

第 I 部門

有限要素解析と模型実験による鉄道無筋コンクリート橋脚の地震時破壊メカニズムの解明

京都大学工学部地球工学科 学生員 ○川松 裕汰

京都大学大学院工学研究科 正会員 古川 愛子

1. 研究の背景と目的 現在でも、全国に無筋コンクリート橋脚を有する在来鉄道が多数存在し、地震時に被害が発生している。典型的な被害形態は、打継目での水平ずれと、打継目下部コンクリートの破壊である（図 1）。打継目上部は破壊せず、打継目下部だけが破壊する現象が知られているが、そのメカニズムは未だ解明されていない。本研究では、有限要素法を用いて打継目上下に作用する応力状態を解析し、無筋コンクリート橋脚の破壊メカニズムを解明すること、模型実験により解明した現象を確認することを目的とする。

図 1 新潟県中越地震で被災した魚野川橋梁 14P 橋脚¹⁾

2. 有限要素法による解析 本研究では、西日本旅客鉄道（株）によって行われた振動台実験²⁾の供試体を解析対象とした。供試体を図 2 に、解析モデルを図 3 に示す。x 軸を加振方向、y 軸を鉛直方向とする。平面応力要素による 2 次元解析を行った。要素毎に奥行き長さを設定することで側方の半円形状を表現した。物性値には実験時の要素試験結果を用いた。密度はコンクリートが $2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、鋼製錘が $4.045 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、ヤング率はコンクリートが $2.2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 、鋼製錘が $2.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、ポアソン比はコンクリートが 0.2、鋼製錘が 0.3 である。コンクリートには引張軟化型の構成則を採用し、引張強度は $2.784 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 、引張軟化係数は $3.9 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ とした。打継目の摩擦係数は 0.64 である。自重と水平加速度を作用させた。



図 2 供試体(西日本旅客鉄道(株)提供)

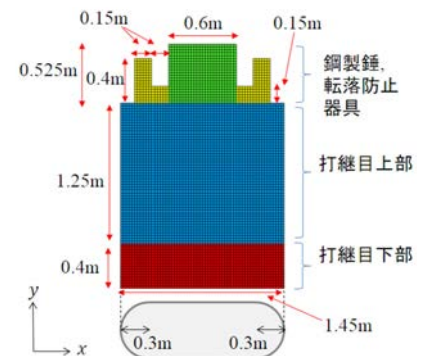


図 3 解析モデル

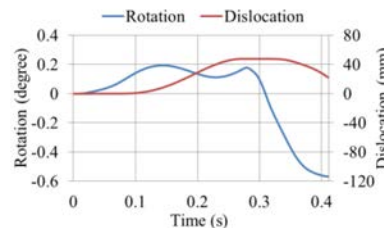


図 4 ケース 1 の回転角と純水平変位

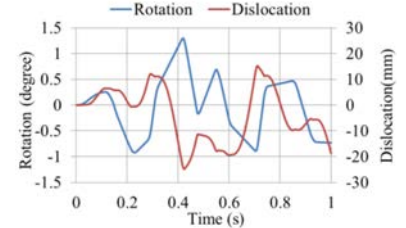


図 5 ケース 2 の回転角と純水平変位

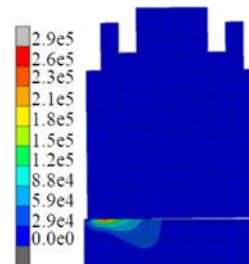


図 6 ケース 1 の最大主応力分布(0.4 秒後)

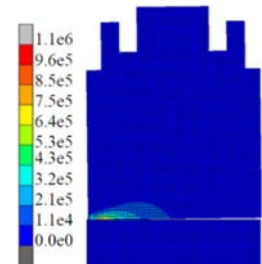


図 7 ケース 2 の最大主応力分布(0.3 秒後)

検討に先立ち、振動台実験の入力地震動を解析モデルに入力したところ、打継目上部の水平変位・回転角、ひび割れ箇所ともに実験結果と良い精度で一致し、解析モデルの妥当性を確認した。しかし、地震動入力時は応力状態が複雑で結果の解釈が困難であった。

そこで、現象を理解し易くするために正弦波を入力した。ケース 1 は 2Hz、ケース 2 は 5Hz の正弦波で、振幅はいずれも 1000gal とした。解析結果を図 4~7 に示す。図 4,5 において回転角とは打継目上部の回転角のことで時計回りを正とする。純水平変位とは打継目上部の水平変位から回転の影響を除去したもので、右方向を正とする。図 6,7 において応力は引張が正で、正の最大主応力は引張応力を意味する。

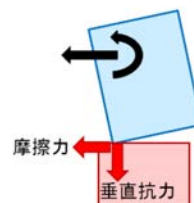


図 8 打継目下部破壊のメカニズム



図 9 打継目上部破壊のメカニズム

Yuta KAWAMATSU and Aiko FURUKAWA

kawamatsu.yuta.35w@st.kyoto-u.ac.jp

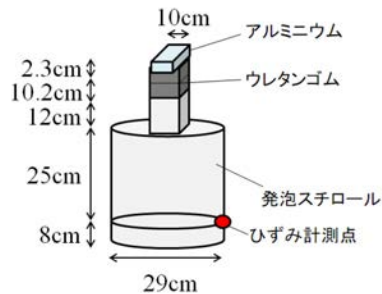


図10 模型実験供試体の寸法

まずケース1について考察する。図6の最大主応力分布より、引張応力は打継目下部にのみ生じている。図は省略するが、ケース1では打継目下部に引張破壊が生じた。打継目下部にのみ引張応力が作用するメカニズムを図8に示す。図4より、0.4秒後の回転の方向と滑動の方向（変位の変化方向）は同方向であり、打継目上部は反時計回りに傾いた状態で左方向に滑動して

