

## 計算機により制御された、はりの動的破壊実験

DYNAMIC DESTRUCTIVE TEST OF A CANTILEVER  
BEAM, CONTROLLED BY AN ANALOG-COMPUTER

伯野元彦\*・四俣正俊\*\*・原 司\*\*\*

By Motohiko Hakuno, Masatoshi Shidawara and Tsukasa Hara

### 1. はじめに

現在、構造物の耐震解析を行なう場合、大地震を受けた時の挙動が興味を中心になっており、多くの論文が出ている<sup>1)~2)</sup>。それらの研究の手法としては、いずれも構造物の「力～変位」関係を図-1に示すようなヒステリシスをもった適当な関係に仮定して、デジタル計算機

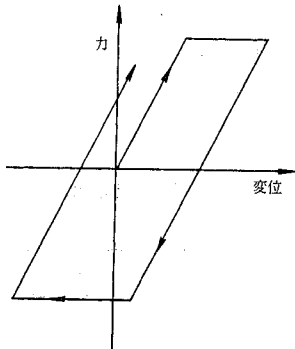


図-1 通常仮定される「力～変位」関係

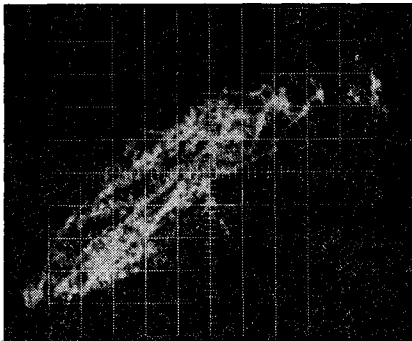


写真-1 定常ランダム大振幅強制変位による「力～変位」関係

またはアナログ計算機によってその振動を計算するというものである。この「力～変位」関係は従来行なわれてきた静的載荷試験結果を参照して仮定しているもので、実際の構造物が地震を受けた時のそれと同じかどうか疑問であるが、筆者らは先にその点を明らかにするための一つの試験として、小さい鋼片持ばりを地震波状外力によって曲げ破壊させた結果を発表したが<sup>3)</sup>、その「力～変位」関係は、従来用いられてきた仮定どおりの軌跡ではなく、写真-1に示すような、いわゆるヒステリシス・ループの中に複雑な軌跡を画きだしていた。

この結果は、構造物の線型を越えた「力～変位」関係は現在のところ、簡単な模型的な関係で表わしうるかどうかは疑わしく、今後の多くの実験結果の集積に待たなければならないことを示している。したがって、いま、構造物が大きく振動し線型を越えた場合を論ずるためには、「力～変位」関係に関する法則を知って、それを用いて振動計算を行なうにはまだかなりの時間を必要とする。そこで、つぎのような計算方法を試みてみたわけである。つまり構造物の振動計算を行なう場合、「力～変位」関係を仮定するのではなく、実際に実験を行ないながらその結果をただちに使って計算してはどうだろうか。具体的にはつぎのようにする。一般に構造物の振動を定める運動方程式はつぎのようなつりあい式である。

$$[\text{慣性力}] + [\text{振動減衰力}] + [\text{復元力}] + [\text{外力}] = 0$$

通常の振動計算に当っては、各項すべてを計算機中で計算する。本研究では「復元力」の項を除いて他の項は計算機中で計算を行なうが、「復元力」項を実験で置き換えようというものである。そして復元力を得るための実験と他の項の計算とを併行して同時に行なう点に特長がある。つまり計算のループ中に実験を含ませたやり方である。「復元力」実験装置は、構造部材に計算機が計算したとおりの振動変位を与え、その時の構造部材に生じた反力を計算機に「On-Line」で送り返してやらなければならない。

\* 正会員 工博 東京大学助教授 地震研究所  
\*\* 正会員 東京工業大学助手 土木工学科  
\*\*\* 元東京工業大学技術補佐員 土木工学科

そのため、実験装置としては、すでに発表した電気油圧式任意波形荷重試験機を用いた<sup>3)</sup>。この試験機は最大出力 1.5 t と小型のため実際の構造部材の復元力を求めることはとうていできず、非常に小さい供試体（厚 5 mm、長 60 mm、幅 20 mm）を用いたので、本研究は表題のような計算方法のための予備的研究といえよう。

さて、以上のような計算を行なうのはよいが、なぜ、実験的な研究方法もあるのにいまさら計算実験混合の方式を提案するかという理由である。それは、実験的に構造物の地震に対する強度を知るために、動的破壊実験を行なう場合、小さな模型であると実験に不可欠な相似則を満足させるような実験条件を備えることが困難なため、どうしても模型が大きくなってしまう。

それにもなって振動台、その他の加振装置も大型化せざるを得ず、多くの費用と時間を要することとなり、各大学、研究所などで個々にそのような研究を行なうことなど不可能である。そこで、あらかじめ適当な仮定により、大地震を受けた構造物の振動を計算しておき、それを目安としてどの部材が壊れるかを知ってその破壊する部材のみを取り出して、構造部材としての境界条件を与えて構造物が振動してその一部の部材が破壊するのと同じような状況を再現しようというわけである。

したがって、破壊する部材が  $n$  個あれば  $n$  個の実験装置を必要とする。この点は本計算法の多少の欠点というべきであろう。

## 2. 計算方法

本計算方法は 図-2 に計算の流れを示したように、アナログ計算機、任意波形動的的材料試験機、発振器、測定器系から成っている。強震による構造物の振動計算の具体的な例としては、本研究では 図-3 に示すような 1 自由度系の場合を取り扱った。この系の振動方程式は周知のように式 (1) で表わされる。

