

# 与えられた応答スペクトルを持つ人工地震波のシミュレーション

——最適化手法による低周波数成分波の振幅決定に関する基礎的考察——

安 楽 秀 嶽

## Simulation of Spectrum-Compatible Artificial Earthquake Records

——Basic Study on Determination of Amplitude of Low-Frequency Wave Components  
by Means of Optimization Technique——

Hidetake Anraku

### Abstract

An examination is made of the background for simulations of artificial earthquake records, and the methods used in these simulations are outlined. One of these methods, an iterative procedure which attempts to simulate spectrum-compatible earthquake records by composing many harmonic waves is shown with some calculated examples. To overcome the drawbacks of this method, a new procedure is presented where an optimization technique is adopted for iterative modification of amplitudes of low-frequency wave components, and calculations with a number of simple examples show the adequacy and reasonability of this method.

### 概 要

近年人工地震波のシミュレーションが色々と試みられている背景について考察を加え、既往の研究におけるシミュレーション法を概観した。そのうちの一手法である、人工地震波の応答スペクトルとあらかじめ設定した目標スペクトルとを一致させようとする、繰り返し計算に基づいたシミュレーション法を採用して筆者が行った計算について紹介するとともに、長周期領域では応答スペクトルと目標値の適合度は必ずしも良くないことを指摘し、その理由についての検討を行った。そして、人工地震波を構成する成分波を、短周期成分波と長周期成分波に分離して扱い、後者の成分波の振幅を、同振幅と応答最大値の生起時刻を変数とする最適化手法によって修正することを提案し、手法の概要を説明するとともに、簡単な例題によりその妥当性を示した。

### 1. 序

近年、人工地震波のシミュレーションと、それを用いた地震応答解析が色々試みられているが、その大きな理由として、二つのものが考えられるであろう。

まず一つは、弾塑性地震応答を統計的に評価する際に入力として用いる為の人工地震波のシミュレーションである。耐震設計に際して行う構造物の地震応答解析には特定の地震の記録波形を用いることが多いが、そのような特定の地震波を用いた応答解析が、将来予測される不規則な地震に対する耐震設計にとって必ずしも十分ではないことは明らかである。このような観点から、構造物の地震応答を統計的、確率的に評価しようとする試みがなされつつあり、簡単な弾性構造物に関しては、不規則振動論を用いた線形定常応答の予測をはじめとし、理論的な評価法も次第に形を整えて来つつある。しかし、複

雑な構造物の弾性挙動や、大規模な地震時に予想される構造物の弾塑性挙動を予測する手法として、不規則振動論はまだ十分な道具とは言えず、現状では、妥当と思われる地震波をいくつか想定して通常の弾塑性解析プログラムを用いて応答解析を行い、得られた結果を統計的に処理して設計の目安とするのが最も合理的と思われる。そしてこのような解析における入力地震波として、ある平均的特性を持った人工地震波を用いることが考えられる。

他の一つは、理論的解析に基づく弾塑性地震応答評価の妥当性の検証の為に解析に用いることを考えた人工地震波のシミュレーションである。今日、弾塑性応答の評価に関しては、不規則振動論に基づく弾性応答の評価のような理論的評価法が十分でないので、解析的に応答を評価しようとするれば、種々の仮定と単純化に基づいた解析が必要になる。そして、このようにして得た解の妥当

性は、単一の地震波を用いた弾塑性応答解析によって十分に保証されるものでなく、人工的にシミュレートした、ある平均的特性を持ったいくつかの模擬地震波を用いて解析を行い、それを統計的に処理して得られた結果と比較することにより、より正確にチェックされる。

このように、人工地震波のシミュレーションは、耐震設計および構造物の弾塑性応答解析において重要な意義を持つものである。

## 2. 人工地震波シミュレーションに関する既往の研究

前述のように、人工地震波のシミュレーションの耐震工学における意義は少なからぬものがあり、種々の研究者によってその試みがなされているが、これ等は大きくは、(1)Filtered Process としてのシミュレーション、(2)位相差を考慮した調和波の重ね合せによるシミュレーション、の2つに分類して考えることが出来る。

### 2.1. Filtered Process としてのシミュレーション

これは、人工的に発生させたランダム変数  $\eta(t)$  を、線形フィルター  $L\{\}$  により口過した結果を模擬地震波として用いるものであり、次のようなものが試みられている。

**2.1.1. White noise** これは、正規分布するランダム変数ある時間刻みで並べたホワイト・ノイズを人工地震波として用いるものである。Bycraftはこのようにしてシミュレートした地震波の応答スペクトルを求めて Housner の標準スペクトルと比較し、その妥当性を検証するとともに、この模擬地震波を用いた構造物の弾塑性応答解析を行った<sup>1)</sup>。

