

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

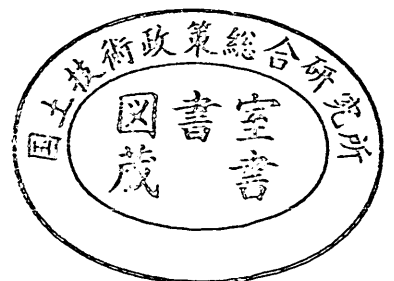
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 19

NO. 1

MAR. 1980

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第19巻 第1号 (Vol. 19, No. 1), 1980年3月 (Mar. 1980)

目 次 (CONTENTS)

1. 直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力—空気圧縮モデルによる検討—
.....谷本勝利・高橋重雄・村永 努..... 3
(Uplift Forces on a Ceiling Slab of Wave Dissipating Caisson with
a Permeable Front Wall—Analytical Model for Compression of an
Enclosed Air Layer—.....Katsutoshi TANIMOTO, Shigeo TAKAHASHI
and Tsutomu MURANAGA)
2. 石灰・セメント系安定処理土の基本的特性に関する研究 (第2報)
.....寺師昌明・田中洋行・光本 司・新留雄二・本間定吉.....33
(Fundamental Properties of Lime- and Cement-treated Soils
(2nd Report).....Masaaki TERASHI, Hiroyuki TANAKA,
Tsukasa MITSUMOTO, Yuji NIIDOME and Sadakichi HONMA)
3. 広帯域入力地震動の合成方法の提案
.....井合 進・土田 肇.....63
(A Synthesis Method of Input Ground Motions of a Wide Period
Range.....Susumu IAI and Hajime TSUCHIDA)

3. 広帯域入力地震動の合成方法の提案

井合 進*・土田 肇**

要 旨

最近、構造物の大型化に伴い、その固有周期が周期10秒以上の範囲から周期数分の一秒程度までの範囲にわたって存在するような構造物の建設が計画されるようになった。このような構造物の地震応答解析には、このような広い周期帯域にわたって十分な妥当性を持つ入力地震動が必要である。これまで多くの構造物の地震応答解析に用いてきた強震加速度記録は、周期数秒以上の長周期帯域において十分な精度を有していない。そこで、永久変位に相当する静的な成分から周期数十分の一秒までの広い周期帯域にわたって十分な妥当性を持つような入力地震動を合成する方法を考えた。その方法は、全体を4つの周期帯域に分け、静的な成分を含むものは断層モデルにより、また周期数十秒の成分、周期数秒の成分、周期数分の一秒の成分に代表される帯域の成分は、それぞれ実地震の記録波形の振幅を補正したものにより設定し、合成するというものである。

本報告では、合成のための具体的な手法を示すとともに、マグニチュード8.0の地震に対し、震央距離が50, 100, 200 kmの地点での広帯域入力地震動を合成して示した。

* 構造部 耐震構造研究室

** 構造部 耐震構造研究室長

3. A Synthesis Method of Input Ground Motions of a Wide Period Range

Susumu IAI*

Hajime TSUCHIDA**

Synopsis

Recent development of engineering has made it possible to plan and construct very large structures whose natural periods exist over a wide period range; from 10 seconds or longer to one second or shorter. An earthquake response analysis of structures of this kind requires an input ground motion which maintains acceptable reliability over the wide period range. However, accuracy of a long period components of several seconds or longer is doubtful of strong-motion accelerograms which have been used for earthquake response analyses of common structures.

The report presents a method to synthesize an input ground motion which, over a wide period range, has reliability achievable under the present state of knowledge of this field. The method covers a period range from a static component to a short period component of 0.1 second or shorter. The method proposed here is as follows. The wide period range where input ground motions are synthesized is divided into four period bands; one including a static component, one including several tens seconds, one including several seconds, and one shorter than one second. The input ground motions are synthesized from four components of earthquake ground motions corresponding to these four period bands. The component of the period band including a static motion is theoretically calculated by a fault model and the rest three are formed respectively by modifying the amplitudes of seismograms of actual earthquake motions.

Synthesized ground motions for a magnitude 8.0 earthquake are also presented.

* Member, Earthquake Resistant Structures Laboratory, Structures Division

** Chief, Earthquake Resistant Structures Laboratory, Structures Division

目 次

要 旨	63
1. 緒 論	67
1.1 研究の目的とその背景	67
1.2 研究の範囲	67
1.3 研究の方法	68
2. 入力地震動の合成の基本的な考え方	68
3. 地震動に関する研究成果の分類と評価	69
3.1 研究成果の分類の方法	69
3.2 対象とした研究成果	70
3.3 研究成果の周期帯域別の評価	73
4. 広帯域入力地震動の合成方法	74
4.1 合成方法の概要	74
4.2 各周期帯域の成分の設定方法	75
4.3 適用上の注意	77
5. 計 算 例	78
6. 結 論	94
7. 結 語	94
謝 辞	95
参 考 文 献	95

1. 緒 論

1.1 研究の目的とその背景

近年、技術の発展に伴い、これまでに建設されたことのないような大型の構造物あるいは新しい型式の構造物の建設が計画されるようになった。最近では、浮遊式構造物がその例として挙げられる。浮遊式構造物というのは、本体を水に浮かべ、けい留施設により本体を指定位置にほぼ固定する形式の構造物である。

地震応答という観点から、現在アイデアとして示されている浮遊式構造物の振動性状についての特徴を挙げれば、次のとおりである。

- i) 構造物の利用上の制約を緩和するために、風や流れによる移動を押えと共に、一方波による外力を緩和するように本体とけい留施設が適宜に軟く、かつある程度以上に剛に結合されていることが望まれる。また、地震動に対しては、本体は非常に質量の大きなものとなることが予想されるので、本体とけい留施設が剛に結合されていると、けい留施設は本体から非常に大きな反力を受けることになる。したがって、地震動の影響に限って考えれば、本体とけい留施設とは大きな相対変位を吸収できる柔な部材を介して結合されていることが望ましい。この相反する要望により、低レベルの荷重に対しては荷重一変形曲線のこう配が大きく、高レベルの荷重に対してはこう配の小さい部材によって本体とけい留施設が結合されることが考えられる。すなわち、非線型な振動系である。
- ii) 荷重レベルが低く、線型な振動系とみなせる範囲での固有周期がいくつかあり、地震応答を検討するに当たって無視することのできない影響をもつ固有周期が数分の1秒程度から10秒以上の周期範囲にまで広がって存在することである。

これまでに建設されてきた多くの構造物の場合は、数秒以下の範囲に固有周期を持つものが大部分であり、しかも線型系に近い挙動を示すものが多いのに対して、上記の2つの特徴は著しいものであると考えられる。このような動的特徴を有する構造物は、特に浮遊式構造物に限らず今後様々なものが計画されるようになると思われる。

このように広帯域に固有周期の広がって存在する構造物であっても、それが線型であれば、各固有周期に対応する周期付近をカバーする地震動が別々に与えられていれば、それらに対する応答を重ね合わせることにより、その応答を求めることができる。しかし非線型系の応答解

析においては線型系の場合と異なり重ね合せの原理が適用できない。すなわち、各周期成分ごとに別々に系の応答を計算した後でそれらを重ね合わせることにより全体としての応答を求めるという考え方ができない。したがって、このような構造物の地震応答解析に必要とされる入力地震動は、周期10秒を越える範囲から周期数分の一秒程度までを含む広い帯域にわたって、十分な精度を持つ必要がある。また、非線型系の応答計算を行うために、入力地震動は最終的には時刻歴のかたちであることも必要である。

これまで工学的な目的で行われてきた強震観測により得られた地震動記録は、周期数秒以上の領域においては、多くの場合、実用上十分な精度を有していない¹⁾。もっとも、これまでの構造物の地震応答解析では、これらの強震記録を用いて、十分な精度の解析結果が得られた。というのは、これまでに建設されてきた大部分の構造物の固有周期は、数秒以下であったからである。しかし、線型な範囲での固有周期が10秒を越えるような構造物の場合には、このような強震記録を直接に応答解析に用いることは適当ではない。

地震動の観測は、工学的な目的で行われてきた強震観測に限らず、理学的な目的で行われてきたものも多い。たとえば、気象庁の1倍強震計による観測では、周期数秒前後の成分を精度よく観測している。しかし、いずれの観測も、その記録波形が十分な精度を持つのは、それぞれの地震計の特性に応じたある特定の周期帯域に限られることには変わりない。永久変位のような静的な成分から周期数十分の一秒にわたるような広帯域において十分な精度で地震動が観測された例はない。

線型な範囲での固有周期が10秒を越える範囲にまで広がって存在する非線型構造物の地震応答解析を行うためには、なんらかの方法によりこのような広い周期帯域をカバーする入力地震動を合成する必要がある。しかし、このような広帯域の入力地震動を合成するための方法はいまだ提案された例がない。そこで著者らはそのための方法を考え、その方法により例題としての入力地震動の計算を行った。本報告はそれについて報告するものである。

本研究の一部は、1979年7月の地震工学研究発表会において発表した²⁾。

1.2 研究の範囲

本研究を行うにあたって、その範囲を3つの意味で設定した。それらは考慮する周期帯域の広さ、考慮する方向成分、地震動を設定する位置の3つである。考慮する周期帯域としては、周期の長い方については周期無限大

すなわち永久変位のような静的な成分までを含むものとした。周期の短い方はこれまでの強震観測によりカバーできる数十分の一秒までとした。前記の浮遊式構造物に限れば周期無限大までは必要ないが、更に広い範囲に考慮すべき固有周期を有する構造物の出現ということも考慮してできる限り広帯域の入力地震動を考えることとした。

前記の浮遊式構造物の地震応答解析では上下方向の地震応答の検討の必要性はほとんど無い。また、これまでに実施された地震応答解析でも水平方向についてのみ解析している例が多い。したがって、考慮する方向成分については水平方向2成分とした。

最後に、地震動を設定する位置については次のように考えた。一般に地表の地震動を推定したり、構造物と地盤の相互作用を検討する際には、表層地盤の地震応答を考慮することが多い。そのため、入力地震動を設定する位置として基盤の表面を考えることが多い。基盤としては、工学的には、岩盤または N 値 50 以上の洪積層を考えることが多い。この基盤の表面を地震学で設定する基盤の表面と区別する意味で、設計基盤面と呼ぶ。そこで本報告では、広帯域入力地震動として、設計基盤面における地震動を考えることとした。ここで、関連事項として設計基盤面より上方の表層地盤の地震応答についてふれると、その水平成分は、各点における鉛直方向の一次的なせん断波の伝播を考えることにより取扱うことができる。このことは、東京国際空港における多測点での地震動の同時観測でも確認された³⁾。また、前記の工学的には N 値 50 以上の洪積層を設計基盤面として扱うことについては、多数地点での地表の地震動記録から設計基盤面下方より上方へ入射する地震波を求め、そのスペクトル特性を比較することにより検討されている⁴⁾。この場合、表層地盤の地震応答は前記の考え方にもとづいている。

以上により、著者が目標としている入力地震動の設定位置、成分、周期帯域についての条件が明らかになった。次に、このような条件に適合する入力地震動を、どのような地震に対して設定するかを考える必要がある。すなわち、地震についてどのような条件を与えて入力地震動を設定するかということである。このことは、用いる手法により与えられるべき条件も変化するので、ここで完全に議論することは難しい。報告を進める過程で順次検討するが、ここでは、最小限の条件として、想定する震源の位置およびマグニチュードは与えられるものとする。

1.3 研究の方法

地震動に関する研究は、現在も次々と新しい成果を生みだしている。本報告で研究対象とした広帯域入力地震動の合成方法を考えるにあたっては、著者が可能な範囲において、現在までに得られた研究・調査の成果を検討し、研究目的に適合する手法・資料を選定し、それらを一つに合成する手法にまとめることとした。次章以降の理解を容易にするために、本報告の論旨の展開の概要を示せば、以下のとおりである。

既にふれたように、そのまま広帯域入力地震動として用いられるものはない。したがって、何らかの基準で区分された状態で入手できる資料を合成して広帯域入力地震動を得ることになる。区分の基準としては、後に詳しく説明するが、地震動を物理的視点から区分するものとして、周期帯域、時間帯域、波動の種類が考えられる。また、地震動の波形を得る手法からは観測によるものとシミュレーションによるものとに区分できる。まず、どの基準で区分された資料を合成して広帯域入力地震動を合成することが適当かを検討した。検討の内容は追って詳しく報告するが、周期帯域ごとに区分されて入手される資料を合成することが適当と判断された。そこで、周期帯域ごとに分類して地震動波形を得る具体的方法を選定評価した。その結果から、それぞれ周期帯域において、観測による方法とシミュレーションによる方法のいずれによるのが適当かを判断した。

以上の結果をふまえて、各周期帯域ごとに求まる地震動波形を合成する方法を示した。

さらに例題として、仮想地震に対して本報告で示した手法により広帯域入力地震動を合成して示した。

2. 入力地震動の合成の基本的な考え方

前章においてふれたように、現在のところ、そのまま広帯域入力地震動として利用できる地震波はない。ここで言う地震波は地震動の観測結果に限らず、何らかの方法で作成された地震波をも含むものとする。したがって、何らかの基準によって区分された部分ごとに得られる地震波を合成して、広帯域入力地震動を作成することになる。すでに説明したように、本報告で言う広帯域は地震動の周期に対して広帯域ということである。そのことからすれば、地震動の周期帯域を区分し、そのそれぞれの帯域について地震波を求め合成するということは、最も直接的な発想と言える。しかし、ここではもう少し広く区分の基準を検討し、いずれの区分にもとづいて合成を行うのかを考えてみたい。

いま仮りに、ある地点で地震動の完全な観測記録が得られたとし、その記録を何らかの基準により分解すなわ

ち区分する事を考える。この場合どのような基準が考えられるであろうか。そのような基準としては、周期、時間、波動の種類が考えられる。

周期による区分は、地震動成分の存在する周期帯域を区分することである。したがって、この場合の合成はそれぞれの帯域ごとに地震動波形を求め、広帯域地震動を合成することである。区分された周期帯域を小さくにとって帯域ごとの地震動を求めることは、周期スペクトルを求めることと等価となる。

時間による区分は地震波継続時間を区分することである。例えば、P波初動からS波初動まで、S波初動からSS(S波が地表面で一度反射してS波として観測点に到達したもの)初動まで、等々と区分することである。また、機械的に地震波の先端から一定時間間隔で区分するという事も考えられる。もし、このように区分された時間帯域ごとに、地震動の周期については広帯域な地震動を求めることができれば、それを合成して、ここで目的とする広帯域入力地震動を作成することができる。

波動の種類による区分は、実体波(さらに区分すれば、P波、S波)、表面波(レイリー波、ラブ波)に区分することである。そのそれぞれを周期帯域での制約なしに求めることができれば、それらを合成することにより広帯域入力地震動を作成することができる。

さらには、前記の3種類の区分方法を併用することも考えられる。例えば、時間で区分した時間帯域内を周期帯域に区分し、それぞれに対して地震動を求めて合成する方法である。しかし、このような併用は過度の細分化と考えられるので、本報告ではふれないこととする。

次に、地震動を求める手法であるが、これには、観測による方法とシミュレーションによる方法とがある。観測による方法とは、観測波形そのものおよびその振幅を圧縮または伸張して用いる場合を指す。

シミュレーションによる方法は、一般論としては、物理モデルを用いる方法すなわち模型実験による方法と数値モデルを用いる方法とがある。物理モデルを用いる方法は、震源および入力地震動が必要とされている地点を含む地球の必要部分を模型化し、その中で地震を発生させ、対象地点での地震動を観測する方法である。原理的には考えられるが、実施は非常に困難である。数値モデルによる方法は、地震の発生と地震波の伝播過程を数値的にモデル化し、数値計算により対象地点の地震動を求める方法である。物理モデルを用いるシミュレーションが非常に困難であることから、本報では、以後シミュレーションは数値モデルによるシミュレーションを指すものとする。

以上のようにシミュレーションを定義すると、模擬地震波はシミュレーションによるものか否かという疑問が生ずる。それが観測された地震動を必要とせずに計算機内で作成されるという意味で、シミュレーションによるものと考えられることもあろう。しかし、前記のように地震の発生と地震波の伝播をモデル化して求めたものではない。そこで、本報告では、それが観測結果より推定される地震動特性に合った地震動を求めるものであることに着目し、観測値による方法の一部に含めて取扱うこととした。

