

耐震設計用入力地震動について

—模擬地震波作成をめぐる諸問題—

鈴木 浩平* 青木 繁**

要 約

耐震工学の立場からの地震動のとりあつかいと、問題点について概観している。都市施設、各種生産施設を含む構造物、システムの耐震設計、防震対策を考えると、上記の構造系に作用する想定入力としての地震動をどう評価するかということは、非常に重要な問題である。

本稿では、この観点からまず工学的に考慮しなくてはならない地震動の諸特性について述べる。次に、実際によく使われる地震動記録の特徴について説明し、とくに地震波の解折と処理における典型的問題として、加速度記録から地震動の速度と変位を求める工学的手法と問題点について考察する。

さらに、各種の構造系の耐震設計用入力として模擬地震波の作成が活発になっている現状と、その研究過程について詳述する。模擬地震波の作成は、応答計算によって応答スペクトルを求めることが困難な多自由度系や非線形系の応答解折などに供する目的でなされてきたものであるが、地震動の本質に沿うという理学的な側面からも、また解折論的側面からも多くの未解決の課題をかかえている。これらの問題点についても検討を加えている。

1 はじめに

近年地震工学の発展に伴ない、耐震設計の対象となる各種構造物やシステムの地震応答特性を把握することが重要になってきている。事実、大型電子計算機システムの飛躍的発達には、相当に複雑かつ大規模な構造物や大都市システムや産業施設を適切な力学モデルに置換するシミュレーションを可能にしており、特定の入力地震動が与えられたときに、その構造物やシステムがどんな応答性状をするかを推定することができる。この過程において、実系としての構造物やシステムのモデル化が所要の目的に対して適切であるか否かを検討することはもちろん重要であり、最近では、設計誤差や製作誤差をも考慮して構造物を「確率系」として扱うアプローチも注目されてきている。

しかし、構造物やシステム（以下、簡単のために、構造系と略す）がいかに適切にモデル化されたとしても、これら構造系に作用する地震動により、応答量の推定値が大きく変動してしまい、選択した入力波に依存して耐震設計の基準や考え方がまったく異なってしまうことにもなる。地震動のもつ不規則性については、詳しくは本

稿で述べるが、例えばひとつの例として、化学プラントの耐震設計において（同一の地震波であっても）、含まれる周期成分を2秒までとするか、5秒までとかなるによって、耐震対策に必要なコストが桁ちがいになるという話を耳にするほどである。また筆者らのように、直接地表面から入力をうける構造系だけでなく、建屋などいわゆる主構造物系（1次系）に設置された機器・配管系などいわゆる付加構造物系（2次系）の耐震問題をあつかう者にとっては、1次系を通過して2次系に作用する地震入力が増幅され、従って上記の地震入力による2次系の応答のばらつきも大きくなっていくため、入力地震動の選択には一層大きな注意を払わざるを得ない。

本稿では、上にのべたような観点から、まず、各種構造系の耐震設計に用いられる入力地震動の性質およびそれを実用に供する際に生じる若干の問題点について述べる。つぎに、近年とくにここ10年来、不規則振動論や確率過程論に関する研究の進展や、多くの強震記録の収録・解析をもとにして、地震波を人工的に作成する研究がなされてきている現状を絡め、併せてそれに伴う実用上の問題点を探ろうとする。なお本稿の一部は、筆者が属する不規則振動に関する研究グループで作成した研究論文抄録集を参考にしていることを付記する。

* 東京都立大学都市研究センター・工学部

** 東京都立大学・工学部

2 地震動波形の特性

すでに述べたように、各種の構造系の地震応答解析に使用する地震波の選択は、それを入力とした解析による応答諸量が対象となる構造系の耐震設計時における許容応力や断面形状などを大きく左右するために慎重になされる必要がある。周知のように、わが国においてもここ10数年来多数の強震動の記録がとられるようになり、膨大に得られている中小規模の地震記録とともにそれらの波形解析が精細に行なわれてきている。その結果、たとえば地表面で記録された地震動には地盤の固有周期に相当するものが確率的に卓越してあらわれることなどが明らかになってきている。

応答解析用の入力として地震動記録を採用するとき、あるいは解析用の模擬地震波を作成しようとするときには、上記の特徴を考えて設計対象の構造系が設置される地表面の卓越周期を有する波形を採用するか、設計対象構造系にもっとも不利と考えられる特性を有する波形をとるか、またはまったく別個の基準によるかという問題が生じる。

そのような観点から地震動のもつ特性を列挙してみると以下のようになる。

(1)地震動の最大値；一般に地震動記録は加速度で測定・記録されることが普通であり、最大加速度をもって地震動の最大値とすることが多い。しかし、必要に応じて速度や変位として最大値をあらわすこともある。

(2)地震動の継続時間；継続時間については、どこをもって地震動の始まりとし、どこをもって地震動の終わりとするかによって継続時間のとり方もまったく異なる。あらかじめ設定した基準値を越した地震動が自動的に記録されるようになっているときは、その設定量より当然記録長も異なってくる。工学的には、大型タンクのスロッシング（揺動）など10秒以上の長周期を問題にするときを別にすると、おおよそ10秒から数十秒の記録長が使われることが多い。

(3)地震動の周波数特性；記録された地震動は、その地震の発生機構、伝播過程さらには測定器や種々の変換器の特性などを反映して種々の周波数成分が、さまざまな強さで混入している。従って、地震動のもつ強さ（振幅あるいはパワー）のスペクトル分布は、構造系の動的な耐震性を評価する上で、非常に重要なファクターとなる。この点から地震波のスペクトル解析を行なうためのさまざまな手法が提案され、解析器などハード面での発展もめざましい。

(4)地盤性状；上にのべた周波数特性に大きな影響を与えるのは、地震動測定地点の地盤の振動特性である。地盤の特性については、1964年の新潟地震でみられたよう

な液状化現象など非常に複雑なものもあり、その特徴を画一的に把握することはむづかしい。しかし、たとえば常時微動の測定・解析などによって地盤のもつ卓越周期や減衰特性の推定なども行なわれており、地盤を適切な力学モデルに置換する試みもなされている。

(5)非定常特性；地震動の卓越振動数や継続時間がわかっても、地震動の性質はその継続時間内で変動している。たとえば、同一の最大加速度をもち継続時間の等しい地震動でもその最大値の生起時刻は異なるであろう。また、地震動波形のピークを連ねた曲線（包絡曲線とよぶ）は一般に振幅の時間的変動をあらわすものとしてよく使われるが、この曲線は後で述べるように、模擬地震動を作成するときに大変重要となる。さらに、地震動は一般に初期には振動数の高い波が続き、時間が経過するに従って振動数の低い波が卓越することが多い。このように、周波数特性も時間とともに変動する非定常性を有している。

