

# 边坡岩体锚固性能研究回顾与展望<sup>\*</sup>

洪海春, 刘建达, 黄伟生, 高志兵

(江苏省地震工程研究院, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 岩体锚固是岩体工程领域中非常重要的分支, 而岩体锚固性能研究又是岩体锚固技术成败的关键。系统论述了边坡岩体锚固性能的国内外研究现状和进展, 涉及到受力特性、长期性能和耐久性三个方面的研究成果。阐述边坡岩体锚固性能研究存在的相关问题, 对其今后的发展趋势进行了展望。

**关键词:** 边坡岩体; 锚固性能; 受力特性; 长期性能; 耐久性; 回顾与展望

**中图分类号:** P 642. 22   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-811X(2008)03-0102-07

## 0 引言

岩石边坡是与人类生存环境以及地质工程活动密切相关的, 最基本也是极为重要的自然地质环境之一<sup>[1]</sup>。随着人口的急剧增长和土地资源的过度开发, 边坡问题已变成同地震和火山相并列的全球性三大地质灾害(源)之一。在人类发展过程中, 无时不与它相互冲突、相互影响、相互协调, 进而达到相互依存, 有些岩石边坡在经历不稳定状态到稳定状态的过程后, 成为永久性的“人工自然标志”, 融入地质环境中<sup>[2]</sup>。随着国家基础设施的大量兴建和西部大开发战略的积极推进, 水利水电工程和铁路工程、公路工程等领域中高陡边坡与日俱增并产生边坡岩体稳定问题, 而边坡岩体锚固技术在高边坡的加固和支护处理中占主导地位, 是最普遍、最经济和最有效的方法之一。

岩体锚固是岩土工程领域中重要的分支, 而岩体锚固性能的研究又是岩体锚固技术成败的关键。岩体锚固是指为预防和治理滑坡、地表沉降、巷道坍塌等地质灾害, 采用锚杆、预应力锚杆和锚索等锚固件, 以改善岩体的应力状态, 达到调动和提高岩体自身强度和自稳能力的措施。岩体锚固性能是指工程设计、工程施工以及工程运营期间, 岩体锚固所具有的特性和功能<sup>[3]</sup>。

边坡岩体锚固中最基本的性能是受力特性, 包括剪应力分布特性和轴力分布特性等内容, 其影响

着边坡岩体锚固的长期性能和耐久性以及边坡工程的安全和稳定等方面。边坡岩体锚固的长期性能主要是指边坡岩体锚固在重大工程施工期间所具有的特性和功能, 而边坡岩体锚固的耐久性主要是指边坡岩体锚固在重大工程运营期间所具有的特性和功能<sup>[3]</sup>。边坡岩体锚固的受力特性、长期性能和耐久性在重大工程的设计、施工以及运营期间具有依次递进的关系, 贯穿于整个工程中, 三者相互影响、相互渗透, 组成锚固性能的完整体系。

本文论述了边坡岩体锚固性能的国内外研究现状和进展, 涉及到受力特性、长期性能和耐久性三个方面的研究成果。阐述边坡岩体锚固性能研究存在的相关问题, 对其今后的发展趋势进行了展望。

## 1 边坡岩体锚固受力特性研究

边坡岩体锚固工程的力学效应主要表现在两个方面: 一是加固岩体作用, 使岩体锚固一体化, 提高岩体的整体稳定性; 二是利用岩体的抗剪强度传递与承受结构物的拉力, 对围岩表面提供反力以约束岩体向临空方向的变形。

在岩体锚固荷载转移机制、粘结应力分布特征及其有关问题等, 借以确定某一特定的锚固系统, 是否能安全地承受规定的设计荷载, 能否正确地估计施工方法的变化对荷载的影响, 对于提高岩体锚固性能都起到积极作用。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008-01-10

基金项目: 国家发展和改革委员会项目“城市活断层试验探测”(20041138)资助

作者简介: 洪海春(1977-), 男, 江西新干人, 博士, 工程师, 主要从事地震工程、岩土工程等方面的研究工作。

E-mail: haichunhong@126.com

### 1.1 剪应力特性研究

锚索预应力和锚固段长度的合理确定是预应力锚索加固岩体设计中的关键问题, 而锚固段长度主要决定于锚固段的粘结强度, 实际上也就是锚固段剪应力大小及分布规律影响预应力和锚固段长度两个因素, 在这方面研究成果比较丰富。

