

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4）

—覆工実物大実験装置を用いた圧入実験—

Study of automatic lining construction using Self-Compacting Concrete (Part 4) -Press-fit experiment using full-scale lining experimental equipment-

キーワード

トンネル覆工, 自己充填コンクリート, 自動化, 充填, 圧入, 均質性

藤原 正佑*, 弘光 太郎*, 小山 広光*,
小野 知義*, 宇野 洋志城**

研究概要

覆工施工の省力化技術を開発することを目的に、自己充填コンクリートを用いた実物大実験を行った。圧入口を片側2箇所、計4箇所設置し、天端部の圧入の際、コンクリートがラップ側から充填されるように計画した。圧入中は充填感知センサによるコンクリート打上がり状況の記録や、圧力センサによる型枠面の圧力測定を行った。構築した覆工からはコア供試体を採取し、コンクリートの均質性評価を行った。

充填感知センサから得られた天端部の充填状況は、天端部充填の進行とともにラップ側から順に充填する状況を確認した。出来映えは良好であり、充填不良やコールドジョイント等の不具合は確認されず、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。コア供試体から得られた密度、圧縮強度および粗骨材量は、ばらつきが小さく、従来工法により構築された覆工と同等の均質性を有していることが確認できた。

ABSTRACT

A full-scale experiment using Self-Filling Concrete was conducted with the aim of developing labor-saving technique for lining construction. A total of four press-in ports were set up, two on each side, so that the concrete would be filled from the lap side during the press-in of the top edge. During the press-in, the status of pouring concrete was recorded by a filling sensor and the pressure on the formwork surface was measured by a pressure sensor. Core specimens were collected from the constructed lining to evaluate the homogeneity of the concrete. The filling condition of the top edge obtained from the filling sensor showed that the filling progressed from the lap side as the top edge filling progressed. The workmanship was good, and no defects such as defective filling or cold joints were observed, no surface bubbles due to entrained air that tend to occur below the spring line. The density, compressive strength, and amount of coarse aggregate content obtained from the core specimens have little variation, and are as homogeneous as the linings constructed, as confirmed by the conventional method.

1 はじめに

山岳トンネルの覆工コンクリートの施工は、一般に、地山とスライドセントルに挟まれた空間にスランブ15cm程度のコンクリートを打ち込み、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へ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が困難となることが予想され、その対策が急務であると考えられている。

筆者らは、上述の問題解決と施工省力化を達成することを目的として、自己充填コンクリートを用いた新工法の開発を行ってきた。これまでに実施した実物大実験¹⁾（以下、1回目の実験）においては、スライドセントル下方に設置する圧入口を片側1箇所、計2箇所とし、自己充填コンクリートの圧入を行った。人員3名で施工を完了し、省人化、省力化が達成可能であることを確認した。覆工の出来映えに関しては、充填不良やコールドジョイント等の不具合は確認されず、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い良好

* 技術センター 土木研究部, ** 技術センター

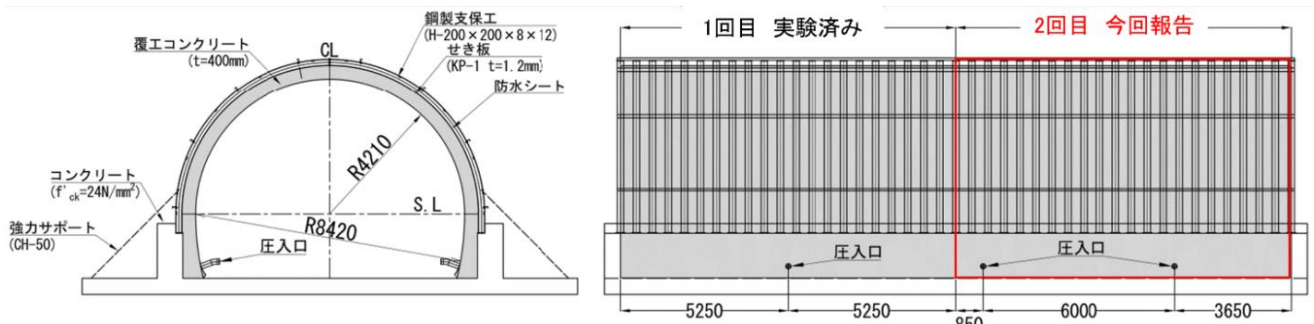


図-1 外型枠および覆工

な美観を呈していた。しかし、充填感知センサから得られた型枠内部のコンクリートの充填状況によると、天端部において、延長方向中央部から型枠内部が充填され、両端部へと充填が進んでいたことが分かった。通常、従来工法では、天端部に未充填箇所を発生させないように、既設コンクリート側（以下、ラップ側）に設置された吹上げ口からコンクリートを充填する、吹上げ方式が採用²⁾されている。片側端部に既設の覆工が存在する状況での施工を想定した場合、1回目の実験では、スライドセントル中央部から両端部へと充填が進んでいたことから、天端ラップ部付近に未充填箇所が発生することが懸念された。

そこで、本開発においても、圧入するコンクリートがラップ側から充填されるよう改善する必要があると考え、圧入口の増設、位置の変更を行い2回目の実物大実験を行った。

本稿では、2回目の実物大実験の結果を報告する。

2 実験概要

2.1 自己充填コンクリートの配合

表-1に今回用いた自己充填コンクリートの配合を示す。自己充填コンクリートは自己充填ランク3の条件（スランプフロー：600±50mm，U形充填高さ・障害なし：300mm）を目標値とした。同表の配合を標準とし、実験中のフレッシュ性状に併せて高性能 AE 減水剤の使用量を適宜調整した。アジテータ車（4m³/台，運搬時間：約15分）到着後、スランプフロー試験および空気量測定等を実施しフレッシュ性状の確認を行った。

