

開削工法による大断面4連アーチカルバートの施工

Construction of four spans large Arch-Culvert with cut-and-cover method

田口敬介*, 水野希典**, 中野計***, 内村祥史****, 長屋淳一*****

Keisuke TAGUCHI, Maresuke MIZUNO, Hakaru NAKANO, Yasushi UCHIMURA and Junichi NAGAYA

第二京阪道路（大阪北道路）の寝屋川市域では、閑静な住宅地が広がる丘陵地において、地中連続壁およびグラウンドアンカーにより開削し、わが国でも例を見ない全幅約60mの大断面4連アーチカルバートの構築を進めている。4連アーチカルバートは、底板および上床版をアーチ形状とすることで、上載荷重および地盤反力に対し、アーチアクションによる部材軸力の効果により、在来のボックスカルバートよりも薄い部材厚を実現している。本報告では、この4連アーチカルバートの施工における移動式セントルおよび埋設型枠の採用で実現した急速施工の概要、施工を進める上で技術的課題であった支持地盤の管理、コンクリートのひび割れ対策、埋め戻しによる構造物への影響についてその取り組みを報告する。

キーワード：開削工法，アーチカルバート，移動式セントル，温度ひび割れ，計測管理

cut-and-cover method, arch-culverts, movable formwork, harmful cracks caused by the heat of cement hydration, measurement management

1. はじめに

第二京阪道路の国守工事（図-1）では、延長220mの区間で、地中連続壁、グラウンドアンカーを用いて開削し、大断面のカルバート構造物を施工する。本工事の大きな特徴は、わが国でも例を見ない大断面の4連アーチカルバートが採用されていることである。

4連アーチカルバートは、縦断方向の長さが、15mと10mの2種類のブロック割りをを行い、全10ブロック、延長140mの施工を行う。横断方向幅は、約60mと平面的にも大規模である。一方、部材厚は、アーチアクションによる部材軸力の効果から、最大土かぶり15.7mの荷重条件下で、従来工法のボックスカルバートよりも合理的な断面を実現している。

しかしながら、合理的な断面であるゆえ、上載荷重の条件変化、支持地盤の変形特性のバラツキなどの外的要因に敏感な構造であり、詳細設計時の設計条件と実施工で相違が生じた場合には、部材応力の超過などの問題が懸念されるという側面も併せ持つ。また、各部材厚は、アーチスラブ、底板および側壁で1.4m、アーチスラブの連結部（以下アーチ付け根と呼ぶ）は、アーチスラブ間を剛結するため非常にマッシブな形状をしており、セメント水和熱に起因する有害なひび割れの発生が懸念された。そこで、支持地盤のバラツキに関する問題については、原位置試験で得られた結果から構造物照査を迅速に実施できる施工管理方法を確立することによって対応し

た。また、温度ひび割れによる耐久性低下の問題については、3次元FEMモデルを用いた温度ひび割れ解析と試験施工を実施し、パイプクーリング工法などのひび割れを制御可能な対策工法を選定し適用した。また埋め戻しの施工では、土圧および構造物の応力について計測管理を実施し、構造物の安全性確保と設計の妥当性について検証した。本稿では、これらの合理的な大断面4連アーチカルバートの技術的課題に対する取り組みと、移動式セントルなどの施工設備を多数投入し、急速施工を行っている当現場の施工概要について記述する。

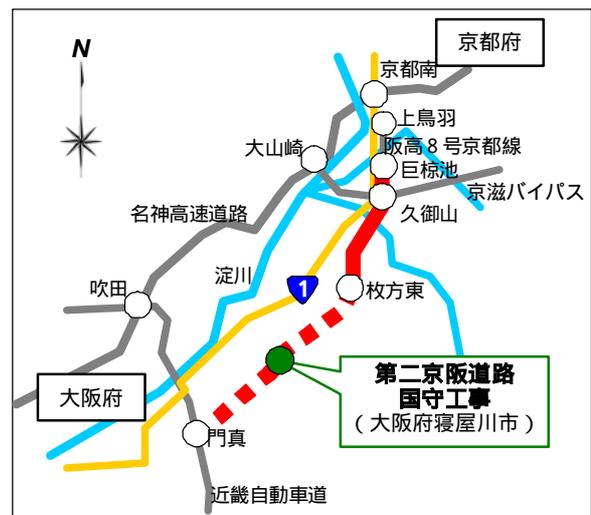


図-1 工事位置図

* 西日本高速道路(株)関西支社枚方工事事務所寝屋川工事区 工事長 Manager of neyagawa section, West Nippon Expressway Co., Ltd.
** 西日本高速道路(株)関西支社枚方工事事務所寝屋川工事区 技師 Neyagawa section, West Nippon Expressway Co., Ltd.
*** 第二京阪道路国守JV工事事務所 所長 Manager, Kunimori Section-Dainikeihan Road Joint Venture
**** 第二京阪道路国守JV工事事務所 工事課長 Section Chief, Kunimori Section-Dainikeihan Road Joint Venture
***** (株)地域地盤環境研究所 部長 General manager researcher, Geo-Research Institute

