

港湾空港技術研究所 資料

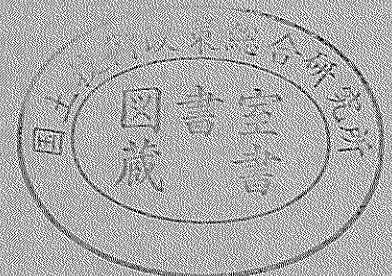
TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1019 June 2002

港湾地域強震観測年報（2001）

深澤	清尊
佐藤	陽子
野津	厚
菅野	高弘

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	2
1. はじめに	4
2. 観測網と観測機器	5
2.1 観測網	5
2.2 強震計の点検	5
2.3 観測地点	5
2.4 強震計	6
2.5 基礎と小屋	14
3. 記録の保管まで	15
4. 記録のデジタル化	15
4.1 デジタル化装置	15
4.2 デジタル化	16
5. 記録の補正	17
5.1 固定線補正	18
5.2 区分的ゼロ線補正	18
5.3 円弧補正	19
5.4 記録紙送りの立ち上がり補正	19
5.5 平滑化	20
5.6 時間間隔補正	20
5.7 ERS-F, G, GV型, SMAC-MDU型強震計の記録の場合	20
6. 予備的解析	20
6.1 フィルタリングと積分の方法	20
6.2 計器特性補正等のためのフィルタ	20
6.3 SMAC-B2相当フィルタ	22
6.4 積分用のハイパスフィルタ	23
6.5 予備的解析のアウトプット	25
7. まとめ	25
参考文献	26
強震観測担当者(2001年1月~12月)	28

港湾地域強震観測年報 (2001)

深澤 清尊*
佐藤 陽子**
野津 厚***
菅野 高弘****

要 旨

1962年より実施されている港湾地域強震観測においては、2001年12月31日現在、5978の強震記録が蓄積されるに至っている。このうち、2001年には214の強震記録が得られている。強震計の台数としては、2001年12月31日現在、97台の強震計が60港に設置されており、設置状況としては、65台が地盤上に、28台が地中に、4台が構造物上に設置されている。本強震観測網では、機械式アナログ記録方式のSMAC-B2型強震計及び電気式デジタル記録方式のERS-F、-G、-GV型強震計、同じく電気式デジタル記録方式のSMAC-MDU型強震計の3種類の強震計が使用されている。

本資料は、2001年に港湾地域強震観測網で得られた記録について報告するものである。得られた記録は港湾毎に分類され、地震諸元、記録番号、最大加速度等とともに付録CDの強震観測表にまとめられている。強震観測表の地震諸元は、気象庁発行の「地震・火山月報(カタログ編)」および「全国震源データ」に基づいている。また、強震記録の記録番号は、各観測地点から記録が送られてきた順番に付けられており、記録の分類として、頭文字「S」で始まる記録はSMAC-B2型強震計で得られた記録、「F」はERS-F、-G、-GV型強震計で得られた記録、「U」はSMAC-MDU型強震計で得られた記録をそれぞれ示している。強震観測表にまとめられているすべての記録のデジタルデータを付録CDにCSV形式で収録している。最大加速度が20Galを越える記録については加速度波形を画像ファイルの形で付録CDに収録している。また、最大加速度が50Galを越える比較的大きな記録については、加速度波形に加え、速度波形、変位波形、応答スペクトル、フーリエスペクトル、水平面内の加速度・速度・変位の軌跡も画像ファイルの形で付録CDに収録している。

2001年における港湾地域強震観測は、以下に示す諸機関の協力の下に実施された。

国土交通省港湾局 国土交通省地方整備局 国土交通省北海道開発局 内閣府沖縄総合事務局
国土交通省国土技術政策総合研究所 東京都港湾局 静岡県港湾総室 宮崎県港湾課 大阪市港湾局

本年報の作成は、各観測地点での強震観測担当者の努力に負うところが非常に大きい。担当者各位に敬意と謝意を表すとともに、各観測地点で実際に強震計の点検ならびに記録の取扱いに携わった方々の氏名を巻末に掲載する。

キーワード： 地震、港湾地域強震観測、数値化加速度記録、応答スペクトル

* 地盤・構造部 構造振動研究室
** 科学技術庁重点研究支援協力員
*** 地盤・構造部 主任研究官
**** 地盤・構造部 構造振動研究室長
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
Phone:0468-44-5058 Fax:0468-44-0839 E-mail: fukazawa@pari.go.jp

ANNUAL REPORT ON STRONG-MOTION EARTHQUAKE RECORDS IN JAPANESE PORTS (2001)

Kiyotaka FUKAZAWA*
Yoko SATO **
Atsushi NOZU***
Takahiro SUGANO ****

Synopsis

Since 1962, strong ground motions and earthquake responses of structures have been observed in the major ports in Japan. By the end of December 2001, 5978 accelerograms had been accumulated and analyzed at the Port and Airport Research Institute.

The strong-motion earthquake observation network in Japanese ports consists of 97 strong-motion accelerographs installed at 60 ports as of December 2001. 65 accelerographs out of 97 are installed on ground surface, 28 accelerographs are in ground by using bore-hole and the rest 4 are on structures such as quay walls. In the network, three types of accelerographs have been used, namely the SMAC-B2 accelerograph, the ERS accelerograph and the SMAC-MDU accelerograph. The SMAC-B2 accelerograph is of a mechanical type and the ERS accelerograph is of an electrical type equipped with either an analogue or a digital recorder. The SMAC-MDU accelerograph is of an electrical type equipped with a digital recorder.

This report presents results of observation and preliminary analysis of records obtained in 2001. ASCII data of the reproduced accelerograms for all the records in 2001 are available in the attached CD in user-friendly CSV format. Also, computer plots of reproduced accelerograms are available in the CD for the records with maximum accelerations exceeding 20 Gals. For the records with maximum acceleration exceeding 50 Gals, computer plots of reproduced accelerograms, integrated velocities and displacements, response spectra, Fourier spectra and loci of accelerations, velocities and displacements in horizontal plane are available in the CD.

Key Words: Earthquake, Port, Strong-Motion Earthquake Observation,
Digitized Acceleration Record, Response Spectra

* Member of Structural Dynamics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
** Assistance Fellow, Core Research Project, Science and Technology Agency,
Japan Science and Technology Corporation
*** Senior Researcher, Geotechnical and Structural Engineering Department
**** Head, Structural Dynamics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
3-1-1 Nagase Yokosuka 239-0826, Japan
Phone: +81-468-44-5058 Fax: +81-468-44-0839 E-mail: fukazawa@pari.go.jp

1. はじめに

港湾地域強震観測は当所の前身である運輸省港湾技術研究所が中心となり 1962 年に開始され、国の機関や地方自治体が参画して実施されてきた。2001 年の観測は以下に示す諸機関の協力の下に実施された。

国土交通省港湾局
 国土交通省東北地方整備局
 国土交通省関東地方整備局
 国土交通省北陸地方整備局
 国土交通省中部地方整備局
 国土交通省近畿地方整備局
 国土交通省中国地方整備局
 国土交通省四国地方整備局
 国土交通省九州地方整備局
 国土交通省北海道開発局
 内閣府沖縄総合事務局
 東京都港湾局
 静岡県港湾総室
 大阪市港湾局
 宮崎県港湾課
 国土技術政策総合研究所

観測網は年々拡大し、2001 年 12 月の時点では全国 60 の港に 97 台の強震計が設置されている。この観測網により、2001 年 12 月までに 5978 の加速度記録が得られている。2001 年には 214 の記録が得られている。

港湾地域強震観測の目的は極めて多岐にわたるが、ここでは代表的な三つの目的を説明する。第一の目的は、港湾に被害をもたらすような大地震が発生した場合に、その揺れを記録して、これを被害メカニズムの解明や適切な復旧工法の選定に利用することである。これは、航空機事故の際にフライトレコーダを回収して事故原因の究明に用いることにも似ている。1995 年兵庫県南部地震で被災した神戸港のケーソン式岸壁の被害メカニズム解明には、神戸港で取得された強震記録が必須の資料として活用された¹⁾。2) 強震観測の第二の目的は、地点毎に異なる地震動の特性を解明することである。図-1 では八戸港と関西国際空港で得られた強震記録のフーリエスペクトルを比較している。八戸港では 1968 年十勝沖地震と 1994 年三陸はるか沖地震の強震記録が得られているが、26 年の時を隔てて発生した二つの大地震で、いずれも周期 2.5 秒（周波数 0.4Hz）の成分が卓越している。一方、関西国際空港では 1995 年兵庫県南部地震と 2000 年鳥取県西部地震の記録が

得られているが、いずれも周期 5 秒（周波数 0.2Hz）の成分が卓越している。このような地点毎の地震動の特性を解明する手段として、強震観測は最も有効である。強震観測の第三の目的は、良質な中小地震の記録を取得して、将来の大地震の揺れの予測に活用することである。上述のように地震動の性質は地点毎に異なるのであるから、構造物の耐震設計には地点毎の特性を反映した入力地震動を用いることが望ましい。各港湾で得られた中小地震の記録には、港湾毎の地下構造の情報が含まれており、この情報を生かすことにより、将来の大地震による揺れの予測に役立てることができる。その一例として、2000 年鳥取県西部地震の余震の際に境港で取得された記録を経験的グリーン関数法と呼ばれる方法で多数重ね合わせることにより、鳥取県西部地震の本震地動をシミュレーションした結果を図-2 に示す。シミュレーションの結果は概ね良好である。手法の詳細については文献³⁾を参照されたい。

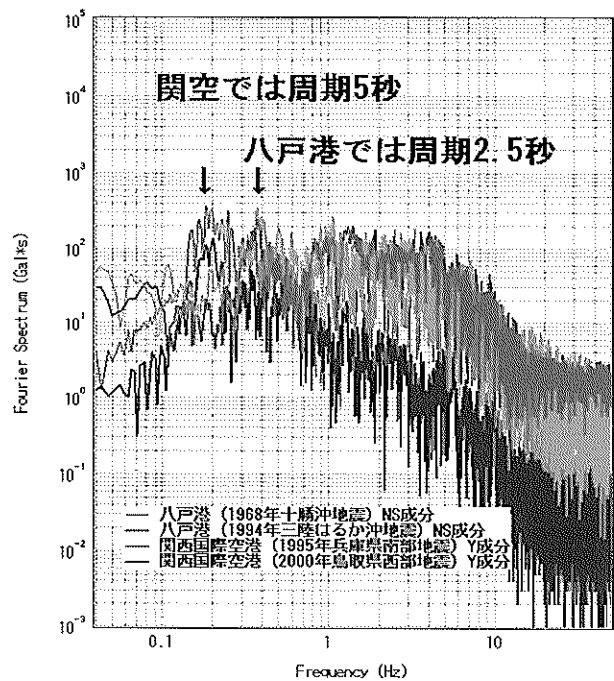


図-1 八戸港と関西国際空港の地震動特性の比較

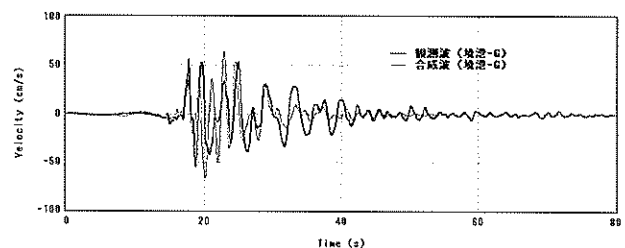


図-2 経験的グリーン関数法による 2000 年鳥取県西部地震の本震地動の再現

港湾地域強震観測で得られた記録は、後に説明するような処理と解析を経た後に、強震観測年報として公表されてきた。まず、1963年から1975年の記録が強震観測年報として公表された⁴¹⁻⁴⁴⁾。1963年から1975年の年報には鉛直成分が含まれていなかったため、それらは別冊¹⁵⁾として公表された。1976年と1977年の強震観測年報からは新しいデータ処理の方法を取り入れ、計器補正を施した加速度波形とそれを積分した速度波形と変位波形、フーリエスペクトルや応答スペクトルを年報で報告するようになった¹⁶⁾⁻³⁴⁾。また、被害を伴うような大地震が発生したときには、それらの地震の記録だけを集めた資料を、通常の年報とは別に公表してきた³⁵⁾⁻⁴⁶⁾。

強震観測年報(1999&2000)⁴⁷⁾より、新たな試みとして、CDを採用することとした。CDを採用したことにはいくつか理由があるが、その中でも最大の理由は、強震記録のデジタルデータを確実に後世に残す手段としてCDが有効であると判断したことである。昨今のように公的機関の組織再編が進む中では、強震記録のデジタルデータを研究室内で保管することが最も確実な保管方法であるとはもはや言えなくなっている。デジタルデータを保管する場所としてはウェブ・サーバも考えられるが、ウェブ・サーバのサービスが停止すれば、それと同時にデータが失われる可能性がある。むしろ、港湾空港技術研究所資料のようなしかなるべき出版物に電子媒体を添付して、その中にデジタルデータを収めておくことが、強震記録のデジタルデータを後世に残す最も確実な手段であろう。このような考えの下に電子媒体の採用を決めたのであるから、電子媒体として何を選ぶかは重要な問題である。CDは、今日では最も一般的な電子媒体の一つであるし、容量もかなり大きく、また廉価でもある。また、光磁気ディスクと異なり、国内外を問わず利用されている。このようなことから、電子情報の長期保管を目指す場合の媒体として現段階ではCDが最も適切であると考え、CDを採用することとした。

今回の年報も、前回⁴⁷⁾同様CDを採用している。付録CDには、2001年に取得されたすべての加速度記録のデジタルデータがCSV形式で収められている。また、20Galを越える記録については、加速度記録を図化したものが収められている。さらに、50Galを越える記録については、加速度記録と、これを積分して得た速度波形、変位波形、応答スペクトル、フーリエスペクトル、さらに加速度・速度・変位の水平面内の軌跡を図化したものが収められている。

2. 観測網と観測機器

2.1 観測網

港湾地域強震観測網は日本全国の海岸線をカバーしており、2001年末の時点では97の強震計が60の港に設置されている。2001年末の時点で強震計の設置されている港湾は、付録CDの地図に示すとおりである。地図上の港名をクリックすれば、強震計の機種と設置条件が表示される。観測地点の土質柱状図等も付録CDに収められており、地図からたどることができる。観測地点のさらなる詳細情報については観測地点資料⁴⁸⁾⁻⁵³⁾を参照されたい。2001年12月の時点では、97の観測地点のうち2地点にSMAC-B2型強震計が、87地点にERS型強震計が、残りの8地点にSMAC-MDU型強震計が設置されている。

2.2 強震計の点検

強震計の点検は当所と他の参画機関との緊密な協力の下に実施されている。

現在、ERS-G/GV型強震計とSMAC-MDU型強震計のほとんどは電話回線(NTT-ISDN回線)に接続され、観測点と横須賀の港湾空港技術研究所との間でオンラインデータ転送が可能な状況となっている。このオンラインシステムは2001年12月の時点では97の強震観測地点のうち75地点に設置されている。オンラインシステムは、データ収集だけでなく強震計の健全度把握にも用いられており、強震計の点検等に係る現場の負担を軽減することに寄与している。

非オンライン化地点については、月1回以上の定期点検と、震度2以上の地震が発生した直後の臨時点検を行うことになっている。記録が得られた場合、記録の損傷を避けるため、直ちに研究所に郵送することになっている。

