

地震時地盤ひずみの解析を目的とした個別記録方式による デジタル強震計の記録精度

RECORDING ACCURACY OF DIGITAL STRONG-MOTION ACCELEROGRAPH WITH
INDEPENDENT TRIGGERING AND RECORDING SYSTEM FOR ANALYSIS OF
FINITE GROUND STRAINS INDUCED DURING EARTHQUAKES

田村 敬一*・川島 一彦**・相沢 興***・高橋 和之***

By Keiichi TAMURA, Kazuhiko KAWASHIMA, Koh AIZAWA and Kazuyuki TAKAHASHI

In the analysis of dense instrument array data obtained by independent triggering and recording systems, it is inevitably necessary to understand the accuracy of the data. Such requirement is particularly severe when ground strains induced during earthquakes are evaluated from differential ground displacements at several observing points. Errors associated with numerical integration of acceleration records at low frequency range and difference of sensitivities between instruments are likely to develop unrealistic ground strains. This paper presents experimental analysis on the effect of lower cut-off frequency of instrument correction filter, number of bits of AD converter and its sampling interval on accuracy of calculated displacement. And reliability of relative displacements evaluated from the records by plural instruments is also presented.

Keywords : finite ground strain, digital strong-motion accelerograph, dense instrument array

1. まえがき

地震動に及ぼす地形・地盤条件の影響、地震時の地盤ひずみ、地震波の伝播特性等の解析のために各所で高密度強震観測^{1),2)}が実施されるようになってきた。高密度強震観測では複数の強震計を用いた個別記録方式が採られる場合が多いが、観測記録の解析に際しては記録が所要の精度を十分に有しているか否かの検討が重要となる。中でも、地中構造物の耐震設計上重要な地震時の地盤ひずみを解析するためには、観測で得られる加速度記録から変位を計算する必要があるが、数値積分により加速度から変位を求める際には長周期成分のノイズが含まれていると、変位波形が発散する場合がある。したがって、一般に、数値積分に際しては長周期成分を除去するのが普通であるが^{3),4)}、デジタル強震計ではどの程度の周期までを数値積分に見込めるかの検討が必要とされる。また、同一仕様の強震計を用いたとしても、もともとよく似た特性をもつ複数地点間の地震動から、地震時

地盤ひずみを求める場合には、個々の強震計のわずかな特性の違いにより地震時地盤ひずみの解析結果に大きな誤差を生じる可能性がある。このため、地震時地盤ひずみの解析を行うためには、複数の強震計から計算された地震動変位にどの程度のばらつきが現実的に存在するか検討しておくことが必要とされる。

本報告では、上記の観点から、デジタル強震計を用いた2種類の加振実験を行い、1) 加速度から変位を計算する際の長周期側の遮断周期、強震計のAD変換器のビット数およびサンプリング間隔が変位の精度に及ぼす影響について検討するとともに、2) 複数の強震計間の変位の再現性について検討した結果を報告する。

2. デジタル強震計の振動台加振実験

強震時に強震計に作用した地震動とこれに対して強震計が示す応答との関係を正確に把握するために、強震計を用いた2種類の振動台加振実験を行った。実験に用いた強震計は、建設省土木研究所が高密度強震観測に使用している16ビットデジタル強震計であり、その主要な仕様は表-1に示すとおりである。個別記録方式の強震計を用いて地震時地盤ひずみを求めるためには、各強震計間の時間の同期を正確にとることが重要である。こ

* 正会員 工修 建設省土木研究所地震防災部振動研究室 研究員 (〒305 茨城県つくば市旭1)

** 正会員 工博 建設省土木研究所地震防災部耐震研究室 室長 (同上)

*** 正会員 建設省土木研究所地震防災部振動研究室 (同上)

のため、各強震計には公称精度 10^{-7} の水晶時計（表—1 参照）を内蔵し、データの収録を行うとともに絶対時刻を記録できるようになっている。また、水晶時計は毎正時に NHK の時報により自動時刻較正されるようになっている。したがって、本実験のように、時刻較正を行った直後に実験を行うと、強震計の時刻は絶対時刻に対して 1/200 秒以下の精度に保つことができる。

換振部および記録部の特性（公称値）から計算により求めた振幅特性および位相特性を示すと、図—1 のようになる。

a) 変位の測定精度検討実験（実験 I）

強震計により得られた加速度記録を 2 回数値積分して変位を求める際の実用的な長周期側の遮断周期、AD 変換のビット数およびサンプリング間隔の影響をそれぞれ検討するために行った実験であり、1 台の強震計を小型振動台上に固定し、地震波による加振を行った。実験に用いた振動台は ± 20 cm のストロークを有する動電型振動台であり、公称 1/15~1/10 Hz 程度までの低振動数領域の地震動を比較的小さなノイズで再現できる。実験では、振動台の変位を差動トランス型変位計（最少精度 1/50 mm）により直接測定し、これを以下の解析では“真の変位”とみなすこととした。

