

標準波一相補直交成分波の組合せによる 橋梁の耐震照査用水平 2 方向入力地震動

五十嵐 晃¹・井上 和真²・古川 愛子³・宇野 裕恵⁴・松田 宏⁵

¹京都大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 准教授 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: igarashi.akira.7m@kyoto-u.ac.jp

²大成建設株式会社 (〒160-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail: inukzm00@pub.taisei.co.jp

³京都大学 大学院工学研究科都市社会工学専攻 准教授 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: furukawa.aiko.3w@kyoto-u.ac.jp

⁴オイレス工業株式会社 免制震事業部 部長 (〒108-0075 東京都港区港南 1-6-34)

E-mail: h.uno@oiles.co.jp

⁵JIPテクノサイエンス株式会社 (〒103-0025 東京都中央区茅場町1-2-5)

E-mail: mtd@cm.jip-ts.co.jp

橋梁の時刻歴応答解析による 2 方向性を考慮した耐震性能照査を行うためには、規定された照査用スペクトルに適合し、特性が明確な 2 次元性を持つ 2 方向入力地震動時刻歴波形を用いることが望ましいと考えられる。このような性質を持つ 2 方向入力地震動を、相補直交成分波と呼ぶ概念を用いて作成する方法を提案した。道路橋示方書の標準波に基づき提案手法により作成した 2 方向入力、各々の直交成分が照査用スペクトルに適合しており、かつ 2 方向弾性 1 自由度系に対し固有周期によらず 1 方向入力のスペクトルと整合する強度を持つという条件を十分な精度で満たしていることを示した。免制震橋梁の簡易モデルを用い 2 方向地震動を用いた動的応答計算により確認できると考えられる特徴的な応答性状等の検討を行い、地震動のタイプにより表れる入力の 2 方向性による影響の算出例を示した。

Key Words : Bi-directional ground motion, spectrum-compatible accelerogram, polarization filter, Hilbert transform, seismic design, bridge, seismic isolation, seismic damper

1. はじめに

橋梁をはじめとする構造物に作用する地震動は、本質的に水平面の 2 次元と鉛直方向を合わせた 3 次元的な現象であり、構造物の耐震性能に関わる構造物の動的応答もまた 3 次元的である。しかしながら橋梁の耐震設計の場合、鉛直動を含む 3 次元的な応答が耐震性能に顕著に影響する可能性のある長大橋を除いては、鉛直地震動の影響は支配的ではなく専ら地震動の水平成分が考慮される。さらに、我が国における道路橋示方書¹⁾に代表されるように、一般橋の耐震性能照査における考え方では、考慮される水平地震力を橋軸方向・橋軸直角方向の各々の 1 方向に独立に橋に作用させ、耐震性能を満足することを照査する方法が採用されている。

その一方で、構造物に 2 方向に同時に地震動が作用した場合の挙動は、特に上述の耐震設計およ

び照査法との関係から重要性が高い課題として検討されている。例えば、矩形断面 RC 橋脚に 2 方向に同時載荷を行った場合、損傷が 1 方向載荷よりも大きくなることが報告されている²⁾。2 方向地震力による橋脚の動的な弾塑性応答や損傷に関しても、ハイブリッド実験^{3,4)}、大型振動台実験⁵⁾等により 2 方向地震力の影響が検討されている。

このように、構造物の地震時挙動という観点からは、2 方向入力の構造物への影響は 1 方向入力とは異なる（大きくなる）ことが推察され、実験的にも検証されているものの、耐震設計体系の中で 1 方向入力が広く用いられてきた背景の一つとして、設計における照査用の入力が地震応答スペクトルとして与えられる際の考え方がある。道路橋示方書¹⁾における設計地震動スペクトルの大きさは、既往の強震記録での水平面内 2 成分の記録を時間領域において合成した絶対最大値を基に、一般橋の設計や照査において各方向にその地震力を

一方向に作用させる方法との整合を取りながら設定されたものであり、2方向の効果を見込んだ上で設計法全体で橋梁の安全性が確保された大きさになっている、と解釈される。同様に、例えば日本建築学会の免震構造設計指針⁶⁾の中では、力学的方向性を持たない履歴ダンパーを有する免震建物の2方向地震動の作用に対する挙動の検討が述べられている。1940年 El Centro記録を入力として用い、強軸方向（加速度の2方向合成最大値を与える方向）の成分のみの1方向入力と、弱軸方向を含む2方向入力による応答変位を比較すると、1方向入力と比べて16%程度の増加、応答速度換算で26%程度の増加が見られるが、これはそれまでの既往研究で予測されている増加レベルであり、1方向入力であっても設定レベルに2方向の効果が含まれていれば、安全率に含めて考えれば良いとしている。

しかしながら、特に耐震性能の照査においてレベルのみでなく、多次元性を持つ2方向入力地震動を考慮する必要性が提起される背景として、第一に曲線橋などの橋梁の設計および耐震性能照査の問題が挙げられる。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、特に直線橋で近似することが適切でない曲線橋の耐震性能の動的照査を時刻歴応答解析により行う場合の方法として、1方向の照査用地震動を様々な角度で入力して応答解析を行う方法が一般的に用いられている。このような構造物は複雑な振動モードを持つ上、レベル2地震時の弾塑性挙動や幾何学的非線形性を含めた複合非線形性と合わせて考えた場合、3次元性を持つ実際の地震動に対する応答が、1方向入力のみによる照査では適切に評価されない可能性がある。すなわち評価の信頼性に関する問題である。また、第二に指摘できるのは、免制震技術を用いた橋梁の照査の問題である。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、主に耐震補強に用いられている制震ダンパーの適用や、多径間連続橋に免震支承と併せて制震ダンパーを適用する免制震橋梁が近年は広がりを見せているが¹²⁾、このような免制震橋梁が特に前述の曲線橋に適用された場合には、免震支承の2方向変形-復元力特性、制震ダンパーの非線形性に加え、方向性を持つシリンドラ型制震ダンパーの水平面内の回転挙動などが生じ、上述の1方向入力による評価の信頼性の評価は、より複雑な問題となる。

したがって、橋梁の時刻歴応答解析による動的耐震性能照査を行う際に、規定された照査用スペクトルに適合し、特性が明確な2次元性を持つ2方向入力地震動時刻歴波形を用いることが望ましいと考えられる。そこで本論文では、そのような2方向入力地震動を作成する1つの方法として、相補直交成分波と呼ぶ概念を用いる考え方を提案する。作成された2方向入力地震動を、非線形時刻歴応答解析に適用することで、2方向性を考慮

した耐震性能照査を行うことを目的としている。なお、与えられたスペクトルに適合する2方向地震動波形を求める手法は、一様ハザードスペクトルへの適合地震動の算出を前提とした既往研究がある。例えば、Gavin・Dickinson⁷⁾は、地震動の統計的なモデル化に基づき、2方向応答スペクトルに基づく地震動を乱数や速度パルスを用いて生成する手法を報告している。Grant⁸⁾は、地震動の強軸方向・弱軸方向の向きおよびスペクトル強度に適合する2方向地震動を、ウェーブレットの重ね合わせにより作成する方法を示している。本研究で提案する方法は、これらの研究で用いられる方法よりも簡便であり、かつ照査用スペクトルのレベルの設定や1方向入力による照査との整合性を保持することで、我が国における道路橋の実務設計のプロセスへの将来的な適用性が高い方法にすることを目標として検討を行っているところに特徴がある。

