

報告 自己充填コンクリートの圧入によるトンネル覆工構築

弘光 太郎^{*1}・藤原 正佑^{*1}・小山 広光^{*2}・小野 知義^{*3}

要旨：覆工の自動化技術の開発を目的に、自己充填コンクリートを用いた実物大施工実験を行った。スライドセントル下端の圧入口から自己充填コンクリートを圧入し、配管の切替え作業および締め固め作業を行わずに覆工を構築した。1回目と2回目の実験で圧入口の数と配置を変え、圧力、充填順序、コンクリートの充填位置の判定を行った。本手法によりコンクリート打設の省力化を図ることが可能であり、覆工コンクリートに充填不良は確認されず、スプリングライン下方の表面気泡は認められなかった。また、圧入口の増設および位置の変更により、既設覆工側（ラップ側）の未充填箇所を抑制できることが確認された。

キーワード：トンネル、覆工、自己充填コンクリート、省力化、充填、圧入

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る。

筆者らは、上述の問題解決と省力化施工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いる。本開発では、自己充填コンクリートをスライドセントル中央部下端に設置した圧入口から圧入し、パイプレータによる振動締め固めおよびスライドセントル作業窓から作業窓への配管切替えを行わずにコンクリートをトンネル天端まで充填させる施工を想定している。今般、この施工方法の妥当性、コンクリートの充填性を確認するため、模擬地山および実際のスライドセントルを用いた実物大施工実験を計画した。実物大施工実験の実施に先立ち、スライドセントル内を流動する自己充填コンクリートの圧送性、充填状況と均質性の確認、および使用センサ類の適用性検証を目的に、壁状模擬型枠（長さ 10.5m、高さ 1.00～1.42m、厚さ 300mm）を用いた予備実験¹⁾を行った。コンクリートの最大水平流動距離を 8.00m とした試験体では、6m より長い水平流動距離および型枠端部において、配合値に対しコンクリートの粗骨材量が小さくなる傾向を確認した。

本報は、上記の予備実験結果をもとに圧入口の位置、各種センサ類の計測方法およびセンサ位置、コンクリートの圧入方法および速度を設定して実施した、実物大施工実験の結果について報告するものである。

2. 実験概要

2.1 実物大実験装置

図-1 に、実験で用いた外型枠の概要を示す。敷地内に構築したコンクリート擁壁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, $t=1.2\text{mm}$) を貼り付けて、延長 10.5m×2 スパン分の外型枠、すなわち模擬地山を設置した。実施工の条件を模擬するため、キーストンプレートの内面には防水シートを敷設した。側方地盤ばねが期待できないことから、覆工断面内に鉄筋を配置して RC 構造とし、実験実施期間における地震時の構造安全性を確保した。施工ではかぶりを確実に確保するため覆工厚を 400mm とした。

図-2 に、スライドセントルに配置した圧入口および各種センサの配置図を示す。圧入口の配置パターンによる充填性について比較を行うため、1 回目の実験では、スライドセントル下端部に左右各 1 箇所（計 2 箇所）、2 回目の実験では左右各 2 箇所（計 4 箇所）から圧入を行った。また、実験準備期間の都合によりそれぞれの施工時期が異なり、1 回目の実験を冬季、2 回目の実験を夏季に実施した。

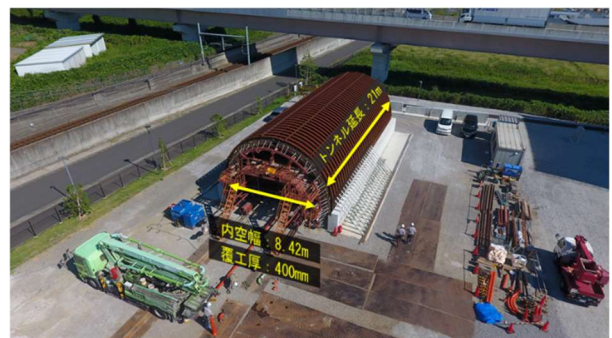


図-1 外型枠の概要

*1 佐藤工業株式会社 技術センター 土木研究部 (正会員)

