地震応答解析における構造物基礎のモデル化について
── モデルの動特性の精度に関する検討 ──

京都大学工学部　正員　後藤 尚男
京都大学工学部　正員　○吉原 進
京都大学大学院　学生員　和田 浩

1. はしがき　一昨年度および昨年度の当学術講演会において，地表層中に根入れ部分を持つ構造物基礎系の耐震設計の実用的な計算法の一つとして，地表層を縦横の仮想的な直線で分割してできるブロックの集合体と考え，これに質量が集中しているとする多自由度表示による新しいモデル化の手法を発表した。[1),2)] この手法を用いた若干の数値計算例をもとにして，このモデル化の妥当性についてある程度の結論を得た。そこで今回はこのモデルを実際問題に適用するときに必要となる精度について考察したものである。またこの際後述するように計算法に若干の改良を加えたものである。なおモデル化の手法，地盤の条件その他特別にことわりのないものは従来のものと同様である。

2. 運動方程式　従来は計算式の行列表示により数値計算を行なったが，これによると行列要素の数が地表層の分割数；n，地表層の横方向の広がりを表わす質点列数；mの増加とともに急激に増加し，計算上一つの障害となっていた。しかもその要素は，対角付近以外は0でありこれをそのまま用いることは，計算機の容量，占有時間の上で非常に不利である。そこでこの行列をいくつかの小行列に分割して必要部分のみを取り出し，繰り返し計算を行なうことにした。地盤のみの運動方程式は

$$M_0\ddot{u} + C_0\dot{u} + f_0 u = F_0 \quad \text{-------------- (1)}$$

であり，基礎構造物を剛体とし，これが並進とともに回転運動を行なうとき，この剛体を含めた振動系の運動方程式は

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + (K+f)x = F \quad \text{-------------- (2)}$$

であった。これらの各係数行列は各々の講演概要集に記してある。いまこの系に定常波が入射したとき，この系の運動方程式を次のように変形する。

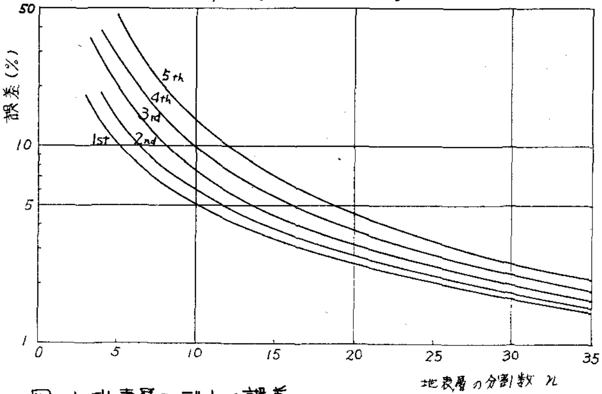
$$\left.\begin{array}{l} M_R\ddot{x}_R + C_R\dot{x}_R + C_{RS}\dot{x}_1 + K_R x_R + K_{RS} x_1 = F_R \\ \left.\begin{array}{l} M_0\ddot{x}_1 + C_{RS}^T\dot{x}_R + C_d\dot{x}_1 + C_c\dot{x}_2 + K_{RS}^T x_R + K_d x_1 + K_c x_2 = F_1 \\ M_0\ddot{x}_2 + C_c\dot{x}_1 + C_d\dot{x}_2 + C_c\dot{x}_3 + K_c x_1 + K_d x_2 + K_c x_3 = F_2 \\ \text{-------------------------} \\ M_0\ddot{x}_{m-1} + C_c\dot{x}_{m-2} + C_d\dot{x}_{n-1} + C_c\dot{x}_m + K_c x_{m-2} + K_d x_{m-1} + K_c x_m = F_{m-1} \\ M_0\ddot{x}_m + C_c\dot{x}_{m-1} + C_d\dot{x}_m + K_c x_{m-1} + K_d x_m = F_m \end{array}\right\} m\text{個} \end{array}\right\} \text{---(3)}$$

