

# 論文 自己充填コンクリートを圧入した覆工の均質性評価

藤原 正佑\*1・弘光 太郎\*1・小山 広光\*2・橋本紳一郎\*3

**要旨:** 覆工の自動化施工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。スライドセントル下端に設置した圧入口から自己充填コンクリートを圧入し、締固めを行わずに覆工を構築した。圧入口を2箇所とした場合と、4箇所とした場合の計2回の実験を行った。硬化後、コア供試体を採取し、圧縮強度、粗骨材量および密度の計測を行い、均質性の評価を行った。測定結果から、圧入口を4箇所とし、圧入口からの水平距離を小さくすることで、より均質な覆工を構築できることを確認した。

**キーワード:** 自己充填コンクリート, 山岳トンネル, 覆工, 圧入, 自動化, コア, 均質性

## 1. はじめに

山岳トンネルの覆工コンクリートの施工は、これまで、地山とスライドセントルに挟まれた空間にスランプ15cm程度のコンクリートを、作業窓から配管を順次上部へ切り替えながら打ち込み、バイブレータで締め固めながら充填する方法で行われてきた。また、打設前の準備から清掃作業に渡って、狭隘な空間における作業が行われていた。この方法は、作業員の技量や経験に頼るところが大きく、締固め不良による材料分離、コールドジョイント等の不具合の発生が懸念される。さらに、近年の建設作業員の高齢化、熟練工不足により、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、上述の問題解決および施工の省力化を目的として、スライドセントル下端に設置した圧入口から自己充填コンクリートを圧入し、バイブレータによる締固めおよび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する方法を開発した。

使用する自己充填コンクリートは、施工中に配管の閉塞トラブル等が無く、天端まで確実に充填され、硬化後

は従来工法により構築された覆工と同等程度の均質性を有している必要がある。そのため、適切な材料分離抵抗性、流動性、経時保持性が求められる。筆者らは、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および充填性を事前に確認することを目的に、圧入口から型枠端部までの最大水平流動距離を5.25m, 8.00mとした壁状模擬型枠(長さ10.5m, 高さ1.00~1.42m, 厚さ300mm)を用いて予備実験を行った。コンクリートの最大水平流動距離を8.00mとした試験体では型枠端部でコンクリートの粗骨材量が減少する傾向が確認されたものの、最大水平流動距離を5.25mとした試験体では圧縮強度、粗骨材量がおおむね均質な傾向であることが確認された。

これらの結果をもとに、模擬地山、スライドセントルを用いた実物大実験を計画し、実施した。

本稿では、実験により構築した覆工の硬化後の均質性評価を行う。さらに、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、最適な圧入口の数を選定する。

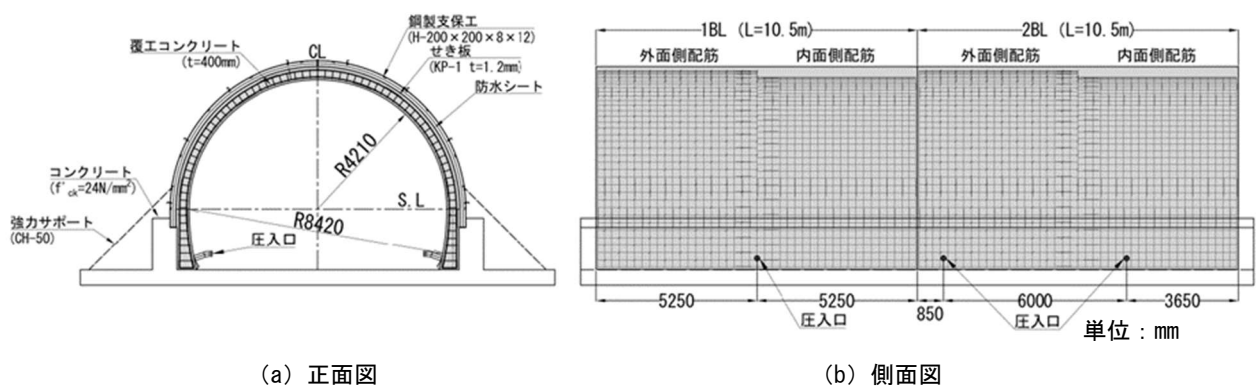


図-1 実物大実験装置および覆工コンクリートの概要

\*1 佐藤工業(株) 技術センター 土木研究部 (正会員)  
 \*2 佐藤工業(株) 技術センター 土木研究部 主席研究員 (正会員)  
 \*3 千葉工業大学創造工学部 都市環境工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