**2.1.2. Filtered white noise** これは、上記ホワイトノイズを、線形フィルターを通して得られた結果を模擬地震波として用いるものである。

$$\text{white noise} \rightarrow \boxed{\text{線形フィルター}} \rightarrow \text{人工地震波}$$

$$\eta(t) \quad L\{\} \quad Z(t)$$

線形フィルターとしては種々のものが考えられておりその個数も1個に限らず複数のもも用いられている<sup>8)</sup>。

例1. 次の周波数伝達関数  $H^2(\omega)$  で表わされる線形フィルターを用いたシミュレーションを、Ruiz と Penzien が試みている<sup>9)</sup>。

$$H^2(\omega) = \frac{1 + 4h_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2\right\}^2 + 4h_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2} \dots\dots\dots(1)$$

これは、基礎に入力したホワイトノイズが、表層地盤の影響を経て、地表部分で得られる不規則地震波になるという金井、田治見モデルを基にしたシミュレーション

法であり、 $\omega_g$  と  $h_g$  はそれぞれ、地盤の卓越振動数と減衰係数を表わす。

人工地震波の加速度成分  $Z(t)$  は、次の振動方程式

$$\frac{d^2}{dt^2} \varphi + 2h_g \omega_g \frac{d}{dt} \varphi + \omega_g^2 \varphi = \eta(t) \dots\dots\dots(2)$$

の解を用いて、 $Z(t) = \ddot{\varphi} + \eta(t)$  と与える。

例2. Amin と Ang は、上記の filter の他に、次のような filter を用いている<sup>5)</sup>。

$$L\{\} = \frac{d^2}{dt^2} + 2h\omega_1 \frac{d}{dt} + \omega_1^2$$

$$L\{\} = \frac{d}{dt} + l$$

### 2.1.3. Filtered Poisson Process (Shot Noise)

Shinozuka<sup>10)</sup> や Amin<sup>5)</sup> が試みた方法で、filter への入力として、次の Shot Noise を考える。

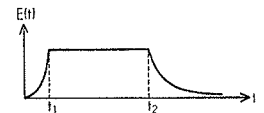
$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{N(t)} A_n \cdot \delta(t - \tau_n) \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $N(t)$  はポアソン過程、 $A_n$  は期待値0のランダム変数、 $\delta(\ )$  は Dirac のデルタ関数である。

**2.1.4. 非定常プロセス** 非定常な模擬地震波を得るには、上記の線形フィルターを通して得られた定常出力  $Z(t)$  に時刻関数  $E(t)$  を乗ずるか、(3)式に示した Shot Noise  $\eta(t)$  に  $E(t)$  を乗じて非定常な入力を与え、得られた非定常出力を人工地震波として採用するという方法を用いる。

時刻関数  $E(t)$  は、これまでの研究で次のようなものが報告されている。

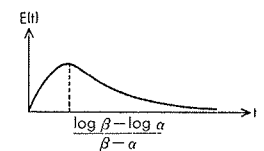
$$E_1(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & (0 \leq t < t_1)^{4),7)} \\ 1 & (t_1 \leq t < t_2) \\ e^{\alpha(t-t_2)} & (t_2 \leq t) \end{cases}$$



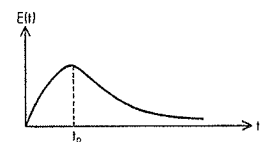
$$E_2(t) = (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) H(t)^{10)}$$

但し  $\beta > \alpha > 0$

$H(t)$ : Heaviside  
の単位階段関数



$$E_3(t) = \frac{t}{t_p} e^{(1-t/t_p)} H(t)^{3)}$$



## 2.2. 調和波の重ね合せによるシミュレーション

この方法では、地震波  $Z(t)$  は次の方程式によりシミュレートされる。

$$Z(t) = E(t) \sum_{n=1}^N C_n \cos(\omega_n t + \varphi_n) \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 $\omega_n$ : 成分周波数,  $\varphi_n$ :  $0 \leq \varphi_n \leq 2\pi$  間に、一様分布するランダム位相差,  $C_n$ : 各成分波の振幅,  $N$ : 成分波数

