

中層梁が損傷した2層式RCラーメン高架橋の構造性能

畠山 琴羽¹・植村 佳大²・高橋 良和³

¹学生会員 京都大学大学院工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）
²正会員 工博 京都大学助教 工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）
³正会員 工博 京都大学教授 工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

1. 背景

2021年2月13日に、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。そして、その一年後の2022年3月16日に、同じく福島県沖を震源とするマグニチュード7.4の地震(以下、2022年福島県沖地震とする)が発生した。これらの地震は、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ており、宮城県および福島県では最大震度6強が観測された。一方で、地震後の調査によって、家屋や道路構造物の被害、ならびに地盤被害は軽微であったことが明らかとなっている。

しかし、東北新幹線の2層式RCラーメン高架橋の中層梁の損傷が、程度の差はあれど、広範囲で発生したことが、被害報告書¹⁾²⁾により報告されている。その中には、コンクリートが剥落し、鉄筋が露出する事例も確認された。このように、2層式RCラーメン高架橋の中層梁の被害事例が多く報告されていることから、中層梁が損傷した際の余震への抵抗性を把握することは重要であるといえる。

また、福島県および宮城県に位置する東北新幹線の鉄道構造物は、建設当初から現在に至るまで、マグニチュード7を超える強い地震を複数回経験している。特に2層式RCラーメン高架橋では、中層梁に過去の地震被害に対する補修痕が確認できる。複数回地震被害を経験して補修を繰り返すことで、その部材の剛性が低下してしまう可能性も否定できないと考えられ、中層梁の剛性が低下している場合の2層式RCラーメン高架橋の構造性能を把握することも重要となる。

そこで本研究では、中層梁が損傷した2層式RCラーメン高架橋の構造性能把握に向けて、中層梁の剛

性を段階的に劣化させた際の2層式RCラーメン高架橋の構造性能の評価を行う。また、漸増動的解析を行い、中層梁が損傷した2層式RCラーメン高架橋の地震時応答性状を評価する。

2. 2層式RCラーメン高架橋における中層梁の役割

(1) 建設当時の2層式RCラーメン高架橋の設計思想

東海道新幹線工事誌³⁾によると、竣工当時の2層式RCラーメン高架橋の設計について、「梁の高さを大きく、柱の断面を小さくして、梁と柱の剛比を大きくしている」との記載がある。梁と柱の剛比を大きくする利点として、以下が挙げられている。

- 梁の高さが大きいので、梁の主鉄筋量が少ない。
- 梁の断面を小さくしているため温度変化、乾燥収縮による応力が減少する。
- 梁の剛度が大きいので水平力による層モーメントが柱の上下端に均等に分配させるので柱の設計曲げモーメントが減少する。
- 柱の曲げモーメントが小さくなるので、基礎が小さくなる。
- 温度変化、乾燥収縮による応力度が小さいので、柱の断面および基礎の構造はほぼ一定となる。このためおのおののフーチングに作用する荷重が一定となり、不同沈下を起こす危険性が少なくなる。
- 柱の剛性が小さいため基礎に働くラーメンとしての水平力が小さくなる。このためフーチングの水平変位をおこす危険性が少なくなる。また、不測の理由によってフーチングの水平変位が生じても柱の断面が小さいので構造物に生ずる応

力は小さい。

このように、当時建設された2層式RCラーメン高架橋では、柱と比較して中層梁の剛度を大きくすることで、柱に発生する曲げモーメントを小さくすることが期待されている。2021年および2022年福島県沖地震で被害を受けた東北新幹線の2層式RCラーメン高架橋も、同様の設計思想のもとで建設されていたと推測できる。そうした中、1. でも述べたが、福島県および宮城県に位置する2層式RCラーメン高架橋では、中層梁に過去の地震被害に対する補修痕が確認できる。また既往の研究により、損傷後の耐震補修により、部材の剛性が低下することが指摘されている⁴⁾。そこで3. にて、中層梁と柱の剛比が建設時の設計想定通りに確保されない場合の2層式RCラーメン高架橋の構造性能を検証する。

