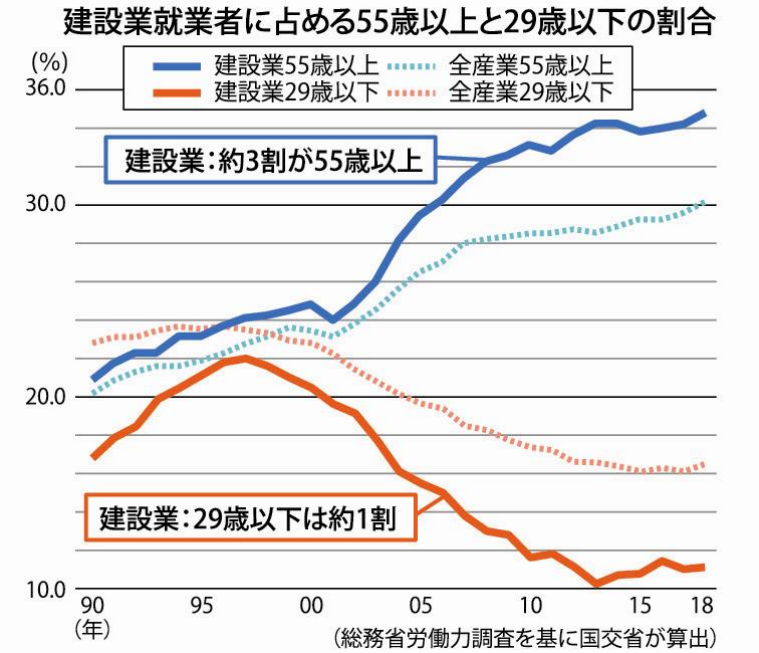
新東名トンネル建設における清水建設の新技術

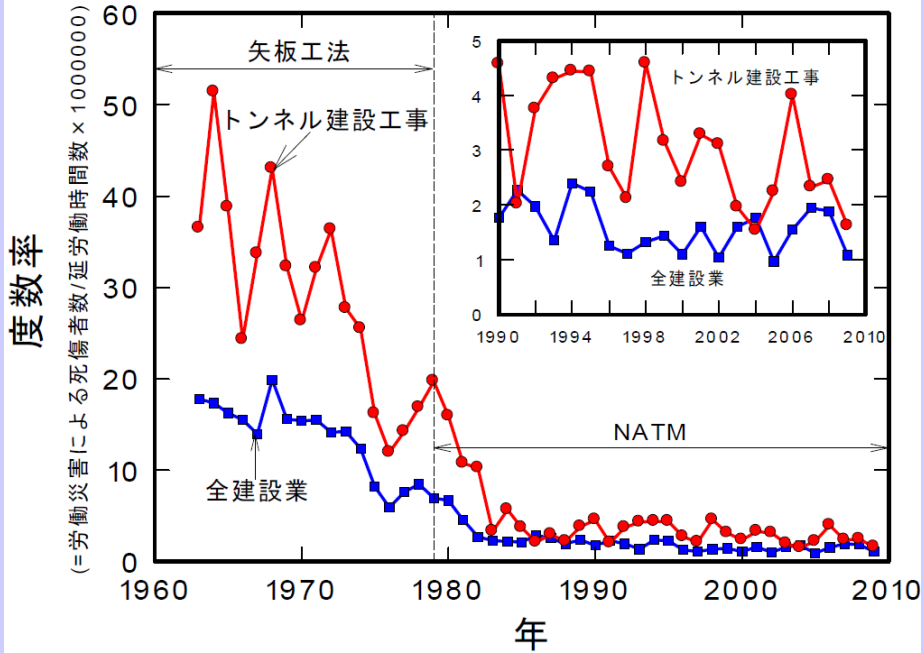
清水建設株式会社
土木技術本部 地下空間統括部
福田　毅

「熟練技術の継承」の背景

熟練作業員の減少



トンネル特有のリスク

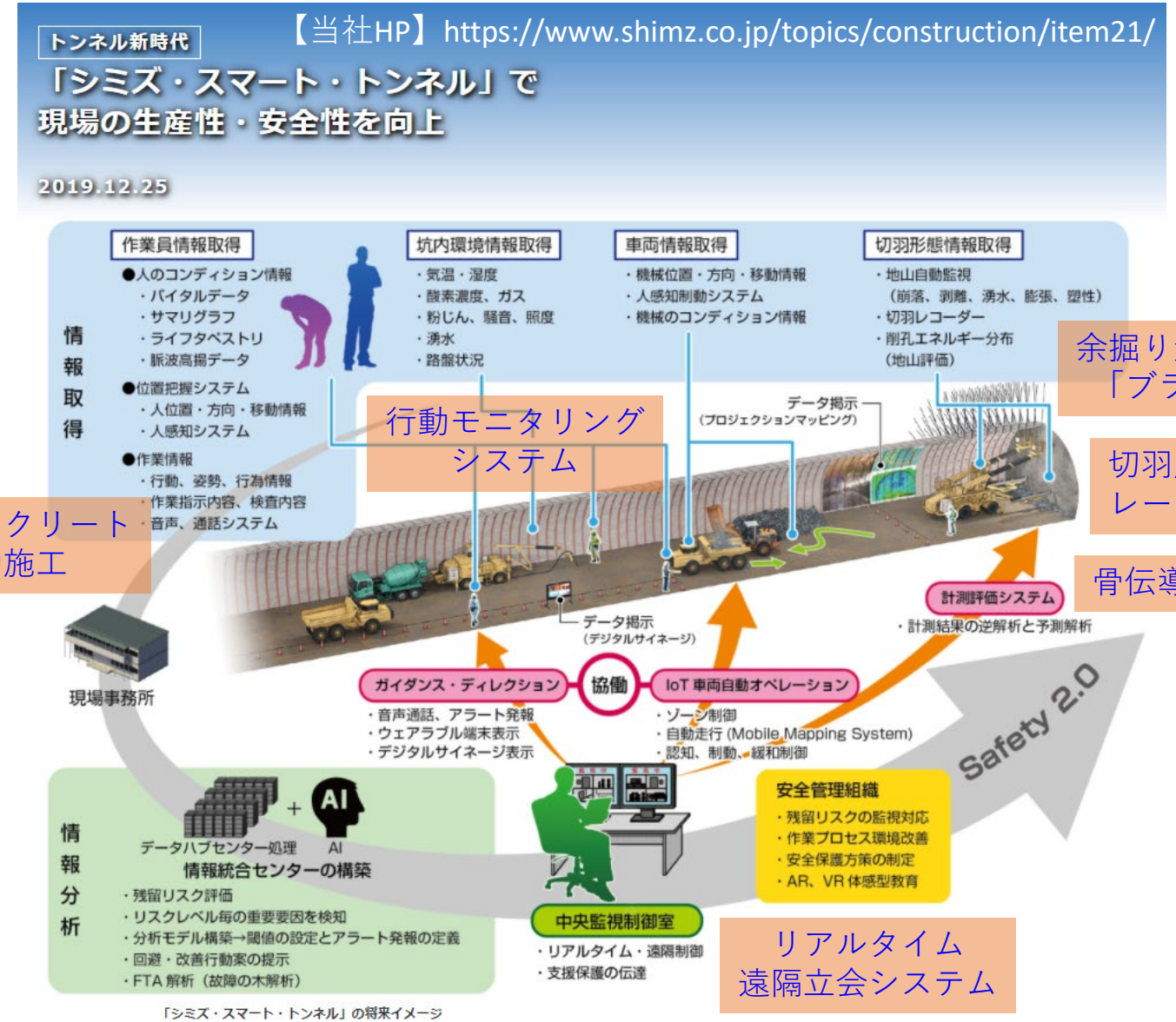


～社会的ニーズ～

ICT技術による省人化・効率化・安全性向上

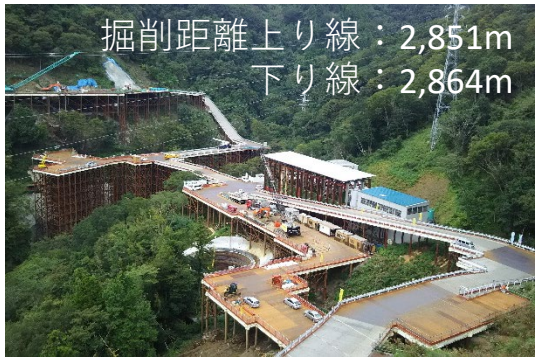
熟練技能の数値化（客観的評価）

シミズ・スマート・トンネル



「シミズ・スマート・トンネル」の将来イメージ

新東名の山岳トンネル現場の概要

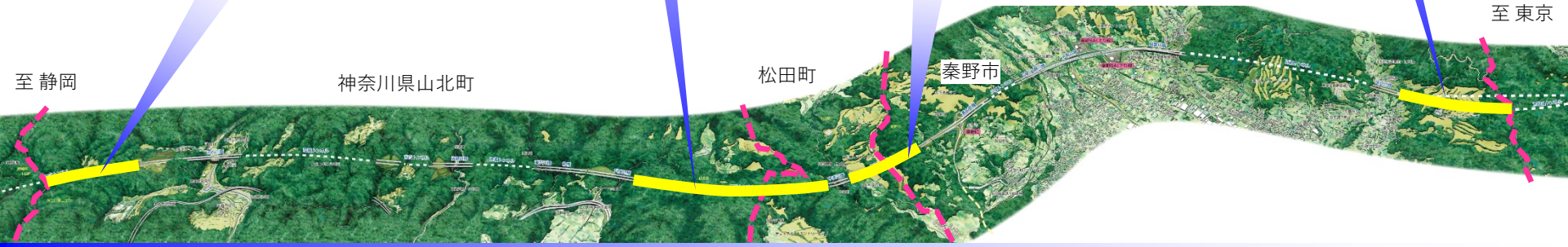


高松トンネル工事

高取山トンネル西工事

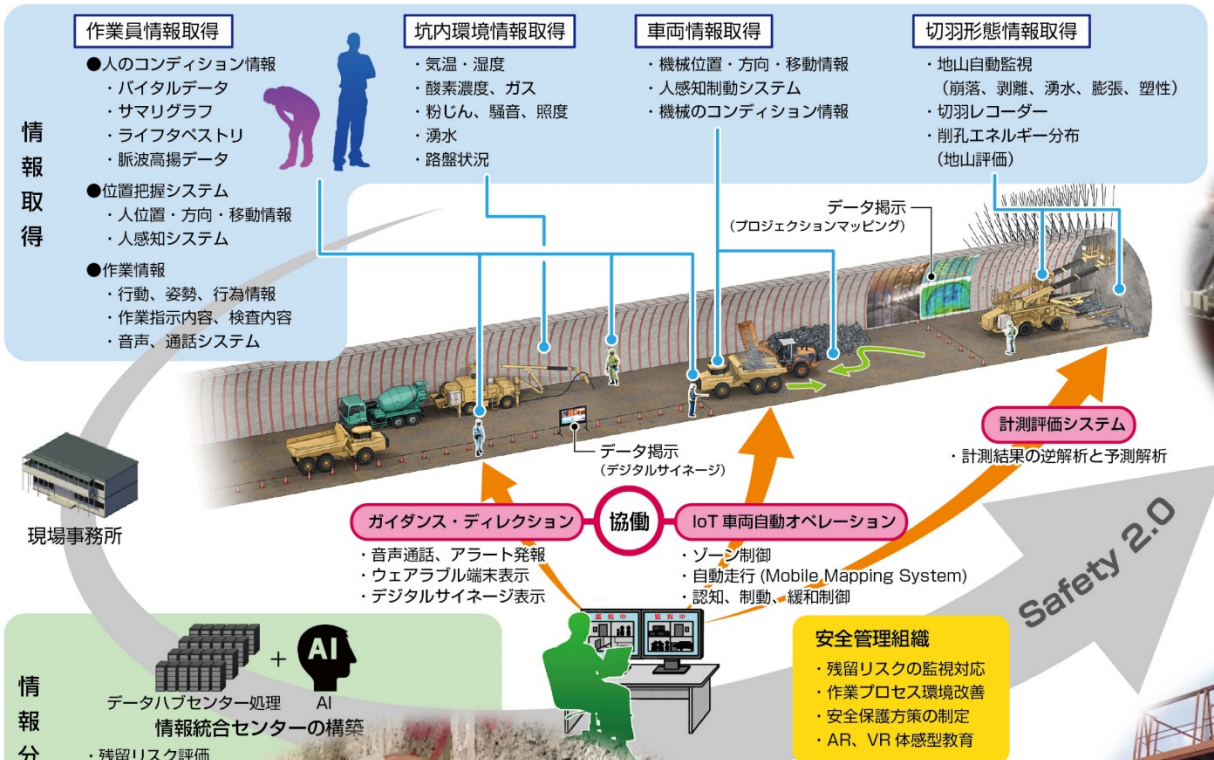
川西工事

萱沼トンネル工事



新東名山岳トンネル工事で展開する新技術

「シミズ・スマート・トンネル」で現場の生産性・安全性を向上



余掘り低減技術
～ブラストマスタ®～

建設機械施工 Vol.72 No.5 May 2020

＠高取山トンネル西工事

目　次

1. 開発の背景と目的
2. 高取山トンネル西工事 工事概要
3. 差し角自動制御システムの概要
4. 実証試験（余掘り低減効果確認）
5. 実証試験（削孔エネルギーの活用）
6. 今後の展望

開発の背景と目的

背景

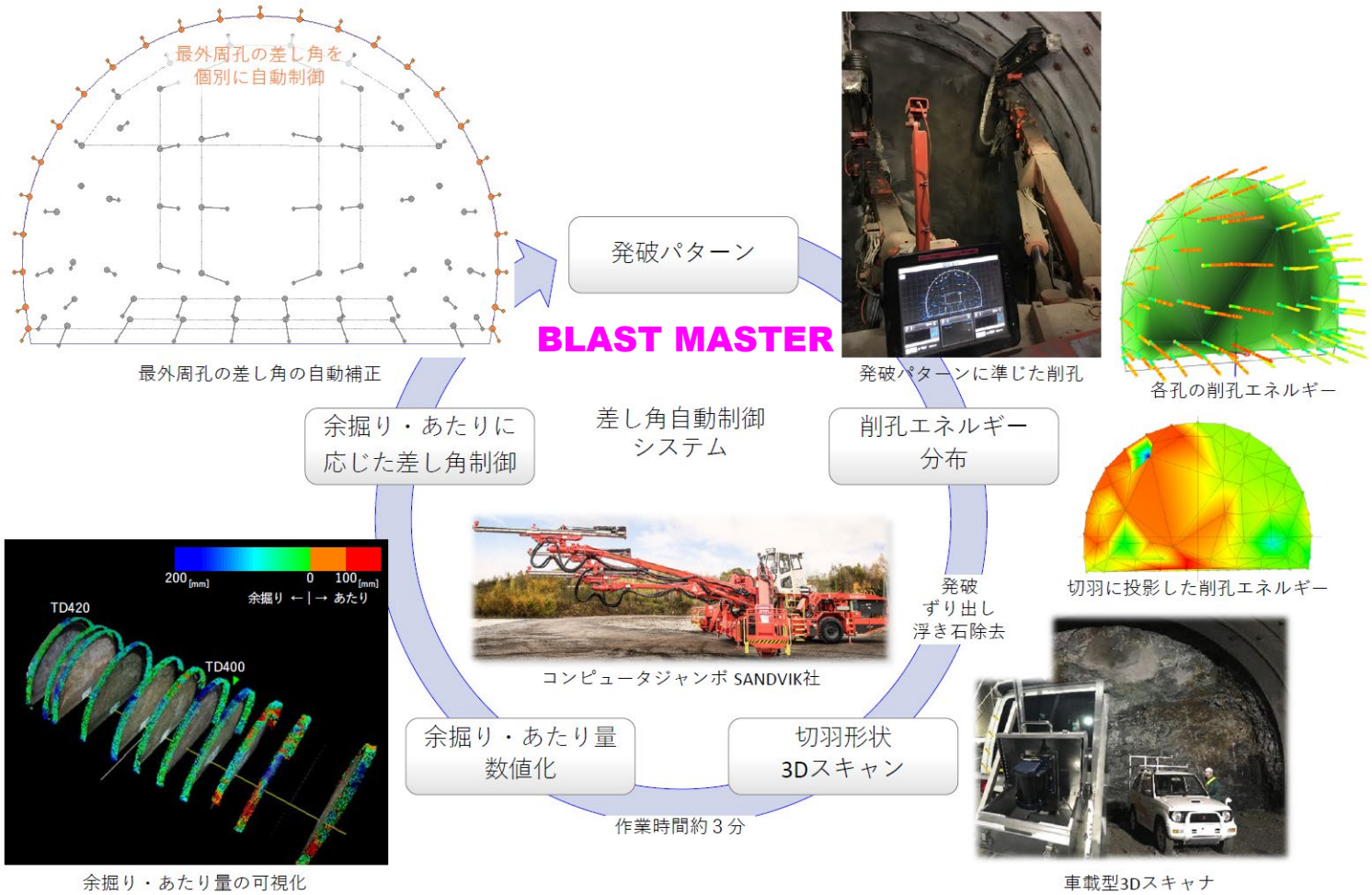
- 今後の熟練技能労働者不足
- 安全・生産性・品質の向上

目的

- 客観的情報を収集・活用し，経験や勘に頼らない施工技術の構築
- 爆破掘削において熟練技能に頼らない余掘り低減技術

山岳トンネル余掘り低減技術
差し角自動制御システム
― ブラストマスタ ―

差し角自動制御システムの全体概要



これらの手順を繰り返し実行することで熟練技能労働者の経験と勘に頼らずとも段階的に余掘り低減・掘削面の平滑化を可能にする

切羽形状の数値化（車載型3Dスキャナの活用）

切羽前設置状況

3Dスキャナ

車内でのスキャナ操作状況

スキャナ設置から撤去までおよそ３分程度の作業

※スキャナの設置は切羽の浮き石を除去し安全を
確保した後に行う

切羽形状の数値化（車載型3Dスキャナの活用）

新東名高速道路高取山トンネル西工事 － 下り線

前回のスキャン日時	2019/05/29 21:24
今回のスキャン日時	2019/05/30 02:50

サイクル	728
支保パターン	CⅡ-c-i-H-B

掘削範囲 TD	805.6～806.8
評価対象 TD	806.3～806.8

上半半径	5.75
下半半径	11.05

余掘りに応じた差し角制御結果

No.	周方向 照査対象 [deg.]	余掘り 平均	差し角 [deg.] 今回	補正量	次回	オフセット [mm]
1	-90.0～-80.7	72	5.7	-1.9	3.8	0
2	-80.7～-71.7	120	3.8	-3.8	0.0	0
3	-71.7～-62.1	59	3.9	-1.9	2.0	0
4	-62.1～-51.6	55	0.0	-1.9	0.0	0
5	-51.6～-41.1	69	1.9	-1.9	0.0	0
6	-41.1～-30.8	64	1.9	-1.9	0.0	0
7	-30.8～-20.6	22	1.9	-1.9	0.0	0
8	-20.6～-10.3	-9	3.8	1.9	5.7	0
9	-10.3～0.0	-102	9.5	3.8	13.3	0
10	0.0～10.2	-64	1.9	1.9	3.8	0
11	10.2～20.4	-28	3.8	1.9	5.7	0
12	20.4～30.7	5	0.0	-1.9	0.0	-2.5
13	30.7～41.1	33	2.0	-1.9	0.1	0
14	41.1～51.6	99	0.0	-1.9	0.0	-49.5
15	51.6～62.1	110	1.9	-3.8	0.0	0
16	62.1～71.7	70	2.0	-1.9	0.1	0
17	71.7～80.7	88	1.9	-1.9	0.0	0
18	80.7～89.9	135	3.8	-3.8	0.0	0
全体平均		40				

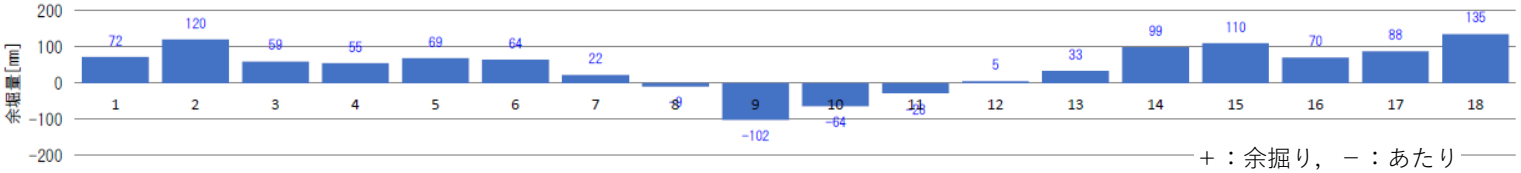
※ オフセット値　＋：外方向，－：内方向

掘削範囲の余掘り量

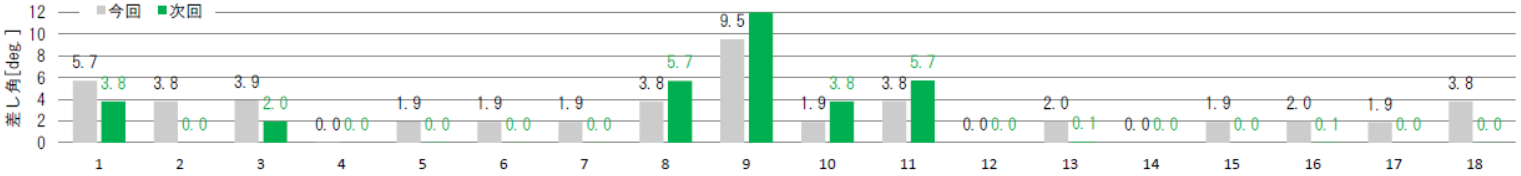
余掘り量 凡例	TD [m] 805.1	805.2	805.3	805.4	805.5	805.6	806.3	806.4	806.5	806.6	806.7	806.8
300	126	125	120	108	57	47	91	105	96	64	28	17
	77	77	73	58	28	27	128	175	177	92	51	-3
	77	68	68	54	13	3	93	84	76	47	36	-25
	80	59	70	79	74	59	54	54	45	67	59	58
	30	42	69	78	95	112	79	73	69	60	62	58
	35	40	66	87	97	92	42	52	70	76	80	61
	76	86	81	95	111	100	61	48	2	11	23	-54
	195	165	128	101	74	70	7	-5	-5	-11	-18	-63
	58	63	67	53	32	-5	-96	-92	-95	-91	-112	-156
0	98	91	93	61	15	-26	-27	-33	-46	-69	-91	-135
	143	143	141	140	134	103	15	4	-19	-35	-53	-79
-100	235	213	198	181	173	170	29	42	30	11	-25	-54
	317	277	251	243	234	242	129	75	40	15	-21	-40
	387	408	401	384	359	326	136	125	105	92	81	52
	340	313	283	281	271	252	104	110	115	120	120	94
	279	267	259	255	220	211	84	98	85	77	55	22
	260	240	218	183	157	142	171	142	88	72	55	-28
-300	213	180	150	101	95	80	82	106	157	179	160	75
[mm] 平均	166	159	152	141	124	111	66	65	55	43	27	-11

