

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 (その2)

——最適化手法による低周波数成分波振幅の決定と適合性の改良——

安 楽 秀 嶽

Simulation of Spectrum-compatible Artificial Earthquake Records (Part 2)

——Determination of Amplitude of Low-Frequency Wave Components by Means of Optimization Technique and Improvements of Suitability of Spectrum——

Hidetake Anraku

Abstract

Following the previous paper, in this report, the determination of the amplitude of low-frequency wave components is tried by means of the optimization technique. Compared with the basic study of the previous paper, the numbers of the component waves which compose the artificial earthquake records are increased and the optimization procedure is improved. Examples of the numerical studies show the validity of the method. Moreover, the parametric study proceeds by changing both the natural periods of the calculation to fit the spectra and the numbers of the component waves, to examine the suitabilities of the spectra in the highfrequency region. The influence of base line correction on the response spectrum is also examined.

概 要

前報¹⁾において、標題地震波のシミュレーションにおける長周期領域での適合性の悪さについてふれ、最適化手法による長周期成分波振幅の決定を提案して、その可能性について基礎的考察を加えた。本論文は同手法を拡張したものである。現実的な地震波を表わし得るような、多くの成分波より合成される人工地震波の長周期成分波振幅を最適化手法により決定し、長周期領域でのスペクトルの適合性を向上させることを試みた。手法の概要を示し、数値計算例を示して、その妥当性を検証した。さらに、短周期成分波の成分波数や、収速計算実行点の数を変化させたパラメトリックな計算を行い、これ等の数を増やすことで、適合性が改良されることを示した。また、基準線の補正について述べ、同補正が応答スペクトルに与える影響について調べた。

1. 序

前報¹⁾において、人工地震波のシミュレーションに関する研究を概観し、併せて、あらかじめ与えられた目標スペクトルと同一の応答スペクトルを持つ人工地震波のシミュレーションに関する考察を行った。

同論文では、調和波の重ね合せによって人工地震波をシミュレートする際に、各成分波の振幅を簡単な繰り返し計算で求めようとする既往の手法では、シミュレートした人工地震波のスペクトルが必ずしも目的値と一致しないこと、この傾向は特に長周期領域で顕著なことを指摘し、その原因について検討した。

そして、その原因が、長周期領域における応答の非定常性(過渡性)にあることを明らかにし、各成分波の振

幅と最大値生起時刻を未知数とする、最適化手法によるシミュレーションを提案した。

具体的な計算手法を示し、数値計算によりその検証を行って、基本的な手法の妥当性を確認したが、計算の対象とした成分波数が少なかった為に、現実的な地震波を構成するような多くの成分波から成る地震波のシミュレーションに対しては、その妥当性は確かめられてはいなかった。

本報告は、実用的な観点に立って、現実の地震波に対応するような多くの成分波より成る地震波を対象に、上記手法の適応性を検討して手法を改良したものである。長周期成分波振幅の最適化手法による決定が試みられ、具体的な計算例を通じて、その妥当性が検討されている。

また、短周期領域における人工地震波の応答スペクト

ルと目標スペクトルの適合性について考察を加えている。幾つかの代表点を選んで、両者を一致させるべく行う繰り返し計算の収束性は良いこと、その他の点では両者の適合性は必ずしも良くないことを指摘している。そして、収束計算実行点の数や成分波の数を変化させた計算を行い、これ等が両者の適合性に与える影響について調べている。

2. シミュレーション計算法

2.1. 計算手順の概略

前報で述べたシミュレーション法の概略を示す。

- (1) 目標スペクトル $S_r^T(\omega)$ を与える。
- (2) $0 \sim 2\pi$ 間に一様分布するランダム位相差 φ_n ($n = 1 \sim N$) を与える。
ここで N は成分波の数である。また、ランダム位相差 φ_n は任意の整数 $INITAL$ を与えれば Subroutine により自動的に作成される。
- (3) 次式で人工地震波 $Z(t)$ をつくる。