2. 水平2方向入力による1質点系応答に関する予備的検討

提案する2方向入力の作成方法を説明する準備として、予備的な事項および2方向入力を設定する際に課題となる問題を説明する。

(1) 2方向応答スペクトル

様々な固有周期 T を持つ等方な2次元線形弾性1質点振動子（図-1）を考える。時間を t 、水平面は図に示すように x - y 座標で定義するものとし、また与えられた2方向入力加速度 $a_x(t)$ 、 $a_y(t)$ に対する、固有周期 T の2次元1質点系の水平2次元応答の x 方向成分、 y 方向成分をそれぞれ $d_x(T, t)$ 、 $d_y(T, t)$ とする。 $S_{Rd}(T)$ を、この応答の動径方向最大値（2方向成分合成最大値）と固有周期 T の関係、すなわち次式で定義する。

$$S_{Rd}(T) = \max_t \left\{ \sqrt{d_x(T, t)^2 + d_y(T, t)^2} \right\} \quad (1)$$

この $S_{Rd}(T)$ を、2方向応答スペクトル (biaxial response spectrum⁷⁾)と呼ぶ。これは x 方向、 y 方向それぞれの1方向での弾性応答スペクトル

$$S_{jd}(T) = \max_t \left\{ |d_j(T, t)| \right\}, \quad j = x, y \quad (2)$$

を2方向入力の場合に拡張したものである。

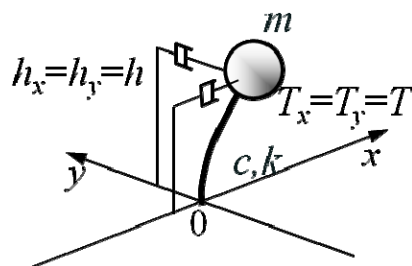


図-1 2次元線形弾性1質点振動子

(2) 望ましい2方向入力性の性質

設計あるいは照査用地震動として、応答スペクトル $S(T)$ が与えられることを前提とする。通常、設計あるいは照査用の地震スペクトルは1方向入力を前提として設定されることから、1方向で耐震性能照査を行うための入力波形は、

1a. 1方向入力地震動 $a(t)$ の応答スペクトル $S_d(T)$ は、照査用スペクトル $S(T)$ に適合していることを目標として作成される。道路橋示方書においては、そのような地震動波形が既往の地震動記録波形に振幅調整を行った形で提供されており、これを標準波と呼ぶこととする。

次に、照査用の2方向入力を考える場合、少なくとも1方向入力との強度（弾性スペクトル値）に整合性があることが最低限の条件であり、これに加えて2次元性を持つ（方向を回転した1方向入力にならない）ことが望ましい性質であると考えられる。1つの考え方として、具体的に次の2つの条件が考えられる。

- 2a. 2方向入力地震動の各々の直交成分 $a_x(t)$ 、 $a_y(t)$ の応答スペクトル $S_{xd}(T)$ 、 $S_{yd}(T)$ は、照査用スペクトル $S(T)$ に適合している
- 2b. 2方向入力地震動 $\{a_x(t), a_y(t)\}^T$ の2方向応答スペクトル $S_{Rd}(T)$ が照査用スペクトル $S(T)$ に適合している

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、弾性応答を考える限り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であると考えられる。

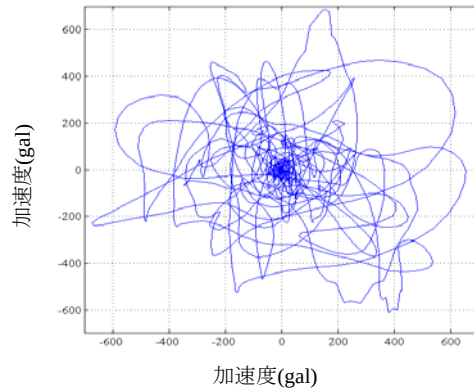
(3) 道示標準波の組み合わせ2方向入力の問題点

2方向入力の例として考えられるのは、目標とする照査用スペクトルに対応する2つの異なる標準波をx方向、y方向の成分として組み合わせたものである。このような2方向入力は前節で述べた望ましい性質を満足するかどうかを検討する。

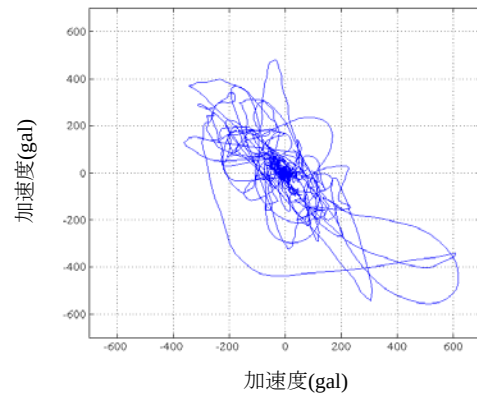
道路橋示方書におけるレベル2タイプⅡ地震動のⅡ種地盤用のスペクトルを目標とし、対応する標準波Ⅱ-Ⅱ-1とⅡ-Ⅱ-2（それぞれ、兵庫県南部地震JR鷹取記録のNS成分とEW成分を振幅調整したもの）の組合せ、および同じくⅢ種地盤用のスペクトルを目標とし、標準波Ⅱ-Ⅲ-2とⅡ-Ⅲ-3（同地震のポートアイランド記録NS成分とEW成分の振幅調整波）の組合せの2ケースについて、水平面内の加速度軌跡を図-2に示す。横軸をEW成分、縦軸をNS成分として表示している。

いずれのケースも、標準波を用いているため性質2a. は自動的に満足している。2方向応答スペクトルと、目標スペクトルの適合度を判断するため、2方向応答倍率 $r_d(T)$ を次式で定義し、算出する。

$$r_d(T) = \frac{S_{Rd}(T)}{\max(S_{xd}(T), S_{yd}(T))} \quad (2)$$



(a) 標準波Ⅱ-Ⅱ-1およびⅡ-Ⅱ-2の組合せ



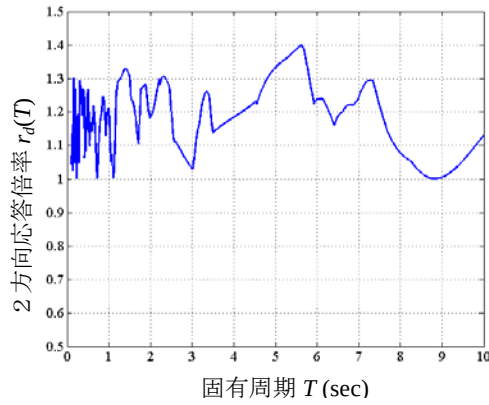
(b) 標準波Ⅱ-Ⅲ-2とⅡ-Ⅲ-3の組合せ

図-2 標準波の組み合わせによる2方向入力の加速度軌跡

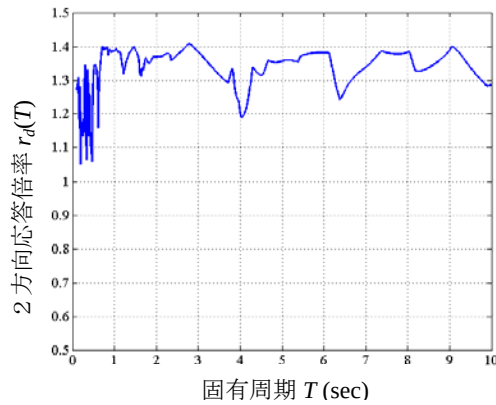
2方向応答倍率 $r_d(T)$ は、1方向入力で評価される最大応答と比較して、2方向入力とした場合に最大応答（2方向合成値）が大きくなる度合いを評価するものであり、定義より1以上の値となる。2方向応答スペクトルが目標スペクトルに適合していれば（性質2b.）、 $r_d(T)$ は1に等しくなる。

