

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

澤村 康生¹, 岸田 潔², 木村 亮³, 小高 武⁴

1 京都大学大学院

2 京都大学大学院・工学研究科・都市社会工学専攻

3 京都大学大学院・工学研究科・社会基盤工学専攻

4 ジオスター（株）・技術部

概 要

多ユニットアーチカルバート盛土は、盛土内に複数のカルバート構造が挿入された盛土で、地震時における盛土地盤とカルバート構造の相互作用を検証し、耐震性について検討する必要がある。耐震性に関するこれまでの研究は、数値解析を用いたものが主であり、実験による検討は行われてこなかった。本研究では、連続するアーチカルバートの設置間隔（ユニット間隔）に注目し、地震時にユニット間隔がアーチカルバートおよび周辺地盤に与える影響を明らかにすることを目的として、動的遠心模型実験を実施した。実験結果より、ユニット間隔がアーチカルバートの高さの 1/2 までであれば、アーチカルバートや周辺地盤の挙動が大きく変化することはないことが確認された。

キーワード：アーチカルバート、盛土、ユニット間隔、動的遠心模型実験

1. はじめに

幹線ネットワークを築く重要な路線として位置付けられている高規格道路は、その機能上の理由から、高架橋や盛土により他の道路および鉄道などと立体交差させ、それぞれの交通機能を確保する必要がある。しかしながら、高架橋では建設コストが高く、盛土では地域を分断する、という問題がある。このような問題を解決するため、プレキャストアーチカルバートを道路延長方向に連続して設置する、多ユニットアーチカルバート盛土（写真1）が提案されている。プレキャストアーチカルバートとは、カルバートの主要部材をあらかじめ工場で製造し、現場で組み立てて施工するカルバート構造で、優れた施工性と品質管理の容易さから、近年広く利用されているプレキャスト製品である。多ユニットアーチカルバート盛土は、盛土内に複数のプレキャストアーチカルバートを含んでいるため、その構造の形状が橋梁構造に近く、高架橋に近い開放感を有している。また、連続的なアーチ形状が景観に調和しやすいといった特徴がある。さらに、切土などによる建設発生土の利用が可能であり、高架橋に比べて経済的である。このような観点から、今後その需要は増加していくと推測される。

本研究では、盛土内に設置されたアーチカルバートを対象としているが、これまで盛土の耐震性に関しては、地震時被害の復旧が容易であることなどを理由にあまり検討がされてこなかった。しかしながら、2004年の新潟県中越地震を初めとして道路盛土においても多数の地震時被害

が発生したことなどから、道路盛土においても耐震性向上の必要性が提示されている¹⁾²⁾³⁾。また、カルバート構造に着目しても、これまで多数建設されてきた従来型のカルバートでは、長年の実績により特に地震の影響を考慮しなくても過去の地震において目立った損傷が生じなかったことを背景に、設計においては常時の荷重のみを対象とするのが一般的であった⁴⁾。しかし、カルバート構造は道路ネットワークを構成する道路盛土において非常に重要な位置を占めており、道路盛土の耐震性の向上という観点からもカルバート構造の耐震性を把握することは重要である。特に、本研究で対象とする多ユニットアーチカルバート盛土のように、複数のカルバートを近接して設置する場合や、本体断面にヒンジ構造を有するプレキャスト製品で従来型のカルバートの適用範囲を超えるような大規模な内空断面が可能となるカルバートなどについては、従来型のカルバートとの相違を踏まえた上で、耐震性も含めて適



写真1 多ユニットアーチカルバート盛土（写真の現場は盛土材として軽量盛土が使用されているため通常の盛土材を用いた時よりユニット間隔が狭くなっている）

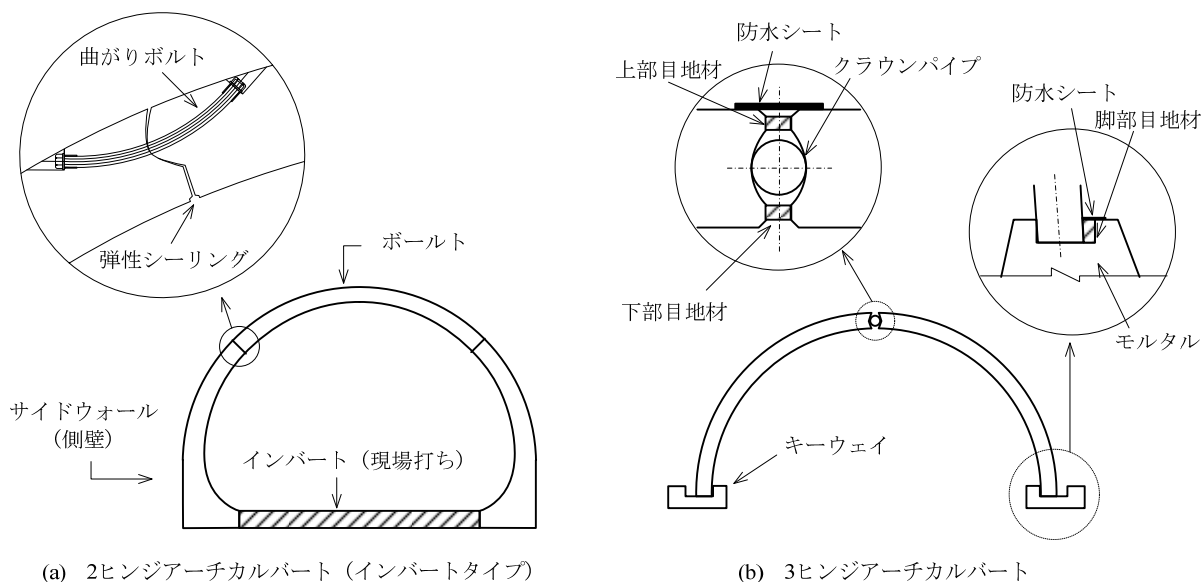


図1 プレキャストアーチカルバートの構造

切かつ総合的な検討を加えて設計を行う必要がある。

現在用いられている多分割式のプレキャストアーチカルバートには、多ユニットアーチカルバート盛土で用いられる2ヒンジのアーチカルバートと、3ヒンジのアーチカルバートがある。図1にそれぞれの構造を示す。2ヒンジアーチカルバートは、アーチの左右両肩部で分割され、施工時にはヒンジ機能を持つ曲がりボルトで一体化される。基礎形式にはインバートを打設しない形式もあるが、多ユニットアーチカルバート盛土で用いられる場合には現場でインバートを打設し、サイドウォール部を一体化させる。一方3ヒンジアーチカルバートは、クラウン部と脚部に分割されており、天端はクラウンパイプにより結合、脚部はキーウェイと呼ばれる基礎に挿入されており共にヒンジ構造となっている。

上述したように、断面にヒンジ構造を有するプレキャストのアーチカルバートにおいては、耐震性の検討は必要不可欠なものであり、これまでにそれぞれのアーチカルバートについて研究がなされてきた。3ヒンジのアーチカルバートの耐震性に関しては、低土被り・高土被り条件下における水平および鉛直方向振動に対する検討⁵⁾や、横断方向および縦断方向の振動特性について検討が行われている⁶⁾。また、実施工では盛土部分に補強土工法を用いることを考慮して、3ヒンジアーチカルバートだけでなく補強土壁部分についても実物を再現した振動実験も行われている⁷⁾⁸⁾。

