

# 2層式 RC ラーメン高架橋の中層梁の地震損傷 が残存耐震性能に及ぼす影響

井上 和真<sup>1</sup>・植村 佳大<sup>2</sup>・浅見 健斗<sup>3</sup>・今井 克実<sup>4</sup>・井澤 亮介<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 群馬工業高等専門学校講師 環境都市工学科 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580)  
E-mail: inoue@cvt.gunma-ct.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 京都大学助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: uemura.keita.3n@kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>非会員 群馬工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580)  
E-mail: c17502@gunma.kosen-ac.jp

<sup>4</sup>非会員 群馬工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580)  
E-mail: ae21902@gunma.kosen-ac.jp

<sup>5</sup>学生会員 群馬工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580)  
E-mail: ae21901@gunma.kosen-ac.jp

2001年芸予地震の山陽新幹線、2021年福島県沖地震の東北新幹線など、過去に新幹線の2層式RCラーメン高架橋の中層梁がせん断損傷が生じた。本研究は2層式RCラーメン高架橋を対象に、中層梁の地震損傷が、残存耐震性能(余震に対する抵抗性)に与える影響を様々な振幅倍率の2回の地震動入力による非線形FEM地震応答解析によって評価した。

その結果、中層梁のコンクリートの圧縮軟化や中層梁の帯鉄筋の降伏が構造系全体の動的応答特性に与える影響は小さく、中層梁の損傷が2層式ラーメンの残存耐震性能に与える影響は軽微である可能性があるといえる。中層梁の損傷を有した状態からの2回目の地震動入力に対する解析結果は、中層梁の損傷のある場合と損傷のない場合と比較して、最大応答変位は最大で20%程度大きくなることが確認された。

**Key Words:** Two-story reinforced concrete frame, Mid-beam, Dynamic analysis, Finite element method, Anti-catastrophe

## 1. 研究の背景

2021年2月、福島県沖を震源とするマグニチュード7.3の地震(以下、2021年福島県沖地震とする)が発生した。この地震は、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の余震であると考えられ、宮城県および福島県では最大震度6強が観測された。地震後の調査では、家屋や道路構造物の被害、ならびに地盤災害は軽微であった一方で、東北新幹線2層式RCラーメン高架橋の中層梁のせん断損傷が、程度の差はあれど広範囲で発生したことが報告されている<sup>1)2)</sup>(写真-1)。

2層式RCラーメン高架橋の中層梁の被災事例は、1978年宮城県沖地震や2001年芸予地震、2011年東北地方太平洋沖地震など、過去の地震でも多数確認されている。

特に、2001年芸予地震<sup>3)</sup>では、他のコンクリート構造物の被害は少なく、2層式RCラーメン高架橋の中層梁の被害が主であったと報告されており、先述した2021年福島県沖地震における被災事例と類似している。

一般的に、2層式RCラーメン高架橋では、地震時の



写真-1 2層式RCラーメン高架橋の中層梁のせん断損傷<sup>1)</sup>

損傷を中層梁に誘導することで、柱の損傷およびそれに伴う残留変位低減効果が期待できることが知られている<sup>4)</sup>。そのため、2層式 RC ラーメン高架橋の中層梁のみに損傷が発生するという状況は、損傷制御の観点で理想的な損傷モードであるといえる。一方で、2011年東北地方太平洋沖地震を契機として提案された危機耐性<sup>5)</sup>の考え方に基づくと、設計想定を超える地震動や本震後の余震などによる超過作用に対する、中層梁損傷後の2層式 RC ラーメン高架橋の応答性状や復元力特性については、配慮が必要であるといえる。しかしながら、中層梁損傷後の2層式 RC ラーメン高架橋の応答性状に言及している既往文献はいくつか見受けられるものの<sup>6)</sup>、上述のような超過作用に対する危機耐性についての議論は行われていない。

そこで本研究では、中層梁が損傷した2層式ラーメン高架橋の余震への抵抗性を解析的に検証することで、レジリエンス評価につなげることを目的とした。具体的には、2001年芸予地震で被災した山陽新幹線の構造を参考に、地震応答解析を実施し、2層式 RC ラーメン高架橋における中層梁の地震損傷が構造全体の応答特性・耐荷特性・残存耐震性能に与える影響を検証した。

