

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.S2.030

加锚节理面的抗剪试验研究

汪小刚¹, 周纪军², 贾志欣¹, 赵宇飞¹, 刘立鹏¹

(1. 中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 北京 100048; 2. 中车建设工程有限公司 土建工程部, 北京 100078)

摘要: 通过一系列剪切模型试验, 研究在不同法向力、预应力和锚固情况下锚索对平滑节理面抗剪性能的影响, 利用对比试验将销钉力、预应力和轴力增量 3 种力的抗剪作用分离出来, 着重探讨了在剪切过程中 3 种力对节理面的抗剪贡献, 并分析了锚索模拟体的破坏形式。试验结果表明, 预应力锚固明显提高了节理面剪切力-位移曲线初始段的抗剪力和剪切刚度, 并使得曲线末段表现出塑性强化的特征; 预应力大小对加锚节理面抗剪强度的影响与试验条件、节理面状况和锚固角等有关。试验和理论分析表明, 剪切位移开始阶段预应力和销钉作用发挥了主要作用, 杆体形成塑性铰后轴力增量则起了重要的作用, 锚索的破坏一般发生在节理面附近, 属于拉剪复合破坏模式。

关键词: 节理面; 锚索; 剪切试验; 预应力; 销钉作用; 轴力增量

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2016)增2-0250-07

Shear tests on bolted joint planes

WANG Xiao-gang¹, ZHOU Ji-jun², JIA Zhi-xin¹, ZHAO Yu-fei¹, LIU Li-peng¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. Civil Engineering Department, CCRC Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 100078, China)

Abstract: By a series of shearing model test, the effect of anchor cable on shear resistance behavior of smooth joints are studied under different normal stresses, prestresses and anchorage conditions. In the model test, shear resistance of dowel force, prestressing force and increment of axial force is separated and the shear contribution of three forces is discussed deeply to joint planes. Contribution to shear strength of joints is discussed due to dowel effect, prestress and increment of axial force in the shear progress, and failure mode of cable simulant is analyzed. Experiment results show that prestressed anchorage improve shear resistance and shear stiffness in initial phase of shear, and prompt joints to show characteristic of plastic-hardening. Experiment results also reveal that effect of prestress on joint shear strength is related with test condition, condition of joint planes and anchorage angle. Experimental and theoretical analyses show that prestress force and dowel effect play a major role in the initial phase of shear displacement and the increment of axial force play an important role after formation of plastic hinge. Cable failure usually occurred in the vicinity of the shear joint due to the combination of shear load and axial load.

Keywords: joint planes; anchor cable; shear test; prestress; dowel effect; increment of axial force

1 引言

岩土锚固技术是近代岩土工程领域的一个重要分支, 特别是预应力锚固技术, 充分发挥岩土自身的能量, 积极调动岩土体自身强度和自稳能力, 广泛地应用于地下工程、边坡过程、深基坑工程等领域。虽然锚固理论取得了较大进展, 但与日益广泛、规模巨大的实践相比, 理论研究还存在明显滞

后现象, 尤其是在新型锚固结构出现后。边坡岩体的滑移破坏是比较常见的形式, 非常必要从加锚节理面在剪切荷载作用下的破坏出发, 研究加锚节理面的抗剪特性。

Pellet 等^[1]理论分析了加锚节理面剪切性能, 并建立了分析模型。杨为民^[2]、杨松林等^[3]从理论上探讨了加锚节理面剪切变形。葛修润等^[4]结合试验系统分析其抗剪特性, 给出了分析模型和理论分析

收稿日期: 2016-01-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目 (No. 2011CB013502); 国家自然科学基金 (No. 51409283)。

This work was supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (2011CB013502) and the National Natural Science Foundation of China (51409283).

