

## (a) 応答スペクトル適合法

応答スペクトル適合法は、目標とする応答スペクトルに適合する模擬地震動を作成する方法である。応答スペクトルには多くの経験式が提案されているが（例えば文献<sup>6)</sup>）、本節では現在、最も広く利用されている建設省（現国土交通省）「告示 平 12 建告第 1461 号：超高層建物の構造耐震上の安全性を確かめるための構造計算の基準を定める件」に基づく応答スペクトル<sup>7), 8)</sup>（以下、告示スペクトル）を代表例として、それに適合する地震動（以下、告示波）の作成法や注意点を説明する。

告示波の作成方法の概要は以下の通りである<sup>8)</sup>。まず目標とする応答スペクトルとして、解放工学的基盤（十分な層厚と剛性を有し、せん断波速度が約 400 m 毎秒以上の地盤）において、表 4.2.1 の加速応答スペクトル（減衰定数 5%）を用いる。「稀に発生する地震動」によって建築物の構造耐力上主要な部分が損傷しないこと、及び「極めて稀に発生する地震動」によって建築物が倒壊、崩壊等しないことを、それぞれ運動方程式に基づき確かめることとされている。他の条件として、継続時間を 60 秒以上とすること、適切な時間の間隔で地震動の数値（加速度、速度若しくは変位）が明らかにされていること、複数個数以上を策定すること、表層地盤による増幅を適切に考慮すること、建築物の規模及び形態に応じた上下方向の地震動や、当該地震動に直交する方向の水平動、地震動の位相差及び鉛直方向の荷重に対する水平方向の変形の影響等を適切に考慮すること、等が記されている。

表 4.2.1 解放工学的基盤における告示スペクトル（減衰 5%）

周期 T (s)	加速度応答スペクトル (m/s <sup>2</sup> )	
	稀に発生する地震動 (レベル 1)	極めて稀に発生する地震動 (レベル 2)
T < 0.16	(0.64+6T) Z	(3.2+30T) Z
0.16 ≤ T < 0.64	1.6Z	8Z
0.64 ≤ T	(1.024/T) Z	(5.12/T) Z

注：T は建築物の設計用 1 次固有周期（単位：s）、Z は地震地域係数

標準的な模擬地震動の作成方法として、一般に波形合成は次の正弦波合成法が用いられる<sup>9)</sup>。

$$a(t) = E(t) \sum_i A_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (4.2.1)$$

ここで、 $a(t)$  は模擬地震動の時刻歴波形、 $E(t)$  は強度関数（波形の包絡関数）、 $A_i$ 、 $\omega_i$ 、 $\phi_i$  はそれぞれ  $i$  振動数のフーリエ振幅、円振動数、位相角である。告示スペクトルへ適合させる方法として以下に示す手法が示されている。まずランダム波や観測波など元になる波形を用意する。この加速度波形のフーリエ振幅スペクトルとして、告示の速度応答スペクトルを用い、逆フーリエ変換より初期波形を設定する。次に、その波形の応答スペクトルと告示スペクトルを比較し、周期ごとに補正した振幅スペクトルから新たな修正波形を求める。この作業を所要の適合度が得られるまで繰り返し、最終的な模擬地震動とする。

一般に告示スペクトル ( $DSa_i$ ) に適合する模擬地震動による応答スペクトル ( $Sa_i$ ) の適合条件として、次の 4 つの条件が示されている<sup>8), 9)</sup>。

- ① 最小応答スペクトル比： $\varepsilon_{min} = (S_{a_i} / DS_{a_i})_{min} \geq 0.85$
- ② スペクトル強度比： $SI_{ratio} = \Sigma pS_{v_i} / \Sigma DpS_{v_i} \geq 1.0$
- ③ スペクトル比の変動係数： $\varepsilon_{cv} = \{ \Sigma (\varepsilon_i - 1.0)^2 / N \}^{1/2} \leq 0.05$
- ④ スペクトル比の平均値誤差： $\varepsilon_{ave} = \Sigma \varepsilon_i / N \geq 0.98$

ここで、 $pS_{v_i}$ と $DpS_{v_i}$ はそれぞれ $S_{a_i}$ と $DS_{a_i}$ の疑似速度応答スペクトル、 $N$ は周期のポイント数である。対象とする周期範囲は0.02秒から5秒を原則としているが、関東平野や大阪盆地など厚い堆積層を持つ堆積盆地では長周期地震動の卓越を考慮し、10秒まで考慮するとされている。また②のスペクトル強度も本来の定義である0.1～2.5秒だけでなく、対象建物の周期に応じ、1～5秒などに設定を変更することとされている。

