

シールドを用いた場所打ち支保システムの施工

Tunnel Excavation by the Casting Support Tunnelling System using TBM

飯田廣臣¹・磯谷篤実²・井浦智実³・川嶋潤二⁴・小西真治⁵

Hiroomi Iida, Atsumi Isogai, Tomomi Iura, Jyunji Kawashima and Shinji Konishi

¹フェロー会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 工務部長 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)

E-mail:h.iida@jr-tt.go.jp

²正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 盛岡支社 (〒020-0034 盛岡市盛岡駅前通1-41)

³正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 盛岡支社 七戸鉄道建設所

(〒039-2511 青森県上北郡七戸町笹田川久保32-2)

⁴正会員 熊谷・東洋・大本・井上 共同企業体 所長 (〒034-0102 青森県十和田市大沢田字早坂24-1)

⁵正会員 工博 鉄道総合技術研究所 鉄道技術推進センター次長 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

The Sambongihara tunnel of Tohoku Shinkansen line was firstly constructed by NATM. However, because the tunnel is in an unconsolidated soil with high groundwater level, the stability control of a tunnel face was very difficult by NATM. Thus, the new excavation system using TBM was adopted under the consideration of safety, economic efficiency, and construction management. In the new excavation system, the lining is constructed by the cast-in-place concrete that was improved from the same basis as an existing Extruded Concrete Lining method. This paper reports the outline of the new excavation system and the results of the construction work in an early period.

Key Words : unconsolidated soil, casting support, shield tunnelling method, extruded concrete lining, NATM

1. はじめに

三本木原トンネルは、現在建設中の東北新幹線(八戸・新青森間)のうち、三本木原台地の下を貫く延長 4,280mの新幹線複線断面トンネルである。図-1 に位置平面図を示す。

掘削対象は、砂層、火山灰質シルト、粘性土層が主体の含水未固結地山である。平成 13 年 8 月から、

青森方坑口より、地下水位低下工法や注入式先受工法を用いた NATM による掘削を開始したが、切羽進行が止まるほどの崩落がたびたび発生した。そこで、安全性・経済性・施工管理上の問題から、シールド工法を用いた新施工システムの採用を決定し、東京方坑口より掘削を行うこととした。本稿では、含水未固結地山において採用した、新施工システム「SENS」の施工計画と初期の施工結果について述べる。



図-1 位置平面図

2. 新施工システム採用の経緯

当該区間の地形は、標高 60m 程度の比較的平坦な洪積台地と、河川等によって形成された沖積低地及びその支流によって開析された沖積谷で構成されている。地質は、新第三紀鮮新世から第四紀更新世初期にかけて堆積した野辺地層を基盤とし、これを覆う各段丘構成層が分布し、最上位に十和田・八甲

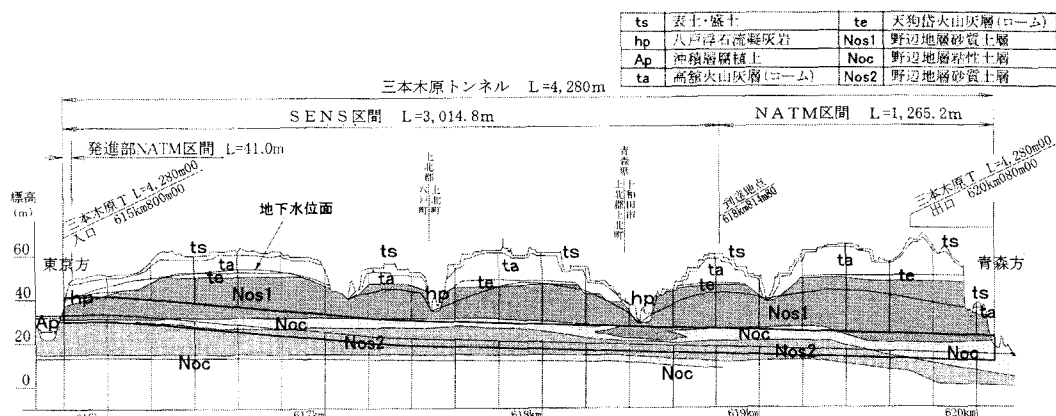


図-2 地質縦断面図

表-1 代表的な土質試験結果

	乾燥密度 ρ_d [g/cm ³]	間隙比 e	細粒分含有率 F_c [%]	均等係数 U_c	透水係数 k [cm/s]
Nos1	1.463	0.864	4.6	3.73	5.33×10^{-4}
Noc	1.480	0.917	21.5	37.97	—
Nos2	1.632	0.679	11.6	6.87	4.61×10^{-4}

