

シールド部分同時施工法「ロスゼロ工法」 の開発

西明良¹・神谷眞一²

¹飛鳥建設(株) 土木本部 機電部(〒102-8332 東京都千代田区三番町2番地)

²東洋工業(株) 技術部(〒111-0052 東京都台東区柳橋2-21-13, 東洋ビル)

本工法は、シールドジャッキの圧力制御を活用して掘進とセグメントの組立を同時に行うシールド高速施工法である。切羽安定と掘進精度を確保しながら一部のセグメントを組み立てる。シールド機の本体構造、セグメント、土砂搬送設備等は一切手を加えることなく、安価な高速化を実現する。軸方向挿入式セグメントは、kセグメントをトンネル軸方向から挿入する構造であり、挿入代が必要なことからシールド機を常に余分に推進させる。そのため下部セグメントの組立スペースは早期に確保され、掘進中の組立が可能になる。本工法は、軸方向挿入式セグメントの組立により生じるこの余分な推進時間を利用してセグメントを組み立て、サイクルの短縮を図る。

キーワード:シールド,高速化,同時施工,セグメント組立,圧力制御,軸方向挿入式

1. はじめに

昨今の社会情勢よりシールド工法は建設コストの縮減が重要な課題である。長距離化はシールド機械費、立坑費削減等の経済的メリットが得られるうえ、過密化による用地問題にも対応できることから年々進んでいる。高速化は、長距離化に伴い工期が長くなることから必然的に要求されるが、施工者にとっても人件費、機械損料等が抑えられるため有益である。シールド工法は、シールド掘進とセグメント組立にかかる時間が大半を占めており、これら的高速化が不可欠となる。しかし、単なる作業の高速化は、スペックアップによる設備コストの上昇、危険作業の増加による安全性の低下を招くため、掘進と組立を同時に行う同時施工法が注目される。当社では、コスト縮減を主目的とした高速施工法「ロスゼロ工法」を開発し、実用化を進めている。本工法は、軸方向挿入式セグメントの組立で生じる余分な推進時間を利用して一部のセグメントを組み立てるものである。これによりシールド機の本体構造やセグメント、土砂搬送設備等は一切手を加えることなく、安価な高速化が図れる。本論では、工法の概要と施工例、有効性等について述べる。

2. 部分的な同時施工

(1) セグメント挿入代の活用

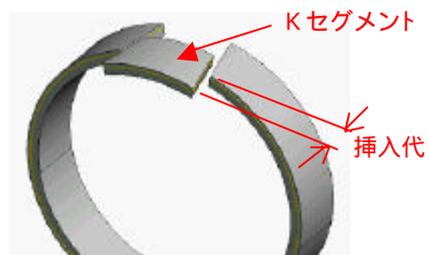


図-1 軸方向挿入式セグメント

軸方向挿入式セグメントは、図-1に示すように最後に組み立てるセグメント(kセグメント)をトンネル軸方向から挿入する構造である。これはkセグメントの落ち込みによって生じる破損を防止するためであり、重量が重くなる中口径以上のシールド工事で多く用いられている。この方式は、図-2に示すようにシールド機のテール部に1/3セグメント幅程度の挿入代を必要とするため、常にシールド機を余分に推進させなければならない。その結果、組立に必要なスペースは早期に確保され、掘進の途中よりセグメントの組立が可能になる。

