

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 地下に根入れされたケーソン基礎等の大型土木構造物に対する地震応答を計算する場合には、周辺地盤との動的相互作用を考慮しなければならないことはよく知られており、相互作用を考慮したいろいろな計算法が提案されている。ここで相互作用とは、周辺地盤の変位が構造物の変位に及ぼす作用と逆に構造物の変位が周辺地盤の変位に与える影響の両者を意味している。多柱基礎構造物についても、その地震応答を計算する場合には、厳密には周辺地盤との相互作用を考慮しなければならないことはいうまでもない。しかし、多柱基礎構造物は大型ケーソン基礎等に

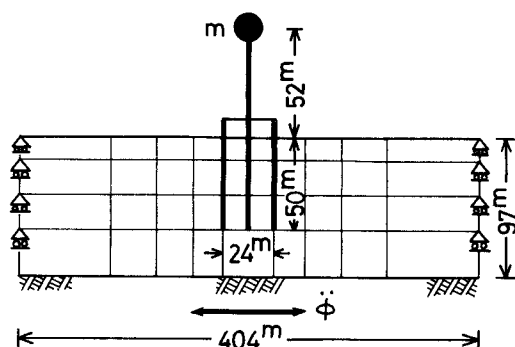


図-1 多柱基礎構造物-地盤系

比べて、重量及び剛性が小さいので、上述の相互作用のうち、多柱基礎構造物の変位が周辺地盤の変位に及ぼす影響はあまり大きくないと考えられる。本論では、地盤との相互作用を考慮する場合と地盤の変位が構造物の変位に及ぼす影響のみを考慮して、その逆の作用はこれを無視する場合の2通りの場合についてそれぞれ多柱基礎構造物の地震応答計算を行った。得られた両者の計算結果を比較検討して、本論で取上げたような多柱基礎構造物については、その地震応答を求めるとき、後者の考え方に従って、即ち多柱基礎構造物が周辺地盤に及ぼす影響はこれを無視して応答計算を行ってもよいことを示した。

2. 多柱基礎構造物-地盤系 上層地盤中に根入れされた多柱基礎構造物が、堅固な基盤から ϕ で表わされる地震入力を受けたときの応答解析を行うのに、これを図-1に示すような有限な拡がりをもつ振動系にモデル化して取扱った。このように地盤を有限な振動系に置換して扱うためには、一般にその両端の鉛直境界面に何らかの物理的処理を施して、ここにおいて波動の反射及び屈折が生じないようにせねばならない。しかし、本論の目的が、多柱基礎構造物-地盤系の地震応答解析において多柱基礎構造物の変位が周辺地盤の変位に与える影響を無視できるかどうかを検討することであることを考えれば、図-1に示すような程度の拡がりをもつ振動系を採用すれば十分であろう。一般に地盤の拡がりが有限である場合の方が無限である場合に比べて相互作用の影響は大きく表われると考えられる。さて、解析には有限要素法と振動型解析法を用いた。図-1においてその奥行き方向の拡がりを考慮した3次元解析を行うことは、計算機の容量その他の制約から困難であるので、本論においては奥行き方向には変形はすべて一様であるとして2次元解析を行った。まず解析の第1段階として、有限要素法を用いて図-1に示す振動系の固有円振動数及び振動型を求めた。解析上採用した諸条件は次の通りである。地盤は平面歪状態にあるものとしてこれを長方形要素に分割した。柱は曲げ及び伸縮変形を行う梁要素と考え、頂版は平面歪状態にある長方形要素とした。地盤の水平方向の鉛直境界は水平方向変位自由とし、垂直変位は拘束した。また上層地盤は堅固な水平基盤上に存在すると仮定した。系の対称性を考えて解析は系の右半分のみについて行った。このとき対称軸上の重量、剛性はすべてもとの値の $1/2$ とした。図-1の系の質量マトリクス、剛性マトリクス及び円振動数をそれぞれ M_E, K_E, ω とすれば、与系の振動数方程式は $|K_E - \omega^2 M_E| = 0$ (1)、振動型 Y_E は式(1)を満足する ω について $(K_E - \omega^2 M_E)Y_E = 0$ (2) から求めることができる。本解析における節点数は47、要素数は42である。固有円振動数は1次が1.635、2次が2.337、3次

が 3.770, また 6 次が 6.451 rad/s である。

3. 地震応答解析 前述のように、本論においては (i) 地盤との相互作用を考慮する場合に対する解析 (以下 A 法という) と (ii) 地盤の変位が構造物の変位に及ぼす影響のみを考慮して、構造物の変位が周辺地盤の変位に及ぼす作用は小さいとしてこれを無視する場合に対する解析 (以下 B 法という) の 2 通りの解析を行って、両者の結果を比較した。

3. 1. A 法について 前章で求めた固有円振動数と振動型を用いれば、図-1 に示す系が基礎から ϕ で表わされる地震入力を受けたときの同系の各節点の変位応答は次式から求めることができる。

$$y_E = \tilde{Y}_E a_E \quad \text{----- (3)}$$

$$\ddot{a}_E + 2h_E \omega_E \dot{a}_E + \omega_E^2 a_E = -\phi \beta_E \quad \text{---- (4)}$$

