

文章编号: 1006-4710(2013)01-0086-06

锚杆应力与影响参数之间的关系研究

朱训国^{1,2}

(1. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622;

2. 大连大学 复杂结构系统灾害预测与控制辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116622)

摘要: 为了研究锚杆承载力与其影响因素之间的关系, 在一定的假设条件下, 对常规拉拔实验物理模型建立了其相应的力学模型, 并推导出锚杆的应力应变函数。然后, 根据相应的试验结果, 深入分析了相应的影响因素: 锚固体材料结构参数、注浆体材料力学特性参数对锚杆承载力的影响, 在此基础上推导了考虑上述因素的锚杆摩阻力和承载力的计算公式以及其他的一系列结论。

关键词: 注浆岩石锚杆; 拉拔试验; 力学模型; 影响因素

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A

Research on the Relationship between the Stress and Influencing Parameters for Rock Bolt

ZHU Xunguo^{1,2}

(1. College of Architectural Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China;

2. Provincial Key Laboratory for Disaster Predicting and Controlling of Complex Structural System, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: In order to study the relationship between the bolt bearing capacity and the impact factors, and under a certain hypothetical condition, the mechanical model corresponding to conventional pull-out experimental physical model is established, and the stress and strain function of bolt is derived. And then, in terms of the corresponding test results, an indepth analysis is made of such impact factors as the effects of bolt material structure parameters and mechanical properties of grouting material parameters upon the bolt bearing capacity, on the basis of which the calculation formulas of bolt friction resistance and bearing capacity in considering the above influencing factors and a series of other conclusions are derived in this paper.

Key words: grouted rock bolt; pull-out test; mechanical model; influencing factors

锚杆(索)支护因其简单高效而大量应用于岩土和地下工程中^[1]。锚杆的类型、锚固岩土体性质、施工工艺都对锚杆的锚固效果产生一定的影响。为了更好地确定锚固设计参数, 对于重要工程都会对锚杆进行一定数量的拉拔试验和数值计算^[2]。国际岩石力学学会、我国各专业机构也专门对此问题制定了相关的试验规范, 以利于锚杆设计的合理正确。同时, 国内外的许多专家学者对锚杆的锚固性能也进行了大量的研究工作。文献[3]基于荷载传递理论推导得到锚杆抗拔力与位移之间的解析关系式, 研究了考虑锚杆自由端变形下的承载力特性。

文献[4]基于巷道围岩松动圈支护理论和锚杆支护原理, 利用现场监测对锚杆支护参数进行设计, 尤其是对锚杆承载力的确定进行了研究。文献[5]通过单根和多根扩底锚杆抗拉试验, 分析试验数据和破坏形态, 给出了扩底锚杆承载力值的一般公式。文献[6]进行了扩体型锚杆的工艺试验和抗拔试验研究。试验结果表明, 扩体型锚杆较普通锚杆的承载力平均提高 20% ~ 30%, 最大提高 66%; 扩体型锚杆的轴向应变陡降现象明显, 具有显著的端承效应。文献[7]研究了锚杆(索)受力及变形特性, 探讨了在锚杆支护中使用碟形托盘及其组合体进行让压锚

收稿日期: 2012-10-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009015/E090705; 51274051/E0409); 辽宁省教育厅科学技术基金资助项目(L2012450); 大连大学博士专项基金资助项目。

作者简介: 朱训国, 男, 博士, 研究方向为地下工程稳定性与防灾减灾。E-mail: zhu_xunguo@hotmail.com。

杆支护的可行性。文献[8]利用现有的锚杆承载力计算公式对楠竹加筋复合锚杆和钢筋锚杆的极限承载力进行试算,并在对各种土层锚杆承载力计算公式分析的基础上得出了影响锚杆抗拔承载力的因素,提出通过扩大锚杆截面和改良锚固方法可以提高锚杆抗拔承载力的工程建议。文献[9]进行现场试验施工,得到锚杆的应力应变关系及极限抗拔承载力。研究表明,改善锚土界面特性和采用变截面的锚固体可显著提高锚杆的抗拔承载力,同时,提出了一种经济高效的抗浮锚杆施工工法。

