

# シールドを用いた場所打ち支保システムにおける一次覆工コンクリートの打設を模擬した大型実験

野口 守<sup>1</sup>・田中 淳寛<sup>2</sup>・宮嵯 俊彦<sup>3</sup>・焼田 真司<sup>4</sup>・坂根 英之<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (〒030-0801 青森県青森市新町2丁目2-4)

E-mail: mam.noguchi@jrtt.go.jp

<sup>2</sup>正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (〒030-0801 青森県青森市新町2丁目2-4)

E-mail: ats.tanaka@jrtt.go.jp

<sup>3</sup>正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (〒030-0801 青森県青森市新町2丁目2-4)

E-mail: t.miyazaki@jrtt.go.jp

<sup>4</sup>正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: yakita@rtri.or.jp

<sup>5</sup>正会員 鹿島建設株式会社 機械部 技術3グループ (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11)

E-mail: sakane@kajima.com

シールドを用いた場所打ち支保システム（以下、SENS）は、シールド掘進と同時に打設する場所打ちの一次覆工コンクリートによってライニングを構築するトンネル施工法で、東北新幹線三本木原トンネルに続き、北海道新幹線津軽蓬田トンネルで2例目の施工を行っている。三本木原トンネルでは良好な施工結果が得られたが、場所打ちライニングに関する設備上のトラブルやより合理的な施工管理手法の確立などにおいて課題も残った。本研究では、SENSにおける一次覆工コンクリートの打設を模擬した大型実験装置を製作し、新たに開発した数種のコンクリートを用いて、津軽蓬田トンネルで想定される施工条件下で打設実験を行い、施工性やライニングの品質、性状などを確認した。

**Key Words :** SENS, shield tunneling method, extruded concrete lining, NATM, cast-in-situ concrete, experiment of concrete casting

## 1. はじめに

SENSは、シールド掘進と同時に打設する場所打ちの一次覆工コンクリートによってライニングを構築するトンネル施工法である<sup>1)2)</sup>。SENSは、2004~2006年にかけて東北新幹線三本木原トンネルの約3,000m間で初めて開発、採用された工法で、現在、北海道新幹線津軽蓬田トンネルで2例目の施工を行っている<sup>3)</sup>。

三本木原トンネルにおける施工実績は、NATMと比較し高い安全性を確保しつつ、2倍以上の掘削進行（最大172.8m/月）を達成することができた。また、経済性についてもNATMとほぼ同等であったことなど良好な施工結果が得られたが、場所打ちライニングに関する設備上のトラブル発生やより合理的な施工管理手法の確立といった点において課題も残った。このため、SENSを津軽蓬田トンネルに適用するにあたり、SENSの特性を考慮したコンクリートの開発も行われた<sup>4)</sup>。

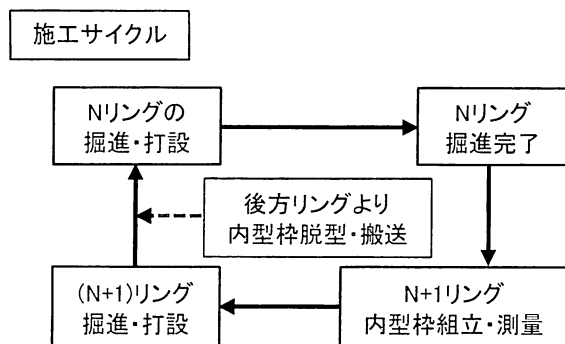
本稿では、SENSにおける一次覆工コンクリートの打設を模擬した大型実験装置を製作して、津軽蓬田トンネ

ルで想定される施工条件の下で、新たに開発したコンクリートを用いた打設実験を行い、施工性やライニングの出来形、品質などを確認した結果について報告する。

## 2. SENSの一次覆工コンクリート

### (1) SENSの掘進機構

図-1にSENSの施工サイクルと掘進機構を示す。シールド掘進と同時にマシンテールでは妻型枠に設置した12箇所の打設ポートからコンクリートを打設する。1リング分の掘進、打設が終了すると、下部からシールドジャッキを締め、内型枠をリング状に組立て、再び1リング分の掘進、打設を繰り返す。組立てに用いる内型枠は、前リングの掘進後に最後方リング側から解体し、切羽側に運び込んだものである。なお、内型枠と一次覆工コンクリートとの付着力からシールドの掘進反力をとるため、16リングの内型枠を装備している。また、コンクリートの打設を繰り返すことにより、ポンプや配管内に付着し



