

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.02.021

支护结构对地下厂房围岩附加抗能的作用研究

刘登禹¹, 张建海¹, 周 钟², 廖成刚², 郑进修¹, 罗 滔³

(1. 四川大学 水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610065;

3. 西京学院陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安 710123)

摘 要: 为更合理地解释支护结构的作用机理, 量化锚杆(索)的加固效果, 从能量分析角度开展研究, 首先明确附加抗能是支护结构对围岩贡献的能量补给, 提出了支护结构的能量补给理论分析方法及其抗能计算公式; 进而依据国内 20 个水电工程地下厂房实测资料, 对主厂房边墙的支护参数展开归纳统计; 最后基于附加抗能提出了能量支护指数的概念。结果表明: 支护结构对围岩附加抗能的贡献主要包括锚杆(索)抗拉强度提供的抗能、锚杆(索)与围岩接触面粘结作用提供的抗能、围岩裂隙灌浆粘结作用提供的抗能; 锚杆(索)附加抗能、围岩强度应力比、主厂房开挖跨度三者的关系可通过 4 个经验公式加以概括; 锚杆(索)的能量支护指数分布在 1.0 附近, 该特性可以为工程设计提供参考依据。

关键词: 地下厂房; 支护结构; 附加抗能; 能量支护指数

中图分类号: TU94⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)02—0109—09

Additional Energy Resistant Effects of Supporting Structure to Surrounding Rock in Underground Powerhouse

LIU Dengyu¹, ZHANG Jianhai¹, ZHOU Zhong², LIAO Chenggang², ZHENG Jinxiu¹, LUO Tao³

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

2. Power China Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 610065, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an, Shaanxi 710123, China)

Abstract: To more reasonably explain the reinforcement mechanism of supporting structure to surrounding rock, and quantify the reinforced effect of bolts, conducting a research from a perspective of energy analysis is a new way. Firstly, it is defined that the additional resistant energy is an energy supply that supporting structure contributes to surrounding rock, and a theoretical analysis method of energy replenishment for supporting structure is proposed together with its calculation formulas of resistant energy. Then, the side wall's supporting parameters of 20 hydropower underground powerhouses in China are summarized. Finally, a concept of energy supporting index is put forward based on the additional resistant energy. The research result indicates that the additional resistant energy is composed of 3 parts: resistant energy provided by tensile strength of bolts, resistant energy provided by bonding effect of interface between bolts and surrounding rock, and resistant energy provided by bonding effect of fissure grouting in surrounding rock. Relationship between the additional resistant energy provided by bolts, the strength-stress ratio of surrounding rock, and the excavation span of main powerhouse is fitted by 4 empirical formulas. All energy supporting indexes of 20 projects are distributed in the vicinity of 1.0, this feature can provide reference for support design.

Keywords: underground powerhouse; supporting structure; additional anti-energy; energy supporting index

收稿日期: 2018-10-23

修稿日期: 2018-11-27

作者简介: 刘登禹(1994—), 男, 四川广元人, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程和地下工程理论及计算分析。E-mail: 273247997@qq.com
通讯作者: 张建海(1968—), 男, 河南卫辉人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程和地下工程理论及计算分析方面的研究工作。

E-mail: 1057729757@qq.com

地下厂房开挖后,洞周围压急剧下降,围岩强度降低,抵抗变形和破坏的能力下降,甚至出现劈裂、剥落、松弛等破坏现象,且高地应力条件下的洞周松弛区可超过 $10\text{ m}^{[1]}$ 。对此,工程上一般综合采用普通锚杆、预应力锚杆(索)组成的支护结构加固围岩。特别是近年来深部地下工程的不断增多,地下厂房面临高地应力、大埋深、穿越地层复杂多变、高地下水孔压等复杂地质环境,加之洞室群空间布置密集、围岩介质特性迥异,因而复杂应力状态下围岩的加固机理和设计规范尚不成熟,地下厂房的支护结构在相当程度上仍处于“经验设计、经验施工”的阶段^[2-3]。如何更合理地解释支护结构对围岩的加固机理,定量地评价锚杆(索)的支护效果,从而指导支护结构设计仍是一个亟待深化研究的问题。

长期以来,众多学者通过理论推导、模型试验及数值模拟等手段对锚杆(索)的加固机理进行了深入研究。葛修润等^[4]通过加锚岩体的节理面抗剪试验,探讨了锚杆的“销钉”作用机制对节理面抗剪强度的影响。Kilic 等^[5]通过抗拔破坏实验,将水灰比、锚孔深度和添加剂等不同条件下的锚固体承载力进行对比,研究了不同灌浆体特性对锚杆抗拔能力的影响。侯朝炯等^[6]通过模型试验研究了巷道锚杆支护下锚固岩体峰值强度及残余强度的强化效应,并分析了其对锚固围岩力学参数的改善。Kim 等^[7]通过室内实验研究了不同锚固间距下围岩抗剪强度与法向应力之间的关系,认为岩石锚杆可使围岩凝聚力显著增加,而对围岩内摩擦角影响较小。徐前卫等^[8]针对预应力锚索的三维数值模拟,提出了一种以特定杆单元分别模拟锚固段、自由段的新方法,阐述了锚固的力学机理主要在于改善围岩应力状态、抑制节理面剪胀效应和使岩体增韧止裂。唐旭海等^[9]提出了锚杆支护下围岩黏聚力增量的计算公式,在溪洛渡地下厂房围岩稳定性的有限元分析中应用效果良好。杨慧敏^[10]通过对预应力锚杆(索)进行数值模拟研究,证明了支护结构可有效改善围岩应力状态和力学参数,并能提高节理岩体的变形能力和抗剪性能。谷拴成等^[11]基于复合材料等效的概念提出了一种围岩增强体模型,并根据围岩增强理论和位移等效条件导出了锚杆加固后岩体强度参数的表达式,且该公式与数值模拟结果吻合良好。综上所述,目前对于锚杆(索)作用机理的分析,一般都是将其视为杆、梁单元考虑,一方面考虑它的刚度贡献,另一方面考虑其对围岩强度参数的贡献,但鲜有从能量角度研究支护机理和支护效果

