低減衰機器の耐震性試験用入力波の合成* (広帯域の包絡応答スペクトルを満たす模擬地震動の合成法)

北 田 義 夫^{*1}

Generation of Input Motion for Vibration Test of Lightly Damped Equipment (Methodology to Generate Artificial Earthquake to Fit Widely Enveloped Response Spectrum)

Yoshio KITADA

This paper describes methods for generating artificial motion applicable to seismic design analyses and vibration tests of plant equipment to prove seismic performance. A typical motion that satisfies the target response spectrum (TRS) is used as the input motion of the vibration test. The TRS is generally produced by enveloping various floor response spectra of the tested equipment so that the spectrum tends to have wide-band frequency components (WBFCs) reflecting various plant conditions. The WBFCs generally increase the maximum acceleration of the generated motion. Moreover, there are limits to shaking table performance, including applicable maximum acceleration, velocity, and displacement. These limits sometimes cause problems in generating the motion. This paper reviews some typical methods of generating artificial earthquake motion and their improvement to generate motion satisfying the WBFC spectrum for lightly damped equipment. Typical motions generated by the improved method have never been generated previously by conventional methods of generating artificial earthquakes.

Key Words: Seismic Motion, Forced Vibration, Shaking Table, Artificial Earthquake Motion, Lightly Damped Equipment, Fast Fourier Transformation

1. 緒 言

近年プラント設備機器に対する振動台を用いた耐震性の実証や確証を目的とした試験が精力的に行われている。こうした試験では入力振動として、各プラントで、評価対象機器の設置床での低減衰応答スペクトルを包絡した、包絡応答スペクトルに適合させた模擬地震動が用いられることが多い。この包絡応答スペクトルは広振動数帯域で大きな応答を発生させるが、この種の模擬地震動を作成すること自体はさほど難しくはない。しかし、一般に高レベルの振動数成分が広い振動数域にわたって存在する模擬地震動の最大加速度は大きくなる傾向がある。一方、試験装置である振動台にもその性能に限界があるため、入力振動レベルに制限があるほか、試験体にとっても大きなレベルでの多数回の加振は望ましくない。このため、模擬地震動作成時には最大加速度等に現実的な範囲で制限が設けられる。こうした制限下での所定の目標応答スペクトルを満たす模擬地震動の作成はしばしば難しい場合がある。ここでは大きなレベルの応答を発生させる、低減

衰の包絡応答スペクトルに適合する模擬地震動の作成法に関して述べる。

2. 模擬地震動作成法

模擬地震動は基本的には種々の振動数の正弦波群を重ね合わせて作成される。この正弦波群に与える位相のとり方や重ね合わせ法によりいくつかの模擬地震動作成法があるが、ここでは以降に記す代数関數位相法⁽¹⁾とガウス波位相法⁽²⁾を用いて検討する。

これまで広く用いられている模擬地震動の作成手法は、各振動数成分波にある振幅を与えると同時に位相角を $0 \sim 2\pi$ 間の一様乱数で与え、これらを FFT を用いた逆フーリエ変換により合成するものである。

こうして合成した波形は一般に振幅が一定の定常波形となるので、この波形に図1のような振幅の立上り部、定常部および、減衰部からなる振幅包絡関数を掛けて“地震動らしさ”を与えている⁽³⁾。以後、この方法を正弦波合成法と呼ぶ。この方法による模擬地震動時刻歴 $x(t)$ は次式で表される。

$$x(t) = e(t) \sum_{i=0}^n a_i \sin(\omega_i t + \phi_i) \cdots \cdots (1)$$

ここで、

ω_i : i 番めの成分波の角振動数 (rad/s)

* 原稿受付 平成5年3月24日。

^{*1} 正員、(株)東芝原子力プラント技術部 (〒235 横浜市民子区新杉田8)。

図 1 模擬地震動の包絡関数 (M 8.4)

図 2 正弦波合成法で作成された M 6.5, Δ 7.2 km の模擬地震動 10 波の平均応答スペクトルと代表例

a_i : i 番めの成分波の振幅

ϕ_i : i 番めの成分波の位相角 (rad)

