

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

豊田浩史¹・伊藤寿晃²

¹正会員 博士(工) 長岡技術科学大学助教授 工学部 環境・建設系 (〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1)

²正会員 修士(工) 株式会社 加賀田組 (〒950-0909 新潟市八千代1-5-32)

テールアルメ盛土と3ヒンジアーチの土構造物は、静的な問題に対しては海外においても多くの検討が重ねられているが、地震を想定した動的な問題に関する検討はまだ不十分であり、データの蓄積も乏しいのが現状である。そこで本研究では、模型振動実験によりこの土構造物の振動特性について調べる。動的挙動として、アーチ部材にかかる曲げモーメントやテールアルメ補強壁の変位に着目する。動的挙動に影響を及ぼしそうな要因である加振条件や土構造物の物性値を変化させ、挙動にどのような影響を与えるか調べる。このようにして得られた実験結果を基に、この構造物の地震時安定性を評価するためのモデル化時に重要となりうる影響因子について検討を行う。

Key Words : *shaking table test, reinforced soil, earthfill, backfill, dynamic interaction*

1. はじめに

プレキャスト3ヒンジアーチカルバートは短スパン(通常20m以下)の橋梁や現場打ちカルバートに代わるアーチ構造物を3ヒンジで構築する工法として開発された。その適用範囲には、道路や水路等の開削トンネル、道路や鉄道等の各種立体交差などが挙げられる。盛土ウイング壁および頂部壁にはテールアルメ工法が用いられ、アーチ部材は鉄筋コンクリート製品である。アーチ部材は工場生産され、現場で架設するため迅速かつ簡単に施工できコストも削減できる。また基礎部と頂部の3点をヒンジとした静定構造物であり、比較的薄い部材によって、盛土と一体となった構造体を形成し、アーチ部が変位することにより全体の安定を保持させるところにこの工法の特徴がある。スペイン、カナダ、オーストリア、イギリスなど海外においては300件以上の施工実績を持っているが¹⁾、日本においては、まだ歴史が浅く、今も様々な検討が行われている。

例えば、安野、星田²⁾はプレキャストアーチカルバート工の積雪地域における冬季施工で、省力化、合理化および工期短縮を計った結果を報告した。しかし、アーチカルバートの挙動に関してはまだ解明すべき事

項が多く、今後の研究により、さらに合理的、経済的工法となる可能性があることを述べている。

武田ら³⁾はプレキャストアーチカルバートの施工時の現場計測結果と有限要素法を用いた解析結果の比較検討を行った。その結果、弾性および弾塑性解析とも、定性的には予測可能であるが、計測結果との整合性を高めるためには、強度定数の評価方法や頂部に新たな要素を挿入するなどして解析方法を改善する必要があるとしている。

高貝ら⁴⁾および豊田、高貝⁵⁾は盛土部をテールアルメ工法で補強した3ヒンジアーチの模型を作製し、振動実験を行った。この際、盛土の密度および加振方向を変化させて振動特性および破壊特性を検討した。加振方向については、その影響の大きさを考え、アーチ部材間の開きとテールアルメ補強壁の変位には、アーチ方向に振動させた縦断方向加振で、アーチ部材にかかる力は、アーチ直角方向に振動させた横断方向加振で評価した。盛土の密度が小さいと、アーチ部材間の開きと、テールアルメ補強壁の変位が大きくなり、さらにアーチ部材の軸力が小さく、曲げモーメントが大きく出る傾向にあり、構造上好ましくないと報告している。さらにFEM解析により、動的な応力を検討し、アーチと盛土の接触部に柔らかい薄層要素(インター

表-1 振動実験の相似則 (文献^{7), 8)}を修正・加筆)

物理量	次元	実物/模型
長さ	L	λ
盛土材の密度	ML^{-3}	1
加速度	LT^{-2}	1
周波数(振動数)	T^{-1}	$\lambda^{-3/4}$
減衰定数		1
弾性係数	$ML^{-1}T^{-2}$	$\lambda^{1/2}$
変位	L	$\lambda^{3/2}$
応力	$ML^{-1}T^{-2}$	λ
ひずみ		$\lambda^{1/2}$
断面二次モーメント	L^4	λ^4
曲げモーメント	ML^2T^{-2}	λ^4

L:長さ, M:質量, T:時間

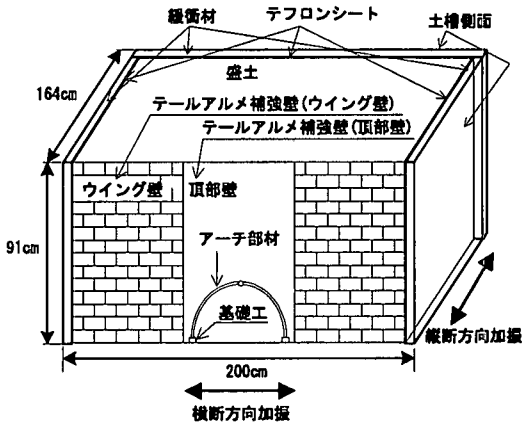


図-1 実験模型概略図⁵⁾

フェイス要素と称する)を用いることにより、実験結果をよく再現できるとしている。しかし現段階ではインターフェイス要素の物性値の決定に関しては模型実験を行わなければならない、一般性を持たせるためにさらに検討を要するとしている。