第一作者简介: 汪小刚, 男, 1965 年生, 博士, 教授级高工, 主要从事岩土工程及水利工程稳定性方面的教学与研究工作。E-mail: wangxg@iwhr.com

通讯作者: 周纪军, 男, 1980 年生, 博士, 工程师, 主要从事岩土工程与动载方面的设计与研究工作。E-mail: zhoujijun99@126.com

方法。顾金才^[5]试验研究了预应力、锚固角等对齿状节理面的初始剪切刚度、峰值和残余强度的影响。Ludvig 等^[6]通过试验研究锚杆类型、锚固角等对节理面抗剪的影响。Grasselli^[7]数值分析了全锚和膨胀两种锚杆在节理岩体中的破坏。Jalalifar 等^[8]试验和数值分析表明锚杆作用大小取决于锚杆抗拉强度和岩体强度。宋宏伟等^[9]、贾颖绚等^[10]通过物理试验和数值分析认为剪切过程中锚杆的导轨作用对节理面起到负面效应。张伟^[11]开展剪切试验研究了锚杆的变形受力特征。Ferrero^[12]的直剪试验表明锚杆预应力有效地减小节理峰值强度对应的位移。刘爱卿等^[13]的双剪试验表明预紧力大幅提高锚固节理岩体的抗剪刚度。

对于加锚节理面的研究集中在峰值强度、残余强度、锚杆受力等方面的试验，或理论分析和建立抗剪强度公式和分析模型。工程实践发现，因某些原因锚固边坡会产生一定小距离滑动，之后边坡滑动基本停止并可长时间保持稳定。除了预应力作用，锚固系统在边坡滑动中还发挥了哪些储备作用，各作用是怎么产生的？针对这些问题，本文在理论分析基础上通过对比试验，将各种作用分离出来，分析了其相应的作用机制和抗剪贡献。

2 试验模型

加锚节理面的剪切对比试验采用特别设计改造的直剪仪器，可进行 300 mm×300 mm×300 mm 大尺寸节理岩体试验。实际工程中高边坡加固采用的锚索加固排距一般是 5 m 左右，结合试验设备状况，综合确定模型试验的几何相似比为 1/15。

岩体模拟材料选用常用的水泥砂浆体，参考有关试验^[14]试配，单轴抗压强度约为 8 MPa，密度相似比为 1/1.3。节理岩体模型由上下两块齿合而成，节理面为平滑型，模型参见图 1。



图 1 节理岩体模型

Fig.1 Model of jointed rock

综合考虑锚索模拟体的抗拉强度、弹性模量以及锚索和岩体弹性模量的匹配，选择市场易于获得

的铝棒，直径为 8 mm，抗拉强度为 475 MPa，屈服应力为 320 MPa，弹性模量为 65 GPa。试验时，棒体下半段做螺纹处理用于锚固，上半段涂抹润滑油及塑料薄膜包裹，然后用水泥砂浆灌封锚索孔。

结合相关的研究^[4, 15]，通过加锚结构面剪切过程中的理论分析可知，影响加锚节理面抗剪特性的因素有 4 个，即节理面本身的阻力、预应力阻滑作用、过程中产生的轴力增量阻滑作用和锚索销钉剪力的销钉作用，其中预应力和轴力增量总称为轴力。

为了研究 4 个影响因素，专门设计了剪切对比试验，考虑影响因素的可分离性和试验的可操作性，共设计了 4 种锚固情况的剪切对比试验。4 种锚固情况分别为无锚索、锚固+尾部自由、锚固+尾部锁定（实际施加很小的预应力）、锚固+预应力。4 种锚固情况的简图如图 2 所示。

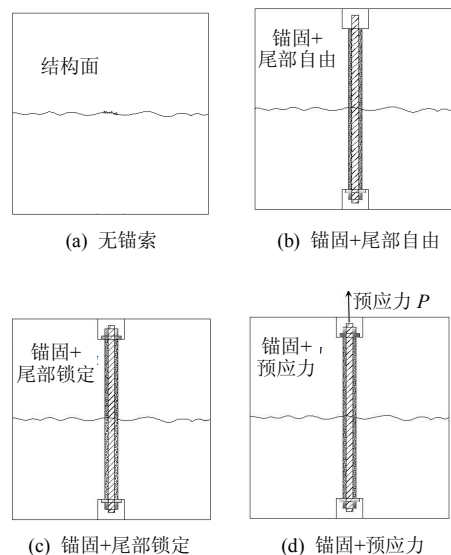


图 2 4 种锚固情况简图

Fig.2 Diagram of four anchorage conditions

无锚索和锚固+尾部自由主要对比考察锚索销钉作用，锚固+尾部锁定和锚固+预应力主要对比考察预应力的影响。试验时除了获得基本剪切力-位移曲线等基本信息，还特别设计安装了位移传感器和穿心传感器，以获得预应力值、过程中法向位移和锚索尾部的轴力增量等价值信息。

