

(17) 昭和58年日本海中部地震による気象庁変位強震計記録の定量的解析

京都大学工学部 ○野田 茂 山田善一
春本鐵工所 富本 信

1. 緒 論 最近、大型石油タンク、長大橋梁、超高層ビルなど固有周期が5秒以上にも達する構造物が、建設されるようになってきた。SMAC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。本研究の目的は、1983年の日本海中部地震時のやや長周期帯域(5~15秒)における地震動の特性を検討することである。ここでは、前述したことを勘案して、気象庁1倍強震計記録を用いることにした。

2. 気象庁1倍強震計記録の数値化 著者らは、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28日の本震 $M=7.7$, 6月9日の2つの余震 $M=6.1$ と 8.0 , 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。各管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、振子部のアーム長、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、チェビシェフ形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)を通してある。

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。

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

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

図1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 $V(T)$ に乗じた値を、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、図2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。

図2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, 2) 建設省土木研究所, 3) 坪井によるものを、 $M = 7.7$ 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 (SMA C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。

図3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てみる。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、他の強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湾土木事務所(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、余震記録が吉川・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。

図4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けば、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、図5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、図6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。

本震（5月26日）と余震（6月9日M=6.1、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、図7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ペ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、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よく似た特性を示したり（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）同一の地震の一つの成分（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よく一致しているが、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めになっていることが挙げられる。

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、SMA C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、SMA C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/（1～2）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SMA C-B₂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SMA C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都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。

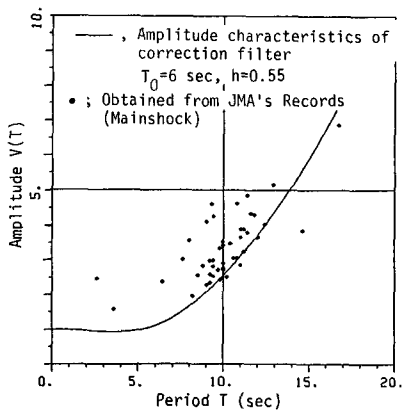


図1 本震時の地動最大変位と変位強震計の最大振幅値の上

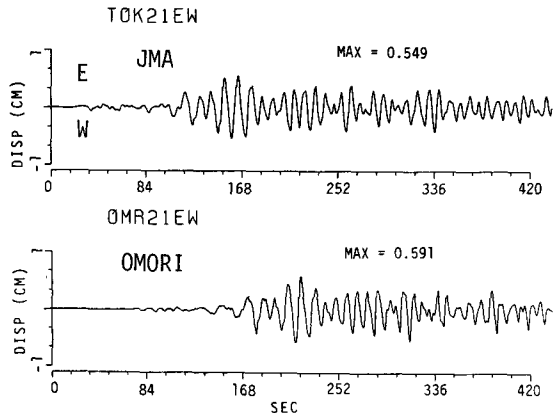


図4 最大余震に対する東京での変位強震計と大森式長周期地震計の記録から求めた変位波(EW成分)

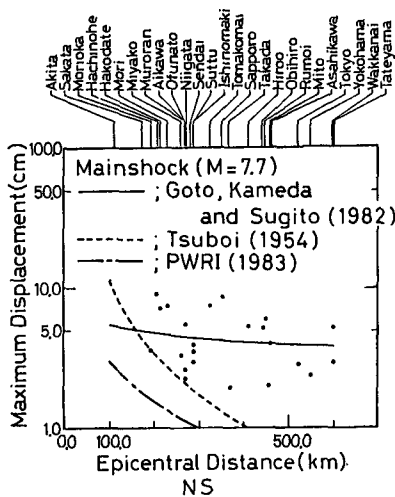


図2 本震時の地動変位(NS成分)の距離減衰

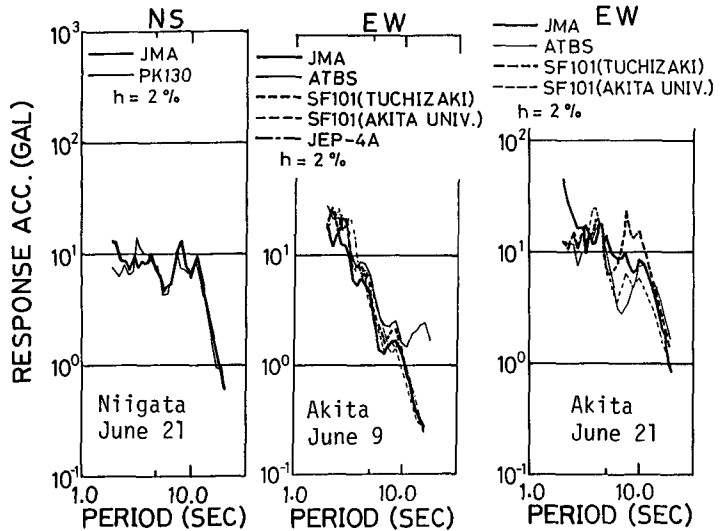


図5 変位強震計と加速度計PK130から求めた新潟の加速度応答スペクトル(h=2%)

図6 変位強震計及び周波数・タイナックレンジの広い速度・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%)

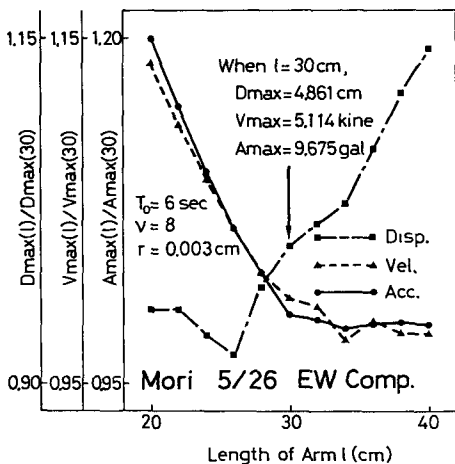


図3 変位強震計のγ-L長の変化が最大地動(震のEW成分)に及ぼす影響

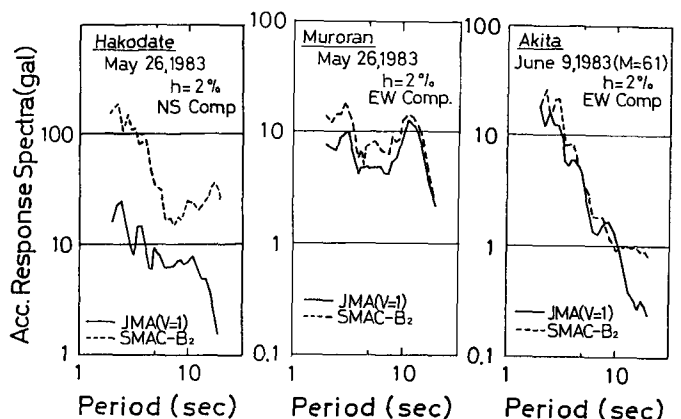


図7 SMAC B2型加速度計と変位強震計の記録から得た加速度応答スペクトル(h=2%)