

预应力锚索桩设计与计算

陈 占

摘 要 为进一步完善预应力锚索桩的设计与计算理论,节约工程投资,较为准确地确定锚索桩锚索预应力值及锚索桩设计计算控制条件,采用分段计算法和地基系数法,根据悬臂梁挠曲变形理论和弹性地基梁理论,计算预应力锚索桩锚索与桩变形协调时桩的变形与内力,以控制桩锚固面处变形及改善桩身内力分布来设计计算锚索桩径、锚索预应力值及锚索长度。按桩身内力变化,采用极限状态法,以正负弯矩对桩进行双面配筋。经过多处工程实践,该设计计算理论能较好地反映现场实际情况。

关键词 锚索桩 变形协调 弹性地基梁 锚索力 锚索预应力 内力 土压力

预应力锚索桩在我国应用始于20世纪80年代中期,是一项应用前景非常广阔的新型支挡抗滑结构。目前,预应力锚索桩的设计计算尚未完全成熟,有待进一步完善和施工验证。铁路部门曾采用不同的计算方法,在京广线设计施工了拉杆锚固桩墙,其计算未考虑拉杆与桩的变形协调,并未对拉杆施加预应力^①;在南昆等线及滑坡整治工程中设计并施工了预应力锚索桩,其计算虽考虑了桩与锚索变形协调,但忽略了锚索预应力的损失^{②③}。本文结合株六复线工程实践,采用分段计算法和地基系数法,提出根据岩土体物理力学性质,考虑锚索与桩变形协调及锚索预应力损失;以控制桩锚固面处变形及改善桩身内力分布为理论依据,设计并计算预应力锚索桩。

1 基本假定

(1)推力假定。同一地层为力学性质相同的均质体,(破裂体)为刚性体,滑体(破裂体)稳定服从刚性平衡理论,推力分布可为三角形、矩形、梯形或其他形式;假定每根锚索桩承受相邻两桩“中-中”的岩土压力(滑坡推力)作用于桩上的主要力有岩土压力(滑坡推力)、锚索拉力及桩周围岩作用力;桩锚固段为岩层时,不计桩与岩土间摩擦力、桩身自重、锚索竖向力、桩前地基抗力及桩底反力,桩锚固段为破碎岩土层时,应考虑上述诸力并应检算桩底基础承载力。

(2)弹性地基梁(文克尔)假定^[1]。①桩锚固段上任一点对地基岩土体的作用力,只在该点引起压缩,作用力大小与地基在该点的压缩变形成正比,即为:

$$p_y = K \cdot x_y, \quad (1)$$

式中: p_y :桩至地基岩土体 y 处的侧向作用力; K :地基系数(又称地基反力或抗力系数); x_y : y 处地基岩土体压缩变形。②根据牛顿第一定律,在文克尔假定条件下,地基岩土对桩的反力为:

$$\sigma_y = p_y = K \cdot x_y. \quad (2)$$

从而得到:地基对桩锚固段上任一点的地基反力与相应位置地基的压缩变形成正比,同时又与地基岩土体的物理力学性质有关。

(3)结构计算假定。①平截面假定^[2]:所有与桩轴线垂直的截面在桩变形后仍保持为平面,且仍与挠曲了的桩轴保持垂直;②弹性体假定^[1]:钢筋基本上是弹性体,而混凝土则是弹塑性体,但在设计的应用阶段Ⅲ,二者均可视为弹性体,应力图形简化为矩形。

(4)锚索作用点及变形假定。由于锚索受力时会发生弹性伸长变形,桩上锚索作用点可假定为弹性铰支点^②;锚索变形假定:在不考虑桩的挠曲变形对锚索变形的影响条件下,锚索在锚索力作用下的弹性变形。

