

2 層式 RC ラーメン高架橋の 地震後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

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

E-mail: uemura.keita.3n@kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

³ 正会員 京都大学教授 大学院工学研究科 (〒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月の福島県沖地震において、東北新幹線の2層式RCラーメン高架橋の中層梁損傷が広範囲で確認された。一般的に、2層式高架橋における中層梁損傷は、柱部の損傷低減に繋がるとされているが、当該地震で確認された中層梁の損傷モードはせん断破壊型であり、理想とするエネルギー吸収性能が発揮されていないといえる。また、中層梁損傷が高架橋の耐震性能に与える影響についての検討は過去に実施されているが、中層梁損傷が地震後の列車走行性に与える影響についての検討事例は見当たらない。そこで本研究では、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に関する検討の一例として、中層梁の損傷モードの違いに着目した数値解析を実施し、構造物の耐震性能と地震後の列車走行性に与える影響の定量化に向けた検証プロセスを示した。

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

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1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、図-1のような東北新幹線の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、鉄筋が露出するなどの顕著な被害の事例も確認された。一方で、既往の研究において、中層梁が先行的に損傷することで、柱部の損傷を軽減し、2層式RCラーメン高架橋全体の残留変位を低減させる効果が解析的に示されており²⁾、今回の損傷事例は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捉えることができる。しかし、竣工当時の2層式RCラーメン高架橋の設計では、梁と柱の剛比を大きくすることで柱部の曲げモーメント低減が図られていたものの³⁾、中層梁に損傷を誘導して柱部の損傷を軽減するといった損傷制御のような考え方はなされていないことが読み取れる。事実、2022年福島県沖地震の被害(図-1)を見ると、2層式RCラーメン高架橋の中層梁には曲げ損傷ではなく、顕著なせん断損傷が発生していることがわかる。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いないため、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。つまり、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損傷に対し、安易に損傷制御の考え方を適用させるのは適切でないといえる。

また、中層梁損傷後の2層式RCラーメン高架橋の耐震性能や応答性状に関する検討の事例がいくつか見受けられるものの⁴⁾、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。一方で、列車走行性に主眼を置いた検討は数多く見受けられる。例えば、曾我部ら⁵⁾は新幹線車両と鉄道構造物との動的相互作用を



(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

考慮し、高橋脚・長スパン連続桁橋梁の地震時の列車走行性に関してその基本性状及び改善方法を検討している。Yangら⁹⁾は、地盤・橋梁間および橋梁・鉄道間の相互作用を考慮した3次元有限要素モデルを用い、列車走行性について詳細に検討している。また、Gongら⁹⁾は、列車と橋梁の相互作用を考慮した3次元の連成モデルを用い、列車の動的応答の観点から列車の走行安全性について検討している。このように、列車走行性に関する既往の研究において、列車と鉄道構造物の連成モデルを用いた検討等が行われている。しかしこれらの検討は、あくまで列車と鉄道構造物の連成挙動や、橋脚負担過重といった各種パラメータが列車走行性に及ぼす影響を明らかにすることを目的としており、構造性能の変化と列車走行性を定量的に結び付けることに主眼を置いたものではない。このように、構造物の耐震性能と構造物の社会へ提供されるサービス水準の定量的関係に関する検討が不足しているのが現状である。そのため、中層梁の損傷が仮に列車の走行性に影響を与えない程度であったとしても、列車の運行を停止するといった安全側の対応をせざるを得ず、社会に提供されるサービス水準の低下につながる恐れがある。2層式RCラーメン高架橋が保有する耐震性能と社会に提供できるサービス水準との関係が定量化され

れば、地震後の復旧計画が合理的に策定可能となるといえる。

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は、危機耐性の実現を目指す上でも課題となりうる。本田ら¹⁰⁾は、耐震設計における危機耐性の概念について「協議の設計段階で想定していなかった事象においても、構造物が、単体、またはシステムとして、破滅的な状況に陥らないような性質」と提唱している。また、平成24年に改訂された鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計¹¹⁾では、危機耐性について、作用・応答・抵抗が設計範囲外であったことにより橋梁が崩壊へ至るプロセスを考慮し、社会への影響がより小さくなるように配慮するべき旨を示している。このように、危機耐性の特徴は、設計想定と異なる事象に対し構造物の崩壊が社会に及ぼす影響を最小限とすることを目指すというものである。しかし、危機耐性を実現する構造技術がいくつか提案されている中で^{12,13)}、その構造技術が社会に及ぼす影響については定性的な評価に留まっている。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、地震後の合理的な復旧だけでなく、危機耐性の定量化ならびに危機耐性実現に向けた構造技術開発の活発化にも繋がる。

そこで本研究では、中層梁の損傷モードが2層式RCラーメン高架橋の応答特性に与える影響を明らかにしつつ、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、その検証プロセスを示すことを目的とする。

2. 性能・機能・サービスと列車走行性の照査方法

(1) インフラにおける性能・機能・サービス

インフラの性能とは、構造分野からの視点では、インフラ(構造物)が機能を発揮することを保証するための定量的指標(構造性能水準)を意味するが、計画分野からの視点では、インフラの機能が社会に対してどの程度効果を発揮しているかを表す定量的指標(サービス水準)を意味するといえる。これらを狭義のインフラ性能とすると、広義のインフラ性能は、インフラのハード・ソフト対応水準を表現する定量的指標といえる。ここで、「性能」や「機能」は、日常的に用いられる語句であるため、個人および状況によって異なる解釈がなされることがある。そこで、本研究における語句を以下のように定義する。

性能 構造物などの性質と能力を示す定量的指標

機能 構造物のはたらきや固有の役割を示す定性的指標

サービス(水準) 機能が(社会に対して)どの程度効果を発揮しているかを表す定量的指標

性能は定量的指標であるため、その水準の高低が議論され、「高性能」という表現がなされる。機能は、異なる機能の数の多少が議論され、「多機能」という表現がなされる。サービス(水準)は性能と同様、定量的指標であるため、その水準の高低が議論され、「高いサービス水準」という表現がなされる。先の「高機能」とは、「機能のサービス水準が高い」ことを意味していると考えられる。これにより、機能を定量的に評価するためには、機能とサービス水準の関係を明確にする必要があるといえる。

