

I-15 構造物の耐震設計用応答スペクトルについて

北海道大学 正員 渡辺 昇
北海道大学 正員 ○金子 孝吉

1. まえがき

構造物の耐震設計において、動的な応答解析を簡略化するための手法として応答スペクトル法が考えだされすっかり定着している。そして現在までに強震記録を使用した耐震設計用の強震動応答スペクトルが多数提案されてきた。その応答スペクトルから設計用のスペクトルとして作成する場合には、片山、岩崎らの使ったなんらかの“正規化”と“平均化”が行なわれなければならない¹⁾。正規化とはスペクトルの縦距を一定の尺度に統一することであり、平均化とは強度の異なる多くの地震記録、あるいは地盤条件別などの平均化に相当するものである。

入力地震波の非定常性を考慮した正規化し、平均化された応答スペクトルを作るためには主要なパラメーターを使って整理する必要がある。そこで著者らは各種のパラメーターを次のように分けて、それぞれについて検討することにした。

- 1) スペクトルの縦距：速度応答、加速度応答および加速度応答比などによって応答スペクトルの性格が変わる。
- 2) 地盤種別：スペクトル曲線の形状は地震を記録した地点の地盤条件によって異なる。
- 3) 入力地震波の種類：強震記録に代表される自然地震、常時微動、火薬による人工地震および板たたき法による S 波記録などを入力地震波として、それぞれ応答スペクトルを作成したものを比較する。なお減衰定数あるいは地震波の S 波部と表面波部などの区別も含まれる。
- 4) 地震の規模：自然地震の場合は地震のマグニチュードの大小が、そして強震記録以外の場合でもエネルギーの大小が、地震動の周期特性に影響する。
- 5) 震央距離：震央距離の大小による周期特性およびスペクトルの形状特性への影響を調べる。

以上のような主要な情報パラメーターを含んだ応答スペクトル法について説明を加えるものである。

2. 応答スペクトル

設計用入力地震波が、一自由度系あるいは多自由度系の構造物に入力した場合の応答解析を行ない、絶対加速度応答波の最大値もしくはその最大値を入力波の最大値で割った加速度比を縦距にとり、構造物の各固有周期についてプロットしたものがいわゆる加速度応答スペクトルである。特に後者は加速度比を β で現わし、 β 曲線と呼ぶこともある。

1) スペクトル縦距の選定

図-1 は建設省土木研究所で昭和52年にまとめた「新耐震設計法(案)」(土研資料第1185号)のうちから選んだ最大加速度応答スペクトルである。それに対して図-2 は入力地震波の最大値で除した応答倍率スペクトルすなわち β 曲線を示した。これはわが国における各種の地盤上で得られた数多くの強震記録のうちから選んで解析

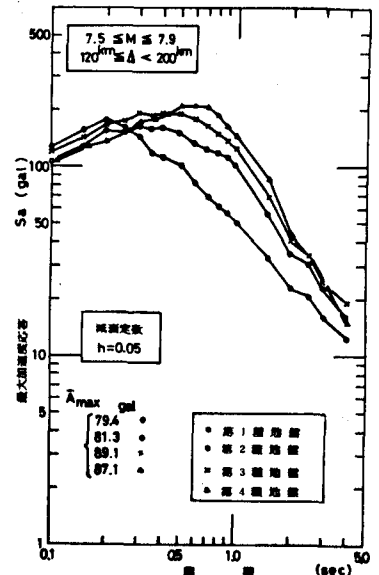


図-1 加速度応答スペクトル

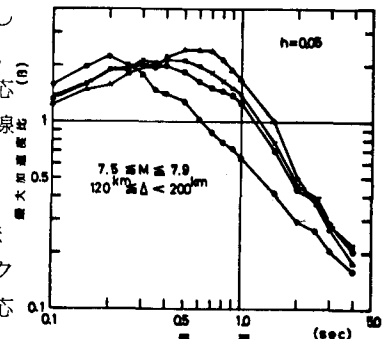


図-2 加速度比スペクトル

されたものである。

正規化のパラメーターとしてわが国では地震記録の最大加速度を用いることが多い。図-1 のような強震記録に対する応答スペクトルはマグニチュードや震央距離を含んだものとして有用であるが、図-2 の β 曲線を用いる設計法は、従来の震度法による設計法に容易にすりつけられるという利点を持つ。つまり過去の地震発生データから地域別、地盤別に設置される標準の設計震度に、構造物の振動特性による加速度応答倍率をかけることによって構造物の動的性状を勘案しつつ、「修正震度法」そして動的応答解析による「応答スペクトル法」が実用的な耐震設計の手法として採用できるからである。

