

深礎工による基礎および橋脚構築における施工効率化と高品質化の取組み — 三遠道路8号橋下部工事 —

Improvement of Construction Efficiency and High Quality in Foundation and Bridge Pier Construction by Caisson Type Pile Deep Foundation — Construction Work of the San-en Road 8th Bridge —

宮脇 伸行*1 小塚 直人*1 村下 富雄*2
Nobuyuki Miyawaki Naoto Kozuka Tomio Murashita
高馬 崇*3 加瀬 翔一*2
Takashi Koma Shouichi Kase

要旨

本工事は、中央構造線に関連した断層破砕帯が分布している奥三河地域に位置する三遠道路8号橋の下部工・基礎工を構築した工事である。橋脚の基礎は、断層破砕帯分布域や河川に近接した大口径の深礎杭であり、遮水性のないライナープレート土留による掘削という厳しい条件下での施工であった。そのため、断層破砕帯の出現を精度良く予測し、事前に突発湧水の対策を計画することが重要であった。また、掘削地山が岩盤で構成されていたため、民家や国道が近接した環境での発破掘削となり、騒音、振動、低周波音、飛び石などの抑制が課題であった。橋脚は断面積が大きく高さも20mと高いマスコンクリートの構造物となっているため、ひび割れの発生を抑制してコンクリートの品質確保を図ることが重要であった。本報告では、これらの課題を解決するために本工事で実施した対策について報告する。

キーワード：断層破砕帯 3次元地質モデル 大口径深礎杭 試験発破 バイブクーリング 温度再上昇

1. はじめに

三遠南信自動車道は、長野県飯田市の中央自動車道の飯田山本 IC を起点として、静岡県浜松市北区引佐町の新東名高速道路の浜松いなさ北 IC に至る延長約 100km の高規格幹線道路である。静岡県側は、水窪佐久間道路・佐久間道路・三遠道路で構成され、一部区間は開通しており、未開通区間は浜松国道事務所により現在事業が進められている。

本工事は、愛知県新城市において三遠道路8号橋（橋梁形式：PC2 径間連続ラーメン箱桁橋）のP1 橋脚下部工および基礎工を構築するものである。図1に工事場所とP1 橋脚の位置を示す。本工場の位置する奥三河地域は、中央構造線に関連する断層破砕帯が数多く分布しており、P1 橋脚の施工位置にも断層破砕帯の出現が予想されていた。そのため、深礎の掘削において、施工の支障となる断層破砕帯の出現位置を予測することが重要であった。

また、P1 橋脚の施工位置は岩盤が分布しているため、深礎工は発破掘削により実施することとなっていた。しかし、民家が近接しており、発破に伴う振動や騒音、低周波音などの影響の抑制が重要であった。さらに、発破掘削による背面の地山の緩みや、河川近傍であることから掘削時の湧水などの対応も必要であった。