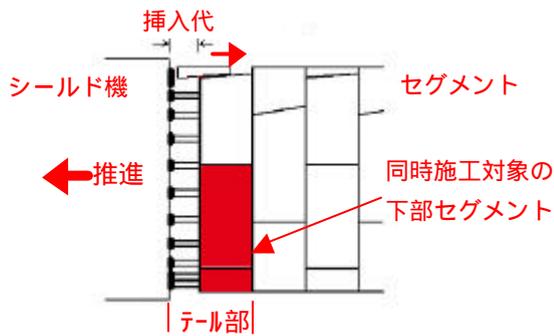


図-2 テール部の挿入代

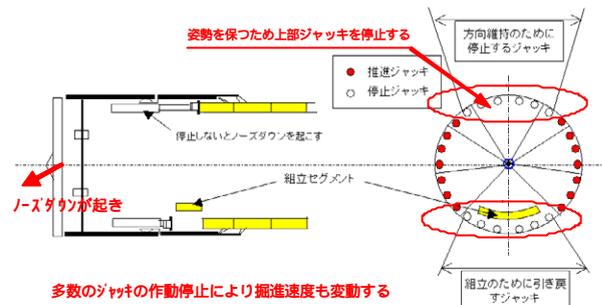


図-3 同時施工の技術的課題

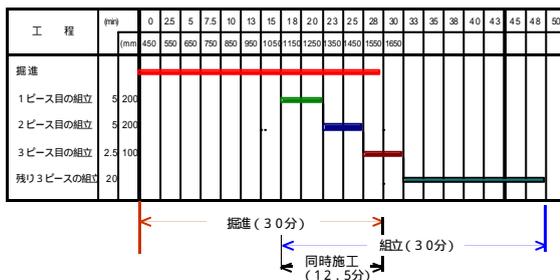
(2) サイクル短縮効果

この挿入代を推進する時間にセグメントの組立を前倒しで行えば、同時施工の効果により施工サイクルが短縮される。表-1は一般的な施工条件でその効果を検証したものである。

表-1 施工条件

セグメント幅	1200mm
挿入代	450mm
掘進速度	40mm/min
セグメント分割数	6
掘進・組立時間	各30分
挿入代推進時間	11分
ジャッキ引戻時間	1.5分

表-2 工程短縮の効果



$$\text{同時施工時間} = \text{挿入代推進時間} + \text{ジャッキ引戻時間} \\ = 11分 + 1.5分 = 12.5分$$

$$\text{工程短縮の効果} = \text{同時施工時間} / \text{掘進・組立時間} \\ = 12.5分 / (30分 \times 2) = 21\%$$

同時施工による作業効率の低下を30%と仮定すると15%のサイクル短縮効果が得られる。

(3) 技術的な課題

同時施工では、シールド掘進中に広範囲なジャッキの作動、停止を繰り返すため、様々な悪影響を及ぼすことが考えられる。

これを図-3の下部セグメントを組み立てる例で説明する。組立範囲のジャッキを停止させるとシールド機の推力バランスが崩れ、徐々にノーズダウンを起こす。これを防止するには軸対称のジャッキも停止させる必要があり、方向制御ジャッキの極端な減少により姿勢修正が困難になる。またジャッキの作動、停止の繰り返しにより掘進速度、切羽圧力が不安定になり、地表面沈下を誘発させる。さらに過大な偏荷重により、セグメントの目開き、漏水、破損等が生じる。

3. ロスゼロ工法の概要

(1) 解決の手段

一般にこれらの同時施工における問題の解決にはシールド掘進とセグメント組立の機能を分離した特殊構造のシールド機が用いられる。前胴部の首振りによる方向制御により、シールドジャッキのパターンに関係なく自由に方向を修正する「頭胴制御式シールド工法」、複数のジャッキを格子状に組み合わせたラチスジャッキにより姿勢制御を行う「ラチス制御式シールド工法」、掘進は推進ジャッキ、セグメント組立は組立ジャッキの2種類の専用ジャッキを装備する「ダブルジャッキ式同時掘進シールド工法」等が開発されており、既に実施工により良好な成果を上げている。これらの工法は、高速化を追求したものであり、特別なシールド機を使用することを特長とする。本工法では、コスト低減と適用性を重視しており、図-4に示すように一般的なシールド機のジャッキ制御方法を改善することにより問題解決を図った。

組立範囲以外のジャッキの圧力を制御して不足したジャッキモーメントを補い、同時施工中のシールド機の姿勢を適切に制御する。

モーメントを一定に保ちながらジャッキの圧力

を緩やかに変更する過程を設け、ジャッキの作動・停止時に生じる掘進速度，姿勢の変動を防止する。

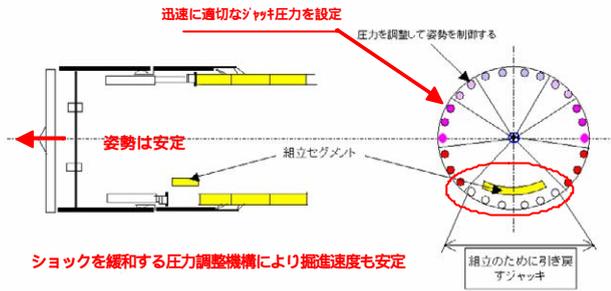


図-4 ジャッキ制御による解決方法

(2) 圧力制御の概要

ジャッキ制御には以下のような圧力制御を適用した。この方式は、各ジャッキの圧力を無段階に調整して任意の推力勾配を作り、シールド機の姿勢を制御するものである。図-5にその概念図を示す。ジャッキ操作点の方向を最大値とし、 r に比例した一定の勾配の推力分布を定義すると各ジャッキの推力割合(P_i)は次式により求まる。

