

(12) 各種地震計記録の長周期成分の信頼度に関する 定量的な検討

京都大学大学院 学生員 岡市 明大

京都大学工学部 正員 山田 善一 野田 茂

1. まえがき 構造物が大型化する現在、合理的でかつ十分な耐震対策を施すためには、長周期帯域における地震動特性を解明することが必要不可欠である。そして、地震計記録から多くの工学的情報を引き出す際には、記録精度に対する正しい認識がなくてはならない。本研究は、各種の地震計記録の長周期帯域(2~20秒)における信頼性を、非常に高い精度をもつ油圧式の振動台を用いて行った加振実験の結果より検討するものである。具体的には、確かな信頼性がある差動トランス型変位計の測定値を真値(基準波)とし、これと他の計器の記録とを目視によって、また、SN比、コヒーレンスや相互相関数などの定量的な尺度によって比較する。

2. 加振実験の概要 実験装置は、Fig.1のように、長周期振動台と加速度および変位の計測システムから構成されている。同一振動台上に各種の計器を同時に設置し、実地震波の最大振幅をコントロールして加振した。加振方向は水平一方向とした。使用した振動台、振動台の挙動を計測する計器、検討対象とした地震計、入力波は以下の通りである。

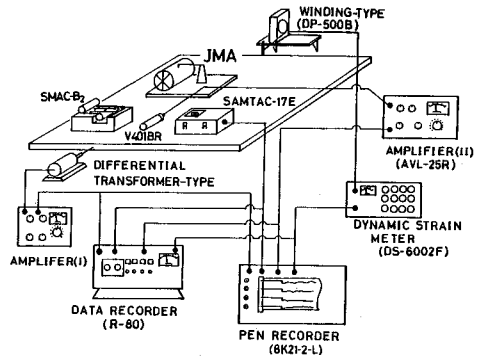


Fig.1 Diagram of the Experiment.

【振動台】 (財) 電力中央研究所所有の上下動・水平動連成振動台

【計器】 差動トランス型変位計：0~10Hzの間でほぼフラットな特性を有している。各種地震計との比較検討に当たって、この計測値をそのまま振動台の変位と見なす。

巻込型変位計(東京測器製作所製)：DP-500B と呼ぶ。

以上2つの変位計を振動台とは縁を切った固定面に設置し、振動台の挙動を計測した。

52C型の気象庁1倍強震計(勝島製作所製)：JMAと呼ぶ。

以上変位計

デジタル式サーボ型強震計(東京測振製)：SAMTAC-17Eと呼ぶ。

SMAC-B₂型強震計(明石製作所製)：SMAC-B₂と呼ぶ。

アナログ式サーボ型高振動数用振動計(明石製作所製)：V401BRと呼ぶ。以上加速度計

【入力波】 1983年の日本海中部地震時に各気象台あるいは測候所で観測され、長周期(10秒前後)波の卓越したJMA記録を数値化したもの4波を用いた。すなわち、八戸・森・室蘭・苫小牧の記録のNS成分である。実験番号は、おのおの、頭部にH、MO、MR、Tの記号を付し、続くAiで入力最大振幅i cmを示す。ただし、AOと表記してあるのは原波形のまま入力したことを示し、末尾のSはJMAが振り切れたことを示す。

各記録には、必要に応じて計器補正などの各種の補正を施した。差動トランス型と巻込型変位計の変位記録から速度と加速度波を得るには、高速フーリエ変換を利用した微分の操作によった。JMAについては、1自由度系の運動方程式より、時間領域において加速度波が求められる。そして、SAMTAC-17E、SMAC-B₂とV401BRの加速度記録と同様に記録を線形加速度法によって積分し、変位と速度波を求めた。本研究では、2~20秒の周期帯域の波だけを抽出するために、チェビシェフ型の漸近式デジタルフィルターをかけた。フィルタリングの能率は、周波数毎の通過帯と遮断帯の波の振幅に関係したパラメーター(A_pとA_s)によってコントロールされる。ここでは、記録のSN比から、A_pとA_sの最適値を決めた。すなわち、A_p=0.1, A_s=40とした。

3. 各種地震計の記録精度の検討方法 まず、目視により、差動トランス型変位計の記録波形と他の計器の記録波形を変位・速度・加速度について各々比較した。解析に必要な記録精度すなわちSN比は、長周期(2

