

論文 自己充填覆工構築システムにおける圧送管内圧力による充填性評価に関する検討

永島 啓介*1・小山 広光*2・弘光 太郎*3・橋本 紳一郎*4

要旨：近年の建設業界は、作業員の高齢化、熟練工不足といった問題や、構造物に対する要求品質向上といった背景から、これまでの施工方法を継続することは困難になりつつある。そこで、このような問題の解決のためにトンネル覆工に着目して、自己充填コンクリートを用いてセントル下部から圧入する手法の検討を行った。本研究では型枠への充填性、充填完了の目安の把握のために配管に圧力計を設置して、圧送時の管内圧力を測定した、2つのシリーズの実験から、型枠に打ち込まれた自重圧から充填状況の把握、圧送初期の平均管内圧力と最大管内圧力の圧力比から圧入終了の目安の把握が可能であると示唆された。

キーワード：トンネル覆工、自己充填コンクリート、圧送、管内圧力、充填性評価

1. はじめ

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、締め固める方法で行われているが、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の要求品質向上といった背景から、近い将来にこれまでの施工方法を継続することは困難となることが予想される。

そこで、前述の問題を解決する手段として覆工コンクリートの品質を確保しつつ、省力化、省人化をはかることを目的として、「自己充填覆工構築システム」が開発されている。本研究では、自己充填コンクリートを用いて締め固めを行う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⁾では圧入の状況を充填センサにて判定する手法を用いているが、充填センサは測点が非常に多く、計測に多大な労力が必要なことや、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の課題がある。これらに対し、既往の研究²⁾を参考とした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で充填完了判定、また、セントル内側に設置した振動加速度計から充填状況の把握が可能であると考え、実験的検討を行った。今回の実験では、実際のセントルを用いて、圧入実験を2つのシリーズに分け、検討を行った。シリーズ1では圧入口を型枠延長方向中央部に片側

1箇所（計2箇所）設置し、管内圧力の推移により充填状況の把握、充填完了の判定、振動加速度計により充填状況の目安の検討を行った。シリーズ2では圧入口を片側2箇所（計4箇所）設置し、管内圧力の推移により充填状況の把握、充填完了の判定を行った。

2. シリーズ1（圧入口片側1箇所）

シリーズ1では、既往の研究²⁾より下部から圧入することの有効性、管内圧力の計測による充填状況の把握が可能であることが示唆されたため、本シリーズでは、実物大のセントルを用いてセントル下部から自己充填コンクリートを充填する方法で、管内圧力の計測及び型枠内面に設置した圧力センサにより充填完了の目安を把握することを目的として検討を行った。また、型枠内面に設置した振動加速度計から充填状況の目安の検討を行った。

2.1 実験概要

2.1.1 使用材料および自己充填コンクリートの配合

表-1 に使用材料を示し、表-2 に自己充填コンクリートの配合を示す。目標スランブフローは $600 \pm 50 \text{mm}$ 、目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ とし、U形充填高さは、障害無し：300mm（自己充填ランク3程度）を目標値とした。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ブフロー試験及び空気量試験を行い、U形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構築したコンクリート擁壁に鋼製支保工を設置し、内面にはキーストンプレートを貼り付けて模

*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 佐藤工業株式会社 技術センター 土木研究部 主席研究員（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）

*4 千葉工業大学 創造工学部 都市環境工学科 准教授（正会員）

擬地山を構築した。実施工の条件を模擬するためにキーストンプレート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 10.5 m、覆工厚 400mm (容積 84m³) であり、内部に液圧対応のため補強したスライドセントルをセットした。(図-2 縮模様部分) 型枠延長方向中央部下端には、自己充填コンクリートの圧入口を左右 1 箇所ずつ (計 2 箇所) 設置し、圧入は下端からのみ行った。

2.1.3 配管及び圧力計設置位置

図-2 に配管図及び圧力計取り付け位置を示す。配管条件としては、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) を使用し、それ以降は 6B 管 (内径 150mm) を使用した。圧力計は、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に、ポンプ車根元付近、中間地点、枝分かれした左右の圧入口付近の計 4 箇所設置した。スライドセントル型枠面には、圧力センサ (21 箇所)、振動加速度計を 8 箇所設置した。