(6)地震動の3次元特性；我々が実際に観察したり、何らかの目的で使用する地震動の波形は平面に記録された2次元波であるが、実際の地震の動きは3次元空間における運動であり、近年、直下型地震に対する対策や、構造系の3次元応答解析の必要性が増してくるにつれ、地震動の3方向成分間の相関特性の解明などもなされてきている。なお、地震動のねじり運動など回転運動も考慮した解析は今のところまだあまりなされていないようである。

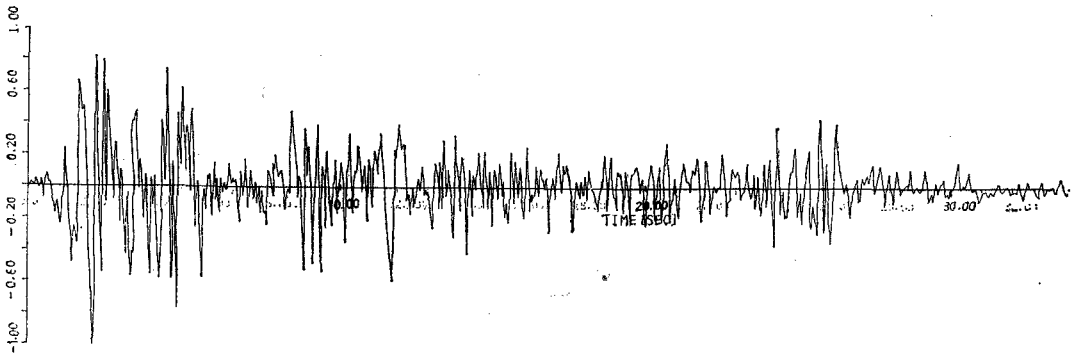
3 地震動記録例とその特徴

図1の(1)に示すのは、1940年5月米国カリフォルニア州南部のEl Centroで測定された加速度記録波形である。この波形は、当時としては貴重な強震動記録（最大加速度は330gal）であるところから、多くの工学的研究あるいは実際の設計にとり入れられている。今日では、El Centro波形を入力したときの構造系の各種の応答量が、他の地震入力による応答量と比較するときのひとつの基準になっている感ずらる。②は近年、とくに日本の耐震設計では非常に多く用いられている1968年5月の十勝沖地震時における八戸港湾での測定記録である。この地震は、マグニチュード7.9という大きなもので甚大な被害をもたらしたことからよく使われる。③は、1964年6月の新潟地震時における市内信濃川沿いのアパートで採れた記録であり、長周期成分とくに数秒の周期がかなり優越してあらわれている。これは、恐らく地盤が液状化しているためと考えられている。一方、④は短周期成分が顕著に卓越した衝撃的地震動の例で、1966年に生じた松代群発地震時において筆者らが記録した岩盤上の加速度波形である。松代群発地震は、有感地震だ

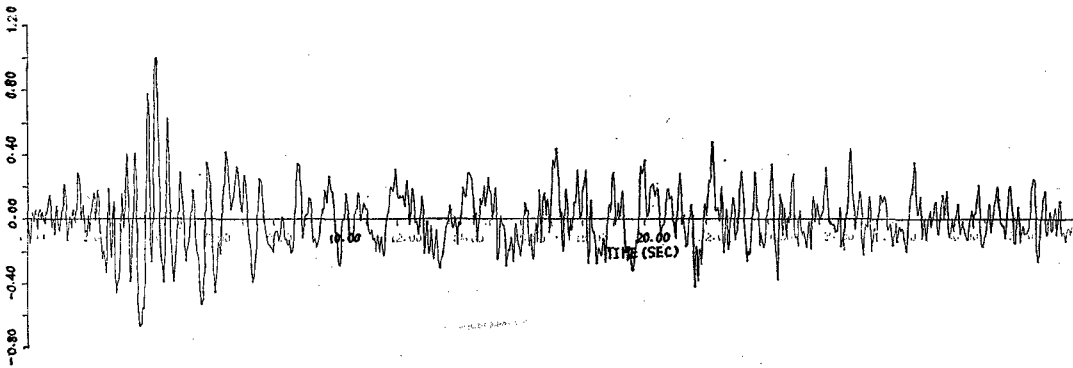
けでも2年間に60万回以上という膨大な頻度の地震であり、測定場所や測定機器のちがいによるバラツキはあるが、一般に20Hz以上という地震動としては非常に高い振動数成分を有している。継続時間も1秒からせいぜい数秒くらいで、いくつかの地震が連続的に起こることも多い。図2には、これらの波形の周波数分布を調べるために計算したパワースペクトル曲線の例を示している。パワースペクトル曲線を見ると、地震動の卓越している

成分が一目でわかり、例えば El Centro 地震入力に対しては、約1.5Hzあるいは約4Hzの固有振動数をもつ構造系は耐震性が良くないなどのことが推定できる。

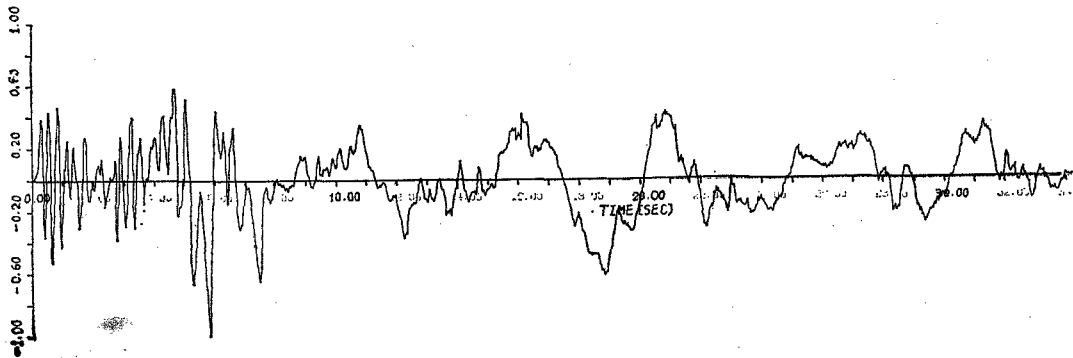
図3には、地震動の非定常特性を示す例として新潟地震の波形についてのパワースペクトル曲線をあげている。等しく(この場合4秒間)とった時間内でのスペクトルが時間経過とともに大きく変動しているのがよくわかり、最大ピークの周波数も、3.5Hz(0.28秒)→0.5Hz



図一(1) Imperial Valley 地震 (M=7.0, May, 1940) におけるCalifornia, El Centroの記録 (NS方向)



図一(2) 十勝沖地震 (M=7.9, May, 1968) における八戸市港湾における記録 (NS方向)



図一(3) 新潟地震 (M=7.5, June, 1964) における新潟市内川岸町での記録 (NS方向)

