地盤変形を考慮に入れた鋼管橋脚の地震応答計算図表

九州大学 工学部 正員 小 坪 清 真
九州工業大学 正員 ○高 西 照 彦

1. まえがき

著者等は前著[1]において，比較的硬い地盤で得られた地震記録を下層基盤での入力波として用い，上層軟弱地盤の変形を考えた場合の鋼管橋脚の地震応答を計算した。しかし，この解析法ではいろいろの入力波に対する橋脚の地震応答を推定するのに個々の入力波に対して一一同じような計算をくり返す必要がある。本論はスペクトル解析の手法を用いて，地盤の変形を考慮に入れた場合の橋脚の地震応答を統計的に計算し，比較的容易に橋脚の地震応答の最大値が推定できる計算図表を作製して鋼管橋脚の耐震設計の一資料を提供しようとするものである。

2. 解析の基本的考え方

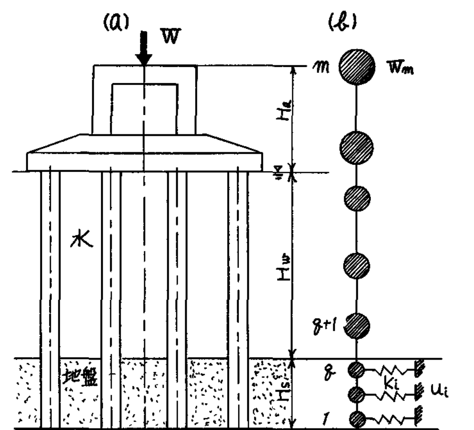
本論は，地震動とそれに対する応答をエルゴード性をもつ定常確率過程とみなし，それらの分散の平方根がそれぞれの最大値に比例すると考える田治見の方法[2]を用い，さらに，地盤変形の影響を考慮に入れた統計的計算法を提案したものである．今，y_{max}, σ_{SR} をそれぞれ地盤の変形を考慮した場合の橋脚天端の地震動による最大応答変位およびその分散とし，地盤の変形を考慮しない場合には肩に添字0をつけて表わせば(以後これに従う)次の式が成り立つ。

$$\lambda_{SR}=\sqrt{\sigma_{SR}/\sigma_{SR}^{0}}=y_{max}/y_{max}^{0} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

ここに，λ_{SR} は地盤の変形を考慮した場合としない場合の橋脚の地震応答変位の分散の比の平方根であって，$(\lambda_{SR}-1)$ は地盤の変形が橋脚の変位にどれほどの影響を及ぼすかを示す係数とみることができる。λ_{SR} が求められれば y_{max}^{0} が既知の場合には(1)式から $y_{max}=\lambda_{SR}\,y_{max}^{0}$ によって y_{max} が推定できる。y_{max}^{0} は例えばG.W. Housnerの平均速度スペクトル[3]，田治見の加速度伝達率[2]等からその値を推定することができる。

3. 鋼管橋脚の振動モデル

解析には前著と全く同一の鋼管橋脚を用いた。すなわち 図-1(a)に示すような鋼管橋脚を図-2(b)に示すような多質点系に置換して計算を行った。



図―1

4. 地盤の変位応答の理論

地盤の運動を考えるのに地盤を多質点系に置換してその運動を求めた。地盤が下層基盤から不規則な地震加速度 $\ddot{\varphi}(t)$ を受けた場合の運動は次の各式から求められる。地盤の i 点の変位 u_i は地盤の第 p 次の振動型を U_{pi} とすれば次式のように表わせる。

$$u_i=\sum_{p=1}^{p} b_p U_{pi} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

b_p は次の微分方程式から求められる。

$$\ddot{b}_p+2h_{gp}n_{gp}\dot{b}_p+n_{gp}^2 b_p=-\delta_p\ddot{\varphi} \quad \cdots\cdots\cdots (3)$$

ここに，$\delta_p=\left(\sum_{i=1}^{g}\frac{w_i}{g}U_{pi}\right)\Big/\left(\sum_{i=1}^{g}\frac{w_i}{g}U_{pi}^2\right) \quad \cdots\cdots (4)$

