

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

豊田浩史¹・高貝真²

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

²修士(工) 株式会社日本地域振興計画 総合企画事業部 (〒010-0933 秋田市市川元松丘町5-33)

近年、迅速かつ簡単に施工できる3ヒンジアーチとテールアルメ工法を用いた盛土の施工例が増えてきている。この土構造物は柔な構造で、静的に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しての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。また、入力加速度とアーチ部材にかかる動的応力、テールアルメ壁の変位との関係についても調べ、この構造物の地震時安定性について評価する。このようにして得られた実験結果をもとに、2次元地震応答解析法の適用性について検討を行う。

Key Words : shaking table test, reinforced soil, banking structure, dynamic interaction, seismic response

1. はじめに

プレキャスト製3ヒンジアーチは、短スパンの橋梁や現場打ちボックスカルバートに代わるものとして、フランスのテールアルメ社で開発された構造物であり、この方法においては、基本的に盛土側面をテールアルメ工法で補強することが推奨されている。アーチは縦断方向に分割された構造物であるため、全体の構造が一体化されたものに比べ剛性が小さくなるが、工場生産されるため、迅速かつ簡単に施工でき、コストも削減できる。我が国においても土木工事の省力化が叫ばれており、3ヒンジアーチとテールアルメ工法で補強した盛土の施工例が増えてきている¹⁾。この構造物は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、安定させるところに特徴がある。また3ヒンジによる静定構造であるため土圧に対しても安定した構造物であり、欧米を中心とする海外においての施工実績からその安全性が確認されている²⁾。

研究においては、大浦、大川³⁾は、施工中の土圧の変化によるアーチ部材の応力状態およびアーチ部材側方への無転圧層の影響を模型実験で検討した。この無転圧層は実際の施工において、アーチ部材近傍(アーチ部材から50cm程度)で締固めを行わない部分に相当し、この工学的意味の検討を行った。その結果、アーチ部材に発生する軸力は盛土高さが高くなるほど増加し、曲げモーメントは盛土高さがアーチのクラウ

ンと等しくなったときに最大となり、その後は減少することがわかった。また無転圧層はアーチ部材に作用する転圧層からの土圧を軽減する緩衝材の役目を果たし、施工中にアーチ部材に作用する軸力、曲げモーメントを小さく抑えることができるこを示した。しかし、長期的にみると、徐々に締固まることによる沈下や雨水による洗い流しの問題なども考慮に入れて検討する必要があるとしている。

さらに大浦ら⁴⁾は繰返し動的荷重がカルバートに作用する際の土圧の変化がカルバートに与える影響を模型実験で検討した。その結果、アーチ部材上の盛土表面から載荷板を通して繰返し荷重を加えると、荷重が集中して作用する部分では土とアーチカルバートの相互作用により土圧の応力状態が変化し、繰返し荷重を経ることにより軸力が低下していくという構造上好ましくない結果が得られた。

俊成ら⁵⁾はテールアルメ補強壁で補強される盛土部分を石膏で固めた安定処理土で置換し、振動台を用いて3ヒンジアーチ(プレハブ式アーチカルバート)の振動特性および動的な破壊特性を模型振動実験により検討した。その結果、アーチ部材1/4角(1/4円形であるアーチの中央)の動的な軸力および曲げモーメントは、加速度の大きさとともに緩やかに増加する結果を得た。また加振方向を変えたときの破壊形態(安定処理土のクラック発生形態)についても考察を行った。

さらに多田ら⁶⁾は石膏で固めた安定処理土ではテー

ルアルメ補強壁のフレキシブルな挙動を表せないとして、テールアルメ補強壁の模型を作製して振動台実験を行った。その結果この構造物の地震時安定性評価には、テールアルメ補強壁の変形が重要になってくることがわかった。

小川⁷⁾は実際の現場において、盛土材の細粒分含有量や自然含水比とテールアルメ工法の壁面変位との関係について調べた。その結果、礫粒土、砂粒土、まさ土においては細粒分含有量が15~19%を越えると変位は急に大きくなり、この変位が急に大きくなる盛土材の境界は、砂と中間土(細粒分含有率が15~19%)の境界にほぼ一致した。一方しらすにおいては細粒分含有量が40%以内であれば、壁面変位には影響を与えたかった。また、礫粒土、まさ土においては盛土材の自然含水比の増加に伴い、壁面の前面側への傾き(壁面勾配)は大きくなる傾向にあるが、しらすにおいては自然含水比に関係なく、壁面勾配は小さい値となることがわかった。

以上、3ヒンジアーチとテールアルメ補強壁に関する施工や研究例をみる限りかなり積極的に行われており、特に欧米では実績も上げてきていることがわかる。しかし、兵庫県南部地震でも構造物が多大な被害を被ったように、日本のような地震国でこの工法を用いる場合には地震時の耐震性や振動特性を十分把握しておくことが必要であるにもかかわらず、動的な問題に対するデータは不足しているように感じられる。そこで本研究では、3ヒンジアーチとテールアルメ補強壁に関する動的問題において、基礎的なデータを蓄えていきたい。ただし本研究においてはそのデータ収集を目的としており、3ヒンジアーチとテールアルメ補強壁の組み合わせが最良かどうかの検討は対象外であり、今後の検討課題となる。

