

III-503

単杭の沈下解析における荷重伝達法と簡易化境界要素法の比較 (その2)

(財) 大阪土質試験所 正会員 平山 英喜
(株) 武智工務所 正会員 ○ 山下 啓明

1. まえがき

杭の沈下解析法として実用的な、荷重伝達法 ($t-z$ 法) とミンドリン解を利用する弾性理論法 (簡易化BEM) を、同一の地盤定数を用いた線形解析例によって比較する。非線形解析との比較により、インプット定数決定の際の留意点を指摘する。また、両者の地盤抵抗を表すマトリックスの内容を対比して、地盤抵抗をばねで置き換えて要素間相互作用を考慮していない $t-z$ 法の特性を考察する。

2. 解析の方法・条件

$t-z$ 法および簡易化BEMの解析手法については、線形および非線形の各々の場合に対して、文献1) にまとめた。

本稿では、線形解析の場合の両方法の特性を比較するため、例題として図-1に示す一様地盤とギブソン地盤中の杭を考える。双曲線型応力-ひずみモデルによる非線形解析¹⁾との対応を考えて、表-1に示す解析インプット定数を用いた。ここで、土の弾性係数 E として、非線形解析における初期弾性係数 E_i の $1/2$ の値を用いたのは、線形解析の対象荷重として非線形解析における極限荷重の約 $1/2$ の荷重を想定しているためである。

3. 解析結果と考察

線形解析の結果を、非線形解析と比較して図-2に示す。この図から、荷重レベルが極限荷重 (一様地盤: $314.2+35.3=349.5$ [tf], ギブソン地盤: $314.2+70.7=384.9$ [tf]) の半分程度で、線形解析と $R_{fs}=1.0$ の簡易化BEMは、ほぼ一致する。これは、コンドナー型の双曲線型応力-ひずみモデルでは、極限値の $1/2$ における割線弾性係数は初期弾性係数の $1/2$ であるためである。周辺地盤のひずみの不均質性を考慮した $R_{fs}=0.5$ の簡易化BEMや $t-z$ 法による解析からは、この仮定は安全側の仮定と考えられる。

ここで、簡易化BEMは、一様地盤での線形解析では、ミンドリン解の仮定 (半無限の均質弾性体) を満たしているので、非線形性や引張り力に抵抗しない等の実際の土の特性との差異は別にして、解析的には極めて近似度の高いものである。実際、一様地盤でのFEM解析 ($\nu=0.499$, 幅・深さ各々100m) と簡易化BEMとの結果を比較すると、杭頭沈下量でFEMの方が7%だけ小さかった。

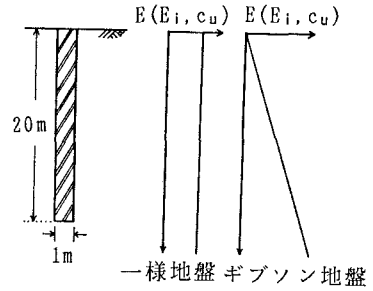
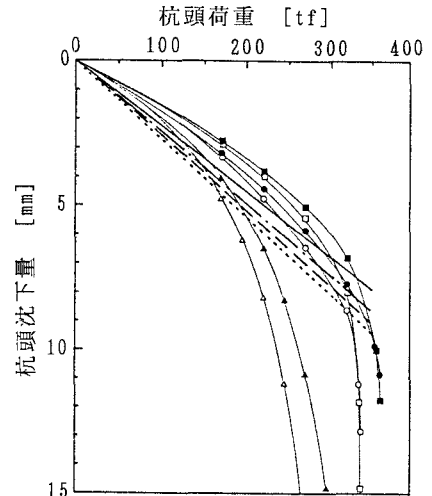


図-1 解析例の条件

表-1 解析インプット定数

線形解析	一様地盤	ギブソン地盤
E [tf/m ²]	3750	0~7500
ν	0.5	同 左
杭の E [tf/m ²]	2.6×10^6	同 左

非線形解析 ¹⁾	一様地盤	ギブソン地盤
c_u [tf/m ²]	5	0~10
E_i [tf/m ²]	$1500 \cdot c_u$	同 左
ν	0.5	同 左
R_{fs}	1.0または0.5	同 左
杭の E [tf/m ²]	2.6×10^6	同 左



解析法	線形解析		
	簡易化BEM	$t-z$ 法	
地盤			
一様地盤	—	—	
ギブソン地盤	—	—	

解析法	非線形解析		
	簡易化BEM	$t-z$ 法	
地盤	$R_{fs}=1.0$	$R_{fs}=0.5$	
一様地盤	—○—	—□—	
ギブソン地盤	—●—	—■—	

図-2 線形・非線形解析結果の比較

t-z 法を簡易化BEMと比較するために、両者をばねモデルで表現すると、図-3のようになる。すなわち、杭をn個の軸要素と1個の底面要素に分割した場合、t-z 法では各要素に1つのばねが連結しており、合計(n+1)個のばねで地盤の抵抗が表されるのに対し、簡易化BEMでは各要素に他の要素からの要素間相互作用が働くため、各要素に(n+1)個のばねが連結していることになり、合計(n+1)²個のばねで地盤の抵抗が表される。弾性解析において、杭のi番目の要素との接触面における土の変位 z_i は、両解析法で各々次のように表される。

$$z_i = \frac{t_i}{k_{ii}} \quad (t\text{-}z\text{法}), \quad z_i = \sum_{j=1}^{n+1} \frac{t_j}{k_{ij}} \quad (\text{簡易化BEM}) \quad \cdots (1)$$

