

## Bi-linear 復元力特性を持つ構造物の地震応答\*

EARTHQUAKE RESPONSE OF STRUCTURES HAVING  
BI-LINEAR RESTORING FORCE CHARACTERISTICS

国 井 隆 弘\*\*

By Takahiro Kunii

## 1. ま え が き

本研究は線型限界と bi-linear 復元力特性とに注目して、1 質点系の非線型振動の地震応答を求め、この絶対最大量を線型振動時の周期のもとにプロットすることにより（以後これを非線型振動地震応答スペクトルと呼ぶこととする）従来用いられてきた地震応答スペクトルと比較検討したものである。

構造物の耐震設計においては地震の強さの頻度と構造物の損傷とを結びつけて対応させることが必要であり、このためには線型振動とともに非線型振動の応答量が考慮されねばならない。すなわち降伏点に注目した復元力の弾塑性に基づく非線型振動は地震の強さの頻度を構造物の損傷の程度に結びつけることを可能にして、これを許容し得る構造物の損傷にそっていくつかの段階に設定すれば弾性計算のみで生じる過大な震度を減ずる可能性も期待できる<sup>1)</sup>。

一方コンクリート構造物のごとく、応力-ひずみ関係が非線型を示す材料特性に基づく非線型性、あるいはひび割れのごとく降伏点以下での復元力特性の非線型性は弾性振動範囲内の減衰的効果の要因の 1 つとして上記の弾塑性振動とは異なった意味で扱うことができる。

どちらかという個々の構造物を対象とした復元力特性の把握に関する研究<sup>2)~4)</sup>、応答計算方法についての研究<sup>5)~8)</sup>等とは別に、地震応答スペクトルを用いて非線型振動応答特性を把握しようとする研究<sup>9)~13)</sup>も数多く、この方法によれば、幾種かの非線型特性について周期をもとにした応答特性を得ることができる。非線型振動では各次のモードに相応する応答を重ね合わせることはできないので応答スペクトルから応答量を算定するには更に多くの検討を必要とするが<sup>12)</sup>、1 質点系としての応答が

支配的である場合が多いことから、応答スペクトルによって非線型応答特性を解析することは妥当と思われる。

非線型振動の応答スペクトルを扱う場合、多くの研究は復元力特性における線型限界の設定、あるいは線型限界と最大変位との相互関係に注目している。Bycroft<sup>9)</sup>、Response Analyzer Committee<sup>10)</sup> は加速度が各周期にわたって一定であるような線型限界を設定しているが、この場合、比較的長い周期の応答が求めにくい。Veletsos と Newmark<sup>11)</sup> は完全塑性型について線型応答変位をひき下げる方法で、すなわち地震波を拡大する方法を用いると同時に一方では ductility factor に基づいて整理している。本研究のごとく bi-linear の特性に注目する場合、非線型振動における安全度の問題より、どちらかといえば非線型応答の特性の把握に重点が置かれることから本研究では線型振動の応答量を基準とした線型限界を用いている。

非線型復元力特性として多くの研究は完全塑性型を導入しているが、久田<sup>4)</sup> は bi-linear 特性についてその最も線型に近いものから完全塑性型まで変化させて応答量に与える効果を調べている。本研究では更に発展させ、周期、線型限界、bi-linear 特性、線型応答量等の各パラメーター相互間での応答量の関連性を解析した。

以上の考察のもとに、Taft と El-Centro の地震加速度を用いて解析した結果、応答量は線型限界のみならず、周期、線型応答量、bi-linear 特性等とも相互に関連し合っ影響を受け、非線型振動の応答量が線型振動を上まわる場合も認められた。なお、曲げ振動系の多質点系の応答と、これら 1 質点系との関係、および粘性減衰が非線型応答スペクトルに及ぼす影響について若干検討してあるが問題点を指摘するととどめた。

## 2. 解 析 方 法

線型限界は構造物に固有のものであり、まえがきで述

\* 土木学会第 25 回年次学術講演会にて一部発表

\*\* 学生会員 工修 東京都立大学大学院博士課程

べたごとく非線型振動のもつ効果のねらい方によっても異なる。構造物の破損の程度に注目する場合には、降伏応力を越えた挙動が問題となり、弾性範囲内での非線型性を問題とする場合には比較的低い応力での応答量に注目されると考えられる。小林<sup>1)</sup>は大中小の三段階の地震を考え、それぞれに対して異なった復元力特性を適応させて興味ある結果を得ている。

応答スペクトルの形で非線型振動を扱う場合、より一般的な応答傾向を得るとき、あるいは設計に直接結びつく実践的な量的解析を行なう際、そのメリットは倍加される。この意味で周期にかかわらず一定な加速度を線型限界として解析した Bycroft らの研究<sup>9)</sup>は実践的に有効な線型限界を選んだものと理解される。しかしながら建設省土研で提案した平均応答スペクトル<sup>13)</sup>にみられるごとく、応答加速度は一般に周期が1秒の付近から周期の増加とともに一定して減少する傾向を示す。このため比較的大きい変位を持つような長い周期に対して線型限界をとり決めるのが困難であり、文献 9), 10) はともに周期1秒付近より短い範囲を扱っている。

ductility factor は復元力特性の描くヒステリシスループのもつエネルギー的特性とも関連づけられ、耐震安全性の尺度として構造物の終局状態に対する基準を追求するものとして<sup>14)</sup>弾塑性応答解析に多く用いられてきた。しかしながら、この場合、完全塑性型復元力特性と結びつけられることが多く、bi-linear の特性との関連性において、その意義は筆者の知る限りあまり検討されていないようである。

