

東北地方太平洋沖地震により損傷した新幹線 RC橋脚に関する被害分析

友竹 幸治¹・篠田 健次²・桑木野 耕介³・大郷 貴之⁴・小林 将志⁵

¹正会員 ジェイアール東日本コンサルタンツ株式会社 技術本部
(〒171-0021 東京都豊島区西池袋1丁目11番地1号 メトロポリタンプラザ19F)
E-mail: tomotake@jrc.jregroup.ne.jp

²正会員 ジェイアール東日本コンサルタンツ株式会社 技術本部
(〒171-0021 東京都豊島区西池袋1丁目11番地1号 メトロポリタンプラザ19F)
E-mail: shinoda@jrc.jregroup.ne.jp

³正会員 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター (〒151-8512 東京都渋谷区代々木2丁目2番地6号)
E-mail: kuwakino-k@jreast.co.jp

⁴正会員 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター (〒151-8512 東京都渋谷区代々木2丁目2番地6号)
E-mail: osato@jreast.co.jp

⁵フェロー会員 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所
(〒151-8512 東京都渋谷区代々木2丁目2番地6号)
E-mail: masa-kobayashi@jreast.co.jp

東北新幹線は2011年に発生した東北地方太平洋沖地震を受けて、一部のRC橋脚が、軸方向鉄筋の外方への変形やかぶりコンクリートの広範囲な剥落が生じる中程度の損傷を生じた。本論文では、地震時に損傷を受けやすいRC橋脚く体断面形状を明らかにすることを目的に、比較的大きな損傷を受けたRC橋脚を例にく体断面形状が変化したときにどのような地震応答が生じるか2方向曲げの影響を考慮した地震応答解析により分析した。その結果、壁式橋脚は、橋軸直角方向において、耐力が大きいため、円形断面や正方形断面の単柱式橋脚と比較すると応答が相対的に小さくなる傾向があることを示した。

Key Words: *the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, seismic damage, bridge pier, seismic response analysis*

1. はじめに

2011年3月11日に発生したMw 9.0の東北地方太平洋沖地震により、東北新幹線でも多くの構造物が被害を生じた。東北新幹線は、地震を受ける以前に破壊形態がせん断破壊先行型に分類される構造物に対して耐震補強が完了していたため、せん断破壊により構造物が崩壊するような壊滅的な損傷は生じなかった。鉄筋コンクリート橋脚（以下、RC橋脚という）は、東北新幹線で15基の中程度の損傷が報告されたほか、軽度のひび割れを生じる損傷が数件みられた。RC橋脚く体の構造的な損傷部位は、軸方向鉄筋段落し部およびく体の基部であった¹⁾。これは、旧技術基準により設計されていたことにより、段落し部における途中定着部の性能が不足していた

ことと、く体の変形性能が不足していたことが原因であると考えられる。

東北地方太平洋沖地震および本地震以前の大規模地震においても、RC橋脚の地震作用による損傷は、円形断面の単柱式RC橋脚が多くを占め、く体の中間部において全周にわたる曲げ損傷によりコンクリートが剥落し、軸方向鉄筋が柱の外側に大きくはらみ出す損傷が生じている^{2), 3)}。

これまでの研究では、マクロ的損傷分析^{4), 5)}や地震動の載荷方法の違いによる橋脚の損傷度に関する研究^{6), 7)}などがある。しかし、本論文で対象とするような橋脚く体断面形状に着目して構造的な特徴を分析した研究は極めて少ない。

そこで、本論文では、東北新幹線に対して実施した損傷度調査の結果を基に、中程度の損傷（損傷度

表-1 損傷度の判定区分

| 損傷度 | 損傷状況 |
|-----|------------------------------------|
| A | 柱の倒壊、桁の落下 |
| B1 | 軸方向鉄筋の飛び出し、かぶりコンクリートの広範囲な剥落、軌道沈下有り |
| B2 | 軸方向鉄筋の飛び出し、かぶりコンクリートの広範囲な剥落、軌道沈下無し |
| C | 残留ひび割れ、かぶりコンクリートの一部の剥落、軌道沈下無し |



図-1 損傷度の判定区分の例

表-2 損傷を受けた橋脚の割合

| 損傷度 | 性能分類 | 補強 | | |
|--------------|------|------|-------|-------|
| | | 補強済 | 補強前 | 小計 |
| A | | 0 | 0 | 0 |
| B1 | | 0 | 0 | 0 |
| B2 | | 0 | 5 (1) | 5 (1) |
| C | | 0 | 9 (1) | 9 (1) |
| 対象範囲の橋脚概数 | | 500 | 8800 | 9300 |
| 対象範囲でのC以上の割合 | | 0.0% | 0.16% | 0.15% |

注1) () 内の数値は、2011年4月7日の余震による被害を再掲

注2) 軽微なひび割れ等の箇所は除く

表-3 損傷を受けたRC橋脚の一覧

| 橋脚No | 損傷度 | 損傷部位 | 形状 | 断面寸法 | 縦横比 | 段落し数 |
|------|-----|------|----|-----------|------|------|
| 1 | C | 段落し部 | 矩形 | 2350×6000 | 2.55 | 1 |
| 2 | C | 段落し部 | 矩形 | 2550×6000 | 2.35 | 1 |
| 3 | C | 段落し部 | 矩形 | 2600×6000 | 2.31 | 1 |
| 4 | C | 段落し部 | 矩形 | 3000×5000 | 1.67 | 1 |
| 5 | C | 段落し部 | 円形 | φ5500 | 1.00 | 1 |
| 6 | B2 | 段落し部 | 円形 | φ2600 | 1.00 | 1 |
| 7 | C | 段落し部 | 円形 | φ2600 | 1.00 | 1 |
| 8 | C | 段落し部 | 円形 | φ2600 | 1.00 | 1 |
| 9 | B2 | 段落し部 | 円形 | φ3800 | 1.00 | 1 |
| 10 | C | 段落し部 | 円形 | φ5000 | 1.00 | 1 |
| 11 | C | 段落し部 | 円形 | φ5000 | 1.00 | 1 |
| 12 | B2 | 基部 | 矩形 | 2300×6000 | 2.61 | 0 |
| 13 | B2 | 段落し部 | 円形 | φ3700 | 1.00 | 3 |
| 14 | B2 | 段落し部 | 円形 | φ4500 | 1.00 | 4 |

