

I — 9 三成分地震波入力を考慮した剛基礎の設計震度

北大工学部 正員 渡辺 昇
専修短大 正員 金子 孝吉
専修短大 正員 三上 敬司

I. まえがき

土木・建築における構造物の耐震設計には従来、(1)震度法、(2)修正震度法および(3)動的解析法〔i. 時刻歴応答解析法、ii. 平均応答スペクトル法〕を採用することが示方書に決められている。

しかし、それらは一般に一方あるいは多方向多成分でも各成分が独立しており、一自由度の解析モデルで扱われることがほとんどである。

だが、過去大地震による構造物の崩壊をみても回転振動やねじれ振動によるとみられる被害が少なからず報告されている。特に構造物の基礎部の移動・沈下・傾斜ならびに支承部と上部構造との相互の衝突などが事例として挙げられる。

これらの被害を防ぐためには、重要な構造物であればあるほどその基礎部の三次元解析に裏付けされた耐震設計法が必要になってくると思われる。そのため、本研究では、剛な円柱基礎を例に三成分地震波同時入力による三次元応答解析の理論による多自由度系の固有値解析および応答解析から始め、次に多自由度系の設計震度を求める式を提案し、加速度応答倍率とパワー増幅スペクトルを求めることにした。

その結果、従来の一自由度系震度に比べ、多自由度系では割増して考慮しなければならないという結論を得たのでここに報告する。

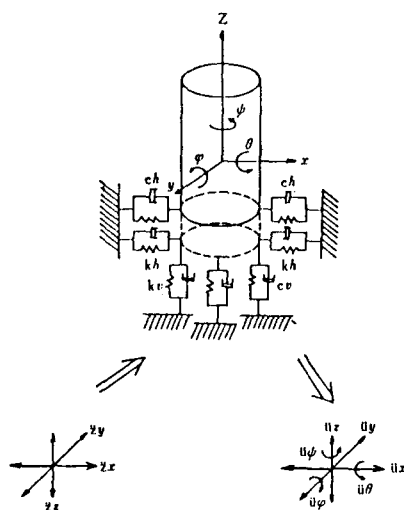
II. 多自由度系剛基礎モデルの設計震度

地盤上に築造されている実際の構造物の振動は橋脚のように剛な構造物であればその振動性状は地盤振動によって決ってしまう。それは地盤も一般の構造部材と同じように弾性的性質を持ち、橋脚はあたかもバネで支えられたと等価に考えることができるからである。地盤は上下に対しても水平に対しても抵抗するから、地盤の性状を等価的に表わすバネ群を示すことができる。地盤に支持された円柱基礎をここでは図-1に示すように水平 x 、 y の2成分と鉛直 z の1成分にバネ支持されたロッキング振動モデルで扱うことにする。

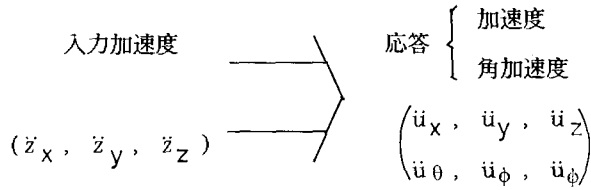
実際の構造物として、たとえばコンクリート製フーチング基礎を想定して説明することにする。バネは基礎底面および根入れ側面に連続的に分布しているとみなすことができるから、単位面積あたりのバネを考えると都合がよい。

いま、鉛直および水平の方向の地盤係数を k_v および k_h 入力波の三成分 応答波の三成分
とすると k_v は地盤の種類によって $1 \sim 200$ [kg/cm^3] 図-1 円柱剛基礎の三次元解析モデル
の範囲にあることが知られている。そして一般に水平方向の地盤係数 k_h は鉛直方向の地盤係数 k_v の約 $1/3$ とされている。

さて、これらのことを考慮して図-1のような基礎-地盤モデルを、三成分地震波の同時入力による剛体の多自由度系応答解析理論を適用することにする。理論はすでに文献1)、2)に示されているが、簡単に説明すると直交座標の各軸方向3成分(x , y , z)および各軸回りの3成分(θ , ϕ , ψ)を考慮した6自由度剛体モデルとして扱っている。図に示すように3成分(水平2、鉛直1)の地震波が同時入力される