3 加锚节理面的抗剪特性

剪切对比试验共做了 0.20、0.35、0.50、0.70、1.00 MPa 共 5 组法向力，每组基本包括以上 4 种锚固情况。

3.1 剪切力-位移曲线特征

对于平滑节理面，随着剪切位移的增加，剪切

力逐渐升高, 曲线在经过转折点后趋于恒定值, 无峰值, 平滑节理面的剪切力-位移典型曲线如图 3 所示。试验位移-剪切力曲线中剪切力都是从一个较小的力而非 0 开始, 是为了更好控制试验效果采用前面力控制-后面位移控制的加载方式, 曲线只采取了位移控制方式的曲线。

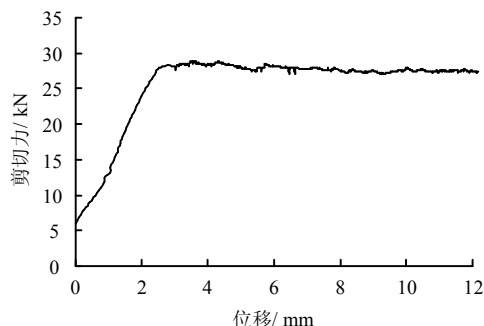


图 3 平滑节理面的剪切特征曲线

Fig.3 Shear characteristic curve of smooth joint surface

在不同正应力条件下节理面抗剪强度虽然不同, 但各个曲线的形状相似, 开始阶段曲线为斜直线, 有时其初始部分呈下凹型, 随着剪切位移达到一定值后曲线转换为平直线。平滑节理面剪切力-位移曲线可简化渐增曲线段+平直段 2 段。

通过不同正应力水平下压剪试验数据线性拟合, 得到平滑节理面的抗剪强度参数, 拟合曲线如图 4 所示。

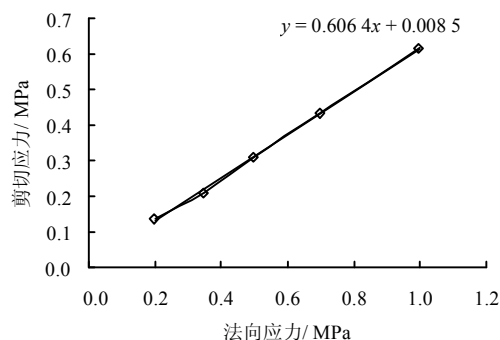


图 4 平滑节理面的抗剪强度拟合曲线

Fig.4 Fitting curve of shear strength for smooth joint surface

试验设计平滑节理面的内摩擦系数为 0.606, 相应内摩擦角为 31.23° , 黏聚力为 8.5 kPa。

节理面通过锚索加固后, 其剪切力学性能与无锚情况相比具有明显的变化, 图 5 为法向力 0.7 MPa 时预应力加锚和无锚情况下的曲线对比。随着剪切位移的增加, 预应力加锚节理面曲线一直渐增, 无峰值点, 除非锚索破断。从图中可以看出, 预应力加锚后提高了节理面的抗剪力和初始阶段的剪切刚

度, 杆体在转折点处形成“塑性铰”^[8], 其后曲线末段的变化规律发生了改变, 由原来的平直段变为渐增直线段, 表现出“塑性强化”特征, 只是斜率相对初始部分较小。

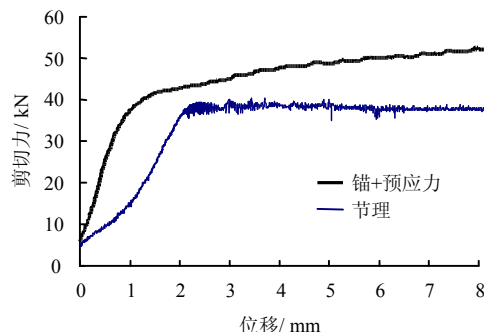
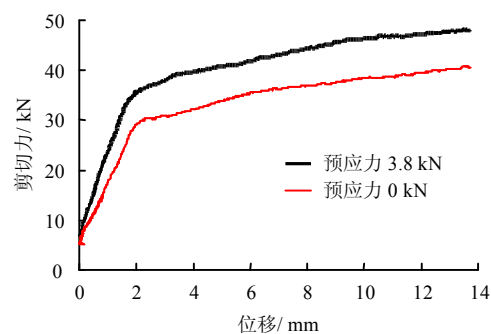


