

岩基中的垂直锚杆分析

彭宣茂 傅作新 张子明

(河海大学力学系, 南京)

提 要

本文采用链杆法对岩基中的单根垂直锚杆及锚杆群进行了分析, 得出了锚杆-岩基相互作用的位移影响系数, 所得结果可用于求解底板-锚杆-岩基的相互作用问题。

一、引 言

在土建和水利工程的船坞或船闸设计中, 当地基是坚硬完好的岩基时, 可以采用较薄的底板, 以充分利用自然条件, 降低工程造价^[1]。但是当底板下的浮托力大于底板及上部结构的抗浮力时, 底板将可能浮起或开裂, 从而造成整个工程的破坏。为了防止这种现象的发生, 一般在底板下设置锚杆或抗拔桩将底板和岩基锚固起来, 以抵抗扬压力。为了能经济合理地设计底板的厚度, 选择锚杆群的最佳布置方式及锚杆直径、长度等, 必须首先分析锚杆-岩基二者的相互作用。为此, 本文以弹性理论为依据, 运用链杆法^[2]对岩基中的单根垂直锚杆及锚杆群进行分析。

二、单根锚杆与岩基的相互作用

如图1(a)所示, 设岩基内有一根圆柱形锚杆, 长度为 l , 杆体直径为 d , 在锚杆顶部受有轴向受拉荷载 P 。假定岩基为理想的均质弹性半空间体, 其弹模 E_s , 泊松比 μ 等都为常数, 且都不因有锚杆的存在而改变; 并假定锚固段和岩基是紧密接触的, 它们之间不产生相对滑移。

现对锚杆沿长度进行离散, 将锚杆剖分为 n 个均匀圆柱形单元。在每个单元侧面中点设置环形竖向链杆以代替杆体表面与岩基的摩阻力; 在锚杆底部中点设置竖向链杆以代替锚头端部和岩基接触的竖向反力(如图1(b))。采用混合法求解, 解除各链杆约束代以约束力, 并在锚杆顶部附加一个竖向刚性约束。以各锚杆的侧面摩阻力 X_i 、锚杆底部正应力 X_b 及锚杆顶部的刚性位移 y_0 为基本未知值。假定 X_i 和 X_b 在对应的锚杆单元侧面和锚杆底面为均匀分布。根据解除约束处即各锚杆单元侧面、锚杆底面与岩基的位移协调条件以及锚杆的力的平衡条件, 建立混合法的典型方程。解此方程, 问题便可得以解决。

(一) 锚杆的位移

假定锚杆的弹模 E_p 和杆体截面积 A 为常数。由于锚杆顶部被约束, 故锚杆可简化为一端

固定另一端自由的拉压杆, 并假定在荷载和各反力作用下, 同一截面上各点的位移是相等的。

考虑图2(a)中的典型锚杆单元*i*, 由于第*j*个锚杆单元侧面的摩阻力 X_j 作用下所引起的在*i*处的锚杆侧位移可表示为

$$u_{ij} = \frac{4c^2}{E_p d} w_{ij} X_j \quad (1)$$

其中

$$w_{ij} = \begin{cases} i-1/2 & (i < j) \\ j-5/8 & (i = j) \\ j-1/2 & (i > j) \end{cases} \quad (2)$$

$c = l/n$, 为锚杆单元的高度。

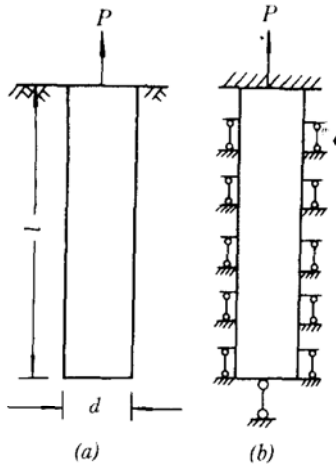


图1

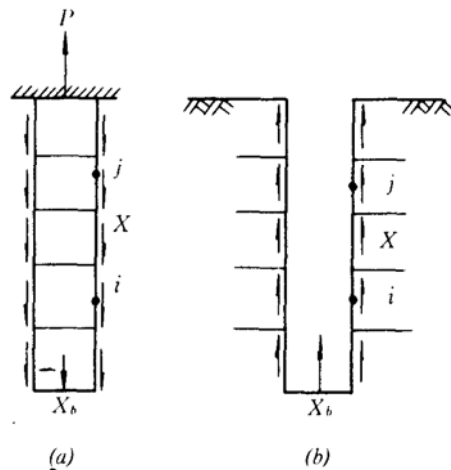


图2

由于锚杆底面正应力 X_b 作用下所引起的在*i*处的锚杆侧位移可表示为

$$u_{ib} = \frac{4c^2}{E_p d} w_{ib} X_b \quad (3)$$

$$\text{其中 } w_{ib} = (i-1/2) d / 4c \quad (4)$$

同理可得 w_{bj} 和 w_{bb} 。

由于全部锚杆单元侧面的摩阻力, 锚杆底面正应力以及荷载作用下所产生的*i*处的锚杆侧位移可表示为

$$u_i = \frac{4c^2}{E_p d} \sum_{j=1}^n w_{ij} X_j + \frac{4c^2}{E_p d} w_{ib} X_b + \delta_{ip} \quad (5)$$

