

アーチ橋の復元力モデルと 3 次元応答解析について

山尾敏孝¹・村本裕樹²・原田秀則³・原岡雅史⁴

¹正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

²正会員 修(工) 横河ブリッジ㈱ (〒108-0023 東京都港区芝浦 4-4-44)

³アジアプランニング㈱ (〒862-0970 熊本市渡鹿 7-15-27-101)

⁴学生員 熊本大学大学院自然科学研究科博士前期課程 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

鋼上路式アーチ橋を対象に、橋軸方向・橋軸直角方向・鉛直方向の三方向同時加振により非線形動的応答解析を試みた。まず、実アーチ橋の断面データを基に定めたアーチリブ部材を対象に、弾塑性有限要素解析を行なって、面内曲げモーメント M_y 及び面外曲げモーメント M_z 、軸力 N の相関強度及び復元力モデルを誘導した。得られた復元力モデルを用いてアーチリブの M_y-M_z-N 相関強度考慮の有無がアーチ橋全体系の動的応答に及ぼす影響について検討を行った。まず固有値解析を行った結果、対象にした鋼上路式アーチ橋の振動特性は低次振動モードのみでなく、高次振動モードも重要であることがわかった。また、アーチリブの相関強度を考慮することにより軸力 N の応答が小さく、残留変位が大きくなる傾向が見られ、相関考慮の重要性が明らかになった。

Key Words: Deck-type steel arch bridge, 3-dimensional seismic behavior, restoring force model interaction curves

1. はじめに

上・中路式アーチ橋の地震時の挙動は複雑なことから非線形動的応答解析法により耐震設計することになっている¹⁾。しかし、地震荷重などを受けるアーチリブ部材においては、軸方向圧縮力が卓越するほかに、曲げモーメントやねじりモーメントが複合的に作用する。そこで、骨組み要素を用いて非線形動的解析を行う際には、圧縮、曲げ及びねじりの組み合わせ荷重に対する復元力特性と相関強度曲線が必要となると考えられる。高軸力を受ける部材の挙動や 2 軸曲げ及び圧縮との相関強度関係に関する研究も行われている^{2)~4)}が、これらは、主として部材レベルにおける検討である。また、アーチ橋のような高次不静定構造物の全体系応答の検討に関して、これらを適用した研究はまだ少ないようである^{5), 6)}。

本研究では鋼上路式アーチ橋を対象とし、実アーチ橋梁で用いられている断面データを基にしてモデルアーチの断面を求め、アーチリブ部材の復元力モデル及び相関強度曲線を誘導した。さらのこれらを用いて、非線形動的応答解析を行い、相関強度の考慮の有無がアーチ橋の全体系応答に及ぼす影響について検討を行ったものである。

2. 解析モデルと解析条件

(1) 解析モデルと解析手法

解析対象橋梁は、昭和 55 年道路橋示方書により設計された実橋梁で、橋長 180.0m、支間割りが 20.0m+132.0m+26.6m である鋼上路式アーチ橋とした。アーチ諸元は図-1 に示すようにアーチ支間長 126.0m、ライズ 20.0m となっている。床版は鉄筋コンクリート床版($t=210\text{mm}$)、舗装はアスファルト舗装($t=60\text{mm}$)である。解析モデルは、アーチリブ、補剛桁、柱材等からなる 3 次元立体骨組質点モデルで、図-2 とした。支持条件として、アーチリブ両端は固定ヒンジ支承、桁部分は両端とも橋軸方向に可動なヒンジ支承とした。解析対象橋梁の基礎は直接基礎であるため、基礎の変形を無視して固定とした。

解析手法は、部材の非線形性を考慮するため運動方程式を直接に数値積分する直接積分法を用いた。積分手法は Newmark の β 法($\beta=0.25$)とし、積分時間間隔は 0.001sec、質量は集中質量とした⁷⁾。

解析に用いた各部材の減衰定数は、地震時の応答が塑性域に達しているかどうかに関係なく 0.02 とした。また、モード減衰のタイプはレイリー比例型とし、固有値解析の結果より有効質量比の大きい 2