## 2. 2層式 RC ラーメン高架橋の被災事例

本章では、過去の2層式 RC ラーメン高架橋の被災事例を簡単にまとめる。

1978年宮城県沖地震<sup>8)</sup>では、当時建設中だった東北新幹線が被災し、その被害は宮城県全域に広がった。2層式 RC ラーメン高架橋では、線路直角方向の中層梁の被害が顕著であり、数多く的高架橋にせん断ひび割れが発生したことが報告されている。具体的には、柱上下端のひび割れが33ブロックのラーメン高架橋で確認されたのに対し、中層梁のひび割れは73ブロックのラーメン高架橋で発生したことが報告されており、ひび割れ幅の大きいものは1mm程度にまで達していたことが確認されている。なお、線路方向の中層梁にはひび割れは発生せず、1層式 RC ラーメン高架橋においても柱上部に多少のひび割れが発生した程度であったと報告されている。

1995年兵庫県南部地震<sup>9)</sup>では、1層式、2層式問わず、数多くの RC ラーメン高架橋において倒壊等の甚大な被害が発生した。2層式 RC ラーメン高架橋では、上層梁または中層梁直下で柱のせん断ひび割れが生じ、これが柱内部を貫通することで、自重の影響によって崩壊した被災事例が複数の地点で確認されている。

2001年芸予地震では、山陽新幹線の一部区間における2層式 RC ラーメン高架橋の中層梁に被害が発生したことが報告されている。具体的には、197本にひび割れなどの異状が見つかり、うち12本では鉄筋が露出する

などの被害が確認されている。2層式 RC ラーメン高架橋の柱の損傷は確認されなかった。また、1層式 RC ラーメン高架橋やその他コンクリート構造物の主な被害も確認されていない。

2003年三陸南地震<sup>10)</sup>では、東北新幹線の盛岡～水沢江刺間にある RC ラーメン高架橋のうち、22か所の高架橋の柱において、せん断ひび割れ等の比較的大きな損傷が確認されたが、それらは全て1層式 RC ラーメン高架橋であった。2層式 RC ラーメン高架橋における被害は報告されていない。

2004年新潟中越地震<sup>11)</sup>では、一部の2層式 RC ラーメン高架橋において、線路方向・線路直角方向ともに、中層梁のせん断ひび割れが確認されている。なお、柱の損傷は確認されていない。一方で、1層式 RC ラーメン高架橋での被害は比較的大きく、損傷の大きいところでは柱上部から中央部付近へ向けてのひび割れ、かぶりコンクリートの剥落、内部鉄筋の露出等が確認された。

2011年東北地方太平洋沖地震<sup>13)</sup>では、複数の2層式 RC ラーメン高架橋において、中層梁のせん断ひび割れが確認された。中には、中層梁と柱の接合部にひび割れが発生した事例や、本震の際は中層梁のせん断ひび割れ発生のみであった高架橋において、約1か月後に発生した余震による中層梁の損傷増大ならびに地表付近の柱の重度の損傷が確認された事例も存在した。なお、1層式 RC ラーメン高架橋においても被害が確認されており、中には荷重支持能力を喪失するレベルの柱のせん断損傷も報告されている。

2021年福島県沖地震<sup>2)</sup>では、東北新幹線の2層式 RC ラーメン高架橋の中層梁のせん断ひび割れが広範囲で発生した。中にはコンクリートが剥落し、内部鉄筋の露出を伴う損傷も確認された。一部、中層梁と柱の接合部や中層梁直下のひび割れも確認されたものの、その被害は軽微なものであった。また、1層式 RC ラーメン高架橋やその他コンクリート構造物の被害についても確認されず、土木構造物の主な被害は、2層式 RC ラーメン高架橋の中層梁のせん断損傷のみであったといえる。

