

# コヒーレンス関数を用いた 曲線橋の地震応答卓越方向の推定に関する一考察

池内智行<sup>1</sup>・盛川仁<sup>2</sup>・松井勲<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 鳥取大学助手 工学部土木工学科(〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101)  
<sup>2</sup>正会員 工博 東京工業大学助教授 大学院総合理工学研究科(〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259)  
<sup>3</sup>正会員 工修 (株)ハルテック(〒551-0021 大阪市大正区南恩加島 6-20-34)

曲線橋のような複雑な構造物では地震応答が最もクリティカルとなる入力方向が自明でない。そのような場合、現在の耐震設計においては地震波の様々な入力方向に対して、各々、時刻歴応答解析を繰り返し行うことにより最大の部材力あるいは応答変位が発生する入力方向を探索する手法が採用されている。一方で岡野は鉛直アレー観測によって得られた異なる深度での地震動記録のコヒーレンスを用いて、地盤の強、弱軸方向が推定可能であることを示している。本研究では岡野の手法に改良を加え、曲線橋の地震応答卓越方向の推定に適用する。また、2つの曲線橋モデルに対して提案手法を用いて応答卓越方向の推定を行い、推定の精度を確認した。

**Key Words:** coherence function, critical direction, curved girder bridge, simple estimation

## 1. はじめに

構造物の耐震性能照査に対して時刻歴応答解析は大変有効な手段であり、近年は橋梁の耐震設計を行う際に一般的に用いられている<sup>1)</sup>。現在、橋梁が立地する地域での活断層の活動状況・分布にもとづいて設計用入力地震動を細かく決定することが求められている<sup>2)</sup>が、活断層に関する情報が十分でない場合には、入力地震波が卓越する方向を特定することが困難である。そのため、時刻歴応答解析による照査はあらゆる方位からの地震入力に対して耐震性能を保證せざるを得ないのが現状である。ただし、入力方向によって応答にほとんど差がない橋脚をもつ直線橋のような場合、橋軸または橋軸直角方向の地震入力で応答が最大となるため、この2方向のみの照査で代表させることが可能である。一方、曲線橋のように橋軸に対して非対称な形状をもつ構造の場合、応答卓越方向が不明であるため、まずこれを決定することが必要となる。そのため、入力方向を一定間隔で変化させて多数回の時刻歴応答解析を実行する手法が一般的に用いられている<sup>3)</sup>。この方法によれば、例えば15°おきに180°の範囲で探索を行うとすると実に13回もの時刻歴応答解析を実行しなければならず、時間およびコストの負担が大きい。

これらの背景から川神らは代表的な形状の曲線橋について振動特性を明らかにするため、振動形解析法による直接応答計算法<sup>4),5)</sup>および確率論的手法を用いた定常応答解析法<sup>6)</sup>について検討している。また、山口ら<sup>7)</sup>は各方位から地震入力を受ける典型的な鋼曲線ラーメン橋について弾塑性時刻歴応答解析を行い、その基本性状についてまとめている。しかし、曲線橋については多くの形

状パターンが考えられるため、応答卓越方向について汎用性のある答えをあらかじめ用意して時刻歴応答解析による照査に利用することは困難を伴う。

Lopez・Torres<sup>8)</sup>は、構造物の地震応答卓越方向を応答スペクトルの利用で簡易に求める方法を提案している。これは、地震入力に対して構造物の各モードでの最大応答値を各入力方向別に求め、それを最後に合成する方法であるためモード数の多くなる複雑な構造物ではその簡易さが失われてしまう。一方で、時刻歴波形の相関を利用して地震動そのものの主軸方向について推定法<sup>9),10),11)</sup>が提案されている。この中で星谷・石橋<sup>11)</sup>は、地震動の主軸についてコヒーレンス関数で評価することの意義について論じている。また、岡野<sup>12)</sup>はコヒーレンス関数を異なる深度で同時に観測された水平直交2方向の鉛直アレー地震記録に対して適用し、地盤の主軸について推定を行っている。

本研究ではこの岡野の方法を改良して、曲線橋の応答卓越方向推定に利用する手法を提案する。提案した方法によれば、わずか1回の時刻歴応答解析結果より応答卓越方向が決定できるため、従来の多数回時刻歴応答解析を用いる方法(以降、従来法と呼ぶ)と比べはるかに簡易である。また、従来の方法との比較により提案法の推定精度の検討を行う。

## 2. コヒーレンスに基づく応答卓越方向の推定理論

岡野は、平面内の直交する2方向で同時に観測された鉛直アレー地震記録のコヒーレンスについて確率過程論的考察を加えることで、地盤の強、弱軸が推定可能であること<sup>12)</sup>を明らかにしている。ここでは、岡野

