

厚岸大橋で観測された強震記録の補正について

中 辻 隆*
芳 村 仁**

Corrections of Strong-Motion Accelerograms Observed at Akkeshi Bridge

Takashi NAKATUJI
Jin YOSHIMURA

要 旨

厚岸大橋の地表および地盤中にそれぞれ SMAC-E 型, JEP-301 型の地震計が設置され強震観測がつけられている。デジタル化された加速度記録から積分を行ない速度量, 変位量を求めるには記録時あるいはデジタル化のための作業過程で混入した誤差を取り除く必要がある。

本紀要は, SMAC-E 型, JEP-301 型強震計を用いて観測された記録の補正手法について報告するものである。

Synopsis

Since the accelerographs have been installed at Akkeshi Bridge (Eastern Hokkaido) in 1972, many strong-motion earthquakes have been recorded.

For some purposes, it is necessary to integrate the digitized acceleration to obtain the velocity and displacement curves. But the errors in the digitized record, which involved in both recording and digital processing, prevent from deriving the correct velocity and displacement. It is said that the errors are mainly caused by the unknown zero base-line of accelerograms and the fall-out of transducer response in the accelerograph.

In this paper, we present the procedure for correcting the accelerograms recorded with the SMAC-E₂ and the JEP-301 accelerographs. That includes the base-line, the enlargement, the instrument and the band-pass filter corrections. Furthermore, some typical reduced velocity and displacement curves are shown.

1. ま え が き

昭和 47 年に竣工した厚岸大橋は, 北海道東部・厚岸町にある厚岸湾と厚岸湖口にかかる(図-1)橋長 456.50 m の五径間ゲルバー型ワーレントラス橋である(図-3)。架設位置が深度 60 m 以下に支持層をもつ軟弱地盤であり(図-2), また, この地方が従来より地震の多発地帯であることから, その地震時の挙動に大きな関心が寄せられ, 地表, 地中および橋脚上における強震観測が北大

ならびに道土木部によって行なわれている。

強震計の設置以来, 幾多の強震記録が得られ, 構造物や表層地盤の地震時における挙動解析のための貴重な基礎データとして利用されている。動



図-1 「厚岸」 1/50,000

* 助 手 土木工学科

** 教 授 北海道大学工学部土木工学科

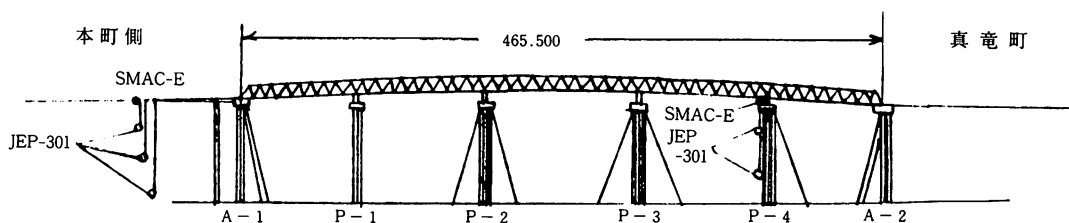


図-3 強振計の設置位置

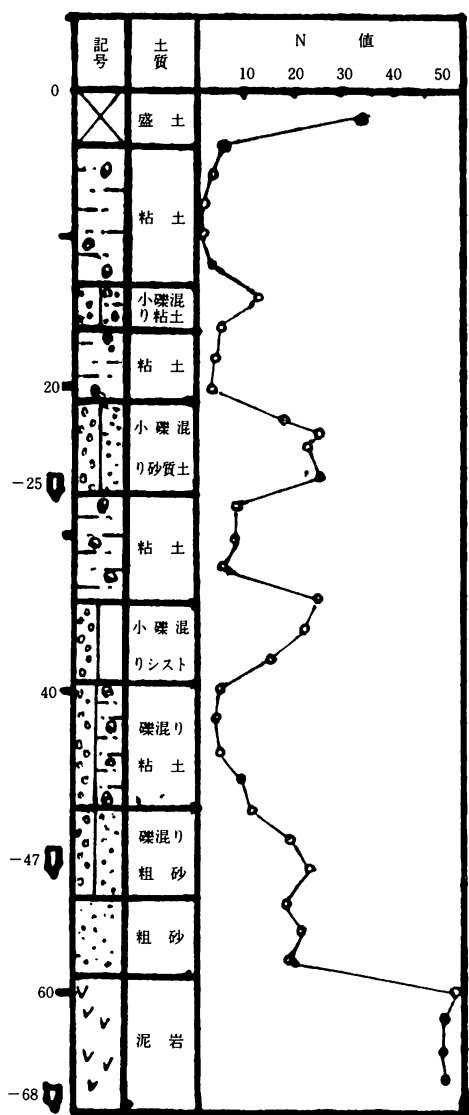


図-2 土質柱状図

的解析において、速度あるすいは変位量が必要とされる場合、得られた速度記録を積分するが、得られた記録をそのまま積分しただけでは計算された速度あるいは変位量は発散してしまうことが多い。これは、記録計自体の振動特性と得られたアナログ記録をデジタル量へ変換する過程において含まれる各種の誤差にその因を有している。

誤差の原因分析とその除去手法についてはすでに、内外の多くの研究者により幾多の報告がなされ、強震計の感度の低下と、デジタル化するための記録紙上の固定線の蛇行とがその大きな要因である事が指摘されている。さらに、それ以外の誤差を補正するために、誤差が多く含まれる低振動数成分と高振動数成分をカットするバンドパスフィルターの設定を提案しているものが多い。

