

論文 圧送管内圧力による高流動コンクリートを用いた自己充填型トンネル覆工施工の充填性評価手法に関する検討

池田 信義*¹・花咲 魁人*¹・橋本 紳一郎*²・小山 広光*³

要旨：覆工コンクリート施工における従来の施工方法での問題点（剥落、色むら、ひび割れ、表面気泡等）の解決と施工の省力化を目的として、高流動コンクリートを型枠下部から圧入する覆工の自動化施工の開発・検討^{1) 2)}を行っている。それらの開発・検討に対し、本研究では型枠への充填完了の評価指標を確立するため、高流動コンクリートの圧入に用いる配管に圧力計を取り付け、管内圧力を測定した。2つのシリーズの実験的検討から、型枠に打ち込まれたコンクリートの自重圧を考慮せず、圧入初期の平均管内圧力を1とした場合の最大管内圧力の上昇値が、充填完了の目安となることが示唆された。

キーワード：トンネル覆工、高流動コンクリート、圧送、管内圧力、充填性評価

1. はじめに

山岳トンネルの覆工コンクリートの打込みは、一般に、側壁部ではコンクリートをスライドセントルの作業窓から投入して行い、順次上へと配管を切り替え、天端部では吹上げ方法で行われるが、この従来の施工工法では覆工コンクリートの充填不良や色むら、ひび割れなどの初期欠陥の発生が懸念されている。

一方、近年の建設作業員の高齢化、熟練工不足の問題やコンクリート構造物への要求品質の高まりといった背景から、近い将来にこれまでの施工方法を継続することが困難となることが予想される。前述の問題を解決する手段として覆工の自動化施工に着目し、高流動コンクリートを用いて覆工を締め固めることなく下部からの圧入のみで構築する手法を考案し実験を行った。これまでの研究¹⁾により圧入の状況を充填センサにて判定する手法が考案されているが、充填センサは測点が非常に多く、計測に多大な労力がかかることや、コンクリート以外の液体も検知してしまうこと、各測点の反応はあるものの、充填完了の目安が感知できないなど様々な課題がある。これらに対しては、管内圧力を計測する手法は、本工法によって、密閉された型枠内へコンクリートが密実に充填される瞬間は、型枠及び圧送管に高い圧力が作用することが予測されるため、型枠内部の充填確認が困難な覆工コンクリートにおいて、圧送管内の圧力の増加を検知することにより充填完了判定が可能であると考え、実験的検討を行った。本研究ではシリーズを2つに分け、検討を行った。シリーズ1ではスプリングライン下を模擬した壁上型枠への圧入を行い、管内圧力の推移により充填完了判定を行った。シリーズ2では地山を想定した実

表－1 使用材料

使用材料	内容
セメント	C：普通ポルトランドセメント 密度：3.15g/cm ³
練混ぜ水	W：地下水
細骨材	S1：山砂，茨城県行方市 表乾密度：2.58g/cm ³
	S2：砕砂，栃木県佐野市 表乾密度：2.69g/cm ³
粗骨材	G：硬質砂岩碎石 2005，茨城県つくば市 表乾密度：2.69g/cm ³
混和剤	SP：高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系化合物と増粘成分)
	AE：AE 剤

表－2 コンクリート配合表

W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	C	S1	S2	G	SP
41.6	48.7	4.5	170	409	576	257	904	6.95

物大模擬構造物を作製し実際のセントルにて圧入を行い、管内圧力の推移と充填完了判定の目安を検討した。

2. シリーズ1（壁上型枠への圧入試験）

シリーズ1では実物大構造物への適用の前段階として、セントル内を流動する高流動コンクリートの圧送性及び、型枠への充填性を事前に確認するためにセントル下部を模擬した壁上型枠を用い、圧送性、充填性、圧入終了判定の目安を把握することを目的として検討を行った。