$$P_i = 1 + \left\{ \frac{(i - \alpha) + 1}{2} - 1 \right\} \times r$$

i : ジャッキ番号

α : ジャッキの取付角度

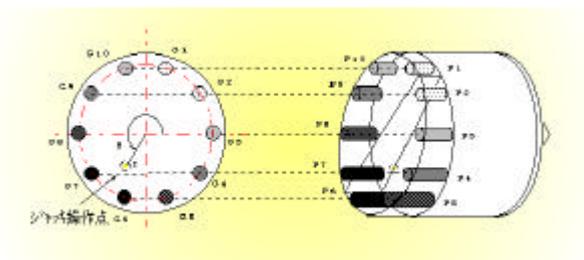


図-5 圧力制御の概念図

シールド機の姿勢は上記のジャッキ操作点を変えることにより自由に制御できる。

図-6は姿勢とジャッキ操作点の関係を示したものである。ジャッキ操作点の r は、目標方向に対する水平、鉛直方向の姿勢偏差 x 、 y から次式により求まる。

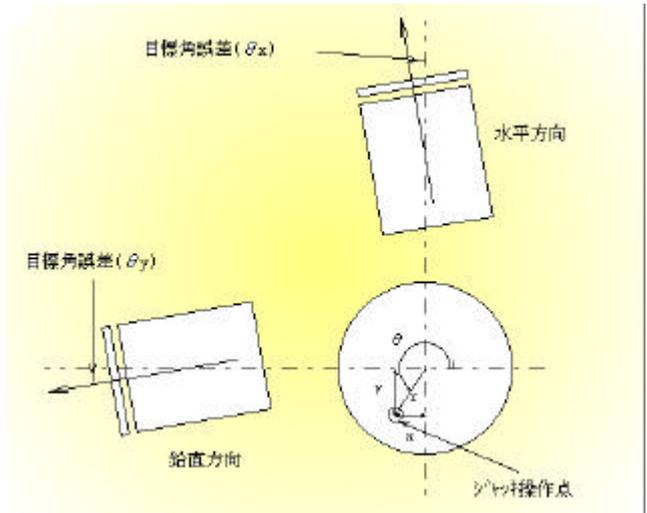


図-6 姿勢とジャッキ操作点の関係

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right)$$

ただし

$$x = Bx \left(x + Tx \int xdt \right)$$

$$y = By \left(y + Ty \int ydt \right)$$

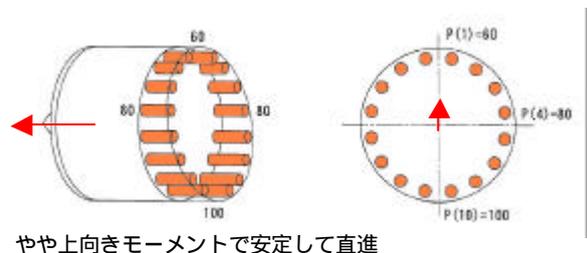
(Bx , By : 比例定数)

(Tx , Ty : 積分定数)

(3) 同時施工における制御方法

同時施工では以下のような制御を適用する。

図-7の制御過程C1はセグメント組立前の通常掘進時のジャッキ制御状況を示したものである。推力の割合は最下部100%，左右80%，上部60%とやや上向きのモーメントによりシールド機が直進していると仮定する。

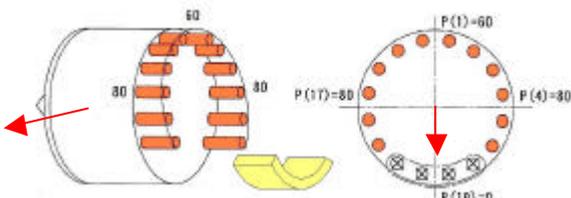


やや上向きモーメントで安定して直進

図-7 制御過程C1

図-8の制御過程C2はセグメントを組み立てるた

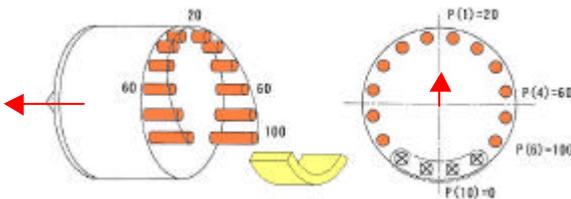
め、その範囲のジャッキを停止した状況である。ジャッキの停止により推力バランスが崩れ、この場合モーメントが下向きに変わる。これにより、シールド機はノーズダウンを起こす。