また，n_{gp}, h_{gp} はそれぞれ地盤の才p次の振動の固有円振動数，減衰常数，s は地盤中の質点の数，W_iは質点 i の重量，g は重力の加速度である。$\ddot{\phi}$が与えられると刻々におけるu_iが計算できる。

5. 橋脚の変位応答の理論

橋脚の才r次の振動型を Y_{ri} とすれば橋脚のi点の変位は次のように書ける。

$y_i = \sum_{r=1}^{R} a_r Y_{ri}$ -------------(5)　　a_rは次の微分方程式から求められる。

$\ddot{a}_r + 2h_{sr}n_{sr}\dot{a}_r + n_{sr}^2 a_r = -\beta_r\ddot{\phi} + \sum_{i=1}^{s} e_{ri}u_i$ ----------------(6)

ここに，$\beta_r = \left(\sum_{i=1}^{m}\frac{W_i}{g}Y_{ri}\right)\Big/\left(\sum_{i=1}^{m}\frac{W_i}{g}Y_{ri}^2\right)$ ---------(7),　　$e_{ri} = (K_iY_{ri})\Big/\left(\sum_{i=1}^{m}\frac{W_i}{g}Y_{ri}^2\right)$ ---------(8)

また，n_{sr}, h_{sr} はそれぞれ橋脚の才r次の振動の固有円振動数，減衰常数，W_iは橋脚の質点iの重量，K_iはi点の地盤のバネ常数で$K_i = kND\Delta l$ である。kは地盤反力係数，Dは鋼管外径，Nは鋼管数，Δlは鋼管の地中における分割長である。$\ddot{\phi}$とu_iが与えられると(5),(6)式から刻々のy_iを計算することができる。　(6)式の右辺の才2項は地盤変形の影響を示す項であって(2),(8)式を用いて変形すれば

$\sum_{i=1}^{s} e_{ri}u_i = \sum_{p=1}^{P}\gamma_{rp}n_{gr}n_{gp}b_p$ ---------(9)　　ここに，$\gamma_{rp} = \left(\sum_{i=1}^{s}K_iY_{ri}U_{pi}\right)\Big/\left(n_{gr}n_{gp}\sum_{i=1}^{m}\frac{W_i}{g}Y_{ri}^2\right)$ ---------(10)

今，橋脚天端m点において振動型を$Y_{rm}=1$にとれば変位y_mは(5)式から　$y_m = \sum_{r=1}^{R}a_r$ -----------(5)′

a_rは(6),(9)式から　$\ddot{a}_r + 2h_{sr}n_{sr}\dot{a}_r + n_{sr}^2a_r = -\beta_r\ddot{\phi} + \sum_{p=1}^{P}\gamma_{rp}n_{gp}n_{gr}b_p$ ----------(6)′　として求められる。

以上より結局，地盤と橋脚の減衰常数h_{gp}, h_{sr}が与えられれば地震応答の計算に必要な諸常数（それぞれ地盤，橋脚に固有な値）を既知として$\beta_r, \gamma_{rp}, \delta_r$ はそれぞれ(7),(10),(4)の各式から計算できる定数であるから，橋脚天端の変位y_mは(5)′,(6)′,(3)の各式から$\ddot{\phi}$に応じて刻々計算することができる。

6. 統計的解析（分散σ_{SR}とλ_{SR}）

(1) σ_{SR}の計算式　　橋脚天端の地震応答変位の分散σ_{SR}は次の各式によって求めることができる。

y_m, a_rのフーリエ変換をそれぞれ$Y_m(i\omega), A_r(i\omega)$とすれば(5)′式をフーリエ変換して

$Y_m(i\omega) = \sum_{r=1}^{R}A_r(i\omega)$ ------------(11)　　したがって，y_mの分散σ_{SR}は次の式で示される。

$\sigma_{SR} = \lim_{T\to\infty}\int_0^{\infty}\frac{2\pi}{T}|Y_m(i\omega)|^2d\omega = \lim_{T\to\infty}\int_0^{\infty}\frac{2\pi}{T}\left|\sum_{r=1}^{R}A_r(i\omega)\right|^2d\omega$ -----------------(12)

