

鋼製ラケット型ラーメン高架橋の非線形地震応答解析

Nonlinear Seismic Response Analysis of Viaducts with Racket Shaped Steel Rigid Frame

北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 伊勢 典央 (Norio Ise)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 川上 隆司 (Takashi Kawakami)

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、レベルII地震動の内陸直下型地震(Type II)であり、近代都市部に発生した世界的にも稀有な事例である。都市機能が麻痺した中で、高速道路などの橋梁構造物の損傷による交通機能の停止は復旧作業の妨げになり、日本経済にも大きな損害を与えたことは周知の事実である。この震災については、事前に想定されていた被害程度を遙かに上回るものとなった。損傷した橋梁構造物は靱性に対する配慮が不十分であった時代に建設されたものが多く、その他にも、実際の地震力が想定されていた地震力よりも大きいものであったことが要因であると考えられる。壊滅的な損傷を負った橋梁構造物の多くは、RC 橋脚および鋼製橋脚を有する高架橋において生じており、これらは、従来行われてきた震度法による設計を地震時保有水平耐力法の視点から再検討する形で想定されてきたものである。実際には、想定されていた約1G程度という弾性応答地震力ではなく、その2倍である約2Gの地震力が作用したものと考えられる。これまでの土木構造物は、0.2G という静的な荷重をかけた場合の変形量に対して、許容応力度内となるように部材の断面形状を決定する震度法という耐震設計法を採用してきたため、従来のレベルI以上の地震力である兵庫県南部地震に耐えることができなかつたと考えられる。これに対してこれまで2度道路橋示方書が改訂され、材料非線形性および幾何学的非線形性を考慮した動的解析は、以前にもまして重要視されている。

鋼製橋脚は、用地制約の多い都市部で採用されることが多く、その多くは1層門型構造や2層式ラーメン構造であり、より用地に制約がある場合は本研究で取り扱うラケット型になることもある。ラーメン橋脚の特徴としては、上記のような大地震時に水平慣性力によって働く軸力変動が挙げられる。この軸力の変動により降伏曲げ耐力が変化し、耐震性評価に影響を与えようと考えられる。また、柱間隔に比べ上部工の重心位置が高い橋脚など、軸力が大きく変動し柱基部に引き抜き力が作用するようなラーメン橋脚に対しては、軸力変動の影響を考慮する必要がある。しかし、鋼製橋脚の耐震性能評価に関する研究は、一定の軸力を受ける単柱形式を対象としたものがほとんどであり、橋脚単体を非線形地震応答解析した例はあまり多くない。また、本研究で取り扱うラケット型鋼製ラーメン高架橋についての研究は極めて少ないのが現状である。

そこで本研究は、鋼製ラケット型橋脚を単体として取

り上げ3次元立体骨組構造にモデル化し、固有振動解析を行うことで基本的な固有振動モードを把握するとともに、幾何学的非線形性と鋼材の降伏を考慮した弾塑性有限変位動的応答解析法を用いて時刻歴応答解析を行う。多径間連続高架橋からラケット型ラーメン橋脚を取り出し、その橋軸直角方向の動的挙動に着目し、その骨組形状によって橋脚基部の軸力、せん断力や曲げモーメント、橋脚上部の中心における変位などが受ける影響について比較検討する。

2. 地震応答解析

2-1 解析モデル

本研究では、伊勢原、藤沢線の高架橋の1つを参考に、ファイバー要素により鋼製ラーメン橋脚を3次元骨組構造にモデル化したものを用いる。解析モデルの橋脚形状は図-1(a)に示す。基本寸法は、高さ22.6m、上部構造の幅14.2mである。橋脚の骨組形状としては、下部橋脚左端を原点として、D=0m、1.8m、3.6m、5.4m、7.1mとcase1からcase5までの5パターンとする。橋脚基部は固定としている。断面は内部に垂直補剛材をもつ中空長方形断面であり、これを図-2に、各断面寸法の詳細を表-1に示す。死荷重は径間長を48mとして水平部材に鉛直下向きに作用させている。他の橋脚による橋軸方向の剛性は水平ばね要素にモデル化し置き換えている。

