

# 盛土内に設置されたカルバートの 構造形式と地震時挙動に関する研究

澤村 康生<sup>1</sup>・岸田 潔<sup>2</sup><sup>1</sup>京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 (〒615-8540京都市西京区京都大学桂 C1-4-291)<sup>2</sup>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 C1-3-266)

近年、耐震設計を必要としない従来型カルバートの適用範囲を超えるような規模や構造形式のカルバートが開発され、それらの地震時挙動の把握が重要な課題となっている。そこで本研究では、カルバートの覆工形状と盛土高に注目して動的遠心模型実験とその数値解析を実施し、盛土を含むカルバート構造物の地震時挙動に関する検討を行った。その結果、ボックスタイプとアーチタイプでは盛土高さによる影響が異なることが明らかになった。また、高土盛り条件でカルバートが施工させる際には、カルバートは盛土の挙動に追従するという前提が成り立たなくなる可能性があることが明らかになった。

キーワード カルバート、盛土、遠心模型実験、有限要素法

## 1. はじめに

現在、カルバートの設計・施工においては、道路土工カルバート工指針<sup>1)</sup>に示される従来型カルバートの適用範囲(ボックスカルバートの場合:幅 6.5 m, 高さ 5 m 以下)を満たすものについては、長年の実績により常時の荷重のみを考慮するのが一般的である。これは、カルバート構造物は地震時に周辺地盤や盛土と一体となって挙動するため、函体本体に作用する断面力は小さいという前提に基づいている。事実このようなカルバートは、1995年の兵庫県南部地震や2004年の新潟県中越地震等による強い地震を受けてきたにも関わらず、特に、地震時の影響を考慮しなくても目立った損傷は生じていない。

しかしながら近年、大断面・高盛土条件下といった、従来型カルバートの適用範囲外である規模の大きな道路用ボックスカルバートの施工が増加してきている。このような盛土構造物でもこの前提が成り立つのか、すなわち規模の大きなカルバートに対する確保すべき耐震性能、およびそれを満足する限界状態については明確になっていない<sup>2)</sup>。

一方、そのような剛性カルバートに対して、ヒンジ式プレキャストアーチカルバートは、剛性カルバートとたわみ性カルバートの中間的な特徴を持つ柔なカルバートであり、部材の剛性により外力を支持する他の形式に比べて、部材厚を薄くしながら内空幅 15~20 m 程度、土盛り 20 m 程度までの大断面の施工が可能である。しかし本体断面にヒンジを有することからやはり従来の慣用設

計法の適用範囲外である。このため耐震性については、工法ごとに検討が実施されており<sup>3,4)</sup>、阪神大震災レベルの変位に対してもその安定性を保つことが確認されている。しかし、継ぎ手のヒンジ構造の有無や挿入位置が盛土構造物全体としての耐震性に与える影響についての検討は十分ではない。今後は剛性カルバートとの相違を踏まえた上で、耐震性も含めて適切かつ統一的な検討を加えた設計法を構築する必要がある。

そこで本研究では、カルバートの構造形式と盛土高さがカルバート構造物および周辺地盤の地震時挙動に与える影響を明らかにすることを目的に、動的遠心模型実験とその数値解析を実施した。

## 2. 遠心模型実験

### (1) 実験条件

本研究では、剛性土槽(長さ450 mm×高さ300 mm×奥行き150 mm)を用いて、遠心力50G場における振動実験を実施した。実験では、カルバートの構造形式と盛土高さがカルバート構造物の地震時挙動に与える影響を明らかにするために、カルバート模型として、(a) ボックスカルバート模型(ボックスモデル)、(b) 肩部が剛結されたアーチカルバート模型(剛結アーチモデル)、(c) 肩部にヒンジ構造を有するアーチカルバート模型(2ヒンジアーチモデル)の3種類を作製した。また、盛