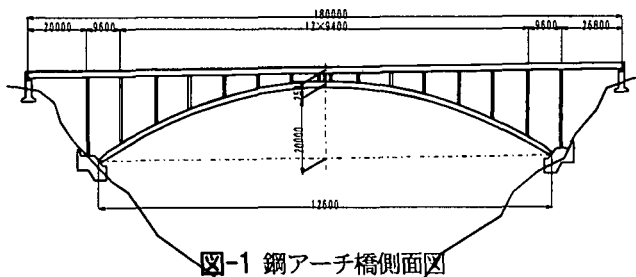


図-1 鋼アーチ橋側面図

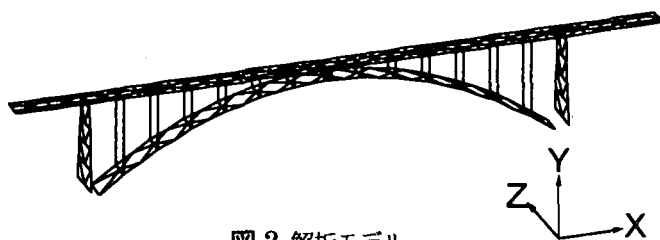


図-2 解析モデル

次振動モード ($h=0.02$, $\omega=5.483$) と 7 次振動モード ($h=0.02$, $\omega=15.514$) の 2 つの振動モードを選択し $\alpha=0.1620$, $\beta=0.0019$ とした。

(2) 入力地震動と入力方向

入力地震動は 1995 年兵庫県南部地震(M7.2)において JR 西日本鷹取駅構内地上で観測された記録を用いた。データ間隔は 0.01sec, 最大加速度は NS 成分で-641.7gal, EW 成分で-666.2gal, UD 成分で 289.7gal である。なお, 入力地振動は, 橋軸方向, 橋軸直角方向, 鉛直方向の 3 成分同時加振とし, NS 成分を橋軸方向, EW 成分を橋軸直角方向, UD 成分を鉛直方向に作用させた。

(3) 部材の相関強度と履歴特性

部材の非線形特性はモーメント M と曲率 ϕ の関係で考慮した。 $M-\phi$ 関係はアーチリブ断面部材を対象とし, 汎用プログラム MARC[®] を用いた FEM 解析結果より決定した。なお, FEM 解析方法等の詳細については文献 9) を参考されたし。解析より得られた部材の非線形特性は, アーチリブと補剛桁のみをトリリニア標準型モデルとしてモデル化し, アーチリブ部材において軸力の変動を考慮するために, 面内曲げモーメント M_y , 面外曲げモーメント M_z , 及び軸力 N の相関曲線を式(1)のように定義した。また, 図-3 は M_y-M_z-N の相関曲線とスケルトンカーブのイメージ図であるが, 復元力モデルを決定するにはスケルトンカーブと履歴特性が必要である。スケルトンカーブは単調載荷解析を基に定式化を行った。履歴特性は, 一般的に鋼部材で用いられている標準型のトリリニア復元力モデル (図-4 参照) を用いた⁹⁾。

$$\sqrt{\left(\frac{M_y}{M_{y_u}}\right)^2 + \left(\frac{M_z}{M_{z_u}}\right)^2} + \left(\frac{N}{N_u}\right)^{1.5} = 1.0 \quad (1)$$