2.3 観測地点

観測網には3種類の観測地点がある。1つ目は地表面の加速度を記録するもの、2つ目はボアホールを使用し地中の加速度を記録するもの、3つ目は構造物の地震応答を記録するものである。構造物の地震応答を記録するための観測点のそばには必ず地盤の加速度を測定するための観測点が設けられている。

地盤加速度を記録する観測地点では、原則として、強震計の水平成分の一つは真北を向いている。例外として、強震計が構造物と平行に設置されている場合がある。ほとんどの港湾施設、例えば岸壁や棧橋などは2次元的な構造物であり、構造物の法線方向に垂直な成分と平行な成分を計

測ることが望ましいからである。構造物の応答を記録する観測点と、これに付随して地盤加速度を記録する観測点では、強震計は構造物と平行に設置されている。強震計の2つの水平成分が真の南北方向と東西方向に一致しない場合には、方向成分を表すために偏角(単位は度)が使用される。例えば N10E は真北から東に 10°回転した方向を意味する。

観測網のそれぞれの観測地点には観測地点名が付けられている。観測地点名は位置と強震計の型と設置条件の組み合わせである。例えば北海道の釧路港の観測点は「釧路-G」および「釧路-GB」と名付けられている。「釧路」は観測地点の場所を意味している。港湾工事事務所に設置されている観測点では「小名浜事」のように「事」という文字をつけている。添え字の「G」は強震計の型を表しており釧路港には ERS-G 型強震計が設置されていることを意味している。SMAC-B2 型強震計が設置されていれば添え字「S」を、ERS-B, C, D 型の強震計なら添え字「M」を、ERS-F 型強震計なら添え字「F」を、ERS-G/GV 型強震計なら添え字「G」を、SMAC-MDU 型強震計なら添え字「U」を付けている。「釧路-GB」で添え字「G」の後ろの「B」は設置条件を示し、ボアホールを使用して地中に強震計を設置していることを意味している。例えば「釧路-G」のように設置条件を表す添え字がない場合は、その強震計が地表に設置されていることを意味している。添え字「R」がついている場合は強震計が構造物上に設置されていることを意味する。「神戸」と「六甲」の観測点は地中の異なる深さに強震計が設置されている。この場合、添え字「B」の後ろに「40」等の数字をつけて地中強震計の深度を表している。また、「清水日の出-UC1」と「清水日の出-UC2」の「C」は、強震計が CDM 改良地盤に設置されていることを示している。

2.4 強震計

(1) SMAC-B2 型強震計

SMAC-B2 型強震計は強震測定委員会によって開発された3成分の機械式強震計で、ロール状のパラフィン紙の上を引っかけて記録をとるものである。SMAC-B2 型強震計の仕様を表-1に示す。強震計の内部と、理論的な周波数特性をそれぞれ図-3と図-4に示す。

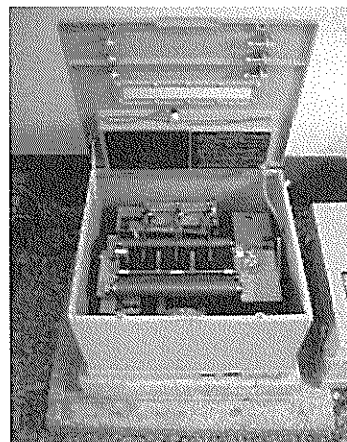


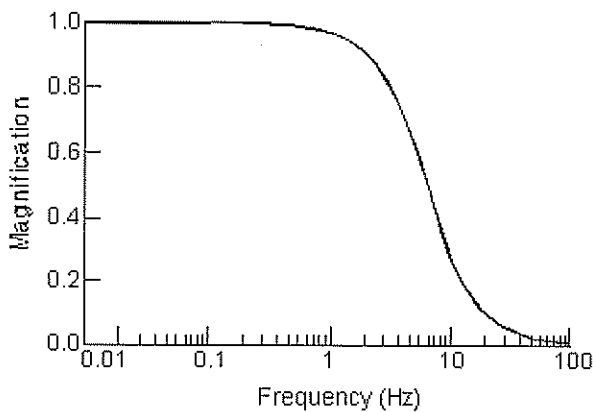
図-3 SMAC-B2 型強震計の内部

表-1 SMAC-B2 型強震計の仕様

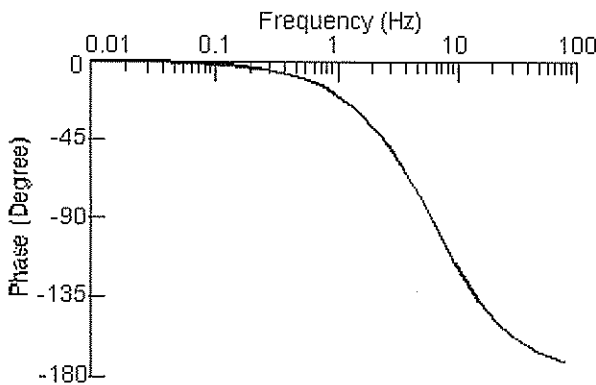
成分数	水平2成分と上下成分
固有周期	0.14s
感度	12.5Gal/mm
減衰度	臨界減衰
減衰方法	空気減衰
最大記録範囲	500Gal
記録速度	10mm/s
記録紙	スタイラスペーパー
駆動方式	手巻きぜんまい式 (ガバナ速度調整)
記録時間	3min 1本の記録紙で5回記録可能
スタータ	電気式接点式上下成分型地震計による
スタータ振子の固有周期	0.3s
起動加速度	5Gal
補助スタータ	機械式感震ボールの落下による
刻時マーク	1秒間のパルスマーク
電源	乾電池 3V×4個
大きさ	54×54×37cm (内寸)
重量	100kg

SMAC-B2 型強震計は湾地域強震観測網の標準的な強震計の1つであった。初期の強震観測では SMAC-B2 型が標準的な強震計であり港湾地域での観測条件に適した型でもあった。SMAC-B2 型強震計の後に、委員会で様々な形式の強震計が開発された。しかしながら、強震観測網では SMAC-B2 型を唯一の機械式強震計として使用してきた。計器補正や維持管理の観点から、多くの形式の強震計を使用することは不都合であったからである。2001 年 12 月の時点で稼働中の SMAC-B2 型強震計は 2 台である。

SMAC-B2 型強震計のトリガーレベルは、地盤のノイズが小さい場所では 5Gal とし、建設工事や貨物輸送の大型トラックのためにノイズが比較的大きな場所では 8Gal としてきた。また、数は多くないが、強震計のそばに交通量の非常に多い道路がある場合にはトリガーレベルを 11Gal としてきた。



(a) amplitude



(b) phase

図-4 SMAC-B2 型強震計の計器特性

(2) ERS-B, C, D 型強震計

港湾地域強震観測では SMAC-B2 型強震計が広く使われてきた。しかし SMAC-B2 型強震計が設置できない場所も

いくつか存在する。例えば構造物上や地中である。したがって、こうした場所での観測のため、港湾技術研究所で ERS 型強震計が開発された。ERS 型強震計の換振器と記録器は一体ではなく、別々に設置することができる。

まず、磁気テープレコーダを使用した強震計が開発された。この強震計は ERS-A 型と呼ばれた。一定期間の使用の後に磁気テープレコーダをオシログラフに交換した。交換後の強震計は ERS-B 型と名付けられた。ERS-A, B 型は水平 2 方向のみの加速度を記録できる。ERS-B 型の仕様を表-2 に、ERS-A, -B 型の換振器を図-5 に示す。ERS-B 型強震計は現在すでに使われていない。

表-2 ERS-B 型強震計の仕様

換振器	
形式	可動線輪型
成分数	水平 2 成分
固有周期	0.5s
減衰定数	約 17
減衰方法	電磁制動
測定加速度範囲	250Gal
抵抗	320Ω
出力電圧	約 2mV/Gal (無負荷のとき)
耐水性	20kg/cm ² 以上
記録器	
形式	電磁オシログラフ
ガルバノメータの固有振動数	100Hz
感度	166mm/mA
記録紙	92mm (幅)×30m (長さ) (現像の必要なし)
記録紙送り速度	2cm/s
刻時マーク	0.1s
電源：蓄電池 (自動充電)	

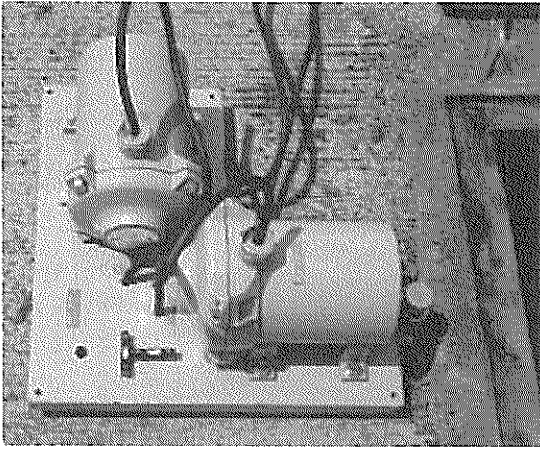


図-5 ERS-A, -B 型強震計の換振器

その後 ERS-C 型強震計が開発され設置された。ERS-B 型強震計は水平 2 成分の加速度しか記録できなかったが、ERS-C 型は水平 2 成分に加え鉛直成分の加速度も記録できた。ERS-C 型の換振器を図-6 に示す。ERS-C 型は現在すでに使われていない。

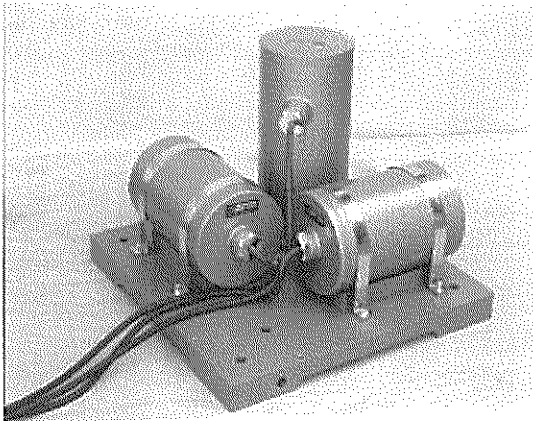


図-6 ERS-C 型強震計の換振器

ERS-D 型強震計は地中の加速度を計測するために開発された。ERS-D 型の換振器は ERS-C 型とほぼ同仕様であるがボアホール内に設置できるようになっている。ERS-C, D 型の仕様を表-3 に示す。ERS-D 型の換振器を図-7 に示す。ERS-D 型は現在すでに使われていない。

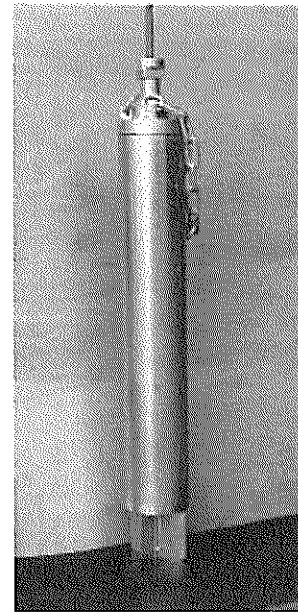
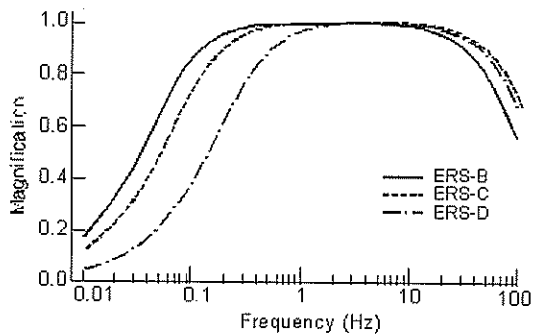


図-7 ERS-D 型強震計の換振器

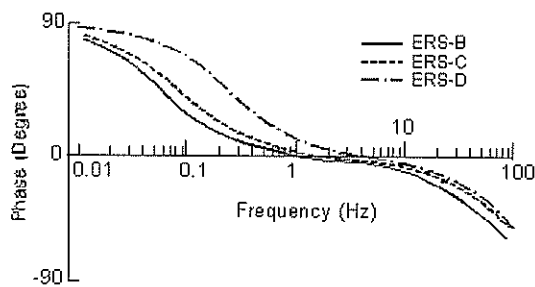
表-3 ERS-C(-D)型強震計の仕様

換振器	
形式	可動線輪型
成分数	水平 2 成分
固有振動数	3Hz
減衰定数	約 17
減衰方法	電磁制動
測定加速度範囲	500Gal
耐水性	20kg/cm ² 以上
記録器	
形式	電磁オシログラフ
ガルバノメータの固有振動数	270Hz
記録紙	198mm (幅)×30m (長さ) (現像の必要なし)
記録紙送り速度	4cm/s
刻時マーク	0.1s
記録感度：2 または 10Gal/mm	
電源：蓄電池 (自動充電)	

ERS-B, C, D 型強震計の換振器はオシログラフの中にあるガルバノメータとほぼ直接接続されている。感度とインピーダンスを調整するための抵抗回路が両者の間にあるのみである。計測器の信頼性を最大限のものとするため、増幅器は用いられていない。総合感度は回路の抵抗を変えることによって簡単に調節できる。したがってERS-B, C, D 型強震計は最大感度で観測を開始し、記録を開始した後で地震動の振幅に応じて感度を再調整できるという利点を有する。図-8 にこれらの強震計の周波数特性を示す。ERS-B, C, D 型のトリガーレベルは SMAC-B2 型と同様である。



(a) amplitude



(b) phase

図-8 ERS-B, C, D 型強震計の周波数特性

(3) ERS-F 型強震計

ERS-F 型強震計は不揮発性磁気バブルメモリを備えたデジタルタイプの強震計である。記録システムのメインユニットは図-9 に示されており、IMB の不揮発性磁気バブルメモリが 4 つと制御装置からなり、その寸法は 240×240×35mm、重量は約 1kg である。記録システムには 2 つのユニットが設置できるが、函館港と常陸那珂港は 1 つのユニットしか設置していない。時間信号はこのバブルメモリの 1 つのチャンネルに記録され、加速度 3 成分に時間信号を加えた 4 チャンネルの記録時間はユニットが 2 つの場合には約 40 分である。

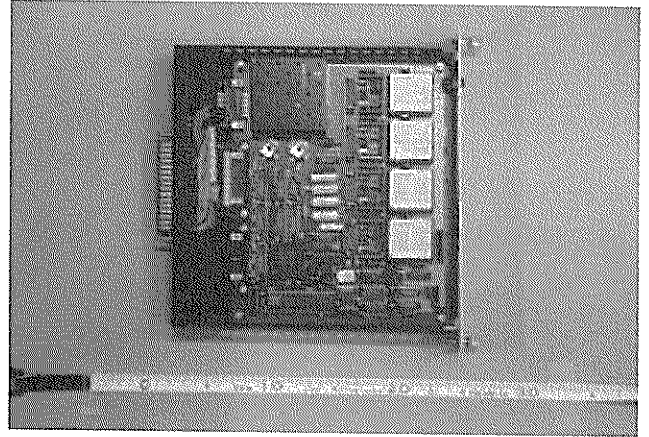


図-9 ERS-F 型強震計の記録システム

ERS-F 型強震計にはさまざまな型式がある。標準的な型式として図-10 に示すような一体型のものがあり、換振器と磁気バブルメモリを含む記録器を 1 つの箱に収納している。その他の形式として、換振器と記録器が分かれた分離タイプがある。図-11 に示されているものは、ボアホールを使用して地中に設置し、地中ないし基盤における地震動を観測するための換振器である。図-12 に示す換振器は構造物に取り付けるタイプのものである。磁気バブルメモリを含む ERS-F 型強震計の記録器を前から見た様子を図-13 に示している。2001 年 12 月現在、稼働中の ERS-F 型強震計は 7 台である。

