位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究

その1 位相差分分布と地震動経時特性の関係に関する理論的背景

A STUDY ON A GENERATION OF SIMULATED EARTHQUAKE GROUND MOTION
CONSIDERING PHASE DIFFERENCE CHARACTERISTICSPart 1 Theoretical background of the relationship between
phase difference distribution and envelope characteristics

山根尚志*, 長橋純男**

Takashi YAMANE and Sumio NAGAHASHI

The purpose of this paper is to demonstrate that the theoretical background of the similarity between the distribution of phase differences and the shape of the wave envelope can be clearly explained by using the concept of beat. The validity of this idea is verified by analyzing recorded earthquake motions. This idea, moreover, derives two significant results, that a wave with uniform phase differences becomes a pulse independently of Fourier amplitude, and that the position of the pulse on the time axis and the pulse type can be specified by the parameters of the phase difference and the initial phase angle. Comparing response spectra of two waves with identical Fourier amplitudes, it is illustrated that the response spectrum depends on Fourier phase as well as Fourier amplitude.

Keywords: Simulated earthquake ground motion, Fourier phase, Phase difference,

Envelope characteristics of time history, Beat, Pulse

模擬地震動、フーリエ位相、位相差分、経時特性、うなり、パルス波

1. 序

高層建築物・免震建築物の地震応答解析では、例えば最大速度値で規準化した観測地震動以外に、設計用に設定した目標応答スペクトルに適合する模擬地震動を作成し、これを入力地震動として用いることがある。この模擬地震動の作成に関しては、与えられた目標応答スペクトルに適合する時刻歴を正弦波の重ね合わせで求める手法が一般的であるが、これは、時刻歴波形経時特性の設定方法という観点からみて以下の2種に大別することができる。一つは、位相を一様乱数で与え、Jennings et al.¹⁾が定義した時刻歴包絡線を規定して地震動を作成する手法^{例えば2)}であり、もう一つは、位相として観測地震動の特性を採用する手法^{例えば3)}である。前者では、人為的に作成した位相特性・経時特性と、実現象としての地震動特性との関係が明快とはいえない。一方後者は実現象から位相を借用しているため、位相特性という観点ではこのような問題は少ないと判断でき、また、得られた時刻歴は位相を採用した原波形と非常に良く似た形状となり、より現実的な地震動が作成されていると考えることができる。しかしこの場合でも、位相を採用する地震動の選択基準は明快ではなく、より論理的な考え方の提示が期待されている。

従来、設計用地震動に関する研究は振幅特性に重点が置かれ、位相特性に関する研究は少なかったが、大崎ら⁴⁾が、隣り合うフーリ

エ位相の差である位相差分分布と加速度時刻歴波形（以下、時刻歴波形と称する。）の包絡形の類似性を指摘して以来、地震動の位相特性と経時特性に関する研究が行われるようになってきた。和泉・勝倉⁵⁾は、フーリエ位相の傾きである群遅延時間の平均値と標準偏差により、時刻歴波形の重心位置と広がり表現できることを示し、位相情報と波形の経時特性の関係を論じた。木村⁶⁾は群遅延時間を用いた波形制御について考察し、特に、初期位相が局所的波形形状に大きな影響を与えることを指摘した。また沢田⁷⁾は、位相差分分布と経時特性の類似性に関する理論的根拠について検討し、回帰分析の手法を用いることにより、微小帯域の最大値生起時間が、その帯域の位相差分の重みつき平均で表されることを示した。さらに沢田ら⁸⁾は、地震動継続時間と群遅延時間の関係についても検討している。

このような基礎的研究を踏まえ、位相差分分布、あるいは群遅延時間を考慮した模擬地震動に関する研究が行われるようになってきた。石井ら⁹⁾は、観測地震動の分析及び位相差分分布特性が応答に与える影響に関する検討を行い、狭帯域の位相差分分布を考慮した模擬地震動作成手法を提案している。また佐藤らは、群遅延時間の平均値と標準偏差が、やや長周期地震動の経時特性を評価するための指標として適切であることを示し¹⁰⁾、地震動記録の回帰分析を

* ㈱日建設計構造設計室 主査・工修

** 千葉工業大学工学部建築学科 教授・工博

Senior Structural Engineer, Structural Engineering Dept., Nikken Sekkei Ltd., M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Chiba Institute of Technology, Dr. Eng.

