

基于非线性 Mohr-Coulomb 强度准则下锚索 极限抗拔力研究

邹金锋, 李 亮, 杨小礼, 邓宗伟

(中南大学土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 根据预应力锚索破裂面的形状参数方程、非线性 Mohr-Coulomb 强度准则和极限平衡原理, 推导出一个能够考虑锚索破裂面形状、岩土体种类、抗拉强度以及围岩压力和灌浆压力等因素的预应力锚索极限抗拔承载力计算公式。理论计算结果和算例分析表明了该理论及其求解方法的有效性和可靠性。

关键词: 非线性; 强度准则; 极限抗拔力; 预应力锚索

中图分类号: U455

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)01-0107-05

作者简介: 邹金锋(1978-), 男, 河南新县人, 博士研究生, 主要从事边坡与地下工程方面的研究工作。E-mail: zoujinfeng_0@163.com。

Study on the ultimate pullout force of pre-stressed cable based on nonlinear Mohr-Coulomb failure criterion

ZOU Jin-feng, LI Liang, YANG Xiao-li, DENG Zong-wei

(School of Civil Engineering & Architecture, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on the biparametric equation for shape of rupture surface, according to the limit equilibrium principle and Mohr-Coulomb nonlinear criterion, the ultimate pullout force of prestressed cables could be calculated by the derived equation which considered the shapes of rupture surface, rock types, grouting pressures, grouting materials, unconfined compressive strength of rock and weathering degree. At last, a case of the ultimate pullout force for two type of rupture surface was given by using a nonlinear SQP algorithm and the relation between the nonlinear parameter and the ultimate pullout force was analyzed. The theoretical values agreed with the measured values from the field test.

Key words: nonlinear; failure criterion; ultimate pullout force; pre-stressed cable

0 前 言

由于预应力锚索具有良好的支护优势, 已广泛地运用于各种滑坡治理与高边坡支护中^[1-4]。尽管锚索的支护优势与锚索的极限抗拔力直接相关^[2-3], 但多数学者对锚索的研究一般都着重于锚索的摩阻力沿锚固长度的分布及预应力的损失等方面^[5-7]。虽然有些学者对锚索的极限抗拔力有过不少研究, 但大多以 Hoek-Brown 强度准则为岩土体的破坏准则而得出的理论解答。如 Serrano A 和 Olalla C 等^[8]假设岩土体的破坏准则为 Hoek-Brown 强度准则, 根据极限平衡条件给出了锚索的极限抗拔力理论公式, 但需要采用变分的方法进行求解, 故不便于工程上的应用; Serrano A 等^[9]也是基于同一原理, 所采用的求解方法同样也很难应用; 另些学者考虑到了锚索等抗拔锚固系统的破坏面因素, 但所给的理论也不能与锚索的实际破坏面相吻

合^[10-12]。何思明等采用了较全面的分析方法^[13-16], 也考虑到了锚索达到极限承载力能力时的各破坏面情况, 但分析的情况只局限于岩土体处于 Hoek-Brown 强度准则的破坏行为。而对大多岩土体而言, 其强度准则都呈现出非线性 Mohr-Coulomb 强度准则^[17-18], 而基于这一强度准则下锚索极限抗拔力的探讨在国内外还很少有人涉及。据此, 本文将用较全面的破坏面参数方程和极限平衡原理, 并考虑岩土体的种类、无侧限抗压强度、风化程度、破碎特性及灌浆材料和灌浆压力等因素, 采用适合的非线性 Mohr-Coulomb 非强度准则来给出锚索破坏时的极限抗拔力理论解答。这在理论和在工程应用上都是一种有益的探索。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50408020)

