

アーチ盛土工法におけるアーチカルバートの 応力・変形挙動について

長屋 淳一¹・沼 勝雄²

¹新都市社会技術融合創造研究会 アーチカルバートプロジェクト幹事 (〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2)

²近畿地方整備局 奈良国道事務所 (〒630-8115 奈良市大宮町3-5-11) .

アーチ盛土は、連続的にプレキャストアーチカルバートを配置した盛土構造物の略称で、地域遮断、ダムアップ、風の遮断等の盛土構造物の課題を克服したものである。個々のアーチカルバートの設計は、アーチカルバートを梁、底盤および盛土地盤をばねでモデル化した2次元フレーム解析により設計が行われるが、多連アーチカルバートの設計への適用性については十分に議論されていない。本論文は、京奈和自動車道の大和御所ICで用いられた2連アーチカルバートにおいて盛土による応力・変形挙動の計測を行い、設計との比較検証を行った。また、サイドウォール部とセンターピア部の不等沈下による影響についても考察を行った。

キーワード アーチ盛土工法、アーチカルバート、現場計測、応力・変形

1. はじめに

アーチ盛土は、連続的にプレキャストアーチカルバートを配置した盛土構造物で、地域の遮断、ダムアップ、風の遮断等の盛土構造物の課題を克服したものであり、さらに、景観性に優れ、地元や利用者に優位性や利便性を示すことができるものである¹⁾。アーチカルバートに作用する荷重は、側部の盛土による側方土圧が作用した後、上部の盛土により鉛直土圧が作用することとなるが、アーチカルバートの部材間はヒンジ構造であり、比較的柔な構造体と盛土地盤の相互作用により、各盛土段階で多様な応力・変形挙動を示すと考えられる。これらの応力・変形挙動をアーチカルバートの設計では、アーチカルバートを梁、周辺底盤を地盤ばねでモデル化した2次元フレーム解析により各盛土段階における応力を求めて応力照査が行われる。この設計の妥当性を評価するために実施した3連アーチカルバートの現場計測事例²⁾では、インバート中央部の鉄筋にコンクリートのクラックを伴う引張応力が観測され、設計と乖離する部分も見られた。そこで、これらの応力挙動を検証するさらなるデータを得るために、京奈和自動車道の大和御所ICで用いられた2連アーチカルバートにおける現場計測を行い、設計値との比較を行った。また、今回の計測では、多連アーチカルバートにおけるサイドウォールとセンターピアの不等沈下が躯体の応力に大きく影響する結果であり、不等沈下と躯体応力の関係についても考察を行った。

2. 工事概要

計測現場は、京奈和自動車道の大和御所ICに用いられた2連アーチカルバートである。図-1に盛土状況、図-2にアーチカルバートの標準断面を示す。アーチカルバートは、ボルト、サイドウォール、センターピアの各部材をヒンジ構造であるリングジョイントで繋いで構築され、アーチカルバートは高さ8.3m、幅18.3m、ボルトおよびサイドウォールの上部の部材厚は30cmである。施工手順は、アーチカルバートを設置後、底版部に鉄筋を配置し、インバート部にコンクリートを打設(厚さ40cm)して躯体を完成させた後、盛土を締め固めている。



図-1 盛土状況

く。締め固め手順は、①小型バックフォーで裏込め土の敷き均し、②プレート式小型転圧機で躯体1.0mの範囲の転圧、③その他箇所はハンドガイド式小型転圧機で転圧の順で行い、土被り厚0.8mまで盛土を行った。図-3に当該地における地盤状況を示す。基礎地盤は、層厚約2mの埋土層、沖積砂層の下に層厚2.5mの沖積粘土層が堆積しているため、地耐力確保を目的として表層2mに地盤改良を行った。

