論文　軸方向鉄筋の内側に円形スパイラル鉄筋を配置した鉄道ＲＣ構造物の耐震設計法の提案

吉田　徹[*1]・菅野　貴浩[*2]・木野　淳一[*3]・岩佐　高吉[*4]

要旨：軸方向鉄筋の内側に円形スパイラル鉄筋を配置した鉄道ＲＣ構造物を対象に，鉄道耐震標準による耐震性能照査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可能となる耐震設計法の確立を目指し，線材モデルによる解析的検討を行った。

非線形解析結果をもとに各地盤種別毎の簡易所要降伏震度スペクトルを作成し，これを用いたＲＣラーメン高架橋の簡易耐震設計法の提案を行った。

キーワード：内巻帯鉄筋，簡易所要降伏震度スペクトル，耐震設計

1．はじめに

兵庫県南部地震以降，鉄筋コンクリート（以下「ＲＣ」という）構造物は耐震性能を大幅に向上することが必要となった[1)]。ＲＣ柱部材においては，変形性能の向上を図るため軸方向鉄筋を取り囲むせん断補強鉄筋（以下「外巻帯鉄筋」という）を密に配置することが一般的である。しかしながら，外巻帯鉄筋による補強では，配筋の複雑化，過密化を招くだけでなく，部材の変形性能向上効果に限界が生じる[1)]ことから，耐震設計においては，構造物の降伏震度を従来より高くすることにより耐震性能の向上を図る傾向にある。

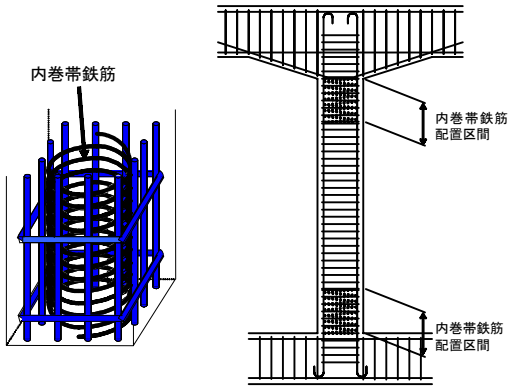
一方，著者らは外巻帯鉄筋に加え，**図－１**に示すように軸方向鉄筋の内側に円形スパイラル鉄筋（以下「内巻帯鉄筋」という）を配置することを考案し，ＲＣ模型試験体を用いた交番載荷実験を行うとともに[2)]，部材の変形性能算定手法の提案を行ってきた[3)]。この内巻帯鉄筋を配置したＲＣ柱部材は，変形性能を飛躍的に向上させることが可能であり，構造物の耐震性能向上に大きな効果が期待できると考えられる。

そこで今回，内巻帯鉄筋を配置した鉄道ＲＣラーメン高架橋を対象に，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）に基づく耐震性能の検討を行うとともに，鉄道耐震標準による耐震性能照査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可能な耐震設計法の確立を目指し，線材モデルによる解析的検討を行った。本論文は，これらの検討概要について報告するものである。

2．内巻帯鉄筋を配置した構造物の耐震性能の検討

2．1 検討対象構造物

検討構造物は，一般的な鉄道ＲＣラーメン高



図－１　内巻帯鉄筋配置例

*1 東日本旅客鉄道（株）建設工事部構造技術センター　課　員　(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　工修　(正会員)
*3 東日本旅客鉄道（株）建設工事部構造技術センター　課　員　工修　(正会員)
*4 東日本旅客鉄道（株）研究開発センターフロンティアサービス研究所　主　席　(正会員)

架橋を対象とした。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，構造物全体系の降伏および終局が柱部材で決定されるものとした。構造物の一般条件を下記に示す。

・構造形式：ＲＣ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**に示す。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対象に行った。これは，多径間ラーメンよりも単径間ラーメンの方が一般に柱の軸力変動が大きくなり，耐震性能に与える影響が厳しいためである。なお，解析モデルの地盤種別は鉄道耐震標準に示されるＧ２～Ｇ６地盤を対象とした。