前回の実績　今回の実績

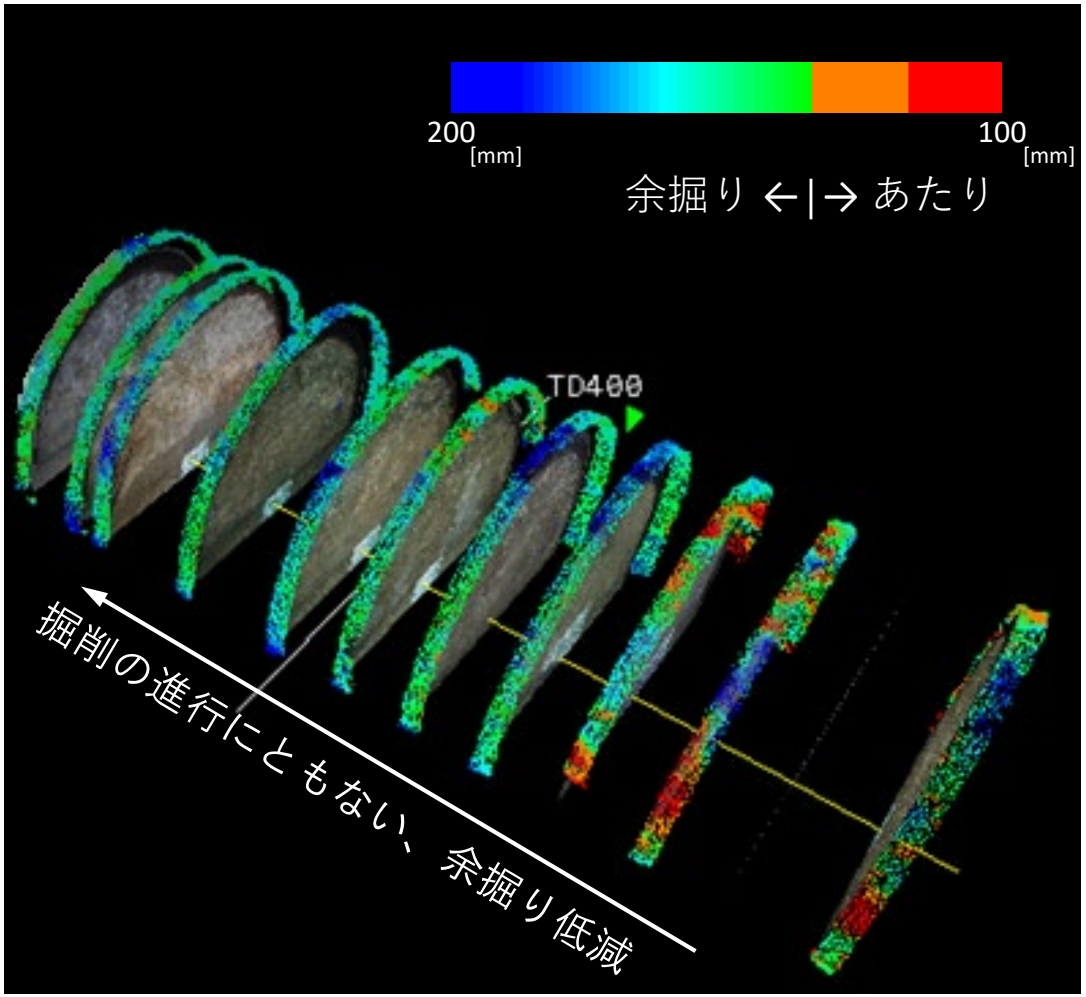
今回の実績
照査対象ごとの
余掘り量平均

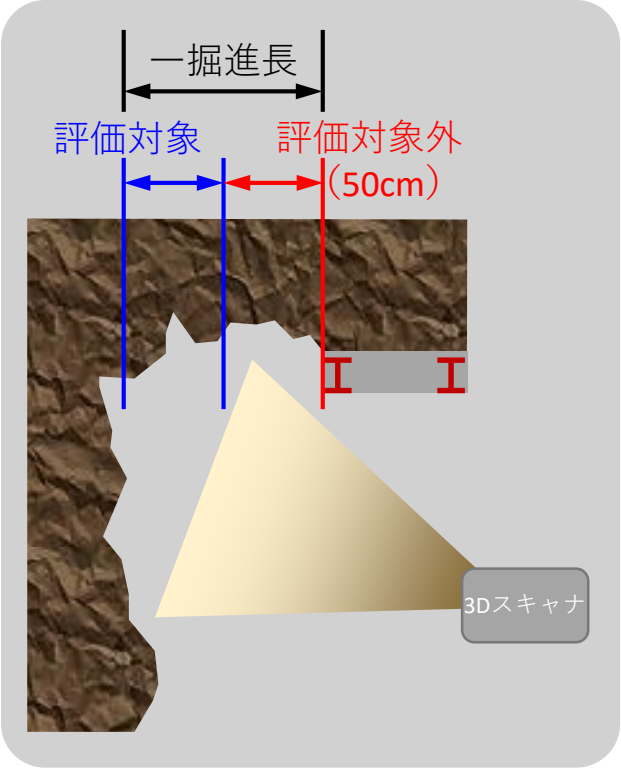


今回の差し角実績
と
次回の差し角

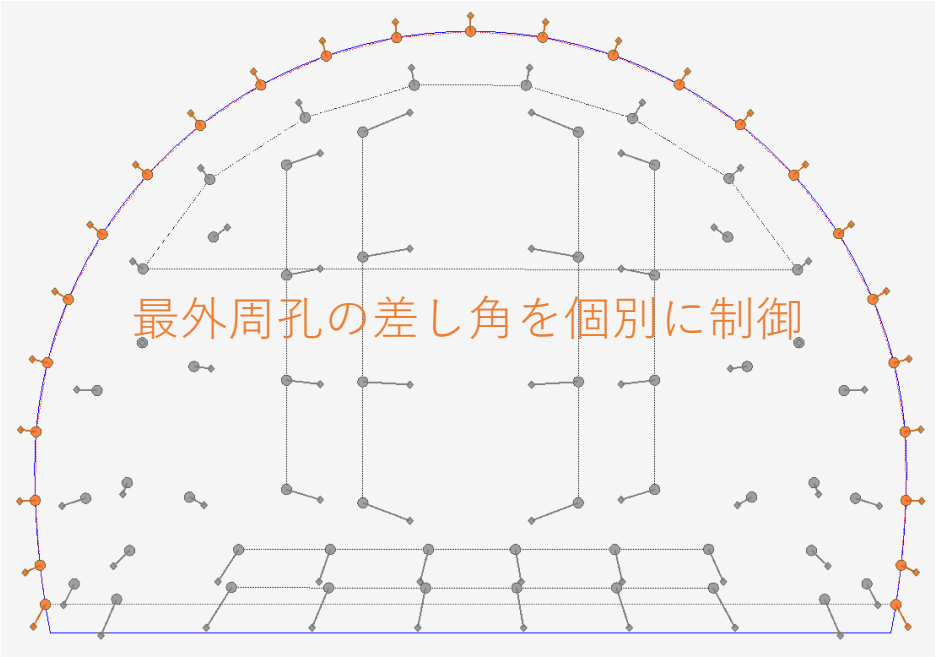


余掘り・あたりの可視化

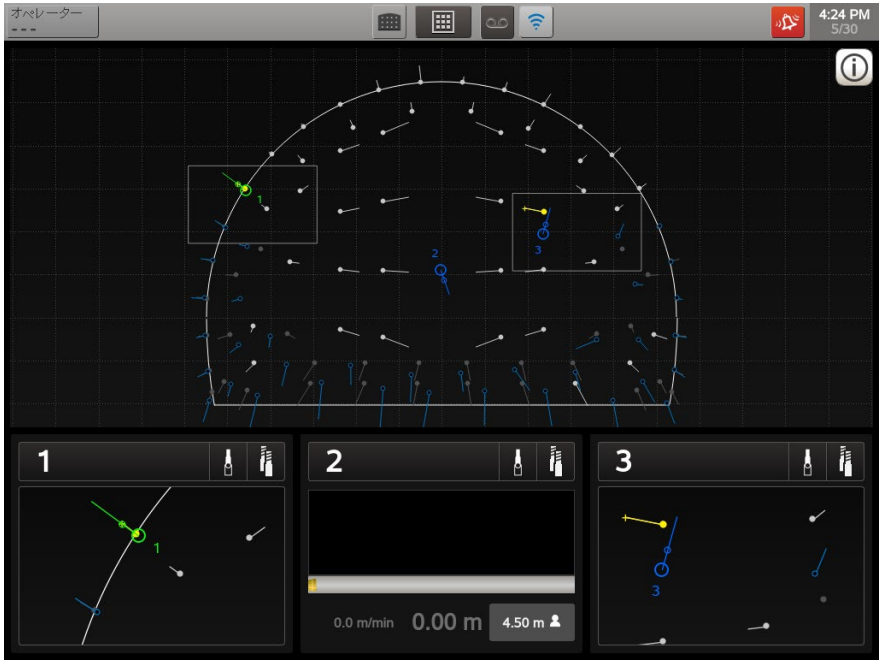

200
[mm]
100
[mm]
余掘り ←|→ あたり
TD400
掘削の進行にともない、余掘り低減


一掘進長
評価対象
評価対象外
(50cm)
3Dスキャナ

発破パターンの自動修正と次削孔への反映



発破パターンの自動修正



コンピュータジャンボ操作画面

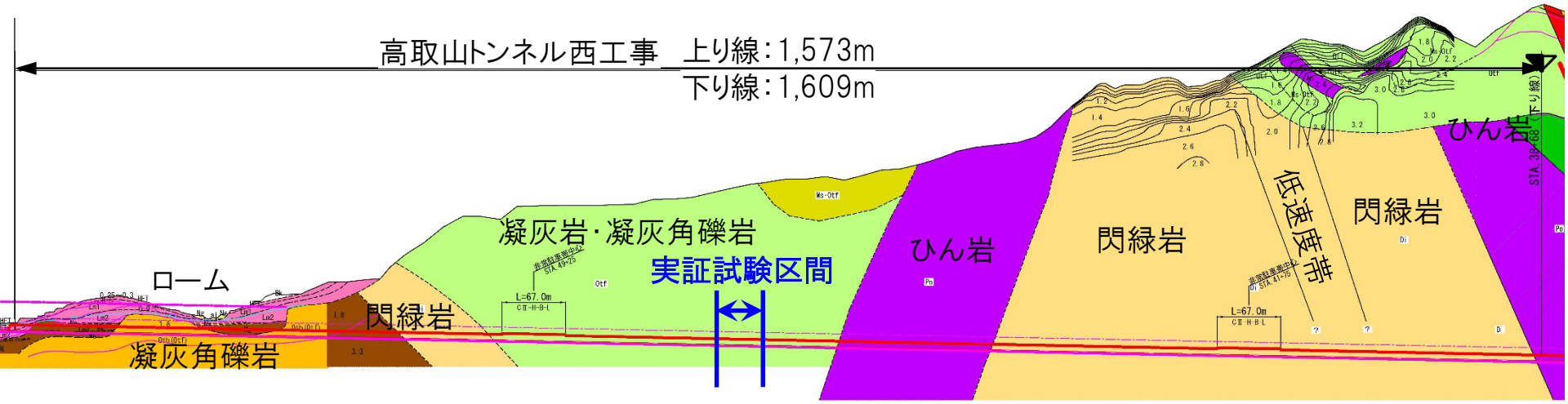
コンピュータジャンボに表示された発破パターンに準じて作業員が削孔

経験と勘に頼らないシステム・技能労働者不足解消

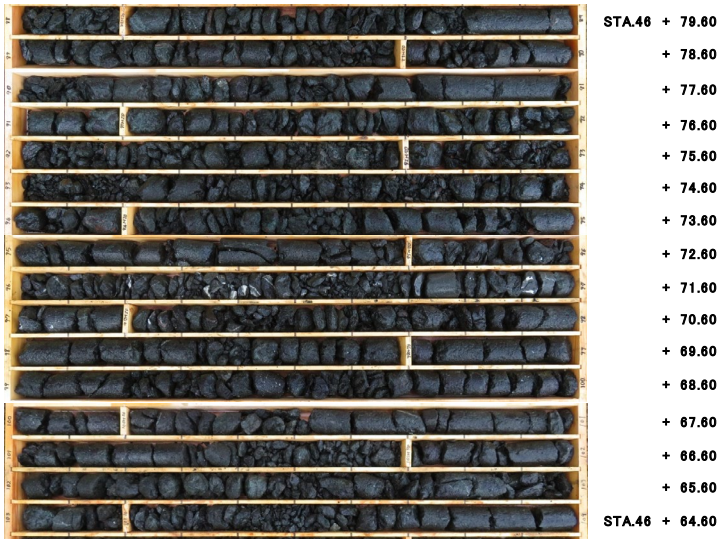
実 証 試 験

差し角自動制御による余掘り低減効果の確認

実証試験区間の地質概要

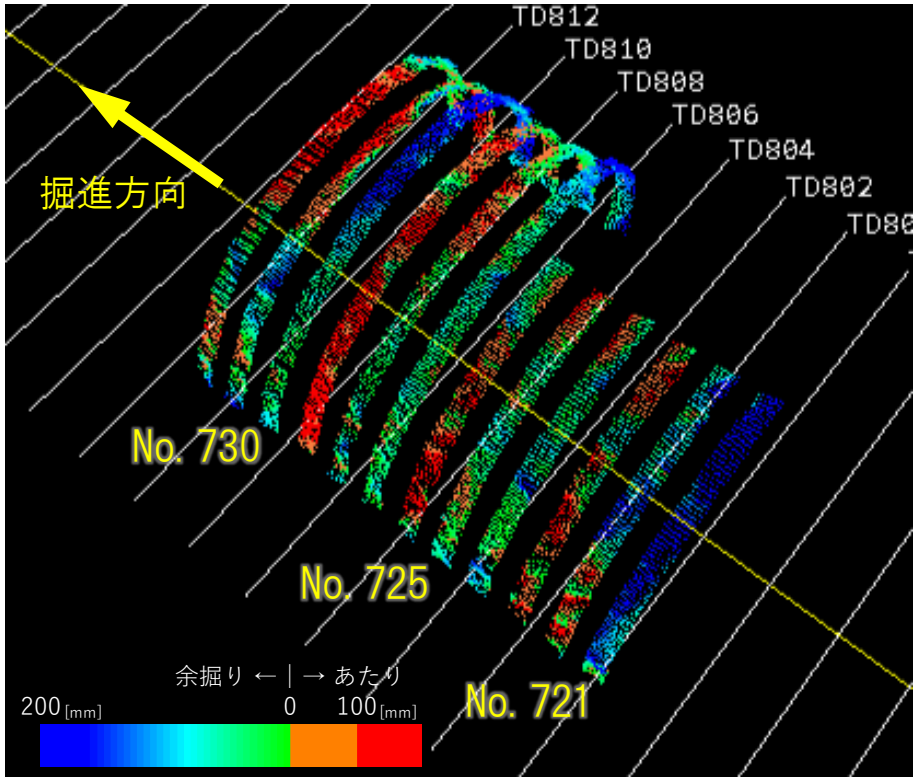


凝灰角礫岩（切羽写真）

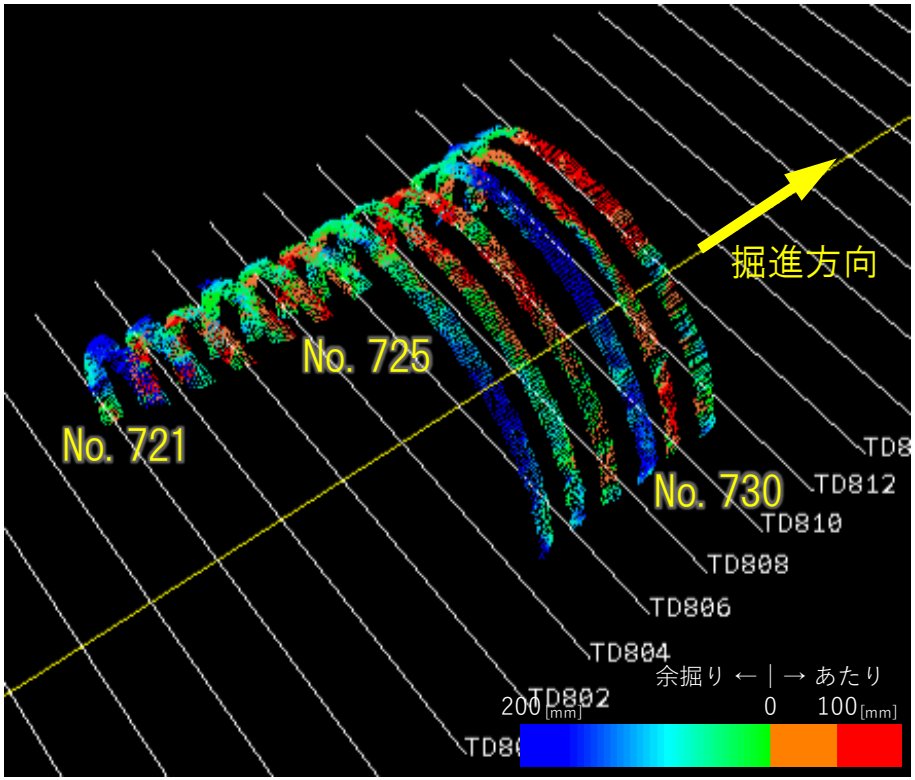


凝灰角礫岩（コア写真）

実証試験の結果と知見（3Dスキャナによる可視化）

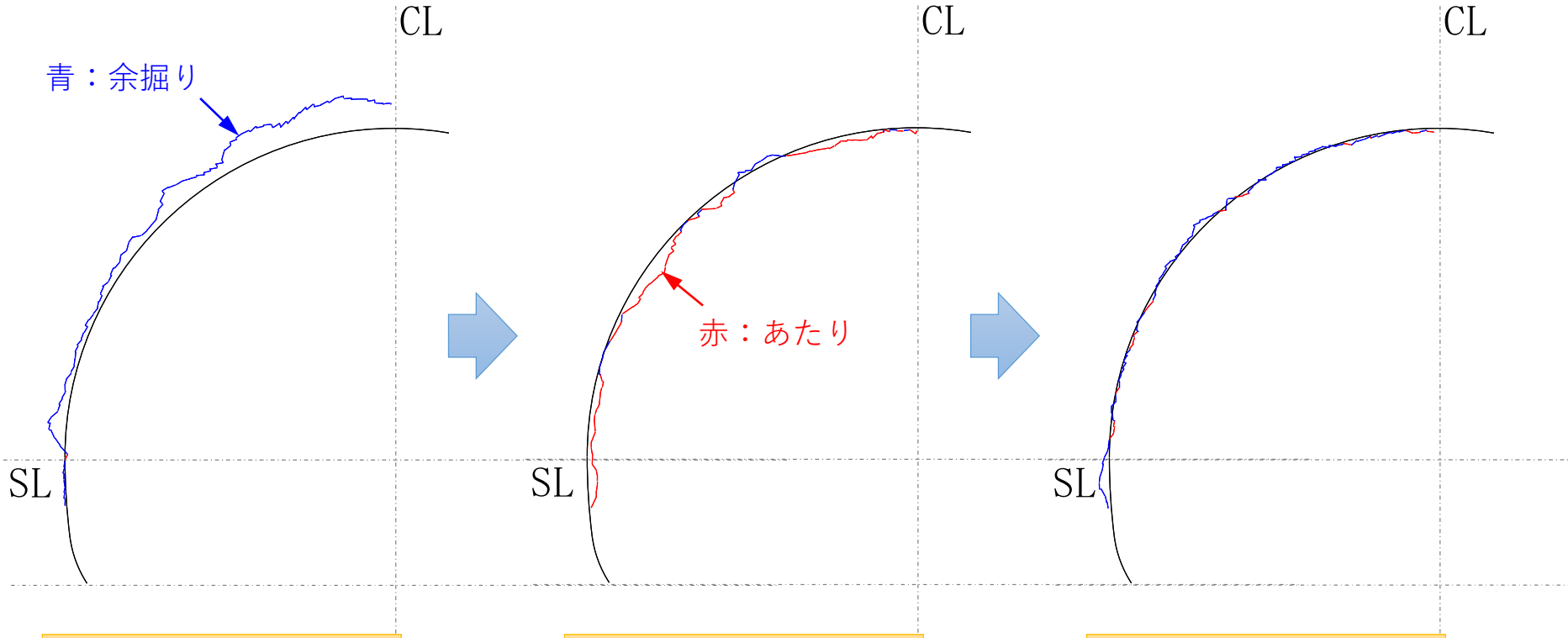


【左側壁部】



【右側壁部】

実証試験の結果と知見（システム適用前後の余掘り評価）



【システム適用前】
最大余掘り量：67.0cm
余掘り平均量：30.2cm

【システム２回適用】
最大余掘り量：16.6cm
余掘り平均量： 6.5cm

【システム４回適用】
最大余掘り量：21.0cm
余掘り平均量： 6.6cm

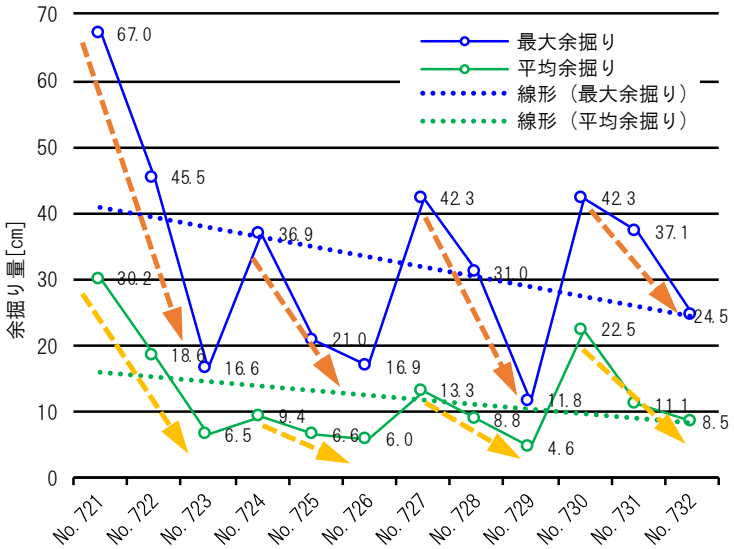
- ✓ 最大余掘り量でみると，約70%の余掘りが低減
- ✓ 掘削面の平滑化
- ✓ システムが判断する差し角制御で余掘りの低減を確認