B2程度および一部損傷度Cを含む)を受けたRC橋脚の構造的特徴について分析する。その上で、比

較的大きな損傷を受けたRC橋脚を例にして、地震時に損傷を受けやすい橋脚く体断面形状を明らかにすることを目的に、橋脚く体断面形状・断面諸元、入力地震動の方向、段落しの有無、地震動の特性に着目し、地震応答解析による解析的分析を行った。その内容について以下に述べる。

2. 損傷を受けたRC橋脚の概要

(1) 対象建造物の概要

東北新幹線の橋りょうには、工期の短縮、施工の合理化・安全確保の観点から移動式支保工など新しい工法が採用され、橋脚の標準設計は、RC壁式橋脚とされている⁸⁾。ただし、河川部などの比較的スパンの長い橋りょうの橋脚については、円形断面の張出式橋脚が採用されている。設計水平震度は、旧標準の規定より0.2~0.25で設計されている。

(2) 損傷度調査の概要

RC橋脚の損傷度の分類は、震災直後に実施した外観調査及び写真判定に基づき、損傷の大きい順にA, B1, B2, Cに区分した。

表-1および図-1は、損傷度調査におけるRC橋脚の損傷度の判定区分と、損傷度の分類を示したものである。

表-2は、東北新幹線において損傷を受けた橋脚の割合を示したものである。橋脚く体の耐震補強は、せん断余裕度が低いものと段落し部の性能が低いものの一部が新潟中越地震以後に行われていた。全体として軌道沈下が発生するB1以上の被害はなく、耐震補強済のRC橋脚く体においては、損傷度がC以上の被害は発生していない。RC橋脚の中規模程度に損傷した割合は全体橋脚数の約0.15%であった。なお4月7日の余震によって損傷した2基は、本震時にも損傷を受けた橋脚である。

表-3は、表-2において損傷を受けたRC橋脚の一覧を示したものである。損傷を受けた橋脚の性能は、ほとんどが段落し部の性能が低いものであり、1基(橋脚No.12)のみがく体基部が曲げ先行破壊型であるが、変形性能が低いものであった。

損傷の特徴は、段落し部における損傷が多くを占め、円形断面もしくは比較的縦横比が小さい壁式橋脚の段落し部において発生している。

(3) 段落し部周辺での損傷範囲

図-2は、縦横比2.31の矩形断面を有する橋脚の段落し部の損傷状況を示したものである。図-3は、

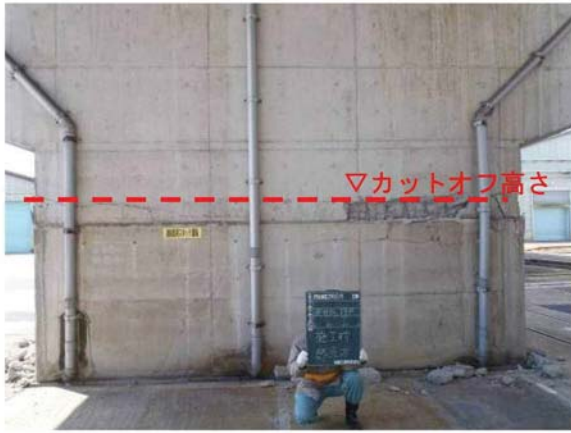


図-2 段落し部の損傷状況①（橋脚 No. 3）



図-3 段落し部の損傷状況②（橋脚 No. 6）

縦横比 1.00 の円形断面を有する橋脚の段落し部の損傷状況を示したものである。段落し部周辺でのかぶりの剥落等の損傷範囲は、比較的損傷度が低い段階（C程度）では段落しのカットオフ点（段落しする軸方向鉄筋の部材軸方向の位置）よりも下側に損傷が出ていた。損傷度がB2となり軸方向鉄筋の座屈や帯鉄筋の破断がみられるような段階となるとカットオフ点よりも上側にもコンクリート剥落範囲が拡大していた。円形断面の段落し部は、全周に渡り広範囲に損傷を受けたが、壁式橋脚の損傷範囲は、400mm程度と比較的損傷範囲は小さかった。

3. 損傷を生じやすい構造的特徴の分析

(1) 分析の方法

く体の断面形状や段落しの条件などの構造的特徴を把握することを目的に、被害分析を行った。分析対象とした構造物は、東北新幹線および在来線のRC橋脚で、中程度の損傷（損傷度B2および一部損

傷度Cを含む）を受けたRC橋脚とした。

(2) く体の断面形状

図-4は、断面形状別損傷数を示したものである。図-5は、東北新幹線の東京～盛岡間の橋脚断面形状の割合を示したものである。く体形状は、円形断面の比率が非常に高く、在来線橋脚も含めた損傷橋脚21基のうち16基が円形断面であり、残りの5基は矩形断面の壁式橋脚であった。

表-4は、橋脚形状別損傷割合を示したものである。東北新幹線においては円形断面のRC橋脚は全体の5%程度であるにも関わらず、その他の形状よりも損傷数が多く、矩形断面を有する橋脚の損傷数を矩形断面の橋脚全数で除した割合が0.1%程度であるのに対して、円形断面を有する橋脚の損傷数を円形断面の橋脚全数で除した割合は、約5%と高い比率を示した。