２．２ 解析条件

解析に用いたＲＣ柱部材の曲げモーメント－部材回転角関係を**図－３**に示す。部材の非線形特性は，テトラリニア型の骨格曲線を持つ耐力低下型モデルとした。ここで，部材の終局点は，安全側ではあるが，文献 3）に示すＫ点を用いて検討を行うこととした。また，解析モデルの柱部材には，各ケースとも部材じん性率が 20 以上となるよう内巻帯鉄筋量を定めた。

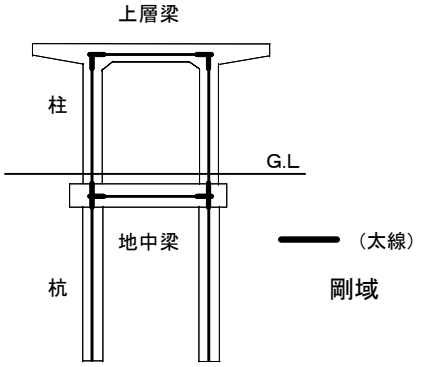
なお，本検討では内巻帯鉄筋を柱部材のみに配置することを想定したため，杭部材および梁部材の非線形特性は，鉄道耐震標準に基づきＭ－φ関係により表現している。

解析ツールは， 3 次元骨組み汎用プログラムを使用し，幾何学的非線形性を考慮した 2 次元の静的非線形解析を行った。

２．３ 解析結果

内巻帯鉄筋を配置したＲＣラーメン高架橋の解析結果を**表－２**に示す。また，比較のため内巻帯鉄筋を配置せずに外巻帯鉄筋のみをせん断耐力比（Vyd／Vmu，ここに Vyd：部材の設計せん断耐力，Vmu=Mu / a　Mu：部材の曲げ耐力，a：せん断スパン）が 2.0 程度となるように配置したＲＣラーメン高架橋の解析結果を**表－３**に示す。

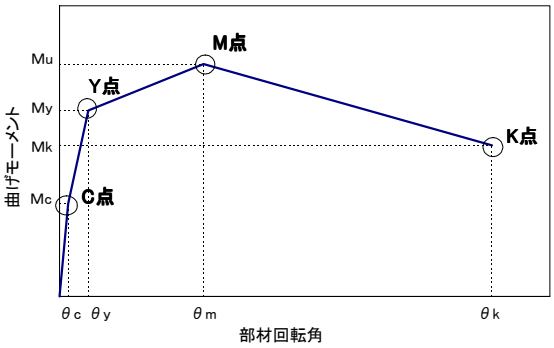
耐震性能の照査は，各地盤種別毎に静的非線形解析により構造物全体系のじん性率を求め，さらに，鉄道耐震標準で定められている非線形スペクトル法により応答塑性率を求め，構造物全体系のじん性率と応答塑性率の比較により行



図－２　ＲＣラーメン高架橋解析モデル

表－１解析パラメータ

柱断面高さ	600～900mm
柱断面幅	600～900mm
高さ（地中梁天端からスラブ天端）	4～12m
柱引張鉄筋比	0.53～1.32
柱外巻帯鉄筋比	0.16～0.60
降伏震度	0.20～0.45
等価固有周期	0.44～1.33sec



図－３　曲げモーメント－部材回転角関係

表－２　ＲＣラーメン高架橋解析結果（内巻帯鉄筋配置）

解析ケース番号	地盤種別	降伏震度	等価固有周期	構造系じん性率	応答塑性率	判定
S1	G2	0.313	0.521	9.88	10>	OUT
S2	G2	0.377	0.515	9.45	9.79	OUT
S3	G2	0.398	0.514	9.80	8.70	OK
S4	G2	0.304	0.725	12.25	8.16	OK
S5	G2	0.453	0.719	8.78	5.32	OK
S6	G2	0.201	0.977	15.00	8.60	OK
S7	G2	0.323	0.897	13.62	5.96	OK
S8	G2	0.293	1.332	14.38	3.95	OK
S9	G3	0.382	0.472	11.06	10>	OUT
S10	G3	0.437	0.467	10.71	9.73	OK
S11	G3	0.440	0.643	11.14	7.51	OK
S12	G3	0.366	0.648	13.14	9.48	OK
S13	G3	0.318	0.793	17.70	8.44	OK
S14	G3	0.297	1.161	18.70	5.39	OK
S15	G4	0.352	0.446	13.57	8.70	OK
S16	G4	0.297	0.628	16.55	9.11	OK
S17	G4	0.327	0.742	18.78	6.91	OK
S18	G4	0.302	1.092	19.56	5.19	OK
S19	G5	0.311	0.491	11.07	8.93	OK
S20	G5	0.365	0.483	10.88	6.45	OK
S21	G5	0.290	0.670	15.00	8.40	OK
S22	G5	0.320	0.791	17.60	6.32	OK
S23	G5	0.302	1.151	17.70	5.17	OK
S24	G6	0.307	0.585	8.23	6.40	OK
S25	G6	0.394	0.574	7.38	4.15	OK
S26	G6	0.271	0.759	12.67	6.17	OK
S27	G6	0.219	0.956	14.10	6.56	OK
S28	G6	0.315	0.873	14.67	4.54	OK
S29	G6	0.289	1.234	14.64	3.85	OK