2. 工事概要

2.1 工事概要

第二京阪道路は、京都と大阪を結ぶ延長約 28.3km の広域幹線道路である。6車線の自動車専用道路と2～4車線の一般道路から構成される。本道路は「緑立つ道」の愛称で親しまれ、環境、景観に配慮した道路である。国守工事は、大阪府北東部、淀川左岸の寝屋川市域に位置（図-1）する。付近一帯は、閑静な住宅街が広がる丘陵地で、道路は、この丘陵地帯を、延長 780m の NATM トンネルおよび開削トンネルで横断する。このうち国守工事は、開削トンネル区間の延長 220m で地中連続壁、グラウンドアンカーを用いて地盤を掘り下げ、4連アーチカルバートとボックスカルバートを構築する。

2.2 地質概要

当工事の施工箇所は、海拔 35～48m の丘陵地帯で、表層は、段丘層（洪積層）が被覆し、その下に大阪層群のレキ、砂、粘土の互層が厚く堆積する。構造物の支持地盤は、N=30～50 の砂層（Os2）である。地下水は、GL-7m 付近に存在する表層の自然帯水と、以深の各大阪層群砂層に若干の被圧を伴う帯水層が存在する。

2.3 構造概要

4連アーチカルバートは、底板および上床版をアーチ形状とすることで、上載荷重および地盤反力に対し、アーチアクションによる部材軸力の効果を発揮することで、ボックスカルバートと比べると、薄い部材厚を実現している。また、大断面の剛結4連形式となっており、縦断方向のブロック長（10m、15m）に対し幅が約 60m と大きい構造である。埋め戻し形状は、横断方向両端部で約 10m の高低差があり、最大土かぶり厚は 15.7m である。詳細設計では、この偏荷重を考慮し断面寸法および配置鉄筋を決定している。構造一般図を図-2 に示す。主要工事数量を表-1 に示す。

3. 施工概要

3.1 打設ロット割りおよびブロック割

近接する閑静な住宅街に配慮した作業時間の制約から、施工部位は、底板、側壁、アーチ付け根、アーチスラブの4部位に分割した。打設ロット割りを図-3 に示す。国守工事は、4連アーチカルバートを延長 140m、全 10 ブロックの施工を行う。そのうち、8 ブロックがブロック長 15m、2 ブロックがブロック長 10m である。なお、ボックスカルバート延長は 80m である。

表-1 主要工事数量

項目	仕様	数量
掘削	-	315,000 m ³
埋戻し	流動化処理土含む	95,000 m ³
地中連続壁	TRD、全旋回	15,819 m ²
グラウンドアンカー	除去式 135, 165	2,510 本
カルバート工	4連 BOX-C 延長	80 m
"	4連アーチカルバート延長	140 m
コンクリート	30-12-20N	61,198 m ³
鉄筋	SD345	12,715 t
移動式セントル	側壁、アーチ付け根、アーチ	16 基
クレーン設備	移動式クレーン、橋型	4 基