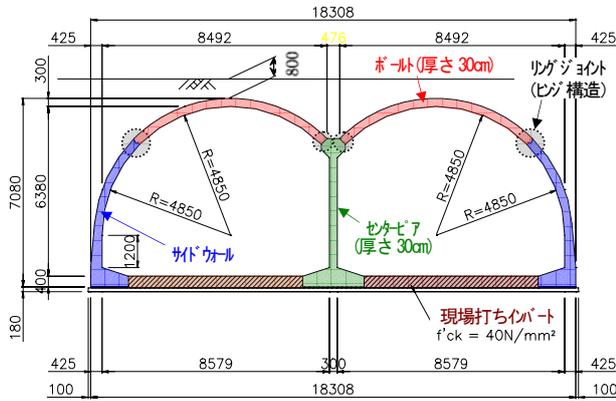


図-2 アーチカルバートの標準断面図



図-3 基礎地盤状況と地盤改良工

3. 現場計測概要

盛土に伴うアーチカルバートの応力・変形挙動を把握するために、アーチカルバートの鉄筋応力および内空変位の計測を行った。また、サイドウォールにパッド式土圧計³⁾を設置し、盛土による側方土圧の計測も行った。

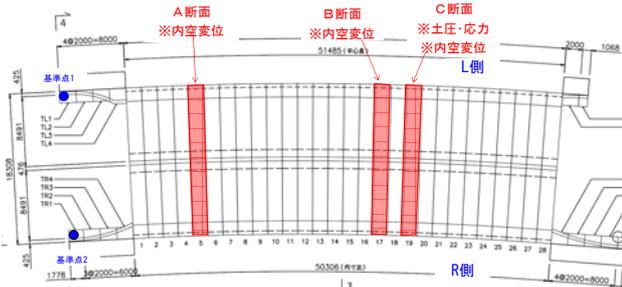


図-4 計測器設置平面位置図

図-4に計測器設置平面位置図、図-5に計測器の設置断面図を示す。計測断面は3断面設け、A、B断面は内空変位計測、C断面は内空変位と土圧・応力の計測を行った。アーチカルバートに作用する断面力（軸力、曲げモーメント）と設計値を比較するためにアーチカルバートの内側・外側鉄筋応力の計測値より断面力を求めた。

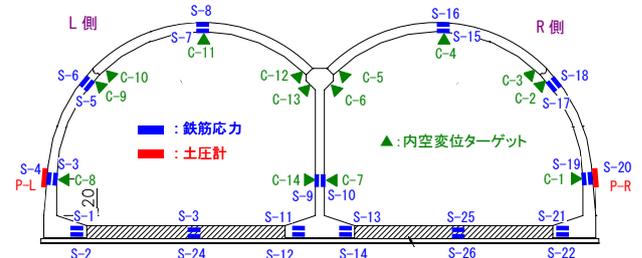


図-5 計測器設置位置図 (C断面)

4. 現場計測結果

(1) 内空変位結果

図-6に各盛土段階における内空変位の計測結果を示す。いずれの計測断面においてもヒンジ部から天端まで（図-6の水色から緑色）の盛土時に大きな沈下が発生している。その沈下量は、左サイドウォール部で75～95mm、右サイドウォール部で80～109mm、センターピア部で37～57mmであり、左右の沈下を比べると右側が若干大きく、サイドウォール部とセンターピア部を比べ

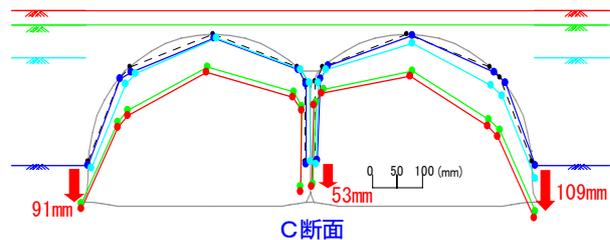
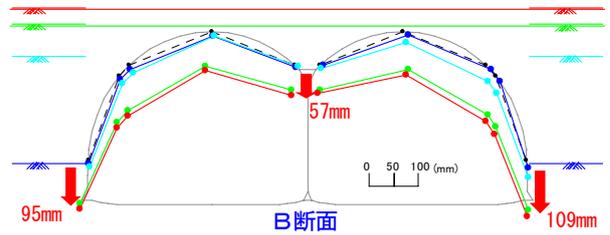
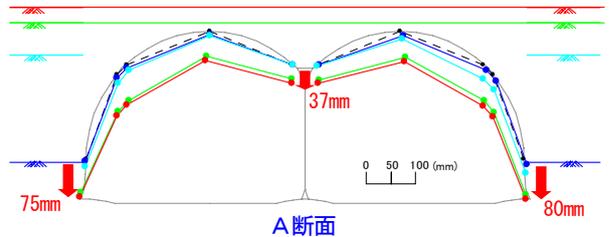