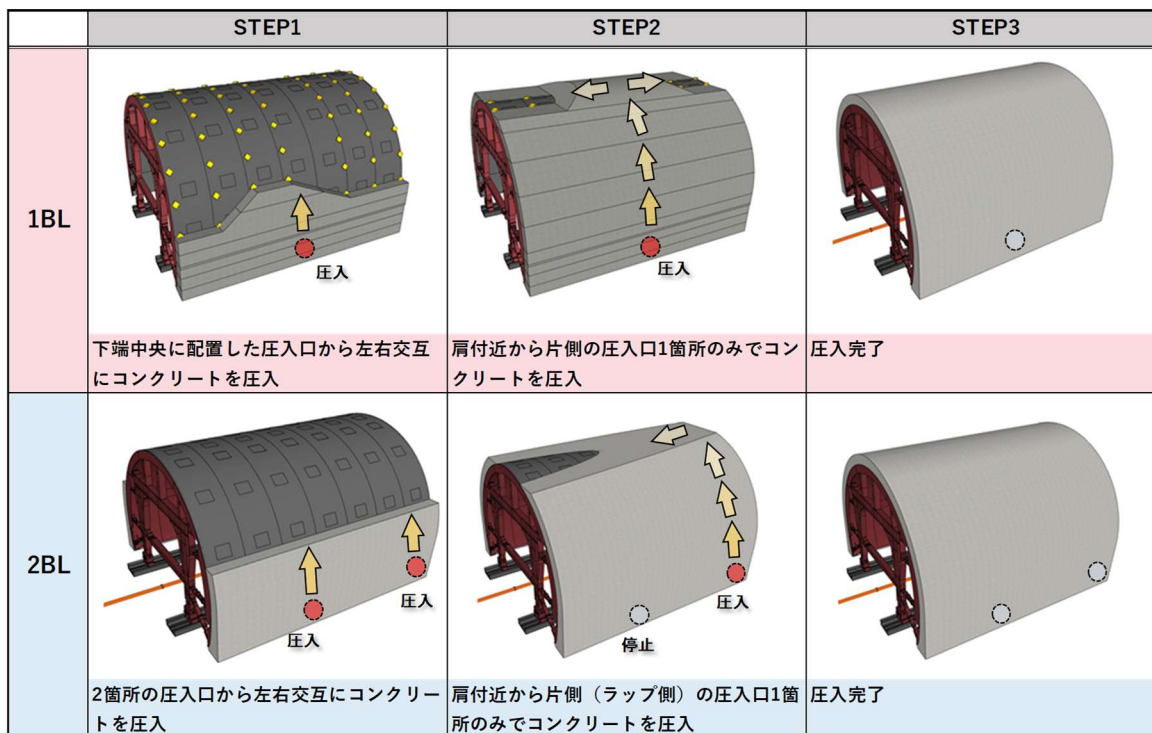


図-2 各 BL の圧入方法

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 <sup>3</sup> )					
			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/cm<sup>3</sup>)
- S1: 山砂(茨城県行方市産, 表乾密度 2.58g/cm<sup>3</sup>)
- S2: 砕砂(栃木県佐野産, 表乾密度 2.69g/cm<sup>3</sup>)
- G: 1BL, 砕石 2005(茨城県つくば市産, 表乾密度 2.69g/cm<sup>3</sup>)  
2BL, 石灰砕石2005(表乾密度 2.69g/cm<sup>3</sup>)
- SP: 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系化合物と増粘成分)