(2) 現行の設計基準における性能・機能・サービス

橋の性能について道路橋示方書・同解説 I共通編¹⁴⁾(以下、道路橋示方書共通編とする)では、「橋の耐荷性能や耐久性能、その他使用目的との適合性を満足するために必要な性能から構成される一連の性能(1.2節)」と定義されており、耐荷性能の照査や耐久性能の設計についての詳細が記載されている。一方、機能について、道路橋示方書共通編¹⁴⁾では、「橋としての機能が損なわれていない状態とは、橋が計画通りに交通に利用できること(2.2節)」の記載のように、抽象的な表現に留まった記述が見られる。また、機能とサービス(水準)の関係について、道路構造令の解説と運用¹⁵⁾では、「道路の機能を明確にするには、道路の機能が発揮されることによって道路利用者などに提供されるサービスの観点から考える」との記載がある。これは、構造物の機能を評価すべきであることを示しており、本研究で定義した、構造物の機能とサービス水準の関係に近い記載であるといえる。しかし、機能が提供するサービス水準が定量的に示されている記述は見当たらない。

このように、構造性能水準と機能が提供する社会へのサービス水準はともに定量的指標であるが、社会へのサービス水準は定量的に示されておらず、両者が結びついていないのが現状である。これらを結びつけることができれば、定性的な表現に留まっていた指標を定量的指標として表現することが可能となる。また、1.でも触れたように、危機耐性実現に向けた構造技術に関する多くの議論は、危機耐性を実現する構造技術が社会に及ぼす影響を定性的に表現しているのみであり、結果、それらを構造性能水準として表現できないことが本質的な課題であるといえる。

もし、この課題が解決され、定性的な表現に留まっ

ていた指標を定量的指標として表現することが可能となれば、危機耐性を「危機耐性能」といった危機耐性を実現する構造技術を定量的に評価する指標として設計行為の中に組み込むことも可能となる。そのためには、サービス水準と構造性能水準を結びつけることが必要であり、そのための工学的根拠の構築(観測、実験、解析など)が不可欠である。そこで、本研究では2層式RCラーメン高架橋を検討対象とし、構造性能と社会への影響(サービス水準)の結びつきを定量的に評価することを試み、その検証プロセスの一例を示す。

(3) 現行の走行安全性の照査方法

a) 地震時の走行安全性について

地震時の走行安全性に係る変位の照査について、地震動によって生じる構造物の横振動変位に対する照査と構造物境界における軌道面の不同変位に対する照査が鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限¹⁶⁾(以下、鉄道標準変位制限とする)で規定されている。前者の横振動変位に対する照査は、地震時の横方向の振動変位に対するスペクトル強度 $SI(mm)$ (以下、 SI 値とする)を用いる照査法である。鉄道標準変位制限¹⁶⁾における SI 値の応答値の算定方法は、次のとおりである。まず、地表面地震動を対象構造物に入力して、等価固有周期 T_{eq} を持つ構造物天端の加速度応答波を求めた後、この加速度応答波による5%減衰の速度応答スペクトルを求め、その応答速度の周期成分を周期0.1sから2.5sまで積分して求める。解析より算出した SI 値と、 T_{eq} に対応した限界スペクトル強度 $SI_L(mm)$ を比較することで、地震時の走行性に係る照査を行う。なお、限界スペクトル SI_L は、車輪とレール間の水平相対変位の最大値70mmを地震時の走行安全性の目安値とし、代表的な車両諸元を用いた解析に基づいて算出したものとして鉄道標準変位制限¹⁶⁾で規定されている。具体的な算出式は以下の通りである。

$$\begin{cases} SI_L = -8500T_{eq} + 6650 & T_{eq} < 0.3 \\ SI_L = 4100 & 0.3 \leq T_{eq} < 1.2 \\ SI_L = 1375T_{eq} + 2450 & 1.2 \leq T_{eq} \end{cases} \quad (1)$$

また、スペクトル強度 SI を用いた地震時の走行安全性の照査法の妥当性について、Luo¹⁷⁾は鉄道車両の動的応答挙動を簡略化した解析モデルで検討を行っている。その結果、厳密な数値シミュレーションによって得られた変位の安全限界値を、 SI 値として実際の設計に反映可能であることを示している。これより、スペクトル強度 SI を用いた地震時の列車走行性の照査は適用性が高いことがわかる。

