

南竹加筋复合锚杆施工工艺优化研究

任非凡^{1,2}, 谌文武^{1,2}, 张景科^{1,2}, 梁收运^{1,2}, 和法国^{1,2}, 王冠³, 崔凯^{1,2}

(1. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000;
3. 兰州大学 西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 首先, 结合复合锚杆的特殊性, 对复合锚杆的锚固机制进行简要分析, 获取其界面剪应力与轴向应力分布理论解; 其次, 在充分认识研究区概况、崖体破坏形式及复合锚杆锚固机制的基础上, 结合交河故城崖体锚固工程, 对其施工工艺进行系统地总结优化, 分别从布孔定位、钻进成孔、上锚杆、安设锚杆、注浆、安设锚具、锚孔封堵、表面作旧、锚杆养护等多方面进行探讨, 研究结果可为干旱半干旱地区土遗址高陡边坡复合锚杆加固技术的推广应用提供科学依据, 并对类似的锚固工程具有理论和实践指导作用。

关键词: 工程地质; 南竹加筋复合锚杆; 锚固机制; 文物保护; 施工工艺

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 2 - 3789 - 06

STUDY ON CONSTRUCTION TECHNIQUES OF A NOVEL BAMBOO-STEEL COMPOSITE ROCK-BOLT

REN Feifan^{1,2}, CHEN Wenwu^{1,2}, ZHANG Jingke^{1,2}, LIANG Shouyun^{1,2},
HE Faguo^{1,2}, WANG Guan³, CUI Kai^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China*; 2. *College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China*; 3. *Key Laboratory of Western China's Environmental, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China*)

Abstract: Firstly, anchorage mechanism of composite rock-bolt was discussed. The special characteristics of the analytical solutions of shear stress and axial stress distribution were developed. Secondly, relying on the anchoring projects of the cliff of Jiaohe Ancient City, the construction techniques have been systematically optimized based on understanding general situation of the study area and anchorage mechanism of the composite rockbolt as well as failure modes of the cliff, including the location of anchor hole, hole-creating, lifting rock-bolts, installing rock-bolts, grouting, installing anchor devices, blocking the anchor holes, imitation of ancient surface, and curing the rock-bolts. The research results provide scientific basis for popularizing this new type rock-bolt for the preservation projects of cultural relics in the arid-semiarid regions, and it has a referential meaning for similar anchoring projects.

Key words: engineering geology; bamboo-steel composite rock-bolts; preservation of cultural relics; anchoring mechanism; construction techniques

收稿日期: 2008 - 11 - 07; **修回日期:** 2009 - 03 - 02

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2006BAK30B02)

作者简介: 任非凡(1980 -), 男, 2006 年毕业于兰州大学岩土工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程与新材料方面的研究工作。E-mail: renff03@hotmail.com

1 引言

岩土体锚固是挖掘岩土潜能、提高岩土工程稳定性最经济、有效的方法之一，是岩土加固工程的一个重要组成部分^[1~8]。近些年来，保存在我国西北丝绸之路上的土遗址，遭受了多年严重的风蚀、雨蚀、地震以及人类活动等破坏，大批的土遗址濒临破坏，鉴于此，国家加大了文物保护力度。针对具有特殊性的文物土体，如何经济、安全的抢险加固为数不多的土建筑遗址，特别是由于构造裂隙、卸荷裂隙的相互组合造成大量的文物本(载)体不断的倾倒、崩塌、滑塌，导致土遗址大范围的破坏甚至消失，已经成为广大专家、学者最为关注的问题之一^[9~12]。锚固作为提高岩土体稳定性一种行之有效的措施正被广大的文物加固单位所采用。