図-3に2方向応答倍率 $r_d(T)$ を周期 T の関数として示したものを示す。目標値の1よりも大きいことがわかる。この結果より、2つの道路橋示方書標準波を2方向成分として組み合わせた2方向入力の問題は、次の2点であることが理解される。

- ・ 2方向応答倍率 $r_d(T)$ の値が1より大きく、照査用スペクトルの設定で意図されているよりも“強い”入力となっており、1方向入力との強度の整合性が保たれていない。構造物が、照査用スペクトルに対応して要求されている耐震性能をこのような2方向入力に対して満足するためには、本来の要求より高い耐震性能を持つていなければならないことになる。
- ・ 2方向応答倍率 $r_d(T)$ の値は、周期 T に依存して変動する。弾性1自由度系あるいは等方な1質点系が対象であれば、2方向入力の全体振幅を調整することで強度を一致させることは可能であるが、構造物の固有周期によって目標スペクトル



(a) 標準波Ⅱ-Ⅱ-1とⅡ-Ⅱ-2の組合せ



(b) 標準波Ⅱ-Ⅲ-1とⅡ-Ⅲ-2の組合せ

図-3 2方向応答倍率

ルと比べた作用の強さが変動するので、固有周期の変化としても特性付けられる弾塑性系や、複数のモード固有周期を持つ多自由度系が対象の場合には、全体振幅を調整しても強度を1方向入力と全て一致させることは不可能である。

(4) 円形軌跡の2方向同時入力の検討

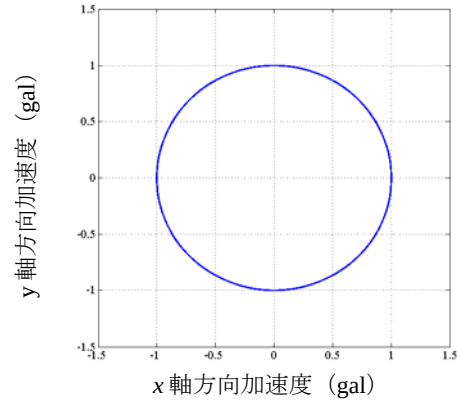
2方向応答倍率 $r_d(T)$ を可能な限り小さく、一定値1に近づけるための条件について考察する。上述の(3)節の計算結果より、2方向入力の軌跡に特定の方向性がある場合に2方向応答倍率 $r_d(T)$ が大きくなる傾向があることが推察される。また、(2)節で提示した条件2a., 2b.は、入力に方向性がないことを示唆している性質とも推測できる。そこで、加速度軌跡が方向性のない円形の軌跡となる場合の2方向応答倍率 $r_d(T)$ を試算する。

x軸方向の入力加速度およびy軸方向の入力加速度をそれぞれ

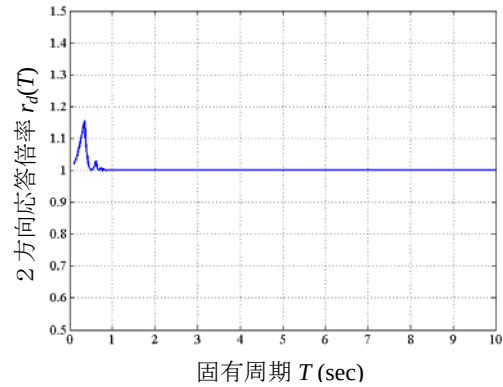
$$\begin{aligned} a_x(t) &= A \cos \omega t \\ a_y(t) &= A \sin \omega t \end{aligned} \quad (2)$$

とした。ここに、加速度振幅 A は1 gal, 円振動数 ω はrad/sec, 振動子の減衰定数は5%とした。

図-4aに加速度の軌跡を、図-4bに2方向応答倍率を計算した結果を示す。 $T < 0.5$ secの範囲で静止初期条件からの過渡応答の影響による変動が見られる



(a) 加速度軌跡



(b) 2方向応答倍率

図-4 加速度軌跡が円形となる場合

が、2方向応答倍率はほとんどの周期 T の範囲で1.0に近い値を示し、目標とする特性を持つ入力の特徴を持つことが示されている。

3. 相補直交成分波と2方向入力の作成法

(1) 複素偏極解析

弾性波伝搬に伴い生じる3次元的な粒子運動の軌跡を、軌跡の方向性に基づく成分に分離することで分析を行う。偏極フィルタ(polarization filter)と呼ばれる手法⁹⁾がある。Vidale¹⁰⁾は、偏極フィルタを楕円形の軌跡の成分を扱えるように拡張し、直線あるいは楕円形の軌跡を分離した上で方向性を定量的に算出する方法を提案した。これを、複素偏極解析(complex polarization analysis)と呼ぶ。

以下に、鉛直成分を無視し水平2方向成分のみを対象として計算する前提に基づき、複素偏極解析による計算手順を整理して示す。地震動による水平面内の粒子運動を想定する地盤上(内)のある点について、水平面上にx-y空間直交座標を考え、その点の軌跡の2次元の成分をそれぞれ $x(t)$, $y(t)$ とする。また、それぞれの成分に対応する解析信号 $u(t)$, $v(t)$ を、式(3)で定義する。

$$\begin{cases} u(t) = x(t) + iH[x(t)] \\ v(t) = y(t) + iH[y(t)] \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 i は虚数単位であり、 $H[\cdot]$ は次式で定義

されるヒルベルト変換を表す．

$$H[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(u)}{\pi(t-u)} du \quad (4)$$

各時刻 t において， $u(t)$ ， $v(t)$ を基に式(5)により行列 $C(t)$ を計算する．

$$C(t) = \begin{bmatrix} uu^* & uv^* \\ vu^* & vv^* \end{bmatrix}_t \quad (5)$$

上付の*は複素共役を示す．この行列 $C(t)$ は，偏極フィルタにおける粒子運動の共分散行列に対応する行列であり，時刻 t 前後の時間に渡り各要素の移動平均を取ることで適切な平滑化を行ったものを用いることができる．この行列の固有値 λ_1 ， λ_2 および固有ベクトル χ_1 ， χ_2 を求める．

$$(C(t) - \lambda_j I)\chi_j = 0 \quad (j=1,2) \quad (6)$$

$C(t)$ は定義よりエルミート対称行列であるので，固有値 λ_1 ， λ_2 は非負の実数である．最大固有値 λ_1 に対する固有ベクトル χ_1 を

$$\chi_1(t) = \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ y_1(t) \end{Bmatrix} \quad (7)$$