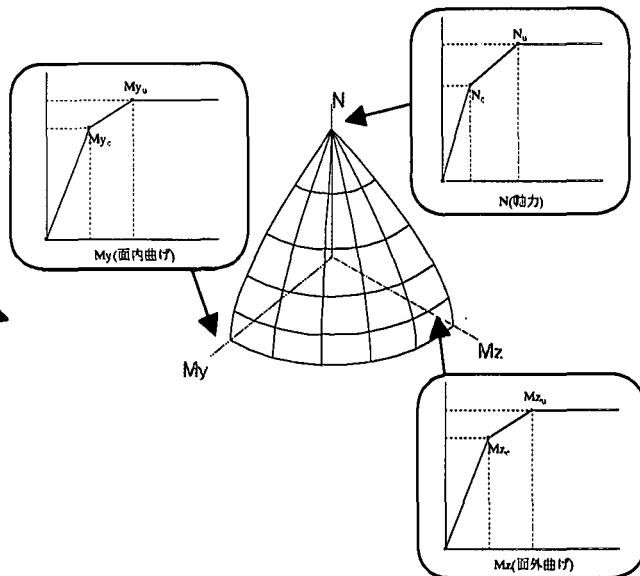


図-3 M_y-M_z-N 相関曲面のイメージ図

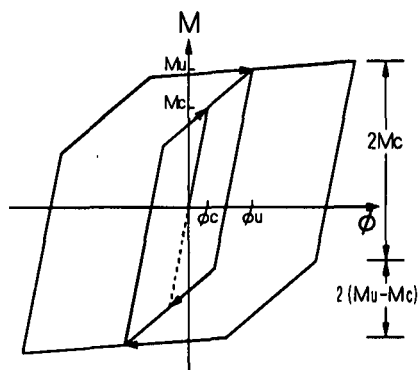


図-4 標準型履歴特性

(4) 固有値解析

表-1 は固有値解析の結果を示しているが, 表中の $X(\%)$, $Y(\%)$, $Z(\%)$ はそれぞれ橋軸方向, 鉛直方向, 橋軸直角方向への有効質量比である。一般に一本柱や桁橋に関しては, 高次振動モードの計算は省略できるが, アーチ橋や斜張橋などの複雑な構造物では高次モードにまで影響が広がると考えられる。今回解析した鋼上路式アーチ橋に関しても, 有効質量の分布は低次振動モードだけでなく, 高次モードにも分布している。したがって, 鋼上路式アーチ橋の振動特性は, 高次振動も重要である事がわかる。図-5 には橋軸方向, 鉛直方向, 橋軸直角方向でそれぞれ最も卓越する振動モードのモード図を示した。上段に橋軸直角方向から見た変形を, 下段に鉛直方向から見た変形を示した。

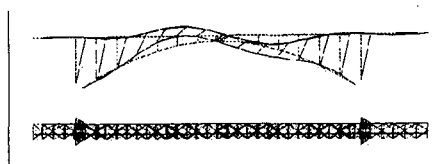
3. 動的解析結果及び考察

(1) アーチリブの最大断面力分布

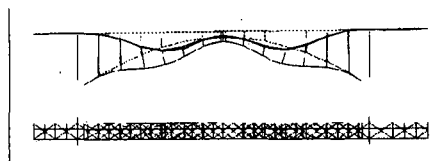
図-6 はアーチリブの最大応答軸力 N , 面内・面外曲げモーメント M_y , M_z 及びねじりモーメント M_x の

表-1 固有値解析結果

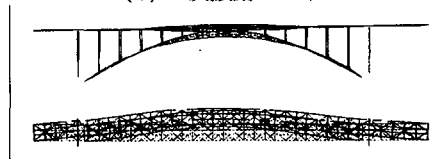
次数	固有周期	有効質量比(%)		
	sec	X	Y	Z
1	2.038	24.7	0.0	0.0
2	1.146	0.0	0.0	73.7
3	0.926	0.0	0.1	0.0
4	0.571	53.5	0.0	0.0
5	0.522	0.0	0.0	0.1
6	0.518	2.9	0.1	0.0
7	0.405	0.0	56.3	0.0
8	0.391	0.0	1.2	0.0
9	0.338	0.0	0.0	0.5
10	0.327	0.0	19.8	0.0
11	0.325	0.0	0.0	0.1
12	0.297	0.0	0.0	12.4
13	0.274	0.0	0.0	0.3
14	0.263	0.0	0.0	0.1
15	0.258	0.0	0.0	0.8



