

# 論文 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

小池 悟<sup>\*1</sup>・野間 康隆<sup>\*2</sup>・多宝 徹<sup>\*3</sup>・齋藤 淳<sup>\*4</sup>

**要旨**：山岳トンネルにおける覆工コンクリート天端部の施工は、施工完了ブロックとの境界付近に設置した吹上げ口よりコンクリートポンプの圧送力でもってスパン全体にコンクリートを充填していく吹上げ方式により実施される。この施工方法ではコンクリートを 10 m 程度流動させることとなるが、コンクリート品質への影響について、十分に検討されていない。そこで、吹上げ方式によるコンクリート品質への影響を検証するために、覆工天端部を模擬した実物大型枠を用いて実験を行った。実験を通じて、吹上げ口から充填していくコンクリートの挙動と、吹上げ方式で打ち込まれるコンクリートの品質が良好であることを確認した。

**キーワード**：NATM, 覆工コンクリート, 吹上げ方式, 充填状況, 材料分離

## 1. はじめに

矢板工法時代の覆工コンクリートは、覆工天端部に打込み用の配管を設置し、配管を引き抜きながら打ち込んでいく引抜き方式で施工が行われていた。昭和 60 年代以降、NATM が主流となり、覆工天端部の施工は吹上げ方式による打込みに変わった。吹上げ方式は、既設コンクリートとの境界(ラップ側)から 75 cm 程度離れた位置に吹上げ口を取り付け、そこからコンクリートポンプの圧送力でもってコンクリートを型枠内部へ送り込んでいく打込み方法である<sup>1)</sup>。これにより、引抜き方式では、コンクリートの投入箇所が随時移動し、コンクリートの連続性を保つことが困難であったのに対して、吹上げ方式は 1 箇所から連続的に打込みを行えるため、相対的に覆工コンクリートの品質は向上した<sup>2)</sup>。

しかし、覆工コンクリートを施工する際に使用する型枠(セントル)は、延長 10.5 m 程度のもを使用し、吹上げロー箇所からつま部にかけて連続して打ち込んでいくため、コンクリートを最大 10 m 程度流動させる必要が生じる。このような打込み方法は、一般の土木構造物の場合と比較して特異な打込み方法となるが、これによるコンクリート品質への影響については十分に検討されていない。

また、覆工天端部施工時の締固めは、セントルの作業窓から棒状バイブレータを用いて行われ、バイブレータによる締固め作業を行えるコンクリートは、棒状バイブレータが届く範囲に限られる。そのため、任意の位置でバイブレータによる締固めを行うことは難しく、時間差を持って打ち込まれたコンクリートの打重ね部分の締固めを十分に行うことができない場合もある。このような

ことから、覆工天端部でのコンクリートの締固め不足やコールドジョイントの発生というような、コンクリートの均一性や一体性が損なわれることが懸念される。

そこで、吹上げ方式による打込み方法がコンクリートの品質に与える影響を検証することを目的として、実物大の模擬型枠を用いて実験を実施した。

## 2. 実験概要

### 2.1 模擬型枠

実験に用いた型枠はトンネルの覆工コンクリートの天端部を実物大で模擬したものである。型枠の寸法は、延長 10.5 m、幅 5.0 m、厚さ 0.35 m とした。写真-1 に型枠の外観、図-1 に型枠の平面図を示す。

模擬型枠は、内型枠と外型枠からなり、内型枠はトンネル現場のセントルの天端部を再現し、外型枠は地山を模した。既設コンクリートとの境界面(ラップ側)は、既設コンクリートに替えて、鋼製のつま板で代替した。外型枠と内型枠の間は型枠セパレータで緊縛し、コンクリートの打込みによる型枠のはらみを抑制している。また、作業窓は実際のセントルを模して 1.5 m 間隔に設置した。ラップ側にはエア抜き孔を 1 箇所設置した。

