

## モデル化の違いに着目した単柱鋼製橋脚の 地震応答解析の比較検証

藤田 雅義<sup>1</sup>・富 健一<sup>2</sup>・梅林 福太郎<sup>3</sup>・横田 貴大<sup>4</sup>  
田嶋 仁志<sup>5</sup>・庄司 学<sup>6</sup>・松原 拓朗<sup>7</sup>

- <sup>1</sup>JIPテクノサイエンス株式会社 建設ソリューション事業部（〒102-0074 東京都千代田区九段南1-3-1）  
<sup>2</sup>正会員 工博 パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通基盤事業部（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22）  
<sup>3</sup>正会員 工修 株式会社オリエンタルコンサルタンツ 関東支社 特殊構造部（〒151-0071 東京都渋谷区本町3-12-1）  
<sup>4</sup>パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪本社 交通基盤事業部（〒530-0004 大阪府大阪市北区堂島浜1-2-1）  
<sup>5</sup>正会員 工博 株式会社IHIインフラシステム（〒108-0023 東京都港区芝浦3-17-12）  
<sup>6</sup>正会員 工博 筑波大学 システム情報系（〒305-8573 つくば市天王台1-1-1）  
<sup>7</sup>正会員 工博 首都高速道路株式会社 東京東局（〒103-0015 東京都中央区日本橋箱崎町43 - 5）

### 1. はじめに

鋼製橋脚における耐震性能照査を実施する際の解析モデルは、道路橋示方書<sup>1)</sup>で提示されている梁モデル（M-φモデル）が基本となっているが、日本鋼構造協会<sup>2)</sup>、土木学会<sup>3)</sup>からはファイバーモデルによる照査方法も提案されている。ファイバーモデルとは、部材断面を微小要素に分割し、その垂直応力と垂直ひずみの関係を基に計算することを基本とし、軸力変動や2軸曲げの影響が考慮できるモデルである。梁モデルとファイバーモデルは、平面保持の仮定と断面不変の仮定が前提となっているため、非常に大きな地震動が発生した際に鋼製橋脚に発生する局部座屈のような幾何学的非線形の影響は考慮できない。より正確な局部座屈の影響を精度良く解析するためには、シェル要素を用いた有限要素法（FEM）による解析が必要となるが、解析コードSeanFEM<sup>4)</sup>を用いた場合においては幾何学的非線形を考慮した有限変位解析を行うことが可能となる。

本検証解析では、都市高速道路で標準的に用いられている単柱鋼製橋脚に対して、M-φモデル（部材非線形）、ファイバーモデル1（材料非線形）、ファイバーモデル2（材料非線形＋幾何学的非線形）の3モデルで解析を実施し、解析モデルによる地震応答の検証を実施した。解析コードは、M-φモデルとFiber1はTDAPIII、Fiber2ではSeanFEMを用いた。

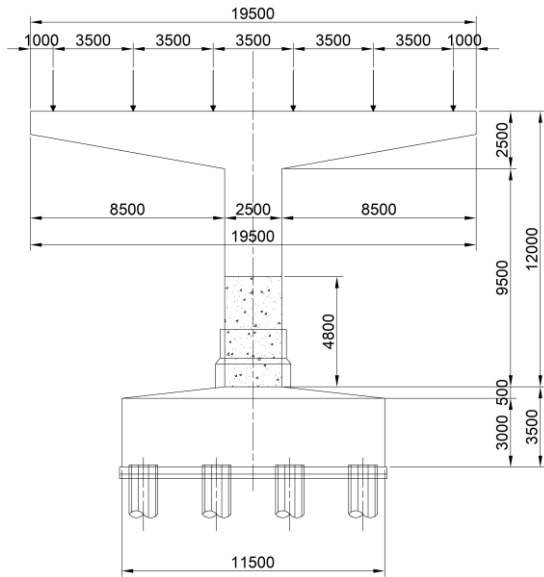
### 2. 対象構造物

対象となる鋼製橋脚は、昭和54年に竣工された首都高速道路の既設鋼製橋脚とした（図-1）。既設橋脚は柱基部にコンクリートが充填されているが、本解析では充填コンクリート有無の2ケースを検証した。

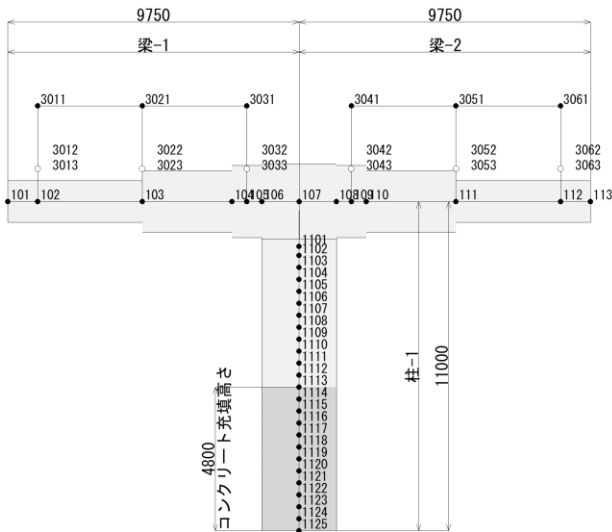
竣工された橋脚は柱の補剛板厚や材質が断面ごとに変化している。断面諸元を変更せずに解析すると、充填コンクリート直上と柱基部の両方の位置で塑性化する結果となった。複数の位置で塑性化する場合は、プッシュオーバー解析による橋脚天端のP-δ曲線図の比較検証が難しくなるため、本検証解析では表-1に示すように補剛板厚を変更すると共に、材質をSM490材で統一し、柱基部で塑性化するように調整した。なお、表-1に座屈パラメータも示すが、既設橋脚ということもあり、現行の道路橋示方書<sup>1)</sup>の規定は満足していない。