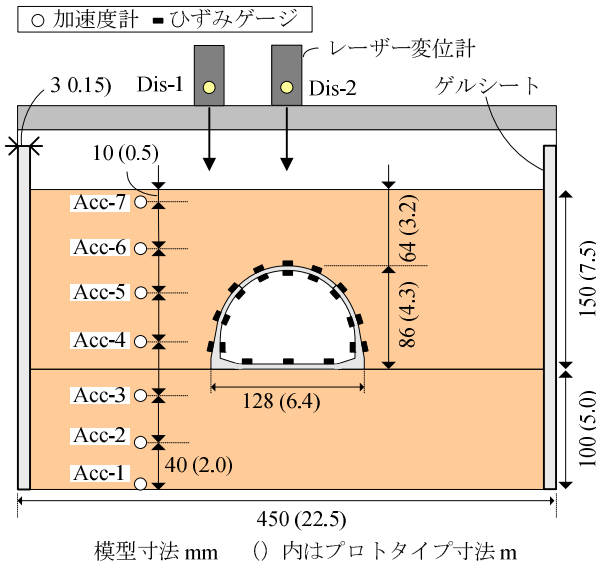


図-1 実験模型および計測器配置の一例 (高盛土条件)

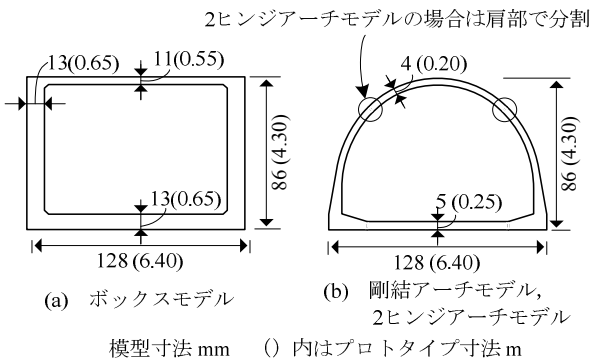


図-2 カルバート模型の寸法

土条件としては、盛土高さ5.0 m (土被り0.7 m) の低盛土条件、盛土高さ7.5 m (土被り3.2 m) の高盛土条件の2種類でカルバート盛土構造物が施工された場合とした。

図-1に実験模型及び計測器の配置の一例を示す。

## (2) カルバート模型

本実験で使用するカルバート模型は、ボックスモデルとアーチモデルで高さと同径幅が同等となるように設計した。また、アーチカルバート模型は、基礎形式としてインバートタイプを採用した。図-2にそれぞれのカルバート模型の寸法を示す。実際のカルバート構造物は、鉄筋コンクリート製であるが、実物の1/50の模型に配筋を施すのは非常に困難であるため、模型は珪砂6号：早強セメント：水=2：1：0.65の配合のモルタル<sup>9)</sup>のみで作成した。カルバート模型は、打設後24時間で脱型し、28日間水中養生した後、気中と60℃の乾燥炉でそれぞれ24時間乾燥させて使用した。2ヒンジアーチモデルの模型を作製する際には、打設時にあらかじめ肩部にアルミ板を挿し込み、脱型時にボールド部とそれ以外のパーツに分解した。その後、接触部分の両方にひずみゲージ用コ

表-1 カルバート模型の材料定数

ヤング率 $E_c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$2.07 \times 10^7$
圧縮強度 $f_c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$4.92 \times 10^4$
曲げ強度 $f_b$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$1.17 \times 10^4$
引張り強度 $f_t$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$5.76 \times 10^3$
単位体積重量 $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	1935
ポアソン比 $\nu$	0.18

表-2 豊浦砂の物性値

比重 $G_s$	2.64
平均粒径 $D_{50}$ [mm]	0.20
最大間隙比 $e_{max}$	0.975
最小間隙比 $e_{min}$	0.585
相対密度 $D_r$ [%]	85

ーティング材を薄く塗り固め、端面を整形した。実験時には、肩部のヒンジ位置から砂がこぼれ落ちるのを防止するために、ボールド部に貼付したクラフトテープによって表面を被服した。ただし、このクラフトテープはボールド部のみに貼付しており、これにより肩部が接着することはない。ヒンジモデルは上記の加工以外は一体型のモデルと同様の作製方法である。表-1にカルバート模型の材料定数を示す。