後者の不同変位に対する照査は、設計応答値が設計限界値を超えないことを確認することで照査する。なお、

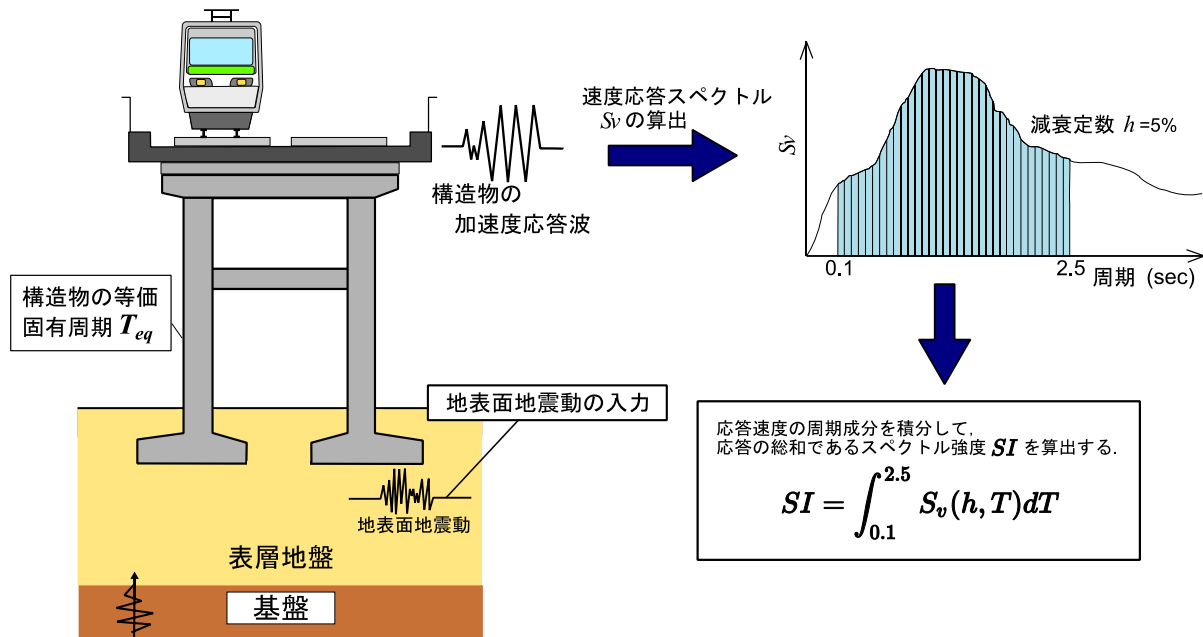


図-2 地震時の走行安全性に関わる照査フロー

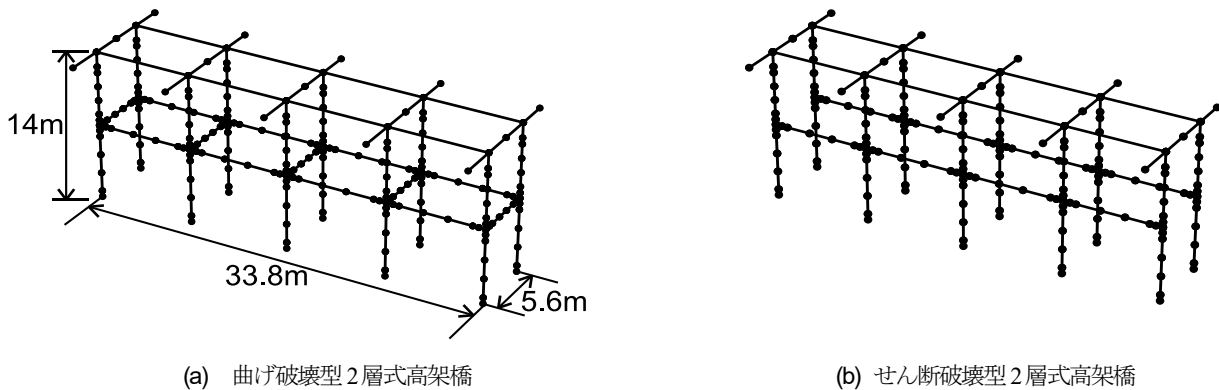


図-3 構造モデル

照査対象となる不同変位は水平目違いと角折れである。

b) 地震後の走行安全性について

地震後の走行安全性の照査については、車両と構造物の全体をモデル化して動的相互作用解析により行う照査方法が鉄道標準変位制限⁶⁾で規定されている。また、これと等価な照査結果が得られるように、桁のたわみおよび不同変位の限界値が設定されている。なお、照査対象となる不同変位は鉛直目違いと角折れである。

3. 2層式RCラーメン高架橋の中層梁損傷が地震時の列車走行性に与える影響

(1) 本検討の目的

1.で述べたように、2022年福島県沖地震で被災した2層式RCラーメン高架橋では、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当時の設計が行われ

ていないため、中層梁の損傷モードがせん断破壊型になったと捉えることができる。すなわち、当時の基準で設計された現存の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られる。

そこで本検討では、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の2種類の解析モデルを作成し、漸増動的解析(IDA)により、2層式RCラーメン高架橋が示す破壊性状や応答特性に関して考察する。その後、2.(3)a)で述べた横振動変位に対するSI値を用いた地震時の振動変位に関する評価を行い、中層梁の破壊モードが地震時の列車の走行性に与える影響について検討する。具体的には、図-2に示す地震時の走行安全性に関わる照査フローのように、地震動を対象構造物に入力して、構造物の加速度応答波を求めた後、この加速度応答波による速度応答スペクト