このシミュレーション方法では、 $E(t)$ ,  $\omega_n$ ,  $C_n$  および  $N$  の値によって地震波の特性が定められ、個々の地震波のランダム性は、ランダム位相差  $\varphi_n$  のみに依存する。

a)  $\omega_n$  の決め方

1)  $\omega_1 = 2\pi/T$  を基本とし、その整数倍を用いる<sup>7)</sup>。

但し、 $T$ : 地震継続時間

2) 適当な刻みで  $\omega_n$  を定める<sup>7)13)</sup>。

3)  $t_n = 2\pi/\omega_n$  を適当な刻みで定める。

4) ある確率分布に基づいて  $\omega_n$  を定める<sup>6)</sup>。

例、 $P(\omega) = 2\omega^2 \text{EXP}(-\omega/\omega_p)/\omega_p^3$

b)  $C_n$  の決め方

1)  $C_n$  を一定値とする。これは上記4)の方法で  $\omega_n$  を定めたとき用いられた。各周波数成分の強弱は、 $\omega$  の頻度分布  $P(\omega)$  により定められる。

2) 任意に与えられたパワースペクトルに基づいて  $C_n$  を定める。

3) 繰り返し計算により、あらかじめ与えられた応答スペクトルと同一の応答スペクトルを持つような  $C_n$  を定める。

3. 与えられた応答スペクトルを持つ人工地震波のシミュレーション

3.1. 計算の手順

シミュレーションには式(4)を用い、時刻関数は2.1.4.に示した関数  $E_1(t)$  を用いた。 $\omega_n$  は適当な周波数領域にわたり、適当な間隔刻みで定めた。 $C_n$  の値は、(4)式でシミュレートされた地震波の擬速度応答スペクトル  $S_v$  が、前もって設定した目標スペクトル  $S_T$  と一致するように、繰り返し計算により修正する。

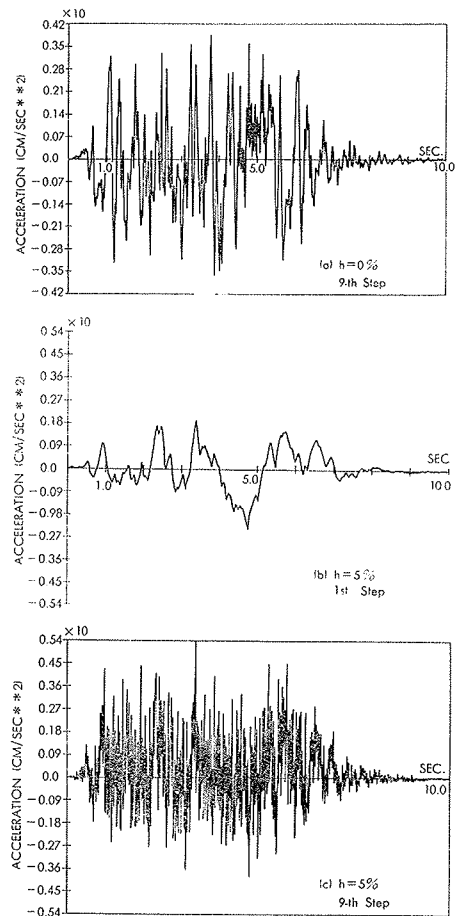
係数  $C_n$  に対応する成分周波数を  $\omega_n$  とし、 $\omega_n$  に対応する目標スペクトルを  $S_T$ ,  $\omega_n$  に対応する地震波の応答スペクトルの値を  $S_v$  とすれば、 $C_n$  の値は、次式によって新しい値に修正され、 $S_v$  の値が十分  $S_T$  に収束するまでこの計算を繰り返す。

$$C_n' = \frac{S_v}{S_T} C_n \dots\dots\dots(5)$$

3.2. シミュレーション例

Housner の標準スペクトルのうち、減衰0%および5%のスペクトルを目標にした、継続時間10秒の人工地震波のシミュレーション例を図1に示す。

$C_n$  の初期値として各周波数  $\omega_n$  に対応する  $S_T$  の値を用いて行った繰り返し計算のうち、減衰0%の場合の繰り返し計算第1段階の加速度記録  $Z(t)$  を図(a)に、減衰



図一1 人工地震波

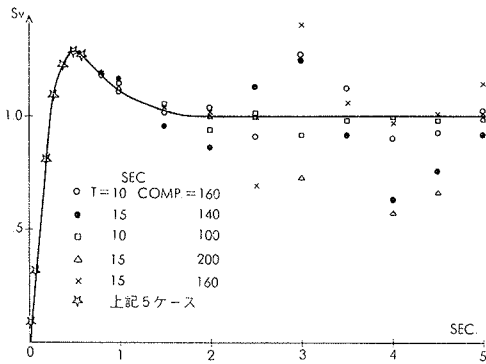
5%の場合の第1段階と第9段階の値を図(b), (c)に示す。繰り返し計算により  $C_n$  が修正されて短周期成分が次第に大きくなっている様子や、減衰の大きい場合、応答計算においてその影響は特に短周期成分に現われる為に、それに対応して、地震波でも減衰の大きい(c)の方が、(b)よりも短周期成分が卓越して表われていく様子が分る。