## (3) 模型地盤と境界条件

模型地盤には、基礎地盤、盛土共に乾燥豊浦砂を用いて、相対密度が85%の密詰めとなるようにした。豊浦砂の物性値を表-2に示す。また剛性土槽を用いて振動実験を行ったため、土槽壁面に緩衝材として厚さ3 mmのゲルシートを貼付し、土槽境界の影響を緩和した<sup>9)</sup>。

## (4) 入力波形

入力地震動の決定に際しては、兵庫県南部地震でのJR西日本鷹取駅構内地盤における地震波が、周波数1 Hz付近で卓越するという結果を参考に、周波数1 Hz、振動台での最大加速度400 galを目標に、振動装置の変位制御で正弦波1波のみを入力した。

## 3. 実験結果

図-3に、カルバート覆工に発生する曲げモーメントの分布を示す。曲げモーメントは、覆工の内側に引張りが生じる場合を正と定義している。図には、それぞれのモデルに対して、(a) 加振前の初期状態、(b) 最大曲げモーメントが発生時、(c) 曲げモーメントの増分量 (曲げモーメントの最大値と初期値の差) をそれぞれ示してい

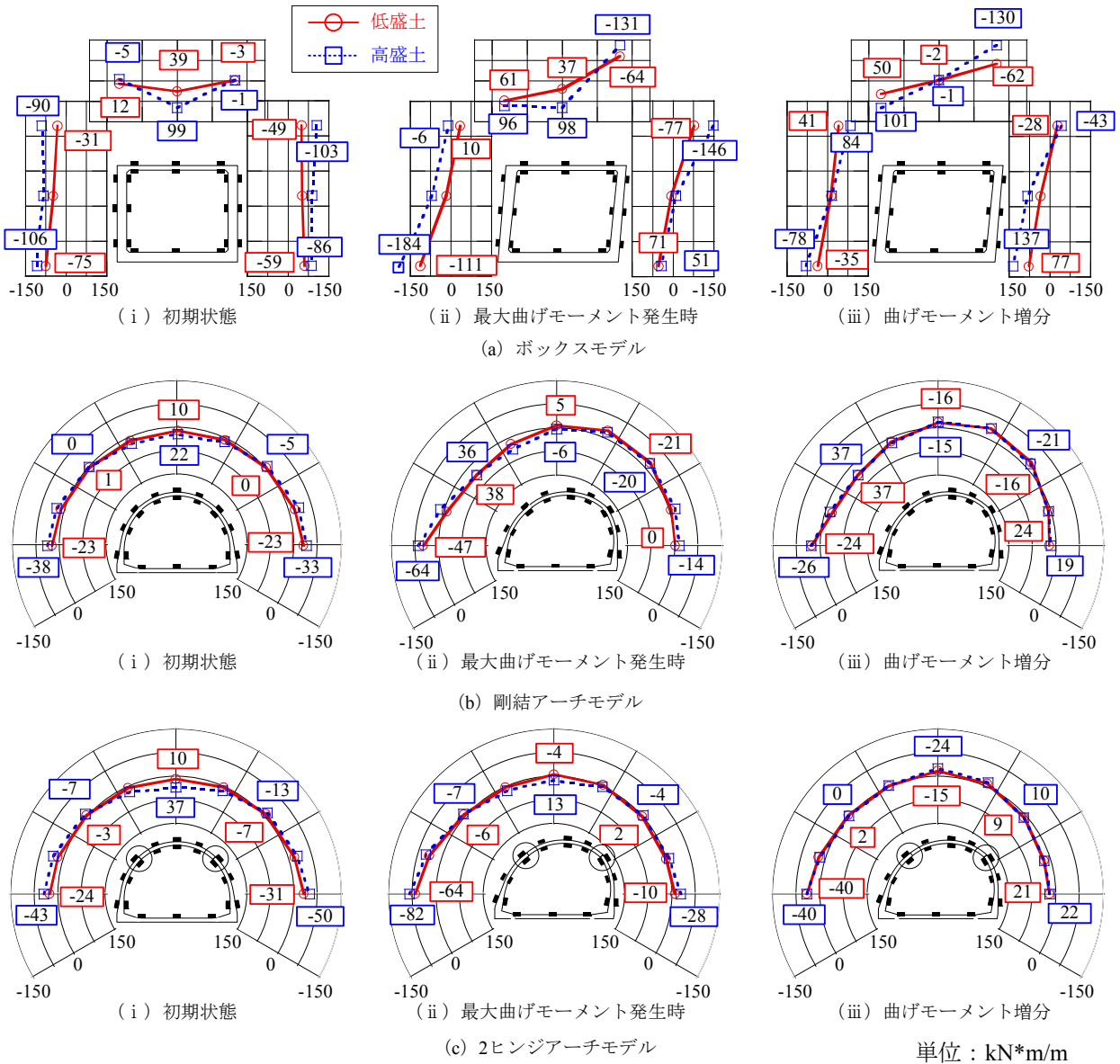


図-3 カルバート覆工に発生する曲げモーメント分布

る。

まずボックスモデルの初期状態では、盛土高さの増加により、頂板の中央部および側壁全体においてその増加が顕著であることが確認できる。最大曲げモーメントが発生した際には、右側に傾くモードで変形しており、左脚部および右頂部の隅角部において大きな曲げモーメントが発生する。増分量においても、盛土高さに比例していることがわかる。これより、ボックスモデルでは、盛土条件が初期状態並びに地震時の覆工の変形にも大きく影響することがわかる。このため、全体剛性の比較的高いボックスカルバートでは、従来型カルバートの適用範囲を越えるような高盛土条件の施工において局所的な変形が発生し、盛土の挙動に追従するという前提が成り立たなくなる可能性があると言える。