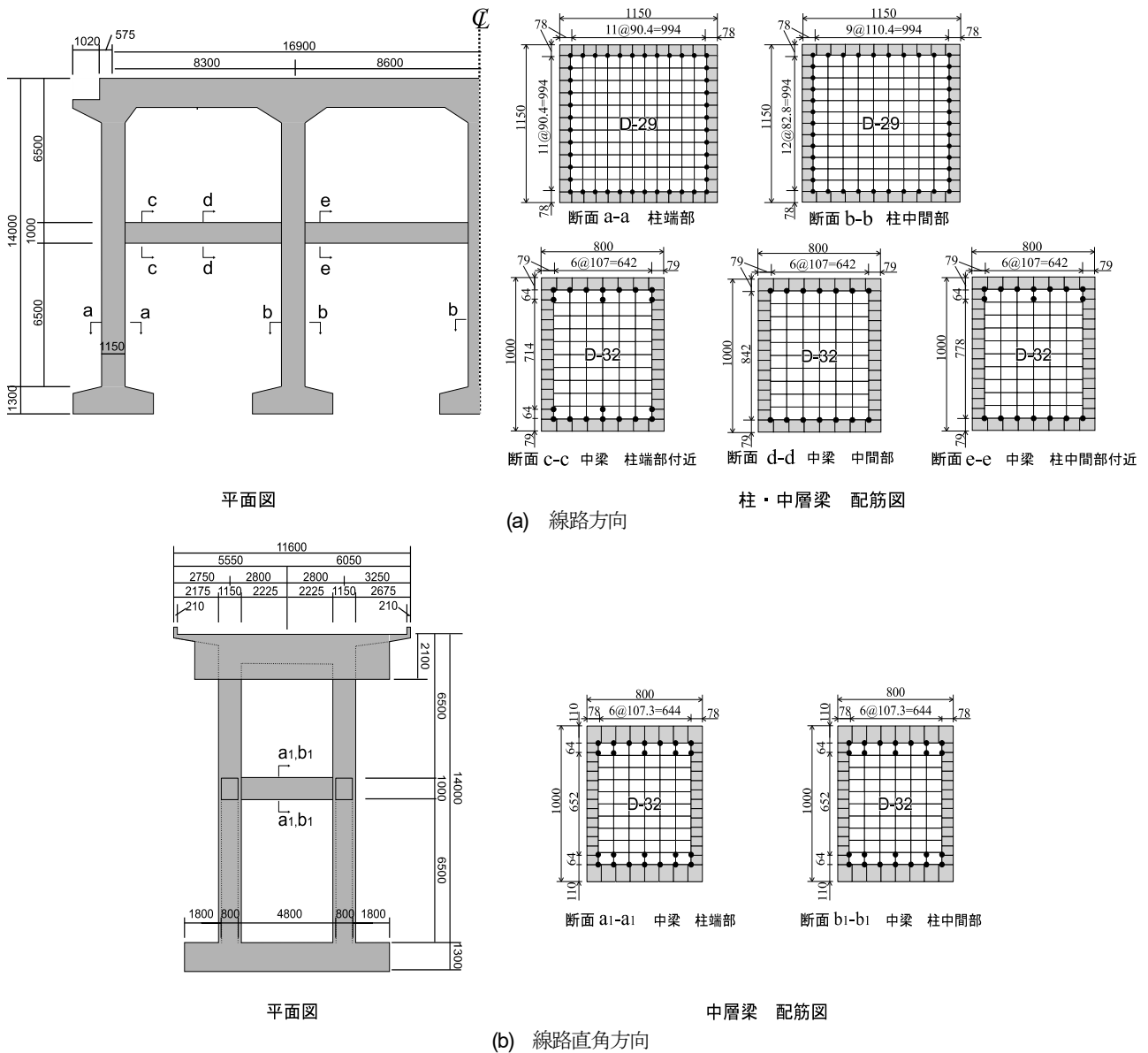


図-4 対象とする2層式RCラーメン高架橋の平面図および配筋図(Unit:mm)

ルを求め、その応答速度の周期成分を周期0.1sから2.5sまで積分して横振動変位に対するSI値を求める。解析より算出した横振動変位に対するSI値と、 T_{eq} に対応した限界スペクトル強度 SI_L (式(1))を比較することで、地震時の走行性に係る照査を行う。

(2) 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梁式高架橋で、幅が33.8m、高さが14m、奥行きが5.6mであり、図-3(a)のようにモデル化を行った。上層梁および中層梁と柱の接合部を剛体要素、柱および中層梁を非線形梁要素とした。具体的な平面図および配筋図を図-4に示す。また、非線形梁要素はファイバーモデルとしてモデル化を行った。中層梁をファイバーモデルでモデル化することで、2層式RCラーメン高架橋を、中層梁が曲げ破

壊して理想的なエネルギー吸収性能を示す2層式RCラーメン高架橋(以下、「曲げ破壊型2層式高架橋」とする)とみなす。

一方、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、「せん断破壊型2層式高架橋」とする)を用いる(図-3(b))。各モデルにおける塑性ヒンジ部の要素長は、堺・星隈¹⁸⁾の提案式に基づいて決定した。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。

材料モデルについては、コンクリートの材料モデルに、最大圧縮応力を示すまでの骨格曲線として Hognes-tadモデル¹⁹⁾ (図-5)を採用し、最大圧縮以降の骨格曲線を最大圧縮応力に到達した点と終局点を結ぶ直線でモデル

表-1 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 σ_c (MPa)	36.55	34.13
最大圧縮時ひずみ ε_{cc}	-0.0031	-0.002
終局時応力 σ_{cu} (MPa)	19.15	17.95
終局ひずみ ε_{cu}	-0.0094	-0.007

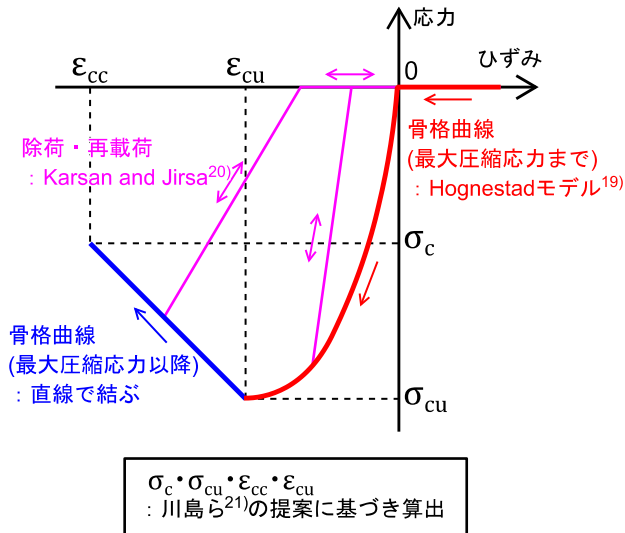


図-5 本検討で用いたコンクリートの材料モデル

化した。除荷・載荷時の挙動はKarsan and Jirsa²⁰⁾が提案した履歴を描かない簡易的なモデルを採用した。なお、コンクリートの最大圧縮応力、最大圧縮時ひずみ、終局時応力、終局ひずみは、川島ら²¹⁾の提案に基づき算出した。ここで、コンクリートの材料特性を表-1に示す。また、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。

(3) 入力地震動

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²²⁾を基準地震動とした。そして、入力倍率を0.1から1.5まで0.1刻みに増幅させ、線形に振幅調整した地震動を橋軸直角方向に入力した。

(4) 検討結果

a) 破壊形状および応答特性

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-6に示す。図中では、IDA曲線と合わせて曲げ破壊型2層式高架橋とせん断破壊型2層式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-7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。

