

多数の RC 橋梁・高架橋群の効率的な モデル化のための感度分析

和田 一範¹・日野 篤志²・室野 剛隆³・本山 紘希⁴・松本 拓⁵

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:wada.kazunori.73@rtri.or.jp

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:hino.atsushi.44@rtri.or.jp

³正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:murono@rtri.or.jp

⁴正会員 (国研) 理化学研究所 計算科学研究機構 総合防災・減災研究ユニット
(〒650-0047 兵庫県神戸市中央区港島南町 7-1-26)

E-mail:hiroki.motoyama@riken.jp

⁵正会員 伊藤忠テクノソリューションズ (株) 科学システム事業部 科学・工学技術部 建設技術課
(〒100-6080 東京都千代田区霞が関3-2-5 霞が関ビル)

E-mail:taku.matsumoto@ctc-g.co.jp

鉄道構造物は、数十～数百 km の長い区間に渡って連続するシステムであり、局所的な地震被害であっても、路線全体の性能が損なわれる可能性がある。そのため、路線における被害程度を評価し、危険度の高い構造物を抽出することが重要となる。鉄道総合技術研究所では路線全体の被害状況を解析的に評価する手法として「鉄道地震災害シミュレータ」を開発した。しかし、多数の構造物群をモデル化するには、膨大な時間とコストが要する。そこで、本稿では RC 橋梁・高架橋群を効率的にモデル化するために必要な事項を整理し、それらの事項を満たすモデル化方法を提示した。そして、設計計算のモデルに対して、モデル化を変更することにより非線形応答特性（震度－変位関係、等価固有周期など）へ与える感度を項目ごとにプッシュ・オーバー解析で分析した。

Key Words: reinforced concrete bridges and viaducts, efficient modeling, design calculation model, sensibility analysis

1. はじめに

鉄道構造物は、数十～数百 km の長い区間に渡って連続するシステムであり、局所的な地震被害であっても、路線全体の性能が損なわれる可能性がある。過去、兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震など大規模地震が発生し、運転が再開されるまで多大な時間を要した。今後も、南海トラフ地震などの巨大地震の発生が懸念される中、路線全体について想定される地震時被害状況を事前に予測しておくことは鉄道構造物のレジリエンスの確保の観点から重要である。

これまで、路線全体の被害状況を予測するためには、広域な被害程度の概要をマクロに予測（概略評価）し、

その中から特に危険度の高い箇所について、個別に対応する（詳細評価）という 2 段階の評価を採用することが合理的と考えられてきた。鉄道総合技術研究所では、路線全体の概略評価を目的として、地震動の特性および構造物の振動特性を考慮した地震被害推定ノモグラムを提案している^{1), 2)}。本手法は簡便であり、かつ被害の概略評価法として有効であることが確認されている。一方で、各地点の時刻歴の地震動波形の評価手法の高精度化やスーパーコンピュータを使用した数値解析の大規模化・高度化によって、膨大な構造物群について非線形時刻歴応答解析を実施し、地盤・構造物の応答や被害状況を詳細に評価する、すなわちノモグラムを用いるような概略評価の段階を省略し、路線全体について詳細評価すること

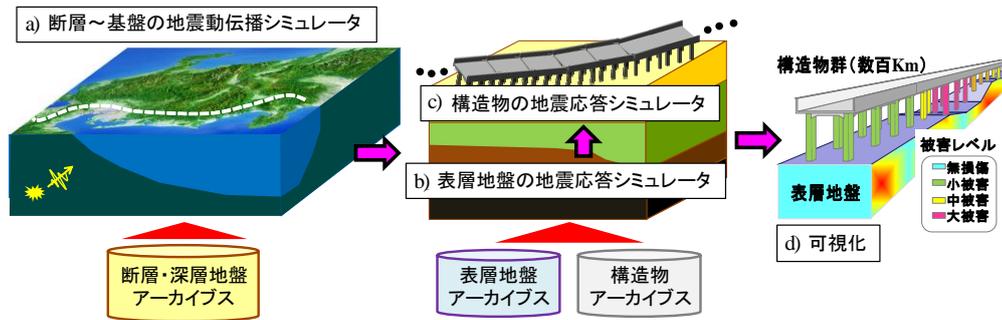


図-1 鉄道地震災害シミュレータの概要

も現実的な選択肢となってきた。

このような状況を鑑みて、鉄道総合技術研究所では「鉄道地震災害シミュレータ」³⁾ (以下、災害シミュレータ) (図-1)を開発してきた。災害シミュレータでは、数十～数百 km の路線全体について、想定される地震に対して、地震動伝播解析から地盤応答解析、構造物の非線形応答解析までを一連で実施することが可能である。本稿では、多数の RC 橋梁・高架橋群のモデル化方法に着目するため、以降では災害シミュレータにおける構造物のモデル化に焦点を当てる。

