構造物の耐震性評価に関する基礎的考察

徳島大学工学部　正員　宇都宮英彦
徳島大学工学部　正員　沢田　勉
総合技術コンサルタント　正員○篠原　修二

1　まえがき

近年，種々の地震応答解析法が示され，今まで解析できなかった複雑な構造物においても応答解析が可能になった。しかしながら，耐震性評価を行う上において基本的な問題として，どのような地震外力を採用するかという問題が残る。たとえば，平均応答スペクトルを用いるとしても同じ大きさの加速度において，より大きい応答を示すものもあり得るし，また模擬地震波形を用いるとしても，そのスペクトルの形状，振幅特性の形状の決定が問題となる。このような問題の解決に一つの示唆を与えるものとして，最悪地震の考え方があるが，これは，全ての地震波を，1,2のパラメータにより特徴づけ，その中で，構造物に対して最も危険な外力に対して解析を行なえばよいという考えである。そこで本研究では，不規則性を有し，最悪地震の基本概念である作用する外力をそれぞれの構造物に対して選ぶということから，構造特性である固有振動数と減衰定数により決定される帯域幅を有する帯域制限ホワイトノイズに対する応答解析および，応答スペクトルの検討を行なった。

2．地震動の強さを示すパラメータ

地震動の強さを表わすパラメータとしては種々示され一般には最大加速度が用いられているが，最大加速度だけでは評価できない例も出ている。本研究では自乗平方根強度により，地震動の強さを示すことにする。

自乗平方根強度Ｉは次式で示される。

$$I = \sqrt{\int_0^{T_d} \{\ddot{y}(t)\}^2 dt} \tag{1}$$

ここで，$\ddot{y}(t)$：地震加速度，T_d：地震継続時間である。自乗平方根強度は，地震動の全パワーの平方根であり地震動全体の一種のエネルギーを表わす。式(1)からもわかるように，継続時間T_dの取り方により大きく左右される。よって，実地震波における自乗平方根強度の評価の方法には注意が必要であるが，本研究においては，実地震記録の全継続時間により求めた自乗平方根強度を用いた。

自乗平方根強度Ｉと，帯域制限ホワイトノイズのスペクトル強度S_0の関係は次式で示される。

$$2S_0(\omega_2-\omega_1)T = I^2 \tag{2}$$

ここで，ω_2, ω_1は帯域制限ホワイトノイズにおける上下限の振動数，Ｔ：帯域制限ホワイトノイズの継続時間である。

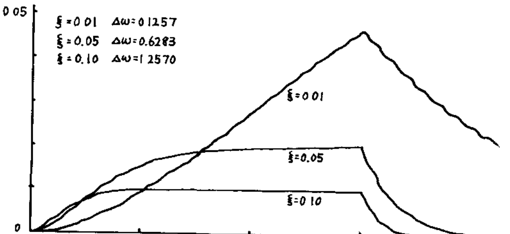


Fig.1 矩形ホワイトノイズの過渡応答 $\Delta\omega=2\xi\omega$

3．応答解析

振動系は，簡単な線形1自由度とし次式で示される．

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega_m\dot{x}(t) + \omega_m^2 x(t) = -\ddot{y}(t) \tag{3}$$

そして，式(2)における$(\omega_2-\omega_1)$を$2\xi\omega_m$とする。つまり，$\ddot{y}(t)$を，ω_mを中心とし，$2\xi\omega_m$の帯域幅を有する帯域制限ホワイトノイズと考える。定常解は，

$$E[x^2] = \frac{\pi S_0}{2\xi\omega_m^3}\left[I(\omega_2/\omega_m,\xi) - I(\omega_1/\omega_m,\xi)\right],$$

$$I(\omega/\omega_m,\xi) = \frac{1}{\pi}\tan^{-1}\frac{2\xi\,\omega/\omega_m}{1-(\omega/\omega_m)^2} + \frac{\xi}{2\pi\sqrt{1-\xi^2}}\ln\frac{1+(\omega/\omega_m)^2+2\sqrt{1-\xi^2}\cdot\omega/\omega_m}{1+(\omega/\omega_m)^2-2\sqrt{1-\xi^2}\cdot\omega/\omega_m} \tag{4}$$

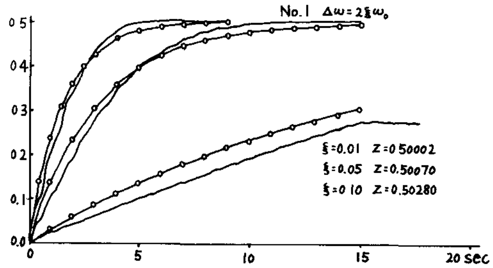


Fig.2 Ｚの時間的変化

非定常応答は，rectangular step envelope function を有する Barnoshi の式を用い，数値積分を行ない求めた。その結果を Fig.-1 に示す。これを，理想的ホワイトノイズの応答と比較すると Fig.-2 のようになる。Fig.-2 における丸印は，関数 $(1-e^{-\xi\omega_n t})$ である。この関数を用い，帯域制限ホワイトノイズ入力に対する自乗平均応答を近似的に次式で示すことができる。

$$E[x^2(t)] = \frac{\pi S_0}{2\xi\omega_n^3}(1-e^{-2\xi\omega_n t})[I(\omega_2/\omega_n,\xi) - I(\omega_1/\omega_n,\xi)](1-e^{-\xi\omega_n t}) \quad (5)$$