下向きモーメントとなりノーズダウンを起こす

図-8 制御過程C2

図-9の制御過程C3は変化した下向きのモーメントを修正するためジャッキの圧力を調整し、推力の割合を下部100%，左右60%，上部20%に変更した状況である。これによりジャッキモーメントはC1と同等となり、シールド機は再び直進する。



上向きモーメントとなり姿勢が保持される

図-9 制御過程C3

(4) 掘進の安定化に関する処理

前項の制御過程C1からC2、C3に移る過程において迅速に推力バランスを調整しないと、ジャッキモーメントの変化によりシールド機の姿勢が不安定になる。また、急激に油圧が変化するため掘進速度も不安定になる。そこでジャッキ変更前にモーメントを一定に保ちながら停止ジャッキの圧力を緩やかに下げる圧力調整過程を設けた。これを前項の制御過程C1からC3に移る過程で説明する。

図-10は、制御過程C1の推力分布とそのときのジャッキモーメントM1を表したものであり、図-11は、制御過程C3の推力分布とそのときのジャッキモーメントM2を表したものである。両者のジャッキモーメントM1とM2は一致する。

図-12は、C1からC3に移行するときの圧力の調整過程を表したものである。停止するジャッキ群の

減圧と推進させるジャッキ群の加圧を同一時間で行うことによりジャッキモーメントを変化させることなく推力バランスを変更する。これにより組立範囲のジャッキを停止したときの姿勢、掘進速度の変動を防止することができる。

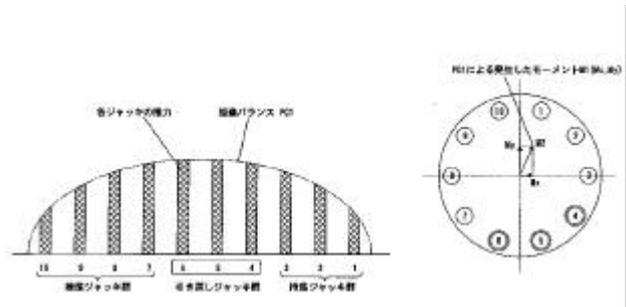


図-10 制御過程C1の推力分布

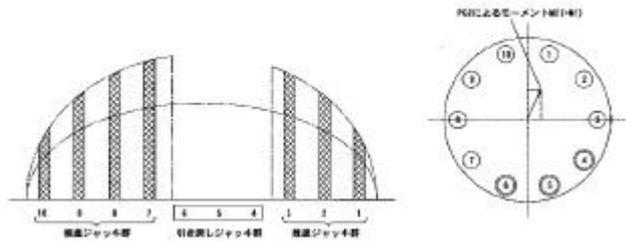


図-11 制御過程C3の推力分布

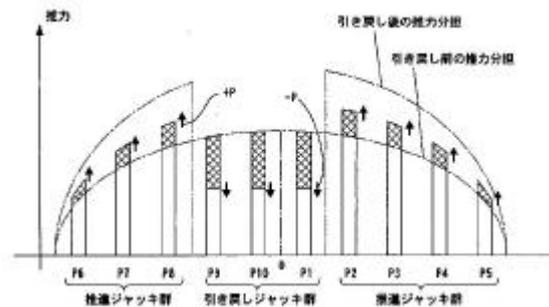


図-12 圧力調整過程

4. 施工例(1)

(1) 工事概要

工事件名：堀川中央幹線(その1-2)公共下水道工事(発注者：京都市下水道局)

工法：泥土圧シールド工法，外径： 7,160mm

装備推力：2500 kN * 24本 = 60,000 kN
 土質：砂礫(N値50以上)
 セグメント：幅600mm，7分割，スチール
 同時施工：2ピース
 実施時期：平成15年7月～10月

