

覆工コンクリート施工の自動打設システムの開発

－実大施工実験による施工性の検証－

Development of Automatic Casting System for Tunnel Lining Concrete

- Verification of Usability Based on the Full-Scale Casting Experiments -

松本隆太郎* 御器谷直子* Biswas Rajib Kumar* 齋藤隆弘*

要 旨

山岳トンネルにおける覆工コンクリートの施工は、作業負荷の低減や労働者減少への対応が喫緊の課題となっている一方で、一連の施工が繰り返される工種であることから、自動化や省力化の余地がある。そこで筆者らは、既報で検討した圧力計を用いた打上り高さ管理技術を基に、コンクリートのポンプ圧送と型枠パイプレータの稼働の制御を加えた自動打設システムを開発した。実大規模の施工実験の結果、打上り高さに基づくポンプ圧送と型枠パイプレータの自動制御による施工が打込み開始から完了まで可能であり、省力化に寄与すること、セントル脱型後の品質が確保されていることを確認した。

キーワード：山岳トンネル、省力化、ポンプ圧送、型枠パイプレータ、中流動コンクリート

1. はじめに

建設工事におけるコンクリート施工では、品質を確保するための打込み作業や締固め作業、養生作業および施工管理に多くの熟練技能労働者や施工管理者を必要としているが、熟練技能労働者の不足が問題となっており、技術革新による省力化が求められている。山岳トンネル工事の覆工コンクリート施工においても、多くの作業で人材を必要とするが、その作業自体は繰り返し同じパターンで行うことが多いことから、施工の自動化による省力化を図る余地が大きい工種と考えられる。

筆者らは既往の研究¹⁾において、施工の高速化を目的に左右同時にコンクリートを圧入する施工方法に取り組み、同工法が品質を損ねることなく急速施工に寄与する技術であることを明らかにした。また、圧力計を用いてコンクリートの打上り高さを測定する方法が、圧力計から 1.3～1.5m 程度の高さまでは施工管理に必要な精度を有することを明らかにした²⁾。定量的な測定値に基づく打込み管理を行うことで、技能労働者の能力に左右されない施工が可能となる。しかし、これらは要素技術であるため、覆工コンクリート施工の全体的な省力化には至っていない。

そこで筆者らは、覆工コンクリートにおける打込み作業の自動化を目標に、上記の要素技術とコンクリートのポンプ圧送、型枠パイプレータの稼働の制御を統合した自動打設システム（以下、本システム）を開発した。現

場への導入にあたり、実用性の確認を目的とし、本システムを用いた実大規模の施工実験を行った。本報では、本システムの概要と実大施工実験の結果を報告する。

2. 自動打設システムの概要

本システムの概要を図-1に示す。本システムは、移動式型枠（以下、セントル）のスキンプレータの周長方向に複数設置される圧力計、圧力計の変化に応じて制御方法を任意にプログラムすることが可能な装置（以下、制御用 PLC）、および操作用 PC で構成される。本システムで制御する型枠パイプレータとコンクリートポンプは制御用 PLC と有線で接続され、制御用 PLC からの信

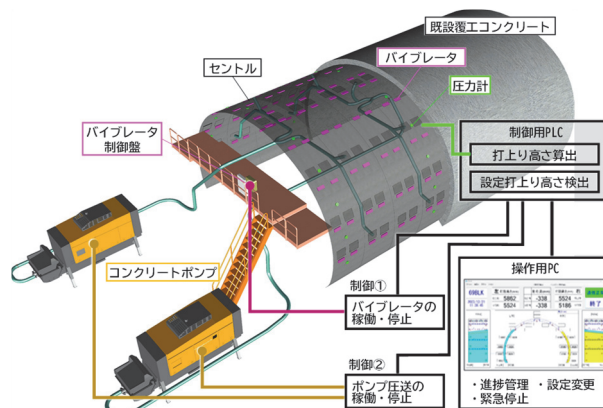


図-1 自動打設システムの概要

* 技術本部技術研究所土木研究グループ

号を受けて稼働する。ただし、いずれも緊急時を考慮し直接操作が可能である。操作用 PC モニタには施工管理用のユーザーインターフェースが表示され、施工の進捗確認だけでなく制御設定の変更、緊急停止などの手動操作が行える。また、制御用 PC を外部ネットワークに接続することで、現地に不在でも工事事務所の PC など遠隔地での確認が可能である。

