

28. シールドを用いた場所打ち支保システムの開発と適用

熊谷・東洋・大本・井上特定建設企業体：○千代 啓三、川嶋 潤二
 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 東北新幹線局：井浦 智実

1. はじめに

一般に、地盤の堅固な山岳地域では NATM が、地盤が軟弱で自立することが望めない都市部ではシールド工法が標準工法として採用されてきた。しかし、近年、山岳地域では未固結の比較的不安定な地盤に対して NATM を、また、都市部では地盤の比較的堅固な大深度にシールド工法を適用する試みが見られる。これらの NATM とシールド工法の境界領域に対しては、切羽の安定性、安全性、工期の点で、シールド工法が優位であるが、経済性で NATM の方が優れており、両方の利点を兼ね備えた工法の開発が期待されている。

本論文で検討する三本木原トンネルは、図-1のように、含水未固結の砂質土地盤が主な対象となっており、NATM とシールド工法のまさに境界領域と言える地盤である。

本論文は上記のような背景をもとに、三本木原トンネルを対象に開発した「シールドを用いた場所打ち支保システム (SENS)」について概説する。また、構成する技術のうち、課題であった場所打ちコンクリート打設システムに特に注目し説明するとともに

に、実施工への適用結果と今後の展望について報告するものである。

2. 三本木原トンネルの概要と問題点



写真-1 NATM 施工における切羽崩落状況

三本木原トンネルは東北新幹線 (八戸・新青森間) の建設工事の一部で、延長が 4,280m の新幹線複線断面トンネルである。また、三本木原トンネルで掘削対象となる地盤は主に未固結の帯水砂質土層で構成されている。

平成 13 年 8 月に、青森方坑口より NATM による

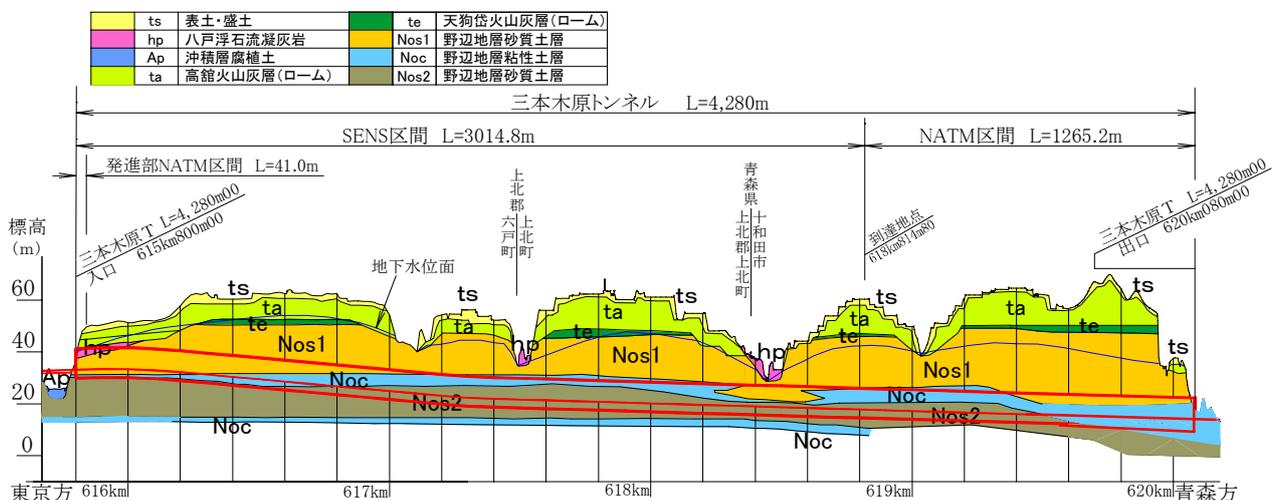


図-1 トンネル縦断面図

掘削を開始した。切羽面が不安定なため、地下水位低下工法や注入式長尺先受工などの補助工法を併用したが、写真-1のように、砂質土層が崩落し、平成14年には2度切羽の進行が停止した¹⁾。このため、NATMによる掘削工事の安全性、補助工法の採用による経済性および施工性、掘削の低進行などが問題となった。

そこで、シールド工法を用いた新しい施工システムを開発し、NATMによる掘削を1,265.2mで終了し、反対側の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. SENSの開発