的报道。

鉴于此,本文从能量分析的角度,将锚杆(索)加固围岩视为一个支护结构与围岩协同工作的完整结构体系,附加抗能即为支护结构对围岩贡献的能量补给,而围岩的受力变形和破坏失稳将是整个体系能量储存与耗散的体现^[12-13]。基于此,提出了支护结构的能量补给理论分析方法及其抗能计算公式,揭示了支护结构的能量作用机理;进而依据国内 20 个水电工程地下厂房实测资料,对主厂房边墙的支护参数展开归纳统计;最后基于附加抗能提出了能量支护指数的概念,建立了支护结构附加抗能的经验判据方法。

1 支护结构对围岩附加抗能的贡献

1.1 附加抗能的组成及计算方法

围岩施加锚杆(索)后,构成共同变形和承载体系。相对于岩体,锚杆(索)抗拉强度大,塑性变形量大,能达到的极限应变也远大于岩体。如图 1 所示,对于间排距为 $(a \times b)/\text{m}$ 、长度为 L/m 、直径为 Φ/m 、横截面积为 A_g/m^2 的锚杆(索),支护结构对围岩附加抗能的能量补给主要体现在以下三个方面。

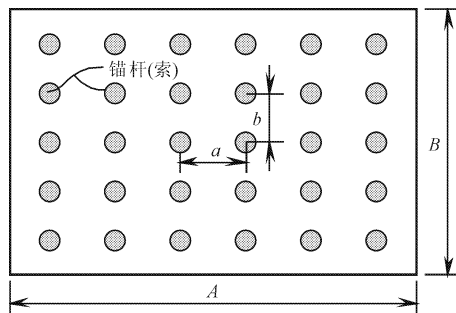


图 1 锚杆(索)布置示意图

1.1.1 锚杆(索)抗拉强度提供的抗能

图 1 中长 A/m 、宽 B/m 、深 L/m 区域的围岩体积 V_r/m^3 为

$$V_r = ABL \quad (1)$$

以上体积内锚杆(索)总数 n 为

$$n = \frac{AB}{ab} \quad (2)$$

则围岩体积 V_r 内的锚杆(索)体积 V_b/m^3 为

$$V_b = nA_gL \quad (3)$$

故单位体积岩体内的锚杆(索)体积 r_b/m^3 为

$$r_b = \frac{V_b}{V_r} = \frac{A_g}{ab} \quad (4)$$

锚杆(索)的应力-应变关系采用弹性-理想塑性模型(见图 2),则单位体积锚杆(索)抗拉强度

提供的抗能 $U_b/(J \cdot m^{-3})$ 为

$$U_b = \frac{\sigma_1^2}{2E_s} + \sigma_1 \left(\epsilon_s - \frac{\sigma_1}{E_s} \right) \quad (5)$$

式中: σ_1 为锚杆(索)的抗拉强度, Pa; E_s 为其弹性模量, Pa; ϵ_s 为其极限应变, 可取为 0.2。

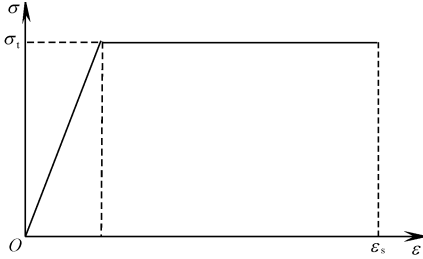


图 2 锚杆(索)的应力 - 应变关系

由式(4)、式(5)可得单位体积岩体内锚杆(索)抗拉强度提供的抗能 $U_{ten}/(J \cdot m^{-3})$ 为

$$U_{ten} = r_b U_b = \frac{A_g}{ab} \left[\frac{\sigma_1^2}{2E_s} + \sigma_1 \left(\epsilon_s - \frac{\sigma_1}{E_s} \right) \right] \quad (6)$$

1.1.2 锚杆(索)/围岩接触面粘结作用提供的抗能

图 3 为锚杆(索)与岩体在钻孔灌注砂浆后形成的接触面,其粘结作用具有粘结表面能。设该接触面的单位面积粘结表面能为 $\gamma_1/(J \cdot m^{-2})$, 则单根锚杆(索)与围岩接触面的面积 $A_m/(m^2)$ 可近似为

$$A_m \approx \pi \Phi L \quad (7)$$

则单根锚杆(索)与围岩接触面粘结作用提供的抗剪能 $U_m/(J \cdot m^{-3})$ 为

$$U_m = \gamma_1 A_m \quad (8)$$

类似式(4)的推导, 故单位体积岩体内锚杆(索)与围岩接触面提供的抗能 $U_{int}/(J \cdot m^{-3})$ 为

$$U_{int} = \frac{nU_m}{V_r} = \frac{\pi \Phi \gamma_1}{ab} \quad (9)$$

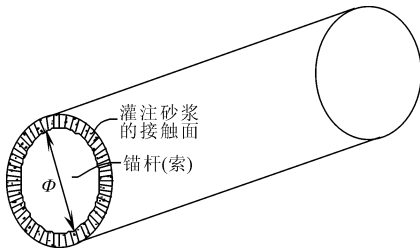


图 3 锚杆(索)与围岩的接触面

对于粘结表面能 γ_1 , 采用文献[14]中粘结应力 τ/MPa 与滑移量 d/mm 的关系曲线见(图 4、图 5), 其对应公式为

$$\text{锚杆} \quad \tau = \left(\begin{array}{l} 54.61d - 525.93d^2 \\ + 2001.83d^3 - 2712.86d^4 \end{array} \right) \quad (10)$$

$$\text{锚索} \quad \tau = \left(\begin{array}{l} 38.23d - 81.55d^2 \\ + 83.50d^3 - 37.51d^4 \end{array} \right) \quad (11)$$

在滑移量为零至最大粘结剪应力对应的滑移量之间, 通过积分求值。

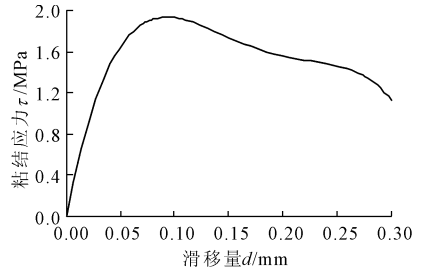


图 4 锚杆的粘结 - 滑移曲线^[14]