$e(t)$: 模擬地震動の振幅包絡関数

この方法で M(地震マグニチュード) 6.5, Δ (震央距離) 7.2 km の Ta(5%) (5% 減衰の目標加速度応答スペクトル) に適合させて作成した模擬地震動 10 波について Sa(5%) (5% 減衰の加速度応答スペクトル) と, Sa(1%) の各ばらつきと, その代表的時刻歴波形および加速度応答スペクトルを図 2 に示す。図から Sa(1%) は Ta(1%) を大きく上回る傾向がわかる⁽³⁾。

2.1 代数関數位相法(混合位相法) 代数関數位相法は正弦波合成法で Sa(5%) を Ta(5%) に適合させて模擬地震動を作成すると Sa(1%) は Ta(1%) を大きく上回る点を改善するために考案された模擬地震動作成法の一つであり, 成分波の位相を関数形で与える点に特徴がある。この方法は模擬地震動の極端な例としてパルス波を考えると低減衰系の応答が小さくなることにヒントを得ている。このパルス波の特徴はフーリエ振幅が振動数に関係なく一定値となり, 応答スペクトルが非常に滑らかな形となるほか, 位相が振動数軸に沿って負の一定こう配となっていることにあ

図 3 代数関數位相のパラメータの相違と地震波 (α : 10.0, κ : 0.25, d : 50, 160, 1000)

る。

このパルス波位相を用いて Sa(5%) が Ta(5%) に適合する模擬地震動を作成すると, これまでの正弦波合成法による模擬地震動とは逆に, Sa(1%) は Ta(1%) を大きく下回ることが見出された。このことから模擬地震動の位相をパルス波のように振動数の関数として与えることにより Ta(5%) と Ta(1%) の両目標加速度応答スペクトルに適合する模擬地震動の合成が可能であると考えられた。このため模擬地震動の位相として適切な関数形について種々な検討がなされた結果, 下式に示す指数関数が有望なことがわかった⁽³⁾。

$$\phi = af + d(e^{-\kappa f} - 1) \dots \dots \dots (2)$$

ここで,

f : 振動数 (Hz)

α, d, κ : 任意の定数

上記の定数, α, d および κ は, それぞれ未知数であるが, 次の特性を考慮し決定される。

① α 値は時刻歴波形の時間軸に対する平行移動に関与し, この値が大きいと波形は後方へ移動する。

② κ 値は低減衰応答スペクトルの周期軸に対するこう配に関与し, この値が小さいと応答スペクトルは短周期側で大きくなり, 長周期側で小さくなる。 κ 値が大きい場合はこの逆の特性を示す。

③ d 値は低減衰の応答スペクトルの大きさに関与

しこの値が大きい場合にはスペクトルのレベルが上昇し、小さい場合には下降する。

図3は、式(2)の α 値を10.0、 κ 値を0.25とし3種類の d 値により位相を定め、それぞれM6.5、 $\Delta 7.2$ kmのTa(5%)に適合させて作成した模擬地震動のSa(1%)、Ta(1%)および加速度時刻歴である。図3(a)のように d 値が小さいとSa(1%)はTa(1%)を大きく下回り主要動の継続時間も短くなる。 d 値が160のときは図3(b)のように主要動の継続時間も若干長くなり、Ta(5%)とTa(1%)の両者を同時に満足させ得るが、波形は地震動らしくはない。さらに図3(c)のように d 値を1000にした場合には、Sa(1%)はTa(1%)を大きく上回るほか、加速度振幅は定常となるのがわかる。このようにパラメータ値の適切な選択により、Ta(5%)とTa(1%)の両者を同時に満足させる模擬地震動が作成可能となる。また位相が連続関数であるため、応答曲線も連続的で滑らかな曲線になることも特徴である。