(1) SENSの概要

本工法の開発目的は、三本木原トンネルのように、地山条件等により補助工法の効果が十分に期待できず、切羽の自立が困難な層が含まれる場合に対し、シールド工法の“安全性”と“進行”，NATMの“経済性”を同時に満たす工法を確立することにある。

トンネル掘削工法には、「切羽保持」、「排土」、「覆工（内空断面の保持）」の3つの機能が必要であるが、前述のような経緯から新工法では、シールドを用いて「切羽保持」の機能を果たすことにより、切羽の安全性と進行の改善を期待した。また、シールド内の「排土」もシールドの装備で行う。

次に、覆工の考え方について説明する。シールド工法では一般にセグメントを使用しているが、セグメントは、NATMの吹付けコンクリートに比べ、製作精度が高く、止水性や外観の点で高い性能を有しているが、その反面経済性が劣る。新工法では一次覆工に対する要求性能をNATMと同様に考えて、内空変位等の坑内計測を通じて覆工の健全性を確認する必要はあるが、クラックや土砂をとまわらない漏水は許容するものとした。上記の考え方にもとづいて、セグメントに比べ経済的な場所打ちコンクリートを採用した。外観や導水のため、防水シート工と二次覆工を実施するが、それでも、セグメントよりも経済的に覆工体を構築することが可能となった。

上記の特長から、本工法を『シールドを用いた場所打ち支保システム』と称し、シールド(Shield

tunneling method)、ECL(場所打ちコンクリート)、NATMの技術を組み合わせ、それぞれの利点を取り込んだ新しいシステム(System)であることからこれらの頭文字を取り、略称としてSENSと呼ぶこととした²⁾。

(2) 場所打ちコンクリートの問題点

場所打ちコンクリートは、打設直後は液圧で地山の変形に抵抗し、ある程度地山が変形した後に硬化コンクリートとして支保を形成する。このため、硬化コンクリートに作用する土荷重の影響が小さくなることが期待される。

一方、場所打ちコンクリートは、覆工としての機能を果たすが、過去の施工実績が少ないため、打設システムの計画を十分検討する必要があった。打設システムの計画時に検討課題となった事項を以下に列挙する。

- ・掘進と同時に、コンクリートがテールボイド全域に確実に充填されるための方法
- ・型枠組立、掘進の施工サイクルの中でコンクリートを打設するため、圧送中のコンクリートの硬化対策
- ・掘進完了後のコンクリートの清掃手順やコンクリート注入孔の閉鎖の方法

(3) 三本木原トンネルへのSENSの適用

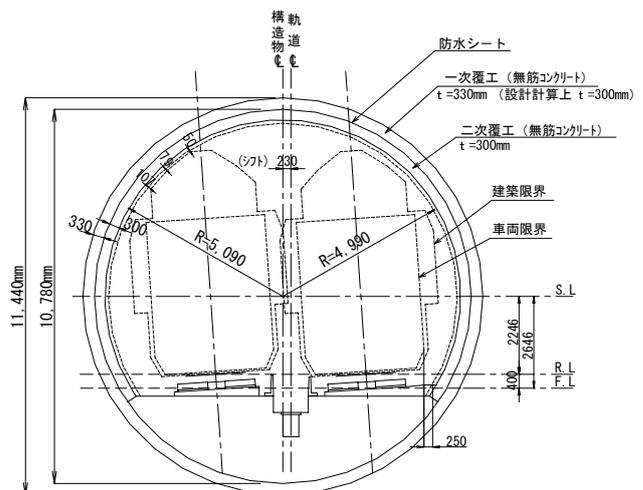


図-2 トンネル断面図(曲線部 R=8,000m)