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{dx}{dt} + R(x, t) = F(t) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $x$ ：変形量、 $t$ ：時間、 $\varepsilon$ ：減衰係数、

$R$ ：復元項、 $F(t)$ ：地震加速度

すでに述べたように式 (1) の  $R(x, t)$  の項は実験か

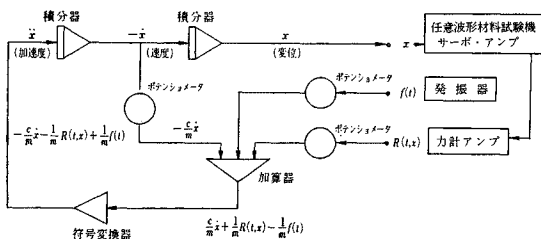


図-2 計算流れ図

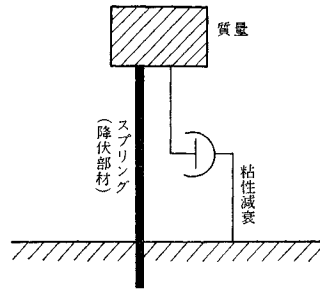


図-3 本研究で取扱った 1 自由度振動系

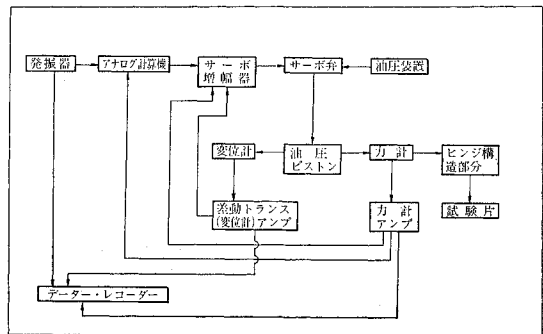


図-4 全体としての計算構成図

らの出力として得られる。他の項の計算はアナログ計算機により行なわれるが、全体としての構成は結局 図-4 に与えたようになる。

### アナログ計算機

本研究に用いたアナログ計算機の仕様はつぎのとおりである。

製造形式	横河電機 KK 低速型
演算電圧	±10 V
サークルテスト	振幅誤差 ±0.1% / サイクル 周波数誤差 ±0.5%
ドリフト	5 μV/hr

### 任意波形動的的材料試験機

本試験機は研究室において試作したもので、つぎのような性能もっている。

形式	電気油圧式
最大出力	1.5 t
平坦振動数領域	DC~20 Hz
最大片振幅	10 cm
最大速度	80 cm/sec
油圧ユニット	30 l/min, 140 kg/cm <sup>2</sup>
サーボ弁	30 l/min, 140 kg/cm <sup>2</sup>