厚岸大橋で観測された加速度記録から、速度、変位量を求めるにあたっては、

(1)設置されている強震計が、我国で最も普及している SMAC-B2 型ではなく、SMAC-E 型と動電型の JEP-301 型であること、また、

(2)記録方式が直接記録紙上にペン書きされるのではなく、平坦なスクラッチフィルム上に記録された後マイラー上に焼付・引伸ばしされていることから、既に提案されているフィルターのパラメータについて検討される必要がある。

本紀要において、一次的な補正として、固定線補正と引伸ばしによる時間軸補正について、また二次的な補正として計器特性補正とバンドパスフィルター補正について検討を加え報告した。

主に使用したデータは、地表 (SMAC-E₂ 型) については昭和 48 年 6 月 17 日の地震記録で、また、地中 (JEP-301 型) については昭和 47 年 5 月 11 日の地震記録である。

表-1 強震計の仕様

(SMAC-E ₂ 型)	
型 式	振 子
成 分 数	3 (水平 2, 鉛直 1)
固有振動数	20.HZ
減 衰 定 数	0.6 (空気減衰)
測 定 範 囲	1000 gal
加速度感度	フィルム上 5mm/500 gal
(JEP-301型換振器)	
型 式	可動線輪型 (動電型)
成 分 数	2 (水平 2)
固有振動数	7.5 HZ
減 衰 定 数	15 (電磁制動)
加速度感度	約0.2 MV/gal
ソイル抵抗	900Ω
(記録器)	
記 録 方 式	スクラッチフィルム上のひっかき
記録線の幅	約10μ (ダイヤモンド針)
記録フィルム	幅35mm 長さ45m
送り速度	5mm/S
刻 時	0.2 S ごと

2. 強震計及び波形記録の数値化

設置された強震計は、SMAC-E 型 2 台と動電型 JEP 301-型 5 台である。図-3 に示す通り本町側では地盤中 (上) に、真竜側では橋脚 (P-4) に強震計を設置している。

なお、本報告においては、本町側で観測された地盤中 (上) の記録のみを解析の対象としている。

表-1 は両強震計の仕様である。図-4 と図-5 は仕様に基づいて描かれた振幅および位相の振動数特性曲線である。図-4 中に、我国で最も広く設置されている SMAC-B2 型の特性曲線も示したが、この図から、ここで用いられている SMAC-E₂ 型の振動数特性が B2 型のそれに比し高振動数領域での感度がわかる。また図-5 は JEP-301 型の特性曲線であるが 0.2~0.3 Hz でかなり感度が低下していることがわかる。これは今後の補正において大きな問題となるところである。

フィルム上には五本の記録が描かれている。一番上が、各地震記録の基準線設定のための固定線であり、一番下が刻時 (タイムマーク) 記録であり、そして中の 3 本が地震記録である。