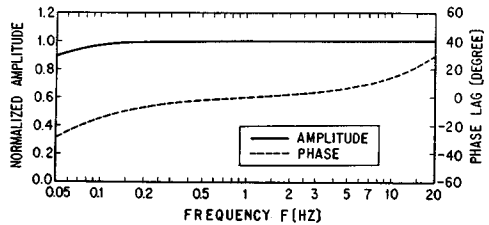
振動台への入力としては、表—2 に示す 5 種類の実測記録を用い、これを表—3 (a) に示すように加速度レベルを 2 種類に変化させて使用した。各記録の加速度波形および加速度応答スペクトル倍率（減衰定数 5%）は、それぞれ、図—2 および図—3 に示すとおりである。入力記録としては、0.15 秒付近に卓越周期を有する富津岬記録から、1 秒付近に卓越周期を有する南港記録まで

表—1 デジタル強震計の主要仕様

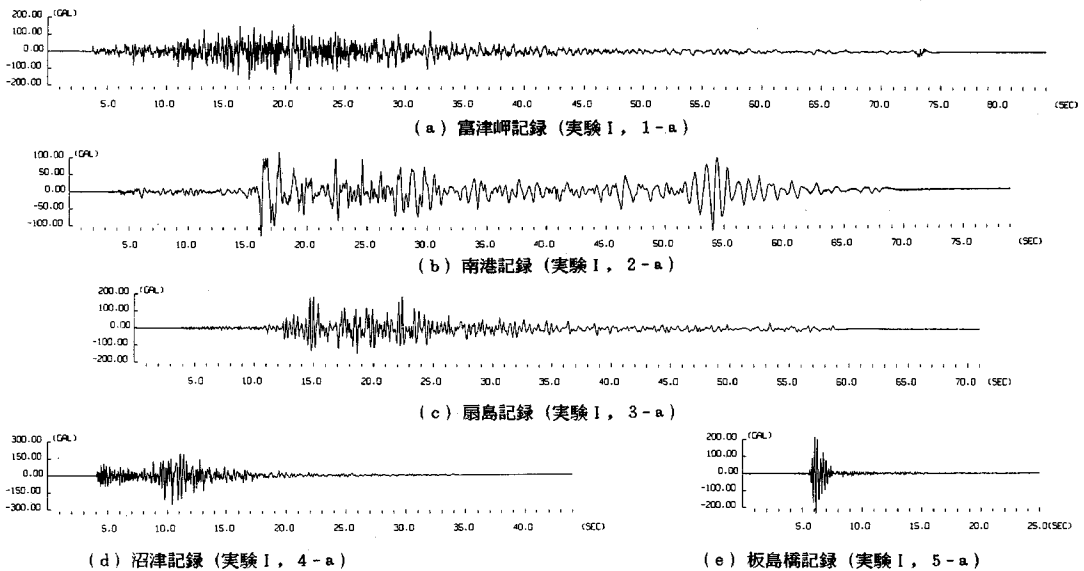
換振部	型式	速度帰還型サーボタイプ加速度計
	測定加速度範囲	± 1000 gal
	固有振動数	5 Hz
起動部	減衰定数	240
	感振方向	上下成分
記録部	起動加速度	5 gal (可変)
	方式	デジタル (16 ビット)
	成分数	信号 3, 時間 1, 計 4
	チップ	デジタルカートリッジテープ
	ダイナミックレンジ	96 dB (公称値)
	サンプリング間隔	1/200 秒
タイムコード	記録時間	約 30 分
	遅延時間	5 秒
	時計精度	10^{-7} (公称値)
	自動時刻較正	NHK 時報により毎正時に較正

表—2 加振実験に入力として用いた強震記録

発生日月	地震名	マグニチュード	震央距離 [km]	記録地点
1972. 2. 29	八丈島近海地震	7.1	300	富津岬地盤上 (NS成分)
1973. 11. 25	和歌山県中部の地震	5.6	100	南港橋周辺地盤上 (NS成分)
1974. 8. 4	栃木—茨城県境の地震	5.8	90	扇島地盤上 (EW成分)
1980. 6. 29	伊豆半島東方沖の地震	6.7	47	沼津バイパス地盤上 (NS成分)
1988. 8. 6	豊後水道沖地震の余震	5.3	18.4	板橋橋周辺地盤上 (LG成分)



図—1 デジタル強震計の振幅および位相特性



図—2 加振実験に用いた加速度記録

種々の周期特性を有する記録を選定している。また、継続時間の観点からは、基本的に60秒程度以上継続時間がある記録を選定している。ただし、板島橋記録だけは継続時間が10秒程度と短い、これは参考のために検討したものである。なお、入力記録のレベルとしては、土木構造物の耐震設計上重要と考えられる100gal以上とした。これは、前述したように、本解析の目的が土木

構造物の耐震設計に用いる地震時地盤ひずみの記録精度にあるためである。

b) 強震計相互間の相対変位精度検討実験(実験II)

複数の強震計により得られた加速度記録のうち、任意の2台の強震計記録から求めた相対変位の推定精度を検討するために、図-4に示すように、振動台上に8台の同一仕様(表-1参照)の強震計をずれ等を生じないように固定し、地震波による加振実験を行った。ここで、各強震計の設置方向は、長尺の定規を用いて振動方向と一致させた。また、加振実験の直前に全強震計の時刻較正を行い、時間の同期をとった。これにより、絶対時間に対する各強震計の時間のずれは、1/200秒以下とみなすことができる。

