

鋼・コンクリート複合アーチ橋の耐震設計 ー富士川橋の場合ー

猪熊康夫¹・台原 直²・為広尚起³

¹正会員 日本道路公団 （〒420 静岡県静岡市御幸町11-30 エクセルワールド静岡ビル14F）

²正会員 株式会社長大 （〒305 茨城県つくば市春日3-22-6）

³正会員 株式会社構造計画研究所 （〒164 東京都中野区本町4-38-13）

1. はじめに

合理性と経済性を追求して、各々の材料特性を生かした複合構造を採用した構造物が増えてきている。複合構造のアーチ橋への適用としては、圧縮応力が支配的なアーチリブと鉛直材にコンクリートを使用し、曲げ応力が支配的な補剛桁には鋼を使用することが考えられる。

兵庫県南部地震以後、耐震設計の基本は震度法から地震時保有水平耐力法へと移行している。単柱形式の橋脚や1層の門型ラーメン橋脚のようにその振動特性が1自由度系で近似できる構造物に対しては、静的解析による地震時保有水平耐力法が道路橋示方書等の設計基準類に規定されているが^{1)・2)・3)}、アーチ橋のように複数の振動モードによってその地震応答が決定されるような構造物に対しては非線形動的解析のみが兵庫県南部地震のような大地震に対する耐震性を判定する唯一の手段となる。

本報告は、第2東名高速道路の富士IC～清水IC間に建設が計画されている鋼・コンクリート複合アーチ橋（富士川橋）の耐震設計の中で実施された非線形動的解析について紹介する。

2. 解析対象橋梁とその非線形性

富士川橋は平成2年の道路橋示方書によって設計されたが、兵庫県南部地震に対する耐震性を判定するために神戸海洋気象台記録を入力地震動とした非線形動的解析を行い、その結果に基づいて地震時保有水平耐力法に準じた照査を行った。

図-1に富士川橋の一般図を示す。富士川橋は、橋長381m、アーチリブの支間長265m、耐震設計上の地盤種別はⅠ種地盤で設計水平震度は0.16である。

富士川橋のような長大アーチ橋では、次のような非線形性が地震応答に影響を与えと考えられる。

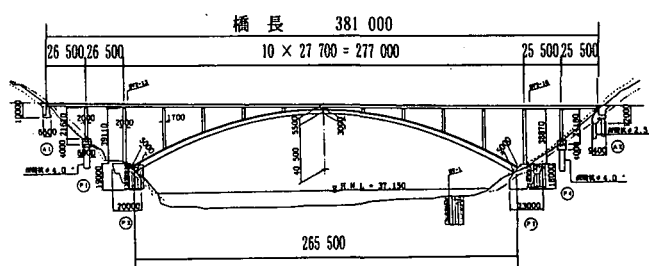


図-1 解析対象橋梁

- 1) アーチリブの細長比が大きい場合、変形の影響（幾何学的非線形）が無視できない。
- 2) 大規模な地震時には、ひび割れの発生や鉄筋の降伏によるRC部材の剛性低下（材料非線形）が起こる。
- 3) アーチ橋のような不静定構造物においては、地震時に軸力が変動し、その変動が大きい場合には、材料の非線形性（ $M-\phi$ 関係）が変化する。（ $N-M$ 相関）。

これらの非線形性の有無が、地震応答に与える影響をアーチ橋を対象に検討した例は少ない。設計では、全ての非線形性を考慮した動的解析を行うことが最良の方法であるが、上述のような3つの非線形性を同時に考慮した解析法の精度等は十分解明されていない。富士川橋ではこのような解析技術の現状を考慮して、表-1に示す解析を実施し、耐震性の照査を行った。なお、後述するように、非線形梁要素に $N-M$ 相関を考慮した解析では、 $M-\phi$ 履歴ループが反転する際に誤差が生じることがあるため、複合非線形解析の応答値は参考値に留めた。

表-1 解析ケース一覧

解析理論	考慮した非線形性
Ⅰ. 微小変位理論	・材料非線形
Ⅱ. 線形化有限変位理論	・初期軸力の影響を考慮した材料非線形
Ⅲ. 複合非線形	・軸力の変動による材料の非線形性（ $N-M$ 相関） ・変形の影響（大変形）