其中 δ_{ip} 为锚杆上轴向荷载作用下在锚杆单元*i*处所引起的位移。如果只考虑锚杆顶部的轴向荷载, 而不考虑锚杆的自重或其它沿锚杆分布的外荷载, 则 $\delta_{ip} = 0$ 。

再考虑到锚杆顶部的刚性位移 y_0 , 则*i*处的锚杆侧位移可表示为

$$u_i = \frac{4c^2}{E_p d} \sum_{j=1}^n w_{ij} X_j + \frac{4c^2}{E_p d} w_{ib} X_b + \delta_{ip} + y_0 \quad (6)$$

对于锚杆底部可写出类似的位移表达式。现将所有的锚杆侧面单元和锚杆底部位移用矩阵表示为

$$\{U\} = \frac{4c^2}{E_p d} [W] \{X\} + \{I\} y_0 + \{\Delta_p\} \quad (7)$$

式中 $\{U\}$ 为 $(n+1)$ 阶锚杆侧面和底部位移列阵; $\{X\}$ 为 $(n+1)$ 阶锚杆侧面摩阻力和锚杆底部正应力列阵; $\{I\}$ 为 $(n+1)$ 阶单位列阵; $\{\Delta_d\}$ 为 $(n+1)$ 阶荷载作用下所引起的位移列阵; $[W]$ 为锚杆的位移影响矩阵。

(二) 岩基的位移

对于图2(b)中典型的岩基单元 i , 由于第 j 个岩基单元上的摩阻力 X_j 作用下所引起的 i 处的位移可表示为

$$v_{ij} = -\frac{d}{E_s} s_{ij} X_j \quad (8)$$

其中 s_{ij} 为在第 j 个岩基单元上的单位摩阻力 $X_j=1$ 作用下所引起的 i 处的竖向位移影响系数。 s_{ij} 可由弹性半空间体内部作用集中力的 Mindlin 方程^[3]积分而得(图3)

$$s_{ij} = \frac{(1+\mu)}{4\pi(1-\mu)} \int_0^{\pi/2} \int_{j-1/c}^{jc} \left\{ \frac{3-4\mu}{\sqrt{[(i-0.5)c-\xi]^2+d^2\cos^2\theta}} + \frac{8(1-\mu)^2-(3-4\mu)}{\sqrt{[(i-0.5)c+\xi]^2+d^2\cos^2\theta}} \right. \\ + \frac{[(i-0.5)c-\xi]^2}{\sqrt{[(i-0.5)c-\xi]^2+d^2\cos^2\theta}} + \frac{(3-4\mu)[(i-0.5)c+\xi]^2-2(i-0.5)c\xi}{\sqrt{[(i-0.5)c+\xi]^2+d^2\cos^2\theta}^3} \\ \left. + \frac{6(i-0.5)c\xi[(i-0.5)c+\xi]^2}{\sqrt{[(i-0.5)c+\xi]^2+d^2\cos^2\theta}^5} \right\} d\xi d\theta \quad (9)$$

令 $f=l/d$, 对 ξ 进行积分得

$$s_{ij} = \frac{(1+\mu)}{4\pi(1-\mu)} \int_0^{\pi/2} \left\{ 4(1-\mu) \ln \frac{(j-i+0.5)+\sqrt{(n/f)^2\cos^2\theta+(j-i+0.5)^2}}{(j-i-0.5)+\sqrt{(n/f)^2\cos^2\theta+(j-i-0.5)^2}} \right. \\ + 8(1-\mu)^2 \ln \frac{(j+i-0.5)+\sqrt{(n/f)^2\cos^2\theta+(j+i-0.5)^2}}{(j+i-1.5)+\sqrt{(n/f)^2\cos^2\theta+(j+i-1.5)^2}} \\ + \frac{(j-i-0.5)}{\sqrt{(n/f)^2\cos^2\theta+(j-i-0.5)^2}} - \frac{(j-i+0.5)}{\sqrt{(n/f)^2\cos^2\theta+(j-i+0.5)^2}} \\ + \frac{(5-4\mu)(i-0.5)+(3-4\mu)(j-1)}{\sqrt{(n/f)^2\cos^2\theta+(j+i-1.5)^2}} - \frac{(5-4\mu)(i-0.5)+(3-4\mu)j}{\sqrt{(n/f)^2\cos^2\theta+(j+i-0.5)^2}} \\ \left. + \frac{2(i-0.5)(j-1)(j+i-1.5)}{\sqrt{[(n/f)^2\cos^2\theta+(j+i-1.5)^2]^3}} - \frac{2(i-0.5)(j+i-0.5)j}{\sqrt{[(n/f)^2\cos^2\theta+(j+i-0.5)^2]^3}} \right\} d\theta \quad (10)$$

