

ファイバーモデルを用いた地震応答解析における RC橋脚の鉛直振動に関する検討

吉澤 努¹・高 文君²・徳橋 亮治³

¹正会員 工修 大日本コンサルタント株式会社（〒170-0003 東京都豊島区駒込三丁目23番1号）

²正会員 工博 大日本コンサルタント株式会社（〒170-0003 東京都豊島区駒込三丁目23番1号）

³正会員 大日本コンサルタント株式会社（〒170-0003 東京都豊島区駒込三丁目23番1号）

1. はじめに

RC部材に曲げが生じるとコンクリートにひび割れが生じ、中立軸が図心から移動する。このため、軸方向の変位が生じ、変位が拘束される場合は軸力変動が生じる。アーチ橋やラーメン橋脚等、構造物の応答にRC部材の軸力-曲げ相関の影響が無視できない構造物では、RC部材の曲げにともなう軸力変動に対する注意が必要である。

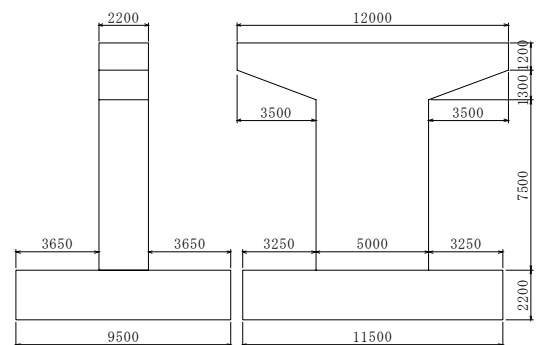
RC橋脚が地震による水平振動を受ける場合も、橋脚基部の曲げにより橋脚に鉛直方向の変位が生じ、水平振動と同時に鉛直振動が生じると考えられる。

本検討では、RC部材の曲げに起因する軸力変動の検討を行うため、単純な構造物である単柱形式のRC橋脚を対象とした動的解析を行う。解析モデルは非線形梁モデルとファイバーモデルの2通りとし、入力地震動はレベル2地震動とする。この解析により、橋脚の地震応答におけるモデル化の違いを示すとともに、橋のRC部材の解析モデルにファイバーモデルを用いる場合の留意点について考察する。

2. 検討対象橋脚と解析条件

(1) 検討対象橋脚

検討対象橋脚は文献¹⁾のモデル橋脚を参考に、図-1に示す形状及び寸法とする。支承条件は固定とし、死荷重反力及び上部構造の分担重量は6000kNとする。基礎は直接基礎とする。橋脚の配筋は平成24年版道路橋示方書²⁾による静的照査法で設定し、橋軸方向の曲げに対する軸方向鉄筋はD38を2段とする。



(a) 側面図 (b) 正面図

図-1 検討対象橋脚

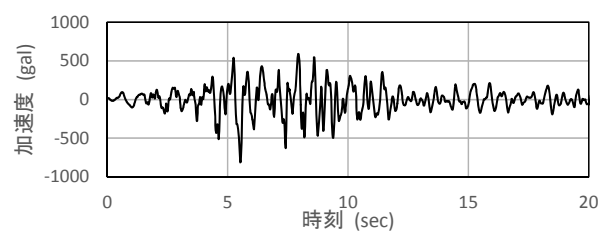


図-2 入力地震動

(2) 解析条件

入力地震動は図-2に示す道路橋示方書の標準波Ⅱ-Ⅰ-1²⁾とし、地震動の入力方向は橋軸方向とする。

解析手法はNewmarkの β 法 ($\beta=1/4$) とし、積分時間間隔は梁モデルでは1/500秒、ファイバーモデルでは1/10000秒とする。

減衰はレイリー減衰とし、動的解析で用いる定数は橋脚の1次および2次の水平振動モードから設定する。

(3) 解析モデルと解析ケース

解析モデルは、橋脚基部に非線形梁要素を配置した梁モデルとファイバーモデルの2通りとする。

非線形梁モデルは橋脚柱部を降伏剛性とし、基部の塑性ヒンジ区間に非線形梁要素を設ける。基部の梁要素は降伏曲げモーメントに達した時に勾配が水平となるバイリニアモデルとする。非線形履歴モデルは武田型とする。