橋脚の設計水平震度は、0.2～0.25で設計されており、上部工の支承条件は、起点側・終点側とも固定が6基、起点側・終点側とも可動が6基、固定と可動の支承が4基、馬桁で支承が1箇所なのが3基、連続桁の固定・可動支承が各1箇所であり、支承条件の違いによる影響はみられなかった。

(3) 段落しの条件

図-6は、段落し箇所数別損傷橋脚数を示したものである。段落しの箇所数別では、1箇所が11基、2箇所が4基、3箇所以上が5基で、段落しがないものが1基であった。また、段落しが複数ある場合の損傷箇所は、全てが最上段ではないが、比較的先端部に近い段落し部において損傷していた。

4. 損傷度B2のRC橋脚に対する個別分析による損傷原因の推定

本章では、B2の損傷を生じた円形断面の単柱式橋脚である橋脚No.9の損傷事例に対して地震時の実構造物を模擬した地震応答解析を行うことにより、地震による損傷の程度の推察を行う。

(1) 分析対象の橋脚の損傷状況および周辺状況

図-7は、橋脚No.9の損傷状況である。橋脚く体部材中で大きく曲げ損傷を生じた位置は、段落し部であり、カットオフ点から上下1.0m程度の範囲において全周に渡りかぶりコンクリートが剥落し、軸方向鉄筋の飛び出しも見られた。

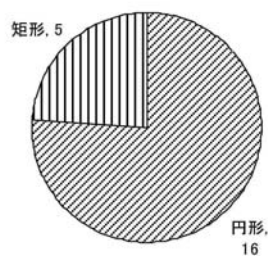


図-4 断面形状別損傷数

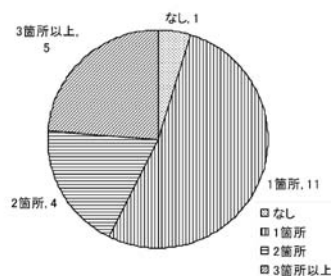


図-6 段落し箇所数別損傷橋脚数

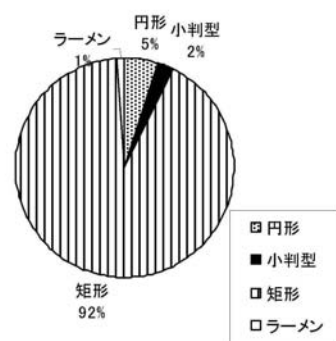


図-5 橋脚断面形状の割合 (東北新幹線東京-盛岡間)

表-4 損傷度の判定区分

| 断面形状 | | 損傷橋脚数 | 損傷割合 |
|-------|-----|-------|------|
| 単柱 | 円形 | 16 | 4.7% |
| | 小判型 | 0 | — |
| | 矩形 | 5 | 0.1% |
| ラメン橋脚 | | 0 | — |

(2) 個別分析の方法

解析は、材料の非線形性を考慮できるファイバーモデルによる方法によることとし、RC非線形解析プログラムUC-win/COM3 (Fiber) を用いて行った。解析方法は、弾塑性時刻歴応答解析で、RC部材(橋脚く体)は、平面保持を仮定し、RC材料構成則に基づくファイバー要素とした。図-8に解析で用いた東京大学コンクリート研究室で開発された鉄筋コンクリートの構成則である鉄筋およびコンクリートの材料非線形モデルを示す⁹⁾。コンクリートの平均応力-平均ひずみの関係には、圧縮と引張2つの構成則からなる構成則を定義し、コンクリート中の鉄筋の平



図-7 橋脚 No. 9 の損傷状況

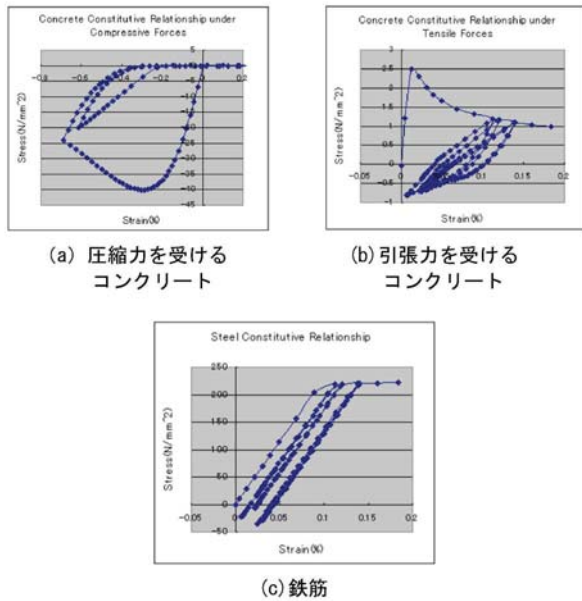
均応力-平均ひずみを表す構成則は島らのモデルを採用している。非線形部材は3次元ファイバーモデルの採用により、軸力変動の影響、2軸曲げの影響、および軸方向剛性と2方向曲げ剛性の連成効果を正しく取り込むことができるため、あらゆる方向からの荷重に対して計算が可能である。

橋脚く体部材の破壊形態は、曲げ破壊モードであり、荷重条件は、列車荷重・雪荷重は載荷しないものとした。なお、周辺地盤の影響は、本解析においては考慮していない。

図-9は、解析で用いた東北地方太平洋沖地震で観測されたK-NET 仙台 MYG013 の主要動の水平2成分の地震動であるNS成分およびEW成分を示したものである。なお、鉛直動の影響については考慮していない。

図-10は、東北地方太平洋沖地震(K-NET 仙台)の地震動の加速度応答スペクトル(減衰5%)を示したものである。なお、RC橋脚の固有周期帯は0.1s~0.5s程度である。