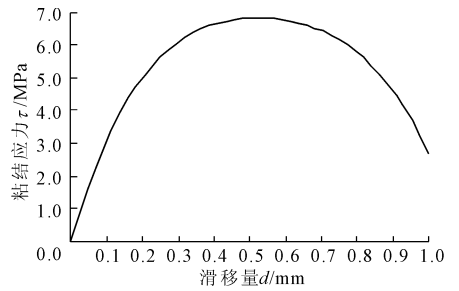


图 5 锚索的粘结 - 滑移曲线^[15]

1.1.3 围岩裂隙灌浆粘结作用提供的抗能

围岩裂隙进行灌浆处理后, 砂浆对灌浆孔周围裂隙起到填充和粘结作用, 同样存在粘结表面能。为简化推导, 假设裂隙行迹沿单一方向, 围岩裂隙灌浆的单位面积粘结表面能为 $\gamma_2/(J \cdot m^{-2})$, 裂隙连通率为 η , 单孔灌浆影响区半径为 R_C/m , 裂隙间距为 d_j/m 。

以钻孔为中心截取长、宽、深均为 L_0/m 的岩体(见图 6), 则单位深度的围岩裂隙面积 S_0/m^2 为

$$S_0 = \eta L_0^2 \quad (12)$$

而围岩总体积 $V = L_0^3$ 内总裂隙迹数 N 为

$$N = \frac{L_0}{d_j} \quad (13)$$

则围岩总体积 V 内的裂隙总面积 S_j/m^2 为

$$S_j = NS_0 = \eta \frac{V}{d_j} \quad (14)$$

故单位体积岩体内裂隙总面积 r_j/m^2 为

$$r_j = \frac{S_j}{V} = \frac{\eta}{d_j} \quad (15)$$

由此可得单孔灌浆内的裂隙总面积 S_{j0}/m^2 为

$$S_{j0} = \pi R_C^2 L \cdot r_j = \frac{\eta \pi R_C^2 L}{d_j} \quad (16)$$

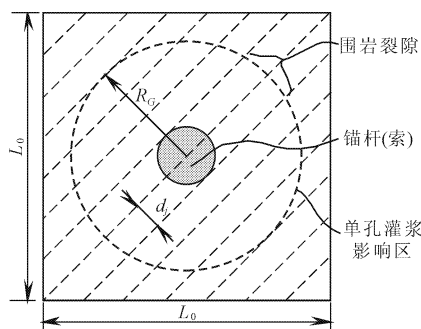


图 6 围岩裂隙灌浆示意图

类似式(4)的推导,得到单位体积岩体内围岩裂隙灌浆提供的抗能 $U_{\text{grt}}/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$ 为

$$U_{\text{grt}} = \frac{nS_{j0}\gamma_2}{V_r} = \frac{\pi R_G^2 \eta \gamma_2}{abd_j} \quad (17)$$

由式(6)、式(9)、式(17)可得单位体积岩体内支护结构对围岩贡献的附加抗能 $U_{\text{add}}/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$ 为

$$U_{\text{add}} = U_{\text{ten}} + U_{\text{int}} + U_{\text{grt}} \quad (18)$$

1.2 附加抗能组成的对比分析

对于直径 28 mm 和 32 mm 的锚杆,其杆体部分为 HRB335 钢筋,极限抗拉强度 455 MPa,弹性模量 200 GPa,极限拉应变取为 0.2^[16];式(10)中最大粘结剪应力 τ_{max} 对应的滑移量 $d = 0.09$ mm,由此求得粘结表面能 γ_1 为 128.8 J/m²;参考式(10)的 γ_1 计算值,裂隙灌浆的粘结表面能 γ_2 取为 800 J/m²。对于单束锚固力为 1 000 kN(1×6 股)和 2 000 kN(1×12 股)的锚索,其索体部分由相应股数的钢绞线组成,极限抗拉强度 1 570 MPa,弹性模量 195 GPa,极限拉应变取为 0.2,而钢绞线股数由锚固预应力根据文献[17-18]确定;式(11)中最大粘结剪应力 τ_{max} 对应的滑移量 $d = 0.52$ mm,由此求得求得粘结表面能 γ_1 为 2 603.4 J/m²;参考式(11)的 γ_1 计算值,裂隙灌浆的粘结表面能 γ_2 取为 1 000 J/m²。同时参考锦屏一级地下厂房的围岩特征,单孔灌浆影响区半径、裂隙间距、裂隙连通率均分别取为 0.5 m、0.1 m 和 0.3 m。

由式(18)可见,支护结构贡献的附加抗能与间排距有关。据此绘制出锚杆(索)提供的各项附加抗能-间排距关系曲线(见图 7—图 11),并对各项附加抗能的大小量级进行了列表对比(见表 1、表 2)。

由图 7—图 11 可见, U_{ten} 、 U_{int} 、 U_{grt} 均随着间排距的增加而减小,且在间排距较小时增长迅速;在相等间排距下, $\Phi 32$ 锚杆 U_{ten} 、 U_{int} 较 $\Phi 28$ 更大,2 000 kN 锚索 U_{ten} 、 U_{int} 较 1 000 kN 更大。由表 1、表 2 可见, U_{ten} 是附加抗能 U_{add} 的主体,例如:在一定间排

距下, $\Phi 28$ 锚杆的 U_{ten} 约占其附加抗能 U_{add} 的 96.71%,而 U_{int} 、 U_{grt} 之和的比例仅为 3.29%,其余情况类似。分析表明,以上三种抗能贡献中锚杆(索)抗拉强度提供的抗能量级最为显著,而锚杆(索)与围岩接触面及围岩裂隙灌浆的粘结作用提供的抗能量级较小,在计算支护结构对围岩附加抗能的贡献时可以忽略。