と表す．固有ベクトル χ_1 はノルムが1となるよう正規化されているものとする．したがって，一般に複素数である χ_1 の各成分 $x_1(t)$ ， $y_1(t)$ は，次式を満たす．

$$\|\chi_1(t)\| = \sqrt{x_1^*(t)x_1(t) + y_1^*(t)y_1(t)} = 1 \quad (8)$$

時刻 t において，粒子が x - y 平面での直線運動を行っている場合（直線偏極）， $x_1(t)$ と $y_1(t)$ は複素平面上で原点を通る一つの直線上に位置し，また円運動を行っている場合（楕円偏極において半径が一定）は， $x_0(t)$ と $y_0(t)$ がともに複素平面上の原点を中心とする一つの円上にあり，かつ原点から見て互いに直交する位置にある．いずれのケースに近いかを判定するため，さらに次の計算を行う．複素平面上で固有ベクトル $\chi_0(t)$ を回転させ， $\chi_0(t)$ の実部の値が最大となるような場合の実部ベクトルのノルムを $X(t)$ とする．

$$X(t) = \max_{\alpha} \sqrt{\left\{ \operatorname{Re}(x_1(t)e^{i\alpha}) \right\}^2 + \left\{ \operatorname{Re}(y_1(t)e^{i\alpha}) \right\}^2} \quad (9)$$

$X(t)$ に基づき次式の楕円偏極指標 $P_E(t)$ を算出する．

$$P_E(t) = \frac{\sqrt{1 - X(t)^2}}{X(t)} \quad (10)$$

$P_E(t)$ は，粒子運動の楕円偏極成分における扁平度を0と1の間の範囲の実数値で表現したものになっており， $P_E(t)=0$ は直線運動に， $P_E(t)=1$ は円運動に対応している．2方向地震動の加速度軌跡にこの計算を適用し P_E の値の時間変化を得ることで，各時刻における粒子加速度の，直線運動と円運動の間での特性の時間的変動を評価することができる．

(2) 相補直交成分波

前章での考察より，2方向応答倍率が $r_d(T)=1$ となるような2方向入力，加速度軌跡が円運動の性質を持つ，という仮説が考えられる．前述のよ

うに軌跡が各時刻において円運動となる条件は複素偏極解析により定量化できるので，これらに関連付けることで2方向入力を決定することを考える．すなわち，2方向応答倍率が弾性応答周期 T に依らず一定値1となる2方向入力は，次の考え方で得られると推定する．

2方向入力加速度の x 方向成分， y 方向成分をそれぞれ $a_x(t)$ ， $a_y(t)$ とし，これらが前節の粒子軌跡に対応して，式(3)～(10)において

$$x(t) = a_x(t), \quad y(t) = a_y(t) \quad (11)$$

と見なし扱われるものとする． $a_x(t)$ が予め与えられた場合に， $a_y(t)$ を

$$P_E(t) = 1 \quad (12)$$

を満たすように定める問題を考える．このような性質を満たす $a_y(t)$ を， $a_x(t)$ の相補直交成分波と呼ぶこととする．

相補直交成分波を算出する方法を次に述べる．まず，式(5)における行列 $C(t)$ の算定において，移動平均等を行わない時刻 t における値のみを式(5)に適用した結果で近似できるものと仮定する．すると，

$$C(t) = \begin{Bmatrix} u(t) \\ v(t) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u^*(t) & v^*(t) \end{Bmatrix} \quad (13)$$

と表わされることから，この時の固有ベクトル χ_1 は

$$\chi_1(t) = \beta \begin{Bmatrix} u(t) \\ v(t) \end{Bmatrix} \quad \text{ここに } \beta = \frac{1}{\sqrt{|u|^2 + |v|^2}} \quad (14)$$

となることは自明である．

次に，式(12)を満たすための条件は，定義式(10)より

$$X(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

であり，これは

$$v(t) = \pm i u(t) \quad (16)$$

の時に成立することは，式(9)に $x_1(t)=\beta u(t)$ ， $y_1(t)=\beta v(t)$ を代入することにより確かめることができる．式(16)に， $u(t)$ と $v(t)$ の定義である式(3)および式(11)を代入すると，

$$a_y(t) + i H[a_y(t)] = \pm H[a_x(t)] \mp i a_x(t) \quad (17)$$

であり（複号同順），この式は

$$a_y(t) = \pm H[a_x(t)] \quad (18)$$

の時に成立する．式(18)の正負の符号のいずれを用いても式(12)を満たすが，特にここで正符号を採用したものを，相補直交成分波と定義することとする．すなわち，相補直交成分波 $a_y(t)$ は $a_x(t)$ のヒルベルト変換にほかならない．ヒルベルト変換は数値計算の手法も確立しており，極めて簡便に計算することができる．

(3) 標準波—相補直交成分波による2方向入力

こうして導入した相補直交成分波の考え方をを用いて，2.(1)節で示した性質2a.および2b.を満たす2方向地震動を近似的に作成する方法として，以下の手法が考えられる．

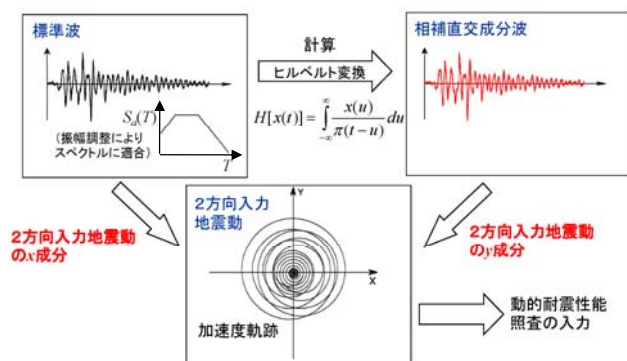


図-5 標準波－相補直交成分波による2方向入力地震動作成の概念図

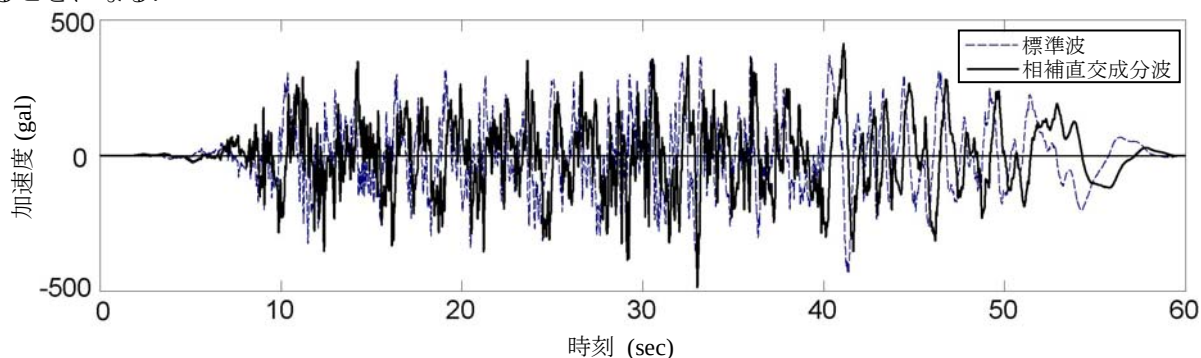
与えられた照査用スペクトル $S(T)$ に対して、適合した地震動波形 $a_x(t)$ を算出する。道路橋示方書の場合はその例が標準波として与えられるので、これをそのまま用いることができる。次に、ヒルベルト変換を用いて標準波 $a_x(t)$ の相補直交成分波 $H[a_x(t)]$ を算出する。これら $a_x(t)$ および $a_y(t)=H[a_x(t)]$ を2方向入力地震動の2成分として用いる。

