

報告 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

友竹 幸治*1・篠田 健次*2・小林 將志*3

要旨: 東北地方太平洋沖地震においては、鉄道構造物の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受けた。そのため、損傷した東北新幹線のRC橋脚に対する諸元および損傷状況に対する調査を実施した。構造的特徴の分析を行い、損傷を受けた構造物の特徴を示すとともに、比較的大きな損傷を受けた円形断面RC橋脚の弾塑性時刻歴応答解析および橋脚く体断面形状によるパラメータスタディを行った。RC橋脚のく体断面形状が、円形断面からく体の縦横比が大きくなると、断面耐力が増加し、剛性が向上することによって、損傷が小さくなることが再現された。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, RC橋脚, 被害分析, 時刻歴応答解析

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)により、東北新幹線でも多くの構造物が被害を生じた。RC橋脚においては、東北新幹線で15基の中程度の損傷が報告されているほか、軽度のひび割れを生じる損傷が数件みられた。また4月7日の余震により補修済みのRC橋脚が再度損傷するといった事象も生じた。RC橋脚の構造的な損傷部位としては、主鉄筋段落し部およびく体の基部であった。これは、旧基準により設計されていたことにより、段落し部の途中定着部の性能が不足していることと、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。

RCラーメン高架橋に関する被害分析においては、地震により水平繰返し力を受ける構造物の損傷と耐震性能に関する研究^{1), 2), 3), 4)}などがある。しかし、本報告で対象とするRC橋脚については、マクロ的損傷分析⁵⁾、⁶⁾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^{7), 8)}などはあるが、構造的な特徴を分析した研究は極めて少ない。

そこで、本報告では、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(ここでは、損傷度B2程度および一部損傷度Cを含む)を受けたRC橋脚の構造的な特徴について分析した。また、その上で比較的大きな損傷を受けたRC橋脚を例に、橋脚く体の断面形状が変化した場合にどのような地震応答を生じるのかを検証したので、以下に示す。

2. RC橋脚の損傷度調査

2.1 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、損傷度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-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

2.2 損傷を受けた橋脚の割合

損傷を受けた橋脚の割合を表-2に示す。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B1以上の被害はなく、耐震補強済みのRC橋脚く体においては、損傷度がC以上の被害はみられな

*1 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部構造技術センター (正会員)

*2 ジェイアール東日本コンサルタンツ(株) 技術本部技術第一部 (正会員)

*3 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部構造技術センター課長 工修 (正会員)

った。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-2 損傷割合

損傷度	性能分類	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、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

東北新幹線において損傷したRC橋脚の一覧を表-3に示す。

損傷を受けた橋脚の性能は、段落し部の性能が低いものと、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。

損傷の特徴としては、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。



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. 9)

表-3 損傷したRC橋脚一覧

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
15	C	段落し部	円形	φ4800	1.00	3

2.3 段落し部周辺での損傷範囲

段落し部周辺でのかぶりの剥落等の損傷範囲については、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(図-2参照)。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(図-3参照)。

表-4に段落し部における損傷範囲を示す。損傷範囲は複数の段落しにまたがって損傷を起こしているケースを除いては、概ね損傷範囲がカットオフ点を境に上下に軸方向鉄筋径の30~50倍程度の範囲まで広がっている。

表-4 段落し部の損傷範囲

No	軸方向鉄筋径 mm	上側損傷範囲 mm	下側損傷範囲 mm	備考損傷度
1	19	—	400	C
2	29	—	—	C
3	19	—	600	C
4	19	—	300	C
6	32	800	2400	B2
7	22	400	800	C
8	32	800	700	C
9	32	1100	1200	B2
10	32	900	400	C
11	32	700	800	C
13	32	1800	4000	B2・複数*
14	32	1300	1500	B2
15	32	600	2000	C

*: 複数の段落して損傷

3. RC橋脚の構造特性による損傷分析

3.1 橋脚の損傷の特徴

中程度の損傷(損傷度B2程度及び一部損傷度Cを含む)を受けたRC橋脚のく体の断面形状や段落しの条件などの構造的特徴について分析する。

(1) く体の断面形状

東北新幹線の橋りょうについては、施工の合理化、工期の短縮、施工の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、鉄筋コンクリート壁式橋脚とされている⁹⁾。ただし河川部などの比較的長スパンの特殊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。

