

二層連続ラーメン高架橋の非線形地震応答解析

Nonlinear Seismic Response Analysis of Continuous Rigid Frame Viaduct with Double Decks

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○久家 隆裕 (Takahiro Kuge)

北海道大学大学院工学研究科 学生員 白井 遼太郎 (Ryoutarou Shirai)

1. まえがき

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が用いられてきた。しかし、先の兵庫県南部地震以降、1996 年と 2002 年に「道路橋示方書 V 耐震設計編」が大幅に改訂されたことにより、特殊な形状や構造を有する橋、また構造部位の固有モードが多数あり、地震時の挙動が複雑であると考えられる橋に対しては動的解析を行い、その結果を設計に反映させることとなった。

まず動的解析の解析モデルとしては、節点に集中した質量を与え、部材の剛度は通常の静的解析に用いる剛度を使用した多質点系の骨組構造モデルを用いるのが普通である。また、地震時の動的挙動の検討は、まずその構造の持つ固有の振動特性(固有振動数と固有振動モード)を明らかにすることが必要であり、固有振動解析が行われる。また、その固有振動解析に続いて過去の地震動記録や、それを振幅調節したものを用いて、応答スペクトル解析や時刻歴応答解析が行われる。なお、動的解析に用いる地震入力波形は、1 波形だけでなく、3 波形程度用いるのが望ましい。これは、当該地点に発生するであろう地震動は、今までに観測された地震の特性や規模などと異なることが予測されるからである。それで、3 波形程度の入力地震波に対する解析結果の平均値を用いて耐震性の照査を行うことが求められている。

今回対象とする高架橋は、橋脚の形式が 3 つに分かれており、大地震時に複雑な挙動が予想される。よって、その挙動を想定し、またそれによって全体の橋脚のうちどの橋脚のどの部分が損傷を受けやすいかを知り、今後の高架橋の設計に役立てることを今回の目的とする。

そこで、本研究では上部構造・下部構造を全体構造システムとしてモデル化をし、非線形地震応答解析を行うことで大地震時の構造物の挙動を把握する。また、鋼材の曲げモーメント・曲率を求め、鋼材の照査を行うこととする。なお、解析には(株)アーク情報システム所有の 3 次元動的応答解析システム「TDAPIII」を用いる。

2. 解析モデル

2.1 対象とした高架橋

本研究では、伊勢原、藤沢線の高架橋の一つである 10 号橋橋梁を解析対象とする。形式は径間長が 48m の 9 径間連続開断面箱桁橋であり、特徴として橋脚の形式が P1 橋脚が RC2 柱式橋脚、P2～P4 橋脚が 2 柱式鋼製ラーメン橋脚、P5～P10 橋脚が 2 層 2 柱式ラーメン橋脚と 3 つに分かれていることが挙げられる。また、地盤種別はⅢ種地盤、耐震性能は耐震性能 2 で照査を行う。

2.2 解析モデル

解析を行うにあたり使用したモデルを図-1 に示す。解析モデルは、節点数 684 個、要素数 743 個の立体骨組構造である。橋脚と梁の結合部は剛結合としてモデル化し、橋脚のそれ以外の部分は非線形部材としてモデル化する。導入した非線形部材の応力-ひずみの関係は図-2 のような正規バイリニアモデルとする。また地盤および基礎構造物は集約パネモデル化する。