三本木原トンネルのSENS区間の覆工断面を図-2に示す。図のように一次覆工は外径11.44m、覆工厚330mm(設計有効厚さ300m)で、その内側

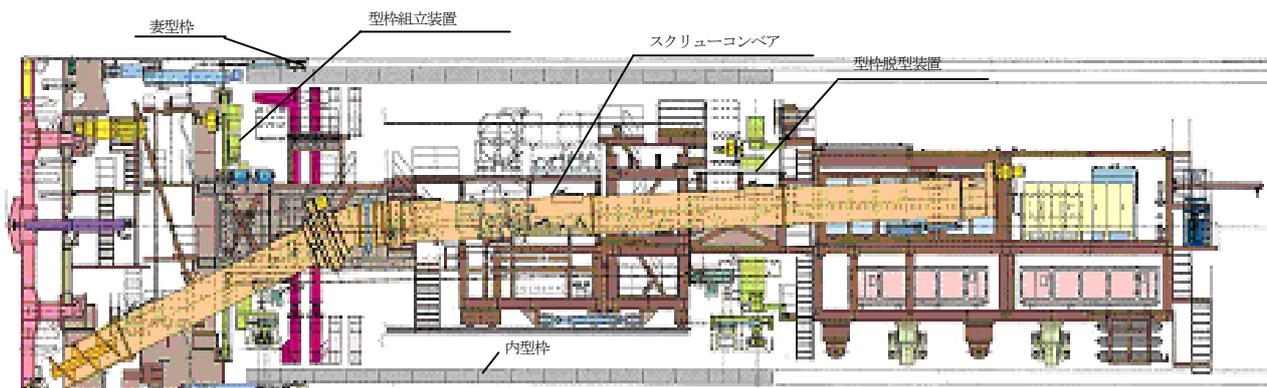


図-3 シールド全体図

に、NATM と同様にインバートコンクリートと化粧巻きとしての厚さ300mmの二次覆工を打設する。

三本木原トンネルでは新たな工法を適用したため、多くの課題が存在したが、本稿では、上記の課題に対し、SENS を適用した三本木原トンネルの施工設備、特に場所打ちコンクリート打設システムの概要と問題点を中心に説明する。

4. 三本木原トンネルにおける施工設備

(1) シールド

SENS で使用するシールドは密閉型としている。これは、開放型の場合、テールで打設したコンクリート圧力がシールド外周を介して解放され、密実なコンクリートが打設できないためである。三本木原トンネルでは、図-3のように土圧式シールドを採用した。

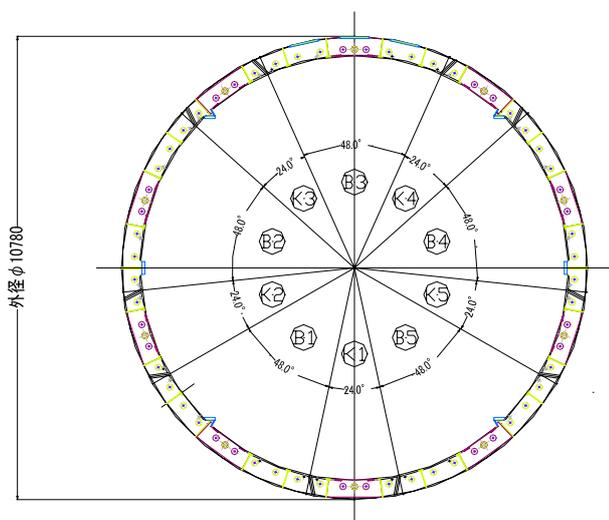


図-4 内型枠断面図

内型枠は、1.2m 幅の鋼製型枠を16リング使用している。図-4のように、1リングは10ピースに分割されており、どの位置からも脱型できるように半径方向挿入式のKピースとBピースの組み合わせとしている。

シールドには、本体に型枠組立装置を、後続台車に型枠脱型装置を装備しており、型枠脱型装置で脱型した型枠をホイスで切羽側に搬送し、テール内の型枠組立装置で組み立てるという方法で16リングの型枠を繰り返し使用する。