3. 解析法と解析モデル

材料非線形、幾何学的非線形、複合非線形についての説明は数多くの文献に紹介されているので、ここでは、軸力の変動によって材料の非線形性が変化する場合の取り扱いについて示す。

(1) 相関曲線の設定

本解析では、軸力と M_c 、 M_y の相関関係を(M , N)平面内にプロットすることで得られる閉曲線、すなわち M - N 相関曲線を与え、この相関曲線を用いて塑性化の判定を行うことで、軸力変動の影響を考慮する手法を採用している。相関曲線は、ひび割れ曲線、降伏曲線、終局曲線の3曲線で構成される。本解析では履歴特性として剛性低下型トリリニアモデルを用いているので、 M_u の包絡として描かれている終局曲線は剛性の変更等には用いられていない。この3曲線を部材内の弾塑性評価点毎に1組設定する。

(2) 塑性化の判定と剛性変更

塑性化の判定は、応答曲げモーメント m と応答軸力 n を NM 平面上の点(m , n)としてプロットし、上述の各曲線との位置関係を各時刻でチェックすることにより行われる。点(m , n)がひび割れ曲線の内側にあるときは「弾性」、ひび割れ曲線の外かつ降伏曲線の内側にある状態では「ひび割れ」、降伏曲線の外側にある状態では「降伏」の判定を出し、判定に応じて曲げ剛性 $E I$ を変化させる。軸方向剛性 $E A$ は曲げと同時に変更せず、軸力項のみの1軸判定で変化させている。

(3) 硬化則と履歴特性

点(m , n)がいずれかの曲線を内側から外側に向かって横切り、さらに外側に向かって進行している間、当該曲線は進行する応力点が常に曲線上に乗るように、塑性論に規定される複合硬化則に従って移動かつ膨張する。またこの状態から点(m , n)が曲面の内側に戻った場合、各曲線はその直前の状態のまま、次に点(m , n)が曲線を内側から横切るまで、位置と形状が保持される。これは武田型の履歴則を制御する際の、ひび割れあるいは降伏進行中挙動と、除荷時の弾性復帰挙動をそれぞれモデル化したものである。

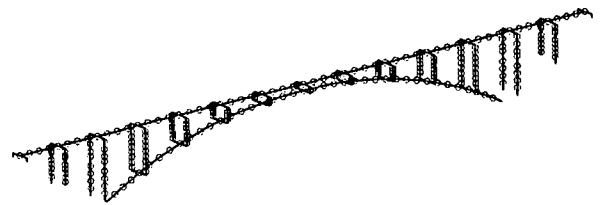
(4) 履歴の除荷ルート

点(m , n)が降伏曲面の内側に戻り除荷判定が出た場合、通常の1軸での武田ループ制御と同様のルールで前回経験した反対側(m が正の状態から除荷が発生したのなら負側、あるいはその逆)の最大点を目指して、低下

された剛性で戻り始める。しかし実際の反対側降伏復帰は点(m , n)と曲線との交差で判定されるので、必ずしも元々目指していた点で反対側の降伏復帰が起こるとは限らない。(3)で述べた複合硬化による曲線の移動かつ膨張は、点(m , n)が MN 平面上の直線的経路を行来する(m と n の変動卓越周期がほぼ同じ)と仮定して、 m が進行している側の曲面状態を点(m , n)に追従させると同時に、前回の反対側最大点を経験した付近(前回の除荷点付近)の曲面状態を変化させないように制御している。

このように仮定しているため、 M - ϕ 履歴ループが反転し最大点を目指す場合に、実際の挙動とずれが生じることがある。これが、非線形梁要素に軸力変動を考慮する解析法の問題点となっている。