表-1 橋脚断面諸元と座屈パラメータ

|       | 充填CON無   |          | 充填CON有   |          |
|-------|----------|----------|----------|----------|
|       | Flg      | Web      | Flg      | Web      |
| 補剛板   | 2000×28  | 2500×28  | 2000×28  | 2500×28  |
| Rib   | 3-180×16 | 4-180×16 | 3-150×14 | 4-150×14 |
| Rf    | 0.502    | 0.509    | 0.659    | 0.677    |
| Rr    | 0.373    | 0.373    | 0.373    | 0.373    |
| 補剛材剛比 | 0.526    | 0.518    | 0.531    | 0.514    |



(1) 橋脚正面図



(2) 解析モデル図

図-1 解析対象橋脚

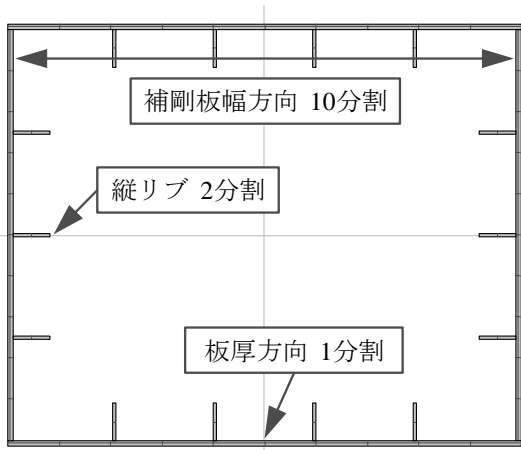


図-2 ファイバーモデルの断面分割

### 3. 解析条件

対象橋脚の橋軸方向の支承条件は固定支承となっている。橋脚下端の拘束条件は主な検証項目を柱応答値の比較としたため、基礎ばねを用いずに固定とした。検証波形は道路橋示方書<sup>1)</sup>で定義されたレベル2地震動の標準波形とし、Ⅲ種地盤-タイプⅡ-第1波を用いた。

橋脚の要素分割は各モデルで統一し、柱の要素長は400mm(断面幅の1/5)とした。ファイバーモデルにおける断面の分割方法は、板厚方向は1分割、補剛板幅方向は10分割、縦リブは2分割とした(図-2)。鋼材の応力-ひずみ関係は、2次勾配を初期勾配の1/100としたバイリニア型の骨格曲線で評価し、材料構成則は移動硬化則を用いた(図-3)。充填コンクリートの応力-ひずみ関係は道路橋示方書<sup>1)</sup>に基づき、圧縮力のみ抵抗し、引張力には抵抗しないモデルとした(図-4)。

検証項目は、固有値解析結果の比較、プッシュオーバー解析による橋脚天端のP-δ曲線図の比較、代表波における動的解析の時刻歴応答図と履歴図、最大最小応答値とし、各モデルを比較した。

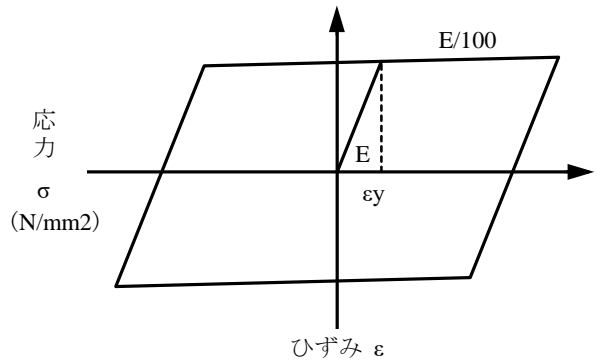


図-3 鋼材の応力-ひずみ関係

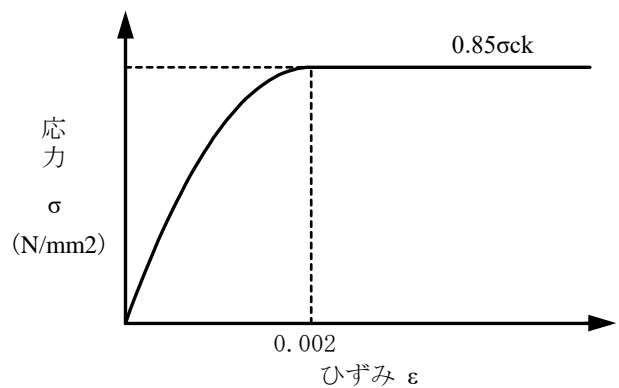


図-4 充填コンクリートの応力-ひずみ関係

#### 4. 固有値解析の比較

各解析モデルにおける橋軸方向1次モードの固有値解析結果を表-2に示す。なお、橋軸方向1次モードの形状は各解析モデルで大きく変わらないため、本稿では代表として充填コンクリート無のM-φモデルのモード図を示した(図-5)。