強度の異なる地震記録の応答スペクトルを同じ尺度で比較することができるという点でも、最大加速度応答倍率のものより加速度応答倍率で表わした β 曲線の方が有用であろう。

2) 地盤種別による比較

地盤種別に関する問題はすでに多くの資料をもとにかなり議論されているのでここでは簡単にふれておく。地盤の軟硬の度合については図-1 と図-2 に示されているように、軟弱な第 4 種地盤ほど長周期の増幅率が大きいということは周知の通りである。

3) 強震記録以外の入力地震波による
応答スペクトルとの比較

青森県津軽平野において測定した記録は、1968 年十勝沖地震、常時微動、火薬による人工地震および板たたき法による S 波 (図-3) であった。³⁾

図-4 は EW 方向の加速度波を入力した場合のそれぞれの β 曲線を示したものである。平野全体を揺らすような大地震と火薬によって極く表層の一部の地域を振動させる人工地震とを比較するという矛盾はあるが、同一の地盤で記録されているからには地盤の特性を含んでいるという共通性を重視したい。

図からエネルギーの小さな人工地震や板たたき法による S 波などは長周期の増幅性がなく、自然地震では 2 秒近い長周期まで倍率が 1 を越えている。ただ倍率のピークの値はすべて 4 以下であり、平均すれば 3 ぐらいになる。また図-5 は 1968 年十勝沖地震の余震の 1 つで NS 方向の加速度記録から、あえてその初動 S 波部と表面波部をそれぞれ入力した場合の β 曲線である。表面波部の記録による応答倍率は長周期で大きくなっている。しかし減衰が大きければ、S 波部の応答とそれほど差がないようである。

強震記録の β 曲線に常時微動の β 曲線が比較的近く、重なることもあるようだ。釧路で記録された常時微動波と 1962 年

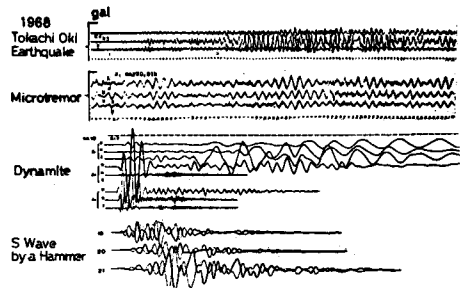


図-3 青森県津軽平野における測定記録

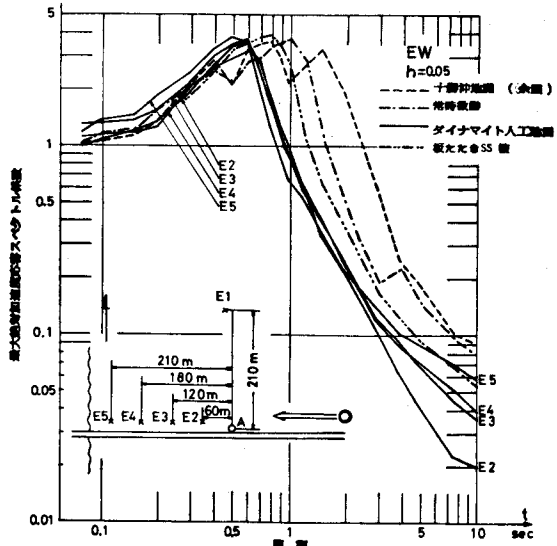


図-4 β 曲線

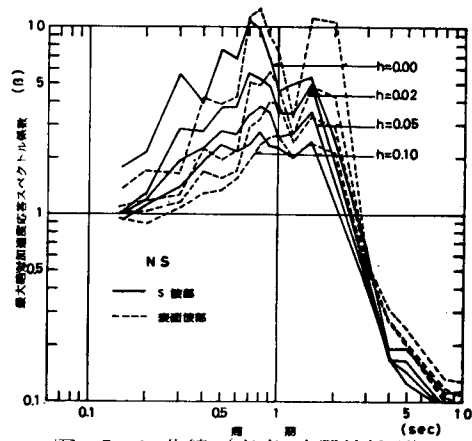


図-5 β 曲線 (青森 十勝沖地震)

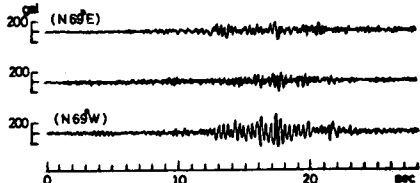


図-6 1962年 能登沖地震記録

広尾沖地震波（図-6）とを比較してみた。地震は SMAC 強震記録で、 $M=7.0$ 、 $H=70\text{ km}$ 、 $N 42^{\circ}28'$ 、 $E 143^{\circ}49'$ で、水平方向には $N 61^{\circ}E$ 、 $N 21^{\circ}W$ の加速度記録である。