土遗址按照建筑材料可分为夯土、生土、土坯、垛泥等，虽然在夯土上对木质锚杆的研究取得了有益的经验，但是对于生土遗址，特别是大厚度的文物土体，锚固研究的工作不多，传统的木质锚杆(长度≤1.5 m)已经不能满足加固长度的需要，如交河故城崖体发育的离临空面较远的深大裂隙锚固，国内研究仍是空白，亦没有适合的锚杆能够满足文物加固的需要^[9~11]。因此，结合交河故城锚固工程的特殊性，针对传统锚杆所使用的钢材的缺陷性，材料的耐久性较差，不适合土遗址的加固，锚杆强度要求比土的强度略大，不能超过太多，否则容易产生新的破坏，土遗址加固中要求锚杆的变形要较小等要求，以敦煌研究院李最雄研究员为首的科研队伍研发了南竹加筋复合锚杆，此锚杆内部为φ15.2 mm钢绞线，向外依次为复合材料、南竹、玻璃丝布(见图 1)，满足了文物加固的要求。复合锚杆加固技术尚属首创，其钻孔合理布设、钻孔、注浆工艺和流程等问题尚未得到科学合理的阐释。对上述问题进行较系统科学的研究，探索了比较完善的施工技术体系和质量评价体系，直接服务于工程建设，确保工程顺利实施。同时，为干旱半干旱地区土遗址高陡边坡复合锚杆加固技术的推广应用提供了科学依据。

2 南竹加筋复合锚杆的锚固机制

鉴于复合锚杆自身复杂的多界面性，即钢绞线与复合材料、复合材料与南竹、南竹与水泥砂浆、

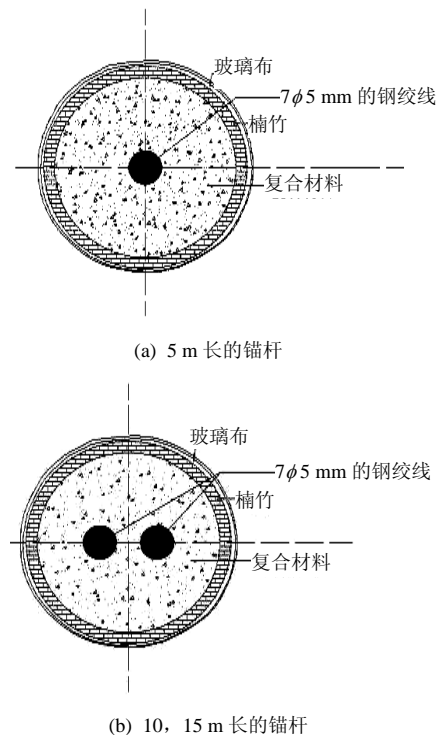


图 1 南竹加筋复合锚杆横截面构造示意图

Fig.1 The cross-section sketch of bamboo-steel composite rock-bolts

水泥砂浆与锚固层等界面，因此，了解其荷载传递机制有利于施工工艺的优化，可起到事半功倍的效果。目前，对锚杆的锚固机制和锚固效果的研究大部分是通过现场试验数据得到的，复合锚杆锚固作用受控于钢绞线、复合材料、南竹、水泥砂浆以及岩体五者之间的力学传递作用，在锚固系统中，力的传递由钢绞线传递到复合材料，继而经复合材料、南竹、水泥砂浆最后传递到稳定土体中^[6, 8, 13]。经过对复合锚杆进行拉拔试验，试验结果表明，在锚杆拉拔过程中，锚杆最易于钢绞线与复合材料的界面发生破坏，因此，这一界面受力机制决定着复合锚杆的承载能力，并且其抵抗破坏的能力主要通过克服界面物理黏结→机械咬合→摩擦作用 3 个方面来提供，杆体与复合材料应力平衡示意图如图 2 所示，荷载沿复合锚杆通过各界面自内而外传递至稳定土体中。

