

動的解析に基づく上路式2ヒンジ鋼製アーチ橋の 耐震性に関する検討

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修士課程 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 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)

1. まえがき

上路式アーチ橋はアーチ部材の軸圧縮力によって構造系を支持する形式であり、もともと地盤条件が良好な山岳地において採用されることが多く、海洋性地震の多いわが国では地震を経験する確率が低かったこと、また、地盤条件が良好であるため地震力も一般には小さかったこと等の理由から、まだ本格的な震災例はない。しかし、アーチ橋は0.2程度の設計水平震度に相当する地震力に対して震度法によって耐震設計されただけであり、兵庫県南部地震の経験に基づけば、こうした震災経験の少ない形式の橋に対しても耐震性を検討しておく必要がある¹⁾。強震動を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、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は従来ほとんど検討されていない²⁾。

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鋼製上路式2ヒンジ補剛アーチ橋を取り上げ、これに兵庫県南部地震による神戸海洋気象台での地震動が作用した場合の耐震性をアーチ部材に着目して検討したので、この結果を報告する。

2. 解析対象橋及び解析モデル化

解析対象とするのは、図-1に示すように支間長155m、アーチライズ28mの2主構からなる上路式2ヒンジ補剛アーチ橋である。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。固有値解析によれば、基本固有周期は、橋軸方向には2.18秒、橋軸直角方向には0.80秒で

ある。アーチ橋における耐震設計では、面内方向の応答が重要であるため、以下では、この方向に対する検討結果を示す。

図-2に示すように、アーチリブの設計軸力は自重+活荷重の組み合わせによって、またアーチリブの設計曲げモーメントは自重+活荷重+温度変化の組み合わせによって、それぞれ決められている。自重だけによってアーチリブに生じる断面力を設計断面力と比較すると、軸力では80%、曲げモーメントでは15%となり、アーチリブの軸力に対しては自重が大きな影響を持っているが、曲げモーメントに対しては活荷重の影響が大きく、温度変化の影響もある。

動的解析では、対象とするアーチ橋を骨組構造モデルに置換した。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。モデル化に際しては、平面保持の条件を仮定し、鋼材のひずみ硬化やバウシinger効果、せん断によるアーチリブの塑性化は無視した。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はほぼ同じとなるため、全塑性曲げモーメントに達した時に、全塑性化する完全バイリニア型履歴復元力特性を仮定することとした。

軸力 N と曲げモーメント M を受ける部材では、軸力 N とモーメント M の相関関係は、次のように与えられる^{3),4)}。ここでは、簡単のため、充実断面に対する条件式を用いている。

