

強震動を受ける鋼製アーチ橋 の振動特性

榊原泰造¹・川島一彦²・庄司学³

¹ 学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

² フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (同上)

³ 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (同上)

従来震災経験はないが、震度法によってしか耐震設計されてきていない上路式2ヒンジ鋼製アーチ橋の耐震性を地震時保有水平耐力法の考え方にに基づき線形及び非線形地震応答解析により検討した。軸力と曲げモーメントを同時に受ける構造上および耐震安定上重要なアーチリブに着目し、塑性化の度合いを検討した。その結果、平成7年兵庫県南部地震による神戸海洋気象台記録のように強い地震動を受けた場合には、アーチリブの一部に非線形性が生じる可能性が明らかになった。

Key Words : Arch Bridge, Seismic Design, Ductility Design, Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Dynamic Response Analysis

1. まえがき

平成8年11月の道路橋示方書の改訂によって、斜張橋、吊橋、上・中路式のアーチ橋等の設計においては、動的解析によって耐震設計する道が開かれた。兵庫県南部地震のようにもっと大きな地震力をアーチ橋が受けた場合にはアーチ部材は塑性化する可能性があるが、どの程度の塑性化が生じ得るのか、また、この塑性化によってアーチ部材は自重に対して安定性を保ち得るのかという点が従来ほとんど検討されていない。本研究では、震度法によって静的に耐震設計された既存の上路式2ヒンジ補鋼アーチ橋を取り上げ、これを地震応答解析によって解析し、アーチ橋の耐震性をアーチ部材に着目して検討した。

2. 解析対象橋及び解析モデル化

解析対象橋とするのは、図-1に示す、支間長155m、アーチライズ28mの上路式2ヒンジ補剛アーチ橋である。図中には後述する動的解析によって求めた塑性化が生じる断面も示している。本橋は昭和55年道路橋示方書により設計水平震度0.23(橋軸方向)、0.18(橋軸直角方向)を見込んで震度法

により耐震設計されている。

解析では、骨組構造モデルを用いた。アーチ橋の限界強度は、アーチ軸線の形状、支持方式、補剛桁の有無、補剛桁とアーチリブとの固定条件、アーチリブの細長比、断面形状、荷重作用方式、部材の残留応力、部材のたわみ、材料の応力～ひずみ関係、横構の形式など、いろいろな要因によって支配される。本解析においては、これらのうち材料非線形性として、アーチリブの曲げに伴う塑性ヒンジ化を考慮することとした。地震によりアーチリブに曲げモーメントと軸力が時間的に変化しながら作用した場合の非線形履歴復元力特性に関しては、研究例がほとんどない。このため、アーチリブの曲げモーメント～曲率関係を、ここでは完全バイリニア型履歴復元力モデルで表すこととした。それを図-2に示す。ただし、モデル化に以下の仮定を設けた。

(1) 鋼材のひずみ硬化及びせん断によるアーチリブの塑性化を無視し、アーチリブが中空箱形断面であることから、降伏曲げモーメントと全塑性曲げモーメントが近接する。このため、全塑性曲げモーメントに達した時に2次剛性に達し、図-2に示したように全塑性化後の2次剛性は0と仮定する。