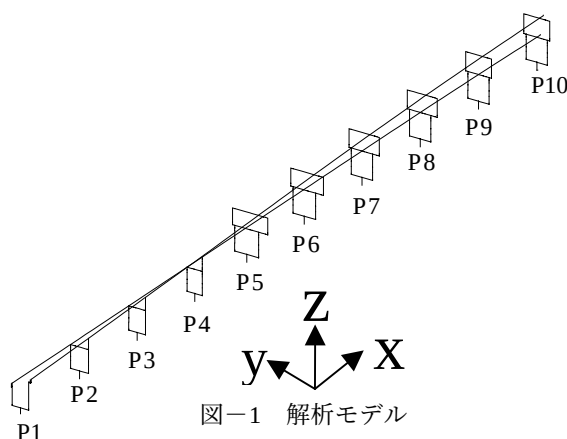


図-1 解析モデル

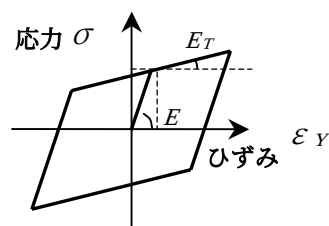


図-2 バイリニア型の応力-ひずみ曲線

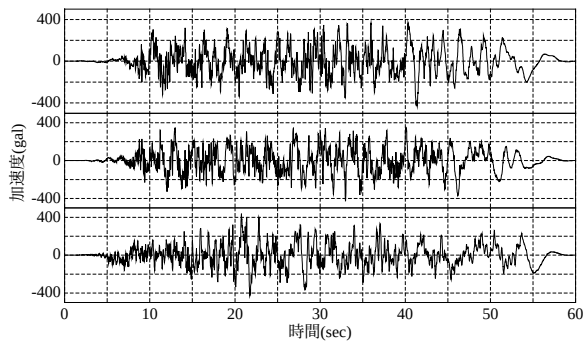


図-3 タイプ I 地震波(1 倍波)

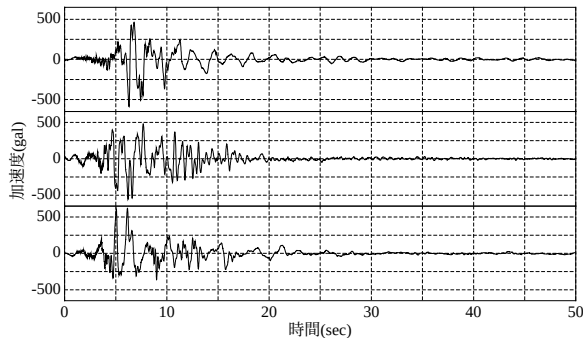


図-4 タイプ II 地震波(1 倍波)

表-1 固有振動数と刺激係数

モード次数	振動数(Hz)	周期数(s)	刺激係数			モード形状
			X	Y	Z	
1次	1.099	0.910	130	-0.3912	4.4926	橋軸1次
2次	1.366	0.732	-0.03533	92.64	6.267	水平1次
3次	1.431	0.699	-0.2476	21.123	3.025	水平2次
4次	1.505	0.664	-1.112	70.79	1.496	水平3次
12次	1.871	0.535	-39.69	-0.04929	-0.777	橋軸2次
14次	1.906	0.525	-0.3328	0.3528	0.8733	鉛直1次
16次	2.025	0.494	-0.444	-1.16	5.869	鉛直2次

