

パソコンとディジタイザーを用いた地震記録処理プログラムの開発とその応用

京都大学 工学部 正員 山田善一
京都大学 工学部 正員 ○野田 茂
京都大学 工学部 正員 四方敏明

1. 諸論 近年、大型石油タンク、長大橋梁、超高層ビルなど、構造物の大型化に伴い、やや長周期領域における地震動特性の把握が重要となってきた。SMA C型に代表される通常の工学式強震加速度計では、この帯域の地震動を精度よく記録できないこともあって、大地震時の応答評価は不十分なのが現状である。長周期構造物が建設されている現在、10秒前後の地震動を正しく評価することが必要である。このようなことにより、全国的な観測体制が整っている、気象庁1倍強震計など、固有周期数秒以上の地震計の記録を数値化し、定量的な解析を試みることは、大いに意義深いことである。¹⁾

本研究の目的は、昭和58年日本海中部地震時における気象庁1倍強震計の記録を主に用いて、16ビットのパーソナル・コンピュータ(NEC PC9801)とディジタイザー(関東電子株式会社 MODEL-K510)を連結させることにより、地震記録を簡単に処理できる各種の汎用的なプログラムを開発し、かつトータルシステム化を図り、地震動解析の技法を提供することである。また、本研究で示したデータ処理技法や処理システムの有効性を調べるため、大型計算機(FACOM M382)による解析結果とも比較し、さらに応用研究の一例として、やや長周期地震動(2~20秒)の工学的特性について検討した。

本研究で提案した一連の処理プログラムは、以下のようである。

1) パソコンとディジタイザーを連結し、スタイラスペーパー上の地震記録の波形を任意の時間間隔で読みとり、数値化し、そのデータを、ミニフロッピーディスクに格納するための、Basicプログラムを開発した。本プログラムでは、同時に、CRTディスプレイ上にも地震波形を表示させ、図形の対応ができるようになっている。

2) 次に、数値化した地震記録に各種の補正や補間を施すプログラムを作成した。具体的には、もとのデータに、i) 零線補正、ii) 円弧補正、iii) アームの傾斜補正(α 補正)、iv) 機械式地震計のペン先と記録紙の間の摩擦の影響の補正、v) 地震計の計器補正を施し、かつ、Cosine補間の方法を用いて等時間間隔の数値化記録を求め、これらの地震波形を図形出力した。

3) 2) で得られた地震動波形は漸化式の数値フィルター(バンドパスフィルター)を通し、地動の変位、速度と加速度の波形を得るとともに、F.F.T.を用いて、各種のフーリエ・スペクトル、応答スペクトルや非定常スペクトルなどを計算し、かつ、図化するためのプログラムを開発した。

4) このようにして求めた地震動波形やスペクトルなどの情報は、研究者がいつでも有効に活用できるように、パソコン用のデータベースとして構築した。

以上のような処理システムは、データの収集→処理→情報化という流れをすべて含むものである。一連のプログラムを実施するため、昭和58年の日本海中部地震による本震(5月26日)と余震(6月9日、21日)の地震記録を全国の各気象台と測候所から収集し、そのうち合計135成分を数値化し、データベースとして構築した。本研究の特色としては以下のような諸点が挙げられる。

1) 地震データの一連の処理が安価で時間に制限されることのないパーソナル・コンピュータで実施できるように、汎用的なプログラムを開発したこと。

2) 数値計算に当っては1倍強震計の時定数が入力データとして必要となるが、本研究では、アンケート調査を実施することにより、正確なデータを用いたこと。

3) 特定の地震に注目し、パソコンとディジタイザーを用いて多数の記録を数値化し、定量的な解析を実施した例は他にあまり見当たらないこと。

2. 気象庁1倍強震計記録の数値化と各種の補正

2.1 概説 筆者らは、本震発生後の7月初旬から、北海道・東北・関東・中部地域における、各管区・地方気象台および測候所(43観測地点)から、1倍強震計と100倍の電磁式地震計の記録(5月26日の本震 $M=7.7$ 、6月9日の2つの余震 $M=6.1$ と 6.0 、6月21日の最大余震 $M=7.1$)のコピーを入手した。このうち、今回数値化を実施した観測点は28地点であり、本震と余震を合せて計135成分の記録を数値化した。各官署における記録を収集するとともに、強震計の計器特性に関する詳細なアンケート調査を実施した。なお、記録の各種補正に当っては、各観測所での計器の整備状態や定数の経年変化が生ずるため、地震発生日に最も近い日に検定されたデータを採用した。具体的には、固有周期、制振度、振り子のアーム長、摩擦値ならびに各成分間の時間の同時性を確保するために、基準時刻からの各ペンの起動の遅れを調整する時刻量を調べた。

記録の数値化は、京都大学工学部土木工学教室計算機室所有のディジタイザーを用いて行なった。機械式地震計の記録には、零線、紙送りむら、円弧、波形のゆがみ、成分間の時間の同時性、摩擦や計器特性などの各種の補正を施した。ここで、ペンの摩擦力を含めた非線形な運動方程式を解くことにより、記録波形から計器補正を考慮し、かつ摩擦の影響を除いた地動の変位を得た。求めた波形は、チェビシェフ型の等リップル漸化フィルターのうち、特にバンドパスフィルター(2~20秒の範囲)を通して行っている。