2.2 実物大実験装置

図-1に地山を模擬した外型枠および覆工の概要を示す。コンクリート壁面に鋼製支保工を建て込み、内面にはキーストンプレート（KP-1，t=1.2mm）を貼り付けて、10.5m×2スパン分の外型枠を設置した。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。また、覆工厚を1回目の実験同様に400mmとした。

1回目の実験結果に基づき、2回目の実験においてもコ

表-1 自己充填コンクリートの配合

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

使用材料

- C：普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³）
- S1：山砂（茨城県行方市産，表乾密度 2.58g/cm³）
- S2：砕砂（栃木県佐野産，表乾密度 2.69g/cm³）
- G：石灰砕石2005（表乾密度 2.69g/cm³）
- SP：高性能AE減水剤（ポリカルボン酸系化合物と増粘成分）

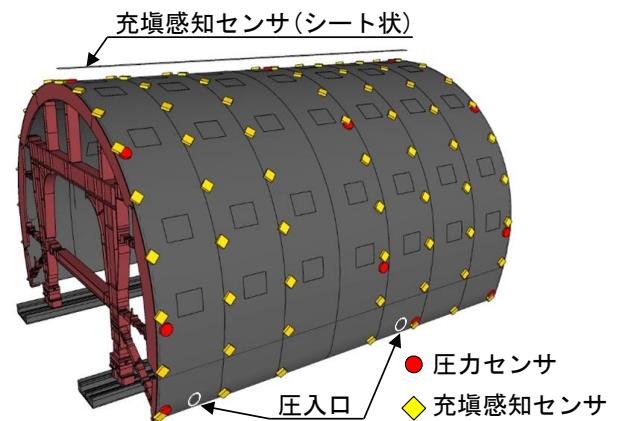


図-2 各種センサ、圧入口の位置



写真-1 実物大実験の状況

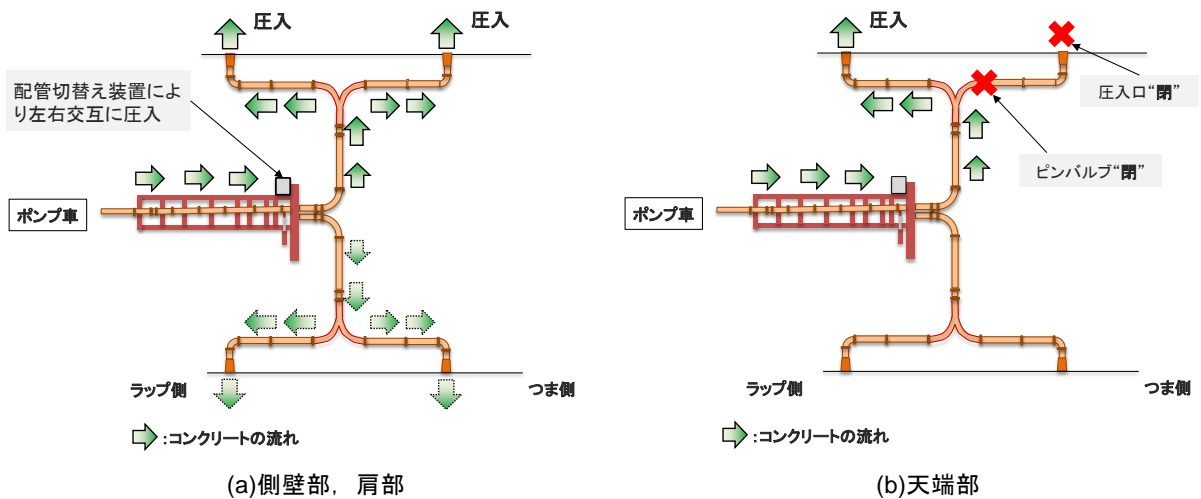


図-3 圧入方法

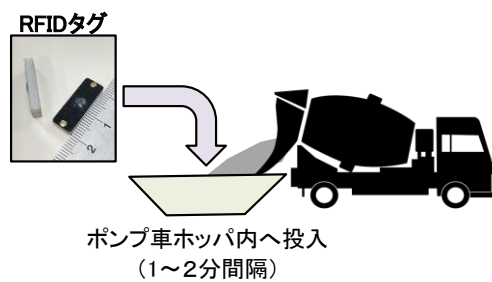


図-4 RFID タグの投入方法

ンクリートの側圧として液圧を考慮することとした。

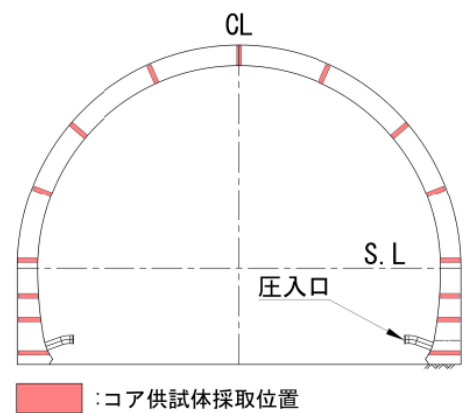
なお、使用したスライドセントルは1回目と同様であり、従来のスライドセントルに補強設計を行い、リブ、ジャッキ等の見直しを行ったものである。

図-2にスライドセントルに設置した各種センサおよび圧入口の位置図を示す。1回目の実験と同様(図-2参照)に、スライドセントル型枠面に充填感知センサ(119箇所)に設置した。また、圧力センサについては、1回目に設置した21箇所に加え、天端部に2箇所追加(天端部計5箇所)で設置した。地山側の防水シート面には充填感知センサ11箇所を配置した。

