

中小口径シールドにおける掘進組立て同時施工 —1号幹線用水路 1号トンネル建設工事—

横田仁志* 河越勝* 宮浦知弥** 小口模那** 朝倉佐和子** 木下慶人**

本工事では、シールド工事の工程遅延のリスクを回避する対策として、シールドジャッキの油圧回路を独立させ油圧制御を行うタイプでの掘進組立て同時施工を採用した。事前課題として、シールドマシンのノーズダウンや偏荷重によるセグメントの損傷が挙げられた。対策として、下部2ピースを通常通り組立てることとし、偏荷重によるセグメントへの影響については、計測によりセグメントへの影響を確認することとした。

施工時間に関しては、通常掘進と比較し、1リングあたり14分短縮することができ、セグメントへの影響に関しては、掘進開始時に若干の偏荷重が発生したが、セグメントに損傷を及ぼさないことを確認した。

キーワード：泥土圧式シールド, 工期短縮, 掘進組立て同時施工, 中小口径断面

1. はじめに

現在の1号幹線用水路は、昭和21年度から昭和39年度にかけて国営信濃川左岸土地改良事業により建設された用水路である。近年、1号幹線用水路の一部区間においては、一級河川（茶郷川）と兼用しており農業用水の適正な送水管理に支障が生じている。そのため、信濃川左岸流域土地改良事業で、1号トンネルを新設し、茶郷川との分離を図り、農業用水を安定的に送水する計画としている。

本工事で新設する1号幹線用水路は、トンネル完成後の通水開始計画が確定しており、通水開始計画日までに工事を完了させなければならない。シールド工事の工程遅延のリスクを回避する対策として、掘進組立て同時施工（以下、「同時掘進」という。）を採用した。

本報では、シールドジャッキの油圧回路を独立させ油圧制御を行うタイプでの同時掘進を中小口径シールドへ導入するにあたっての課題、施工時間短縮および偏荷重によるセグメントへの影響の確認について報告する。

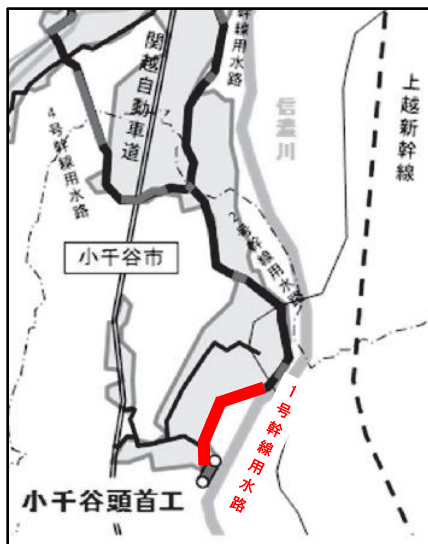


Fig.1 1号幹線用水路位置図¹⁾

2. 工事概要

工 事 名：信濃川左岸流域農業水利事業 1号幹線水路 1号トンネル建設工事
 発 注 者：農林水産省 北陸農政局（信濃川左岸流域農業水利事業所）
 施 工 者：株式会社熊谷組
 工事場所：新潟県小千谷市千谷地内ほか
 工 期：令和元年12月13日～令和5年11月30日
 シールド工事：泥土圧式シールド工法
 シールドマシン外径φ4,050mm
 二次覆工省略型セグメント
 （外径φ3,900mm, 仕上がり内径φ3,500mm）
 施工延長 2,627m