実験に用いた振動台はテーブル寸法2m×3mの電気油圧サーボ型の振動台であり、入力地震動は実験Iと同じく表-2に示す5種類の実測記録を表-3(b)に示すように加速度レベルを2種類に変化させて用いた。テーブルの剛性は、8台の強震計を相互に固定するうえからは、十分に大きいとみなし得るため、加振実験中には強震計間には相対変位は生じないはずであり、実際に得られた記録をもとに算出したある2台の強震計間に相対変位があれば、それは誤差によるものであると考えたこととした。

表-3 加振実験の一覧

(a) 実験I

実験番号	記録名	最大加速度 [gal]	最大変位 ¹⁾ [cm]
1-a	富津岬記録	196.2	2.83
1-b		806.7	11.91
2-a	南港記録	133.9	4.50
2-b		469.9	16.32
3-a	扇島記録	196.0	3.49
3-b		656.4	9.16
4-a	沼津記録	274.3	1.20
4-b		746.1	3.06
5-a	板島橋記録	257.7	0.85
5-b		782.5	2.50

(b) 実験II

実験番号	記録名	最大加速度 ²⁾ [gal]	最大変位 ³⁾ [cm]
1-a	富津岬記録	167.6	2.90
1-b		351.2	4.70
2-a	南港記録	157.6	3.02
2-b		243.5	6.96
3-a	扇島記録	139.3	2.91
3-b		343.4	4.95
4-a	沼津記録	158.0	1.01
4-b		439.2	2.08
5-a	板島橋記録	154.2	0.83
5-b		397.7	1.34

(注) 1) 差動トランス型変位計による 2) 8台の強震計の平均値 3) 8台の強震計の計算変位の平均値

3. 変位記録精度の検討

(1) 変位の計算方法およびその精度の定義

強震計により得られた加速度記録から変位を求めるために、振動数領域において加速度記録に強震計の特性を補正するためのフィルターをかけ、数値積分する方法を用いる。すなわち、いま、強震計による加速度記録を $a(t)$ とすれば、そのフーリエ変換 $F_a(f)$ は次式で表わされる。

$$F_a(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t)e^{-i2\pi ft} dt \dots \dots \dots (1)$$

これに強震計の特性を補正するためのフィルター $F_c(f)$ を見込むと、変位 $d(t)$ は次のように求められる。

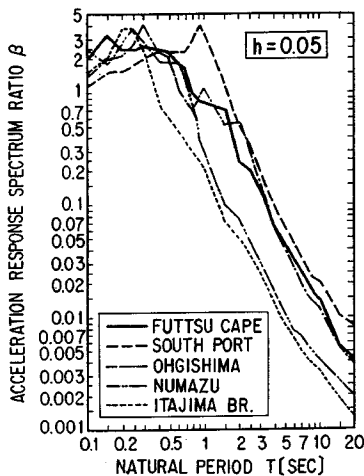


図-3 加速度応答スペクトル倍率(減衰定数5%)

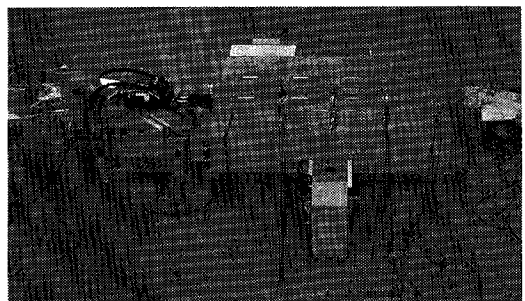


図-4 実験IIの概要(振動台上に8台の強震計を配置)

$$d(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(f)}{-4\pi^2 f^2} e^{i2\pi ft} df \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

$$F(f) = F_0(f) \cdot F_c(f) \dots\dots\dots (3)$$

$$F_c(f) = \begin{cases} 0 & f < f_{lu} \\ \frac{f - f_{lu}}{f_{iu} - f_{lu}} \frac{\exp|\phi(f)|}{A(f)} & f_{lu} \leq f \leq f_{iu} \\ \frac{\exp|\phi(f)|}{A(f)} & f_{iu} < f < f_{uu} \dots\dots (4) \\ \frac{f_{uu} - f}{f_{uu} - f_{iu}} \frac{\exp|\phi(f)|}{A(f)} & f_{uu} \leq f \leq f_{uu} \\ 0 & f_{uu} < f \end{cases}$$

ここで、 $A(f)$ および $\phi(f)$ は、それぞれ、図-1 に示した強震計の振幅特性および位相特性関数である。また、 f_{lu} および f_{iu} は、それぞれ、低振動数側および高振動数側の遮断振動数であり、 f_{lu} および f_{uu} は、それぞれ、 f_{lu} および f_{iu} に対応する補正フィルター倍率が 0 となる振動数である。なお、ここで、変位の計算に際しては高振動数側の遮断振動数は支配的な要因ではないことを考慮して、 f_{lu} および f_{uu} は、それぞれ、20 Hz および 21 Hz とした。

いま、式 (2) により強震計の加速度記録から計算した変位 (以下、計算変位とよぶ) を $d(t)$ 、差動トランス型変位計で直接測定した振動台の変位 (以下、基準変位とよぶ) を $D(t)$ とし、 $D(t)$ に対する $d(t)$ の精度を検討するために次の 3 種類のパラメーターを定義す