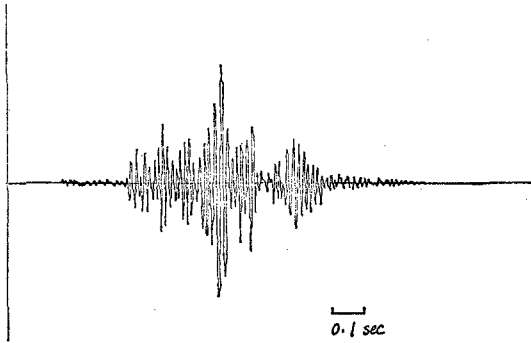


図-1 (4) 松代群発地震の測定記録の例
(April, 1966, 長野県若穂町保科・在家公民館脇岩盤)

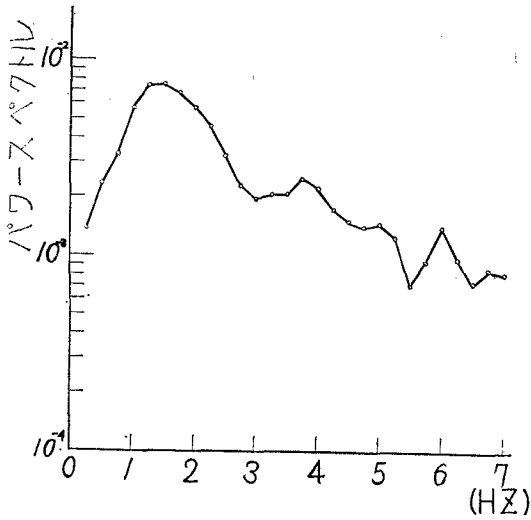


図-2 El Centro 記録のパワースペクトル

(2秒)→0.2Hz(5秒)と低い方へ推移している様子がよくわかる。パワースペクトルの推定は、理論的には無限長の継続時間を有する定常時系列についてのみ有効であるものだが、近年MEM(最大エントロピー法)という新しいスペクトル計算のアルゴリズムの開発により、継続時間の短い波形あるいは非定常性の波形のスペクトル変動を精度良く推定することが可能になってきている。

つぎに、地震動記録が同じ地震動であっても測定地点や構造系の建設予定地点のちがいでよって当然相異してくることは予想されるが、近接した地点であっても異なっている例を示そう。図4は、前述の松代群発地震時において比較的震源に近い地表面で20m間隔の6点で同時測定された地震波形である。測定点によって地震波の形状そのものも異なってくるが距離が離れるにしたがって波形間に時間差のあることが認められる。この場合は、

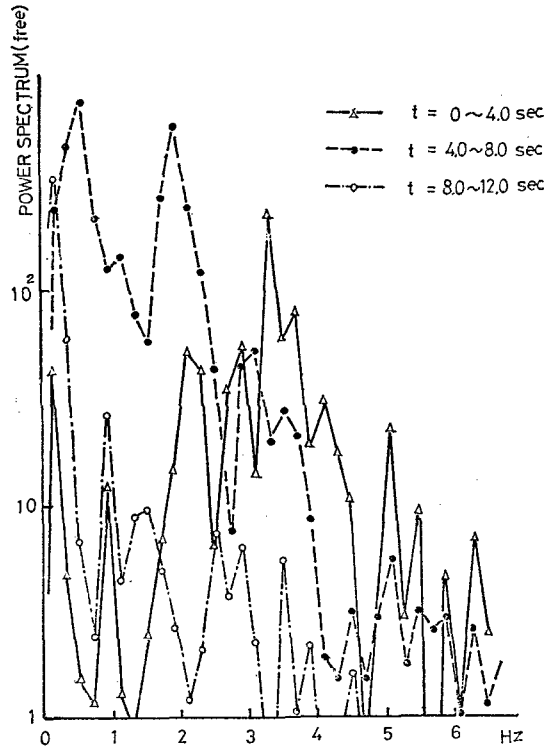


図-3 新潟地震波パワースペクトルの時間的変動

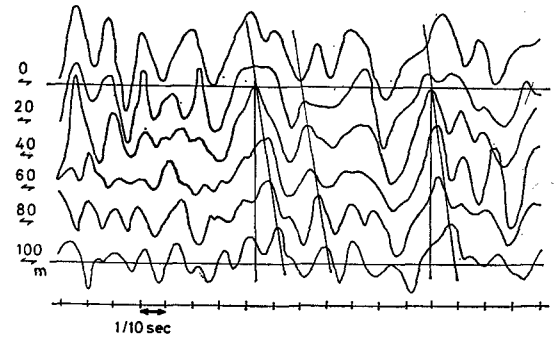


図-4 近接6地点の地表震動同時記録(吉川)

10mの距離に対して約0.10秒の時間おくれがある。地震波の伝播方向と構造系の長手方向が一至したときには、当然応答にも位相差の影響があらわれることが予想される。図5は、両端から互いに時間おくれをもつ2入力作用した構造系モデルの最大応答量の時間おくれに対する変動を示したものである。構造系の固有周期や減衰係数にもよるが、応答倍率が時間差によって数倍も変わりうる。図6は、同一構内の同一建物の約30m離れた2点(地階床面)での同時測定記録である。図7はこれらの波形をパワースペクトル解析したものであ

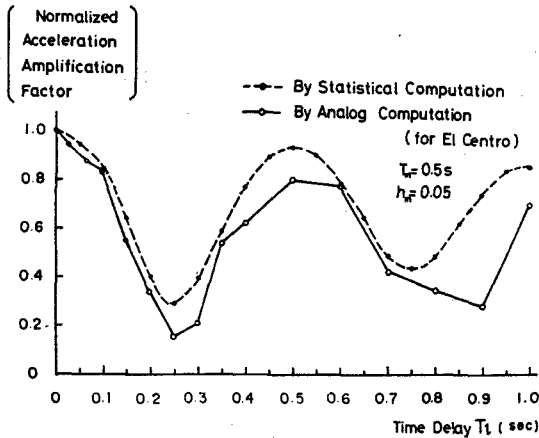


図-5 2入力間時間おくれによる応答倍率の変動(鈴木)(固有周期0.5秒,減衰係数比5%の例)

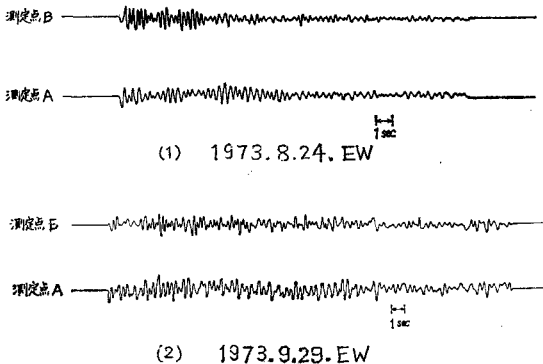


図-6 構内地2地点地震加速度測定記録(鈴木)