Photo.1 シールドマシン

* 土木事業本部 シールド技術部
 ** 北陸支店 土木部 信濃川左岸シールド作業所

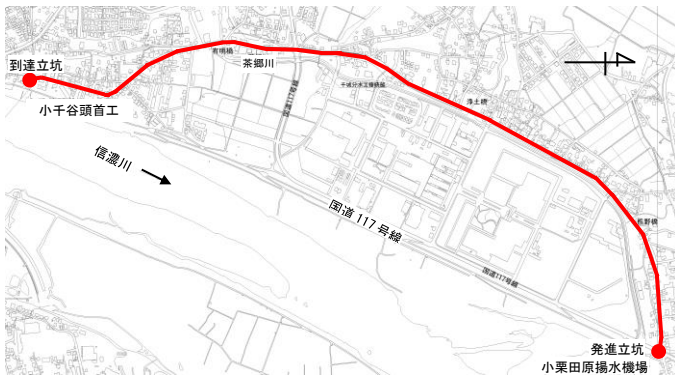


Fig. 2 1号幹線用水路平面図

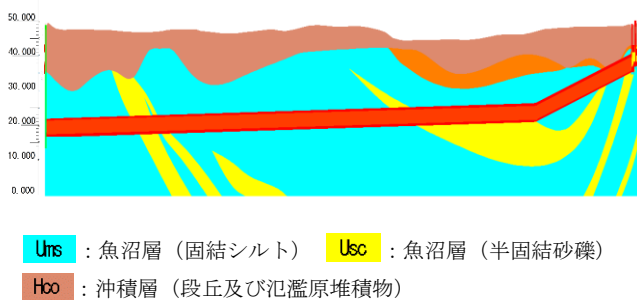


Fig. 3 1号幹線用水路縦断面図

3. シールドにおける同時掘進

3.1 同時掘進とは

通常のシールド工法では、セグメント1リング分のシールド掘削を完了し、シールドマシンのテール内にセグメントの組立てスペースが確保できたら、シールド掘削を停止してセグメント組立て作業を行う。

これに対して同時掘進は、シールド掘削とセグメント組立て作業を同時に行うことにより、施工時間を短縮するものである。施工時間を短縮するために、設備やシステムを見直し、シールド施工の能率を向上させるものである。通常のシールド掘進の概要図と同時掘進の概要図をFig. 4, Fig. 5に示す。

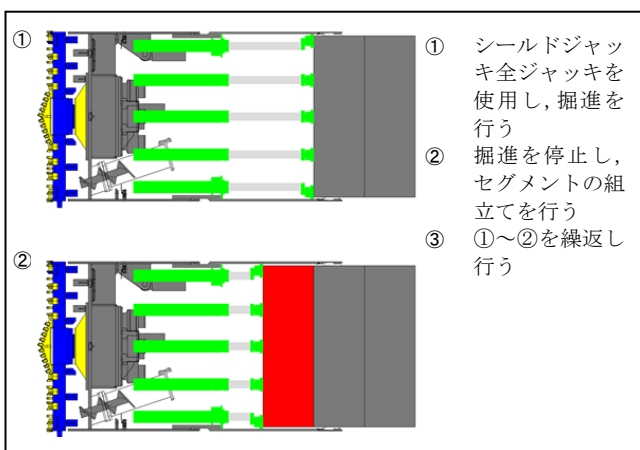


Fig. 4 通常掘進概要図

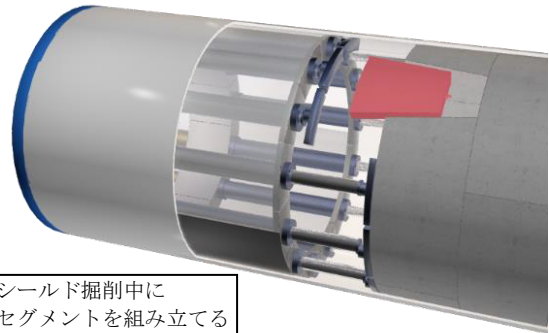


Fig. 5 同時掘進概要図

3.2 同時掘進の現況

同時掘進の方法はロングジャッキ方式とダブルジャッキ方式に大別される。ロングジャッキ方式は、シールドジャッキのストロークをセグメント2リング分の幅以上とすることにより、同時掘進を可能とする。ダブルジャッキ方式は、シールド前胴と後胴がスラストジャッキで連結され、前胴は後胴に対して0.5~1リング分前方に押し出し可能な構造である。後胴に設置されたエレクターでセグメントを組み立て中に、スラストジャッキを伸ばすことで、前胴を前方に押し出して掘進を行う。掘進と組立て終了後にスラストジャッキを縮めると同時にシールドジャッキを伸ばすことで後胴を1リング分前進させ、完了する。

現在の同時掘進は、ロングジャッキ方式として、フード部の首振り機構等を併用したタイプ、六角形のハニカムセグメントを用いるタイプおよびシールドジャッキの油圧回路を独立させ油圧制御を行うタイプ等が実用化され、ダブルジャッキ方式として、ラチスジャッキを使用するタイプ、シールドマシンの中に内胴を装備し、二種類のジャッキで掘進するタイプが実用化されている。

