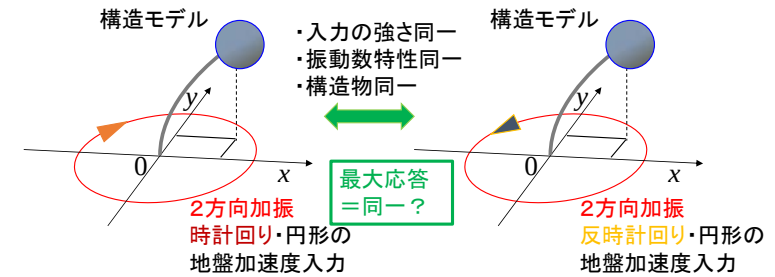


3次元入力地震動の位相極性に着目した構造物の耐震性能評価法の開発

京都大学防災研究所 教授
五十嵐 晃

背景（既往の研究より）



- ・知見：両者の最大応答は**同一ではない**（線形系でも！）
- ・位相極性(Phase Polarity)：2方向加振の場合は**時計回り**／**反時計回り**の区別の**一般化**
- ・異なる最大応答 ← 構造モデルが**非対称**な場合に生じる
 - ・原因の理論的説明
 - ・具体的な相違の評価

1

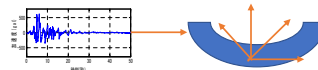
背景：多次元（2方向／3方向）入力

- ・非対称橋梁（曲線橋、偏心モーメントを受ける構造など）の耐震性能の照査
- 橋梁では方向を刻んだ**1方向入力**が一般的（道路橋示方書・同解説）
- －水平面で影響が最も大きくなる地震動の方向を考慮
- －水平2方向の慣性力の影響を独立に考慮してよい（最大方向＋その直角方向）
- －全ての部材に鉛直方向の地震動の影響を考慮するとはしていない（必要な場合は「適切に考慮」）

問題提起：多次元入力時の動的応答が適切に反映された評価になっているか？

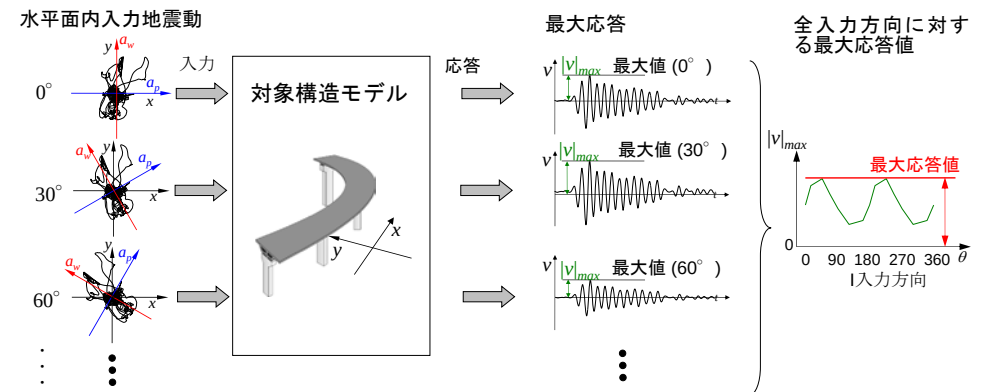
- ・非対称性による剛体回転モードの影響
- ・複数モードの連成
- ・制震ダンパーの回転など

合理的な**3方向入力**に基づく性能照査法の検討



2

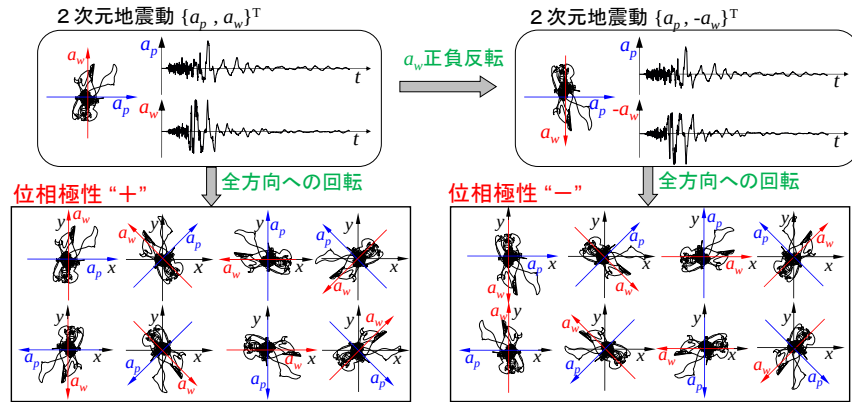
背景：2次元地震動入力の水平面内回転に対する応答の評価



- ・**2次元入力の全入力方向**に対する最大応答値を考える
- ・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