基に震央距離をパラメータとしてこれら指標を統計的にモデル化している¹¹⁾。また、ウェーブレット変換を用いサポート区間毎にこれら指標を求め、マグニチュードと震央距離により回帰分析を行って設計用の標準的位相特性をモデル化した研究もある^{12),13)}。これらは、震源から観測点までの複雑な特性を全体として捉え、マグニチュードや震央距離という明解で一般的にも広く認知されている物理パラメータを用いて、地震動の経時特性を表現しようとしたものである。しかし、これらの手法は点震源を仮定しているため、断層面との位置関係を考慮した設計用地震動の作成には適していない。これに対し、断層の震源破壊過程をインパルス列としてモデル化し、震源・伝播経路・地盤増幅の各特性の群遅延時間を合成することにより、位相特性をシミュレートした模擬地震動を作成する手法も提案されている¹⁴⁾。しかし論文にも記述されているように、この手法では、震源が遠くにあり伝播経路特性が複雑な場合には、主要動以降の継続波部分が適切に評価できないという問題点がある。また震源近傍の地震動評価に限っても、一般的にはインパルス列の設定は難しく、実用的見地からすると、この点も解決されるべき課題であると考えられる。

以上のように、位相情報を用いて設計用模擬地震動に経時特性を与える研究は、群遅延時間の平均値・標準偏差を統計的に処理する手法が主流であり、小領域に分割した断層面でインパルス列を想定する手法が新しい試みとして位置付けられる。しかし前者は、断層面の広がりや局所的なサイト特性を考慮することが難しく、また後者は、遠距離地震の適切な評価ができず、また震源破壊過程の想定も難しく実用性という観点で問題が残っている。

このような研究状況の下で、位相特性設定に関する、より明快で且つ実用的な考え方の提示が期待されている。筆者らは、既往の研究とは異なる視点で位相差分布について考察し、これに基づいた観測地震動記録の分析を踏まえて位相特性の選択基準を示し、模擬地震動の経時特性を論理的に決定するための考え方を提案することを目指している。ここでは、そのための基礎となる位相差分布について考察する。

本論文の目的は、位相特性を考慮した設計用模擬地震動の作成を前提とし、位相差分布と経時特性の関係に関する理論的背景を明らかにすることにある。本論文ではまず、波形の重ね合わせという、より直接的で感覚的にも捉えやすい概念を用いて、位相差分布と地震動経時特性の類似性について説明する。次に、この概念を用いて位相差分布とパルス波の関係について論ずるとともに、初期位相が経時特性に与える影響に関しても、より論理的な考え方を示す。更に、地震応答はフーリエ振幅のみならずフーリエ位相にも大きく依存していることを例示し、模擬地震動の作成にあたっては振幅特性のみでなく、位相特性も合理的判断に基づいて設定する必要があることを指摘する。

2. 位相差分布の物理的意味

地震動時刻歴 $f(t)$ は有限フーリエ級数に展開すれば、次式のように表現される。

$$f(t) = \sum_{k=0}^{N/2} a_k \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (1)$$

ここに、 a_k は k 次のフーリエ振幅、 ϕ_k は k 次のフーリエ位相、 ω_k

は k 次の円振動数、 N は離散化された時刻歴のデータ数を表す。但し 0 次は非振動成分であるので、 $\omega_0 = \phi_0 = 0$ とする。この記号を用いて、隣り合うフーリエ位相の差である位相差分 $\Delta\phi_k$ は以下のように定義される。

$$\Delta\phi_k = \phi_{k+1} - \phi_k \quad (k=1, 2, \dots, N/2-1) \quad (2)$$

但し、 $\Delta\phi_k$ は区間 $[0, -2\pi]$ の値とする。

区間 $[0, -2\pi]$ を均等に分割し、位相差分の区間毎の頻度分布を表した図が位相差分布であり、この形状と地震動包絡形の類似性が指摘されている⁴⁾。図 1 に、1968 年十勝沖地震八戸港湾 EW 成分（以下、HACHINOHE EW と称する。）及び 1995 年兵庫県南部地震神戸海洋気象台 NS 成分（以下、JMA KOBE NS と称する。）の時刻歴波形と位相差分布の比較を示すが、この例でもその類似性は明らかである。なお本論文では文献 4) と同様に、位相差分の区間 $[0, -2\pi]$ を 32 等分し、また頻度分布に関しては、パワースペクトルの低次からの累積が 99% となる範囲までの振動数成分について計算した。解析に用いた時刻歴波形の時間刻みは 0.02 sec、データ長さは 163.84 sec とした。HACHINOHE EW 原波の全長は 120 sec であるので、後続のゼロを付加してデータ長さを調整した。

