

## 第I部門

## 鉄道無筋コンクリート橋脚の地震時挙動の数値解析に関する研究

京都大学工学部 学生員 ○矢野 翔大 京都大学大学院 正会員 古川 愛子  
京都大学大学院 正会員 清野 純史

## 1. 研究の背景と目的

全国の在来鉄道において、地震による無筋コンクリート橋脚の被害が発生している。典型的な被害形態は、打継目における水平ずれと打継目下側コンクリート端部の剥落である。これらの被害を受けて耐震性の検討が急務であり、無筋コンクリート橋脚に適した地震時挙動の解析手法の開発が望まれる。2015年1月に西日本旅客鉄道(株)によって振動台実験が実施され<sup>1)</sup>、改良版個別要素法<sup>2)</sup>を用いて同実験の再現解析が行われたが<sup>3)</sup>、回転角の過小評価や破壊状況の再現性に課題を残している。そこで本研究では、改良版個別要素法のばねモデルの改良、および解析モデルの改良によって、振動台の破壊状況を再現できるようにすることを目的とした。

## 2. 改良版個別要素法

個別要素法では、構造物を剛体要素の集合体とモデル化し、接触要素間にばねとダッシュポットを配置し相互作用を表現する。改良版個別要素法では、要素表面をセグメントに分割し各セグメントにばね等を設置(図1左)することで、理論的にばね定数を決定することが可能になった<sup>1)</sup>。従来の手法では、図1中のように分割し、頂点、辺、面にばね等を設置していた。

## 3. 振動台実験の再現解析

## 3.1 供試体および解析モデル

図2左に供試体、右に解析モデルを示す。フーチングは幅2.29m、奥行き1.5m、高さ0.6m、橋脚は幅1.45m、奥行き0.66m、高さ1.65mであり、0.4mの高さに打継目を有する。要素分割に関しては、要素境界が縦方向に一直線とならないようにした。要素サイズは箇所によって異なり、両端の20cm幅の領域(破壊部)を幅の小さい要素で、それ以外(非破壊部)を幅の大きい要素で分割した。破壊部の要素幅は、5cmを基本として偶数段の両端のみ3.75cmとするモデル1と、2.5cmを基本として偶数段の両端のみ1.25cmとす

るモデル2を考えた。要素高さは、打継目上側の1段目を以下を5cm、2段目以上を10cmとした。奥行きは1分割とした。鋼製錘は幅0.6m、奥行き0.45m、高さ0.525mとした。

解析に用いた材料特性は供試体の要素試験結果に基づき設定した<sup>1)</sup>。コンクリートの密度 $2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、ヤング率 $2.2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 、ポアソン比0.2、圧縮強度 $2.784 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 、引張強度とせん断強度は圧縮強度の1/10、1/4とした。鋼製錘は質量810kg、ヤング率 $2.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、ポアソン比0.3とした。減衰定数は臨界減衰の1.0とした。打継目は表面加工され平坦であることから、引張強度は0とし、摩擦係数は試験結果<sup>1)</sup>である0.64を採用した。

## 3.2 入力地震動

振動台実験では鉄道構造物等設計標準<sup>4)</sup>のL2地震動スペクトルII(G2)の地表面地震動を振幅調整した波形に相似則を適用したものが用いられた。解析では、打継目下部に破壊が生じた最大加速度1000, 1200galの2ケースを対象とし、振動台上で計測された加速度波形<sup>2)</sup>の振幅の大きい3秒間を入力した。

## 3.3 回転運動の再現性における問題点と改善策

従来の改良版個別要素法では、要素間の引っ掛かりが原因で摩擦係数を上手く再現できなかった。そこで、2015年度の研究<sup>3)</sup>では、要素の面のみにばねを設置することで引っ掛かりを解消し、摩擦係数を再現できることが確認された。しかし、このばねモ

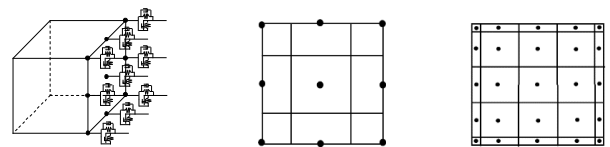


図1 要素表面のばね設置の様子とばね設置点(黒点)  
(左:ばね設置の様子, 中:従来, 右:提案)

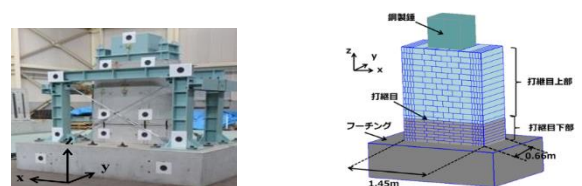


図2 供試体(左)および解析モデル(右)

デルでは抵抗モーメントの過小評価により回転運動を上手く再現できなかった。そこで本研究では、端のばねを頂点により近い位置に設置するようにした。図1右のように、要素の辺の長さを1としたときに、端部から 0.001 の位置にばねを設置した。これにより、滑動とロッキングにおいて理論解と数値解析解が一致することが確認され、今回改良したばねモデルを用いた改良版個別要素法の信頼性が確認された。