(5)变形协调假定。将桩、锚固段桩周岩土

及锚索系统作为一个整体,视为超静定结构;在锚索作用点,桩的位移与锚索弹性伸长量之间的变形协调。

2 锚索桩的变形协调及锚索力的确定

2.1 桩与锚索变形计算

2.1.1 桩的变形计算 桩的变形计算包括悬臂段变形和锚固段变形计算两部分,由于桩悬臂段和锚固段的受力约束不同,故采用分段计算法,分别计算桩悬臂段和锚固段的变形及内力。将桩悬臂段视为悬臂梁,按梁轴挠曲变形理论计算其变形和内力;桩锚固段则视为弹性地基梁;按弹性地基梁理论计算其变形和内力。

(1) 桩悬臂段的变形计算。根据假定,锚索桩锚固段固定于弹性岩土体中,锚索的水平作用力为一水平作用于桩悬臂段上的力,对 n 个支点、任何形式受力的预应力锚索桩,均可按叠加原理计算桩悬臂段的变形,当锚索桩背土压力分布为梯形时(如图1,土压力计算应根据桩后岩土体的破碎程度而采用相应的折减系数,折减系数可通过试验或经验取得),在 n 个锚索力 N_i 作用下,设桩与桩中心间距为 S 、桩悬臂段长为 H 。根据梁轴挠曲变形叠加原理,由梁挠曲变形近似微分方程^[2]得:

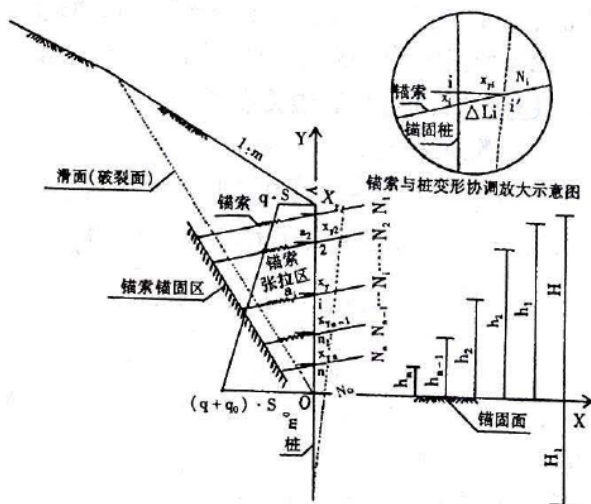


图1 试样应力及微裂纹分布示意

$$\frac{d^2 X_y}{dy^2} = -\frac{M(y)}{EI} \quad (3)$$

解微分方程(3):

$$X_y = -\frac{1}{EI} \left| \int \left(\int M(y) \cdot dy \right) dy + D \cdot y + F \right| \quad (4)$$

根据已知条件,由(4)得桩悬臂段桩轴上每一点水平位移,即为下式:

$$X_y = X_{y0} + \varphi_0 y - \frac{1}{EI} \left| m_0 \frac{y^2}{2!} + \sum_{j=1}^n N_j \cos \alpha_j \frac{(y-h_j)^3}{3!} + N_0 \frac{y^3}{3!} - \frac{qSy^4}{4!} + \frac{q_0 Sy^4}{5! L} (y-5H) \right| \quad (5)$$

式中: X_{y0} 为桩 O 点处水平位移; φ_0 为桩 O 点处转角; $N_0 = (\frac{q_0}{2} + q)S \cdot H - \sum_{j=1}^n N_j \cos \alpha_j$, 为 O 点地基对桩的集中力,数值上等于桩在 O 点处剪力,即 $N_0 = Q_0$,

$m_0 = - \left| (q_0 H^2/6 + qH^2/2)S - \sum_{j=1}^n N_j \cos(\alpha_j) h_j \right|$ 为 O 点地基对桩的集中力偶,数值上等于桩在 O 点处的弯矩,即 $m_0 = M_0$; E : 桩的弹性模量, $E = 0.8E_h$ (同标号混凝土的弹性模量); I : 桩截面的惯性矩。

$$\text{令 } Q = (\frac{q_0}{2} + q)S \cdot H, M = (\frac{q_0 H^2}{6} + \frac{qH^2}{2})S$$

