

地震により被災した二層ラーメン高架橋の 構造性能とサービス水準に関する考察

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)

E-mail: hatakeyama.kotoha.64r@st.kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

²正会員 京都大学大学院工学研究科 助教 工博 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: uemura.keita.3n@kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学大学院工学研究科 教授 工博 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

2022年3月に発生した福島県沖地震において、2層式RCラーメン高架橋の中層梁の損傷が多数確認された。そのため、中層梁が損傷した際の2層式RCラーメン高架橋の構造特性の変化を把握することは重要となる。また、2層式RCラーメン高架橋における中層梁の損傷が列車の走行性に与える影響は明らかでない。これは、構造物の耐震性能と社会へ提供されるサービス水準の定量的関係が明らかでないことの一例であり、これらの定量的関係が提示されれば、新たな構造技術の開発や社会実装の活発化に繋がると考えられる。そこで本研究では、地震により被災した2層式RCラーメン高架橋の構造性能を評価するとともに、2層式RCラーメン高架橋の地震後の列車走行性の定量的評価を目的として耐震性能とサービス水準の関係の検証プロセスを示した。

Key Words: two-story RC viaduct, structural performance, anti-catastrophe, train mobility, service level

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⁾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。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る。

そこで本研究では、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2層式RCラーメン高架橋の地震時応答性状の把握を目指す。また、複数回地震被害と補修を繰り返されている現状を鑑み、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の把握に向けた検討を行う。

また、既往の研究において、中層梁損傷が列車走行性に与える影響についての検討例は見当たらない。これは、構造物の耐震性能と社会へ提供されるサービス水準の定量的関係が明らかでないことの一例と考えられる。構造物の耐震性能とサービス水準の定量的関係が導出できれば、新たな構造技術の実装により、社会に提供されるサービス水準がどう変化するかを関連づけることに繋がり、構造技術開発の活発化にも繋がると考えられる。そこで本研究では、構造物の耐震性能とサービス水準の定量的関係の導出の例として、2層式RCラーメン高架橋の中層梁損傷後の列車走行性を定量的に評価することを試みる。

2. 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) 建設当時の2層式RCラーメン高架橋の設計における中層梁の役割

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ので温度変化、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。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おり⁴⁾、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についての検討が必要であると考えられる。

(2) 本章における検討の概要

a) 目的

本章では、2.(1) で述べた現状を鑑み、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

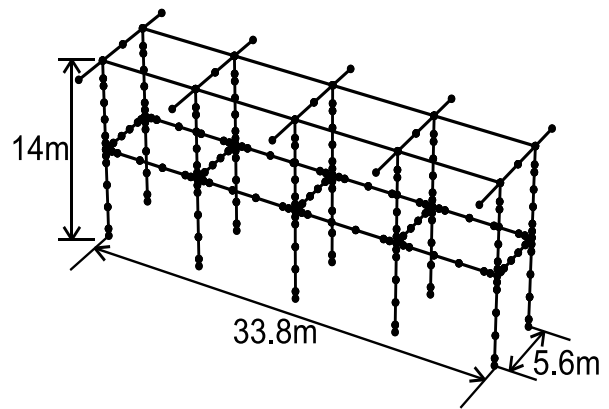


図-1 2層式RCラーメン高架橋の数値解析モデルの全体図

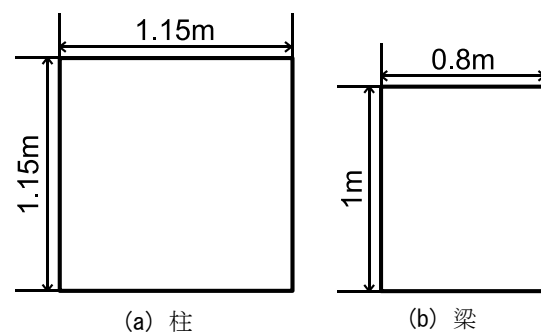


図-2 2層式RCラーメン高架橋の数値解析モデルの断面図

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。

b) 構造モデル

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-1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-2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/mm²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。

c) 荷重条件

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 1.170×10^4 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 5.85×10^3 kNの水平荷重を作用させた。