ここにx_Rは剛体の変位を，x_j $(j=1,2,\cdots m)$は第j列目の各質点の変位を表わす列ベクトルである。これらの式の係数行列は大きいもので$(n\times n)$であり，式(2)のそれが$(l\times l)$, $l=2+n\cdot m$であることを考えると，計算に要する手数が非常に楽になることがわかる。式(3)において外力項を$F_j=\bar{F}_j e^{i\omega t}$とすれば，各変位項も$x_j=X_j e^{i\omega t}$と表わされるので，式(3)はベクト

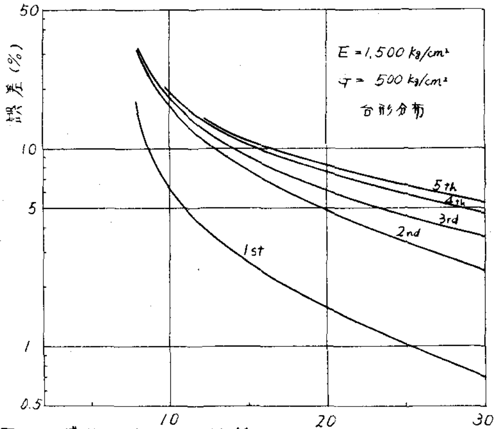
ルX_j (j=R,1,2,⋯m)に関する連立方程式となる。この連立方程式において，m+1番目のものより順次X_j(j=m+1,m,⋯2,1)を消去してゆけば，剛体の変位$X_R=(x,\varphi)^T$を求めることができる。

3. 地表層モデルの精度

図−1は地表層のモデルにおいて，層の固有円振動数と分割数；nの関係を求める一方，これと同一の地盤条件を有する連続半無限弾性体の固有円振動数をも求め，これらの比較により固有円振動数に関する精度を求めたものである。モデルの精度は地盤条件に関係なく，分割数のみの関数となる。一方Idrissら[3]は非定常入力による地盤モデルの応答量（主に加速度）と同一の地盤条件の連続解との任意時点の極大値の比較によりモデルの精度を求めている。その結果は地盤の固有周期が大きくなると精度が悪くなると報告されている。また地盤の固有周期にもよるが層の分割数がそれほど大きくなくても，応答加速度はかなりの精度で一致している。われわれの手法も地盤のみを対象とするときは，Idrissらのモデルと本質的には異ならないのであるが，図−1からもわかるとおり固有値で精度を求める方が，応答量で求めるより厳しくなるようである。また分割数が小さいときは応答量が小さく，すなわち危険側になるのでモデルの決定（分割数の決定）には十分な検討が必要である。



図−1 地表層モデルの誤差



図−2 構造物基礎系の誤差

4. 剛体を含む構造物基礎系の精度

剛体が並進を伴って回転運動を行なうときの定常解を式(3)より求め，2の共振円振動数と質点列数；mの関係より，mの増加による共振円振動数の増分をそのときの共振円振動数で除して精度を求めたのが図−2である。この場合地表層の分割数nは5であり，質点列数mの最大は30であるから，この振動系の最大の自由度は152である。この図によると図−1とよく似た傾向にあることがわかる。さらにmが小さいときは剛体と地盤の連成効果が大きく，mの剛体の動特性に与える影響は大きい。ただしこの図において誤差というのは上述したように絶対誤差でないことに注意を要する。またこの誤差がnの値によってどのように変化するかはまだ資料不足で明確にわからないが，nが3と5の場合を比べると，図−1の傾向と同様であろうといえる。これ以外の考察は講演時にゆずる。計算は京都大学電子計算機KDC-IIを用いた。

（参考文献）
1) 後藤尚男，土岐憲三，吉原進；土木学会関西支部学術講演会講演概要集，I-29, 1967, 10
2) 後藤尚男，土岐憲三，吉原進；土木学会関西支部学術講演会講演概要集，I-18, 1968, 5
3) Idriss, I.M., Seed, H.B.; Proc. of A.S.C.E., SM. Vol. 94, NO. 4, pp. 1003〜1031 July, (1968)