本システムによるコンクリートの打込み方法は、セントルの左右同時の打込みと圧入併用を標準としている。圧送ポンプは 1 台もしくは 2 台配置され、2 台の場合はそれぞれから圧送されるコンクリートがセントルの前後に打ち込まれる。配管は途中 Y 字管で分岐し、左右の打込み口に接続しており、1 系統から左右同時にコンクリートが供給される。一般的なセントル延長である 10.5m～12.5m に対し左右同時に打ち込むことで、左右の偏りを削減でき、時間あたりの圧送量の増加による作業時間の短縮が期待できる。

圧入併用とは、打込み口から下方にコンクリートを流し込んだ後、同じ打込み口から上方の空間に圧送により押し上げるように打ち込む手法である。一つの打込み口からコンクリートを打ち込む範囲を拡大することで配管切替え回数が削減され、省力化および作業時間の短縮が期待できる。

本システムの制御フローを図-2 に示す。施工前の準備として、計画図面に基づき覆工コンクリートの寸法と、圧力計の設置位置から型枠パイプレータの稼働や配管を切り替えるための打上り高さを設定する。この他に、時間あたりの圧送量や打込み完了判断時の圧力、左右の打上り高さが異なる際に圧送停止する打上り高さの左右差の閾値が設定できる。

コンクリートの打込みにおいては、本システムの操作 PC に表示される「圧送開始」ボタンを押下することでポンプ圧送が開始され、コンクリートの圧力はセントルに設置した圧力計で常時測定される。

コンクリートの打上り高さは、圧力計が測定する値を液圧として用いて式 (1) から連続的に算出する。

$$h_{cte} = h_{pgn} + \frac{p_n}{\rho} \quad \text{式 (1)}$$

ここで、 h_{cte} : 打上り高さ算出値(m)、 h_{pgn} : No.n の圧力計の設置高さ(m)、 p_n : No.n の圧力計が測定する圧力(kPa)、 ρ : コンクリートの単位体積重量(kN/m³)

ただし、傾斜した形状の型枠への圧力は理論値よりも小さくなるとされていることから³⁾、圧力計の設置間隔は実験結果²⁾ において精度が確認された 1.5m 以内とすることが理想である。打上り高さ算出値は、コンクリートの天端から 1.5m 以内にある圧力計となるよう、コンクリートの圧力を受ける圧力計のうち最も上部に位置するものから算出した (以下、打上り高さ算出値)。

打上り高さ算出値が設定値に達すると、ポンプ圧送の停止、パイプレータの稼働、ポンプ圧送の再開が自動で制御される。なお、本システムでは最初の圧送開始、配管切替え、配管切替え後の圧送の再開を手動作業とした。

3. 自動打設システムによる実大施工実験

3.1 実験概要

実大規模のトンネルを模擬した覆工コンクリートの施工実験を技術研究所内で実施し、本システムの動作確認と実用性について検証した。

a. 覆工コンクリートとセントルの仕様

実験に用いたトンネルの形状とセントルを図-3 に示す。内空断面積は約 61m²、覆工コンクリートの厚さは 350mm、主鉄筋は D19@250mm、配力鉄筋は D16@300mm、セントルの延長は 3.0m、コンクリートの打込み口は下から両側に SL 口と肩口、天端中央に吹上げ口の計 5 箇所とした。1 ブロックあたりの施工数量は約 21m³ である。圧力計は文献²⁾ を参考に、セントル付帯設備の配置を考慮し周長方向 1.5m 程度の間隔で、セントルの下端から打込み口の肩口の近くにあるスキンプレータのヒンジ (以下、肩部) 付近までは鉛直距離で 1.5m 以内、肩部以降は 0.8m 程度以内となるよう片側 6 箇所、天端中央に 1 箇所の計 13 個配置した。型枠パイプレータは片側に 7 箇所の計 14 台設置した。また、実験では地山の代わりとなる組立式の鋼製型枠を設置した。