図-11は、解析モデルを示したものである。橋脚く体は、すべてファイバー要素を用いてモデル化を



(a) 圧縮力を受ける
コンクリート (b) 引張力を受ける
コンクリート

(c) 鉄筋

図-8 ファイバーモデルに用いる材料構成則

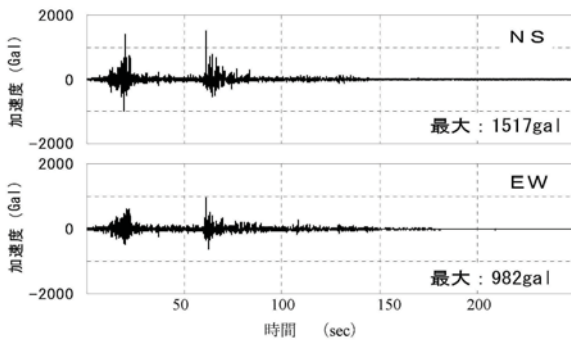


図-9 K-NET 仙台 MYG013

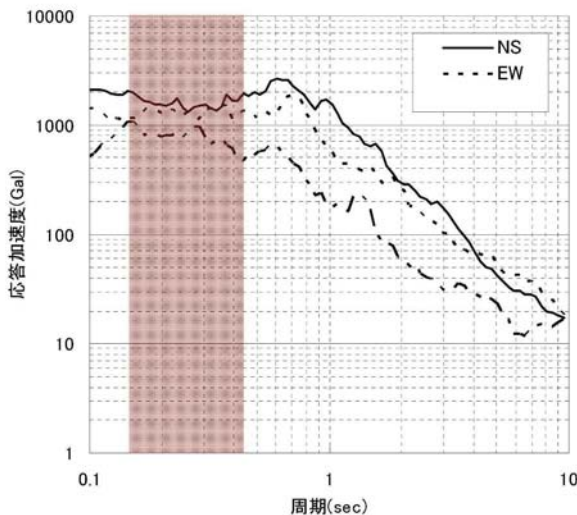


図-10 東北地方太平洋沖地震 (K-NET 仙台) の地震動の加速度応答スペクトル (減衰 5%)

行った。途中定着された鉄筋の付着切れの設定位置は、設計上、部材の有効高さまたは鉄筋の定着長の

どちらか大きい値とする方法が用いられる。しかし、く体断面形状をパラメータとし、2方向曲げの影響を考慮した解析ケースにおいて、部材断面の有効高さは、地震動の方向により変化する。そのため、本解析においては、段落しされている軸方向鉄筋D32 (SD 345) の部材軸方向の位置であるカットオフ点から鉄筋の定着長相当の 30ϕ (ϕ :鉄筋の直径) 下がった位置を軸方向鉄筋比の変化点として一律設定した。なお、コンクリートの設計基準強度は、 27 N/mm^2 とし、上部工の反力は全ての解析ケースで一定とした。

図-12は、解析結果のく体の損傷状況図を示したものである。軸方向鉄筋段落し部において、コンクリートの圧縮ひずみが 3500μ を超える重度な損傷が発生する結果となり、実被害と同じ損傷が発生する解析結果が得られた。段落し部における途中定着部の性能が不足して曲げによる損傷が先行したものと推定できる。なお、曲げによる段落し部の損傷が概ね再現できており、ファイバー要素解析の妥当性の確認ができる。

5. 地震応答解析による損傷を生じやすい構造的特徴の分析

(1) 解析に用いる地震動およびく体断面緒元

地震時に損傷を受けやすい橋脚く体断面形状を明らかにすることを目的に、橋脚く体断面形状・断面諸元、入力地震動の方向、段落しの有無、地震動の特性に着目し、地震応答解析による解析的検証を行った。

解析に用いる基本地震動は、兵庫県南部地震における神戸海洋気象台 (JMA 神戸) 観測記録の主要動とした。図-13に主要動の水平2成分の地震動であるNS成分およびEW成分を示す。鉛直動の影響については考慮していない。

図-14は、兵庫県南部地震 (神戸海洋気象台) の地震動の加速度応答スペクトル (減衰 5%) を示したものである。

表-5は、地震応答解析において設定した断面諸元を示したものである。CASE1は、縦横比1.0の正方形断面で基本ケースと耐力と断面積を合わせた等価等積断面としたケースである。

CASE2は、縦横比3.0の矩形断面で、解析上、断面積と橋軸方向の曲げ耐力を基本ケースにあわせ、剛性および橋軸直角方向の曲げ耐力をパラメータとしたケースである。

CASE3は、縦横比1.0の正方形断面で、解析上、

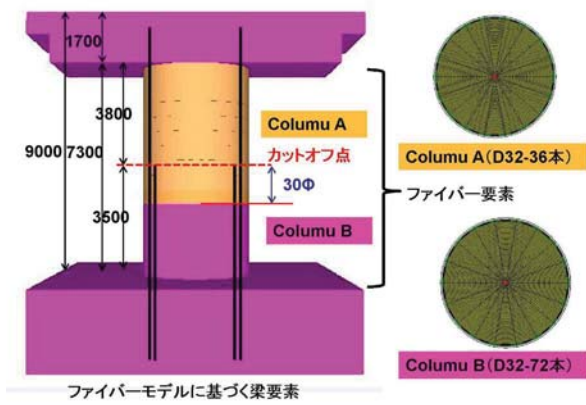
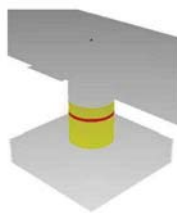


図-11 解析モデル



■: 重度な損傷 (コンクリートの圧縮ひずみが0.35%以上もしくは鉄筋の引張ひずみが2%を超える)
 ■: 軽微な損傷 (鉄筋の引張ひずみが0.2% (鉄筋降伏ひずみ相当))