### 2.2 打込み手順

コンクリートの打込みは、吹上げロー箇所から行った。締固めは内型枠に設置された作業窓から、棒状バイブレータを用いて実施した。

コンクリート打込み数量 19.4 m<sup>3</sup> に対して、4 m<sup>3</sup> 積み生のコン車 5 台分(合計 20 m<sup>3</sup>)のコンクリートを用いて実験を行った。また、コンクリート硬化後に充填性状を観察できるよう、コンクリートを生コン車毎に異なる

\*1 (株)安藤・間 技術本部 技術研究所 土木研究部 修(工) (正会員)

\*2 (株)安藤・間 技術本部 技術研究所 土木研究部 博(学) (正会員)

\*3 (株)安藤・間 土木事業本部 先端技術開発室 博(工)

\*4 (株)安藤・間 技術本部 技術研究所 土木研究部 博(工) (正会員)

色で着色した。表-1にコンクリート着色の諸元を示す。本実験では、現場に到着した生コン車に粉体状の着色剤を投入し、2分間高速攪拌することでコンクリートを着色した。

### 2.3 コンクリート配合と使用材料

表-2にコンクリートの使用材料、表-3にコンクリートの配合表を示す。コンクリートのスランブは、着色によるスランブロスを考慮し、ベースコンクリートのスランブを21cmとし、着色後のスランブを $18 \pm 2.5$ cmで管理した。

### 2.4 充填管理

#### (1) 圧力計

打込み時の内型枠にかかる充填圧をリアルタイムで計測するために、内型枠天端部のスキンプレートに圧力計を設置した。圧力計の設置箇所は、ラップ側、スパン中央、つま側の3箇所とした(図-1参照)。

#### (2) 充填検知システム

充填検知システム<sup>3)</sup>は、充填状況を確認したい箇所に振動デバイスを設置し、コンクリートと振動デバイスの接触状況により充填状況を判定するものである。本実験では、地山側に相当する外型枠の内表面に振動デバイスを設置した。設置箇所は、圧力計の直上の外型枠内表面とした。

## 3. 吹上げ方式による充填状況

### 3.1 従来の覆工天端部施工方法

一般に、覆工コンクリートの施工は、側壁部の打込み完了後、打込み口を天端の吹上げ口に切り替え、吹上げ方式により天端部の打込みが行われる。吹上げ方式により打ち込まれた天端部のコンクリートは、図-2の(a)→(b)→(c)の順番で充填されていく。すなわち、吹上げ口から型枠内部に打ち込まれたコンクリートは、ラップ部の際を天端から肩部に向かって横断方向に流下した後、つま側に向かって、縦断方向に肩部が充填されていく(図-2(a)参照)。その後、天端部に向かって徐々に充填高さを上げていく。流れてくるコンクリートは棒状パイプレータを用いて人力で締め固めが行われ、セントルの表面を覆っていく。パイプレータを操作する作業員はコンクリートの充填面積が広がるのにしたがって、作業窓を閉めながらつま側に移動する(図-2(b)参照)。作業窓を

すべて閉鎖した後は(図-2(c)参照)、つま板近傍を除いて、パイプレータを用いることなく吹上げ口からコンクリートを圧入する。その後、つま側まで完全に充填された段階で打込み完了となる。

