

すさみ串本道路における生産性向上の取り組み ～遠隔臨場やCo覆工自動打設～

井出 善太¹・笹嶋 和彦²

¹近畿地方整備局 琵琶湖河川事務所 工務課 (〒520-2279滋賀県大津市黒津4-5-1)

²近畿地方整備局 京都国道事務所 京都第一出張所 (〒612-8208京都府伏見区下鳥羽但馬町25)

紀南河川国道事務所では、和歌山県西牟婁郡すさみ町と東牟婁郡串本長を結ぶ一般国道42号すさみ串本道路の早期供用を目指している。その事業の中で、生産性向上の取り組みの一部として遠隔臨場及びCo覆工自動打設がある。本稿では、その二つの取り組みの内容についての説明を行い、そして有効性及び課題についてまとめたものである。

キーワード 遠隔臨場, Co覆工自動打設, 生産性向上

1. すさみ串本道路の概要

一般国道42号「すさみ串本道路」(図-1,2参照)は、近畿自動車道紀勢線の一部として、和歌山県西牟婁郡すさみ町と東牟婁郡串本町との間を結ぶ延長19.2kmの自動車専用道路であり、2014年度に事業化された。現在紀伊半島南部にある幹線道路は現道の国道42号のみであり、線形が厳しいことに加えて台風や豪雨などの異常気象発生時には度々通行止めとなっている。そのため、すさみ串本道路は、本地域における災害時の信頼性・安全性の確保、救急医療活動の支援、観光活性化等を目的に整備が行われている。また、近い将来高い確率での発生が懸念されている南海トラフの巨大地震に伴う大津波により、現道の大部分は浸水区間内に入ると想定されており、浸水区間を回避する高さに計画されているすさみ串本道路は、「命の道」として1日も早い供用が期待されている。すさみ串本道路は、既に供用済みとなっている近畿自動車道紀勢線の区間に加えて事業中の串本太地道路(2018年度事業化)・新宮道路(2019年度事業化)・新宮紀宝道路(2015年度事業化)と合わせて紀伊半島を1周する高規格幹線道路となる予定である。本論文では、R2年度に施行された遠隔臨場と事業の一部である二色トンネル工事の中のCo覆工自動打設について記載する。

2. Co自動覆工打設について

(1)すさみ串本道路二色トンネル工事の概要

一般国道42号すさみ串本道路二色トンネルは、和歌山県東牟婁郡串本町閼野川地先から二色地先に位置し、トンネル延長365m、掘削断面積124m²、内空幅が12mの上半

3心円扁平大断面トンネルである(図-1)。工事着手は2019年月4月12日、覆工開始は2020年7月29日である。施工基面の地質は、新生代第三紀中新世の堆積岩である熊野層群敷屋累層に属する泥岩、泥岩優勢互層が分布し、破碎帯を介在する(図-2)。延長の約40%は地山強度比が0.4~1.6の低強度地山であり、延長の56%は小土被りである。実施したトンネル支保パターンは、表-1に示す。掘削方法は、トンネルの切羽の安定と作業性に優れる球面切羽による大背先行上半先進ベンチカット工法爆破掘削を基本にして、施工サイクルの切羽で1日1回のDigital出来形測量を実施、掘削面や吹付け面、切羽形状の出来形を確認して、施工を確実にしている(図-3)。覆工は、トンネル掘削完了後に開始する。覆工施工単位(BL)の1ブロック長は、10.5mである。これらを考慮して、覆工コンクリート移動型枠を計画する。