图 5 加锚、与无锚情况下的特征曲线(法向应力 0.7 MPa)

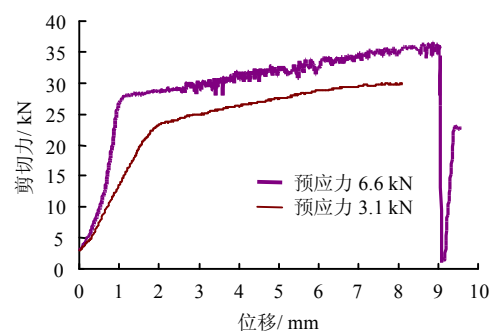
Fig.5 Characteristic curves of joint surfaces with and without bolt under 0.7 MPa normal loading

3.2 预应力作用

对于工程中的节理面预应力具有重要的加固作用, 在工程实践和试验中得到证实。图 6 为不同法向力时在不同预应力条件下加锚节理面的剪切力-位移曲线。预应力的施加明显地提高了节理面曲线初始阶段的抗剪刚度, 预应力越高, 抗剪刚度的提高越明显, 预应力对节理面曲线末段的抗剪刚度影响不大。



(a) 法向力 0.5 MPa



(b) 法向力 0.35 MPa

图 6 不同预应力下节理面剪切力-位移曲线

Fig.6 Shear force-displacement curves of joint surfaces under different prestress

对于锚杆或锚索预应力是否提高节理面抗剪强度方面一直存在异议, 有的试验分析认为锚索预应力对抗剪强度没有影响或者影响很小^[16], 另一些则证明预应力可以提高节理面的抗剪强度^[5, 17], 这些结论的不同源于研究角度和条件的不同。

Dight 等^[18]基于力的平衡和屈服准则, 分析推导了形成塑性铰时锚杆销钉剪力计算式较为合理, 公式为

$$Q_p = \frac{D_b^2}{4} \sqrt{1.7\pi\sigma_y P_u \left[1 - \left(\frac{T}{T_y} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

式中: Q_p 为销钉剪力; D_b 为杆体直径; σ_y 为杆体屈服应力; T_y 为屈服力; T 为预应力; P_u 为岩体反力, 与岩石强度有很大关系。

式(1)表明, 销钉剪力与杆强度、岩体强度、预应力有关。实践和试验证明在防腐等措施设置合理情况下杆体的破坏一般发生在节理面附近^[7, 19], 其破坏符合拉剪屈服破坏准则。锚索对节理面的抗剪作用主要来自轴力和剪力的作用, 轴力包括预应力和轴力增量, 通过垂直和平行节理面的两个分量发挥作用, 而轴力大小同时影响着剪力。

从整体加固角度考虑预应力的作用, 在平滑节理面, 如果锚索先于岩体破坏, 节理面最大抗剪力在杆体破坏时达到, 一般预应力锚杆索设置的预应力大小相对杆体材料的屈服力相差不大, 根据式(1)对应销钉剪力的差别也不大, 杆体最终破坏对应的轴力和剪力组合值相近, 预应力大小对剪切强度的影响不明显, 小预应力只是经过更长时间的轴力增量接近大预应力的情况才破坏, 见图 6(b), 但是, 预应力明显提高了位移-剪力曲线初始段(形成塑性铰前)的抗剪力。如果节理岩体先破坏, 或者试验并没有进行到岩体或者锚索破坏, 轴力的增长并没有发展杆体的破坏状态, 通常预应力越大, 轴力的发挥越大, 其抗剪强度越大。除此之外, 预应力大小具体的影响还与节理面状况、锚固角等有关。

3.3 各种作用对节理面的影响

通过在不同锚固情况下曲线研究几种因素对节理面抗剪特性的影响, 图 7 为不同法向力和锚固情况下的曲线, 图中预应力分别为 1.2、3.8、3.1、2.7 kN。锚+尾部自由与节理情况的相比体现了锚的销钉作用, 锚+尾部自由与锚+预应力的相比体现了锚的预应力作用。从图中可以看出, 锚的销钉作用明显提高了初期阶段的抗剪刚度和抗剪力, 在小法向力下这种作用越明显, 销钉作用也影响了曲线末段的抗剪刚度。