本研究では、日本のような地震国でこの工法を用いる場合に問題となる耐震性や振動特性に影響を与える因子について検討する。この構造物で重要な動的挙動として、アーチ部材にかかる曲げモーメントとテールアルメ補強壁(頂部壁)の変位に着目する。加振条件や土構造物の各種物性値を変化させて実験を行い、動的挙動にどのような影響を与えるか調べる。加振においては、その方向性を考慮して水平2次元(2方向)加振を、土構造物の物性値においては、アーチ部材と盛土材の摩擦およびテールアルメ工法のストリップと盛土材の摩擦、また盛土材の密度を変化パラメータとする。このようにして得られた実験結果を基に、この構造物の地震時安定性を評価するためのモデル化時に重要となりうる影響因子について検討する。

2. 模型振動実験の方法

(1) 模型について

a) 縮尺と相似則

実物に対し、図-1に示すような縮尺1/20の模型を実験に用いた。実物の土かぶり厚は1m以上30m以下と決められている。アーチに作用する上載圧が大きくなると、(水平)振動によりアーチに作用する動的応力も大きくなると考えられるため、出来るだけ土かぶり厚のある模型を作製することにする。土槽や試料の

制限より、図-1のような模型となり、土かぶり厚は実物に換算して約12mとなる。

模型から実物の挙動を推定するためには相似則を考える必要がある。模型実験の相似則は、振動問題で一般的に用いられる(せん断)剛性が拘束圧の平方根に比例するという研究成果⁶⁾を用いると、表-1のようになる^{7), 8)}。ここで λ は長さの比(実物/模型)で、本実験では $\lambda = 20$ となる。本研究では実構造物を解析するわけではなく、想定構造物に対して様々な影響因子による基本的性質を押さえることにあるため、結果は相似比による換算を行わず模型サイズの値で示しておく。

b) アーチ部材およびテールアルメ補強壁

アーチ部材はアクリル樹脂で作製し、実物と幾何的相似は合わしてある。また、測定する曲げモーメントに対する剛性(EI)については、実物に表-1の相似則を適用して、実際と大きくかけ離れていないことを確認した⁵⁾。アーチ部材の形状は、ほぼ1/4円で、上端部の溝に丸棒を置いて1/4円形アーチ部材どうしを接触させて、アーチ(半円)を組み立てた(図-2)。またアーチ下端部は基礎工(土槽に固定)の上に配置するのみとした。

テールアルメ補強壁はコンクリートスキンを組立てて造るため、全体として柔構造となる。模型においても連結部は出来るだけ柔なものになるよう、図-3のように木製のひごで連結しながらスキンを千鳥状に配置した。ただし頂部壁に関しては、実物もそうであるように(現場打ちされることが多い)1枚のパネルで作製した(図-1参照)。ストリップの配置に関しては、アーチがあるためストリップを配置できない場所を除いてウイング壁と同じである。本論文では、テールア

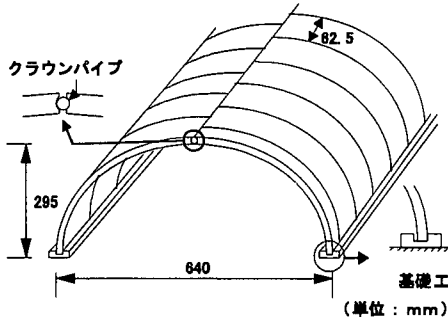


図-2 アーチ部材の組み方⁵⁾

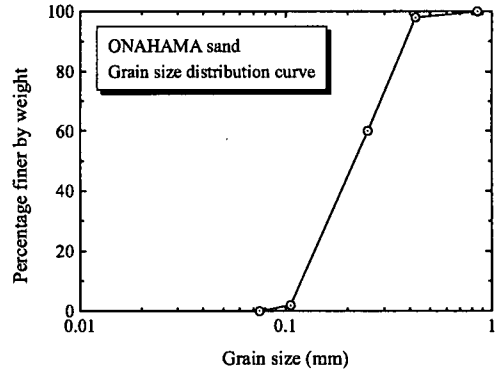


図-4 盛土材の粒径加積曲線⁵⁾

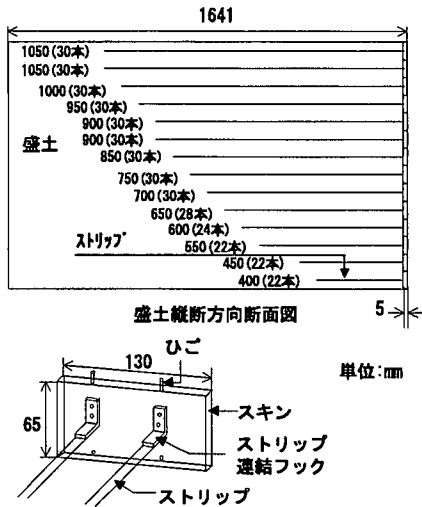


図-3 スキンとストリップの配置⁵⁾

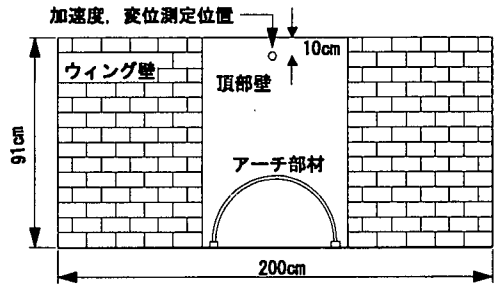


図-5 加速度と補強壁変位測定位置⁵⁾

ルメ補強壁(ウィング壁)、テールアルメ補強壁(頂部壁)として区別することにする。盛土材の漏れ防止のため、スキンの連結部にビニールテープを貼り、アーチと頂部壁の連結部には、スポンジを挟んだ。実際はコンクリート製のスキンであるが、モデルスキンの材質は工作のしやすい塩化ビニールを、ストリップには厚さ0.1mm、幅10mmのりん青銅板を用いた。ストリップは日本テールアルメ協会の「宅地造成に用いるテールアルメ工法計算手順」に準じて配置してある。

c) 盛土作製方法および境界条件

盛土材として福島県いわき市小名浜で採取した砂(小名浜砂)を自然乾燥させて用いた。図-4に粒径加積曲線を示す。模型盛土は、振動締固めにより作製し、締固め無しから十分に締固めたものまで、様々な相対密度のものを作製した($Dr = 40\% \sim Dr = 80\%$)。また、締固めは14層に分けて行った。