ただし、図3(b)に示すようにこの代数関数位相を用いると作成された模擬地震動は一種の正弦波掃引波状の独特な波形となり、明らかに地震動らしさを欠くという短所がある。このため“地震動”らしさは主として低振動数成分により形成されていると考え、低減衰系である機器の固有振動数が多く存在する5~8 Hz以上の高振動数側ではこの代数関数位相を用い、一般に剛に設計された機器の固有振動数が存在しない5~8 Hz以下の低振動数側は乱數位相を用いることにより“地震動”らしさを与える混合位相法が提案され

た⁽³⁾。

図4はこの手法でM6.5、 $\Delta 7.2$ kmのTa(5%)に適合させて作成した模擬地震動例である。この例では8 Hz以下の振動数成分に乱數位相を用いているため、Sa(1%)の高振動数(低周期)側で良好にTa(1%)を満たしているが、その時刻歴波形は高振動数成分が3秒付近に集中しており、いまだ“地震動”らしさに欠ける面もあると考えられる。

2.2 ビート波合成法 一般に地震動記録をバンド・パス・フィルタで分解すると、その要素波の包絡形は、ビート状波の繰返しとなる傾向がある。図5はSan Jose地震(1955)での観測記録の一例をバンド・パス・フィルタ²⁾により分解した4種類の振動数帯域(6.5~8.5 Hz, 10.5~12.5 Hz, 14.5~16.5 Hz および 18.5~20.5 Hz)における要素波形である。ビート波合成法はこの性質(ガウス波⁽²⁾)を応用し、その要素波がビート状波の繰返しとなる様な模擬地震動作成手法として提案するものであり、下式で表される。

$$x(t) = c(t) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} \cos [2\pi \{f_i + \Delta f_i \times (j-1)\} t + \phi_{ij}] \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここで

f_i : i 番めの振動数帯域の最初の振動数 (Hz)

Δf_i : i 番めの要素波の成分波間の振動数差 (Hz)

ϕ_{ij} : i 番めの要素波の j 番めの成分波位相 (rad)

a_{ij} : i 番めの要素波の j 番めの成分波振幅

すなわち時刻歴波形の振動数成分間隔、 Δf_i 、をFFTでの $\Delta f (=1/T_d, T_d$: 地震動の継続時間(秒))より大

図4 混合位相法により作成された模擬地震動(M 6.5)

図5 バンドパスフィルタにより分解された地震動の要素波例(San Jose地震, 1955.9.4)

きめ(2~6倍)にとり、それ以外の振動数成分には零振幅を与え逆フーリエ変換により波を合成すると、図6に示すように、 $T_i (=1/\Delta f_i)$ ごとに同一波形が符号を反転させつつ繰返す性質がある。ビート波合成法はこうした性質をもつ要素波を重ね合せて模擬地震動を作成する点に特徴がある。ただし、この手法でもすべての要素波をビート波とすると代数関数位相法の場合と同様に模擬地震動の包絡形にいわゆる“地震動”らしさが備わらないため、混合位相法と同様に5~8 Hz以下の低振動数域に従来の正弦波合成法を応用することにより“地震動”らしさを与える必要がある。

ビート波合成法による模擬地震動の作成には以下の方法が推奨される。

① 模擬地震動に“地震動らしさ”を与えるため、5~8 Hz以下の要素波の位相は一様乱数で与える。このため5~8 Hz以下の周期域での低減衰応答スペクトルの目標応答スペクトルへの収束性は問わない。

② 同じく“地震動らしさ”を与えるため、作成波に図1の型の振幅包絡関数を用いる。

③ 5~8 Hz以上の各振動数帯域の要素波を構成する成分波に与える位相は式(2)の代数関数で与える。

④ 隣合う各振動数帯域要素波間の関連性を特に考慮しないと要素波間の継ぎ目にあたる振動数点で低減衰の応答スペクトルが目標応答スペクトルを大きく上回る場合が多い。この欠点を補うには、隣合う振動数帯域要素波に現れるビート波群の中、少なくとも一組は高振動数側の要素波が先にくるように重ね合ればよい。この微調整は代数関数で与える位相パラメータ、 α 値の大小を調節すればよい。すなわち、 α 値は時刻歴波形の平行移動に関与し各振動数帯域要素波内の $T=1/\Delta f$ 間ごとに現れるビート波の立上り時間とほぼ対応付けられるためである。