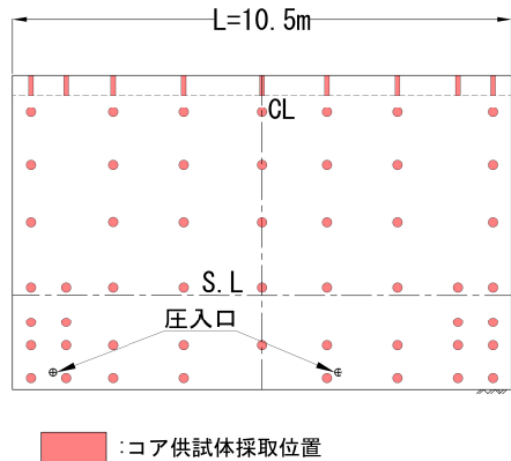
1回目の実験では、型枠面の縦断方向中央部(最大水平流動距離5.25m)下端に、自己充填コンクリートの圧入口を左右1箇所ずつ(合計2箇所)配置したが、2回目の実験では、圧入口をラップ側下端部に圧入口を増設し、1回目の実験で配置した圧入口を1.5mつま側へ移設した。

2.3 圧送設備および圧送手順

写真-1に実物大実験の状況を示す。スライドセントル下端に設置した圧入口まで配管し、コンクリートポンプ車で自己充填コンクリートを圧送した。左右の圧入口に圧送経路を切り替える配管切替え装置を底版部に設置した。なお、コンクリートポンプ車、配管切替え装置は1回目の実験と同じものを使用している。



(a)正面図



(b)側面図

図-5 コア採取位置

図-3 (a) に側壁部、肩部の圧入方法を示す。圧入によるスライドセントルへの偏圧を最小限にするため、左右の打上がり高さの差が0.5m程度以内におさまるよう、スプリングラインまでは目視確認、スプリングラインより上方は充填感知センサおよびコンクリートポンプ車の圧送回数から打上がり高さを管理した。配管切替え装置

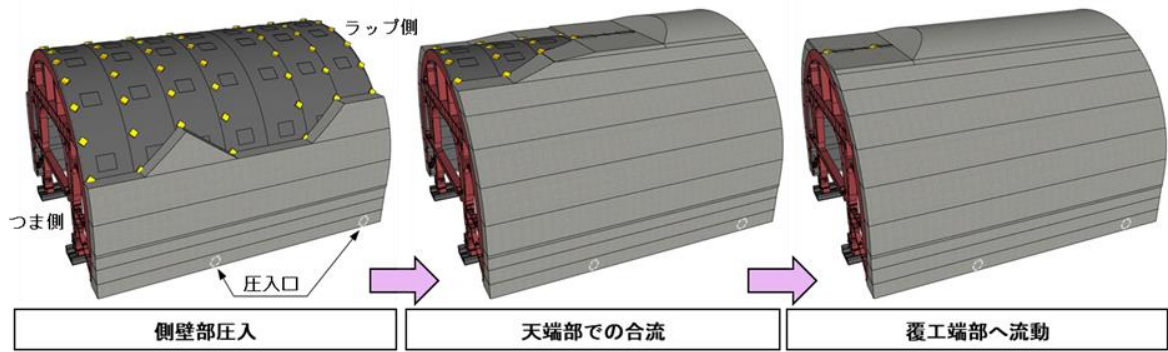


図-6 コンクリートの充填状況

により左右交互に、2つの圧入口へ圧送を行った。図-3 (b)に天端部の圧入方法を示す。ラップ側から充填されるように、片側2箇所のうち、中央部の圧入口を閉じ、ラップ側からのみの圧入を行った。

RFID タグによるコンクリート充填位置の推定

覆工内に充填するコンクリートが、いつ圧入されたものかを確認するため、RFID タグによる充填位置の推定を行った。なお、筆者らが行った壁上型枠を用いた実験³⁾によりこの推定方法の妥当性を確認しており、本実験においても同様の方法で推定を行うこととした。事前にナンバリングされた RFID タグを、図-4に示すように順次ポンプ車ホップ内へ投入した。覆工が硬化後に覆工内面から RFID タグリーダーにより検出、判別することで、いつの時点で圧入されたコンクリートが、どの位置に到達したかを推定した。

2.4 覆工の均質性評価

コンクリートが硬化後、均質性の評価を目的にコアの採取を行った。図-5にコア採取箇所の概要を示す。コアの両端面を研磨することで、 $\phi 100\text{mm} \times$ 長さ 200mm のコア供試体をコア1本につき1本作製し、密度、粗骨材面積率および圧縮強度 (JIS A 1107) の測定を行った。圧縮強度試験までの間、全てのコア供試体を同じ室内にて保管した。その後、材齢約12週で圧縮強度試験を実施した。

粗骨材面積率の算出には、既往の研究⁴⁾を参考に画像解析による手法を採用した。コア供試体の覆工内面側、外面側切断面の写真を撮影し、断面内に存在する粒形 5mm 以上の骨材にマーキングを行った。その後、画像ファイルを画像処理ソフトにかけ、それぞれの粗骨材面積率の算出を行い、内面側、外面側の平均値をそのコア供試体の粗骨材面積率とした。本実験では、密度、圧縮強度、粗骨材面積率について、全コア供試体から得られた平均値との比をそれぞれ、密度比、強度比、粗骨材量比とし、評価を行うこととした。