田山の火山砕屑物が広く分布している。トンネル通過部の地質は野辺地層が主体であり、未固結な砂層及び粘性土の互層となっている。土被りは2~45m、平均23m程度である。地下水位はほぼ全線に渡り、トンネル天端以上であり、最も高いところでは天端から17m程度上方となっている。図-2にトンネル全体の地質縦断面図を示す。三本木原トンネルでは当初、青森方坑口よりNATMによる掘削を行っていた。NATM区間では、トンネル天端付近に均等係数が概ね5以下で透水性の高い上部砂層Nos1が、その下部には粘性土層Nocが、最下部に下部砂層Nos2が分布している状況であった。各層の代表的な土質試験結果を表-1に示す。地下水位低下工法や注入式先受工法を用いて掘削を行っていたが、砂層と粘性土層が複雑な互層を呈していたため、地下水位低下工法の効果が十分に発揮されず、また対象となるNos1層は非常に流動化を生じやすい地質であり、切羽が著しく不安定な条件下での掘削を余儀なくされた。そのような中、平成14年には切羽進行が止まるほどの大きな崩落が発生した¹⁾。このため、掘削工事の安全性、注入式先受工法の採用による経済性及び施工性、掘削の低進行等が問題となった。そこで、NATMによる掘削を約1,265mで終了し、シールドを用いた新しい施工システムを採用し、東京方坑口より残り約3,000mの掘削を行うことを計画した。

3. 新施工システム「SENS」

本工事では、前述のように切羽保持が非常に困難であるため、安全性を考慮しシールド工法を用いて掘削することを考えた。しかし、シールド工法は「切羽保持」、「掘削」、「覆工」の一連の施工システムが確立された工法ではあるが、NATMと比較し「覆工」における工事費が割高となる。そのため、覆工方式として場所打ちライニング工法を採用することとした。しかしながら、過去に施工実績のある代表的な場所打ちライニング工法であるECL工法には次のような問題点がある。

- ECL工法を採用した施工実績が少ないため、施工管理方法、覆工設計手法ともに十分に確立された工法とは言い難い。
- 過去のECL工法の施工実績では、トンネル掘削やコンクリート打設システムのトラブルに起因した配管の閉塞やコンクリートの切羽への廻り込み等のトラブルが発生した例もある。
- ECL工法で施工した場所打ちコンクリートライニングを完成形の構造体として採用したことにより、ひび割れや漏水等の品質管理上の問題が発生し、その対策に労力を要した例もある。

そこで、これらの問題に対処するため、本工事では場所打ちライニングコンクリートを山岳トンネルにおける吹付けコンクリート等と同様に、一次支保材としての機能を有するものと位置付けた。すなわち、掘削された空洞を安定させるための支保材とし

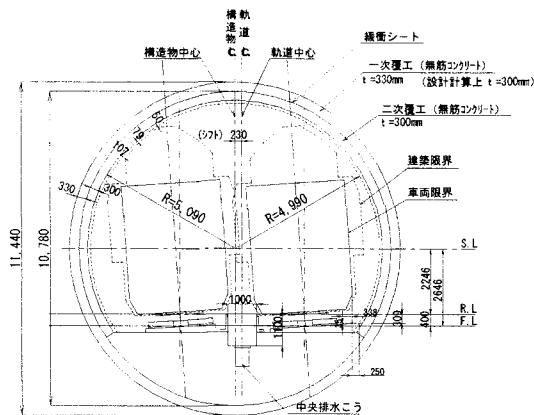


図-3 曲線部断面図 (R=8,000m)

ての機能を有するが、ある程度の地下水の流入やひび割れを許容する排水性トンネルと考え、場所打ちコンクリートの変形が収束したことを確認した上で、作用荷重を受け持たない化粧巻きとして二次覆工を構築してトンネルを完成させる。このように、シールドにより「切羽保持」と「掘削」を行い、場所打ちライニングコンクリートを一次支保材として利用し、地山の変位収束後に荷重を受け持たない化粧巻きとして二次覆工コンクリートを打設することで「覆工」を構築する場所打ち支保システムを採用することとし、この新しい施工システムを以下の通り「SENS」(センス)と名付けた。