充填コンクリート無の場合は、M-φモデルとFiber1,2で固有周期に大きな差異はなかったが、充填コンクリート有の場合は、M-φモデルに比べてFiber1,2の方が固有周期が短くなった。これは充填コンクリートのモデル化の違いによって生じていると考えられる。具体的には、M-φモデルは充填コンクリートの圧縮応力のみを分担し、引張応力を無視してM-φ骨格曲線を設定しているのに対し、Fiber1,2は充填コンクリートの圧縮応力と引張応力が共に評価される違いがある。

#### 5. プッシュオーバー解析結果の比較

##### (1) 充填コンクリート無の場合

充填コンクリート無の条件で、橋軸方向にプッシュオーバー解析をした場合の水平荷重と水平変位の関係を図-6に示す。初期勾配はほぼ一致しているも

表-2 橋軸方向 固有値解析結果

| 充填 CON | モデル化方法 | 振動数 (Hz) | 固有周期 (sec) |
|--------|--------|----------|------------|
| 無      | M-φ    | 1.126    | 0.888      |
|        | Fiber1 | 1.126    | 0.888      |
|        | Fiber2 | 1.113    | 0.899      |
| 有      | M-φ    | 1.187    | 0.843      |
|        | Fiber1 | 1.400    | 0.715      |
|        | Fiber2 | 1.316    | 0.760      |

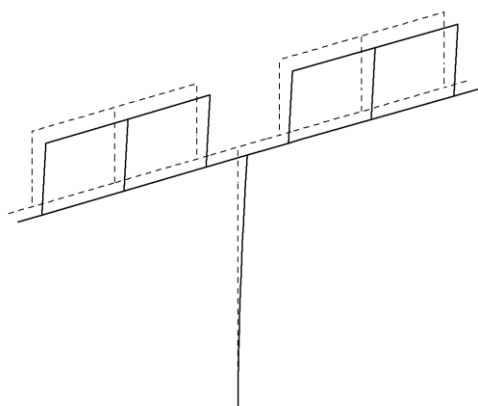


図-5 橋軸方向1次モード (充填CON無のM-φモデル)

の、2次勾配はFiber1,2と比べてM-φモデルの方が大きくなっている。この現象は非線形パラメータの違いによって生じていると考えられる。つまり、Fiber1,2における鋼材の2次勾配は初期勾配の1/100としているのに対し、M-φモデルでは死荷重状態のM-φ関係を骨格曲線として定義(具体的には2次勾配を5/100と設定)している。この非線形パラメータの違いによって、P-δ曲線の2次勾配に差が生じることが分かった。また、降伏荷重は解析モデルによらずほぼ等しくなるはずであるが、Fiber1のみ他と比べて大きくなっていることが確認できた。

次に、充填コンクリート無の条件で、橋軸方向にプッシュオーバー解析をした場合の水平荷重と鉛直変位の関係を図-7に示す。M-φモデルは鉛直方向に変位しなかったが、Fiber1,2は降伏荷重を超えた後に下向きの鉛直変位が微増している。特に断面力が不連続となっている訳でもなく、水平荷重によって降伏した要素のみが鉛直方向に変位しているため、筆者らはファイバー要素自体が縮みながら、平面保持の仮定を成立させるように中立軸を算定していると考えている。ただし、全要素の中立軸とひずみの関係を正確に把握できていないため、引き続き検証していく予定である。

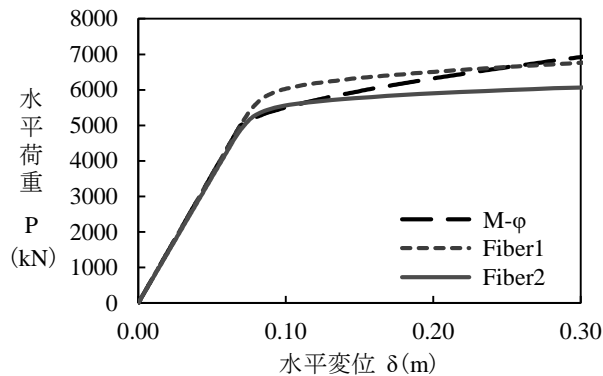


図-6 水平荷重と水平変位の関係 (充填CON無)

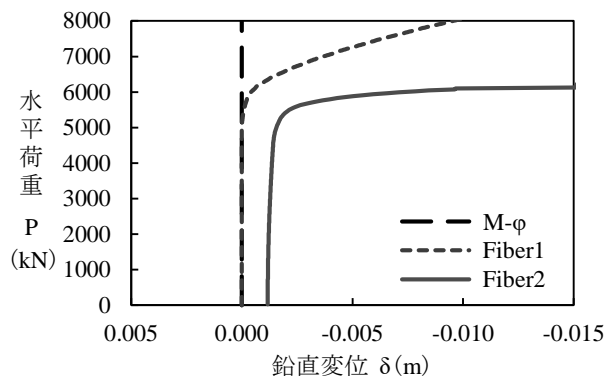


図-7 水平荷重と鉛直変位の関係 (充填CON無)

(2) 充填コンクリート有の場合

充填コンクリート有の条件で、橋軸方向にプッシュオーバー解析をした場合の水平荷重と水平変位の関係を図-8に示す。充填コンクリート無の条件とは異なり、2次勾配はほぼ一致している。これも非線形パラメータの関係から説明すると、M-φモデルの2次勾配が充填コンクリート無の条件と比べて緩い（具体的には3/100）ため、結果的にP-δ曲線の2次勾配がほぼ一致したと考えている。なお、初期勾配と降伏荷重は各モデルで一致しないことが確認できた。