ファイバーモデルは断面を高さ方向に50程度に分割した2次元ファイバーモデルとする。ファイバー要素はコンクリートと鉄筋の2通りを用いる。コンクリートは道路橋示方書²⁾に示された指数関数型コンクリートモデルとする。鉄筋は移動硬化型のバイリニアモデルとする。

コンクリートは、通常のRC断面計算で想定されるように引張応力を無視したモデルと、文献³⁾に示された、引張応力が異形鉄筋を介してコンクリート間で伝達されることを考慮したモデルの2通りとする。

ファイバーモデルの橋脚の高さ方向の要素分割は柱の断面高さの1/4倍とする。ファイバーモデルは橋脚基部から梁下端までの範囲に設定する。

解析ケースを整理すると以下の3ケースである。

- ケース①非線形梁モデル
- ケース②ファイバーモデル（引張履歴無視）
- ケース③ファイバーモデル（引張履歴考慮）

3. 非線形梁モデルとファイバーモデルの比較

(1) 静的解析によるファイバーモデルの非線形挙動

ファイバーモデルに対して橋脚天端に水平荷重を静的に漸増载荷し、水平荷重－水平変位（ $P-\delta$ 関係）を算出した結果を、地震時保有水平耐力法による計算結果と合わせて図-3に示す。ここで、基礎バネの変位は考慮していない。

地震時保有水平耐力法による $P-\delta$ 関係の計算値に対し、ファイバーモデルの解析結果はよく一致している。ファイバーモデルのケース②では降伏変位を超えた後の水平荷重が地震時保有水平耐力法による計算値をやや上回っている。これは、ファイバーモデルではかぶりコンクリートの圧縮応力を考慮していることによる。

ファイバーモデルでは橋脚の水平方向の変位にともない、基部の曲げに起因する鉛直方向の変位が生じる。橋脚天端の水平方向と鉛直方向の変位の関係を図-4に示す。耐震性能2の限界となる時の水平変

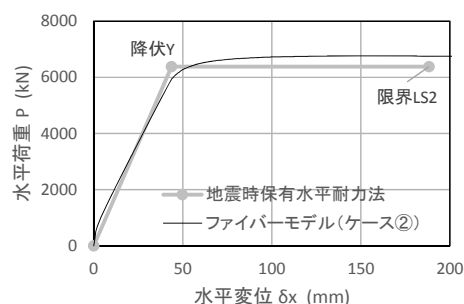


図-3 橋脚の水平荷重－水平変位関係

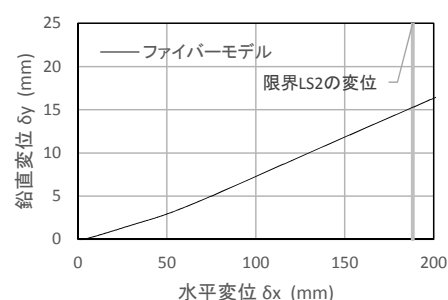
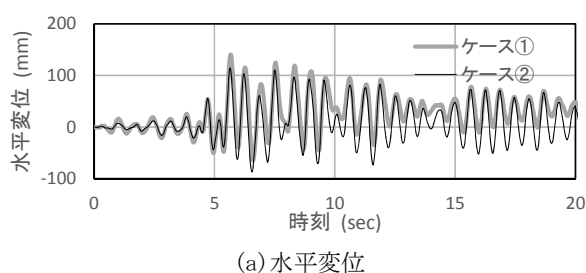
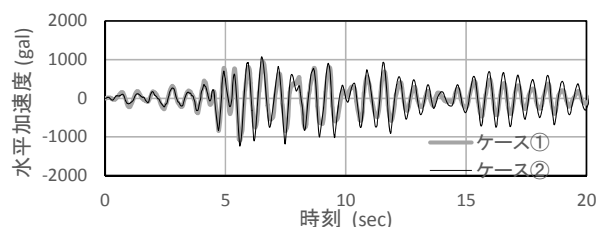