2.2 地震記録処理システムの構成 本研究では、16ビットパーソナル・コンピュータ(NEC PC9801)とディジタイザ・タブレット(関東電子機 MODEL-K510)を用いて、地震記録の数値化を実施している。Fig.1は地震記録の処理を行なう際の、機器の構成図を示したものである。本システムは、パソコン本体(CPU)、キーボード、CRTディスプレイ、フロッピーディスクユニット、ターミナルプリンター、XYプロッター、ディジタイザ・タブレットおよびモデムで構成されている。パソコンとディジタイザは、RS-232Cを通してデータを送受信できる。また、数値化データは電話回線を介して大型計算機センターに送り、オンライン処理もできるようにしている。ディジタイザ・タブレットから入力した記録波形の座標値(時刻と振幅を示す)は、CRTディスプレイに図示できる。ただし、数値化データはCRTディスプレイのドット数に対応するように変換し、表示するようにしている。

2.3 数値化 ディジタイザを用いて、日本海中部地震による本震および余震の地震記録の数値化を行った。なお、記録は、読み取り可能な程度に拡大した。ディジタイザにより波形をトレースするために、x、y座標を読み、これをフロッピーディスクケットに入力した後、大型計算機に転送した。また、確認のためプロッターにより記録波形を再生し、再生波形と実測波形を重ね合わせることで、目視で両者の一致度を調べた。なお、不正確な部分については、原則として、数値化をし直すことにした。ただし、記録を読み取る際に、波形が途切れていたり、不明瞭な箇所があるときには、前後の波形の形状から推測した。

2.4 各種の補正

(1) 零線補正

読み取ったN個の点(x_i, y_i)から、時間軸と振幅に対して歪が生じないように零線補正を施すには、以下の手続きを取ればよい。Fig.2(a)より、以下の式が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ Y_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

このとき、次式の $\sum Y_i^2$ が最小となるように、座標変換を行ない、 θ と Y_0 の値を求める。ただし、 \sum は $\sum_{i=1}^N$ を意味する。すなわち、式(3)と(4)が成り立つような解を求めればよい。

$$\sum Y_i^2 = \sum (-x_i \sin \theta + y_i \cos \theta - Y_0)^2 \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\sum Y_i^2)}{\partial \theta} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\sum Y_i^2)}{\partial Y_0} = 0 \quad (4)$$

ここに、 θ が既知であれば、式(4)から Y_0 が得られる。

$$Y_0 = \{-\sin \theta (\sum x_i) + \cos \theta (\sum y_i)\} / N \quad (5)$$

上式を式(3)に代入し、その式を解けば、 θ に関する式として次式が成り立つ。

$$\tan 2\theta = \frac{2 \{ \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i) / N \}}{\sum x_i^2 - \sum y_i^2 - \{ (\sum x_i)^2 - (\sum y_i)^2 \} / N} \quad (6)$$

上式から θ を算出し、これを式(1)と(5)に代入することにより、零線補正に関する式が得られる。

(2) 円弧補正

アームの長さは、有限であるため、記録には無視し得ない円弧の影響がある。そこで、この影響を取り除くために円弧補正を行なった。

Fig.2(b)のように座標をとると、アーム長、中心軸からの回転角、変換前と後のデータの座標を、おのおの、 $l, \theta, (X, Y), (x, y)$ とすれば、これらには、次式の関係が成り立つ。

$$\begin{cases} X = l - l \cos \theta, & x = 0 \\ Y = l \sin \theta, & y = l \theta \end{cases} \quad (7)$$

従って、x、y座標における円弧補正量は、

$$\begin{cases} \Delta x_i = X - x \\ = l(1 - \cos \theta) \\ \Delta y_i = Y - y \\ = l(\sin \theta - \theta) \end{cases} \quad (8)$$

となる。また、記録紙の紙送り速度を V_p とすれば、 Δx_i を時間単位に変換すると、紙送りむらによる時間の補正項として以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} \Delta t_i &= \Delta x_i / V_p \\ &= l / V_p \cdot (1 - \cos \theta) \end{aligned} \quad (9)$$

なお、タイム・マークは水平2成分のいずれかに明記されている。これにより、 V_p は求まるが、紙送りむらがあるため、 V_p が時間的に変化することを考慮して補正した。

(3) l 補正

地震計の振子の復元力が小さく機構がフレキシブルであると、いったん記録ペンが中心線からずれ、中心

線が偏ったり、波形の勾配が一定方向のみに大きくなることもある。このような場合の波形のゆがみの補正法について述べる。

Fig.2(c)のように座標をとると、記録ペンが本来の中心線から α だけ回転しているとすれば、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} X &= \rho - \rho \cos \theta & , & & x &= \rho - \rho \cos(\theta - \alpha) \\ Y &= \rho \sin \theta & , & & y &= \rho \sin(\theta - \alpha) \end{aligned} \right\} \text{-----} \quad (10)$$

従って、 α による補正量 Δx_2 、 Δy_2 は、次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_2 &= X - x \\ &= \rho \{ \cos(\theta - \alpha) - \cos \theta \} \\ \Delta y_2 &= Y - y \\ &= \rho \{ \sin \theta - \sin(\theta - \alpha) \} \end{aligned} \right\} \text{-----} \quad (11)$$