4. シミュレーション結果の考察

4.1. 人工地震波応答スペクトルの適合性

地震波のランダム性を支配する位相差  $\varphi_n$  の分布を変化させ、Housnerの減衰0%の速度スペクトルを目標スペクトルに選んでシミュレートした人工地震波の応答スペクトルを図2に示す。計算では、位相差の他、同図に示すように地震継続時間を10秒と15秒、成分周波数の数を100~160と変化させた。

この図から、固有周期の短い領域では、シミュレートした人工地震波の応答スペクトルは目標スペクトルと良く一致しているが、長周期領域では、その平均的値は別として、各地電波個々の応答スペクトルは目標スペクトルと必ずしも良く一致せず、個々の地震波に平均的特性を持たせるといふ所期の目的を十分に達成していないこ



図—2 人工地震波応答スペクトル

とが分る。このような傾向は、他の人工地震波のシミュレーションの場合にも認められる事実であるが、長周期構造物では地震継続時間中の応答の非定常性が大きく成分波振幅の変動の影響の表われ方が複雑で、(5)式による簡単な成分波振幅の修正だけでは、その応答スペクトルを目標値と一致させることが困難になるためと思われる。

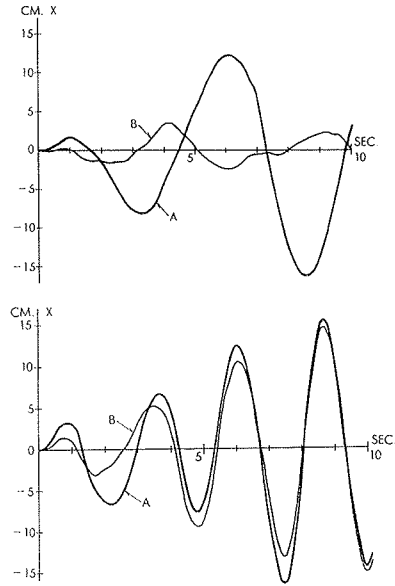
4.2. 成分波の短周期成分と長周期成分の2グループへの分離と両グループの応答への寄与

(4)式によって人工地震波を合成する成分波を、短周期成分波グループと長周期成分グループに分離し、この両グループの短周期構造物および長周期構造物の応答に対する寄与を調べた。

人工地震波の成分周波数は、周期分割により与え、0.02~0.5秒間を25に等分割、0.5~4.5秒間を25に等分割、4.5~7秒間を6つに等分割し、合計57個の成分波を用いた。この周波数成分を、4.5秒以下の短周期成分波グループSと、これ以外の長周期成分波グループLに分けて考える。

この地震波による応答計算例を図3に示す。図(a)は固有周期5秒、(b)は固有周期2.5秒の構造物を対象に、全周波数成分による応答時刻歴Aと、短周期成分波Sグループの周波数成分による応答時刻歴Bを示したものであり、両者の差が長周期成分波Lグループの寄与分である。図(a)の長周期構造物の応答では、応答に対するSグループの周波数成分の寄与は小さく、大部分がLグループの周波数成分に対する応答であるのに対して図(b)の短周期構造物では、この傾向は逆転し、応答に寄与するには大部分がSグループの周波数成分である。

このような事実と、短周期構造物と長周期構造物の地震継続時間中における応答の非定常性の程度の差等を考慮し、併せて、(5)式によって成分波振幅の修正を行って得た人工地震波の応答スペクトルの目標スペクトルとの適合度が、図2に示すように、短周期領域と長周期領域で異なることを考えると、全ての周波数成分の波を、(5)式によって一律に修正するのではなく、これを短周期成



図—3 成分波の応答への寄与

分と長周期成分に分離して扱い、短周期成分については(5)式で振幅を修正するとともに、長周期成分波に対しては、それによる応答の非定常性も考慮して振幅修正を行うことが合理的と考えられるであろう。

5. 最適化手法による長周期成分波の修正

5.1. 個別成分波に対する1質点系の応答

固有振動数  $\omega_j$  の成分波  $j$  に対する、固有振動数  $\omega_1$  の一質点系での応答  $x_{1j}$  は、次式の解として求まる。

$$\ddot{x}_{1j} + 2h\omega_1\dot{x}_{1j} + \omega_1^2 x_{1j} = -E_1(t)C_j \cos(\omega_j t + \varphi_j) \dots\dots(6)$$