図-6 各盛土段階における内空変形図

ると38~56mmの不等沈下が発生している。これらの沈下は、図-3に示した沖積粘土層（N値=2、層厚2.5m）の盛土に伴う圧密沈下によるものであり、2連アーチカルバートの場合、センターピア部とサイドウォール部における盛土荷重の大きさの違いが不等沈下を引き起こす要因となっている。

図-7にC断面の盛土完了時における内空変位量を示す。アーチカルバートは、上載荷重により横へ広がるような変形を示していると同時に、全体的に左側へ変位するような挙動をしている。

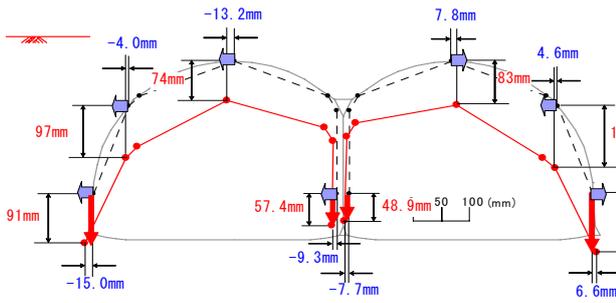


図-7 盛土完了時における内空変形量（C断面）

(2) 土圧計測結果

図-8に盛土工程とサイドウォール部に作用する側圧の経時変化を示す。図中には、側圧係数 $K=0.6$ 、 1.0 とした場合の計算上の側圧も示してある。サイドウォール部に作用する側圧は、左側は側圧係数 $K=1.0$ に相当する側圧が作用し、右側は側圧係数 $K=0.6$ に相当する側圧が作用しており、左側の側圧が大きな偏土圧が作用する状況となっている。ここで計測される土圧は、アーチカルバートの変位による地盤反力や土圧の減少も含んだものであり、アーチカルバートの沈下やアーチカルバートの内空変位が偏土圧の要因となっていることが考えられる。