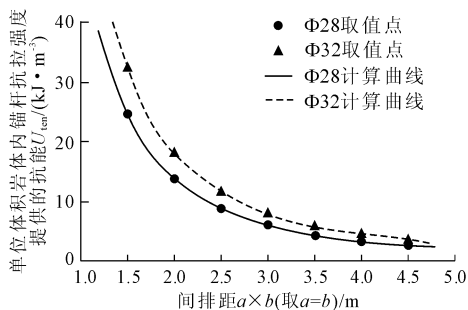


图 7 锚杆抗拉强度抗能与间排距关系曲线

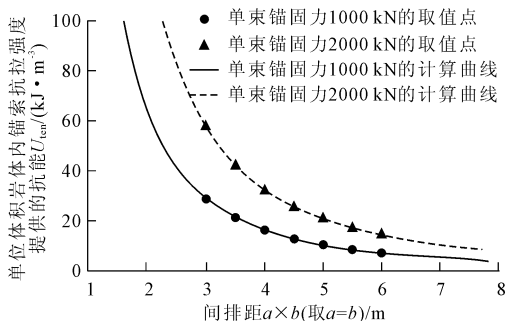


图 8 锚索抗拉强度抗能与间排距关系曲线

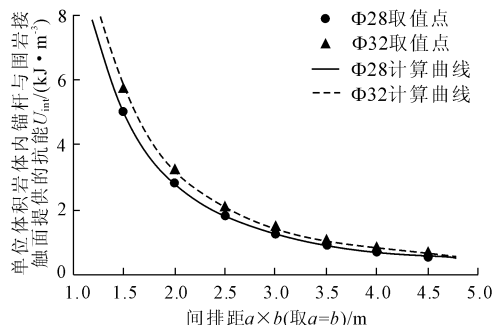


图 9 锚杆与围岩的接触面抗能与间排距关系曲线

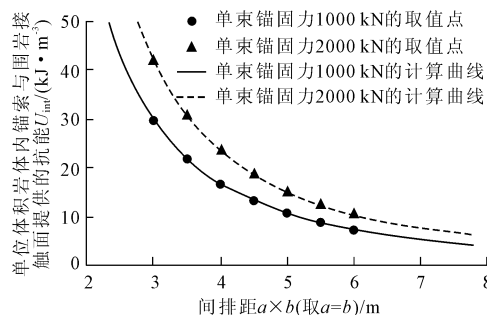


图 10 锚索与围岩的接触面抗能与间排距关系曲线

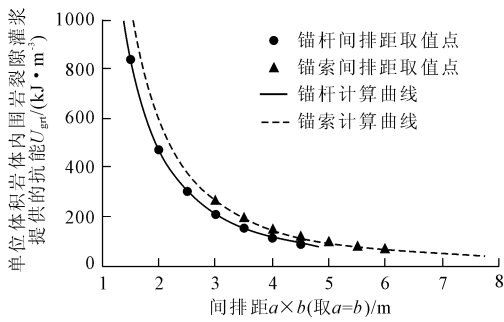


图 11 围岩裂隙灌浆抗能与间排距关系曲线

表 1 单位体积岩体内锚杆提供的各部分附加抗能

间排距 $a \times b/m$	$U_{ten}/(kJ \cdot m^{-3})$		$U_{int}/(J \cdot m^{-3})$		$U_{gr}/(J \cdot m^{-3})$	
	直径 28 mm	直径 32 mm	直径 28 mm	直径 32 mm	直径 28 mm	直径 32 mm
	1.5 × 1.5	24.76	32.34	5.04	5.75	837.76
2.0 × 2.0	13.93	18.19	2.83	3.24	471.24	471.24
2.5 × 2.5	8.91	11.64	1.81	2.07	301.59	301.59
3.0 × 3.0	6.19	80.86	1.26	1.44	209.44	209.44
3.5 × 3.5	4.55	59.40	0.92	1.06	153.87	153.87
4.0 × 4.0	3.48	45.48	0.71	0.81	117.81	117.81
4.5 × 4.5	2.75	35.94	0.56	0.64	93.08	93.08

表 2 单位体积岩体内锚索提供的各部分附加抗能

间排距 $a \times b/m$	$U_{ten}/(kJ \cdot m^{-3})$		$U_{int}/(J \cdot m^{-3})$		$U_{gr}/(J \cdot m^{-3})$	
	单束锚 固力 1000 kN (1 × 6 股)	单束锚 固力 2000 kN (1 × 12 股)	单束锚 固力 1000 kN (1 × 6 股)	单束锚 固力 2000 kN (1 × 12 股)	单束锚 固力 1000 kN (1 × 6 股)	单束锚 固力 2000 kN (1 × 12 股)
	3.0 × 3.0	28.72	57.43	29.72	42.03	261.80
3.5 × 3.5	21.10	42.20	21.83	30.88	192.34	192.34
4.0 × 4.0	16.15	32.31	16.72	23.64	147.26	147.26
4.5 × 4.5	12.76	25.53	13.21	18.68	116.36	116.36
5.0 × 5.0	10.34	20.68	10.70	15.13	94.25	94.25
5.5 × 5.5	8.54	17.09	8.84	12.50	77.89	77.89
6.0 × 6.0	7.18	14.36	7.43	10.51	65.45	65.45

锚杆(索)与围岩接触面及围岩裂隙灌浆具有粘结作用,其提供的抗能量级较小,但这并非说明它们的粘结作用可以不必严格保证。相反,粘结作用是锚杆(索)与围岩及围岩裂隙之间形成整体、相互作用、共同工作的基础。根据规范,只有在锚固时采取严格的构造措施,例如锚固段的固定材料、类型、长度、专项处理措施等^[18-19],才能保证足够的粘结强度以承受相对滑动、传递应力、协调变形。

2 围岩强度应力比、主厂房开挖跨度与附加抗能的关系

根据 1.2 节所述,在计算支护结构对围岩附加

抗能的贡献时,仅考虑锚杆(索)抗拉强度提供的抗能,故假设锚杆(索)提供的附加抗能 U_{add} 与其抗拉强度抗能 U_{ten} 近似相等。

2.1 锚杆支护提供的附加抗能

表 3 为江口、水布垭等 20 个国内大型水电工程地下厂房的围岩物理力学参数、锚杆支护参数及其附加抗能计算值^[20-25]。其中,参数 B 为主厂房的开挖跨度,地应力取主厂房附近的最大主应力,围岩的强度应力比 k_σ 为无量纲常数。在统计资料中采用主厂房边墙上的系统锚杆参与统计;当上下游边墙系统锚杆的布置有变化时,取其平均值统计。单位体积岩体内锚杆提供的附加抗能由式(18)得到。