## 2. 実験概要

### 2.1 実物大実験装置および覆工の概要

図-1 に実物大実験装置および覆工の概要を示す。コンクリート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 (KP-1, t=1.2mm) を貼り付けて、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。

外型枠は地山と違い、側方地盤ばねが期待できないため、地震時の構造安全性を確保するため、RC 構造(主鉄筋 D16@250mm, 配力筋 D13@250mm)とした。部材厚 350mm で構造設計を行ったが、実施においてはかぶりを確実に確保するため 400mm とした。

実物大実験は計2回実施した。以降、1 スパン目を 1BL, 2 スパン目を 2BL と表記する。

圧入口を図-2 に示す位置で配置し、自己充填コンクリートを圧送した。1BL では覆工両端部に木矢板のつま

型枠を設置し、2BL では片側(ラップ側)が既設コンクリート、片側が木矢板のつま型枠を設置した条件下においての施工となった。

### 2.2 圧入方法

図-2 に圧入方法の概要を示す。1BL においては、スライドセントル下端延長方向中央に片側1箇所、計2箇所の圧入口を設けた。自己充填コンクリートを、配管切替装置を用いて左右交互に打ち上げ、天端部までの充填を行った。2BL においてはスライドセントル下端のラップ側と中央部付近に片側2箇所、計4箇所の圧入口を設けた。最初に、配管切替装置を用い、片側2箇所の圧入口から左右交互にコンクリートを打ち上げた。スライドセントルに設置した充填感知センサ<sup>2)</sup>により充填高さが肩部付近まで近づいたことを確認後、片側1箇所、ラップ側の圧入口のみを用いて天端部までの充填を行い、ラップ側に未充填箇所が発生しないようにした。

既報<sup>2)</sup>に基づき、作用する側圧を液圧と考慮し従来のスライドセントルに追加補強を行っている。そのため、打ち上がり速度に制限が無く、連続的にコンクリートを充填することが可能である。しかし、圧入によるスライドセントルへの偏圧を最小限にする必要があるため、左右の充填高さの差が 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充填高さを管理した。アジテータ車の受入れ目標台数は7~8台/時間(26.7分/m)とし実験を行った。

