I-151　　地震応答解析における地盤のばね効果

法政大学工学部　正員　大地羊三
川田工業研究室　正員　○梅沢宣雄

1. まえがき

地震による動的応答解析を行う場合，地盤－基礎－上部工を一体構造としてモデル化することは，一般的には困難であるので，地盤－基礎系を近似的にばね評価として表わす方法がよく用いられる。しかし，このばねの評価にあたっては，地盤の力学的性質ばかりでなく，地盤の構成や広がりに大きく左右されると考えられる。そこで構造物のまわりの地盤をできるだけ実際に近い形にモデル化し，構造物と地盤を一つの系と考え，有限要素法を用い地盤－基礎系のばねを評価し，実際の応答値の特性について調べてみる。特に連成ばねの評価方法について一提案したい。

2. 地盤－基礎系のばねの評価方法

地盤も構造物も本来三次元の広がりをもつが，二次元の問題として取扱っても，その特性を十分表わすことができると考え，地盤－基礎系を二次元平面問題として解析することにし，有限要素として三角形要素を用いることにする。一方，基礎は今回はケーソン基礎を考え，ケーソン躯体は剛体と仮定する。地盤の項 (s) と地盤と剛体の境界の項 (b) に分けて変位と外力の関係を表わせば，

$$\begin{bmatrix} \mathbb{K}_{bb} & \mathbb{K}_{bs} \\ \mathbb{K}_{sb} & \mathbb{K}_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ x_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbb{P}_b \\ \mathbb{P}_s \end{bmatrix} \qquad (1)$$

となる。ここで x_b, x_s は各々地盤と境界の変位ベクトルを表わし，$\mathbb{P}_b, \mathbb{P}_s$ は各々地盤と境界に作用する外力ベクトルを表わす。ところで，境界に作用する力を剛体内の任意点の力 ($\mathbb{P}_g$) に変換すると

$$\mathbb{P}_g = g \cdot \mathbb{P}_b \qquad (2)$$

で表わすことができる。また，境界の変位と剛体内の任意点の変位 (x_g) の関係式は

$$x_b = g^T x_g \qquad (3)$$

となる。ここで g は境界と剛体内の任意点の変換行列であり，具体的な形は次式で表わせる (Fig-2 参照)

$$g = [g_i, g_j, g_k, \cdots\cdots, g_n]$$

$$g_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_i & -Y_i & 1 & 0 & 0 \\ -Z_i & 0 & X_i & 0 & 1 & 0 \\ Y_i & -X_i & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \begin{cases} X_i = \bar{x} - x_i \\ Y_i = \bar{y} - y_i \\ Z_i = \bar{z} - z_i \end{cases} \qquad (4)$$

式 (2) および (3) を式 (1) に代入すると剛体内の任意点と地盤の関係式が得られ，次のように表わすことができる．

$$\begin{bmatrix} g\mathbb{K}_{bb}g^T & g\mathbb{K}_{bs} \\ \mathbb{K}_{sb}g^T & \mathbb{K}_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_g \\ x_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbb{P}_g \\ \mathbb{P}_s \end{bmatrix} \qquad (5)$$

第二項より x_s を求め第一項に代入すれば

$$\left[g\mathbb{K}_{bb}g^T - g\mathbb{K}_{bs}\mathbb{K}_{ss}^{-1}\mathbb{K}_{sb}g^T \right] x_g = \mathbb{P}_g - g\mathbb{K}_{bs}\mathbb{K}_{ss}^{-1}\mathbb{P}_s \qquad (6)$$

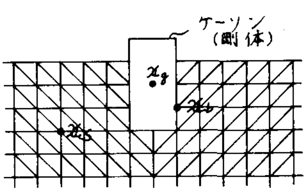


Fig-1. 地盤－基礎系のモデル

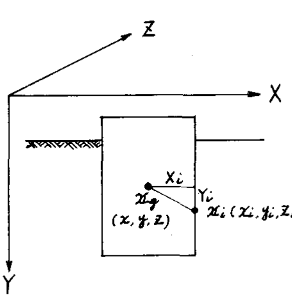


Fig-2. 変換行列

左辺の係数がいわゆるばね定数で，次のように連成ばねとして表わすことができる。

$$\begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & K_{x\theta} \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ K_{\theta x} & 0 & K_{\theta\theta} \end{bmatrix}$$