- ・名称「SENS」(以下の各頭文字)
 - ・Shield Tunnelling Method
 - ・Extruded Concrete Lining (ECL)
 - ・New Austrian Tunnelling Method (NATM)
 - ・System
- ・和称
「シールドを用いた場所打ち支保システム」
- ・英称
Casting Support Tunnelling System using TBM

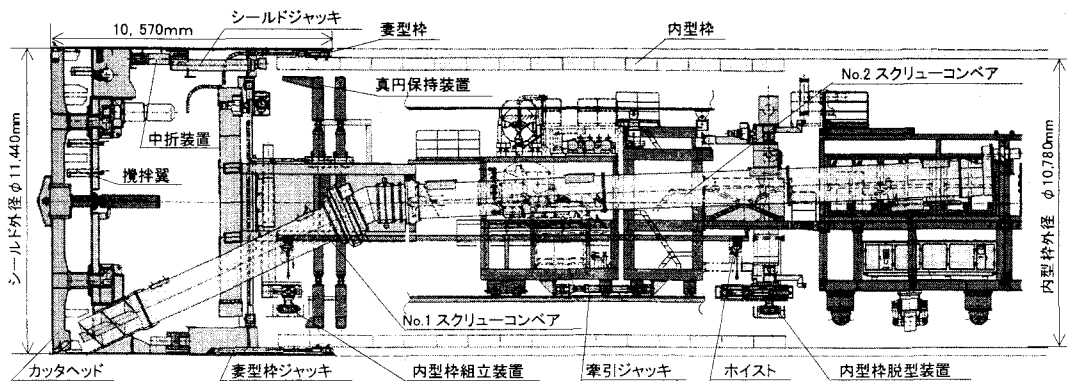


図-4 シールド一般図

4. トンネル断面の設定

三本木原トンネルにおいてSENSを採用するにあたり、新たにトンネル断面の設定を行った。トンネル線形は以下に示す通りである。

- ・平面線形 直線及び曲線 (R=8,000m)
- ・縦断線形 +3‰, -9‰, -3‰

三本木原トンネルの断面図(曲線部)を図-3に示す。一般的なNATMトンネルの馬蹄形断面とは異なり、円形断面としている。

(1) 内空断面について

内空断面は、建築限界外余裕50mm以上の確保と、大断面シールドの施工実績をもとに、蛇行余裕量100mmの確保等を考慮し決定した。

(2) 一次覆工コンクリート

一次覆工コンクリートについては、併進工法設計施工指針(案)都市トンネル編(日本鉄道建設公団、平成4年4月)に基づき土水圧、地盤反力等の荷重を考慮した設計計算を行った。また、内型枠と場所打ちコンクリートの付着力によりシールド推進反力を得ることから、内型枠の装備数や施工サイクル等を考慮し、コンクリート強度についても検討を行った。その結果、一次覆工コンクリートについて、以下の通り決定した。

- ・無筋コンクリート、厚さ300mm
- ・設計基準強度 $\sigma_{28}=30\text{N/mm}^2$
(脱型強度 $\sigma_1=15\text{N/mm}^2$)

(3) 二次覆工コンクリート

二次覆工コンクリートについては、荷重を受け持たない化粧巻きという位置付けであることから特に設計計算は行わず、NATM設計施工指針(日本鉄道建設公団、平成8年2月)に準じ一般的な新幹線複

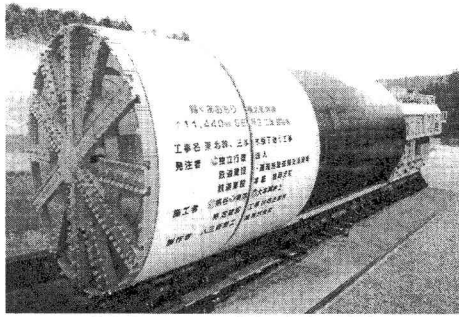


図-5 シールド組立完了状況

線断面トンネルと同様に以下の通りとした。

- ・無筋コンクリート，厚さ300mm
- ・設計基準強度 $\sigma_{28}=18\text{N/mm}^2$

5. 施工システムの概要

過去のECL工法の施工事例をもとに，シールド，コンクリート打設システム等の施工設備について十分に検討を重ねた。

(1) 施工システムの概要

本工事では掘削対象地質が主に透水性の高い未固結な砂層と粘性土層が主体であることから，掘削方式として密閉型の泥土圧シールドを採用した。図-4にシールド一般図を，シールドの現地組立て完了時の状況を図-5に示す。

