

土木構造物における3次元解析、動的解析、非線形解析など 解析技術適用の事例とその効果

ファイバーモデルを用いた時刻歴応答解析による 曲線橋の動的照査例

(株)フォーラムエイト 東京本社技術サポート Gr 中川 信男

1. はじめに

平成14年に改訂された「道路橋示方書（V耐震設計編）」（以下、道示V）では、橋の動的特性、目標とする耐震性能に応じ、表-1のように照査方法を規定しており、動的照査法の適用範囲がそれまでより広がった。

本稿では、動的照査による耐震性能の評価が必要な曲線橋について、その照査例を紹介する。また、曲線橋の橋脚は、2軸曲げが同時に作用する部材となる。これによる影響を適切に考慮するため、ファイバーモデルを利用する。

照査は、橋脚に生じる応答曲率および応答せん断力を、道示Vで示される許容値と比較することにより実施する。また、ファイバーモデルを利用すると、応答ひずみによって、被りコンクリートやコアコンクリートの損傷状態が詳細に把握できることから、応答ひずみによって地震時の損傷状態を評価することも試みる。

解析には、弊社3次元非線形解析ソフト「UC-win/Frames(3D) Ver.1.07」および「UC-1 橋脚の設計 Ver.4」を用いる。

2. ファイバーモデルによる動的解析に基づく耐震性能評価方法

1) 道路橋示方書に基づく照査方法

道示Vでは、橋脚のレベル2地震動に対する照査を行う場合、次に示す曲げに関する照査とせん断に関する照査を実施することが一般的である。これらは、断面の水平・鉛直軸に関し、1軸曲げを受ける部材・断面の性能に基づく照査方法である。よっ

て、2軸曲げを同時に受ける部材・断面への適用に関しては、十分な注意が必要となる。

a. 曲げに関する照査

- ・塑性化を考慮する部位

$$\mu_r \leq \mu_a$$

ここに、 μ_r ：応答塑性率

μ_a ：許容塑性率

※ 橋脚のモデル化手法に応じて曲率や回転角に基づいて照査を行っても良い。

回転角の場合

$$\theta_{\max} \leq \theta_{pa}$$

ここに、

$$\theta_{pa} = \theta_{py0} + (\theta_{pu} - \theta_{py0}) / \alpha$$

θ_{pa} ：許容回転角

θ_{pu} ：終局時の回転角

θ_{py0} ：初降伏時の回転角

α ：安全係数

$\theta_{\max}$ ：応答回転角

曲率の場合

$$\phi_{\max} \leq \phi_a$$

ここに、

$$\phi_a = \phi_{y0} + (\phi_u - \phi_{y0}) / \alpha$$

ϕ_a ：許容曲率

ϕ_u ：終局曲率

ϕ_{y0} ：初降伏曲率

α ：安全係数

$\phi_{\max}$ ：応答曲率

- ・塑性化を考慮しない部位

$$\phi_{\max} \leq \phi_{y0}$$

b. せん断に関する照査

$$S_{max} \leq P_s$$

ここに、PS：せん断耐力

S_{max} ：応答せん断力

2) 応答ひずみに基づく方法

ファイバーモデルでは、断面内のひずみ分布を得ることが可能なため、被りコンクリート、コアコンクリート、鉄筋などに生じる損傷状態を詳細に把握することができる。

ここでは、部材・断面の損傷状態を、ひずみによって表す方法の一例を示す。

a.RC 単柱の繰返し実験の概要と結果

道示Vの地震時保有水平耐力法において、RC橋脚の耐震性能を定めるために参考にされた実験結果を参考にする¹⁾²⁾。実験供試体を図-1に、実験結果を図-2に示す。ここでは、タイプ2地震動を想定した3回繰返し載荷実験に着目する。そして、ファイバーモデルを用いた解析により、本実験を再現する。