3 実験結果および考察

3.1 自己充填コンクリートの圧送結果

アジテータ車の搬入台数は20台であり、圧入数量 80m^3 に対して、圧入時間は3時間18分となった。2回目実験においても配管の閉塞等は無く、終始順調な圧送で実験を終了した。おおむね $20 \sim 30\text{m}^3/\text{h}$ で圧入することができ、平均圧入速度は $27.0\text{m}^3/\text{h}$ となった。なお、肩部付近にコンクリートが到達した際にスプリングライン付近のつま型枠からコンクリートの漏出が確認されたため、圧入を一時中断して補修を行った。つま型枠には通常施工と同様に木矢板($t=30\text{mm}$)を使用し、裏面からウレタンフォームによる間詰め処理を事前に行っており、補強用のパイプサポートも通常の施工より密に配置していたが、つま型枠同士の部分的な隙間からコンクリートが漏出した。圧入時間短縮の観点から、つま型枠隙間の間詰め処理については今後留意すべき課題となった。1回目実験と同様に施工人員は3名で施工を完了し、省力化、省人化が可能であることを確認できた。

3.2 自己充填コンクリートの充填状況

図-6に充填感知センサから得られた型枠内部における自己充填コンクリートの充填状況を示す。同図に示すように、側壁部では片側2箇所の圧入口からそれぞれ端部へ向かって自己充填コンクリートが充填する状況を充填感知センサによって確認できた。ラップ側、中央部付近、つま側の順に型枠内部が充填されていた。

打上がり面が肩部に到達後、中央部付近の圧入口を閉じ、片側のラップ側圧入口からのみ圧入を行った。圧入側のラップ側からコンクリートが天端部を越流して左右のコンクリート打上がり面が合流した。その後、ラップ側からつま側に向かって型枠内部が充填され、充填が進んでいた。天端部も充填の進行とともにラップ側から順に充填する状況を確認した。さらに、圧入終了時には、防水シート面に貼り付けた充填感知センサが全てコンクリートを検知していることを確認できた。よって、既設の覆工が存在し、片側に空気の逃げ道がない状況においても、片側のラップ側圧入口からのみ圧入することで、ラップ側の未充填部の発生を抑制できることを確認した。

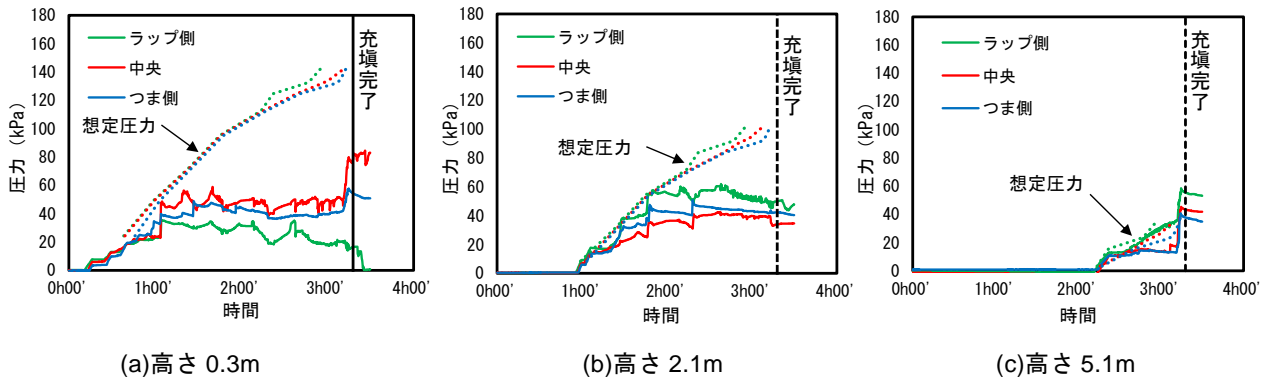


図-7 圧力の計測値（右側）

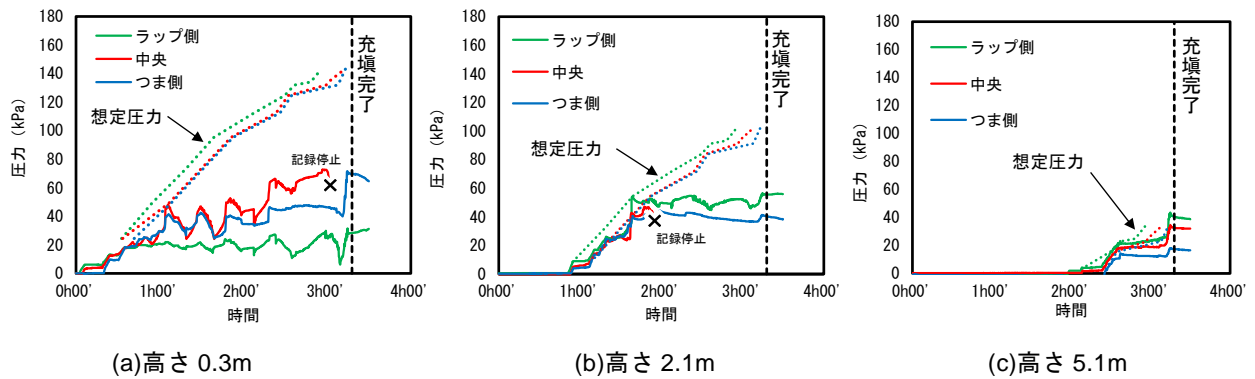


図-8 圧力の計測値（左側）

3.3 スライドセントルに作用する圧力

図-7, 8に左側, 右側の各高さにおける圧力の計測値を示す。図中に示す想定圧力は、充填感知センサから得られるコンクリートの打上がり高さに単位体積重量を乗じて液圧を算出したものである。2回目の実験は気温が30℃を超える夏期に実施した。図より、左右ともに、高さ0.3mにおける延長方向中央部付近の圧力は、他の箇所の圧力より大きな値を示している。また、実験開始1時間経過後までは、液圧と同様の圧力上昇が認められるが、1時間後以降は、いずれの圧力も想定圧力よりも小さい値で推移している。一方で、高さ2.1mにおける圧力の計測値では、ラップ側、つま側、中央部付近の順に圧力が大きな値を示していることを確認した。また、これらの計測値は高さ0.3mにおける計測値と同様に、圧力の計測開始から1時間経過後までは、液圧と同様の圧力上昇が認められるが、1時間後以降は、想定圧力よりも小さい値で推移している。既往の研究⁶⁾において、ある一定の高さまでは液圧と同様に側圧が増加するものの、途中で最大値を示した後、圧力の低下および若干の増加傾向があることが報告されている。外気温やコンクリートの打込み温度が1回目の実験よりも高かったため、先に打ち込まれた下端部のコンクリートの自立が進んだことが原因として考えられる。