由于锚杆底面正应力 X_b 作用下所引起的 i 处的位移可表示为

$$v_{ib} = -\frac{d}{E_s} s_{ib} X_b \quad (11)$$

其中 s_{ib} 为锚杆底部正应力 $X_b=1$ 时对 i 处的位移影响系数, 同样可由 Mindlin 方程积分而得(图4)。

如果不考虑锚杆底部锚固点扩大的影响, 则

$$s_{ib} = \frac{(1+\mu)}{4\pi(1-\mu)} \int_0^{\pi/2} \int_0^{d\cos\theta} \left\{ \frac{3-4\mu}{\sqrt{(n-i+0.5)^2c^2+r^2}} + \frac{8(1-\mu)^2-(3-4\mu)}{\sqrt{(n+i-0.5)^2c^2+r^2}} \right. \\ + \frac{(n-i+0.5)^2c^2}{\sqrt{[(n-i+0.5)^2c^2+r^2]^3}} + \frac{(3-4\mu)(n+i-0.5)^2c^2-2n(i-0.5)c^2}{\sqrt{[(n+i-0.5)^2c^2+r^2]^3}} \\ \left. + \frac{6(i-0.5)(n+i-0.5)nc^3}{\sqrt{[(n+i-0.5)^2c^2+r^2]^5}} \right\} r dr d\theta \quad (12)$$

令 $f = \eta d$, 对 r 积分得

$$\begin{aligned}
 s_{ib} = & \frac{(1+\mu)f}{4\pi(1-\mu)n} \int_0^{\pi/2} \left\{ (3-4\mu)\sqrt{(n-i+0.5)^2 + (n/f)^2 \cos^2 \theta} - 2(1-2\mu)(n-i+0.5) \right. \\
 & + (8\mu^2 - 12\mu + 5)\sqrt{(n/f)^2 \cos^2 \theta + (n+i-0.5)^2} + (n+i-0.5) \\
 & - \frac{(n-i+0.5)^2}{\sqrt{(n/f)^2 \cos^2 \theta + (n-i+0.5)^2}} + [(3-4\mu)(n+i-0.5)^2 - 2n(i-0.5)] \left[\frac{1}{(n-i+0.5)} \right. \\
 & - \left. \frac{1}{\sqrt{(n/f)^2 \cos^2 \theta + (n+i-0.5)^2}} \right] + 2n(i-0.5)(n+i-0.5)^2 \left[\frac{1}{(n+i-0.5)^3} \right. \\
 & \left. \left. - \frac{1}{\sqrt{[(n/f)^2 \cos^2 \theta + (n+i-0.5)^2]^3}} \right] \right\} d\theta \quad (13)
 \end{aligned}$$

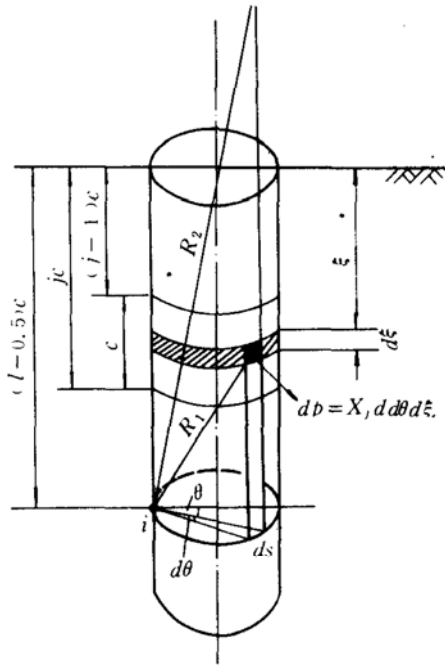


图3

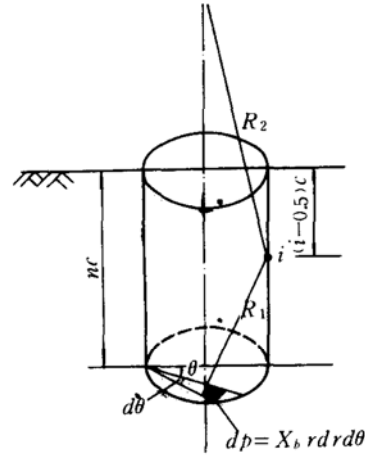


图4

由于全部锚杆侧面岩基单元的摩阻力和锚杆底部岩基正应力作用下所引起的 i 处的位移为

$$v_i = -\frac{d}{E_s} \sum_{j=1}^n s_{ij} X_j - \frac{d}{E_s} s_{ib} X_b \quad (14)$$