型枠のリング数は、以下のようにして決定した。シールドの推力は、コンクリートと内型枠外面との付着力を利用しており、コンクリートと型枠の付着

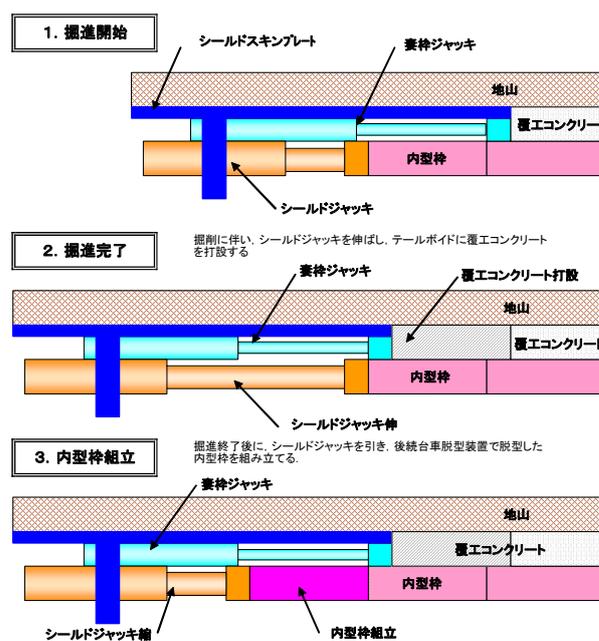


図-5 コンクリート打設順序模式図

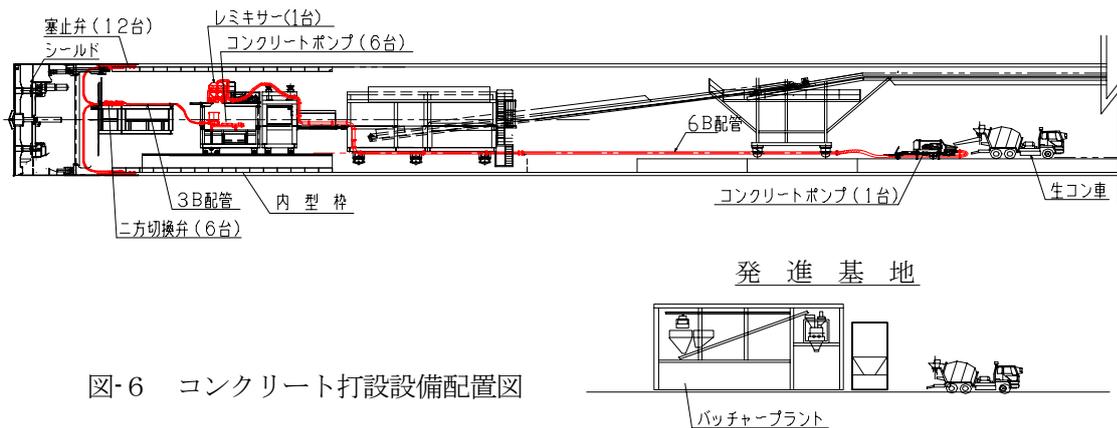


図-6 コンクリート打設設備配置図

力を 200kN/m^2 として計算した結果、付着力を確保するために7リングが必要となった。このため、コンクリート強度が発現する24時間の間に8リング進むことから、脱型する1リングを加えて合計16リングを装備している。

(2) コンクリート打設システム

図-5にコンクリートの打設順序の模式図を示す。一次覆工コンクリートは、掘進にともなって発生するテールボイドに、確実に充填されなければならない。また、固結前のコンクリートを機内に抱えた状態で掘進するため、施工中の些細なトラブルでも1~2時間の短い時間で解決しなければ、掘進を停止する必要も生じる。このため、三本木原トンネルでは過去のECL施工例でのコンクリート打設システムの問題点を検討し、次のようなコンクリート打設システムを採用した。

1) 打設ルート・設備

コンクリート打設に関する設備の配置を図-6に示す。打設設備の故障や作動不良が掘進を円滑に行う障害となるため、システムの選定にあたってはこれまでの使用実績や動作の信頼性に留意した。また、軽微な故障であれば、バックアップ可能な設備とするように計画した。その特性は、以下のとおりである。

- ・ コンクリートは、トンネル内はアジテータトラックで運搬され、シールドの後方約25mに設置したコンクリート供給ポンプで後続台車上のレミキサーまで6インチ管を通して圧送される。
- ・ シールド内にコンクリート打設ポンプを6台設置し、それぞれのポンプに二方向切替弁を配置

して合計12箇所の打設孔から打設を行う。配管は3インチとし、コンクリートポンプは少量でも打設量の調整が可能なものを使用し、1台の故障であれば残りの5台でバックアップできる能力を有している。