(5) 解析モデル



○: 質量点

図-2 解析モデル図

解析モデルは、以下の方針で作成した。

- 1) 解析モデルは、図-2に示すような3次元の骨組みモデルとした。
- 2) 橋軸方向から地震動を入力した場合は、桁は非線形に入らないため線形梁要素でモデル化した。橋軸直角方向から地震動を入力した場合は、RC床版の剛性が桁の剛性に大きく寄与するためRC断面と同様に平面保持の仮定の元に非線形特性を求め、非線形梁要素(M - ϕ)でモデル化した。
- 3) アーチリブ、鉛直材、橋脚については、非線形梁要素でモデル化した。
- 4) 材料の非線形特性は、死荷重時の軸力が作用するものとして算出し、履歴則は武田モデルとした。
- 5) 構造減衰は、桁は複合桁であることを考慮して鋼材に用いられる2%とした。アーチリブ、鉛直材、橋脚は、履歴モデルによる履歴減衰が解析の過程において自動的に考慮されるので2%とした。基礎〜地盤系のばねについては、逸散減衰を考慮して10%とした。減衰マトリックスは、歪みエネルギー比例型のモード減衰定数を算出し、橋軸方向の水平振動が卓越する1次モード($T_1=1.87$ 秒)と鉛直曲げ振動が卓越する2次モード($T_2=1.12$ 秒)よりレーリー型の減衰マトリックスを作成した。

4. 複合アーチ橋の非線形応答

(1) 初期軸力の影響

図-2に示すモデルのアーチリブの基部と橋脚基部を固定とした解析モデルを用いて、微小変位理論と線形化有限変位理論による材料非線形動的解析をそれぞれ行い、初期軸力による幾何剛性が非線形応答に与える影響を検討した。図-3はアーチリブの曲げモーメントを示したものである。アーチリブの曲げモーメントの非線形応答に初期軸力が与える影響は少なく、初期軸力を考慮した場合の曲げモーメントが微小変位理論のそれを越えている場合でもその最大値は微小変位理論の1.06倍である。

(2) 軸力変動と大変形の影響

図-2に示すモデルに基礎-地盤系をバネとして考慮した解析モデルを用いて、線形化有限変位理論による材料非線形解析と、軸力変動と大変形を考慮した材料非線形解析（以下、複合非線形解析とする）を行い、軸力変動と大変形の考慮が非線形応答に与える影響を検討した。図-4はアーチリブの曲げモーメント、図-5はアーチリブの軸力をそれぞれ示したものである。曲げモーメントは、アーチリブの基部付近では線形化有限変位理論による応答値の方が大きい。鉛直材が存在する区間では複合非線形解析による応答値の方が大きい。軸力は、アーチリブの基部付近と中央部で複合非線形解析の方が大きな応答値となっている。曲げモーメントと軸力はアーチリブの基部で最大となり、曲げモーメントは線形化有限変位理論による応答値の方が1.23倍、軸力は複合非線形解析による応答値の方が1.05倍大きな値を示している。

図-6は、アーチリブ中央部の橋軸方向変位の応答変位を示したものである。地震開始から最大応答値が発生するまでの間は、線形化有限変位理論と複合非線形解析の応答変位は良く一致している。しかし、最大応答発生後においては複合非線形解析では残留変位が生じているのに対して線形化有限変位理論では生じていない。最大応答変位は、線形化有限変位理論が7.9cm、複合非線形解析が8.5cmであり、大変形の考慮の影響は少ないと言える。これより、最大応答発生後の残留変位の発生は、軸力の変動による材料の非線形特性の変化が原因と考えられる。

図-7は、アーチリブ基部の曲げモーメントと曲率の応答履歴を示したものである。履歴曲線の形状を比較すると、複合非線形解析では40000tf・mという比較的小さな曲げモーメントが発生した時に最大応答曲率が発生しており、その値は線形化有限変位理論の約2.7倍となる。両者の応答履歴に差が生じ始めた点に着目して地震開始から5.2秒間の応答履歴を図-8示した。図より両解析において、曲げモーメントと曲率の関係が異なることがわか

