

地震応答スペクトルに及ぼす SMAC 型 強震計特性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF RESPONSE CHARACTERISTICS OF SMAC TYPE ACCELEROGRAPH ON RESPONSE SPECTRUM

岩崎敏男*・川島一彦**・若林進***・高木義和****

By Toshio IWASAKI, Kazuhiko KAWASHIMA, Susumu WAKABAYASHI
and Yoshikazu TAKAGI

1. 概 説

強震記録を用いた解析は、近年記録数が豊富になったこともあり、各所で実施されるようになってきているが、新しい構造形式の公共土木施設の出現とその規模の大型化に伴い強震計に要求されていた従来までの諸要求をさらに凌駕した短周期、ならびに長周期の振動数領域での性能に対する要求とともに、中程度の周期領域においても記録の精度に関する関心が高まりつつある。強震記録の利用を図るために、精度に関して現在必要とされている検討事項としては以下のものがあげられる。

① SMAC-B2型強震計は、振子の固有周期が0.14秒(7.14Hz)、減衰定数が1.0であり、短周期領域での感度が低下している。このような短周期領域での感度の低下が、地震応答解析に用いる入力地震動もしくは応答スペクトルに与える影響の程度とその補正方法。

② 加速度記録を数値積分して、速度および変位を算出する場合に、長周期領域の波動成分に混入してくる各種の誤差の影響とそれに対する適切な補正方法。

これらの点に関しては、現在までに各所で研究が進められ、いろいろな提案が行われているが^{1)~13)}、これらは主として解析的に取り扱ったものが多く、実際の観測に使われている強震計を用いて実験的に検討を加えた研究は非常に少ない^{4), 12), 13)}。

ここでは、現在広く一般に使われ、多数の強震記録を提供し続けているSMAC-B2型強震計、およびSMAC-Q型強震計を対象とし、加振台を用いた強震計の振動実

験を行い、これらの強震計のもつ振動数特性とこれが強震記録から計算した地震応答スペクトルに及ぼす影響を検討した。なお、実験に用いた2台の強震計(B2型およびQ型)はいずれも建設省土木研究所旧千葉支所構内において現在までにそれぞれ約12年および2年間通常の強震観測に供してきたものである。

2. SMAC 強震計の加振実験

(1) 実験装置

実験に用いた装置の概要を図-1に示す。実験装置は振動台と加速度および変位の計測システムから構成されており、振動台上にSMAC-B2型強震計(以下ではB2型強震計とよぶ)、およびSMAC-Q型強震計(以下ではQ型強震計とよぶ)を同時に設置して後述の実験を行った。なお、加振の方向は水平1方向であり、強震計の前後動を振動台の加振方向にセットした。

実験に用いた振動台は動電型の振動台であり、主要な仕様は表-1に示すとおりである。

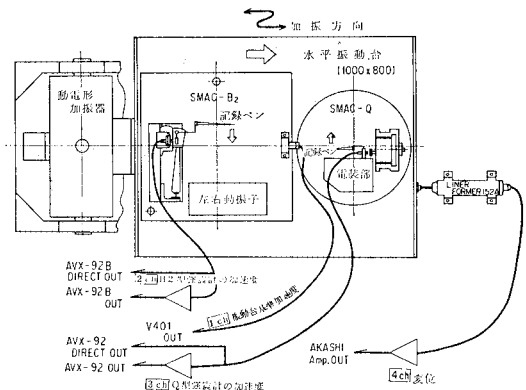


図-1 加振実験装置の概要

* 正会員 工修 建設省土木研究所地震防災部振動研究室
室長

** 正会員 工修 建設省土木研究所地震防災部振動研究室
主任研究員

*** 正会員 建設省土木研究所企画部施設課電気係長

**** 正会員 建設省土木研究所地震防災部振動研究室 技官

表-1 加振装置の主要な仕様

摘要	諸元	摘要	諸元
名称	動電型加振装置	最大速度	50 cm/s
形式	ASE-316 L	最大加速度	1 g
最大加振力	50 kg-G	許容搭載重量	100 kg
振動数範囲	0.2~50 Hz	振動台寸法	950×800(mm)
最大振幅	50 mm (両振幅)		

実験に際して計測した項目は、① 振動台の加速度(以下、基準加速度とよぶ)、② 振動台の変位(以下、基準変位とよぶ)、③ B2型強震計の加速度記録、④ Q型強震計の加速度記録、の4つである。これらの記録は精度の保持と解析処理の迅速化のために、すべて電気信号として取り出し、データレコーダに記録した。

振動台の加速度および変位の計測にはそれぞれサーボ型加速度計(固有振動数 400 Hz)、および差動トランス型変位計(0~10 Hzの間ではおおむねフラットな特性を有している)を用い、サーボ加速度計は振動台中央に、また、変位計は振動台と振動台とは縁を切った固定壁との間にそれぞれ設置した。

強震計の応答加速度はこれを電気信号として取り出すために、振子の振動を機械的に拡大する SMAC 型強震計の通常の記録方式ではなく、非接触式変位計を B2 型強震計の場合には図-2 に示すように、Q型強震計の場合には図-3 に示すようにそれぞれ振子とは縁を切った固定点に取り付け、これと振子に取り付けた変位検出用の鉄片との間の微小な空隙の距離の変化(振子の振動振幅)を直接電気信号に変換することによって記録した。

(2) 実験方法

強震計の振動数特性および位相特性を調べるために、表-2 に示す振動数の組み合わせにより 1~25 Hz の定常加振による強震計の応答を測定した。ここで振動台への入力加速度を 100 gal および 300 gal の2種類に変化させて実験を行ったが、これは、加速度強度による振動特性の変化を検討するために行ったものである。

また、実測された地震動記録を用いて加振した場合に強震計の応答がどの程度入力した加速度記録を再現するかを調べるために表-3、および図-4 に示す5種類の地震動記録を用いた加振実験を行った。これらの記録はいずれも 0.5~30 Hz の振動数範囲ではフラットな特性をもつ電磁式強震計により測定した実測地震動記録である。表-

3 には、これらの地震動記録に卓越する振動数成分も示されている(詳しくは後述の図-9 に示す記録のパワースペクトルを参照)が、これよりわかるように、入力地震記録としては、静内橋記録のように比較的周期の長い成分が卓越するものから、浮島公園の記録のように短周期成分の卓越するものまで各種の振動数領域をカバーするように選定している。

3. SMAC 型強震計の振動応答特性

(1) 振幅特性

正弦波による定常加振実験から求めた B2 型、および Q 型強震計の振幅特性をそれぞれ表-4 および表-5 に示す。表中には 100 gal 加振および 300 gal 加振時の振幅特性を読取値として示すとともに、加振入力振動数

