

実大規模の曲げ破壊型円形断面RC橋脚に関する3次元弾塑性地震応答解析

Inelastic seismic response analysis of flexural-failure type prototype circular shape RC bridge piers by means of 3D-FEM

室蘭工業大学
(独) 土木研究所
寒地土木研究所
室蘭工業大学大学院 ○ 学生員

フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正 員 張 広鋒 (Guangfeng Zhang)
正 員 岡田 慎哉 (Shinya Okada)
西島羽侑一 (Yuichi Nishitoba)

1. はじめに

近年、地震が多発する状況において、地震動を受けるRC橋脚の耐震性能や破壊形式の把握することは重要である。そこで、E-defenseでは実規模のRC橋脚を対象に3方向地震動を入力する場合の耐荷性状や破壊特性を把握することを目的に実規模実験を実施している。RC橋脚の合理的な耐震設計手法あるいは補修・補強法を確立するためには、実験のみならず数値解析の手法を用いて効率的に検討をしなければならない。このような観点から、著者らはこれまでに3方向地震動を受ける1/3モデルを対象にRC橋脚に関する数値解析を行ってきた¹⁾。

本検討では、実規模のRC円形断面の橋脚を対象として全体系をモデル化し、振動実験の事前解析を行った。本研究では、曲げ破壊が予測される試験体を、対象に3次元弾塑性解析を実施し、数値解析結果について検討を行った。本解析では、構造解析用汎用コード DIANA を使用した²⁾。

る。支承は、固定支承、滑り支承から構成されている。また、桁部はローラー支点である。コンクリート強度は27MPaである。軸方向筋としてD29を合計80本、横拘束筋としてD13を配筋している。表-1には、コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を示す。

2.2 解析モデル

図-2には、解析モデルの要素分割図を示す。本解析では、桁部を含む全体系をモデル化することとした。桁、上部工質量、コンクリート要素は全て固体要素を用いてモデル化した。橋脚部分割は、周方向に32分割、軸方向に50分割としている。

図-2に、配筋の一部を示す。配筋は試験体と同様の配筋としている。鉄筋のモデル化は、埋め込み鉄筋要素を用いてモデル化している。埋め込み鉄筋要素とは、独立な自由度を持たず、節点に依存することなく固体要素に自由に埋め込める要素である。埋め込み鉄筋のひずみは、埋め込

2. 解析概要

2.1 試験体概要

図-1には、解析対象とした試験体の形状寸法、配筋状況を示す。試験体は、橋脚と桁、上部工質量、支承から構成されており、橋脚柱部分は高さ6000mm、断面形状は半径900mmの円形断面となっている。上部工質量と桁の自重を合わせた質量は片側で167.8tであり、計335.6tである。

表-1 材料特性

材料	圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	降伏強度 f_y (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
コンクリート	27.0	2.14	-	26.5	0.2
軸方向筋 (D29)	-	-	380	200	0.3
横拘束筋 (D13)	-	-	380	200	0.3

