

覆工コンクリートの急速施工法の開発

ーひび割れ誘発目地の形成機構を有するセントルを用いた実大施工実験ー

Rapid Construction System for Concrete Lining

- Full-Scale Construction Experiment Using Tunnel Formwork Carriage Incorporating Formative Mechanism of Crack-Inducing Joints -

齋藤隆弘* 浜田 元* 小野 緑* 張志セン** 黒岡健司***

要 旨

覆工コンクリートの急速施工法として、1 施工スパンを延長するロングスパンセントル方式の開発に取り組んでいる。この方法では 1 施工スパンが通常より長い為、不特定箇所におけるひび割れ発生リスクが増大する。このため、コンクリート打設前に金属製の目地板をセントル中央部に設置し、コンクリート硬化後に引き抜くことにより、ひび割れ誘発目地を形成する方法を考案した。

この方法の実施工への適用性を確認するため、実規模の模擬トンネルにおいて実大施工実験を実施した。その結果、目地板がスパン中央部にあってもコンクリートを確実に充填できること、コンクリート硬化後に目地板の引抜きが容易に行えること、目地周辺のコンクリートに品質上の問題がないこと、目地の形成によりひび割れを誘発できることを確認した。

キーワード：覆工コンクリート、ロングスパンセントル、ひび割れ誘発目地、実大施工実験

1. まえがき

覆工コンクリートの急速施工（月進 200m 程度）を実現する方法として、従来の2日に1回の打設サイクルを確保しつつ、施工スパン長を通常の 10.5m から 18m 以上に延長する工法の実現に取り組んだ。

本施工法においては、1施工スパン長が通常よりも長い為、覆工コンクリートの温湿度変化に伴うひび割れ発生リスクが増加する。通常の施工では10.5mごとに施工するケースが多く、施工スパン間の鉛直打継目が開口することにより、ひび割れ誘発目地と同様の役割を果たしている。そこで、施工スパン長18m以上のセントルでは、通常の施工と同等の目地の間隔を確保するため、その中間にひび割れ誘発目地を設けることとした。ロングスパンセントルによる施工を図-1に示す。

従来の目地形成方法として、コンクリート打設後に

カッター切断する手法が見られるが、この場合、カッター切断前にコンクリートにひび割れが発生する恐れがある。これに対して目地板を打設前に設置する方法が有効と考えられるが、引抜き時に隣接した目地板が接触することから、目地板の間に隙間を設ける必要がある。このため本開発では、打設前にセントル中央部に目地板を設置し、コンクリート硬化後に目地板を引き抜くことで目地を形成し、なおかつ目地に切れ目がなく、連続していることを条件として目地形成方法を考案した。

この方法では、目地板によりコンクリートの充填性が損なわれないこと、コンクリートを損傷することなく目地板を引き抜けること、形成された目地によりひび割れが誘発できること、の3点が課題といえる。そこで、これらの課題について、(一社) 施工技術総合研究所（静岡県富士市）の模擬トンネル（断面積 78m²、長さ 80m）にて施工実験を行って検証したので、結果を報告する。

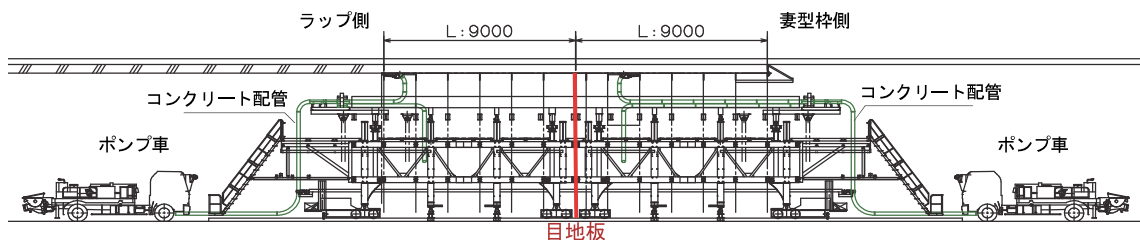


図-1 ロングスパンセントルによる施工

*技術研究所土木研究グループ **東日本支社土木技術部 ***東日本支社リニューアル技術部

表-2 コンクリートの配合

配合名	W/C %	s/a %	単位量(kg/m ³)					非鋼繊維 %/Vol	備考
			セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤		
21-15-40N	58.5	40.5	265	155	763	1129	2.65	-	最大骨材径 40mm
21-15-25N	58.5	46.9	282	165	864	986	2.82	-	最大骨材径 25mm
24-21-20N	50	54.3	350	175	956	811	4.20	0.3	中流動(繊維入り)
24-21-20N	50	54.3	350	175	956	811	4.20	-	中流動(繊維なし)
40-60-20N	40.5	54.3	433	175	919	779	5.85	-	高流動(自己充填ランクⅡ)