本研究は非線型振動応答のもつ減衰の効果も考慮した応答スペクトルの中で把握しようとするもので、この目的からすれば、線型限界を耐震安全性からあるいは応答加速度から設定するのは得策ではなく、応答量は変位を用いて検討するのがわかりやすい。本研究では以上の考察のもとに、線型振動の応答変位に注目した。すなわち線型応答変位をそれぞれの周期で同じ割合でひき下げてそれを線型限界とした。この方法は線型応答変位を線型限界としたとき、更に拡大された地震波に対する非線型応答を求めることと同じ意味を持つことはいままでもない。いま線型応答スペクトルの変位を  $x_0$  とすれば、線型限界  $x_y$  は  $x_y = n \cdot x_0$  となる。ここでは  $n$  は 0.1 から 1.0 まで 0.1 きざみで与えられるパラメーターとする。このとき用いられた地震波は最大加速度を 200 gal とした Taft, Calif. 1952 N 21°W および El-Centro, Calif. 1940 NS の二種である(両地震波とも、最初の 20 秒間の波形が入力波とされた)。

復元力の非線型が線型に近いような bi-linear 特性であるとき、ヒステリシスの描く面積に相応したエネルギー吸収はあまり期待できないと考えられ、むしろ非線型

範囲に入ったときの固有周期の変化に伴う共振の現象に対する効果が注目されるが、久田<sup>ら</sup>は力-変位関係の中で弾性範囲内に対する塑性範囲内のばね定数の比を -0.2 から 1.0 まで変化させて、その間の応答量の変動を解析した。本研究ではこの比の値  $A$  を  $A=0.1 \sim 1.0$  と 0.1 きざみとして(ただし復元力特性は後述のごとく無次元化されたものを扱っている)  $A$  の変化に伴う応答量を線型限界のパラメーター  $n$  と結びつけて解析している。

### 3. 応答計算法

さきに筆者は曲げ振動系の多質点系における応答計算方法を提案したが<sup>7), 8)</sup>、これを1質点系に適用させ、更に無次元的に扱えばデジタル的な応答計算手段として比較的簡単な方程式が導かれる。

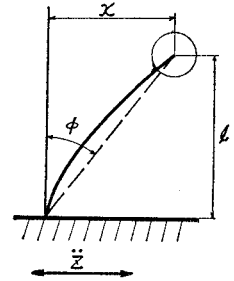


図-1 振動系

図-1 に示した振動系の運動方程式は

$$m\ddot{x} + P = -m\ddot{z} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $m$  : 質点の質量

$x$  : 質点の基盤に対する相対変位

$P$  : 質点に作用する復元力

$\ddot{z}$  : 地震加速度

更に図-2 に示された曲げモーメント ( $M$ ) と回転角 ( $\phi$ ) の復元力特性から、 $p$  を円振動数として次式が得られる。

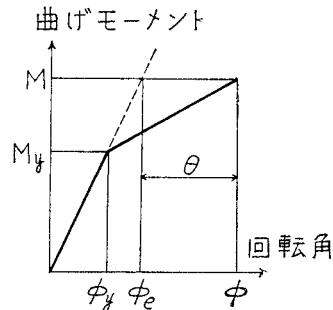


図-2 復元力特性

$$\left. \begin{aligned} x &= \phi l \\ \phi &= \phi_e + \theta \\ P &= m p^2 \phi_e l \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $\phi_e$  : 回転角  $\phi$  の線型的な部分で復元力に関係する

$\theta$  : 回転角  $\phi$  の非線型による増加部分で復元力に関係しない

式(2)を式(1)に代入すれば

$$\ddot{\phi}_e + p^2 \phi_e = -\ddot{z}/l - \ddot{\theta} \dots \dots \dots (3)$$

が得られるが、式(3)は右辺に強制力項として $\ddot{\theta}$ を持った運動方程式であり、 $\theta$ は試算的に求める方法がとられる。式(3)の両辺を $\phi_y$ で割れば無次元量としての方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\bar{\phi}}_e + p^2 \bar{\phi}_e &= -\ddot{\bar{z}} - \ddot{\bar{\theta}} \\ \bar{\phi}_e &= \phi_e / \phi_y, \quad \bar{\theta} = \theta / \phi_y, \quad \bar{z} = z / x_y \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

式(4)に相応する復元力特性が図-3に示されるが、この関係は曲げ振動系においてのみ有効性を持つのではなく、せん断系に用いられる力-変位関係も同様に

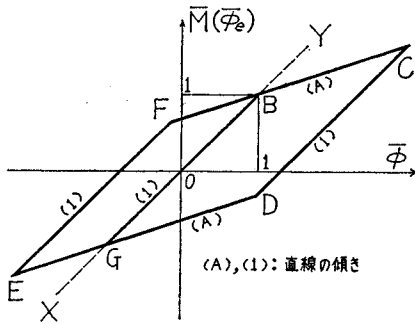


図-3 無次元化された復元力特性 (A=1/3)