### 擬似地震波発生器

これも別論文にて説明したように、10 数 Hz 以上の振動数をカットした白色雑音に次式  $g(t)$  で表わされる

包絡線を掛け合わせたものを擬似地震波として発生する。

$$g(t) = e^{-At} - e^{-Bt} \dots \dots \dots (2)$$

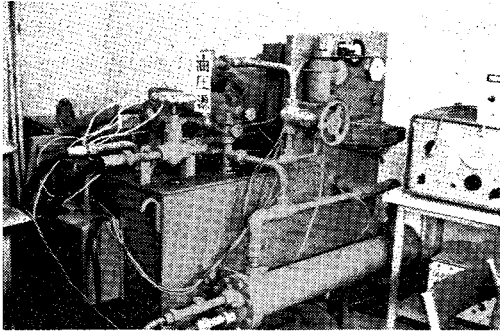


写真-2 (a) 振動油圧発生装置

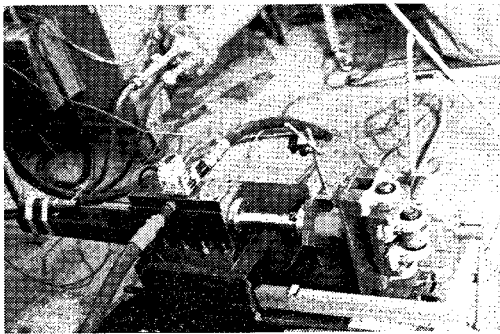


写真-2 (b) 油圧ピストン, 供試体支持部

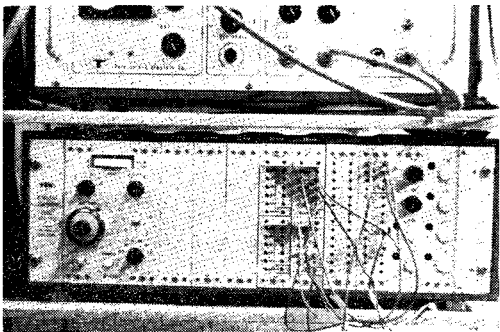


写真-2 (c) アナログ計算機

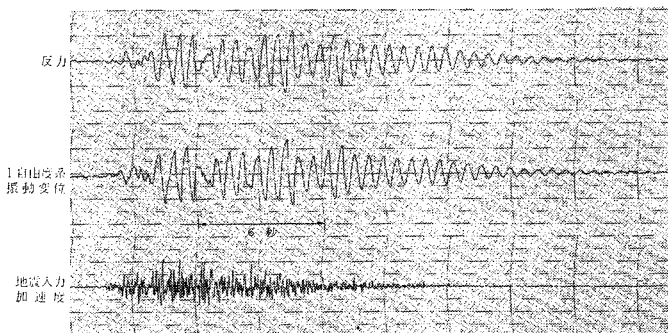


図-5 微小擬似地震波入力による振動変位と反力

なお、本発振器は通常の種々の振動数の正弦波、10 数 Hz 以上をカットした定常的白色雑音も発生することができる。東京振動研究所の特注品。

以上述べた実験装置の説明写真を 写真-2 に示す。

### 3. 計算結果

#### (1) 地震応答

擬似地震波を 1 自由度系への入力加速度として計算した時のアナログ計算機の出力について数例を 図-5~9 ならびに 写真-3~6 に示す。

図-5：入力が微小な地震波のため、図-3 に示した振動系のばねに相当する片持ばり供試体がまだ降伏していない状態である。地震加速度波形、構造物振動変位、片持ばり反力の 3 者が示されているが、構造物振動変位は、複雑な波形の地震加速度を受けて、固有振動（約 1.5 Hz）を誘起されていることがわかる。

そのとき生じている反力波形は、ほぼ変位と等しい波形となっている。また、地震が終わったあとも自由振動が減衰していくのが認められる。要するに通常のアナログ計算機による計算結果と等しい結果が得られた。

写真-3：図-5 の構造物振動変位と反力をブラウン管オシログラフの横軸と縦軸に入れた軌跡である。「変位~反力」はまだほとんど線型領域に留まっていることがわかる。

図-6：地震加速度を大きくした場合の振動変位、反力を示す。変位と反力とが同一の波形を示しておらず、反力はある値以上は頭打ちの状態で波形のピークの高さが比較的そろっている。これは片持ばりが降伏したことを示すものであろう。変位は振動が終わったあと、中立軸のずれを示しており、残留変形を明らかに認めることができる。また当然のことであるが、反力にはそのような現象を認めることはできない。

写真-4：図-6 の「変位~反力」関係をブラウン管オシロ写真によって示したものである。複雑な波形の外

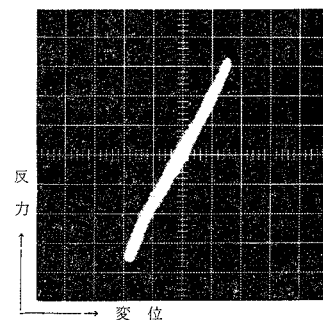


写真-3 微小地震入力時の「変位~反力」関係

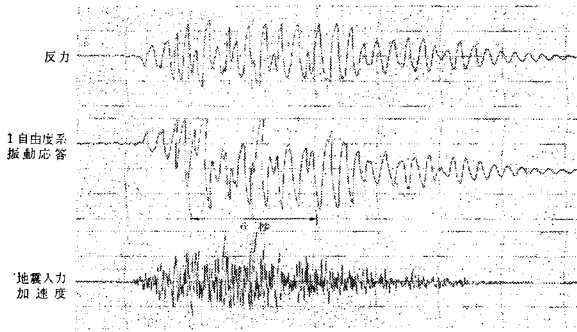


図-6 大振幅擬似地震波入力による非線形振動応答

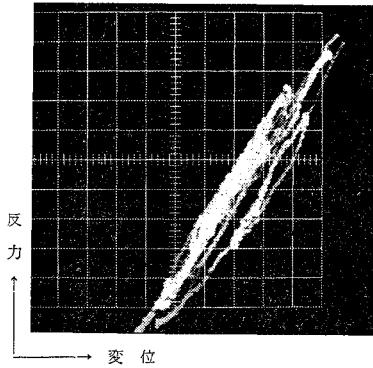


写真-4 大地震入力時の「変位～反力」関係

力を直接供試体に加えて破壊させた場合(写真-1)には「変位～反力」関係も複雑な模様を画いているが、写真-4では比較的的正弦波形外力の場合と似た、ゆるいヒステリシスを画きながら、破壊してゆく。これは図-6でわかるように供試体部分が多少降伏しても、構造物の振動は固有振動が卓越しているため、構造物の振動変位は振幅のゆるやかに変化する正弦波に近い。したがって、供試体部分も正弦波形に近い外力を受けるため、正弦波形外力による破壊時の「力～変位」関係と似ているのではなかろうか。このように擬似地震波によって1自由度系が降伏点を越えて振動する時もその「力～変位」関係は正弦波形力により系を動的に破壊させる時のそれと大差ないということは、現在耐震解析に主として使われている図-1のような「力～変位」関係をほぼ容認する資料となる。

## (2) 定常的不規則波に対する応答

10 数 Hz 以上をカットした定常的的白色雑音の入力に対しても構造物の降伏後の振動応答を求めた。このような定常的加速度に対する振動応答は、非常に長く続く大地震あるいは台風に対する構造物の振動という点で興味のある問題である。実際の計算に当たっては最初、微小な定常的不規則加速度を与え、ある時間たったのち、加速度のレベルを上げるという過程で計算を行なった。