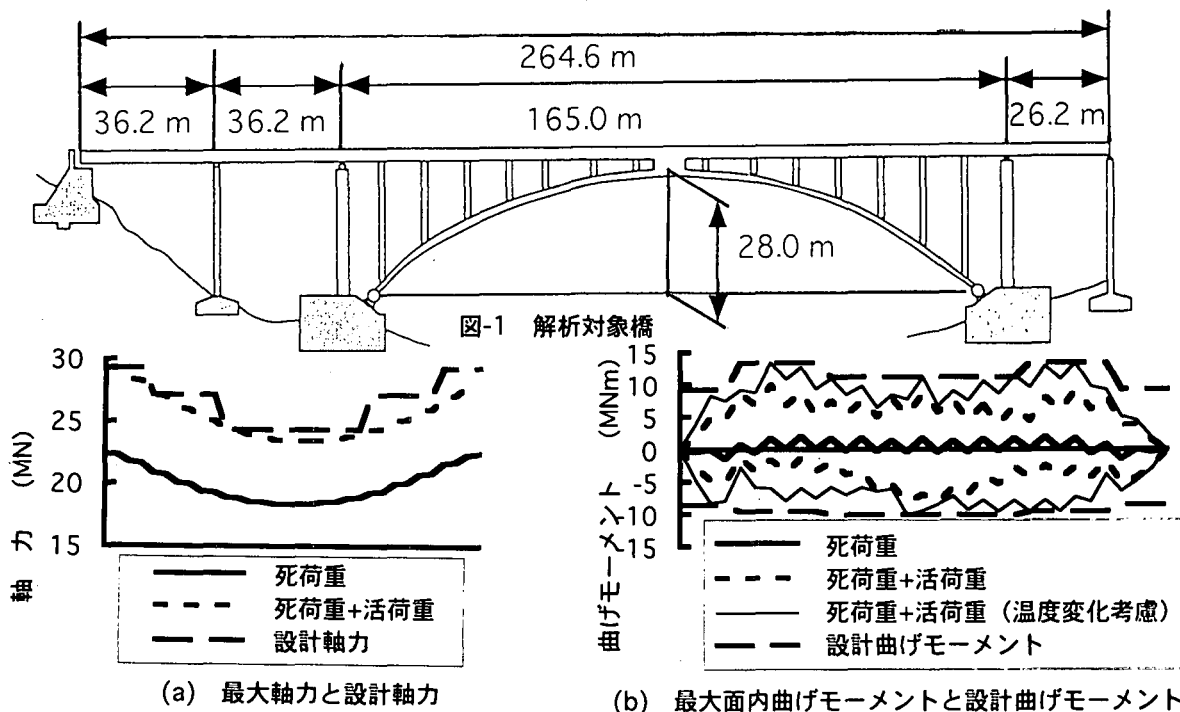


図-2 静的設計による最大断面力と設計断面力

$$\left(\frac{N}{N_Y}\right)^2 + \left|\frac{M}{M_p}\right| = 1 \quad (1)$$

ここで、アーチリブの断面を図-3 に示すようにモデル化すると、降伏軸力 N_Y と全塑性モーメント M_p は、次のように求められる⁵⁾。

$$N_Y = A\sigma_Y = \{D_1 D_2 - (D_1 - 2t_1)(D_2 - 2t_2)\}\sigma_Y \quad (2)$$

$$M_p = Z\sigma_Y = \frac{1}{4}\{D_1^2 D_2 - (D_1 - 2t_1)^2 (D_2 - 2t_2)\}\sigma_Y \quad (3)$$

ここで、 A は断面積、 Z は全塑性断面係数、 σ_Y は降伏応力度、 D_1 、 D_2 はウェブ及びフランジの長さ、 t_1 、 t_2 はフランジ及びウェブの厚さである。

従って、式(2)、(3)を式(1)に代入すると、軸力 N と曲げモーメント M の相関関係は次のようになる。