上述文献主要的不足就是大多试验主要是针对锚杆某一方面进行的,缺乏系统性。文献[10]~[12]通过试验研究了不同的注浆材料、锚杆类型对全长注浆锚杆锚固力的影响,并取得了大量的高质量的研究成果。从这些试验结果中,可以非常清晰地明晰锚杆的锚固性能与锚固参数的相应关系。此外,在锚杆的载荷传递力学模型研究中,文献[13]通过对风化岩体中拉、压力型锚杆的锚固力的监测,根据 P - S 曲线和载荷传递原理建立了锚杆锚固段的载荷传递力学模型。文献[14]根据锚杆微段的受力平衡以及载荷传递机理建立了锚杆的载荷传递微分方程,根据隧道围岩安装锚杆前后的应变变形耦合建立了锚杆的轴向载荷传递方程,在此基础上,结合圆形隧洞围岩的径向变形方程,推导出理想弹塑性围岩中注浆岩石锚杆的轴向应力的计算模型,以及锚固段与围岩体界面之间的摩阻力计算模型。

为了进一步对锚杆的锚固性能与其影响参数的关系进行研究,本文根据常规拉拔试验的力学模型建立全长注浆岩石锚杆的力学模型,并在此基础上对影响其锚固效果的众多参数进行分析,深入研究锚杆的锚固机理。

1 拉拔实验下注浆岩石锚杆应力分布模型

锚杆拉拔试验的基本原理是在锚杆拉拔试验中,利用加载仪器对锚杆逐级施加荷载,直至锚固系统发生失效破坏。记录每级荷载作用下锚固系统的位移变化,绘制荷载-位移(P - S)曲线,试验简图如图1所示。

大量的实验表明,在锚固系统处于弹性状态,锚杆的受力载荷 P 与锚固系统发生的位移变形 S 之间基本呈线性函数关系。国家规范规定,锚固系统发生的变形是弹性变形,其与锚杆所受外部荷载之间呈线性关系,由此可以认为当锚固系统安全运行时,锚固体的塑性变形较小,对锚固体的安全影响不大。

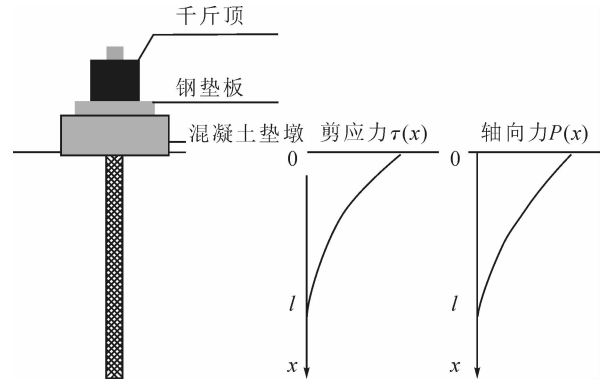


图1 常规拉拔试验方法中锚杆的受力状态

Fig. 1 Distribution of stress for rockbolt in its conventional pullout test

根据锚杆所受载荷 P 与锚固系统发生的位移变形 S 之间基本呈线性函数关系和锚杆的受力平衡状态,可得锚固段界面摩阻力为^[14]:

$$\tau(x) = \frac{K}{\pi d} \int_l^x \varepsilon(x) dx \quad (1)$$

式中, $\varepsilon(x)$ 是锚杆或锚索的轴向正应变, $\tau(x)$ 为锚固体与围岩体界面上的摩阻力, l 为锚杆的有效锚固长度, d 为锚杆的直径。综合剪切刚度 $K = K_{\min} \left\{ \frac{E_r}{4(1-\mu_r^2)d_b}, \frac{E_g}{4(1-\mu_g^2)d_g} \right\}$, 或 $K = \frac{K_1 K_2}{(K_1 + K_2)}$ 。式中, K_1 、 K_2 分别为注浆体和岩体的剪切刚度; E_r 、 E_g 分别为岩体和注浆体的弹性模量; μ_r 、 μ_g 分别为岩体和注浆体的泊松比; d_b 、 d_g 分别为锚杆和注浆体的直径。