スクラッチフィルム上にダイヤモンド針を用いて描かれた波形記録は、マイラー上に 8 倍の焼付

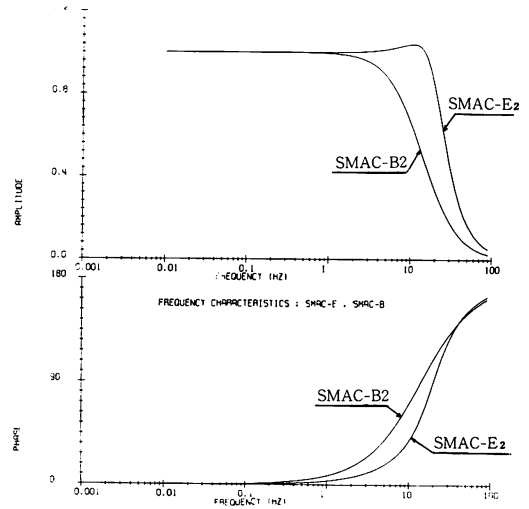


図-4 SMAC-E₂ 型の特性曲線

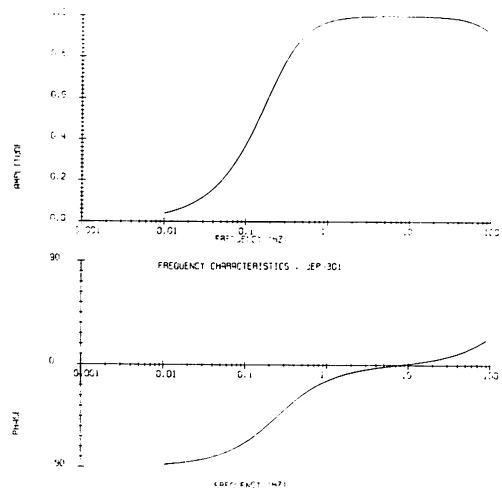


図-5 JEP-301型の特性曲線

拡大された後、座標読取装置で 0.01 秒あるいは、0.02 秒間隔で数値化される。

数値化された波形記録は紙テープに出力された後 M. T. (磁気テープ) あるいはカードに媒体変換され各種の解析に利用される。

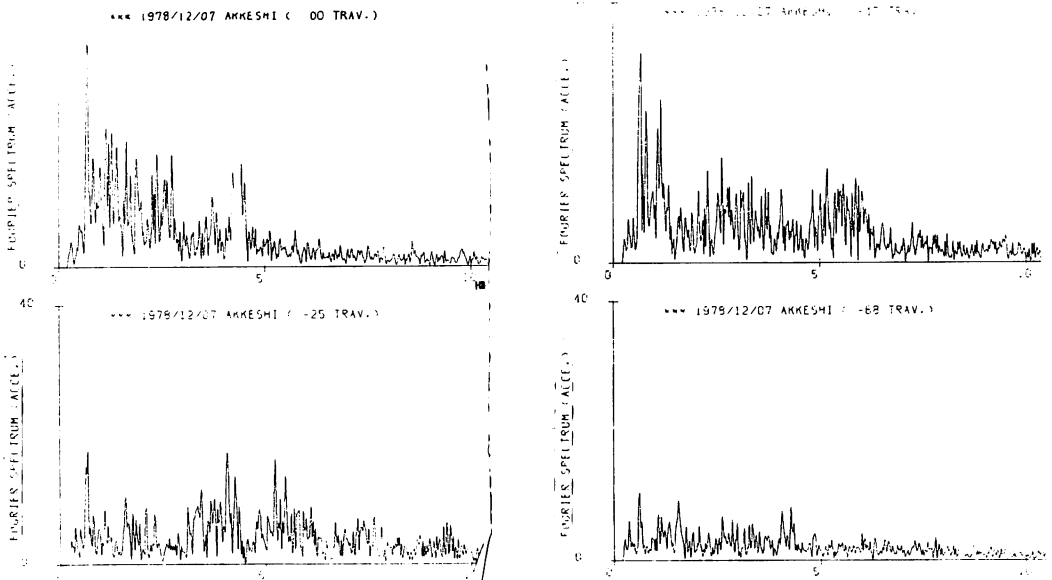
3. 強 震 記 録

表-2 は、強震計の設置以来観測された主な強震記録の一覧である。このうち、地表と地中の水平二成分が全部揃って記録されたのは二個だけである。その他については、観測上の種々の理由により、いくつかの成分が欠落している。測定された加速度が最も大きいのは地表 (SMAC-E₂) に

表一 2 これまでに観測された強震記録

番号	年 月 日	M	震 源 地	緯 度	経 度	深 さ	震央距離	最大加速度 (G A L)			
								地表	-25m	-47m	-68m
1	S 47. 5. 11	5.8	釧 路 沖	42°36′	144°56′	60	97	—	{ 42 19	{ 36 21	{ 23 17
2	S 48. 6. 17	7.4	根 室 半 島 沖	42°58′	145°57′	40	90	{ 136 100	—	—	—
3	S 48. 6. 24	7.1	〃	42°57′	146°45′	30	150	{ 74 77	—	—	—
4	S 49. 9. 20	5.5	釧 路 沖	42°41′	145°06′	50	82	{ 41 25	{ 15 7	{ 19 8	{ 12 7
5	S 49. 11. 9	6.5	苫 小 牧 沖	42°30′	141°47′	130	260	19	—	—	—
6	S 53. 5. 24	5.5	釧 路 沖	42°30′	144°52′	50	66	{ 38 16	{ 9 7	{ — 12	{ — 8
7	S 53. 6. 14	5.0	根室半島南東沖	42°58′	145°03′	40	44	{ 12 13	{ 6 4	{ — 5	{ 4 4
8	S 53. 12. 7	7.7	エ ト ロ フ 沖	44°44′	146°58′	100	191	{ 57 57	{ 18 17	{ 21 15	{ 8 14

*上段 橋軸直角方向
下段 橋軸方向



図一 7 加速度フーリエスペクトルの垂直分布 (S 53. 12. 7)

おいては昭和 48 年 6 月 17 日に起きた地震の 136 gal であり、地中 (JEP-301) においては昭和 47 年 5 月 11 日の 42 gal である。

図一 6 に最大加速度の垂直分布の例を示した。一般に上部ほど加速度の大きさが増大していて表層地盤中の地震波の伝播特性がよく現われているが、その増幅度は必ずしも一定ではなく各地震ごとに異なっている。深度 68 m の泥岩中に設置されている地中地震計の記録は、地震基盤の記録と考えられるが、おおよそ 10 gal 前後の加速度を記録

している。

厚岸大橋近傍の表層地盤は、耐震設計指針でいうと第Ⅳ種の地盤であるが、この表層地盤の特性を明らかにするために、各深度で測定された加速記録のフーリエスペクトルを図一 7 に示した。ここでも、地表において、長期成分が卓越しているのが見られ、軟弱地盤中における波動伝播の様子があらわれている。

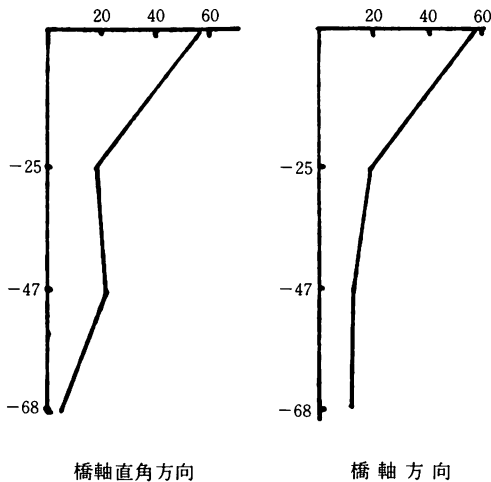


図-6 最大加速度の垂直方向分布
(S53. 12. 7)

4. 補正法の概要

デジタル化された地震記録に含まれる誤差には地震計の振動数特性に因るものからデジタル化のプロット作業に因るものまでその原因は多岐にわたっている⁽¹⁾。

これまでに報告されている内外の多くの研究成果により、誤差の重要な原因が、地震記録の基準軸線（固定線）の不安定性と地震計の高低振動数領域における感度低下にあることが指摘されている。

図-8に補正手順を示した。本報告においても、固定線補正と計器特性補正を主とし、その他の誤差は周波数領域におけるバンドパスフィルターを用いて断するものとした。引伸ばし補正は、デジタル化の作業の過程でスクラッチフィルムを8倍に拡大した時に記録の始端と終端との拡大率に差異が認められた場合にのみ適用するものとした。また、スクラッチフィルム上では、1mmが100gal相当であるので、ペンの円弧描きによる影響は十分小さいと考え、円弧補正とそれに伴う時間軸補正は行なわないものとした。以下、各補正項目について簡単に説明してゆきたい。

