

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

3次元解析による偏心橋脚を有する橋梁 の地震時挙動の評価

(株) フォーラムエイト 大阪支社 支社長 青戸 拡起

1. はじめに

実際の地震動は、水平動や鉛直動が入り交じり、構造物を揺さぶる地震荷重を1方向に限定することは非常に難しい。よって、ここでは、実際の地震動と同じ2方向の水平動を利用した3次元動的解析を実施し、現行の設計で多用される水平1方向地震動による2次元動的解析の結果と比較することにより、3次元動的解析を利用した耐震性能照査の着目ポイントを整理する。

今回は、3次元非線形解析に基づく耐震性能照査の重要性が指摘されはじめている、偏心橋脚を有する直線橋を対象とする。偏心橋脚は、地震時に複雑な挙動が予想されるため、近年、鉄筋が降伏するような大きな変形レベルでの挙動について、実験による検証が数多く行われている。これについては、第1回（'05年11月号）で紹介している。

なお、弊社のUC-win/FRAME(3D)Ver.1.07により、非線形動的解析を実施する。

2. 解析対象と解析モデル

1) 解析対象

図-1、2に示す、鉄筋コンクリート製の偏心橋脚を有する分散構造の直線橋を対象とする。この区間は偏心橋脚が連続する区間で、1区間分を取り出したモデルである。また、この橋脚は、道示Vの地震時保有水平耐力法を満足するように設計されてい

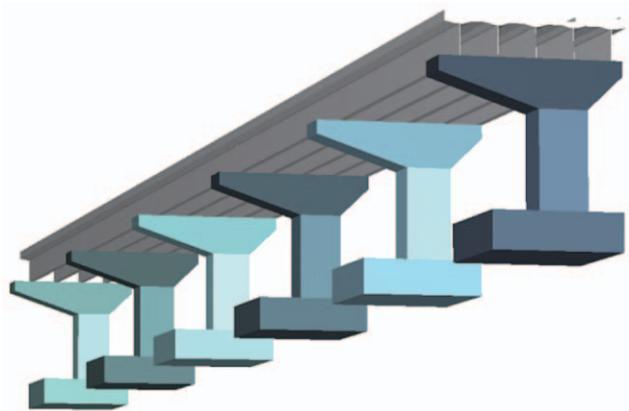


図-1 対象橋梁の概観図

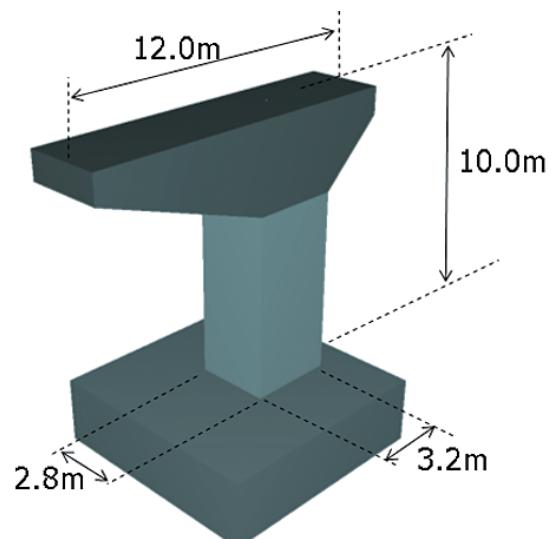


図-2 橋脚の概観図

る。表-1に設計条件と保有耐力の計算結果を示す。

表-1 設計条件と橋脚の諸元（レベル2地震動）

重要度の区分	B種	
地域区分	A地域($C_2=1.0$)	
	橋軸方向	直角方向
保有水平耐力 P_u (kN)	4406	3337
$k_{hc} \cdot W$ (kN)	2433	2465
等価重量 W (kN)	6081	6161
降伏変位 δ_y (mm)	29.5	42.33
終局変位 δ_u (mm)	199.2	338.0
許容塑性率 μ_a	4.834	5.721
基部断面 M_u (kN-m)	44062	52653
初期モーメント M_0 (kN-m)	0	11944
初期変位 δ_0 (mm)	0.0	3.4
橋脚基部から慣性力作用位置までの高さ h (m)	10.0	12.2
残留変位 δ_R (mm)	42.8	110.3
許容残留変位 δ_{Ra} (mm)	100.0	122.0