災害シミュレータでは、現行の鉄道構造物の耐震設計標準⁴⁾に従って路線全体を詳細にモデル化し、非線形時刻歴応答解析を実施することが可能である。これまで、被害事例と比較して被害数で 1 割程度安全側 (損傷した構造物を多く評価) に評価できることがわかっている³⁾。しかしながら、上述した評価を行う場合は、上部工の荷重、形状や部材の鉄筋配置、基礎の配置、非線形特性など大量の情報が必要となり、数十～数百 km の路線全体を対象に設計計算と同等のモデルを構築し、非線形時刻歴応答解析を実施するためには、膨大な時間とコストが必要となる。また、設計年代の古い構造物などは、モデル化に必要な情報が全て揃わない可能性も考えられる。

そこで、本稿では多数の RC 橋梁・高架橋群を効率的にモデル化することを目的として、以下に述べる検討を実施した。まず、多数の RC 橋梁・高架橋群を効率的にモデル化するために災害シミュレータに要求される事項を整理した。次に、現行の鉄道構造物の耐震設計標準⁴⁾に準拠したモデル (以下、設計計算モデル) に対して、要求される事項を満足するようなモデル化の変更項目を提示した。最後に、変更項目ごとについて、プッシュ・オーバー解析を実施し、非線形応答特性 (震度-変位関係、等価固有周期、降伏震度) へ与える感度を分析した。

2. 鉄道地震災害シミュレータに要求される事項

本章では、災害シミュレータで多数の RC 橋梁・高架橋群を効率的にモデル化するために必要とされる事項を

整理する。

(1) データ入力の効率性およびデータの取得しやすさ

路線全体に位置する膨大な数の RC 橋梁・高架橋群をモデル化するうえでは、データ入力に多大な時間と労力がかかる。また、構造物の詳細な図面が残っておらず、詳細なモデル化が不可能な場合も想定される。そのため、可能な限りモデル化に必要な情報量や作業量を少なくして、データ入力の効率性を高める必要があることと、一般図等の比較的得やすい情報からのみモデル化することを考える必要がある。

(2) 解析の速度および安定性

路線全体の被害状況を予測する際には、想定される断層や地震発生シナリオが複数存在する場合が多い。また、耐震補強の効果の定量評価を行うような場合は、構造物のモデル化を複数パターンで設定する可能性もある。このことから、災害シミュレータを用いた解析は、地震動や構造物モデルなどをパラメトリックに変化させて多くの回数実施することが考えられる。そのため、一度の解析にかかる速度を極力抑える必要がある。また、大規模な解析を行うため、一部の構造物の応答解析が計算途中で発散してしまい、意図した結果が得られない場合も考えられる。そのため、安定的に解を出力することも必要である。

(3) 解析結果の精度

(1)や(2)を鑑みて、設計計算モデルからモデル化方法を変更するものの、災害シミュレータの評価結果の精度が設計計算モデルの算定精度から大きく低下すると、評価結果として活用できない。そのため、災害シミュレータとしては、設計計算モデルの算定精度と同程度もしくはそれ以上の算定精度を有する必要がある。

3. 全線評価モデルの概要

2で整理した災害シミュレータに要求される事項を満足するために、本稿では表-1に示す 6項目を設計計算モ

表-1 感度分析を行う項目

項目	設計計算モデル	全線評価モデル
①解析次元	2次元	3次元
②上層梁・スラブ	T型断面	矩形梁+弾性体シェル
③柱部材の非線形性	テトラリニア	トリリニア
④軸力変動	考慮	未考慮
⑤杭の非線形性	非線形部材	線形部材
⑥直接基礎の地盤ばね	回転ばね	分布ばね