土槽境界(横断方向両端と、縦断方向のテールアルメ補強壁と反対側)には、土の変形を妨げないようにするために緩衝材(厚さ2.5cmのネオプレンゴム)を貼り付け、壁面摩擦を低減するため、緩衝材と盛土の間にテフロンシートを設置した(図-1)。

(2) 計測器設置位置

加速度とアーチ部材応力に関しては模型縦断方向の中央で測定した。図-5に加速度とテールアルメ補強壁(頂部壁)の(残留)水平変位測定位置を示す。図は2次元表示であるが、加速度計は模型縦断方向中央に設置してある。頂部壁の変位はレーザー変位計により測定し、補強壁が前面に押し出してくる方向が正である。

アーチ部材(1/4円)の両端はヒンジであるため曲げモーメントはゼロになる。また、静的載荷に関しては、アーチ部材(1/4円)の中央部付近で曲げモーメントが最大になることが報告されている⁹⁾。そこで、縦断方向中央部のアーチ部材に対して図-6に示すようにアーチ部材(1/4円)の中央で、曲げモーメントを測定することにする。曲げモーメントは、図-6に示し

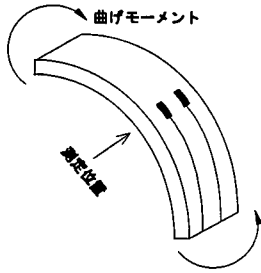


図-6 アーチ部材応力測定位置⁵⁾

た矢印の方向が正となる。

(3) 実験の種類

実験は、模型の周波数特性(卓越周期)を調べるための共振試験と、加振を大きくしていく破壊試験を行った。

a) 共振試験

入力波として、30gal程度の比較的小さな加速度振幅の正弦波を5Hzから2Hz刻みで49Hzまで周波数を上げていながら、加速度計の測定位置における加速度を測定する。盛土部における加速度と土槽底部の入力加速度から加速度応答倍率を求め、固有周波数を把握する。なお、本研究において振幅とは片振幅を意味するものとする。

b) 破壊試験

共振周波数は加振の強さにより変動するが、破壊試験ではそれぞれの共振試験で求められた比較的小さな加速度に対する共振周波数を用いることにする。正弦波の加速度振幅を50galから50gal刻みで上げていき、構造物が破壊する(盛土材が頂部壁とアーチ部材の間から漏れ始める)まで行った。実験条件によっては、実際には起こり得ない加速度(正弦波で600gal)まで破壊しない場合もあったが、構造物の安全性(安全率)の高さを示すため、最後まで行った。またそれぞれの加速度に対して約30秒の加振を行っており、データ収録ができた後、次の加速度の実験を開始している。ゆる詰めと中密詰めの場合は、段階的に加速度振幅を上げていく間に盛土が密になる恐れがあったため、破壊加速度付近と考えられる加速度振幅200galより加振を始め、100galづつ上げていった。

表-2 加振条件

加振条件	加振加速度	測定方向
縦断	縦断方向のみ加振 周波数：27Hz	縦断
横断	横断方向のみ加振 周波数：31(D), 29(M) 27(L)Hz	横断
円	縦断振幅：増加 横断振幅：縦断と同じ 位相差：90° 周波数：27Hz	縦断 横断
楕円 A	縦断振幅：増加 横断振幅：200gal 固定 位相差：90° 周波数：27Hz	縦断
楕円 B	縦断振幅：200gal 固定 横断振幅：増加 位相差：90° 周波数：27Hz	横断
45° 直線	縦断振幅：増加 横断振幅：縦断と同じ 位相差：0° 周波数：27Hz	縦断