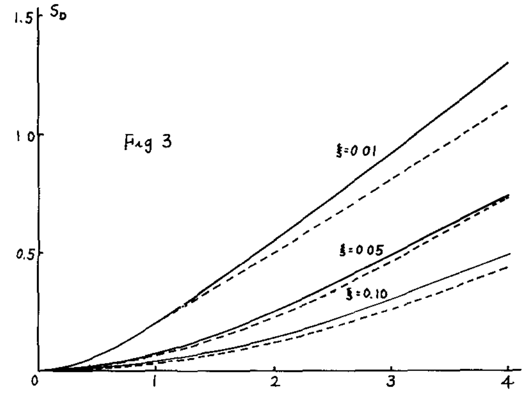
4. 最大値推定と応答スペクトル

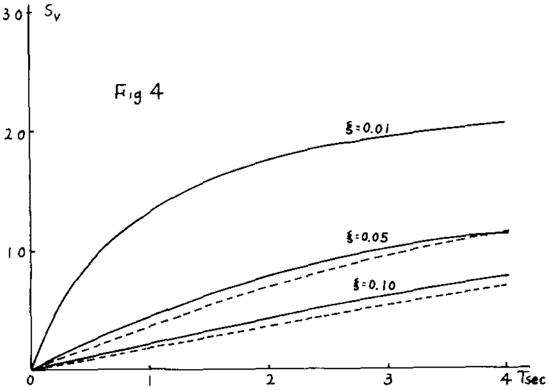
帯域制限ホワイトノイズ入力と，実地震とを応答スペクトルの形により比較を行なった。帯域制限ホワイトノイズ入力に対する最大応答値の推定には，文献4) 5) より，次の2式を用いた。

$$E[|x|_{max}] = \sigma_x\{[2\ln(\nu_x\cdot T)]^{1/2} + 0.5772\times[2\ln(\nu_x\cdot T)]^{-1/2}\} \quad (6)$$

$$E[|x|_{max}] = 2.5\,\sigma_{max} \quad (7)$$

ここで，ν_xは見かけの振動数である。Fig.-3,-4,-5 に式(7)による応答スペクトルを示す。図中，縦軸は，I で正規化している。図を実地震波における応答スペクトルと比較を行なった場合，約7倍以上の過大評価となる。この過大評価の一番大きい原因は，実地震波においては，そのパワーが，いろんな周波数成分をもち分散しているが，本研究の方法では，その全体のパワーをある単一の周波数付近の狭い帯域幅に集中させているため，同じ自乗平方根強度においても非常に大きい応答値を示すことになる。この修正法としては，実地震波において，単一周波数成分に集中する割合の検討が必要である。つまり，全体のパワーを想定し，そのパワーの何割位いが，単一周波数成分に集中する可能性があるかということの検討である。





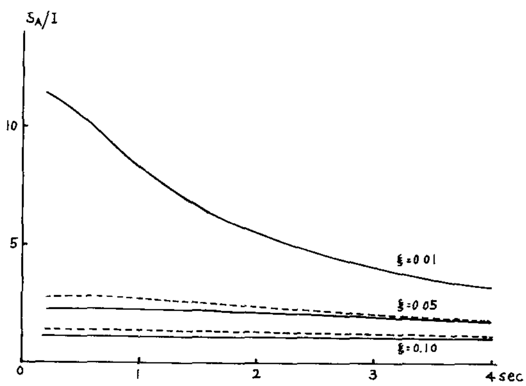


Fig. 5

5. むすび

本研究では，地震動を非常に簡単な形で表現し，その応答特性および，応答スペクトルの検討を行なったが，上記のような過大評価の修正，入力を決定するパラメータ自乗平方根強度，スペクトル強度，継続時間の決定法を，実地震波との比較を行ないながら今後明確にしてゆくつもりである。

〈参考文献〉 1) R.L. Barnoski 'Mean-Square Response of Simple Mechanical System to Nonstationary Random Excitation' ASME 1969
2) R.F. Drenick 'Model-Free Design of Aseismic Structures' ASCE 1970
3) R.F. Drenick 'Aseismic Design by way of Critical Excitation' ASCE 1973
4) 小堀 ほか '擬似地震動に関する応答スペクトル' 土木学会論文報告集 1972年 2月
5) 亀田弘行 '不規則地震動に対する構造物の最大応答の推定法について' 土木学会論文報告集 1972年 5月