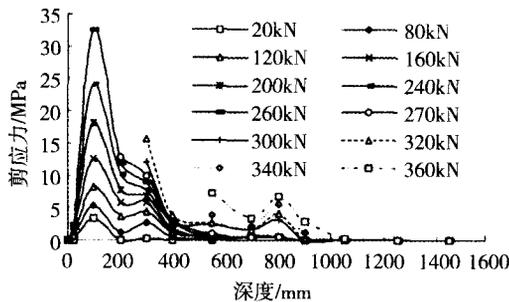


锚固类结构杆体临界锚固长度问题综合研究 —国内相关研究进展（续）

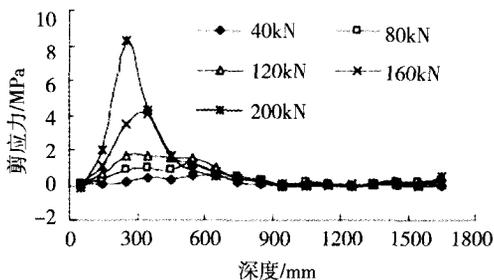
曾宪明 林大路 李世民 左 魁 徐孝华 杜宁波
(总参工程兵科研三所 洛阳 471023)

(续上期)

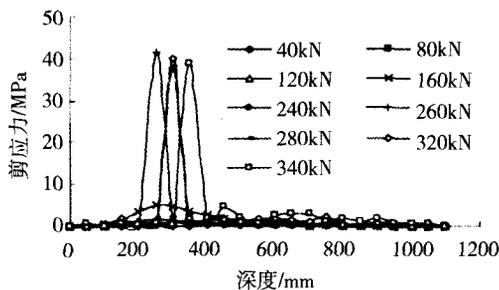
文[28] (2007) 报道了全长黏结玻璃增强聚合物锚杆破坏机制拉拔破坏模型试验。研究指出, 在砂浆体强度较高条件下, 可能发生锚杆拉断破坏, 也可能发生剪切破坏; 在轴向拉应力先达到锚杆抗拉强度时则会在自由段发生拉断破坏; 在最大剪应力先达到纤维丝的抗剪强度时则在锚固段内先发生剪切破坏。试验测得的锚固段杆体表面剪应力典型分布曲线见图15。



(a) 应变片测试的剪应力与深度关系



(b) 第3次加载光纤测试的剪应力与深度关系



(c) 第6次加载光纤测试的剪应力与深度关系

图15 模型3锚固段杆体表面剪应力分布

这是一个比较典型的剪应力峰值点与零值点同时发生向杆体深部转移的例子, 转移后峰值与转移前相差无几, 转移前、后峰值与零值点之间的空间距离大体为常数, 此常数即是临界锚固长度。

文[29] (1998) 完成了预应力锚索内锚固段受力特点与破坏特征模型试验研究, 其典型试验结果见图16。

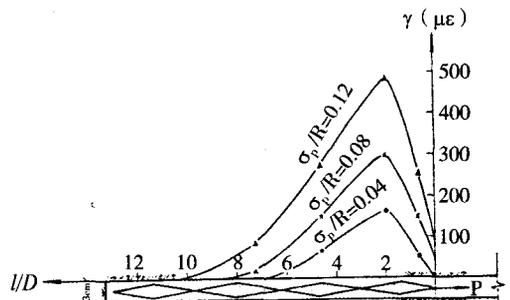


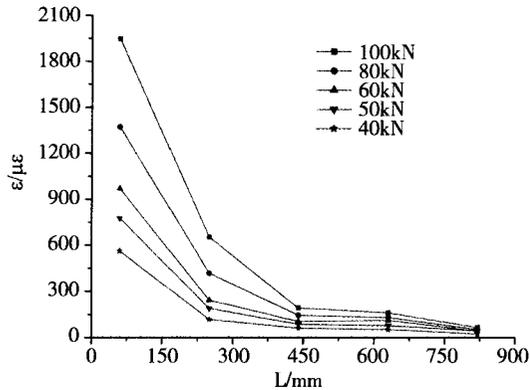
图16 文献[29]测邻近第二交结面剪应变分布

文[30] (2006) 为研究锚固类结构杆体临界锚固长度, 进行了系列室内模型试验。实测锚杆内锚固段杆体第1界面轴应变分布曲线如图17所示。以第1界面试验曲线为基础, 经分析求得第2界面剪应力分布形态如图18所示。

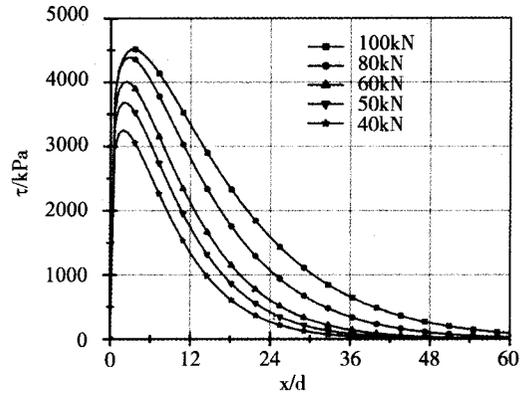
4 理论分析研究

理论分析研究锚固类结构杆体临界锚固长度问题, 包括解析、数值模拟、半理论半经验分析, 以及半数分析等。这一方面的成果比较多。理论分析是研究临界锚固长度的问题重要方法之一。

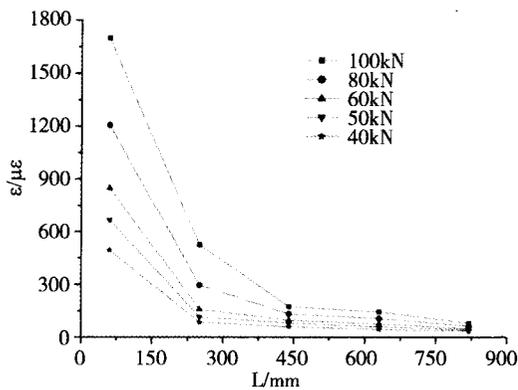
文[31] (2005) 采用理想弹塑性荷载传递函数, 通过分析极限承载力与锚杆长度的关系, 推导了锚杆临界锚固长度的解析算式, 在此基础上进一步分析了摩阻力分布、极限锚固力与锚固长度的关系。分析指出, 当锚固长度小于工程临界



