

機械式およびデジタル強震計の記録精度について —— S M A C 強震計記録の補正法の検討 ——

後藤 尚男・亀田 弘行
杉戸 真太・鈴木 裕

ACCURACY OF RECORDS OBTAINED BY MECHANICAL AND DIGITAL ACCELEROGRAPH —— EXAMINATION OF METHOD OF CORRECTION FOR SMAC-B2 ACCELEROGRAPH RECORDS ——

By Hisao GOTO, Hiroyuki KAMEDA, Masata SUGITO
and Yutaka SŪZUKI

Synopsis

An experimental study has been performed for development of correction technique of strong motion records obtained by the SMAC-B2 accelerograph. The shaking tests have been carried out both for the long period and the short period range by using the typical strong motion accelerographs and relevant equipments: they are the SMAC-B2 accelerograph, the digital accelerograph SAMTAC-17E, the AKASHI Servo accelerograph, and the Displacement Tape Measure. The cut-off frequencies for the correction filter for the SMAC-B2 accelerograms have been examined comparing with the SAMTAC accelerograms and displacement time history obtained by the Displacement Tape Measure. The applicability of the correction filter for the strong motion records have been examined by using the Japanese typical records obtained by the SMAC-B2 accelerograph.

1. 序 論

現在までにわが国で得られている強震記録は SMAC 型強震計によるものが多く、1964年の新潟地震以降非常に多数の地震記録の蓄積があり、しかも多くの地点での記録を得ており、耐震工学の発展に大きく寄与してきている。

しかしながら、この種の強震計の記録には、主として記録波形の基線の不安定性に起因する長周期ノイズ、高振動数域での強震計の感度低下の2種の誤差が存在することがこれまで多くの研究機関より指摘されている。近年のように構造物が多様化、長大化し、高・低振動数領域での地震動記録の的確な評価が求められるようになると、これらの領域についての記録特性について知ることは特に重要なこととなってきた。しかも今日までの重要な記録の大部分はこの SMAC 型強震計によって得られたものであるため、今後ともこれを利用していくにはこれらの記録特性を正しく把握し、適切な補正法を考えていくことが必要である。

これまでに検討されてきた SMAC 型強震計記録の補正法の代表的なものとして後藤、亀田、杉戸、今西による、デジタルフィルターを用いた補正法がある。この補正法は、SMAC 原記録のフーリエ変換に、感度低下などの計器特性を考慮した周波数応答関数であるデジタルフィルターを乗じることによって長周期ノイズを除去し、同時に知周期成分の感度低下を補正するものであり、低域及び高域遮断振動数なるパラメーターを設け各記録ごとの信頼できる振動数範囲を定めている。その他、この種の補正法として運輸省港

湾技術研究所²⁾によるバリアブルフィルターを用いた補正法などがある。

また、建設省土木研究所³⁾は、SMAC 記録をもとにした加速度応答スペクトルが、短周期領域においてどの程度低下するかについての定量的な評価を行った。

長周期成分に関しては、土岐、中瀬⁴⁾によるペン摩擦を考慮した補正法がある。この補正法は、SMAC の記録紙と記録ペンとの摩擦によって生じる長周期ノイズの特徴を仮定し、その成分のみを原記録より取り除くものであり、前出のデジタルフィルターと本質的に異なり独創的な方法であると言える。しかし、ノイズレベルが記録によって違い、その設定方法が困難である場合もある。この研究については後に触れることにする。

以上のような状況を背景に、本研究では SMAC-B2 強震計の感度特性を検討するため、高精度の SAMTAC-17E デジタル強震計との同時加振実験を行った。それによって、特に短周期領域において SAMTAC の記録を基準とすることができ、また長周期領域においては振動台に設置した変位計の記録より SMAC 記録の合理的な補正法を見出す助けとすることができる。

なお本研究で用いた補正法はデジタルフィルターによるものであるが、最適フィルター定数が記録のスペクトル特性などといかなる関連があるか、実験記録、及び実際の強震記録をもとに検討した。

2. 機械式およびデジタル強震計の同時加振実験の概要

2.1 目 的

本実験は、SMAC-B2 強震加速度計と、SAMTAC-17E デジタル強震加速度計とを同一振動台に載せて加振する同時加振実験であり、高精度の SAMTAC 強震計記録と、SMAC 記録の感度特性を比較することによって SMAC 記録の一般的特性を明らかにし、合理的な補正法を検討することを目的とする。

2.2 実験方法

入力に用いた振動は異なる振動数をもつ正弦波と、ランダム波である。振動数が 0.1~1 (Hz) の入力振動は入力による加振で、1~20 (Hz) の入力振動は機械加振であり、それぞれ長周期領域実験、短周期領域実験とする。当然、両実験装置は異なり、以下におのおのの装置、実験ケースなどについて述べる。

(1) 長周期領域実験

(i) 実験に使用した計器・器具

- ・ SMAC-B2 強震加速度計
- ・ SAMTAC-17E デジタル強震加速度計
- ・ サーボ型加速度計 (通称明石サーボ)
- ・ 手押し車
- ・ 巻尺型変位計
- ・ データレコーダー
- ・ ペンレコーダー

(ii) 実験装置

実験装置の写真を **Photo. 1** に示す。

(iii) 実験ケース

正弦波入力については、振動数と最大加速度を適当に組み合わせ、**Table 1** に示すような実験ケース表を作成し、これに従い加振を行った。表中の記号はデータ整理のために設けた番号で特に意味はない。またランダム波の卓越振動数は約 0.8 Hz であり、長周期成分の卓越するランダム波と呼ぶことにする。

