

地震応答スペクトルと耐震設計法について、二、三の考察

正員 渡 辺 昇*

1. ま え が き

土木学会の土木構造物の耐震設計指針案によれば、「土木構造物の耐震設計は震度法によることを原則とする。」となっており、本州四国連絡橋耐震設計指針によれば、「構造物の耐震設計は、基本固有周期が0.67秒以上のものには動的解析を0.67秒以下のものには震度法を適用する。」となっている。後者はいわゆる修正度震法とよばれるものであり、図-1のような係数 β を用いる方法である。

また、最近わが国の各地の地震記録をデジタル計算機によって整理して、図-2のような応答スペクトル曲線を作る精力的な作業が、建設省土木研究所においても実施されている（土木研究所報告128号の1など参照）。これに対して、筆者は最近、アナログ計算機とカーブ

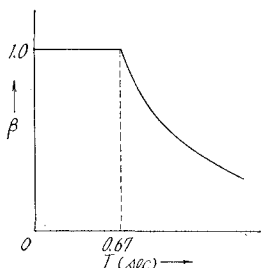


図-1

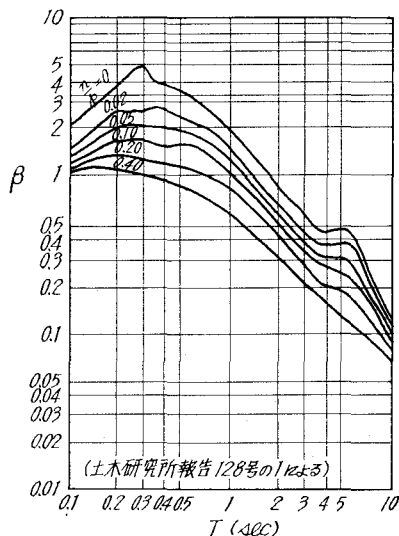


図-2

リーダーを用いて、実際の地震波に対する実際の応答スペクトルの問題を基本的に検討してみたところ、これからの耐震設計法について二、三の指針が得られることになったので、ここでその概要を報告してみたいと思う。

2. アナログ計算機の線型振動のブロック図

いま、図-3のような構造系が基礎に地動 $z(t)$ をうける場合を考えるとその運動の微分方程式は次のようになる。

$$m(\ddot{y} + \ddot{z}) + c\dot{y} + ky = 0, \quad (1)$$

あるいは

$$\ddot{y} + \ddot{z} = -\frac{c}{m} \dot{y} - \frac{k}{m} y, \quad (2)$$

あるいは

$$\ddot{y} + \frac{c}{m} \dot{y} + \frac{k}{m} y = -\ddot{z}, \quad (3)$$

ここで

- m = 質量 (kg sec/cm²),
- k = 質量 m を支える部材の剛度 (kg/cm),
- c = 構造物の粘性減衰係数 (kg sec/cm),
- y = 質量 m の基盤に対する相対変位 (cm),
- $\dot{y}$ = 質量 m の基盤に対する相対速度 (cm/sec),
- $\ddot{y}$ = 質量 m の基盤に対する相対加速度 (gal),
- $\ddot{y} + \ddot{z}$ = 質量 m の基盤に対する絶対加速度 (gal)

である。いま

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{c}{2m} \text{ (sec}^{-1}\text{)}, \\ p &= \sqrt{\frac{k}{m}} = \text{非減衰円振動数 (sec}^{-1}\text{)}, \\ \frac{n}{p} &= \frac{c}{2\sqrt{mk}}, \\ T &= \frac{2\pi}{p} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = \text{非減衰固有周期 (sec)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