ここで  $E_1(t)$  は2, 1, 4. で与えられる時刻関数である。上式の特解を、 $0 \leq t < t_1$ ,  $t_1 \leq t < t_2$ ,  $t_2 \leq t$  に応じて求め、これと一般解の和で与えられる応答変位  $x_{1j}$  が、 $t=0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  という時刻関数の不連続点で連続するよう一般解の係数を定めれば、 $x_{1j}$  は次の形で求められる<sup>14)</sup>。

$$x_{1j} = c_j f_{1j}(t) \dots\dots\dots(7)$$

ここで  $f_{1j}(t)$  は時刻のみの関数である。

応答  $x_1$  は、短周期成分グループに対する応答  $S_j$  と長周期成分グループに対する応答  $L_j$  とに分けられ、

$$x_1 = \sum_j x_{1j} = \sum_{S_j} c_j f_{1j}(t) + \sum_{L_j} c_j f_{1j}(t) \dots\dots\dots(8)$$

と表わされる。

5.2. 最適化手法による成分波修正の定式化

応答スペクトルを目標値  $X_1$  と一致させる為には、

$$(x_1)_{\max} = \left[ \sum_{S_j} c_j \cdot f_{1j}(t_1) + \sum_{L_j} c_j \cdot f_{1j}(t_1) \right]_{\max} = X_1 \dots\dots(9)$$

となるような  $\{c_j\}$  と  $t_1$  を求めればよい。ここで  $t_1$  は  $x_1$  の最大値の生起時刻である。

$x_1$  の最大点においては、 $\dot{x}_1 = 0$  となるので

$$\dot{x}_1 = \sum_{S_j} c_j \cdot \dot{f}_{1j}(t) + \sum_{L_j} c_j \cdot \dot{f}_{1j}(t) = 0 \dots\dots\dots(10)$$

という関係式が成り立つ。(9)式を満す  $\{c_j\}$ ,  $t_1$  を求める

代りに(10)式と、次の(11)式を同時に満す  $\{c_j\}$ ,  $t_1$  を求めることを試みる。

$$\tilde{x}_1 = \sum_j c_j \cdot f_{1j}(t) + \sum_l c_l \cdot f_{1l}(t) - x_1 = 0 \dots\dots\dots(11)$$

ところで、(10)式は  $x_1$  の極値を与え、最大値を求める為の必要条件ではあっても、十分条件ではない。従って、(10), (11)式を満す  $c_j$ ,  $t_1$  が必ずしも global な最適解として  $x_1$  の最大値を  $X_1$  と等しくするとは限らず、local な最適解を与え、最大値以外の  $x_1$  の極値を  $X_1$  と等しくする可能性が有る。その場合、得られた地震波の応答スペクトルは  $X_1$  を越え、その生起時刻も  $t_1$  と異なってくる。

そこで、(10), (11)両式の最適問題への定式化に際しては、global な最適解を求める可能性を高める為に、後述するような工夫が行われる。

ここで  $i = 1 \sim N$  なる  $N$  個の点の 応答スペクトルを目標値と一致させるものとすれば、(10), (11)式は各々  $i = 1 \sim N$  点において成り立たねばならない。

$\{c_j\} = \mathbf{c}$ ,  $\{t_i\} = \mathbf{t}$  と書き、 $\mathbf{c}$  と  $\mathbf{t}$  が真の解と異なる為、これ等両式に生じる誤差ベクトルを  $\mathbf{r}$  とすれば、両式に代り次の式が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} \vdots \\ \tilde{x}(\mathbf{c}, \mathbf{t}) \\ \vdots \\ \tilde{x}(\mathbf{c}, \mathbf{t}) \\ \vdots \end{Bmatrix} = \mathbf{x}(\mathbf{c}, \mathbf{t}) = \mathbf{r} \dots\dots\dots(12)$$

(10), (11)式を満す  $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{t}$  の値を求める為に、繰り返し計算によって(12)式の誤差ベクトル  $\mathbf{r}$  をできるだけ小さくするように、 $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{t}$  を修正していく。 $\mathbf{r}$  の最小化としては、次のような方法が考えられる。

- (1) ベクトルのノルム  $\|\mathbf{r}\|$  を最小化する、
- (2) ベクトル  $\mathbf{r}$  の要素  $r_i$  の絶対値の和  $\sum |r_i|$  を最小化する。

方程式の数が未知数よりも多い優決定係の場合、方程式は一般に無矛盾ではないが、(1)の方法を用いれば最小 2 乗法の意味で解が求められる。

(1) の方法に従えば、

$$F_0 = \sum_i r_i^2 = \sum_i [\tilde{x}_1(\mathbf{c}, \mathbf{t})^2 + \tilde{x}_1(\mathbf{c}, \mathbf{t})^2] \dots\dots\dots(13)$$

