

1 まえがき

構造物の耐震設計法に関しては地震の頻度と強さと構造物の損傷とが結びつけられてきた。この考えに基づくと、弾性範囲内での応答量と共に弾性を越えた場合についても応答量を考慮するのが妥当であり、この問題については多くの研究が種々の考え方のもとに行われてきた。1つの方向性は応答スペクトルに注目するものであり、この中で主たる論点はエネルギーの消散などによる減衰性であると思われる。本研究は弾性を越えた時の即ち非線型状態を考慮した応答スペクトルについて線型限界、非線型特性などをパラメーターとして応答量の減少状況を追跡したもので、いくつかの興味ある結果が得られた。

2 解析方法

非線型振動の応答を求めていく際には解析方法が、入力としての地震波の強さ及び選択、非線型限界の設定方法、及び非線型特性の把握、の3つに主として支配されると思われる。入力波については今まで記録された強振波あるいは人工的な地震波等が考えられるが、ここでは一応実録波のT-AFT及びEL-CENTROを用いた。大きさは建設省、土研で求めている平均応答スペクトルとの比較を考慮して最大加速度を200 galにした。

非線型限界については、いくつかの研究¹⁾²⁾が限界を加速度と関連付けている。この方法は設計加速度に注目できる点で有効であるが、周期が比較的大きい範囲での解析がむずかしいと考えられる。1質点系の場合、実際的には変位を基準にして線型限界を決定するのが解り易く、応答変位と線型限界変位の割合に注目していくのも有力な解決の1つと思われる。ここでは限界変位を5, 10, 20, 30 cmと単に選定して比較検討すると共に、線型応答変位の n 割(n は1~9)という限界変位の設定を行った。

非線型特性は構造物特有のものであり、各々の特性ごとに応答量を求めるのが本来の姿であるが応答スペクトルの概念から考えれば一般化するのが当然であり、多くの研究は完全弾塑性形、或いはbi-linear形の特性を用いている。履歴のともなう非線型特性では、その描くループの面積に関するエネルギーの消散が考えられるが、地震波の如き複雑な入力波の場合、必ずしも常にループを描き続けるとは思われない。また、共振状態の形で振巾が大きくなった場合、上記の原因だけでなくループを考えない非線型性が振巾を減少することも考えられる。

このことからbi-linearの特性(図1の $A = k_p/k_e$)の変化が応答に及ぼす影響は興味があるが、これを扱った研究は比較的少ない。³⁾ 本研究では A を0.9~0.1までのパラメーターとして応答変位の減少割合を調べてみた。粘性減衰がこれら非線型振動の応答スペクトルに与える影響は、決して無視できるものとは思えないが、この問題は次回にゆずり、今回は非減衰振動に関して主として記すことにしたい。

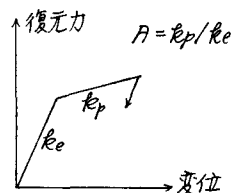


図-1

3. 計算方法

さきに筆者の提案した運動方程式^(4),5)を一質点系に適用すれば、多質点系の場合と比較検討するのが便利である。いま m ; 質点の質量, x ; 質点の基盤に対する相対変位, P ; 復元力, $\ddot{x}$; 地震加速度 とすれば、運動方程式は、

$$m\ddot{x} + P = -m\ddot{x} \quad (1) \quad \text{この中に } x = \phi l, \phi = \phi_e + \theta \text{ を代入して、} P \text{ を固有円振動数として整理すれば(図-2参照) } \ddot{\phi}_e + p^2 \phi_e = -\ddot{x}/l - \ddot{\theta} \quad (2)$$

となり左辺は線型の形をとる。多質点系の曲げ柔の場合、線型限界は曲げモーメントに支配されるので(2)式を無次元化しておくのが便利である。 $\bar{\phi}_e = \phi_e/\phi_y, \bar{\theta} = \theta/\phi_y, \ddot{\bar{x}} = \ddot{x}/x_y$ 、即ち $\bar{x} = \bar{\phi} = \bar{\phi}_e + \bar{\theta}$ となれば(2)式は、 $\ddot{\bar{\phi}}_e + p^2 \bar{\phi}_e = -\ddot{\bar{x}} - \ddot{\bar{\theta}} \quad (3)$