在 1970 年, Philips 假定结合应力沿锚(杆)索长度方向按指数关系分布, 较好的反映了荷载从锚(杆)索转移到灌浆体的力学特性, 得到普遍的认同<sup>[4]</sup>。试验研究表明, 锚固段剪应力分布是很不均匀的<sup>[5-6]</sup>, 一般剪应力比较集中在前端且会达到峰值, 然后逐渐向末端减小并最终趋近于零。国内外相关研究也得出类似的结论。通过构造正态分布函数<sup>[7]</sup>、双曲函数<sup>[8]</sup>、指数函数<sup>[9-10]</sup>、复合幂函数<sup>[11]</sup>来描述锚固段剪应力分布曲线, 讨论锚固段的有效长度及其安全储备等。何思明将预应力锚索锚固段离散化, 最终获得锚索锚固段的侧阻力分布及荷载、变形特性<sup>[12]</sup>。张端良等运用弹性理论对锚固段周边剪应力进行求解, 求出剪应力沿锚固段轴向的分布曲线, 并通过与现场试验结果对比, 得出锚固段周边剪应力分布的合理结论<sup>[13]</sup>。

现行规范采用平均粘结强度来确定锚固段有效长度<sup>[14]</sup>, 假定剪应力分布沿孔壁均匀分布条件下进行计算, 如此计算得出的锚固段长度有许多不完善之处<sup>[9]</sup>, 也是不严谨的, 计算的安全系数往往比实际偏大, 可能潜伏危险<sup>[7]</sup>。

然而, 以往的假设和力学模型分析剪应力分布比较粗糙, 与实际有出入<sup>[13]</sup>, 需要进一步完善。洪海春基于弹性理论, 按照半空间体在边界上受法向集中力作用, 对预应力锚索锚固段剪应力沿长度方向的分布规律进行模型研究<sup>[3]</sup>。

### 1.2 轴力特性研究

在不同岩体条件下锚杆表现出不同的作用机理, 例如, 对层状岩体的组合梁作用、对松碎岩体的挤压作用、对软弱、松动、不稳定危石的悬吊作用以及对节理岩体的楔固作用、对围岩强度强化作用等理论均得到普遍的认同<sup>[15]</sup>。由于锚杆或预应力锚索(锚杆)的轴力是剪应力的积分, 因此, 锚杆或预应力锚索(锚杆)的受力特征及其影响因素, 虽然表达形式不同在本质上却是统一的。

张发明根据预应力锚索现场试验结果, 对内锚固段轴力和剪应力的分布特征、传递特征等进行了比较系统的分析, 分别提出了内锚固段轴力、剪应力分布的经验公式, 得出岩体与锚固体的粘结强度不仅与岩石单轴抗压强度有关, 还与内锚

固段裂隙的分布与性质有关的结论<sup>[16]</sup>。

尤春安通过实验室研究, 验证了锚固体与岩体界面上的破坏是锚固系统失效的主要形式。同时发现锚固力的大小不但与锚杆长度、直径等有关, 而且与锚固灌浆材料的组构有密切的关系, 提出了新的提高锚固力的途径。采用实验研究的方法, 探讨锚固体界面力学特征、在荷载作用下变形规律以及界面上的应力分布规律。根据锚固体的力学效应, 将锚固界面上的力学行为分为弹性变形阶段、塑性滑移阶段和脱粘残余摩擦阶段三种状态<sup>[10]</sup>。

洪海春针对单孔多筋全长粘结式长锚杆与一般锚杆或预应力锚索锚固段轴力特性不同, 根据监测资料分析锚杆轴力特性, 结合前人研究成果, 提出锚杆尺寸效应的概念, 研究成果为改善和优化工程设计提供科学依据<sup>[3]</sup>。

### 1.3 群锚效应研究

尽管我国应用预应力锚固技术起步较晚, 但发展很快, 有些学者在边坡岩体群锚加固机理和群锚效应的现场试验和新理论研究方面具有开拓性的贡献, 研究成果比较丰硕。

黄福德等、李 宁等结合“八五”国家重点科技攻关项目“高边坡开挖及加固措施研究”的子课题“高边坡预应力群锚加固机理研究”, 根据从宏观过程的动态效应现象, 分析研究加锚岩体的共性机理与材料个性特征的思路。在李家峡水电站层状岩质高边坡的施工现场开展了预应力锚杆(索)群锚试验, 并配合进行了室内楔形体群锚加固边坡的破坏性模拟试验, 应用岩体损伤模型、摩擦接触模型、无限边界模型等新模型与方法, 结合数值仿真计算的理论分析验证, 发现了群锚增稳的机理依据、增效效应加锚法, 提出了广义预锚参数选择的系统论新方法, 分析了模拟预应力锚索、灌浆体与岩体界面之间的相互作用和耦合效应, 首次考虑了预应力对岩体损伤张量的影响, 定义了表层岩体新增围压下形成的连续不均匀分布的“岩壳效应”压应力场的机理标准。对单锚、群锚的力学机理与加固效果进行了系统的数值仿真试验分析研究, 从岩体强度理论、岩体弹塑性理论、岩体断裂理论以及岩体损伤理论等不同角度验证数值仿真分析的结果<sup>[17-18]</sup>。