橋脚の構築において、マスコンクリートの構造物であるため、セメント水和熱による外部拘束に起因した温度ひび割れの発生を抑制することが重要であった。

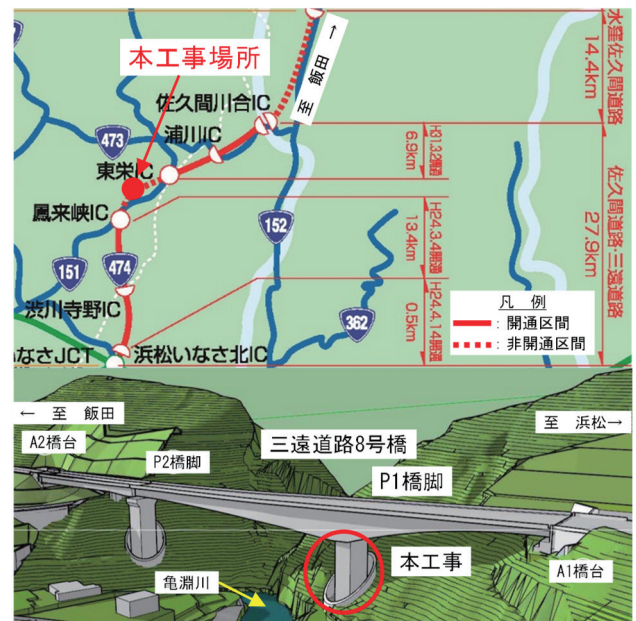


図1 工事場所とP1 橋脚の位置¹⁾

2. 工事概要

2.1 工事概要

本工事は、深礎工と橋脚躯体を構築する工事である。深礎工において、斜面部は竹割り土留構造とし、地表面で深をライナープレートで孔壁を抑え、発破掘削により構築する。橋脚躯体は現場打ちコンクリートにより構築する。

工事概要を表1に示す。

*1 名古屋支店 土木部 *2 技術本部 土木技術部 *3 技術研究所 大阪テクノセンター

表1 工事概要

工事名称	令和元年度 三遠道路8号橋下部工事
発注者	国土交通省中部地方整備局
施工者	株式会社鴻池組
工事場所	愛知県新城市川合
工期	2019年11月～2021年12月
工事内容	工事延長：L=40m 橋梁下部 RC橋脚1基 ・道路土工 ・深礎工（杭径φ13.5m, L=22.0m） ・橋脚躯体工（H20.0×W10.0×L5.5） ・竹割土留

成されており、段丘堆積物が堆積している。

施工区域には、新第三紀中新世に形成された設楽層群鳳来湖累層の流紋岩が分布している。その流紋岩の分布域には、中央構造線の断層の一つと考えられる断層破砕帯（岩級区分：DL～DH級）や、中央構造線の活動時に形成されたと考えられる断層が固結した断層岩の一種であるカタクレーサイト（岩級区分：DH～CL級）も帯状に分布しており、P1・P2橋脚部にも断層破砕帯やカタクレーサイトが出現すると考えられていた。

