

预应力锚索内锚段粘结强度及长度的确定

张发明¹, 刘 宁¹, 陈祖煜²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘要:通过对国内 30 余例锚固工程试验资料的统计分析, 在讨论影响岩体与锚固体间粘结强度因素的基础上, 提出了确定预应力锚索内锚固段与岩体间粘结强度的经验公式. 为便于设计人员确定内锚段长度, 建立了内锚段长度设计系数图. 实例计算表明, 所提供的确定方法与岩锚试验结果较为吻合.

关键词:锚索; 粘结强度; 内锚固段; 设计系数; 锚固; 岩体基本质量指标

中图分类号: TU31

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2002)03-0001-03

预应力锚索作为岩土体加固的主要手段, 在水利水电、交通、矿山等建设中得到了广泛的应用. 在预应力锚索的设计中, 内锚固段长度的确定是其十分重要的环节, 设计人员通常从以下 3 个方面来考虑: ①预应力钢绞线是否从水泥浆或水泥砂浆中抽出; ②钢绞线是否断裂; ③内锚固段是否沿孔壁滑移. 前两个方面, 由于试验较易, 费时较少, 通常可以从室内试验求得. 但是, 内锚段是否会从孔壁中抽出只能凭现场岩锚试验的结果来确定, 故常需要花费大量的人力与财力. 因此, 长期以来, 对岩体与锚体间的粘结强度合理取值, 国内外许多学者进行了一些相关研究, 如英国小约翰根据某些代表性岩石抗压强度试验结果, 提出了岩石与灌浆体间粘结强度的设计值; Serrano 和 Olalla^[1,2] 等根据 Hoek-Brown 准则推导了群锚破坏条件下的岩锚极限粘结强度 C_{ult} 的经验公式; 我国长江科学院韩军^[3] 等提出了按岩石强度等级确定的锚固体与岩体粘结强度的建议值. 上述诸多方法, 为确定岩体与锚固体间的粘结强度提供了一种简便的方法, 但未能考虑岩体中结构面的性质与发育程度、内锚段灌浆作用等因素对粘结强度的影响, 与实际工程需要相比尚有一定差异. 不同岩体中实施的大量岩锚试验, 积累了丰富的试验资料, 为建立经验公式提供了详实的统计依据, 使建立粘结强度与岩体性质之间的经验关系成为后继工程减少岩锚试验的又一重要的途径. 本文通过大量岩锚试验资料分析, 结合室内模型试验, 从分析影响粘结强度众多因素入手, 提出了确定岩锚粘结强度的经验方法, 并建立岩体质量与粘结强度的相关

关系, 为工程设计人员提供一种简便的方法, 期望对确定粘结强度的方法有所改进.

1 影响岩锚粘结强度的因素

现场岩锚试验及室内试验结果表明, 影响粘结强度的因素主要有以下几个方面.

1.1 岩石抗压强度与粘结强度的相关性分析

大量现场试验表明, 坚硬、力学强度高的岩石如花岗岩具有较高的粘结强度; 而软弱、力学强度较低的岩石, 在相同的胶结材料时具有较低的粘结强度, 通过对国内小浪底、漫湾、隔河岩等 30 余例岩锚工程的 120 束代表性锚索拉拔试验资料进行粘结强度与相应内锚段完整岩石抗压强度的相关性分析 (图 1), 得到两者间的相关关系式:

$$C_1' = 0.7224 \ln(R_c / \text{MPa}) - 1.6112 \quad (1)$$

式中: C_1' 为完整岩石与锚固体间的粘结强度, MPa; R_c 为岩石单轴抗压强度, MPa.