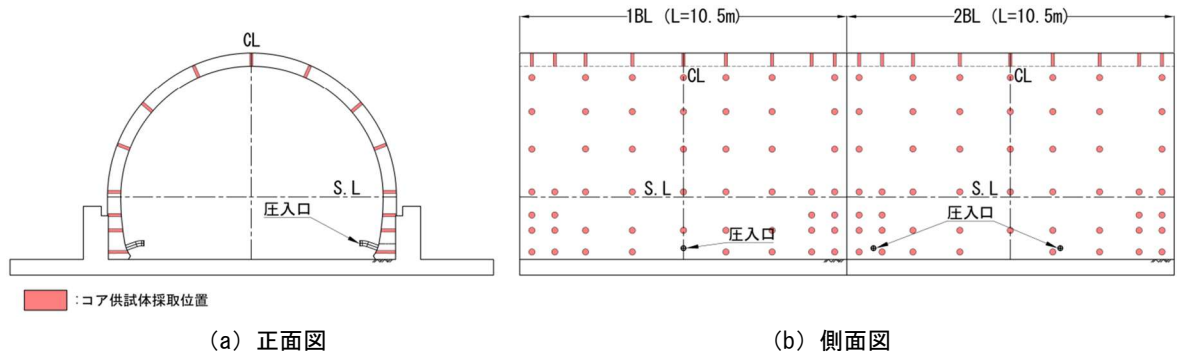


図-3 コア採取位置

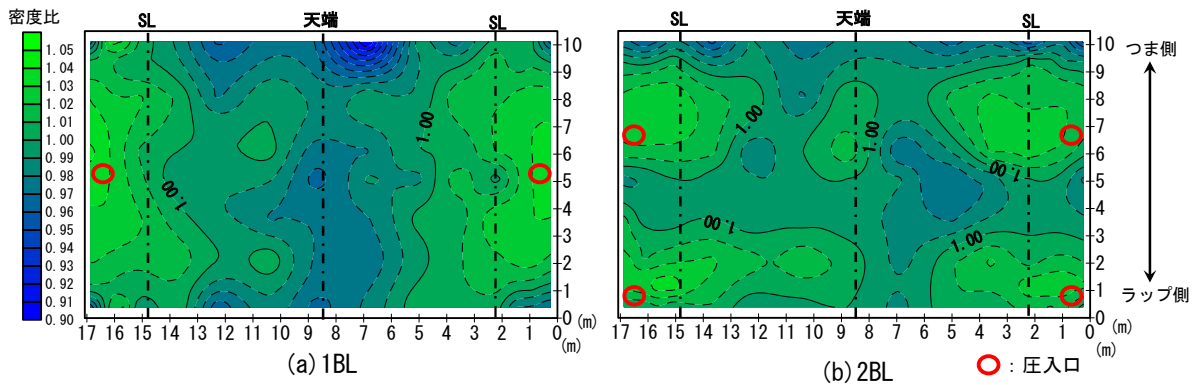


図-4 密度比のコンター図

表-2 自己充填コンクリートの試験結果

BL	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
1BL	595 x 580	4.9	19
2BL	605 x 600	5.4	31

いずれの BL においても、ピストン式のコンクリートポンプ車を用いて圧送を行った。1BL のコンクリート圧入数量は約 84m<sup>3</sup>、圧入時間は 3 時間 14 分、2BL のコンクリート圧入数量は約 80m<sup>3</sup>、圧入時間は 3 時間 18 分であった。

1BL は冬季に、2BL は夏季に実験を行っている。

### 2.3 自己充填コンクリートの配合

実験は当社技術センター敷地内の実験ヤードで実施し、自己充填コンクリートは近郊のコンクリートプラントにて製造した。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 2 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、練混ぜ直後から 120 分後のスランプフローの経時変化量が-50mm 程度となるように試験練りを行っている。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 4m<sup>3</sup> を積み込み、実験ヤードへ運搬 (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てフレッシュ

性状の確認を行った。

### 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-3 にコア採取箇所の概要を示す。コアの直径はφ100mm とし、長さ約 400mm~650mm のコアを図に示す位置で 1BL につき 111 本、計 222 本採取した。コアの採取時期は、1BL が材齢約 8 週、2BL が材齢約 4 週である。

コアを採取後、覆工内面側 (スライドセントル側)、外面側 (外型枠側) を均等に切断し、残った中心部分のコアの両端面を研磨することで、φ100mm×長さ 200mm のコア供試体をコア 1 本につき 1 本作製した。その後、密度、粗骨材面積率および圧縮強度 (JISA 1107) の測定を行った。圧縮強度試験までの間、全てのコア供試体と同じ室内にて保管した。その後、1BL、2BL とともに材齢約 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<sup>34)</sup>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

