

# 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2)

西村昭彦<sup>1</sup>・斉琳<sup>2</sup>・○佐野弘幸<sup>3</sup>・長井哲和<sup>4</sup>・馬淵倉一<sup>5</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>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)

<sup>4</sup>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)

<sup>5</sup>正会員 工修 株式会社CRC 総合研究所 建設システム事業部(〒136-8581 東京都江東区南砂 2-7-5)

「鉄道構造物設計標準耐震設計」(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。(その1)に基づいた3次元動的解析を用いた設計の結果と鉄道構造物の耐震設計で一般に用いられている2次元静的非線形解析を用いた非線形スペクトル法による設計の比較を試みた。

定量的な比較としては、2次元モデルと3次元モデルの静的非線形解析の比較と3次元モデルによる非線形スペクトル法と動的解析法の比較を行った。さらに、3次元動的解析を用いて設計した構造物を2次元のモデルを用いた非線形スペクトル法で照査を試みた。

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

## 1. はじめに

(その1)においては、3次元動的解析による設計の手法を提案し、2次元非線形スペクトル法と3次元動的解析法の相違点について考察してきた。本報告では、これらの手法に基づいて不整形ラーメン高架橋を設計した場合にどのような相違点があるかを定量的に示す。これらの比較結果より不整形ラーメン高架橋の設計における留意点について考察した。

## 2. 比較の方法

2次元の非線形スペクトル法と3次元の動的解析法による設計を直接比較することは難しい。ここでは、2次元モデルと3次元モデルの相違点、非線形スペクトル法と動的解析法の相違点を把握するために解析法を表1に示すように分類した。

表1 設計方法の種類

|           | 2次元 | 3次元 |
|-----------|-----|-----|
| 非線形スペクトル法 | A   | B   |
| 動的解析法     | C   | D   |

A: 2次元モデルで静的非線形解析を行い非線形スペクトルで応答値を求める方法。鉄道構造物の耐震設計で一般的に用いられている。

B: 3次元モデルで静的非線形解析を行い非線形スペクトルで応答値を求める方法。

C: 2次元モデルで動的解析を行い応答値を求める方法。

D: 3次元モデルで動的解析を行い応答値を求める方法。

本報告で行った設計に用いた方法である。

本報告では次の3つの手法で比較を行った。

### (a) 2次元モデルと3次元モデルの静的非線形解析結果を比較

(AとBを震度~変位曲線で比較する。)

### (b) 3次元モデルによる非線形スペクトル法と動的解析法の比較

(BとDを部材の損傷レベルで比較する。)

### (c) 2次元非線形スペクトル法と3次元動的解析法による同一構造物の照査結果の比較

(AとDを設計結果の定性的な比較を行う。)

これらの比較検討は、(その1)に示した不整形ラーメン高架橋を対象に行った。不整形ラーメン高架橋のモデル概要を図1に示す。

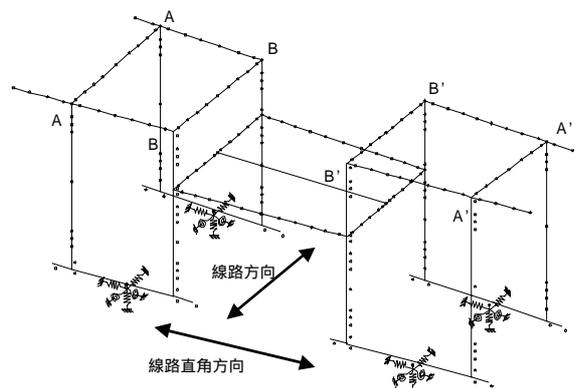


図1 不整形ラーメン高架橋のモデル概要

## 3. 2次元モデルと3次元モデルの比較

2次元モデルと3次元モデルに対して静的非線形解析を行い、震度~変位曲線の比較を行った。

### (1)比較の方法

3次元モデルについては線路方向に水平力を与えて静的非線形解析を行い、2次元モデルについては線路方向に4断面モデルを作成して静的非線形解析を行った。これらの解析結果を震度~変位曲線により比較する。