テール部分では掘進に伴いコンクリートを加圧しながら打設し，妻型枠で圧力を保持することにより，

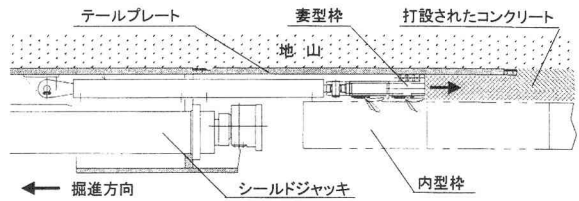


図-6 コンクリート打設部詳細図

土水圧に対抗する。コンクリート打設箇所の詳細図を図-6に示す。コンクリートの打設はシールドの後方台車上に設けた6台のコンクリートポンプを用いて行い，それぞれの打設配管を二方向切替弁によって12箇所系統に振り分け，各打設口から打設を行う。コンクリート圧力を保持しながら空隙を生じさせないように，掘進量とのバランスを調整しながら加圧，充填する。

内型枠は16リング装備しており，1リングの延長は1.2mである。最後尾の内型枠は掘進中に脱型され，先頭位置まで搬送される。1リング分の掘進が完了すると，掘進を一時停止し内型枠の組立を行い，その後再び1リング分の掘進，コンクリート打設を行う。推進反力は内型枠と硬化したコンクリートとの付着力で確保する。想定進行は最高9.6m（8リング）/日、平均月進120m程度を想定している。

また，シールドの後方では，一般的なNATMによる施工と同様に，インバートコンクリートの打設，ダンプトラックによる掘削ずり搬出，シート施工，二次覆工の構築を連続して行う。図-7に坑内施工概要図を示す。