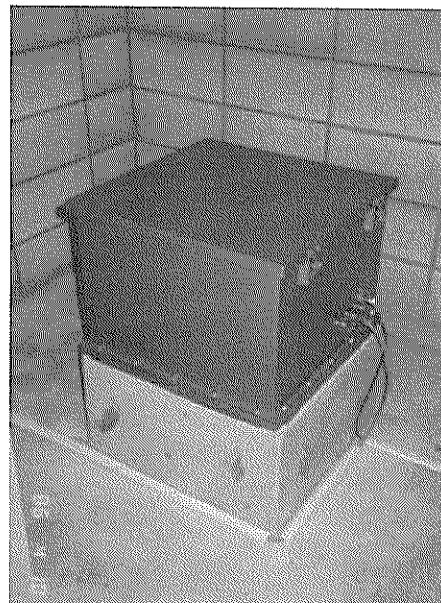


図-10 一体型の ERS-F 型強震計

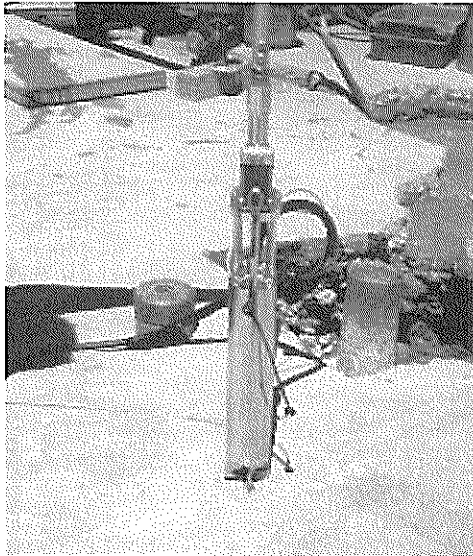


図-11 ERS-F, G, GV 型強震計の地中設置用換振器

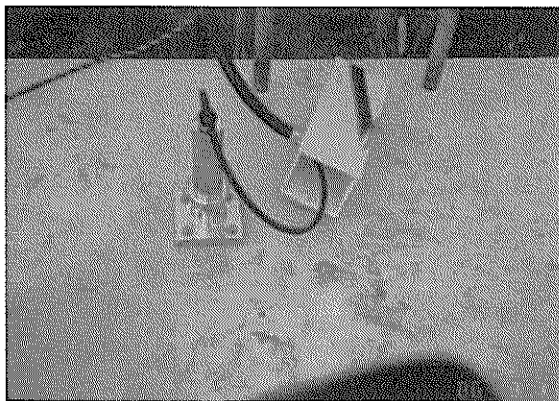


図-12 ERS-F, G, GV 型強震計の構造物取り付け用換振器



図-13 ERS-F 型強震計記録システムの外観

ERS-F 型強震計のブロックダイアグラムを図-14 に示す。ERS-F 型強震計の仕様を表-4 に示す。換振器の周波数特性を図-15 に示す。収録時間は最短 1 分で、加速度レベルのモニタリングにより 1 分刻みで最高 10 分まで延長することができる。トリガーの 40 秒後、もしくは収録を延長した時刻の 40 秒後における加速度レベルがトリガーレベルよりも高い場合に記録時間が延長される。記録システムのメインユニットは最大で 3 成分 60 秒の地震動を 20 個記録することができる。連続して地震が発生し、記録器の記憶容量を越えそうになった場合、最大加速度の大きな記録が残るようになっている。しかし、例外として、180 秒を越える記録は最初のものを優先する。

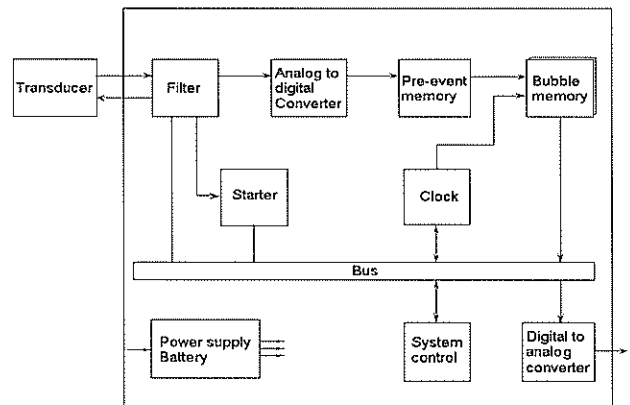


図-14 ERS-F 型強震計のブロックダイアグラム

表-4 ERS-F, G, GV 型強震計の仕様

総合特性	
計測可能加速度	(-F)2G (-G, -GV)0.008G~2G の範囲で設定可能
周波数範囲	0.01Hz-35Hz
ダイナミックレンジ	86dB over
換振器	
成分	水平 2 成分と上下成分
計測可能加速度	(-F) 2G (-G, -GV)0.008G~2G の範囲で設定可能
感度	10^{-5}
形式	(-F and -G)フォースバランス

	(-GV)速度帰還型
フィルタ	
ハイパスフィルタ	0.007Hz -6dB/octave
ローパスフィルタ	35Hz -18dB/octave
A/D 変換	
解像度	16bit
変換速度	100Hz
遅延メモリ	10s
時計: 内蔵時計の精度は 1/100s, 1 時間毎にラジオの時報により校正	
スタータ: トリガーレベルは計測可能加速度の 0.5, 1 または 2%	
記録器	
チャンネル数	(-F) 4-10 チャンネル (うち 1 チャンネルは時刻) (-G, -GV) 3-12 チャンネル
メモリサイズ	(-F) バブルメモリ: 1 Mbytes×2 (-G, -GV) IC カードメモリ: 2 Mbytes
収録時間	1 記録あたり 1-10min
最大記録時間	(-F) 40 min/4ch (-G, -GV) 52 min/3ch 加速度が大きいものを優先的に保存
関連情報	観測地点, 記録数, 記録開始時刻, 各成分の最大値
校正: 総合的な校正が可能	
バックアップ電源: 充電後 2 時間	
容器: アルミニウム箱, 防水	
サイズ: (-F) 54(L)×54(W)×38(H)cm (-G, -GV) 54(L)×54(W)×33(H)cm	

改良されている。ICカードのメモリサイズは2MBである。加速度3成分の記録時間は1つのカードで約52分である。加速度のトリガーレベルは様々な段階に設定できる。強震計の計測可能最大加速度は2Gで最大加速度のレベル(感度)は0.008Gから2Gの間で適切な値に設定できる。2001年12月の時点でERS-G/GV型強震計の総数は80である。ERS-G/GV型強震計の仕様を表-4にERS-F型と共に示す。ERS-G型の換振器はフォースバランス式であり、ERS-GV型の換振器は速度帰還型である。ERS-GV型強震計は、雷に対する安全性から、地中観測点と、これに付随する地表観測点(例えば「釧路-GB」と「釧路-G」)で用いられるようになった。ERS-G型強震計の周波数特性はERS-F型強震計と同じであり、図-15に示すとおりである。ERS-GV型強震計の周波数特性はERS-F,G型と異なり、これを図-17に示す。換振器と記録器を一つの箱に収納した標準的なERS-G/GV型強震計の内部を図-18に示す。

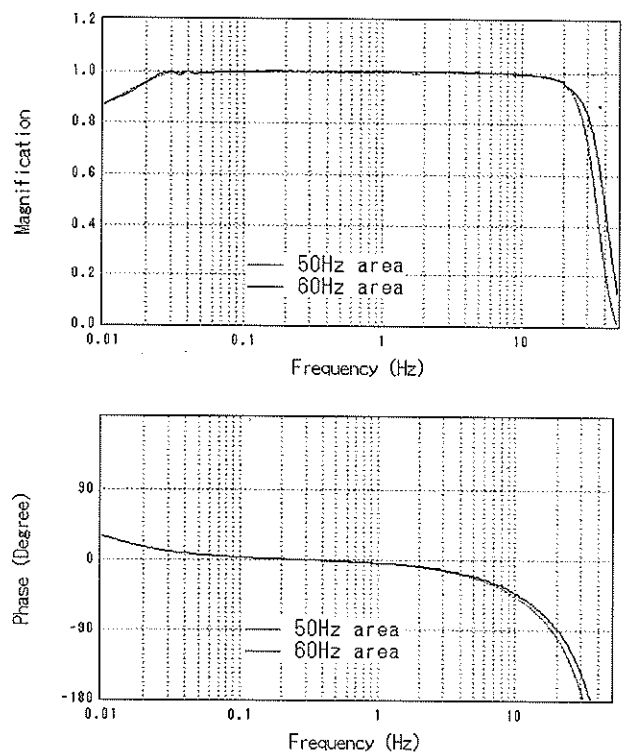


図-15 ERS-F, -G型強震計の周波数特性

(4) ERS-G/GV型強震計

ERS-G/GV型強震計はERS-F型強震計を改良したものである。強震計の換振器はERS-F型強震計のものと同様である。ERS-G/GV型強震計では図-16に示すようなICカードが記録に用いられ、また、制御システムもやや

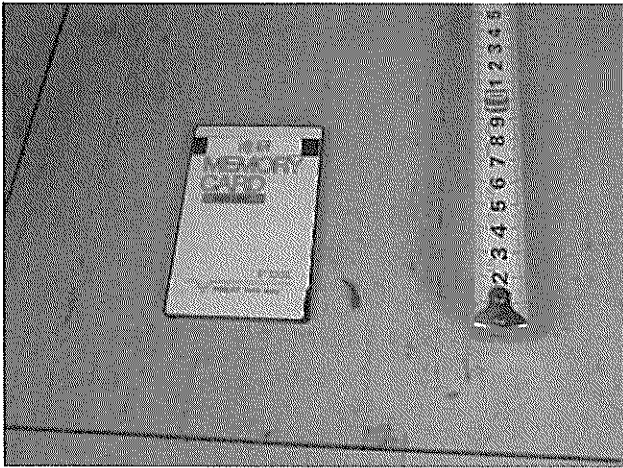


図-16 ERS-G/GV 型強震計の IC カードメモリ

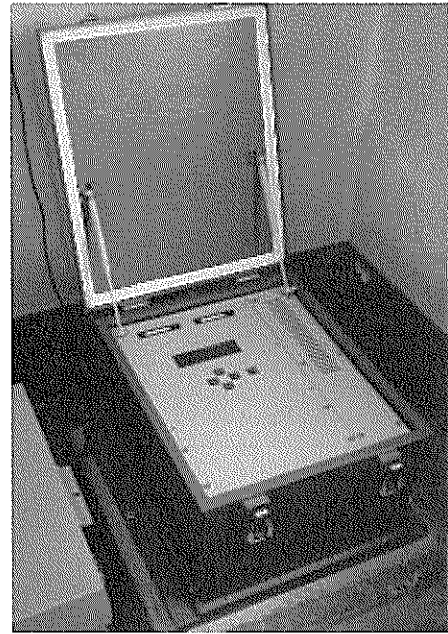


図-18 ERS-G/GV 型強震計の内部

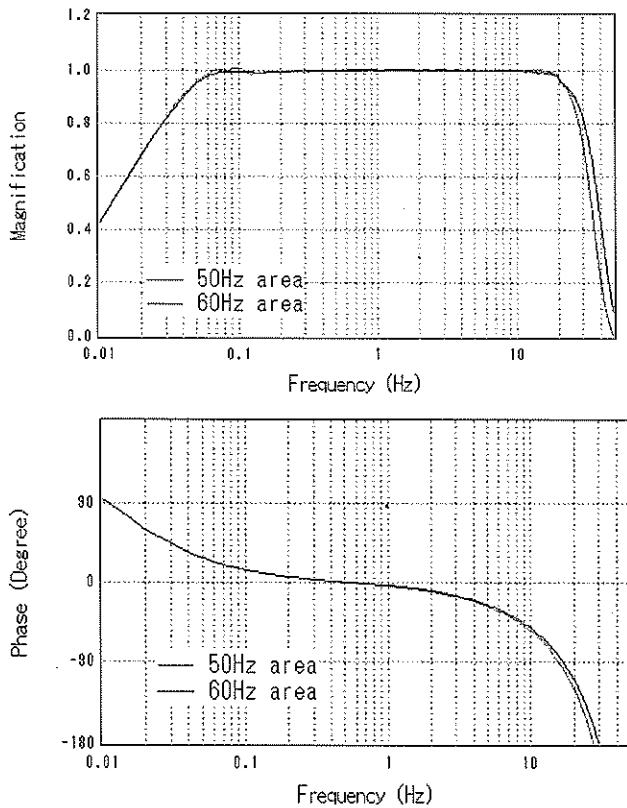


図-17 ERS-GV 型強震計の周波数特性

非オンライン化地点の場合、地震を記録後、記録システムのメインユニット(メモリ)が取り出され、次の地震を記録するため、他のメモリに置き換えられる。取り出されたメインユニット(つまり、ERS-F 型の場合にはコネクタ部分にエリミネータを取り付けたバブルメモリ、ERS-G/GV 型の場合には IC カード)はケースに入れて港湾空港技術研究所に郵送される。この記録媒体はコンピュータに接続された再生器にセットされ、地震動の加速度時刻歴が再生される。トリガー時の絶対時刻もまた強震計内蔵の時計の記録から得られる。表-4 に示すように記録システムは 10 秒のデジタル遅延メモリを有する。もしも地震の初期微動の前に記録が始まっている場合には、初期微動に先行する記録の一部が削除される。

(5) SMAC-MDU 型強震計

SMAC-MDU 型強震計はそれまで強震計の多数を占めていた ERS 型強震計に代わり 2001 年より導入されるようになった。SMAC-MDU 型強震計はデジタルタイプの強震計である。表-5 に SMAC-MDU 型強震計の仕様を示す。強震計の内部と理論的な周波数特性をそれぞれ図-19 と図-20 に示す。

表-5 SMAC-MDU 型強震計の仕様
(港湾地域強震観測での設定)

計測	
計測範囲	±2097Gal
振動数範囲	DC~30Hz
ダイナミックレンジ	114dB
A/D 変換	
解像度	24bit
サンプリング周波数	100Hz
換振器	
成分	水平 2 成分と上下成分
感度	3V/G
形式	フォースバランス
フィルタ	
ハイパスフィルタ	0.02Hz
ローパスフィルタ	30Hz
時計	
水晶精度	誤差±0.5ppm 以下
時刻修正	GPS による時刻修正
記録	
起動条件	指定 3 成分の論理演算組み合わせ
記録開始	正秒記録開始
記録停止	停止設定レベルを下回って設定時間後に自動停止
最大記録時間	600 s/3ch 加速度が大きいものを優先的に保存
メモリ	IC カードメモリ: 10Mbyte
記録内容	加速度波形データ, 起動時刻 設定値, 機器状態, 最大加速度値 SI 値, 計測震度値
電源	
使用電源	AC100V 50/60Hz