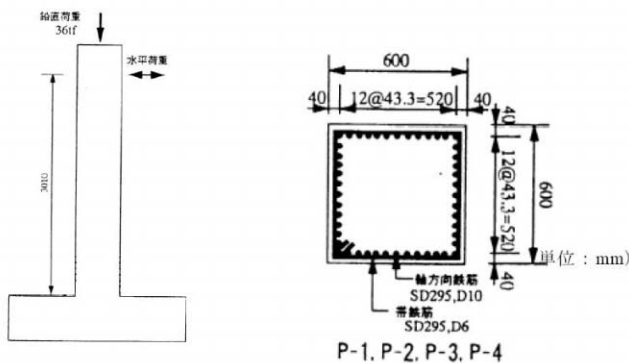


図-1 実験供試体寸法図・配筋図¹⁾²⁾

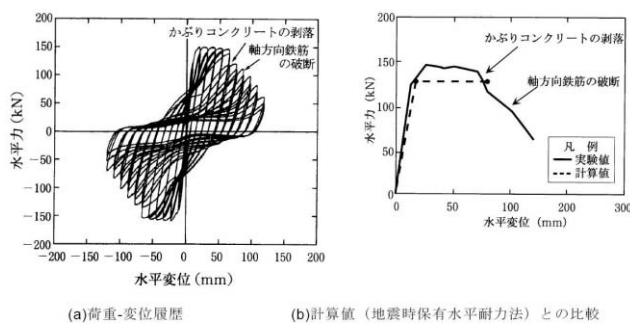


図-2 実験結果 (3回繰返し実験:P2供試体)[荷重-変位]¹⁾²⁾

水平荷重-水平変位関係を図-4に、柱基部断面における被りコンクリートとコアコンクリートそれぞれの最外縁のコンクリート応力-ひずみ履歴を図-5に示す。

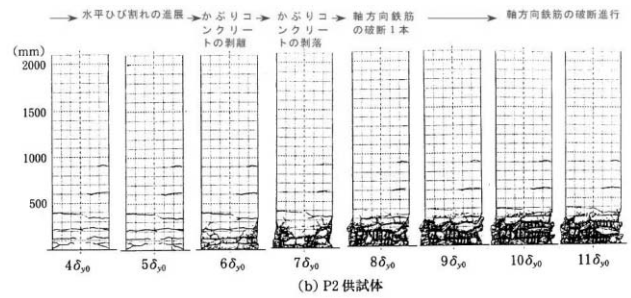


図-3 実験結果 (3回繰返し実験:P2供試体)[ひび割れ図]¹⁾²⁾

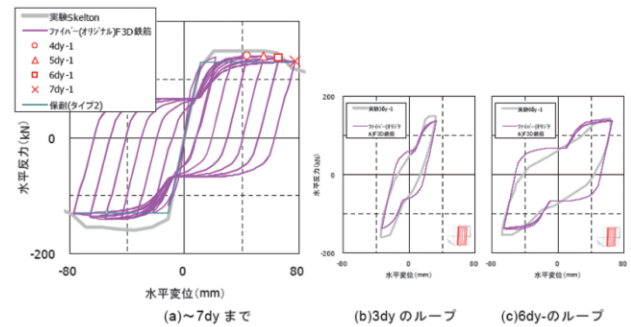


図-4 荷重-変位関係の比較

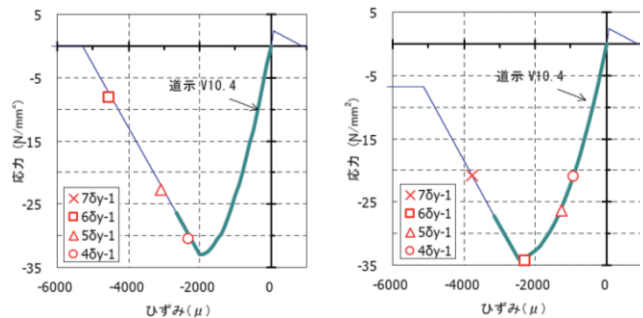


図-5 コンクリートの応力-ひずみ履歴

5 δy_0 の時、被りコンクリートの応力がほぼ終局状態に達する状態となり(図-5)、外観上、被りコンクリートの剥離はほとんど確認できない(図-3)。6 δy_0 の時、被りコンクリートの圧縮抵抗は大きく低下、またコアコンクリートの応力はほぼ最大圧縮応力に達する状態となり(図-5)、外観上、被りコンクリートの剥離や部分的な剥落が確認できる(図-3)。そして、地震時保有水平耐力法の終局時に相当する7 δy_0 の時、被りコンクリートは完全に圧縮抵抗力を失い、コアコンクリートが終局ひずみに達する状態となり(図-5)、道示VにおけるRC橋脚の終局時の仮定と大変よく一致している。また、この時、外観上、主鉄筋の座屈や被りコンクリートの剥落が顕著に確認できる(図-3)。