以上のとおり、何について区分された帯域について地震動を求めるかということと、そのための手法が整理された。そこで、そのそれぞれについて、地震動を求めることの可能性を検討した。その検討結果を詳細に説明することは本報告の目的ではなく、また、前記のように整理された段階でそれぞれについて地震動を求めることの可能性を考えることは、困難なことではない。したがって、それぞれについて地震動を求めることの可能性についての説明は省略する。

次に、周期、時間等の区分に対し、観測による方法とシミュレーションによる方法の両方で地震動が求まる場合にそのいずれを用いるかを考える必要がある。もし、両方法を評価して、いずれの方法で求めた地震動が信頼性が高いかを判断できるならば、信頼性の高いものを用いればよい。両者の信頼性に判断がつかない場合には、本研究においては、観測による方法を優先的に採用することとした。

以上の考察から、区分された周期帯域ごとに地震動を求め、それらを合成することが適切な処置と判断された。その主な理由は次のとおりである。第一に、区分されたすべての周期帯域について、何らかの方法で地震動を求めることができる。第二に、地震計の特性から、地震動そのものが区分された周期帯域ごとに観測されている。このことは、すでに述べた観測による方法から定まった地震動を優先利用する場合に都合が良い。

3. 地震動に関する研究成果の分類と評価

3.1 分類と評価の方法

前章で説明したように、広帯域入力地震動を求めるには、区分された周期帯域ごとに地震動を定め、それらを合成することとした。そこで、本章では、観測による方法とシミュレーションによる方法それぞれについて地震動を求める方法を説明した。それらは、区分された周期帯域ごとに分けて説明されている。また、これまでの研究成果を網羅的に分類して説明するのではなく、著者が

観測による方法あるいはシミュレーションによる方法ではこの方法を用いるのが適当と判断したものを中心に説明する。したがって、ここでいう研究成果の分類とは、著者の選択した方法を周期帯域に応じて配列したことを意味する。

周期帯域をどのように区分するかは重要な点である。しかし、そのことは、どのように区分すると地震波を求めるのに便利かということと関係する。そこで、本章では大まかな周期区分にもとづいて説明し、その後それぞれに区分された周期帯域の境界を明確にする。

本章の後半では、それぞれの周期帯域について、観測による方法とシミュレーションによる方法のいずれで地震波を求めるのが適当かを検討する。それが、本章でいうところの評価である。

3.2 対象とした研究成果

(1) 地震動の観測結果

a) 地震計の特性と観測の精度

地震動は種々の地震計で観測されている。観測において全く誤差が含まれなければ、電子計算機により計器特性の補正をすることによりすべての周期の成分が正しく再生される。しかし、実際には、誤差が含まれ、計器特性の補正を行っても、すべての周期の成分が正しく再生されるわけではない。以後において、精度よく観測される周期帯域としては、計器特性の補正を行うことにより正しく再生される周期帯域であるものとする。

精度よく観測される帯域は、地震計の特性に応じ、また、観測する地震動の特性に応じ異なるが、主に地震計の特性に応じて異なる。その帯域は、おおまかに分類すれば、4つの帯域であり、それぞれの帯域を代表する周期は、数分の一秒、数秒、数十秒、および無限大秒（永久変位のような静的な成分に対応する）である。

b) 周期数分の一秒の成分

周期数分の一秒の成分に代表される周期帯域は、工学的な目的で設置されてきた強震加速度計によりカバーされている。たとえば、港湾地域強震観測においては、SMAC-B2強震計とERS強震計が用いられている。精度よく観測できる帯域は、SMAC-B2強震計の場合、周期数秒から0.1秒程度まで、ERS強震計の場合、周期数秒から数十分の一秒までである¹⁾。

このような強震加速度計の記録をもとにして、マグニチュードと最大加速度と震源距離またはこれに類する距離との関係が調べられてきた。この関係を提案したものうち、野田・上部の提案による関係²⁾は、港湾地域強震観測により得られた記録をもとにして求めたものであり、著者らの研究との適合性がよい。また、同一のマグ

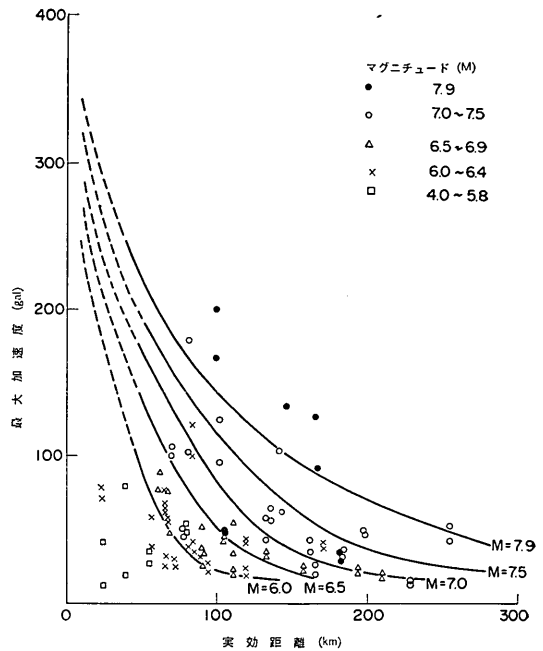


図-1 基盤最大加加速度と実効距離と気象庁マグニチュードの関係³⁾

ニチュードと距離に対して最も大きな最大加速度を与えるグループに属する。すなわち、設計上最も安全側である。そこで、最大加加速度、マグニチュードと距離の関係の代表として、野田・上部の提案した関係についてその概略を説明することとする³⁾。

図-1にその関係を示す。この図において、実効距離というのは、地震源としての断層面の位置が既知の場合には断層面から地震動の観測点までの距離である。断層面の位置が未知の場合にはマグニチュードに応じて定まる大きさの球状の震源域からの距離である⁶⁾。また、同図においてマグニチュードというのは、気象庁によって定められるマグニチュードであり、固有周期約5秒の地震計の記録波形等から定められるものである⁷⁾。最後に、同図において最大加加速度というのは、SMAC-B2強震計またはこれと同じ計器特性を持つ地震計によって記録される加速度波形の最大振幅のことである。野田、上部は同図に示した関係を解析的な関係式で示していないが、港湾技術研究所の研究室レベルでの内部資料に、この関係を数値表で示している。この数値表は、いまだ公表されていないので付録に載せた。

c) 周期数秒の成分

周期数秒の成分は、気象庁の一倍強震計をはじめとする地震計による観測が行われてきた。図-2にその計器

広帯域入力地震動の合成方法の提案

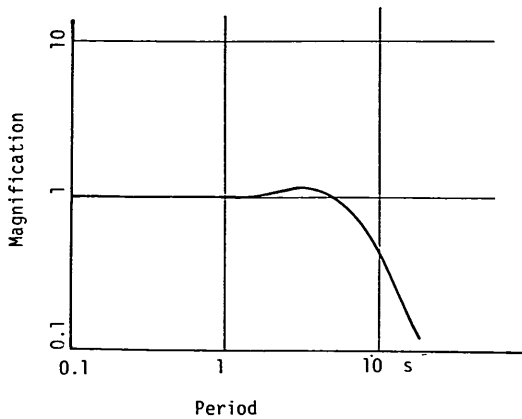


図-2 気象庁一倍強震計の計器特性

特性を示す。記録用のドラムの送り速度 (3 cm/分) を考え合わせれば、おおむね、精度よく記録できる帯域は、周期10秒から1秒程度までである。

このような地震計により得られた記録をもとにしてマグニチュードをパラメタとする最大水平振幅と震央距離との関係を与える公式が得られている⁹⁾。この公式は提案者の名をとって坪井公式と呼ばれ、気象庁でマグニチュードを定めるために用いられている。次式で与えられる。

$$M_J = \frac{1}{2} \log(A_N^2 + A_E^2) + 1.73 \log d - 0.83 \dots (1)$$

ここに M_J : マグニチュード (気象庁発表のマグニチュード)

A_N, A_E : 固有周期約5秒の地震計で得られた周期5秒以下の記録波形のNおよびE方向の最大振幅 (μ)

d : 震央距離 (km)

これを図化して、図-3に示した。以後、 M_J のことを、気象庁マグニチュードと呼ぶ。

この坪井公式は種々の地盤上の観測値に対する平均的

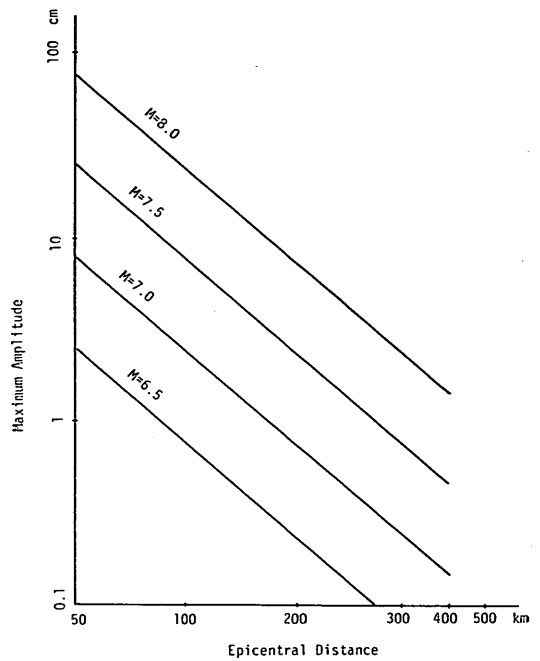


図-3 固有周期約5秒の地震計の記録による最大振幅と震央距離と気象庁マグニチュードの関係 (坪井公式)⁹⁾

な関係式である。各観測所において観測される振幅は、観測した地震のマグニチュードと震央距離からこの式によって求められる振幅に対して、観測所ごとにほぼ常に大きいかまたは小さいという一定の傾向がある。ある観測所で観測された振幅を標準的な振幅すなわち、坪井公式で与えられる振幅を割ったものは、地盤係数と呼ばれている。地盤係数を観測点に従っておおまかに分類したものは、勝又によれば、表-1の通りである⁹⁾。この成果はマグニチュード6以上の地震約70個をもとに得られている。

表-1 地盤係数による観測所の分類 (勝又⁷⁾による)

記号	概要	地盤係数	例
H	振幅が常に非常に小さい。岩盤上や、それに近い条件の観測所に多い。	2以上	根室、八戸、宮古、盛岡、石巻、相川、松代等。
H-M	H型とM型の中間的性質のところ。	1.3~2	柿岡、大島、静岡等。
M	標準的 (平均的) 振幅を示すところ。	0.8~1.3	仙台、福島、宇都宮、水戸、三島等。
S-M	S型とM型との中間的性質のところ。	0.5~0.8	熊谷、甲府、名古屋等。
S	振幅が常に非常に大きい。軟弱な地層上の観測所に多い。	0.5以下	青森、秋田、酒田、新潟、東京、横浜、大阪等。

d) 周期数十秒の成分

周期数十秒の成分、特に周期20秒程度の表面波に代表される成分は、気象庁の長周期地震計による観測が行なわれている。しかし、その観測の歴史は周期数秒の成分の観測の歴史に比べれば短い。長周期地震計の計器特性の例として、図-4に気象庁のLP-Lo型地震計の計器特性を示す。精度よく観測できる帯域は、おおむね周期10秒から50秒程度、すなわち周期20秒前後に卓越する表面波の成分をかこむ範囲である。

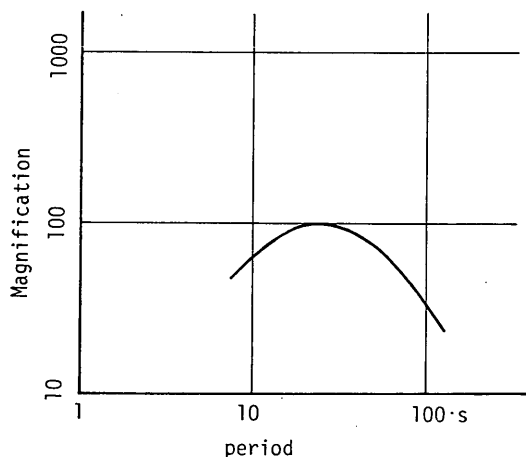


図-4 気象庁 LP-Lo 地震計の計器特性

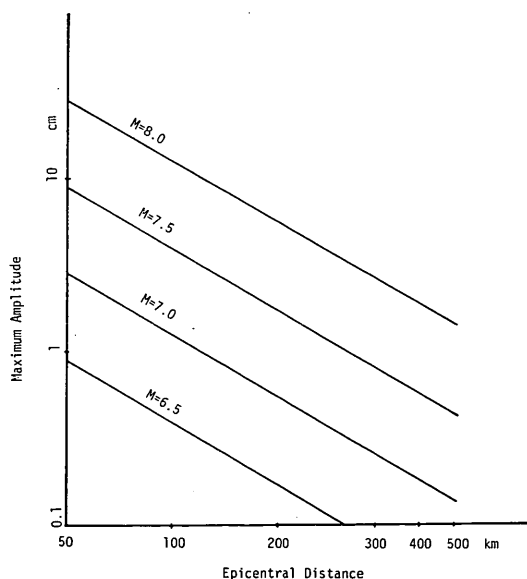


図-5 周期20秒程度の表面波の最大振幅と震央距離と表面波マグニチュードの関係(松代における表面波マグニチュードの式)¹⁰⁾

このような地震計により得られた記録をもとにして、表面波マグニチュードをパラメタとする、最大水平振幅と震央距離との関係式を与える公式が得られている¹⁰⁾。松代における関係式は次式で与えられる。

$$M_S = \frac{1}{2} \log(a_N^2 + a_E^2) + 1.31 \log \delta + 3.00 \dots \dots (2)$$

ここに M_S : 表面波マグニチュード

a_N, a_E : 長周期地震計で得られた周期20秒程度の表面波の記録波形の N および E 方向の最大振幅 (μ)

δ : 震央距離 (度)

これを図化して、図-5に示した。なお、松代の観測点の地盤条件は岩盤である。

e) 静的な成分

静的な成分については、測地的な観測により、震源に比較的近い地点で測定されている。しかし、水平成分については、上下成分の場合の海水面のような絶対的な基準点がないため、やや便宜的に定めた基準点に対する相対的な変位しか測定できていない。

(2) 震源モデル

a) 基本的なモデル

地震動発生メカニズムとしては、断層モデル¹¹⁾が考えられることが多い。これは、弾性体中にある大きさの断層面を考え、この面においてある大きさのくいちがいが起ったときの弾性体の振動が地震動であるとする考え方である。その理論的根拠は、震源が double couple (複双力源) であるという観測にもとづく事実と、地殻変動に関する観測結果の両者を統一的に説明できることにある。

一口に断層モデルと言っても単純なものから複雑なものまで種々のものがある。そのうち、比較的単純で引用されることの多いモデルは次のようなものである¹²⁾。すなわち、弾性体としては無限に広がる均質なものを考える。断層面の形状は矩形であるとする。断層面のずれ方は、ramp function と呼ばれるもので、ある時間に一定速度で動いて一定値に達すると停止するというものを考える。ついでながら、この時間のことを立上り時間 (rise time) と言う。最後に断層面における破壊すなわちずれは一定速度で一方向に伝播するものとする。このモデルに必要なパラメタは、大きく分けて、断層面に関する幾何的な量、断層面の動き方に関する量、および弾性体の弾性定数の3つからなる。表-2に具体的にこれらのパラメタを示した。

このモデルで計算した地震動と観測値を比較した結果は、これまでの研究によれば次のとおりである¹³⁾。すな

表-2 基本的な断層モデルのパラメタ

大分類	小分類	パラメタ
断層面に関する幾何的な量	断層面の大きさ	断層の長さ 断層の幅
	断層面の方向	傾斜角 走行方向
	観測点に対する断層面の相対的な位置	北緯 東経 深さ
断層面の動き方に関する量	断層面上の各点での動き方	ずれの大きさ ずれの方向 立上り時間
	破壊の伝播	破壊伝播の速度 破壊伝播の方向
弾性体の弾性定数	弾性体の弾性定数	P波速度 S波速度

わち、前節で述べたとおり、観測値としては、周期数十分の一秒から数十秒までの成分と静的な成分とがある。このうち、周期数十分の一秒から数十秒までの成分の観測値と計算値を比較した結果、計算値と観測値が似ているのは、おおむね周期10秒から数十秒までの帯域においてであり、しかも、おおむねせん断波の到達する時刻までの範囲に限られる。せん断波到達時刻以後の観測波形には、このモデルで計算し得ない反射波や表面波が同時に含まれているため、計算値とは似ていない。一方、静的な成分の比較によれば、計算値と観測値とは、ほぼ一致する。したがって、当然のことであるが、静的な成分に関しては、せん断波到達時刻以後も一致する。