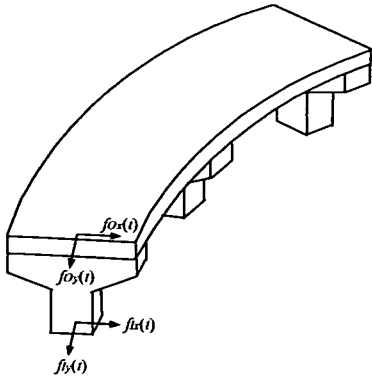


図-1 地震波と応答の入出力関係

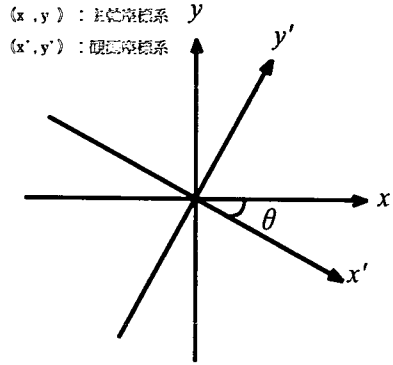


図-2 観測座標系

の方法を概観し曲線橋の特性を考慮して、コヒーレンスを用いた強、弱軸方向の推定法について述べる。

川神らの計算結果<sup>4)</sup>を参照すると曲線橋の橋脚が最大応答と最小応答となる地震入力方向はほぼ直交している。そこで直線橋と同様に、曲線橋においても図-1のように水平面内で直交する強軸および弱軸があるものと仮定して、それらの軸に一致する座標系を主軸座標系 $(x, y)$ と呼ぶこととする。また、以下では曲線橋への入力地震波を入力、それに対する応答を出力と呼ぶ。強軸もしくは弱軸に沿って入力があった場合はその方向のみ応答することを考えると、次の式が成り立つ。

$$f_{Ox}(t) = \int_{-\infty}^t h_x(\eta) f_{I_x}(t-\eta) d\eta \quad (1a)$$

$$f_{Oy}(t) = \int_{-\infty}^t h_y(\eta) f_{I_y}(t-\eta) d\eta \quad (1b)$$

ここで、 $f_{I_x}(t)$ 、 $f_{Ox}(t)$ は $x$ 軸方向の入力、出力の時系列、 $h_x(\eta)$ は構造物の $x$ 軸方向のインパルス応答関数である。また、 $y$ の添え字は $y$ 軸方向であることを示す。この式は線形応答に対して成り立つが、非線形応答の場合にもインパルス応答関数を等価線形化して求めることで十分成り立つと考えられる。次に、図-2に示すように強軸、弱軸と一致した主軸座標系 $(x, y)$ から時計回りの方向に $\theta$ 回転した観測座標系 $(x', y')$ を考えるとその座標系での時刻歴波形 $f_{x'}(t)$ 、 $f_{y'}(t)$ は式(2)で変換される。

$$\begin{Bmatrix} f_{x'}(t) \\ f_{y'}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_x(t) \\ f_y(t) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式(1)、(2)を用いて、 $x'$ 軸方向の入出力の相互相関関数 $R_{I_x'Ox'}(\tau)$ を求め、さらにフーリエ変換を行うと次式のようになる。

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} R_{I_x'Ox'}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau &= S_{I_x'Ox'}(\omega) = \\ & H_x(\omega) [\cos^2\theta S_{I_x'I_x'}(\omega) - \cos\theta \sin\theta S_{I_x'I_y'}(\omega)] \\ &+ H_y(\omega) [\sin^2\theta S_{I_x'I_x'}(\omega) + \cos\theta \sin\theta S_{I_x'I_y'}(\omega)] \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $S_{I_x'Ox'}(\omega)$ は $x'$ 軸方向の入出力のクロススペクトル、 $\omega$ は角周波数、 $S_{I_x'I_x'}(\omega)$ は $x$ 軸方向の入力のパワースペクトル、 $S_{I_x'I_y'}(\omega)$ は $x$ 軸方向および $y$ 軸方向の入力のクロススペクトル、 $H_x(\omega)$ 、 $H_y(\omega)$ は $h_x(t)$ 、 $h_y(t)$ をフーリエ変換したものでそれぞれ $x, y$ 軸方向の伝達関数を示す。