～20秒)帯域での性能を評価する項目(記録の最大振幅、分解能、エリアジング、低周波遮断特性、換振器の特性)から理論的に決まる¹⁾。そこで、定性的な議論だけでなく、定量的な評価基準を用いて工学的に利用する立場から、各種地震計の記録精度を検討した。すなわち、定量的な評価基準には、①最大振幅の比、②エネルギーの比、③エネルギーの残差、④相互相関誤差関数、⑤フーリエスペクトル、⑥コヒーレンス、⑦SN比を採用した。このうち、2つの波形間の各周波数毎の線形性(波形のゆがみ)の程度を表すコヒーレンスは非常に有益な尺度と考えられる。コヒーレンスの算定法は文献2)に従うとし、以下の点に留意した。なお、③と⑥は文献2)と異なる手続きをとった。

- ③ 既往の理論的な方法ではコヒーレンスが常に1と求められてしまう。そこで、Parzenウィンドーを用いて、スペクトルの平滑化を行った。
- ⑥ 各種地震計の記録波形に時間のずれがあると、コヒーレンスは過小評価になるので、前もって相互相関関数の値が最大になる時間だけ波形をずらした。
- ⑦ 独立な波形でも、コヒーレンスのアンサンブル平均値が零にならないという問題に対し、改良化された算定法²⁾を用いて処理した。

4. 波形の再現性の検討(目視および3.の①～④による)

一例として、Fig.2に、MOAO地震波の振動台への入力に対して得られた差動トランス型変位計と各種地震計の変位波形を示す。

JMAの変位計と差動トランス型変位計の絶対時刻は同期していない。両者の変位波を重ね合わせると、最大振幅の違いは見られるものの、記録の始動部からコーダ部全体に対して、細かいリップルを含めた波の相は実によく一致している。周期20秒程度を遮断周期に設定しておけば、計器補正の効果が適正であることがわかる。

SAMTAC-17Eの変位波形には、差動トランス型変位計記録に比べて、1)長周期の波が卓越しており、最大振幅はかなり過大である、2)振動台入力波形の始動部ならびに最強部以降のコーダ部に長周期のghost waveが出現している。このようなノイズ波が換振器や記録装置のどの段階で混入したのか、現時点ではそのメカニズムを明確にできない。実際の地震観測態勢下において、波形のゆがみがどのように現れるかは、今後解明されねばならない問題である。

SMAC-B₂の最大振幅は、差動トランス型変位計の基準記録振幅よりも若干過大であるが、両波形の形状に大差はない。加速度振幅の小さい長周期成分は、SMACのようなアナログ式強震計では誤差に埋もれてしまいがちである。しかし、記録性能が比較的良好だった原因としては、1)振動台を変位制御でコントロールし、入力波形に長周期成分が多く含まれていたため、SN比が上がったこと、および2)分解能の高いディジタイザを用いて、記録の読み取りを慎重に行ったことなどが考えられる。波形をさらに改善するには、土岐らの提案した補正³⁾を実施する必要がある。

5. フーリエスペクトルの検討

一例として、Fig.3には、Fig.2に対応する記録波(MOAO)における加速度フーリエ振幅スペクトルを示す。計器補正などの処理は実施されている。なお、0.5Hz以上および0.05Hz以下の振動数領域のスペクトルは、本質的にはノイズ波に起因している。従って、ここでは紙面の都合上

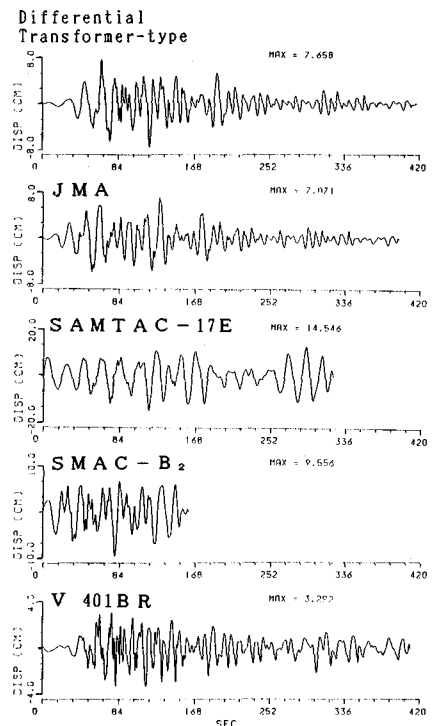


Fig.2 Typical example of displacement waveforms (MOAO).