重要な動的問題の1つであるアーチ部材に生じる動的応力やテールアルメ補強壁の変位などは、土圧により左右されると考えられる。土圧に影響をおよぼすパラメータとして、地盤深さや密度などが挙げられ⁸⁾、特に密度により土(地盤)の挙動は全く違ってくる。實際には転圧により密度管理され施工されるが、基礎的な研究として、盛土の密度が違うときの動的挙動についても把握しておく。またこの構造物は方向性を持っているため、それぞれ2方向(縦断と横断)で独立に振動させ、その特性について調べる。

以上のことを踏まえ、まず模型振動実験により密度と振動方向を考慮したアーチ部材の動的応力、アーチ部材間の開き、およびテールアルメ補強壁の変位の特性を明らかにする。そして実験結果をもとにこの土構造物に対して2次元地震応答解析の適用を試みる。

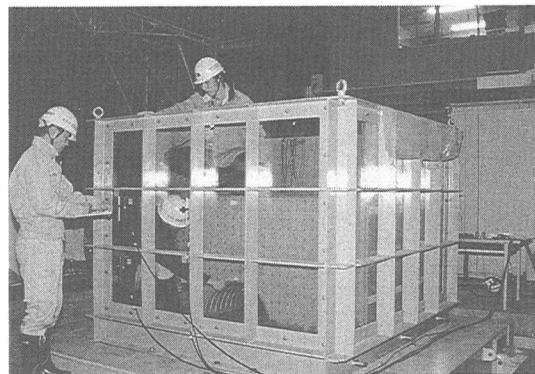


写真-1 実験模型

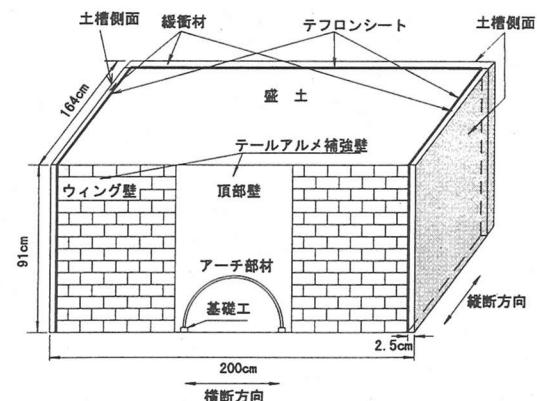


図-1 実験模型概略図

2. 模型振動実験の方法

(1) 模型について

a) 縮尺

想定構造物(以下、実物)に対し、写真-1、図-1に示すような縮尺1/20の模型を実験に用いた。また模型の奥行き方向を縦断方向、横(幅)方向を横断方向と呼ぶこととする。

b) アーチ部材

実際のアーチ部材は鉄筋コンクリート製であるが、縮尺1/20で鉄筋コンクリート製アーチ部材を作製するのは困難であるためアクリル樹脂で作製し、長さの相似比は合わせてある。また、測定する軸力および曲げモーメントに対する剛性についても実際のものと相似比がほぼ成立するようにした(2.(2)参照)。アーチ部材の形状は、ほぼ1/4円で、上端部の溝に丸棒をお

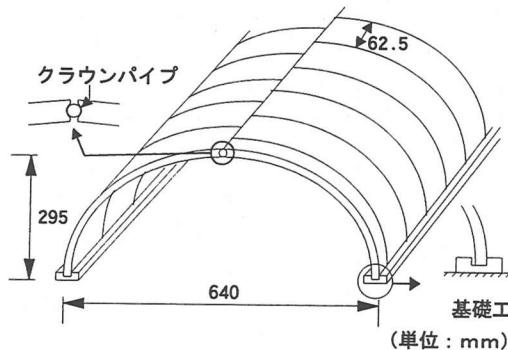


図-2 アーチ部材の組み方

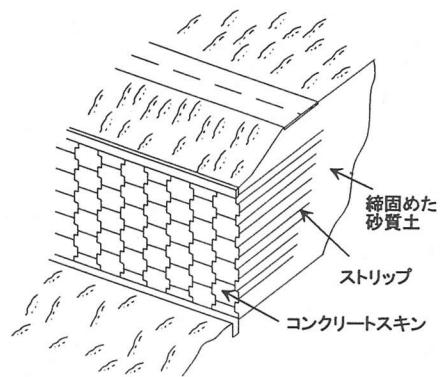


図-3 テールアルメ工法概略図

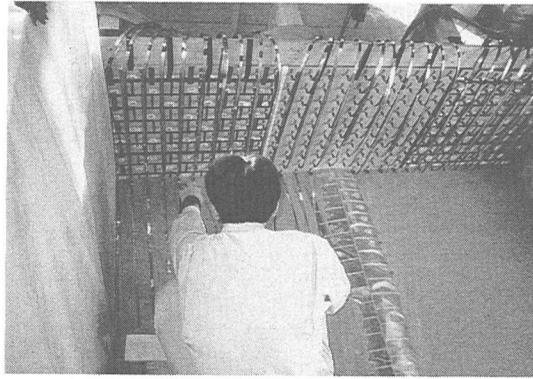


写真-2 模型作製状況

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、写真-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。

c) テールアルメ補強壁

また、テールアルメ補強壁に関しては、図-3 のように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。したがって、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、木製のひごで連結しながらほぼ相似模型のスキンを千鳥状に配置した(図-4)。ただし頂部壁に関しては、実構造物もそうであるように(実構造物では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。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、模型スキンの材質は工作のしやすい塩化ビニールを、ス