2.2 実験結果及び考察

2.2.1 自己充填コンクリートのフレッシュ性状試験結果

表-3 に自己充填コンクリートのフレッシュ性状試験結果を示す。全てのアジテータ車において、スランプフロー、空気量、U 形充填高さが目標値を満たし、流動性及び材料分離抵抗性は自己充填ランク 3 相当であることを確認し、圧入実験を行った。

2.2.2 自己充填コンクリートの圧送及び圧送状態

圧送数量 84m³ に対して、アジテータ車の搬入台数は 21 台であり、圧入の終了時間は 3 時間 14 分であった。コンクリートの圧送は、左右に設置した圧入口から交互に行った。圧送するコンクリートの高さに偏りがないように、スライドセントル作業窓からの目視による打ち上がり高さの確認、ピストン式コンクリートポンプ車のピストン回数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。圧送速度としては 20~30m³/h で圧送を行い、平均で 27.2m³/h となった。圧入終了の目安は、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の確認から判断した。図-3 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、圧入口切り替え時、再開後も途切れることなく連続的に行うことができ

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: 硬質砂岩砕石 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

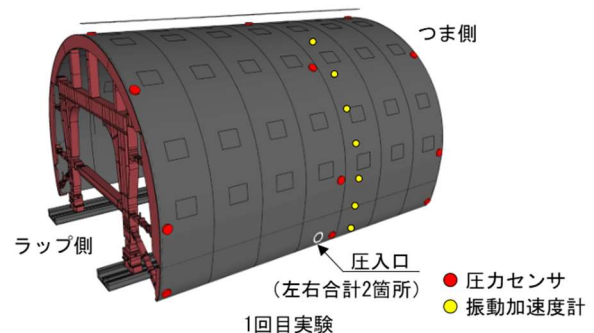


図-1 覆工実物大実験装置設置状況

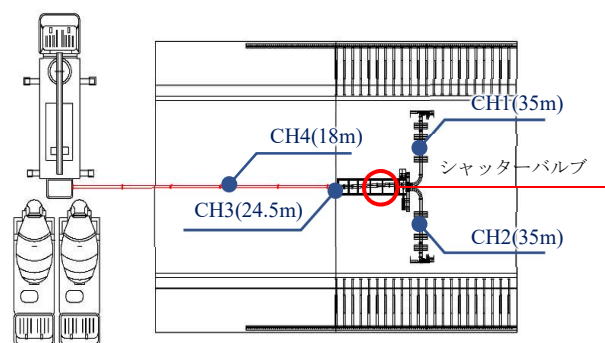


図-2 配管図及び圧力計取り付け位置 (平面図)

表-3 フレッシュ性状試験結果

アジテータ車 No.	試験場所	スランプフロー (mm)	スランプフロー到達時間(sec)		空気量 (%)	U 形充填高さ (mm)	300mm 到達時間 (sec)	コンクリート温度 (°C)	外気温 (°C)
			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

順調圧送状態であったと判断した。

2.2.3 圧力計測結果

図-4 に経過時間による平均管内圧力の推移を示す。通常の圧送と同様に、水平換算距離が長くなるにつれて、平均管内圧力が小さくなる傾向があったことに加えて、全ての計測位置で平均管内圧力の緩やかな上昇が見られた。これは、圧入された型枠内のコンクリートによる自重の影響を受け、コンクリートの自重圧として管内圧力の値が見かけ上、大きくなったと考えられる。したがって、管内圧力の値が大きくなることで、型枠内にコンクリートが徐々に充填していくことが確認できると示唆される。

図-5 に CH2 で計測された自重圧と型枠の圧入口付近に設置した圧力センサの関係を示す。自重圧の値と、圧力センサの結果を比較すると、概ね一致することがわかる。そのため、配管に設置した圧力計から得られた自重圧の値は型枠に設置した圧力センサの値と同等であり、配管の圧力計のみで型枠内の充填状況を把握できることが明らかとなった。

図-6 に圧入初期(図-3 点線部)を1とした場合の最大管内圧力(図-3 赤丸部)を示す。圧力計の設置位置ごとに比較すると、圧入口側である CH2 が最も大きな圧力比を示しており、8.23 倍となっている。最も低い値でも 3.75 倍とどの CH でも圧入終了の目安の把握が可能であることが分かる。现阶段では、8 倍程度と大きな値となって表れるため、圧入口側(CH2)の地点での計測が圧入終了の目安として最も適していると考えられる。