高さ5.1mにおいては、圧送終了直前に天端部を加圧するように圧送したため、一時的に圧力が上昇したものの、圧入全般においては想定圧力を超過することはなく、打

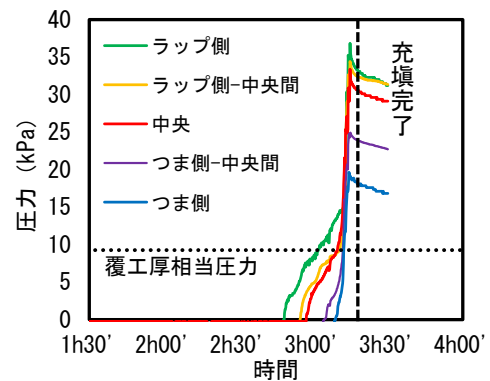


図-9 圧力の計測値（天端部）

込み完了まで全体的に小さい値で推移していた。図-9に天端部の圧力の計測値を示す。図より、ラップ側、ラップ側-中央間、中央、つま側-中央間、つま側の順で圧力を検知していることが分かる。このことから、図-6で確認された天端部の充填状況と同様に、型枠内のコンクリートは、ラップ側からつま側へ充填している様子が見えてくる。したがって、圧入中においては、スライドセントル天端に作用する圧力の計測を行うことで、ラップ側からコンクリートが充填する状況をおおむね把握することができると考えられる。

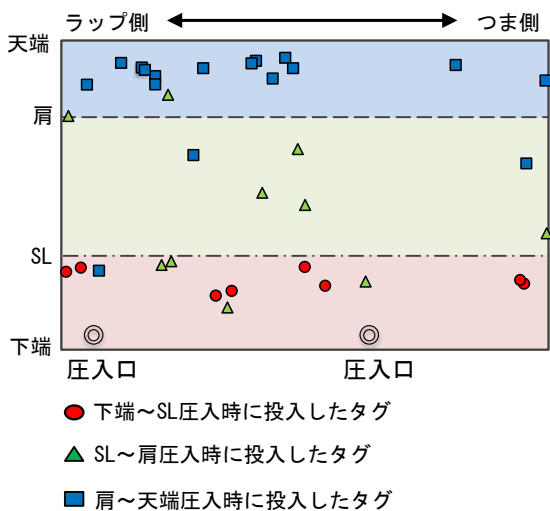


図-10 RFID タグの検出位置

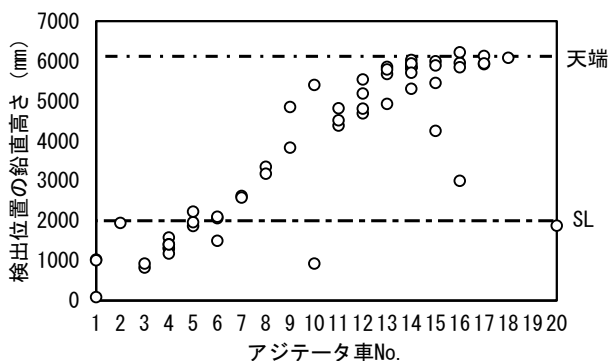


図-11 アジテータ車 No.と検出位置の鉛直高さ

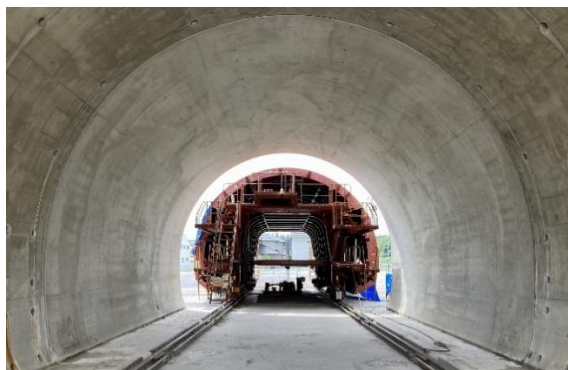


写真-2 覆工の出来映え

3.4 覆工の出来映え

写真-2に覆工の出来映えを示す。充填不良やコールドジョイントの発生等は認められず、従来工法で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なく、良好な出来映えであり、2回目の実験においても1回目の実験同様に良好な出来映えであった。このことから、圧入口の増設による出来映えへの影響は今回の実験において確認されなかった。

3.5 自己充填コンクリートの充填位置推定

図-11に、RFID タグの検出位置を示す。下端部から天端部にかけて3層に分けた際の投入時間別の RFID タグ読取位置を示す。なお、同図は覆工の左右側面を投影し、左右両面の RFID タグを集約して表示している。投入した RFID タグ200個のうち59個 (29.5%) を確認した。投入した RFID タグは、1回目の実験と同様におおむね投入した時間帯の打込み箇所が存在していることを確認した。肩部～天端部にかけて投入した RFID タグの大部分を同じ時間帯の打込み箇所にて確認することができ、後に圧入した自己充填コンクリートが打上がり面に向かって流動することが示唆された。