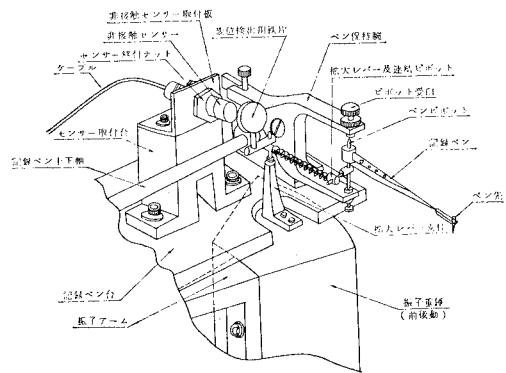


図-2 B2型強震計の加速度応答の測定法

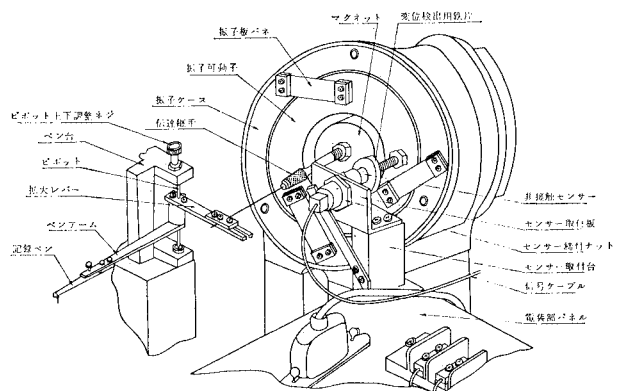


図-3 Q型強震計の加速度応答の測定法

表-2 正弦波加振実験

シリーズ No.	入力波	加 振 振 動 数 [Hz]															
I	正弦波 100 gal 一定加振	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	17	20	22	25
II	正弦波 300 gal 一定加振	—	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	17	20	22	25

表-3 加振実験に用いた地震動記録

実験番号	入力地震動記録						加振実験における最大加速度 ¹⁾ (gal)	卓越振動数 ²⁾	実験記号 ³⁾
	発生年月日	地震名	M	震央距離(km)	記録地点	記録時最大加速度(gal)			
1	1973. 6.17	根室半島沖地震	7.4	305	静内橋近傍地盤上NS成分	45	50	0.6, 1.4, 2.9	E-1
2	1974. 5. 9	伊豆半島沖地震	6.9	140	川崎市浮島公園地盤上NS成分	12	50	0.6, 1.6, 2.6	E-2
3	1978. 1.14	伊豆大島近海地震	7.0	90	千葉県富津沖地盤上NS成分	51	200	1.2, 1.8, 2.1 2.4, 3.0, 4.5	E-3
4	1978. 1.14	伊豆大島近海地震	7.0	230	名古屋港金城埠頭地盤上NS成分	22	100	1.1	E-4
5							150		E-5
6	1970. 9.30	多摩川下流地震	4.5	8	川崎市浮島公園地盤上NS成分	22	200	5.2	E-6
7							300		E-7

注：1) 最大加速度は実験時における目標値であり、実際に加振台に生じた加速度値ではない。
 2) 加振台に生じた加速度応答のパワースペクトルから求めた卓越振動数であり、下横線のついた振動数は最も卓越した振動数を表わしている。
 3) 以下の実験結果の表示には、この記号を用いる。

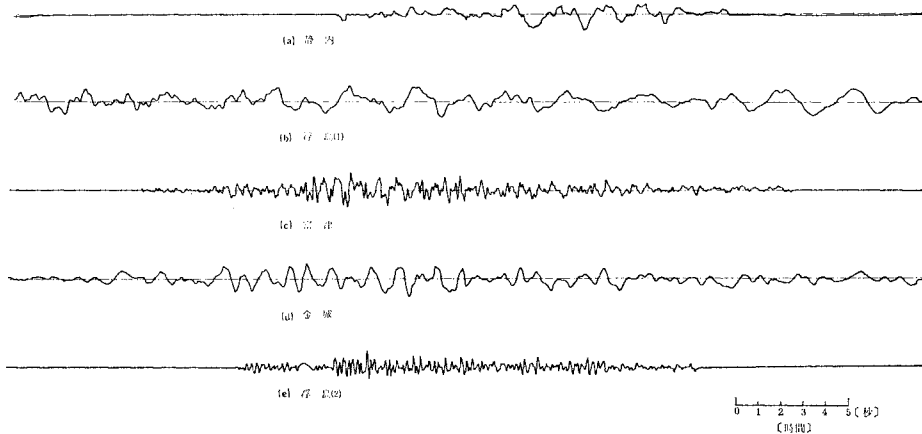


図-4 地震波振動実験に用いた入力地震記録波形

1 Hz の場合を基準として正規化して求めた振幅特性も同時に示されている。この結果によれば、100 gal 加振の場合と 300 gal 加振の場合の振幅特性は、ほとんど同一の結果となっており、ここで取り扱った B2 型および Q 型強震計の振幅特性は 100~300 gal の範囲では加速度強度にあまり左右されず、ほぼ一定の値を示すことがわかる。

次に、一自由度系のばね-マス系が振動数 $f(=\omega/2\pi)$ [Hz] の定常振動外力を受けた場合の加速度応答倍率は周知のように次式で与えられる。

$$R(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4h^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- $R(\omega)$: 一自由度系の加速度応答倍率
- m, k : 一自由度系の質量およびばね定数
- ω_0 : 一自由度系の固有円振動数
- $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$

h : 一自由度系の減衰定数

ω : 外力の円振動数

SMAC 型強震計では、機械式の振子の応答変位が強震計に作用した加速度に比例するように設計されているから、式(1)で表わされる加速度応答倍率は、強震計を一自由度系の振動体にモデル化した場合の振幅特性に比例する。

B2 型強震計の場合には、固有振動数 $f_0=7.14$ Hz、減衰定数 $h=1$ (限界減衰)、Q 型強震計の場合には、固有振動数 $f_0=20$ Hz、減衰定数 $h \approx 0.55$ と設計されている。個々の強震計において、設計で目標としたおりの特性が満足されているかどうかには検討の余地もあるが、いま、これらの設計値をもとに式(1)から振幅特性を求め、これを 1 Hz の場合の振幅特性値を 1.0 として正規化すると 図-5 および 図-6 に示すようになる。図中には、表-4 および 表-5 に示した実測値 (100 gal 加振の場合と 300 gal 加振の場合の振幅特性値の平均値) も同時に示されている。この結果によれば、B2 型強震