図-7 に振動加速度計の設置状況、計測結果を示す。(左:予備実験 右:本実験)を示す。予備実験とは、振動加速度計により充填状況把握の有効性を検討したもので、壁状型枠の片面をアクリル樹脂製の透明型枠にし、コンクリートを本実験と同様に圧入することにより、その流動状況を目視で確認できる型枠を用いて実験を行った。加速度計の計測については、既往の研究³⁾で行われている配管にマグネット式の加速度センサを設置し配管壁に圧送中のコンクリートの骨材が衝突を繰り返す、その衝突による計測結果の状況から圧送性の判定をする簡易手法を応用したものであり、圧入によるコンクリートが加速度計計測位置を通過する際に生じる振動を計測することにより充填状況把握の可能性について検討したものである。予備実験では、コンクリートが振動加速度計の計測位置に到達する直前に波形の変化が見られ、値が大きくなることから、コンクリートが到達していることが判定できた。しかし、本実験においては、圧入によってコンクリートが充填し、計測位置を通過する前後から加速度波形の値は大きく乱れており、充填状

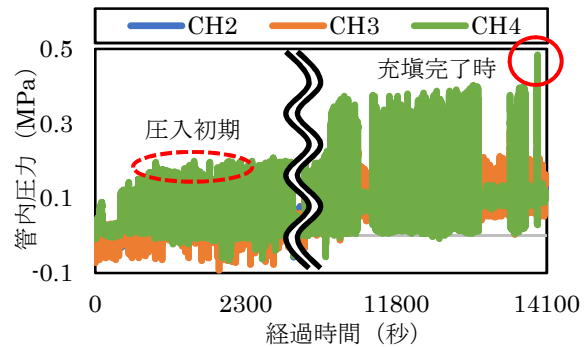


図-3 圧力波形全体図

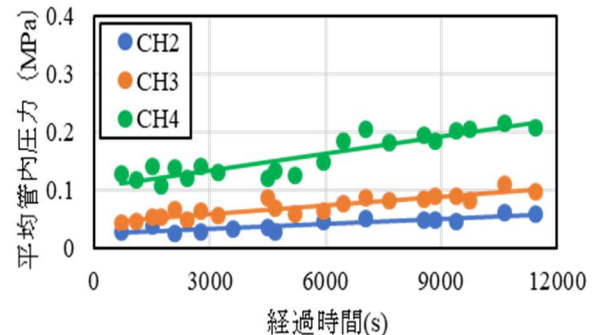


図-4 経過時間による管内圧力の推移

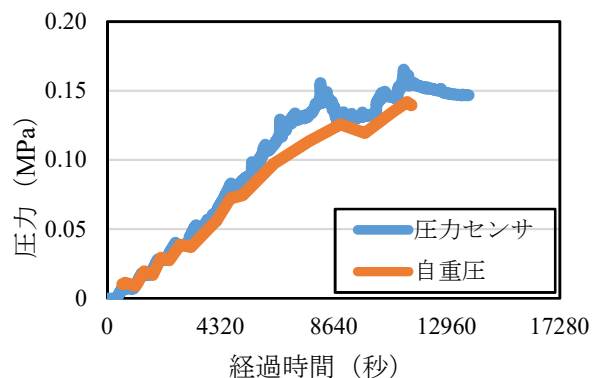


図-5 圧力センサと自重圧(CH2)の圧力の関係

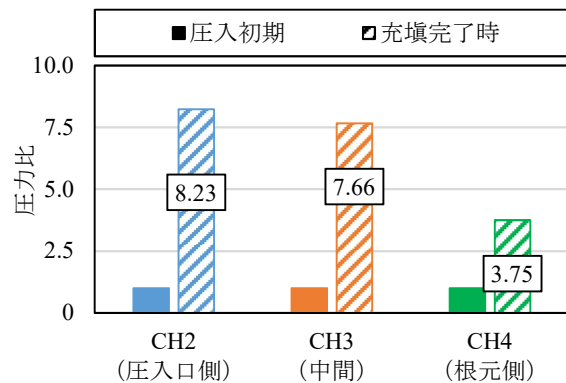


図-6 圧入初期の平均管内圧力の値を1とした場合の最大管内圧力の圧力比

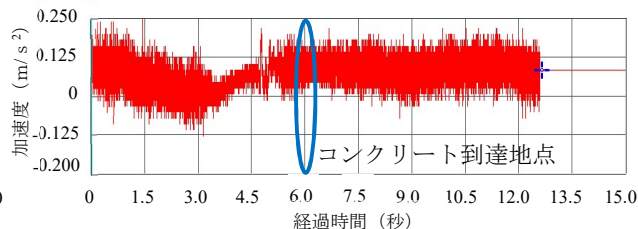
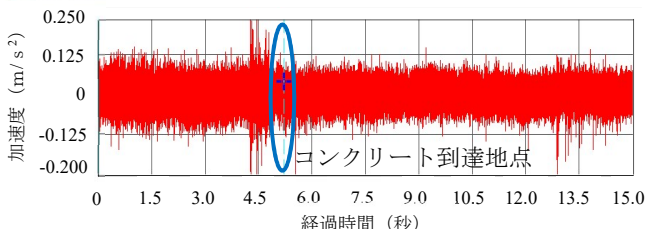
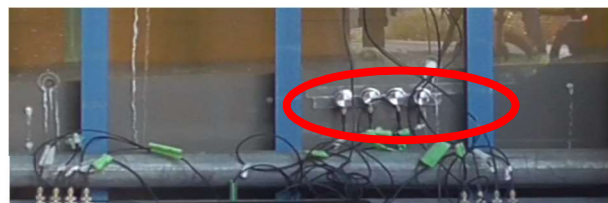


図-7 振動加速度設置状況，計測結果（左：予備実験 右：本実験）