図-7: 不規則加速度のレベルが小さく片持ばりが降伏していない状態における振動。振動系の固有振動がはっきり認められる。振動変位と反力の波形が相似である。

写真-5: 片持ばりが降伏していないので、「反力～変位」関係は直線であることが知られる。

図-8: 不規則外力が大きくなって片持ばりが降伏した場合の振動を示す。変位と反力の振動波形が相似でなくなり、反力のピークの高さがほぼそろってくるのは擬似地震波の場合と同様である。そしてもう一つの特長は、振動変位においてもきれいな固有振動が認められなくなるという点である。通常いわれているような「降伏すると固有振動周期が長くなって見掛けの減衰定数が増える」という言葉からは、固有振動はあくまで固有振動

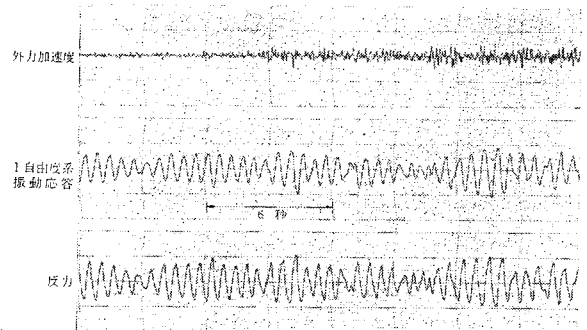


図-7 微小定常不規則力による振動応答

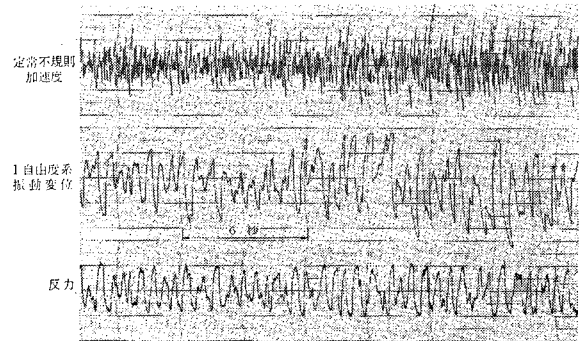


図-8 大振幅定常不規則外力による非線形振動応答

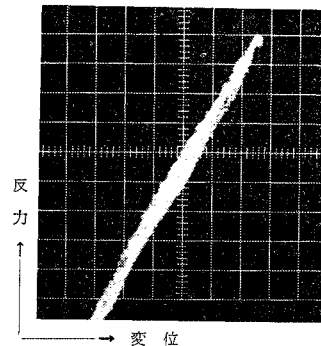


写真-5 微小定常不規則波入力時の「変位～反力」関係

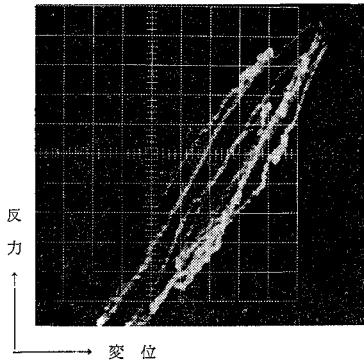


写真-6 定常不規則波入力による「変位～反力」関係

であって周期が長くなり、減衰が多少多くなったきれいな固有振動が現われるのではないかと想像するのだが、結果は全く異なり、図-8 から知られるようにむしろ見掛け上は周期の短い波が波形に乗って「きたなく」なるように思われる。

写真-6：図-8 に相当する場合の「変位～反力」関係である。かなりのヒステリシス・ループを画いていることが認められるが、そんなに複雑な軌跡を示してはならず、ほぼ通常の弾塑性モデルに似た「変位～反力」関係を示している。しかし、図-8 からは、従来考えられてきたような非線型の影響を単に、ばね定数  $K$  の減少と振動減衰定数  $C$  の増加に置き換えて 1 自由度系として、解析することは危険であることが知られるので「力～変位」関係は従来の仮定と大差ないにしても、振動波形そのものは、1 自由度系の固有振動とはかなり異なった、より複雑な波形となることを忘れてはならない。

#### 4. 計算結果

##### (1) 振動特性の変化 (正弦波外力による場合)

振動学の教科書によって周知の事からであるが、構造物が線型の場合  $H$  を問題にしている構造系の系関数とすれば、 $f$  を外力、 $y$  を系の振動変位として

$$y(t) = H(p)f(t) \dots \dots \dots (3)$$

の関係がある。式 (3) をフーリエ変換の形に書けば、

$$Y(i\omega) = H(i\omega)F(i\omega) \dots \dots \dots (4)$$

となる。

$$\text{ここに、} Y(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)e^{-i\omega t} dt$$

$$F(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$$

$H(i\omega)$  : 位相、振幅両者を考えた共振曲線

そして、構造物が線型である限り  $H(i\omega)$  すなわち振動特性は変化することなく、その構造物に固有のものである。したがって、 $H(i\omega)$  に相当する系の振動特性 (固

有振動数、固有振動形、振動減衰定数) を求めておきさえすれば、どのような複雑な波形をもった外力  $f(t)$  が作用しても構造物の振動は計算によって求めることができ、その結果構造物に生じる動的応力の最大値なども求められて設計に役立てることができるわけである。それほど重要な特性  $H(i\omega)$  は通常、構造物系に  $\omega$  という円振動数をもった正弦波外力を与え、それに対する振動振幅  $y(\omega)$  を求めて、 $\omega \sim y(\omega)$  の関係すなわち  $H(i\omega)$  を求めるという方法がとられている。