今，$\sigma_{SRpq} = \lim_{T\to\infty}\int_0^{\infty}\frac{2\pi}{T}|A_p(i\omega)A_q(-i\omega)|d\omega$　と書けば(12)式のσ_{SR}は　$\sigma_{SR} = \sum_{p=1}^{R}\sum_{q=1}^{R}\sigma_{SRpq}$ ------------(13)

と表わせる。σ_{SRpp}は自己相関にもとずく分散でありσ_{SRpq}は各振動次数間における相互相関にもとずく分散を示すもので$\sigma_{SRqp} = \sigma_{SRpq}$である。さて，$\ddot{\phi}(t)$のフーリエ変換を$F(i\omega)$，$b_p$のフーリエ変換を$B_p(i\omega)$とすれば$A_r(i\omega), B_p(i\omega)$はそれぞれ(6)′,(3)式から両辺のフーリエ変換をとって次のように表わせる。

$A_r(i\omega) = \dfrac{-\beta_rF(i\omega) + \sum_{p=1}^{P}\gamma_{rp}n_{gr}n_{gp}B_p(i\omega)}{n_{sr}^2 - \omega^2 + 2h_{sr}n_{sr}(i\omega)}$ --------(14).　　$B_p(i\omega) = \dfrac{-\delta_pF(i\omega)}{n_{gp}^2 - \omega^2 + 2h_{gp}n_{gp}(i\omega)}$ -----(15)

地盤の変形を考慮しない場合のy_m^0の分散σ_{SR}^0を求めるには(14)式で$\gamma_{rp}=0$とおいて(13)式に代入すればよい。したがって，以上よりλ_{SR}は　$\lambda_{SR} = \sqrt{\sigma_{SR}/\sigma_{SR}^0}$　として計算することができる。

(2) $P=R=2$の場合　　(2),(5)式でそれぞれ$P=2$，$R=2$とした場合，すなわち，地盤と橋脚の振動次数をそれぞれ才2次までとった場合のλ_{SR}の計算式を示せば次の通りである。

$\alpha_{10}=1$，$\alpha_{11} = \frac{\gamma_{11}\delta_1}{\beta_1}$，$\alpha_{12} = \left(\frac{\gamma_{12}\delta_2}{\beta_1}\right)\Big/\left(\frac{n_{g2}}{n_{g1}}\right)$，$\alpha_{20}=1$，$\alpha_{21} = \frac{\gamma_{21}\delta_1}{\beta_2}\left(\frac{n_{g2}}{n_{g1}}\right)$，$\alpha_{22} = \frac{\gamma_{22}\delta_2}{\beta_2}$ -------(16)　とおけば

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_{SR11} &= (\beta_1^2/n_{s1}^4)\sum_{i=0}^{2}\sum_{j=0}^{2}\alpha_{1i}\alpha_{1j}I_{ij}^{11}\quad(I_{ji}^{11}=I_{ij}^{11})\\
\sigma_{SR12} = \sigma_{SR21} &= \{\beta_1\beta_2/(n_{s1}^2n_{s2}^2)\}\sum_{i=0}^{2}\sum_{j=0}^{2}\alpha_{1i}\alpha_{2j}I_{ij}^{12}\\
\sigma_{SR22} &= (\beta_2^2/n_{s2}^4)\sum_{i=0}^{2}\sum_{j=0}^{2}\alpha_{2i}\alpha_{2j}I_{ij}^{22}\quad(I_{ji}^{22}=I_{ij}^{22})
\end{aligned}\right\}\quad(17)$$

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_{SR11}^0 &= (\beta_1^2/n_{s1}^4)I_{00}^{11}\\
\sigma_{SR12}^0 = \sigma_{SR21}^0 &= \{\beta_1\beta_2/(n_{s1}^2n_{s2}^2)\}I_{00}^{12}\\
\sigma_{SR22}^0 &= (\beta_2^2/n_{s2}^4)I_{00}^{22}
\end{aligned}\right\}\quad(18)$$