図-11に RFID タグを投入したアジテータ車 No.と検出位置の鉛直高さを示す。図より、圧入順序を示すアジテータ車 No.とともに、検出位置が大きくなっていることが分かる。

以上の結果から、圧入した自己充填コンクリートは先に圧入されたコンクリートを掻き分けながら打上がり面に流動したことが推察される。さらに、天端の充填においては順次新しいコンクリートが供給されてコンクリートが打ち重なっていると考えられる。

3.6 覆工の均質性評価

図-12に密度比のコンター図 (等値線図) を示す。平均値は2.30g/cm³であった。圧入口付近の密度比が大きい傾向が見られる。この傾向は、1回目の実験においても同様であった。

図-13に強度比のコンター図を示す。平均値は52.3N/mm²であった。なお、ポテンシャル供試体の圧縮強度は50.3N/mm²である。図より、圧入口付近およびその直上において強度比が大きい傾向が見られる。この傾向は、密度比の傾向と概ね一致している。

図-14に粗骨材量比のコンター図を示す。平均値は0.354m³/m³であった。図より、圧入口付近とその直上および天端部の粗骨材量比が大きい傾向を示し、密度比の傾向とおおむね一致している。このことから、前述した密度比分布の傾向は粗骨材量比が影響したことも一因であると考えられる。しかし、一般に、コンクリート中の粗骨材の割合が増加すると圧縮強度が減少することが知られているが、今回の結果は、圧入口付近の圧縮強度はむしろ大きくなっている。このことから、圧入口付近の密度比や強度比が他の箇所と比較して大きい値を示した一因として、空気量の減少が推察される。

また、天端部においてはラップ側からつま側まで粗骨材がおおむね平均値以上存在していることを確認できる。このことから、天端部充填の際にラップ側 (片側1箇所) のみの圧入を行っても、粗骨材の均質性に大きな影響を及ぼさないことが確認できた。