通过引入一剪切滑移模型，结合变形协调与应力平衡条件，其界面剪应力分布弹性解可用一双曲函数表示，即

$$\tau = \frac{P\lambda \cosh(\lambda x)}{2\pi r_b \sinh(\lambda L)} \quad (1)$$

式中： P 为拉拔荷载， L 为锚杆的长度， r_b 为杆体。杆体轴向应力分布可用下式表示：

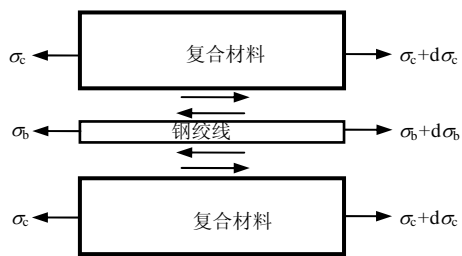


图 2 杆体与复合材料应力平衡示意图

Fig.2 Stress equilibrium between bolt and composite material

$$\sigma_s = \frac{P \sinh(\lambda x)}{\pi r_b^2 \sinh(\lambda L)} \quad (2)$$

其中,

$$\lambda^2 = \frac{2\tau_f}{\delta_1} \left[\frac{1}{E_b r_b} + \frac{r_b}{E_c (r_c^2 - r_b^2)} \right] \quad (3)$$

式中: τ_f 为界面峰值剪应力; δ_1 为峰值剪应力相对应的滑移量; E_b , E_c 分别指杆体与复合材料的弹性模量; r_c 为复合材料的半径。

3 施工工艺优化研究

交河故城位于吐鲁番盆地西部, 整体坐落于两河之间的柳叶形台地上, 台地高约 30 m, 呈 NW~SE 向展布, 具有干热、少雨、多大风的气候特征, 新构造运动强烈, 地层平缓, 为湖状沉积, 地层岩性自上而下主要分布有: 粉质黏土、粉土、粉质黏土与粉土互层、粉砂、含砾粗砂、卵砾石等。正是由于交河故城所处的地质环境, 在河流冲刷、风蚀、地震以及人为破坏等多种因素的作用下, 造成了故城崖体周围的土体不断崩塌、滑塌、倾倒, 导致故城面积不断的减小。因此, 锚固加固工程势在必行。

南竹加筋复合锚杆由于其自身的特性, 已应用于交河故城锚固工程中, 但由于在很多方面不同于普通的锚杆、锚索, 正确的认识复合锚杆的施工技术, 对施工的高效性、安全性、经济性会起到很大的作用。因此, 本文在充分认识研究区概况、崖体破坏形式及复合锚杆锚固机制的基础上, 结合交河故城崖体的锚固工程, 基于南竹加筋复合锚杆自身特性与土遗址加固的特殊性来研究该新型锚杆的施工工艺, 研究主要从布孔定位→钻进成孔→上锚杆→安设锚杆→注浆→安设锚具→锚孔封堵→表面作旧→锚杆养护等方面来进行^[13]。

3.1 布孔定位

在进行钻进成孔前, 须完成布孔定位的工作,

定位的准确与否直接影响锚固工程的质量。因此结合工程实际需要, 采用近景摄影图片进行数字化定位。考虑到锚杆的特性、防止群锚效应以达到最佳的锚固效果, 需进行梅花桩式布孔(见图 3), 锚孔横向间距 2 m, 竖向间距 2.5 m, 如遇裂隙, 应尽量避免将锚孔设置在裂隙上, 可根据情况作适当调整。对于被裂隙切割成孤岛状的危险土体, 布孔时应尽量将锚孔布置在土体的较厚的部位, 使其对危险土体起到良好的控制作用。另外布孔时应避免将锚孔放置在软弱夹层上, 如交河故城中常见的黑色细砂层等, 否则锚杆的锚固作用将被大大削弱。