表-4 B2型強震計の振幅特性

加振振動数 (Hz)	100 gal 加振の場合		300 gal 加振の場合		100 gal 加振と 300 gal 加振の 平均値 ³⁾ (1 Hz で正規化)	理論値 ⁵⁾
	振子振動振幅 ¹⁾ (両振幅) (μ)	1 Hz で正規化 ²⁾	振子振動振幅 ¹⁾ (両振幅) (μ)	1 Hz で正規化 ²⁾		
1	1000	1.000	(3069) ⁴⁾	1.000	1.000	1.000
2	945	0.945	2900	0.945	0.945	0.927
3	850	0.850	2600	0.847	0.849	0.850
4	745	0.745	2300	0.749	0.747	0.761
5	655	0.655	2020	0.658	0.657	0.671
6	570	0.570	1770	0.577	0.574	0.587
7	505	0.505	1540	0.502	0.504	0.510
8	440	0.440	1370	0.446	0.443	0.444
9	395	0.395	1200	0.391	0.393	0.386
10	345	0.345	1060	0.345	0.345	0.338
12	280	0.280	860	0.280	0.280	0.262
15	200	0.200	630	0.205	0.203	0.185
17	170	0.170	520	0.169	0.170	0.150
20	135	0.135	400	0.130	0.133	0.113
22	115	0.115	350	0.114	0.115	0.0954
25	95	0.095	280	0.091	0.093	0.0755

- 注: 1) 非接触式センサーで測定した振子の振動振幅 (両振幅) (単位はマイクロン)。
 2) 1 Hz で加振した場合の振子の振動振幅で正規化した振幅。
 3) 2) で求めた正規化した振幅を 100 gal 加振と 300 gal 加振の場合で平均した値。
 4) 300 gal 加振の場合には 1 Hz で加振実験をしていない。そのため、100 gal 加振の場合の 1 Hz 加振と 2 Hz 加振の振動振幅の比から () 内の数値を推定した。
 5) 理論値: 式 (1) で求めた振幅特性 (1 Hz の値で正規化)。

表-5 Q型強震計の振幅特性

加振振動数 (Hz)	100 gal 加振の場合		300 gal 加振の場合		100 gal 加振と 300 gal 加振の 平均値 ³⁾ (1 Hz で正規化)	理論値 ⁵⁾
	振子振動振幅 ¹⁾ (両振幅) (μ)	1 Hz で正規化 ²⁾	振子振動振幅 ¹⁾ (両振幅) (μ)	1 Hz で正規化 ²⁾		
1	60.0	1.00	(180.2) ⁴⁾	1.00	1.00	1.000
2	60.5	1.01	182.0	1.01	1.01	1.004
3	61.0	1.02	183.0	1.02	1.02	1.01
4	61.5	1.03	186.0	1.03	1.03	1.02
5	61.5	1.03	186.0	1.03	1.03	1.02
6	62.0	1.03	186.0	1.03	1.03	1.03
7	62.0	1.03	188.0	1.04	1.04	1.04
8	62.0	1.03	190.0	1.05	1.04	1.05
9	63.5	1.06	190.0	1.05	1.06	1.07
10	63.5	1.06	191.0	1.06	1.06	1.08
12	64.0	1.07	193.0	1.07	1.07	1.09
15	64.0	1.07	196.0	1.09	1.08	1.07
17	63.5	1.06	192.0	1.07	1.07	1.03
20	60.5	1.01	181.0	1.00	1.01	0.91
22	56.0	0.93	170.0	0.94	0.94	0.81
25	50.0	0.83	148.0	0.82	0.83	0.67

- 注: 1), 2), 3), 4), 5) は 表-4 の注を参照。

計およびQ型強震計のいずれの場合にも、実測値は式 (1) による理論値と比較的によく一致することが認められる。

(2) 実測地震動記録に対する 波形特性の再現性

実測地震動記録により加振実験を行った結果の一例を 図-7 (実験 E-1, 表-3 参照) および 図-8 (実験 E-7) に示す。これは、データレコーダに収録した実験結果を AD 変換器により、1/100 秒の等時間間隔に数値化し、これをプロッターにより図化したものであり、それぞれ、基準変位、基準加速度、B2型強震計の加速度記録およびQ型強震計の加速度記録の4種類の波形を示している。これらの波形を相互に比較すると、B2型強震計による加速度記録は振動台の基準加速度に比較して、全体に波形の山谷がなめらかになっており、明らかに高振動数成分が過小に評価されていることがわかる。

また、それぞれの加振実験 (実験 E1~E7) ごとに、最大加速度に着目して整理すると 表-6 のようになる。Q型強震計によって記録した最大加速度は振動台の基準加速度計による最大加速度の 0.99~1.03 倍 (平均は 1.01 倍) に収まっているのに対し、B2型強震計による最大加速度は基準加速度の 0.75~0.90 倍 (平均は 0.84 倍) に下回っているのがわかる。