2.1.1 附加抗能与强度应力比的关系

根据表 3 中强度应力比 k_σ 和单位体积岩体内的附加抗能 U_{add} 两列数据绘制各工程数据点于图 12,并且根据这些数据点作最小二乘曲线拟合,得到公式如下:

$$U_{add} = 118.6k_\sigma^{-2} + 22.53 \quad (19)$$

从图 12 可见以上数据点大多分布在拟合曲线两侧,从而形成了围绕其上下一定范围的数据带,且单位体积岩体内的附加抗能 U_{add} 随强度应力比 k_σ 的减少而增大。图 12 中拟合曲线的变化趋势表明,当强度应力比 $k_\sigma > 6.0$ 时,锚杆支护提供的附加抗能逐渐趋于常数;当强度应力比 $3.0 \leq k_\sigma \leq 6.0$ 时曲线逐步抬升,反应出锚杆贡献的附加抗能随强度应力比的减少逐步增加;当强度应力比 $k_\sigma < 3.0$ 时,由于围岩处于高-极高应力状态,所需锚杆提供的附加抗能急剧增加。根据式(19),地下厂房的围岩强度越小、地应力越高、强度应力比越小,所需锚杆对围岩附加抗能的贡献随之越大,且与强度应力比呈现出负 2 次非线性关系。

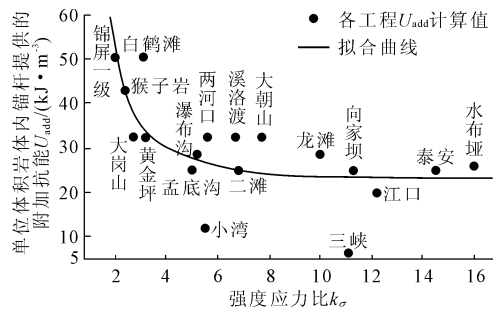


图 12 锚杆附加抗能与强度应力比的关系

2.1.2 附加抗能与强度应力比及开挖跨度的关系

根据表 3 中开挖跨度 B 、强度应力比 k_σ 和单位体积岩体内的附加抗能 U_{add} 三列数据绘制各工程数据点于图 13,并且根据这些数据点作最小二乘曲面

拟合,得到公式如下:

$$U_{add} = 3.857k_{\sigma}^{-2}B + 0.7677B \quad (20)$$

从图 13 可见,在强度应力比不变的情况下,由

锚杆提供的附加抗能 U_{add} 与开挖跨度 B 呈线性关系,它随着开挖跨度 B 的增加而增加,并与强度应力比仍呈现负 2 次特性。

表 3 各厂房相关资料及锚杆支护的附加抗能计算值

工程名称	开挖跨度 B/m	单轴抗压强度 R_c/MPa	最大主应力 σ/MPa	强度应力比 k_{σ}	锚杆直径 Φ/mm	锚杆间排距 $a \times b/m$	单位体积岩体内的附加抗能 $U_{add}/(kJ \cdot m^{-3})$
江口	19.2	90	7.4	12.2	25.0	1.5×1.5	19.74
水布垭	21.5	90	5.6	16.0	28.5	1.5×1.5	25.65
泰安	24.5	160	11.0	14.5	28.0	1.5×1.5	24.76
小浪底	26.2	100	5.0	20.0	32.0	1.5×1.5	32.34
大朝山	26.4	85	11.0	7.7	32.0	1.5×1.5	32.34
瀑布沟	32.4	120	23.3	5.2	30.0	1.5×1.5	28.43
龙滩	30.7	130	13.0	10.0	30.0	1.5×1.5	28.43
锦屏一级	29.2	70	35.7	2.0	32.0	1.2×1.2	50.53
向家坝	31.0	100	8.9	11.3	28.0	1.5×1.5	24.76
三峡	32.5	130	11.7	11.1	28.0	3.0×3.0	6.19
溪洛渡	31.9	120	18.0	6.7	32.0	1.5×1.5	32.34
二滩	30.7	200	29.5	6.8	28.0	1.5×1.5	24.76
佛子岭	25.3	105	1.3	80.8	28.5	1.5×1.5	25.65
两河口	28.7	100	18.0	5.6	32.0	1.5×1.5	32.34
黄金坪	28.8	75	23.2	3.2	32.0	1.5×1.5	32.34
猴子岩	29.2	80	33.5	2.4	32.0	1.3×1.3	43.06
白鹤滩	34.0	95	31.0	3.1	32.0	1.2×1.2	50.53
小湾	31.5	140	25.4	5.5	32.0	2.5×2.5	11.64
大岗山	30.8	60	22.2	2.7	32.0	1.5×1.5	32.34
孟底沟	29.1	85	17.0	5.0	28.0	1.5×1.5	24.76

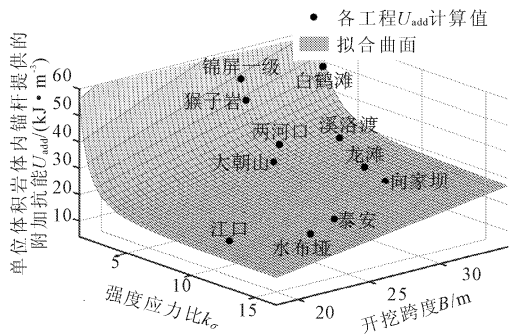


图 13 锚杆附加抗能与强度应力比及开挖跨度的关系

2.2 锚索支护提供的附加抗能

表 4 为 12 个国内大型水电工程地下厂房的围岩物理力学参数、锚索支护参数及其附加抗能计算值^[20-25]。与表 3 类似,其各项参数均以主厂房进行统计。对于锚索支护,单位体积岩体内的附加抗能由式(18)得到。

2.2.1 附加抗能与强度应力比的关系

根据表 4 中强度应力比 k_{σ} 和单位体积岩体内的附加抗能 U_{add} 两列数据绘制各工程数据点于图

14,并且根据这些数据点作最小二乘曲线拟合,得到公式如下:

$$U_{add} = 60.16k_{\sigma}^{-0.4552} \quad (21)$$

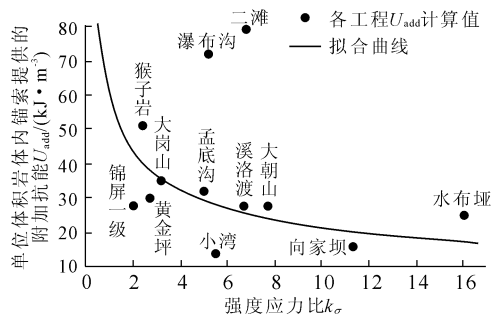


图 14 锚索附加抗能与强度应力比的关系

从图 14 可见单位体积岩体内的附加抗能 U_{add} 随强度应力比 k_{σ} 的增大而减少。当强度应力比 $k_{\sigma} > 7.0$ 时,锚索提供附加抗能的增长速率逐渐减缓;当强度应力比 $3.0 \leq k_{\sigma} \leq 7.0$ 时曲线逐步抬升,反应锚索贡献的附加抗能随强度应力比的减少逐步增加;当强度应力比 $k_{\sigma} < 3.0$ 时,由于围岩的高应力状