Q, M 分别为岩土压力作用于桩 O 点的剪力及弯矩, N_j 为 j 点锚索拉力, h_j 为 j 点到 O 的距离,则有:

$$Q_0 = Q - \sum_{j=1}^n N_j \cos \alpha_j, M_0 = M - \sum_{j=1}^n N_j \cos(\alpha_j) h_j \quad (6)$$

由式(5)知,对于桩上每一锚索作用点 i 处,其相应水平位移 X_{hi} 为:

$$X_{hi} = X_{y0} + \varphi_0 h_i - \frac{1}{EI} \left| m_0 \frac{h_i^2}{2!} + \sum_{j=1}^n N_j \cos \alpha_j \frac{(h_i-h_j)^3}{3!} + N_0 \frac{h_i^3}{3!} - \frac{qSh_i^4}{4!} + \frac{q_0 Sh_i^4}{5! H} (h_i-5H) \right| \quad (7)$$

将 N_0, m_0 代入(7)式,合并同类项得:

$$X_{hi} = X_{y0} + \varphi_0 h_i + \frac{1}{EI} \left| \left(\frac{qSh_i^4}{4!} + \frac{qSH^2 h_i^2}{2!} + \frac{qSHh_i^3}{3!} \right) + \left(\frac{q_0 Sh_i^2}{5! H} (10H^3 - 10H^2 h_i + 5Hh_i^2 - h_i^3) \right) - \left| \sum_{j=1}^n N_j \cos \alpha_j \cdot \left(\frac{h_i^2}{2!} h_j + \frac{(h_i-h_j)^3}{3!} - \frac{h_i^3}{3!} \right) \right| \right| \quad (8)$$

$$\text{令 } \Delta_{iq} = \frac{1}{EI} \left| \left(\frac{qSh_i^4}{4!} + \frac{qSH^2 h_i^2}{2!} - \frac{qSHh_i^3}{3!} \right) + \left(\frac{q_0 Sh_i^2}{5! H} (10H^3 - 10H^2 h_i + 5Hh_i^2 - h_i^3) \right) \right|$$

$$\sum_{j=1}^n \Delta_{ij} = \frac{1}{EI} \left| \sum_{j=1}^n N_j \cos \alpha_j \cdot \left(\frac{h_i^2}{2!} h_j + \frac{(h_i - h_j)^3}{3!} - \frac{h_i^3}{3!} \right) \right|$$

则(8)可简化为:

$$X_{hi} = X_{y0} + \varphi_0 h_i + \Delta_{iq} - \sum_{j=1}^n \Delta_{ij} \quad (9)$$

令 $\xi_{ij} = \frac{1}{EI} \left(\frac{h_i^2}{2!} h_j + \frac{(h_i - h_j)^3}{3!} - \frac{h_i^3}{3!} \right)$, 则有:

$$\Delta_{ij} = N_j \cos \alpha_j \cdot \xi_{ij} \quad (10)$$

当 $h_i \leq h_j$ 时, $\xi_{ij} = \frac{1}{EI} \frac{h_i^2 (3h_j - h_i)}{3!}$; 当 $h_j \leq h_i \leq H$ 时, $\xi_{ij} = \frac{1}{EI} \frac{h_j^2 (3h_i - h_j)}{3!}$. 式中: Δ_{iq} 及 Δ_{ij} 分别为岩土压力及锚索拉力 N_j 作用于 i 点桩的位移。

