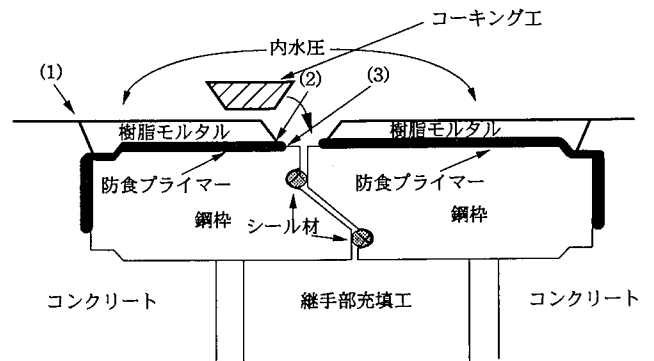
地下河川トンネルにおける一次覆工で完結する覆工方式に対するトンネル内空の鋼材面の防食仕様については、(財)先端建設技術センターにて、下水道用内面仕様としての実績のある“エポキシプライマー+樹脂モルタル”が基本仕様として提示されていた。このため防食仕様の開発にあたっては、この基本仕様を堅持しつつ最適化の開発に着手した。なお開発にあたっては仕様環境を次のように推定した。

- (1)地下トンネルは太陽光による塗膜劣化は発生しない
- (2)流入水は主として雨水であり、貯留されることから溶存酸素量は低い
- (3)流砂による磨耗が考えられる
- (4)外圧や内圧、自重などによる覆工(セグメント)変形に追従できる

具体的には、表3に示す塗膜材の密着耐久性及び防食耐久性のポイントとなる塗膜界面部の劣化要因を抽出した。図10に界面部を示す。

表3 塗膜界面部の劣化要因

劣化部位	区分	要因	問題の有無
塗膜自体	物理的	砂	有
		熱	無
		変形	有
		施工時衝撃	有
塗膜界面	化学的	光(紫外線)	無
		薬品(耐アルカリ・酸性)	無
塗膜界面	化学的	水	有
		水	有
		薬品(耐アルカリ・酸性)	有
		酸素(腐食)	少ない



界面(1): 樹脂モルタル/コンクリート
界面(2): 防食プライマー/樹脂モルタル
界面(3): 防食プライマー/鋼棒

図10 NMセグメントの防食層断面

5.3 試験方法の確立と評価試験

地下河川トンネルにおける一次覆工方式は新規の技術であるため、鋼材の使用例はほとんどない。このため試験方法を確立し、試験による評価に取り組んだ。

塗膜界面の劣化は、乾湿、没水、湿潤環境下での鋼面との密着性の低下であり、塗膜自体の劣化は、変形時のわれの発生や流砂による磨耗が考えられるため、試験材の形状や試験条件の最適化を検討し、促進試験方法を確立した。また、耐磨耗試験には、乾式の落砂磨耗試験装置を考案した。更に、塗布作業性の効率化を検討するため、塗装後の塗膜のならし易さの程度や塗膜の垂れの有無(25度の傾斜で試験)などを検証した。密着性能試験の結果の一部を図11に示す。また、総合的な評価項目として、(1)塗膜物性、(2)変形追従性、(3)耐衝撃性、(4)耐アルカリ性、(5)耐酸性、(6)耐水密着性、(7)耐食性、及び(8)塗装作業性を比較し、最適仕様を選定した。評価試験結果の一部を表4に示す。

5.4 地下河川トンネルの防食仕様

基本となる防食材料を改良するとともに、材料相互の組合せを選定し、かつ各種の試験による評価を経て、NMセグメントの防食は次の仕様を満足するものとした。

- (1)鋼面の素地調整度は、塗膜の密着性を確保するため1種ケレン(ケレンの程度は1種から4種までであり、その最高グレード)とすること
- (2)鋼面に直接塗布するエポキシプライマー材は、純粋水の温度勾配試験(温度差25℃)でも塗膜膨れや密着性の低下が少ないこと
- (3)防食の保護材ともなる最上層のエポキシ樹脂モルタル材は、長さ300mmで10mmの変位下でも剥離を生じることなく、また、コンクリートと同等の耐磨耗性を有すること。かつ、1回の作業で5mm厚さの塗布が確保できること