また、式(1)、(2)を用いて $x'$ 軸方向の出力の自己相関関数 $R_{Ox'Ox'}(\tau)$ を求め、さらにフーリエ変換を行うと $x'$ 軸方向の出力のパワースペクトル $S_{Ox'Ox'}(\omega)$ は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} R_{Ox'Ox'}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau &= S_{Ox'Ox'}(\omega) = H_x(\omega) H_x^*(\omega) [S_{I_x'I_x'}(\omega) \cos^4\theta \\ &+ S_{I_y'I_y'}(\omega) \sin^2\theta \cos^2\theta - \{S_{I_x'I_y'}(\omega) + S_{I_y'I_x'}(\omega)\} \sin\theta \cos^3\theta] \\ &+ H_y^*(\omega) H_y(\omega) [S_{I_x'I_x'}(\omega) \sin^4\theta + S_{I_y'I_y'}(\omega) \sin^2\theta \cos^2\theta \\ &+ \{S_{I_x'I_y'}(\omega) + S_{I_y'I_x'}(\omega)\} \sin^3\theta \cos\theta] + H_x^*(\omega) H_y(\omega) \times \\ &[\{S_{I_x'I_y'}(\omega) - S_{I_y'I_x'}(\omega)\} \sin^2\theta \cos^2\theta + S_{I_x'I_x'}(\omega) \sin\theta \cos^3\theta \\ &- S_{I_y'I_y'}(\omega) \sin^3\theta \cos\theta] + H_y^*(\omega) H_x(\omega) [\{S_{I_x'I_y'}(\omega) - S_{I_y'I_x'}(\omega)\} \times \\ &\sin^2\theta \cos^2\theta - S_{I_x'I_x'}(\omega) \sin^3\theta \cos\theta + S_{I_y'I_y'}(\omega) \sin\theta \cos^3\theta] \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $*$ は複素共役であることを示す。

さて、 $x'$ 軸方向の入出力のコヒーレンスは式(5)で定義される。

$$coh_{I_x'Ox'}^2(\omega) = \frac{|S_{I_x'Ox'}(\omega)|^2}{S_{I_x'I_x'}(\omega) S_{Ox'Ox'}(\omega)} = \frac{S_{I_x'Ox'}^*(\omega) S_{I_x'Ox'}(\omega)}{S_{I_x'I_x'}(\omega) S_{Ox'Ox'}(\omega)} \quad (5)$$

コヒーレンスは0~1の値を持つ2つの波の相関性を示す指標であり、式(5)を見てわかるように、入力された時刻歴波形がそのまま出力されると、分子のクロススペクトルおよび、分母の出力のパワースペクトルは入力のパワースペクトルと等しくなり、コヒーレンスは1となる。また、入力された波形と出力に全く相関がない場合、分子の入出力のクロススペクトルは0となりコヒーレンスは0となる性質を持っている。ここで、式(5)は

式(3), (4)を用いて次式のように展開される.

$$\begin{aligned}
 & coh_{x'\alpha'}^2(\omega) \\
 &= \frac{1}{S_{\alpha'\alpha'}(\omega)} \left[ \{H_x^*(\omega)H_x(\omega) \right. \\
 &\quad \left. - H_x^*(\omega)H_y(\omega) - H_y^*(\omega)H_x(\omega) + H_y^*(\omega)H_y(\omega)\} \right. \\
 &\quad \left. \times S_{x'y'}^*(\omega)S_{x'y'}(\omega)S_{x'y'}^{-1}(\omega)\sin^2\theta\cos^2\theta + A(\omega) \right] \\
 &\quad \frac{1}{8} \left[ \{H_x(\omega) - H_y(\omega)\}^* \{H_x(\omega) - H_y(\omega)\} \right] \\
 &= \frac{\times (1 - \cos 4\theta) coh_{x'y'}^2(\omega) S_{x'y'}^*(\omega) + A(\omega)}{\frac{1}{8} \left[ \{H_x(\omega) - H_y(\omega)\}^* \{H_x(\omega) - H_y(\omega)\} \right]} \quad (6) \\
 &\quad \times (1 - \cos 4\theta) S_{x'y'}(\omega) + A(\omega)
 \end{aligned}$$

ここに,  $coh_{x'y'}^2(\omega)$  は  $x'$ ,  $y'$  軸方向の入力どうしのコヒーレンスであり,  $A(\omega)$  は次式のようになる.