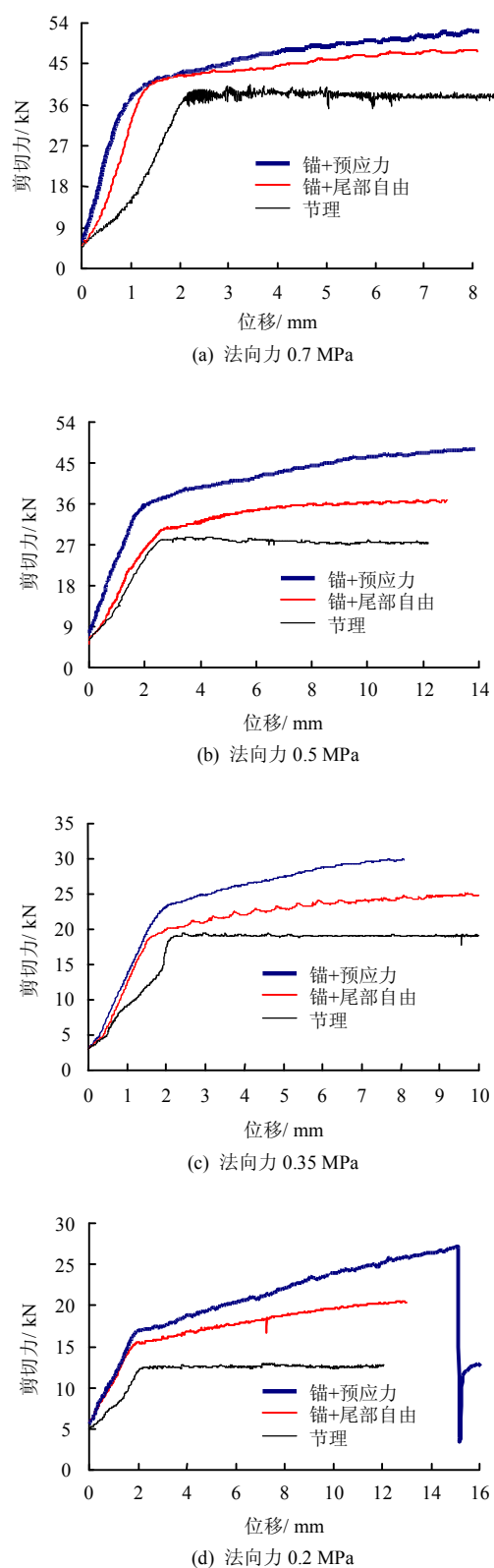


图 7 不同锚固情况下剪切力-位移曲线
Fig.7 Shear force-displacement curves under different anchorage conditions

为进一步分析加锚节理面的抗剪特性, 整理了法向应力 0.35、0.20 MPa 时不同锚固情况下抗剪指标, 见表 1。从表中可见, 与无锚固节理相比, 预应力锚固在法向应力 0.35、0.20 MPa 时, 初始段抗

剪力分别提高了 24%和 36%，初始段剪切刚度分别提高了 36%和 66%。因销钉作用，在两种法向力时初始段抗剪力分别提高了 7%和 25%，初始段剪切刚度分别提高了 13%和 46%，销钉作用也相对提高了曲线末段的抗剪力和剪切刚度。

表 1 不同法向力时节理面抗剪指标
Table 1 Shear strength parameters of joint surfaces under deferent normal stresses

法向应力 /MPa	抗剪指标	锚+预应力	锚+尾自由	无锚索
0.35	初始段抗剪力/kN	23.45	20.18	18.95
	位移 6 mm 抗剪力/kN	28.7	23.9	19.00
	初始剪切刚度/(kN/mm)	9.83	8.18	7.25
	末段剪切刚度/(kN/mm)	1.27	0.58	0.00
0.20	初始段抗剪力/kN	16.92	15.55	12.42
	位移 6 mm 抗剪力/kN	20.38	17.77	12.42
	初始剪切刚度/(kN/mm)	5.28	4.66	3.19
	末段剪切刚度/(kN/mm)	1.02	0.58	0.00