さて、構造物の振動が大きくなって降伏した場合、振動は非線型となり、その結果  $H(i\omega)$  も変わってくる。 $H(i\omega)$  がどのように変わるかは、従来の非線型振動理論により近似的に種々研究されている<sup>4)</sup>。それによれば、 $H(i\omega)$  の変化にはつぎの二つの特長がある。第1は固有振動数の低下であり、第2には等価振動減衰定数の増加である。ただし、この変化を理論的に導く場合、外力としては正弦波外力を仮定しており、地震波のような複雑な波形の外力が作用した場合の変化についてはまだ研究がなされていない。複雑な波形の外力の場合はさておき、正弦波外力によって  $H(i\omega)$  すなわち共振曲線がどのように変化するかを本解析により求めた。図-9、10 は正弦波外力の大きさとともに共振曲線がいかに変化するかを示している。

図-9 は正弦波外力の大きさを大きくした場合の振動系の振動変位振幅をそのままプロットしたものであり、外力振幅が大きくなるにつれて変位振幅も大きくなっている。一方図-10 (a)～(b) は図-9 の変位を、加えた外力振幅で除してあり系の振動数特性 (共振曲線) に相当する。図-10 の (a) は振動系の固有振動数が約

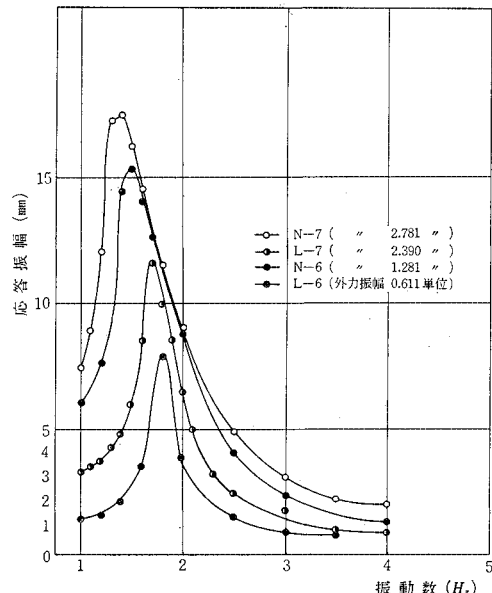


図-9 外力振動数と変位応答振幅の関係 (正弦波外力)

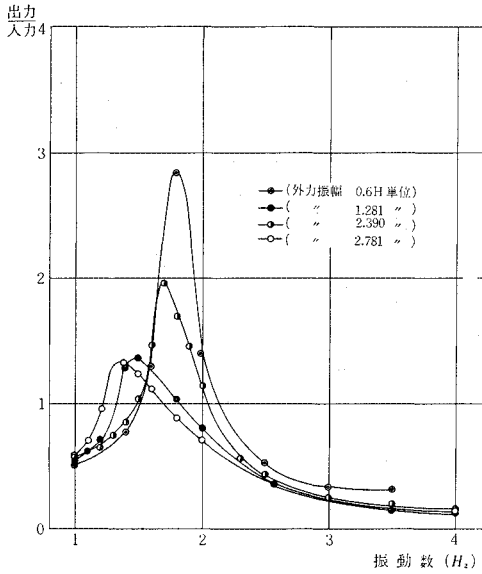


図-10 (a) 正規化された共振曲線

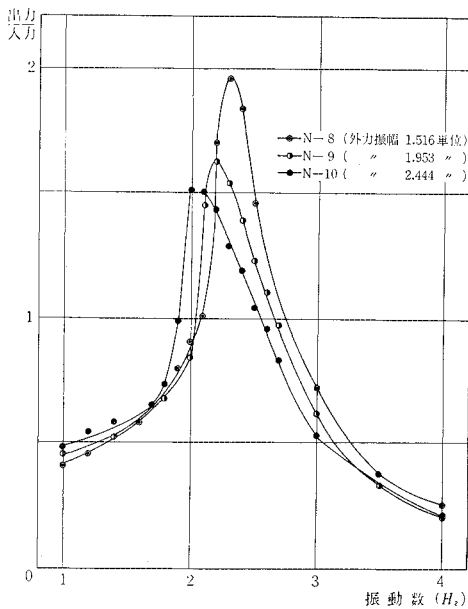


図-10 (b) 正規化された共振曲線

1.8 Hz, (b) は約 2.3 Hz の場合の外力振幅と共振曲線の変化の関係を示しているが、固有振動数の低下が明らかに認められる。外力振幅が約 4 倍に増加することによって、見掛けの固有振動数は 20% 程度の低下をきたしている。また共振時振幅は外力と比例関係にはなく、外力振幅を等しいとした時、降伏後は弾性振動の場合にくらべて 50% 程度に減少している。

これは見掛けの振動減衰定数の増加を示すものであろう。なお、振動減衰定数は共振曲線のピークの拓がり方から求める方法もある<sup>5)</sup>。すなわち共振振動数  $f_0$  の前