(a) 4次振動モード



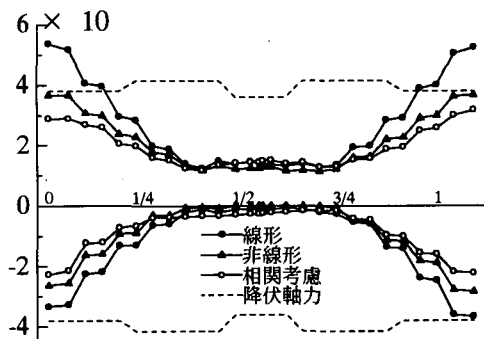
(b) 7次振動モード



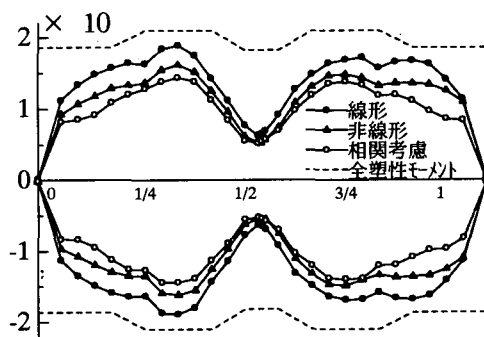
(c) 2次振動モード

図-5 卓越する振動モード

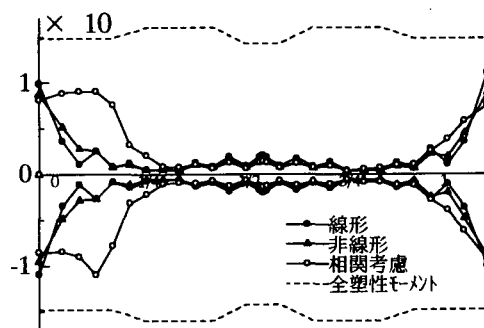
分布を示したものである。図中には線形動的解析、非線形動的解析、アーチリブに $My-Mz-N$ 相関を考慮した場合を併せて示した。図からわかるように、最大応答軸力 N (+:圧縮 -:引張)はアーチ支承部で死荷重時の約4倍と大きな値を示している。面内曲げモーメント My は正負共に $1/4, 3/4$ 部分で最も大きくなっている。面外曲げモーメント Mz は支承部付近に集中しており、面外曲げに対して横構や支材によって抵抗していると考えられる。なお、相関を考慮すると、軸力や面内曲げモーメントの最大値が相関無しに比べて若干小さくなっている。面外曲げモーメントは支承部からスパンの $1/4$ 付近に相関考慮有りの影響が見える。ねじりモーメント Mx は、線形動的解析、非線形動的解析の場合ともスパンの $1/4,$



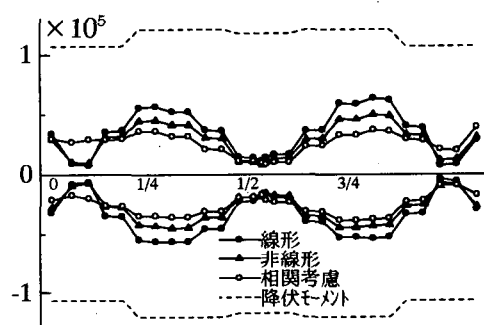
(a) 軸力分布(kN)



(b) 面内モーメント分布(kN·cm)



(c) 面外モーメント分布(kN·cm)



(d) ねじりモーメント分布(kN·cm)

図-6 アーチリブの最大断面力分布

$3/4$ 部分で多少大きめの分布形状を示しているが、相関考慮有りでは、全体的に平均化した分布形状となった。なお、相関考慮有りの場合のねじりモーメントの大きさは、降伏ねじりモーメントの20%~30%程度であった。鋼上路式アーチ橋においては、アーチリブの支承部においては軸力及び面外曲げモーメントが卓越し、 $1/4, 3/4$ 部では面内曲げモーメント及びねじりモーメントが大きくなった。

(2) 基部のMz-N曲線

図-7はアーチリブの左側支承部における、面外曲げモーメントMzと軸力Nの履歴応答曲線を非線形動的解析及び相関を考慮した解析結果について示した。相関強度を考慮し、軸力Nと面外曲げモーメントMzが同時にかかる場合には、相関効果により、N及びMzの耐力は低減されるため、非線形動的解析結果よりも軸力Nの応答が小さくなっている。しかし、その履歴形状は、非線形動的解析結果に比べ横軸(Mz)方向に広がっていることがわかる。

(3) 時刻歴応答変位

図-8にアーチ支間1/4部の橋軸方向、橋軸直角方向の変位の時刻歴応答を示した。どの方向についても、相関を考慮した場合に、残留変位が大きくなっていく。なお、解析時間5secを過ぎた辺りから相関強度の考慮の有無により変位挙動に差が生じ始め、影響が出ている。橋軸直角方向に対しては、解析時間5sec辺りで最大応答変位を記録しているが、相関を考慮した解析では、その後応答変位が相関を考慮しない場合に比べて、急に小さくなっている。