なお、ヒルベルト変換は振動数成分の振幅は不変で、位相を一様に $\pi/2$ 加える線形変換である¹¹⁾ことから、この場合標準波 $a_x(t)$ とその相補直交成分波 $a_y(t)$ のフーリエ振幅スペクトルは同一である。この性質は、標準波と相補直交成分波の弾性応答スペクトルが理論的に一致することまでは意味しないが、概ね同様の値の傾向を持つことが期待される。この仮定が十分な精度で成立するとした場合、 $a_y(t)$ は照査スペクトルに適合する条件が近似的に満足されることになる。

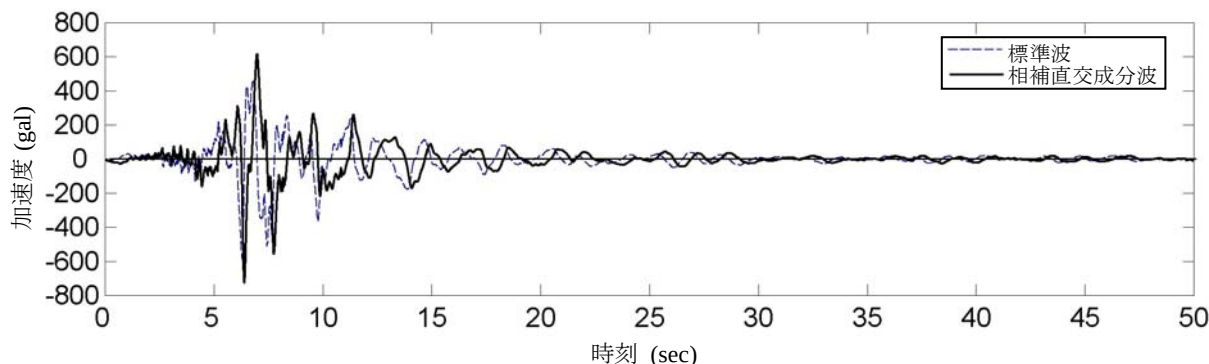
3. 水平2方向入力の実例

計算例として、道路橋示方書におけるレベル2タイプI地震動のIII種地盤用の加速度波形1（標準波I-III-1）、およびタイプIIの地震動のIII種地盤用の加速度波形1（標準波II-III-1）の2つの標準波を用いた2方向入力の例を示す。図-6に、それぞれの標準波と、算出された相補直交成分波の加速度波形を示す。また、図-7に、標準波をx軸方向成分、その相補直交成分波をy軸方向成分とした場合の加速度軌跡を示す。加速度軌跡は予測される通り、軌跡曲線を個々の位置ごとに局所的に見れば円形に類似した形状であり、全体的には方向性が小さい入力であることが確認できるが、必ずしも全ての方向について合成加速度の大きさが一樣であるわけではない。

標準波と相補直交成分波の応答スペクトルを比較したものを図-8に示す。いずれのケースにおいても、タイプII地震動のケースの短周期領域において若干の相違は認められるものの、両者の応答スペクトルは特に0.5sec以上の周期では全般的にほぼ同様の大きさとなり、相補直交成分波と標準波の応答スペクトルはほぼ等しいという仮説は成立すると見なして良いものと考えられる。さらに、2方向応答倍率 $r_d(T)$ を計算した結果を図-9に示す。2方向応答倍率の値は1に極めて近く、1からの差は最大で5%程度に留まり、良好な特性を有していることを示している。

