

3ヒンジ式プレキャストアーチカルバートの耐震性能評価と補強方法

岩谷祐太・野田 翼・石田雅博

1. はじめに

近年、建設現場では現場作業の省力化や効率化を目的として、コンクリート構造物のプレキャスト化が進んでおり、地中構造物についても大断面の3ヒンジ式プレキャストアーチカルバート（以下「3ヒンジアーチ」という。）が採用されている。3ヒンジアーチは、写真-1に示すように脚部に2箇所と頂部に1箇所、計3箇所のヒンジ接合部を持つ、鉄筋コンクリートの構造物である。

カルバートのような地中構造物の耐荷性能は、一般的に図-1に示すような横断方向（函軸直角方向）の耐荷力によって上載荷重を支えており、縦断方向（函軸方向）に上載荷重の支持機能は無いとされている¹⁾。そのため、地中構造物の耐震性能に関する研究においては、横断方向の研究が優先されてきた。

そのような中、2011年東北地方太平洋沖地震において、高速道路の3ヒンジアーチに写真-2に示すような接合部のコンクリート片の剥落が生じた²⁾。藤原ら³⁾は、カルバート縦断方向の強い地震動により、部材同士が強く接触し合い、この損傷が発生したものと推測している。このような損傷が生じた場合、地震時の耐荷性能が確保できないため耐震補強を行う必要があるが、具体的な耐震補強対策案がないのが現状である。

そこで、本研究では動的遠心模型実験と3次元FEMによる再現解析により、3ヒンジアーチの縦断方向の損傷メカニズムの解明及び補強方法について検討を行った。

なお、本研究は（国研）土木研究所、京都大学、（株）高速道路総合技術研究所で行った「プレキャスト部材を用いた既設カルバートの耐震性能評価と補強方法に関する共同研究」の成果の一部である。

2. 損傷メカニズムの検討

2.1 動的遠心模型実験

2.1.1 実験概要

損傷メカニズム確認のため、3ヒンジアーチをモデル化した小型模型による動的遠心模型実験を行った。本実験は遠心力50G場で行うため、相似則を考慮し模型寸法は実物大寸法の1/50とした。作製模型を写真-3に示す。

実験で想定した断面形状のうち内空幅は、実際に被災し損傷したカルバートのうち損傷程度の大きかったものの平均値である9.0mとした。部材厚は最も剛性の低い断面となるよう規格部材厚の中で最小値である250mmとし、内空高さはこれらの条件から逆算して4.7mとした。実験では想定した1/50サイズのアリウム合金製模型を作製した。構造材の違いを考慮し、曲げ剛性EIが相似則をできる限り満足するよう、模型の部材厚を4mmに決定した。