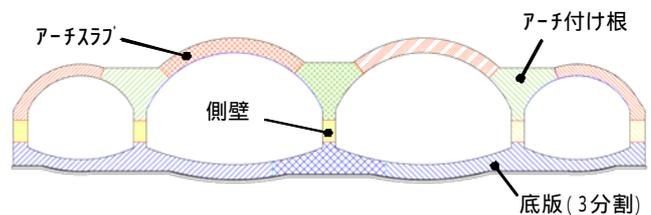


図-3 打設ロット割り

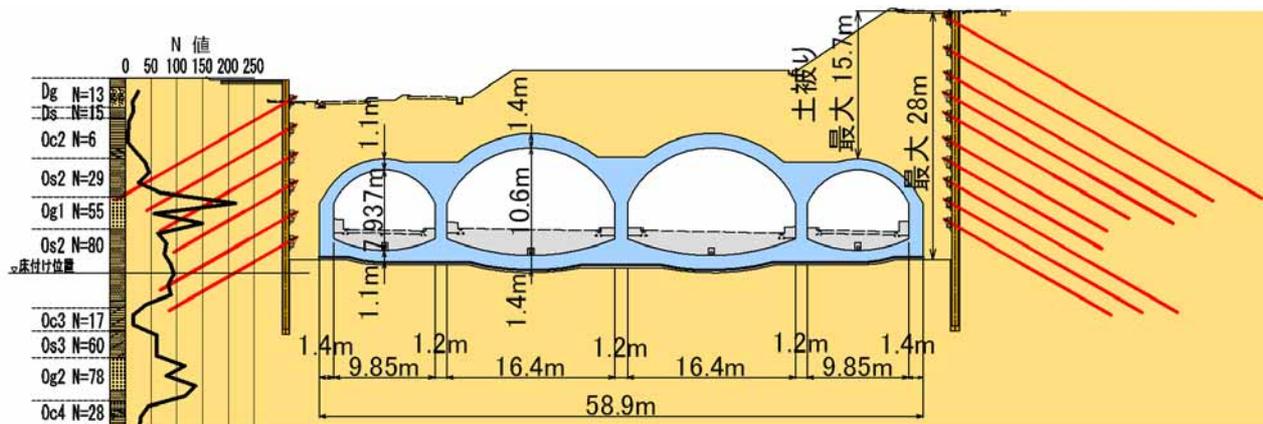


図-2 構造一般図

3.2 コンクリート配合

コンクリート配合を表-2 に示す。コンクリートは、普通セメントを使用し設計基準強度は 30N/mm²である。アーチスラブの鉄筋量は、260kg/m³と過密であり、コンクリートの充填性を確保するため、スランブを 12cm とすることで対応した。

3.3 施工設備

(1)移動式スライドセントル

供用開始時期および作業時間の制約から、4連アーチカルバートの構築では、工期短縮が重要な命題となる。本工事では、移動式スライドセントルを、側壁、アーチ付け根およびアーチスラブに全 16 基を投入した。作業の高効率化を目的として、各セントルを連続的に活用して（図-4）工場で流れ作業のように各部位の構築をするので、現場を見渡すと、底版からアーチスラブまでの構築を同時に見ることができる。写真-1、写真-2 に施工状況写真を示す。

アーチスラブの施工では、上曲面の蓋型枠として外セントルを用いる。外セントルは、両端部の急傾斜部にメタルフォームを配置し、残りの範囲は人力コテ仕上げを実施した。また、コンクリート打設、締固めを実施するため、開閉式の蓋を有する打設開口（45cm x 45cm）を 75cm ピッチで設けている。

(2)インバート栈橋

工事用道路の付帯設備として大規模なインバート栈橋を 2 基投入した。インバート栈橋を用いることで、底版の防水作業および鉄筋作業の施工区間を跨いで工事用車両が通行でき、作業中の底版より奥に、鉄筋、生コンなどの資機材搬入が可能となる。インバート栈橋は、底版の進捗に合わせ、電動チルホールと滑車を用いて移動する。

(3)揚重設備

本工事では、インバート栈橋および完成した底版上を工事用道路として使用する。工事用道路上に移動式クレーンを設置し、鉄筋等の揚重作業を行なった場合には、道路幅員のほぼ全体を占有するため、資材搬入の滞りや

クレーン稼働率の低下が避けられない。そこで、工事用道路の常時確保とクレーン作業との両立が可能な、揚重設備を計画した。側壁、アーチ付け根の施工では、クレーン架台をフレーム構造とし、クレーン直下を工事用車両が通行できるジブクレーン台車を採用した。また、アーチスラブでは、完成したアーチ付け根上に工事用道路に影響を与えない橋型クレーンを採用した。

表-2 コンクリート配合 (30-12-20N)

W / C	s / a	単用量 (kg/m ³)							セメント種別	
		W	C	細骨材		粗骨材				湿和材 高機能 AE 減衰材
				海砂	砕砂	4020	2015	1505		
50	42	167	334	443	296	-	584	478	2.589	N



写真-1 現場全景(大阪方より京都方)



写真-2 現場全景(京都方より大阪方)

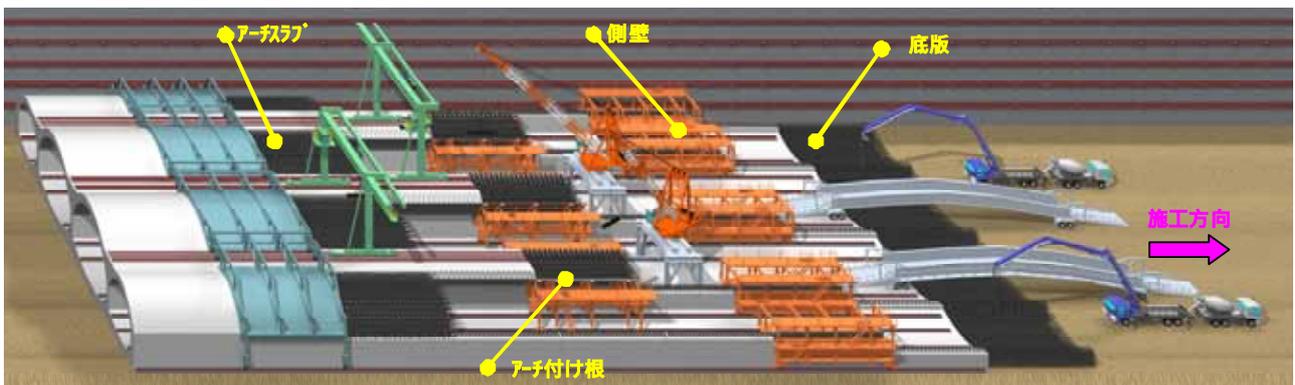


図-4 施工設備配置

3.4 埋設型枠を用いた底版工期短縮策

本工事では、底版からアーチまでの各部位を同時期に施工する。よって、ブロックごとの施工サイクル日数は、最も所要日数が多い部位の日数となる。例えば各部位の所要日数が、底版 45 日、側壁 15 日、アーチ付け根 32 日、アーチスラブ 32 日と仮定する。この場合、日数が最大となる底版 45 日が、ブロックごとの施工サイクル日数となり、その他の部位は次ブロックへの移動ができず手待ちとなる。したがって、各部位の施工日数を揃え、手待ちを解消することが、工期短縮の必須条件となる。