表－３　ＲＣラーメン高架橋解析結果（外巻帯鉄筋のみ配置）

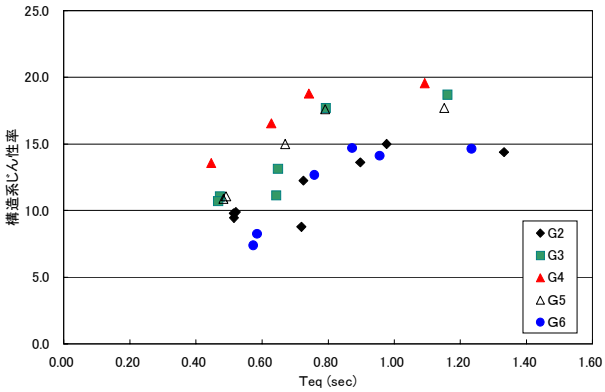
解析ケース番号	地盤種別	降伏震度	等価固有周期	構造系じん性率	応答塑性率	判定
N1	G2	0.697	0.508	3.22	4.89	OUT
N2	G2	0.794	0.508	3.59	2.83	OK
N3	G3	0.700	0.455	3.72	4.08	OUT
N4	G3	0.799	0.454	4.09	3.11	OK

った。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，構造物全体系の終局変位は，高架橋のある柱部材がコア耐力維持点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ている。表中の「ＯＫ」とは，構造物全体系のじん性率が応答塑性率を上回り，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。

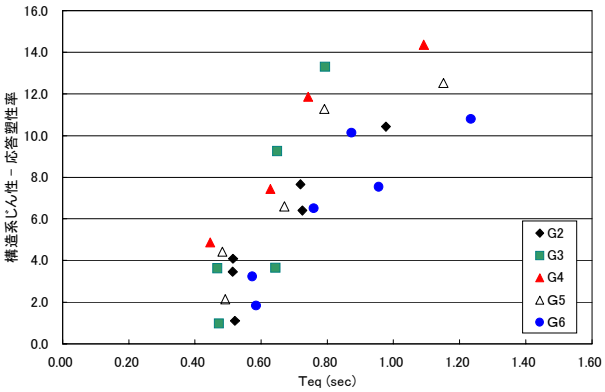
表－２に示す内巻帯鉄筋を配置したラーメン高架橋の解析結果では，等価固有周期（降伏点と原点とを結ぶ割線剛性から計算される構造物の固有周期）が 0.5 秒程度に着目すると，Ｇ２地盤およびＧ３地盤の場合，耐震性能照査を満足する所要降伏震度は 0.4～0.44 程度の値となったが，Ｇ４～Ｇ６地盤では，0.35 程度以下の降伏震度で照査を満足できる結果となった。また，等価固有周期が 0.8 秒以上においては，各地盤種別とも所要降伏震度は 0.35 程度以下で耐震性能照査を満足できる結果となった。

一方，比較のために行った**表－３**に示す外巻帯鉄筋のみの従来タイプの高架橋の解析結果では，等価固有周期が 0.5 秒程度の場合，耐震性能照査を満足する所要降伏震度は 0.7～0.8 程度と非常に高い値となった。