本研究対象である多ユニットアーチカルバート盛土で用いられる2ヒンジアーチカルバートについても、これまでに埋設過程を考慮した覆工の力学挙動⁹⁾¹⁰⁾、鉛直土圧の軽減方法¹¹⁾、基礎処理幅の検討¹²⁾など、さまざまな研究が行われてきた。耐震性に関しても、兵庫県南部地震レベルの地盤変位に対してその安定性を保つことが確認されている¹³⁾¹⁴⁾。しかしながら、盛土内に複数のアーチカルバートを連続して設置する同構造の耐震性に対する検討は、

数値解析による検討¹⁵⁾がわずかにある程度であり、十分であるとは言い難い。

同構造の耐震性に最も影響を与える要因は、盛土内に連続して設置されるアーチカルバート同士の設置間隔（以後、ユニット間隔）であると考えられる。ユニット間隔が狭い場合には、ユニット間の地盤の体積が小さくなることで隣接するアーチカルバート同士の相互作用が生じ、アーチカルバートや周辺地盤の応答が増幅する可能性がある。

そこで本研究では、アーチカルバートのユニット間隔に注目し、地震時にユニット間隔がアーチカルバートおよび周辺地盤に与える影響を明らかにすることを目的に、動的遠心模型実験を実施した。ただし、同構造では、地震時土圧の軽減や締め固めが不要で施工が容易であることから、盛土材として気泡混合軽量土などが用いられることがあり、軽量盛土を用いた場合には、上記の理由により通常の盛土材を用いた場合と比較してユニット間隔を狭めることが可能であると考えられる。写真1の現場では、盛土材として軽量盛土を用いているため、ユニット間隔が狭くなっている。しかし、本研究ではユニット間隔の違いによる影響を把握するため、盛土材として通常の盛土材を用いた場合について検討を行った。また、以後アーチカルバートとは図1(a)に示す2ヒンジのアーチカルバートのことを指す。

2. 遠心模型実験

2.1 実験対象

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50 G場において振動実験を行った。本研究対象である多ユニットアーチカルバート盛土では、上述したように盛土材として軽量盛土を用いる場合があるが、本実験ではユニット間隔の違いによる基本

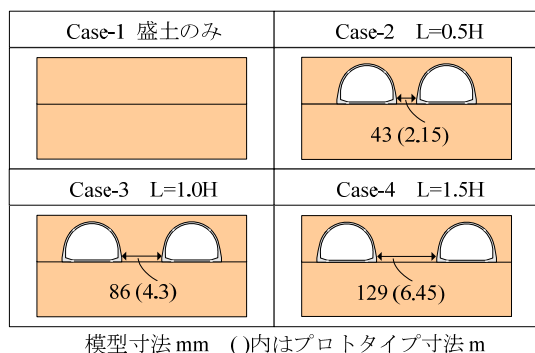
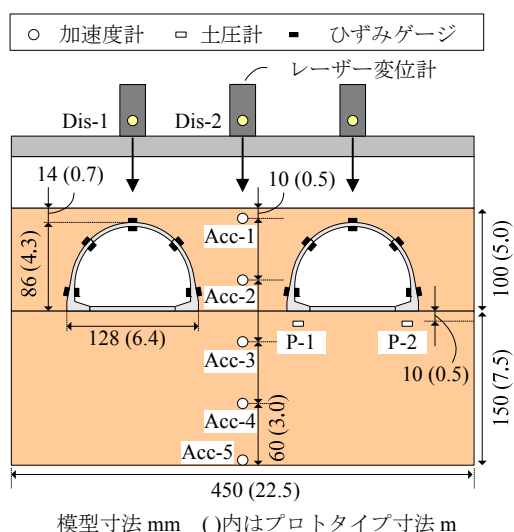


図4 実験ケース

動的挙動の解明を目的としているため、実験対象は7.5 mの砂質地盤上に通常の盛土材を用いて5.0 mの盛土工が施工された場合とした。また、本来は複数のプレキャストアーチカルバートが連続して設置されている場合を対象としているが、実験土槽の制約から、実験では2ユニット区間のみをモデル化した。図2に実験模型および計測器の配置を示す。本実験における計測項目は、ユニット中央の地盤の応答加速度、地表面の変位、アーチカルバート下部地盤の鉛直応力、アーチカルバートに発生するひずみとした。

2.2 アーチカルバート

本研究で対象とするアーチカルバートは、土被り0.7 m、高さ $H=4.3$ m、幅 $D=6.4$ mとした。遠心力50G場の実験において力学的な相似側を満足させるためには、模型寸法は実物の1/50、模型の剛性は実物と等しくする必要がある。そこで、アーチカルバート模型は形状、部材厚共に実物の1/50スケールとした。図3にアーチカルバート模型の寸法を示す。実際のアーチカルバートは、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、模型はモルタルのみを用いて作製した。模型の作製に当たっては、既往の研究¹⁰⁾におけるモルタルの

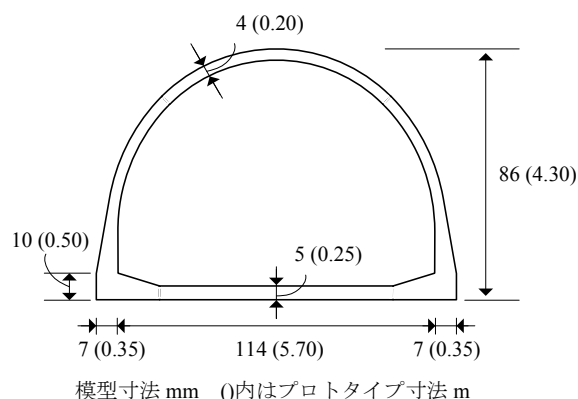


表1 アーチカルバート模型の材料定数

ヤング率 E_e [kN/m ²]	2.07×10^7
圧縮強度 f_c [kN/m ²]	4.92×10^4
曲げ強度 f_b [kN/m ²]	1.17×10^4
引張り強度 f_t [kN/m ²]	5.76×10^3
単位体積重量 γ [kN/m ³]	19.35
ポアソン比 ν	0.18

表2 豊浦砂の物性値

比重 G_s	2.65
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

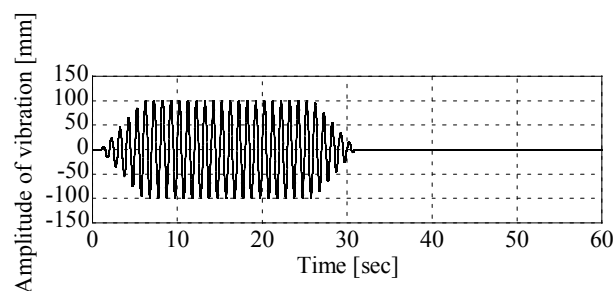


図5 入力波形

配合と作製方法を参考に、珪砂6号：早強セメント：水＝2：1：0.65の割合のモルタルで作製した。打設後は28日間水中養生し、その後気中と60℃の乾燥炉でそれぞれ24時間乾燥させて使用した。表1にアーチカルバートの材料定数を示す。本実験で使用した模型の圧縮強度は、技術マニュアル¹⁷⁾における設計基準強度 4.0×10^4 kN/m²をやや上回る値であることから、模型は実際のアーチカルバートとほぼ等しい曲げ剛性、軸剛性を有しているといえる。ただし、実際のプレキャストアーチカルバートは、分割された部材を現場で接合するものであり、継ぎ手部は曲がりボルトにより結合されている。したがって継ぎ手部は剛結とヒ