D：密詰め、M：中密詰め、L：ゆる詰め

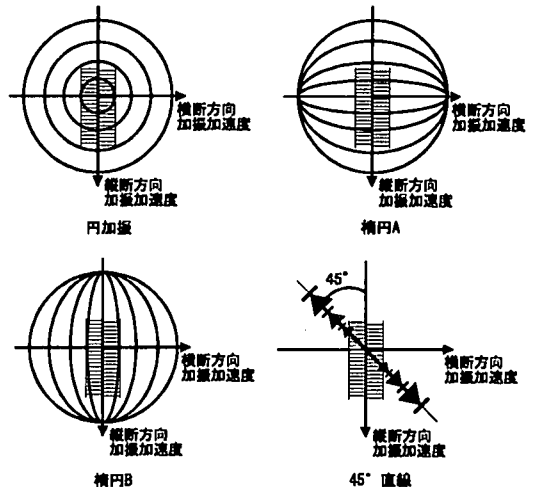


図-7 加速度軌跡

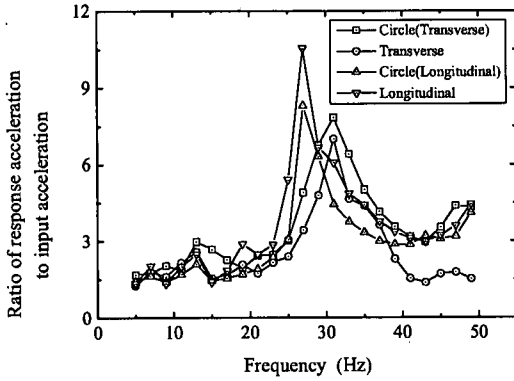


図-8 1方向と2方向加振時の周波数特性

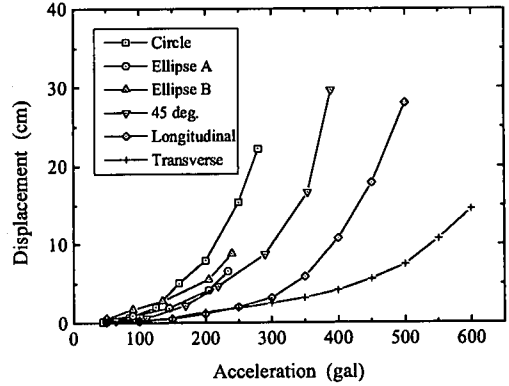


図-9 テールアルメ補強壁(頂部壁)の変位

3. 2方向振動試験

(1) 加振条件

実際の地震では、非常に複雑な加速度軌跡をとるため、そのデータから加振と方向の影響を論じるのは難しくなる。そこで本研究では、基本的な入力波として、2方向(横断方向と縦断方向)とも正弦波とし、その大きさと位相を変化させた。表-2のように2種類の1方向加振と4種類の2方向加振を行った。表中の「測定方向」には、結果を整理するとき用いた入力加速度の測定方向を示してある。この方向の加速度振幅をそれぞれの加振条件の加速度振幅とした。また2方向加振の入力周波数は縦断方向の共振周波数を用いた。これは、入力加速度が大きくなると共振周波数も小さくなると考えられ、危険側を考え、横断方向より小さい縦断方向の共振周波数を採用した。例えば、楕円A加振では横断方向加速度は常に200galに固定しておき、縦断方向加速度の大きさを変化させ、この縦断方向加速度の値で結果を整理する、ということである。円加振では加速度が2方向とも大きくなる影響を、楕円加振では1方向を200galに固定して他方向が徐々に大きくなる影響を、45°直線加振では円加振や1方向加振と比べることで位相差または方向の影響を見るために行った。模型盛土を上方から見たときの加速度軌跡を図-7に示す。中心部の細線は組み合わせられたアーチを示している。この2方向加振試験において、模型盛土の相対密度は70%程度であった。

(2) 共振試験結果

図-8に円加振の横断方向(Circle(Transverse))と横断加振(Transverse)および円加振の縦断方向(Circle(Longitudinal))と縦断加振(Longitudinal)の加速度応答倍率を示す。この図より、対象とする方向が一致していれば、応答倍率には若干の違いが見られるものの、共振周波数は一致している。したがって、共振周波数に対しては、変形が小さく弾性に近い範囲においては2方向(円加振)で加振される影響はほとんど無いことがわかる。また、模型での共振点は横断方向が31Hz、縦断方向が27Hzであるが、表-1によると周波数の相似比(実物/模型)は $20^{-3/4}$ となり、実物に換算した共振点は横断方向3.3Hz、縦断方向が2.9Hzとなる。これは実地震動の卓越周波数領域に含まれるものであり、共振を起こす可能性があることを示唆している。

(3) 加振条件による影響

図-9に各加振条件におけるテールアルメ補強壁(頂部壁)の残留変位を示す。加振方向によらず、縦断方向残留変位を測定してある。表-2に示す周波数(27Hz、横断加振のみ31Hz)で約30秒加振後の残留値である。1方向加振(縦断、横断)に比べ2方向加振(円、楕円、45°直線)では変位がかなり大きくなっているのがわかる。これは、縦断方向のみならず横断方向加振でも、振動により砂とテールアルメのストリップの摩擦が小さくなるため盛土を鉛直に支えられず、変位が表れるからである。つまり、テールアルメ補強壁(頂部壁)の変位については、1方向だけでなく2方向の振動を考慮する必要がある。初期から縦断方向に200galの振

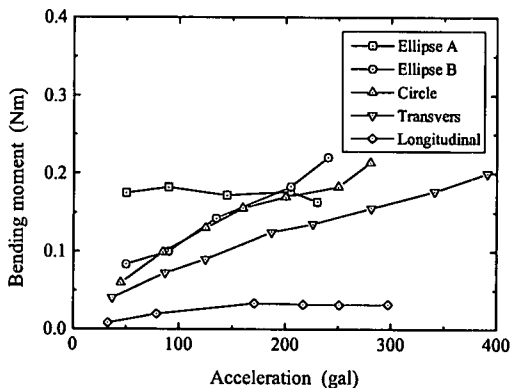


図-10 円, 楕円 A, 楕円 B, 縦断, 横断加振時の曲げモーメント振幅

動がかかっていることを考えると、200gal 付近までは楕円 B が楕円 A より若干変位が大きくなるのも納得できる。また、45° 直線加振の加速度を $\sqrt{2}$ 倍することにより、45° 方向の加速度で評価してやると、横断加振と縦断加振の間にくる。これより危険な方向としては、縦断、45°、横断という順になる。