收稿日期: 2005-09-20

1 预应力锚索破坏特性分析及非线性强度准则

1.1 锚索破裂面的参数方程

在极限拉拔荷载作用下, 锚索的破裂面形状有各种不同的假设。由文献[13]可知, 大量试验证实锚索的破裂面均为曲线型破裂面, 铅直荷载作用下, 其四周土中的破裂面呈对称的喇叭形, 其切线方向在板边缘近似垂直, 在地表处, 无论砂土还是黏质砂土均接近 $(45^\circ - \varphi/2)$, 简化为直线型是为了研究方便。最简单的假设是锚索沿浆体与岩土体的接触面破坏 (图 1 中的破裂面①); 其次就是假设破裂面为圆锥面 (图 1 中的破裂面②), 即其端部与锚索相切, 而在地表处与水平面成 $(45^\circ - \varphi/2)$ 夹角 (图 1 中的破裂面③)。

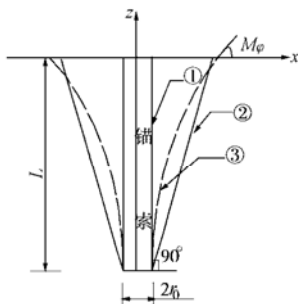


图 1 锚索典型破裂面示意图

Fig. 1 Typical rupture surface of cables

根据文献[13]可以建立如下破裂面的参数方程:

$$x = r_0 + \frac{L}{(n+1)\tan(\pi/4 - \varphi/2)} \left(\frac{z}{L}\right)^{(n+1)}, \quad (1)$$

式中, r_0 为锚固体半径, L 为锚固段长度, φ 为岩土体的内摩擦角, n 为大于 0 的待定参数。不难看出, 当 $z = L$ 时, 可求出锚索锚固段顶部的破坏范围为

$$x_G = r_0 + \frac{L}{(n+1)\tan(\pi/4 - \varphi/2)}. \quad (2)$$

根据式 (1) 所建立的破裂面参数方程可知: 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 因为考虑的是锚固段的破裂面, 故 $z \leq L$, 因此这种情况就是图 1 中所对应的破裂面①; 当 $n \rightarrow 0$ 时, 就是图 1 中破裂面②; 当 n 取其他值时, 得到的破裂面就是图 1 中复合破裂面③。因此式 (1) 所给出的参数方程符合锚索破坏时的实际状况。

1.2 非线性 Mohr-Coulomb 强度准则

在岩土工程中, 常常采用线性 Mohr-Coulomb 非强度准则, 在这个强度准则中, 最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 呈线性关系, 其表达式为

$$\sigma_1 = q_p + M_p \sigma_3, \quad (3)$$

式中, σ_1 和 σ_3 分别为破坏时的大、小主应力, q_p 、 M_p 为与岩土抗剪强度指标 c 、 φ 之间的关系为

$$M_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad q_p = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (4)$$

然而, 实验表明^[17-18], 在软弱的围岩中, 最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 的关系是非线性关系, 而线性关系只是其中的特例。其非线性曲线可用下式描述:

$$\sigma_1 = q_p + M_p^* \left(\sigma_3 / q_p\right)^\alpha, \quad (5)$$

式中, M_p^* 和 α 为由三轴实验确定的参数。式 (5) 是 Bieniawski 于 1974 年首次提出的, 它是在线性 Mohr-Coulomb 强度准则的基础上发展起来的。在应力空间 (τ, σ_n) 中, 式 (5) 的等价表达式为

$$\tau = c_0 \left(1 + \sigma_n / \sigma_t\right)^{1/m}. \quad (6)$$

将表达式 (6) 绘制成曲线如图 2 所示。在图 2 和式 (6) 中, c_0 为曲线与纵轴的截距, c_0 , σ_t 和 m 为由三轴试验确定的岩土材料参数。当 $m=1$ 时, 式 (6) 变成线性 Mohr-Coulomb 强度准则。