断面形状別損傷数を図-4に示す。く体形状については、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。特に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(表-5参照)。

橋脚の設計水平震度は、0.2~0.25で設計されており、上部工の支承条件については、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、馬桁で支承が1箇所なのが3基で、支承条件の違いによる影響はみられなかった。

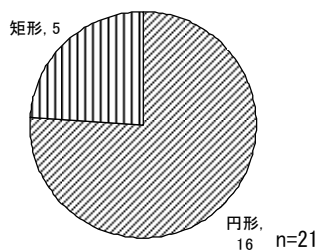


図-4 断面形状別損傷数

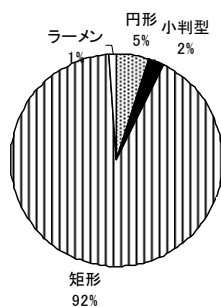


図-5 橋脚断面形状の割合(東北新幹線東京~盛岡間)

表-5 橋脚形状別損傷割合

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%
ラーメン橋脚	0 -	

また、円形断面が多いのでく体の縦横比は1:1のものが多いが、矩形断面の5基についても全て1:3を下回る形状であった。表-6に矩形断面の5基の縦横比を示す。

表-6 く体の縦横比(矩形断面のみ)

橋脚No.	形状	縦横比
1	2350×6000	2.55
2	2550×6000	2.35
3	2600×6000	2.31
4	3000×5000	1.67
12	2300×6000	2.61

(2) 段落しの条件

段落し箇所数別損傷橋脚数を図-6に示す。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5基で、段落しがないものが1基であった。

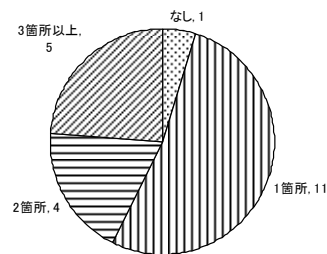


図-6 段落し箇所数別損傷橋脚数

また、段落しが複数ある場合の損傷箇所は表-7に示すとおりであった。全てが最上段ではないが、比較的上端部に近い段落し部において損傷していることが分かる。

表-7 段落し数と損傷箇所

橋脚No.	段落し数	損傷箇所
13	3	段落し②
14	4	段落し③
15	3	段落し③

*段落しは下から①・②・③・・・とする。

4. 弾塑性時刻歴応答解析による損傷原因の推定

4.1 解析条件

円形断面のく体形状を有する単柱式橋脚で、損傷度がB2であった橋脚No.9について地震時の実構造物を模擬した解析を行った。解析は、RC非線形解析プログラムUC-win/COM3(Fiber)を用いて行った。

橋脚No.9の損傷状況を図-7に示す。



図-7 橋脚 No. 9 の損傷状況

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正しい計算が可能である。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。

4.2 解析に用いる地震動

東北地方太平洋沖地震の特徴としては、非常に広い範囲で大きな揺れを生じた点、揺れの継続時間が長かったこと等が挙げられる。大きな損傷を受けた構造物に比較的近い地震計の観測波の一例と兵庫県南部地震の観測波との比較を図-8に、加速度応答スペクトル（観測波と同箇所）を図-9示す。