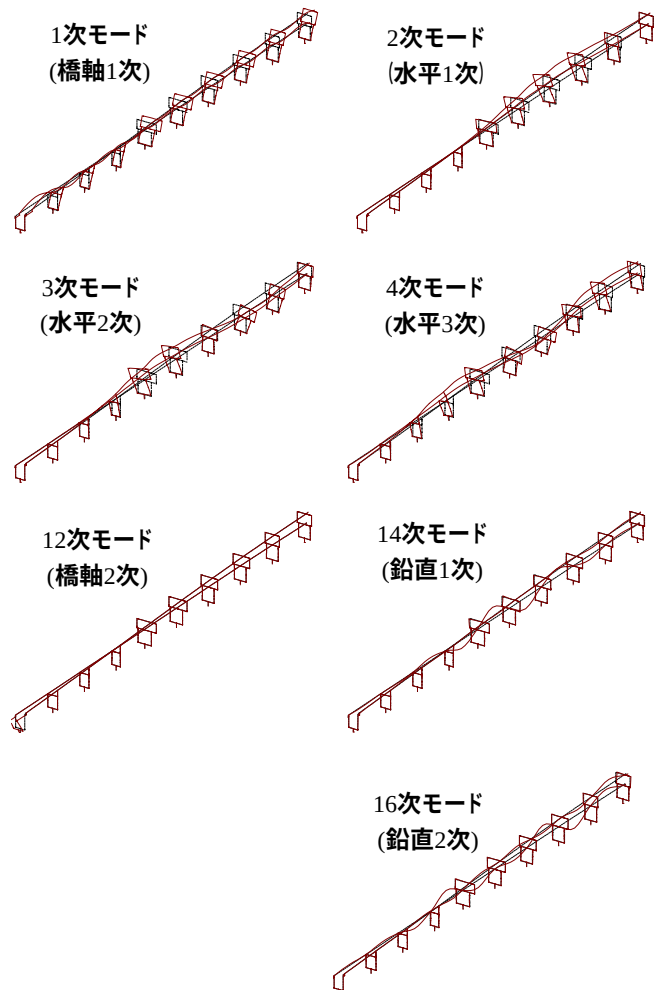


図-5 固有振動モード

2.3 解析条件

本研究では、剛性および質量マトリックスが非対称であっても実数の範囲内で解くことができる Subspace 法を用いて固有振動解析を行った。なお、固有値・固有ベクトルは 1 次から 100 次まで求め、時刻歴応答解析は Newmark β 法による直接積分法とし、 $\beta=0.25$ を用いた。積分間隔は 0.01 秒とし、応答時間はタイプ I 地震波が 60 秒、タイプ II 地震波が 50 秒とした。入力地震波は、図-3 に示すタイプ I 地震波（プレート境界型地震）の 3 波を橋軸、橋軸直角方向にそれぞれ入力し、3 波平均する。図-4 に示すタイプ II 波（内陸直下型地震）の 3 波も同様に橋軸、橋軸直角方向に入力し、3 波平均する。また、タイプ I 波・タイプ II 波の振幅を 1.5 倍・2 倍に調整した地震波も入力した。減衰には Rayleigh 減衰を用いた。また動的解析を行う前に死荷重を作用させた静的解析を行い、その応力、歪みを考慮して動的解析を行った。

3. 数値解析結果

3.1 固有振動特性

固有振動解析から得られた主要な振動モードを図-5 に、固有振動数と刺激係数を表-1 にそれぞれ示す。

表-1 より橋軸方向は橋軸 1 次モードの刺激係数で大きな値が得られ、これが卓越モードとなっていることが認められる。水平方向は水平 1 次モードと水平 3 次モードの刺激係数に大きな値が出ている。また、鉛直方向は鉛直 1 次モードのモード次数が 14 となっており、高次で現れることが確認できる。

図-5 より橋軸 1 次モードは P1 を除く全ての橋脚が橋軸方向の同じ向きに挙動している。また水平 1 次モードでは P5～P9 が挙動しており、水平 3 次モードでは P3～P10 が挙動していることが確認できる。