なお、本仕様は、寝屋川北部地下河川古川調節池築造工事に採用され、施工された。NMセグメントの鋼枠に重防食を施した部位を写真1に示す。

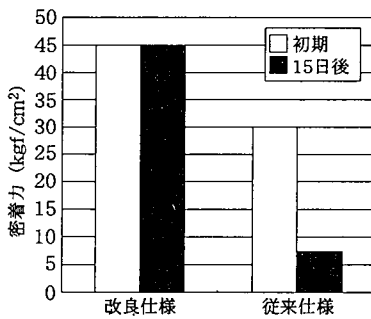


図11 温度勾配試験による各防食仕様の密着性能差

表4 検討結果

仕様		改良仕様	
素地調整		1種ケレン	
試験内容		プライマー	樹脂モルタル
変形追従性	長さ300mmに対して10mmの変位を与えた時の異常確認	異常なし	
耐衝撃性	落重衝撃試験 (ASTM5/16撃芯2.5kg・m, 4kg・m)	異常なし	
耐摩擦性	耐砂磨耗試験	研磨剤	GP-7(グリッド材)
	研磨材25gを30回/分の頻度で1mの高さから試験片に落下させ3時間後の試験片の磨耗量を測定する	磨耗性	○
耐アルカリ性	10%苛性ソーダ液浸漬(3週間)	研磨剤	サンド#100
		磨耗性	○
耐酸性	10%硫酸浸漬(3週間)	異常なし	
耐水密着性	温度勾配試験*1	塗膜膨れ	○ ○
		密着性	○ ○ ○
	塩水浸漬試験*2	錆進展性	○ ○ ○
		密着性	○ ○ ○
耐食性	塩水噴霧試験*3	錆進展性	○ ○ ○
		密着性	○ ○ ○
	乾湿繰り返し試験*4	錆進展性	○
		密着性	○ ○
	衝撃試験後乾湿繰り返し試験*4	衝撃痕からの腐食の有無	○
総合評価	プライマーと樹脂モルタルの個別比較	◎	○
	総合評価	◎ 没水環境での密着性、乾湿環境での耐食性が極めて良好	

*1 試験条件：純水40/15℃、プライマー(2週間)、樹脂モルタル(1か月)
 *2 試験条件：40℃、3%NaCl、1か月
 *3 試験条件：35℃、3%NaCl、1か月
 *4 試験条件：60℃乾燥1時間、40℃浸漬1時間の繰り返し1か月



写真1 鋼枠に重防食を施したNMセグメント

6. 現場施工

寝屋川地下河川

NMセグメントは、大阪府寝屋川北部地下河川古川調節池築造工事(鹿島・熊谷組・飛鳥建設・鴻池組共同企業体、延長2km、内空7.5m、トンネル底部GL-48m)において、1997年10月に一次覆工方式による組立施工を終え、その施工特性であるセグメントの組立速度と高真円性、及び設計被圧圧水4kgf/cm²下での覆工の高水密性を実証した。また、本工事によるNMセグメントの技術評価は、更に寝屋川南部地下河川久宝寺調節池築造工事や鉄道トンネル(みなとみらい21線)へと採用分野の拡大をもたらしている。図12²⁾に本工事のルートを示す。写真2に施工後のトンネル内空を示す。また、表5³⁾にセグメントの組立時間を、表6³⁾にトンネル内空の計測結果を示す。いずれも従来技術を凌駕している。これらはNM形鋼の圧延とセグメント製作の高精度化によるものでもある。覆工の高水密性と鋼面の重防食技術は、トンネル覆工の長期の耐久性を十分に期待させるものである。

従来、地下河川トンネルでは、地表下の土圧、水圧を鉄筋コンクリートの一次覆工で、また河川水貯留時の内圧を二次覆工と称する内巻き鉄筋コンクリートで対処する覆工仕様が採用されてきた。1993~1994年度に関東地方建設局、東京都、大阪府の委託を受けた先端建設技術センターは、学識者、有識者による技術委員会を設置し、内外荷重を一次覆工部材で完結する新しい覆工構造“内圧型一次覆工方式”の開発に取組み、各種の載荷試験を経て、NMセグ