実験に用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。覆工コンクリートに適用されることの多い中流動コンクリートを使用した。

b. 実験ケース

実験のケースを表-2 に示す。圧送ポンプ種、配管系統、配管切替え回数、圧送ポンプ制御方法、打込み完了の判断方法をパラメータとして 4 ケースを設定した。本システムが多様な圧送ポンプに対応するか確認するため、

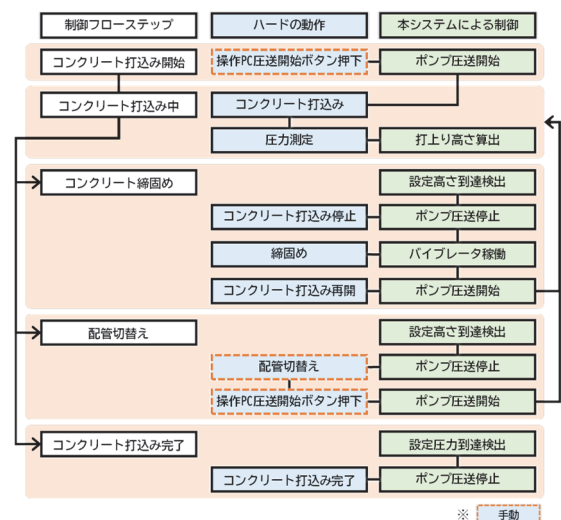


図-2 本システムの制御フロー

圧送ポンプはメーカーが異なる2機種を選定し、リモコン端子から有線で制御用 PLC に接続した。ケース 1、2、4 の配管系統は、圧送ポンプ 1 台から Y 字管による左右分岐配管とし、左右同時にコンクリートを打ち込んだ。ケース 3 では、実際の圧送系統を模擬するため左右別配管とし、圧送ポンプ 2 台を用いて左右それぞれにコンクリートを打ち込んだ。配管切替え回数は、ケース 1 と 4 は SL 口から肩口への 1 回とし、実際の施工では天端中央部の吹上げ口が使用されることから、ケース 2 と 3 では SL 口から肩口と、肩口から吹上げ口の 2 回とした。打込み完了は、ケース 1 では手動で設計圧力 (8kPa) までの充てんを確認するのに対し、ケース 2 と 3 は地山替わりの鋼製型枠への負荷を考慮し 10kPa、ケース 4 では設計の約 2 倍となる 15kPa で圧送を停止する制御とした。また、セントル横断方向でコンクリートの偏圧が生じないように、打上り高さの左右差が 300mm を超えた場合に自動停止する制御とし、復旧には左右分岐後の配管途中にある流量調整ピンを使用した。なお、打上り高さ算出

値の導出において、コンクリートの単位体積重量に 22.54kN/m³ (コンクリートの単位容積質量 2.3t/m³、重力加速度 9.8m/s²) を用いた。

c. 測定項目

本システムによる圧力、打込み状況の確認のほか、検知センサを用いて実際のコンクリートの打上り高さを記録した。また、打上り高さ算出値の精度確認を目的に、セントルに設けた高さが既知の検知センサがコンクリートを検出した時刻と、同じ時刻に記録された打上り高さ算出値との比較を行った。セントル脱型後には表層評価を目的に表透気試験 (トレント法) と目視評価を行った。

3.2 実験結果

実験の全景を写真-1 に、コンクリート受入試験の結果を表-3 に示す。実験は 2024 年 2 月から 5 月の間で実施し、表-1 に示す管理値を満足することを確認した。