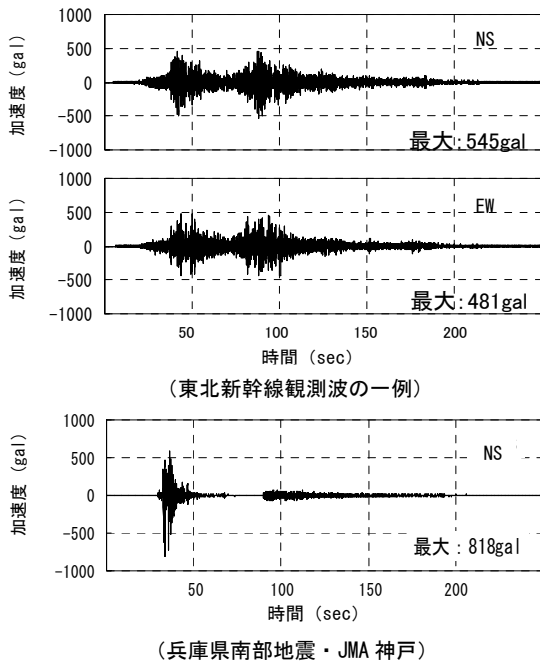


図-8 東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の地震動波形の比較

東北地方太平洋沖地震は、地震動の継続時間が長かったこともあり、明確な地震動の卓越方向はみられなかった。また加速度応答スペクトル 0.5 秒程度以下の短周期にピークを示しており、鉄道の土木構造物の固有周期 0.4 ~ 1.0 秒の範囲において、兵庫県南部地震の最大加速度と同程度の値であった。

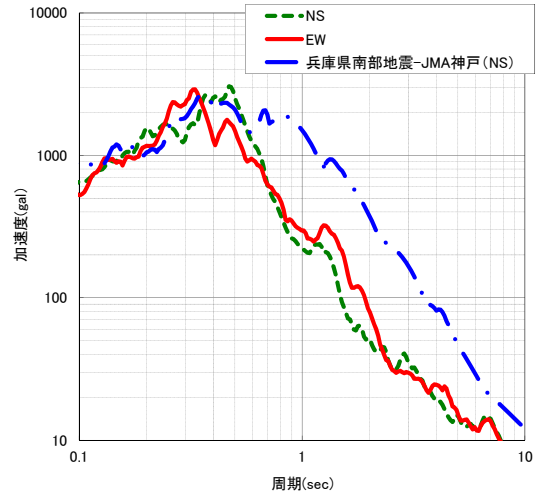


図-9 加速度応答スペクトル

非線形応答は、波形の位相特性により応答性状が大きく変わるが、本報告では、く体断面形状をパラメータとして検討し、地震時に被害を受けやすいく体断面形状の検証を目的としているため、時刻歴地震波形は、図-10に示す兵庫県南部地震における神戸海洋気象台観測記録の主要動を取り出して用いた。水平成分の観測は南北（NS）方向と東西（EW）方向の加速度波形が記録されており、これを水平2成分の地震動として利用した。鉛直動の影響については考慮していない。

なお、本解析においては、短辺方向に EW 成分を、長辺方向に NS 成分を作用させて解析を行った。

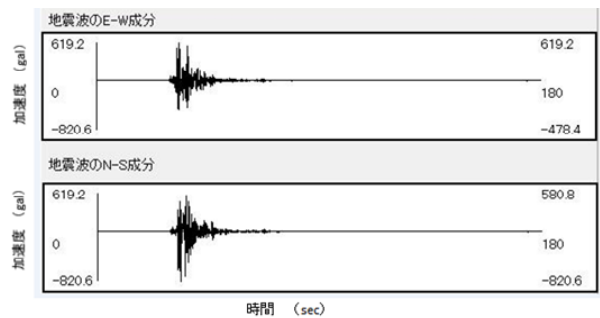


図-10 兵庫県南部地震で観測された加速度波形

4.3 構造体諸元と解析モデル

構造体諸元として表-8に断面諸元を示す。構造体の諸元は、円形断面を基本とし、橋脚く体の断面形状によ

るパラメータスタディとして縦横比が1.0の等積な矩形断面、縦横比が1.5および2.0および3.0の矩形断面とした。矩形断面については、短辺方向の剛性および曲げ耐力が円形断面と等積な矩形断面と等しくなるように設定し、長辺

方向の剛性および曲げ耐力をパラメータとしたケースを実施した。橋脚く体は、すべてファイバー要素を用いてモデル化を行った。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が、2方向曲げの影響を考慮して縦横比を変化させ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(SD345)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することとした¹⁰⁾。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-11に解析モデル(円形断面の場合)を示す。