(2) 中層梁損傷による柱部の損傷低減効果について

過去の検討において、中層梁が先行的に損傷することで、柱部の損傷が軽減され、2層式RCラーメン高架橋全体の残留変位低減効果が解析的に示されている⁶⁾。先述したように、2021年および2022年福島県沖地震においても、地震被害を受けた2層式RCラーメン高架橋の多くは中層梁にのみ損傷が発生しており、中層梁の損傷が先行している様子が確認できる。以上から、2層式RCラーメン高架橋では、建設当時の設計では部材の損傷は想定されていないものの、結果として中層梁の先行的な損傷による柱部の損傷低減効果が発揮されているといえる。

しかし、2022年福島県沖地震における2層式RCラーメン高架橋の中層梁の損傷事例を見ると、中層梁には顕著なせん断損傷が発生していることがわかる(図-1)。中層梁の先行的な損傷による柱部の損傷低減効果を期待する場合、本来であれば中層梁の損傷モードはエネルギー吸収性能に富む曲げモードが理想的であるが、建設当時は部材の損傷を想定された設計が行われておらず、損傷モードがせん断破壊型となってしまうと考えられる。そこで4. にて、本震時に中層梁がせん断損傷した際の2層式RCラーメン高架橋の余震への抵抗性を検証する。

3. 中層梁剛性が2層式RCラーメン高架橋の構造性能に与える影響について

(1) 目的

本章では、中層梁と柱の剛比が変化した場合の2層式RCラーメン高架橋の構造性能を把握することを



(a) 伊達 BL (37°49'30"N, 140°29'39"E)



(b) 新白石 BL (37°59'33"N, 140°37'50"E)

図-1 2022年福島県沖地震における2層式RCラーメン高架橋の中層梁の損傷事例

目的として、中層梁の曲げ剛性 EI (ヤング率×断面二次モーメント)を段階的に変化させた2層式RCラーメン高架橋に対して静的解析を行う。具体的には2層式RCラーメン高架橋の中層梁の曲げ剛性 EI を1倍、0.5倍、0.25倍、0.125倍、0倍と変化させたときのN図、Q図、M図を求めるとともに、中層梁の曲げ剛性が変化した場合の2層式RCラーメン高架橋の変形性能について考察する。

(2) 構造モデルと荷重条件

2層式RCラーメン高架橋は東北新幹線の一般的な諸元を用いた。その基本単位は4径間のスラブ軌道用単純ばり式高架橋で、幅が33.8m、高さが14m、奥行きが5.6mであり、図-2のようにモデル化を行った。部材は全て弾性梁要素としてモデル化し、図-3に示す断面条件を採用した。ヤング率は鉄筋コンクリートを想定して 25000N/mm^2 を基準とし、曲げ剛性 EI が所定の倍率となるよう値を変更した。

荷重条件については、対象構造の上部構死荷重を参考として各柱の上端と上層梁と柱の各交点(計10点)に合計 $1.170 \times 10^4\text{kN}$ の軸力を作用させた。また、

柱上端に、軸力の半分の大きさである $5.85 \times 10^3 \text{kN}$ の水平荷重を作用させた。

(3) 中層梁の剛性と構造物の応答特性の関係について

本解析で得られた断面力図を図-4～図-6に示す。

図-4および図-5のN図とQ図に着目すると、中層梁の剛性が変化したとしても、柱に発生する軸力およびせん断力に大きな変化は見られないことがわかる。一方、図-6に示したM図を見ると、2層式RCラーメン高架橋の中層梁の剛性が低下するに従い、柱・梁接合部における曲げモーメントが低下し、結果として柱上下端に発生する曲げモーメントが増加する様子が確認できる。具体的には、中層梁の曲げ剛性が0.5倍、0.25倍、0.125倍、0倍と低下するにつれて、柱に作用する最大曲げモーメントは1.12倍、1.25倍、1.35倍、1.50倍と増加するという結果が得られた。これは、梁と柱の剛比が低下することで、水平力による層モーメントを柱の上下端に均等に分配させるという中層梁の機能が低下しているためであると考えられる。ここで、中層梁の剛性と2層式RCラーメン高架橋の柱上端の水平変位の関係を図-7に示す。なお図-7では、中層梁の剛性倍率が0.75倍のときの結果も示している。図より、中層梁の曲げ剛性が0.5倍、0.25倍、0.125倍、0倍と低下するにつれて、柱上端の水平変位が1.23倍、1.46倍、1.64倍、1.92倍と増加することがわかる。これは、梁の剛性低下によって柱の曲げモーメントが増大したためであると考えられるが、剛性低下率に対する曲げモーメントの増分に対し、柱上部の水平変位の増分の方が大きいという結果が得られた。また、構造系全体の剛性の変化に応じて、2層式RCラーメン高架橋の固有周期も表-1に示すように変化している。