(2) 短周期領域実験

(i) 実験に用いた計器・器具

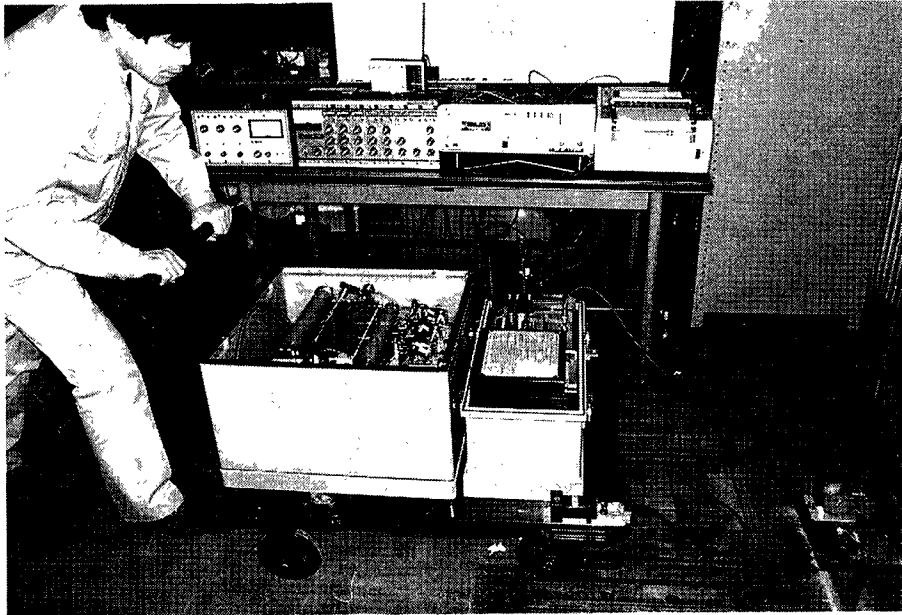


Photo. 1 View of Long Period Experiment.

Table 1 Cases of Experiment (Long Period Range)

(a) Sinusoidal Wave Input

$f(\text{Hz})$ Amax (gal)	(A) 1.000	(B) 0.800	(C) 0.600	(D) 0.500	(E) 0.333	(F) 0.250	(G) 0.200	(H) 0.167	(I) 0.125	(J) 0.100
5					E-5 [1.1]	F-5 [2.0]	G-5 [3.2]	H-5 [4.5]	I-5 [8.1]	J-5 [12.5]
15				D-15 [1.5]	E-15 [3.3]	F-15 [6.0]	G-15 [9.6]	H-15 [13.5]		
30			C-30 [2.1]	D-30 [3.0]	E-30 [6.8]	F-30 [12.1]	G-30 [19.0]			
50	A-50 [1.3]	B-50 [2.0]	C-50 [3.5]	D-50 [5.1]	E-50 [11.4]					
150	A-150 [3.8]	B-150 [5.9]	C-150 [10.6]	D-150 [15.2]						
300	A-300 [7.6]	B-300 [11.9]								

[]...Dmax(cm)

(b) Random Wave

Comp.	Predominant Frequency (Hz)	Amax(gal)	Recorded Time (S)
LPRDM 1	0.8	323	30
LPRDM 2	0.8	402	40
LPRDM 3	0.8	389	40

- SMAC-B2 強震加速度計
- SAMTAC-17E デジタル強振加速度計
- サーボ型加速度計 (明石サーボ)
- 加振機
- データレコーダー
- ペンレコーダー

(ii) 実験装置

実験装置の概念図を **Fig. 1** に示す。

(iii) 実験ケース

長周期領域実験と同様に、正弦波入力については振動数、最大加速度を適当に組み合わせ **Table 2** に示すような実験ケース表を作成し、これに従い加振を行った。表中において○印をつけたケースが、実験に加振を行ったものであり、その他のケースは加振機の性能上不可能であったものである。

また、ランダム波の卓越振動数は約 6 Hz であり、短周期成分の卓越するランダム波と呼ぶことにする。

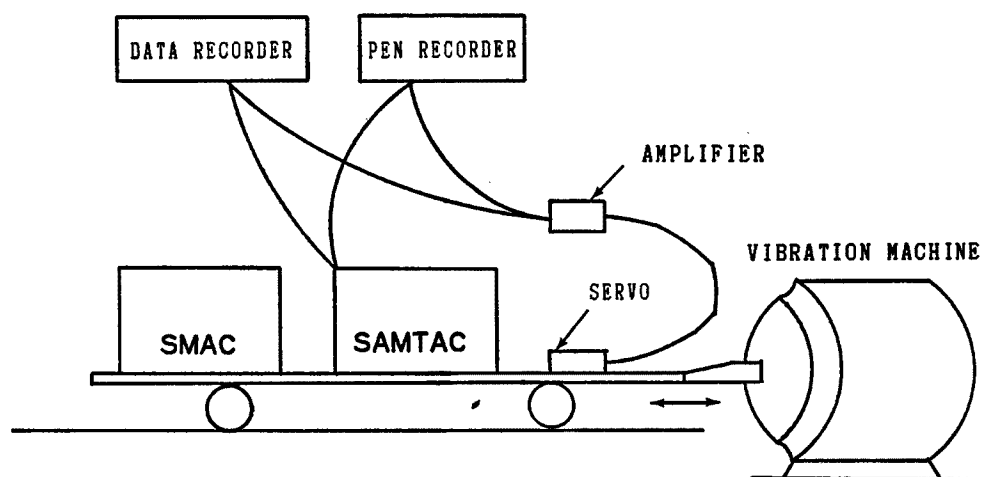


Fig. 1 Equipment of Experiment (Short Period Range).

