

不整形ラーメン高架橋の性能設計に基づく 耐震設計例(その1)

○西村昭彦¹・斉琳²・佐野弘幸³・長井哲和⁴

¹フェロー会員 工博 株式会社テス 土木事業部(〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38)

²正会員 Ph.D 株式会社テス 土木事業部(〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38)

³正会員 工修 株式会社テス 土木事業部(〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38)

⁴正会員 技術士 ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社 土木設計部(〒460-0008 名古屋市中区栄 2-5-1)

「鉄道構造物設計標準耐震設計」¹⁾(以下、「耐震標準」と称する)に基づいて、不整形ラーメン高架橋の耐震設計を3次元動的解析法で行った。本報告では、耐震標準に記載された項目に基づいた3次元モデルの設定および耐震性能の評価を実際に行い、これらの作業レベルにおいて、留意すべき点や検討を要する事項、今後解決しなければならない問題点などについて整理した。

さらに、(その2)では、鉄道構造物の耐震設計で一般に用いられている2次元の非線形スペクトル法と、3次元動的解析法の比較を行い、変形の違いや照査結果の違いを示し、考察した。

Key Words : 3-D model, nonlinear dynamic analysis, earthquake-resistant performance, assessment

1. はじめに

耐震標準では、耐震設計における構造物の応答値の算定は、動的解析法によることを原則としているが、一般的な構造の橋梁・高架橋に対しては、所要降伏震度スペクトル等により応答値を求めても良いこととされている。現状の耐震設計においては、2次元の静的非線形解析の結果に対して所要降伏震度スペクトルを用いて応答値を算定していることが多く(以下、非線形スペクトル法と称する)、3次元の動的解析法が導入されている例は少ない。

本報告では、3次元動的解析の設計手順を示した上で、鉄道構造物の3次元動的解析による耐震設計と非線形スペクトル法による耐震設計の手法を比較する。その上で、3次元振動モデルの作成や動的解析結果の照査などで、問題となった項目や独自に設定した項目などを取り上げ、考察を行う。

2. 設計法の比較

非線形スペクトル法を用いた耐震設計と3次元の動的非線形解析を用いた耐震設計の手順について比較を行う。

(1) 2次元解析と3次元解析の違いに関する相違点

モデルの次元が増えると、部材が変形する方向が増加し、2次元モデルで考慮していた曲げ変形に対して直角方向の曲げ変形も同時に発生し、ねじれの変形も構造物の振動に大きく影響を与えるようになる。また、部材の断面形状によっては曲げ耐力や変形性能が変形方向によって変化するため、これに伴って剛性低下の基準を変更する必要があるなど、モデル設定の作業量は多くなる。

しかし、逆に3次元解析により省略できる作業項目も存在する。例えば、2次元モデルでは、一つ

の構造物に対して複数の断面でモデルを設定して検討する必要があるが、これらのモデルに載荷する地震慣性力は荷重分担率を計算して、分配する必要がある。この点においては、3次元解析では一つのモデルを作成するだけで構造物全体の照査を行うことができるので省力化となる場合がある。

特に、複雑な構造形式の構造物では構造物全体の振動モードを2次元に比べて合理的に表現できるので解析結果の信頼性も高いと考えられる。

(2) 静的解析と動的解析に関する相違点

非線形スペクトル法は静的解析の結果を利用した動的解析と位置付けられるが、現状では非線形スペクトルは1自由度の振動モデルの動的解析に基づいて設定されており、高次あるいは複雑な振動モードが卓越する構造物には適用できない。一方、動的解析では構造物の詳細な地震応答に対応した変形性能の検証を行うことができる。

しかし、破壊形態の判定は構造物が十分に耐力が低下するまで構造物を変形させる必要があるが、動的解析でこの状態を表現することは難しい。本報告では、破壊形態の判定には3次元のモデルに対して静的非線形解析を行い、せん断に対する照査により判定した。

また、動的解析においては、部材減衰係数の設定が解析結果に影響を及ぼすため、十分に検討する必要がある。非線形特性による履歴減衰を考慮する部材については0.02、履歴減衰を考慮しない部材については0.05、剛域やねじれ変形など弾性体として損傷をさせない場合などは、0.01とした。