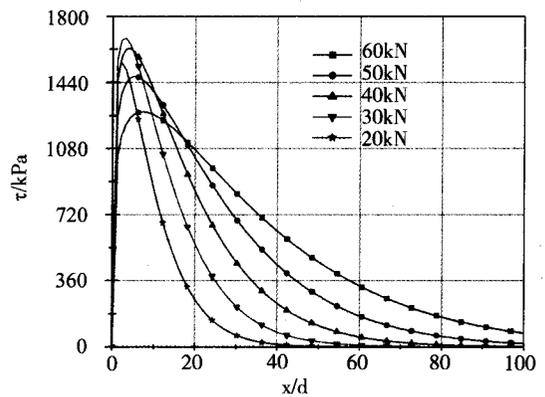
(a) 高强介质试件



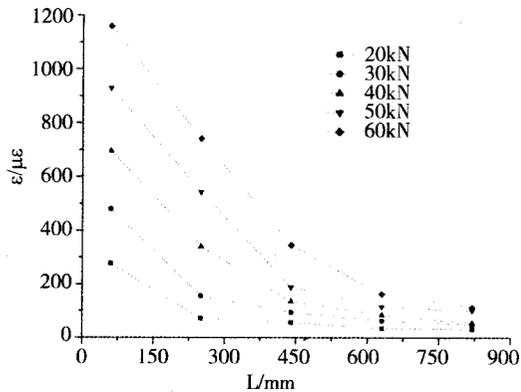
(b) 中强介质试件的剪应力分布形态



(b) 中强介质试件



(c) 低强介质试件的剪应力分布形态



(c) 低强介质试件

图17 实测锚杆内锚固段杆体轴应变分布曲线

锚固长度时，摩阻力分布较为均匀，且锚固长度的增加对极限承载力提高明显。基于这一点，建议锚杆的设计长度应小于工程临界锚固长度：

$$l'_c = 2/K = 2\sqrt{EA/\lambda} \quad (3)$$

式中： l'_c 为理论临界锚固长度； $K = \sqrt{\lambda/EA}$ ； E 为锚固体综合模量； A 为锚固体综合面积； λ 为

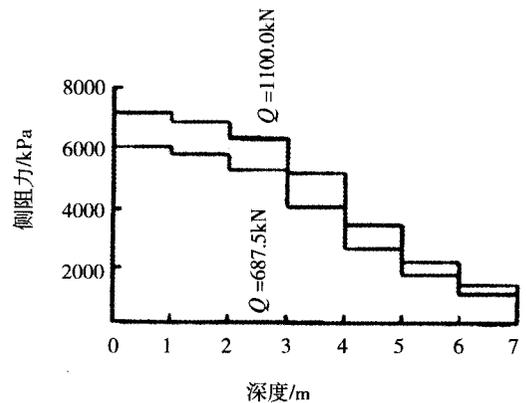


图18 锚杆第二界面剪应力分布形态

图19 理论锚固段侧阻力分布曲线

侧摩阻刚度系数，可通过锚杆试验的p-s关系反演获得。

文[31]是一篇文题即针对锚杆临界锚固长度的论文，非常难得。

文[32]（2004）报道了关于预应力锚索锚固段侧阻力的非线性分析方法。其典型算例结果见图19。

该图显示，侧阻力分布不均匀，邻近外端点处有一峰值，但未发生转移；峰值沿杆体长度向里端衰减，其零值已超过试验锚固段长度（7m），故该工程设计锚固长度短于临界锚固长度。为方便比较，笔者对该图作了90°旋转（逆时针）。

文[33]（2004）报道对高压注浆土钉进行了研究，通过抗拔力学模型探讨了高压注浆土钉的特性和抗拔荷载传递机理，给出了有、无高压条件下土钉界面粘结强度的标准值（建议），其结果为表3所涵盖。笔者认为，一定岩土介质的临界锚固长度本来是一定的，如果通过高压注浆等措施，能使介质物理学参数指标值提高，则临界锚固长度也会有相应变化，一般会缩短。

文[34]（2003）报道，在Mindlin问题位移解基础上，导出了拉力型锚杆受力的弹性解，计算了锚杆在不同岩体中有效锚固长度，认为影响锚杆有效锚固长度的因素是：岩体物理学参数、荷载、施工质量、岩体松弛深度范围、膨胀性、节理裂隙分布特性等。不同直径、不同拉拔力、不同岩体介质中锚杆轴力分布典型曲线见图20~图22。

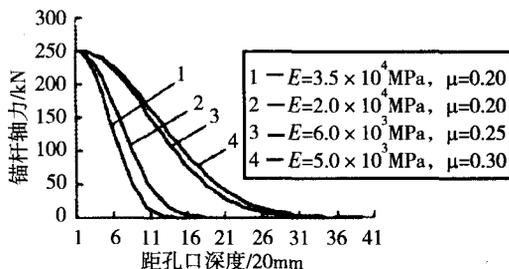


图22 不同岩体介质中锚杆轴力分布曲线

上述计算结果的启示是：锚杆直径越大，拉拔力就越高；支护介质越软弱，锚杆临界锚固长度就越长，反之越短。不过，上述曲线图中，轴力峰值均未出现转移，而零值却出现了明显转移，因此，临界锚固长度尚不能准确确定。

文[35]（2007）报道了基于非线性Mohr-Coulomb强度准则下锚索极限抗拔力研究成果。作者根据预应力锚索破裂面（第2界面-笔者注）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、围岩压力和注浆压力等因素的预应力锚索极限抗拔承载力计算公式。其典型结果见图23和图24。其中图23是沿第3界面破坏（ $\theta \neq 90^\circ$ ），图24是沿第2界面的破坏（ $\theta = 90^\circ$ ），m是由三轴试验确定的岩土材料非线性参数。