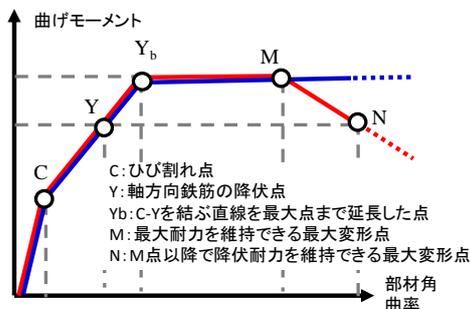


図-2 部材の非線形特性の例 (RC部材)⁵⁾

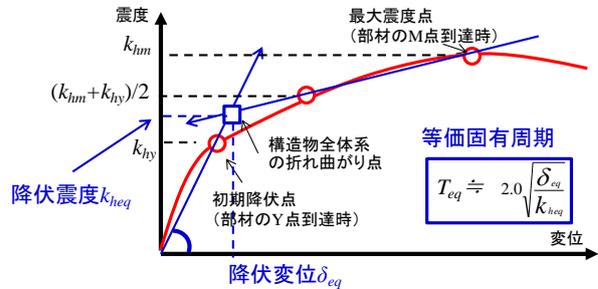


図-3 降伏震度、降伏変位、等価固有周期の算定⁴⁾

デルから変更した。本モデルをここでは全線評価モデルと呼ぶ。本章では、設計計算モデルに対する全線評価モデルでの変更点について、2.の要求事項と対応させて述べる。

(1) 解析次元

設計計算モデルでは、線路方向と線路直角方向の断面について、2次元でモデル化するのが一般的であるが、全線評価モデルではデータ入力の効率性および解析結果の精度を鑑みて3次元でモデル化することとした。

データ入力の効率性については、3次元でモデル化することで、部材、荷重分布等を直接的に設定でき、2次元モデルの際に必要なデータ入力前の計算が不要となる。具体的には、線路方向の荷重分担の処理など実構造物を2次元化するための構造物ごとの事前の計算が不要となる。また、斜角桁を2次元モデルでモデル化する場合には、上記に加えて荷重の割増しも考慮する必要があるが、3次元でモデル化することで、斜角桁を陽な形でモデル化できる。

また、解析精度については、3次元でモデル化することで、3次元効果、例えば構造物のねじれの影響を表現できるため、設計計算モデルに対して有利である。

(2) 上層梁・スラブ

設計計算モデルでは、上層梁とスラブの有効幅分を考慮してT型の断面として断面諸元を計算することが一般的であるが、全線評価モデルではデータ入力の効率性を鑑みて、上層梁を矩形梁、スラブを弾性体シェルでモデル化することとした。このことによって、個々の構造物ごとにスラブの有効幅を算定する作業を不要とした。

(3) 柱部材の非線形性

設計計算モデルでは、柱部材について図-2の赤線に示すように、最大耐力(図中のM点)を示した以降の挙動までモデル化したテトラリニアモデルを用いるが⁵⁾、全線評価モデルでは解析の速度および安定性を鑑みて図-2の青線に示すようにM点以降は剛性が変化しないトリリニアモデルでモデル化することとした。このことによって、一般に解析の安定性が比較的低く、収束計算に時間がかかる最大耐力以降の負勾配の領域を考慮しないことになる。

なお、トリリニアモデルでモデル化した場合も、降伏震度 k_{heq} や等価固有周期 T_{eq} といった非線形応答特性は評価可能である(図-3)。

(4) 軸力変動

設計計算モデルでは、軸力変動の影響は考慮することが一般的であるが、全線評価モデルでは、解析の速度および安定性を鑑みて、軸力変動の影響は考慮しないこととした。このことにより、解析ステップごとの軸力に関する収束計算が不要となり解析の安定性や速度が向上する。

(5) 杭の非線形性

設計計算モデルでは、杭は非線形でモデル化されているが、全線評価モデルでは、データの取得しやすさを鑑みて、杭を線形部材とした。これは、杭の非線形モデル化に必要な鉄筋量などの情報が、柱部材に比べると取得しにくいと考えられるためである。