以上より、2層式 RC ラーメン高架橋における中層梁の損傷は、過去の多くの地震で確認されている。中には、2001年芸予地震や2021年福島県沖地震のように、他のコンクリート構造物の被害がほとんど見当たらなかったにも関わらず、2層式 RC ラーメン高架橋の中層梁の損傷のみが確認された事例も存在する。

## 3. 2層式ラーメン高架橋の構造特性

### (1) 本章の検討概要および解析条件

本章では、鉛直荷重（列車通行時）と水平荷重（地震時）に対する1層式ラーメン構造と2層式ラーメン構

造の断面力図を比較することで、2層式ラーメン構造における中層梁の役割について整理する。その際、各構造における部材は梁要素によりモデル化し、図-1中に示す位置に鉛直荷重および水平荷重をそれぞれ作用させた解析を行った。なお、載荷荷重の大きさは単位荷重1kNである。

(2) 解析結果

a) 鉛直荷重載荷時

図-2に鉛直荷重載荷時におけるラーメン構造の断面図を示す。図-2(a)より、鉛直荷重載荷時は、中層梁の有無に関わらず、上層梁にのみせん断力が発生することがわかる。また図-2(b)を見ても、中層梁の有無により柱断面に発生する曲げモーメントに多少の変化が見られるものの、鉛直荷重載荷時に2層式ラーメン構造の中層梁には曲げモーメントは発生していないことがわかる。よって、鉛直荷重に対する中層梁の影響は小さいことから、地震時に中層梁の損傷が発生した場合でも、ラーメン構造の鉛直支持性能は維持されることが確認された。

b) 水平荷重載荷時

図-3に水平荷重載荷時におけるラーメン構造の断面力図を示す。図より、中層梁の存在によって、水平荷重に対して発生する上層梁のせん断力が軽減されていることがわかる。また、2層式ラーメン構造では、1層式ラーメン構造に比べ、上層梁および柱に発生する曲げモーメントが減少していることがわかる。よって、2層式ラーメン構造における中層梁は、水平荷重作用時に発生する各部材の断面力を低減させる効果を有していることが確認された。

以上の結果から、地震時に中層梁が損傷することで、柱および上層梁の断面力が增大する可能性があり、中層梁の損傷度が構造系全体の応答特性や耐震残存性能に与える影響について、より詳細な検討が必要といえる。

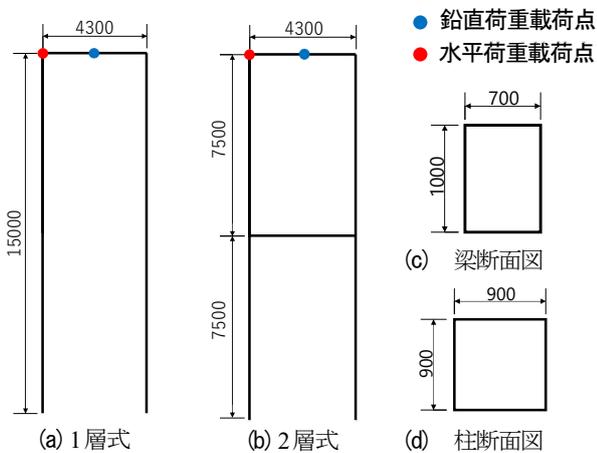
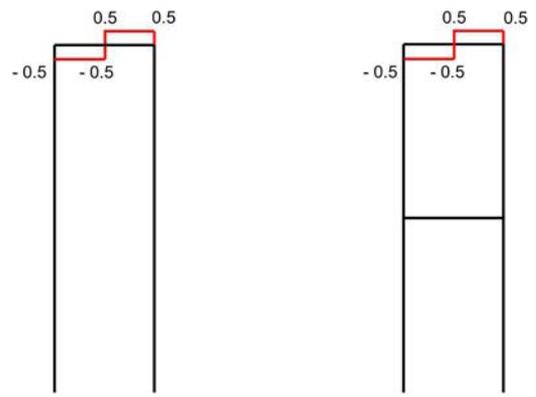
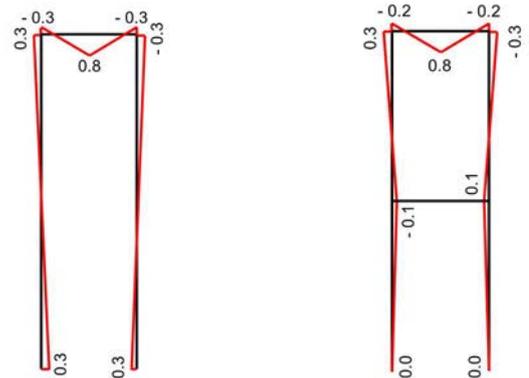