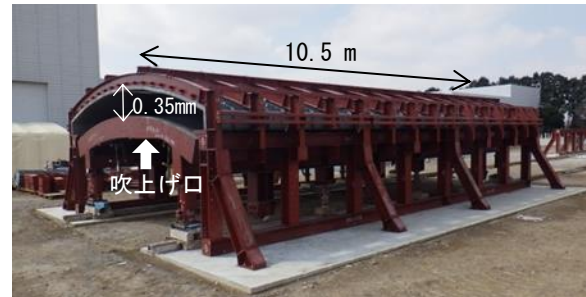


写真-1 実験用模擬型枠外観

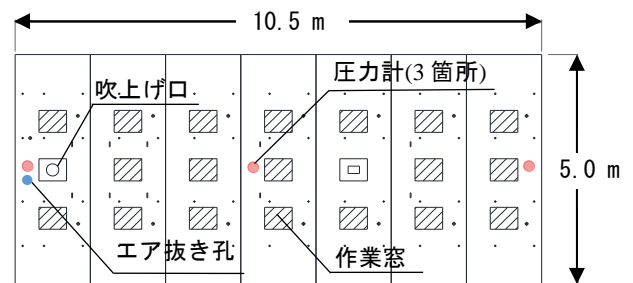


図-1 型枠平面図

表-1 コンクリート打込み諸元

	生コン車台数	累計打込み数量(m <sup>3</sup> )	着色
①	1台目	0~4	茶
②	2台目	4~8	橙
③	3台目	8~12	黄
④	4台目	12~16	赤
⑤	5台目	16~20	青

表-2 コンクリート使用材料

材料	種類	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント	密度:3.15g/cm <sup>3</sup>
細骨材	砂	表乾密度:2.58g/cm <sup>3</sup> , 実績率:2.5%
	砂利	表乾密度:2.69g/cm <sup>3</sup> , 実績率:3.1%
粗骨材	碎石	表乾密度:2.69g/cm <sup>3</sup> , 実績率:60.0%
混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系化合物
着色剤	酸化鉄	比重:4.1~5.2g/ml

表-3 コンクリート配合表

呼び強度	スランブ	粗骨材最大寸法	水セメント比	細骨材率	単位量					
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
N/mm <sup>2</sup>	cm	mm	%	%	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
27	21 (着色後:18)	20	53.0	48.9	175	330	596	266	928	3.30