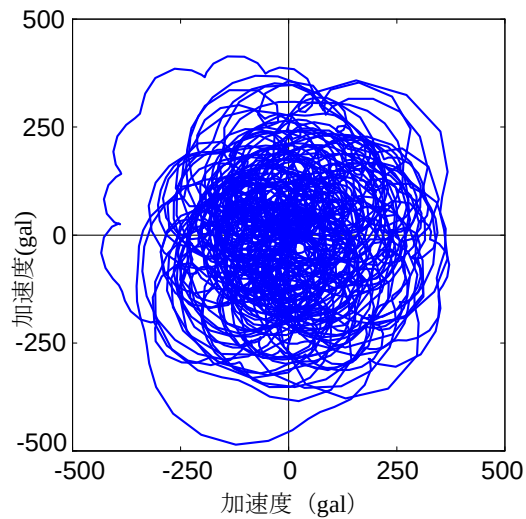


(a) 標準波 I-III-1

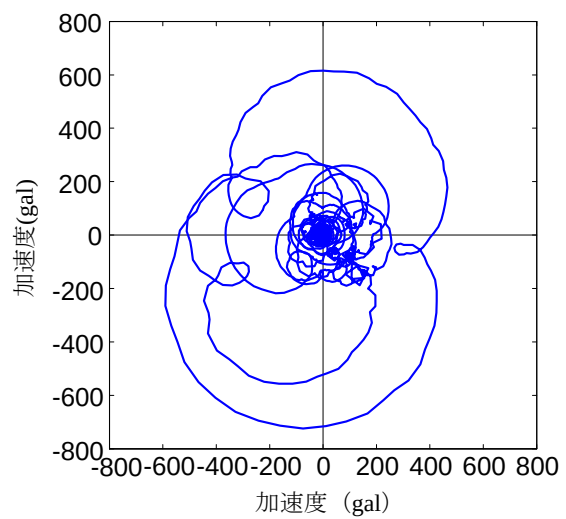


(b) 標準波 II-III-1

図-6 標準波と相補直交成分波の加速度時刻歴波形

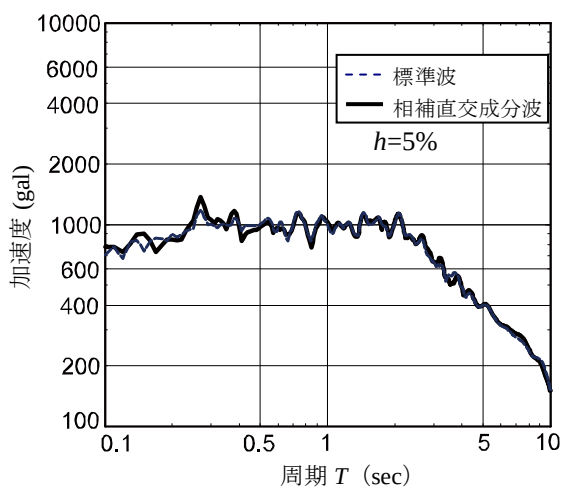


(a) 標準波 I-III-1

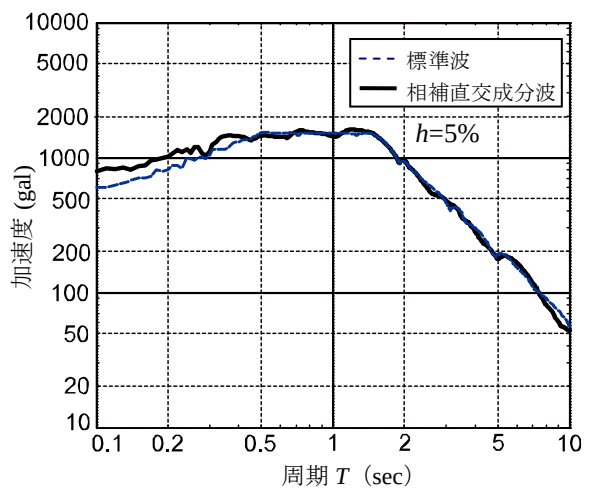


(b) 標準波 II-III-1

図-7 標準波－相補直交成分波による2方向地震動の加速度軌跡

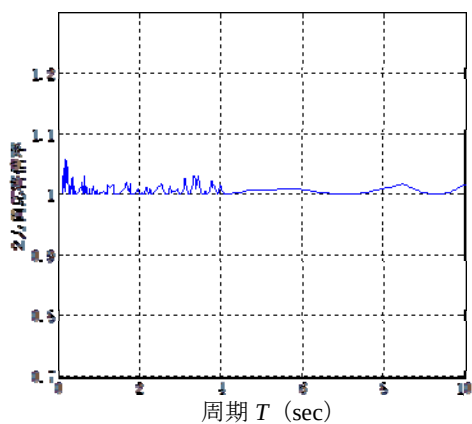


(a) 標準波 I-III-1

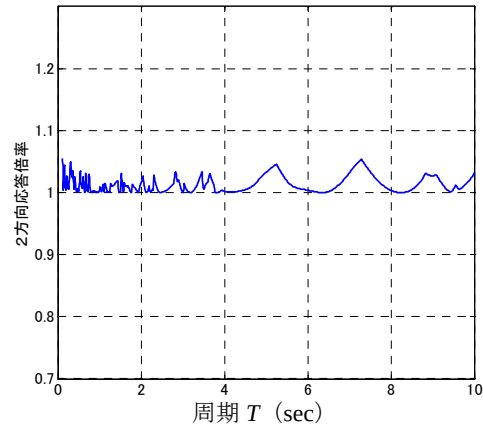


(b) 標準波 II-III-1

図-8 標準波と相補直交成分波の応答スペクトルの比較



(a) 標準波 I-III-1

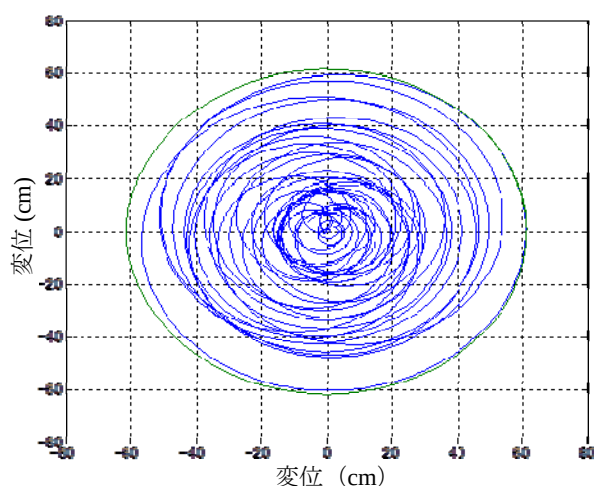


(b) 標準波 II-III-1

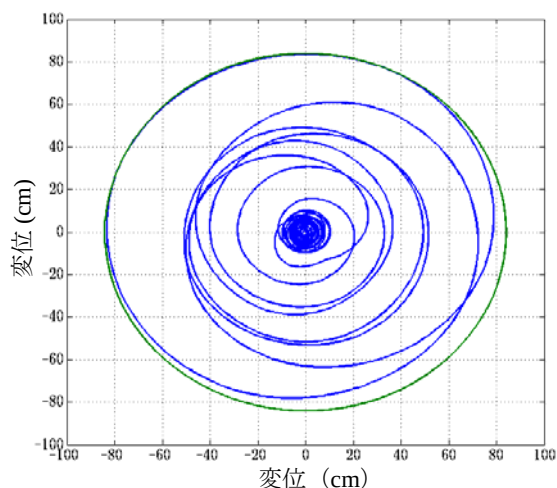
図-9 作成された2方向入力の2方向応答倍率

こうして得られた2方向入力に対する2次元弾性1質点系の2次元応答を計算した。代表的な結果として、固有周期 $T=1.5\text{sec}$ の等方1質点系に、上述の2種類の標準波に基づく2方向入力を与え、変位応答軌跡をプロットしたものを図-10に示す。図中の緑線の円は、半径が標準波による1方向入

力で得られる最大応答値を示している。入力地震動の方向性が小さく、2方向応答の合成最大応答値と1方向入力の最大応答値が概ね等しいことから、目標とした性質に近い特性を有すると考えられる。



(a) 標準波 I-III-1



(b) 標準波 II-III-1

図-10 標準波一相補直交成分波による2方向地震動に対する等方1質点系($T=1.5\text{sec}$)の変位応答軌跡

4. 免制震橋梁モデルによる検討

2方向入力地震動による照査が想定される構造物として免制震橋梁を例にとり、標準波一相補直交成分波による2方向地震動を用いた動的応答計算により確認できると考えられる特徴的な応答性状等について、簡易モデルを用いた検討を行った。

(1) 免制震橋梁の簡易モデル

多径間連続免制震橋梁の1本の橋脚部分を取り出し、橋桁、免震支承、シリンダ型の制震ダンパーからなる免制震橋梁の簡易モデルとして設定した非線形2次元1質点系モデルを図-11に示す。

質量900tと仮定した橋桁は橋軸方向、橋軸直角方向のいずれにも変位が生じるが、制震ダンパーは1方向のみに設置されている。ダンパー軸方向を x 軸とし、反時計周りに直角の方向を y 軸とする。

免震支承は高減衰ゴム支承を想定し、その2方向非線形復元力特性のモデル化には、水平2方向の応答に相関を持つMSS (Multiple Shear Spring) 要素⁹⁾を用いた。MSS要素は、8本のバイリニア型履歴復元力バネ要素を等間隔の角度で配置して結合したモデルとし、免震支承のせん断ひずみ250%相当の変位振幅500mmでの等価固有周期が1.9秒となるようなパラメータを各非線形バネ要素に設定している。

制震ダンパーは、摩擦型の履歴モデルを用い、降伏荷重は橋桁重量の0.2倍に相当する値に設定した。動的応答解析における制震ダンパー荷重の作用方向には、図-12に示すような桁変位応答によるダンパー長の変化と平面内におけるダンパー軸方向の回転を考慮した。設定したダンパーの初期の長さは400mmである。

(2) 1方向入力および2方向入力による免制震橋梁の応答の評価の検討

前述の免制震橋梁モデルを用いて、標準波の1

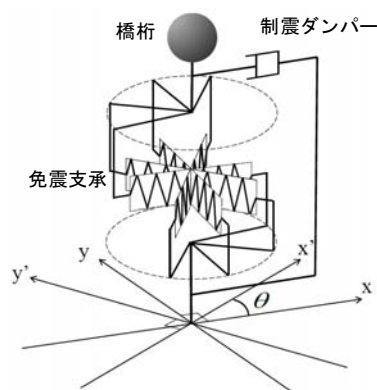
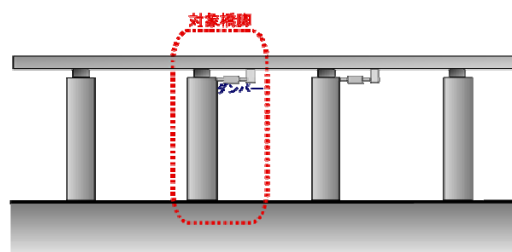