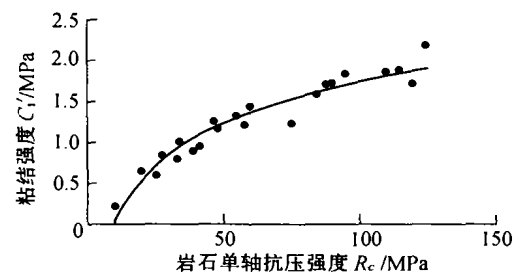


图 1 岩锚粘结强度与岩石单轴抗压强度关系曲线

1.2 结构面特征对粘结强度的影响

岩体与锚固体间的粘结强度尚与岩体中分布的

结构面性质有关.为进一步探索结构面发育程度及性质对粘结强度的影响,笔者在实验室内选取了灰岩、砂岩、花岗岩及片麻岩等四类弱风化~微风化岩石(保证试验数据的可比性),根据不同结构面的几何性质分别模拟锚索的工作机理进行拉拔试验,将试验后的岩块作结构面的发育程度、结合程度的描述,结构面的发育程度以结构面间距衡量,结合程度则以结构面的张开度、填充物来表示.试验结果的统计表明,对于同类岩体,结构面间距、张开度对粘结强度的影响尤其显著,将所有的试验资料按结构面间距和张开度分别统计其对粘结强度的影响,得到相应的影响系数见表1和表2.

表1 结构面间距对粘结强度的影响系数 K_1

组数	平均间距/m	结构面类型	K_1
1~2	>1.0	试块中无结构面	1.000
2~3	1.0~0.4	节理、裂隙	0.863
≥3	0.4~0.2	节理、裂隙	0.802
≥3	≤0.2	各种类型结构面	0.585

表2 结构面张开度及填充物对粘结强度的影响系数 K_2

张开度/mm	填充物类型	K_2
<1	无充填	1.135
1~3	Si, Fe 质胶结	0.965
	Ca, 泥质胶结	0.876
	结构面平直, 泥质胶结	0.753
>3	Si 质胶结, 结构面粗糙	0.836
	Fe, Ca 质胶结	0.735
	泥质胶结	0.613

1.3 浆体强度特性

目前,工程上通常采用纯水泥浆与水泥砂浆作为岩锚的注浆材料.针对这两种材料,长江科学院结合三峡工程进行了大量的试验研究,结果表明,相同岩体条件下,不同注浆材料浆体与岩体间的粘结强度有所差异(表3).水泥砂浆与岩体间的粘结强度比纯水泥浆与岩体的粘结强度略高.

表3 不同注浆材料与粘结强度对照

注浆材料	浆体抗压强度/MPa		浆体与岩石粘结强度/MPa		水灰比
	7 d	28 d	7 d	28 d	
水泥砂浆	48.4	76.2	3.45	4.70	0.35
	45.5	72.0	2.87	3.53	0.38
	40.7	65.4	2.44	2.59	0.40
水泥浆	39.2	71.8	3.13	4.05	0.35
	25.3	65.8	2.48	3.14	0.40
	35.4	67.9	2.56	3.33	0.38

1.4 施工质量

施工质量对岩体与锚固体的粘结强度也有一定的影响.对工程规模巨大,要求较高的大吨位预应力锚索,一般要求钻孔后用高压风进行吹渣,后用清水洗孔.当岩体较破碎时,压力注浆可以提高岩体的整

体性及粘结强度.但迄今为止,还没有相关的锚索质量无损检测设备,对施工质量也未有较好的检测方法,故本文建议,通过取一折减系数 R_3 来考虑施工质量对粘结强度的影响, R_3 可根据岩体质量、施工单位的信誉综合确定.

2 用综合因素法确定岩锚粘结强度

从以上分析可知,岩体与锚固体间的粘结强度不仅与完整岩石的抗压强度有关,同时岩体中结构面间距,张开度及填充物、浆体性质与施工质量对强度均有一定的影响.因此,综合以上4个方面的因素,确定粘结强度的经验公式可表示为

$$C_1 = C_1' K_1 K_2 R_3 \tag{2}$$

式中: C_1 为岩体与锚固体间粘结强度标准值, MPa; K_1, K_2 为考虑结构面张开度、填充物对粘结强度影响的因子,取表1、表2中的数值; R_3 为施工质量修正系数.

3 用基本质量指标法确定岩锚粘结强度

3.1 基本质量指标确定的岩锚粘结强度 C_2^*

由于综合因素法较难获得 R_3 , 为工程应用的方便,拟寻求用岩体基本质量指标来确定岩锚粘结强度的方法.岩体基本质量指标是我国实施岩体质量分级的重要依据,该指标基本反映了岩体的强度与完整性,可以用来确定岩锚粘结强度的大小,质量好的岩体对应的岩体与锚固注浆材料间的粘结强度高.因此,本文通过对国内一些锚索工程的实例分析,得到由岩体基本质量指标 BQ 确定粘结强度的经验公式(式(3)),相关曲线如图2所示.

$$C_2^* = 1.553 \ln BQ - 8.1662 \tag{3}$$

式中: C_2^* 为采用岩体基本质量指标确定的岩体与锚固体间粘结强度, MPa; BQ 为岩体基本质量指标,其值由 $BQ = 90R_c + 250K_v$ 确定, R_c 为岩石单轴抗压强度值, K_v 为完整性系数,可参照文献[4]确定.