図-1 ラーメン構造の解析モデル概略図 (単位: mm)

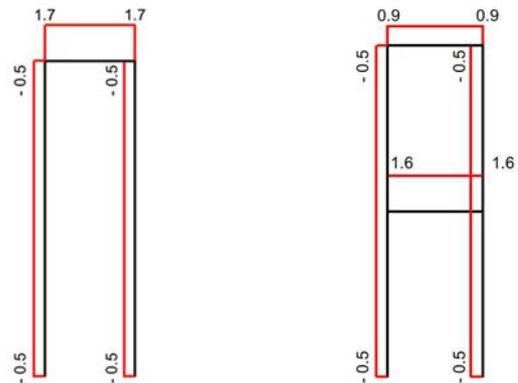


(a) せん断力図 (単位: kN)

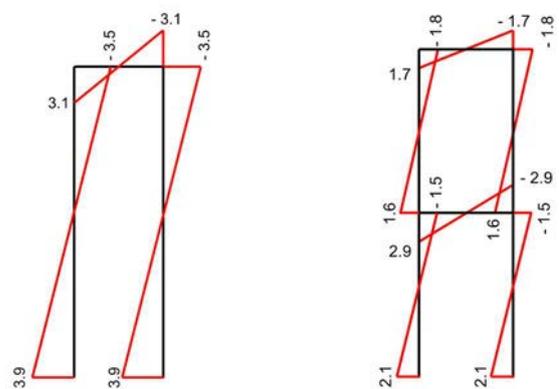


(b) 曲げモーメント図 (単位: kN・m)

図-2 鉛直荷重載荷時の断面図 (左: 1層式, 右: 2層式)



(a) せん断力図 (単位: kN)



(b) 曲げモーメント図 (単位: kN・m)

図-3 水平荷重載荷時の断面図 (左: 1層式, 右: 2層式)

#### 4. 非線形 FEM 解析地震応答解析の条件

##### (1) 数値解析モデル

非線形 FEM 解析は、解析ソフト FINAL-v11<sup>15)</sup>を用いた。FINAL はコンクリート系構造物の FEM 非線形解析に特化した解析プログラムであり、コンクリートのひび割れや圧壊、鉄筋降伏などを詳細に模擬することができる。対象の 2 層式 RC ラーメン高架橋の解析モデル図を図-4 に示す。有限要素による解析モデルの作成にあたり、山陽新幹線三原駅近くの宮浦第 1 高架橋の 2 層式 RC ラーメンの構造寸法と配筋を参考に解析モデルを作成した。表-1 にコンクリートと鉄筋材料特性を表-2 に各部材の鉄筋量を示す。コンクリートの構成則に関しては、引張側はひび割れまで線形とし、ひび割れ後は出雲モデル圧縮側修正 Ahmad モデル、ひび割れ面のせん断伝達も考慮した。鉄筋の応力～ひびきみ関係は、包絡線はバイリニアを仮定し、履歴特性は修正 Menegotto-Pinto モデルとした。

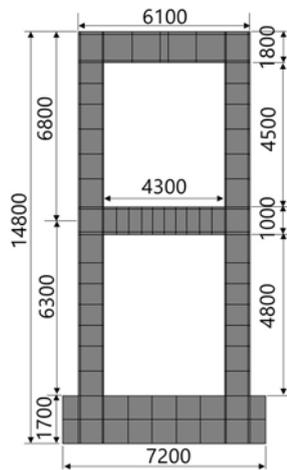


図-4 解析モデル図 (単位: mm)

表-1 コンクリートと鉄筋材料特性

コンクリート	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
	32	3.0	21000
鉄筋	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	
	350	280000	