図-10 に円, 楕円 A, 楕円 B, 縦断, 横断加振時の各加振加速度におけるアーチ部材の曲げモーメント振幅を示す。振動が安定した後、測定を行っているが、この間はほぼ定常的な振幅を示したため、最大両振幅の半分の値を振幅とした。振動前に設定した曲げモーメントのゼロ点が振動後にずれているような場合もあり(ずれは曲げモーメント振幅より小)、若干の残留成分を生じることもあった。楕円 A 加振は、縦断方向の加速度を変化させてもほぼ一定値を示している。縦断加振を見ても、小さな値(0.04Nm)ではあるが、ほぼ一定値となっている。楕円 A 加振は、横断方向加速度は 200gal で固定している。この図より横断加振の 200gal 時の曲げモーメント振幅に縦断加振時の曲げモーメント振幅を足したものが、楕円 A 加振時の曲げモーメント振幅になっていることがわかる。円, 楕円 B 加振時の曲げモーメント振幅と加速度の関係は、横断加振時とほぼ同じ傾きをしている。また横断加振時の曲げモーメント振幅に縦断加振時の曲げモーメント振幅を足したものが、ほぼ円, 楕円 B 加振のものに等しくなっている。

以上の結果より、本実験の範囲では 2 方向加振時の曲げモーメント振幅は横断加振時の曲げモーメント振幅に縦断加振時の曲げモーメント振幅(0.04Nm 一定)を足したものになるといえる。ただし、縦断方向の加

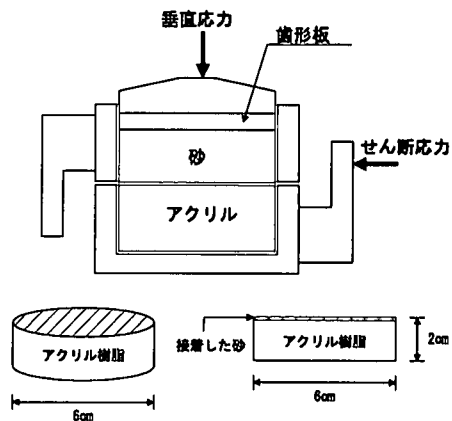


図-11 アーチ部材摩擦評価試験の概要

振に関しては曲げモーメント振幅が 0.04Nm と小さく、アーチの曲げモーメントにほとんど影響しないことがわかる。つまり、アーチの曲げモーメントは、横断方向加振のみ考慮に入ればよいということになる。

4. 物性値評価試験

実物においては、アーチ部材は鉄筋コンクリート製、ストリップは圧延鋼材、ストリップと盛土材の摩擦を大きくするため、リップ付きのストリップが用いられる場合もある。これまでの試験においては、アーチ部材はアクリル樹脂、ストリップはリン骨銅板で作られており、剛性については相似則より評価されているが、盛土とアーチおよびストリップの摩擦については何ら考慮されていない。解析を行うためには、アーチ部材と盛土の接触部をうまく評価してやる必要があるが、どのような影響因子があるかは明らかにされていない⁵⁾。そこで、ここではアーチ部材とストリップの摩擦を変化させて実験を行う。実物と同様に、模型で鉄筋コンクリート製のアーチやリップ付きのストリップを作製することが困難だったため、以下に述べるような代替法で摩擦を変化させることにした。したがって、実物と等価な模型の作製ではなく、摩擦の影響について基礎的知見を得ることが目的となる。

(1) アーチ部材

アーチ部材表面に、シリコンボンドで盛土材と同じ砂を付着させた。これを摩擦付きアーチ部材と呼ぶことにする。摩擦の評価試験は、図-11 に示すように一面せん断試験機を用いて行った。下箱に丁度収まる表面が平滑なアーチ部材(アクリル樹脂)と、アーチ部

