

計測による多ユニットアーチカルバートの 応力・変形挙動の評価

長屋淳一¹・小高 武²・大村宏幸³・岸田 潔⁴・横峰正二⁵

¹正会員 株式会社 地域地盤環境研究所 (〒550-0012 大阪市西区立売堀四丁目3-2)
E-mail:nagaya@geor.co.jp

²ジオスター株式会社 技術部 (〒355-0001 埼玉県東松山市岡字膳棚1871)

³日本ゼニスパイプ株式会社 (〒101-0032 東京都千代田区岩本町1-10-5(TMMビル5F))

⁴正会員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1)

⁵国土交通省 九州地方整備局 延岡河川国道事務所 (〒882-0803 延岡市大貫町1-2889)

多ユニットアーチカルバート工法は、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。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、設計条件となる鉛直・水平荷重や地盤反力係数の設定方法は、多連アーチカルバートとして十分に議論がなされていない部分がある。本論文では、3連アーチカルバートに作用する土圧、応力および変形の現場計測を行い、盛土施工時の3連アーチカルバートの応力・変形挙動を調べ、設計値との比較を行い、設計手法の検証を行った。

Key Words : *multi-arch culvert, in-site measurement, design, stress and deformation behavior*

1. はじめに

多ユニットアーチカルバート工法は、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。アーチカルバートの設計は、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。しかし、実現場において多連アーチカルバートの応力・変形を調べ、設計値と比較して設計方法

の妥当性を検証した例はほとんどない。本論文では、3連アーチカルバートに作用する土圧、応力および変形を現場計測を行い、各盛土段階における3連アーチカルバートの応力・変形挙動について検討を行った。また、3連アーチカルバートの設計値との比較し、本設計手法の検証を行った。

2. 工事概要

計測現場は、宮崎県延岡市において多ユニット3連アーチカルバート盛土を用いて建設された道路建設工事であり、連続的に敷設した3連アーチカルバート間および上部を盛土してアーチカルバート上に道路を造成するものである。図-1に構築後の状況写真、図-2にアーチカルバートの標準断面図を示す。アーチカルバートは、ポールト、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 35.7m、ボルトおよびサイドウォールの上部の部材厚は 40cm 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、コンクリートを打設して躯体を完成させる。その後、テールアルメ工法により壁体を設置しながら盛土を締め固めていく。締め固め手順は、①小型バックフォア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、最終の盛土高さは約 10m(土被り厚 1.7m)。さらに 60cm の舗装が敷設される。図-3 に盛土材料の粒径加積曲線を示す。盛土材料は、近傍の掘削工事における発生土で、細粒分混じり礫質土であり、粒度組成は礫分 49.5%、砂分 17.7%、細粒分 32.8%、最大粒径 53mm、最大乾燥密度 19.1kN/m³、湿潤単位体積重量 17.2kN/m³ である。また、リングジョイントまでの盛土は



図-1 構築後の状況写真

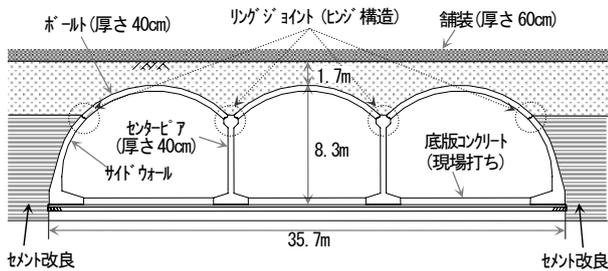


図-2 アーチカルバートの標準断面図

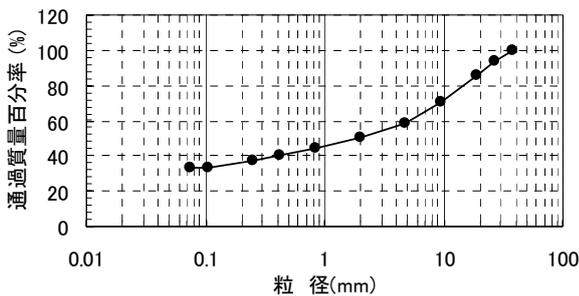


図-3 盛土材の粒径加積曲線

設計上の水平地盤反力が確保できるようにセメント改良(設計強度 840kN/m²、変形係数 $E_0=84000\text{kN/m}^2$)を行った。

3. 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、サイドウォールに土圧計を設置し、アーチカルバート間の盛土による側方土圧の計測も行った。図-4 に計測器の設置箇所を示す。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・外側鉄筋に設置したひずみ計より、以下の手順で断面力を求めた。