内蔵充電電池	DC12V バックアップ:3 時間以上
外形寸法・質量	
サイズ(据置型)	398W×418D×210Hmm, 約 24kg

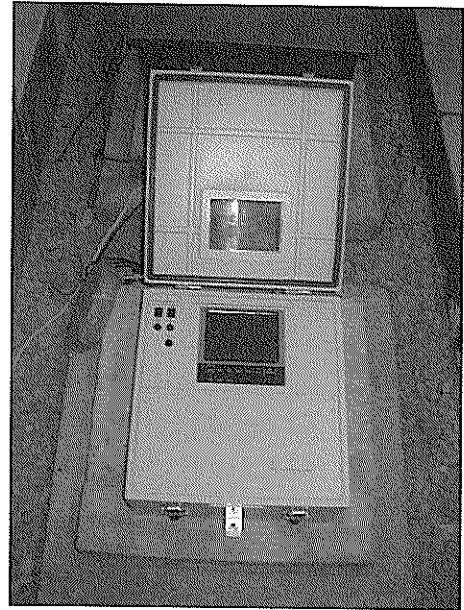


図-19 SMAC-MDU 型強震計の内部

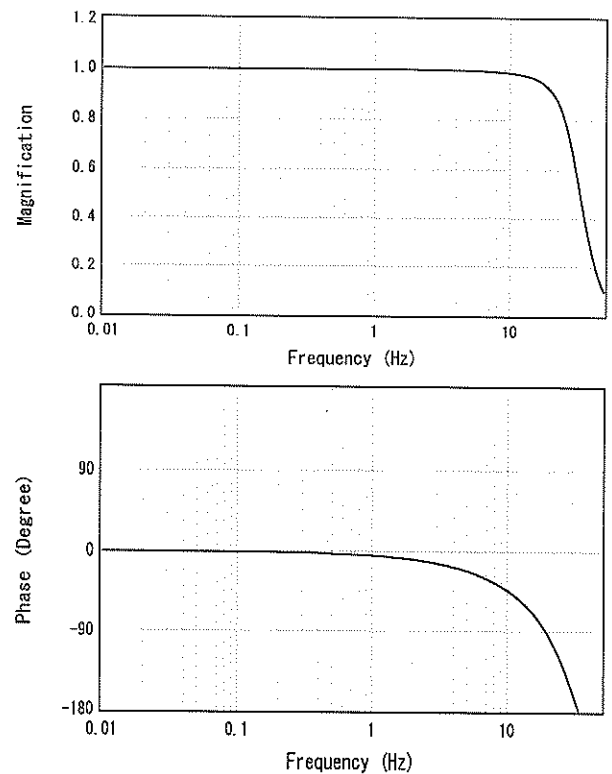
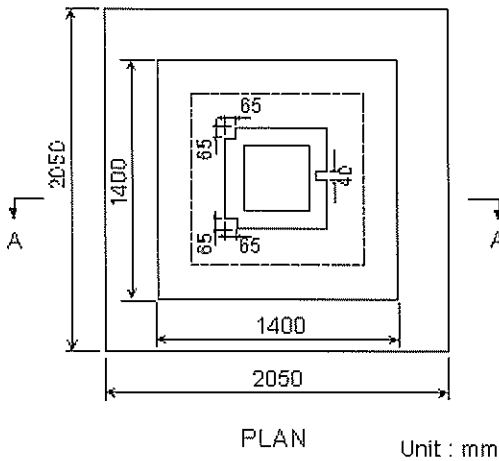


図-20 SMAC-MDU 型強震計の周波数特性

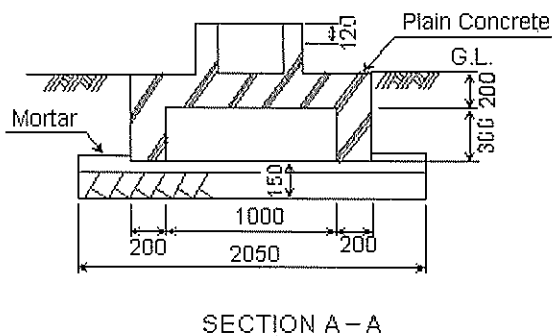
SMAC-MDU 型強震計は 2001 年 12 月の時点で全国の港湾に 8 台設置されている。これらは港湾空港技術研究所に設置された 1 台を除き、すべて港湾空港技術研究所に電話回線で接続されており、強震計の健全度把握とデータ収集はオンラインで実施できる。このことは現地の観測担当者の負担軽減に寄与している。万が一、オンラインでの記録の入手が不可能になった場合には、付属の IC カードメモリを郵送して、港湾空港技術研究所でデータを読み込むことになる。

2.5 基礎と小屋

港湾地域強震観測網の強震計には浅い基礎が使用されている。SMAC-B2 型強震計は図-21 に示すような鉄筋コンクリート製の簡単な基礎の上に設置されている。基礎下のくぼんだ空間は、基礎のみかけの密度を周囲の土の密度と等しくすることにより、基礎が存在することによる記録への影響を最小限にするために設けられている。SMAC-B2 型を ERS-F, G/GV, SAMC-MDU 型に取り替えた後も、同じ基礎が使用されている。



PLAN Unit : mm



SECTION A-A

図-21 SMAC-B2 型強震計の基礎

ERS-B, C 型強震計の場合、標準的な基礎というものは特に存在しない。ERS-C 型強震計換振器の基礎の形状と大きさの一例を図-22 に示す。

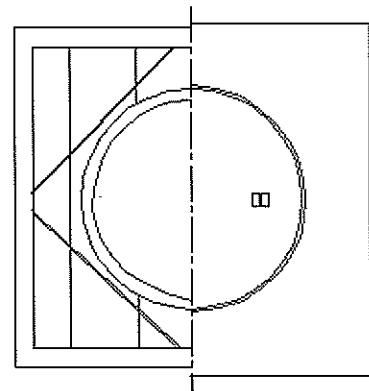
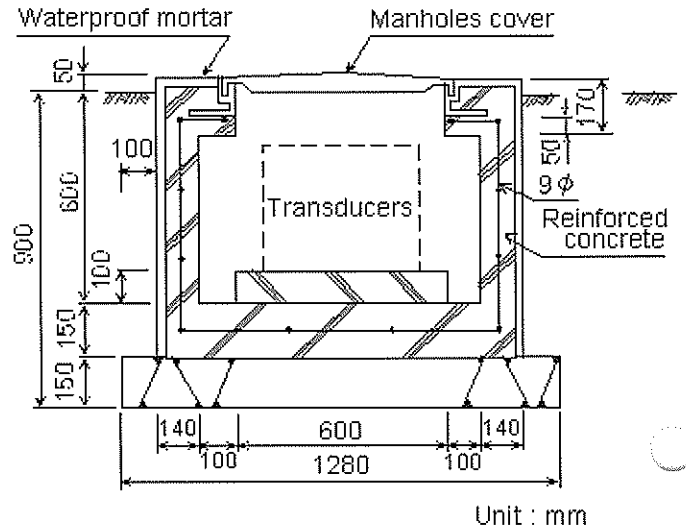


図-22 ERS-C 型強震計の基礎の一例

通常、強震計の基礎を支持するのに杭は使用されない。しかし、観測地点がとてもやわらかい地盤であったり、ゆるい砂であったりする場合には、コンクリートや木製の杭が使用される。例えば「新潟-G」の観測点では基礎を杭で支持している。すべての基礎は強震計を収納する小屋とは構造的に離れている。

強震計は、強震計を収納することを主たる目的として建てられた小屋に収納される場合もあれば、他の目的で建てられた小屋に収納される場合もある。前者の場合の小屋は鉄筋コンクリートやコンクリートブロックで作られているが、中にはプレハブ式の小屋もある。強震観測小屋の一例として、「小名浜事-G, GB」観測点の小屋を図-23 に示す。

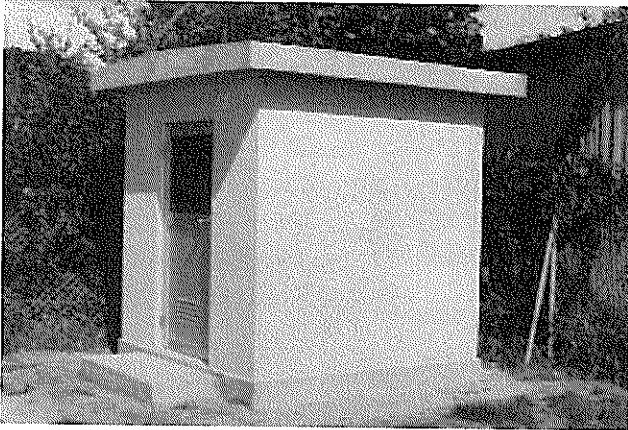


図-23 強震観測小屋の一例(小名浜事-G, GB)

3. 記録の保管まで

港湾空港技術研究所に到着したすべての強震記録は以下に述べる手順で整理・保管される。

まず、各々の強震記録は、研究室に到着した順に番号がつけられる。SMAC-B2 型強震計による記録には「S」で始まる番号、ERS-B,C,D 型強震計による記録には「M」で始まる番号、ERS-F,G,GV 型強震計の記録には「F」で始まる番号、SMAC-MDU 型強震計の記録には「U」で始まる番号が付けられる。

次に、各々の強震記録に対応する地震を確認する。SMAC-B2 型および ERS-B,C,D 型強震計には時計が内蔵されていないので、記録には時刻の情報がない。そこで、ほとんどの記録は、地震に関する情報を添えて研究室に送られてくる。ところが、こうした情報のない記録も少なからず存在する。例えば、地震直後の点検でなく定期点検の際に見つかった記録の場合に、このようなことが起こる。こうした場合、記録の得られた可能性のある期間を考慮して、その間に発生した地震の中から対応する地震を探す。記録に対応する地震の決定は、気象庁地震火山概況⁵⁴⁾と気象庁震源データ (FD)⁵⁵⁾による。

ERS-F,G,GV 型強震計と SMAC-MDU 型強震計の場合、記録の中に時刻の情報が含まれるので、記録に対応する地震はすぐに判明する。

付録 CD に含まれる強震記録一覧において、マグニチュードは気象庁マグニチュードである。2001 年 4 月に実施されたマグニチュード算定方法の改訂は、付録 CD のマグニチュードには反映されていない。

SMAC-B2 型強震計の記録紙は、フィルムの上に赤色の金属粉末を塗布したものである。これをサファイアペンでこすることにより、その部分の塗布剤を剥離させ、波形を

記録する。SMAC-B2 型強震計の記録紙は、そのままでは傷つきやすく、デジタル作業には適さないのが常であった。マイラーフィルムに密着コピーされるのが常であった。マイラーフィルムは温度・湿度等の変化に対しても安定である。このマイラーフィルムが後に生産中止となり、1997 年の 3 月からは通常のフィルムに置き換わった。このため、SMAC-B2 型強震計の記録の中で S-2668 以降の記録のデジタル精度は若干低下することとなった。マイラーフィルムのサイズは長さ 55cm、幅 33cm である。もしも記録の主要部分の長さが 30~45cm 以上であれば、記録を複数の区間に分けてマイラーフィルムにコピーする。このとき、データの連続性を保証するため各区間の両端の約 10cm は重複させておく。このプロセスを経た後には、半透明の背景に記録が黒く描かれた状態になり、コントラストがはっきりし、デジタルに適したものとなる。ERS-B,C,D 型強震計の記録は、そのままデジタルの作業に供される。コピー等は作成されない。

4. 記録のデジタル化

ERS-F,G,GV 型強震計および SMAC-MDU 型強震計の記録はデジタル化の必要がない。本章に述べる事柄は、SMAC-B2 型および ERS-B,C,D 型強震計の記録に関するものである。

4.1 デジタル化装置

港湾空港技術研究所では 2 種類のデジタル化装置が用いられてきた。1 つは SMAC-B2 型強震計の記録のためのものである。もう 1 つは ERS-B,C,D 型強震計の記録のためのものである。SMAC-B2 型強震計の記録のためのデジタル化装置は半自動式である。このデジタル化装置の外観と仕様をそれぞれ図-24 と表-6 に示す。デジタル化装置の動作は以下に述べる通りである。

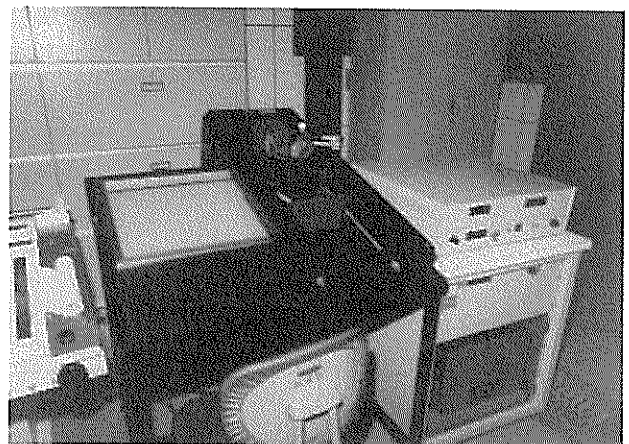


図-24 SMAC-B2 型強震計の記録のためのデジタル化装置

表-6 SMAC-B2 型強震計の記録のためのデジタル装置の仕様

テーブル	
テーブルの寸法	750mm(横)×660mm(縦)
読みとり範囲	430mm(横)×300mm(縦)
拡大鏡	5倍, クロスマーク, 照明ランプ付き
拡大鏡の移動	縦軸: ノブの回転による 横軸: 自動, 移動間隔 0.1mm
制御部	
解像度	1000 カウント/mm 以上
表示	縦軸: 符号+4桁 横軸: 4桁

テーブル部分の拡大鏡は、手で調節ねじを回すことにより、Y軸方向に移動する。ここで、Y軸方向とは、テーブルに向かって縦の方向のことであり、上向きを正にとる。またX軸は、これと直角座標をなす方向にとるものとする。さて、先に述べた調節ネジにはポテンショメータがつながれていて、これによりY座標のアナログ信号が取り出される。拡大鏡にはクロスマークと照明ランプが付いており、拡大鏡に書かれているクロスマークをオペレータがデジタル化しようとする波形に合わせ、押しボタンを押すと、その点のY座標を示すアナログ信号が、変換器によりデジタル信号に変換され、これがパネルに表示されるとともに、電子計算機のメモリに保存される。これと同時に拡大鏡はX軸方向に0.1mmだけ自動的に送られる。

ERS-B,C,D型強震計による記録は、図-25に示すオシログラフ用のデジタル装置によりデジタル化される。記録はテーブル上にセットされ、オペレータがカーソルでデジタル化しようとする波形をなぞると、カーソルのX座標が0.1mm増えるごとに、カーソルのX座標とY座標がデジタル信号に変換され電子計算機のメモリに保存される。電子計算機の必要部分がデジタル化された後で、得られたデジタル値をリストや磁気テープに記録したり、アナログ信号などの形で取り出すことができる。