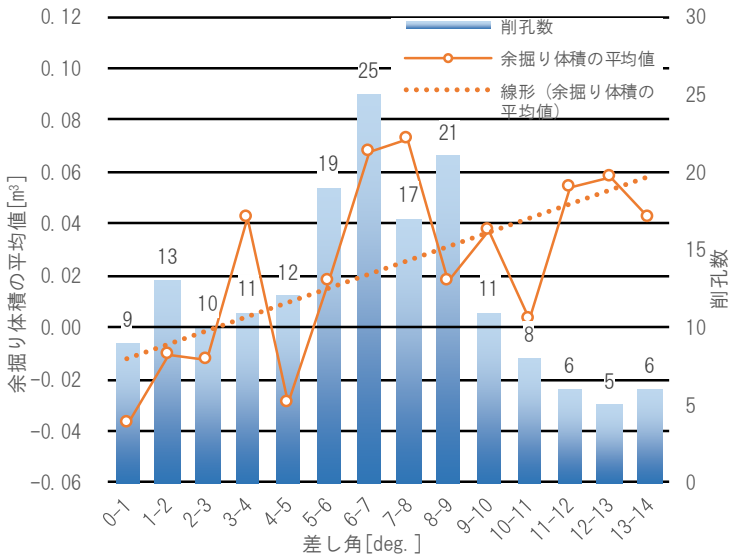
実証試験の結果と知見（地質の違いに見る余掘りの変化）

凝灰角礫岩

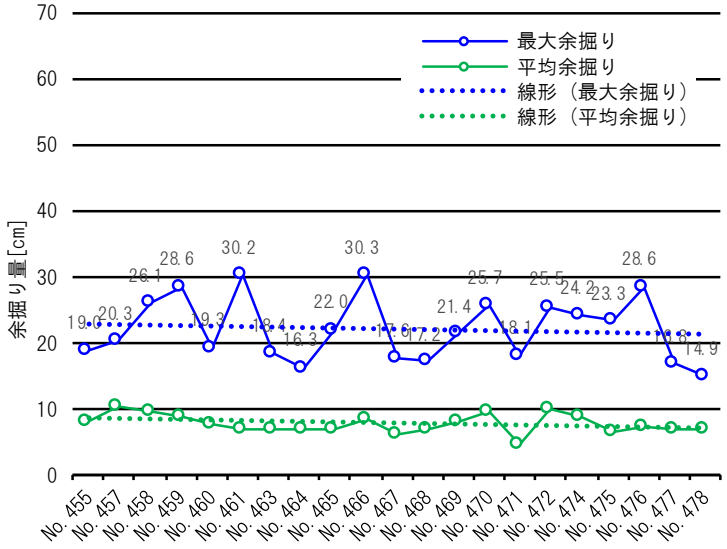
風化礫岩

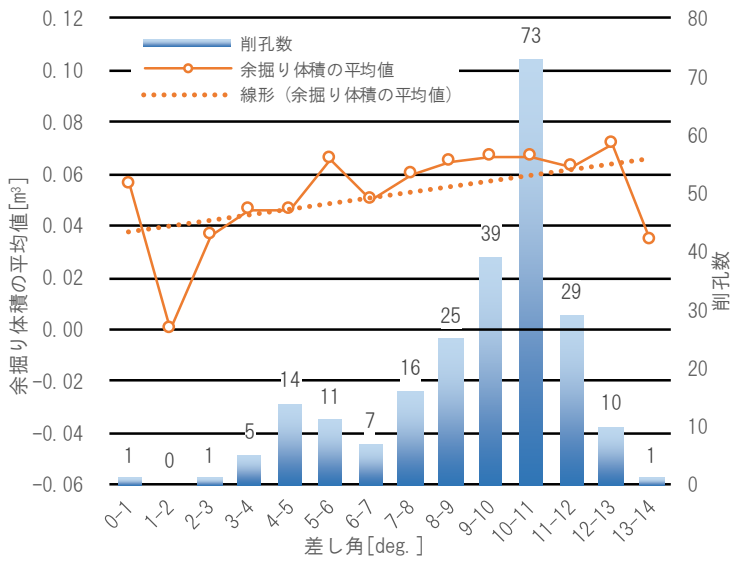
5．実証試験の結果と知見（地質の違いに見る余掘りの変化）





凝灰角礫岩（実証試験区間）





風化礫岩

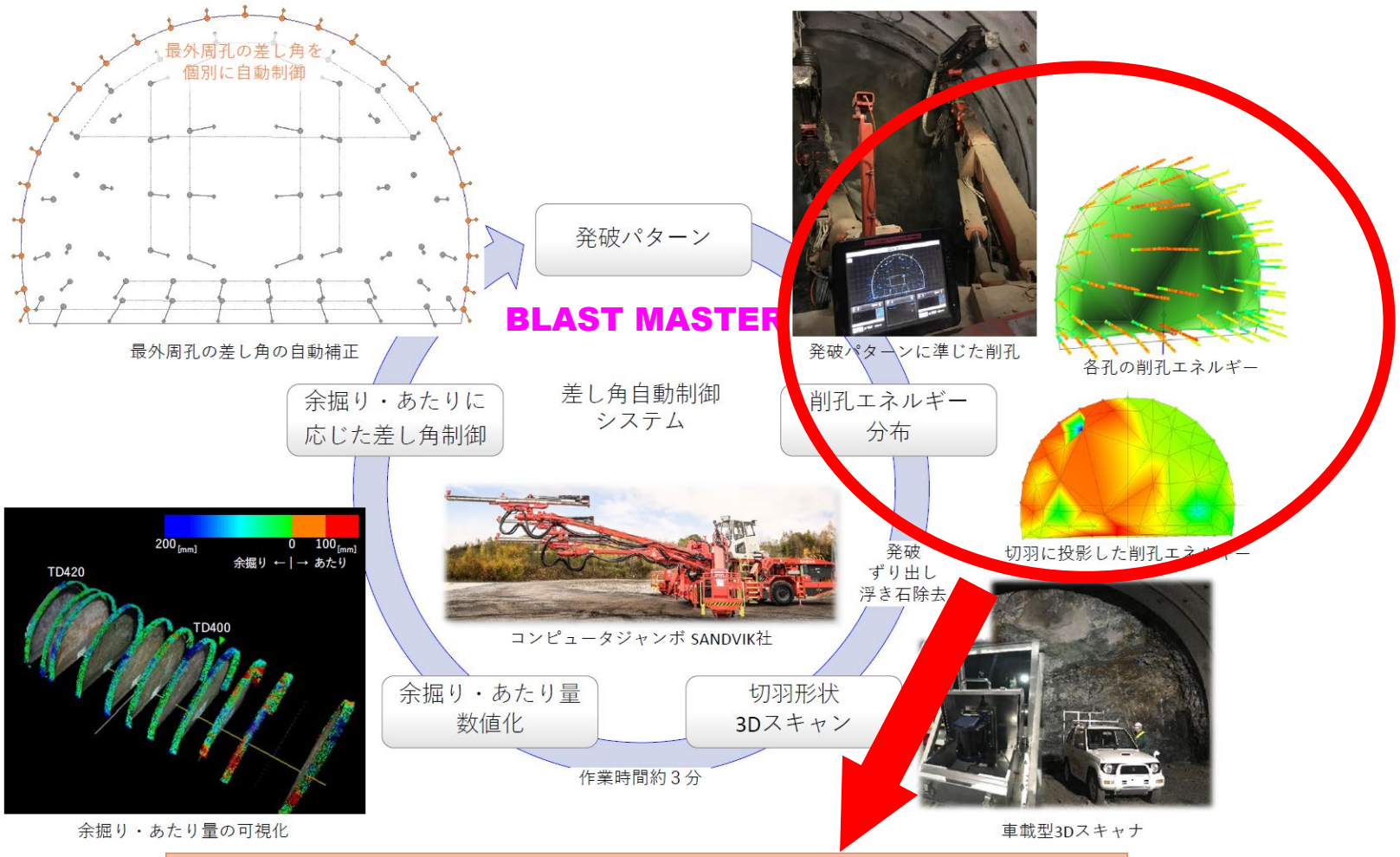
まとめ（余掘り低減技術の評価）

- ✓ 余掘り／あたりに応じて差し角が自動制御され，余掘り／あたりの低減を確認した．
- ✓ 余掘りが低減することで，結果的に掘削面の平滑化も可能であることを確認した．
- ✓ 地質の違いで余掘り／あたりの傾向が異なることを確認した．
- ✓ 今後懸念されている技能労働者不足の解消に貢献するシステムであると言える．

客観的指標（削孔エネルギー）を活用した

切羽災害防止
と
新しい切羽評価点法の提案

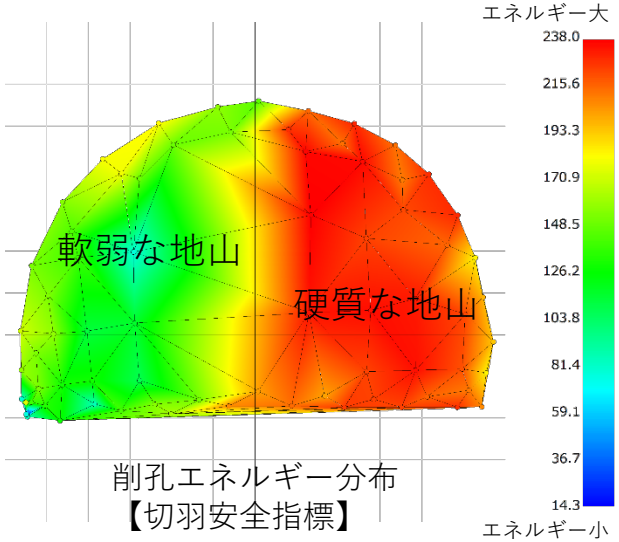
差し角自動制御システムの全体概要



■熟練技能を必要としない余掘り低減技術■
① 削孔エネルギーを活用した切羽災害防止技術
② 技術者の技量に頼らない客観的切羽評価(案)

切羽災害防止への活用

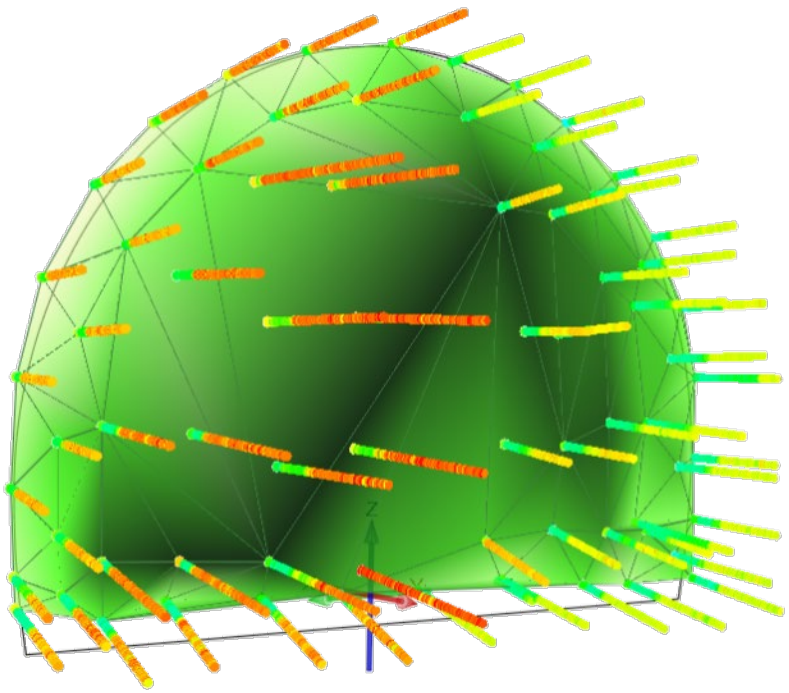
削孔エネルギー自動取得

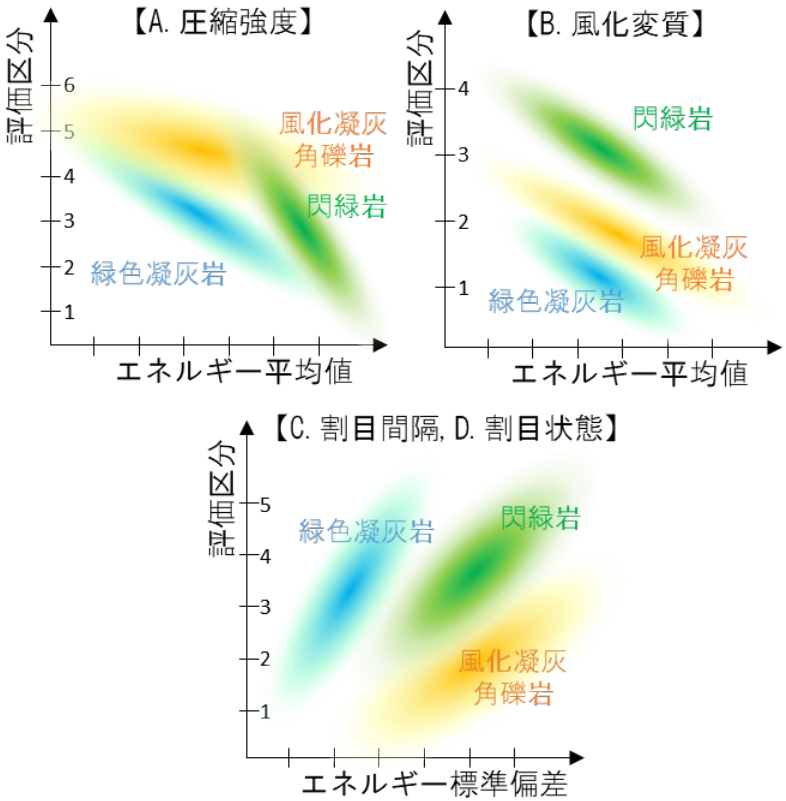


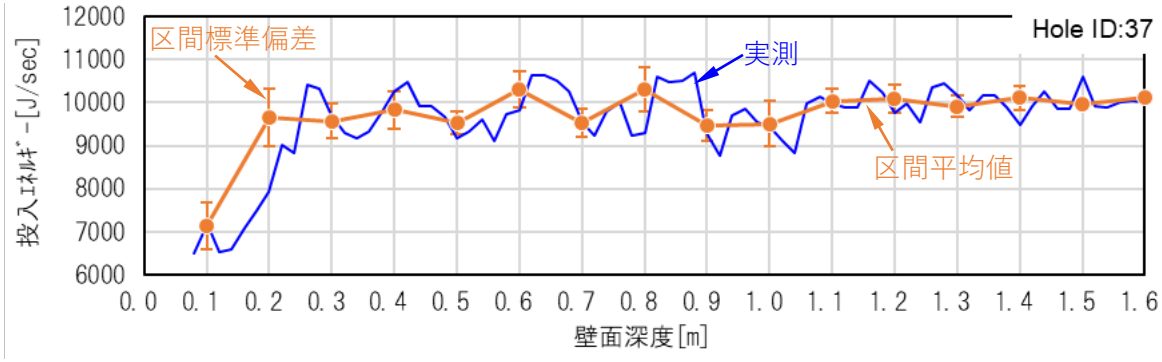
削孔エネルギー分布
【切羽安全指標】

情報
自動配信

削孔エネルギーの取得と活用（客観的判断指標）

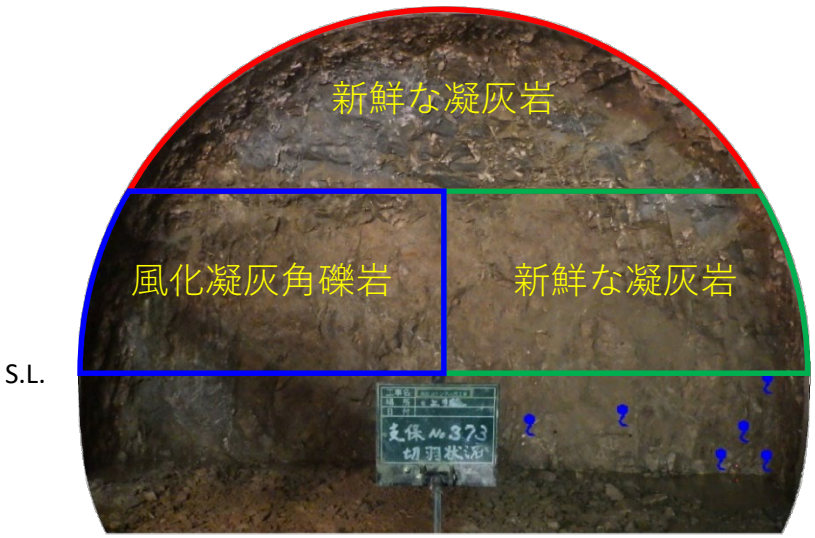


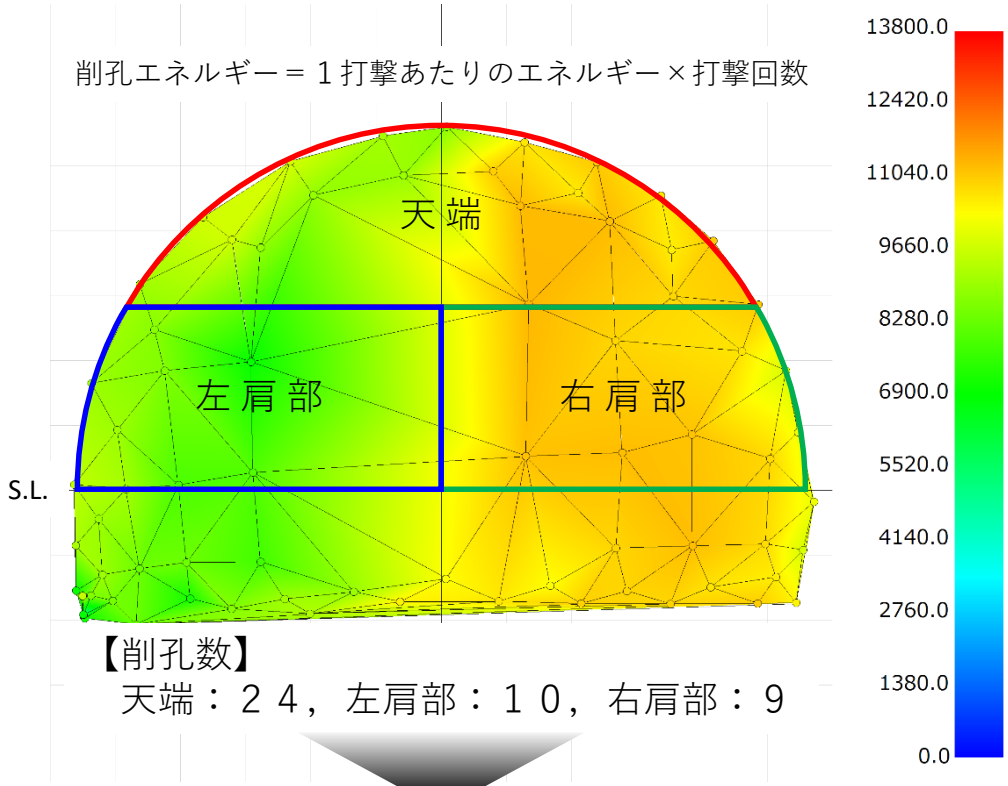




エネルギー評価指標
平均値・標準偏差

新しい切羽評価点法の提案



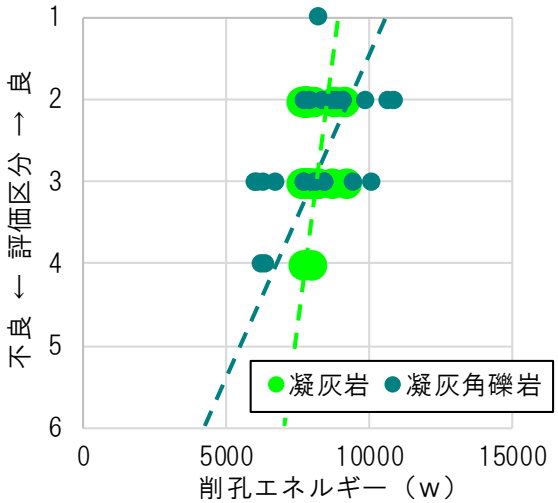


各エリアの岩盤分類・評価点
（技術者判断）

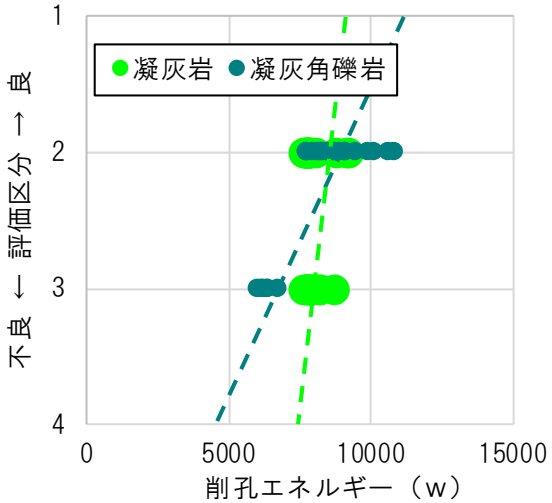
各エリアの削孔データの平均・標準偏差
（機械データ／客観的指標）

データの蓄積
岩種ごとに評価点と機械データに相関性があるのか確認

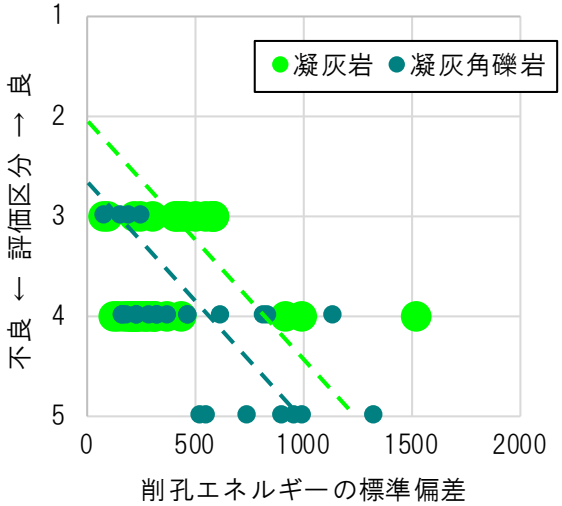
実証試験の結果と知見（評価区分と削孔エネルギ゛-の相関性）



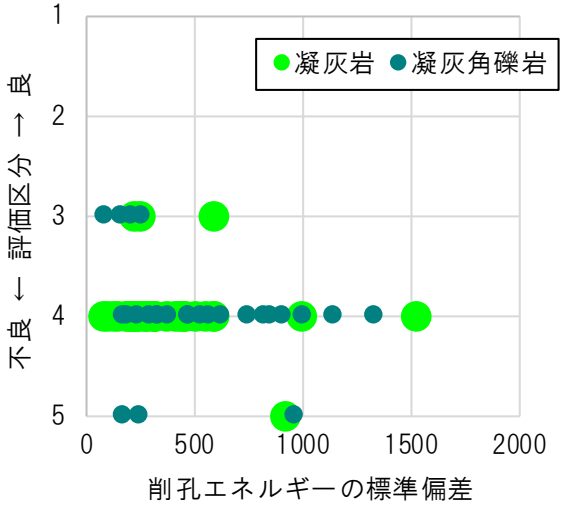
【A. 圧縮強度】



【B. 風化変質】



【C. 割目間隔】



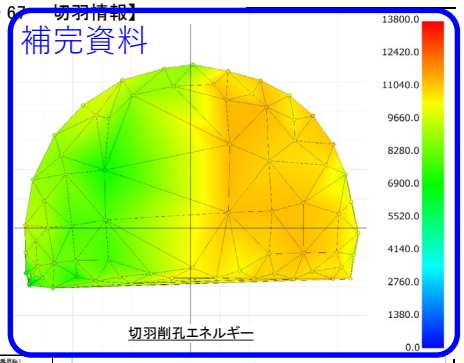
【D. 割目状態】

実証試験の結果と知見（新しい切羽観察シート）

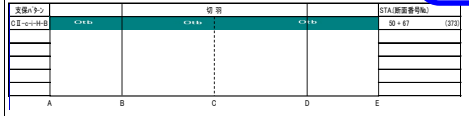
【STA.: 50 + 67　切羽情報】

切羽写真

補完資料



切羽削孔エネルギー



壁面展開図

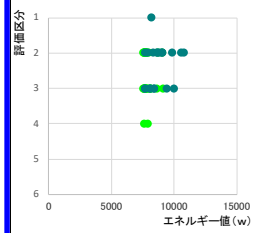
切羽断面図

切羽はOtb(風化凝灰角礫岩)が主体で、局所的にOtf(緑色凝灰岩)が分布している。切羽は自立し岩石自体は硬質な部分もあるが、割れ目は開口し粘土を挟んでいるため、切羽天端部及び素掘り面から肌落ちが見られる。導水処理したボーリング孔からの湧水量は約300L/minある。