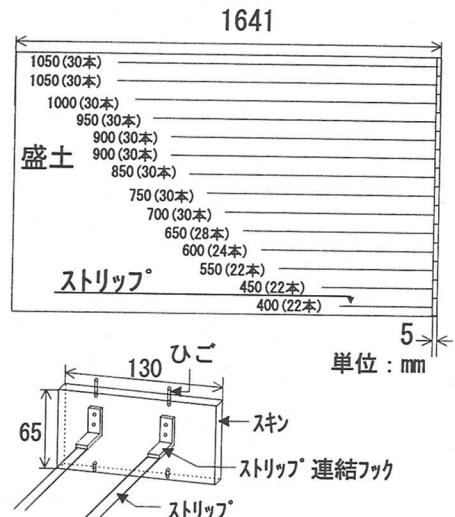


図-4 スキンとストリップの配置

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。写真-2 にストリップを地盤に配置している状況を示す。

d) 境界条件

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 のネオプレーンゴム)を貼り付け、壁面摩擦を低減するため、緩衝材と地盤の間にテフロンシートを設置した(図-1)。

表-2 振動実験の相似則

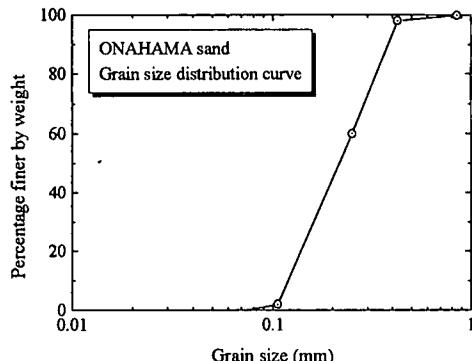


図-5 盛土材の粒径加積曲線

表-1 盛土材の物理的性質

土粒子の密度 (ρ_s)	2.71 g/cm ³
最大粒径	0.85 mm
細粒分含有率 (F.C.)	1.31 %
最大間隙比 (e_{max})	1.02
最小間隙比 (e_{min})	0.63
最適含水比 (w_{opt})	18.2 %

e) 盛土作製方法

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-5に粒径加積曲線を、表-1に物理的性質を示す。模型盛土は、密詰めとゆる詰めで作製した。密詰めの場合は、相対密度が80%程度になるように管理しながら、振動により各層(14層)を締固めた。ゆる詰めの場合は、一切締固めは行わず、相対密度が40%程度になるように作製した。

(2) 相似則

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⁹⁾を用いると、表-2のようになる^{10), 11)}。例えば、アーチ部材を考えると、アクリル樹脂の弾性係数は 2.9×10^6 kPa で、これを実際に換算すると $2.9 \times 10^6 \times 20^{\frac{1}{2}} = 1.3 \times 10^7$ kPa となる。実際の鉄筋コンクリート製のアーチ部材では、 2.0×10^7 kPa 程度のものが使われることを考えると、若干小さめの値となる。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(実在しない)に対して様

物理量	次元	相似比
長さ	L	λ
盛土材の密度	ML ⁻³	1
重力加速度	LT ⁻²	1
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 ² T ⁻²	λ^4

L: 長さ, M: 質量, T: 時間

的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はせず、模型サイズの値で示しておく。

(3) 測定位置

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。アーチ部材間の開きの測定は縦断方向に数ヶ所行ったが、最もテールアルメ補強壁よりもしか変位が表れなかつたため、この結果のみ示す。

a) 加速度測定位置

模型内での加速度測定位置は図-6に示すように、加速度応答倍率を求めるため深さ方向4ヶ所で計測した。横断方向加振の時は横断方向の加速度を、縦断方向加振の時は縦断方向の加速度を測定した。

b) アーチ部材応力

アーチ部材応力は図-7に示すようにアーチ部材(1/4円)の中央にひずみゲージを貼り付け、軸力と曲げモーメントを測定した。軸力、曲げモーメントは、図-7に示した矢印の方向が正となる。