(3) 検討結果

本解析で得られた断面力図を図-3～図-5に示す。図-3および図-4のN図とQ図に着目すると、中層梁

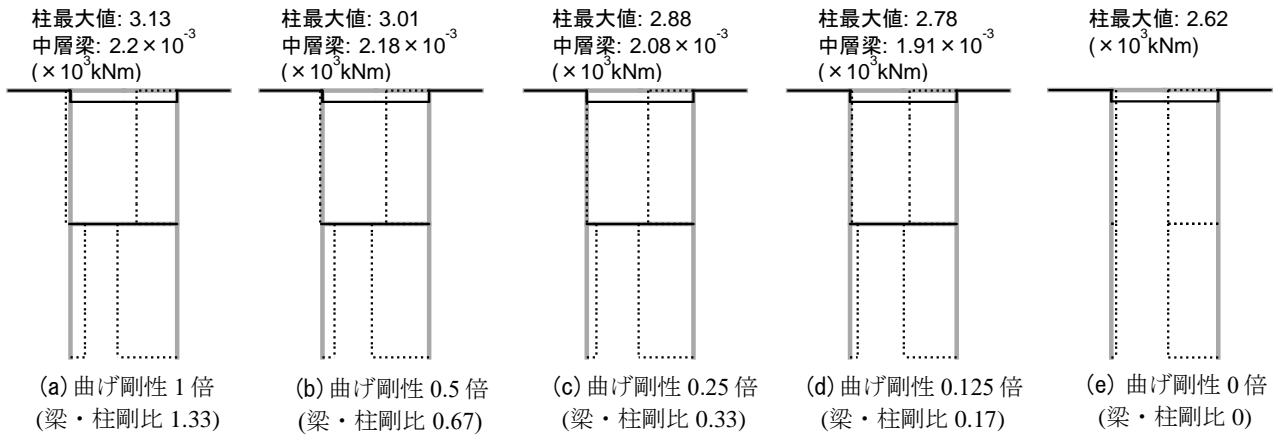


図-3 断面力図 (N 図)

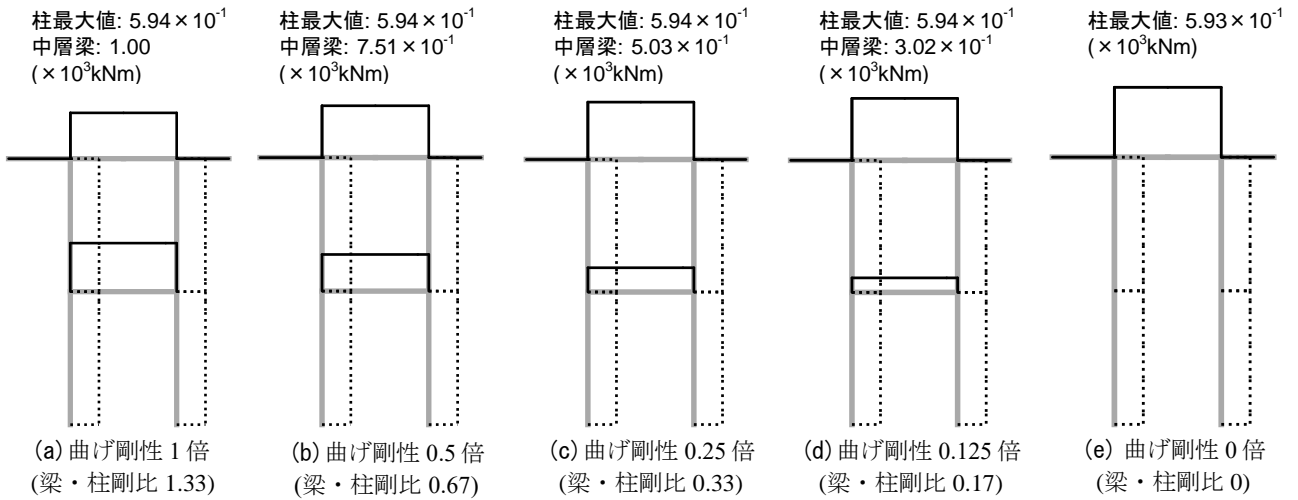


図-4 断面力図 (Q 図)