张发明根据现场试验中不同的岩体质量以及不同预应力值引起的群锚效应是不相同的, 同时, 又结合 B. Benmokrane 等和 R. Brincker 的研究成果将其称为群锚第一效应和群锚第二效应, 分别从岩体表层的压缩效应和锚固端应力集中效应两方个面, 探

讨了预应力群锚对边坡岩体的加固效应<sup>[16]</sup>。

何思明提出了一种计算群锚效应的理论模型,能够考虑岩体的本构关系以及稳定岩体中应力的相互影响,理论上较为完善,结合边坡岩体预应力锚索支护进行分析,具有较高的参考价值<sup>[12]</sup>。

唐树名等为研究预应力锚索群锚锚固实体均质岩体边坡的群锚效应及锚索的布置方案,针对锚固后的边坡均质岩体进行了室内模型试验。根据多种群锚方案试件的试验结果,研究了锚固均质岩体模型的强度变形特征。通过试验中不同间距群锚中的单锚对模型试件强度变形的影响,研究了模型试件中所体现出的群锚效应。最后,得出了可供工程参考的相关结论<sup>[19]</sup>。

#### 1.4 其他研究成果

国内外学者在数值仿真模拟方法进行了很多有益的尝试,推动了边坡岩体锚固性能研究向量化、经济化、高效化方向发展,揭示了锚杆或预应力锚索对改善边坡岩体应力状态,减少岩体塑性区、拉应力区以及控制岩体变形的效果,积累了丰富的经验<sup>[20]</sup>。有限元方法在 20 世纪 70 年代以来开始运用于岩体锚固性能研究中,相对而言,有限单元法是可以用来求解复杂工程问题近似解的数值方法,是数值方法中最早使用的方法之一,也是岩体锚固工程中最普通的方法。雷晓燕在 O. Aydan 等的研究工作基础上,提出了一种考虑锚芯与灌浆间剪切破坏作用的三维锚杆单元。运用该单元对方体拉拔试验进行了数值计算,计算结果与理论解吻合。作为实例,还对路堤边坡加固问题进行了分析,证实了模型的可靠性和实用性<sup>[21]</sup>。张发明对预应力锚固边坡的非线性弹塑性有限元分析作了较为合理的假设,并提出裂隙岩体锚根效应在数值模拟中的应用方法,得到的结论为准确的地质参数是数值模拟成功的关键<sup>[16]</sup>。刘小丽提出利用杆系有限元来考虑地梁与岩体相互作用的方法,对边坡加固中的预应力锚索框架地梁进行计算。基于线弹性 Winkler 地基模型,分别考虑结构的弯曲变形和扭转变形,对框架地梁有限元计算模型进行了分析说明<sup>[22]</sup>。此外,张玉军等<sup>[23]</sup>、张燎军等<sup>[24]</sup>、朱晗迺<sup>[25]</sup>采用有限元进行边坡岩体锚固性能进行了分析计算,得出了一些有意义的结论。

拉格朗日分析方法的基本原理与方法建立在 P. A. Cundall 等人提出的显式有限差分法基础上,是一种适合于求解非线性大变形问题的数值分析方法,本质上仍然属于求解连续介质范畴,在岩体锚固性能研究中有相关应用。丁秀丽等为研

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。预应力锚索在张拉过程中在岩体内形成了表层压缩区,由于多根预应力锚索的作用,每根锚索的压应力集中区互相叠合形成一个连续分布的压缩带,其分布形态与锚索布置方式、间距、锚索根数以及预应力的有关<sup>[26]</sup>。张思峰等采用拉格朗日分析法对预应力单、群锚体系作用下锚固段、自由段以及锚头部位的受力、变形和破坏机理进行了三维数值模拟分析,探讨了影响锚固段剪应力分布的因素。最后,将其应用到工程实践中,证明了其合理性和有效性<sup>[27]</sup>。

离散元法是一种模拟离散介质的数值计算方法,在岩土力学等领域的数值模拟中得到广泛应用,是一种新兴的非连续体分析方法。焦玉勇等<sup>[28]</sup>系统地研究了三维离散单元法的基本原理和数值解算方法,论述了动态松弛三维离散元法的数据结构,提出了地下水、锚杆、边界力等数据的组织方法和三维分析方法,为三维离散元程序的编写提供了依据,给出了相应的算法和公式,并通过边坡和地下洞室锚固的算例进行了验证。

