

预应力锚索加固岩体的应力损失分析

丁多文 白世伟 罗国煜

摘要 预应力锚索加固岩体的效果取决于预应力的大小。为了保持岩体长期稳定,必须长期保持有足够的预应力。岩体随时间产生的变形、锚索松驰、腐蚀、结构的不同等因素都将造成锚索预应力损失。这对加固效果产生不良影响。本文着重研究岩体随时间的变形产生的预应力损失。锚索的预应力损失可按 $\sigma_{\mu} = \sigma_r + \sigma_{at} + \psi L_t$ 计算。文中根据岩体的粘弹特性,分别推导了 σ_r 和 σ_{at} 的计算公式。最后讨论锚固段和自由段的长度对减少预应力损失的作用。

关键词 预应力锚固 应力损失 松驰

1 前言

预应力锚索在地下开挖、边坡工程、坝基等工程中运用得越来越广泛。由于预应力的损失,使工程失败而达不到加固效果的例子也很多。为使预应力锚索能更好地服务于工程,对预应力损失过程的分析和计算显得特别重要。而目前这方面的工作做得很少。因此,本文对预应力损失做理论方面的探讨。

2 自由段岩体压缩的预应力损失

预应力锚索加固是一种主动加固方式,通过锚索对加固的岩体预先施加压力,限制岩体有害变形的发展,从而保持岩体的稳定。预应力锚索加固结构如图1所示。自由段的岩体受到锚索预应力的作用产生压缩变形。这种变形是由于预应力引起自由段岩体的应力集中而产生的。自由段岩体由于受到风化等地质作用,松散破碎,在长期应力作用下,变形除了瞬时变形外,还有一部分变形将随着时间而变化,造成载荷损失(图2)。为了模拟自由段岩体的这种变形特性,本文取开尔文—伏尔特粘弹性模型本构关系进行分析(图3)。

其本构关系:

$$\frac{\eta_{fr}}{E_{f2}} \varepsilon + \varepsilon = \frac{\eta_{fr}}{E_{f1} \cdot E_{f2}} \sigma + \frac{E_{f1} + E_{f2}}{E_{f1} \cdot E_{f2}} \sigma \quad (1)$$

式中: η_{fr} ——自由段岩体粘滞系数; E_{f1} 、 E_{f2} ——自由段岩体弹性模量; ε ——自由段岩体应变率; σ ——自由段岩体应力的时间导数。上式也可写为:

$$P_{\sigma} = Q_{\varepsilon} \quad (2)$$

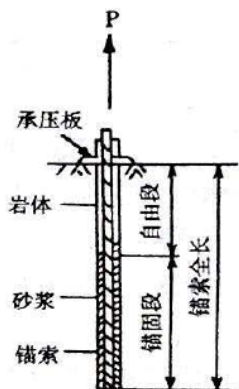


图1 预应力锚索加固示意图

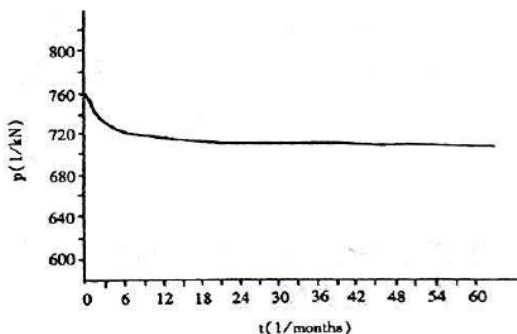


图2 锚索预应力随时间变化图

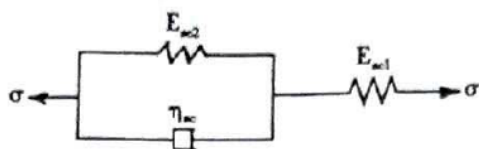


图3 开尔文—伏尔特模型

式中:

$$P = \frac{E_{f1} + E_{f2}}{E_{f1} \cdot E_{f2}} + \frac{\eta_{fr}}{E_{f1} \cdot E_{f2}} \cdot \frac{\partial}{\partial t}$$

$$Q = 1 + \frac{\eta_{fr}}{E_{f2}} \cdot \frac{\partial}{\partial t}$$

自由段岩体受到钢板压力的作用而产生压缩变形。其变形可根据法向压力 P 作用在半无限体表面半径为 R 的圆面积上,且静水压力下为弹性。而畸变下表现为开尔文—伏尔特模型本构关系。位移的粘弹性解为:

$$W_{ft} = \frac{PR(E_{f1} + E_{f2})}{2E_{f1} \cdot E_{f2}} + \frac{3PR(E_{f1} + E_{f2})}{2[3k(E_{f1} + E_{f2}) + E_{f1} \cdot E_{f2}]} - \frac{PR}{2E_{f2}} e^{-\frac{E_{f2}t}{\eta_{fr}}} - \frac{3PRE_{f1}^2}{2(3k + E_{f1})[3k(E_{f1} + E_{f2} + E_{f1} \cdot E_{f2})]} e^{-\alpha t} \quad (3)$$