Nリングの掘進・打設

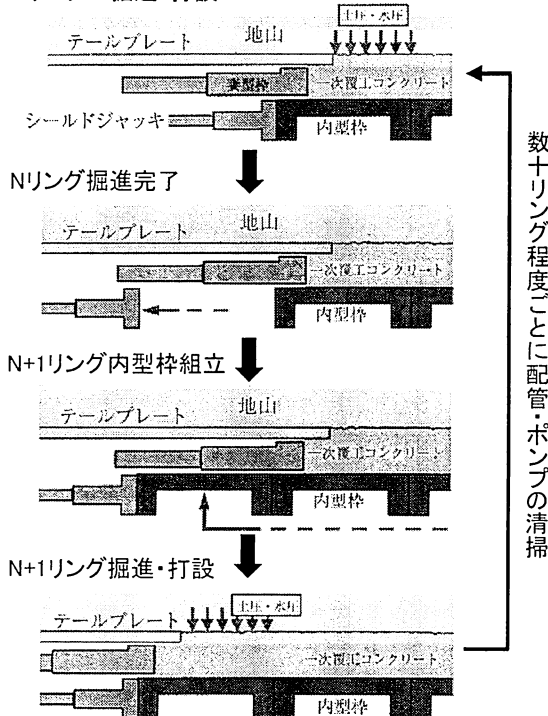


図-1 SENSの施工サイクルおよび掘進機構

たコンクリートが凝結を始め、打設能力が低下していく。このため、このサイクルを数十リング程度繰り返すごとに配管、ポンプなどに付着したコンクリートの清掃を行う必要がある。

## (2) 三本木原トンネルで用いた一次覆工コンクリート

SENSでは、地山からの土水圧が作用した状態で一次覆工コンクリートを打設する。また、連続掘進に必要な掘進反力を内型枠とコンクリートの付着力でとるため、必要な強度が短時間に発現する必要がある。そこで、三本木原トンネルの一次覆工コンクリートは、高機能特殊増粘剤を用いて水中分離抵抗性を高めるとともに、フレッシュ性を一定時間保持するなど、表-1に示す要求性能を満足するコンクリートを用いた。基本配合を表-2に示す。

表-1 三本木原トンネルで用いた一次覆工コンクリートの要求性能

|          |                                                                   |
|----------|-------------------------------------------------------------------|
| スランプフロー  | 600±50mm                                                          |
| フレッシュ保持性 | 4時間後練混ぜ時の80%以上                                                    |
| 強度性状     | 早強性：24時間強度で15N/mm <sup>2</sup> 以上<br>28日強度：30N/mm <sup>2</sup> 以上 |
| ポンプ圧送性   | 3インチ配管で30mの距離に5m <sup>3</sup> /hを打設可能                             |
| 材料分離抵抗性  | 圧送および充てん時に分離を生じない                                                 |
| 水中分離抵抗性  | 含水未固結地山でも適切にコンクリートが打設可能 (pH≤12で管理)                                |

表-2 三本木原トンネルで用いた一次覆工コンクリートの基本配合

| 水セメント比  | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     | 増粘剤A  | 増粘剤B  | 高性能AE減水剤 |
|---------|--------------------------|-----|-----|-----|-------|-------|----------|
| W/C (%) | W                        | C   | S   | G   | (W×%) | (W×%) | (C×%)    |
| 35      | 190                      | 543 | 597 | 948 | 4.0   | 4.0   | 3.2      |

表-3 配合レベル

|        |                                       |
|--------|---------------------------------------|
| 配合レベルⅠ | 三本木原トンネルの一次覆工コンクリートと同様の水中分離抵抗性を意識した配合 |
| 配合レベルⅡ | 水中分離抵抗性混和剤添加量を低減し、低コスト化を意識した配合        |
| 配合レベルⅢ | 水中分離抵抗性混和剤を用いず、経済性を特に意識した配合           |

このように、三本木原トンネルの一次覆工コンクリートは、粘性が高く、水中分離抵抗性に優れているが、施工性としては、コンクリートを地山と内型枠の間に掘進速度に合わせながら密実にテールボイド内に充填するために高い打設圧力が必要となり、内型枠やコンクリートポンプなどのシールド設備への過剰な負担要因となった。また、配管周囲にモルタル分が付着し、配管の閉塞などが掘削の進行を妨げる要因ともなった。このようなことから、低粘性でかつ、要求性能を備えた新たなコンクリートの開発が必要となった。