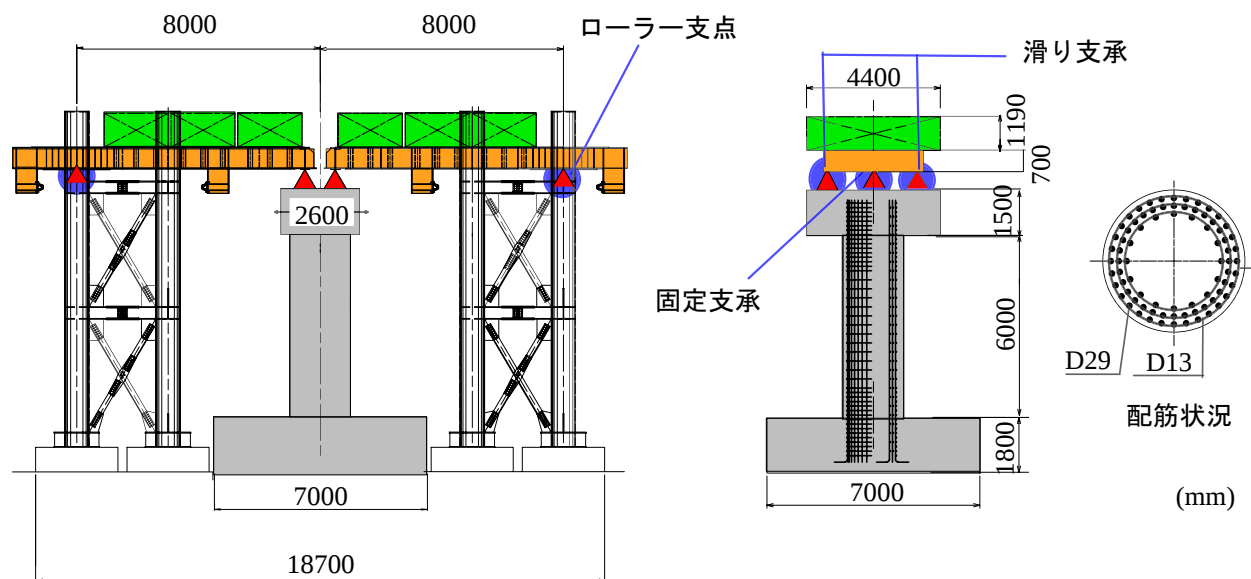


図-1 試験体概要

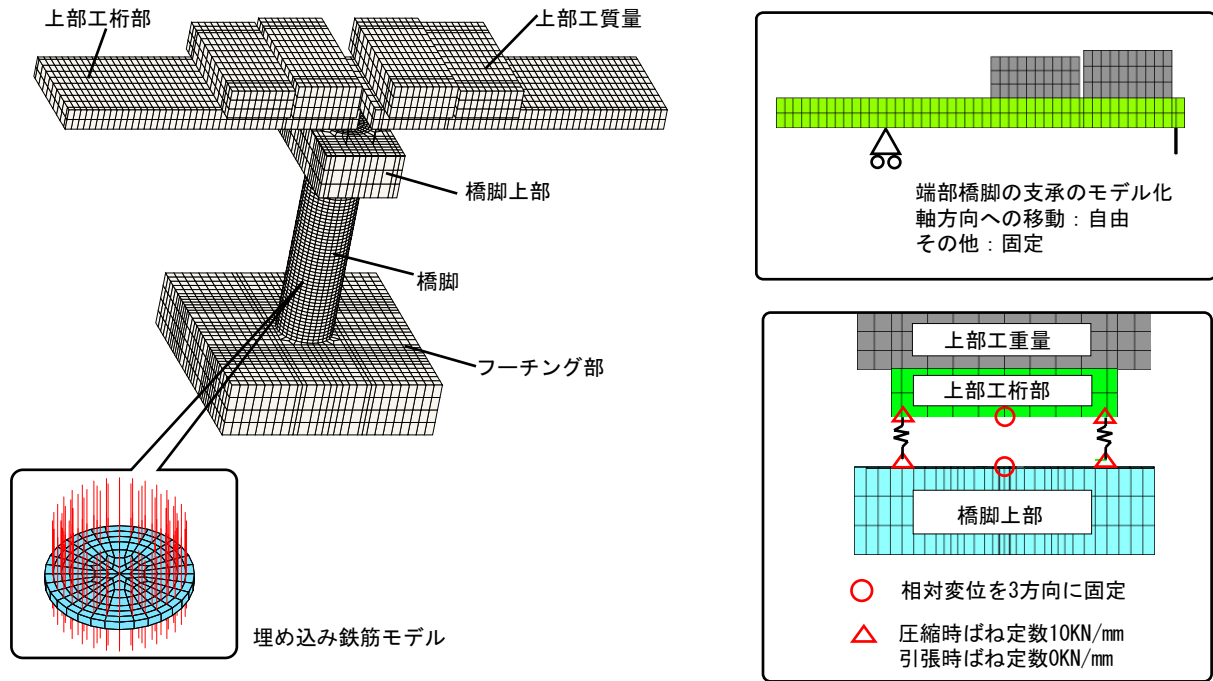


図-2 要素分割と境界条件

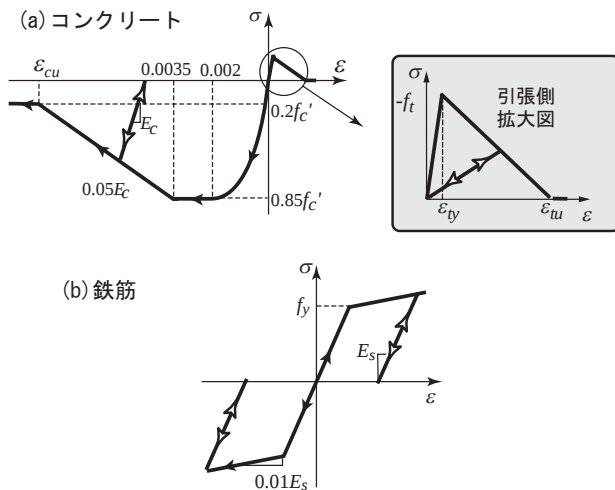


図-3 材料構成則

またコンクリート要素のひずみから算出される。鉄筋は完全付着と仮定した。

図-2 右側に、支承の境界条件を示す。支承は、滑り支承を圧縮時にばね定数 10 kN/mm、それ以外を 0 N/mm としてモデル化した。固定支承については、図に示す節点の相対変位を等しくすることでモデル化している。桁部の境界条件は、桁のローラー支点を上下方向・橋軸直角方向の変位を固定として再現した。また、フーチング部の底面を完全固定としている。どの境界条件についても固定するのは変位のみであり、回転を許容している。減衰定数は 1% に設定した。

2.3 材料構成則

図-3 に、材料構成則を示す。降伏の判定にはコンクリート、鉄筋ともに von Mises の降伏条件を適用した。コンクリートの圧縮側については $0.85f'_c$ に達した後、 $0.05E_c$ の勾配で $0.2f'_c$ まで軟化するように設定した。引張側には線形軟化モデルを適用することとし、終局ひずみ ϵ_{tu} は文献 3)