(a) 打設直後



(b) 脱型直前



(c) スポンジテープを貼付した模型



(d) 奥行き方向には3分割



(e) 設置の様子



(f) 実験時の様子

写真2 アーチカルバート模型

ンジの中間的な構造である。しかしながら、実物の 1/50 の模型を用いる本実験において、肩部の継ぎ手部分を正確に再現することは困難であることから、実験においてアーチカルバートは肩部に継ぎ手構造を有さない一体型の模型として作製した。しかし、本実験ではユニット間隔の違いによる動的挙動の把握を目的としていることや、アーチの構造上、肩部では曲げモーメントが発生しにくいことなどから、一体型の模型を用いても一定の議論は可能と考える。本実験では平面ひずみ条件下で実験を行っているため、奥行き方向の土槽壁面との摩擦を軽減することが重要である。そこで、既往の研究¹⁸⁾において模型と壁面との摩擦を低減するために用いられた方法を参考にして、アーチカルバート模型は奥行き方向に3分割し、模型と壁面、模型と模型の間にはスポンジテープを薄く配することで摩擦の軽減を図った。なお、加振後に地表面を観察したところ、3分割した模型の境目で地表面形状が不連続になる等の不具合は確認されず、3分割した模型はいずれも同様のモードで挙動したと考えられる。また本実験では、アーチカルバートのひずみを計測し、アーチカルバートに作用する軸力と曲げモーメントを計測している。ひずみゲージを貼付するに当たっては、壁面の摩擦を考慮して、3分割した内、真ん中の模型にひずみゲージを貼付した。貼付位置はアーチカルバートの両脚部、両肩部、ボールド頂部とした。写真2にアーチカルバート模型を示す。

2.3 模型地盤

模型地盤には、砂質地盤、盛土共に乾燥豊浦砂を用いて気中落下法により相対密度が 85%の密詰めとなるように作製した。豊浦砂の物性値を表2に示す。密な地盤を作製した理由としては、技術マニュアル¹⁷⁾において、アーチカ

ルバートを直接設置する場合は N 値 15 以上の地盤、盛土部分の締固め度が 92 %以上としているためである。

2.4 実験ケース

本実験では、アーチカルバートのユニット間隔が同構造の耐震性に与える影響を明らかにすることを目的としている。そこで、ユニット間隔 L をパラメータとして、アーチカルバートの高さ H を基準に L を $0.5H$, $1.0H$, $1.5H$ とした3ケースで実験を行った。また、比較のためにアーチカルバートを含まない盛土のみの場合でも実験を行った。図4に実験ケースを示す。

2.5 入力波

入力地震動については、盛土やカルバートの被害が顕著であった兵庫県南部地震や新潟県中越地震などの内陸型地震を想定し、入力波形の周波数を決定した。方法としては、兵庫県南部地震(1995年)でのJR西日本鷹取駅構内地盤で観測された地震波に対してフーリエ変換を行い、周波数 1 Hz 付近で卓越するという結果を得た。そこで本実験においては、入力波はプロトタイプ 1 Hz のテーパ付き正弦波 30 波とし、振動台の変位を制御することで与えた。図5に入力波を示す。

なお、以後に示す結果はすべてプロトタイプ表示とする。

3. 実験結果

3.1 地盤の応答加速度

本実験では、ユニット中央における地盤の応答加速度を計測した。図6に、盛土のみの Case-1 における(a)地表面付近(Acc-1), (b)アーチカルバート脚部付近(Acc-2), (c)基

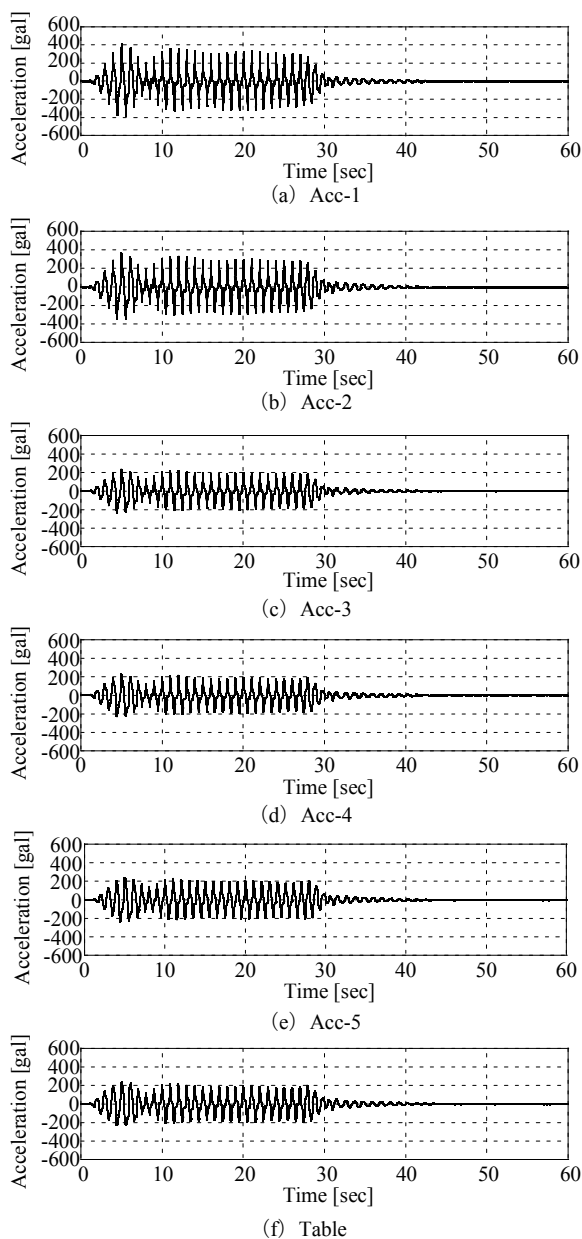


図6 応答加速度の時刻歴 (Case-1)

礎地盤上部(Acc-3), (d)基礎地盤中央部(Acc-4), (e)土槽底部(Acc-5), (f)振動台(Table), のそれぞれの応答加速度の時刻歴を示す。振動台で計測された最大応答加速度は 200 gal 程度であり, 土槽底部においてもほぼ振動台と同様の値を示す。その後, 地表面に近づくにつれて次第に加速度が増幅していき, 地表面付近 (Acc-1) の最大応答加速度は 400 gal 程度にまで増幅していることが確認できる。この傾向は, アーチカルバートを含む Case-2~4 でも同様であった。Acc-1 で計測された最大加速度は, Case-1~4 でそれぞれ 407, 415, 415, 410 gal であった。最大加速度については, ケース間で多少の差はあるものの, 応答加速度の時刻歴ではアーチカルバートの有無やユニット間隔の違いによる明確な差は見られなかったため, 周波数による検討を行った。図 7 に, 盛土のみの Case-1 とユニット間隔 $L=0.5H$ の Case-2 における地表面付近 (Acc-1) と振動台の応答加速