とする。

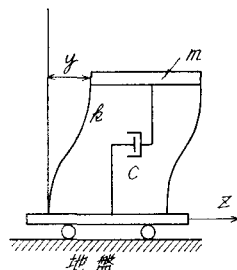


図-3

* 北海道大学工学部教授 工博

式 (2) をアナログ計算機のブロック図であらわせば、図-4 のとおりである。ここで、 A_1 , A_2 , A_3 は加算器、 I_1 , I_2 は積分器、①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦ はポテンショメーター、①, ②, ③, ④, ⑤ は出力のペンレコーダーである。実際の地震波はカーブリーダーを用いて入力とした。ここでは、入力として釧路地震波 EW 成分 (1962 年 4 月 23 日発生, 最大加速度 373 gal) を用いた。このブロック図においては、① から地盤加速度 $\ddot{z}$ が、② から相対加速度 $\ddot{y}$ が、③ から相対速度 $\dot{y}$ が、④ から相対変位 y が、⑤ から絶対加速度 $(\ddot{y} + \ddot{z})$ が、それぞれ出力として出てきて、記録紙にペン書きされるように工夫してある。このブロック図では特に、⑤ のように、絶対加速度 $(\ddot{y} + \ddot{z})$ が出てくるように配慮した点が一つの特長である。すなわち、この $(\ddot{y} + \ddot{z})$ に質量 m を乗ずれば、構造物に作用する慣性力が