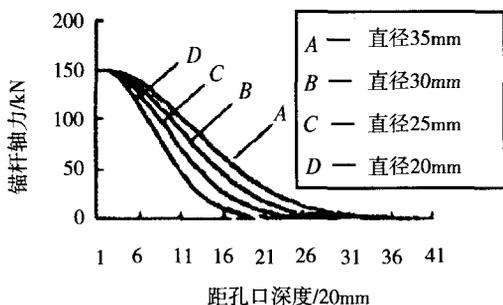


图20 不同直径的锚杆轴力分布曲线

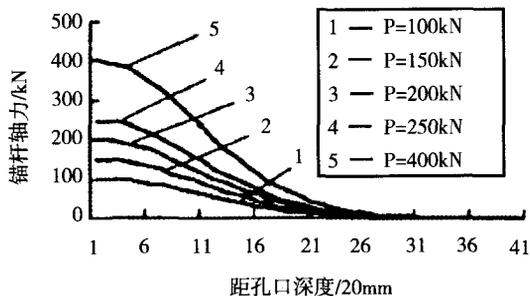


图21 不同拉拔力作用下的锚杆轴力分布曲线

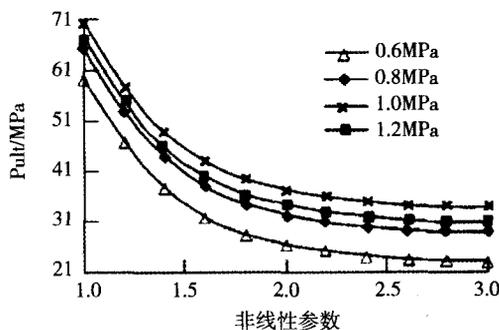


图23 Pult与m的关系曲线图

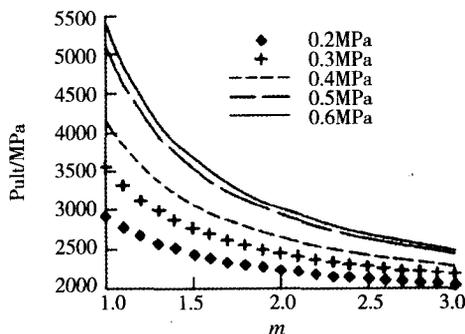


图24 Pult与m的关系曲线图

这里作者通过破裂面与锚固体的夹角 θ 的变化,探讨了第2和第3界面的相互关系,甚为难得。上述二图表明:峰值的空间位置未发生转移,说明荷载还有潜力可挖;非零值点未出现在杆体上,表明杆体设计长度稍短;第3界面力比第2界面小得多,可认为第3界面力是第2界面衰减的结果。实际上,第2、第3界面上的剪应力均由第1界面衰减、传递而来,三个界面间存在着较复杂的相互作用关系。

文[36](2004)以锚索拔出(第1界面)为对象建立理论分析模型,对岩锚界面端部的断裂力学行为进行了研究。作者指出,剪应力和径向应力在界面的两个端部(内端部和外端部)都有较强应力集中现象,应力集中可能直接引起端部破坏,而平均应力设计方法则忽略了这一现象。并认为岩锚外端部破坏不宜使用最大剪应力强度破坏准则,而应采用断裂力学中表征奇异应力场强度的应力强度因子。

文[37](2004)给出了锚杆与锚固体(第1界面)粘结未破坏和已破坏两种情况下锚杆轴应力-轴位移关系,提出利用锚杆拉拔试验数据来反演确定最大侧剪应力 τ_f 、变形参数 a 和总破坏区长度。研究指出,高的岩石单轴抗压强度、较大的锚固面积比有助于提高锚固节理的剪切刚度,倾斜锚杆加固的节理剪切刚度、节理抗剪强度均比垂直锚杆的更大。

文[38](2004)报道以大量试验资料为基础,提出了一个描述预应力锚索破裂面形状的双参数方程。在此基础上根据极限平衡原理及岩体的Hoek-Brown准则,研究了预应力锚索的极限承载力,指出锚杆极限抗拔力取决于锚索破裂面形状、岩体种类、无侧限抗压强度、风化程度、灌浆材料和灌浆压力等。作者主要研究了第2、第3界面极限承载力问题。极限承载力问题搞清楚,临界锚固长度问题也将迎刃而解。

文[39](2004)将剪切滞模型的基本原理应用于预应力锚索作用机理研究,认为应用该模型可研究预应力锚索侧阻力分布模式及荷载-位移特性。其典型结果如图25所示。

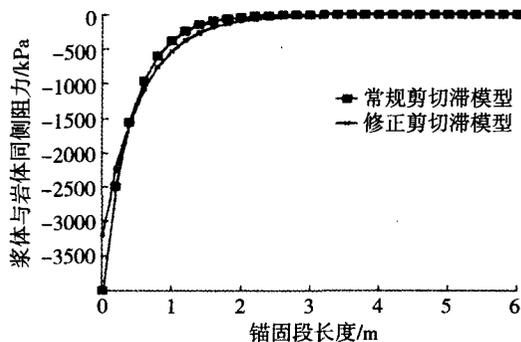
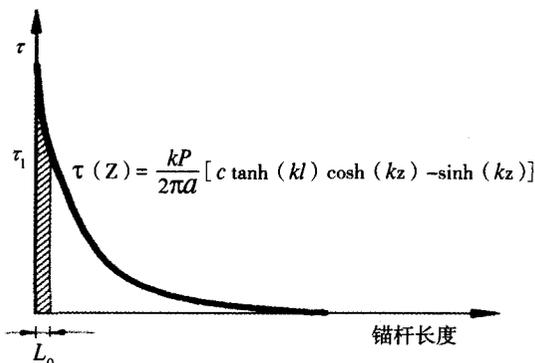
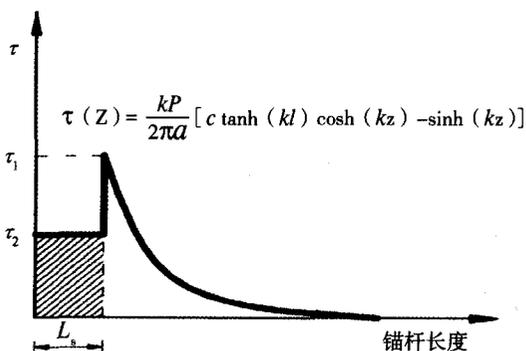


图25 预应力锚索侧阻力分布

文[40](2006)根据弹性理论轴对称问题的基本理论和方法,在引入锚杆影响范围内平均轴向应力(平均轴向应变)假设以及考虑界面本构关系条件下,推导建立锚杆黏结良好和脱黏两种情况下界面应力分布公式。剪应力沿锚杆分布特性如图26所示。



(a) 不考虑界面脱黏情况



(b) 考虑界面脱黏情况

图26 剪应力沿锚杆分布特性

文[41](2006)以胶结式预应力锚索锚固段与围岩体界面特性、锚固段极限黏结强度以及侧阻力分布规律为基础,给出了预应力锚索锚固段合理长度的计算方法,研究了岩体特性、灌浆材料特性、束体材料以及三者之间相对刚度等因素