この関係で扱うことができる。図-3は縦軸に $\bar{M}$ (= $M/M_y$ )あるいは $\bar{\phi}_e$ 、横軸に $\bar{\phi}$ をとってあるが、線型範囲すなわちGB, CD, EFは直線の傾きが1となり、非線型範囲FC, DEは傾きがA( $0 < A \leq 1$ )で示される。 $\bar{\theta}$ は任意の線分上から $\bar{\phi}$ 軸に平行に引いた直線が線分XYと交わるまでの長さで与えられるが、復元力特性の各位置に対して次の関係を持っている。

- i) FC上(非線型範囲)  $\bar{M} = \bar{\phi} - (1-A)(\bar{\phi} - 1), \quad \bar{\theta} = (1-A)(\bar{\phi}_e - 1)/A$
  - ii) CD上(線型範囲)  $\bar{M} = \bar{\phi} - (1-A)(\bar{\phi}_e - 1), \quad \bar{\theta} = (1-A)(\bar{\phi}_{eC} - 1)/A$
  - iii) DE上(非線型範囲)  $\bar{M} = \bar{\phi} - (1-A)(\bar{\phi} + 1), \quad \bar{\theta} = (1-A)(\bar{\phi}_e + 1)/A$
  - iv) EF上(線型範囲)  $\bar{M} = \bar{\phi} - (1-A)(\bar{\phi}_F - 1), \quad \bar{\theta} = (1-A)(\bar{\phi}_{eF} - 1)/A$
- .....(5)

#### 4. 応答特性

##### (1) 変位

Taft および El-Centro の地震波について、周期が0.1秒から10秒まで比較的細かくプロットして(98個)描いた非減衰の線型変位応答スペクトルが図-4と図-5にそれぞれ示してある。非減衰振動のため周期が

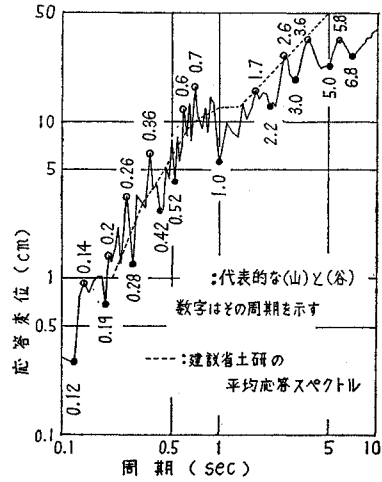


図-4 線型変位応答スペクトル (TAFT)

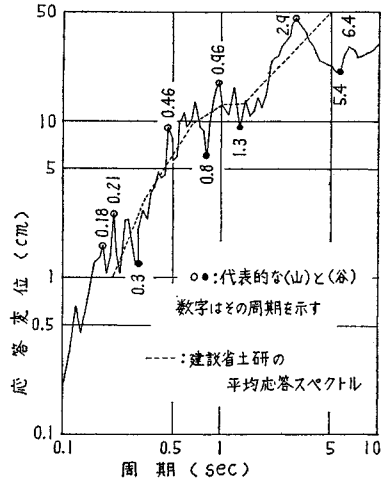


図-5 線型変位応答スペクトル (EL-CENTRO)

3秒付近以下では特に複雑な形状を呈しており、このままの形で検討していくのは適当でない。そこで応答スペクトルの概形を得る方法として次に述べる手段が選ばれた。

まず各応答スペクトルの中心線を想定するとともに、平均応答スペクトルに注目して、これらを大きく上まわる応答量を示す代表的な(山)の部分、およびその逆の(谷)の部分をいくつか選び出し、これに相当する周期が入力地震波に対して敏感あるいは鈍感に反応を示したと考え、応答スペクトルの概形の特徴を与えるものとした。次に応答スペクトルの全体的な概形を与えるものとして0.1秒から10秒まで対数目盛でなるべく等間隔に約25個の周期を選んだ。このようにして描かれた応答スペクトルが図-6、図-7の $n=1.0, h=0.0$ の曲線で示される。

bi-linear 復元力特性を持つ振動系においては線型振

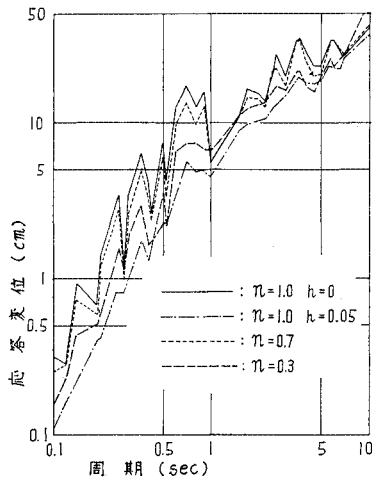
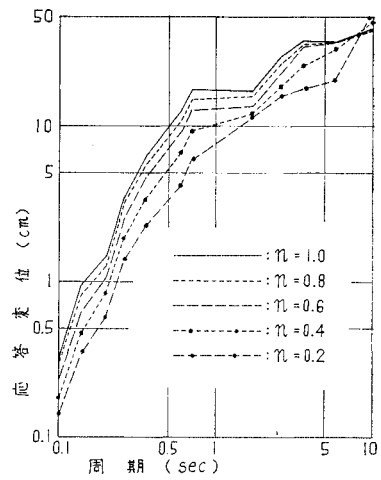


図-6 非線型変位応答スペクトル (TAFT,  $A=0.3$ )



