

論文 鉄道用のRCラーメン高架橋とRC橋脚を対象とした簡易耐震設計法の提案

吉田 徹^{*1}・小林 薫^{*2}

要旨：鉄道耐震標準で定められた耐震性能を満足し、従来の震度法レベルで簡易に設計可能となる耐震設計法の確立を目指し、1質点系構造物に置換可能な鉄道RC構造物を対象に、等価固有周期と所要の耐震性能を満足する降伏震度の関係を非線形解析により検討した。また、解析結果をもとに簡易所要降伏震度スペクトルの検討を行い、これを用いた鉄道用RCラーメン高架橋およびRC橋脚の簡易耐震設計法の提案を行った。

キーワード：鉄道RC構造物、簡易所要降伏震度スペクトル、等価固有周期

1. はじめに

鉄道RC構造物の耐震設計は、平成11年10月に制定された「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計¹⁾」(以下、「鉄道耐震標準」という)により行われている。この鉄道耐震標準では、静的非線形解析および動的非線形解析を用いて構造物の耐震性能を照査する設計法を採用している。

しかしながら、鉄道耐震標準による耐震性能照査を構造物の設計に適用するにあたっては、いくつかの問題点が挙げられる。まず、断面諸元を仮定した後に非線形解析による照査を行うことから、最適な諸元を得るまでのトライアル数の増加が見込まれ、設計期間の長期化や設計費の増大が予想される。また、性能照査型の設計法であるため、設計者の相違により構造物諸元に大きな差異が生じることが予想され、これにより地震後の構造物の復旧性等に差が生じる恐れがある。さらには、非線形解析結果の妥当性を判断することが難しいということも懸念される。

そこで今回、鉄道耐震標準で定められた耐震性能を満足し、従来の震度法レベルで簡易に設計を行うことができる耐震設計法の確立を目指し、1質点系構造物に置換が可能なRC構造物

を対象とした解析的検討を行った。

本文は、鉄道用RCラーメン高架橋およびRC橋脚を対象とした簡易耐震設計法の検討概要について報告するものである。

2. 簡易耐震設計法の検討方針

前述のように鉄道耐震標準は非線形解析による性能照査を前提とした設計法となっており、従来の震度法レベルの設計法に比べ煩雑な設計手法となっている。そこで、より簡便な耐震設計法の確立を目指し、下記コンセプトによる検討を行った。

- 1) 簡易耐震設計法により設計した構造物は、鉄道耐震標準による耐震性能照査を自動的に満足する。
- 2) 弾性解析を前提とした従来の震度法レベルの設計法とする。
- 3) 適用範囲をRCラーメン高架橋(1層、地中梁有)およびRC橋脚(壁式橋脚の場合は線路方向)に限定する。

3. 簡易耐震設計手順

本手法を用いたL2地震動に対する耐震設計フローを図1に示す。実務設計では、全体構造計画の策定後、地盤種別と等価固有周期(降

*1 東日本旅客鉄道(株)建設工事部構造技術センター(正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株)建設工事部構造技術センター副課長 博士(工学)(正会員)

伏点と原点とを結ぶ割線剛性から計算される構造物の固有周期)の算定を行う。その後、次章に示す簡易所要降伏震度スペクトルを用いて設計水平震度を設定し、線形解析による断面力を算定後、耐震性能の検討を行う。

耐震性能の検討では、まず、部材に所要の降伏耐力を与えることを目的に曲げモーメントに対する安全性の検討を行う。

次に、柱部材の場合は部材接合部から2D(D:断面高さ)区間以外の区間において、部材がせん断破壊先行の破壊モードとならないよう、せん断力に対する安全性の検討を行う。

さらに、構造上塑性ヒンジ領域となる部材接合部から2D区間において、所要の変形性能を付与するために耐力比(V_{yd} / V_{mu} ,ここに V_{yd} :部材の設計せん断耐力, $V_{mu} = \mu / a$ μ :部材の曲げ耐力, a :せん断スパン)が2.0以上となるように帯鉄筋量を定め設計が終了する。