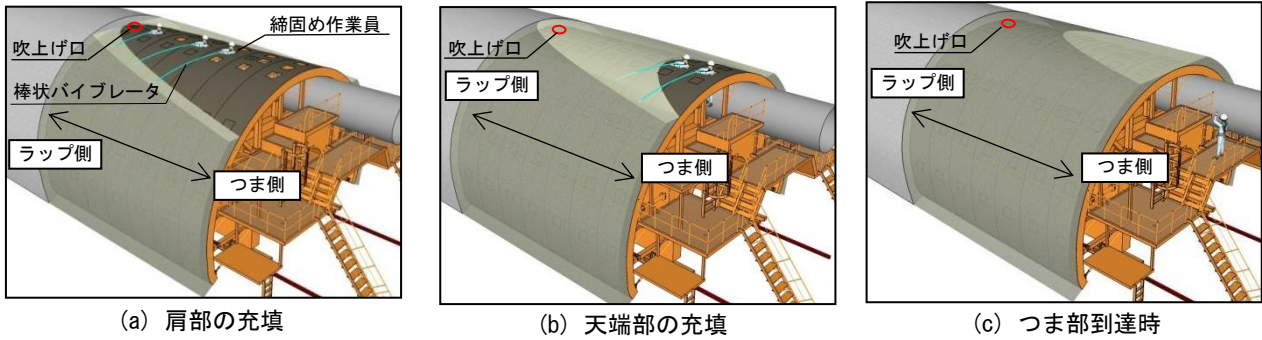


図-2 吹上げ方式によるコンクリート打込み概要

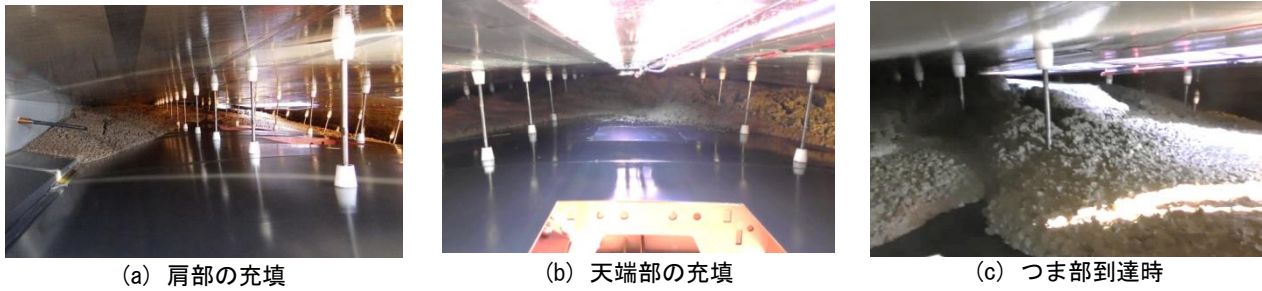


写真-2 実験時のコンクリート充填状況

### 3.2 実験による検証

#### (1) 打込み時の挙動

本実験で再現した覆工天端部のコンクリートの充填挙動について、打込み時および硬化後の目視観察により検討した。

写真-2(a)は1台目のコンクリートの打込み状況で、図-2(a)のように吹上げ口から、肩部に向かってコンクリートが流動している。写真-2(b)は3台目のコンクリート打込み完了時の充填状況である。この時点で、覆工内面となるセントルの天端部の大部分を覆い、つま板から3mの付近まで到達している(図-3参照)。写真-2(c)は、つま側までコンクリート到達直前の状況である。

写真-3、写真-4に硬化後のコンクリートの上面・下面を示す。写真上に示している①~⑤の数字は打込み順序を示している。写真-3、写真-4に示したコンクリート上面・下面の分布は概ね同じ傾向を示している。また、1~3台目に打ち込んだコンクリートは肩部に充填され、4、5台目のコンクリートは天頂部に帯状に充填されていることがわかる。

コンクリート打込み時に確認した状況では、3台目まで打込み完了した時点ではつま板から3mの区間を除いて、コンクリートがセントル天端を覆っていた(図-2(b)、図-3参照)。一方で、硬化後のコンクリートの充填状況を見ると、天端部には4、5台目に打ち込んだコンクリートが帯状に充填されている。このことから、圧入によって打ち込まれた4、5台目のコンクリートがセントル天端部を覆っていた3台目までのコンクリート肩部に押し出し、これを置換しながら充填していったものと推測される。

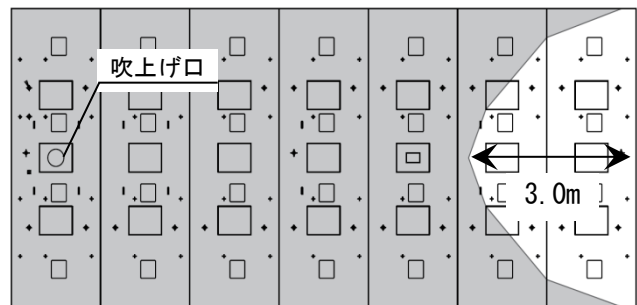


図-3 3台目打込み完了時の充填状況

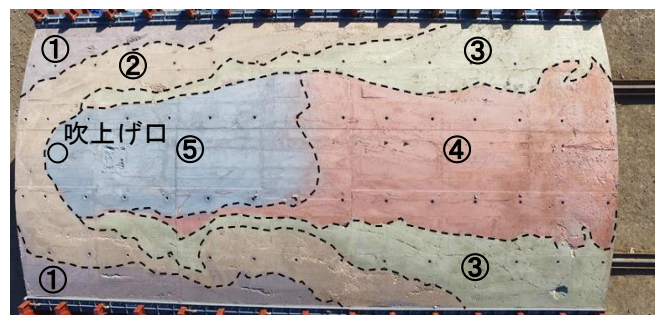


写真-3 硬化後コンクリートの充填状況(上面)