c) アーチ部材間の開き

縦断方向に並んだアーチ部材間の開き(縦断方向)を見るために、図-8に示す位置にπ型変位計を設置した。アーチ部材間が開くと正である。

d) テールアルメ壁の変位

テールアルメ補強壁の(残留)水平変位を測定するため、図-9に示す測定点にレーザー変位計を設置した。テールアルメ補強壁が前面に押し出てくる方向が正である。

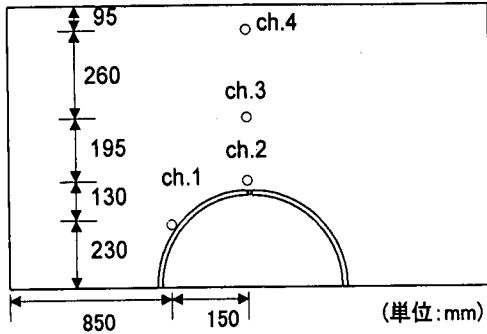


図-6 加速度測定位置

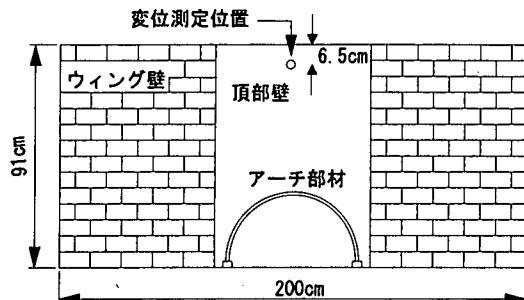


図-9 テールアルメ壁の変位測定位置

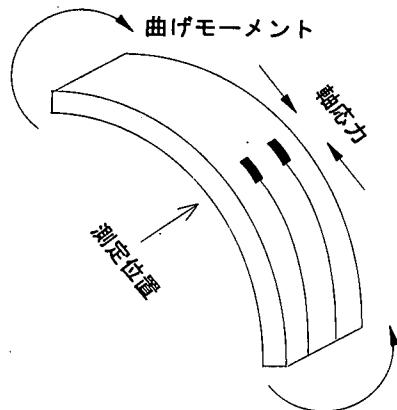


図-7 アーチ部材応力測定位置

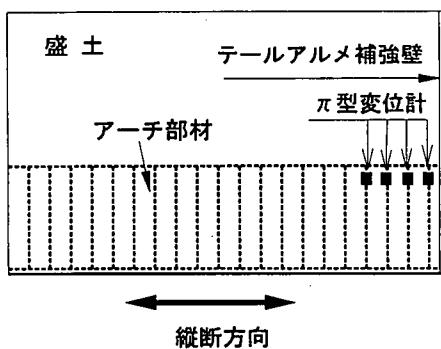


図-8 アーチ部材間の開き測定位置

(4) 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。それぞれの試験において、盛土は密詰めとゆる詰めで行った。

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きながら、各加速度計の測定位置における加速度を測定する。各位置における測定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、固有振動数を把握する。加振方向は横断方向と縦断方向のそれぞれについて行った。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。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(盛土材がテールアルメ壁とアーチ部材の間から漏れ始める)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、データー収録ができた後、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。

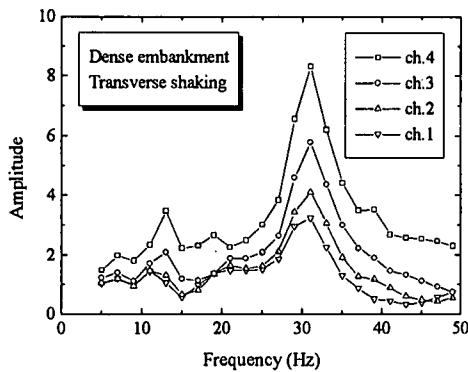


図-10 共振試験結果(密詰め, 横断方向加振)

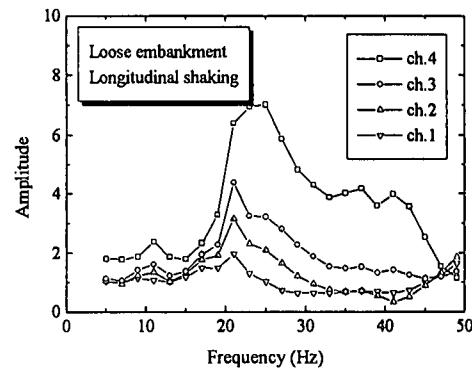


図-13 共振試験結果(ゆる詰め, 縦断方向加振)

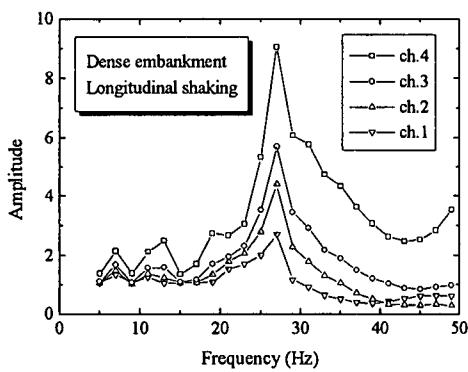


図-11 共振試験結果(密詰め, 縦断方向加振)

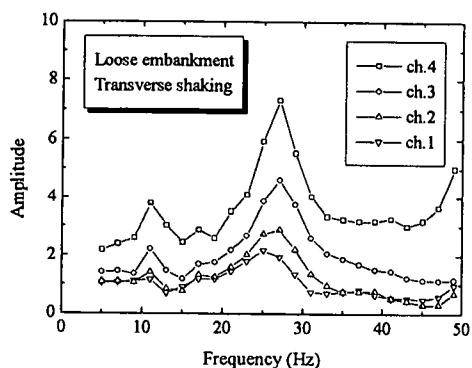


図-12 共振試験結果(ゆる詰め, 横断方向加振)

表-3 各実験条件における共振周波数

実験条件	加振方向	共振周波数 (模型)	共振周波数 (実物)
密詰め	横断方向	31 Hz	3.3 Hz
密詰め	縦断方向	27 Hz	2.9 Hz
ゆる詰め	横断方向	27 Hz	2.9 Hz
ゆる詰め	縦断方向	21 Hz	2.2 Hz

3. 実験結果

(1) 共振試験結果

図-10～13 に各実験条件における共振試験での加速度応答倍率の結果を示す。密詰め盛土における横断方向加振および縦断方向加振の共振周波数は図-10, 11 に示すようにそれぞれ 31 Hz, 27 Hz となっている。ゆる詰め盛土における横断方向加振および縦断方向加振の共振周波数は図-12, 13 に示すようにそれぞれ 27 Hz, 21 Hz である。まず縦断方向加振では横断方向加振より共振周波数が小さくなっているが、これはテールアルメ補強壁が柔な構造であるためと考えられる。またゆる詰め盛土は密詰め盛土と比べ、共振周波数と加速度応答倍率が小さくなっているのは、ゆる詰め砂の動的変形特性は密詰め砂より、せん断剛性は小さく減衰は大きくなっているからである。これらの結果を表-3 にまとめておく。なお、表-3 における共振周波数(実物)という項目は、表-2 の相似比に基づいて実物に換算した値である。破壊実験における入力波の周波数はこの共振周波数を用いる。