表-2 各部材の鉄筋量

部材		主筋の鉄筋比 (%)	せん断補強筋
柱部	中央部	2.61	D10-300
	端部	2.61	D10-150
中層梁	中央部	2.03	D13-250
	端部	3.39	
上層梁	中央部	1.68	D13-250
	端部	1.68	

##### (2) 入力地震動

本検討の地震応答解析における入力地震動は、鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計<sup>16)</sup>の簡易な手法により算定する L2 地震動とする。入力地震動の加速度時刻歴波形と応答スペクトルを図-5、6 に示す。図-6 には、参考として 2001 年芸予地震の K-NET 竹原 (NS 成分) と、2021 年福島県沖地震の K-NET 白石で観測された地震動の東北新幹線線路直角方向の応答スペクトル<sup>17)</sup>も併せて示す。K-NET 竹原 (NS 成分) を示しているのは、解析モデルの参考とした宮浦第 1 高架橋の 2 層式 RC ラーメンと地盤条件が類似しているためである。なお、2 で述べたように、2001 年芸予地震および 2021 年福島県沖地震では、2 層式 RC ラーメン高架橋の中層梁においてのみ顕著な損傷が確認されている。本検討においては、2 回の地震動を与えることにより、2 層式ラーメンの残存耐震性能 (余震に対する抵抗性) を評価する。1 回目の入力地震動の振幅倍率を 0.0 ~ 1.0 とすることで、入力レベルに応じた地震損傷を 2 層式 RC ラーメン高架橋に与える。また、余震に相当する 2 回目の入力振幅倍率を 0.1 ~ 1.0 とすることで、余震に対する地震時挙動を評価する。表-4 に入力地震動の振幅倍率の組合せ例を示す。なお、2 回目の入力地震動は位相の正負の両方の比較解析を行い、最大応答変位の大きい方の解析結果として採用した。

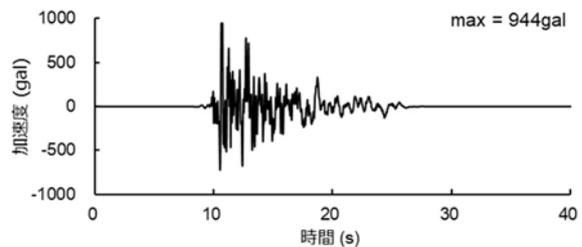


図-5 入力地震動の加速度時刻歴波形

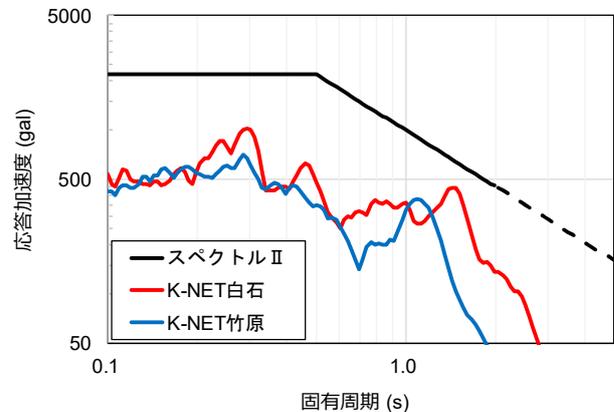


図-6 入力地震動と既往地震の観測記録の応答スペクトル

表4 入力地震動の振幅倍率の組合せ例

1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
0.0	0.1	0.1	0.1	...	0.5	1.0	0.1
	0.2		0.2				0.2
	0.3		0.3				0.3
	0.4		0.4				0.4
	0.5		0.5				0.5
	0.6		0.6				0.6
	0.7		0.7				0.7
	0.8		0.8				0.8
	0.9		0.9				0.9
	1.0		1.0				1.0