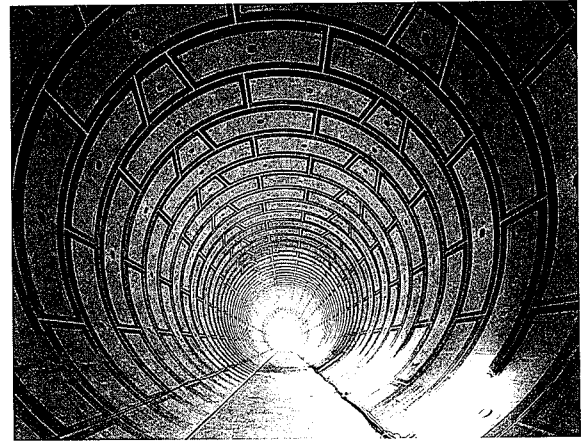


写真2 寝屋川北部地下河川古川調節池築造工事

表5 セグメントの組み立て時間³⁾

リング No.	土質別*1	掘進 時間	セグメント*2	手動 半自動	組み立て 時間
100	Dc3・Dsg3	70分	NM	手動	60分
200	Dc3・Dsg3	60分	NM	半自動	50分
300	Dc3・Dsg3	80分	NM	半自動	40分
600	Dc3・Dsg3	60分	NM	半自動	40分
885	Dc3	50分	DC	手動	120分
1 000	Dc3	50分	NM	半自動	30分
1 200	Dc3	50分	NM	半自動	30分

*1 土質：Dc3→洪積粘土層(N値7~14)
Dc3・Dsg3→洪積砂礫層(N値≥60)
*2 セグメント：NM→ボルトレス・8P
DC→開口補強特殊・10P

表6 覆工の真円性、トンネル内空の計測結果³⁾

	NMセグメント(一般部)	ダクトイル(開口部)
縦寸法	-10mm~-16mm	-32mm
横寸法	+13mm~+6mm	未計測

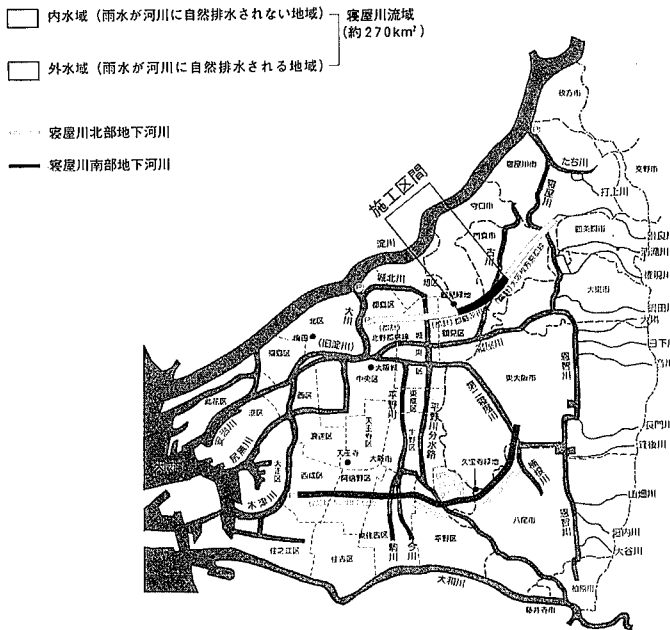
ントを有力候補の一つに選定した。本工事はこの延長上に位置するものである。

7. 結 言

都市部の今後のインフラストラクチャ整備は、ますます建設の深部地下化が進むことが予測される。そのような中に、NMセグメントが大深度、長距離掘進、大口径の寝屋川地下河川築造工事に初の内圧型一次覆工方式として採用され、その技術特性が実証されたことは、鹿島共同企業体の施工技術に負ったものでもある。また、ボルトレスセグメントの着想は、東京大学名誉教授(現東京理科大学)松本嘉司氏によるものであり、東京都交通局地下鉄12号線環状部での施工が一次覆工方式への技術確立の原点ともなった。深く謝意を表する。

参照文献

- 1) 新日本製鐵：公共工事コスト削減を支援する新日鐵の建材商品。p.13
- 2) パンフレット：寝屋川北部地下河川古川調節池築造工事、施工：大阪府寝屋川水系工営所、施工：鹿島建設、熊谷組、飛鳥建設、鴻池共同企業体。p.2
- 3) 大山剛毅、石村勝宏、中村稔：トンネルと地下、ボルトレス合成セグメントによる地下河川の施工。土木工学社、1998



計画断面図

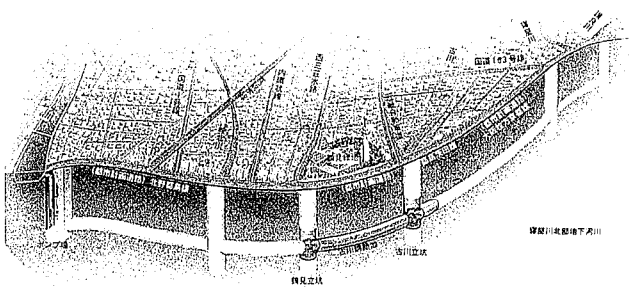


図12 地下河川ルート概要