況の把握をすることはできなかった。これは、加速度センサ自体のセンサ感度の問題、型枠周辺の振動の影響、設置位置の問題など様々であるが、簡易的な手法であるため引き続き課題検討を行い、充填状況の把握に有効な手段として検討を行っていく予定である。以上から、シリーズ2では圧力のみ注目して評価を行った。

2.2.4 覆工の出来形評価

写真-1 に脱型後の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やコールドジョイント等はなく、従来工法において発生が懸念されていたスプリングライン下方の巻込み空気による表面気泡も確認されなかった。

これにより、自己充填コンクリートの圧入による構築が可能であることが示唆された。また、圧入時の管内圧力から充填状況の把握、圧入終了の目安の把握が可能であることが確認された。



写真-1 脱型後の覆工コンクリート外観

3.シリーズ2（圧入口片側2箇所）

シリーズ1では、充填状況としては、圧入口を延長方向中央部に設置したため、左右の圧入口直上付近のコンクリートが天端部において合流した後、両端部に向かって充填が進んでいくことが確認された。実施工では、初回の覆工以降、片側端部に既設の覆工が存在する状況での施工となる。天端部ラップ側に空気の逃げ道がない状態となり、天端における未充填箇所の発生が懸念される。そのため、シリーズ2ではラップ側から充填させるため

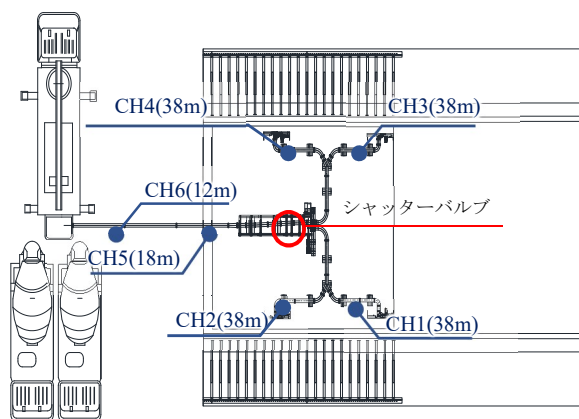


図-8 配管図及び圧力計取り付け位置（平面図）

表-4 フレッシュ性状試験結果

アジテータ車	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 (%)	コンクリート温度 (°C)
				50cm	停止		
1 台目	プラント	5	635	2.3	17.5	5.2	31
	実験ヤード	30	600	-	-	5.4	31
21 台目	プラント	5	-	-	-	-	-
	実験ヤード	30	615	-	16.6	4.8	-

