

覆工コンクリート天端部の品質に関する実験的検討

小池 悟^{*1}・小野里みどり^{*2}・諸澤正毅^{*3}・野間康隆^{*1}・多寶 徹^{*4}

山岳トンネルの覆工天端部は、一般に吹上げ方式で施工され、施工完了ブロックとの境界近傍に設置した吹上げ口からコンクリートを打ち込み、スパン全体に充填される。この施工方法ではコンクリートを最大 10 m 程度流動させて打ち込むこととなるが、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。そこで、吹上げ方式による品質面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。実験結果から、圧入することで天端部のコンクリートの品質は確保され、良好な施工ができていることを確認した。一方、バイブレータの締固め方法等については、改善すべき点もあることがわかった。そこで、追加実験を行い、覆工天端部の打込み方法を改善する知見を得た。

キーワード： NATM, 覆工コンクリート, 吹上げ方式, 材料分離, 締固め

1. はじめに

山岳トンネル覆工コンクリートの天端部は、一般に吹上げ方式で施工される。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、そこから型枠内部へコンクリートをコンクリートポンプの圧送力で送り込んでいく打込み方法である¹⁾。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 程度のものが用いられる。吹上げ方式では、コンクリートの打込みを天端の吹上げ口一箇所からつま部にかけて連続して行うため、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。

そこで、従来の吹上げ方式による施工法がコンクリートの品質にどのような影響を与えるか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検証実験を行った。

検証実験では、①コンクリートの充填状況を詳細に把握することと、②均一性の高い良好なコンクリートとなっているかに着目して検証を行った。①に関しては、コンクリートを着色して打ち込むことで、コンクリート硬化後に充填状況を確認した。また②に関しては、切断面における粗骨材の分布状況やコア供試体の試験から得られたデータにて品質の均一性を評価した。

さらに、検証実験から得られた結果を踏まえ、改善策を検討し、その有効性を検証するための追加実験を行った。

本稿では、これらの実験から得られた知見を報告する。

2. 従来の天端部施工法の検証実験

2.1 実験の目的

矢板工法時代の覆工コンクリートは、コンクリートポンプの性能面から吹上げ方式での打込みが難しく、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を行っていた(図-1 参照)。

昭和 60 年代以降、コンクリートポンプの性能向上に伴い、NATM が主流となる頃には、覆工天端部の施工は吹上げ方式による打込みに変遷した(図-2 参照)。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。

一方で、コンクリートの流動距離に着目すると、天端部のコンクリートは 10 m 程度流動させることとなり、一般の土木構造物と比べるとかなり特殊な打込み方法となった。一般に、コンクリートの流動距離が長くなると材料分離などの問題が生じると考えられているが、覆工天端部において、このような打込み方法を採用する場合の品質面での検証は十分に行われていない。

また、覆工天端部の締固めは、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(図-2 参照)、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

*1 土木研究部 *2 技術企画部 *3 土木設計部 *4 先端技術開発室

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、筆者らは、従来の施工法での懸念事項を検証するために、実物大の実験用模擬型枠を用いて実験（以下、検証実験という）を行った。

2.2 実験概要

(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-3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。また、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。外型枠の天頂部にはアクリル製の観察窓を設け、コンクリート打込み中の充填状況を型枠上部から観察できるようにした。

(2) 打込み数量およびコンクリートの着色

コンクリート打込み数量は19.4 m³で、生コン車5台で4 m³ずつ合計20 m³のコンクリートを用いた。実験では、充填性状を検証するために、コンクリートを生コン車毎に異なる色に着色した。表-2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。

(3) 使用材料およびコンクリート配合

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21 cmとし、着色後のスランブを18±2.5 cmで管理した。

(4) 充填管理

コンクリートの充填性を確認するために、充填圧を計測するための圧力計とコンクリート締固め時の振動を検知することでコンクリートの充填を確認する振動デバイス²⁾を型枠内部に設置した。

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 ³)	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