同理, 由于第 j 个岩基单元上的摩阻力 X_j 的作用所引起的在锚杆底面中点处岩基的竖向位移可表示为

$$v_{bj} = -\frac{d}{E_s} s_{bj} X_j \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned}
 s_{bj} = & \frac{(1+\mu)}{8\pi(1-\mu)} \left\{ 4(1-\mu)^2 \ln \frac{(j+n) + \sqrt{(n/2f)^2 + (j+n)^2}}{(j-1-n) + \sqrt{(n/2f)^2 + (j-1-n)^2}} \right. \\
 & + 8(1-\mu)^2 \ln \frac{(j+n) + \sqrt{(n/2f)^2 + (j+n)^2}}{(j-1+n) + \sqrt{(n/2f)^2 + (j-1+n)^2}} + \frac{(j-1-n)}{\sqrt{(n/2f)^2 + (j-1-n)^2}}
 \end{aligned}$$

$$-\frac{(j-n)}{\sqrt{(n/2f)^2+(j-n)^2}} + \frac{(5-4\mu)n+(3-4\mu)(j-1)}{\sqrt{(n/2f)^2+(j-1+n)^2}} \\ -\frac{(5-4\mu)n+(3-4\mu)j}{\sqrt{(n/2f)^2+(j+n)^2}} + \frac{2n(j-1)(j-1+n)}{\sqrt{[(n/2f)^2+(j-1+n)^2]^3}} - \frac{2nj(j+n)}{\sqrt{(n/2f)^2+(j+n)^2}} \} \quad (16)$$

由于锚杆底部正应力 X_b 作用下所引起的锚杆底面的位移可表示为

$$v_{bb} = -\frac{d}{E_s} s_{bb} X_b \quad (17)$$

其中
$$s_{bb} = \frac{(1+\mu)f}{4\pi(1-\mu)} \left\{ (3-4\mu)\frac{1}{2f} + (8\mu^2-12\mu+5)(\sqrt{4+(1/2f)^2}-2) \right. \\ \left. + 2(5-8\mu)\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{4+(1/2f)^2}}\right) + 8\left(\frac{1}{8} - \frac{1}{\sqrt{[4+(1/2f)^2]^3}}\right) \right\} \quad (18)$$

由于全部锚杆侧面岩基单元上的摩阻力 X_i 和锚杆底部岩基的正应力 X_b 的作用, 所引起的锚杆底面处岩基的竖向位移为

$$v_b = -\frac{d}{E_s} \sum_{j=1}^n s_{bj} X_j - \frac{d}{E_s} s_{bb} X_b \quad (19)$$

将所有锚杆侧面岩基单元和锚杆底部岩基的位移用矩阵表示为

$$\{V\} = -\frac{d}{E_s} [S] \{X\} \quad (20)$$

其中 $\{V\}$ 为 $(n+1)$ 阶锚杆侧面和锚杆底部的岩基位移列阵; $[S]$ 为 $(n+1)$ 阶锚杆侧面和锚杆底部岩基位移影响矩阵。

(三) 典型方程的建立

根据锚杆侧面及锚杆底面处锚杆与岩基的位移协调条件可得

$$\{U\} = \{V\} \quad (21)$$

将式(7)和式(20)代入式(21), 整理得

$$\left(\frac{4f}{Kn^2} [W] + \frac{1}{f} [S] \right) \{X\} + \{I\} z_0 = \{\Delta_q\} \quad (22)$$

式中 $z_0 = \frac{E_s}{l} y_0$, $\{\Delta_q\} = -\frac{E_s}{l} \{\Delta_p\}$, $K = \frac{E_p}{E_s}$ 。

K 是反映锚杆与岩基相对拉伸性的一个指标, 称之为弹模比。 K 值愈小, 则表明锚杆愈易拉伸。

根据锚杆的力的平衡条件, 可得补充方程

$$\sum_{j=1}^n \pi d \frac{l}{n} X_j + \frac{\pi}{4} d^2 X_b = \sum P \quad (23)$$