この手法により、M6.5、震央距離7.2 kmのTa(5%)に適合して作成した模擬地震動の例を図7に示す。この図から図4の模擬地震動の高振動数成分が3秒付近に集中している点が改善されているのがわかる。

図6 ビート状要素波の時間刻み Δt と要素波形
($T_i=1/\Delta f_i$ の周期で同一波形が繰り返す)

3. 機器の振動試験に用いる入力波の試作

機器の耐震性評価試験の入力動として、低減衰(例えば1%減衰)の加速度応答スペクトルが、低振動数域から高振動数域までの広帯域にわたって高レベルで定義された場合を想定し、この応答スペクトルを満足する試験波を、ビート波合成法を応用して試作する。

図7 ビート波合成法により作成した模擬地震動

(a) 3~12 Hz 成分卓越型入力動

(b) 10~25 Hz 成分卓越型入力動

図8 試作試験波の目標応答スペクトル(1%減衰)

3・1 目標応答スペクトルの設定 ビート波合成法の適用性実証を目的とするため、図8に示す2種類の大きなレベルの $Ta(1\%)$ を目標応答スペクトルとして与える。図8(a)はケース1で、3~12 Hz 成分卓越形目標応答スペクトルとしての振動数域で大きな応答を発生させる応答スペクトルで、5 Hz の振動系の場合 19 000 gal(cm/s^2) もの大きな応答が発生するという厳しいものである。この厳しいスペクトルを満たす地震動は振動台の制御が可能なように、最大加速度が 1 500 gal 以下で最大速度は 70 cm/s 以下となる条件を設ける。図8(b)はケース2で、10~25 Hz 成分卓越形目標応答スペクトルとして、300 gal 以内の最大加速度で、10~25 Hz の高振動数域で 4 000 gal もの大きな応答が発生するという条件を設ける。

3・2 3~12 Hz 成分卓越型入力波 図8(a)の目標応答加速度スペクトルに適合する試験波を時間刻み 0.01 秒、継続時間 33.5 秒で正弦波合成法で作成した例を図9に示す。この例では最大加速度は 3 000 gal で、最大速度も 70 cm/s を上回っており、現在国内で使用されているどの振動台の能力をもはるかに超えているため、試験波としては不適切である。

この大きなレベルの目標応答加速度スペクトルを満たす入力動を 1 500 gal 以下の最大加速度の時刻歴波として生成するには、より小さな最大加速度でできる限り大きな応答を引出す技術が必要となる。このことは逆の意味で代数関数位相法が考え出された際の背景と類似している。すなわち、模擬地震動作成時に成分波に与える位相が乱数の場合、低減衰系である 1% 減衰の目標応答スペクトルを大きく上回る傾向を、代数関数位相の導入により低減化した。しかしこの代数関数位相の 1 パラメータである、式(2)の d 値が小さい

と、低減衰の応答スペクトルは図3(a)のように目標応答スペクトルを大きく下回るほか、逆に大きいと図3(c)のように目標応答スペクトルを大きく上回る傾向がある。

このように d 値の与え方次第では正弦波合成法による模擬地震動の低減衰応答スペクトルをも上回る模擬地震動の作成も可能となる。この一例としてビート状要素波合成に用いる代数関数位相パラメータ、 d 値を適切に選択し目標とする試験波を合成する。この際、代数関数位相法の項で述べた①~③の性質を十分に応用するため、種々の基礎検討を行い次の方針を立てた。

まず①の α 値は、ビート波合成法では継続時間内で同一時刻歴要素波形が符号を反転させつつ繰返すため、代数関数位相法(または混合位相法)のように波形全体が一時点に集中することがないのでここでは値を零とし、式(2)の位相を与える関数形を簡素化する。