る³⁾。

$$\sigma = \int_0^{T_d} |d(t)^2 - D(t)^2| dt / T_d \dots\dots\dots (5)$$

$$\mu = \int_0^{T_d} d(t)^2 dt / \int_0^{T_d} D(t)^2 dt \dots\dots\dots (6)$$

$$\xi = |d(t)|_{\max} / |D(t)|_{\max} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 T_d は $d(t)$ および $D(t)$ の継続時間である。式 (5)~式 (7) から明らかなように、 $d(t)$ が $D(t)$ によく一致するほど、 σ は 0 に、また、 μ および ξ は 1 に、それぞれ、近くなる。 σ は長さの 2 乗の次元を有しているが、これは入力記録の振幅が計算変位の精度に及ぼす影響を検討するためにあえて無次元化しなかったものである。

(2) 数値フィルターの遮断周期が変位の精度に及ぼす影響

式 (4) で定義したフィルターの低振動数側の遮断振動数が式 (2) で定義した変位の精度に及ぼす影響を検討するために、遮断振動数 f_{lu} および f_{iu} を、それぞれ、1/5, 1/10, 1/15, 1/20 [Hz] および 1/6, 1/11, 1/16, 1/21 [Hz] の 4 種類に変化させて変位の計算を行った。このようにして求めた計算変位の一例として、表-3 に示した実験 2-a (南港記録) の場合を図-5 に示す。なお、図中には計算変位のほかに、基準変位も合わせて示している。これによれば、遮断周期 $1/f_{lu}$ が 5 秒から 20 秒の範囲では、波形の形状をもとに計算変位と基準変位を比較しても両者の間に著しい差異は認められないことが

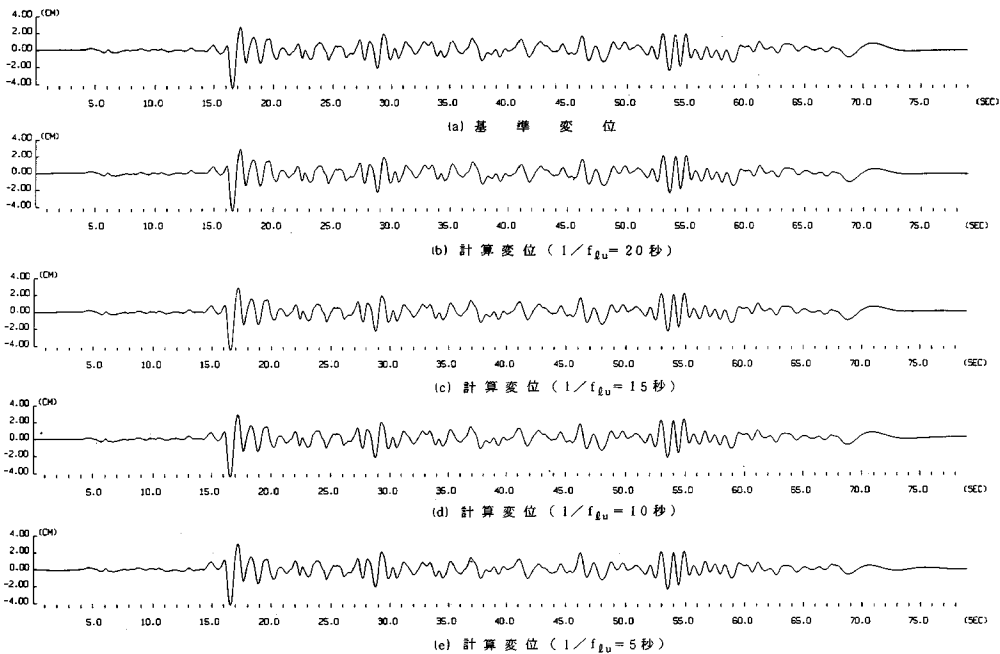


図-5 基準変位と計算変位の比較例 (実験 2-a)

わかる。次に遮断周期 $1/f_{iu}$ と変位の精度との関係を式 (5), (6), (7) で表わすと、図-6~図-8 に示すようになる。これより、変位の精度を検討すると、次のようになる。

a) σ による精度の検討

図-6 によれば、実験 1-a (富津岬記録), 実験 2-a (南港記録) および実験 3-a (扇島記録) の場合には、 σ の値は $1/f_{iu}$ が 5 秒から 10 秒になるに従って減少し、 $1/f_{iu}$ が 10 秒から 20 秒の間で最小値をとる。同じ富津岬記録, 南港記録, 扇島記録を用いて加速度レベルを大きくした実験 1-b, 2-b, 3-b の場合には、 σ の値は $1/f_{iu}=10\sim 15$ [秒] 付近で最小値をとる。これに対して、実験 4-a, 4-b (沼津記録), 5-a, 5-b (板島橋記録) の場合には、 σ の値は $1/f_{iu}=5\sim 10$ [秒] で最小値をとり、 $1/f_{iu}>10$ [秒] では単調に増加する。また、いずれの記録についても、加速度レベルを大きくすると、 σ の値を最小にする $1/f_{iu}$ が短周期側に移行する傾向が認められるが、その理由については現状でははっきりしない。