式中 $\sum P$ 表示作用在锚杆上竖向外荷载的合力。将式(23)写成矩阵形式为

$$\{H\}^T \{X\} = F \quad (24)$$

式中 $\{H\}^T = \left\{ \frac{\pi dl}{n}, \frac{\pi dl}{n}, \dots, \frac{\pi dl}{n}, \frac{\pi d^2}{4} \right\}$, $F = \sum P$

将方程(22)和方程(24)联立起来得

$$\begin{bmatrix} [A] & [I] \\ [H]^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{X\} \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{\Delta_q\} \\ F \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\text{其中 } [A] = \frac{4f}{Kn^2}[W] + \frac{1}{f}[S]$$

如果只考虑锚杆顶部荷载, 则 $\{\Delta_0\} = \{0\}$, $F = P$ 。求解方程 (25), 便可得到锚杆侧面摩阻力和锚杆底部正应力及锚杆顶部位移。进而根据叠加原理可以确定整个岩基内的应力场和位移场。

三、锚杆群与岩基的相互作用

前面所述的对单根锚杆与岩基的相互作用分析很容易推广到锚杆群和岩基的相互作用分析。如图 5 所示, 设有 m 根不同材料性质和几何尺寸的圆柱形锚杆按一定的间距设置在岩基内, 在锚杆顶部分别承受各自的竖向荷载。首先对各

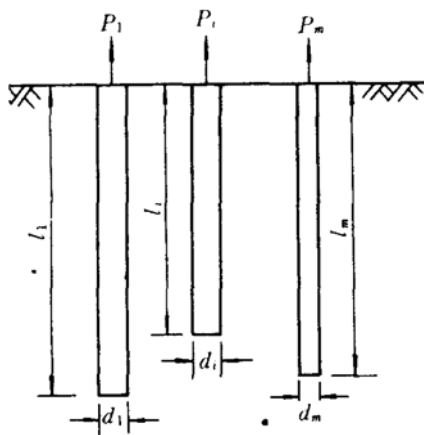


图 5

锚杆沿长度进行离散, 即将第 k 根锚杆剖分为 n_k 个均匀单元, 在各锚杆单元侧面中点设置环形竖向链杆以代替锚杆侧面摩阻力, 在各锚杆底部中点设置竖向链杆以代替锚杆底部的正应力。同样用混合法求解, 解除各链杆约束代以约束力, 并在各锚杆顶部都附加一个刚性约束。以各锚杆侧面摩阻力 X_{ik} 、锚杆底面正应力 X_{bk} 以及各锚杆顶部的刚性位移 y_{0k} 为基本未知值。根据各锚杆与岩基相邻界面的位移协调条件和各锚杆自身的平衡条件建立求解 $\sum_{k=1}^m n_k + 2m$ 个未知值的典型方程。从而可以求得各锚杆和岩基之间的反力及各锚杆顶部位移, 再根据叠加法可以确定整个岩基内的应力场和位移场。

对于每一根锚杆 k , 都可写出类似于式 (7) 的锚

杆位移方程为

$$\{U\}_k = \frac{4c_k^2}{E_{pk}d_k} \{W\}_k \{X\}_k + [I] y_{0k} + \{\Delta_p\}_k \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (26)$$

将所有锚杆侧面和锚杆底部的位移合并用矩阵表示为

$$\{U_G\} = [E_G][W_G]\{X_G\} + [I_G]\{y_G\} + \{\Delta_{pG}\} \quad (27)$$

其中 $\{U_G\} = \{ \{U\}_1^T, \{U\}_2^T, \dots, \{U\}_m^T \}^T$; $\{X_G\} = \{ \{X\}_1^T, \{X\}_2^T, \dots, \{X\}_m^T \}$; $\{y_G\} = \{y_{01}, y_{02}, \dots, y_{0m}\}^T$;

$\{\Delta_{pG}\} = \{ \{\Delta_{p1}\}^T, \{\Delta_{p2}\}^T, \dots, \{\Delta_{pm}\}^T \}^T$;

$$[E_G] = \begin{bmatrix} \frac{4c_1^2}{E_1d_1} & & 0 \\ & \frac{4c_2^2}{E_2d_2} & \\ 0 & & \frac{4c_m^2}{E_md_m} \end{bmatrix};$$

$$[W_c] = \begin{bmatrix} [W]_1 & & 0 \\ & [W]_2 & \\ 0 & & [W]_m \end{bmatrix}; \quad [I_c] = \begin{bmatrix} [I]_1 & & 0 \\ & [I]_2 & \\ 0 & & [I]_m \end{bmatrix};$$

$[W]_k$ 中各元素可按式(2)或式(4)求出, $[\Delta_{pl}]_k$ 可根据实际荷载按材料力学公式求出, 如果只考虑锚杆顶部的荷载, 则 $[\Delta_{pl}]_k = \{0\}$ 。