いる。このとき、打継目下部には摩擦力が左方向に作用し、摩擦力作用位置より右側には引張応力が作用する。一方、打継目上部に対しては摩擦力の向きが反対であることから、圧縮応力が作用する。以上が、打継目下部だけに引張応力が生じるメカニズムであり、引張応力が引張強度を超えた場合、打継目下部だけに破壊が生じることになる。

次にケース2について考察する。図7より、打継目上部にのみ引張応力が作用している。図は省略するが、ケース2では打継目上部に引張破壊が生じた。打継目上部にのみ引張応力が作用するメカニズムを図9に示す。図5より、0.3秒後の回転と滑動（変位変化）方向は逆方向であり、打継目上部は反時計回りに傾いた状態で右方向に滑動している。したがって、摩擦力作用方向がケース1と逆方向になるため、打継目上部にのみ引張応力が作用すると考えられる。

以上の結果より、入力の変動数が低い時は打継目上部の回転と滑動が同方向となり、打継目下部に引張応力が生じること、変動数が高い時は打継目上部の回転と滑動が逆方向となり打継目上部に引張応力が生じることが確認できた。しかし、過去の被害で打継目上部の被害は見られない。その要因は、高振動数成分が卓越し、かつ引張応力が引張強度を上回るほどに高振動数成分の大きい地震動の発生するケースが少ないからであると推察される。

3. 模型実験による検証 解析で考えられたメカニズムが実際に生じているのかを検証するために振動台実験を行った。JR 飯山線魚野川橋梁 14P 橋脚の 1/12.5 の大きさの縮小模型（図10）を用いた。レーザー変位計による変位から打継目上部の回転角と純水平変位を算出し、高速度カメラ画像からひずみを算出した。ひずみを計測し易くするため、剛性の低い発泡スチロールで供試体を作製し、錘の質量を調整した。供試体の打継目下部と上部、錘の質量はそれぞれ 0.064kg, 0.20kg, 2.3kg である。ヤング率は $8.9 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 、摩擦係数は 0.48 である。入力地震動は図11に示す 3.5Hz のスイープ波とした。実験結果を図12, 13に示す。図12より回転と滑動が同方向であること、図13より打継目下部には引張ひずみが、打継目上部には圧縮ひずみが生じており、ケース1と同様の現象が確認された。

図は省略するが、打継目上部の高さを 67cm に変更した供試体に 5Hz のスイープ波を入力したところ、回転と滑動が逆方向で、打継目上部に引張ひずみが生じており、ケース2と同様の現象が確認された。

4. 結論 入力振動数の違いにより、打継目上下に作用する摩擦力の向きが変わり、打継目下部に引張応力が生じる場合と打継目上部に引張応力が生じる場合のあることが明らかとなった。模型実験でも同様のメカニズムが確認された。

参考文献 1) 九州工業大学災害調査団：平成 16 年新潟県中越地震－第二次被害調査速報版－，2004，2) (公財) 鉄道総合技術研究所：受託業務報告書 無筋橋脚耐震対策確認試験，2015。

謝辞 西日本旅客鉄道（株）には振動台実験結果を提供していただきました。京都大学インフラ先端技術共同講座の先生方にはデジタルコリレーションシステムを貸していただきました。ここに記して謝意を表します。

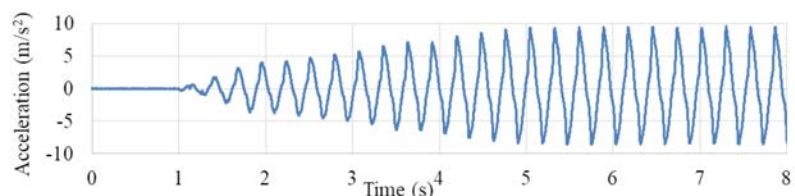


図11 入力地震動

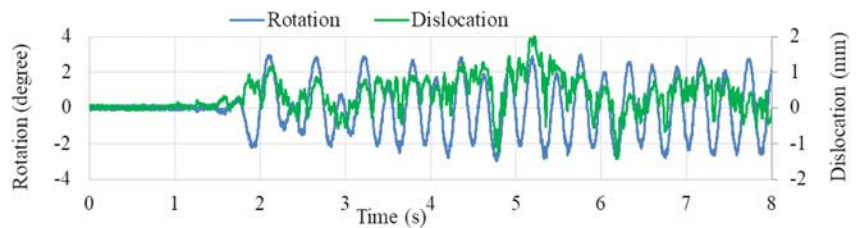


図12 打継目上部の回転角と純水平変位

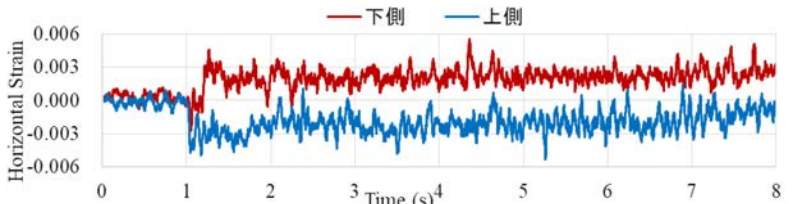


図13 水平方向ひずみ