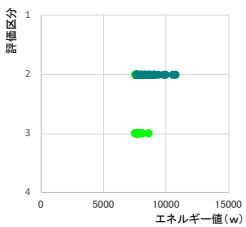
コメント

補完資料

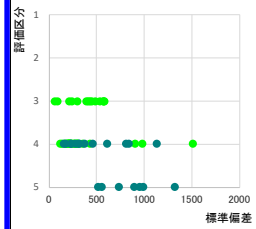
【切羽評価区分　と　削孔エネルギー　の相関性】



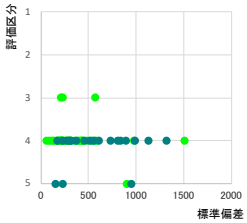
【A　圧縮強度】



【B　風化変質】



【C　割目間隔】

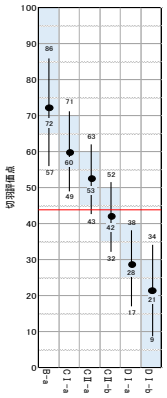


【D　割目状態】

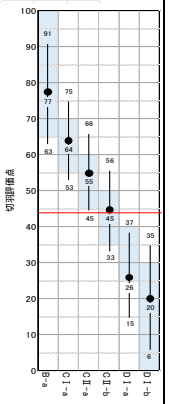
● 凝灰岩　● 凝灰角礫岩

【切羽評価点と支保選定】

支保パターン	切羽評価点
B－a	65～
CⅠ－a	55～70
CⅡ－a	45～60
CⅡ－b	35～50
DⅠ－a	20～40
DⅠ－b	～30



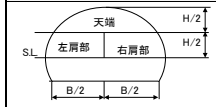
全岩種



中硬質岩・軟質岩[塊状]

切羽観察データシート

トンネル名：新東名高速道路　高取山トンネル西工事			観察年月日：平成 30年 7月 3日
測点 STA.: 50 + 67	坑口からの距離：386 m	断面番号：No. 373	支保パターン：CⅡ-c-i-H-B
土被り高さ：26.6 m	岩石名・地質時代：凝灰角礫岩 第三紀層	岩石グループ(1～5)：2	岩石名コード：35
補助工法（増吹きボルトを含む）の諸元：AGF	増し支保工の諸元：		A.B計測：



特殊条件・状態等

崩壊の有無,状況　有り

インバート早期閉合の有無　有り

観察項目		評価区分						評価点記入欄 左肩	中央	右肩
A.圧縮強度 (N/mm2)	一軸圧縮強度	100以上	100～50	50～25	25～10	10～3	3以下			
	ポイントロード	4以上	4～2	2～1	1～0.4	0.4以下				
	ハンマーの打撃による強度の目安	岩片を地面に置きハンマーで強打しても割れにくい。	岩片を地面に置きハンマーで強打すれば割れる。	岩片を手に持ってハンマーで叩いて割ることができる。	岩片どおしをたたき合わせて割ることができる。	両手で岩片を部分的にでも割ることができる。	力を込めれば小さな岩片を指先でつぶすことができる。			
	評価区分	1	2	3	4	5	6	2 (24)	3 (18)	2 (24)
B.風化変質	風化の目安	概ね新鮮	割れ目沿いの風化変質	岩芯まで風化変質	土砂状風化、未固結土砂					
	熱水変質などの目安	変質は見られない	変質により割れ目に粘土を挟む	変質により岩芯まで強度低下	著しい変質により全体が土砂状粘土化					
	評価区分	1	2	3	4			2 (13)	2 (13)	2 (13)
C.割目間隔	割れ目の間隔	d≧1m	1m＞d≧50cm	50＞d≧20cm	20＞d≧5cm	5cm＞d				
	RQD	80以上	80～50	60～30	40～10	20以下				
	評価区分	1	2	3	4	5		4 (6)	5 (0)	4 (6)
D.割目状態	割目の開口度	割目は密着している。	割目の一部が開口している。	割目の多くが開口している。	割目が開口している。（幅1～5mm）	割目が開口し5mm以上の幅がある。				
	割目の挟在物	なし	なし	なし	薄粘土を挟む（5mm以下）	厚粘土を挟む（5mm以上）				
	割目の粗度鏡肌	粗い	割目が平滑	一部に鏡肌	よく磨れた鏡肌					
	評価区分	1	2	3	4	5		4 (7)	4 (7)	4 (7)
E.走向傾斜	走向がトンネル軸と直角	1.差し目 傾斜45～90°	2.差し目 傾斜 20～45°	3.差し目流れ目 傾斜 0～20°	4.流れ目 傾斜 20～45°	5.流れ目 傾斜 45～90°		5	5	5
	トンネル軸と平行			1.傾斜 0～20°	2.傾斜 20～45°	3.傾斜 45～90°		1	1	1

切羽10m区間での湧水量と水による劣化状態による評価（劣化は現在および将来における可能性について判定する）

F.湧水量	状態	なし 滲水 1ℓ/分以下	滴水程度 1～20ℓ/分	集中湧水 20～100ℓ/分	全面湧水 100ℓ/分以上			
	評価区分	1	2	3	4	1	1	1
G.劣化	水による劣化	肌落ち・剥落なし	岩片等が剥離、剥落した緩みを生ず	岩塊・岩片等が抜落ちた軟弱化	流出			
	評価区分	1	2	3	4	1 (0)	1 (0)	1 (0)

評価項目	1	2	3	4	評価区分
切羽の自立安定性（素彫り面の状態）	肌落ち・剥落なし	岩片等が剥離、剥落した	岩塊・岩片等が抜落ちた	－	
切羽の湧水状態	なし	滴水程度（1～20ℓ/分）	集中湧水（20～100ℓ/分）	全面湧水（100ℓ/分以上）	

左肩	天端（代表地質）	右肩
凝灰岩	凝灰角礫岩	凝灰角礫岩

評価点		
50	38	50
44		

加重平均点＝（左肩＋天端×2＋右肩）÷4

まとめ（客観的性をもたせた切羽観察）

- ✓ 評価項目A.圧縮強度，B.風化変質においては，ある程度データが集中しており，相関性がみられた．
- ✓ 評価項目C.割目間隔は，データの分布幅は大きいものの相関性を確認できた．
- ✓ 評価項目D.割目状態は，現状においては明確な相関性は認められない．今後さらなるデータの蓄積が必要である．
- ✓ 提案する帳票は，現在のNEXCO帳票を補完する資料として活用しており，引き続きデータの蓄積と評価区分のしきい値の精度向上に努めたい．

覆工コンクリート
自動施工ロボットシステム

@高松トンネル工事

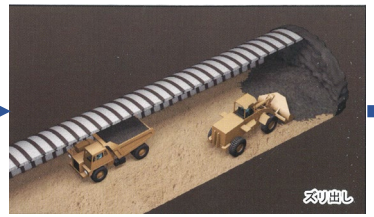
目　次

1. 従来の山岳トンネル覆工施工
2. 従来方式によるコンクリート打設における現状と課題
3. 覆工自動施工ロボットシステムの概要
4. ロボットシステムの導入効果
5. まとめ（社会的意義・発展性）

1．従来の山岳トンネル覆工施工

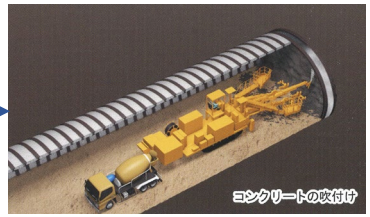
山岳トンネルの施工サイクル

①掘削(機械･発破)