关于岩基的位移, 对任一根锚杆 e 的第 i 个岩基单元都可写出类似于式(14)的岩基的位移方程。

$$v_{ie} = - \sum_{k=1}^m \left(\frac{1}{E_s} \sum_{j=1}^{n_k} s_{ie,jk} X_{jk} + \frac{1}{E_s} s_{ie,bk} X_{bk} \right) \quad (28)$$

对于任一根锚杆 e 的底部都可以写出类似于式(19)的位移方程。

$$v_{be} = - \sum_{k=1}^m \left(\frac{1}{E_s} \sum_{j=1}^{n_k} s_{be,jk} X_{jk} + \frac{1}{E_s} s_{be,bk} X_{bk} \right) \quad (29)$$

将所有锚杆侧面岩基单元和锚杆底部的岩基位移合并用矩阵表示为

$$\{V_c\} = - \frac{1}{E_s} [S_c] \{X_c\} \quad (30)$$

其中 $\{V_c\} = \{ \{V\}_1^T, \{V\}_2^T, \dots, \{V\}_m^T \}^T$, $\{X_c\} = \{ \{X\}_1^T, \{X\}_2^T, \dots, \{X\}_m^T \}^T$

$$[S_c] = \begin{bmatrix} [S]_{11} & [S]_{12} & \dots & [S]_{1m} \\ [S]_{21} & [S]_{22} & \dots & [S]_{2m} \\ \vdots & & & \vdots \\ [S]_{m1} & [S]_{m2} & \dots & [S]_{mm} \end{bmatrix}$$

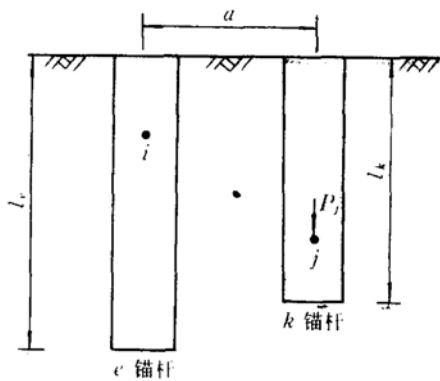


图6

式中 $[S]_{kk}$ 表示第 k 根锚杆自身侧面摩阻力和锚杆底部正应力所引起的本根锚杆侧面或锚杆底部岩基位移影响系数, 可由式(10)、式(13)、式(16)和式(18)确定。而 $[S]_{ek}$ 表示第 k 根锚杆的侧面摩阻力和锚杆底部正应力所引起的第 e 根锚杆侧面和锚杆底部的位移影响系数。其数值也可以根据 Mindlin 方程进行积分得到类似式(10)、(13)、(16)和式(18)的表达式。但是采用如下的简化计算也能满足工程要求, 而计算时间要少得多。

如图6所示, 设 k 锚杆到 e 锚杆的中心线的距离为 a , 现将 k 锚杆 j 单元的摩阻力 X_{jk} 所引起的 e 锚杆 i 单元侧面的任一点位移用 k 锚杆 j 单元的合力 $\pi d_k c_k X_{jk}$ 所引起的 e 锚杆 i 单元中点的位移来代替, 于是可得

$$s_{ie,jk} = \frac{c_k(1+\mu)}{8(1-\mu)} \left\{ \frac{3-4\mu}{\sqrt{z_1^2+a^2}} + \frac{8(1-\mu)^2-(3-4\mu)}{\sqrt{z_2^2+a^2}} + \frac{z_1^2}{\sqrt{(z_1^2+a^2)^3}} \right. \\ \left. + \frac{(3-4\mu)z_2^2-2(j-0.5)(i-0.5)c_e c_k}{\sqrt{(z_2^2+a^2)^3}} + \frac{(j-0.5)(i-0.5)z_2^2 c_e c_k}{\sqrt{(z_2^2+a^2)^5}} \right\} \quad (31)$$

其中 $z_1 = (i-0.5)c_e - (j-0.5)c_k$, $z_2 = (i-0.5)c_e + (j-0.5)c_k$ 。

同理可以求得 $s_{be,jk}$, $s_{ie,bk}$ 和 $s_{be,bk}$ 。

根据各锚杆侧面和锚杆底面的位移协调条件可得

$$\{U_c\} = \{V_c\} \quad (32)$$

将式(27)和式(30)代入式(32)并整理得

$$([E_c][W_c] + \frac{1}{E_s}[S_c])\{X_c\} + [I_c]\{y_c\} = -\{\Delta_{pc}\} \quad (33)$$