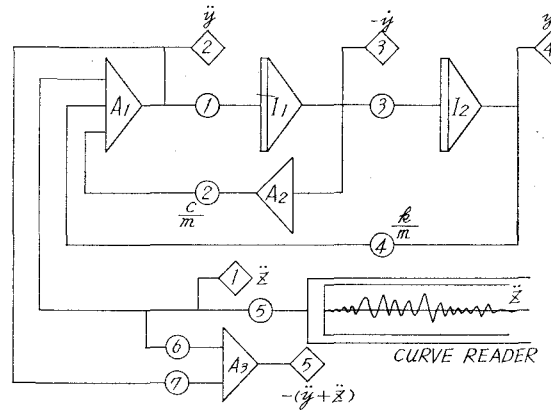


図-4

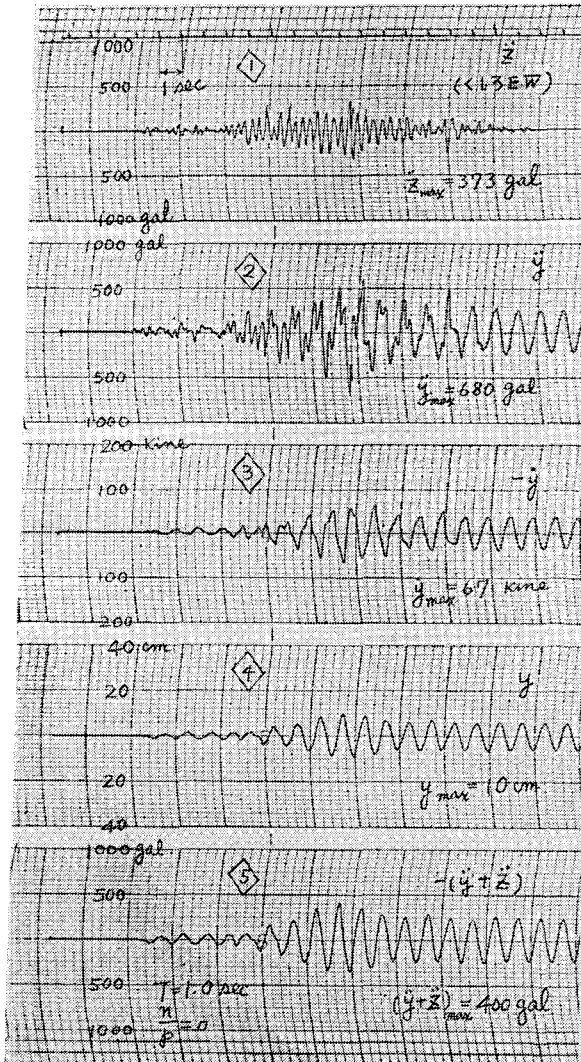


図-5

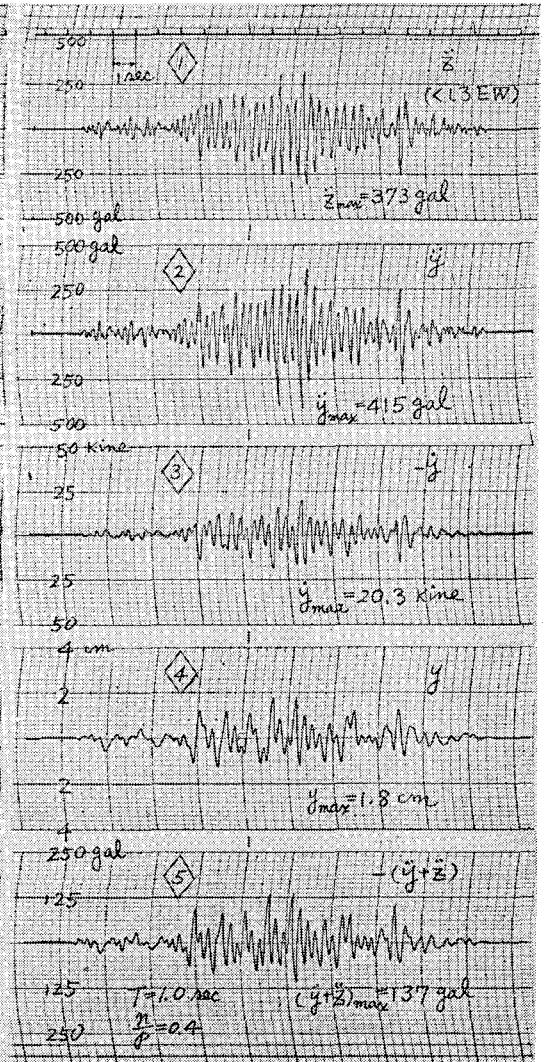


図-6

求まり、さらに、④の y に k を乗ずれば、構造物の復元力が求まることになる。そしてもしも非減衰振動($\frac{n}{p}=0$)の場合には、式(1)の左辺の $c\dot{y}$ は零となるから、慣性力と復元力とが等しくなり、④の記録と⑤の記録とは互いに相似になる筈であり、アナログ計算の結果を検算することができるので便利である。

3. アナログ解析による地震応答スペクトル

式(2)の左辺 $\ddot{y}$ には、鉋路地震波 EW 成分をカーブリーダーで入れ、式(2)の右辺の $\frac{c}{m}$ と $\frac{k}{m}$ をポテンシオメーター②および④によっていろいろに変え、図-5および図-6のようなものを何枚も作り、そこから $\ddot{y}$, $\dot{y}$, y , $(\ddot{y}+\ddot{z})$ の最大値を拾って、これを図示すると図-7のとおりである。横軸には構造物の非減衰固有周期 T をとった。さらに、図-7の $y_{\max}$ の曲線を $\frac{2\pi}{T}$ 倍して、いわゆる Housner 氏の応答速度スペクトル曲線 S_v を描けば図-8の破線のようにになる。この図-8では、アナログによる $\dot{y}_{\max}$ の曲線をも実線で、図-7より比較のために転記しておいた。

次いで、図-7の $y_{\max}$ の曲線を $(\frac{2\pi}{T})^2$ 倍して、いわゆる応答加速度スペクトル曲線 S_A とし、それを鉋路地震波の加速度の最大値373 galで除したものを β 曲線として図示すれば図-9の破線のようにになる。この β 曲線は、図-2の β 曲線のことである。この図-9では、図-7のアナログによる $(\ddot{y}+\ddot{z})_{\max}$ の曲線を373 galで除した曲線も実線で比較のために併記しておいた。