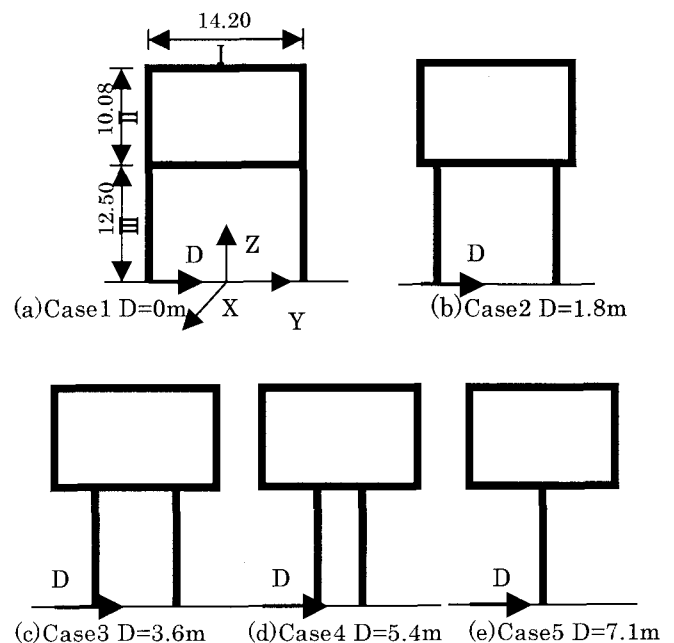


図-1 橋脚の骨組形状

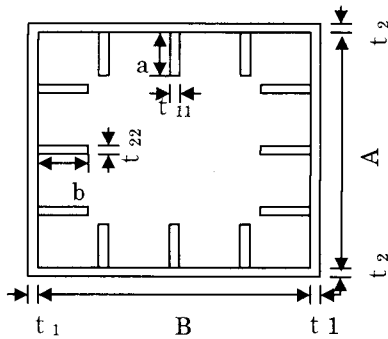


図-2 垂直補剛材をもつ中空長方形断面

表-1 断面諸元

C.S.Dim. (cm)		Outer dimension				Stiffener dimension			
		A	B	t ₁	t ₂	a	b	t ₁₁	t ₂₂
Pier parts	I	250	250	3.0	3.0	23	23	2.2	2.2
	II	250	250	3.0	3.0	23	23	2.2	2.2
	III	200	200	2.0	2.0	23	23	2.2	2.2

*ただし Case5 のみⅢの t₁, t₂=4.0

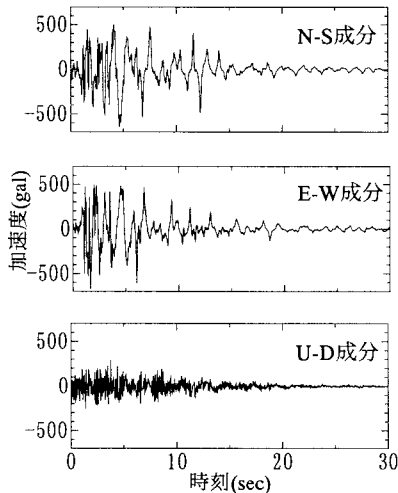


図-4 入力地震加速度波形

2-2 解析方法

本研究では、鋼材の降伏と幾何学的非線形性を考慮した、はり柱要素の有限要素法と Newmark β 法および修正 Newton-Raphson 法を併用した平面骨組のための弾塑性有限変位動的応答解析を3次元的に拡張した解析手法を用いる。接線剛性マトリックスは材料の非線形性とはり要素の応力-ひずみ関係から初期応力状態を考慮している。鋼材の応力-ひずみ関係は図-3 に示すようなバイリニア型のモデルとする。塑性域のひずみ硬化を 0.01 とし、降伏応力と弾性係数の値はそれぞれ 355MPa、200GPa とする。鋼製ラーメン橋脚の減衰には Rayleigh 減衰を適用しており、減衰定数は1次固有振動モードの面内、面外に対して2%とした。入力地震波は図-4 に示す兵庫県南部地震 JR 鷹取駅記録における3成分加速度波形を用いる。E-W 波は橋軸方向に、N-S 波は橋軸直角方向に入力する。