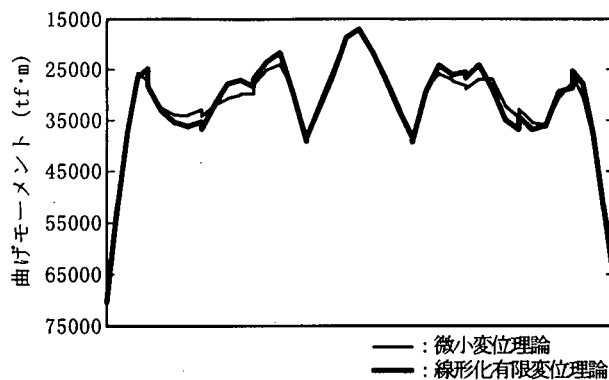


図-3 アーチリブ最大モーメント図

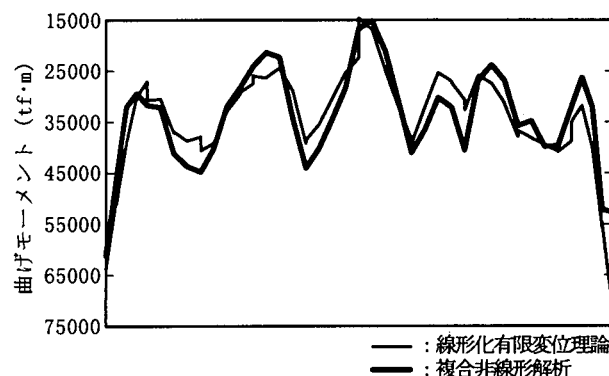


図-4 アーチリブ最大モーメント図

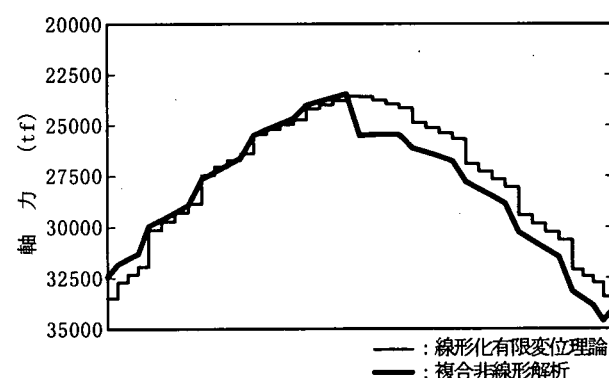


図-5 アーチリブ最大軸力図

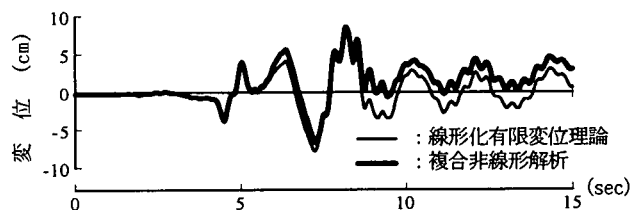


図-6 アーチリブ中央の橋軸方向変位

る。応答曲率が最大となった時の軸力に着目すると地震によって発生する軸力は引張となり、その結果、アーチリブ基部の軸力は死荷重によって発生する軸力よりも60%小さい軸力となっている。このため、複合非線形解析において参照しているM- ϕ 関係の降伏時の曲げモーメントが死荷重によって発生する軸力が作用している時の降伏曲げモーメントよりも小さくなっている。複合非線形解析では、軸力が減少する場合参照するM- ϕ 関係のひび割れ点や降伏点は、初めに参照していたものより

も小さくなり、軸力変動を無視した時よりも早くひび割れ曲率や降伏曲率に達する。

図-9は、アーチリブ基部の曲げモーメントと軸力の相関図を地震開始から最大応答が発生するまでの8秒間を示したものである。複合非線形解析による曲げモーメントは降伏曲げモーメント程度に留まっているのに対して、線形化有限変位理論による曲げモーメントは終局モーメントまで達している。両解析の違いは、軸力が低下した時の発生曲げモーメントの違いに現れていることがわかる。軸力が同じなのに曲げモーメントが異なるのは、同じ軸力であっても両解析法で参照している $M\sim\phi$ 関係が異なるからである。

以上より、軸力の変動に伴う材料の非線形性の変化はアーチ橋の地震応答に大きな影響を与えることがわかる。

5. まとめ

鋼・コンクリート複合アーチ橋である富士川橋の地震時保有水平耐力法に相当する照査を、非線形動的解析によって行った。非線形動的解析は、長大アーチ橋において影響が大きいと考えられる変形の影響（幾何学的非線形）、材料非線形、軸力の変動による材料非線形特性の変化を考慮して行った。検討結果を以下に示す。