图 3 梅花桩布孔

Fig.3 Quincuncial-pile location of anchor eyes

3.2 钻进成孔

结合崖体的地形地貌与孔位的地层岩性, 钻进工艺采用螺旋回转钻进方法, 配用三翼钻头、冲击钻头, 所有锚孔均采用自重轻、体积小, 便于高空作业的 HQD110 型电动潜孔钻机成孔, 并结合 Ingersoll-Rand750 型空压机边成孔边出渣。钻头直径 68~130 mm, 经加工改造可达到 180 mm, 单次推进长度 1 000 mm, 成孔时孔深应比锚杆设计长度大 500 mm。钻进前将钻机移置孔位前方后, 将钻架底座固定在脚手架上, 并调整钻架角度略小于设计角度 15°。这是由于钻杆在钻进过程中, 随着钻杆的不断增长, 其整体刚度将随之降低, 土层孔壁相对软弱, 钻杆在类似悬臂的状态下进行钻进, 极易出现钻头下垂, 逐步偏离原来的直线, 造成一定的偏差, 并使钻杆尾部向上翘起, 与设计角度 15°有一定的偏差, 形成弧形断面^[13~15]。开孔应采用重压慢转, 待钻具稳定后再正常钻进。本工程钻进采用无水干钻, 以确保不影响孔壁的黏结性能。钻孔孔壁的沉渣, 使用高压空气(风压 0.2~0.4 MPa)将孔内岩土粉末吹净, 以免降低水泥砂浆与孔壁岩土体的黏结强度。对于具有宽大裂隙的危险土体, 开孔时一般采用干磨方式钻进, 直到跨过裂隙进入稳定土体后可以酌情进行冲击。对于微小裂隙, 在监测危险土体稳定的情况下, 可采取冲击的方式进行钻进

以增快施工进度。对于在砂层上成孔时,由于砂土较松散,黏结性差,为了防止塌孔、孔径过大,应少用冲击钻进,多用干磨的方式成孔,且给风量要适当减少。钻进速度的大小与给风量的大小有关,风量越大,压力越大,进尺越快,反之进尺缓慢。另外,成孔效率与被锚固土体危险程度、孔位所处地层岩性以及钻工技术熟练程度等息息相关。钻孔施工过程中如发现排渣异常,出现地下水、暗沟、文物、墓穴等异常情况时,应停止钻孔施工,查明情况后处理。

3.3 上锚杆

成孔完毕后,应尽快安设锚杆,由于此新型锚杆以及崖体的特殊性(高度约 30 m,坡度近 90°,有的地方甚至反倾),下排的锚杆可通过人梯借助脚手架可完成上锚杆操作,但为上层锚孔安设锚杆时就遇到了很多问题,特别是长 15 m 的锚杆,稍有不慎,锚杆将有折断的危险,造成不必要的经济损失,因此很有必要对上锚杆的工艺进行研究。通过对现有的 2 种工艺进行调查:

(1) 第一种锚杆上吊方式是用两个同高度的定滑轮,一个滑轮的绳子拴住锚杆的头部,另一个拴住锚杆靠头部的位置,然后每隔 2 m 用铁丝将绳子箍在锚杆上,并在接近锚杆尾部的地方加上了 6 m 长的钢管来减少锚杆弯曲(锚杆尾部经常发生折断),随着锚杆的上升,依次剪断铁丝,并逐渐将锚杆尾部插入事先打好的钻孔,最终将锚杆安装完毕。

(2) 第二种锚杆上吊方式也是用 2 个定滑轮,但是两个定滑轮的高度不同,一高一低(见图 4),2 个定滑轮用套环分别挂住锚杆头部的 2 根钢绞线,然后分别用铁丝将 2 根绳子箍在锚杆上,随着锚杆的上升,依次剪断位置较低的定滑轮的绳子,以降低锚杆尾部高度,并逐渐将锚杆尾部插入事先打好的钻孔,最终将锚杆安装完毕。

