

構造物のモデル化の違いが地震時の応答性状に与える影響

Effects on the response behavior by the difference of the modeling structure in case of the earthquake

北武コンサルタント(株) ○ 正員 藤田郁美 (Ikumi Fujita)
 北武コンサルタント(株) 正員 渡辺忠朋 (Tadatomo Watanabe)
 (財)鉄道総合技術研究所 正員 谷村幸裕 (Yukihiro Tanimura)

1. はじめに

地震作用による構造物全体系の性能を合理的に評価するためには、構造物を立体で捉えることが出来る 3 次元でモデル化するのが望ましい。しかし 3 次元のモデル化は複雑であり、特別な場合を除き現在は独立した水平 2 方向にモデル化する 2 次元解析が多くの場合適用されている¹⁾。

本研究では、構造物のモデル化の違いが地震時の応答性状に与える影響に関する基礎資料を得ることを目的とし、鉄道 RC ラーメン高架橋を 3 次元と 2 次元の両方にモデル化し、それぞれの地震時の応答性状を比較検討を行った。以下にその概要を示す。

2. 検討概要

2.1 検討モデル

本検討は、図-1 に示す鉄道 RC ラーメン高架橋を用いて解析を行った。高架橋は 5 径間(全長 50.0m)、3 径間(全長 30.0m)、1 径間(全長 10.0m)の 3 種類で、高架橋高さは、地中梁天端からスラブ天端まで $H=7.0\text{m}$ である。また、線路直角方向の柱間隔は 5.0m であり、軌道構造は複線(2 線)である。図-1 を 3 次元にモデル化したものが、図-2 であり、2 次元にモデル化したものが図-3 である。解析には列車荷重を考慮し、図-1 の L1 側に列車が載っているものとした²⁾。3 次元解析

モデル、2 次元解析モデルともに、径間数を 5 径間、3 径間、1 径間と変化させ、解析を行った。また、柱と梁の接合部に質量を配置した。(表-1 参照)

なお、部材の剛性は柱部材の非線形性のみ考慮するものとし、他部材に関しては、線形として解析した。柱部材の復元力特性は武田モデルとし、基礎形式については直接基礎とし、柱下端を固定としている。

表-1 柱と梁の接合部の節点質量

解析モデル	区分	節点	質量($\text{kN}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$)
2 次元	L1	1, 11, 21, 31, 41, 51	1.086
	L2	52, 62, 72, 82, 92, 102	1.077
	C1	1, 52	1.161
	C2	11, 62	1.041
3 次元	-	1, 51	1.307
	-	11, 41	1.160
	-	21, 31	1.185
	-	52, 102	1.029
	-	62, 92	0.895
	-	72, 82	0.913

注) 区分 L1: 列車載荷有り の 2 次元解析線路方向
 区分 L2: 列車載荷無し の 2 次元解析線路方向
 区分 C1: 2 次元解析線路直角方向端部
 区分 C2: 2 次元解析線路直角方向中間部

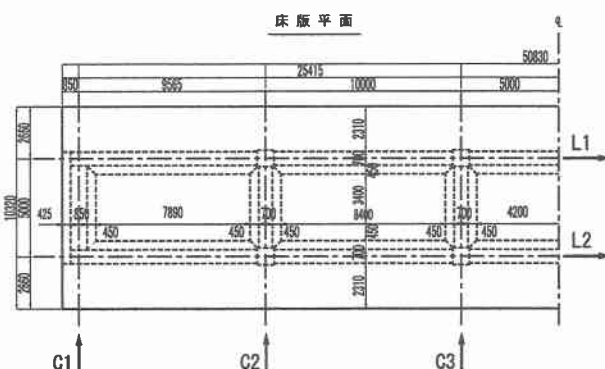
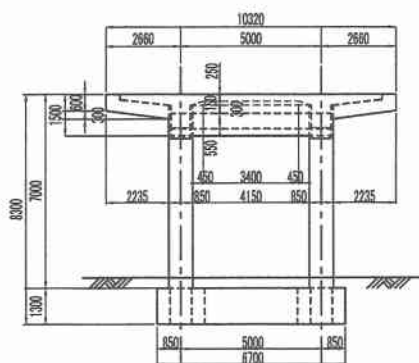


図-1 鉄道 RC ラーメン高架橋構造図

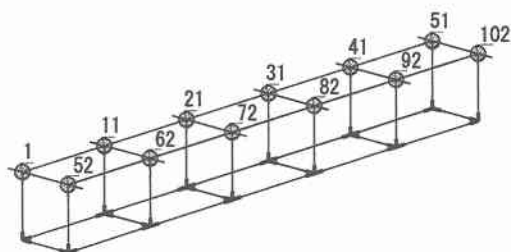


図-2 3 次元解析骨組図(5 径間)