(2) 桩锚固段变形计算。桩锚固面 O 点的水平位移 X_{y0} 、转角 φ_0 及桩锚固段的变形可根据地基系数法(K 法或 m 法)求得, 考虑桩锚固面受水平剪力及弯矩时, 得桩弹性地基梁的挠曲微分方程^[1,3,4]:

$$EI \frac{d^4 X_y}{dy^4} + KB_p y X_y = 0 \quad (K \text{ 法}), \quad (11)$$

$$EI \frac{d^4 X_y}{dy^4} + MB_p y X_y = 0 \quad (m \text{ 法}), \quad (12)$$

由于 m 法可简化为多层 K 法, 在这里只介绍 K 法。(11)式中, K 为地基系数; B_p 为桩的计算宽度, $EI = 0.8E_h I$, 引入地基变形系数。 $\beta = \left(\frac{KB_p}{4EI} \right)^{1/4}$, 得下式:

$$\frac{d^4 X_y}{dy^4} + 4\beta^4 y = 0 \quad (K \text{ 法}). \quad (13)$$

通过数学求解, 得桩锚固面以下桩身任一截面的变位、侧应力和内力计算公式:

$$X_y = X_{y0} \varphi_1 + \frac{\varphi_0}{\beta} \varphi_2 + \frac{M_0}{\beta^2 EI} \varphi_3 + \frac{Q_0}{\beta^3 EI} \varphi_4, \quad (14)$$

$$\varphi_y = -4\beta X_{y0} \varphi_4 + \varphi_0 \varphi_1 + \frac{M_0}{\beta EI} \varphi_2 + \frac{Q_0}{\beta^2 EI} \varphi_3, \quad (15)$$

$$M_y = -4\beta^2 X_{y0} EI \varphi_3 - 4\varphi_0 \beta EI \varphi_4 + M_0 \varphi_1 + \frac{Q_0}{\beta^2 EI} \varphi_2, \quad (16)$$

$$Q_y = -4\beta^3 X_{y0} EI \varphi_2 - 4\varphi_0 \beta^2 EI \varphi_3 - 4\beta M_0 \varphi_4 + Q_0 \varphi_1, \quad (17)$$

$$\sigma_y = K X_y, \quad (18)$$

$$X_{y0} = \frac{M_0}{\beta EI} \varphi_1 + \frac{Q_0}{\beta^3 EI} \varphi_2, \quad (19)$$

$$\varphi_{y0} = -\left(\frac{M_0}{\beta EI} \varphi_2 + \frac{Q_0}{\beta^2 EI} \varphi_3 \right), \quad (20)$$

式中: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ 为 K 法影响函数值, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 为与 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ 相关的无量纲系数。

令 $X_{y0} + \varphi_0 h_i = B_i Q_0 + C_i M_0$, 则:

$$B_i = \frac{\varphi_1}{\beta^3 EI} - \frac{\varphi_2}{\beta^2 EI} h_i, C_i = \frac{\varphi_2}{\beta^2 EI} - \frac{\varphi_3}{\beta EI} h_i. \quad (21)$$

2.1.2 锚索变形计算。根据假定, 锚索变形计算不考虑桩的挠曲变形对锚索变形的影响, 为锚索在锚索作用下的弹性变形, 根据虎克定律, 得如下计算式^[5]:

$$\Delta L_i = \frac{(N_i - N_0) L_i}{E_g A_i} = \delta_i (N_i - N_0), \quad (22)$$

$$A_i = \frac{n\pi d^2}{4}$$

式中: ΔL_i 为第 i 孔锚索弹性伸长量; N_i 为第 i 孔锚索作用力; N_0 为第 i 孔锚索初始预应力(一般取 $50kN$ 或 $0.1N_i$); L_i 为第 i 孔锚索自由段长度 + $1/3$ 锚固段长度; E_g 为锚索弹性模量; δ_i 为第 i 根锚索的挠度系数; A_i 为第 i 孔锚索钢绞线的横截面积; d 为每单根钢绞线直径; n 为每孔锚索的束数。