表-3 実験ケース

Case	コンクリート種	補強鉄筋	目地板						側壁部～肩部の打設		天端部の打設	
			有無	種類				材質		配管系統の数	打設方法	打設口の位置と口数
				挿入深さ(mm)		厚さ(mm)						
				左	右	左	右	左	右			
1	普通コンクリート(21-15-40N)	無筋	なし	-	-	-	-	-	-	1(既設側)	流し込み	既設側の天端部吹上口
2	普通コンクリート(21-15-40N)	無筋	なし	-	-	-	-	-	-	1(既設側)	圧入	既設側の天端部吹上口
3	普通コンクリート(21-15-40N)	無筋	あり	200		6-2		アルミ		2	圧入	2か所の天端部吹上口
4	普通コンクリート(21-15-25N)	有筋	なし	-	-	-	-	-	-	1(既設側)	圧入	既設側の天端部吹上口
5	普通コンクリート(21-15-25N)	有筋	あり	100		6-2		鉄		2	圧入	2か所の天端部吹上口
6	中流動コンクリート(24-21-20N)	有筋	あり	200		6-2		アルミ 鉄		2	圧入	4か所の肩部打設口
7	高流動コンクリート(40-60-20N)	有筋	あり	200	100	3		鉄		2	圧入	4か所の肩部打設口
8	中流動コンクリート(24-21-20N)	無筋	あり	200		6-2		アルミ 鉄		2	圧入	4か所の肩部打設口

■施工状況① ■施工状況② ※表中、目地板の欄で、左・右は、セントルの進行方向に対する表記である。

[施工状況① : Case1、2、4]

- 想定：ロングスパンセントルの片側9m（打継目～目地、目地～妻型枠）の施工状況
- 目的：1系統でセントルの片側を施工したときのコンクリートの流動状況およびコンクリート品質の確認、ダミージョイントによる断面欠損が50mmの場合のひび割れ誘発状況の確認

[施工状況② : Case3、5、6、7、8]

- 想定：ロングスパンセントルのスパン中央に目地板が設置された条件での施工状況
- 目的：目地板を設置したときのコンクリートの流動状況およびコンクリートの品質の確認、目地板の引抜き状況の確認、断面欠損が100mm～200mmの場合のひび割れの誘発状況の確認

また、Case4～Case7においては、補強鉄筋（主筋D19@200、配力筋D16@300）を設置した。

2.6 測定項目

打設中には、コンクリートの流動性状や締固め・充填状況を目視観察するとともに、圧力計や充填検知センサーを用いて、不可視部の充填状況を観測した。脱型後に圧入時のコンクリートの流れを識別できるように、異なる色の顔料をアジテーター車1台ごとに投入した。

打設翌日の脱型前に、目地板を引き抜き、目地板1枚ごとに引抜き荷重を測定した。

脱型後には、覆工天端部背面の空洞の有無を確認するため、電磁波レーダー探査とコアボーリングを行った。また、硬化コンクリートの品質を確認するため、コンクリートコアの圧縮強度試験、テストハンマー強度試験、トレント法による表面透気試験を行った。ひび割れ誘発目地部では、側壁部と天端部においてコア採取を行い、

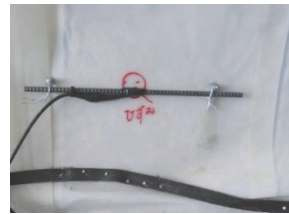


写真-1 ひずみ計測用鉄筋



写真-2 目地部変位計

ひび割れの発生状況を確認するとともに、目地部とバルク部（目地から離れたコンクリート内部）において水銀圧入式細孔径分布測定を行った。

脱型後の目視観察では、コンクリートの流動性状、打設したコンクリートの仕上がり状況、目地板を引き抜いた目地周りの欠損やひび割れの有無を確認した。なお、目地の一部分では、目地表面を露出させて観察し、テストハンマー試験を実施した。