図-4 橋脚の水平変位にともなう鉛直変位



(a) 水平変位



(b) 水平加速度

図-5 橋脚天端の応答波形

位 188mm に対して鉛直変位はその 8.1%となる 15.3mmである。

(2) 動的解析結果の比較

非線形梁モデルとファイバーモデルの動的解析結果を以降に示す。

図-5は橋脚天端の水平方向の変位および加速度の時刻歴図である。ケース①（非線形梁モデル）とケース②（ファイバーモデル）のを比較すると似通った波形であるが、変位、加速度ともに振幅がやや異なる。特に、変位波形においてケース①で見られる基線のずれがケース②ではあまり顕著ではない。

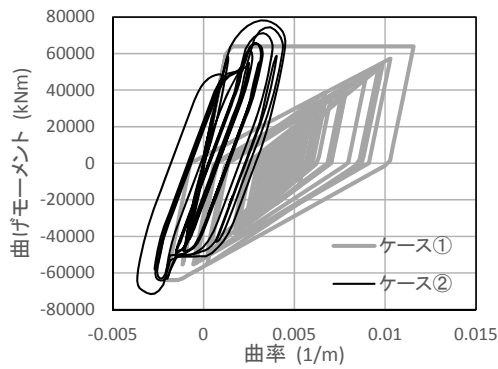


図-6 橋脚基部のM-φ履歴図

橋脚基部の曲げモーメントー曲率（M-φ）履歴を図-6に示す。履歴曲線において正方向の曲げにより鉄筋降伏により勾配が変化する位置はケース①とケース②ではほぼ同じであるが、ケース②のファイバーモデルでは降伏後に曲げモーメントの増加が見られ、曲率の最大値はケース①の梁モデルの1/2以下である。

ファイバーモデルで曲げ降伏後に耐力が増加することはプッシュオーバー解析でも見られたが、耐力の増加の程度はプッシュオーバー解析より大きい。

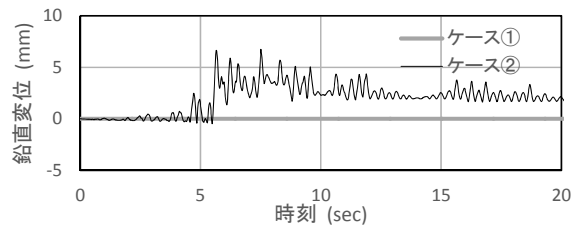
また、文献⁴⁾での解析結果と同様に、ファイバーモデルでは部材の降伏後に曲げモーメントの符号が反転する際の剛性の低下が見られない。これは、ファイバーモデルでは鉄筋のBauscinger効果や座屈等の事象が考慮されていないためと考えられる。鋼材のひずみ硬化の影響も含め、より実験結果に合うような要素の履歴モデルを採用することが今後の課題である。

(3) 橋脚の鉛直方向の振動と軸力変動

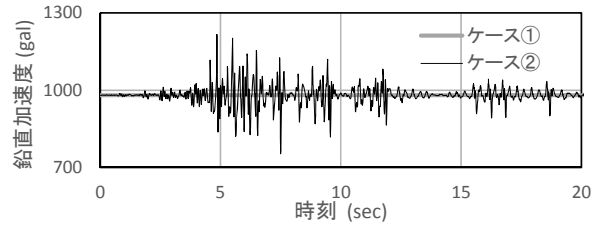
橋脚天端の鉛直方向の変位と加速度の時刻歴図を図-7に、橋脚基部の軸力の時刻歴図を図-8に示す。ケース②のファイバーモデルでは橋脚に鉛直振動と軸力変動が生じている。鉛直変位の最大値は6.73mm、軸力の最大値は27934kNである。

RC部材は曲げにより軸方向の変位が生じるが、単柱式の橋脚は変位が拘束されないため、静的な荷重の場合は水平曲げにともなう軸力は生じない。しかし、質量を有するため地震時は鉛直振動に対し慣性力が生じ、単柱式橋脚でも水平曲げと同時に軸力変動が生じる。

図-7と図-8を比較すると、鉛直方向の変位に上方向のピークが生じる時刻と軸圧縮力が大きくなる時刻が近い（軸力最大の時刻5.60秒に対し変位のピークの時刻は5.66秒）ことから、橋脚の軸力変動は橋脚の鉛直振動にともなう慣性力によると考えられる。