$$\begin{aligned}
 A(\omega) &= H_x^*(\omega)H_x(\omega)[S_{x'x'}(\omega)\cos^4\theta - \{S_{x'y'}(\omega) \\
 &+ S_{y'x'}(\omega)\}\sin\theta\cos^3\theta] + H_x^*(\omega)H_y(\omega)\times \\
 &[S_{x'x'}(\omega)\sin^2\theta\cos^2\theta + S_{x'y'}(\omega)\sin\theta\cos^3\theta \\
 &- S_{y'x'}(\omega)\sin^3\theta\cos\theta] + H_y^*(\omega)H_x(\omega)\times \\
 &[S_{x'x'}(\omega)\sin^2\theta\cos^2\theta - S_{x'y'}(\omega)\sin^3\theta\cos\theta \\
 &+ S_{y'x'}(\omega)\sin\theta\cos^3\theta] + H_y^*(\omega)H_y(\omega)\times \\
 &[S_{x'x'}(\omega)\sin^4\theta + \{S_{x'y'}(\omega) + S_{y'x'}(\omega)\}\sin^3\theta\cos\theta] \quad (7)
 \end{aligned}$$

式(6)において入力 2 方向のコヒーレンス  $coh_{x'y'}^2(\omega)$  は, 実際には座標系の回転に対して一定にはならないが,  $(1 - \cos 4\theta)$  が  $[0, 2]$  を周期的に変動するのに比べれば  $coh_{x'y'}^2(\omega)$  の変化は小さく, 相対的に一定と仮定することができる. さらに, 次式は自明である.

$$\{H_x(\omega) - H_y(\omega)\}^* \{H_x(\omega) - H_y(\omega)\} \geq 0 \quad (8)$$

$$0 \leq coh_{x'y'}^2(\omega) \leq 1 \quad (9)$$

式(6)の値は  $\theta=0, 90^\circ$  の時に  $(1 - \cos 4\theta) = 0$  よりとり得る最大の値である 1.0 となる. また,  $\theta=0, 90^\circ$  では式(8), (9)の条件のため 1.0 より小さくなる. このため  $\theta=0, 90^\circ$  では必ず極大値をとることが分かる. つまり, 観測座標系の  $x$  軸が弱軸あるいは強軸に一致するときコヒーレンスは極大値をとることになり, 入出力のコヒーレンスの変化を指標として, 曲線橋に対する応答卓越方向を定めることが可能である.

### 3. 推定手順

前節で述べた考察より応答卓越方向の推定法を提案する. 具体的な手順を示すと以下のようになる.

① 応答卓越方向を調べる構造物について時刻歴応答解

析を行う. この時刻歴応答解析では, あらゆる方向の応答が含まれるように, 平面内の直交 2 方向に異なる地震波を同時入力する.

② 観測方向  $\theta$  でのコヒーレンスを算定する.

a) 用いた 2 方向の入力加速度から座標変換の式(2)を用いて観測方向  $\theta$  の入力加速度を求める.

b) ①の時刻歴応答解析で求めた構造物の 2 方向の応答加速度を用いて a) と同様に観測方向  $\theta$  の応答加速度を求める.

c) 観測方向  $\theta$  での, 入力加速度を入力, 構造物の応答加速度を出力と考えて式(5)よりコヒーレンスを求める.

③ 観測方向が  $0 \sim 180^\circ$  の範囲において②の手順にしたがってコヒーレンスを算出し, 観測方向によるコヒーレンスの変化を調べる.

④ コヒーレンスが極大値となる観測方向を応答卓越方向とする. コヒーレンスは推定理論上から強, 弱軸のどちらに対しても観測方向が一致すると極大値となる. そのためコヒーレンスは 2 つの観測方向で極大値をとり, 応答卓越方向をこの 2 つの方向に絞り込むことができる. さらに, 物理的考察が可能であれば, この 2 方向から応答卓越方向を選択することができる.

この推定手順のうち②c)で求められたコヒーレンスは, 式(5)の定義を見ても明らかのように振動数の関数となっている. そのため, 観測方向に対するコヒーレンスの変化を調べるためには, ある着目した振動数でのコヒーレンス, もしくはある振動数範囲でのコヒーレンスの平均を代表値としてその変化を考える必要がある. 岡野は地盤の強, 弱軸を求めるにあたって, 主要な地盤の共振振動数を含む広い範囲  $0.3\text{Hz} \sim 10.0\text{Hz}$  でコヒーレンスの平均を求めその観測方向の代表値としている.

しかし, 橋梁を対象とする場合, 地盤と比較して主要な共振振動数範囲が狭く, しかもその範囲以外では応答のパワースペクトルがほぼ 0 に近い極めて小さな値となる. コヒーレンスは応答のパワースペクトルを分母に持つため, この特徴が推定精度を低下させることが容易に推察できる. そこで, 本研究では応答のパワースペクトルが十分大きな値を持つよう平均範囲を  $\pm 1/2$  オクターブ(付録参照)とし, 平均範囲の中心を応答のパワースペクトルがピーク値となる振動数とした.