(a) (山) の応答

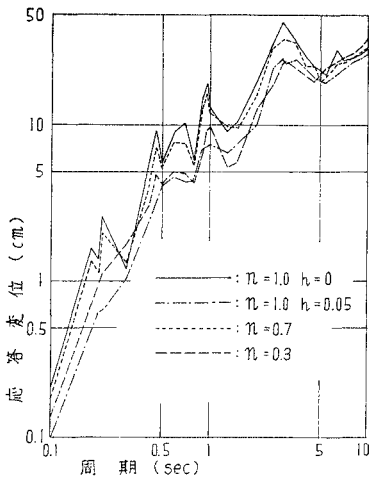
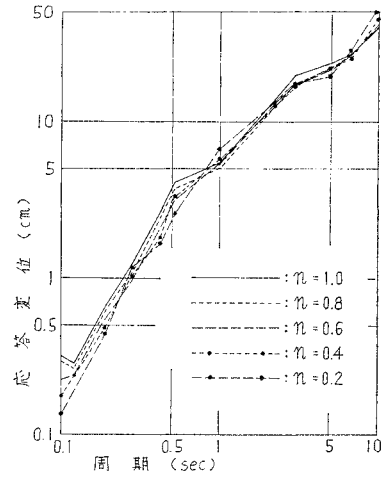


図-7 非線型変位応答スペクトル (EL-CENTRO,  $A=0.3$ )



(b) (谷) の応答

図-8 非線型変位応答スペクトル (TAFT,  $A=0.5$ )

動状態から非線型状態に移行するとともに、系の持つ固有周期が明らかに変化すると考えられるため、系が共振状態を生じるような入力を受けたときには(図-4, 図-5 でみられた(山)の部分はこの共振的な部分とも考えられる)線型振動にみられる共振は生じにくいことも予想がつく。図-6, 図-7 は  $A=0.3$  のとき  $n=1.0$  (線型) について粘性減衰定数  $h$  が  $0.0$  と  $0.05$  の場合について  $n=0.7$  と  $n=0.3$  と比較したものだが、非線型応答が(山)で線型応答を大きく下まわり、逆に(谷)では線型応答に近い値を示すかあるいは上まわることが観察される。図-8 (a), (b) はこの性質を更にわかりやすく説明したもので、線型限界を示す  $n$  の値にかかわらず(山)と(谷)では対照的に異なる非線型的効果をもつことが理解される。このため結果として(山)と(谷)が解消されて、応答スペクトルは平坦化される傾

向をもち、非線型応答が粘性減衰を持つ線型応答と比較的相似したスペクトル形を示すことがうかがわれる。

図-9, 図-10 は線型限界が応答におよぼす影響を、線型に近い場合 ( $A=0.8$ ) と完全塑性型に近い場合 ( $A=0.2$ ) の二種類について、代表的な周期を用いて明らかにしたものであるが、応答量の増減は線型応答変位に対する非線型応答変位の比  $R(R=x/x_e)$  で説明されている。ここで選ばれた周期は図-4, 図-5 で(山)に相当する場合には  $\triangle, \square$  で、(谷)は  $\bullet, \blacktriangle, \blacksquare$  の印で、その他は無印で区別されており(図内の数字は周期を表わす)周期の長短、および共振性において代表的なものとした。

全体的にみて周期が長くなるに従って応答比  $R$  は大きくなる性質があり、 $A=0.8$  のときには  $n$  が  $0.5$  より小さい場合、周期が  $2$  秒付近より長いものに対して特

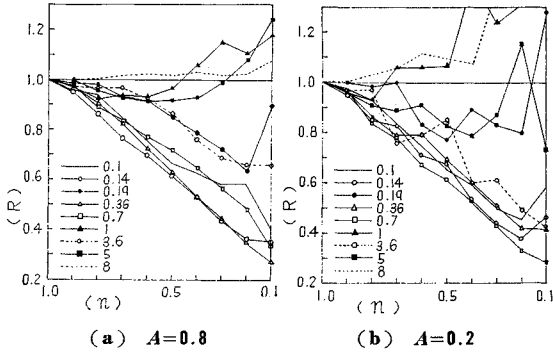


図-9  $n$  をパラメーターとした応答変位 (TAFT)

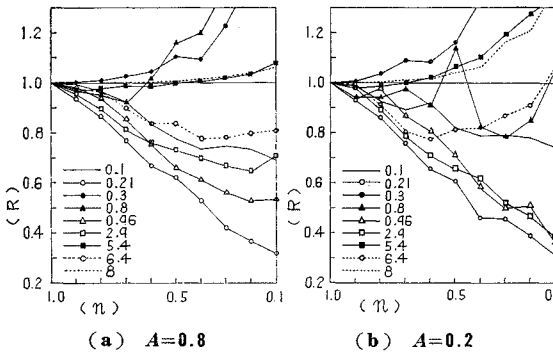


図-10  $n$  をパラメーターとした応答変位 (EL-CENTRO)

にこの傾向を示す。これは比較的長い周期において非線型振動による応答量の低下が少ないことを示すもので、傾向としては Veletsos らの研究<sup>11)</sup>と同じであるが、(谷)にあたる周期においてはこの傾向はあてはまらず、むしろ  $n$  の値に大きく影響を受けている。一方 (山) の場合は  $n$  の値が小さくなるほど、図上で直線的に小さい  $R$  の値を示す傾向を持つが、周期が比較的長いものは  $n$  の減少に対して  $R$  の低下の割合が小さくなる。