(2) の方法に従えば、

$$F_0 = \sum_i |r_i| = \sum_i [|\tilde{x}_1(\mathbf{c}, \mathbf{t})| + |\tilde{x}_1(\mathbf{c}, \mathbf{t})|] \dots\dots\dots(14)$$

を最小にする  $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{t}$  が最適化手法で求められる。

前述のように、(13) 式、(14) 式の関数  $F_0$  の最小化の過程で、global な最適解が得られるような工夫が必要であるが、ここでは両式の目的関数  $F_0$  に補助関数を加え、次の形に変換した新しい目的関数  $F^k$  を用いて最適化を行う。

$$F^k = F_0 - R^k \sum_i |x_i| \dots\dots\dots(15)$$

$$F^k = F_0 + R^k \sum_i c_j^2 \dots\dots\dots(16)$$

但し  $k = 1, 2, \dots$

$$R_1 > R_2 > \dots > 0$$

両式右辺第 2 項が補助関数である。(16)式は目的関数  $F_0$  を最小化するとともに応答値  $\sum |x_i|$  が最大となるようなベクトル  $\mathbf{c}$  と  $\mathbf{t}$  を探すことにより、 $|x_i|$  の最大点において  $F_0$  を 0 とする  $\mathbf{c}$  と  $\mathbf{t}$  を求めるものである。(16)式は  $F_0$  を最小にする解のうちで振幅の 2 乗和が最小となる解を選ぶものであり、全体としての最小のパワーを持つ一群の波を選んで、応答の極大値を目標スペクトルと一致させるように  $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{t}$  を定めることにより、応答の最大値と目標スペクトルが一致するような振幅  $\mathbf{c}$  を求めるものである。

$k = 1, 2, \dots$  の各段階で、前段階で得た  $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{t}$  を初期値とする最小化を繰り返せば、摂動パラメータが、 $R^k = 0$  のとき、 $F^k$  の最小値は  $F_0$  のそれと一致する。

### 5.3. 最適化手法

$F^k$  の最小化は以下の手順の繰り返しによる。

- (1) 修正方向ベクトル  $\mathbf{s}$  の決定。
- (2)  $F^k(\mathbf{c} + \lambda \mathbf{s}_c, \mathbf{t} + \lambda \mathbf{s}_t) \rightarrow \min.$  なる  $\lambda$  の決定。
- (3)  $\mathbf{c} = \mathbf{c} + \lambda \mathbf{s}_c$ ,  $\mathbf{t} = \mathbf{t} + \lambda \mathbf{s}_t$  とする。
- (4) (1)に換る。

修正方向ベクトル  $\mathbf{s}$  は、Davidon 法等の傾斜法または Gauss 法により求める。(2)の段階における関数  $F^k$  の最小化は、黄金分割法等の一変数関数の最小化手法を用いる。上記の計算を繰り返して解が収束したら、その解を初期値とし、 $k = k + 1$  と置いて同じ手順で計算を行い、 $R^k \rightarrow 0$  となり補助関数の項の比重が  $F_0$  に対し十分小さくなったら計算を打ち切る。

## 6. 計算例

成分波 1 波および 2 波の簡単な例を対象に、上記手法を用いて、応答スペクトルが目標値と一致するように成分波振幅を決定する為の計算を行い、手法の妥当性を調べた。