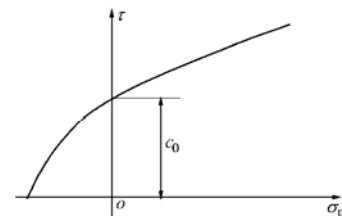


图 2 非线性屈服准则的切线

Fig. 2 The tangential line for the nonlinear failure criterion

2 锚索极限抗拔力计算

为了分析问题的方便和不失一般性, 假设锚索的破裂面为图 1 中的破坏面③, 建立如图 3 所示的计算模型。以此为基础, 采用非线性 Mohr-Coulomb 强度准则和极限平衡原理来研究破裂面上力的平衡, 并确定锚索的极限抗拔力, 锚索自由段上的岩土体用超载代替, 其大小为 $q_0 = \gamma h$, 其中, γ 为自由段岩土体的平均重度, h 为自由段长度, 取图 3 中的一个微元体进行极限平衡分析。作用在微元破裂面上的切向应力为 τ^* , 法向应力为 σ^* , 破裂面长度设为 ΔL , 其中法向应力 σ^* 的计算公式为

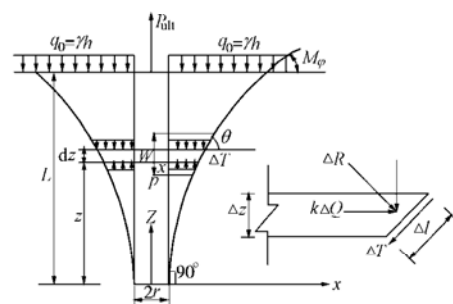


图 3 锚索极限抗拔力计算模型图

Fig. 3 The calculation model for the ultimate pullout force of cables

$$\sigma^* = [\gamma h + \gamma'(L - z)](\cos \theta + k_0 \sin \theta), \quad (7)$$

式中, k_0 为侧压力系数, γ' 为锚固段岩土体的平均重度, θ 为微元体破裂面切线方向与水平向的夹角。

考虑到微元体的竖向力平衡条件, 得

$$\Delta P = \pi q \Delta x (2x + \Delta x) + \pi \Delta q (x + \Delta x)^2 + \pi (x + \Delta x / 2)^2 \gamma' \Delta z + 2\pi (x + \Delta x / 2) (\tau^* \sin \theta + \sigma^* \cos \theta) \Delta z. \quad (8)$$

略去微分的高阶项并对等式两边分别取极限, 得

$$dP = 2\pi q dx + \pi \gamma' x^2 dz + 2\pi (\tau^* \sin \theta + \sigma^* \cos \theta) x dz, \quad (9)$$

其中, $\tau^* = c_0 (1 + \sigma_n / \sigma_i)^{1/m}$, $q = \gamma h + \gamma'(L - z)$, $\cos \theta = \sqrt{1/(1 + \tan^2 \theta)}$, $\sin \theta = \sqrt{\tan^2 \theta / (1 + \tan^2 \theta)}$, $\cot \theta = dx/dz = 1/\tan(e\varphi)(L/z)^{n+1}$ 。

根据非线性 Mohr-Coulomb 强度准则, 上述平衡方程可化为

$$dP/dz = 2\pi [\gamma h + \gamma'(L - z)] \cot \theta + \pi \gamma' x^2 + 2\pi x c_0 \{ (1 + (\sigma_n / \sigma_i)^{1/m} \cot \theta + [\gamma h + \gamma'(L - z)] \cos \theta + k_0 \sin \theta) \}. \quad (10)$$

对式 (10) 积分, 可得锚索的极限抗拔力计算公式为

$$P = \int_0^L \{ 2\pi [\gamma h + \gamma'(L - z)] \frac{dx}{dz} + \pi \gamma' x^2 + 2\pi x \{ c_0 (1 + \frac{\sigma_n}{\sigma_i})^{1/m} \cot \theta + [\gamma h + \gamma'(L - z)] (\cos \theta + k_0 \sin \theta) \} \} dz. \quad (11)$$

3 算例分析与讨论

3.1 求解方法

从理论上讲, 对式 (11) 求导, 可以利用下式所述的极值原理来进行求解:

$$\left. \begin{aligned} dP/dn &= 0, & d^2P/dn^2 &< 0 \\ dP/de &= 0, & d^2P/de^2 &< 0 \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