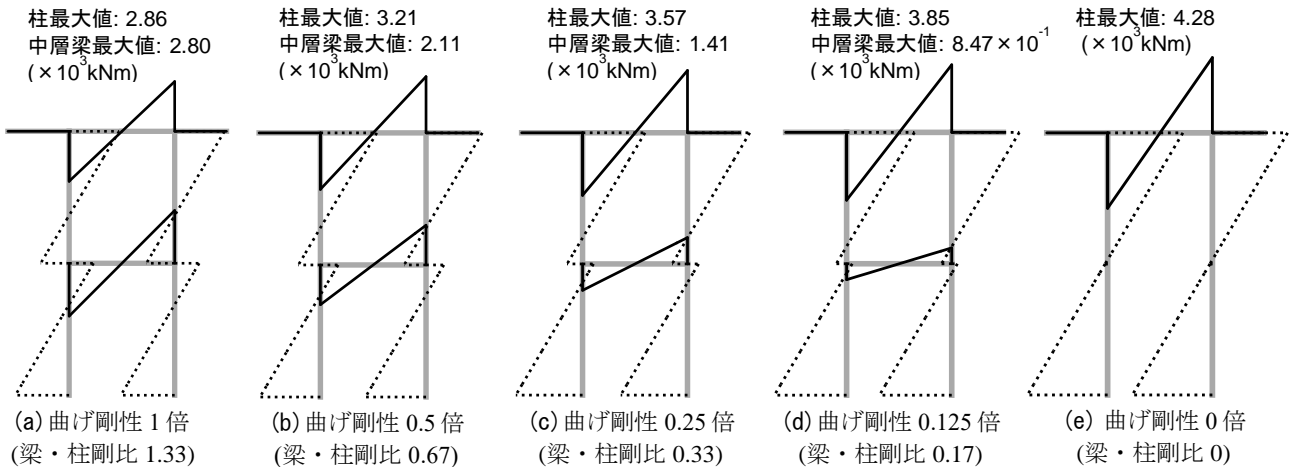


図-5 断面力図 (M 図)

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-5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、中層梁の剛性変化に伴う2層式RCラーメン高架橋の固有

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

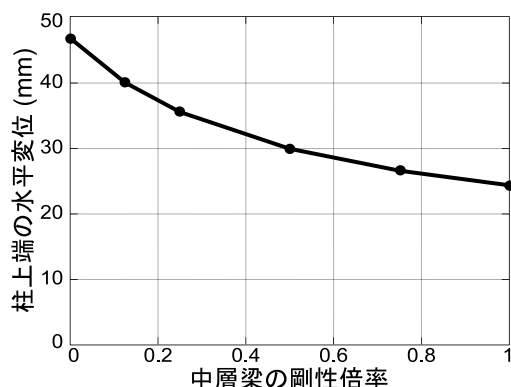


図-6 中層梁の剛性と2層式RCラーメン高架橋の柱上端の水平変位の関係

周期の変化を表-1に示す。なお図-6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、中層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、中層梁の剛性低下率に対する柱基部の曲げモーメントの増分割合以上に、柱上部の水平変位が増加するという結果が得られた。

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) 中層梁損傷による柱部の損傷低減効果について

既往の研究において、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



(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)