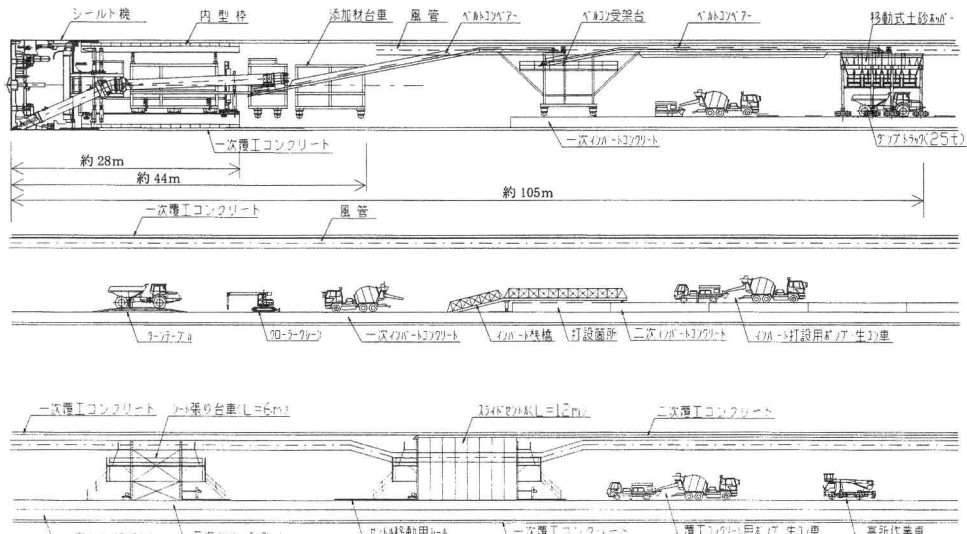


図-7 坑内施工概要図

表-2 シールドの主な仕様

項 目	仕 様
シールド形式	泥土圧シールド、外径φ11,440mm
装備推力	90,000 kN (3,000 kN×30 本)
中折装置	V型フラット後胴押し形式
カットトルク	常用 22,755 kN・m ($\alpha=15.2$) 最大 27,306 kN・m ($\alpha=18.2$)
カタヘッド形式	スポークタイプ (メイン 6 本、補助 6 本)
カットビット	メインビット、特殊先行ビット、 フィッシュテール、 コピーカット×3 基 (2 基は予備)、 レスキュービット×3 基 (予備)
No.1 スクリュー コンベア	内径 1,200mm, L=11.28m
No.2 スクリュー コンベア	内径 1,200mm, L=12.48m
排土能力	最大 370m ³ /h
土圧計	チャンバー隔壁部 7 箇所 妻型枠部 4 箇所
妻型枠	内径φ10,780mm, 外径φ11,320mm 外周シール: 2 層構造ゴムシール 3 段 内周シール: ステンレス板+ブラシシール 2 段 コンクリート打設口 3 インチ×12 箇所 妻型枠ジャッキ: 320 kN×18 本
内型枠	装備数: 16 リング, 外径φ10,780mm

(2) シールドの仕様詳細

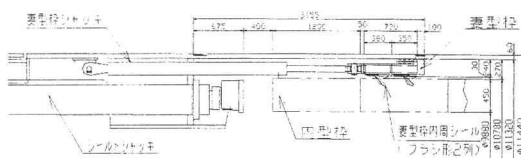
三本木原トンネルで使用するシールドの仕様詳細について述べる。シールドの主な仕様は表-2に示す通りである。シールド設備のうち、本工事において特に検討を重ねた項目について、その詳細を以下に述べる。

a) カットビット及び装備カットトルク

本工事では、掘進延長が約 3,000m と長距離となるため、ビットの摩耗対策について十分な検討を行った。その結果、チップ材として一般的に採用される実績が多い JIS E5 種では許容摩耗量を超える結果となったため、本工事では約 1.9 倍の耐摩耗性を持つ JIS E3 種を採用することとし、ビット交換については計画しないこととした。しかしながら、最外周のビットは内周のビットと比較し、相対的に摺動距離が長く、カットトルクの上昇等により掘進速度が低下した場合、欠損等が発生する可能性もあることから、不測の事態に備えレスキュービットシステムを採用した。レスキュービットは、通常は格納された状態になっているが、最外周のビットに欠損等が生じた場合に、掘削外径を確保するために作動させるシステムである。

また、装備カットトルクについては、常用 22,755 kN・m ($\alpha=15.2$)、最大 27,306 kN・m ($\alpha=18.2$) である。トルク係数 α は泥土圧シール

○妻型枠ジャッキが伸びた状態(コンクリート圧力:低)



○妻型枠ジャッキが縮んだ状態(コンクリート圧力:高)

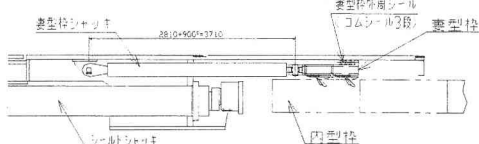


図-8 妻型枠詳細図



図-9 組立完了時の妻型枠

ドの場合 $\alpha=8\sim23$ が標準的²⁾であり、この範囲に収まっている。

b) 妻型枠

妻型枠は一次覆工コンクリートの打設機能、コンクリート加圧力の保持・調整機能を有する設備である。妻型枠本体はシールドテール軸に対して常に垂直であり、コンクリートの圧力を保持・調節するために、テールプレート内面と内型枠外面に常に接して摺動する構造となっている。妻型枠の詳細図を図-8に示す。また、図-9は妻型枠の組立完了時の状況である。コンクリートは妻型枠に設けられた12箇所の3インチ径の打設口から打設する。妻型枠は18本のジャッキによって制御され、コンクリート圧力が設定よりも高くなると妻型枠ジャッキが縮み、妻型枠は切羽側に移動し定圧に保つ。その逆にコンクリート圧力が不足すると妻型枠ジャッキが伸びて、圧力を保持するよう妻型枠がテール側に移動する。18本のジャッキは、3本ずつのブロックを構成しており、それぞれがアクチュエーターによって制御されているため、全ての妻型枠のストロークが常に一定に保たれる。また、妻型枠のコンクリート側の面には土圧計が4箇所設置されており、テール部のコンクリート圧力を検知する仕組みとなっている。

c) 内型枠

一次覆工コンクリートが硬化するまでの間、内型

枠には土水圧やコンクリート圧力、施工時荷重等が作用するため、十分な強度を有するのは勿論のこと、脱型、搬送、組立を約3,000mにわたって繰返し行っていくため、十分な耐久性も要求される。そのため、剛性の高い鋼製の内型枠を採用した。内型枠1リングは10分割（K型：5ピース、B型：5ピース）で構成されている。内型枠の装備リング数については、想定日進量と、シールド推進に必要な付着力の発現時期を考慮して16リングと定めた。