对锚索锚固段荷载传递特性的影响机制问题。其典型计算结果如图27~图29所示。

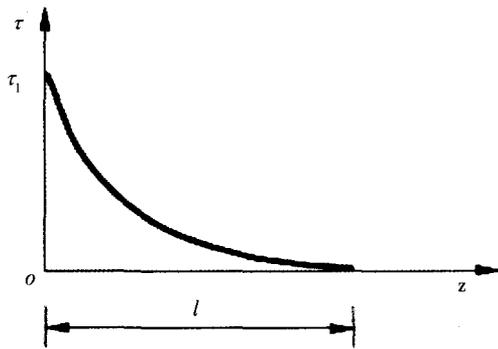


图27 弹性阶段锚固段侧阻力分布

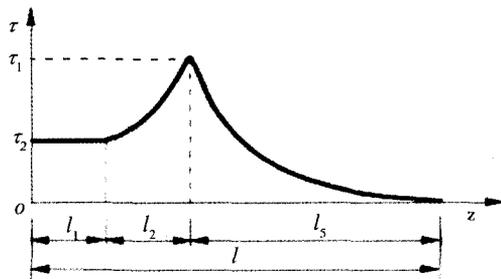


图28 塑性阶段锚固段侧阻力分布

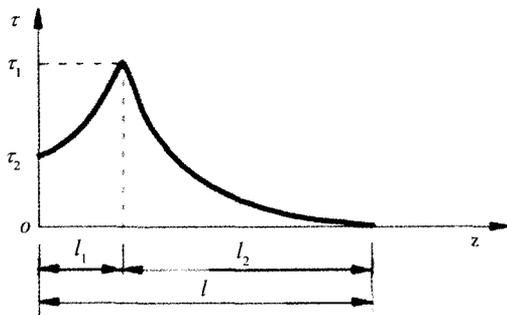


图29 典型的锚固段侧阻力分布

可以认为,图28和图29中的 τ_1 是图27中的 τ_1 转移而来,如能证明或证实相应的 l_3 (图28)和 l_3 (图29)接近相等且等于图27中的 l_3 ,则它们就是临界锚固长度。

文[42](2005)通过拟合不同类型工程中锚杆拉拔试验实测数据,提出了锚固段轴力分布的三参数复合幂函数模型,以及锚索锚固段轴力分布的两参数复合幂函数模型,由静力平衡条件建立了剪应力沿锚固长度的分布规律。文章分析了剪应力分布的特征,提出了一种锚索有效锚固长度计算方法,给出了参数G的取值,指出按平均

强度法确定锚索有效锚固长度是偏于不安全的。文章还指出,由于岩土材料的复杂性,锚杆轴力分布的理论解与试验实测值差异较大:理论解得锚杆轴力峰值出现在锚杆外端部,实测值则出现在锚杆内部[43~46](2002,2003,2000,2001)。笔者认为,以试验依据分析剪应力分布特征不失为一个较可靠方法,但试验数据常因环境恶劣不易取得很完备,尤其是现场试验。

文[47](2002)报道采用动力瞬态激振方法使锚杆引起弹性振动,通过测定锚杆的振动响应来估计和推断锚杆的极限承载力。与极限承载力相对应的锚杆长度即为临界锚固长度。这是一种将神经网络这种非线性动力系统运用于锚固工程无损检测的灰色系统预测方法。

文[48](2007)报道采用数值分析方法,从土体应力路径的角度研究了土钉支护的工作性能和作用机理。研究指出,应力路径分析方法能很好反映随基坑开挖、支护工序推进,土体应力不断转移、叠加的力学响应过程;土钉的应力传递作用又将钉头部位土体的应力转移至钉尾深部的土体。笔者认为,上述转移是浆体局部产生破坏并转移的结果,常与临界锚固长度的确定相伴而生。

文[49,50](2000,2000)报道三峡工程永久船闸工程人工开挖岩质边坡最高达170余米,一般坡高为100~160m,闸室边墙部位为50~70m的直立坡。为保证船闸边坡的稳定性,共采用了3000kN和1000kN级锚索4000多根,高强锚索100,000多根对边坡进行加固。文[51](2002)为研究预应力锚索对三峡船闸高边坡岩体的加固效果,采用三维显式有限差分法,建立预应力锚固数值仿真模型进行了一系列计算机模拟试验。其典型计算结果见图30。该曲线表明,轴力零值点有转移而峰值点无转移,故临界锚固长度尚不确定。

文[52~56](1998,2001,2004,2000,2003)报道基于弹性半无限体的Mindlin位移解(解析解),采用锚固体与孔壁岩土严格全程黏结的共同变形假设,建立力学模型,以半数值形式的计算机求解或微分方程的解析推导,得到了

若干侧阻力沿锚杆杆体长度分布的理论解。这些成果丰富了研究侧阻力分布规律的方法，有重要参考价值。不过，所得分布规律与工程实际尚有若干差异。

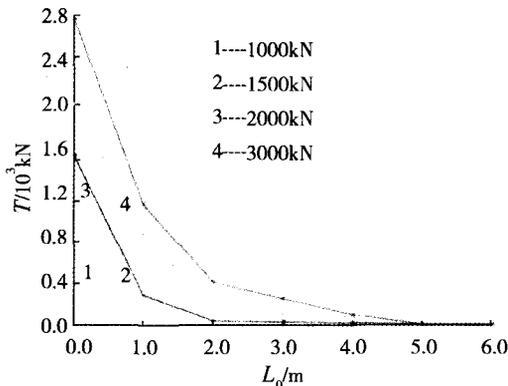


图30 不同吨位预应力锚索内锚固段轴力分布曲线

文[57] (2006) 报道以岩土介质的半无限弹性体假设为基础建立一维力学模型，利用半无限体Mindlin问题的位移解析解，以半数数值法求得岩土体与锚固体的孔壁界面（即第2界面）位移差值。通过引入侧阻力与位移差值的滑移-软化模型关系，对锚索锚固段的侧阻力分布进行了半数数值求解。其典型结果见图31~图33。