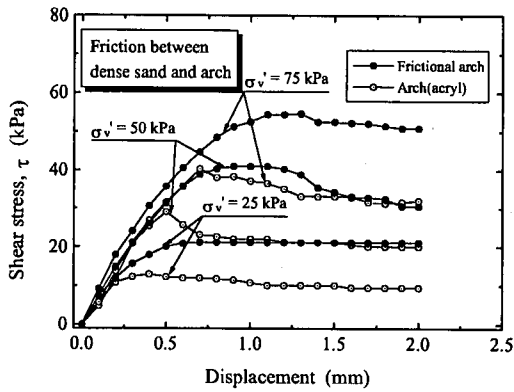


図-12 密詰め砂とアーチ部材の摩擦

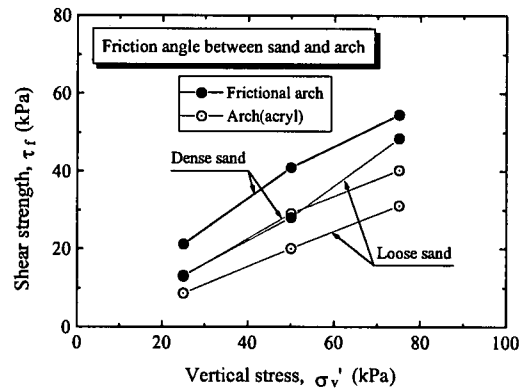


図-14 アーチ部材摩擦評価試験の結果

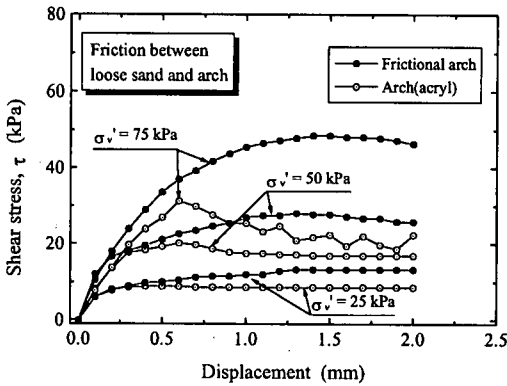


図-13 ゆる詰め砂とアーチ部材の摩擦

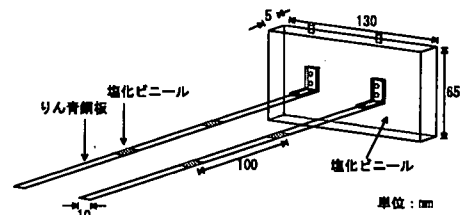


図-15 摩擦付きストリップの概要

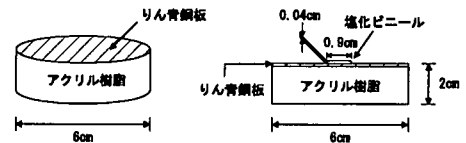


図-16 ストリップの摩擦評価試験供試体

材上面に砂を付着させた摩擦付きアーチ部材の2種類を、上箱には締固めた密な砂と締固めていないゆるい砂の2種類、合計4ケースで摩擦を測定した。試験条件は、圧密定圧せん断試験で、0.25 mm/minのせん断変位速度で行った。密詰め砂、ゆる詰め砂とアーチ部材の応力-変位関係をそれぞれ図-12、図-13に示す。密詰め砂、ゆる詰め砂とも同じ条件下で、せん断強度は摩擦付きアーチの方が大きくなっている。密詰め砂においてはほとんどの条件でひずみ軟化が起っており、摩擦付きアーチでは最大強度点(ピーク)は平滑なアーチ(アクリル)より大きい変位で表れている。しかし、せん断初期の傾きはどの場合もあまり違いは出ていない。

破壊時のせん断応力と垂直応力の関係を図-14に示す。摩擦付きアーチは平滑なアーチに比べ、より大

きな摩擦抵抗があることがわかる。また、砂の密度が大きくなると摩擦抵抗も大きくなっている。以上より、砂を付着させることと砂の密度を大きくすることで、アーチ部材と砂の摩擦は大きくなるといえる。

(2) ストリップ材

実際の施工においては、リップ付きのストリップを使用しているが、本研究においては簡単に摩擦を増加させる方法として、図-15のようにストリップに塩化ビニール(ビニールテープ)を貼り付けた。これを、摩擦付きストリップと呼ぶことにする。

ストリップの引き抜き抵抗を考えたとき、ストリップと盛土材の摩擦角が盛土材の内部摩擦角より小さければ、ストリップと盛土材のすべりに支配されるが、摩擦が十分大きいときは周辺の土と一体になって抵抗

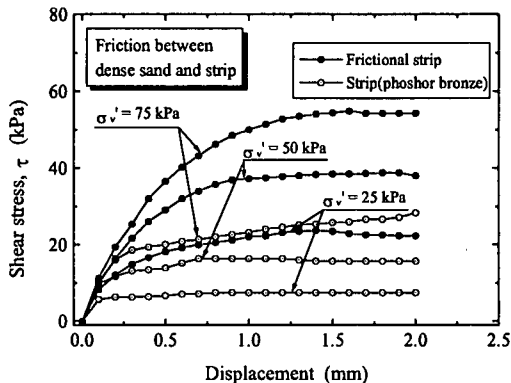


図-17 密詰め砂とストリップ材の摩擦

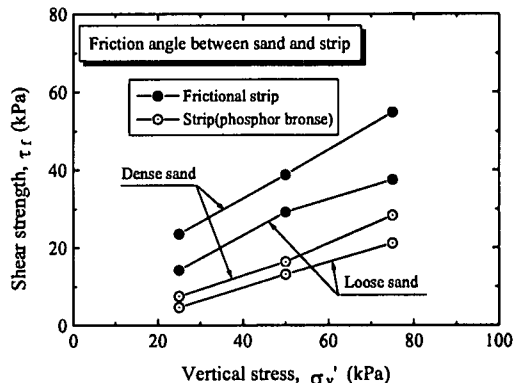


図-19 ストリップ材摩擦評価試験の結果

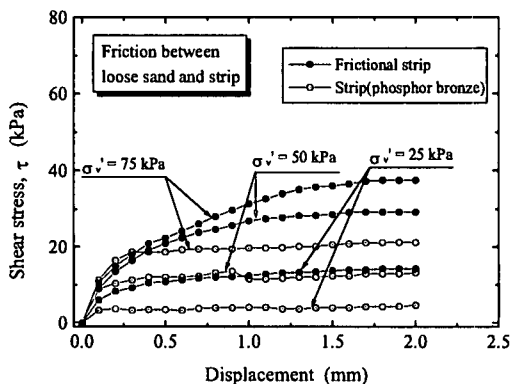


図-18 ゆる詰め砂とストリップ材の摩擦

することが考えられ、一面せん断試験法の妥当性に問題がでてくる。別途行った試験より(密詰め盛土材の内部摩擦角 49.7 度, ゆる詰め 32.3 度)⁵⁾, ストリップと盛土材の摩擦角が盛土材の内部摩擦角より小さいことがわかったので、一面せん断試験で摩擦を評価することにする。

下箱には、アクリル樹脂にリン青銅板を貼り付けたものとともに塩化ビニールを貼り付けたもの(摩擦付き)を用意した(図-16 参照)。リン青銅板と塩化ビニールは面積比がストリップと同じになるようにしてあるが、実際のストリップとは形が違うため、ここでは定性的な評価に止めておく。

上箱には密な砂とゆるい砂の2種類を入れて実験を行った。試験条件もアーチ部材と同じく、圧密定圧せん断試験で、 0.25 mm/min のせん断変位速度で行っ

た。密詰め砂、ゆる詰め砂とストリップ材の応力-変位関係をそれぞれ 図-17、図-18 に示す。密詰め砂、ゆる詰め砂とも同じ条件下で、せん断強度は摩擦付きストリップの方が大きくなっている。密詰め砂、ゆる詰め砂ともひずみ軟化は起こっておらず、すべての条件においてせん断初期の傾きにほとんど違いは出ていない。