このときの3次元モデルの解析は、要素の変形特性を(その1)で述べたように設定したため、震度~変位曲線は負勾配にならない。3次元モデルの解析結果には、最初に部材が最大耐力点に達する点をマークした。これは、負勾配への編曲点に相当する点と考えることができる。

### (2)比較結果

2次元モデルの解析結果では、断面によって変形性能が大きく異なることがわかる。外側の1層ラーメン部分の断面(AA,A'A')は、内側の2層ラーメン部分の断面(BB,B'B')に比べて応答震度が大きく変形性も大きい傾向がある。

3次元モデルの解析結果は、2次元モデルの断面(BB,B'B')の解析結果に類似した曲線となっており、最大耐力点を比較すると変形性能は、2次元モデルより変位が大きくなる傾向を示していることがわかる。比較の結果を図2に示す。

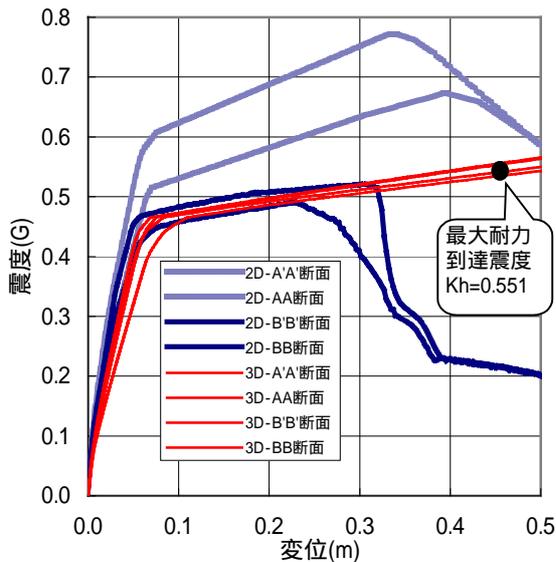


図2 線路方向の震度~変位曲線の比較

## 4. 3次元モデルによる非線形スペクトル法と動的解析法の比較

### (1)比較の方法

3次元動的解析のモデルをそのまま使って、静的非線形解析を行い、非線形スペクトル法で応答値を求めた。この結果を、非線形スペクトル法の結果として、応答値における部材の損傷レベルを評価した。

一方、動的解析の結果は、各部材について最大応答塑性率時の部材の損傷レベルで評価した。これらの結果を部材ごとに比較することにより、非

線形スペクトル法と動的解析法を比較する。

### (2)動的解析法におけるモデルの振動特性

動的解析におけるモデルの振動モードを有効質量比で示すと表2のようになる。また、振動モードを図3に示す。

1次モードおよび2次モードは線路方向の振動モード、3次モードは線路直角方向の振動モードであるといえる。また振動モードの形状から、1次の振動モードは、背が高く線路方向スパンが短いA'A'断面とB'B'断面で囲まれたラーメンの部分に卓越した振動モードであると考えられる。また、2次モードは、AA断面とBB断面で囲まれたラーメンの部分に卓越した振動モードであると考えられる。1次、2次振動の影響により、線路方向の振動はB'B'断面付近を中心にねじれ現象が見られるが、線路直角方向の振動は見られない。