3

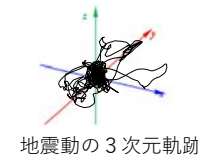
背景：位相極性（phase polarity）の概念



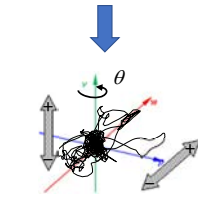
- 上記2つの地震動入力群の要素同士は、どの方向に回転させても一致するものがない → 2つの群の区別＝位相極性
- 水平2次元問題の場合、位相極性は2つ（便宜上“+”“−”と表記）存在

4

研究の概要：3次元地震動入力の場合への拡張



地震動の3次元軌跡



3次元入力の回転／符号反転の組合せ

- 水平2成分の性質と鉛直1成分の性質は、特性や構造物への入力としての作用等の面で相違 → 全ての3次元空間的回転（仰角＋方位角）は考えない
- 回転は鉛直z軸周りの全周360°の方向θのみ考慮
- 符号反転は水平y軸に関するもの、鉛直z軸に関するものの2通りの組み合わせ
- 3次元入力地震動の位相極性は、y軸・z軸成分の符号の正負の組み合わせ++、-+、+-、--の4つが存在
- 全方向に回転した入力地震動のこれらの符号反転が、構造物の地震応答評価に与える影響（理論的分析＋相違の評価）を検討
- 動的解析による非線形弾塑性地震応答に関する検討・調査

5

最大応答評価の定式化のための定義式

- 運動方程式（線形多自由度系）

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = -\mathbf{M}(\mathbf{1}_x a_x(t) + \mathbf{1}_y a_y(t) + \mathbf{1}_z a_z(t))$$

- 構造物モデル応答のモード分解

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{i=1}^N \boldsymbol{\phi}_i q_i(t) \quad \ddot{q}_i(t) + 2h_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = -\left\{ \begin{matrix} \beta_i^x & \beta_i^y & \beta_i^z \end{matrix} \right\} \begin{Bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \\ a_z(t) \end{Bmatrix}$$

i次モードのx,y,z成分加振に対する刺激係数

- 3次元地震動のz軸周りの回転

$$\begin{Bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \\ a_z(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_p(t) \\ a_w(t) \\ a_v(t) \end{Bmatrix}$$

- 応答評価値の定義

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{f}^T \mathbf{u}(t)$$

6

最大応答評価の定式化の誘導（1）

- 3次元位相極性に対応する符号反転を含む運動方程式

$$\ddot{q}_i(t) + 2h_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = -\left\{ \begin{matrix} \beta_i^x & \beta_i^y & \beta_i^z \end{matrix} \right\} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_p(t) \\ \pm_h a_w(t) \\ \pm_v a_v(t) \end{Bmatrix}$$

水平成分正負の複号
鉛直成分正負の複号

- 構造物モデル応答のモード分解

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{i=1}^N \left\{ \begin{matrix} \beta_i^x & \beta_i^y & \beta_i^z \end{matrix} \right\} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_i^p(t) \\ \pm_h r_i^w(t) \\ \pm_v r_i^v(t) \end{Bmatrix} \boldsymbol{\phi}_i$$

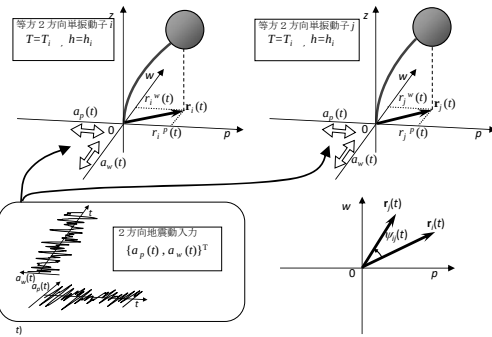
$$= \sum_{i=1}^N \left[\left(\beta_i^x \cos \theta + \beta_i^y \sin \theta \right) r_i^p(t) \pm_h \left(-\beta_i^x \sin \theta + \beta_i^y \cos \theta \right) r_i^w(t) \pm_v \beta_i^z r_i^v(t) \right] \boldsymbol{\phi}_i$$