*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 土木研究部長

1 回目の実験では、スライドセントル縦断方向中央部下端に圧入口を設置した（最大水平流動距離 5.25m）。2 回目の実験ではラップ側下端部に圧入口を増設し、1 回目実験で配置した圧入口を 1.5m つま側へ移設した。スライドセントルの構造設計においては、既報²⁾の実験結果に基づき、コンクリートの側圧を液圧とした。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。また、圧入中のコンクリートの充填状況を確認するため、スライドセントル型枠面には、予備実験¹⁾にて妥当性を確認した充填感知センサ（119 箇所）および圧力センサ（21～23 箇所）を配置し、天端部の充填状況確認のため、外型枠の天端部にはシート状の充填感知センサ（11 箇所）を配置した。

併せて、RFID タグにより、圧入した自己充填コンクリートの充填位置の把握を行った。アジテータ車からポンプ車ホッパへの荷卸し開始後、1 台につき 1～2 分間隔で RFID タグをコンクリート中に 1 個ずつ投入した。脱型後に覆工内面から RFID タグリーダーにより読み取り、当該箇所がどの時点で圧入されたコンクリートであるかを判別した。

2.2 自己充填コンクリートの配合

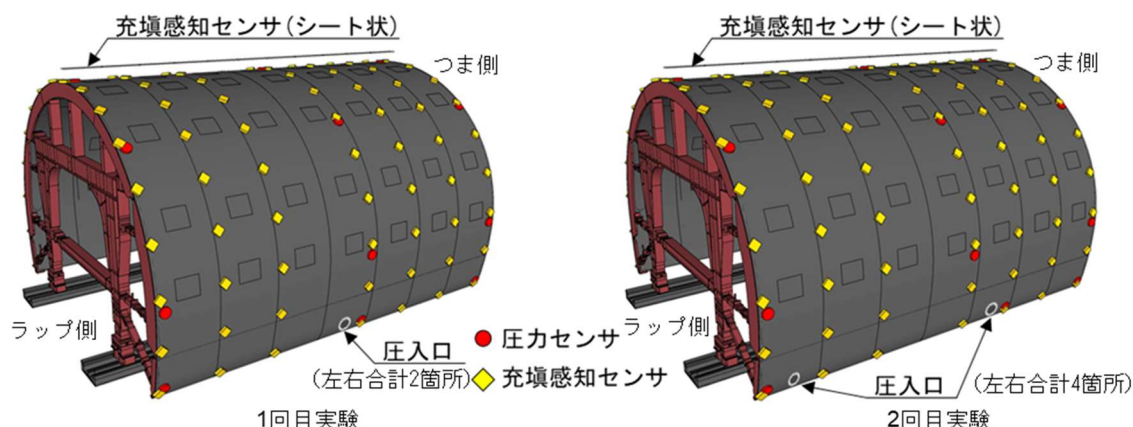
表－1 に自己充填コンクリートの配合を示す。自己充填コンクリートは自己充填ランク 3 の条件（スランプフロー：600±50mm，U 形充填高さ・障害なし：300mm）

表－1 自己充填コンクリートの配合

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

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：碎石 2005（茨城県つくば市産，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 圧入口および各種センサの配置図

を目標値とした。表－1 の使用量を基本配合とし、高性能 AE 減水剤の使用量を実験中のフレッシュ性状に併せて適宜調整した。1 台のアジテータ車に 4m³ を積み込み、運搬時間は約 15 分であった。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てフレッシュ性状の確認を行った。

2.3 施工手順

図－3 に圧入の概要を示す。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（図－4）を底版部に設置した。配管には 125A（5B）管および 150A（6B）管を使用した。

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。目視確認、充填センサ、圧送回数により配管切替えタイミングを指示し、手動のレバー操作により配管切替え操作を行った。

2 回目の実験では、ラップ側から充填することを目的として、天端部圧入時のみ、片側 2 箇所のうちラップ側の圧入口のみを使用して圧入を行った。外型枠の天端部に配置した充填感知センサがラップ側からつま側までの全箇所においてコンクリートの到達を感知した後、つま型枠の打音により充填確認を行って圧送を終了した。