2) 解析モデル

図-3、4に示すように、骨組み部材により橋梁全体系をモデル化する。

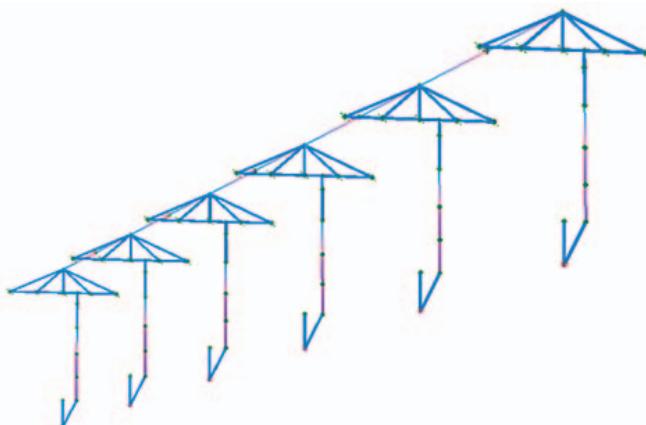


図-3 解析モデル（全体）

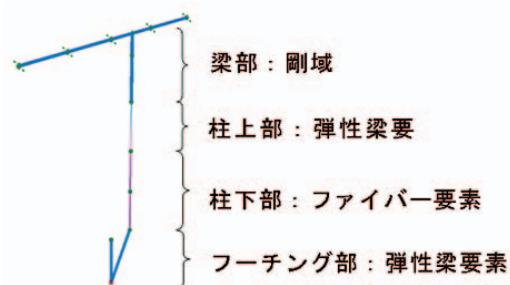


図-4 解析モデル（橋脚）

また、偏心した構造のため、橋軸方向のみに地震動を作用させる動的解析においても、橋脚は2軸曲げが同時に作用する部材となる。よって、塑性化が

想定される橋脚基部については、ファイバー要素を設けることとする。図-5にファイバー要素に用いた材料履歴モデルを示す。

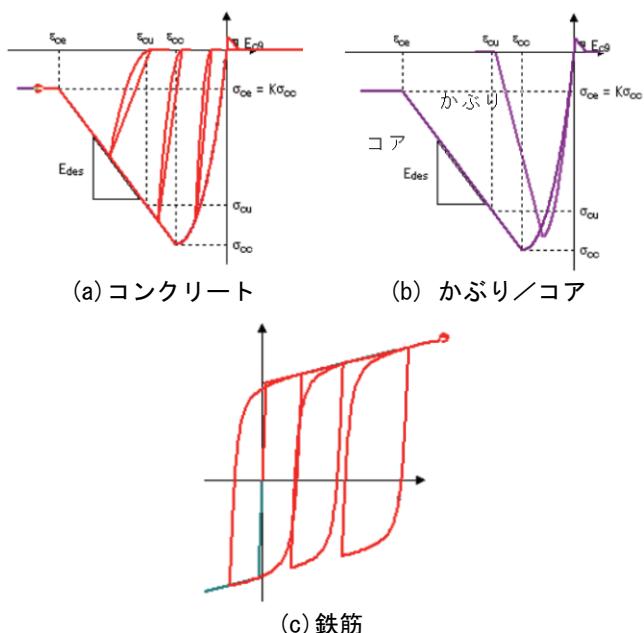


図-5 ファイバー要素に適用する材料モデル

隣接区間の重量を端部の橋脚に付加することで、隣接区間の影響を簡易的に考慮することとする。フーチングの底面は固定とする。

数値解析法は、Newmark- β 法 ($\beta = 1/4$) による時刻歴応答解析により行う。減衰マトリクスは、要素別剛性比例型（初期剛性比例）により算出する。粘性減衰定数は、上部構造に3%、橋脚の弾性梁要素は5%とするが、ファイバー要素はその材料履歴モデルで生じる履歴減衰のみとし、粘性減衰は与えない。また、幾何学的非線形を考慮することにより、P- Δ 効果を取り入れる。