(a) 鉛直変位



(b) 鉛直加速度

図-7 橋脚天端の鉛直変位と鉛直加速度

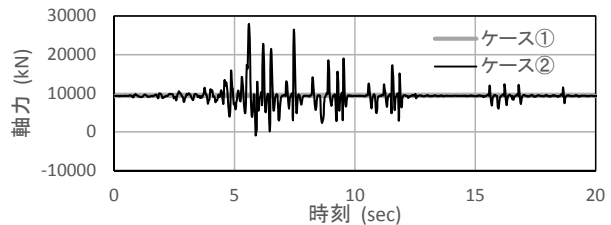


図-8 橋脚基部の軸力変動

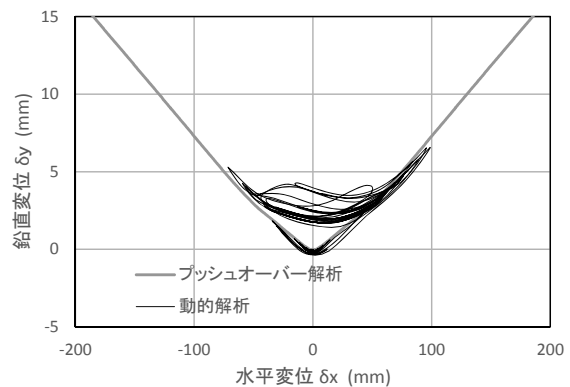


図-9 橋脚天端の水平変位ー鉛直変位履歴図

鉛直変位は最大値に達した後、X軸まで戻らず、2mm程度の残留変位が生じている。これは、軸方向鉄筋の降伏により永久変形が生じているためである。

ファイバーモデルの解析ケース②について、水平変位と鉛直変位の関係を図-9に示す。橋脚天端の変位は基礎バネの変形による分を除いた値である。2方向の変位の関係はグラフの原点近傍でV字型の履歴を示している。振動の途中より変位が残留し、履歴曲線の下限が上方向に移動している。図にはプッシュオーバー解析による水平変位と鉛直変位の関係も示している。静的解析による水平変位ー鉛直変位

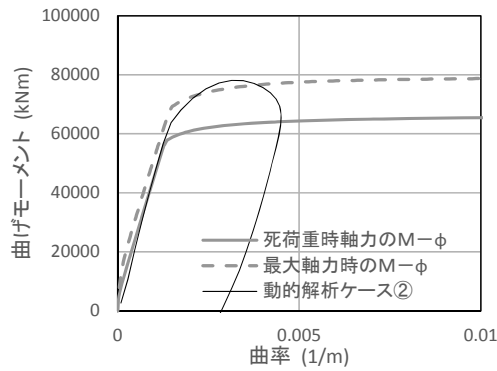


図-10 橋脚基部のM-φ履歴（静的解析と比較）

関係の曲線は動的解析の履歴の下縁とよく一致している。

軸力が最大となる時刻5.60秒の前後の時間（時刻5.48秒～5.80秒）の橋脚基部のM-φ履歴と、静的なプッシュオーバー解析によるM-φ曲線を図-10に示す。曲げモーメントの値は軸力変動が生じないプッシュオーバー解析の場合最大値が65822kNmであるのに対し、動的解析結果の最大値は78089kNmで1.2倍程度大きい値である。この違いは軸力が増したことの影響と考えられる。動的解析では軸力の最大値は27934kNであり、死荷重時軸力9319kNの約3倍である。橋脚基部の軸力を動的解析の最大軸力としてプッシュオーバー解析を行った結果を図中の破線で示す。最大曲げモーメントは78932kNと算出され、動的解析結果の最大曲げに近い値である。

以上より、RC部材の地震時の曲げ応答を厳密に算定するためには、曲げによる部材の軸方向の変位とそれによる軸力変動、さらに、軸力変動による曲げ耐力の変化を適切に把握する必要がある。