基礎地盤は、3ヒンジアーチの設計施工マニュアル⁴⁾に従い、3号硅砂を用いて相対密度85%以上となるよう締め固め管理を行い作製した。裏込め



写真-1 3ヒンジ式プレキャストアーチカルバート

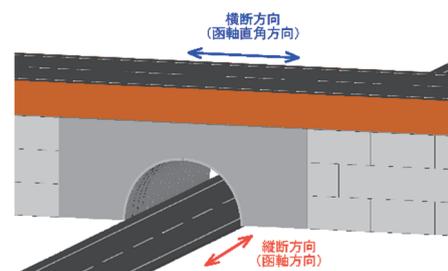


図-1 カルバート検討方向の定義



写真-2 接合部の損傷

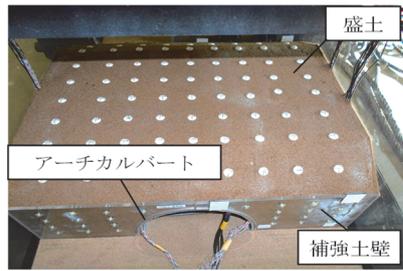


写真-3 作製模型

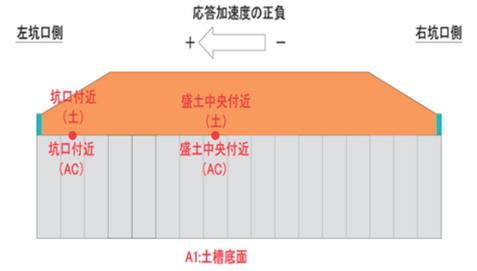


図-2 加速度計設置位置

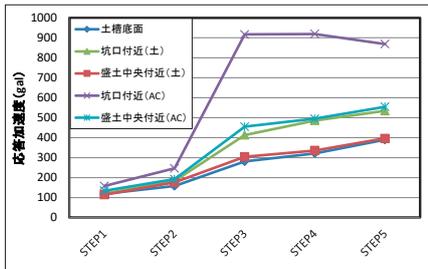


図-3 応答加速度

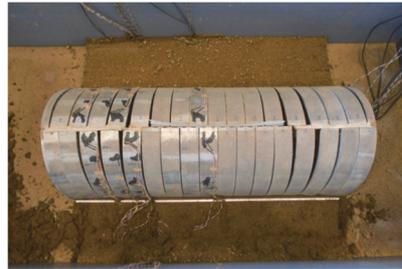


写真-4 加振後外観状況

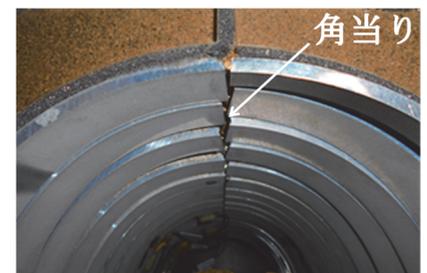
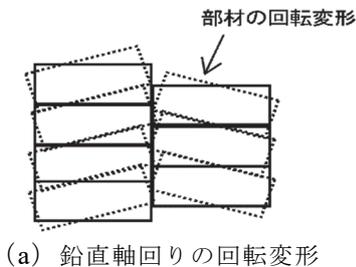
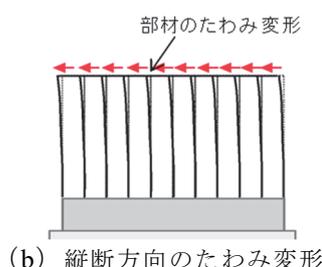


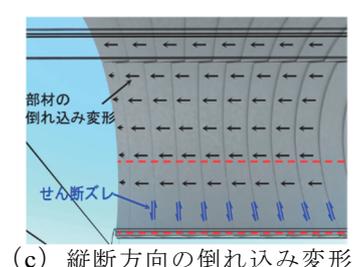
写真-5 加振後内部状況



(a) 鉛直軸回りの回転変形



(b) 縦断方向のたわみ変形



(c) 縦断方向の倒れ込み変形

図-4 作用する変形モード

地盤も同様に、締固め度90%以上となるよう湿潤江戸崎砂を用いて締固め管理を行い作製した。坑口壁は、ストリップを使用した補強土壁構造とした。坑口壁は厚さ5mmの亚克力板でモデル化した。ストリップはりん青銅板の表面に乾燥状態の7号珪砂を付着させることでモデル化した。

2.1.2 入力波形

本実験では、遠心力50G場に達した時点からSTEP0とし、STEP1では入力加速度100galを縦断方向に加振し、その後1ステップごとに入力加速度を50galずつ漸増させ、実験装置の最大加速度600galまで11ステップの加振を行った。本実験はステップ加振法により地震動を载荷しているため、前ステップの残留変形や応力がある状態での地震動の载荷となっている。入力波は周波数を1Hzとした正弦波を20波入力した。

2.1.3 実験結果

11ステップの加振予定であったが、STEP5にてアーチ縦断方向の目開きが大きくなり、上部盛土がアーチ内部に流入し崩壊に至ったため実験を終了した。図-2のとおり、アーチ天端、それと高さ方向に同位置の土中、及び土槽底面に設置した

加速度計により計測した応答加速度の最大値を図-3に示す。STEP3において坑口付近(AC)の応答加速度が大きくなっており、同位置土中の坑口付近(土)との差が大きいことから、部材が土とは独立して挙動していると推察される。

次に、加振後に土を除去した外観状況及び内部状況をそれぞれ写真-4、写真-5に示す。頂部ヒンジ部の坑口方向への変形が大きく、坑口から3～5リング目で目開きが生じていた。また、アーチが縦断方向に変形し部材同士がぶつかり、実現場の損傷と同様の角当りが生じているのが確認できた。この結果から、接合部の損傷は縦断方向の加振により生じていたことが確認できた。

2.2 3次元FEM解析

実験時の変形モードを詳細に確認するため、3次元FEMによる再現解析を行った。その結果、図-4のとおり①鉛直軸回りの回転変形、②縦断方向のたわみ変形、③縦断方向の倒れ込み変形の3つの変形モードが複合的に作用していることが分かった。補強方法は、このような複雑な変形を抑制する方法を選定する必要があると考えられる。