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

ここで、 C_n : 成分波振幅, ω_j : 成分波振動数, $E(t)$: 震波に非定常性を与える時刻関数である。

- (4) 幾つかの点 ω において、 $Z(t)$ に対応する応答スペクトル $S_v(\omega)$ を計算する。 $S_v(\omega)$ と $S_r^T(\omega)$ を比較し収束が不十分なら(5)(a), (b)の計算を繰り返す。
- (5) 短周期成分波の振幅 C_n を次の手順で修正する。
 - (a) 振幅 C_n に対応する成分周波数を ω_n とし、 ω_n に対応する応答スペクトル $S_v(\omega_n)$ を、上記 $S_v(\omega)$ を用いて内挿法により求める。また、 ω_n に対応する目標スペクトルを $S_r^T(\omega_n)$ とする。
 - (b) 次式により C_n を修正する。

$$C_n = \frac{S_v(\omega_n)}{S_r^T(\omega_n)} C_n \quad \dots\dots(2)$$

- (6) 次に長周期成分波振幅 C_n を以下の手順で修正する。
 - (a) 固有振動数 ω_j の成分波 j に対する、固有周期 i の 1 質点系の応答 x_{ij} を求める。

$$x_{ij} = C_j \cdot f_{ij}(t_i) \quad \dots\dots(3)$$

但し f_{ij} は、振幅 C を含まない時刻のみの関数である。

- (b) 全成分波を、長周期グループ L と短周期グループ S に分離して扱い、全成分波を考慮した地震波に対する応答を次式で表わす。

$$x_i = \sum_{j=1}^N x_{ij} = \sum_S C_j f_{ij}(t_i) + \sum_L C_j \cdot f_{ij}(t_i) \quad \dots\dots(4)$$

- (c) 応答スペクトルが目標値と一致するように、次式を満たす長周期成分波振幅 $\{C_j\}_L$ を決める。

$$(x_i)_{\max} = [\sum_S C_j \cdot f_{ij}(t_i) + \sum_L C_j \cdot f_{ij}(t_i)]_{\max} = X_i \quad \dots(5)$$

ここで、短周期成分波の振幅 $\{C_j\}_S$ は、式(2)で求めた値を用いる。

- (6) (3)に戻る。

2.2. 長周期成分波振幅の決定法

上述の(5)式を満たす長周期成分波振幅 $\{C_j\}_L$ は、最適化手法により求める。最適化手法としては、下記の2つの方法が考えられている。

(1) 1 phase 法

前報で述べた方法であり、成分波振幅 $\{C_j\}_L$ と最大値生起時刻 $\{t_i\}$ を同時に未知数とする最適化計算を行う。同計算法では、変位 x_i と目標値 X_i の差の自乗和に、 x_i の時間微分 \dot{x}_i の2乗和を加えた、次の目的関数 F を最小にする $\{C\}$ 、 $\{t\}$ を最適化手法により求めて解としている。

$$F = \sum (x_i - X_i)^2 + \sum \dot{x}_i^2 \quad \dots\dots(6)$$

そして、local は最適解を避けて global は最適解を求める為に、摂動パラメータ R を用いて目的関数 F を変換している。

この計算法は、前報の計算例でも示したように、成分波数の少ない場合には一応有効な手段と言えた。

- しかし、成分波数の増えた今回の計算では、
- (a) 性質の異なる2種類の未知数 $\{C_j\}$ と $\{t_i\}$ を同一レベルで扱ったことによる目的関数の複雑化。
 - (b) 未知数の増大による計算の手間
 - (c) 摂動パラメータ R の値の決め方の困難さ
- 等等の問題により、種々の困難が生じ、満足のいく解を得られないことが多かった。

そこで今回は次の(2)の方法を試み、妥当な解を得ることができた。

(2) 2 phase 法

この計算法では、変数 $\{C_j\}$ と $\{t_i\}$ を別々に扱い、2つの phase に分けて最適化の計算を行う。

(a) phase 1

(4)式の x_i に対し

$$x_i = \sum_S C_j \cdot f_{ij}(t_i) + \sum_L C_j \cdot f_{ij}(t_i) \longrightarrow \max \quad \dots\dots(7)$$

とする t_i ($i=1, 2, \dots$) を求める。

(b) phase 2

上記の $\{t_i\}$ に対して、次式の自乗和を最小にする $\{C_j\}_L$ を求める。

$$\sum (x_i - X_i)^2 \longrightarrow \min.$$

3. 計算例

前述の手法を用いて、前もって与えられた目標スペクトルと一致するような応答スペクトルを有する地震波の

シミュレーションを試みた。

3.1. 地震波のパラメータ

- シミュレーションの為に合成される成分波の数は、
- 0.02~0.5秒間0.02秒刻み25成分、
- 0.5 ~2.5秒間0.1 秒刻み20成分、
- 2.5 ~6.0秒間0.5 秒刻み7 成分

の合計 52成分である。地震動の継続時間は、 $T = 10$ 秒とし、時刻関数は $E(t) = 1.0$ ($0 \leq t \leq 10$) とした。また、ランダム位相差を発生させる整数の初期値は、INITAL = 24756 とした。

