

【ノ ー ト】

強震記録による長周期構造物応答計算の精度

ACCURACY OF SEISMIC RESPONSE OF LONG-PERIOD STRUCTURE
CALCULATED FROM DIGITALIZED STRONG MOTION RECORD

伯野元彦*・松井芳彦**・藤野陽三***

By Motohiko HAKUNO, Yoshihiko MATSUI and Yozo FUZINO

1. はじめに

従来の耐震設計で広く用いられている震度法が正しく適用しうるのは、構造物の固有周期が短いときのみということがわかっている。適用範囲は入力地震波の性質によるが、構造物の固有周期がおおよそ 0.2 秒以下であろう。しかしながら、最近では構造物が巨大化し、数秒から 10 秒程度という長い一次固有周期を持つ構造物がしばしば建設されるようになってきた。このような構造物に対しては動的耐震設計を用いる必要がある。動的耐震設計の基本となるのは地震応答解析であり、一般的には、特定のいくつかの地震波を入力として構造物の振動方程式を積分して最大応答値を求め耐震安全をチェックする。

地震応答解析に輸入として用いられる実地震記録は強震計（おもに SMAC 型）で得られた記録を数値（デジタル）化したものである。地震記録を数値化して得られる地震動は、実際に強震計の受けた地震動に対して次のような原因による誤差を含むと考えられる。

- (i) 地震計の振動特性
 - (ii) 記録紙の送りむら、円弧書き
 - (iii) 零線挿入、読み取りの誤差（数値化）
- } (計器特性)

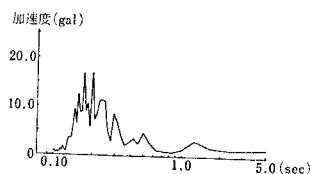
(i) については、比較的長周期の成分（0.5 秒程度以上）は地震計の特性によりほぼ正確に記録されていると考えてよい。地震計特性による補正については、最近検討されているが、まだ一般化には至っていない。(ii) については、すでに何種類かの補正が行われている。(iii) についての問題がこの研究の主題とするものであり、これによる誤差が長周期構造物の直接応答ならびに応答スペクトルにどのような影響を与えるのかを考えて

みた。

SMAC 型強震計によるいくつかの加速度記録の周期成分を調べてみると、通常、計器特性により縮小されているはずの短周期成分（0.1～0.8 秒程度）がかなり卓越していることが普通である。図—1 は例として十勝沖地震（1968 年 5 月 16 日、マグニチュード $M=7.4$ ）の宮古における SMAC-B 型による地震記録（最大加速度 91 gal）の南北方向のフーリエスペクトルを示したものである¹⁾。内陸部で発生する地震の震源付近（“直下型”）では特に短周期成分が卓越する傾向が強い。長周期成分（数秒～10 秒程度）の加速度も正確に記録されているのかもしれない。しかし、通常、地震加速度記録を構成するのは短周期成分がほとんどで、長周期波によるものはごくわずかである。したがって、長周期波による加速度分は小さいだけに読み取り誤差の中に含まれてしまう可能性が高いと考えられる。長周期構造物の応答に強い影響を与えているのは地震波の長周期成分である。この長周期成分にかなりの誤差が介入しているとすれば、これを入力として長周期構造物の地震応答計算を行った場合、その応答値は真の値に対してかなりの誤差があるものと予想される。

以上のことを検証するために、まず次のようなことを行う。まず、解析に用いる地震波として、

- (1) 計器特性に起因する誤差がまったくないという利点を有する模擬地震波——ART WAVE



図—1 十勝沖地震（1968.5.16, $M=7.4$ ）の宮古における地震記録（SMAC-B 型、最大加速度 91 gal）のフーリエスペクトル（南北方向）

* 正会員 工博 東京大学助教授 地震研究所

** 正会員 工修 前田建設工業（株）

*** 正会員 Ph.D. 筑波大学助手 構造工学系

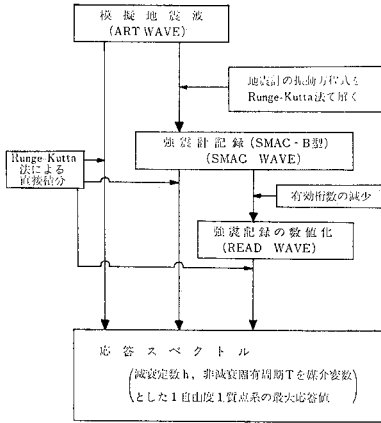


図-2 解析の流れ

表-1 SMAC 強震計の特性

地震計	SMAC-A (A.2)	SMAC-B (B.2)	SMAC-C (C.2)	SMAC-D	SMAC-E
計器周期 (秒)	0.1(0.14)	0.1(0.14)	0.1(0.14)	0.05	0.05
減衰係	臨界	臨界	臨界	60%臨界	60%臨界
感度 (gal/mm)	25(12.5)	25(12.5)	25(12.5)	100	200
最大加速度 (gal)	1000 (500)	1000 (500)	1000 (500)	500	1000
記録速度 (mm/sec)	10	10	10	5	2.5