以上より、柱部の曲げ剛性が同一であったとしても、中層梁の剛性が変化することで、構造系全体の剛性に一定の影響を及ぼし、構造系全体の地震時応答性状が変化する可能性が示唆されたといえる。

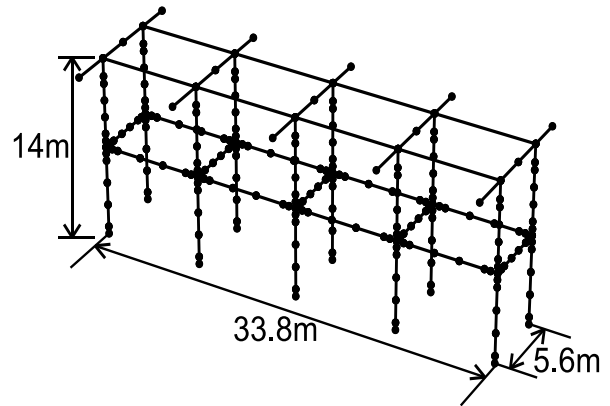


図-2 2層式RCラーメン高架橋の数値解析モデルの全体図

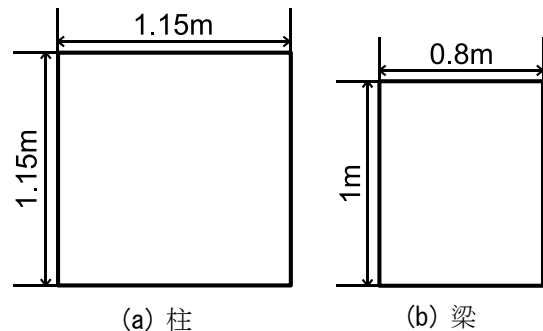


図-3 2層式RCラーメン高架橋の数値解析モデルの断面図

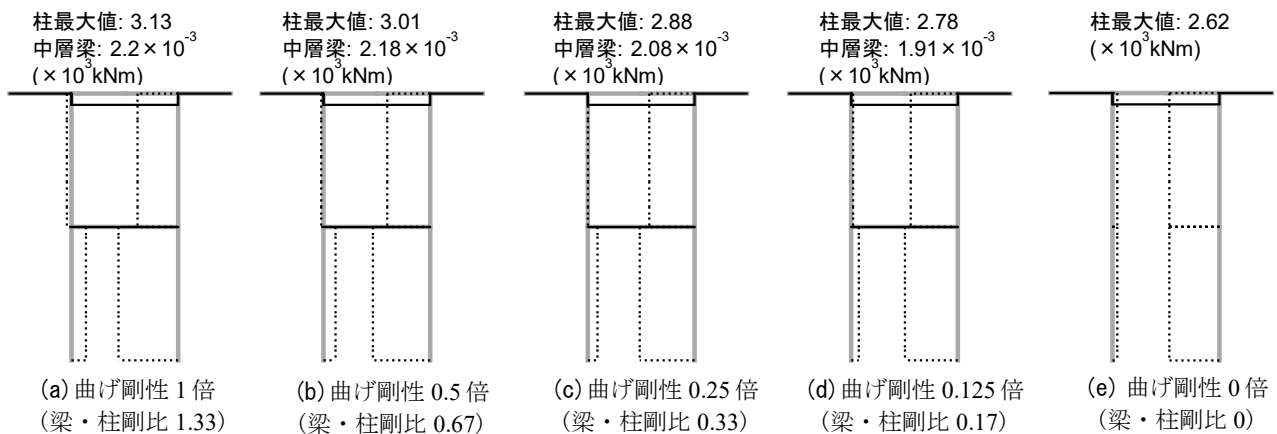


図-4 断面力図 (N図)