2.1 実験概要

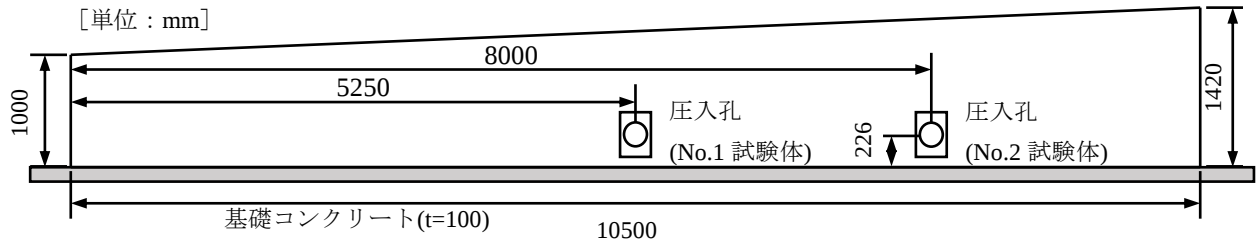
2.1.1 使用材料および高流動コンクリートの配合

表－1に使用材料を示し、表－2に高流動コンクリー

*1 千葉工業大学大学院 創造工学研究科 都市環境工学専攻（学生会員）

*2 千葉工業大学 創造工学部 都市環境工学科 准教授（正会員）

*3 佐藤工業株式会社 技術センター 土木研究部（正会員）



図－1 壁上型枠概要図（側面）

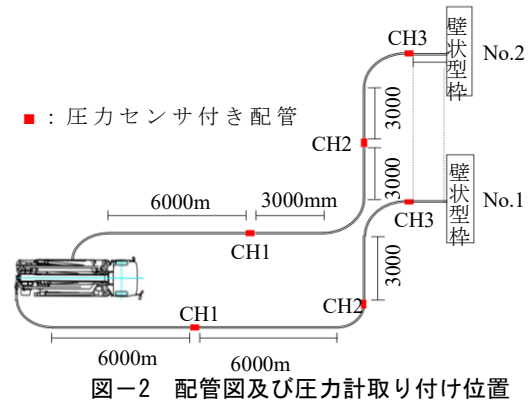
トの配合を示す。これまでの実績^{1) 2)}を基に目標スランプフローは $600 \pm 100 \text{ mm}$ 、目標空気量は $4.5 \pm 1.5 \%$ とし、U 型充填高さは、障害無し：300mm（自己充填ランク 3 程度）を目標値とした。1 バッチ当たりの練混ぜ量は 1.5 m^3 で、1 台のアジテータ車に 2 バッチ分 3 m^3 を積み込んだ。プラントから実験ヤードまでの運搬時間は 15 分程度であり、プラント製造時及び実験ヤード到着後にスランプフロー試験及び空気量試験を行い、V 漏斗試験、U 型充填試験にてフレッシュ性状を確認した後に、型枠への圧入を開始した。

2. 1. 2 型枠概要

図－1 に壁上型枠の概要図を示す。型枠は基礎コンクリート（長さ $25.5 \text{ m} \times$ 幅 $3.0 \text{ m} \times$ 厚さ 0.1 m ）の上に、高さ 1.21 m （中央部）、長さ 10.5 m 、厚さ 0.3 m （容積約 3.8 m^3 ）の壁上型枠を作製した。本実験では高流動コンクリートの流動及び充填状況を直接確認するため、型枠片面にアクリル樹脂製の透明型枠を配置した。壁上型枠は 2 体作製し、それぞれ No.1 試験体、No.2 試験体とした。No.1 試験体は型枠中央に圧入口を設置し、No.2 試験体は中央から 2.75 m （型枠左端部から 8.0 m ）の位置に圧入口を設置した。圧入口は $\phi 130 \text{ mm}$ で圧入終了後、配管の取り外しが可能となる様にシャッターバルブを設置した。

2. 1. 3 配管及び圧力計設置位置

圧送にはピストン式コンクリートポンプ車（最大吐出量： 77 m^3 ）を使用し、型枠下部に設けた圧入口から高流動コンクリートを型枠内に圧送した。配管図及び圧力計取り付け位置及び取り付け状況を図－2 に示す。圧送に使用した配管は 5B 管（内径 125 mm ）を使用し、2 つの試験体で水平換算距離とベント管の数を同一として同じ圧送条件とした。ポンプ車付け根から試験体までの水平換算距離は 49.1 m である。コンクリートの配管内での圧送状態及び、型枠内での充填状況が管内圧力に与える影響を検討するため、それぞれの圧送管に圧力計を 3 箇所ずつ設置し、管内の圧力を測定し、充填完了判定の可否について検証を行った。圧力計の取り付け位置は、圧送、充填状況の確認のために、ポンプ車根元付近、圧入口付近と配管の中間地点の 3 点について計測した。