議論しない。

差動トランス型変位計記録のサンプリング間隔は0.02秒、JMAのそれは0.1秒であった。サンプリング間隔の相違により、両者の加速度フーリエスペクトル(2~20秒)の形状に多少の差は認められるものの、大局的にはよく対応している。JMAのフーリエスペクトルは、約0.18~0.5 Hzの帯域で若干過小に評価される傾向にある。

SAMTAC-17Eの加速度フーリエスペクトルは、周期2~約10秒において、差動トランス型変位計のものとの相関性が高い。しかし、Fig.3の波形からして、フーリエ位相スペクトルの再現性のよくないことが予想される。約10秒あたりから長周期側において、両者の形状に差が目立ち始め、SAMTAC-17Eのフーリエスペクトルは長周期領域で増大する傾向にある。一方、SAMTAC-17Eは短周期側の感度がよく、分解能からして0.5Hz以上のノイズ波は解析に十分耐えうるということがわかる。

SMAC-B₂の加速度フーリエスペクトル(2~20秒)は差動トランス型変位計のものをかなり忠実に再現していることがわかる。加振実験によるSMAC-B₂原記録の最大振幅(1.26mm)はそれほど大きくなかった。もし、入力レベルがもっと大きくかつ長周期の成分が卓越しておれば、長周期側のSN比はより高くなる。本結果は、このような場合、適切な補正を施せば、SMAC-B₂の記録は長周期域でもかなり信頼できることを示唆しているものと言える。

6. コヒーレンスによる精度の定量評価 異なる地震波に対して、差動トランス型変位計と各種地震計記録のコヒーレンスを求めたのがFig.4である。各計器とも、コヒーレンスは変位波と加速度波について検討した。変位波であれ、加速度波であれ、これらの波形のコヒーレンスは周期とともに同一の挙動を示すことが望ましい。このことは、強震計が変位(加速度)変換に耐え得るSN比を有しておれば、当然実現されるべきことだからである。しかしながら、Fig.4に示すように、この条件を満足する地震計はJMAだけである。SAMTAC-17EやSMAC-B₂のコヒーレンスの傾向は、変位波と加速度波で異なっている。

Fig.4(a)のJMAのコヒーレンスは、変位波および加速度波において、周期約5.5秒以上でかなり高い値を示している。しかし、短周期になるとともに、コヒーレンスの値は減少している。この原因としては、1)記録紙上では長周期成分が卓越していて、ごく短周期波は顕著でなく、従ってSN比が小さくなること、2)Fig.2からわかるように、短周期波の位相を合わせる事が難しいこと、および3)短周期の成分は数値化の際に精度上読み取りが困難なことがあげられる。いずれにしても、1倍強震計は、地震動の長周期成分を評価する際に、工学上実用に意義を有するものと考えられる。

Fig.4(b)に示すSAMTAC-17Eのコヒーレンスよ

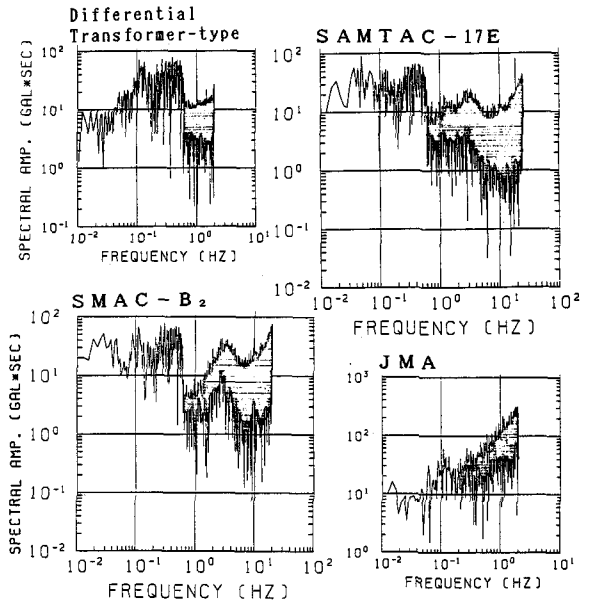


Fig.3 Fourier spectrum (MOA0).

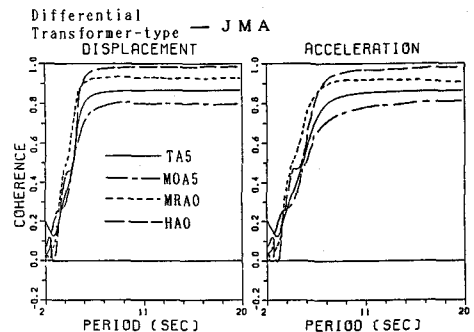


Fig.4(a) Coherence function estimates.