図-12 く体の損傷状況図

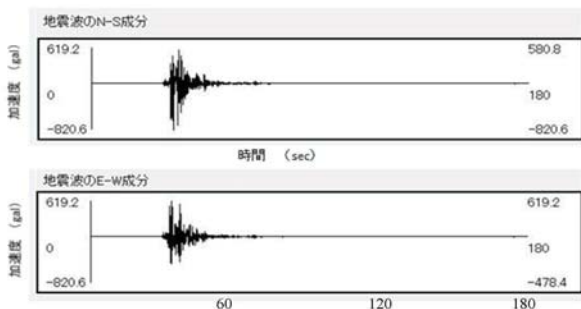


図-13 兵庫県南部地震で観測された加速度波形

橋軸直角方向の曲げ耐力を CASE2 と同程度に大きくしたケースである。

CASE4～CASE6 は、縦横比 1.5, 2.0, 3.0 の矩形断面とし、橋軸方向の剛性および曲げ耐力を基本ケースにあわせ、橋軸直角方向の剛性および曲げ耐力をパラメータとしたケースである。

CASE7～CASE10 は、地震動の入力方向 (方位) の影響を把握するため、基本ケースおよび CASE4～CASE6 に対して地震動の入力方向 (方位) を 90° 回転させたケースである。

CASE11, CASE12 は、段落しの影響を把握するため、基本ケースおよび CASE6 に対して段落しがないものとして解析したケースである。

CASE13, 14 は、地震動の特性による相違の影響を把握するため、基本ケースおよび CASE6 に対して、

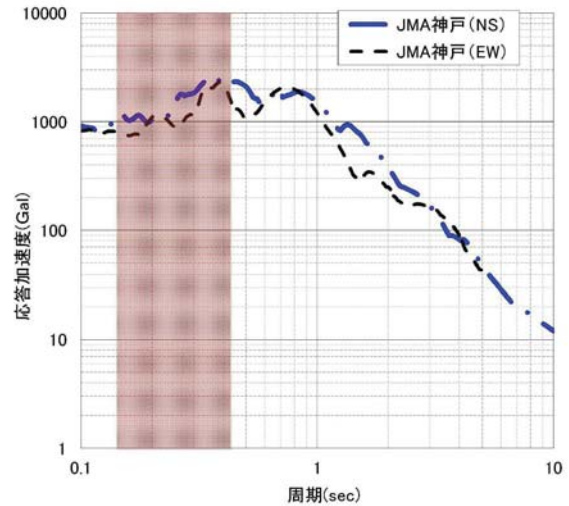


図-14 兵庫県南部地震 (神戸海洋気象台) の地震動の加速度応答スペクトル (減衰 5%)

入力地震動を東北地方太平洋沖地震 (K-NET 仙台) の地震動としたものである。

(2) 解析結果

橋脚く体の断面諸元の違いが RC 橋脚の応答に及ぼす影響について、以下に示す。本論文では、橋脚く体断面諸元の相異による影響、地震動の入力方向 (方位) の影響、地震動の特性による相違の影響、段落しの有無の影響に着目した。最大応答加速度と最大応答変位の解析結果一覧を表-6 に示す。

(3) 異なる断面諸元の影響

橋脚く体の断面諸元の違いが RC 橋脚の最大応答変位および最大応答加速度に及ぼす影響について示す。

円形断面と等価等積な縦横比 1.0 の正方形断面を比較すると、最大応答変位は、ほぼ同等で大きな差異がみられず、最大応答加速度は、正方形断面の方がやや小さくなった。縦横比を 3.0 とした CASE2 は、橋軸方向の断面剛性が $1/3$ と小さいため最大応答変位が大きくなり最大応答加速度は小さくなった。縦横比 1.0 の正方形断面で曲げ耐力を大きくした CASE3 は、橋軸方向の曲げ耐力も大きくなり、部材の塑性化が生じにくくなるため応答変位が小さくなるが、橋軸方向の最大応答加速度が大きくなった。一方の剛性および曲げ耐力を大きくした CASE4～CASE6 は、最大応答加速度および最大応答変位とも相対的に小さくなった。剛性および曲げ耐力を合わせた橋軸方向においても、応答変位は相対的に小さくなった。

図-15 は、橋脚く体断面の断面積をあわせた基本

表-5 地震応答解析における断面緒元

| | 基本ケース CASE7 CASE11 CASE13 | CASE1 | CASE2 | CASE3 | CASE4 CASE8 | CASE5 CASE9 | CASE6 CASE10 CASE12 CASE14 |
|--|------------------------------------|------------------------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------------|
| | 円形断面 | 矩形断面 | | | | | |
| | | 縦横比1.0 (正方形) | 縦横比3.0 | 縦横比1.0 (正方形) | 縦横比1.5 | 縦横比2.0 | 縦横比3.0 |
| 断面図 | | | | | | | |
| 断面半径(mm) | 1900 | - | - | - | - | - | - |
| 断面幅B(mm) | - | 3368 | 5632 | 3368 | 4564 | 5664 | 7677 |
| 断面高H(mm) | - | 3368 | 1944 | 3368 | 3043 | 2832 | 2559 |
| 軸方向鉄筋 | D32-72本 | D32-18本 (側鉄筋D32-14本) D32-18本 | D32-66本 D32-66本 | D32-18本 (側鉄筋D32-14本) D32-18本 | D32-36本 D32-36本 | D32-36本 D32-36本 | D32-44本 D32-44本 |
| 断面積A(m ²) | 11.34 | 11.34 | 11.34 | 11.34 | 13.89 | 16.04 | 19.65 |
| 断面二次モーメントIx(m ⁴) 【橋軸直角方向】 | 10.23 | 10.72 | 32.13 | 10.72 | 24.12 | 42.88 | 96.49 |
| 断面二次モーメントIy(m ⁴) 【橋軸方向】 | 10.23 | 10.72 | 3.57 | 10.72 | 10.72 | 10.72 | 10.72 |
| 曲げ降伏耐力My(x)(kN・m) 【橋軸直角方向】 | 28891 | 28771 | 55559 | 93762 | 35342 | 44825 | 70356 |
| 曲げ降伏耐力My(y)(kN・m) 【橋軸方向】 | | | 22439 | 46412 | 33908 | 32957 | 30087 |
| 曲げ耐力Mu(x)(kN・m) 【橋軸直角方向】 | 36256 | 36105 | 104304 | 105393 | 52977 | 69102 | 106734 |
| 曲げ耐力Mu(y)(kN・m) 【橋軸方向】 | | | 36859 | 91822 | 35783 | 34770 | 35353 |

