

軸力変動を考慮したラーメン系柱部の簡易照査 （概略的な検討段階における照査）に関する検討

熊木 幸¹・矢部 正明²

¹正会員 修(工) 株式会社長大 構造防災室（〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730）

²正会員 博(工) 株式会社長大 構造防災室（〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730）

1. はじめに

有限要素法と従来の構造物や部材の復元力モデルの中間に位置するファイバーモデルは、実務設計においてもその使用頻度は急激に増加しつつある。材料非線形という観点からは、材料の非線形性を断面の各位置に生じるひずみや応力に基づいて制御するというファイバーモデルは理にかなったものといえる。しかし、動的解析に関しては、ファイバーモデルに用いられる応力-ひずみ関係は、鉄筋コンクリート部材や鋼部材の復元力モデルである Takeda モデルやバイリニアモデルおよびトリリニアモデルのように、十分に普及したものがない。このため、道路橋の分野では、軸力変動の影響が耐震設計上無視できない橋梁に対しても、次のような簡易的な照査法を採用している例が多い¹⁾。

Step1：死荷重時の軸力 N_0 に基づいて求めた曲げモーメント-曲率関係による非線形動的解析を実施し、許容値以内に収まっているかを照査。

Step2：Step1 で得られた応答軸力の最大値 $[N(t)]_{\max}$ に基づいて求めた曲げモーメント-曲率関係による非線形動的解析を実施し、許容値以内に収まっているかを照査。

Step3：Step1 で得られた応答軸力の最小値 $[N(t)]_{\min}$ に基づいて求めた曲げモーメント-曲率関係による非線形動的解析を実施し、許容値以内に収まっているかを照査。

このような簡易的な照査法は、ファイバーモデルのような詳細な（軸力変動を無理なく考慮するという点では）解析より得られた応答値を用いた照査よりも安全側の照査結果を与えてくれると考えられる。例えば、鉄筋コンクリート部材の場合、応答軸力の

最小値 $[N(t)]_{\min}$ に関する曲げモーメント-曲率関係は、その降伏曲げモーメントが死荷重時の軸力 N_0 や応答軸力の最大値 $[N(t)]_{\max}$ に関して求めたものよりも小さくなるため、そのような骨格曲線を用いた非線形動的解析では、部材に生じる塑性変形量は大きくなると予想されるからである。

本報告は、実務設計の場で実施されている上述のような簡易照査法がファイバーモデルによって得られる応答値とどのような関係にあるかを試算によって確認したものである。対象としたのは、鋼部材によって構成されるラーメン橋脚である。

2. 対象とするラーメン橋脚と解析モデル

検討の対象とするラーメン橋脚は、道路橋を対象として設計されたものであり、図-1に示すような矩形断面を有する高さ10m、横梁の長さ10mの鋼製門型ラーメン橋脚である。このラーメン橋脚の固有周期は0.5秒で、橋脚柱部の死荷重による初期軸力 N_0 の降伏軸力 $N_y = \sigma_y \cdot A$ に対する比 N_0/N_y は16%である。

ここでの目的が橋脚柱部に生じる軸力変動が非線形応答に与える影響であることから、解析モデルは、全ての質量を横梁の中央に与えた1質点系モデルとした。橋脚柱部の非線形性は、前述した簡易照査で用いられている3種類の曲げモーメント-曲率関係を有する非線形梁要素モデル（以下 $M-\phi$ モデルとする）とした場合とファイバーモデルとした場合について検討する。ファイバーモデルを用いた解析では、フランジを板厚方向に2分割、ウェブを100分割、フランジを補剛するリブを10分割し、それぞれのファイバー要素に、図-2に示す骨格曲線を有するバイ