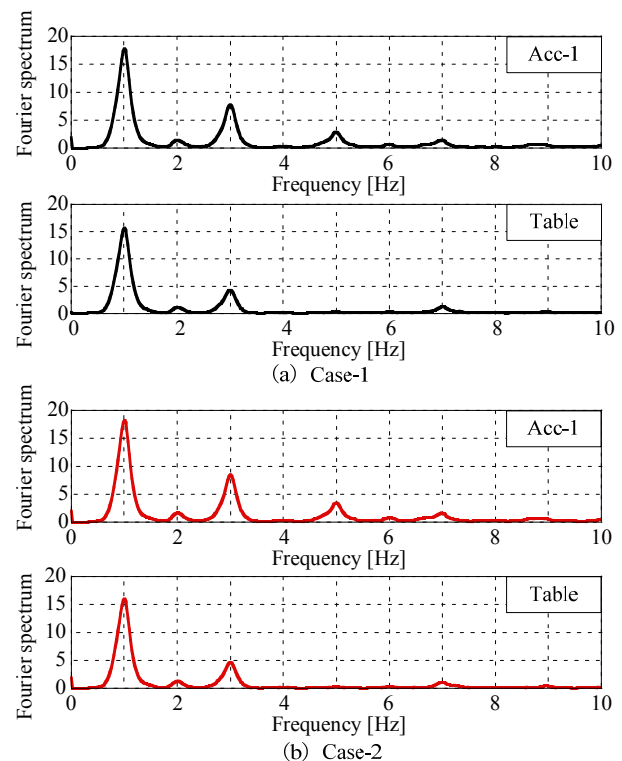


図7 ユニット中央の応答加速度のフーリエ・スペクトル

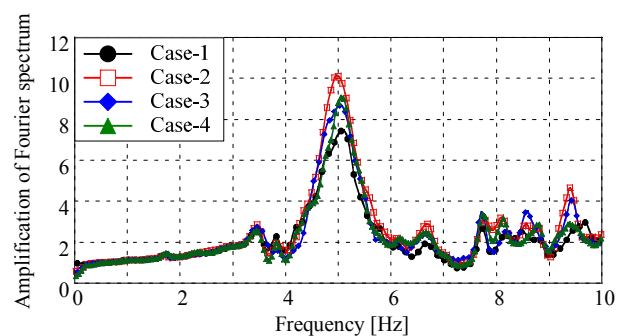
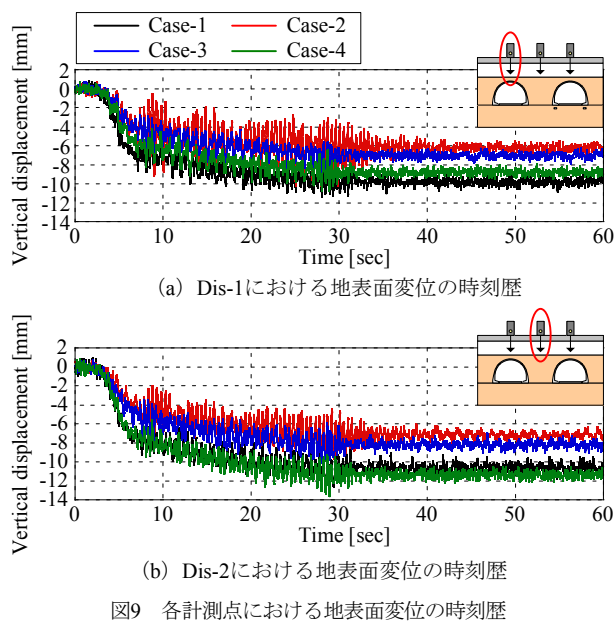


図8 フーリエ・スペクトルの増幅率

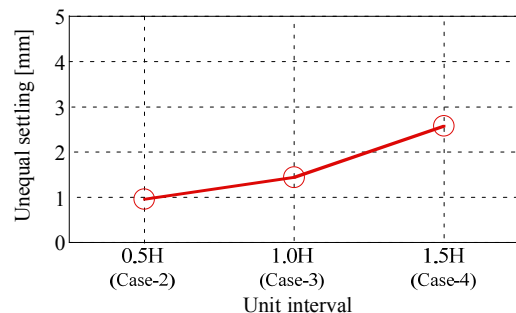
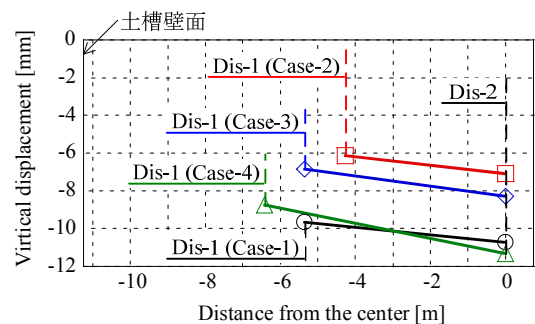
度のフーリエ・スペクトルをそれぞれ示す。図より, Case-1,2 の両方で入力した 1 Hz 付近の周波数が卓越していることが確認できる。振動台と Acc-1 のフーリエ・スペクトルを比較すると, 振動台に比べて Acc-1 の方が, 1 Hz 付近を始め複数の周波数でフーリエ・スペクトルの値が大きくなっていることがわかる。これは, 地震波が地表面付近へと伝わる過程で, 加速度の絶対値だけでなく, 周波数成分も増幅しているためである。そこで, 周波数成分の増幅を評価するために, 図 8 に Acc-1 のフーリエ・スペクトルを振動台のフーリエ・スペクトルで除したフーリエ・スペクトルの増幅率を示す。ここで増幅率は, 土槽底部から入力した地震波が地表面へと伝わる過程で, どの周波数帯の波が顕著に増幅しているかを表している。これにより, 構造体として特に注意すべき周波数帯を知ることができる。盛土のみの Case-1 をみると, 5Hz 付近の増幅が顕著であることが確認できる。これより, 本実験における盛土



の固有周期は 5Hz 付近であると考えられる。アーチカルバートを含む Case-2~4 では、盛土のみの Case-1 に比べて、5Hz 付近の増幅がさらに大きくなることがわかる。特に、ユニット間隔の最も狭い Case-2 では盛土のみの Case-1 と比較して 4 割程度大きくなることが確認できる。このことから、アーチカルバートを含む場合は、固有周期は盛土のみの場合と変わらないが、固有周期付近の加速度増幅をより強めることが考えられる。

3.2 地表面変位

図 9 に、左側のアーチカルバート頂部 (Dis-1) とユニット中央 (Dis-2) における地表面変位の時刻歴を示す。アーチカルバートを含まない Case-1 については、Case-3 ($L=1.00H$) と同様の位置で計測を行っている。まずアーチカルバートを含む Case-2~4 に着目すると、ユニット間隔が狭くなるほどユニット中央の地表面変位が小さくなることが確認できる。これは、ユニット間隔が狭い場合には、ユニット間の盛土部分の体積が小さくなるために、下部の地盤が負担する重量が小さくなったことで、加振中のせん断に伴う圧縮量が小さくなったためであると考えられる。また、ユニット間隔が狭い場合には、アーチカルバートと地盤の摩擦により地盤の滑り込み沈下が抑制されることも原因として考えられる。一方、アーチカルバート頂部の地表面変位においても、ユニット間隔が狭くなるほど変位量が小さくなることがわかる。これは、ユニット中央の地表面変位が小さくなったことで、アーチカルバート上部の地盤がアーチカルバートの形状に沿って変位する量が小さくなったためであると考えられる。ただし本実験では、土槽の制約上 2 ユニット区間のみをモデル化しているため、ユニット間隔を狭めた場合にはアーチカルバートと土槽壁面との距離は逆に広がる。上述した盛土部分の体積に関する考察に基づくと、アーチカルバートと土槽壁