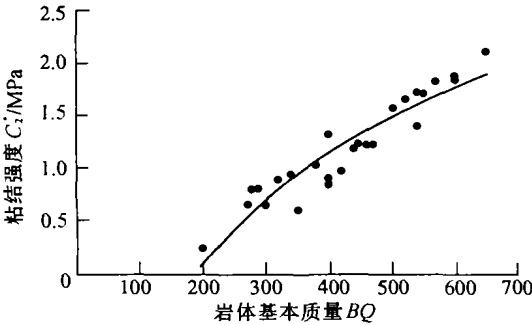


图2 C_2^* 与 BQ 相关关系曲线

3.2 锚根效应对粘结强度 C_2^* 的修正

现场及室内套钻观察表明,高压注浆状态下(注

浆压力大于 0.5 MPa), 锚固段岩体裂隙特征对锚固粘结力有一定的影响^[5], 对于无充填的张性结构面, 在高压注浆条件下, 浆液沿裂隙充填, 形成锚根, 该部分水泥砂浆提高了岩体与锚固体间的粘结力, 而在采用岩体基本质量指标确定的岩体与锚固体间粘结强度的公式中, 未考虑这一影响, 故需作进一步修正, 其修正公式式(5)可通过式(4)得到。

$$P = \pi d \tau \sum t_i \tag{4}$$

式中: P 为仅考虑锚根效应的粘结力, N; n 为张开度大于 1 mm 且无充填的张性裂隙数量, 可由钻孔裂隙统计得到; t_i 为单条张裂隙的宽度, mm; τ 为水泥砂浆或纯水泥浆的抗剪强度, Pa; d 为锚索孔的直径, mm. 由式(4)可得考虑锚根效应的粘结强度为

$$C_2 = C_2^* + (\tau/L) \sum t_i \tag{5}$$

式中: C_2 为考虑锚根效应修正的粘结强度设计值, MPa; C_2^* 为由岩体基本质量指标确定的岩体与锚固体间粘结强度, MPa; L 为内锚固段长度, m; 其它符号同上. 在实际工程设计中, 一般很难取得每一束锚索的锚根段岩体的结构面分布, 故可将锚根效应作为安全储备项而不计入设计参数中。

4 内锚段长度设计

预应力锚索的设计包括锚固荷载大小、锚孔直径及内锚固段长度等, 锚固荷载的大小根据被加固岩体所需锚固力及外锚墩下岩体的承载力确定, 锚孔直径由锚索吨位及钢绞线数量确定, 而内锚固段长度主要依赖于设计安全系数、锚孔直径、锚固荷载大小及粘结强度的大小. 因此, 假设一长度设计系数 K_0 , 内锚固段长度 L 就可以由式(6)确定. 本文建立了基于岩体基本质量指标 BQ 的内锚固段长度设计系数 K_0 图(图 3), 设计人员仅需根据锚孔的直径、内锚段岩体质量指标 BQ 就可从图中查得 K_0 值, 再由式

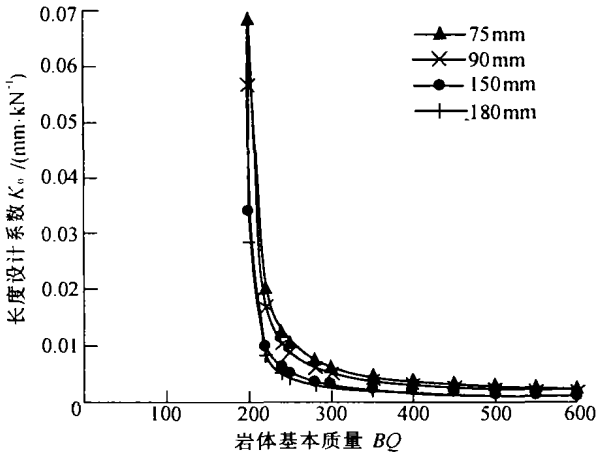


图 3 内锚段长度设计系数 K_0 曲线

(6) 确定内锚固段长度 L :

$$L = K_0 KP \tag{6}$$

式中: K_0 为内锚固段长度设计系数, mm/kN, 可由图 3 查得; K 为锚索设计所采用的安全储备, 根据工程等级、荷载大小及锚根效应确定, 一般取值为 2.5 ~ 3.0; P 为设计单束锚索承载力, kN.