ここで、 Δx_2 を時間単位に変換すると、

$$\begin{aligned} \Delta t_2 &= \Delta x_2 / V_p \\ &= \rho / V_p \cdot \{ \cos(\theta - \alpha) - \cos \theta \} \end{aligned} \text{-----} \quad (12)$$

ところで、 α は、「波形の長さが十分長い場合には、波形の勾配の総和は一般に0に近くなる」という仮定を若干修正した方法を用いて求めた。すなわち、今、任意時間間隔で数値化した記録の*i*番目の点(x_i, y_i)と*i+1*番目の点(x_{i+1}, y_{i+1})($i=1, \dots, N-1, N$: 総データ数)の間の勾配を次式のように S_i とする。

$$S_i = \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) \right\} \cdot \frac{\rho_i}{\rho} \quad \text{-----} \quad (13) \quad \text{ただし、} \rho_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$$

ここで、次式の条件を満足するような α を取束計算により、トライアル・アンド・エラーによって見出した

$$\sum_{i=1}^{N-1} S_i = 0 \quad \text{-----} \quad (14)$$

(4) Cosine補間

以上の各種の補正を施して得られたデータの座標間をCosine補間することにより、任意の時間*t*における地動の振幅*y*を求めた。すなわち、連続する2点(y_i, t_i), (y_{i+1}, t_{i+1})における波形を用いると、次式の近似解が得られる。

$$y(t) = \frac{y_i + y_{i+1}}{2} + \frac{y_i - y_{i+1}}{2} \cos \left(\pi \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} \right) \quad \text{-----} \quad (15)$$

(5) 計器補正と摩擦の影響の除去

本研究では上記の計算を以下の手続きにより行なうことを考えてみた。

機械式地震計では、拡大機構や針先の間摩擦力が働いて振子の運動を止めようとする。この力は、運動の速度には関係せず、ほぼ一定と見られるが、各部分の摩擦力をすべて針先におけるものに引き直し、その力を*R*とする。振子の運動方程式には、 $\pm LR$ (L =振子の先から針先までのアーム長)という項が加わる。すなわち、記録の振れを*y*、地動加速度を \ddot{x} とすると、次式が成り立つ。

$$\ddot{y} + 2h\omega_0 \dot{y} + \omega_0^2 y = V\ddot{x} \pm \frac{VV'R}{M} \quad \text{-----} \quad (16)$$

ここに、 h 、 ω_0 、 V はおのおの、減衰定数、固有円振動数、基本倍率である。

また、 $V' = \rho / H \cdot V$ であり、 $\rho = K / MH$ (相当振子の長さ)、 M 、 H 、 K は、振子部の質量、回転軸と重心間の距離、回転軸まわりの慣性モーメントである。式(16)の右辺における \pm は $\dot{y} < 0$ のとき+、 $\dot{y} > 0$ のとき-をとる。

振子も地面も動いていない場合を考えると、針先は、次の式の*y*の範囲内のどこにでも止まったままでいることができる。

$$\omega_0^2 |y| \leq VV'R/M \quad \text{-----} \quad (17)$$

この|*y*|の最大値*r*を、地震計の摩擦値という。すなわち、固有周期を*T*₀とすれば、次のようになる。

$$r = T_0 \cdot VV'R / 4\pi^2 M \quad \text{-----} \quad (18)$$

摩擦があると、地面が動いても振子が動かないことがある。それは、

$$\frac{VV'R}{M} - \omega_0^2 |y| > V|\dot{x}| \quad \text{-----} \quad (19)$$

のときである。 $\omega_0^2 |y|$ の最大値は $VV'R/M$ (すなわち $\omega_0^2 r$)であるから、 $2VV'R/M > V|\dot{x}|$ のときは、振子が動かないこともあり得る。

式(16)に示す、ペンの摩擦力を含めた非線形な運動方程式を解くことにより、記録波形から計器補正を考慮し、かつ摩擦の影響を除いた地動の変位*x*が得られる。

(6) 帯域フィルターによるノイズの除去

加速度記録から変位波を計算するには、1) 米国で標準的に使用されているTrifunacの方法、2) 周波数領域でのF.F.T.フィルターを用いる方法や、3) 時間領域の漸化式数値フィルターを用いる方法がある。1)の方法は加速度から積分して求めた変位波の零軸に最小自乗法を用いて3次曲線を適用することにより、フ

フィルターを用いて長周期波をカットしている。しかし、この方法では因果律を満たさないような波が出現することが、実験的にも解析的にも証明されている。²⁾ また、2)の方法でも地震の特性によれば、真の変位波が得られないケースもある。例えば、Fig.3は、Ormsbyフィルターを用いて加速度記録の低周波ノイズを除去して求めた地動の変位と観測した実際の変位波を比較したものである。Ormsbyフィルターによると、初動付近の波形が相当に歪み、初動の前には実際にはない波が出現している。このような事例を勘案し、本研究では、1)や2)の方法に比べて波の初動部のきれがよく、実測変位波と計算値との対応が極めて優れており、合理性が既に確認されている3)の手法を用いた。

本研究では、斎藤の論文³⁾を参考にして、チェビシェフ型等リップル漸化フィルターのうち、特にバンドパス・フィルターを適用した。フィルターの振幅特性はFig.4のようである。ただし、ここでは周期範囲を2~20秒に限定している。