ここに，I^{11}_{ij}，I^{12}_{ij}，I^{22}_{ij} は次に示すような ω の函数を用いて計算される積分値を表わす．

$$\left.\begin{array}{l}
N_1(\omega)=\left(1-\frac{\omega^2}{n_{g1}^2}\right)^2+4h_{g1}^2\frac{\omega^2}{n_{g1}^2}\ ,\quad N_2(\omega)\ \text{は}\ N_1(\omega)\ \text{において}\ n_{g1},h_{g1}\ \text{の代りに}\ n_{g2},h_{g2}\ \text{とすればよい。}\\
N_3(\omega)=\left(1-\frac{\omega^2}{n_{g1}^2}\right)\left(1-\frac{\omega^2}{n_{g2}^2}\right)+4h_{g1}h_{g2}\frac{\omega^2}{n_{g1}n_{g2}}\ ,\quad N_4(\omega)=\left(1-\frac{\omega^2}{n_{g1}^2}\right)h_{g2}-\left(\frac{n_{g2}^2}{n_{g1}^2}-\frac{\omega^2}{n_{g1}^2}\right)h_{g1}\Big/\left(\frac{n_{g2}}{n_{g1}}\right)\\
S_i(\omega)\ \text{は}\ N_i(\omega)\ \text{において}\ n_{gi},h_{gi}\ \text{の代りにそれぞれ}\ n_{si},h_{si}\ \text{とすればよい。}
\end{array}\right\}\quad(19)$$

$$\left.\begin{array}{ll}
I^{11}_{00}=\int_0^\infty\frac{1}{S_1(\omega)}\Phi(\omega)d\omega & I^{11}_{01}=\int_0^\infty\left(1-\frac{\omega^2}{n_{g1}^2}\right)\frac{1}{N_1(\omega)S_1(\omega)}\Phi(\omega)d\omega\\
I^{11}_{02}=\int_0^\infty\left(1-\frac{\omega^2}{n_{g2}^2}\right)\frac{1}{N_2(\omega)S_1(\omega)}\Phi(\omega)d\omega & I^{11}_{11}=\int_0^\infty\frac{1}{N_1(\omega)S_1(\omega)}\Phi(\omega)d\omega\\
I^{11}_{12}=\int_0^\infty\frac{1}{N_1(\omega)N_2(\omega)S_1(\omega)}N_3(\omega)\Phi(\omega)d\omega & I^{11}_{22}=\int_0^\infty\frac{1}{N_2(\omega)S_1(\omega)}\Phi(\omega)d\omega
\end{array}\right\}\quad(20)$$

$$\left.\begin{array}{ll}
I_p=\int_0^\infty\left(1-\frac{\omega^2}{n_{g1}^2}\right)\frac{1}{N_1(\omega)S_1(\omega)S_2(\omega)}S_3(\omega)\Phi(\omega)d\omega & I_q=\int_0^\infty\left(1-\frac{\omega^2}{n_{g2}^2}\right)\frac{1}{N_2(\omega)S_1(\omega)S_2(\omega)}S_3(\omega)\Phi(\omega)d\omega\\
I_r=\int_0^\infty\frac{1}{N_1(\omega)N_2(\omega)S_1(\omega)S_2(\omega)}N_3(\omega)S_3(\omega)\Phi(\omega)d\omega & I_s=\int_0^\infty\frac{\omega^2}{n_{g1}n_{s2}}\frac{1}{N_1(\omega)S_1(\omega)S_2(\omega)}S_4(\omega)\Phi(\omega)d\omega\\
I_t=\int_0^\infty\frac{\omega^2}{n_{g2}n_{s2}}\frac{1}{N_2(\omega)S_1(\omega)S_2(\omega)}S_4(\omega)\Phi(\omega)d\omega & I_u=\int_0^\infty\frac{\omega^2}{n_{g2}n_{s2}}\frac{1}{N_1(\omega)N_2(\omega)S_1(\omega)S_2(\omega)}N_4(\omega)S_4(\omega)\Phi(\omega)d\omega\\
I^{12}_{00}=\int_0^\infty\frac{1}{S_1(\omega)S_2(\omega)}S_3(\omega)\Phi(\omega)d\omega & I^{12}_{01}=I_p-4h_{g1}I_s\\
I^{12}_{02}=I_q-4h_{g2}I_t & I^{12}_{10}=I_p+4h_{g1}I_s\\
I^{12}_{11}=\int_0^\infty\frac{1}{N_1(\omega)S_1(\omega)S_2(\omega)}S_3(\omega)\Phi(\omega)d\omega & I^{12}_{12}=I_r-4I_u\\
I^{12}_{20}=I_q+4h_{g2}I_t & I^{12}_{21}=I_r+4I_u\\
I^{12}_{22}=\int_0^\infty\frac{1}{N_2(\omega)S_1(\omega)S_2(\omega)}S_3(\omega)\Phi(\omega)d\omega &
\end{array}\right\}\quad(21)$$

