

サイト特性強震動を用いた東北新幹線 RC1層ラーメン高架橋の地震応答解析

石橋 寛樹¹・秦 吉弥²・篠口 冴子³・秋山 充良⁴

¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

²正会員 博（工）大阪大学助教 大学院工学研究科地球総合工学専攻（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）

³学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

⁴正会員 博（工）早稲田大学教授 創造理工学部社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

1. はじめに

地震被害調査では、大きな損傷が生じたRC ラーメン高架橋に直近しており、かつ、同種の構造であっても全く被害が生じていない高架橋が観察されることがある。線状に同種の構造物が連続して存在する場合、基礎構造や表層地盤の地層構成は一般的に緩やかに変化しており、被害の生じたラーメン高架橋と被害の生じていないものとの差に特徴的な違いを見出せない。図-1は、2003年三陸南地震後に撮影した岩手県内の東北新幹線RC1層ラーメン高架橋（第5猪鼻高架橋）である。RC柱の構造諸元、あるいは地盤条件には大差がないにも関わらず、高架橋R13やR14の端部に位置するRC柱にはせん断によりかぶりコンクリートが剥落するほどの比較的大きな損傷が生じていた一方で、高架橋R12には損傷が観察されなかった¹⁾。

2003年三陸南地震後に行われた東北新幹線RC ラーメン高架橋の被害分析では、その数値解析に際し、対象高架橋との距離、および地盤条件の類似性から、防災科学研究所K-NET 強震記録の観測点を選定し、K-NETの地震記録をそのまま用いた動的解析が行われている¹⁾。これにより、RC柱が強震動で損傷することを再現できている。しかし、例えば、被害の生じたすぐ直近の同種のRC ラーメン高架橋を同じ強震動を用いて動的解析を行うと、実際には地震被害の観察されなかったRC ラーメン高架橋に、計算上、損傷が発生することになる。同種の構造が同様の地盤条件にあり、しかも非常に近い距離に存在しているにも関わらず、被害の有無が生じてしまうことを説明するのは容易ではない。

一方、著者らは、参考文献2)において、ほぼ同じ構造諸元を持ちながらRC1層ラーメン高架橋の地震被害に大きな差が生じた地点を取り上げ、隣接する高架橋位置でそれぞれの強震動を推定し、スペクトル特性などを比較している。具体的には、2011年東北地方太平洋沖地震について、JR長町駅付近の高架橋（南長町・中長



図-1 2003年三陸南地震による岩手県猪鼻高架橋（RC1層ラーメン）の地震被害

町・北長町高架橋で、以下、単に長町高架橋）周辺に着目し、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法³⁾により強震動を推定している。

本研究では、このようにして推定された長町高架橋周辺の強震動を用いて、RC1層ラーメン高架橋の非線形地震応答解析を行い、高架橋に生じる応答値と2011年東北地方太平洋沖地震で観察された地震被害の関係を考察する。そして、RC ラーメン高架橋の被害がある区間に集中的に生じたことや、それらの前後では被害が生じていないことの理由を高架橋位置で推定される強震動の違いから説明することを試みる。この種のアプローチにより高架橋の損傷の大小が説明できるのであれば、将来的には、同種のRC ラーメン高架橋が同様の地盤条件上にあるような場合でも、地震時に損傷し易い構造の位置を特定でき、また、例えば、既存構造物であれば、優先的に耐震補強を実施すべき地点を同定できるようになると期待される。

2. サイト特性を反映した強震動の作成

(1) 強震動の推定位置

2011年東北地方太平洋沖地震では、岩手県や宮城県にある東北新幹線の高架橋に被害が生じているが、特に、JR長町駅周辺では、500m程度の区間にあるRC1層ラーメン高架橋に被害が集中し、その前後の区間では大きな損傷は確認されていない^{3),4)}（図-2参照）。主な被害は、参考文献4)によれば、RC柱の軸方向鉄筋の降