形成した目地によるひび割れの誘発については、その状況を確認するため、スパン中央のコンクリート内部（GL+500mm）に、ひずみゲージを貼り付けた鉄筋（D10）を埋設し測定した。また、熱電対を防水シート面に取り付け、コンクリート温度を測定した。脱型後には、形成された目地を挟んで変位計を設置し、目地部の変位を測定した。写真-1にひずみ計測用鉄筋の設置状況、写真-2に目地部の変位計を示す。

3. 実験結果

3.1 天端部の打設状況

覆工天端部では、目地板により打設空間が遮られており、この箇所でのコンクリートの充填性に注意を払う必要がある。目地板がなく既設側の吹上のみを使用したケース（Case2）、目地板があり、天端充填の最終段階で、

ラップ側の吹上口のみを使用し打設したケース (Case3)、ラップ側の吹上口によりラップ側の空間を充填後、妻型枠側の吹上口により充填を行ったケース (Case5) について、天端部充填時の型枠の圧力を比較するとともに、充填状況を確認した。

打設時の天端部の圧力を図-4、図-5、図-6に示す。圧力の測定位置は図-2に示されている。目地板のないCase2では、各箇所での最大圧力は60kPa~75kPaの範囲内で大きな差はない。これに対し目地板があり、充填の最終段階でラップ側の吹上口のみを使用したCase3では、充填完了時に、目地板のラップ側 (圧力計②) および吹上口に近い箇所 (圧力計①) の圧力が、著しく上昇した。この結果、セントルの許容圧力 (80kPa) を超えるだけでなく、目地板の前後での圧力差が140kPa程度となり、目地板に著しい偏圧が作用し、変形した。一方、目地板があり、充填の最終段階で妻型枠側の吹上口を使用したCase5では、最大圧力は30kPa以下と比較的低い範囲となり、目地板の変形も見られなかった。なお、検測ピン、コア抜き、電磁波レーダー探査の結果、いずれのケースでも完全に充填されていることを確認した。目地の形成状態、目地板の施工性、天端の充填状況を考えると、目地板をセントル中央部に配置した場合には、天端部打設の最終段階では、ラップ側の吹上口のみを使用するのではなく、妻型枠側の吹上口も使用することが望ましい。

3.2 目地板の引抜き

目地板の引抜き状況を写真-3、引抜き後の目地板の状況を写真-4に示す。引抜き後の目地板には、前述の

特殊ポリマーが吸水膨張し、ゲル化したものが付着していることから、目地板とコンクリートの摩擦力の低減効果が想定どおりに発揮されたと考えられる。

各ケースにおける目地板の引抜き荷重の平均値を表-4に示す。Case6を除き、引抜き荷重の平均値は3kN以下であり、人力もしくはレバブロックにより引抜き可能であった。事前の試験では、特殊ポリマーを使用した場合、0.3kN程度の荷重で引抜き可能であったが、これと比較すれば、大きな荷重を要している。この要因として、目地板同士の接触、セントルと目地板の接触、打込み時における特殊ポリマーの剥がれ等の可能性が考えられる。また、Case6では、他のケースと比較して著しく大きな荷重を要しているが、その要因の一つとして、コンクリートに繊維が混入されたことにより、目地板とコンクリートの摩擦抵抗が増大したことが考えられる。このため、繊維を混入するコンクリート配合では、特殊ポリマーの塗布回数を増やす、もしくは引抜きを行う時間を早めるなどの対策が必要と考えられる。

Case5、Case7、Case8では、コンクリートの呼び強度に差異はあるが、これによる引抜き荷重の相関は明確には見られない。このことから、高流動コンクリートのようにセメント量が多く、強度発現性の高いコンクリートを使用した場合でも、普通コンクリートと比較して特別な配慮は不要であると考えられる。

図-7に、Case7における、目地板単位面積あたりの荷重と引抜き材齢との関係を示す。本ケースでは一部の目地板を用い、打設終了直後における引抜きを試行し、残りを翌日に引き抜いた。この荷重は、引抜き荷重を目