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

実験前に行った性状試験結果を表-2 に示す。

使用した自己充填コンクリートの性状は、おおむね基準値の範囲内であった。冬季および夏季の影響からコンクリート温度には 10℃程度の差が生じることとなった。

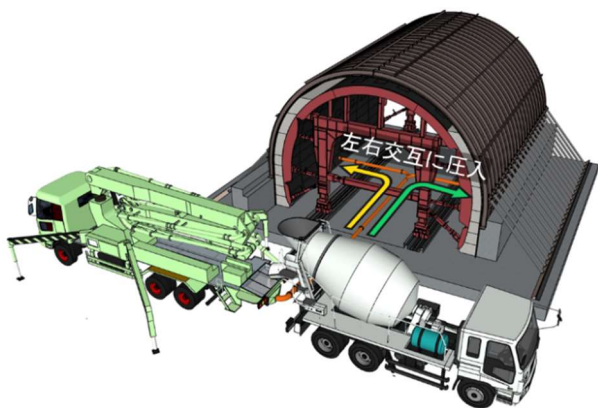


図-3 圧入の概要

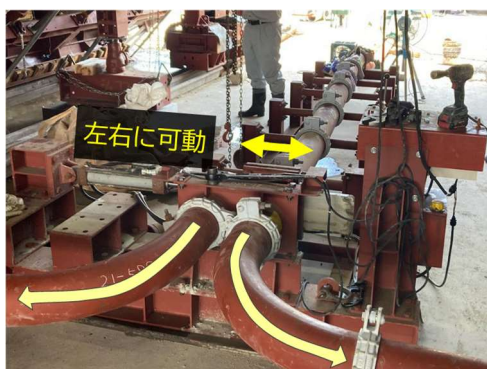


図-4 配管切替え装置

表-2 自己充填コンクリートの性状試験結果

	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
1回目実験	595×580	4.8	19.0
2回目実験	605×600	5.4	31.0

(1) 1回目実験

アジテータ車の搬入台数は21台であり、圧入数量84m³に対して、圧入時間は3時間14分となった。連続的にアジテータ車を受入れることができ、配管の閉塞等のトラブルも無く、終始順調な圧送で実験を終了することができた。おおむね20～30m³/hで圧入することができ、平均圧入速度は27.2m³/hとなった。今回の実験ではスライドセントルに作用する側圧を液圧として設計しているため、打上がり速度を制限せず、連続的に打込みを行うことができ、プラントの供給能力次第ではさらなる圧入時間の短縮が期待できる。また、作業人員3名（配管切替え1名、つま型枠監視2名）にて打設作業を完了し、従来工法に必要な作業人員（6名程度）と比較して省力化を実現できた。