2.2 桩与锚索变形协调及锚索拉力计算

2.2.1 变形协调及锚索拉力计算

将桩、锚固段桩周岩土及锚索系统作为一个整体, 视为超静定结构; 桩在桩背土压力、锚索力及桩周围岩作用力等共同作用下, 桩与锚索将同时发生变形, 在锚索作用点, 桩的位移与锚索弹性伸长量存在某种变形协调关系; 由于桩上每一点竖向变形极小可忽略, 可假定桩上每点变形与其相应点的水平位移相等, 当桩与锚索变形协调时, 桩上第 i 个锚索作用点桩的位移 (X_{hi}) 与锚索弹性伸长量 (ΔL_i) 存在下述关系^[6]:

$$\Delta L_i = X_{hi} \cdot \cos \alpha_i. \quad (23)$$

将(6), (9), (21), (22)式代入(23)式得:

$$\left| B_i \left(Q - \sum_{j=1}^n N_j \cos \alpha_j \right) + C_i \left(M - \sum_{j=1}^n N_j \cos(\alpha_j) h_j \right) + \Delta_{iq} - \sum_{j=1}^n N_j \cos \alpha_j \cdot \xi_{ij} \right| \cdot \cos \alpha_i = \delta_i (N_i - N_0).$$

整理得:

$$\sum_{j=1}^n (B_i + C_i \cdot h_i + \xi_{ij}) N_j \cos \alpha_j + \delta_i \cdot N_i = (B_i Q + C_i M + \Delta_{iq}) \cos \alpha_i + \delta_i N_0. \quad (24)$$

$$\text{令 } \varepsilon_{ij} = (B_j + C_j \cdot h_i + \xi_{ij}) \cos \alpha_j,$$

$D_i = (B_i Q + C_i M + \Delta_{iq}) \cos \alpha_i + \delta_i N_0$, 则(24)式可表示为:

$$\sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} \cdot N_j + \delta_i \cdot N_i = D_i. \quad (25)$$

解线性方程组(25), 可确定各锚索拉力 N_j :

$$N_j = F_j / F. \quad (26)$$

其中:

$$F = \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} + \delta_1 & \cdots & \varepsilon_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \varepsilon_{n1} & \cdots & \varepsilon_{nn} + \delta_n \end{vmatrix}$$

$$F_k = \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} + \delta_1 & \cdots & \varepsilon_{1(j-1)} & D_1 & \varepsilon_{1(j+1)} & \cdots & \varepsilon_{1n} \\ \varepsilon_{21} & \cdots & \varepsilon_{2(j-1)} & D_2 & \varepsilon_{2(j+1)} & \cdots & \varepsilon_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \varepsilon_{n1} & \cdots & \varepsilon_{n(j-1)} & D_n & \varepsilon_{n(j+1)} & \cdots & \varepsilon_{2n} + \delta_n \end{vmatrix}$$

2.2.2 锚索预应力值的确定

(1) 根据锚索桩与锚索变形协调时的锚索拉力计算式(26), 首先计算仅在土压力作用下, 锚索不施加预应力时的锚索与桩变形协调时的锚索所需的拉力 N_{1j} ; (2) 根据《铁路桥涵设计规范》^[7]、《铁路路基支挡结构物设计规则》^[8], 岩石地基系数 K 由岩石的极限抗压强度确定, 不随岩层面的埋藏深度而变化; 土层地基比例系数 m 则为桩基地面处(抗滑桩锚固面)水平位移在不超过一定范围(桥规为 6mm, 路规为 6~10mm)时所对应的值; (3) 对桩锚固段地层为岩层的锚索桩进行设计时, 根据式(26), 通过调整锚索拉力 N_j 、锚索自由段长度、桩截面及桩锚固段长度, 使桩锚固段 $\sigma_y \leq [\sigma]$, 桩在有锚索情况下的正负弯矩大致相等, 桩锚固面处水平位移不超过相应范围, 则最为经济合理^[9]; (4) 对桩锚固段地层为破碎岩层或土层的锚索桩进行设计时, 由于受土层锚索受力限制, 锚索拉力相对较小; 根据式(26), 通过调整锚索拉力 N_j 、锚索自由段长度、桩截面及桩锚固段长度, 使桩锚固面水平位移控制在规范规定范围、桩锚固段 $\sigma_y \leq [\sigma]$, 并考虑桩与岩土间摩擦力、桩身自重、锚索竖向力及桩底反力, 检算桩底地基应力是否满足要求; (5) 由前述知, 设各支点锚索的预应力为 N_{2j} , 则有:

$$N_{2j} = N_j - N_{1j}, j = 1, \cdots, n. \quad (27)$$

考虑到锚索在张拉完成后受多种因素影响, 随时间推移锚索将会发生较大的应力松弛, 预应力相应发生较大的损失, 如不考虑将可能对锚索桩结构产生不利影响甚至破坏。根据经验, 岩层锚索预应力损失一般为 10%~20%, 土层(破碎岩层)则为 20%~30%。因此, 在锚索桩设计时应考虑预应力损失的影响, 建议锚索的预应力值为:

$$N_{3j} = k_1 \cdot N_{2j} = k_1 (N_j - N_{1j}),$$

k_1 为预应力损失系数, 一般取 1.1~1.3。

$$\text{令 } R_j = N_{1j} + N_{3j}, \quad (28)$$

式中: R_j 为各点锚索拉力设计值, 在桩正面配筋时考虑; 桩背面配筋及内力计算时则考虑 N_j 。

3 锚索桩内力计算

3.1 桩悬臂段 OA 内力计算(图 1)

(1) 当 $H - h_i < y \leq H$ 时,

$$Q_y = q(H - y) + q_0(H - h_i)^2/2H,$$

$$M_y = q(H - y)^2/2 + q_0(H - y)^3/6H.$$

(2) 当 $y = H - h_i$ 时, $i = 1, 2, \cdots, n$,

$$Q_y = q(H - h_i) + \frac{q_0(H - h_i)^2}{2H} - \sum_{j=1}^i N_j \cos \alpha_j, \quad (29)$$

$$M_y = q(H - h_i)^2/2 + q_0(H - h_i)^3/6H - \sum_{j=1}^i N_j \cos \alpha_j (h_j - h_i). \quad (30)$$

(3) 当 $H - h_{i-1} < y < H - h_i$ 时, $i = 2, \cdots, n$,

$$Q_y = q(H - y) + \frac{q_0(H - y)^2}{2H} - \sum_{j=1}^{i-1} N_j \cos \alpha_j, \quad (31)$$

$$M_y = q(H - y)^2/2 + q_0(H - y)^3/6H - \sum_{j=1}^{i-1} N_j \cos \alpha_j (h_j - y). \quad (32)$$

(4) 当 $0 \leq y < H - h_n$ 时,

$$Q_y = q(H - y) + \frac{q_0(H - y)^2}{2H} - \sum_{j=1}^n N_j \cos \alpha_j, \quad (33)$$

$$M_y = q(H - y)^2/2 + q_0(H - y)^3/6H - \sum_{j=1}^n N_j \cos \alpha_j (h_j - y). \quad (34)$$

当 $y = 0$ 时, 按(33)、(34)式可求得桩锚固面处的剪力和弯矩; 桩正面配筋设计时, 将(29)~(34)各式中的 N_j 换成(28)式中的 R_j 来计算桩正面的弯矩。

3.2 桩锚固段内力计算

根据 2.2.1 中桩锚固段变形计算中的(16)、(17)式来计算桩锚固段弯矩和剪力。

3.3 桩的配筋

由锚索桩内力计算知, 桩受正负弯矩的作用, 应按双面配筋原理进行配筋。在桩悬臂段根据桩所受锚索水平力和桩背土压力计算桩的最大剪应力和最大弯矩; 在桩的锚固段, 则根据锚固面处的弯矩和剪力应用弹性地基梁理论计算锚固段弯矩、剪力。根据前述假定, 按极限状态法进行锚索桩的纵筋和箍筋的计算, 在锚孔处还应根据锚索竖向拉力的大小, 考虑是否设置斜筋。桩正面的纵筋应将其全部伸长至桩顶。另预应力锚索的设