- ①各部材の鉄筋のひずみ計測値と鉄筋のヤング係数より鉄筋応力を求める。
- ②コンクリートのひずみ量が鉄筋のひずみと同じであるとしてひずみ計測値とコンクリートのヤング係数よりコンクリートの応力を求める。
- ③内側と外側の鉄筋およびコンクリート応力と鉄筋量、鉄筋の被りより計測位置における断面力を求める。この時、コンクリート応力が引張強度以下の場合にはコンクリートの引張応力も考慮し、引張強度以上の場合には無視して算出する。

ここで、鉄筋のヤング係数は $E_s = 210 \text{ kN/mm}^2$ 、コンクリートのヤング係数は $E_c = 15 \text{ kN/mm}^2$ 、コンクリートの引張強度は $f_{tk} = 3.27 \text{ N/mm}^2$ ($f_{tk} = 0.23f'_{ck}{}^{2/3}$, f'_{ck} は設計基準強度 40 N/mm^2) と設定した。

また、アーチカルバート間の盛土によるアーチカルバ

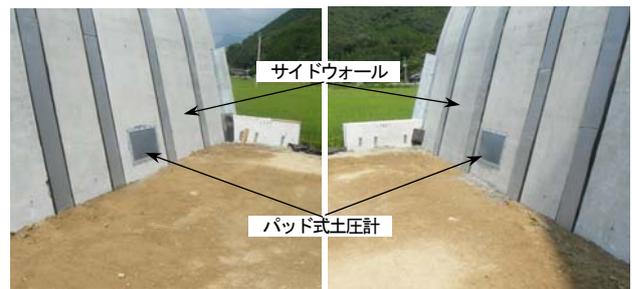


図-5 パッド式土圧計の設置状況

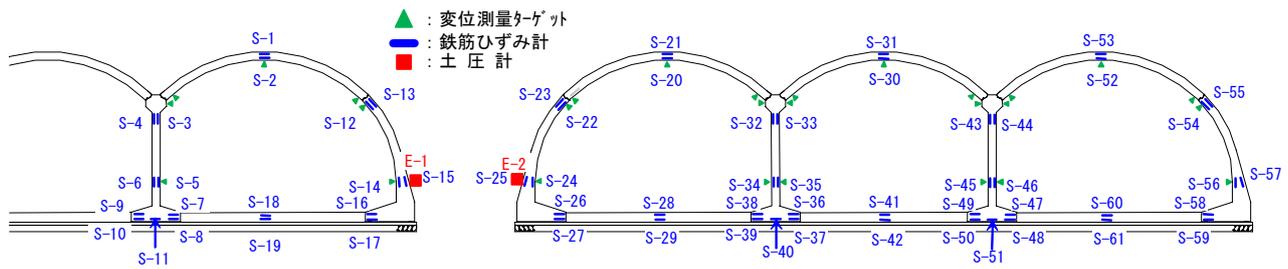


図-4 計測器の設置箇所

ートへの側方土圧を調べるため、サイドウォールにパッド式土圧計³⁾を設置した。図-5にパッド式土圧計の設置状況を示す。アーチカルバートの内空変位は、図-4に示す▲の位置に変位計測ターゲットを設置し、3次元測量を行った。