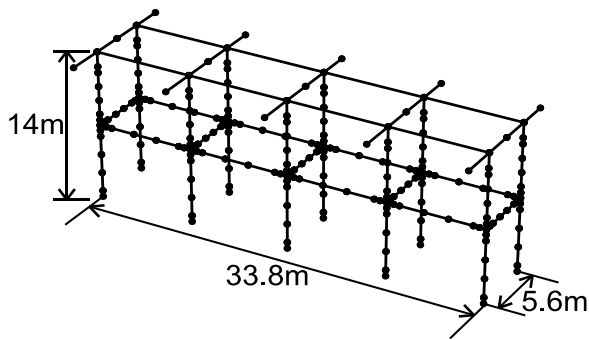
図-7 2022年福島県沖地震における2層式RCラーメン高架橋の中層梁の損傷事例

損傷低減効果が発揮されていると捉えることができる。しかしその一方で、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-7)。これは、建設当時は中層梁に損傷を誘導してエネルギー吸収を図るという思想で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。以上のように、現行の2層式RCラーメン高架橋では、中層梁がせん断破壊することにより、理想とするエネルギー吸収性能が発揮されていないと考えることができる。

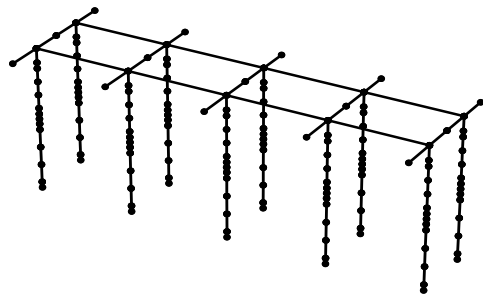
(2) 本章における検討の概要

a) 目的

本章では、2層式RCラーメン高架橋において、中層梁がせん断破壊してエネルギー吸収性能を示さない場合と、曲げ破壊して理想的なエネルギー吸収性能を示す場合で、どれ程地震時応答が変化するかを漸増動的解析(IDA)により検討する。その際、中層梁がせん断破壊する場合を想定した数値解析では、中層梁が早期に部材としての機能を喪失し、エネルギー吸収性能を示さない極端な状況を想定する。具体的には、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、「中層梁がせん断破壊した2層式RCラーメン高架橋」とする)と、



(a) 理想的な2層式RCラーメン高架橋



(b) 中層梁がせん断破壊する2層式RCラーメン高架橋

図-8 構造モデル

ファイバー要素を用いて中層梁をモデル化した構造(以下、「理想的な2層式RCラーメン高架橋」と呼ぶ)に対して解析を実施する。

b) 解析モデル

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る。理想的な2層式RCラーメン高架橋に関しては、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ファイバーモデルとしてモデル化した(図-8)。中層梁がせん断破壊する2層式RCラーメン高架橋に関しては、理想的な2層式RCラーメン高架橋の解析モデルから中層梁の要素を取り除いたモデルとした。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Hongstad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⁷⁾に基づき、帯鉄筋の拘束効果を考慮している。

c) 荷重条件

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1.170×10⁴ kNの軸力を作用させた。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⁷⁾を基準地震動とし、入力倍率を0.1から1.5まで0.1刻みに増幅させて橋軸直角方向に入力した。

(3) 検討結果

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

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ラーメン高架橋に対するIDA曲線を図-10に示す。

図-10より、中層梁がせん断破壊する2層式RCラーメン高架橋の地震時の最大応答変位は、理想的な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、理想的な2層式RCラーメン高架橋の最大応答変位は109.47mm、中層梁がせん断破壊する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、中層梁がせん断破壊する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、中層梁のせん断破壊により、2層式RCラーメン高架橋が長周期化し、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、IDA曲線と合わせて理想的な2層式RCラーメン高架橋と中層梁がせん断破壊する2層式RCラーメン高架橋の損傷過程を示す。その際、要素の損傷判定は、図-10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、中層梁がせん断破壊する2層式RCラーメン高架橋では、理想的な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、中層梁がせん断破壊する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、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、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、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。