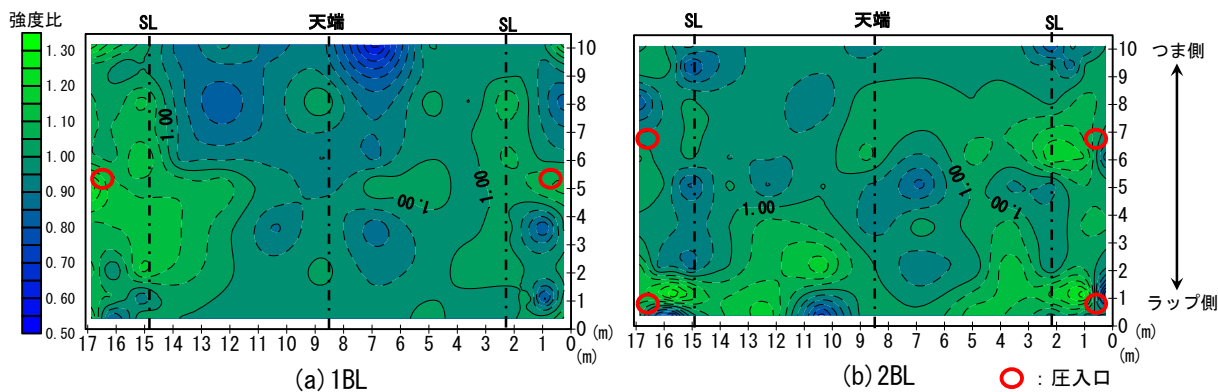


図-5 強度比のコンター図

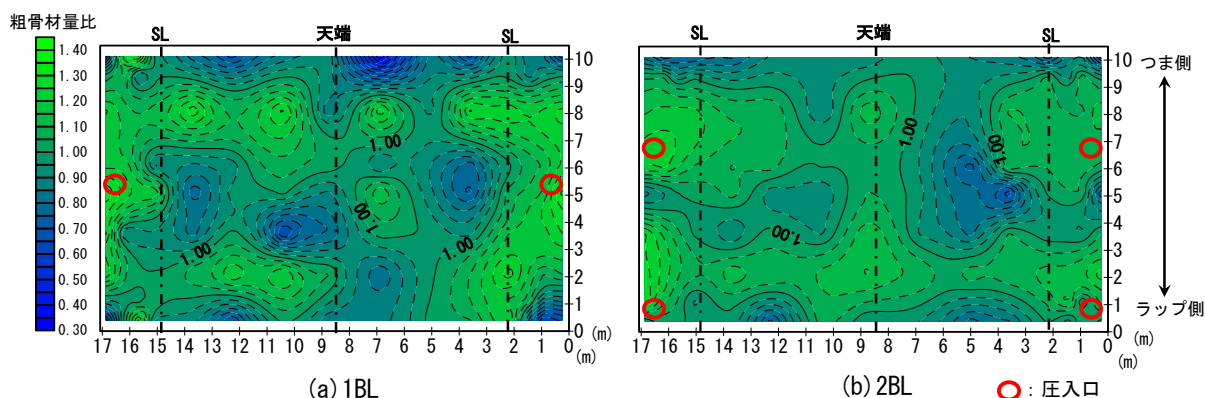


図-6 粗骨材量比のコンター図

とし、評価を行うこととした。

### 3. 実験結果および考察

表-2に1BL, 2BLの自己充填コンクリートの試験結果を示す。1BL, 2BLともに実験開始前に性状試験を行い、基準値以内に入っていることを確認し、実験を開始した。

図-4に1BL, 2BLの密度比のコンター図(等値線図)を示す。1BLの平均値は $2.36\text{g}/\text{cm}^3$ , 2BLの平均値は $2.30\text{g}/\text{cm}^3$ であった。図より、1BLの密度比は、圧入口を中心にSL下部において大きい傾向を示している。一方で、2BLにおいても1BLと同様に、圧入口付近の密度比が大きい傾向が見られる。しかし、1BLと違い圧入口の直上が大きい傾向を示している。

次に、図-5に1BL, 2BLの強度比のコンター図を示す。1BLの平均値は $59.5\text{N}/\text{mm}^2$ , 2BLの平均値は $52.3\text{N}/\text{mm}^2$ であった。なお、ポテンシャル供試体の圧縮強度は $50.3\text{N}/\text{mm}^2$ である。1BLの強度比は密度比と同様に、圧入口を中心にSL下部において大きくなる傾向が見られる。既往の研究<sup>5)</sup>において、柱状に作成した試験体から採取したコア供試体の圧縮強度は、水や空気が追い出されることで、下部での強度が大きくなることが報告されている。1BLにおいては、水や空気が天端方向へ追い出されたことにより、天端からSL下部へかけ密度