式中: P ——锚索预加张力; k ——岩体体积变形模量; R ——承压板半径。

$$\alpha = [3k(E_{f1} + E_{f2}) + E_{f1} \cdot E_{f2}] / (3k + E_{f1}) \eta_{fr}$$

t ——时间。

自由段岩体位移产生的预应力损失为:

$$\sigma_{ft} = \frac{W_{ft}}{L_{fr}} E_c \quad (4)$$

式中: σ_{ft} ——自由段岩体产生的预应力损失值, L_{fr} ——自由段锚索长度, E_c ——锚索弹性模量, W_{ft} ——自由段岩体压缩量, 当 $t=0$ 时, 瞬时的预应力损失为:

$$\sigma_{f0} = \frac{W_{f0}}{L_{f0}} E_c \quad (5)$$

式中: W_{f0} ——把 $t=0$ 代入式(3)的位移值, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 预压力损失为:

$$\sigma_{f\infty} = \frac{W_{f\infty}}{L_{fr}} E_c \quad (6)$$

式中: $W_{f\infty}$ ——把 $t \rightarrow \infty$ 代入式(3)的位移值。

自由段锚索随时间产生的最大预应力损失

为:

$$\sigma_{ft} = \frac{W_{f\infty}}{L_{fr}} E_c - \frac{W_{f0}}{L_{fr}} E_c = \frac{E_c}{L_{fr}} (W_{f\infty} - W_{f0}) \quad (7)$$

这样就确定了自由段岩体随时间可能产生的最大预应力损失值。

3 锚固段岩体的预应力损失

锚固段结构见图4示。根据锚索受到张拉后,锚索与砂浆交界的粗糙作用,使砂浆厚壁筒的外表面也产生径向位移。而外面受到岩体的约束产生 P_2 , P_2 作用到岩壁上。其受力分析见图5示。

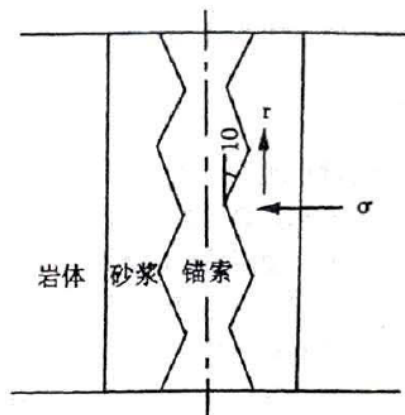


图4 锚固段结构

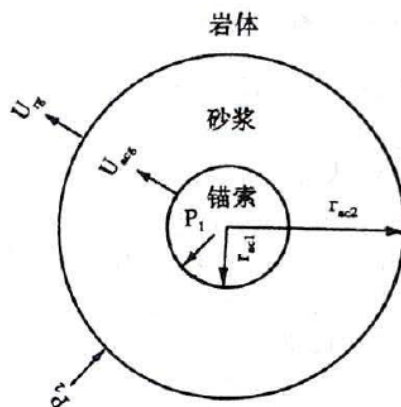


图5 锚固段受力状态

认为砂浆服从弹性本构关系和锚固段岩体服从于开尔文—伏尔特模型本构关系见图6示。其本构关系为:

$$P\sigma = Q\varepsilon \quad (8)$$

$$\text{式中: } P = \frac{E_{ac1} + E_{ac2}}{E_{ac1} \cdot E_{ac2}} + \frac{\eta_{ac}}{E_{ac1} \cdot E_{ac2}} + \frac{\alpha}{\alpha_t}$$

$$Q = 1 + \frac{\eta_{ac}}{E_{ac2}} \frac{\alpha}{\alpha_t}$$

根据厚壁筒理论和粘弹性对应原理可求得砂浆内壁的径向位移为:

$$v_{acg} = m'' p_1 \quad (9)$$

式中: v_{acg} —砂浆内壁径向位移, P_1 —砂浆内壁压力。

$$m'' = \frac{(1 + v_g)(1 - 2v_g)}{E_g} \cdot \frac{(r_1^2 - r_2^2)}{r_2^2 - r_1^2} r_1 + \frac{(1 + v_g)}{E_g} \cdot \frac{(1 - \frac{1}{x'}) r_1^2 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r_1}$$