図－2 配管図及び圧力計取り付け位置

2. 2 実験結果及び考察

2. 2. 1 高流動コンクリートの性状

表－3 に高流動コンクリートのフレッシュ性状試験結果を示す。いずれの試験体においても 1 台目のアジテータ車から試料を採取し、プラント及び実験ヤードにてフレッシュ性状試験を行った。コンクリート温度および外気温の影響により、いずれの場合においても実験ヤード到着後のスランプフローはプラント出荷時から低下したものの、U 型充填試験、V 漏斗試験において、流動性および材料分離抵抗性は自己充填ランク 3 相当を満足したことを確認したため、圧送実験を実施した。

2. 2. 2 高流動コンクリートの圧送

コンクリート吐出量は $18 \text{ m}^3/\text{h}$ （ポンプ車操作盤読み値）で一定とした。各試験体で圧送に要した時間は、No.1 試験体で 13.3 分、No.2 試験体で 13.7 分であった。いずれの試験体においても型枠天端部まで完全に充填されたことを確認し、圧送終了とした。

2. 2. 3 圧力計測結果

図－3 に計測で得られた圧力波形全体図を示す。いずれの試験体においても各計測点において、圧力波形の全体に大きな乱れは見られず、また、型枠内へ圧送及び充填するコンクリートの状態の目視確認でも連続的で途切れることなく、順調な圧送状態であったことから、すべての圧送で順調圧送状態であったと判断した。また、圧力は徐々に上昇し、充填終了時にはピーク値となった。

図－4 に No.1 試験体における平均管内圧力と水平換算距離との関係を示す。従来の圧送³⁾ではポンプ車根元から圧力測定管までの距離が離れるにつれて管内圧力の値は小さくなっていたが、本圧送ではポンプ車根元より

表-3 フレッシュ性状試験結果

試験体 No.	試験場所	経過時間 (min)	スランブフロー (mm)	スランブフロー到達時間(sec)		空気量 (%)	V 漏斗流下時間 (sec)	U 型充填高さ (mm)	コンクリート温度 (°C)
				50cm	停止				
1	プラント	5	650×640 (645)	3.0	28.3	4.5	-	-	-
	実験ヤード	30	518×497 (510)	4.4	15.9	4.9	5.3	311	33
2	プラント	5	650×645 (645)	3.1	23.8	4.5	-	-	-
	実験ヤード	30	521×516 (520)	4.0	13.4	4.8	8.7	330	31

一番遠い計測点 (CH3) がよりポンプ車に近い CH2 の値を超えるか同等程度の圧力であった。この傾向はいずれの試験体においても確認された。これは、壁状型枠に圧入する力と、型枠に圧入されたコンクリートが自重の影響を受け、上方圧送の際に生じる状況と同様に管内圧力が高まったと考えられる。また、圧入開始時よりも圧入終了時のほうが全体的に高い圧力が作用していることが確認できた。それらの詳細な状況は、図-5 に示す。平均管内圧力の経時変化から、管内圧力は充填初期の時点で急激に上昇するのではなく、コンクリートの圧入と型枠内への充填に伴い、徐々に増加する状況が確認できたため、充填完了判定の目安には平均管内圧力や、その圧力比を指標にできると考えられる。

図-6、図-7 に圧入中の平均管内圧力を 1 とした場合の最大管内圧力 (ピーク値: 図-3 の赤丸で示した部分) を示す。いずれの試験体も最大管内圧力の圧力比の上昇が確認され、充填完了の目安となり得ることが示唆された。本実験での圧入終了を判定する計測位置は自重圧の影響を受けにくく、また、CH2, 3 は圧力比が大きな値となって表れることを確認した。