図-2 長町高架橋の強震動推定地点

伏後に正負の繰り返し荷重を受けることによるコアコンクリートの損傷である。RC 単純桁を支持している柱高さの短い高架橋端部に位置するRC 柱においてB ランク（かぶりコンクリートの剥落やコアコンクリートの損傷など）、中間に位置するRC 柱でC ランク（残留ひび割れやかぶりコンクリートの一部の剥落など）の被害が報告されている。

本研究では、図-2 にある長町高架橋P_01-P_32 の32か所の位置で推定された強震動³⁾を用いてRC1 層ラーメン高架橋の地震応答解析を行う。地震基盤（工学的基盤以深の岩盤）から地盤地表までの地震動の増幅割合を示すため、図-3 にP_20 とその周辺におけるサイト増幅特性を示した。図-3 より、P_20 とその周辺におけるサイト増幅特性はそれぞれ特徴が異なっており、同じ強震動を用いてJR 長町駅周辺にある一連の高架橋の地震応答解析を行うことは適切でないことが分かる。

(2) 強震動推定方法²⁾

ここでは、各高架橋位置での強震動の推定方法の概略を示す。推定方法の詳細は、参考文献2)を参照されたい。P_01-P_32 について、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法³⁾を適用した。本計算手法では、SPGA モデル⁹⁾を特性化震源モデルとして採用することで、震源特性⁶⁾・伝播経路特性^{6),7)}・サイト増幅特性（図-3 参照）の積からフーリエ振幅を評価し、余

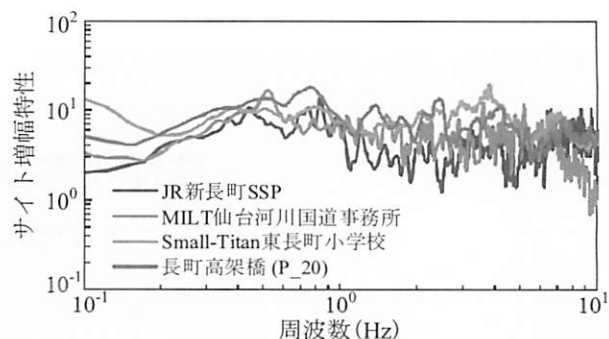


図-3 長町高架橋(P_20)とその周辺のサイト増幅特性

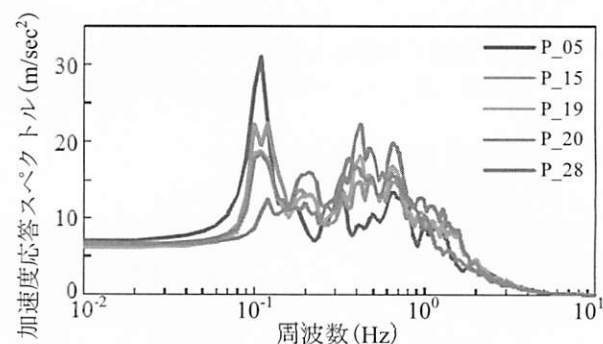


図-4 加速度応答スペクトル（橋軸直角方向）

震観測により得られた記録からフーリエ位相を評価した。評価したフーリエ振幅とフーリエ位相を用いて要素地震（小地震）による地震波を算定し、これに対してグリーン関数法⁸⁾に基づく地震波の重ね合わせ⁹⁾を行うことで、本震による地震動を水平二成分（橋軸方向および橋軸直角方向）について推定した。

3. サイト特性を考慮した強震動によるRCラーメン高架橋の地震応答解析

(1) 加速度応答スペクトルの比較

図-4 に各地点で推定された強震動（橋軸直角方向）の加速度応答スペクトル（減衰定数5%）の例を示した。さらに、P_01-P_32 で推定されたそれぞれの強震動について、後述する解析対象RC1 層ラーメン高架橋の1 次固有周期に対応する加速度応答スペクトルの分布を図-5 に示した。なお、固有周期の値は橋軸方向では0.51 秒、橋軸直角方向では0.55 秒である。