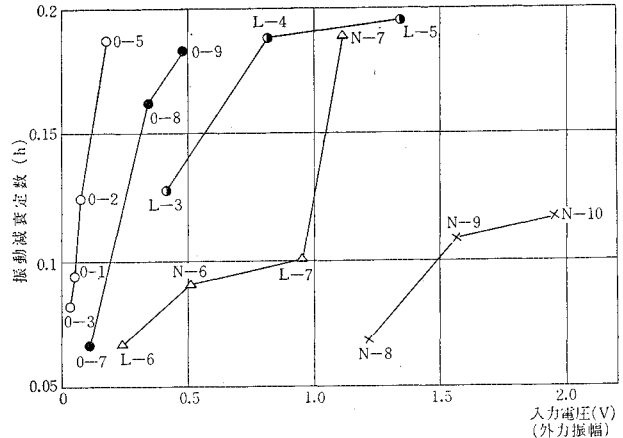


図-11 正弦波外力振幅と減衰定数の関係

後にピーク振幅の  $1/\sqrt{2}$  の振幅をもつ振動数  $f_1, f_2$  を求め次に近よって近似的に減衰定数  $h$  が求められるというものである。

$$h = \frac{f_2 - f_1}{2f_0} \dots \dots \dots (5)$$

式 (5) を用いて 図-10 に一例を示したような一連の共振曲線から求められた減衰定数の値を外力振幅に対して画いたのが 図-11 である。

この結果から見ると減衰定数は正弦波外力振幅が大きくなって、振動の非線型性が強くなると、ほとんど例外なく大きくなっていることが知られる。その減衰定数増大の程度は外力が 5 倍になった時、定数は 3 倍弱になっている。

(2) 振動特性の変化(擬似地震波加速度による場合)

(1) でも述べたように、線型振動の場合には動特性  $H(i\omega)$  はその振動系固有のものであり、 $H(i\omega)$  を求める方法が正弦波外力によるものであっても、衝撃力によるものであっても、白色雑音によるものであっても、解  $H(i\omega)$  は同一のものが得られる。しかしながら、非線型振動にあつては、 $H(i\omega)$  は振動系に固有のものではなく、外力の振幅、波形等によって変わることが予想される。

しかしながら、われわれは大地震を受けて構造物が降伏してしまった場合の振動を論ずる場合、振動外力が正弦波である場合の動特性の変化(固有振動数の低下、減衰定数の増加)、たとえば 図-9, 10 などの結果を念頭においている。地震波のような複雑な波形の外力を受けた場合にも、正弦波外力による特性変化と大差ないのかどうか、また変化の程度はどうか等、知りたい点が多々あるので、3. (1) において説明した擬似地震波を入力とした場合の非線型応答計算結果をつぎのような方法で解析し、 $H(i\omega)$  の変化を求めた。

すなわち、4. で述べたように地震加速度のフーリエ変換を  $F(i\omega)$ 、振動系の振動変位フーリエ変換を  $Y(i\omega)$  とした場合、振動系の動特性  $H(i\omega)$  はつぎのように与えられる。

$$H(i\omega) = \frac{Y(i\omega)}{F(i\omega)} \dots\dots\dots(6)$$

したがって、振動系の動特性  $H(i\omega)$  を知りたい場合には、振動系に加えた地震加速度波形  $f(t)$  とその振動変位  $y(t)$  を測定しておけば式 (6) から計算される。なお、式 (6) は複素数の形で与えられるが、われわれの通常扱う系の共振曲線を得るためには、つぎのように絶対値を計算すればよい。

$$|H(i\omega)|(\text{共振曲線}) = \frac{|Y(i\omega)|}{|F(i\omega)|} \dots\dots\dots(7)$$

$$A_{rg}|H(i\omega)| = A_{rg}|Y(i\omega)| - A_{rg}|F(i\omega)| \dots\dots(8)$$

ここに、

$$|Y(i\omega)| = \left[ \left\{ \int_0^T y(t) \cos \omega t dt \right\}^2 + \left\{ \int_0^T y(t) \sin \omega t dt \right\}^2 \right]^{1/2}$$

$$|F(i\omega)| = \left[ \left\{ \int_0^T f(t) \cos \omega t dt \right\}^2 + \left\{ \int_0^T f(t) \sin \omega t dt \right\}^2 \right]^{1/2}$$

$$A_{rg}|Y(i\omega)| = \tan^{-1} \left\{ - \int_0^T y(t) \sin \omega t dt / \int_0^T y(t) \cos \omega t dt \right\}$$

$$A_{rg}|F(i\omega)| = \tan^{-1} \left\{ - \int_0^T f(t) \sin \omega t dt / \int_0^T f(t) \cos \omega t dt \right\} \dots\dots\dots(9)$$

$T$ : 振動振幅がゼロとなったとみなせるまでの時間。

なお、われわれの計算結果を解析する場合には、 $y(t)$  は残留変形のため地震加速度が加わらなくなり振動振幅がなくなっても、ある値を保っていることが多い (図-6 参照)。そのような関数の場合、フーリエ変換そのものが発散してしまうため実行不可能であるので、実際には式 (9) 中の  $y(t)$  の代わりに  $dy/dt$  を採用し、 $H(i\omega)$  としては式 (6) の代わりに次式を用いた。

$$|H(i\omega)|(\text{共振曲線}) = \frac{|\dot{Y}(i\omega)|}{\omega|F(i\omega)|} \dots\dots\dots(10)$$

式中  $\dot{Y}(i\omega)$  とは  $dy/dt$  のフーリエ積分という意味である。

図-12 は擬似地震波による図-5, 6 のような構造物の線型ならびに非線型振動を前述の方法で解析した共振曲線を示している。この共振曲線を正弦波形加速度を外力とした場合のそれ (図-10 (a), (b)) と比較してみると構造部材が弾性範囲から塑性に入るにつれて「共振倍率の低下」、「固有周期の低下」はいずれにも共通して認