4. 建造物の耐震性能と社会へ提供されるサービス水準の定量的関係について

(1) 建造物の性能・機能・サービス水準について

本研究では、建造物の性能・機能・サービス水準を以下のように定義する。

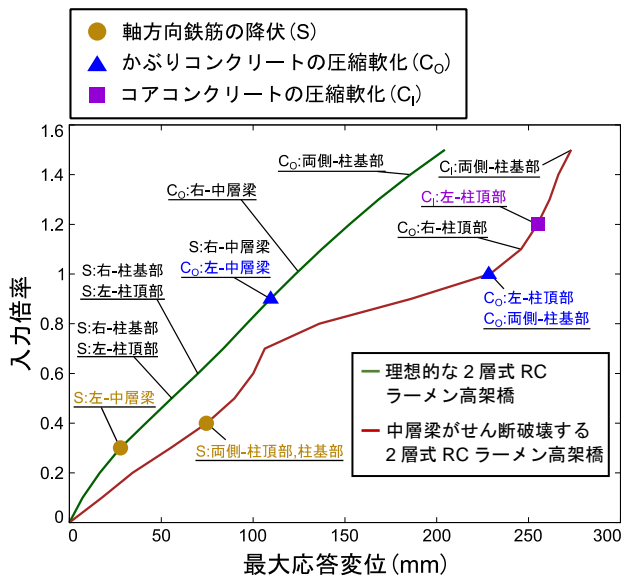


図-9 IDA 曲線

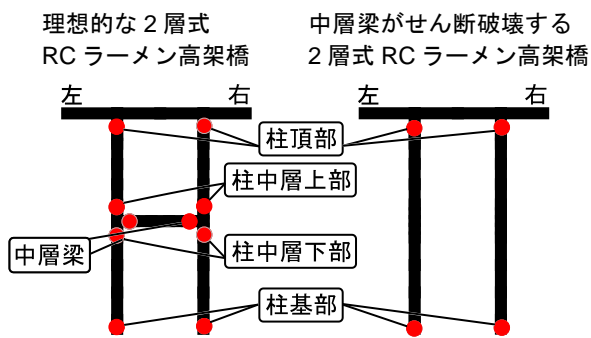


図-10 損傷判定要素の位置

性能：構造物などの性質と能力を示す定量的指標
 機能：構造物の働きや固有の役割を示す定量的指標
 サービス水準：機能がどの程度効果を発揮しているかを表す定量的指標

現行の設計書⁸⁹⁾では、性能について具体的な記載がある一方、機能についての表現は抽象的であり、またその機能が提供するサービス水準についての記載は見当たらない。近年、土木構造物の危機耐性に関する議論が活発化しているが、危機耐性が社会へ与える影響について定量的な評価は行われておらず、提案構造が実装された際に、構造物が社会に提供されるサービス水準がどう変化するかといった言及はなされていない。構造物性能とサービス水準を定量的に結び付けることができれば、危機耐性を考える際の達成目標を定量的に表現することが可能となり、危機耐性実現に向けた技術の開発や社会実装の活発化に繋がるといえる。

(2) 本章における検討の概要

a) 目的

本章では、4.(1)で述べた現状を踏まえ、構造物の耐震性能とサービス水準の定量的関係の導出の例として、2層式RCラーメン高架橋の中層梁損傷後の列車走行性を定量的に評価することを試みる。その

表-3 地震時の走行安全性に係る水平目違いと列車の走行速度の関係

列車最高速度 (km/h)	水平目違い (mm)
130	14
210	10
300	7

際、RCラーメン高架橋が社会に提供するサービス水準を、列車が走行可能な速度 (以下、列車走行速度と呼ぶ) によって定量化することとする。具体的には、構造物に入力された地震動に対して列車が走行不能になる確率 (以下、列車走行不能確率と呼ぶ) を試算することで、耐震性能とサービス水準の関係の定量化を目指す。