なお、タイプ2地震に対する耐震性能として、道示Vでは、本実験の5 δy_0 時の損傷は耐震性能2の

限界状態に、本実験の6 δy_0 時の損傷は同耐震性能3の限界状態に相当するとされている。

b. 損傷状態を表すひずみの値

以上の比較より、損傷状態を「ひずみ」で表すとすると、例えば次のように整理することができる。

被りコンクリートが剥離しない限界：

$$\text{被りコンクリート } \varepsilon'c \leq \varepsilon'cu$$

または

$$\text{コアコンクリート } \varepsilon'c \leq 0.5 \cdot \varepsilon'cc$$

被りコンクリートが部分的に剥落する限界：

コアコンクリートが十分に耐荷力を持っていれば、被りコンクリートを大きく剥落させる要因となる主鉄筋座屈が抑制されると考える。

$$\text{コアコンクリート } \varepsilon'c \leq \varepsilon'cc$$

終局限界：

コアコンクリートが終局に達する。よって、主鉄筋座屈が顕著になり、被りコンクリートが大きく剥落する。

$$\text{コアコンクリート } \varepsilon'c \leq \varepsilon'cu$$

ここに、

$\varepsilon'c$: コンクリートの応答ひずみ

$\varepsilon'cc$: 最大圧縮応力時のひずみ

$\varepsilon'cu$: コンクリートの終局ひずみ

すなわち、被りコンクリートの剥離・剥落の程度を、実験で観察されたコアコンクリートと主鉄筋の損傷メカニズムを参考に置き換えたものともいえる。

3. 曲線橋への適用

1) 解析対象

解析対象は、図-6に示すPC3径間連続中空床版曲線橋である。モデルの概要を以下に示す。

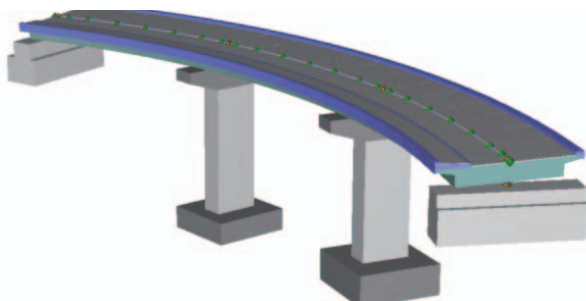


図-6 橋梁全体図

橋梁形式：PC3 径間連続中空床版橋

(橋長 71.1m, 支間割 23.0m + 23.3m + 23.0m)

下部構造：逆T式橋台(A1,A2)

張出 RC 壁式橋脚 (P1,P2) H = 13.5m、12.0m

基礎形式：深礎杭(橋台)、直接基礎(橋脚)

支承条件：地震時水平力分散構造

重要度：A種

地域区分：B地域($C_z = 0.85$)

地盤種別：Ⅱ種地盤

2) 動的照査実施手順

道示Vでは、前述の表-1に示すように、動的照査に基づいて耐震性能の評価を実施することになっている。ただし、現実的には、あらかじめ静的照査(震度法、地震時保有水平耐力法)で断面諸元を仮決定し、その断面に対し動的照査を行うことが多い。