ここに

$$\begin{aligned} \ddot{r}_p(t) + 2h_i \omega_i \dot{r}_p(t) + \omega_i^2 r_p(t) &= -a_p(t) & \ddot{r}_v(t) + 2h_i \omega_i \dot{r}_v(t) + \omega_i^2 r_v(t) &= -a_v(t) \\ \ddot{r}_w(t) + 2h_i \omega_i \dot{r}_w(t) + \omega_i^2 r_w(t) &= -a_w(t) \end{aligned}$$

7

最大応答評価の定式化の誘導（２）



・ 応答評価値の表現

$$v(t) = \sum_{i=1}^N \left[(\beta_i^x \cos \theta + \beta_i^y \sin \theta) r_i^p(t) \pm_h (-\beta_i^x \sin \theta + \beta_i^y \cos \theta) r_i^w(t) \pm_v \beta_i^z r_i^z(t) \right] (\mathbf{f}^T \boldsymbol{\Phi}_i)$$

$$= \left\{ \sum_{i=1}^N (s_i^x r_i^p(t) \pm_h s_i^y r_i^w(t)) \right\} \cos \theta + \left\{ \sum_{i=1}^N (s_i^y r_i^p(t) \mp_h s_i^x r_i^w(t)) \right\} \sin \theta + \left\{ \sum_{i=1}^N \pm_v s_i^z r_i^z(t) \right\}$$

- ・ 構造モデル係数の導入
 $s_i^x = \beta_i^x (\mathbf{f}^T \boldsymbol{\Phi}_i)$, $s_i^y = \beta_i^y (\mathbf{f}^T \boldsymbol{\Phi}_i)$, $s_i^z = \beta_i^z (\mathbf{f}^T \boldsymbol{\Phi}_i)$

- ・ Cauchy-Schwarzの不等式による最大値評価

$$\mathbf{d} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N (s_i^x r_i^p(t) \pm s_i^y r_i^w(t)) \\ \sum_{i=1}^N (s_i^y r_i^p(t) \mp s_i^x r_i^w(t)) \\ \sum_{i=1}^N (\pm_v s_i^z r_i^z(t)) \end{array} \right\}, \quad \mathbf{e} = \left\{ \begin{array}{l} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 1 \end{array} \right\}$$

$$|\mathbf{d} \cdot \mathbf{e}| \leq \|\mathbf{d}\| \|\mathbf{e}\| \text{ より}$$

$$\max_{\theta} \max_t |v(t)|^2 = 2 \max_t \|\mathbf{d}\|^2$$

$$= 2 \max_t \left[\sum_{i=1}^N (s_i^x r_i^p(t) \pm_h s_i^y r_i^w(t)) (s_i^x r_i^p(t) \pm_h s_i^y r_i^w(t)) \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (s_i^y r_i^p(t) \mp_h s_i^x r_i^w(t)) (s_j^y r_j^p(t) \mp_h s_j^x r_j^w(t)) \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\pm_v s_i^z r_i^z(t)) (\pm_v s_j^z r_j^z(t)) \right]$$

8

最大応答評価の定式化の誘導（３）

- ・ 構造係数成分とモード応答成分の積分分解への変形

$$\max_{\theta} \max_t |v(t)|^2 = 2 \max_t \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (s_i^x s_j^x + s_i^y s_j^y) (r_i^p(t) r_j^p(t) + r_i^w(t) r_j^w(t)) \right. \\ \left. \pm_h \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (s_i^x s_j^y - s_i^y s_j^x) (r_i^p(t) r_j^w(t) - r_i^w(t) r_j^p(t)) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N s_i^z s_j^z r_i^z(t) r_j^z(t) \right]$$

- ・ ベクトルの内積・外積を用いた表現

$$\max_{\theta} \max_t |v(t)| = 2 \max_t \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{s}_j) (\mathbf{r}_i(t) \cdot \mathbf{r}_j(t)) \pm_h \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\mathbf{s}_i \times \mathbf{s}_j) \cdot (\mathbf{r}_i(t) \times \mathbf{r}_j(t)) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N s_i^z s_j^z r_i^z(t) r_j^z(t)}$$