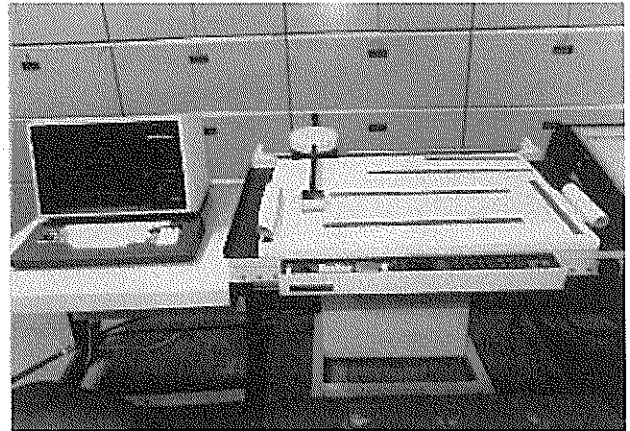


図-25 ERS-B, C, D型強震計の記録のためのデジタル装置

4.2 数値化

以下に述べるデジタル化の手順(図-26)は1976年の記録から採用されているものである。

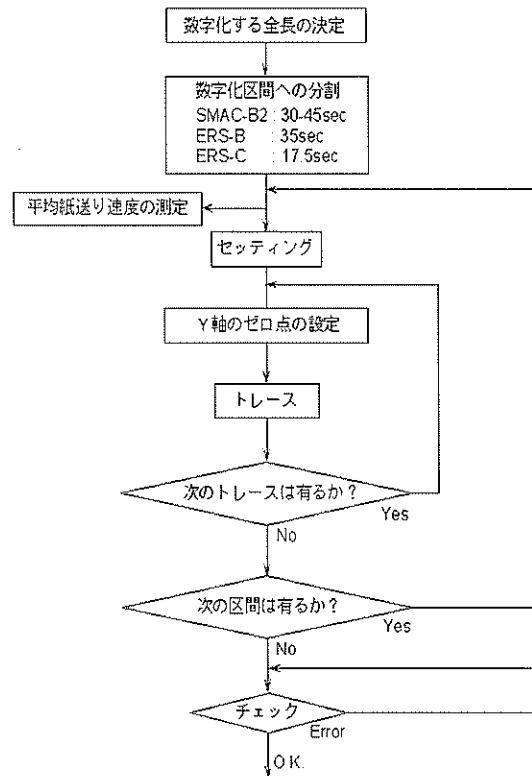


図-26 デジタル化の手順

(1) SMAC-B2 型強震計

SMAC-B2 型強震計の記録は、加速度波形、固定線、タイムマーク、円弧および振子の自由振動波形からなる。振子の自由振動波形は固有周期と減衰定数の校正のための

ものである。これらのうち、ここでデジタル化するのは加速度波形、固定線および円弧である。デジタルされた固定線と円弧は後に記録の補正に用いられる。

固定線は、強震計のフレームに固定されたペンによって描かれる。円弧は、記録紙を停止させてペンを手動で動かすことにより記入したマークである。円弧は、ペンの片寄りを含めた円弧書きによる誤差を取り除くために用いられる。タイムマークは毎秒1回のパルスを記録したもので、記録速度の確認のために描かれるものである。ここでは、このタイムマークを、記録紙の送りの平均的な速度を確認するためだけに用いる。なぜなら、実際に SMAC-B2 型強震計のタイマーの特性を調べた結果⁵⁶⁾、タイマーの平均値の誤差は1%以下、変動係数も0.5%以下と推定され、これがデジタル化装置のデジタル化間隔(0.1mm)と同程度であると考えられたためである。記録紙の送りの平均的な速度を求めるには、タイムマークの30秒分の長さを、ERS-B,C,D型強震計のためのデジタル化装置で測定する。

デジタル化は、記録のはじめの部分から行う。デジタルする部分は、目視により、加速度が0でないと判断される部分をすべて含むように行われる。デジタル化装置のテーブルの大きさには限りがあるので、記録はいくつかの部分に分割される。各々の部分は30-45cmであり、これはほぼ30-45秒に相当する。Y軸方向のデジタル化の最小単位は0.008mmであり、これは約0.1Galに相当する。デジタル化の手順は以下に述べるとおりである。

a) コピーのセッティング

まず、記録のコピーをデジタル化装置のテーブルにテープで固定する。次に、テーブルの調節ネジを使って、コピーの固定線がデジタル化装置のX軸にほぼ平行になるように、テーブルを微小回転させる。この調整には、固定線上の点で、デジタル化区間の両端にある2つの点を使い、この2つの点のY座標が一致するようにテーブルを回転させる。

b) Y軸のゼロ点の設定

Y軸座標をゼロとすべき点に拡大鏡のクロスマークを合わせ、デジタル化装置のY座標をゼロに初期化する。この操作をY軸のゼロ点の設定という。後に補正のところでは区分的ゼロ線補正を実施するので、ここでは各々の区間でゼロ点を仮に定めておけばよい。そこで、便宜上、読み始めの点のY座標をゼロとする。

c) トレース

トレースは先に述べた方法でオペレータが実施する。3成分の加速度波形と2本の固定線、それに3つの円弧がX軸方向に0.001mm間隔でデジタル化される。X軸方向の間隔はほぼ0.001秒に相当する。加速度波形は円弧書きである

から、ここではまだ時間軸上で等間隔にデジタルされたことにはなっていない。

d) 収録

電子計算機のメモリに収められたデジタルデータは、記録番号、成分、観測地点名、発震年月日、時間間隔等とともに磁気テープに保存される。

(2) ERS-B, C, D型強震計

ERS-B,C,D型強震計は加速度波形、固定線およびタイムマークからなる。固定線は、オシログラフのフレームに固定された反射鏡によって描かれ、2mm間隔で記録紙一面に挿入される。ここでは、加速度波形と、記録紙の中心付近の固定線がデジタル化される。デジタル化装置のテーブルの大きさには限りがあるので、記録はいくつかの部分に分割される。各々の部分は70cmであり、これはERS-B型強震計の場合35秒に、ERS-C,D型強震計の場合17.5秒に相当する。

ERS-B,C,D型強震計の記録の場合、セッティングとY軸のゼロ点の設定はSMAC-B2型強震計の記録と同様に実施される。トレースは先に述べた方法でオペレータが実施する。加速度波形はX軸方向に0.1mm間隔でデジタル化される。これはERS-B型強震計の場合0.005秒に、ERS-C,D型強震計の場合0.0025秒に相当する。固定線はX軸方向に5cm間隔でデジタル化される。これはERS-B型強震計の場合2.5秒に、ERS-C,D型強震計の場合1.25秒に相当する。次に、これを補間して0.1mm間隔のデジタルデータを得る。Y軸方向のデジタル化の最小単位は0.1mmであり、これはERS-B型強震計の場合約0.1Galに、ERS-C,D型強震計の場合約0.2Galまたは約1.0Galに相当する。ERS-C,D型強震計の場合、ガルバノメータの感度に関する補正が、校正信号により行われる。

ERS-C,D型強震計の記録のタイムマークは、水晶発振器により0.1秒間ごとに1回入るパルスを記録したものであるが、これは記録紙の送りの平均的な速度を確認するためだけに用いる。なぜなら、実際にERS-C,D型強震計のタイマーの特性を調べた結果⁵⁶⁾、タイマーの誤差はデジタル化装置のデジタル化間隔(0.1mm)と同程度であると考えられたためである。記録紙の送りの平均的な速度を求めるには、タイムマークの30秒分の長さを、ERS-B,C,D型強震計のためのデジタル化装置で測定する。ERS-B型強震計の場合、発振器の精度が電池とインバータで構成される電源の周波数に依存するので、タイムマークは用いないこととした。

5. 記録の補正

ここでは、記録の補正のうち、計器特性補正に先だつて実施する補正について述べる。計器特性補正については次章

で述べる。計器特性以外の補正の手順は図-27 に示す通りであるが、これは 1976 年以降の記録に適用されてきたものである⁵⁶⁾。ただし、SMAC-B2 型強震計の記録紙送りの立ち上がり補正は、強震計の改良に対応して若干改良された。計器特性補正以外の補正を経て得られた加速度波形を以後「オリジナル加速度波形」と呼ぶ。

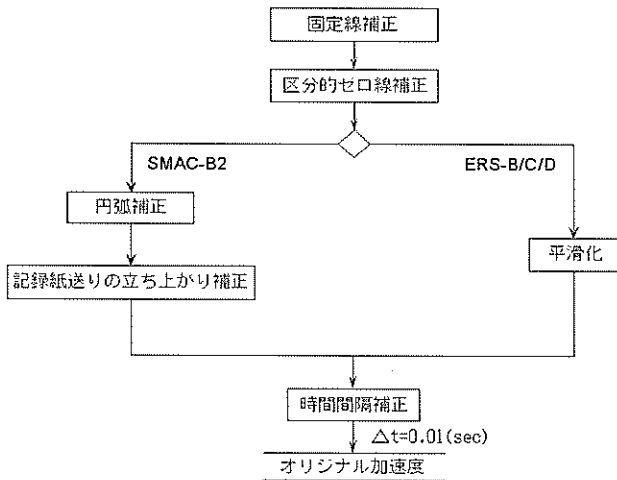


図-27 記録の補正の手順（計器特性補正を除く）

SMAC-B2 型強震計の記録の補正（計器特性補正を除く）は以下の手順で実施される。

- 5.1 固定線補正
- 5.2 区分的ゼロ線補正
- 5.3 円弧補正
- 5.4 記録紙送りの立ち上がり補正
- 5.6 時間間隔補正

ERS-B,C,D 型強震計の記録の補正（計器特性補正を除く）は以下の手順で実施される。

- 5.1 固定線補正
- 5.2 区分的ゼロ線補正
- 5.5 平滑化
- 5.6 時間間隔補正

以上の各々について以下に簡潔に述べる。ERS-F,G/GV 型強震計と SMAC-MDU 型強震計については 5.7 で述べる。

5.1 固定線補正

この補正は、以下に述べる誤差を取り除くために行う。

- 1) 記録時の記録紙の蛇行による誤差
- 2) 数字化装置のアームの蛇行による誤差
- 3) 記録紙のセッティングにおいて発生する記録紙全体の微小な回転の誤差

このうち数字化装置のアームの蛇行については、ピアノ

線とテグストを数字化装置上に直線になるように張力を加えて固定し、それぞれの直線をトレースすることにより、アームの蛇行は十分に小さいことが確認されている⁵⁶⁾。

数字化された固定線を加速度から引く前に、数字化された固定線を、次のような重み関数により平滑化する。

$$W(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \exp(-\alpha t^2) & (|t| \leq t_0) \\ 0 & (|t| > t_0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{ここに } \alpha = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2, \quad t_0 = \sqrt{\frac{5}{\alpha}} \cong 1.42(\text{sec})$$

ただし、数字化区間の端部付近で、区間端からの距離が t_0 より小さい範囲では、式 (1) の α と t_0 は $\alpha = 5/S^2$, $t_0 = S$ とする。ここに S は区間端からの距離である。この平滑化は、ほぼ、遮断周波数 2.0Hz のローパスフィルタに相当する。こうして平滑化された固定線を加速度波形から引く。SMAC-B2 型強震計の場合、記録紙には 3 本の加速度波形にはさまれるように 2 本の固定線が描かれているが、記録紙上の両端にある 2 成分（水平成分）の波形を補正するための固定線は、それぞれの成分に最も近い固定線とした。また、中央に描かれる成分（上下成分）の波形を補正するための固定線は、2 本の固定線の平均値とした。ERS-B,C,D 型強震計の場合、ほぼ中央にある 1 本の固定線をすべての加速度波形から引くこととした。

5.2 区分的ゼロ線補正

先に述べたように、数字化終了時には Y 軸のゼロ点は各区間ごとに任意に定められている。したがって、数字化のための分割によって、加速度波形には区分的に一定値をとるような階段状の誤差が導入される。このような階段状の誤差は、低い振動数成分だけを取り除くようなフィルタをかけても、階段の角の部分が残されてしまう。ここでは、固定線補正後の加速度波形の各区間のゼロ線補正がもしも正しく行われ、しかるのちに接続されたならば、およそ $1/T$ 以下の低い周波数成分がほぼ 0 であるような波形が得られるとの仮定の下に区分的ゼロ線補正を行う。ここに T は数字化のために分割した区間の最小長さである。周波数領域で詳細な検討を行った結果、各区間ごとの加速度の重み平均がゼロとなるように区分的ゼロ線補正を行うこととした。重み関数としては次のものを用いる。

$$w(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \exp(-\alpha t^2) & (|t| \leq \frac{T}{2}) \\ 0 & (|t| > \frac{T}{2}) \end{cases} \quad (2)$$

ここに $\alpha = \frac{20}{T^2}$, T は各区間の長さである。

ゼロ線補正の誤差は、ほぼ $1/T$ 以下の低い周波数成分の大きさに比例する。ここでは、ここで提案するゼロ線補正と、各区間の平均値を 0 とするゼロ線補正との違いを明らかにするため、以下に計算例を示す。ここでは計算機で生成した正弦波 (100Gal, 5Hz, 5000 データ, サンプル周波数 100Hz) を、それぞれ 2510 データと 2490 データの二つの区間にわけた。これら二つの区間を、区間ごとに数字化された加速度波形とみなす。区分的ゼロ線補正は二つの方法で行う。次に、後述する固定フィルタにより積分して変位波形を求め、区間の接続点を含む部分を図-28 と図-29 に示す。区間の接続点はこれらの図では 10.1 秒である。この場合、真の変位波形は正弦波なのであるから、提案法の方がはるかに良い結果を与えていることがわかる。

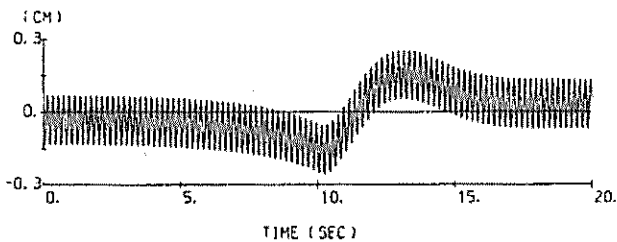


図-28 各区間の平均値をゼロとして補正した加速度から求めた変位波形

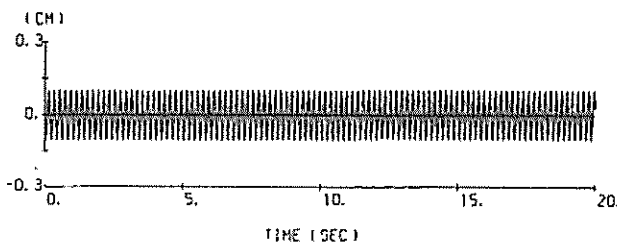


図-29 提案した方法で補正した加速度から求めた変位波形

5.3 円弧補正

円弧補正は、SMAC-B2 型強震計の記録について、各々のデータの正しい X 座標を求めるために行う。円弧の中心の Y 座標は、数字化された円弧から図-30 に示すように求められる。円の半径を $r(\text{mm})$ 、補正される点の Y 座標を $y(\text{mm})$ 、円の中心の Y 座標を $a(\text{mm})$ 、さらに補正される点の X 座標の誤差を $e(\text{mm})$ とすれば、次式を得る。

$$e = r - \sqrt{r^2 - (y - a)^2} \quad (3)$$

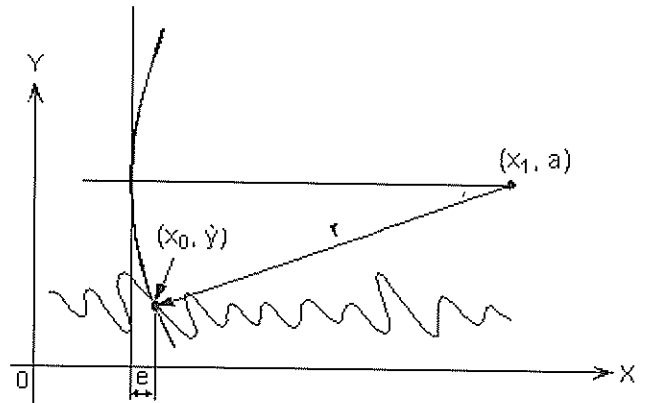


図-30 円弧補正の概念図

円弧を数字化する際の Y 軸のゼロ点の設定には任意性があるが、 $(y-a)$ はゼロ点の設定には依存しないので円弧補正には支障がない。円弧が書かれていない記録や、円弧の長さが十分でないもの (円弧の端点の X 座標が 0.5mm 未満のもの) の場合には、 $a=0$ とする。