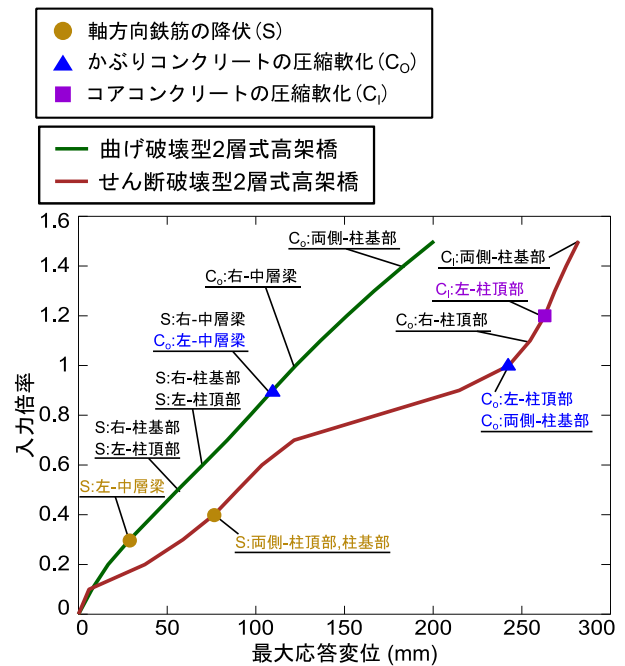


図-6 最大応答変位を指標とした IDA 曲線

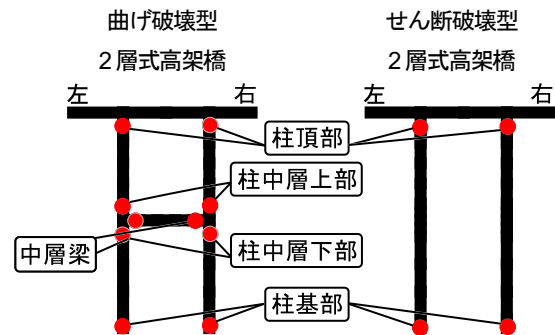


図-7 損傷判定要素の位置

はじめに、曲げ破壊型2層式高架橋の損傷に注目する。最初に確認された損傷は中層梁の軸方向鉄筋降伏であり、そのときの入力倍率は0.3であった。その後、入力倍率が0.5の入力において、柱基部および柱頂部の軸方向鉄筋降伏が確認された。また、中層梁のかぶりコンクリートの圧縮軟化は入力倍率0.9で確認され、柱基部のかぶりコンクリートの圧縮軟化は入力倍率1.4で発生した。この結果から、本解析モデルにより、中層梁から損傷ははじめ、次に柱が損傷しはじめるという2層式RCラーメン高架橋特有の損傷過程が再現できていることがわかる。

また、曲げ破壊型2層式高架橋とせん断破壊型2層式高架橋の損傷比較をすると、せん断破壊型2層式高架橋は曲げ破壊型2層式高架橋よりすべての損傷イベントが早く発生することがわかる。特に、せん断破壊型2層式高架橋は入力倍率1.2で柱頂部のコアコンクリートが損傷したが、曲げ破壊型2層式高架橋は損傷しなかった。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

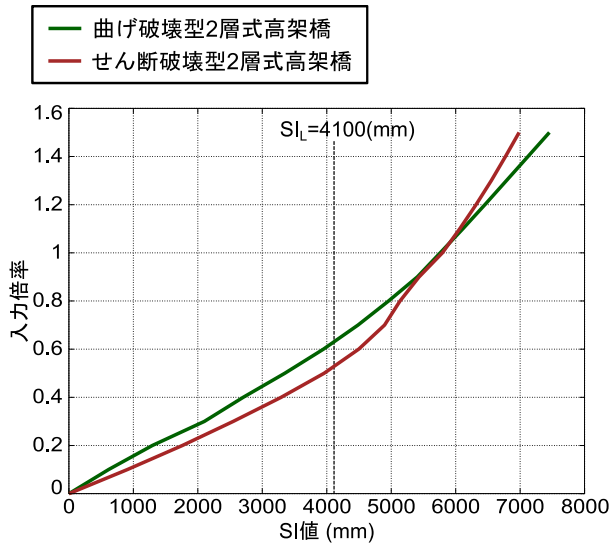


図-8 入力倍率と横振動変位に対するSI値の関係

しやすくなることを示しているといえる。

次に最大応答変位に注目すると、図-6より、せん断破壊型2層式高架橋の地震時の最大応答変位は、曲げ破壊型2層式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、曲げ破壊型2層式高架橋の最大応答変位は109.5mm、せん断破壊型2層式高架橋の最大応答変位は214.7mmであり、中層梁のせん断損傷により地震時応答が96%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、せん断破壊型2層式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。

b) 地震時の列車走行性

本項では、2層式RCラーメン高架橋の性能が地震時の列車走行性に与える影響を評価することを目的に、曲げ破壊型2層式高架橋とせん断破壊型2層式高架橋における入力倍率と横振動変位に対するSI値の関係を算出した(図-8)。なお、曲げ破壊型2層式高架橋およびせん断破壊型2層式高架橋における限界スペクトル強度 SI_L (式(1))は、4100mmであった。ここで、横振動変位に対するSI値が SI_L を超えた時に注目すると、曲げ破壊型2層式高架橋は入力倍率0.6付近で SI_L を超過しているのに対し、せん断破壊型2層式高架橋は入力倍率0.5付近で SI_L を超過しており、中層梁の損傷モードが地震時の列車走行性に一定の程度の影響を与えていることがわかる。しかしながら、曲げ破壊型2層式高架橋とせん断破壊型2層式高架橋の横振動変位に対するSI値の差は、3.(4)a)で示した最大応答変位の結果(図-6)ほどは顕著でないことがわかる。特に入力倍率0.9では、横振動変位に対するSI値が曲げ破壊型2層式高架橋で5403mm、せん断破壊型2層式高架橋では5431mmであり、入力倍率1.0では、曲げ破壊型2層式高架

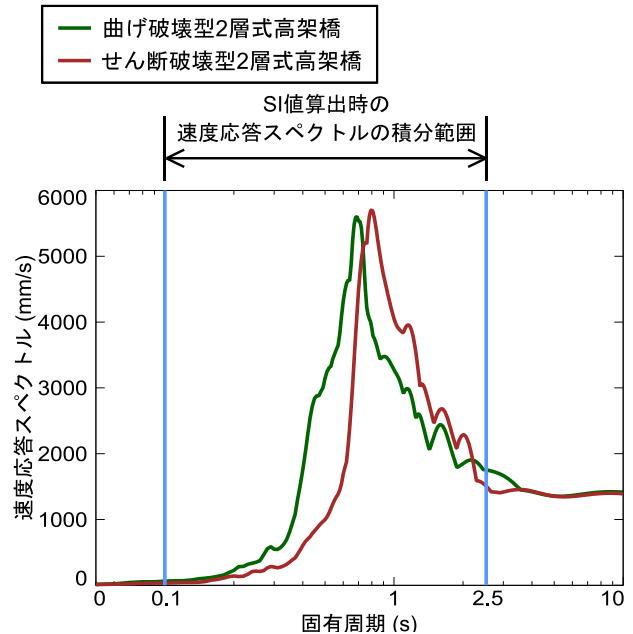


図-9 入力倍率1.0における速度応答スペクトル強度

橋が5760mm、せん断破壊型2層式高架橋で5793mmであることから、その差は顕著でないことがわかる。ここで、入力倍率1.0における曲げ破壊型2層式高架橋とせん断破壊型2層式高架橋の速度応答スペクトルを図-9に示す。なお、ここにおける速度応答スペクトルとは、図-2で示した通り、構造物の加速度応答波による速度応答スペクトルであり、地震波入力による速度応答スペクトルに比べて応答値が大きくなることに注意されたい。図-9より、横振動変位に対するSI値算出の積分範囲において、曲げ破壊型2層式高架橋とせん断破壊型2層式高架橋で応答が卓越する周期帯に差があるものの、速度応答スペクトルの形状や最大値には大差がないことがわかる。そのため、曲げ破壊型2層式高架橋のSI値と中層梁がせん断破壊型2層式高架橋のSI値に大きな差が生じなかったと考えられる。