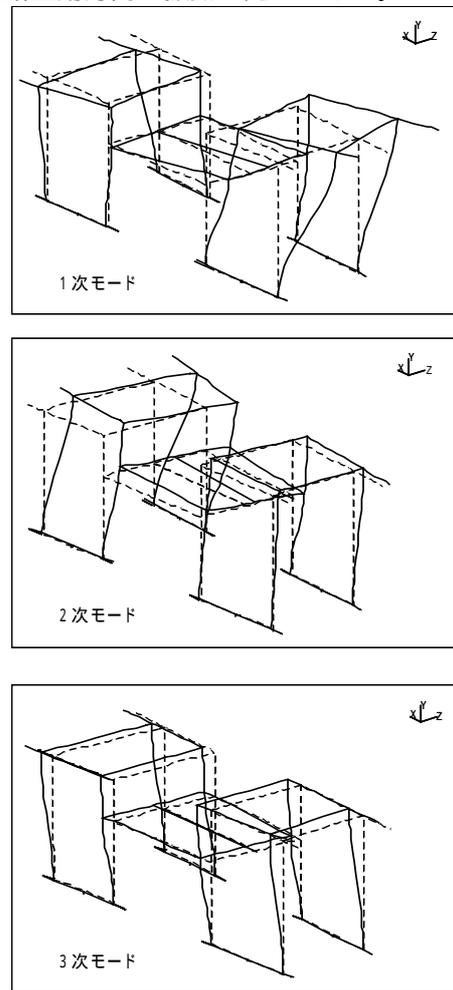


図3 動的解析における振動モード

表2 振動モード(有効質量比)

| 振動次数 | 固有振動数 (Hz) | 有効質量比(%) |        |
|------|------------|----------|--------|
|      |            | 線路方向     | 線路直角方向 |
| 1次   | 2.514      | 14       | 0      |
| 2次   | 2.721      | 53       | 0      |
| 3次   | 3.307      | 0        | 70     |

### (3) 比較結果

構造物の各部材ごとに、損傷レベルが最も大きい要素を代表として損傷レベルを表記した結果を表 3 および表 4 に示す。解析結果の比較では、非線形スペクトル法の方が損傷レベルは大きい傾向となった。(損傷レベルについては(その1)参照。)

表 3 損傷レベルの評価結果(線路方向)

| 着目部材  | 着目断面       | 損傷レベル  |       |
|-------|------------|--------|-------|
|       |            | スペクトル法 | 動的解析法 |
| 上層梁部材 | AA 断面      | 1      | 1     |
|       | BB 断面      | 1      | 1     |
|       | B'B' 断面    | 1      | 1     |
|       | A'A' 断面    | 2      | 1     |
| 中層梁部材 | BB 断面      | 2      | 1     |
|       | B'B' 断面    | 1      | 1     |
| 外柱部材  | AA 断面(上)   | 2      | 2     |
|       | AA 断面(下)   | 2      | 2     |
|       | A'A' 断面(上) | 3      | 2     |
|       | A'A' 断面(下) | 2      | 2     |
| 中柱部材  | BB 断面(上)   | 2      | 2     |
|       | BB 断面(下)   | 3      | 2     |
|       | B'B' 断面(上) | 3      | 2     |
|       | B'B' 断面(下) | 3      | 2     |

表 4 損傷レベルの評価結果(線路直角方向)

| 着目部材  | 着目断面          | 損傷レベル  |       |
|-------|---------------|--------|-------|
|       |               | スペクトル法 | 動的解析法 |
| 上層梁部材 | AA - BB 間     | 1      | 1     |
|       | A'A' - B'B' 間 | 1      | 1     |
| 中層梁部材 | BB - B'B' 間   | 1      | 1     |
| 外柱部材  | AA 断面(上)      | 2      | 2     |
|       | AA 断面(下)      | 2      | 2     |
|       | A'A' 断面(上)    | 2      | 2     |
|       | A'A' 断面(下)    | 2      | 2     |
| 中柱部材  | BB 断面(上)      | 2      | 1     |
|       | BB 断面(下)      | 3      | 2     |
|       | B'B' 断面(上)    | 2      | 2     |
|       | B'B' 断面(下)    | 3      | 2     |