(2) 破壊試験結果

破壊試験においては、振動により発生する動土圧の方向を考えて、横断方向加振よりアーチ部材にかかる軸力(軸応力で評価する)と曲げモーメント(アーチ部材一枚あたりの曲げモーメントで評価する)を評価し、縦断方向加振よりアーチ部材間の開きとテールアルメ補強壁の変位を評価する。ただしテールアルメ補強壁については横断方向加振時もかなりの変位が見られたため、この結果も示しておく。

破壊試験におけるアーチ部材の軸応力振幅を図-14に示す。軸応力振幅はゆる詰め盛土より密詰め盛土のほうが大きくなっているが、これは密詰め盛土のほうがアーチ部材上の地盤の質量が大きく、横方向の加速度により、より大きな力がアーチにかかるためと思われる。

アーチ部材1枚あたりの曲げモーメントは図-15に示すように軸応力とは逆にゆる詰め盛土のほうが大きくなる。これは、ゆる詰めの場合、盛土がほとんど締固まっていない状態であるため変形しやすく加振力が働いたときに曲げモーメントが増加しやすいと考えられる。

アーチ部材間の開きと、テールアルメ補強壁の変位であるが、振動による動的変位は非常に小さいため、約30秒間加振をした後の残留変位で評価する。またアーチ部材間の開きに関しては、坑口付近のみ開きが生じ、坑口から奥に入ったアーチ部材間には開きは生じなかっただため、坑口付近の結果のみ示してある。まずアーチ部材間の開きであるが図-16に示すように密詰め盛土の場合はほとんど変化しないが、ゆる詰め盛土の場合は小さい加速度でも開きが生じている。ゆる詰めでは地盤が変形しやすく、アーチ部材も動きやすくなっているといえる。

テールアルメ補強壁の変位の測定値を図-17に示す。ゆる詰めでは、盛土そのものの強度だけでなく、テールアルメによる補強効果も小さく、加速度の増加に伴いせん断ひずみが増大した結果、残留変位が大きくなっている。また加振方向に関しては、変位方向と直角の横断方向でもかなりの変位が表れている。これは、横断方向加振であっても砂とテールアルメのストリップの摩擦が小さくなつたため盛土を鉛直に支えられず、徐々に前に変位したものと考えられる。密詰め盛土では正弦波で300gal程度まではほとんど変位が出ていない。不規則波である実際の地震においてはさらに大きな最大加速度まで安定していると考えられ、密詰め盛土ならテールアルメ補強壁の耐震性は十分期待できる。

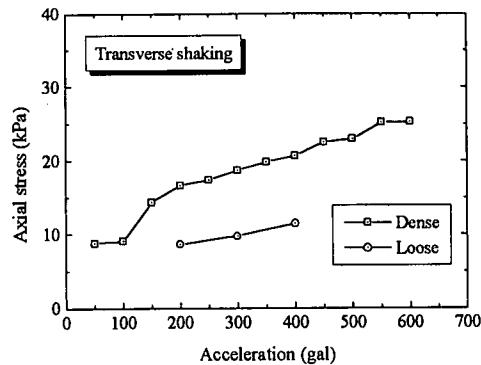


図-14 アーチ部材の軸応力(横断方向加振)

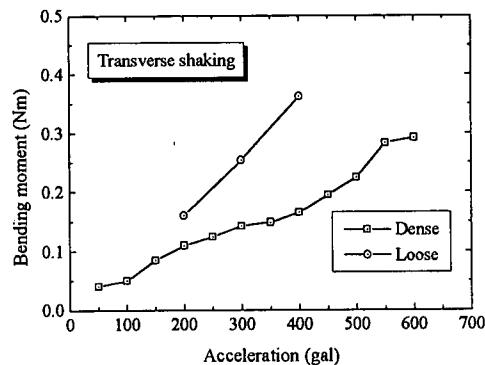


図-15 アーチ部材の曲げモーメント(横断方向加振)

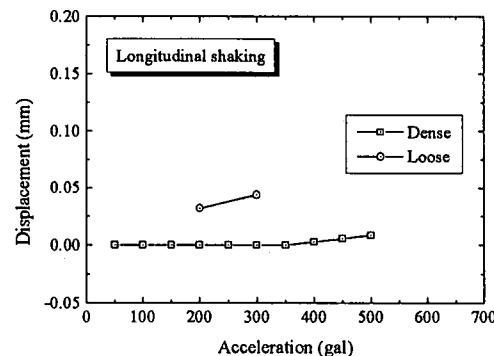


図-16 アーチ部材間の開き(縦断方向加振)