### 4. 曲線橋に対する地震応答卓越方向の推定

高速道路のインターチェンジやランプに数多く使用されている曲線橋<sup>9)</sup>を対象とし, 前節で提案した手順に従って地震応答卓越方向のコヒーレンスによる推定を行い, 従来法の結果と比較し, 推定精度について検討した.

#### (1) 曲線橋モデル

曲線橋のモデルは, 標準的な形状として図-3 に示すように円弧の桁をもつ多径間連続曲線橋を考えた. ま

た、それぞれのモデルで円弧の半径は 100m、橋脚高さは 12m で共通とし、円弧が囲む中心角を 90°、180° とした。曲線橋の各諸元については表-1 に示すように 2つのモデルですべて橋脚断面、桁断面を同じとした。また橋脚は 22.5° 毎に配置した。支承条件は各モデルともに P1 橋脚のみをピン支承、その他の橋脚はローラー支承とした。ローラー支承の可動方向は桁の接線方向としている。本来、時刻歴応答解析による照査は弾塑性性を考慮した上で行うが、提案法の基礎的な検討を行うために、塑性化は考慮せず、非線形応答を含む場合は今後の課題とした。また、入力地震波についてもランダムな位相を有するホワイトノイズを用いた。

(2) 従来法による曲線橋の応答卓越方向の算定

1 方向のみにホワイトノイズを入力地震波として時刻歴応答解析を行った。この入力方向を 15° 間隔で変化させ、それぞれの入力方向での最大応答変位を求めた。各橋脚に対する地震波入力角度と最大応答変位の関係を Model1,2 について、それぞれ図-4~8 に示す。図-4,6 の右側の枠線内に各橋脚での最大応答となった入力方向を示す。図より P1 橋脚以外の橋脚については、ほぼ桁の法線方向に地震入力があったときに応答変位が最も大きくなっていることが分かる。これは、ローラー支承が桁に対して接線方向に可動、法線方向に固定となっているためである。P1 橋脚の地震応答卓越方向については Model1 では桁端を結ぶ方向とほぼ一致しているが、Model2 になると 90° となり違う傾向を示す。

(3) コヒーレンスによる地震応答卓越方向の推定

各曲線橋モデルについて直交 2 方向から振幅が等しく位相の異なる 2 つのホワイトノイズを同時に作用させ時刻歴応答解析を行い、3 章の手順に従って各観測方向でのコヒーレンスを求めた。ここでは、全方向で入力地震波はほぼ一定強度としたが、必ずしもその必要はない。また、式(5)からコヒーレンスを求める際には、バンド幅 0.216Hz となるハニングウィンドウで平

滑化<sup>24)</sup>したパワースペクトル、クロススペクトルを用いた。コヒーレンスを求める観測方向は 0° から 180° まで 1° 毎とした。図-9~13 に結果を示す。図中、コヒーレンス曲線上の●は極大値点、矢印は従来法によって求めた各橋脚の地震応答卓越方向を示す。

図より、どの曲線橋モデルにおいても、P1 橋脚を除くと従来法で求めた応答卓越方向とコヒーレンスが極大値となっている方向がほぼ一致していることが分かる。この中には Model2 の P5 橋脚のように極大値が 103° と 170° となり間隔が 90° より小さくなるものもあったが、従来法から求めた応答卓越方向とのずれは小さかった。また、地震応答卓越方向を示している付近の入力角度でコヒーレンスが不連続になっているが、これは方向によってパワースペクトルのピークを与える振動数が変化するためであり、コヒーレンスの平均をとる範囲が大きく変わるためである。

図-9 より Model1 の P1 橋脚については、コヒーレンスの変化が変動的で 3 ヲ所で極大値が発生している。これは主軸方向以外でも極大値となる可能性があるためである。しかし、主軸方向では必ず極大値となるというコヒーレンスの特徴を考慮して、90° 間隔となる 2 つの極大値が発生している観測方向を強、弱軸とみなすと、ほぼ従来法で求めた応答卓越方向と一致する。すなわち、Model1 の P1 橋脚においてコヒーレンスの極大値を示すのは、35°、119°、162° の 3 方向であるが 90° 間隔になるという条件より 35°、119° が選択され、さらに物理的考察より 119° が応答卓越方向であると推定される。

提案したコヒーレンスによる推定法と従来の方法との差を図-9~13 の記号 P1, P2, ... の上に示す。図より、従来法と提案法によって推定された地震応答卓越方向の差の最大値は、Model1 で -18°、Model2 で -19° である。これより、コヒーレンスによる地震応答卓越方向の推定は最大で 20° 程度の誤差が生じることが分かる。また、各橋脚における誤差の二乗平均平方根をとると、Model1,2 でそれぞれ 10.6、12.9° となり、