$$\left[\frac{N}{\{D_1 D_2 - (D_1 - 2t_1)(D_2 - 2t_2)\}\sigma_Y}\right]^2 + \frac{M}{\frac{1}{4}\{D_1^2 D_2 - (D_1 - 2t_1)^2 (D_2 - 2t_2)\}\sigma_Y} = 1 \quad (4)$$

アーチリブの材質はSS400であるため、降伏応力度を $\sigma_Y = 235$ MPa として全塑性時のアーチリブの軸力 N 、曲げモーメント M の相関曲線をアーチリブの端点付近、1/4点(3/4点)付近、アーチクラウン部付近に分けて求めると図-4(a)のようになる。図-4(b)は曲げモーメント-曲率の関係を示したものである。ただし、ここでの完全弾塑性化とは、部材の曲げに伴う弾塑性化であり、軸方向の弾塑性化(座屈現象など)は考慮していない。軸力と曲げモーメントとの時間的なインターアクションを考慮して解析した。

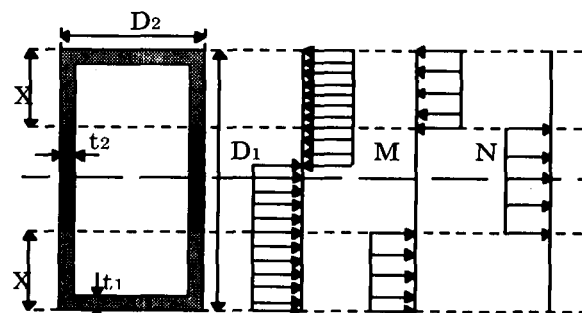
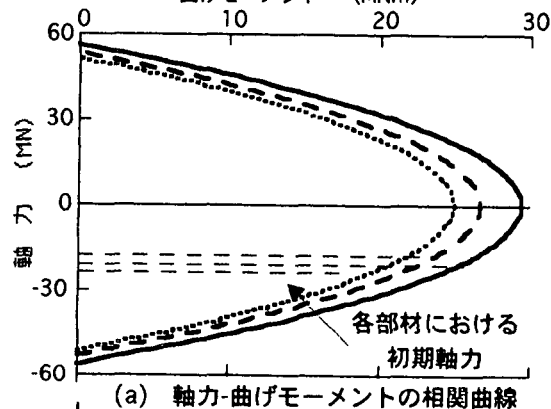
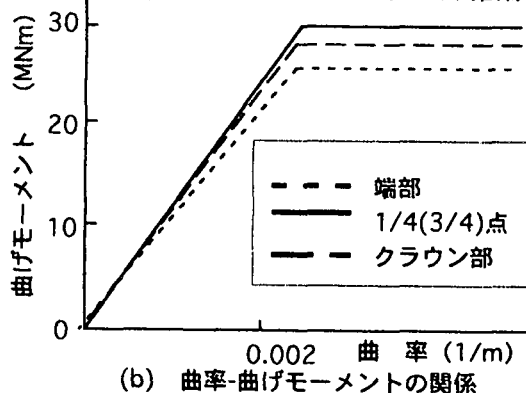