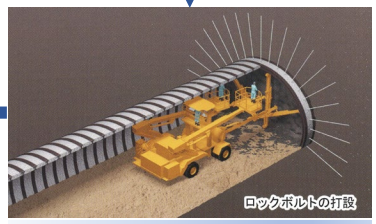


②掘削土搬出

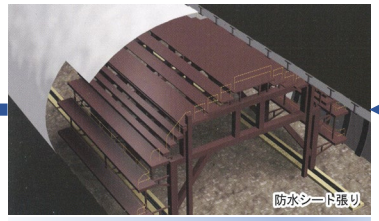
③鋼製支保工建込み



④吹付けコンクリート



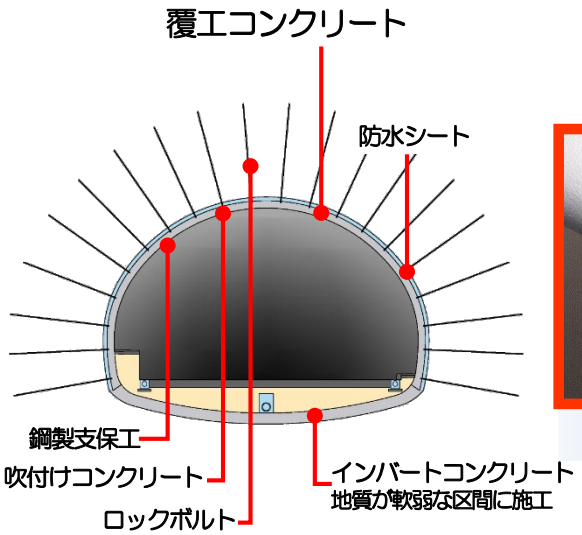
⑤ロックボルト打設



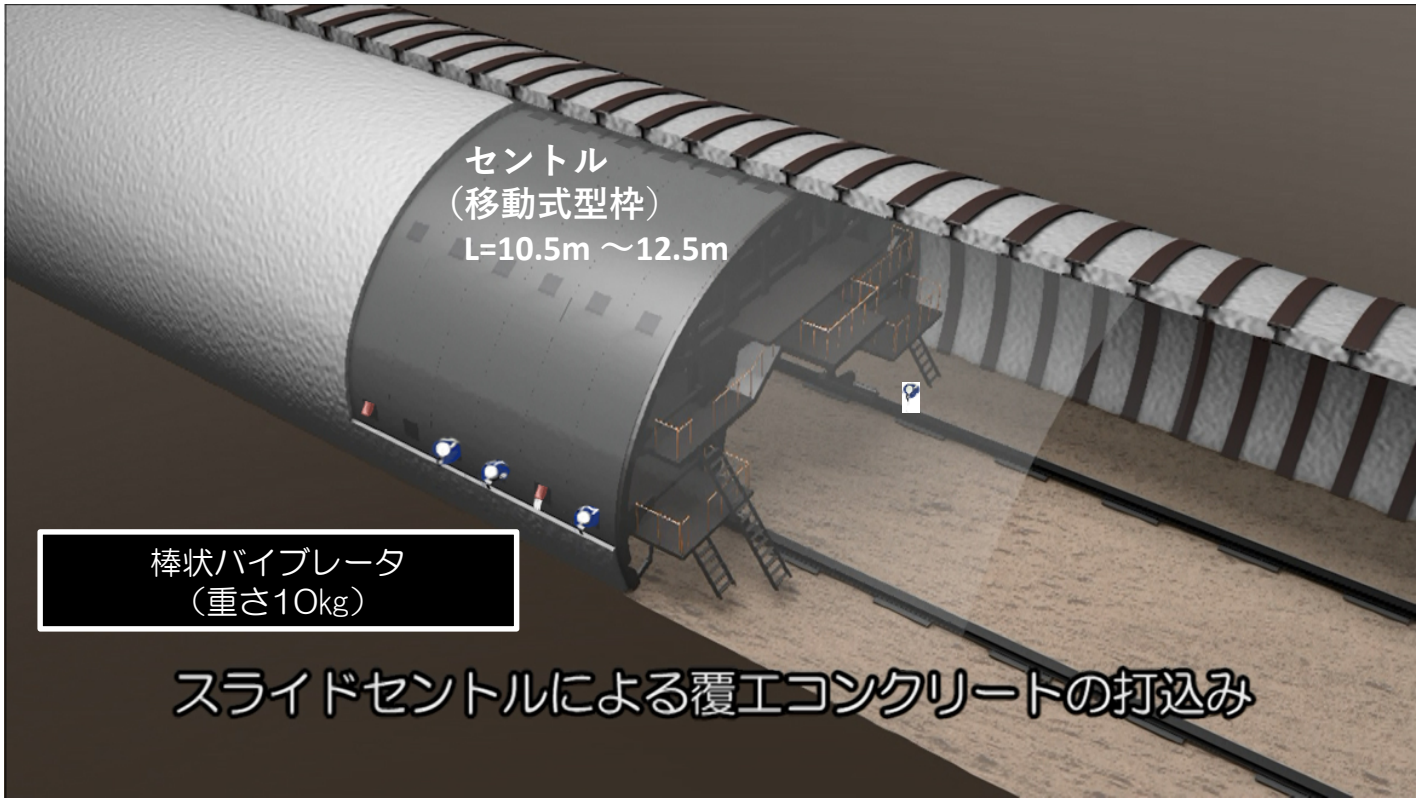
⑥防水シート

⑦覆工コンクリート

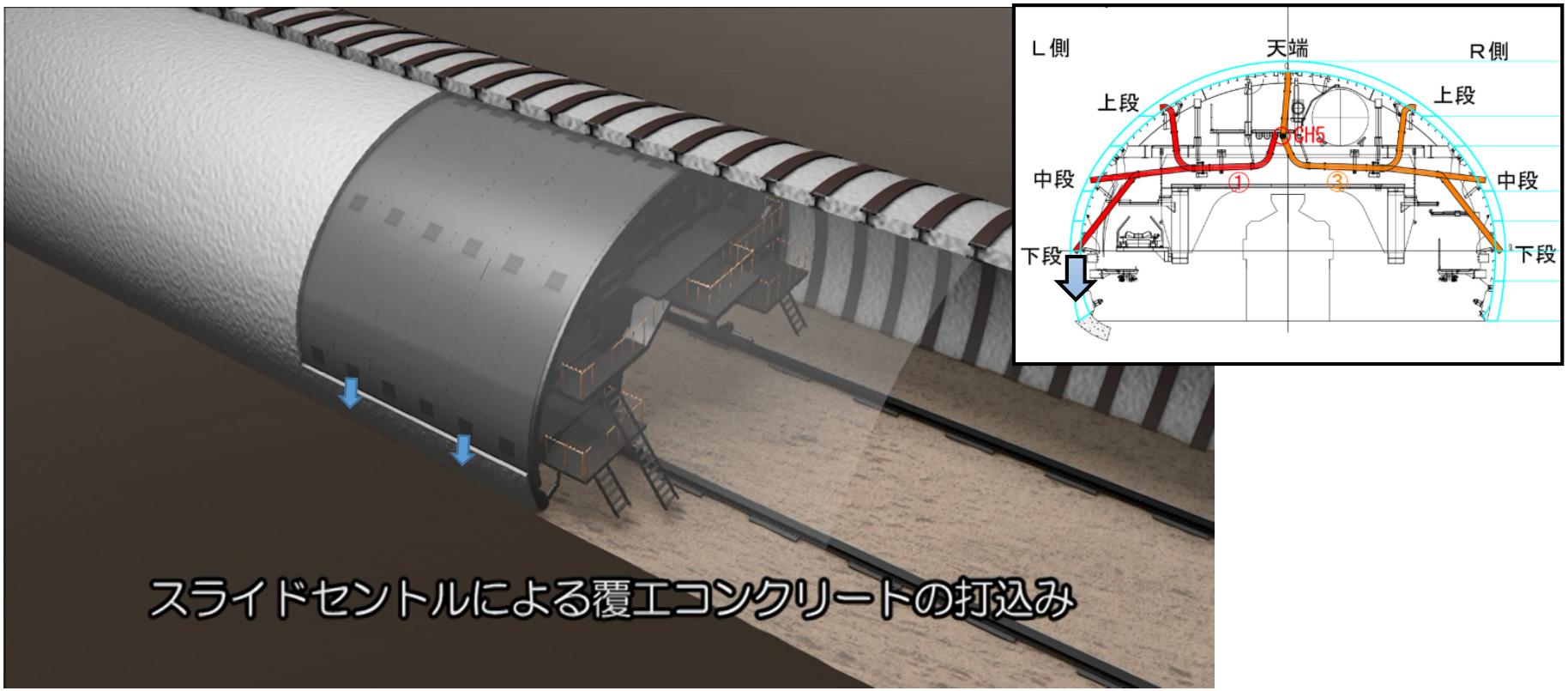
①～⑦の繰り返し



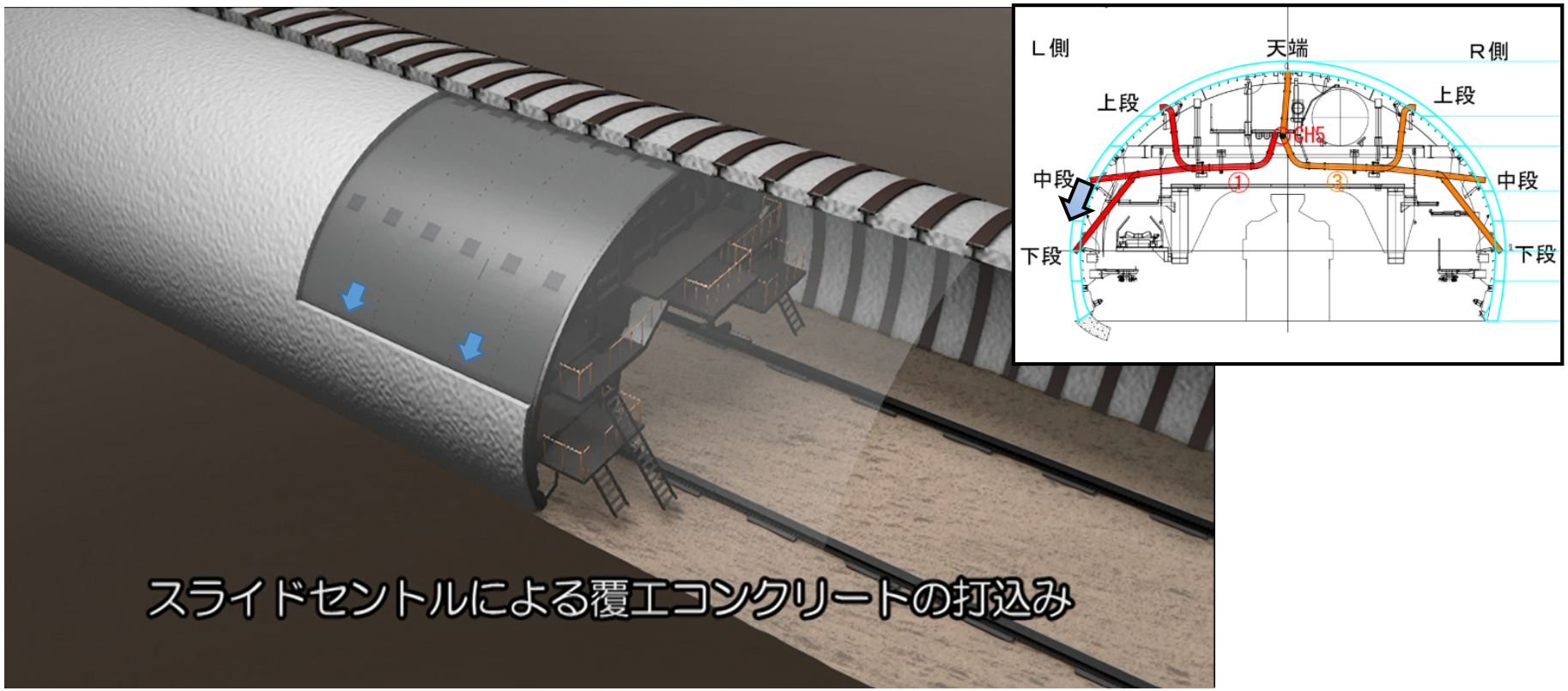
1．従来の山岳トンネル覆工施工



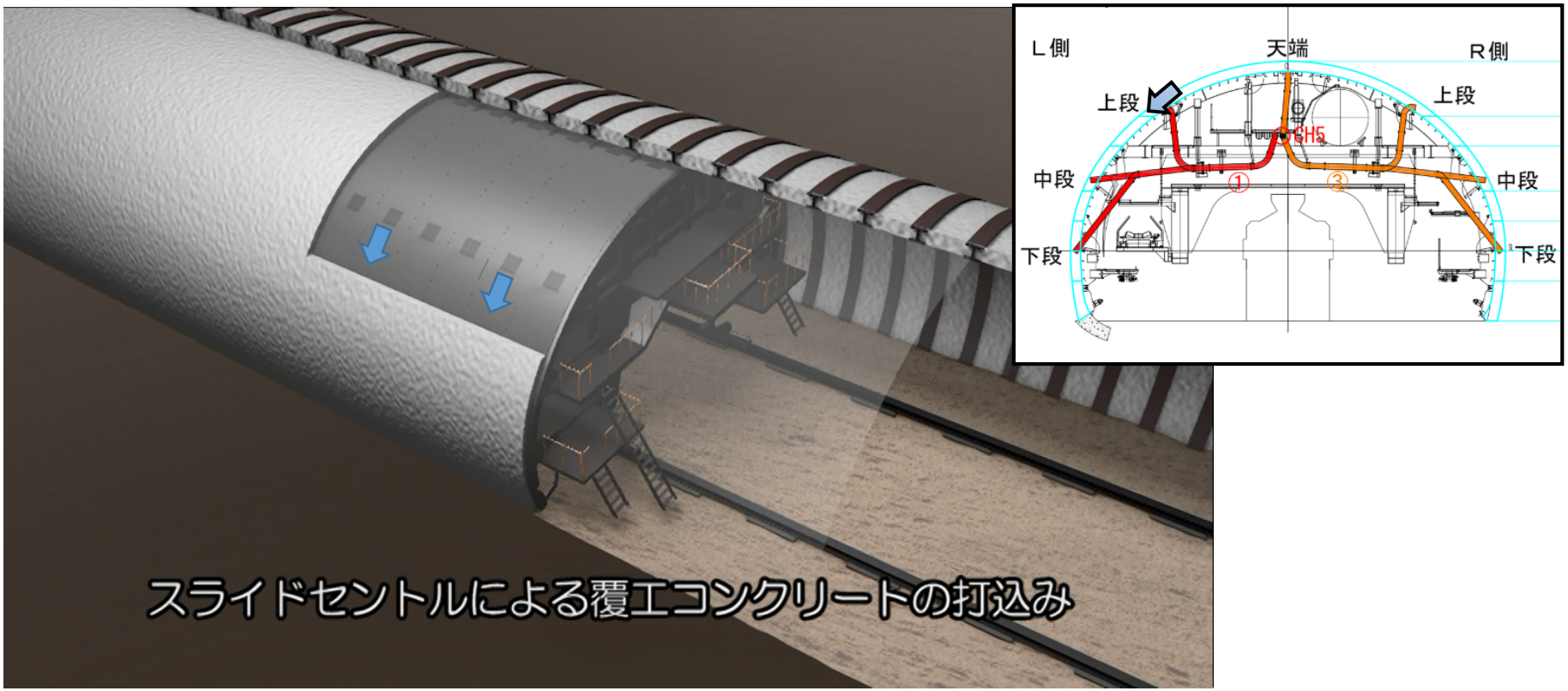
1．従来の山岳トンネル覆工施工



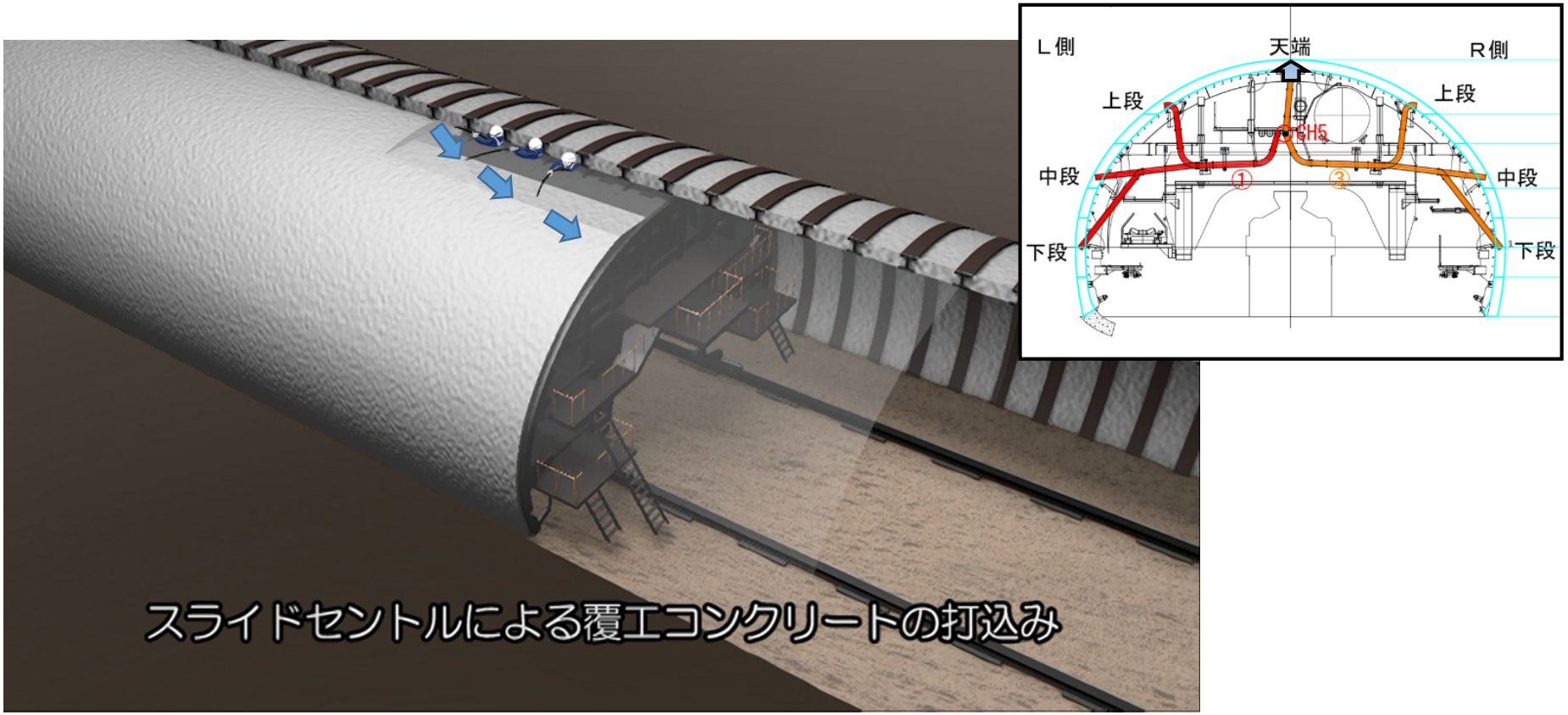
1．従来の山岳トンネル覆工施工



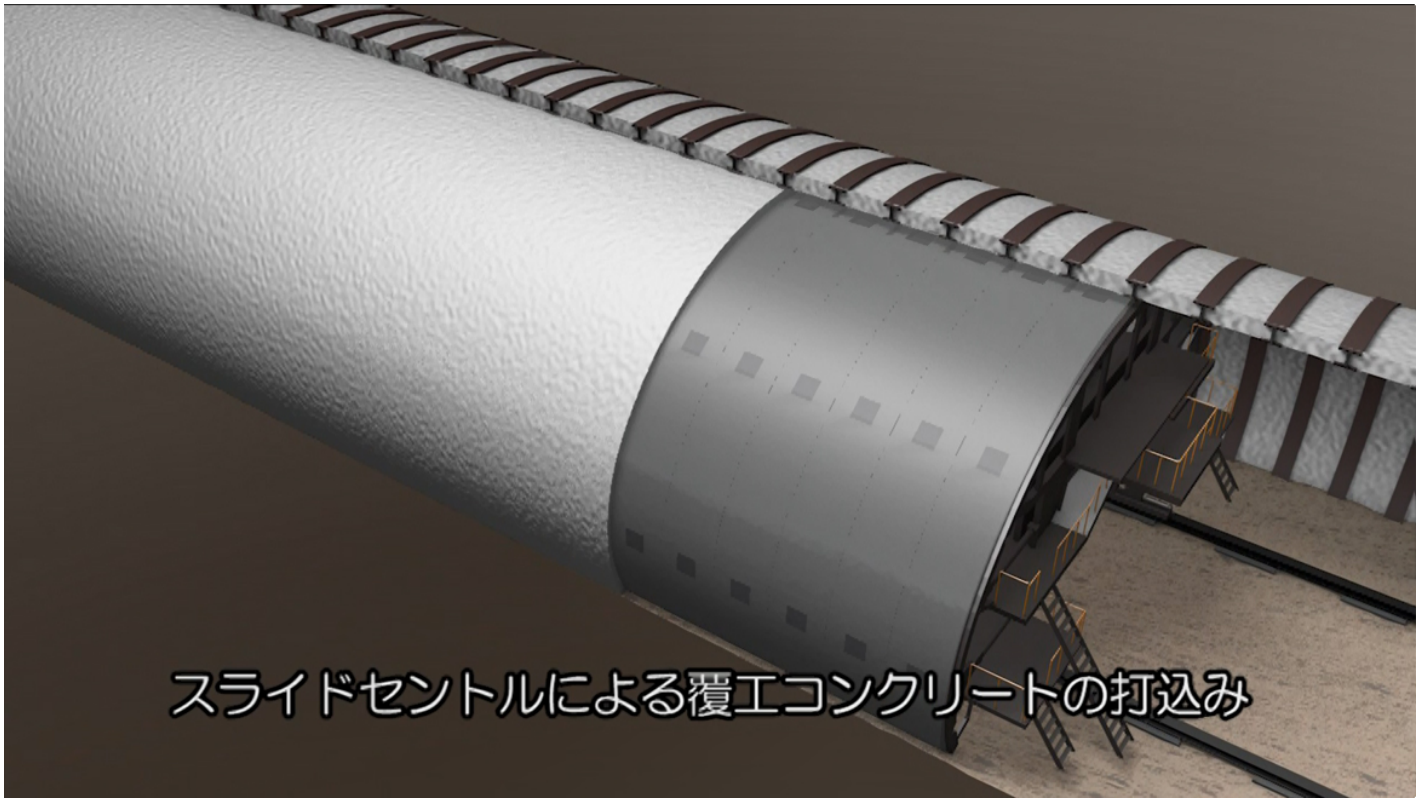
1．従来の山岳トンネル覆工施工



1．従来の山岳トンネル覆工施工



1．従来の山岳トンネル覆工施工

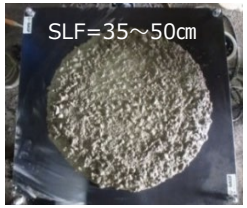


2． 従来方式によるコンクリート打設における現状と課題

【材料】 ・発注者の仕様改善
（中流動コンクリートの使用）

【施工】 ・施工品質のばらつき
（作業員の技量に左右される）
・苦渋労働環境

中流動覆工コンクリート



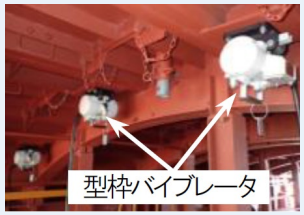
・材料分離抵抗性、流動性に優れる配合

材料特性を最大限に活かす

覆工作業ロボット化への挑戦

自動打込みシステム開発

自動締固めシステム開発



覆工コンクリート打込み・締固めの自動化

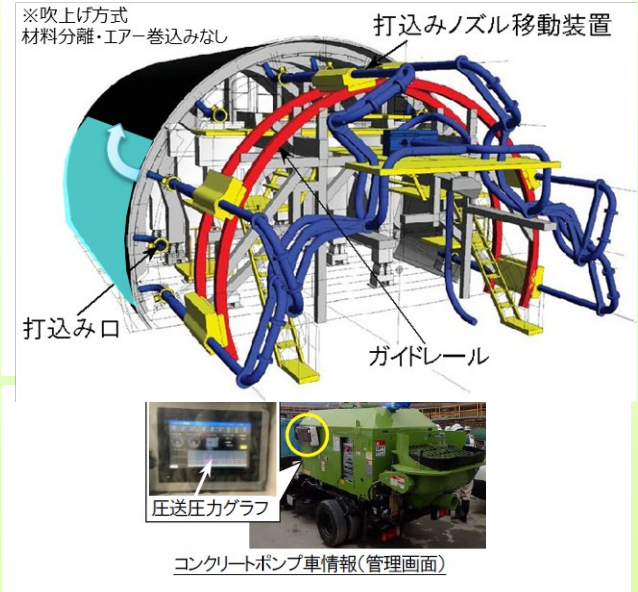
施工品質の均質化（高品質化）

苦渋作業からの解放（省力化）

3．技術の概要（覆工自動施工ロボットシステム）

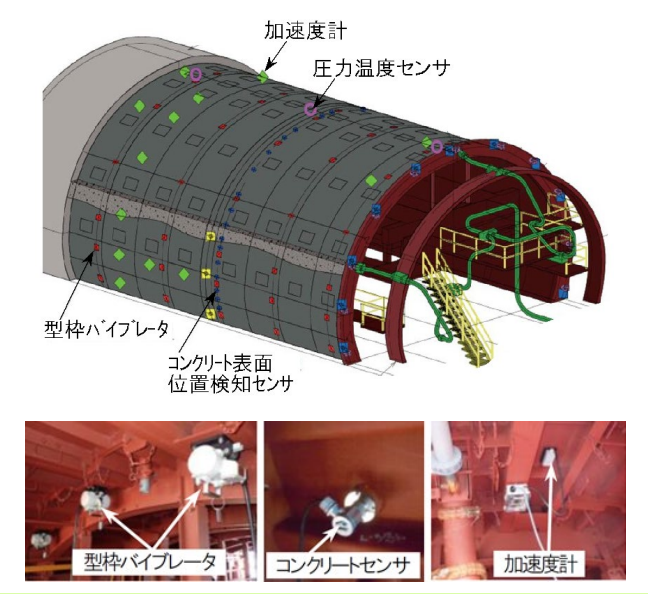
自動打込み装置

■マニピュレータ方式打込み装置による自動打込み



自動締固め装置

■型枠バイブレータによる自動締固め

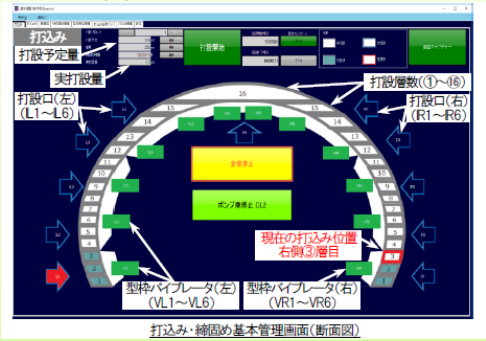


コンピューターシステムで集中制御する事により自動施工を具現化

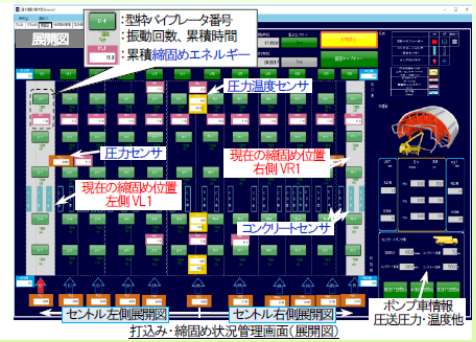
3．技術の概要（覆工自動施工ロボットシステム）

コンピューターシステム

・打込み箇所・締固め状態を数値で可視化



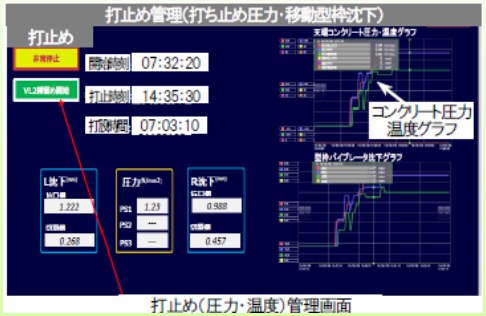
打込み・締固め基本管理画面(断面図)



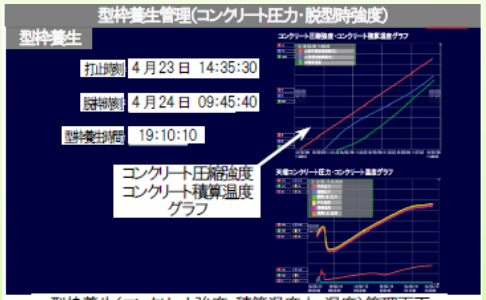
打込み・締固め状況管理画面(展開図)

センサ名	台数	用　途
コンクリートセンサ	30	打込みコンクリート表面位置検知
圧力センサ	13	打込みコンクリート圧力など
加速度センサ	19	締固めエネルギー算定
圧力温度センサ	3	打止め圧力 脱型枠強度
沈下計	4	移動型枠沈下量

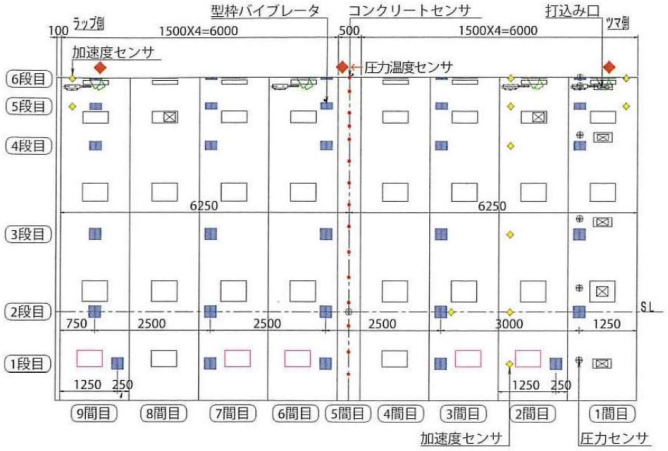
・コンクリート圧力と温度、型枠沈下量をリアルタイムに表示（管理値で打止め・脱型枠判断）