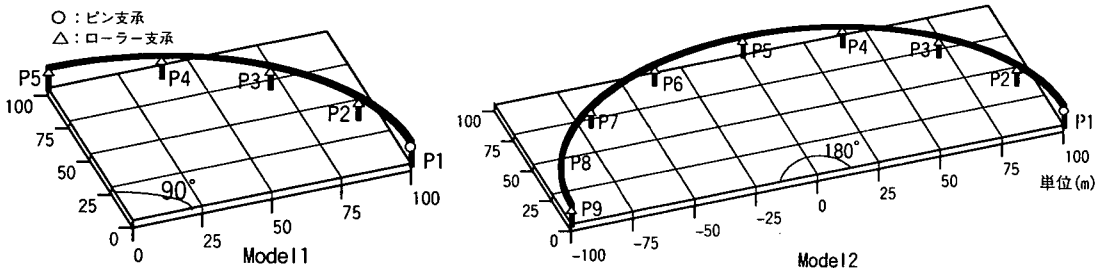


図-3 曲線橋モデル

表-1 曲線橋モデルの諸元

|    | 断面積(m <sup>2</sup> ) | 断面2次モーメント(m <sup>4</sup> ) |        | 弾性係数(MPa)              | 質量                 |
|----|----------------------|----------------------------|--------|------------------------|--------------------|
|    |                      | 面内                         | 面外     |                        |                    |
| 主桁 | 0.295                | 0.2400                     | 1.9500 | 2.06 × 10 <sup>5</sup> | 3.52(t/m) (分布質量)   |
| 橋脚 | 0.275                | 0.0313                     | 0.0313 | 2.06 × 10 <sup>5</sup> | 13.8(t) (天端での集中質量) |

従来法が 15° 毎に時刻歴応答計算を行っていることを考えると、設計上十分な精度で地震応答卓越方向を推定できている。

## 5. 結論

1) コヒーレンスを指標とする、構造物の地震応答卓

越方向の推定手順を示した。

2) 推定手順のうち、観測方法のコヒーレンス算出については構造物の応答特性を十分考慮して、出力のパワースペクトルのピーク値を示す振動数に対して±1/2 オクターブの範囲でコヒーレンスの平均をとることを提案した。

3) 提案した推定法では、コヒーレンスが極大値をと

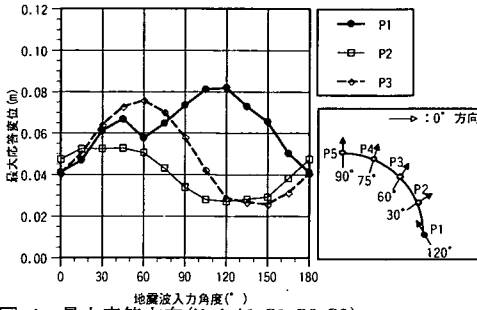


図-4 最大応答方向(Model1:P1,P2,P3)

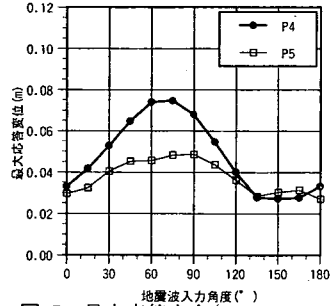


図-5 最大応答方向(Model1:P4,P5)

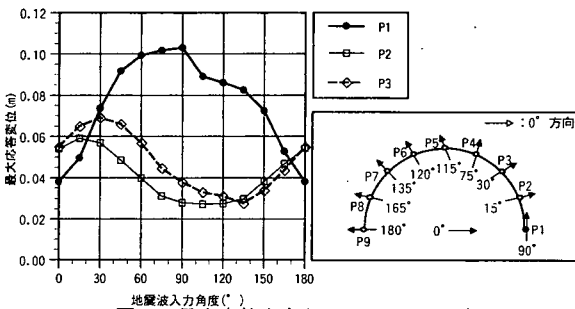


図-6 最大応答方向(Model2:P1,P2,P3)

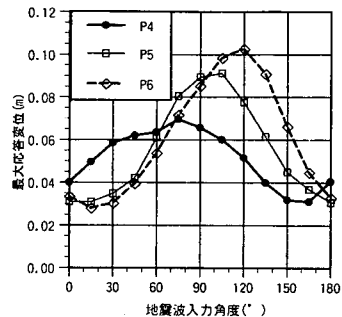


図-7 最大応答方向(Model2:P4,P5,P6)