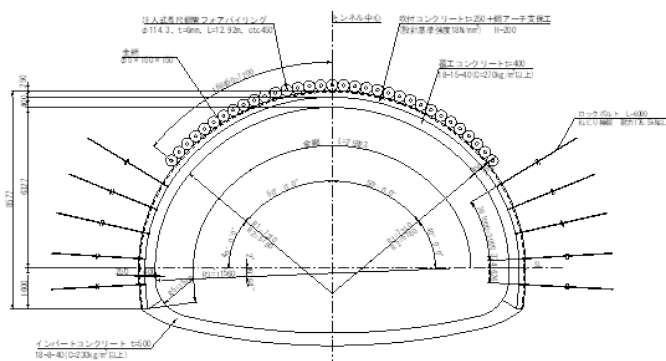


図-1 坑口 DIIIa1 パターン概要

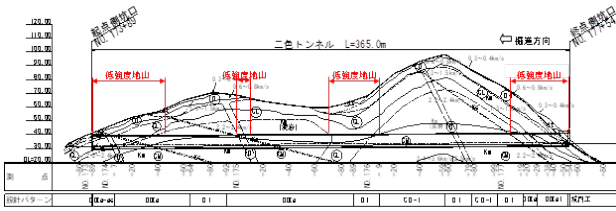


図-2 地質縦断面

表-1 トンネル支保パターン諸元

支保パターン	D Ⅲa (D Ⅲa1)	C Ⅱ i	D Ⅰ
地山等級	D Ⅰ, D Ⅱ	C Ⅱ	D Ⅰ
一振進長 (m)	1.00	1.20	1.00
吹付け厚 (cm)	25	15	20
鋼アーチ支保工サイズ	H-200	H-150	H-150
ロックボルト, 周方向間隔	L=6m, 1.0m	L=4m, 1.2m	L=6m, 1.0m
掘削補助工	(注入式炭尺先受)		



図-3 球面切羽全景 (大背先行上半先進ベンチカット工法) (2)現場流動覆工コンクリート施工について

a) 現場流動覆工コンクリート自動施工システム概要

JIS 認定生コン工場製造ベースコンクリートに増粘剤一液タイプ流動化剤 (FD) を高速攪拌させた現場流動覆工コンクリートの締固めは、「型枠バイブレータ (VB) の加振で、打込んだコンクリート表面が水平となり、流動が止まる状態にする」を基本とし、流動性に優れ、材料分離がない現場流動覆工コンクリートの特性を活かす合理的な吹上げ方式の打込みとする。コンクリート圧送、配管切替え、打込み装置の打込み口への移動、型枠バイブレータ (VB) 締固めは、作業をパターン化し、PC システムによる機械制御で、覆工コンクリート施工を自動化する (図-4)。打込み締固めの施工パターンは、PC システムの計画 DB で規定する。PC システムは、各種センサからのリアルタイムデータで施工状況を把握、監視し、計画 DB の施工手順に従ってマンピュレータ方式配管切替えと打込み装置、型枠バイブレータシステムなどの各種装置およびコンクリートポンプを自動制御する。施工状況や締固め状態は、数値で確認でき、実施 DB に保存する。

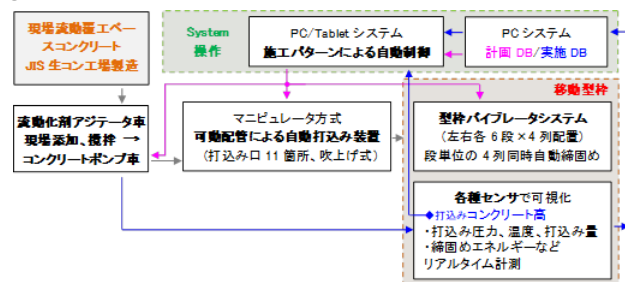


図-4 自動覆工システムフロー図

b) 覆工自動施工計画

現場流動覆工コンクリートの特性を活かすコンクリート打込みは、切羽妻側からの吹上げ方式を採用する。コンクリート打込み口と配管切替えは、PC 制御の機械による自動打込みとし、締固めは、型枠バイブレータ (VB) による自動パターン締固めである。アーチ部のコンクリート打込み締固めがトンネル品質に大きく影響する上半 3 心円大断面トンネルの現場流動覆工コンクリート自動施工システム計画の考え方と主な機能は、以下に示す。

①移動型枠にマンピュレータ方式打込み装置と型枠バイブレータを装備し、PC システムで自動制御する。

②打込み締固めの 1 施工単位は、側部と肩部はコンクリートボリュームを 2m³ずつ、天端部は 4m³を基本とし、打込み箇所番号 (①~⑮) で規定する (図-5)。この箇所の施工で使用する打込み口 (IL, IR) と型枠バイブレータ (VL, VR) は、PC システムの計画 DB に登録する。

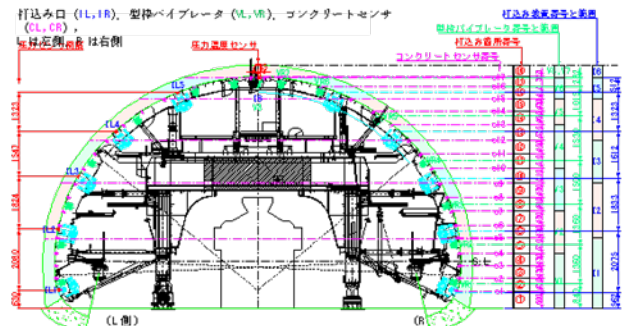


図-5 打込み箇所番号・装置の打込み範囲と締固め範囲 (妻側断面図)