打止め(圧力・温度)管理画面

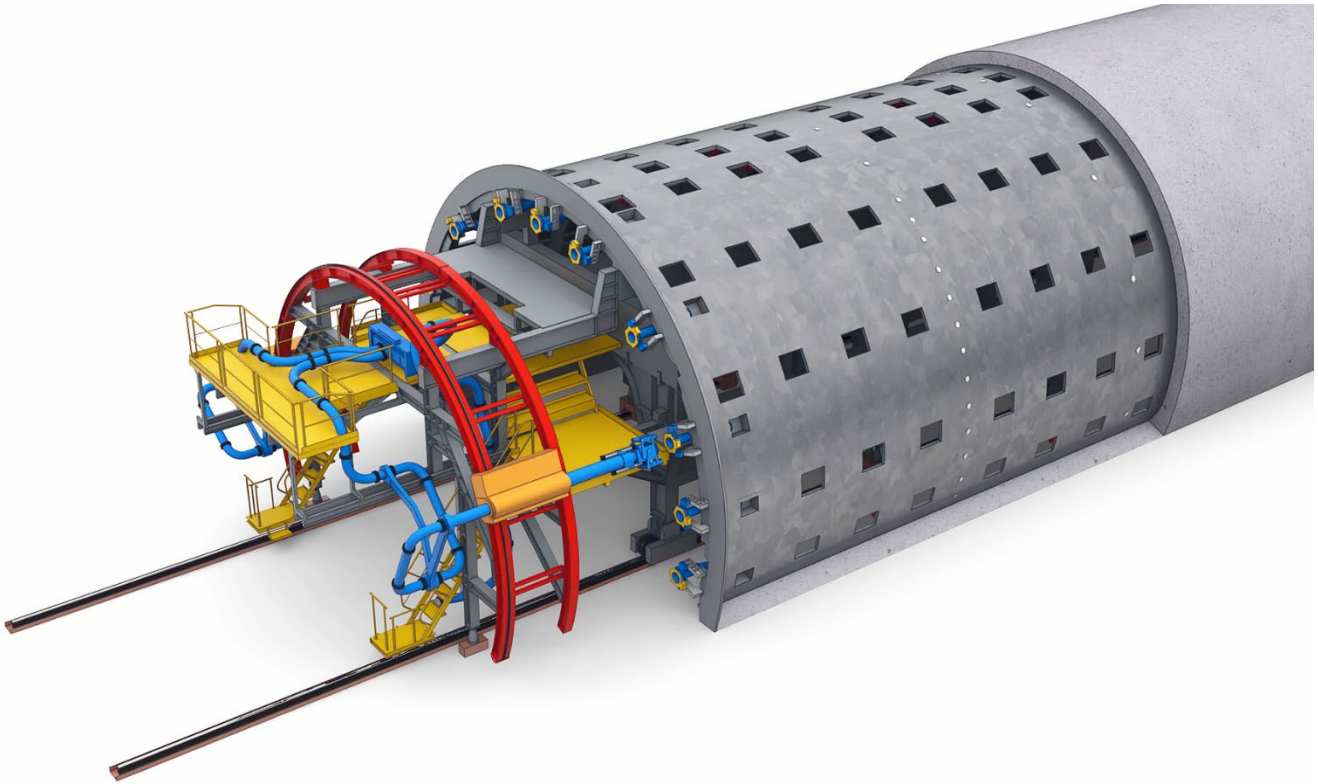


型枠養生(コンクリート強度・積算温度力・温度)管理画面

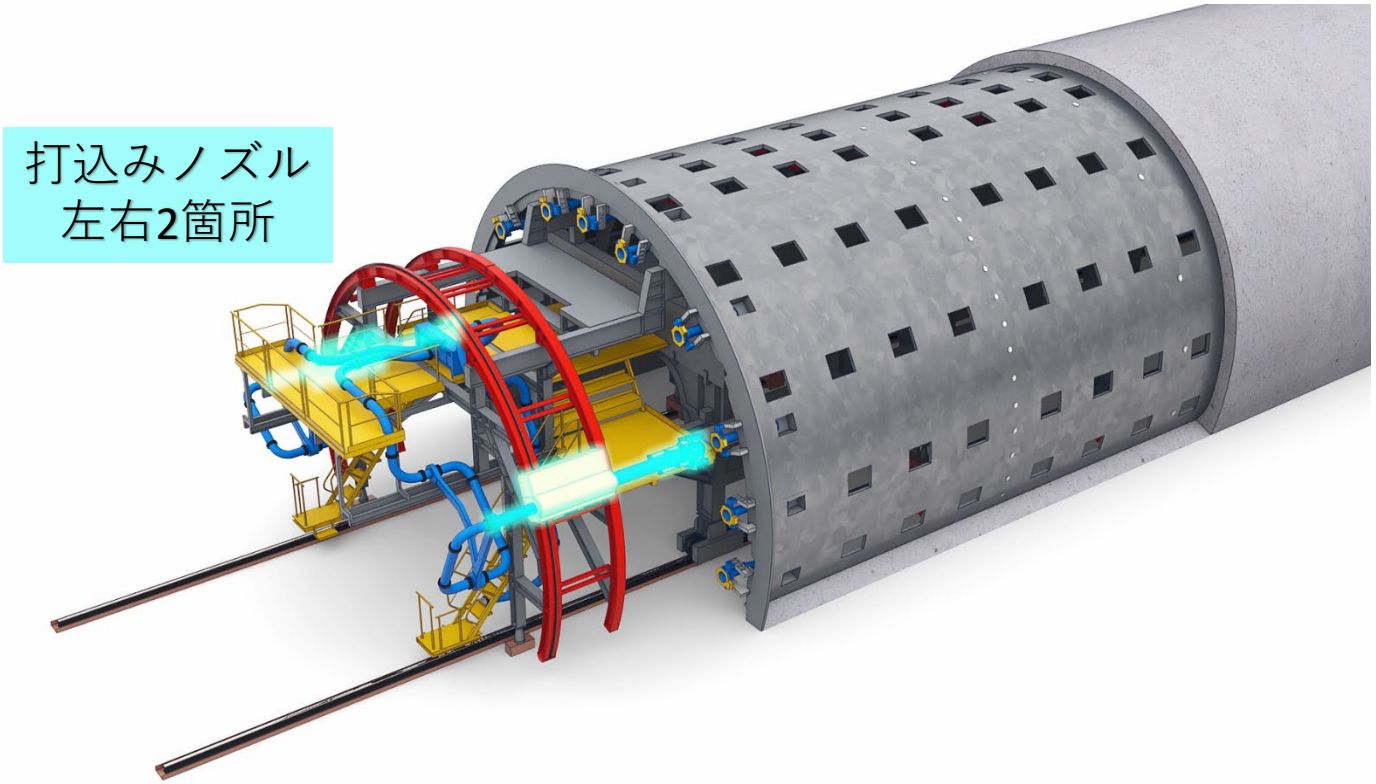


打込み・締固め状態を数値で可視化し、次施工判断が可能

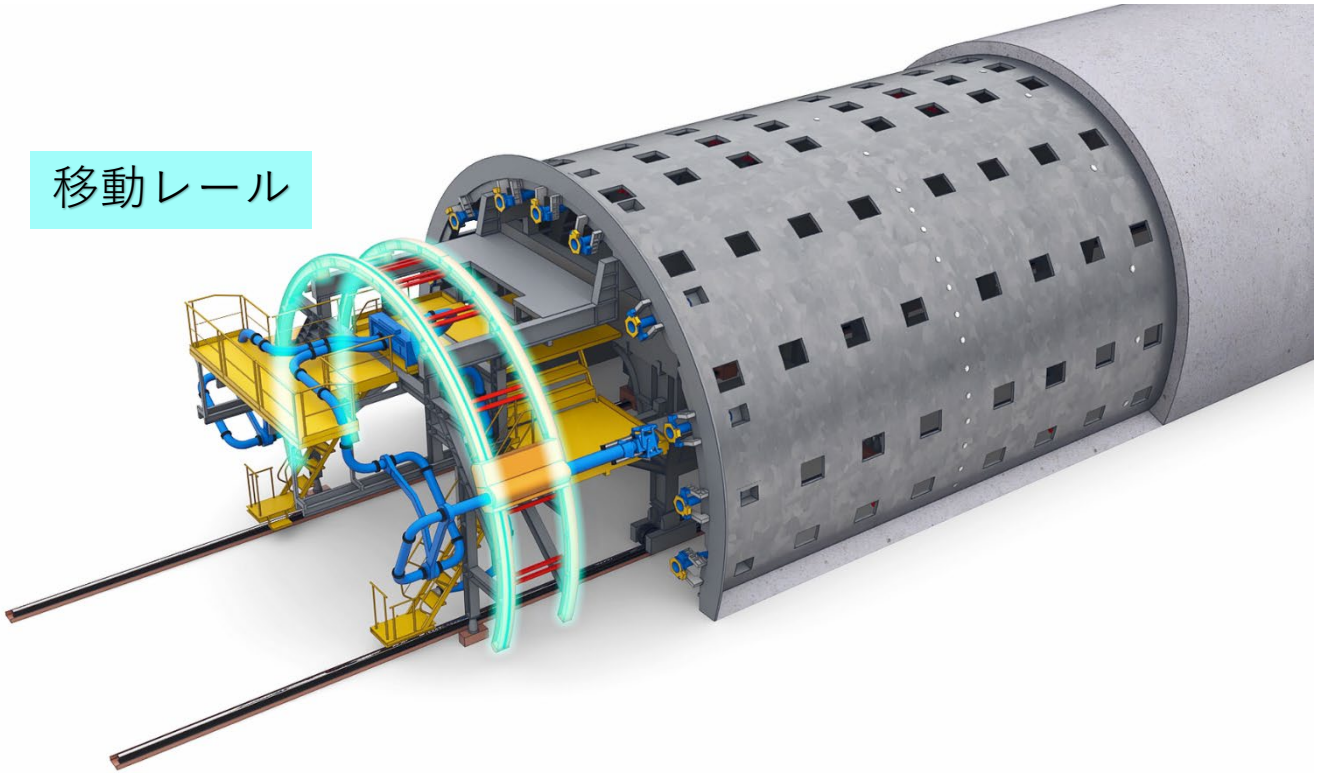
ロボットシステムによる自動打込み・締固めの流れ



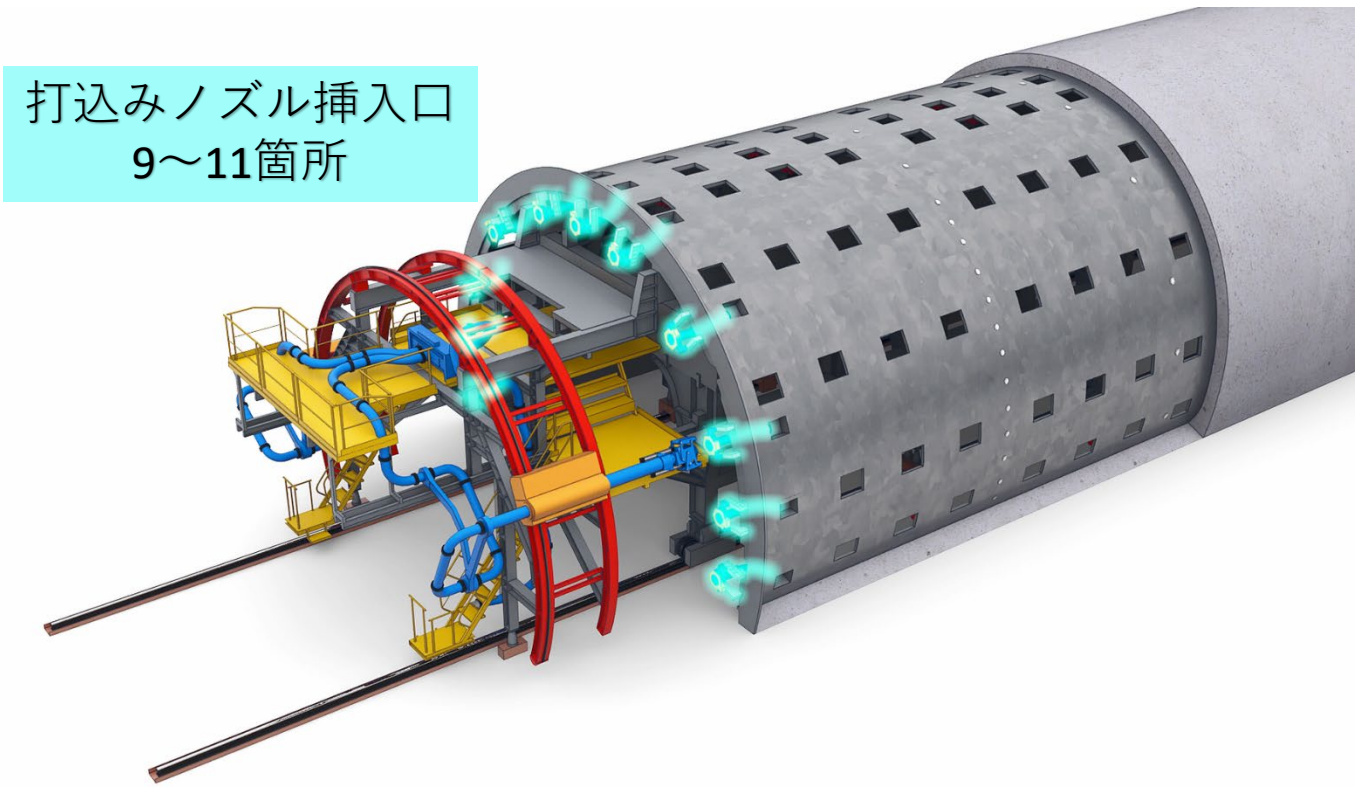
ロボットシステムによる自動打込み・締固めの流れ



ロボットシステムによる自動打込み・締固めの流れ

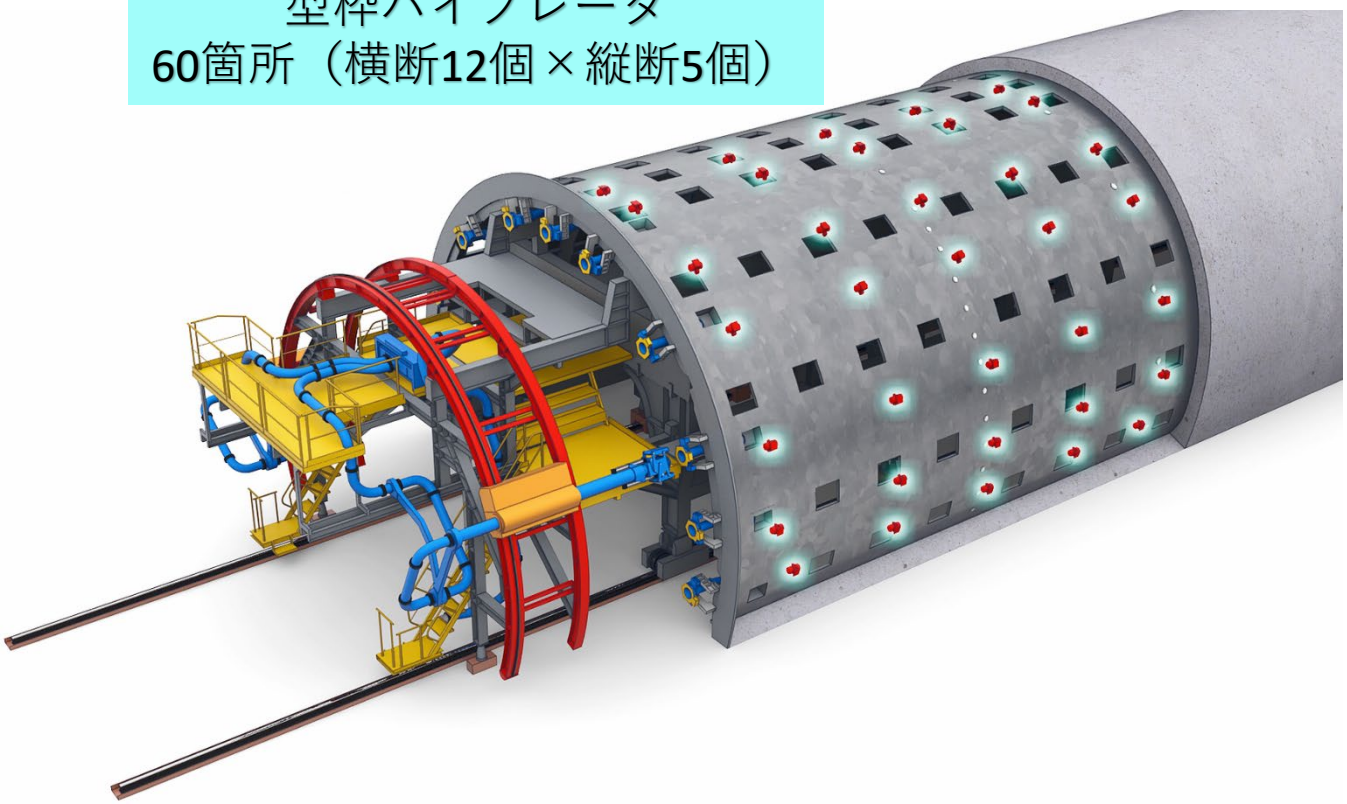


ロボットシステムによる自動打込み・締固めの流れ

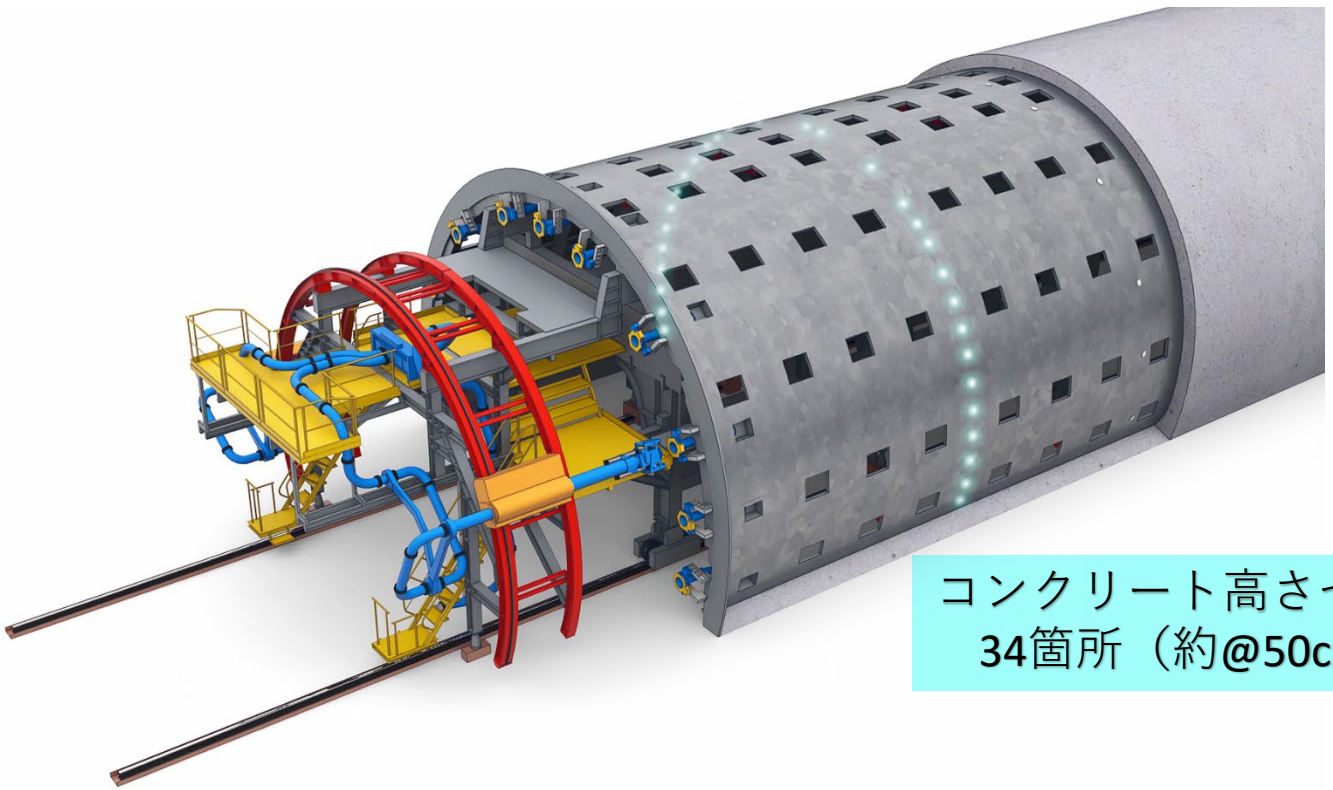


ロボットシステムによる自動打込み・締固めの流れ

型枠バイブレータ
60箇所（横断12個×縦断5個）

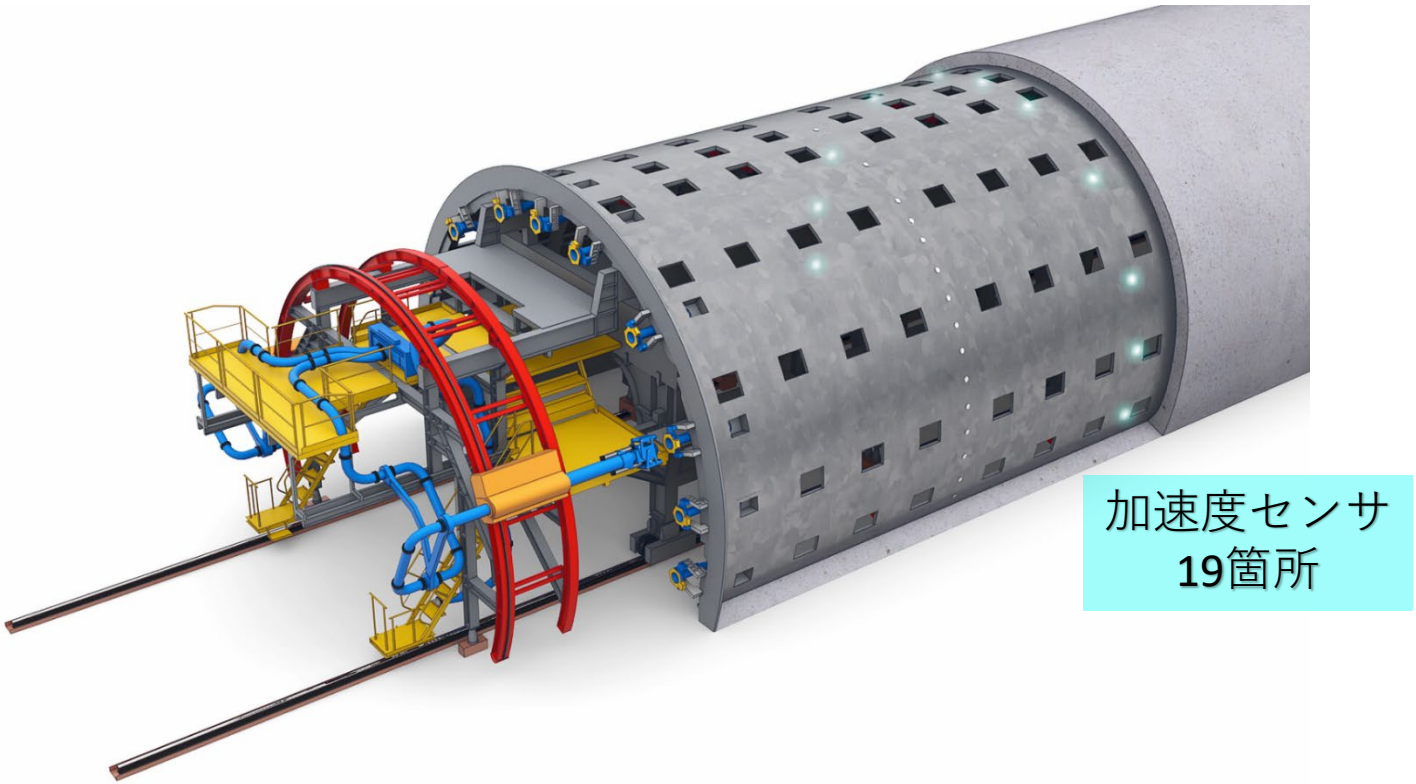


ロボットシステムによる自動打込み・締固めの流れ

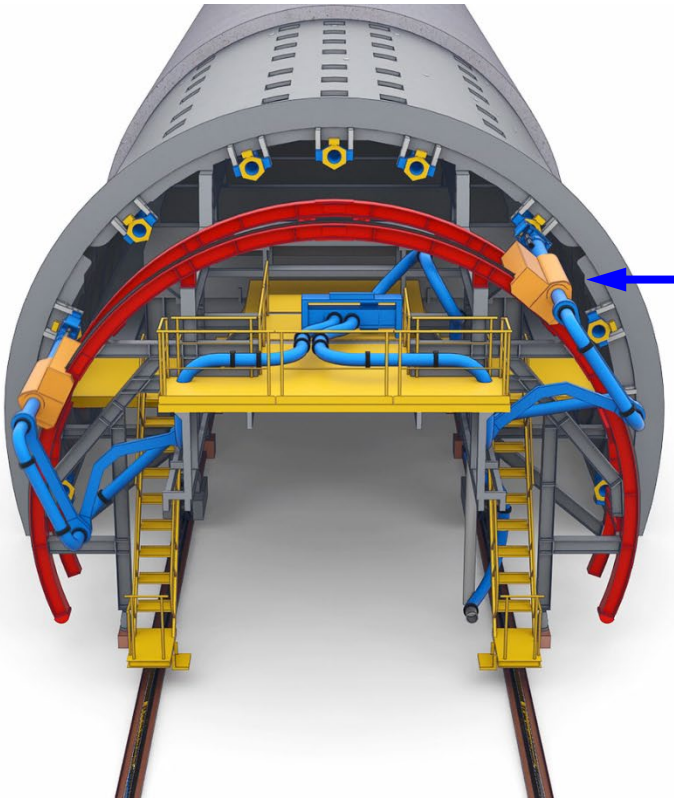


コンクリート高さセンサ
34箇所（約@50cm）

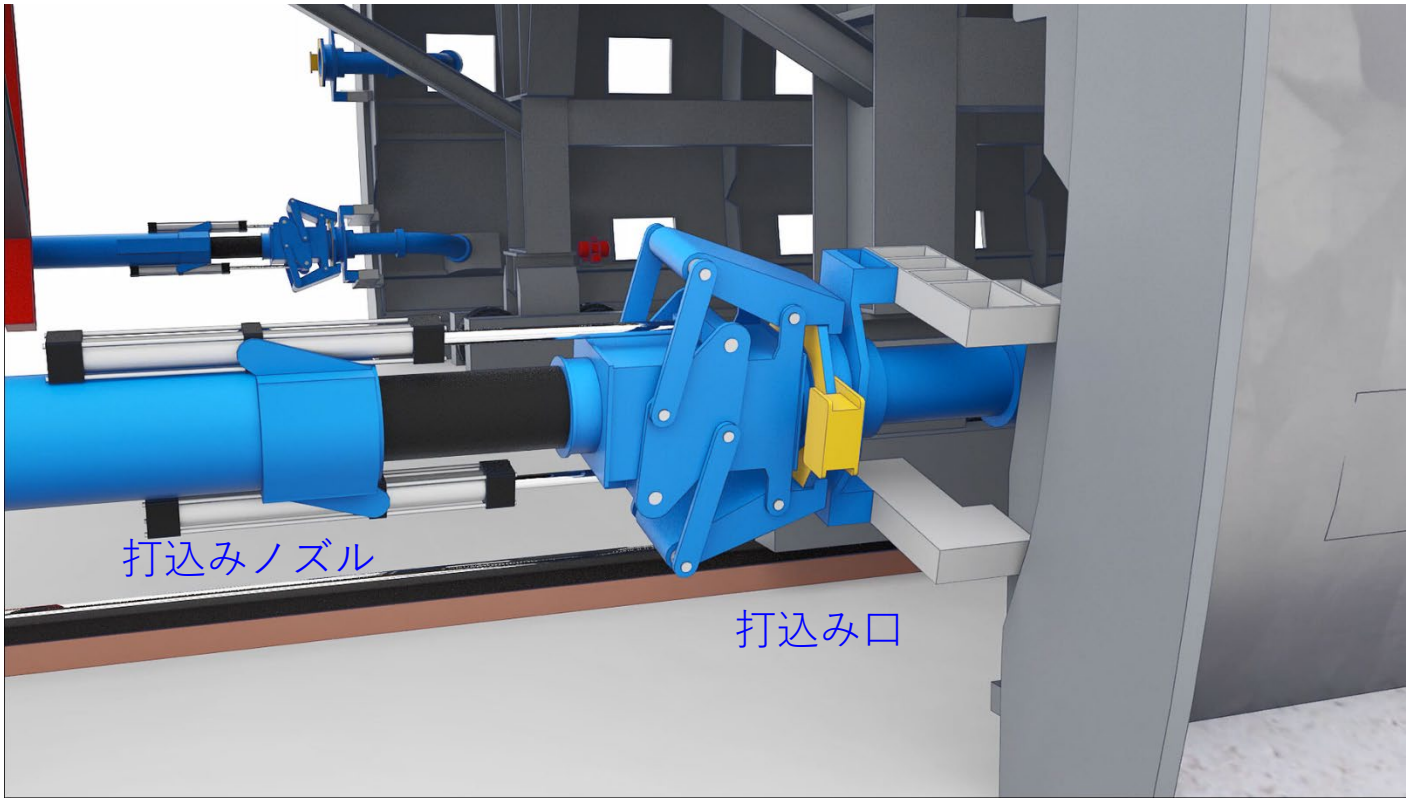
ロボットシステムによる自動打込み・締固めの流れ



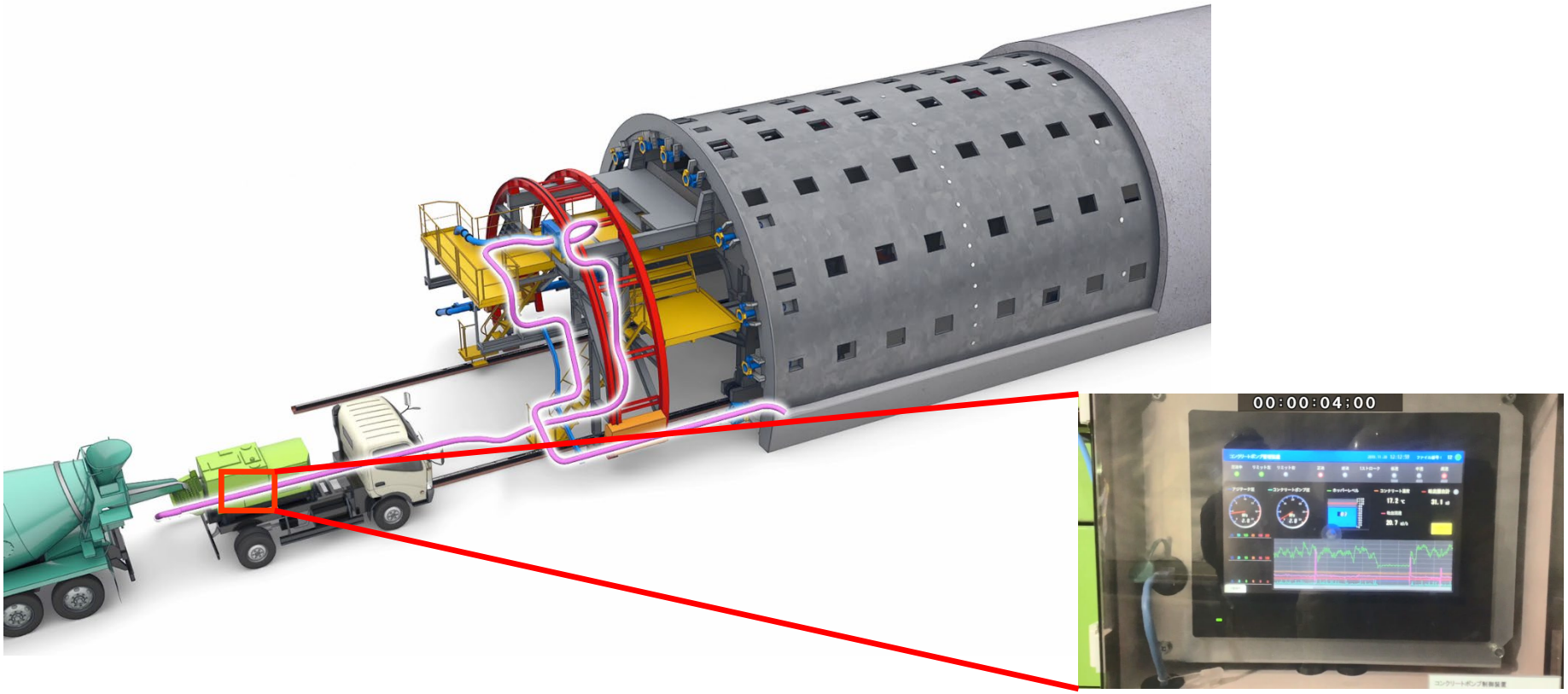
ロボットシステムによる自動打込み・締固めの流れ



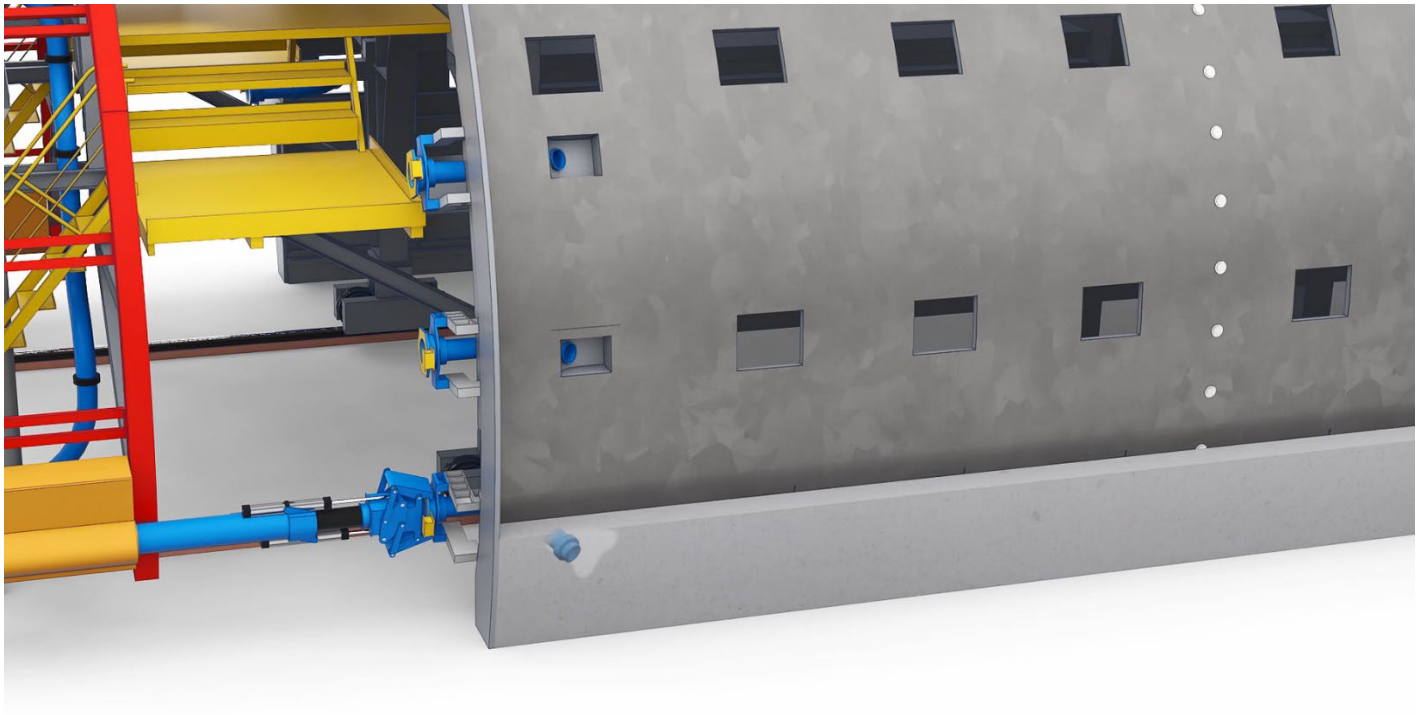
ロボットシステムによる自動打込み・締固めの流れ



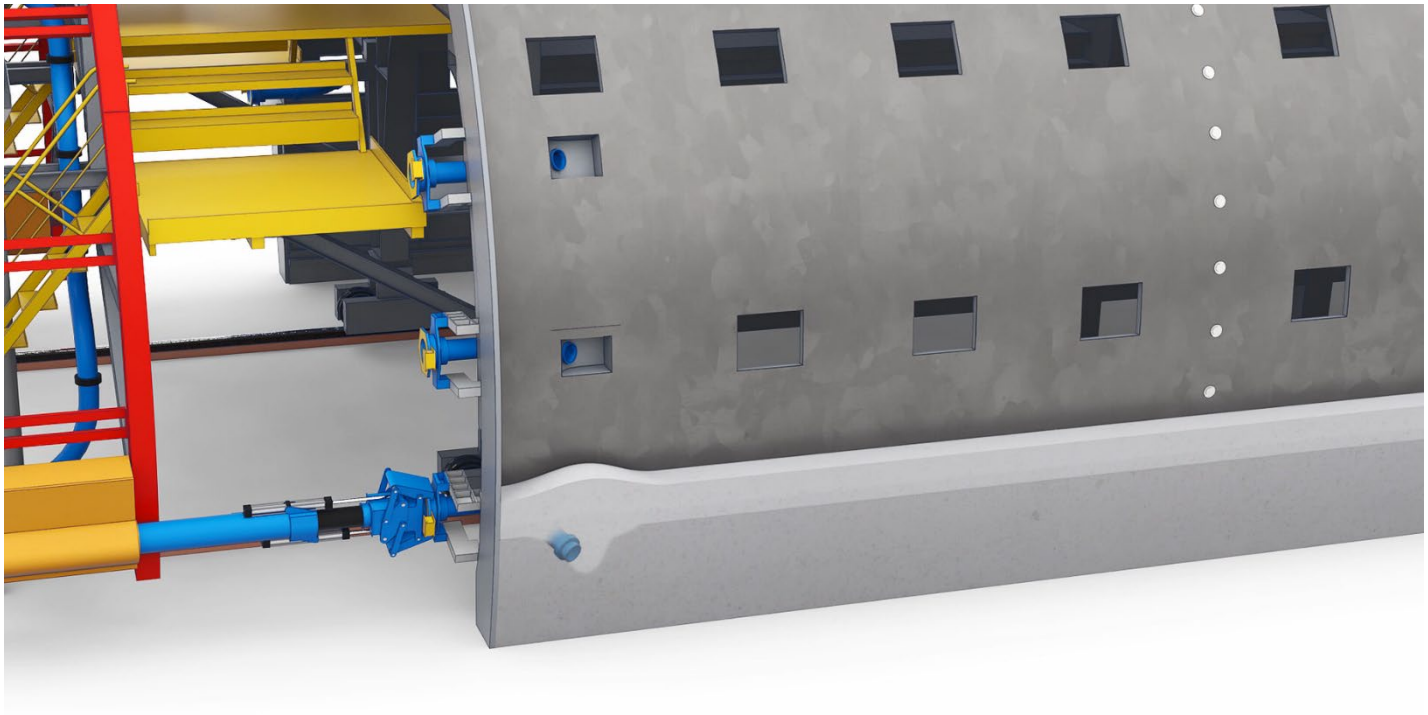
ロボットシステムによる自動打込み・締固めの流れ



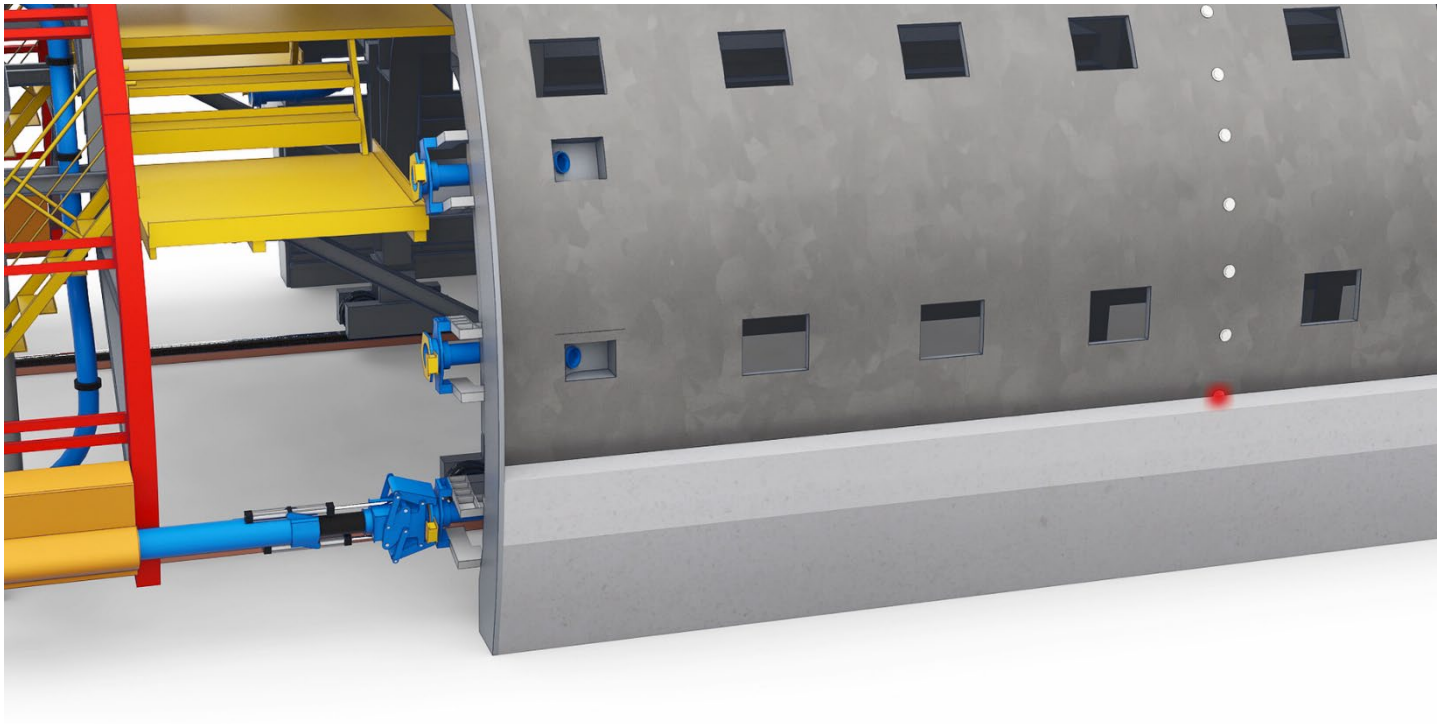
ロボットシステムによる自動打込み・締固めの流れ



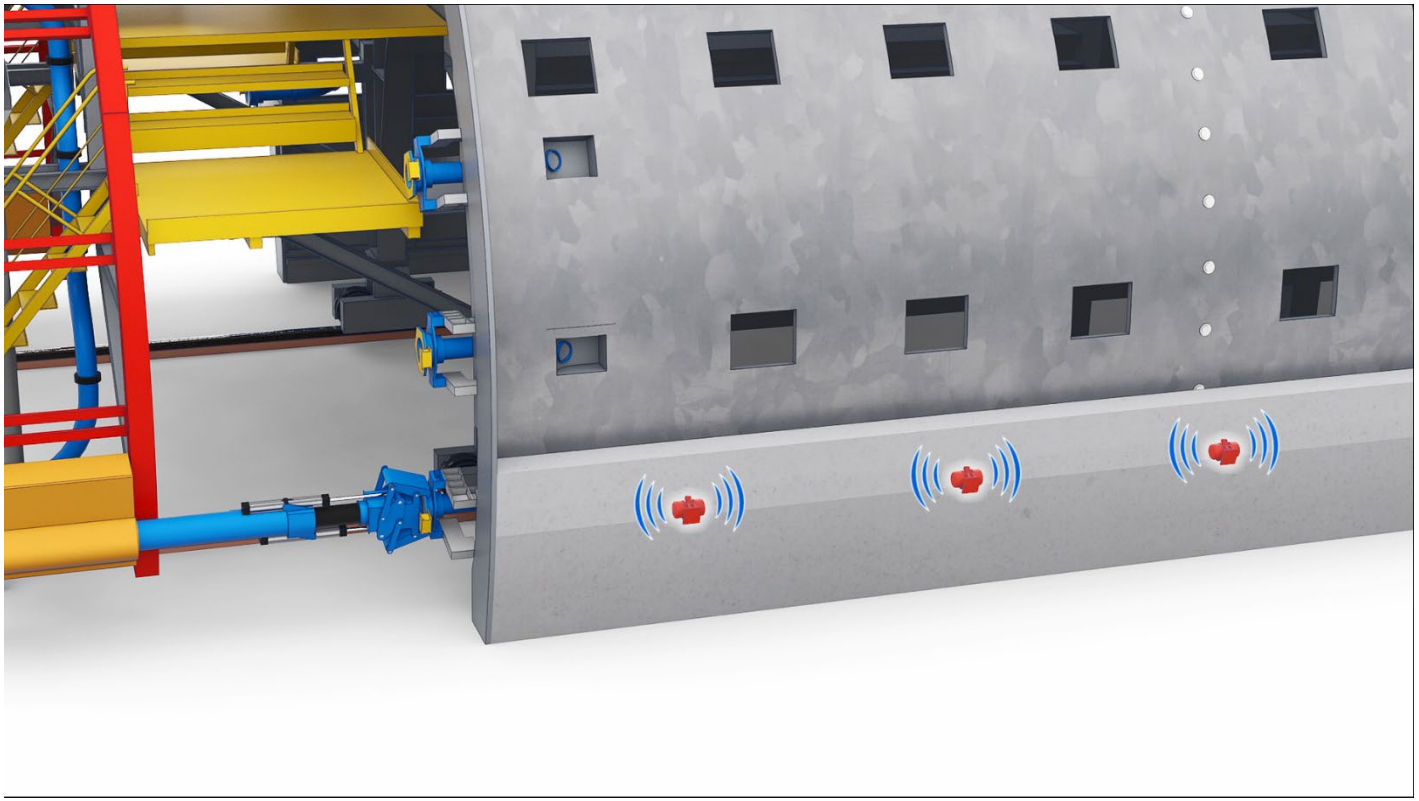
ロボットシステムによる自動打込み・締固めの流れ



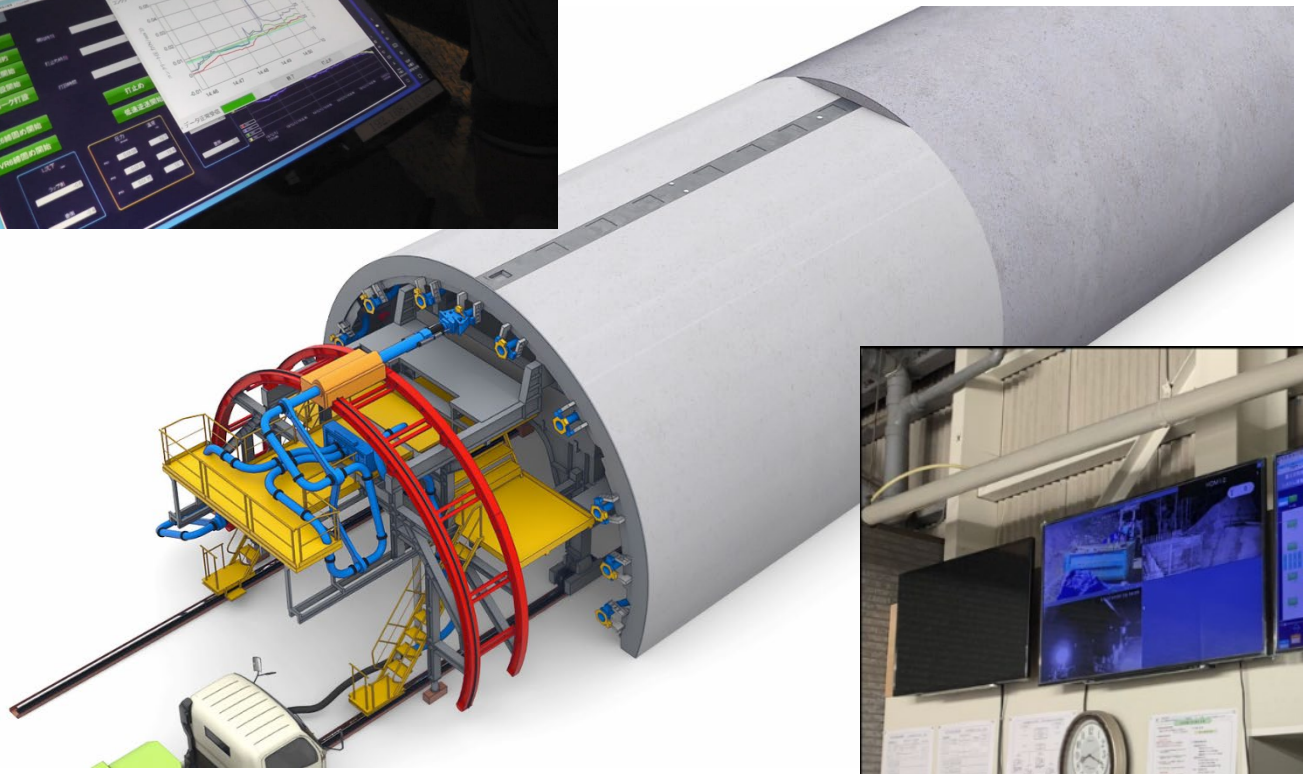
ロボットシステムによる自動打込み・締固めの流れ



ロボットシステムによる自動打込み・締固めの流れ



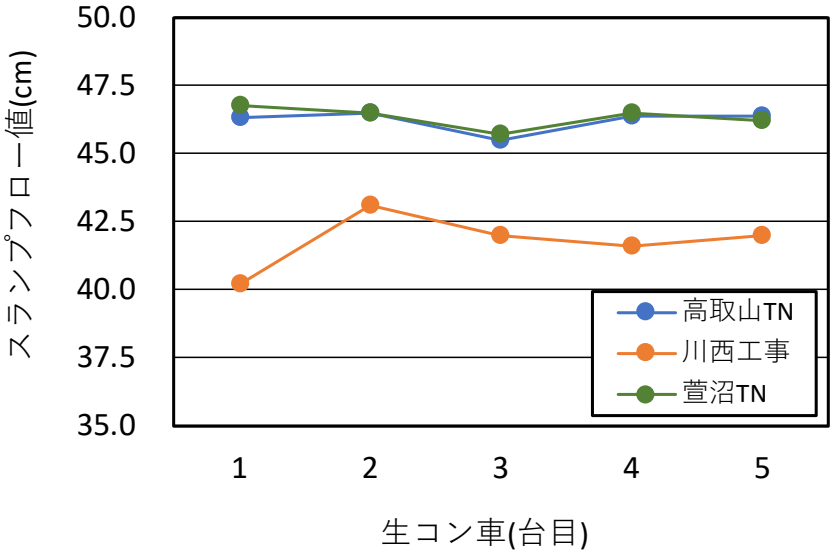
ロボットシステムによる自動打込み・締固めの流れ



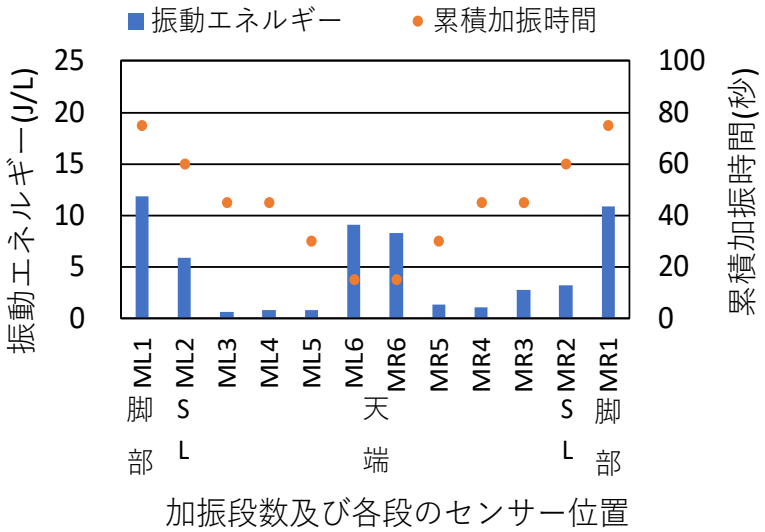
4．ロボットシステムの導入効果

	覆工コンクリート高品質化		飛躍的な省力化	
課題	技能労働者の技量に依存する締固め	材料分離・エアーの巻込み、色むらが多い打込み	【人力作業】狭隘な空間での締固め作業	労務6人 施工時間 6時間30分
