APPENDIX

Appendix　A　等価線形化法について

A.1　まえがき

これまで非線形変位応答の一般的な推定法として等価線形化法が知られている。柴田他[*1]は、弾塑性応答の最大値を応答スペクトルを利用した等価線形解析により推定する手法を示している。また、Moehle[*2]はこの等価線形化法に基付いた手法がいろいろなタイプの構造物の地震時の変位応答を良く推定できる事を示している。ここでは、等価線形化法による推定の結果を、２章で示した結果と対応させて検討する。

A.2　等価線形化法

等価線形化法の主な特徴は、

i)　有効周期の伸びによる変形の増大、

ii)　等価粘性減衰の増大による変形の減少、である。

有効周期は、予想される最大変位を降伏変位で除した値（塑性率、μ）の関数として与えられる。今、荷重―変形関係を図―A.1に示したような弾塑性型に理想化すると、有効周期T_{ef}は、初期周期T_0と塑性率の関数として次式で与えられる。

$$T_{eq} = T_0\sqrt{\mu} \quad \text{(A.1)}$$

一方、等価粘性減衰、h_{eq}は柴田[*1]の提案より、

$$h_{eq} = 0.2(1-1/\sqrt{\mu}) + 0.02 \quad \text{(A.2)}$$

また、このときの変位応答スペクトルと、2%減衰のものとの関係も同様に柴田[*1]による加速度応答スペクトルに対する提案を準用して次式で与える。

$$\frac{[S_d]_{eq}}{[S_d]_{2\%}} = \frac{8}{6+100\cdot h_{eq}} \quad \text{(A.3)}$$

(A.2),(A.2)式より、

$$\frac{[S_d]_{eq}}{[S_d]_{2\%}} = \frac{0.4\sqrt{\mu}}{1.4\sqrt{\mu}-1} \quad \text{(A.4)}$$

*1 Sibata, A. et al, "Substitute structure method for seismic design in R/C," ASCE,ST,Vol.102,No.1

*2 Moehle, J.P., "Strong motion drift estimates for　R/C structures," ASCE,ST,Vol.110,No.9

A.3　弾塑性応答

２％減衰の速度応答スペクトルを、地震波の特性周期、*Tc*で変化する２本の直線で表せば、変位応答スペクトルは図−A.2に示すように、*Tc*までは周期の２次式で、*Tc*以降は１次式で表せる。従ってここでは、弾塑性変位応答を構造物の周期*T0*が*Tc*より大きいかどうかで分けて考える。

1)　$T_0 > Tc$

変位応答スペクトルは図−A.3(a) に示したように直線で表せるので、周期の伸びによる変位、δ_1は、弾性応答変位、δ_0より(A.1) 式を参考にして次式で求まる。

$$\delta_1 = \delta_0 (T_{ef} / T_0) = \delta_0 \cdot \sqrt{\mu} \quad \text{・-----} \quad (A.5)$$

ところが、変形は等価粘性減衰の増加によって減少するので、変位応答は、(A.4)、(A.5)式の積によって求まる。よって、

$$\delta_2 = \delta_1 \cdot \frac{0.4\sqrt{\mu}}{1.4\sqrt{\mu}-1} = \delta_0 \cdot \frac{0.4 \cdot \mu}{1.4\sqrt{\mu}-1} \quad \text{-----} \quad (A.6)$$

(A.6)式で与えられるδ_2は仮定した塑性率、μに対して与えられるものであり、これは、図−A.1中の$\delta_2 = \delta_y \cdot \mu$と等しくなければならない。

一方、図−A.1を参照すると、降伏変形と強度比、*SR*（降伏強度／2%減衰弾性応答せん断力）の関係は、

$$\delta_y = \delta_0 \cdot SR \quad \text{-----} \quad (A.7)$$

(A.6)、(A.7)式より、

$$\mu = (0.4 / SR + 1)^2 / 2 \quad \text{-----} \quad (A.8)$$

従って、変位応答比、*DR*（最大応答変位／変位応答スペクトル値）は、次式で与えられる。

$$DR = \frac{D_2}{D_0} = \frac{\mu D_y}{D_0} = \frac{(SR + 0.4)^2}{2 \cdot SR} \quad \text{-----} \quad (A.9)$$

2)　$T_0 < Tc$

この領域ではさらに、有効周期が*Tc*以下にとどまるか否かで分けて考える。

i)　$Tef < Tc$

この場合、変位応答スペクトルは，図−A.3(b) に示したように、周期の2次式で

あるので、(A.5)式の代りに(A.10)式を用いる事により、1)と同様に求められる。

$$\delta_1 = \delta_0 (T_{ef} / T_0)^2 = \delta_0 \cdot \mu \quad \text{-----} \quad (A.10)$$

従って、*DR*は、

$$DR = \frac{SR}{(1.4 - 0.4 / SR)^2} \quad \text{-----} \quad (A.11)$$

ii) $T_{ef} > Tc$

ここでは、以下の検討を容易にするために、*Tc*以下の領域に図−A.3(c) に一点鎖線で示したような仮想の直線で与えられる応答スペクトルを考える。弾性応答スペクトル、δ_0と、この仮想応答スペクトル、δ_3の関係は、周期比、*TR* (T_0/Tc)の関数として次式で与えられる。

$$\frac{\delta_3}{\delta_0} = \frac{1}{TR} \quad \text{-----} \quad (A.12)$$

δ_2とδ_3の関係は、(9) 式のδ_0をδ_3と置き替えることにより与えられるので、

$$DR = \frac{\delta_2}{\delta_0} = \frac{\delta_3}{\delta_0} \cdot \frac{\delta_2}{\delta_3} = \frac{(SR + 0.4)^2}{2SR} \frac{1}{TR} \quad \text{-----} \quad (A.13)$$