(山) と (谷) のもつ応答特性は  $n$  の値についても明らかな相違を示す。一般には  $n$  の減少に伴って両者の  $R$  の値の差は大きくなるが、この差は比較的短い周期のと

ころで特に大きい。また (谷) にあたる部分は  $n$  の変化に伴って変動の大きい  $R$  の値をとっているが、この傾向は  $A$  が 0.8 よりも 0.2 のときの方が強いようである。

この  $A$  に対する特徴を更にくわしく調べるため 図-11, 図-12 では  $n=0.5$  のときの  $A$  をパラメーターにした応答量を描いているが、(山) の周期は  $A$  が 0.8 以下ではほぼ同じ  $R$  の値を持つ傾向にあり、この結果に限れば久田らの研究<sup>9)</sup>と同様であるが、ここでも (谷) にあたる周期の応答が  $A$  の変化に対して大きな変動を示している。

図-13 は線型振動において粘性減衰をもつ応答が減衰定数  $h$  をパラメーターにして描かれたものだが、共振状況を示すと思われる (山) の応答が (谷) の応答に比べて減少度が大きいこと、長い周期を持つ系の応答ほど減少度が小さくなること等について考えれば、非線型応答の場合に相似しており、図-6, 図-7 でみられた平坦化現象からくる相似性が裏づけられる。

図-14 (a)~(f) は  $A$  と  $n$  を同時にパラメーターとして代表的特性をもつ周期について  $R$  をプロットしたものだが、(a) は短い周期の (谷) に相当するし、(b) は同じく (山) に相当し、(c) は中間的な周期の (谷) の場合、(d), (e) は比較的長い周期の (谷) と (山)、(f) は相当長い周期の場合である。(山) の場合は  $A, n$  の変化に対して  $R$  の変動が一般に少なく、 $R$  値の作り出す面が多くの場合平らである。短い周期は (b) で代表され、周期が長くなるに従って (e) のような形に変化していくが、その変化の傾向は 図-9~図-12 でみられたものと同じである。(谷) の  $R$  の面は複雑であることが多く、しかも周期ごとに独特の形を示すため周期の長短に関しては一般的な特徴がつかめない。しかしながら、大体  $R$  値は 1 に近い値をとり、このことは線型応答と同じ応答量を持つ傾向があることを示しているが、線型応答を上回る  $R > 1$  を示す場合は  $n$  が 0.5 より小さい時かあるいは  $A$  が 0.3 より小さい時に限られ

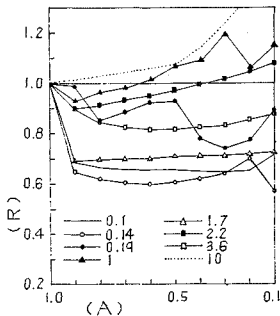


図-11  $A$  をパラメーターとした応答変位 (TAFT,  $n=0.5$ )

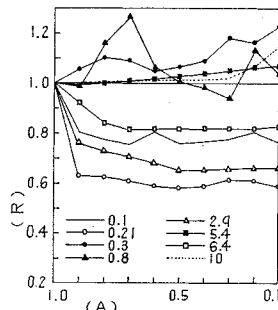


図-12  $A$  をパラメーターとした応答変位 (EL-CENTRO,  $n=0.5$ )

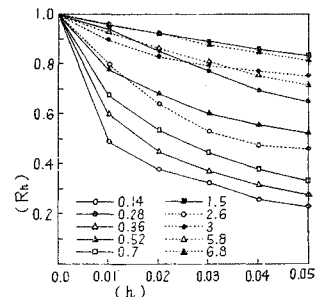


図-13 線型減衰応答 (TAFT)