4. 本シールドへの導入

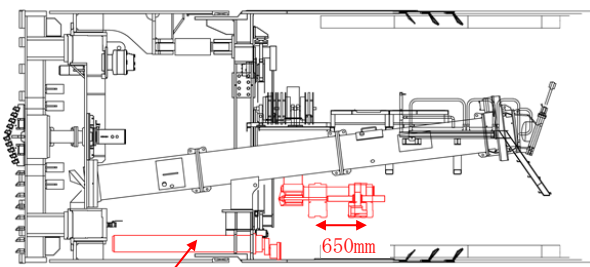
4.1 中小口径(φ4m)への導入

上記の同時掘進の種類の中で特殊なシールドマシンを使用せずに通常のシールドマシンで同時掘進を行うことができるタイプはシールドジャッキの油圧回路を独立させ油圧制御を行うタイプのみである。本シールドでは、シールドマシンの構造を変更せず、推力の力点をコントロールすることで同時掘進を行うことができる点、他のタイプよりシールドマシンの機長を短くできる点、設計のセグメントを使用できる点、経済性、施工に優れていることから、シールドジャッキの油圧回路を独立させ油圧制御を行うタイプを採用した。

シールドジャッキの油圧回路を独立させ油圧制御を行うタイプの実績としては、中小口径シールドでは、シールドジャッキの本数やセグメントの分割数が少なく、シールドジャッキを縮める割合が多くなるため、これまでは大口径シールドのみであった。

4. 2 シールドマシン

今回使用したシールドマシンを Fig.6 に示す。



ロングシールドジャッキ

Fig.6 シールドマシン詳細図

シールドマシンの構造は、通常のシールドマシンと同様であるが、同時掘進を行うためにシールドジャッキやエレクターを同時掘進対応型に変更する必要がある。

4. 2. 1 シールドジャッキ

シールドジャッキのストロークは軸方向挿入型 K セグメントの場合、セグメント幅の 1/3~1/2 の挿入余裕を考慮したジャッキストロークが必要である。本シールドでは、同時掘進を行うにあたり掘進の途中でセグメントの組立てスペースを確保するため、上記条件に加えてジャッキストローク長がさらに 200mm 長いロングシールドジャッキを採用した。

4. 2. 2 エレクター

通常セグメント組立ては、シールドマシンを停止させ固定の位置でセグメントの組立てを行うが、同時掘進を行う場合、シールド掘削に伴ってトンネル軸方向でのセグメント組立て位置が変化するため、それに追従できる前後のスライド機能を持ったエレクター機構が必要となる。

今回は通常より 650mm 長いスライド機能のエレクターを採用した。

4. 2. 3 シールドジャッキの油圧制御

セグメントは6分割でシールドジャッキは17本である。シールドジャッキの油圧回路を独立させ油圧制御を行うタイプの同時掘進を行う際、セグメント1ピースを組み立てるためには組立てピースの3本と姿勢制御するための反対側の3本を縮める必要がある。そのため、シールドジャッキの油圧回路は17本のシールドジャッキを8ブロックに分割し、シールドジャッキ圧力を調整することでシールドマシンの方向制御を行う計画とした。シールドジャッキの油圧回路のブロック分割図を Fig.7 に示す。

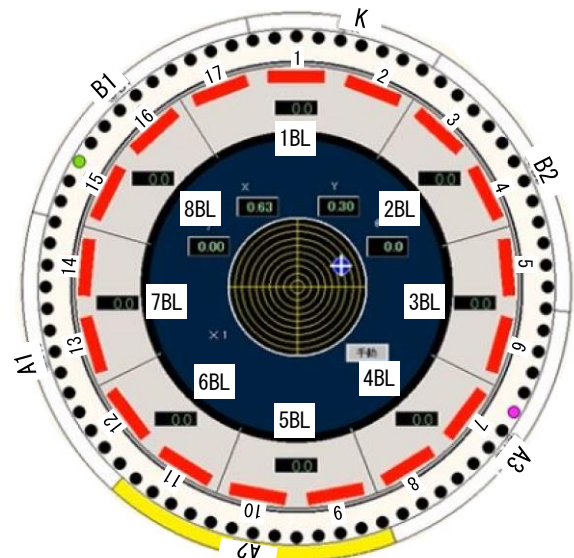
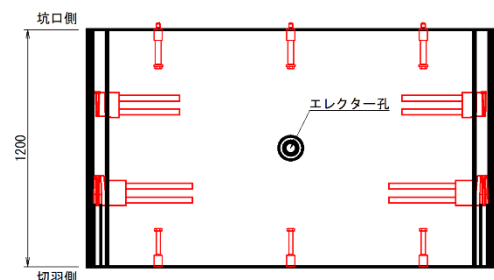