なお、動的解析には、剛性比例減衰を用いた。

3. 構造物の設計条件について

本報告でモデルとした鉄道構造物は、線路方向は1径間、線路直角方向は3径間(中央は複線、両

端は単線)で柱の高さが異なる特殊な構造のラーメン高架橋である。

基礎形式は、線路直角方向の柱を2本ずつ一つのフーチングで連結した直接基礎である。フーチング底面の土質条件は、N 値 50 の砂質土で、地盤種別は G3 である。構造部の形状を図 1 に 3 次元振動モデルの概要を図 2 に示す。

動的解析に用いる入力地震動については、耐震標準に準じて作成されたスペクトルⅡの G3 地盤における地表面設計地震動を用いた。

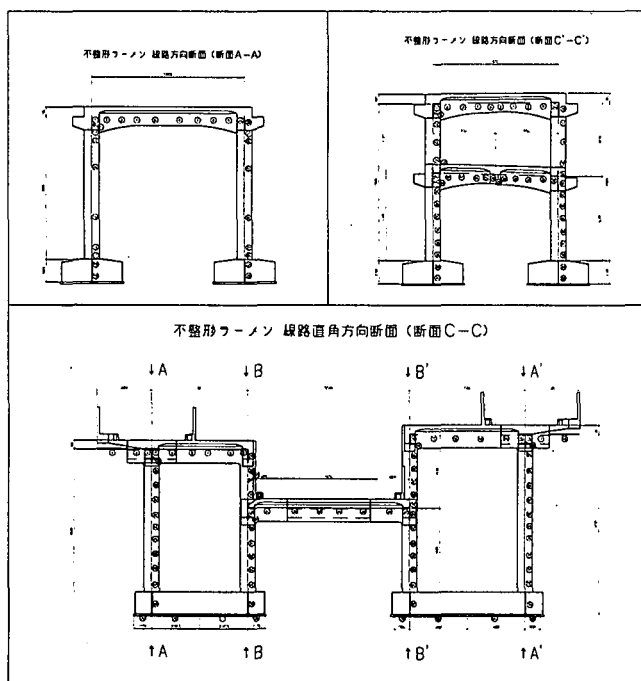


図 1 構造物の一般図と 2 次元モデル

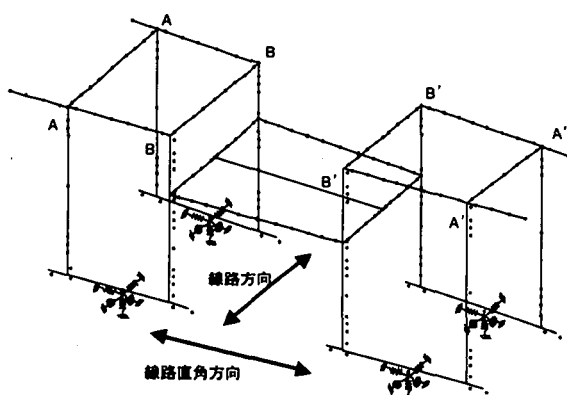


図 2 3次元振動モデル

4. 3次元振動モデルの設定

部材や基礎ばねの復元力特性と荷重の設定について特徴的な事項について記述する。

(1) 部材の非線形特性の設定

解析モデルの各要素の復元力特性は、耐震標準の RC 棒部材の変形特性に基づいてその骨格曲線

を設定し、履歴曲線は修正武田モデルを用いることとした。しかし、部材によっては、軸力変動が大きくその影響に大きく依存したり、スラブの面内方向のねじれ剛性を考慮する必要のある梁部材など、構造上の条件を考慮してモデル諸元の設定方法を検討する必要がある。

(a) 梁部材の設定について

ラーメン高架橋の上層梁は、スラブに密着しているため、ねじり方向の変形や水平方向の曲げ変形は、スラブの影響が大きく影響する。従って、上層梁の変形性能は、主として鉛直方向変位による曲げ変形（以下面内曲げモーメントという）で発揮されるものと考えることができる。また、上層梁の軸力変動は、柱などに比べてその変動幅が小さいため、ほとんど無視できると考え、軸力は初期荷重の状態に固定し、復元力特性を設定した。