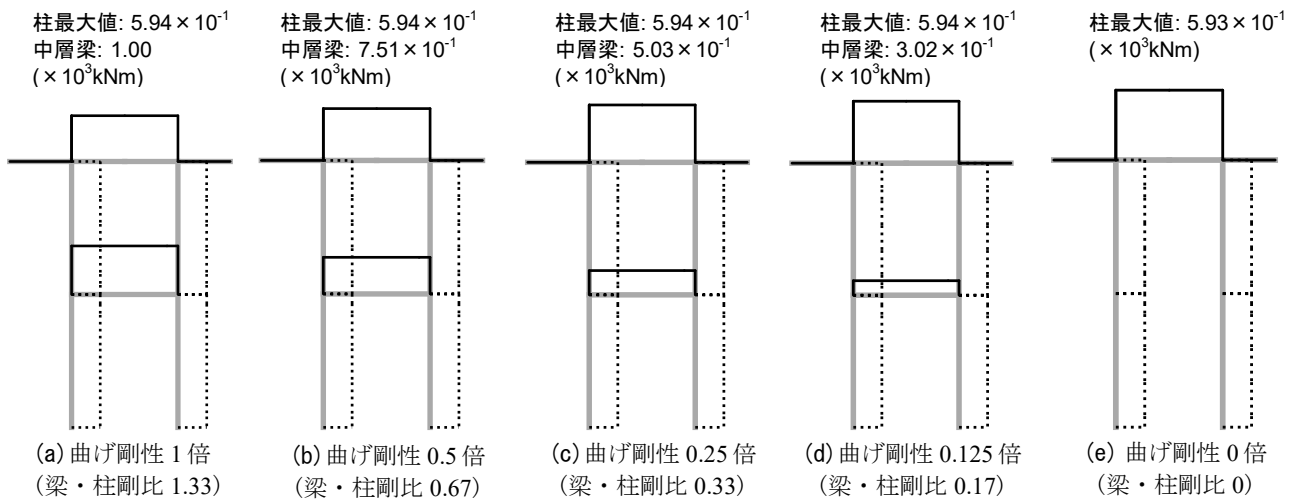


図-5 断面力図 (Q 図)

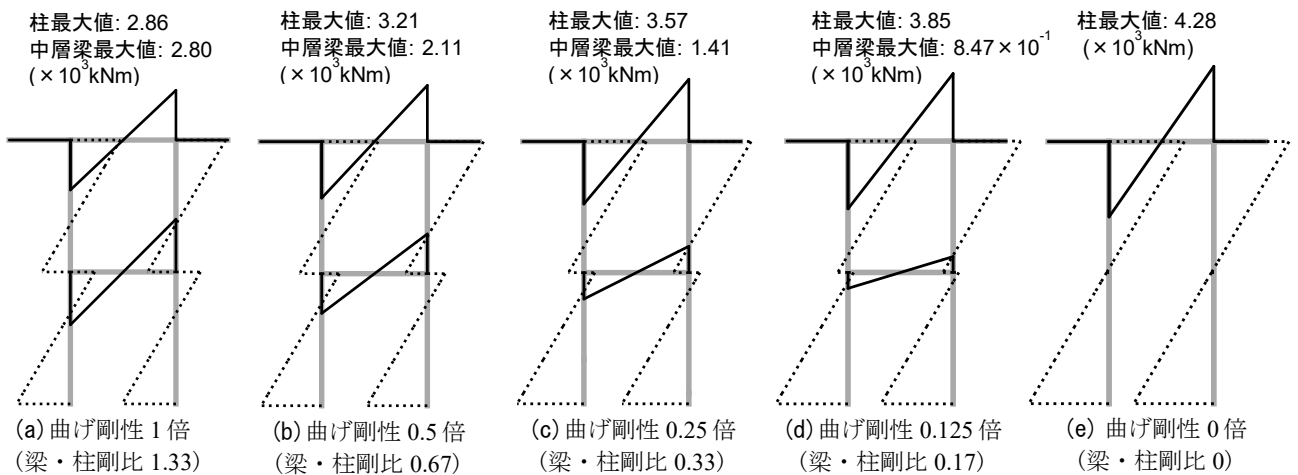


図-6 断面力図 (M 図)