5.4 記録紙送りの立ち上がり補正

記録紙送りの立ち上がり速度は次式で表される。この式は、港湾技術研究所で実施された試験に基づいており、図-31 に示される。

$$v = \left(1 - \frac{1}{b^2} (t - t_0)^2 \right) \cdot v_a \quad (4)$$

ここに v は時刻 t における記録紙送りの速度、 v_a は記録紙送りの速度が一定になった後の速度、 t は記録器の始動時からの経過時間、 t_0 と b は定数である。

もしも t_0 と b が与えられれば、記録紙送りの立ち上がり補正は容易に実施することができる。図-31 では $t_0=2.0(\text{s})$ および $b=2.0(\text{s})$ が用いられていたが、その後、 t_0 の値を若干変更の方がより妥当な補正となることがわかったので、本資料では $t_0=1.9(\text{s})$ を用いている。

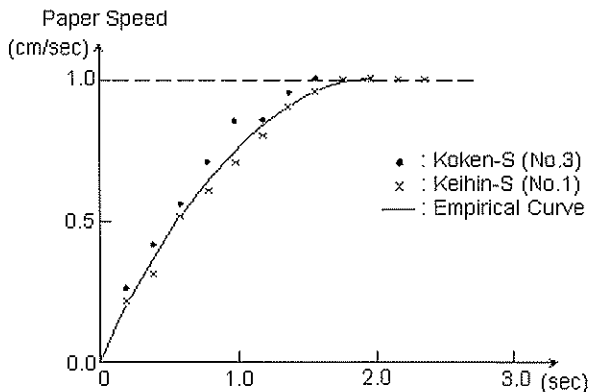


図-31 記録紙送りの立ち上がり

5.5 平滑化

平滑化は ERS-B,C,D 型強震計の記録に適用される。ERS-B,C,D 型強震計の記録は 0.1mm 間隔でデジタル化されるが、この間隔は時間軸上では ERS-B 型強震計の場合 0.005 秒に、ERS-C,D 型強震計の場合 0.0025 秒に相当する。これまでに得られた ERS-B,C,D 型強震計の記録を見るかぎり、50Hz 以上の振動数成分の占める割合はきわめて小さい。そこで、誤差の含まれる割合が大きいと思われる 50Hz 以上の周波数成分を取り除く。

ここで用いる重み付き移動平均の重み関数は次式で示される。

$$g(t) = \begin{cases} f_1 + f_0 & (t=0) \\ \frac{2}{f_1 - f_0} \left(\frac{\cos(2\pi f_0 t) - \cos(2\pi f_1 t)}{(2\pi t)^2} \right) & (t \neq 0) \end{cases} \quad (5)$$

ここに $f_0=45\text{Hz}$, $f_1=55\text{Hz}$.

この重み付き移動平均に相当するフィルタを図-32 に示す。

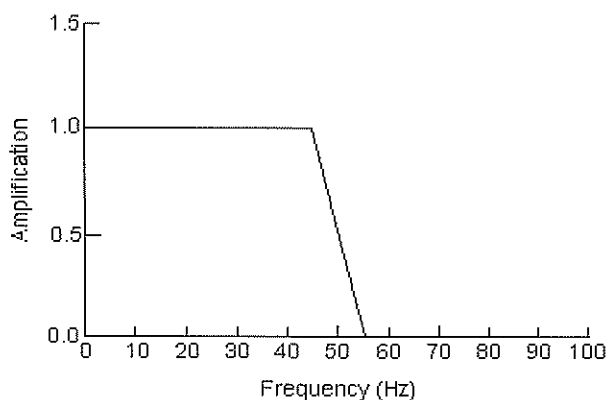


図-32 平滑化のためのフィルタ

5.6 時間間隔補正

データは通常、補間により 0.01 秒の等間隔とする。SMAC-B2 型強震計の記録は、0.1mm 間隔でデジタル化されたあと、円弧補正が行われる。こうして得られたデータは時間軸上では等間隔でない。加速度波形の絶対値が減少するような区間では間隔が 0.01 秒より長く、加速度波形の絶対値が増加する区間では間隔が 0.01 秒より短い。

ERS-B,C,D 型強震計の場合、加速度波形は 0.1mm 間隔でデジタル化されるが、この間隔は時間軸上では ERS-B 型強震計の場合 0.005 秒に、ERS-C,D 型強震計の場合 0.0025 秒に相当する。時間間隔を 0.01 秒に変更するに先立ち、上述のように 50Hz 以上の振動数成分を平滑化により取り除いているので、ここではエイリアジングの心配はない。デジタル化の際に高密度でサンプリングを行っているため、このような形で高周波ノイズを取り除くことができ、補間の精度が向上する。

5.7 ERS-F, G, GV 型, SMAC-MDU 型強震計の記録の場合

ERS-F,G,GV 型, SMAC-MDU 型強震計の記録の場合、補正としては、データ全体に対するゼロ線補正と、計器特性補正を実施する。計器特性補正については後述する。

6. 予備的解析

以下に述べる予備的解析は、1976 年以降の記録に適用されてきたものである^{56), 57)}。その内容は、計器特性補正のためのフィルタリング、高周波成分と低周波成分の補正のためのフィルタリング、積分、応答スペクトルとフーリエスペクトルの計算などである。予備的解析の手順を図-33 に示す。

6.1 フィルタリングと積分の方法

フィルタリングと積分は周波数領域で実施する。リンク効果を避けるため、デジタル化された加速度波形の外側にゼロを付けたものに対して FFT を適用する。ゼロ部分の長さ $L(s)$ は次式により定める。

$$L > \max [2 / 3T, 10.0] \quad (6)$$

ここに $T(s)$ はデジタル化のために分割した区間の最小長さである。この条件は、後述する積分用のハイパスフィルタのインパルス応答を考慮して定めたものである。また、ゼロ部分の長さ $L(s)$ は、FFT の計算時間をなるべく短くするため、できるだけ短く設定する。

6.2 計器特性補正等のためのフィルタ

(1) SMAC-B2 型強震計の記録のためのフィルタ

計器特性補正のためのフィルタ $A_s(f)$ は、次式に示すように、SMAC-B2 型強震計の換振器の周波数特性の逆数として定義される。

$$A_s(f) = 1 - \left(\frac{f}{f_s}\right)^2 + 2h_s \left(\frac{f}{f_s}\right) i \quad (7)$$

ここに $f_s=1/0.14=7.1\text{Hz}$, $h_s=1.0$

一方、補助フィルタ $B_s(f)$ を次式により定義する。

$$B_s(f) = \begin{cases} 1 & (|f| \leq f_0) \\ \frac{1}{|A_s(f)|} \exp\left(-\frac{(|f|-f_0)^2}{20}\right) & (|f| > f_0) \end{cases} \quad (8)$$

ここに $f_0=10\text{Hz}$

補助フィルタは、デジタル化による高周波ノイズを抑制するとともに、時間領域に戻したときにデジタル区間の両端で不自然なフィルタの応答が生じないように、高周波成分をある程度残すことを意図して定められたものである。計器特性補正のためのフィルタ $A_s(f)$ と補助フィルタ $B_s(f)$ を図-34と図-35にそれぞれ示す。 $A_s(f)$ と $B_s(f)$ を合成した図-36に示すフィルタがSMAC-B2型強震計の記録に適用される。

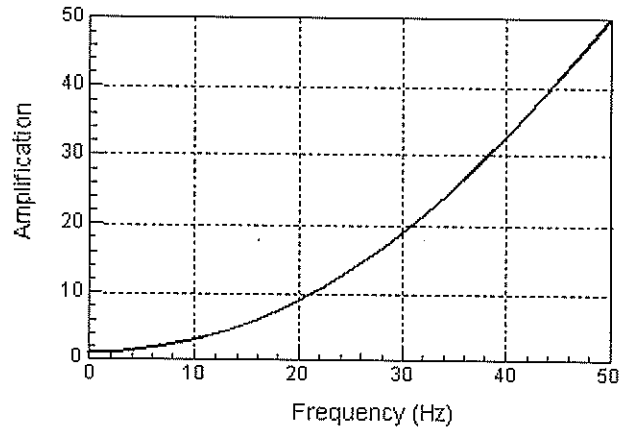


図-34 SMAC-B2 型強震計の記録の計器特性補正のためのフィルタ

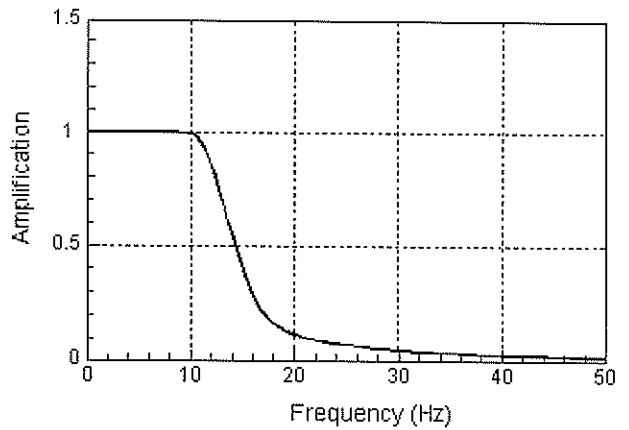


図-35 SMAC-B2 型強震計の記録の補助フィルタ

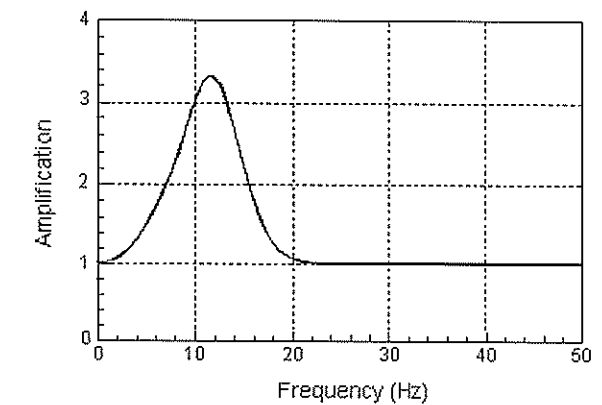


図-36 SMAC-B2 型強震計の記録の計器特性補正のためのフィルタと補助フィルタの合成

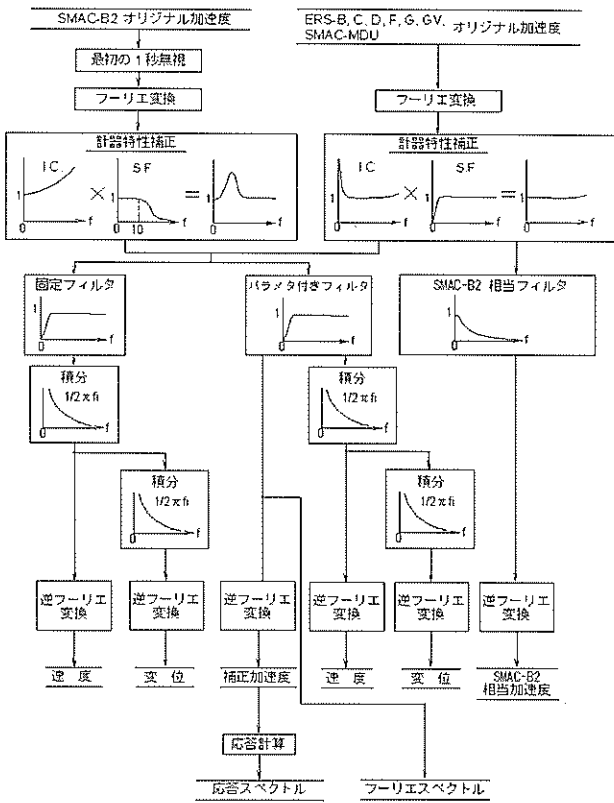


図-33 予備的解析の手順

(2) ERS-B, C, D 型強震計の記録のためのフィルタ
計器特性補正のためのフィルタ $A_E(f)$ は次式により定義

される。

$$A_E(f) = A_P(f) \cdot A_G(f) \quad (9)$$

$$A_P(f) = 1 + \frac{i}{2hp} \left(\frac{f}{f_p} - \frac{f_p}{f} \right) \quad (10)$$

$$A_G(f) = 1 - \left(\frac{f}{f_G} \right)^2 + 2h_G \left(\frac{f}{f_G} \right) i \quad (11)$$

ここに

ERS-B 型強震計： $f_p=2.0\text{Hz}$, $h_p=17$, $f_G=100\text{Hz}$, $h_G=0.7$

ERS-C 型強震計： $f_p=3.0\text{Hz}$, $h_p=17$, $f_G=270\text{Hz}$, $h_G=0.7$

ERS-D 型強震計： $f_p=5.0\text{Hz}$, $h_p=10$, $f_G=270\text{Hz}$, $h_G=0.7$

上式において $1/A_P(f)$ は換振器の周波数特性を、 $1/A_G(f)$ はガルバノメータの周波数特性を示す。計器特性補正のためのフィルタ $A_E(f)$ を 3 種類の強震計について図-37 に示す。

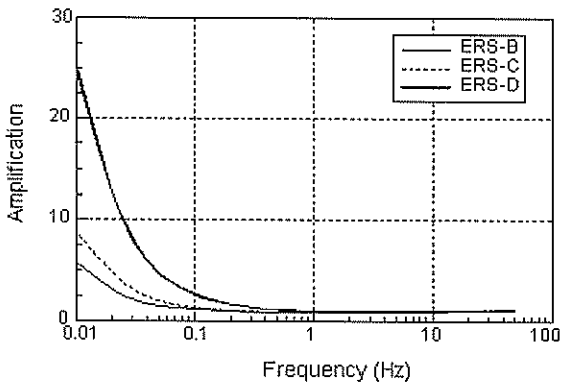


図-37 ERS-B, C, D 型強震計の記録の計器特性補正のためのフィルタ

補助フィルタ $B_E(f)$ を次式により定義する。

$$B_E(f) = \begin{cases} 1/A_P(f) & (|f| \leq f_p) \\ 1 & (|f| > f_p) \end{cases}$$

(12)

補助フィルタはデジタル化による低周波成分の誤差を抑制するために用いられる。補助フィルタ $B_E(f)$ を図-38 に示す。 $A_E(f)$ と $B_E(f)$ を合成した図-39 に示すフィルタが ERS-B, C, D 型強震計の記録に適用される。