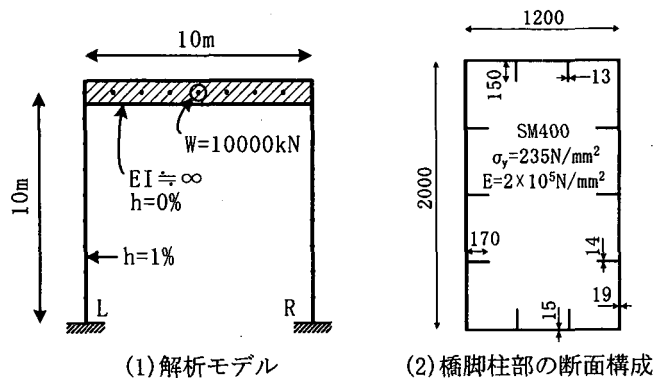


図-1 対象とする鋼製門型ラーメン橋脚

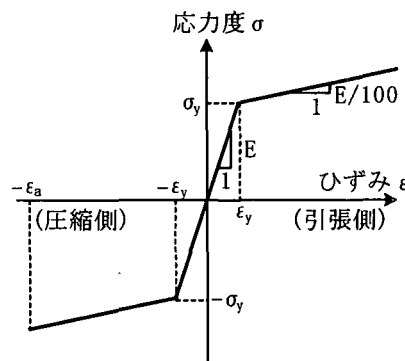


図-2 鋼材の応力-ひずみ関係

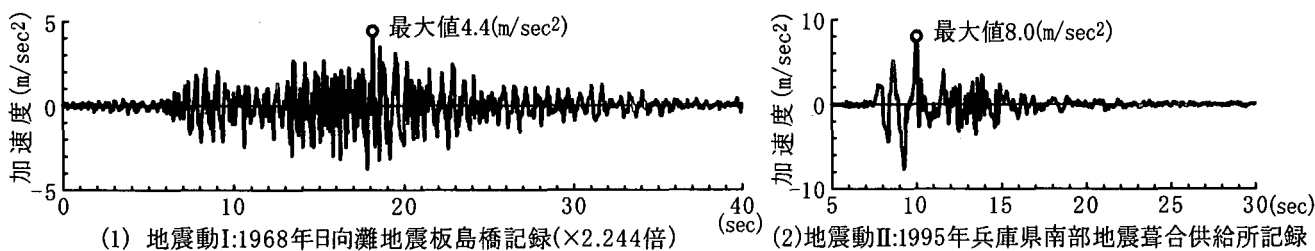


図-3 検討に用いる入力地震動

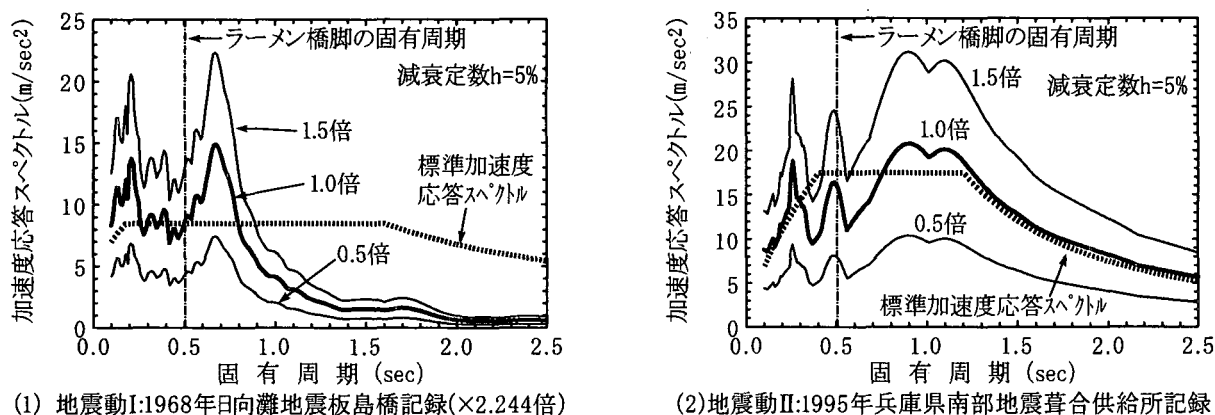


図-4 検討に用いる入力地震動の加速度応答スペクトル

リニア型の応力-ひずみ関係を与えた。減衰力は、橋脚柱部の構造減衰定数を1%とし、初期剛性比例型粘性減衰マトリックスによってモデル化した。

3. 入力地震動

検討に用いる入力地震動は、プレート境界に生じる海洋性地震によって観測された1968年日向灘地震の板島橋記録と、内陸直下型地震によって観測された1995年兵庫県南部地震の葦合記録である。図-3,4は、検討に用いる入力地震動とその加速度応答スペクトルを示したものである。板島記録の加速度振幅は、レベル2地震動としては小さいので、対象とするラーメン橋脚の固有周期において道路橋示方書に