非连续变形分析(DDA)方法是与有限元的连续变形分析方法相平行的一种新的非连续变形分析方法,是近年来发展的能分析裂隙岩体的一种较好的数值计算方法。Larbi Siad 运用两种平动破坏机理,在屈服设计理论动力学方法的基础上,针对采用被动受力的全长粘结式锚杆加固岩体边坡进行稳定性分析。对于给定的加固倾斜面,稳定性表中所必需的加固强度的估算下限值与节理面的摩擦角有关;在某种程度上,所得的结果容许了加固边坡的全部抗滑力和锚杆稳固边坡的积极效应<sup>[29]</sup>。

国际岩石力学与工程领域中,在现场原位进行的岩体锚杆、预应力锚索力学性能试验属于现场试验研究的范畴。余坪等对全长粘结预应力锚索治理滑坡工程中,开展锚索粘结材料的内力影响锚索的可靠性,在治理贵昆线等的滑坡工程中测试了粘结材料的内力变化及粘结材料的锚固性能研究<sup>[5]</sup>。朱焕春等针对三峡永久船闸高边坡中高强结构锚杆在工程运行期将承担水压力、温度应力等周期性荷载的作用,叙述了反复张拉荷载作用下锚杆受力状态、变形特征和锚杆作用机理的现场试验结果,揭示出循环荷载作用下锚杆应力大小和影响范围会向深度传递,但变形相对稳定<sup>[30]</sup>。盛宏光在现场试验的基础上,对压力分散型回收式锚索的传力机制和锚固性能进行了研究,并对其设计方法与施工工

艺进行了探讨, 提出了其设计与施工方面的建议<sup>[31]</sup>。何思明以众多试验资料为研究基础, 提出了一个描述预应力锚索破裂面形状的双参数方程。根据极限平衡原理及岩体 Hoek - Brown 准则, 研究了预应力锚索的极限抗拔承载力, 并提出了一个极值原理。同时, 基于修正剪切滞模型和损伤理论, 研究了预应力锚索荷载 - 变形特性、侧阻力分布模式等重要性质<sup>[12]</sup>。

国内外在边坡岩体锚固性能研究及其工程应用方面的室内模型试验研究工作, 具有比较突出的研究成果, 对于保证边坡岩体锚固的安全性等起到了很好的促进作用。王天金采用三维模型试验分析了边坡的破坏机制、边坡破坏的发生及发展过程, 研究了粘结力的变化对临界滑面的影响<sup>[32]</sup>。朱维申等通过室内相似模型试验, 对三峡船闸高边坡岩体的分离块体经系统锚杆加固后, 其抗压强度、弹性模量及粘聚力和内摩擦系数的值都有所提高、锚固岩体的各向异性进行了初步研究。研究表明: 边坡岩体经系统锚杆加固后, 其力学性质得到改善, 表现在各力学参数值有所提高<sup>[33]</sup>。朱晗逯采用室内物理模型试验对破碎岩质边坡锚固效应进行了探讨, 得出了张拉过程中的相互影响规律, 锚索预应力长期变化规律, 以及坡体内部土压力的响应规律。对锚固体系在受到坡体后缘下滑力作用下体系响应的试验研究表明, 其在边坡下滑力作用下的工作状态具有空间效应, 同时, 坡体内部滑面上正应力的变化规律。对坡体内部出现强渗流的情况下锚固边坡的破坏性试验表明了锚固体系对边坡的增稳效果<sup>[25]</sup>。

20 世纪以来, 断裂力学和损伤力学先后在岩石力学领域中逐渐得到运用和发展<sup>[34]</sup>, 进而引入到边坡岩体锚固性能研究中。杨延毅研究了以加锚裂纹面的变形协调条件推求锚杆的等效桥联应力与止裂韧度增值, 运用损伤加筋体的自一致理论建立加锚卸荷裂隙带的本构关系, 并从加锚裂纹的断裂扩展过程建立演化方程。提出了桥联锚杆的杆体屈服与拉断, 杆体与孔壁围岩胶结面的粘滑与脱胶拔出等失效与破坏的强度准则<sup>[35]</sup>。朱维申等针对节理岩体提出了多种不同的本构模型, 并介绍了运用物理模拟试验和数值方法对节理岩体的破坏机理、损伤演化方程、锚杆和锚索的锚固效应等展开多方面的研究, 最终将研究成果运用于三峡、李家峡等重大边坡工程的稳定性分析<sup>[33]</sup>。王成基于线弹性断裂力学原理, 将层状岩体的层间潜在最弱面等效为等间距共线多节理的

力学模型, 通过分析含有一条节理的有限大小岩体在压剪应力作用下节理线附近应力场在锚固前后的变化, 提出锚固效果计算公式, 较好地解释了边坡锚固的增效问题<sup>[36]</sup>。