3) 入力地震動

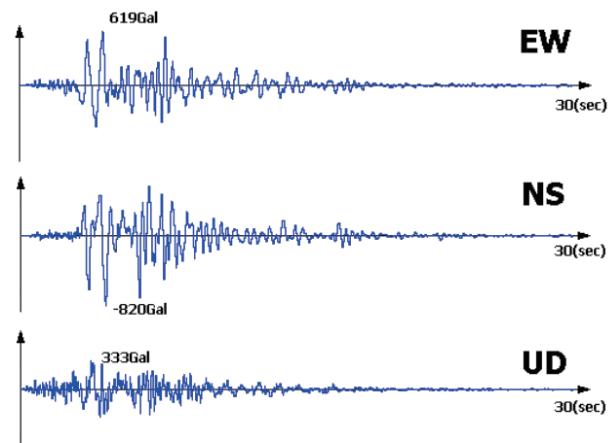


図-6 兵庫県南部地震(1995)の観測波形

兵庫県南部地震（1995）において、神戸海洋気象台で観測された加速度記録を利用する。図-6に、その時刻歴波形を示す。なお、今回の解析では、その水平2方向成分のみを用い、鉛直動は考慮していない。

3. 水平2方向地震動の与え方

1) 地震動の与え方

地震動の与え方について、図-7に示す。橋軸方向と橋軸直角方向に地震動を同時に作用させたCase1と、それを別々に作用させたCase2を考え、これらによる挙動を比較する。



図-7 地震動の与え方

2) 解析結果

図-8に、P2橋脚天端の応答変位のオービット（=軌跡）を示す。Case2に比べ、Case1の最大応答変位が大きくなっている。すなわち、現行設計による評価（=Case2）よりも、実際の地震時（=Case1）にはより大きな応答変位が発生する可能性があるものと考える。