底版は、鉄筋などの資材量が多いことに加え、1日当たりコンクリート打設量の制約から3分割での施工となり、必要施工日数が最大で工程上のネックとなった。

そこで、底版の工程短縮を目的として、モルタル靱性ボードを型枠面版に利用し、本体内に埋設可能な打継ぎ型枠（写真-3）を開発した。凹形状の面版表面と部材中央付近に設けた段違いによりせん断力への抵抗性を確保した。型枠の組立し手間、打継ぎ処理手間、鉄筋組立作業の手待ちなどを解消し、底版の所要日数の約20%を短縮した。この結果、手待ちを解消し、1ブロックあたりの施工サイクル日数を32日（暦日）とした。



写真-3 埋設型枠設置状況(底版)

て、地盤反力係数の大小や地盤反力係数の横断方向の変化を与え感度解析を実施した結果、感度が高く、構造物の発生応力に対する影響が大きいことが判明した。具体的には、地盤反力係数が設計値よりも小さい場合には構造物の応力が増加する傾向があり、また、支持地盤の左右で、バラツキが大きい場合についても同様の傾向が見られた。一例として、設計時と見直し時（現場試験後）の地盤反力係数から算定した断面力の比較を図-5に示す。鉄筋応力が $s=178 \sim 192 \text{ N/mm}^2$ に増加し、支持地盤の影響を敏感に受けていることが分かる。

4. 支持地盤の管理

4.1 支持地盤が部材に与える影響

4連アーチカルバートの2次元フレームモデルを用い

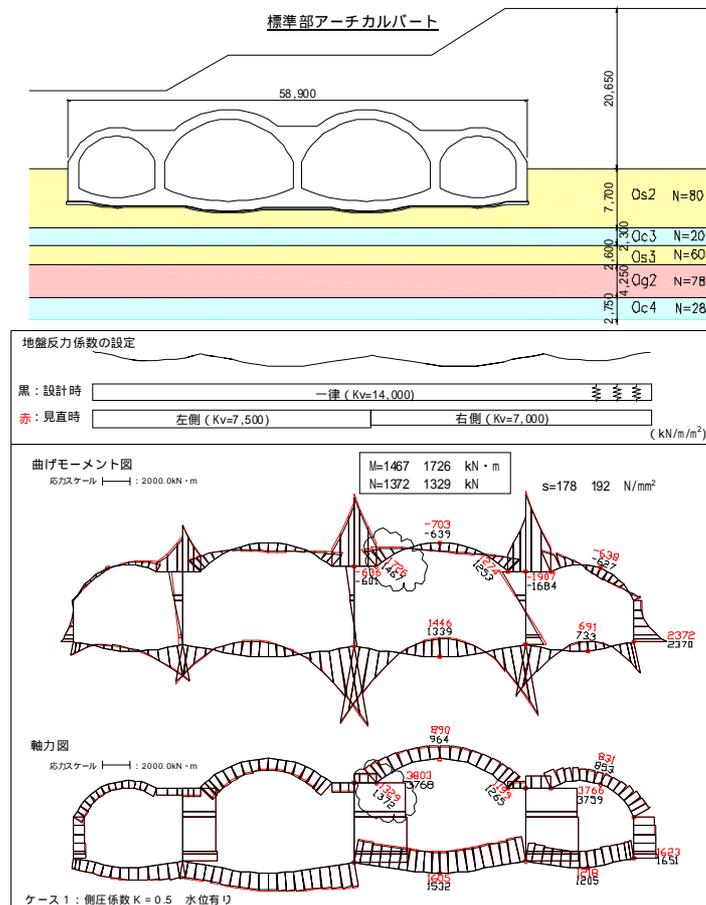


図-5 地盤反力係数の違いによる断面力比較図

4.2 支持地盤の管理方法

(1) 平板載荷試験

1ブロックあたり横断方向2箇所の平板載荷試験を実施し、床付け地盤の変形係数および横断方向の差異を確認する。試験位置を図-6に示す。試験による変形係数が、設計値を下回る場合、図-7に示すように平板載荷試験結果を表層地盤の変形係数として、深さ10m範囲を考慮した地盤反力係数を左右2箇所で算定し、構造物の発生応力を照査する。

(2) 簡易支持力試験

1ブロックで2箇所しか実施しない平板載荷試験の変形係数が、ブロック全体の代表値として適切であること、また、ブロック全体で地盤の変形係数のバラツキが過大でないことを確認するため、目視による土層確認に加え、簡易支持力試験を1ブロックあたり27箇所で行って変形係数の分布を把握した(図-6, 写真-4)。簡易支持力試験器(キャスポル)は、国土交通省で施工管理の合理化を目的に開発され、重錘を地盤上に自由落下させた際