## 2 边坡岩体锚固长期性能研究

边坡岩体锚固工程实践表明, 预应力损失是一个不可避免的现象, 同时也是较难定量计算的, 然而, 预应力损失关系到锚固工程的长期性能, 是锚固技术的关键问题之一。边坡岩体预应力锚固设置后, 连续观测超过 24 h 就可称为预应力锚固的长期观测, 其目的是掌握锚杆或锚索的预应力或位移的变化规律, 确认锚杆或锚索的长期工作性能, 从而决定是否要采取相应的补救措施, 以便充分发挥锚固作用和确保工程的安全稳定。例如, 对阿尔及利亚舍尔法大坝加固所用的预应力锚索的预应力进行了时间最长的监测, 由于钢材松弛与混凝土流变, 3 年后预应力损失量为 4%, 而在 18 年后预应力损失量达 5.5%, 说明预应力锚索的长期性能是正常的, 不需要采取其他措施进行处理<sup>[4]</sup>。英国利物浦桑登多克 200 t 岩体预应力锚索长达 10 年的监测资料表明, 在卸除 10% 的超负荷载后, 锚索预应力在 10 年内最大变化范围为 -2% ~ 3% 之间, 表明工程锚索的设计是令人满意的<sup>[3]</sup>。国外的岩土锚固规范也要求有相关的研究工作。由于时间因素而导致预应力损失主要包括钢绞线的松弛、混凝土徐变和岩体蠕变以及其他因素而引起的。相对而言, 钢绞线松弛和混凝土徐变引起的锚索预应力损失量均较少, 而岩体蠕变导致预应力损失却比较明显。

边坡岩体预应力锚固中锚索预应力和边坡岩体蠕变存在耦合作用问题, 这方面的研究成果鲜见报道。张玉军等根据“等效材料”的概念, 运用本构理论和模型试验手段, 对锚固岩体的流变特性作了探讨, 建立了相应的力学模型、解析公式及有限元数值方法, 并为之进行了计算验证和工程应用的讨论<sup>[37]</sup>。尽管研究工作并不是针对边坡预应力锚固而展开的, 但是仍具有较高的参考价值。丁多文等根据岩体的粘弹性, 着重研究岩体随时间的变形产生的预应力损失, 推导了预应力损失的计算表达式, 最后讨论锚固段和自由段的长度对减少预应力损失的作用<sup>[38]</sup>, 但考虑预应力与边坡岩体蠕变耦合作用并不充分。陈安敏等根据模型试验研究结果, 给出了模拟软岩材料的蠕变方程, 提出了锚索张拉吨位

随时间而损失的估算方法<sup>[39]</sup>。余开彪等根据应变与时间的关系,推算出锚索预应力损失的计算公式和最终损失量<sup>[40]</sup>。同样,研究成果没有考虑预应力与边坡岩体蠕变耦合效应。朱晗迺基于广义 Kelvin 模型建立了耦合模型,推导出其锚索预应力长期变化的理论公式并验证了其公式的正确性,最后结合具体工程实例给出其应用<sup>[25]</sup>。

国外在现场监测方面的工作较早,涉及到陡高开挖边坡、船坞抗倾覆、挡土墙、重力坝加固、桥梁锚碇等工程实践中预应力锚索的长期性能、完整性和破坏特性等较多方面的研究,重点分析锚固力、锁定荷载、温度等随时间的变化关系以及钢绞线的均匀受拉作用等,对我国采用现场监测资料分析方法研究边坡岩体锚固性能具有很高的参考价值<sup>[41]</sup>。李端友等<sup>[42]</sup>、张电吉等<sup>[43]</sup>、张发明等<sup>[16]</sup>总结出预应力损失变化规律是预应力均经历快速下降阶段、波动变化阶段和稳定变化阶段 3 个阶段。高大水等总结出预应力损失变化规律是急剧损失期、一般损失期和缓慢损失期 3 个阶段。然而,当边坡岩体预应力锚固所处的地质环境发生变化时,预应力可能出现突变损失阶段<sup>[44]</sup>。洪海春在前人研究成果的基础上,根据现场工程实践经验,将锚索预应力损失分为 4 个阶段:快速下降阶段、波动变化阶段、稳定变化阶段和非常突变损失阶段<sup>[3]</sup>。

目前,国内外对预应力锚固长期性能的定量研究成果并不多见,主要集中于预应力损失的定性研究。洪海春考虑锚索预应力和边坡岩体蠕变的耦合作用,采用新的非线性粘塑性体(NVPB)组成的改进西原模型,推导了耦合作用下锚索预应力长期变化的计算公式。针对预应力锚索的现场监测值和理论计算值进行对比分析,验证了计算公式的正确性与合理性。研究成果可以为边坡岩体预应力锚固长期性能研究提供参考或依据<sup>[3]</sup>。

