

設計用簡易降伏強度スペクトルによる鉄道用ラーメン高架橋の耐震設計

小林 薫¹・鎌田 則夫²・石橋 忠良³

¹正会員 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事事務 構造技術センター(〒151 東京都渋谷区代々木2-2-2)

²正会員 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事事務 構造技術センター(〒151 東京都渋谷区代々木2-2-2)

³フェロー会員 工博 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事事務 構造技術センター(〒151 東京都渋谷区代々木2-2-2)

1. はじめに

阪神大震災以降、構造物の耐震設計は、構造物の弾塑性挙動を詳細に検討するための弾塑性地震応答解析によることが推奨されている。これは、構造物にとって、従来の耐震設計の目標となっていたプレート境界型地震での地震動より、さらに大きな地震動となる内陸型の直下型地震に対しても所要の耐震性能を満足する必要があり、特に、構造物の塑性化を許容するじん性設計を行うコンクリート構造物の耐震設計では、構造物の塑性域での挙動をより精度よく把握する必要があるためと思われる。

振動性状が複雑な構造物では、各部材の力学特性や降伏耐力によって、各部材の塑性ヒンジの形成順が構造物の地震応答に大きく影響するため、構造物の弾塑性地震応答解析結果として、構造系と部材系で一致しなくなるような場合も想定される。このような構造物の耐震設計では、弾塑性応答解析の必然性がある。

しかし、振動性状が比較的単純な構造物、例えば、単純桁を支持する橋脚やビームスラブ形式の1層ラーメン構造などでは、これらの構造物の復元力特性を考慮した1質点系の振動モデルでの弾塑性地震応答解析をあらかじめ数多く行うことによって、構造物の弾塑性挙動が事前に把握できる。このような場合では、設計対象構造物毎に弾塑性地震応答解析の必然性はないものと思われる。

そこで、本文では、1質点系振動モデルへの置換が可能な構造物を前提に、耐震設計計算の簡便さと構造物の弾塑性挙動を考慮した耐震設計用簡易降伏強度スペクトルを提案し、そのスペクトルを用いた設計例として7径間連続1層の鉄道用RCラーメン高架橋耐震設計の概要を示す。さらに、当該設計構造物を部材レベルでの振動モデルによる弾塑性時刻歴地震応答解析を行い、本文で示した設計用簡易降伏強度スペクトルの有効性に関する検証を行ったものである。

2. 耐震設計用簡易降伏強度スペクトルの提案

降伏強度スペクトル¹⁾は、1質点系振動モデルの弾塑性地震応答解析から、構造物の等価固有周期、構造物が許容する応答塑性率、構造物の降伏震度の関数として表現したものである。降伏強度スペクトルは、解析用地震波や1質点系振動モデルの復元力特性によって大きく変化する。このため、降伏強度スペクトルの作成では、対象とする構造物の復元力特性や構造特性を十分把握する必要がある。さらに、耐震設計を簡便に行うためには、耐震性能照査も自動的に満足するように設定する必要もある。

図-1に、本文で提案する耐震設計用簡易降伏強度スペクトルの例を示す。このスペクトルの作成条件としては、構造物の復元力特性を剛性低減型のバイリニアおよび剛性低減型のトリリニアとし、検討用地震波を1995年の兵庫県南部地震における神戸海洋気象台での観測記録、1968年十勝沖地震における八戸港湾における観測記録を用いた。図中の各点は、弾塑性地震応答解析結果として、構造物に許容する応答塑性率が10となるように復元力特性の降伏耐力をインテレーションにより求め、降伏震度として示したものである。本解析結果を踏まえ耐震設計用簡易降伏強度スペクトルとしては、工学的な