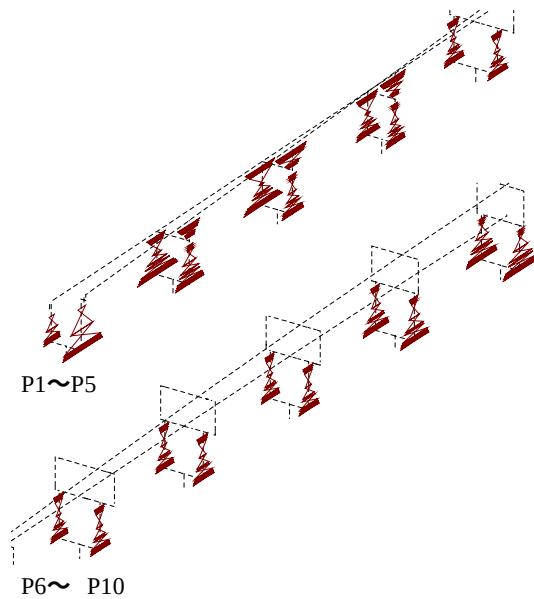


図-6 最大・最小曲げモーメント図（橋軸方向）

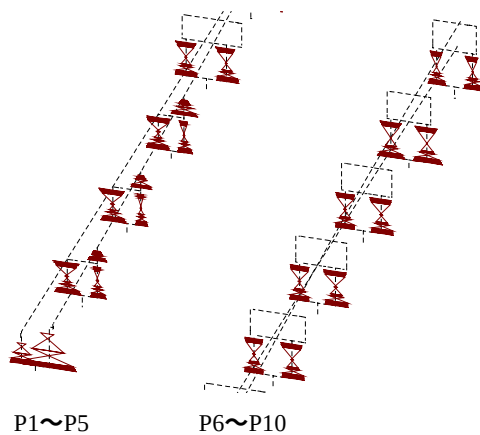


図-7 最大・最小曲げモーメント図（橋軸直角方向）

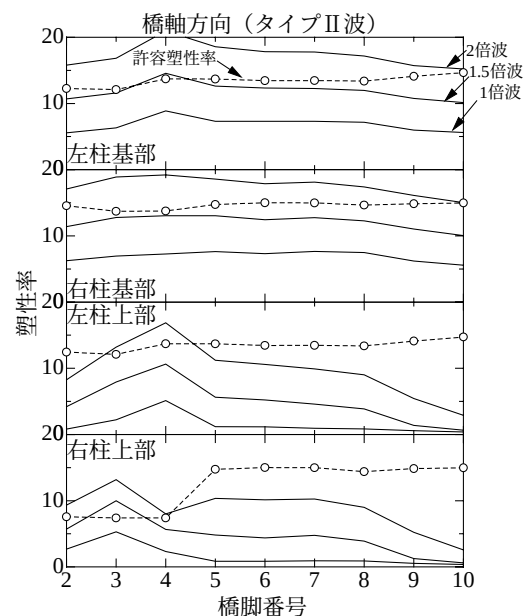
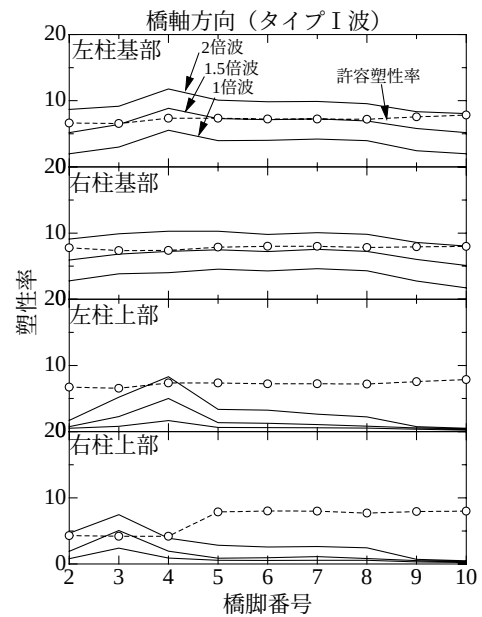


図-8 塑性率（橋軸方向）

3.2 時刻歴地震応答特性

(1) 非線形部材の最大・最小曲げモーメント

橋軸・橋軸直角方向に地震波を入力した時の橋脚の非線形部材の最大・最小曲げモーメント図を図6,7に示す。

図6より橋軸方向の地震波に対して、P1とP5～P10は橋脚基部において、P2～P4は橋脚上部・基部において大きい曲げモーメントとなっていることが確認できる。

図7より橋軸直角方向の地震波に対して、P1とP2～P4の右柱は橋脚基部において、残りは橋脚上部・基部において大きい曲げモーメントとなっていることが確認できる。

(2) 鋼材の照査

P2～P10までの橋脚の上部と基部を塑性化許容領域とし、鋼材の応答塑性率が許容塑性率を超えなければ安全とする。なお、道路橋示法書に基づき応答塑性率 $=\phi_r/\phi_y$ 、許容塑性率 $=1+(\phi_u-\phi_y)/(\alpha\phi_y)$ として求める。

また、 ϕ_r は応答曲率、 ϕ_y は降伏曲率、 ϕ_u は終局曲率とし、 α は安全係数としタイプI地震動の時は $\alpha=3.0$ 、タイプII地震動の時は $\alpha=1.5$ とする。

応答塑性率と許容塑性率を比較した照査結果を図8,9に示す。なお、グラフの実線が塑性率の小さい方から順に1倍波、1.5倍波、2倍波の応答塑性率を、破線が許容塑性率を示している。

図8,9より、いずれも1倍波に対しては応答塑性率が許容塑性率を上回ることにはなかったが、1.5倍・2倍波になると上回る部分がでてくることが確認できる。

図8より橋軸方向地震波に対し、橋脚基部においては全ての橋脚で比較的高い応答塑性率になっており、2倍波に対しては、タイプI・タイプII地震波ともに全ての橋脚で許容塑性率を超えていることが分かる。これは、全ての橋脚が橋軸方向に同じ向きに挙動することによる