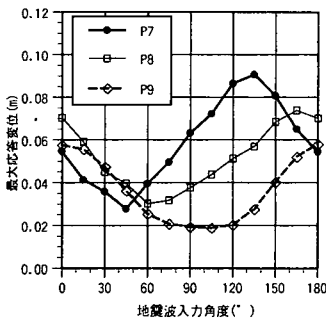


図-8 最大応答方向(Model2:P7,P8,P9)

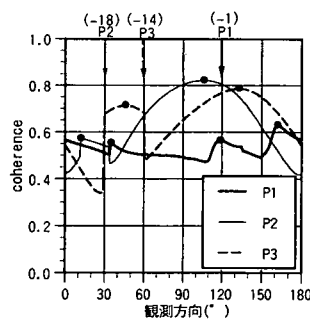


図-9 コヒーレンス(Model1:P1,P2,P3)

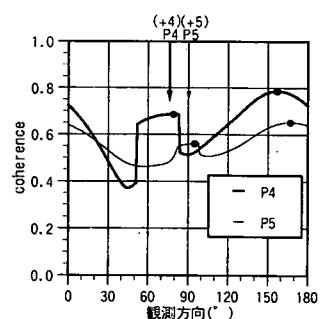


図-10 コヒーレンス(Model1:P4,P5)

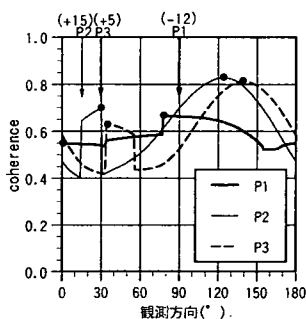


図-11 コヒーレンス(Model2:P1,P2,P3)

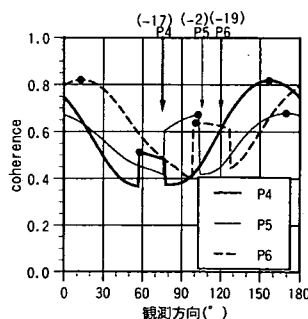


図-12 コヒーレンス(Model2:P4,P5,P6)

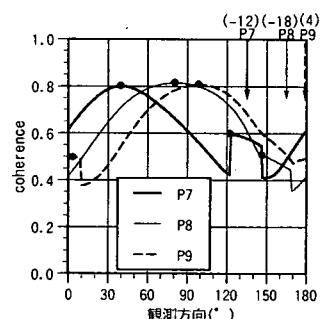


図-13 コヒーレンス(Model2:P7,P8,P9)

る 2 つの観測方向のいずれかが応答卓越方向と判断できる。また、コヒーレンスの極大値が 3 カ所以上存在し応答卓越方向の判断が難しい場合でも、強軸と弱軸が 90° 間隔で出現することから容易に 2 方向が選択できることが分かった。

- 4) 曲線桁の円弧が囲む中心角を 90°, 180° に変化させた 2 つの曲線橋モデルを例にして従来法と本論文で提案した推定手法の比較を行った結果、最大でも ±20° の誤差で推定可能であることを示した。
- 5) 式(1a), (1b)に示されるように、推定理論は線形応答が基礎となっているが、非線形応答時にも等価線形的に成り立つとすれば適用は可能であると考えられる。ただし非線形応答時の推定精度については今後の検討課題である。

謝辞：本研究の一部は、日本鋼構造協会次世代土木鋼構造委員会「橋梁システムと耐震性小委員会」の活動の一環として行われました。また、京都大学防災研究所の澤田純男助教授には多くのご助言を頂きました。記して感謝の意を表します。

#### 付録

ハーフパワー法<sup>15)</sup>では共振振動数の両側で共振時パワーの 1/2 のパワーを示す振動数を基準に減衰定数を求める。この考えをもとに減衰定数  $h=0.05$  として共振振動数  $f_0$  から ±1/2 オクターブの振動数 ( $f_1=f_0/\sqrt{2}$ ,  $f_2=\sqrt{2}f_0$ ) でのパワーの大きさを求めると以下ようになる。

固有振動数  $f_0$  の 1 自由度系に振動数  $f$  の外力が作用する場合、加速度応答の倍率は以下の式で求められる。

$$L_1 = \frac{(f/f_0)^2}{\sqrt{(1-f^2/f_0^2)^2 + 4h^2(f/f_0)^2}} \quad (10)$$

また、固有振動数  $f_0$  と外力の振動数  $f$  が一致する共振時の倍率は次のようになる。

$$L_0 = \frac{1}{2h} \quad (11)$$

式(10),(11)に  $h=0.05$ ,  $f=f_1$  ( $f_2$ ) を代入して共振時に対する振幅の比  $L_1/L_0$  ( $L_2/L_0$ ) を求めると以下ようになる。

$$\frac{L_1}{L_0} = \frac{(1/\sqrt{2})^2 / \sqrt{(1-(1/2)^2)^2 + 4 \cdot 0.05^2 \cdot (1/2)}}{1/(2 \cdot 0.05)} = 0.099 \quad (12)$$

$$\frac{L_2}{L_0} = \frac{(\sqrt{2})^2 / \sqrt{(1-2)^2 + 4 \cdot 0.05^2 \cdot 2}}{1/(2 \cdot 0.05)} = 0.198 \quad (13)$$