4. アーチカルバートの設計⁴⁾

アーチカルバートの設計⁴⁾は、構造体を梁、地盤を地盤ばねでモデル化した2次元フレーム解析を用いる。

(1) 設計荷重

アーチカルバートの設計において考慮する荷重は、自重、鉛直土圧、水平土圧および活荷重であり、これらの荷重によりアーチカルバートの変位に対する地盤反力が地盤ばねにより考慮される。この内、自重はアーチカルバートの重量より、鉛直土圧は、上部盛土材の単位体積重量と土被り厚より求められる。水平土圧および水平地盤ばねは、各盛土段階により表-1のように設定され、ヒンジ位置から天端までの盛土では、ヒンジ以下の水平土圧係数 $K=0.3$ で水平地盤ばねを考慮しない場合と、 $K=1-\sin\phi$ (一般的に設計で用いられる定数 $\phi=30^\circ$ の場合、 $K=0.5$) で水平地盤ばねを考慮する場合の両方を解析する。

表-1 盛土状態による水平土圧係数

盛土状態	水平土圧係数 (K)		水平地盤ばね
	ヒンジ以上	ヒンジ以下	
ヒンジ位置まで	—	0.3	考慮しない
天端まで	0.3	0.3	考慮しない
	0.3	$1-\sin\phi$	考慮する
天端より上	0.3	$1-\sin\phi$	考慮する

また、活荷重は、土被り4m未満の場合、T荷重、4m以上の場合は、ボルト上面に様に $10(\text{kN}/\text{m}^2)$ の等分布荷重を考慮する。

荷重の組み合わせは、製品保管時から製品移動時、建設時、共用時までの作用荷重状態を想定し、これらの組み合わせより、最大断面力を抽出し、部材応力度の照査を行う。

(2) 地盤反力係数

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る式(1)により算定する。

$$k = k_0 \cdot \left(\frac{B}{0.3} \right)^{-3/4} \quad (1)$$

k : 地盤反力係数

k_0 : 直径 30cm の剛体円板による平板載荷試験の値に相当する地盤反力係数で、各種土質試験・調査により求められた変形係数から推定する場合は、式(2)により求める。

$$k_v = \frac{1}{0.3} \cdot \alpha \cdot E_0 \quad (2)$$

B : 地盤反力係数の算定に用いる換算幅

※鉛直地盤反力係数の場合、底版幅の1/2、水平地盤反力係数の場合、アーチカルバートの全高さ

E_0 : 地盤の変形係数

α : 地盤反力係数の推定に用いる係数

計測現場における基礎地盤の鉛直地盤反力係数は、基礎地盤のN値が $N=20$ 、裏込め地盤における水平土圧係数は、裏込め土のN値が $N=30$ として地盤反力係数を設定した。なお、ボルト部では水平方向とのなす角が 45° 以下となり、水平変位による反力が期待し難いため地盤ばねは設けないものとする。

5. 現場計測結果

(1) 土圧計測結果

図-6にサイドウォールに設置した土圧計の計測結果を示す。図中には、盛土高さおよび水平土圧係数 $K=0.3, 0.5$ とした場合の計算側圧およびサイドウォールのコンクリート内に設置した温度計の経時変化も示してある。これより、土圧計測結果はばらつきが見られるが、アーチカル