図-11 免制震橋梁の非線形2方向1質点モデル

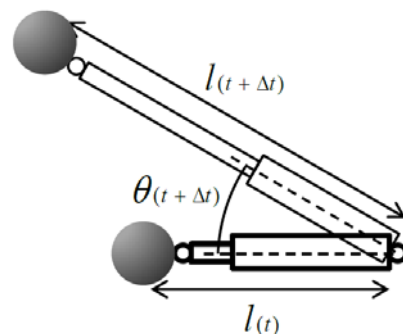
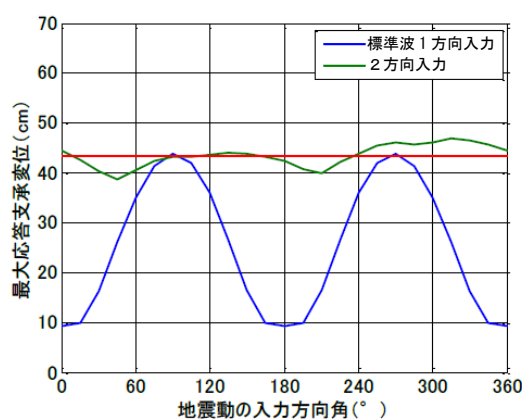
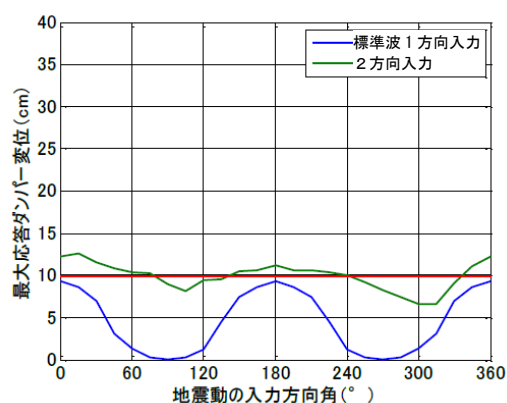


図-12 制震ダンパーの変位と回転挙動

方向入力により評価される最大応答と、標準波一相補直交成分波を用いた2方向入力で評価される最大応答の関係を検討した。1方向入力の入力方

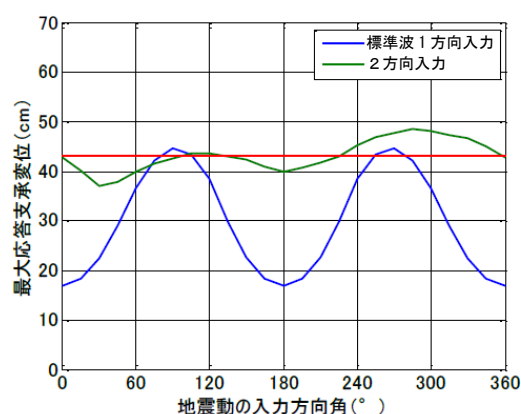


(a) 支承の最大応答変位（2成分合成値）

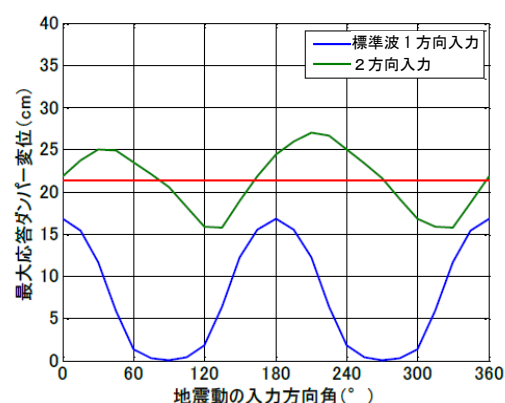


(b) ダンパーの最大応答変位

図-13 入力方向と応答の関係（標準波 I-III-1）



(a) 支承の最大応答変位（2成分合成値）



(b) ダンパーの最大応答変位

図-14 入力方向と応答の関係（標準波 II-III-1）

向である x' 軸の角度を 360° 変化させた応答解析を行い、得られる最大応答値と入力方向の方位角 θ の関係を調べた。方位角 θ は、図-11に示されるように x 軸からの反時計周りの角度で定義する。2方向入力のケースでは、標準波成分の方向に取った x' 軸を方位角 θ の方向、相補直交成分波の方向である y' 軸をそこから反時計周りに直角方向とした上で、同様に θ を 0° から 360° まで変化させて応答計算を行い、得られる最大応答値と θ の関係を整理している。ここで着目した最大応答値は、免震支承の最大合成変位と、ダンパー変位の2つである。

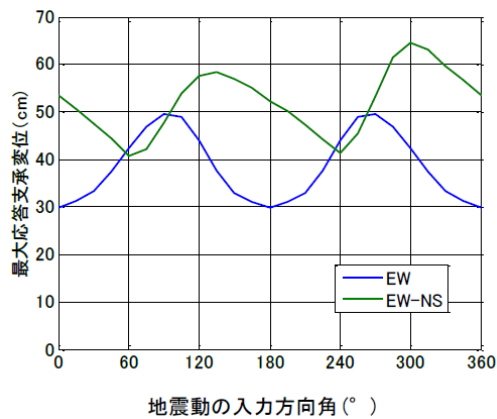
代表的な結果として、図-13に標準波 I-III-1のケース、図-14に標準波 II-III-1のケースに関する、最大応答値（免震支承の合成変位、ダンパー変位）と入力方向 θ の関係を示す。タイプ I 地震動のケースでは、支承合成変位、タンパー変位ともに提案する方法で作成した2方向入力による最大応答値は、入力方向に関わらず著しい変動はなく、また赤で表示したその評価値（平均値）は、標準波の1方向入力による最大応答値にほぼ等しく、標準波-相補直交成分波による2方向入力をういた応答値の評価は妥当であると考えられる。これに対し図-14のタイプ II 地震動の場合、支承合成変位については2方向入力の場合は入力方位角による変動は10%程度に収まっているのに対し、ダンパー変位については2方向入力の応答は1方向入力の応

答よりも全般的に大きくなる上、最大応答のばらつきが大きくなる傾向を示した。これは、加速度軌跡が円運動の性質を持つという仮説を前提として作成された2方向入力が、タイプ II 地震動の標準波に基づく場合にはその加速度軌跡にやや方向性が表れることや、ダンパー変位という応答量にはタイプ II の地震動の方がタイプ I の地震動よりも入力の2次元性の影響が大きく現れやすいことを示唆しているものと考えられる。