Fig.7 油圧回路ブロック分割図

4. 3 セグメント

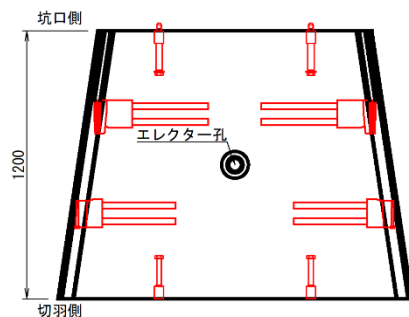
本シールドのセグメント構造図を Fig.8、リング間継手、セグメント継手詳細図を Fig.9 に示す。

A セグメント



※A1, A2型セグメントのセグメント間継手の配置は、継手配置内面展開図の配置とする。

K セグメント



Kセグメント施工時の
セットバック量は600mmとする

Fig.8 セグメント構造図

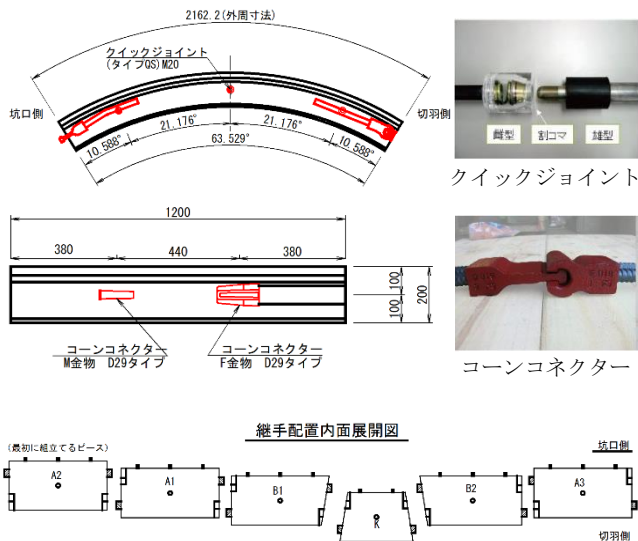


Fig. 9 リング間継手・セグメント継手詳細図

本セグメントは、二次覆工省略型セグメントであり、継手構造は、リング間はピン挿入型継手構造（クイックジョイント（タイプ（QS） M20））、セグメント継手はワンパス継手（コーンコネクター）を採用した。従来のボルト式セグメントと比較し、セグメント組立て時間が大幅に短縮し、安定した高速施工を可能とした。

また、二次覆工省略型セグメントのため、ひび割れ等による損傷は漏水等の原因となる。リング継手が 17 箇所であることから、シールドジャッキを継手の数に合わせてシールドジャッキの本数を 17 本とし、セグメントに与えるジャッキ推力均等荷重となるようにした。

4. 4 同時掘進の事前課題

シールドジャッキの油圧回路を独立させ油圧制御を行うタイプは、シールド掘削中にシールドジャッキの一部を縮めてセグメントを組立てるため、以下の点が課題となる。

- ① シールドマシンの方向制御（推力の力点制御）ができなくなり、シールドマシンが蛇行する。特にセグメントの下部ピースを組み立てる際に下部のシールドジャッキを縮めた状態でシールド掘削を行うと、シールドマシンがノーズダウンし、姿勢制御が困難となる。
- ② セグメントに偏荷重が作用し、セグメントの欠けやクラックが発生する。