次に、充填コンクリート有の条件で、橋軸方向にプッシュオーバー解析をした場合の水平荷重と鉛直変位の関係を図-9に示す。M-φモデルは鉛直方向に変位しなかったが、Fiber1では降伏荷重を超えた後に上向きの鉛直変位が微増している。一方で、Fiber2では降伏荷重を超えた後に上向きの鉛直変位が微増した後に変曲点があり、下向きの変位に至っている。この現象は、幾何学的非線形の影響によって生じたものと推測しているが、未解明な事項も多く、引き続き検証していく予定である。

6. 動的解析結果の比較

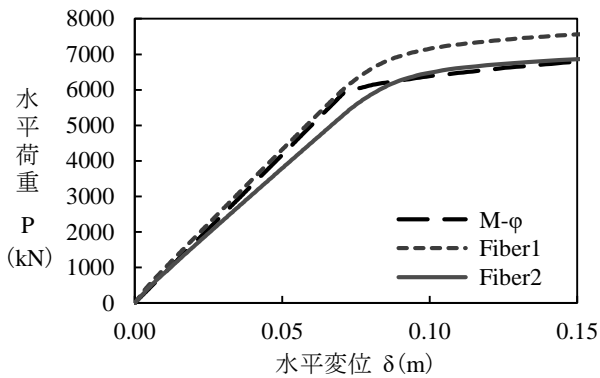


図-8 水平荷重と水平変位の関係（充填CON有）

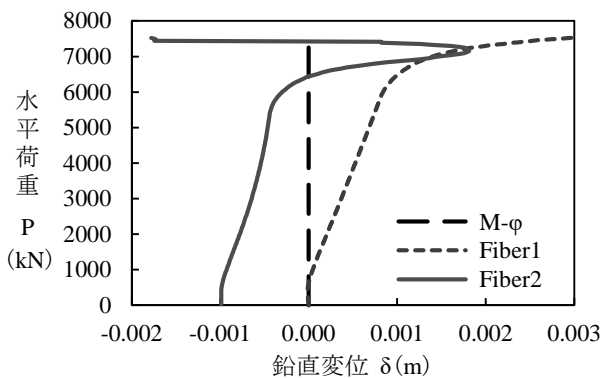
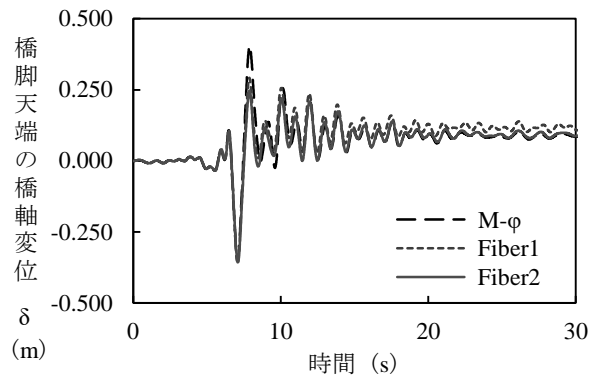


図-9 水平荷重と鉛直変位の関係（充填CON有）

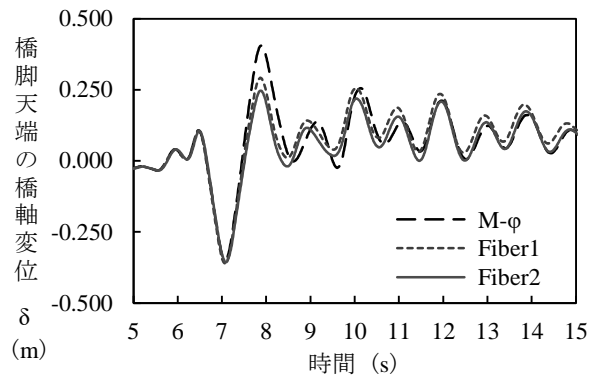
(1) 充填コンクリート無の場合

充填コンクリート無の条件で、橋軸方向に対して動的解析を行った。図-10に橋脚天端の橋軸変位、図-11に橋脚天端の鉛直変位、図-12に橋脚下端の軸力、図-13に橋脚下端の曲げモーメントと曲率、図-14に橋脚下端のせん断力と橋脚天端の水平変位、表-3に橋脚天端の最大最小変位、表-4に橋脚下端の最大最小断面力をそれぞれ示す。なお、図-10～図-12に関してはモデル化方法ごとの応答値の違いが分かるように、0～30秒区間の全体図と5～15秒区間の拡大図を示すこととした。また、図-13のみM-φモデルとFiber1の応答値を示す。

橋脚天端の橋軸変位（図-10）に関しては、1回目のピーク（7.1秒）まではほぼ一致するものの（表-3のmin値）、2回目のピーク（7.9秒）で大きく差が出ており（表-3のmax値）、それ以後の残留変位にも差が発生している。この現象はプッシュオーバー解析結果の比較で示したように、2次勾配の違いに起因すると考えられる。特に、図-13においてはM-φモデルとFiber1の2次勾配に顕著な差があることが分かる。今後は2次勾配の値をパラメータとした解析や幾何学的非線形の有無が結果に与える影響について検証していく予定である。



