

3次元入力地震動の位相極性に着目した構造物の耐震性能評価法の開発

京都大学 ○五十嵐 晃

耐震構造	地震応答	動的応答解析
3次元地震動	応答評価	非線形弾塑性応答

研究の目的

橋梁などの社会基盤構造物の耐震性照査には、簡便な1方向地震作用の仮定よりも、特に複雑な形状を有する構造物等で鉛直地震動の影響が無視できない場合には実際の地震動の多成分（NS, EW, UD）を有する多次元性に基づく時刻歴応答解析による応答評価がより合理的であると考えられる。これを陽に規定した海外の設計基準の場合であっても、入力地震動の設定は、2次元加速度入力波形を多数集めた群を考え、その期待値が全ての方向についての最大応答の大きさである RotD100 スペクトルへの適合を規定しているに留まる。水平2方向地震動には、最大応答の大きさ以外にも方向性の強さや方位に関する強度の広がり（方向パターン）の形状など、地震動の性質を規定する様々な特性が知られているが、これらは評価者の自由に任されているのが現状である。さらに、3成分の地震動（水平2方向+鉛直1方向）を入力として用いて構造モデルの非線形動的解析を行う場合には、3次元地震動の方向性や方向パターンなどの特性の構造物の耐震性能評価への影響については、ほとんど知られていない。

本研究では、こうした多次元の地震動の最大強度以外の方向性や方向パターンを含む性質をどのように指定すれば、実際の構造物の耐震性や性能を適切に評価できるのかを明らかにするための基礎的な分析として、「3次元位相極性」の概念を用いた方法を提案する。構造モデルを用いた非線形時刻歴応答解析の例により、その概念が具体的にどのような影響を及ぼすか、またそれを用いた構造物の応答評価の考え方について検討する。

研究の内容

このような3次元地震動を用いての構造物の性能照査の手順としては、動的応答解析により得られる最大応答値（seismic demand）が設計基準値（seismic capacity）を超えないことを確認することが基本的に想定されるプロセスである。道路橋示方書に代表される各種の橋梁の設計基準では、例えば曲線橋など複雑な動的挙動が想定される形状を有する場合には、標準地震動を様々な方位での入力による照査手法が示されている。3次元の地震

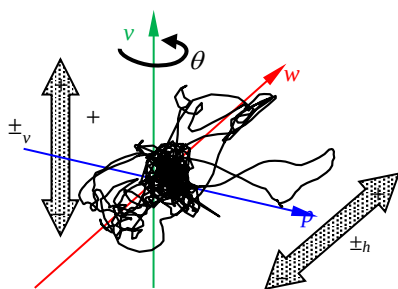
動入力を用いる場合についても、構造設計上の安全を確保するためには、各成分の入力方位を構造物に対して考え得る複数の方位に回転させた時の最大応答値を評価し、基準値を超えない事を確認する手順が妥当である。

本研究では、ここで扱う多次元入力地震動の分析法として「位相極性」に着目する。この特性の意義は、次のように説明される。3次元地震動の全ての入力方向への変化に加えて、与えられた多軸加速度成分波について、正負の反転あるいは反転なしの2つの場合が存在する。

2成分の場合、1つの成分を正負非反転、1つの成分を正負反転として、2次元平面上を原点について回転することで得られる2方向入力群と元の2方向入力群は、互いに鏡像関係にあり、入力方向をどのように変化させても両群の中には互いに一致する2方向入力の組は存在せず、2つに区別されたグループの2次元入力群が生成できる。これらの2つのグループの区別を位相極性（phase polarity）と呼び、2次元地震動の場合は、1成分の正負反転の有無により、2つの位相極性（それぞれ「+」、「-」の記号で表記）が存在する。

3次元地震動に対して考えられる位相極性は、橋梁などの構造物の耐震性能照査を想定すると、水平動2成分の性質と鉛直1成分の性質に特性や構造物への入力としての作用状況に明確な相違が見られることから、水平動の鉛直軸周りの全周 360° の方位回転のみを考え、例えば鉛直軸が傾斜するような座標系の回転は考えない取扱いを仮定する。この時、水平2成分のうち一方成分の符号反転と、鉛直成分の符号反転の2種類を考える。したがって、3次元入力地震動の水平・鉛直成分の符号の正負の組み合わせである++、-+、+-、--の合計4つの位相極性が存在し、構造物の地震応答評価に与える影響を検討する。

最も基本的な状況として、地表基盤面上に設置された線形弾性構造物の仮定を置き、3次元地震動が基盤面に生じた場合の最大地震応答値の理論的評価を行う。線形多自由度系の運動方程式と、固有振動モードへの解のモード分解を起点に最大地震応答値の理論式の導出を行うことで、3次元位相極性がどのように評価に現れるかを検討した。