る。一見してわかるように、低い振動数領域におけるピークは一致しているが高い振動数のピーク値には大きなずれがみられる。このように、同一地震における近接した点での記録にも、記録計設置点の振動特性を反映して、地震波記録の特性は大きく変わることが理解される。

4 地震波の解析と処理 (とくに地震動加速度波形の積分について)

すでに2でのべたように、地震動の波形は加速度として記録されていることが多い。速度あるいは変位の記録もないわけではないが、まず第一に、速度や変位の記録を主眼とする測定機器に比較して加速度計は小型化でき扱いやすく、さらに広帯域の周波数領域に対して精度良く追従するというハード的なメリットと、第二に、構造系の応答解析においては、一般に運動方程式を加速度によって決まる強制力を入力とする形で計算することが工学的に都合がよいというソフト的なメリットなどにより、加速度波形が広汎に利用されている。

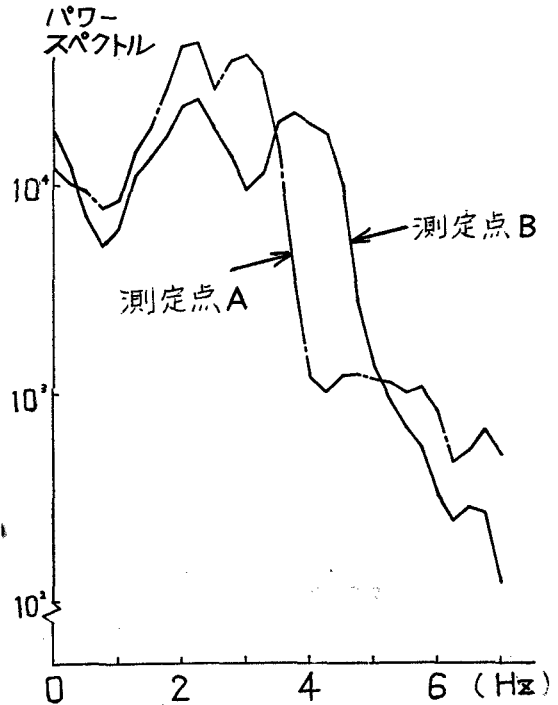


図-7 構内2地点測定記録波形のパワースペクトル

しかしながら、地震工学の分野においても、
 (1)加振実験用振動台や加振器の制御用入力
 (2)柔構造物、配管系や貯槽タンク内の液面揺動など固有周期の長い(振動数の低い)構造系の地震応答解析
 (3)多数の入力を同時にうける構造系の応答解析
 (4)模擬地震波の作成(速度波、変位波)
 (5)不完全地震記録からの実際の地動の推定というような実用上の必要性から、速度や変位の波形が必要になることがかなり多い。速度計や変位計による記録がほとんどない現状を考えると、加速度波形を積分して速度や変位の波形を得ることが考えられる。

しかし周知のように、加速度記録の波形を直接積分して変位に変換しようとするときには、次にあげるような諸要因により、波形が発散してしまい、実用に供せるような安定した速度や変位の波形が得られないのが普通である。

- (i) 加速度記録の基準線設定の誤差
- (ii) 地震計、増幅器、記録計などの非線形性
- (iii) 記録紙の振幅方向の蛇行と時間送りの不正確性
- (iv) 読み取りや内挿操作における誤差
- (v) 初期変位、初期速度の不明確性

このために、これらの影響を除去あるいは補正して、安定した積分演算によって速度や変位を得ようとするいくつかの方法が提案されている。これらの手法は大別すると、

(I)適切な関数曲線などにより、基準線を補正する手法と

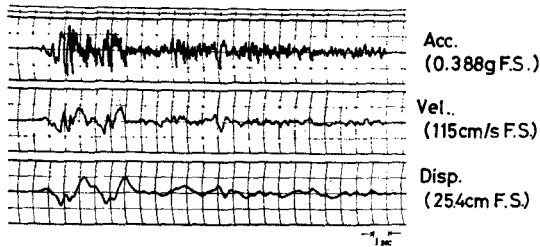
(II)フィルタを用いて積分演算を安定化する手法とに分けられる。(I)については、まだ十分な地震記録や解析装置がなかった1947年にカリフォルニア工大のHousnerが長周期正弦波による補正を提案して以来、2次曲線、3次曲線などにより基準線を修正し、記録紙の蛇行などの影響を除去しようとする研究がなされた。しかし、このことにより本来地震動がもっている長周期特性が損なわれてしまうことによる信頼性の低下を指摘する人(例えば、Shiffら)もいる。(II)については、いくつかの提案があるが、筆者らは、減衰を有する極長周期の2次系フィードバック要素によるアナログの積分法を提案している。この方法の概要は次のようになる。

1. 記録紙上の原波形に含まれているドリフトによる被積分波の発散を抑制するため、原波形中に期待される最大長周期成分より十分大きい周期を有する2次フィードバックフィルタを通す。必要に応じて、積分の振幅発散抑制効果を増すために1次遅れのフィードバックフィルタをも併せ用いる。

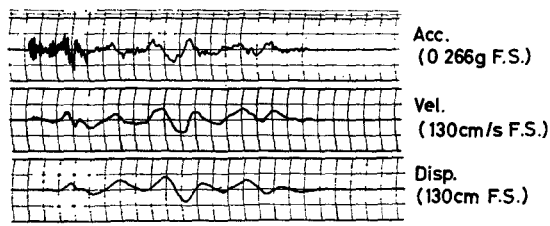
2. 上記の演算過程で、積分波形中に生じる不要な長周期成分は、高域波アナログフィルタにより除去する。

3. これらの積分演算における最適な演算パラメータの選択は、演算系の伝達関数のゲイン特性と位相特性の誤差が許容範囲内におさまるように線図を利用して選ぶ。

この演算方法は、パラメータの設定さえ適切におこなえば、演算が迅速かつ連続的に行えるという利点をもっている。図8には本手法によって得た積分波形の例を示



El Centro Earthquake (1940, May, USA)



Niigata Earthquake (1964, June, Japan)

図-8 補正積分法による加速度、速度および変位の同時波形(鈴木)

している。

近年、CIT(カリフォルニア工大)の地震工学研究所で開発された標準地震動の記録システムは、変換器の諸特性、高・低両周波数域におけるデジタル化誤差およびさまざまな複写、変換操作中におけるゆがみなどを十分に考慮して、原波形のもつ情報を忠実に再現して登録しておこうとするシステムであり、世界の地震工学者や設計者の便をはかっている。

5 設計用地震波のシミュレーション

現在、各種構造系の耐震設計計算の入力地震動として最も広く用いられているのは、El Centro、十勝沖などに代表される過去に記録された強地震動記録である。しかし設計計算用入力として採用できる強地震動記録は少なく、また構造系の建設計画地点での記録があることはまったくまれであり、また、多自由度系や非線形特性をもつ系の応答特性は応答スペクトルでは計算できず、適切な入力波の選択がとりわけ必要となる。このように、強地震動記録の少ない現状では、実地震動記録を用いて構造系の安全性評価を行なっても、将来の予測不可能な地震に対しては、定量的な評価についての信頼性に関して疑問が残る。