次に、強震計の応答加速度に含まれる振動数成分を調べるために、基準加速度、B2 および Q型強震計の記録のそれぞれのパワースペクトルの一例

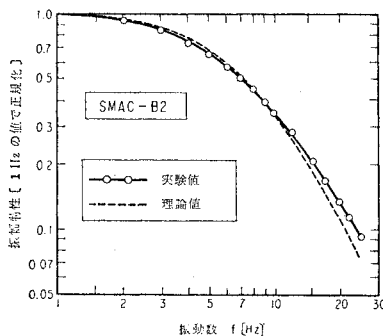


図-5 B2型強震計の振幅特性

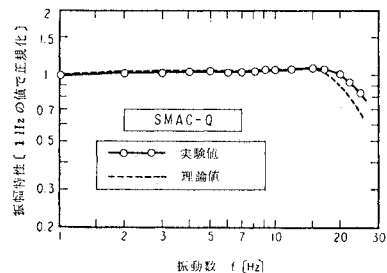
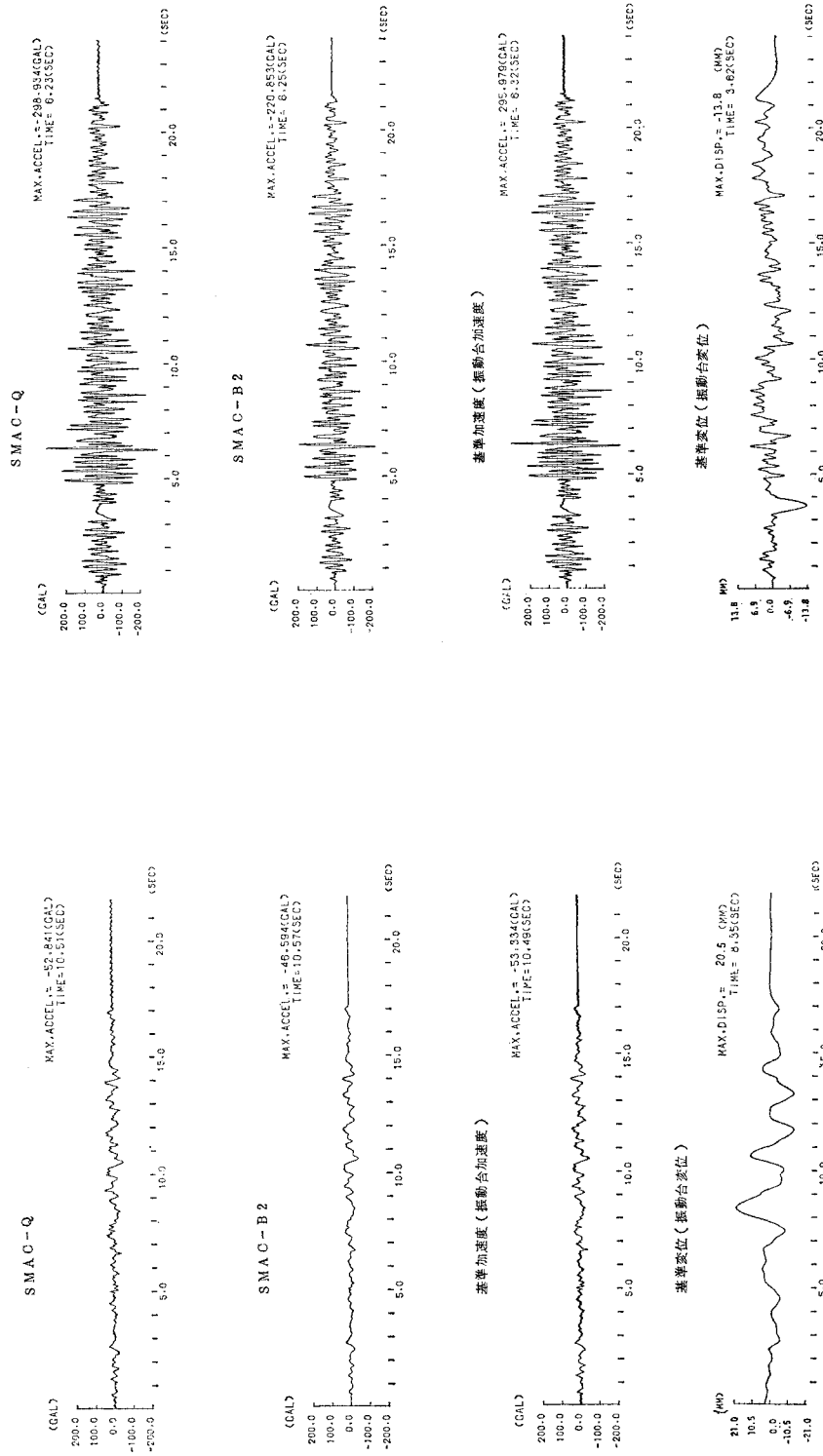


図-6 Q型強震計の振幅特性



図—8 地震波振動実験結果の一例(実験 E-7 の場合)

図—7 地震波振動実験結果の一例(実験 E-1 の場合)

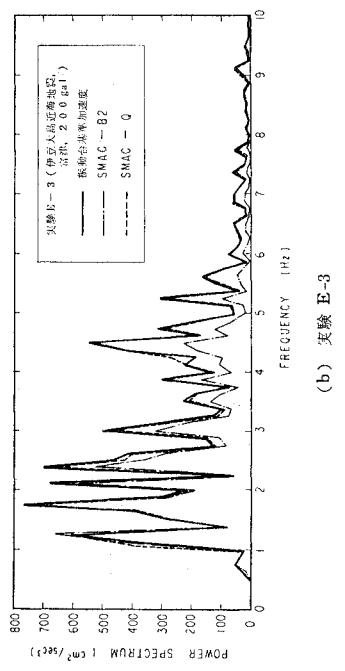
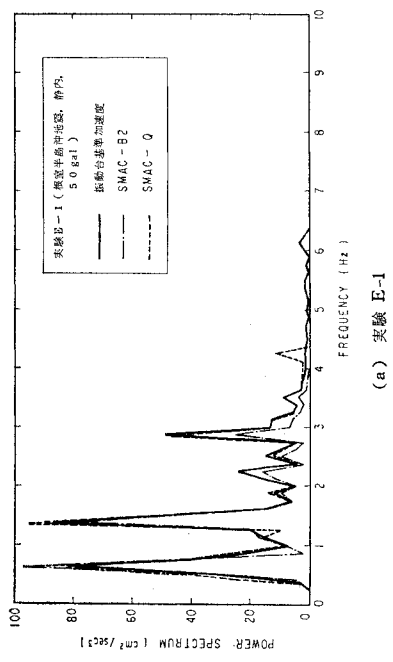
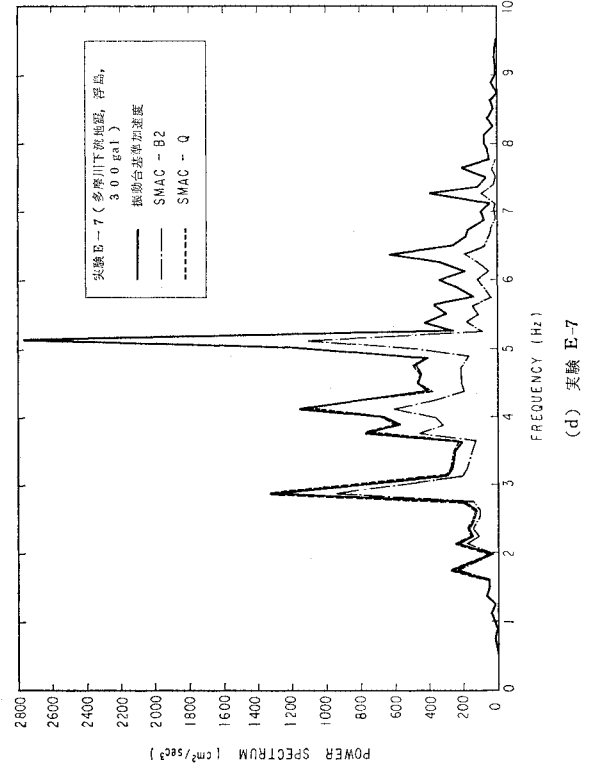
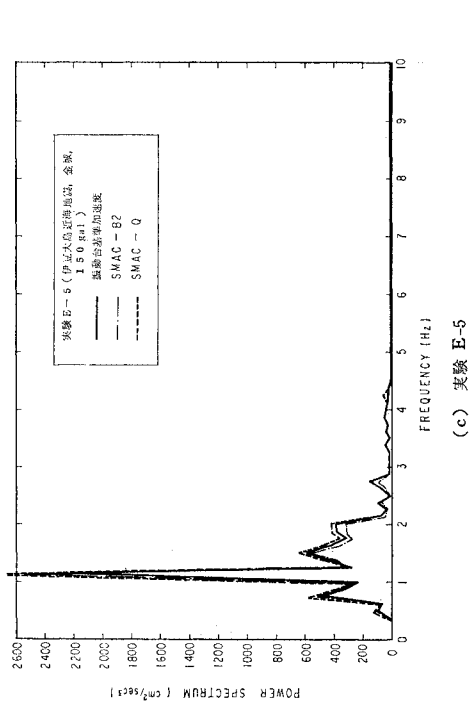