面の間の地盤においては、ユニット間隔が狭いケースほど地表面変位が大きくなると考えられるが、実験後の地表面の観察によると、いずれのケースも地盤の圧縮による沈下に加えて土槽壁面の近傍で地盤が壁面から離れる際に発生する主働楔による沈下も確認された。アーチカルバート頂部の沈下については、ユニット中央の沈下量だけでなくアーチカルバートと土槽壁面の間の盛土部分における沈下量も関係していると考えられるが、本実験においてはユニット中央の沈下量に大きく影響されるような結果となった。つぎに、アーチカルバートを含む Case-2~4 とアーチカルバートを含まない Case-1 について比較すると、ユニット中央においては、Case-1 と Case-4 でほぼ等しい沈下量が生じており、ユニット間隔が最も広い Case-4 では隣接するアーチカルバートの影響が小さくなったと考えられる。これより、ユニット間隔を一定以上離すと、それぞれのアーチカルバートは単体で設置された場合に近づくことが予想される。図 10 には、各計測点での最終地表面変位を示す。横軸は、土槽壁面からユニット中央までにおけるそれぞれの計測位置を示している。また図 11 には Dis-1 と Dis-2 における不同沈下量を示す。これらより、ユニット間隔を狭くするとそれぞれの計測点での沈下量が小さくなるだけでなく、相対的に不同沈下量も小さくなることがわかる。

3.3 アーチカルバート下部地盤の鉛直土圧

図 12 に、向かって右側に設置したアーチカルバートの下部地盤に発生した鉛直土圧比の時刻歴を示す。本論文において鉛直土圧比とは、各ケースにおける計測値を初期値

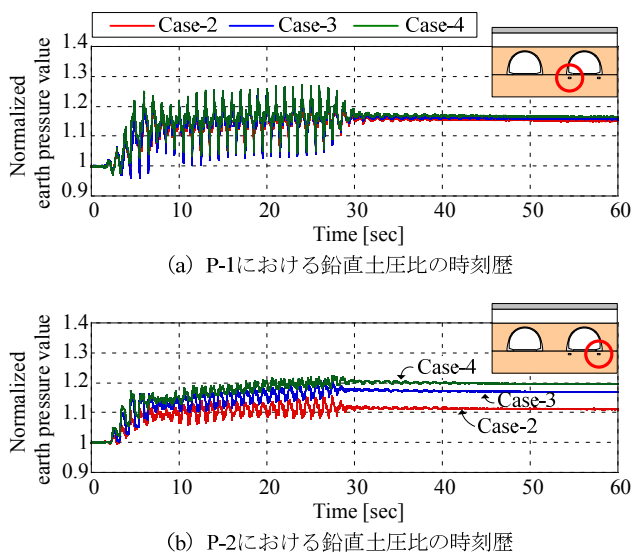


図12 アーチカルバート下部における鉛直土圧比の時刻歴

で正規化した値と定義している。ここで、各ケースにおける初期値はCase-2~4のそれぞれでP-1が184 kPa, 216 kPa, 180 kPa, P-2が186 kPa, 171 kPa, 143 kPaであった。図12より、加振中は繰り返しのせん断によるアーチカルバートおよび周辺地盤の沈下に伴って、鉛直土圧比が増加していき、加振後は初期よりも大きな鉛直土圧が発生することが確認できる。P-1とP-2を比較すると、P-1ではいずれのケースも同様の挙動を示すのに対して、P-2ではユニット間隔が広いケースの方が、加振中の鉛直土圧比の増加が顕著であることがわかる。これは、P-2ではユニット間隔による影響に加えて、前節でも述べたように、土槽壁面の近傍において地盤が壁面から離れる際に生じる主働楔による沈下の影響を受け易いためであると考えられる。そこで、主働楔による地盤の沈下が比較的小さく、ユニット間隔による影響が大きいと考えられる加振直後から10秒後までに着目し、それぞれの最大鉛直土圧比を図13に示す。ここで、次節のアーチカルバートに発生する断面力とも関連するが、P-1において鉛直土圧比が最大となる時刻におけるアーチカルバートの変形モードは、曲げモーメントの値から図14に示すようなモードである。アーチカルバートのような地中構造物は周辺の地盤に追従するように変形するため、アーチカルバートは地盤からせん断力を受け、右に傾く際には左脚部、左に傾く際には右脚部の下部地盤においてそれぞれ鉛直土圧が増加する。図13より、P-1とP-2の両方において、ユニット間隔が広くなるにつれて最大鉛直土圧比が大きくなることが確認できる。これは、アーチカルバートは周辺地盤に追従するように挙動すると考えられるため、ユニット間隔が狭いケースほどアーチカルバートを含む周辺の地盤の剛性が相対的に増加し、せん断力によるアーチカルバートと周辺地盤の変形が抑制されるためであると考えられる。またこの理由により、アーチカルバート下部地盤の鉛直土圧に関しても、ユニット間隔を一定以上離すと、それぞれのアーチカルバートは単

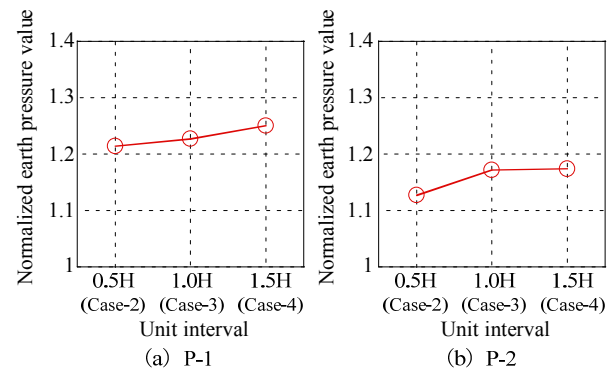


図13 加振直後から10秒後までにおける鉛直土圧比の最大値

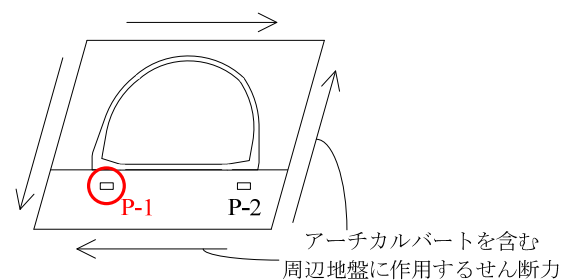


図14 P-1の鉛直土圧比が最大となる時の変形モード

体で設置された場合に近づくことが予想される。

3.1 アーチカルバートに発生する断面力

図15に、初期状態において左右のアーチカルバートに発生する軸力と曲げモーメントの分布をそれぞれ示す。軸力は圧縮を正、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15の軸力分布より、初期状態においては、脚部で土被りを支持する形で軸力が分布しており、軸力の支持機構を有するアーチカルバートの特徴をよく表していることがわかる。また曲げモーメント分布では、脚部で大きな曲げモーメントが発生している一方で、本来はプレキャスト部材の結合位置となる肩部においてほとんど曲げモーメントが発生していないことが確認できる。次に向かって左側に設置したアーチカルバートに注目し、それぞれの位置における軸力と曲げモーメントの時刻歴を示したのが図16,17である。図16より、加振後は左側の脚部においてアーチカルバートおよび周辺地盤の沈下に伴って若干軸力が増加するが、他の位置においては概ね初期状態と等しい軸力となっていることがわかる。曲げモーメントについても、同位置において軸力と同様、アーチカルバートおよび周辺地盤の沈下に伴う増加が見られた。曲げモーメントについてケース間を比較すると、Case-2の左側脚部のみ初期状態から他のケースと異なるが、加振開始からの挙動は左側脚部も含めていずれの位置においてもケース間で同様の傾向を示すことがわかる。また、両方の脚部以外の位置では大きな曲げモーメントが発生しておらず、同構造の耐震性を検討する際には脚部が特