(1)固定線補正

マイラーに焼付けられた波形記録においては、記録フィルムのゆがみ、フィルム送りの際の送りむらあるいは引伸ばしの不均一性等の各種の原因によりその基準となるべき軸が蛇行している。固

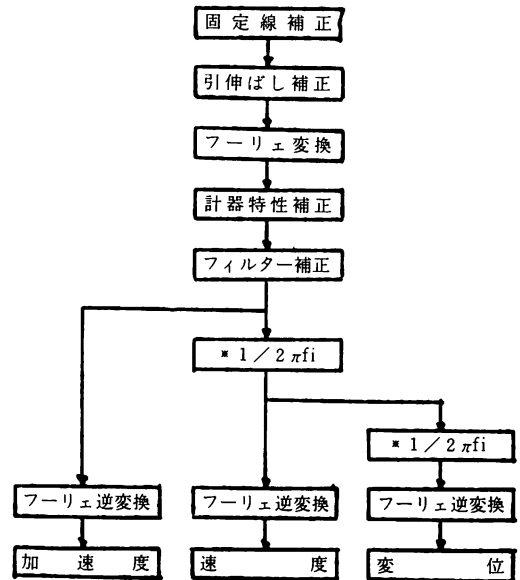


図-8 補正手順

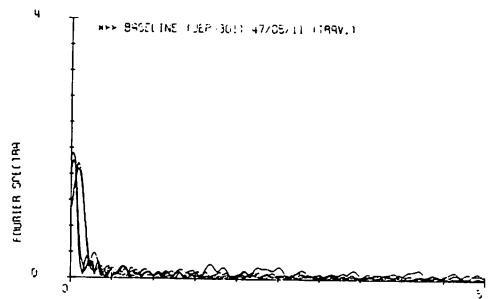


図-9 固定線のフーリエスペクトル

定線補正はこの蛇行を取り除くためのものである。フィルム上の固定線の蛇行が波形記録の蛇行と同一であると仮定し各波形記録の値から固定線の値を差し引き補正を行なっている。

図-9はデジタル化された固定線のフーリエスペクトルである。0.2~0.3Hzまでの長周期成分が卓越している事がわかる。即ち、固定線に3~5秒周期のうねりが生じている事を示している。図中の4本の線は座標読取りを2人の人間がそれぞれ0.01秒と0.1秒間隔に行なった事を示している。図-9に示した以外の他の例においても同程度の長周期成分が卓越しており、これはデジタル化するまでの段階で長周期成分の誤差が混入している事をあらわしている。この原因としては、スクラッチフィルム及びマイラーの材料としての品質の安定性を考えるならば、主に記録時のフィルムの紙りむらと焼付、引伸ばし時のフィルム及び投影画

表-3 タイムマークの読取り例

to	t
0	0
400	400
800	891
1200	1201
1600	1602
2000	2001
2400	2402
2800	2801
3200	3202
$t = 1.0005 t_o - 0.0024$ $\epsilon = 0.0005$	

面のねじとが考えられるが、その定量的な検討は今後に残されている。

なお、デジタル化された固定線の値は、その高周期成分を除去するために移動平均を行ない使用されている。

(2)引伸ばし補正

光学装置を用いてフィルムをマイラー上に引伸ばす時に記録の軸方向に拡大率の差異が生じる事が予想されるために行なう補正である。

加速度記録から二度積分して変位を求める時に引伸ばし誤差が与える影響の大きさは、簡単な演算によって確かめる事が出来る。今、引伸ばしの不均一の大きさが軸方向に一樣に生じると仮定すると、デジタル化された時間軸 (t) と真の時間軸 (t_o) の間には

$$t = \alpha t_o + \beta = (1 + \epsilon) t_o + \beta \quad (1)$$

の関係があるので、加速度記録から積分した変位の振幅において

$$\frac{1}{(1+\epsilon)^2} - 1 \doteq \pm 2\epsilon \quad (2)$$

の誤差を生じる。表-3は記録されたタイムマークをデジタル化した結果の例である。他の例においても ϵ の値は非常に小さく、座標上の誤差はタイムマークの読取誤差と判別し難い。本解析においても $\epsilon = 0.01$ を越えない限り本補正は行なわないものとしている。

引伸ばし補正においても、デジタル化された刻時記録は平滑化された後用いられている。また、地震記録はこの補正後改めて等時間間隔になるように計算し直されることになっている。

(3)計器特性補正

地震計はそれぞれの振動数特性を有していることで得られた記録は真の加速度記録とは異なっている。それぞれの振動数特性に応じて記録加速度を補正するのが計器特性補正である。本補正は振動数領域で行なわれる。即ち、SMAC-E型において

$$\bar{x}(f) = \left[1 - \left(\frac{f}{f_s} \right)^2 + 2h_s \left(\frac{f}{f_s} \right) i \right] \times x(f) \quad (3)$$

ここで、 $f_s = 20\text{Hz}$ 、 $h_s = 0.6$ である。

JEP-301型において

$$\bar{x}(f) = \left[1 + \frac{i}{2h_j} \left(\frac{f}{f_j} - \frac{f_j}{f} \right) \right] \times x(f) \quad (4)$$

ここで、 $f_j = 7.5\text{Hz}$ 、 $h_j = 20$ である。

但し $x(f)$ 、 $\bar{x}(f)$ はそれぞれ計器特性補正前後の加速度記録のフーリエ変換である。

図-4に見る通り、SMAC-Eの計器特性の良さが特筆される。10Hzを越える付近まで平坦であるその特性は、地震波の周波数成分を考えるとほとんど計器特性補正を必要としない程といえる。