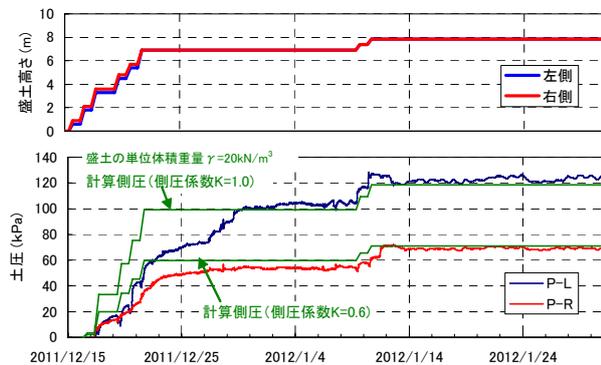


図-8 サイドウォールに作用する土圧計測結果

(3) 応力計測結果

図-9に鉄筋応力の経時変化図、図-10に盛土完了時における鉄筋応力分布図を示す。これらの計測結果より、

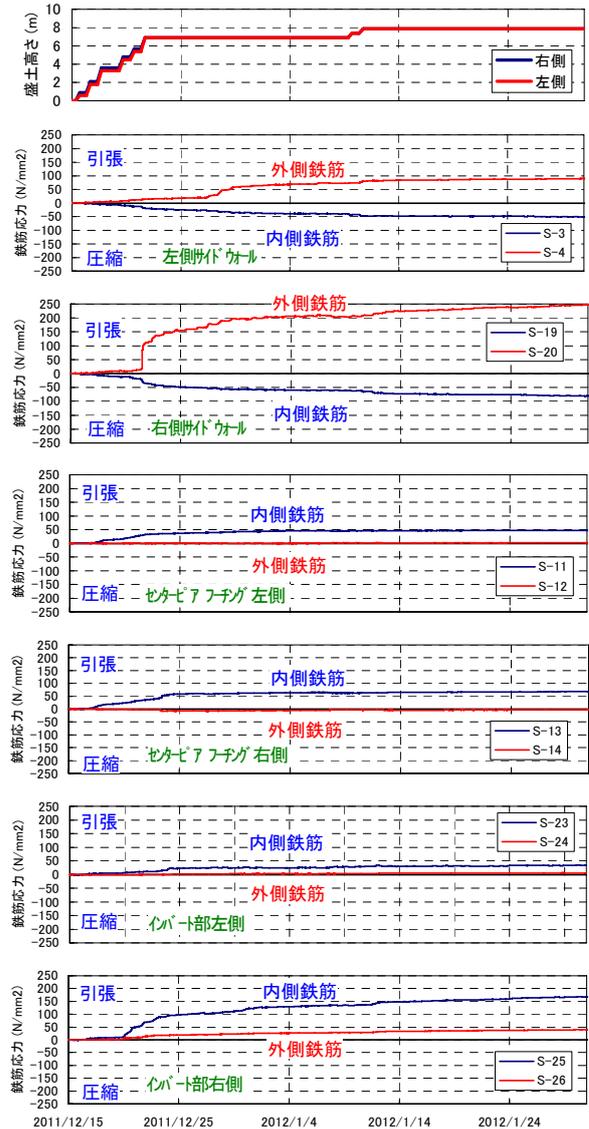


図-9 鉄筋応力の経時変化

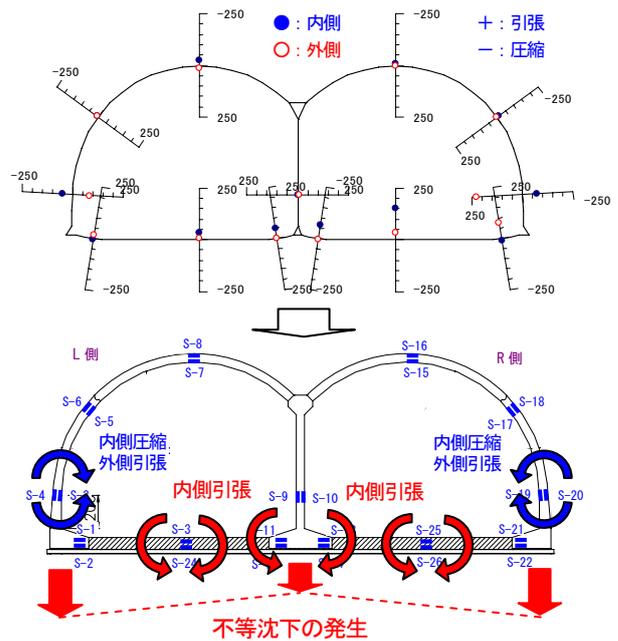


図-10 盛土完了時の鉄筋応力分布

サイドウォールは内側鉄筋が圧縮，外側鉄筋が引張，インバート部では内側鉄筋に引張力が作用している．これらの鉄筋応力に挙動は盛土荷重による応力の発生に加え，内空変位結果で示した不等沈下が大きく影響していると考えられ，特に，沈下量の大きい右側のサイドウォールの外側鉄筋に大きな引張力が作用している．なお，右側サイドウォールの外側鉄筋の引張応力が盛土途中に急激に増加しているのは，盛土および沈下に伴う引張応力の増加によりコンクリートにクラックが発生し，コンクリートに作用していた応力が鉄筋に移行してきたためと考えられる．

5. 計測値と設計値の比較

本現場におけるアーチカルバートの設計⁴⁾は，アーチカルバートを梁，底盤および盛土地盤をばねでモデル化した2次元フレーム解析により設計された．図-11に土被り厚0.8mにおける内空変位および断面力（軸力，曲げモーメント）の計測値と設計値の比較図を示す．ここで示す断面力は，内側，外側の鉄筋応力より換算するが，その際にコンクリートと鉄筋のヤング係数比 n が必要と