2. 5算出した地動の波形の一例 上記の手續により、本震時における森のNS成分の記録を数値化した。ただし、強震計の固有周期=6秒、制振度=8、摩擦値=0.001cm、アーム長=30cmとしている。Fig.5は、原記録、計器補正前の記録および地動の変位・速度・加速度波形について比較したものである。森の原記録には円弧歪の影響が強く出ている。しかし、円弧補正後の波形を見ると、その影響が除かれている様子が理解できる。計器補正後の地動の変位波は、原記録の初動後約2.4分間における記録と比べると、かなり長周期の成分が出現しており、様子が全く異なっている。また、その最大振幅は原記録の振幅値の2.5倍程度となっていることがわかる。

3. 最大変位振幅の簡易算定法 本震時における変位計記録(水平2成分)の最大振幅を A_{max} 、この最大振幅を与える卓越周期を T 、数値化して各種の補正を施した後の地動の最大水平変位(NS, EW成分)を $A_{R, max}$ とする。さらに、気象庁変位強震計の固有周期を T_0 、減衰定数を h とすれば、地震計の振幅特性を補正する係数 $V(T)$ は、次式のようになる。

$$V(T) = \sqrt{\{(T/T_0)^2 - 1\}^2 + 4h^2(T/T_0)^2} \quad (20)$$

なお、ここでは水平成分に着目するので、 $T_0 = 6$ 秒、 $h = 0.55$ とした。

Fig.6では、横軸に T をとり、その T に対し、縦軸に $A_{R, max}/A_{max}$ を \bullet 印で、また $V(T)$ を実線で示している。図からわかるように、地動の最大変位 $A_{R, max}$ は、計器補正係数 $V(T)$ を地震記録の変位最大振幅 A_{max} に乗じた値に完全にはならない。すなわち、 $A_{R, max} = V(T) A_{max}$ とはならず、 $A_{R, max} = (1 \sim 2) V(T) A_{max}$ の関係がほぼ成立していることがわかる。同図は、地動の最大変位振幅 $A_{R, max}$ の予測式として、平均的に $A_{R, max} = 1.5 V(T) A_{max}$ とすればよいことを示唆している。このことは、大地震時に周期6秒以上の波が卓越するとき、1倍強震計の最大振幅 A_{max} や地震記録の卓越周期 T を用いて、変位計最大振幅 A_{max} に計器補正係数 $V(T)$ を乗じた値を、地動の最大変位とみなすことは過小評価につながることを示している。また、変位記録の卓越周期と地動変位の卓越周期が完全に一致しないことも、重要なことである。やや長周期地震動の変位波の卓越周期は、地震の規模と破壊のメカニズム、伝播経路や対象地点の地盤構造などを勘案して決めるもので、地震月報に記されている卓越周期と同等とするのは早計である。

4. 最大地動変位のアテニュエーション 日本海中部地震による本震時の気象庁1倍強震計記録を数値化し、これを計器補正(補正範囲2~20秒)後、変位波形から計算した最大地動の距離減衰特性を示すと、Fig.7のようになる。ここでは、NS成分の結果のみ図示する。最大変位は遠距離になるほど減衰して小さくなるとは限らない。例えば、震央距離が598kmの稚内のNS成分の最大変位は5.2cm、522kmの東京のEW成分で5.05cm、549kmの横浜のEW成分で3.69cm、601kmの館山で2.96cmである。これらに対し半分程度の震央距離に位置する相川のEW、NS成分の最大変位は2.59、2.93cmであって、遠距離の観測点の最大変位の5割になっている。このことは、稚内・東京・横浜・館山などが一般に長周期帯域で揺れやすい性質を持っていることと関係があることを意味する。

Fig.7には、比較のため、現在まで我が国で提案されている、最大変位の主要な予測式(距離減衰式)、すなわち1)後藤・亀田・杉戸⁴⁾、2)建設省土木研究所⁵⁾、3)坪井⁶⁾によるものを、 $M = 7.7$ に対して示している。坪井公式を除き、いずれの距離減衰式も強震加速度記録(SMAC型地震計)から求めたものである。既往の最大地動の予測結果がお互いに異なっているのは、使用したデータの質の違いによる影響ではないかと考えられる。なお、変位を算出する際に用いるフィルター(振動数帯域)が個々の研究者ごとに同一ではないので、これらを考慮しないと厳密な意味では相互に比較できない。図から、本研究で求めた地動最大変位は、後藤らの式(周期7秒以下に注目)から推定した結果と比較的調和している。

5. 強震計のアーム長の変化が地動に及ぼす影響 気象庁1倍強震計のアーム長は水平動で3cm、上下動で2.5cmである。振幅レベルが大きくなると、ペンアームの円弧や零線のずれ・傾斜の影響が顕著になることがある。そこで、地震計のアーム長が不明であるとしたとき、記録上の振幅の大きい箇所、アーム長が最大地動や波形にどの程度影響を及ぼすかを検討してみた。

Fig.8は、本震時における森のEW成分の記録を数値化し、アーム長を20~40cmと変化させたときの、各種の補正後に計算した最大地動をプロットしたものである。縦軸の最大変位・最大速度・最大加速度は、ア