### 3 边坡岩体锚固耐久性研究

随着边坡岩体锚固工程实践的不断深入,对预应力锚固耐久性、锚索腐蚀影响、锚索材料、锚固寿命、防腐技术、施工工艺以及预应力锚索的锚固效果的研究越来越重视,近年来已逐渐将耐久性问题及防腐研究的重要性提到议事日程。

在岩体锚固耐久性研究方面,主要借助于混凝土以及预应力混凝土的相关理论而展开,研究成果比较丰硕。刘西拉等对混凝土中钢筋腐蚀的电化学过程从理论上进行了定量分析和描述,提

出了钢筋腐蚀的物理模型。建立了一个具体计算模式,对大气中普通钢筋混凝土结构、大气中预应力钢筋混凝土结构、海水中普通钢筋混凝土结构、海水中预应力钢筋混凝土结构 4 种典型情况分别进行分析。同时,定义了结构寿命概念,说明定量计算结构的耐久性是完全有可能的<sup>[45]</sup>。李永和针对地下采矿环境下,钢筋混凝土结构与喷锚结构的碳化腐蚀损伤、裂纹扩展、可靠性评估、剩余寿命预测及其优化维修决策等方面作为一个完整体系,进行了系统而又全面地研究与探讨<sup>[46]</sup>。淡丹辉等根据钢筋混凝土锈胀动力学及金属力学化学原理,分析了在混凝土完好的条件下,钢筋应力对锈蚀反应速度的影响。通过计算,确证了均匀锈蚀条件下应力因素对钢筋锈蚀速度无显著影响<sup>[47]</sup>。金伟良等以及牛荻涛出版专著详细阐述了在混凝土结构耐久性与寿命预测方面的研究成果和最新进展<sup>[48-49]</sup>。曾宪明等提出了锚固类结构的安全性及耐久性问题,概述了业已产生的破坏实例,评述了国内外的相关研究进展。在此基础上,分析了需要着重解决的几个关键问题,并对开展锚固类结构使用寿命与防护对策问题研究的方法进行了探讨<sup>[50]</sup>。夏宁从锈蚀对锚固体承载力的横向影响表现为砂浆保护层的锈胀开裂以及纵向影响表现为锚杆与砂浆粘结性能的下降两方面着手,对锈蚀锚固体的力学性能进行了研究,并在此基础上建立了锈蚀锚固体的耐久性评估方法<sup>[51]</sup>。然而,边坡岩体锚固时刻受到周围介质(水、气、湿度等)的影响,所处的地质条件也比较恶劣,此外,锚杆和预应力锚索的锈蚀机理也不尽相同。考虑边坡岩体预应力锚固的耐久性,只能尽可能的参考和借鉴混凝土材料或锚杆方面的研究成果和研究方法等。

由于在预应力锚索加固岩体的设计和施工过程中,仅仅考虑其安全性和强度要求,国内外在边坡岩体锚固锈蚀与防护性能的理论研究和现场试验研究方面几乎是空白,通常的办法是采用现场实际检测与室内模拟实验相结合的方法。在防护技术方面,1986 年国际预应力协会(FIP)统计资料 and 我国近 30 年预应力锚索应用情况的调查均表明,预应力锚索破坏主要是由于钢绞线腐蚀断裂引起的且破坏多数发生在锚头附近,因此,钢绞线的防腐是其耐久性的关键<sup>[20]</sup>。杜进生等有关无粘结预应力混凝土结构发生锈蚀的谬论和错误观点进行了剖析,并提出正确的观点。通过具体案例的分析说明,发生锈蚀的无粘结预应力混凝土

结构不仅可以维修,而且能够做到节省维修费用<sup>[52]</sup>。熊学玉等针对预应力混凝土结构破坏的预兆不明显,具有突发性及难预见性,更加剧了危险性,叙述了影响预应力结构耐久性的破坏性物理和化学两个方面作用,认为加强预应力混凝土结构耐久性研究极为重要<sup>[53]</sup>。蔡启龙等根据无粘结预应力锚索的腐蚀机理,腐蚀损伤形态和腐蚀特点,论述了对无粘结锚索加强防护的必要性,并从锚索的材料、结构和施工等方面提出一些防护措施,以确保锚索的耐久性<sup>[54]</sup>。

由于边坡岩体预应力锚固技术的历史不长,在我国应用时间则相对更短,预应力锚索在工程应用中的实际寿命,即耐久性如何,难以根据应用实践来证明。洪海春将全长粘结式预应力锚索注浆体受到的环向应力,考虑为预应力引起的注浆体环向拉应力和锚索体对注浆体的锈胀力共同作用,推导出锚索体均匀锈蚀导致注浆体开裂时的极限增长量计算公式。在前人研究成果基础上,得出了边坡岩体预应力锚索开裂时服务年限的估算表达式,进一步开展耐久性分析,同时,提出改善预应力锚固耐久性的工程措施<sup>[3]</sup>。