つぎに、剛結アーチモデルでは、初期状態において両

脚部で負の曲げモーメントが発生し、頂部ではアーチが内空側へたわむようなモードで正の曲げモーメントが発生する。一方で肩部においてはほとんど曲げモーメントが発生していない。また、低盛土条件においては側方土圧の影響が卓越するが、高盛土条件においては鉛直土圧が増加し、構造物全体が扁平に変形するような挙動を示すことがわかる。これらは、アーチカルバートの特徴を良く表しているといえる。地震時においては、左脚部および右肩部においては外側に引張りが生じるモード、左肩部においては内側に引張りが生じるモードで曲げモーメントが発生する。これより、アーチカルバートは、ボックスカルバートに比べて部材の変形をある程度許容し、周辺地盤と一体となって挙動していることがわかる。増分量では、盛土高さによらずほぼ一定の値を示し、盛土高さは初期状態における断面力にのみ影響を与えると言

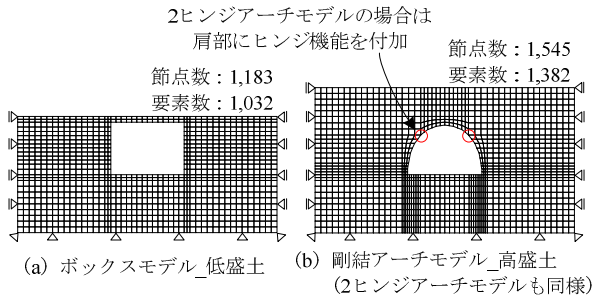


図-4 解析メッシュと境界条件

える。

2ヒンジアーチカルバートモデルでは、変形モードや盛土条件の影響は剛結アーチモデルとほぼ同様である。一方、地震時においては、剛結アーチカルバートと比較して、脚部に大きな曲げモーメントが発生するが、肩部ではほとんどゼロから変化しない。剛結モデルは脚部と肩部で地震力を負担するのに対して、2ヒンジアーチカルバートでは脚部のみで地震力を負担しているといえる。増加量については、剛結アーチモデルと同様、盛土高さによらずほぼ一定である。このことから、剛結および2ヒンジアーチモデルでは、軸力による支持機構により曲げ変形を抑えられるだけでなく、本実験の範囲内においては、地震荷重の影響を小さく見積もることができると考えられる。すなわち、高盛土条件下においても、部材厚を薄く保つことが可能であると考えられる。