3.2. 目標スペクトル

目標スペクトルは、基盤一表層より成る金井一多治見の地盤モデル²⁾をもとに定めた。同モデルの基盤にwhite noise より成る外乱が作用した場合の、表層地盤上の一質点系の変位および速度の定常応答の分散を求め、これを基に、ランダム変動の最大値を推定する Davenport³⁾の式を用いて応答の最大値を推定し、これを目標スペクトルとした。同スペクトルのパラメータは、金井一多治見地盤のパラメータ、表層地盤の卓越周期 T_g および減衰定数 h_g 、地震の継続時間 T である。 T および構造物の減衰定数 h を各々、 $T = 10$ 秒、 $h = 2\%$ として、 T_g および h_g をパラメータにして求めた目標スペクトルは図-1 のようになる。

3.3. 計算結果

$T_g = 0.4$ sec, $h_g = 0.6$, $T = 10$ sec で与えられる目標スペクトルを対象にシミュレーションを行った。

振幅{C}を、最適化手法を用いること無しに、(2)式に基づく単純な繰り返し計算のみによって決定した結果得られた地震波のスペクトルを図-2に示す。

応答スペクトルと目標スペクトルを一致させる為に繰り返し収束計算を行った点のスペクトルを◎で示し、それ以外の点のスペクトルを●で示す。

同図から、次の事が指摘できる。

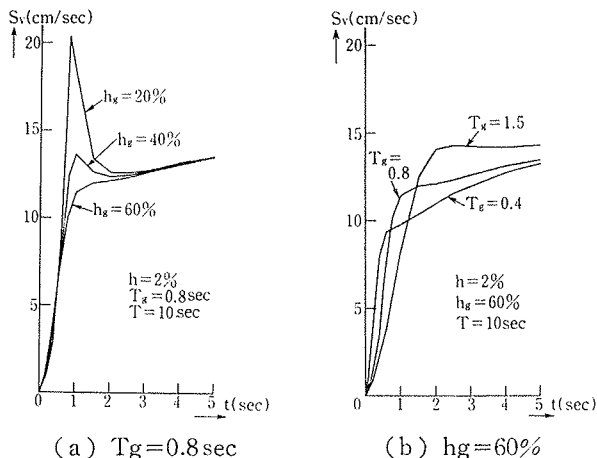


図-1 目標スペクトル

- (1) 短周期領域では、収束計算実行点の応答スペクトルは目標スペクトルと良く一致し、収束度は良い。
- (2) 長周期領域での収束度は必ずしも良くない。
- (3) 短周期領域では、収束計算実行点以外での人工地震波のスペクトルと目標値とのバラツキが大きい。
- (4) 他方、長周期領域ではそのバラツキは小さい。

このうち、(1), (2)は Housner の標準スペクトルを目標スペクトルとしたシミュレーションを試みた前報でも指摘されている。

そこで、長周期領域における繰り返し計算の収束性を向上させる為に、2~5秒間の0.5秒刻みの七つの点の収束計算を、最適化手法を用いて行うことを試みる。このとき変数は、3~6秒間の7つの成分波の振幅と最大値生起時刻とする。最適化手法としては、前述の2 phase法を用いる。

同計算における解の収束状況を表1に示す。同表に示すのは、収束計算の各段階における X_1 ((4)式)の最大値および x_1 を、目標スペクトル X_1 で除して標準化した値である。