b) 本検討の流れ

2層式RCラーメン高架橋におけるサービス水準の定量的評価の流れを図-11に示す。図に示す通り、構造物性能とサービス水準を定量的に関連づけるためには、構造物の応答変位と不同変位の関係を導出する必要がある。特に、構造物の耐震性能が反映される地震時の最大応答変位 δ_m と列車の走行性に影響を与える地震後の目違い δ_g の関係を下記のように定式化すべきと考える。

$$\delta_g = f(\delta_m) \quad (1)$$

しかし、実際に地震による目違いを決定づける要因は、材料の不確定性や地盤特性の相違などが複合的に絡み合うため、 $f(\delta_m)$ を構造解析のみで導くには限度がある。また現行の設計基準¹⁰⁾では、地震後の走行安全性に係る水平目違いの限界値が走行速度と関連づけて指標化されていない。このように、現状では構造物性能とサービス水準を定量的に関連づけるための知見が不十分であり、更なる研究や観測データが必要であるのが現状といえる。

そこで本章での検討では、これらの不十分な知見を補うため、下記のような仮定を行う。

- 目違い δ_g と最大応答変位 δ_m の関係は、以下に示す線形関係で表すことができる。

$$\delta_g = 0.1\delta_m \quad (2)$$

- 現行設計基準¹⁰⁾に記載されている地震時の走行安全性に係る水平目違いと列車の走行速度の関係 (表-3) を、地震後の走行安全性の照査に使用できる。

そして、列車走行不能確率の算定に向けて、モンテカルロシミュレーションを用いて最大応答変位の確率分布を算出し、得られた最大応答変位をもとに式(2)を用いて材料特性の違いに起因する水平目違い量を算出する。その後、表-3を用いることで、列車走行可能速度を導出し、列車走行不能確率を算定することとした。

なお本検討の内容は、あくまで簡易的な仮定を基にした列車走行不能確率の試算であり、2層式RCラーメン高架橋の中層梁の損傷が地震後の列車走行性に与える影響の検証プロセスを示すことを主たる