規定される標準加速度応答スペクトルと一致するようにその加速度振幅を拡大した。これを地震動Ⅰとし、葦合記録を地震動Ⅱとする。さらに橋脚柱部に生じる軸力の変動量を変化させるために、地震動Ⅰ、Ⅱともに、加速度振幅を0.5倍、1.5倍と変化した場合についても検討する。

4. 橋脚柱部に生じる軸力変動と曲げモーメント-曲率関係の変化

(1) 橋脚柱部に生じる軸力変動

図-5は、ラーメン橋脚に地震動が作用した場合に、橋脚柱部に軸力変動が生じる様子を模式的に表したものである。死荷重により圧縮力が作用していた橋

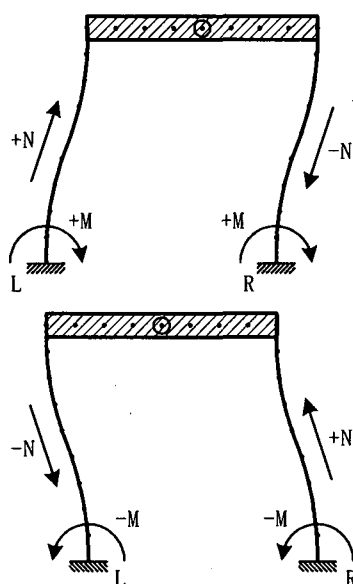
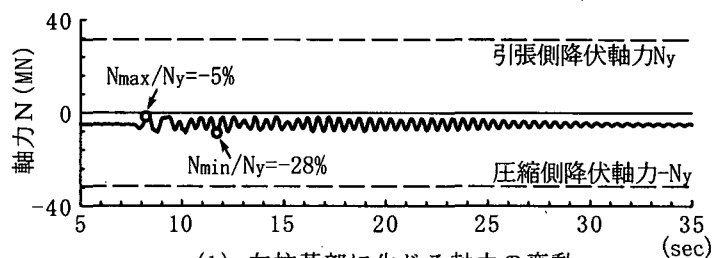


図-5 ラーメン橋脚に生じる軸力変動

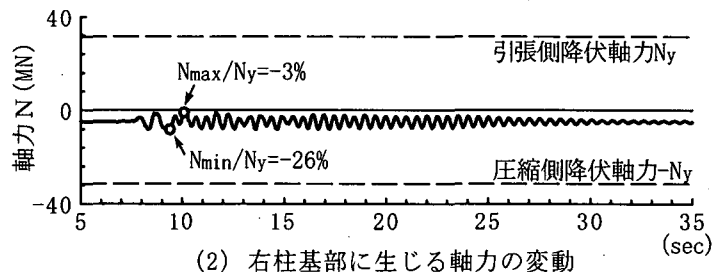
脚柱部は、地震動が作用することで、上部構造の重量を支持する横梁が右柱の方に移動すると、右柱の圧縮力が増加し、左柱の圧縮力は減少する。横梁が左柱の方に移動すると逆の現象が生じる。図-6は、地震動Ⅱが作用したときに、橋脚柱部に生じる軸力変動の様子をファイバーモデルを用いて求めたものである。軸力の変動量は、降伏軸力比 N/N_y で 23% にも達することがわかる。この他、0.5, 1.0, 1.5倍の地震動Ⅰが作用した場合の軸力変動量は、降伏軸力比 N/N_y で 17%, 22%, 23%, 0.5, 1.5倍の地震動Ⅱが作用した場合の軸力変動量は、降伏軸力比 N/N_y で 21%, 24%となっている。

(2) 軸力変動にともなう橋脚柱部の曲げモーメント－曲率関係の変化

橋脚柱部の曲げモーメント－曲率関係は、軸力の変動にともなって変化する。図-7は、対象とするラーメン橋脚の曲げモーメント－曲率関係を示したものである。図中、最大曲げモーメントと最大曲率は、フランジに生じるひずみが、道路橋示方書Ⅴ耐震設計編に準じて断面の幅厚比パラメータを基に算出した許容ひずみ $\epsilon_a (=9.7\epsilon_y)$ に達するときの曲げモーメント M_a や曲率 ϕ_a である。図には、地震動が作用した場合に軸力が変動する範囲である降伏軸力比 $N/N_y = 0\%, 15\%, 30\%$ の場合の曲げモーメント－曲率関係を示している。軸力が作用しない $N/N_y = 0\%$ の状態では、圧縮側と引張側の降伏が同時に生じるため曲げモーメント－曲率関係はバイリニア型となる。一方、軸力が増加すると圧縮側と引張側で別々