なる．今回の断面力の換算に用いるヤング係数比は，センターピアの軸力の換算値が設計値と一致する場合のヤング係数比 ($n=10$) を設定した．また，インバートは厚さ40cmの現場打ちコンクリートであるが，この下に厚さ18cmの捨てコンで敷き均されているため，この捨てコンも断面力を算出する際のインバートの厚みに考慮した．

設計に用いる鉛直および水平地盤反力係数は，「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編⁵⁾」の地盤反力係数推定方法により求めた．表-1に設計における地盤反力係数

表-1 設計における地盤反力係数の設定方法

地盤	設計条件	単位	備考	
基礎地盤	改良体の強度 q_0	550	kN/m^2	
	改良体の変形係数 E_0	220,000	kN/m^2	$E_0 = \varepsilon \cdot 100 \cdot q_0$ ($\alpha=4$)
	換算載荷幅 B	9.154	m	アーチカルバート全幅の1/2
	鉛直地盤反力係数 k_v	56,480	kN/m^3	式(1)より算出
側方地盤	盛土地盤の変形係数 E_0	28,000	kN/m^2	$E_0=2800N$ (kN/m^2) ※NはN値, $N=10$
	換算載荷幅 B	7	m	アーチカルバートの高さ
	水平地盤反力係数 k_h	8,720	kN/m^3	式(1)より算出

※地盤反力係数の算出式

$$k = \frac{1}{0.3} \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot \left(\frac{B}{0.3}\right)^{-3/4} \quad \text{式(1)}$$