### 3.4 打継目下部の破壊のメカニズム

図3に打継目下部の破壊メカニズムを示す。加振後、約 0.38s で右 (x 軸の正) 側に滑動を始める。その後、約 0.5s で時計回りに回転し打継目下部の右側が破壊する。さらに約 0.65s で左側に滑動し反時計回りに回転する。その時に打継目下部の左側が破壊し、打継目下部の両端が破壊した状態となった。

### 3.5 振動台実験の再現結果

図4に加振後の打継目付近の破壊状況を示す。モデル1において、1000gal のケースでは右 (正) 側に滑動するだけで破壊は生じなかったが、1200gal のケースでは、打継目下部右側に破壊が生じた (図4(a))。要素幅 3.75cm に対して、1000gal のケースの滑動量は約 2cm, 1200gal のケースの滑動量は約 4cm であり、滑動量が要素幅より大きい場合に破壊を再現することができた。

モデル2に関しては、要素幅 1.75cm が 1000gal, 1200gal のいずれのケースの滑動量よりも小さいため、打継目下部の両端に破壊が生じた (図4(b)(c))。1000gal のケースにおいては前述した破壊メカニズム通りに再現できた。しかし、1200gal のケースでは打継目上部にも破壊が生じた。この理由として考えられるのは、破壊部と非破壊部で要素の幅が不連続となっており、その要素が接触したときに大きな力が発生し亀裂が生じるということである。図5(a)(b)では左に打継目の水平ずれ、右に回転角を示す。水平ずれは実験と解析結果が途中まで一致したが、破壊が進展するにつれて一致しなくなった。次に上下動の影響を考慮した。実験ではx軸方向のみに加速度が入力されたが、制御誤差によりy方向の揺れも観測された。そこで、z軸方向にx軸方向の3%の大きさの加速度も入力した。その結果、図5(c)のように水平ずれおよび回転角の再現性がわずかに向上し、

打継目上部の破壊を抑制することができた。

## 4. 結論

本研究では、改良版個別要素法において、回転運動を理論通りに再現できるようなばねモデルを提案した。また、振動台実験の再現解析のモデルの改良を行い、打継目下部の剥離をメカニズム通りに再現できるようになった。しかし、打継目上部の破壊も生じ、回転角の再現性にも課題を残した。

## 参考文献

- 1) 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。
- 2) A. Furukawa et. al., Journal of Disaster Research Vol.6, No.1, 2011。
- 3) 古川愛子他，地震工学研究発表会論文集，Paper No. C23-892，2016。
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，2012。

謝辞 西日本旅客鉄道(株)による振動台実験結果を使用させて頂きました。

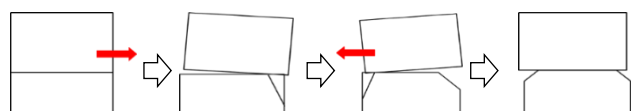


図3 打継目下部の破壊メカニズム

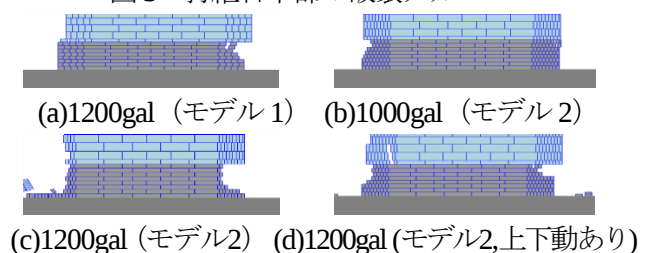


図4 打継目付近の破壊状況

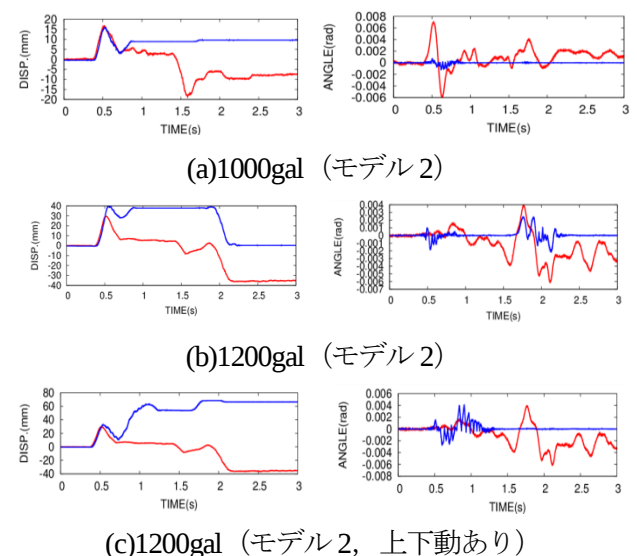


図5 水平ずれ (左), 回転角 (右) の再現結果  
(赤線：実験, 青線：解析)