図－４に内巻帯鉄筋を配置したラーメン高架橋の構造物全体系のじん性率と等価固有周期



図－４ 構造系じん性率と等価固有周期 Teq の関係



図－５ （構造系じん性率－応答塑性率）と等価固有周期 Teq の関係

Teq の関係を示す。今回検討を行った等価固有周期の範囲では，構造物全体系のじん性率は，7～19 程度となった。また，周期が 0.8 秒程度以下の周期帯では，各地盤種別とも周期が長くなるに従いじん性率が増加する傾向を示した。

図－５は縦軸に構造物全体系じん性率と応答塑性率の差をとり，横軸に等価固有周期 Teq を表したものである。設計上の余裕代と考えることができる構造物全体系じん性率と応答塑性率の差は，1～14 程度の値となり，周期の長期化に伴い増加する傾向を示した。これは，解析モデルの降伏震度を各周期帯でほぼ一定としたため，長周期帯で応答塑性率が小さくなったことによるものと考えられる。

3． 簡易耐震設計法の検討

3．1 簡易耐震設計法の検討方針

鉄道ＲＣ構造物の耐震設計は，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，従来の震度法や修正震度法による設計法に比べ複雑な照査が必要となっている。前述のように柱部材に内巻帯鉄筋を配置することにより，ＲＣ構造物の耐震性能は飛躍的に向上することが明らかとなった。そこで，この特性を活かし，より簡便な耐震設計法の確立を図ることを目的に検討を行った。

検討にあたり，簡易耐震設計法は，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とともに，この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ことを前提とした。

3．2 簡易耐震設計手順

図－６に本手法を用いたＬ２地震動に対する耐震設計フローを示す。耐震設計は，地盤種別と等価固有周期の算定後，次節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用いて耐震性能の検討を行うこととなる。

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，部材が曲げ破壊モードとなるよう，外巻帯鉄筋について，せん断力に対する安全性の検討を行う。

さらに，内巻帯鉄筋を配置する部材基部において，所要の変形性能を付与するために式(1)を満足するよう内巻帯鉄筋量を定め設計が終了する。

$$2\pi \cdot f_{wy} \cdot A_{ws}/(\pi R \cdot s \cdot \sigma_{cu}) \geqq \alpha \qquad (1)$$

ここに，f_{wy}：内巻帯鉄筋の降伏強度(N/mm^2)

A_{ws}：内巻帯鉄筋の断面積(mm^2)

R：内巻帯鉄筋の直径(mm)

s：内巻帯鉄筋の間隔(mm)

σ_{cu}：終局時コンクリート応力度(N/mm^2)

なお，式(1)左辺は，文献 3）に示される拘束度 q である。式(1)において，α（部材じん性率 20 以上を確保することができる拘束度）以上となるよう内巻帯鉄筋量を配置することとなる。

3．3 簡易所要降伏震度スペクトルの検討

簡易耐震設計法では震度法レベルでの設計法を前提としており，耐震性能照査を満足させる所要降伏震度を簡易に求める手段が必要となる。本検討では，縦軸に所要降伏震度を，横軸に等価固有周期を図示した簡易所要降伏震度スペクトルを作成し，等価固有周期をもとに，その構造物に要求される所要降伏震度を求める手法を採用する。

簡易所要降伏震度スペクトルの検討は，前章で示した内巻帯鉄筋を配置したＲＣラーメン高架橋の解析結果に基づき行う。**図－７～11** 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 Khy を，横軸に等価固有周期 Teq を示している。

解析結果をもとに定めた簡易所要降伏震度スペクトル適用ラインを図中に実線で示す。このスペクトルは，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，さらに，鉄道耐震標準に定められている**表－４**に示すＬ１地震動に対する設計水平震度以上となるように定めた。また，スペクトルは，各周期帯で可能な限りフラットとなるよう設定した。これは，実設計時に仮に部材断面の変更が生じても降伏震度に変化がなければ設計作業の手戻りが少ないことや，線状鉄道構造物の地震後の復旧性等を考慮したためである。

今回提案する各地盤種別における所要降伏震度 Khy の算定式を式（2）～（6）に示す。

１）Ｇ１地盤

$$\left.\begin{array}{l} 0.5 \leqq Teq < 0.7 \text{の場合} \\ \qquad Khy = 0.237 Teq^{-0.758} \\ 0.7 \leqq Teq \leqq 1.5 \text{ の場合} \\ \qquad Khy = 0.31 \end{array}\right\} \quad (2)$$