められる。ただし、擬似地震波による振動の場合には、固有周期の低下は非常に少なく気持程度のものである。さらに、地震波の場合のみ現われた特長として、固有周期よりかなりの長周期に卓越した振動成分が出現するという点である。すなわち、地震波のような複雑な波形の外力により構造物が非線型振動を行なう場合には、従来いわれているような「固有周期の低下」が現われるというより、固有周期の低下はほとんどなく、別にかなり長い周期の成分が現われる。すなわち、弾性振動では図-

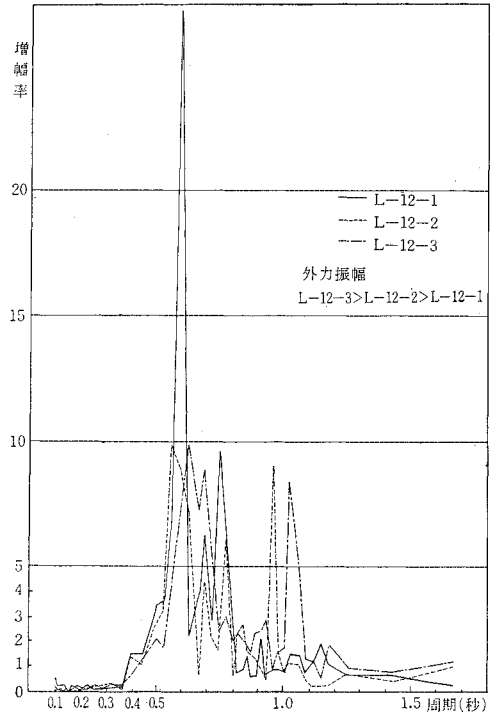


図-12 擬似地震波入力の場合の共振曲線変化

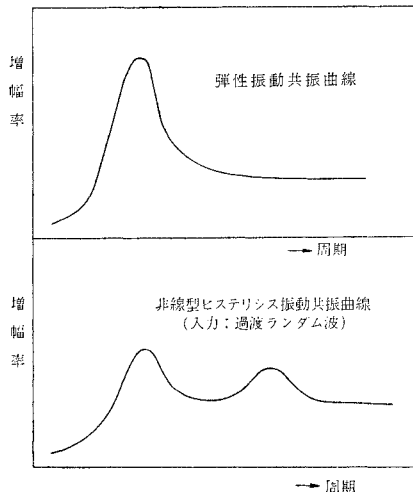
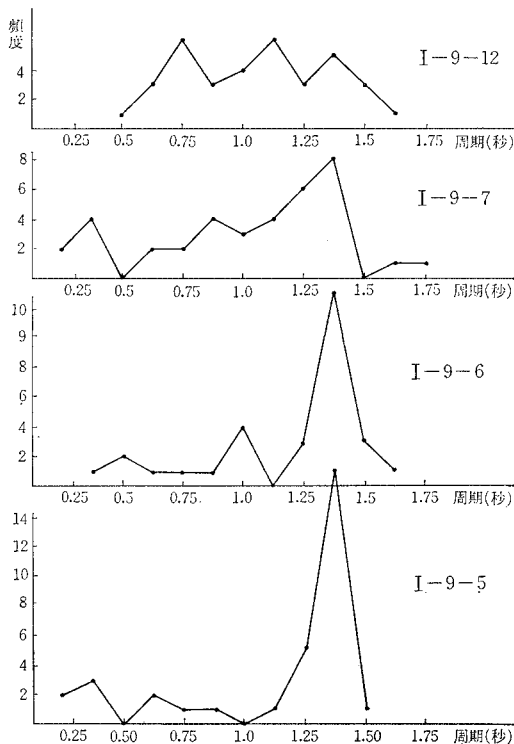


図-13 共振曲線の双頭現象の模式図

—13 に示すように共振曲線が1個の鋭い山だったのが降伏すると1個の山が2個のピークに分裂したという印象を受けた。これが、すべての過渡ランダム非線型振動に共通した現象かどうかは、わからないが、今後に残された興味ある研究課題であると思っている。

### (3) 振動変位ピークの周期頻度 (擬似地震波加速度による場合)

図—6 のように擬似地震波による1自由度系の非線形振動変位は、ほぼ固有振動で振動しており、その固有振動周期が通常いわれるように長くなるかどうかは、判然としなない。その点をはっきりさせるため、振動変位のピーク間の時間を調べ、その時間を振動周期とみなして、その振動周期の頻度分布を調べてみた。振動系が降伏して弾性範囲から弾塑性範囲に入った時、周期頻度のピークに当る周期が長周期の方へ移動するかどうかを確かめようとしたものである。その結果の一例を 図—14 に示してある。実験番号の最後の数字が多いほど塑性域に入っているわけであるが、この結果では、弾性振動では、1.35 秒に固有振動と思われるピークがあり、振動が非線形化するにつれて、固有振動のピークがはっきりしなくなり種々の周期成分が現われて周期頻度曲線が平坦となっていることが認められる。この図からも前述のように、非線形領域に入るにつれて固有周期はのびるのでは



図—14 振動変位ピーク間の周期頻度分布  
(外力振幅 I-9-12>I-9-7>I-9-6>I-9-5)

なく、他の周期成分が現われてくるという仮定が裏づけられた。

## 5. む す び

大振動外力を受けた構造物の実際に近い振動応答を知るため、その構造物のうち降伏する部材をとり出して、その部分のみを実験に置き換え他の降伏していない構造物部分の振動は電子計算機により計算し、置き換えられた実験装置は計算機と「On-Line」で結合し、計算ループの中に含ませてしまうという手法を開発し予備実験ではあるが一応の成功を収めた。