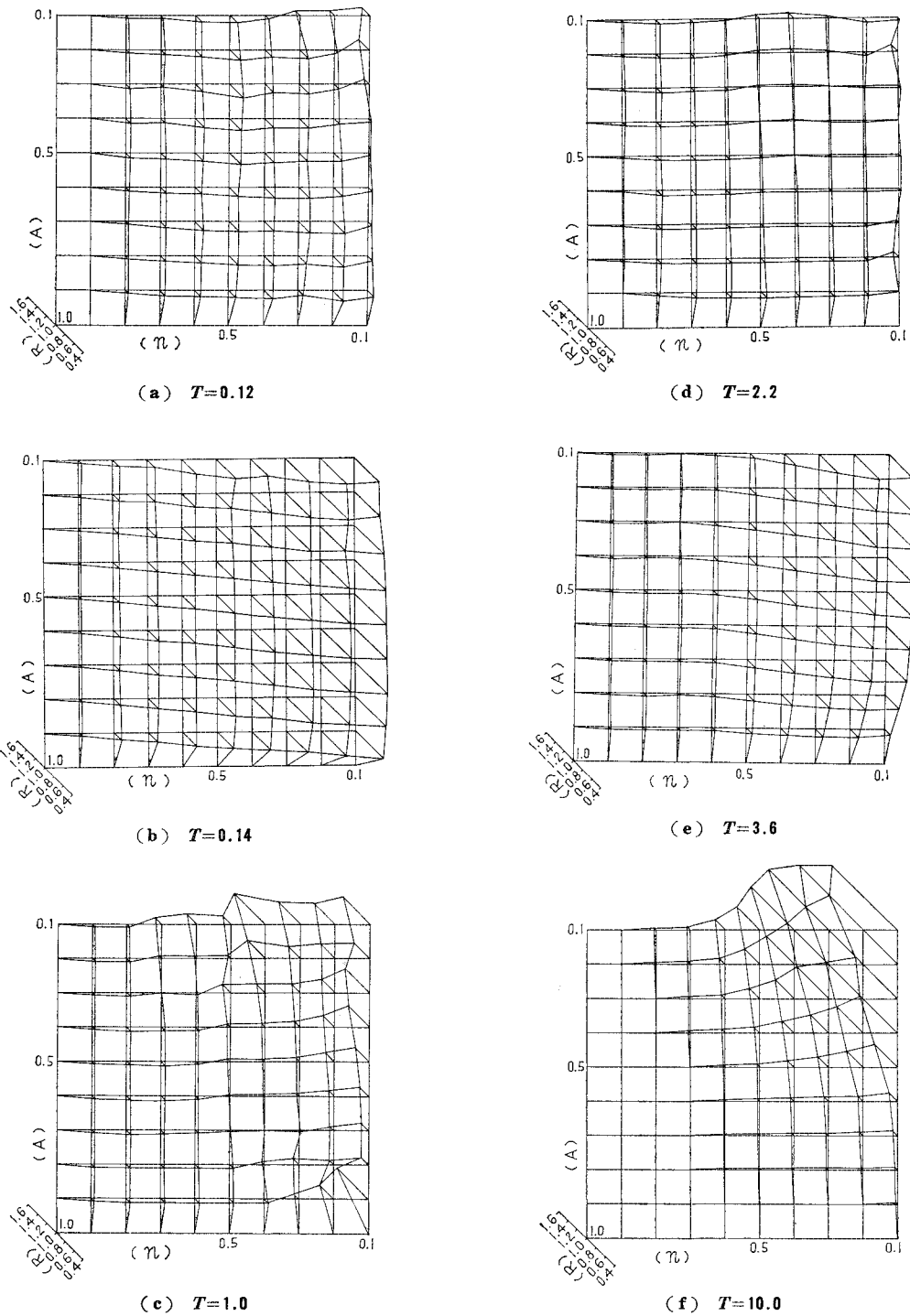


図-14  $A$  と  $n$  をパラメーターとした応答変位 (TAFT)

るようである ((a), (c), (d) 参照)。

周期が7~10秒の間では本研究に用いられた二種の地震波は応答スペクトルの中でピークを持たないため、これまでのごとく(山)と(谷)にわけて解析できない

が、その特徴は例外なく(f)と同形の $R$ の面をもつ。 $n$ と $A$ がともに小さくなるほど $R$ の値は1を大きくうわまわり、その他の場合は $R \neq 1$ となって周期が7秒以下のこれまでの特性とは傾向が全く異なる。

## (2) 粘性減衰の影響

これまでの解析は非線型振動のもつ減衰の効果に主眼が置かれたため非減衰振動が扱われてきた。しかしながら、実際の構造物には何らかの形で減衰作用が働くはずであり、非線型応答における解析もこの作用を考慮した上で行なわれるのが理想的である。非線型振動の中で粘性減衰作用がどのように影響するのか、そしてまた、減衰の原因と考えられているものの中で非線型振動の減衰的效果がどの程度の割合で含まれているものなのか等を明らかにしていくことは興味のあることであり、筆者の期待するところだが、本研究では粘性減衰が作用する場合としない場合とについて非線型応答を比較することから、その一般的な傾向を簡易につかみとるにとどめた。

図-15 では (a) 減衰定数  $h=0$ , (b)  $h=0.02$  の場合について  $n$  と  $R$  の関係を求めたものだが、一般的な特徴として粘性減衰が作用すると、非線型振動は非減衰

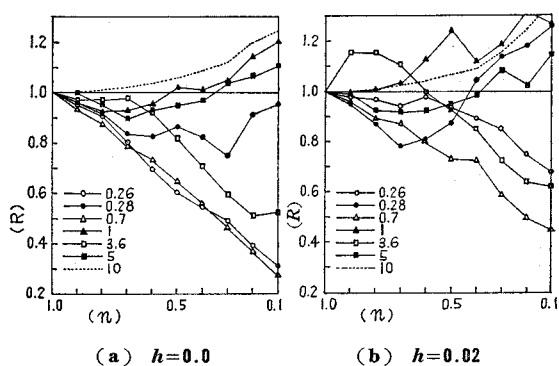


図-15 粘性減衰の作用した応答変位 (TAFT,  $A=0.6$ )

振動のときよりも応答量の減少割合を少なくする。減衰が作用した場合、応答が非線型振動から受ける効果が弱まることは予想されることだが、 $h=0$  で  $R$  が 1 よりも大きい値をとっていた周期 (0.28, 1.0, 5.0, 10.0) が  $h=0.02$  では更に  $R$  の値を大きくしていることは注目される。なお、 $n$  の変化に伴う応答比  $R$  の変動は周期が 3.6 秒の場合のように極端にその傾向を変えてしまうものが他にもいくつか見られたが、多くの場合その形の特徴は粘性減衰によって大きく変わらないようである。

## (3) 加速度

応答加速度は構造物の応答問題において実践的には最も注目されるものであり、非線型振動の諸特性が応答加速度を通して検討されれば都合がよい。しかしながら、非線型振動においては線型振動の場合と違って応答量の大小と入力加速度の増減、すなわち許容される加速度とを直接結びつけることはできない。一般に非線型応答は線型限界を持った復元力特性に基づいて考えられるもの