③1 施工単位は、打込み高を 30~60cm とし、移動型枠中央 (4 間目) に配置するコンクリートセンサ (CL, CR) でコンクリート表面位置を検知、到達を確認して打込み箇所の打込みを終える (図-6)。

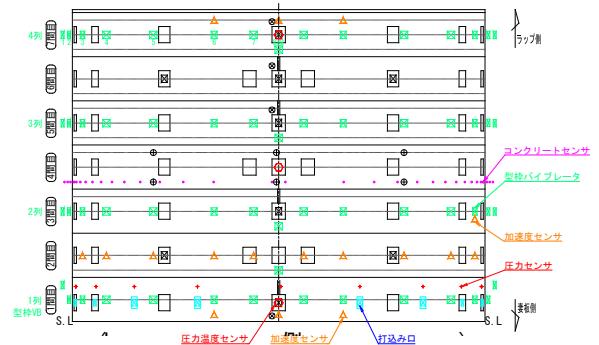


図-6 各種センサ配置概要 (平面図)

④打込み速度は、打込み高さ 1.5~2.0m/h、コンクリートボリューム 12~16m³/h を目安とする。

⑤打込み口は、トンネル周方向に 1.5~2.5m 間隔、左右に 5 箇所、天端に 1 箇所の計 11 箇所を妻側に設ける (図-7)。左右 5 箇所の打込み口の切替えは、打込み箇所番号との対応で PC が判断し、打込み口シャッタを閉めてから上方の打込み口に移動する。天端の打込み口 1 箇所 (I6) は、上半 3 心円扁平大断面トンネルであるので、

固定式の検査窓式打込み口とする。

⑥型枠バイブレータ (VB) は、周方向最大 1.5m 間隔、延長方向 3.0m 以内を目安に配置する。

⑦コンクリートの打込みは、多関節コンクリート可動配管のマニピュレータ方式打込み装置を左右に装備し、吹上げ方式で打込む。この PC 制御の打込み装置は、打込みノズルと打込みノズル移動台車で構成され、移動レールに沿ってトンネル周方向に移動する。打込みノズルは、油圧シリンダ PC 制御でトンネル軸方向前後に移動でき、打込みノズル挿入口に挿入、固定、解除、引抜きができる (写真-1)

⑧型枠バイブレータ (VB) によるコンクリート自動締固めは、10cm 以上のコンクリート被りを確保し、適正締固めエネルギー 3.7J/L 以上の加振を基本とする。締固めエネルギーは、コンクリート表面下の加振段について、締固めの都度、最大加速度を求め、締固めエネルギー換算式で算定する。

⑨型枠バイブレータは、段単位の稼働とし、最大 4 台の同時加振、段当たり 15 秒、最大 5 回の稼働とする。

⑩天端部は、コンクリートボリューム 4m³ 単位の自動打込みとし、その都度、左右 (V7) と天端 (V8) の型枠 VB を順次稼働させて締固める。防水シート表面天端中央の圧力温度センサがコンクリート圧力を検知した時点で、打込み締固めのパターン施工を終え、「打止め画面」に切り替えて、密充填のための打込みを継続する。

⑪コンクリート打止めは、管理値による自動打止めを基本とし、天端中央および既施工ラップ側と妻側の両端部の圧力温度センサがコンクリート圧力を検知し、移動型枠の沈下が管理値を超えた時点で密充填と判定し、覆工自動施工を完了する。

⑫覆工コンクリート養生は、脱型枠までの移動型枠養生である。

主要使用機械を表-2 に示す。施工状況、締固め状態、コンクリート打止めと脱型枠を数値で可視化し、施工管理するための各種センサは、表-3 に示す。



写真-1 マニピュレータ方式自動打込み装置全景

表-2 主要使用機械

機械名	用途
コンクリートポンプ車	コンクリート圧送、PS制御
アジテータ車	コンクリート運搬、流動化攪拌
流動化剤添加装置	印字記録付き
マニピュレータ方式打込み装置	吹上げ方式コンクリート打込み
打込み口	移動型枠妻側、シャッター自動開閉
打込むノズル	マニピュレータ方式自動打込み装置
打込みノズル移動台車	マニピュレータ方式自動打込み装置
型枠バイブレータ	コンクリート締固め
スライドセントル	覆工自動施工用移動型枠