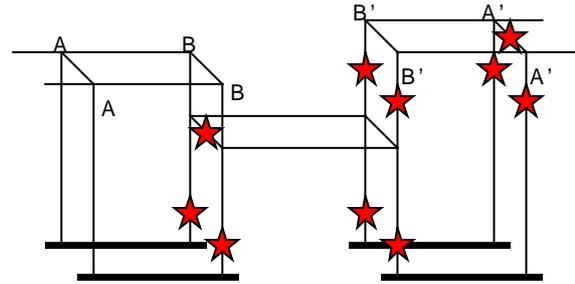
動的解析法と非線形スペクトル法で損傷レベルが異なっている部材に着目して、その分布を比較した。地震動の載荷方向別に比較結果を見ると、線路直角方向の解析では、中柱の下層の部分に損傷レベルに違いがあり、非線形スペクトル法の損傷レベルが大きかった。線路方向の解析では、上層梁、中層梁、外柱、中柱のすべての部材で損傷レベルに違いがあり、非線形スペクトル法の損傷レベルが大きい傾向となった。これは、振動モードの違いが原因と考える。損傷レベルの分布状況を図 4 に示す。

### (4) 損傷レベルの違いについて

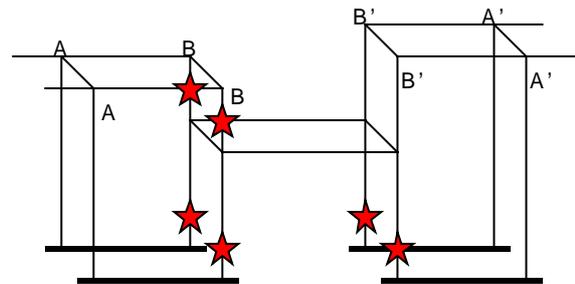
これらの結果より、線路方向の解析において、非線形スペクトル法と動的解析法で損傷レベルの

分布が著しく異なるのは、静的解析で載荷する慣性力と動的解析で生じる振動モードの違いにあるためと考えられる。また、線路直角方向の解析においては、静的解析で載荷する慣性力と動的解析で生じる振動モードが類似しているため、損傷レベルの違いが少ない結果になったと考えられる。

また、静的解析では、剛性の高い部材に応力が集中する傾向にあるが、動的解析では、振動モードに依存して応力や部材の曲率が分散されるため、損傷が集中しにくいと考えられる。これが、静的非線形解析の方が全体的に損傷レベルが大きくなった理由と考えられる。



線路方向解析の比較



線路直角方向解析の比較

★マークは非線形スペクトル法の損傷レベルが動的解析法の損傷レベルより大きい部材であることを示す。

図 4 損傷レベルの分布状況比較(線路方向)

## 5. 2次元非線形スペクトル法と3次元動的解析法による設計法の比較

3次元の動的解析の結果と2次元の静的非線形解析に基づいた非線形スペクトル法の結果を直接的に比較することは物理的に困難である。ここでは、次に示す方法により定性的な比較を試みた結果を示す。

### (1) 比較の方法

3次元の動的解析によって設計された構造物を2次元のモデルで表現し、静的非線形解析を用いた非線形スペクトル法で評価を試みた。この結果、部材および直接基礎の変形性能が足りない結果となった。

そこで、2次元の非線形スペクトル法により変形性能を満足する設計を行い、結果として得られた構造物諸元をもとの構造物諸元と比較することにより、設計法を定性的に評価した。

## (2)比較結果

2次元の非線形スペクトル法による耐震設計の結果得られた構造物諸元は、線路方向の検討で大きく違いが生じた。動的解析法で設計した構造物に対して非線形スペクトル法で設計した構造物は、フーチング幅が大きくなり、線路方向に独立していたフーチングは、連続した一つのフーチングにしなければならなかった。また、中柱の2次元断面において中層梁と下層柱の鉄筋量を増加しなければならなかった。これは、2次元の静的非線形解析においては、変形が進むと独立フーチングでは柱下端部の回転角が大きくなりすぎ、中層梁と柱の連結部分に働く曲げモーメントと回転角が大きくなったためと考えられる。