図-15に粗骨材量比と強度比との関係を示す。図より、粗骨材量比の大きさに関わらず強度比はおおむね0.75～

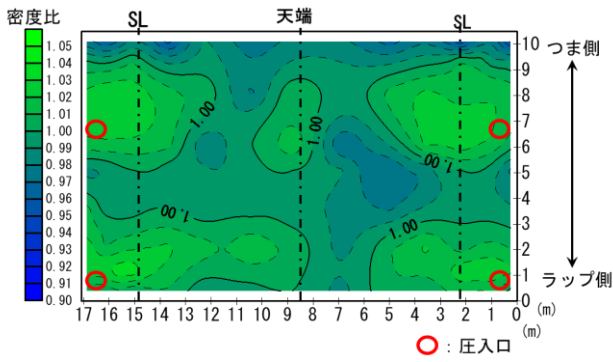


図-12 密度比のコンター図

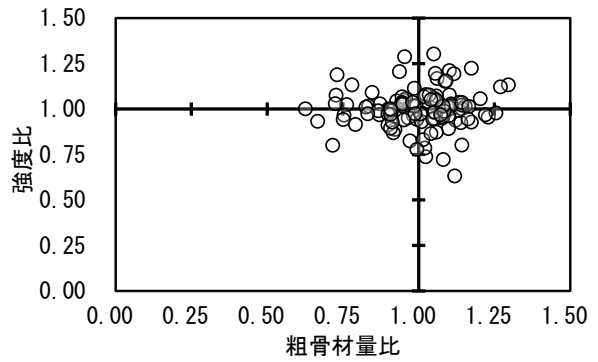


図-15 粗骨材量比と強度比との関係

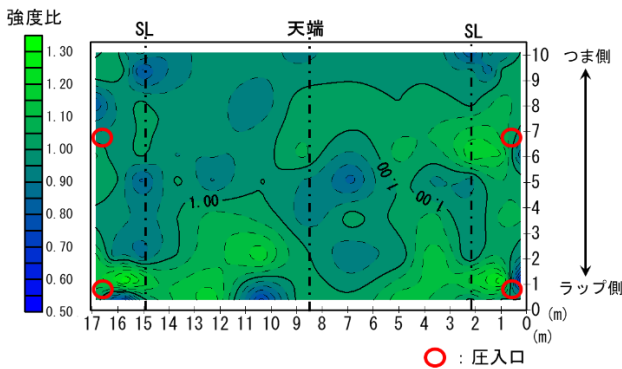


図-13 強度比のコンター図

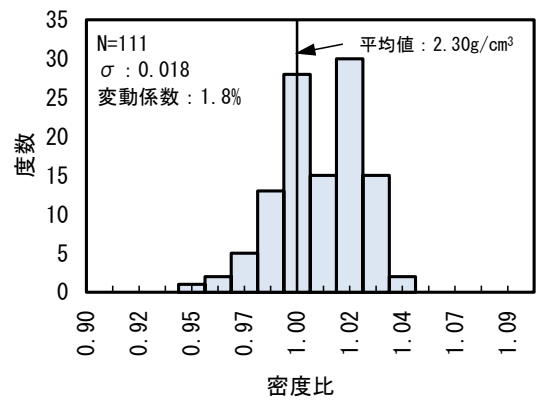


図-16 密度比のヒストグラム

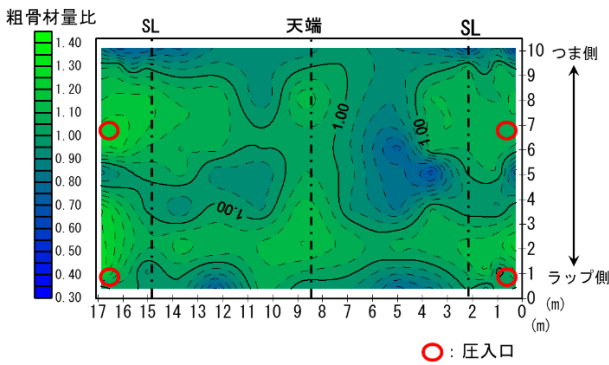


図-14 粗骨材量比のコンター図

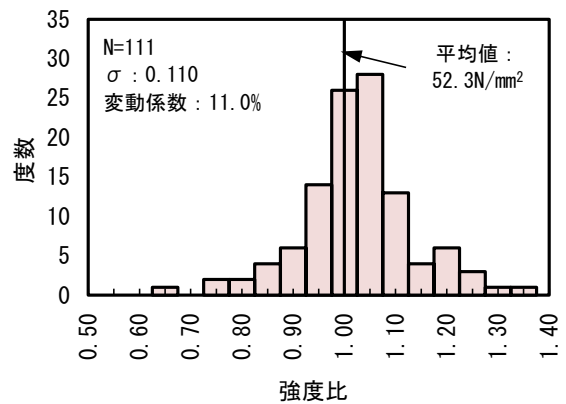


図-17 強度比のヒストグラム

1.25付近の間でばらついている。よって、今回確認された粗骨材量比のばらつきは、強度比、すなわち圧縮強度影響を及ぼすものではないと考えられる。

図-16に密度比のヒストグラムを示す。図より、変動係数は1.8%と小さい。図-12では、天端からSL下部にかけ大きくなる傾向が確認されたが、この傾向は非常に小さい幅でのばらつきであったことが分かる。

図-17に強度比のヒストグラムを示す。図より、強度比に関しては中央値と最頻値がおおむね一致しており、正規分布に近い形状となった。既往の調査⁸⁾より、同一のコンクリートを打設して製作した供試体（構造物大のもの）から採取したコアの圧縮強度のばらつき（変動係数）は、最大で15%程度と考えられることが報告されている。一方で今回得られた結果は変動係数11.0%と、上述した値と比較すると小さいことから、ばらつきは小さく、構

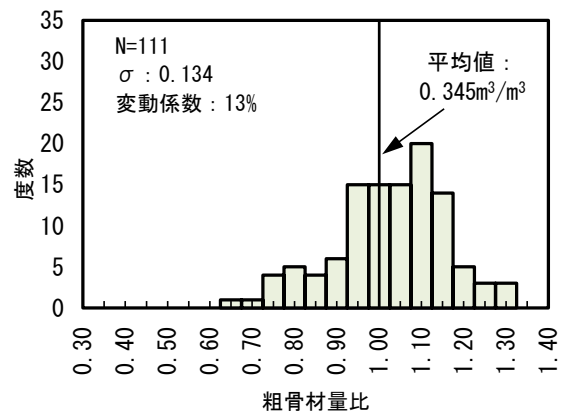


図-18 粗骨材量比のヒストグラム

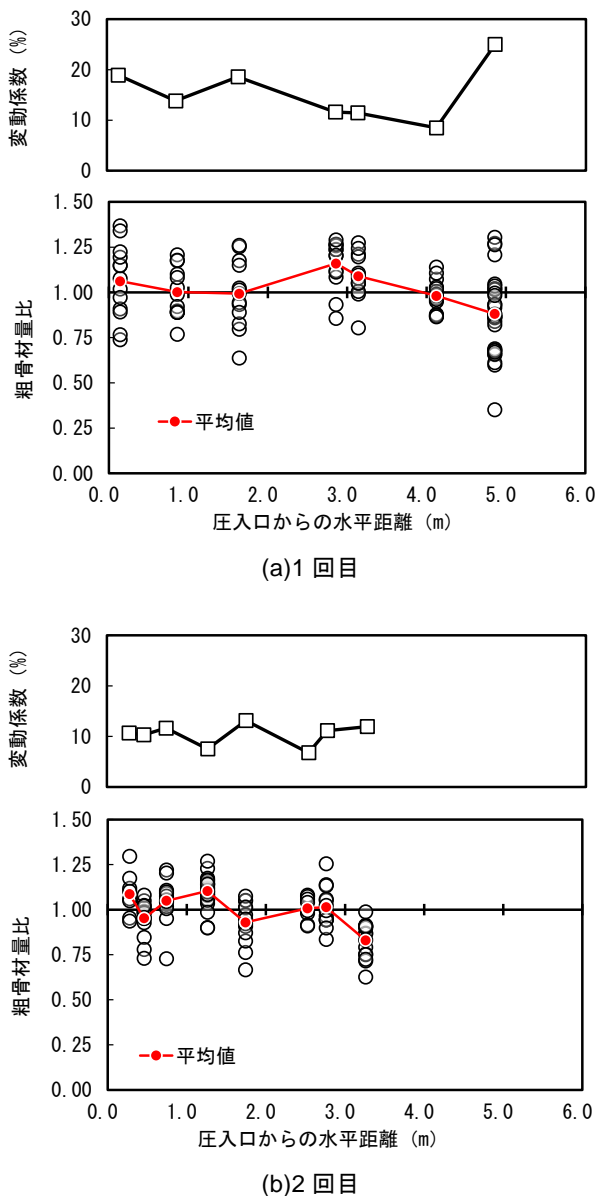


図-19 圧入口からの水平距離と粗骨材量比との関係

築した覆工は実構造物程度の均質性を有しているといえる。

図-18に粗骨材量比のヒストグラムを示す。図より、変動係数が13%と、1回目の実験（変動係数：19%）よりも小さくなる結果となった。既往の研究より、実物大型枠を用いて従来工法により構築した覆工⁹⁾の天端部、肩部の粗骨材量の変動係数が6～15%程度の範囲内であったことが報告されている。このことから、2回目実験で構築した覆工は、粗骨材量に関しても、従来工法と同等の均質性を有していると考えられる。また、変動係数が小さく、すなわち粗骨材量のばらつきが小さくなった要因として、圧入口を増設したことにより、コンクリートの流動距離が小さくなったことが考えられる。土木学会コンクリート標準示方書¹⁰⁾では、高流動コンクリートの施工において粗骨材が分離する要因として、水平流動距離の増加が挙げられている。そこで、本研究においては、圧入口から各コアまでの水平距離に着目し、粗骨材量が不均質となる要因の整理を行うこととした。