２）Ｇ２地盤

$$\left.\begin{array}{l} 0.5 \leqq Teq < 0.7 \text{の場合} \\ \qquad Khy = 0.298 Teq^{-0.528} \\ 0.7 \leqq Teq \leqq 1.5 \text{ の場合} \\ \qquad Khy = 0.36 \end{array}\right\} \quad (3)$$

３）Ｇ３地盤

$0.5 \leqq Teq \leqq 1.5$ の場合　$Khy = 0.38$　(4)

４）Ｇ４地盤

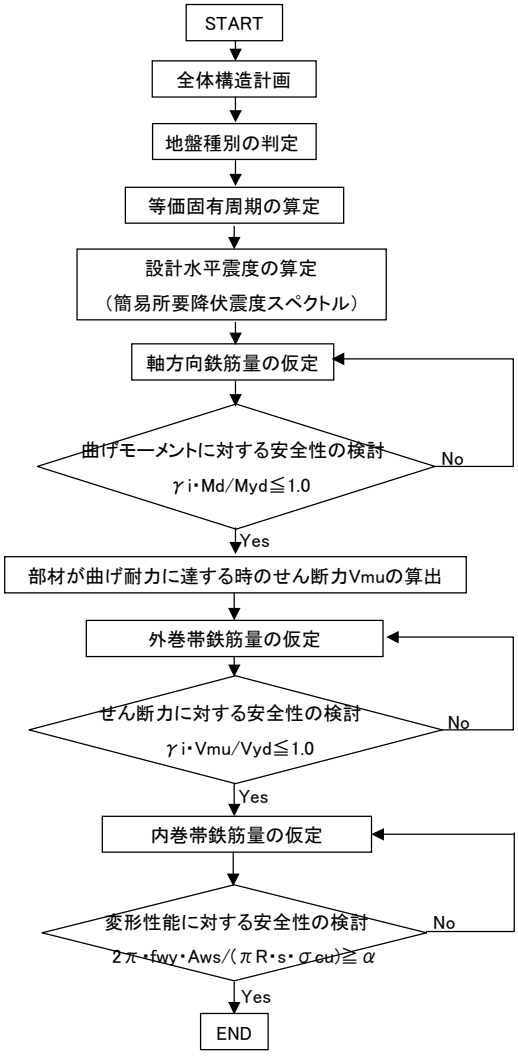
$0.5 \leqq Teq \leqq 1.5$ の場合　$Khy = 0.41$　(5)

５）Ｇ５地盤

$0.5 \leqq Teq \leqq 1.5$ の場合　$Khy = 0.35$　(6)