I^{22}_{ij} は I^{11}_{ij} において $S_1(\omega)$ の代りに $S_2(\omega)$ とすればよい。 ------------------------(22)

また，$\Phi(\omega)$ は地震動 $\ddot{\varphi}(t)$ のパワースペクトルを示し　$\Phi(\omega)=\lim_{T\to\infty}\frac{2\pi}{T}|F(i\omega)|^2$ -----------(23)　である。

次に，地盤の変形を考慮する場合としない場合のそれぞれの分散の比をとって λ^2_{SRpq} と書き

$$\left.\begin{array}{l}
R^{11}_{ij}=I^{11}_{ij}/I^{11}_{00}\\
R^{12}_{ij}=I^{12}_{ij}/I^{12}_{00}\\
R^{22}_{ij}=I^{22}_{ij}/I^{22}_{00}
\end{array}\right\}\ (24)\quad \text{とおけば}\quad
\left.\begin{array}{l}
\lambda^2_{SR11}=\sigma_{SR11}/\sigma^0_{SR11}=\sum_{i=0}^{2}\sum_{j=0}^{2}\alpha_{1i}\alpha_{1j}R^{11}_{ij}\\
\lambda^2_{SR12}=\sigma_{SR12}/\sigma^0_{SR12}=\sum_{i=0}^{2}\sum_{j=0}^{2}\alpha_{1i}\alpha_{2j}R^{12}_{ij}\\
\lambda^2_{SR22}=\sigma_{SR22}/\sigma^0_{SR22}=\sum_{i=0}^{2}\sum_{j=0}^{2}\alpha_{2i}\alpha_{2j}R^{22}_{ij}
\end{array}\right\}\ (25)$$

と表わせる。

したがって，λ_{SR} は次式のように表わすことができる。

$$\lambda^2_{SR}=\frac{\sigma_{SR}}{\sigma^0_{SR}}=\frac{\sum_{p=1}^{2}\sum_{q=1}^{2}\sigma_{SRpq}}{\sum_{p=1}^{2}\sum_{q=1}^{2}\sigma^0_{SRpq}}=\frac{\lambda^2_{SR11}+2\eta\,{}^1R_0^2\lambda^2_{SR12}+\eta^2\,{}^2R_0^2\lambda_{SR22}}{1+2\eta\,{}^1R_0^2+\eta^2\,{}^2R_0^2}\ \text{----------}(26)$$

ここに，$\eta=\left(\frac{\beta_2}{\beta_1}\right)\Big/\left(\frac{M_{S2}}{M_{S1}}\right)^2$ -------(27)，　${}^1R_0^2=I^{12}_{00}/I^{11}_{00}$ ，　${}^2R_0^2=I^{22}_{00}/I^{11}_{00}$ ----------(28)

以上の結果から R^{11}_{ij}，R^{12}_{ij}，R^{22}_{ij} の積分値をいろいろな n_g, n_s, h_g, h_s 等についてあらかじめ計算しそれを図表化しておけば α_{ij}，η 等は既知の定数であるからいろいろな n_g, n_s, h_g, h_s 等に対する λ_{SR} はその図表を利用して(26)式から容易に求めることができる。

7. R^{11}_{ij} の計算

R^{11}_{ij} 等の積分を計算するには地動のパワースペクトル $\Phi(\omega)$ の式の形が分っていなければならない。本節の計算には次に示す式[2]を用いた。

$$\Phi(\omega)=\frac{1+4h_0^2\frac{\omega^2}{n_0^2}}{\left(1-\frac{\omega^2}{n_0^2}\right)^2+4h_0^2\frac{\omega^2}{n_0^2}}B\qquad\left(\begin{array}{l}n_0\ \text{は地動スペクトルの卓越円振動数，B は一定値}\\ h_0\ \text{はスペクトルの山の形に関係する量}\end{array}\right)\ \text{----------}(29)$$