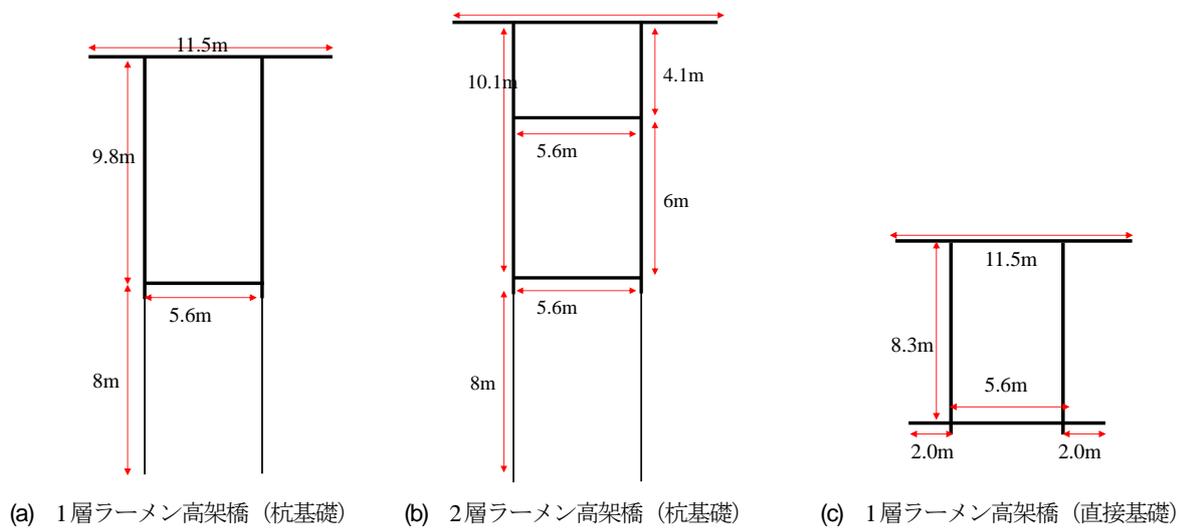


図-4 設計計算モデルの概要例

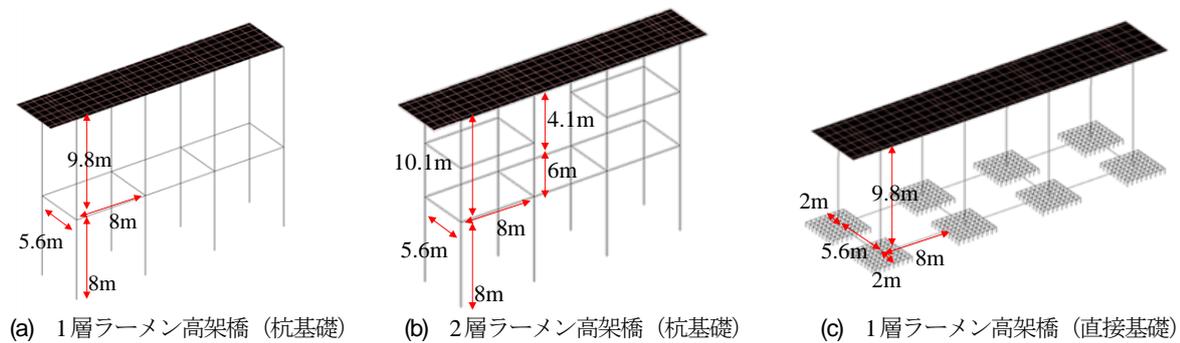


図-5 簡易モデルの概要例

(6) 地盤ばね（直接基礎）

鉛直方向に関するフーチング底面と地盤の相互作用を表現する方法として、設計計算モデルでは、鉛直ばね1本と回転ばね1本で表現する方法が従来しばしば用いられていたが、全線評価モデルでは解析結果の精度を鑑みて、分布ばね（複数の鉛直ばね）で表現することとした。このことにより、構造物のねじれの影響を考慮でき、回転ばねモデルよりも精度が向上すると考えられる。

なお、鉄道構造物の現行の基礎標準⁹⁾では、ラーメン高架橋については、分布ばねでモデル化することが推奨されている。

4. 検討概要

3.において整理されたモデル変更項目ごとに、非線形応答特性に与える感度を分析する。本章では、検討概要として感度分析を実施する対象構造物、検討方法について述べる。

(1) 対象構造物

構造形式（ラーメン、橋脚）、基礎種別（直接基礎、杭基礎）が異なる代表的な構造物6基について、設計計算モデルと全線評価モデルとの非線形応答値の比較を行

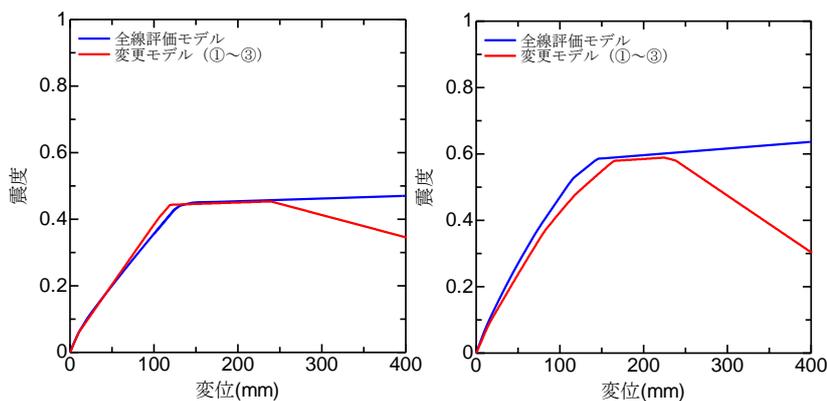
表-2 対象構造物一覧

No	構造形式	基礎形式
1	1層ラーメン	杭基礎
2	2層ラーメン	杭基礎
3	1層ラーメン	直接基礎
4	2層ラーメン	直接基礎
5	1層ラーメン（2径間）	杭基礎
6	桁式橋脚	杭基礎（既成杭）