り、1)地震波の種類に係わらず、加速度波の方が変位波よりも相関の程度が大きい、2)例外を除いて、長周期になるとともにコヒーレンスが小さくなる右下がりの傾向が明瞭であることがわかる。解析に必要な記録精度-S/N比は入力地震動のスペクトルとも密接な関係がある。変位変換にも耐え得る標準的な仕様を考えれば、SAMTAC-17Eは少なくとも周期6秒くらいまでの成分を精度よく記録できると言える。

HA14Sのコヒーレンスを除いて、他の地震波によるSMAC-B₂加速度波のコヒーレンスの値が変位波のものよりも大きいという傾向は、SAMTAC-17Eのときと同じである。TA12S、MRA14SとMOA12Sの加速度波のコヒーレンスの算定値は0.9以上を示している。しかも、約5秒以下の周期帯域とMOA12Sの結果を除けば、変位波の相関の程度は高い。

7. あとがき 本研究で得られた成果を列挙すると、以下ようになる。

(1) 振り切れの生じない範囲において、JMAは概して長周期帯域まで波を良く再現していた。コヒーレンスの値は約5.5~20秒の範囲において、0.8以上の値を示しており、かなり信頼度の高いことがわかった。約2~5.5秒の帯域で、フーリエスペクトルは、数値化などの誤差に伴うノイズのために、差動トランス型変位計のそれよりも過小になる傾向があった。総じて、JMAの記録は、長周期地震動の評価に当たって、工学的価値の高いものと言える。しかし、振り切れた場合には、真の波の推定法が要求される。

(2) SAMTAC-17Eの長周期帯域における記録精度はそれほど期待できない。加速度記録から求めた変位波形は、差動トランス型変位計のそれに比べて長周期のghost waveが強調され、平均的に1.7倍も過大になった。フーリエスペクトルは、10秒ほどより長周期帯域において、差動トランス型変位計のそれよりもかなり過大になった。コヒーレンスの値は周期約5.5秒において0.7~0.8であり、これ以上の長周期帯域では急激に減少していることなどから、信頼できる範囲は約5~6秒程度までと考えられる。

(3) 土岐らによれば、SMAC-B₂は、長周期帯域において、記録精度に問題があるはずである。確かにその傾向はあるが、記録の数値化を慎重に行いかつSMACノイズをいくぶん取り去っているせいか、八戸の記録を除いて変位波の再現性は高く、コヒーレンスの値は0.7以上とかなり良い結果が得られた。特に2~5秒の比較的短周期側では、加速度波のコヒーレンスの値が0.9を越えており、かなりの一致度が見られた。最大振幅は差動トランス型変位計のそれに比べて若干過大になっており、土岐らの提案した補正³⁾を実施する必要がある。

謝辞 実験の実施に際し、振動台は(財)電力中央研究所から、1倍強震計は(株)勝島製作所から、SMAC-B₂型強震計は本学工学部交通土木工学教室の路線施設講座から借用した。SMAC-B₂型強震計の記録の数値化は通称SMAC-Readerと呼ばれる装置(東京大学地震研究所所有)を用いて行った。実験を進めるに当たっては多くの方のご協力を頂いた。各位にお礼を申し上げる次第である。

[参考文献] 1)岡田成幸:日本建築学会論文報告集,第339号,pp.45~56,昭和59年5月。第355号,pp.60~69,昭和60年9月。2)川上英二・佐藤靖彦:構造工学論文集,Vol.32A,pp.749~762,1986年3月。3)土岐憲三・澤田純男・中瀬仁・杉山和久:京都大学防災研究所年報,第30号B-2,昭和62年4月。

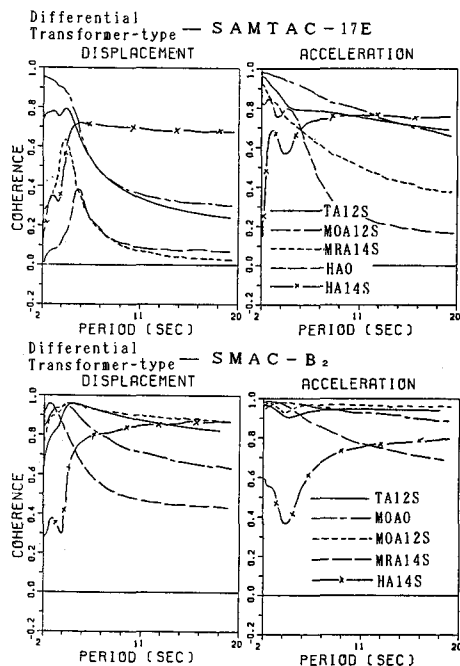


Fig.4(b) Coherence function estimates.