(2) アーチリブに作用する軸力と曲げモーメントの相関曲線を図-3に示すように考慮する。ただし、本

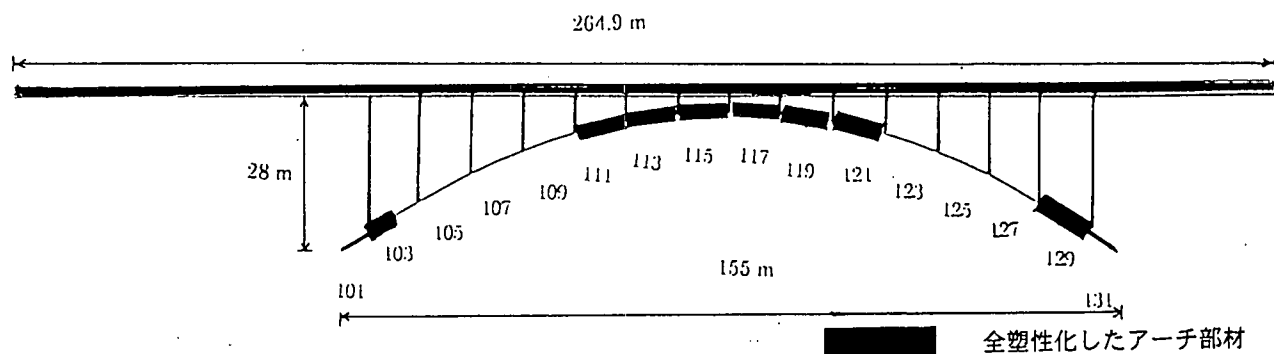


図-1 解析モデル及び動的解析により全塑性化するアーチリブの範囲

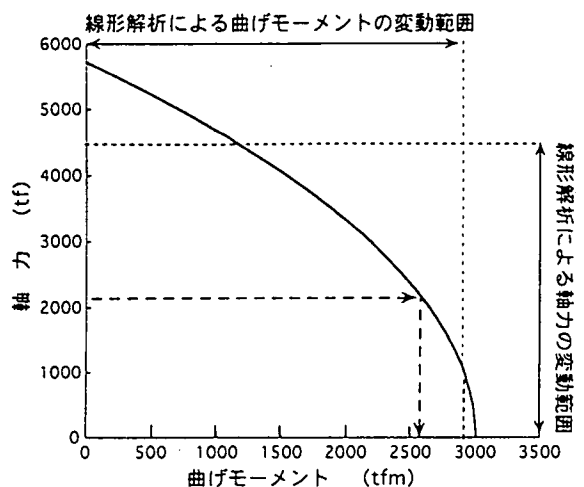


図-2 アーチリブのN-M 相関曲線
と死荷重による全塑性曲げモーメント

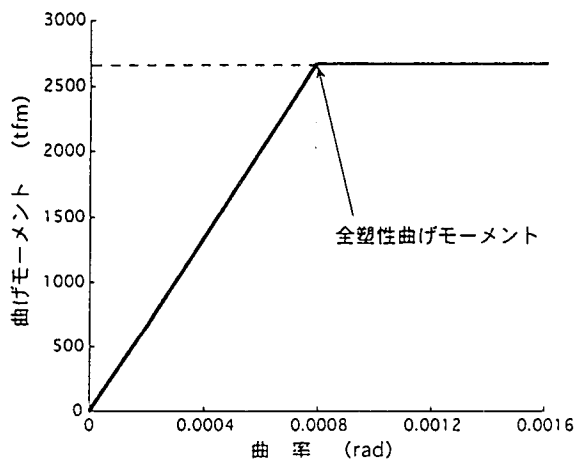


図-3 アーチリブの完全弾塑性型バイリニアモデル

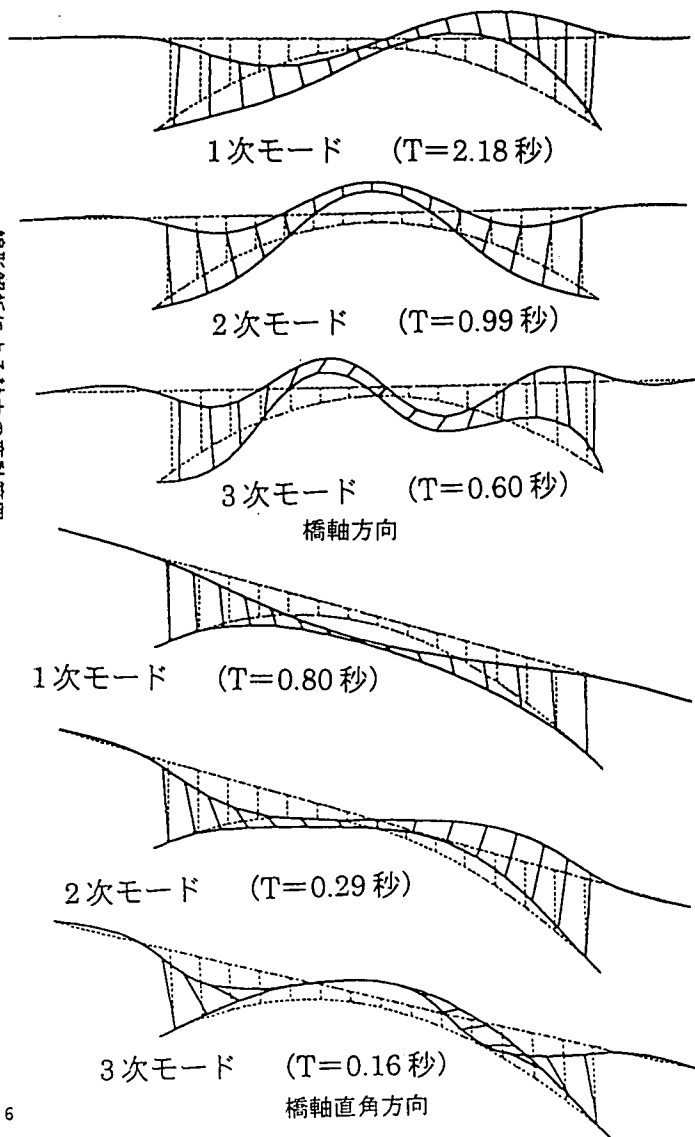


図-4 卓越振動モード