う。表-2に対象構造物一覧、図-4、図-5にその一例として、構造物 No.1～No.3 のモデル概要を示す。ここで、図-4 は設計計算モデル、図-5 は全線評価モデルを示す。なお、設計計算モデルについては、鉄道構造物の耐震設計においてよく用いられている「静的非線形解析プログラム JRSNAP」を用いてモデル化した。また、今回検討した各構造物は、RC 橋梁・高架橋の設計で通常採用される上部工先行降伏（ここでは柱が基礎より先行して降伏する）の構造物である。

(2) 検討方法

全線評価モデルまたは設計計算モデルを基に、表-1 に示した感度分析を行う項目のみの条件を変えたモデルを作成し、節点に重量を割り当て震度（加速度/重力加速度）を小さいレベルから徐々に漸増させたプッシュ・



(a) 1層ラーメン高架橋 (杭基礎) (b) 2層ラーメン高架橋 (杭基礎)

図-6 解析次元, 上層梁・スラブ, 柱の非線形性の影響

オーバー解析 (静的非線形解析) を実施する。解析結果から得られる構造物全体系の震度-変位関係を比較する。また、設計計算モデルと全線評価モデルとの降伏震度, 等価固有周期の差異についても把握する。

5. 感度分析結果

(1) 解析次元, 上層梁・スラブモデル, 柱部材の非線形性の影響

図-6に1層ラーメン高架橋 (杭基礎), 2層ラーメン高架橋 (杭基礎) に関して全線評価モデルと, ①解析次元, ②上層梁・スラブモデル, ③柱の非線形特性のみを変更したモデルの震度-変位関係の比較を示す。図-6より, 自明ではあるが③の影響により, 全線評価モデルから変更したモデルの方が, 最大震度 (変位約 230mm 時点) を示した以降の挙動には違いが見られ, テトラリニアモデルを採用している変更モデルの方が負勾配の領域に入っている。それに対して, 最大震度までの範囲については, 両結果がほぼ同様の挙動を示していることがわかる。このことから, ①, ②のモデル化を簡易に行っても, 最大震度までの構造物全体系の非線形応答特性にはあまり影響を与えないことがわかる。

(2) 直接基礎の地盤ばねのモデル化の影響

図-7に1層ラーメン高架橋 (直接基礎) に関して全線評価モデル (分布ばね利用) と回転ばねに変更したモデルの震度-変位関係の比較を示す。図-7より最大震度 (変位約 160mm 時点) までの挙動については, 両者の結果がほぼ同等となる。なお, 最大震度以降の挙動に違いが見られるのは, 変更モデルが柱の非線形特性としてテトラリニアモデルを採用しているためである。今回のケースでは, 直接基礎の鉛直方向の地盤ばねを分布ばねで3次元的にモデル化しても非線形応答特性にあまり影響を与えないことがわかる。これは, ねじれの影響が小さい構造物であったためと考えられる。

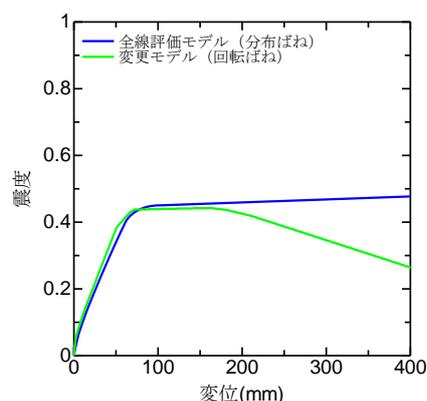
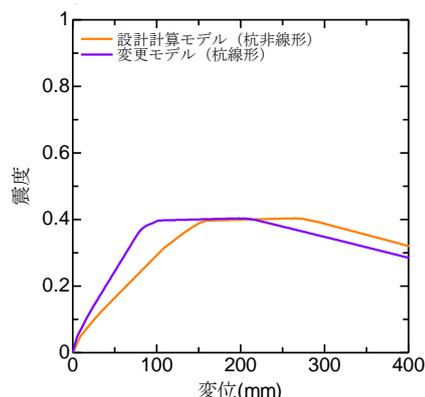
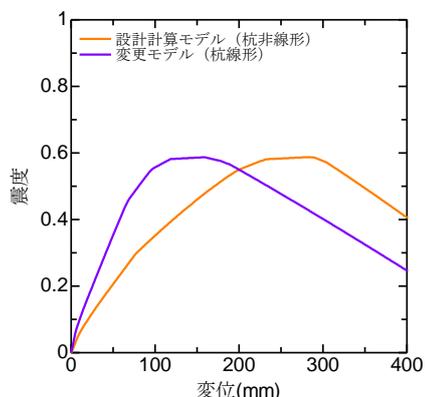


