

設計地震動を超える外力に対する鉄道橋梁の 成立性と初期建設コストに関する研究

寶地 雄大¹・室野 剛隆²

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）

²正会員 工博 （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）

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、 $M_w9.0$ という我が国観測史上最大の地震であった。この地震を経験して、いわゆる「想定外の地震」に対する残余のリスクを強く認識することになった。また、中央防災会議によれば今後30年間の南海トラフ巨大地震の発生確率は60～70%といわれており¹⁾、巨大地震に対する対策が喫緊の課題となっている。このような中で、鉄道構造物の耐震基準²⁾では設計地震動を超える地震に対して構造物が破滅的な状況に至らないことを要求する「危機耐性」の概念が導入されている。危機耐性は、設計では考慮できない不測の事態への配慮を求めるものである。危機耐性に対しては、西村、室野ら³⁾や齊藤、室野⁴⁾らが提案している構造的な対応以外にも、耐震計画なども含めたソフト的な対応も求められる。一方では、従来の耐震設計の延長線上で想定を超える地震動に対抗する考え方もある。宮路、川島ら⁵⁾は、道路橋を対象に設計地震動を超える地震動を想定し、設計地震動の大きさと初期建設コストの観点から検討を行っている。ただし、鉄道におけるそのような検討はなく、その場合、鉄道構造物が現実的に成立するか疑問がある。

そこで、本稿では、一般的に用いられる鉄道橋梁を対象として、鉄道の耐震基準に示される設計地震動を1.5倍、2.0倍と増加させた試設計を行うことで、構造物の成立性及び地震作用と初期建設コストの関係について試算した。

2. 検討条件

(1) 対象構造物および地盤の概要

図-1に検討対象とした構造物の一般図を示す。対象構造物は、鉄道橋梁のうちRCラーメン高架橋と桁式高架橋を対象とした。なお、ここでは、新幹線複線用構造物を想定している。RCラーメン高架橋は、径間長10.0mの1層4径間とし、地中梁、RC杭を有する1柱1杭形式の構造諸元とした。また、ラーメン高架橋の隣接桁は、スパン10mのRC単純T 桁である。次に、桁式高架橋は、群杭基礎を有する高さ8mの壁式橋脚とし、隣接桁はスパン20mのRC単純T 桁とした。両構造物の杭基礎は、支持層に根入れした完全支持杭とし、杭長43mのRC場所打ち杭である。各部材の材料諸元は、鉄筋はSD390を用い、く体と基礎にはそれぞれ 27N/mm^2 と 30N/mm^2 を設計基準強度とするコンクリートを用いた。

地盤条件は、砂、礫、粘土互層の鉄道の耐震基準におけるG4地盤（普通～軟弱地盤）とした。また、地震動によって地盤が液状化しないものとした。

(2) 解析条件および検討ケース

構造物の設計は、鉄道構造物の耐震設計において一般的に用いられる静的非線形解析を使用して行う。そのため、構造物のモデル化は部材をはり要素、地盤をばね要素とした分離型の質点系モデルとした。また、要求性能は、安全性を満足することを条件とし、柱、杭基礎、支承等の構造物を構成する各部材が損傷レベル3、すなわち、荷重変位関係の中で、構造物の最大応答変位がN点（降伏耐力を維持でき