表-6 最大応答加速度・最大応答変位の結果一覧

| y:橋軸方向 ↑ x:橋軸直角方向 ←→ | 基本ケース | CASE1 | CASE2 | CASE3 | CASE4 | CASE5 | CASE6 | CASE7 | CASE8 | CASE9 | CASE10 | CASE11 | CASE12 | CASE13 | CASE14 | | |
|-------------------------------|----------------------------|--------|-----------------|--------|--------|--------|----------------------------|--------|--------|----------------------------|--------|-----------------------------|-------------------|--------|--------|-------|--------|
| | 円形断面 | 矩形断面 | | | 矩形断面 | | | 円形断面 | 矩形断面 | | | 円形断面 | 矩形断面 | 円形断面 | 矩形断面 | | |
| | 縦横比1.0 (正方形) | 縦横比3.0 | 縦横比1.0 (正方形) | 縦横比1.5 | 縦横比2.0 | 縦横比3.0 | | 縦横比1.5 | 縦横比2.0 | 縦横比3.0 | | 縦横比3.0 | | 縦横比3.0 | | | |
| 断面形状図 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 入力地震動 | 兵庫県南部地震 JMA神戸 | | | | | | | | | | | | 東北地方太平洋沖地震K-NET仙台 | | | | |
| 最大加速度 (gal) | 619.2(EW成分) 820.6(NS成分) | | | | | | 820.6(NS成分) 619.2(EW成分) | | | 619.2(EW成分) 820.6(NS成分) | | 982.3(EW成分) 1517.2(NS成分) | | | | | |
| 段落し部 | 曲げ降伏耐力My(kN・m) | x | 18147 | 18672 | 36596 | 57803 | 23608 | 30018 | 45726 | 18147 | 23608 | 30018 | 45726 | - | - | 18147 | 45726 |
| | | y | | | 13817 | 31143 | 20813 | 20117 | 18419 | | 20813 | 20117 | 18419 | - | - | | 18419 |
| 基部 | 曲げ耐力Mu(kN・m) | x | 22773 | 22678 | 63172 | 64053 | 33072 | 42917 | 64853 | 22773 | 33072 | 42917 | 64853 | - | - | 22773 | 64853 |
| | | y | | | 21318 | 60388 | 22111 | 21403 | 21469 | | 22111 | 21403 | 21469 | - | - | | 21469 |
| | 曲げ降伏耐力My(kN・m) | x | 28891 | 28771 | 55559 | 93762 | 35342 | 44825 | 70356 | 28891 | 35342 | 44825 | 70356 | 28891 | 70356 | 28891 | 70356 |
| | | y | | | 22439 | 46412 | 33908 | 32957 | 30087 | | 33908 | 32957 | 30087 | | 30087 | | 30087 |
| | 曲げ耐力Mu(kN・m) | x | 36256 | 36105 | 104304 | 105393 | 52977 | 69102 | 106734 | 36256 | 52977 | 69102 | 106734 | 36256 | 106734 | 36256 | 106734 |
| | | y | | | 36859 | 91822 | 35783 | 34770 | 35353 | | 35783 | 34770 | 35353 | | 35353 | | 35353 |
| 最大応答加速度 (gal) | 2方向 載荷 | x | 943 | 872 | 1136 | 787 | 914 | 858 | 707 | 1013 | 805 | 861 | 847 | 1024 | 646 | 760 | 802 |
| | | y | 1013 | 891 | 764 | 1303 | 762 | 919 | 932 | 943 | 654 | 722 | 648 | 1029 | 939 | 951 | 924 |
| 最大応答変位 (mm) | 2方向 載荷 | x | 69 | 69 | 19 | 8 | 41 | 10 | 4 | 103 | 10 | 4 | 1 | 68 | 4 | 56 | 9 |
| | | y | 103 | 95 | 205 | 25 | 81 | 58 | 58 | 69 | 23 | 19 | 9 | 99 | 58 | 80 | 57 |

ケースおよびCASE1～CASE3の兵庫県南部地震におけるJMA神戸のNS成分(最大加速度820gal)を橋軸方向に、EW成分(最大加速度619gal)を橋軸直角方向に同時に作用させた橋脚天端の応答変位の軌跡を示したものである。円形断面および縦横比1.0の正方形断面は、水平2方向地震動の作用の影響により、応答変位が全方向に連続した軌跡を描くように応答する結果となった。縦横比を3.0としたCASE2は、曲げ耐力が大きい橋軸直角方向には応答しにくい結果となり、断面剛性が小さい橋軸方向の応答変位量が大きくなった。縦横比1.0の正方形断面で曲げ耐力を大きくしたCASE3は、部材の塑性化が生じにくくなるため、応答変位量が小さくなった。

(4) 地震動の入力方向(方位)の影響

地震動の入力方向(方位)の違いがRC橋脚の最大応答変位および最大応答加速度に及ぼす影響について示す。表-6において基本ケースとCASE7を比較すると、円形断面であるため、耐力は地震応答の方向によらず同じであり、入力方向を90°回転させると、橋軸方向と橋軸直角方向の応答値が逆となる結果となった。縦横比1.5のCASE4とCASE8、縦横比2.0のCASE5とCASE9、縦横比3.0のCASE6とCASE10を比較すると、橋軸方向に作用する地震動の加速度が小さくなると、最大応答変位および最大応答加速度は小さくなった。橋軸直角方向の地震動の加速度が大きくなることにより、CASE9および