図-9 パワースペクトルによる基準加速度と強震計の応答加速度の比較

表-6 地震波振動実験による最大加速度の比較

実験番号 ¹⁾	振動台基準加速度	B2型強震計	Q型強震計
E-1	53.3	46.6 (0.87)	52.8 (0.99)
E-2	48.7	41.4 (0.85)	49.4 (1.01)
E-3	213.8	183.9 (0.86)	213.0 (1.00)
E-4	102.6	92.4 (0.90)	106.2 (1.03)
E-5	132.0	114.9 (0.87)	134.2 (1.02)
E-6	175.4	132.9 (0.76)	177.3 (1.01)
E-7	296.0	220.9 (0.75)	298.9 (1.01)
() 内の平均		(0.84)	(1.01)

注:1) () 内の数字は、振動台基準加速度で正規化した場合の強震計の最大加速度。

2) 実験番号については表-3 参照。

(実験 E-1, E-3, E-5, E-7) を示したのが、図-9 である。対象とする振動数の範囲は 0~10 Hz とした。この結果によれば、Q型強震計による応答値の卓越振動数成分およびパワー値は、基準加速度と極めてよく一致しており、0~10 Hz の振動数の範囲においては、Q型強震計は基準加速度をよく再現するといってもよいであろう。

これに対して、B2型強震計の場合には7回の加振実験のいずれの場合にも、3 Hz 程度以上の振動数の領域において、基準加速度に比較してパワーレベルが低下しているのが認められる。したがって、このような振動数領域に対しては適当な方法により感度の補正を加えて記録を利用していくことが求められる。

4. 加速度応答スペクトルに及ぼす影響

振動実験により求めた SMAC 型強震計の記録を用いて、強震計の特性が加速度応答スペクトルにどのような影響を与えるかを検討した。対象としたのは絶対加速度応答スペクトル S_A 、および絶対加速度応答スペクトル倍率 β である。ここで、 S_A は固有周期 T 秒、減衰定数 h の線形一自由度の振動系にある任意の入力地震動 (最大加速度 A_{max} [gal] とする) を作用させた場合の振動系の最大応答加速度であり、 β とは次の関係がある。

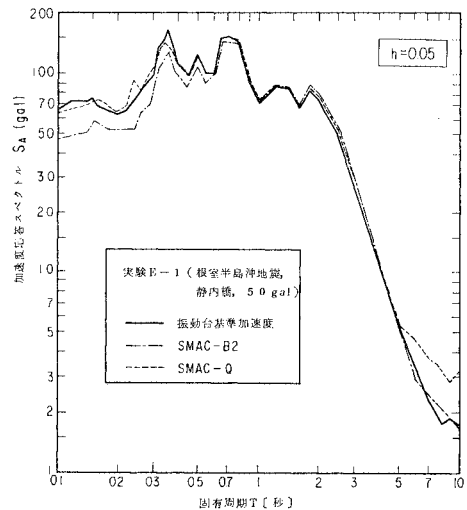
$$S_A = \beta \times A_{max} \dots\dots\dots (2)$$

式 (2) で定義した加速度応答スペクトル S_A および加速度応答倍率 β を、基準加速度、B2 および Q型強震計による記録のそれぞれに対して減衰定数 $h=0.05$ として計算した一例を図-10 (実験 E-1)、および図-11 (実験 E-7) に示す。この結果によれば、B2型強震計の S_A スペクトル値はおおむね 0.3 秒以下の周期領域において基準加速度および Q型強震計記録の S_A スペクトル値を下まわっているのがわかる。また、固有周期が約 2 秒以上の領域においては、基準加速度、B2 および Q型強震計記録の三者間で S_A スペクトルが相互

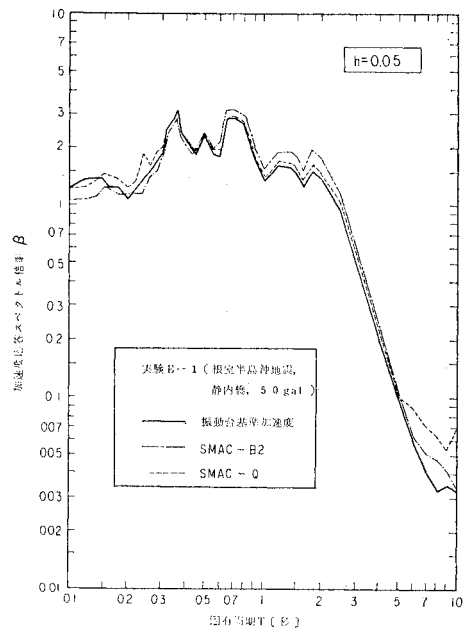
に異なる傾向が認められる。

これに対して β スペクトルの場合には、B2型強震計記録によるスペクトル値は、基準加速度記録のスペクトル値に比較して、固有周期がおおむね 0.3 秒以下の周期領域においては小さめ、固有周期がおおむね 0.5 秒以上の周期領域においては大きめの結果を与えている。

以上のような傾向をさらにはっきりさせるため、三者の S_A および β スペクトル値どうしの比を次のように定義した。



(a) 加速度応答スペクトル S_A



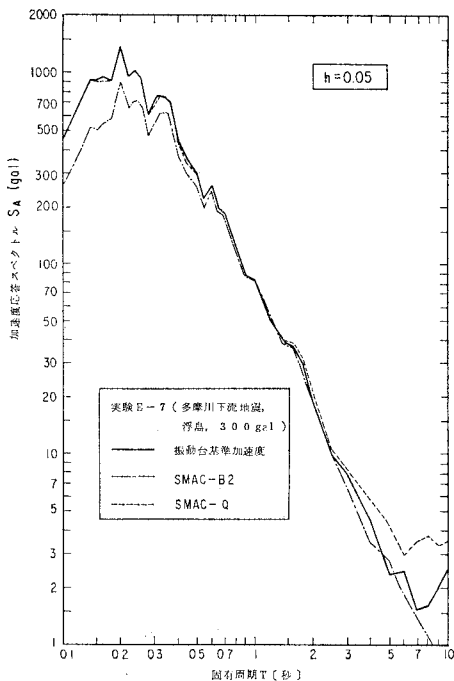
(b) 加速度応答スペクトル倍率 β

図-10 加速度応答スペクトルによる基準加速度と強震計の応答加速度の比較 (実験 E-1)