一方、包絡関数 $E(t)$ として、一般に次のようなJennings型の関数<sup>10)</sup>が用いられる。

$$E(t) = \begin{cases} (t/t_b)^2 & 0 < t \leq t_b \\ 1.0 & t_b < t \leq t_c \\ \exp\{\log_e(A_{fac}) \cdot (t-t_c)/(t_d-t_c)\} & t_c < t \leq t_d \\ A_{fac} \{(t_e-t)/(t_e-t_d)\}^2 & t_d < t \leq t_e \end{cases} \quad (4.2.2)$$

ここで、 $t_b$ 、 $t_c$ 、 $t_d$ 、 $t_e$ は、それぞれ最大振幅のまでの立ち上がり時間、最大振幅の終了時間、継続時間、終了時間であり、 $t_e$ 以降の振幅は0である(図4.2.2を参照)。また $A_{fac}$ は主要動の振幅1に対する時刻 $t_d$ における振幅比で、一般に0.1程度の値が用いられる。各時間の具体的な与え方として、Jenningsらによる提案<sup>10)</sup>である $t_b=4$ 秒と $t_c=35$ 秒(中地震では15秒)、 $t_d$ は告示により60秒以上などが用いられる。なお、この方法では数分以上にわたる長い継続時間の地震動を作成することも可能である。マグニチュードや震源距離などをパラメータとして、各時間パラメータを与える様々な経験式が提案されているので、文献<sup>6)</sup>を参照されたい。

次に、告示波の策定例や注意点を記す。まず模擬地震動の作成例として、図4.2.2にランダム位相を用いた加速度波形と応答スペクトルを示す。10回の収束計算により、適合条件は全て満足している( $\varepsilon_{min} \cong 0.91$ 、 $SI_{ratio} \cong 1.0$ 、 $\varepsilon_{cv} \cong 0.032$ 、 $\varepsilon_{ave} \cong 1.0$ )。しかし、図4.2.2の波形では収束計算により包絡関数 $E$ を10回乗じたことにより、立ち上がり部分と尾部の振幅が著しく小さくなり、60秒の継続時間という条件を満足していない。これを改善するには、継続時間( $t_d$ や $t_e$ )を長くする方法や、より収束がゆっくりと収束する包絡関数を用いる方法などがある。例として図4.2.3に、 $E$ に0.2の累乗を施した包絡関数を使用した結果を示す。図4.2.3と図4.2.2の波形を比べると、主要動には殆ど差異は無いが、元の包絡関数に近い緩やかな収束を示しており、60秒の継続時間を満足していることがわかる。

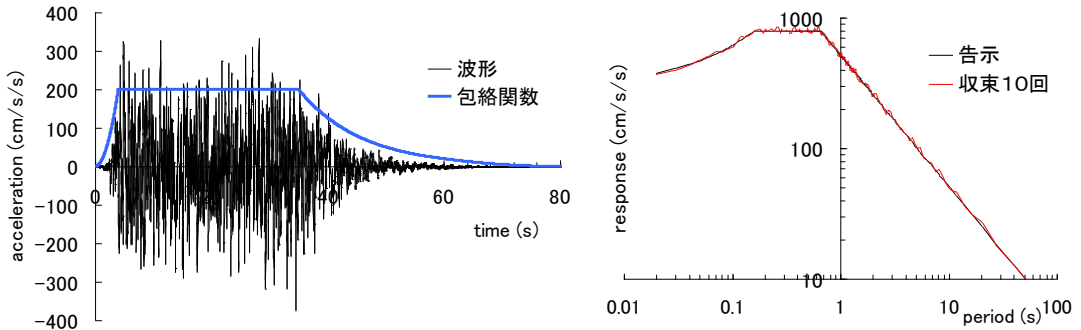


図 4.2.2 ランダム位相による模擬地震動の例 ( $t_b = 4, t_c = 35, t_d = 60, t_e = 80$  s)