(1) 左柱基部に生じる軸力の変動



(2) 右柱基部に生じる軸力の変動

図-6 地震動Ⅱが作用したときにラーメン橋脚基部に生じる軸力変動 (ファイバーモデル)

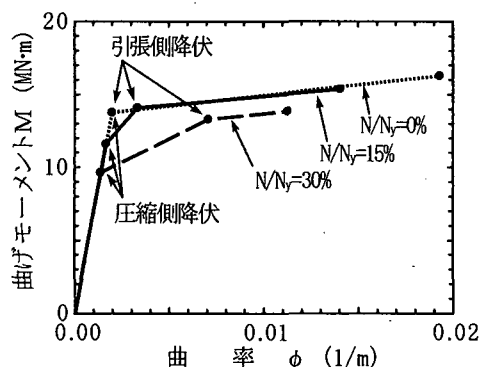


図-7 軸力変動の影響による曲げモーメントと曲率の関係の変化

に降伏が生じ、曲げモーメント－曲率関係はトリリニア型となる。注目すべきは、圧縮軸力が大きくなると圧縮側の降伏曲げモーメントが小さくなるとともに、圧縮側の降伏から引張側の降伏に到るまでの剛性（2次剛性）が大きくなっている点である。圧縮側の降伏曲げモーメントの低下は、脚柱部の非線形化を早めるが、2次剛性の増加は塑性変形を抑制するという効果を有している。