则锚杆的轴向力为:

$$P(x) = \int_l^x 2\tau(x) \pi r dx \quad (2)$$

轴向正应变为:

$$\varepsilon(x) = 4P(x)/(E\pi d^2) \quad (3)$$

联合上述各式得:

$$P(x) = \int_l^x 2\tau(x) \pi r dx = \pi d \int_l^x \tau(x) dx = K \int_l^x \left[\int_l^x \varepsilon(x) dx \right] dx \quad (4)$$

$$P''(x) = 4KP(x)/(E\pi d^2) \quad (5)$$

代入轴力计算式(4)得:

$$\tau''(x) = 4K\tau(x)/(E\pi d^2) \quad (6)$$

解得 $\tau(x) = c \exp(-x \sqrt{4K/(E\pi d^2)})$, 式中 c 为常数。则锚杆轴向力分布函数为:

$$P(x) = [c\pi d/\sqrt{4K/(E\pi d^2)}] \exp(-x \sqrt{4K/(E\pi d^2)})$$

当 $x = 0$ 时, $P(0) = c\pi d/\sqrt{4K/(E\pi d^2)}$ 。

由图1可知,当 $x = 0$ 时, $P(x) = F$ 。因此得:

$$c = \frac{F}{\pi d} \sqrt{\frac{4K}{E\pi d^2}}$$

于是剪应力和轴向力以及轴向正应力的函数关系为:

$$\tau(x) = \frac{F}{\pi d} \sqrt{\frac{4K}{E\pi d^2}} \exp\left(-x \sqrt{\frac{4K}{E\pi d^2}}\right) \quad (7)$$

$$P(x) = F \exp\left(-x \sqrt{\frac{4K}{E\pi d^2}}\right) \quad (8)$$

$$\sigma(x) = \frac{4F}{\pi d^2} \exp\left(-x \sqrt{\frac{4K}{E\pi d^2}}\right) \quad (9)$$

式中 $E = E_r E_g / (E_r + E_g)$ 为锚固体的弹性模量; F 为锚杆的拉拔力; d 为锚固体直径。

为了验证本文推导公式之正确性,根据文献[15]中相关试验参数进行验证。文中作者对注浆锚杆相继进行了轴向拉拔力分别为40、120、140 kN的拉拔试验。 $K_1 = 4.5$ MPa/mm, $K_2 = 5.0 \times 10^3$ MPa/mm。锚固段的弹性模量 $E = 2.07 \times 10^5$ MPa, 锚固段直径 $d = 26$ mm。以拉拔力 $F = 40$ kN对上述计算公式的正确性进行验证,将上述参数带入公式(9),然后换算成锚固段的应变值,与实测应变值进行对比,计算结果如表1所示。

表1 理论计算结果与实测应变数据对比表

Tab.1 The comparison between theoretical results and the insite measured strain data

应变片位置	$x = 50$ mm	$x = 250$ mm	$x = 550$ mm
实测数据/mm	242	70	8
计算结果/mm	251	67	6

从表1可以看出,本文所推导的公式计算结果与实测数据非常接近,可以说明本文所推导的计算公式是合理的。

根据上述锚杆剪应力和轴向力以及轴向正应力的计算公式可以得出,围岩体参数、锚杆的几何和材质力学参数对锚杆的承载力影响很大。因此,为了更好地研究上述参数与承载力之间的关系,需要对上述参数进行深入分析与研究,以期得到影响锚固效果的主要因素。

2 锚杆承载力与影响参数之间的关系

锚固系统,尤其是锚固段的破坏通常发生在两个界面即注浆体与锚杆体之间的界面或锚固段与岩土体之间的界面上。所以,锚固系统的极限承载力由上述两界面中容许剪切强度较小的界面决定。因