シールドマシンのノーズダウンイメージを Fig. 10 に示す。

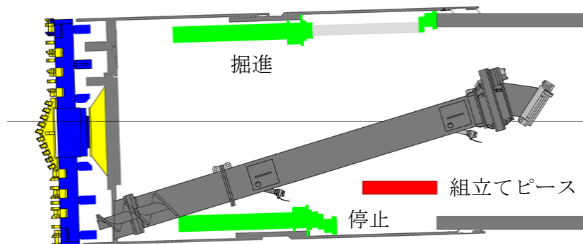


Fig. 10 シールドマシン ノーズダウンイメージ

4. 5 事前課題の対策

事前課題の対策として、同時掘進はセグメント 3 ピース（A1（A3）・B1・B2 セグメント）を対象とし、下部 2 ピース（A2・A3（A1）セグメント）は通常掘進と同様にシールド掘進を一時停止してセグメントの組立てを行うことで、シールドマシンのノーズダウンを防止した。また、偏荷重によるセグメントの欠けやクラックについては、前例がなく、事前解析もできないことから、計測によりセグメントへの影響を確認することとした。

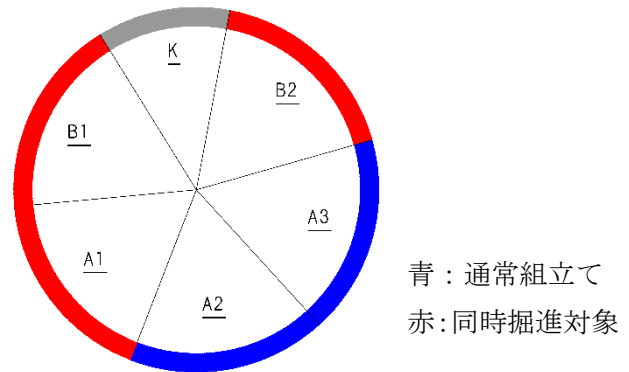


Fig. 11 セグメント組立て図

4. 6 同時掘進の計画

4. 6. 1 組立てジャッキ使用計画

同時掘進を行うにあたり、組立てジャッキの使用計画を行う。組立てジャッキの使用計画例を Table 1 に示す。セグメントとシールドマシンの実際のローリング値も加味して、セグメントを組み立てるためのジャッキパターンを検討した。

Table 1 組立てジャッキ使用計画表

組立て順序	通常組立て		同時掘進				
	1	2	3	4	5		
組立てピース名	A2	A3	A1	B2	B1		
ジャッキNo.	引戻	押込	引戻	押込	引戻	押込	
No.1						○	
No.2				○		○	
No.3				○		○	
No.4				○	○		
No.5		○	○	○	○		
No.6		○	○	○	○		
No.7		○	○				
No.8	○		○	○			
No.9	○		○	○			
No.10	○	○					
No.11	○	○					
No.12	○		○	○			
No.13			○	○			
No.14			○	○			
No.15			○		○	○	
No.16						○	
No.17						○	

4. 6. 2 計画サイクルタイム

計画時の通常掘進と同時掘進のサイクルタイムを Fig. 12, Fig. 13 に示す. シールドジャッキスピードは 25mm/min で, セグメント 1 ピースの組立て時間は 6min とした. 同時掘進を行うことにより, 1 リングあたり 22min 短縮する計画とした.

分	10	20	30	40	50	60	70	80	90	計
掘進	48分									84
組立て					36分					

Fig. 12 計画の通常掘進サイクル

分	10	20	30	40	50	60	70	80	90	計
掘進	26分									62
組立て			36分							
同時掘進					22分					

Fig. 13 計画の同時掘進サイクル

5. 同時掘進の施工結果

5. 1 サイクルタイム

通常掘進と同時掘進のサイクルを Fig. 14, Fig. 15 に示す. 通常掘進は 85min であり, 同時掘進は 71min となり, 同時掘進以外の要素も含まれるが, 1 リングあたり 14min 短縮することができた.

分	10	20	30	40	50	60	70	80	90	計
掘進	30分				15分					85
ズリ鋼車入替				15分						
組立て						25分				

Fig. 14 通常掘進サイクル

分	10	20	30	40	50	60	70	80	90	計
掘進	39分		①							71
ズリ鋼車入替				15分						
組立て				6分	③	17分		⑤		
同時掘進						④ 14分				

Fig. 15 同時掘進サイクル

計画時のサイクルタイムと比較すると, 通常掘進は概ね計画通りであった. 掘削スピードにより掘削時間は異

なるが, 掘進中にセグメントを組み立てることにより, サイクル時間を短縮することができた.