図 1 位相差分布と時刻歴波形の比較

次に、位相差分布のもつ物理的意味について考察する。

式(1)の任意の隣り合う成分波を重ね合わせると、その合成波は以下のように記述される。但し、ここでは位相差分布のもつ性質を明らかにすることが目的であるため、フーリエ振幅は共に 1.0 と仮定する。

$$\begin{aligned} & \cos(\omega_{k+1}t + \phi_{k+1}) + \cos(\omega_k t + \phi_k) \\ &= 2 \cos\left(\frac{\omega_{k+1} - \omega_k}{2}t + \frac{\phi_{k+1} - \phi_k}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega_{k+1} + \omega_k}{2}t + \frac{\phi_{k+1} + \phi_k}{2}\right) \quad (3) \\ & \quad (k=1, \dots, N/2-1) \end{aligned}$$

ここで隣り合う円振動数の差が小さいことを考慮すると、式(3)右辺の第1因子である $\cos$ 関数の周期は長く、これは、第2因子の $\cos$ 関数が円振動数 $(\omega_{k+1} + \omega_k)/2$ で単振動する波形に、第1因子で与えられる包絡形を乗じた振幅特性を有する波形、すなわち「うなり」となる。円振動数の差分 $\Delta\omega$ と波形の全長 T (sec) との間には式(4)の関係があるので、式(3)の包絡関数の周期は $2T$ となるが、この関係は次数 k に依存しないため、隣り合う成分波の合成波の包絡形はすべて、全長 $2T$ の $\cos$ 関数となる。

$$\Delta\omega = \omega_{k+1} - \omega_k = 2\pi/T \quad (4)$$

次に、このうなりの振幅が最大となる、いわゆる「腹」の位置について検討する。時間軸上での腹の位置を $\bar{t}$ と表し、 $\Delta\phi_k$ 及び $\Delta\omega$ の記号を用いると、式(3)の包絡関数が最大となる条件は以下のように記述される。

$$\Delta\omega \bar{t} + \Delta\phi_k = 0 \quad (5)$$

ここで式(4)を考慮すると、以下の関係式が得られる。

$$\frac{\bar{t}}{T} = -\frac{\Delta\phi_k}{2\pi} \quad (6)$$

これは、時刻歴波形の任意の隣り合う成分波を抽出し重ね合わせた場合、うなりの腹の位置 $\bar{t}$ と全長 T との比率が、位相差分の符号を反転させた値 $-\Delta\phi_k$ と 2π との比率に等しいことを意味する。換言すれば、全長 T を 2π に対応させると、最大振幅が発生する時間軸上の位置 $\bar{t}$ は $-\Delta\phi_k$ に対応することになる。なお、式(2)で $\Delta\phi_k$ の区間を負の領域 $[0, -2\pi]$ としているのは、式(6)の対応関係を時間軸の正の領域で成り立たせるためである。

以上の概念を説明したものが図2である。ここでは全長を 40.96 sec とし、隣り合う成分波の位相ずれの状況を把握しやすい例として、10 次と 11 次の隣り合う成分波の重ね合わせについて示した。左側の図が隣り合う成分波、右側の図が合成波及びその包絡関数である。位相差分は、 $\Delta\phi = 0, -\pi/2, -\pi, -3\pi/2$ の4ケースとしたが、この図より、式(6)で与えられる、位相差分とうなりの腹の位置との対応関係が理解できる。

なお、隣り合う成分波の振幅が異なるときには、うなりの節の位置での振幅は完全にはゼロとならず、この部分でくびれた形状となる。くびれの程度は隣り合う振幅の比率に依存しているが、ここではその程度に関しては議論せず、時間軸上での腹の位置に着目して論理を展開する。

本節では、隣り合う成分波の位相差分が、それらを合成したうなりの腹の、時間軸上での位置に対応していることを指摘した。位相差分分布は位相差分を区間毎に総計した頻度分布であるから、同一区間に属する各合成波の最大振幅は、時間軸上のほぼ同じ位置に存在することになる。また、属している合成波をすべて重ね合わせた波形を区間毎に比較すると、その最大振幅値に関する傾向は、位相差分の頻度分布と相似的になると推察することができる。これより、全成分波の重ね合わせである原波形の経時特性と位相差分分布が類似したものになると考えることができるが、次節において観測地震動記録を分析することによりこの考え方の妥当性を検証する。な