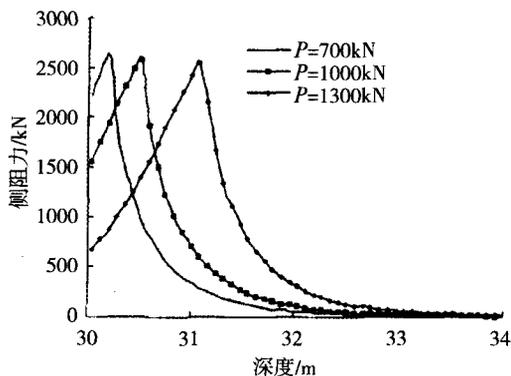


图31 不同位拔力作用下的侧阻力分布曲线

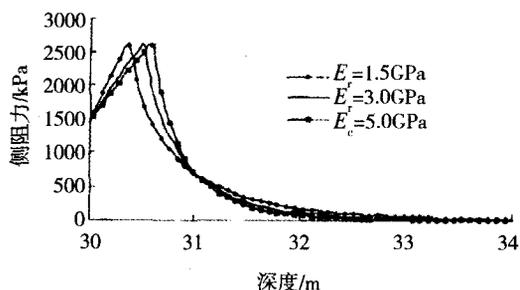


图32 岩土体不同弹性模量的侧阻力分布曲线

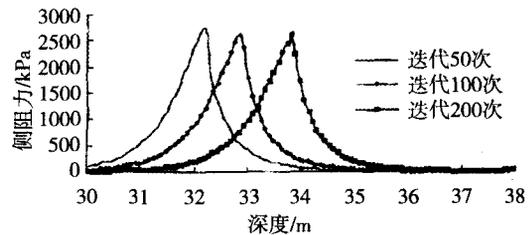


图33 锚固失效的“累进破坏”计算现象

计算结果表明：不同拉拔力、不同弹性模量、不同迭代次数条件下，侧阻力峰值和零值均会发生沿杆体深部的转移，其实质仍然是浆体材料局部破坏已发生转移的结果。需要指出，3组曲线靠近外端处的峰值，此前似已发生过转移。

文[58] (1995) 报道以李家峡水电站岩质高边坡工程为背景，通过大吨位试验分析和有限元数值模拟方法研究了预应力长锚索单体加固机理。研究指出，锚固作用范围只在锚头、锚根附近约2m的区域内，采用增大锚固力、改变锚固角、变更锚索长度等措施，应力影响变化范围不显著。笔者认为，这里所谓“锚根”（即内锚固段）受应力影响范围，实际上就是指锚杆有效锚固长度；介质不同，受应力影响范围也不同。

文[59] (2004) 经研究指出，锚索内锚固段最小安全长度 L_{\min} 一般随预应力吨位 t 、锚索砂浆混合体弹模 E_s 的增加而增加；随岩体变形模量 E_r 、砂浆抗剪强度 τ_c 的增加而减小，如下式所示：

$$L_{\min} = \frac{K_2 t}{2\pi R \tau_c} \left(\frac{E_s}{E_r} \right)^{1/m} \quad (4)$$

式中： K_2 为试验拟合参数； R 为锚索砂浆混合体横截面面积；其余符号意义见上文中。在这里 L_{\min} 可近似理解为临界锚固长度，但不等于临界锚固长度，因为临界锚固长度与设计预应力吨位和设计吨位均无关。

文[60] (2004) 报道，采用简化Bishop条分法和复合形法，建立了软土地区复合土钉支护结构内部整体稳定性安全系数计算模型，利用全局差分法建立灵敏度分析模型，研究了安全系数及其灵敏度与各设计参数之间的变化关系，其中安全系数 F_s 与土钉长度 L 的关系，以及钉长灵敏度 S_L 与 L 的关系见图34。

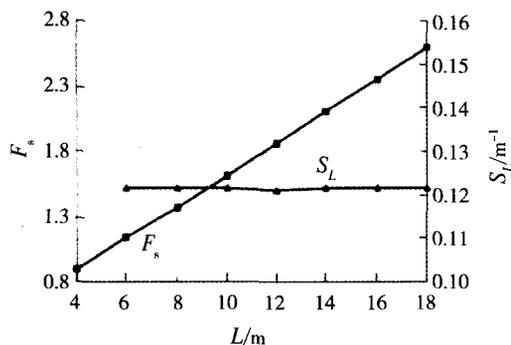


图34 F_s -L及 S_L -L关系曲线

由上图知：安全系数 F_s 随土钉长度 L 增加而增加，但这应限制在土钉临界锚固长度之内；钉长 L 的灵敏度 S_L 总大于零，而无论 L 是为6m，还是18m，变化幅度并不大，换言之， S_L 对长度的变化不敏感。

文[61] (2004) 分析了复合地基临界桩长的定义及研究现状，通过数值模拟方法，揭示了复合地基临界桩长的客观存在性质，对临界桩长问题进行了探讨。笔者认为，桩主要承压，锚固类结构锚固体主要受拉或压，二者有一定可比性；迄今最大直径的锚固体已达到或超过较小的或微型的桩直径。因而相应的研究结果在一定条件下可以互相借鉴和学习。

文[62] (2006) 对无支护及有支护隧道围岩在爆炸荷载作用下应力波传播特性进行了有限元数值模拟。研究表明，锚杆对应力波传播衰减作用明显，其关系可用指数函数来拟合。笔者认为，这一结论很有意义，说明在动载下，动应力分布也是不均匀的，而且其规律与静载下的相近。

5 综合研究

关于锚固类结构杆体临界锚固长度问题的综合研究，也是一种有效方法，能够综合、定性地对该问题的研究成果进行评述、归纳、比对、提炼、分析和阐释。但采用该方法提出的成果很少。

文[63] (2005) 根据岩土锚固的有关试验资料，分析了影响锚杆灌浆体与岩土体间粘结强度的主要因素，提出了粘结强度的建议值，指出锚杆受荷时，沿锚固段长度粘结应力分布的不均匀

性，其程度随锚固段长度的增加而加剧；以往在计算锚杆抗拔力公式中对不同锚固长度的锚杆均采用单一的粘结强度是不合理的，而应引入锚固长度对粘结强度的影响系数。作者在综合国内外相关资料基础上，提出了锚固段注浆体与岩土体间（即第2界面）粘结强度的建议值（表2，表3），可供读者参考。