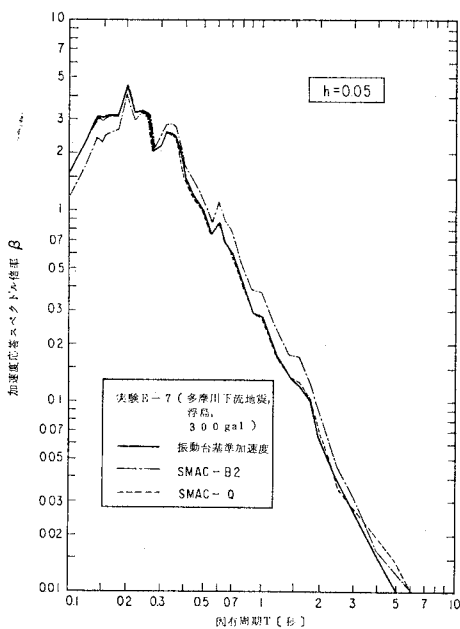
$$R_{S_A}^{B^2} \equiv \frac{S_A^{B^2}}{S_A^*}, R_{S_A}^Q \equiv \frac{S_A^Q}{S_A^*} \dots\dots\dots (3)$$

$$R_{\beta}^{B^2} \equiv \frac{\beta^{B^2}}{\beta^*}, R_{\beta}^Q \equiv \frac{\beta^Q}{\beta^*} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、



(a) 加速度応答スペクトル S_A



(b) 加速度応答スペクトル倍率 β

図-11 加速度応答スペクトルによる基準加速度と強震計の応答加速度の比較 (実験 E-7)

S_A^* , β^* : 振動台基準加速度から求めた S_A スペクトルおよび β スペクトル

$S_A^{B^2}$, β^{B^2} : B2 型強震計による加速度記録から求めた S_A スペクトルおよび β スペクトル

S_A^Q , β^Q : Q型強震計による加速度記録から求めた S_A スペクトルおよび β スペクトル

式 (3) および式 (4) で定義した $R_{S_A}^Q$, $R_{S_A}^{B^2}$ および R_{β}^Q , $R_{\beta}^{B^2}$ の一例を 4 種類の地震波加振実験 (実験 E-1, E-3, E-5, E-6) に対して示すと、それぞれ 図-12~15 のようになる。これらの結果を整理すると次のようになる。

a) Q型強震計記録による S_A スペクトル ($R_{S_A}^Q$)

図-12 より、 $R_{S_A}^Q$ はいずれの入力地震記録の場合も固有周期 T が 0.1 秒から 2 秒程度までは、おおむね 1.0

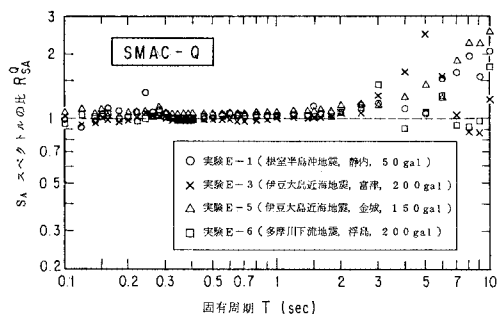


図-12 S_A スペクトルの比 $R_{S_A}^Q$ の一例 (Q型強震計)

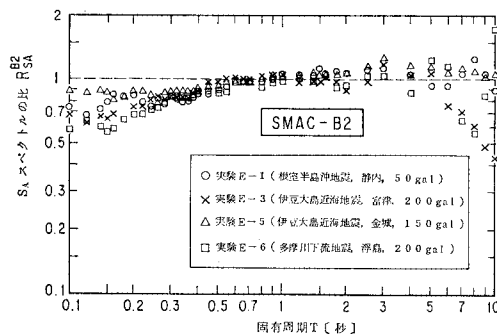


図-13 S_A スペクトルの比 $R_{S_A}^{B^2}$ の一例 (B2型強震計)

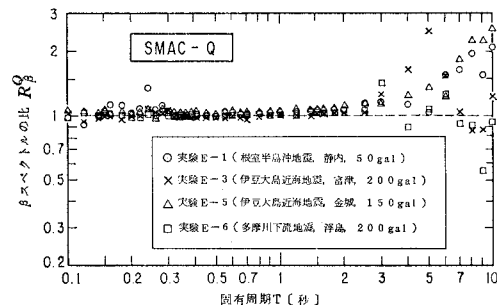
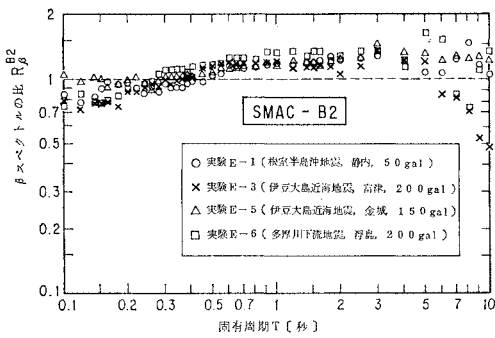


図-14 β スペクトルの比 R_{β}^Q の一例 (Q型強震計)



図一15 β スペクトルの比 R_{β}^{B2} の一例 (B2 型強震計)

であることから、この範囲の振動数領域では Q 型強震計により測定した加速度記録の S_A スペクトルは、振動台の基準加速度の S_A スペクトルとよく一致していることがわかる。これに対して、固有周期が約 2 秒以上の領域では、 $R_{S_A}^Q$ は 0.8~2.5 の範囲でばらつき、また、加振実験ごとの変化も大きい。

以上のような点から、Q 型強震計により測定した加速度記録をもとに加速度応答スペクトル S_A を計算した場合には、固有周期が 0.1 秒から約 2 秒の範囲では S_A スペクトルは、実際の地震動の特性をほぼ正しく再現していると考えられる。

b) B2 型強震計記録によるスペクトル ($R_{S_A}^{B2}$)

B2 型強震計の場合には、図一13 より、 $R_{S_A}^{B2}$ は固有周期がおおむね 0.6 秒以下の領域において、1.0 以下となっているのがわかる。1.0 よりも小さくなる度合いは、入力地震動ごとに変化しており、短周期成分が最も卓越している実験 E-6 の場合には、固有周期 0.1 秒付近で $R_{S_A}^{B2}$ は約 0.6 にまで下っている。固有周期が約 0.6~2 秒の範囲では、 $R_{S_A}^{B2}$ はおおむね 1.0 に近く、さらにこれより固有周期の長い領域では、 $R_{S_A}^{B2}$ は入力地震動ごとにはばらつく傾向を示す。このような点は前述した Q 型強震計の場合 ($R_{S_A}^Q$) と似かよっているが、 $R_{S_A}^Q$ の場合には、この領域で $R_{S_A}^Q$ が 1.0 よりも大きくなるケースが多かったのに対し、 $R_{S_A}^{B2}$ の場合には、1.0 よりも大きくなるケースと小さくなるケースの両者の場合がある点が異なっている。

以上のような結果を総合すると、B2 型強震計により測定した加速度記録をもとに S_A スペクトルを計算した場合には、固有周期が約 0.6 秒から 2 秒の範囲ではおおむね正しく基準加速度のスペクトル値を評価することができるが、固有周期が約 0.6 秒よりも短い周期の領域ではスペクトル値を小さめに評価していることになる。

c) Q 型強震計記録による β スペクトル (R_{β}^Q)