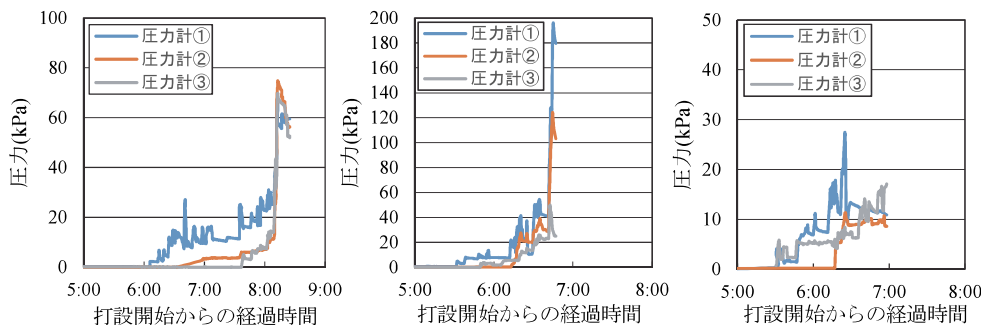


図-4 天端部の圧力(case2) 図-5 天端部の圧力(case3) 図-6 天端部の圧力(case5)



写真-3 目地板引抜き状況



写真-4 引抜き後の目地板の状況

Case	コンクリート種	鉄筋	目地板							
			左			右				
			材質	挿入深さ mm	厚さ mm	引抜き 荷重 kN	材質	挿入深さ mm	厚さ mm	引抜き 荷重 kN
3	21-15-40N	無	アルミ	200	6	-	アルミ	200	6	-
5	21-15-25N	有	鉄	100	6	1.76	鉄	100	3	0.84
6	24-21-20N 中流動(繊維入り)	有	アルミ	200	6	11.51	鉄	200	3	10.49
7	40-60-20N (高流動)	有	鉄	200	3	2.54	鉄	100	3	0.55
8	24-21-20N 中流動(繊維なし)	無	アルミ	200	6	2.68	鉄	200	3	0.66

※ Case3では、荷重計の不備により、引抜き荷重を計測できていない

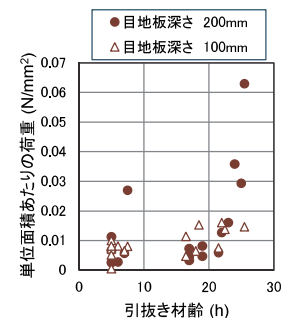


図-7 単位面積あたりの引抜き荷重と材齢 (Case7)

地板がコンクリートと接触している部分の面積で除することにより算出した。目地板の深さが200 mmの場合において、数枚の目地板で荷重が極端に大きくなる場合が見られるが、これ以外では目地の深さが異なっても、面積あたりの荷重の違いは見られない。引抜き材齢が20時間となるまでは、単位面積あたりの引抜き荷重は0.02N/mm²以下であるが、その後材齢の増加に伴い、荷重が増加する傾向を示した。このことから、目地板の引抜きを容易に行うためには、コンクリート硬化後、なるべく速やかに、少なくとも打設翌日の作業開始直後から行う必要がある。

目地板の引抜きには、引抜きに労力を要したCase6以外でも、1打設ごとに2時間程度を要している。作業時間の短縮のためには、効率的に引抜きを行える仕組みを考案する必要がある。

3.3 ひび割れ誘発目地周辺のコンクリートの品質

写真-5、写真-6に、Case3における、目地部の仕上がり状況を示す。Case3では、コンクリート打設時の圧力により目地板が変形したが、これを含めて全ケースにおいて、目地周辺にひび割れや角欠けなどは見られず、目地板引抜き時に、コンクリートに過剰な負荷を与えていないことがわかる。