これらの問題を克服するために、模擬地震波 (artificial earthquake motion あるいは pseudo-earthquake time history) の作成が考えられてきた。この模擬地震波作成の試みは、1947年、Housnerによって最初になされてから今日迄の約30年間に数多く提案されてきた。しかし、いくつかの手法が並列的あるいは系列的になされているのが現状であり、模擬地震波の作成に関する統一した考え方というものは確立していないのが実状であろう。

現在まで提案ないし実用に供されている模擬地震波のシミュレーションモデルを分類すると、

- A) 不規則雑音 (white noise, random noise) によるモデル
- B) 周波数特性を有する定常不規則過程によるモデル
- C) 振幅のみが非定常な不規則過程によるモデル
- D) 振幅特性および周波数特性の両方が非定常な不規則過程によるモデル

の四つのカテゴリーに分けることができる。

A) の不規則雑音を用いた周波数特性のない模擬地震波は、約30年前に Housnerによって最初に提案された。このモデルは、パルスを時間軸上にランダムに生じさせて地震加速度を模擬したもので、例えば図9のようになる。1950年代から1960年代にかけて、Rosenbluth, Ward, Bycroft といった人達が、デジタルパルスやアナログ雑音により、この種の信号を作成し入力として用いた。

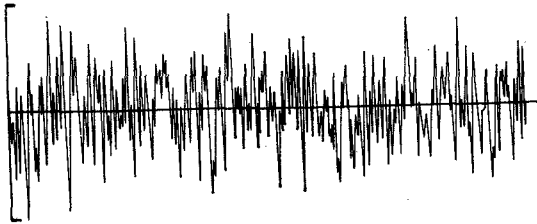


図-9 定常不規則雑音過程 (乱数発生による)

すでに述べたように実地震動の加速度記録のパワースペクトルは、白色雑音のように一定ではなく、地震波の発生機構、伝播過程や測定該地点の地盤の振動特性を反映してそれぞれ特有の周波数特性をもっている。このような周波数特性を有する地震加速度を確率過程で模擬したのがB)のモデルである。このモデルもやはりHousnerが1955年に実地震加速度記録8成分の平均的スペクトルに合うように、波長および振幅の異なる多くの正弦波を時間軸上にランダムにならべて重ね合わせて作成したのが最初のものである。わが国でも、1960年田治見(現日大教授)が、1自由度系の基礎に白色雑音を外乱として受けた時の質点の絶対加速度応答のパワースペクトル密度関数によって模擬地震波のパワースペクトルをあらわすという考えを発表している。図10には、周期0.3秒、減衰係数比0.4の1質点地盤モデルを用いたこの狭帯域不規則過程としての模擬地震波の例を示す。

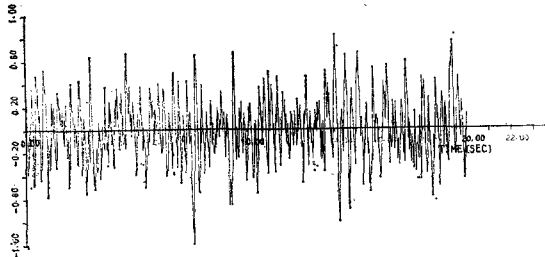


図-10 周波数特性をもつ定常模擬地震波

初期微動から始まり、立上りおよび主要動と続き、そして最後に減衰するという実際の地震動の全過程を考えると、当然地震動の振幅の変動を考慮したC)の非定常モデルを想定するのが自然であろう。このC)のモデルの作成においては、A)またはB)の定常不規則過程に、振幅の時間的変化(非定常性)を表現した何らかの確定関数を掛け合わせるのが普通である。この確定関数のことを一般に包絡関数(Envelope function)または、形状関数(Shaping function)などとよんでいる。この確定時間関数には、数多くの提案がなされているが、よく使われるものとしては、1967年にShinozukaらによって提案された指数関数を用いたものや、1968年Aminらによ

て提案された地震動の立上り、強震主要動および減衰部を三分割して表示したものなどがある。図11に示すのは指数関数を使用した例である。すなわち、 $\beta > \alpha > 0$ なる定数 α 、 β を用いて $e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}$ なる関数を作成すると、 α 、 β の選び方によって一般に図11に描かれたような形状の曲線が得られる。この図における $\psi(t)$ は、上記の関数とその最大値で割って振幅最大値を1に揃えた(正規化した)ものである。作成したい模擬地震波の性質により関数の形状を適宜に選ぶことができる。図12は地盤の卓越周期を0.3秒、減衰係数比を0.4として作成したこの方法による模擬地震波の例である。一方、図13に

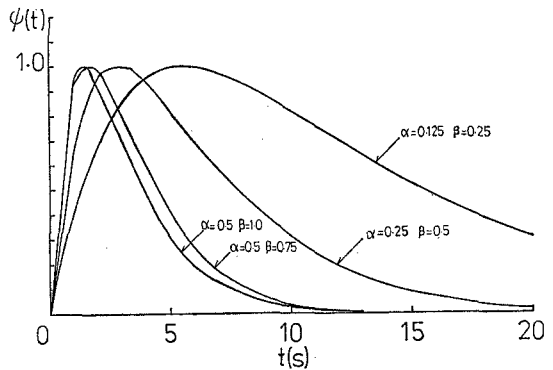


図-11 指数関数を用いた包絡関数 (Shinozuka)

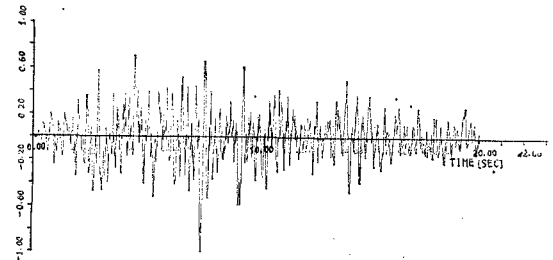


図-12 指数関数形包絡関数を用いた振幅非常模擬地震波 ($\alpha=0.25$, $\beta=0.5$; 地盤モデルの固有周期0.5秒)

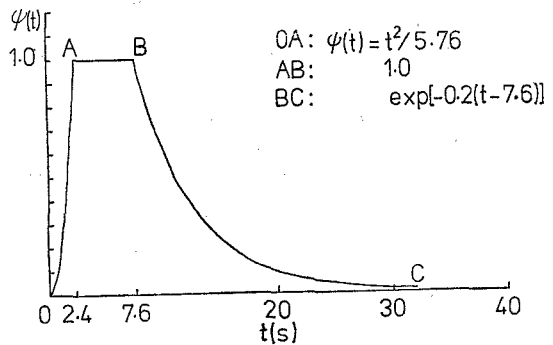


図-13 3分割形確定関数による包絡関数 ((Iyenger)

$$\begin{aligned}
 OA: & \psi(t) = t^2 / 5.76 \\
 AB: & 1.0 \\
 BC: & \exp[-0.2(t-7.6)]
 \end{aligned}$$