根据式 (12) 即可确定 n 和 e , 从而得到相应的破裂面方程及对应的锚索极限抗拔力解答。但要完成这一过程的困难较大, 因为式 (12) 有时无极值点, 即使有极值点, 在极值点处还需要满足 $d^2P/dn^2 < 0$ 条件。为了避免这一困难, 可以采用非线性 SQP 优化方法对式 (12) 求最小值^[19], 其具体实施过程叙述如下。

设非线性规划的目标函数和约束方程为

$$\left. \begin{aligned} \min & \quad f(x) \\ \text{s.t.} & \quad \left. \begin{aligned} c_i(x) &= 0 & (i=1, 2, \dots, m_c) \\ c_i(x) &\geq 0 & (i=m_c+1, \dots, m) \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

式中, 目标函数 $f(x)$ 和所有的 $c_i(x)$ 均为 R^n 中的二阶连续可微函数。

对式 (13) 的目标函数和等式约束方程进行拉格朗日变换得

$$L(x, \lambda) = f(x) - \sum_{i=1}^m \lambda_i c_i(x), \quad (14)$$

式中, $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)^T$ 为拉格朗日乘子向量。可通过逐步计算式 (14) 的解而得式 (13) 的局部稳定解。

为得到式 (13) 的最优解, 需通过对式 (13) 的罚函数进行一维搜索才能来保证 SQP 优化方法具有整体收敛性。这里对式 (13) 采用如下形式的罚函数:

$$F_r(x) = F(x) + r \left\{ \sum_{i=1}^{m_c} |c_i(x)| + \sum_{i=m_c+1}^m [\min[0, c_i(x)]] \right\}, \quad (15)$$

式中, $r > 0$ 是罚因子, $[\]$ 中的项为点 x 的可行性程度, 若 x 是式 (13) 的可行点, 则此项之值为 0, 随着点 x 远离可行域, 它取得更大的值。

利用上述过程进行编程就可以对式 (12) 求解。

本文可采用这种方法进行求解。

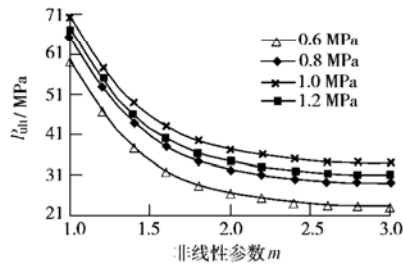
3.2 算例分析

(1) 试验介绍

本试验参照中国工程建设标准化协会标准^[20]。试验过程中锚索出现以下任一情况均视为已破坏的判定标准: ①后一级荷载产生的锚头位移增量达到或超过前一级荷载的两倍; ②锚头位移不收敛; ③锚头总位移超过设计允许位移值。考虑钻孔直径和安装中锚束的弯曲程度不一致等因素, 在正式张拉前对钢绞线预加载 3 次, 每次持续 5~10 min。3 次预加载后试验开始。如试验不能马上开始, 下次试验前仍应重复预加载。为分析锚固体的破坏形式和极限抗拔力, 故试验张拉连续进行, 在前级荷载稳定后进行下级加载, 直至破坏。因锚索锚固段长度及所处地层情况的差异, 使试验锚索的设计破坏荷载不同, 因此试验过程中采用的分级荷载也不相同。每次加荷后至少观测 5 min, 观测时间内, 测读锚头位移不应少于 3 次, 锚头位移量不大于 0.1 mm 时, 可施加下一级荷载; 否则需延长观测时间, 直至锚头位移增量在 2 h 内小于 0.2 mm 时, 可施加下一级荷载; 如还不满足, 则需再次延长观测时间, 直至锚头位移增量 4 h 内小于 2.0 mm 时, 再施加下一级荷载。由于部分地层为已风化土状的全强风化花岗岩, 加上破坏试验相应破坏荷载较大, 使得承压墩反力装置的反向位移不可忽视, 特设置相应装置测读承压墩的反向位移, 通过数据处理将此位移的影响消除, 得到锚头的真实位移。分别记录每级荷载作用下的锚头位移和承压墩位移, 计算锚索的伸长量。锚索采用 XQM 锚固体系, 其自锚能力好, 性能优良。试验设备选用 YCW-150A 型千斤顶 (行程 20 cm)、YDC240Q 千斤顶和 ZB4—500 型电动油泵, 位移测量仪器用位移百分表、直尺及游标卡尺。