4. まとめ

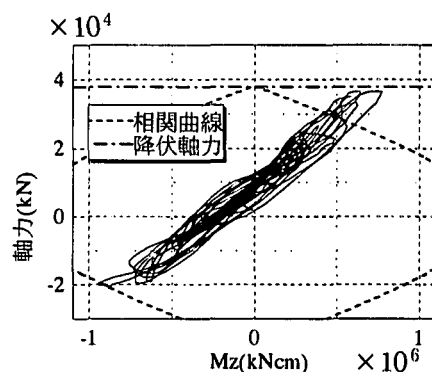
(1) 固有値解析を行った結果、有効質量比の分布は低次振動モードだけではなく、高次振動モードにまで分布していた。これより、鋼上路式アーチ橋の振動特性は、高次振動モードも重要であることがわかった。

(2) 非線形動的解析を行い、My-Mz-N相関強度考慮の有無による結果を比較したところ、相関強度を考慮することにより、軸力の応答が小さくなり、残留変位が大きくなる傾向が見られた。これより、アーチの3次元応答に対する、相関考慮の重要性が明らかになった。

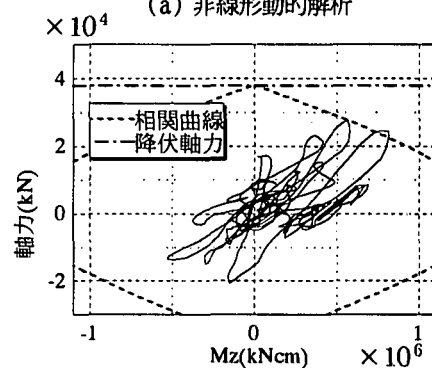
参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（I共通編,II鋼橋編,V耐震設計編），1996。
- 2) 岩坪要,山尾敏孝,小串正明,岡本鉄也：補剛箱型断面部材の曲げ繰返し挙動特性,第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.233-240, 1998。
- 3) 中井博,北田俊行,村山泰男,室塚直人：曲げとねじりを受ける箱桁の終局強度に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.71-82, 1996
- 4) 北田俊行,中井博,國廣昌史,原田直樹：圧縮と曲げとを受ける無補剛・補剛薄肉箱型断面の終局強度相関曲線に関する研究, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.331-342, 1994。
- 5) 劉玉擎,彦坂熙：上路式パイプアーチ橋の非線形地震応答特性の解析,第3回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.173-178, 1999。
- 6) 土木学会西部支部：平成9～11年度 中径間橋梁の耐震性向上に関する研究委員会報告書, 1999。
- 7) (株)構造計画研究所：3次元立体構造物の静的・動的非線形解析プログラムRESP-T理論マニュアル, 1998。
- 8) MARC K7：Users Manual Vol. A-E, 1997。
- 9) 佐藤昌司：組合せ断面力を受ける補剛箱形部材の復元力モデルの作成に関する研究, 熊本大学卒業論文, 2001。

(2001.5.25 受付)

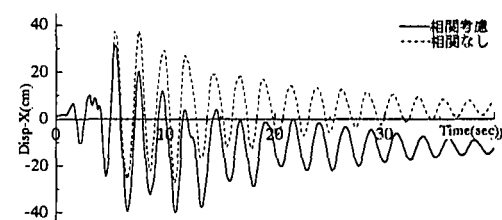


(a) 非線形動的解析

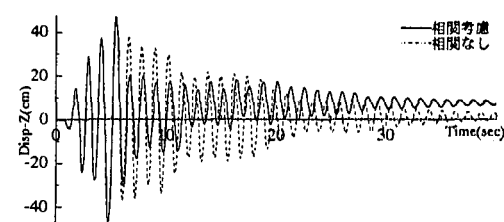


(b) 相関考慮

図-7 基部のMz-N曲線



(a) 橋軸方向変位



(b) 橋軸直角方向変位

図-8 アーチ支間1/4部の時刻歴応答変位