Table 2 Cases of Experiment (Short Period Range)

(a) Sinusoidal Wave Input										
$f(\text{Hz})$ Aman (gal)	(1) 0.5	(2) 0.8	(3) 1.2	(4) 2.0	(5) 3.0	(6) 5.0	(7) 7.0	(8) 10.0	(9) 20.0	(10) 30.0
(1) 30				I-1-4	I-1-5	I-1-6	I-1-7	I-1-8	I-1-9	I-1-10
(2) 80					I-2-5	I-2-6	I-2-7	I-2-8	I-2-9	I-2-10
(3) 150					I-3-5	I-3-6	I-3-7	I-3-8	I-3-9	I-3-10
(4) 250							I-4-7	I-4-8	I-4-9	
(b) Random Wave input										
No.	Predominant Frequency (Hz)	Amax (gal)	Recorded Time (S)							
1	6	138	40							
2	6	311	40							
3	6	125	40							
4	6	293	40							

2.3 SMAC 記録のデジタル化

SMAC 強震計の記録はアナログ波形として取り出されるので、種々の解析を行うにはこれをデジタル化しなくてはならない。

デジタル化にあたっては、まずスタイラスペーパー上に刻まれた SMAC 記録を複写機で可視化し、それをディジタイザーによってデジタル化する。次にこのデータに円弧補正を施し、2次元座標系で横軸(X軸)の値を時間(秒)、縦軸(Y軸)の値を加速度(gal)の単位に換算する。この際、SMAC 振子の記録紙上での感度 12.5gal/mm の仕様に従った。またフーリエ変換など種々の数値処理が行えるよう、これらのデータの等時間間隔化を行う。その間隔は長周期入力波の場合で 0.02 秒短周期入力波で 0.01 秒とした。

なお、SAMTAC 記録については、加速度記録は、デジタル式にカートリッジテープに記憶される仕組みになっているので、それを専用のリーダーで読み取ればよい。(既に等時間間隔化がなされている)

3. デジタルフィルターによる補正法の検討

3.1 実験データに基づくフィルター定数の検討

デジタルフィルターによる補正を行う前に、長周期短周期両方にわたっての正弦波入力の実験ケースにおいて SMAC, SAMTAC 両強震計が得た最大加速度をそれぞれ A_{SM} , A_{ST} とし、その比(A_{SM}/A_{ST})の値を SMAC/SAMTAC として Fig. 2 に示した。データ読取りの際、パルスが生じたなどのために SAMTAC のデータが得られなかったケースもあり、それについては比較的高精度のサーボ型加速度計(明石サーボ)の記録で代用した。また比較のために、減衰理論より求められた SMAC の感度曲線も同図中に併わせて示した。これより、SMAC の高振動数領域での感度低下が明らかであり、また理論曲線からのばらつき方もさほど大きくないことから、SAMTAC の精度が標準計器として信頼するに足りるものだと言えるだろう。

次にランダム波を対象として、SMAC 記録にデジタルフィルター補正を施し、補正前後のフーリエスペクトル、最大加速度、最大変位の値などを求め、SAMTAC 記録と比較しながら、SMAC 記録における最適補正フィルターについて検討した。

用いたフィルターは Fig. 3 に示したようなものである。低振動数領域に関しての最適フィルター定数を

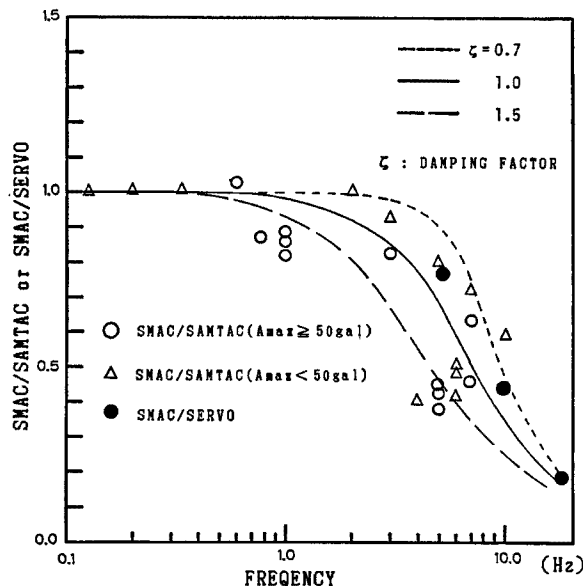


Fig. 2 Sensitivity of SMAC-B2 based on SAMTAC Accelerograph.

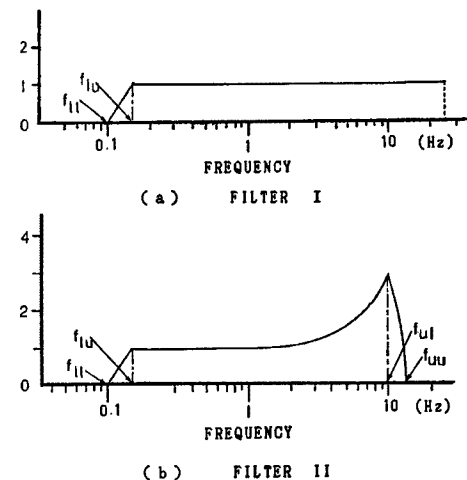


Fig. 3 Frequency Characteristics of Correction Filters.