また、作動中の強震計の固有振動数と減衰定数の仕様からのずれは少なからぬ影響をもっと予想されるが、今後に残された課題である。

(4)バンドパスフィルター

デジタル化された波形記録には、デジタルのために波形をプロットする時の読取り誤差や、デジタルそれ自体によるいはフィルムやマイラーのゆがみによる誤差等々既に述べた固定線補正、引伸ばし補正そして計器特性補正だけでは取り除くことの出来ない多くの誤差を含んでいる。これらの誤差に対処するために振動数領域において両端の高低振動数成分をしゃ断するバンドパスフィルターが設定される。ここで用いるバンドパスフィルターは、両端でのGibbs現象を抑えるために、図-10に示

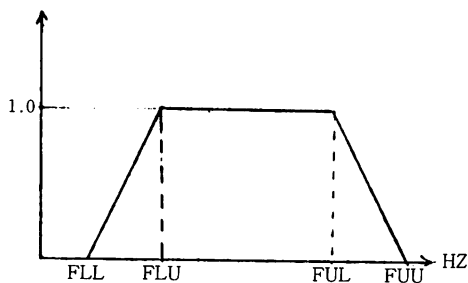


図-10 バンドパスフィルター

表－4 シャ断周波数の積分結果への影響

深 さ _(m)	FLL 方 向	0.10		0.15		0.20	
00 (SMAC-E) S 48. 6, 17	直 角 —136 —103	—20.4~17.6	○	—20.2~18.1	○	—20.5~17.9	○
		— 4.0~ 4.0	○	— 4.4~ 3.3	○	— 4.7~ 3.0	○
	橋 軸 —96 —100	—15.7~14.8	○	—15.5~14.4	○	—16.8~13.0	○
		— 4.5~ 2.7	○	— 4.8~ 1.9	○	— 4.3~ 2.5	○
—25 (JEP-301) S 47. 5, 11	直 角 —42 —35	— 0.6~ 1.8	○	— 0.6~ 1.8	○	— 0.9~ 1.6	○
		—0.38~0.13	△	—0.35~0.12	△	—0.09~0.14	○
	橋 軸 —12 —19	— 1.8~ 0.1	○	— 1.7~ 0.1	○	— 1.3~ 0.6	○
		—0.09~0.40	△	—0.08~0.38	△	—0.16~0.15	○
—47 (JEP-301) S 47. 5, 11	直 角 —36 —30	— 0.7~ 2.1	○	— 0.7~ 2.1	○	— 0.7~ 1.8	○
		—0.34~0.18	△	—0.31~0.18	△	—0.10~0.17	○
	橋 軸 —21 —14	— 1.9~ 0.8	○	— 1.9~ 0.8	○	— 1.3~ 1.3	○
		—0.17~0.65	△	—0.16~0.60	△	—0.23~0.14	○
—68 (JEP-301) S 47. 5, 11	直 角 —23 —19	— 0.1~ 1.6	○	— 0.1~ 1.5	○	— 0.4~ 1.2	○
		—0.56~0.13	△	—0.52~0.12	△	—0.08~0.17	○
	橋 軸 —15 —17	— 1.9~ 0.0	△	— 1.8~ 0.0	△	— 1.4~ 0.4	○
		—0.10~0.52	△	—0.09~0.49	△	—0.17~0.18	○
* 1 方向の欄にかかれた数字は記録された加速度の範囲を示す。 * 2 各欄上段—速度、下段—変位の範囲を示す。 * 3 ○, △ 波形の形状としての適否を示す。							

す様な台形とした。

フィルターのパラメータ FLL, FLU, FUL,そして FUU の値を変えて加速度記録の補正とその積分を行なった。文献(2)の研究を参考にし、ここでは FLU=FLL+0.05, FUL=10, FUU=15 と固定し FLL の値のみを 0.10, 0.15 および 0.20 と変化させた。

図-11 に SMAC-E 型で観測された記録の補正後の加速度とさらに積分された後の速度と変位曲線を示した。同様に図-12 は JEP-301 型からのものである。但しこの例では引伸ばし補正は行っていない。図-11 と図-12 とから次の事が結果づけられる。

(1)加速度記録においては、SMAC-E 型, JEP→301 型にかかわらずパラメータの影響はほとんどない。補正前後の加速度の差は 2～5 gal 程度である。

(2)速度さらに変位と積分を進めるに従ってパラメータの影響が拡大して行く傾向にある。

(3)SMAC-E 型に比し、JEP-301 型の方がより強くパラメータの影響をうけている。即ち、これは、図-4 と図-5 の両地震計の特性曲線から分かるように、積分に大きな影響を与える低振動数領域における感度の差によるものと思われる。特に JEP-301 型においては、問題となっている

0.10～0.20 Hz 付近でかなりの感度低下が予想される。さらに、実際に作動している地震計が、種々の要因により仕様に示されている固有振動数あるすいは減衰定数から離れて運動している場合には、積分結果に重大な影響を与えるものと思われる。

フィルムによるシャ断の影響をよりあきらかにするために、図-11 と図-12 における加速度、速度および変位のフーリエスペクトルを図-13 と図-14 に示した。図-13 と図-14 はそれぞれ図-11 と図-12 に対応している。両図から、上で述べた時間領域における(1)～(3)の性質が容易に推察する事が出来る。ここで最も注目しなければならないのは、JEP-301 型における変位波のスペクトル図に見られる 0.195 Hz の卓越成分の取扱いである。これをシャ断するか否かが時間軸における変位波形に大きな差異をもたらしている。同じ周波数成分は JEP-301 型で観測された記録から得られた変位のスペクトルに悉くあらわれている。即ち、図に示した—25 m地点のみならず—47 mあるいは—68 m地点での記録にもあらわれてくる。また他日の記録においても同様である。表-4 は、いくつかの記録に関してフィルターのパラメータ FLL の値を変えた時の積分結果の一覧を示す。ここで波形の形状としての適否とは、実際