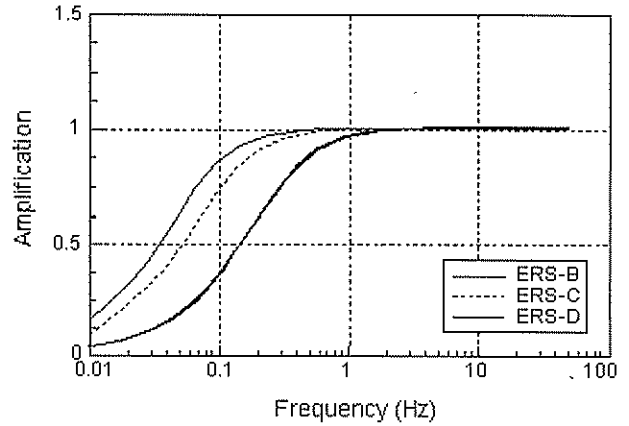


図-38 ERS-B, C, D 型強震計の記録のための補助フィルタ

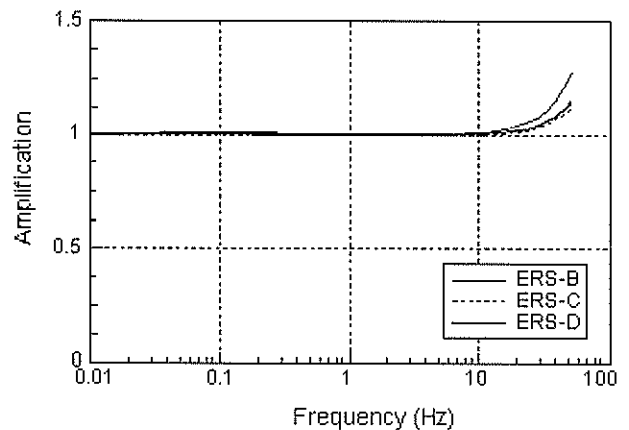


図-39 ERS-B, C, D 型強震計の記録の計器特性補正のためのフィルタと補助フィルタの合成

(3) ERS-F, G, GV, SMAC-MDU 型強震計のためのフィルタ
計器特性補正としては、図-15(b)、図-17(b)および図-20(b)に示す位相特性に関する補正のみ行う。振幅特性に関する補正は実施しない。ただし、高周波成分を次式に示すフィルタにより取り除く。

$$A_f(f) = \begin{cases} 1 & |f| \leq f_1 \\ \frac{1}{2} [\cos(\pi(f-f_1)/(f_2-f_1)) + 1] & f_1 \leq |f| \leq f_2 \\ 0 & f_2 \leq |f| \end{cases} \quad (13)$$

ここに $f_1=25\text{Hz}$, $f_2=40\text{Hz}$ 。

6.3 SMAC-B2 相当フィルタ

SMAC-B2 型強震計の周波数特性は ERS 型強震計及び SMAC-MDU 型強震計とは異なるので、これらの互いに異

なる機種が強震計による記録の相互比較を可能にするため、ERS 型強震計及び SMAC-MDU 型強震計の記録に対しては次式に示すフィルタを適用する。

$$S(f) = \frac{1}{1 - \left(\frac{f}{f_s}\right)^2 + 2h_s\left(\frac{f}{f_s}\right)i} \quad (14)$$

ここに $f_s=1/0.14=7.1\text{Hz}$, $h_s=1.0$

このフィルタは図-40 に示されるとおり、SMAC-B2 型強震計と同じ周波数特性を有する。このフィルタは、ERS 型強震計及び SMAC-MDU 型強震計の記録に計器特性補正のためのフィルタと補助フィルタを適用した後に適用する。このフィルタを作用させることによって得られた加速度は「SMAC-B2 相当加速度」と呼ばれる。ここで得られる加速度は強震計で測定しようとしている地盤や構造物の本来の加速度とは異なっており、その最大値は本来の加速度よりも小さいが、この処理を施して得られる加速度はすべて互いに比較可能である。

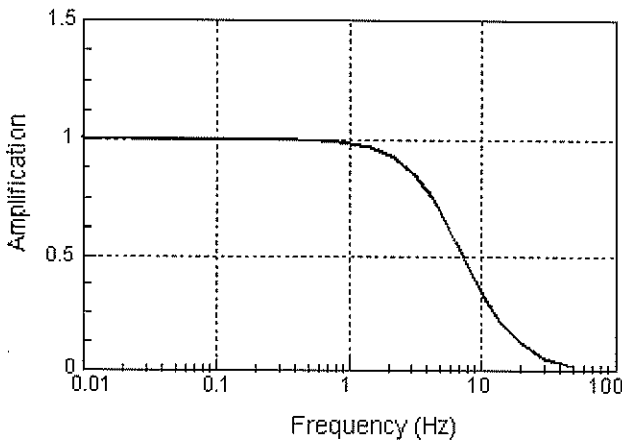


図-40 SMAC-B2 相当フィルタ

6.4 積分用のハイパスフィルタ

上述の補正等を施した後で得られる加速度波形が含む誤差は、デジタル化時のランダムな誤差と区分的ゼロ線補正による誤差だけであると期待される。区分的ゼロ線補正による誤差はほぼ $1/T$ 以下の周波数成分のみに影響する。ここに T はデジタル化のために分割した区間の長さである。

デジタル化時のランダムな誤差を調べた結果によると、SN 比の周波数特性は、デジタル化された加速度波形の周波数特性に近いことがわかっている。言い換えれば、加速度波形のスペクトルの振幅が大きな周波数に対しては、SN 比が良好である。この結果は $1/T$ 以上の周波数帯域に適用できる

と思われる。

すべての周波数に対して SN 比を一定以上に保つと同時に物理的に意味のある信号はできるだけ消さないようにするという観点からは、積分用のハイパスフィルタの遮断周波数が加速度波形の周波数特性に応じて変化することが望ましい。一方、積分後に得られる速度波形や変位波形を異なる記録について相互に比較するという観点からは、遮断周波数が一定値であるほうが都合がよい。

強震記録が様々な立場で応用されることを考慮し、ここでは、速度波形や変位波形を得るための積分方法として二通りの方法を用いる。一つは固定フィルタを用いる方法であり、もう一つはパラメタ付きフィルタを用いる方法である。

(1) 固定フィルタ

固定フィルタは次式により定義される。

$$H_1(f) = \frac{1}{1 - \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 - 2h\left(\frac{f_0}{f}\right)i} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_1}{f}\right)^2}} \quad (15)$$

ここに $f_0=1/6(\text{Hz})$, $h=0.552$, $f_1=0.1(\text{Hz})$

このフィルタは、得られる変位波形が気象庁の 1 倍強震計 ($T=6$ 秒, $h=0.552$) の変位波形と比較できるように設定されたものである。フィルタの遮断周波数(3 dB down)は 0.154Hz である。固定フィルタを図-41 に示す。

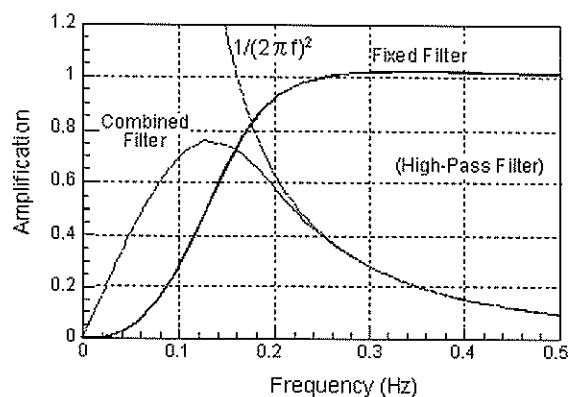


図-41 固定フィルタと二回積分の合成

(2) パラメタ付きフィルタ

このフィルタは次式により定義される。

$$H_2(f) = \left\{ 1 - \exp\left(-\left(\frac{f}{f_c}\right)^2\right) \right\}^2 \quad (16)$$

このフィルタの遮断周波数は $1.36f_c$ (3 dB down) である。

パラメタ付きフィルタを図-42 および図-43 に示す。パラメタ f_c は、 σ と E が等しくなるように定められる。ここに σ は次式により定義される。

$$\sigma^2 = \frac{1}{S} \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 \cdot \left\{ 1 - \exp(-fT)^2 \right\}^4 \cdot \left\{ 1 - H_2(f) \right\}^2 df \quad (17)$$

ここに S はデジタル化された記録の全長、 T はデジタル化のために分割された区間の最小長さ、 $X(f)$ はオリジナル加速度のフーリエ変換である。

E は以下に示す値である。

SMAC-B2 型

$$E = 0.5 \text{ (Gal)}$$

ERS-B,C,D 型強震計

$$E = 0.05p \text{ (Gal)}$$

ここに p (Gal/mm) は ERS-B,C,D 型強震計の感度

ERS-F,G 型強震計

$$E = (p \times 0.001) \times 0.02236 \text{ (Gal)}$$

ここに p (Gal/2¹⁵) は ERS-F,G 型強震計の感度

ERS-GV 型強震計

$$E = (p \times 0.001) \times 0.07071 \text{ (Gal)}$$

ここに p (Gal/2¹⁵) は ERS-GV 型強震計の感度

SMAC-MDU 型強震計

$$E = (p \times 0.001) \times 0.00707 \text{ (Gal)}$$

ここに p (Gal/2²³) は SMAC-MDU 型強震計の感度

ERS-F,G,GV 型強震計及び SMAC-MDU 型強震計の E 値は、非地震時に取得した記録のノイズレベルを調べて定めたものである。前々報までは、ERS-F,G 型（フォースフィードバック）と ERS-GV 型（速度帰還型）の E 値を等しいとしていたが、両者の低周波側のノイズレベルに差が認められたので、前報から、両者を区別することとした。

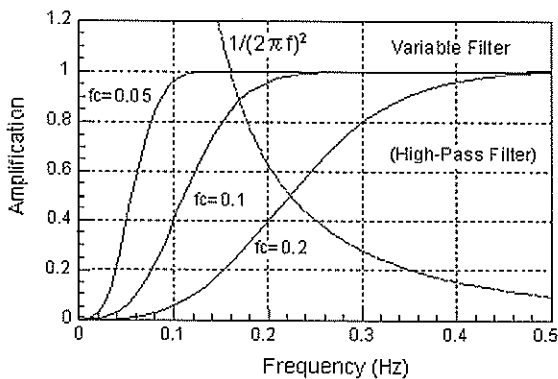


図-42 パラメタ付きフィルタと二回積分

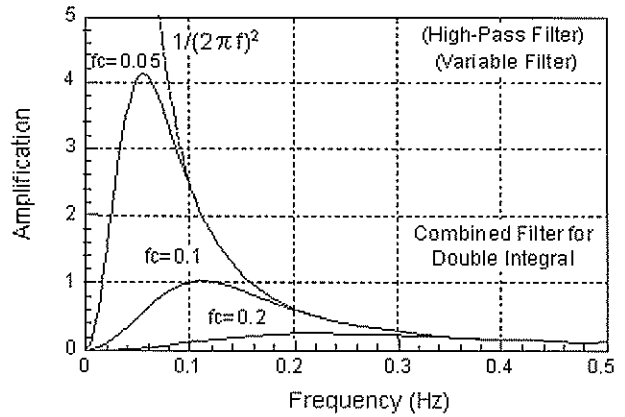


図-43 パラメタ付きフィルタと二回積分の合成

f_c の決定手順は図-44 に示す通りである。 f_c は、本質的には加速度波形の低周波成分（ただし $1/T$ よりも高周波側）を一定の大きさだけ削除するように定められる。加速度波形の低周波成分が大きいほど f_c は小さな値となる。なぜなら、低周波成分の振幅が大きいほど低周波成分の SN 比は大きいからである。 $1/T$ 以下の周波数成分については、区分的ゼロ線補正の段階で誤差が混入している可能性があり、「振幅が大きいほど SN 比が大きい」という上述の事実がこの $1/T$ 以下の周波数帯域についてはあてはまらないので、 f_c の決定の際には $1/T$ 以下の周波数成分を考慮に入れない。

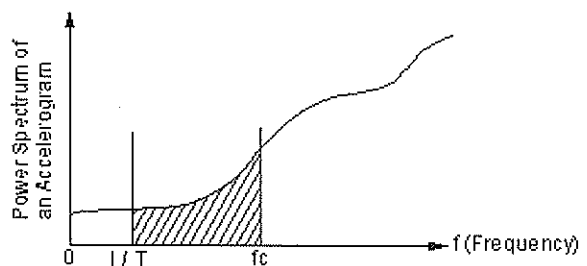
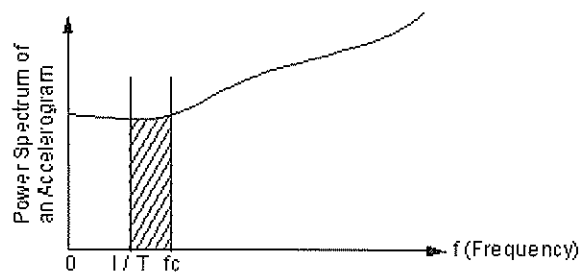


図-44 f_c の決定手順

しかしながら、このような f_c の決定手順は、すべての周波数に対して SN 比を一定以上に保つという観点と、 f_c を一定に保つという観点との妥協の産物である。このような妥協の産物を取り入れるのは、仮に加速度波形の振幅特性と SN 比の振幅特性との関係が崩れるような場合にも、安定した f_c が得られるようにするためである。上述の関係は、加速度波形の周波数特性やデジタル化するデータの長さ、加速度波形の非定常性等にもある程度依存する可能性があり、絶対的なものとは言えないからである。先に、SMAC-B2 型強震計の補助フィルタとして固定ローパスフィルタを採用したのは、上述の関係が崩れるような性質が、高周波成分に対してはより顕著であると判断したためである。ここで用いる二つのハイパスフィルタはいずれもなだらかな周波数特性を持っており、遮断周波数の前後の成分が時間領域に変換したときに不自然な形をとって現れるのを防ぐことができる。

6.5 予備的解析のアウトプット

(1) 加速度、速度、変位

SMAC-B2 型強震計のオリジナル加速度の最初の 1 秒は、計器特性補正と積分の段階では無視する。なぜなら、記録紙送りの立ち上がり速度の補正の段階で、立ち上がり速度の個体差や、デジタル化の開始位置の選び方といった要因が、最初の 1 秒の精度に影響を及ぼしてしまうためである。ERS 型強震計及び SMAC-MDU 型強震計の場合にはこのような配慮は必要でない。オリジナル加速度に、上述のフィルタリングや積分といった操作を行い、その結果が付録 CD に収められている。本資料において「補正加速度」はパラメタ付きフィルタ通過後の加速度を意味し、「SMAC-B2 相当加速度」は SMAC-B2 相当フィルタ通過後の加速度を意味する。速度と変位は、固定フィルタによるものとパラメタ付きフィルタによるものの双方を提示している。

異なる機種種の補正加速度は必ずしも比較可能でないことに注意する必要がある。なぜなら、それぞれの機種種に対して定義された補助フィルタの相違が主に 10Hz 以上の高周波成分に影響するからである。補正加速度を比較するよりも、ERS 型強震計及び SMAC-MDU 型強震計の SMAC-B2 相当加速度と SMAC-B2 型強震計のオリジナル加速度を比較することが合理的である。この比較は約 0.1Hz 以上の周波数成分に対して行うことができる。

(2) 応答スペクトル

応答スペクトルは補正加速度から計算される。絶対加速度比、絶対加速度、相対速度、相対変位の 4 種類の応答が

0%, 1%, 5% の 3 種類の 1 自由度系に対して計算される。

(3) フーリエスペクトル

フーリエスペクトルは補正加速度から FFT により計算される。

(4) 軌跡

水平面内における加速度、速度、変位の軌跡が付録 CD に収録されている。加速度の軌跡は補正加速度を用いて、速度と変位の軌跡は固定フィルタによる速度波形と変位波形を用いて描いた。