図一14 より、 R_{β}^Q は固有周期が 0.1 秒から約 2 秒までの領域においておおむね 1.0 であり、かつ、このよう

な傾向は入力地震動ごとの変動も小さい。固有周期が約 2 秒以上の領域になると、 R_{β}^Q は徐々に 1.0 よりも大きくなり、入力地震動ごとの変動も大きくなる傾向にある。

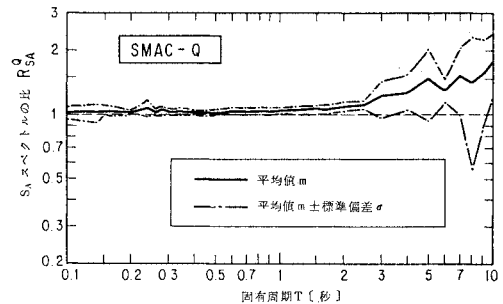
d) B2 型強震計記録による β スペクトル (R_{β}^{B2})

B2 型強震計の場合には、図一15 より、 R_{β}^{B2} は固有周期がおおむね 0.3 秒以下の領域においては 1.0 より小さく、また 0.3 秒から約 2 秒までの領域においては 1.0 よりもやや大きくなっているのがわかる。また、固有周期が約 2 秒以上の長周期領域では、 R_{β}^{B2} の場合と同様に R_{β}^{B2} は 0.4~1.6 の範囲でばらつき、また、入力地震動ごとの変動も大きい。

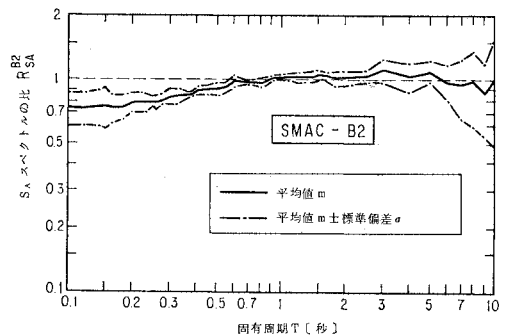
以上のような点を総合すると、B2 型強震計により測定した加速度記録をもとに β スペクトルを計算すると、固有周期が 0.1~0.3 秒の範囲ではスペクトル値をやや小さめに、固有周期が 0.3 秒から約 2 秒の範囲ではスペクトル値をやや大きめに、それぞれ評価していることになる。

図一12~15 に示したような $R_{S_A}^Q$, $R_{S_A}^{B2}$, R_{β}^Q , R_{β}^{B2} を 7 回の加振実験ごとに平均し、これに標準偏差の 1 倍を加減すると図一16~19 のようになる。これらの結果には、上述したような加速度応答スペクトル S_A および β に対する SMAC 型強震計の特性の影響がよく現われている。

最後に、上記の結果では固有周期が約 2 秒以上の領域



図一16 S_A スペクトルの比 $R_{S_A}^Q$ の平均値 (Q 型強震計)



図一17 S_A スペクトルの比 $R_{S_A}^{B2}$ の平均値 (B2 型強震計)

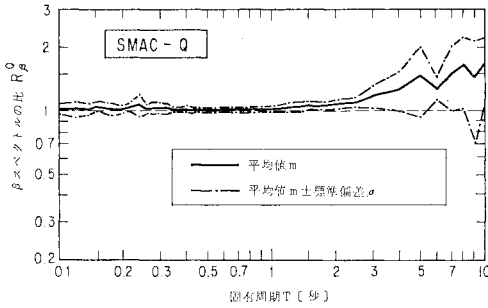


図-18 β スペクトルの比 R_{β}^Q の平均値 (Q型強震計)

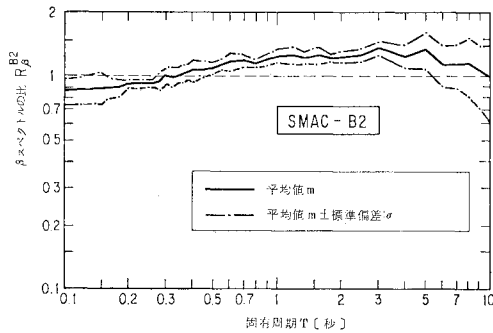


図-19 β スペクトルの比 R_{β}^{B2} の平均値 (B2型強震計)

において、B2型およびQ型強震計記録をもとに計算した S_A スペクトルおよび β スペクトルがともに、基準加速度より算出したスペクトルと比較して異なっており、その度合いは入力地震動ごとに変化する傾向を示した。この原因は、強震計の約2秒以上の波動成分の再現性に対する誤差およびデータレコーダへの収録再生とAD変換を含めた記録の後処理システムの精度の2つが考えられる。前者についてはこれを直接検定しにくいいため、ここでは後者の後処理システムのうち、データレコーダの再生およびAD変換(16bit)の精度について以下のような簡単な検討を加えた。

すなわち、加振実験の際にデータレコーダに収録したB2型強震計の応答の中から同一の収録記録をもとに、これを複数回(5回)再生およびAD変換を繰り返し、それぞれに対して S_A スペクトルを計算した。次に、これら5回の S_A スペクトルの中の任意の1回の S_A スペクトルに対する残り4回の S_A スペクトルの比を計算し、これより4回分の S_A スペクトル比の平均値と標準偏差を求めた結果の一例が図-20(実験E-6)である。もちろんこの場合には、5回の S_A スペクトルのうちのどれを基準として S_A スペクトル比を計算するかによって図-20に示した結果は多少変化するが、おおよその傾向はこのような方法によっても検討することができる。図-20によ

れば、固有周期が約1秒以下の領域では S_A スペクトル比の平均値はほぼ1.0ほど、また標準偏差も非常に小さく、この領域では記録の再生およびAD変換の精度はまず問題なかったことを示している。これに対して、固有周期が約1秒以上になると S_A スペクトル比の平均値が1.0のまわりを10~20%の範囲で変動し、また標準偏差も大きくなっており、約1秒以上の周期に対しては、データレコーダの再生およびAD変換の過程を通して非系統的な誤差が混入してくることを示している。この原因としては、長周期成分になるほど地震動に含まれる振幅が小さいため、データレコーダおよびAD変換器の分解能の不足に起因して発生する精度の低下、およびデータレコーダのテープ走行のむら等が考えられる。前者の原因は、本質的にはデータレコーダおよびAD変換器のSN特性に関連しており^{21),22)}、したがって、仮に入力地震動の最大加速度が非常に小さいものであれば、図-20に示した S_A スペクトル比の非系統的な誤差は約1秒以上の周期領域のみならず、1秒以下の領域においても生じ得たと考えられる。図-20に示した結果においても詳しくみると、固有周期が約0.2秒以下の領域において標準偏差がわずかながら大きくなる傾向にあることは、このような点の現われであると考えられる。