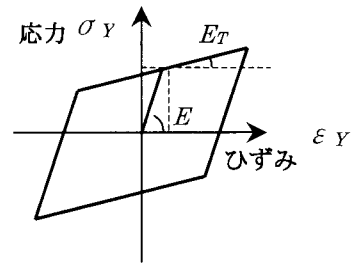


図-3 バイリニア型の応力-ひずみ曲線

表-2 基本固有周期と固有振動数

固有周期(sec)			
mode	L1	H1	T ₁
Case1	0.3258	0.1757	0.0732
Case2	0.3275	0.1812	0.0842
Case3	0.3295	0.1951	0.1015
Case4	0.3315	0.2519	0.1277
Case5	0.3414	0.5458	0.1513
固有振動数(Hz)			
mode	L1	H1	T ₁
Case1	3.0694	5.6915	13.6612
Case2	3.0534	5.5188	11.8765
Case3	3.0349	5.1282	9.8522
Case4	3.1066	3.9698	7.8085
Case5	2.9291	1.8322	6.6094

3. 数値計算結果

3-1 固有振動特性

地震応答解析に先立って、各鋼製ラーメン橋脚の立体固有振動解析を行った。計算された各鋼製ラーメン橋脚モデルの基本固有振動モードに関する固有周期、固有振動数を表-2 にまとめて示す。表中の記号 L₁、H₁ および T₁ はそれぞれ橋軸方向、橋軸直角方向およびねじり振動に対する1次固有振動モードを意味している。橋軸方向の1次固有周期(L₁)は桁による影響を置き換えたばねモデルによって、Case1 から Case5 までそれほど変化しないことがわかる。それに比べて橋軸直角方向の1次固有周期(H₁)は橋脚の間隔が短くなるにつれ固有周期が長くなっている。表-2 より、基本固有振動モードは Case1 から Case4 では橋軸方向の固有振動モード(L₁)が卓越し、Case5 では橋軸直角方向の固有振動モード(H₁)が卓越することがわかる。

3-2 動的応答特性

(1) 橋脚上部中心の変位

橋脚上部中心における最大変位の各 Case ごとにおける変化を図-5 に示す。また、各 Case ごとの時刻歴応答変位を図-6 に示す。

橋軸直角方向(面内方向)の最大変位の変化は、表-2 の基本固有周期からもわかるとおり、Case1 から Case4 までは固有周期が長くなるにつれて、図-5 のように最大変位も増加する傾向にある。しかし、Case5 については他の場合とは違い、橋脚が1本であるので、最大変位は急激に増加している。このことは、橋軸方向(面外方向)についても同じことが言える。一方、鉛直方向はほとんど変化が見られない。

