

設計地震動を上回る地震動に対する鉄道橋梁の初期建設コストに関する研究

(公財) 鉄道総合技術研究所

正会員 寶地 雄大 室野 剛隆

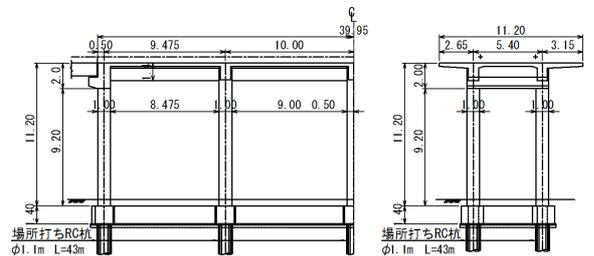
パシフィックコンサルタンツ (株)

正会員 ○高橋 健

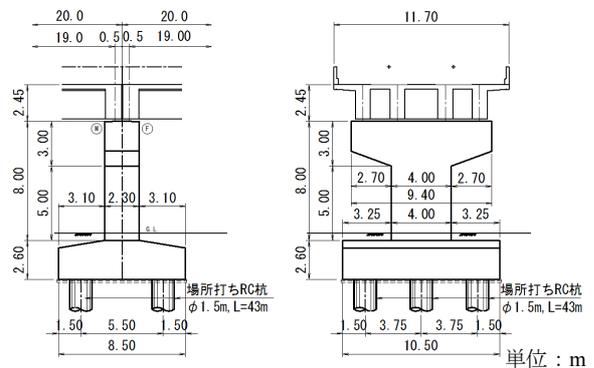
1. はじめに 近年，発生が危惧されている南海トラフ巨大地震や首都直下地震などの設計地震動を上回る可能性がある巨大地震に対する対策が喫緊の課題となっている．このような，巨大地震に対して被害規模を最小化するための方法として考えられる最も単純な着想は，設計地震動の数倍の地震動に対して従来の耐震設計法を適用することである．その際には，宮路，川島ら¹⁾²⁾が，道路橋を対象に行った地震動の大きさと構造物の初期建設コストに関する研究が参考となる．そこで，本稿では，設計地震動を上回る地震動に対する耐震設計の考え方を議論するための基礎的な資料を得ることを目的に，鉄道構造物で標準的なラーメン高架橋と桁式橋梁を対象として，鉄道の耐震基準³⁾に示す設計地震動を大きくした場合の構造物の成立性および地震作用と初期建設コストの関係について試算を行った．

2. 対象構造物および検討ケース 図-1に検討対象とした構造物の一般図を示す．対象構造物は複線用の1層4径間のRCラーメン高架橋および単純RCT桁を支持するRC壁式橋梁とした．構造物の高さは約10m，地盤条件は砂，礫，粘土互層のG4地盤(普通～軟弱地盤)，基礎杭は43mの場所打ち杭を想定した．また，鉄筋はSD390を用い，く体と基礎にはそれぞれ27N/mm²と30N/mm²を設計基準強度とするコンクリートを用いた．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質点モデルとし，非線形応答スペクトル法³⁾を用いて安全性の照査を実施する．また，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. 検討結果 表-2に各検討ケースにおける構造物の諸元を示す．地震作用を2.0倍とした場合の柱，橋脚の寸法は，ラーメン高架橋では1.6×1.6／(1.0×1.0) = 2.56倍，橋梁では5.0×3.8／(4.0×2.3) = 2.07倍となった．また，杭の総断面積は，ラーメン高架橋では3.31倍，橋梁では1.5倍となった．



(a) ラーメン高架橋



(b) 桁式橋梁

図-1 対象構造物の一般図

各ケースの応答値一覧を表-3に，地震作用倍率と降伏震度倍率を図-2に示す．なお，図-2には宮路，川島らが

表-1 検討ケース

対象構造物	RC ラーメン高架橋			RC 壁式橋脚			
	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 ^{*2}	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．※2: 全ケースとも，く体・柱が先行降伏になるように構造諸元を設定