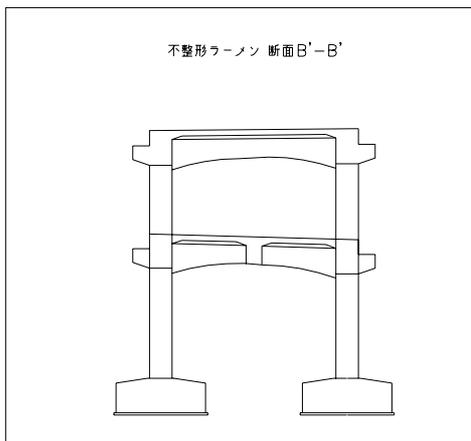


図 5 線路方向一般図(動的解析法)

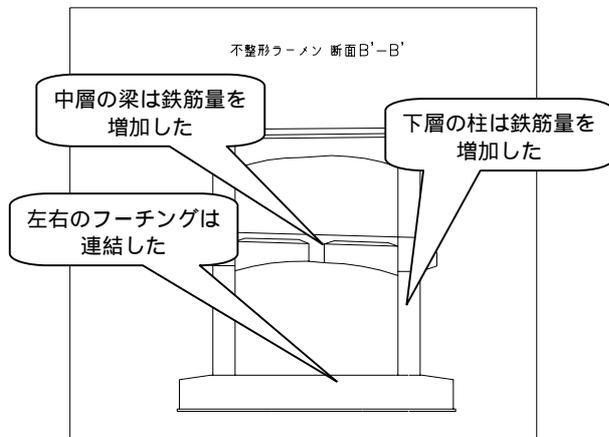


図 6 線路方向一般図(非線形スペクトル法)

一方、動的解析では、フーチングの回転慣性などの影響により、回転変形が十分に大きくなる前に逆方向の慣性力がかかり、回転変形や曲げモーメントが大きくなりすぎたため、独立基礎のままであっても、中層梁や柱にかかる断面力が小さくなったと考えることができる。

各設計法による構造物の線路方向の一般図を図 5 および図 6 に示す。

## 6. 考察

以上の検討結果をまとめると次のようになる。

- 3次元モデルと2次元モデルの比較においては、変形性能は、3次元モデルの方が2次元より高性能となる結果が得られた。
- 3次元モデルによる非線形スペクトル法と動的解析法の比較においては、動的解析の方が損傷が分散することにより、結果的に全体的な損傷レベルは小さくなることが確認できた。
- 2次元非線形スペクトル法と3次元動的解析法による設計法の比較においては、3次元動的解析の方が断面諸元およびフーチングの諸元が小さい結果になり、経済的な設計となることがわかった。

これらの比較結果では、2次元の非線形スペクトル法による耐震設計は、3次元の動的解析法による耐震設計に比べて、部材が大きくなり安全側の設計になっているように感じられる。

しかし、3次元の動的解析法による地震応答解析は、合理的な部材断面力や変形、変位を計算しているため、2次元の非線形スペクトル法に比べて正確な応答値に基づいた耐震設計であると考えられる。

特に、本報告で例とした不整形な構造物については、1次の振動モードがねじれのモードであるため、現状の2次元の非線形スペクトル法では合理的な地震荷重を与えることができない。したがって、3次元の方がより合理的な設計法であるということができよう。

## 7. まとめ

不整形ラーメン高架橋をモデルとした耐震設計により、2次元非線形スペクトル法と3次元動的解析法の比較を行った。これにより、両方の手法に対しての問題点と今後の課題が明らかになった。

非線形スペクトル法の課題としては、ねじれモードなどが卓越する場合などに適用できるような水平震度のかけ方を研究する必要がある。これにより、不整形構造物に対する2次元の非線形スペクトル法の適用範囲を広げることが可能であろう。

また、3次元動的解析法の課題としては、モデルの設定や照査などにおいて、部材のねじれ方向や斜め方向の曲げ変形に関する剛性低下の研究を進め、これらの剛性低下や変形性能の照査のルールを確立する必要がある。さらに、解析および照査の作業の効率化も重要な課題といえよう。ソフトウェアの開発等によりこれらの課題が克服できると、解析ケースや荷重分担率の計算など、大幅に工程を削減できる面もあり、耐震設計の飛躍的な高精度化と作業軽減の可能性が考えられる。

## 参考文献

- (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)
- 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)