(2) 2回目実験

アジテータ車の搬入台数は20台であり、圧入数量80m³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

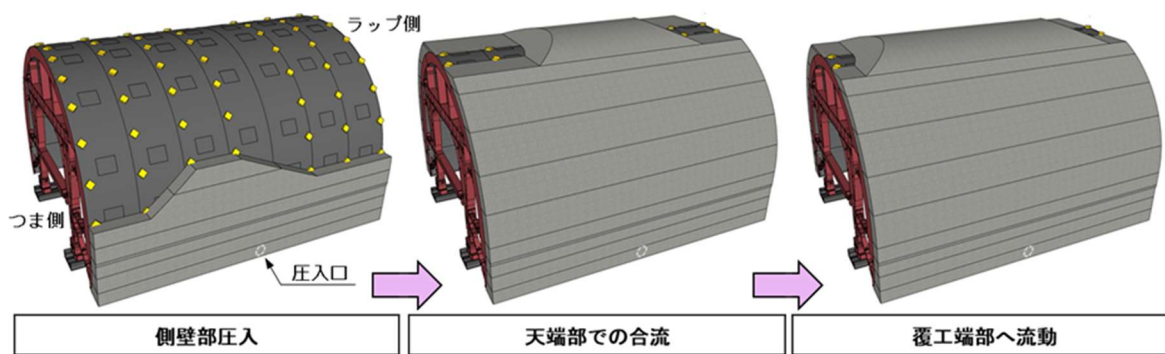


図-5 充填感知センサから得られた型枠内部における自己充填コンクリートの充填状況（1回目実験）

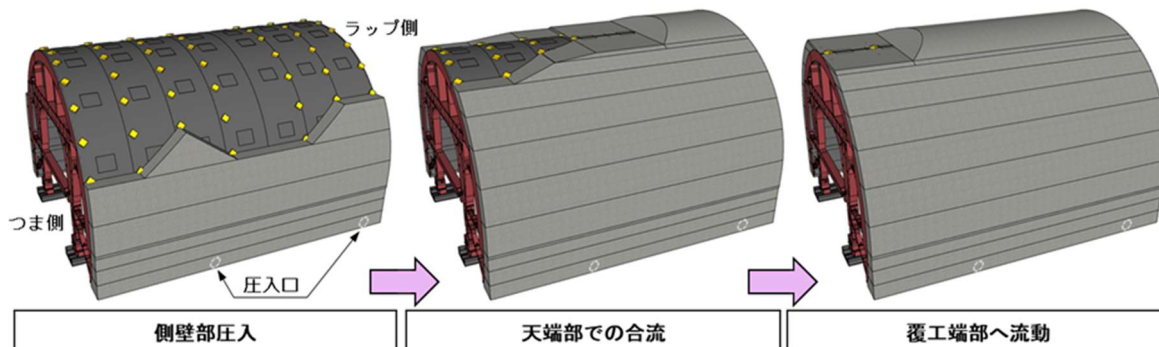


図-6 充填感知センサから得られた型枠内部における自己充填コンクリートの充填状況（2回目実験）

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。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。圧入時間短縮の面において今後留意すべき課題となった。施工人員は 1 回目実験と同様に 3 名にて施工を完了した。

3.2 自己充填コンクリートの充填状況

(1) 1 回目実験

図-5 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。図に示すように、圧入口から両端部へと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。天端部では、圧入側のコンクリートが反対側へ越流して延長方向中央部において左右のコンクリート打上り面が合流後、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。今回の実験は既設の覆工が無く、両端部に木矢板のつま型枠を設置した条件であった。実施工では初回の構築以降、片側端部に既設の覆工が存在する状況での施工となるため、天端付近に溜まった空気の逃げ道がない状態となる。

今回の実験のように延長方向中央部から端部に向かって充填することにより、天端における未充填箇所の発生が懸念される。2 回目実験ではラップ側から天端

部を充填するため、圧入口の数および配置を変更することとした。

(2) 2 回目実験

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。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。

打上り面が肩部に到達後、中央部付近の圧入口を閉塞し、片側のラップ側圧入口からのみ充填を行った。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（地山側）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。

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、圧入口の増設および位置の変更により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。