であり、そのため振動系のもつ周期が線型振動の周期より多くの場合長くなる傾向にある。したがって、同じ応答変位を示す場合には線型振動の応答加速度の方が大きいことになり、このことは復元力特性において線型限界を越えたところでは、わずかな応力の増加でも急激に変位が増加する性質 (bi-linear) から想像できる。

非線型応答における応答加速度は線型限界と応答変位に大きく依存し、またこれらに注目しながら解析されねばならないことはいうまでもなく、いわゆる弾塑性振動として構造物の安全度の観点から検討されるのが適当であろう。小堀<sup>14)</sup>は降伏変位と終局変位とから終局安全率を求めており、また Veletsos らの研究<sup>15)</sup>は弾塑性応答の解析の中で ductility factor を崩壊を基準とした安全度の尺度としている。

本研究は非線型応答について bi-linear 復元力特性と線型限界とをパラメーターとして、その相互間の特性を調べようとするもので、この目的からすれば応答加速度を用いて検討するのは得策でない。なぜならパラメーターの  $A$  と  $n$  が小さくなればそれだけ応答加速度が小さくなるのが前もって予想され、パラメーターによる応答特性がつかめないからである。図-16 に示されるごとく、応答加速度は明らかに  $n$  に大きく支配され、 $h=0.05$  の線型 ( $n=1$ ) の減衰振動が  $n=0.3$  の場合を上まわる値を示し、応答変位の図 (図-6, 図-7) とは異なる結果となる。

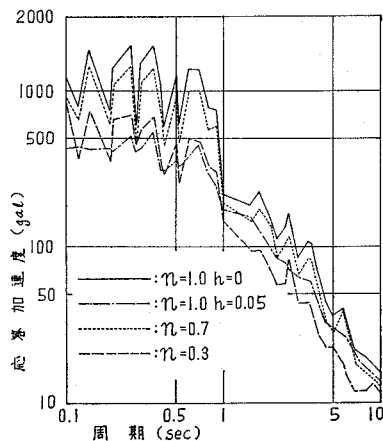


図-16 非線型加速度応答スペクトル (TAFT,  $A=0.3$ )

## (4) 多質点系 (曲げ系) の応答

線型振動の場合、応答スペクトルの重ね合わせから多質点系の応答量を算出する方法がとられ得るが、非線型振動ではこの手段はとれない。しかしながら、もし系が 1 次振動に大きく支配されるもので、しかも 1 次振動のモードが非線型性から生じるたわみ形と相似するならば 1 質点系としての非線型応答がその系の支配的な傾向を

示すものとも考えられる<sup>12)</sup>。この意味で非線型振動から得た応答スペクトルと実際得多質点系の応答との関係、およびそれにおよぼす要因を求めていくことは興味があるが、もし系が曲げに支配されるような振動系であるならば曲げモーメントが変位に比べて高次振動に支配されやすいという一般的な性質に注目されねばならない。たとえば断面、剛性が一樣なはりのような構造物では、曲げモーメントの受ける各次の影響は変位の受ける影響に比べて振動数比の二乗倍になる。

図-17はこの様子を3質点系について示したもののだが1質点系と比べて応答曲げモーメントは明らかに相違しており、曲げモーメントに非線型特性を依存している3質点系は線型から非線型に移行するときの曲げモーメントの時間的性質に、たとえば加速度に支配されるような観測ができ、そしてまた非線型特性である $A$ の値とも同時に無関係でないと思われる( $A=0.8$ と $A=0.4$ では全く異なる応答を示す)。

3質点系の曲げモーメントは明らかに高次の影響を強く受けており、それだけ高次の影響が無視できないとともに、 $A$ の値に敏感に反応しやすい傾向がうかがわれ、1質点系の場合とは非線型に入るとき条件が異なるのが明らかである。このため両者の応答変位は相当かけはなれた値を示し、図-17の例では3質点系が応答変位の振幅を大きく減少しているにもかかわらず、残留変位的な要因のためその変位は大きく上まわる( $A=0.4$ )。

## 5. む す び

本研究は bi-linear 復元力特性を表わすパラメーターとして $A$ 、線型限界のパラメーターとして $n$ を用いて非線型振動の応答スペクトルを変位で作製することにより、その傾向を応答比 $R$ で観察したものだが、以下に記すいくつかの特性が認められた。

(1) 入力地震波として Taft および El-Centro の二種を最大加速度を 200 gal にして用いたが、両者の示す非線型応答はほぼ一致した傾向を持つ。

(2)  $h=0$  の応答スペクトルは多くの(山)と(谷)を持つが、これらのいくつかに注目して(図-4, 5)非線型応答特性を求めてみると、減衰の効果は(山)において明らかに大きく、(谷)では小さい(図-6~8)。そしてこの傾向は粘性減衰のもつ性質(図-13)と相似する。