- 1) 微小変位理論と線形化有限変位理論は、ほぼ等しい応答値となった。
- 2) 線形化有限変位理論と複合非線形解析の差はアーチリブの基部の曲げモーメントで大きく、前者は後者の1.23倍大きな値となった。
- 3) 富士川橋では、大変形の考慮の有無よりも軸力の変動による材料非線形特性の変化の方が、地震応答に与える影響が大きいことがわかった。
- 4) 富士川橋は、震度法で設計された断面を線形化有限変位理論による非線形動的解析より得られた応答値で照査した結果に基づいて、鉛直材付近のアーチリブの帯鉄筋径をD22からD25、鉛直材の帯鉄筋径をD16からD19に変更した。

軸力の変動に伴う曲げモーメント-曲率関係の変化が、非線形応答に与える影響が大きいことがわかった。しかし、これに関する橋梁分野での研究は少なく、多くがファイバーモデルを用いた解析的研究であり、実際の挙動がどうなるかという実証的な研究は少ない。アーチ橋のアーチリブや吊構における2本柱形式の主塔が橋軸直角方向の地震動の作用を受けた場合等には、地震時に軸力が大きく変動するため、軸力変動を考慮した実用的な解析法の提案が期待される。

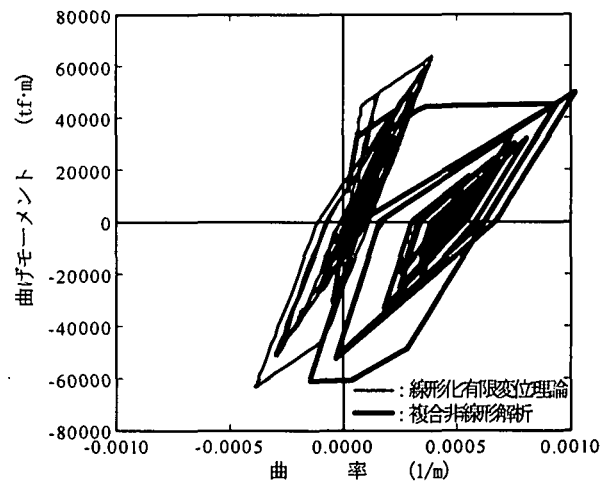


図-7 曲げモーメントと曲率の関係

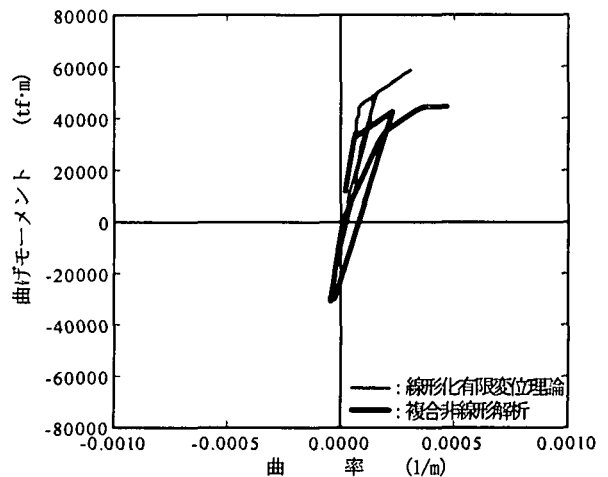


図-8 曲げモーメントと曲率の関係

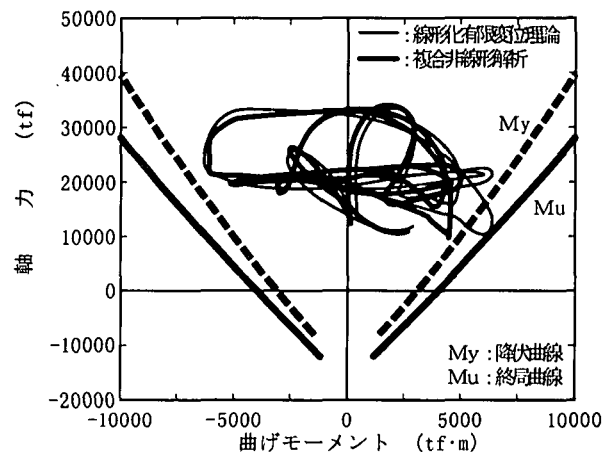


図-9 軸力-曲げモーメント相関図

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説(平成2年2月) (社)日本道路協会
- 2) 「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様」の準用に関する参考資料(案)(平成7年6月) (社)日本道路協会
- 3) 道路橋示方書・同解説(平成8年12月) (社)日本道路協会