図-7 はその応答スペクトルである。実線が広尾沖地震、破線が常時微動を入力波とした場合の β 曲線である。両者よく一致しているが、これは地盤の周期特性が両者とも強く現われているものと思われる。なおこの地点の表層地盤の固有周期は 0.25 秒と 0.35 秒である。⁵⁾

4) 地震の規模と震央距離

前述で示したように、正規化し、平均化した β 曲線は、逆に本来個々に含んでいた入力地震波の多くの情報を消してしまっている。その代表的なものがマグニチュードと震央距離である。これらそれぞれの大小が地震動の周期特性に影響を及ぼすことは広く認められている。

なお正確に言えば震央距離ではなく震源距離であるが、構造物に影響の大である比較的浅い地震を対象としているということでここでは震央距離についての比較を行なうことにする。

図-8 は 1973 年の根室半島沖地震の最大の余震、 $M=7.1$ 、 $H=30\text{ km}$ 、 $N 42^{\circ}57'$ 、 $E 146^{\circ}45'$ の NS 成分である。上から震源に近い順で示したが、この加速度記録を入力波とした場合の β 曲線を図-9 に示す。

図でみるかぎり震央距離 Δ の大小によるスペクトル上の差は認められず、どれとどれを比べてもランダムである。もちろん Δ に関係する相違があるはずであるが、ここでは地盤や地形による影響が入っており比較にならない。ただ振幅の大きな記録と、表面波の卓越した記録ほど長周期領域も増幅されていることが判る。

次に示す図-10は建設省土木研究所の土研資料第 1185 号¹⁾にある最大加速度応答スペクトルの中から、震央距離 $20\text{ km} \leq \Delta < 60\text{ km}$ で第1種地盤（実線）と第4種地盤（破線）について、マグニチュード M が図中に示してあるように変った場合の β 曲線である。

いずれも地震の規模が大きくなるほど β 曲線が右に移動する。すなわち長い周期の応答倍率が増幅されることになる。言い換えれば大きな地震ほど大領域の地層を揺すり、継続時間が長く、表面波が発生しやすく持続性があるため、長周期の増幅度が大きくなるわけである。ただし、大地震のデータが少ないため、 $M < 7.5$ の場合も同様のことが言えるとはかぎらない。

この図-10で示された地震の規模の増加による β 曲線の右への移動の度合を数量的に与えることができれば地震規模をパラメーターとするより適切な耐震設計用応答スペクトルを作成することが可能である。