お以下の節においては、この位相差分の各区間に属する成分波の集合を位相差分群と称することにする。

図2 隣り合う成分波と合成波及びその包絡関数

3. 位相差分群毎のフーリエ振幅・時刻歴波形

前節の考え方を基にして、一般的に地震動波形の経時特性と位相差分分布の関係について検討するため、位相差分群毎にフーリエ振幅・時刻歴波形を求める。

位相差分群に関しては、区間 $[0, -2\pi]$ を 32 等分していることより、第 j 群の区間を以下のように定義する。

$$(j-1)\pi/16 \leq |\Delta\phi| < j\pi/16 \quad (j=1, 2, \dots, 32) \quad (7)$$

位相差分分布はこの区間毎の頻度を表しているが、それぞれの群の内訳として、各群に属する成分波のフーリエ振幅を、振動数を横軸にして整理した結果が図3である。加速度時刻歴としては HACHINOHE EW を用いたが、第5群を中心にして第1~11群に成分波が集中していることは、図1(a)の位相差分分布が第5群で最も高く、これを中心にした第1~11群の頻度分布が支配的であることと対応している。また、頻度の高い群ほどフーリエ振幅の値も大きいという傾向が認められる。この図により、各群に属する振動数成分の全体像を把握することができる。なお、この例ではパワースペクトルの累積が 99% となる振動数は約 7.59 Hz であった。また、このグルーピングは位相差分を基に行っているため、 $(k-1)$ 次と k 次の位相差分と、 k 次と $(k+1)$ 次の位相差分が異なる場合、 k 次の成分波は異なる2つの群に属することになるが、この場合には、 k 次のフーリエ振幅は 1/2 ずつ両方の群に振り分けて表示している。

次に、群に属する成分波をすべて重ね合わせた合成波を、図3と同様、群毎に整理して図4に示す。但し第17~32群の加速度波形の振幅は非常に小さいため、それらの図は省略した。これより、振

図3 位相差分群毎のフーリエ振幅 (HACHINOHE EW)

図4 位相差分群毎の時刻歴波形 (HACHINOHE EW)

図5 位相差分群毎のフーリエ振幅 (JMA KOBE NS)

図6 位相差分群毎の時刻歴波形 (JMA KOBE NS)

幅の大きな群は第 4~6 群であり、これらが原波形の経時特性に大きな影響を与えていると指摘できる。また、波形のピークの位置に関しては以下のような特徴が読み取れる。例えば、第 4 群の位相差分は概ね $\Delta\phi = -\pi/4$ であり、式(6)によると最大振幅は、原点から測って全長の 1/8 程度に位置すると想定されるが、図中のピークの位置はこれに良く対応している。また、第 16 群の位相差分は概ね $\Delta\phi = -\pi$ であり、最大振幅は波形の中央になると考えられるが、図 4 でもその特徴が表れている。振幅の差はあるものの、すべての群で式(6)の傾向が認められ、位相差分の変化とともにピークの位置が移動してゆく様子が把握できる。なお、ある成分波が 2 つの群に属する場合、そのフーリエ振幅を 1/2 として両方の群に振り分けているため、各群の時刻歴をすべて重ね合わせた波形は原波形と一致する。図 4 の各群の波形には時刻 150(sec)前後に比較的大きな振幅が見られるが、波形を重ね合わせることにによりこの部分の振幅は打ち消しあうため、その合成波は図 1(a)の加速度時刻歴と同じものとなる。

JMA KOBE NS に関して同様の分析を行った結果が、図 5 及び図 6 である。但し図 1(b)の位相差分分布からも明らかに、第 4~11 群以外の頻度分布はほとんど無視できるため、ここでは省略した。これより、第 7、8 群が支配的であり、これらの合成波は、原点から測って約 1/4 の位置に大きな振幅を有していることが読み取れる。これは、これらの群の位相差分が概ね $\Delta\phi = -\pi/2$ であることに対応している。なおこの例では、パワースペクトルの累積が 99% となる振動数は約 6.71Hz であった。

以上、包絡形の異なる観測地震動 2 波を分析し、前節の論理の妥当性を検証した。群毎に合成した波形の特性を把握することにより、位相差分分布と時刻歴経時特性の関係が、波形の重ね合わせという簡明な概念を用いて物理的・視覚的に理解できることを示した。