パワースペクトルは応答の 2 乗となるため、共振振動数  $f_0$  から ±1/2 オクターブの振動数  $f_1$  および  $f_2$  では共振時パワーに対してパワーの大きさがそれぞれ約 1 および 4% となる。よって、共振振動数を中心とした ±1/2 オクターブの範囲では、パワースペクトルは十分大きな値を持つことが保証されており、コヒーレンスを求めるのに有効な範囲であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.
- 2) 土木学会「耐震基準等基本問題検討会議」：土木構造物の耐震基準等に関する提言, 土木学会誌, Vol. 80, No. 7, pp. (1)-(7)
- 3) 土木学会, 日本鋼構造協会：橋梁システムの動的解析と耐震性, 橋梁システムと耐震性小委員会報告書, 2000.
- 4) 川神雅秀, 崎山毅, 松田浩, 岡林隆敏, 森田千尋：曲線桁橋における水平地震入射角と支承部の動的応答特性, 構造工学論文集, Vol. 40A, pp. 759-770, 1994.
- 5) Kawakami, M., Sakiyama, T., Matsuda, H. and Morita, C.: In-Plane and Out-Plane Free Vibrations of Curved Beams with Variable Sections, *Journal of Sound and Vibration*, No.187, pp.381-401, 1995.
- 6) 川神雅秀, 岡林隆敏, 崎山毅：不規則応答解析による曲線橋支承部の地震動最悪入力方向についての考察, 土木学会論文集, No. 516/VI-27, pp. 99-104, 1995.
- 7) 山口栄輝, 清水俊彦, 川神雅秀, 田崎賢治, 野中哲也, 久保嘉延：鋼曲線ラーメン橋の地震時応答特性に関する基礎的研究, 鋼構造論文集, Vol. 47A, pp. 851 - 860, 2001.
- 8) Lopez, O. and Torres, R.: The Critical Angle of Seismic Incidence and the Maximum Structural Response, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 26, pp. 881-894, 1997.
- 9) 渡部丹：3 次元強震地動シミュレーション, 建築研究所年報, pp. 201-206, 1974.
- 10) Kubo, T. and Pienzien, J.: Characteristics of Three - Dimensional Ground motions Along Principal Axes, San Fernando Earthquake, 6th WCEE, pp. 439-444, 1977.
- 11) 星谷勝, 石橋裕：地震動ベクトルの主軸と波形特性, 土木学会論文報告集, 第 268 号, pp. 33-46, 1977.
- 12) 岡野創：確率変数を含む地盤および地盤-構造物系の地震応答量の評価に関する研究, 神戸大学学位論文, pp. 17-32, 1998.
- 13) 中井博, 橋本良之, 北田俊行, 南荘淳, 村山泰男：曲線箱桁橋の実績調査, 橋梁と基礎, No. 5, 1994.
- 14) Kawakami, H., Sato, Y. and Kubo, K.: Properties of Coherence Functions and Modification of Computational Method, *Proc. of JSCE*, No. 374/ I-6, pp. 161-171, 1986.
- 15) 例えば, 小坪清真：土木振動学, 森北出版, pp. 350-354, 1995.

(2001. 6. 4 受付)

## A STUDY ON ESTIMATION FOR CRITICAL DIRECTION OF DYNAMIC RESPONSE OF CURVED GIRDER BRIDGE USING COHERENCE FUNCTIONS

Tomoyuki IKEUCHI, Hitoshi MORIKAWA and Isao MATSUI

We present a simple method to estimate the horizontal incident direction of earthquake ground motion, which gives most severe response of a curved girder bridges: we call it "critical direction." To find the critical direction, most of designers have to calculate dynamic responses of a structure for incident waves from various azimuth. Thus, the many resources are required for calculation. To diminish such the difficulty in numerical calculation, we improve a method proposed by Okano. He has developed a method to estimate the principal axis of the ground using coherence functions among the observed time traces of earthquake ground motion. It is concluded that the proposed method can reduce the cost for numerical calculation without a lack of accuracy.