そして予備実験の結果知られた事がらを列記すればつぎのようである。

(1) 本解析方法により構造物の強震時振動を従来の方法より精度よく解析できると思われる。

(2) 強震を受けた構造物は一方向に破壊が生じると、その最初に破壊が起こった方向に振動破壊を進行させていく。

(3) 強震時の構造物の固有振動の誘起をも考慮に入れた本解析における「変位～反力」関係は前論文で扱った供試体のたわみ振動が無視できる場合、すなわち、地震波加速度波形状外力で供試体を直接破壊させた場合の「変位～反力」関係 (写真—1 参照) にくらべてより簡明なヒステリシス・ループを画く。すなわち正弦波外力による「変位～反力」関係に似ている。このことは従来耐震解析に用いられてきた図—1 のような「力～変位」関係で計算を行っても大きな間違いではないといえるかも知れない。しかしながら 図—1 のような原点に対して、対称な復元力特性では (2) に示した進行性破壊現象は説明できない。

(4) 強震時の系の動特性の変化は、正弦波外力の場合の「固有振動周期の長周期への移動」、「見掛けの振動減衰定数の増大」のうち前者はその傾向が認められる程度で著しくはなく、むしろ固有周期はほとんど変化せず増幅率が非常に低下し、固有周期よりかなり長周期に固有周期におけるとほぼ同程度の山ができるという、双頭化現象が目立った。

(5) 定常的不規則波の場合は、外力が大きくなり部材の降伏が進むにつれて、固有振動に高調波がのり波形が「きたなく」という特長が認められた。

(6) 擬似地震波のような過渡不規則波が入力である場合と、定常的不規則波が入力である場合と、1自由度系の非線形振動の様子に多少の違いが見られる。

つまり過渡不規則波の場合には、系の振動が非線形領域に入っている時間が比較的短いのに対して、定常的な場合には非線形領域に入っている時間が長く振動波形の



乱れは後者に著しいように感じられた。

つぎに本解析方法の将来に残されている点を述べてみよう。

(1) 任意波形加振装置の精度の向上と出力の増大：この問題はほとんど経費面のみの問題として解決できるものと思われる。本研究において使用した装置の最大出力は 1.5 t であったが、実構造部材にも適用するため出力を 20 t に増加し振動全振幅は 20 cm を保つ場合、定常的に以上の性能を発揮するためには、数百 kW の電力を必要として実現の可能性が薄くなるため、すでに勝田博士<sup>9)</sup>らが試みておられるようなアキュムレーターの中に油圧を貯めてそれを地震波動継続時間の数分間に一度に放出するという方法がとられることになる。波形の精度の点については、現在まだいろいろな障害が残っていると思われるが、この解決は時間の問題であろう。

(2) 高速デジタル計算機と実験装置との「On-Line」結合：本研究では、アナログ計算機と任意波形材料試験装置とを「On-Line」結合して演算を行なったわけであるが、この場合の欠点としては、試験装置の方に応答の位相遅れが多少あり、それが計算全体の精度の低下をもたらしている。デジタル計算機により本実験装置を制御する場合には、実験装置の位相遅れを予測してそれを演算におり込むことが可能であり、その結果計算全体の精度を向上することができる。さらに、アナログ計算機の場合、原則的には串団子モデル化した振動系しか取り扱えないが、デジタル計算機では、偏微分方程式で表わされる、はり、板、殻等も取り扱えるという利点がある。つまり、制御に制約がなく多少誇張していえば、どのような問題も取り扱えるということである。

(3) 鋼以外の材料でできた部材の動的破壊実験：本研究において鋼部材を供試体に採用した主な理由は、測定結果のバラツキが少ないであろうということであって、コンクリート、土などは動的外力によって破壊させる場合、鋼以上に興味ある結果が得られることが期待され、今後はこのような材料についても本研究に用いた実験方法が適用されることが望まれる。

謝辞：本研究は東工大土木工学科 藤城泰行、横山功一両君の卒業研究として行なったものであり、資料整理には新島美徳子嬢の手をわずらわしたので謝意を表したい。

また文部省災害特定研究費の援助を受け、さらに本研究における計算のすべては東京大学大型計算センターにおいて行なった。ここに記して感謝する。

#### 参 考 文 献

- 1) 志賀敏男・柴田明徳・小野瀬順一：Torsional Response of Buildings to Strong Motion Earthquake, 日本地震工学シンポジウム (1966) 講演集, pp. 209~214
- 2) Robert D. Hanson: Post-elastic Dynamic Response of Steel Structures, 日本地震工学シンポジウム (1966) 講演集, pp. 221~226
- 3) 伯野元彦・四俣正俊：はりの動的破壊時の復元力特性に関する基礎的実験, 土木学会論文報告集, 第 162 号, pp. 11~20, 1969
- 4) Timoshenko, S., 谷下市松・渡辺茂共訳：工業振動学, 東京図書, 1964
- 5) 土木学会：土木技術者のための振動便覧, 1966, p. 104
- 6) Katsuta C., T. Tajime and N. Mashizu: Electrohydraulic Shaking Table by Servomechanism, Trans. of the Architectural Institute of Japan, No. 117, Nov. 1965

(1969. 4. 21・受付)