4. 一様位相差分分布とパルス波

本節では、すべての位相差分が一定であるような位相特性を有する時刻歴波形について考察する。

ここでもまず、隣り合う成分波の重ね合わせについて考える。2 節では、式(3)右辺の第 1 因子である $\cos$ 関数、つまりうなりの包絡関数に着目して、その腹の位置が式(6)で規定されることを示したが、ここでは第 2 因子の $\cos$ 関数に着目して、局所的な波の形状について論ずる。

すべての位相差分が同じである場合、その位相差分を $\Delta\phi$ 、1 次の円振動数・フーリエ位相を ω_1 、 ϕ_1 と表すと、 k 次の円振動数とフーリエ位相は次のように記述される。

$$\omega_k = \omega_1 + (k-1)\Delta\omega \quad (8)$$

$$\phi_k = \phi_1 + (k-1)\Delta\phi \quad (9)$$

この関係式を用いると、ここで注目している $\cos$ 関数は以下のように展開される。

$$\begin{aligned} & \cos\left(\frac{\omega_{k+1} + \omega_k}{2}t + \frac{\phi_{k+1} + \phi_k}{2}\right) \\ &= \cos\left(\frac{2\omega_1 + (2k-1)\Delta\omega}{2}t + \frac{2\phi_1 + (2k-1)\Delta\phi}{2}\right) \\ &= \cos\left(\omega_1 t + \phi_1 + \frac{2k-1}{2}(\Delta\omega t + \Delta\phi)\right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$(k=1, \dots, N/2-1)$$

この式をうなりの腹の位置、 $t=\bar{t}$ において評価する。式(5)を適用し、 $\omega_1 = \Delta\omega$ であることを考慮すると、以下の関係式が得られる。

$$\begin{aligned} & \cos\left(\frac{\omega_{k+1} + \omega_k}{2}\bar{t} + \frac{\phi_{k+1} + \phi_k}{2}\right) \\ &= \cos(\phi_1 - \Delta\phi) \end{aligned} \quad (11)$$

$$(k=1, \dots, N/2-1)$$

すべての成分波間の位相差分が同一である場合、次数に依らず式(11)の関係が成立するが、これは $t=\bar{t}$ の位置ですべての成分波が同位相となることを意味している。言い換えると、 $t=\bar{t}$ の点を原点とみなした場合、すべての成分波は、式(11)右辺の $\cos$ 関数の引数で与えられる位相角でこの点を通過することになる。このように任意の点をすべての成分波が同位相で通過する場合には、その点の近傍で振幅が著しく大きくなり、それ以外の時間領域では成分波が打ち消しあい振幅が小さくなると予測されるが、ここでは、このような特徴を有する波をパルス波と定義する。このパルス波を比較対照として用いる理由は、同一フーリエ振幅を有していても波形の経時特性が異なること、また弾性応答スペクトルを比較することにより、地震応答がフーリエ振幅のみならず、位相特性にも大きく依存していることを明快に理解できるからである。更に本節では、初期位相と位相差分をパラメータとしてパルス波形の制御が可能であることも示す。

すべての成分波の位相差分が同一である場合には、各成分波は $t=\bar{t}$ の点を同位相で通過することを述べたが、その典型的な例として以下の 4 例について検討する。ここでは、式(11)の引数である、初期位相 ϕ_1 と位相差分 $\Delta\phi$ の差をパラメータとして分類した。

- $\phi_1 - \Delta\phi = 0$: 各成分波はすべて、 $t=\bar{t}$ で正の最大振幅となる $\cos$ 関数、 $\cos(\omega_k(t-\bar{t}))$ であり、合成波はこの点で正の最大振幅を持つパルス波。
- $\phi_1 - \Delta\phi = \pi$: 各成分波はすべて、 $t=\bar{t}$ で負の最大振幅となる $\cos$ 関数、 $-\cos(\omega_k(t-\bar{t}))$ であり、合成波はこの点で負の最大振幅を持つパルス波。
- $\phi_1 - \Delta\phi = \pi/2$: 各成分波はすべて、 $t=\bar{t}$ で位相ずれが π となる $\sin$ 関数、 $-\sin(\omega_k(t-\bar{t}))$ であり、合成波はこれらを重ね合わせたパルス波。
- $\phi_1 - \Delta\phi = 3\pi/2$: 各成分波はすべて、 $t=\bar{t}$ で位相ずれが 0 となる $\sin$ 関数、 $\sin(\omega_k(t-\bar{t}))$ であり、合成波はこれらを重ね合わせたパルス波。