(2) 理论结果与试验结果分析

$\theta \neq 90^\circ$ 时, 可直接利用二次线性规划方法对式 (12) 进行求解。利用二次线性规划的方法可得预应力锚索在不同的正应力作用下的极限抗拔力 P_{ult} 与非线性参数 m 间的关系, 见图 4。为验证本文的理论结果, 取京珠高速公路上某滑坡的锚索拉拔试验结果进

图4 P_{ult} 与 m 的关系曲线图Fig. 4 The $P_{ult} - m$ curves

行验证。该滑坡体的体积约 60000 m^3 ，滑坡区位于东亚大陆新华夏系第二复式沉降带的中南部，顺着公路方向，主要构造为新华夏系构造，其次为华夏系构造，主要构造线方向呈北 $35^\circ \sim 40^\circ$ 东向，且该区域还位于二迭 - 侏罗系形成的含煤构造盆地，公路东西侧山体受新华夏系苏仙岭逆断层控制，呈带状南北向坐落在含煤构造盆地之上。滑坡区沿线路方向长约 50 m ，沿滑移方向长约 135 m 。该滑坡采用锚索加固的处理方案。为了解预应力锚索在该煤系地层中的抗拔力问题，特在现场对锚索实际抗拔力进行了破坏性拉拔试验。

根据该滑坡煤系地层中岩土体的室内常规试验及三轴试验可知其主要参数指标为： $\gamma = 23.5 \text{ kN/m}^3$ ， $\varphi = 9.90^\circ$ ， $c_0 = 58 \text{ kPa}$ ， $\sigma_n = 2.8 \text{ MPa}$ ， $m = 2.03$ 。锚索采用 8 根 $7\phi 5 \text{ mm}$ 的钢绞线，试验锚索的锚固段长度为 8.0 m ，自由段长度为 4.7 m ，钻孔直径为 130 mm ，钻孔倾角为 25° ，灌浆压力为 0.6 MPa ，滑坡体中劣质煤的平均重度 $\gamma' = 20 \text{ kN/m}^3$ ，含水率在 $11.2\% \sim 19.6\%$ 之间。锚索的破坏性试验中实际张拉到了 3172.6 kPa 。而根据二次线性规划的优化方法可以求得 $n = 1.82$ ，从而得出理论计算结果为 $P_{ult} = 3281.6 \text{ kPa}$ 。试验实测结果与理论结果的对比说明利用非线性 Mohr-Coulomb 强度准则和二次线性规划法来预估预应力锚索极限抗拔力是可靠的。

当 $\theta = 90^\circ$ 时，锚索必定沿浆体与孔壁的接触面破坏，其破坏面如图 1 中的破坏面①所示，根据式 (12)，可以求得锚索的极限抗拔承载力理论计算式为

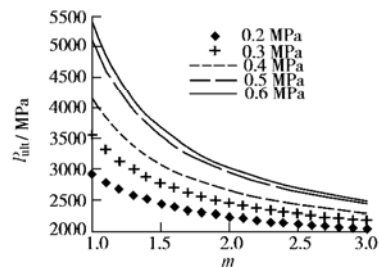
$$P_{ult} = \pi D L \tau^* = \pi D L c_0 (1 + \sigma_n / \sigma_t)^{1/m}, \quad (16)$$