写真-1 に脱型後の No.1 試験体の外観を示す。いずれの試験体も目視により、大きな表面気泡などは確認されず、コンクリート表面は密実に充填されていたことから、上記の圧力を用いた充填完了の評価指標の有効性が示唆された。

3. シリーズ 2 (実物大構造物への圧入試験)

シリーズ 2 ではシリーズ 1 で得られた知見を基に、実物大のセントルを用いてセントル下部から高流動コンクリートを充填する方法で圧送性及び型枠への充填性を確認するとともに、配管に設置した圧力計から圧入終了判定の目安を把握することを目的に検討を行った。

3.1 実験概要

3.1.1 使用材料および高流動コンクリートの配合

使用材料はシリーズ 1 と同様のものを使用した。コンクリートの配合を表-4 に示す。コンクリートの配合はシリーズ 1 と同様に、スランブフローは $600 \pm 100 \text{ mm}$ 、空気量は $4.5 \pm 1.5 \%$ を目標値とし、U 型充填高さは、障害無し: 300 mm (自己充填ランク 3 程度) を目標値とした。プラントから実験ヤードまでの運搬時間は 15 分程

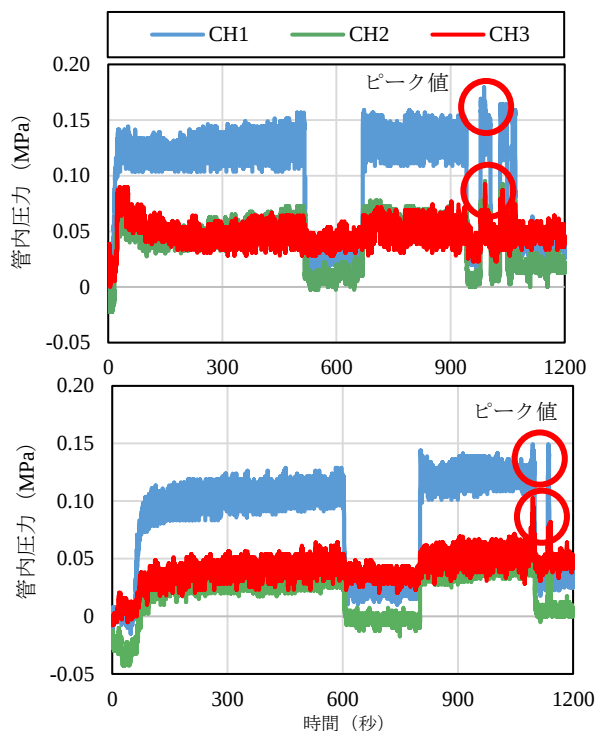


図-3 圧力波形全体図
(上: No. 1 試験体, 下: No. 2 試験体)

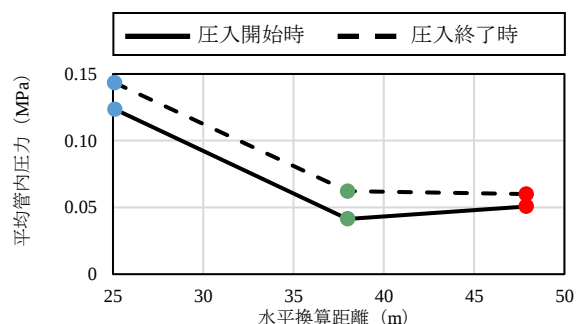


図-4 平均管内圧力と距離の関係 (No. 1 試験体)

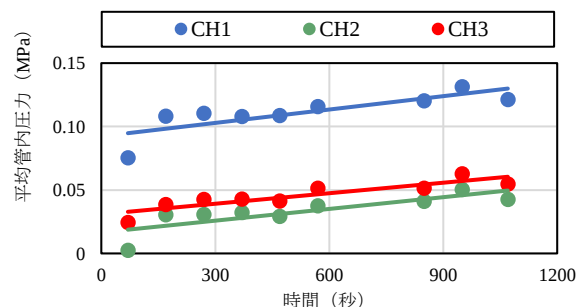


図-5 平均管内圧力の経時変化 (No. 2 試験体)