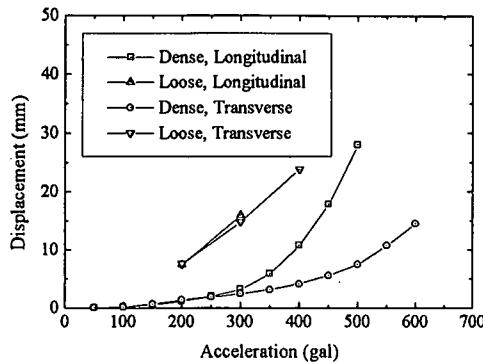


図-17 テールアルメ補強壁の変位

(3) 破壊形態についての考察

本研究で用いた相似則が破壊時(大変形時)まで成立するかには疑問があるが、ここでは模型の破壊形態について考察する。本実験の全てのケースにおいて、振動が強くなるとテールアルメ補強壁が前にはらみだしてきて破壊した。またテールアルメ補強壁上部ほど変位が大きかった。さらに振動を大きくしていくと、アーチ部材頂部とテールアルメ補強壁の間から砂が漏れ始め、ここで実験終了とした。テールアルメ補強壁のスキンの連結部や頂部壁とアーチ部材の連結部の強度については、実構造物との相似について考慮していないため正確な議論はできないが、実験結果よりテールアルメ補強壁とアーチ部材の連結部が1つのネックになりそうなことがわかる。ただし、この連結部の強度を上げると頂部壁とともにアーチ部材が動かされ、アーチ部材間の開きに影響を与えると考えられるためさらに検討が必要である。

次に盛土の沈下であるが、密詰め盛土ではテールアルメ補強壁の変形により、補強壁後部の地盤が沈下したが、補強壁から離れたところではほとんど沈下はみられなかった。密詰め盛土では地盤の残留変形はテールアルメ補強壁周辺にのみ起こるようである。ゆる詰め盛土では補強壁の後部のみならず、振動で密に詰まることにより全体が沈下していた。

また、本研究ではアーチ部材にかかる動的応力を測定することに主眼をおき、破壊強度についての相似則は考慮していない。アーチ部材の破壊形態を模型より調べるには、強度についての相似則を満足した模型を作製する必要がある。

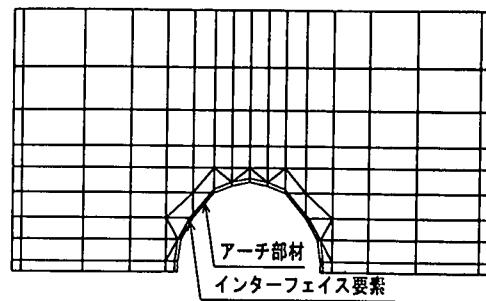


図-18 解析メッシュ

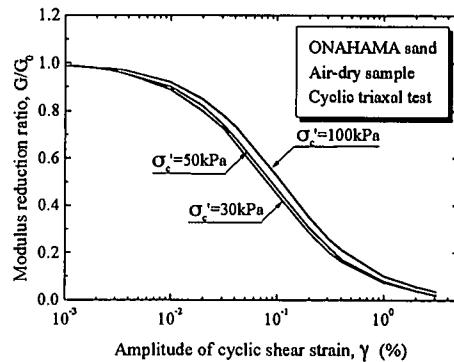


図-19 盛土材のせん断剛性のひずみ依存性

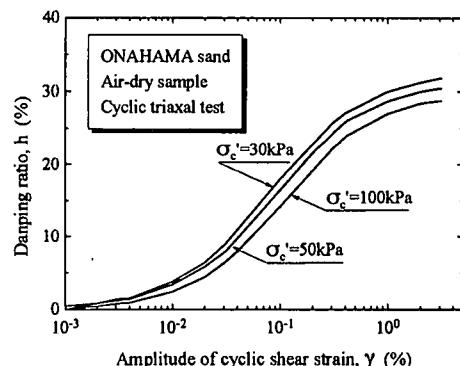


図-20 盛土材の減衰係数のひずみ依存性

表-4 盛土材の一面せん断試験結果

乾燥密度 (g/cm ³)	飽和度 (%)	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (°)
1.40	1.9	0.00	32.3
1.60	3.1	0.00	49.7

4. 模型振動実験の解析

(1) 解析の概要

模型振動実験で得られた結果をもとに、FLUSH¹²⁾の考え方を用いた2次元地震応答解析による横断方向加振時の周波数特性およびアーチにかかる力(軸力と曲げモーメント)の解析を行った。テールアルメ補強壁の変形による影響についても当然考えるべきであるが、本論文に示した結果は、縦断方向中央部に設置された測定器の結果であるため、3次元的影響は小さいとして(実際、テールアルメ補強壁周辺のみ大きく変形しており、補強壁より離れたところでは変形は小さかった)、2次元解析を行った。また、テールアルメ補強壁は横断方向に補強効果はないものとした。地盤の非線形性は等価線形化法により考慮する。解析に用いたメッシュは図-18に示す通りである。モデルの盛土には平面ひずみ要素を、アーチ部材には梁要素を設定した。盛土材の動的変形特性については、模型実験で使用する小名浜砂(自然乾燥状態)で振動三軸試験を実施し、せん断剛性と減衰定数とひずみとの関係(図-19、20)を求めた。また別途実施した小名浜砂(自然乾燥状態)の圧密定圧一面せん断試験により得られた結果は表-4の通りである。模型実験における上層では、極端に拘束圧が小さくなってしまうが、ひずみ依存曲線は振動三軸試験における拘束圧30 kPaの結果を用いた。初期せん断剛性(G_0)については、拘束圧の影響による換算⁹⁾と振動三軸試験結果より得られた式(1)を用いて算定した。ここで、初期せん断剛性(G_0)は非常に微小ひずみ領域であるため、式(1)にもあるように有効拘束圧 p' の0.5乗ではなく0.4乗に比例するとした⁹⁾。模型実験において拘束圧は土圧係数を仮定して式(2)を用いる。この式の土圧係数 K は密詰めの場合 $K=0.4$ 、ゆる詰めの場合 $K=0.5$ とした。アーチ部材と盛土の間にはすべりも生じていると考えられ、このすべりを簡単に表現するために、アーチ部材と盛土の間に、せん断剛性の小さい線形材料からなる薄い層(せん断剛性が小さく線形の材料であるということを以外は、盛土材と同じ設定である)