态,所需锚索提供的附加抗能急剧增加。根据式(21),地下厂房的围岩强度应力比越小,所需锚索对

围岩附加抗能的贡献反而越大,并与强度应力比呈负幂函数关系。

表 4 各厂房相关资料及锚索支护的附加抗能计算值

工程名称	开挖跨度 B/m	单轴抗压强度 R_c/MPa	最大主应力 σ_1/MPa	强度应力比 k_σ	锚索内力 F/kN	锚索间排距 $(a \times b)/m$	单位体积岩体内的附加抗能 $U_{add}/(kJ \cdot m^{-3})$
水布垭	21.5	90	5.6	16.0	1500	4.2 × 4.5	25.07
大朝山	26.4	85	11.0	7.7	2000	4.5 × 5.2	27.61
锦屏一级	29.2	70	35.7	2.0	1750	4.5 × 4.5	27.65
向家坝	31.0	100	8.9	11.3	1500	5.0 × 6.0	15.79
溪洛渡	31.9	120	18.0	6.7	1750	4.5 × 4.5	27.65
二滩	30.7	200	29.5	6.8	1500	3.0 × 2.0	78.97
黄金坪	28.8	75	23.2	3.2	1750	4.0 × 4.0	35.00
猴子岩	29.2	80	33.5	2.4	2500	4.0 × 4.0	51.15
小湾	31.5	140	25.4	5.5	1000	5.0 × 5.0	13.78
瀑布沟	32.4	120	23.3	5.2	2000	3.0 × 3.0	71.79
大岗山	30.8	60	22.9	2.7	1800	4.5 × 4.5	29.78
孟底沟	29.1	85	17.0	5.0	2000	4.5 × 4.5	31.91

将图 12 与图 14 的锚杆(索)拟合曲线加以对比发现:(1) 两者中间过渡带的变化范围比较接近;(2) 两者在低强度应力比状态时附加抗能的增长速率都很大,说明围岩处于低强度应力比状态时,需要可靠的支护措施以提供围岩稳定所必需的附加抗能;(3) 当强度应力比较大时,由锚杆附加提供的抗能逐渐趋于常数,而锚索则以一定变化率逐步减小;(4) 同一强度应力比下,两者均可对围岩贡献相当量级的附加抗能。

2.2.2 附加抗能与强度应力比及开挖跨度的关系

根据表 4 中开挖跨度 B 、强度应力比 k_σ 和单位体积岩体内的附加抗能 U_{add} 三列数据绘制各工程数据点于图 15,并且根据这些数据点作最小二乘曲面拟合,有如下公式:

$$U_{add} = 11.47k_\sigma^{-2}B - 3.564k_\sigma^{-1}B + 1.501B \quad (22)$$

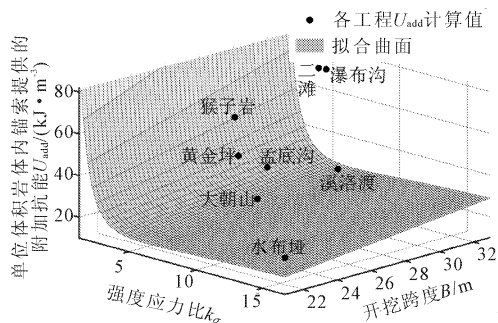


图 15 锚索附加抗能与强度应力比及开挖跨度的关系

从图 15 可见,以上数据点分布于拟合曲面上

下,在强度应力比 k_σ 不变的情况下,由锚索提供的附加抗能 U_{add} 随开挖跨度 B 的增加而线性增加,但与强度应力比仍呈现负 2 次关系。

3 支护结构附加抗能的经验判据

3.1 锚杆支护的经验判据

为更好地反映支护结构实际附加抗能与经验公式之间的相对关系,可以基于附加抗能定义无量纲的锚杆能量支护指数

$$I_a = \frac{U_{add}^a}{[U_{add}^a]} \quad (23)$$

式中: U_{add}^a 为按式(18)所得的实际附加抗能; $[U_{add}^a]$ 分别为按式(19)、式(20)所得的经验附加抗能。

利用式(23)计算各工程的锚杆能量支护指数 I_a ,结果见表 5。图 16 对该指数的离散分布进行了统计,可以发现:(1) 锚杆能量支护指数 I_a 的分布范围集中在 1.0 上下;(2) 对同一工程分别按两个拟合公式的计算结果比较相近。这说明拟合公式能在一定程度上反应锚杆支护所需提供的附加抗能,可以将其作为经验依据加以参考。

3.2 锚索支护的经验判据

同理可以定义无量纲的锚索能量支护指数

$$I_b = \frac{U_{add}^b}{[U_{add}^b]} \quad (24)$$

式中: U_{add}^b 为按式(18)所得的实际附加抗能; $[U_{add}^b]$ 分别为按式(21)、式(22)所得的经验附加抗能。

表 5 各厂房锚杆能量支护指数计算值

工程名称	单位体积岩体内锚杆提供的附加抗能 $U_{add}/(kJ \cdot m^{-3})$	由式(19)计算的 $[U_{add}^a]/(kJ \cdot m^{-3})$	由式(19)所得 $[U_{add}^a]$ 计算的 I_a	由式(20)计算的 $[U_{add}^b]/(kJ \cdot m^{-3})$	由式(20)所得 $[U_{add}^b]$ 计算的 I_b
江口	19.74	23.33	0.85	15.24	1.30
水布垭	25.65	22.99	1.12	16.83	1.52
泰安	24.76	23.09	1.07	19.26	1.29
小浪底	32.34	22.83	1.42	20.37	1.59
大朝山	32.34	24.53	1.32	21.98	1.47
瀑布沟	28.43	26.92	1.06	29.50	0.96
龙滩	28.43	23.72	1.20	24.75	1.15
锦屏一级	50.53	52.18	0.97	50.57	1.00
向家坝	24.76	23.46	1.06	24.74	1.00
三峡	6.19	23.49	0.26	25.97	0.24
溪洛渡	32.34	25.17	1.28	27.23	1.19
二滩	24.76	25.09	0.99	26.13	0.95
佛子岭	25.65	22.55	1.14	19.44	1.32
两河口	32.34	26.31	1.23	25.56	1.27
黄金坪	32.34	34.11	0.95	32.96	0.98
猴子岩	43.06	43.12	1.00	41.97	1.03
白鹤滩	50.53	34.87	1.45	39.75	1.27
小湾	11.64	26.45	0.44	28.20	0.41
大岗山	32.34	38.80	0.83	39.94	0.81
孟底沟	24.76	27.27	0.91	26.83	0.92