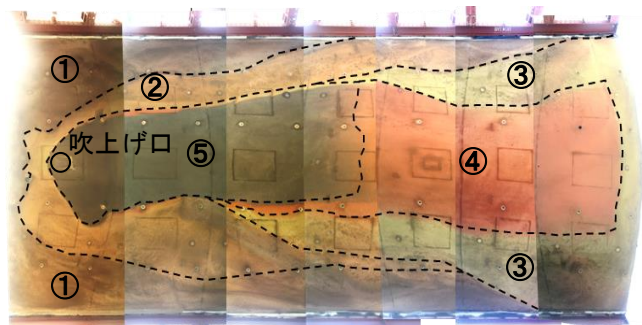


写真-4 硬化後コンクリートの充填状況(下面)

これまで筆者らは、セメント表面を覆いながらつま側にまで広がってくるコンクリートをバイブレータで締め固めることにより、覆工天端部下面の表面の気泡や縞模様の発生等の初期欠陥を防止していると考えていた。しかし、打込み完了後に天端部を覆っていたコンクリートは、4、5 台目に打ち込んだコンクリートで、通常の棒状バイブレータでの締め固めは困難となる。4、5 台目に打ち込んだコンクリートは、コンクリートポンプ車の圧送力による押し出し（圧入）のみで天端部に充填されていくことから、覆工天端部下面の表面品質は圧入によって担保されているものと考えられる。

## (2) 充填圧力の経時変化

図-4 に型枠に設置した圧力計の計測結果を示す。ここで、覆工巻厚 (0.35 m) 分のコンクリートの自重により載荷される圧力は 8 kPa ( $8 \text{ kN/m}^2 = 0.35 \text{ m} \times 23 \text{ kN/m}^3$ ) となる。この値がコンクリート充填の目安となる。スパン中央部の圧力計 (No.2) が 8 kPa を越えてくるのは、概ね 4 台目の打込み開始以降である。その後も圧力の上昇は緩やかで、つま側の圧力計 (No.3) が 8 kPa を超えるのは打込み終了直前で、最後に加圧充填を行うことで、No.1 ~ 3 の圧力計の値が急激に上昇する。

充填検知システムの計測結果と併せて検討すると、ラップ側の外型枠内表面に設置した振動デバイスの充填が確認されたのは、吹上げ口近傍に設置した圧力計 (No.1) の値が 30 kPa の時点であった。この値は、覆工巻厚分のコンクリート自重のおよそ 4 倍に相当する値である。このことから、ラップ側は、1,2 台目で概ね充填されるが、打込みの早い段階で完全に充填されることはなく、スパン全体にコンクリートが充填し、コンクリート自重の 4 倍の圧力が作用した段階で完全充填することわかった。

## 4. 硬化コンクリートの品質評価

覆工天端部のコンクリート (4, 5 台目のコンクリート) は、バイブレータによる締め固めが困難であるものの、吹上げ口からの圧入により、押し出されながら充填していくことがわかった。一方、肩部のコンクリート (1~3 台目のコンクリート) は、バイブレータで締め固めを十分に行えるものの、コンクリートを長距離流動させて充填されていくこととなる。これら締め固めの程度や充填性状の違いがコンクリートの品質に与える影響について、解析および試験により検討を行った。