と、剛体は6成分の応答が生じることになるのである。加速度量で表すとすれば、



のようになる。また応答の6成分の運動が互いに連成し合うバネ系になっており、減衰力としては6成分各独立な非比例減衰を考慮して展開されている。

さて、設計震度は従来1自由度系構造物に対する入力加速度 z と応答加速度 u をそれぞれ重力の加速度 g で除したもので、それぞれ k_1 、 k_2 で表すと地盤はバネ的な特性を持っているから、基礎は地盤と同じ動きをすることはなく、加速度は β_0 倍され $k_2 = \beta_0 k_1$ の関係にある。この加速度応答倍率は基礎と地盤の固有周期により変化するが、共振状態ほど大きくなる。そこで構造物の設計にこの β_0 を平滑化して求めた係数を用いる修正震度法も採用されている。この設計震度の考え方を三次元的に6自由度の成分を考慮して適用してみることにする。

いま、ここでは便宜上構造物を円柱剛基礎（質量 m 、半径 R 、高さ H ）とする。一般には6自由度系剛体モデルとして扱うわけであるが、この円柱剛基礎の場合特に x 、 y 、 z 三方向並進運動と x 、 y 軸回りの回転運動すなわち y 、 x 方向への転倒を考慮したロッキング振動に対する検討が主体となっている。したがって、各応答成分のなかで z 軸回りの ϕ 成分については考慮しないかまたは考慮しても他の成分の応答量にくらべて極微小量で扱うことになる。 x 、 y 、 z 方向の地震入力加速度 $\ddot{z}_x$ 、 $\ddot{z}_y$ および $\ddot{z}_z$ により基礎底面端に関する転倒モーメント M_1 が作用すると考えれば、

$$M_1 = \sqrt{(m \ddot{z}_x)^2 + (m \ddot{z}_y)^2} \frac{H}{2} + m \ddot{z}_z R = \frac{mH}{2} (\sqrt{\ddot{z}_x^2 + \ddot{z}_y^2} + r \ddot{z}_z) \quad (1)$$

ただし、 $r = D/H$ 、 $D (= 2R)$ は直径で、

$$K_1 = (\sqrt{\ddot{z}_x^2 + \ddot{z}_y^2} + r \ddot{z}_z) / \ddot{g} \quad (2)$$

である。さらに、6成分すべての応答加速度 $\ddot{u}_x$ 、 $\ddot{u}_y$ 、 $\ddot{u}_z$ 、 $\ddot{u}_\theta$ 、 $\ddot{u}_\phi$ および $\ddot{u}_\phi$ による転倒モーメント M_2 は、

$$\begin{aligned} M_2 &= \sqrt{\left(\frac{mH}{2} \ddot{u}_x + I_y \ddot{u}_\phi\right)^2 + \left(\frac{mH}{2} \ddot{u}_y + I_x \ddot{u}_\theta\right)^2} + m \ddot{u}_z R \\ &= \frac{mH}{2} \{ \sqrt{(\ddot{u}_x + \alpha_\phi \ddot{u}_\phi)^2 + (\ddot{u}_y + \alpha_\theta \ddot{u}_\theta)^2} + r \ddot{u}_z \} / \ddot{g} \end{aligned} \quad (3)$$

で表される。ここに $\alpha_\phi = 2 I_y / mH$ 、 $\alpha_\theta = 2 I_x / mH$ で、

$$K_2 = \{ \sqrt{(\ddot{u}_x + \alpha_\phi \ddot{u}_\phi)^2 + (\ddot{u}_y + \alpha_\theta \ddot{u}_\theta)^2} + r \ddot{u}_z \} / \ddot{g} \quad (4)$$

とするが、ここで ϕ 成分については転倒モーメントに寄与しないとして含んでいない。

したがって、 K_1 および K_2 が三成分同時入力による震度および三次元6自由度応答の震度と言うことができる。このときの加速度応答倍率 β は、

$$\beta = \frac{\sqrt{(\ddot{u}_x + \alpha_\phi \ddot{u}_\phi)^2 + (\ddot{u}_y + \alpha_\theta \ddot{u}_\theta)^2} + r \ddot{u}_z}{\sqrt{\ddot{z}_x^2 + \ddot{z}_y^2} + r \ddot{z}_z} \quad (5)$$