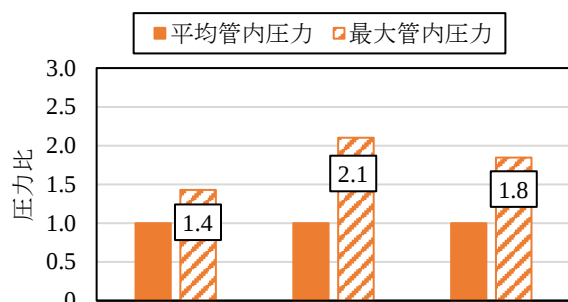


図-6 平均管内圧力を1とした場合の最大管内圧力の圧力比 (No.1 試験体)

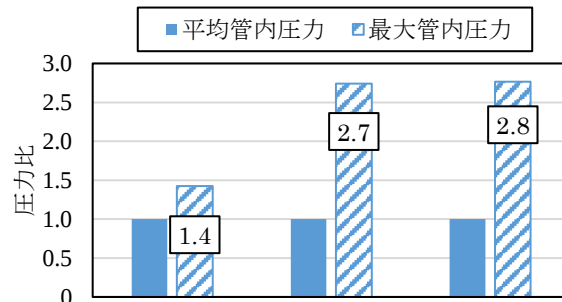


図-7 平均管内圧力を1とした場合の最大管内圧力の圧力比 (No.2 試験体)



写真-1 脱型後の試験体外観

度であり、プラント製造時にスランプフロー試験及び空気量試験を行い、実験ヤードではスランプフロー試験、空気量試験、U型充填試験にてフレッシュ性状を確認し、型枠への圧入を開始した。

3.1.2 型枠概要

写真-2 に覆工実物大実験装置の設置状況を示す。今回の実験は地上に地山を模擬した覆工実物大実験装置を構築し実験を行った。型枠はコンクリート擁壁上に鋼製支保工を建て込み、内面にはキーストンプレートを張り付けた。実施工の条件と合わせるため、キーストンプレートの内面には防水シートを敷設した。型枠の大きさは、内空幅 8.42m、天頂高さ 6.21m、奥行き 10.5m、覆工厚 400mm (容積約 84m³) であり、内部に液圧対応のため補強したセントルを組み立てた。型枠面の縦断方向中央部下端には、高流動コンクリートの圧入口を左右 1箇所ずつ配置した。圧入は下端からのみ行い、配管切替え装置を底版部に設置した。

3.1.3 配管及び圧力計取り付け位置

配管図及び圧力計取り付け位置を図-8 に示す。ポンプ車根元から圧入口までの水平換算距離は 51.3m でポンプ車から 21.5m 地点までは 5B 管 (内径 125mm) それ以降は 6B 管 (内径 150mm) を使用した。圧力計の取り付け位置は、シリーズ 1 同様に、圧送、充填状況を確認するためポンプ車付近、枝分かれした左右の圧入口付近、配管の中間地点付近に設置した。

3.2 実験による充填状況及び考察

3.2.1 高流動コンクリートのフレッシュ性状試験結果

表-4 コンクリート配合表

W/C	s/a	空気量	単位量(kg/m³)						
			W	C	S1	S2	G	SP	AE
41.6	48.7	4.5	170	409	576	257	904	7.77	0.004