5. 2 施工状況



Photo. 2 掘進前



Photo. 3 掘進完了



Photo. 4 下部セグメント組立て完了



Photo. 5 同時掘進開始



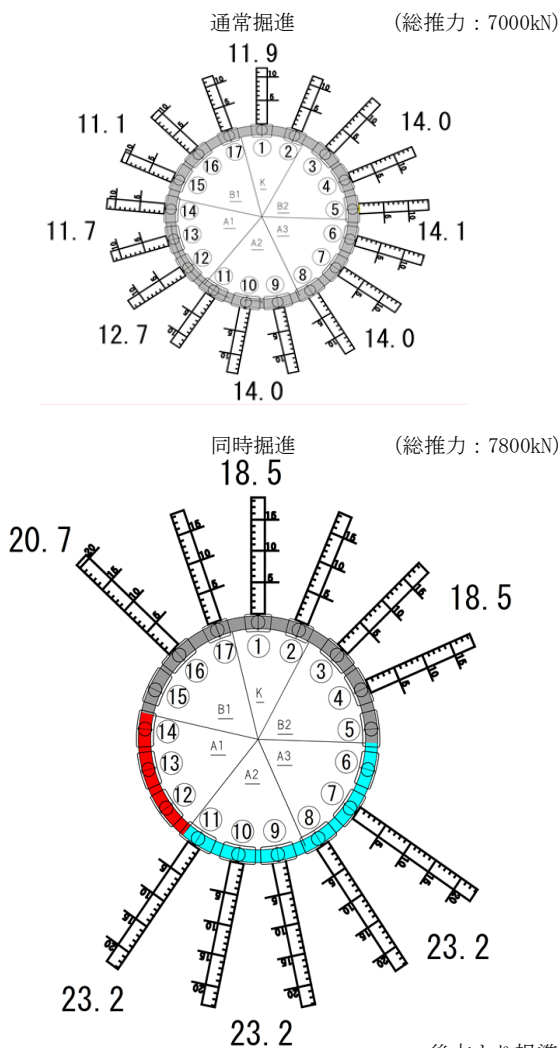
Photo. 6 同時掘進 セグメント組立て完了

6. 同時掘進によるセグメントへの影響

同時掘進による事前課題②の偏荷重によるセグメントの欠けやクラックを確認するため、シールドジャッキのジャッキ圧力と各種計測について以下に示す。

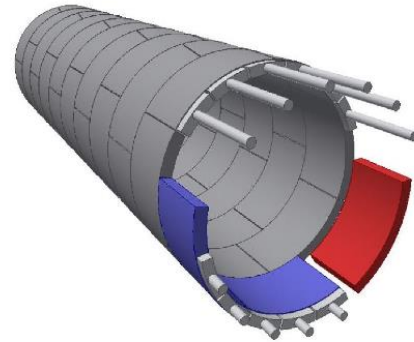
6.1 シールドジャッキ圧力

シールドマシンの姿勢を制御するために、推力の力点をコントロールする必要がある。直線区間では力点を中央で保持する必要がある。通常掘進では、全ジャッキでほぼ同圧力で掘進している。シールド掘削とセグメントの組立てを同時に行うためには、セグメント組立てピース部分と軸対象のシールドジャッキ圧力を低圧または0とした。セグメント組立てのために引抜いたシールドジャッキの両端のシールドジャッキ圧力を高圧にするため、シールドジャッキ圧力がアンバランスとなる。通常掘進時と同時掘進時のシールドジャッキ圧力図を Fig. 16 に示す。



法線目盛：ジャッキ圧力 (MPa) 後方より視準
 灰色：前リング, 青：組立て済ピース, 赤：組立て中ピース

Fig. 16 シールドジャッキ圧力図



リング継手：クイックジョイント
 セグメント継手：コーンコネクター 前方より視準

Fig. 17 同時掘進シールドジャッキイメージ図

6.2 セグメント計測

今回の同時掘進では、組立てたセグメントが円形状になる前（セグメント組立て途中）に下部2ピースのセグメントを反力にしてシールド掘削を開始する。また、シールドジャッキ圧力もアンバランスとなるため、組立て途中のセグメントピースに偏荷重が作用し、クラックやセグメントの欠け等の損傷が生じることが懸念された。そのため、通常掘進と同時掘進の下部セグメント2ピースを組み立てた状態でのひずみ、リング間・ピース間の目開きとセグメントの倒れを計測し、同時掘進によるセグメントへの影響を確認することとした。