5 工程实例

三峡永久船闸高边坡, 设计采用了 2450 余束锚索加固其中存在的定位与不定位的不稳定块体, 通过大量的现场岩锚试验, 得到锚固体与岩体的粘结强度标准值为 1.85 ~ 2.12 MPa. 根据长江水利委员会三峡勘察分院历年勘察资料及有关文献^[6,7] 分析, 得到的三峡永久船闸区岩体的单轴抗压强度 R_c , RMR 及岩体基本质量 BQ , 见表 4. 现按本文提出的两种方法对其进行粘结强度的计算并校核 3000 kN 级预应力锚索的内锚段长度, 按综合因素法求得 $C_1 = 2.16$ MPa, 考虑锚根效应按岩体基本质量指标 BQ 计算的粘结强度为 $C_2 = 1.89$ MPa, 后者基本符合实际试验结果, 对于 3000 kN 预应力锚索, 安全储备为 2.5, 若设计孔径为 165 mm, 内锚段岩体质量指标为 600, 从图 3 中查得 K_0 为 0.001 1, 则计算得到的内锚段长度为 8.25 m, 实际施工采用的内锚段长度为 8.0 m, 计算结果与现场试验结果基本吻合. 由于综合因素法较难考虑施工因素的影响, 计算值比实际值略大, 因此, 在实际应用中, 可按两者分别计算, 最后视工程重要程度与安全系数的大小, 或取两者之平均值, 或取两者之小值以满足工程设计需要. 锚索运行情况良好.

表 4 三峡永久船闸高边坡岩体物理力学性质指标

岩体风化程度	R_c /MPa	RMR	BQ
全风化	1.0 ~ 2.0	93	190
强风化	15 ~ 20	22	250
弱风化	20 ~ 85	52 ~ 64	250 ~ 550
微风化	85 ~ 100	77	600
新鲜	90 ~ 110	87	650

6 结 论

在室内外岩锚试验的基础上, 对影响岩体与锚固体粘结强度的因素进行了分析, 提出了确定粘结强度的两种经验公式: 综合因素法和按岩体基本质量指标 BQ 确定粘结强度 C_2 的方法. 根据多个工程实例分析与比较, 建立了岩锚内锚固段长度设计系数的图谱, 为确定预应力锚索内锚固段长度提供了一套简便实用的方法, 同时也弥补了小约翰提出的粘结强度经验值的局限性, 具有广泛的应用性, 可供岩锚设计人员使用.

(下转第 40 页)

荷期间,气压室水位(涌浪)、压力、 PL 值在规定范围之内波动,波动周期也较短,气压室及引水系统、机组运行平稳,2套微机监控系统显示水位、压力、 PL 值与实测数据基本吻合.运行期间遇电网事故3次,2台机组全甩负荷关机(1次满负荷、2次80%负荷),此时气压室气压、水位及压力管水压上升最大值均在限制范围内,满足了机组在各种运行工况下的要求.

图3是在最高库水位2台机组同时甩负荷工况下,气压室压力、水位及蜗壳进口内水压力波动变化曲线图,从图中看出,较大波动过程只延续4~5个周期,共计200s左右时间.由此可见,气压室能够有效降低水击压力和抑制水位波动振幅,及时加快压力、水位波动的衰减速度,对引水系统过渡过程的稳定起了关键作用.