(2) (1) の地震動を SMAC-B 型地震計に作用させて作り出した強震記録——SMAC WAVE

(3) (2) の記録において数値化の誤差を考慮して有効数字を少なくした波——READ WAVE

を用意し、そして、この3種類の波を入力としてそれぞれの応答スペクトルを求めてみる。計算はすべてコンピューターによる。以上の解析の流れを描いたものが図-2である。また、現在設置されている SMAC 型強震計の特性を表-1に示す。この中で SMAC-B, SMAC-B 2 が多く用いられているが、ここでは SMAC-B 型について考えてみることにする。

2. 入力地震波

(1) 模擬地震波 (ART WAVE)

すでに述べたように本研究の目的は、実際の地動加速度が強震計に記録されたあと、数値化誤差（読み取り誤差）——有効数字の桁数の低下としてここでは扱う——によって、地震応答計算結果（特に長周期領域において）がどのような影響を受けるのか考えることである。したがって、この場合の地震動としては、

- 地震計の計器特性の影響を受けていない。
- 振幅の有効数字が 7~8 桁の精度を持っている。

の2点が要求される。そのため、ここでは模擬地震波として既応の記録を採用せず、多くの正弦波を重ね合わせ

ることによって作製した。

一般に、ある地点での地震動の性質は発震機構、伝播経路、表面地盤の性質等に強く影響されているといわれており、当然それは、構造物の地震応答にも強く影響してくるだろう。

模擬地震波を作る際には、これらのことがらを十分考慮して適切なスペクトル密度の時間関数を与える必要がある。しかし、ここでは簡単に“速度スペクトル一定”という仮定で、継続時間 30 秒、波数領域 (0.1~10 Hz)、最大加速度 100 gal、時間刻み 0.01 秒の波を次のような三角級数の和として表わされる関数 $g(t)$ と時間軸上の強度変化を表わす確定過渡包絡線 $e(t)$ をかけ合わせた $h(t)$ を模擬地震波として使用した。

$$g(t) = \sum_i a f_i \cos 2\pi (f_i t - \phi_i) \dots\dots\dots (2)$$

$$e(t) = \begin{cases} (t/4.5)^3 & : 0 \leq t \leq 4.5 \\ 1.0 & : 4.5 \leq t \leq 12 \\ \exp\{-(t-12)/4\} & : 12 \leq t \leq 30 \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

$$h(t) = e(t) \cdot g(t) \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 a : 定数 最初は 1.0 と仮定し、 $h(t)_{max}$ が 100 gal になるよう、あとで調節する。

f_i : 周波数 $n/30, n=3, 4, \dots, 300$

ϕ_i : 位相差 $0 \sim 1$ までの一様乱数

解析に際してはこのような波 $h(t)$ を 10 個用意した。図-3 は式 (3) に与える包絡線 $e(t)$ を示し、図-4 に示すのはこのようにして作成された模擬地震波 $h(t)$ の 1 例である。

(2) 強震記録 (SMAC WAVE)

模擬地震動 $h(t)$ を地表面の實地震動と考え、これが前述の SMAC-B 型強震計に作用した時、理想的には以下のような強震記録を記録する。強震計の特性は表-1 に与えられているから、運動方程式は、

$$\ddot{x} + 2 \times (20\pi) \times \dot{x} + (20\pi)^2 x = -h(t) \dots\dots (5)$$

となり、この方程式を 0.01 秒間隔で Runge-Kutta により解いて求めた $x(t)$ に幾何倍率、感度を考慮して強震記録（加速度）とする。この計算もコンピューターにより行っているため強震記録の値は有効桁 7~8 桁を持っていると考えてよい。図-5 はこうして得られた模擬地