図-5 より、P_01-P_32 で推定される強震動を比較すると、RC ラーメン高架橋に損傷が生じた区間（図中、被災区間）の加速度応答スペクトルの値はその他の区間よりも大きい傾向にある。一方で、加速度応答スペクトルの値の大小と被害の有無が対応していない地点も見られ、特に、P_25 では、被災区間以上の加速度応答スペクトルが生じている。一質点自由度系であっても加速度応答スペクトルと非線形応答変位の関係には大きなばらつきが報告されており¹⁰⁾、以降では、非線形時刻歴応答解析の結果と地震損傷度の関係を比較する。

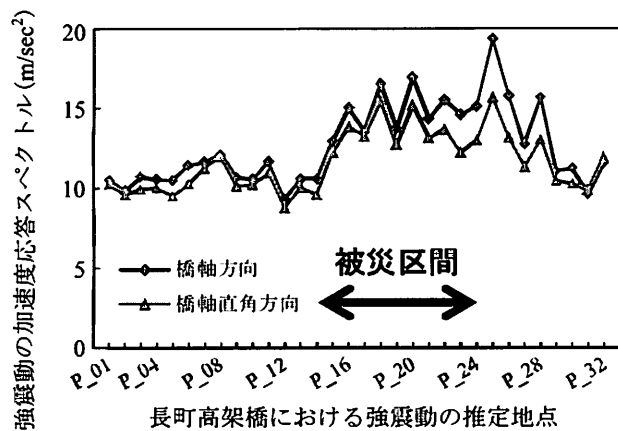


図-5 推定された強震動の1次固有周期に対応する加速度応答スペクトルの分布図

(2) 非線形時刻歴応答解析

P_01-P_32 で推定された32の強震動を用いて非線形動的解析を行い、地震時応答の大きさから高架橋RC柱の損傷度を比較する。本研究では、図-6に示すように3次元の多質点系骨組解析を採用し、RC柱の上下端に設けた塑性ヒンジの中心位置に与える非線形パネ（モーメント-回転角（ $M-\theta$ ）関係）により曲げによる非線形性を表現した。基礎はモデル化せずに、RC柱の下端を固定している。また、軸力変動の影響は考慮せず、 $M-\theta$ 関係の非線形パネの骨格曲線は、死荷重時の状態に対して定めている。なお、鉛直方向に地震動は入力していない。

本研究では、入力する強震動の違いによる非線形応答の大小に着目することから、第5猪鼻高架橋R15¹⁾の図面に基づき動的解析モデルを作成し、解析対象地点に関係なく、全ての場合で同じ高架橋モデルを使用する。その際、せん断による損傷は考慮せず、曲げによる非線形応答の比較のみを行う。つまり、入力される強震動の違いによる同一構造物の応答値の差を比較することで、地震被害が生じた位置で推定された強震動はこの種のラーメン高架橋に大きな応答を生じさせるのかを確認する。解析対象とする地点にあるRCラーメン高架橋は、全て1層構造であり、柱高さや構造諸元に大きな違いはなく、既往の研究⁴⁾に示される耐震性能もほぼ同等なものとして判断されるが、より詳細に地震被害とラーメン高架橋の応答値の対応を比較するためには、各高架橋の基礎の違いなどを反映した動的解析モデルを用いる必要がある。

数値積分にはNewmarkの β 法（ $\beta=1/4$ ）を使用し、減衰はRayleigh減衰とした。 $M-\theta$ 関係の骨格曲線は、鉄道構造物等設計標準（以下、鉄道標準）に従い算定し、Y点（降伏点）・M点（モーメント最大点）・N点（終局点（降伏荷重を維持する最大変形点））の三点を結ぶ直線とした。図-7に解析に用いた $M-\theta$ 関係の骨格曲線を