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	□5.0×3.8
	主鉄筋 ^{*3}	D32-9	D32-12	D32-15	D38-31, 2段	D38-35, 2段	D38-39, 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	D25, 6.0組 ctc125
杭	断面寸法 ^{*1,4}	φ1.1	φ1.5	φ2.0	φ1.5-6	φ1.5-6	φ1.5-9
	主鉄筋	D38-12	D38-24	D51-24	D32-26	D51-20	D51-24
	帯鉄筋	D22, 1組 ctc125	D29, 1組 ctc125	D32, 1組 ctc125	D25, 1組 ctc150	D32, 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

キーワード 鉄道構造物，超過地震動，要求性能，初期建設コスト，危機耐性，耐震設計

連絡先 〒101-8462 東京都千代田区神田錦町三丁目22番地 パシフィックコンサルタンツ(株) TEL:03-6777-1823

行った道路橋（高さ約 12m，基礎杭は 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。鉄道橋梁と道路橋は，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の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，橋梁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事が分かる。

次に，荷重変位曲線を図-3 に，応答値の一覧を表-3 に示す。図-3 (b) の橋梁では，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。また，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，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大きく (図-2)，橋脚と比較して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 (表-2)。

4. 初期建設コストの比較 国土交通省土木工事積算基準⁴⁾等に基づき，各ケースの初期建設コストを算出した。図-4 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-4 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，鉄道橋梁および道路橋は，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，鉄道橋梁では 3~4 割を占めており，道路橋でも高い割合を占めていることに起因する。桁式橋梁は，ラーメン高架橋より地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ものと考えられる。

5. おわりに 本稿では，ラーメン高架橋と桁式橋梁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が分かった。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。鉄道の耐震基準では，想定を超える地震が発生した場合にも，破滅的な状態に至ることを回避する「危機耐性³⁾」の概念が導入されている。危機耐性とは，大きく設定した地震動に対して構造物を頑健とするのではなく，構造物の一部が破壊しても倒壊はしないという冗長性を確保する概念もある。新たな概念を導入した構造形式⁵⁾⁶⁾を含めた検討を実施し，設計地震動を上回る地震対策の深度化を行っていく。

参考文献 1) 宮路，川島：市民から見た橋梁の耐震性能目標，第 9 回地震保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2006. 2) 川島：大規模地震による橋梁の耐震性，土木研究センター「地震に強い道路橋設計講習会」，2007. 3) (公財) 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. 4) (一財) 建設物価調査会：土木工事積算標準単価 (平成 27 年度版). 5) 西村ら：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. 6) 齊藤，室野ら：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.

表-3 設計された構造物の応答値の一覧

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

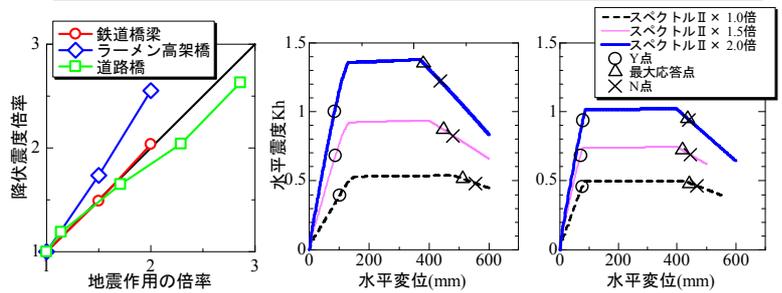


図-2 地震作用倍率と降伏震度倍率の関係

(a) ラーメン高架橋 (b) 橋梁
図-3 荷重変位曲線

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。また，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，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大きく (図-2)，橋脚と比較して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 (表-2)。

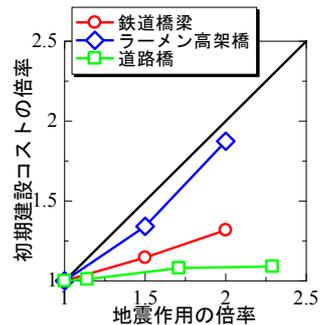


図-4 地震作用の倍率と初期建設コストの倍率