また、内型枠の脱型前に天端のコンクリートの充填状況を確認するため、各リングの天端にFRP製の検査窓を設け、脱型前にそこから超音波探査を行い、巻厚及び空隙の有無等を確認することとした。

(3) コンクリート打設設備

一次覆工コンクリートは、坑外プラントで製造した後、ミキサー車によってトンネル坑内に運搬する。供給ポンプにより、6インチ径の配管を通してシールド後方台車上に設けられたレミキサーまで圧送し、そこから6台のコンクリートポンプを用い、それぞれの打設系統を二方向切替弁によって振り分け、3インチ径の配管を通して最終的に妻型枠の12箇所への打設口から加圧しながら打設する。コンクリートの充填圧力は、妻型枠の土圧計のみではなく、12箇所への打設口付近に設置している配管圧力計によっても確認することが可能である。図-10にシールド機内の打設系統を示す。妻型枠の打設口は、長期掘進停止時にはコンクリート硬化による閉塞を防止するため、清掃を行う必要がある。そのため、油圧ジャッキ式の塞止弁を設け、コンクリートが流動性を保った状態で打設口付近の配管を清掃できる構造とした。図-11はシールド内部の打設部の構造である。また、図-12は塞止弁の作動状況である。

(4) 一次覆工コンクリートの品質

場所打ちコンクリートによって一次覆工コンクリートを構築するため、その品質が本施工システムの生命線であるといえる。そのため、以下に示す性能が要求される。

- ・圧送及び充填が確実に行えること（高流動性）
- ・練上がりから打設まで最長約4時間、フレッシュ性状を保持すること（フレッシュ性状の保持）
- ・地下水条件下での打設でも目標強度と品質を満足

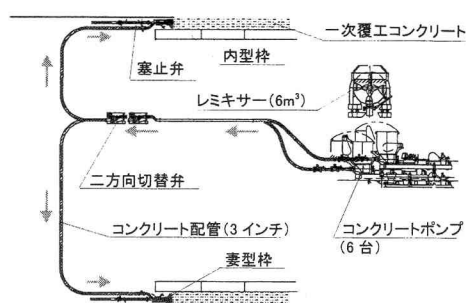


図-10 コンクリート打設系統

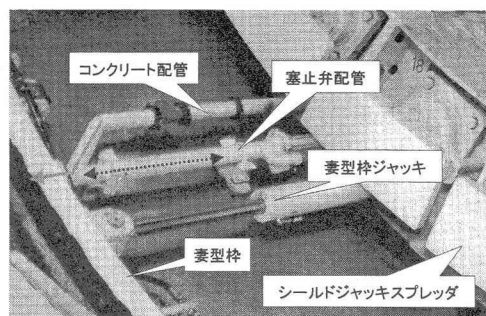


図-11 シールド内部の打設部

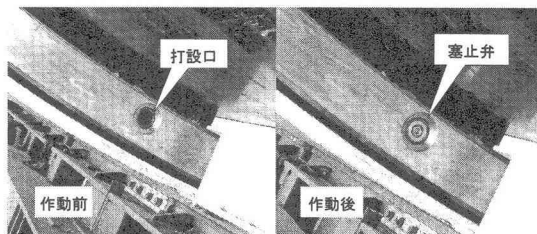


図-12 塞止弁作動状況

- する耐水性を保有すること（耐水性）
- ・材齢24時間で15N/mm²以上の強度を確保（早強性）
- ・ポンプ圧送及び充填時の材料分離を抑制すること（材料分離抵抗性）