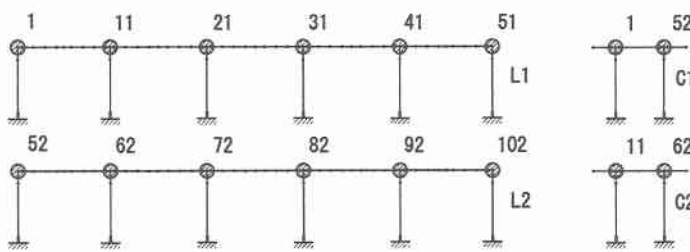


図-3 2 次元解析骨組図(5 径間)

2.2 入力地震動

(1)地震動の入力方向

3次元モデルに関しては、地震動入力方向を線路方向、線路直角方向の他に、図-4に示すように、線路方向から22.5° 時計回りに回転させた方向、同様に 45° , 67.5° 回転させた方向の計 5 方向に入力した。本検討における全検討ケースを表-2 に示す。

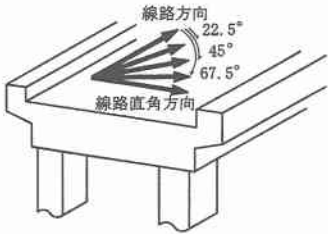


図-4 3次元解析における地震動の入力方向

(2)地震波形

解析に使用した地震波形を図-5に示す。図-5の地震波は実際の鉄道構造物設計で用いられている。

また、入力方向に波形を変換する方法として、始めに主軸座標系を(X, Y)とする。ここから線路方向に対してθ回転した任意の座標系(X', Y')を考えると、X'軸方向での時刻歴波形は式(1)で変換される³⁾。式(1)を使用し、各方向に地震波を入力した。

$$f_x'(t)=f_x(t)\cos \theta +f_y(t)\sin \theta \tag{1}$$

- ここに、 $f_x'(t)$: 変換後の波形
- $f_x(t)$: 線路方向に分担される地震波
- $f_y(t)$: 線路直角方向に分担される地震波
- θ : 線路方向からの角度

3. 部材の非線形性

3.1 部材のモデル化

柱部材は材端ばねモデルを用いた。M-θ関係を考慮したビーム要素としてモデル化した。図-6 の検討方向に対する性能を、線路方向、線路直角方向、22.5° 方向、45° 方向、67.5° 方向の全ての方向に対して適用した。これにより、解析上、柱部材は円断面となる。ここで、柱部材の非線形性を部材端部の曲げモーメントと部材角の関係でモデル化したものが図-7である⁴⁾。なお、柱の軸力変動を考慮するため、軸力と曲げ性能の相関関係を考慮した。

3.2 Multiple Shear Spring モデル

本検討では 3 次元解析において式(1)で変換された地震波を 2 方向に入力する 2 方向入力解析であるため、Multiple Shear Spring モデル⁵⁾を適用した。MSS モデルは複数のばねの要素が放射状に配置された状態を仮定している。したがって、ばねの本数を多くすることで、全方向に均等な剛性、耐力を持たせることができるモデルである。

ここで、本検討の要素分割は 8 分割とし、1 つの要素に対する復元力特性と MSS モデル全体に対する復元力特性の関係は以下により決定した。

主軸からある角度を持つ要素の剛性は、方向余弦の 1 乗、耐力は 2 乗に比例する。これを考慮した要素分割 8 に対する低減率は、図-7 の性能の、剛性に対して 0.250000、耐力に対して 0.198912 の率で低減し、個々の要素に対する性能とした。

表-2 検討ケース

case	モデル	径間数	入力方向	区分
1	2次元	1径間	線路方向	L1
2				L2
3			線路直角方向	C1
4		3径間	線路方向	L1
5				L2
6			線路直角方向	C1
7				C2
8		5径間	線路方向	L1
9				L2
10			線路直角方向	C1
11				C2
12	3次元	1径間	橋軸方向	—
13			22.5° 方向	—
14			45° 方向	—
15			67.5° 方向	—
16			橋軸直角方向	—
17		3径間	橋軸方向	—
18			22.5° 方向	—
19			45° 方向	—
20			67.5° 方向	—
21			橋軸直角方向	—
22		5径間	橋軸方向	—
23			22.5° 方向	—
24			45° 方向	—
25			67.5° 方向	—
26			橋軸直角方向	—