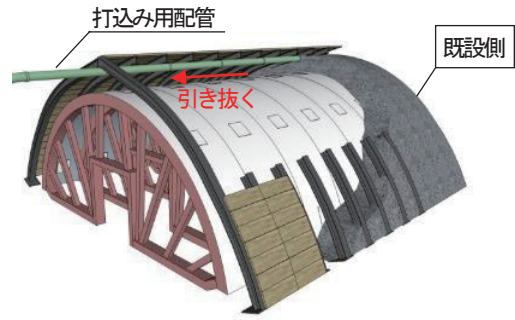


図-1 引抜き方式によるコンクリート打込み概要図

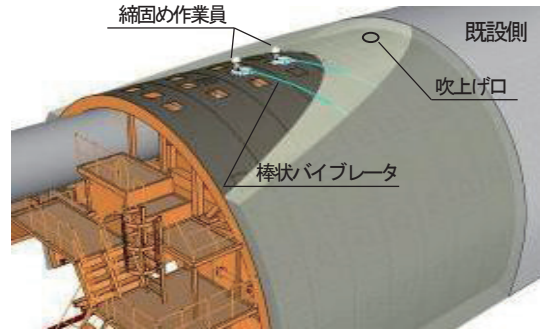


図-2 吹上げ方式によるコンクリート打込み概要図

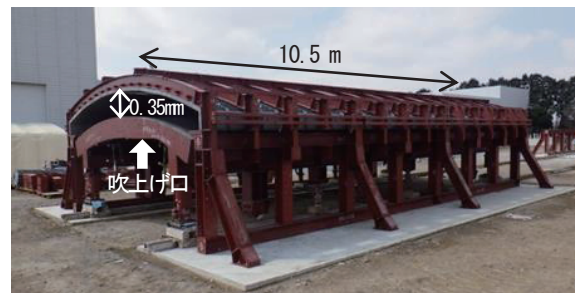


写真-1 実験用模擬型枠外観

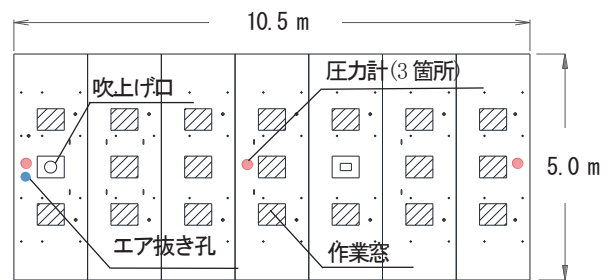


図-3 型枠平面図

表-2 コンクリートの使用材料

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 ³
	砂	表乾密度:2.58g/cm ³ , 実積率:2.5%
細骨材	砂利	表乾密度:2.69g/cm ³ , 実積率:3.1%
	砕石	表乾密度:2.69g/cm ³ , 実積率:60.0%
混和剤	高性能AE減水剤	フローリック SF500S
着色剤	酸化鉄	比重:4.1~5.2g/ml

圧力計は内型枠に取り付け、打込み時の型枠にかかる圧力をリアルタイムで計測した。圧力計の設置位置は、**図-3**に示すように型枠の長手方向中央部に3箇所とした。また、振動デバイスは外型枠の内表面に取り付けた。設置位置は、圧力計設置位置の直上とした。

2.3 コンクリート充填状況

(1) 従来の天端部施工方法

一般に、吹上げ方式で打ち込んだ覆工天端部のコンクリートは、**図-4**の(a)→(b)→(c)の順番で充填していく。打込み口を天端の吹上げ口に切り替えた直後のコンクリートは、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-4(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バイブ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。バイブ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-4(b)**参照)。作業窓をすべて閉鎖した後は(**図-4(c)**参照)、つま板近傍を除いて、バイブ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。

(2) 検証実験による充填状況の検証

検証実験では、従来の天端部施工方法を再現した実験を行った。**写真-2(a)**は1台目のコンクリートの打込み状況で、**図-4(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-5**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。なお、**写真-3**、**写真-4**ともに写真の上を北としている。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、

表-3 コンクリート配合表

呼び強度	スランプ	粗骨材最大寸法	水セメント比	細骨材率	単用量					
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
N/mm ²	cm	mm	%	%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
27	21 (目標:18)	20	53.0	48.9	330	330	596	266	928	3.30

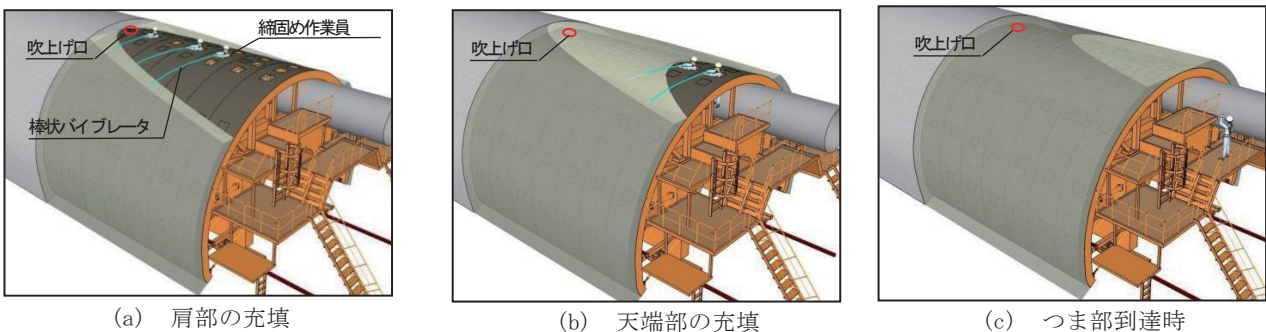


図-4 吹上げ方式によるコンクリート打込み概要

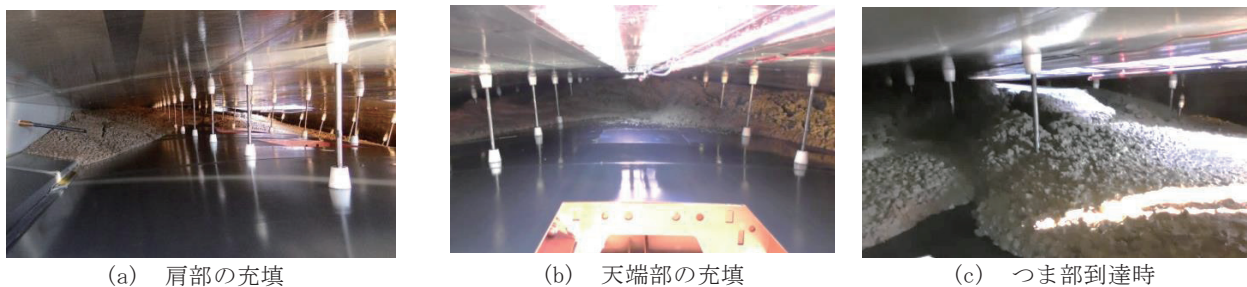


写真-2 検証実験におけるコンクリート充填状況

セントル天端をコンクリートが覆っている（図-4 (b)，図-5 参照）。一方、打込み後のコンクリート分布をみると、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、4、5台目に打ち込んだコンクリートが、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を肩部に押し出し、これを置換しながら充填していったものと推測される。