### 4.1 粗骨材分布

#### (1) 画像解析による粗骨材分布の算出手法

コンクリート中の粗骨材の分布状況を、硬化コンクリートの切断面の画像解析により評価した。

天端部と肩部のコンクリートの流動による影響を検証するために、粗骨材分布量の算出は、写真-5 に示す

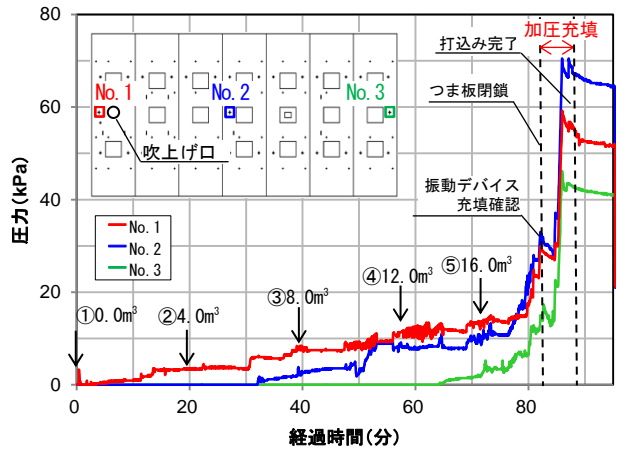


図-4 コンクリート充填圧力経時変化

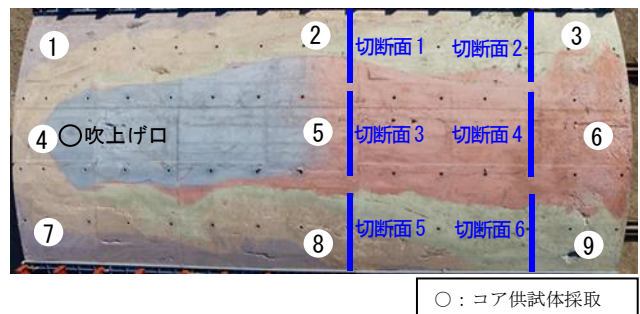


写真-5 コア供試体採取箇所および粗骨材量解析断面

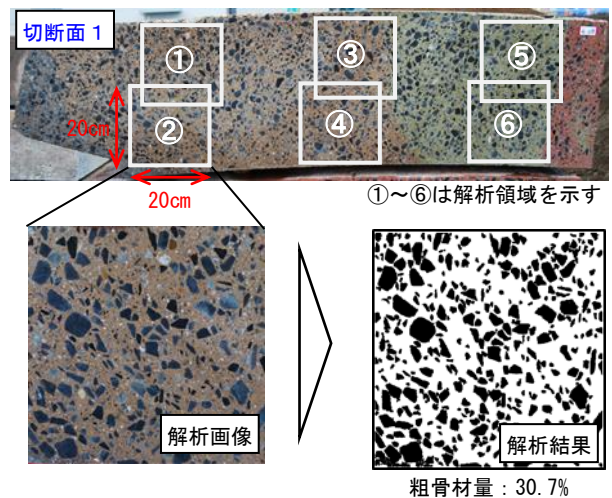


図-5 画像解析による粗骨材成分の判別

6つの切断面 (切断面 1~6) で行った。切断面毎に 20 cm × 20 cm の領域を 6 箇所 (図-5 参照) 選定し、その領域内に占める粗骨材量を画像解析により算出した。画像解析は、断面画像のモルタル成分と粗骨材成分とを色彩により判別し、粗骨材成分を抽出するアルゴリズムとなっている<sup>4)</sup>。抽出した粗骨材成分の解析画像領域内での割合を粗骨材量としている。図-5 に画像解析結果の一例を示す。

#### (2) 粗骨材分布の算出結果

表-4 に、画像解析による粗骨材量の算出結果を示す。

ここで、ラップ側からつま側に向かって左側の肩部を肩部 A、右側を肩部 B と呼ぶこととする。配合表の数値から算出した粗骨材量は 34.5 % で、各切断面の粗骨材量の平均値との差は最大でも 3.9 % であった。このことから、スパン全体における粗骨材量のばらつきは少なく、良好な品質であると言える。

切断面毎の粗骨材量のばらつきに与える影響を評価するために、それぞれの切断面で標準偏差を算出した。天端部での標準偏差は吹上げ口からの距離によらず値の変化は見られなかった。これは、天端部のコンクリートは流動させるといよりも、吹上げ口から押し出されながら充填していくため（圧入）、吹上げ口から遠い位置で充填されても、コンクリート中の粗骨材が分離しなかったと考える。一方、肩部の標準偏差に関しては、肩部 A は吹上げ口からの距離が近い切断面 1（スパン中央部）で値が大きくなり、肩部 B は吹上げ口からの距離が遠い切断面 6（つま側）で値が大きくなった。肩部のコンクリートはバイブレータで締め固め、流動させながら充填していくため、測定箇所により標準偏差の値が変化したと考えられる。但し、肩部 A と肩部 B で流動距離に応じた標準偏差の大小は異なっており、吹上げ方式という特殊な打込み条件下においては、流動距離の長短が粗骨材のばらつきに影響を及ぼすとは一概に言えないことを示している。今後、肩部の粗骨材のばらつきについて、より詳細に検討を進めていく必要があると考える。