②の κ 値は、この目標応答スペクトルが 3~12 Hz の比較的低振動数(長周期)の応答が卓越しているため、応答レベルを短周期側で下げ長周期側で上げるべく、比較的大きな値を用いる。なお、 κ の値を小さくすると高振動数成分が卓越するため、振動数が低いほど大きな振幅をもつ一種独特な正弦波掃引波形となる。

③の d 値は、低減衰の応答スペクトル・レベルを上昇させるため、比較的大きな値とする必要がある。その大きさは κ 値の大きさと密接に関与し、 κ 値が大きい場合には比較的小きな値を、また小さい場合には比較的大きな値を用いるとよい。同一の κ 値でも、 d 値が大き過ぎると乱数位相の場合と同様に加速度レベルは大きくなり、反対に d 値が小さ過ぎると加速度時刻歴は独特の正弦掃引波形となる。また d 値の減少に伴い加速度レベルは次第に小さくなるが、ある値を超えると逆に大きくなるため最適値の存在がうかがわれた。

図10にビート波合成法を用い単一要素波で作成した模擬地震動例を示す。この図には式(2)のパラメータ、 α 値と κ 値をそれぞれ 0.0 と 0.25 に設定し、 d 値を 400、1 000 および 10 000 に代え、それぞれ目標応答スペクトルに適合させて作成した模擬地震動の加速度時刻歴波形を示す。 d 値が小さいと最大加速度は小さくなるが、ビート波合成法特有の同一波形の繰返しがりょうに現れ、明らかに“地震動らしさ”に欠ける。また d 値が大きくなると最大加速度が大きくなり、加速度時刻歴波形もランダム波状になるのがわかる。

このため、最適な d 値を見出すためのパラメータ検索を行った。このパラメータ検索では、隣合う要素波

図9 正弦波合成法で作成した試験波(ケース1)

図 10 ビート波合成法の d 値の相違と試験波形
($\alpha : 0.0$, $\kappa : 0.25$)

間の干渉で生じる応答スペクトル上の過大応答を避けるため、要素波を一波に限定した。また、もともと振動台の制御が難しい高振動数側の応答を抑制するため、30 Hz 以上の高振動数成分を排除すべく、模擬地震動の時間刻みを 0.015 秒とした。このため作成された模擬地震動を通常広く用いられている 0.01 秒の時間刻みとするため、いったん、加速度値の時間軸上での線形補間により時間刻みを 0.005 秒に 2 点内挿した後、間引きし 0.01 秒にした。さらに、ビート波合成法の特徴である振動数成分波間の振動数間隔を約 0.1 Hz に設定した。このため、FFT を応用する際には、時刻歴の継続時間、約 33.5 秒から定まる振動数成分刻み (約 0.03 Hz) ごとの各振動数成分を 3 点おきに抜取り、これらを要素波の振動数成分とし、これらに振幅値を与えるとともに、これらの要素波間にある残り 3 点の振動数成分の振幅値を零に設定した。

このパラメータ検索の結果、 α , κ および d の最適値として、それぞれ 0.0, 0.25 および 650 の各値が得られた。これらのパラメータを用いて合成した試験用

図 11 ビート波合成法により作成した試験波
($\alpha : 0.0$, $\kappa : 0.25$, $d : 650.0$)

図 12 正弦波合成法で作成した試験波 (ケース 2)

入力動の応答スペクトル、加速度、速度、および変位の各時刻歴波形を図 11 に示す。図から最大加速度が 1356 gal, 最大速度が 54 cm/s, 最大変位が 56 mm となり、所定の条件を満足しているのがわかる。

3.3 10~25 Hz 成分卓越型入力波 図 8 (b) の目標加速度応答スペクトルに適合する試験波を、時間刻み 0.01 秒、継続時間約 44 秒の条件で正弦波合成法

図 13 ビート波合成法で作成した試験波(ケース 2)
(0~7 Hz: 乱數位相, 7~50 Hz: $\alpha=0.0$, $\kappa=0.01$, $d=45\,000$)