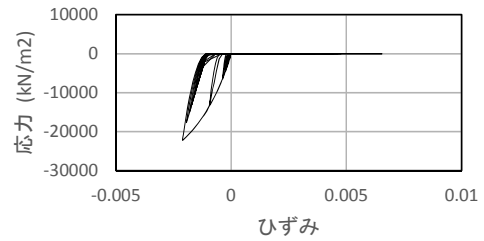
4. コンクリートの引張履歴の影響

(1) コンクリートの引張履歴を考慮した解析結果

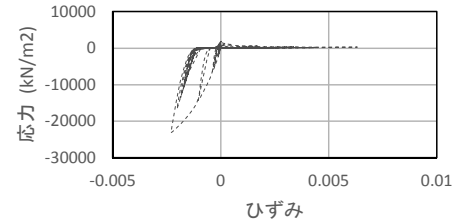
図-11にファイバーモデルの解析ケース（ケース②およびケース③）における、圧縮ひずみが最大となる要素の応力-ひずみ（ $\sigma - \varepsilon$ ）履歴を示す。ケース②（引張履歴無視）では引張応力が生じていない。一方、ケース③（引張履歴考慮）では引張応力が生じ、引張側でも履歴ループを描いている。

図-12にファイバーモデルの解析ケースにおける、橋脚基部のM-φ履歴図を示す。両方で履歴図は似通っているが、引張履歴を考慮するケース③の方が曲げモーメントと曲率の最大値が大きい。

このような違いが出る理由として、コンクリートの引張応力を考慮すると断面の曲げに対する抵抗が



(a) ケース②（引張履歴無視モデル）



(b) ケース③（引張履歴考慮モデル）

図-11 圧縮縁のコンクリートの $\sigma - \varepsilon$ 履歴図

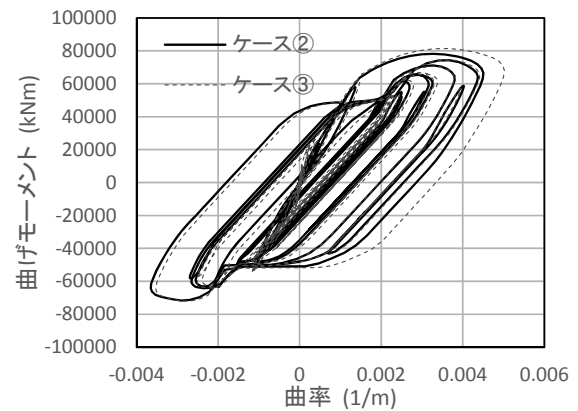


図-12 橋脚基部のM-φ履歴（引張履歴の影響）

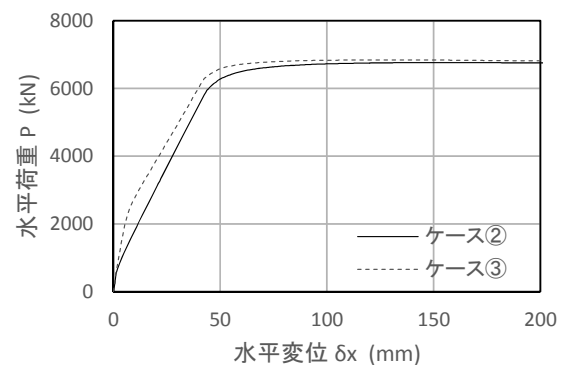


図-13 引張履歴を考慮する場合の橋脚の耐力

増すため、橋脚の剛性が相対的に高くなることが考えられる。

ケース②では中立軸より引張側の応力を無視するのに対し、考慮するケース③では引張応力を考慮するため、同じ軸力である場合には力のつり合いから圧縮応力も大きくなる。圧縮応力は図心からより離