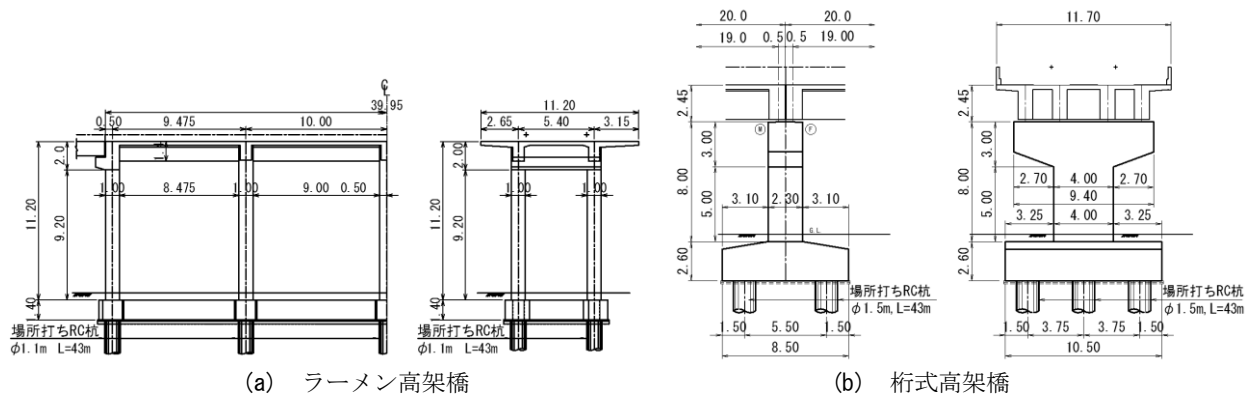


図-1 対象構造物の一般図

表-1 検討ケース

対象構造物	RC ラーメン高架橋			桁式高架橋		
地震作用の倍率※1	1.0 倍	1.5 倍	2.0 倍	1.0 倍	1.5 倍	2.0 倍
Case	R1.0	R1.5	R2.0	P1.0	P1.5	P2.0

※1：L2地震動スペクトルⅡに対する地震作用の倍率を示している。

表-2 設計された構造物の諸元

Case	R1.0	R1.5	R2.0	P1.0	P1.5	P2.0
柱 (く体)	断面寸法※1,2	□1.0×1.0	□1.3×1.3	□1.6×1.6	□4.0×2.3	□4.5×3.0
	主鉄筋※3	D32-9	D32-12	D32-15	D38-31, 2 段	D38-35, 2 段
	帯鉄筋	D16, 2.0 組 ctc100	D19, 1.5 組 ctc100	D22, 1.5 組 ctc100	D25, 5.5 組 ctc125	D25, 6.0 組 ctc125
杭	断面寸法※1,4	φ1.1	φ1.5	φ2.0	φ1.5-6	φ1.5-9
	主鉄筋	D38-12	D38-24	D51-24	D32-26	D51-20
	帯鉄筋	D22, 1 組 ctc125	D29, 1 組 ctc125	D32, 1 組 ctc125	D25, 1 組 ctc150	D32, 1 組 ctc150

※1：寸法の単位は m. ※2：橋脚は線路直角方向幅×線路方向厚で表記. ※3：線路方向で有効となる鉄筋を表記.

※4：橋脚は杭径-本数で表記

る最大変形点)に到達していないことを条件とした。ここで、構造物の応答値の算定および照査は、橋軸方向および橋軸直角方向の2方向を行っている。さらに、構造物はく体、柱が主たる損傷箇所となるように照査において構造物の諸元を決定している。

次に、検討ケースは、耐震基準に示されているL2スペクトルⅡに対する所要降伏震度スペクトルを1.0倍、1.5倍、2.0倍とした表-1に示す6ケースを実施した。

3. 地震作用に対する構造物の成立性

本章では、2章の条件で行った試設計の結果を概観するとともに、地震作用の増加に対して構造物の成立性について検証を行う。

(1) 地震作用と構造物諸元の関係

表-2に試設計によって得られた各検討ケースの構

造物の諸元を示す。各ケースともに地震作用の増加に伴い部材断面寸法が増加していることが分かる。地震作用が1.0倍と2.0倍の場合について、柱、く体の寸法を比較すると、ラーメン高架橋では、 $1.6\text{m} \times 1.6\text{m} / (1.0\text{m} \times 1.0\text{m}) = 2.56$ 倍、桁式高架橋では $5.0\text{m} \times 3.8\text{m} / (4.0\text{m} \times 2.3\text{m}) = 2.07$ 倍となった。桁式高架橋は、壁式橋脚という構造形式の特性上、橋軸直角方向の剛性が大きく、地震作用の増加に対して橋軸直角方向の断面寸法の増加は小さい。また、杭の総断面積について比較すると、ラーメン高架橋では1柱1杭形式であることから杭径の増加が桁式高架橋に比べ大きく3.31倍、桁式高架橋では1.5倍となった。

(2) 地震作用と構造物の応答値の関係

各ケースの応答値一覧を表-3に、地震作用の倍率に対する降伏震度の倍率を図-2に示す。なお、図-2には宮路、川島らが行った道路橋（高さ約12m、基

表-3 検討ケース

Case	R1.0	R1.5	R2.0	P1.0	P1.5	P2.0
降伏震度	0.393	0.682	1.003	0.460	0.685	0.937
降伏変位(mm)	100	87	84	79	73	82
等価固有周期(sec)	1.009	0.714	0.579	0.813	0.639	0.577
応答塑性率	5.12	5.16	4.54	5.57	5.72	5.34
最大応答変位(mm)	512.2	448.5	381.7	441.1	417.6	435.2