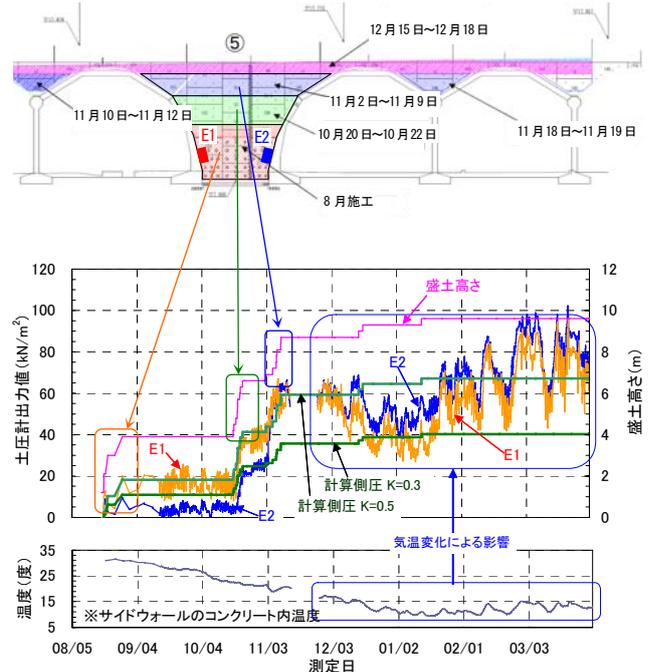


図-6 側方土圧計測結果

パート間の盛土時に、サイドウォールへの側圧が増加し、土圧増加量は、リングジョイントまでの盛土時には、水平土圧係数 $K=0.3\sim 0.5$ 、天端までの盛土時には $K=0.5$ に相当する土圧が作用しており、設計土圧にほぼ一致した値を示している。また、土圧計測値にばらつきが見られる要因としては、温度変化の影響を受けていると考えられる。図-7に、2010/2/1から1ヶ月間の土圧と温度の計測値を示す。土圧計測値は1日の短期周期で変動しながら、コンクリート内の温度変化に対応して変動していることがわかる。このように土圧の計測値が温度変化の影響を受ける要因としては、①パッド式土圧計の圧力センサーの温度による影響、②受圧板内のオイルの体積変化による影響、③アーチカルバート自体の温度変化に伴う変形に対する地盤反力の変化が考えられる。①、②については、室内実験において無負荷の状態での室内の温度変化させた時に土圧計の出力値が変わらないことを確認している。よって、土圧計自体の影響ではなく、温度変化に対するアーチカルバート自体の挙動によるものと考えられる。