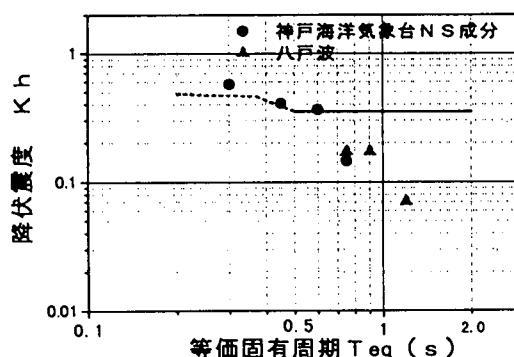


図-1 耐震設計用簡易降伏強度スペクトル

判断を加え構造物に要求される降伏震度を実線で示したものである。

本スペクトルの特徴は、1質点系振動モデルに置換可能な構造物の有する計算上の等価固有周期帯で、構造物に要求される降伏震度をフラットにしている点である。このようなスペクトルにするメリットとして、耐震設計計算中、仮に部材の断面寸法が多少変化しても降伏震度に変化がないことから設計作業上の大きな手戻りもなく簡便に耐震設計が行うことができる。また、鉄道構造物のようなライン上に伸びるような場合、ライン上の構造物の耐震性能が同程度となり、震後の応急復旧等の効率化に対しても有利と思われる。さらに、本スペクトルを用いて構造物の降伏震度を設定するならば、構造物の応答加速度が0.2gレベル程度に設定されるレベル1地震動に対する部材の検討も自動的に満足することになる。

1質点系の振動モデルへの置換が可能な構造物を前提に、このような耐震設計用簡易降伏強度スペクトルを用いる理由として、構造物における等価固有周期の算定精度の問題がある。構造物の等価固有周期は、構造系の荷重・変位曲線における原点と降伏点を結ぶ割線剛性に対する構造系の固有周期を表し、降伏強度スペクトルにおける弾塑性挙動を示す構造物の振動特性として表現される。等価固有周期を精度よく算定するためには、構造系の割線剛性を正確に把握する必要があること、地震時の地盤のひずみ度を考慮した地盤のパネ定数を適切に定めることが重要となる。しかしながら、構造物の設計時点では、必ずしも十分な調査、検討から構造物の等価固有周期を算定されているとはいえず、実設計では簡易手法から算定されているのが実状である。このため、等価固有周期に対して鋭敏な降伏強度スペクトルでは、耐震設計計算用に適さないと思われるからである。

3. 耐震設計用簡易降伏強度スペクトルを用いた鉄道用ラーメン高架橋の耐震設計

図-2に、耐震設計用簡易降伏強度スペクトルによる

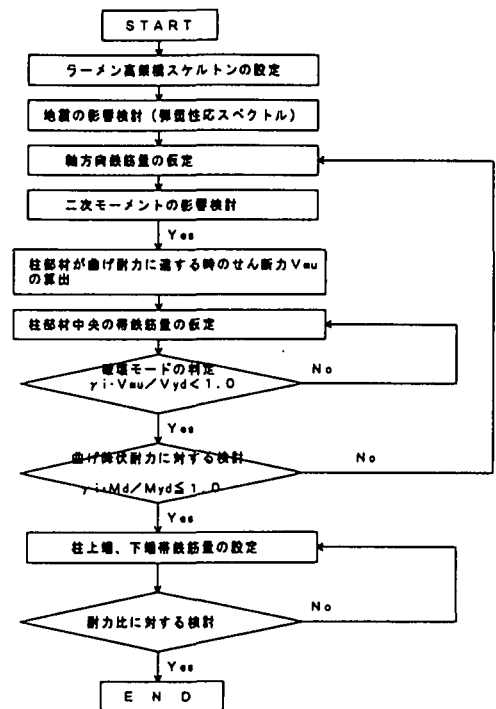


図-2 ラン高架橋耐震設計の検討フロー

鉄道用ラーメン高架橋耐震設計の検討フローを示す。また、図-3に、設計計算を行ったラーメン高架橋の一般図を示す。

ラーメン高架橋は、機能性や経済性に有利な構造形式で、鉄道のコンクリート構造物の中で最も多く用いられている。ラーメン高架橋では、一般に柱部材が耐震の検討において断面が決定される。柱部材の設計方針としては、柱部材の軸方向鉄筋量を耐震設計用簡易降伏強度スペクトルで要求される降伏震度以上の降伏耐力を確保するように配置する。柱部材のせん断設計については、柱部材上下端の2D（D：柱断面高さ）区間以外の箇所では柱部材がせん断先行の破壊モードにならないようにせん断補強鉄筋を配置する。また、柱上下端の2D区間については、構造上塑性ヒンジとなる箇所であることから、所要の部材じん性能を満足するようにせん断補強鉄筋を