表2 锚杆灌浆体与岩体间粘结强度建议值

岩石种类	岩石单轴饱和抗压强度/Mpa	锚杆体-岩石间粘结强度
		标准值/Mpa
硬岩	>60	1.5~2.8
中硬岩	30~60	1.0~1.5
软岩	<30	0.3~1.0

注：锚杆的锚固段长度为6.0~8.0m。

表3 锚杆灌浆体与土体间粘结强度 f_{mg} 建议值

土的种类	土的状态	粘结强度	
		一次低压或无压注浆	二次高压注浆
/Mpa			
淤泥质土	-	20~25	35~50
粘性土	软塑	30~40	60~70
	可塑	40~50	70~90
	硬塑	50~60	90~110
	坚硬	60~70	110~130
砂土	松散	80~140	-
	稍密	180~220	-
	中密	200~250	-
	密实	270~350	-

注：锚杆的锚固段长度为10~12m。

文[64] (2003) 在综合论述地锚荷载传递机理以及岩土锚固作用机理后强调指出，围绕地锚荷载传递机理的研究，应考虑粘结应力非均匀分布的事实，进而提出切合实际的单锚和群锚有效承载力的实用计算方法。另据文献[64]报道，中国台湾在砂性土的抗浮工程中，应用了内锚固段被扩成圆锥体的锚杆，借助旋转的叶片，可在该部位形成直径为0.6m的锥体，当锚固长度为6~10m时，锚杆的极限承载力可达960~1400kN，比直径为12cm的圆柱形内锚固段的锚杆承载力提高2~3倍。在香港新机场建设中，采用单孔复合锚固创造了单根土层锚杆承载力的很高纪录。锚杆被置于砂和全风化崩解的花岗岩层中，由7个

单元锚杆组成,单元锚杆的固定长度分别为5m和3m,锚杆固定总长度为30m,在3000kN荷载作用下,未见异常变化。上述第1例是在一定岩土介质中,有效缩短锚固类结构杆体临界锚固长度的例子,第2例则是有效利用临界锚固长度以提高承载力的例子。即使如此,它们仍然存在一个临界锚固长度问题。

6 结语

①关于锚固类结构杆体临界锚固长度问题的相关研究,我国滞后国外大约15a~30a时间,并且长期以来,我国参考和借鉴了国外许多技术方法和经验。

②临界锚固长度问题的提出和持续研究,经历了数十年时间历程,至今也仅能认为已取得阶段性成果,仍有许多问题需研究解决。即使发现这一问题,我国至少晚于国外10a左右时间。

③缩短上述差别源于有我国特色的土钉支护的兴起和发展,又特别是土钉支护技术在新奥法和土钉墙工法不建议使用的不良地质条件下(如软土、厚填土等)的成功应用,又特别是锚固类和复合锚固类结构概念的提出,使得注浆土钉、锚杆和锚索在一定条件下可以统一起来进行研究的成果。

④关于临界锚固长度问题研究,近年来我国开展得非常活跃,其认识深度已不亚于国外。特别是界面剪应力在两个正交方向上的衰减,以及以三个转移(峰值点、零值点、浆体局部破坏)确定临界锚固长度的试验方法等特色明显,在国外未见同类成果发表。

⑤提出、研究并解决锚固类结构杆体临界锚固长度问题的实质,旨在彻底告别界面平均剪应力的概念和设计方法,建立以临界锚固长度为基本依据的设计计算方法,显著提高工程安全度。

参考文献

- [1] 肖世国,周德培.非全长粘结型锚索锚固段长度的一种确定方法[J].岩石力学与工程学报,2004,23(9):1530~1534.(Xiao Shiguo,Zhou Depei. Calculation method of length of anchoring segment for partial-cohesive cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2004,23(9):1530~1534. (in Chinese))
- [2] 张友葩,高永涛,吴顺川.预应力锚杆锚固段长度的研究[J].岩石力学与工程学报,2005,Vol.24 No.6.(Zhang Youpa,Gao Yongtao,Wu Shunchuan. Study on bonding length of prestress anchor bar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2005, Vol.24 No.6. (in Chinese))
- [3] 邬爱清,韩军,罗超文,程良奎.单孔复合型锚杆锚固体应力分布特征研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(2):247~251.(Wu Aiqing,Han Jun,Luo Chaowen,Cheng Liangkui. Research on stress distribution along bolts with single borehole and multiple anchors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2004,23(2):247~251 (in Chinese))
- [4] 荣冠,朱焕春,周创兵.螺纹钢与圆钢锚杆工作机理对比试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(3):469~475.(Rong Guan,Zhu Huanchun,Zhou Chuangbing. Testing study on working mechanism of fully grouted bolts of thread steel and smooth steel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2004,23(3):469~475 (in Chinese))
- [5] 李国维,黄志怀,张丹,王思敬.玻璃纤维增强聚合物锚杆承载特征现场试验[J].岩石力学与工程学报,2006,Vol.25 No.11:2240~2246.(Li Guowei,Huang Zhihui,Zhang Dan,Wang Sijing. Field test on load-bearing character of glass fiber reinforced polymer bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2006, Vol.25 No.11:2240~2246 (in Chinese))
- [6] 段建立,谭跃虎,樊有维,陆峰.复合土钉支护的现场测试研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(12):2128~2132.(Duan Jianli,Tan Yuehu,Fan Youwei,Lu Feng. Field testing study on composite soil nailing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2004,23(12):2128~2132 (in Chinese))
- [7] 朱焕春,吴海滨,赵海斌.反复张拉荷载作用下锚杆工作机理试验研究[J].岩土工程学报,1999,21(6):662~665
- [8] 杨松林,荣冠,朱焕春.混凝土中锚杆传递机理的理论分析和现场试验[J].岩土力学,2001,22(1):72~74
- [9] 樊启祥,顾文红.三峡永久船闸高强结构锚杆现场试验研究及质量控制[J].岩石力学与工程学报,2001,20(5):657~660
- [10] 张发明,邵蔚侠.岩质高边坡预应力锚固问题研究[J].河海大学学报,1999,27(6):18~26
- [11] 娄国充,周德培.软岩高边坡土钉支护的监测分析与优化设计[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2734~2738.(Lou Guochong,Zhou Depei. Monitoring and design optimization of soil-nailing support for high weak rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2004,23(16):2734~2738. (in Chinese))
- [12] 程良奎,胡建林.土层锚杆的几个力学问题[A].见:中国岩土锚固工程协会主编.岩土工程中的锚固技术[C].北京:人民交通出版社,1996
- [13] 水利部西北勘测设计研究院.岩质高边坡开挖及加固措施研究[R].1995,212~261
- [14] 程良奎,范景伦.岩土锚固[M].北京:中国建筑工业出版社,2003,5~9
- [15] 李锡润,林韵梅.预紧式锚杆附加应力场分布规律和支护参数选择[J].地下工程,1983,(5):11~16
- [16] 孙学毅.边坡加固机理探讨[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2818~2823.(Sun Xueyi. Study on mechanism