取り組み	【締固めをパターン化】 定量的な指標に基づく締固め	【全口吹上げ方式】 材料分離・エアーの巻込みがない打込み	【機械作業】 打込み、締固め状態の確認、システム監視	【機械作業】 労務2人 施工時間5時間30分
効果	締固めむらのない緻密なコンクリート施工が可能	エアーあばた・色むらの少ない密充填コンクリート施工が可能	作業の仕方が大きく改善	打設労務 →66%低減 打設時間 →15%低減

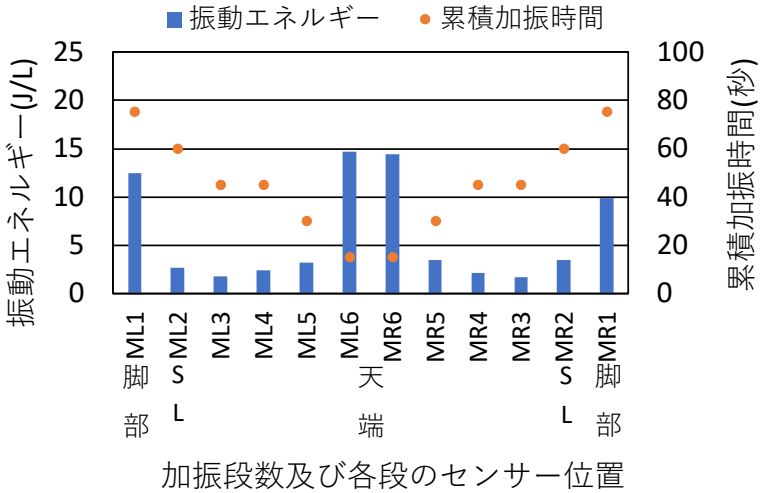
4．ロボットシステムの導入効果



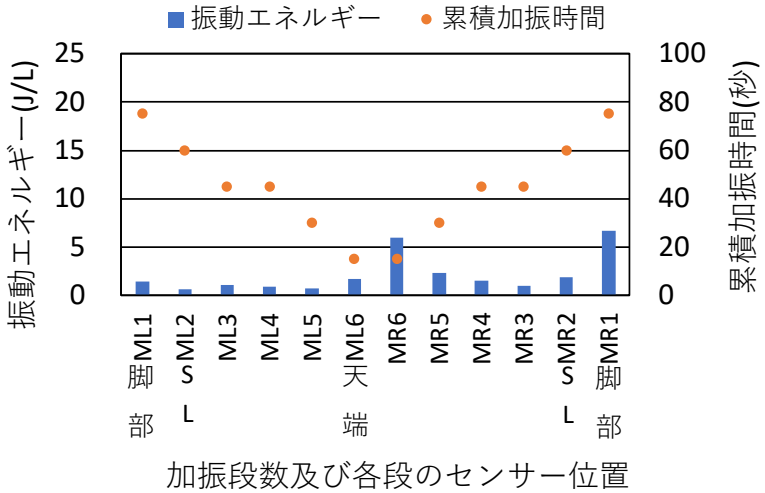
高取山TN



川西工事

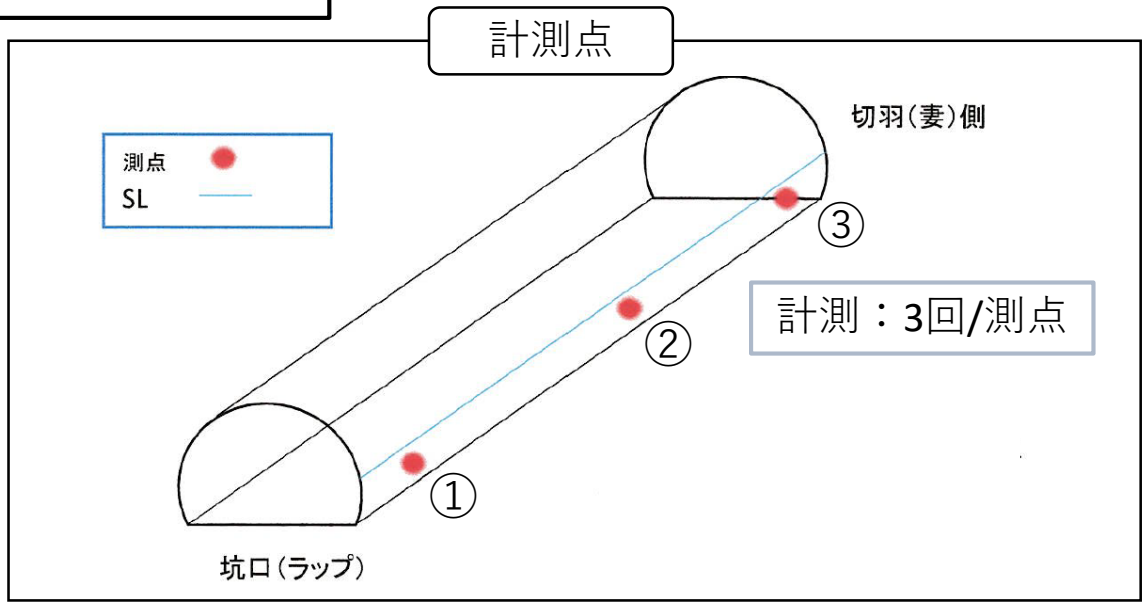


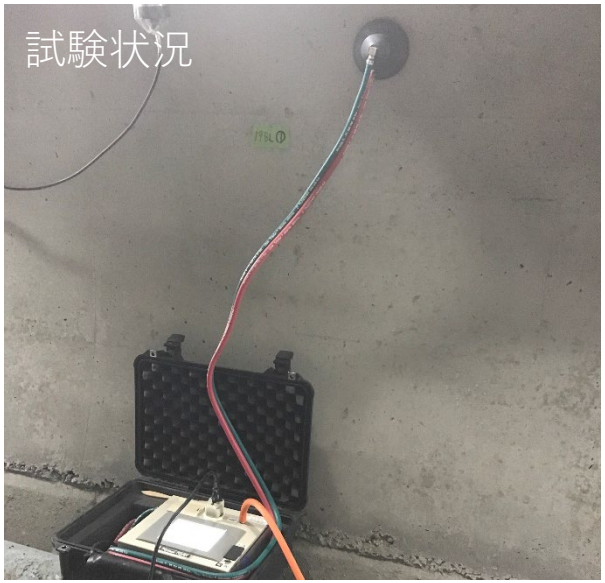
萱沼TN

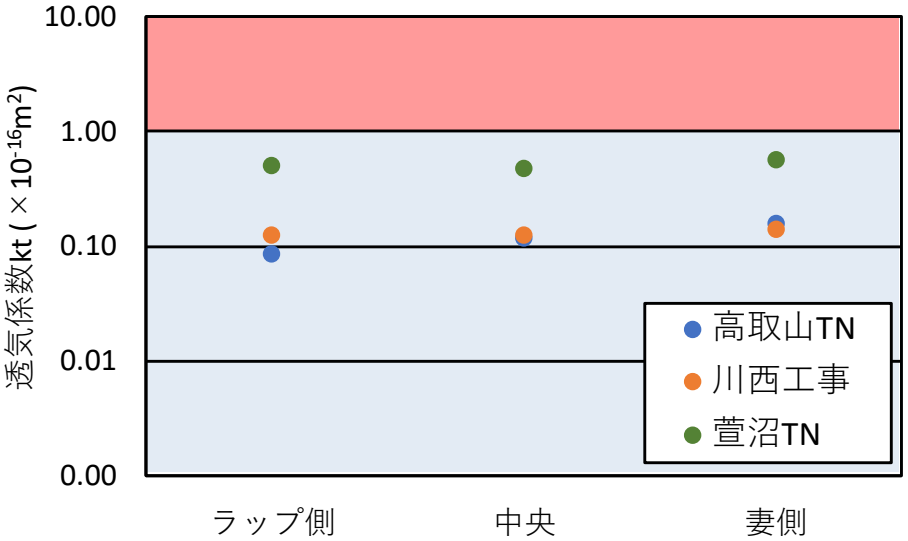


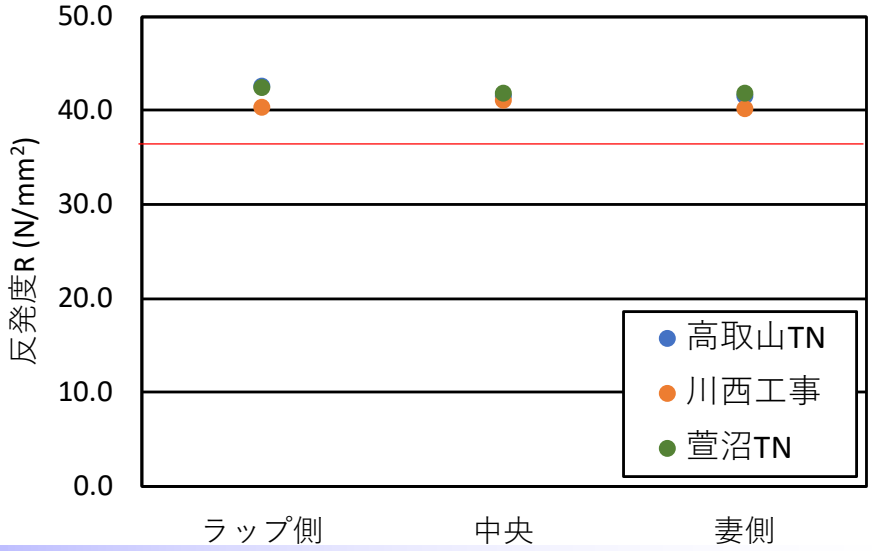
4．ロボットシステムの導入効果

透気性試験概要









5．まとめ（社会的意義・発展性）

社会的意義

施工に起因する覆工不具合の発生 （はく落による第3者被害等）	→	施工時の品質確保 （耐久性向上）
労働集約型産業 ・高齢化 ・技能労働者不足	→	・大量離職への対応 ・省力化 （作業の在り方を変革）

本システムによる覆工自動施工の成功は、これらの課題を解決でき、社会的意義は大きく、山岳トンネル覆工施工方法の道を拓いたものと考えられます。

遠隔立会検査技術
子どもたちに誇れるしごと
@高松トンネル工事

目　次

1. 開発背景
2. ウェアラブル端末の仕様
3. 現場での試行状況
4. 今後の発展

1．開発の背景

ウェアラブル端末の活用した現場管理

【建設現場に求められる課題】

- ✓ 働き方改革の実現に向けた生産性向上
- ✓ 中堅層の不足による若手職員の早期教育
- ✓ 多拠点化する工事現場を少人数で現場管理・現場技術支援する必要性
- ✓ コロナ禍での人同士の接触機会の削減

工事現場のリモートコミュニケーション標準化の推進

例）・遠隔での作業指示、安全指導
・遠隔立会（臨場）
・遠方現場の作業状況確認

工事現場で手を塞がずに持ち運び・利用できるウェアラブル端末を用いた支援システム

2．ウェアラブル端末の仕様

ウェアラブル端末 装着時

- **100%ハンズ・フリー**
  ボタン、タッチ、ジェスチャー制御不要
- **高度な音声制御**
  95dB騒音環境でも利用可能
- **高い処理能力**
  Android 8, 2.0 GHz 8-Core CPU,
  2GB RAM, 16GB ROM, microSDで256GB拡張可能
  Wi-Fi + BT + GPS
- **鮮明な画面表示**
  7インチディスプレイに匹敵 (WVGA)、
  明るい日差しでも見やすい画面
- **カメラ付き**
  16MP高画質動画や静止画、600 lumensのライト
- **丈夫で長持ち**
  IP-66レベルの防塵・防水、耐衝撃
- **長時間稼働**
  大容量電池（3,250mAh）と低消費電力設計により、
  8時間以上の連続稼働が可能