の衝撃加速度から粘着力、内部摩擦角などの地盤定数を測定可能な、軽量かつ取り扱いやすい試験器である。バラツキの許容値は、土質調査結果から大層群土層の変形係数の標準偏差(1)の値(図-8)を採用した。なお、バラツキが許容値内にある場合、構造物は許容応力度を満足することを確認している。

(3) 支持地盤試験結果

試験結果の1例を表-3に示す。平板載荷試験では、試験値が設計値よりも小さい。簡易支持力試験結果のバラツキ(1)は、管理値(1a)を満足する。したがって、全体的に支持地盤が設計での想定よりも弱い地盤であると判断した。そこで、試験結果から地盤反力係数を再設定し、構造物の応力度照査を実施し、許容応力を満足しない場合には、鉄筋径のランクアップなどの対策を実施した。簡易支持力試験と平板載荷試験結果との相関図を図-9に示す。簡易支持力試験による変形係数は、0s3層ではバラツキが大きい、その他の土層では変形係数を十分な精度で測定できている。

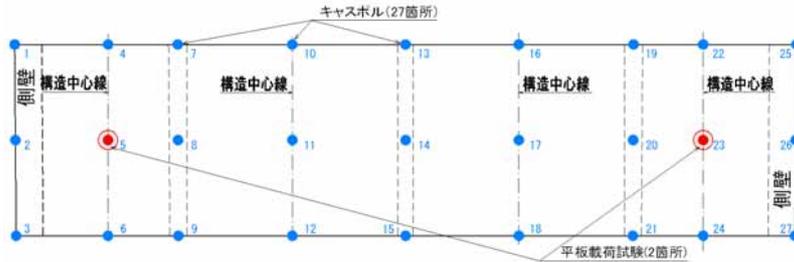


図-6 試験位置図(1ブロック当り)

当初設計	試験後
床付け面	
Os2 E=224000 kN/m ²	Os2 E=52201 kN/m ²
Oc3 E= 64800	Oc3 E= 64800
Os3 E=168000	Os3 E=168000
Og2 E=218400	Og2 E=218400
Oc4 E= 78400	Oc4 E= 78400

表層(0s2層)の変形係数に平板載荷試験結果を適用
この範囲の変形係数および層厚を用いて地盤反力係数を算定

図-7 平板載荷試験結果の適用

表-3 計測結果(1BL)

管理方法	計測値		管理値 (設計値)
	左側	右側	
平板載荷試験 E0(kN/m ²)	52,201	34,100	224,000
簡易支持力試験 1 (kN/m ²)	3,980		32,000

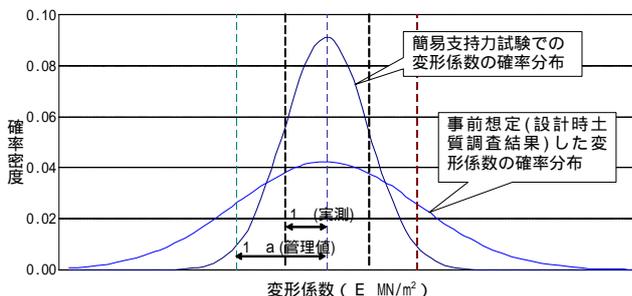


図-8 支持地盤のバラツキ評価方法



写真-4 試験位置図(1ブロック当り)

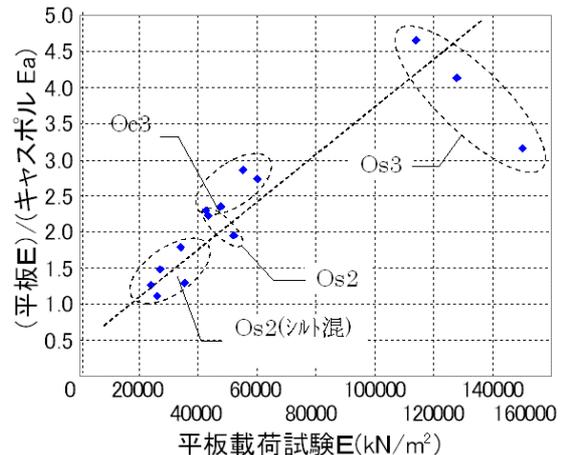


図-9 簡易支持力試験と平板載荷試験の相関

5. コンクリートのひび割れ対策

5.1 対策概要

4連アーチカルバートにおいて、アーチ付け根およびアーチスラブは、主たる外力である上載土荷重を支持する重要な構造部材である。また、完成後は常に地下水に浸漬されるため、初期欠陥を重点的に抑制し、耐久性を確保する必要がある。このように重要部位となるアーチ付け根は、非常にマッシュな構造であり、コンクリート硬化時の水和熱による温度上昇に伴うひび割れ発生がもっとも懸念される部位でもある(図-10)。そこで、3次元FEMモデルによる温度応力解析と、試験施工を併せて実施し、本構造物に最適なひび割れ対策を適用した。