(1) 全体図（0～30秒）

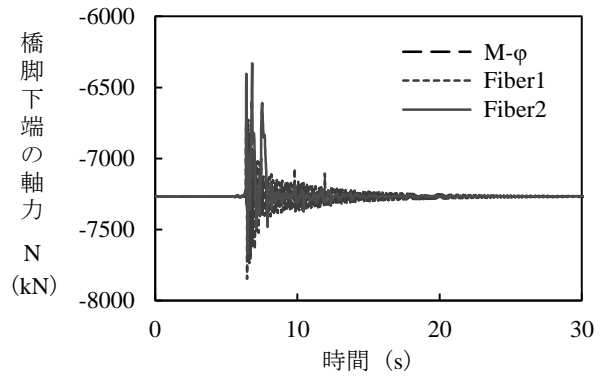


(2) 拡大図（5～15秒）

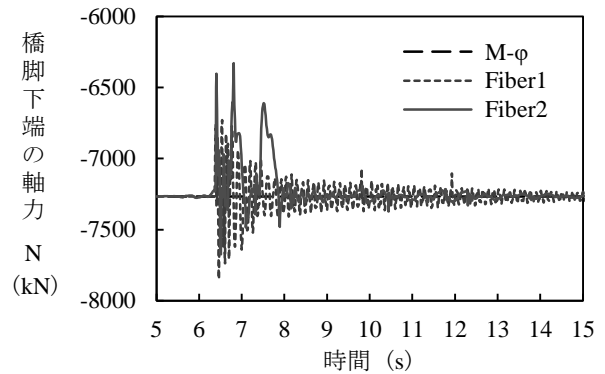
図-10 橋脚天端の橋軸変位（充填CON無）

橋脚天端の鉛直変位 (図-11) に関しては、M-φモデルで鉛直変位が発生しておらず、Fiber1では6.5～8.0秒の区間で下向きの鉛直変位 (-0.005m) が発生し、それ以降に大きな変動はない。Fiber2では下向きの鉛直変位 (最大で-0.011m) が発生し、6.5～30.0秒の区間で微振幅する結果となった。プッシュオーバー解析結果の比較で示したように、この現象も平面保持の仮定に基づいて、ファイバー要素自体が圧縮側に変形しながら中立軸を算定していることが原因と考えている。

橋脚下端の軸力 (図-12) に関しては、M-φモデルで軸力が一定値を示しているのに対して、Fiber1では6.5～20.0秒の区間で死荷重時軸力 (-7267kN) から最大で550kNほどの増減が確認できた。Fiber2では6.5～7.5秒の区間で軸力が大きく変動している。構造形式が単柱橋脚であるため、本来であれば鉛直変位と軸力に相関関係が見られるはずだが、図-11と図-12からは関係性が認められない。この現象は不つり合い力が関与していると考えられる。ファイバー要素が圧縮側に変形することにより軸力が発生するものの、その軸力が次のステップへ正しく引き継いでいない可能性がある。今後は不つり合い力パラメータについても検証する予定である。

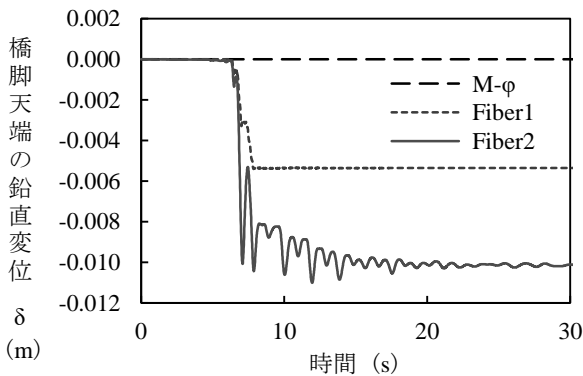


(1) 全体図 (0～30秒)

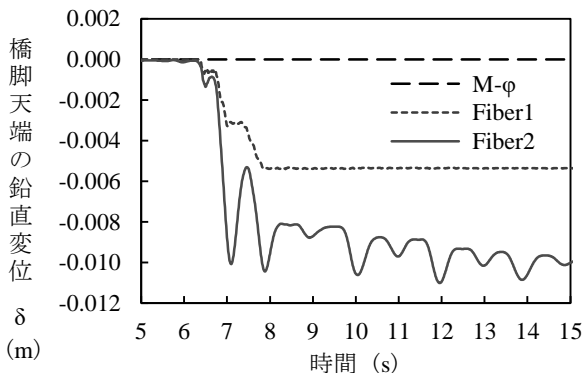


(2) 拡大図 (5～15秒)

図-12 橋脚下端の軸力 (充填CON無)



(1) 全体図 (0～30秒)



(2) 拡大図 (5～15秒)

図-11 橋脚天端の鉛直変位 (充填CON無)

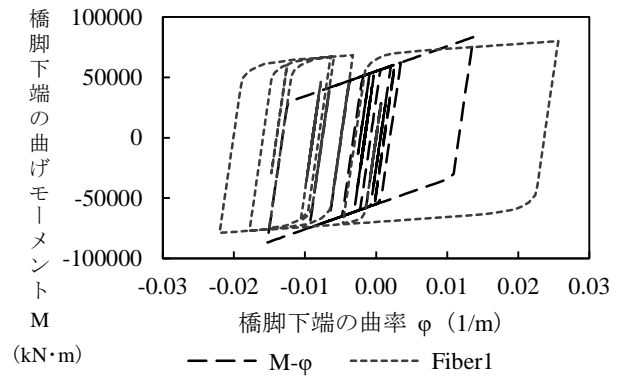


図-13 橋脚下端の曲げモーメントと曲率 (充填CON無)