4. 簡易所要降伏震度スペクトルの検討

4.1 検討概要

簡易耐震設計法では従来の震度法レベルでの設計法を前提としているため、簡易所要降伏震度スペクトルの検討が必要となる。簡易所要降伏震度スペクトルとは、縦軸の所要降伏震度と、横軸の等価固有周期との関係を図示したものであり、構造物の等価固有周期を算出することで、その構造物に要求される所要降伏震度が簡易に求められるものである。

簡易所要降伏震度スペクトルの検討は、各地盤種別においてく体断面、く体高さ、軸方向鉄筋および帯鉄筋等を変化させ、すなわち等価固有周期と降伏震度を変化させて静的非線形解析を実施し、鉄道耐震標準に定められている非線形スペクトル法(簡易な動的解析による照査法)を用いた性能照査を行い、性能を満足する範囲でスペクトルを定めることとした。なお、簡易耐震設計法では、構造物に設定する耐震性能として、設計の簡略化を図る目的から、鉄道耐震標準で定められている重要度の高い構造物に適

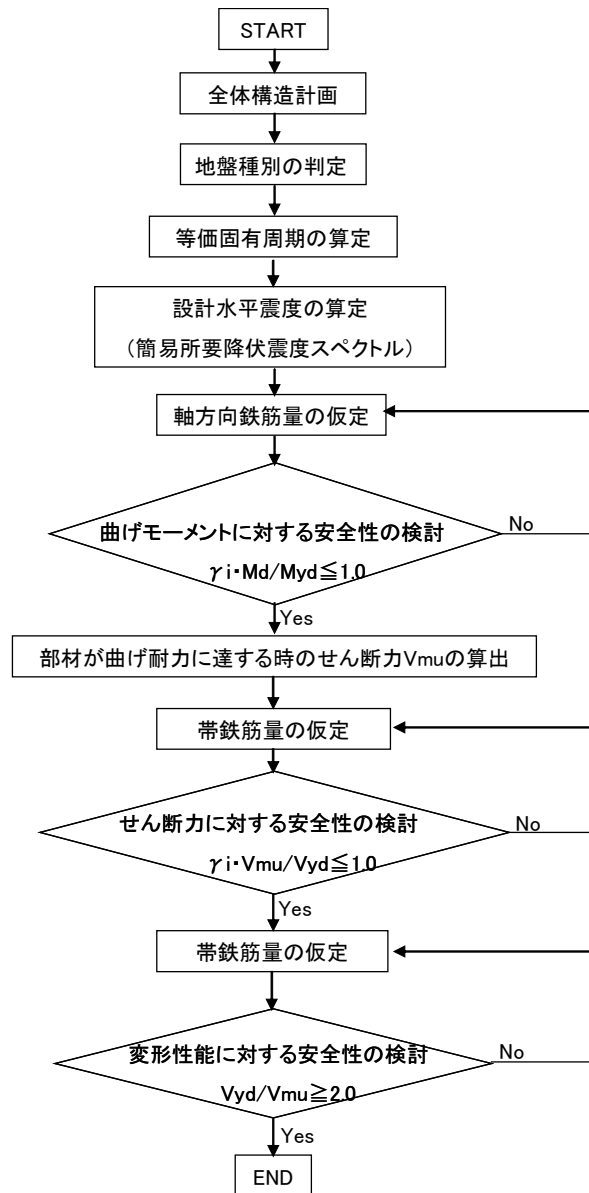


図 1 耐震設計フロー

用する耐震性能 に統一することとした。

4.2 検討対象構造物

簡易耐震設計法の適用範囲は、一般的な地中梁の設置されるRCラーメン高架橋とRC壁式橋脚を対象とすることとし、それ以外の構造物は鉄道耐震標準によることとした。

解析にあたり、検討対象構造モデルは、上部構造物が基礎構造物より先行降伏するものとし、さらに、RCラーメン高架橋の場合は、構造物全体の降伏および終局が柱部材で決定されるものとした。

(1) RCラーメン高架橋

構造形式：R C ビームスラブ式ラーメン高架橋

接続形式：ゲルバー桁形式

基礎形式：杭基礎(場所打ちコンクリート杭)

検討方向：橋軸直角方向

径間数：1 径間

層数：1 層

解析モデルの一例を図 - 2 に、解析時の主なパラメータを表 1 示す。図に示すように、ラーメン高架橋の解析は、線路直角方向の単径間ラーメンを主対象として行った。これは、単径間ラーメンの方が押込み側と引抜き側の柱の軸力変動が大きくなり、一般に多径間ラーメンよりも柱部材の変形性能が厳しい条件となるためである。