#### 4. 遠心模型実験に対する数値解析

##### (1) 数値解析の概要

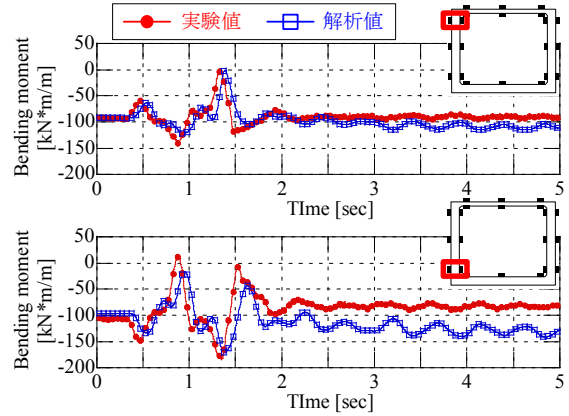
本研究では、弾塑性有限要素解析コードDBLEAVES<sup>7)</sup>を用いて二次元弾塑性有限要素解析を行った。図-4に解析メッシュと境界条件を示す。解析においては、剛結アーチモデルと2ヒンジアーチモデルは同一のメッシュを用いた。ただし、2ヒンジアーチモデルでは肩部にヒンジ機能を有するモデルとしてモデル化した。

##### (2) 地盤および盛土材料のモデル化

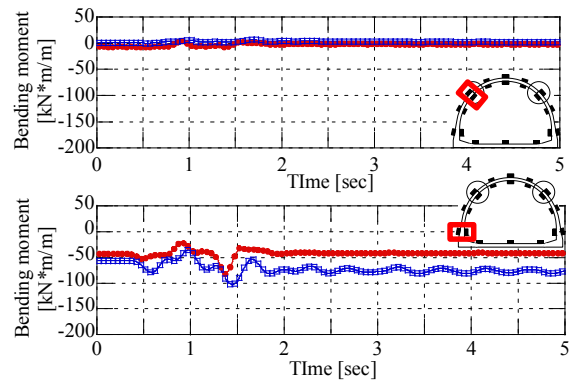
本解析における地盤および盛土の構成式には、subloading  $t_f$  model<sup>8)</sup>を用いた。subloading  $t_f$  modelは中間主応力の影響やせん断剛性の拘束圧依存性を考慮できる上、砂・粘土の区別なく正規圧密状態～過圧密状態を考慮することが可能である。

##### (3) カルバートのモデル化

カルバート覆工に発生する軸力は、繰り返し作用する水平荷重の大きさによって変動し、カルバートの非線形的な挙動は軸力変動の影響を受ける。そこで本研究では覆工部材強度の軸力依存性を考慮したAFD-model<sup>9)</sup>を用い



(a) ボックスモデル\_高盛土



(b) 2ヒンジアーチモデル\_高盛土

図-5 曲げモーメントの時刻歴

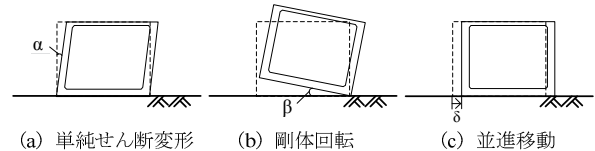


図-6 カルバートの変形モード

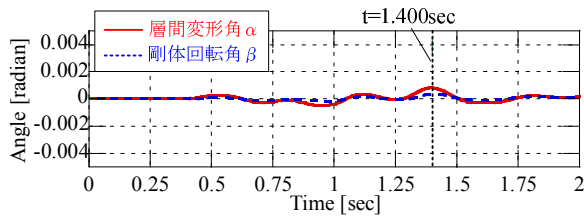
てアーチカルバートのモデル化を行った。また、覆工と地盤の境界部分には、Joint要素を配して境界面での摩擦特性を考慮した。

#### 5. 解析結果

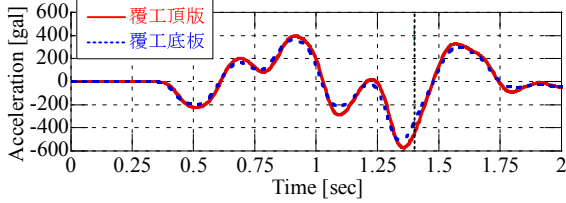
実験と同様、解析における剛結アーチと2ヒンジアーチの結果を比較すると、2ヒンジアーチの方が脚部の負担割合が大きいことを除いて両者は同様の傾向を示した。そこで以下では、主にボックスモデルと2ヒンジアーチモデルの結果に着目して結果を整理する。