a. 本システムによる打込みの制御と省力化

ケース 2 を施工中の操作 PC モニタを図-4 に示す。コンクリートが打ち込まれた範囲は左右異なる色でハッ

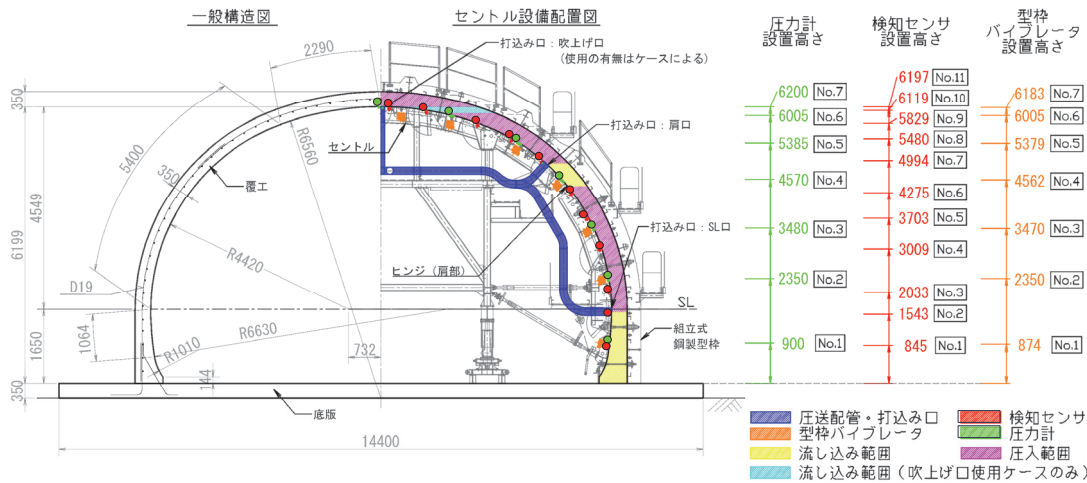


図-3 実験に用いたトンネル構造図とセントル設備配置図

表-1 コンクリート配合

スラブ フロー (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	粗骨材 最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m ³)				Ad
					W	C	S	G	
50 (±7.5)※	4.5 (±1.5)※	48.5	51.7	20	175	361	891	837	C×1.5%

※管理値、材齢 28 日における圧縮強度=24N/mm²、W：地下水、C：普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm³、比表面積 3260cm²/g、S：細骨材、栃木県宇都宮市東木代町、表乾密度 2.59g/cm³、粗粒率 3.00、吸水率 2.08%、G：粗骨材、栃木県宇都宮市東木代町 (砕石)、表乾密度 2.60g/cm³、吸水率 1.88%、Ad：高性能 AE 減水剤、標準型 I 種、密度 1.06g/cm³

表-2 実験ケース

ケース	1	2	3	4
圧送ポンプ種	① 定置式 35m ³ /h 1 台	② 配管車 25m ³ /h 1 台	① 1 台、② 1 台	① 1 台
配管系統	Y 字管で 2 系統に分岐し左右同時打込み	Y 字管で 2 系統に分岐し左右同時打込み	2 系統で左右それぞれに圧送り打込み	Y 字管で 2 系統に分岐し左右同時打込み
配管切替え回数	1 回 (SL 口 → 肩口)	2 回 (SL 口 → 肩口 → 吹上げ口)	2 回 (SL 口 → 肩口 → 吹上げ口)	1 回 (SL 口 → 肩口)
圧送ポンプ 制御方法	左右差 300mm 以上で自動停止 停止後の流量調整と再開は手動	左右差 300mm 以上で自動停止 停止後の流量調整と再開は手動	左右差 300mm 以上で自動停止、左右差 300mm 未満となるよう圧送を自動制御	左右差 300mm 以上で自動停止 停止後の流量調整と再開は手動
打込み完了	手動 (天端圧力計が 8kPa)	天端圧力計が 10kPa (設計+2kPa)	天端圧力計が 10kPa (設計+2kPa)	天端圧力計が 15kPa (設計+7kPa)
セントル型枠 および配管図				

チングされ、打上り高さ算出値の推移と左右差は中央上部、稼働する型枠パイプレータは赤枠で強調表示される仕様となっており、これら制御と稼働の終始はデータとして記録される。本実験では5秒に1回の頻度でデータを取得しており、打上り高さ算出値の推移も同頻度で更新される。これらの表示と型枠パイプレータおよびポンプ圧送の稼働が不具合なく連動し、管理用表示から打込みの管理が可能であることを確認した。