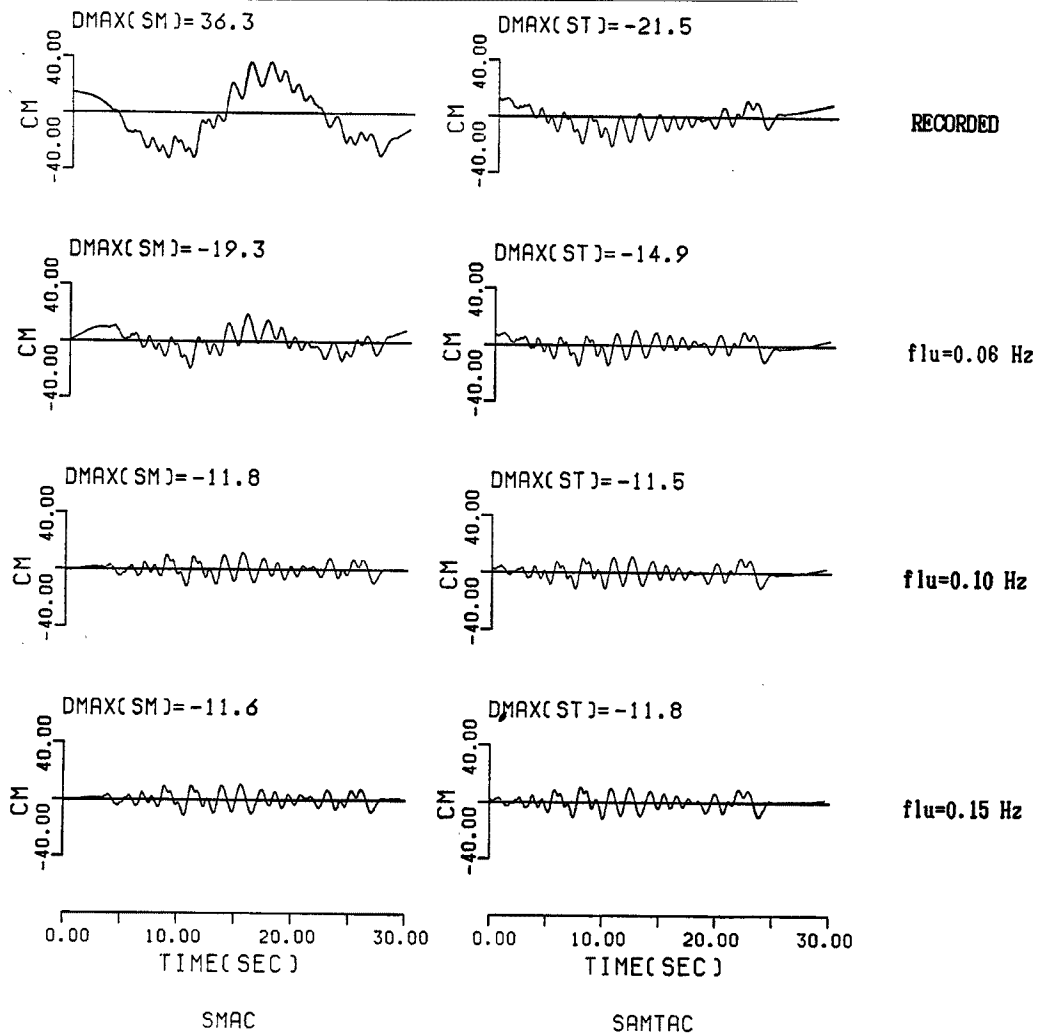


Fig. 4 Variation of Displacement for Lower Cut-off Frequencies (Filter I).

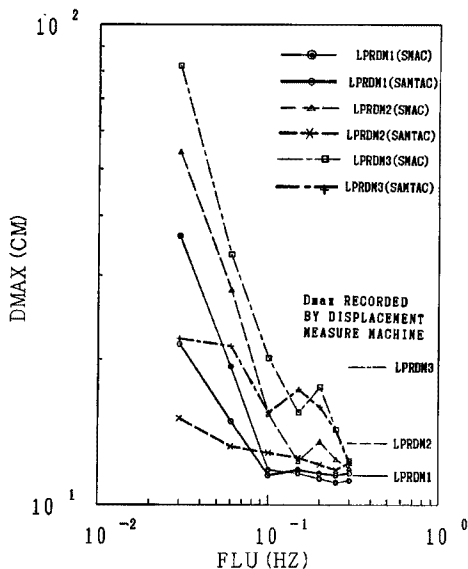


Fig. 5 Maximum Displacement vs. Lower Cut-off Frequency (Filter I).