以上より、現行の照査に倣って検証した結果、中層梁の損傷モードの差異が地震時の列車走行性における横振動変位に与える影響は小さい可能性が示唆された。

4. 地震後の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について

(1) 目的

本章では、2.で述べた現状を踏まえ、地震後の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。その際、2層式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、列車走行速度とする)によって

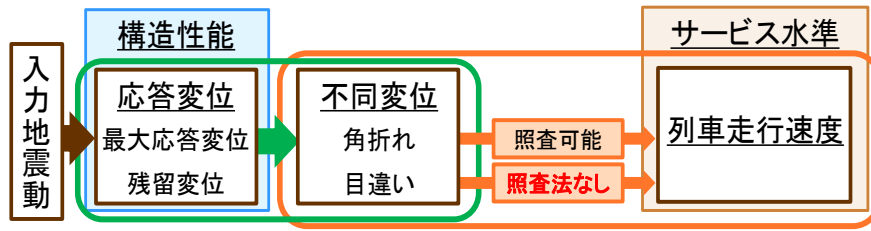


図-10 構造性能に関連する物理量とサービス水準に関連する物理量の関連性

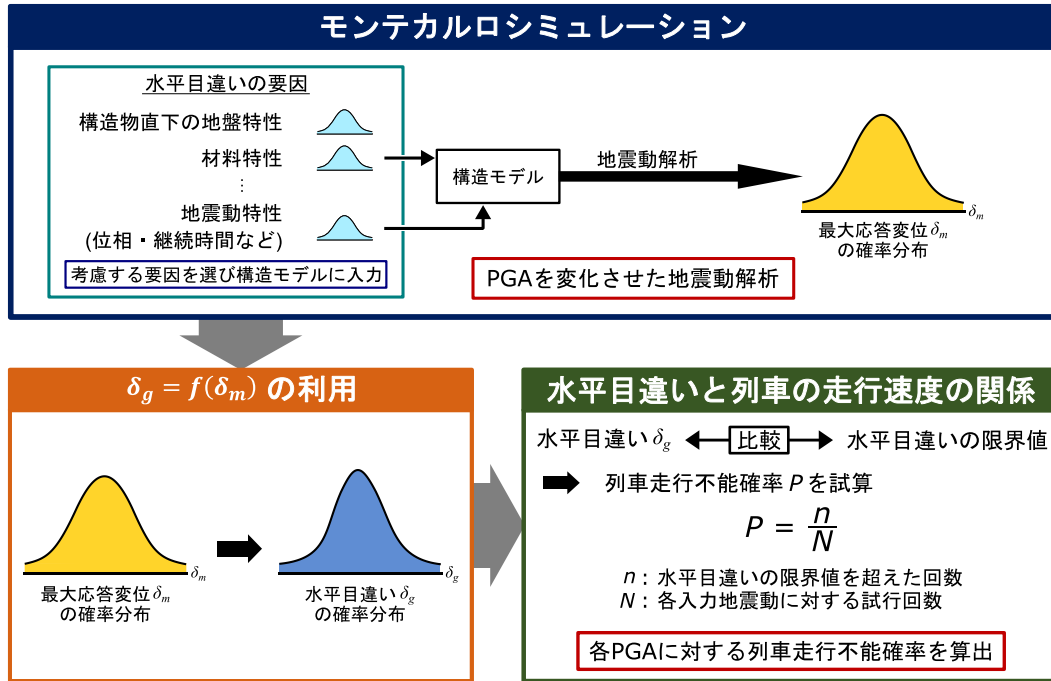


図-11 地震後の列車走行性に関する検討プロセス

表-2 地震時の走行安全性に係る水平目違いの限界値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

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する)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。

(2) サービス水準の定量的評価に向けた課題

本検討で実施するサービス水準の定量的評価の流れを図-10に示す。図に示す通り、構造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、隣接する複数の構造物間での残留変位の差異が地震後の水平目違いに相当すると考えられるため、サービス水準の定量的評価の際は、構造物の残留変位と地震後の水平目違い

δ_g の関連に着目するのが自然といえる。しかしながら、耐震設計では地震時の最大応答変位 δ_m が頻繁に用いられるため、構造性能とサービス水準を定量的に関連づけるためには、構造物の残留変位ではなく、地震時の最大応答変位 δ_m と地震後の水平目違い δ_g の関係を定式化すべきと考える。

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

しかし、実際に地震による水平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、2.(3)b)で述べたように、現行の設計基準¹⁶⁾では、地震後の常時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。

