

京都大学大学院 学生員 ○井上 和真 正会員 五十嵐 晃 正会員 古川 愛子  
 オイレス工業 正会員 宇野 裕恵 JIP テクノサイエンス 正会員 松田 宏

1. 背景

橋梁のレベル 2 地震動に対する目標耐震性能を経済的に確保する技術として、従来は主に耐震補強において用いられてきた制震を多径間連続橋の免震手法と併せて積極的に取り入れた、免制震橋梁の形式が検討されている。我が国では地理的な制約のため橋長の長い橋は曲線橋となることが多く、このような免制震橋梁の動的応答特性は複雑なものとなる。時刻歴応答解析により道路橋の動的耐震性能照査を行う場合、1 方向の照査用地震動を様々な角度で入力する照査法が一般的に用いられている。しかし、免制震橋梁は免震支承や制震ダンパーの非線形性、制震ダンパーの水平面内の回転挙動など、曲線橋としての橋梁の地震時挙動は水平 2 次元的に複雑な挙動を示す。また、3 次元性を持つ実際の地震動入力下で生じる水平 2 次元的な応答の効果は、従来の 1 方向入力による照査では適切に評価されないおそれがある。そこで、免制震橋梁の 2 次元的な挙動の動的耐震照査を行うための水平 2 方向地震動を、規定された照査用スペクトルに基づいて作成する考え方を提案するとともに、その妥当性および免制震橋梁の応答の 2 次元性の影響を検討した。

2. 提案手法の考え方とヒルベルト変換による相補直交成分波の作成

1 方向入力を想定した照査用スペクトルが与えられるものとして、次の 2 つの性質を同時に満たす 2 方向入力地震動を照査用入力として考える。

- ① 2 方向入力地震動の各々の直交成分は照査用スペクトルに適合している
- ② 2 方向入力地震動の 2 方向応答スペクトルが照査用スペクトルに適合している

ここに、2 方向応答スペクトルを、様々な固有周期を持つ等方な 2 次元線形弾性 1 質点振動子の与えられた 2 方向入力に対する水平 2 次元応答の動径方向

最大値  $S_{Rd}$  と、固有周期の関係と定義する。このような性質を持つ 2 方向入力地震動は、構造物の 2 方向合成変位などの応答値の照査については 1 方向入力と同等の強さを持ち、その中で 2 次元性の最も強い入力と考えられる。

このような性質を満たす 2 方向地震動を作成する方法として、以下の手法を考える。照査用スペクトルに適合した照査用地震動波形が与えられているものとしてこれを標準波と呼ぶこととする。標準波のヒルベルト変換で定義される「相補直交成分波」を計算し、標準波と相補直交成分波を 2 方向成分とすれば、上記の 2 つの条件を満たすと推測される。

例として、道路橋示方書におけるレベル 2 タイプ II の地震動の III 種地盤用 1 の波形（加速度波形 II-III-1）を  $x$  軸、その相補直交成分波を  $y$  軸入力とした場合の加速度軌跡を図 2 に示す。作成された 2 方向入力は円的な挙動を示す。固有周期 1.5 秒の等方性の 1 質点 2 自由度の線形バネマスモデルに水平 2 方向入力を行い、変位応答軌跡を示したものが図 3 である。図中の緑線の円は 1 方向入力最大応答値を半径とする円であり、入力地震動の方向性が小さい事、および 2 方向応答の動径方向最大応答値と 1 方向入力の最大応答値がほぼ等しいことを示している。