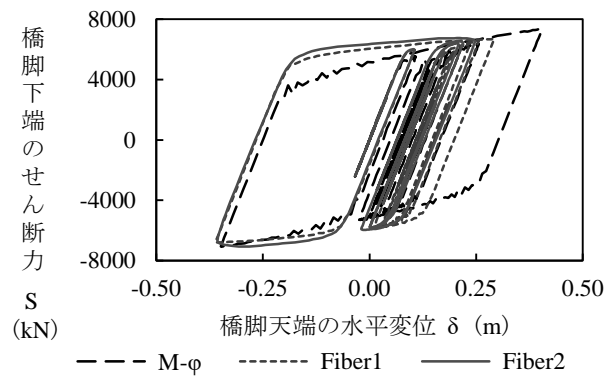


図-14 橋脚下端のせん断力と橋脚天端の水平変位

橋脚下端のせん断力（表-4）は、M-φモデルの方がFiber1,2と比べて大きくなっている。図-13と図-14の関係から、この現象はM-φモデルとFiber1,2の2次勾配に起因すると考えている。

表-3 橋脚天端の最大最小変位

|        | 橋軸方向変位 (m) |        | 鉛直方向変位 (m) |        |
|--------|------------|--------|------------|--------|
|        | max        | min    | max        | min    |
| M-φ    | 0.405      | -0.349 | 0.000      | 0.000  |
| Fiber1 | 0.292      | -0.361 | 0.000      | -0.005 |
| Fiber2 | 0.247      | -0.357 | 0.000      | -0.011 |

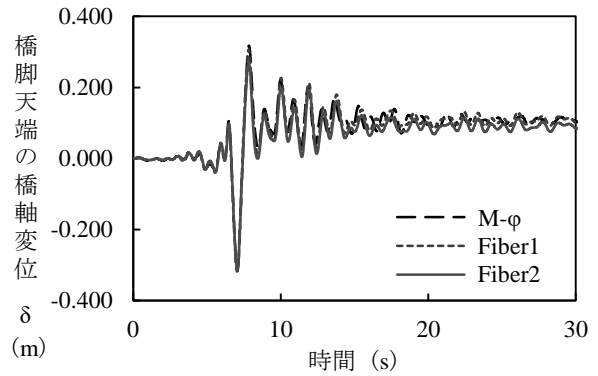
表-4 橋脚下端の最大最小断面力

|        | 軸力 (kN)    |        | せん断力 (kN) |           |
|--------|------------|--------|-----------|-----------|
|        | max        | min    | max       | min       |
| M-φ    | -7267      | -7267  | 7369      | -7063     |
| Fiber1 | -6729      | -7847  | 6697      | -6790     |
| Fiber2 | -6329      | -7674  | 6745      | -7065     |
|        | 曲げM (kN・m) |        | ひずみε (-)  |           |
|        | max        | min    | max       | min       |
| M-φ    | 84826      | -88255 | ---       | ---       |
| Fiber1 | 81438      | -80097 | 0.023276  | -0.028692 |
| Fiber2 | 81121      | -78857 | 0.022462  | -0.028406 |

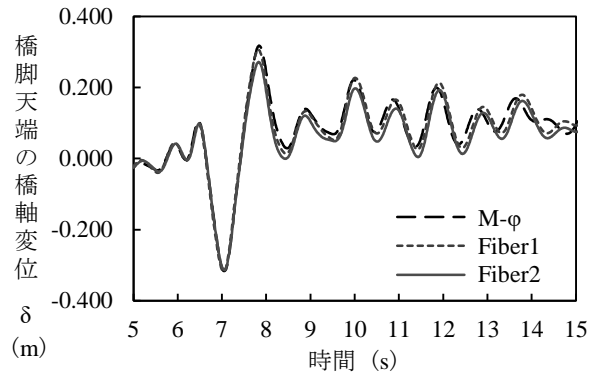
(2) 充填コンクリート有の場合

充填コンクリート有の条件で、橋軸方向に対して動的解析を行った。図-15に橋脚天端の橋軸変位、図-16に橋脚天端の鉛直変位、図-17に橋脚下端の軸力、図-18に橋脚下端の曲げモーメントと曲率、図-19に橋脚下端のせん断力と橋脚天端の水平変位、表-5に橋脚天端の最大最小変位、表-6に橋脚下端の最大最小断面力をそれぞれ示す。なお、図-15～図-17に関してはモデル化方法ごとの応答値の違いが分かるように、0～30秒区間の全体図と5～15秒区間の拡大図を示すこととした。また、図-18のみM-φモデルとFiber1の応答値を示す。

橋脚天端の橋軸変位（図-15）に関しては、1回目のピーク（7.1秒）まではほぼ一致するものの（表-5のmin値）、2回目のピーク（7.8秒）ではM-φモデルとFiber1はほぼ一致するがFiber2とは大きく差が出ており（表-5のmax値）、それ以後の残留変位にも差が発生している。この現象はプッシュオーバー解析結果の比較で示したように、2次勾配の違いに起因すると考えられる。充填コンクリート有の場合は、図-8より2次勾配がM-φモデルとFiber1で近似していること、図-18は図-13と比べてM-φモデルとFiber1の2次勾配も近似していることから、M-φモデルとFiber1はほぼ一致する結果になったと考えられる。