6.3 計測方法

ひずみ計測にはコンクリートひずみゲージを使用し、A2セグメントとA1 (A3)セグメントに設置した。セグメントの倒れと目開きに関しては、防水型変位計を使用し、計測を行った。計測機器の設置位置図を Fig. 18 に示す。計測時間は、下部2ピースの組立て後から掘進完了までとした。

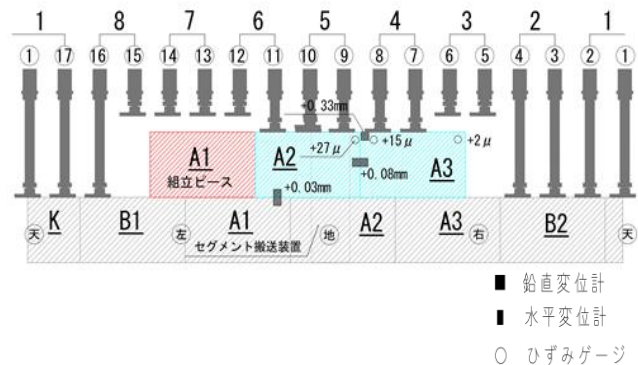


Fig. 18 計測機器の設置位置図

計測リングは、同時掘進を1262リング（甲組）と1263リング（乙組）の2パターンで計測し、通常掘進を1264リング（甲組）で計測した。

計測時間は、下部2ピースの組立て後から掘進完了までとした。

6. 4 計測結果

セグメントの倒れ, 目開き, コンクリートひずみの計測結果を Table 2, Table 3 と計測位置の断面図を Fig. 19 に示す.

Table 2 セグメントの倒れ・目開き計測結果

	セグメントの倒れ +: 内側 -: 外側	目開き (mm)	
		+: 伸び -: 縮み	
		ピース間	リング間
通常掘進	+0.28	-0.33	+0.16
同時掘進	+0.33	+0.08	+0.03

Table 3 コンクリートひずみ計測結果

	コンクリートひずみ +: 引張 -: 圧縮		
	No.1(μ)	No.2(μ)	No.3(μ)
通常掘進	-8	-2	-3
同時掘進	+2	+15	+28

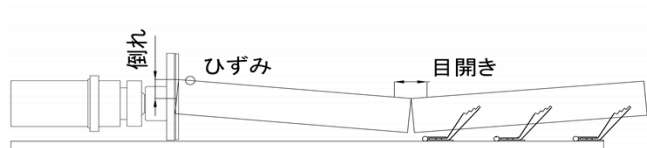


Fig. 19 計測位置 断面図

セグメントの倒れについては, 通常掘進と同時掘進共に内側に倒れる結果となった.

目開きについては, ピース間・リング間共に 0.5mm 未満であり, 掘進による影響は小さかった.

コンクリートひずみについては, 通常掘進では圧縮の力が発生し, 同時掘進では引張の力が発生した. セグメント表面の応力は, 通常掘進ではセグメントの内側への倒れに伴って, セグメントどうしが押し付け合う圧縮力が発生した. 同時掘進では, セグメント組立て後から計測を始めているため, セグメント組立て時に発生した圧縮力が掘進の際には緩和されたため引張側の数値となったと考えられる.

6. 5 計測機器設置状況

ひずみゲージ, 水平変位計と鉛直変位計の設置状況を Photo. 7, Photo. 8, Photo. 9 に示す.