計算は地盤，橋脚に対してそれぞれ才1次，才2次振動までをとった場合について行った。R^{11}_{ij} の計算は一例として $h_0=0.3$，$h_{g1}=h_{g2}=0.2$ に対して h_{s1}，h_{s2} を 0.05，0.10 とした場合に n_{s1}/n_{g1} をいろいろに変えて n_0/n_{g1} が 0.1，0.5，1.0，10.0，の4通りの場合について行った。なほ積分 R^{11}_{ij} の値は

電子計算機を利用して留数計算によって求めた。R''_{ij} の値をいろいろな場合について示せば表−1のようになる。

8. 計算例及び考察

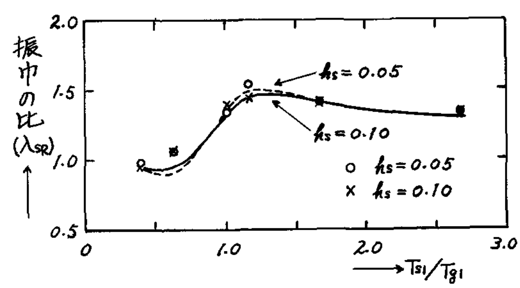
著者等は前著において図−1に示す鋼管橋脚の地震応答を計算し地盤の変形を考慮した場合としない場合の橋脚天端の最大変位の比を地盤の性質をいろいろに変えた場合について求めた。本節では本論に従って統計的計算によって得た結果と前著の結果とを比較検討する目的で地盤，橋脚の諸元等をすべて前著の場合と同一にとって λ_{SR} を求めた。ただし，前著においては地盤と橋脚はそれぞれ才3次才2次振動までをとって応答計算を行ったが本節では地盤は才2次まで橋脚は才1次振動のみをとった場合について計算を行った。入力地震波 $\ddot{\varphi}(t)$ としてはエルセントロ地震（May.18, 1940）を用い，h_0 の値は0.3を採用した。計算結果の一例を図−2に示す。図中の実線は統計的に計算した結果を示し前著の結果は○印と×印でプロットした。図から電算による応答計算値と統計的計算値とは比較的よく一致していることが分る。しかし，現在入力波としてエルセントロ地震波についての計算を行っているにすぎないので今後いろいろの地震波について上の結果を確かめてみることが必要である。また，地盤，橋脚共に才1次振動をとって計算した場合より本節のように地盤を才2次振動までとって計算した場合の方が電算による応答計算値により近くなる。

	$n_0/n_{g1}=0.5$, $n_{g2}/n_{g1}=2.36$									
	$h_0=0.3$, $h_{g1}=h_{g2}=0.2$, $h_{s1}=h_{s2}=0.05$					$h_{s1}=h_{s2}=0.10$				
n_{s1}/n_{g1}	R''_{01}	R''_{02}	R''_{11}	R''_{12}	R''_{22}	R''_{01}	R''_{02}	R''_{11}	R''_{12}	R''_{22}
0.1	1.0088	0.9896	1.0195	1.0111	0.0323	1.0090	0.9894	1.0204	1.0115	0.0324
0.5	1.2335	0.8109	1.6379	1.3098	0.0349	1.2228	0.8185	1.6172	1.2966	0.0348
0.8	1.3997	0.6877	3.2754	1.6706	0.0383	1.3284	0.7268	2.7648	1.5384	0.0373
0.9	1.1800	0.6574	3.9892	1.5325	0.0396	1.1951	0.7077	3.1517	1.4491	0.0382
1.0	0.7302	0.6297	4.0403	1.0828	0.0410	0.9631	0.6911	3.1974	1.2195	0.0390
1.1	0.3730	0.6026	3.3345	0.6370	0.0426	0.7661	0.6753	2.8931	0.9838	0.0400
1.5	0.4115	0.4536	1.6254	0.4758	0.0515	0.7008	0.5904	1.8777	0.7993	0.0450
2.0	0.6323	-0.0429	1.4112	0.7123	0.0717	0.8193	0.3466	1.6577	0.9134	0.0546
3.0	0.8034	0.0394	1.4482	0.9383	0.0463	0.9227	0.3429	1.6300	1.0413	0.0445