(2) R C 橋脚

構造形式：R C 壁式橋脚

桁形式：複線用 P C 6 主 I 形桁

基礎形式：杭基礎(場所打ちコンクリート杭)

支承種別：ゴム支承

検討方向：橋軸方向

解析モデルの一例を図 - 3 に、解析パラメータを表 2 示す。R C 橋脚は、橋軸方向のみで検討を行っており、橋軸直角方向については、一般に基礎構造物が先行降伏すると考えられるため、本検討の対象外とした。

4.3 地盤種別

簡易耐震設計では、鉄道耐震標準に示される地盤種別を表 3 に示す 4 種類の地盤種別に簡略化することとした。簡易所要降伏震度スペクトルの検討において、鉄道耐震標準で定められている地盤種別毎に解析モデルを設定し静的非線形解析を行い、それぞれのモデルに対する解析結果を今回設定した 4 種類の地盤種別毎に整理することとした。

4.4 解析条件

図 - 4 に、静的非線形解析に用いた R C 部材の曲げモーメント - 部材回転角関係を示す。部材の非線形特性は、鉄道耐震標準を参考にテトラリニア型の骨格曲線を持つ耐力低下型モデル

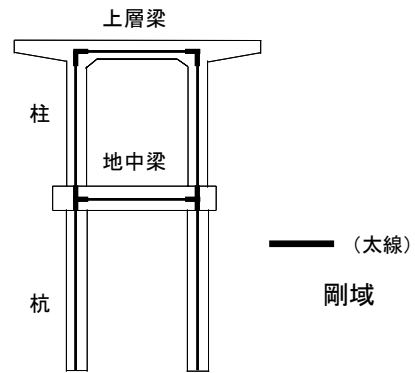


図 2 R Cラーメン高架橋解析モデル

表 1 R Cラーメン高架橋解析パラメータ

柱断面高さ	600~1400mm
柱断面幅	600~1400mm
高さ(地中梁天端からスラブ天端)	4~20m
柱引張鉄筋比	0.53~1.78
柱帯鉄筋比	0.33~2.58
降伏震度	0.24~0.80
等価固有周期	0.44~1.51sec
解析ケース数	85

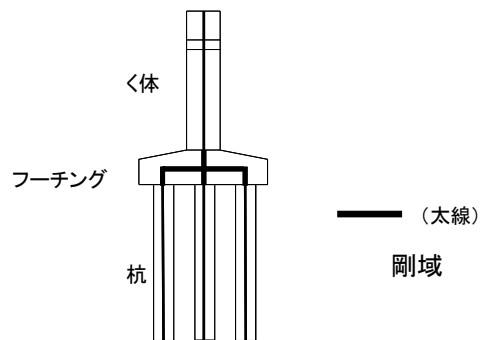


図 3 R C橋脚解析モデル

表 2 R C橋脚橋解析パラメータ

く体断面高さ	2200~3500mm
く体断面幅	5000mm
高さ(フーチング天端から桁座面)	6~20m
く体引張鉄筋比	0.36~0.75
く体帯鉄筋比	0.25~0.76
降伏震度	0.23~0.60
等価固有周期	0.65~1.84sec
解析ケース数	56

表 3 地盤種別

地盤種別	固有周期(sec)	鉄道耐震標準における地盤種別	参考地盤種別
I	~ 0.25	G0,G1,G2	岩盤・基盤・洪積層
II	0.25 ~ 0.5	G3	普通地盤
III	0.5 ~ 1.5	G4,G5,G6	軟弱地盤
IV	1.5 ~	G7	極めて軟弱な地盤

とした。ここで、部材の終局点は、図中に示す N 点（降伏荷重 M_y を下回らない最大変位点）とした。

また、簡易耐震設計法では、簡易所要降伏震度スペクトルを用いて、所要降伏震度を設定するとともに、塑性ヒンジ領域においては、部材に所要の変形性能を付与するために帯鉄筋量を構造細目に定めることとした。ここで、帯鉄筋量は、既往の文献²⁾を参考に部材の耐力比 (V_{yd} / V_{mu}) が 2.0 以上となるよう配置することとした。このため、解析時には柱部材の耐力比の値を 2.0 で一定とした。