上記の要求品質を満足するコンクリートについて、事前室内実験、現地試験等を通して検討を重ねた。

従来の水中コンクリートで使用する耐水性材料（増粘剤）は硬化遅延を起こすため、要求性能の耐水性と早強性を同時に兼ね備えることが困難であった。その点を改善するため、耐水性を持たせる材料としてアルキルアリルスルホン酸系の高性能特殊増粘剤を使用することとした。この増粘剤はA剤とB剤の2剤から成り、A剤が水中でマイナス、B剤

表-3 基本配合設計

水セメント比 W/C(%)	細骨材率 S/a(%)	単位量(kg/m ³)				増粘剤 A (W×%)	増粘剤 B (W×%)	高性能 AE 減水剤 (C×%)
		W	C	S	G			
35	38	190	543	597	948	4.0	4.0	3.2

表-4 スランプフロー試験結果

経過時間	スランプフロー
0 時間	610mm×610mm
1 時間	620mm×620mm
2 時間	630mm×630mm
3 時間	610mm×610mm
4 時間	610mm×610mm

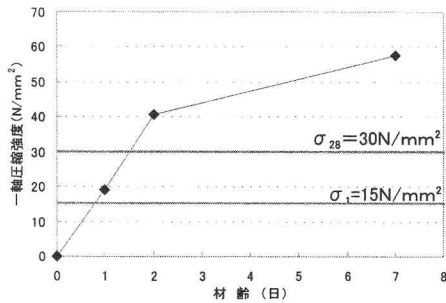


図-13 一軸圧縮強度試験結果

がプラスの電荷を帯びる。このA剤とB剤とが磁石のようなイメージで引き合うことにより、疑似ポリマーを形成する。この疑似ポリマーは従来の増粘剤とは異なるメカニズムで機能し硬化遅延を起こさないため、耐水性と早強性を高いレベルで兼ね備えることが可能となる。特殊増粘剤及び、遅延効果を目的とする高性能A/E減水剤の適正な混入率、コンクリートの性状、品質等を確認するために、前述の基本条件をもとに各試験を行い、基本配合設計を表-3のように決定した。また、主な試験項目の結果を以下に述べる。

a) スランプフロー試験

スランプフロー試験の結果は表-4に示す通りである。練上がり後4時間を経過しても、スランプフローの低下は見られず、十分なフレッシュ性状を保持していることが確認された。

b) 一軸圧縮強度試験

一軸圧縮強度試験の結果を図-13に示す。材齢1日の設計基準強度15N/mm²を満足する早強性が確保されていることが確認された。

c) 水中分離度試験

土木学会の水中不分離性コンクリート設計施工指針（案）に基づき、水中分離度試験を行った。これは、蒸留水中にフレッシュコンクリートを自由落下させ、上澄み水のpHを測定する試験である。図-14に示す通り、通常のコンクリートと特殊増粘剤を混入したコンクリートでは、水の濁り具合に明確な差が見られる。pHを測定した結果、特殊増粘剤を混入したコンクリートは水中不分離性の基準であるpH≤12を満足していた。これは、特殊増粘剤の作



図-14 水中分離度試験結果

用によってセメント分が水中に溶出しにくい状態になっているためである。

これらの室内実験及び現場での試験練りを通して、特殊増粘剤を混入したコンクリートが要求品質を満足することを確認した。しかしながら、施工状況や季節毎の気温変動等の影響を大きく受けることが予想されるため、施工段階で随時最適な配合を選定することとしている。また、セメント量が多いため、温度応力や乾燥収縮等によるひび割れの発生も懸念されることから、施工時には一次覆工コンクリートの状況を入念に観察することとしている。

6. 初期段階の施工状況について

本工事では、シールド発進時の推進反力を得るために、予め坑口から40m程度はNATMにより施工を行い、その坑内にシールドを引込んでから発進する方式を採用した。シールドの製作運搬、現地組立は平成16年5月までに完了し、その後シールド発進準備工の後に、7月中旬よりSENSによる施工を開始した。平成16年8月末時点で、約90mの掘進が完了した状況である。ここでは、特に初期段階の一次覆工コンクリートの施工状況及び品質について述べる。