で表すことができる。

III. 円柱基礎の振動解析

図-1に示した円柱剛基礎の解析モデルを用いて次の条件のもとに数値計算を行う。

〔条件〕

(1) コンクリート製基礎を考慮して単位体積重量を $w = 2.35 \times 10^{-3} (\text{kg}/\text{cm}^3)$ とする。

(2) 三成分同時入力での2通りの場合について解析する。

(イ) 各応答成分が独立なバネ特性を有する各1自由度非連成系

(ロ) 各応答成分が連成するバネ特性を有する6自由度連成系

(3) 円柱剛基礎の直径Dと高さHの比 r を0.1～0.5の範囲で変化させる。

(4) 鉛直方向の地盤反力係数 k_v を軟弱地盤から岩盤まで想定して1～500 (kg/cm^3)の範囲で変化させる。

(5) 地盤反力係数は x, y, z 方向で非対称性を持たせて、 $k_{hy} = 1.1 k_{hx} = \frac{1.1}{3} k_v$ を用いる。

以上の条件のもとで、円柱剛基礎の構造特性および振動特性を (a) 構造諸元、(b) 固有値、(c) パワー増幅スペクトル、の順に示すことにする。

(a) 構造諸元

(i) 質量 m ：基礎の体積を V とすれば、 $V = \pi R H$ だから、

$$m = w V / g = \pi w R^2 H / g$$

(ii) 慣性モーメント I_i ($i = x, y, z$) :

$$I_x = I_y = m \frac{3 R^2 + H^2}{12}, \quad I_z = \frac{m R^2}{2}$$

(iii) 復元係数マトリックス k_{ij} (i or $j = x, y, z, \theta, \phi, \psi$) :

$$i) k_{xx} = \frac{\pi}{3} R^2 k_v, \quad k_{yy} = \frac{1.1\pi}{3} R^2 k_v, \quad k_{zz} = \pi R^2 k_v, \quad k_{\theta\theta} = \frac{\pi}{4} R^2 (R^2 + \frac{1.1}{3} H^2) k_v$$

$$k_{\phi\phi} = \frac{\pi}{4} R^2 (R^2 + \frac{1}{3} H^2) k_v, \quad k_{\psi\psi} = \frac{\pi}{6} R^2 H k_v$$

なる対角要素以外はすべて0である非連成系

$$ii) k_{x\phi} = \frac{\pi}{6} R^2 H k_v, \quad k_{y\theta} = \frac{1.1\pi}{6} R^2 H k_v$$

他に $k_{xy}, k_{x\theta}, k_{x\phi}, k_{y\phi}, k_{y\psi}$ を加えた対称連成系

(iv) 減衰係数 c_i ($= 2 \zeta_i \sqrt{m_i \cdot k_{ij}}$) : 減衰力は各応答成分のみに働くものとし、減衰比 ζ を用いて x, y が0.005, θ, ϕ が0.03, z, ψ が0.05を仮定した。

(b) 固有値

固有値解析は前記したように、 r と k_v を $0.1 \leq r \leq 0.5, 2 \leq k_v \leq 200$ (kg/cm^3)の範囲で変化させ連成および非連成のバネ特性において行った。たとえば表-1は連成バネ特性で $k_v = 20 \text{ kg}/\text{cm}^3$ で、 r が0.1～0.5と変わった場合であるが x 軸回りの回転成分 θ 、すなわち y 方向に転倒する成分、が他の成分に比べて最も長周期になっている。それは転倒などの回転成分が並進運動の成分より長周期の振動系であることを示している。次に転倒成分 θ の周期が円柱の直径と高さの比 r によって変化する様子を図-2に示した。これによると r が小さいほど細長い基礎になり、周期が長くなる傾向にある。そして地盤係数が小さければ小さいほど極端に長周期になっている。点線で示した部分より左側では勾配が急になっており、急激に長周期になってしまう。

表-1 固有値

		$(k_v=20\text{ kg/cm})$				
γ	γ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
x	T	0.118	0.119	0.120	0.120	0.121
	h	0.020	0.020	0.020	0.020	0.021
y	T	0.114	0.114	0.115	0.115	0.116
	h	0.020	0.020	0.020	0.021	0.021
z	T	0.138	0.138	0.138	0.138	0.138
	h	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
θ	T	3.964	2.693	1.466	1.030	0.807
	h	0.276	0.142	0.086	0.062	0.049
φ	T	1.931	1.203	0.883	0.706	0.594
	h	0.204	0.107	0.073	0.056	0.045
ψ	T	0.239	0.239	0.239	0.239	0.239
	h	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050