式中， P_{ult} 为锚索极限抗拔力， σ_n 可理解为围岩压力或者是灌浆压力，取二者中的较大值作为计算值，其他符号意义与前面相同。

对于式 (16) 的结果，本文利用长沙至重庆高速公路某边坡预应力锚索拉拔试验的结果进行验证。该边坡的地质构造处于新华夏系一级构造第三复式隆起带东缘，中生代沅麻坳陷盆地中部，岩层产状为 $155^\circ \sim 165^\circ \angle 2^\circ \sim 4^\circ$ ，岩层走向与公路的线路走向呈小角度相交，为顺坡方向。滑动带以下为稳定的钙质砂

岩，滑动带为极度软化的红砂岩，滑动带以上为红砂岩破碎体。为了弄清预应力锚索在该地质条件下的锚固效果，特设计了三根试验锚索进行循环加载式的破坏性试验。根据锚固层钙质砂岩的室内常规试验及三轴试验可知其主要参数指标为： $c_0 = 90 \text{ kPa}$ ， $\sigma_t = 247.5 \text{ kPa}$ ， $\sigma_n = 10.8 \text{ MPa}$ ， $m = 1.8$ 。试验锚索的锚固段长度为 5.5 m ，自由段长度为 4.0 m ，钻孔直径为 130 mm ，灌浆压力为 0.58 MPa ，滑坡体中碎石土的平均重度 $\gamma' = 21.5 \text{ kN/m}^3$ 。试验中实测到三根锚索的极限抗拔力平均值为： $P_{ult} = 1671.2 \text{ kPa}$ ，其计算值 $P_{ult} = 1683.8 \text{ kPa}$ 与现场实测值基本吻合。当 m 分别取 $1.0 \sim 3.0$ 时，预应力锚索的极限抗拔力 P_{ult} 在不同的正应力 σ_n 作用下与参数非线性参数 m 之间的关系如图 5 所示。

图 4、5 中可看出，锚索受到的正应力相同时，材料非线性常数 m 越大，非线性关系就越明显，锚索的极限抗拔力就会越小；反之则越大。当不同非线性参数的岩土体要想达到相同极限抗拔力时，非线性参数越大就需要的正应力也会越大。当非线性参数相同时，锚索极限抗拔力随正应力的增加而增大。灌浆压力和围岩压力对于锚索抗拔力影响因素中起关键作用的是其中的较大者。因此在不破坏岩土体整体性的前提下我们可适当增加灌浆压力以提高锚索的极限抗拔力。

图5 P_{ult} 与 m 的关系曲线图Fig. 5 The $P_{ult} - m$ curves

4 结 论

(1) 采用岩土体的非线性 Mohr-Coulomb 强度准则并根据其破坏时的破裂面状态特征和极限平衡原理，推导出了能够综合考虑锚索破裂面形状、岩土体种类、抗拉强度以及围岩压力和灌浆压力等因素的预应力锚索极限抗拔承载力计算公式。

(2) 理论计算与实测结果吻合，说明了本文理论的可靠性，同时也说明了利用非线性 Mohr-Coulomb 强度准则分析锚索极限抗拔力的合理性。

(3) 在相同的正应力作用下，锚索的极限抗拔力随非线性参数的增大而降低，而且非线性参数越大，要使锚索达到相同的极限抗拔力就需要越大的正应力来提供，说明注浆锚索的注浆压力或者围岩压力对锚

索的极限抗拔力有着重要的制约作用。

参考文献:

- [1] 朱杰兵, 韩 军, 程良奎, 等. 三峡永久船闸预应力锚索加固对周围岩土体力学性状影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(6): 853 - 857. (ZHU Jie-bing, HAN Jun, CHENG Liang-kui, et al. Research on rockmass properties near anchor with prestressing for TGP's permanent ship lock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(6): 853 - 857. (in Chinese))
- [2] 邹金锋, 李 亮, 阮 波. 弹性状态下锚杆位移变形分析[J]. 中国铁道科学, 2004, **25**(5): 94 - 96. (ZOU Jin-feng, LI Liang, RUAN Bo. Analysis of displacement and deformation of anchor bolt under elastic state [J]. China Railway Science, 2004, **25**(5): 94 - 96. (in Chinese))
- [3] 蒋忠信. 拉力型锚索锚固段剪应力分布的高斯曲线模型[J]. 岩土工程学报, 2001, **123**(3): 696 - 699. (JIANG Zhong-xin. A Gauss curve model on shear stress along anchoring section of anchoring rope of extensional force type [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(6): 696 - 699. (in Chinese))
- [4] SERRANO A, et al. Ultimate bearing capacity at the tip of a pile in rock-part 2: application[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, **39**(7): 847 - 866.
- [5] SERRANO A, OLALLA C. Tensile resistance of rock and anchors[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1999, **36**(10): 449 - 474.
- [6] SANTARELLI F. Theoretical and experimental investigation of the stability of the axisymmetric bore hole[D]. London: University of London, 1987.
- [7] FARMER Holmberg. Stress distribution along a resin grouted rock anchor[J]. Int J Rock Mech and Min Geotech Abst, 1975, **12**(3): 347 - 351.
- [8] SERRANO A, et al. Ultimate bearing capacity at the tip of a pile in rock-part 1: application[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, **39**(7): 833 - 846.
- [9] SERRANO A, OLALLA C, GONZÁLEZ J. Ultimate bearing capacity of rock masses based on the modified Hoek-Brown criterion[J]. 2000, **37**(6): 1013 - 1018.
- [10] LADE P V. Elastic-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surface [J]. Int J Soilds Struct, 1977, **13**: 1019 - 1035.
- [11] KUMAR P. Shear failure envelope of nonlinear fracture criterion for rock mass[J]. Tunnelling and Underground Space Technologies, 1998, **13**(4): 453 - 458.
- [12] HAMPARUTHI K, MUTHUKRISHNAIAH K. Anchor in sand bed: delineation of rupture surface [J]. Ocean Engineering, 1999, **26**(6): 1249 - 1273.
- [13] 何思明, 王成华. 预应力锚索破坏特性及极限抗拔力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(17): 2966 - 2971. (HE Si-ming, WANG Cheng-hua. Study on failure characteristics and ultimate pullout force of prestressed cable [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(17): 2966 - 2971. (in Chinese))
- [14] 何思明, 张小刚, 等. 基于修正剪切滞模型的预应力锚索作用机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(15): 2562 - 2567. (HE Si-ming, ZHANG Xiao-gang, et al. Study on mechanism of prestressed anchoring cable based on modified shear lag model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(15): 251 - 256. (in Chinese))
- [15] 何思明, 张小刚, 王成华. 预应力锚索的非线性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(9): 1535 - 1541. (HE Si-ming, ZHANG Xiao-gang, WANG Cheng-hua. Nonlinear analysis on prestressed cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(9): 1535 - 1541. (in Chinese))
- [16] 何思明, 王成华, 吴文华. 基于损伤理论的预应力锚索荷载-变形特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(5): 786 - 792. (HE Si-ming, WANG Cheng-hua, WU Wen-hua. Analysis on loading-deformation of prestressed cable based on damage theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(5): 786 - 792. (in Chinese))
- [17] YANG Xiao-li, LI Liang, YIN Jian-hua. Stability analysis of rock slopes with a modified Hoek-Brown failure criterion[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, **28**(2): 181 - 190.
- [18] YANG Xiao-li, LI Liang, YIN Jian-hua. Seismic and static stability analysis for rock slopes by a kinematical approach[J]. Geotechnique, 2004, **54**(8): 543 - 549.
- [19] YANG Xiao-li, YIN Jian-hua. Upper bound solution for ultimate bearing capacity with a modified Hoek-Brown failure criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2005, **42**(4): 550 - 560.
- [20] CECS22—90 土层锚杆与施工规范[S]. 1990. (CECS22—90 Code for design and construction of soil anchors[S]. 1990. (in Chinese))
- [21] POWELL D. The convergence of variable methods for nonlinearly constrained optimization calculations [C]// Nonlinear Programmings. New York: Academic Press, 1978: 27 - 63.