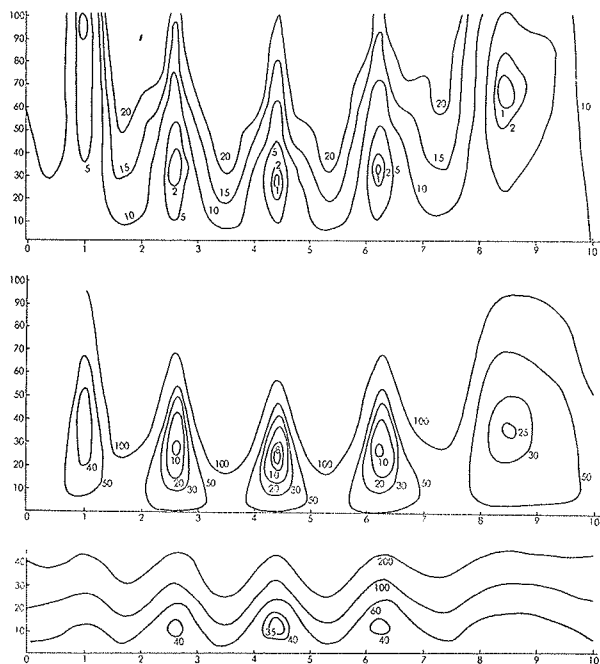
### 6.1. 成分波 1 波の計算例

固有同期 4.5 秒の成分波 1 波を受ける減衰 5%，固有周期 3 秒の系の速度応答スペクトル値を、目標値 7.5 cm/sec にするように、前述の手法によって成分波振幅を決定することを試みた。同振動系の応答は  $t = 4.4$  秒で最大となり、それに対応するスペクトル値が目標値と一致する為の成分波振幅は  $C = 27.4$  である。計算は、目的関数  $F_0$  および  $F^k$ 、最適解深索方向ベクトル  $\mathbf{s}$  の計算法、摂動パラメータ  $R^k$  をパラメータに行った。

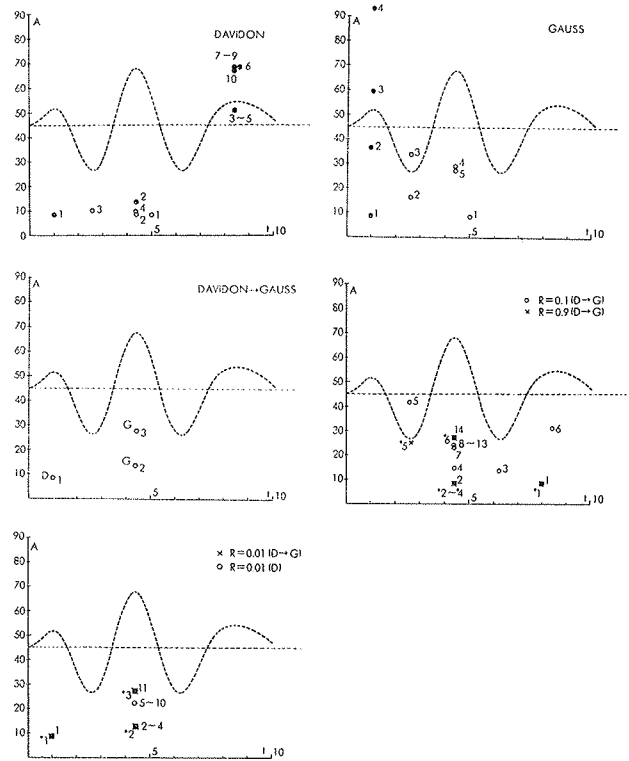
6.1.1. 等高線 図 4 に、関数  $F_0$  および  $F^k$  の、 $t \sim c$  平面における等高線図を示す。図(a)は、式(16)で表わさ

れる関数  $F_0$  の等高線を示し、(b)および(c)は、式(10)で表わされる関数  $F^k$  の、 $R=0.1$  および  $0.01$  における等高線を示す。図(a)においては、質点系の時刻歴応答が極値をとる点に対応して、 $(t, c)=(4.4, 27.4)$  の他にも関数  $F_0$  を 0 にする local な最適解が存在し、これ等の点では振幅  $c$  の値は global な最適解  $27.4$  より大きい。これ等の点に解が収束すると、得られた地震波のスペクトルは目標値より大きくなる。図(b)は、(10)式の目的関数  $F^k$  のうち、摂動パラメータ  $R^k$  の値が大きく、従って補助関数の比重が大きいものの等高線図である。関数  $F_0$  の極小点のうち、真の最適解から離れたいくつかの点は消滅しており、存在する極小点の間でも真の最適解と Local な最適解の間にはその関数値に大小が生じて、解が真の最適値に収束する可能性が高まることを示す。図(c)は、 $k$  に関する繰り返し計算がすすみ摂動パラメータ  $R^k$  の値が、従って補助関数の比重が小さくなった状態における  $F^k$  の等高線図であるが、図(b)では消滅していた local な最適点が表われて  $F^k$  の等高線と  $F_0$  のそれは近づき、 $F^k$  の最小化が  $F_0$  の最小化に通じることを示す。従って収束計算では、最初補助関数の比重を大きく取って global な最適解への接近を試み、計算が進行するに従ってその比重を減じて真の最適解を求めるのが有効と思われる。

6.1.2. 最適解への収束プロセス 図5は、 $t$  と  $c$  の初期値に種々の値を設定し、目的関数と探索方向ベクトルの計算法をパラメータに行った計算における、解の収束過程を示す。これ等の図に点線で示されているのは振動系の応答時刻歴を無次元で表示したものである。