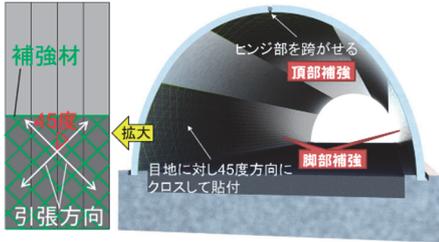


図-5 ケース②補強イメージ

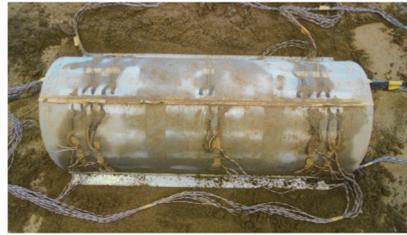


写真-6 ケース① 加振後外観状況



写真-7 ケース① 加振後内部状況

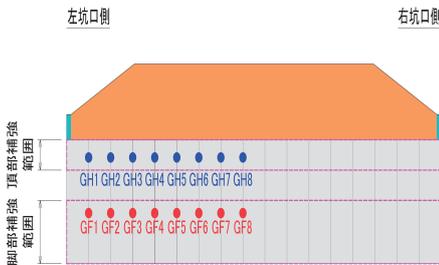


図-6 ひずみゲージ設置位置

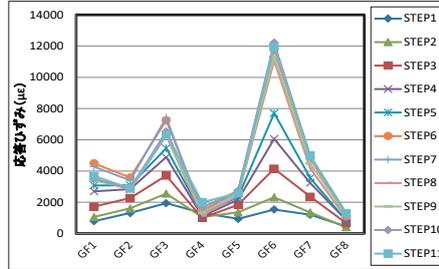


図-7 ケース①脚部応答ひずみ

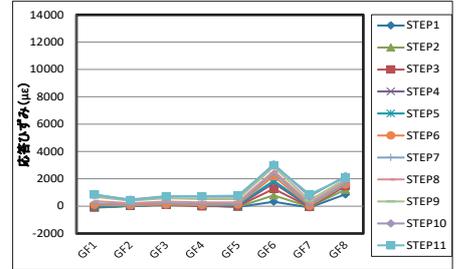


図-8 ケース②脚部応答ひずみ

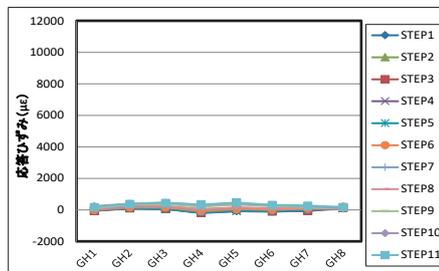


図-9 ケース②頂部応答ひずみ

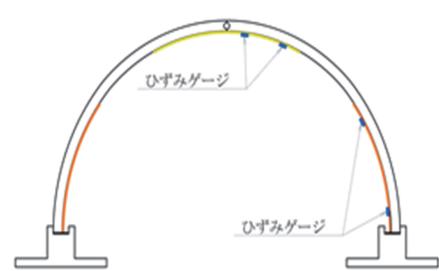


図-10 ひずみゲージ設置位置

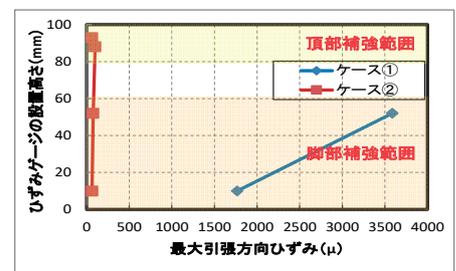


図-11 高さ方向の応答ひずみ

3. 補強工法の検討

3.1 動的遠心模型実験

3.1.1 補強工法の検討及びモデル化

補強工法は、カルバート内空側から施工可能であり、補強後に建築限界を侵さない工法として炭素繊維シート補強を選定した。炭素繊維シートのモデル化にあたり、異方性材料であること、及び引張強度及び引張剛性だけでなく接着剤の付着強度や付着面積も影響すると考えられることから、別の材料でモデル化するのではなく実際に使用を想定している炭素繊維シートを用いることとした。補強諸元は、実構造物に対し目付量 $200\text{g}/\text{m}^2$ の1方向シートを4層の施工を想定した。ここで目付量とは、繊維の単位面積当たりの重量のことである。この補強量を1/50モデルで再現しようとした場合、必要シート厚は 0.0089mm 程度となるが、シート厚が薄すぎて対応する製品が存在しないため、シート厚が 0.0556mm の目付量 $200\text{g}/\text{m}^2$ の2方向シートを1層貼り付けた。その場合、シート厚が目標厚の6.25倍となり、想定した補強諸元より