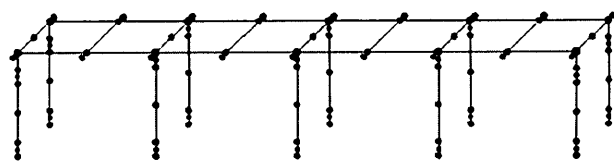


図-6 解析モデル

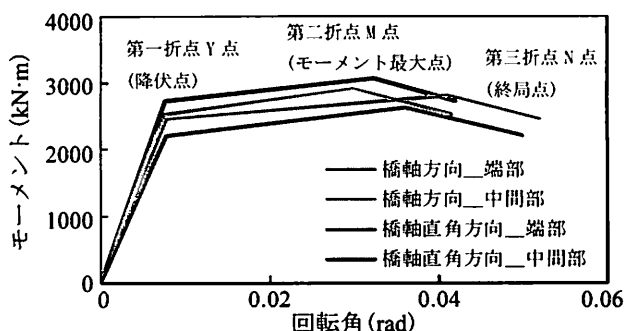


図-7 モーメント-回転角関係の骨格曲線

示す。履歴モデルはTakeda型に従うと仮定し、仮にN点を超える応答が生じたとしても、M点とN点を結ぶ直線をそのまま延ばし、それを骨格曲線として解析を続けた。N点を超えると軟化勾配は変化する可能性もあり、後述のN点以上の応答（損傷レベル4と判定）が生じた際の応答回転角の値は過小評価している可能性がある。

(3) 動的解析結果

図-8にP_05およびP_19で推定された強震動を入力した際の高架橋RC柱ヒンジ部の $M-\theta$ 関係の一例を示す。また、サイト特性を反映した各強震動について、高架橋内の全ての塑性ヒンジの中で生じる回転角の最大値を求め、鉄道標準が定める定義に従い損傷レベルを比較した。ここでは、損傷レベルは1-4の4段階であり、最大回転角が0点-Y点間にあるときを損傷レベル1、Y点-M点間にあるときを損傷レベル2、M点-N点間にあるときを損傷レベル3、N点以上のときを損傷レベル4と定義されている。図-8から推定されるように、桁を支持する端部のRC柱に大きな応答回転角が生じている。

P_01-P_32を用いた動的解析から得られた最大回転角の分布を図-9に示す。図-9より、全ての場合で曲げ降伏点を超える応答が生じている。曲げ降伏を若干超えた程度の応答では、地震後にひび割れはほとんど残留しないが、参考文献4)に示される被害状況と比べて、被災区間以外で大きな応答が生じる結果となった。しかし、相対的には、RCラーメン高架橋に被害が生じた被災区間ではその他の区間に比べて大きな最大回転角が発生し、特にP_18で推定された強震動は橋軸方向・橋軸直角方向ともに大きな応答値を生じさせている。