これまで筆者らは、セントル表面を覆いながらつま側に向かって広がってくるコンクリートにバイブレータをかけ、コンクリートの締固めを行うことで、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、通常の棒状バイブレータでは締固めが困難な4、5台目に打ち込んだコンクリートであった。このことから、覆工天端部下面のコンクリートは圧入によって、品質が確保されたものと考えられる。

図-6 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が充填された目安となる。型枠中央部の圧力計 (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。

なお、ラップ側肩部に設置した振動デバイスで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 と高い値に達した時点であった。

2.4 硬化コンクリートの品質評価

従来の施工方法では、天端部のコンクリートは、バイブレータによる締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されていくことがわかった。一方、肩部のコンクリートについては、バイブレータで締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。これら締固めの程度や充填性状の違いが覆工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した。

また、天端部のコンクリート (4、5台目のコンクリート) と肩部の (1~3台目のコンクリート) の境界部を観察すると、境界線が明瞭になっている状況が認められる。この部分の打重ね部が不均一になっている可能性があるため、天端部と肩部の打重ね部の品質評価も実施した。

(1) 粗骨材分布

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。

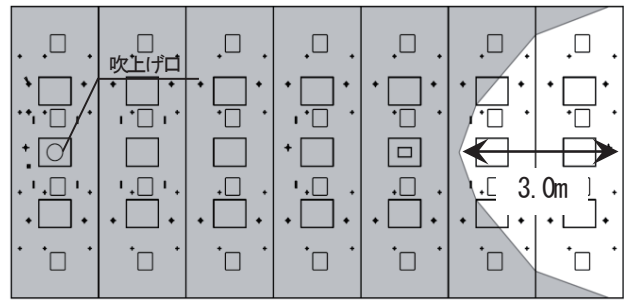


図-5 3台目打込み完了時のコンクリートの覆工天端部での充填状況

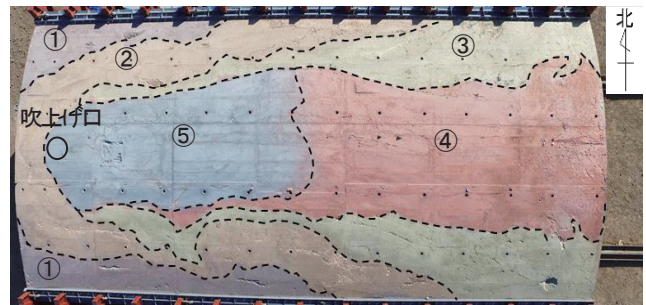


写真-3 硬化後コンクリート充填状況 (上面)

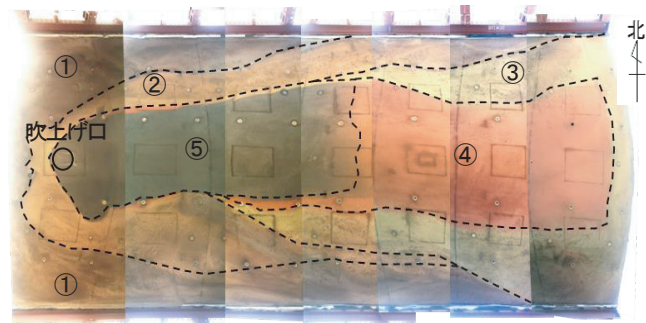


写真-4 硬化後コンクリート充填状況 (下面)