図-6 に示す橋軸直角方向の時刻歴応答変位より、

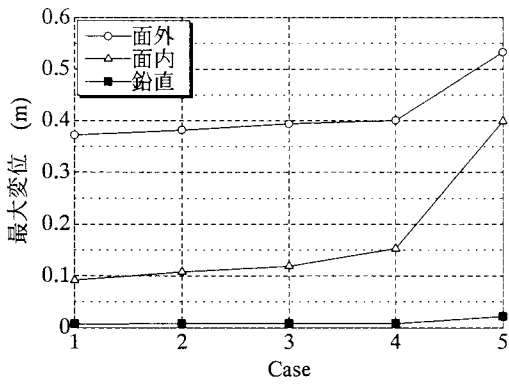


図-5 最大変位

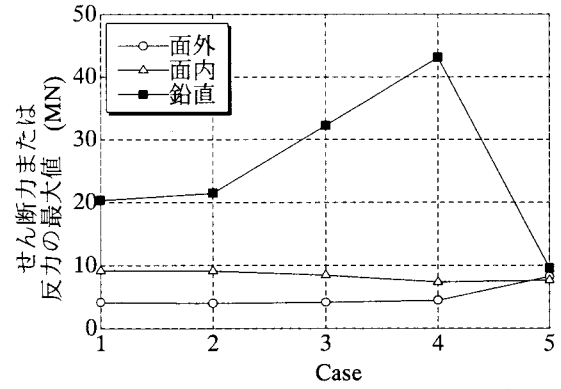


図-7 せん断力および反力の最大値

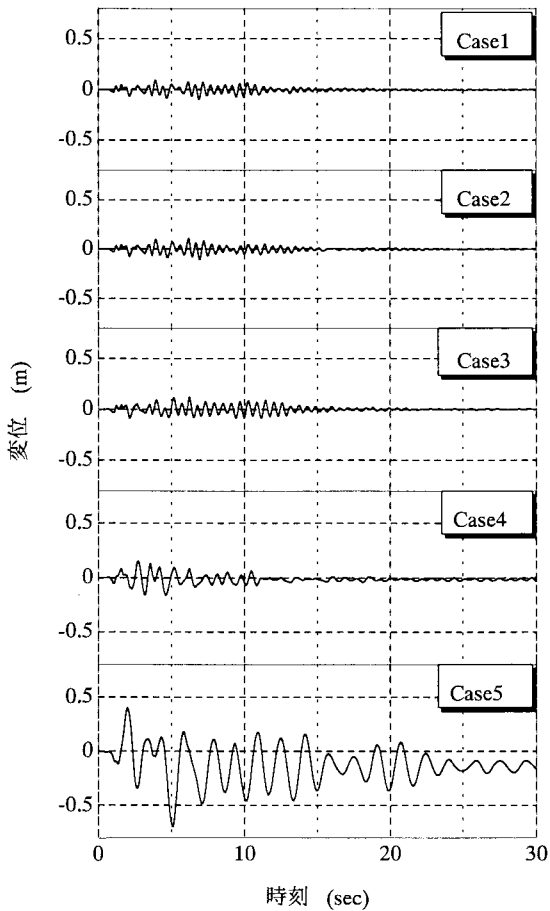


図-6 橋軸直角方向の時刻歴応答変位

Case1 から Case4 までは応答変位の値が増加し、長周期化していることがわかる。さらに Case5 では、残留変位が生じることが確認できる。

(2) 橋脚基部のせん断力および鉛直反力

橋脚基部に作用するせん断力および鉛直反力の最大値の各 Case ごとにおける変化を図-7 に示す。

鉛直反力については Case1 から Case4 までは大きく増加しており、Case5 で急激に減少している。これはもともと橋脚全体の自重により、左右の脚にそれぞれ 2 MN の反力が作用しているが、それが地震動によりロックンギン振動することにより左右の脚に大きな鉛直反力が生まれる。左右の脚の間隔が短くなるにつれ、その反力