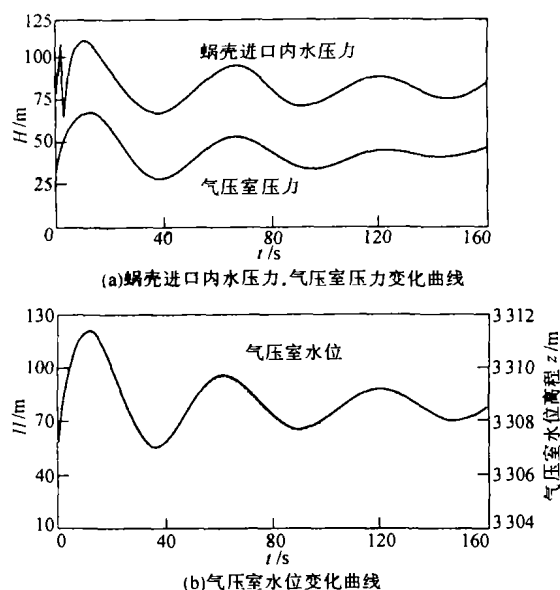


图3 2台机组同时甩负荷工况波动变化曲线

按照系统限制条件要求,机组最大上升转速、蜗壳进口处最大水压力及气压室的最高涌波水位和最大气压等控制参数数值,应发生在库水位最高3341.4m,2台机组满负荷运行全甩,导叶按给定规律正常关闭时的工况,通过运行试验和模型试验,实测 $\xi_{\max} = 47.2\% < 50\%$, $\beta_{\max} = 44.6\% < 45\%$,最高涌波水位3310.78m,最高气压0.7MPa,均满足设计要求.气压室最低运行水位,应发生在最低运行库水位3335m,1台机组满负荷运行,另1台增全负荷工况,通过运行试验表明,此时最低涌波水位高于气压室底板2.8m,满足最小水深不小于2.5m的要求.

5 结 语

大干沟水电站气压室的运行经验表明,同开敞的调压室一样,密闭的气压室完全能够满足反射水击

波、改善机组运行稳定性的各项要求,在地形地质条件适宜的情况下,气压室方案不失为一个经济的选择.气压室在大干沟电站的成功应用,达到既降低工程造价又缩短工期的目的,并填补了我国水电站在这一领域的空白,给同类水电站提供了宝贵的实践经验.

参考文献:

- [1] 刘启钊,彭守拙.水电站调压室[M].北京:水利电力出版社,1995.

(收稿日期:2001-02-27 编辑:熊水斌)

(上接第3页)

参考文献:

- [1] Serrano A, Olalla C. Tensile resistance of rock anchors[J]. Int J of Rock Mec and Min Sci, 1999, 36(4):449.
- [2] Serrano A, Olalla C. Ultimate bearing of grouted cable bolts[J]. Int J Rock Mec Sci & Geomech Abstra, 1992, 29(5):503~524.
- [3] 韩军,程良奎.岩土体与锚固体间粘结强度[A].见:程良奎,刘启琛编.岩土锚固工程技术的应用与发展[C].北京:万国学术出版社,1996:317~320.
- [4] GB50218-94, 工程岩体分级标准[S].
- [5] 张发明.岩质边坡预应力锚固效应及应用研究[D].南京:河海大学,2000.
- [6] 董学晟,夏熙伦.三峡工程高边坡岩体力学试验研究的历史回顾[J].长江科学院院报,1999,16(2):26~30.
- [7] 张有天.岩石高边坡的变形与稳定[M].北京:中国水利水电出版社,1999.49.

(收稿日期:2001-03-07 编辑:张志琴)

(上接第13页)

b. 开闸放水情况:由于过闸水流的流速和水流的脉动作用,泥沙更不会沉积在拦沙潜堰的结构物上.即使有泥沙落于拦沙潜堰结构物上影响了拦沙潜堰的正常工作,需要清理时,也只需将拦沙潜堰附近的水流加以扰动,使沉积于拦沙潜堰上的泥沙重新浮起即可随大河水流而去.

3 结 语

引黄灌溉防沙问题是影响引黄灌溉发展的重要难题,人们对它的认识在不同时期也有所不同,处理办法也各异,并为此做过不少工作,花了大量的人力物力,用各种办法来处理利用引进的泥沙.从黄河泥沙的特点来看,它有其有害的一面,也有其有益的一面,如何“趋利避害,变害为利”,是我们解决引黄泥沙处理利用的方针,目的是以最小的代价取得最大的效益.

(收稿日期:2001-01-20 编辑:熊水斌)