周期数十秒以上の成分のうち静的な成分を除いたものについては観測値がほとんどないため、計算値と観測値の比較は行われていない。しかし、このように周期の長い成分の波長は非常に長く、反射等の様相は静的な成分の様相に近いものであると考える。したがって、周期数十秒以上の長周期成分については、せん断波到達時刻以前以後を通じて、計算値と実地震動とが一致するものとする。

b) 複雑化したモデル

さきに述べた基本的なモデルでは、周期数秒以下の短周期の成分や、せん断波到達時刻以後の反射波や表面波の成分を説明することができない。このため、基本的なモデルを複雑化することにより、これらを説明しようとする研究がなされている。複雑化する対象としては、発震機構に関する断層の動き方の部分と、地震波の伝播

に関する弾性体の構造（不均質性）の部分とからなる。

発震機構に関する部分の複雑化は、くいちがいの時間関数を複雑化する方法¹⁴⁾や断層面上における破壊伝播を複雑化する方法¹⁵⁾により行われる。いずれの方法も定性的には理論的な妥当性があり、しかも、パラメタをうまく設定すれば、地震動波形の短周期成分まで説明することが可能である。しかしこれらのモデルにより地震動波形を予測する場合に、そのパラメタをいかにして設定するかということは、明らかにされていない。

地震波の伝播に関する部分の複雑化は、弾性体の層構造として、半無限¹⁶⁾のものや多層構造¹⁷⁾のものを考えることにより行われる。震源は点震源であるが、地球全体を球状の多層構造としたモデルも提案されている¹⁸⁾。このようなモデルにより周期数秒以上の周期成分について、せん断波到達時刻以後の地震動波形についても説明が可能である¹⁹⁾。しかし、多くの場合、周期数秒程度の成分に影響するような地下構造に関するデータは、一部の地域については徐々に明らかにされてはいるものの²⁰⁾、現状では極めて乏しい。したがって、一般的に周期数秒程度の成分まで理論的に計算することは難しい。しかし、地球をとりまく地殻に関するデータは一応得られているので²¹⁾、地殻をモデル化した二層構造のモデルにより、周期20秒程度の表面波を計算することは可能である。

以上に述べたすべての部分を複雑化して、周期50秒から0.05秒までの帯域の理論地震動を工学的な目的のために求めた例もあるが²²⁾、この場合もモデルのパラメタの設定方法が一般化されていないので実用に供することができないという点は、既に述べたものと共通している。

3.3 研究成果の周期帯域別の評価

(1) 評価における視点

地震動の設定は、経験公式を含む広い意味でのモデルの設定と、モデルのパラメタの設定との二段階からなる。モデルのパラメタを設定するために得ることのできる情報量には限りがある。したがって、モデルの設定にあたっては、そのモデルに必要なパラメタの数と、現状で得られる情報量とのバランスを考える必要がある。これまでに行われた研究成果を評価するにあたって、この点に留意した。

(2) 周期数分の一秒を囲む帯域

周期数分の一秒を囲む帯域については、観測値にもとづく地震動の設定方法として、野田・上部の提案による設計基盤面における最大加速度、震源域までの実効距離、気象庁マグニチュードの関係式により、強震記録のうちの適当なものの振幅を調整して用いる方法がある。

野田・上部の関係式については既に説明したとおりである。

断層モデルによりこの帯域の地震動波形を求めることは理論的には可能である。しかし、発震機構のモデルおよび伝播経路のモデルの両方において、そのパラメータをすべてにわたって設定するための情報が現状では得られていない。したがって、実用上、断層モデルにより周期数分の一秒を囲む帯域の成分を求めることはできないのが現状である。

(3) 周期数秒を囲む帯域

周期数秒を囲む帯域においては、この帯域に適合する地震計で観測された地震波形の振幅を想定する地震の条件に対して坪井公式から求まる最大振幅が一致するように調整して用いることができる。設計基盤面より深い地盤構造による増幅の効果は地盤係数により、振幅の調整にとり入れることができる。坪井公式および地盤係数については、既に説明したとおりである。

断層モデルにより周期数秒を囲む帯域の地震波形を求めた例はいくつかある。しかし、周期数秒の成分に影響の大きい地盤構造が、震源から観測点までにわたってわかっていることは少ない。したがって一般的には、この帯域の成分を断層モデルにより求めることは容易ではない。

(4) 周期数十秒を囲む帯域

周期数十秒を囲む帯域においては、松代（岩盤上）における最大振幅、震央距離、表面波マグニチュードの関係が得られている。周期数十秒の成分は、地球をとりまく厚さ20km程度の地殻の影響を受け、特に周期20秒程度の表面波が卓越することが多い。このように大きな構造の影響しか受けないので、少なくとも日本国内における局地的な増幅度の変化は小さいものと考えられる。したがって、この表面波マグニチュードの関係式を用いて、最大振幅を求めることは妥当である。

一方、地殻をモデル化した断層モデルによりこの帯域の成分を求めることも可能である。この場合には、震源のパラメータが適正に設定されれば、この帯域の成分の振幅のみならず、そのパラメータに応じた波形も完全に決定される。しかし、想定する地震のパラメータの決定の精度を考え合わせた全体としての妥当性は、過去の地震の記録波形の振幅を調整して設定する方法の妥当性と著しい差はないのが現状である。断層モデルによる2層構造のシミュレーションプログラムの開発にはそれなりの時間と労力がかかることから見て、この帯域の成分も、実地震の記録波形により設定することが妥当であると考え

(5) 静的な成分を含む帯域

静的な成分を含む帯域においては、静的な成分のみの測定値はあるものの、非常に周期の長い動的な成分の観測値はほとんどない。

一方、この帯域ではその成分の波長が極めて長いので、無限媒質に対する基本的な断層モデルで地震動波形の設定をすることができる。また、地震パラメータのうち特に設定のむずかしい立上り時間がこの帯域の成分に与える影響は小さい。したがって、この帯域における地震動は、基本的な断層モデルにより設定することが妥当であると考え

4. 広帯域入力地震動の合成方法

4.1 合成方法の概要

第3章においては、全体をおおまかに4つの周期帯域にわけて考えを進めてきた。それぞれの帯域は、周期数分の一秒、数秒、数十秒、および無限大秒によって代表されるものであった。はじめの3つの帯域については、実地震の記録波形を用いて設定することが妥当であると考えた。残りの帯域については、無限媒質の断層モデルによるシミュレーションで設定することが妥当であると考えた。以上が第3章で行った評価の要約である。

それぞれの帯域に応じた設定方法により妥当性を持ってカバーできる周期範囲は、それぞれ3.2節の各項で述べたとおりである。すなわち、先に述べた4つの帯域に応じて、数十分の一秒または0.1秒より数秒まで、1秒程度より10秒程度まで、10秒程度より数十秒まで、数十秒以上、であった。このうち、周期1秒程度から数秒までの帯域は、2つの設定方法が重複している。この帯域で両者を比較すれば、周期数秒に代表される帯域をカバーする設定方法の方が、周期数分の一秒に代表される帯域をカバーする設定方法よりも精度がよいと考える。

以上の検討にもとづいて、設計基盤面における広帯域入力地震動の合成方法として、次のようなものを考えた。

まず、静的な成分から周期数十分の一秒の成分までを含む周期範囲において入力地震動を設定するものとし、この範囲を4つの周期帯域に分けて考える。その帯域はそれぞれ、0.02秒または0.1秒より1～2秒までの帯域、1～2秒より6～10秒までの帯域、6～10秒より30～50秒までの帯域、および30～50秒以上の帯域である。ここで～印で示したのは、それぞれの帯域の境界としての遷移領域であり、バンドパスフィルタの減衰のための領域である。このような領域を設けたのは、各帯域における

広帯域入力地震動の合成方法の提案

表-3 設計基盤面における広帯域入力地震動の設定方法

帯域		30~50 秒以上	6~10 秒より 30~50 秒まで	1~2 秒より 6~10 秒まで	0.02秒(0.1秒)より 1~2 秒まで
設定の方法	波形の設定方法	断層モデルによるシミュレーション	長周期地震計 (Lp-Lo型) 等による実地震の記録波形。	1倍強震計等による実地震の記録波形。	ERS 強震計 (帯域を0.02 秒以上とする場合) や SMAC-B2 強震計 (帯域を0.1 秒以上とする場合) 等による実地震の記録波形。
	ピーク値の設定方法	シミュレーション結果そのまま	表面波マグニチュードの式	坪井の式と地盤係数	野田・上部の式
設定に必要なパラメータ		断層の長さ (L) 断層の幅 (W) 傾斜角 (δ) 向き (ϕ) 位置 (N, E, H) ずれの大きさ (D) ずれの方向 (λ) 立上りの時間 (τ) 破壊の伝播速度 (C_0) 破壊の伝播方向 (γ) P 波伝播速度 (V_p) S 波伝播速度 (V_s)	表面波マグニチュード (M_s) 震央の位置 (N, E)	気象庁マグニチュード (M_I) 震央の位置 (N, E) 地盤係数 (K)	気象庁マグニチュード (M_I) 断層の長さ (L) 断層の幅 (W) 傾斜角 (δ) 向き (ϕ) 位置 (N, E, H)

成分が各帯域の境界においてなめらかにつながるようにするためである。フィルタの減衰曲線は \cos 型とした。それぞれの帯域の成分のもととなる地震動波形は、次のようにして作る。すなわち、周期30~50秒以下の3つの帯域については、それぞれの帯域について、実地震の記録波形の振幅を拡大縮小する。周期30~50秒以上の帯域については、断層モデルにより計算する。この段階では、これらの地震動波形は、対応する帯域以外の成分を含んでいる。つぎに、先に述べたバンドパスフィルタにより、それぞれの地震動波形から対応する帯域の成分のみをとり出す。振幅を拡大縮小するのは、バンドパスフィルタをかける前の波形のピーク値をもとにして行う点に注意する必要がある。最後に、各成分のS波の初動が一致するように重ね合わせて、広帯域入力地震動とする。S波の初動を一致させた理由は、通常の加速度強震記録ではP波の初動が欠落しているためである。

表-3に、各帯域での設定方法をまとめた。次節において、その詳細について各帯域ごとに説明する。その時にS波の識別の方法についてもふれる。

4.2 各周期帯域の成分の設定方法

(1) 周期0.02秒または0.1秒より1~2秒までの成分
この帯域の成分の波形は、強震加速度計により得られた記録をもとにして設定する。岩盤または設計基盤面の

記録を用いる。ただし、表層地盤の地震応答特性が十分な精度で明らかにされている場合には、地表の記録から推定した設計基盤面における波形を用いてもよい。帯域内の周期特性や継続時間は、マグニチュード、震央距離、伝播経路等によってやや変わる可能性があるため、可能な限り設定すべき条件に近い記録波形を選択する。この帯域の成分では、経験的に見ると著しい方向性は見られないが、震源から発する波の大きな性質を考えると何らかの方向性があるのではないと思われる。しかも座標変換の計算は容易であるため、地震動を記録した時の震央の方向成分が、入力地震動を設定するに際して想定される震央の方向成分と一致するように座標変換する。ただし、観測した地震の断層面がわかっている場合には、震央への方向ではなく、断層面への方向が一致するように座標変換する。

最大振幅は、野田・上部の提案した設計基盤面における最大加速度、気象庁マグニチュード、震源域までの実効距離の関係により定める。最大加速度の設定は、各方向成分ごとに独立に行うのではなく、2つの成分の最大加速度の平均値が設定すべき値になるように、2つの方向成分に同一の倍率係数をかけて行う。また、この最大加速度はSMAC-B2強震計の計器特性を持つ地震計により記録される波形の最大振幅のことである。したが

って、SMAC-B2強震計の記録であれば、計器特性を補正する前の最大加速度振幅を、またSMAC-B2強震計以外の地震計の記録であれば、SMAC-B2強震計の記録に相当する等価な波形の最大加速度振幅をもとにして、この関係を適用する必要がある。なお、港湾地域強震観測年報においては、1976年の記録からERS強震計の記録については、「SMAC-B2 EQUIVALENT」としてSMAC-B2強震計の記録に相当する等価な波形およびその最大加速度振幅を示している²³⁾。実効距離としては、野田、上部は「震源域」までまたは断層面までの2種類の距離を考えているが、ここでは、断層面までの距離を考える。

つぎに、バンドパスフィルタにより、この帯域の成分のみを取出し、2回積分により変位の形にしておく。

最後に、波形の先頭部分および後端部分に若干の処理を加える。一般に、記録波形のS波の初動を、断層モデルにより求められたS波到達時刻に合わせた時、記録波形の先頭の時刻が、断層モデルにより求められたP波到達時刻と一致するとは限らず、また記録波形の長さが必要十分なだけ長いという保証もない。そこで、先頭の部分については、もし記録波形の先頭が断層モデルにより求められたP波の初動よりも早い時刻であれば、このP波の初動時刻から徐々に振動が始まるように、 \cos 型の重み関数をかける。また記録波形の先頭が断層モデルにより求められた初動よりもおそい時刻であれば、この初動からの記録波形の先頭までの時刻は振幅がゼロであるとし、記録波形の先頭から徐々に振動が始まるように、 \cos 型の重み関数をかける。記録の後端部分については、もし記録波形の長さが必要な長さに満たなければ、 \cos 型の重み関数をかけて、徐々にゼロに近づくようにし、以後の振幅としてゼロを与える。 \cos 型の重み関数の長さ、すなわち、立上げまたは立下げの時間はこの帯域の成分については2秒とする。

S波の初動は、主要動の開始点であるものとする。また記録の先頭から主要動が始まっている場合には、記録の先頭をS波の初動と考える。これらの考え方は、便宜的に定めたものであるが、もし何らかの方法により、より確かにS波の初動が識別できる場合には、その方法を使うべきであると考え。

以上、この帯域の成分を設定するために必要なパラメータをまとめれば、気象庁マグニチュード M_L および断層面までの距離を求めるために必要なもの、すなわち断層面の大きさ(長さ L と幅 W)、その向き(傾斜角 θ と走行方向 φ)、その観測点に対する相対的な位置(北緯 N_1 、東経 E_1 、深さ H)である。

(2) 周期1~2秒より6~10秒までの成分

この帯域の成分は、固有周期数秒程度の変位計により得られた記録をもとにして設定する。速度計の記録を積分したものをもとにしてもよい。周期数秒以上の成分の波長は、設計基盤面の深さに比べて十分大きいことが多いので、設計基盤面における波形として地表面における記録波形を使う。帯域内の周期特性や継続時間はマグニチュード、震央距離、伝播経路、特に、設計基盤面より深い地盤構造の影響を受けるので、可能な限り、設定する条件に近い条件のもとで記録された波形を選択する。この帯域の成分を含む記録波形が数字化されて公表されている例は少ないが、全くないわけではない²⁴⁾。この帯域の成分も、明確な方向性を持つとは限らないが、地震動を記録した時の震央の方向成分が、入力地震動を設定するに際して想定される震央の方向成分と一致するように設定する。ただし観測した地震の断層面がわかっている場合には、震央への方向ではなく、断層面への方向が一致するように変換する。

最大振幅は、坪井公式および地盤係数により定める。坪井公式は、気象庁の一倍強震計の計器特性を持つ地震計により記録される波形のうちで、周期5秒以下の波形の最大振幅に適用される。最大振幅の設定にあたって、この点に注意する必要がある。また、各方向成分ごとに独立に最大振幅を設定するのではなく、2つの方向成分に同一の倍率係数をかけてその振幅を設定するという点は前項と同様である。

次に、バンドパスフィルタにより、この帯域の成分のみを取出す。

最後に、波形の先頭部分および後端部分に、前項で説明したものと同様の処理を行う。 \cos 型の重み関数の長さは、この帯域については10秒とする。

この帯域の波形については、S波の識別は地震学の分野では数多く行われているので、その方法に従う。多くの記録については気象庁の地震月報によりその情報が得られるので、これに従う。

以上、この帯域の成分を設定するために必要なパラメータは、気象庁マグニチュード M_L 、地盤係数 K 、および観測点に対する震央の相対的な位置(北緯 N 、東経 E のそれぞれの差、または、震央距離と震央の方向)である。

震央の位置は、本方法を適用するに当たっては、断層面の中央にあるものとする。その理由は、坪井公式が、断層面上の様々な位置にある地震について、様々な方向にある観測点で得られた記録をもとにして得られた平均的な関係を表わすものであると考えられるからである。