定める時は高振動域をそのままに(倍率を1に固定)にしたフィルターⅠを用い, 高振動数領域についてみる場合は, 感度低下を補正するフィルターⅡを用いる。ただしその際低域遮断振動数 f_{lu} は 0.15Hz に固定した。

まず低振動数領域での誤差成分について論ずるため, 長周期ランダム波3成分の記録を対象に SMAC, SMTAC 両強震計記録を低域フィルターに通過させる。

Fig. 4 に長周期成分の卓越するランダム波のうち1成分の, 低域遮断振動数をいろいろに変えて補正した変位波形を示す。SMAC, SMTAC 両記録とも, f_{lu} が 0.1Hz より小さい間は変位波形が発散する傾向を示し, 低振動数誤差が含まれていることが明らかである。さらに f_{lu} を大きくし, 0.1Hz 以上となると, 変位波形, 補正後の最大変位とも両強震計記録はほぼ一致する。このようにして, 長周期成分の卓越するランダム波全3成分について補正後の最大変位と低域遮断振動数との関係を求め Fig. 5 に示す。

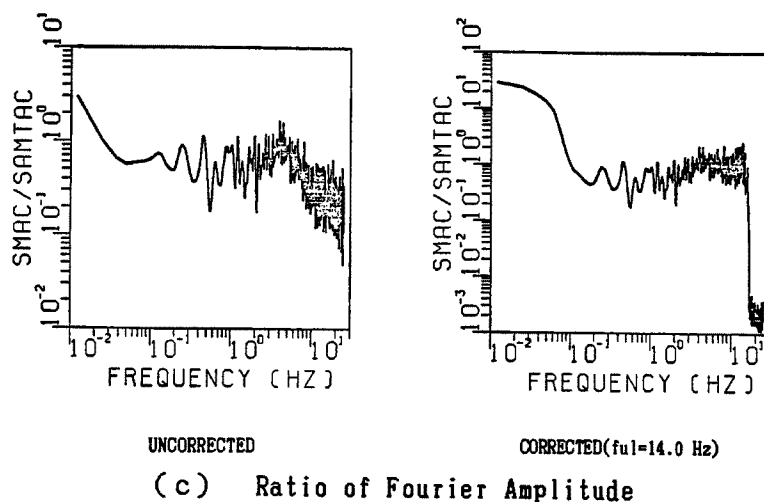
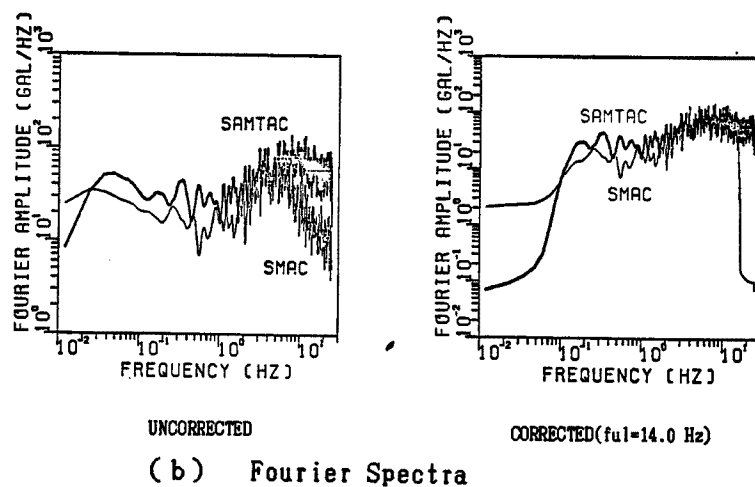
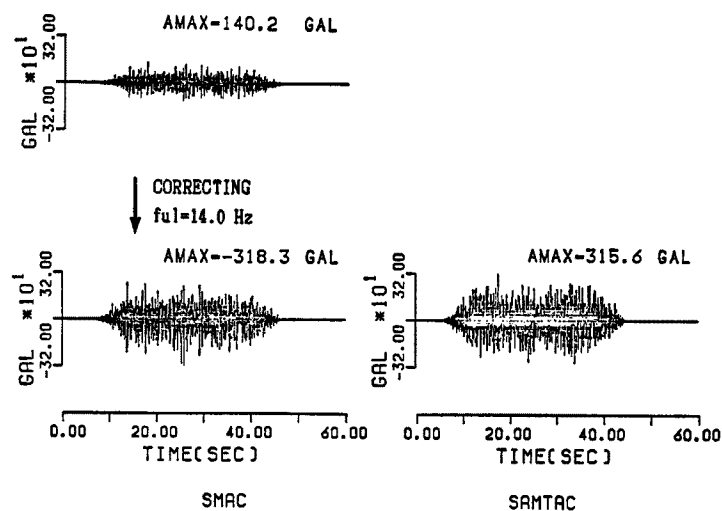


Fig. 6 Corrected Accelerogram and Fourier Spectra Compared with SAMTAC Record (Filter II).

図右下に巻尺型変位計が得た各ケースごとの最大変位記録が示されているが、これとの対応で最適な低域フィルター一定数を定めると、約 0.1 Hz が適当であり、これにより長周期の成分は基線の不安定性等に起因する低振動数誤差として除去すべきである。また、この図より SAMTAC の低振動数誤差も SMAC と比べて少ないながらも認めることができ、SMAC と同じく 0.1 Hz 以下の長周期成分は除去した方がよい。

短周期成分の卓越するランダム波についても同様に低域フィルターで補正し、補正後の最大変位と低域遮断振動数との関係を求めたところ、補正後の最大変位は、低域遮断振動数の増加に伴って単調に減少するのみであり、最適なフィルター一定数設定は困難であった。