5.2 温度応力解析

温度応力解析に用いた3次元FEMモデルを図-11に示す。解析では、ひび割れ指数の値からひび割れ発生確率を予測するが、構造物に発生するひび割れ幅を0.2mm以下に抑制することを目標として、ひび割れ指数を算定すると1.24となる。この値をひび割れ指数の目標値に定めた。ひび割れ対策を実施しない場合、アーチ付け根における最高温度は、夏期の打設ケース(外気温27.3)で、部材内部の最高温度が70以上で、外気温と40を超える差が現れた。ひび割れ指数は、中心部および表面での低下が著しく、ひび割れ指数を算定すると1.0となり、目標とするひび割れ指数を満足できなかった。そこで、適用可能な対策工を、対費用効果で比較し、パイプクーリング工法および膨張コンクリートの2案を解析対象として選定した。パイプクーリングは、直径2.7cmのSGP管をモデル化した。通水温度は、外気温-5で設定した。

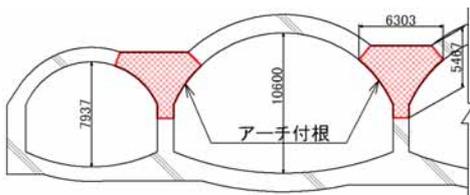


図-10 温度ひび割れが懸念されるアーチ付け根

表-4 実測ひび割れ幅と解析値との比較(アーチ付け根)

対策工	解析値		実測ひび割れ幅(mm)	ひび割れ幅の比率(実測/解析)
	ひび割れ指数	ひび割れ幅(mm)		
膨張材	0.91	0.30	0.35	1.2
パイプクーリング	0.94	0.29	0.15	0.5

膨張コンクリートは、見かけの線膨張係数を既往実績¹⁾の平均値である $8.3 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ とし解析を行なった。膨張コンクリートは、最高温度が無対策と同様に70以上となる。若材齢時に表面が、長期材齢で、部材中央で目標とするひび割れ指数を下回る。この結果から、貫通ひび割れの発生が予測される。パイプクーリングの解析では、中心部の温度は60前後となり、温度抑制効果が高い。長期材齢時には、ひび割れ指数はほぼ2.0以上となり、内部ひび割れは防止できる。よって、アーチ付け根の対策工としてはパイプクーリングが有効であり、貫通ひび割れの発生は抑制できる。ただし、解析では線膨張係数などの仮定値があり、解析だけで対策工の選定に至ることができないと判断し、実構造物を用いた試験施工を計画した。

5.3 試験施工

試験施工では、アーチ付け根を対象として、膨張コンクリートとパイプクーリング工法を適用(図-12)し、ひび割れ幅の実測値からひび割れ抑制効果を評価することで対策工の選定を行なった。試験施工の結果、発熱温度は、両対策ともに解析値と実測値との間で良く一致した。コンクリート内部の最高温度は、膨張材75に対しパイプクーリングが55となり、20の温度低減効果が確認できた。アーチ付け根は、膨張材で解析値の1.2倍、パイプクーリングで0.5倍の実測ひび割れ(表-4)で、パイプクーリングが有効であった。試験施工の結果から、アーチ付け根にはパイプクーリングを対策工として採用した。

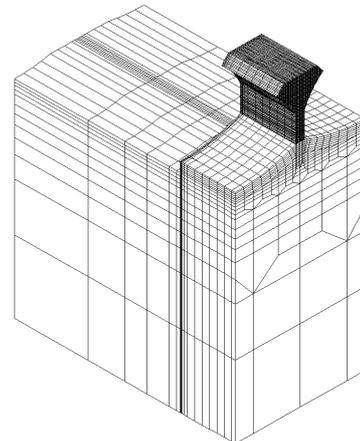


図-11 温度応力解析に用いた3次元FEMモデル

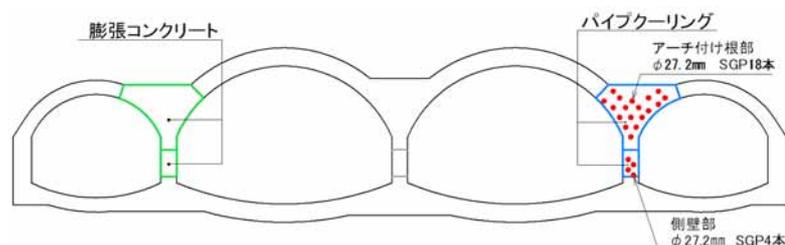


図-12 試験施工実施断面図

6. 埋め戻しの影響評価

6.1 影響評価概要

本工事では、盛土の各段階において本体構造物に作用する土圧と応力の計測を行い、構造物の安全性を確認するとともに埋め戻しが構造物に与える影響を、設計値と実測値との比較から評価した。計測項目は、作用土圧、鉄筋応力、構造物の沈下である。図-13 に計測器の設置位置を示す。また、図-14 に埋め戻しの施工ステップを示す。計測対象ブロックは、埋め戻しを最初に行うブロックを選定することで、施工初期に埋め戻しが構造物に与える影響を評価し、施工方法の妥当性と構造物の安全性を確認しつつ作業を進めた。計測は盛土の各施工ステップ完了毎に実施した。