なお、解析ツールは、汎用の 3 次元骨組みプログラムを使用し、幾何学的非線形性を考慮した 2 次元の非線形解析を行った。

4.5 検討結果

簡易所要降伏震度スペクトルの検討は、各地盤種別毎に静的非線形解析により構造物全体系のじん性率を求め、さらに、鉄道耐震標準で定められている非線形スペクトル法により応答塑性率を求め、構造物全体系のじん性率が応答塑性率を上回る降伏震度を求めた。ここで、構造物全体系のじん性率は、構造物全体系の終局変位を構造物全体系の降伏変位で除した値とした。なお、RC ラーメン高架橋の構造物全体系の終局変位は、高架橋のある柱部材が終局に至った時点の高架橋天端の水平変位とし、構造物全体系の降伏変位は、高架橋のある柱部材が降伏した時点の高架橋天端の水平変位とした。

図 - 5 ~ 8 に各地盤種別毎の解析結果を示す。図の縦軸に所要降伏震度 K_{hy} を、横軸に等価固有周期 T_{eq} を示している。なお、凡例中の「OK」とは、構造物全体系のじん性率が応答塑性

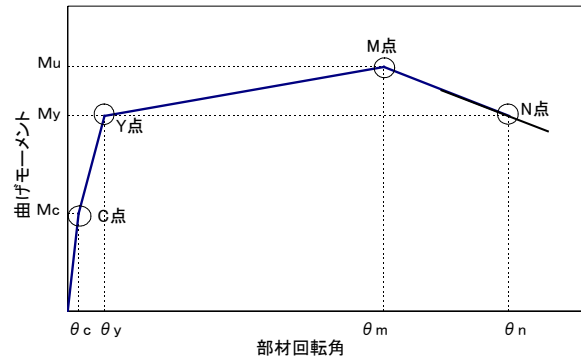


図 4 曲げモーメント - 部材回転角関係

率を上回っていることを意味し、鉄道耐震標準による耐震性能照査を満足していることを示す。すなわち、構造物の各部材が耐震性能における損傷レベルの制限値以下の状態である。また、凡例中の「OUT」は、応答塑性率が構造物全体系のじん性率を上回っていることを意味し、鉄道耐震標準による耐震性能照査を満足していないことを示している。

解析の結果、等価固有周期が 0.5 秒程度の場合、種地盤および種地盤では、耐震性能照査を満足する所要降伏震度は、0.7~0.8 程度と比較的高い値となった。一方、種地盤および種では、0.4 程度の降伏震度で照査を満足できる結果となった。また、等価固有周期が 1.0 秒以上においては、各地盤種別とも所要降伏震度は 0.4 以下で耐震性能照査を満足できる結果となった。なお、図中には RC ラーメン高架橋および RC 橋脚の解析結果を併記しているが、各地盤種別において両者は全周期帯でほぼ同様の傾向を示した。

これらの解析結果をもとに定めた簡易所要降伏震度スペクトルを図中を実線で示す。スペクトル適用ラインは、構造物全体系のじん性率が応答塑性率を上回っている降伏震度 (= OK の点) 以上とし、既往の設計資料^{3) 4) 5)}に示される降伏震度を勘案して定めた。また、スペクトルは、構造物に要求される降伏震度が各周期帯で可能な限りフラットとなるよう設定した。このようなスペクトルとするメリットとしては、実設計時に仮に部材断面の変更が生じて降伏