※せん断地盤反力係数は， k_v, k_h の1/3

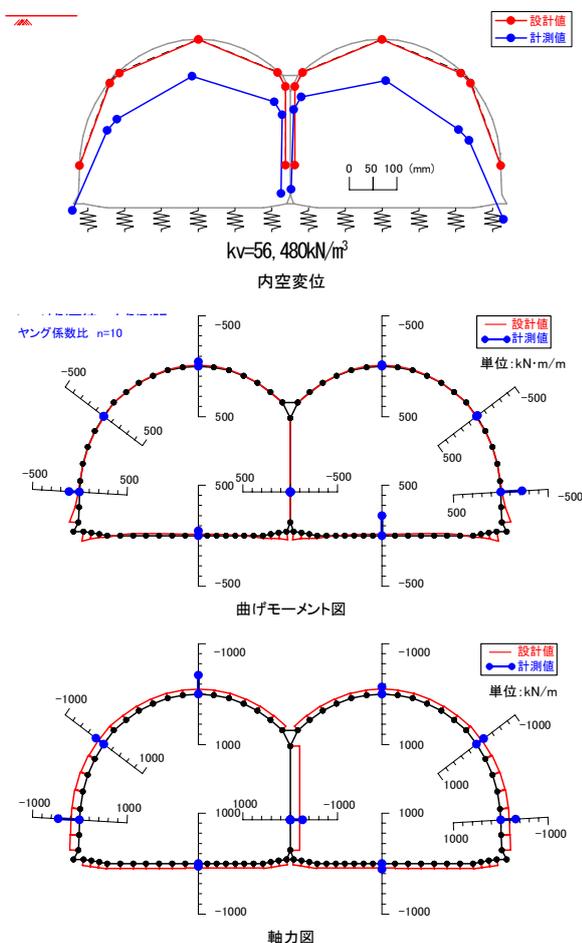


図-11 設計値と計測値の比較

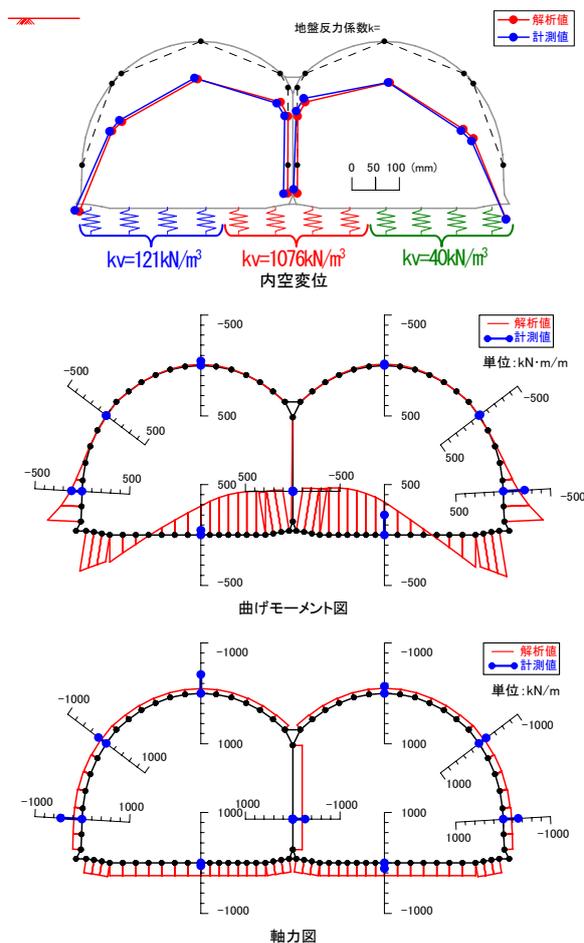


図-12 シミュレーション解析値と計測値の比較

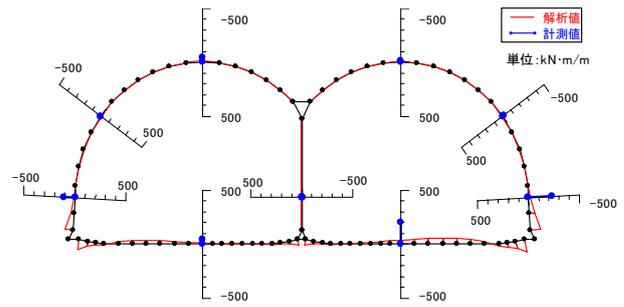
を示す。図-11より設計値と計測値を比較すると設計値は沈下量が小さく、サイドウォールの曲げモーメントが小さい。これは、設計では基礎地盤の鉛直地盤反力係数を改良体の強度より求めており、大きな地盤反力係数を設定しているが、実際には改良体の下層には沖積粘土地盤があり、この粘土地盤の圧密沈下による沈下が発生しているためである。そこで、基礎地盤の地盤反力係数（左右サイドウォールとセンターピア部の3つに分割）をパラメータとして計測された沈下量をシミュレートする解析を行った。図-12にシミュレーション解析値と計測値の比較図を示す。解析値の内空変位は計測値をほぼ一致した結果が得られている。シミュレーション解析における断面力は、沈下とともにサイドウォールとセンターピアの間に不等沈下が発生するため、サイドウォールおよびインバートの曲げモーメントが原設計よりも大きくなり、計測値の状況により近い結果となっている。これより、2連アーチカルバートに沈下が生じた場合、サイドウォール部とセンターピア部に不等沈下が生じ、これがサイドウォールおよびインバートの応力に大きく影響すると言える。

6. アーチカルバートの沈下と躯体応力の関係

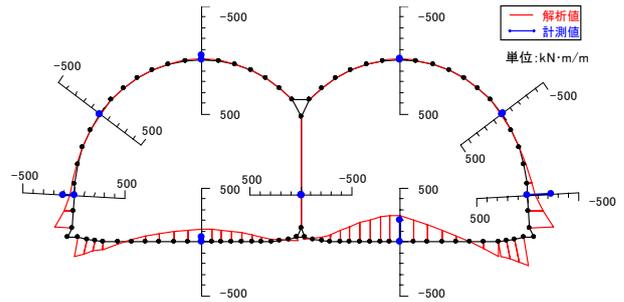
今回の現場計測の結果より、2連アーチカルバートでは盛土荷重により大きな沈下が生じた場合、サイドウォール部とセンターピア部に不等沈下が生じ、サイドウォールおよびインバートの曲げモーメントが増加することが観測された。ここでは、大和御所ICの設計モデルを用いて基礎地盤の地盤反力係数をパラメトリックに変化させて、不等沈下量と断面力および発生応力度の関係について調べた。