(3) 周期 6~10秒より 30~50 秒までの成分

この帯域の成分の波形は、周期20秒程度の成分を中心として観測するような、長周期地震計により得られた記録をもとにして設定する。この帯域の成分は、その発震機構や震央距離によって影響を受けるので、可能な限り設定する条件に近い条件の下で記録された波形を選択する。しかし、観測された波形の例は、かならずしも十分であるとは言えない。震央距離の大きいほど継続時間が長くなる傾向があるので、観測時の震央距離が設定する震央距離よりも長ければ、設計上安全側となると考えられる。この帯域の成分は、方向性を持つが、それは発震機構にも左右される。しかし、震央の方向は、波形の方向性と密接な関係を有するので、観測時の震央の方向成分が、想定すべき地震の震央の方向成分と一致するように座標変換する。ただし観測した地震の断層面がわかっている場合には、震央への方向ではなく、断層面への方向が一致するように変換する。

最大振幅は、表面波マグニチュードの式により定める。この公式は、気象庁の L_p - L_o 型のような計器特性を持つ地震計により得られた周期20秒程度の表面波の振幅に対して適用するものである。したがって、これとは異なる計器特性を持つ地震計により得られた記録を用いる場合には、 L_p - L_o 型のような計器特性を持つ地震計の記録波形と等価な波形の最大振幅を求めて、この公式を適用する。各方向成分ごとに独立に最大振幅を設定するのではなく、2つの方向成分に同一の倍率係数をかけてその振幅を設定するという点は、前項と同様である。

次にバンドパスフィルタをかけ、この帯域の成分のみをとり出す。

最後に、波形の先頭部分および後端部分に、前項と同様の処理を行う。 \cos 型の重み関数の長さは、この帯域については30秒とする。

この帯域の波形については、S波の識別は、視察による方法は適用困難である。そこで、同時に得られた周期数秒の成分をカバーする記録のS波の到達時刻を、前項で述べたように地震月報等で求めることにより、間接的にその到達時刻を求める。

以上において、この帯域の成分を設定するために必要なパラメータは、表面波マグニチュード M_s 、および観測点に対する震央の相対的な位置（北緯 N 、東経 E のそれぞれの差、または、震央距離と震央の方向）である。

震央は、前項と同様に、断層面の中央にとる。表面波マグニチュードは、発生の予想される地震に対して、必ずしも与えられるとは限らないが、過去の地震等を参考とすることができる²⁹⁾。

(4) 周期 30~50 秒以上の成分

この帯域の成分は、すでに説明したように、無限媒質に対する基本的な断層モデルにより求める。次に、フィルタにより、この帯域の成分のみをとり出す。フィルタをかけて得られた波形は、通常、P波の初動より前から振幅がゼロでない値をとる。そこで、P波の初動部分に前項と同様の処理を行う。 \cos 型の重み関数の長さは、前項と同じく30秒とする。

設定すべきパラメータは、断層面の長さや幅と方向（走行方向と傾斜角）と観測点に対する相対的な位置、くいちがいの大きさと方向と立上り時間、くいちがいの伝播の速度と方向、である。これらのパラメータの大部分は、将来は、発生すると予想される地震に対して、然るべき機関あるいは専門家から与えられるようになると思われる。また、残りのパラメータについても、過去に起きた大地震のパラメータやパラメータ相互の関係についてまとめた資料²⁹⁾を参考として定めることができる。

4.3 適用上の注意

ここに報告した手法では、周期数十秒および周期数秒により代表される帯域の地震波を設定する際に、表面波マグニチュードあるいは気象庁マグニチュードと震央距離および地震動の振幅との関係式が用いられている。この関係式では震源は点として考えられ、その直上の地表面が震央とされている。したがって、広帯域入力地震波の合成で考えているような面としての広がりをもった震源は、前記の関係式においては想定されていない。また、強震加速度計以外の多くの地震計の感度は高く、震央に近い位置の地震計では完全な記録は得られない。したがって、前記の関係式の震央付近における適用性には注意すべきと思われる。両関係式ともに、震央距離ゼロに対する振幅は無限大となる。以上の理由から、ここに示した手法は、震源域内に適用することはできない。また、同じ理由により震源域の近傍に対してこの方法を適用することは無理があろう。ただし、現在のところ、その近傍と考えるべき範囲がどの程度のものかについての明確な定量的見解は得られていない。

震源域およびその近傍を除く部分における本手法の適用性を、合成された地震動と観測された地震動を比較することより検証することは不可能である。それは、既に説明したように、すくなくとも現在の地震観測技術によれば、個々の地震計は限られた周期帯域の地震動しか記録できないからである。しかし、ここで用いられた各周期帯域での地震波の設定方法は、それぞれ個々に研究され、それぞれの部分においては実測値にもとづいているものである。また、いずれも、関係する研究者や技術者

者の批判を受ける期間を経過したものである。したがって、各帯域ごとの地震波を合成する部分が未経験部分と言える。この部分については、既に説明したように、各帯域の地震波の時間的一致をとることや記録の先頭付近の処理など改良の余地が残されていることは事実である。

現在のところ、この方法の適用性を定量的に示すことはできない。しかし、前記の事情を総合すれば、ここに報告した手法により合成された地震波は、固有周期数秒以下の構造物に強震記録を選定して用いることに次ぐ適用性をもっと考えられる。すくなくとも、何らかの他の手法で設定された広帯域入力地震動と同等の適用性を有するものと考えられる。

表-4 計算に用いた地震のパラメタ

パラメタの項目	記号	パラメタの値
断層の長さ	L	100 km
断層の幅	W	50 km
傾斜角	δ	-30度
走行方向	φ	90度
くいちがいの大きさ	D	3 m
くいちがいの方向	λ	-90度
立上り時間	τ	5秒
破壊の伝播速度(長さ方向)	C_1	4.243 km/秒
破壊の伝播速度(幅の方向)	C_2	4.243 km/秒
P波の伝播速度	V_P	6.0 km/秒
S波の伝播速度	V_S	3.5 km/秒
表面波マグニチュード	M_S	8.2
気象庁マグニチュード	M_J	8.0
地盤係数	K	1.0
震源の深さ	H	30 km
震源の位置		断層面の中央

5. 計算例

第3章に述べた方法により求めた設計基盤面における広帯域入力地震動の例を示す。想定した地震は、気象庁マグニチュード8.0、断層面の大きさが100km×50km、くいちがいの大きさが3mという規模のものである。表-4にそのパラメタを示した。図-6は、これらのパラメタのうち断層面に関するパラメタの意味を示したものである。地震動を求めた地点は図-7にB-1~D-8の記号で示した地点であり、震央距離50km、100km、200kmの各8地点、計24点である。ただし、同図で斜線で示した部分が断層面を示す。

表-5に、本計算に用いた記録波形の諸元を示す。

図-8に、C-8地点のE-W成分の変位波形の計算例を示す。同図の上から、30~50秒以上の成分、6~10秒より30~50秒までの成分、1~2より6~10秒までの成分、0.1秒より1~2秒までの成分、最後に、これら4つの成分を重合させて求めた合成波形である。この変位波形に対応する加速度波形が図-9に示したものである。図-10~図-21に、各地点の変位波形および加速度波形を示す。これらの図の加速度波形の主要部分を時間軸の縮尺を変えて図化した例を図-22~図-24に示した。

これらの図において、時刻0は、各地点におけるP波の到達時刻にとった。また、最大加速度は、地震計の計器特性の補正を行った波形の最大加速度に相当している。

応答スペクトルの例を図-25、図-26に示した。

断層モデルにより地震動を求める電子計算機用プログラムは文献26)により作成し、文献27)の例題によりチェックした。

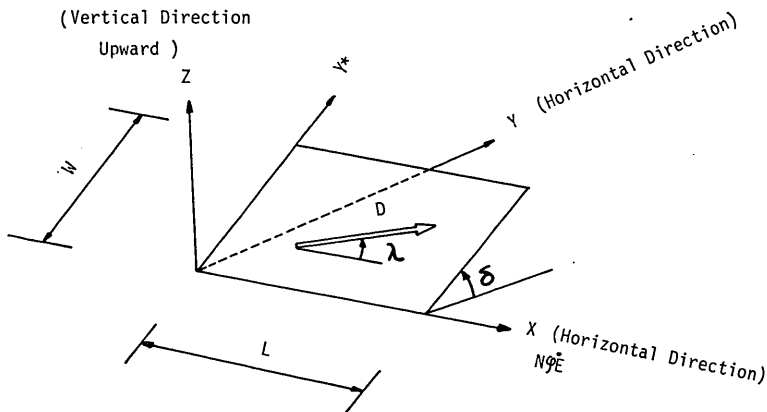


図-6 断層面に関するパラメタの概念図

広帯域入力地震動の合成方法の提案

表-5 計算に用いた記録波形

周期帯域	設定する地点	震央距離 (km)	気象庁 マグニチュード	深さ (km)	観測地点	発震年月日	地震名	地震計	備考 (記録番号)
0.02秒 または 0.1秒 より 1~2秒	B-1~B-8	60	7.0	0	久里浜	1978. 1. 14	1978年 伊豆大島近海 の地震	ERS 強震計	M-170
	C-1~C-8	103	7.4	40	大船渡	1978. 6. 12	1978年 宮城県沖地震	SMAC-B2 強震計	S-1210
	D-1~D-8	166	7.4	40	宮古	1978. 6. 12	1978年 宮城県沖地震	SMAC-B2 強震計	S-1204
1~2秒 より 6~10秒	B-1~B-8	68	6.9	0	本郷	1931. 9. 21	西埼玉地震	大森式 長周期地震計	J-2
	C-1~C-8	98	7.2	0	本郷	1930. 11. 26	北伊豆地震	大森式 長周期地震計	J-1
	D-1~D-8	240	7.4	60	大手町	1953. 11. 26	房総沖地震	気象庁 一倍強震計	J-4
6~10秒 より 30~50秒	B-1~B-8	555	5.9	0	松代	1977. 12. 24		気象庁 Lp-Lo型地震計	L-3
	C-1~C-8	〃	〃	〃	〃	〃		〃	〃
	D-1~D-8	〃	〃	〃	〃	〃		〃	〃