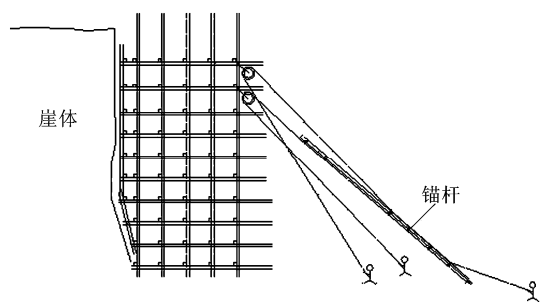


图 4 锚杆吊装示意图

Fig.4 The sketch of hoisting rock-bolts

通过调查分析,发现两种上锚杆的方法各有利弊,第一种方法在锚杆尾部加衬钢管可以大大降低锚杆折断的机率,但是由于锚杆自身较重,加之钢管的重量,无疑增大了人力的消耗,因此考虑应用轻型、刚度大的材料代替钢管,如用铝合金外加碳钢等材料来代替。第二种方法使用两个不同高度的定滑轮大大减少了消耗功,并且给上锚杆预留了更大的活动空间,但是需升高脚手架搭设的高度。因此两种方法需结合起来,使用轻型材料加衬锚杆,安设不同高度的定滑轮来减少能量消耗,并为锚杆的入孔预留更多的空间。入孔安放锚杆前,为保证锚杆位置居中及锚固质量,应在锚杆每隔 1.5~2.0 m 安置居中支架,入孔时应防止锚杆挤压、弯曲或扭转,锚杆入孔倾角和方位应与锚孔的倾角和方位一致,要平顺推送,严禁抖动、扭转和串动,安装完成后,不得随意对其敲击,悬挂重物。工程实践证明,应用改进后的上锚杆方法大大降低了锚杆的折断率,节约了人力,满足了工程的需要。

3.4 锚孔注浆

注浆设备采用通达牌 JZB-2 型挤压式注浆泵进行注浆,其最大工作压力可达 3 MPa,水平输送距离为 100 m,垂直输送高度 50 m,出浆量 1.4~2.0 m³/h。浆液为 1:1:0.43 水泥砂浆,随搅随用,浆液应在初凝前用完,进入注浆泵的水泥砂浆需经过滤,以防止未搅拌开的水泥块进入泵体,堵塞阀座或灌浆管路。注浆管采用 $\phi 25$ mm 硬塑料管,具有一定的强度(管壁压力 ≥ 2 MPa),以保证注浆施工过程中注浆顺利,不堵塞、爆管或破损拉断。事先将注浆管与锚杆一同下入锚孔中,注浆管距孔底 0.5 m,然后将注浆管连接到挤压式注浆泵上开始注浆,为避免浆液将注浆管固结住,随着砂浆的注入缓慢匀速的拔出,直到锚孔浆液溢出,这时用塞子将锚孔塞住,等待浆液固结。注浆结束后,及时拆开并清洗注浆泵的吸、排水室及注浆管路,防止残存水泥浆凝固。一般情况下,锚孔注浆时间视注浆泵的档位、传送相对高差、距离的远近、注浆技术的熟练程度略有不同,裂隙的发育程度也是注浆难易的一个重要因素,随着土层变形的增加,土层内的裂隙和渗透性均增大,适当的滞后时间或者转换注浆档位有利于浆液的渗透^[16]。如果跨越宽裂隙时,需在跨越裂隙部位放上 $\phi 150$ mm 的 PVC 套管,达到防治漏浆的目的。对于宽大裂隙,为了保证锚固质量,如 41-5 区狮身人面像的宽大裂隙,可容一人进入,这时可将跨越裂隙的锚孔两端分别用水泥砂浆封堵,

然后分别进行注浆(见图 5, 6), 以防止浆液流入裂隙中。否则, 一方面造成不必要的浪费, 另一方面给其他锚孔的成孔带来不便。



图 5 裂隙两侧锚孔封堵

Fig.5 Blocking both sides of the fissure



图 6 裂隙两端分别注浆

Fig.6 Grouting from two ends of the fissure respectively

3.5 安设锚具

为了保证锚杆对危险土体的锚固作用, 锚具的安设非常的重要。首先在锚孔周围凿一个尺寸 300 mm 的四方槽, 以便安装锚板, 然后用较稠的水泥砂浆对注完浆的锚孔进行补浆, 并在凿好的四方槽底部抹上水泥砂浆。接着将锚板穿过钢绞线与锚杆垂直安置, 并轻击直到锚板周围有浆液溢出, 以示锚板与浆液紧密接触; 最后安装锚具。