3.3 スライドセントルに作用する圧力

(1) 1 回目実験

図-7 に圧力センサの計測値と想定圧力との関係を示す。冬季の実験のため、平均気温は 5°C 程度の気候であった。

想定圧力は、充填感知センサから得られる打上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

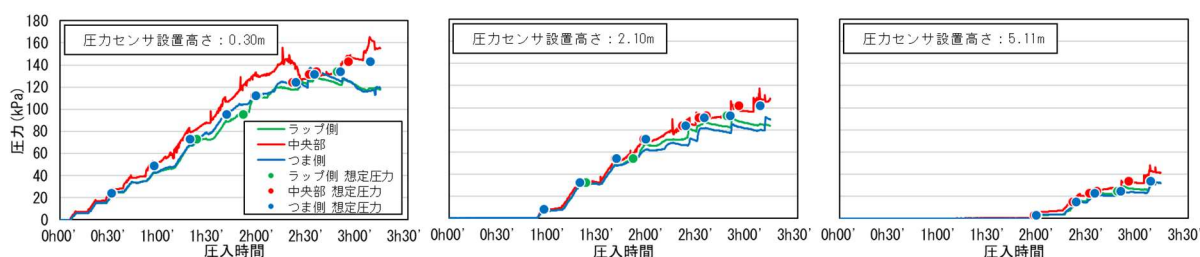


図-7 圧入センサの計測値と想定圧力との関係（1 回目実験）

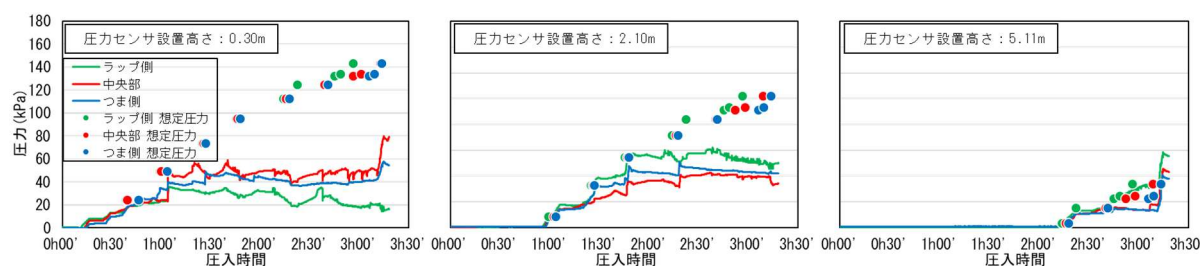


図-8 圧入センサの計測値と想定圧力との関係（2 回目実験）

出したものである。図より、各圧力センサにより実測した圧力の推移は、想定圧力とおおむね一致することが確認できた。また、高さ 0.30m における延長方向中央部の圧力は、同じ高さの端部の圧力や想定圧力より大きな値を示すことを確認した。高さ 2.1m 以上においても同様に、延長方向中央部の圧力が端部より高い値を示したが、想定圧力は超過していなかった。

圧入口の上部に位置する中央部の圧力センサはコンクリートの流動経路上に位置しているため、型枠面とコンクリートの摩擦の影響を受けて圧力が増加したと考えられる。また、端部においてはコンクリートの凝結に伴い側圧が減少したと考えられる。

(2) 2 回目実験

図-8 に圧力センサの計測値と想定圧力との関係を示す。2 回目実験は気温が 30℃を超える夏季に実施した。

高さ 0.30m における延長方向中央部付近の圧力は、同じ高さの端部の圧力より大きな値を示しており、実験開始約 1 時間経過後までは、おおむね液圧と同様の圧力上昇が認められる。1 時間後以降は、すべての圧力センサ設置箇所において想定圧力よりも小さい値で推移しており、既往の研究³⁾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。気温およびコンクリート温度が 1 回目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凝結が進んだことが原因として考えられる。

高さ 2.1m 以上においては、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。圧送終了直前に天端部を加圧するように圧送し

ため、下端部において圧入終了直前に一時的な圧力上昇は確認されたものの、想定圧力を超過することはない、打込み完了まで全体的に小さい値で推移していた。

3.4 覆工の出来映え

(1) 1 回目実験

充填不良やコールドジョイントの発生等は認められず、本実験のような有配筋の覆工で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できた。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ったといえる。

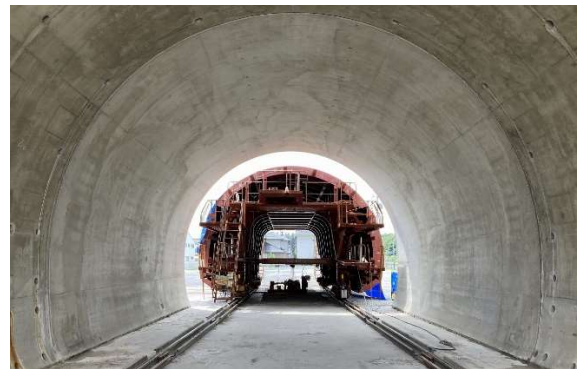


写真-1 覆工の出来映え (2 回目実験)