5. ファイバーモデルと死荷重時の軸力に基づくM－φモデルを用いた場合のラーメン橋脚に生じる地震応答の比較

(1) 横梁に生じる地震応答

図-8は、地震動Ⅰと地震動Ⅱが作用したときの横梁中央における応答変位波形を示したものである。地震動Ⅰが作用した場合には、ファイバーモデルと

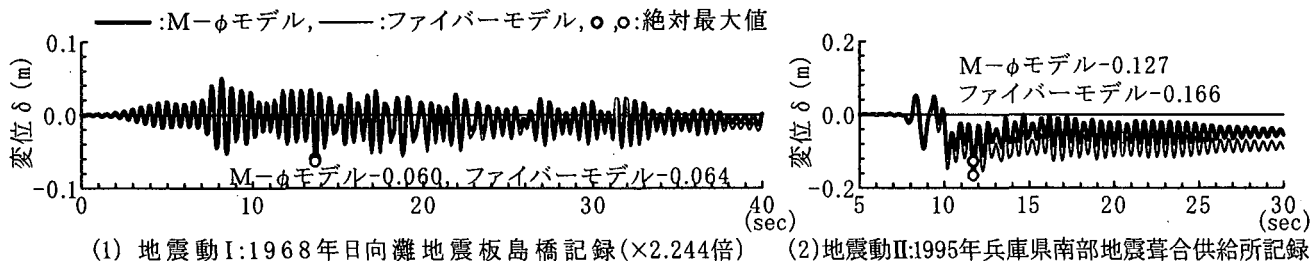


図-8 横梁位置に生じる応答変位波形

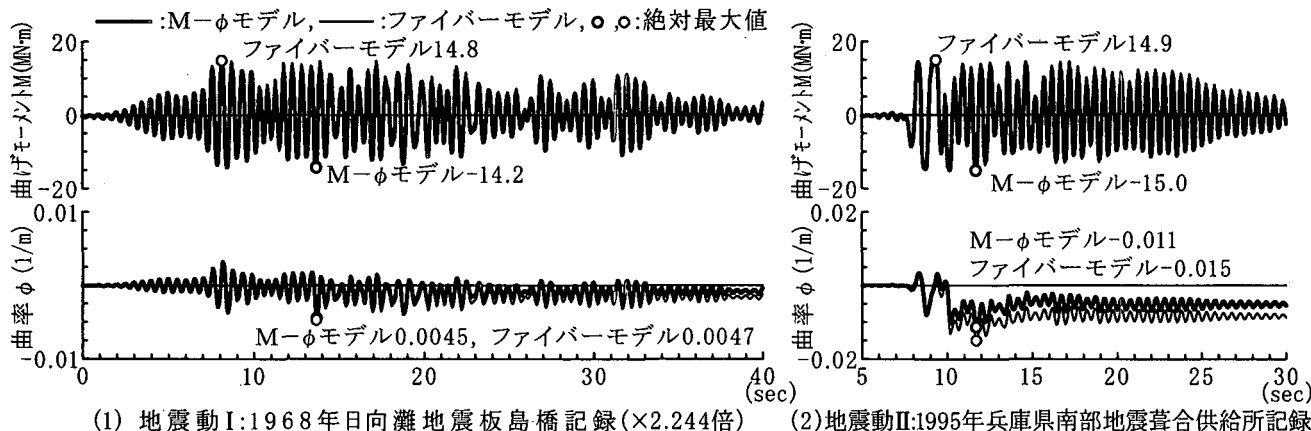


図-9 左柱基部に生じる曲げモーメントと曲率の時刻歴応答波形

$M-\phi$ モデル(死荷重時軸力)の応答変位はほぼ等しいことがわかる。しかし、地震動Ⅱが作用した場合には、明らかにファイバーモデルの方が大きな応答が生じており、死荷重時の軸力による $M-\phi$ モデルの解析結果は設計という観点からは危険側の評価となっている。

(2) 橋脚柱部に生じる地震応答

図-9は、地震動Ⅰと地震動Ⅱが作用したときの左柱基部に生じる曲げモーメントと曲率の応答波形を示したものである。図-8と同様に、 $M-\phi$ モデルは死荷重時の軸力に基づくものである。曲げモーメントの時刻歴応答波形は、地震動Ⅰ・Ⅱとも良く一致しているが、最大応答値の発生時刻は異なっている。曲率の時刻歴応答波形は、地震動Ⅰでは良く一致しているが、地震動Ⅱではファイバーモデル、 $M-\phi$ モデルとも同時刻に最大応答値が生じているものの、最大応答値が発生する2秒ほど前から両解析モデルによる差が大きくなっており、ファイバーモデルの方が大きな曲率を生じていることがわかる。

図-10は、地震動Ⅰ、1.5倍の地震動Ⅰ、地震動Ⅱが作用したときの、曲げモーメントー曲率関係を示したものである。図には、死荷重時の軸力に基づく $M-\phi$ モデルの骨格曲線を一緒に示している。当然、

死荷重時の軸力に基づく $M-\phi$ モデルの地震応答は、骨格曲線に沿ってトリリニアの履歴を描いている。一方、ファイバーモデルの地震応答は、曲げモーメントの正の方向では図示した骨格曲線よりも大きな履歴を描き、曲げモーメントの負の方向では図示した骨格曲線よりも小さな履歴を描いている。これは、ファイバーモデルでは軸力変動の影響が考慮されているからである。左柱基部では正の曲げモーメントが生じるときに圧縮力が減少して圧縮側の降伏曲げモーメントが増加し、負の曲げモーメントが生じるときに圧縮力が増加して圧縮側の降伏曲げモーメントが減少していることがわかる。また、解析モデルの差は、曲げモーメントよりも曲率に大きな影響を与え、地震動Ⅱが作用した場合には曲率の絶対最大値が25%も異なる結果となっている。

6. 異なる軸力に基づく $M-\phi$ モデルを用いた場合のラーメン橋脚に生じる地震応答の比較

(1) 橋脚柱部に生じる曲率の比較

解析モデルによって大きく地震応答が変化する曲率に着目して、死荷重時の軸力に基づく $M-\phi$ モデル、最小圧縮力に基づく $M-\phi$ モデル、最大圧縮力