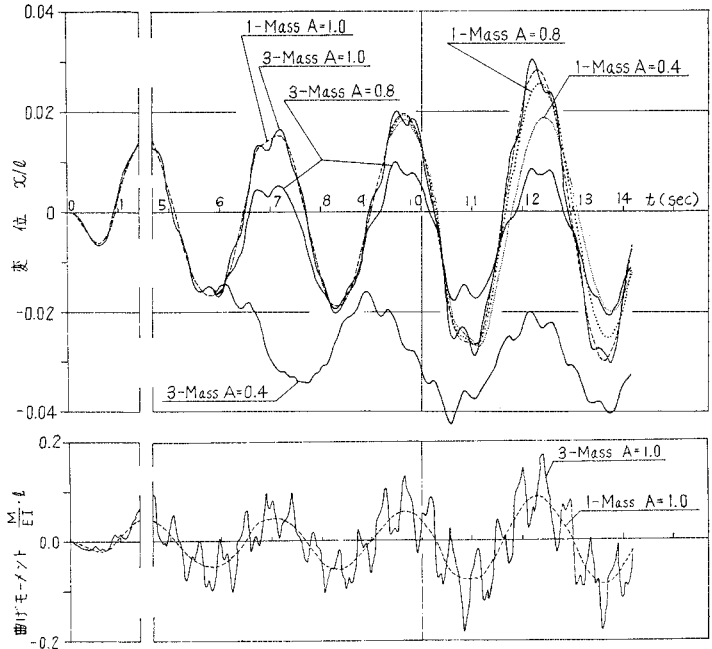


図-17 1質点系と3質点系の応答 (TAFT,  $n=0.5$ ,  $T=2.6$  sec,  $l=10$  m)

(3) 周期の長短からくる応答性質は(2)の傾向に支配されやすく明確にはつかみがたいが、一般に周期が0.1~1.5秒の間では $A$ と $n$ にかかわらず(2)の性質が強く、2~6秒では $A$ と $n$ に敏感に反応して(2)の性質が薄らぐ傾向をもち、7~10秒では非線型応答が線型応答を上まわり( $R>1$ )、これは $A$ と $n$ がともに小さくなるほど顕著である(図-9, 10)。

(4) (山)の応答は $n$ が小さくなるほど、 $A$ の値に関係なく減衰の効果が大きくなるが、しかし周期が2秒より長くなると、この効果は弱まる。一方(谷)では応答が $A$ の値に大きく影響され、 $n$ の変化に伴う応答比 $R$ の変動は大きく、 $A$ が小さくなるほどこの傾向が強い(図-9, 10)。

(5)  $A$ の値が1.0~0.8の間で $R$ の値は大きく変化して、以後 $A$ が0.7~0.1の間では $R$ の値は一定となる。しかしながら、(谷)の応答は $A$ の変化に伴って大きく変動して明確な傾向はつかめない(図-11, 12)。

(6) 多くの場合非線型応答は $R<1$ となり線型応答よりも小さい値を示すが、(谷)の部分および周期が7秒より長い場合は線型の応答を上まわり( $R>1$ )、 $A$ と $n$ が小さくなるほどこの傾向が強い(図-14)。

なお、粘性減衰が作用する場合(図-15)、多質点系との関連性(図-17)について若干記したが、これらについては後日発表する機会を得たい。

謝辞：この研究を進めるにあたり、終始、懇切丁寧なご指導をいただいた奥田秋夫教授に心から感謝の意を表



わすとともに、惜みない協力をいただいた研究室の皆様、および電算のプログラミングで協力をいただいた永田栄造氏（日本ビジネスコンサルタント）に心から感謝いたします。なお、計算に東京大学大型電子計算機 HITAC 5020, および都立大学 FACOM 270-20/30 が用いられた。

#### 参 考 文 献

- 1) 小林啓美：地震の頻度と設計震度，日本地震工学シンポジウム（1962）講演集。
- 2) 小高昭夫：耐震構造の総合研究，宇野書店，上巻，pp. 311~324.
- 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，No. 162, 1969.
- 4) T. Hisada, K. Nakagawa and M. Izumi : Earthquake Response of Structures Having Various Restoring Force Characteristics, 日本地震工学シンポジウム（1962）講演集。
- 5) H.H. Bleich, M.C. Salvadori : Impulsive Motion of Elasto-Plastic Beams, Proc. ASCE, Vol. 79, EM, 1953.
- 6) Y. Yamada : Elastic-Plastic Analysis of Suspension Bridge Towers Subjected to Earthquake Ground Motions, Memoirs of the Faculty of Engineering Kyoto Univ., Vol. 23, Part 3, 1961.
- 7) 国井隆弘：曲げ振動系の非線型応答，第10回地震工学研究発表会講演概要，1969.
- 8) 国井隆弘：非線型振動についての一考察，第24回年次学術講演概要，1969.
- 9) G.N. Bycroft, M.J. Murphy and K.J. Brown : Electrical Analog for Earthquake Yield Spectra, Proc. ASCE, Vol. 85, EM 4, 1959.
- 10) Response Analyzer Committe : Non-linear Response Analyzers and Application to Earthquake Resistant Design, Proc. 2nd WCEE, 1960.
- 11) A.S. Veletsos, N.M. Newmark : Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple System to Earthquake Motion, Proc. 2nd WCEE, 1960.
- 12) R.W. Clough, K.L. Benuska and E.L. Wilson : Inelastic Earthquake Response of Tall Buildings, Proc. 3rd WCEE, 1967.
- 13) 土木学会，本州四国連絡橋技術調査委員会：本州四国連絡橋技術調査報告書・耐震設計指針，1967.
- 14) 小堀輝二：動的設計の現段階，日本地震工学シンポジウム（1962）講演集。

(1970. 10. 14・受付)