此,锚杆的极限承载力定义为锚固段两界面中某界面临近破坏时,锚杆的承载力为锚杆的极限承载力。根据文献[10],假定发生破坏的界面是锚固体与岩土体之间的界面,其容许剪切强度 $[\tau] = 8.15$ MPa。下面分别就锚杆承载力和锚固体材料参数、注浆体材料特性之间的影响关系进行分析研究。

2.1 锚杆承载力与锚固体材料参数之间的关系

假定锚固体的直径 d 分别为20、30、40、50、60 mm, $K_1 = 4.5$ GPa, $K_2 = 5$ GPa,根据 K 的计算公式得 $K = 2.4$ GPa,同时,锚固体的弹性模量 $E = 210$ GPa,锚杆长度 $l = 1.5$ m。根据上文中界面容许剪切强度 $[\tau] = 8.15$ MPa,联合公式(8)可以得到不同直径下锚杆的承载力 P_b 分别为6.86、12.60、19.41、27.12、35.65 kN。

锚固体的握裹面积 $A_b = \pi dl$,其中 l 为锚固体长度即锚杆的长度,根据上文计算参数,通过计算得到不同直径锚固体的握裹面积 A_b 分别为9.4、14.1、18.8、23.6、28.3 cm^2 ,承载力与锚固体握裹面积之间通过数据拟合,得到二者之间的函数关系为:

$$P_b = -8.39 + 1.52 \times A_b, R = 0.99726$$

假设锚固长度 l 分别为0.5、0.75、1.0、1.25、1.5 m, $d = 30$ mm,通过计算得锚杆的承载力 P_b 分别为185.12、191.08、191.90、192.01、192.03 kN。通过数据拟合可得锚杆长度与其承载力之间的函数关系为:

$$P_b = 192.03 - 365.31 \exp(-7.94x), R^2 = 1$$

当锚固长度超过1 m后,不论锚杆的锚固长度如何增加,其承载比并没有发生明显的变化。二者之间的关系类似桩基础的载荷位移 $P-S$ 曲线;当锚杆的长度超过临界锚固长度,锚固系统发生破坏,此时锚杆承载力即为锚杆的极限承载力。

上述研究表明,在保障锚固系统安全情况下,采用较粗、较长的杆体材料可以有效提高锚固系统的承载力,有效改善其锚固效果。但在增加锚杆直径的情况,必须综合考虑锚杆与注浆体厚度之间的匹配问题,避免材料浪费。

2.2 锚杆应力与注浆体材料特性的关系

锚固段注浆体材料特性主要包括注浆体的水灰比 w/c 、注浆体的抗压强度 UCS 、注浆体的抗剪强度 τ_g 、注浆体的弹性模量 E_g 及其硬化时间 t 。为了研究注浆体材料特性对锚杆应力的影响,下面分别对相应参数与锚杆所受应力之间的相互关系进行分析研究。测试结果采用文献[10]中的相关试验数据,具体数据如表2所示。文献[10]中采用的锚杆分

两种,一种是异型锚杆,一种是普通螺纹锚杆,本文选取有对比价值的螺纹锚杆试验数据。其中锚固体与岩土体之间界面平均剪应力 τ_b 的计算公式为:

$$\tau_b = \frac{1}{l} \int_0^l \tau(x) dx = \frac{F}{\pi d} \frac{1}{l} \left[1 - \exp\left(-l \sqrt{\frac{4K}{E\pi d^2}}\right) \right] = \frac{F}{\pi d} \frac{1}{l} [1 - \exp(-lA)] \quad (10)$$

通过对公式(7)、(8)与公式(10)的适当变换,可以得到界面平均剪应力和界面剪应力、锚杆承载

力之间的函数关系:

$$\tau(x) = \frac{\tau_b \cdot A \cdot l}{\exp(Ax) - \exp[A(x-l)]} \quad (11)$$

$$P(x) = \frac{\tau_b \cdot \pi \cdot d \cdot l}{\exp(Ax) - \exp[A(x-l)]} \quad (12)$$

其中 $A = \sqrt{\frac{4K}{E\pi d^2}}$,其他参数同上文所述。

表2 注浆体特性与锚杆承载力之间的力学关系^[10]