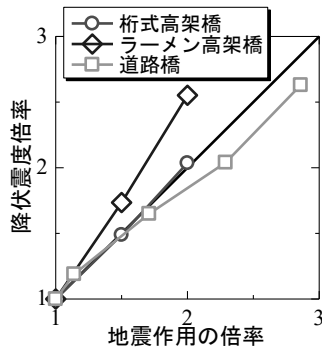
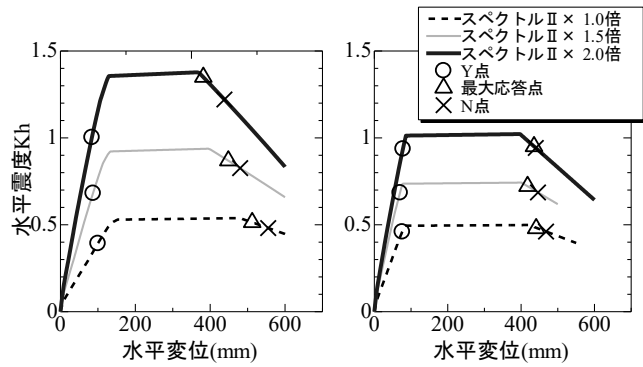


図-2 地震作用の倍率と降伏震度の倍率

図-3 荷重変位曲線
(a) ラーメン高架橋 (b) 桁式高架橋

礎杭は12m、スパン40mの5径間連続版桁）を対象とした検討結果も合わせて示している。桁式高架橋と道路橋は、地震作用の倍率と降伏震度の倍率はほぼ1:1の関係となっている。このことから、設計基準によらず橋脚式の構造形式では地震作用の倍率と降伏震度の倍率は同様の傾向を示すものと考えられる。一方、桁式高架橋とラーメン高架橋を比較すると、ラーメン高架橋では、地震作用の倍率に対して、降伏震度の倍率が大きくなるのが分かる。次に、荷重変位曲線を図-3に示す。図-3(b)の桁式高架橋では、負勾配となる変位が地震作用の大きさによらずほぼ一定であるが、図-3(a)のラーメン高架橋では地震作用の増加とともに負勾配となる変位が減少している。このことから、ラーメン高架橋は地震作用の増加に伴い変形性能が低下していることが分かる。これは、地震作用の増加とともに、柱上部を剛結する横梁の高さが増加（2.0m→2.4m→3.2m）することで柱長さが減少したためと考えられる。また、変形性能が低下することで地震作用のエネルギーを吸収するために降伏震度を高める必要がある。そして、これにより等価固有周期が低下し地震作用に対して構造物が応答し易くなることで、さらに降伏震度を高める必要が生じる。そのため、図-2に示すとおりラーメン高架橋では地震作用の倍率以上に降伏震度の倍率が高く、桁式高架橋と比較して表-2のように部材断面寸法の増加倍率も大きくなったものと考えられる。

以上の結果より、地震作用の増加に対して部材寸

法を増加させることで、地震作用が設計地震動の2.0倍となったとしても安全性を満足する構造物が成立することが確認された。

4. 地震作用に対する初期建設コスト

本章では、国土交通省土木工事積算基準⁶⁾等の標準単価に基づき、3章で検討を行った各ケースについて、初期建設コストを算出することで、地震作用と初期建設コストの関係を明らかにする。

建設コストの算定は、施工費、材料費、仮設費等対象とする構造物の建設に必要な費用をすべて考慮することとした。ただし、上部工（隣接桁）および支承部は、地震作用の大きさによらず変化しないものとした。図-4に初期建設コスト全体のうち各部材のコスト割合を示す。ラーメン高架橋は、柱・梁、杭がそれぞれ3～5割を占めている。一方、桁式高架橋は、上部工、杭がそれぞれ3～4割を占めていることがわかる。次に、図-5に地震作用と初期建設コストの関係を示す。また、同図には宮路、川島らの検討結果を合わせて示している。図-5からラーメン高架橋は、地震作用倍率と同程度の倍率で初期建設コストが増加することが分かる。一方、桁式高架橋および道路橋は、地震作用に対して建設コストは1:1の関係では増加しないことが分かる。これは、初期建設コストのうち上部工のコストの割合が高く、道路橋でも同様に上部工が高い割合を占めていることに起因する。桁式高架橋は、ラーメン高架橋より地