図-7 直接基礎の地盤ばねのモデル化の影響



(a) 1層ラーメン高架橋 (杭基礎)

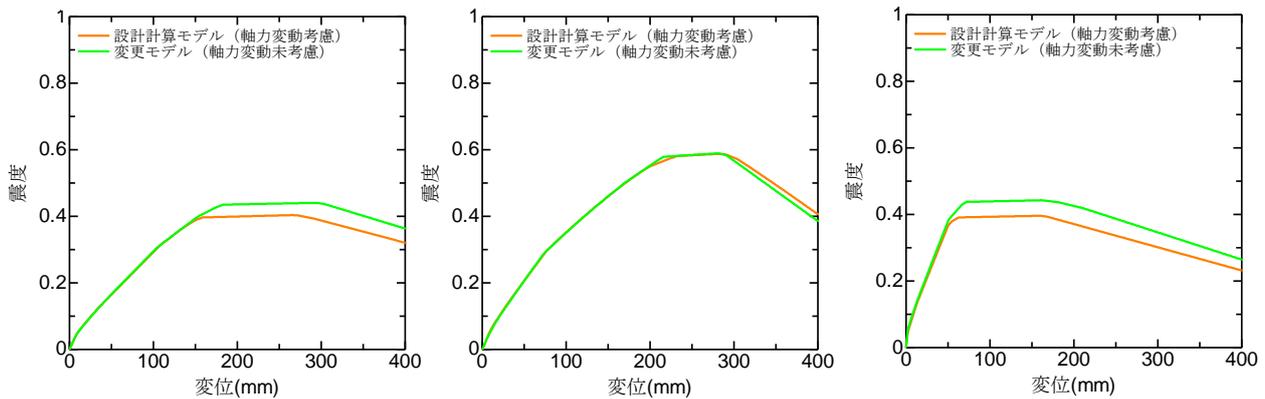


(b) 2層ラーメン高架橋 (杭基礎)

図-8 杭部材の非線形性の影響

(3) 杭の非線形性の影響

図-8に1層ラーメン高架橋 (杭基礎), 2層ラーメン高架橋 (杭基礎) に関して設計計算モデル (杭の非線形性考慮) と, 杭を線形部材に変更したモデルの震度-変位関係の比較を示す。図-8より最大震度は同程度である。これは, これらの構造物が上部工先行降伏であり, 最大震度が柱部材の耐力で決定されるためと考えられる。一方で, 最大震度時の変位は, 杭に非線形性を考慮すると, 杭が線形部材の場合に比べて大きくなる。例えば, 1層ラーメン高架橋 (杭基礎) では, 杭が線形部材の場合, 最大震度時の変位は約 200mm に対して, 杭の非線



(a) 1層ラーメン高架橋 (杭基礎) (b) 2層ラーメン高架橋 (杭基礎) (c) 1層ラーメン高架橋 (直接基礎)

図-9 軸力変動の影響

形性を考慮すると約280mmとなる。この傾向は、等価固有周期に換算すると、長周期化することに相当する。これは、杭にひび割れ(図-2のC点を越えた応答)が発生し、杭の剛性が低下することで、構造物全体が長周期化したためと考えられる。

このことから、本稿で対象とした上部工先行降伏の構造物の場合、杭の非線形性の影響は等価固有周期に感度が大きいことがわかる。

(4) 軸力変動の影響

図-9に1層ラーメン高架橋(杭基礎)、2層ラーメン高架橋(杭基礎)、1層ラーメン高架橋(直接基礎)に関して設計計算モデル(軸力変動考慮)と、軸力変動を考慮しないように変更したモデルの震度-変位関係の比較を示す。図-9より構造形式によって影響の大小は異なるものの、軸力変動を考慮することで、最大震度が小さくなる傾向がある。例えば、1層ラーメン高架橋(直接基礎)では、軸力変動を考慮しない場合、最大震度が約0.43に対し、軸力変動を考慮した場合、最大震度は約0.4となる。これは、これらの構造が上部工先行降伏であり、最大震度が柱の耐力で決定されることと、引張側(軸力が低下する側)の柱部材の降伏耐力が小さくなるためと考えられる(図-10)。