復元力特性も無次元化され得る、 $\bar{M} = M/M_y$ とすれば図-3の如く

線型部分(OB, EF, CDをさす)の傾きは1、非線型部分

(FBC, DEをこうぶとすれば)の傾きは図-1で示した A

($0 < A \leq 1$)で与えられる。1ル-7°として $O \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow B$

を示してあるが図-3の矢印を合致させれば、どんな複雑な形もとれる。各線上では次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} \text{FC上(非線型)} \quad \bar{M} &= \bar{\phi} - (1-A)(\bar{\phi}_e - 1), \quad \bar{\theta} = \frac{1-A}{A}(\bar{\phi}_e - 1) \\ \text{CD上(線型)} \quad \bar{M} &= \bar{\phi} - (1-A)(\bar{\phi}_e - 1), \quad \bar{\theta} = \frac{1-A}{A}(\bar{\phi}_e - 1) \\ \text{DE上(非線型)} \quad \bar{M} &= \bar{\phi} - (1-A)(\bar{\phi} + 1), \quad \bar{\theta} = \frac{1-A}{A}(\bar{\phi}_e + 1) \\ \text{EF上(線型)} \quad \bar{M} &= \bar{\phi} - (1-A)(\bar{\phi}_e - 1), \quad \bar{\theta} = \frac{1-A}{A}(\bar{\phi}_e - 1) \end{aligned} \quad (4)$$

今回は差分間隔 0.01 secの差分で計算を行い、 $\bar{\theta}$ の試算は0.00001

間隔で増減した。非線型状態での計算順序は図-4に示してある。

4. 結果及び考察

図-5 は線型振動のTAFTの変位スナフトルであるが、減衰がない場合非常に複雑な形を示している。このため解り易くするため図6の様に周期間隔を適当に抜げて示すことにする。尚、特別にことわらない限り粘性減衰はないものとする。

図-6, 7 で $A=0.8$ の非線型振動と線型振動が比較されている。ここで注目されるのは、周期 T が大きくなる程非線型振動の減衰性が失われている事であるが、これを更に詳しく、 A の変化を加えて示したのが図-8である。縦軸は線型振動に対する割合を示すが $T=5 \text{ sec}$ 以上では線形振動の方が小さい応答変位を示す様になる。

次に平均応答スナフトルよりも大きい応答を示すもの、即ち、図6, 7で上向きのみをもっている様な周期に於いては、非線型振動に入ると比較的大きい減少を示し、またこの逆の傾向もある。このことは図-9で更に確かめられる。また A の変化にともなう応答量の増減は図8, 9から明らかだが $T=5 \text{ sec}$ 以下では $A=0.8 \sim 0.6$ までの間に減少量がほぼ定まり、 $A=0.5 \sim 0.1$ の値はこれを持続

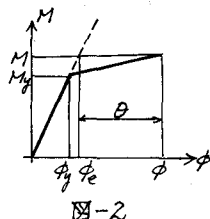


図-2

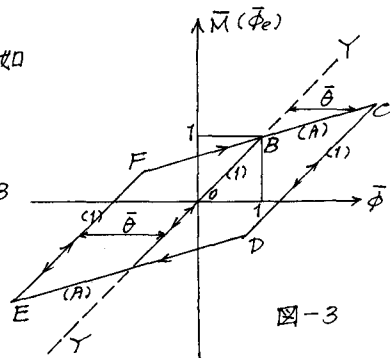


図-3

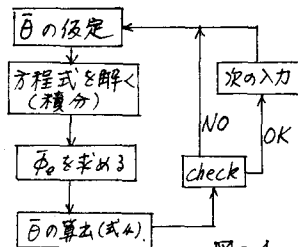


図-4

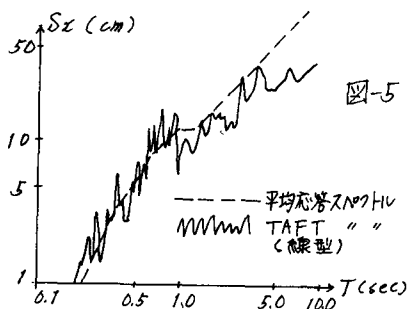


図-5

するのが認められる。しかしながら
 T が5 secを越えと A が小さくな
 ればなる程、応答量が増加する様な
 傾向がある。図-8, 9は $X_y = 5$ cm
 について示したものであるが、これらの
 傾向について別の角度から注目した
 のが図-10である。 μ は線型変位 X_e
 に対する線型限界変位 X_y の比 $\mu = \frac{X_y}{X_e}$
 である。ここでも同様に $T=1$ sec以
 下の周期に対して減衰的效果が大き
 く、又、 μ が小さい程顕著である。