図-13に基礎地盤の地盤反力係数のパラメトリック解析における曲げモーメント分布を示す。また、図-14にこれらの解析結果における不等沈下量とアーチカルバート躯体の断面力の関係を示す。グラフに表示したのは曲げモーメントが最大値を示すサイドウォールの脚部およびインバートの端部、鉄筋応力の計測位置であるサイドウォールのスプリングライン位置およびインバートの中央部である。地盤反力係数が小さくなり、不等沈下量が大きくなるにつれて、いずれの点においても曲げモーメントが大きく作用していることがわかる。

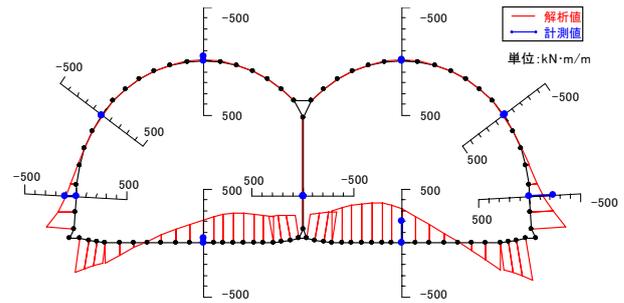
図-15に不等沈下量と鉄筋引張応力を示す。グラフに表示したのはサイドウォールおよびインバートの計測位置における発生応力度の解析値（塗潰し）と計測値（白抜き）である。サイドウォールスプリングライン位置における外側鉄筋およびインバート中央部の内側鉄筋は、不等沈下量の増加とともに引張応力が増加している。また、図-15には盛土完了後における不等沈下量と鉄筋引



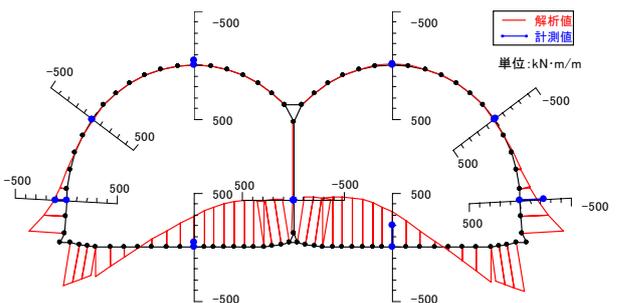
(1) サイドウォールとセンターピアの相対変位=2.5mm



(2) サイドウォールとセンターピアの相対変位=17.8mm



(3) サイドウォールとセンターピアの相対変位=36.5mm



(4) サイドウォールとセンターピアの相対変位=51.6mm

図-13 各地盤反力係数における曲げモーメント（解析）

張応力の計測値も併記してある。不等沈下量と鉄筋引張応力の関係は、同じ不等沈下量で比較すると計測値に比べて解析値の方が鉄筋引張応力が大きい。解析ではコンクリートの引張強度を考慮していないこと、計測値はコンクリートのクラックの発生位置によっては、ばらつきが大きいことなどを考慮すると、解析における不等沈下量と鉄筋引張応力の関係は、概ね計測値を評価してい

ると言える。この関係から見ると原設計の不等沈下量 5mm における鉄筋引張応力に対して、不等沈下量の計測値 55~65mm では約 10 倍の鉄筋引張応力が作用することとなる。すなわち、多連アーチカルバートの設計においては、盛土荷重が影響する深度までの土層を含めた地盤反力係数を適切に設定し、沈下量を精度良く評価することが重要である。