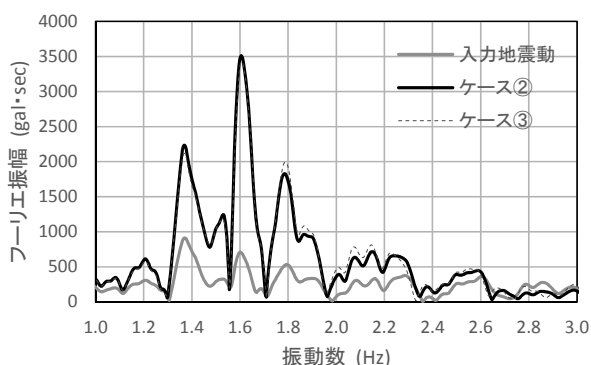


図-14 応答加速度のフーリエスペクトル

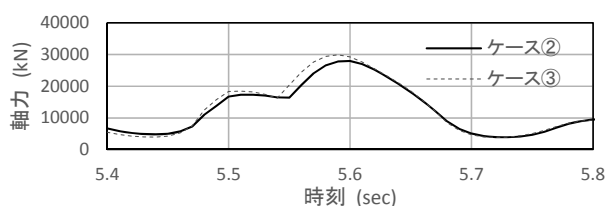


図-15 応答値最大時の軸力の比較

れた位置であるため、同じ変位に対しては曲げモーメントが大きくなる。図-13に橋脚の水平荷重－水平変位関係をファイバーモデルどうしで比較して示す。引張履歴を考慮するケース③の方が、特に変位が小さい領域で水平荷重が大きい値となっている。

(2) コンクリートの引張履歴を考慮した解析結果

図-14に入力地震動と橋脚天端の応答加速度波形のフーリエスペクトルを示す。作図範囲はフーリエ振幅の最大値の近傍で解析ケースによる違いが見られる振動数1Hz～3Hzとしている。振動数約1.6Hzのピークでは2つのケースに大きい違いは見られないが、振動数約1.8Hz～2.2Hzの範囲ではケース③の方がフーリエ振幅が大きい。引張履歴を考慮することで構造物の剛性が高くなり、この振動数領域の応答値が大きくなったことが、ケース②とケース③の地震応答の違いとして表れたと考えられる。

図-15に、橋脚基部の曲げモーメント及び曲率が最大となる時刻5.4秒～5.8秒の橋脚基部の軸力の時刻歴を示す。軸力の最大値はケース②よりケース③の方が大きい値である。橋脚の曲げ応答が増したことが軸力変動も大きくしたと考えられることから、曲げ応答と軸力変動の相互作用もケース②とケース③の応答値の違いに影響したと考えられる。

以上より、コンクリートの引張応力を無視することが必ずしも安全側の仮定ではないことが示されている。

5. ファイバーモデルによる解析上の留意点

(1) ファイバーモデルの解析上の知見と留意点

RC橋脚は水平方向の振動と同時に鉛直方向の振動が生じることがファイバーモデルによる解析で確認された。橋脚の鉛直変位は静的なプッシュオーバー解析でも算出され、変位の値は静的解析と動的解析で整合していた。鉛直変位が生じる理由は、コンクリート要素の $\sigma - \varepsilon$ 関係が非対称であり、RC部材に曲げが作用するとひび割れが生じて中立軸が図心から大きく移動することによる。

橋脚の水平振動に起因する鉛直振動は、橋脚柱部の軸力変動を生じさせ、軸力変動は橋脚の曲げ耐力に影響を与える。単柱橋脚でもこのような事象が見られたことから、アーチ橋やラーメン橋脚のような構造物では、RC部材の曲げによる軸力変動の影響により深い注意が必要となる。

また、軸力変動により曲げ耐力が大きくなることにより、構造物に作用するせん断力も大きくなるため、部材のせん断耐力にも注意が必要となる。

コンクリート要素の引張履歴の影響は顕著ではないが、無視できない場合もあると考えられる。本検討では、橋脚基部の曲げ応答が引張履歴を考慮したケースで大きい値となった。コンクリートの引張応力を無視することが必ずしも安全側ではないため、検討対象により適切なモデル化を行う必要がある。

なお、ファイバーモデルにおけるRC部材のM- ϕ 履歴は非線形梁要素の武田モデルと相違が見られるため、部材の損傷過程をより実験結果に近づけるための検討が必要である。

(2) 部材の曲げによる軸方向変位の算定方法

RC梁に作用する曲げにより、軸方向に生じる変位を算出する方法について以下に述べる。

橋脚の曲げ変形を、図-16に示すような単純な剛体のロッキング運動として表すと、橋脚天端の鉛直変位は以下の式で表される。

$$\delta_y = \frac{D}{2} \times \theta \quad (1)$$

ここで、 δ_y は橋脚天端の鉛直変位、 D は柱断面の荷重載荷方向の高さ、 θ は橋脚天端の変位 δ_x を橋脚高さ h で除した値である。ここで、 θ の符号は δ_y が上方向となるようにとる。

