

論文 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被害分析に関する基礎的研究

石橋 寛樹^{*1}・秦 吉弥^{*2}・秋山 充良^{*3}

要旨：鉄道高架橋のような線状に続く構造物では、構造諸元や地盤条件が同様であっても、構造物の地震被害に大きな差が生じることがある。本研究では、隣接する RC ラーメン高架橋であっても、高架橋のそれぞれのサイト特性を反映した強震動を作成し、それらを用いた地震応答解析を行った。そして、過去の地震において、RC ラーメン高架橋に大きな損傷が生じた地点では、地震時応答の計算値が大きくなることを確認した。幾つかの仮定を設けた上での検討結果ではあるが、サイト特性の違いを考慮した強震動と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同定できる可能性を示した。

キーワード：RC ラーメン高架橋, サイト特性, 強震動, 地震応答解析, 地震被害

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 年三陸南地震後に岩手県内の第 5 猪鼻高架橋で撮影した東北新幹線 RC1 層ラーメン高架橋である。RC 柱の構造諸元、あるいは地盤条件に大差がないにもかかわらず、高架橋 R13 や R14 の端部の 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、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かかわらず、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) や 3) 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



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

を比較している。具体的には、2003 年三陸南地震において被害の生じた猪鼻高架橋と被害の生じなかった中曽根高架橋について、高架橋位置の強震動をサイト特性置換手法²⁾により推定した。また、2011 年東北地方太平洋沖地震については、JR 長町駅付近の高架橋 (南長町・中長町・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猪鼻高架橋・中曽根高架橋、および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 2003 年三陸南地震あるいは 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地点や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それぞれの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、地震時に損傷しやす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。

*1 早稲田大学 創造理工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

*2 大阪大学 大学院工学研究科地球総合工学専攻助教 博(工)

*3 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科教授 博(工) (正会員)

2. サイト特性を反映した強震動の作成

2.1 強震動の推定位置

2003年三陸南地震による強震動の作用によって、岩手県花巻市にある東北新幹線の第5猪鼻高架橋にかぶりコンクリートの一部が剥落するほどのせん断による損傷が生じている¹⁾。一方で、猪鼻高架橋近くに位置する第1中曽根高架橋は、2003年三陸南地震により損傷していない。猪鼻高架橋と中曽根高架橋の距離は近く、構造諸元や地盤条件がほぼ同じRC1層ラーメン高架橋である(図-2(a)参照)。また、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^{4), 5)}(図-2(b)参照)。主な被害は、参考文献5)によれば、RC柱の軸方向鉄筋の降伏後に正負の繰り返し繰り返し載荷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(a)にあるI_01(猪鼻高架橋)、およびN_01(中曽根高架橋)の2か所、および図-2(b)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^{2), 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(a)にI_01とN_01におけるサイト増幅特性^{6), 7)}を、図-3(b)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、I_01とN_01、および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猪鼻高架橋と中曽根高架橋、あるいは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。