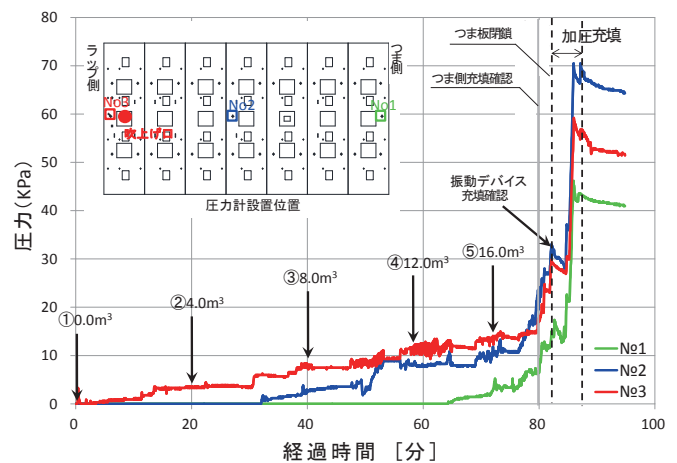


図-6 コンクリート充填圧力経時変化

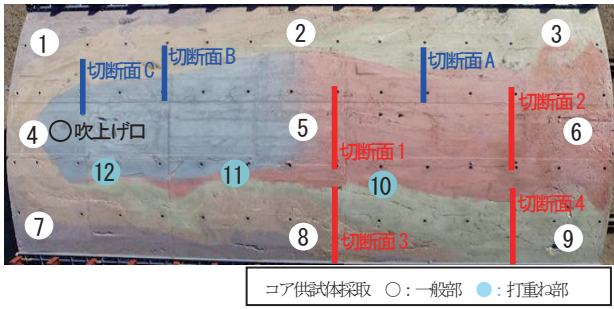


写真-5 コア採取箇所および解析評価断面

天端部と肩部のコンクリートの横移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4つの切断面（切断面1～4）で行った。それぞれの切断面毎に20 cm×20cmの領域を6箇所選定し、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、筆者らが開発した断面画像のモルタル成分と粗骨材成分とを色彩で判別し、粗骨材を抽出するアルゴリズムとなっている³⁾。図-7に画像解析による粗骨材成分抽出の解析結果の一例を示す。

表-4に、画像解析による粗骨材量の算出結果を示す。各切断面の平均値を比較すると全体的に大きなばらつきはないが、切断面4の標準偏差が天端部（切断面1, 2）や肩部の切断面3と比較して、2倍程度と大きくなっている。これは、コンクリートを流動させる肩部と圧入に近い状態で打ち込んだ天端部とで材料の分離傾向に違いが出た可能性や、コンクリートの移動距離の違いによる影響であると考えられる。

(2) コンクリート圧縮強度

コンクリート圧縮強度の傾向を検討するために、コア（φ100）採取による圧縮強度試験（σ28）を行った。写真-5に示す9箇所（一般部①～⑨）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300mm）を採取し、高さ200mmの供試体を上側と下側で作成することで、覆工の上面側と下面側の違いを見るためである。

表-5に圧縮強度試験結果を示す。計測値は肩部と天端部ごとにまとめ、各箇所（①～⑨）の平均値は30 N/mm²以上となっている。特に、天端部のコンクリートについては、バイブレータをかけていないにもかかわらず、高い圧縮強度を示している。これは、圧力計の計測値で最大70kPa程度まで加圧充填した効果であると考えられる。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。

(3) 単位容積質量・超音波伝播速度

採取したコア供試体を用いて、単位容積質量および超音波伝播速度を計測した結果を表-6、表-7に示す。

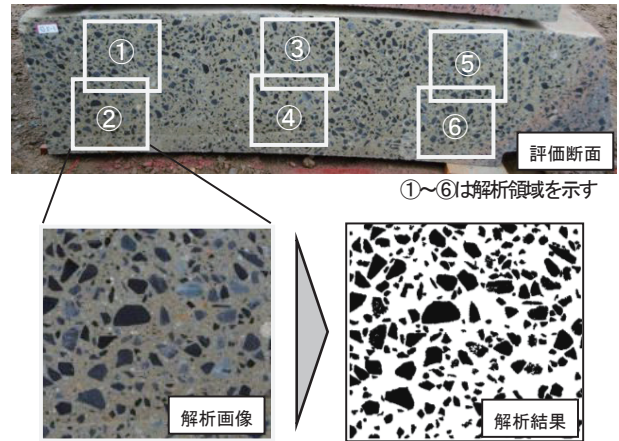


図-7 画像解析による粗骨材成分の判別

表-4 粗骨材分布量

		骨材量 [%]						平均	標準偏差
		①	②	③	④	⑤	⑥		
天端部	切断面1	39.3	38.4	34.5	33.6	33.5	35.5	35.8	2.27
	切断面2	42.1	37.6	41.2	39.1	36.4	33.7	38.4	2.85
肩部	切断面3	37.1	35.0	43.7	36.2	39.2	36.7	38.0	2.85
	切断面4	39.6	37.8	32.1	25.4	39.4	31.3	34.3	5.15

表-5 コア供試体による圧縮強度（一般部）

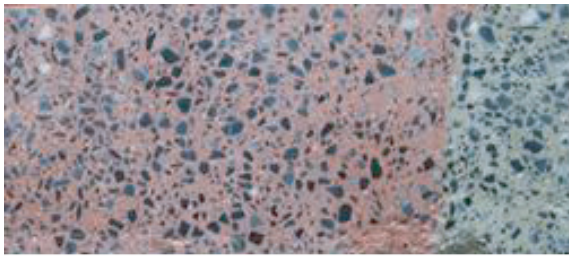
	圧縮強度 [N/mm ²]						平均値	標準偏差
	①	②	③	④	⑤	⑥		
肩部 ①～③	37.9	35.3	35.1	33.8	31.9	32.9	34.5	1.92
天端部 ④～⑥	28.3	32.3	31.6	33.8	31.9	34.5	32.1	1.96
肩部 ⑦～⑨	32.9	34.8	29.6	30.3	31.6	31.4	31.8	1.72