ーム長が30cmとしたときの値で正規化して示している。ここで、地震計の固有周期、制振度、摩擦値は同一にしている。森における水平EW成分の最大速度と最大加速度はアーム長が長くなるほど(20~32cm)激減しているが、それより長いアームに対しては変化がない。一方、最大変位については、アーム長が26cmまでは小さくなりつつあるが、それ以上になると、逆に増大している。森のように、原記録の主要部に比較的短周期成分が卓越しており、計器補正によって地動変位に周期10秒前後の波が出現する状況を考える。このときには、零線ずれとペンアームの円弧補正を施すと、アーム長が短いほど時間の補正量が小さくなるので、短周期成分が卓越する。この短周期成分はやや長周期地動の波形に付随した形で現れている。しかし、アーム長が長くなると、ゆっくりした波が卓越するから、短周期成分は消失してくる。

6. やや長周期帯域における変位型強震計記録の精度の検討 本研究では、日本海中部地震の本震と余震時の1倍強震計記録を用いて、ダイナミック・レンジと周波数レンジの広い、他の地震計の記録と比較することにより、変位型強震計が長周期まで精度よく解析できることを定量的に検討した。以下に示すように、周期2~20秒の範囲における地動の変位波形と加速度応答スペクトルの精度に関して、これだけの広範囲のデータを統一的に比較・検討した研究例は他に見当たらない。

気象庁1倍強震計記録(以下JMAと称する)との比較のため、次の5つの地震計を採用した。すなわち、1)大森式長周期地震計(OMORI);東京大学地震研究所に設置されている、2)村松式速度型強震計(SF101);この地震計は東京測振製で、秋田大学の鉱業博物館(TEG)と秋田市土崎港の運輸省港務土木事務所(TUC)に設置され、5月31日から余震観測が村松と入倉らによって、実施された、3)明石製加速度強震計(ATBS);秋田地方気象台の気象庁1倍強震計が設置されている同じ台上に加速度計が設置され、余震観測が吉川・入倉によって行なわれた、4)明石サーボ型加速度強震計(JEP-4A);岡田らにより、本震観測は東京都中野区野方で、余震観測は秋田大学鉱業博物館で実施された、5)動コイル型加速度計(PK130);新潟地方気象台において、加速度計による余震観測が工藤らによって実施された。地震計は速度帰還型である。

Fig.9は、東京管区気象台における気象庁1倍強震計と大森式長周期地震計から計算した、地動の変位波(最大余震におけるEW成分)を比較したものである。地震計のOMORIから求めた最大変位振幅はJMAによるものよりも若干大きくなっている。観測点は同じではないが、細かい短周期側のリップルを除外、変位波の相や卓越周期は一致している。また、周期10秒付近で振幅が大きくなることも共通であり、全体として長周期側で振幅が大きい傾向は類似している。両記録による変位波はほぼ完全に一致しており、2つの地震計の特性差による誤差は無視できると考えられる。

6月21日の最大余震において、JMAの1倍変位計と加速度型強震計PK130の両者により、新潟地方気象台で得られた記録の加速度応答スペクトル($h=2\%$, NS成分)が、Fig.10である。加速度応答スペクトルは相互に比較的似た特性を示している。このことは、気象庁1倍強震計記録が種々の観点から工学的に利用できることを我々に提起している。

2つの余震について、変位・速度・加速度型地震計から求めた秋田の加速度応答スペクトル($h=2\%$)の例を、Fig.11に示す。まず、6月9日の応答スペクトルを見ると、秋田地方気象台の加速度計ATBSによるスペクトルの固有周期10秒程度以上を除けば、全体として地震計の種別により、極端に加速度応答が異なることはない。ATBSによる応答が約10秒以上で異常に大きくなっているのは、記録器に問題があったのか、あるいは記録の継続時間も大いに関与しているのではないかと考えられる。一般に、一部の帯域を除けば、速度・加速度型強震計から求めた応答スペクトルの方がJMAの1倍変位計より求められるものよりも大きめの値を与えている。速度型地震計による秋田大(TEG)と土崎港(TUC)における結果には少し開きがある。両者の波形もあまり似通っていなかったため、これは地盤条件の差に起因していると推察される。なお、秋田大のSF101とJEP-4Aの2つの地震記録による加速度応答は比較的似ていた。

次に、最大余震の応答スペクトルについて検討する。この場合、ATBSによる加速度応答は、水平2成分の周期5~10秒の帯域においてJMAによる応答よりもかなり小さくなっている。しかし、この帯域を除けば、JMAとATBSによる応答はほぼ調和していると言える。また、概略的に言うと、NS, UD成分に対する、土崎港(TUC)の加速度応答は10秒以下でJMAによる応答よりも大きく、逆に秋田大(TEG)の応答は5~8秒以上でJMAによるものよりも小さくなっていた。TUCでの速度型強震計SF101とJMAの変位型強震計による加速度応答の差は、明らかに地盤条件の差だと考えられる。

7. SMA C型加速度計と気象庁変位型強震計記録の比較 ここでは、同一地域にあって近接した地点で得られた、気象庁1倍強震計記録とSMA C-B₂型加速度記録⁷⁾から計算した加速度応答スペクトル($h=2\%$, 周期範囲2~20秒)を比較することにより、両者の一致度を検討した。観測点としては、函館・室蘭・酒田・秋田を選んだ。なお、函館ではERS-C地震計が使われている。