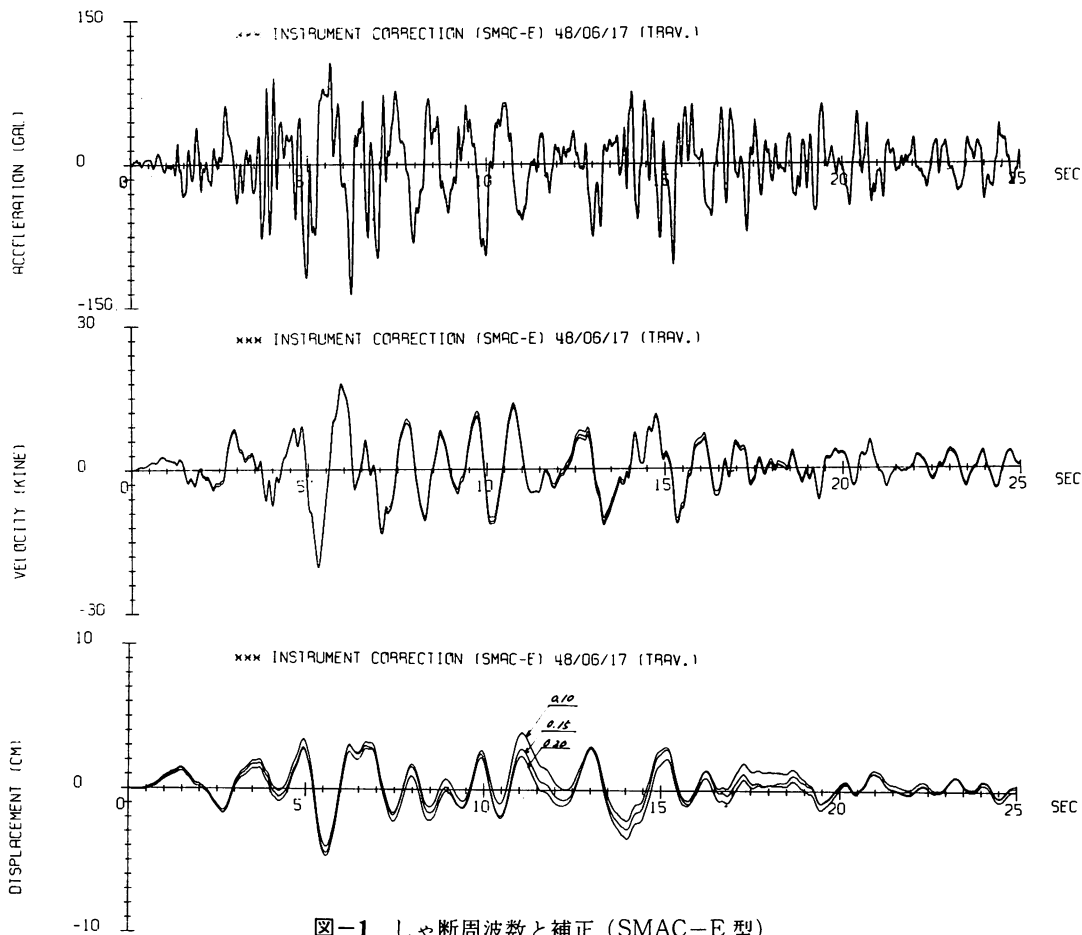


図-1 シャ断周波数と補正 (SMAC-E 型)

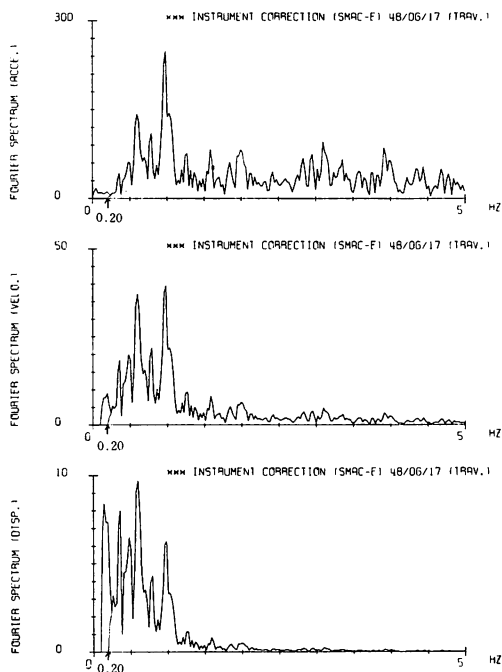


図-13 シャ断周波数と補正 (SMAC-E 型)

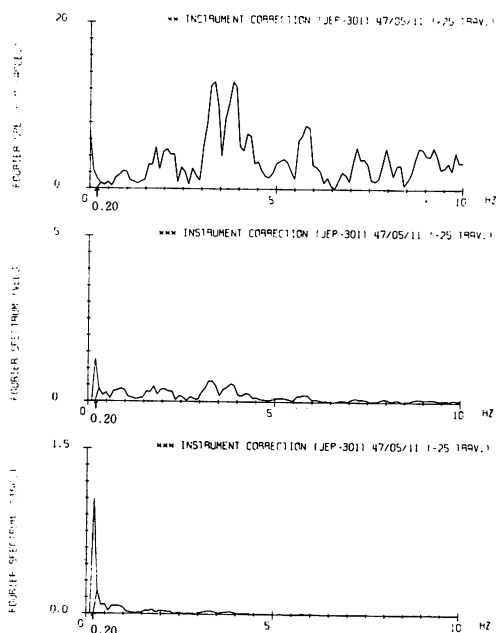


図-14 シャ断周波数と補正 (JEP-301型)