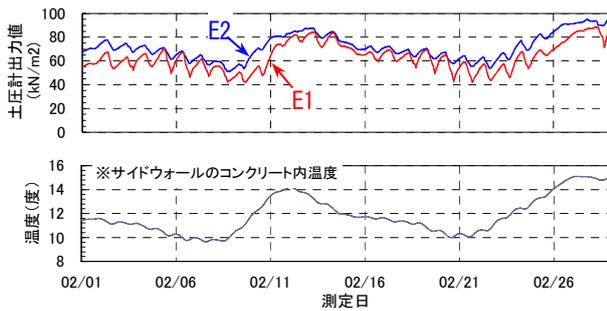


図-7 土圧計測値と気温変化

(2) 内空変位および鉄筋応力

図-8に各盛土段階における3次元測量結果による内空変位を示す。上段は、各盛土段階における計測値、下

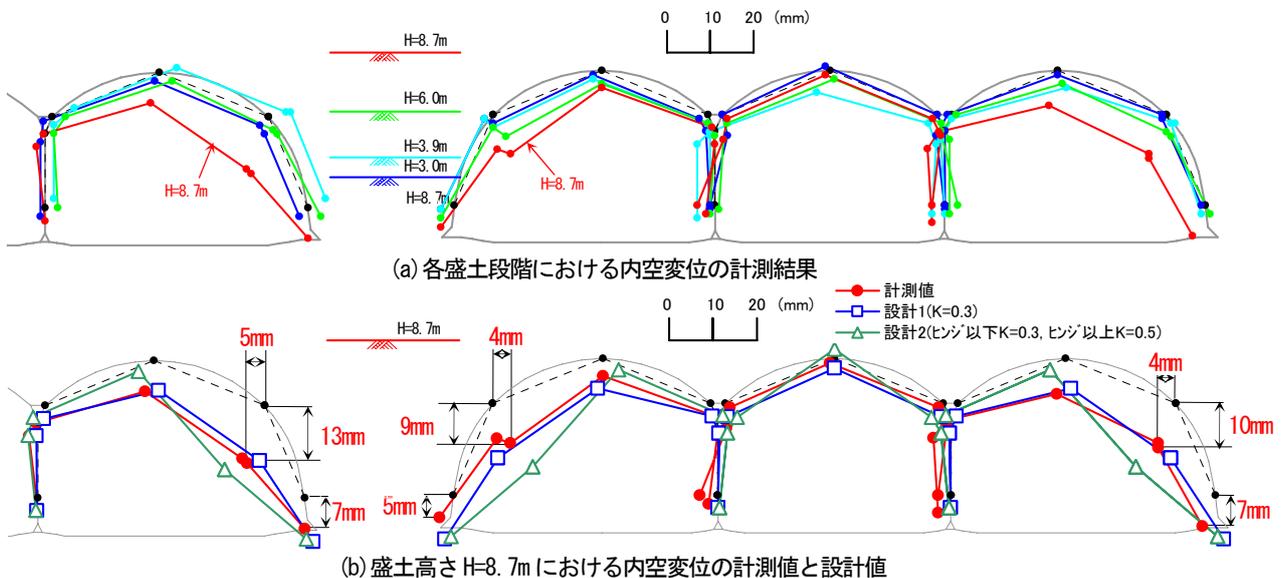


図-8 内空変位計測結果

段は盛土高さ $H=8.7\text{m}$ 時の計測値と側圧を $K=0.3$ とした場合の設計値(設計1)とヒンジ以上を $K=0.3$ 、ヒンジ以下を $K=0.5$ とした場合の設計値(設計2)を示してある。これより、アーチカルバートは、アーチカルバート間の盛土がリングジョイントに達するまでは大きな変位の発生は見られないが、リングジョイント以降の盛土によりサイドウォールが斜め上方から押し付けられるような変形を示しており、盛土高さ $H=8.7\text{m}$ においてリングジョイント部では $4\sim 5\text{mm}$ 内側へ、 $9\sim 13\text{mm}$ 下側、アーチカルバートの脚部は $5\sim 7\text{mm}$ の沈下が発生している。設計値は計測値と同様な変形モードを示しており、変形量は設計1とほぼ一致している。また、基礎地盤の沈下量は設計値と同程度であり、設計における基礎地盤の鉛直地盤反力係数は実地盤を適正に評価していると言える。

図-9に鉄筋応力の経時変化図を示す。ここに示す鉄筋応力は、アーチカルバート設置時を初期値としたものであり、自重による発生応力は含んでいない。また、ボルト、サイドウォール部にばらつきが見られるのは、温度変化による影響である。図-9より鉄筋応力もリングジョイント以降の盛土時に斜め上方から盛土荷重を受けることにより、サイドウォールの下部に内側圧縮、外側引張となる大きな曲げモーメントが発生し、この荷重に対して底盤からの反力を受け、サイドウォールのフーチング部分にも曲げモーメントが作用している。また、アーチカルバート間の盛土の影響はボルトを介してセンターピアにまで及んでおり、センターピアの下端部においても若干の曲げモーメントが作用している。

一方、底版コンクリートは天端までの盛土時に急激に内側、外側の両方の鉄筋に引張応力が発生している。これは、底版コンクリートに引張力が作用し、その引張力がコンクリートの引張強度を上回った時点でコンクリートの引張抵抗がなくなり、その引張力が鉄筋に作用し、

鉄筋の引張応力が増加したと考えられる。また、増加した鉄筋応力は、外側鉄筋よりも内側鉄筋の方が大きく、上載荷重がサイドウォールとセンターピアを介して地盤に作用するため、底版コンクリートの中央部には地盤反

力による曲げモーメントも作用している。このような現象は、中央および右側の底版コンクリートにも発生しており、底版コンクリート全体に引張応力が作用していることがわかる。