示した確定関数は Amin らの提案にもとづくものの一例である。これによると、地震動の継続時間を、立ち上り領域 ($0 \leq t \leq t_1$)、主要動領域 ($t_1 \leq t \leq t_2$) および減衰領域 ($t_2 \leq t$) の3領域に分割し、それぞれ

$$\phi(t) = \begin{cases} \phi_0 \times (t/t_1)^2 & ; 0 \leq t \leq t_1 \\ \phi_0 & ; t_1 \leq t \leq t_2 \\ \phi_0 \times e^{-c(t-t_2)} & ; t_2 \leq t \end{cases}$$

であらわしたものである。ここで、 ϕ_0 は最大振幅を、 c は減衰の度合いをあらわす定数である。図13の例では、 $\phi_0 = 1.0$ 、 $t_1 = 2.4$ 秒、 $t_2 = 7.6$ 秒、 $c = 0.2$ としている。こ

の3分割型の模擬地震波作成法は、指数型に比較して主要動の継続時間の調節などにおいて融通性が高いという特徴がある。確定関数の提案には、そのほか種々のものがあるが、最近筆者らの研究室において、主要動が継続時間の中期に生じ、立ち上り領域と減衰領域が比較対称的な形状をもつ地震動については、4次曲線によるあてはめが比較的良好であることを見出した。図14は、この方法による実地震動記録と、これを模擬した地震波の比較例である。ここで卓越振動数は、パワースペクトル曲線から推定している。

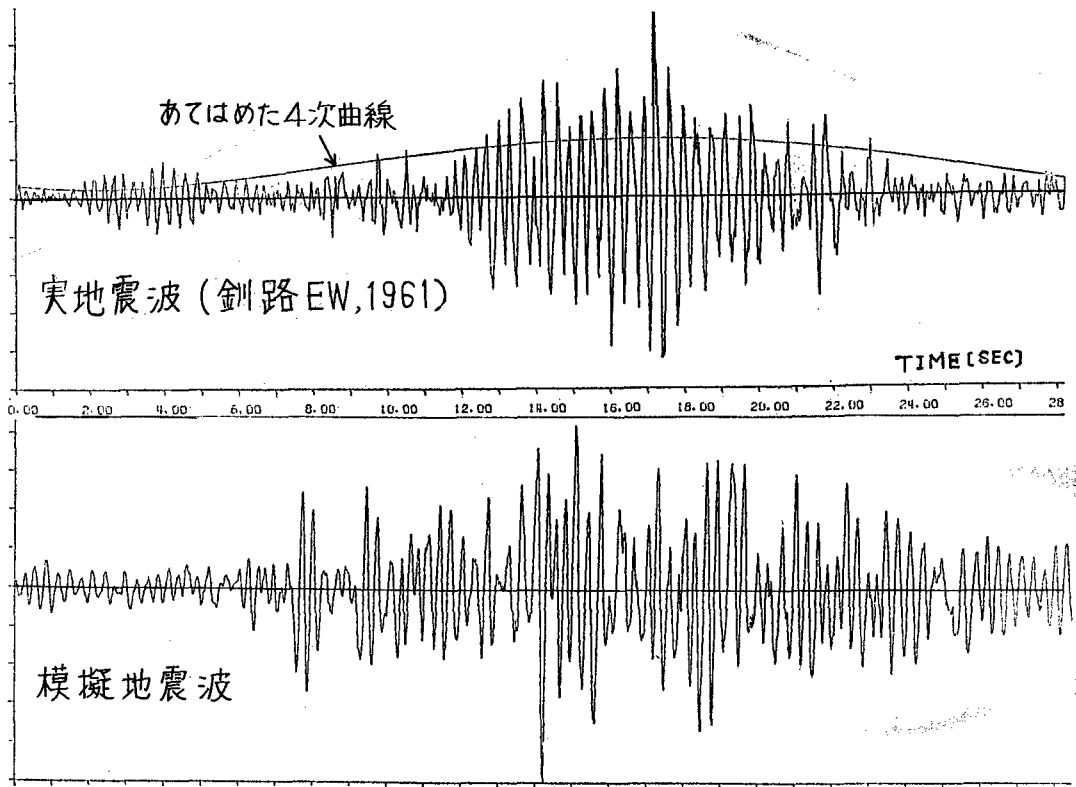


図14 4次曲線を用いた模擬地震波と実地震波の比較 (今津)

D) の振幅と周波数の非定常性を考慮したモデルは、もっとも実地震波の性質を忠実に反映したものといえる。しかしながら、パワースペクトルの推定は本来定常的な周波数特性をもつ時系列を対象としてなされてきたものであって、振幅も周波数特性も非定常である不規則過程のパワースペクトルの解析には若干の未解決の問題が残っているのが実状である。従って、例えば地震動の継続時間をいくつかの領域に分割して各区間を定常とみなして定常解析法を適用したものや、スペクトルを周波

数と時間の関数として3次元空間で定義する展開パワースペクトル (evolutionary power spectrum) や、さらには、物理スペクトル (physical spectrum) を用いたものなど、各種の提案が並列的になされている現状である。また、この問題と関連して、実地震動の3次元解析も行なわれ始めている。この3次元の特徴をもつ3方向成分の同時シミュレーションも今後の重要な課題となろう。表1は、本節で述べた模擬地震波作成に関する研究・提案の経過と特徴を概略的に整理したものである。

A) white noise	B) stationary	C) nonstationary (amplitude)	D) nonstationary (amplitude & frequency)
No. 1 Housner (1947) random pulse train			
No. 3 Rosenblueth (1956) random pulse (velocity)	No. 2 Housner (1955) sin 波の和		
No. 4 Bycroft (1960) white noise (analog)	No. 5 Barstein (1960) 変位と加速度の自己相関 を与える	No. 6 Bolotin (1960) 有限個のパラメータで模 擬 $a_k(t) = A_k^r(t) \times \rho_k^q(t)$	
No. 9 Bustamante & Rosenblueth (1962) random pulse (velocity)	No. 7 Tajimi (1960) 白色雑音入力による1自 由度加速度応答スペクト ル	No. 8 Goldberg, Bernard & Bogdanoff (1961) Iyenger型 envelopeを持つ適当な位 相差を持って重畳	
No. 11 Ward (1965) 1. filtered white noise 2. real earthquake 3. white noise (analog)	No. 10 Jennings & Housner (1964) 1自由度系の応答 white noise		

表1 模擬地震波作成の研究経過(1)