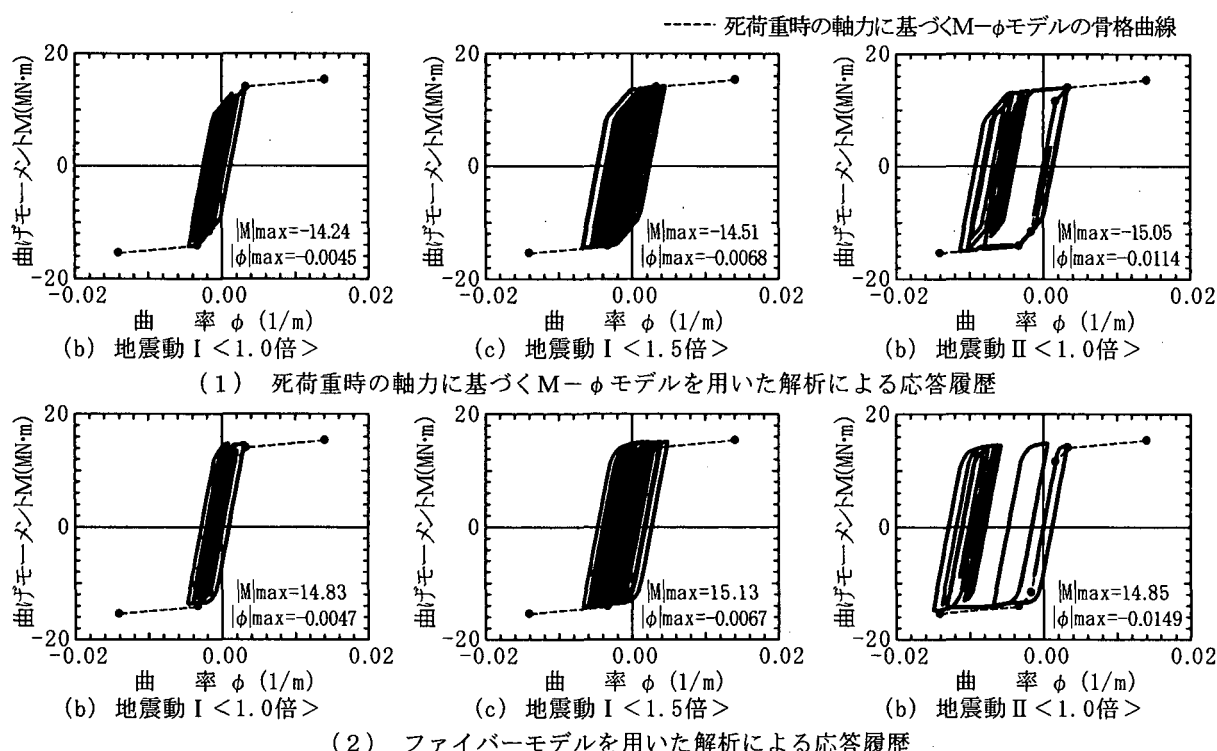


図-10 左柱基部における曲げモーメントと曲率の関係

に基づくM-φモデルの地震応答を比較する。図-11は、1.5倍の地震動Ⅰ、1.0倍と1.5倍の地震動Ⅱが作用した場合について、3種類のM-φモデルを用いた曲率の時刻歴応答波形を示したものであり、それぞれ細線でファイバーモデルを用いた解析の時刻歴応答波形を示している。

図-11(1)、(3)の1.5倍の地震動Ⅰや1.5倍の地震動Ⅱが作用した場合は、圧縮側の降伏曲げモーメントが最も大きいことから生じる塑性変形が小さいと予想された最小圧縮力に基づくM-φモデルの応答曲率が最も小さく、圧縮側の降伏曲げモーメントが最も小さいことから生じる塑性変形が大きいと予想された最大圧縮力に基づくM-φモデルの応答曲率が最も大きくなっている。

図-11(2)の地震動Ⅱが作用した場合は、圧縮側の降伏曲げモーメントが最も大きい最小圧縮力に基づくM-φモデルで最も大きな応答曲率が生じ、圧縮側の降伏曲げモーメントが最も小さい最大圧縮力に基づくM-φモデルで最も小さな応答曲率が生じている。これは、最小圧縮力や死荷重時軸力に基づくM-φモデルに比較して、最大圧縮力に基づいたM-φモデルの降伏曲げモーメントが小さいために、早めに最大応答曲率が生じているからである。例えば、8秒～9秒間に見られる応答曲率は明らかに最大圧縮力に基づいたM-φモデルのものが最も大きい。同