図-15、図-16 に埋め戻しの施工ステップ 10 における断面力分布（設計値）を示す。

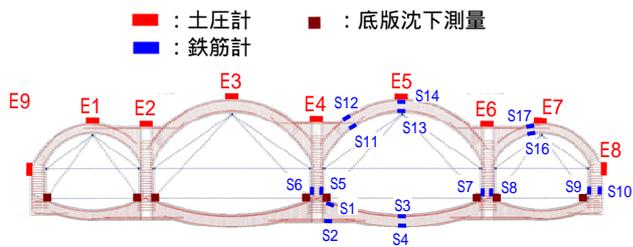


図-13 計測器設置位置図

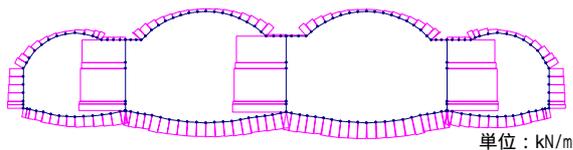


図-15 設計における軸力分布 (ステップ 10)

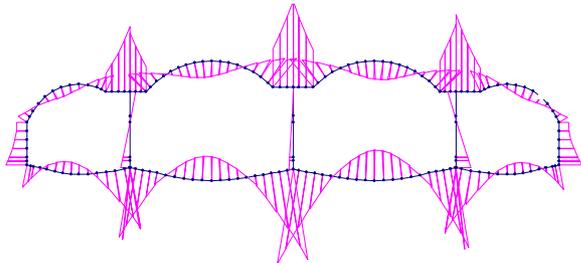


図-16 設計における曲げモーメント分布 (ステップ 10)

6.2 本体構造物の計測結果と設計値の比較

(1)土圧

図-17 に 8, 10 ステップにおける作用土圧の計測結果と設計値を示す。鉛直土圧の計測値は、埋戻しが進むに従って土圧が増加し、ステップ 8 では、計測値が土被り厚に相当する土圧が作用しており設計値とよい一致を示している。ステップ 10 では、右半分の E4~E7 において設計値と土圧分布が異なる部分もあるが、土圧の計測値は設計値と良い一致を示している。

これに対して E8 の側圧は、10 ステップで設計値に対し約 150kN/m^2 大きな値を示している。図-14 の ~ の範囲は、狭隘な範囲での施工となるため、流動化処理土による埋め戻しを実施している。よって、側圧増加の要因としては、構造物側面の地盤反力係数が設計よりも大きくなり、アーチ上載荷重がもたらす構造物の横方向変位を抑制したことが考えられる。また、アンカー除去に伴う土留め変形が、土砂で埋め戻しを行った範囲（ ~ ）よりも変形係数が大きい流動化処理土の範囲（ ~ ）に伝達し、構造物へ側圧が作用したことも要因として推察される。

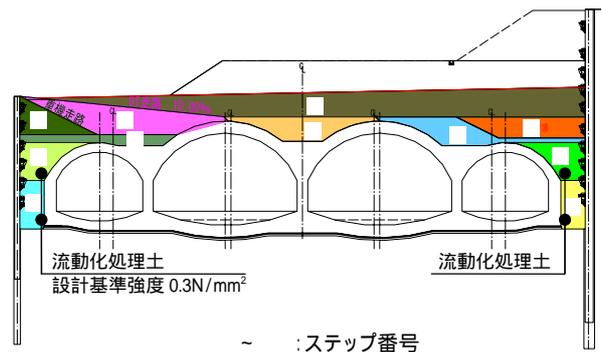


図-14 埋戻しの施工ステップ

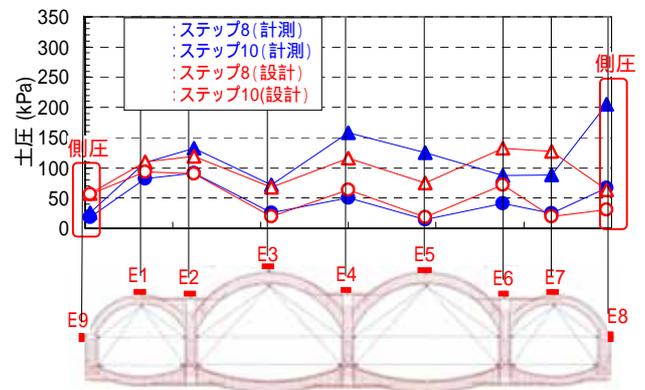


図-17 本体構造物の作用土圧

(2) 断面力

図-18、図-19に鉄筋応力の計測値から求められる軸力と曲げモーメントの分布を示す。軸力、曲げモーメントともにステップ8では、アーチスラブおよび側壁について設計値と計測値は良い一致を示している。ステップ10では、いずれの部位でも、軸力の計測値は設計値よりも大きな値を示したが、曲げモーメントはいずれの部位でも減少している。これは、流動化処理土による構造物側面の拘束効果が高く、アーチ上載荷重による構造物の横方向変位を抑制したこと、また、ステップ9以降に設計では考慮していない土留め壁の変形に伴う側圧が増加したことから、アーチアクションによる部材軸力が増加し、結果、曲げモーメントが低減されたものと推察される。