解析では解析プログラムの制約から、時間的に変化する軸力と曲げモーメントとの相関関係を考慮することができないため、自重によってアーチリブに生じる初期軸力に相当する全塑性曲げモーメントを求め、作用曲げモーメントがこの値に達したときにアーチリブは完全弾塑性化すると仮定する。入力地震

動としては、平成 7 年の兵庫県南部地震により神戸海洋気象台で観測された記録 (NS 成分、UD 成分) を用いる。

3. 固有振動特性

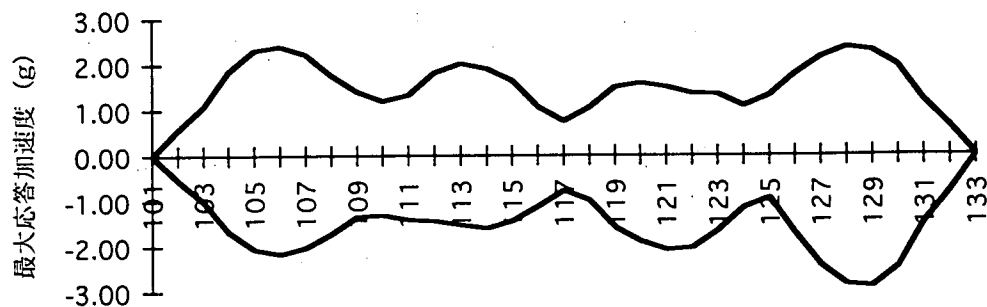
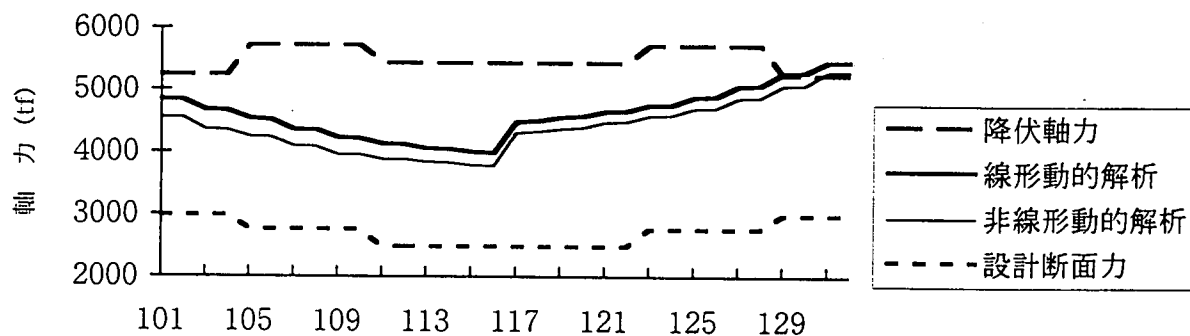
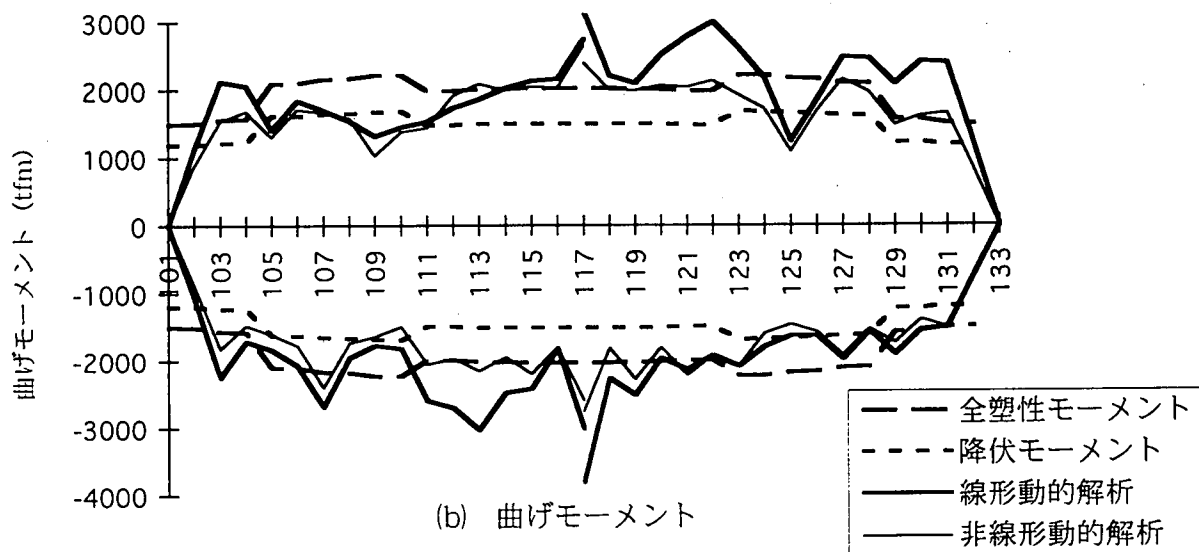