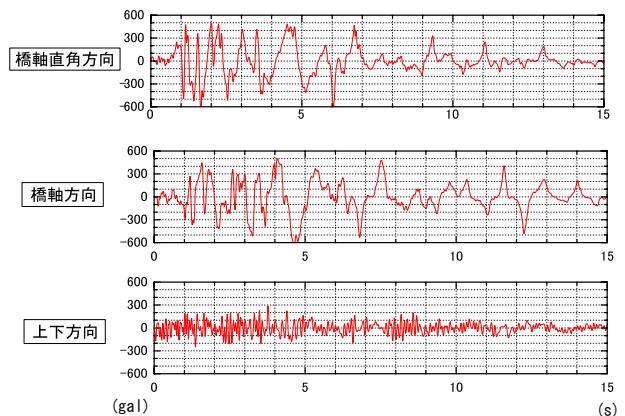


図-4 入力加速度

に基づき式 (1) より定義される。式中の h_{eq} は要素の等価長さである。 G_f はコンクリートの引張破壊エネルギーであり、式 (2) より算出される。式中の d_{max} は粗骨材の最大寸法である。

$$\epsilon_{tu} = \frac{2G_f}{f_t h_{eq}} \quad (1)$$

$$G_f = 10(d_{max})^{1/3} \cdot f'_c \quad (2)$$

除荷・再載荷に関しては、鉄筋は引張・圧縮ともに elastic unloading、コンクリートでは、圧縮側で弾性除荷、引張側では secant unloading とした。ひび割れ破壊に関しては、主応力が引張強度に達した時に直角にひび割れが発生するものとする Fixed orthogonal crack モデルによって判定した。破壊後のせん断保持については初期剛性の 20% として計算している。