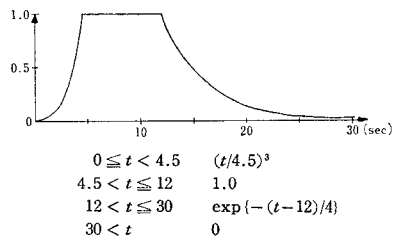


図-3 包絡線 $e(t)$ の形状

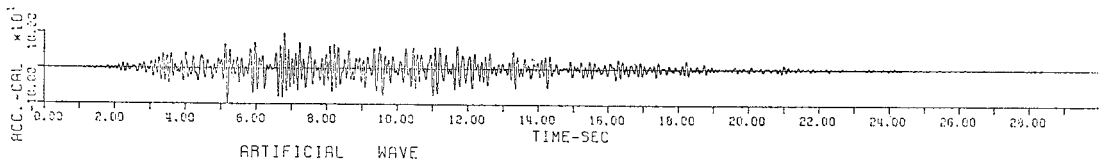


図-4 模擬地震波 $h(t)$ の1例

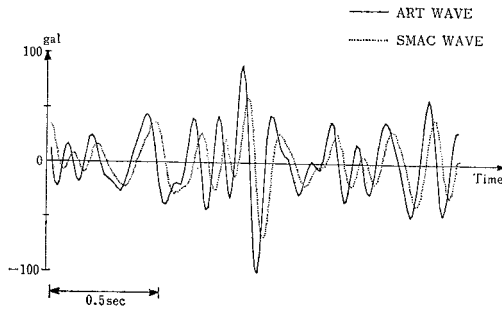


図-5 模擬地震波 (ART WAVE) とその強震計による記録 (SMAC WAVE)

震波 (ART WAVE) と、それが作用した時の強震記録 (SMAC WAVE) の一例を示す. 強震計の特性によって位相遅れがめだつたが, 全体として波形のひずみは顕著ではない.

(3) 読み取り波

強震記録の数値化における読み取りの誤差を考えた波であり, ここではそれを有効数字の桁数の低下として考えた. すなわち, 式 (5) によって計算された強震計の応答 $x(t)$ に幾何倍率 ($\times 16$) を考えたものが実際の記録紙上の記録であるから, その振幅 0.1 mm をまたは 0.2 mm の誤差があるものとして読み取り, それを読み取り波とする. 一般に使用されている読取器の最小読取能力は公称 10μ (0.01 mm) 程度であるが, 零位置・記録線の幅および計器の保存状態を考えると, 信頼できる読み取り値としては 10μ よりもかなり大きくなり $30 \sim 40 \mu$ 程度と思われるが, ここではさらに粗く考え 0.1 mm とした. これは誤差の上限と考えてよいだろう. なお, 0.1 mm の読みでは加速度は 2.5 gal おきとなり, 0.2 mm では 5 gal となる (SMAC-B 型).

3. 応答スペクトル

以上のようにして求めた各波それぞれ 10 個の, ① 模擬地震波, ② 強震記録, ③ 読取波 (0.1 mm, および 0.2 mm), を固有周期 (T), 減衰定数 (h) を持つ線形一自由度一質点系に作用させて応答変位スペクトル (S_D) を求めてみる. 非減衰固有周期 $T=0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 1.0, 2.0, 5.0, 8.0, 10.0$ 秒, 減衰定数 $h=0.05$, または 0.20 とした. ここでの応答計算は運動方程式,

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \omega^2x = -\ddot{x}_0 \dots\dots\dots (6)$$

ここで, $\omega = 2\pi/T$, \ddot{x}_0 : 地震入力
を時間刻み $\Delta t = 0.01$ 秒にとって Runge-Kutta 法によって変位 $x(t)$ を求め, その最大値を取った.

4. 結果と考察

図-6 は, 地表における地震動を 1 自由度系の入力とした時と, その地震動が SMAC 強震計に作用して計器特性の影響を受けた強震計の出力 (有効桁数 7~8 桁) を入力とした時の最大変位応答値の比をプロットしたものである. これからみると, 強震計の特性が 0.1~1.0 秒の間に強くあらわれていることが知られる. この構造物の周期範囲では, 応答スペクトル値は実際より小さめに出るということである. また, 応答比にはほとんどばらつきが認められず, 強震計の記録が 7~8 桁もの精度をもって読みとれば, 10 秒程度の長周期まで応答値は真の地動によるとほとんど変わらず, 精度がよいことを示している.

図-7 は 図-6 とは異なって, 図-6 で用いた強震計の記録を読み取り誤差 0.1 mm (つまり, 0.05 mm で四捨五入し, 有効数字は 3 桁程度になる) で読み取ったデータを入力として応答計算を行ったものと, 強震計に作用した真の地震動による最大応答値との比を示したものである. この場合には 1 秒より短周期ではばらつきがほとんどなく, 図-7 と同様の性質を示しているが, 2 秒より長周期となると大きなばらつきを示し, 計算された応答には大きな誤差が含まれていることを示唆している. 次に, 1 自由度系の減衰定数 h を 0.05 から 0.20 に変えて同様なことを行った結果を 図-8 に示す.これ

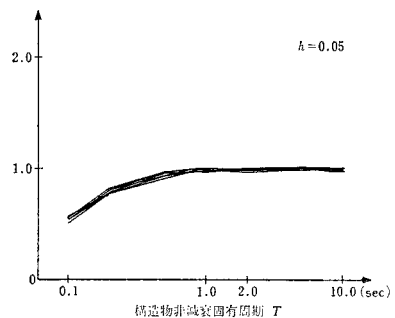
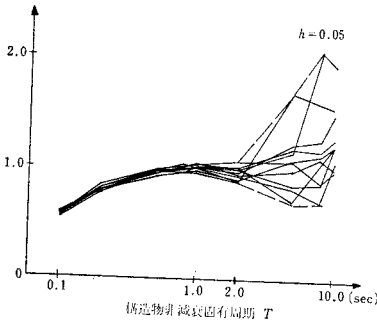