図-5 線形動的解析（橋軸方向入力）によるアーチリブの最大応答加速度



(a) 軸力



(b) 曲げモーメント

図-6 アーチリブに生じる最大断面力

主要モードに対する固有振動モードを図-4に示す。橋軸方向、橋軸直角方向の1次固有周期はそれぞれ、2.18秒、0.80秒であり、橋軸方向のほうが長くなる。これは上路式2ヒンジアーチ橋の特有な構造形式によるものであり、上部構造の床版剛性が大きく影響しているためである。

すなわち、橋軸方向には、桁の両端は可動であり、桁がアーチリブの変位を拘束しないが、橋軸直角方向には桁の両端で支承により変位が拘束される結果、橋全体系の剛性が増してこの方向の基本固有周期が小さくなるのである。橋軸方向の1次卓越振動モー

ドに着目すると、アーチリブの1/4点では水平方向と上下方向の振動モードの値は1:1.7となっており、橋軸方向に加振を受けても、上下方向に極めて大きな応答を生じることを示している。

4. 強震動を受けた場合のアーチ橋の耐震性

線形動的解析によって橋軸方向に入力地震動を作用させた場合の、アーチリブ上の各節点における最大応答加速度を求めた結果を図-5に示す。入力加速度とした神戸海洋気象台記録(0.835g)に対して、