写真-7に、Case3において、側壁部のひび割れ誘発目地を露出させた面を示す。露出面は平滑であり、ひび

割れなどは見られない。この面においてテストハンマー試験を行った結果を表-5に示す。比較のために、目地付近のコンクリート表面で測定した結果も併記する。目地の露出面でのテストハンマー強度は、付近のコンクリートにおける強度とほぼ同等である。天端部のコアを用いた細孔径分布の測定結果を図-8に示す。目地部とバルク部の細孔径分布に大きな違いはなく、目地の形成によりコンクリートの緻密性に影響する細孔構造に違いがないことがわかる。このことから、目地露出面は、強度、ひび割れ、仕上がり、緻密性の面において、型枠により形成された面と同等の品質であると考えられる。

3.4 目地によるひび割れの誘発

図-9に、計測用鉄筋のひずみを示す。計測用鉄筋は、側壁部の目地背面に埋設されており、目地部にひび割れが誘発された場合、ひび割れ幅の拡大とともに、引張ひずみが増加すると考えられる。このため、計測用鉄筋のひずみを測定することにより、ひび割れの誘発時期の判定と進行状況を判断することができる。目地を形成しないケースについてはひずみの急増が見られないのに対して、目地を形成したケースについては、いずれも打設開始から2日程度～3日程度の範囲でひずみが急増しており、この時期に側壁下部において、ひび割れが誘発されたと考えられる。

写真-8にCase5における目地内正面の状況、写真-



写真-5 目地部の仕上がり(側壁部) 写真-6 目地部の仕上がり(天端部)

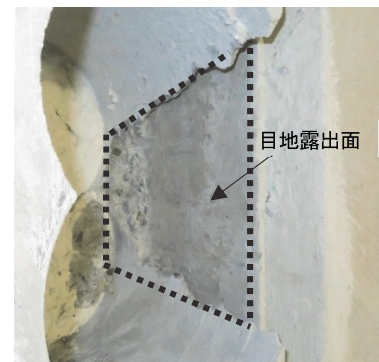


写真-7 目地露出面(Case3)

表-5 目地露出面のテストハンマー強度 (N/mm²)

Case	露出面①	露出面②	目地付近の覆工表面
3	21.4	23.9	24.7

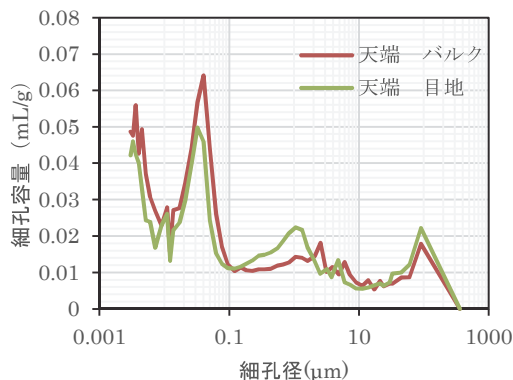


図-8 目地部コアの細孔径分布(case3)

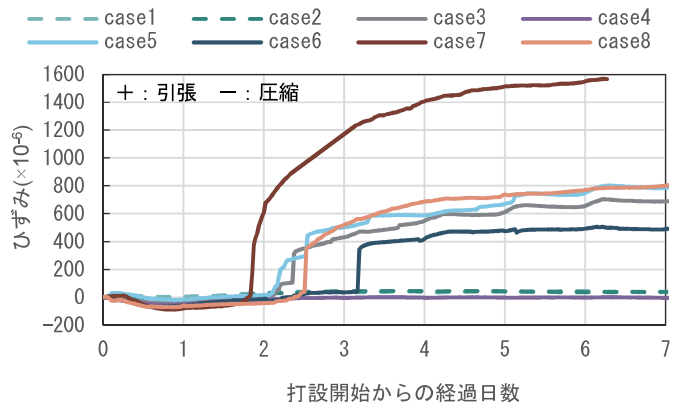


図-9 側壁目地部背面の計測用鉄筋のひずみ



写真-8 側壁目地内のひび割れ (Case5)

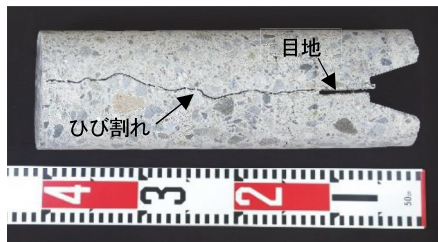


写真-9 側壁目地部コアのひび割れ (Case5)