計算の進行につれて x_1 の最大値が目標スペクトルに近づいていき、それにつれて x_1 も 0 に収束していく様子が分る。

このようにして求めた3秒以上の成分波振幅 C_j および (2)式で求めた3秒未満の成分波振幅を用いてシミュレートした地震波の応答スペクトル計算した。

この応答スペクトルを目標スペクトルで除して標準化

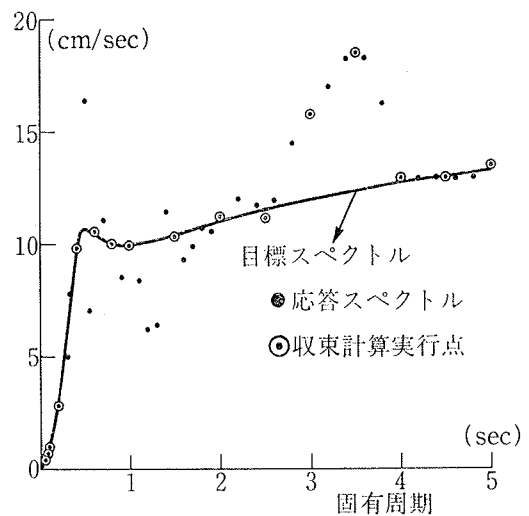


図-2 目標スペクトルの適合性

繰り返し回数	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}
1	1.00	1.00	1.35	1.53	1.01	0.99	1.03	0.02	-0.02	-0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	-0.03
12	0.99	0.90	1.08	0.99	0.98	0.99	1.03	0.03	-0.02	0.05	-0.02	0.06	0.05	-0.1	
22	0.98	1.01	1.15	1.16	1.08	1.05	1.05	0.01	0.01	0.007	0.01	0.007	0.002	-0.01	
33	0.98	0.97	1.03	1.02	0.99	0.98	1.01	0.02	0.01	-0.01	-0.03	-0.01	0.01	0.008	

表-1 最適化手法による解の収束

したものを図-3に示す。最適化手法を用いず(2)式をもとにシミュレートした地震波のスペクトルも併せて同図に示す。

最適化手法により目標スペクトルと一致させるべく計算を行った、固有周期2~5秒間の7つの点では、スペクトル比はほぼ1.0となって解は満足すべき収束度を示している。

そして、これ等の点の間の、収束演算実行点以外の点でも、応答スペクトルは目標値と良好な一致を示す。最適化手法を用いない解と比べスペクトル特性が改良されているのが分り、手法の妥当性が示される。

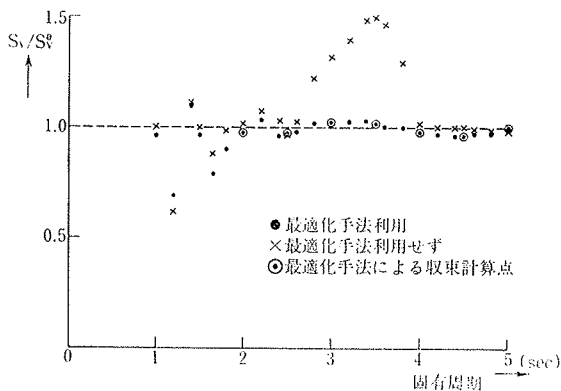


図-3 最適化手法によるスペクトルの適合

4. 収束計算点と成分波の数がスペクトルの適合性に与える影響

前述の最適化手法により、長周期領域の収束計算実行点における収束度を満足するものにできること、この領域では収束計算実行点以外の点でのスペクトルの適合性も良いことを見た。

しかし短周期領域では、(2)式の繰り返し計算で収束演算実行点の収束度は高められるが、その他の点での適合度は必ずしも良くないことも明らかにされた。

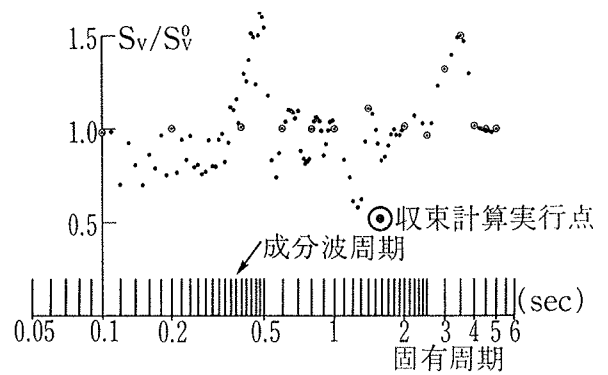
そこで、低周期領域における収束演算実行点や成分波の数をパラメトリックに変化させたシミュレーションを行い、スペクトルの適合性の変化を調べた。

4.1. 収束計算実行点の数

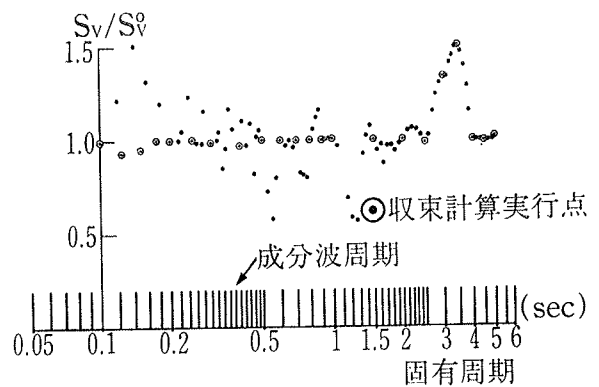
収束計算実行点の数を変化させて行った計算の結果得られた人工地震のスペクトルを図-3(a)~(d)に示す。