表-3 各種センサ

センサ名	用途
コンクリートセンサ	打込みコンクリート表面位置検知
圧力センサ	打込みコンクリート圧力など
加速度センサ	締固めエネルギー算定
圧力温度センサ	打止め圧力、積算温度
沈下計	移動型枠沈下量

c) 覆工パターン施工

覆工コンクリート施工は、PC システムの計画 DB に施工パターンと装置の動きを規定する。覆工コンクリート自動施工順序は、打込み箇所番号①から⑰を左右切り替えながら施工フローにしたがって行う (図-8)。(1)の打込みは、PC システムから打込み箇所番号の打込み開始の確認が求められ、オペレータは PC 画面で確認、開始を指示する。これによりコンクリートポンプが稼働し、打込みを開始する。打込み箇所の打込み高をコンクリートセンサが検知した時点でポンプは自動停止、打込みを終える。その後、(2)型枠バイブレータ締固めを開始し、15 秒間稼働する。この(1)(2)を PC 画面で確認しながら打込み箇所番号⑰まで繰り返す。

天端部の打込み箇所⑱は、コンクリートボリューム 4m³ 単位の打込みとし、その都度、左右 (VL7, VR7) と天端 (V8) の型枠バイブレータ (VB) を順次稼働させて締固める。トンネル天端中央の圧力温度センサがコンクリート圧力を検知した時点で打込み締固めのパターン施工を終え、ポンプ車ストローク単位の打込みに切り替える。コンクリート打止めは、管理値の天端 3 箇所のコンクリート圧力 (0.005N/mm² 以上を目安) と移動型枠の沈下 (最大 5mm) で密充填を確認、判定し、覆工施工を終える。

なお、覆工コンクリート自動施工システムの安定性を確認後、自動運転に切り替え、システムと施工状況およ

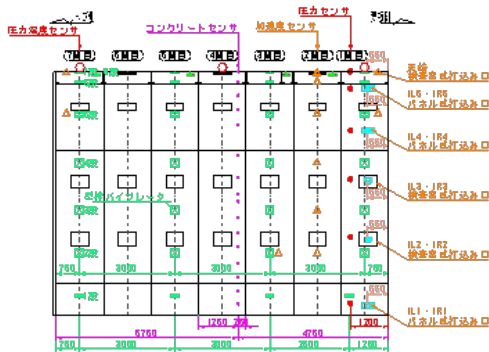


図-7 打込み口・型枠バイブレータ・各種センサ配置概要

び締固め状態を画面で確認、監視する。

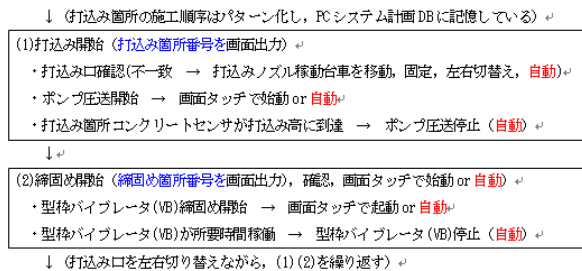


図-8 打込み箇所の自動施工フロー

d) 覆工施工パラメータ計測

打込み口 11 箇所のコンクリート圧力とポンプ車コンクリート押し出し圧力を連続計測し、施工状況を把握、確認する。締固めエネルギーは、締固めの都度、19 箇所の加速度センサで最大加速度を求め、締固めエネルギーを算定、累積、PC 画面に出力し、締固め状態と締固め時間を確認する。トンネル中心天端の妻側、中央、ラップ側の 3 箇所の防水シート表面に圧力温度センサを貼り付け、コンクリート圧力と温度を 2 秒間隔に自動計測、同時に移動型枠 4 箇所の沈下計からの沈下量を確認して、密充填を判断、打止める。脱型枠時の若材齢強度は、コンクリートの積算温度と実機試験時に求めた若材齢強度推定式を用いて算定し、脱型枠に必要とする圧縮強度との比較で、脱型枠を確認、判断する。移動型枠に作用するコンクリート圧力は、圧力センサでリアルタイム計測し、打込み速度を確認する。

e) 覆工コンクリート性能評価

現場流動覆工コンクリートの力学特性は、覆工 3 週後に、テストハンマーによる強度推定試験 (JSCE-G 504-2007) で数値化し、強度特性を確認する。試験断面は、覆工ブロック端から 1m 離れの妻側とラップ側の両端、締固めエネルギー評価の移動型枠 2 間目の計 3 断面である。測点箇所は、天端部、左右 SL 部とし、計 9 箇所である。覆工仕上がり表面品質は、剥離、気泡、砂すじ、色むら、打重ね線、目地不良、窓枠段差について目視観察で評価する。