ケース2における右側に設置した各圧力計の測定値と打上り高さ算出値の関係を図-5に示す。打上り高さ算出値は、初めに圧力計 No.1 で測定した圧力に基づき算出され、高さ 2350mm に設置された圧力計 No.2 で圧力を検出した後は圧力計 No.2 に基づき算出される。圧力計 No.1 は、圧力計 No.2 が設置された鉛直距離 1450mmの間では打上り高さ算出値と理論値はほぼ同じ値で推移し、それ以降は理論値に対し打上り高さ算出値の方が大きくなる傾向がみられた。圧力計 No.2 から No.6 についても、ひとつ上に位置する圧力計までは理論値とほぼ同じ値で推移したが、その鉛直距離は上部になるほど短くなる傾向となった。これは、時間の経過による流動性の低下と、セントルの上方ほど傾斜形状となるため理論値よりも圧力が小さくなった³⁾ことが原因と推察された。

コンクリート打込み時の各圧力計の打上り高さ算出値の推移と検知センサおよび型枠パイプレータ、配管切替えの施工記録を図-6に示す。打込み完了時間は開始から4時間20分後、打上がり速さは1.56m/hとなり、現場で施工する際の打上り速さと同程度であった。

検知センサが反応した打上り高さと、同じ時刻の打上り高さ算出値は、施工開始から完了まで大きな差はみられなかった。打込み開始から約70分後に打上り高さ算出値の左右差が設定した閾値の300mmを超えポンプ圧送が停止した。このときに点検窓からコンクリート天端の高さを実測したところ左右で約300mmの差が生じており、打上り高さ算出値と実測に差異はみられなかった。

ポンプ圧送と型枠パイプレータは、打上り高さ算出値に基づいて予め設定した手順の通りに、自動制御で稼働した。技能労働者はポンプ圧送と型枠パイプレータの稼働状況を監視し、施工時の主な作業は配管切替え、片付け、清掃などであった。

コンクリートの打込みは、天端頂部に設置した圧力計(図-3のNo.7)が設定した値の10kPa(図-6の6625mmに相当)に到達した後、自動で圧送が停止することで完了した。

点検窓からの目視により、圧入されたコンクリートは打込み口から垂直に上昇し、コンクリートの天端面をわずかに盛り上げながら延長方向の両端に向かって流れる動きがみられた。配管切替え時の打込み口の閉塞や圧入途中で圧送が困難となるなどの不具合は生じなかった。

4 ケース全てにおいて、本システムに起因する打込み

不可となるトラブルなく施工でき、本システムによる打込みの管理が可能であることを確認した。覆工コンクリートの打込み作業は圧送ポンプの管理を含めて一般的に8名程度で行われるが、圧送ポンプに関わる技能労働



写真-1 実験の全景

表-3 施工日およびコンクリート受入試験の結果

ケース	1	2	3	4
施工日(2024年)	2/13	2/26	4/25	5/31
スラブフロー(mm)	485	560	515	450
空気量(%)	3.8	4.6	4.0	3.3
コンクリート温度(°C)	14	15	23	26

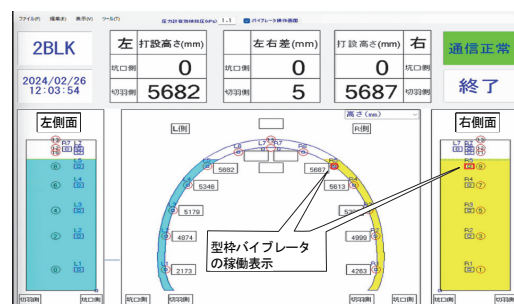


図-4 施工中の操作PCモニタの表示例
(左右は切羽に向かっての表記)