以上をとりまとめると、一般に、 σ の値は $1/f_{iu}$ が 10 秒付近で最小値をとり、したがって、この付近で変位の精度が最も安定していることを示している。この理由としては、次の事項が考えられる。すなわち、記録の解析対象範囲を広くとるためには、加振実験に含まれる周期成分の範囲で $1/f_{iu}$ をなるべく大きくとることが望ましいが、一般に長周期成分の加速度振幅は小さく、その記録精度は低下する。したがって $1/f_{iu}$ を長くとした場合には、加速度記録に含まれる長周期成分の誤差が数値積分の過程で増幅される結果、変位の精度が低下すると考えられる。たとえば、沼津記録および板島橋記録については、他の 3 記録の場合と比較して、 $1/f_{iu}$ を短くとした場合に変位の精度が良いのは、図-3 に示したようにこの両記録には 1 秒程度以上の周期成分があまり含まれ

ていないためであると考えられる。また、振動台の特性上、15 秒程度以上の周期成分については必ずしも十分に検討し得なかったことに注意しなければならない。これに対して、 $1/f_{iu}$ を短くした場合には、当然ながら加速度記録に含まれる $1/f_{iu}$ より長い周期成分を評価できないために、計算変位は基準変位よりも一般に小さくなり、結果的に精度は低下すると考えられる。

b) μ による精度の検討

図-7 によれば、 μ による精度は、上述した σ の場合とおおむね一致している。すなわち、 μ が最も 1.0 に近くなる遮断周期 $1/f_{iu}$ は 10 秒程度であり、この場合に

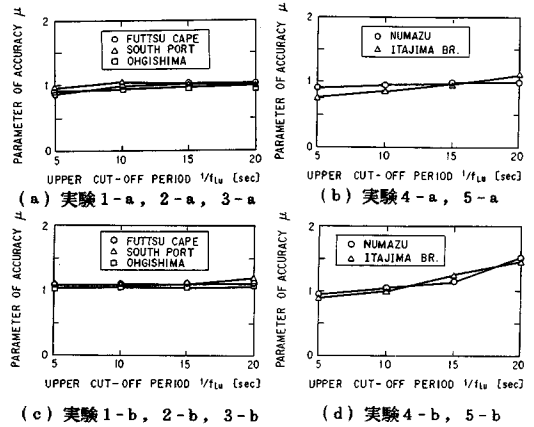


図-7 μ による変位精度の検討

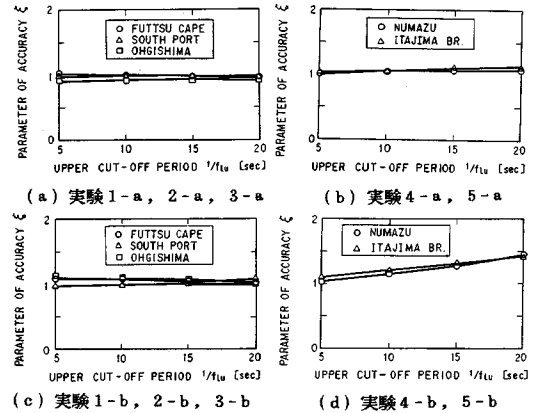


図-8 ξ による変位精度の検討

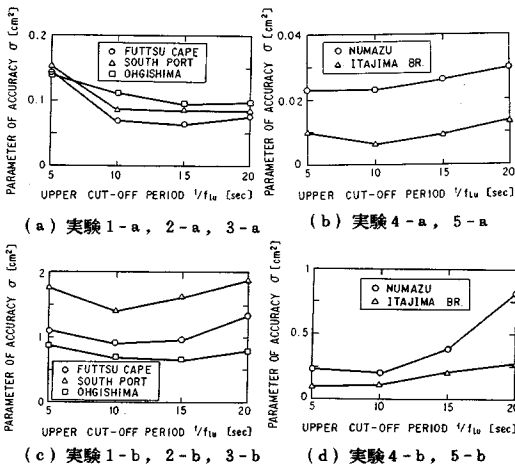


図-6 σ による変位精度の検討

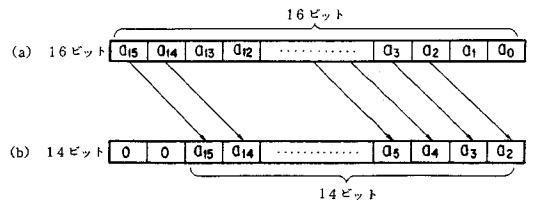


図-9 16ビットと14ビットの比較

変位の再現性が良いことを示している。ただし、 μ の値の変化は、 σ の値の変化と比較して遮断周期の影響をそれほど敏感に受けない。

c) ξ による精度の検討

ξ による精度は、 μ による場合と同様であり、遮断周期 $1/f_{iu}$ によって大きく変化しない。また、 ξ の値は、 $1/f_{iu}$ が 5~20 秒の範囲においていずれの $1/f_{iu}$ に対してもおおむね 1.0 に近い。ただし、沼津記録および板島橋記録については $1/f_{iu}$ が 5 秒の場合に ξ の値が最も 1.0 に近くなるが、これは a) に述べたように両記録には 1 秒程度以上の周期成分があまり含まれていないためであると考えられる。

以上の検討結果を総合すると、本実験の範囲では、低振動数側の遮断振動数 f_{iu} としては、少なくとも 1/10 Hz 程度まではとれるものと考えられる。

(3) AD 変換器のビット数が変位の精度に及ぼす影響

本実験で使用したデジタル強震計は 16 ビット AD 変換器を用いているが、AD 変換のビット数が 14, 12, 10 ビットと変化した場合の変位の再現性について数値実験的に検討する。