Tab.2 Relationship between the mechanical properties and the grouting material on the bolt load capacity

注浆体类型	UCS/MPa	E_g /GPa	τ_g /MPa	P_b /kN	A_b /cm ²	τ_b /MPa	τ_b/τ_g
$w/c = 0.4^a$	5.30	1.15	2.04	16.53	84	1.94	0.95
$w/c = 0.4^b$	12.84	2.74	4.99	43.75	84	5.20	1.04
$w/c = 0.4^c$	17.74	2.96	6.22	55.28	84	6.63	1.07
$w/c = 0.4^d$	20.80	3.39	7.95	57.59	84	6.83	0.86
$w/c = 0.4^e$	22.94	3.79	9.17	59.84	84	7.14	0.78
$w/c = 0.4^f$	32.01	7.40	10.30	75.26	102	7.34	0.86
$w/c = 0.38^f$	33.33	8.05	10.70	77.39	102	7.54	0.71
$w/c = 0.36^f$	38.94	9.12	11.30	78.99	102	7.75	0.70
$w/c = 0.34^f$	42.00	9.30	11.93	80.87	102	7.95	0.68

说明:a、b、c、d、e、f分别表示注浆体硬化时间为1、3、5、7、14、21 d; τ_g 为注浆体的抗剪强度; τ_b 为锚固体与岩土体之间破坏界面的平均剪应力。

1) τ_g 与 τ_b 的关系

从表2可以看出,随着注浆体抗剪强度的增加,平均剪应力也在增加。以握裹面积为84 cm²的锚杆为例,通过相关试验数据的函数拟合,得到 τ_g 与 τ_b 之间的拟合函数为:

$$\tau_b = 3.58415 \times \ln(\tau_g) - 0.50009, R^2 = 0.97546$$

由此可见, τ_g 与 τ_b 呈半对数线性函数关系。

2) UCS 对 τ_b 的影响

通过相关试验数据的函数拟合,得到二者之间的拟合函数为: $\tau_b = 3.6145 \times \ln(UCS) - 4.04059$, $R^2 = 0.99411$ 。由此可见,UCS与 τ_b 呈半对数线性函数关系。

3) E_g 与 τ_b 的关系

通过对表2中的相关数据的拟合,得到了注浆体弹性模量和界面平均剪应力之间的函数关系为: $\tau_b = 4.46325 \times \ln(E_g) + 1.27569$, $R^2 = 0.96698$ 。

4) t 对 P_b 和 τ_b 的影响

在锚杆施工中,当注浆体注入钻孔后并非立刻硬化,须经过一定的时间才能起到其应有的作用,因此,分析不同硬化阶段对锚杆承载力的影响也是必要的。

通过试验数据的函数拟合,得到 t 与 P_b 之间的拟合函数为: $P_b = -72.51 \times \exp(t/ -1.96) + 60.02$, $R^2 = 0.99896$ 。从拟合函数可知,随着注浆体凝固硬化时间的增长,锚杆的承载力也随之增大,当凝固硬化时间超过7天后,锚杆的承载力增长就比较缓慢了。

通过相关试验数据的函数拟合,得到 τ_b 与 t 之间的拟合函数为: $\tau_b = 7.34046 \times [1 - \exp(-0.3931t)]$, $R^2 = 0.98137$,二者也呈一定的指数函数关系。

对于此问题的解释可以从注浆体自身物理特性进行分析,由于注浆体一般采用的是细骨料混凝土,混凝土硬化7天后其强度基本可以达到28天强度的80%,因此,其凝固7天后锚杆的承载力变化就基本处于较小范围。

5) w/c 对 P_b 和 τ_b 的影响

选择表2中握裹面积同为102 cm²且锚固段注浆体的水灰比分别为0.4、0.38、0.36、0.34的锚杆进行分析。通过数据拟合,得到二者的拟合关系函数为: $P_b = -92.15 \times (w/c) + 112.223$, $R = -0.99858$ 。即随着 w/c 的增大, P_b 随之降低。