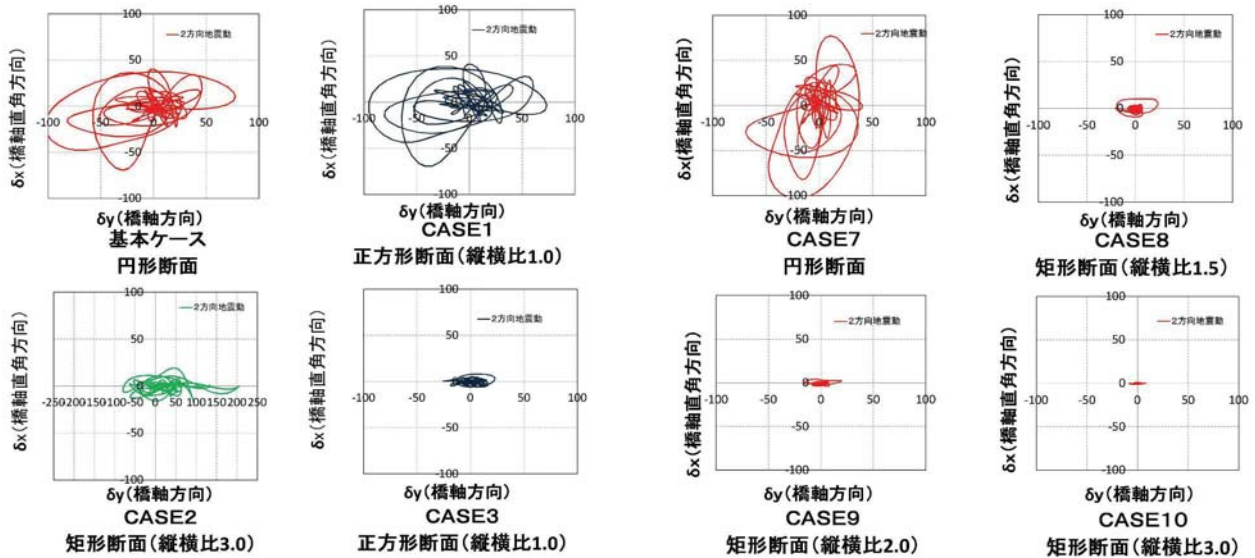


図-15 橋脚天端の応答変位の軌跡[JMA 神戸] (NS成分を橋軸方向とした場合)

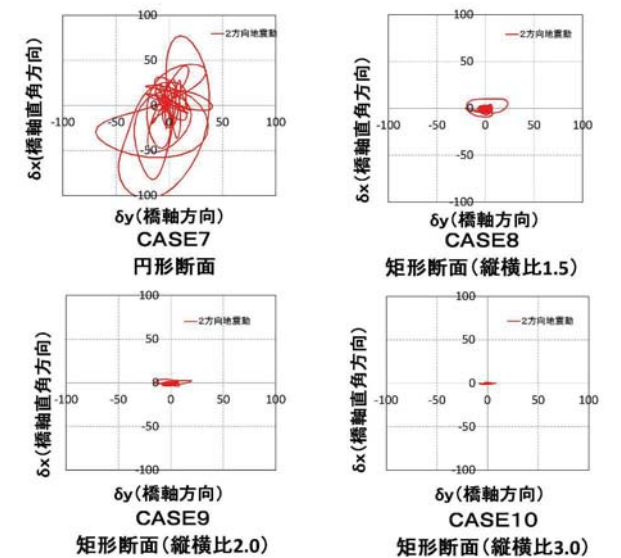


図-17 橋脚天端の応答変位の軌跡[JMA 神戸] (EW成分を橋軸方向とした場合)

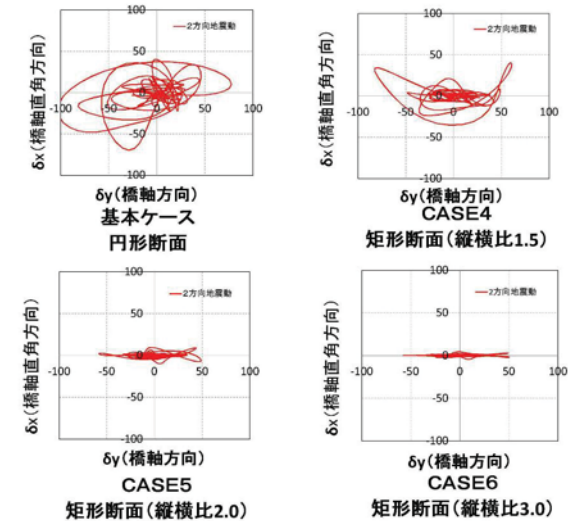


図-16 橋脚天端の応答変位の軌跡[JMA 神戸] (NS成分を橋軸方向とした場合)

CASE10は、橋軸直角方向の最大応答加速度は大きくなったが、最大応答変位は小さくなった。

橋脚天端の応答変位の軌跡について、兵庫県南部地震におけるJMA神戸のNS成分(最大加速度820gal)を橋軸方向に、EW成分(最大加速度619gal)を橋軸直角方向に作用させた結果を図-16に、入力方向を90°回転させ、EW成分(最大加速度619gal)を橋軸方向に、NS成分(最大加速度820gal)を橋軸直角方向に作用させた結果を図-17に示す。

縦横比が異なる矩形の壁式橋脚は、橋軸直角方向の耐力が大きいため、地震動の方向により応答変位が小さくなるのに対し、円形断面は、どの方向に地震動が作用しても同様な応答を示すことが推定する