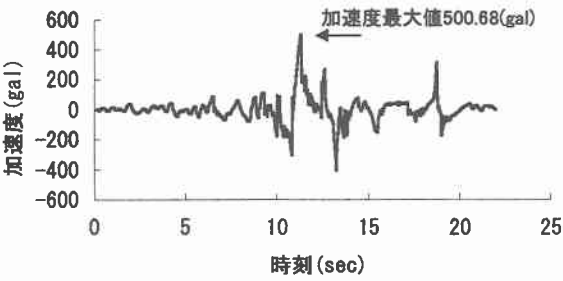


図-5 入力地震波形

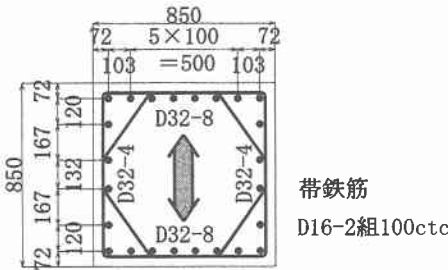


図-6 高架橋柱断面図

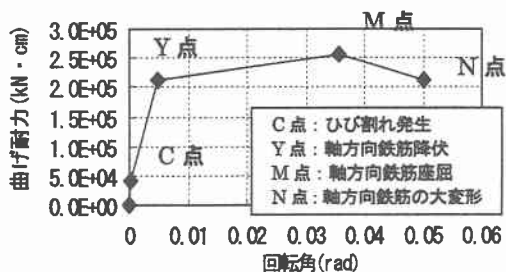


図-7 柱部材の M-θ 関係

4. 検討結果および考察

各検討ケースの節点 1 に対する水平変位時刻歴を図-8、図-9、図-10 に示す。全て柱を上から見た変位の動態である。

図-8 は 1 径間、図-9 は 3 径間、図-10 は 5 径間を示し、節点 1 における、3 次元解析の線路方向、 22.5° 方向、 45° 方向、 67.5° 方向、線路直角方向と、2 次元解析の線路方向と 2 次元の線路直角方向を図示したものである。

図中の円は 3 次元線路方向の変位最大値と、3 次元線路直角方向の変位最大値を示したものであり、実線が線路方向、破線が線路直角方向に対しての変位最大値である。

ここで、各変位量の最大値を比較することとし、結果を表-3 に示す。

(1) 入力方向による変位の違い

図-11、図-12、図-13 は、2 次元解析の変位最大値に対する 3 次元解析の各入力方向の変位最大値の比 ($3D \delta_{max}/2D \delta_{max}$) と入力方向の関係を示す。図-11 は 1 径間の場合で、図-12 は 3 径間、図-13 は 5 径間の場合である。

図-11 に示すように、1 径間ではどの方向でも、 $3D \delta_{max}/2D \delta_{max}$ は 1.0 より大きい値のため、3 次元解析が 2 次元解析の変位を上回っている。

図-12、図-13 に関しても、2 次元解析線路方向に対する $3D \delta_{max}/2DL \delta_{max}$ は、どの方向に対しても 1.0 より大きい値のため、3 次元解析が上回る結果となった。一方 2 次元線路直角方向に対する $3D \delta_{max}/2DC \delta_{max}$ は図-12 の 3 径間では、どの方向でもほぼ 1.0 前後を示した。

図-13 の 5 径間での $3D \delta_{max}/2DC \delta_{max}$ は 3 次元のどの方向でも 1.0 より小さい値を示した。

図-11 の 1 径間の場合、 $3D \delta_{max}/2DL \delta_{max}$ 、 $3D \delta_{max}/2DC \delta_{max}$ とともに線路方向で値が最大となり、角度が 22.5° 、 45° 、 67.5° 、線路直角方向となるにつれて、 $3D \delta_{max}/2D \delta_{max}$ が減る傾向となっている。

一方 3 径間、5 径間の場合、 $3D \delta_{max}/2DL \delta_{max}$ 、 $3D \delta_{max}/2DC \delta_{max}$ とともに 67.5° で最大値を示し、 67.5° を境として、 $3D \delta_{max}/2D \delta_{max}$ が減少する傾向を示した。

表-3 変位量の最大値

case	δ_{max} (cm)	case	δ_{max} (cm)	case	δ_{max} (cm)
case2	3.033	case5	2.622	case9	2.460
case3	3.179	case6	3.168	case10	3.159
case12	3.753	case17	3.087	case22	2.868
case13	3.689	case18	3.147	case23	2.954
case14	3.627	case19	3.266	case24	3.034
case15	3.464	case20	3.276	case25	3.066
case16	3.414	case21	3.171	case26	2.998