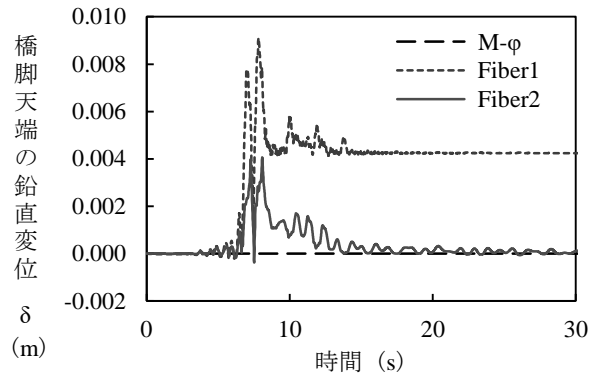


(1) 全体図 (0～30秒)

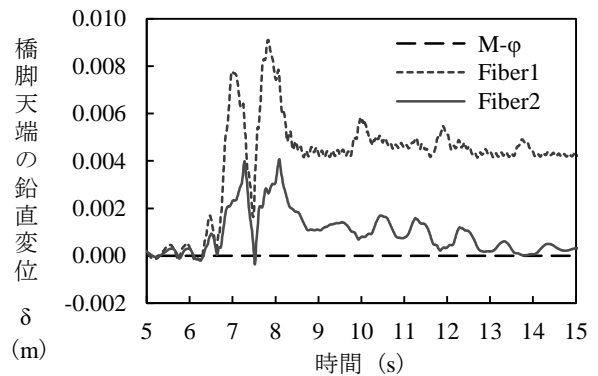


(2) 拡大図 (5～15秒)

図-15 橋脚天端の橋軸変位 (充填CON有)



(1) 全体図 (0～30秒)



(2) 拡大図 (5～15秒)

図-16 橋脚天端の鉛直変位 (充填CON有)

橋脚天端の鉛直変位（図-16）に関しては、M-φモデルで鉛直変位が発生しておらず、Fiber1では特に6.5～8.0秒の区間で上向きの鉛直変位（0.009m）が発生し、15.0秒以降は大きな変動はない。Fiber2では上向きの鉛直変位（0.004m）が発生し、6.5～30.0秒の区間で微振幅する結果となった。プッシュオーバー解析結果の比較で示したように、この現象も平面保持の仮定に基づいてファイバー要素自身が引張側に変形しながら中立軸を算定していることが原因と考えている。また、鉛直変位の大きさとして、充填コンクリート無の場合はFiber2の方が大きく、充填コンクリート有の場合はFiber1の方が大きくなった。この逆転現象は、充填コンクリートの評価方法、幾何学的非線形の考慮の有無等の原因が考えられ、今後検証していく予定である。

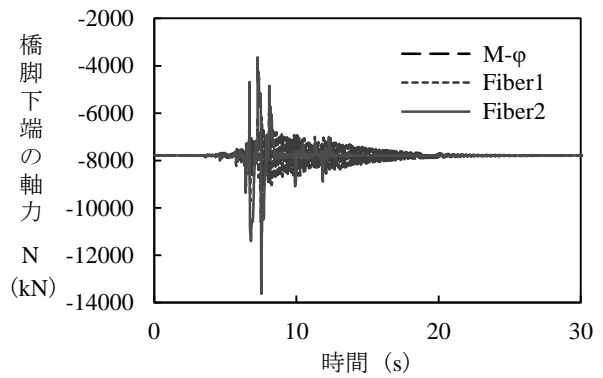
橋脚下端の軸力（図-17）に関しては、M-φモデルで軸力が一定値を示しているのに対して、Fiber1では6.5～20.0秒の区間で軸力変動が確認できる。また、Fiber2では6.5～7.5秒の区間で軸力が大きく変動している。構造形式が単柱橋脚であるため、本来であれば鉛直変位と軸力に相関関係が見られるはずだが、図-16と図-17からは関係性が認められない。この現象は不つり合い力が関与していると考えられる。ファイバー要素が引張側に変形することにより軸力が発生するものの、その軸力が次のステップへ正しく引き継いでいない可能性がある。今後は不つり合い力パラメータについても検証する予定である。なお、この現象は、充填コンクリート有無の条件で同様に発生した。

表-5 橋脚天端の最大最小変位

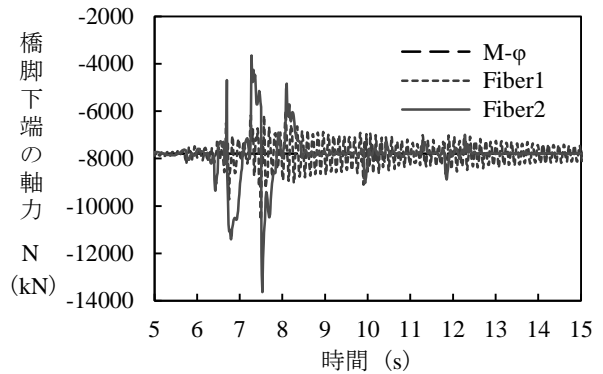
|        | 橋軸方向変位 (m) |        | 鉛直方向変位 (m) |       |
|--------|------------|--------|------------|-------|
|        | max        | min    | max        | min   |
| M-φ    | 0.318      | -0.317 | 0.000      | 0.000 |
| Fiber1 | 0.307      | -0.318 | 0.009      | 0.000 |
| Fiber2 | 0.272      | -0.313 | 0.004      | 0.000 |