(a) 猪鼻高架橋と中曽根高架橋の強震動推定地点

2.2 強震動推定方法^{2), 3)}

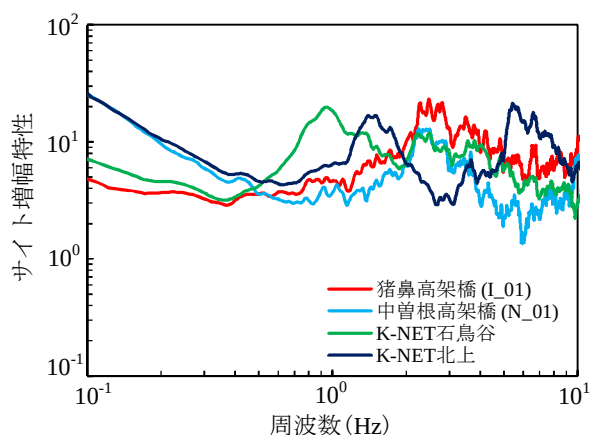
ここでは、各高架橋位置での強震動の推定方法の概略を示す。推定方法の詳細は、参考文献2)や3)を参照されたい。I_01とN_01については、サイト特性置換手法²⁾により強震動を推定している。具体的には、推定点(I_01もしくはN_01)とその周辺の基準観測点(K-NET 石鳥谷もしくはK-NET 北上)におけるサイト増幅特性(図-3(a)参照)の比率(推定点/基準観測点)の計算を行い、この比率に対して基準観測点と推定点の距離の違いによる補正^{8), 9)}を施し、さらに基準観測点での本震観測記録のフーリエ振幅を掛け合わせることで、推定点でのフーリエ振幅を算定した。そして、算定したフーリエ振幅と推定点で得られた中小地震観測記録のフーリエ位相に基づくフーリエ逆変換(因果性を考慮)³⁾を行うことによって、推定点における強震動を水平二成分(橋軸方向および橋軸直角方向)について算定した。

一方、P_01-P_32については、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¹⁰⁾を特性化震源モデルとして採用することで、震源特性⁸⁾・伝播経路特性^{8), 9)}・サイト増幅特性(図-3(b)参照)の積からフーリエ振幅を評価し、余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¹¹⁾に基づく地震波の重ね合わせ¹²⁾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。

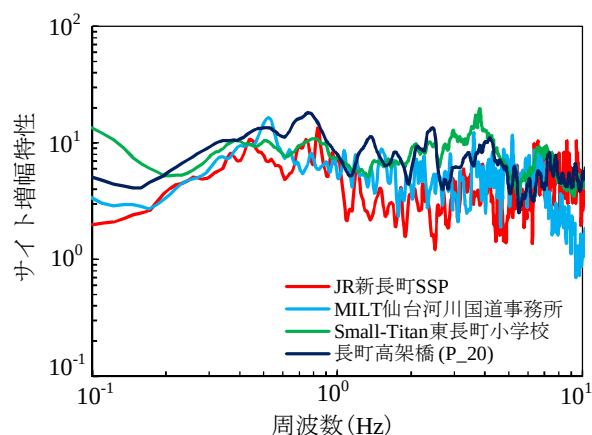


(b) 長町高架橋の強震動推定地点

図-2 猪鼻高架橋と中曽根高架橋および長町高架橋の強震動推定地点



(a) 猪鼻高架橋 (I_01)・中曽根高架橋 (N_01) とその周辺



(b) 長町高架橋 (P_20) とその周辺

図-3 サイト増幅特性の比較

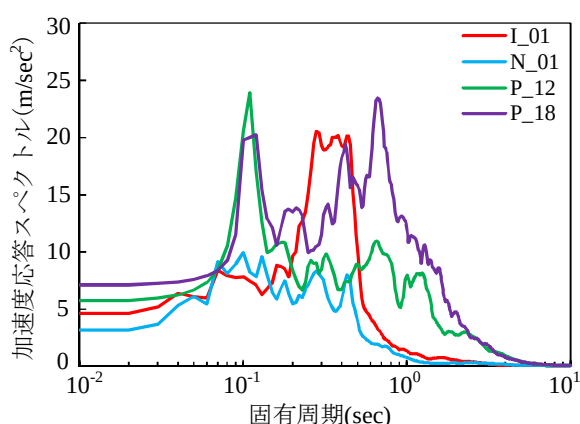


図-4 加速度応答スペクトル

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

3.1 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（減衰定数は 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-4 において I_01 と N_01 を比較すると、RC1 層ラーメン高架橋の固有周期の範囲（0.5 秒近辺）では、2003 年三陸南地震で高架橋に被害が生じた位置での強震動（I_01）の加速度応答スペクトルが大きくなっている。また、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いる¹³⁾。そこで以降では、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。