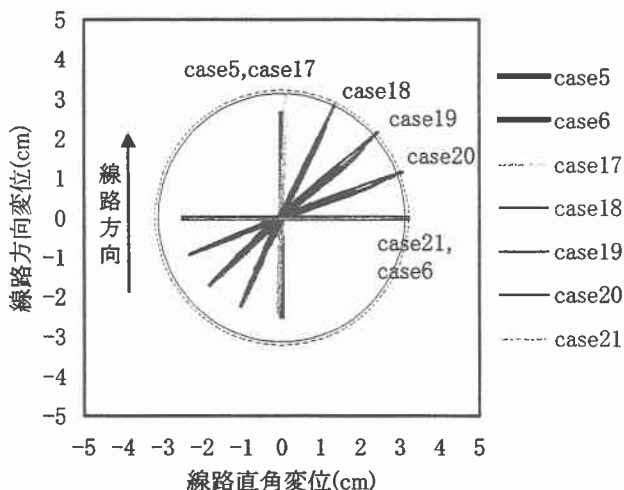


図-8 1 径間節点 1 における変位の時刻歴

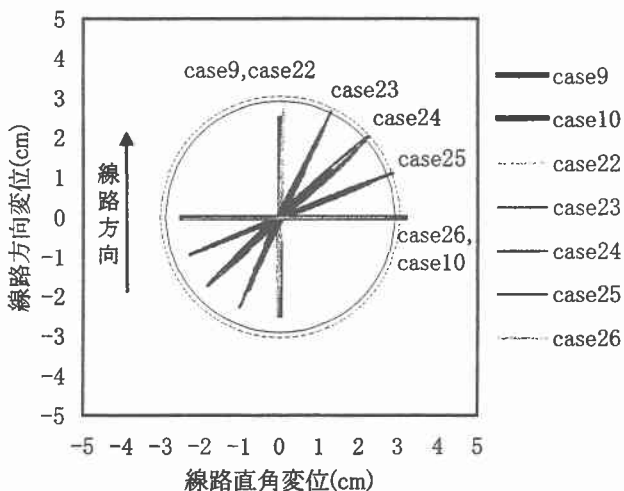


図-9 3 径間節点 1 における変位の時刻歴

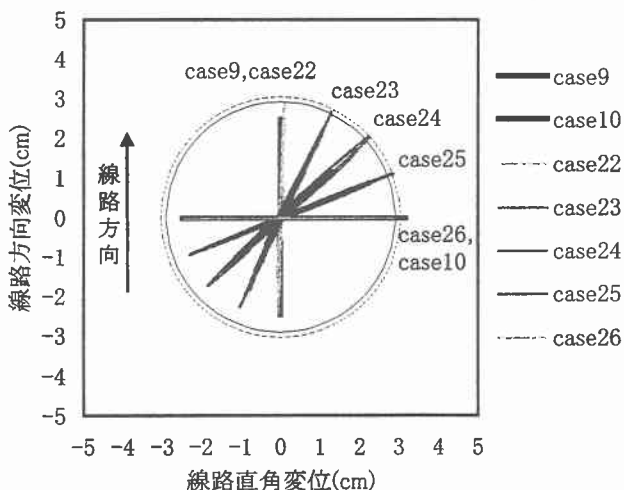


図-10 5 径間節点 1 における変位の時刻歴

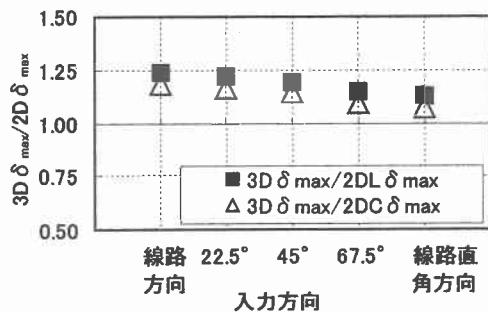


図-11 $3D \delta_{\max}/2D \delta_{\max}$ と入力方向の関係(1 径間)

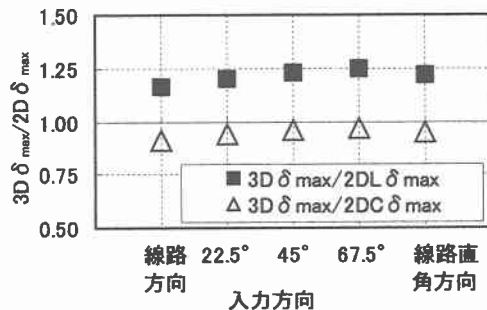


図-13 $3D \delta_{\max}/2D \delta_{\max}$ と入力方向の関係(5 径間)