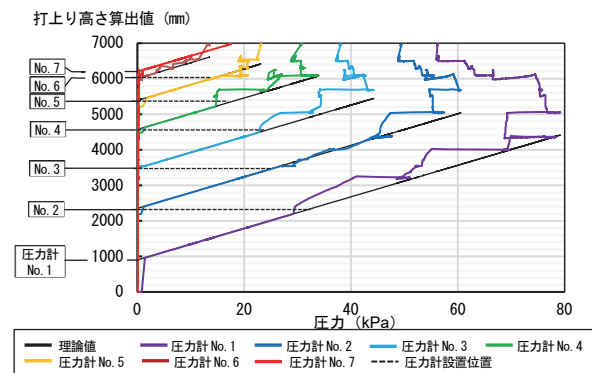


図-5 圧力計の測定値と打上り高さ算出値の関係

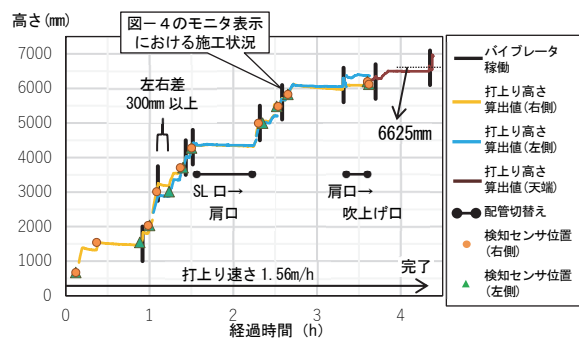


図-6 打上り高さ算出値の推移

者は不要であり、2 人程度の省人化が図れる。また、型枠パイププレートに関わる作業は操作用 PC の操作および監視が主な業務となり、締固め作業に熟練度は問われず負荷が低減されるため、技能労働者の省力化が図れる。

b. 打上り高さ検出値の精度

縦軸に検知センサの設置高さを、横軸に検知センサが反応した同時刻の打上り高さ算出値をプロットした図を図-7に、検知センサを真値としたときの打上り高さ算出値の差の絶対値（以下、絶対誤差）の平均と標準偏差を表-4に示す。全てのケースで得られた絶対誤差の平均は 78mm、標準偏差 70mm (n=70) となった。しかし、検知センサ No.10 と No.11 の絶対誤差が相対的に大きい傾向がみられ、吹上げ口を使用したケース 3 では約 231mm が生じ、吹上げ口を使用していないケース 1 では 98mm で最も小さく、およそ 2.4 倍の差がみられた。

ケース 3 施工時の本システムの記録を調べた結果、検知センサ No.9 までは反応し打上り高さ算出値が配管切替え高さに到達し、配管を吹上げ口に切り替え打ち込み始めた直後に、検知センサが No.11、No.10 の順に連続して反応した。これは、吹上げ口から流れ込むコンクリートに反応したためであり、実際の打上り高さと異なる値である。そのため、吹上げ口を使用したケース 2 と 3 の検知センサ No.10 と No.11 を除いた補正後と打上り高さ算出値を比較した結果、誤差の絶対値の平均は 67mm、標準偏差 60mm (n=63) となった。本システムによる打上り高さ算出値は、真値に対し±187mm 以内に約95%が収まる精度である。本システムによる施工で打上り高さ算出値に起因するトラブルは生じなかったことから、本システムは施工管理に必要な打上り高さ算出値の精度を有すると考える。本実験で使用した規模のセトルの場合、セトルの他付帯設備を考慮したうえで、圧力計は周長方向 1.5m、鉛直距離は最大で 1.5m 程度以内の間隔で設置する必要がある。

c. 表層評価

打ち重ね最大時間は配管切替え時の約 60 分であり、セトル脱型後のコンクリート内空側の目視確認では、ひび割れや未充填はみられなかったことから、コールドジョイントなどの施工不良は生じてないと判断した。

材齢 28 日に表層透気試験を実施した。測定箇所と評価基準⁴⁾を図-8に示す。透気係数は一般的なコンクリートの場合、 $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ （一般）以下が求められる。測定箇所はケースごとに内空側のスパン中央において SL、天端、肩部付近の圧入範囲と流込み範囲、SL とし、SL と天端は妻側も測定した。

測定の結果を図-9に示す。ケース別の平均は全て「一般」の評価となった。実際の覆工コンクリートでは通常よりも小さい値が求められることから、同等の評価が得られたといえる。測定位置別の平均では、SL が「一般」の評価であったのに対し、天端頂部は「良」の