锚固段界面平均剪应力与注浆体水灰比之间的拟合函数为: $\tau_b = -10.2 \times (w/c) + 11.419$, $R = -0.99995$ 。即随着 w/c 的增大, τ_b 随之降低。

通过分析上述各种因素对锚杆界面粘结强度、锚杆承载力的影响,以及所得拟合函数,对公式(11)、(12)进行修正,得到锚杆界面粘结强度、锚杆承载力与各个影响因素之间的综合表达函数关系为:

$$\tau_b = f(\tau_g, UCS, E_g, t, w/c)$$

将上式带入公式(11)和(12),可以得到锚固系统剪应力与轴向荷载的计算公式为:

$$\tau(x) = \frac{\tau_b \cdot A \cdot l}{\exp(Ax) - \exp[A(x-l)]} = \frac{f(\tau_g, UCS, E_g, t, w/c) \cdot A \cdot l}{\exp(Ax) - \exp[A(x-l)]} \quad (13)$$

$$P(x) = \frac{\tau_b \cdot \pi \cdot d \cdot l}{\exp(Ax) - \exp[A(x-l)]} = \frac{f(\tau_g, UCS, E_g, t, w/c) \cdot \pi \cdot d \cdot l}{\exp(Ax) - \exp[A(x-l)]} \quad (14)$$

从以上两式可以进一步得出,锚杆的界面剪应力和轴向荷载不仅仅与锚杆的材料性质有关,而且还与注浆体的力学性质有非常大的关系。因此,如果要确定锚杆的界面剪应力、锚杆的轴向荷载等锚杆的受力情况,需要综合考虑多方面的因素才能得到合理的计算公式。

3 结论

本文根据锚杆拉拔试验中的受力简化模型,建立了全长注浆岩石锚杆的轴向荷载和界面剪应力函数方程,然后在此基础上对影响轴向力和剪应力分布的相关参数进行了分析研究,得到了以下研究结论。

1) 注浆岩石锚杆在常规拉拔试验下,其轴向荷载和界面剪应力基本呈指数递减函数分布,从锚杆受力最大值逐渐递减至零值。这与规范中假定锚杆受力均匀分布是不同的。

2) 不同的锚杆直径对锚固应力分布形式影响不大,但不同直径的锚杆其锚固性能是不同的。在一定范围内,适当增大锚杆的直径可以有效地改善锚杆的锚固效果。但必须与锚固段的注浆体厚度呈最佳匹配。因此,在锚杆安装中,应该选择较大直径的锚杆体,并考虑锚杆直径与注浆体厚度的匹配问题。

3) 锚杆的长度与其承载力之间的函数关系是

非线性函数关系。当锚固系统处于弹性阶段,锚杆的承载力与其长度呈线性关系;当锚固系统处于塑性破坏阶段,锚杆长度的增加并不能使锚杆承载力有效增加。由此可以认为在锚固设计中存在一个有效锚固长度的重要参数。对于注浆体材料特性与锚杆承载力的影响关系,通过分析得出, τ_g 与 τ_b 、 UCS 与 τ_b 以及 E_g 与 τ_b 都呈半对数线性函数关系。注浆体不同的凝固硬化阶段 t 与 P_b 和 τ_b 之间呈递增指数函数关系。 w/c 与 P_b 和 τ_b 之间呈线性递减函数关系,即随着 w/c 的增大, P_b 和 τ_b 随之降低。

4) 在上述研究的基础上提出了一个综合考虑多种因素确定锚杆界面剪应力和轴向荷载的计算公式,根据文中各种影响因素的分析拟合函数基本可以确定界面剪应力和轴向荷载。

参考文献:

- [1] 朱训国,杨庆. 深基坑预应力锚索支护监测数据分析与研究[J]. 西安理工大学学报,2011,27(3):350-355.
Zhu Xunguo, Yang Qing. The study and analysis of monitoring data for pre-stressed anchorage in foundation excavation reinforcement engineering [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011,27(3):350-355.
- [2] 靖洪文,曲天智,吴学兵,等. 压力分散型锚杆力学特征影响因素的数值分析[J]. 西安理工大学学报,2008,24(1):32-37.
Jing Hongwen, Qu Tianzhi, Wu Xuebing, et al. Numerical analysis on influencing factors of pressure dispersive rockbolts mechanical properties [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008,24(1):32-37.
- [3] 刘晓明,张亮亮. 考虑自由端受荷的锚杆变形和承载特性研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2012,39(6):7-13.
Liu Xiaoming, Zhang Liangliang. Research on the deformation and bearing characteristics of anchor considering the load bearing of free section [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2012,39(6):7-13.
- [4] 徐长磊,郭相参. 矿山巷道锚杆支护参数的设计方法[J]. 中国矿业,2012,21(S):381-384.
Xu Changlei, Guo Xiangcan. A method designing parameter of bolting for a mine roadway [J]. China Mining Magazine, 2012,21(S):381-384.
- [5] 阎寒,邓德全. 扩底锚杆在风力发电机组基础中的承载力探讨[J]. 武汉大学学报:工学版,2012,45(S):151-155.
Yan Han, Deng Dequan. Discussion on bearing capacity of enlarged bottom anchor bolt in wind turbine foundation [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012,45(S):

- 151-155.
- [6] 胡建林,张培文. 扩体型锚杆的研制及其抗拔试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(6):1615-1620.
Hu Jianlin, Zhang Peiwen. Development of under reamed anchor and experimental study of uplift resistance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(6):1615-1620.
- [7] 陈新年,奚家米,张琨. 锚杆(索)作用力学特性分析及让压试验[J]. 煤田地质与勘探,2011,39(6):45-49.
Chen Xinnian, Xi Jiami, Zhang Kun. Mechanical properties of anchor bolt(cable) action and yield experiment[J]. Coal Geology & Exploration, 2011,39(6):45-49.
- [8] 王晓东,张虎元,吕擎峰,等. 土层锚杆抗拔承载力确定方法及影响因素分析[J]. 建筑结构,2010,40(3):58-63.
Wang Xiaodong, Zhang Huyuan, Lü Qingfeng, et al. Calculating method of soil anchor pullout resistance and analysis on its influencing factors [J]. Building Structure, 2010, 40(3):58~63.
- [9] 孙涛,杨俊杰,安庆军,等. 土层抗浮锚杆承载力关键影响因素现场试验研究[J]. 中国海洋大学学报,2011,41(11):18-22.
Sun Tao, Yang Junjie, An Qingjun, et al. Study on key factors to affect the bearing capacity of soil anti-floating anchor by field tests [J]. Periodical of Ocean University of China, 2011,41(11):18-22.
- [10] Kilic A, Yasar E, Celik A G. Effect of grout properties on the pull-out load capacity of fully grouted rock bolt [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2002, 17: 355-362.
- [11] Kilic A, Yasar E, Atis C D. Effect of bar shape on the pull-out capacity of fully grouted rock bolts[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18:1-6.
- [12] Nak-Kyung Kim. Performance of tension and compression anchors in weathered soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(12):1138-1150.
- [13] 朱训国,王大国. 基于载荷传递机理的注浆岩石锚杆锚固模型[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2008,27(6):813-817.
Zhu Xunguo, Wang Daguo. Study of reinforcement mechanism of fully grouting rock bolt based on load transfer mechanism[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2008,27(6):813-817.
- [14] 朱训国,杨庆,栾茂田. 岩体锚固效应研究及锚杆的解析本构模型研究[J]. 岩土力学,2007,3:527-533.
Zhu Xunguo, Yang Qing, Luan Maotian. Study of reinforcement effect of anchored rock mass and analytical constitutive equation for rock bolt [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007,3:527-533.
- [15] 董宏晓. 锚杆内锚固段应力分布及设计计算方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2001.
Dong Hongxiao. Shear stress distribution and design calculation method for internal section [D]. Chengdou: Southwest Jiaotong University, 2001.

(责任编辑 王卫勋)