以上のことより、低振動数域においては長周期成分の卓越する記録では約 0.1 Hz まで信頼することができ、短周期成分の卓越する記録では明確な信頼区間は決定しにくいことがわかった。しかし現実には周期が十数秒もの長周期構造が存在し、さらに長周期化していくものと思われる。そのような意味でもより長周期領域での SMAC の感度特性を明らかにしていくことは今後の大きな課題となるであろう。

高振動数域については、主に強震計の感度低下を補正する目的で、Fig. 3 のフィルターⅡを用いる。取り扱った記録は長周期成分の卓越するランダム波 3 成分と短周期成分の卓越するランダム波 4 成分、計 7 成分であり、これらの SMAC 記録を異なる高域遮断振動数をもつフィルターで補正する。

Fig. 6 に短周期成分の卓越するランダム波のうち 1 成分を例にとり、その SMAC 記録にフィルター補正を施し、高域遮断振動数を変えることによって補正後の加速度波形が変化していく様子を示した。ただし

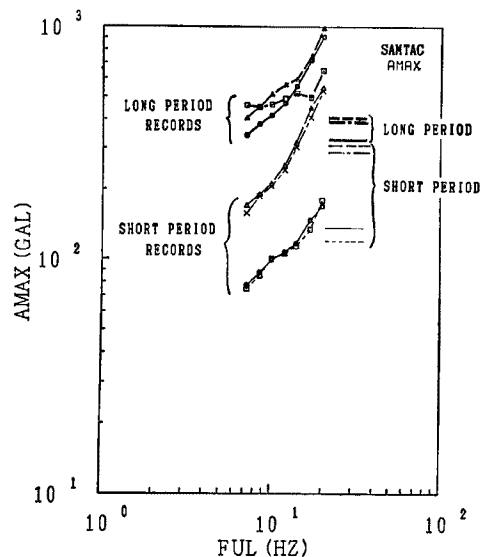


Fig. 7 Maximum Acceleration vs. Higher Cut-off Frequency (Filter II).

SAMTAC 記録は補正せず、原記録のままである。また、補正前と、 f_{ul} が 14.0 Hz の時の補正後フーリエスペクトルと、その時の SMAC, SAMTAC 両記録のフーリエ振幅の比も示した。この図から、フィルター補正によって、SMAC 記録の補正後最大加速度、補正後フーリエスペクトルを SAMTAC 記録に近づけることができることがわかるが、加速度波形の平均的レベルには両者の間にはある程度の差位が見られ、主に単一ピークのみが増幅されたものと思われる。他の成分の記録にもこのような傾向が認められ、記録特性によっては以上のようなことが起こることを留意すべきであろう。

他の成分記録にも同様な操作を行い、補正後の最大加速度と高域遮断振動数との関係を求め、Fig. 7 に示す。同図右部分に各ケースごとの SAMTAC が得た最大加速度を示したが、この値と曲線とが一致する点をもって最適なフィルター一定数とみなすと、長周期ランダム波で約 7 Hz、短周期ランダム波で約 12~15 Hz となり、短周期成分が卓越する記録の方が相対的に高い振動数成分まで信頼できることがわかる。

3.2 強震記録におけるフィルター一定数の検討と実験結果との比較

前節は実験記録をもとに最適フィルターについて検討したものであるが、これと同様なことを種々の特徴を有する強震記録について行ってみる。高森⁹⁾は、異なる卓越振動数を有する強震記録10成分 (Table 3 参照) を対象に、最適な低域遮断振動数、高域遮断振動数をフーリエスペクトル形状などの判断基準に求めた。Fig. 8 は、以上のように求められた最適フィルター一定数と、記録の卓越振動数との関係を示したものである。それによると低域遮断振動数、つまり長周期側をどこまで信頼するかは、卓越振動数と深い関係があると見られ、図中にも示したが、最適 $f_{ul} = 0.116 \cdot \exp \{0.232 f_p\}$ と回帰できる。一方、高域遮断振動数については卓越振動数によらずほぼ 10 Hz 前後で一定している。このように取扱う記録が実験によるものと実際のもの

Table 3 List of Strong Motion Records with Related Parameters

No.	site	com- ponrent	soil con- dition	recorded time (sec)	Amax (gal)	Fmax (gal/Hz)	spect- rum shape	predo- minant frequen- cy(Hz)	feu(Hz)	ful(Hz)
1	Muroran	EW	3	90	204	200	M-S	2.0	0.175	10.0
2	Ofunado	NS	3	90	79	300	M-S	1.0	0.15	10.0
3	Aomori	NS	3	140	208	400	L-F	(0.3)	0.1	12.0
4	Nigata	S	4	100	24	40	L-F	(0.3)	0.175	10.0
5	Hachinohe	NS	2	120	233	250	F	(0.4)	0.15	10.0
6	Akita	E	2	120	203	280	$F\left(\frac{H}{L}>D\right)$	0.4 2.0	0.08	12.0
7	Ochiai B.	EW	4	10	77	20	F	2.0	0.25	8.5
8	Tokyo Bay	EW	1	20	106	60	H-S	5.0	0.5	10.0
9	Miyako	E	1	60	110	150	H-S	5.0	0.25	14.0
10	Kashima	NS	2	30	33	15	M-F	—	0.25	12.0