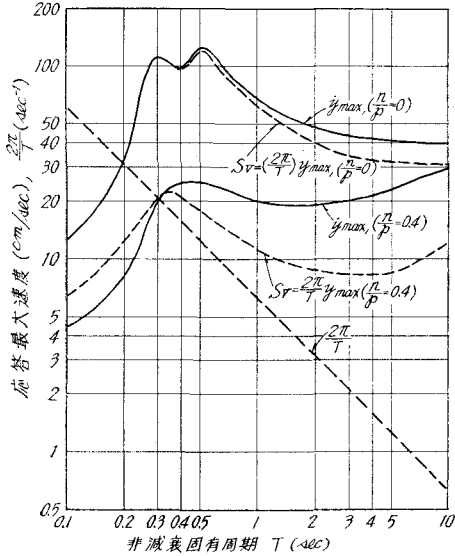


図-8

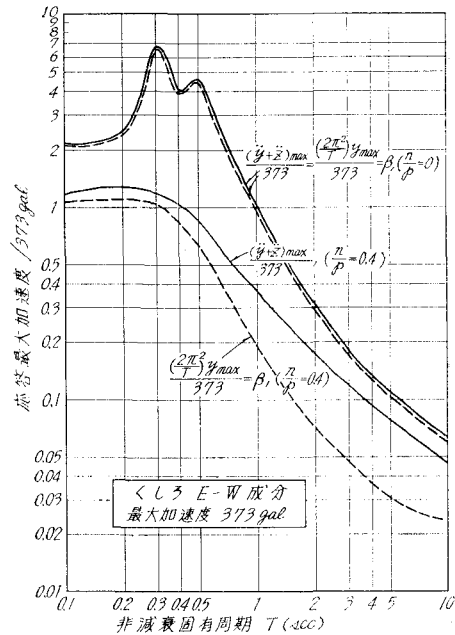


図-9

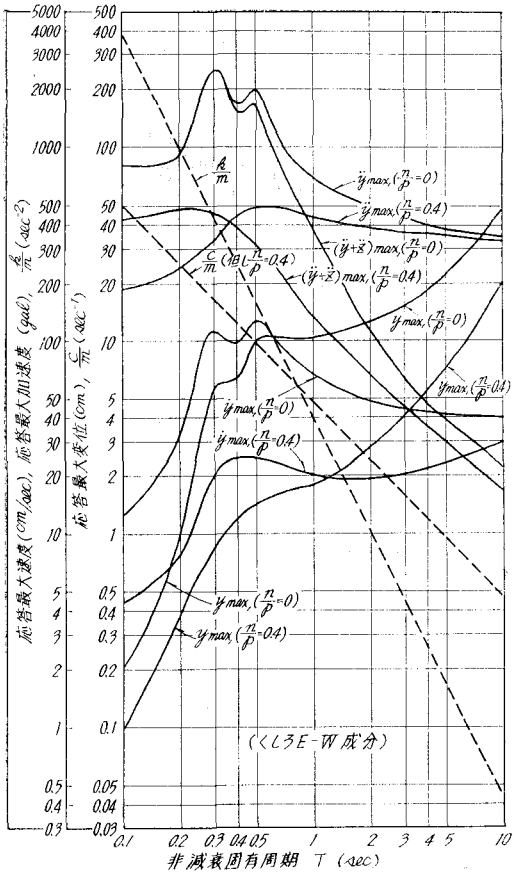


図-7

4. 解析結果からみた考察

(i) 図-5からみて、 $\frac{n}{p}=0$ の非減衰応答の場合、 Φ の y の曲線と Φ の $-(\dot{y}+\dot{z})$ の曲線とは完全に相似である。すなわち、図-9のように、 $\frac{n}{p}=0$ の場合、絶対加速度 $(\dot{y}+\dot{z})_{\max}$ の代りに $\frac{k}{m} y_{\max}$ すなわち、 $\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 y_{\max}$ を完全に用いることができる。

(ii) 図-5からみて、 $\frac{n}{p}=0$ の場合でも、 Φ の y の曲線と Φ の $-\dot{y}$ の曲線とは完全に相似ではない。すなわち、 $\dot{y}_{\max}$ の代りに $S_F = \left(\frac{2\pi}{T}\right) y_{\max}$ を完全に代用することはできない。すなわち、図-8において、 $\frac{n}{p}=0$ の場合でも、 $\dot{y}_{\max}$ の曲線と S_F の曲線とは近似的には等しいが完全には一致しない。

(iii) 図-6からみて、 $\frac{n}{p} \neq 0$ の減衰応答の場合、 Φ の y の曲線と Φ の $-(\dot{y}+\dot{z})$ の曲線とはかなりよく似ているが完全に相似ではない。すなわち、図-9のように、 $\frac{n}{p} \neq 0$ の場合、絶対加速度 $(\dot{y}+\dot{z})_{\max}$ の代りに $\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 y_{\max}$ を代用することはできない。