7. まとめ

1962 年より実施されている港湾地域強震観測においては、2001 年 12 月 31 日現在、5978 の強震記録が蓄積されるに至っている。このうち、2001 年には 214 の強震記録が得られている。強震計の台数としては、2001 年 12 月 31 日現在、97 台の強震計が 60 港に設置されており、設置状況としては、65 台が地盤上に、28 台が地中に、4 台が構造物上に設置されている。本強震観測網では、機械式アナログ記録方式の SMAC-B2 型強震計および電気式デジタル記録方式の ERS-F,-G,-GV 型強震計、同じく電気式デジタル記録方式の SMAC-MDU 型強震計の 3 種類の強震計が使用されている。

本資料は、2001 年に港湾地域強震観測網で得られた記録について報告するものである。本観測網で得られた記録は地点毎に分類され、地震諸元、記録番号、最大加速度等とともに強震観測表にまとめられている。強震観測表の地震諸元は、気象庁発行の「地震・火山月報 (カタログ編)」および「全国震源データ」に基づいている。また、強震記録の記録番号は、各観測地点から記録が送られてきた順番に付けられており、記録の分類として、頭文字「S」で始まる記録は SMAC-B2 型強震計で得られた記録、「F」は ERS-F,-G,-GV 型強震計で得られた記録、「U」は SMAC-MDU 型強震計で得られた記録をそれぞれ示している。強震観測表にまとめられている記録の中で、最大加速度が 20Gal を越える記録については加速度波形を示している。また、最大加速度が 50Gal を越える比較的大きな記録については、加速度波形に加え、速度波形、変位波形、応答スペクトル、フーリエスペクトル、水平面内の加速度・速度・変位の軌跡も併せて示している。

(2002 年 2 月 14 日受付)

参考文献

- 1) 菅野高弘, 三籐正明, 及川研: 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(その8) ケーソン式岸壁の被災に関する模型振動実験, 港湾技研資料, No.813, 1995年9月, pp.207-252.
- 2) 一井康二, 井合進, 森田年一: 兵庫県南部地震におけるケーソン式岸壁の挙動の有効応力解析, 港湾技研報告, 第36巻, 第2号, 1997年6月, pp.41-86.
- 3) 井合進, 菅野高弘, 山崎浩之, 長尾毅, 野津厚, 一井康二, 森川嘉之, 小濱英司, 西守男雄, 佐藤陽子, 田中剛, 海老原健介, 大村武史, 大槇正紀: 平成12年(2000年)鳥取県西部地震による港湾施設等の被害報告, 港湾技研資料, No.1015, 2001年12月.
- 4) 土田 肇・山田通一郎・倉田栄一・須藤克子: 港湾地域強震観測年報(1963・1964), 港湾技研資料 No.55, 1968年9月.
- 5) 土田 肇・山田通一郎・倉田栄一・須藤克子: 港湾地域強震観測年報(1965・1966), 港湾技研資料 No.62, 1968年12月.
- 6) 土田 肇・倉田栄一・須藤克子: 港湾地域強震観測年報(1967), 港湾技研資料 No.64, 1969年3月.
- 7) 土田 肇・倉田栄一・須藤克子: 港湾地域強震観測年報(1968), 港湾技研資料 No.98, 1970年3月.
- 8) 土田 肇・倉田栄一・須藤克子: 港湾地域強震観測年報(1969), 港湾技研資料 No.100, 1970年6月.
- 9) 土田 肇・倉田栄一・須藤克子: 港湾地域強震観測年報(1970), 港湾技研資料 No.116, 1971年3月.
- 10) 倉田栄一・石坂徳三・土田 肇: 港湾地域強震観測年報(1971), 港湾技研資料 No.136, 1972年3月.
- 11) 倉田栄一・石坂徳三・土田 肇: 港湾地域強震観測年報(1972), 港湾技研資料 No.160, 1973年3月.
- 12) 倉田栄一・石坂徳三・土田 肇: 港湾地域強震観測年報(1973), 港湾技研資料 No.181, 1974年3月.
- 13) 倉田栄一・石坂徳三・土田 肇: 港湾地域強震観測年報(1974), 港湾技研資料 No.202, 1975年3月.
- 14) 倉田栄一・井合進・土田 肇: 港湾地域強震観測年報(1975), 港湾技研資料 No.236, 1976年3月.
- 15) 倉田栄一・井合進・土田 肇: 港湾地域強震観測年報, 補遺(1963~1975, 上下動成分), 港湾技研資料 No.250, 1976年12月.
- 16) 倉田栄一・井合進・土田 肇: 港湾地域強震観測年報(1976・1977), 港湾技研資料 No.287, 1978年3月.
- 17) 倉田栄一・井合進・横山淑子・土田 肇: 港湾地域強震観測年報(1978・1979), 港湾技研資料 No.338, 1980年6月.
- 18) 倉田栄一・井合進・横山淑子・野田節男: 港湾地域強震観測年報(1980), 港湾技研資料 No.374, 1981年6月.
- 19) 倉田栄一・野田節男: 港湾地域強震観測年報(1981), 港湾技研資料 No.426, 1982年6月.
- 20) 倉田栄一・福原哲夫・野田節男: 港湾地域強震観測年報(1982), 港湾技研資料 No.446, 1983年6月.
- 21) 倉田栄一・福原哲夫・野田節男: 港湾地域強震観測年報(1983), 港湾技研資料 No.487, 1984年6月.
- 22) 倉田栄一・福原哲夫・野田節男: 港湾地域強震観測年報(1984), 港湾技研資料 No.519, 1985年6月.
- 23) 倉田栄一・福原哲夫・野田節男: 港湾地域強震観測年報(1985), 港湾技研資料 No.547, 1986年6月.
- 24) 倉田栄一・井合進・野田節男: 港湾地域強震観測年報(1986), 港湾技研資料 No.588, 1987年6月.
- 25) 倉田栄一・野田節男・樋口豊志: 港湾地域強震観測年報(1987), 港湾技研資料 No.618, 1988年6月.
- 26) 倉田栄一・井合進: 港湾地域強震観測年報(1988), 港湾技研資料 No.649, 1989年6月.
- 27) 倉田栄一・井合進: 港湾地域強震観測年報(1989), 港湾技研資料 No.676, 1990年6月.
- 28) 倉田栄一・井合進: 港湾地域強震観測年報(1990), 港湾技研資料 No.705, 1991年6月.
- 29) 倉田栄一・井合進: 港湾地域強震観測年報(1991), 港湾技研資料 No.727, 1992年6月.
- 30) 松永康男・桜井博孝・森田年一・井合進: 港湾地域強震観測年報(1992&1993), 港湾技研資料 No.776, 1994年6月.
- 31) 宮田正史・佐藤幸博・一井康二・森田年一・井合進: 港湾地域強震観測年報(1994), 港湾技研資料 No.840, 1996年6月.
- 32) 佐藤幸博・一井康二・井合進・星野裕子・佐藤陽子・宮田正史・森田年一: 港湾地域強震観測年報(1995&1996), 港湾技研資料 No.909, 1998年9月.
- 33) 佐藤幸博・一井康二・井合進・星野裕子・佐藤陽子: 港湾地域強震観測年報(1997), 港湾技研資料 No.936, 1999年6月.
- 34) 佐藤幸博・一井康二・星野裕子・佐藤陽子・井合進・長尾毅: 港湾地域強震観測年報(1998), 港湾技研資料 No.942, 1999年9月.
- 35) 土田 肇・倉田栄一・須藤克子: 1968年十勝沖地震とその余震の港湾地域における強震記録, 港湾技研資料

- No.80, 1969年6月.
- 36)倉田栄一・井合 進・土田 肇：1978年伊豆大島近海の地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.317, 1979年3月.
- 37)倉田栄一・井合 進・横山淑子・土田 肇：1978年宮城県沖地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.319, 1979年6月.
- 38)倉田栄一・野田節男：昭和57年(1982年)浦河沖地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.442, 1983年3月.
- 39)倉田栄一・福原哲夫・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強震記録，港湾技研資料 No.458, 1983年9月.
- 40)倉田栄一・福原哲夫・野田節男：昭和59年(1984年)8月7日 日向灘地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.503, 1984年12月.
- 41)倉田栄一・野田節男・樋口豊志：昭和62年(1987年)12月17日 千葉県東方沖地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.619, 1988年6月.
- 42)松永康男・桜井博孝・森田年一・井合 進：1993年釧路沖地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.777, 1994年6月.
- 43)松永康男・桜井博孝・森田年一・井合 進：1993年北海道南西沖地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.778, 1994年6月.
- 44)佐藤幸博・宮田正史・一井康二・森田年一・井合 進：1994年北海道東方沖地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.853, 1996年12月.
- 45)佐藤幸博・一井康二・宮田正史・森田年一・井合 進：1994年三陸はるか沖地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.892, 1997年12月.
- 46)佐藤幸博・一井康二・星野裕子・佐藤陽子・宮田正史・森田年一・井合 進：1995年兵庫県南部地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料 No.907, 1998年6月.
- 47)野津厚・深澤清尊・佐藤陽子・玉井伸昌・菅野高弘：港湾地域強震観測年報(1999&2000)，港湾技研資料 No.1016, 2002年3月.
- 48)土田 肇・山田通一郎・倉田栄一：港湾地域強震観測地点資料(その1)，港湾技研資料 No.34, 1967年11月.
- 49)倉田栄一・土田 肇・須藤克子：港湾地域強震観測地点資料(その2)，港湾技研資料 No.107, 1970年12月.
- 50)倉田栄一・石坂徳三：港湾地域強震観測地点資料(その3)，港湾技研資料 No.156, 1973年3月.
- 51)横山淑子・倉田栄一：港湾地域強震観測地点資料(その4)，港湾技研資料 No.298, 1978年6月.
- 52)横山淑子・倉田栄一：港湾地域強震観測地点資料(その5)，港湾技研資料 No.351, 1980年9月.
- 53)一井康二・佐藤幸博・佐藤陽子・星野裕子・井合 進：港湾地域強震観測地点資料(その6)，港湾技研資料 No.935, 1999年6月.
- 54)気象庁：地震火山月報(カタログ編)，2001年.
- 55)気象庁：震源データ (FD)，2001年.
- 56)井合 進・倉田栄一・土田 肇：強震記録のデジタル補正，港湾技研資料 No.286, 1978年3月.
- 57) Susumu Iai and Eiichi Kurata: Integration of Strong-Motion Accelerograms, Proceedings of the 5th Japan Earthquake Engineering Symposium, November 1978, pp.225-232.

強震観測担当者（2001年1月～12月）

東北地方整備局

青森港湾工事事務所	千葉 新一	木村 慎二	
八戸港湾空港工事事務所	原田 久志	滝沢 洋一	佑川 英明
釜石港湾工事事務所	福田 良介	高島 喜助	
塩釜港湾空港工事事務所	盛田 貴仁	五月女 誠	
小名浜港湾工事事務所	千葉 秀樹	村上 博文	
秋田港湾工事事務所	東條 慎太郎	佐々木 豊喜	桜庭 敏
酒田港湾工事事務所	三浦 裕信		

北陸地方整備局

新潟港湾空港工事事務所	中西 正則	森内 政弘	
伏木富山港湾工事事務所 新湊事務所	竹田 敏之	加邊 誠	
金沢港湾空港工事事務所	松本 祐二	辻 浩幸	柳 幸一
敦賀港湾工事事務所	間野 豊晴	石田 道昭	

関東地方整備局

鹿島港湾工事事務所	雨宮 康良	逸見 誓一	
鹿島港湾工事事務所 常陸那珂港事務所	貴船 哲央	志茂 香	
千葉港湾工事事務所	阿部 二郎	遠藤 武志	
京浜港湾工事事務所	伊勢 勉	今 隆之	

中部地方整備局

清水港湾工事事務所	宮原 祐二	寺田 竜士	
清水港湾工事事務所 清水港事務所	木全 啓介		
清水港湾工事事務所 下田港事務所	和田 尚久	前川 直紀	
清水港湾工事事務所 御前崎港事務所	後藤 健太郎		
三河港湾工事事務所	神谷 幸子	中津川 哲司	
三河港湾工事事務所 衣浦港事務所	中村 祐二		
名古屋港湾空港工事事務所	森 健作		
四日市港湾工事事務所	板生 孝司	木原 弘一	

近畿地方整備局

和歌山港湾工事事務所	桑原 賢二		
神戸港湾工事事務所	高橋 幸成	君島 伸司	
神戸港湾工事事務所 尼崎港事務所	兼田 伸二	玉井 和久	

中国地方整備局

境港湾空港工事事務所	内田 貴宏	児玉 富士男	
広島港湾空港工事事務所	吉川 修	吉持 誠司	

四国地方整備局

松山港湾空港工事事務所	高木 利記	小松 誠二	
小松島港湾空港工事事務所	千葉 泰三	細川 善広	
高知港湾空港工事事務所	高橋 吉弘	坂本 賢二	岡本 英幸

九州地方整備局

別府港湾空港工事事務所 大分港事務所	藤丸 勲	樋口 正隆	
宮崎港湾空港工事事務所	丸野 隆夫	奥村 靖浩	澤田 鉄司
志布志港湾工事事務所	中村 嘉邦	緒方 一之	
鹿児島港湾空港工事事務所	富田 康大	上田 倫大	

北海道開発局

釧路開発建設部 根室港湾建設事業所	松尾 義雄	角花 真記	
釧路開発建設部 釧路港湾建設事務所	青木 潤一	佐藤 仁	佐藤 朱美
帯広開発建設部 十勝港湾建設事業所	北構 義明	白木 聡	
室蘭開発建設部 浦河港湾建設事務所	大塚 寿浩	海津 博行	黒川 忍
室蘭開発建設部 苫小牧港湾建設事務所	三宮 芳明	長谷 一矢	
室蘭開発建設部 室蘭港湾建設事務所	佐々木 洋介		
小樽開発建設部 小樽港湾建設事務所	豊田 義明	千葉 政幸	坂下 勲
函館開発建設部 函館港湾建設事務所	小暮 逸郎	澤田 孝幸	
函館開発建設部 瀬棚港湾建設事業所	原田 克哉		
函館開発建設部 江差港湾建設事務所	萬年 富美雄	桑名 智幸	
留萌開発建設部 留萌港湾建設事務所	宮里 健一	京野 勇一	
網走開発建設部 網走港湾建設事務所	田中 和彦		
網走開発建設部 紋別港湾建設事務所	三原 一憲	藤田 雄二	東館 雅樹

沖縄総合事務局

那覇港湾空港工事事務所	池原 興栄	奥田 聡	金城 健吾
那覇港湾空港工事事務所 中城港湾出張所	高原 務仁		
平良港湾工事事務所	名嘉 康行	川満 正樹	
石垣港湾工事事務所	平良 宗孝		

都道府県

東京都港湾局	樋口 友行	遠藤 俊夫	
大阪市港湾局	島津 喜則	木下 佳美	石川 豊
静岡県田子の浦港管理事務所	笠井 将史	戸張 聖久	杉村 幸治
宮崎県北部港湾事務所	八田 和彦	中島 健太郎	

港湾空港技術研究所資料 No.1019

2002.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 0468(44)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 有限会社 黎明社

Copyright © (2002) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。