再根据各锚杆的力的平衡条件可得 m 个补充方程

$$\sum_{j=1}^{n_k} \pi d_k c_k X_{jk} + \frac{\pi}{4} d_k^2 X_{bk} = \sum P_k \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (34)$$

写成矩阵形式为

$$[H_c]\{X_c\} = \{P_c\} \quad (35)$$

其中 $[H_c] = \begin{bmatrix} -\{H\}_1^T & 0 \\ & \{H\}_2^T \\ 0 & \{H\}_m^T \end{bmatrix}$

$$\{P_c\} = [\sum P_1, \sum P_2, \dots, \sum P_m]^T$$

将式(33)、式(35)合并写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} [A_c] & [I_c] \\ [H_c] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{X_c\} \\ \{y_c\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\{\Delta_{pc}\} \\ \{P_c\} \end{bmatrix} \quad (36)$$

其中 $[A_c] = [E_c][W_c] + \frac{1}{E_s}[S_c]$; $[0]$ 为 m 阶零矩阵。

求解方程(36), 便可得到各锚杆侧面的摩阻力和锚杆底面正应力及各锚杆的顶部位移, 进而可以得到整个岩基内的应力场和位移场。

四、算例和成果分析

我们根据以上所建议的计算方案, 编制了相应的计算机程序, 并计算了文献[4]的两个类似的算例。取 $n=10$, $l/d=25$, $\mu=0.5$, 分别对弹模比 $K=50$ 和 $K=5000$ 时的单根锚杆进行了分析。图7表示锚杆侧面摩阻力沿锚杆长度的分布图。由图知, 本文的结果与文献[4]的结果几乎是一样的。

表1是对于同一性质的锚杆($l/d=50$, $\mu=0.5$)不同的链杆数目进行计算的结果, 它反映出不同链杆数目对计算精度的影响。由表1可以看出, 对于不同的弹模比 K , 链杆数目对锚杆顶部位移(y_0)和锚杆底部分担荷载的比率($\frac{X_b}{P} \cdot \frac{\pi d^2}{4}$)的影响有所不同, 当 K 值越来越大时, 其影响越来越小。一般地, 除了极易拉伸的锚杆($K < 100$)外, 用10根链杆就能够达到工程上所要求的精度。

在分析底板-锚杆-岩基相互作用时, 必须计算锚杆顶部的刚度^[5]或柔度系数, 即单位力作用在锚杆

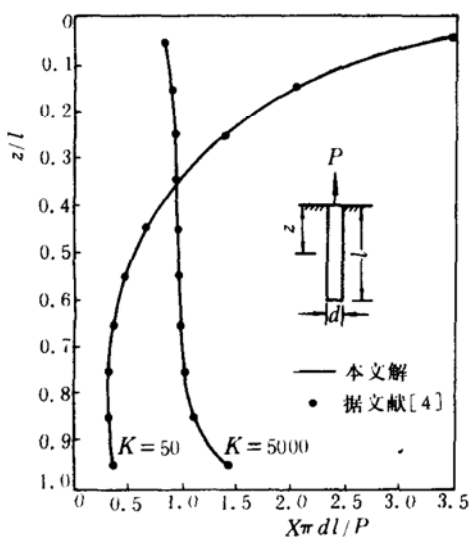


图7

顶部时的锚杆顶部位移。为此我们对不同的长径比 l/d 和弹模比 K 进行了大量的计算。锚杆顶部位移影响系数随 l/d 的分布情况如图8所示。从图中可以看出,在长径比 l/d 相同的情况下,锚杆顶部位移影响系数随弹模比的增大而迅速减小。而且当 K 值比较小时,锚杆顶部位移影响系数随着 l/d 的增大而急剧增大,当 K 值越大时,锚杆顶部位移影响系数随 l/d 的变化越趋于平缓。图9表示锚杆底部分担荷载的比率随 l/d 的变化图。由图可知,当 K 值较小时,锚杆底部分担荷载的比率随 l/d 的增长而很快就趋于零。因此可以认为当 l/d 大于100时,锚杆顶部的荷载完全由锚杆侧面作用力平衡,而成为纯摩擦锚杆。随着 K 值的增加,锚杆底部分担荷载的比率也越大。

表1

锚杆数目对计算精度的影响

$K = E_p/E_s$	n	y_0	X_0/P
100	5	0.8199	0.5491×10^{-2}
	10	0.7939	0.4788×10^{-2}
	20	0.7907	0.4170×10^{-2}
1000	5	0.3261	0.2269×10^{-2}
	10	0.3254	0.2018×10^{-2}
	20	0.3255	0.1788×10^{-2}
10000	5	0.2334	0.2966×10^{-2}
	10	0.2329	0.2640×10^{-2}
	20	0.2328	0.2343×10^{-2}