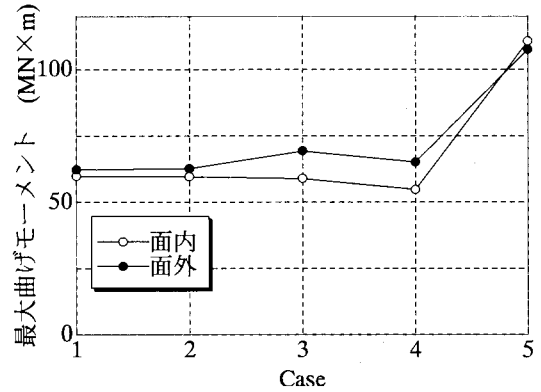


図-8 最大曲げモーメント

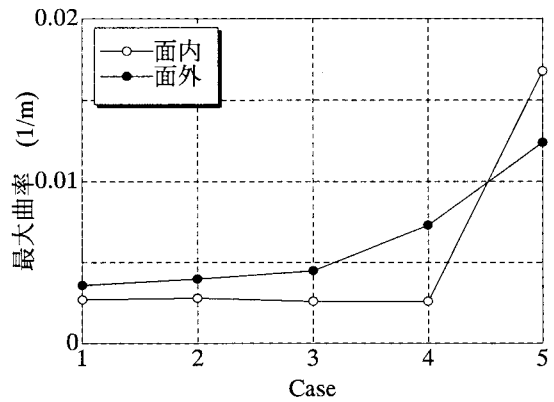


図-9 最大曲率

は大きくなっていく。しかし、Case5 のように脚が1本になるとロックンギン振動は起こらず、上部が大きく揺れる振動形式になるので、その分反力は小さくなると思われる。

橋軸直角方向(面内方向)についてのせん断力の値は、Case1 から Case4 までは 5 MN 前後の値をとっている。橋軸方向(面外方向)についてのせん断力の値は、Case1 から Case5 までは 10 MN 付近の値をとっている。このようにせん断力については、橋軸直角方向(面内方向)および橋軸方向(面外方向)のどちらも大きな変化は見られないことがわかる。

(3) 橋脚基部における曲げモーメントと曲率

曲げモーメントならびに曲率の最大値の各 Case ごとにおける変化を図-8 および図-9 に示す。また、曲げモーメントと曲率の関係を図-10 に示す。

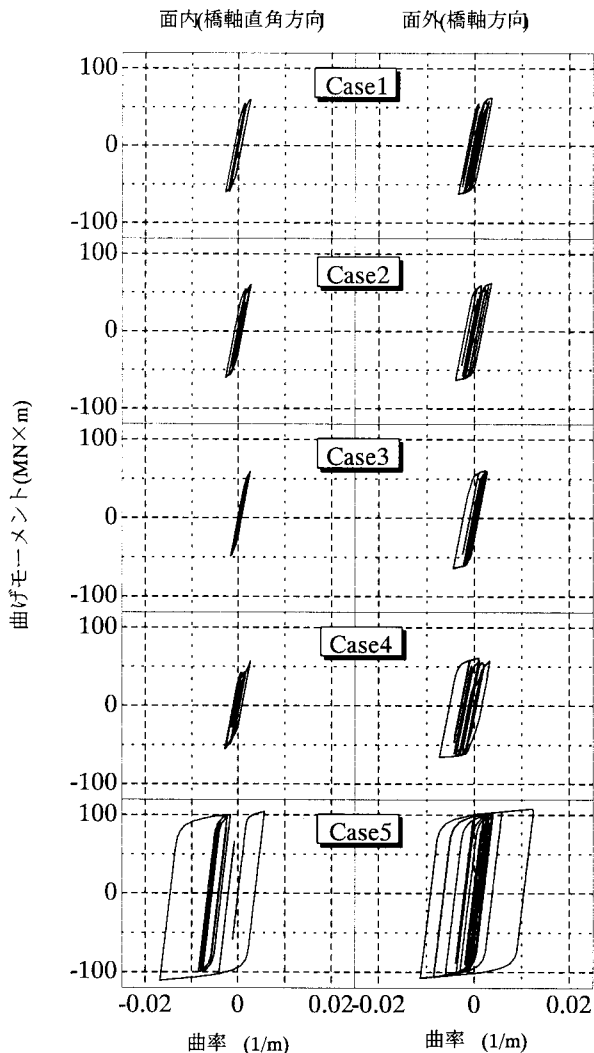


図-10 曲げモーメントと曲率の関係

図-8、図-9より面内方向については、Case1からCase4においては、曲げモーメント、曲率ともにわずかに減少傾向にあるものの、大きな変化は見られない。これは図-7のせん断力の変化が小さいことから確認できる。Case5においては曲げモーメント、曲率ともに大きく増加している。面外方向については、曲げモーメントはCase1からCase3まで増加し、いったんCase4で減少し、Case5で大きく増加している。曲率はCase1からCase5で比較的単調に増加する傾向にある。