## (3) 新たな一次覆工コンクリートの開発

そこで、今後SENSの経済性をさらに求めるうえで、水圧などの地山条件に応じて使い分けが可能な新たなコンクリートの検討を試み、表-3に示す配合レベルを基準に新たな配合を開発した。

開発にあたっては、三本木原トンネルで用いた一次覆工コンクリートと同等の要求性能を有するコンクリートの開発を第一と考え、4種類の配合を開発した。また、それ以外に配合レベルⅡ、Ⅲのコンクリートも作り、室内試験を実施して各配合の性状比較を行った。その結果、いずれの試験においても、配合レベルⅠにおいては、各

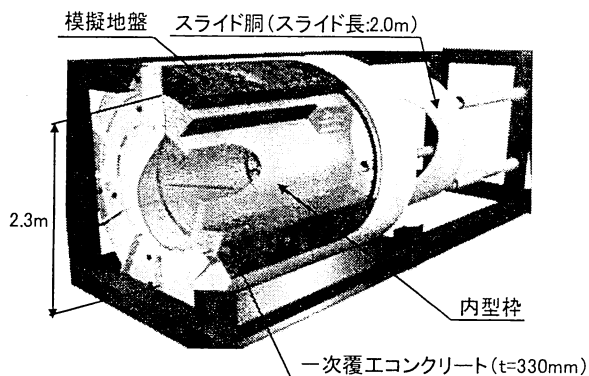


図-2 SENS打設を模擬した大型実験装置

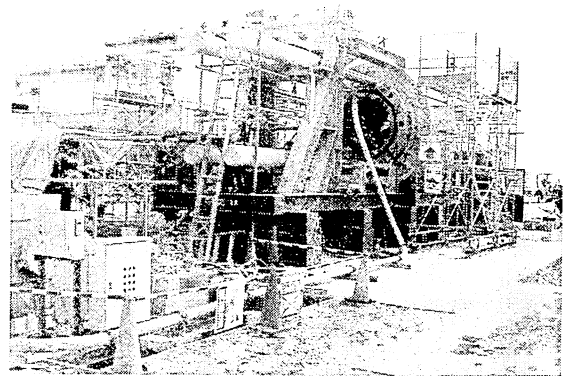


写真-1 SENS打設試験状況

配合に大差はなく、とくに問題はみられなかった。しかし、水中分離抵抗性を低減した配合レベルⅡ、Ⅲでは被圧水環境での性状が低下していることが確認された。

### 3. SENSの打設を模擬した大型実験

#### (1) 実験概要

津軽蓬田トンネルにおけるSENSの施工条件に近い状態でのコンクリートの打設に関する施工性、覆工出来形、および覆工の品質などを確認するため、大型の実験機を製作し、SENSにおける一次覆工コンクリート打設を模擬した実験を行った。実験は、要求性能を満たしたうえで施工性や品質に優れたコンクリート配合を選定することを目的とした各種配合を用いたコンクリート打設試験と、実施工上想定される特殊な条件において発生し得る事象やその際の覆工の状況を把握し、SENSの施工管理の基礎資料とすることを目的とした特殊な条件を想定した打設試験の2種類である。

図-2に実験機の模式図を、写真-1に実験状況を示す。実験装置は被圧水環境下でのコンクリート打設や覆工出来形を確認できる構造となっている。実験装置の最外周には、津軽蓬田トンネルの地盤に近い砂を用いて模擬地盤を形成し、その中にタービンポンプで加圧水を送り、最大0.6MPaまで加圧可能な構造とした。また、模擬地盤の内側にはSENSの妻型枠を模擬したスライド胴を設置し、内型枠に沿ってジャッキでスライド（スライドストローク2.0m）させながら、2台のコンクリートポンプを用いて、スライド胴の端面に設置した上下2箇所の打設ポートからコンクリートを打設して内型枠と模擬地盤の間に一次覆工コンクリートを構築するものである。