#### 4.2 圧縮強度( $\sigma_{28}$ )

コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を評価するために、コア供試体 ( $\phi 100$ ) を採取し、圧縮強度試験 ( $\sigma_{28}$ ) を行った。写真-5 に示す 9 箇所から、2 本ずつ計 18 本の供試体を採取した。2 本ずつとしたのは、近接して 2 本のコア（高さ 350 mm）を採取し、高さ 200 mm の供試体を上側と下側で作成することで、覆工コンクリートの上面側と下面側の品質の差異を見るためである。

表-5 に試験結果を示す。計測値は肩部と天端部ごとにまとめ、それぞれの箇所の平均値は 30 N/mm<sup>2</sup> 以上となった。天端部のコンクリートは、締め固めを十分には行っていないが、圧力計の計測値で最大 70 kPa まで加圧充填し、高い圧力下で硬化したため、高い強度を発現したと考えられる。肩部の圧縮強度については、肩部 B に対して肩部 A の平均値は 2.7N/mm<sup>2</sup> 大きい値となった。表-4 の粗骨材量から、肩部 A はモルタル分が多くなっており、この値の差異が圧縮強度の大きさに影響を及ぼしたものと考えられる。また、標準偏差に関しては、いずれの箇所も小さい値であり、全体的に均質なコンクリートであると判断できる。

表-4 画像解析による粗骨材量

		粗骨材量 [%]						平均	標準偏差
		①	②	③	④	⑤	⑥		
肩部 A	切断面 1	30.1	30.7	37.6	37.3	26.4	28.4	31.8	4.26
	切断面 2	34.1	28.6	38.4	31.6	32.7	30.7	32.7	3.07
天端部	切断面 3	39.3	38.4	34.5	33.6	33.5	35.5	35.8	2.27
	切断面 4	42.1	37.6	41.2	39.1	36.4	33.7	38.4	2.85
肩部 B	切断面 5	37.1	35.0	43.7	36.2	39.2	36.7	38.0	2.85
	切断面 6	39.6	37.8	32.1	25.4	39.4	31.3	34.3	5.15

表-5 圧縮強度 ( $\sigma_{28}$ )

	圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]							標準偏差
	平均値							
肩部 A ①~③	37.9	35.3	35.1	33.8	31.9	32.9	34.5	1.92
天端部 ④~⑥	28.3	32.3	31.6	33.8	31.9	34.5	32.1	1.96
肩部 B ⑦~⑨	32.9	34.8	29.6	30.3	31.6	31.4	31.8	1.72

表-6 テストハンマー強度

		テストハンマー強度 [N/mm <sup>2</sup> ]			平均値	標準偏差
		平均値				
肩部 A	地山側	35.6	29.5	33.1	32.3	1.93
	内空側	32.5	30.5	32.3		
天端部	地山側	32.4	27.8	31.9	32.1	2.15
	内空側	34.2	34.3	31.8		
肩部 B	地山側	30.2	32.4	29.8	32.5	2.09
	内空側	35.1	35.1	32.1		

表-7 単位容積質量

	単位容積質量 [kg/m <sup>3</sup> ]							標準偏差
	平均値							
肩部 A ①~③	2314	2368	2323	2271	2331	2325	2322	28.3
天端部 ④~⑥	2341	2317	2314	2303	2276	2234	2297	34.4
肩部 B ⑦~⑨	2307	2333	2302	2307	2320	2312	2313	10.4