A) white noise	B) stationary	C) nonstationary (amplitude)	D) nonstationary (amplitude & frequency)
	<p>No. 18 Goto & Kaneda (1968)</p> <p>$x(t) = \beta f(t; \tau) g(t)$ $g(t) =$ 平均値ゼロの stationary process $Sg(\omega) = \frac{128}{3\omega t} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^4 \times \exp\left(-4\frac{\omega}{\omega_0}\right)$ $f(t; \tau)$: 確定時間関数</p> <p>No. 21 Liu & Jhaveri (1969) PSDFの算出, ピーク: 1ヶ or 2ヶ線形1質点系モデル</p>	<p>No. 12 Shinozuka & Sato(1967) W.N.→filter→envelope →速度波 W.N.→envelope→filter →速度波 速度波→微分→加速度波 envelope = $\begin{pmatrix} -\alpha t & -\beta t \\ e & -e \end{pmatrix} H(t)$</p> <p>No. 15 Amin & Ang (1968) filtered shot noise $S(t) = \sum X_k \delta(t - t_k)$ $\text{Var}(X_k) = I(t_k) dt$</p> <p>No. 14 Jennings, Housner & Tsai (1968) W.N.→2次元フィルター → envelope (Amin & Ang型)</p> <p>No. 20 Iyengar & Iyengar(1969) stationary × envelope $(a_1 + a_2 t) e^{-pt}$</p> <p>No. 22 Goto & Toki (1969) stationary × envelope $a(t/tp) \exp(1 - \frac{t}{tp}) u(t)$</p>	

表1 模擬地震波作成の研究経過(2)

A) white noise	B) stationary	C) nonstationary (amplitude)	D) nonstationary (amplitude & frequency)
		<p>No. 23</p> <p>Watabe (1969)</p> <p>各波の振幅間の相関性を考慮, envelope→Amin & Ang型</p> <p>No. 33</p> <p>Ruiz & Penzien (1971)</p> <p>白色雑音×envelope →filter</p> <p>No. 35</p> <p>Levy, Kozin & Moorman (1971)</p> <p>W.N.×envelope→filter (Shinozuka型) (3種類)</p> <p>相関性の考慮</p> <p>No. 39</p> <p>Shimizu (1972)</p> <p>$\alpha(t) = \phi(t)\alpha s(t)$ $\phi(t) = \text{envelope} = e^{-at} - e^{-\beta t}$ $\alpha s(t) = \text{stationary}$</p> <p>振動数特性が非定常なものにも拡張</p>	<p>No. 31</p> <p>Beaudet (1970)</p> <p>No. 30</p> <p>Yamahara (1970)</p> <p>非定常スペクトル→simulated earthquake ↑ 区間定常としてpower spectrumを計算</p> <p>No. 36</p> <p>Trifunac (1971)</p> <p>$f_n(t; \Delta) = \text{amplitude envelope spectrum}$ (tとωを2軸として3次元表示)</p> <p>$A(t; \Delta) = \Delta \omega \bar{Z} f_n(t; \Delta) \times \sin(\omega_n t + \delta_n)$</p>

表3 模擬地震波作成の研究経過(3)

A) whitenoise	B) stationary	C) nonstationary (amplitude)	D) nonstationary (amplitude & frequency)
			<p>No. 49 Saragoni & Hart (1974) 時間軸を3分割し, 各区間は定常として単峰スペクトル密度を有すると考える。 envelope: Iyengar & Iyengar型</p> <p>No. 50 Kameda (1975) evolutionary power spectrumを使用</p> <p>No. 52 Goto & Kitaura (1975) 局所スペクトル密度, 各区間は定常 envelope = $\frac{t}{t_p} \exp(1 - \frac{t}{t_p})u(t)$</p> <p>No. 64 Hoshiya, Chiba & Kusano (1976) physical spectrum を使用 harmonic & shot noise の両モデル</p>
		<p>No. 57 Muto & Miyamura(1975) 通産省指針に基づく envelope: Jennings型</p>	

表4 模擬地震波作成の研究経過(4)

6 構造系の応答特性を考慮した模擬地震波

各種構造系の動的耐震設計は、応答スペクトルを用いて作成されることが多い。この設計のための応答スペクトル曲線は、1959年にHousnerによって初めて平均的な設計用スペクトルが提案されて以来、Newmark, Blume, Hallなどにより実用的見地からいくつかの提案がなされてきた。図15は、これまでに提案されている国内外の設計用応答スペクトル曲線のコードを中心にして描いたものである。対象とする構造系の種類や減衰係数比の大きさにより、曲線の形状は当然異なってくるし、地盤の種類や地震の活動度 (seismicity) などとも考慮した形でこれらの設計曲線を整理する傾向は今後ますますなされていくことが予想される。

このことから、模擬地震波の作成にあたっては、所用の設計スペクトル曲線に適合するような入力特性をもつように波形を作成しようとする試みが、ここ数年来集中的になされている。とくに、地震対策についてきわめて慎重な配慮が要求される原子力発電プラントの耐震設計の分野では、アメリカを中心にしたこのような作成手法の研究や提案が流行している。これらの方法は、細かい相違点を別とすると大略次の2段階から成っている。

(1) source となる地震波形や不規則信号を入力として応答スペクトルを計算する。

(2) 求めた応答スペクトルと適合されるべき設計スペクトルの曲線形状を比較して、設計スペクトルより過大になっている領域に対応するスペクトル曲線部分を抑制 (suppressing) し、過小になっている部分を昂揚 (raisings) させるように source 波形を適当な方法で修正して設計用模擬地震波を作成する。

(1) の段階で用いる source 波形としては、El Centro などよく使われる実地震波を採用する場合と、まったく「くせ」のないものとして広帯域不規則雑音信号などに確定関数を乗じたものを用いる場合の二通りがあるようである。また、(2) の段階では、一般には応答スペクトルとフーリエスペクトルの形状が似ていることを利用して、フーリエ変換法によって周波数領域で source 波形の修正をする場合が多い。この方法は、計算処理労力が比較的少なく済むという特徴を有して、生産施設内の各種の付加的構造物設計用の床応答スペクトルに対しても有効である。このほかにもバンドパスフィルターを用いて修正する方法や、正弦波の重量により修正する方法もある。

このような設計スペクトルからの模擬地震波作成にはいくつかの問題点もある。たとえば、設計スペクトル曲線のすべての周波数成分を網羅する模擬地震波の作成は事実上不可能であり、工学的必要性もないと考えられ

る。またひとつの減衰係数比の値を選定して適合させた模擬地震波によって計算した応答スペクトルが、他の減衰値に対してもうまく合うという保障はまったくない。さらに、幅の広い応答スペクトルに合せた模擬地震波は、自由度の高い構造物に対し、高次モードの影響により実際には絶対にあり得ない応答倍率を示すことが多い。これらの問題は、そもそも模擬地震動には、物理的観点から本質的に考慮されるべき地震動の特性が欠落しているのではないかという問題とともに今後追及されるべき課題であろう。