(3)施工結果および得られた知見

a) 打込み締固め状況

覆工コンクリート自動施工システムの機械や装置、システムにトラブルはなく、PC システムは有効に機能し、所要性能を満たすことを確認した。T-1 (AdF) のフレッシュコンクリートの品質は安定しており、吹上げ方式打込み後のフレッシュコンクリート表面は、型枠バイブレータ (VB) 締固め後も同様であり、概ね水平を保ち、ブリージング水はなく、材料分離はみられず良好であった。5BL 施工時の坑内気温は 24℃、コンクリート温度は 27℃であった。生コン製造後から打込み完了までの時間は、

最大 1 時間、FD 後は 20 分であった。

b) 打込コンクリート圧力

FD=C×0.4%で無筋 5BL の打込み箇所打込み口のコンクリート圧力とコンクリートポンプ押し出し口圧力は、図-10 に示す。コンクリート押し出し口圧力の平均は 5.5N/mm² である。打込み口 11 箇所における打込み箇所別コンクリート圧力は、0.002~0.044N/mm² となり、打込み箇所が打込み口より上方になるにしたがい大きくなり、増加傾向は同様である。天端打込み箇所⑬は 0.023N/mm²、最大値は打込み口 I1 の 5 層時 (打込み箇所番号⑤) の 0.044N/mm² であり、ポンプ押し出し圧力の 0.7% 以下と小さく、吹上げ方式コンクリート打込み方法に課題はないということがわかった。

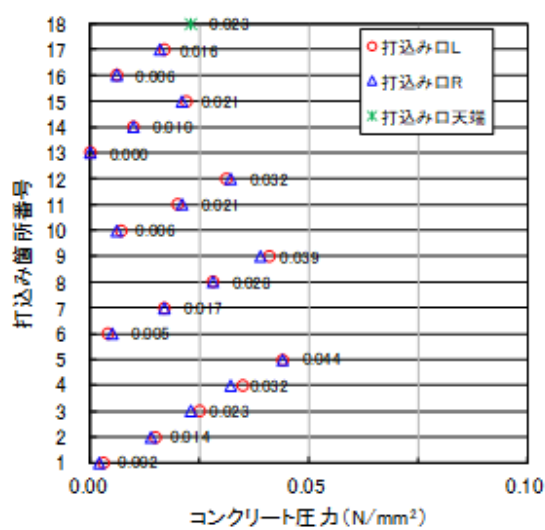


図-10 打込み箇所の打込み口コンクリート圧力

c) 打止めコンクリート圧力

5BL の妻側、中央、ラップ側 3 箇所の天端防水シート表面のコンクリート打止め時コンクリート圧力は、管理目標値の 0.005N/mm² を超えており、打ち込まれたコンクリートは圧力作用下であり、移動型枠が-2.0~-4.6mm 沈下、密充填を確認したので打止めた。その点で覆工コンクリートの自動施工を可能に出来た。打止め圧力が大きい妻側は、締固めエネルギーも大きかった。これは、ラップ側にはすでに打設したコンクリートがあるため圧力が伝わり安い状態にあったと考えられる。

d) 覆工コンクリート仕上がり品質

初回の 3BL と 2 回目 2BL の覆工表面の仕上がり状態を写真-4 に示す。この覆工ブロックは、坑口 IIIa の鉄筋区間で流動化剤添加量は FD=C×0.2% であり、スランプフローは管理値の範囲内にある。しかしながら、吹上げ方式打込みでは、目視観察から、覆工表面 SL 部にコンクリート移動跡が確認された。これが FD=C×0.5% では、フレッシュコンクリート移動跡は少なくなり、覆工表面仕上がり状態は、剥離、気泡、色むら、打重ね線などは見ら