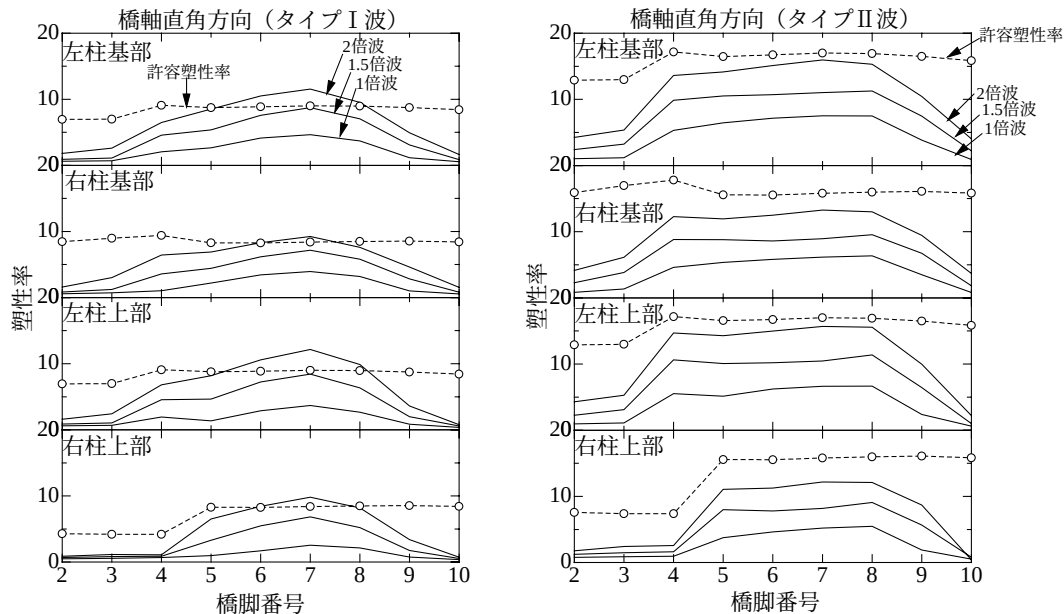


図-9 塑性率（橋軸直角方向）

ものと考えられる。一方、橋脚上部においては、P3、P4において高い応答塑性率となっている。これは、前述したように、橋脚上部で曲げモーメントが大きくなっていることによると考えられる。

図9より、橋軸直角方向地震波に対し、橋脚基部・上部ともに同じようなグラフの形をしておりP4～P8において高い応答塑性率となっていることが確認できる。これは、P4～P8を中心に挙動することにより両端の橋脚より変位が大きくなるによるものと考えられる。

4 あとがき

本研究では、橋脚の形式が3つに分かれている高架橋を対象として、固有振動解析およびレベルⅡ地震動を用いた非線形動的応答解析を行い、全体構造システムとしての地震時挙動について検討を行った。

固有振動解析より、橋軸方向は橋脚が一体となって挙動し、橋軸直角方向は中央の橋脚を中心に挙動することが確認できる。

非線形動的応答解析では、タイプⅠ波よりタイプⅡ波を入力した方が、橋軸方向より橋軸直角方向の方が損傷が大きいことが分かった。また橋軸方向の地震波に対しては、P3の左柱上部でタイプⅠ・タイプⅡ地震波両方ともに1.5倍波で許容塑性率を超えている。これは許容塑性率が低いにもかかわらず、応答塑性率が高いためだと考えられる。

＜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.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、2002.
- 3) 林川俊郎：橋梁工学、朝倉書店、2000.
- 4) 宇佐美勉・社団法人日本鋼構造協会：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン、技報堂出版株式会社、2006.
- 5) 社団法人土木学会：動的解析と耐震設計 第2巻 動的解析の方法、技報堂出版株式会社、1989.
- 6) 矢作枢・和田克哉・五十嵐功・五瀬伸吾・田中英明・原隆史・易鋒：新訂 よくわかる 橋梁下部構造の耐震設計、山海堂、2002.
- 7) 川島一彦：橋梁の耐震設計と耐震補強、技報堂出版株式会社、1998.