各配合を用いたコンクリート打設試験の試験ケースを表-4に示す。本試験の目的は、要求性能を満たしたうえで施工性や品質に優れたコンクリート配合を選定するこ

表-4 各配合を用いたコンクリート打設試験の試験ケース

| CASE | 配合および<br>配合レベル | 模擬地盤水<br>圧 (MPa) | コンクリート打設<br>圧 (MPa) |
|------|----------------|------------------|---------------------|
| 1-1  | 三本木原           | 0.4              | 0.6                 |
| 1-2  | K-I            |                  |                     |
| 1-3  | D-I            |                  |                     |
| 1-4  | T-I            |                  |                     |
| 1-5  | T-II           |                  |                     |
| 1-6  | P-I            |                  |                     |
| 1-7  | P-III          |                  |                     |

表-5 特殊な条件を想定した打設試験の試験ケース

| CASE | 配合  | 想定した特殊条件                   |
|------|-----|----------------------------|
| 2-1  | K-I | 予備圧をゼロとした場合の打設状況確認と地盤の崩壊再現 |
| 2-2  |     | 下部ポートのみから打設した場合の打設状況確認     |

とであるため、模擬地盤に作用させた水圧とコンクリート打設圧は各ケースとも同じ条件とした。また、特殊な条件下を想定した打設試験の試験ケースは、表-5に示すように模擬地盤水圧に対するコンクリート打設の予備圧をゼロとした場合と上下2箇所ある打設ポートのうち、下部の打設ポートのみから打設した場合におけるコンクリートの充填性、施工性、および出来形を確認する2ケースとした。

実験時における計測項目は、模擬地盤水圧、コンクリート打設圧、コンクリート流量、コンクリート圧送性（コンクリートポンプのピストン前面圧力）、出来形、覆工の品質、均質性、コア強度などとしたが、ここでは、各配合を用いたコンクリート打設試験における圧送性と出来形、および特殊な条件下を想定した打設試験における出来形について述べる。

#### (2) 各配合を用いたコンクリート打設試験結果

##### a) コンクリートの圧送性

コンクリートの圧送性の良否を示す指標の一つである

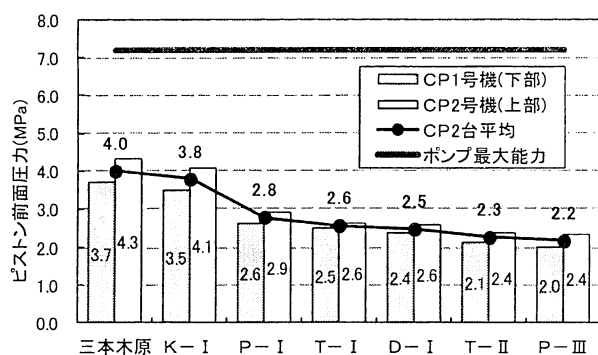


図-3 コンクリートポンプのピストン前面圧力

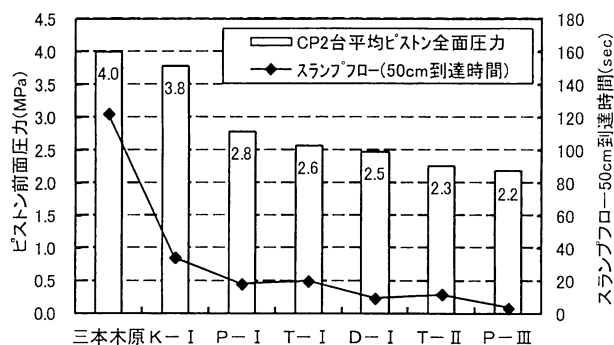


図-4 ピストン前面圧力とスランプフローの関係

コンクリートポンプのピストン前面圧力を図-3に示す。同図から、今回開発したコンクリートは、各配合とも三本木原配合よりピストン前面圧力が低く、圧送性能が向上していることがわかる。また、ピストン前面圧力とフレッシュコンクリートのスランプフロー50cm到達時間の関係を図-4に示す。同図から、50cm到達時間が長いほどピストン前面圧力が高くなっていることがわかる。

#### b) コンクリートの出来形

打設後に実験装置を解体して取り出した覆工コンクリートから採取したコアの寸法を測定し、覆工厚を確認した。結果を図-5に示す。各配合とも、平均値では設計値の330mmを上回っている。K-I 配合では、最大値と最小値のバラツキが大きいが、これは、K-I 配合のみコンクリート打設中にスライド胴の保持圧を低下させる操作を行ったことによる影響と考えられる。