ここに t_i = i 番目の要素に働く応力、

k_{ij} = 図-3 に示したばね係数(地盤反力係数)

全部の要素を考えて、(1)式をマトリックス表示すると、次のようになる。

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \\ z_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/k_{11} & \cdots & 1/k_{1n} & 1/k_{1,n+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1/k_{n1} & \cdots & 1/k_{nn} & \vdots \\ 1/k_{n+1,1} & \cdots & 1/k_{n+1,n+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_n \\ t_{n+1} \end{bmatrix} \quad \cdots (2)$$

ただし、t-z 法では対角成分以外は全て0である。

前述の例題における一様地盤の場合の(2)式の $[1/k_{ij}]$ マトリックスを具体的に示したのが、図-4である。これらの比較により、荷重伝達法の

k_{ij} と簡易化BEMの k_{ij} はかなり異なるが、後者の $\sum_{j=1}^{n+1} (1/k_{ij})$ は、前者の $1/k_{ii}$ とほぼ等しいことが分かる。ギブソン地盤の場合も同様である。すなわち、文献1)の2.1で述べた同心円筒モデルを仮定して算定した荷重伝達法のばね係数は、水平方向の影響領域 r_m を実際よりも大きく仮定することにより、要素間相互作用も含んだ周辺地盤全体の抵抗を1つのばねで近似的に表した結果になっている。杭-土-杭間の相互作用を考慮する必要のない単杭の沈下解析に対しては、t-z 法は簡単でしかもかなりの精度を期待できる解析法と考えられる。参考文献：1) 平山・山下(1990)：“単杭の沈下解析における荷重伝達法と簡易化境界要素法の比較”、第25回土質工学研究発表会

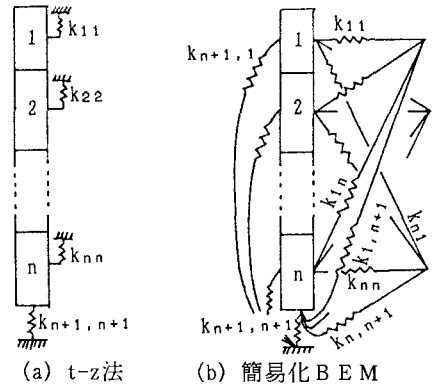


図-3 t-z法と簡易化BEMのばねモデルによる比較

	$1/k_{ii}$
$\begin{bmatrix} 1.565 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 1.565 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.565 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.565 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.565 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.565 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.565 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.565 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.565 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.565 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.157 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.565 \\ 1.565 \\ 1.565 \\ 1.565 \\ 1.565 \\ 1.565 \\ 1.565 \\ 1.565 \\ 1.565 \\ 1.565 \\ 1.565 \\ 0.157 \end{bmatrix}$
(a) t-z法の $[1/k_{ij}]$ ($\times 1000$ 倍)	

	$\sum_{j=1}^{n+1} (1/k_{ij})$
$\begin{bmatrix} 0.674 & 0.323 & 0.183 & 0.127 & 0.097 & 0.078 & 0.066 & 0.056 & 0.050 & 0.044 & 0.005 \\ 0.317 & 0.523 & 0.261 & 0.155 & 0.112 & 0.088 & 0.072 & 0.062 & 0.054 & 0.047 & 0.006 \\ 0.181 & 0.261 & 0.485 & 0.238 & 0.140 & 0.102 & 0.081 & 0.067 & 0.058 & 0.051 & 0.006 \\ 0.126 & 0.155 & 0.238 & 0.468 & 0.226 & 0.131 & 0.095 & 0.076 & 0.063 & 0.055 & 0.006 \\ 0.096 & 0.112 & 0.140 & 0.226 & 0.458 & 0.218 & 0.126 & 0.091 & 0.072 & 0.060 & 0.007 \\ 0.078 & 0.088 & 0.102 & 0.132 & 0.218 & 0.452 & 0.213 & 0.122 & 0.087 & 0.069 & 0.008 \\ 0.065 & 0.072 & 0.081 & 0.095 & 0.126 & 0.213 & 0.448 & 0.210 & 0.119 & 0.085 & 0.009 \\ 0.056 & 0.062 & 0.067 & 0.076 & 0.091 & 0.122 & 0.210 & 0.445 & 0.207 & 0.116 & 0.012 \\ 0.050 & 0.053 & 0.058 & 0.063 & 0.073 & 0.087 & 0.119 & 0.207 & 0.442 & 0.205 & 0.018 \\ 0.044 & 0.047 & 0.051 & 0.055 & 0.060 & 0.070 & 0.084 & 0.117 & 0.205 & 0.441 & 0.040 \\ 0.042 & 0.045 & 0.048 & 0.051 & 0.056 & 0.063 & 0.075 & 0.097 & 0.150 & 0.337 & 0.080 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.703 \\ 1.697 \\ 1.669 \\ 1.639 \\ 1.607 \\ 1.569 \\ 1.524 \\ 1.464 \\ 1.375 \\ 1.214 \\ 1.045 \end{bmatrix}$
(b) 簡易化BEMの $[1/k_{ij}]$ ($\times 1000$ 倍)	

図-4 $[1/k_{ij}]$ マトリックスの比較例(一様地盤、n+1=11の分割による計算)