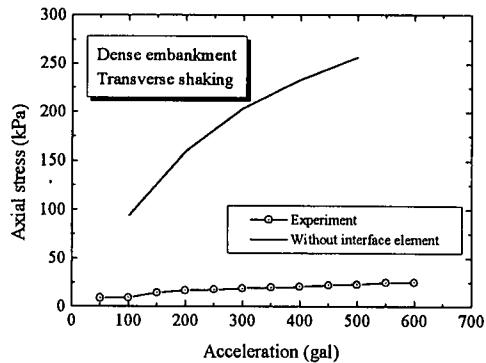


図-21 アーチ部材の軸応力解析結果
(密詰め、インターフェイス要素なし)

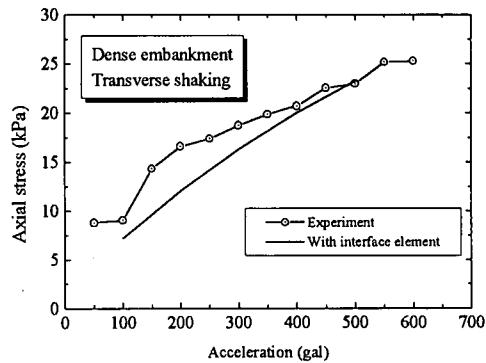


図-22 アーチ部材の軸応力解析結果
(密詰め、インターフェイス要素あり)

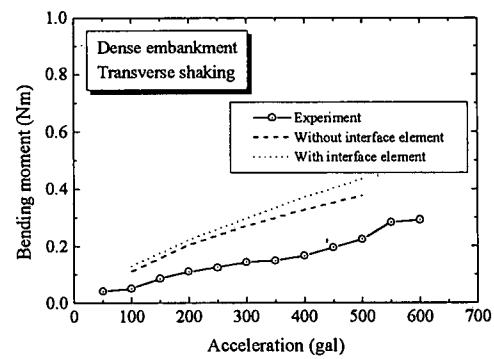


図-23 アーチ部材の曲げモーメント解析結果
(密詰め)

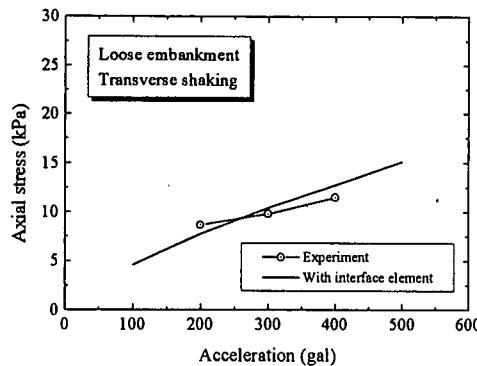


図-24 アーチ部材の軸応力解析結果
(ゆる詰め)

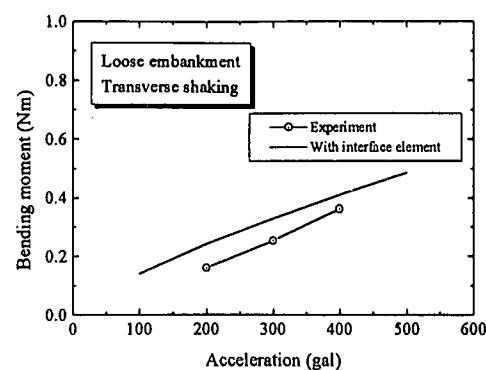


図-25 アーチ部材の曲げモーメント解析結果
(ゆる詰め)

を設けた。ここでは、この接触状態を表現するために使用した薄層の平面要素をインターフェイス要素と称することにする。このような薄層(模型サイズで1cmの厚み)の線形インターフェイス要素を設ける場合と設けない場合(盛土とアーチ部材は同じ動きをする)の両条件で解析を行った。

$$G_0 = 1140 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} p'^{0.4} \quad (\text{kPa}) \quad (1)$$

$$p' = \frac{\sigma_v + 2K\sigma_v}{3} \quad (2)$$

(2) 解析結果

破壊試験におけるインターフェイス要素なしの軸応力のシミュレーション結果を図-21に示す。この図からわかるように実験値と解析値に間に大きな隔たりがある。これは盛土材とアーチ部材が一体となって変形しないことによると考えられ、盛土とアーチ部材の間に剛性が小さく、厚みが1cmの薄層のインターフェイス要素を設けた。インターフェイス要素の物性値に関しては、とりあえず厚みは固定して100 galの入力波の時、実験結果とほぼ一致するように定めた結果、せん断剛性は30 kPaであった。図-22にその解析結果を示す。100 galのみならず入力加速度の増加に伴う軸応力振幅の変化がよくシミュレーションできている。

図-23に曲げモーメントの解析結果を示す。曲げモーメントに関しては、軸応力と比べるとインターフェイス要素の影響が小さくなっている。これは、アーチに等方的な力がかかることにより軸応力が発生し、偏差的な力がかかると曲げモーメントが発生すると