3.2 非線形時刻歴応答解析

I_01 と N_01、および P_01-P_32 で推定された 34 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バネ（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、 $M-\theta$ 関係の非線形バネの骨格曲線は、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^{5), 14)}に示される耐震性能もほぼ同等なものと判断されるが、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

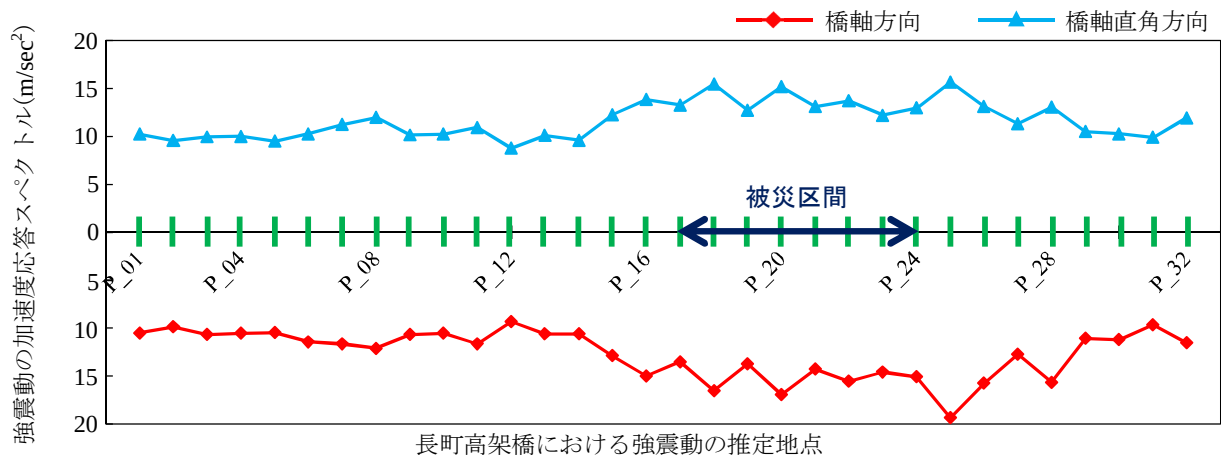


図-5 推定された強震動の1次固有周期に対応する加速度応答スペクトルの分布図

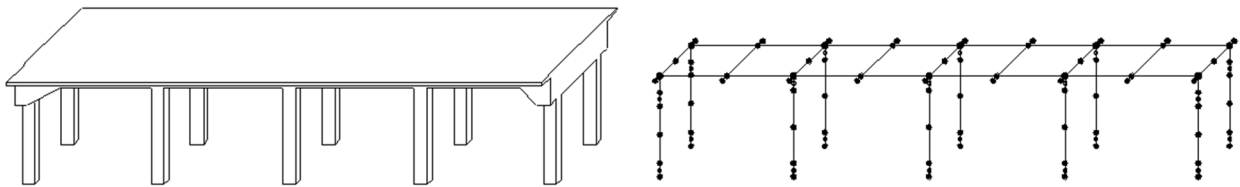


図-6 解析モデル

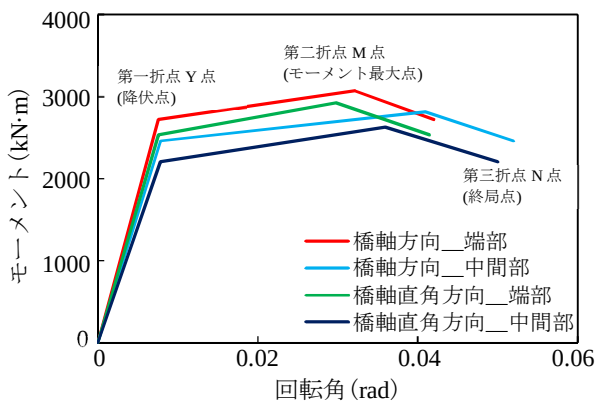


図-7 モーメント-回転角関係の骨格曲線

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）が生じているときの応答塑性率の値は過小評価している可能性がある。