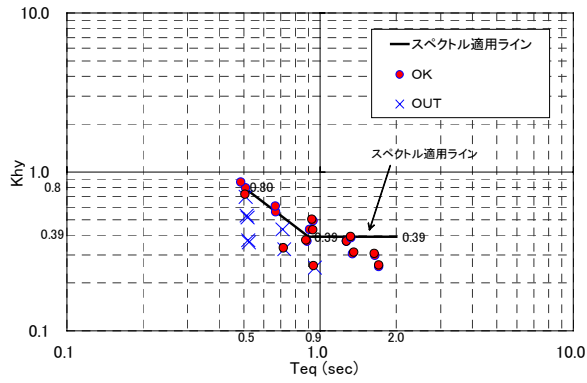


図 5 種地盤用簡易所要降伏震度スペクトル

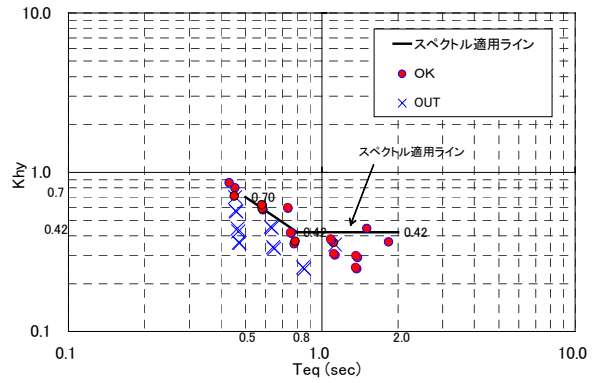


図 6 種地盤用簡易所要降伏震度スペクトル

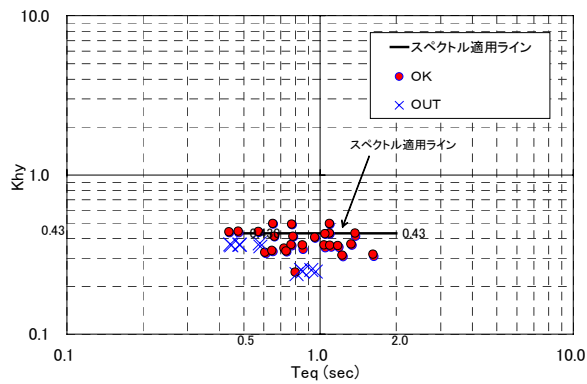


図 7 種地盤用簡易所要降伏震度スペクトル

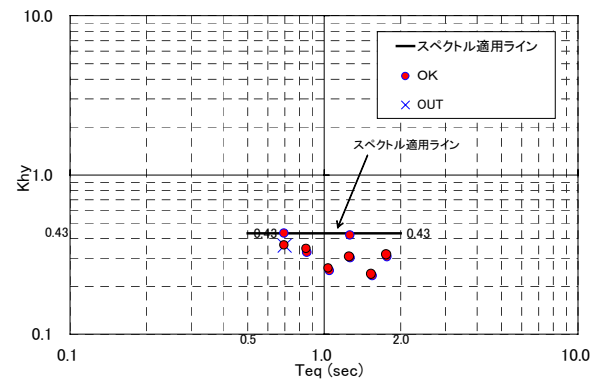


図 8 種地盤用簡易所要降伏震度スペクトル

震度に変化がなければ設計作業の手戻りが少なく簡便に耐震設計を行うことができることや、線状鉄道構造物の降伏震度を統一できることで地震後の応急復旧の効率化を図ることができるためである。

今回提案する各地盤種別における所要降伏震度 K_{hy} の算定式を式(1)～(4)に示す。

$$\begin{aligned}
 &1) \text{ 種地盤} \\
 &\quad 0.5 \text{ Teq} < 0.9 \text{ の場合} \\
 &\quad \quad K_{hy} = 0.343 \text{Teq}^{-1.222} \\
 &\quad 0.9 \text{ Teq} \leq 2.0 \text{ の場合} \\
 &\quad \quad K_{hy} = 0.39
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 &2) \text{ 種地盤} \\
 &\quad 0.5 \text{ Teq} < 0.8 \text{ の場合} \\
 &\quad \quad K_{hy} = 0.330 \text{Teq}^{-1.087} \\
 &\quad 0.8 \text{ Teq} \leq 2.0 \text{ の場合} \\
 &\quad \quad K_{hy} = 0.42
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 &3) \text{ 種地盤} \\
 &\quad 0.5 \text{ Teq} \leq 2.0 \text{ の場合} \\
 &\quad \quad K_{hy} = 0.43 \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &4) \text{ 種地盤} \\
 &\quad 0.5 \text{ Teq} \leq 2.0 \text{ の場合} \\
 &\quad \quad K_{hy} = 0.43 \quad (4)
 \end{aligned}$$