図-19に1回目の実験と2回目の実験の圧入口からの水平距離と粗骨材量比との関係を示す。図より、1回目の実験、2回目の実験、いずれにおいても粗骨材量比は1.00前後を推移している。しかし、1回目の実験では、水平距離5.0m付近において、粗骨材量比の変動係数が大きくなっていることが分かる。一方で、2回目の実験では、いずれの水平距離においても粗骨材量比の変動係数は同程度である。このことから、自己充填コンクリートを用いた覆工の圧入施工において、圧入口からの水平距離の増加は、変動係数が大きくなる、すなわち粗骨材が不均質となるリスクが高くなる要因になると言え、水平流動距離が5.0m以下となるような圧入口の配置を計画することが望ましい。

また、既往の研究³⁾では、部位によって粗骨材量が多い、少ないといった傾向が全ての部位で認められれば材料分離による可能性が高いことを述べているが、図-19では圧入口からの水平距離が大きい場合でも粗骨材量が多い箇所もあり、1回目、2回目の実験ともに粗骨材量が明確に低下している箇所は確認されなかった。このことから、図-19で確認されたばらつきは、材料分離に起因するものではなく、鉄筋の影響、バッチごとのコンクリートの品質のばらつきの影響等が主たる要因である可能性が高い。

4 おわりに

本実験で得られた知見を以下にまとめる。

- ① 天端部ではラップ側の圧入口からのみの圧入によりラップ側から端部へ向かって充填される状況が確認された。
- ② 圧入終了時点において、天端部の防水シート面に貼り付けた充填感知センサが全てコンクリートを感知しており、ラップ側の圧入口からのみの圧入により未充填箇所の発生を抑制できることを確認した。
- ③ 1回目実験と同様に人員3名で施工を完了し、省力化、省人化が可能であることを再確認できた。
- ④ RFID タグの検出結果より、圧入した自己充填コンクリートは先に圧入されたコンクリートを掻き分けながら打上がり面に流動し、天端の充填においては順次新しいコンクリートが供給されてコンクリートが打ち重なっていると考えられる。
- ⑤ 構築した覆工は、充填不良やコールドジョイントの発生等は認められず、圧入口を片側2箇所とした場合においても良好な出来映えであることが確認できた。
- ⑥ 圧入口付近の密度比、強度比、粗骨材量比は比較的大きい傾向にあった。
- ⑦ 強度比の変動係数は、既往の調査と比較すると同程度であり、均質な覆工であるといえる。
- ⑧ 覆工の圧入施工において、圧入口からの水平距離が 5.0m を超過すると粗骨材が不均質となる可能

性があることを確認した。しかし、圧入口を増設した2回目の実験では、水平距離が小さくなったことで、粗骨材の均質性が向上した。

- ⑨ 圧入口をラップ側および延長方向中央部付近に設ける(片側2箇所、計4箇所)ことで、粗骨材の均質性が向上し、従来工法で構築された覆工と同程度の均質性を有する覆工が構築できる。

上記の知見をもとに現場適用を行った結果、良好な出来映えの覆工を構築することができた。また、実際の現場環境においても施工の省力化、省人化が可能であることが確認できた。詳細については、自己充填コンクリートを用いた覆工自動化施工の開発¹¹⁾にて、報告する。

参考文献

- 1) 藤原正佑, 弘光太郎, 小山広光, 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の自動化に関する研究(その3) —覆工実物大実験装置を用いた圧入実験—, 佐藤工業技術研究所報, No.47, pp.37-43, 2022
- 2) 土木学会: トンネル標準示方書【山岳工法編】・同解説, p.196, 2016
- 3) 小山広光, 弘光太郎, 藤原正佑, 小野知義, 宇野洋志城, 橋本紳一郎: 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2) —壁上型枠を用いた圧入実験—, No.46, pp.34-40, 2021.
- 4) 菊地達哉, 木ノ村幸士, 岸利治, 渡部正: コンクリートコアによる SCC 構造物内部品質の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.601-606, 2000
- 5) 島田恒平, 谷本理勇, 指原慶彰, 佐川佳一郎: 特殊界面活性剤を利用したコンクリートの硬化体表面美観性向上検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1151-1156, 2019
- 6) 野村朋宏, 大津秀一, 上村信一, 福田英二: 鋼管矢板本体利用工法を掘削構造に適用した大規模施工に関する報告(3) —高流動コンクリートの側圧に関する現場計測—, 土木学会全国大会第65回年次学術講演会 VI-302, 2010.9
- 7) 川上英男: 粗骨材とコンクリート強度, 材料, 20巻, 208号, 1971
- 8) 国立研究開発法人土木研究所: コンクリート道路橋の性能規定及び部分係数設計法に関する調査研, No.4401, pp.4-5, 2020.
- 9) 小池悟, 野間康隆, 多宝徹, 齋藤淳: 実物大型枠を用いた覆工コンクリート天端部の充填状況と品質に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1317-1322, 2018
- 10) 土木学会: コンクリート標準示方書【施工編】, p.239, 2017
- 11) 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—現場実装による検証—, 佐藤工業技報, No.48, 投稿中