表-6 コア供試体による単位容積質量（一般部）

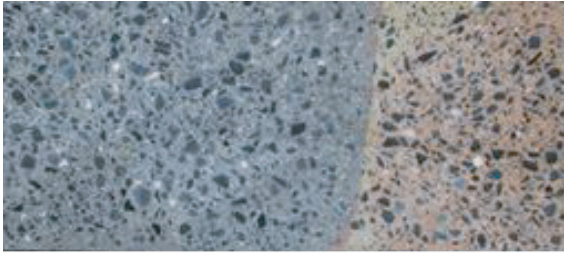
	単位容積質量 [kg/m ³]						平均値	標準偏差
	①	②	③	④	⑤	⑥		
肩部 ①～③	2314	2368	2323	2271	2331	2325	2322	28.3
天端部 ④～⑥	2341	2317	2314	2303	2276	2234	2297	34.4
肩部 ⑦～⑨	2307	2333	2302	2307	2320	2312	2313	10.4

表-7 コア供試体による超音波伝播速度（一般部）

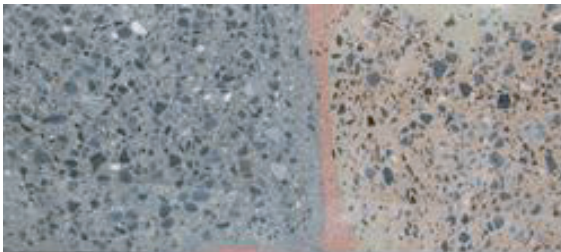
	超音波伝播速度 [m/s]						平均値	標準偏差
	①	②	③	④	⑤	⑥		
肩部 ①～③	4099	4219	4139	4002	4181	4154	4132	68.8
天端部 ④～⑥	4072	4172	4065	4016	3962	4024	4052	65.0
肩部 ⑦～⑨	4116	4081	4063	3996	4067	4179	4084	55.5



(a) 切断面A



(b) 切断面B



(c) 切断面C

写真-6 打重ね部の切断面の状況

表-8 打重ね部の圧縮強度 (材齢62日)

	圧縮強度 [N/mm ²]						平均値
	33.6	34.5	35.6	32.2	33.0	33.5	
コア供試体 ⑩~⑫	33.6	34.5	35.6	32.2	33.0	33.5	33.7

配合表での単位容積質量は2295 kg/m³であり、天端部および肩部の計測結果の平均値と比較するとその差は1.2%と小さい。標準偏差については、最大で34.4 kg/m³となり、平均値に対して1.5%程度である。また、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各箇所での値の差は小さい。以上のことから、圧縮強度と同様にスパン全体にわたって均質性を有していると考えられる。

(4) 打重ね部の検討

写真-5に示す切断面A、BおよびCの観察を行い、天端部と肩部の打重ね部の品質評価を行った。写真-6にコンクリート切断面を示す。切断面の観察から、打重ね部付近は、比較的モルタル分が多く集まり、粗骨材量が減少していることがわかる。

次に打重ね部でのコンクリート強度を確認するために、打重ね部でコアを採取し、圧縮強度を測定した。コア採取箇所は写真-5の打重ね部⑩~⑫で、それぞれの箇所

本ずつコアをサンプリングした。なお、コアの採取時期の都合により材齢は62日となった。表-8に圧縮強度試験の結果を示す。材齢が異なることもあるが、一般部のコア圧縮強度試験の平均値(表-5参照)と同程度以上であり、打重ね部の圧縮強度は良好であると判断できる。

切断面の観察からは境界面付近のコンクリートに不均一性が見られたものの、圧縮強度は良好で、耐荷力上の問題は認められなかった。一方で、粗骨材の分布が顕著に偏る可能性もあり、乾燥収縮量の相違等からひび割れが誘発されることも懸念される。よって、より高い品質のコンクリートとするためには、打重ね部の施工方法の改善が必要である。

2.5 検証実験のまとめ

本章では、従来方法の打込みによる覆工コンクリート天端部の品質を実物大型枠により確認した。従来、覆工天端部については、コンクリートを10 m程度流動させることから、コンクリートの品質に何らかの問題があることが懸念されていた。

本実験の範囲内ではあるが、吹上げ口からコンクリートを圧入する場合(吹上げ方式)には、コンクリートの流動距離が長くても、十分な耐荷力を有する均質なコンクリートを施工できることが明らかになった。

その中で、今後、さらにコンクリートの品質を高めていくための改善点を以下にまとめる。

- ・吹上げ口からの圧入により押し出しながら充填されていく天端部のコンクリートの締固め方法
- ・天端部のコンクリートとそれ以前に打ち込んだ肩部のコンクリートとの打重ね部における締固め方法
- ・肩部のコンクリートにおいて、流動距離が長くなるつま側のコンクリートの品質向上

3. 天端部施工法の改善実験

3.1 概要

本章では、検証実験の結果を受けて、以下の事項の改善に向けた対策について述べる。

- ①天端部のコンクリートの締固め、および天端部のコンクリートとそれ以前に打ち込んだコンクリートの打重ね部の締固め
- ②肩部で流動距離が長くなるつま側のコンクリートの品質向上