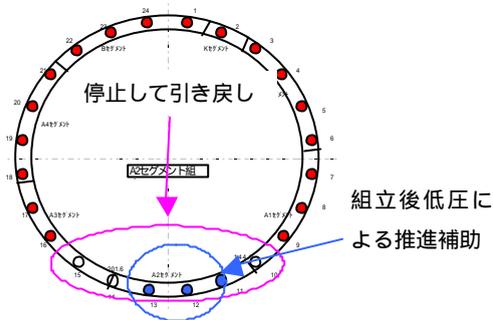


図-13 1ピース目の同時施工

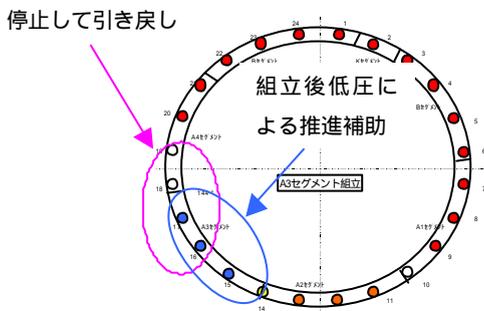


図-14 2ピース目の同時施工

(2) 姿勢制御に関する検証

同時施工では組立範囲のジャッキを推進に使用できないため，組立の進行に伴い姿勢制御が徐々に困難になる．事前のシュミレーションにおいて以下のことを確認した．

- ・ 欠損ジャッキの範囲が25%を越えると姿勢の修正能力が極端に低下する
- ・ 高推力によりジャッキ能力が限界に達すると，制御不能に陥る

当現場では2ピース目の組立時に最大10本(42%)のジャッキを停止する．そのため，ジャッキ装備推力のアップと組立セグメントに低圧で推進するジャッキ(11～17)を加えることで対応した．以下，その施工結果について述べる．

図-15は，1ピース目の同時施工におけるシールド機の姿勢制御状況である．図-13に示すように10～15の6本(25%)を停止し，残りの18本で推進した．このときの総推力は21000kN(装備推力の35%)であった．結果は，水平，鉛直方向とも良好に制御され，

装備推力に余裕があれば欠損範囲が25%を超えても問題なく制御できることを確認した．

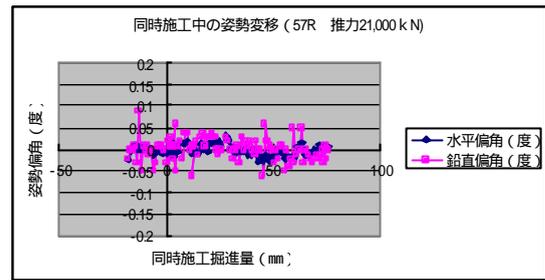


図-15 1ピース目の姿勢制御状況

図-16は，2ピース目の同時施工におけるシールド機の姿勢制御状況である．図-14に示すようにさらに16～19の4本(合計42%)を停止し，残りの14本で推進した．このときの総推力は23300kN(39%)であった．結果は，ジャッキ推力が限界を超え，姿勢を制御できなくなることを確認した．

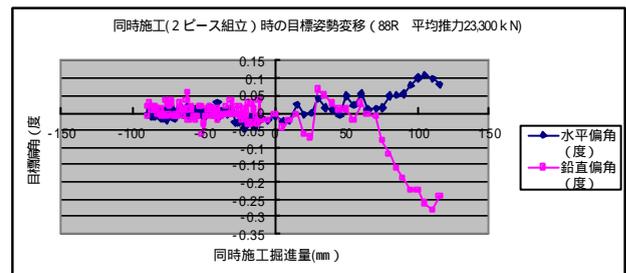


図-16 2ピース目の姿勢制御状況

図-17は，低圧推進ジャッキ11～17を制御に加えた時の制御状況である．不足する鉛直モーメントを低圧推進ジャッキで補うことにより制御が改善されることを確認した．

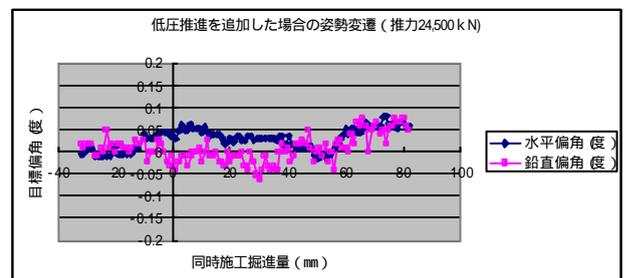


図-17 低圧推進ジャッキの追加

以上より，本工法を適用する場合は，ジャッキ装備推力のアップと低圧推進ジャッキによる推進の補助が不可欠であることを確認した．

5. 施工例(2)