- of slope reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16):2818~2823. (in Chinese)
- [17] 顾金才, 明治清, 沈俊, 陈安敏. 预应力锚索内锚固段受力特点现场试验研究. 见: 中国岩土锚固工程协会编. 岩土锚固新技术. 北京: 人民交通出版社, 1998
- [18] Wu Shengxing. Dynamic experimental study of bond-slip between bars and the concrete in Xiao Wan arch dam, New Developments in Dam Engineering-Wieland, Ren & Tan(eds), 2004 Taylor & Francis Group, London, ISBN 04 1536 2407:951~959
- [19] 曾宪明, 曹长林. 土中喷锚网支护抗爆设计方法研究与应用—项目鉴定报告之一: 基本成果. 洛阳: 总参工程兵科研三所, 1989, 6
- [20] 曹长林, 曾宪明. 黄土坑道喷锚网支护的抗爆性能—III, 支护受力变形特性: 临界承载能力[J]. 防护工程, 1992, 14(1), 46~55
- [21] 曾宪明, 杜云鹤, 范俊奇, 梁仕发, 肖玲, 汪剑辉. 锚固类结构第二交界面剪应力演化规律、衰减特性与计算方法探讨(J). 岩石力学与工程学报, 2005, 8
- [22] Zeng X M and Li Shimin. Prototype and model comparison test study on dynamic load resistance of soil-nail support, International Conference on soil Nailing & Stability of Soil and Rock Engineering, 21~22 October 2004, Nanjing, China.
- [23] 曾宪明, 赵林, 李世民, 林大路. 锚固类结构杆体临界锚固长度与判别方法试验研究. 中国防护工程科技报告. 洛阳: 总参工程兵科研三所, 2008.1
- [24] 朱焕春, 荣冠, 肖明, 王涛. 张拉荷载下全长粘结锚杆工作机理试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 379~384 (Zhu Huanchun, Rong Guan, Xiao Ming, Wang Tao. Testing study on working mechanism of full grouting bolt under tensile load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 379~384. (in Chinese))
- [25] 陈安敏, 顾金才, 沈俊, 曹金刚. 预应力锚索的长度与预应力值对其加固效果的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 848~852 (Chen Anmin, Gu Jincai, Shen Jun, Cao Jingang. Impact of length and prestress value of anchor cable on its reinforcement effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 848~852. (in Chinese))
- [26] 徐景茂, 顾雷雨. 锚索内锚固段注浆体与孔壁之间峰值抗剪强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3765~3769. (Xu Jingmao, Gu Leiyu. Testing study on the peak shear strength between grout and bore wall in the interior bond section of prestressed anchorage cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3765~3769 (in Chinese))
- [27] 陈广峰, 米海珍. 黄土地层中锚杆受力性能试验分析[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, Vol.29 No.1:116~119 (Chen Guangfeng, Mi Haizhen. Experimental analysis of anchor, stress performance in collapsible loess layer[J]. Journal of Gansu University of Technology, 2003, Vol.29 No.1:116~119 (in Chinese))
- [28] 李国维, 高磊, 黄志怀, 刘朝权, 张丹. 全长粘结玻璃纤维增强聚合物锚杆破坏机制拉拔模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, Vol.26 No.8:1653~1663 (Li Guowei, Gao Lei, Huang Zhihuai, Liu Chaoquan, Zhang Dan. Pull-out model experiment on failure mechanism of full-length bonding glass fiber reinforced polymer rebar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, Vol.26 No.8:1653~1663 (in Chinese))
- [29] 郑全平. 预应力锚索加固作用机理与设计计算方法. 中国防护工程科技报告, 1998.11.
- [30] 曾宪明, 范俊奇, 李世民. 锚固类结构界面剪应力相互作用关系研究. 预应力技术, 2006
- [31] 张洁, 尚岳全, 叶彬. 锚杆临界锚固长度解析计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, Vol.24 No.7:1134~1138 (Zhang Jie, Shang Yuequan, Ye Bin. Analytical calculations of critical anchorage length of bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, Vol.24 No.7:1134~1138 (in Chinese))
- [32] 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 Siming, Zhang Xiaogang, Wang Chenghua. Non-linear analysis on prestressed cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1535~1541 (in Chinese))
- [33] 李志刚, 任佰俐, 秦四清. 高压注浆土钉特性及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1564~1567 (Li Zhigang, Ren Baili, Qin Siqing. Characteristics and applications of high-pressure grouting soil nailing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1564~1567 (in Chinese))
- [34] 曹国金, 姜弘道, 熊红梅. 一种确定拉力型锚杆支护长度的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1141~1145 (Cao Guojin, Jiang Hongdao, Xiong Hongmei. Calculation method of support length for stretched bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1141~1145 (in Chinese))
- [35] 邹金锋, 李亮, 杨小礼, 邓宗伟. 基于非线性Mohr-Coulomb强度准则下锚索极限抗拔力研究[J]. 岩土工程学报, 2007, Vol.29 No.1:107~111 (Zou Jinfeng, Li Liang, Yang Xiaoli, Deng Zongwei. Study on the ultimate pullout force of prestressed cable based on nonlinear Mohr-Coulomb failure criterion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, Vol.29 No.1:107~111 (in Chinese))
- [36] 杨春林, 郑百林, 贺鹏飞, 周春儿. 岩锚界面及其端部附近应力场奇异行为的弹性力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 946~951 (Yang Chunlin, Zheng Bailin, He Pengfei, Zhou Chun'er. Singular stress in proximity of interface between anchor and rock and its ends[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6):946~951 (in Chinese))
- [37] 杨松林, 徐卫亚, 黄启平. 节理剪切过程中锚杆的变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3268~3273 (Yang Songlin, Xu Weiya, Huang Qipin. Analysis on the bolt deformation as result of joint shear displacement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19):3268~3273 (in Chinese))
- [38] 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 Siming, Wang Chenghua. 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))
- [39] 何思明, 张小刚, 王成华. 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 Siming, Zhang Xiaogang, Wang Chenghua. Study on mechanism of prestressed anchorage cable based on modified shear lag model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15):2562~2567 (in Chinese))