面内曲げ変形の復元力特性は、軸力固定で耐震標準に基づいて設定した。水平方向の曲げ変形とねじれ変形については、スラブ全幅に対する影響も考慮して弾性として設定した。

これらの条件は、3次元モデルの固有値解析の結果得られる主な振動モードの形状を考慮して適切と考えられる範囲で設定した。

(b) 柱部材の設定について

柱部材は地震応答により軸力が大きく変動するため、軸力変動を考慮して非線形特性を表現する必要がある。橋軸方向と直角方向の曲げ変形の復元力特性を耐震標準に基づいて設定した。ねじれ変形については、弾性として設定した。

また、曲げ変形が斜め方向の場合は、降伏点および最大耐力点の耐力および曲率の低下を考慮して、図 3 に示す方法で低減を行った²⁾。また、照査を行う場合もこの効果を考慮した。

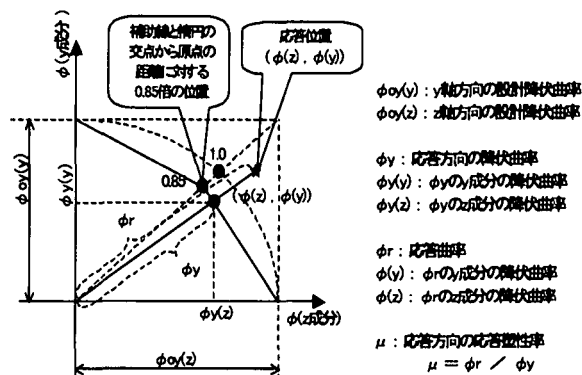


図 3 斜方向曲げ変形による耐力の低減方法

(c) 梁柱共通の設定事項

本解析に用いる 3 次元動的解析ソフトでは、部材の復元力特性で負勾配を設定することが難しいので、耐震標準で定める復元力特性を図 4 に示すように変換して設定した。また、各成分の曲げ変形の履歴特性は、修正武田モデルを用いて履歴減衰を考慮した。減衰定数については剛性比例減衰

を用いた。

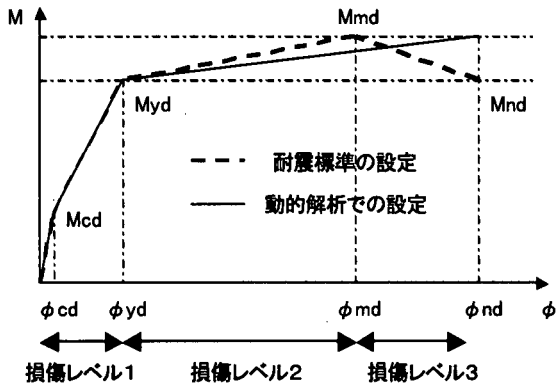


図 4 耐震標準の復元力特性と動的解析で設定した復元力特性の比較

(d) 基礎ばねの設定について

直接基礎の復元力特性は、各基礎の中心位置に集中ばねで設定した。鉛直成分は引抜き抵抗を 0 とし、押込み抵抗の制限値を設定した完全弾塑性のバイリニアモデルとし、履歴特性は考慮しないこととした。水平方向ばねは完全段弾塑性のばねで設定し、履歴特性は考慮しないこととした。回転ばねは各成分ともにトリリニアモデルで設定し、履歴特性は修正武田モデルとした。

各成分のばねは、死荷重と列車荷重載荷時の鉛直反力を考慮してそのときの復元力特性で設定することとした。

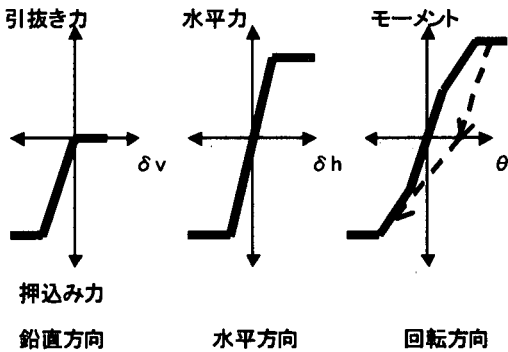


図 5 直接基礎の復元力特性

(2) 荷重の設定

列車荷重は死荷重と異なり、各成分によって構造物に対して作用する荷重の上限値がある。本モデルの設定においては、これらの影響を質量の比率によって表現することとした。列車荷重は作用する成分別に質量を設定することができ、鉛直成分は通常の質量の 1.0 倍、橋軸方向 0.2 倍、直角方向は 0.3 倍とした。