これらの事項を改善するための追加実験を2ケース実施した。実験には、2章の検証実験で使用した模擬型枠と同じものを使用し、コンクリートの配合、使用材料も同じとした。

3.2 改善実験1

(1) 実験概要

本実験は「①天端部のコンクリートの締固め、および天端部のコンクリートとそれ以前に打ち込んだコンクリートの打重ね部の締固め」の改善を目的とした実験である。

改善実験1では、2章で実施した通常施工を模した検証実験に加えて、天端部の締固めに引抜き式パイブレータを用いる。これにより、検証実験では締め固めることが困難であった天端部コンクリートの締固めが可能となり、天端部コンクリートの品質向上が見込める。コンクリートの着色順は表-9に示す通りに行い、各生コン車におけるコンクリート着色作業は検証実験と同手順で実施した。

(2) 実験状況

引抜き式パイブレータは、コンクリートの打込みに先立ち、型枠内部に設置しておいた。この状態で、コンクリートが充填完了するまで、検証実験と同様に棒状パイブレータを用いて施工を行った。その後、コンクリートの充填完了時点で、引抜き式パイブレータを加振させながら引き抜いた(写真-7, 図-8参照)。なお、引抜き式パイブレータを引き抜いた際に生じた空間に周囲のコンクリートが流入し、充填圧が低下するため、引き抜き後に所定の圧力となるまで、再度コンクリートを打ち込んだ。

(3) 実験結果

写真-8, 写真-9に硬化後の上面と下面の充填状況を示す。コンクリートの充填完了時点(引抜き式パイブレータの加振前)までは検証実験と同じ打込み方法であるが、コンクリートの分布は検証実験と若干異なっていた。目標範囲内のコンクリートのフレッシュ性状の変動であってもコンクリートの流路に影響を及ぼすものと考えられる。

表面の着色コンクリートの境界部に着目すると、検証実験では、大部分のコンクリート境界が明瞭で、コールドジョイントではないものの、打重ねの不均一さが認められた。一方、改善実験1では、引抜き式パイブレータにより締固めを行った打重ね部の境界は不明瞭となり、打重ね状態の改善が見られた。

ただし、引抜き式パイブレータは打込み完了後1回だけの締固めであるため、コンクリートの分布状況により効果の差が出やすいことも考えられる。改善実験1では、天端部の引抜き式パイブレータを2本としたが、引抜き式パイブレータの本数を増やし、打重ね部全体をパイブレータの締固め範囲とすることで、さまざまなコンクリートの分布状況に対応できるものとする。

表-10に材齢28日におけるコア供試体の圧縮強度を示す。なお、コア供試体は検証実験と同じ位置から採取し、引抜き式パイブレータによる効果を評価するために天端部のみのデータを示している。試験結果より、天端部にお

ける圧縮強度の平均値は検証実験での値と比較して、約8%向上した。

表-9 コンクリート打込み諸元 (改善実験1)

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

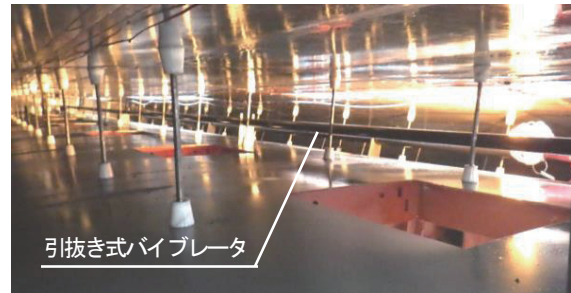


写真-7 引抜き式パイブレータ設置状況

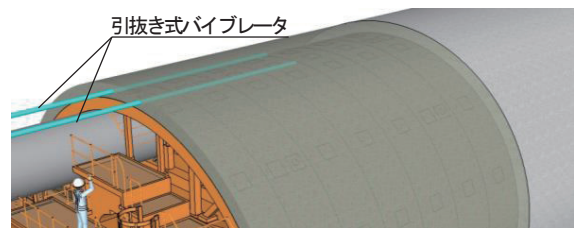


図-8 引抜き式パイブレータ概要



写真-8 硬化後充填状況 (改善実験1: 上面)

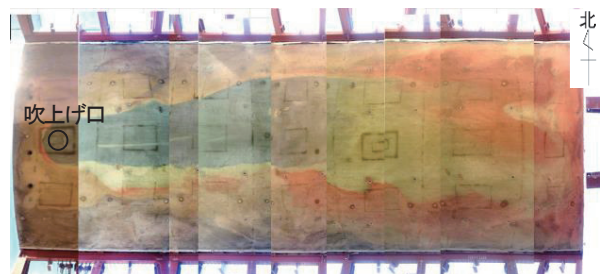


写真-9 硬化後充填状況 (改善実験1: 下面)

表-10 圧縮強度試験結果 (改善実験1)

	計測値 [N/mm ²]						平均値	標準偏差
	39.1	35.8	30.9	36.1	27.8	38.0		
天端部 ④~⑥							34.6 (32.1)	3.98 (1.96)

()内は検証実験での値

3.3 改善実験2

(1) 実験概要

本実験は、改善実験1で目的とした「①天端部のコンクリートの締固め、および天端部のコンクリートとそれ以前に打ち込んだコンクリートの打重ね部の締固め」の改善に加えて、「②肩部で流動距離が長くなるつま側のコンクリートの品質向上」の改善を目的とした実験である。改善実験2では、改善のための施策を2種類講じた。