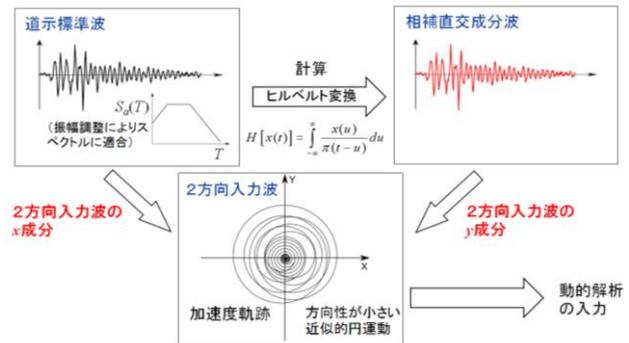


図 1 提案手法の概念図

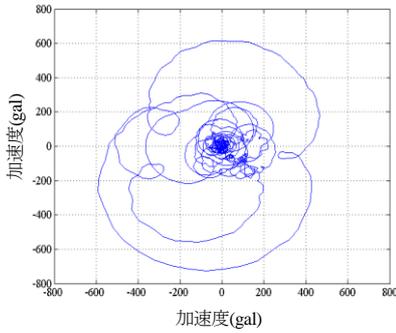


図2 Type II-III-1 加速度  
オービット

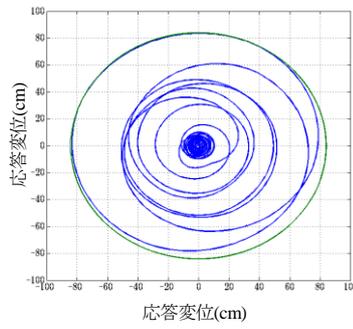


図3 応答のオービット

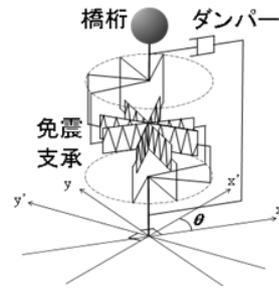


図4 免制震橋梁モデルと  
地震動の入力方向角

### 3. 免制震橋梁モデルによる水平2方向入力地震動の 検討

免制震橋梁の動的照査を想定し、橋桁、免震支承、制震ダンパーで構成される系を図4に示す。1質点弾塑性モデルによりモデル化し、提案した水平2方向入力の検討を行った。免震支承は水平2方向入力の応答に相関を持つMSS (Multiple Shear Spring) 要素を、ダンパーは平面内軸回転を考慮した摩擦型モデルとし、ダンパーの降伏荷重は橋桁の重量の0.2倍とした。このモデルの固有周期は1.9秒であり、免震支承のせん断ひずみ250%時の等価剛性を用いて固有周期を算出した。なお、モデルの固有周期の算出にあたり、ダンパー荷重は考慮していない。1方向入力を様々な方向角 $\theta$ で入力したときの最大応答変位、提案手法の2方向入力の $x$ 軸方向を $\theta$ で入力したときの最大応答変位を計算した。図5、図6にI-III-1を標準波として用いた場合、図7、図8にII-III-1を標準波として用いた場合の最大応答値(支承の合成変位、ダンパー変位)と入力方向の関係を示す。タイプIの地震動のケースでは、支承合成変位、ダンパー変位ともに、提案2方向入力手法による最大応答値は入力方向に関わらずほぼ平均値(赤)まわりの値を示し、動的応答の評価を妥当に行うことができるものと考えられる。これに対しタイプIIの地震動の場合、支承合成変位は同様にほぼ平均値まわりの値により評価できるものの、ダンパー変位は2方向入力では1方向入力よりも大きな応答を示す上、最大応答のばらつきが大きくなる傾向を示した。タイプIIの地震動では、2次元性の影響が大きいことを示す。これは、タイプIIの地震動の方がタイプIの地震動よりも2次元性の影響が大きいことを示している。

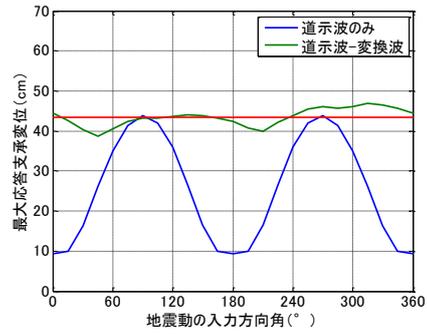


図5 支承合成変位 (タイプ I-III-1)

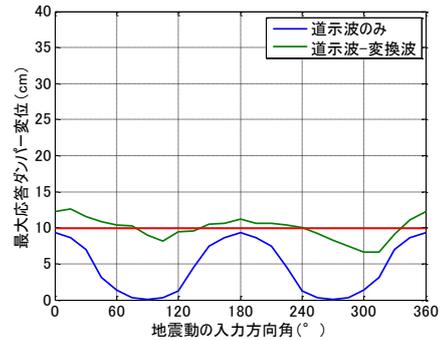


図6 ダンパー変位 (タイプ I-III-1)

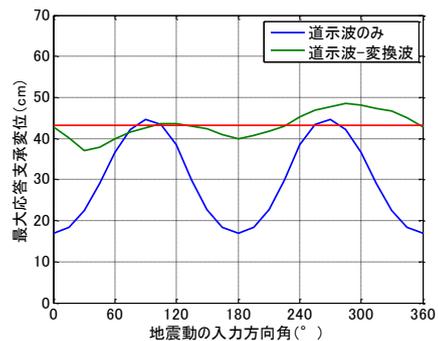


図7 支承合成変位 (タイプ II-III-1)

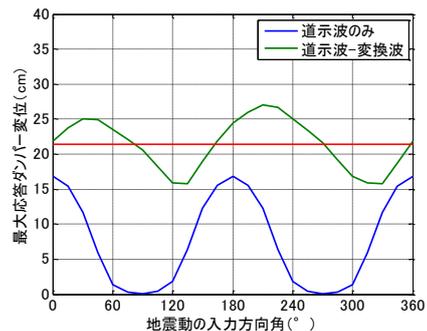


図8 ダンパー変位 (タイプ II-III-1)