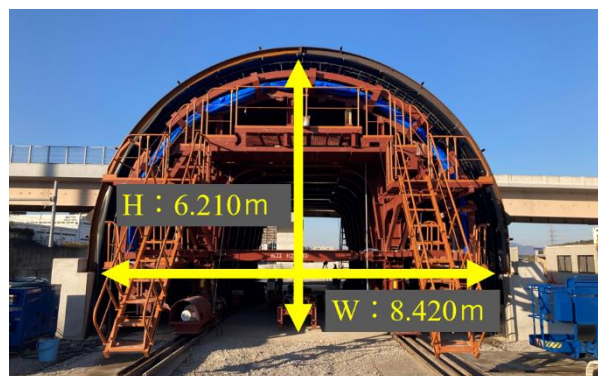


写真-2 覆工実物大実験装置設置状況

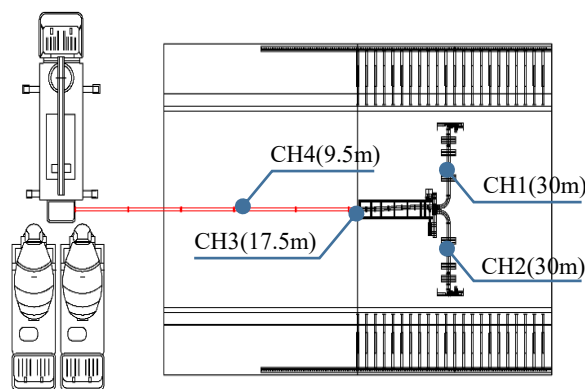


図-8 配管及び圧力計取り付け位置 (平面図)

表-5 フレッシュ性状試験結果

アジテータ車 No.	試験場所	スランブ フロー (mm)	スランブフロー 到達時間(sec)		空気量 (%)	U型 充填高さ (mm)	300mm 到達時間 (sec)	コンクリート 温度 (℃)	外気温 (℃)
			50cm	停止					
1	プラント	665×653 (660)	2.9	22.0	4.7	-	-	17	-
	実験ヤード	682×665 (675)	3.1	28.3	4.9	347	8.8	19	18
11	プラント	560×555 (560)	5.5	12.1	4.7	-	-	20	-
	実験ヤード	595×582 (590)	2.9	25.3	4.8	347	6.8	19	21

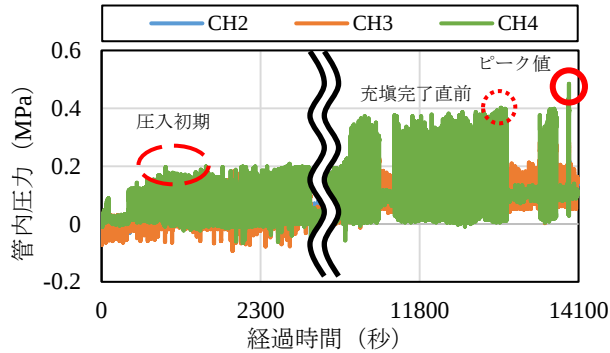


図-9 圧力波形全体図

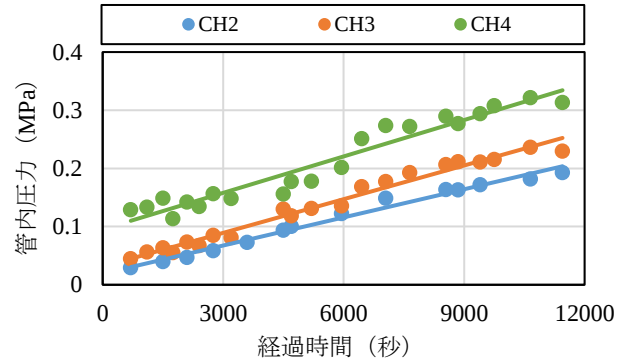


図-10 経過時間による管内圧力の推移

表-5 に高流動コンクリートのフレッシュ性状試験結果を示す。すべてのアジテータ車、目標としていたスランブフロー、空気量、U型充填高さは目標値を満たし、流動性および材料分離抵抗性は自己充填ランク3相当であると判断されたため、圧送実験を実施した。

3.2.2 高流動コンクリートの圧送及び圧送状態

コンクリートの圧送は、左右に設置された圧入口から交互に行った。圧送するコンクリートの偏りが無いように、ピストン式コンクリートポンプ車のストロークが所定の回数に至った段階で、左右の切り替えを手動にて行った。コンクリート吐出量は、圧送開始時に25m³/hで圧送を行い、それ以降は28～37m³/hで圧送を行った。コンクリートの圧入を行った時間は圧入開始から3時間14分であり、圧送数量は84m³であった。アジテータ車数は21台（4m³/車）で単位時間当たりの平均圧入速度は26.0m³/hであった。圧入終了の判定は、所定の容積以上を圧入した他に、つま杵の打音による充填確認、つま杵に作用した圧力の状況などから圧入の終了を判断した。図-9に計測で得られた圧力波形全体図を示す。圧送状態は、圧送時や圧入口への切り替え時、その後の圧送も、特にポンプ車及び管内圧力の急激な上昇や異常などはなく、連続的に途切れることなく圧送ができたことから、順調圧送状態であったと判断した。