図-11は $T=0.7$ secをとり出して
 A と μ の関係を示したが図-8, 9と
 同様に $A=0.8 \sim 0.7$ で減少度が一定
 になる傾向がある。また $A=0.8$ につ
 いて周期 T と μ の関係が図-12に
 示されている。 T が比較的小さい場
 合(図a)、大きい場合(図b)を比べ
 ると図-8と相当似た関係を示す。

μ はよく扱われる塑性率と似た性
 質をもっているものだが、この結果
 の範囲内では、塑性率よりも周期 T 、
 或いは A が減衰度合に与える影響が
 多い様に感じられる、更に数多くの
 結果から検討したい。

最後に図-13に加速度について示
 してある。非線型振動は明らかに周
 期をのばす性質をもっており、また

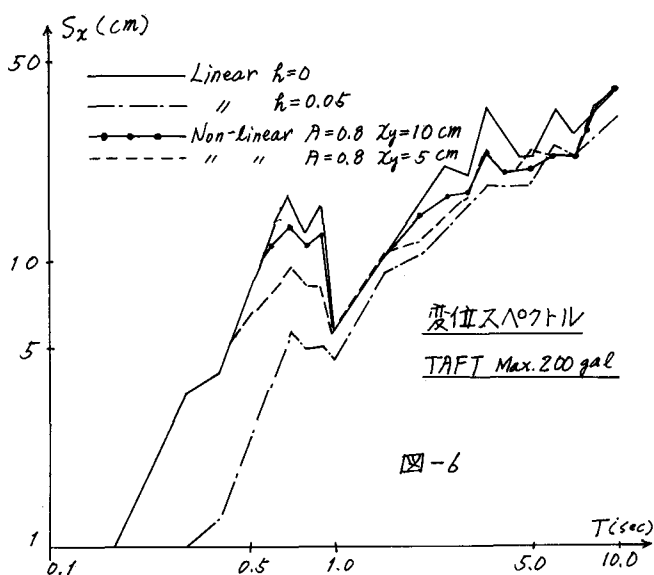


図-6

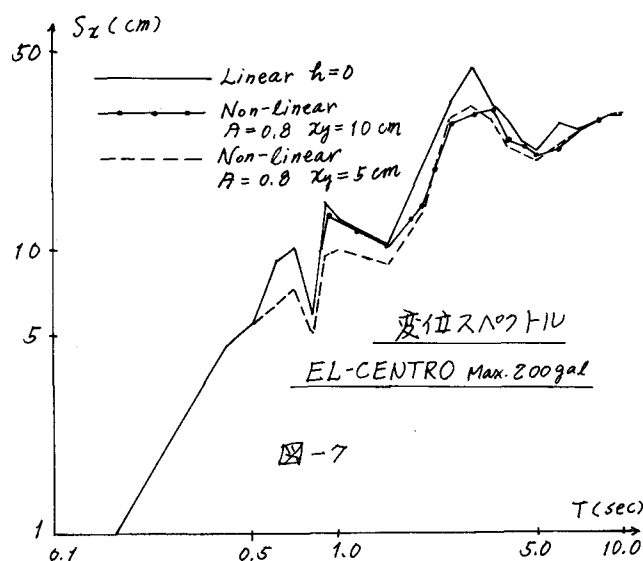
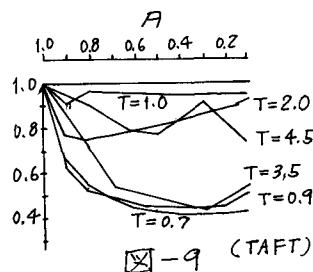
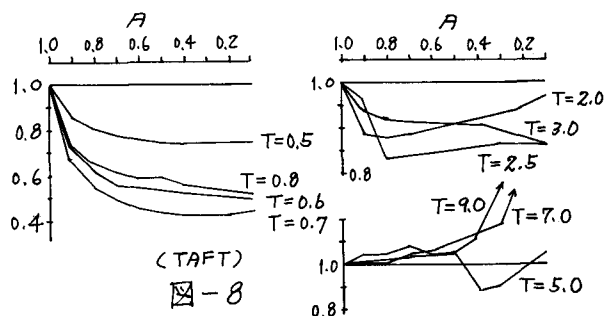
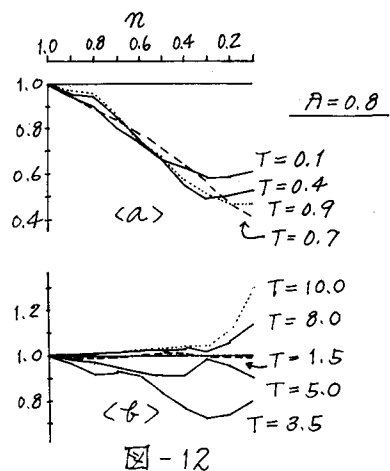
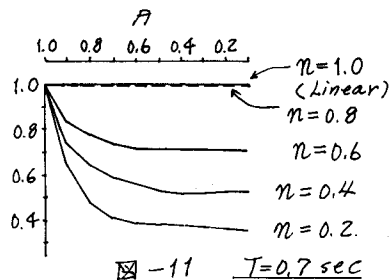
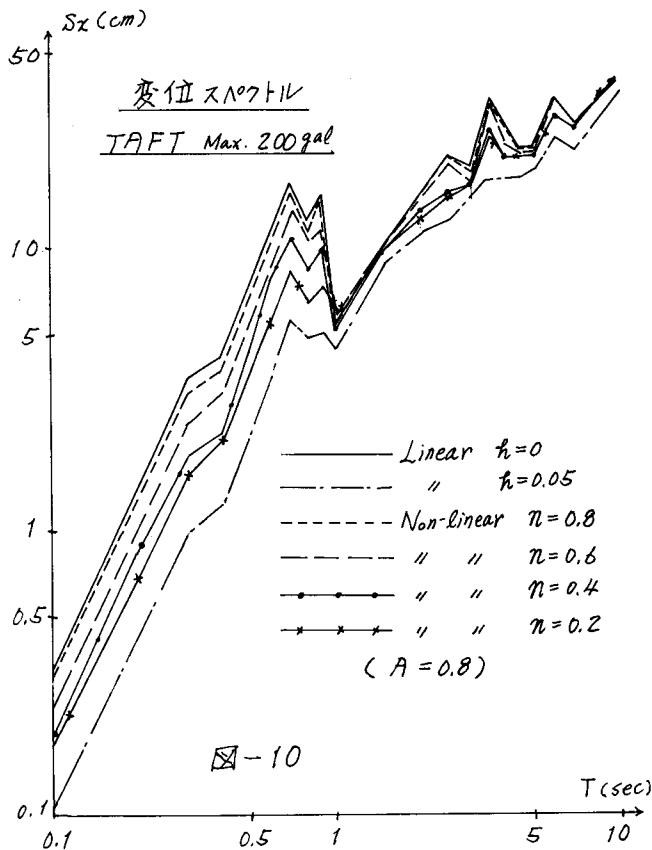


図-7





復元力特性は、変位の増加に対して、復元力を、即ち慣性力を減少させる(相対的に)特性をもつているので、非線型振動は変位よりも、加速度を小さくする傾向があると思われる。

計算に用いられた電算は東大、

HITAC 5020、都立大 FACOM 270-20/30 Z"

ある。この研究を進めるにあたり、始終懇切な指導をいただいた奥田秋夫教授をはじめ、多大の援助をいただいた研究室の皆様には心から感謝いたします。

文献 1) Bycroft 他 "Electrical Analog for Earthquake

Yielding Spectra" Proc. ASCE 85-EM 4 1959.

2) Response Analyzer Committee "Non-linear Response Analyzers and Application To Earthquake Resistant Design" Proc. 2nd WCEE 1966

3) Hisada 他 "Earthquake Response of Structures Having Various Restoring Force Characteristics"

日本地震工学シンポジウム 1962 4) 国井 "非線型振動に於ける" 発表、第4回年次学術講演会、5) 国井 "曲げ振動系の非線型応答、" 10回地震工学

日本地震工学シンポジウム 1962 4) 国井 "非線型振動に於ける" 発表、第4回年次学術講演会、5) 国井 "曲げ振動系の非線型応答、" 10回地震工学