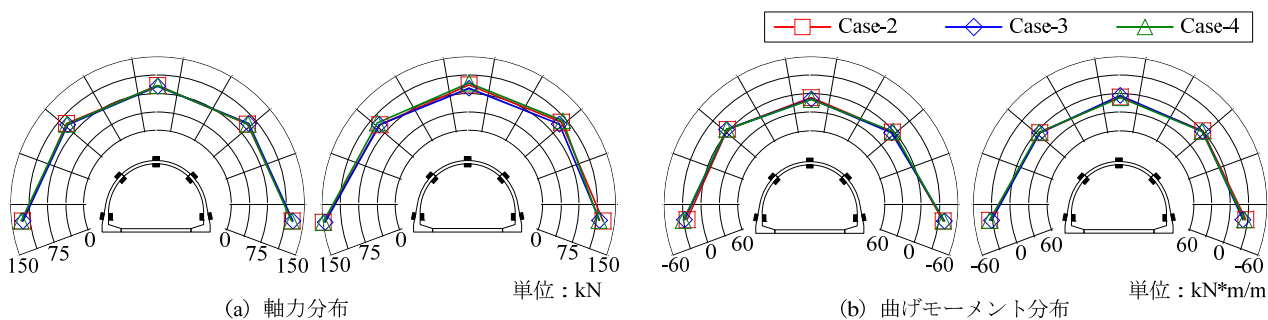


図15 初期状態における断面力分布

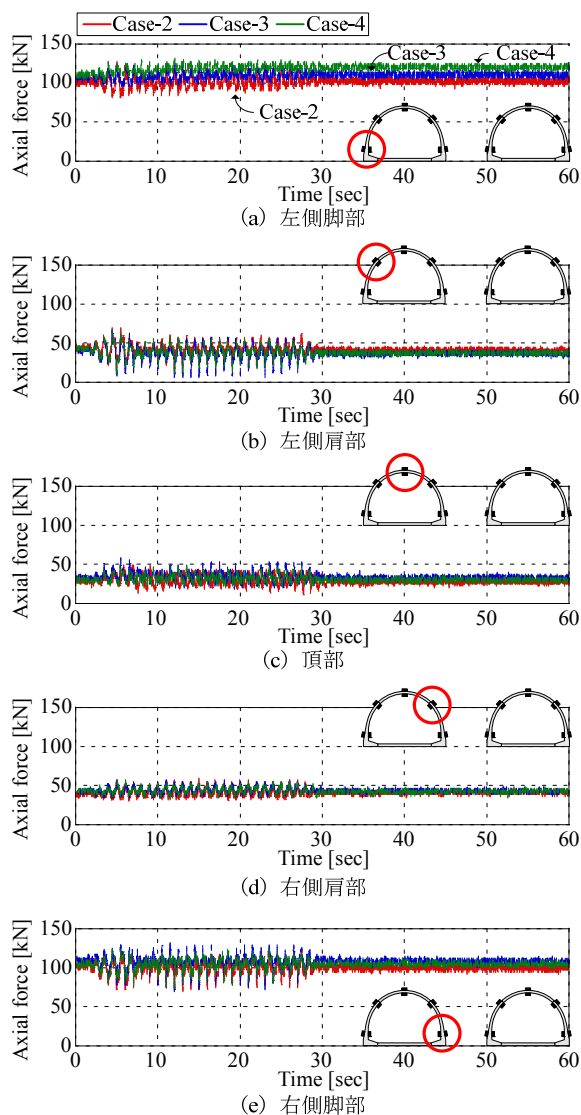


図16 アーチカルバートの各位置における軸力

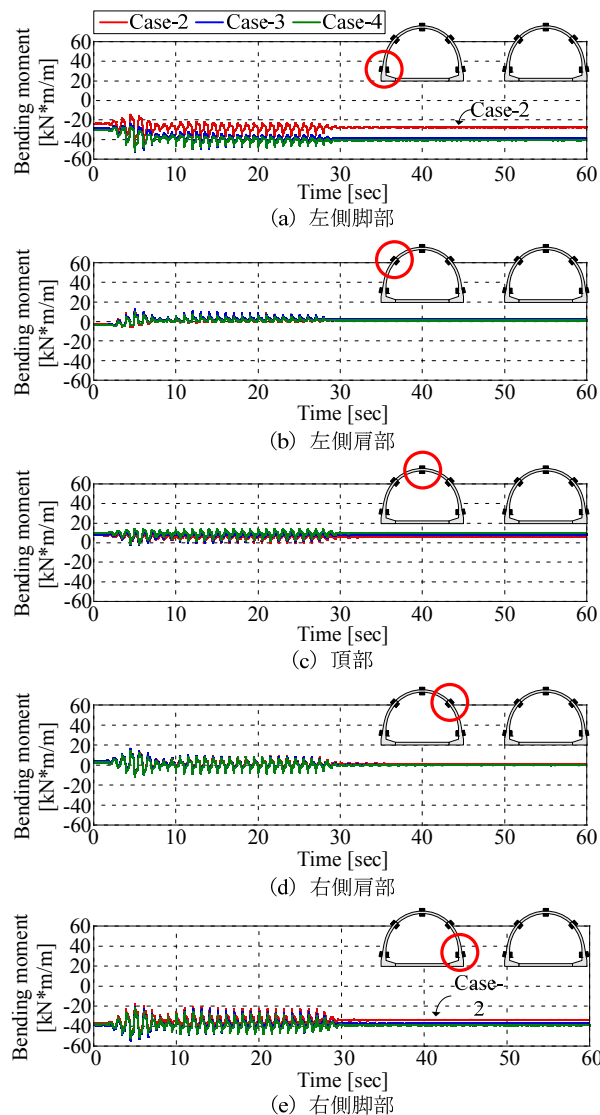


図17 アーチカルバートの各位置における曲げモーメント

に重要であることがわかる。そこで、脚部に最大曲げモーメントが発生する時の断面力分布を示したのが図18である。地震力によりアーチカルバートがたわむ場合、外側に引張りが生じる脚部に大きな曲げモーメントが発生する。また、最大曲げモーメントが発生している脚部では曲げモーメントだけでなく軸力も大きくなることが確認できる。これは、アーチカルバートが周辺地盤と追従してせん断変形する際に、前節のアーチカルバート下部地盤の鉛直土圧

で示した図14のように、アーチカルバートに周辺地盤からのせん断力が働くためである。一般的に、軸力と曲げを同時に受けるコンクリート部材においては、それら2つの作用の仕方によって断面内の応力度分布が変化する。そのため軸力と曲げモーメントを総合して検討する必要がある。図19は、向かって左側に設置したアーチカルバートの両脚部における軸力-曲げモーメント関係を示したものである。まず左側脚部をみると、上述したように Case-3,4