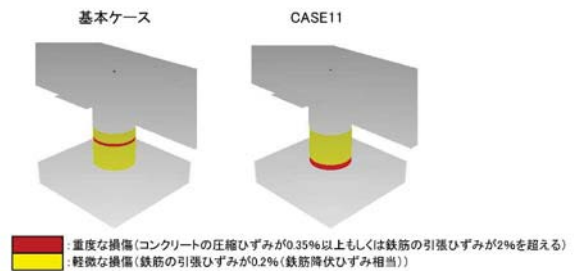


図-18 く体の損傷状況の比較図

ことができる。

(5) 段落し有無の影響

軸方向鉄筋段落しの有無の影響について、基本ケースとCASE11およびCASE6とCASE12を比較する。基本ケースとCASE11のく体の損傷状況の比較図を図-18に示す。段落し有無により部材の損傷部位は異なるが、表-6より最大応答加速度は、段落し無の方が、若干大きくなる傾向にあるが、最大応答変位および最大応答加速度とも大きな差異はみられなかった。

段落しが有ると途中定着部の性能不足により段落し部の損傷が発生し、基部が損傷しにくくなるのに対し、段落しが無いと基部に損傷が集中し、橋脚の応答には影響がないと考えられる。

(6) 地震動の特性による相違の影響

地震動の特性の影響について、基本ケースとCASE13およびCASE6とCASE14を比較する。なお、本解析ケースにおける円形断面の橋脚および矩形断面の橋脚橋軸方向における構造物の固有周期は

0.4 s 程度であり、縦横比 3.0 の矩形断面の橋脚橋軸直角方向における構造物の固有周期は 0.1 s 程度である。

表-6 より円形断面および縦横比 3.0 の矩形断面の橋軸方向は、0.4 s 付近の東北地方太平洋沖地震（K-NET 仙台）の応答加速度は、兵庫県南部地震（JMA 神戸）と比較し小さくなるため、最大応答変位および最大応答加速度は小さくなる傾向を示した。縦横比 3.0 の矩形断面の橋軸直角方向は、短周期成分の卓越する地震動である東北地方太平洋沖地震（K-NET 仙台）で検討した CASE14 のほうが、橋軸直角方向の最大応答変位および最大応答加速度は大きくなった。

6. まとめ

2011 年の東北地方太平洋沖地震において、東北新幹線に対して実施した損傷度調査の結果を基に、中程度の損傷を受けた RC 橋脚の構造的特徴について分析した。また、橋脚く体の断面諸元の相異による RC 橋脚の応答特性を把握するため、水平 2 方向地震動の作用を考慮した解析を行い、異なる断面緒元の影響、地震動の入力方向（方位）の影響、段落し有無の影響、地震動の特性による影響に着目し、弾塑性地震応答解析による分析を行った。分析の結果から得られた知見を以下の通りである。

- (1) 中程度以上の損傷を受けた RC 橋脚の特徴は、全体の約 95% が段落しのある橋脚であり、く体断面形状は、円形断面が多く、矩形断面の橋脚の損傷数を矩形断面の橋脚全数で除した割合が 0.1% であるのに対し、円形断面の橋脚の損傷数を円形断面の橋脚全数で除した割合は約 5% と比較的高い比率を示した。
- (2) 円形断面や正方形断面の単柱式橋脚は、剛性および耐力が地震応答の方向によらず同じであり、地震動の作用方向の影響がない。応答変位は、全方向に連続した軌跡を描くように応答し、全

周に損傷を与えるような応答を生じる。円形断面と等価等積な正方形断面の解析結果を比較すると、最大応答変位は同程度であり、最大応答加速度は、正方形断面の方がやや小さくなる傾向を示した。

一方、壁式橋脚は、橋軸直角方向において、耐力が大きいため、応答が相対的に小さくなるものと考えられる。

参考文献

- 1) 友竹幸治, 篠田健次, 小林將志: 東北地方太平洋沖地震において被害を生じた RC 橋脚の損傷原因に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, 第 36 巻 2 号, No. 2162 / p967-972, 2014.
- 2) 土木学会: 阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害 第 1 章 橋梁, 1996. 12
- 3) 土木学会: コンクリートライブラリー第 114 号: 2003 年に発生した地震によるコンクリート構造物の被害分析, 2004. 11
- 4) 幸左賢二, 藤井 學, 林 秀侃, 中田恒和: RC 単柱式橋脚のマクロ的損傷分析, 土木学会論文集 No. 592 / V-39 号, 1998.
- 5) 小林將志, 篠田健次: 東北地方太平洋沖地震で被災した RC 橋脚の損傷度と復旧性に関する一考察, 土木学会第 67 回年次学術講演会 / V-227, 2012.
- 6) 青戸拡起, 牧原成樹, 吉川弘道: 水平 2 方向地震動を受ける鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形と損傷に関する検討, 第 9 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2006. 2
- 7) 早川涼二, 川島一彦, 渡邊学歩: 水平 2 方向地震力を受ける単柱式 RC 橋脚の耐震性, 土木学会論文集 No. 759, 2004. 4
- 8) 日本国有鉄道: 東北新幹線工事誌 大宮・盛岡間
- 9) 岡村甫, 前川宏一, 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991. 5

STUDY ON DAMAGE CAUSED TO SHINKANSEN RC BRIDGE PIER
BY THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Koji TOMOTAKE, Kenji SHINODA, Kousuke KUWAKINO, Takayuki OSATO , and
Masashi KOBAYASHI

This paper outlines the damage to Shinkansen RC Bridge Pier caused by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. We investigate the damage of the structure. Furthermore, we demonstrate the damage using fiber element analysis. It is found that seismic performance of the pillar type pier is lower than of the wall type pier.