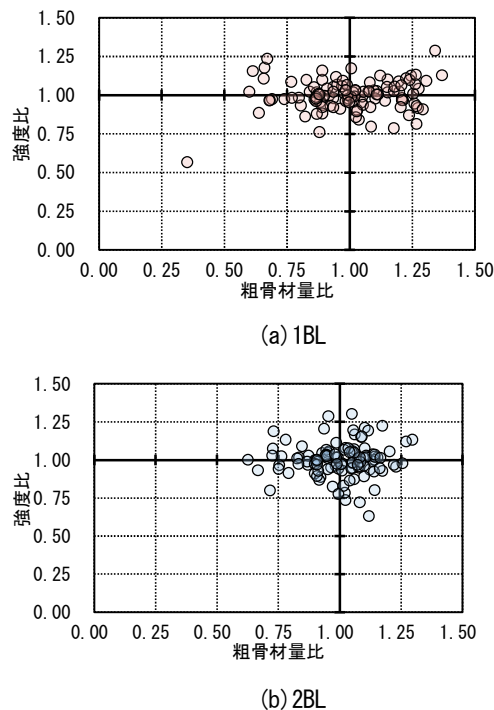
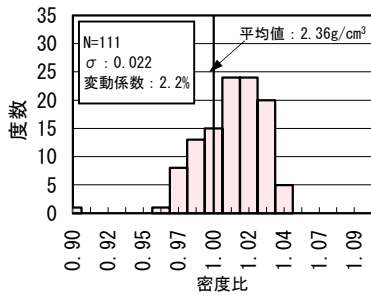


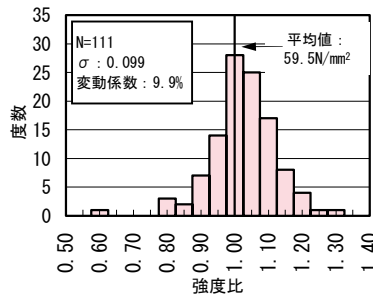
図-7 粗骨材量比と強度比との関係

比および強度比が大きくなるものと推察される。

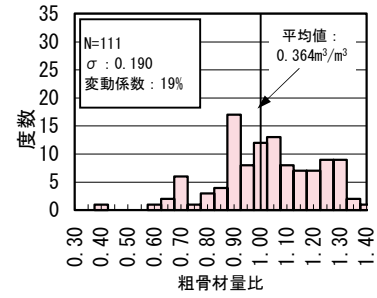
2BLに着目すると、圧入口付近およびその直上において強度比が大きい傾向が見られる。この傾向は、密度比の傾向と概ね一致している。一方で、1BLのようなSL下



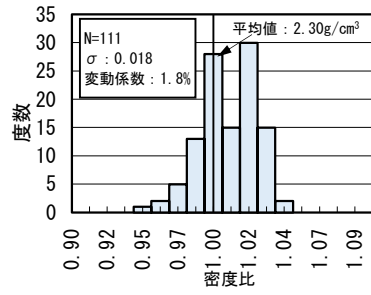
(a) 1BL



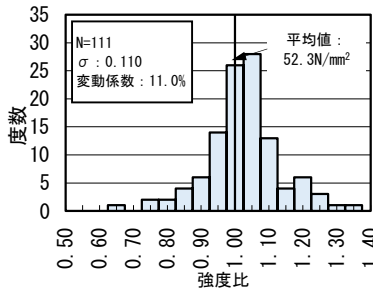
(a) 1BL



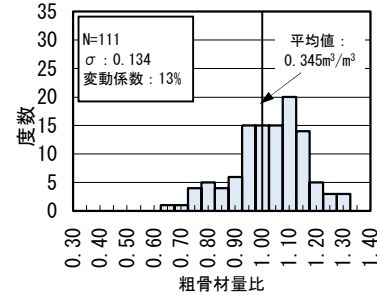
(a) 1BL



(b) 2BL



(b) 2BL



(b) 2BL

図-8 密度比のヒストグラム

図-9 強度比のヒストグラム

図-10 粗骨材量比のヒストグラム

部全域に渡り強度比が大きくなる傾向は見られず、天端部においては強度比が大きい箇所が確認できる。この点については、分岐管を用い圧入口2箇所からコンクリートを圧入したことにより、1箇所当たりの吐出量が減少したこと、2BLは夏季の施工であったため、ブリーディングに伴う空気や水分の移動が生じにくい状況であったこと等が影響していると考えられる。