3.2.3 圧力計測結果

図-10に経過時間による管内圧力の推移を示す。シリーズ1とは異なり、従来の圧送³⁾と同様に、水平換算距が大きくなるにつれて、平均管内圧力は低くなる結果となった。一方で、シリーズ1と同様に全てのCHにおいて、平均管内圧力は時間経過により、徐々に大きくなる傾向がみられた。これは、型枠に圧入されたコンクリー

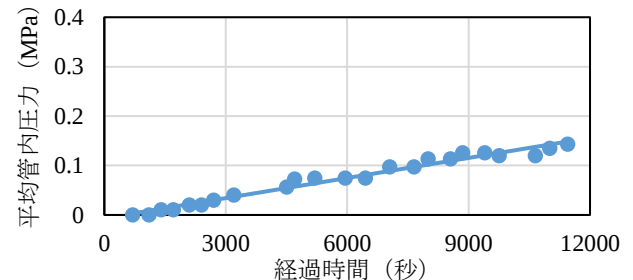


図-11 ピストン未稼働時の圧力の推移
(CH2: 自重圧)

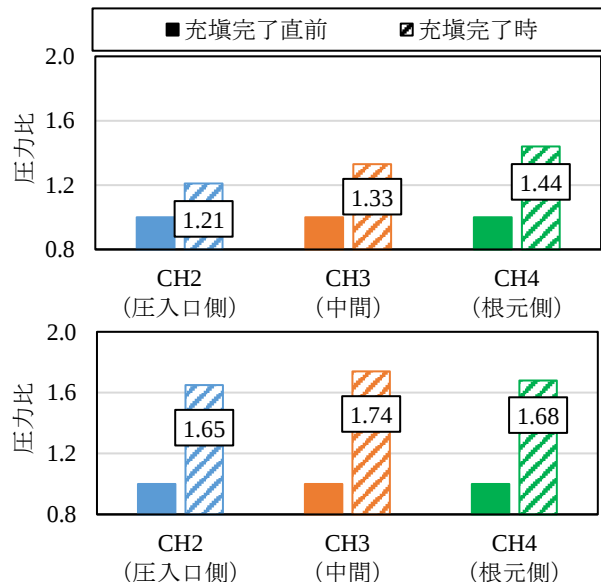


図-12 充填完了直前の値を1とした場合の
最大管内圧力の圧力比
(上: 自重圧補正無, 下: 自重圧補正有)

トが多くなるにつれ、増加していることから、コンクリートの自重圧が影響していると考えられる。次に、左右の圧入口への切り替え時に生じる、圧入していない片側

(CH1 または CH2) の管内圧力負荷をコンクリートの自重圧とした。図-11 に CH2 におけるピストン未稼働時の管内圧力（以下、自重圧）の推移を示す。コンクリートが圧入されるにつれて、自重圧の値は急激に上昇するのではなく徐々に上昇していく傾向が見られた。自重圧から型枠内でのコンクリートの充填状況も想定できるため、今後、他の計測とともに詳細を検討していく予定である。