4. 中層梁が損傷した2層式RCラーメン高架橋の耐震性能について

(1) 目的

本章では、中層梁が損傷した2層式RCラーメン高架橋の余震への抵抗性について検討する。その際、現在の新幹線構造物に用いられている2層式RCラーメン構造において、中層梁の損傷モードがせん断破壊型となっている点を考慮し、本震により2層式RCラーメン高架橋の中層梁がせん断破壊して剛性を喪失し、余震に対してエネルギー吸収性能が発揮されない極端な状況を想定する。具体的には、東北新幹線の一般的な諸元を用いた2層式RCラーメン高架橋と、その2層式RCラーメン高架橋の線路直角方向の中層梁を取り除いた構造(以下、損傷模擬2層式RCラーメン高架橋とする)に対して漸増動的解析(IDA)を実施する。漸増動的解析(IDA)とは、基準となる入力地震動に入力倍率を乗じて、入力地震波の振幅を

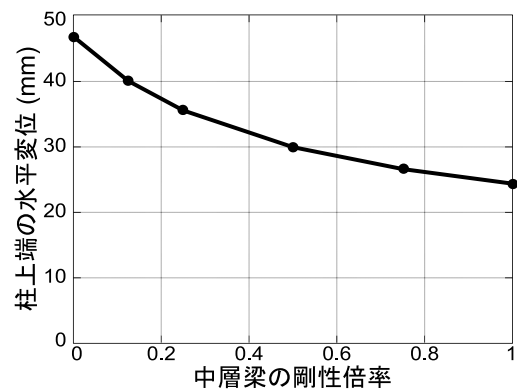


図-7 中層梁の剛性と2層式RCラーメン高架橋の柱上端の水平変位の関係

徐々に増加させながら時刻歴動的解析を繰り返し行い、構造物の耐震性能を評価する手法である。

(2) 構造モデルおよび入力地震動

2層式RCラーメン高架橋の数値解析モデルの概形は、静的解析で使用したモデルと同様のものを用い、

表-1 中層梁の剛性と2層式RCラーメン高架橋の固有周期の関係

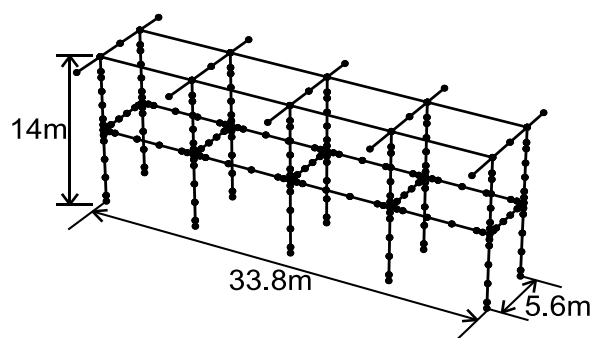
中層梁の剛性倍率	構造全体の固有周期 (s)
1.0	0.443
0.5	0.491
0.25	0.531
0.125	0.561
0.0	0.616

柱と中層梁の要素を弾性梁要素から非線形梁要素に変更した(図-8)。具体的には、上層梁および中層梁と柱の接合部を剛体、柱および中梁を非線形のファイバーモデルとしてモデル化した。なお、構造減衰は1次と2次の固有振動数を用いたレイリー減衰とし、その際の減衰定数を5%とした。また、コンクリートにはHonestadモデルを使用した。その諸量を表-2に示す。軸方向鉄筋にはMenegotto-Pintoモデルを使用し、その降伏強度は402.02N/mm²、ヤング率は200GPa、二次剛性は0.01とした。なお、コアコンクリートのモデル化は、道路橋示方書・同解説V 耐震設計編⁶⁾に基づき、帯鉄筋の拘束効果を考慮している。また、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台地盤上NS成分を基としたレベル2地震動を入力地震動として使用し、入力倍率を0.1から1.5まで0.1刻みに増幅させて漸増動的解析を行った⁹⁾。