表-8 超音波伝播速度

	超音波伝播速度 [m/s]							標準偏差
	平均値							
肩部 A ①~③	4099	4219	4139	4002	4181	4154	4132	68.8
天端部 ④~⑥	4072	4172	4065	4016	3962	4024	4052	65.0
肩部 B ⑦~⑨	4116	4081	4063	3996	4067	4179	4084	55.5

### 4.3 テストハンマー強度

非破壊試験により測定されるテストハンマー強度を、コア供試体採取箇所と同等の位置の地山側と内空側のそれぞれの面で計測した。テストハンマー強度の測定は土木学会基準 JSCE-G504-2007 に準拠した。試験時の材齢は 18 日で、補正係数を掛けて材齢 28 日の強度を推定している。

テストハンマー強度の計測結果を表-6 に示す。計測値は、コア供試体の圧縮強度試験の結果と同様に、肩部と天端部ごとにまとめた。コア供試体の圧縮強度試験結果と比較すると、平均値は圧縮強度と同程度あり、最も誤差が大きい肩部 A との差は  $2.2 \text{ N/mm}^2$  程度であった。標準偏差に関しては、圧縮強度に対してテストハンマー強度の方が大きな値を示す傾向となっているが、テストハンマー強度の標準偏差の最大値は  $2.15 \text{ N/mm}^2$  であり、品質を評価する上では許容範囲内である。

以上より、非破壊試験であるテストハンマー強度の測定結果とコア供試体の圧縮強度試験結果は同程度の値を示し、テストハンマー強度からも全体的に均質性を有していることを確認できた。

### 4.4 単位容積質量・超音波速度

単位容積質量の測定結果を表-7 に示す。配合表での単位容積質量は  $2295 \text{ kg/m}^3$  であり、天端部および肩部の計測結果の平均値と比較しても、その差は 1.2 % と小さい。標準偏差に関しては最大で  $34.4 \text{ kg/m}^3$  で、平均値に対して 1.5 % 程度である。

超音波伝播速度の測定結果を表-8 に示す。超音波伝播速度に関しても、平均値および標準偏差ともに肩部と天端部との値の差は小さい。

以上の測定結果から、コンクリートの密実性に関してもスパン全体にわたって均質で、良好であることを確認した。

## 5. まとめ

本稿は、吹上げ方式による打ち込まれる覆工コンクリート天端部の充填挙動と品質に関して、実物大模擬型枠を用いた実験により得られた知見をまとめたものである。本実験を通じて、以下の(1)~(4)のことがわかった。

- (1) コンクリートを着色して打ち込むことで、コンクリートの充填状況を詳細に把握することができた。
- (2) コア供試体による圧縮強度等の計測結果から、コンクリートの流動による品質の低下は見られなく、ばらつきも許容範囲内であった。また、非破壊試験であるテストハンマー強度は圧縮強度試験結果と概ね同様の傾向を示し、非破壊検査からも良好な品質であることを確認できた。
- (3) 天端部のコンクリートは、従来の吹上げ方式で実施される圧入により、全体的に良好な品質を確保できることを確認した。
- (4) 画像解析による粗骨材分布の検討から、粗骨材量は天端部と比較して肩部でばらつきが大きくなる傾向がみられた。ただし、肩部のばらつきの原因についてはより詳細な検討が必要とされる。

### 参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書 [共通編]・同解説 / [山岳工法編]・同解説, p.196, 2016
- 2) 土木学会：トンネルライブラリー12 山岳トンネル覆工の現状と対策, p.24-25, 2002.9
- 3) 金子稔, 安田正雪, 末岡英二, 坂井孝：締固め検知機能を付加したコンクリートの充填検知システムの開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, No.1, pp.2077-2082, 2009
- 4) 野間康隆, 小池悟：画像解析を用いたコンクリート部材の切断面の粗骨材分布の計測に関する検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, pp.1881-1882, 2017.