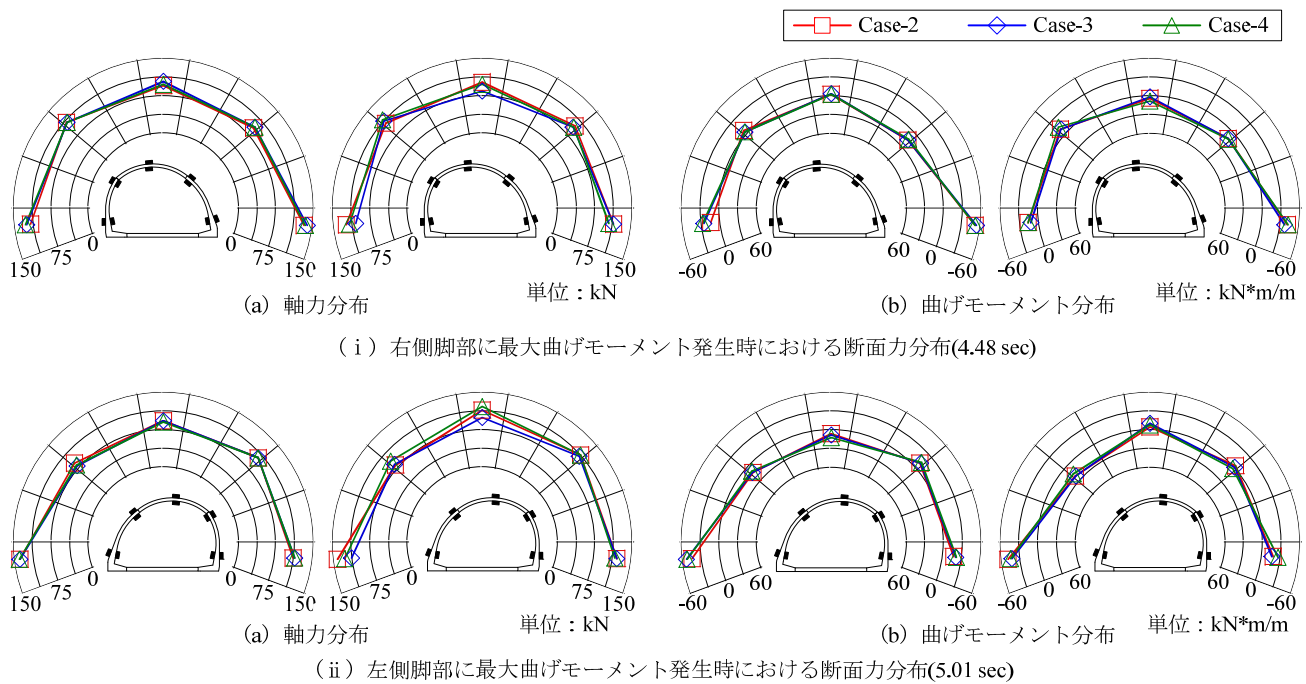


図18 脚部に最大モーメントが発生する時の断面力分布

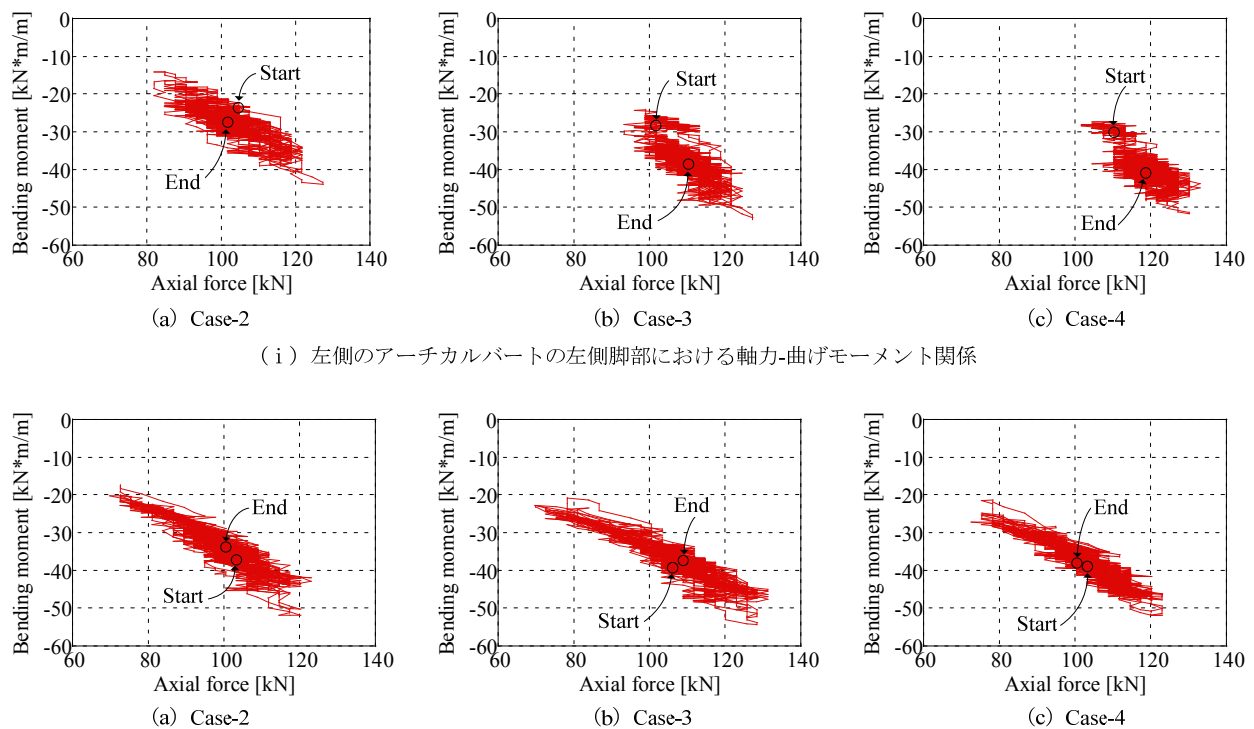


図19 左側のアーチカルバートの両脚部における軸力-曲げモーメント関係

では初期値よりも大きな値で挙動し、最終的には軸力、曲げモーメント共に初期値より大きな値となる。この理由としては、アーチカルバートの沈下によるものと考えられるが、土槽壁面による影響もあるものと考えられるため、今後数値解析等を用いてさらに検討を進める必要がある。一方、右側の脚部を見ると、こちらはいずれのケースにおいても初期値を中心に挙動し、残留値もほとんど発生しないこと

が確認できる。これより、アーチカルバート同士が近接している側の脚部では、ユニット間隔による影響が小さいことがわかる。

以上より、アーチカルバートに発生する断面力については、土槽壁面の影響を除けば初期状態、加振後の挙動ともにユニット間隔による差は明確ではなく、アーチカルバートが単体で設置された場合の挙動から大きく変化するこ

とはないと考えられる。

4. まとめと今後の課題

本研究では、多ユニットアーチカルバート盛土に関して、地震時にユニット間隔の差異がアーチカルバートおよび周辺地盤に与える影響を明らかにすることを目的に、動的遠心模型実験を実施した。本実験で得られた知見は以下の通りである。

- 1) ユニット中央における地盤の応答加速度のフーリエ・スペクトルに関しては、盛土のみの場合は 5 Hz 付近の増幅が顕著である。アーチカルバートを含む場合では、固有周期は盛土のみの場合と変わらないが、固有周期付近の加速度増幅がより大きくなる。
- 2) ユニット間隔が狭い場合には、ユニット間の盛土部分の体積が小さくなるために、下部の地盤が負担する重量が小さくなることや、アーチカルバートと地盤の摩擦により地盤の滑り込み沈下が抑制されることなどから、地表面変位が小さくなる。また、ユニット間隔を狭くすると、ユニット中央とアーチカルバートの頂部におけるそれぞれの沈下量が小さくなるだけでなく、不同沈下量も小さくなる。
- 3) ユニット間隔が狭くなると、アーチカルバートを含む周辺地盤の剛性が相対的に増加し、せん断力による変形が抑制されるため、アーチカルバート下部地盤に作用する鉛直土圧が小さくなる。
- 4) アーチカルバートに作用する曲げモーメントは、ユニット間隔によらずほぼ同様の値を示す。地震時には、脚部に大きな曲げモーメントが発生することから、同構造の耐震安定性を検討する際には脚部が特に重要である。

