

2 方向地震動の Phase Polarity と曲線橋の地震応答への影響の分析

京都大学防災研究所 正会員 ○五十嵐 晃
三井住友建設(株) 正会員 儀久 昂

1. はじめに

道路橋の耐震性能を確認する目的のためには、多次元性を持つ地震動に対する地震応答が本来着目すべき量であるのに対し、設計手順としては構造モデルに対して 1 方向地震動を入力した時の動的応答が用いられている。しかし、近年積極的に導入されている免震・制震橋梁において、応答の多方向性が顕著で、かつ曲線橋のような非対称の線形を有する橋梁、ダンパー配置が非対称性を有する橋梁においては、このような従来の 1 方向地震動入力による耐震性能照査を正当化する仮定のいくつかが成立しなくなる。このような橋梁においては、水平 2 方向入力に基づく耐震性能照査がより合理的であり、その手順や手法の確立が重要と考えられる。水平 2 方向入力によるこうした非対称性を有する構造物の動的応答評価においては、1 方向入力による応答解析では現れない新たな性質や問題が現れ、耐震性能照査においても考慮する必要があると考えられる。ここでは、2 方向入力の位相極性 (Phase polarity) と、構造物応答への影響に関する理論的定式化と数値計算例について述べる。

2. 2 方向入力に関する基本概念

水平 2 方向入力を用いた非線形動的解析に基づく耐震性能を照査する状況を仮定する。ある地点に入力される水平 2 方向地震動を x 成分・ y 成分で与えた時、水平面上の 0° から 360° までの様々な方位角で x - y 座標系を設定した地震動を考えることができる。それぞれの場合に構造モデルに生じる応答値から最大値を求め、全入力方位角 (入力方向) の中で最大値が許容値を下回ることを確認することは、入力方向に関して最もクリティカルな場合で性能要求を満たすことを確認していることになる。このような最大応答値の概念を「全方向 2 方向入力」による応答と呼ぶこととする。概念図を図-1 に示す。

入力に用いる地震動の直交成分のうち、一方の成分のみの正負符号を反転した地震動を考える。両者は鏡像の関係にある。このような 2 つの 2 方向地震動を区別する特性を「位相極性」と呼ぶこととする。位相極性が異なっても、各々の加速度波形の応答スペクトルは同一であり、構造物の応答あるいは地震作用の大きさはいずれの位相極性を選んでも変わらないように思われるが、実際に動的応答解析を実施すると応答最大値が異なる事例が報告されている。ここでは、この相違が生じ得るメカニズムを線形弾性構造物応答のモード分解を用いて説明する。

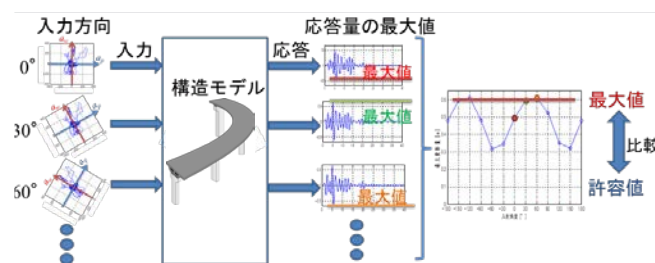


図-1 全方向 2 方向入力問題

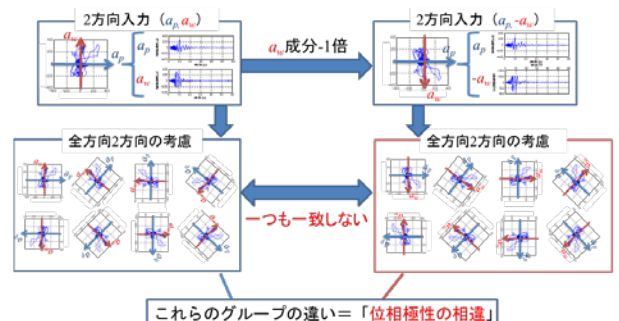


図-2 2 方向入力の位相極性の概念

3. 定式化と理論的考察

前述の全方向 2 方向入力に対する応答評価は、次式で表せる事が示される。

キーワード 耐震性能照査, 2 方向入力, 2 方向応答, 曲線橋, ダンパー

連絡先 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所 都市耐水研究領域 TEL 0774-38-4137

$$\max_t \max_{\theta} |v(t)|^2 = \max_t \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\boldsymbol{\psi}_i \cdot \boldsymbol{\psi}_j) (\mathbf{r}_i(t) \cdot \mathbf{r}_j(t)) \pm \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\boldsymbol{\psi}_i \times \boldsymbol{\psi}_j)_z (\mathbf{r}_i(t) \times \mathbf{r}_j(t))_z \right] \quad (1)$$

ここに、 t は時間、 θ は入力方向を表す角度、 $v(t)$ は着目する構造物の応答量（後述）、 $i, j=1, 2, \dots, N$ は構造系のモード次数である。 $v(t)$ は次式の形で表現される量とする。

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{f} \cdot \mathbf{u}(t) \quad (2)$$