評価が得られ有意差が認められた。SL 部は型枠パイププレート間の中央に位置するため、締固めの効果が最も小さくなることで相対的に透気係数が大きくなり、天端頂部はコンクリートの底面に位置するため表面で気泡が生じにくく、締固めによりエントラップドエアが上昇しコンクリートの表層が密実になったことで透気係数が小さくなったと推察された。打込み方法別でも測定位置別と同様に、SL が「一般」の評価に対し天端頂部は「良」の評価が得られ有意差が認められた。

圧入はエントラップドエアが発生しにくいため気泡が少なく、コンクリート表面が比較的緻密になっていると

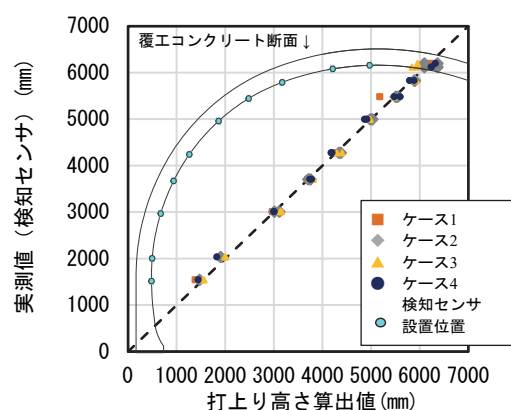


図-7 打上り高さ算出値と検知センサ

表-4 打上り高さ算出値と検知センサの差

ケース	吹上げ口 使用	測点 (箇所)	誤差の絶対値 の平均 (mm)	標準偏差 σ (mm)
1	無し	16	77	80
検知センサ No. 1~9		12	71	
検知センサ No. 10, 11		4	98	
2	有り	18	74	61
検知センサ No. 1~9		14	56	
検知センサ No. 10, 11		4	136	
3	有り	19	80	81
検知センサ No. 1~9		16	52	
検知センサ No. 10, 11		3	231	
4	無し	17	81	53
検知センサ No. 1~9		14	73	
検知センサ No. 10, 11		3	123	
全体	—	70	78	70
補正後	無し	63	67	60