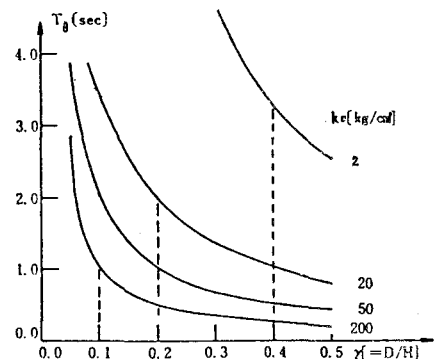


図-2 x 軸回りの転倒成分の固有周期

(c) パワー増幅スペクトル

入力3成分，応答6成分という多自由度の振動系を1自由度の運動として表現するために，運動エネルギーを求めてその倍率スペクトルの平方根でパワー増幅スペクトルを定義した¹⁾。

三成分入力波を正弦波とし，振幅を $(\ddot{z}_x, \ddot{z}_y, \ddot{z}_z)$
 $= (100, 100, 50)$ galとして入力波の周期を変化させた場合についてパワー応答倍率と固有周期との関係を表したパワー増幅スペクトルを求めたのが図-3である。連成バネ特性で， $\gamma = 0.4$ ， $k_v = 20 \text{ kg/cm}^3$ の場合であるが，周期0.706秒(表-1)すなわちy軸回りの転倒に関する成分 ϕ についてその倍率が最も高く約15倍の値をしている。つまりこの場合並進運動より回転運動のパワー増幅が高いことを示すもので，基礎の転倒に関する問題を扱う場合は耐震性を論ずる上で重要である。

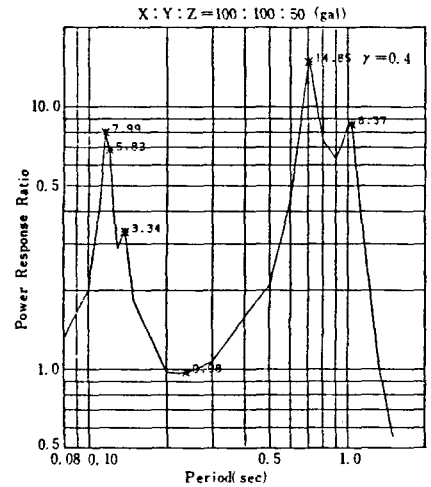


図-3 パワー増幅スペクトル

IV. 従来の震度と多自由度系震度との比較

円柱基礎において各条件を変化させることによって構造特性が明らかになるわけであるが，ここでは三成分の地震波が単独で入力され各成分独自の応答を考慮した従来の震度と三成分が同時入力され各成分が連成する場合の多自由度系の震度を次のような条件において求めてみた。(1)三成分正弦入力波(水平振幅100gal，鉛直振幅50gal)，(2)円柱剛基礎の形状 $\gamma = 0.1 \sim 0.5$ 。表-2は従来の入力および応答の震度 k_1 ， k_2 と多自由度系を考慮する場合の入力および応答の震度 K_1 ， K_2 および加速度応答倍率 β_0 ， β を示したものである。

表-2 設計震度および応答倍率

(Pr, Py, Pz=100, 100, 50gal)						
γ	k_1	k_2	K_1	K_2	β_0	β
0.1	0.105	0.273	0.153	0.392	2.604	2.608
0.2	0.105	0.281	0.161	0.478	2.678	2.909
0.3	0.105	0.292	0.164	0.564	2.783	3.439
0.4	0.105	0.305	0.169	0.675	2.909	3.994
0.5	0.105	0.324	0.174	0.804	3.087	4.621

表-2を通覧してわかることは多自由度系モデルによる震度がいずれも1自由度系での震度より大きな値を示している。入力に関する震度はほぼ50%増，応答に関する震度は $\gamma = 0.1$ で約50%， $\gamma = 0.5$ で約150%増になっている。また，応答倍率でも $\gamma = 0.5$ で約50%増になっている。

V. あとがき

三成分地震波入力による円柱剛基礎モデルの周期特性およびパワー増幅スペクトルによる振幅倍率特性について検討し，総合的に円柱基礎の三次元構造特性を調べた。

また，三次元多自由度系の設計震度を，従来の震度法の考え方に合わせて定義し，多自由度系の震度および加速度応答倍率スペクトルから求めた β 値を提出した。

その結果，円柱基礎の形状如何によっては多自由度系震度はかなり大きくなり，設計震度として用いる場合は，入力時に割増しを考慮しなければならないという結論を得た。

参考文献

- 金子孝吉：三成分地震波入力による地盤と構造物の解析に関する研究，専修大学北海道短期大学紀要，第16号，pp1-120，1983。
- 金子孝吉，渡辺 昇：三成分地震波入力による剛体の三次元応答に関する研究，土木学会論文報告集，第331号，pp1-11，1983。