$$x' = \frac{\frac{1}{2}(\frac{1}{E_{ac2}} + \frac{1}{E_{ac1}} - \frac{1}{E_{ac2}} e^{-\frac{E_{ac2}}{\eta_{ac}} t}) + \frac{(1 + v_g)}{E_g(r_2^2 - r_1^2)} [(1 - 2v_g)r_2^2 + r_1^2]}{\frac{1 + v_g}{E_g(r_2^2 - r_1^2)} [(1 - 2v_g)r_1^2 + r_2^2]}$$

$$P_1 = \frac{P}{2\pi r_1 L_{ac} \lg \{ i_0 [1 - (\frac{P_1}{\sigma_{lim}})^\beta] + \Phi \}}$$

式中: v_g —砂浆泊松比; E_g —砂浆弹性模量; r_1 —砂浆内壁半径; r_2 —砂浆外壁半径; E_{ac2} 、 E_{ac1} —锚固段岩体弹性模量; η_{ac} —锚固段岩体的粘滞系数; P_1 —砂浆内壁压力, P —锚索施加张力; L_{ac} —锚固段长度; σ_{lim} —砂浆抗压强度; β —剪胀角折减系数; $\beta = 0.25$; Φ —岩体内摩擦角; t —时间。

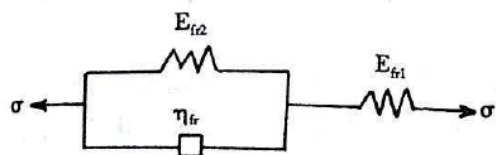


图6 锚固段岩体开尔文-伏尔特模型

锚索由于砂浆的径向位移引起的轴向位移由图4有:

$$U_{axt} = U_{acg} / \lg i_0 \quad (10)$$

式中: U_{axt} —锚固段锚索拉拔位移, i_0 —锚索表面粗糙度, 锚固段引起锚索的预应力损失为:

$$\sigma_{act} = \frac{V_{axt}}{L_{fr}} E_c \quad (11)$$

式中: σ_{act} —锚固段产生的预应力损失, E_c —锚索弹性模量, 当 $t = 0$ 时, 锚固段瞬时的预应力损失为:

$$\sigma_{aco} = \frac{U_{axo}}{L_{fr}} \cdot E_c \quad (12)$$

式中: U_{axo} — $t = 0$ 时锚索锚固段的拉拔位移, σ_{aco} —锚固段瞬时的预应力损失。当 $t \rightarrow \infty$ 时, 锚固段预应力损失为:

$$\sigma_{ac\infty} = \frac{U_{ax\infty}}{L_{fr}} E_c \quad (13)$$

式中: $U_{ax\infty}$ — $t \rightarrow \infty$ 时锚索锚固段的拉拔位移, $\sigma_{ac\infty}$ —锚固段长期产生的预应力损失, 锚固段由时间产生的最大预应力损失为:

$$\sigma_{at} = \frac{E_c}{L_{fr}} (V_{ax\infty} - U_{ax\infty}) \quad (14)$$

这样就确定了锚固段由时间产生的预应力损失计算公式。

4 锚索预应力随时间产生的损失分析

通过以上分析可知, 随时间产生的预应力损失由自由段岩体和锚固段岩体的蠕变以及锚索本身的松弛特性决定。预应力随时间产生的损失可由下式决定:

$$\sigma_u = \sigma_{fr} + \sigma_{at} + \psi L_r \quad (15)$$

式中: σ_u —锚索预应力随时间的损失值, ψ —锚索松弛降低系数 < 1.0 , L_r —锚索随时间的应力松弛损失, 由实验测定。

由式(15)即可确定预应力锚索在为工程服务期间, 预应力随时间损失的最大值。如果预应力损失过大, 将给加固效果带来不良影响。根据上述分析, 增加自由段锚索的长度, 有助于预应力损失的减少; 而增加锚固段的长度, 如果 P_1 保持不变, 对减少锚索预应力损失没有什么作用。在预应力损失部分后, 应及时再次使锚索张拉锁定, 以弥补预应力的损失, 保持有足够的预应力, 使工程长期稳定。

参考文献

- [1] Yazici S. and kaiser P. K. Bond strength of grouted cable bolts. Int. J. Rock Mech Sci & Geomech. Abstr. Vol. 29 No. 3, P279 - 292, 1992.
- [2] Brahim Benmokrane and Gerard Ballivy Five - year monitoring of load losses on prestressed cement - grouted rock anchors Can Geotech. J. No. 28, P668 - 677, 1991.