図-3 軸力と曲げモーメントを同時に受ける部材の全塑性時の応力度の分布



(a) 軸力-曲げモーメントの相関曲線



(b) 曲率-曲げモーメントの関係

図-4 アーチリブのN-M相関曲線と完全弾塑性バイリニアモデル(曲げモーメント最大時)

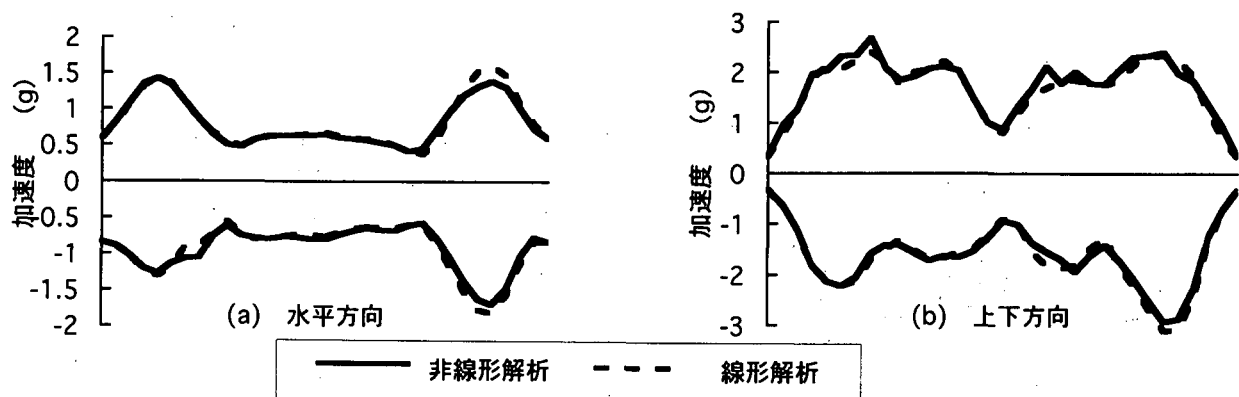


図-5 アーチリブに生じる最大応答加速度

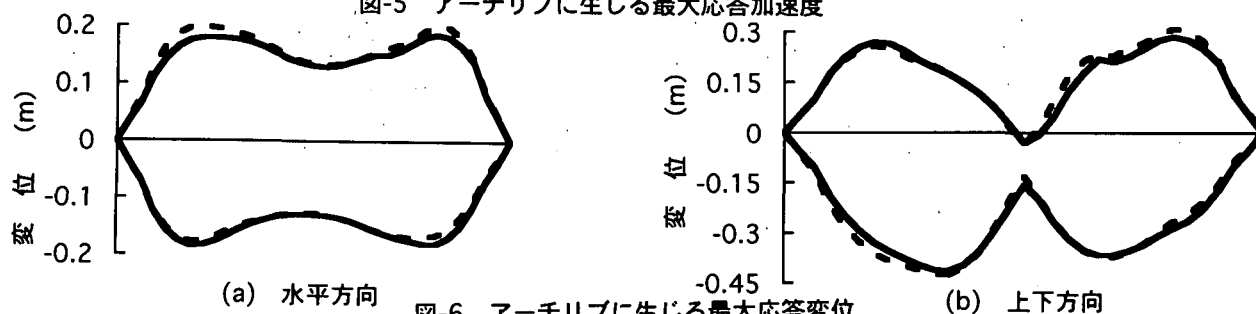


図-6 アーチリブに生じる最大応答変位

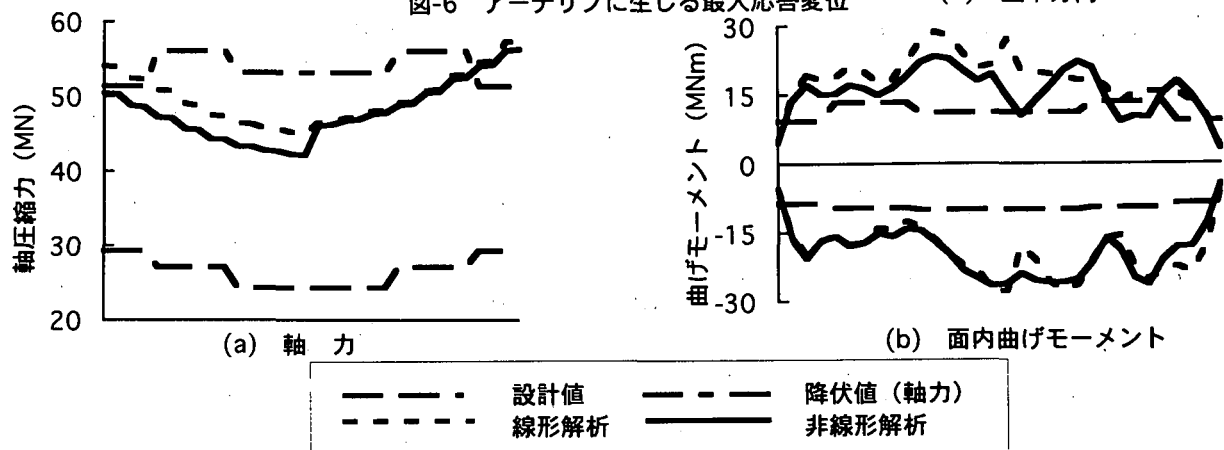


図-7 アーチリブに生じる最大断面力

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. 強震動を受けた場合のアーチ橋の耐震性

非線形動的解析によって求めたアーチリブに生じる最大応答加速度および変位を図-5、図-6に示す。図中には線形解析によって求めた応答も比較のため示している。アーチリブに生じる応答変位や応答加速度は上下方向の方が橋軸方向よりも大きく、上下方向の応答加速度はアーチリブの1/8上では3gにも達する。線形解析と非線形解析には大きな応答の違いは認められない。

最大軸力及び曲げモーメントを示した結果が図-7である。これによれば、アーチリブに生じる最大軸力は、アーチ中央部で44MN、アーチ端部では52MN

程度であり、設計軸力25～30MNを大きく上まわる。特に、アーチ端部では部分的に降伏軸力50MNを上まわる軸力が生じる。線形解析では、非線形解析よりやや大きな軸力が得られる。曲げモーメントはアーチ中央付近で最大となり、20MNm程度と設計曲げモーメント10～20MNmを上まわる。

図-8はアーチクラウン部における軸力と曲げモーメントの相関関係及び曲げモーメント-曲率の履歴を示した結果である。軸力変動にともなって降伏曲げモーメントが変化するため、図-4(b)のように完全弾塑性型の $M-\phi$ 履歴を仮定したにもかかわらず、 $M-\phi$ 関係は完全弾塑性型とはならない。図-9はアーチクラウン付近の部材における軸力、曲げモーメント、曲率の時刻歴図である。