表-1 地震時の挙動の複雑さと耐震性能の照査に適用できる耐震計算法¹⁾

橋の動的特性 照査をする 耐震性能	地震時の挙動 が複雑ではない橋	塑性化や非線形性が複数箇所に生じる橋及びエネルギー一定則の適用が十分検討されていない橋	高次モードの影響が懸念される橋	静的解析の適用性が限定される橋
耐震性能1	静的照査法	静的照査法	動的照査法	動的照査法
耐震性能2	静的照査法	動的照査法	動的照査法	動的照査法
耐震性能3	静的照査法	動的照査法	動的照査法	動的照査法
適用する橋の例	右記以外の条件の橋	・ゴム支承を用いた地震時水平力分散構造を有する橋 ・免震橋 ・ラーメン橋 ・鋼製橋脚に塑性化を考慮する場合	・固有周期の長い橋 ・橋脚高さが高い橋	・斜張橋、吊橋等の長大橋 ・上路式アーチ橋 ・中路式アーチ橋 ・曲線橋

なお、「UC-1 橋脚の設計 Ver.4」と、「UC-win/F-RAME(3D)」を組合せることにより、このような照査手順がスムーズに実施できる。「UC-1 橋脚の設計 Ver.4」を用いて、まず静的照査を満足するよう橋脚断面の概略設計を行った後、「UC-win/F-RAME(3D)」を用いて実際の線形上にその橋脚を配置させ、全体系モデルによる動的照査を実施する(図-7)。動的照査による判定がNGとなった場合は、諸元を変更して静的照査を満足することを再度確認し、動的照査を改めて実施することになる。そして、動的照査での結果を満足するまで、この手順を繰り返す。

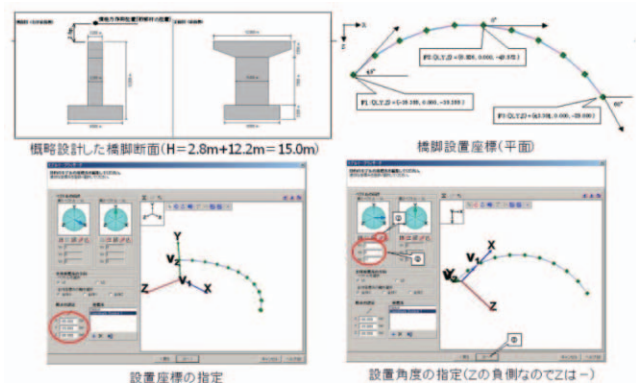


図-7 橋脚データの設定方法

3) 解析モデル

本橋梁の橋脚には、2軸曲げが同時に作用することが懸念されるため、この影響を正しく評価できるファイバーモデルを適用していることと、斜面上に基礎がある橋台に関して、谷川と山側で別々に地盤ばねを評価しているのが大きな特長である。モデルの概要を以下に示す。