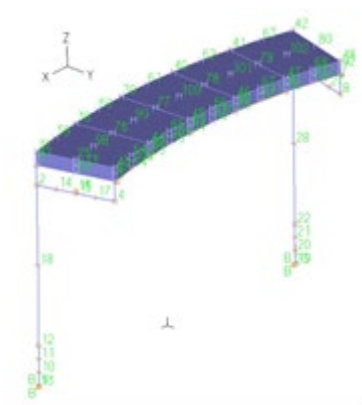


3次元地震動成分と回転・符号反転の組み合わせ

構造物の応答評価において着目する特定の応答量 (Engineering Demand Parameter に相当) として、例えばある構造物上の注目点の特定方向成分の変位、部材断面のひずみ、部材接点間の相対伸縮量などが該当するような、定数ベクトルと時々刻々の応答変位ベクトルの内積によって表現できるとの前提条件を設けた理論式の導出を行った。

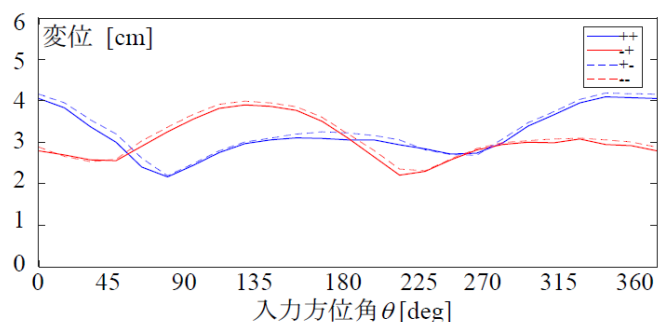
次いで、非対称でかつ鉛直地震動が耐震性能評価に有意な影響を与えるような構造物を想定して簡略な非線形弾塑性復元力を与えた数値モデルを用いて、4つの位相極性について全周方向に回転させた多数の3次元入力地震動に対する時刻歴応答解析を実施した。具体的には、L字型橋脚2本で曲線桁を支持する形式の橋梁モデルを設定した。鉄筋コンクリート橋脚を想定した橋脚部分にはねじり弾性を考慮したはり要素を用いているが、橋脚に2方向相関を持つ非線形弾塑性変位-復元力関係を与えるため、柱部分基部の塑性化を表現するためファイバーはり要素モデルを用いている。

1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台記録での3成分地震動を用いた例を示す。鉛直軸回りの回転は15°刻みで全周を24等分した上で、3次元位相極性の4通り、合計で96セットの3次元入力地震動を作成し、非線形動的応答解析を実施した。逆L字型橋脚の橋軸直角方



曲線桁橋梁数値モデル概要図

向天端変位に関する結果を示す。



3次元位相極性の応答変位-入力方位角関係への影響

同じ入力加速度波形3成分を用いても、応答最大値の評価が位相極性により相違が生じ、位相極性としては4つのうち+-を用いた入力地震動を用いた評価が最大であることがわかる。対象モデルとした逆L字型橋脚の形状配置の場合、地震動の鉛直成分の影響が有意に大きい事が影響していると考えられる。

研究の成果、新発見

- 3次元入力問題では、全ての360°の加振方位の回転を考慮した水平動2成分による最大応答に、鉛直地震動記録のみから算出される2つの固有周期の単振動子の応答の積と、鉛直方向加振に対応する構造物特性の係数を乗じた量を2次元解に加算することで、3次元地震動に対する最大応答値が評価される事を理論的に示した。

- 3次元入力地震動に存在する4種類の位相極性 (水平 $\pm h$ /鉛直 $\pm v = ++, +-, -+, --$) のうち、水平方向の位相極性 ($\pm h$ の符号) の線形弾性構造物の最大応答値への影響は有意に存在するが、鉛直方向の位相極性 ($\pm v$ の符号) の影響は定式化の段階で現れなくなる。

- 固有振動モードが適用できない非線形性を有する構造物モデルにおいても、入力の位相極性による最大応答への影響が生じる上、鉛直成分の位相極性の影響が有意に表れる。

今後の予定

対称で複雑な動特性を持つ構造物の耐震性能照査のための非線形時刻歴応答解析を行う場合、安全側の評価のため、3次元地震動の全ての入力方向のみならず4つの位相極性についての応答解析を行い許容値と比較する考え方を導入する事が考えられる。鉛直成分に起因する位相極性の影響は水平2成分によるものよりも小さい結果となったが、この影響が大きくなる構造物の特性や傾向も今後把握しておく必要があると考えられる。