2.2 地形・地質概要

地質の分布について、地質平面図を図2、地質縦断面図を図3、地層層序を表2に示す。P1・P2橋脚の間には亀淵川が存在している。また、周辺部には低位・中位の段丘が形

3. 地質構造の可視化

深礎工は、河川近傍で掘削するため、破砕帯から突発湧水が懸念され、破砕帯の出現位置を予測する必要があった。



図2 地質平面図

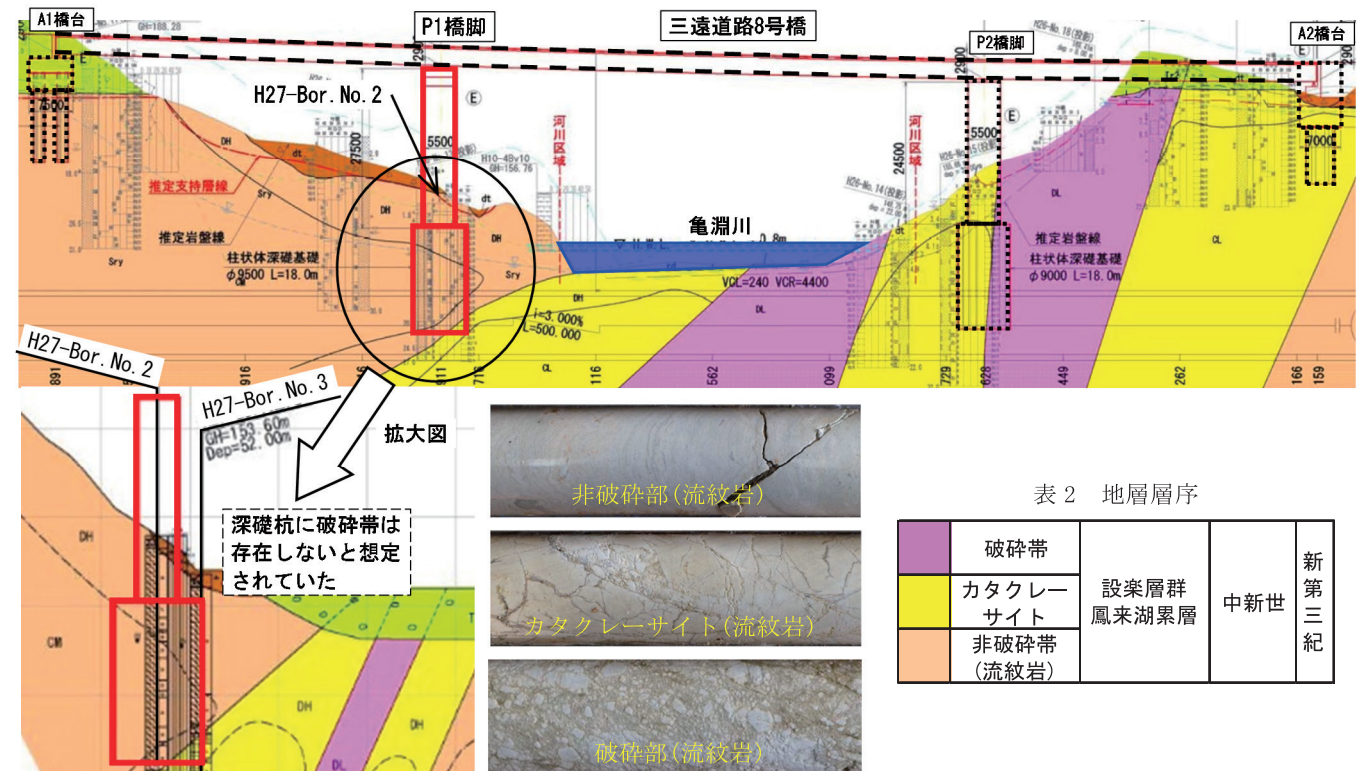


図3 地質縦断面図と流紋岩の状況

表2 地層層序

破砕帯	設楽層群 鳳来湖累層	中新世	新第三紀
カタクレーサイト			
非破砕帯 (流紋岩)			

P1 橋脚位置において、既往調査の H27-Bor. No. 2 (写真 1) と H27-Bor. No. 3 (写真 2) のボーリングコア記録を精査し、連続した D~CL 級の部分 (写真 1、写真 2: 囲み部) を脆弱部 (破碎帯) として再区分した。

事前の地質調査の結果や設計図書の地形・地質情報、脆弱部を再区分した結果を基に 3 次元地質モデル (ソフト名: GEORAMA for Civil3D、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社) を作成して、地質構造や破碎帯の出現位置を確認することにした。

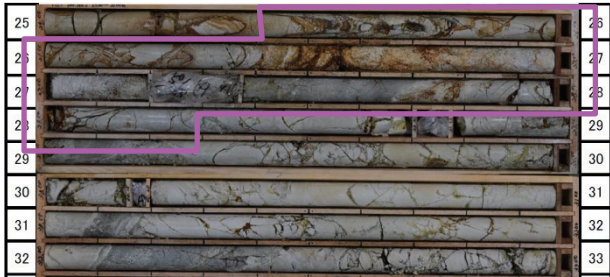


写真 1 ボーリングコア (H27-Bor. No. 2、深度 25~33m)



写真 2 ボーリングコア (H27-Bor. No. 3、深度 17~25m)

3.1 3次元地質モデルによる地質構造の可視化

3 次元地質モデルは、等高線図を利用した地形モデルや、P1 橋脚深礎部の構造物データとボーリング柱状図や地質断面図などの地質情報を基にして作成した (図 4)。3 次元地質モデルは、地層境界面を示すサーフェスモデルと各地層のソリッドモデルで構成される。3 次元地質モデルの構築により、地質構造の可視化を行い深礎工の施工に活用した。