- Chinese))
- [40] 何思明, 李新坡. 预应力锚杆作用机制研究. 岩石力学与工程学报[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, Vol.25 No.9: 1876~1880 (He Siming, Li Xinpo. Study on mechanism of prestressed anchor bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, Vol.25 No.9:1876~1880 (in Chinese))
- [41] 何思明, 田金昌, 周建庭. 胶结式预应力锚索锚固段荷载传递特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, Vol.25 No.1:118~121 (He Siming, Tian Jinchang, Zhou Jianting. Study on load transfer of bond prestressed anchor rope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, Vol.25 No.1:118~121 (in Chinese))
- [42] 朱玉, 卫军, 廖朝华. 确定预应力锚索锚固长度的复合幂函数模型法[J]. 武汉理工大学学报, 2005, Vol.27 No.8: 60~63 (Zhu Yu, Wei Jun, Liao Chaohua. The Combined-power Model Method on Determining the Bounding Length of Prestressed Anchoring Rope[J]. Journal of wuhan university of technology, 2005, Vol.27 No.8:60~63 (in Chinese))
- [43] 薛守义, 刘汉东. 岩体工程学科性质透视[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
- [44] 曹国金, 姜弘道, 熊红梅. 一种确定拉力型锚杆支护长度的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1141~1145.
- [45] 尤春安. 全长粘结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 339~341.
- [46] 蒋忠信. 拉力型锚索锚固段剪应力分布的高斯曲线模式[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 696~699.
- [47] 许明, 张永兴, 阴可. 锚杆极限承载力的人工神经网络预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5):755~758. (Xu Ming, Zhang Yongxing, Yin Ke. Prediction of limit bearing capacity of bolt using artificial neural networks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,21(5):755~758. (in Chinese))
- [48] 贺若兰, 张平, 刘宝琛. 土钉支护工作性能的应力路径分析[J]. 岩土工程学报, 2007, Vol.29 No.8:1256~1259 (He Ruolan, Zhang Ping, Liu Baochen. Stress path analysis on working behaviors of soil nailing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, Vol.29 No.8:1256~1259 (in Chinese))
- [49] 盛谦, 丁秀丽, 冯夏庭等. 三峡船闸高边坡考虑开挖卸荷效应的位移反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 987~993
- [50] 徐年丰. 三峡永久船闸高边坡开挖及加固支护设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 1071~1076
- [51] 丁秀丽, 盛谦, 韩军, 程良奎, 白世伟. 预应力锚索锚固机理的数值模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 980~988.
- [52] 王建宇, 牟瑞芳. 按共同变形原理计算地锚工程中黏结型锚头内力[A]. 见: 岩土锚固新技术[C]. 北京: 人民交通出版社, 1998.52~63. (Wang Jianyu, Mu Ruifang. Inner force calculation of grouted anchor by deformation together principle [A]. In: New Technology for Anchoring Engineering[C]. Beijing: China Communications press. 1998,52~63. (in Chinese))
- [53] 杨松林, 荣冠, 朱焕春. 混凝土中锚杆荷载传递机制的理论分析和现场试验[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 71~74. (Yang Songlin, Rong Guan, Zhu Huanchun. Theoretical analysis and in-situ experiment on load-transfer mechanism of bolt in cement[J]. Rock and soil Mechanics, 2001,22(1):71~74 (in Chinese))
- [54] 张四平, 侯庆. 压力分散型锚杆剪应力分布与现场试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(2): 41~47. (Zhang Siping, Hou Qing. Study on shear stress distribution and in-situ test of pressure-dispersive anchor[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2004,26(2):41~47. (in Chinese))
- [55] 尤春安. 全长黏结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 339~341. (You Chun'an. Mechanical analysis of wholly grouted anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000,19(3): 339~341. (in Chinese))
- [56] 曹国金, 姜弘道, 熊红梅. 一种确定拉力型锚杆支护长度的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1141~1145. (Cao Guojin, Jiang Hongdao, Xiong Hongmei. Calculation method of support length for stretched bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(7): 1141~1145. (in Chinese))
- [57] 蒋良滩, 黄润秋, 蒋忠信. 锚固段侧阻力分布的一维滑移-软化半数数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, Vol.25 No.11:2187~2193 (Jiang Liangwei, Huang Runqiu, Jiang Zhongxin. One-dimensional semi-numerical analysis of lateral shear distribution of anchorage segment considering slipping and softening effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, Vol.25 No.11:2187~2193 (in Chinese))
- [58] 朱维申, 白世伟. 预应力锚索加固机理研究[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所. 1995
- [59] 李宁, 张平, 李国玉. 岩质边坡预应力锚固的设计原则与方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2972~2976. (Li Ning, Zhang Ping, Li Guoyu. Discussion on design principle and method of prestressed cable for support of rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(17):2972~2976. (in Chinese))
- [60] 万林海, 余建民, 冯翠红. 软土复合土钉支护结构参数优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3342~3347. (Wan Linhai, Yu Jianmin, Feng Cuihong. Optimum design of parameters for composite soil nail wall in soft soil foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(19):3342~3347 (in Chinese))
- [61] 张忠坤, 李海斌, 殷宗泽, 曹正康. 路堤下复合地基临界桩长探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 522~526. (Zhang Zhongkun, Li Haibin, Yin Zongze, Cao Zhengkang. On critical length of pile in composite foundation under embankment of highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(3):522~526 (in Chinese))
- [62] 荣耀, 许锡宾, 等. 锚杆对应力波传播影响的有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 115~119
- [63] 韩军, 陈强, 刘元坤, 程良奎. 锚杆灌浆体与岩(土)体间的粘结强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, Vol.24 No.19:3482~3486 (Han Jun, Chen Qiang, Liu Yuankun, Cheng Liangkui. Bond strength between anchor grout and rock or soil masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, Vol.24 No.19:3482~3486 (in Chinese))
- [64] 张乐文, 李术才. 岩土锚固的现状与发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增1): 2214~2221. (Zhang Lewen, Li Shucai. Current state and development of anchorage support for rocks and soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(增1):2214~2221 (in Chinese))