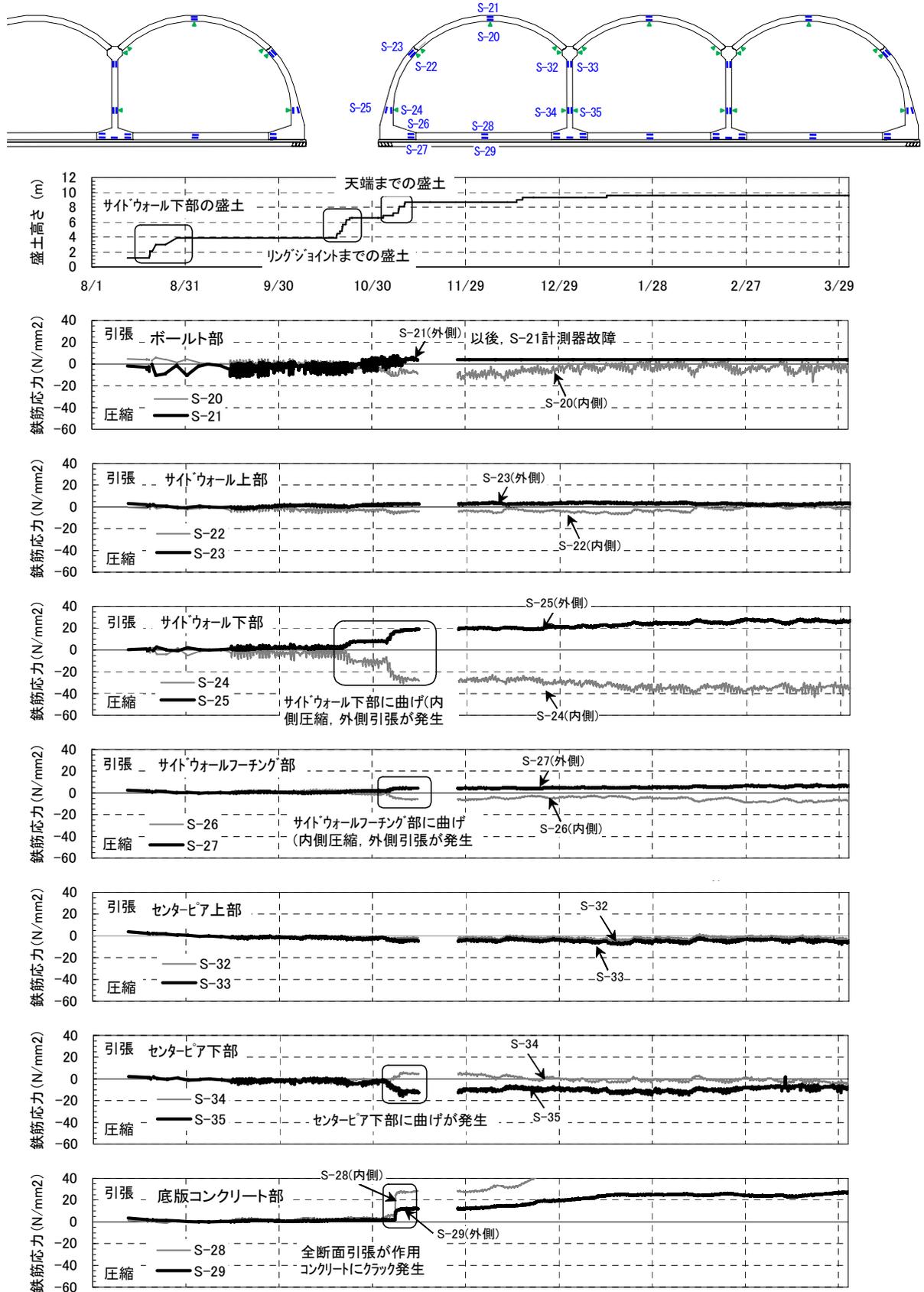


図-9 鉄筋応力の経時変化図

6. 設計値との比較

図-10, 11 に天端までの盛土時および土被り厚 1.3m における軸力, 曲げモーメントの計測値と設計値 (ヒンジ以上は水平土圧係数 $K=0.3$, ヒンジ以下は $K=0.5$) の比較図を示す。軸力, 曲げモーメントは, 各部材の内側, 外側の鉄筋応力より算出しており, コンクリートの引張強度以下の場合, コンクリートの引張応力も考慮している。設計値と計測値を比較するとボルト部とサイドウォール部については, 計測値は定量的に設計値と良く一致した結果を示している。しかし, 底版コンクリート部では, 設計値がアーチカルバート間の盛土による側方土圧が作用し, 底版コンクリートに圧縮力が作用するのに対して, 計測値では引張力が作用している。これは, サ