また、各配合レベルの覆工出来形を写真-2に示す。(a)の配合レベルⅠはP社のライニングであるが、他社の配合でもいずれも良好であった。(b)の配合レベルⅡの外観は概ね良好であったが、天端部分に厚さ10mm程度の薄皮状で強度が低下している部分がみられた。これは、コンクリートの水中分離抵抗性が低いことによるものと考えられる。一方、(c)の配合レベルⅢでは、コンクリート打設中に底部の内型枠継手面よりモルタルが流出する現象が生じた。内型枠解体後、ライニングを確認する

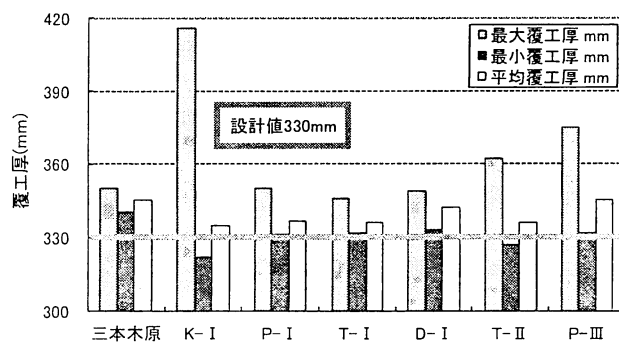
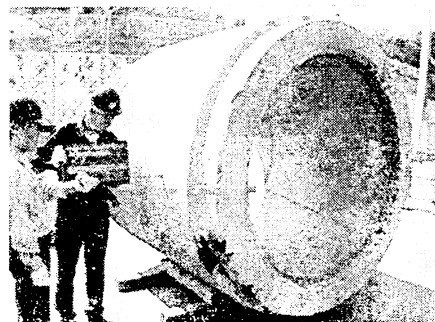
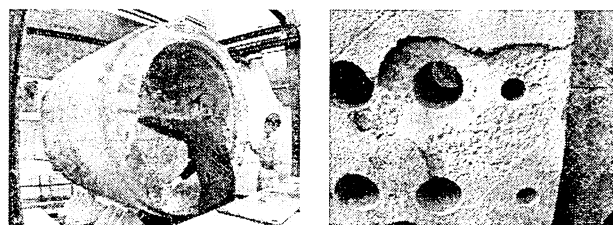


図-5 覆工厚（コア寸法）



(a) 配合レベルⅠ（P社）



(b) 配合レベルⅡ（T社）



(c) 配合レベルⅢ（P社）

写真-2 各配合による出来形比較

とこの部分には穴が開いていた。これは、加圧している清水が水中分離抵抗性の低いコンクリート中を通過したことによるものと考えられる。

#### (3) 特殊な条件を想定した打設試験結果

##### a) 予備圧をゼロとした場合

津軽蓬田トンネルでは、地下水圧に0.2MPa程度の予備圧を加えた打設圧でコンクリートを打設することで地山

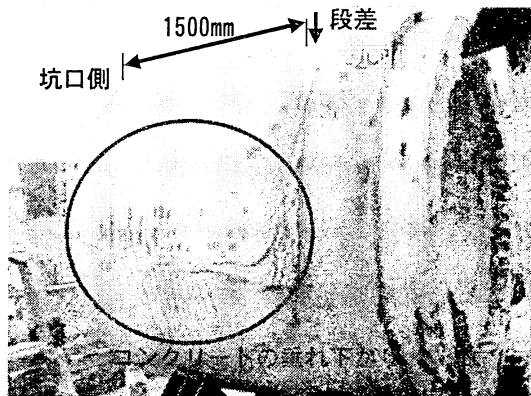
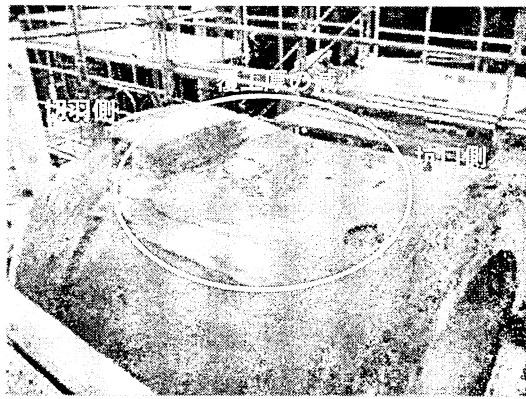