過大な補強となるが、実験で得られた結果に対しシート厚の違いを考慮した補正を行うことで、実構造物の挙動に換算した。

実験ケースは、脚部のみを補強したケース(ケース①)と、脚部に加えて頂部も補強したケース(ケース②)の2ケースとし、それ以外は無補強時と同様の条件で行った。シートの貼り付け範囲は、頂部・脚部とも、カルバートの縦断方向全長とした。シートの貼り付け方向は、前述のとおりアーチ部材には3つの変形が複合して生じており、部材同士の横断方向のせん断ずれ挙動と縦断方向の部材同士が離れる挙動という方向の異なる挙動を抑制することが求められる。そのため、異なる方向の挙動に対し炭素繊維シートの引張抵抗力の分力で抵抗させる目的で、アーチ部材の目地に対して斜め 45 度方向に貼り付けた。また地震時の正負交番載荷を考慮し、 45 度方向にシートをクロスして貼り付けた。さらに頂部のシートは、ヒンジ部の目開きを防止するためヒンジ部を跨ぐように貼り付けた。ケース②における補強イメージを図-5に示す。

3.1.2 実験結果

ケース①及び②では無補強時のような明確な崩壊が確認できなかつたため、実験機の最大加速度であるSTEP11まで加振した。加振後のケース①の外観状況及び内部状況を写真-6及び写真-7に示す。ケース①及び②とも、無補強時に見られたリングの目開きや角当りは確認できなかつた。

次に、図-6に示すアーチ部材の目地位置にあたる炭素繊維シート上に設置したひずみゲージによる応答ひずみを図-7から図-9に示す。ここでいう応答ひずみは、繊維シートの方向すなわちアーチ部材目地に対して斜め45度の方向の値であり、前述したシート厚の違いを考慮した補正を行い実構造物の挙動に換算したものである。ケース①の脚部では、左坑口から6・7リング目の目地位置(GF6)で最大12,000 μ 程度の応答ひずみが生じた一方、ケース②の脚部では最大3,000 μ 程度と約1/4程度であり、ケース②の頂部は最大500 μ 程度とほとんど生じなかつた。

また、左坑口側から2・3リング目の目地位置(GF2)の炭素繊維シートに設置したひずみゲージ設置位置を図-10に、その応答ひずみの最大値を図-11に示す。ケース①では、脚部の炭素繊維シートの上部和下部における最大応答ひずみに約1,800 μ の差が生じたが、ケース②では約15 μ とほぼ差が生じなかつた。ケース①では下部に比べて上部の応答ひずみが大きいことから、アーチ部材が回転するような変形モードであったと考えられる。一方ケース②では頂部も補強することにより、変形モードが回転より並進に近くなり、炭素繊維シート全体で応力を分担したものと考えられる。この結果から、脚部及び頂部を炭素繊維シートで補強することで、アーチ部材の変形を抑制し、所定の耐震補強効果が得られることが分かつた。

4. まとめ

本研究の結果、3ヒンジアーチの頂部ヒンジ部の損傷は、縦断方向荷重により生じる鉛直軸回りの回転変形、坑口方向へのたわみ変形及び倒れ込み変形が原因であることを解明した。また、頂部及び脚部を炭素繊維シート補強することにより、高い変形抑制効果が得られることを確認した。

これらの成果に加えて、補強設計方法等を取りまとめた「プレキャストアーチカルバート耐震補強対策マニュアル(案)」⁵⁾を整備している。ただし、本マニュアルはヒンジを有するプレキャストアーチカルバートについて、耐震補強が必要と判断された場合の補強方法等を示したものであり、耐震補強が必要な具体の構造条件や優先順位を示したものではない。これについては、別途の検討が必要であると考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：続・実務に役立つ耐震設計入門(実践編)、226p、土木学会、2014
- 2) 安部哲生、中村雅範：高速道路における大型プレキャスト部材を用いたカルバートの活用と適用上の留意点、基礎工、Vol.42、pp.8~11、2014
- 3) 藤原優、藤岡一頼、佐伯宗大：3ヒンジプレキャストアーチカルバートの上載盛土の影響に関する分析、土木学会第71回年次学術講演会、2016
- 4) (財)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検討委員会：テクスパン工法設計施工マニュアル(案)、179p、丸善(株)、1998
- 5) (国研)土木研究所、(株)高速道路総合技術研究所、(学)京都大学工学研究科：プレキャスト部材を用いた既設カルバートの耐震性能評価と補強方法に関する共同研究報告書(その2)、pp.496~553、2020

岩谷 祐太



土木研究所橋梁構造研究グループ
構造メンテナンス研究センター 研究員
IWATANI Yuta

野田 翼



研究当時 土木研究所橋梁構造
研究グループ構造メンテナンス
研究センター 研究員、現 西
日本高速道路(株)
NODA Tsubasa

石田 雅博



土木研究所橋梁構造研究グループ
構造メンテナンス研究センター 上席研究員、博士(工学)
Dr. ISHIDA Masahiro