3.6 锚孔封堵与表面作旧

遵循文物“修旧如旧, 不改变原貌”的原则, 需对锚孔进行封堵与表面作旧。

(1) 先用浓度较高的水泥砂浆将锚孔封堵严实, 并保证锚板、锚具、钢绞线完全严实密封, 以增加其锚固强度与防腐性能。

(2) 用加入麻刀的泥浆抹一层(麻刀 10%, 用 3%PS 溶液配置泥浆), 然后将土块嵌入泥浆中(见图 7), 用麻刀泥浆将其表面抹平, 此过程可重复几次, 最后使锚孔表面与崖面齐平(见图 8)。嵌入土块的目的方面在于防止表面泥浆收缩干裂, 另外还可以增加封堵强度, 可以起到填补充填的作用。

3.7 锚杆养护

养护是锚固工程中的一个重要环节, 一方面, 随着时间的推移水泥砂浆逐渐硬化, 力学强度提高, 锚固力也相应的增大。另一方面, 复合锚杆内部的复合材料也随时间力学强度不断提高, 对钢绞线的



图 7 嵌入土块

Fig.7 Embedding clods



图 8 作旧完毕的锚孔

Fig.8 An anchor hole after imitation

握裹力不断增大。锚杆锚固完成后需养护 28 d, 才能充分发挥其锚固作用。

4 结果与讨论

通过对现有复合锚杆施工工艺进行现场调查、统计、对比, 结合复合锚杆自身特性、锚固机制及土遗址加固的特殊性, 主要从布孔定位、成孔、上锚杆、安设锚杆、注浆、安设锚具、锚孔封堵、表面作旧、锚杆养护等多方面进行研究。主要结论如下:

(1) 考虑到锚杆的特性、防止群锚效应, 进行梅花桩布孔, 布孔时应避开裂隙及软弱夹层, 对于被裂隙切割成孤岛状的危险土体, 布孔时应尽量将锚孔放置在土体厚度较大的部位。

(2) 对于存有宽大裂隙危险土体的成孔, 采用干磨方式钻进, 直到跨过裂隙进入稳定土体后可以酌情进行冲击。在砂层上成孔时, 为防止塌孔、孔径过大, 多用干磨的方式成孔, 给风量要适当减少。

(3) 通过对比现有 2 种上锚杆的工艺, 取长补短, 对优化上锚杆方法提出建议。

(4) 由于浆液向孔壁渗透、锚孔中大裂隙的穿过, 造成实际注浆量明显高于理论注浆量, 采取相应的措施, 保证了锚孔注浆的质量、经济。

(5) 灌浆完毕 24 h 后, 应对锚杆进行锚板、锚具的安装, 遵循文物保护“修旧如旧, 不改变原貌”的原则, 对锚孔进行封堵、表面作旧。

(6) 锚杆养护时保证锚固质量的一个重要环

节,封孔作旧完毕后应对锚杆进行 28 d 的养护,以发挥复合锚杆的锚固作用。

在对交河故城崖体保护加固的工程中,对复杂地质条件采取以上施工方法,大大提高了施工工效,节约了施工成本,缩短了工期。从最后的锚杆张拉结果看,全部达到了设计要求,受到业主、研究院与监理等多方好评。南竹加筋复合锚杆作为高边坡文物土体治理的一种有效方法,对文物载体的稳定起到重要的作用。本文所列举的各种施工工艺方法,是在充分理解锚固理论的基础上,结合工程实践总结出来的,可以在类似地层中使用,但由于不同地区地质条件不尽相同,故在施工时采用的施工工艺也会有所不同,应合理地加以参考与借鉴。

致谢 本次研究工作得到敦煌研究院李最雄研究员、王旭东研究员等人的鼎力支持与帮助,在此表示由衷的感谢!