図-12 に、充填完了直前（図-9 点線赤丸部）を 1 とした場合の最大管内圧力（図-9 赤丸部）の圧力比を示す。コンクリートの自重圧が配管全体に影響していると考え、コンクリートの自重圧を配管全体の管内圧力から差し引いた結果を自重圧補正有として示す。自重圧補正有での値の方が圧力比はやや大きかった。加えて、最も低い値でも 1.65 倍を示し、自重圧補正有の圧力比の方が補正無の圧力比よりも大きく、双方を比べると補正有の方が判定しやすい結果となった。しかし、この結果は充填完了直前の圧力と充填完了後の最大管内圧力の値を比較しており、実施工において充填が完了する直前のタイミングを見つけることは困難である。そこで、圧送が安定し、型枠にコンクリートが充填された時点を押入初期（図-9 破線丸部）とし、圧入初期の平均管内圧力を 1 とした場合の最大管内圧力（図-9 赤丸部）の値の圧力比を図-13 に示す。自重圧補正有よりも補正無の圧力比の値が全ての測点において大きく、中でも CH2（圧入口側）の補正無の値は 8.2 倍であった。CH2（圧入口側）において、充填完了前を 1 とした場合の最大管内圧力の圧力比と比べてみても、非常に大きな圧力比となっていることが分かる。よって、圧入初期の平均管内圧力と最大管内圧力の圧力比（自重圧補正無）から充填完了を確認する目安の判断が出来ると考えられる。しかし、どの程度の圧力比が充填完了の目安の値となるのかについては、型枠形状や圧入量と共に今後も検討していく予定である。

写真-3 に脱型後の覆工コンクリートの外観を示す。コンクリート表面には充填不良等は確認されず、巻き込み空気が入りやすいスプリングライン下方にも表面気泡はなく、良好な状況であった。また、トンネル天端部も密実に充填されており、今回の圧力の結果から圧入終了判定も可能であることが示唆された。

4. まとめ

- (1) シリーズ 1 では型枠へのコンクリートの圧入により、配管内の圧力が上昇した。これにより、管内圧力の上昇とその圧力比で、型枠への充填完了の目安となり得ることが示唆された。
- (2) シリーズ 2 では実物大構造物へのコンクリートの

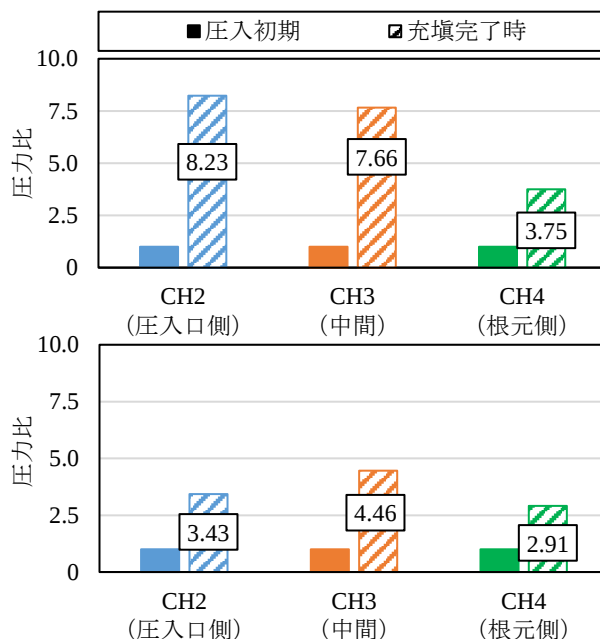


図-13 圧入初期の平均管内圧力の値を 1 とした場合の最大管内圧力の圧力比
(上：自重圧補正無，下：自重圧補正有)



写真-3 脱型後の覆工コンクリート外観

圧入により、シリーズ 1 と同様に圧入とともに配管内の圧力が徐々に高くなった。また、圧入口側での計測で圧入開始付近の平均管内圧力（自重圧補正無）を 1 とした場合の平均管内圧力の圧力比がコンクリートの圧入完了の目安となり得ることが示唆され、本研究では圧入完了時に 8 倍のように非常に高い値を示した。

参考文献

- 1) 弘光太郎, 小山広光, 藤原正佑, 小野知義, 宇野洋志城: 自己充填コンクリートを用いた覆工自動化施工の開発—実物大実験による充填状況および出来映えの確認—, 土木学会第 77 回年次学術講演会, VI-299, 2022.9
- 2) 小山広光, 弘光太郎, 森賢宇, 宇野洋志城: 自己充填コンクリートを用いた覆工の自動化に関する研究 (その 1), 佐藤工業技術研究所報, No.45, 2020
- 3) 橋本紳一郎, 渡辺健, 橋本親典, 伊達重之: 振動デバイスをを用いたポンプ圧送性の視覚化, コンクリート工学年次論文集, Vol.53, No.5, 422-426, 2015