Photo. 7 ひずみゲージ設置状況

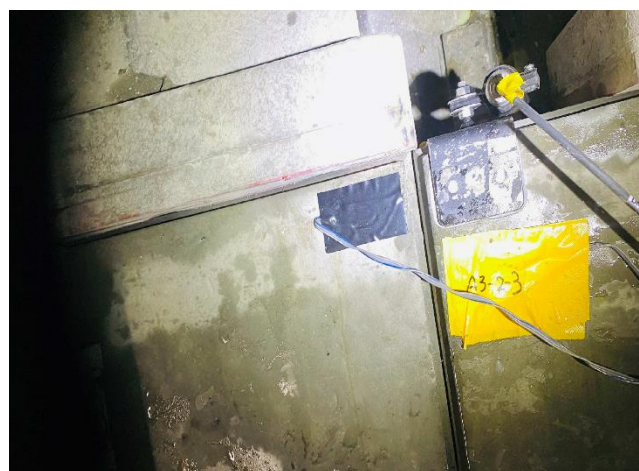


Photo. 8 ひずみゲージ・鉛直変位計 設置状況

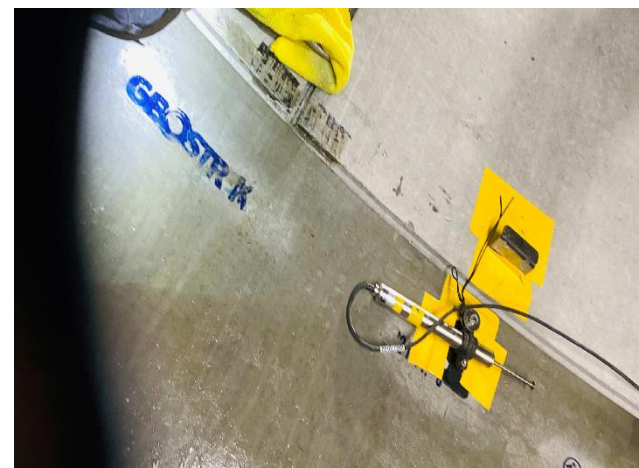


Photo. 9 水平変位計 設置状況

6. 6 考察

同時掘進によるセグメントへの影響についてコンクリートひずみゲージと鉛直・水平変位計を用いて計測を行い, 同時掘進開始時に若干の偏荷重が発生することを確認したが, 欠けやクラックが発生しなかった.

7. まとめ

シールド工事の工期遅延対策として、シールドジャッキの油圧回路を独立させ油圧制御を行うタイプの同時掘進を採用し、同時掘進による課題、施工時間短縮およびセグメントへの影響を計測し確認した。

施工時間に関しては、計画サイクル通りではなかったが、通常掘進時間と比較すると施工時間を短縮することができた。また、同時掘進によるセグメントへの影響は下部 2 ピース組立て後の掘進開始時に若干の偏荷重が発生したが、計測したひずみレベルはセグメントクラック発生ひずみの 1/10 以下であり、セグメントに有害な応力が発生しないことを確認した。

施工時間短縮での課題として、本シールドは泥土圧シールドで掘削土砂の坑内運搬方法がズリ鋼車での運搬のため、同時掘進を開始する際にズリ鋼車の入替による待機時間が発生した。同時掘進でのサイクルタイムを縮めるには、連続ベルコンまたは土砂圧送等による連続排土とし、タイムロス無くすることが効果的と考える。

近年のシールド工法は、大深度化や長距離化が進み建設コストの削減が課題となっている。今後もシールド工事コスト削減のために、シールド施工の高速化が求められる。本工事では、中小口径シールドでシールドジャッキの油圧回路を独立させ油圧制御を行うタイプでの同時掘進が施工可能なことを実証した。

本工事における取組みが今後のシールド工事の計画・施工の一助となれば幸いである。

謝辞

本工事の遂行においては、発注者である北陸農政局 信濃川左岸流域農業水利事業所の皆様のご理解とご指導、地域の皆様、本支店関係部署ならびに協力業者の皆様方に多大なるご尽力をいただきましたこと、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 佐々木俊幸, 栗本慧: 国営信濃川左岸流域土地改良事業の実施状況, JAGREE 100, p 46, 2021. 7

Simultaneous excavation and assembly with small- to medium-diameter shield —The construction of No. 1 Tunnel for No.1 Main Irrigation Canal—

Hitoshi YOKOTA,* Masaru KAWAGOE,* Tomoya MIYAURA,** Mona OGUCHI,** Sawako ASAKURA,** Keito KINOSHITA**

Abstract

To avoid the risk of delays in the shield construction process, this construction project adopted simultaneous excavation and assembly by hydraulic control with independent hydraulic circuits for the shield jacks. Problems to be solved before starting the construction were the nose-down of the shield machine and the damage to the segment due to an eccentric load. The countermeasure chosen and implemented involved the assembly of the two lower segmentpieces in the usual way and measurements to determine the effects of the eccentric load on the segment.

As a result, the construction period was shortened by 14 minutes per ring compared to the conventional excavation method. As for the effects on the segment, it was confirmed that no damage was caused to the segment as a result of the minor eccentric load observed at the start of excavation.

Key words: mud pressure shield, shortening of construction period, simultaneous excavation and assembly, small- to medium-diameter cross section