図-6に1BL, 2BLの粗骨材量比のコンター図を示す。1BLの平均値は $0.364\text{m}^3/\text{m}^3$ 、2BLの平均値は $0.354\text{m}^3/\text{m}^3$ であった。1BLに着目すると、密度比ほど明確ではないが、おもにSL下部において粗骨材量比が大きい傾向が見られる。一方で、2BLにおいては、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、いずれのBLにおいても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<sup>9)</sup>が、今回の結果は、1BL, 2BLともに、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、図-7に1BL, 2BLの粗骨材量比と強度比との関係を示す。図より、いずれのBLにおいても粗骨材量比の大きさに関わらず強度比はおおむね0.75~1.25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、すなわち圧縮強度に影響を及ぼすものではないと考えられる。

図-8に1BL, 2BLの密度比のヒストグラムを示す。

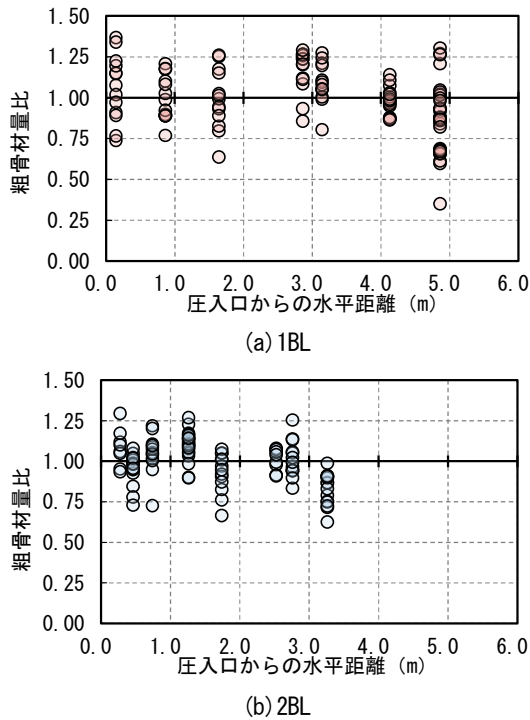
図より、1BLの変動係数は2.2%、2BLにおいても変動係数は1.8%と小さい。図-4では、天端からSL下部にかけ大きくなる傾向が確認されたが、この傾向は非常に小さい幅でのばらつきであったことが分かる。

図-9に1BL, 2BLの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<sup>9)</sup>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。1BLおよび2BLの変動係数は9.9%、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-10に1BL, 2BLの粗骨材量比のヒストグラムを示す。

図より、2BLの変動係数が13%と1BLよりも小さくなっていることが分かる。また、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<sup>7)</sup>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、2BLの覆工は、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低下したことが考えられる。土木学会コンクリート標準示方書<sup>8)</sup>では、高流動コンクリートにおいて粗骨材量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



図一11 圧入口からの水平流動距離と粗骨材量比

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。

図一11に1BL、2BL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、1BLでは、水平距離5.00m付近において粗骨材量比のばらつきの程度が若干ではあるが大きくなっていることが分かる。一方で、2BLでは、いずれの水平距離においても粗骨材量比のばらつきは同程度である。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る。

また、既往の研究<sup>3)</sup>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、図一11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、1BL、2BL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、図一11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) 圧入口の数に関わらず、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。
- (2) 圧入口の数に関わらず、密度比、強度比の変動係数は同程度となった。また、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、均質であるといえる。
- (3) 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粗骨材が不均質となる要因であることを確認した。しかし、圧入口を増設し水平距離を低減することで、均質な覆工を構築できる。
- (4) 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。

#### 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, 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) 壁状型枠を用いた圧入実験, 佐藤工業技術研究所報, No.46, pp.34-40, 2021
- 2) 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の自動化施工の開発—実物大実験による充填状況および出来映えの確認—, 土木学会全国大会第77回年次学術講演会, VI-299, 2022
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 川上英男: 粗骨材とコンクリート強度, 材料, 20巻, 208号, 1971
- 7) 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
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書【施工編】, p.239, 2017