3．現場での試行状況（リモートコミュニケーションのイメージ）

・・・・

他の工事事務所（発注者）
Ex.教育・見学など

工事事務所（発注者）

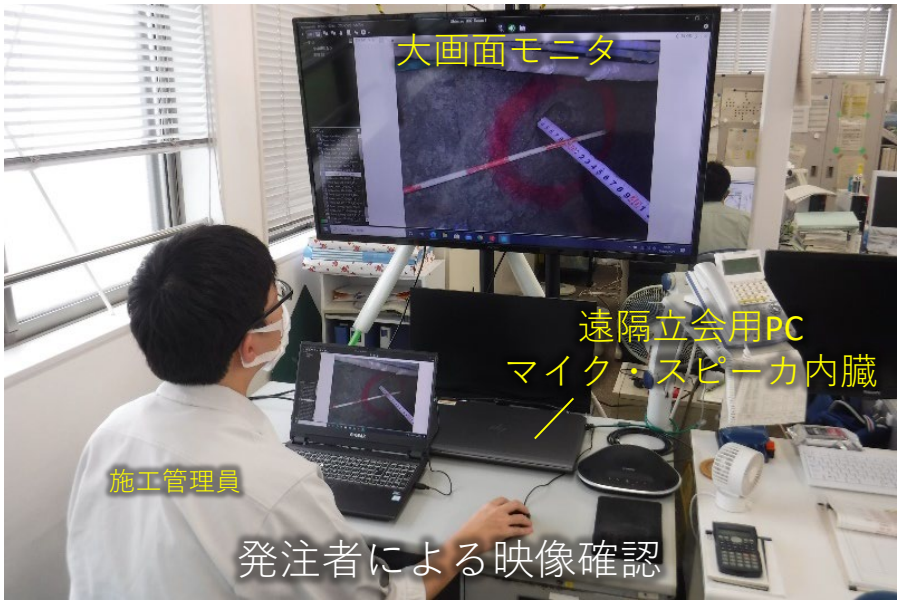
AUTODESK BIM 360 ⇔ Kcube2

・・・・

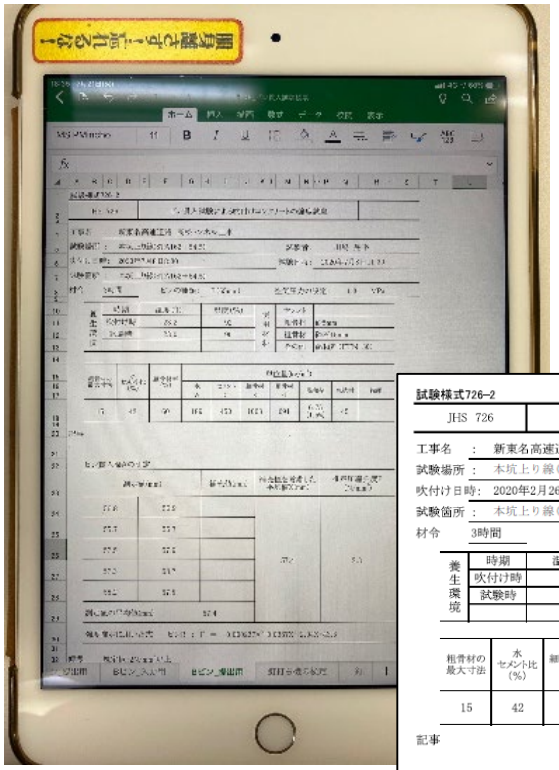
現場関係者

本社現場担当者

トンネル坑内



3．現場での試行状況（立会検査）



AUTODESK BIM 360

試験様式726-2

JHS 726	ピン貫入試験による吹付けコンクリートの強度試験

工事名 ： 新東名高速道路 高松トンネル工事

試験場所 ： 本坑上り線(STA. 161+41.5)　試験者： 川嶋 晃平

吹付け日時： 2020年2月26日　試験日時： 2020年2月26日

試験箇所 ： 本坑上り線(STA. 161+41.5)

材令 3時間　ピンの種類： B(65mm)　空気圧力の設定： 1.30 MPa

養生環境	時期	温度(℃)	湿度(%)
	吹付け時	14.3	69
	試験時	14.7	67

使用材料	
セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	砂5mm
粗骨材	砕石15mm
その他	混和剤(FTN-30)

粗骨材の最大寸法	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m³) 水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	急結材	繊維
15	42	60	189	450	1063	691	6.75 (1.5%)	45	−

記事

ピン貫入深さの測定

測定値(mm)		補充値(mm)	補充値を考慮した平均値X(mm)	推定圧縮強度F (N/mm²)
54.32	53.55		54.9	2.7
53.51	56.21			
55.23	53.32			
56.02	55.32			
53.53	58.29			
測定値の平均値(mm)		54.9		

強度推定に用いた式　ピンB ： $F = -0.000237X^3+0.0367X^2-2.04X+43.3$

備考　規定値：2N/mm²以上

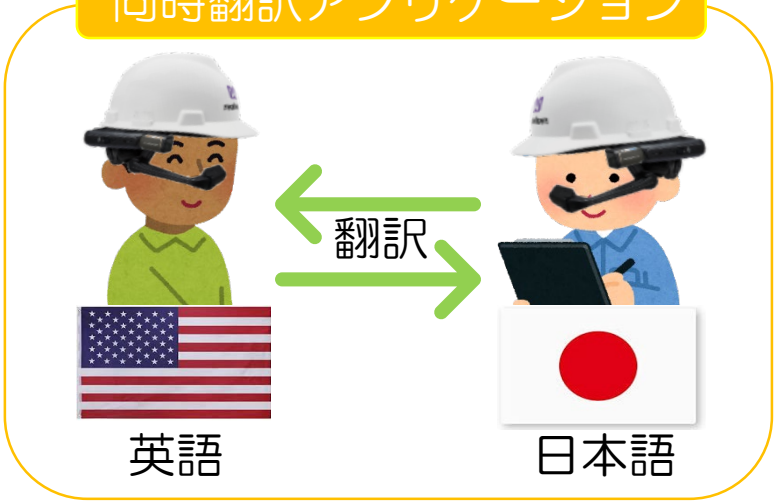
承認済
担当者:　日時: 20/07/05, 19:20

4．今後の発展

帳票作成アプリ

- 現場巡回時に音声入力による写真撮影の実施
- ハンズフリーで指摘事項を入力
- 自動で帳票を作成しデスクワーク時間を削減

同時翻訳アプリケーション



- 英語・日本語間の同時翻訳を実施
- 外国人労働者に対する教育の効率化
- 労働災害・品質不具合の防止

まとめ

従来

熟練技能者　豊富な就業者　大きなリスク

シミズ・スマート・トンネル

技能の数値化　省人化　安全性向上

社会的ニーズに応える技術推進／従来の教訓を理解した技術者の育成

ご清聴ありがとうございました

清水建設株式会社
福田　毅

お問合せ：tys.fukuda@shimz.co.jp