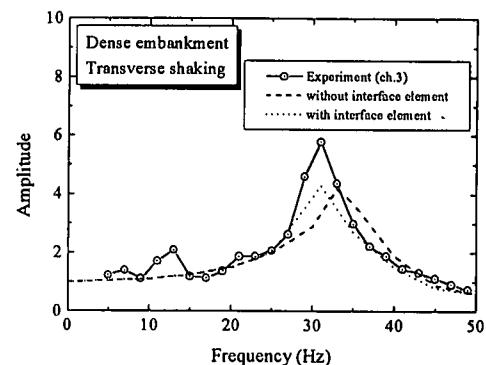


図-26 周波数特性解析結果
(密詰め)

考えると、振動時にインターフェイス要素はアーチを拘束する力を低減させるが、偏差的な力には影響が小さいと考えることができる。曲げモーメントに関してはよく実験結果を表しているといえる。

ゆる詰め盛土のアーチ部材の軸応力と曲げモーメントの解析結果をそれぞれ図-24と図-25に示す。インターフェイス要素の物性値に関しては密詰め盛土の時と同様の方法で定め、せん断剛性10 kPaを得た。この図からわかるように実験値と解析値はよく一致しており、盛土材の密度の変化により、インターフェイス要素のせん断剛性を変化させる必要があることがわかる。

次に密詰め盛土の周波数特性を図-26に示す。共振周波数、加速度応答倍率とも実験値とほぼ一致している。またインターフェイス要素は薄い層なので、周波数特性にあまり影響をあたえていないことがわかる。

インターフェイス要素を導入することにより、解析結果を実験結果と適合させられることについて述べてきたが、実際の構造物に対してどのように設定するかについて現段階では問題点が多い。今後、インターフェイス要素の物性値に与える盛土材の密度、盛土材とアーチ部材の摩擦、拘束圧(模型サイズ)などの影響を詳細に調べることにより、インターフェイス要素の物性値がある程度の範囲で決定できるようになると考えている。

5. 結論

3ヒンジアーチとテールアルメ補強壁ができるだけ忠実に模型に再現し、振動台実験を行った。この実験および解析により以下のことが明らかとなった。

1. ゆるい地盤では振動によるアーチ部材の軸応力は小さくなるが、曲げモーメントが大きくなり、アーチの構造上好ましくない。
2. 密な地盤においては、振動によるアーチ部材間の開きはほとんど無く、テールアルメ補強壁の変位も300 gal程度の正弦波までは安定しているため、この構造物の耐震性は十分期待できる。
3. テールアルメ補強壁の変形は、縦断方向振動のみでなく、横断方向に対しても起こる。
4. 2次元地震応答解析において、盛土とアーチ部材の間にインターフェイス要素を用いることにより、実験結果とほぼ適合させることができる。
- 5.インターフェイス要素の物性値の決定方法については未解明なところが多く、この影響要因についてはさらに詳しく調べる必要がある。これまで行った実験においては、盛土密度の影響を受け、密度が大きくなるとインターフェイス要素の剛性も大きくした方が良い結果が得られた。

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。研究を始めるに当たっての実験準備段階では、当時の長岡技術科学大学大学院生、多田誠氏(現在、道路公団)の協力によるところが大きい。また実験模型作製にあたっては多大な労力を必要とするが、長岡技術科学大学地盤研究室の学生諸君の協力を得ることができた。ここに記して、深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、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「テクスパン工法の冬季施工」，建設技術報告会 in 北陸'98 論文集, pp. 189-192, 1998.
- 2) 例えば、テクスパン工業会：テクスパン工法の海外における設計・施工例, 1993.
- 3) 大浦尚満、大川秀雄：3ヒンジカルバートの施工時における挙動, 第12回土木学会新潟会研究調査発表会論文集, pp. 181-184, 1994.
- 4) 大浦尚満、大川秀雄、阿部憲一、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.
- 5) 俊成安徳、小川正二、佐藤雅宏：プレハブ式アーチカルバートの動的挙動, 土木学会第50回年次学術講演会, pp. 596-597, 1995.
- 6) 多田誠、小川正二、豊田浩史、高貝真：プレハブ式アーチカルバートの振動模型実験, 第31回地盤工学会研究発表会講演集, pp. 1215-1216, 1996.
- 7) 小川憲保：テールアルメ工法における盛土材と壁面変位の関係, 土木学会論文報告集, No.493/III-27, pp. 119-125, 1994.
- 8) Brooker, E. W. and Ireland, H. O. : Earth Pressures at Rest Related to Stress History, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-15, 1965.
- 9) Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y. : Shear Moduli of Sands Under Cyclic Torsional Shear Loading, *Soils and Foundations*, Vol. 18, No. 1, pp. 39-56, 1978.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Lysmer, J., Uda, T., Tsai, C-F., and Seed, H. B. : FLUSH : A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Programs, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, Report No. EERC 75-30, 1975.

(1998. 9. 21 受付)

DYNAMIC BEHAVIOR OF 3-HINGE ARCH
IN TERRE ARMEE FOUNDATION

Hirofumi TOYOTA and Makoto TAKAGAI

A 3-hinge arch precast structure which consists of an arch element produced in factory was developed as an arch structure instead of short-span bridge or cast-in-place culvert. Recently, this method was adopted in Japan, but in a seismically active area like Japan, it is necessary to study the seismic characteristics of this structure.

In this research, shaking table tests were carried out to examine the effects of the density of foundation and the effects of intensity of shaking on the dynamic stresses induced in the 3-hinge arch and on the displacement of Terre Armee wall. In addition, a comparison between the experimental results and the analytical results obtained using existing two-dimensional seismic response analysis was performed.