ここに $\mathbf{u}(t)$ は多自由度系としての応答値ベクトル、 $\mathbf{f}$ は着目量を表す係数ベクトルである。これを用いて式(1)中の係数ベクトル $\boldsymbol{\psi}_i$ は

$$\boldsymbol{\psi}_i = \boldsymbol{\gamma}_i (\mathbf{f} \cdot \boldsymbol{\phi}_i) \quad (3)$$

となる。 $\boldsymbol{\gamma}_i$ は i 次モードの刺激係数ベクトル、 $\boldsymbol{\phi}_i$ はモード形ベクトルである。 $\mathbf{r}_i(t)$ は i 次モードの固有周期と減衰定数を有する等方な 1 質点振動子に 2 方向地震動を入力した時の変位応答ベクトルである。式(1)右辺の複号は、前述の 2 つの位相極性に対応する。

式(1)の表現式を検討すると、求める応答量は 2 つのモード i, j に対応する 2 つの等方 1 質点振動子の応答ベクトルの間の内積 $\mathbf{r}_i(t) \cdot \mathbf{r}_j(t)$ 及び外積 $(\mathbf{r}_i(t) \times \mathbf{r}_j(t))_z$ (それぞれ「ドット項」および「クロス項」と呼ぶ) と、各々に対応する構造係数により決まることが分かる。この表現式により 1 方向入力と 2 方向入力および位相極性の影響について次の事が示される。(1) 1 方向入力と 2 方向入力の相違は、右辺第 2 項のクロス項の有無に帰着する (2) 2 つの位相極性の異なる 2 方向入力に対する応答の差は、クロス項を含む第 2 項で表される (3) 2 つの位相極性の 2 方向入力のうち一方は必ず 1 方向入力よりも大きな応答を示す (4) 2 方向入力のクロス項の影響の大きさは、クロス項の構造係数の大小により決定される。構造物の非対称性が大きくなるほど 2 方向入力の影響が大きくなることが説明される。

4. 数値計算例

図-3 に示すように、ゴム支承およびダンパーを用いた曲線桁橋の簡易化モデルを対象とした数値解析を行った。剛体とみなした曲線桁を等方なゴム支承を介して 2 本の橋脚で支持している。橋脚は桁軸方向が弱軸、その直角方向を強軸として剛性が異なるものとしている。橋脚と曲線桁端の間に設置したダンパーは、右側ダンパーのクロス項の構造係数がほぼ最大となる方向を算出して設置した。

入力として 1995 年兵庫県南部地震東神戸大橋記録（図-4）を用いた例を示す。ドット項およびクロス項を様々な i 次、 j 次モードの固有周期の組合せについて算出した結果を同図に示しているが、クロス項は固有周期の比が 0.8 前後で大きくなる傾向は、多数の地震動記録でも共通してみられた。

東神戸大橋記録入力に対する、右側のダンパーのストローク変位最大値と、入力方向の関係を図-5 に示す。各々の成分 a_1, a_2 を 1 方向入力とした場合、2 つの位相極性の場合 $[a_1, a_2]$ と $[a_1, -a_2]$ についての結果を、ダンパーの付加減衰をゼロとして算出している。位相極性の異なる全方向 2 方向入力で 1.5 倍程度の応答の相違が生じている。

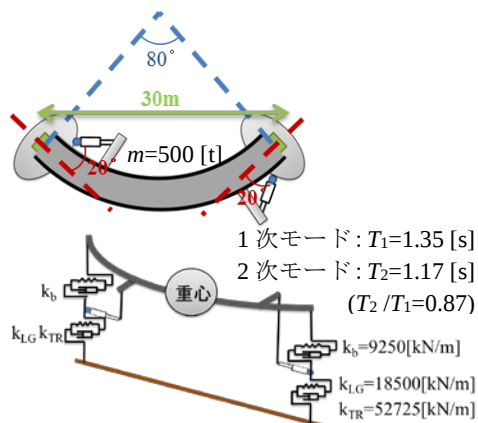


図-3 ゴム支承およびダンパーを設置した曲線桁橋のモデル

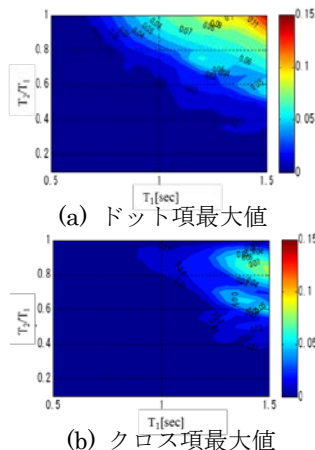


図-4 東神戸大橋記録の 2 方向入力としての特性

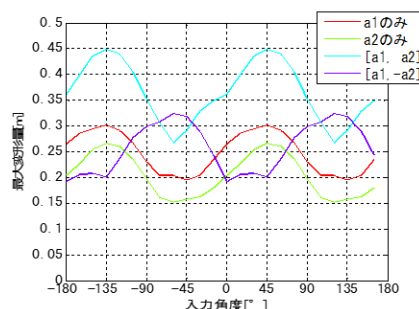


図-5 右側ダンパー変位応答最大値と入力方向の関係