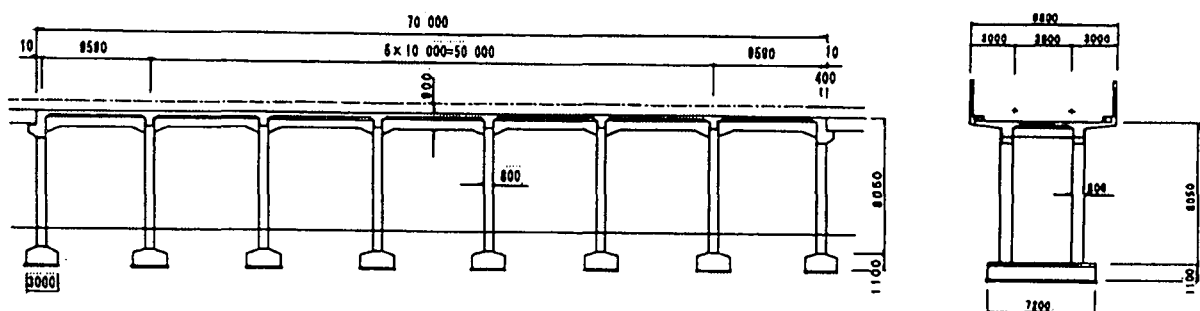
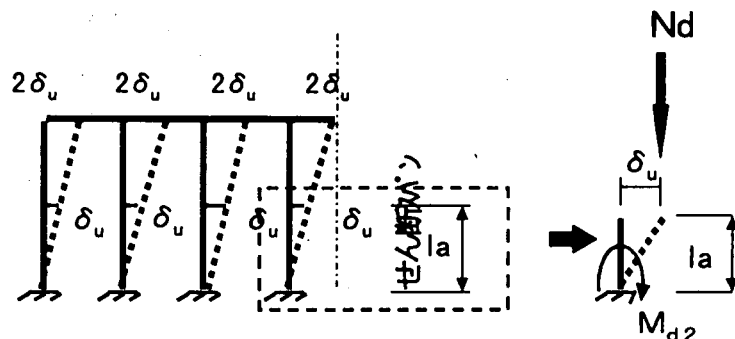


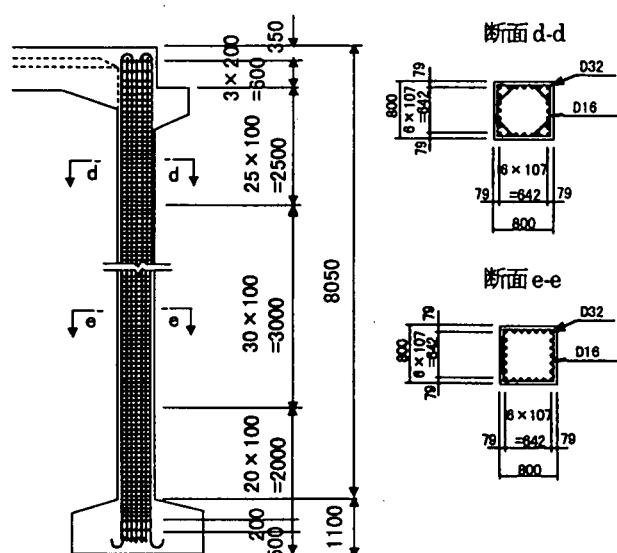
図-3 設計ラーメン高架橋一般図

配置する。このとき、図－1で示した耐震設計用簡易降伏強度スペクトルでは、構造系の応答塑性率を 10 としていることから、10 以上の部材じん性率が必要となる。鉄筋コンクリート部材のじん性能に関しては、塑性ヒンジ区間における曲げ耐力に達するときのせん断力に対する部材のせん断耐力の余裕度（以下「耐力比」という）が大きく影響し、耐力比が2程度となる場合は概ね部材じん性率で 10 程度²⁾ 確保することが可能であることから、柱上下端2D区間では耐力比が2以上となるようにせん断補強鉄筋を配置する。なお、曲げ耐力に達するときのせん断力を算出する際は、実際に柱部材に配置される鉄筋の降伏強度から算定する必要があるが、本設計では鉄筋の規格降伏強度を材料修正係数 ρ_m ($\rho_m=1.2$ ²⁾ とした) から補正して鉄筋の降伏強度を定め、かつ、断面に配置されている全軸方向鉄筋を考慮して算定した。