このことから、本稿で対象とした上部工先行降伏の構造物の場合、軸力変動の影響は降伏震度に感度が大きいことがわかる。

(5) 設計計算モデルと全線評価モデルの非線形応答特性の差異

(1)~(4)で各変更要素について、震度-変位関係に与える感度の大小を分析した。ここでは、表-2で示した検討対象の全構造物について、設計計算モデルと表-1で示した全項目を変更した全線評価モデルとの非線形応答特性(震度-変位関係、降伏震度、等価固有周期)の

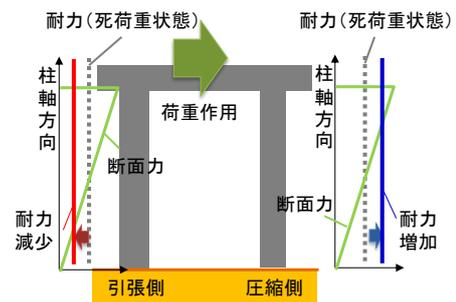


図-10 軸力変動による柱部材の耐力の変化

比較結果を図-11に示す。杭の非線形性や軸力変動の影響によって、等価固有周期としては、設計計算モデルと最大±10%程度の差異となる。一方、降伏震度として、設計計算モデルよりも10~20%程度小さい値となる。

6. おわりに

本稿では、多数のRC橋梁・高架橋群を効率的にモデル化することを目的として、鉄道地震災害シミュレータに要求される事項を整理したうえで、設計計算で用いる詳細なモデル(設計計算モデル)に対して、モデルの効率化を図った項目ごとに非線形応答特性(震度-変位関係、等価固有周期、降伏震度)に与える感度をプッシュ・オーバー解析によって分析した。その結果を以下にまとめる。

- 構造物を3次元でモデル化し、上層梁・スラブを矩形と弾性体シェルでモデル化、直接基礎の地盤ばねを分布ばねでモデル化しても、構造全体系の震度-変位関係について、最大震度までの挙動への感度が小さく、設計計算モデルとほとんど差異なく評価できる。
- 今回検討したRC橋梁・高架橋の場合、杭の非線形化の影響は、等価固有周期を長周期化させる効果があり、軸力変動の影響は、降伏震度を低下させる効果がある。