以上のように、位相差分がすべて同じ場合、 $t=\bar{t}$ という点はいなりの腹であると同時に、すべての成分波の位相が一致する点、すなわちパルス波の原点になることを示した。またこれは、位相差分分布の頻度の高い群では、その合成波はある時刻の周辺に大きな振幅が集中するような波形になることを示唆している。

隣り合う成分波のフーリエ振幅が異なる場合には、うなりの節で振幅がゼロとならず、くびれたような形状となるが、ここで述べた関数の特性は振幅値には依存しないため、上記の内容は、任意振幅の成分波の合成に関して一般性を有している。故に、任意のフーリエ振幅に対し、すべての位相差分を同一とし、初期位相を上記の条件式を満足するように与えることにより、指定した時刻の位置に、

想定した形状のパルス波を発生させることが可能である。

以上、(1)任意のフーリエ振幅を有していても、位相差分を一定とすることでパルス波の作成が可能であること、(2)初期位相と位相差分によりパルス波の形状が制御されることを示した。ここで、これらの妥当性を検証するとともに、(3)観測地震動と同一フーリエ振幅を有するパルス波の応答性状が原波のものと異なること、つまり地震応答は位相特性にも依存していることを確認する目的で、以下のようなパルス波を作成し比較検討を行う。

まず、フーリエ振幅は HACHINOHE EW の特性を採用し、フーリエ位相として、位相差分が一定となるような特性を与えて作成した模擬地震動を図 7 に示す。この例ではパルスの位置を全長の 1/4 とすることを意図し、位相差分を $\Delta\phi = -\pi/2$ とした。また前述の 4 条件に対応させ、初期位相は $\phi_1 = -\pi/2, 0, \pi/2, \pi$ の 4 種類とし、そのパルス波の形状を比較した。但し、上記 4 条件の記述は内容の関連性を重視してその順序を決めているのに対し、図 7 では初期位相 ϕ_1 の値の順に波形を並べている。この結果より、フーリエ振幅の値に依存せずパルス波を発生させることが可能であること、また、初期位相と位相差分という 2 個のパラメータを用いることにより、時間軸上の任意の位置に、想定した形状のパルス波を作成できることが確認された。

図 7. 初期位相を変えて発生させたパルス波の時刻歴波形

次に、 $\phi_1 = 0$ のパルス波と原波 (HACHINOHE EW) の応答スペクトルの比較を図 8 に示す。この図は、減衰定数 $h=5\%$ の線形系の変位応答スペクトルを基に、擬似速度・擬似加速度応答スペクトルを含めて 3 軸対数表示したものである。パルス波の応答スペクトルは、原波のものに比べ全般的に大きく、特に短周期領域での差異

が著しい。これについては、パルス波は一点ですべての成分波が同位相で重ね合わされているため、瞬間的な最大応答を表す応答スペクトルがより大きくなると説明することができる。このように、全く同じフーリエ振幅を有しているにもかかわらず応答値が大きく異なること、つまり、位相特性の違いが応答に大きな影響を与えていることが例証された。また図 9 には、エネルギースペクトル¹⁵⁾の比較を示す。これは、減衰定数 $h=10\%$ の線形系の、解析終了時刻における総入力エネルギーを速度換算したものである。この図では両者はほぼ完全に重なっており、継続時間全体にわたって累積する入力エネルギーは、位相特性の違いによる影響をほとんど受けないことが確認された。

このように位相特性が地震応答に与える影響は大きく、設計用模擬地震動作成にあたっては、これを適切に評価しなければならないと考えられる。

図 8 同一フーリエ振幅を有するパルス波と原波の擬似速度応答スペクトル ($h=5\%$) の比較

図 9 同一フーリエ振幅を有するパルス波と原波のエネルギースペクトル ($h=10\%$) の比較

5. 結論

位相特性を考慮した設計用模擬地震動を作成する目的で、地震動の位相差分分布が有する物理的意味について考察し、以下の結論を得た。

- (1) うなりの概念を用いることにより、位相差分分布と地震動経時特性の類似性に関する理論的背景を明らかにした。すなわち、隣り合う成分波の位相差分が、うなりの腹の位置に対応するこ