## 5. 非線形 FEM 解析地震応答解析の結果

### (1) 1 回目の地震動入力に対する解析結果

図-7 に地震応答解析結果として、1 回目の入力地震動の振幅倍率と最大応答変位の関係 (IDA 曲線) を示す。この結果の整理の方法は、漸増動的解析<sup>17)</sup> (IDA : Incremental Dynamic Analysis) の解析結果の整理方法に相当し、別名、動的プッシュオーバー解析とも呼ばれる。図-7 より、入力地震動の振幅倍率が 0.4 倍 (最大 377gal) のときに中層梁のかぶりコンクリートの圧縮軟化が、入力振幅倍率が 0.6 倍 (最大 566gal) のときに中層梁帯鉄筋の降伏が発生していることがわかる。このような振幅レベルは、中層梁の顕著なせん断損傷が見られた 2001 年芸予地震や 2021 年福島県沖の地震損傷と整合的である。

また、入力地震動の振幅倍率が 0.8 以下の範囲では、IDA 曲線の線形性が概ね維持できていることが読み取れる。これは、中層梁のコンクリートの圧縮軟化や中層梁の帯鉄筋の降伏が構造系全体の動的応答特性に与える影響は小さいということを意味し、中層梁の損傷が 2 層式ラーメンの残存耐震性能に与える影響は軽微である可能性があるといえる。

### (2) 2 回目の地震動入力に対する解析結果

図-8 に中層梁の損傷を有した状態からの 2 回目の入力地震動の振幅倍率と最大応答変位の関係を示す。なお図中には、1 回目の入力地震動の振幅倍率として、中層梁のかぶりコンクリートが圧縮軟化した 0.4 倍と帯鉄筋が降伏した 0.6 倍を用いた場合の結果を図示している。図より、損傷なしの場合の最大応答変位と中層梁の損傷を有する場合の最大応答変位は、最大約 20% 程度の変動であることがわかる。

図-9 に初期損傷で損傷のない状態 (1 回目の入力地震動の振幅倍率が 0.0 倍) と中層梁の帯鉄筋が降伏し、損傷した状態 (1 回目の入力地震動が振幅倍率が 0.6 倍) の後に振幅倍率が 1.0 倍の地震が発生した際の応答変位の時刻歴波形を示す。図より、2 層式 RC ラーメンの動

的応答特性には大きな差が見られず、中層梁の損傷が構造物全体の耐震性能に影響がないことがわかる。

図-10 に柱の主筋を降伏させることに必要な 2 回目の入力地震動の振幅倍率と、初期損傷に対応する 1 回目の入力地震動の振幅倍率の関係を示す。初期損傷として中層梁のひび割れ (1 回目の入力地震動の振幅倍率が 0.4 倍) や、中層梁の帯鉄筋が降伏した場合 (1 回目の入力地震動の振幅倍率が 0.6 倍) を有した場合、損傷がない場合と比べて、柱の主筋を降伏するために必要な PGA は 10 ~ 20% 程度の差であることがわかる。