図-19 に破壊時のせん断応力と垂直応力の関係を示す。ストリップと砂の摩擦はかなり小さいが、摩擦付きストリップにすることにより、かなり抵抗が大きくなっている。また摩擦付きストリップの方が砂の密度の影響を大きく受けていることがわかる。この方法により、ストリップと砂の摩擦を上げることができる。

5. 振動試験における物性値の影響

この試験においては、盛土密度を密詰め($Dr = 80$ 程度)、中密詰め($Dr = 60$ 程度)、ゆる詰め($Dr = 40$ 程度)の3種類に調整して行った。2方向振動試験よりアーチにかかる応力に影響をおよぼすのは横断方向であることがわかったので、アーチにかかる応力を評価するときは横断加振で行う。テールアルメ補強壁(頂部壁)の変位は円、縦断、横断加振で評価を行う。

(1) 共振試験結果

摩擦付きアーチおよび摩擦付きストリップにすることで、盛土上部の共振特性がどのように変化するか調べた。平滑なアーチと摩擦付きアーチの共振試験の結果を図-20 に示す。応答倍率に関して、ゆる詰めで差が見られるのは、加速度計が傾いて設置された可能

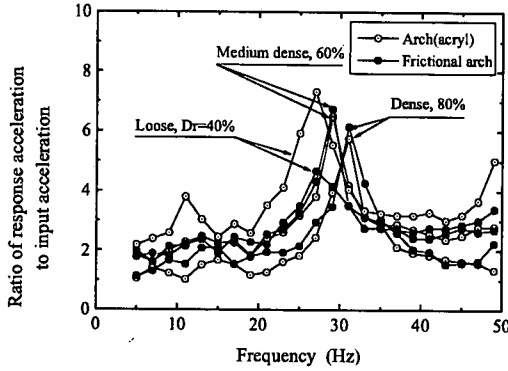


図-20 周波数特性に及ぼすアーチ摩擦抵抗の影響

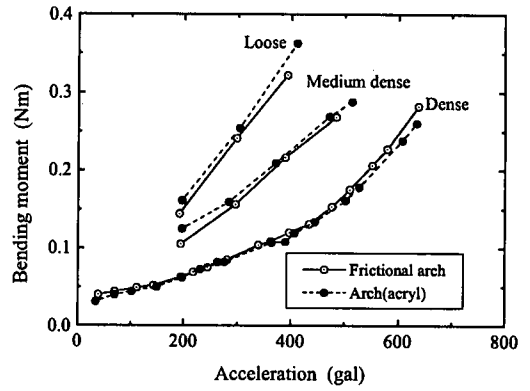


図-22 アーチ部材の曲げモーメント振幅に及ぼすアーチ摩擦抵抗の影響

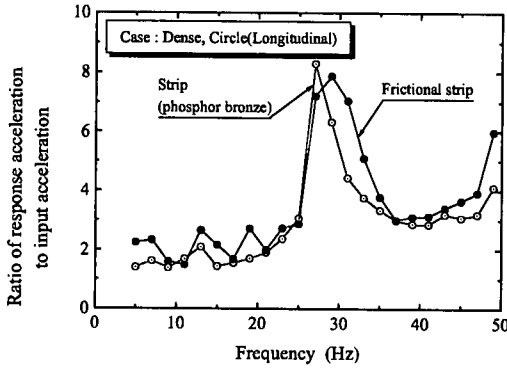


図-21 周波数特性に及ぼすストリップ摩擦抵抗の影響

性がある。この図からアーチの摩擦の有無にかかわらず共振周波数は同じであることがわかる。盛土が密になるほど共振周波数は大きくなっており、盛土の共振周波数はアーチの摩擦抵抗には影響されず、盛土密度に大きく影響されることがわかる。

ストリップにおいても影響はほとんど表れなかったが、縦断方向の共振周波数が若干変化した。図-21に円加振(縦断方向)時の周波数特性を示す。摩擦付きのストリップの方が共振周波数が若干大きくなっているのがわかる。これは、摩擦付きのストリップにすることで、縦断方向の剛性が上がったためと考えられる。しかしその差は微小であり、影響はほとんどないといえる。

(2) 破壊試験結果

振動によるアーチの曲げモーメント振幅を図-22に

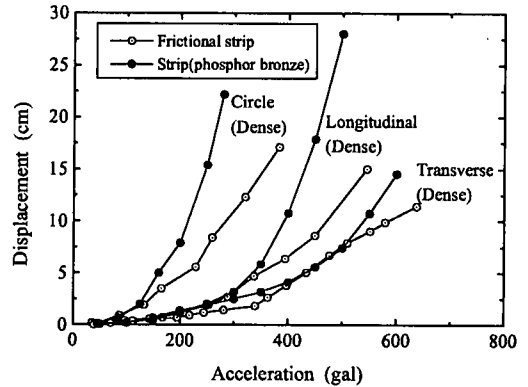


図-23 テールアルメ補強壁(頂部壁)の変位に及ぼすストリップ摩擦抵抗の影響

示す。加速度が大きくなるほど、また盛土がゆるくなるほど曲げモーメント振幅が大きくなっていることがわかる。ゆる詰め盛土が密詰め盛土より上載圧が小さいにもかかわらず、曲げモーメント振幅が大きくなるのは、ゆる詰め盛土の場合、アーチ周辺の拘束が小さく、アーチの曲げモーメントが増加しやすいためと考えられる。しかしアーチ部材の摩擦を変化させても値が各密度ごとに同一であり、摩擦評価試験で確認したようにアーチの摩擦抵抗が違うにもかかわらず、アーチの動的応力は影響を受けていない。これは、アーチと砂の間ですべりが起こるまでの大きな変位には至っていないからであろう。実験模型においては、アーチの剛性が重要であり、その材質(アーチと盛土の摩擦