ここに、 T_{eq} ：等価固有周期（秒）

K_{hy} ：所要降伏震度

5. 等価固有周期の算定方法の検討

5.1 検討概要

簡易耐震設計では、簡易所要降伏震度スペクトルを用いて設計水平震度を設定するにあたり、等価固有周期を算定しなければならない。しかしながら、鉄道耐震標準における等価固有周期の算定方法は、静的非線形解析結果から得られる構造物の降伏震度と降伏変位を用いて算定す

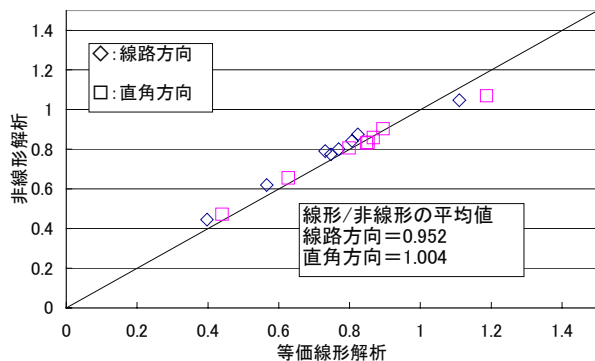


図 9 等価線形解析と静的非線形解析による等価固有周期の比較 (RC ラーメン高架橋)

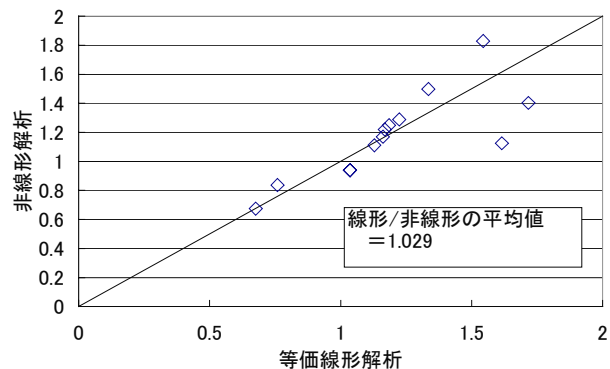


図 10 等価線形解析と静的非線形解析による等価固有周期の比較 (RC 橋脚)

るものである。この方法では、等価固有周期を求める際に常に静的非線形解析を行うことが必要となる。

簡易耐震設計法において、従来の「鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物³⁾」(以下、「鉄道RC標準」という)に示されている等価線形解析により等価固有周期を求める方法を用いることが可能であれば、静的非線形解析を省略し設計の簡略化を図ることができる。そこで、従来の等価線形解析による方法と鉄道耐震標準に示されている静的非線形解析による等価固有周期の算定方法とを比較し、等価線形解析の適用性について検討を行った。ここで、等価線形解析を行う際の部材剛性は、鉄道RC標準に準じて全断面有効の剛性に剛性低減係数 γ_y を乗じて求めることとし、剛性低減係数 γ_y は、RCラーメン高架橋(柱部材)に対して0.5、RC橋脚(く体)に対して0.3と仮定し比較を行った。

5.2 検討結果

図-9、図-10にRCラーメン高架橋およびRC橋脚の等価線形解析と静的非線形解析による等価固有周期の算定結果の関係を示す。検討結果より、RCラーメン高架橋およびRC橋脚ともに、等価線形解析による等価固有周期は、静的非線形解析から求めた等価固有周期と概ね一致する結果となった。これより、簡易耐震設計においては、鉄道RC標準に準じた等価線形解析をもとに等価固有周期を算定する方法を用

いることとした。

6. まとめ

非線形解析を前提とした鉄道耐震標準の諸問題を解消し、設計の合理化を図ることを目的に、RC構造物を対象に簡易耐震設計法について検討を行った。その結果、標準的なRC構造物に対して、鉄道耐震標準による耐震性能照査を満足し、かつ従来の震度法レベルで設計可能な簡易耐震設計法を確立できた。

本手法により、耐震設計における設計費の低減や設計作業の簡略化が図れるとともに、線状鉄道RC構造物の耐震性能の統一を図ることができるものと考えている。

参考文献

- 1) 運輸省鉄道局監修 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，1999.10
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 耐震設計編，1996.7
- 3) 運輸省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，丸善，1992.10
- 4) 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター：新設構造物の耐震設計参考資料，1996.9
- 5) 鉄道総合技術研究所：新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料，1996.3