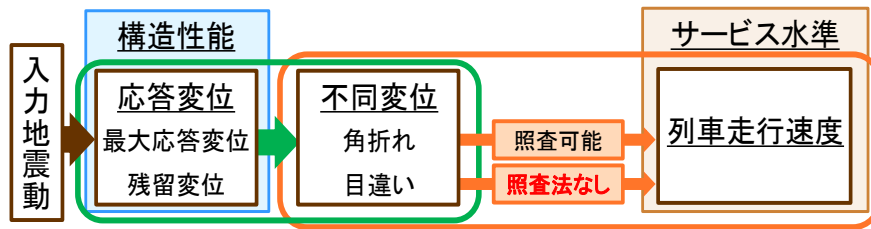


図-12 構造性能とサービス水準の関連性

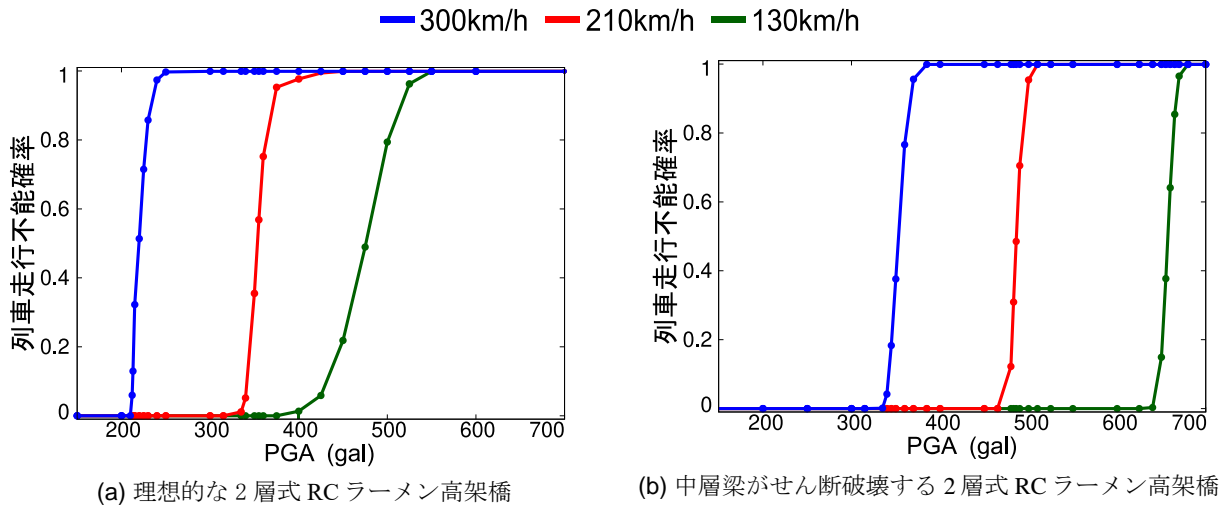


図-12 列車走行不能確率

目的としていることに注意されたい。

c) 構造モデルと入力地震動

本章の検討では、3.での検討と同様、2層式RCラーメン高架橋において、中層梁がせん断破壊してエネルギー吸収性能を示さない場合と、曲げ破壊して理想的なエネルギー吸収性能を示す場合で、どれ程地震後の列車走行性が変化するかを検討する。そのため、解析で用いる2層式RCラーメン高架橋の数値解析モデルの概形は、漸増動的解析で使用したモデルと同様のものを用いた。材料特性は、過去の検討¹¹⁾¹²⁾を参考に、コンクリート圧縮強度および鉄筋の降伏強度を、平均と分散がそれぞれ35.89MPaと3.84MPa、372.65N/mm²と13.73N/mm²である正規分布と仮定して解析を行う。また本解析では、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⁷⁾を基準地震動とし、最大加速度を200galから800galの間で変化させて橋軸直角方向に入力した。

(3) 検討結果

4.で述べた仮定を踏まえて得られた列車走行不能確率を図-12に示す。図-12を見ると、理想的な2層式RCラーメン高架橋では650galの地震発生後、130km/hでの列車走行が14.9%の確率で不能となるのに対し、中層梁がせん断破壊すると130km/hでの列車走行が100%の確率で不能な状況になることがわかる。このように、構造性能の違いが地震後のサービス水準に与える影響を定量的に評価可能であることがわかる。以上のように、地震時の最大応答値

から地震後の水平目違い量を算定し、その値から列車走行不能確率を算定するというプロセスを経ることで、2層式ラーメン高架橋の耐震性能と社会に提供するサービス水準の定量的関係が導出できた。

しかしながら、4.(2b)で述べたように、本検討は2層式ラーメン高架橋の中層梁の損傷が地震後の列車走行性に与える影響の検証プロセスを示すことを主たる目的としている。そのため、簡易的な仮定のもとでの結果に留まっており、構造物の耐震性能とサービス水準の定量的関係の導出に向け、更なる研究や観測が必要であるといえる。

5. まとめ

本研究では、中層梁損傷時の2層式RCラーメン高架橋の地震時応答を評価するとともに、2層式RCラーメン高架橋の中層梁損傷時の列車走行性の定量的評価を目的として、耐震性能とサービス水準を関連づけるプロセスを示した。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すことが示された。特に、中層梁の剛性低

下率に対する柱基部の曲げモーメントの増分割合以上に柱上部の水平変位が増加するという結果が得られた。

- 中層梁時の2層式RCラーメン高架橋の地震時応答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、中層梁がせん断破壊して剛性を喪失し、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、中層梁が理想的なエネルギー吸収性能を示す場合と比較して、最大応答変位が70.0%増大するとともに、柱部の損傷が早期に発生することがわかった。
- 2層式RCラーメン高架橋特有の損傷過程を再現可能なモデルを用い、簡易的な仮定の下で地震後の列車走行不能確率を試算した。検討の結果、中層梁のせん断破壊が地震後の列車の走行性に影響を与える可能性を示した。また、地震時の最大応答値から地震後の水平目違い量を算定し、その値から列車走行不能確率を算定するというプロセスを経ることで、2層式ラーメン高架橋の耐震性能と社会に提供するサービス水準の定量的関係が導出できる可能性を示した。