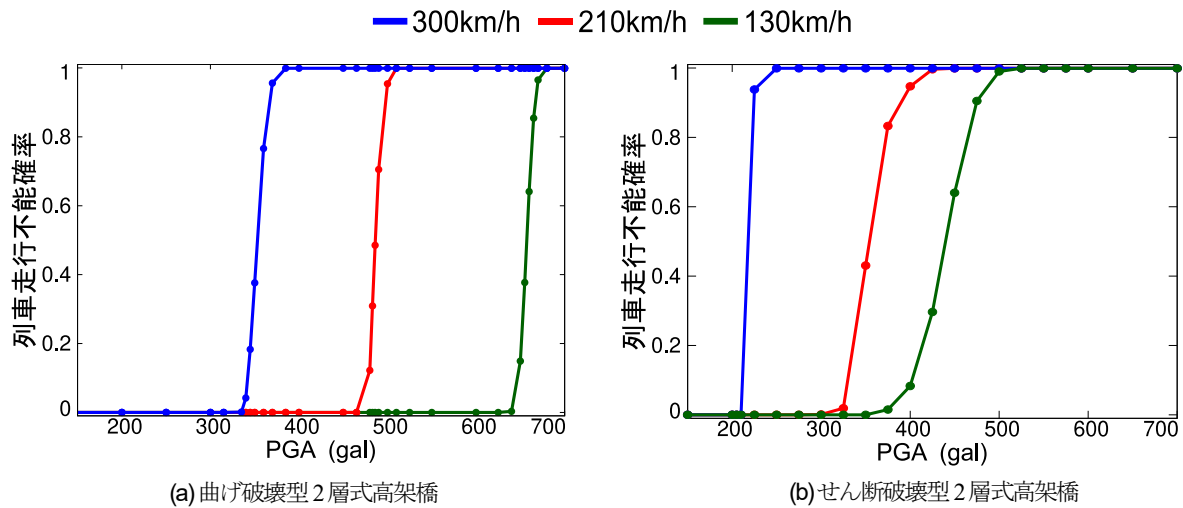


図-12 列車走行不能確率

(3) サービス水準の定量的評価

地震後の列車走行性に関する検討プロセスを図-11に示す。図のように、材料特性、構造物直下の地盤特性、地震動の相異特性など、水平目違いを決定づけるさまざまな要因のうちから必要なものを考慮して、モンテカルロシミュレーションにより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)を用いて水平目違い量を算出する。なお、最大応答変位 δ_m と水平目違い δ_g の関係は一意的に定まるものではない。そのため、最大応答変位 δ_m と水平目違い δ_g の関係についての知見を蓄積させ、式(2)内の定数に確率的な分布を与えることで、最大応答変位 δ_m と水平目違い δ_g の関係の多義性を考慮することが理想といえる。水平目違い量を算出した後、地震後の走行安全性に係る水平目違いの限界値と列車の走行速度との関係を用いることで、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。

しかし、4.(2)で述べたように、これらのさまざまな要因は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界がある。そのため、本検討では、あくまで便宜的な仮定を基にした列車走行不能確率の試算を行い、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。

(4) 本章での検討概要

4.(2)で述べた現状を踏まえ、本研究では、耐震性能とサービス水準の関係の定量的評価の検証プロセスを例示することに検討の主眼を置くこととし、列車走行不能確率を試算に向けて、上述した不十分な知見を補うために2つの仮定を置くこととした。まず、最大応答変位 δ_m と構造境界における水平目違い δ_g の関係を構造解析のみで定式化を行うのは極めて困難であるため、本研究では、便宜的に最大応答変位 δ_m と水平目違い δ_g が簡易的な線形関係であると仮定する。

$$\delta_g = 0.1\delta_m \quad (3)$$

また、図-10に示すように構造性能とサービス水準を定量的に結びつけるためには、水平目違い量と列車の走行可能速度との関係が必要となるが、現行の設計基準¹⁶⁾では、地震後の常時の走行安全性に係る水平目違いの限界値は設定されていないため、表-2に示す地震時の走行安全性に係る水平目違いの限界値と列車の走行速度との関係を、地震後の常時の走行安全性の照査に使用することにした。

また、先述したように、不同変位とは本来、隣接する構造物の応答変位の相違で決まる物理量であり、隣接する構造物間での入力地震動の性質の違いや、構造物直下の地盤特性の相違、構造特性の相違、材料特性のばらつきなど様々な要因が複合して決定される。しかし本検討では、図-11に示した水平目違いを決定づける要因のうち構造物の材料特性の違いに着目し、地震動や地盤の特性が同一である条件のもとで基礎的な検討を行う。そして、隣接する複数の構造物に対する解析を行い、その応答の相違を考察するのではなく、単一の構造に対して材料特性を変化させたモンテカルロシミュレーションを行い、応答値の標準偏差から、構造特性と地震後の不同変位の関係を擬似的に考察することとした。具体的には、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(3)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-2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、あくまで便宜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目的としている。

ことに注意されたい。

(5) 構造モデルと入力地震動

本検討では、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、地震後の列車走行性がどの程度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^{23),24)}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、平均と標準偏差がそれぞれ 35.89 N/mm^2 と 3.84 N/mm^2 、 372.65 N/mm^2 と 13.73 N/mm^2 である正規分布と仮定して解析を行う。また本解析では、3.での検討と同様、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²⁵⁾を基準地震動とし、PGAを200galから700galの間でさまざまに変化させて橋軸直角方向に入力した。

(6) 検討結果

4.(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、曲げ破壊型2層式高架橋では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RC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.(4)で述べたように、本検討は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目的としている。そのため、便宜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。また、列車走行不能確率について、本検討では水平目違いの原因として材料特性のみに注目したため、勾配が急なフラジリティ曲線が得られたが、4.(3)で述べたようにさまざまな不同変位の原因を考慮できれば、フラジリティ曲線の勾配が緩やかになり、列車走行性の定量的評価において実用的に利用することも可能となる。

5. まとめ

本検討では、中層梁の損傷モードが2層式RCラーメン高架橋の地震時の列車の走行性に与える影響について検討した。また、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、その検証プロセスを示した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 2層式RCラーメン高架橋の性能が地震時の列車走行性に与える影響について、現行の照査に準じ、横振動変位に対するSI値を用いた検証を行った結果、中層梁の損傷モードの差異が地震時の走行性における横振動変位に与える影響は小さい可能性があることが示唆された。
- 解析的検討により、便宜的な仮定の下で地震後の列車走行不能確率を試算した。その結果、地震時の最大応答変位から地震後の水平目違いを算定し、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RC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。

最後に、今後の課題を以下に示す。

- 本研究では、地震後の常時の走行安全性に係る水平目違いについての知見が不十分であるため、地震時の走行安全性に係る水平目違いの限界値を地震後の常時の走行安全性に係る水平目違いの照査に使用した。今後は、地震後の常時の走行安全性に係る水平目違いについて適切に評価する必要がある。
- 本研究では、構造物単体の残留変位のばらつきから擬似的に隣接する構造物間の水平目違いの評価を行った。今後は、隣接する構造物を含めた全体構造を適切にモデル化し、かつ構造物直下の地盤特性の差異をモデルに反映させるなどして水平目違いを適切に評価する必要がある。