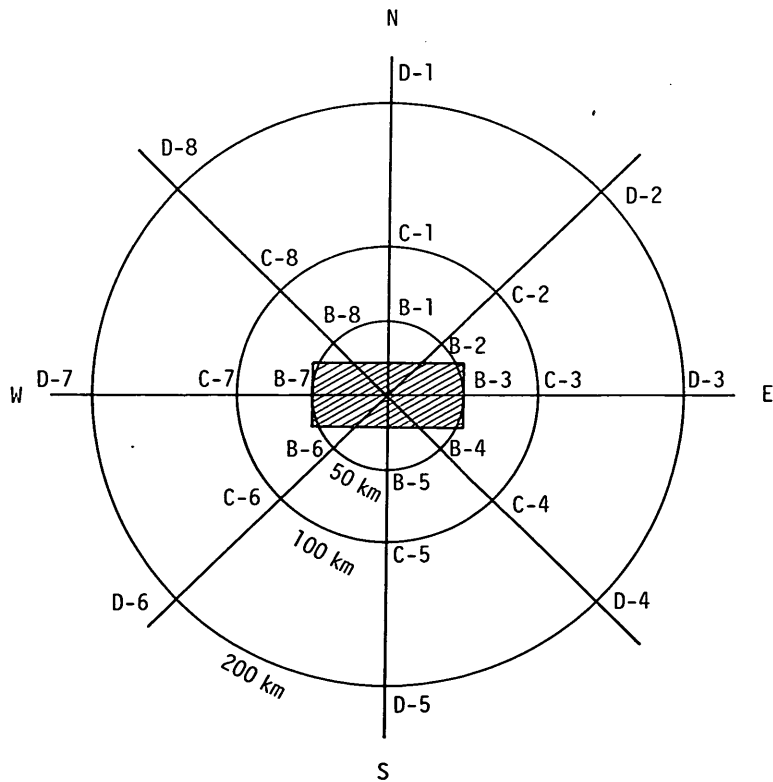


図-7 地震動を求めた各地点の位置と断面の位置

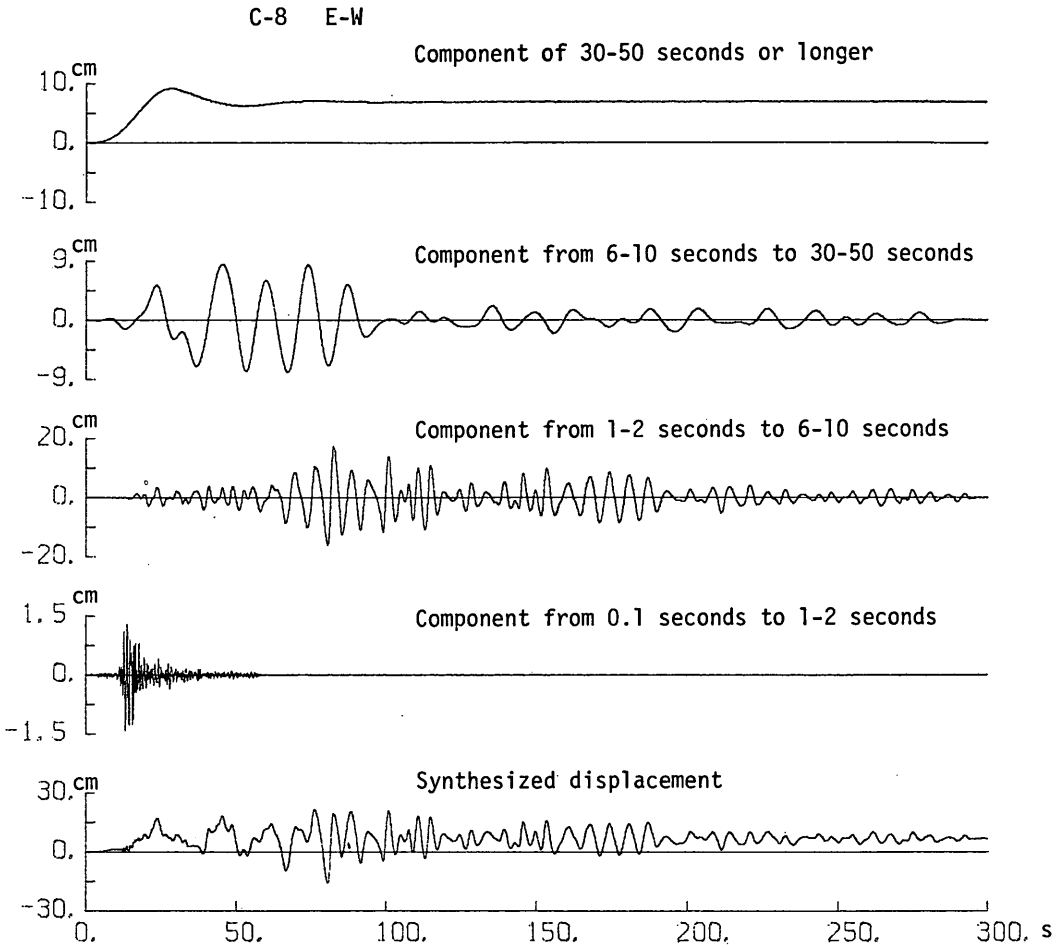


図-8 各帯域の成分と合成変位波形の例

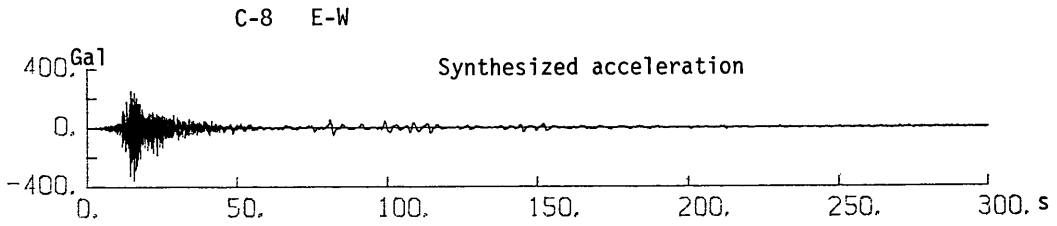


図-9 合成加速度波形の例

広帯域入力地震動の合成方法の提案

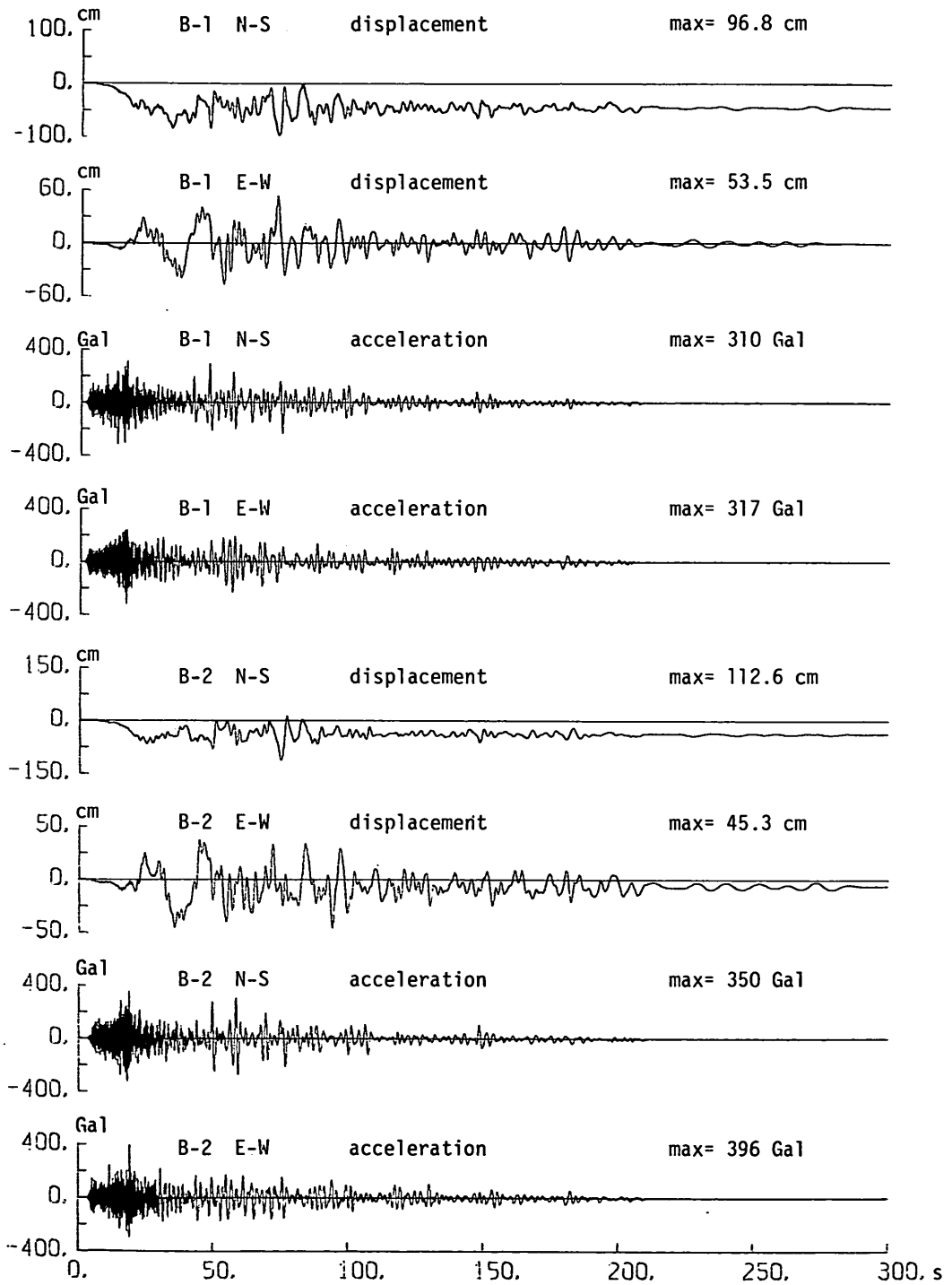


図-10 B-1, B-2 地点の設計基盤面における広帯域入力地震動

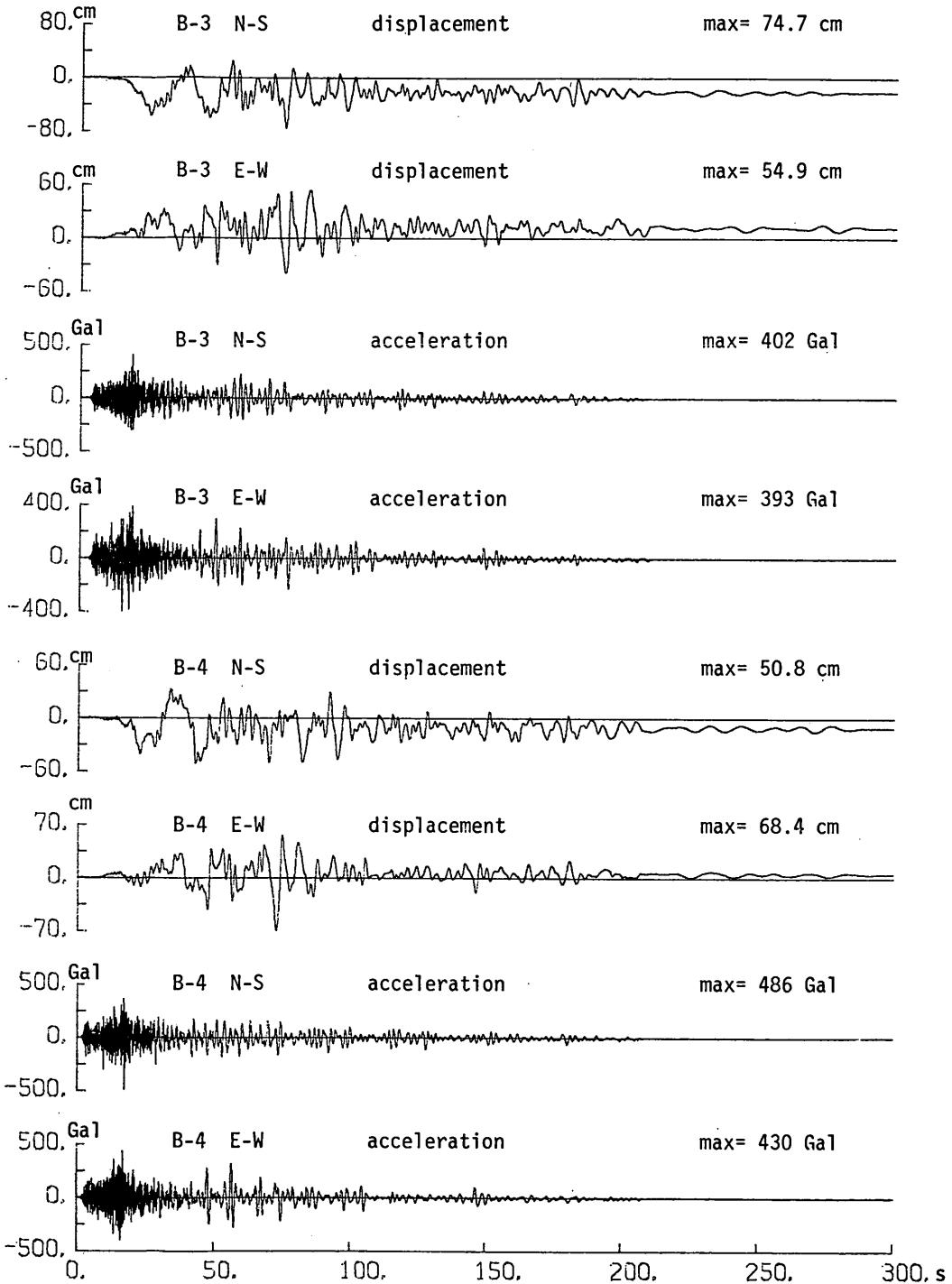


図-11 B-3, B-4 地点の設計基盤面における広帯域入力地震動

広帯域入力地震動の合成方法の提案

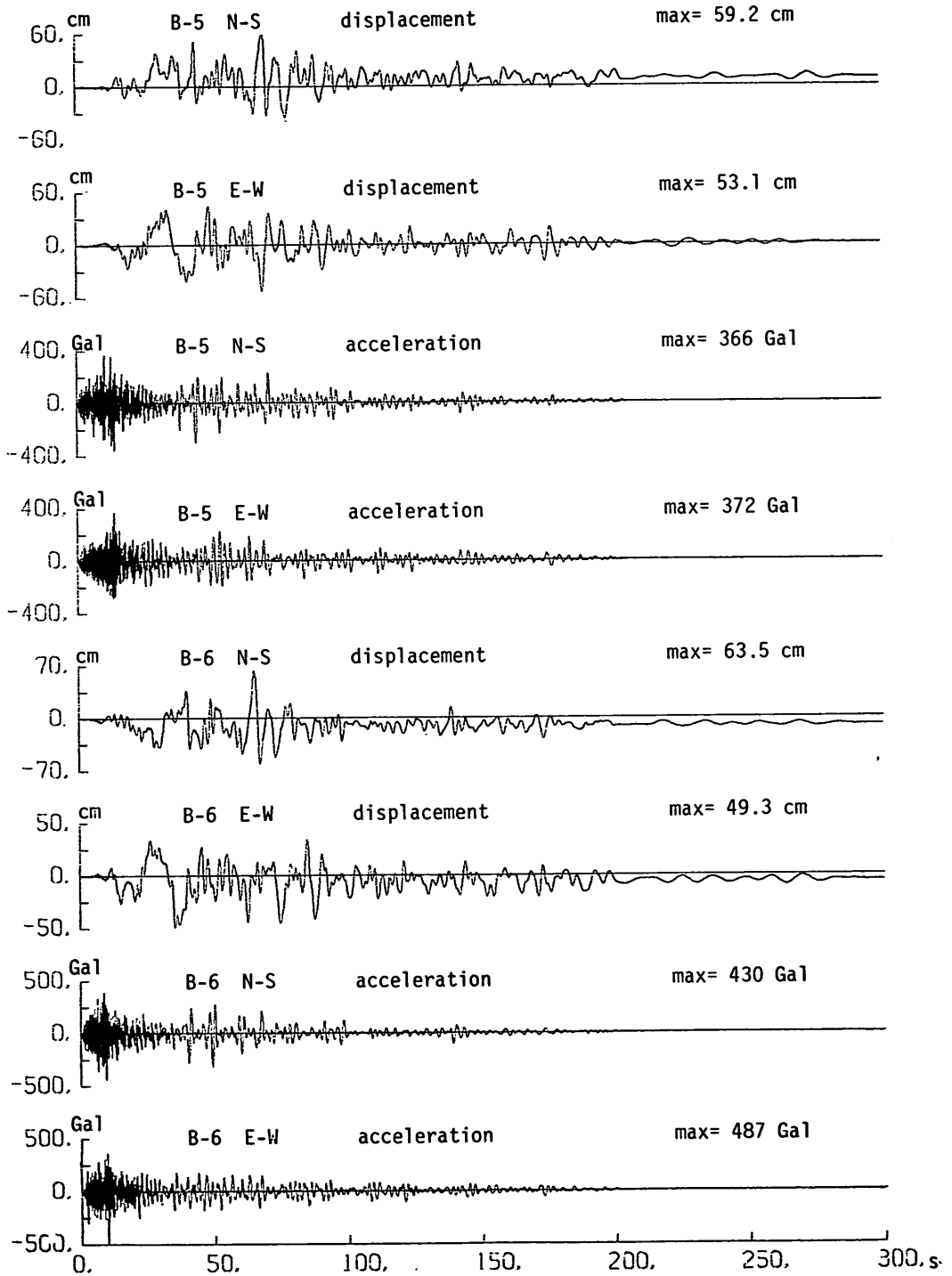


図-12 B-5, B-6 地点の設計基盤面における広帯域入力地震動

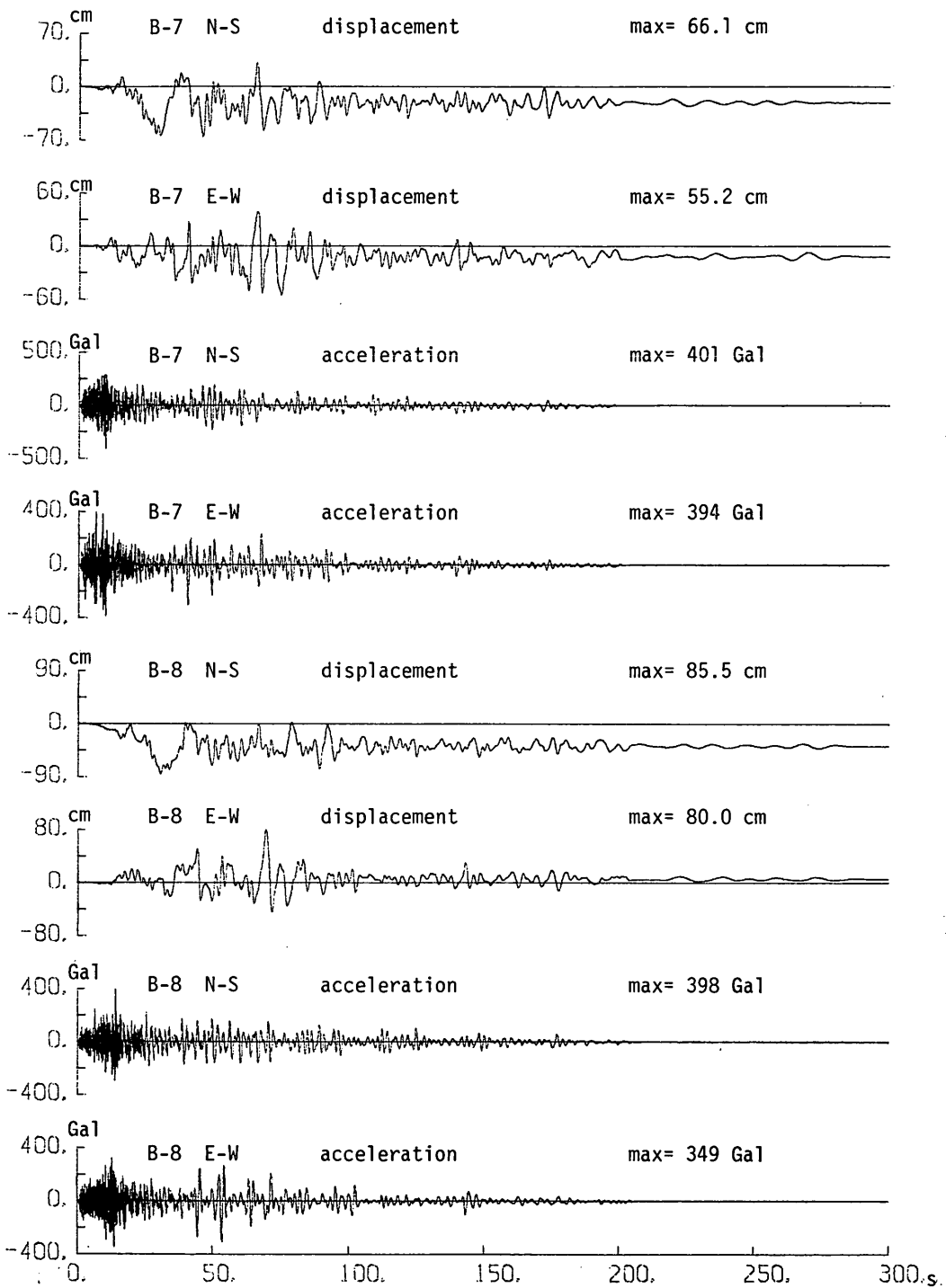


図-13 B-7, B-8 地点の設計基盤面における広帯域入力地震動

広帯域入力地震動の合成方法の提案

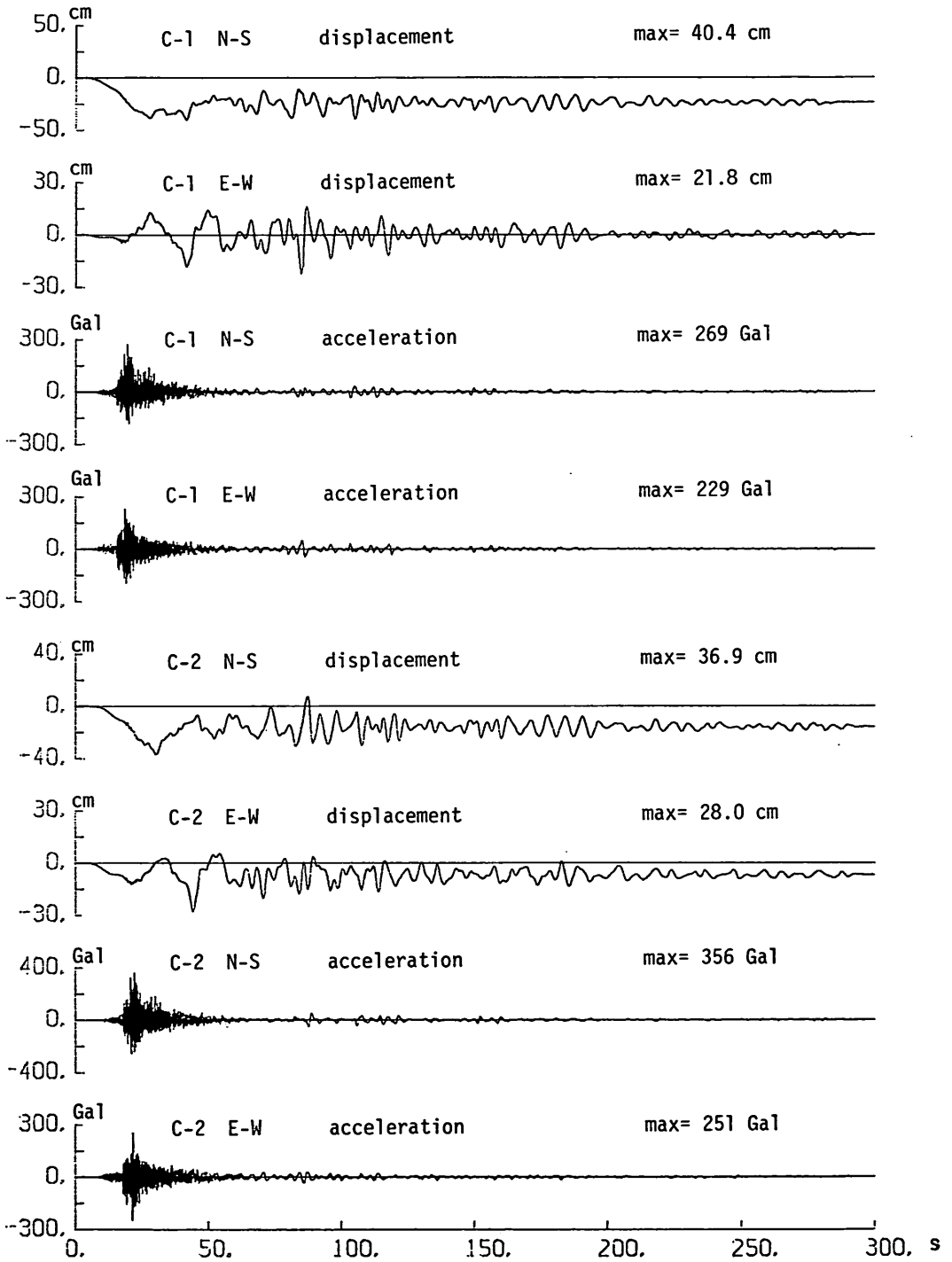


図-14 C-1, C-2 地点の設計基盤面における広帯域入力地震動

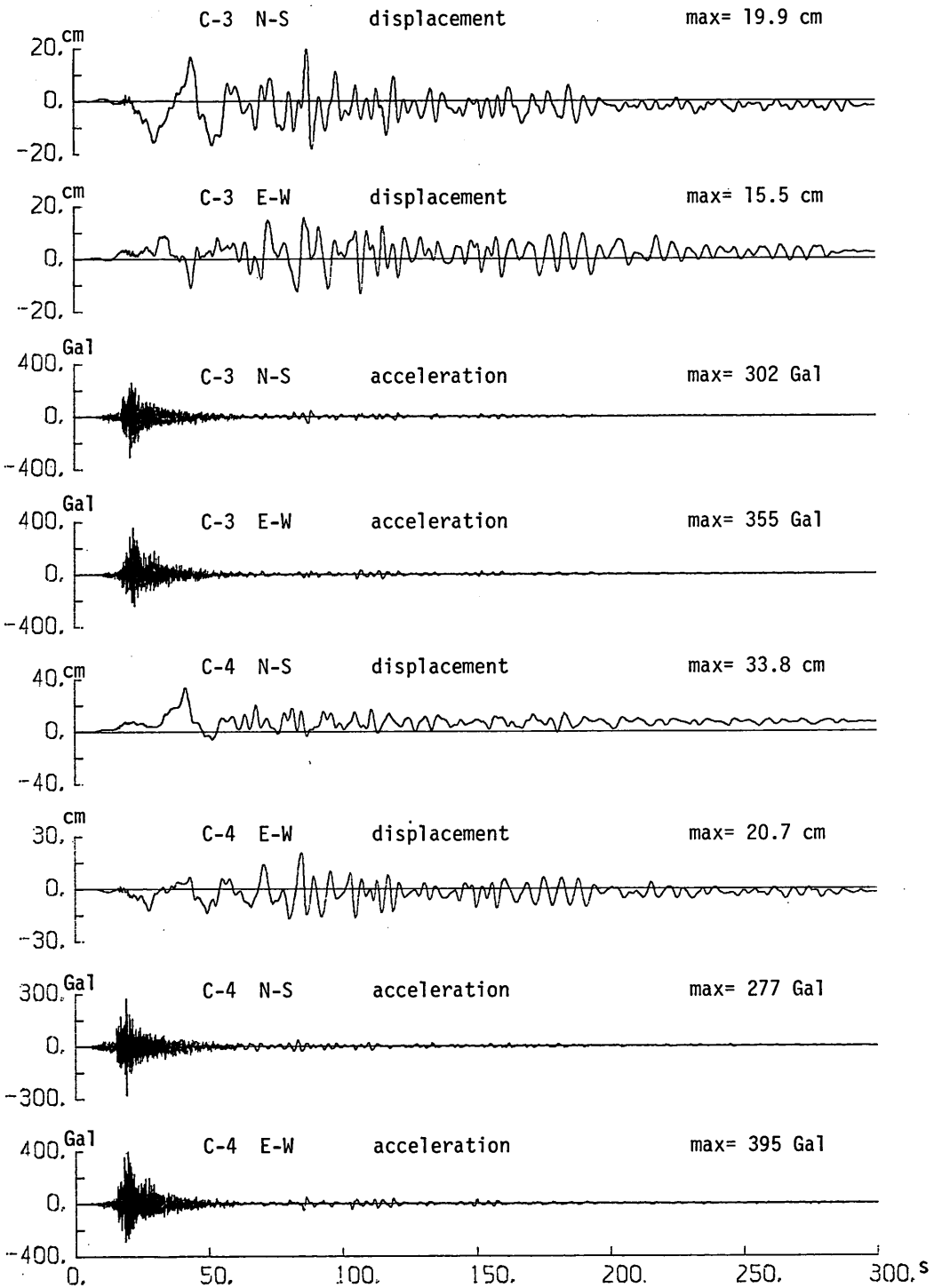


図-15 C-3, C4 地点の設計基盤面における広帯域入力地震動

広帯域入力地震動の合成方法の提案

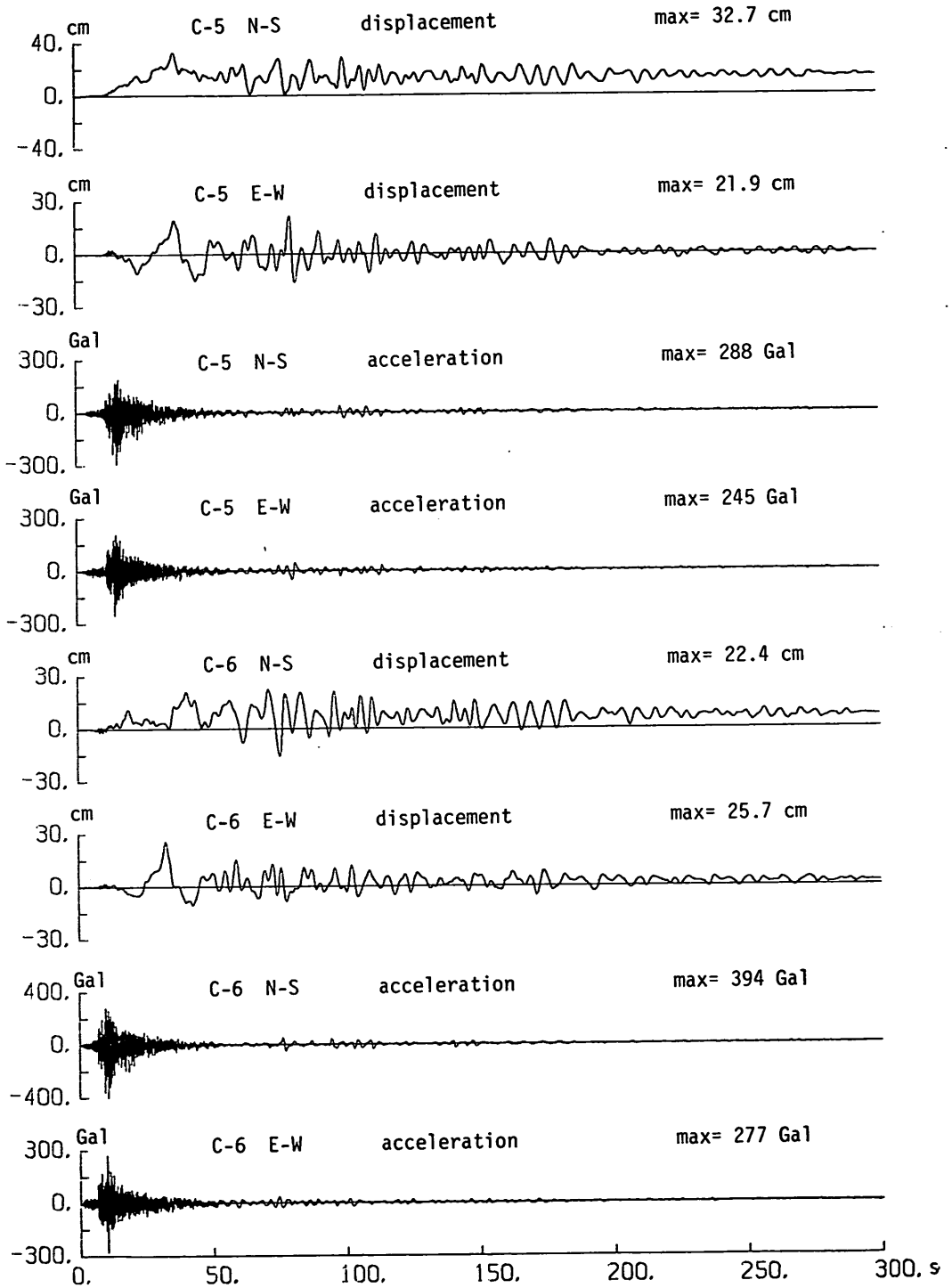


図-16 C-5, C-6 地点の設計基礎面における広帯域入力地震動

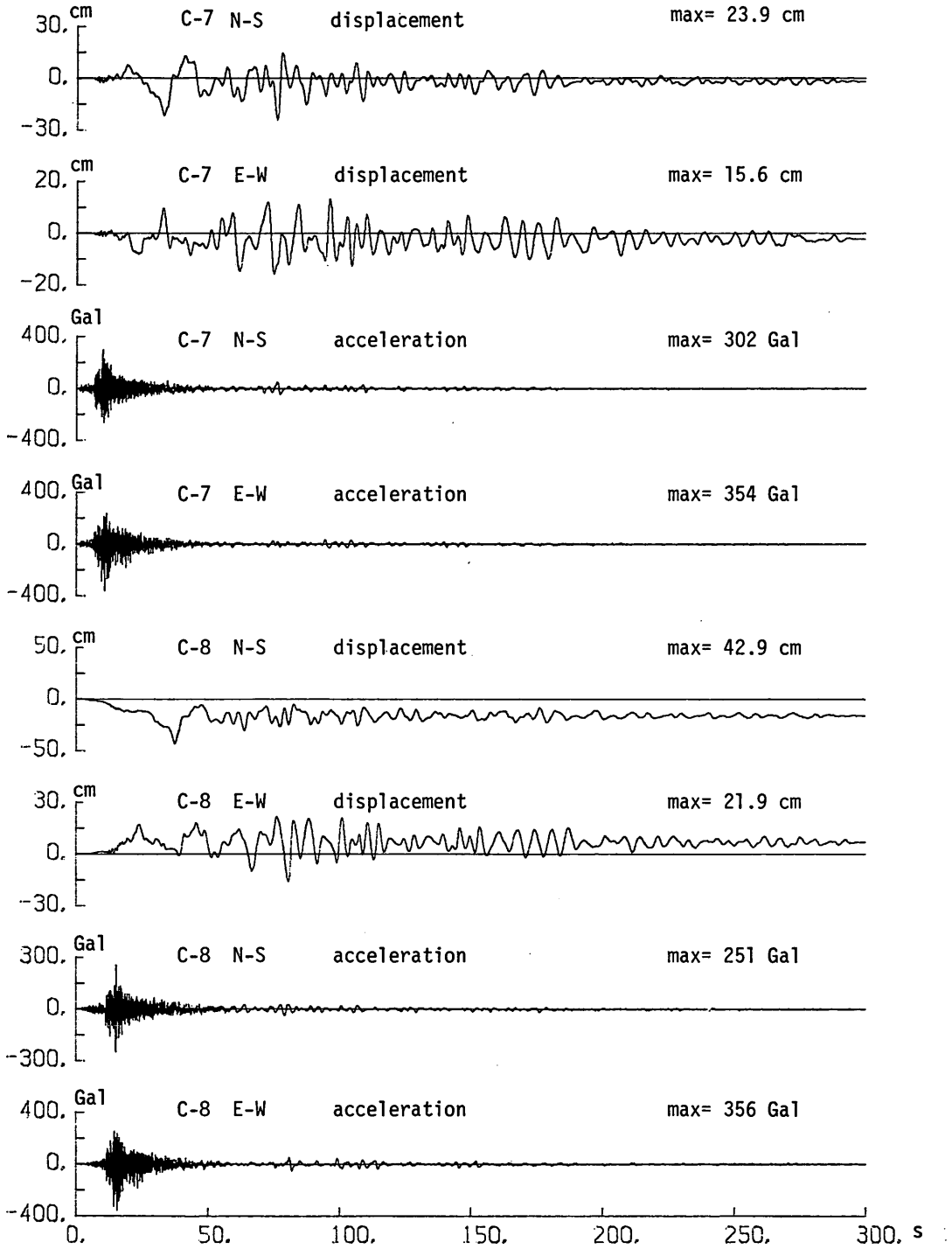


図-17 C-7, C-8 地点の設計基盤面における広帯域入力地震動

広帯域入力地震動の合成方法の提案

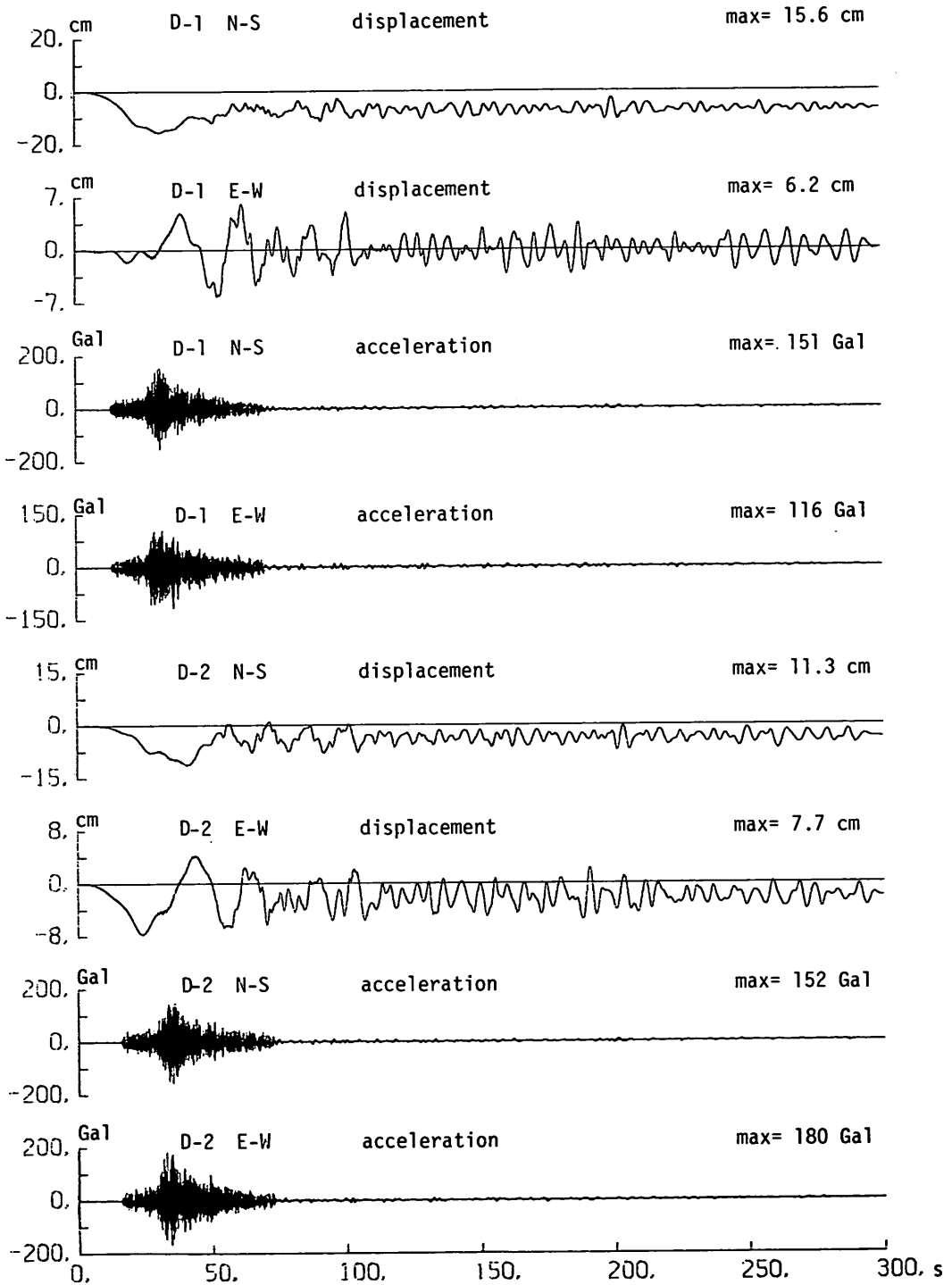


図-18 D-1, D-2 地点の設計基盤面における広帯域入力地震動

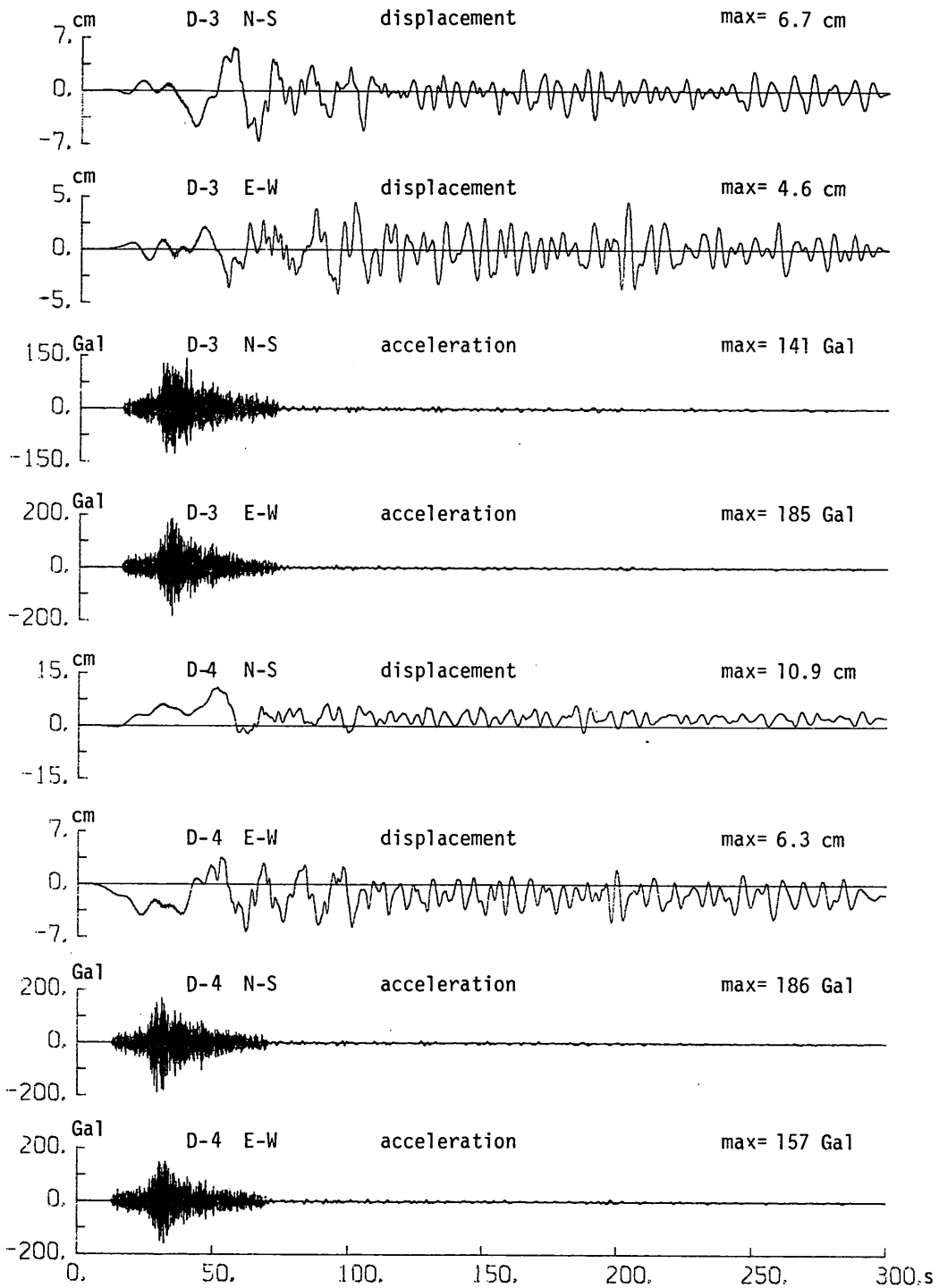


図-19 D-3, D-4 地点の設計基盤面における広帯域入力地震動

広帯域入力地震動の合成方法の提案

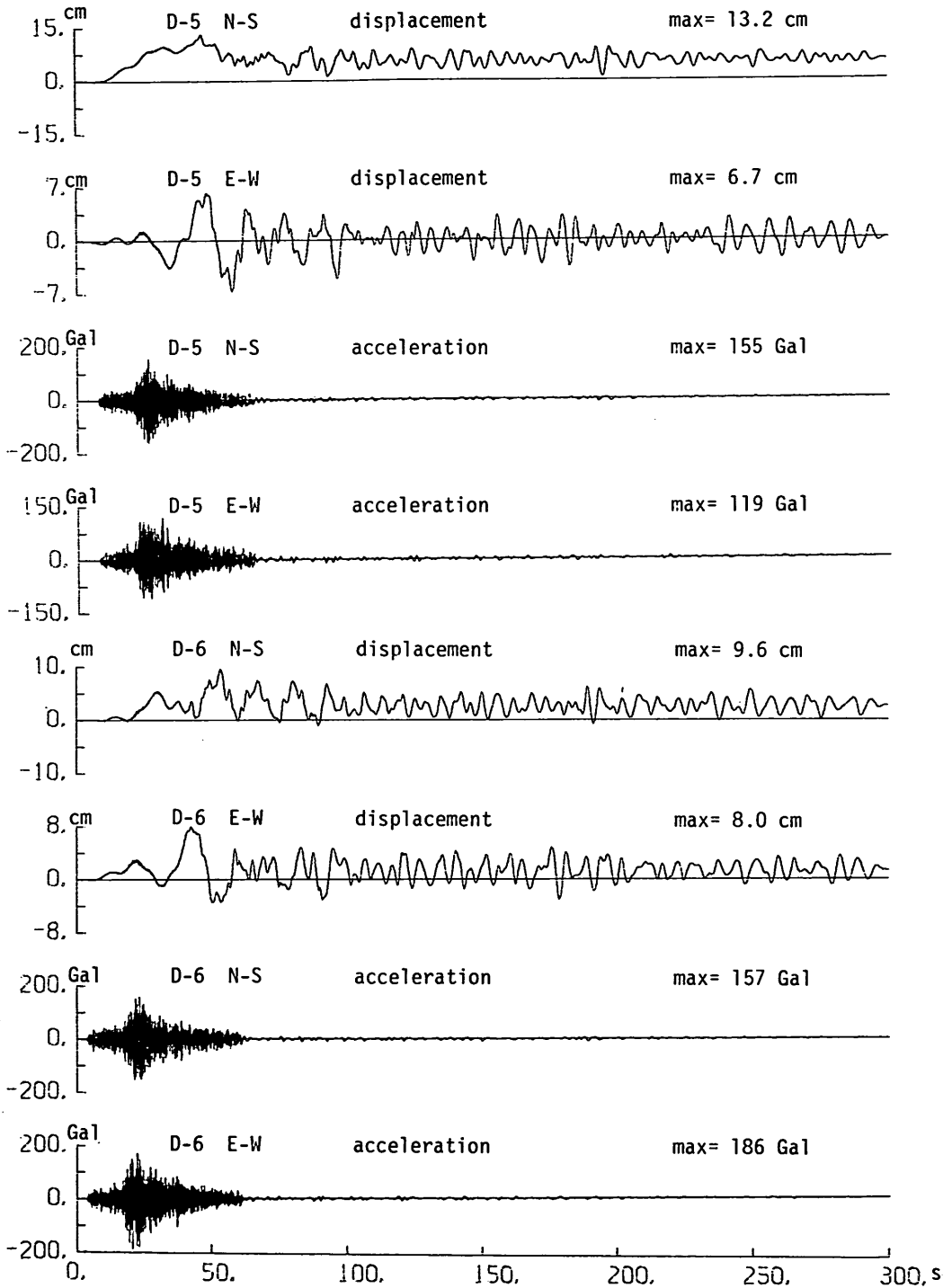


図-20 D-5, D-6 地点の設計基盤面における広帯域入力地震動

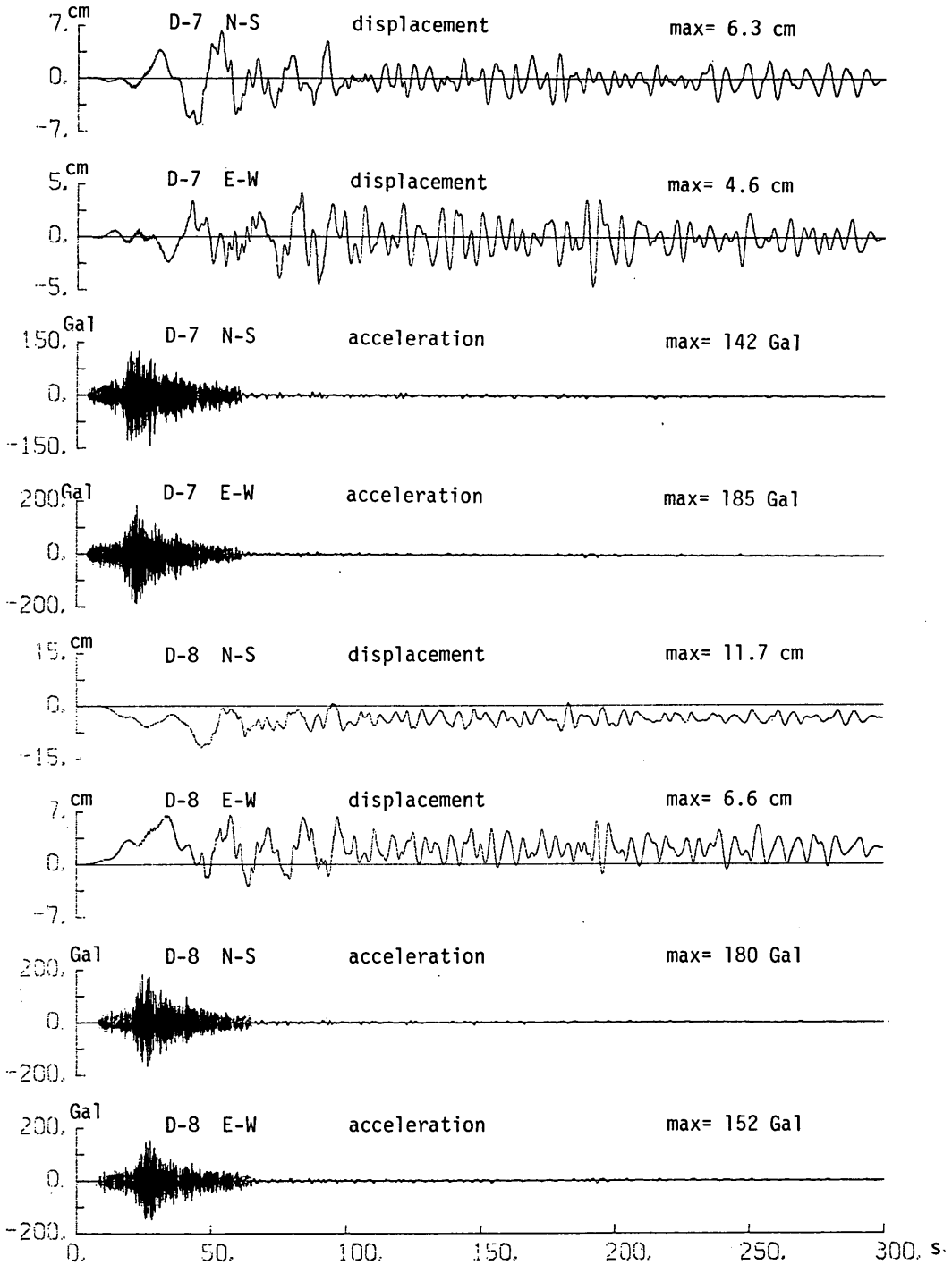


図-21 D-7, D-8 地点の設計基盤面における広帯域入力地震動

広帯域入力地震動の合成方法の提案

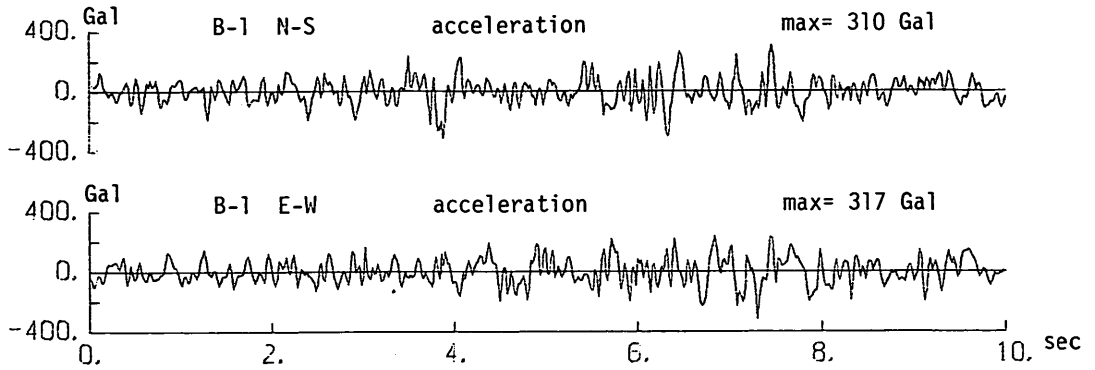


図-22 B-1 地点の設計基盤面における加速度波形の一部

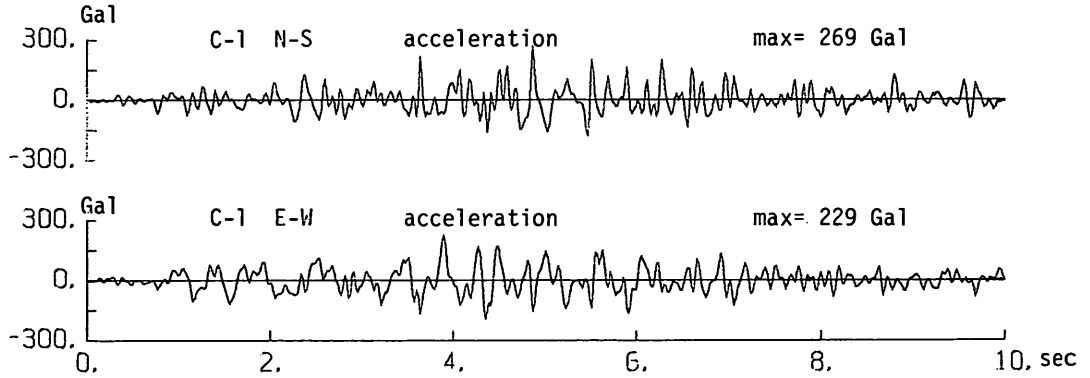


図-23 C-1 地点の設計基盤面における加速度波形の一部

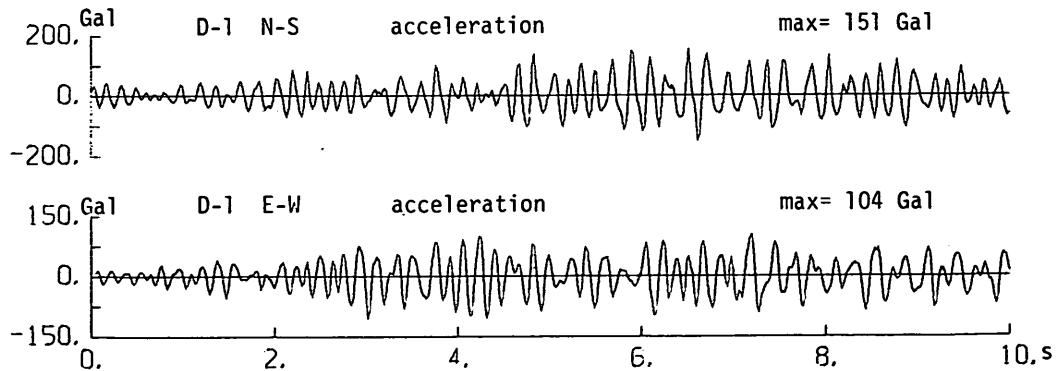


図-24 D-1 地点の設計基盤面における加速度波形の一部

C-1 N-S WIDE

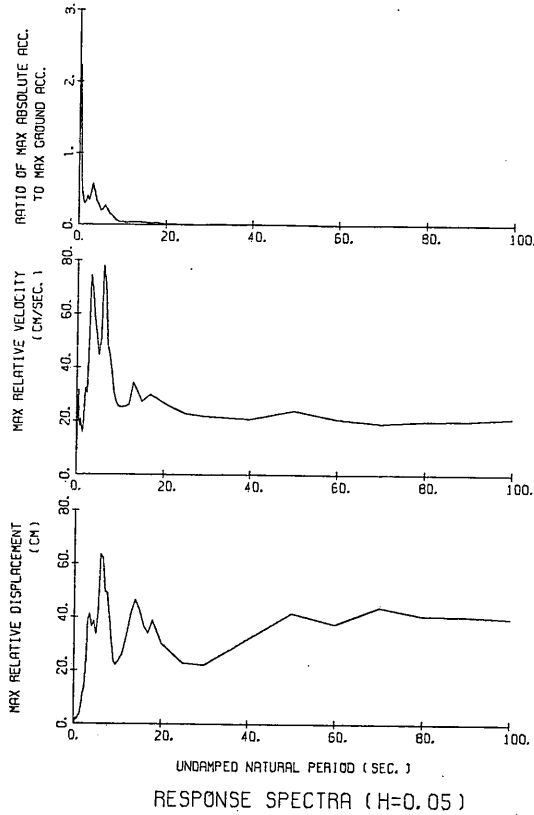


図-25 C-1 地点の設計基盤面の応答スペクトル <N-S成分>

C-1 E-W WIDE

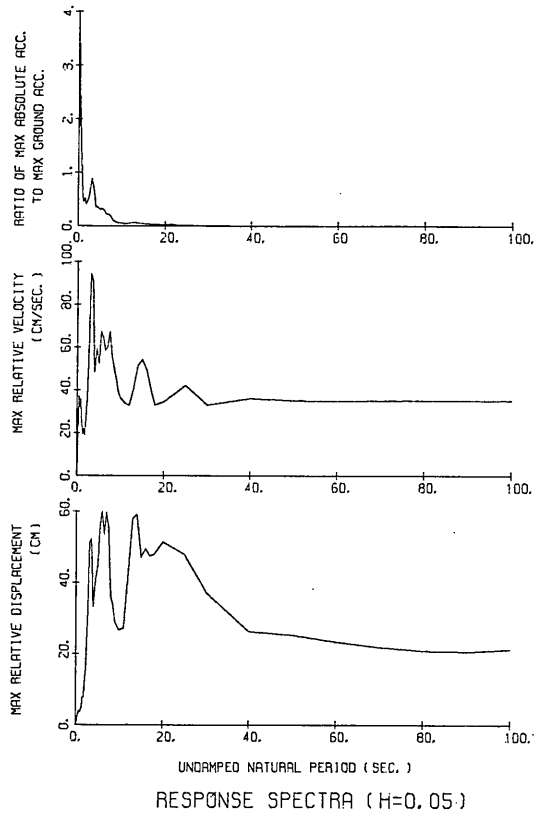


図-26 C-1 地点の設計基盤面の応答スペクトル <E-W成分>

6. 結 論

静的な成分から数十分の一秒の成分までを含む広帯域入り地震動を合成する方法を提案した。その方法は、全体を4つの周期帯域に分け、静的な成分を含むものは断層モデルにより、また、周期数十秒の成分、周期数秒の成分、周期数分の一秒の成分に代表される帯域の成分はそれぞれ実地震の記録波形の振幅を補正したものにより設定し、合成するというものである。

7. 結 語

現在までに地震動の記録は多くの地震計により残されている。しかし、そのいづれでも必要な周期帯域が確保されないときに、いくつかの帯域ごとに地震波を定めそれを合成しようとする考えは、極く自然な発想であろう。したがって、ここで著者が提案した方法の基本的な考え方は多くの人が考えるところであろう。しかしなが