実際の橋脚は剛体ではないため、図-17のように、

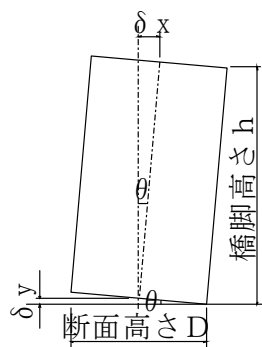


図-16 ロッキング運動における鉛直変位

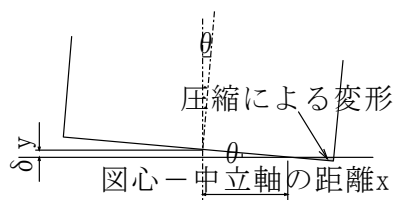


図-17 中立軸位置からの鉛直変位の算出

表-1 橋脚の鉛直変位の算出

状態	中立軸位置 x (mm)	水平変位 δ x (mm)	鉛直変位 δ y (mm)
ひび割れ	—	3.19	0.00
初降伏	380.7	38.50	1.47
限界状態	786.5	188.20	14.80

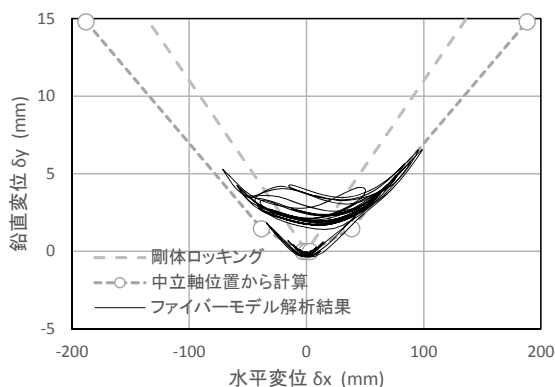


図-18 橋脚の鉛直変位の算出結果

コンクリートの圧縮変形により図心から中立軸までの距離が $D/2$ より小さい値 x をとる。そこで、式(1)の $D/2$ を中立軸位置 x に変えた場合、鉛直変位の算定式は以下となる。

$$\delta_y = x \times \theta \quad (2)$$

橋脚基部の初降伏時、限界状態時の中立軸位置 x

を用いて、各々の時点での鉛直変位を算出した結果を表-1に示す。また、この値をケース②の動的解析結果による橋脚天端の水平変位-鉛直変位履歴図にプロットしたものを図-18に示す。合わせて、式(1)による剛体のロッキング運動の値も示している。ひび割れ時の橋脚の鉛直変位は0としている。

式(2)はきわめて単純な式であるが、これにより、橋脚の鉛直変位をよく表すことができる。RC部材の曲げにともなう軸力変動が問題となる場合、断面計算により算出した中立軸位置から式(2)を用いて、部材の軸方向の変位を概算可能であると考えられる。

6. おわりに

本検討では、RC橋脚を対象に非線形梁要素とファイバーモデルの2通りのモデルにより地震応答解析を行い、モデル化による違いを検討した。検討結果の概要を以下に示す。

- ① 単柱式のRC橋脚でも水平振動にともなう鉛直振動が生じ、それによる軸力変動が部材の曲げ耐力に影響する
- ② アーチ橋やラーメン橋脚等の構造では、RC部材の曲げによる軸力変動に対しより注意を要する
- ③ 曲げ耐力が軸力変動の影響により増加するため、それに伴うせん断力の増加にも注意が必要である
- ④ ファイバーモデルの $M-\phi$ 関係は非線形梁モデルと異なるため改善が必要である
- ⑤ コンクリートの引張履歴の影響が無視できない場合があるため、適切なモデル化が必要である
- ⑥ RC部材の曲げによる軸方向の変位は、簡易的な式で算出が可能である

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997.3.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2012.3.
- 3) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成側，技報堂出版，1991.
- 4) 堺淳一，川島一彦：ファイバー要素を用いた鉄筋コンクリート橋脚の地震応答解析，構造工学論文集，Vol.45A, pp.935-946, 1999.3.