に圧入口の数及び配置を変更した。また、位置の変更をしたことによる管内圧力の変化などを分析した。

3.1 実験概要

3.1.1 使用材料及び自己充填コンクリートの配合

使用材料及び配合、フレッシュ性状試験についてはシリーズ1と同様とし、運搬時間も約25分程度であった。

3.1.2 型枠概要

型枠は内空幅 8.42m、天頂高さ 6.21m、奥行き 10.5m、覆工厚 400mm (容積 84m³) であり、内部に液圧対応のため補強したスライドセントルをセットした。(図-8 縮模様部分) シリーズ1に対し、シリーズ2では天端部ラップ側の未充填箇所の発生が懸念されるため、天端部においてラップ側から充填させることを目的として、圧入口は、1つ目がシリーズ1で設置した圧入口の1.5mつま側、2つ目はラップ側に設置し、左右2箇所ずつ計4箇所設置した。図-8に配管図及び圧力計取り付け位置を示す。ポンプ車根元付近、中間地点、圧入口が2股に分かれた際の管内圧力に与える影響を確認するために2股に分かれた配管にそれぞれ圧力計を設置した。

3.1.3 圧入方法

シリーズ1同様、型枠の下端から圧入する方法で行ったが、天端部においてラップ側からの充填させるため、型枠の肩部から上方はラップの圧入口のみを使用し、圧入を行った。

3.2 実験結果及び考察

3.2.1 自己充填コンクリートのフレッシュ性状試験結果

表-4に自己充填コンクリートのフレッシュ性状試験結果を示す。全てのアジテータ車で性状が良好と判断されたため、型枠への圧入を開始した。

3.2.2 自己充填コンクリートの圧送及び圧送状態

圧送数量 80m³ に対し、アジテータ車の搬入台数は20台であり、圧入時間は3時間18分であった。圧送速度は20~30m³/hで圧送を行い、平均で27.0m³/hとなった。型枠の肩部付近にコンクリートが到達後、延長方向中央部付近の圧入口を閉じ、ラップ側の圧入口のみを用いて圧入を行った。図-9に圧力波形全体図を示す。圧送状態は、圧送時、圧入口切り替え時、その後の圧送も途切れることなく連続的に圧送のできる順調圧送状態であった。今回の実験では、圧入口の位置の変更、増設をしたが、管内圧力に与える影響はほとんどなく、シリーズ1同様の管内圧力の評価が可能と判断し、解析を行った。

3.2.3 圧力計計測結果

図-10に経過時間による平均管内圧力を示す。通常の圧送と同様に、水平換算距離が長くなるにつれて、平均管内圧力が小さくなる傾向があったことに加えて、全ての計測位置において経過時間による平均管内圧力の上昇が確認された。これはシリーズ1同様の傾向であり、自