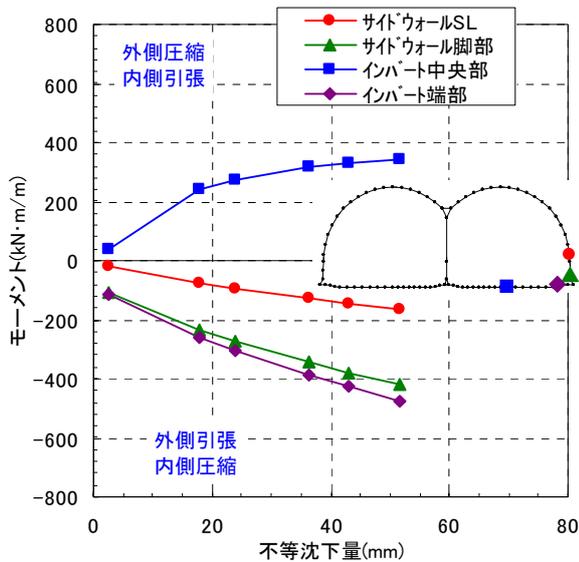


図-14 不等沈下量と曲げモーメントの関係 (解析)

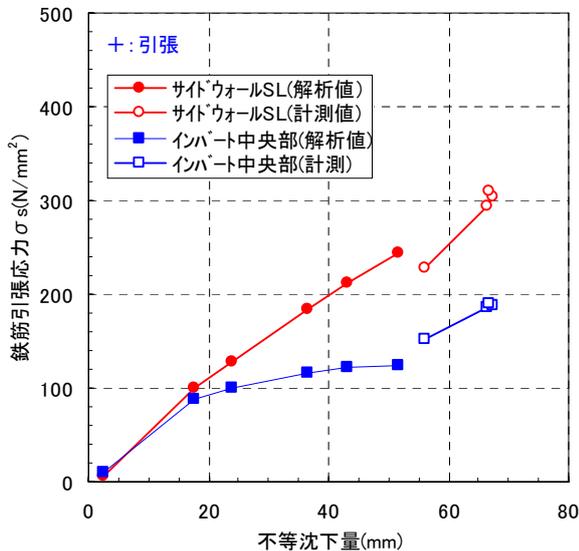


図-15 不等沈下量と鉄筋引張応力の関係 (解析と計測)

- ①2連アーチカルバートを設置する基礎地盤に軟弱粘土層が存在した場合、表層の地盤改良を施しても盛土荷重により沈下が発生し、かつサイドウォール部とセンターピア部に不等沈下が生じ、サイドウォール、インバート、センターピアのフーチング部の曲げモーメントが増加する。
- ②2次元フレーム解析は、沈下に伴うサイドウォールおよびインバートにおける曲げモーメントの増加状況を良く再現している。
- ③2次元フレーム解析で地盤反力係数をパラメトリックに解析した結果、解析における不等沈下量と鉄筋引張応力の関係は、概ね計測値を評価していると言える。
- ④この関係より、原設計の不等沈下量 5mm における鉄筋引張応力に対して、不等沈下量の計測値 55~65mm では約 10 倍の鉄筋引張応力が作用することとなる。
- ⑤多連アーチカルバートの設計においては、盛土荷重が影響する深度までの土層を含めた地盤反力係数を適切に設定し、沈下量も精度良く評価することが重要である。

参考文献

- 1) 日経コンストラクション(2006 10-27): 中島高架橋アーチカルバート工事 (福岡県) 初の7連アーチで工費を3割低減, pp.30~35, 2006.10.
- 2) 長屋淳一, 小高 武, 大村宏幸, 岸田 潔, 横峰正二: 計測による多連ユニットアーチカルバートの応力・変形挙動の評価, 土木学会トンネル工学報告集 第20巻, pp.373-379, 2010.11.
- 3) 橋本 正, 矢部興一, 山根昭彦, 伊藤博昭: パッド式シールドセグメント用土圧計の開発, 第28回土質工学会研究発表会, pp.2055~2058, 1993.
- 4) 新都市社会技術融合創造研究会 景観性に優れたアーチカルバートを用いた盛土構造に関する研究プロジェクト: 連続アーチカルバートを含む盛土工法に関するガイドライン(案)【2ヒンジ式アーチカルバート編】, 2010.
- 5) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 共通編, 下部構造編, 2002.3.

7. まとめ

今回の現場計測および解析検討により、以下のような知見を得た。