(1) 工事概要

工事件名：SJ33工区・SJ34工区(1)トンネル工事(発注者：東京建設局建設第一部新宿工事事務所)
 工法：泥水加圧シールド工法，外径：11.56m
 装備推力：3500kN×36本=126000kN
 土質：砂礫，砂
 セグメント：幅1500mm，9分割，RC，DC，ST
 同時施工：3ピース
 実施時期：平成16年5月～平成17年1月

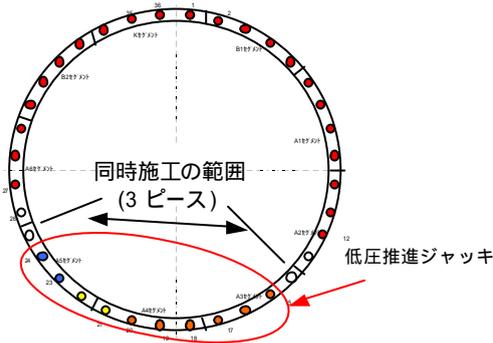


図-18 本工事の同時施工(3ピース)

(2) 安定化処理に関する検証

同時施工では，ジャッキの作動・停止に伴い姿勢，掘進速度が変化する．当工事は大口径の泥水式シールドであるため，その防止対策が不可欠であった．そこで，前項で述べたモーメントを一定に保ちながら推力バランスを変更する圧力調整処理と，掘進速度を一定に保つ速度制御を適用して対応した．

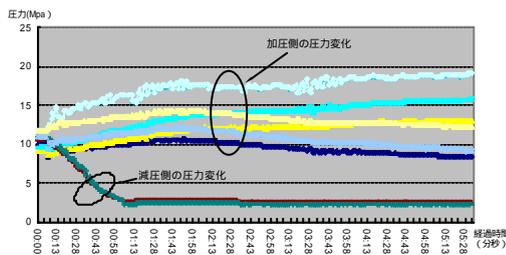


図-19 安定化処理中のジャッキ圧力の推移

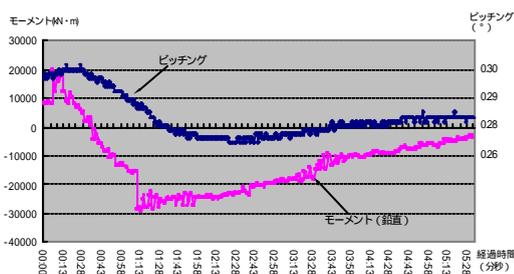


図-20 モーメントと姿勢の推移

図-19は，安定化処理中の各ジャッキ圧力を示し，図-20は，そのときのジャッキモーメントと姿勢の変化を示したものである．減圧側と加圧側の圧力調整処理の時間に差が生じ，それによりモーメントを一定にすることができず，鉛直方向の姿勢が変化している．本工事ではこのような現象により適用率が低下した．そのため，より厳密なモーメント制御を適用して問題解決を図った．

(3) 適用実績とサイクル短縮効果

現在，外回り532R(進捗率50%)の掘進が完了し，以下のような実績を上げている．表-3は進捗率44%時点における同時施工の実施率およびサイクル短縮の効果をまとめたものである．

表-3 工程短縮の効果

種類	リング数	実施率(%)	サイクル時間(H)	短縮時間(H)	短縮効果(%)	短縮時間(H)
RCセグメント	288	30	234	26	11.1	37.4
DCセグメント	134	60	256	31	12.1	41.5
STセグメント	47	39	290	39	13.4	11.9
合計					11.6	90.9

サイクル短縮効果：平均11.6%

短縮時間：90.9時間(13方，8.5暦日)

適用率：40%

6. おわりに

本工法は，適用実績2件によりようやく実用化の目処が立ったところである．しかし，圧力変動防止策の向上，薄桁セグメントへの影響等，解決しなければならない課題が残っている．しかし，これらの諸問題を解決することにより，一般のシールド工事に安価に適用できる高速施工法が確立されると考えている．シールド工法は，コスト縮減，用地確保の問題，大深度地下の有効利用等，ますます長距離化，高速化が求められるものと思われる．本工法は，今後2件の工事に適用する予定であるが，それらの実績を重ねながら技術確立を図り，積極的に提案して行きたいと考えている．

参考文献

- 西明良：圧力制御推進方式によるシールド大断面，大深度工事の施工，平成7年度建設機械と施工法シンポジウム論文集