図—4 目的関数等高線



図—5 最高解への収束プロセス

(13)式の  $F_0$  を目的関数とし、Davidon 法で探索方向ベクトルを定めたものが(a)、Gauss 法で定めたものが、(b)、繰り返し計算の初期の段階においては Davidon 法を、後半は Gauss 法を用いて定めたものが(c)である。(a)の場合、初期値の違いにより解は図5で示す local な最適解に収束したり、cage に入りこんで収束途中で計算が打ち切られたりする。

(b)の場合は初期値によっては解は local な最適解に収束しており、(c)の場合、比較的簡単に global な最適解が得られている。(15)式および(10)式の  $F^k$  を目的関数とし、摂動パラメータの初期値  $R^1$  をパラメータに行った計算例を図(d)、(e)に示す。探索方向ベクトルは Davidon 法 (図中に D で示す)、または最初 Davidon 法続いて、Gauss 法 (D→G で示す) により求めた。解は一般的に、応答曲線が極値を取る時刻近傍に表われる関数  $F_0$  または  $F^k$  の極小点 (図4参照) 付近を振動しながら収束していく。そして計算のアルゴリズムや目的関数の形等のパラメータが収束の仕方に影響を与える。

## 6.2. 成分波 2 波の計算例

成分波 2 波の場合を対象に行った計算結果を表 1 に示す。 $k$  に関しては 2 回の繰り返し計算で解は収束した。同表には繰り返し計算の各段階における  $\bar{x}_i$  の値と、 $k=1$  および  $k=2$  の各々の場合の繰り返し計算の最終段階における目標スペクトルと応答スペクトルの比  $S_v^T/S_v$  の値を示す。最終的にはその比の値は 1 となり、応答ス

	k=1					k=2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
$\bar{x}_1$	3.34	3.34	3.34	0.99	0.46	0.45	0.45	0.73	0	0
$\bar{x}_2$	3.25	3.25	3.25	0.61	0	0	0	0	0	0
$S\ddot{x}/Sv$	1層 = 1.91					1層 = 1.00				
	2層 = 1.72					2層 = 1.00				

表一 成分波 2 波の収束プロセス

ベクトルは目標値と一致して、解法の妥当性が示される。

### 7. 結

人工地震波シミュレーションに関する既往の研究を概観し、応答スペクトルを目標スペクトルと一致させるような人工地震波のシミュレーションを試みるとともに、その問題点を指摘し、最適化手法による長周期成分波の修正を試みた。小数の成分波に対してその妥当性は検証されたが、今後より現実的な問題に対する対応を検討するつもりである。

### 参考文献

- 1) G. N. Bycraft: White Noise Representation of Earthquakes, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. of the ASCE, EM 2, (April 1960)
- 2) P. C. Jennings, G. W. Housner and N. C. Tsai: Simulated Earthquake Motions for Design Purposes, Proc. of the 4th WCEE, Chile, (1969)
- 3) H. Goto and K. Toki: Structural Response to Nonstationary Random Excitation, Proc. of the 4th WCEE, Chile, (1969)
- 4) J. Penzien and Shih-Chi Liu: Nondeterministic Analysis of Nonlinear Structures Subjected to Earthquake Excitations, Proc. of the 4th WCEE, Chile, (1969)

- 5) M. Amin and H.-S. Ang: Nonstationary Stochastic Model for Earthquake Motions, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. of the ASCE, EM2, (April 1968)
- 6) M. Watabe: Simulated Earthquake Acceleration Record for Dynamic Analysis of Structures, Bulletin of the International Institute of Stismology and Earthquake Engineering, Vol. 6, (1969)
- 7) R. H. Scanlan and K. Sacks: Earthquake Time Histories and Response Spectra, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. of the ASCE, EM4, (Aug. 1974)
- 8) G. R. Saragoni and G. C. Hart: Simulation of Artificial Earthquakes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 2, (1974)
- 9) P. Ruiz and J. Penzien: Stochastic Seismic Response of Structures, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. of the ASCE, EM2, (April 1971)
- 10) M. Shinozuka and Y. Sato: Simulation of Nonstationary Random Process, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. of the ASCE, EM1, (Feb. 1967)
- 11) S.-C. Lin and D. P. Jhaveri: Spectral Simulation and Earthquake Site Properties, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. of the ASCE, EM5, (Oct. 1969)
- 12) N.-C. Tsai: Spectrum-Compatible Motions for Design Purposes, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. of the ASCE, EM2, (July 1972)
- 13) 武藤, 太田, 安藤, 宮村, 草野: 人工波作成に関する基礎的研究, その 1, その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和51.10)
- 14) 安楽: 人工地震波のシミュレーション・II, 最適化手法による成分波振幅の修正に関する基礎的考察, 大林組技術研究所報告書, (昭和52.6)