2.4 入力加速度

入力加速度は、大きな破壊を起こす塑性レベルと、小さな破壊のみ起こる弾性レベルの 2 種類を入力した。なお、

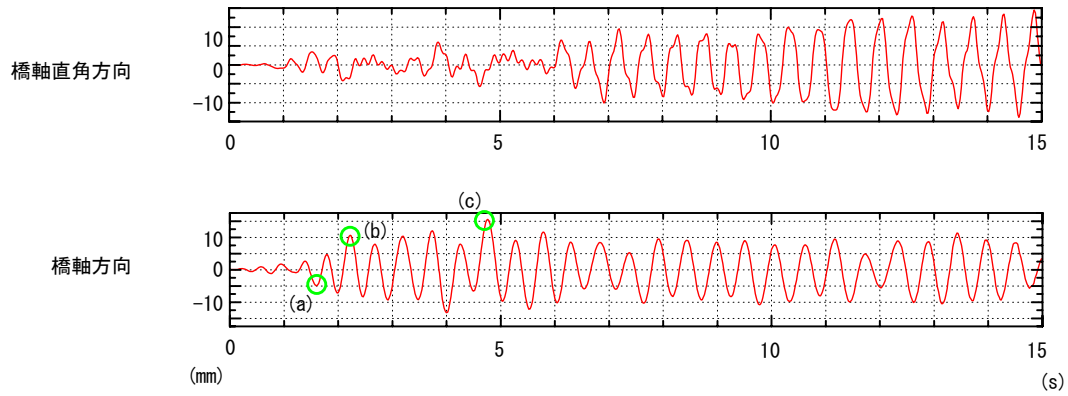


図-5 弾性レベル地震動応答変位

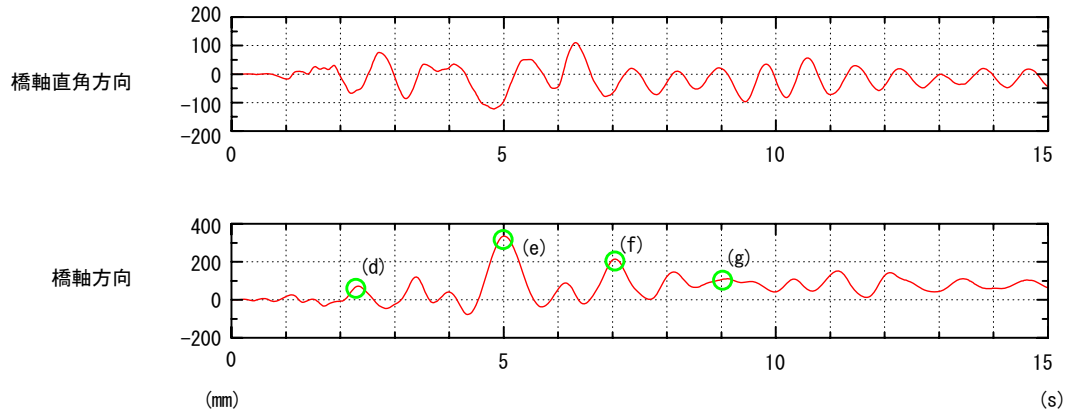


図-6 塑性レベル地震動応答変位

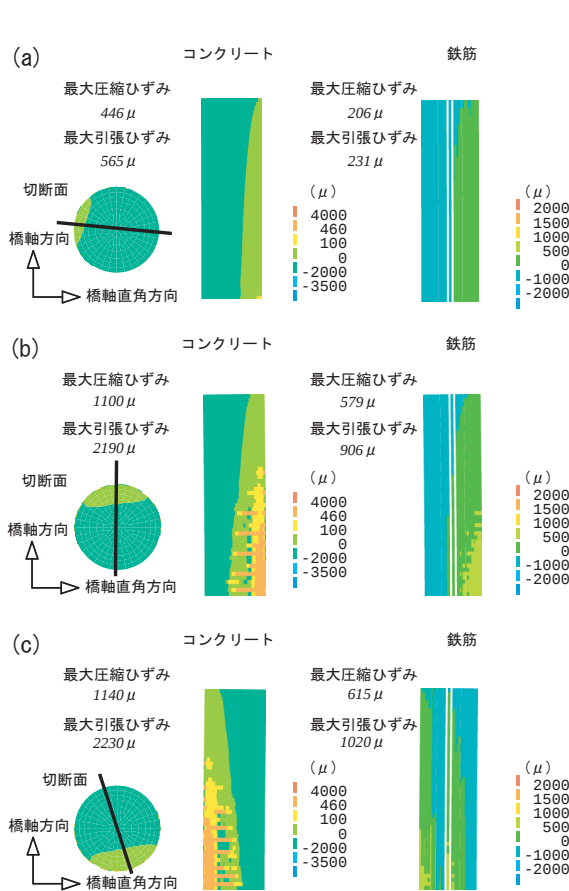


図-7 曲げ破壊型 弾性レベル加振ひずみ分布図

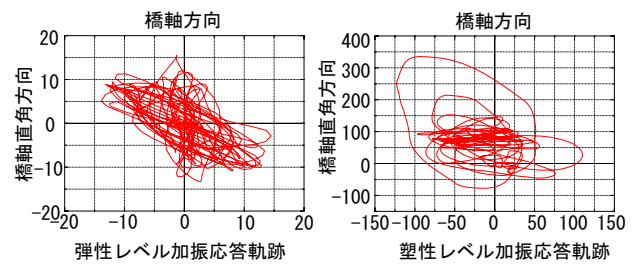


図-8 相対応答変位軌跡

弾性レベルの地震動は、塑性レベルの1/8倍の地震動としている。

図-4に塑性レベルの入力加速度を示す。入力加速度は、フーチング部の底面、桁のローラー支持の固定方向に作用させた。なお、0.02秒間隔で地震動を入力し、応答を求めた。解析は15秒までを行い、検討している。

3. 数値解析結果

3.1 解析結果および考察

図-5・6には数値解析により得られた相対応答変位(以後、応答変位)を示している。また、図-7には、図-5の応答変位の各ピーク点での破壊状況を橋脚部および鉄筋の鉛直ひずみ分布図用いて示している。なお、コンクリートのひずみ分布は各図の左に示すように、圧縮ひずみと引張ひずみがともに最大となる切断面について示している。なお、コンクリートのコンターレベルは図-3の材料構成構成則と対応しており、 $\epsilon_{ty} = 100\mu$ 、 $\epsilon_{tu} = 460\mu$ である。なお、 ϵ_{ty} および ϵ_{tu} はひび割れの発生ひずみおよび、ひび割れの開口ひずみとなっている。鉄筋の降伏ひずみは 2000μ