(2) 2 回目実験

写真-1 に 2 回目実験における覆工の出来映えを示す。

スプリングライン下方に表面気泡や不具合等もなく、良好な出来映えであった。

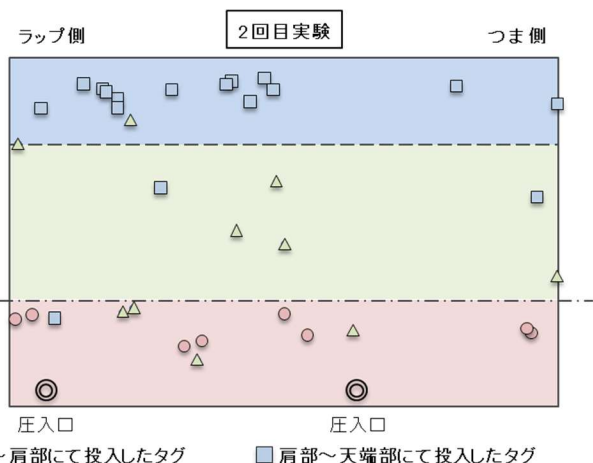
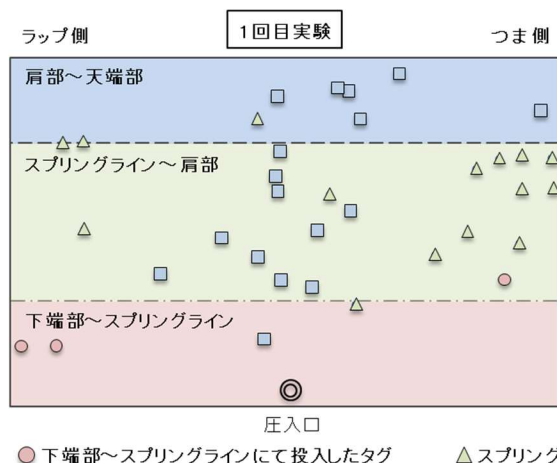


図-9 RFID タグによるコンクリート充填位置判定結果

図-10 RFID タグによるコンクリート充填位置判定結果

3.5 自己充填コンクリートの充填位置判定

(1) 1 回目実験

図-9 に、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。覆工側面にタグを投影して示した図であり、左右のタグを集約して表示している。1 回目実験では、投入した RFID タグ 207 個のうち 35 個 (16.9%) を確認した。

投入した RFID タグは、投入した時間帯の打込み箇所に存在しているもの、異なる場所に存在しているものを確認した。この結果より、打ち込んだコンクリートは、下端部から打上がり面に向かって流動していると考えられ、先に圧入したコンクリートを押し退けるように打上がり面に向かって流動することが示唆された。また、スプリングライン～肩部の打込み箇所に肩部～天端部の圧入時間帯に投入したコンクリートが存在しており、天端付近の打重ね部は経過時間によって流動性が低下していないコンクリートにより打ち重なると考えられる。

(2) 2 回目実験

図-10 に、RFID タグの読み取り位置を示す。2 回目実験では、投入した RFID タグ 200 個のうち 35 個 (17.5%) を確認した。

投入した RFID タグは、1 回目実験と同様におおむね投入した時間帯の打込み箇所に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タグの大部分を同じ時間帯の打込み箇所に確認することができ、圧入口を合計 4 箇所とした場合においても、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。

トの発生等は認められず、スプリングライン下方に発生しやすい表面気泡も発生しなかった。

- 5) 圧入したコンクリートは打上がり面に向かって流動し、おおむね投入した時間帯の打込み箇所に存在し、天端部付近の打重ね部は流動性が低下していないコンクリートによって構築されていると考えられる。
- 6) 実験結果を踏まえ、2 回目実験と同様に左右各 2 箇所 (計 4 箇所) の圧入口を使用した覆工自動化施工技術の実装に現在取り組んでいる。圧力、充填、出来映えの検証を行うとともに、省力化実現のための現場適用へ向けた開発を今後も進めていく。

参考文献

- 1) 小山広光, 弘光太郎, 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—壁状模擬型枠を用いた予備実験による充填状況および均質性の確認, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, VI-298, 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) —補強したセントルを用いた中規模実物大実験—, 佐藤工業技術研究所報, No.46, pp.34-40, 2021.12
- 3) 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割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

4. おわりに

本実験で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) スライドセントルの補強設計により、打上がり速度を制限せず、自己充填コンクリートを連続的に覆工下端部から圧入でき、コンクリート打設における施工人員を 3 名に省力化できた。
- 2) 自己充填コンクリートが下端部から肩部へかけて充填され、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。
- 3) 圧入時のコンクリートの側圧は、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算出した想定圧力 (液圧) とおおむね一致することが確認できた。
- 4) 構築した覆工には、充填不良やコールドジョイン