5. 解析および照査の方法

動的解析により損傷レベルを照査し、静的非線形解析により破壊モードの検討を行う。これら 2

種類の解析・照査により同時に安全性が確認された構造物が耐震性能を満足した構造物となる。

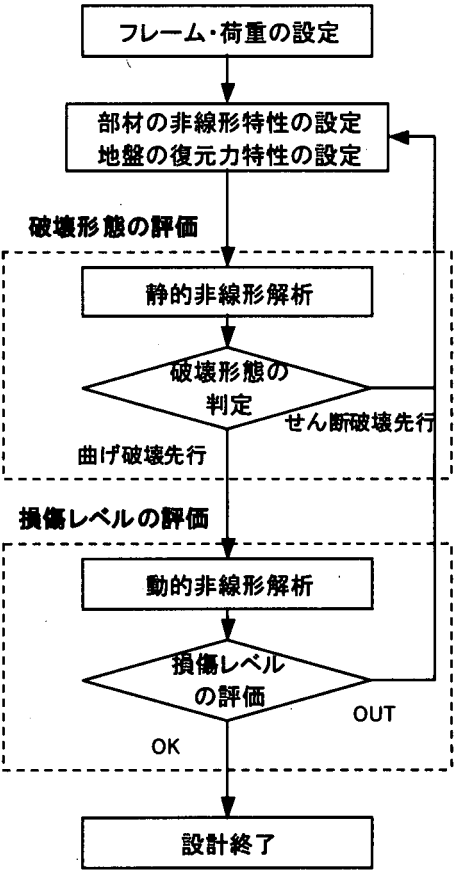


図 6 解析および照査のフロー

(1) 破壊形態の評価

破壊形態の評価は、構造物が脆性的なせん断破壊しないように設計することを目的として行うものである。各部材がせん断破壊よりも曲げ破壊が先行すること、あるいは、十分なせん断耐力が確保されていることを確認する。

(a) 解析方法

破壊形態は、3 次元の動的解析のモデルに対して静的非線形解析を行い、評価した。このときのモデルの部材諸元は耐震標準に準じたテトラリニア型で設定し、部材の軸方向鉄筋の材料係数も 1.2 倍とした。解析は、構造物の耐力が十分に低下するまで押し切るのが望ましいが、解析の収束性を考慮して鉛直部材のうち一部材でも ϕ_n に達した解析ステップ、または、応答震度が降伏震度を下回る解析ステップまでの全ステップを照査範囲とした。

(b) 評価の方法

耐震標準に準じて全解析ステップを対象として、部材を次のタイプに分類し、それぞれのタイプ別に照査を行った。照査の方法を次に示す。

部材のタイプ別に照査を行う。

① 静的非線形解析で ϕ_m に達した部材

次式により破壊モードの判定を行う。

$$\alpha \cdot V_d / V_{yd} \leq 1.0 \rightarrow \text{曲げ破壊モード}$$

$\alpha \cdot V_d / V_{yd} > 1.0 \rightarrow$ せん断破壊モード
ただし、 V_d は最大応答せん断力、 V_{yd} は V_d の解析ステップにおける設計せん断耐力、 $\alpha = 1.0$ である。

②静的非線形解析中に $\phi_y \sim \phi_m$ にある部材

次式により破壊モードの判定を判定を行う。

$\alpha \cdot V_d / V_{yd} \leq 1.0$ 曲げ破壊モード

$\alpha \cdot V_d / V_{yd} > 1.0$ せん断破壊モード

ただし、 $\alpha = 1.2$

③静的非線形解析で ϕ_y に達しなかった部材

次式によりせん断照査を行う。

$\gamma_i \cdot V_d / V_{yd} \leq 1.0$ であることを確認

ただし、 $\gamma_i = 1.0$

せん断破壊モード、または、せん断照査で危険と判定された場合は、断面（配筋など）を変更する必要がある。

② 損傷レベルの評価

損傷レベルの評価は、地震応答の結果部材に生じた曲率の大きさによって評価する。そして、その値が部材毎に定まる制限値を越えないように設計することを目的として行うものである。