図-10は、非線形域に入るアーチリブの位置と曲率応答を示したものである。最大の曲率応答は0.0026(1/m)であり、アーチリブ端部付近に生じる。

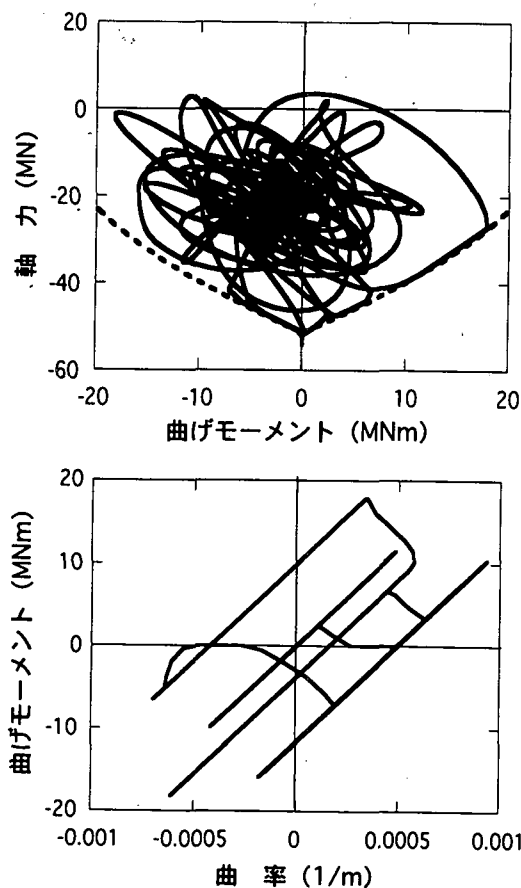


図-8 アーチリブのN-M相関曲線とM- ϕ 曲線の履歴図

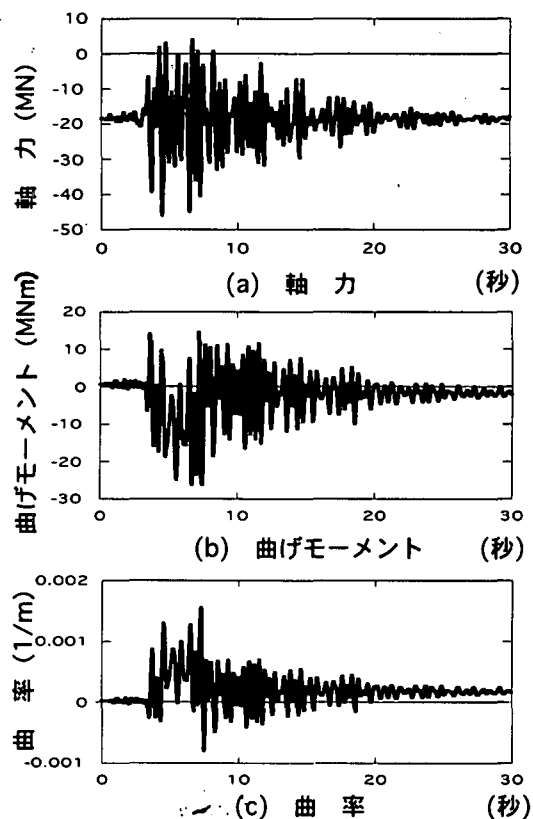


図-9 アーチクラウン部における軸力、曲げモーメント、曲率の時刻歴図

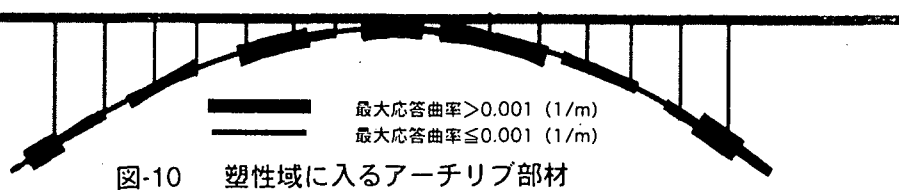


図-10 塑性域に入るアーチリブ部材

(1/m) 程度の塑性化が生じる。

4. 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) 神戸海洋気象台記録を入力すると、水平方向には0.5 から 1.5g、上下方向には 2g 程度の応答が生じる。上下方向の応答の影響を無視できない。
- (2) 震度法で考慮された 0.23 の設計震度に比較して 4 倍程度の地震力が橋軸方向に作用するため、スプリング部には全断面降伏に相当する以上の軸力が作用する。アーチ部の耐震性に重大な影響を与えると考えられるため、このような高軸力下のアーチリブの耐力を慎重に検討する必要がある。
- (3) 式 (4) の軸力と曲げモーメントの相関を考慮し、この軸力に相当する曲げモーメントで降伏する完全弾塑性バイリニア型の履歴特性を考慮した解析を行うと、アーチリブには曲率じん性で最大 0.0026

謝辞：本解析に際して、対象橋のモデル化については、川田工業(株)越後滋氏から種々ご教示をいただきました。ここに、記して厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 榊原泰造, 川島一彦, 庄司学：動的解析に基づく上路式2ヒンジ鋼製アーチ橋の耐震性に関する検討, 東京工業大学地震工学グループ報告書, TIT/EERG 97-2, 1997.
- 2) 榊原泰造, 川島一彦, 庄司学：強震動を受ける鋼製アーチ橋の振動特性, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1045-1048, 1997.7.
- 3) 太田俊昭：新体系土工学 8・構造物の非弾性解析, 1980
- 4) 伊藤学：土木系大学講義シリーズ 11・鋼構造学, 1985
- 5) (株)長大：軸力と曲げモーメントを同時に受ける部材の応力度分布、内部資料、1996