構造物には、応答塑性率 10 となるような大変位領域まで塑性化を許容することから、柱軸方向力によって柱部材には2次モーメントの影響があると思われる。2次モーメントの影響は、幾何学的非線形性を考慮した解析によって詳細に求めることが可能であるが、本設計では簡易手法として柱部材をせん断スパンで切り出してきた簡易モデルから(1)式により算定した。図－4に、2次モーメント算定用簡易モデルを示す。なお、この2次モーメントは、図－2のフローにおいて曲げ降伏耐力に対する検討時の慣性力作用時の断面力 (M_d) に考慮している。



図－4 2次モーメント算定用簡易モデル



図－5 柱部材配筋図

$$M_{d2} = \delta_u \cdot N_d \quad (1)$$

ここに、 M_{d2} ：最大塑性変位によって生じる2次モーメント

δ_u ：最大塑性変位

$$\delta_u = \mu_{rd}(\delta_{y0} + \delta_{y1})$$

μ_{rd} ：最大応答塑性率

δ_{y0} ：降伏時のく体の変位³⁾

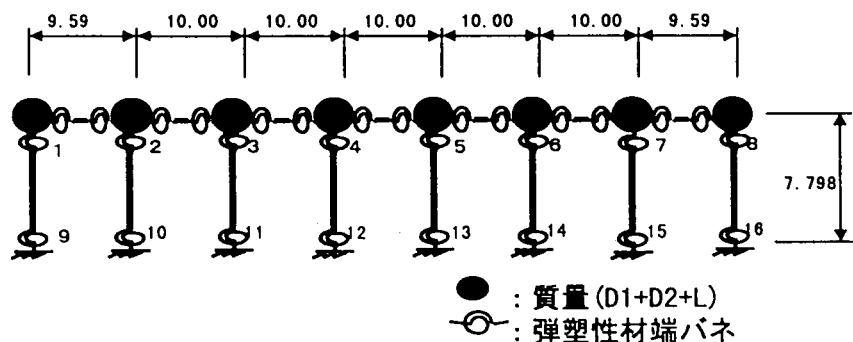
δ_{y1} ：降伏時の軸方向鉄筋抜け出しによる回転変位³⁾

N_d ：軸方向圧縮力

降伏時のく体の変位 δ_{y0} 、降伏時の軸方向鉄筋の抜け出しによる回転変位 δ_{y1} については、参考文献3)により算定した。設計結果として柱部材の配筋状況を図－5に示す。

4. 弾塑性地震応答解析による検証

耐震設計用簡易降伏強度スペクトルを用いた耐震設計の妥当性を検証するために、当該設計対象ラーメン高架橋に対し、部材レベルでの弾塑性時刻歴地震応答解析を行った。図－6に、解析モデルを示す。



図－6 弾塑性地震応答解析モデル

部材に考慮した復元力特性は、柱部材に曲げモーメントと軸方向力の相関を考慮した標準型のトリリニアを、梁部材にはtakeda型をそれぞれ用いた。なお、梁部材では、部材特性上、発生する軸方向力が小さいので復元力特性では軸方向力との相関は無視した。解析に用いた地震波は、1995年の兵庫県南部地震における神戸海洋気象台での観測記録（NS成分）を用いた。解析結果として、図-7にラーメン高架橋上層はり位置での応答加速度波形を、図-8に応答変位波形を、図-9に各部材の最大応答塑性率をそれぞれ示す。

応答加速度の最大値は上層位置で536gal、応答変位については最大値42.1cmを示し、残留変位も約20cmとなった。特に、残留変位については、設計で考慮している最大塑性変位の約60%であった。また、各部材での最大応答塑性率については、7.0程度となり設計条件を満足していた。

以上の結果から、本文で提案したように実用的な範囲で降伏震度をフラットにした耐震設計用簡易降伏強度スペクトルによる耐震設計計算は、弾塑性地震応答解析による照査を行う必要がなく、自動的に耐震性能が満足されることになる。

5. まとめ

本文は、耐震設計の簡便さと構造物の弾塑性挙動を考慮した耐震設計用簡易降伏強度スペクトルによる鉄道用ラーメン高架橋の耐震設計について述べた。特に、応答塑性率10となるような大変位領域の耐震設計では、P-Δ効果の影響も無視できなくなると思われるが、設計ルーチンの中でP-Δ効果を簡易手法で考慮することによって、弾塑性地震応答解析による照査から耐震性能を十分満足する結果が得られた。