イドウォール間の盛土時に作用する側方土圧はサイドウォールのフーチング部における地盤との摩擦により抵抗して, 底版コンクリートに圧縮力がほとんど作用しないが, 上載荷重の増加時には, サイドウォール脚部が広がり, さらに基礎地盤からの地盤反力が作用することにより底版コンクリートに引張力と曲げモーメントが発生していると考えられる。図-8 の内空変位の計測結果をみると定量的な評価をするには測量精度に問題はあるもののサイドウォール脚部の広がりを示す傾向が見られる。但し, 底版コンクリートの上には土が敷設されており, クラックの発生状況は確認できないが, 増加した鉄筋応力は許容応力度内であり, アーチカルバートの構造上の問題ない状態である。

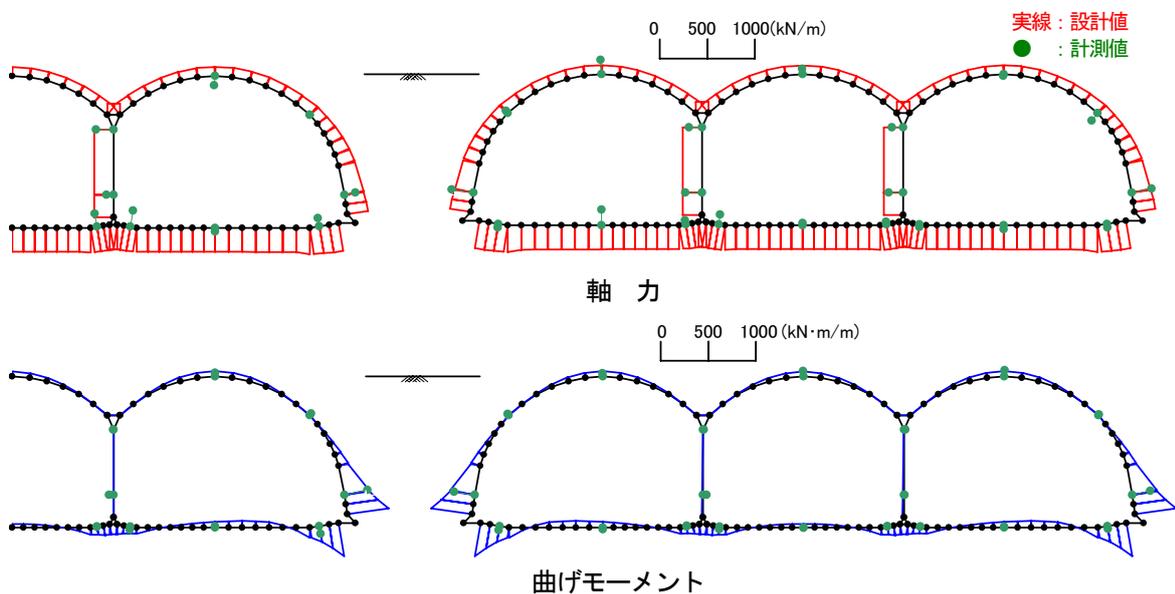


図-10 断面力 (軸力, 曲げモーメント) の設計値との比較 (天端までの盛土)