とを指摘し、波形の重ね合わせという物理的に明快な論理により、その類似性が説明できることを示した。

- (2) 観測地震動の位相差分を分析し、同一位相差分群（位相差分の近い成分波の集合）に属する波の合成波が、うなりの性状を有していることを確認した。また、頻度分布が相対的に高い位相差分群の合成波が原波形の経時特性に支配的な影響を与えていること、各群の合成波の重ね合わせで原波形の経時特性がより直接的・視覚的に説明し得ることを指摘した。
- (3) 位相差分がすべての成分波間で一定である場合、その合成波はフーリエ振幅に依らず、パルス波となることを指摘した。すなわち、うなりの概念を用いることにより、このような合成波は、うなりの腹の位置で著しく大きな振幅を有するパルス波を形成することを示した。
- (4) 更に、そのパルス波の経時特性が初期位相と位相差分の差に依って決まることを指摘し、この2個のパラメータを操作することにより、時間軸上の任意の位置に、想定した形状のパルス波を発生させ得ることを例示した。従来経験的に指摘されていた初期位相と波形制御の関係について、より論理的な考え方を提示した。
- (5) フーリエ振幅が同一であっても、位相特性により弾性応答スペクトルが大きく異なること、つまり、地震応答はフーリエ振幅のみならず、フーリエ位相にも大きく依存していることを例証した。この結果は、設計用模擬地震動の作成にあたっては振幅特性のみでなく、位相特性も合理的判断に基づいて設定する必要があることを示唆している。

謝辞

本研究では、港湾技術研究所の強震観測データ並びに気象庁 87 型電磁式強震計データを利用させていただきました。関係各位に感謝いたします。また論文執筆に関して、(株)日建設計構造設計室山本恵氏に御協力いただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Jennings, P. C., G. W. Housner and N. C. Tsai : Simulated Earthquake Motions for Design Purposes, Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.1, pp.145-160, 1969.1
- 2) Gasparini, D. A. and E. H. Vanmarcke : Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra, M.I.T. Department of Civil Engineering Research Report R76-4, Order No. 527, 1976.1
- 3) 北村春幸, 山根尚志, 村上勝英, 寺本隆幸 : 観測地震動の位相特性を用いた設計用人工地震動について (その1,2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.287-290, 1990.10
- 4) 大崎順彦, 岩崎良二, 大川出, 政尾亨 : 地震波の位相特性とその応用に関する研究, 第5回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.201-208, 1978.11
- 5) 和泉正哲, 勝倉裕 : 地震動の位相情報に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集, 第327号, pp.20-28, 1983.5
- 6) 木村正彦 : 模擬地震動作成における波形制御について, 日本建築学会構造系論文報告集, 第367号, pp.30-36, 1986.9
- 7) 沢田勉 : 位相差分による地震動の非定常性の解析, 土木学会論文集, 第344/I-1号, 1984.4
- 8) 沢田勉, 永江正広, 平尾潔 : 位相差分による地震動継続時間の定義とその統計解析, 土木学会論文集, 第368/I-5号, 1986.4
- 9) 石井透, 神田順, 岩崎良二 : 狭帯域位相特性を考慮した建築設計用模擬地震動作成手法, 日本建築学会構造系論文報告集, 第379号, pp.49-57, 1987.9
- 10) 佐藤智美, 佐藤俊明, 植竹富一, 菅原良次 : 群遅延時間を用いたやや長周

期地震動の経時特性評価のための基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第480号, pp.57-65, 1996.2

- 11) 佐藤智美, 植竹富一, 菅原良次 : 群遅延時間を用いたやや長周期地震動の経験的経時特性モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第493号, pp.31-39, 1997.3
- 12) 佐藤忠信, 室野剛隆, 西村昭彦 : 観測波に基づく地震動の位相スペクトルのモデル化, 土木学会論文集, No.640/I-50, pp.119-130, 2000.1
- 13) 佐藤忠信, 室野剛隆 : 位相情報を用いた地震動のシミュレーション法, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.113-123, 2001.4
- 14) 佐藤忠信, 室野剛隆, 西村昭彦 : 震源・伝播・地点特性を考慮した地震動の位相スペクトルのモデル化, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.201-213, 1999.1
- 15) 加藤勉, 秋山宏 : 強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷, 日本建築学会論文報告集, 第235号, pp.9-18, 1975.9

(2001年7月10日原稿受理, 2001年11月21日採用決定)