ら、実際に広帯域地震動を合成しようとするれば、具体的な方法を検討し総合的に矛盾のないように体系化しなければならない。また、長周期地震計の記録のデジタル化されたものなど多くの資料の収集が必要である。さらに、断層モデルによる地震動のシミュレーションプログラムなどいくつかの電子計算機用プログラムの作成も必要である。したがって、方法として発想することは簡単であっても、実際に合成してみることは容易ではなく、相当本格的に取り組むことの必要な作業である。機会あって著者らはこの方法と取り組んだ。さらに改良されるべき点は残っているが、地震応答解析に実用できると考える地震波の合成に到ったので、ここに報告し、関係分野の方々の御参考に供すると共に、諸賢の御批判御指導を仰ぐこととした。

先にふれたように、手法として考えがまとまっても、具体的に合成された地震波を作り出すにはなお多くの作業を必要とし、誰でも簡単に合成してみるという訳に

はいかない。その意味ではどのような地震波になるのか関心を寄せられる方も多くと考える。その点を考慮して、例題計算結果の地震波形はなるべく多く収録することとした。

本研究においては、その対象を地震動の水平方向成分に限った。しかし、上下方向の成分についても、若干の変更を加えるだけで、ここに提案した方法が適用できると考えている。

謝 辞

勝又 護氏(気象庁)には、長周期地震計による貴重な記録のコピーをいただき、かつ、広帯域入力地震動の設定方法について御討議いただいた。また、三雲 健先生(京都大学防災研究所)にも、広帯域入力地震動の設定方法について御討議いただいた。主に地震学の立場から地震動について研究が続けられているこれらの方との討議は本研究のまとめに際し、示唆するところの多いものであった。ここに、厚く御礼申上げる。

参 考 文 献

- 1) 井合 進・倉田栄一・土田 肇：強震記録のデジタル化と補正，港湾技研資料 No. 286, 1978年3月, 56p.
- 2) 井合 進・土田 肇：広帯域入力地震動についての試み，第15回地震工学研究発表会講演概要, 1979年7月, pp. 201~204
- 3) Hajime Tsuchida and Susumu Iai: Observation of Earthquake Response of Ground with Horizontal and Vertical Seismometer Arrays (2nd Report), Proceedings of the Fifth Japan Earthquake Engineering Symposium, November 1978, pp. 169~176
- 4) 土田 肇・上部達生：地表における強震記録より推定した基盤の地震動の特性，港湾技術研究所報告，第11巻，第4号，1972年12月，pp. 191~270
- 5) 野田節男・上部達生・千葉忠樹：重力式岸壁の震度と地盤加速度，港湾技術研究所報告，Vol. 14, No. 4, 1975年12月，pp. 67~111
- 6) 勝又 護：地震動の最大加速度の推定，験震時報，第37巻，第3号，1972年1月，pp. 79~87
- 7) 気象庁：Introductory Note，地震月報，1979年1月，pp. i~iii
- 8) 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，地震，第2輯，第7巻，第3号，1954年，pp. 185~193
- 9) 勝又 護：地震動振幅の地盤係数(その2)ー最大振幅について，験震時報，Vol. 30, No. 4, 1965年 pp. 1~11
- 10) 宇津徳治：地震学，共立出版，1978年1月
- 11) 丸山卓男：断層地震の波源モデル，関東大地震50周年論文集，東京大学地震研究所，1973年，pp. 147~165
- 12) Haskell, N.A.: Elastic Displacement in the Near-field of a Propagating Fault, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 59, No. 2, April 1969, pp. 865~906
- 13) たとえば，金森博雄・安藤雅孝：関東大地震の断層モデル，関東大地震50周年論文集，1973年，pp. 89~101
- 14) 石田勝彦・大沢 勝：震源特性を考慮した強地震動，1966年 Parkfield 地震と1968年十勝沖地震，第4回日本地震工学シンポジウム，1975年11月，pp. 15~22
- 15) 大塚道男：地震の起こり方のシミュレーション，第4部，断層面に於ける破壊の成長，地震，第2輯，第25巻，第4号，1972年，pp. 275~282
- 16) 川崎一朗・鈴木保典・佐藤良輔：半無限媒質中の断層によって生じる地震波(その1)，地震，第2輯，第25巻，1972年，pp. 207~217
