I-163　ケーソンの非線型復元力の算定について

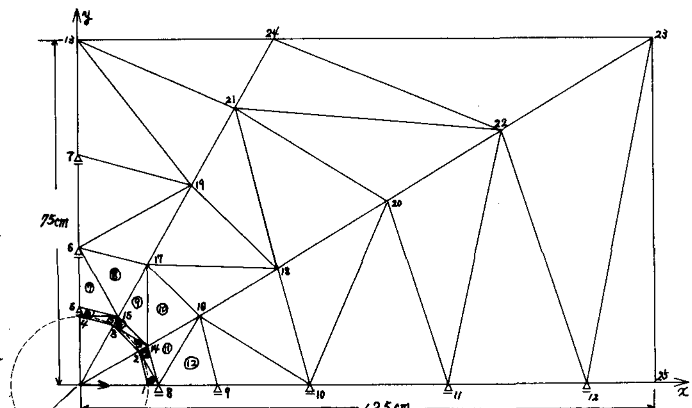
九州大学　工学部　　正員　小坪清真
九州大学　工学部　学生員○石井和夫

I　まえがき

地震時において、構造物周辺地盤の歪は、1％に達することもあるといわれている。このような歪に対し土は非線型的挙動を示し、構造物は明らかに非線型的応答を示すことになる。従来、基礎構造物の耐震設計には、線型な地盤反力係数を用い等価な減衰を仮定する方法が用いられてきたが、最近では、履歴復元力を考慮して、地盤反力係数・減衰定数を求めようとする研究がなされてきている。一般に、地盤のテストピースは比較的容易に得られ、三軸試験やセン断試験により、その応力－歪特性が明らかにされる。本論文では、このようにして得られた応力－歪曲線からケーソンの復元力を求めようとするものであり、ケーソンを2次元的に理想化し、有限要素法を用いて、各要素には、テストピースより得られた応力－歪特性を与え、復元力の2次元的なヒステリシスループを求め、しかるのち、それをケーソンの深さ方向に積分してケーソンの復元力特性を得ようとするものである。この復元力特性が求まれば、これを用いてケーソンの非線型応答計算を行なうことが可能となる。

II　解析方法

図－1に示すような有限要素分割を考える。寸法は図のとうりとし、境界条件として、節点5～12にx方向自由なローラーを取り付け節点13，23~25は、完全固定とした。　土のテストピースの実験結果のかわりに図－2に示すようなσ－εの関係を用い、これを各要素の応力－歪曲線とした。この曲線は応力を歪の関数として最良多項式で近似した。　解析手順は、ケーソン（2次元）に微小な変位を与え、各要素の応力と歪を計算し、次に、その歪に対する応力及びヤング率を求め、増分法により、2次元歪問題を逐次解いていった。このようにして得られた履歴曲線から、ケーソンのロッキングによる変位に対応した反力を読み取り、ケーソン深さ方向に加え合わせ復元力を得、ロッキングによる復元モーメントも、反力にロッキングセンターよりの距離を乗じて得られた。



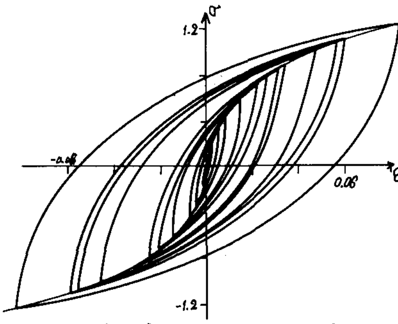
図－1 要素分割　　○内…要素番号

III　有限要素法の精度

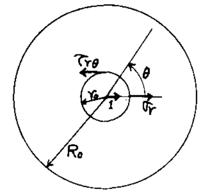
精度をチェックするため、2次元弾性論解との比較を行なった。2次元弾性論は、応力，寸法を図－3の様に定めると次の様に表わせる。

$$\left.\begin{aligned}\left(\sigma_r \cdot r_0 / G\right)_{r=r_0} &= -\frac{6(\xi_0^2+1)}{4(\xi_0^2+1)\log_e \xi_0 + (\xi_0^2-1)}\cos\theta \\ \left(\tau_{r\theta} \cdot r_0 / G\right)_{r=r_0} &= \frac{6\,\xi_0^2}{4(\xi_0^2+1)\log_e \xi_0 + (\xi_0^2-1)}\sin\theta \\ \sigma_x &= \sigma_r\cos\theta + \tau_{r\theta}\cdot\sin\theta\end{aligned}\right\}\ (a)$$

式中記号は、　G；土の剛性率　$\xi_0 = R_0 / r_0$



図－2　応力と歪の関係



図－3 円形領域地盤内のケーソン

図－1に示した要素分割で要素1～6の弾性応力σ_x（図-1 x方向）の合力と節点反力和、及び、分割方法・要素数の異なるものについての合力と節点反力和、2次元弾性論解を表－1に示してある。

表－１から、節点反力和を取るよりも、要素内応力和を取るほうが良いことがわかる。また、要素数を増しても、演算時間に較べて精度がそれほどあがらないこともわかる。したがって、図－１に示した要素分割により計算を進めていった。