このように、構造物を1質点系の振動モデルに置換が可能であるという前提で示した耐震設計用簡易降伏強度スペクトルは、耐震性能照査の部分もスペクトルの設定で考慮することによって、弾塑性地震応答解析を行わなくても合理的な耐震設計が可能であると思われる。

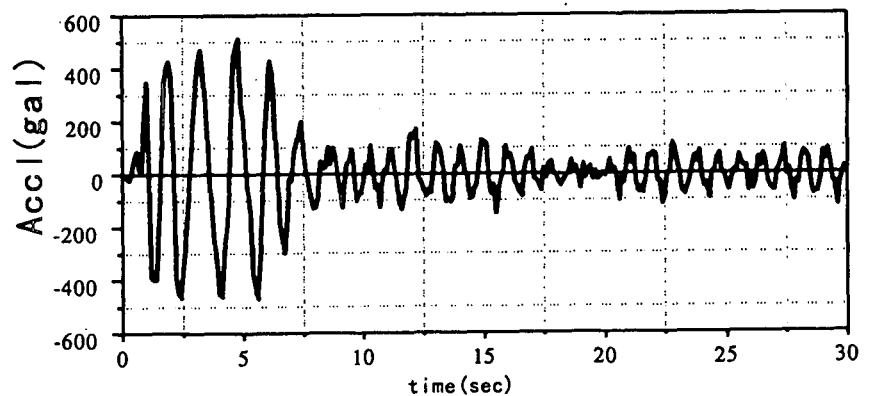


図-7 上層位置での加速度応答波形

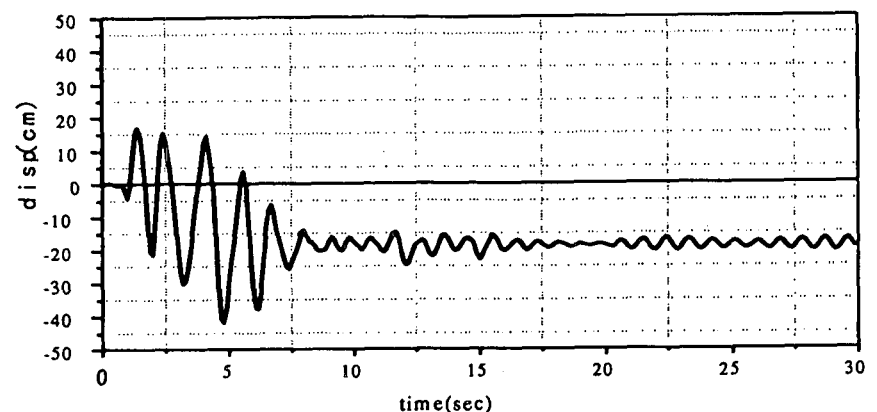


図-8 上層位置の応答変位波形

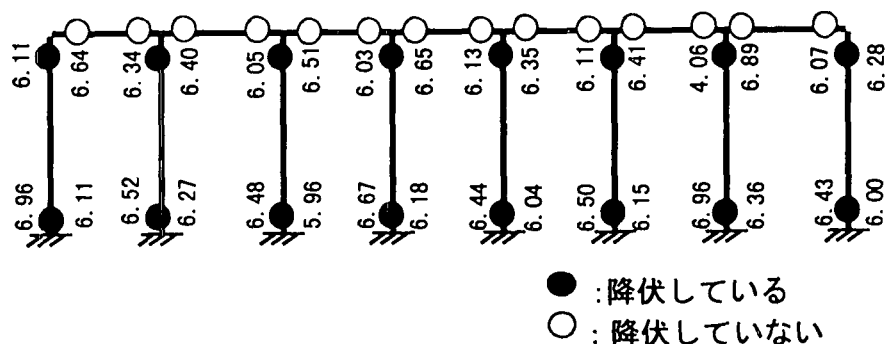


図-9 各部材の応答塑性率

参考文献

- 1) 柴田明徳：最新耐震構造解析、森北出版、p133
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書耐震設計編平成8年度制定
- 3) 石橋忠良、吉野伸一：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形性能に関する研究、土木学会論文集、第390号/V-8