いま、ある加速度の値 A があり、これを 16 ビット AD 変換により表示するものとする。まず、16 ビットで表わし得る整数値 X_{16} は次のようになる。

$$X_{16} = \sum_{i=0}^{15} a_i 2^i \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 a_i は図-9 (a) に示すように第 i ビットに対応する 0 もしくは 1 の値を表わす。いま、強震計の測定加速度範囲は ± 1000 gal としてあるので、 X_{16} の最大値 $\sum_{i=0}^{15} 1 \cdot 2^i = 2^{16} - 1$ が 1000 gal に対応し、最小値 $\sum_{i=0}^{15} 0 \cdot 2^i = 0$ が -1000 gal に対応する。したがって、16 ビット AD 変換では加速度 A は次式に示す A_{16} のように表わされる。

$$A_{16} = 1000 \{ 2 X_{16} / (2^{16} - 1) - 1 \} \quad [\text{gal}] \dots\dots\dots (9)$$

次に、同じ加速度 A を 14 ビットで表わす場合には、図-9 (b) に示すように、16 ビットの場合の下位の 2 ビットが切捨てられるため、14 ビットで表わし得る整数値 X_{14} は次式のようになる。

$$X_{14} = \sum_{i=0}^{13} a_{i+2} 2^i \\ = [X_{16} / 4] \quad [\text{gal}] \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $[\]$ はガウス記号を表わす。また、14 ビットの場合には、 $\sum_{i=0}^{13} 1 \cdot 2^i = 2^{14} - 1$ が 1000 gal に、 $\sum_{i=0}^{13} 0 \cdot 2^i = 0$ が -1000 gal に、それぞれ、対応する。したがって、14 ビット AD 変換では加速度 A は次式に示す A_{14} のように表わされる。

$$A_{14} = 1000 \{ 2 X_{14} / (2^{14} - 1) - 1 \} \quad [\text{gal}] \dots\dots\dots (11)$$

以上より、式 (10) および式 (11) を用いれば、16 ビット AD 変換器を有する強震計で得られた加速度記録 X_{16} をもとに、これを仮に 14 ビット AD 変換器を有する強震計で測定したとすれば、どのような加速度記録になるかを求めることができる。同様に、12 ビットおよび 10 ビットの AD 変換に相当する加速度記録を求めることができる。

加速度記録を数値積分して変位を求める際の遮断振動数は、高振動数側については、(1) に示したように $f_{ui} = 20$ [Hz]、 $f_{un} = 21$ [Hz] とする。また、低振動数側の遮断振動数は、(2) の検討により変位の再現性が全体として良い $f_{iu} = 1/10$ [Hz]、 $f_{in} = 1/11$ [Hz] とする。なお、検討の対象とした実験ケースは、表-3 に示した実験 1-a, 1-b, 2-a, 2-b, 3-a, 3-b の 6 ケースである。以上のようにして計算した変位波形を 16 ビットから 10 ビットまで比較すると、目視ではほとんど区別がつかない程度に一致することがわかったため、式 (5)~(7) で定義した 3 種類のパラメーターを求めた結果の例を示すと、図-10 のようになる。これによれば、今回検討を行った範囲では、AD 変換器のビット数を 16 ビットから 10 ビットまで変化させても、変位の再現性にはほとんど差が認められないことがわかる。この理由としては、表-3 に示したように最大加速度は最も小さい実験 2-a の場合でも約 130 gal であり、10 ビット AD 変換の分解能 1.96 gal ($= 2000 / (2^{10} - 1)$) に比較して十分大きいためである。したがって、通常の土木構造物の耐震設計において重要であると考えられる今回の実験で対象とした程度の強震記録に対しては、AD 変換のビット数が 16~19 の範囲では変位の精度は大きく変化しないということができる。

(4) AD 変換器のサンプリング間隔が変位の精度に及ぼす影響

本実験で使用した強震計の AD 変換器のサンプリング間隔は 1/200 秒であるが、サンプリング間隔が 1/100, 1/50 秒と変化した場合の変位の再現性に及ぼす影響について検討する。

まず、サンプリング間隔が 1/100 秒および 1/50 秒の加速度記録は、1/200 秒間隔の加速度記録を、それぞれ、2 個置きおよび 4 個置きに間引くことにより求めた。加速度記録から数値積分により変位を求める際の遮断振動数は、(3) の場合と同じ値を用いた。また、検討の対象とした実験ケースは、前節と同様に、表-3 に示した実験 1-a, 1-b, 2-a, 2-b, 3-a, 3-b の 6 ケースである。このようにして求めた計算変位の一例として、実験 2-a の場合を図-11 に示す。同じ条件におけるサンプリング間隔が 1/200 秒の場合の変位波形は図-5 (d) に示したとおりであり、図-11 を図-5 (d) と比較すると、

サンプリング間隔が1/200秒から1/100秒に増大しても変位波形に著しい差異は認められない。ただし、サンプリング間隔が1/50秒になると波形の先頭部の精度が低下してくることがわかる。

次に、式(5)~式(7)で定義した σ , μ , ξ によって変位の精度を検討した結果の例を示すと、図-12のようになる。これによれば、 σ の値はサンプリング間隔が1/100秒と1/200秒の場合ではほとんど変わらないが、サンプリング間隔を1/50秒にすると σ の値はかなり大きくなることわかる。また、 μ と ξ についても、サンプリング間隔が1/200秒と1/100秒の場合には1.0に近い値をとるが、サンプリング間隔が1/50秒になると、わずかではあるが1.0からずれる傾向が認められる。以上より、今回の実験で対象とした程度の記録に対しては、加速度記録から数値積分により求めた変位の精度は、