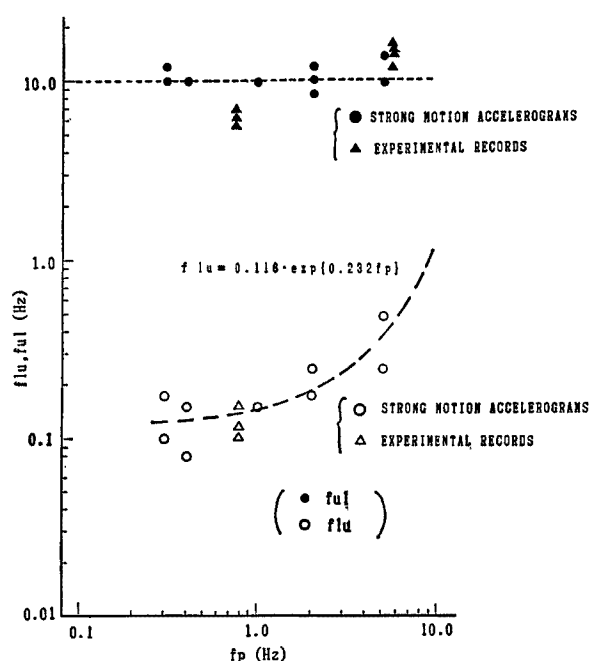


Fig. 8 Optimum Cut-off Frequency vs. Predominant Frequency of Acceleration Fourier Spectra.

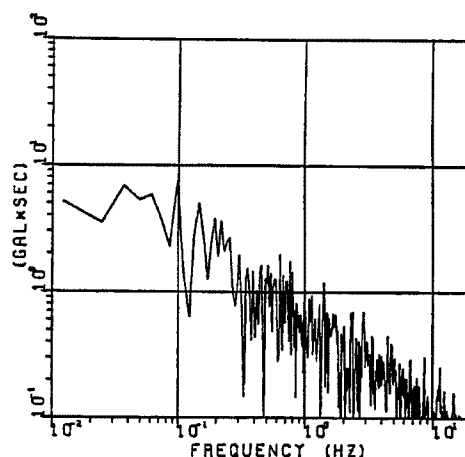
が基線の位置に戻りきらないこと、記録紙の紙送りむらによるペンの蛇行、数値化の際に混入する人為的誤差などが考えられるが、これらのうち主たるものとしてペン摩擦について調べる。まず、計器を加振せずに記録系のみを駆動させて得られる記録のフーリエスペクトルを求めると Fig. 9 のようになる。これを長周期ノイズのスペクトルとみなし、実際の記録のフーリエスペクトルから差し引く。それを逆変換し補正後の加速度時刻歴を得

のとでは最適なフィルター一定数にいくぶん相違がみられる。比較のために同図には前節で得られた実験記録からの結果も示してある。

3.3 土岐、中瀬による研究との比較

土岐、中瀬⁴⁾は、近年ますます長大化し、固有周期が長くなっている土木構造物の耐震設計において特に重要である、SMAC 記録の長周期成分誤差の補正に関する検討を行った。本研究との対応をみることは重要で、以下にその概要を述べる。

SMAC 型強震計記録の長周期誤差の生ずる原因として、記録ペンと記録紙との摩擦でペン

Fig. 9 Fourier Spectra of Long Period Noise⁴⁾.

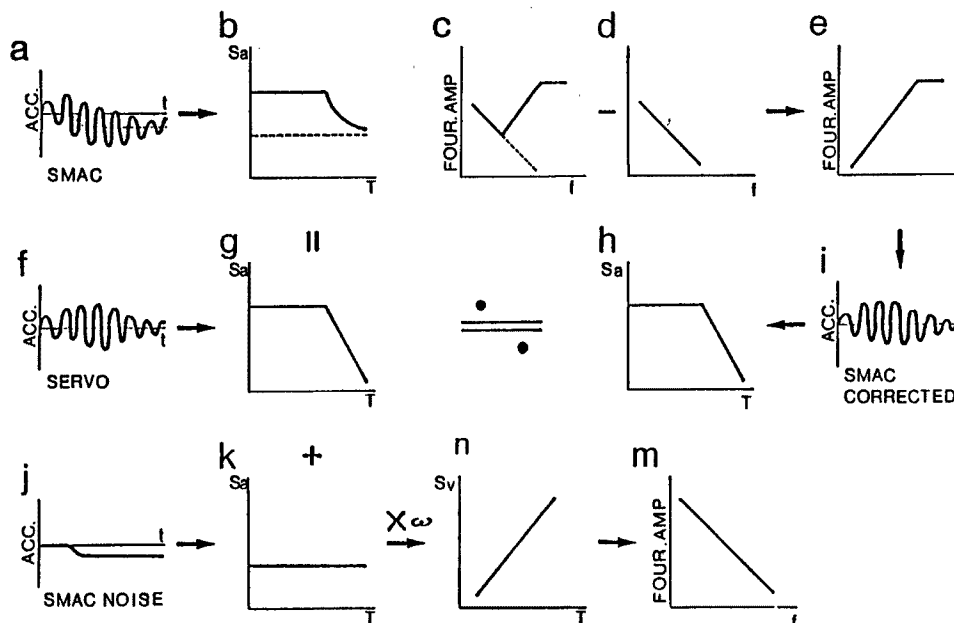
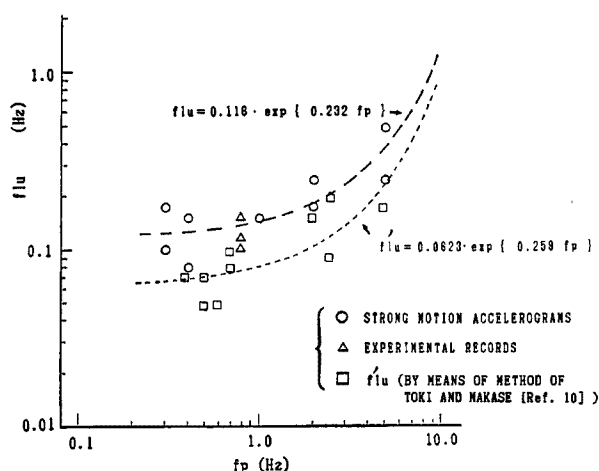
Fig. 10 Correction Procedure for Long Period Noise⁴⁾.