図-11はマグニチュードが一定な地震で震央距離が、

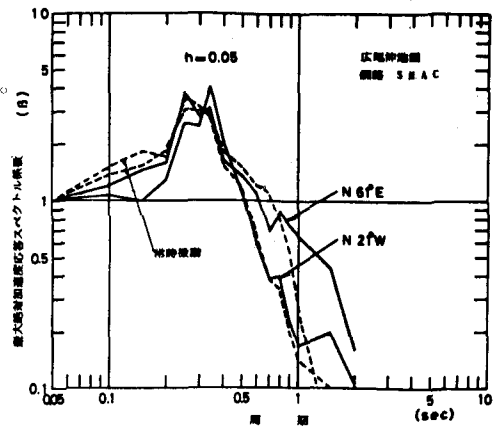


図-7 β 曲線（広尾沖地震、常時微動）

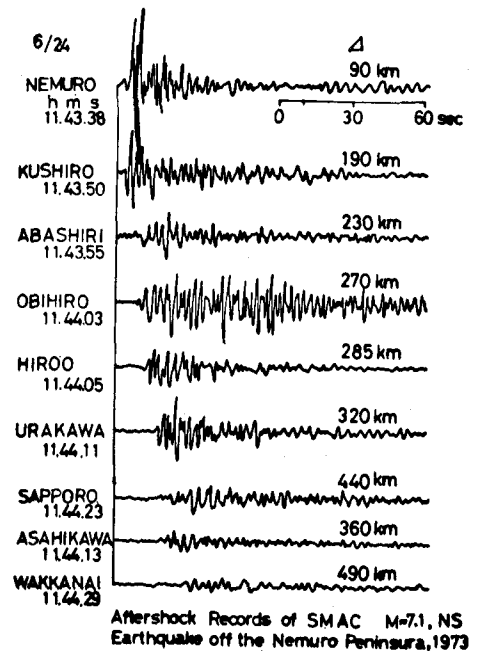


図-8 1973年根室半島沖地震

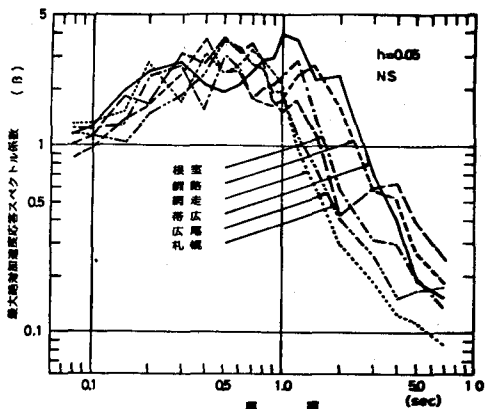


図-9 β 曲線（根室半島沖地震）

図に示されているように変化した場合の β 曲線である。第1種地盤（実線）と第4種地盤（破線）ともに図-10の地震規模の変化の際にみられたような規則的な変化はみられない。これは図-9 の場合と重複するものであるが、次のように解釈した。

エネルギーが大きく振幅の大きな大地震ほど大きな領域を揺するため、周期の長い応答波が増幅し β 曲線は右にずれる。また震源が遠くにあるほど地震が到達するまでに長周期の表面波が形成され、 β 曲線はやはり右にずれることになる。

つまり近い地震は遠い地震より振幅が大きく β 曲線が右によるが、遠い地震は長周期の表面波が発生するためにやはり右にずれということ、震央距離には応答スペクトルでみるかぎり影響しないようである。

3. あとがき

耐震設計用応答スペクトルを作成するために必要な入力波となる地震記録に含まれる情報を色々なパラメータとして扱い、それぞれについての比較を行なった。

すなわち、1) 強震記録以外の波を入力波として作成した応答スペクトルが設計用に使えるかについては、強震記録と比較的に一致する常時微動波については使用することも可能である。2) 正規化された応答スペクトルの縦距が β であればマグニチュードや震央距離の情報が入っていないので、そのパラメーターを考慮すれば、十分に実用化できる。3) ただ震央距離については前述したごとく採用できない。

近年こういった応答スペクトル法の研究がきわめて活発になり、非定常性を含んだ強地震動による応答スペクトルの統計的な解析を行ない、期待値や超過確率の検討を組み込んだ危険度解析が行なわれるようになってきた。しかしここでは強震記録の場合と比較的によく一致する常時微動の記録を使って、簡単なパラメーターを使用した実用性のある設計用応答スペクトルを利用することをすすめたい。

(参考文献)

- 1) 建設省土木研究所振動研究室：土木研究所資料、1968～1976
- 2) 片山恒雄、岩崎敏男、佐伯光昭：地震動加速度応答スペクトルの統計解析、土木学会論文報告集、1978、7
- 3) 渡辺 昇、金子孝吉：ダイナマイト人工地震波による地盤の応答スペクトルについて、土木学会年次学術講演会講演集、1978、9
- 4) 石井 清：地震外力に対する構造物応答の非超過確率、土木学会論文報告集、1977、11
- 5) 酒井良男：1973年6月17日根室半島沖地震調査報告、文部省科学研究(自然災害特別研究)報告書、1974、3
- 6) 金井 清他：広尾沖地震における釧路の強震記録と構造物の被害について、文部省科学研究(特定)報告書、1969、3
- 7) 表俊一郎、中島直吉：常時微動観測と N 値との対比、Proc. of J E E S、1966

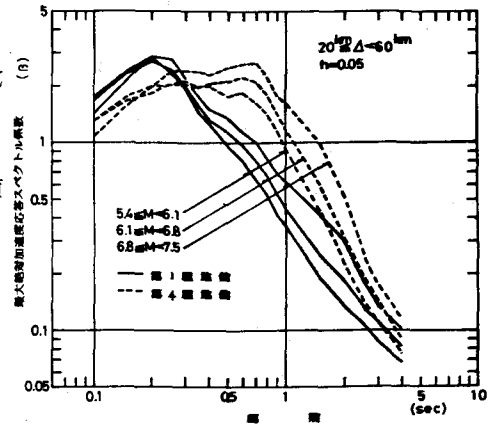


図-10 β 曲線 (震央距離一定)

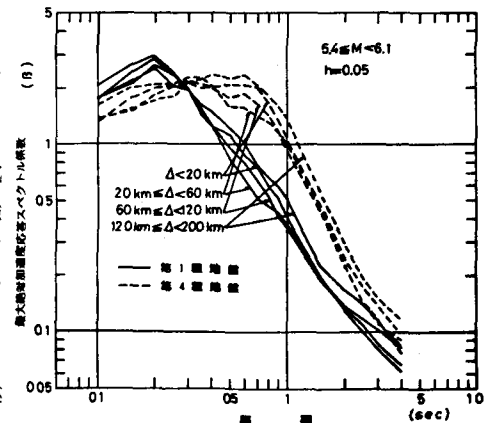


図-11 β 曲線 (マグニチュード一定)