上部工：全断面有効剛性（線形梁要素）

橋脚：ファイバー要素（非線形梁要素）

基礎：地盤ばねによる。橋台の地盤ばねは、基礎が斜面上にあるため、谷側と山側の地盤ばねを個々に評価

支 承：「道示V」表-解 6.2.2. 線形ばね

上部構造について、図-8に示すように支間部と支点部に分けてモデル化する。高欄および舗装部分などの非構造部材については、その剛性は無視し、死荷重のみに反映させる。

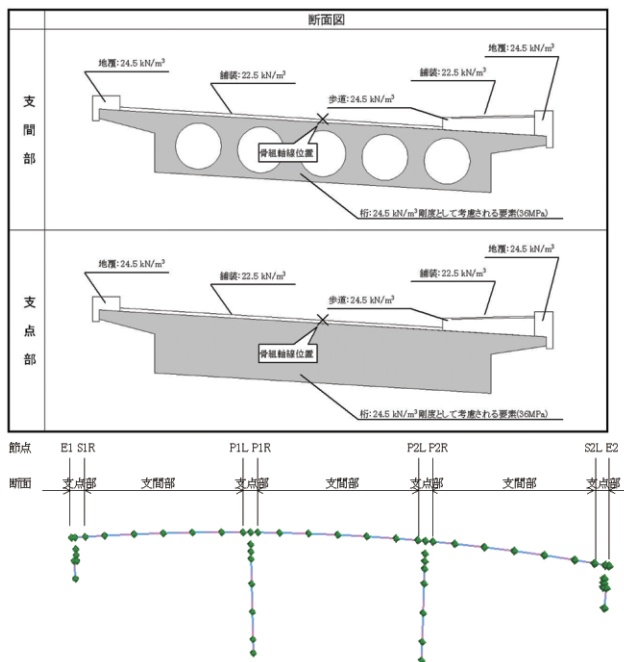


図-8 上部工断面モデル図

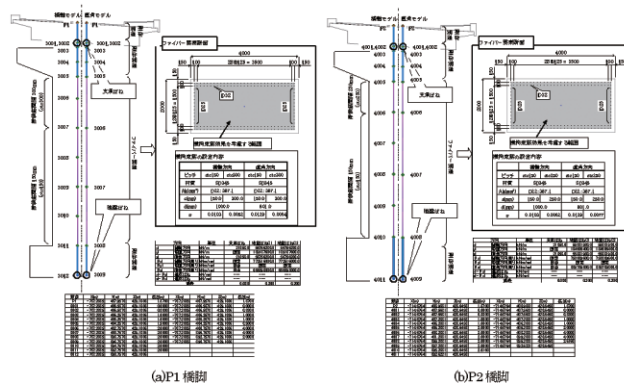


図-9 橋脚モデル図

橋脚について、「UC-1 橋脚の設計 Ver.4」のエクスポート機能により、動的照査に用いるモデルに変換することができるので、これを利用する（図-9）。

そして、タイプ2地震動Ⅱ種地盤用の3波を用いて、図-10に示す橋軸方向および直角方向に対し、別々に地震動を作用させて解析を実施する。減衰は、要素別剛性比例型を用いる。

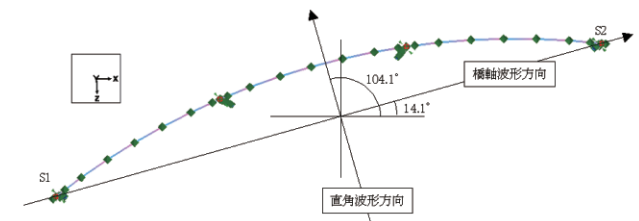


図-10 入力地震波の方向

4) 解析結果

表-2に、タイプ2地震動を直角方向に作用させた場合の、道路橋示方書に基づく照査結果を示す。この場合、各断面の水平・鉛直軸に着目して応答断面力・曲率を抽出し、同じ着目軸に対する許容値と比較することにより、照査を実施する。また、本解析例はA種の橋であるので、残留変位の照査を省略できるが、参考のためこの結果も示している。表-2の、曲率に関する照査をみると、応答値は耐震性能3の許容曲率の1/4～1/10という値となっており、許容値に対し相当余裕のある結果となっている。なお、耐震性能3は、外観上、被りコンクリートの剥離や部分的な剥落が確認できる状態を限界としており、すなわち、それに対して余裕がある状態となることになる。

表-2 道路橋示方書に基づく方法による照査結果

表-2 道路橋示方書に基づく方法による照査結果

項目	橋脚部		橋台部		橋梁部		橋脚部		橋台部		橋梁部	
	橋脚部	橋台部	橋脚部	橋台部	橋脚部	橋台部	橋脚部	橋台部	橋脚部	橋台部	橋脚部	橋台部
最大変位 (mm)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
最大応力 (MPa)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
最大曲率 (1/mm)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
最大変位 (mm)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
最大応力 (MPa)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
最大曲率 (1/mm)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

応答ひずみに基づく損傷レベルについて、各部材毎の最も厳しい損傷レベルを図-11に、P1橋脚基

部断面における損傷レベルとひずみ履歴を図-12に示す。図-12に示す、最外縁コアコンクリートのひずみ履歴に着目すると、いずれも、応答ひずみは最大圧縮応力時のひずみ ε'_{cc} に達するが終局ひずみ ε'_{cu} には達していない状態であり、外観上、被りコンクリートが部分的に剥落する程度の損傷が予想される。