## 4 结论与展望

边坡岩体锚固性能研究的理论体系相对完整、试验内容比较丰富、数值模拟方法较多、现场实践性较强,但是,边坡岩体锚固性能研究在以下几个方面仍有待于进一步探讨和发展、完善。

(1) 边坡岩体锚固受力特性研究是锚固性能的根本保证,对于新型锚杆或预应力锚索的开发和利用,必须紧密结合工程实际,尽量采用理论分析、现场试验和数值模拟等多种手段,解决边坡岩体锚固工程问题,使岩土锚固技术得到更好的发展。

(2) 采用合适的现场试验和数值分析方法应用于边坡岩体群锚加固机理、锚索的性能及设计技术参数等问题的研究。

(3) 在地质条件等多种复杂情形下,难以捕捉边坡岩体锚固长期性能研究现场监测资料,需要进一步开展相关的试验研究和理论研究。

(4) 对于边坡岩体锚固耐久性的服务年限以及应力和锚固材料锈蚀之间复杂的耦合作用,有待于进一步深入探讨,以引起更多的关注。

(5) 国内外对边坡岩体锚固性能研究,大多数基于静态条件而展开的,对地震和爆破等动力作用下岩体锚固的作用方式和破坏特性等鲜有研究,

在这方面的研究应该加强。

## 参考文献:

- [1] E. Hoek, J. W. Bray. Rock Slope Engineering(2nd ed.) [M]. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1974.
- [2] 黄志全, 廖德华, 姜彤, 等. 边坡系统演化的开放度研究[J]. 工程地质学报, 2002, 10(2): 152-155.
- [3] 洪海春. 边坡岩体锚固性能研究及其工程应用[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [4] T. H. Hanna. 锚固技术在岩土工程中的应用[M]. 胡定, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.
- [5] 余坪, 余渊. 滑坡防治预应力锚索的试验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(1): 59-63, 58.
- [6] 顾金才, 明治清, 沈俊, 等. 预应力锚索内锚固段受力特点现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(S0): 788-792.
- [7] 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.
- [8] 张季如, 唐保付. 锚杆荷载传递机理分析的双曲函数模型[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 188-192.
- [9] 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.
- [10] 尤春安. 锚固系统应力传递机理理论及应用研究[D]. 泰安: 山东科技大学, 2004.
- [11] 朱玉, 卫军, 廖朝华. 确定预应力锚索锚固长度的复合幂函数法[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(8): 60-63.
- [12] 何思明. 预应力锚索作用机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [13] 张端良, 董燕军, 唐乐人, 等. 预应力锚索锚固段周边剪应力分布特性的弹性理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(S1): 4735-4738.
- [14] 中华人民共和国行业标准编写组. 水工预应力锚固设计规范(DL/T5176-2003)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [15] 岩土工程手册编委会. 岩土工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [16] 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.
- [17] 黄福德, 赵彦辉, 李宁. 预应力锚固机理数值仿真分析研究[J]. 西北水电, 1996, (1): 8-17.
- [18] 李宁, 赵彦辉, 韩炬, 等. 群锚对断层的加固机理分析及工程应用[J]. 西安理工大学学报, 1997, 13(3): 210-215.
- [19] 唐树名, 曾祥勇, 邓安福. 预应力锚索群锚锚固边坡均质岩体的室内模型试验研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(3): 20-24.
- [20] 程良奎. 岩土锚固研究与新进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3803-3811.
- [21] 雷晓燕. 岩土工程数值计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- [22] 刘小丽. 新型桩锚结构设计计算理论研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- [23] 张玉军, 朱维申. 三峡工程船闸高边坡锚固方案的平面有限元计算[J]. 岩土力学, 1997, 18(1): 1-6.
- [24] 张燎军, 傅作新, 朱岳明, 等. 三峡永久船闸闸墩-锚杆-岩基的非线性耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 230-238.
- [25] 朱晗逯. 破碎岩质边坡锚固技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