写真3 予備圧をゼロとした場合のライニング外観

と内型枠の間のテールボイド内に密実にコンクリートを充填する計画である。このケースは、実施工でコンクリート打設圧と地下水圧が同程度になった場合、および打設圧が地下水圧を下回り地盤が崩壊するような場合を想定したものである。この実験では、スライド胴のストロークが1.5mまでは、コンクリート打設圧と模擬地盤水圧を0.4MPa程度として打設し、ストロークが1.5mの時点でスライド胴の油圧リリーフ弁を開放することで地盤を崩壊させることを試みた。なお、コンクリートは各配合を用いたコンクリート打設試験で用いたK-I配合とほぼ同等の配合であるK-I'配合を使用した。

写真-3に解体後のライニングの外観を示す。坑口側から1.5mの箇所ではライニングの天端部に段差が見られ覆工厚が減少していた。最も薄いところは、設計厚を大きく下回り102mmであった。また、この箇所より坑口側の側面にはコンクリートが下方に垂れている状況が確認された。この現象が見られた坑口から1.5mの位置は、リリーフ弁を開放した位置に相当している。したがって、リリーフ弁の開放によりスライド胴のジャッキが急激に縮み、コンクリートに負圧が発生し、コンクリートが切羽側に引き込まれ、さらにコンクリートに追従して地盤も引き込まれたものと推測される。段差より切羽側の部分については、打設圧と模擬地盤水圧が約0.1MPaで安定して打設できたため所定の覆工厚で打設できたと推測される。

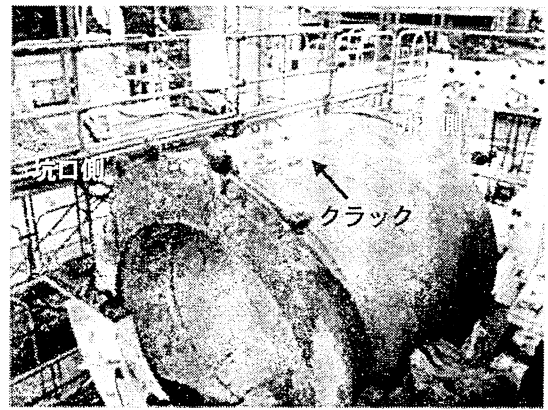
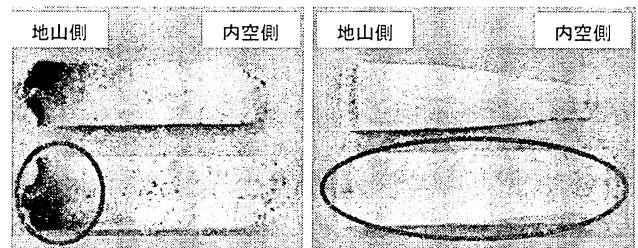


写真4 下部ポートのみから打設した場合のライニング外観



(a) 切羽側天端部

(b) 坑口側天端部

写真5 採取したコアの断面

#### b) 下部ポートのみから打設した場合

津軽蓬田トンネルでは、12箇所の打設ポートからコンクリートを打設する計画である。このケースでは、実施工時にトラブルによって使用できないポートが発生した場合を想定し、下部ポートのみから打設した。なお、スライド胴のストロークが1.2mまでは、コンクリート打設圧は0.6MPa、模擬地盤水圧は0.4MPa程度としたが、ストロークが1.2m以降は予備圧をゼロとし、打設圧を0.4MPa程度まで下げた。コンクリートはK-I'配合を使用した。

写真-4に解体後のライニングの外観を示す。覆工厚はほぼ設計厚以上が確保されていたが、ライニングの天端部に幅0.3～0.5mm程度のひび割れが発生した。このひび割れは覆工の全長にわたって発生しており、内面から模擬地盤側まで貫通していた。なお、このひび割れは内型枠の脱型前（スライド胴を撤去した時点）から発生していたことが確認されている。

また、ライニングの天端部にモルタル層が見られた。コア分析の結果、モルタル層は天端部全長にわたって分布していたが、写真-5に示すように坑口側に多く確認できた。これは、打設ポートを限定し下部のみから打設を行った影響により、先送りしたモルタルが密度の高いコンクリートに押し上げられ天端部に集中したものと推測される。ひび割れが脱型前より発生していたことや貫通

していたことを考慮すると、ライニングの円周方向の自己収縮によるひずみが天端部に不均質に分布したモルタル層に集中してひび割れが発生した可能性があるものと推測される。