次に図-10より、面内、面外ともにCase1からCase4では塑性履歴ループは幾分の変化はあるものの、図-8と図-9の曲げモーメントおよび曲率と同様に、大きな変化は見られない。それに対しCase5においては、大きく塑性化しており、これは図-8と図-9の曲げモーメントおよび曲率の変化からも確認できる。また、面外方向に対し面内方向は塑性履歴ループが原点より左側にシフトしている。このことにより、図-6のCase5における橋軸直角方向の残留変位が生じると考えられる。

4. まとめ

本研究は、ラケット型橋脚をもつ2層式鋼製ラーメン橋脚を対象とし、その骨組形状をCase1からCase5と分類した橋脚モデルにおいて非線形動的応答解析を行い、形状の違いにより生じる動的挙動の変化に着目して比較

検討した。

(1)固有振動解析から、橋軸方向、橋軸直角方向ともにCase1からCase4と長周期化する傾向にあることがわかった。これはCase1からCase4と脚の間隔が短くなることに比例していると考えられる。Case5においては、脚が1本になるので振動形状がかわり長周期になると考えられる。ねじり振動についても、脚の間隔の減少に伴い周期が長くなっている。また、基本固有振動モードはCase1からCase4では橋軸方向の固有振動モード(L_1)が卓越し、Case5では橋軸直角方向の固有振動モード(H_1)が卓越することがわかった。

(2)橋脚上部中心における最大応変位については、Case1からCase5と変化するにつれて、橋軸直角方向については徐々に増加しCase5で大きく増加している。橋軸方向ではCase5で大きく増加しているものの、Case1からCase4ではあまり変化が見られない。鉛直方向はどのCaseも大きな変化は見られない。このことから脚の間隔による影響は、橋軸直角方向で大きいことがわかった。特にCase5では橋脚基部が大きく塑性化することにより、15cmから20cmの残留変位が生じた。

(3)橋脚基部のせん断力はCase1からCase5のどのCaseにおいても大きな変化は見られなかった。鉛直反力については、Case1からCase4と橋脚形状が変化するにつれ、増加する傾向が現れた。これはCase1からCase4と脚の間隔が短くなることに比例していると考えられる。一方、Case5ではCase4に比べ大きく減少した。

(4)モーメントと曲率の関係からは、Case1からCase4でそれぞれ面内方向、面外方向ともに塑性化していることがわかった。しかし、塑性履歴ループには大きな変化は見られなかった。

以上のことよりCase1からCase4のようにラケット型橋脚の骨組形状を変化させた場合は、基部の反力に違いが見られるものの、それ以外の応答値についてはさほど大きな変化は見られなかった。橋脚が1本のCase5については、他の場合と比べて水平変位、曲げモーメント、曲率および鉛直反力で大きな違いが見られた。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、1996.12.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、2002.3.
- 3) 林川俊郎：橋梁工学、朝倉書店、2000.
- 4) 中野友裕、田邊忠顕：RC橋脚の動的2軸曲げ挙動における解析モデルの影響、応用力学論文集 Vol.5, pp.509-518, 2002.8.
- 5) 野田勝哉、菅勝司：鋼製ラーメン橋脚の軸力変動に関する研究、平成13年度土木学会北海道支部論文報告集、第58号、pp.208-211, 2001.
- 6) 大塚久哲、堂上幸男、山平喜一郎、加藤一郎、藤野明義：鋼斜張橋(荒津大橋)の非線形地震応答解析とモデル化の検討、第2地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.155-162, 1998.12.