为了获得剪切过程中的轴力增量，试验时在锚索尾部安装了穿心传感器，图 8 为剪切过程中典型轴力增量-时间和剪切力-时间曲线。由于节理面两壁相对位移和剪胀，引起杆体轴力增量。

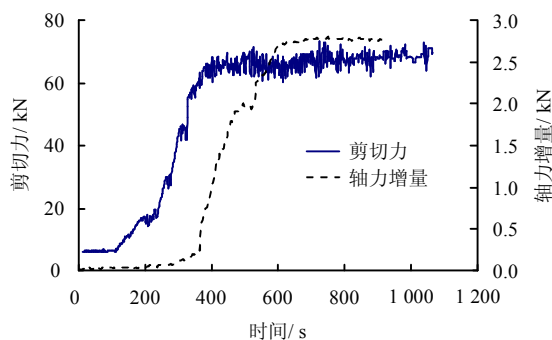


图 8 法向力 1 MPa 时轴力增量-时间和剪切力-时间曲线
Fig.8 Curves of increment of axial force-time and shear force-time under 1 MPa normal loading

通过图中两类曲线的对比，基于前人的研究分析，剪切过程中轴力增量需要锚索经过一定变形后才能明显出现，塑性铰形成时轴力增量较小，可以忽略。随着剪切位移的增加，轴力增量继续增大，只是在形成塑性铰后逐渐集中一定区段，而穿心传感器离节理较远在曲线后段趋于恒定。

虽然每组各试样在材料来源和配比是相同的，但是因各种客观因素影响，试样在强度等参数上一定会有差异，必然会影响每组试样间的对比，见图 5 和 7(a)、7(b)中的对比曲线。图 5 中，单从图中曲

线对比上看锚固+预应力对抗剪强度提高不明显，实际上不是提高不明显，而是因为两节理试样抗剪强度本身差异造成的（试验曲线推断，无锚索节理试样抗剪强度是比锚固+预应力的节理试样大）。

为了更加准确地对比分析其规律，选取剪切过程中铝棒发生断裂的试样数据，根据铝棒断裂后的残余强度确定节理岩体自身强度，由此作为基础进行对比。断裂铝棒的试验条件分别为法向应力 0.35 MPa 和预应力 6.6 kN，法向力 0.2 MPa 和预应力 2.7 kN，曲线见图 6(b)和 7(d)，曲线初始段各种作用对抗剪力的贡献见表 2。初始段轴力增量较小，忽略不计，表中销钉作用贡献由总抗剪力减去预应力抗剪贡献得到，采用式 (1) 理论计算得到的值相比略小。

表 2 试验时各种作用的抗剪贡献
Table 2 Contributions of the different actions to shear strength

初始段抗剪力 /MPa	抗剪力总增量 /kN	预应力贡献		销钉作用贡献	
		量值 /kN	百分比 /%	量值 /kN	百分比 /%
0.35	28.2-21.2=7.0	4	57.1	3	42.9
0.20	16.9-12.2=4.7	1.64	38.4	3.06	64.9

根据试验数据和相关分析计算，从表 2 中可以看出，曲线初始阶段销钉作用发挥了重要的作用。垂直锚固时锚固体体系的抗剪力偏小，加上预应力值设置偏小，导致在此次试验的销钉作用占得比重偏大，但对于屈服力 16 kN 的杆体，3 kN 的销钉剪力也是抗剪的重要组分，不可忽略。

综上分析，锚固节理岩体在滑动曲线的初始段，预应力和销钉作用发挥了主要抗剪作用，销钉作用是其中重要的组成部分；在曲线末段，轴力增量发挥了重要的抗剪作用，直至杆体进入塑性，并最终破坏。

实际的锚固工程，在边坡欲滑及滑动开始阶段，锚杆索的预应力和销钉作用起到主要抗剪作用，销钉作用是以锚索径向变形为前提的，在滑动初始阶段发挥了不可忽略的抗剪贡献，这部分作用在常规计算中是没有涉及的。随着滑动位移的增加，锚杆索发生明显轴向变形，轴力增量则发挥了主要的抗剪作用，锚杆索变形到一定程度，材料进入一定塑性后，锚固系统虽不至于发生破坏，但是已不能保证边坡的长久稳定性。通过以上试验研究和分析，实际边坡在滑动一定距离后仍能稳定下来，这与锚固系统的销钉作用和轴力增量作用发挥有关，尤其在滑动前期阶段。