##### (1) 遠心模型実験との比較

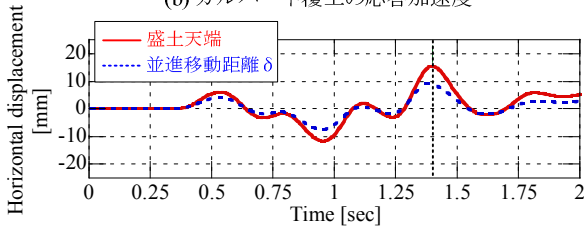
図-5に、高盛土条件下において覆工に発生する曲げモーメントの時刻歴に関して実験値と解析値を示す。両者で若干の位相のずれや2秒後以降の挙動に差異が見られる



(a) 層間変形角と剛体回転角の時刻歴

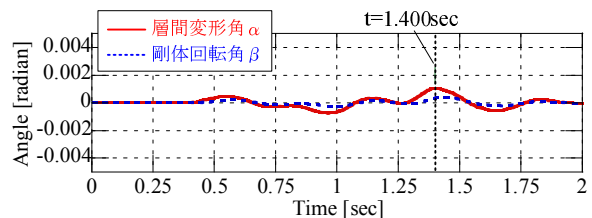


(b) カルバート覆工の応答加速度

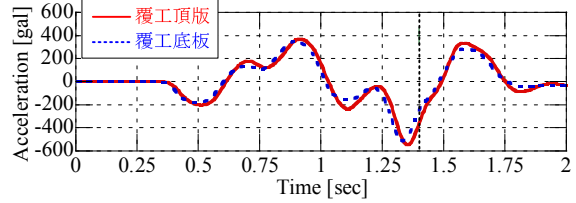


(c) 盛土天端とカルバート覆工の水平変位

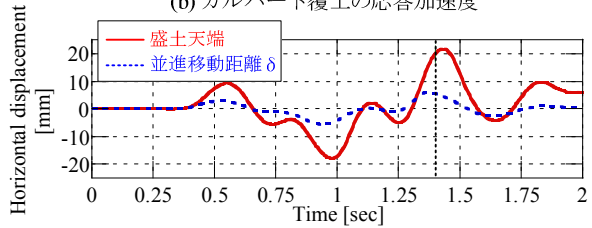
図-7 ボックスモデルの変形モード (低盛土条件)



(a) 層間変形角と剛体回転角の時刻歴



(b) カルバート覆工の応答加速度



(c) 盛土天端とカルバート覆工の水平変位

図-8 ボックスモデルの変形モード (高盛土条件)

が、2ヒンジアーチモデルの肩部でほとんど曲げモーメントが発生しない点や、ボックスモデルにおいて大きな曲げモーメントが発生している点など、本解析は実験のある程度の精度で表現していることが確認できる。

## (2) 盛土内におけるカルバートの挙動

一般に地中構造物の変形挙動は、地盤と構造物の剛性差および構造物の重量に起因する<sup>10)</sup>。そこで研究では、盛土内におけるカルバートの挙動を図-6に示す(a)単純せん断変形、(b)剛体回転、(c)並進移動に分解して考える<sup>2)</sup>。以下ではそれぞれの変形モードの指標である層間変形角  $\alpha$ 、剛体回転角  $\beta$ 、並進移動距離  $\delta$  を用いて本解析における盛土内におけるカルバートの挙動について説明する。