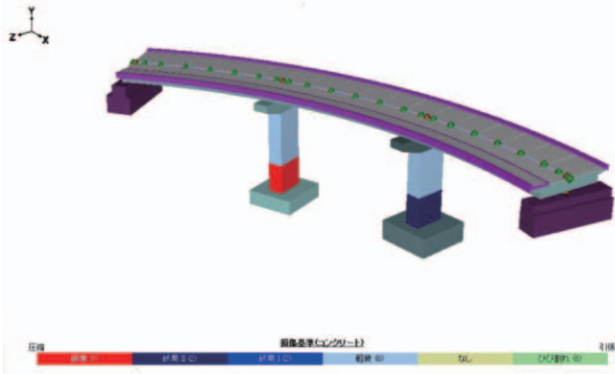
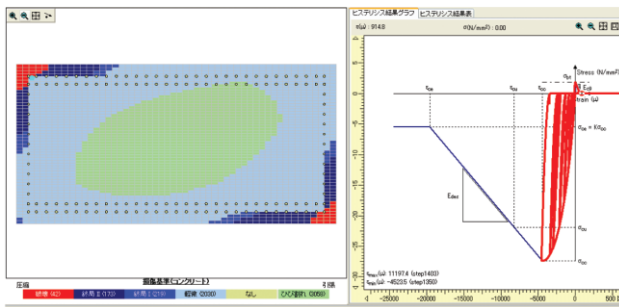
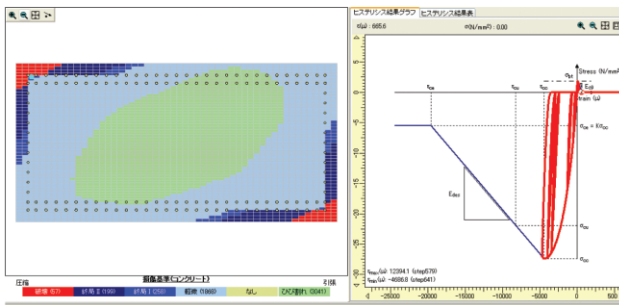


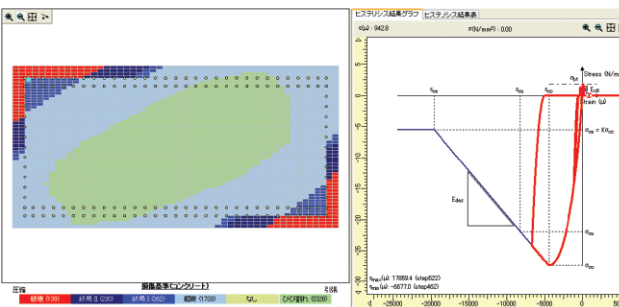
図-11 橋梁全体の損傷結果図



(a) II-II-1 波形による結果



(b) II-II-2 波形による結果



(c) II-II-3 波形による結果

図-12 P1 橋脚断面損傷状況およびコンクリート履歴図

4. まとめ

橋脚に2軸曲げが同時に作用する曲線橋の動的照査について、ファイバーモデルを用いた動的解析を実施した。そして、道路橋示方書に基づく方法で性能照査を行い、応答ひずみに基づく方法で断面の損傷状態について検討した。

その結果、道路橋示方書に基づく方法によると、耐震性能3の「被りコンクリートが部分的に剥落する状態」に対し、相当余裕があると判断された。一方、ひずみに基づく方法では、終局には達していないが、被りコンクリートが部分的に剥落する程度の損傷発生が予想される結果となった。よって、道路橋示方書に基づく方法では、特に2軸曲げが同時に作用する部材・断面において、地震によって生じる損傷状態を十分に評価できない可能性があるものと思われる。

地震時の損傷状態を正確に把握できれば、地震後に必要とされる適切な補強工法・コストを事前に選定することもでき、すると、地震後の利用停止期間の評価も可能となる。防災計画立案にも有益な情報を与えるものと考えている。ファイバーモデルを利用した解析手法は、あらゆる方向への揺れを正しく評価できるという有効性だけでなく、地震時の損傷状態を詳細に把握することも可能になる。ファイバーモデルなどを利用した解析手法の活用が、補強工法選定やライフサイクルコスト評価を通じて、さらなる合理性をもたらすことを期待している。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，平成14年3月
- 2) 星隅順一、運上茂樹、川島一彦、長屋和宏：載荷繰返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法，構造工学論文集，Vol.44A，pp877-888、1998.3