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

- 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 (Accessed

- September 7, 2022)]
- 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) 菅野俊介, 荒木秀夫, 中村光, 林康裕, 米倉重州夫: 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, pp. 55-62, 2004. [Sugano, S., Araki, H., Nakamura, H., Hayashi, Y. and Yonekura, A.: Activities of the research committee for seismic performance evaluation of concrete structures in recent damaged earthquakes, *Annual Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol. 26, No. 1, pp. 55-62, 2004.]
- 4) 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.]
- 5) 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. [Machida, A., Mutsuyoshi, H. and Tsuruta, K.: Inelastic response of reinforced concrete frame structures subjected to earthquake motions, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Issue 378/V-6, pp. 117-126, 1987.]
- 6) 鈴木基行, 秋山充良, 田中慎介, 丸中孝通: 降伏過程を考慮したRC2層ラーメン高架橋の合理的耐震設計法の提案, 土木学会論文集, No. 634/V-45, pp. 269-278, 1999. [Suzuki, M., Akiyama, M., Tanaka, S. and Marunaka, T.: Proposal of seismic design method of RC 2-story viaduct considering the yield process, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, No. 634/V-45, pp. 269-278, 1999.]
- 7) 曾我部正道, 池田学, 涌井一, 松本信之, 田辺誠: 高橋脚・長スパン鉄道橋梁の地震時列車走行性とその可視化, 応用力学論文集, Vol. 10, pp. 1037-1046, 2007. [Sogabe, M., Ikeda, M., Wakui, H., Matsumoto, N. and Tanabe, M.: A study on train-running quality during earthquake for railway long span bridge and its visualization, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 10, pp. 1037-1046, 2007.]
- 8) Yang, X., Wang, H. and Jin, X.: Numerical analysis of a train-bridge system subjected to earthquake and running safety evaluation of moving train, *Shock and Vibration*, Vol. 2016, 2016.
- 9) Gong, W., Zhu, Z., Liu, Y., Liu, R., Tang, Y. and Jiang, L.: Running safety assessment of a train traversing a three-tower cable-stayed bridge under spatially varying ground motion, *Railway Engineering Science*, Vol. 28, No. 2, pp. 184-198, 2020.
- 10) 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一試案構築にむけての考察一, 土木学会論文集 A1 (構造, 地震工学), Vol. 72, No. 4, pp. 459-472, 2016. [Honda, R., Akiyama, M., Kataoka, S., Takahashi, Y., Nodu, A. and Murono, Y.: Seismic design method to consider “anti-catastrophe” concept -A study for the draft of design-, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers A1 (Structure, Earthquake Engineering)*, Vol. 72, No. 4, pp. 459-472, 2016.]
- 11) 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. [Railway Technical Research Institute: *The Revision of Design Standards for Railway Structures and Commentary, Seismic Design*, 2012.]
- 12) 豊岡亮洋, 布川博一, 小野寺周, 室野剛隆: ブロック型倒壊方向制御構造を有するラーメン高架橋柱の静的載荷試験, 土木学会論文集 A1 (構造, 地震工学), Vol. 75, No. 4, pp. 408-415, 2019. [Toyooka, A., Nunokawa, H., Onodera, M. and Murono, Y.: Cyclic loading tests of a viaduct column equipped with the collapse direction control device, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers A1 (Structure, Earthquake Engineering)*, Vol. 75, No. 4, pp. 408-415, 2019.]
- 13) 五島健斗, 植村佳大, 高橋良和: 設計基準外事象に対する挙動が定性的に予測可能な埋め込みメナーゼヒンジRC構造の開発, 土木学会論文集 A1 (構造, 地震工学), Vol. 75, No. 4, pp. 506-519, 2019. [Goto, K., Uemura, K. and Takahashi, Y.: Development of embedded Mesnager hinge RC structure capable of predicting behavior qualitatively for beyond design basis events, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers A1 (Structure, Earthquake Engineering)*, Vol. 75, No. 4, pp. 506-519, 2019.]
- 14) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 2017. [Japan Road Association: *Specifications for Highway Bridges and Commentary I, Common Section*, 2017.]
- 15) 日本道路協会: 道路構造令の解説と運用, 2015. [Japan Road Association: *Explanation and Operation of the Road Structure Order*, 2015.]
- 16) 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. [Railway Technical Research Institute: *The Revision of Design Standards for Railway Structures and Commentary, Displacement Limits*, 2006.]
- 17) Luo, X.: Study on methodology for running safety assessment of trains in seismic design of railway structures, *J. Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier Science Ltd., Vol. 25, No. 2, pp. 79-91, 2005.
- 18) 堺淳一, 星隈順一: 軸方向鉄筋のはらみ出し現象に着目した鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長の評価, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 782-795, 2014. [Sakai, J. and Hoshikuma, J.: Evaluation of plastic hinge length of reinforced concrete bridge columns based on buckling behavior of longitudinal reinforcement, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 60A, pp. 782-795, 2014.]
- 19) Hognestad, E., Hanson, N. W. and McHenry, D.: Concrete stress distribution in ultimate strength design, *ACI Journal*, Vol. 52, No. 12, pp. 455-79, 1955.
- 20) Karsan, I. D. and Jirsa, J. O.: Behavior of concrete under compressive loading, *Journal of the Structural Division*, Vol. 95, No. 12, pp. 2543-2563, 1969.
- 21) 川島一彦, 星隈順一, 長屋和宏: 帯鉄筋による拘束を取り入れたコンクリートの応力-ひずみ関係式, 地震工学研究発表会講演概要, Vol. 22, pp. 483-486, 1993. [Kawashima, K., Hoshikuma, J. and Nagaya, K.:

- Proposition of stress-strain model for concrete confined by hoop reinforcement, *Abstracts of the Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 22, pp. 483-486, 1993.]
- 22) 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.]
- 23) 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.]
- 24) 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.]
- (Received November 11, 2022)
(Accepted February 11, 2023)

STRUCTURAL PERFORMANCE AFTER EARTHQUAKE AND LEVEL OF SERVICE OF TWO-STORY VIADUCT

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.