参考文献(References):

- [1] FREEMAN T J. The behavior of fully-bonded rock bolts in the Kielder experimental tunnel[J]. *Tunnels and Tunneling*, 1978, 10(5): 37 - 40.
- [2] FARMER I W. Stress distribution along a resin grouted rock anchor[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1975, 12(2): 347 - 351.
- [3] HIBINO S, MOTIJAMA M. Effects of rock bolting in jointy rock[C]// *International Symposium on Weak Rock*. Tokyo: [s.n.], 1981: 1 057 - 1 062.
- [4] PELLIS P. The behaviour of fully bonded rockbolt[C]// *Proceedings of the 3rd ISRM Congress*. Denver, USA: [s.n.], 1974: 1 212 - 1 217.
- [5] STILLBORG B. Experimental investigation of steel cables for rock reinforcement in hard rock[Ph. D. Thesis][D]. Sweden: Lulea University, 1984.
- [6] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. *土木工程学报*, 2001, 34(3): 7 - 12.(CHENG Liangkui. Present status and development of ground anchorages[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(3): 7 - 12. (in Chinese))
- [7] 汉纳 T H. 锚固技术在岩土工程中的应用[M]. 胡定, 邱作中, 刘浩吾译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.(HANNA T H. *Anchoring techniques applying in geotechnical engineering*[M]. Translated by HU Ding, QIU Zuozhong, LIU Haowu, et al. Beijing: China Architecture and Building Press, 1986.(in Chinese))
- [8] 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): 2 214 - 2 221.(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(Supp.1): 2 214 - 2 221.(in Chinese))
- [9] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[M]. 北京: 科学出版社, 2003.(LI Zuixiong. *Conservation of ancient sites on the silk road*[M]. Beijing: Science Press, 2003.(in Chinese))
- [10] 孙满利, 王旭东, 李最雄, 等. 交河故城瞭望台保护加固技术[J]. *岩土力学*, 2007, 28(7): 163 - 168.(SUN Manli, WANG Xudong, LI Zuixiong, et al. *Technology of protection and reinforcement for observation platform in Ruins of Jiaohe*[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 163 - 168.(in Chinese))
- [11] 孙满利, 王旭东, 李最雄, 等. 木质锚杆加固生土遗址研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(12): 2 156 - 2 159.(SUN Manli, WANG Xudong, LI Zuixiong, et al. *Study on immature earthen sites reinforced with wood anchor*[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(12): 2 156 - 2 159.(in Chinese))
- [12] 李最雄, 王旭东. 古代土建筑遗址保护加固研究的新进展[J]. *敦煌研究*, 1997, (4): 167 - 172.(LI Zuixiong, WANG Xudong. *The new progress of protection and reinforcement for the ancient earthen architecture site*[J]. *Dunhuang Research*, 1997, (4): 167 - 172.(in Chinese))
- [13] 杨为民, 李燕粉, 张伟. 全长黏结式砂浆锚杆的力学特性数值分析[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(3): 67 - 70.(YANG Weimin, LI Yanfen, ZHANG Wei. *Numerical analysis on mechanical characteristics of fully grouted bolt*[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science)*, 2008, 29(3): 67 - 70.(in Chinese))
- [14] 中国工程建设标准化协会. CECS22: 90 土层锚杆设计与施工规范[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 1991.(China Association for Engineering Construction Standardization. *CECS22: 90 Code for design and construction of soil anchors*[S]. Beijing: China Association for Engineering Construction Standardization, 1991.(in Chinese))
- [15] 姜勇, 孙富通. 土层锚杆技术在特殊工作环境下的施工工艺研究与探讨[J]. *水利水电工程设计*, 2006, 25(3): 26 - 28.(JIANG Yong, SUN Futong. *Study and discuss on the construction techniques of soil anchors in the special working atmosphere*[J]. *Design of Water Resources and Hydroelectric Engineering*, 2006, 25(3): 26 - 28.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. CECS22 岩土锚杆(索)技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. *CECS22 Technical specification for ground anchors*[S]. Beijing: China Planning Press, 2005.(in Chinese))