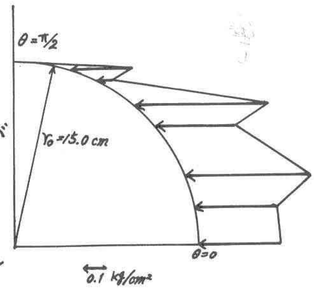
		反力 (kg)	
2次元弾性論厳密解	$\gamma_0=6.7$ ($R_0=100cm$)	1.280	
	$\gamma_0=5.0$ ($R_0=75cm$)	1.520	
有限要素法(FEM) 弾性解		要素内応力和	節点反力和
	要素 32 節点 25(図1)	1.621	2.758
	要素 71 節点 38	1.633	2.589
	要素 26 節点 21	1.480	2.815
	要素 77 節点 52	1.528	2.615
	要素 47 節点 36	1.703	2.680

$G=366\ kg/cm^2,\ \nu=0.4$

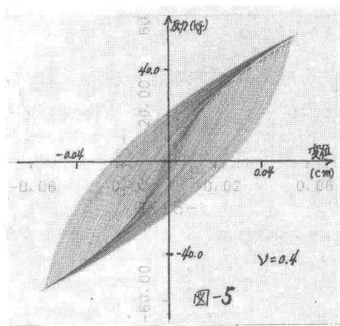
表－1 ケーソン変位 0.001cm による復元力

Ⅳ 復元力解析結果

図－４に弾塑性解析の σ_x の分布を示す。図－５は、単位深さのケーソンに働らく復元力を縦軸に、ケーソンの変位を横軸にして示した。図－６(a)に示すようにケーソンの１次振動のロッキングセンター回りに、角度 θ だけ回転させて、その側面反力による復元モーメントを図－５の結果を用いて計算し、側面反力分布を図－６(b)に、復元モーメントと回転角の関係を図－６(c)に示した。



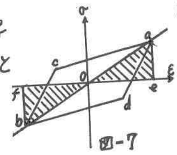
図－4 ケーソン表面の σ_x の分布
(変位 0.015 cm)



Ⅴ 等価線型化

図－６(c)の復元モーメントの履歴曲線より、次のようにして等価な減衰定数を求めることができる。

図－７の履歴ループにおいて ab の勾配が等価弾性係数 E_{eq} であり、履歴減衰 h_{eqh} は次式となる。



$$h_{eqh}=\frac{1}{4\pi}\frac{\Delta W}{W} \qquad (b)$$

ΔW；履歴曲線のループの全面積

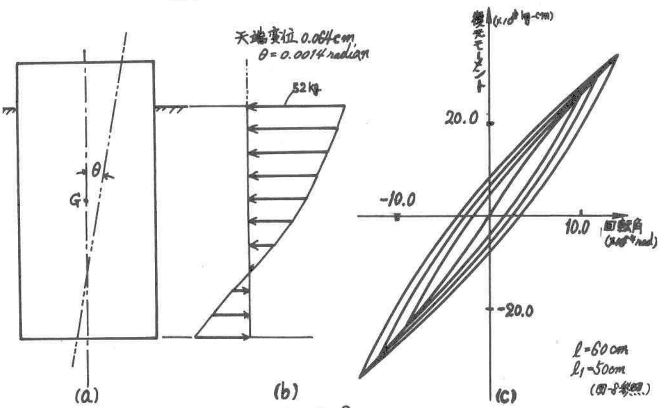
W；Δoae の面積

(b)式の結果を表－２に示す。図６－(c)より求まる反力係数と、減衰定数を用いて、ケーソンの線型応答計算が容易に行ないうる。

このように理想化したことの実際との相違がどの程度であるかということを、図－５をそのまま用いた非線型応答計算によってチェックしていく。

なお、非線型応答計算には、ルンゲ・クッタ・ギル法を用いることとした。

その結果は、目下計算中であり、当日発表する予定である。



図－6

$\ell=60cm,\ \ell_1=50cm$（図－8参照）
（地下逸散減衰 $h=0.047$）

θ_{max} (radian) ＼ h	h_{eqh}	h_{eqh}＋(地下逸散減衰)
0.0004	0.036	0.083
0.0006	0.076	0.123
0.0008	0.099	0.146
0.0010	0.107	0.154
0.0012	0.119	0.166
0.0014	0.126	0.173

表－2 等価減衰と地下逸散減衰

Ⅴ 天端加振によるケーソン応答 (Modal analysis)

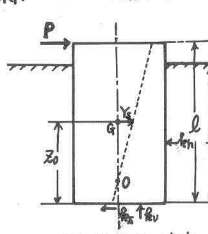
$$\ddot{q}_s+2h_s n_s \dot{q}_s+n_s^2 q_s=P_s \qquad (P_s=Q_s/M_s)$$

Q_s；換算外力　M_s；換算質量

q_s；S次の基準座標

上式を解き２次以上を無視すると、天端応答 y_{top} は、

$$|y_{top}|=\frac{(\ell-z_0+Y_1)}{n_1^2 M_1}\cdot\frac{1}{\sqrt{(1-(\omega/n_1)^2)^2+4h_1^2(\omega/n_1)^2}} \qquad (c)$$



図－8 ケーソン寸法

参考文献

土と構造物の動的相互作用（土負学会）

有限要素法による構造解析プログラム（日本鋼構造学会）