図-9(a)に、P2橋脚偏心方向（=橋軸直角方向）の応答変位の時刻歴変位波形を示す。Caseに関わらず、偏心橋脚特有の、偏心曲げ圧縮側への残留変形

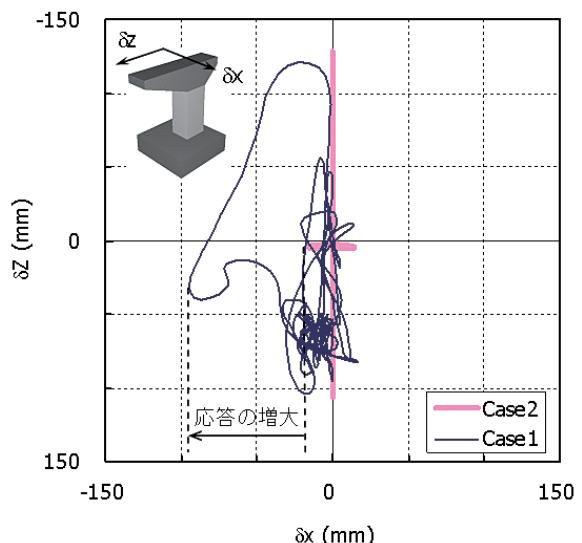
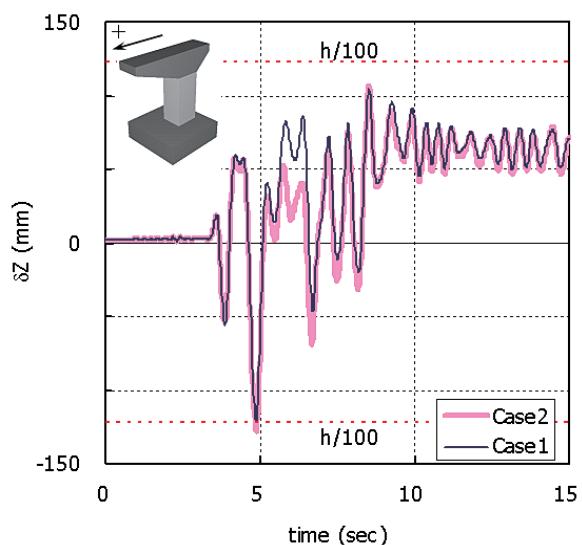
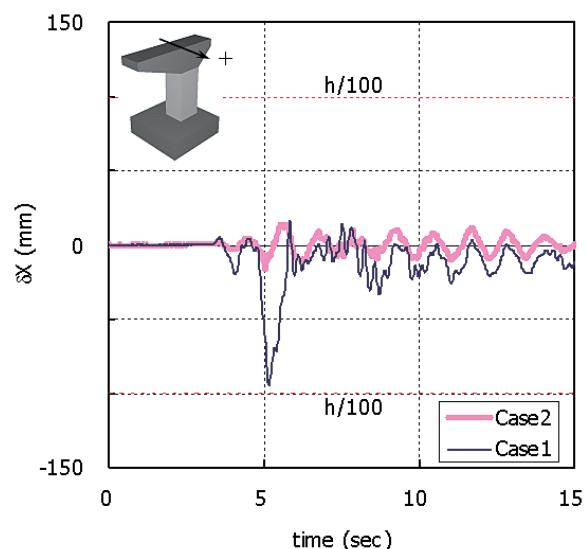


図-8 P2 橋脚の応答変位のオービット



(a) 偏心方向



(b) 偏心直交方向

図-9 P2 橋脚の応答変位

が認められる。図-9(b)に、偏心直交方向(=橋軸方向)の応答変位の時刻歴波形を示す。Case2に比べ、Case1ではその最大応答変位が大きいが、それが発生した後の残留変形も大きくなっている。すなわち、現行設計による評価(=Case2)では、実際の地震時(=Case1)の挙動を十分に捉えきれない可能性がある。

図-10に、Case1の偏心方向への応答変位について、幾何学的非線形の有無による比較を示す。2つの結果はほとんど重なっており、この橋脚の応答については、幾何学的非線形性の影響はほとんど無視できることがわかる。

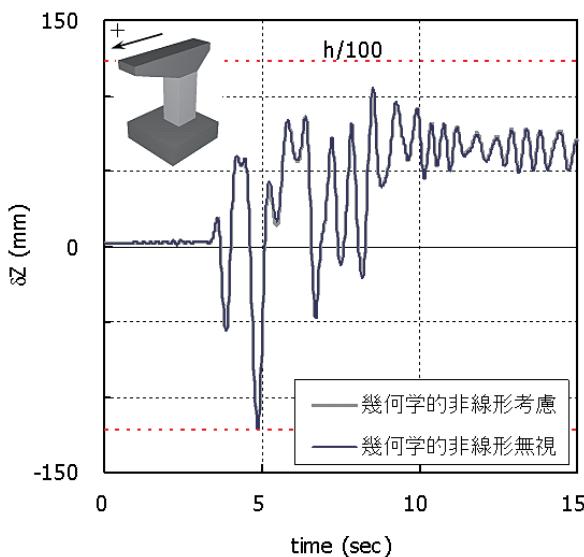


図-10 幾何学的非線形の影響

図-11に、P2橋脚基部におけるコンクリートの最大圧縮ひずみの分布図を示す。Case2では、コアコンクリート内部に終局ひずみを越える箇所($\varepsilon' \geq \varepsilon'_{cu}$)は認められない。しかし、Case1は大きなひずみ($\varepsilon' \geq \varepsilon'_{cc}$)が発生した領域がコアコンクリート内部まで進行しており、また極一部であるが終局ひずみを越える箇所($\varepsilon' \geq \varepsilon'_{cu}$)も確認される。よって、Case1は、復旧性においてより厳しい評価を与えると予想される。なお、道示Vの許容曲率と橋脚基部の最大応答曲率を比較した結果、いずれのCaseも耐震性能2を満足していた。