4 加锚节理面的变形破坏特性

经过剪切加载过后,平滑节理面表层被磨地更光滑,表层出现磨碎细颗粒,节理面锚索孔周边岩体有破坏的痕迹。对已完成试验的试样进行剖析,取出铝棒,对轴向变形区进行量测,结果见表 3。

表 3 模拟锚索变形量

Table 3 Deformation of simulated anchor cable

试验组别	法向力 / MPa	锚固情况	剪切位移 / mm	轴向变形长度 / mm
1	1.00	锚+预应力	10	26
	1.00	锚+尾锁定	9	28
2	0.50	锚+预应力	16	30
	0.50	锚+尾锁定	16	28
	0.50	锚+尾自由	15	26
3	0.50	锚+高预应力	13	28
	0.35	锚+预应力	10	29
	0.35	锚+尾自由	13	27

铝棒因剪切发生弯曲变形主要集中在节理面附近,从表 3 中可见,明显变形区垂直长度为 26~30 mm,即锚索杆体直径 3~4 倍,两段锁定的铝棒变形接近反对称的“S”形,其形状见图 9(a)。从理论上分析,变形区长度与岩体材料强度、锚杆索材料强度、预应力、法向力等有关,不同模型中铝棒剪切试验(见图 9)证明变形区和抗剪力与周围材料强度密切相关。表 3 中测试结果并没有明显体现法向力、预应力等因素的影响,这些因素的影响一定存在,只是小影响易埋在材料个体差异中。



(a) 混凝土中的铝棒



(b) 钢模中的铝棒

图 9 铝棒变形图

Fig.9 Deformation patterns of aluminum bars

试验中铝棒出现过断裂破坏的现象,其破坏形式见图 10。从图中可以看出,铝棒的破坏位置在弯曲变形的中部,即在节理面附近,其破坏表现出剪

切破坏形式,也存在拉伸破坏的痕迹,与图 9(b)剪切破坏存在明显不同,混凝土模拟岩体中铝棒的破坏是拉剪力复合作用产生的,其破坏位置侧面也表明杆体是拉剪破坏。



(a) 破坏端口



(b) 变形形状

图 10 铝棒破坏形状

Fig.10 Failure form of aluminum bars

5 结 论

(1) 与非锚固相比,预应力加锚提高了节理面剪切力-位移曲线初始段的抗剪力和剪切刚度,杆体在曲线转折点处形成“塑性铰”,其后曲线末段变为渐增直线段,表现出“塑性强化”特征。

(2) 预应力锚固对节理面抗剪强度的影响与分析角度和条件有关,从整体加固角度考虑预应力作用,如果预应力锚索先于岩体破坏,节理面最大抗剪力在杆体破坏时达到,预应力大小对节理面抗剪强度影响不明显。如果节理岩体先破坏,或者试验并没有进行到岩体或者锚索破坏,通常预应力越大,轴力的发挥越大,其抗剪力越大。

(3) 试验证明销钉剪力的存在,与轴力抗剪作用相比,虽销钉作用量值有限,但明显提高了初始阶段的抗剪刚度和抗剪力,对曲线末段的抗剪刚度也有影响。

(4) 在边坡欲滑及滑动初始阶段,预应力和销钉作用起了主要抗剪作用,初始阶段的销钉作用是抗剪作用的重要组分,杆体形成塑性铰后的滑动末段,轴力增量则发挥了主要抗剪作用。

(5) 剪切过程中锚索模拟体沿轴向的变形集中在 3~4 倍杆直径范围内,剪切后期轴力增量也大致集中在此范围内,杆体断裂破坏发生在节理面附近,其破坏是拉剪力复合作用产生的。

本文通过对比试验,研究了在垂直锚固下对各种力的抗剪作用,并获得了价值信息,由于试验条件限制,并没有开展多种锚固角的研究(实际上小锚固角时轴力抗剪作用占得相对比重更大些),也是以后研究的一方向。