	$n_0/n_{g1}=1.0$, $n_{g2}/n_{g1}=2.36$									
	$h_0=0.3$, $h_{g1}=h_{g2}=0.2$, $h_{s1}=h_{s2}=0.05$					$h_{s1}=h_{s2}=0.10$				
n_{s1}/n_{g1}	R''_{01}	R''_{02}	R''_{11}	R''_{12}	R''_{22}	R''_{01}	R''_{02}	R''_{11}	R''_{12}	R''_{22}
0.1	1.0085	0.9985	1.0195	1.0108	0.0323	1.0085	0.9985	1.0203	1.0109	0.0323
0.5	1.2361	0.9634	1.7520	1.3258	0.0353	1.2247	0.9620	1.8289	1.3234	0.0354
0.8	1.3930	0.9107	4.2738	1.7813	0.0404	1.2739	0.9101	4.1603	1.6474	0.0405
0.9	1.0036	0.8887	5.4609	1.5272	0.0427	0.9317	0.8898	5.0103	1.4011	0.0426
1.0	0.2282	0.8638	5.5803	0.7555	0.0454	0.3784	0.8677	5.1081	0.8518	0.0450
1.1	-0.4008	0.8352	4.4384	-0.0180	0.0485	-0.0848	0.8434	4.4350	0.3022	0.0475
1.5	-0.4299	0.6422	1.6729	-0.3727	0.0663	-0.2593	0.6954	2.3217	-0.1222	0.0607
2.0	-0.1066	-0.1280	1.4687	-0.0007	0.1065	-0.0039	0.2263	2.0541	0.1478	0.0841
3.0	0.1388	-0.4680	1.7805	0.3835	0.0639	0.2125	-0.0351	2.2534	0.4523	0.0645

	$n_0/n_{g1}=10.0$, $n_{g2}/n_{g1}=2.36$									
	$h_0=0.3$, $h_{g1}=h_{g2}=0.2$, $h_{s1}=h_{s2}=0.05$					$h_{s1}=h_{s2}=0.10$				
n_{s1}/n_{g1}	R''_{01}	R''_{02}	R''_{11}	R''_{12}	R''_{22}	R''_{01}	R''_{02}	R''_{11}	R''_{12}	R''_{22}
0.1	1.0084	1.0015	1.0188	1.0106	0.0323	1.0083	1.0015	1.0189	1.0105	0.0323
0.5	1.2260	1.0371	1.6732	1.3065	0.0351	1.2072	1.0362	1.6803	1.2885	0.0352
0.8	1.3679	1.0972	4.0113	1.7257	0.0404	1.2368	1.0927	3.7132	1.5585	0.0406
0.9	0.9766	1.1241	5.1318	1.4621	0.0431	0.8912	1.1172	4.4715	1.2986	0.0433
1.0	0.1960	1.1546	5.1958	0.6789	0.0463	0.3266	1.1442	4.4930	0.7297	0.0466
1.1	-0.4474	1.1884	3.9939	-0.1156	0.0502	-0.1600	1.1733	3.7364	0.1477	0.0505
1.5	-0.5472	1.3411	0.8885	-0.5745	0.0769	-0.4367	1.2830	1.1845	-0.479	0.0763
2.0	-0.2866	1.1754	0.2969	-0.2462	0.1483	-0.2551	1.0416	0.4772	-0.1912	0.1332
3.0	-0.1172	-0.7550	0.1036	0.1215	0.0628	-0.1099	-0.5372	0.1902	0.1105	0.0697

表−1　R''_{ij} の値　　注：$R''_{00}=1$，$R''_{ji}=R''_{ij}$



図−2

(1)：小坪，高西「鋼管橋脚の耐震設計に関する研究」その1，その2．九大工学集報 vol.39，NO.3，4．昭41.12．

(2)：田治見宏「耐震理論に関する基礎的研究」東大生産技術研究所報告 vol.8，NO.4．1959.3．

(3)：G.W.Housner「Behavior of Structures during Earthquake」Proc. ASCE., vol.85, EM4. Oct. 1959.