(iv) 図-6からみて、 $\frac{n}{p} \neq 0$ の場合、 Φ の y の曲線と Φ の $-\dot{y}$ の曲線とはかなり異っている。すなわち、 $\dot{y}_{\max}$ の代りに $S_F = \left(\frac{2\pi}{T}\right) y_{\max}$ で代用することはできない。すなわち、図-8において、 $\frac{n}{p} \neq 0$ の場合、 $\dot{y}_{\max}$ の曲線と S_F の曲線とはかなり異なる。

(v) 図-7からみて、応答最大変位 $y_{\max}$ は、構造物の固有周期 T が大きければ大きい程大きくなる。

(vi) 図-8からみて、応答最大速度 $\dot{y}_{\max}$ および $S_F = \left(\frac{2\pi}{T}\right) y_{\max}$ の曲線は、構造物の固有周期 T が大きくなるにつれて、だんだん水平線になってゆく（この事実は、すでに Housner 氏も指摘している）。

(vii) 図-7からみて、応答最大相対加速度 $\dot{y}_{\max}$ も、構造物の固有周期 T が大きくなるにつれて、だんだん水平線になってゆく。

(viii) 図-7からみて、応答最大絶対加速度 $(\dot{y}+\dot{z})_{\max}$ は構造物の固有周期 T が大きくなるにつれて、ぐんぐん小さくなる。これと、 $\dot{y}_{\max}$ の曲線とくらべてみると、 $(\dot{y}+\dot{z})_{\max}$ の曲線の方の値が低くなってゆくとこからみて、 T

が大きくなる程、地震加速度 $\ddot{z}$ が構造物に働く慣性力を軽減させるように働いていることがわかる。

(ix) 図-7および図-9からみて、応答最大絶対加速度 $(\dot{y}+\dot{z})_{\max}$ の曲線のピークは、 $\frac{n}{p}=0$ の場合、 $T=0.3$ 秒附近に存在するので、釧路地震波の卓越周期は0.3秒附近であろうと推定される。また、構造物の粘性減衰係数 c が大きい、すなわち、 $\frac{n}{p}$ の値が大きいと、応答最大絶対加速度 $(\dot{y}+\dot{z})_{\max}$ は、 $\frac{n}{p}=0$ の場合にくらべて急激に低下する。

(x) 図-9からみて、 $\frac{n}{p} \neq 0$ の場合、 $\frac{(\dot{y}+\dot{z})_{\max}}{373}$ の曲線と β 曲線とはかなり異っている。一般に、耐震設計計算においては、 β 曲線を構造物に働く慣性力の代りに使用してきているけれども、実際の慣性力の計算には $\frac{(\dot{y}+\dot{z})_{\max}}{373}$ の曲線の方を用いるべきであり、特に、 $\frac{(\dot{y}+\dot{z})_{\max}}{373}$ の方が β 曲線よりも危険側である。

5. あとがき

以上のような観点から考えて、実際の構造物の耐震設計としては、次のような手段を講ずることが必要であろう。

(i) 構造物建設地点の推定発生地震波の波形および卓越周期を何らかの方法であらかじめ知っておく。

(ii) 次に、この推定発生地震波を、アナログ計算機に入力として入れ、図-7または図-9のような $(\dot{y}+\dot{z})_{\max}$ 曲線を作る。

(iii) 次に、その構造物の固有周期 T および減衰係数 $\frac{n}{p}$ を、力学計算などによって計算し、その T と $\frac{n}{p}$ とを用いて、図-7または図-9のような $(\dot{y}+\dot{z})_{\max}$ 曲線より、実際の応答絶対加速度の値を拾い、その構造物の慣性力あるいは設計震度を決める。

たとえば、釧路平野に固有周期 $T=1.0$ sec、 $\frac{n}{p}=0.4$ の構造物を設計しようとする場合などは、図-7の $(\dot{y}+\dot{z})_{\max}$ の曲線の $\frac{n}{p}=0.4$ の場合において、 $T=1.0$ sec における値は140 galであるから、この構造物の設計震度は0.14ということになる。

このように、アナログ計算機は、耐震設計計算上、非常に有効なものであるから、今後の活用が期待されるのである。