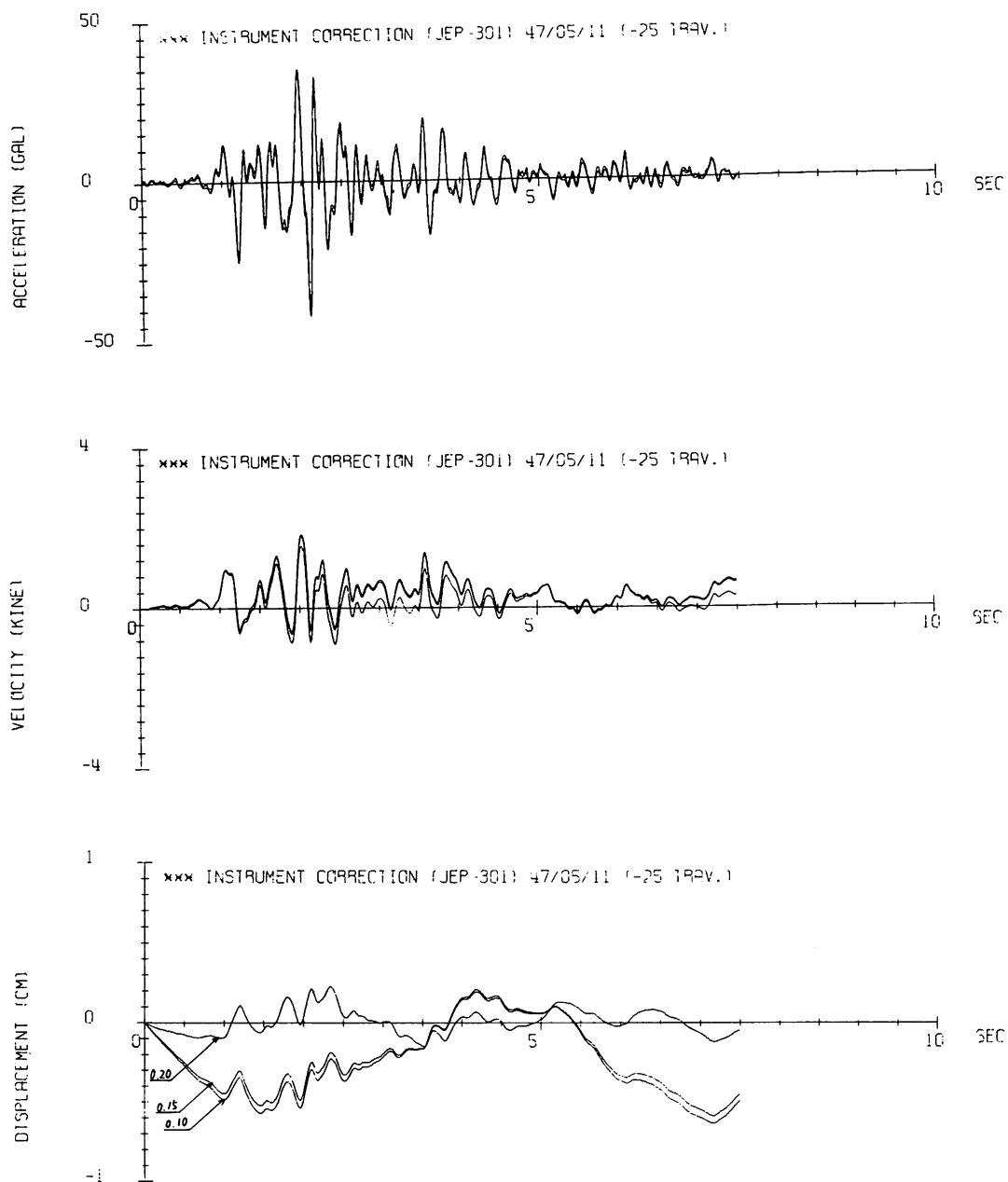


図-12 シャ断周波数と補正 (JEP-301型)