また、海外には、橋軸方向と橋軸直角方向別々に地震動を作用させて最大応答値(=最大断面力)を得た後、例えば、橋軸方向の設計においては、橋軸方向の最大断面力に橋軸直角方向の最大断面力の何割かを加算したものを設計断面力とする方法がある。すなわち、着目方向の設計において、直交する多方向の影響を取り入れている。

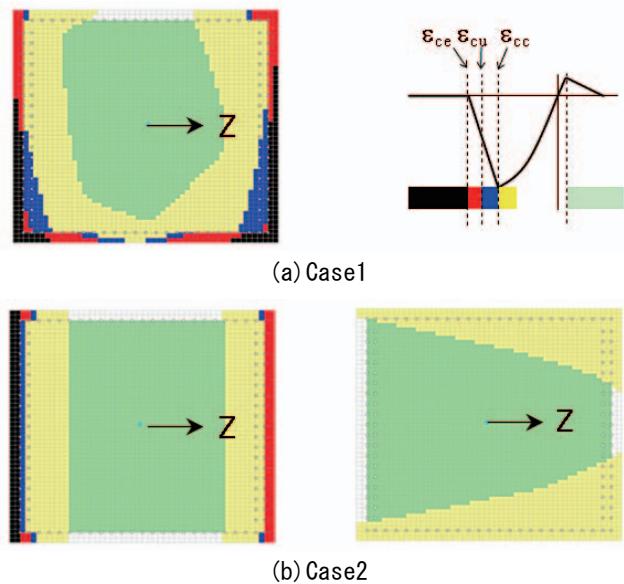


図-11 P2 橋脚基部の最大ひずみの分布図

なお、現行の動的照査に用いられる標準的な時刻歴波形は、設計スペクトルに適合するように振幅調整されたものが多く、既往最大地震の観測波形よりも大きな強度を持つ場合もある。しかし、これらは、直交する多方向の影響を明確に考慮したものではないので、注意が必要である。

4. 水平2方向地震動の入力角度の影響

1) 地震動の作用のさせ方

地震動は方向性を持つため、橋梁の方位、すなわち地震動の入力角度によって、地震時の挙動が異なると予想される。ここでは、図-12に示すように、単純に4つの方位を想定した入力角度の変化を与え、それぞれの解析結果を比較することにする。なお、0度と180度、90度と270度、それぞれの関係は、単純に地震動の正負が入れ替わった状態になる。

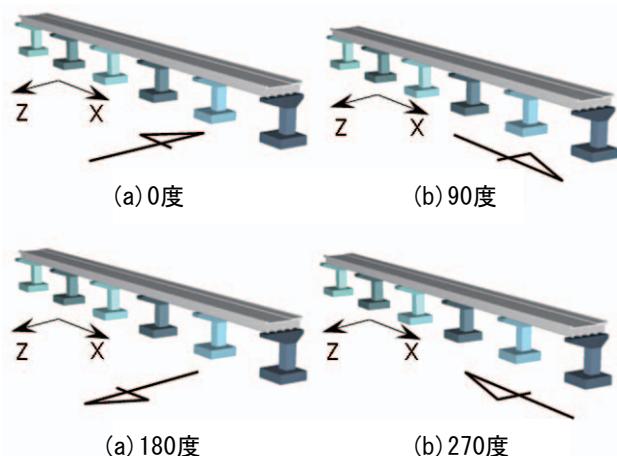


図-12 橋梁の方位の定義

2) 解析結果

図-13に、P2橋脚基部におけるコンクリートの最大圧縮ひずみの分布図を示す。入力角度の違いにより、橋脚基部断面に生じるひずみレベルが大きく異なることがわかる。特に、180度と270度では、コアコンクリート内部の損傷が著しく ($\varepsilon' \geq \varepsilon'_{cu}$, ε'_{ce})、また偏心曲げ圧縮側に偏っている。