1つ目の施策は、通常は天端部に設けた一箇所の吹上げ口から打ち込まれる肩部のコンクリートを、先行して別の方法で打ち込むものである。肩部の先行施工方法の一例として、肩部に追加の吹上げ口を設け、そこから肩部を充填させていく方法などが考えられる。これにより、天端部の吹上げ口からの打込み量を低減し、コンクリートを流動させる量を最小限にすることができる。

2つ目の施策は、天端部の締固めを伸縮式バイブレータで行うものである。伸縮式バイブレータは、セントル天端に挿入孔を開け、型枠内にバイブレータを差し抜きできる状態で設置する(写真-10、図-9参照)。コンクリート打込み時は、バイブレータを差し込んだ状態で打ち込み、充填状況に応じてバイブレータを作動させる。コンクリートの充填を確認した後に、バイブレータを加振させながら引き抜くこととした。改善実験1で用いた引抜き式バイブレータは打込み完了後に1回しか作動できないが、伸縮式バイブレータは吹上げ口からの打込み中でも随時作動させることができる。

(2) 実験状況

改善実験2では、肩部の先行施工は、ブーム式コンクリートポンプ車を用いて、外型枠に設けた作業窓からコンクリートを打ち込んだ。両肩部のコンクリートを水平に打ち込んだ後に、配管を吹上げ口に接続し、吹上げ口からコンクリートを打ち込んだ。この際、締固めは棒状バイブレータを使用した。

吹上げ方式で打ち込む際の締固めは、伸縮式バイブレータの効果を確実に把握するために、通常の棒状バイブレータを併用せず伸縮式バイブレータのみを使用して行った。バイブレータ作動のタイミングは、打込み状況をつま側から観察し、コンクリートの充填状況に応じて伸縮式バイブレータを適宜作動させた。

コンクリートの打込み順序を表-11に示す。コンクリートの着色は全5色とし、生コン車は計6台で打ち込んだ。

(3) 実験結果

写真-11、写真-12に硬化後の上面と下面の充填状況を示す。肩部を先行して打ち込むことで、吹上げ口から打ち込むコンクリートの量が減少したことから、コンクリートの分布は他のケースと異なっている。

表-12にコア供試体の圧縮強度試験の結果を示す。試験結果より、天端部と肩部ともに検証実験と比較して標準偏差は小さくなっており、ばらつきが少ないことがわかる。肩部のばらつきの減少は、肩部の先行施工を行い、コンクリートを流動させないで打ち込んだことによる効果であり、今後、実施工を想定した追加実験が必要であると考えている。

また、天端部の圧縮強度のばらつきの減少に関しては、伸縮式バイブレータにより、打込み中、任意のタイミングで締固めを行ったことによる効果であると考えられる。

表面の着色コンクリートの境界部は、改善実験2では、打重ね面が明瞭に確認できる部分はほぼなくなった(写真-11参照)。これより、検証実験、改善実験1と比べて

表-11 コンクリート打込み諸元(改善実験2)

生コン車台数	累計打込み数量(㎡)	着色	打込み箇所
1台目	0~4	橙	肩部
2台目	4~7		
3台目	7~10	茶	天端部
4台目	10~13	黄	
5台目	13~16	赤	
6台目	16~20	青	

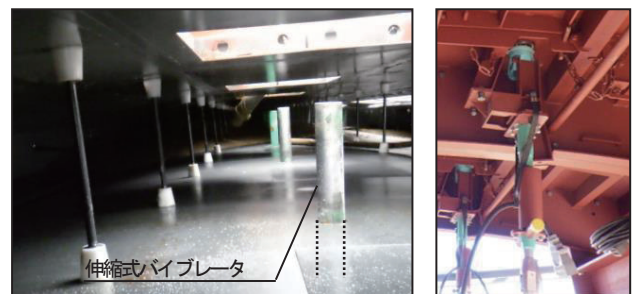


写真-10 伸縮式バイブレータ概要

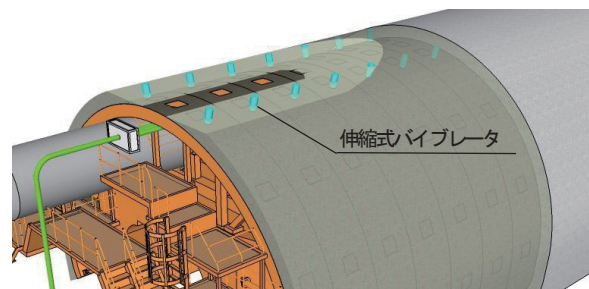


図-9 伸縮式バイブレータの設置状況

表-12 圧縮強度試験結果(改善実験2)

	圧縮強度 [N/mm ²]						標準偏差
	平均値						
肩部 ①~③	34.7	37.3	35.4	33.7	32.9	34.5	1.36 (34.5) (1.92)
天端部 ④~⑥	32.8	35.2	30.6	32.6	33.7	32.4	1.40 (32.1) (1.96)
肩部 ⑦~⑨	34.0	35.7	35.4	35.1	35.2	33.9	0.71 (31.8) (1.72)