図-6 応答変位比 $\left(= \frac{\text{SMAC WAVE による応答}}{\text{ART WAVE による応答}} \right)$



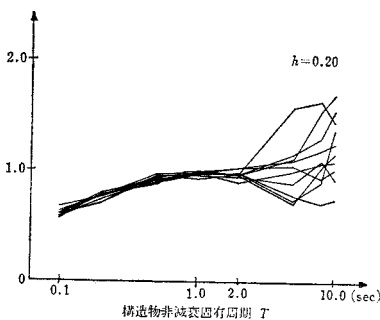
図一七 応答変位比 $\left(= \frac{\text{READ WAVE (0.1 mm) による応答}}{\text{ART WAVE による応答}} \right)$

でも数秒以上の長周期構造物の応答は非常にばらつきを持っていくことがわかる。

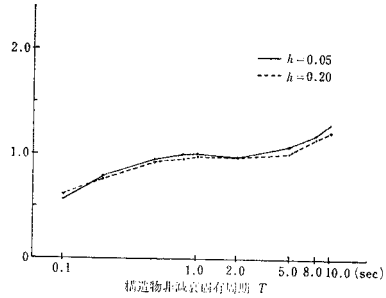
現在、応答スペクトル法による構造物の耐震安全性のチェックが広く使われている。このとき用いられる基準応答スペクトルは数多くの地震記録を入力としたときの最大応答値を平均化したもの（平均応答スペクトル）であり、地震波形の違いによる最大応答値のばらつきは種々の理由で考慮していない。したがって、数値化された地震記録を長周期構造物応答計算に用いることの誤差がもし平均的に零であるならば、平均応答スペクトルを耐震設計に用いる限りは読み取りによる応答の誤差にあまりに神経質になる必要はないと考えられる。図一九は図7,8で示された応答変位比の平均を示したものである。サンプル数は10個と少ないが大体的傾向はつかめるだろう。図一九に示すように、応答変位比の平均は周期1~5秒程度まではたかだか10%であり、数値化による誤差が平均応答スペクトルに及ぼす影響は小さいと考えてよい。しかし、周期が10秒近くになると、平均しても20~30%の誤差があり、注意すべきことと考えられる。

結論として次のことがいえる。

(1) 強震記録を3桁程度の精度で読み取り、それを入力地震波として用いるという現在の地震応答解析手法では、2秒以上の固有周期を有する長周期構造物の応答



図一八 応答変位比 $\left(= \frac{\text{READ WAVE (0.1 mm) による応答}}{\text{ART WAVE による応答}} \right)$



図一九 応答変位比の平均

値の精度はかなり低いものであり、100%程度の誤差の入っている場合もあることがシミュレーションにより示された。

(2) この問題を解決するためには、強震記録の読み取り値の精度を7~8桁に近づける必要がある、デジタル・レコーダーの採用などが有効ではないかと考えられる。

(3) 平均応答スペクトル法により長周期構造物の応答解析を行う場合、固有周期が5秒程度までなら平均スペクトルを決定する段階で読み取りによる誤差は相殺されており、それが応答変位値に及ぼす影響は小さい。

ここに用いた模擬地震波は10個と少なく、また、そのスペクトル構造も実地震波のそれに対して若干異なると考えられる。これらの点を改め、地震記録の読み取り誤差の応答への影響をより定量的に調べることを将来行う予定である。

いずれにせよ、通常の地震の速度スペクトルがほぼ一定ということは、加速度成分についていえば1/(周期)に比例するということである。したがって、いま、最大加速度400ガルの強震加速度記録があったとした場合、その最大加速度を出している波形の主成分が0.3秒であったとすると、長周期のたとえば3秒の成分は1/10の40ガル以下となる。固有周期3秒の構造物にしてみれば、その強震記録の最大加速度は、たとえ400ガルあったとしても、その長周期構造物にとって死命を制せられるのは、たかだか40ガルしかない3秒くらいの地震波成分なのである。強震記録紙上で、40ガルはわずか1.6mmにすぎない。最大値が1.6mmでしかも3秒というような長周期の波を読みとって、応答計算をしなければならぬのだから、長周期構造物の応答計算に誤差を入れないようにすることがいかに難しいかが直観的にもわかるというものである。

参 考 文 献

- 1) 運輸省港湾技術研究所：港湾地域地震観測年報，1970。
(1977.11.14・受付)