3.2 3次元地質モデルによる破碎帯位置の予測と実測

3 次元地質モデルにて可視化された地質構造、特に深礎部における破碎帯の分布状況を確認した結果、深礎工 10m 以深において、破碎帯の出現が予測された。図 5 に当初設計時の想定地質断面と、3 次元地質モデルによる施工時の地質予測を示す。図 6 に示すように、実施工ではおおむね予測した深さと位置で破碎帯の出現を確認した。

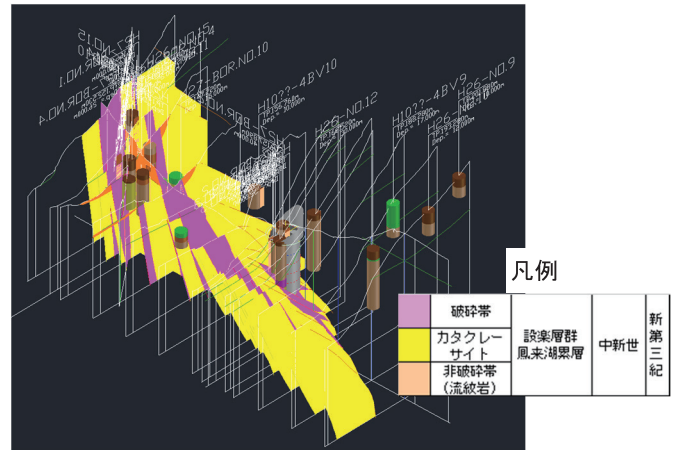


図 4 入力データ

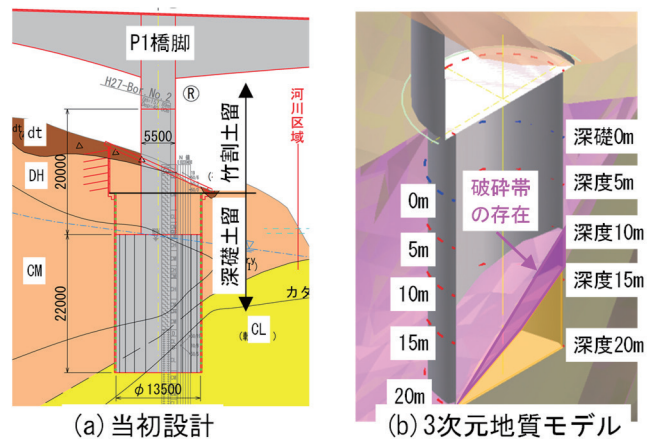


図 5 想定地質の相違

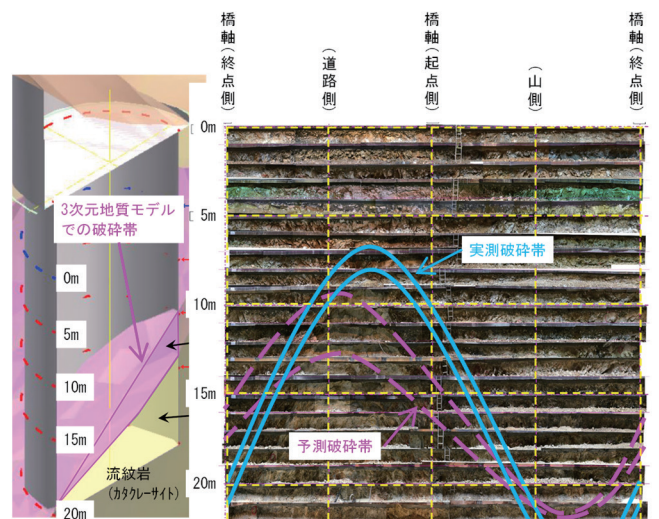


図 6 孔壁展開図

4. 深礎工の施工

4.1 施工上の課題

岩盤地山を掘削するためには発破工法が不可欠であった

が、図2に示す近接する国道や民家に対する発破による飛び石、特に民家については振動や騒音、低周波音による影響が懸念された。また、深礎工の裏込めグラウト充填は一般的には掘削完了後に行われるため、グラウト未充填の状態では発破時の振動により余掘り部が崩壊し、背面地山が緩むことが懸念された。