9に目地部のコアを示すが、実際に目地の背面にひび割れが誘発されていることを確認した。

図-10に、覆工側壁部背面のコンクリートの温度を示す。コンクリートの温度は、打設開始後1日程度でピークを迎え、5日程度まで急激に低下し、その後なだらかに下降している。前述したひび割れが誘発される時期は、急激な温度低下が生じている時期であることから、ひび割れが誘発された要因として、コンクリートの温度低下に伴う収縮が、模擬トンネルの底盤コンクリート（実現場におけるインバートを想定）により拘束されたことが挙げられる。

図-11に、側壁目地部表面の変位を示す。変位計はセンチル脱型後に取り付けているため、目地部のひび割れが変位計の設置前から発生している可能性はあるが、ひび割れ幅の進展状況を把握できる。目地板を設置していないCase1、2、4では、大きな変位の増加が確認されない。これに対して、目地板を設置したCase3、6～8では、変位の変動が大きくなり、コンクリート表面においてもひび割れの誘発を確認できた。ただし、Case5において、他の目地板を設置したケースより変位が少ないのは、目地の深さが100mmと少ないことに加え、変位計の設置時期が遅れたことにより、脱型直後の変位を捉えられていないためと考えられる。また、Case6において、打設後7日～8日に変位が急減しているが、これは次のスパンの打設に伴うコンクリートの側圧の影響と考えられる。変位の急減がCase6のみで見られる理由として、コンクリートに含まれる繊維による影響が予想される。

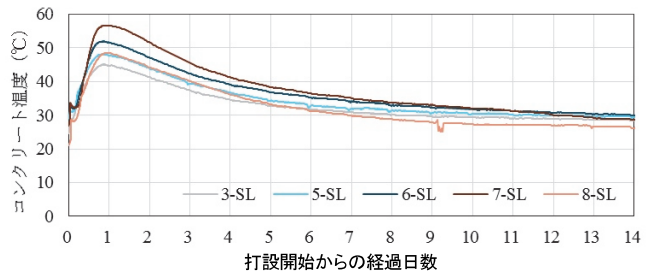


図-10 側壁部のコンクリート温度

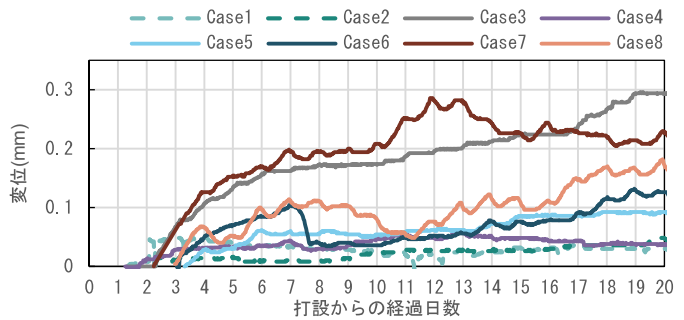


図-11 側壁目地部の表面変位

4. まとめ

ひび割れ誘発目地の形成機構を有するセンチルを用いた実大施工実験により、以下の事項を確認した。

- i. センترل中央に目地板を設置して打設する場合、ラップ側と妻枠側の吹上口を併用することにより、センチルおよび目地板への過剰な負荷を回避し、天端部の確実な充填が可能となる
- ii. 打設前に目地板に接着防止用の特殊ポリマーを塗布し、コンクリート硬化後に引き抜くことにより、人力もしくは簡易な引抜き装置による目地板の引抜きが可能となる
- iii. 引抜き後の目地周辺のコンクリート、および目地形成面は、強度、仕上がり、緻密性の面において、型枠により形成された面と同等の品質である
- iv. ひび割れ誘発目地の形成に伴う断面欠損により、打設開始から2日～3日程度の間ひび割れが誘発されているが、この要因としては下部拘束環境下における温度低下に伴う収縮が考えられる

以上から、目地板を打設前に設置し、コンクリート硬化後に引き抜くことによる目地形成方法について、その施工性、品質、ひび割れ誘発を確認できた。

【参考文献】

- 1) 齋藤隆弘他、「分岐配管を用いた圧入による覆工コンクリートの実大打設実験」、トンネル工学報告集、第28巻、I-3、2018.11
- 2) 土木学会、「コンクリート標準示方書 施工編」、pp.136-137、2017