- [26] 丁秀丽, 盛 谦, 韩 军, 等. 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, 2004, 21(7): 980-988.
- [27] 张思峰, 周 健, 宋修广, 等. 预应力锚索锚固效应的三维数值模拟及其工程应用研究[J]. 地质力学学报, 2006, 12(2): 166-173.
- [28] 焦玉勇. 三维离散单元法及其应用[D]. 武汉: 中国科学院岩土力学研究所, 1998.
- [29] Larbi Siad. Stability analysis of jointed rock slopes [J]. Computers and Geotechnics, 2001, (28): 325-347.
- [30] 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.
- [31] 盛宏光. 压力分散型锚索锚固性能与设计方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2003.
- [32] 王天金. 边坡破坏的三维模型试验及加固方案的选择[C]//中国岩土锚固工程协会. 岩土工程中的锚固技术. 北京: 地震出版社, 1992.
- [33] 朱维申, 李术才, 陈卫忠. 节理岩体破坏机理和锚固效应及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [34] D. Krajcinovic. Damage mechanics: accomplishments, trends and needs [J]. International Journal of Solids and Structures, 2000, 37(1/2): 267-277.
- [35] 杨延毅. 岩质边坡卸荷裂隙加固锚杆的增韧止裂机制与效果分析[J]. 水利学报, 1994, (6): 1-10.
- [36] 王 成. 层状岩体边坡锚固的断裂力学原理[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1900-1904.
- [37] 张玉军, 孙 钧. 锚固岩体的流变模型及计算方法[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 33-45.
- [38] 丁多文, 白世伟, 罗国煜. 预应力锚索加固岩体的应力损失分析[J]. 工程地质学报, 1995, 3(1): 65-69.
- [39] 陈安敏, 顾金才, 沈 俊, 等. 软岩加固中锚索张拉吨位随时间变化规律的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 251-256.
- [40] 余开彪, 程凯兵, 杨明亮. 预应力锚索预应力损失研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(S0): 159-162.
- [41] Littlejohn G. S. Ground anchorages and anchored structures [M]. London: Thmos Telford Publishing, 1997.
- [42] 李端友, 汤平, 李亦明. 三峡永久船闸一期工程岩锚预应力监测[J]. 长江科学院院报, 2000, 17(1): 39-42.
- [43] 张电吉, 汤 平, 白世伟. 节理裂隙岩质边坡预应力锚索锚固监测与机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1276-1280.
- [44] 高大水, 曾 勇. 三峡永久船闸高边坡锚索预应力状态监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 653-656.
- [45] 刘西拉, 苗澍柯. 混凝土结构中的钢筋腐蚀及其耐久性计算[J]. 土木工程学报, 1990, 23(4): 69-78.
- [46] 李永和. 地下钢筋混凝土与喷锚结构碳化断裂损伤及其耐久性研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1999.
- [47] 淡丹辉, 何广汉. 钢筋混凝土构件均匀锈蚀与应力的耦合效应分析[J]. 西南交通大学学报, 2001, 36(2): 181-184.
- [48] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [49] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [50] 曾宪明, 陈肇元, 王靖涛, 等. 锚固类结构安全性与耐久性问题探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2235-2242.
- [51] 夏 宁. 锈蚀锚固体的力学性能研究及耐久性评估初探[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [52] 杜进生, 刘西拉. 无粘结后张预应力混凝土结构的锈蚀-谬论、错误观点及事实[J]. 国外桥梁, 1999, (3): 71-74.
- [53] 熊学玉, 黄鼎业. 预应力工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [54] 蔡启龙, 朱忠荣. 无粘结预应力锚索的腐蚀与防护[J]. 人民长江, 2004, 35(10): 49-51.
- [55] 闫莫明, 徐祯祥, 苏自约. 岩土锚固技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [56] Brahim Benmokrane, Gerand Ballivy. Five - year monitoring of load losses on prestressed cement - grouted anchors [J]. Canadian Geo - technique Journal, 1991, 28(5): 668-677.
- [57] 程良奎, 张作珏, 杨志银. 岩土加固实用技术[M]. 北京: 地震出版社, 1994.
- [58] L. Hobst, J. Zajic. Anchoring in Rock and Soil [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.
- [59] 卢敦华, 何忠明, 林 杭. 某公路边坡锚杆支护系统的安全评价[J]. 灾害学, 2007, 22(3): 63-67, 99.
- [60] 卢敦华, 王星华, 何忠明, 等. 提高节理面  $c$  和  $\varphi$  对岩坡开挖变形的影响[J]. 灾害学, 2007, 22(4): 51-56.

## Review and Prospect of Anchorage Properties of Slope Rock-mass

Hong Haichun, Liu Jianda, Huang Weisheng and Gao Zhibing

(Institute of Earthquake Engineering of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Rock-mass anchorage is the very important branch of the geotechnical engineering. Meanwhile, research on anchorage properties of rock-mass is the key to the rock-mass anchorage technique. The current state and advance in the research of anchorage properties of slope rock-mass both in and outside China are presented systematically evolving the research results of the mechanical properties, long-term performance and durability. The content and the existing problems of the research are elaborated and its development trend is prospected for the further study.

**Key words:** slope rock-mass; anchorage property; mechanical properties; long-term performance; durability; review and prospect