長周期領域の適合性は、前述の最適化手法で改良出来るので、ここでは主に低周期領域の適合性のみを調べる為に、(2)式による成分波振幅の修正のみを行った。

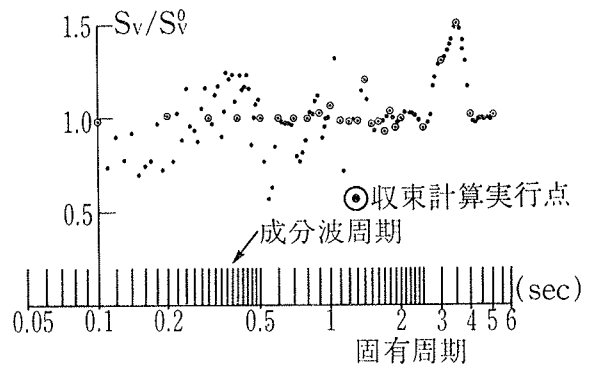
図-4で(a)~(d)と収束演算実行点の数を増やした場合でも、各短周期領域では解の収束性は良いこと、そして、収束計算実行点の数を増す程、スペクトルどうしの適合性は向上することが分る。



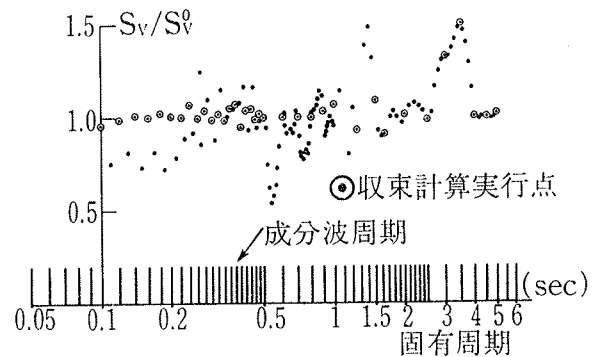
(a)



(b)



(c)



(d)

図-4 収束計算点の数とスペクトルの適合性

各々について、 $T \leq 2.0$ の領域でのバラツキを調べた。図-4(a)~(d)に対応する値は表-2のようになり、成分波周期と一致させた収束計算点の数を増す程その値は小さくなっていく。

しかし成分波の数に限りがあるので、ある程度まで演算点の数を増やすと、それ以上増やしてもスペクトルどうしの適合性はあまり向上しない。

ケース	a	b	c	d
収束計算実行点数	8	16	20	30
分散	0.2317	0.1579	0.1638	0.1487

表-2 収束計算点の数とスペクトルのバラツキ

4.2. 成分波の数

成分波の数がスペクトルの適合性に与える影響を見る為に成分波数を52→68と増やして行ったシミュレーション結果を図-5に示す。

同図にみられるように、成分波数と収束計算実行点の数を増やすことにより、スペクトルどうしの適合性は大きく向上している。このとき $T \leq 2.0$ 秒における分散値は、 $\sigma = 0.1272$ となり、4.1. の場合に比べて小さくなっている。