また、土留め壁の変形の影響を受けていないステップ8までは、設計値と計測値は良い一致を示していることから、4連アーチカルバートの設計では、2次元骨組みモデルによる解析で本体構造物の発生応力を精度良く評価することが可能であることが検証された。なお、底板沈下は、設計値で1.5~1.9mmに対して0~3mm程度の沈下量であり、設計における地盤反力係数についても妥当な評価であった。

7. まとめ

4連アーチカルバートの施工は、平成21年8月現在、構造物の構築および埋め戻しがほぼ完了している。当初懸念されていた、支持地盤の変形特性に関する問題については、原位置試験結果から構造照査を行い、設計との相違がある場合には、迅速に対策を講じることができた。また、温度ひび割れ対策については、壁およびアーチ付け根で施工が完了し、対策工によるひび割れ抑制効果が実証された。埋め戻しの施工における計測で、部材安全性を確保するとともに、4連アーチカルバートの設計手法の妥当性が検証された。

謝辞: 合理的な4連アーチカルバート構造の施工方法確立にあたり、ご指導をいただきました4連めがねトンネル施工検討委員会および4連アーチカルバート施工検討分科会をはじめとする、関係機関、関係者の方々に謝意を表します。今後も関係者の皆様のご指導、ご協力をお願い申し上げます。

参考文献

- 倉田 幸宏ほか：膨張材の効果を考慮した場所打ちPC床版の有限要素解析，土木学会第57回年次学術講演会，2003
- 師山 裕ほか：コンクリート床版における膨張材の効果と鉄筋量の関係に関する解析的検討

The construction works of Kunimori section involves the construction of culvert using the cut-and-cover method. The feature of this construction is to be adopted four spans arch-culverts. Meanwhile, the member thickness realizes a more rational dimensions than the box-culverts. This report details initiatives for problem issue in construction and an outline of these works

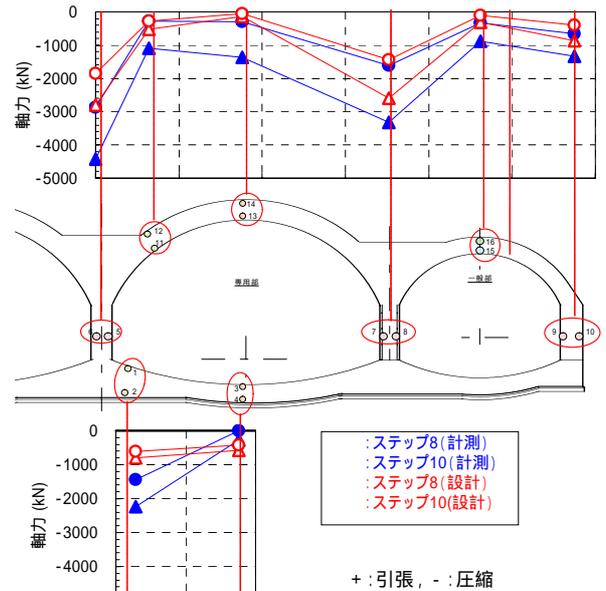


図-18 軸力の計測値および設計値

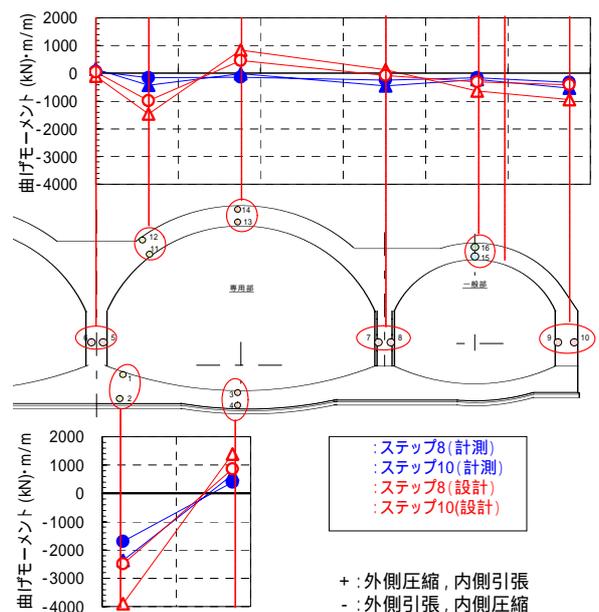


図-19 曲げモーメントの計測値および設計値