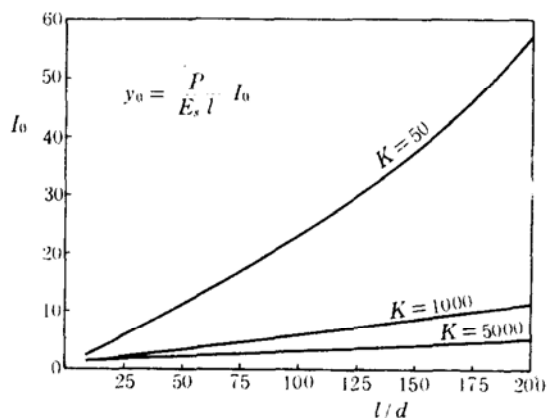


图8

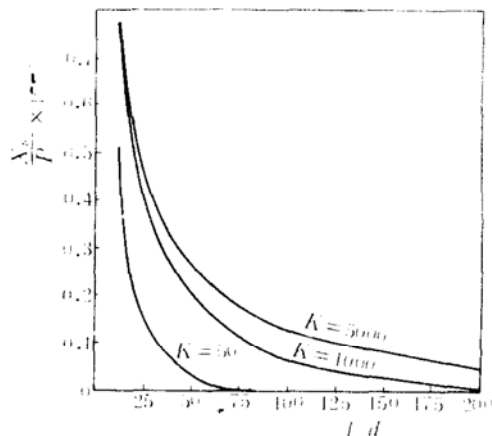


图9

对于锚杆群,我们仅列出了几种典型布置方式的算例,并只考虑其中一根锚杆承受荷载的情况,但在每根锚杆都承受荷载时,可以根据叠加原理获得解答。表2表示 $l/d=50$, $\mu=0.5$ 时,锚杆间距 a 相同而根数和布置方式不同时,受荷锚杆的顶部位移影响系数和底部分担荷载的比率。从表中可以看出,无论哪种形式,当 a 增大时,其锚杆群的影响急剧变小。而当锚杆间距 a 较小时,其锚杆群的影响较大,因此可以认为,在计算锚杆群下的锚杆顶部刚度系数或柔度系数时,对于相邻的锚杆必须考虑锚杆群的相互作用效应,而对于较远的锚杆的影响可以忽略不计。

表2

锚杆布置方式的影响

锚杆间距	布 置 方 式							
	单根锚杆		两根锚杆		三根锚杆 (正三角形布置)		四根锚杆 (正方形布置)	
	y_0	X_0/P	y_0	X_0/P	y_0	X_0/P	y_0	X_0/P
$a=0$	0.4077	0.1565×10^{-2}						
$a=5d$			0.4040	0.1509×10^{-2}	0.4012	0.1465×10^{-2}	0.3999	0.1444×10^{-2}
$a=25d$			0.4077	0.1565×10^{-2}	0.4076	0.1565×10^{-2}	0.4076	0.1565×10^{-2}
$a=50d$			0.4077	0.1565×10^{-2}	0.4077	0.1565×10^{-2}	0.4077	0.1565×10^{-2}

五、结 语

算例表明, 按本文提出的方法进行单根锚杆的分析结果与文献[4]的几乎相同, 这说明本方法不但是可行的, 而且与之相比, 方法更简单, 计算工作量更少。锚杆群的分析只是单根锚杆分析的简单推广。而且还很容易地推广到受横向力作用下的单根锚杆或锚杆群的分析。该方法同样适合于受拉或受压桩与地基的相互作用分析。

参 考 文 献

- [1] Hanna, T. H., 锚固技术在岩土工程中的应用, 胡定等译, 中国建筑工业出版社, 1987, pp. 254—267.
- [2] 傅作新、彭宣茂等, 弹性基础板的有限元-链杆解法, 华东水利学院学报, No. 2, 1986, pp. 7—12.
- [3] 樊大钧, 空间弹性力学, 四川科学技术出版社, 1985, pp. 19—22.
- [4] Mattes, N. S., Poulos, H. G., Settlement of Single Compressible Pile, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, January, 1969, pp. 189—207.
- [5] 横山幸满, 桩结构物的计算方法和计算实例, 唐业清等译, 中国铁道出版社, 1984, pp. 218—239.

Analysis of Vertical Anchor Bar in the Rock Foundation

Peng Xuanmao Fu Zuoxin Zhang Ziming

(Hohai University, Nanjing)

Abstract

In this paper, the Rigid Bar Method is used to analyse the vertical anchor bar and piles in the rock foundation. The displacement effect coefficients for interaction of the anchor bar and the rock foundation are presented. These coefficients may be used to solve the interaction problem of plate, anchor bar and rock foundation.