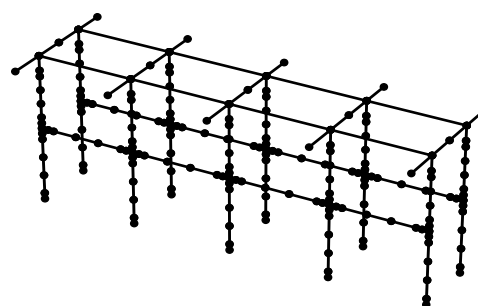
(3) 解析結果

入力地震動の入力倍率を0.1から1.5まで増幅したときの、2層式RCラーメン高架橋と損傷模擬2層式RCラーメン高架橋におけるIDA曲線を図-9に示す。また参考として入力倍率が1倍のときに得られた荷重-変位関係を図-10に示す。なお図-10では、ラーメン高架橋天端の変位として、線路直角方向の上層梁の中央節点の水平変位の値を採用し、荷重は各柱下端の節点の水平反力の合計値を採用した。

図-9より、損傷模擬2層式RCラーメン高架橋の地震時の最大応答変位は2層式RCラーメン高架橋の値に比べて増加することがわかる。特に、入力倍率0.9の結果を見ると、2層式RCラーメン高架橋の最大応答変位は109.47mm、損傷模擬2層式RCラーメン高架橋の最大応答変位は185.99mmであり、中層梁のせん断損傷により地震時応答が70.0%増大するという結果が得られた。一方で、入力倍率1.0以上の領域では、損傷模擬2層式RCラーメン高架橋における最大応答変位の増加率が緩やかになっていることがわかる。これは、損傷模擬2層式RCラーメン高架



(a) 2層式RCラーメン高架橋



(b) 損傷模擬2層式RCラーメン高架橋

図-8 構造モデル

表-2 コンクリートの材料特性

	コアコンクリート	かぶりコンクリート
最大圧縮応力 (N/mm ²)	36.6	34.13
最大圧縮ひずみ	0.0031	0.002
限界圧縮応力 (N/mm ²)	19.15	17.95
限界圧縮ひずみ	0.0	0.007

橋が長周期化し、入力地震動の加速度応答が低下する範囲に入ったためと考えられる。

また図-9には、IDA曲線と合わせて2層式RCラーメン高架橋と損傷模擬2層式RCラーメン高架橋の損傷過程を示している。その際、要素の損傷判定は、図-11に示した各要素で行い、軸方向鉄筋の降伏、かぶりコンクリートおよびコアコンクリートの圧縮軟化を代表的な損傷イベントとした。図-9より、損傷模擬2層式RCラーメン高架橋では、2層式RCラーメン高架橋と比較して柱の全ての損傷イベントが早期に発生していることがわかる。特に、2層式RCラーメン高架橋において柱のコアコンクリートの圧縮軟化が地震動の入力倍率1.5倍とした場合でも発生しなかったのに対し、損傷模擬2層式RCラーメン高架橋においては、入力倍率1.2倍とした場合に柱のコアコンクリートの圧縮軟化が発生していることがわかる。これは、本震において中層梁の損傷が先行し、結果として柱の損傷が軽減されたとしても、中層梁がせん断破壊したことでエネルギー吸収性能が

発揮されない状況に陥った場合、余震により柱部の損傷が発生しやすくなることを示しているといえる。よって、中層梁の損傷が先行することを期待する以上、余震への抵抗性を考慮すると、中層梁は曲げ破壊型の終局モードとするべきであるといえる。

以上により、中層梁が損傷して剛性が低下すると余震に対する応答特性が変化し、中層梁の損傷前と比べて応答変位が大きくなるとともに、柱部の損傷が発生しやすくなる可能性があることがわかった。

5. まとめ

本研究では、中層梁が損傷した際の2層式RCラーメン高架橋に対する解析的検討を実施した。以下に本検討で得られた知見を示す。

- 中層梁と柱の剛比が変化した場合の2層式RCラーメン高架橋の構造性能を把握することを目的に、中層梁の曲げ剛性を段階的に変化させた2層式RCラーメン高架橋に対して静的解析を行った。その結果、柱の柱部の曲げ剛性が同一であったとしても、中層梁の剛性が変化することで、構造系全体の剛性に一定の影響を及ぼし、構造系全体の地震時応答性状が変化することが示唆された。
- 中層梁が損傷した2層式RCラーメン高架橋の余震への抵抗性について検討することを目的に、漸増動的解析を実施した。その際、本震により中層梁がせん断破壊して剛性を喪失し、余震に対して中層梁のエネルギー吸収性能が発揮されない極端な状況を想定した。その結果、中層梁が損傷して剛性が喪失すると、余震に対する応答特性が変化し、中層梁損傷前と比べて応答変位が増大するとともに、柱部の損傷が発生しやすくなる可能性があることがわかった。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(A)21H04574と、科学研究費補助金若手研究21K14231の助成を受けて実施した。謝意を表します。