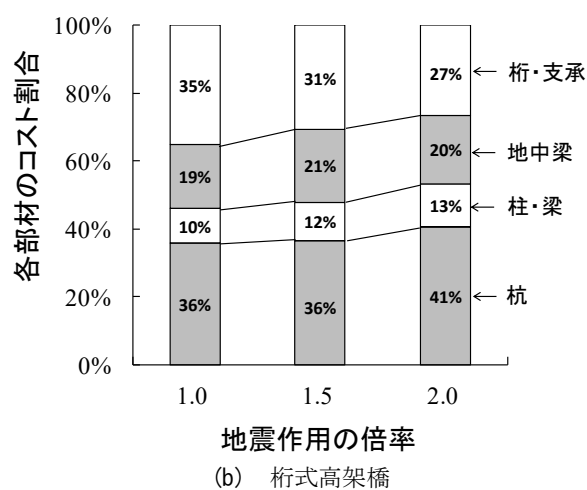
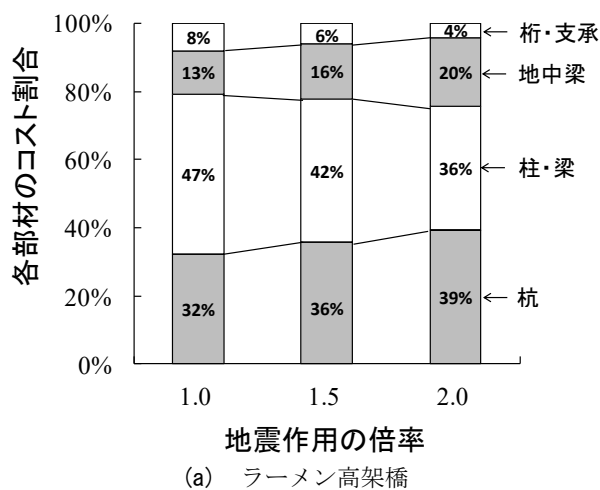


図-4 地震作用の倍率に対する各部材コストの割合

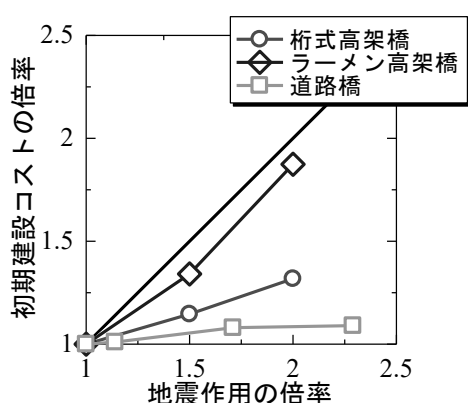


図-5 地震作用の倍率と初期建設コストの倍率

震作用に対する初期建設コストの増加倍率が小さいため、構造形式によって地震作用と初期建設コストの増加倍率が異なることが明らかとなった。

5. おわりに

本稿では、ラーメン高架橋と桁式高架橋を対象に設計地震動を大きくした場合の構造物の成立性と初期建設コストについて試算し、断面寸法等を増加させることで構造物が成立することが明らかとなった。また、地震作用の倍率に対する初期建設コストの倍率は、ラーメン高架橋では1:1の関係であるのに対し、鉄道橋梁では1:0.7程度であり、上部構造との結合方式による差異が見られた。

しかしながら、本検討で行った設計地震動より大きな地震動を想定し、それに耐える構造物を設計するという従来の耐震設計の考え方では、建設コストが飽和することなく右肩上がりに増加し現実的ではない。また、ある規模の地震を想定して耐震設計を行う限り、それを超える地震動によるリスクを無くすことはできない。そのため、これからの耐震設計のあり方は、設計において制御することが困難な部

分が存在することを認め、従来の耐震設計において十分な耐震裕度を持った設計行いつつ、危機耐性の向上を図ることで、巨大地震に対して被害の最小化を目指す必要がある。

耐震設計や耐震補強により耐震裕度を向上する技術は、これまで様々な研究がされ実用化されてきた。しかし、危機耐性は新しい概念であり、その実現には未だ様々な検討が必要な段階である。そのため、今後は危機耐性の向上に関する技術について、ハード・ソフトの両面から検討の深度化を図っていく。

参考文献

- 1) 南海トラフ巨大地震について（最終報告）：中央防災会議 防災対策推進検討会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ，2013。
- 2) 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。
- 3) 西村隆義，室野剛隆，本山紘希，五十嵐晃：危機耐性を高める自重補償構造の提案と成立性，第18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，2015。
- 4) 齊藤正人，室野剛隆，本山紘希：地震時における構造物の倒壊に対する危機耐性機構の一考察，第70回土木学会全国大会概要集，2015。
- 5) 宮路健太郎，川島一彦：市民から見た橋梁の耐震性能目標，第9回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2006。
- 6) （財）建設物価調査会：土木工事積算標準単価（平成27年度版），2015。