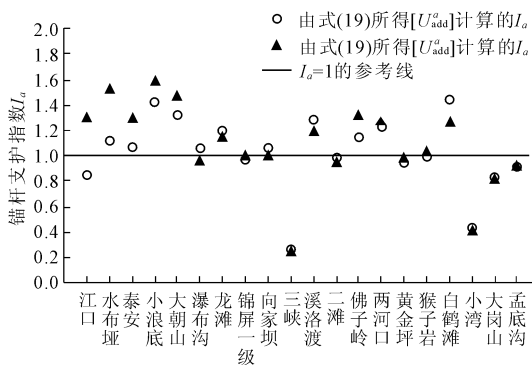


图 16 各厂房锚杆能量支护指数的离散分布

利用式(24)计算各工程的锚索能量支护指数，结果见表 6。图 17 为锚索能量支护指数的离散分布统计，可以得出：(1) 锚索能量支护指数 I_b 的分布范围仍集中在 1.0 上下；(2) 对同一工程分别按两个拟合公式的计算结果总体相近。这说明拟合公式可以近似反应锚索支护所提供的附加抗能，将其作为经验依据是可行的。

3.3 基于能量支护指数的评价标准

根据各工程的实际附加抗能与拟合经验公式，可以将能量支护指数的 1.0 特性作为工程设计的参考依据，以定性地判断支护结构对围岩贡献的附加

抗能是否合理，其评价标准为：当 I_a 或 $I_b < 1.0$ 时，附加抗能偏低；当 I_a 或 $I_b = 1.0$ 时，附加抗能合理；当 I_a 或 $I_b > 1.0$ 时，附加抗能偏高。

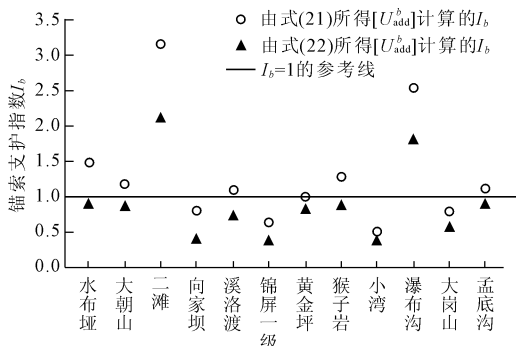


图 17 各厂房锚索能量支护指数的离散分布

4 结 论

从能量分析角度研究支护结构对围岩附加抗能的作用机理，提出支护结构对围岩的能量补给理论分析方法及其抗能计算公式，依据地下厂房实测资料对主厂房边墙的支护参数展开归纳统计，基于能量支护指数建立了支护结构附加抗能的经验判据方法。根据分析结果，主要结论如下：

表 6 各厂房锚索能量支护指数计算值

工程名称	单位体积岩体内锚杆提供的附加抗能 $U_{\text{add}}/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})$	由式(21)计算的 $[U_{\text{add}}^b]/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})$	由式(21)所得 $[U_{\text{add}}^b]$ 计算的 I_b	由式(22)计算的 $[U_{\text{add}}^b]/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})$	由式(22)所得 $[U_{\text{add}}^b]$ 计算的 I_b
水布垭	25.07	17.03	1.47	28.45	0.88
大朝山	27.61	23.76	1.16	32.51	0.85
锦屏一级	27.65	43.88	0.63	75.53	0.37
向家坝	15.79	19.95	0.79	39.54	0.40
溪洛渡	27.65	25.31	1.09	39.06	0.71
二滩	78.97	25.14	3.14	37.61	2.10
黄金坪	35.00	35.43	0.99	43.41	0.81
猴子岩	51.15	40.39	1.27	58.61	0.87
小湾	13.78	27.69	0.50	38.81	0.36
瀑布沟	71.79	28.40	2.53	40.17	1.79
大岗山	29.78	38.28	0.78	54.04	0.55
孟底沟	31.91	28.92	1.10	36.29	0.88

(1) 支护结构可以对围岩附加抗能进行能量补给,其贡献主要体现在三个方面:锚杆(索)抗拉强度提供的抗能、锚杆(索)与围岩接触面粘结作用提供的抗能和围岩裂隙灌浆粘结作用提供的抗能。其中,锚杆(索)抗拉强度提供的抗能量级最为显著,而后两者提供的抗能量级则相对较小。

(2) 通过对地下厂房实测资料统计分析,发现锚杆(索)提供的附加抗能与围岩强度应力比、主厂房开挖跨度呈现出一定的函数关系。通过最小二乘拟合,得到了有关上述三者的 4 个经验公式。其中,锚杆(索)贡献的附加抗能与强度应力比分别成负 2 次、负幂函数关系,其值均在强度应力比小于 3.0 时急剧增加。

(3) 基于支护结构的附加抗能,提出了无量纲能量支护指数的概念。该指数的分布范围在 1.0 上下,它直观反映了支护结构实际附加抗能与经验公式之间的相对关系,其 1.0 特性的评价标准可以为工程设计提供参考依据。

参考文献:

[1] 周宏伟,谢和平,左建平.深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J].力学进展,2005,35(1):91-99.

[2] 谢和平,许唯临,刘超,等.地下水利工程战略构想及关键技术展望[J].岩石力学与工程学报,2018,37(4):781-791.

[3] 刘泉声,雷广峰,彭星新.深部裂隙岩体锚固机制研究进展与思考[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):312-332.

[4] 葛修润,刘建武.加锚节理面抗剪性能研究[J].岩土工程学报,1988,10(1):8-19.

[5] 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(4): 355-362.

[6] 侯朝炯,勾攀峰.巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(3):342-342.

[7] Kim S H, Pelizza S, Kim J S. A study of strength parameters in the reinforced ground by rock bolts[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006,21(3):378-379.