しかしながら、いずれにしても今回の実験で対象とした50~300gal程度の加速度記録に対しては、約1秒以下の周期領域では記録の再生およびAD変換に伴う誤差は非常に小さく、また、1.0秒以上の周期領域においても S_A スペクトル比としての変動は10~20%程度であることを考えると、図-16~19に見られる S_A もしくは β スペクトル比の約2秒以上の周期領域におけるばらつきがすべて記録の後処理にあるとするには無理があると考えられる。しかしながら、この点に関しては、今回の検討は必ずしも十分なものではなく、今後さらに詳

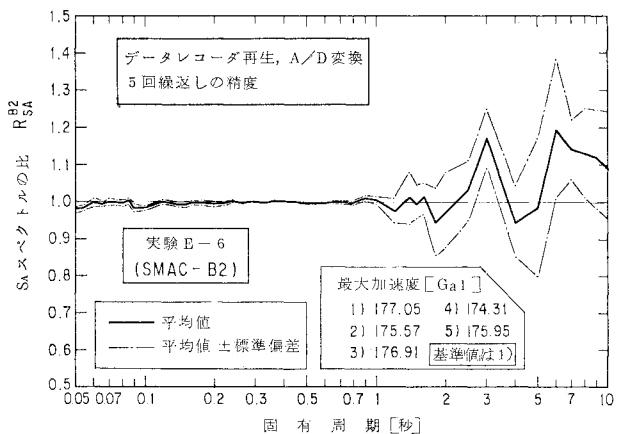


図-20 データレコーダ再生およびAD変換の精度の検討

細に検討する必要がある。

5. 結 論

SMAC-B2 型強震計および SMAC-Q 型強震計を対象として、加振台を用いた振動実験により、これらの強震計がもつ振動特性とこれが強震記録から計算した地震応答スペクトルに及ぼす影響を検討した。今回の検討では、強震計の振子の運動を検出しているため、これより先の記録ペンのたわみ、記録紙の蛇行、変形等の影響は入っていない。これらの実験ならびに解析の結果から以下のような結論を得た。

(1) B2 型強震計は約 0.3 秒以下の波動成分に対しては感度が低下するため、これにより観測された地震動加速度記録は一般に最大加速度を小さめに評価し、また振動数の高い波形の山谷の細部がとれたなめらかな波形となる。今回の加振実験に用いた 7 種類の地震動に対しては、最大加速度の低下率は平均して約 16% であった。

(2) B2 型強震計により測定した強震記録をもとに加速度応答スペクトル S_A を計算した場合には、固有周期が約 0.6 秒から 2 秒の範囲ではおおむね正しく基準加速度（振動台の加速度）のスペクトル値を評価することができるが、固有周期が約 0.6 秒以下の領域では S_A スペクトルを小さめに評価する。また、B2 型強震計記録から β スペクトルを計算した場合には、固有周期が 0.1~0.3 秒の範囲においてはスペクトル値を最大で 15% 程度（7 種類の加振実験の平均値）小さめに、また、0.3 秒から約 2 秒までの範囲においてはスペクトル値を最大で 25% 程度（7 種類の加振実験の平均値）大きめにそれぞれ評価する。

(3) Q 型強震計により測定した加速度記録の最大値は、基準加速度の最大値をよく再現する。今回の加振実験に用いた 7 種類の地震動に対しては、最大加速度は基準加速度に比較して 1% 程度大きめに評価した。

(4) Q 型強震計により測定した記録をもとにして計算した加速度応答スペクトル S_A 、および加速度応答スペクトル倍率 β は、いずれも固有周期が 0.1 秒から約 2 秒の範囲において基準加速度の特性をおおむね正しく再現する。

(5) 今回の実験では、B2 型強震計および Q 型強震計のいずれの場合も、固有周期が約 2 秒以上の領域において加速度応答スペクトル S_A および加速度応答スペクトル倍率 β がともに、基準加速度のスペクトル値に対してかけ離れるとともに、入力地震動ごとに変化するという結果を得た。この原因としては、実験記録の処理シス

テムの精度、SN 特性、強震計の長周期成分に対する再現性等を考えることができるが、このような点に関しては、今後、より慎重に検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 後藤・亀田・杉戸・今西：デジタルフィルターによる SMAC-B2 加速度計記録の補正について、土木学会論文報告集，第 277 号，昭和 53 年 9 月。
- 2) 井合・倉田・土田：強震記録のデジタル化と補正，港湾技術研究所資料，No. 286，運輸省港湾技術研究所，1978.3。
- 3) Trifunac, M.D. : Low Frequency Digitization, Errors and A New Method for Zero Baseline Correction of Strong-Motion Accelerograms, Report No. EERL 70-7, California Institute of Technology, 1970.9.
- 4) Trifunac, M.D. and D.E. Hudson : Laboratory Evaluations and Instrument Corrections of Strong-Motion Accelerographs, Report No. EERL 70-4, California Institute of Technology, 1970.8.
- 5) Trifunac, M.D., F.E. Udvardia and A.G. Brady : High Frequency Errors and Instrument Corrections of Strong-Motion Accelerograms, Report No. EERL 71-5, California Institute of Technology, 1971.7.
- 6) 久保・佐藤：地震観測記録から変位波に変換する方法，第 4 回日本地震工学シンポジウム，昭和 50 年 11 月。
- 7) 吉田・岡山：地震動加速度記録の積分における濾波計算のアルゴリズム，土木学会論文報告集，第 221 号，昭和 49 年 1 月。
- 8) Brady, A.G. and D.E. Hudson : Standard Data Processing of Strong-Motion Accelerograms, Proc. 5 WCEE, 1974.
- 9) Berg, G.V. and G.W. Housner : Integrated Velocity and Displacement of Strong Earthquake Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 51, No. 2, April 1961.
- 10) 栗原・桜井：地震加速度波形の積分，昭和 44 年 2 月。
- 11) 伯野・松井・藤野：強震記録による長周期構造物応答計算の精度，土木学会論文報告集，第 275 号，昭和 53 年 7 月。
- 12) 大久保・寺島・山崎：SMAC-B2 型強震計と電磁式地中地震計の特性検定について，土木研究所資料第 339 号，1968.3。
- 13) 栗林・土岐・若林：SMAC 型強震計による地震動の再現性について，第 4 回日本地震工学シンポジウム，昭和 50 年 11 月。
- 14) 川島・高木：ディジタイザーによる SMAC 型強震計記録読取の精度，土木学会関東支部年次学術講演会，昭和 54 年 1 月。
- 15) 岩崎・若林・川島・高木：SMAC 型強震計の短周期成分特性に関する実験的研究，土木研究所資料第 1505 号，1979.3。
- 16) 川島・若林・高木：SMAC 型強震計の特性が地震応答スペクトルに及ぼす影響，第 15 回土木学会地震工学研究発表会，1979.7。
- 17) 川島・高木・相沢：SMAC 型強震計記録の数値化精度に関する一検討，土木学会関東支部年次学術講演会，1980.1。
- 18) 川島・高木・相沢：SMAC 型強震計記録の長周期成分の補正，土木学会関東支部年次学術講演会，1980.1。