(1) コンクリート打設に関する施工上のトラブル

掘進自体のトラブルが発生しなかったこともあり、施工初期段階ではコンクリート打設に関する大きな不具合は発生していない。しかしながら、コンクリート打設を繰り返すことにより、残コンクリートの硬化が生じる状況があり、打設ポンプ及び塞止弁の一時的な作動不良が発生した。これらについては、施工途中で設備改善を行い、残コンクリートの影響を受けにくい構造とした。また、12リング程度の掘進毎に、定期的に洗浄を行っているため、コンクリート配管の閉塞等は発生していない。

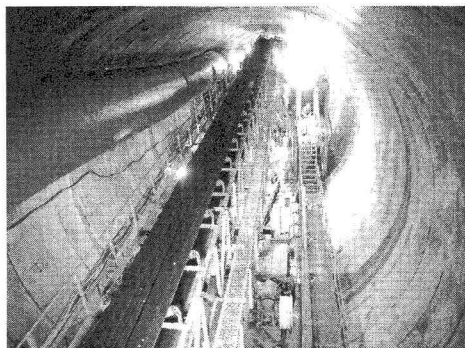


図-15 脱型後の一次覆工コンクリートの全景



図-16 脱型後の一次覆工コンクリートの状況

(2) 脱型後の一次覆工コンクリートの状況

シールド掘進時は、掘削の際に理論上生じる空隙に対して確実に100%以上のコンクリートを充填し、コンクリート圧力が上がっていることを確認することを基本として打設管理を行った。脱型前の超音波探査では空洞等の問題箇所は無く、良好な打設が行われていると考えられる。また、施工初期段階の脱型後の一次覆工コンクリートの状況を図-15及び図-16に示す。左右スプリングラインの上下と天端付近を中心に、トンネル軸方向のひび割れ発生が見られた。ただし、多量の漏水の発生は無く、ひび割れ幅も0.3mm程度以下のものが多く、定期的な観察でもひび割れの進行は認められない。脱型後の坑内の内空変位計測の結果では変位の発生はほとんど無く、トンネル構造的に問題となるひび割れではないと考えられる。ひび割れ要因については、配合セメント量が多いことによる高い水和熱の発生に起因する温度ひび割れによるものが主体であると考えられる。ひび割れ発生方向については、トンネル横断方向のクラックは定期的に生じる打継ぎ目によって吸収されているため、軸方向の発生が顕著であると考えられる。しかしながら、施工はまだ初期段階であるため、一次覆工コンクリートの観察については入念に行っていく予定である。

本工事では、一次覆工コンクリートについては、一次支保材として位置付けており、最終的には二次覆工コンクリートを施工するため、構造的に問題とならない程度の多少の漏水、ひび割れは許容するという考えであるが、より高品質な場所打ちライニングを構築することを目標としている。

7. おわりに

本工事では、低土被り含水未固結地山において安全性、経済性、施工性を追及し、シールドを用いた場所打ち支保システムであるSENSを採用した。SENSによる「切羽保持」、「掘削」、「覆工」の一連の施工システムを実施工により検証し、合理的な施工システムとして確立することが本工事の最大の目的である。また、今後の施工区間では、場所打ちライニングの内部応力、地中変位等の詳細な計測を予定しており、より多くの施工データにより検証を行い、その結果についても随時報告をしたいと考える。

本工事の成果により、NATMの適用限界に近い低土被り含水未固結地山においても、SENSを採用した合理的な施工の可能性が広がるものとする。

本工事では、平均月進120m程度を想定しており、約3,000mを掘削し貫通するまで、約2年半弱の歳月を要する見込みである。現時点では施工は順調に進んでいるが、今後とも貴重な施工データの収集を行うとともに安全かつ合理的な施工を目指すこととしている。

謝辞：本工事におけるSENSの採用は、「東北新幹線トンネル施工技術委員会」（足立紀尚委員長）において検討を重ね決定したものである。貴重な助言や御指摘を頂いた同委員会委員各位ならびに、計画段階より御指導を頂いた早稲田大学理工学部小泉淳教授及び財団法人地域地盤環境研究所の関係者に、この場を借りて深い感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 蓼沼慶正, 磯谷篤実, 須澤浩之, 芳賀宏, 野々村嘉映: 含水未固結地山における切羽安定方策, トンネル工学研究論文・報告集第13巻, pp201~206, 平成15年11月。
- 2) 土木学会: トンネル標準示方書【シールド工法編】・同解説, 平成8年7月。