3.3 動的解析結果

図-8 に P_08、P_17 および P_32 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（橋

軸方向）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。表-1 に L_01 と N_01、および P_01 と P_18 において推定された強震動に対する応答塑性率および損傷レベルを示す。参考として、橋軸方向ならびに橋軸直角方向における 1 次固有周期に対する加速度応答スペクトルも示した。なお、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おり、表-1 に示す応答塑性率は全て端部の RC 柱で生じたものである。

図-8 および表-1 より、L_01 と N_01 において推定された強震動による非線形動的解析結果を比較すると、橋軸方向・橋軸直角方向ともに L_01の方が N_01よりも回転角が大きく算定された。L_01 と N_01 の強震動により高架橋には損傷レベル 1 が生じる。2003 年三陸南地震では、猪鼻高架橋には、端部に位置する RC 柱にせん断による損傷が発生している。これらの RC 柱の曲げ耐力とせん断耐力の比（曲げせん断耐力比）は 0.7 程度であり、表-1 に示す猪鼻高架橋の応答回転角が作用しているときのせん断力（800kN 程度）は部材のせん断耐力を上回る¹⁾。一方、中曽根高架橋の RC 柱は、せん断破壊先行

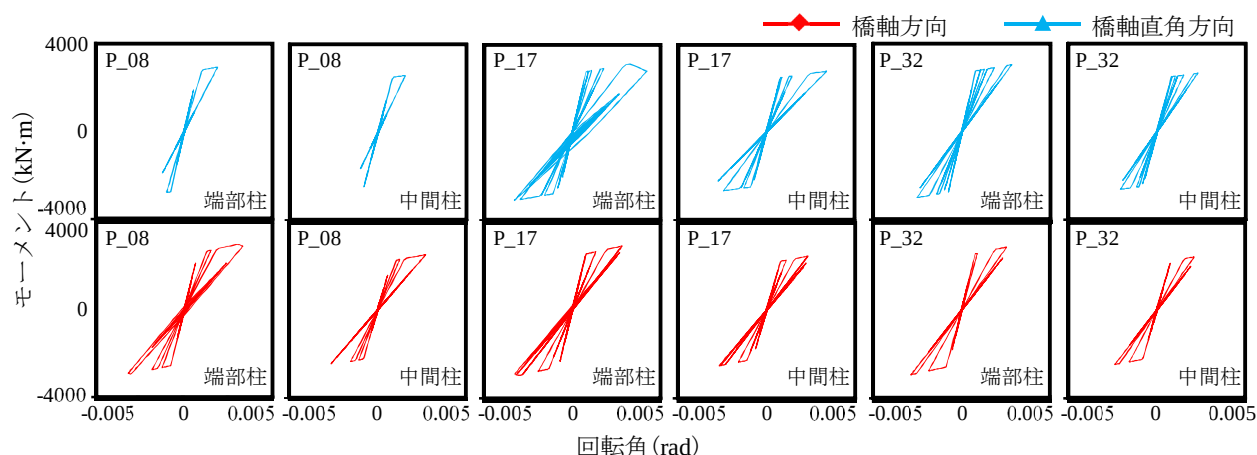


図-8 モーメント-回転角関係

表-1 応答塑性率と損傷レベル

地点	加速度応答スペクトル(m/sec ²)		橋軸方向 最大回転角 (10 ⁻² rad)	橋軸直角方向 最大回転角 (10 ⁻² rad)	橋軸方向		橋軸直角方向	
	橋軸方向	橋軸直角方向			応答塑性率	損傷レベル	応答塑性率	損傷レベル
I_01	6.10	5.06	0.60	0.66	0.80	1	0.87	1
N_01	4.95	2.50	0.30	0.53	0.40	1	0.70	1
P_01	10.51	10.26	2.22	1.39	2.93	2	1.84	2
P_18	16.51	15.47	4.58	5.11	6.05	4	6.78	4