- 17) たとえば Saito, M.: Excitation of Free Oscillations and Surface Waves by a Point Source in a Vertically Heterogeneous Earth, Journal of Geophysical Research, Vol. 72, No. 14, July, 1967, pp. 3689~3699
- 18) Usami, T., Odaka, T., and Sato, Y.: Theoretical Seismograms and Earthquake Mechanism, Part I. Basic Principles, Part II. Effect of Time Function on Surface Waves, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University, Vol. 48, 1970, pp. 533~579
- 19) 工藤一嘉：長周期地動ー強震地動の表面波に関する検討ー，第6回地盤震動シンポジウム，日本建築学会 構造標準委員会 振動分科会 地盤震動小委員会，1978年3月，pp. 9~16
- 20) 嶋 悦三，柳沢馬住，工藤一嘉，吉井敏尅，一ノ瀬洋一郎，瀬尾和大，山崎謙介，大保直人，山本喜俊，小口雄康，長能正武：東京の基盤構造，第1回第2回夢の島爆破実験による地下深部探査，地震研究所彙報 Vol. 51, 1976年，pp. 1~11, 第3回夢の島，吉川町爆破実験による地下深部探査，地震研究所彙報 Vol. 51, 1976年，pp. 45~61
- 21) 地震学会：日本の地震学の概観，地震，第2輯，第20巻，第4号，1967年，特に，日本の地殻構造(安芸敬一) pp. 39~43, 日本列島の地殻構造(浅野周三，浅田 敏) pp. 126~131, 日本周辺海域の地殻構造(田 望) pp. 131~134
- 22) Wiggins, R.A., Sweet, J., and Frazier, G.A.: Seismic Risk for Offshore Structures, 10th Annual Offshore Technology Conference in Houston, 1978, pp. 529~533
- 23) Kurata, E., Iai, S., and Tsuchida, H.: Annual Report on Strong Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1976 and 1977), Technical Note of the Port and Harbour Research Institute, No. 287, March 1978, p. 194
- 24) 大沢 胖・田中貞二・吉沢静代：長周期低倍率地震計記録のデジタル・データ，東京大学地震研究

- 所, 1979年3月, 41p.
 25) Geller, R.J.: Scaling Relations for Earthquake Source Parameters and Magnitudes, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 66, No. 5, October 1976, pp. 1501~1523
 26) 佐藤良輔: 無限媒質中の有限断層によって生じる変

- 位を計算する program, 地震 第2輯, 第28巻, 1975年, pp. 486~489
 27) Sato, R.: Fast Computation of Theoretical Seismograms for an Infinite Medium Part I. Rectangular Fault, Journal of Physics of the Earth, 23, 1975, pp. 323~331

付 録 基盤最大加速度と実効距離と気象庁マグニチュードの関係^{*)}

実効距離 (D) km	マグニチュード (M)						実効距離 (D) km	マグニチュード (M)					
	6.0	6.5	7.0	7.5	7.9	8.5		6.0	6.5	7.0	7.5	7.9	8.5
0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	155	13.5	20.0	33.0	62.0	96.0	130.0
5	302.0	318.0	333.0	355.0	368.0	378.0	160	13.0	19.0	31.0	58.0	93.0	127.0