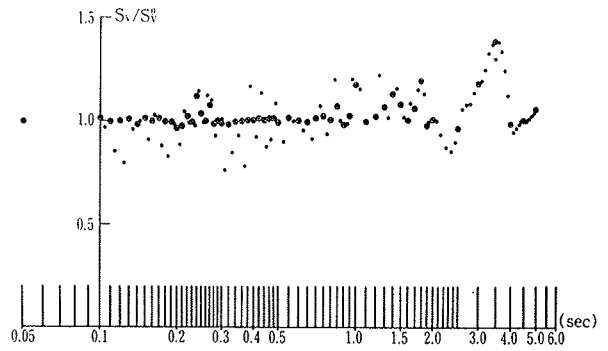


図-5 成分波数とスペクトルの適合性

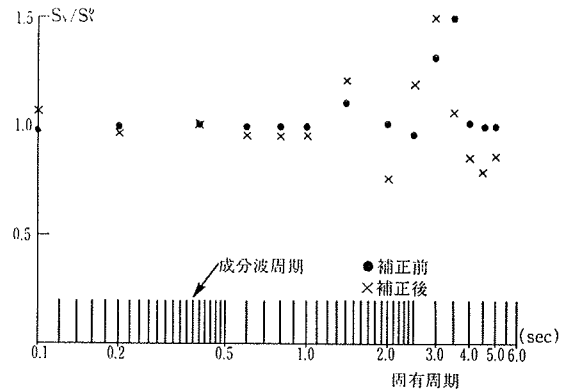
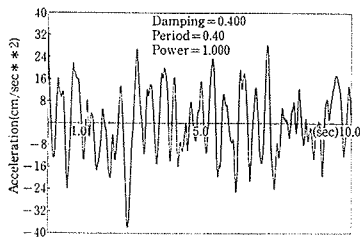
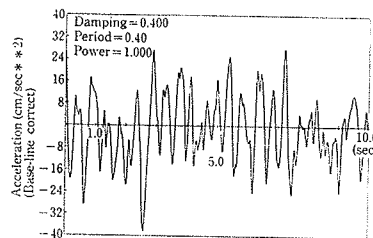


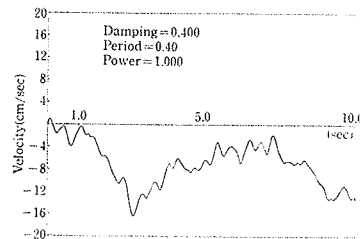
図-8 基準線補正の応答スペクトルへの影響



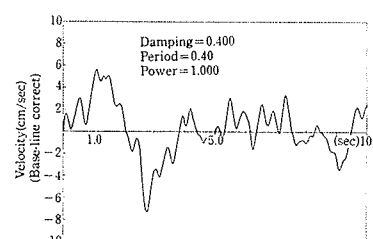
(a) 加速度波形



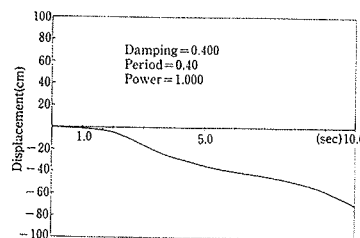
(a) 加速度波形



(b) 速度波形

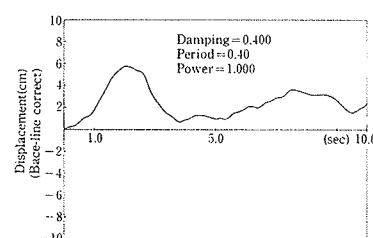


(b) 速度波形



(c) 変位波形

図-6 基準線補正前



(c) 変位波形

図-7 基準線補正後

以上、4.1. および4.2. の結果から、低周期領域では成分波数と繰り返し収束計算実行点の数を増やすことにより、スペクトルどうしの適合性を向上させ得ることが分る。

5. 基準線補正と 応答スペクトル

上述のようにして、求めた加速度波形を積分して得られる速度波形や変位波形は基準線に対するゆがみを持ち、非現実的なものとなるので、これを修正する為に、基準線の補正を行う。

補正は、しばしば行われるように放物線を用い、速度波形の2乗和が最小になるように行う。

5.1. 補正結果

補正前と補正後の地震波の加速度波形、速度波形および変位波形を図-6と図-7に示す。

加速度波形では目立たないが、速度波形と変位波形には、補正前、後で大きな差が認められる。

従ってこれ等の諸量を用いる応答解

析（たとえば，速度項が大きな影響を与える水中構造物の地震応答解析）に際しては，注意が必要である。

5.2. 補正と応答スペクトル

補正前，後の地震波波形に対する応答スペクトルを図-8に示す。両者には，特に長周期領域において差が認められる。

6. 結び

以上の結果をまとめると，人工地震波のシミュレーションに関して，次のことが指摘できる。

(1) 本報告で述べた，最適化手法による長周期成分波振幅の決定法は有効であり，これによって長周期領域での全体的な応答スペクトルの適合性は良好なものとなる。

(2) 短周期領域での適合性は，成分波の数および収束計算実行点の数で左右され，これを増やすことによって改良することができる。

(3) 基準線の補正により，地震波の速度および変位波

形はかなり変化するので，これ等を用いる応答解析では注意が必要である。また，同補正は応答スペクトルに影響を与えるので，場合によっては，前もってこれを見込んだシミュレーションを行うことが必要である。

参考文献

- 1) 安楽：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，大林組技術研究所報，No. 16，(1978)
- 2) H. Tajimi：A Statistical Method of Determining the Maximum Response of a Building Structures during Earthquake, Proceedings of the 2nd WCEE, Tokyo, Japan, (1960)
- 3) A. G. Davenport：Note on the Distribution of the Largest Values of a Random Function with application to Gust loading, Proceedings Institution of Civil Engineerings. Vol. 28, (June 1964)