様に、9秒～10秒間に見られる応答曲率も最大圧縮力に基づいたM-φモデルのものが最も大きい。最大圧縮力に基づいたM-φモデルは、この時点で最大応答曲率が生じてしまいその後残留変形が生じている。そして、10秒を過ぎたところで残留変形が生じている方向とは逆方向に入力地震動の最大振幅が作用し、残留変形は基線方向に戻されているため、残留変形小さくなっている。これに対して、最小圧縮力や死荷重時軸力に基づくM-φモデルは、9秒～10秒間に作用した地震動振幅では大きな応答曲率を生じることはなく、10秒を過ぎたところで作用した入力地震動の最大振幅によって大きな応答曲率が生じ残留変形が生じている。その後、残留変形を基線方向に戻すほどのパワーを有する入力地震動が作用していないために、12秒付近で作用した入力地震動（入力地震動の最大振幅と同方向）によって最大応答曲率に達している。このような非線形応答の違いによって、最大圧縮力に基づいたM-φモデルよりも、最小圧縮力に基づいたM-φモデルの方が大きな応答曲率を生じることになったことがわかる。このことは、地震動Ⅱの振幅を1.5倍にした図-11(3)の応答曲率全てが、図-11(2)の最大圧縮力に基づいたM-φモデルと同様な応答波形を示していることからわかる。