本震(5月26日)と余震(6月9日M=8.1, 6月21日M=7.1)時の加速度応答スペクトルの一例を示したのが、Fig.12である。図示していない他の結果を含めて考察すると、5月26日における函館UD成分の固有周期5秒と10秒、同じく室蘭NS成分の固有周期5~10秒、EW成分の10~20秒、八戸UD成分の固有周期3~10秒、6月9日における秋田EW成分の2~10秒ほどの範囲で、2つの地震計による加速度応答がおおむね同程度の値をとるものがある。しかし、一般に、SMA C型強震計記録から求めた加速度応答ス

クトルの方が気象庁1倍強震計記録から求めたものよりも常に系統的に大きく、その比は数倍に達している。また、ERS地震計が設置されている函館に代表されるように、両者の比が10倍強になることもある。

気象庁1倍変位計と加速度強震計の両者による加速度応答スペクトルの特徴としては、1)同一の地震記録でも、成分によれば比較的良好な特性を示したり(例えば、本震時の八戸で得られた応答は、水平成分の対応が悪いが、UD成分は固有周期3~10秒ほどの範囲で比較的一致している)、2)同一の地震の1つの成分(例えば、6月9日の秋田のEW成分)であっても、詳細にみると、固有周期のある帯域では相互に比較的良好一致しているが、その他の周期範囲では後者の地震計によるスペクトルの方が前者のスペクトルよりも常に大きくなっていることが挙げられる。

Fig.12には、土崎港(TUC)の同一地点で得られたSMAC型加速度計と速度型地震計SF101および1倍強震計から得られた応答も比較している。TUCとJMAの地点は約4kmほど離れている。従って、SF101とJMAの応答値は短周期側で異なった値を示す。しかし、長周期になれば、波動はごく表層の地盤に左右されず、深い地盤の影響を受ける。このことより、15秒以上の応答は比較的良好なものとなっている。本来ならば、SMACとSF101の応答は同じ値を示すのが理想的である。しかし、周期6秒以上において、両者の応答はかなりかけ離れており、加速度計の信頼度の低いことがわかる。この原因として、SMACのペンと記録紙との摩擦の影響が考えられている。⁸⁾

以上を総合的に判断すると、従前から指摘されているように、SMAC型の工学式加速度強震計は周期数秒以上の長周期成分を評価する際、必ずしも十分な精度をもたないことがわかる。従って、周期5秒程度以上の長周期構造物の耐震性を検討するに当たっては、SMAC型強震計記録をそのまま使用するようなことは極力避ける必要がある。

8. 結論 (1)1983年日本海中部地震による本震と余震について、合計135成分の気象庁1倍強震計記録を数値化した。地震計の時定数についてはアンケート調査を実施した。気象庁1倍変位強震計記録の最大振幅に計器補正係数を乗じて、地動の最大変位を推定する式は、真の地動変位を $1/(1\sim 2)$ あるいは平均的に $1/1.5$ ほど過小評価することがわかった。

(2)同一地点あるいは比較的近接した位置で得られた、気象庁変位型強震計記録と、大森式長周期地震計、周波数レンジの広い速度型および加速度型強震計記録を比較することを試みた。観測点としては東京・新潟・秋田を採用した。地震計記録より求めた地動の変位波形(周期2~20秒)と加速度応答スペクトル($h=2\%$)は、相互に一致した特性を示した。すなわち、周期10秒前後(5~15秒)の地震動解析を実施する際、変位型強震計記録は工学的に十分使用可能であるといえる。

(3)これまでに蓄積が多いSMAC-B₂あるいはERS-C型加速度強震計記録が、やや長周期帯域においてどの程度地震動特性を正しく捉えているかを検討するため、変位型強震計記録と比較した。対象地点は、函館・室蘭・八戸・酒田・秋田である。加速度応答スペクトルについて相互に比べると、ある周期帯域でおおむね調和していることもあるが、全体としてSMAC記録による応答の方が数倍~10倍程大きなスペクトル値を与えた。

謝辞：日本海中部地震時における気象庁1倍強震計記録のコピーの送附や時定数のアンケート調査を快く引き受けて頂いた、気象庁をはじめとする各地の気象台・測候所の方々にお礼を申し上げます。本研究で用いた強震記録は、東京大学地震研究所の島崎邦彦助教授と工藤一嘉助手、京都大学防災研究所の吉川宗治教授と入倉考次郎助教授、北海道大学工学部の太田裕教授と岡田成幸助手、岐阜大学教育学部の村松郁栄教授ならびに運輸省港湾技術研究所の御厚意により提供されたものである。ここに記して深謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 山田善一・野田茂・富本信：日本海中部地震時の気象庁1倍強震計記録に基づく周期10秒前後の地震動特性、京都大学防災研究所年報、第28号、B-2、昭和60年4月。
- 2) 武尾実・阿部勝征：漸化フィルター法による加速度記録解析、地震、第2輯、第34巻、第3号、pp.351~364、1981。
- 3) 斎藤正徳：漸化式デジタル・フィルターの自動設計(技術報告)、物理探鉱、第31巻、第4号、pp.112~135、昭和53年8月。
- 4) 後藤尚男・亀田弘行・杉戸真太：地震動の最大地動予測におけるN値を用いた地盤条件の評価法について、土木学会論文報告集、第317号、pp.69~78、1982年11月。
- 5) 建設省土木研究所振動防災部振動研究室：最大地震動および地震応答スペクトルの推定法——(その4)最大加速度、速度、変位および加速度応答スペクトルの距離減衰式の再検討——、土木研究所資料、第1993号、昭和58年3月。
- 6) 坪井忠二：地震動の最大振幅から地震の規模Mを定めることについて、第2輯、第7巻、pp.185~193、1954。
- 7) 倉田栄一・副原哲夫・野田節男：昭和58年(1983年)日本海中部地震の港湾地域における地震記録、港湾技研資料No.458、運輸省港湾技術研究所、1983年7月。
- 8) 土岐憲三・中瀬仁：SMAC強震計における記録系の摩擦の影響、土木学会第40回年次学術講演会概要集第1部、pp.801~802、昭和60年9月。