さらに3次元地質モデルから破碎帯の存在が予測され、河川近傍かつ河床以深での掘削などの条件から、掘削時における突発湧水や大量湧水発生などの可能性が懸念された。

4.2 施工時の対策

深礎工施工に際して、発破掘削による周辺への影響や地山の緩み、突発湧水、湧水による掘削床の泥濁化などの施工上の課題について、対策を実施した。

4.2.1 発破掘削の対策

国道（通行する一般車両や歩行者を含む）への対策として、発破時には鋼製蓋による飛び石防護（写真3）および、一時通行止めを行うこととした。また、近接する民家への対策としては、試験発破と環境測定（振動、騒音、低周波音）を行って最大火薬量（芯抜き部で7.5kg/段、払い部で10.4kg/段）を設定し、発破時の振動が管理値以下となるようにした。表3に試験発破時の環境測定結果の一覧を、図2に測定位置を示す。なお、試験発破時は安全を期して住民の一時退避を行うこととした。試験発破の結果、振動レベル、騒音レベルおよび低周波音レベルは設定した管理値未満であった。

これら試験発破の結果や、竹割土留部の掘削面の地山の状況、3次元地質モデルから推定される地層厚さから、火薬の削孔位置や間隔、削孔深さなどの発破計画を行った。発破後は、図7に示す3Dレーザスキャナを用いて孔壁を立体的に計測し、深礎基礎の直径が確保されているかを検証した。図8に断面計測結果の例を示す。掘削した深礎基礎は設計径（φ13,500）を満足しており、発破計画に問題がないことを確認した。

表3 環境測定結果一覧

	振動レベル (dB)	騒音レベル (dB)	低周波音レベル (dB)
管理値	75 (振動規制法)	85 (騒音規制法)	130 (火薬学会提言値)
測定値	70	82	110
判定	OK	OK	OK
	戸や障子がわずかに 動くのがわかる程度	大声の会話レベル	建具のガタツキが懸 念されるレベル

4.2.2 掘削時の湧水対策

掘削時における、岩盤の亀裂や破碎帯からの突発湧水の



写真3 鋼製蓋による防護

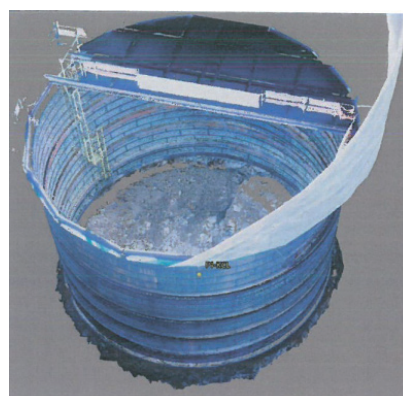


図7 孔壁計測 (3Dレーザスキャナ)

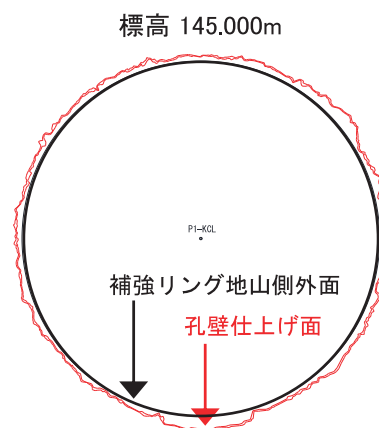


図8 断面計測結果の一例

対応や、発破時の火薬の湿潤防止、掘削土揚土時の掘削床の泥濁化防止のため、地下水位が掘削深度の1.5m下となるように先行排水した。そのために、深礎掘削前にφ500mmの穴あき鋼管を2本建込み、鋼管内に4インチ高揚程水中ポンプ（揚程高22mで1.0m³/minの能力）を2台設置した。写真4に設置状況を示す。実際の掘削地盤では、非常に硬く、亀裂の少ない岩盤が分布していた。また破碎帯も出現したもの、掘削に影響しない小規模な破碎帯であり、坑内全体の湧水量も釜場排水で対応できる程度の量であった。