Fig. 11 Comparison of Optimum Lower Cut-off Frequency.

は、それが連続的に分布している、というような相違点があるが、両者を関連づけるために、土岐、中瀬の方法において、各記録の長周期ノイズレベルを決定したところの振動数より高振動数側でノイズレベルが記録のレベルの約10%になる所をもってデジタルフィルターによる補正法における最適な低域遮断振動数に相当する f_{lu} と考え、種々の特徴をもつ強震記録10成分に対し f_{lu} を定め、それを先の Fig. 8 中にあわせて示すと Fig. 11 のようになる。 f_{lu} は $f_{lu} = 0.0623 \exp \{ 0.259 f_p \}$ と回帰できるが、このことより、土岐、中瀬の方法によって従来のものより、より長周期成分の信頼範囲が広がったということが言えるであろう。

3.4 今後の研究指針

SMAC 型強震計による強震記録は今後とも大いに利用されるべき貴重な記録であるが、その場合、特に長周期、短周期領域での誤差の補正が重要である。

長周期領域での誤差は、主に基線のずれによるものであり、その原因を十分把握し、それに応じた補正法

る。必要に応じて積分変位時刻歴を求める。このようにして得られた補正 SMAC 記録は、基準としたサーボ型加速度計の記録とよく一致し、補正変位波形も、振動台に据えられた差動トランス型変位計、光学式変位計記録と概ね一致している。

この手順を Fig. 10 に示す。この方法の中で、長周期ノイズレベルの決定のしかたについては記録ごとに異なり、長周期側で一ばん大きなレベルを示す点をもってその記録の長周期ノイズレベルとしている。

デジタルフィルターによる補正法は、長周期域において信頼でき受け入れられる周波数領域と、切り捨てるべき領域とが不連続的に分断されているのに対して、本節で紹介した土岐、中瀬の方法

が望まれる。

一方、短周期領域での誤差は、計器特性によるものであるので、そのメカニズムを解明する手段として、SMAC の記録系の解析モデルを考え、入力を試みるということが挙げられる。このモデルでは、ペン摩擦の影響なども考慮に入れ、それが振子の応答とペンの応答とにどう関わり合うかなどを観察することができるであろう。そうすることによって、SMAC 記録の短周期特性についての一般的傾向、さらにその汎用性の高い補正法が見出だされることを切に望むものである。

4. 結 論

SMAC 記録の一般的特性についてはすでによく知られているところであり、各研究機関で特に長周期、短周期成分特性とその補正法が検討されているが、本研究においてもその補正法を SAMTAC デジタル強震計との同時加振実験により、または実際の強震記録を用いて検討した。以下に本研究で得られた成果を列挙する。

- (1) 長周期領域における誤差は、主に基線の不安定性に起因する。本報で、ペン摩擦に着目した土岐、中瀬の研究を紹介し、その妥当性を示したが、本研究では、デジタルフィルターを用いた補正法で数々の実験記録、強震記録を補正し、最適な低域遮断振動数を定めた。これは記録の卓越振動数などによって違い、卓越振動数が大きくなると低域遮断振動数を高くとらなければならない傾向がある。
- (2) 短周期領域では SMAC は感度が低下し、また SN 比が悪化するため、それらの計器特性に応じた補正が必要である。デジタルフィルターによる補正法を用いた場合、最適な高域遮断振動数は記録の卓越振動数が高いほど、高くとってよい傾向が現れた。

また、今後の課題として、ペン摩擦などが記録の短周期成分に及ぼす影響などを調べるため、SMAC の記録系をモデル化し応答解析を行い、検討を進めていきたい。

謝 辞

本研究における実験は京都大学工学部土木工学教室耐震工学研究室と共同で行ったものである。また京都大学防災研究所耐震基礎研究室からは文献4)における解析結果のデータを提供して頂いた。記してこれらの関係者各位、及び本研究の遂行にあたって御協力頂いた方々に深く感謝の意を表する次第である。

なお、本研究における数値計算には京都大学大型計算機センターの FACOM-M382/VP200 システムを用いたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 後藤尚男, 亀田弘行, 杉戸真太, 今西直人: 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, 1978.
- 2) 倉田栄一, 井合 進, 横山淑子, 土田 肇: 港湾技研資料, No. 338
- 3) 建設省土木研究所 地震防災部・振動研究室: 土木研究所資料, SMAC 型強震計の短周期成分特性に関する実験的研究, 昭和54年3月
- 4) 土岐憲三, 中瀬 仁: 強震記録における長周期成分の信頼度に関する研究, 京大耐震研究報告 No. 86-1, 1986年5月
- 5) 高森清人: SMAC-B2 強震計による強震記録の最適補正フィルターに関する研究, 京都大学卒業論文, 昭和61年3月