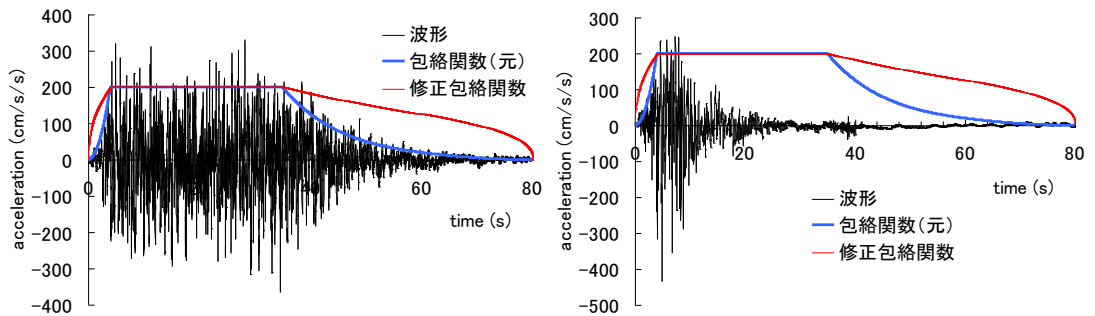


図 4.2.3 ランダム位相による模擬地震動の例  
(図 4.2.2 の包絡関数の 0.2 の累乗を使用)

図 4.2.4 JMA 神戸 NS 成分の位相による模擬  
地震動の例 (位相以外は図 4.2.3 と同じ)

観測波形の位相を用いた例として、図 4.2.4 に JMA 神戸波の NS 成分による計算例を示す。位相以外の条件は全て図 4.2.3 と同じにしている。10 回収束による適合条件は(1)  $\varepsilon_{min} \approx 0.84$ , (2)  $SI_{ratio} \approx 1.0$ , (3)  $\varepsilon_{cv} \approx 0.052$ , (4)  $\varepsilon_{ave} \approx 0.98$  であり、実用上は問題が無いと思われるが、(1)と(3)の条件を満足していない。一般に継続時間の短い観測波形では、適合条件を完全に満足させることは容易ではない。同じ告示スペクトルを用いても、神戸波のように継続時間が短くて衝撃的な波形では、建物の応答が大きくなることが知られている (例えば、文献<sup>12)</sup>)。従って、告示波に用いる位相は、与えられた震源やサイトの諸条件より設計者が適切に判断する必要がある。

告示スペクトルに適合させた模擬地震動は長周期側の成分が小さく、特にランダム位相を仮定した場合は、建物に大きな変形を生じさせる破壊力に乏しい。従って、告示スペクトルに適合させた模擬地震動は、最低限のレベルと位置づけられている地震動と判断される。サイト近傍に活断層がある場合、あるいは厚い堆積層や軟弱地盤上に位置する場合には、より破壊力のある地震動を生じる可能性がある。このため建設サイトが上記のような条件下にある場合、スペクトルに適合させた地震動に加え、断層モデルによる地震動をサイト波として使用することが望ましい。なお試験的ではあるが、図 4.2.2～図 4.2.4 で使用した PC 用ソフトを公開しているので、参照されたい<sup>13)</sup>。

(久田嘉章)

## 参 考 文 献

- 1) 地震調査研究推進本部：地震に関する評価（[http://www.jishin.go.jp/main/p\\_hyoka.htm](http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka.htm)）
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図，2009年7月21日  
（[http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09\\_yosokuchizu/index.htm](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/index.htm)）
- 3) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図2010年版，2010年5月20日  
（[http://www.jishin.go.jp/main/chousa/10\\_yosokuchizu/index.htm](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/10_yosokuchizu/index.htm)）
- 4) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピア」），2009年12月21日（[http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09\\_yosokuchizu/g\\_furoku3.pdf](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/g_furoku3.pdf)）
- 5) 内閣府：防災情報のページ（<http://www.bousai.go.jp/5jishin/index.html>）
- 6) 日本建築学会：地盤震動－現象と理論－，2005
- 7) 大川 出，壇 一男，藤堂正喜：工学的基盤の加速度応答スペクトルを用いた建築物の耐震性能評価（その4）：評価用応答スペクトルとその地域格差の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，pp.1131-1132，1999
- 8) 国土交通省：改正建築基準法の構造関連規定の技術的背景，ぎょうせい，2001
- 9) 北川良和，大川 出，鹿嶋俊英：設計用入力地震動作成手法，建築研究資料，No.83，1994
- 10) P.C. Jennings, G.W. Housner, N.C. Tsai: Simulated Earthquake Motions for Design Purposes, A1.pp.145-160, 4WCEE, 1969
- 11) 日本建築学会：最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法，2009
- 12) 長橋純男：免震構造建築物を対象とした設計用入力地震動の作成動向，第30回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，pp.39-52，2003
- 13) 工学院大学・久田研究室：公開プログラム・データ（Open Data: <http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/index.html>）
- 14) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説（2004），2004年9月15日
- 15) 日本免震構造協会：免震建築物のための設計用入力地震動作成ガイドライン，丸善，2005年11月
- 16) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>, 2011.