计可参照《水工预应力锚固设计规范》^[10]或《土层锚杆设计与施工规范》^[11]进行,其锚索拉力设计值为(28)式中的 R_j 。

4 结语

根据上述计算理论和计算方法,预应力锚索桩现已应用于株水铁路复线、洛湛铁路益永段、焦柳铁路石怀段扩能工程、高速公路高边坡病害整治等工程。根据施工现场反馈的信息,现场实际情况与设计较为吻合。经过经济分析比较,预应力锚索桩较一般抗滑桩设计节约工程费用约20%~30%,具有明显的经济效益和推广应用价值。

参考文献

- [1]池淑兰,徐凤华.路基工程计算及程序设计[M].成都:西南交通大学出版社,1993.

- [2]粟一凡.材料力学[M].北京:高等教育出版社,1983.

- [3]胡人礼,符接翼,丁铨,等.桥梁地基和基础[M].北京:中国铁道出版社,1990.

- [4]德赛CS,克里斯琴JT(美).岩土工程数值方法[M].卢世深,潘善德,王锤琦,等译.北京:中国建筑工业出版社,1981.

- [5]梁炯鋈.锚固与注浆技术手册[M].北京:中国电力出版社,1999.

- [6]蒋楚生,甘跃明,张华.锚索桩板墙结构锚索预应力的确定方法[J].路基工程,1997,(3):10-14.

- [7]TB10002.1-1999,铁路桥涵设计规范[S].

- [8]TBJ25-1990,铁路路基支挡结构物设计规则[S].

- [9]申益民.预应力锚索桩设计探讨[J].路基工程,1999,(5):16-17.

- [10]SL212-1998,水工预应力锚固设计规范[S].

- [11]冶金部-1990,土层锚杆设计与施工规范[S].

(上接第3页)

5.3 现场试验验证

为验证锚索设计的合理性,进行现场锚索张拉与监测,结果表明:3000kN级预应力锚索内锚固段长度8m没有造成锚索失效。同时,锚索间距5.0m有利于锚索布局,并且也是合理间距;单束锚索预应力损失值为0~2kN,也说明了本文所提供的确定方法的合理性。

6 结论

研究表明,在确定岩锚设计参数时,首先应确定岩体的物理力学性质,并在建立锚索失效系统故障树的基础上,应用最大经济期望决策理论可以得到优化设计参数。本文提出的锚固荷载、锚固角、锚固间距、内锚固段长度等优化设计方法,现场试验验证了其合理性与准确性,可供设计部门参考使用,岩锚支护决策支持系统RSASYS可以快速地进行边坡预应力锚索加固设计。

参考文献

- [1]程良奎.中国岩土锚固技术的应用与发展[A].岩土锚固工程技术的应用与发展[C].北京:万国学术出版社,1996年,1~5.

- [2]张发明.岩质边坡预应力锚固效应及应用研究[博士学位论文][D].南京:河海大学,2000年.

- [3]Jun Kanda, Haresh Engineering role in failure lost evaluation for building[J]. Structural safety, 1997, 19(1): 79~90.

- [4]A. H - S. ANG. W. H. TANG, 著,孔芳垂,陈星焘,顾子聪,译.工程规划与设计中的概率概念[M].北京:冶金工业出版社,1991年,6~145.

- [5]陈祖煜,汪小刚.岩质边坡的加固技术[A].孙剑,夏可风,主编.'98水利水电地基与基础工程学术交流会论文集[C].天津:天津科学技术出版社,1998年,419~429.

- [6]张发明,刘宁,赵维炳.岩质高边坡预应力锚固力学行为与群锚效应[J].岩石力学与工程学报,2000(专辑).