表-6 橋脚下端の最大最小断面力

|        | 軸力 (kN)    |        | せん断力 (kN) |           |
|--------|------------|--------|-----------|-----------|
|        | max        | min    | max       | min       |
| M-φ    | -7792      | -7792  | 7336      | -7344     |
| Fiber1 | -5996      | -10592 | 7847      | -7865     |
| Fiber2 | -3644      | -13632 | 8049      | -8211     |
|        | 曲げM (kN・m) |        | ひずみε (-)  |           |
|        | max        | min    | max       | min       |
| M-φ    | 88030      | -88147 | ---       | ---       |
| Fiber1 | 92957      | -92665 | 0.030560  | -0.016723 |
| Fiber2 | 92090      | -91065 | 0.027694  | -0.015563 |



(1) 全体図 (0～30秒)



(2) 拡大図 (5～15秒)

図-17 橋脚下端の軸力 (充填CON有)

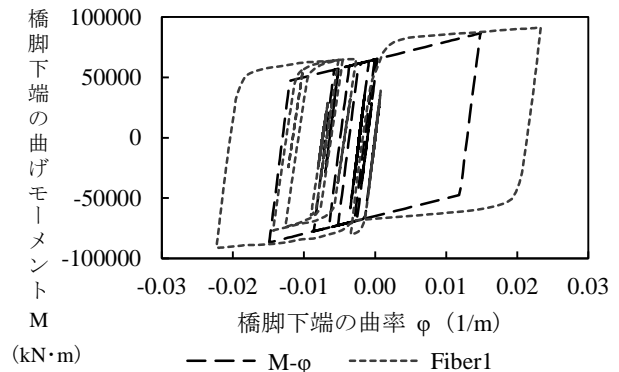


図-18 橋脚下端の曲げモーメントと曲率 (充填CON有)

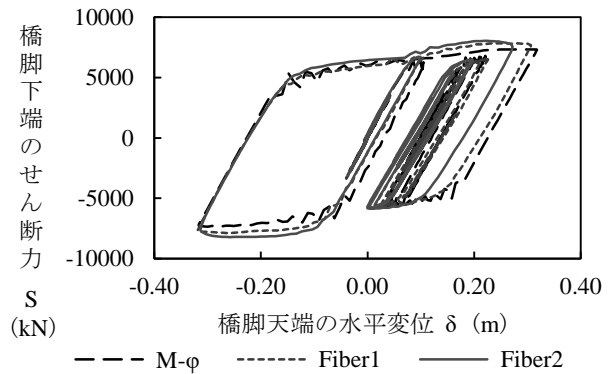


図-19 橋脚下端のせん断力と橋脚天端の水平変位

橋脚下端のせん断力（表-6）は，充填コンクリート無の場合と比べて，Fiber1,2の応答せん断力が大きくなり，充填コンクリート無の場合とは異なる傾向を示している．原因としては，前述の通り，充填コンクリートの評価方法，幾何学的非線形の考慮の有無等の原因が考えられる．

## 7. 結論

モデル化の違いに着目した単柱鋼製橋脚の地震応答解析の比較検証を充填コンクリート有無の条件で行った．本解析で明らかになった事項をまとめると以下となる．

- (1) 固有値解析結果に関しては，充填コンクリート無の場合は橋軸方向1次モードの固有周期がM-φモデルとFiber1,2で大きな差異はなかった．これに対して，充填コンクリート有の場合は充填コンクリートのモデル化の違いにより，M-φモデルに比べてFiber1,2の方が固有周期が短くなった．
- (2) プッシュオーバー解析の水平荷重と水平変位に関しては，充填コンクリート無の場合は降伏時の水平荷重と2次勾配に差が見られた．これに対して，充填コンクリート有の場合は降伏時の水平荷重と初期勾配に差が見られた．
- (3) プッシュオーバー解析の橋脚天端の鉛直変位に関しては，M-φモデルでは鉛直変位しない結果となった．これに対して，充填コンクリート無の場合ではFiber1,2は下向きの鉛直変位が発生した．一方で，充填コンクリート有の場合ではFiber1は上向きの鉛直変位が発生し，Fiber2は上向きの鉛直変位が発生した後に下向きの変位に至っている．

- (4) 動的解析の橋脚天端の橋軸変位に関しては，1回目のピーク時までの応答変位はほぼ一致するものの，降伏後の応答変位に差が見られた．
- (5) 動的解析の橋脚天端の鉛直変位に関しては，M-φモデルでは鉛直変位しない結果となった．これに対して，Fiber1,2では充填コンクリート無の場合は下向きの鉛直変位が発生し，充填コンクリート有の場合は上向きの鉛直変位が発生する結果となった．
- (6) 動的解析の橋脚下端の軸力に関しては，M-φモデルでは軸力変動しない結果となった．これに対して，Fiber1,2では軸力が変動する結果となった．

**謝辞：**本研究は，鋼橋技術研究会「耐震・免震・制振デバイス部会（部会長：田嶋仁志）」の活動内容であり，関係各位からご指導いただきましたことを感謝いたします．

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説I～V，2012.3.
- 2) 日本鋼構造協会：鋼橋の耐震・制震ガイドライン，2006.9.
- 3) 土木学会：鋼・合成構造標準仕様書【耐震設計編】，2008.
- 4) 野中哲也，吉野廣一：パソコンで解くファイバーモデルによる弾塑性有限変位解析，丸善出版，2010.