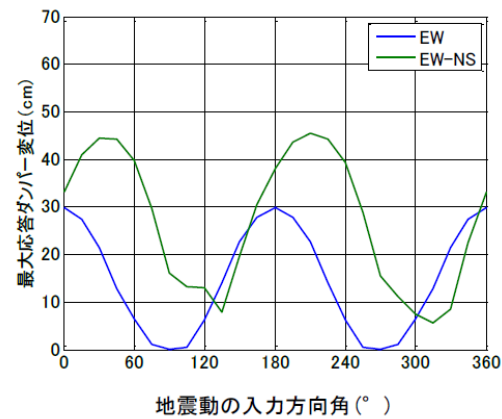
なお、この2次元性の影響と推察される相違と同様の効果は、実際の地震動記録を用いた応答計算でも観察される。同一の計算モデルを用い、兵庫県南部地震 JR 鷹取記録 EW 成分による1方向入力のケースと、NS・EW 成分記録を用いた2方向入力のケースで同様の比較を行った結果を図-15に示す。1方向入力時の応答最大値に比べ2方向入力時の応答最大値は増加するが、免震支承の最大合成変位の増加の割合は30%程度であるのに対し、最大ダンパー変位の増加の割合は約50%と、2方向入力とした効果が相対的にかなり大きく表れる。

5. 結論

橋梁の時刻歴応答解析による2方向性を考慮した耐震性能照査を行うためには、規定された照査



(a) 支承の最大応答変位（2成分合成値）



(b) ダンパーの最大応答変位

図-15 入力方向と応答の関係（JR 鷹取駅記録）

用スペクトルに適合し、特性が明確な2次元性を持つ2方向入力地震動時刻歴波形を用いることが望ましいと考えられる。そこで、このような2方向入力地震動を作成する1つの方法として、相補直交成分波と呼ぶ概念を用いる考え方を提案した。まず、与えられた照査用スペクトルに対して、適合した地震動波形を算出するが、道路橋示方書等の場合はこれが標準波として与えられるので、それをそのまま用いることができる。次に、ヒルベルト変換を適用して標準波の相補直交成分波を算出する。これら標準波および相補直交成分波を2方向入力地震動の2成分として用いる方法である。この方法は、固有周期に関わらず2方向弾性応答の大きさが1方向入力の場合の応答の大きさと一致するような2方向入力、加速度軌跡が円運動の性質を持つ、という仮説に基づき導かれるものである。この手法に関して検討を行なった結果、以下の知見が得られた。

- (1) 2方向入力地震動として望ましい条件は、各々の直交成分が照査用スペクトルに適合していることと、2方向入力地震動の2方向応答倍率が周期に関わらず一定値1となる強度を持つことの2つであると考えられる。道路橋示方書で規定する標準波を用いてこの方法で作成した2方向入力、これらの条件を十分な精度で満たしていることを示した。
- (2) 簡易免制震橋梁モデルを設定し、得られた2方向入力地震動を用いて応答計算を行うことにより、標準波の1方向入力により評価される最大応答値と、作成した2方向入力より得られる最大応答評価値の関係を調べた結果、タイプI地震動のケースでは、支承合成変位、ダンパー変位ともに2方向入力による最大応答値は、入力方向に関わらず著しい変動はなく、標準波の1方向入力による最大応答値にほぼ等しい評価を行うことができることを確認した。
- (3) タイプII地震動の場合、支承合成変位は入力方位角による変動は小さいのに対し、ダンパー変位については2方向入力による応答は1方向

入力の応答よりも最大値および入力方位角による変動が大きくなった。これは、タイプII地震動の標準波に基づく場合は加速度軌跡にやや方向性が表れることや、ダンパー変位という応答量にはタイプIIの地震動の方がタイプIの地震動よりも入力の2次元性の影響が大きく現れやすいことを示唆しているものと考えられる。

なお、本論文では、極く単純化された構造モデルでの検討に限り述べたが、2方向入力を用いた構造物の耐震性能照査への適用性については、実際の橋梁の動的応答特性をより詳細に反映したモデルによる検証を行う必要があると考えられる。簡易モデルによる検討で見られたタイプI地震動とタイプIIでの特性の相違や、ダンパー応答に関する評価の設計での取り扱いなどは、免制震橋梁への適用の場合における今後の課題である。

謝辞：本研究にあたって多大なご助力をいただいた、“免制震すべりシステムを使用した橋梁に関する検討会”（西日本高速道路(株)）の関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編，丸善，2002。
- 2) 早川涼二，川島一彦，渡邊学歩：水平二方向地震力を受ける単柱式RC橋脚の耐震性，土木学会論文集，No.759/I-67，pp.79-98，2004。
- 3) 益子直人，睦好宏史，William Tanzo，町田篤彦：仮動的実験を用いた二方向地震力を受けるRC橋脚の弾塑性応答性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.2，pp.1271-1276，1994。
- 4) 後藤芳顕，小山亮介，藤井雄介，小畑誠：2方向地震動を受ける矩形断面鋼製橋脚の動特性と耐震照査法における限界値，土木学会論文集A，Vol.65，No.1，pp.61-80，2009。
- 5) Kawashima, K., Sasaki, T., Kajiwara, K., Ukon, H., Unjoh, S., Sakai, J., Takahashi, Y., Kosa, K., Yabe, M.: Seismic performance of a flexural failure type reinforced concrete

- bridge column based on E-defense excitation, 土木学会論文集A, Vol. 65, No.2, pp.267-285, 2009.
- 6) 日本建築学会：免震構造設計指針，丸善，1996.
- 7) Gavin, H.P. and Dickinson, B.W.: Generation of uniform-hazard earthquake ground motion, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol.137, No.3, pp.423-432, 2011.
- 8) Grant, D.N.: Response spectral matching of two horizontal ground-motion components, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol.137, No.3, pp.289-297, 2011.
- 9) Montalbetti, J.R. and Kanasevich, E.R.: Enhancement of teleseismic body phases with a polarization filter, *Geophys J. R. Astr. Soc.*, Vol.21, pp.119-129, 1970.
- 10) Vidale, J.E.: Complex polarization analysis of particle motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.76, No.5, pp.1393-1405, 1986.
- 11) Bendat, J.S. and Piersol, A.G.: *Random Data -Analysis & Measurement Procedures*, 3rd ed., Wiley-Interscience, 2000.
- 12) 松田哲夫，鵜飼恵三，和田吉憲，宇野裕恵，松田宏：免制震すべりシステムを適用した橋梁における支承部デバイス機能に関する一考察，第14回性能に基づく橋等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，2011.

SYNTHESIS OF BI-DIRECTIONAL SEISMIC GROUND MOTION BY STANDARD AND COMPLEMENTARY WAVES FOR SEISMIC DESIGN OF BRIDGES

Akira IGARASHI, Kazuma INOUE, Aiko FURUKAWA, Hiroshige UNO
and Hiroshi MATSUDA

For the purpose of seismic performance verification of bridges in the process of seismic design, it is desirable to use spectrum-compatible bi-directional accelerograms with well-established multi-dimensional characteristics. In this paper, a method of generating spectrum-compatible bi-directional accelerograms by means of the complementary normal component wave computed by application of the Hilbert transform to standard accelerograms often provided by design specifications. It is shown that the intensity of the bi-directional input generated by this method is equivalent to that of the conventional unidirectional input with respect to elastic response spectra. Particular features of the effect of bi-directional input to structural model is examined with numerical dynamic response analysis of a simplified bridge model consisting of the superstructure, seismic isolator and a seismic damper, and the difference of the evaluated structural responses between the bi-directional and unidirectional input cases appears, for which the degree of the effect depends on the type of standard earthquake accelerograms.