で作成した例を図 12 に示す。図からわかるように位相を乱数で与えると最大加速度は 840 gal にも達し、目標の 300 gal を大きく上回っている。

またビート合成法により、要素波を 0~7 Hz の低振動数波と 7~50 Hz の高振動数波の二波とし、低振動数波では包絡形を整えるため乱數位相とし、高振動数波では代数関數位相として模擬地震動を合成した。

模擬地震動の時間刻みは 0.01 秒としたが、要素波を構成する成分波の振動数刻みは約 0.08 Hz とした。このため FFT 適用時の模擬地震動の継続時間、約 43.7 秒から定まる約 0.023 Hz 刻みの振動数成分から 3 点おきに抜取った振動数に対して成分波を定義した。

このケースでは高振動数成分が卓越するため、式 (2) の κ 値はケース 1 の場合より小さな値とした。そしてケース 1 の場合と同様にパラメータ検索を行い、最適値として、 κ に 0.01、 d に 45 000 の各値を得た。これらのパラメータ値のほか、 α 値を 0.0 に設定して試験波を合成した。図 13 にこの試験波の応答スペクトルと加速度、速度、並びに変位の各時刻歴波を示す。図の下方には要素波の加速度時刻歴を示す。図のように最大加速度は 504 gal に低下したが、当初の条件である

図 14 作成した試験波の時刻歴波形と応答スペクトル

300 gal にはほど遠い。このようにケース 2 は非常に難しい条件なため、改めて以下の方針を追加した。

① 入力動は試験波として割り切り、波形に図 1 のような振幅包絡関数作用させる等による、“地震動”らしさを与える操作はしない。

② 試験波の合成段階で最大加速度が目標値を超過した場合には強制的に目標値以下に再設定する。但し同一値が(時間的に)連続してはとらないようにする。

③ 試験波は目標応答スペクトルを上回る応答スペクトルとなることを条件とする。

上記の②に記した試験波の最大加速度を目標値以下に強制的に再設定する過程では、同一加速度値が続かないよう 2 番め以降の値を 1 以下の乱数値倍するか、または同一加速度値が連続する部分を関数(例えば二次関数で最小自乗フィッティングする等)で再定義するとよい。また、試験での加振を円滑にし、不要な過渡応答が生じないように、振幅の包絡形は立上りの 3 秒間と終盤の 1 秒間をそれぞれテーパ状に暫増および暫減させるとよい。この手順の下にパラメータ検索を実施した結果、各振動数点で目標応答スペクトルを下回らない試験波が、 α 、 κ ならびに d の各パラメータ値がそ

れぞれ図 13 の模擬地震動の場合と同一値の下に得られた。この試験用入力動の応答スペクトル, 加速度, 速度, ならびに変位の各時刻歴波形を図 14 に示す。図から最大加速度が 300 gal, 最大速度が 27.8 cm/s, 最大変位が 35.6 mm となり, 観測地震波形と比べて立上り部と減衰部に不自然な点が若干あるものの, 所定の条件は満足しているため, 試験用の入力動としての使用は可能と考えられる。

4. 結 言

振動台を用いたプラント機器設備の耐震性試験では, 入力地震動としてしばしば定義される, 種々なプラントの設計条件を包絡し広い振動数域にわたり大きな応答を発生させる, 包絡応答スペクトルを満たす模擬地震動の作成法について検討した。こうした試験で

は試験装置である振動台の可振性能限界のため, 試験波の最大加速度, 最大速度, 最大変位等に制限が設けられる。これらの制限下で包絡応答スペクトルを満たす模擬地震動を作成するのは難しい場合が多い。このため模擬地震動作成手法について検討し, 代数関数位相法を応用発展させてビート波合成法を提案した。この手法を応用して代表的な厳しい条件下で試験波を作成することにより, 従来の方法では全く不可能な条件下でも試験波の作成が可能なることを明らかにした。

文 献

- (1) Masao, T., ほか 5 名, *8-th SMiRT*, K2 (1985), 93.
- (2) Kitada, Y., ほか 5 名, *7-th SMiRT*, K1 (1983), 1215.
- (3) 大崎・ほか 20 名, 模擬地震動作成手法の改良について, (1984), 54, 模擬地震動作成手法研究会.