加速度応答スペクトルと非線形動的解析の結果（最大回転角）を図-5と図-9から比較すると、概ね同様な形状を示している。しかし、P_25で推定された強震動

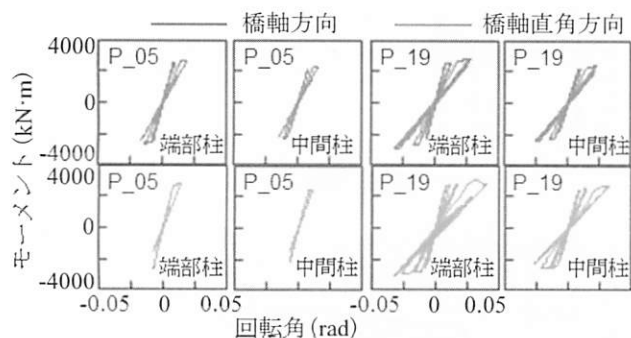


図-8 モーメント-回転角関係

の加速応答スペクトルが全地点の中で最大となっているのに対して、非線形動的解析では、P_18 やP_20 など被災区間に位置する地点で推定された強震動を入力したときに大きな最大回転角が発生している。振幅だけでなく位相特性も踏まえてサイトごとの強震動を再現した結果として、非線形動的解析による応答値は被災区間で大きく、高架橋が損傷していない区間で小さくなるなど、実際の被害の有無に概ね対応した結果が得られている。幾つかの仮定を設けた上での検討結果であり、特に今回は、解析対象とした高架橋の類似性から構造物のモデルは変化させず、曲げによる非線形応答の大小と強震動作成地点の関係、および強震動作成地点での地震被害の有無を関係付けている。今後、構造解析モデルの高度化や、他の地震被害を対象とした継続的な検証が必要ではあるが、本研究での基礎検討から、サイト特性の違いを考慮した強震動と構造物の地震応答解析により、線状構造物の中で大きな地震被害が生じる地点や区間を把握できる可能性が示された。

4. まとめ

サイト特性を踏まえた強震動による非線形動的解析を実施した。その結果、2011 年東北地方太平洋沖地震で被害の生じたRC ラーメン高架橋は、被害の生じなかった地点にある高架橋に比べて、計算上、大きな応答が生じる結果となった。

この基礎検討により、サイト特性を踏まえた強震動と動的解析により、線状に続く構造物の中で、特に耐震上の配慮が必要とされる構造物を同定できる可能性が示された。今後、強震動の推定精度を改善し、また、橋梁モデルを精緻化するとともに、他の地震被害の例を通した検証を重ねる必要がある。

参考文献

- 1) (社)土木学会：コンクリート委員会三陸南地震被害分析小委員会：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，コンクリートライブラリー，No.114, 2004.
- 2) 野津厚，長尾毅，山田雅行：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良－因果性を満足する地震波の生成－，土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.
- 3) 秦吉弥，秋山充良，高橋良和，後藤浩之，野津厚，一井康二：2011 年東北地方太平洋沖地震による長町高架橋被災区間での地盤震動特性の評価，土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集，I-224, pp.447-448, 2013.
- 4) 東日本旅客鉄道：特集「東北地方太平洋沖地震と鉄道構造物」，Structural Engineering Data (SED), No. 37, 2011.11
- 5) 野津厚：2011 年東北地方太平洋沖地震を対象としたスーパーアスペリティモデルの提案，日本地震工学会論文集，Vol.12, No.2, pp.21-40, 2012.
- 6) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of theradiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 7) 佐藤智美，巽誉樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会構造系論文集，No.556, pp.15-24, 2002.
- 8) 野津厚，盛川仁：表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法，地震第 2 輯，Vol.55, pp.36-374, 2003.3
- 9) 入倉孝次郎，香川敬生，関口春子：経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良，日本地震学会秋季大会講演予稿集，No.2, B25, 1997.
- 10) 秋山充良，土井充，松中亮治，鈴木基行：構造系の信頼性を考慮した RC 橋脚の耐震設計に用いる安全係数の試算，土木学会論文集，Vol.718/V-57, pp.1-17, 2002.11
- 11) 小林將志，倉岡希樹，今井勉，菱田雅樹：東北地方太平洋沖地震における RC ラーメン高架橋，柱の損傷度と復旧性に関する分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, pp.1141-1146, 2012.

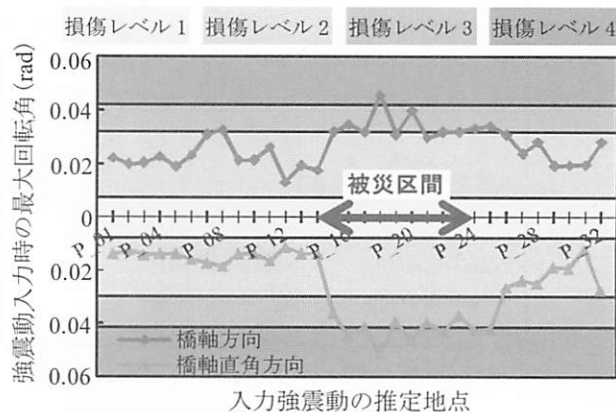


図-9 各対象地点で推定された強震動を入力した際に生じる最大回転角の分布図