れず、アーチ部のコンクリート打込み締固めがトンネル品質に大きく影響する上半3心円大断面トンネルにおける吹上げ方式自動打込みと型枠バイブレータのパターン締固めによる自動施工の覆工仕上がり面は、良好であることを確認した。ただし、 $FD-C \times 0.5\%$ よりも多く添加した場合についてはスランプフロー規定値上限の50cmを超えてしまうので施工はしていない。

e) 覆工コンクリート強度について

5BLの妻側、ラップ側の天端および2間目の天端と左右SL部の計5箇所のテストハンマー試験による3週推定強度は27.4~32.1N/mm²であり、設計基準強度 $f'_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 以上である推定強度の最大最小差は、天端部は1.1N/mm²、SL部は1.4N/mm²であり、ばらつきは小さい。推定強度は、打込みコンクリート圧力の違いによる有意な差はない。

これらから、吹上げ方式自動打込みとパターン締固め方法が覆工コンクリートの強度特性に及ぼす影響は小さく、覆工強度のばらつきが小さい覆工施工法であることが示された。

f) 覆工出来形確認

3Dスキャナによるターゲット自動認識法Digital出来形測量検測システムを用いて7BLの覆工出来形を測量、設計との差を色調表示した(表-4, 図-11)。覆工出来形は、レジストレーション誤差が3mmであり、許容値の設計±5cmの範囲にある。覆工厚は、覆工内空面と防水シート前吹付け面の点群データを用いて、仮想単位平面中心における空間離れを算定、これを覆工厚とし、設計厚との差を色調表示した(表-5, 図-12)。覆工厚の算定値は、設計厚40cm+余巻き10cmの範囲内にあり、設計厚は確保できた。

表-4 覆工内空出来形色調表示

閾値	色
覆工内空線-5cm, 内空側	赤
覆工内空線-5cm~-1cm	黄
覆工内空線±1cm	青
覆工内空線+1cm~+5cm	緑
覆工内空線+5cm, 地山側	桃

表-5 覆工厚色調表示

閾値	色
設計厚未滿	赤
(設計厚+余巻き)未滿	青
(設計厚+余巻き)以上	緑

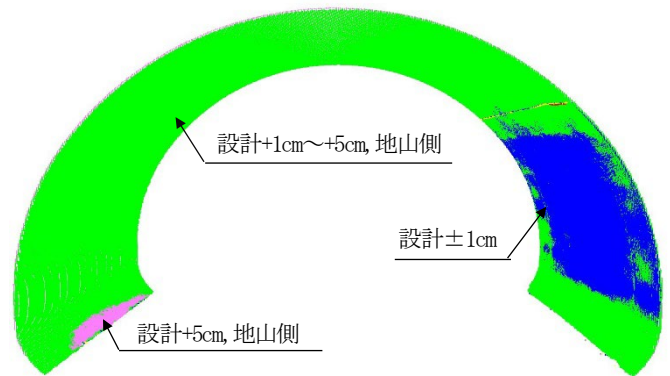


図-11 覆工出来形 (7BL, 起点側から終点, 道路平面線形は右カーブ)

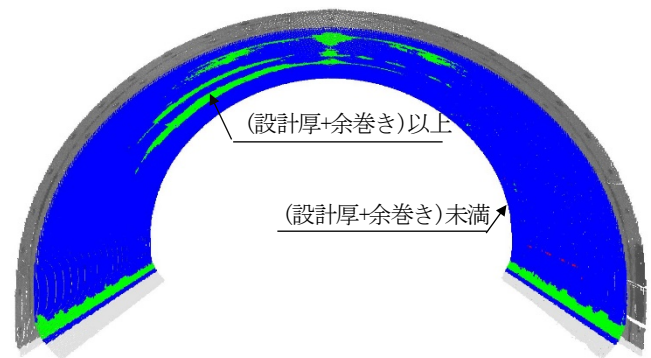


図-12 覆工厚分布 (7BL, DI)