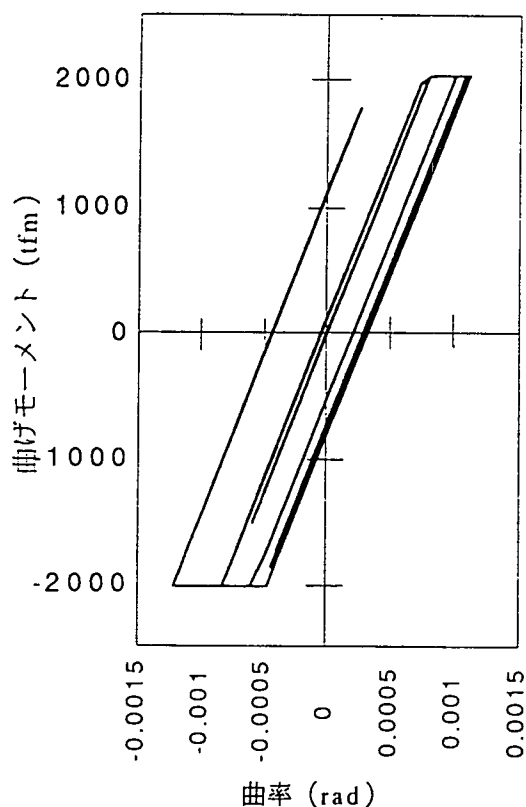


図-7 要素 117 における曲げモーメント～曲率関係

水平方向の応答加速度の最大値は 1.79g、鉛直方向では 2.88g となる。入力加速度に対する応答加速度の比は橋軸方向には約 2.1、上下方向には約 3.4 である。

次にアーチリブに生じる最大軸力及び曲げモーメントを線形動的解析によって求めた。この結果を図-6に示す。ここには、後述する非線形動的解析によって求めた結果も示している。これより、橋軸方向に入力した場合のアーチリブの最大軸力はアーチ中央部で 4000tf、アーチ端部で 5500tf 程度であり、設計軸力 2700tf を大きく上回ることがわかる。特に、アーチ端部においては、降伏軸力 5200tf を上回る大きな軸力が生じる。また、橋軸方向に入力した場合にアーチリブに生じる曲げモーメントはアーチ中央付近で最大となり、4000tfm 程度と設計曲げモーメント 1000tf～1200tf を大きく上回り、さらに降伏モーメント（約 2000tfm）及び全塑性モーメント（約 2300tfm）をも上回っている。したがって、アーチリブには塑性ヒンジが形成されと考えられる。なお、ここに示した降伏曲げモーメント及び全塑性曲げモーメントの値は、図 3 に示したように、自重によりアーチリブに生じる 2000tf 程度の軸力に相当する値である。もし上述したように 4000tf の軸力が生じる場合には、全塑性曲げモーメントは

1500tfm 程度に低下する。したがって、軸力と曲げモーメントの時間依存性の相関を考慮して解析すると、さらに大きな塑性ヒンジがアーチリブに形成される可能性がある。

以上より、アーチリブに塑性ヒンジが生じることがわかったため、アーチリブを非線形はり要素に置き換え、非線形動的解析を行った。前出の図-6には、これより求めた曲げモーメントを示している。塑性化する箇所を示したのが図-1であり、アーチリブの中央部を中心に端部においても塑性化が生じる。図-7はアーチリブ中央部の曲げモーメントの履歴を示した結果である。曲率じん性率は最大で 1.29 と大きくはないが、これは橋軸方向だけに入力地震動を与えた場合の結果であり、前述のように曲げモーメントと軸力の時間的な相互作用を考慮していない結果であることに注意しなければならない。

5. 結論

本解析で明らかとなった事項を示すと、以下のようになる。

(1) 水平方向の 1 方向加振にもかかわらず、ライズスパン比が 1/5.5 のアーチ橋においては、上下方向にも 3 倍程度の応答加速度が生じる。これは実際のアーチ橋が地震動を受けた場合、上下方向へ振動しやすいということを表しているものである。今後のアーチ橋の耐震設計では、上下方向入力の影響をも含めた慎重な設計をしていく必要がある。

(2) 従来の震度法で設計されただけのアーチ橋では、神戸海洋気象台記録レベルの地震動を受けると、アーチリブにはその降伏軸力の 80% から一部引張に至る軸力と、アーチクラウン部付近では全塑性化するだけの非線形応答が生じる。

(3) ただし、これは時間依存性の軸力～曲げモーメントのインターアクションを無視し、死荷重によってアーチリブに生じる軸力に相当する全塑性曲げモーメントを降伏点とした近似的なバイリニアモデルによる解析結果である。地震動などの交番荷重を受けた場合、アーチリブにおいては、軸力及び曲げモーメントの変動の影響を無視することができないため、今後さらにインターアクションの効果を考えた解析が必要である。

謝辞：本解析を実施するに際して、川田工業(株)越後滋氏には、アーチ橋の特性について種々御指導いただきました。また、本解析には(株)鋼材倶楽部の御支援をいただきました。ここに記して厚くお礼申し上げます。