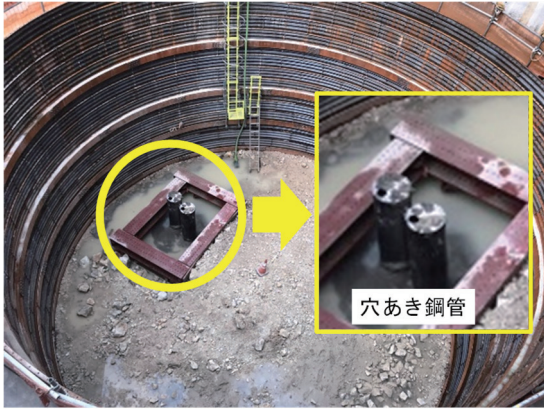


写真4 穴あき鋼管の設置状況

4.2.3 背面側地山の緩みの対策

発破による地山の緩みや崩落を防止するため、ライナープレート取付高さ 1m ごとに余掘り部の裏込めグラウト注入を行った結果、全掘削時に地山崩壊などは生じなかった。

5. 橋脚躯体の施工

橋脚躯体の品質を確保するため、マスコンクリートによる温度ひび割れを抑制することとした。温度ひび割れ対策の照査項目として、ひび割れ指数 I_{cr} と、ひび割れ幅を設定した。部材の性能低下の原因とならず要求性能を満足させる値²⁾として、ひび割れ指数 $I_{cr} \geq 1.0$ 、ひび割れ幅 0.20mm 以下を目標値とした。

5.1 事前解析での温度ひび割れ対策と温度管理計画

ひび割れ抑制に有効な対策案として、(1)パイプクーリングの実施、(2)断熱性の高い養生材の使用、(3)屋根付き遮風シート囲いの設置、(4)使用セメントを高炉B種から普通へ変更の4つを選定し、温度応力解析(ソフト名: ASTEA MACS、株式会社計算力学センター)を実施した。図9に解析モデルを示す。なお、解析は当初計画(対策なし)と対策案(対策あり)の2ケースを実施した。

解析の結果として、表4に最小ひび割れ指数および推定ひび割れ幅の一覧を示す。対策案(対策あり)のケースにおいて、2~4リフトでは要求性能を満足する結果となったが、1リフトで最小ひび割れ指数が1.0以下となった。この原因として、1リフトは他リフトと違い外部拘束が大きく、暑中時期での打込みのため、ひび割れ指数が小さくなったと考えられる。しかし、推定ひび割れ幅が目標値以下であることや、当該箇所が橋脚基部に近く将来的な維持管理が容易であることを踏まえ、対策案(対策あり)の実施による施工を計画した。

施工時にはコンクリート温度を計測し、事前解析結果と

対比してひび割れ対策が確実にその効果を発揮していることを確認した。図10に温度計測位置の平面図を示す。橋脚中心部3箇所(測定A)、および表面4箇所(測定B)に温度計測点を設置し、所定の強度発現が得られる材齢28日までに計測した。