#### 4. まとめ

SENSにおける一次覆工コンクリートの打設を模擬した大型実験装置を製作して、津軽蓬田トンネルで想定される施工条件の下で、施工性や品質に優れたコンクリート配合を選定することを目的とした各配合を用いたコンクリート打設試験と実施工上想定される特殊な条件において発生し得る事象やその際の覆工の状況を把握し、SENSの施工管理の基礎資料とすることを目的とした特殊な条件を想定した打設試験を行った。本試験より得られた成果は以下のとおりである。

- 1) 今回開発したコンクリートは、各配合とも三本木原配合よりピストン前面圧力が低く、圧送性能が向上しており、コンクリートポンプへの負荷を低減できる配合であることが確認できた。
- 2) 今回開発したコンクリートの配合レベルⅠは、いずれも良好な出来形であったが、配合レベルⅢは、打設中に内型枠継手面よりモルタルが流出し、ライニングに穴が開いた。このことから、SENSで用いる一次覆工コンクリートには、水圧に応じた水中分離抵抗性が必要となることがわかった。
- 3) トラブルなどに起因して急激な妻型枠の操作を行った場合、コンクリートが切羽側に引き込まれ、それに伴い地盤の引き込みが発生し、天端部の覆工厚が減少する可能性がある。しかし、実施工では覆工内面からの目視による覆工厚の確認は困難であることから、打設時の施工管理がとくに重要となることが伺える。
- 4) 地下水圧に対するコンクリート打設圧の予備圧は、

おおむねゼロとした場合でも実験機では打設が可能であった。しかし、実施工では、土水圧などの地山条件が掘進と共に変化するため、予備圧を設けて施工することが妥当であるものと考えられる。

- 5) 下部1箇所ポートのみから打設すると、先送りしたモルタルが天端側へ逸走し、天端部のコンクリートが均質にならない可能性がある。このことは、実施工において配管が閉塞するなど使用できる打設ポートが限定された場合、コンクリートが均質に打設できずにライニングに部分的な弱部を発生させ、ひび割れなどの発生原因となることを示唆しており、実施工の施工管理では、連続2ポート以上空けて打設しないなどのバランスを考慮した配慮が必要となるものとする。

現在、津軽蓬田トンネルでは、安全に施工が行われているが今後は、実施工で得られたデータについても整理、分析を行い、SENSの施工条件により合致したコンクリートを開発し、トンネルの品質を高めたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 飯田廣臣、磯谷篤実、井浦智実、川嶋潤二、小西真治：シールドを用いた場所打ち支保システムの施工、トンネル工学報告集、第14巻、pp.195-202, 2004.
- 2) 飯田廣臣、野々村政一、小山幸則、小西真治、小泉淳：シールドを用いた場所打ちライニングの挙動に関する現場計測結果とその考察、土木学会論文集 F, Vol.63, No.3, pp.349-360, 2007.
- 3) 小川淳、小伊豆俊博、玉井達毅、小林孝志：小土被り区間の SENS による初期掘進—北海道新幹線津軽蓬田トンネル—、トンネルと地下、第41巻、第10号、pp.7-15, 2010.
- 4) 長谷川正明、野口守、玉井達毅：SENS（シールドを用いた場所打ち支保システム）のコンクリート開発—北海道新幹線、津軽蓬田トンネル—、コンクリート工学、Vol. 49, No.1, pp.106-109, 2011.

(2012.9.3 受付)

## LARGE-SCALE EXPERIMENT OF CONCRETE CASTING USING SENS

Mamoru NOGUCHI, Atsuhiko TANAKA, Toshihiko MIYAZAKI,  
Shinji YAKITA and Hideyuki SAKANE

SENS was firstly developed and adopted in the Sambongihara Tunnel of Tohoku Shinkansen Line. This is the method to aim digging and the stability of face by closed type TBM, support the tunnel with cast-in-situ concrete lining to be primary lining in parallel with TBM digging. Excellent result was obtained at the SENS construction work of Sambongihara tunnel, however, issues were also found out. In facing with those issues, concrete casting experiment was conducted by using large scale experiment machine in order to improve quality and performance of primary lining concrete. Regarding SENS adopted at the Tsugaruyomogita Tunnel, this paper describes test results of primary lining concrete where modeled experiment machine was used.