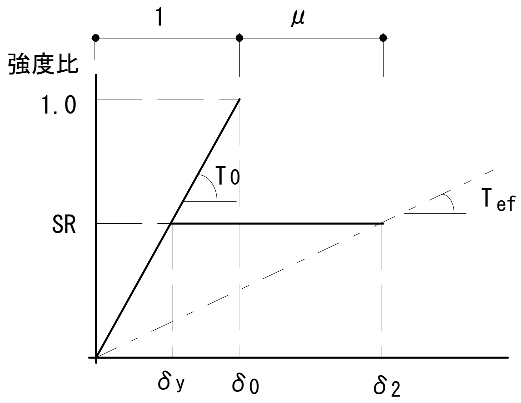
(A.11)式と(A.13)式のうち小なる方が$T_0 < Tc$　の時の応答変位比である。

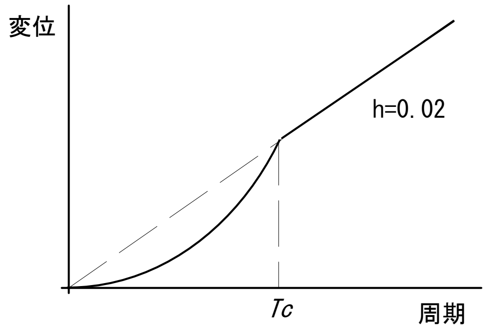
3)　応答変位比

図−A.4に(A.9)､(A.11)､(A.13) 式によって求めた等価線形化法による強度比と応答変位比の関係を示した。図中には、第２章で示したＲＣ構造物に対する数値計算の結果を示している。等価線形化法による応答変位比は、$T_0 > Tc$ の領域では数値計算の結果と良く対応しほぼ1.0 であるが、低強度比、低周期比の場合(*TR*+*SR*＜1.0)にはかなり低目の推定となっている。

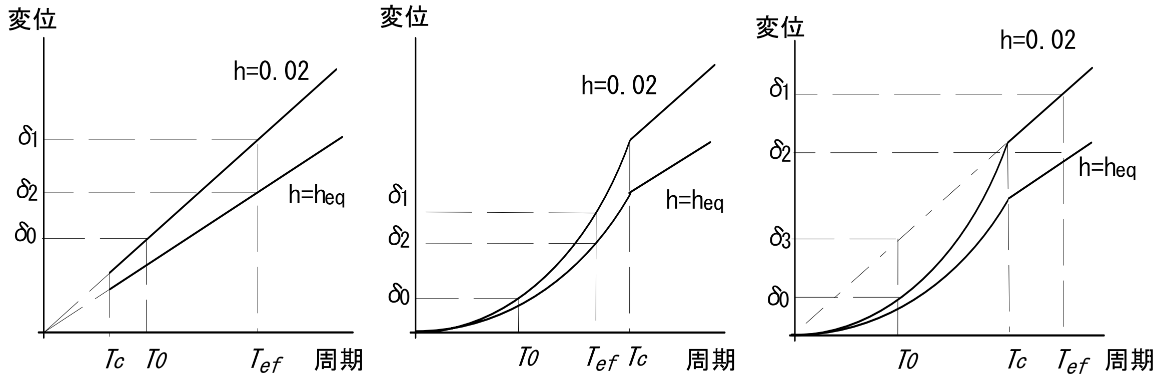
A.4　まとめ

以上により、等価線形化法による非線形変位応答の推定法は、速度応答スペクトルの速度一定領域においては有効であることが改めて示された。ただし、この領域においては、非線形変位応答は弾性応答とさほど変わらないので弾性応答をそのまま使う事により、等価線形化法と同等の結果を得られるものと思われる。



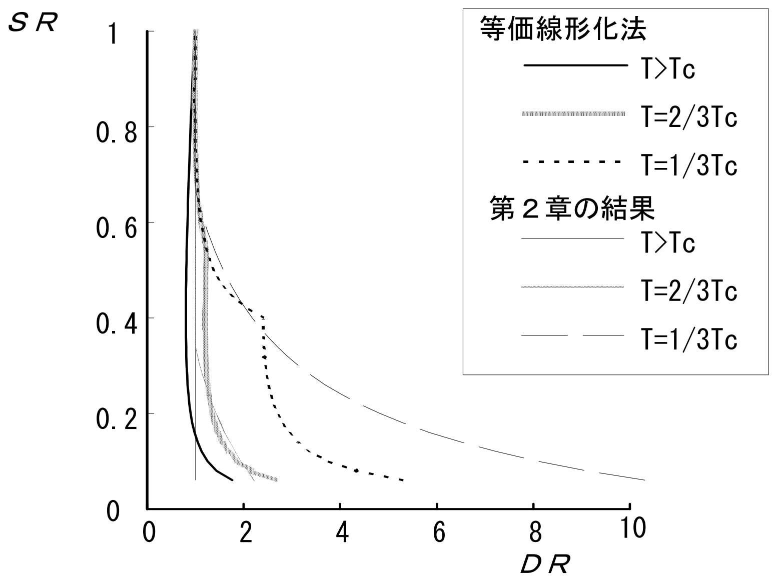


図−A.1　理想化した弾性･弾塑性応答と有効周期　図−A.2　理想化した変位応答スペクトル



(a) $T0 > Tc$　(b) $T0 < Tc$, $T_{ef} < Tc$　(c) $T0 < Tc$, $T_{ef} > Tc$

図−A.3 等価線形化法による非線形変位応答



図−A.4　等価線形化法による強度比*SR*と応答変位比*DR*の関係