### a) ボックスモデル

図-7、図-8 にそれぞれ低盛土条件と高盛土条件における(a)層間変形角  $\alpha$  と剛体回転角  $\beta$ 、(b)頂版および底版の応答加速度、(c)盛土天端の水平変位と並進移動距離  $\delta$  の時刻歴を示す。図中には層間変形角  $\alpha$  の絶対値が最大となる時刻を点線で示している。低盛土条件では、層間変形角  $\alpha$ 、剛体回転角  $\beta$  および盛土天端、並進移動距離  $\delta$  については波形形状がよく一致しており、ほぼ同時刻にピークを示している。また、応答加速度についてはそれらよりやや手前でピークを示している。すなわち、まずボックスカルバートの慣性力が、続けて盛土の振動変位が覆工に作用し、その結果として同時刻にせん断変形、剛体回転、並進移動が発生している。これはボックスカルバートと盛土が一体となって挙動していることを示している。また、層間変形角  $\alpha$ 、剛体回転角  $\beta$  とともに

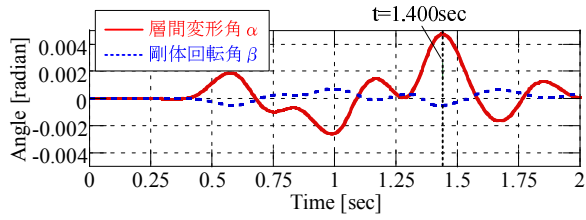
並進移動距離  $\delta$  に対して小さいことから、ボックスカルバートでは部材が厚く重量があるため、並進移動が卓越していると考えられる。

一方高盛土条件では、低盛土条件に比べてややピーク時の層間変形角  $\alpha$  が大きくなっていることがわかる。これは同一の部材厚で土被りが大きくなったため、上載荷重によるせん断変形の影響が大きくなったものと考えられる。さらに、並進移動距離  $\delta$  は小さくなっており、並進移動は上載荷重によって抑えられる結果となった。

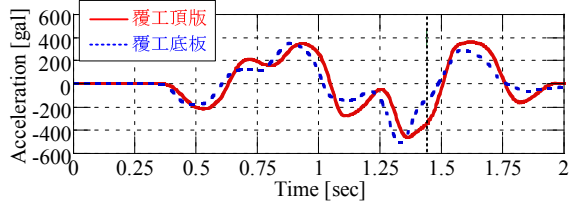
また、(1)覆工の応答加速度、(2)層間変形角  $\alpha$ 、剛体回転角  $\beta$ 、並進移動距離  $\delta$  といった変形モードを示す指標、(3)盛土の振動変位の順にピークを示している。すなわち、一般に地震時において地下構造物に生じる応力は地盤の変位が支配的な影響を及ぼすものと考えられているが、カルバート盛土では、地上構造物と同様に慣性力の影響が支配的となる場合があることを示唆している。

### b) 2ヒンジアーチモデル

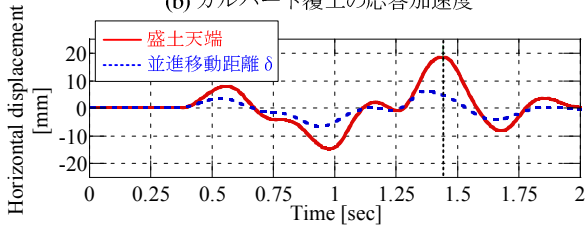
図-9、図-10に低盛土条件と高盛土条件における各解析結果の時刻歴を示す。ボックスモデルに比べて層間変形角  $\alpha$  が大きくなっており、部材厚が小さいためせん断変形が卓越することがわかる。また、カルバートの頂板と底版の応答加速度を見ると、高盛土条件の方が両者の差が小さくなっていることがわかる。これは、土被りが大きくなると、上載荷重の影響によりヒンジ機能が抑制されたためであると考えられる。ちなみに、剛結アーチモデルの場合では、土被りによらずカルバート頂板と底版の応答加速度はほとんど等しい結果となった。並進移動距離  $\delta$  はボックスモデルより小さくなっており、アー