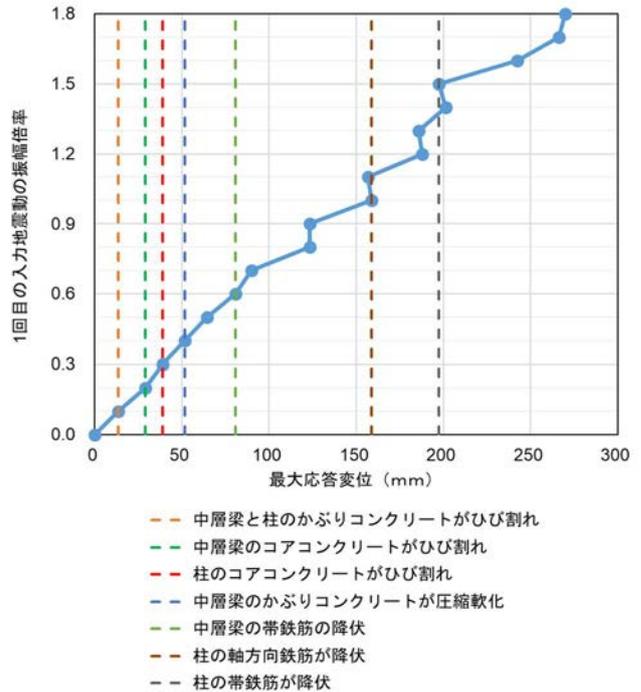


図-7 入力地震動の振幅倍率-最大応答変位関係

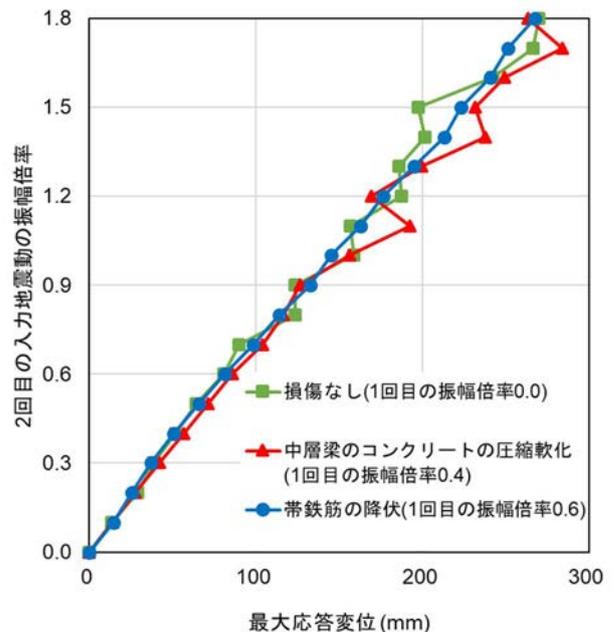


図-8 損傷を有した場合の入力地震動の振幅倍率-最大応答変位関係

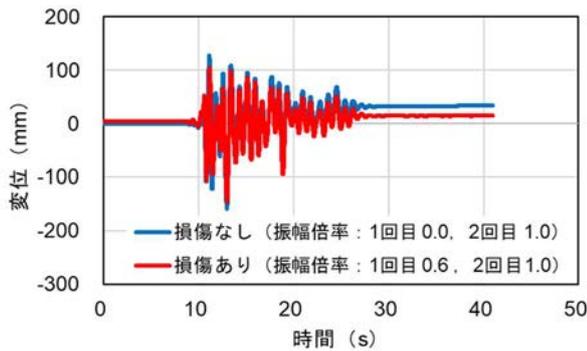


図9 損傷を有した場合の応答変位の時刻歴波形

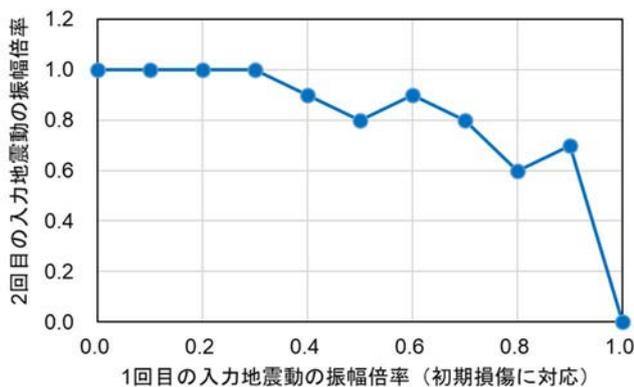


図10 柱の主筋を降伏させるに必要な  
2回目の入力地震動の振幅倍率

## 6. まとめ

本研究では、中層梁が損傷した2層式RCラーメン高架橋の残存耐震性能（余震に対する抵抗性）について、様々な振幅倍率の2回地震動入力による非線形FEM地震応答解析によって検討を行った。

1回目の地震動入力に対する解析結果から、中層梁の損傷が先行する入力地震動の振幅倍率が0.8以下の範囲では、IDA曲線の線形性が概ね維持できていることが読み取れる。これは、中層梁のコンクリートの圧縮軟化や中層梁の帯鉄筋の降伏が構造系全体の動的応答特性に与える影響は小さいということを意味し、中層梁の損傷が2層式ラーメンの残存耐震性能に与える影響は軽微である可能性があるといえる。

また、中層梁の損傷を有した状態からの2回目の地震動入力に対する解析結果は、中層梁の損傷がある場合と損傷のない場合と比較して、最大応答変位は最大で20%程度大きくなることがわかった。