(a) 解析方法

L2 地震動スペクトルⅡ（G3 地盤地表面波）による動的解析結果を用いて各要素の変形性能を曲率で評価する。

(b) 評価の方法

要素ごとに応答塑性率(μ)の時刻歴を計算する。応答塑性率は各時刻の軸力を考慮した部材の $M \sim \phi$ 曲線より求めた降伏曲率(ϕ_{yd})で応答曲率(ϕ_d)を除して求める。 $(\mu = \phi_d / \phi_{yd})$

損傷レベルは、各部材ごとに最大応答塑性率となる時刻の応答曲率を用いて照査する。

破壊形態の判定で降伏に達しなかった部材については、せん断力(V_d)が最大となる時刻で断面力を抽出し、せん断照査も行う。

(c) 照査の方法

本検討では、耐震性能Ⅱを目標としており、各部材の最大応答曲率が損傷レベル2または損傷レベル3を満足することを確認する。基礎ばねについては応答塑性率が6以内となっていることを確認する。

①梁部材の照査

次式により曲率の制限値による照査を行う。

$\gamma_i \cdot \phi_d / \phi_{md} \leq 1.0$ であることを確認

ただし、 ϕ_d は最大応答塑性率時の曲率、 ϕ_{md} はそのときの軸力における耐力最大点の曲率、 $\gamma_i = 1.0$ である。

②柱部材の照査

次式により曲率の制限値による照査を行う。

$\gamma_i \cdot \phi_d / \phi_{nd} \leq 1.0$ であることを確認

ただし、 ϕ_d は最大応答塑性率時の曲率、 ϕ_{nd} はそのときの軸力におけるN点の曲率、 $\gamma_i = 1.0$ である。

③破壊形態の評価で降伏しない部材の照査

次式によりせん断照査を行う。

$\gamma_i \cdot V_d / V_{yd} \leq 1.0$ であることを確認

ただし、 V_d は最大応答せん断力、 V_{yd} は V_d の解析ステップにおける設計せん断耐力、 $\gamma_i = 1.0$ である。

6. 考察

耐震設計の対象が不整形ラーメン高架橋のような特殊な形状の構造物については、正しい評価を行うためには3次元の動的解析を行うことが望ましい。この理由として、非線形スペクトル法の応答値は1次の固有振動数および振動モードに基づいたものであり、高次の固有振動数および振動モードの影響が考慮できないからである。

また、3次元動的解析法と非線形スペクトル法で耐震設計を行うにあたっての比較をモデル作成、解析、照査の工程を考慮して作業性を重視して評価すると次のようになる。

(a) モデル作成

モデル作成の作業量は3次元動的解析の方が多くなる。これは、1部材あたりの設定項目が成分が多くなるためである。

(b) 解析

解析の作業量については、動的解析のほうが少なくなる。これは、非線形スペクトルでは検討断面が多くなることと、部材諸元の変更に際して検討済みの断面にまで影響が及ぶ場合は照査済みの断面に対してまで再解析する必要があるためである。特に断面形状の変更を行う際は、荷重分担率の計算から修正する必要があるため煩雑となる。

(c) 照査

照査の作業量については、動的解析の方が多くなる。これは、動的解析の解析ステップ数が多いことと一部材あたりの成分数が多いためである。

7. 結論

3次元動的解析法により不整形ラーメン高架橋の耐震設計を試みた。

現状において、耐震標準に基づいた3次元動的解析法による耐震設計は可能ではあるものの作業面を考慮したソフトウェア環境はほとんど整っていない状態である。このような状況では、非線形スペクトル法に比べると作業量は多く煩雑で非効率と思える。しかし、作業項目としては3次元動的解析のほうが単純化できるため、作業面におけるソフトウェアが整備されると3次元解析の方が有利になる可能性が高い。

精度の向上としては、2成分同時に大きく断面力が作用するときの照査基準が課題となろう。

参考文献

- 1) (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、丸善、1999.10
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説、丸善、1971.5