()内は検証実験での値

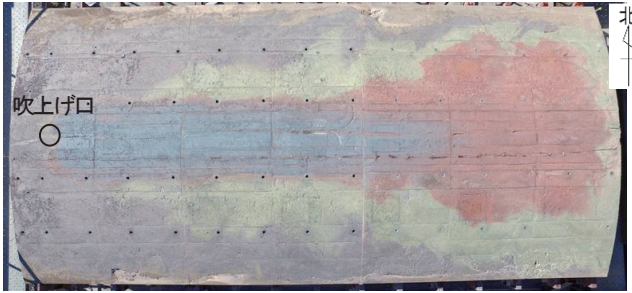


写真-11 硬化後充填状況 (改善実験2: 上面)

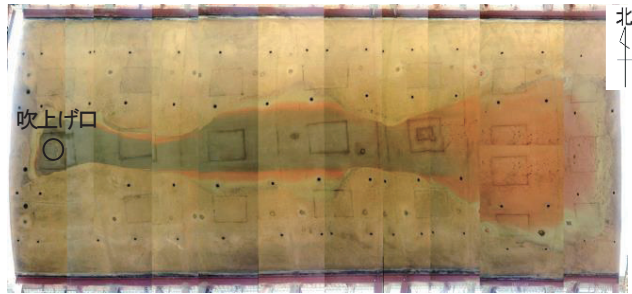


写真-12 硬化後充填状況 (改善実験2: 下面)

も、打重ね部が改善されたと判断できる。これはコンクリート打込み中に、随時、伸縮式バイブレータを加振させることで、打重ね箇所を含め全体的にコンクリートを締め固めることができた効果であると考えられる。

(4) 施工性について

伸縮式バイブレータは、型枠外部から、スイッチのオンオフだけで締め固めを行えることから、棒状バイブレータによる締め固め(写真-13参照)と比較して、作業員への負荷が大幅に軽減された(写真-14参照)。

改善実験2の天端部については、棒状バイブレータを全く用いなかったが、コンクリートの仕上がり、締め固め等において、十分な品質を得ることができた。

4. まとめ

本稿は、吹上げ方式による打込みが覆工天端部のコンクリート品質に与える影響を検証するための実験から得られた知見をまとめたものである。

まず、従来の覆工天端部の施工方法がコンクリートの品質にどのような影響を与えるのかを検討することを目的として、実物大の模擬型枠を用いて検証実験を行った。その結果、以下の(1)~(5)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評価することができた。
- (2) コア供試体による圧縮強度等の計測結果から、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。
- (3) 吹上げ方式による天端部コンクリートの流動距離は長くなるが、従来の施工法で実施される圧入により、全

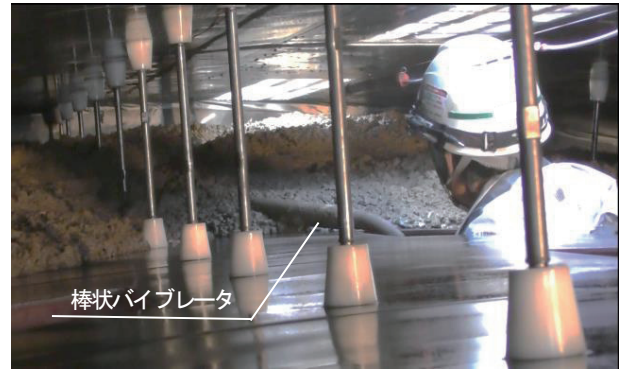


写真-13 従来法による締め固め状況



写真-14 伸縮式バイブレータ使用状況

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、肩部コンクリートの流動距離が長くなるつま側で、粗骨材量の変化が認められた。
- (5) 肩部のコンクリートと天端部のコンクリートの打重ね部において、一部不均一な所があった。
 続いて、従来の施工法の検証実験から得られた課題を踏まえて、2つの改善実験を行い、それらの有効性について検証した。その結果、以下の(6)~(8)ことがわかった。
- (6) 改善実験1の結果から、天頂部のコンクリートの締め固めに対し、引抜き式バイブレータが有効であることがわかった。
- (7) 改善実験2の結果から、肩部を先行して打ち込み、吹上げ口からの打込みを天端部に限定することにより、肩部、天端部のコンクリートの品質を向上させることができた。さらに、伸縮式バイブレータはコンクリート打込み中に随時加振させることができるため、打重ね箇所を含め、全体的にコンクリートを締め固めることができた。これらより、覆工コンクリート天端部の品質向上に繋がった。
- (8) 伸縮式バイブレータの使用により、施工性が改善され、覆工天端部における打込み作業の省力化に繋がると考える。

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) 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
- 3) 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.

Experimental Study on Quality of Tunnel Lining Concrete at the Crown

Satoru KOIKE, Midori ONOZATO, Masanori MOROSAWA,
Yasutaka NOMA and Toru TAHO

In general, tunnel lining concrete at the crown is placed by the upward concrete-injection method and a blow hole for placing concrete is installed at the edge of the formwork. Although the flow distance of concrete is approximately 10m with this method, this effect has not been sufficiently evaluated. Therefore we conducted a model test using a full-scale formwork to evaluate quality of concrete. Consequently, notable segregation was not be observed despite the long-distance flow of concrete. Additional model tests were conducted to evaluate the compaction methods and an improved construction method was proposed.