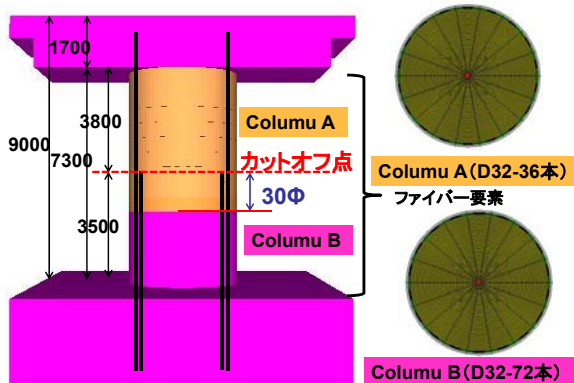


図-11 解析モデル(円形断面の場合)

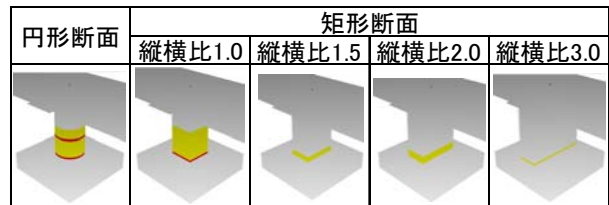
4.4 解析結果

ここでは、橋脚く体の断面形状の違いがRC橋脚の最大応答に及ぼす影響について整理する。

表-8 断面諸元

断面図	円形断面	矩形断面			
		縦横比1.0	縦横比1.5	縦横比2.0	縦横比3.0
断面半径(mm)	1900	-	-	-	-
断面幅B(mm)	-	3368	4564	5664	7677
断面高H(mm)	-	3368	3043	2832	2559
段落し部 主鉄筋	D32-36本	D32-9本 (側鉄筋D32-7本) D32-9本	D32-18本 D32-18本	D32-19本 D32-19本	D32-22本 D32-22本
断面積A(m ²)	11.34	11.34	13.89	16.04	19.65
断面二次モーメントIy(m ⁴) 【短辺方向】	10.23	10.72	10.72	10.72	10.72
断面二次モーメントIx(m ⁴) 【長辺方向】	10.23	10.72	24.12	42.88	96.49
曲げ耐力Mu(y)(kN・m) 【短辺方向】	22773	22678	22112	21403	21469
曲げ耐力Mu(x)(kN・m) 【長辺方向】	22773	22678	33072	42917	64853

図-12に解析結果の損傷状況図を示す。円形断面については、段落し部およびく体基部で重度な損傷が発生しており、等積矩形断面では段落し部の軽微な損傷およびく体基部の重度な損傷が発生し、縦横比が1.5および2.0および3.0の矩形断面となると段落し部の損傷はなく、く体基部の軽微な損傷のみで縦横比が大きくなるにしたがい、短辺方向の断面剛性や断面耐力を等しくしたにもかかわらず損傷の領域も小さくなるのがわかる。

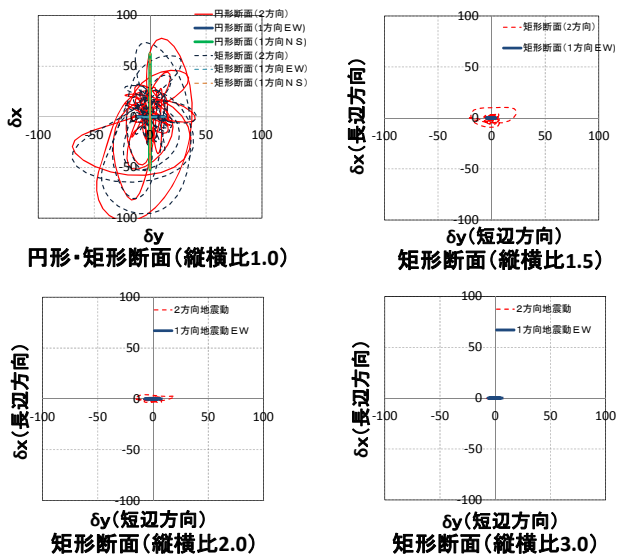


■: 重度な損傷(コンクリートの圧縮ひずみが0.35%以上)
 ■: 軽微な損傷(鉄筋の引張ひずみが0.2%(鉄筋降伏ひずみ相当))