今回の検討は、限られた構造モデルかつ入力地震動による検討である。そのため、様々な構造モデルや入力地震動による検討が必要である。

謝辞：本研究に用いた地震観測記録は国立研究開発法人防災科学技術研究所のK-NETの観測記録を使用させていただきました。また、高架橋の図面および設計計算書の貸与と貴重なご意見をいただきました西日本旅客鉄道株式会社に感謝の意を示します。本研究はJSPS科研費20K14816の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) Kazuma INOUE, Takashi KIYOTA, Masataka SHIGA, Ji Dang, Xin Wang : Preliminary Report of the Damage by the 2021 Off Fukushima Prefecture Earthquake Mj7.3, Japan, JSCE Journal of Disaster FactSheets FS2021-E-0001, 2021.5
- 2) 高橋良和, 植村佳大 : 2021年2月13日福島県沖地震土木構造物被害調査結果(第二報/2月23日), 2021.
- 3) (社)土木学会芸予地震被害調査団 : 2001年3月24日芸予地震被害調査報告, 2001.4
- 4) 菅野俊介, 荒木秀夫, 中村光, 林 康裕, 米倉亜州夫 : 近年の被害地震におけるコンクリート構造物の耐震性能評価研究委員会の活動, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, 2004.
- 5) 本田利器, 秋山充良, 片岡正次郎, 高橋良和, 野津厚, 室野剛隆 : 「危機耐性」を考慮した耐震設計体系 — 試案構築にむけての考察 —, 土木学会論文集A1, Vol.72, No.4, pp.1459-1472, 2016.
- 6) 町田篤彦, 睦好宏史, 鶴田和久 : 地震力を受ける鉄筋コンクリートラーメン構造物の弾塑性応答に関する研究, 土木学会論文集, 第378号/V-6, pp.117-126, 1987.
- 7) 田中慎介, 武田篤史, 井林康, 鈴木基行 : RC2層ラーメン構造の耐震性能に及ぼす中層ばりの力学的特性の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.435-440, 1997.
- 8) (社)土木学会東北支部 : 1978年宮城県沖地震調査報告書, pp.218-229, 1980.
- 9) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会 : 阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害 橋梁, 1996.
- 10) (社)土木学会 : 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, pp.1\_5-1\_24, 2004.
- 11) 九州工業大学災害調査団 : 平成16年新潟中越地震—第二次被害調査速報版—, 2004.
- 12) 石橋忠良 : 新潟中越地震における土木構造物の被害(鉄道施設), 平成16年新潟中越地震被害調査報告会梗概集, pp.67-71, 2004.
- 13) 東日本旅客鉄道株式会社 : 東北地方太平洋沖地震と鉄道構造物, SED第37号, pp.28-50, 2011.
- 14) 高橋良和 : 東北地方太平洋沖地震 構造物被害報告第一報, 2011.
- 15) 伊藤忠テクノソリューションズ(株) : FINAL/V11 HELP, 2011.7
- 16) 公益財団法人 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, 2012.9
- 17) FEMA : Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings, Report No. FEMA-350, SAC Joint Venture, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, 2000.

# EFFECT OF SEISMIC DAMAGED MID-BEAM TWO-STORY REINFORCED CONCRETE FRAME ON RESIDUAL SEISMIC PERFORMANCE

Kazuma INOUE, Keita UEMURA, Kento ASAMI, Katsumi IMAI and  
Ryosuke IZAWA

The mid-beam two-story reinforced concrete frame was damaged by seismic response in the 2011 Geiyo earthquake, 2011 Off Fukushima Prefecture Earthquake, and so on. In this study, the residual seismic performance of two-story reinforced concrete frame was evaluated by nonlinear FEM seismic response analysis induced by multiple earthquake motions of various amplitude.

As a result, the effect of damaged mid-beam on the dynamic response characteristics is small. Therefore, damaged mid-beam is possible that two-story reinforced concrete frame of impact on the residual seismic performance is small. Mid-beam analysis results for the multiple seismic motion inputs from a damaged state were confirmed that the maximum response displacement was increased by about 20% at maximum compared with mid-beam of damage and without damage.