最後に、構造系の側からみてもうひとつの地震波シミュレーションとして最悪模擬地震波という考え方がある。すなわち、与えられた構造系に対して最も都合の悪い特徴をもつ波形の作成法である。ある意味では、最悪模擬地震波の作成は、与えられた構造系がどのような波形に最も弱いかを調べる一種の動的強度解析の意味をもつ。また一方では、動的特性の上で理想化された構造系に対し、最悪地震波を作ったとき、これは一般の構造系シミュレータ用のシビアな模擬地震波としての意味をもつ。例としては、構造系に吸収されるエネルギーが最大になるという意味で、最悪な地震波を発生させる考え方と、応答スペクトルの立場から最悪な波形を発生させるという考え方などがある。

7 おわりに

都市防災学としての耐震工学を考えると、本稿で述べたような問題は、地震防災に直結する課題ではないと考える向きもあるかもしれない。しかし、周知のように地震という現象は大変に複雑な現象であり、理学的にも工学的にも未解決な問題が山積されている。著者らは、都市研究センター研究員として日頃地震防災研究に微力ながら尽力したいと考えるなかで、この総合研究があまりにも political な要請のみに傾注しすぎ、地震現象や地震動というものの本質から遊離してしまうことがないことを念じている。不幸にして都立大学には、理学部にも工学部にも、地震現象の解明を「本職」とする研究組織はないといえる。本稿もまた工学的な「実用的」な考察であり、地震動の本質に迫るものではないが、筆者らの願いが多少なりとも理解していただければ幸甚である。日頃、この種の問題に関し、ご助言ご討論いただいている都市研究センター (工学部) 国井隆弘、望月利男両兄に深い識意をあらわす。また、本稿の計算に助言された東京都立大学学生今津良彦君に感謝する。

参考文献

柴田碧編；応答解析用模擬地震波とその周辺の研究論文抄録集 (昭52.9) R A P R A S 研究会

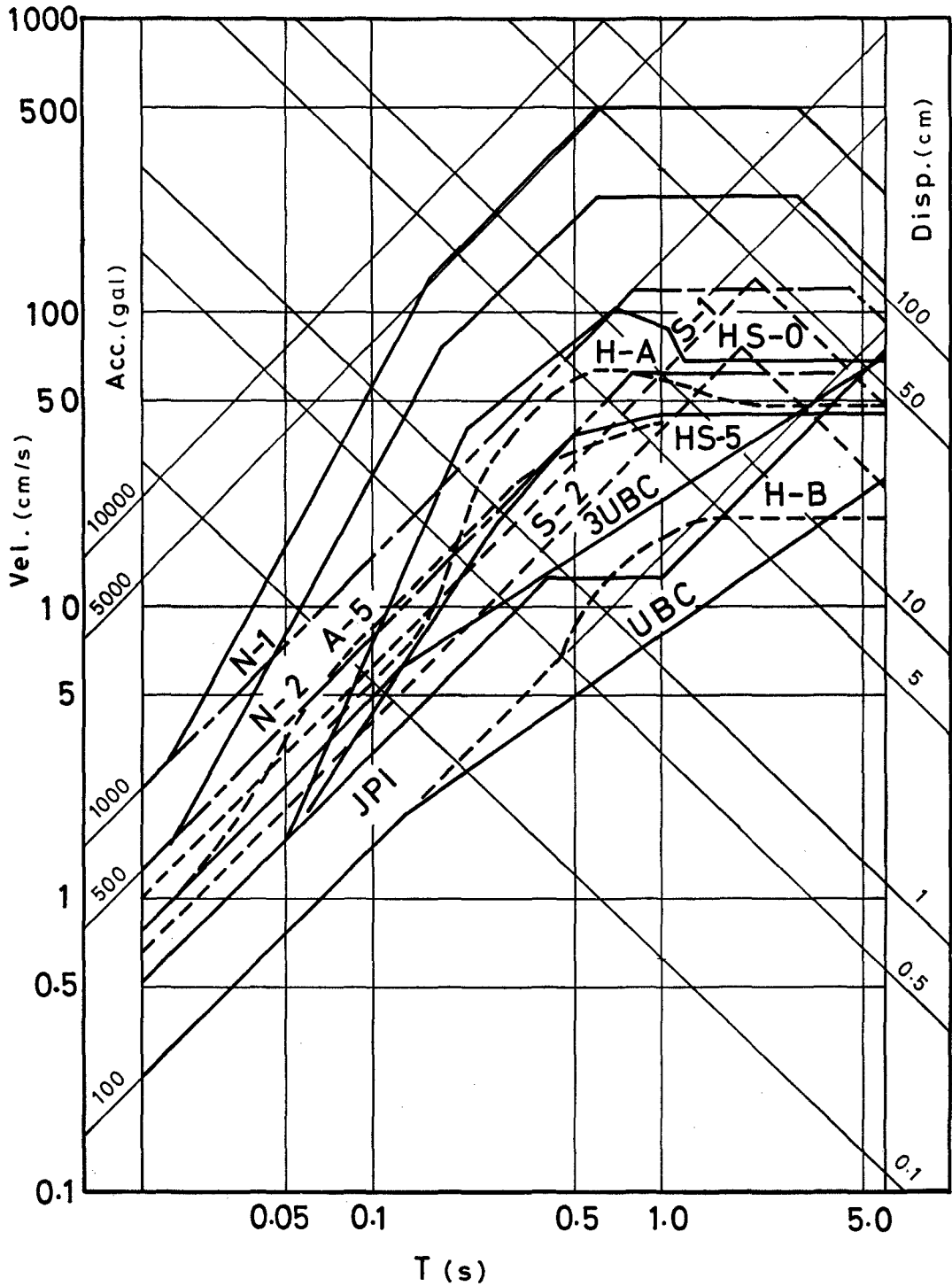


図15 各種コードなどによる設計応答曲線の比較 (柴田)

N-1: Newmark による; Pacoimaダムの地動(史上最大)と0%応答曲線(地動一点鎖線。)

N-2: Newmark による; 原子力発電所設計用地動と0%応答曲線(地動一点鎖線)。

本四-1: 本州四国連絡橋技術委による; 0%応答曲線-200 gal 入力。

本四-2: 同上; 5%応答曲線-200 gal 入力。

H-A: Housnerによる; 大地震0%応答曲線。

H-B: 同上; 遠距離大地震0%応答曲線。

J P I: 石油学会規格。

UBC: Uniform Building Code; 建築物。

UBC-3: 同上; プレースのある4本以上の脚を有する高架水槽。

S-1: California 石油パイプライン; 設計地動

S-2: 同上; 最大想定地動。

A-5: 原子力発電所機器; 5%応答曲線。