参考文献

- 1) 東日本旅客鉄道株式会社：福島県沖地震に伴う東北新幹線の被害と復旧状況等について、https://www.jreast.co.jp/press/2020/20210226_ho05.pdf (2022年6月24日閲覧)
- 2) 井上和真, 植村佳大：2022年3月16日福島県沖で発生した地震の被害調査の報告(構造物被害), 令和4年3月福島県沖の地震に関する被害調査報告会, 2022.

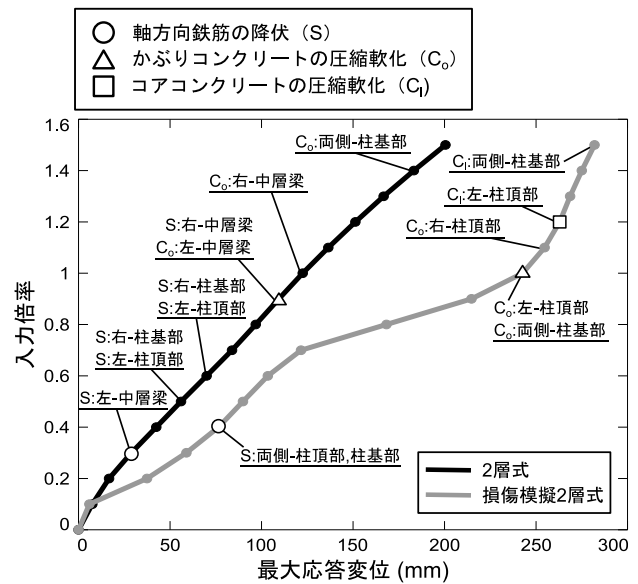
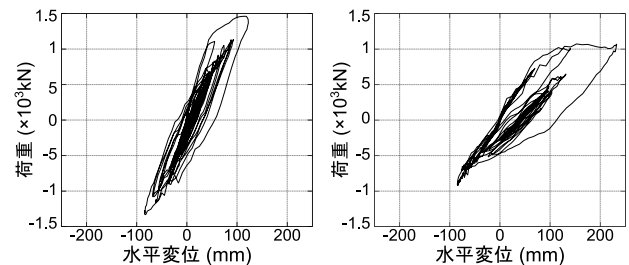


図-9 IDA 曲線



(a) 2層式RCラーメン高架橋 (b) 損傷模擬2層式RCラーメン高架橋

図-10 入力倍率が1倍のときの荷重-変位関係

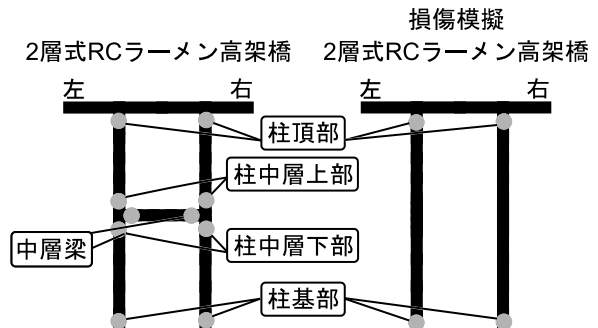


図-11 損傷判定要素の位置

- 3) 日本国有鉄道：東海道新幹線工事誌 土木編, pp.272-278, 1965.
- 4) 尾坂芳夫, 鈴木基行, 石田博樹, 加藤勝美：RCばりのせん断破壊と補修法に関する研究, 土木学会論文集, 第360号/V-3, pp.119-128, 1985.
- 5) 仁平達也, 谷村幸裕, 岡本大, 田所敏弥：曲げ損傷を受けたRC柱の補修後の部材特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1519-1524, 2006.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編, 2017.