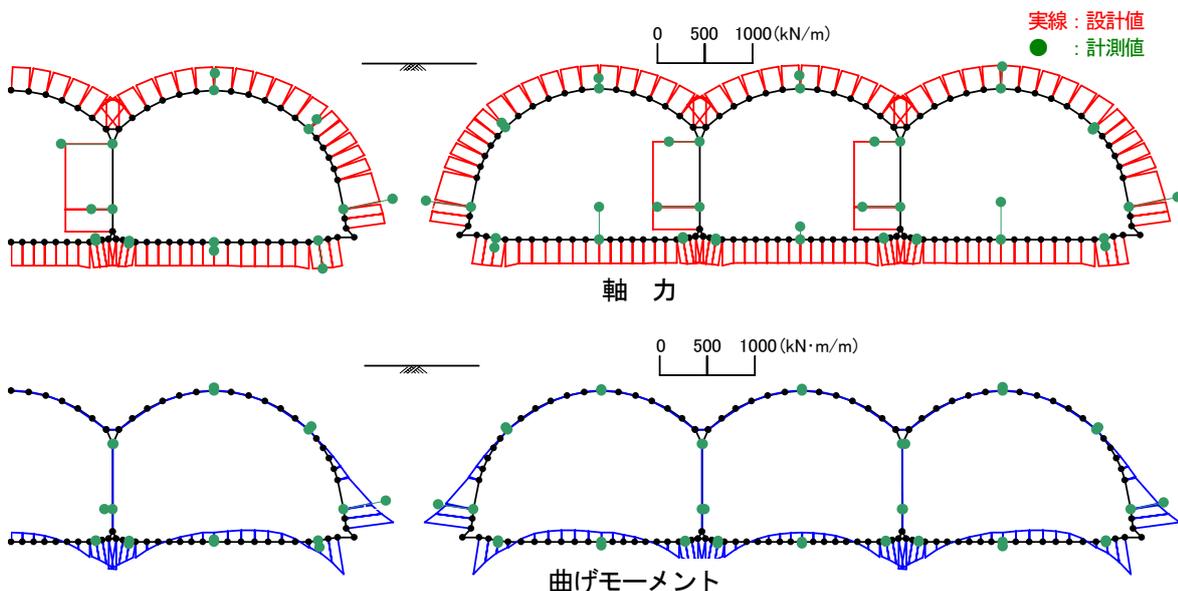


図-11 断面力 (軸力, 曲げモーメント) の設計値との比較 (土被り厚 1.3m)

7. まとめ

3連アーチカルバートに作用する側方土圧、応力および変形の現場計測を行い、盛土に伴う応力・変形挙動を調べ、設計との比較検証を行った。その結果、以下のような知見を得た。

- ①サイドウォールに作用する側方土圧は、リングジョイントまでの盛土時には、水平土圧係数 $K=0.3\sim 0.5$ 、天端のまでの盛土時には $K=0.5$ に相当する土圧が作用しており、設計土圧にほぼ一致している。
- ②アーチカルバート間の盛土がリングジョイントに達するまでは大きな変位の発生は見られないが、リングジョイント以降の盛土によりサイドウォールが斜め上方から押し付けられるような変形を示す。
- ③サイドウォールの下部およびサイドウォールのフーチング部分に大きな曲げモーメントが作用した。また、アーチカルバート間の盛土の影響はボルトを介してセンターピアにまで及んでおり、センターピアの下端部においても若干の曲げモーメントが発生する。
- ④底版コンクリートは、カルバート間の盛土時には、圧縮力は作用しないが、上載荷重の増加に伴い、脚部の開きにより引張力が発生する。
- ⑤ボルト部とサイドウォール部については、計測値は定量的に設計値と良く一致する。
- ⑥但し、底版コンクリートは設計値が圧縮力に対して、計測値は引張力が作用している。これは、設計ではサイドウォールのフーチングにおける地盤との摩擦抵抗

を考慮していないことによるものであると考えられる。

謝辞：本報告論文の現場計測および検討は、「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」にて議論された内容を中心に取りまとめたものである。各委員から貴重な意見をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

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) 土木学会:コンクリート標準示方書【設計編】, pp.34, 2007.
- 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 I 共通編, IV下部構造編, 2002.3.

ESTIMATION OF STRESS AND DEFORMATION BEHAVIOR IN MULTI-ARCH CULVERT BASED ON MEASUREMENT

Junichi NAGAYA, Takeshi KODAKA, Hiroyuki OHMURA, Kiyoshi KISIDA and Seiji YOKOMINE

Multi-arch culvert is one of the methods to construct an embankment with multiple adjacent precast arch culverts installed inside. By this method, several problems of the traditional embankment method, such as blocking the local area, damming up, shut off the wind flow, et al. could be settled. Furthermore, it also has good landscape, superiority and convenience to local consumer. In designing a multi-arch culvert structure, the arch culvert can be supposed as beam, floor plate and ground base of embankment can be supposed as ground spring. By this beam - spring model, stress - displacement analysis can be conducted. However, some requirements in design, such as load in vertical and horizontal direct, the factor of ground reaction, and so on, had not been verified. In this paper, multi-arch culvert design method was verified by a comparative study on the data measured in site to the value in design, including the earth pressure to arch culvert, stress in structure and displacement of the culvert.