[8] 徐前卫,尤春安,朱合华.预应力锚索的三维数值模拟及其锚固机理分析[J].地下空间与工程学报,2005,1(2):214-218,222.

[9] 唐旭海,张建海,张恩宝,等.溪洛渡电站左岸地下厂房洞室群围岩稳定性研究[J].云南水力发电,2007,23(1):33-37.

[10] 杨慧敏.预应力锚杆(索)在节理岩体中的支护机理研究及应用[D].长沙:中南大学,2010.

[11] Gu Shuancheng, Zhou Pan, Huang Ronbin. Mechanical Characteristics Analysis of Surrounding Rock on Anchor Bar Reinforcement[C]//International Conference on Energy Equipment Science and Engineering in 2017/IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Beijing: IOP Publishing, 2018, 128: 012029.

[12] 杨圣奇,徐卫亚,苏承东.大理岩三轴压缩变形破坏与能量特征研究[J].工程力学,2007,24(1):136-142.

[13] 刘天为,何江达,徐文杰.大理岩三轴压缩破坏的能量特征分析[J].岩土工程学报,2013,35(2):395-400.

[14] 陈妙峰,唐德高,高培正,等.锚杆粘结应力与滑移量的试验研究[J].防护工程,2003,25(2):63-65.

[15] 胡钧涛,王太恒,龚玮,等.钢绞线与水泥浆体粘结-滑移性能试验研究[J].石河子农学院学报,1990(3):1-9.

(2) 随着所钻桩孔的俯角增大,注浆量减少,认为在水平向注浆情况下注浆体因自重作用发生横向及竖向同步渗流;桩长随俯角的增加而减少,但是水平桩径和垂直桩径却同步增大,因此建议设计和施工时尽量形成 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 的小俯角注浆,并在俯角作业时通过二次补浆作业方法保证桩长及桩径质量,在水平向注浆时应提高注浆设计量或浆液浓度。

(3) 注浆量与提升速度基本保持线性变化关系,注浆量随着注浆提升速度的增加连续减少;旋喷桩平均桩径随注浆提升速度的增加而减小,表明提升速度提高,处理路基病害的效果将会下降;桩基空腔正矢以及裂纹条数均随提升速度的提升而降低;旋喷桩横截面尺寸的增大必然引起空腔正矢的增大及裂纹条数的增多。在旋喷桩施工中除应满足基本截面成桩参数之外,应该考虑桩体内部的空腔及裂纹生成发展情况确定合适的施工技术参数,建议在旋喷桩处理路基病害过程中提升速度取 20 cm/min 较为合适。

参考文献:

- [1] 张万涛,邓建义,杨德喜.旋喷桩在重载铁路路基下沉病害整治中的应用[J].铁道标准设计,2015,59(1):64-67.
- [2] 陈学喜,吴玉哲,杨昊天,等.斜向高压旋喷桩加固既有铁路路基设计参数的取值[J].铁道建筑,2016(12):60-64.
- [3] 吕若冰,孔纲强,沈扬,等.既有高速公路高压旋喷桩施工现场监测与数值模拟分析[J].防灾减灾工程学报,2015,35(6):752-757.
- [4] 赵朝阳.高压旋喷桩在运营线路基加固工程中的应用[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2013,26(S1):204-206.
- [5] 程勇,黄显彬,麻超超,等.高压旋喷桩加固软基施工

技术研讨[J].工业建筑,2014,44(S1):666-668.

- [6] 顾红伟,孔纲强,丁选明,等.高压旋喷桩处治已通车高速公路软基分析[J].施工技术,2014,43(7):63-66.
- [7] 赵东田.高压旋喷桩在软土路堤中的应用[J].施工技术,2007,36(S2):111-113.
- [8] 李晓鄂,王树清.高压喷射注浆固结体性能研究[J].长江科学院院报,2002,19(Z1):68-70.
- [9] 何润芝,魏小胜,陈庆.高压喷射注浆水泥土固化机理[J].武汉理工大学学报,2002,24(9):31-33.
- [10] 胡建林,杨鑫,崔乃夫,等.玄武岩纤维对水泥土力学性能的影响效应研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(6):138-142.
- [11] 傅海龙.软黏土路基现场强夯置换试验分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(5):52-56.
- [12] 王宁伟,刘铁,于辉,等.电化学注浆加固软土效果的试验研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(6):7-11.
- [13] 袁静波,郑俊杰.高压喷射注浆法在板桩码头防渗中的应用[J].岩土力学,2002,23(S1):123-125.
- [14] 赵丽雅,许宏发,晋学辉,等.盾构隧道下穿铁路群的路基加固及沉降分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):85-90.
- [15] 刘汉龙,周密,陈育民,等.PCC桩加固铁路软土地基现场试验研究[J].岩土力学,2012,33(11):3201-3207.
- [16] 高林生.精伊霍线机务设备选点、布点方案比选[J].铁道标准设计,2012(2):114-117.
- [17] 罗培新.新建铁路精伊霍线雪害防治措施初探[J].路基工程,2006(5):140-141.
- [18] 龚晓南.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [19] 中华人民共和国铁道部.铁路工程特殊岩土勘察规程:TB 10038—2012[S].北京:中国铁道出版社,2012.

(上接第 117 页)

- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.预应力混凝土用钢绞线:GB/T 5224—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [18] 中华人民共和国水利部.水工预应力锚固设计规范:SL 212—2012[S].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部.岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范:GB 50086—2015[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [20] 唐旭海,张建海,蒋峰,等.关于锚固支护设计的统

计方法研究[J].四川大学学报(工程科学版),2007,39(S):176-181.

- [21] 张肖,张建海,蒋峰,等.地下厂房锚索支护设计的统计研究[J].四川水利,2008,29(4):78-80.
- [22] 王秀全,罗维薇.黄金坪水电站地下厂房开挖支护优化设计[J].四川水力发电,2016,35(2):51-54.
- [23] 樊熠玮,李霖.猴子岩水电站地下厂房顶拱开挖支护设计[J].甘肃水利水电技术,2013,49(4):62-64.
- [24] 邓加林,赵志勇,杨宜文.小湾水电站地下厂房围岩支护设计[J].云南水力发电,2007,23(4):55-58.
- [25] 刘一,魏映瑜.大岗山水电站地下厂房洞室群开挖支护设计[J].人民长江,2012,43(22):47-50.