10	238.0	268.0	298.0	318.0	341.0	356.0	165	12.8	18.0	29.0	55.0	90.0	123.0
15	208.0	239.0	270.0	298.0	318.0	335.0	170	12.6	17.0	27.0	51.0	87.0	121.0
20	187.0	219.0	248.0	272.0	298.0	320.0	175	12.4	16.5	26.0	48.0	84.0	118.0
25	170.0	201.0	230.0	250.0	282.0	305.0	180	12.2	16.0	24.0	45.0	81.0	115.0
30	155.0	187.0	215.0	239.0	268.0	293.0	185	12.0	15.5	23.0	43.0	78.0	112.0
35	139.0	175.0	203.0	225.0	254.0	282.0	190	11.8	15.0	22.0	41.0	76.0	109.0
40	123.0	163.0	192.0	214.0	243.0	272.0	195	11.6	14.5	21.0	39.0	73.0	107.0
45	107.0	150.0	181.0	203.0	231.0	261.0	200	11.4	14.0	20.0	37.0	71.0	104.0
50	91.0	138.0	169.0	194.0	222.0	251.0	205	11.2	13.8	19.5	35.0	68.0	102.0
55	78.0	126.0	159.0	184.0	211.0	241.0	210	11.0	13.6	19.0	34.0	66.0	100.0
60	66.0	116.0	150.0	175.0	202.0	234.0	215	10.8	13.4	18.0	33.0	64.0	98.0
65	56.0	105.0	140.0	167.0	193.0	225.0	220	10.6	13.2	17.5	31.0	62.0	96.0
70	48.0	96.0	131.0	158.0	184.0	217.0	225	10.4	13.0	17.0	30.0	60.0	94.0
75	40.0	86.0	123.0	150.0	176.0	209.0	230	10.2	12.8	16.5	29.0	58.0	92.0
80	35.0	78.0	115.0	143.0	168.0	202.0	235	10.0	12.6	16.25	28.0	56.0	90.0
85	30.0	69.0	107.0	136.0	161.0	195.0	240	9.8	12.4	16.0	27.0	54.0	88.0
90	26.0	61.0	99.0	129.0	155.0	189.0	245	9.6	12.2	15.75	26.0	53.0	86.0
95	23.0	56.0	91.0	122.0	149.0	183.0	250	9.4	12.0	15.5	25.5	51.0	84.0
100	21.0	51.0	84.0	116.0	143.0	177.0	255	9.2	11.8	15.25	25.0	49.0	82.0
105	20.0	46.0	77.0	110.0	138.0	172.0	260	9.0	11.6	15.0	24.0	47.0	80.0
110	19.0	42.0	70.0	104.0	133.0	167.0	265	8.8	11.4	14.75	23.5	45.0	78.0
115	18.0	39.0	64.0	99.0	128.0	162.0	270	8.6	11.2	14.5	23.0	43.0	76.0
120	17.0	36.0	58.0	95.0	123.0	158.0	275	8.4	11.0	14.25	22.5	41.0	74.0
125	16.5	32.0	52.0	89.0	119.0	153.0	280	8.2	10.8	14.0	22.0	40.0	72.0
130	16.0	30.0	48.0	84.0	115.0	148.0	285	8.0	10.6	13.75	22.0	38.0	70.0
135	15.5	27.0	45.0	79.0	111.0	145.0	290	7.8	10.4	13.5	22.0	36.0	68.0
140	15.0	25.0	41.0	74.0	107.0	141.0	295	7.6	10.2	13.25	22.0	34.0	66.0
145	14.5	23.0	38.0	70.0	103.0	137.0	300	7.4	10.0	13.0	22.0	33.0	65.0
150	14.0	21.0	36.0	66.0	100.0	134.0							

* 野田, 上部, 千葉による港湾技術研究所の研究室レベルでの内部資料による。