ここで x, y, θ は各々水平，鉛直，および回転方向を示す。

3. 地盤—基礎系のモデル化

地盤は実際には半無限連続体であるのでできるだけ広い範囲を解析するのが理想的であるが，計算機の容量の関係で地盤の範囲を限定しなければならない。そこで Fig-3 に示すように下面と左右を拘束したモデルを考える。今回は $H = 5m$, $L = 5m$ で $E = 45{,}000\ t/m^2$, $\nu = 0.25$ で計算を行い次のような結果を得る。

i) 拘束面までの距離が同じであれば，分割の数が変ってもばねの値にはあまり変化がない。

ii) 水平方向に対して拘束面までの距離は基礎体の幅の3倍以上，深さ方向に対しては2倍以上とれば，ばねの値はほぼ一定となる。

4. 計算例

Fig-3 の地盤—基礎系のモデルで，幅を35m，深さを12.5m でばねの値を決定した場合と完全固定にした場合について Fig-4 に示した上部工の新潟地震（Max. 156.88 gal）に対する応答値を調べその結果を Fig-5 に示す。応答値の計算にあたっては減衰を2%にし，直接積分法*を用いた。この例からもわかるように，応答値には相当相異が見られ，特に最大応答の出現後の減衰性に著しい差がある。これは連成ばねの影響と考えられる。

* W. Clough "Analysis of Structural Vibrations and Dynamic Response" (1969)

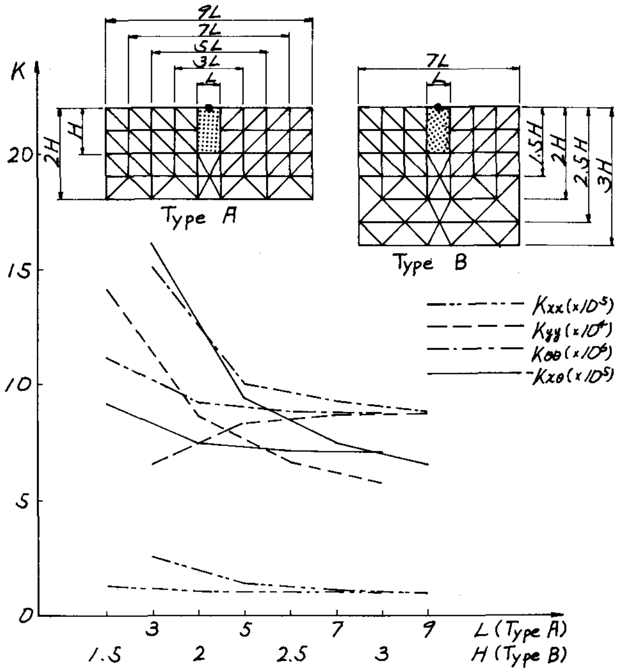
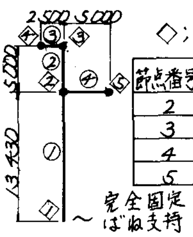


Fig-3　地盤のモデル化と広がり

◇；節点番号　○；部材番号



節点番号	節点重量(t)	部材番号	断面積(m^2)	曲げ剛性($t \cdot m^2$)
2	17.390	1	0.220	2,835,000
3	4.580	2	0.183	2,436,000
4	232.190	3	0.101	1,155,000
5	233.380	4	0.101	1,155,000

Fig-4. 計算例

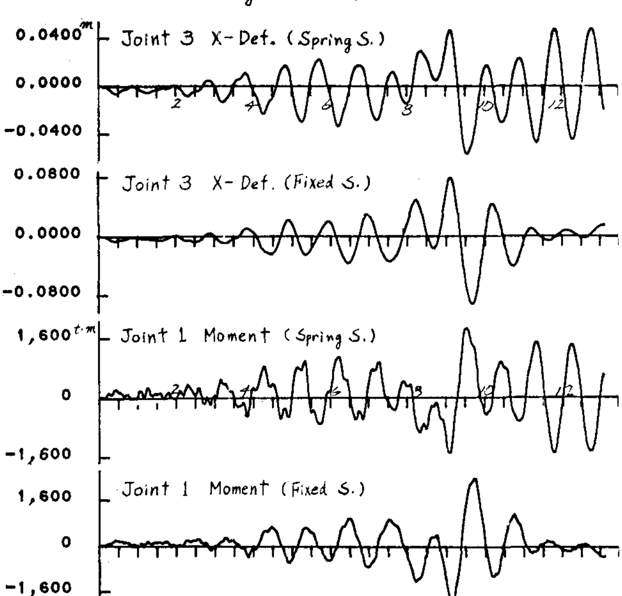


Fig-5. 応答曲線