ここに、 y_E は各節点の変位ベクトル、 $\tilde{Y}_E$ は与系の振動型マトリクス、 a_E は規準座標マトリクス、 h_E は減衰定数マトリクス、 ω_E は固有円振動数マトリクス、 β_E は刺激係数マトリクスで、単位ベクトルを $\mathbb{1}$ と書けば $\beta_E = \tilde{Y}_E^{-1} \mathbb{1}$ と表わすことができる。 ϕ が与えられれば、式 (3)、(4) から刻々の y_E を求めることができる。

3. 2. B 法について 本解法は既に発表された著者等の論文⁽¹⁾ で提案した方法とその考え方は全く同じである。従ってこれについては以下に簡単に結果のみを掲げる。今静止地盤中における多柱基礎構造物の固有円振動数マトリクス、振動型マトリクス及び規準座標ベクトルをそれぞれ ω_s , $\tilde{Y}_s$, a_s とし、上層地盤のそれをそれぞれ ω_g , $\tilde{U}$, a_g とする。さらに地盤が $\tilde{U}$ の静変位をするとき、その地盤変位によって強制された多柱基礎構造物の静変位を表わすマトリクスを $\tilde{Y}_s$ とすれば、多柱基礎構造物の変位が周辺地盤の変位に与える影響を無視した場合の多柱基礎構造物の各節点の変位ベクトル y_s は次式のように表わすことができる。

$$y_s = \tilde{Y}_s a_s + \tilde{Y}_s b \quad \text{----- (5)}, \quad \ddot{a}_s + 2h_s \omega_s \dot{a}_s + \omega_s^2 a_s = -\beta_s \phi - \tilde{Y}_s^{-1} \tilde{Y}_s b - 2h_s \omega_s \tilde{Y}_s^{-1} \tilde{Y}_s b \quad \text{----- (6)}$$

$$\ddot{b} + 2h_g \omega_g \dot{b} + \omega_g^2 b = -\phi \beta_g \quad \text{----- (7)}, \quad \beta_s = \tilde{Y}_s^{-1} \mathbb{1}, \quad \beta_g = \tilde{U}^{-1} \mathbb{1}, \quad h_s, h_g \text{ はそれぞれ多柱基礎構造物及び地盤の減衰定数マトリクスである。また、地盤内各点の変位 } u \text{ は } u = \tilde{U} b \quad \text{----- (8) と表わせる。}\phi \text{ が与えられれば、式 (5)、(6)、(7)、(8) より刻々の } u \text{ 及び } y_s \text{ を求めることができる。なお、上層地盤が浅くて多柱基礎構造物の柱の空中部分が長いときには、式 (5) の右辺第 1 項が支配的となり、柱が地盤中に深く根入れされている場合には地盤変位の影響が大きくなり、従って今度は第 2 項が大きく利いてくるようになる。上述の解析法がこのような特性をもつことから判断すれば、一般にこの解析法に従えば同じ応答計算の精度を得るために採用すべき振動次数の数を比較的少くすることができるといえよう。}$$

4. 数値計算結果並びに考察 計算に用いた振動モデルの大きさは図-1 に示す通りである。点 m の重量は 5000 t である。振動型解析法においてはいずれも固有円振動数が 12 rad/s 以下のもののみを採用した。構造物の固有円振動数は 1 次が 1.641, 2 次が 6.370, 地盤のそれは 1 次が 2.377, 2 次が 3.942 である。これは 2 章で求めた全体系の固有円振動数の第 1, 6 次及び 2, 3 次の値にそれぞれ非常に近い。減衰定数はすべて減衰係数マトリクス $\tilde{C}$ が剛性マトリクス K に比例するように選んだ。そのとき比例定数は A 法において、第 1 次の固有振動数に対する減衰定数が 0.05 となるように定めた。得られた結果の 1 例を図-2, 3 に示した。図-2 は点 m における共振曲線を、図-3 はエルセントロ地震波に対する応答曲線をそれぞれ示したものである。同図から多柱基礎構造物の変位が周辺地盤の変位に及ぼす影響は小さいということがいえる。

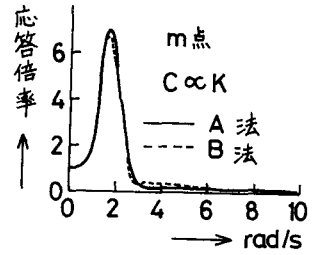


図-2 共振曲線

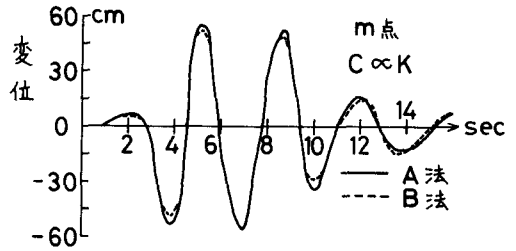


図-3 地震応答曲線

(1) 小坪・高田：鋼管橋脚の地震応答計算法，九大工学集報 第46巻第4号，昭48.8.