- ・ コンクリート打設孔は、過去の事例を参考にして3m程度の間隔とし、写真-2のように12箇所の打設孔を配置した。

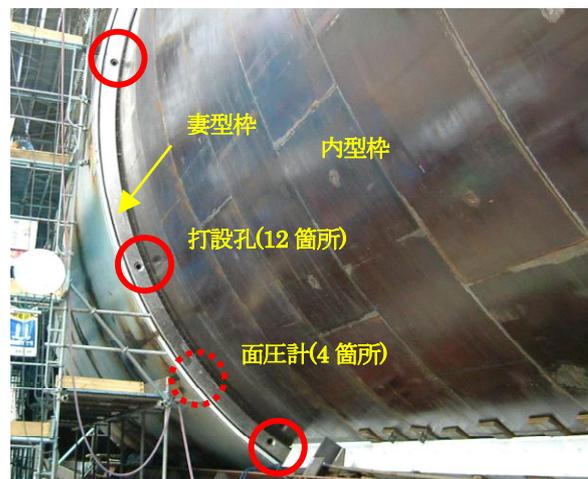


写真-2 打設孔配置状況

2) 塞止弁

掘進を停止した際には、配管内に残ったコンクリートを清掃するために、速やかにコンクリート打設孔を塞ぎ、配管内の残留したコンクリートと覆工コンクリートを分離する必要がある。このため、写真-3のように、コンクリートは分岐管を経由したルートで送り、油圧ジャッキ式の塞止弁で打設孔を閉鎖することとした。

図-7に塞止弁の構造図を、また、写真-4にコンクリート側から見た塞止弁開閉状況の写真を示す。

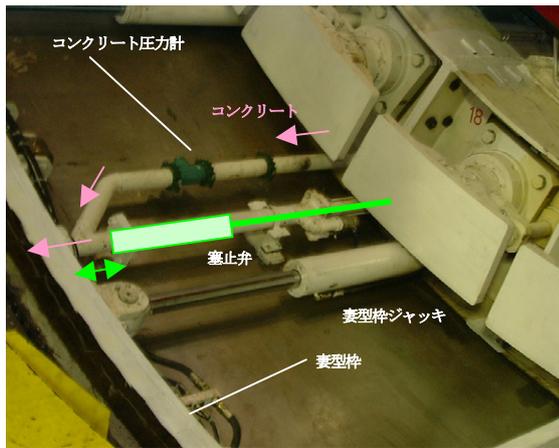


写真-3 塞止弁組立完了状況

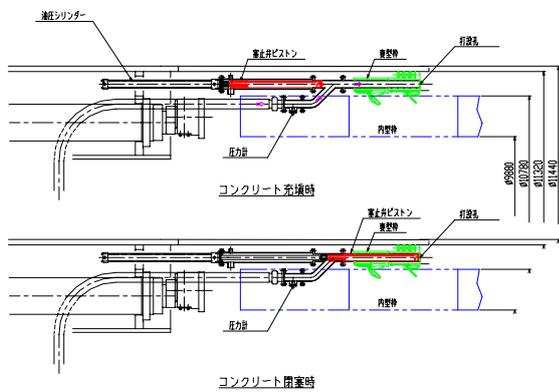


図-7 塞止弁構造図



写真-4 塞止弁開閉状況写真

3) 打設制御システム

コンクリートの打設ポンプが6台あるため、打設管理が複雑である。このため、打設率を設定すれば、掘進速度に応じてポンプの打設速度を自動的に調整できるソフトを使用している。これにともなって、6系統のコンクリート配管に対して、コンクリート圧力計を打設ポンプ口元1箇所、打設孔2箇所に、妻型枠1箇所の各4箇所に、流量計をポンプ口元の各1箇所に設置している。

(3) コンクリートの開発

コンクリート品質には、施工上の制約から、表-

1のような厳しい条件が求められた。このため、特殊増粘剤や高性能AE減水剤を使用してこれらの要求を満足するコンクリートを開発した。開発にあたっては、各品質を確認するため、室内でポンプ圧送試験や充填性確認試験を、現地でも同様にポンプ圧送試験を実施し、コンクリートの性能を確認した。また、施工においても圧縮強度、スランプフロー、水中不分離性等の測定を行い、品質の日常管理を行っている。

表-1 コンクリートの要求品質

品質項目	要求品質
流動性	練りあがりから打ち込みまでの想定時間である4時間は流動性を保持すること
充填性	テールボイドに確実に充填できること
分離抵抗性	流動・充填時に分離しないこと
水中不分離性	地下水圧の加わる場所での打ち込みの際しセメント粒子の逸散を抑えられること
ポンプ圧送性	施工に必要な量の圧送が可能で、圧送後にその他の品質が低下しないこと
強度発現性	材齢1日における強度が15N/mm ² 以上であること