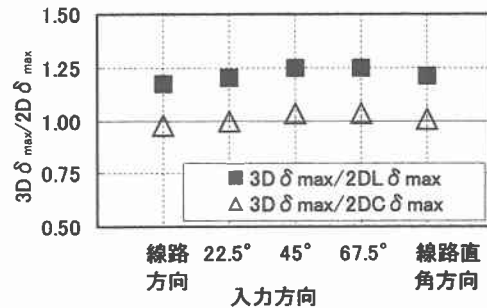


図-12 $3D \delta_{\max}/2D \delta_{\max}$ と入力方向の関係(3 径間)

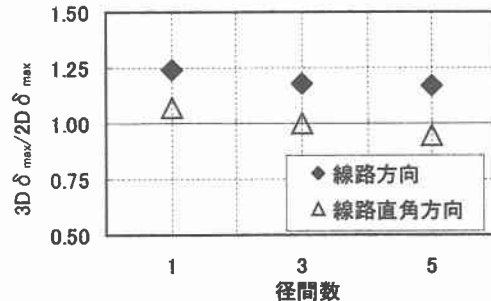


図-14 $3D \delta_{\max}/2D \delta_{\max}$ と径間数の関係

(2) 径間数の変化による変位の違い

図-11, 図-12, 図-13 に示すように, 1 径間では, $3D \delta_{\max}/2DL \delta_{\max}$ と, $3D \delta_{\max}/2DC \delta_{\max}$ の値はほぼ近い値を示している。これは, 1 径間では 2 次元解析の変位最大値が, 線路方向と線路直角方向で, ほぼ同じ値を示したためである。図-12 の 3 径間, 図-13 の 5 径間では, 2 次元解析の線路方向と線路直角方向の変位最大値の差が 3 径間で 0.546cm, 5 径間で 0.699cm であった。したがって, 図-12, 図-13 に示すように, $3D \delta_{\max}/2DL \delta_{\max}$ と, $3D \delta_{\max}/2DC \delta_{\max}$ の値にも差が大きくなるという結果となった。

図-14 は, $3D \delta_{\max}/2D \delta_{\max}$ と径間数の関係を示している。ここで図-14 は線路方向に対する $3D \delta_{\max}/2D \delta_{\max}$ と, 線路直角方向に対する $3D \delta_{\max}/2D \delta_{\max}$ の 2 方向のみに関する結果である。

これによると, 線路方向に対しては 1 径間, 3 径間, 5 径間となるにつれ, $3D \delta_{\max}/2D \delta_{\max}$ は減少傾向にある。

しかし, 線路直角方向では, 3 径間で $3D \delta_{\max}/2D \delta_{\max}$ が 1.0 を示し, 5 径間では 0.95 を示している。5 径間では 2 次元解析の変位が 3 次元解析の変位を上回る結果を示した。

5. 結論

本検討では, RC ラーメン高架橋に対して柱部材の変位の時刻歴を, 3 次元の線路方向, 22.5° 方向, 45° 方向, 67.5° 方向, 2 次元の線路方向, 線路直角方向の各入力方向と, 1 径間, 3 径間, 5 径間の径間数の変化で比較した。結果, 以下の結論が得られた。

(1) 2 次元解析と 3 次元解析の変位の最大値の比較によ

り, 線路方向では 1 径間に関して, 3 次元解析の変位の最大値が全て 2 次元解析を上回り, 線路直角方向でも 2 次元解析を 3 次元解析の変位の最大値が上回っていた。

したがって, 現状の 2 次元解析のみの解析では, ラーメン高架橋などの複雑な構造物で, 特に径間数が少ない場合, 不十分である可能性がある。

(2) 3 次元解析の線路方向, 22.5°, 45°, 67.5°, 線路直角方向で, おおむね同じ変位の時刻歴示していることから, 全ての方向に対して同じ性能が必要となる。本検討では, 矩形断面を円断面と仮定し解析しているため, 本来の矩形断面に対する性能は検討されていない。柱部材は構造物の, 特に重要な部材であるため, 矩形断面の斜め方向での性能を明らかにする必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会編：コンクリート標準示方書(耐震設計編) 平成 8 年
- 2) 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), 1999.10.
- 3) 松井勲, 池内智行, 盛川仁, 上田茂：コヒーレンスを用いた最悪地震入力方向の簡易推定法, 土木学会第 55 回年次学術講演会, 2000.9.
- 4) 渡辺忠朋, 谷村幸裕, 滝口将志, 佐藤勉：鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手法, 土木学会論文集, 第 683 号/V-52, pp.31~45, 2001.8.
- 5) 日本建築学会編：免震構造設計指針, 2001.9.