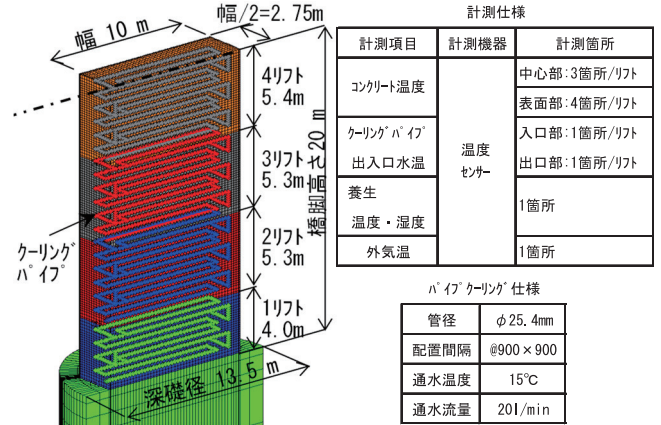


図9 解析モデル(1/2モデル)

表4 解析結果一覧

	打設リフト	ひび割れ指数 I_{cr}		ひび割れ幅	
		最小指数	目標指数	推定(mm)	目標(mm)
当初計画	1リフト	0.47	1.00	0.13	0.20
	2リフト	0.79		0.10	
	3リフト	0.85		0.10	
	4リフト	0.90		0.09	
対策案	1リフト	0.62	1.00	0.12	0.20
	2リフト	1.09		0.08	
	3リフト	1.28		0.06	
	4リフト	1.42		0.05	

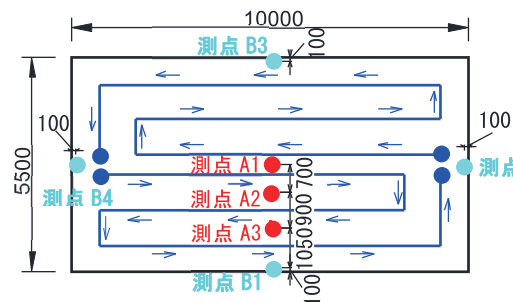


図10 コンクリート温度計測平面位置

5.2 1リフト目における実施工と事前解析の相違

1リフトにおいて、図10に示す測点A1で、パイプクーリングの通水停止後、コンクリート温度が再上昇するリバウンド現象が発生した。そのため、橋脚中心部の温度上昇や、表面部との温度差等によりひび割れの発生が懸念された。対策を講じるため、施工当日の気象条件やコンクリート打込み温度、通水期間の実施工条件を解析条件に反映させたフィードバック解析を実施した。図11に計測と解析の

コンクリート温度変化を示す。通水停止後の計測値と解析値のコンクリート最大温度差は17.0℃であった。通水停止時のコンクリート温度は、計測値(60.0℃)と解析値(56.7℃)で差が見られ、コンクリート温度降下量は、計測値(0.68℃/日)と解析値(0.62℃/日)で同程度の値であった。以上の検討結果より、1リフトでのリバウンド現象が発生した原因はコンクリートの冷却期間不足であったと判断し、2リフト以降はコンクリート最高温度到達後2日間としたパイプクーリング通水期間の見直しを検討した。

5.3 2リフト目以降の対策

図12にパイプクーリング通水期間の見直しの概要を示す。事前解析時におけるコンクリート最高温度(Tmax)と、パイプクーリング停止時のコンクリート温度(T)との温度差 $\Delta T (=T_{max}-T)$ を管理値と設定した。2リフト以降の通水期間は、実施工時の温度計測にて、コンクリート最高温度から管理値(ΔT)以上の温度低下となるまでとした。表5に上記の通水期間管理で施工を行った2~4リフトの計測結果および管理値を示す。2リフト以降では、計測値とフィードバック解析値の温度差が減少した(図13参照)。

表5 2~4リフトの計測値と管理値一覧

打設リフト	通水期間	コンクリート		管理値 ΔT (℃)
		最高温度 T_{max} (℃)	通水停止時 温度 T (℃)	
2リフト	2.8日	63.3(61.6)	42.3(40.6)	21.0(21.0)
3リフト	2.8日	60.7(56.6)	42.1(39.9)	18.6(16.7)
4リフト	2.5日	54.9(53.4)	39.5(39.7)	15.4(13.7)