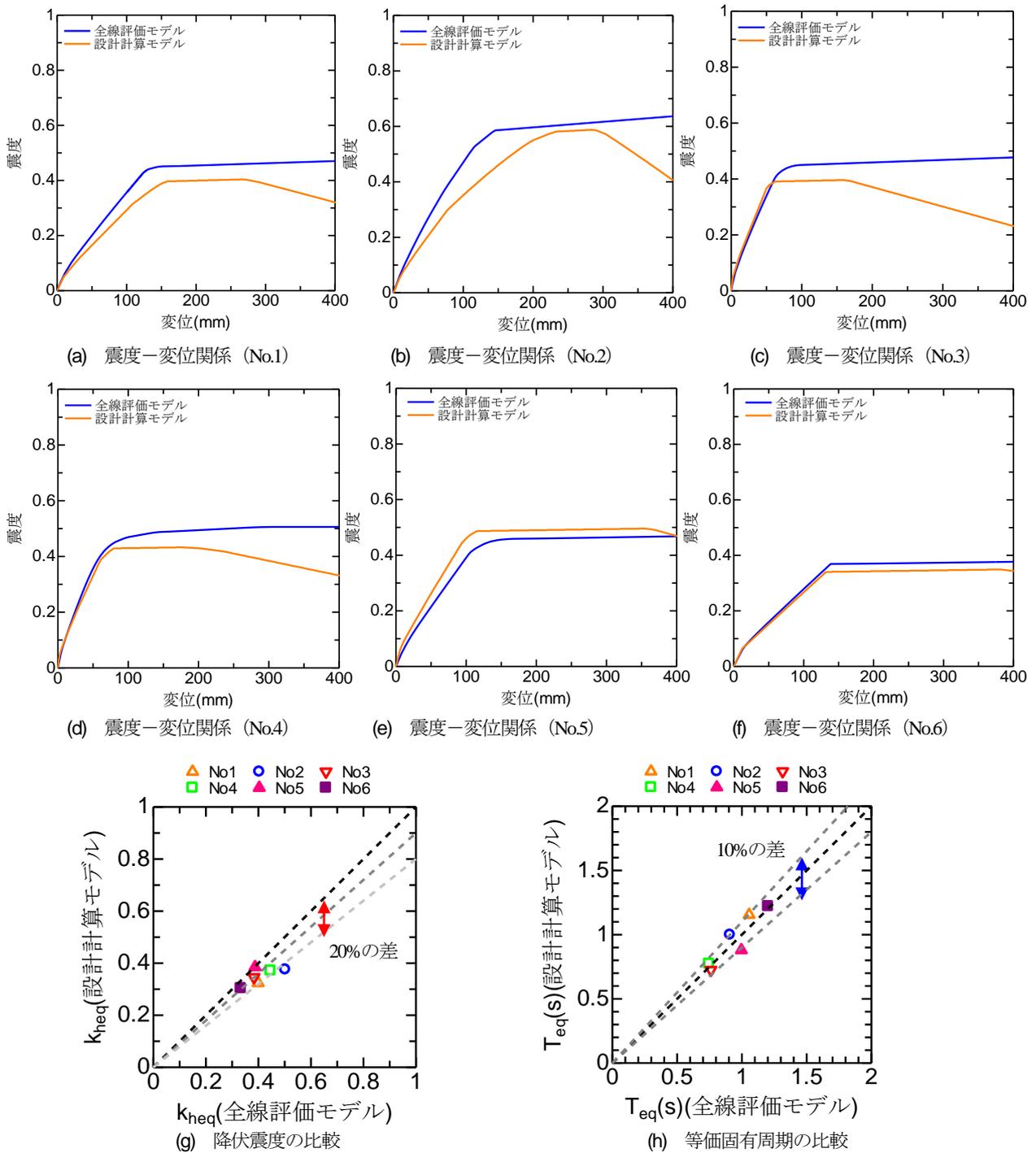


図-11 設計計算モデルと全線評価モデルとの非線形応答値の差異

- ・全線評価モデルと設計計算モデルと等価固有周期および降伏震度を比較したところ、等価固有周期は最大±10%程度の差が見られた。また、降伏震度は設計計算モデルより10~20%程度小さくなる。

以上のことから、数十~数百 km の路線全体をモデル化する場合においても、軸力変動と杭の非線形性は、構造物全体系の非線形応答特性に与える感度が大きいことを考慮するのが望ましいことがわかった。

なお、本研究の一部は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) 室野剛隆, 野上雄太, 宮本岳史: 簡易な指標を用いた構造物および走行車両の地震被害予測法の提案, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.3, pp.535-546, 2010.
- 2) 坂井公俊, 室野剛隆: 地震度の最大加速度と最大速度を用いた土木構造物の地震被害推定ノブグラムの改良, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.4 (地震工学論文集第 34 巻), pp.32-39, 2015.
- 3) 本山紘希, 坂井公俊, 井澤淳, 室野剛隆: 鉄道地震災害シミュレータの開発, 鉄道総研報告, Vol.30, No.5, pp.5-10, 2016.
- 4) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善出版, 2012.
- 5) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構

造物等設計標準・同解説 コンクリート構造, 丸善出版, 2004.

- 6) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造, 丸善出版, 2012.

(. . 受付)

SENSIBILITY ANALYSES FOR EFFICIENT MODELING OF LARGE NUMBER OF REINFORCED CONCRETE BRIDGES AND VIADUCTS

Kazunori WADA, Atsushi HINO, Yoshitaka MURONO, Hiroki MOTOYAMA
and Taku MATSUMOTO

Railway structures continuously exists in a long section of the railway line, so there is a possibility that the performance of the entire railway may be impaired by an earthquake even if the seismic damages are local. Therefore, it is important to extract the weak points by evaluating seismic capacity of the entire railway structures. Railway Technical Research Institute have developed the earthquake disaster simulator which can simulate seismic response analyses of the entire railway structures. However, it takes a lot of time and cost in order to model large number of structures. In this paper, we have organized the requirements for efficient modeling of large number of reinforced concrete bridges and viaducts. Furthermore, we have submitted the way of modeling which meets the requirements. Moreover, we have conducted sensibility analyses for the way of efficient modeling by making comparison between the model of the seismic design and the model established by the way of efficient modeling regarding non linear responses obtained by push over analyses.