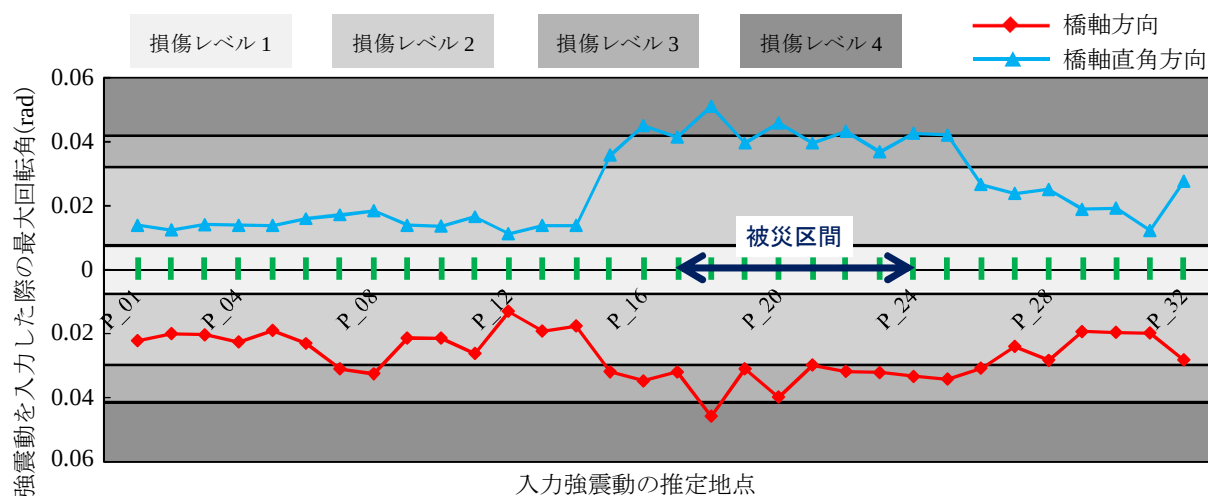


図-9 長町高架橋における各対象地点で推定された強震動を入力した際に生じる最大回転角の分布図

型ではない¹⁵⁾。I_01 と N_01 の各サイト特性を反映した強震動を用いることにより、三陸南地震で損傷が生じた猪鼻高架橋、および損傷が生じなかった中曽根高架橋の地震後の状況を概ね説明可能であるが、より詳細に地震被害との対応を検討するためには、前記したように、各高架橋の諸元の違いを考慮した精緻な解析が必要である。

P_01-P_32 を用いた動的解析により得られた最大回転角の分布を図-9 に示す。図-9 より、全ての場所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 5) 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、2003 年三陸南地震、あるいは 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

- (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.
- Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: A practical method to estimate strong ground motions after an earthquake based on site amplification and phase characteristics, *Bulletin Seismological Society of America (BSSA)*, Vol.101, No.2, pp.688-700, 2011.
- 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.
- 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.
- 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
- 秦吉弥，野津厚，中村晋，高橋良和，後藤浩之：拡張型サイト特性置換手法に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震による新幹線橋梁被災地点での地震動の推定，第 14 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.227-234, 2011.
- Hata, Y., Nozu, A., Nakamura, S., Takahashi, Y. and Goto, H.: Strong motion estimation at the elevated bridges of the Tohoku Shinkansen damaged by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake based on extended site effects substitution method, *Prof. of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, pp.418-429, Tokyo, Japan, 2012.
- Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 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.
- 野津厚：2011 年東北地方太平洋沖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.
- 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
- 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.
- 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
- 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.
- 小林將志，篠田健次，水野光一朗，野澤伸一郎，石橋忠良：東北地方太平洋沖地震により損傷した新幹線 RC ラーメン高架橋に関する被害分析，土木学会論文集 A1, Vol.70, No. 4, pp. I_688-I_700, 2014.