図-11(2)の最大圧縮力に基づいたM-φモデルに

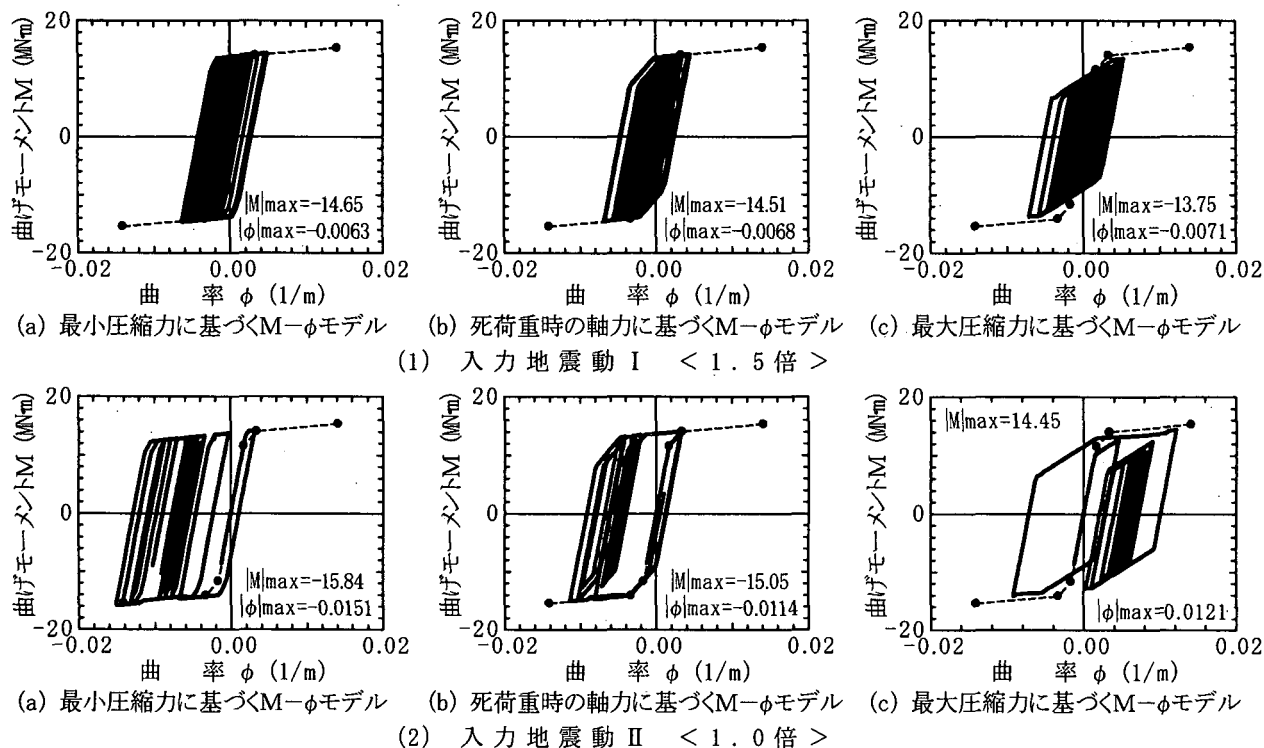


図-12 M- ϕ モデルごとに異なる左柱基部の曲げモーメントと曲率の関係

イバーモデルと最大圧縮力に基づいたM- ϕ モデルの応答曲率波形が大きくかけ離れた結果となっていることからわかる。

(2) 橋脚柱部における応答履歴の比較

図-12は、左柱基部に生じる応答履歴を描いたものであり、死荷重時の軸力に基づくM- ϕ モデルの骨格曲線を点線で示している。図-12(1)は、1.5倍の地震動 I が作用したときの応答履歴であり、どのM- ϕ モデルを用いた解析においても曲率の残留変形は小さく、最小圧縮力に基づいたM- ϕ モデルを用いた解析の応答曲率が最も小さく、最大圧縮力に基づいたM- ϕ モデルを用いた解析の応答曲率が最も大きくなっている。

図-12(2)に示す地震動 II が作用した場合の応答履歴は、M- ϕ モデルによって大きく異なる履歴を描いており、それぞれ異なる残留変形が生じている。特に、最大圧縮力に基づいたM- ϕ モデルによる応答履歴は、他のM- ϕ モデルに比較して早くから最大応答曲率と残留変形が生じていることがわかる。

7. まとめ

軸力変動の影響が耐震設計上無視できないラーメン橋脚を対象に、ファイバーモデルとある軸力に対して求めたM- ϕ モデルによる非線形応答がどのような関係にあるかを試算によって検討した。

- ファイバーモデル
- 死荷重時の軸力が作用したときのM- ϕ モデル
- △ 最小圧縮力が作用したときのM- ϕ モデル
- × 最大圧縮力が作用したときのM- ϕ モデル

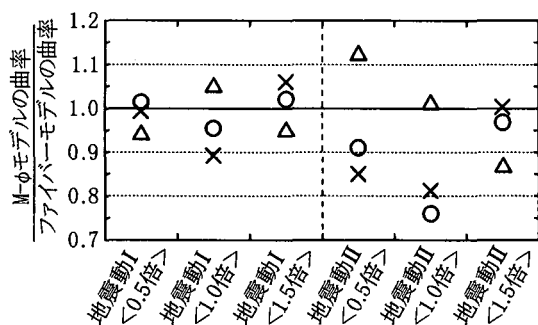


図-13 M- ϕ モデルとファイバーモデルの最大応答曲率の比較

図-11と図-12に見られたように、ある軸力に対して求めたM- ϕ モデルは、その骨格曲線と入力地震動の条件によっては、ファイバーモデルとは全く異なる応答を示す場合があることが確認された。

図-13は、軸力を最小圧縮軸力、死荷重時圧縮軸力、最大圧縮軸力として求めたM- ϕ モデルによる最大応答曲率とファイバーモデルによる最大応答曲率を比較したものである。図より軸力の変動量が小さいからと言って、M- ϕ モデルとファイバーモデルによる差が小さくなるわけではないことがわかる。特に、M- ϕ モデルによる非線形応答は、その骨格

曲線と入力地震動の関係によって大きく変化することがわかる。

実務設計で良く行われている、最小圧縮軸力、死荷重時圧縮軸力、最大圧縮軸力に対して求めた $M-\phi$ モデルを用いて軸力変動の影響を簡易的に考慮するという方法によって得られる応答曲率は大きく変動しているが、ここで検討したケースでは、その上下限値の範囲以内にファイバーモデルによる最大応答値が入っていることが確認できる。しかし、必ず、最小軸力、死荷重時軸力、最大軸力によって得られる非線形応答の範囲に、ファイバーモデルによる非線形応答値が入るという保証はない。

理論的には、軸力変動によって部材の曲げモーメ

ントー曲率関係が変化する問題に関しては、ファイバーモデルの方が、複数の軸力を想定した $M-\phi$ モデルよりも適切な応答値を得ることができる。しかし、ファイバーモデルを実務設計の中に根付かせるためには、動的解析に用いる応力-ひずみ関係のモデル化や応答の評価方法および許容値に関するさらなる研究が必要となる。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料ーPCラーメン橋・RCアーチ橋・PC斜張橋・地中連続壁基礎・深礎基礎等の耐震設計計算例ー，pp. 3-72～3-73，平成10年1月