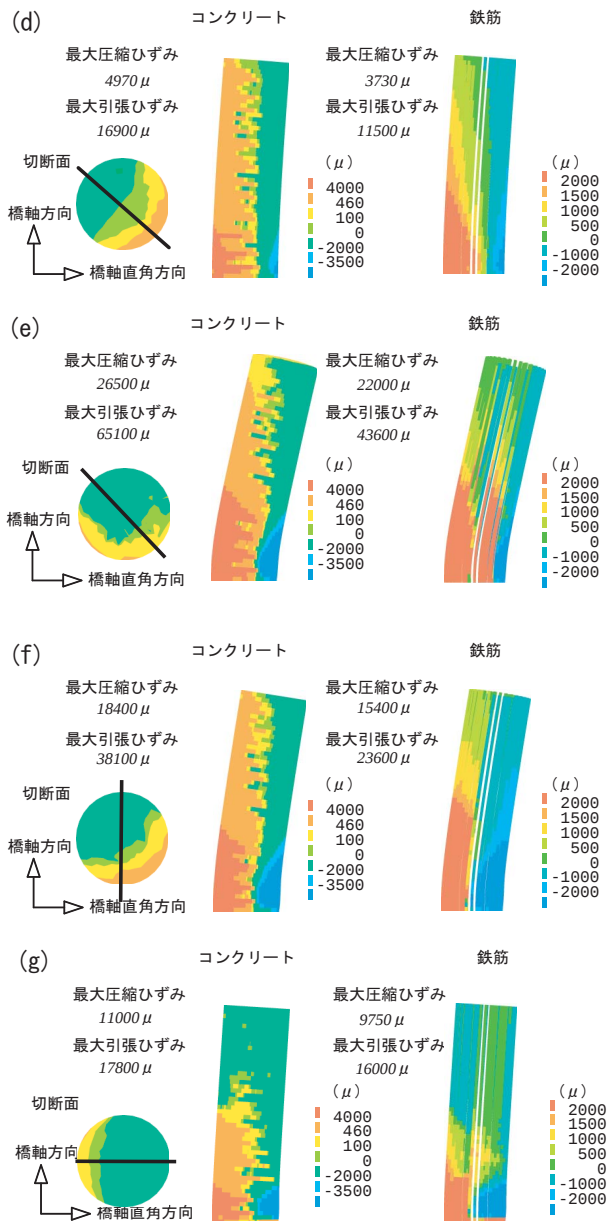


図-9 曲げ破壊型 塑性レベル加振ひずみ分布図

であり、図中の赤色の領域において鉄筋が降伏している。
図-8に応答変位の軌跡を示す。

図-4の弾性レベルの地震動を入力した場合には、5秒付近までは橋軸直角方向の変位振幅は小さく示されている。その後、徐々に振幅が大きくなっていくことが分かる。また、橋軸方向の応答変位を見てみると、加振を始めて約2秒後から振幅が増加していくことが分かる。その後、計算を終了する15秒まで振幅10mm程度を保ち、振動していることが図-8から分かる。これは上部桁を含めた全体系でモデル化していることにより、上部桁および付加質量の慣性力が橋軸方向に働くため、早い段階で応答変位の振幅が大きくなったと考えられる。なお、図-7より、橋脚基部にひび割れが発生していることが分かる。また、応答変位振幅が増加し始めた(b)点では、ひび割れが橋脚の基部からの高さの1/2程度まで進展し、基部においてひび割れが開口していることが分かる。弾性レベル加振において応答変位振幅の最大となる(c)点でもひび割れの性状はほぼ変わらず、鉄筋は降伏ひずみに達していないことから、

致命的な損傷が発生していないことがわかる。

一方、入力地震動のエネルギーが大きい塑性レベル地震動を入力した場合には、橋軸方向、橋軸直角方向ともに2秒付近から変位振幅および周期が大きくなり、加振をはじめてから5秒で最大応答変位が現れている。その後、橋軸直角方向では100mm程度で振動していることが分かる。橋軸方向においては加振を開始して5秒後に最大変位335mmに達し、8秒付近より応答変位100mmを軸として振動していること、図-8塑性レベル地震動の軌跡で、橋軸方向に100mm付近の軌跡多いことにより、橋脚先端において残留変位が100mm生じていることが分かる。

ここで、塑性レベル地震動を入力した場合の破壊状況を見てみると、応答変位に明確なピークが現れた(d)点には橋脚全体に曲げひび割れが開口し、中でも、基部に引張および圧縮ひずみが大きく発生していることが分かる。また、鉄筋のひずみ分布を見てみると、コンクリートのひずみが4000 μ を超える領域で、鉄筋が降伏している。応答変位が最大となる(e)点の破壊状況を見てみると、基部より全体的に曲げ変形が卓越している様子が分かる。また、ひび割れ開口領域および圧壊領域が拡大している。しかしながら、鉄筋の座屈している様子は確認できない。これは、本解析に用いている埋め込み鉄筋要素がコンクリートと完全付着であると仮定しているために鉄筋の座屈の様子を再現できないものと考えられる。(f)点では、橋脚基部圧縮側が膨らんでいることが分かる。これにより、この時点は、橋脚の圧縮側のコンクリートが剥落していると考えられ、また鉄筋の降伏領域が橋脚の高さ半分まで進展していることがわかる。振幅軸が変位100mm付近に移動したと思われる(g)点におけるひずみ分布図を見てみると、基部の角折れの様子を確認でき、橋脚に残留変位が生じていることが分かる。このことより、塑性レベルの地震動を入力し、加振を始めた約8秒後には、橋脚が完全に破壊され、終局に至っているものと考えられる。

4. まとめ

本研究は、3方向地震動を受けるRC橋脚の地震動応答性状および破壊性状を把握することを目的として実大規模円形断面図RC橋脚に関する3D-FEM解析を実施した。本解析では、橋脚基部からひび割れが進展する曲げ破壊性状をよく表現することができたと思われる。今後、実験記録との比較を行い、より合理的な設計手法の確立と、解析手法の把握をしたいと考えている。

謝辞

今回、この解析を行うにあたって、(独)土木研究所に実大規模実験に使用する各試験体の図面、加速度入力データを提供していただいた。ここに、深く感謝を述べる。

参考文献

- 1) 張 広鋒, 岸 徳光, 西 弘明, 小室 雅人: 三次元有限要素法による円形断面RC橋脚の弾塑性地震応答解析, 土木学会第62回年次学術講演会, pp.957-958, 2007.
- 2) Nonlinear Analysis User's Manual (7.2), TNO Building and Construction Research.
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書(2002年制定) 構造性能照査編, 2002.