参考文献

- [1] PELLET F, EGGER P. Analytical model for the mechanical behaviour of bolted rock joints subjected to shearing[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1996, 29(2): 73—97.
- [2] 杨为民. 锚杆对断续节理岩体的加固作用机制及应用研究[博士学位论文 D]. 济南: 山东大学, 2009.
YANG Wei-min. Study on reinforcement mechanism of rock bolt to intermittent jointed rock mass and application[Ph. D. Thesis D]. Jinan: Shandong University, 2009.
- [3] 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 Song-lin, XU Wei-ya, HUANG Qi-ping. Analysis on the bolt deformation as result of joint shear displacement[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3268—3273.
- [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.
GE Xiu-run, LIU Jian-wu. Study on the shear resistance behaviour of bolted rock joints[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1988, 10(1): 8—19.
- [5] 顾金才, 沈俊, 陈安敏, 等. 预应力锚索加固机理与设计计算方法研究[C]//第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 32—39.
GU Jin-cai, SHEN Jun, CHEN An-min, et al. Study on the reinforcement mechanism and calculation method for rock engineering reinforced by prestressed anchor cables[C]//Proceedings of 8th Rock Mechanics and Engineering Conference of China. Beijing: Science Press, 2004: 32—39.
- [6] LUVIG B, 李迪. 锚杆的剪切试验[J]. 人民长江, 1984, 15(4): 51—58.
LUVIG B, LI Di. Shear test of rock bolts[J]. **Yangtze River**, 1984, 15(4): 51—58.
- [7] GRASSELLI G. 3D behaviour of bolted rock joints: experimental and numerical study[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2005, 42(1): 13—24.
- [8] JALALIFAR H, AZIA N. Experimental and 3D numerical simulation of reinforced shear jointes[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2010, 43(1): 95—103.
- [9] SONG Hong-wei, DUAN Yan-yan, YANG Jing. Numerical simulation on bolted rock joint shearing performance[J]. **Ming Science and Technology**, 2010, 20(3): 460—465.
- [10] 贾颖绚, 宋宏伟, 段艳燕. 非连续岩体锚杆导轨作用的物理模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 614—617.
JIA Ying-xuan, SONG Hong-wei, DUAN Yan-yan. Physical simulation study on railway effect of bolt in discontinuous rock mass[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2007, 36(4): 614—617.
- [11] 张伟. 基于预应力锚杆模型的节理岩体稳定性非连续性[博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2010.
ZHAGN Wei. Discontinuous deformation analysis on stability of jointed rockmass based on pre-stressed rockbolt model[Ph. D. Thesis D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [12] FERRERO A M. The shear strength of reinforced rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1995, 32(6): 595—605.
- [13] 刘爱卿, 鞠文君, 许海涛, 等. 锚杆预紧力对节理岩体抗剪性能影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 391—396.
LIU Ai-qing, JU Wen-jun, XU Hai-tao, et al. Experimental study on the effect of bolt prestress on the shear behavior of jointed rockmass[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(3): 391—396.
- [14] 周纪军, 汪小刚, 贾志欣, 等. 锚固结构爆破振动规律与损伤的模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1257—1263.
ZHOU Ji-jun, WANG Xiao-gang, JIA Zhi-xin, et al. Vibration rule and damage of anchorage structure subjected to blasting using model test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(6): 1257—1263.
- [15] 陈文强, 贾志欣, 赵宇飞, 等. 剪切过程中锚杆的轴向和横向作用分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 143—149.
CHEN Wen-qiang, JIA Zhi-xin, ZHAO Yu-fei, et al. Analysis of axial and transverse effects of rock bolt during shearing process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(1): 143—149.
- [16] HAAS C J. Analysis of rock bolting to prevent shear movement in fractured ground[J]. **Mining Engineering**, 1981, 33(6): 698—704.
- [17] 张伟, 刘全声. 基于剪切实验的预应力锚杆变形性能分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2231—2240.
ZHANG Wei, LIU Quan-sheng. Analysis of deformation characteristics of prestressed anchor bolt based on shear test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(8): 2231—2240.
- [18] DIGHT P M. Improvements to the stability of rock walls to open pit mines[Ph. D. Thesis D]. Melbom: Monash University, 1982.
- [19] 肖同强, 李怀珍, 徐营, 等. 深部构造应力区煤巷肩角锚杆破断机制及控制[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2303—2308.
XIAO Tong-qiang, LI Huai-zhen, XU Ying, et al. Breaking mechanism of shoulder bolt of deep coal roadway in tectonic stress area its control[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(8): 2303—2308.