位相極性により応答値が変化する原因 鉛直成分の符号の影響が相殺して複合が消える

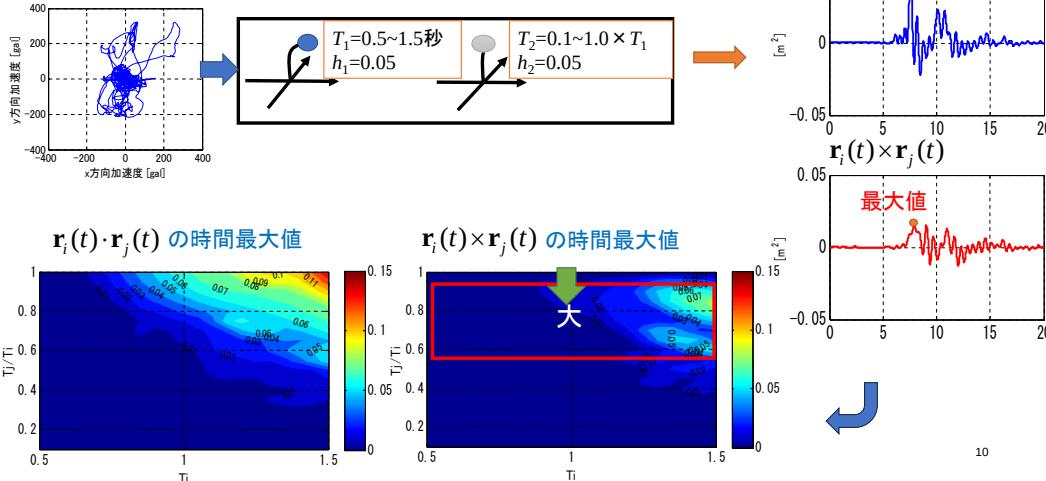
ここに

$$\mathbf{r}_i(t) = \begin{Bmatrix} r_i^p(t) \\ r_i^w(t) \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{s}_i = \begin{Bmatrix} s_i^x \\ s_i^y \\ 0 \end{Bmatrix} = (\mathbf{f}^T \boldsymbol{\Phi}_i) \begin{Bmatrix} \beta_i^x \\ \beta_i^y \\ 0 \end{Bmatrix}$$

9

（参考） 2方向地震動の評価の計算例（既往研究）

例：1995年兵庫県南部地震 東神戸大橋記録



10

3次元問題に関する新たな知見

- ・ 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つのモード固有周期 T_1, T_2 の単振動子の応答の積（ベクトル内積・外積）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加算することで、3次元地震動に対する応答値が評価される。
- ・ 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）により線形弾性構造物の最大応答値への影響が明示されるのに対し、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キャンセルされ現れなくなる。

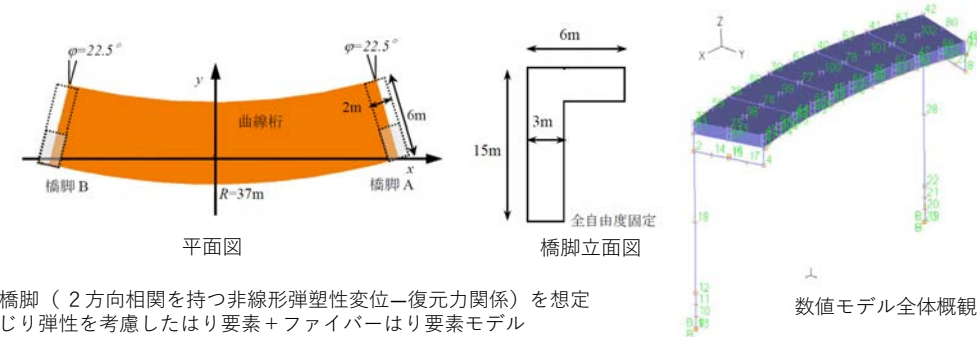
11

弾塑性非線形構造モデルの応答数値解析

- 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非線形弾塑性復元力を与えた簡略化構造モデルを用いて、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
- 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、線形弾性構造物に対する理論式では現れなかった鉛直方向入力成分の符号の影響を検討