抵抗)は、すべりを起こさなければほとんど影響を及ぼさないと見える。

また解析精度を上げるために、アーチ部材と盛土の間に薄肉要素(インターフェイス要素と称した)を用いたが⁵⁾、アーチと盛土の摩擦抵抗に応じて、この要素の入力物性値を変える必要はないということである。つまり、インターフェイス要素の入力物性値は、アーチと盛土の摩擦抵抗に影響されない。

破壊試験におけるテールアルメ補強壁(頂部壁)の変位を図-23に示す。すべての加振条件で、摩擦付きストリップの方が変位が小さくなっている。この結果より、振動によるテールアルメ補強壁(頂部壁)の残留変形には、ストリップの摩擦抵抗が影響していることがわかる。つまり、ストリップの摩擦抵抗を上げることにより補強効果を増すことができる。

6. 結論

模型振動実験により、3ヒンジアーチとテールアルメ盛土の土構造物の振動特性について調べた。動的挙動に影響を及ぼしそうな要因である加振条件や土構造物の各種物性値を変化させて実験を行った。本研究により以下のことが明らかとなった。

1. 小さい振動(変形)のもとでの共振周波数は、2方向(円加振)で加振される影響をほとんど受けていない。
2. テールアルメ補強壁(頂部壁)は、2方向振動により1方向振動時より大きく変形する。これは縦断加振のみでなく、横断加振に対しても変形が起こることに起因している。テールアルメ補強壁(頂部壁)の変形には、2方向の振動を考慮する必要がある。
3. 振動によるアーチの曲げモーメント振幅は、縦断加振による影響は小さく、横断加振により支配される。したがって、水平面内の2次元(2方向)振動を考慮する場合、横断方向の成分のみ考えればよいことになる。
4. 振動によるアーチの曲げモーメント振幅は、砂とアーチの摩擦抵抗を変化させても影響がなかった。これは、今回の実験条件内において、アーチ模型作製ではアーチの剛性の相似で材質を選定すればよい(摩擦を考える必要はない)ということである。また、ゆるい盛土ほど、振動によ

るアーチ部材の曲げモーメント振幅が大きくなることがわかった。

5. 振動によるテールアルメ補強壁(頂部壁)の変位は、砂とストリップの摩擦抵抗に大きく依存する。つまり、ストリップの摩擦抵抗を上げることにより補強効果を増大することができる。

謝辞: 本研究を進めるにあたって、(株)テクノソールの佐藤雅宏氏と辰井俊美氏より貴重な助言と資料を頂いた。本研究において、貴重な実験成果の一部は当時の長岡技術科学大学大学院生、五十嵐武氏(現在、八千代エンジニアリング(株))の協力により得られた。また多大な労力を必要とする実験模型作製にあたっては、長岡技術科学大学地盤研究室の学生諸君の協力により順調に進めることができた。ここに記して、深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、テクspan工業会：テクspan工法の海外における設計・施工例、1993。
- 2) 例えば、安野健夫、星田典行：積雪地帯におけるアーチカルバートの高速施工「テクspan工法の冬季施工」、建設技術報告会 in 北陸'98 論文集, pp. 189-192, 1998。
- 3) 武田弘次, 丸山正, 種村弘栄, 村上猛: プレキャストアーチカルバートの施工とその挙動, 第32回地盤工学会研究発表会講演集, pp. 2167-2168, 1997。
- 4) 高貝真, 豊田浩史, 五十嵐武: 振動模型実験による3ヒンジアーチと地盤の動的相互作用, 第32回地盤工学会研究発表会講演集, pp. 1141-1142, 1997。
- 5) 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。
- 6) Iwasaki, T., Tatsuoaka, F. and Takagi, Y.: Shear Moduli of Sands Under Cyclic Torsional Shear Loading, *Soils and Foundations*, Vol. 18, No. 1, pp. 39-56, 1978。
- 7) 香川崇章: 土構造物の模型振動実験における相似則, 土木学会論文報告集, 第275号, pp. 69-77, 1978。
- 8) 柴田徹, 太田秀樹: 土質模型実験における相似則, 土と基礎, Vol. 28, No. 5, pp. 9-14, 1980。
- 9) 大浦尚満, 大川秀雄, 阿部窓一, 北林信太郎: 3ヒンジカルバートの繰返し荷重による挙動, 第13回土木学会新潟会研究調査発表会論文集, pp. 217-220, 1995。

(2000. 3. 27 受付)

EFFECTS OF SHAKING CONDITIONS AND MATERIAL PROPERTIES
ON DYNAMIC BEHAVIOR OF TERRE ARMEE FOUNDATION
AND 3-HINGE ARCH

Hirofumi TOYOTA and Toshiaki ITOH

Earth structures with precasted arch culvert and Terre Armeé wall have been constructed in many parts of Japan. However, in a seismically active area like Japan, there is a need to study the seismic and shaking characteristics of the said structure. In this research, shaking table tests under two directional shaking in a horizontal plane were conducted to examine the effects of the shaking conditions, i.e., between one direction and two directions, on the dynamic stresses that develop in a 3-hinge arch and on the displacement of Terre Armeé wall. Furthermore, the effect of friction between the ground and arch or strips was examined. Based on the results, the factors which are necessary to evaluate the seismic stability of the said structure are confirmed.