3. 遠隔臨場の試行について

(1)遠隔臨場の概要

a) 遠隔臨場とは

動画撮影用のカメラ(ウェアラブルカメラ等)により撮影した映像と音声をWeb会議システム等を利用して「段階確認」、「材料確認」と「立会」を行うものである。本件の試行を行う際は、「建設現場の遠隔臨場に関する試行要領(案)(以下、「本要領」という。)」に従うものとする。なお、2020年度では、すさみ串本道路事業の中では3工事試行しており、また紀南河川国道事務所全体では6工事施工している。

b) 遠隔臨場に使用する機器構成と仕様

遠隔臨場に使用する動画撮影用のカメラ(ウェアラブルカメラ等)の資機材は受注者が準備、運用するものとする。機器構成については図-13に示す。



図-13 遠隔臨場機器構成

また、動画撮影用のカメラ(ウェアラブルカメラ等)に関する仕様については表-6に示す。

表-6 動画撮影用カメラの仕様

項目	仕様	備考
映像	画素数：640×480以上	カラー
	フレームレート：15fps以上	
音声	マイク：モノラル（1チャンネル）以上	
	スピーカー：モノラル（1チャンネル）以上	

c) 試行状況について

すさみ串本道路事業において動画撮影用カメラの内訳は、3工事中ウェアラブルカメラが2工事、タブレットタイプが1工事となった。また、紀南河川国道事務所管内ではウェアラブルカメラタイプが3工事、タブレットタイプが2工事、スマートグラスタイプが1工事であった。

d) 遠隔臨場における課題及び効果について

今回、すさみ串本道路事業を含めて紀南河川国道事務所内で試行を行っている施工業者にアンケート調査を行った。遠隔臨場における課題及び効果を図-14、図-15に示す。また全体評価についても表-7に示す。

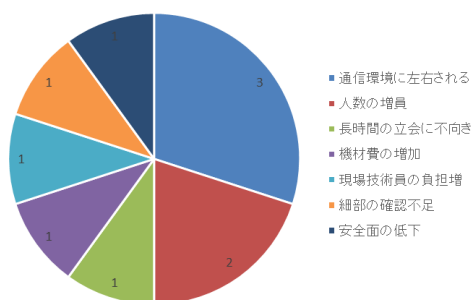


図-14 遠隔臨場における課題

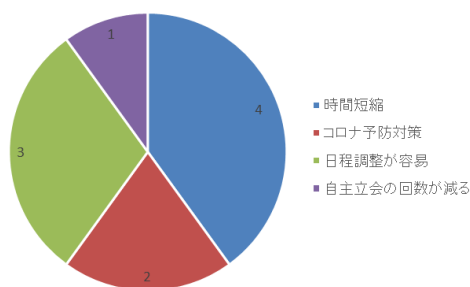
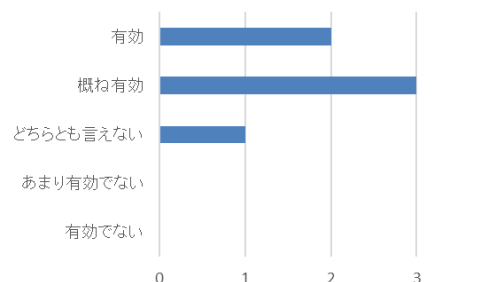


図-15 遠隔臨場における効果

表-7 総合評価



遠隔臨場の課題については、「通信環境に左右される」「人数の増員」が主に上げられた。紀南河川国道事務所管内は、山間部での施工が多いため電波が届かない状態になりうる可能性が高いため、通信環境が悪くなりやすい。また、遠隔臨場を行う際、基本的に撮影者が必要となり施工業者側の負担が大きくなるということがわかる。

反対に、遠隔臨場における効果であるが、「時間短縮」、「日程調整が容易」が主に上げられた。現場臨場をする際は基本的に監督員との調整を省くことができることが一番のメリットであることが読み取れる。そのため、総合的には、遠隔臨場が有効であることがわかった。ただし、今後より普及させていくには、通信環境の向上や現場での機材の小型化をすることで受注者の施工しやすい環境づくりが必要であると考えます。

4. おわりに

本稿では、すさみ串本道路における生産性向上の取り組みとしてCo覆工自動打設、遠隔臨場に注目して、執筆を行った。

Co覆工自動打設については、生産性向上(省人化・品質の均一化・安全性の向上)の観点から非常に有効な手段であるとわかった。しかし、依然として国土交通省内での活用実績が乏しいので今後、すさみ串本道路事業以外の場所でも普及していく方がよいと考えます。

また、遠隔臨場については、基本的には有効であることは確認されているが、本来必要である山間地等での利用・受注者の負担の観点において課題が散見される状況であるので今後ハード・ソフトの両面から課題の克服に取り組む必要があると考えます。

参考文献

- 1) 笹嶋和彦, 扁平大断面トンネル覆工を現場流動コンクリートを用いて自動施工