(a) 層間変形角と剛体回転角の時刻歴

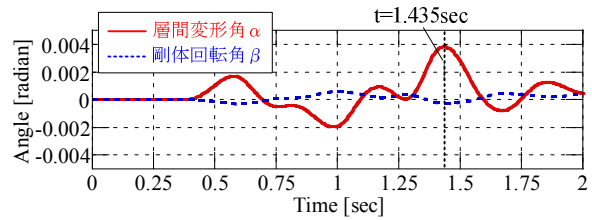


(b) カルバート覆工の応答加速度

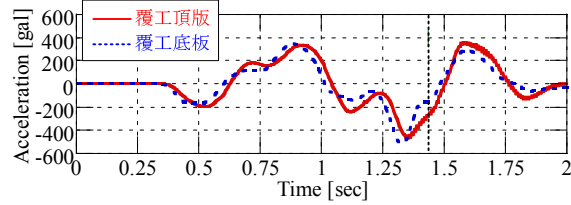


(c) 盛土天端とカルバート覆工の水平変位

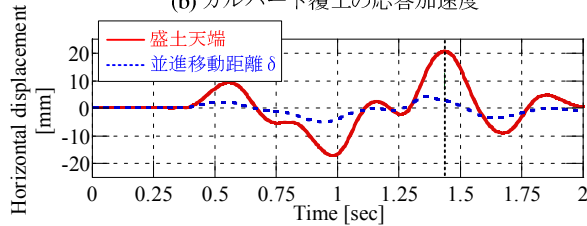
図-9 2ヒンジアーチモデルの変形モード (低盛土条件)



(a) 層間変形角と剛体回転角の時刻歴



(b) カルバート覆工の応答加速度



(c) 盛土天端とカルバート覆工の水平変位

図-10 2ヒンジアーチモデルの変形モード (高盛土条件)

チカルバートは部材が薄く重量が小さいことから、作用する慣性力も小さくなることを反映している。高盛土条件になると並進移動距離 $\delta$ が小さくなる点はボックスモデルと同様であった。

## 6. まとめ

本研究により得られた知見は以下の通りである。

- ① ボックスモデルにおいては、盛土高さが初期状態並びに地震時の覆工の変形にも影響を与えたのに対し、アーチモデルでは初期状態における断面力のみに影響を与える。
- ② ボックスモデルでは、高盛土条件になると上載荷重により並進移動は抑えられるが、部材厚が厚くなると慣性力の影響が支配的になり、地盤と一体となって挙動するという前提が成り立たなくなる可能性がある。
- ③ 2ヒンジアーチモデルでは、変形モードや盛土条件の影響は剛結アーチモデルと同様である。しかし地震時には、肩部の曲げモーメントが発生しない分、脚部の負担割合が大きくなる。そのため、ヒンジ式のアーチカルバートでは、ヒンジ位置や全体への影響を十分に検討する必要がある。

### 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路土工 カルバート工指針（平成21年度版），丸善出版，2010。

- 2) 山本正彦，谷本俊輔，佐々木哲也：大地震時におけるボックスカルバートの動的挙動に関する遠心力模型実験，第56回地盤工学シンポジウム，pp.37-44, 2011。
- 3) モジュラーチ工法協会：Modularch技術マニュアル，2008。
- 4) 財団法人先端建設技術センター：テクスパン工法設計施工マニュアル(案)，1998。
- 5) 澤村康生，岸田 潔，木村 亮，小高 武：多ユニットアーチカルバート盛土の動的挙動に関する遠心模型実験，地盤工学ジャーナル，Vol.6, No.2, pp.201-212, 2011。
- 6) 清田三四郎，森野達也，米沢豊司，丸山 修，小島謙一，坂本寛章：パイルスラブ式盛土の模型振動台実験 - 盛土補強材の効果一，土木学会第65回年次学術講演会，pp.729-730, 2010。
- 7) Ye, B., Ye, G. L., Zhang, F. and Yashima, A.: Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand, Soils and Foundations, Vol.47, No.3, pp.547-558, 2007。
- 8) Nakai, T. and Hinokio, M.: A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, Soils and Foundations, Vol.44, No.2, pp.53-70, 2004。
- 9) Zhang, F. and Kimura, M.: Numerical prediction of the dynamic behavior of an RC group-pile foundation, Soils and Foundations, Vol.42, No.3, pp.72-92, 2002。
- 10) 大塚久哲，新井雅之，岩上憲一，高野直道，竹内幹雄，橘善規，節婦光一，村井和彦，楊 光遠：地中・基礎構造の耐震設計，九州大学出版会，2001。