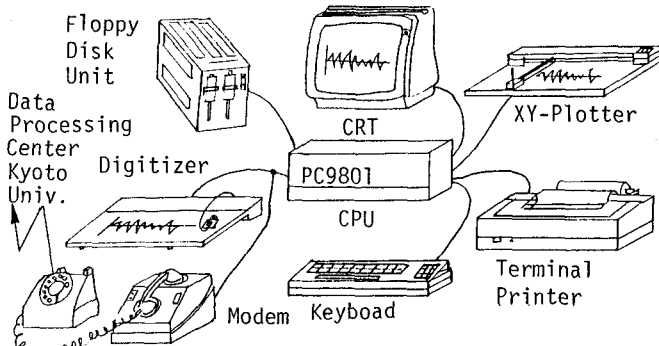


Fig. 1 Record Digitizing System and Routine Processing of Strong Earthquake Ground Motions Using Personal Computer

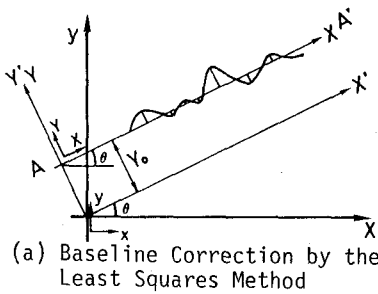
Observed Displacement



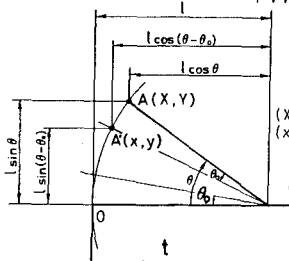
Displacement Calculated from Ormsby Filter



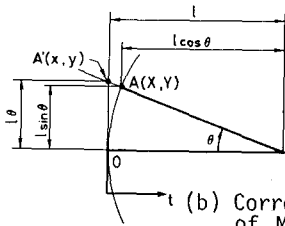
Fig. 3 Comparison of Actual Ground Displacement with One Calculated from Ormsby Filter



(a) Baseline Correction by the Least Squares Method



(c) Correction for Deflection and Ramp of Rotation Axis of Arm from True Zero-line



(b) Correction for Finite Length of Mechanical Arm

l : length of arm
 (X, Y) : data point
 (x, y) : desired point after correction for finite length of mechanical arm

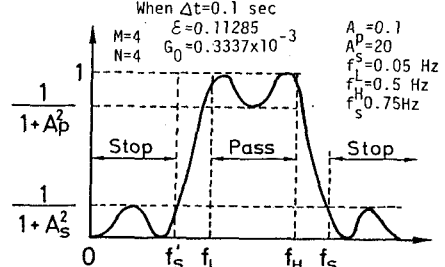
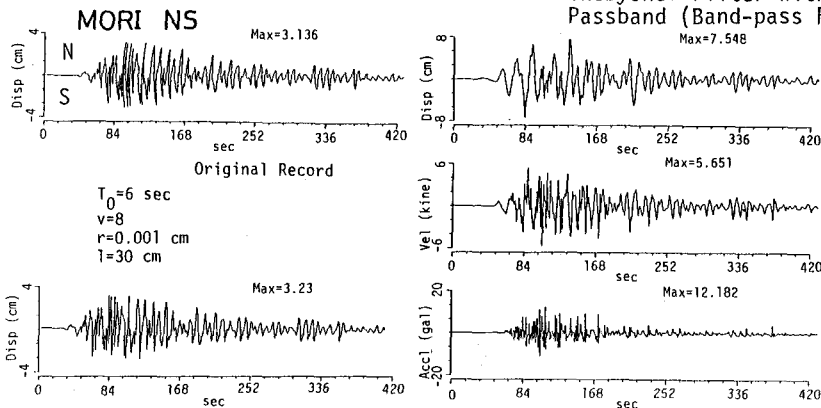


Fig. 4 Frequency Characteristics of Chebyshev Filter with Equiripple Passband (Band-pass Filter)



Baseline correction, paper speed correction, correction for effect of arc and correction for inclination of mechanical arm