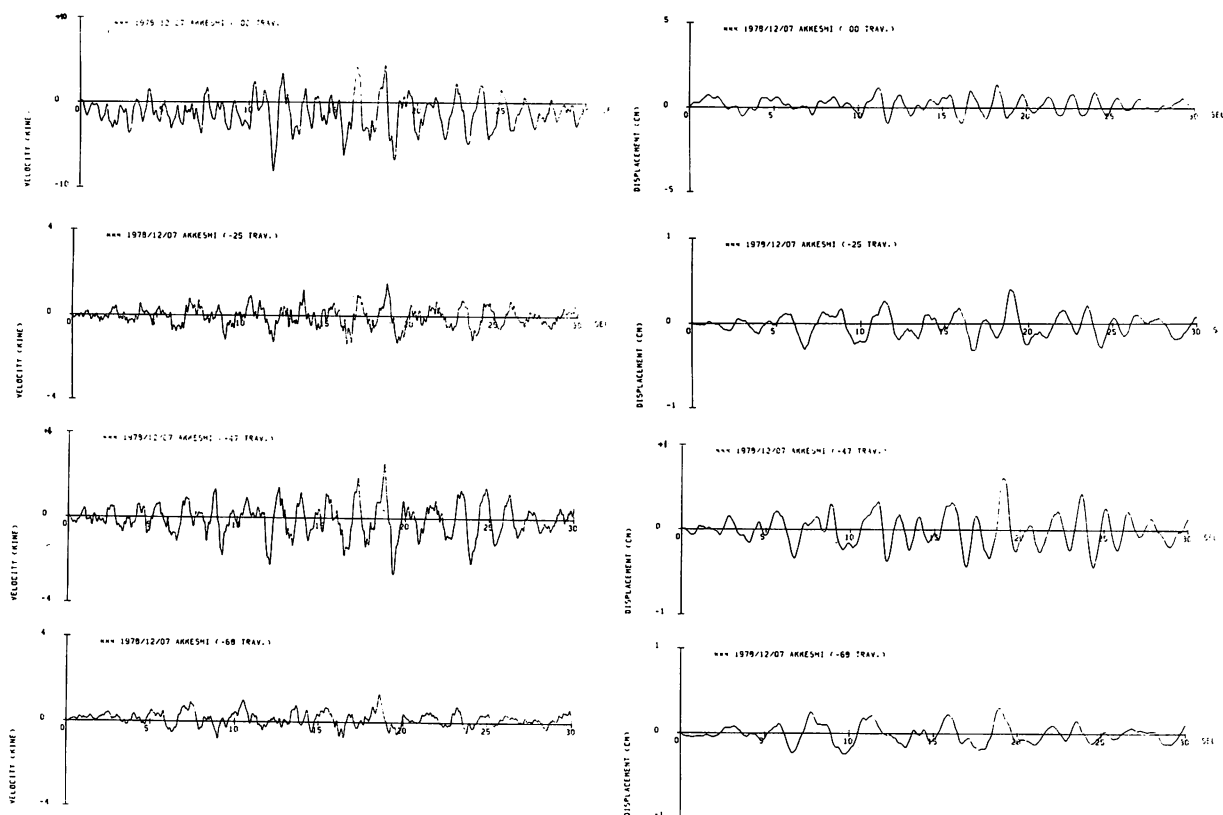


図-15 計算された速度と変位曲線

の地震時の振動状態から考えて経験的あるいは視覚的に判断した結果にしかすぎない。以上の結果からこの0.195 Hzの成分に関して考察するならば、図-2に示すように各測定位置での地盤定数が異なっているにもかかわらず同じ卓越周波数をもつと考える事は不自然であり、記録中あるいはデジタル化の作業段階で混入した誤差が固定線補正や計器特性補正で取り除かれる事なく残留していると考えの方が理に合っていると思われる。この残留誤差の原因としては既に述べたように、JEP-301型における低振動数領域における感度の低下及びこの仕様からのずれあるいは焼付・引伸ばし時の拡大率の不均一性等が考えられるがそれらの定量的な検討は今後の課題である。

図-15に昭和53年12月7日に地表ならびに地中において同時に観測された記録から求めた速度と変位曲線を示した。ここではFLL=0.20として計算されている。

以上の結果から、SMAC-Eの記録についてはFLL=0.10、JEP-301については0.20のフィル

ターを用いる事によりほぼ妥当な積分値を得る事が出来ると思われる。

5. あ と が き

覆水盆に返らずの喩えにあるように、信号に混入した雑音を取り除くには多くの困難を伴う。例えば、図-15に示す速度あるいは変位記録は単に定性的な検討の結果求めたものでありそれらの精度の検討には今後に多大な仕事量を必要としている。

しかしながら、SMAC-Eに関してその記録の精度の高さが確認された事は本報告の成果の一つである。計算された速度あるいは変位の精度を定量的に検討する一つのアプローチとして、この精度的に優れた地表でのSMAC-E型の記録から多重反射の理論を用いて地中の地盤の挙動を解析し地中での強震記録と比較する事は大変興味深い事と思われる。

最後に、波形を読み取り、あるいは解析時に適

切な助言を与えて下さった北大工学部土木工学科構造力学講座佐々木氏と北海学園大学工学部土木工学科の早川寛氏に深く感謝したい。

参 考 文 献

- (1) 井合・倉田・土田；強震記録のデジタル化と補正，港湾技研資料 No 286，1978 年 3 月
- (2) 後藤・亀田・杉戸・今西；ディジタルフィルターによる SMAC-B 2 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 年 9 月
- (3) 倉田・井合・土田；港湾地域強震観測年報（1976・1977），港湾技研資料 No 287，1978 年 3 月
- (4) 倉田・井合・横山・土田；1978 年宮城県沖地震の港湾地地域における強震記録，港湾技研資料 No 319，1979 年 6 月
- (5) 田中・森下・大沢・吉沢；強震記録の補正について，建築学会大会学術講演梗概集，昭 47 年 10 月
- (6) 栗林・土岐・若林；SMAC 型強震計による地動の再現性について，Proc. of the 4-th Japan Earthquake Engineering Symposium-1975, Nov. 1975, pp153-160
- (7) D. Trifunac ; Zero Baseline Correction of Strong-Motion Accelerograms, Bull of the Seism. Soc. of Amer., Vol. 61, No.5, pp1201-1211, Oct. 1971
- (8) D. Trifunac ; A Note on Correction of Strong-Motion Accelerograms for Instrument Response ; Bull of Seim. Soc. of Amer Vol. Feb. 1972
- (9) D. Trifunac ; E. Udawadia and G. Brady ; Analysis of Errors in Digitized Strong-Motion Accelerograms, Bull. of Seim : Soc. of Amer., Vol. 63, No.1, pp157-187, Feb. 1973
- (10) 大崎順彦；地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1976 年 7 月
- (11) 日野幹雄；スペクトル解析，朝倉書店，昭和 52 年 10 月
- (12) A. パボリス著大槻喬，平岡寛二監訳；工学のための応用フーリエ積分，オーム社，昭和 42 年 8 月
- (13) 小山・芳村・早川；厚岸大橋地盤における強震計記録の解析について，土木学会北海道支部論文報告集，第 34 号，昭和 53 年 2 月
- (14) 芳村・早川・奥村・伊藤；厚岸大橋地盤における強震計記録の解析について，土木学会北海道支部論文報告集，第 35 号，昭和 54 年 2 月

（昭和 54 年 11 月 30 日受理）