以上の結果より、ユニット間隔の違いによってアーチカルバートを含む周辺地盤の加速度応答や沈下量などの挙動が異なることが確認された。これは、アーチカルバートのような地中構造物の場合、アーチカルバートは周辺地盤の挙動に追従するように変形するため、ユニット間隔が狭くなるほどアーチカルバートを含む周辺地盤の剛性が相対的に増加し、全体としてのせん断剛性が高まるためであると考えられる。また逆に、ユニット間隔がある一定以上広くなると、アーチカルバートが単体で設置された場合の挙動に近づくと考えられる。一方で、本構造において最も重要であると考えられるアーチカルバートに発生する曲げモーメントについてはユニット間隔による大きな差は見られず、ユニット間隔の影響は小さいと考えられる。したがって、7.5 m の砂質地盤に砂質土を用いて 5.0 m の盛土工が施工された場合を対象とした本研究の範囲内であれば、ユニット間隔をアーチカルバートの高さの 1/2 まで近づけても、同構造の耐震性に与える影響は小さいと考えられる。

なお、本研究では、遠心模型実験を行うにあたり、さまざまな制限の中で実験を行っている。今後、さらに研究を

発展させていくためには、以下の課題が考えられる。

- 1) 本実験では、剛土槽を用いて実験を行ったが、土槽の壁面による影響については考慮していない。特にユニット間隔を広くした場合には、影響が大きくなることが予想される。今後は土槽の壁面による影響を軽減できるせん断土槽を用いた検討や、数値解析との比較などが必要である。
- 2) 本実験では平面ひずみ条件を仮定し、実験を行った。しかしながら、同構造の地震時の変形モードとしては、地盤の圧縮による沈下に加えて、はらみ出しも考えられる。アーチカルバートに発生する断面力に関しては安全側の検討となっているが、地盤の変形については更なる検討が必要である。
- 3) 本実験では、地表面付近の最大応答加速度が 400 gal 程度の地震力で検討を行った。今後は、より大きな地震力についても検討が必要である。
- 4) 本実験では、アーチカルバートは一体型の構造として実験を行った。しかしながら、実際は、肩部の継ぎ手部は剛結とヒンジ構造の中間的な構造であり、今後は継ぎ手部のモデル化について考慮する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究(B)No.21360224 によるものである。

参考文献

- 1) 常田賢一, 小田和広, 鍋島康之, 江川裕輔: 新潟県中越地震における道路施設の被害水準と道路機能の特性, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, No.009, pp.1-9, 2005.
- 2) Tokida, K., Oda, K., Nabeshima, Y. and Egawa, Y.: Damage level of road infrastructure and road traffic performance in the mid Niigata prefecture earthquake of 2004, Structural Engineering/Earthquake Engineering, JSCE, Vol.24, No.1, pp.51s-61s, 2007.
- 3) 常田賢一, 小田和広: 道路盛土の耐震性能評価の方向性に関する考察, 土木学会論文集, No.4/III-65, pp.857-873, 2009.
- 4) 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.
- 5) 入江伸明, 伊藤和也, 高橋章浩, 日下部治: 3 ヒンジトンネルの地震時挙動に関する遠心実験, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp.1779-1780, 2002.
- 6) 例えば, 熊田哲規, 高橋裕輔, 北林孝顕, 堀田三成, 大井 純, 小泉 淳: テクスパン工法を用いたトンネルの模型振動実験について (その 1) テクスパン工法および模型振動実験の概要について, 土木学会第 50 回年次学術講演会, pp.1112-1113, 1995.

- 7) 豊田浩史, 高貝 真: テールアルメ盛土中における 3 ヒンジアーチの動的挙動, 土木学会論文集, No.624/III-47, pp.255-266, 1999.
- 8) 豊田浩史, 伊藤寿晃: テールアルメ盛土と 3 ヒンジアーチの動的挙動に与える加振条件と各種物性値の影響, 土木学会論文集, No.666/III-53, pp.279-289, 2000.
- 9) 足立紀尚, 木村 亮, 岸田 潔, 鮫島竜一, 岩崎喬夫, 河野 定: プレキャストトンネル構造の力学的安定に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.708 /III-59, pp.25-40, 2002.
- 10) 足立紀尚, 木村 亮, 岸田 潔, 鮫島竜一: アーチプレキャストトンネルをモデル化したトンネル模型実験, 第 36 回地盤工学研究発表会, pp.1943-1944, 2001.
- 11) 川内啓輔, 足立紀尚, 木村 亮, 岸田 潔: カルバートに作用する鉛直土圧に関する実験的検討, 土木学会平成 14 年度関西支部年次学術講演会講演概要, III-59-1~III-59-2, 2002.
- 12) 足立紀尚, 木村 亮, 岸田 潔, 川内啓輔: アーチカルバートの基礎処理幅に関する検討, 土木学会第 57 回 年次学術講演会講演集, pp.569-570, 2002.
- 13) 財団法人土木研究センター: モジュラーチ工法の耐震性向上に関する研究委員会 報告書 [概要], 1996.
- 14) 財団法人土木研究センター: モジュラーチ工法の耐震性に関する研究委員会 (その 2) 報告書, 1997.
- 15) Hwang, J. H., Kishida, K. and Kimura, M.: Numerical Study for Interaction between Structure and Ground of Multi-Arch Culverts with Filling Embankment under Seismic Condition, *Proc. of the 20th KKCNN Symposium on Civil Engineering*, Jeju, Korea, pp.346-349, 2007.
- 16) 木村 亮, 足立紀尚, 小林秀人: 水平力を受ける鉄筋コンクリート群杭の終局挙動に関する遠心模型実験, 京都大学防災研究所年報, 第 38 号 B-2, pp.1-16, 1995.
- 17) モジュラーチ工法協会 (2008): *Modularch 技術マニュアル*.
- 18) 中村伸也: 遠心模型実験による重力式擁壁の地震時挙動の把握と震度法の合理化に関する一提案, 土木学会論文集, No.785 /III-70, pp.107-122, 2005.

(2010. 12. 24 受付)

Centrifuge model test on dynamic behavior of multi arch culverts embankment

Yasuo SAWAMURA¹, Kiyoshi KISHIDA², Makoto KIMURA³ and Takeshi KODAKA⁴

1 Department of Urban and Environmental Engineering, Kyoto University

2 Department of Urban Management, Kyoto University

3 Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University

4 Technical Development Department, GEOSTR Corporation

Abstract

Multi-arch culverts embankment is a new type of filling structure where several precast arch culverts are installed continuously in the direction of the road extension. The key point in design is to estimate the practical optimal installation interval between successive arch culverts and to clarify the interactive seismic behavior of filling material and culvert structure. A couple of researches have been done to investigate the earth-quake proof stability of multi-arch culverts embankment through numerical analysis only. In this study, dynamic centrifuge modeling test was carried out to clarify the mechanical influence of the installation intervals between consecutive arch culverts and the mechanical behavior of the surrounding soil during earthquake. From the experimental result, even if unit interval was brought close to 1/2 the height of arch culvert, it was found out that the behavior of arch culvert and the surrounding soil did not change greatly.

Key words: Arch culvert, embankment, unit interval, dynamic centrifuge model test