ここに，Teq：等価固有周期（秒）

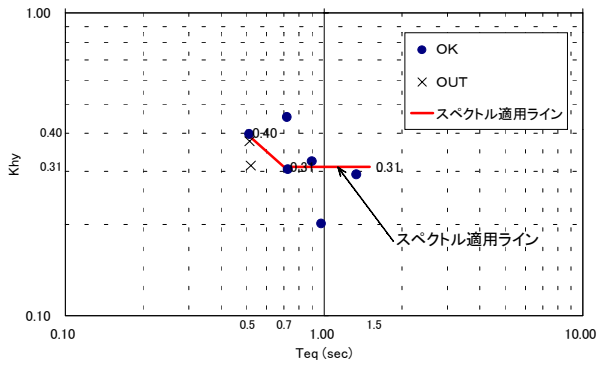
Khy： 所要降伏震度



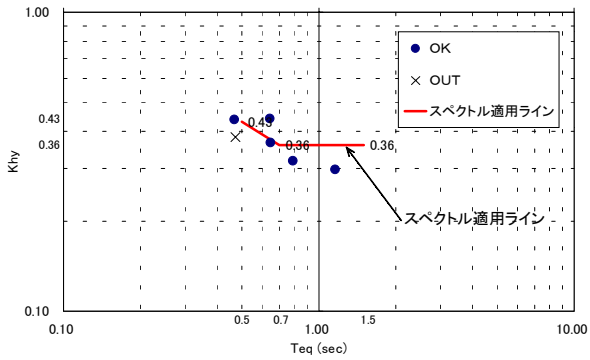
図－６ 耐震設計フロー

表－４ Ｌ１地震動に対する設計水平震度

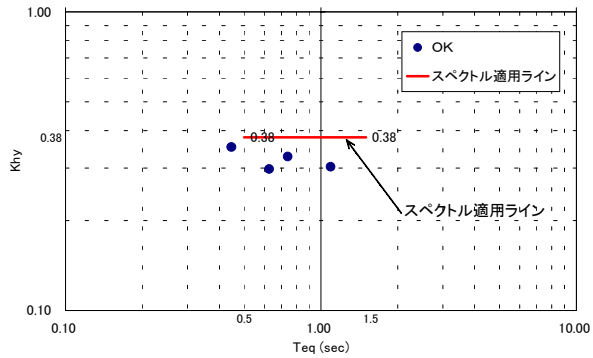
地盤種別	応答加速度(gal)	設計水平震度
G2	300	0.306
G3	350	0.357
G4	370	0.378
G5	400	0.408
G6	340	0.347



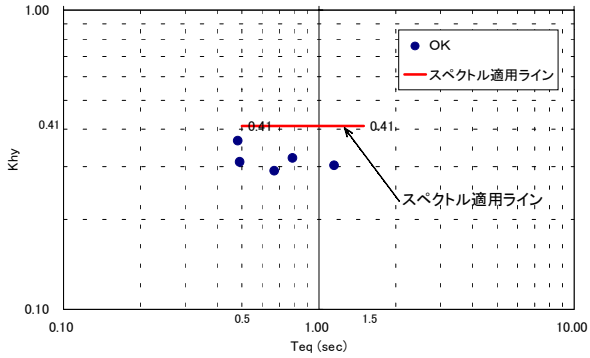
図－７　Ｇ２地盤用簡易所要降伏震度スペクトル



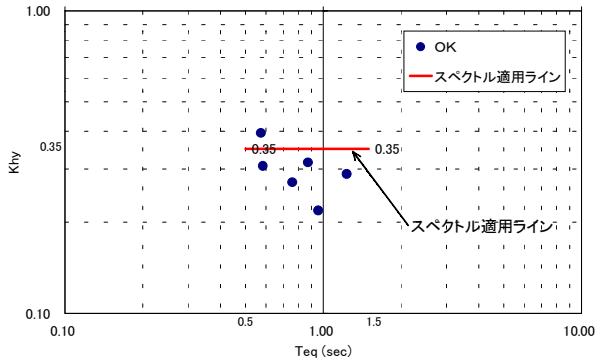
図－８　Ｇ３地盤用簡易所要降伏震度スペクトル



図－９　Ｇ４地盤用簡易所要降伏震度スペクトル



図－10　Ｇ５地盤用簡易所要降伏震度スペクトル



図－11　Ｇ６地盤用簡易所要降伏震度スペクトル

4.　まとめ

内巻帯鉄筋を配置したＲＣラーメン高架橋を対象に非線形解析に基づく耐震性能の検討を行った。その結果，柱部材に内巻帯鉄筋を配置することにより，構造物の耐震性能は飛躍的に向上することが明らかとなった。

さらに，設計の合理化を図ることを目的に，簡易耐震設計法についての検討を行い，内巻帯鉄筋を配置した標準的なＲＣラーメン高架橋に対して，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となる耐震設計法の有効性を確認することができた。

謝辞

本耐震設計手法の検討にあたり，東日本旅客鉄道（株）建設工事部構造技術センター石橋所長，同研究開発センターフロンティアサービス研究所小林副課長にご指導を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

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）小林薫，菅野貴浩，木野淳一：軸方向鉄筋の内側にせん断補強鉄筋を配置したRC柱の交番載荷実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1135-1140，2002.7

3）木野淳一，菅野貴浩，吉田徹，岩佐高吉：軸方向鉄筋の内側に円形スパイラル鉄筋を組み合わせ配置したRC柱の変形性能について，コンクリート工学年次論文集，Vol.25,2003.7（投稿中）