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。

REFERENCES

- 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/2022/20220420_ho01.pdf (2022年9月7日閲覧) [East Japan Railway Company: Damage and restoration status of Tohoku Shinkansen line due to the Fukushima offshore earthquake]
- 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. [Inoue, K. and Uemura, K.: Report on the damage investigation of the earthquake that occurred off the coast of Fukushima Prefecture on March 16, 2022 (structural damage), *Report on the Damage Caused by the March 2022 Earthquake off the Coast of Fukushima Prefecture*, 2022.]
- 3) 日本国有鉄道：東海道新幹線工事誌 土木編, pp.272-278, 1965. [Japanese National Railways: *Tokaido Shinkansen Construction Journal, Public Works Section*,

- 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. [Ozaka, Y., Suzuki, M., Ishida, H. and Kato, K.: Study on shear failure and repair method of reinforced concrete beam, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Issue 360/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. [Nihira, T., Tanimura, Y., Okamoto, D. and Tadokoro, T.: Experimental study on member properties of bending damaged RC columns after repair, *Annual Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.28, No.2, pp.1519-1524, 2006.]
- 6) 菅野俊介, 荒木秀夫, 中村光, 林康裕, 米倉亘州夫：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時論文集, Vol.26, No.1, pp.55-62, 2004. [Sugano, S., Araki, H., Nakamura, H., Hayashi, Y. and Yonekura, A.: oooo, *Annual Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.26, No.1, pp.55-62, 2004.]
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編, 2017. [Japan Road Association: *Specifications for Highway Bridges and Commentary V, Seismic Design Section*, 2017.]
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書 同解説 I 共通編, 2017.11. [Japan Road Association: *Specifications for Highway Bridges and Commentary I, Common Section*, 2017.11.]
- 9) 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, 2012.9. [Railway Technical Research Institute: *The Revision of Design Standards for Railway Structures and Commentary, Seismic Design*, 2012.9.]
- 10) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準 同解説変位制限, 2006.2. [Railway Technical Research Institute: *The Revision of Design Standards for Railway Structures and Commentary, Seismic Design, Displacement Limit*, 2006.2.]
- 11) 高橋利一：受託試験におけるコンクリートの圧縮強度に関する調査, 昭和59年度, GBRC, 39号, 1985. [Takahashi, T.: Investigation on compressive strength of concrete test pieces in consigned tests, In 1984 fiscal year, *GBRC*, Issue 39, 1985.]
- 12) 池田茂：受託試験における鉄筋コンクリート用異形棒鋼の引張及び曲げ試験に関する調査, 昭和60年度 GBRC, 44号, 1986. [Ikeda, S.: Investigations on tensile and bending tests of deformed steel bar for reinforced concrete in entrusted test, The case of FY 1985, *GBRC*, Issue 44, 1986.]

STRUCTURAL PERFORMANCE AND LEVEL OF SERVICE OF TWO-STORY VIADUCT DAMAGED BY EARTHQUAKE

Kotoha HATAKEYAMA, Keita UEMURA and Yoshikazu TAKAHASHI

During the Fukushima Prefecture earthquake that occurred in March 2022, a lot of damage to the middle beams of two-story RC viaduct was confirmed. Therefore, it is important to understand the changes in the structural properties of two-story RC viaduct when the middle beams are damaged. In addition, it is not clear how the damage to the middle beams of two-story RC viaduct affects the train mobility. The fact means that the quantitative relationship between the structural performance and the level of service provided to society is not clear. If such quantitative relationship is provided, the development of new structural technology and its implementation in society will be stimulated. Therefore, this study evaluates the seismic resistance to two-story RC viaduct after damage to the middle beam, and presents a verification process of the relationship between structural performance and level of service in order to quantitatively evaluate the train mobility of two-story RC viaduct after damage to the middle beam.