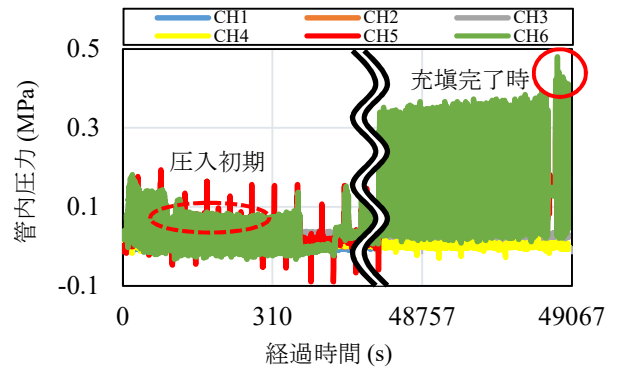


図-9 圧力波形全体図

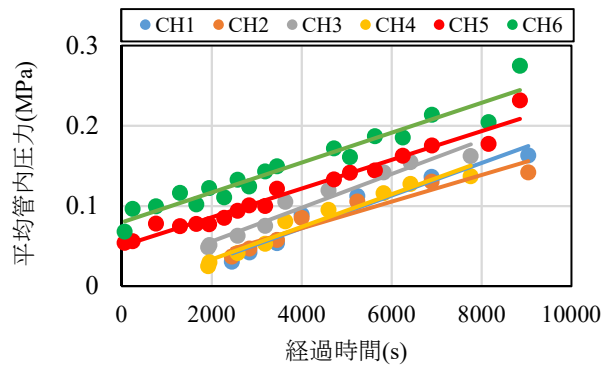


図-10 経過時間による平均管内圧力の推移

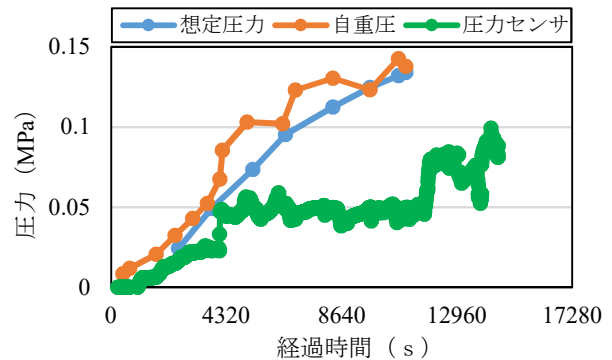


図-11 自重圧、想定圧力、圧力センサの関係

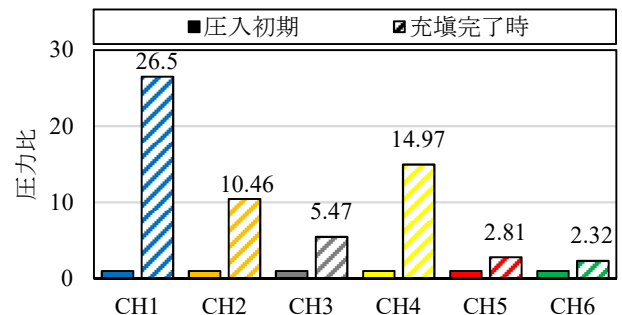


図-12 圧入初期を1とした場合の最大管内圧力の圧力比

重圧と考えることができ、今回の実験でも変わらず、型枠内にコンクリートが充填していくことが確認できると示唆された。

図-11に自重圧、想定圧力、圧力センサの関係を示す。図より、圧力センサと自重圧の結果を比較しても、相関性は確認されなかった。これはシリーズ2が夏季に行われたことや、圧力センサの設置状況によるものであると考えられる。そのため、今回は、想定圧力と自重圧の結果を比較した。想定圧力は、コンクリートが充填された打ち上がり高さにコンクリートの単位体積重量を乗じて液圧を算出したものである。図より、コンクリートの打ち上がりに対する自重圧の値はおおむね一致することが確認できた。これにより、実際に型枠内にコンクリートが充填していく様子を管内圧力から算出した自重圧の値から把握できることが示唆される。

図-12に圧入初期を1とした場合の最大管内圧力の圧力比を示す。圧力計設置位置ごとに比較すると、圧入口側であるCH1が最も圧力比が大きく、26.5倍となっている。CH1と同じラップ側のCH3では5.47倍と同じ側であるのにも関わらず、値に大きな違いが見られた。充填完了時の最大管内圧力の値は同程度にも関わらず、CH1では圧入初期の値が顕著に小さかったため、初期の値と最大管内圧力の値を比較したときの圧力比が他のCHと比べて大きな値となっていた。図-12のように圧入初期の値と最大管内圧力の値の圧力比が10程度であれば圧入終了の目安の判定をすることは可能であるが、今後は、2股にしたことで圧入初期の値に与える影響と充填完了を示す閾値の設定を検討していく予定である。

3.2.4 覆工の出来形評価

写真-2に脱型後のコンクリートの外観に示す。出来映えはシリーズ1と同様、表面気泡や不良箇所もなく良好であった。

これにより、圧入口の数および配置の変更を施しても自己充填コンクリートの圧入による構築が可能であることが確認された。

4.まとめ

- (1) 本実験より、自己充填コンクリートをセントル下部から圧入することに対する有効性が確認できた。



写真-2 脱型後のコンクリートの外観

- (2) 圧入口が左右1箇所の場合も、左右2箇所の場合も変わらず、管内圧力の評価は可能であり、配管に設置した圧力計から得られた自重圧から充填状況の把握が可能であった。また、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圧力比から圧入終了の目安の把握が可能であることが示唆された。
- (3) 硬化後の覆工コンクリートの外観は、充填不良や、コールドジョイントの発生は認められず、従来工法において、スプリングライン下方に発生しやすい巻込み空気による表面気泡も確認されなかった。

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) 池田信義，花咲魁人，橋本紳一郎，小山広光：圧送管内の圧力におけ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，日本コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.1，2023
- 3) 橋本紳一郎，平川恭奨，南浩輔，中島良光：コンクリートの簡易圧送性評価手法における配管条件および圧送性判定の検討，セメント・コンクリート論文集，Vol.69，No.1，pp.272-278，2015