コンクリートの日常管理を行う中で、これらの品質のうち、特に、流動性、ポンプ圧送性、強度発現性は、温度による変動が大きいことがわかった。このため、今後、気温によって適切な添加剤の配合量を選定する必要がある。

5. 施工状況

(1) 進行

掘進速度は毎分15mm程度で、1リング約1.5時間、また、型枠組立に約1.0時間必要なため、1リングあたり少なくとも約2.5時間を要する。型枠の脱型は、型枠組立や掘進と平行して実施している。作業はコンクリートを抱えているため24時間連続して行っており、1日の進捗としては8~10リングである。ただし、以下のような理由から連続した掘進は最大でも16リングとしている。

- ・ 連続して掘進するとコンクリート配管やポンプホッパー内の滞留箇所のコンクリートが固結し、ポンプ圧力の上昇や閉塞の原因となる。

- ・ 打設したコンクリートが妻型枠に付着して、コンクリートがテールボイドに完全に充填されるのを阻害する。
- ・ 後続台車が走行するための一次インバートコンクリートを打設する必要がある。

このため、1.5～2日間連続して掘進した後は、0.5日掘進を停止して、配管やポンプの清掃メンテナンスを行い、その後、再度掘進を再開するというサイクルで施工を行っている。

また、図-8に示すように、妻型枠のテールブラシ背面に固結したコンクリートが蓄積し、テールブラシの型枠に対する柔軟な追従を妨げることがわかった。このため、約100リング掘進を行うと、2日程度要して、妻型枠をシールド側に引き出し、テールブラシの背面を清掃している。

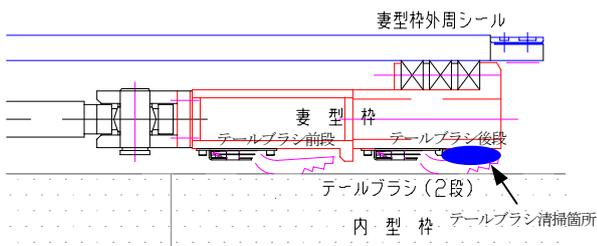


図-8 妻型枠テールブラシ背面清掃箇所

掘進は、8月末現在で約1200mを完了した。また、月進では、最高166.8mを記録しており、上記のようなシールド工法にはない工程が必要となるものの、同トンネルのNATMによる施工に比べ大きな進捗を得ている。

(2) 覆工コンクリートの出来形



写真-5 一次覆工コンクリート打設完了

脱型後の一次覆工コンクリートの写真を写真-5に示す。一次覆工コンクリートには、掘進停止時にできる打継目やコンクリートの収縮等にもなるクラックが発生しているが、クラック幅も0.3mm以下のものがほとんどで土砂を引き込むような漏水は確認されていない。また、坑内計測の結果、トンネルの変位もほとんど確認されておらず、構造的に問題となるようなクラックは発生していない。

(3) 周辺地盤への影響

シールド通過時の地盤の影響を測定した結果、土被りが1D程度の小土被りの箇所では、コンクリート打設時に地表面が10mm程度隆起したが、土被りが2D程度の箇所ではほとんど地表面の変位が見られなかった。

6. おわりに

三本木原トンネルでは、一次覆工コンクリートはNATMの吹付けコンクリートと比較して十分な性能を有していることが確認できており、早期の掘進完了を目指して施工を進めているところである。

ただし、今後、連続掘進が可能なリング数を増やし、妻型枠テールブラシ背面の清掃を不要とするような工夫を行うことによって、飛躍的に進捗を増やすことができると考える。また、コンクリート清掃方法など設備を工夫することでより省力化することのできる点もある。

今後、三本木原トンネルでの実績と問題点を踏まえ、SENSがNATMとシールド工法の境界領域の地盤に対する工法として、選択肢を提供できるよう施工実績を積むとともに、工法の改善・研究を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 蓼沼慶正他：含水未固結地山トンネル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，2003年11月
- 2) 佐々木幹夫他：場所打ち支保システムによる山岳密閉シールド—東北新幹線 三本木原トンネル—，トンネルと地下，第36巻4号，2005年4月