Instrumental correction and band-pass filtering

Fig. 5 Example of Seismogram Corrections at Mori Station of JMA due to Mainshock

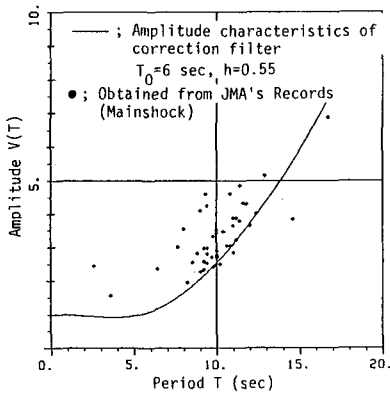


Fig. 6 Analytical Check on Accuracy of Simplified Estimation Method for Maximum Ground Displacements

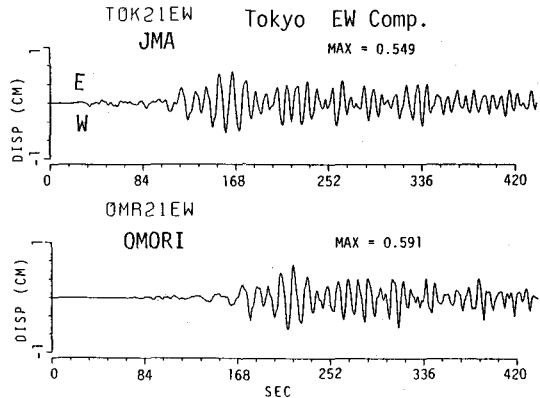


Fig. 9 Comparison of Displacement Waveform of Ground Motion Calculated from JMA Record of Large Aftershock with One from Omori's Long-period Seismograph at Tokyo

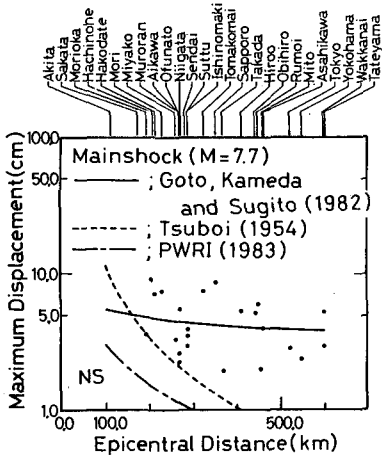


Fig. 7 Comparison of Attenuation of Peak Values of Ground Motion Displacements with Corresponding Curves Obtained from Japanese Empirical Relations

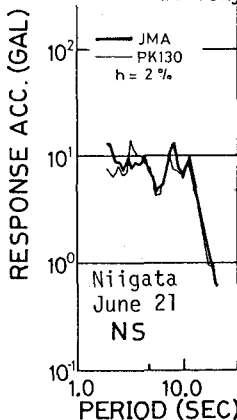


Fig. 10 Acceleration Response Spectra at Niigata JMA

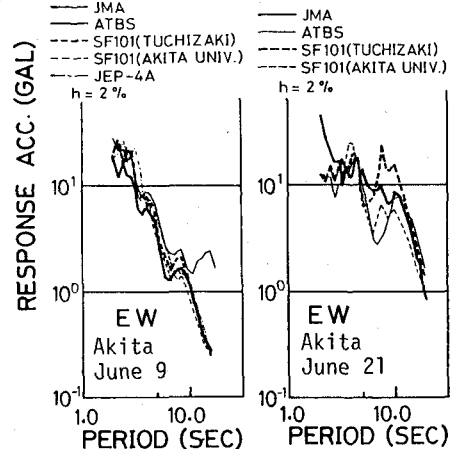


Fig. 11 Comparison of Acceleration Response Spectra Obtained through JMA Records with Those Computed from Some Other Strong Motion Seismographs at Akita

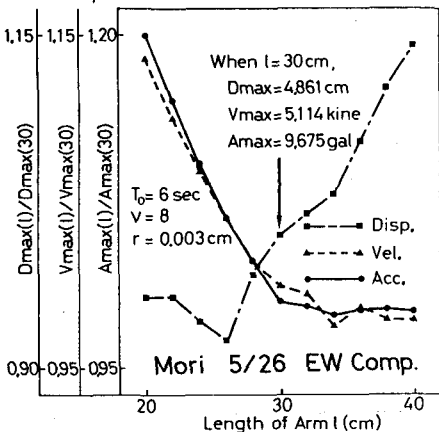


Fig. 8 Influence of Finite Length of Mechanical Arm on Maximum Ground Motions at Mori Station of JMA

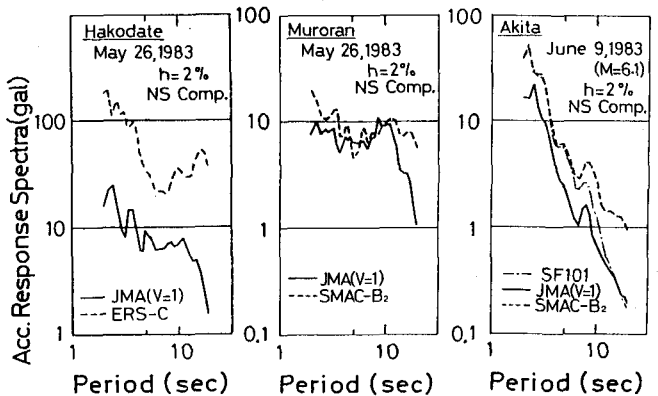


Fig. 12 Comparison of Response Spectra Computed from Records of JMA-type Strong Motion Seismographs with Those of SMAC or ERS Records at Near Sites