サンプリング間隔が1/100秒以下の場合には良好であるが、サンプリング間隔が1/50秒になるとやや低下することがわかる。

4. 強震計相互間の変位の再現性

(1) 強震計間の相対変位の精度

いま、同一の振動台上に固定して同時に加振した8台の強震計のうちのある2台の強震計の加速度記録から求めた変位を $d_i(t)$ および $d_j(t)$ として、相対変位 $d_i(t) - d_j(t)$ の精度を検討するために、次式で表わされるパラメーター η を定義する。

$$\eta = |d_i(t) - d_j(t)|_{\max} / |d_i(t)|_{\max} \dots\dots\dots(12)$$

ここで、以後の解析においては、 $d_i(t)$ としては強震計1~7から求めた変位($i=1, 2, \dots, 7$)を、また、 $d_j(t)$ としては強震計8から求めた変位($j=8$)を用いることにする。なお、変位の計算方法は3.(1)に示した手法と同じであり、数値フィルターの遮断振動数は3.(2)の検討結果に基づき、 $f_{ui}=20$ [Hz], $f_{uj}=21$ [Hz],

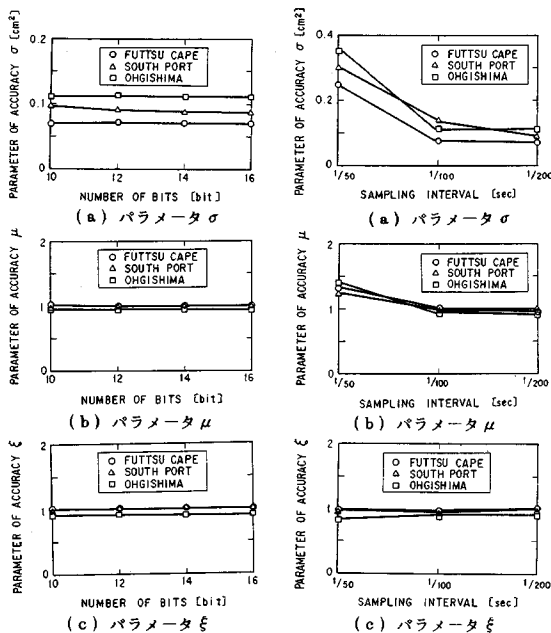


図-10 AD変換のビット数と変位精度の関係(実験1-a, 2-a, 3-aの場合) 図-12 サンプリング間隔と変位精度の関係(実験1-a, 2-a, 3-aの場合)

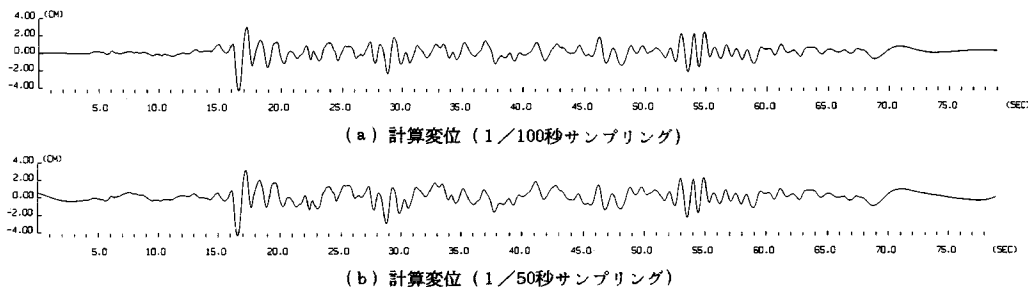


図-11 サンプリング間隔の差異による変位波形の比較例(実験2-a)

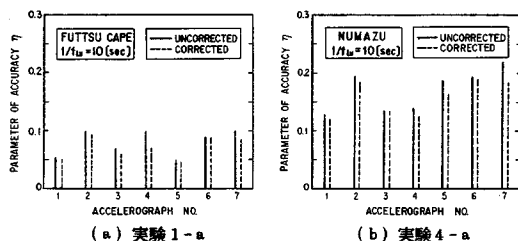


図-13 η による相対変位の精度の算出例(1/f_{iu}=10秒)

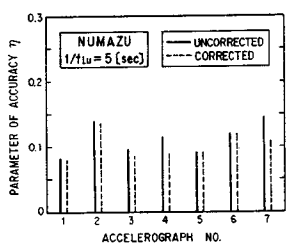


図-14 η による相対変位の精度の算出例(実験4-a, 1/f_{iu}=5秒)

表-4 強震計の感度補正係数の一覧

強震計番号	補正係数
1	1.04
2	0.99
3	1.06
4	0.95
5	0.98
6	1.01
7	0.97
8	1.01

$f_{iu}=1/10$ [Hz], $f_{u}=1/11$ [Hz] とする.