計算対象モデル

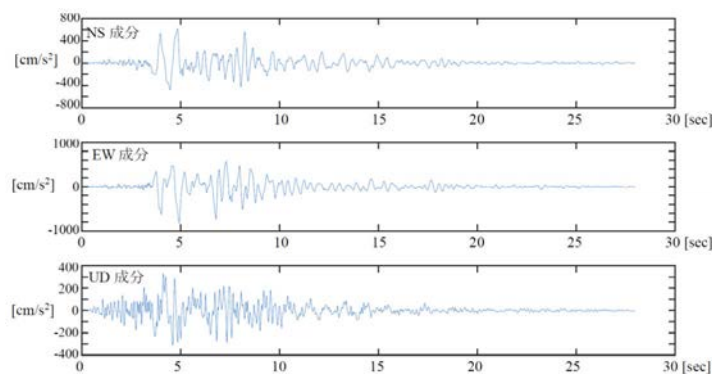
- 逆L字型橋脚2本（橋脚A、橋脚B）を有する曲線桁橋モデル



- ・ RC橋脚（2方向相関を持つ非線形弾塑性変位－復元力関係）を想定
- ・ ねじり弾性を考慮したはり要素＋ファイバーはり要素モデル
- ・ コンクリート：一軸応力－ひずみ関係＋鉄筋：バイリニア構成則
- ・ 曲線桁：近似剛体モデル（水平・鉛直方向質量＋3回回転慣性モーメント）
- ・ 支持条件：橋脚A上固定＋橋脚B上移動支承条件

入力地震動

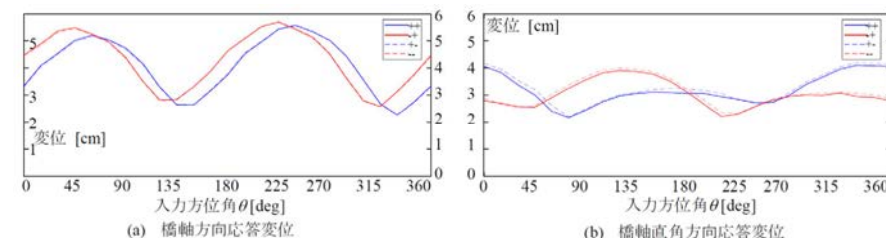
- 1995年兵庫県南部地震：JMA神戸記録(EW, NS, UD)



- ・3次元入力地震動：96セット
ー鉛直軸回り回転：15° 刻み24等分
- ー3次元位相極性：4つ（++、+-、-+、--）
- ・着目応答量：橋脚A天端変位応答（橋軸方向成分、橋軸直角方向成分）

計算結果

- 橋脚最大応答変位-入力方位角関係の3次元位相極性による影響



位相極性	橋軸方向最大応答 [cm]	橋軸直角方向最大応答 [cm]
++	5.57	4.10
+-	5.69	3.91
+ -	5.58	4.19
— —	5.71	4.00

橋軸方向応答

- ・鉛直成分の位相極性が追加されたことによる効果
(++と+-の相違、-+と--の相違)は限定的

橋軸直角方向応答

- ・ α を用いた入力地震動を用いた動的応答解析に基づく評価がもっとも重要
- ・ 橋軸方向応答に比べ、鉛直成分の位相極性が応答に与える影響が有意に大きく表れる
- ・ 理由：地震動の鉛直成分の影響が橋軸方向応答よりも橋軸直角方向応答の方が大きいため

得られた主な知見

- 3次元位相極性の影響は、線形弾性構造物を仮定して固有振動モードのベアを通じて応答値が決定される事を示す理論的な評価式が得られた
- 計算結果によれば、対象構造物の特性によっては多次元地震動入力、元になる入力加速度が同じであっても、位相極性に依じて応答評価に相当な影響を与える
- 数値計算によれば非線形性を有する構造物モデルにおいては、材料非線形性や幾何学的非線形性等を考慮した非線形構造系でも、入力の位相極性による最大応答への影響が同様に生じる
- 非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に非線形時刻歴応答解析を行う状況では、3方向地震動を入力として用いる場合は、安全側の評価のため、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、いずれかのうち大きい応答値を許容値と比較する考え方を導入する必要性が高い。
- 鉛直成分に起因する位相極性の符号の影響は水平2成分によるものと比べると小さい影響となる結果となったが、この影響が大きくなる場合についても今後把握しておく必要があると考えられる