※()は、事前解析値を示す

6. おわりに

3次元地質モデルの作成により地質構造を可視化し、破碎帯の出現位置を予測した。実施工の結果、破碎帯の出現位置は、予測とおおむね一致していることを確認した。

深礎工では、試験発破による発破計画を策定し、近接する民家へ発破による影響を最小限に抑制した。また、破碎帯の出現や河川近傍の施工による大量湧水の発生が懸念されていたが、湧水量は少なく、掘削工に対する大きな影響はなかった。橋脚躯体工では、全リフト構築完了後のひび割れ調査において、ひび割れは確認されなかった。各種ひび割れ対策や、現場計測に基づくフィードバックを行うことで、より効果の高いひび割れ抑制が可能となった。

今後も事象の予測や対策の事前立案など、安全かつ効率的な施工が行えるように、3次元モデルを活用した地質評価手法やフィードバック解析による温度ひび割れ予測の高度化を進めていく。

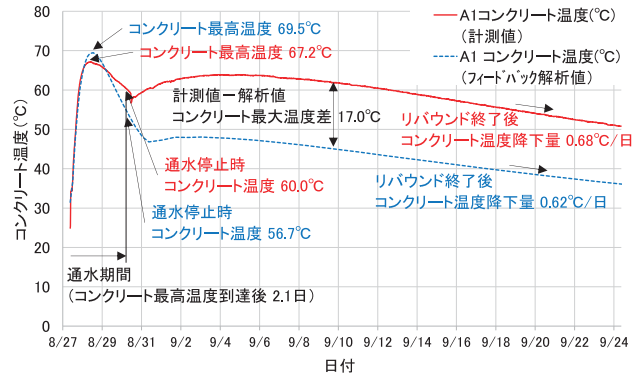


図11 1リフトのコンクリート温度変化(計測と解析)

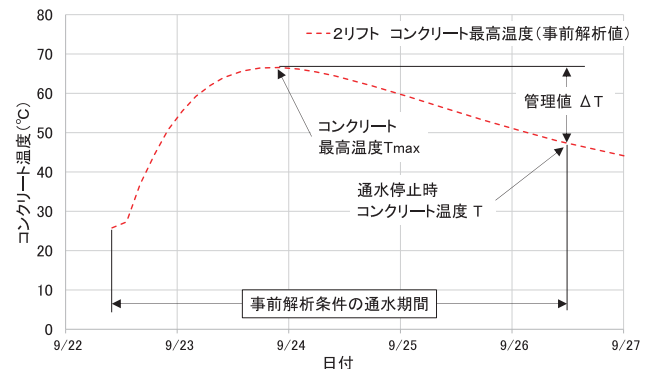


図12 通水期間の見直し概要

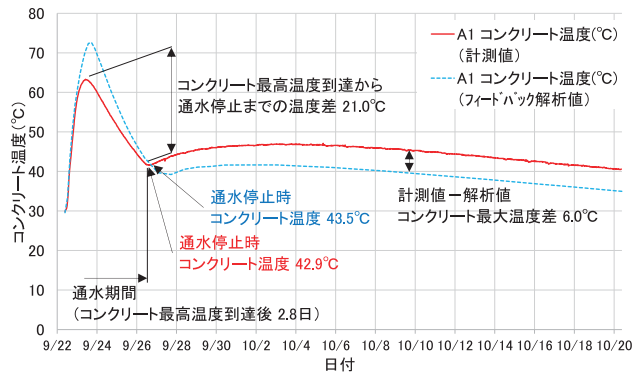


図13 2リフトのコンクリート温度変化(計測と解析)

参考文献

- 国土交通省中部地方整備局浜松河川国道事務所：三遠南信自動車道、
<https://www.cbr.mlit.go.jp/hamamatsu/road/route474/>
(2022.4閲覧)
- コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016、p.53