表一3 (b) に示した各実験ケースについてパラメーター η を求めた一例を示すと、図一13の実線のようになる。 η の値は、富津岬記録、南港記録および扇島記録を入力した場合には最大10%程度、また、これらと比較して継続時間が短く、短周期成分が卓越する沼津記録および板島橋記録を入力した場合には最大20%程度となる。なお、沼津記録および板島橋記録について、 $1/f_{iu}$ を5秒とした場合には、図一14に示すように η の値は10%程度となる。このように強震計間に相対変位が生じる理由としては、次の事項が考えられる。

- 1) 個々の強震計の感度が完全に同一ではない。
- 2) 強震計間の時刻の同期が完全にはとられていない。
- 3) 強震計の設置方向にわずかな誤差がある。
- 4) 強震計の振動台への固定が完全ではない。

このうち、2) については前述したように加振実験の直前に全強震計の時刻較正を行っているため強震計間の時刻の同期は十分にとられているとみなせること、また、3) および4) については少なくとも実務的には正確を期していることから、以下では1) の影響について検討することにする。

(2) 強震計相互間の感度補正

強震計相互間の記録精度を向上させるためには、各強震計間の感度の不揃いを補正することが必要である。そこで、次のような方法で強震計の感度補正を行うこととした。すなわちいま、強震計 m ($m=1, 2, \dots, M$, M :強震計台数=8) の実験ケース n ($n=1, 2, \dots, N$, N :実験ケース数=10) における最大加速度を $A_{m,n}$ とする。ここで、実験ケース n の最大加速度の最適値 A_n を次式により定義する。

$$A_n = \sum_{m=1}^M A_{m,n} / M \dots\dots\dots(13)$$

次に、強震計 m に対する補正係数として、次式で定義する誤差 ϵ_m を最小とするような C_m を用いることとする。

$$\epsilon_m = \sum_{n=1}^N (C_m A_{m,n} - A_n)^2 \dots\dots\dots(14)$$

$\partial \epsilon_m / \partial C_m = 0$ の条件より、 C_m は次のように与えられる。

$$C_m = \sum_{n=1}^N A_{m,n} A_n / \sum_{n=1}^N A_{m,n}^2 \dots\dots\dots(15)$$

このようにして求めた各強震計に対する補正係数の一覧を示すと、表一4のようになり、補正係数の値は0.95~1.05程度の値をとることがわかる。

以上の手法により感度補正を施した加速度記録をもとに変位を計算し、式(12)で表わされる相対変位の精度のパラメーター η を再び求めた結果が、図一13の破線

である。これによれば、上記補正を加えることにより全体として相対変位の精度は向上する。ただし、その度合は必ずしも十分なものではない。したがって、現状では複数の強震計により得られた記録には(1)に示した程度の誤差があるものとして、記録を利用していくことが必要と考えられる。

5. 結 論

高密度強震観測に使用しているデジタル強震計の記録精度について、加速度記録から数値積分して求めた変位の精度および強震計相互間の記録精度のばらつきについて検討した。本検討から得られた結論は、以下のとおりである。

(1) 加速度記録から数値積分により変位を求める際の低振動数側の遮断振動数は、少なくとも1/10 Hz程度まではとることができる。なお、さらに長周期領域における変位の再現性については今後検討を要する。

(2) 入力地震動の加速度レベルがAD変換の分解能より十分に大きい場合にはAD変換のビット数を16ビットから10ビットまで変化させても、変位の再現性に有意な差異は認められない。

(3) 変位の再現性に対するAD変換のサンプリング間隔の影響は、1/200秒と1/100秒の間ではほとんど差異が認められないが、サンプリング間隔を1/50秒にすると、これらに比較して変位の再現性は低下する。

(4) 同時に加振したある2台の強震計記録から求めた相対変位の最大値は、本検討の範囲内では、変位の最大値の10%程度である。また、本検討で提案した感度補正を施すことにより、強震計相互間の記録精度を向上させることができる。ただし、提案手法に基づく感度補正による精度の向上は必ずしも大きなものではなく、現状では複数の強震計により得られた記録には上述した程度の誤差があるものとして、記録を利用していくことが必要である。

謝 辞：本検討の一部(実験II)においては、杉峯正夫氏(昭和58年度豊橋技術科学大学実務訓練生)のご協力を頂いた。末尾ながら、厚くお礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) International Association for Earthquake Engineering : Strong-Motion Earthquake Instrument Arrays, Proc. of the International Workshop on Strong-Motion Earthquake Instrument Arrays, Edited by Iwan, W.D., Honolulu, Hawaii, U.S.A., May, 1978.
- 2) Tadayoshi Ohkubo, Tadashi Arakawa and Kazuhiko Kawashima : Dense Instrument Array Program of the

- Public Works Research Institute and Preliminary Analysis of the Records, Eighth World Conference on Earthquake Engineering, July, 1984.
- 3) 川島一彦・高木義和・相沢 興：数値化精度を考慮したSMAC-B₂型強震計記録の計器補正法および変位計算法, 土木学会論文報告集, 第325号, 昭和57年9月.
 - 4) 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, 昭和53年9月.
 - 5) Tadashi Arakawa, Kazuhiko Kawashima and Keiichi Tamura : Finite Ground Strains Induced during Earthquake for Application to Seismic Design of Underground Structures, Fifth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, April, 1985.
 - 6) 荒川直士・川島一彦・田村敬一・相沢 興・高橋和之：高密度強震観測用デジタル強震計の記録精度に関する実験的検討, 土木研究所資料, 第2019号, 昭和58年8月.
(1986.8.1・受付)
-