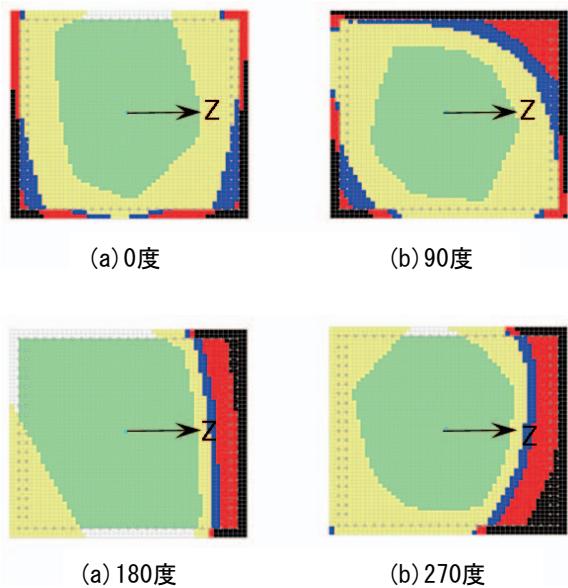


図-13 P2 橋脚基部断面の最大ひずみの分布

図-14に、P2橋脚偏心方向の応答変位の時刻歴波形を示す。同図(a)(b)のいずれからも、最大応答の発生方向と偏心による初期変形の方向が重なる場合(180度と270度)に、残留変形が著しく増大するものと予想される。

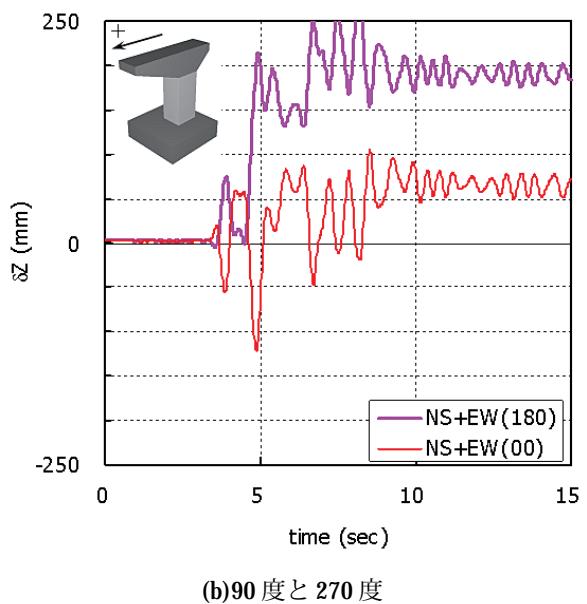


図-14 P2 橋脚の橋軸直角方向の応答変位

5.まとめ

- 今回の対象においては、橋軸方向と橋軸直角方向に地震動を同時に作用させた時、それを別々に作用させた場合に比べ、偏心直角方向 (=橋軸方向)への応答が大きく増大することが確認された。また、橋軸方向と橋軸直角方向に地震動を別々に作用させる場合、互いの方向の挙動を独立に扱うこととなり、実際の地震時の現象と異なっていることが予想される。よって、橋軸方向と橋軸直角方向に地震動を同時に作用させることは、地震時の安全性に対しより正しい評価を与えるものと考える。
- 地震動の正負を反転する (0度→180度、90度→270度) だけで、最大応答が大きく異なることが確認された。今回のモデルが、偏心橋脚を有する非対称構造であるため、その影響が著しいものとなったと予想される。また、偏心方向の応答において、その最大応答が偏心曲げによる初期変形と同じ方向に生じた場合、残留変形が著しく増大すると予想される。よって、方位の与え方 (=地震動の入力角度) が、橋脚の最大応答および残留変形に大きな影響を与えることとなり、複数の入力角度による検討が、地震時の安全性に対し非常に有効であるものと考える。