図-12 損傷状況図

図-13に解析結果の橋脚天端における応答変位の軌跡を示す。最大応答変位は、円形断面で103mm(NS), 69mm(EW), 縦横比が1.0の等積矩形断面で95mm(NS), 69mm(EW)であった。橋脚く体の形状を縦横比1.5とすると短辺方向(EW)に29mm, 長辺方向(NS)に10mmとなり、縦横比を2.0とすると短辺方向(EW)に19mm, 長辺方向(NS)に4mm, 縦横比を3.0とすると短辺方向(EW)に9mm, 長辺方向(NS)に1mm程度しか応答しない結果となった。よって最大応答変位の減少率は、加速度が619.2galである短辺方向と比較すると、縦横比1.5の断面形状で0.42倍, 縦横比2.0の断面形状で0.27倍, 縦横比3.0の断面形

状となると0.13倍となり、橋脚く体断面形状の縦横比の影響により最大応答変位が減少したことになる。



図一 1 3 橋脚天端の応答変位の軌跡

4.5 断面形状の違いによる再現解析

比較的大きな損傷を受けた円形断面 RC 橋脚の地震応答解析を行った結果、段落し部は、RC 部材の荷重変位関係の最大水平荷重以降の状態となり、曲げによる損傷として段落し部において主にかぶりコンクリートの広範囲な剥落、軸方向鉄筋の外方への変形、軸方向鉄筋の変形により押し出されることによる帯鉄筋の変形などが発生することが再現でき、ファイバー要素解析の妥当性の確認ができた。

短辺方向の剛性および曲げ耐力を一定と仮定した場合において、RC 橋脚の損傷は、円形断面から縦横比が大きくなると、断面耐力が増加し、剛性が向上することによって、損傷が小さくなることが再現された。

5. まとめ

- (1) 被災程度が中程度以上の損傷を受けた RC 橋脚の特徴は、段落しのあることが全体の約 95%であった。
- (2) 中程度以上の損傷を受けた RC 橋脚の断面形状は、円形断面のものが多く、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、その他の形状より損傷数が多く、矩形断面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%であるのに対して、円形断面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%と円形断面の損傷比率が高かった。

- (3) 中程度の損傷を受けた RC 橋脚を例に 3 次元ファイバー要素を用いた骨組みモデルで弾塑性時刻歴応答解析を行った結果、兵庫県南部地震における地震動においては、縦横比が小さい円形断面および正方形断面は、地震動の卓越方向に関係なく応答変位が同等に大きくなるが、縦横比が大きくなると、断面耐力が増加し、剛性が向上することによって損傷が小さくなることが再現された。

参考文献

- 1) 石橋忠良, 池田靖忠, 菅野貴浩, 岡村甫: 鉄筋コンクリート高架橋の地震被害程度と設計上の耐震性能に関する検討, 土木学会論文集 No.563/I-39, 1997.
- 2) 篠田健次, 小林將志, 水野光一郎, 佐々木勝法: 東北地方太平洋沖地震における東北新幹線 RC ラーメン高架橋の被害分析, コンクリート工学年次論文集, 第 34 巻 2 号, No.2190/p 1135-1140, 2012.
- 3) 小林將志, 水野光一郎, 倉岡希樹, 野澤伸一郎, 石橋忠良: 東北地方太平洋沖地震により損傷した RC ラーメン高架橋に対する被害分析, 土木学会論文集 A1,Vo69,No.4/I_790 - I_797, 2013.
- 4) 小林將志, 篠田健次, 水野光一郎: 東北地方太平洋沖地震により損傷した新幹線 RC ラーメン高架橋に関する被害分析, 土木学会 第 33 回地震工学研究発表会論文集, 2013.10
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 青戸拙起, 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
- 8) 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
- 9) 日本国有鉄道: 東北新幹線工事誌 大宮・盛岡間
- 10) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 2004.4