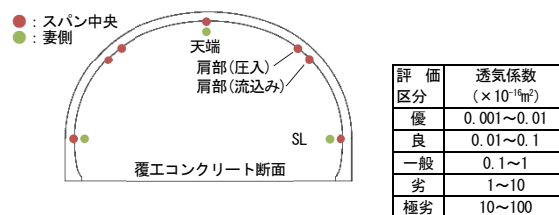


図-8 透気試験の測点とグレーディング⁴⁾

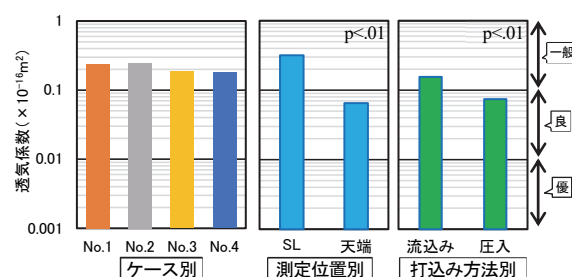


図-9 透気試験の結果

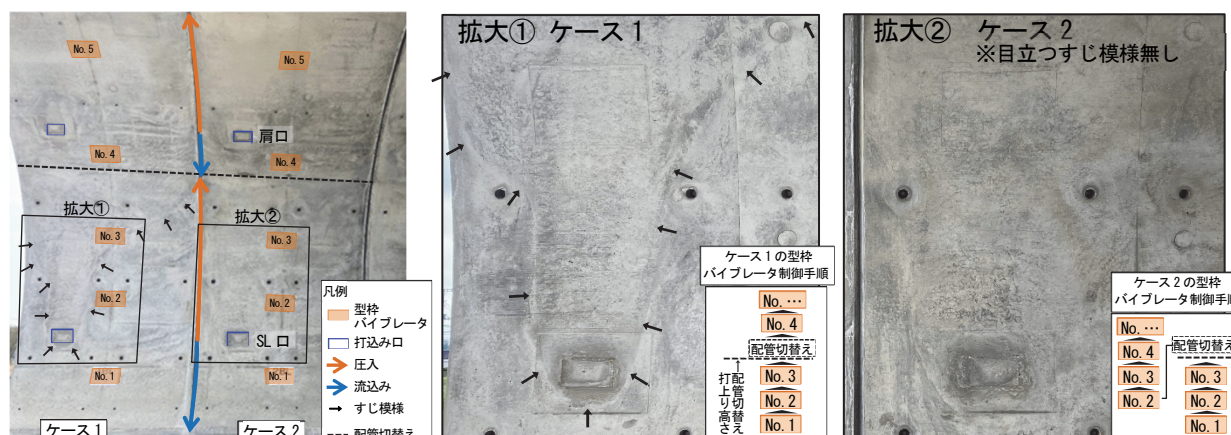


図-10 内空側からみたコンクリートの表層（ケース 1 とケース 2）

推察された。以上より、コンクリートを打込み口から圧入することで、流込みよりも品質向上が期待できる。

施工後の覆工コンクリートを内空側から撮影した写真を図-10に示す。初めに施工実験を行ったケース 1において、コンクリートが SL 部の打込み口から上方に向かってコンクリートの流動跡（以下、すじ模様）が確認された。覆工コンクリートは仕上がり面であるため美観を損なう現象といえる。すじ模様の形状から圧入が原因と推測されたため、施工記録を見直し改善を図った。

ケース 1 では、コンクリートの打上り高さの推移に伴い、打上り面の下部に位置する最上段の型枠パイプレータを No.1 から順に 30 秒稼働させた（図-10 ケース 1 の型枠パイプレータ制御手順）。圧入範囲において、すでに打ち込まれたコンクリートと打込み口から新しく圧入され上部方向に打ち込まれるコンクリートの境目において、型枠パイプレータから離れた位置ほど一体化の効果が小さくなったため、すじ模様が残ったと推定した。そのためケース 2 では、配管切替えの位置までは同じ手順で行い、配管切替え後に SL 部の打込み口から打上り面以下にある型枠パイプレータ No.1 と No.2 を下から順に再度 30 秒ずつ稼働させる手順に変更した（図-10 ケース 2 の型枠パイプレータ制御手順）。その結果、ケース 1 でみられたすじ模様は発生せず、その他目立つ模様は認められなかったことから、型枠パイプレータの稼働を工夫することで、圧入によって打込み口から上方に生じるすじ模様を改善できることがわかった。

4. 結論

覆工コンクリートの自動打設システムを開発し、実大規模の施工実験を行った。得られた結果を以下に示す。

- i. 実大規模で型枠パイプレータと圧送ポンプの自動制御による打込みができ、施工管理において本システムが実用性を有することを確認した
- ii. 圧送ポンプを常時操作する技能労働者は不要となり、締固めは自動制御により作業負荷が低減でき

るため、省人化および省力化に寄与する

- iii. コンクリートの打上り高さ算出値の精度は、平均誤差 67mm、標準偏差 60mm となったが、圧力計を直壁形状部で 1.5m、傾斜部で 1.0m 程度以内に据え付けることで、施工管理に差し支えない精度で本システムを運用できる
- iv. 圧入した範囲の表層透気試験で、通常の流込み範囲より評価の高い「良」が得られた一方で、コンクリート表面には圧入に起因するすじ模様が生じる場合があるが、型枠パイプレータの稼働方法の工夫によって目立たなくすることが可能である

5. おわりに

本システムは、定量的なコンクリートの打上り高さに基づき高い再現性で打込み管理ができるため、技能労働者の熟練度に依存することなく安定した品質の確保と施工が可能である。実現現場へ適用し実績を積み重ね、より実用性の高い技術となるよう開発を進める。

【参考文献】

- 1) 小野 緑、浜田 元、斎藤隆弘、張 志瑄、「覆工コンクリートの急速施工における圧入打設の施工性と品質」、土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会、VI-116、2019
- 2) 斎藤隆弘、張 志瑄、小野 緑、浜田 元、「セントルに設置した圧力計によるコンクリート打設高さ検知システム」、土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会、VI-105、2019
- 3) 土木学会、「コンクリートライブラリー136 高流動コンクリートの配合設計・施工指針 [2012 年版]」、p.136、2012
- 4) R.Torrent、G.Frenzer、A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the “covercrete”、International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering、pp.985-992、1995.9