

锚固方式对节理岩体剪切性能影响试验研究

腾俊洋^{1,2}, 张宇宁^{1,2}, 唐建新^{1,2}, 张 闯^{1,2}, 李臣林^{1,2}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044)

摘 要: 分别采用预制混凝土块、45 号钢螺杆、矿用化学浆液来模拟围岩、锚杆及锚固剂进行节理岩体室内剪切试验, 研究在无锚、端锚和全锚 3 种情况下节理岩体抗剪特性及锚杆受力变形特征。研究结果表明: 在不同锚固方式下节理岩体的剪力-位移曲线有显著的差异, 无锚试件表现为脆性特征; 端锚试件在调动锚杆抗剪强度时会有一剪力小幅下降的转折点, 全锚试件与节理匹配性较好, 可以承受更大的剪力; 对于加锚试件, 无论是端锚还是全锚锚杆, 根据锚杆变形特点, 均可分为拉伸区、剪拉区和压缩区。锚杆在剪力和拉力综合作用下破坏时即发生在剪拉区。锚固方式不同, 剪切试验过程中锚杆轴力分布也不同, 全锚锚杆主要分布于节理面附近, 随着与节理距离增加, 轴力迅速衰减。端锚锚杆轴力分布则相对均匀。

关 键 词: 隧道工程; 锚固方式; 剪切试验; 节理岩体; 破坏形式

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017)08-2279-07

Experimental study on shear behavior of jointed rock mass with anchorage mode

TENG Jun-yang^{1,2}, ZHANG Yu-ning^{1,2}, TANG Jian-xin^{1,2}, ZHANG Chuang^{1,2}, LI Chen-lin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In this study, precast concrete blocks, #45 steel screw, mine chemical grout were used to simulate the surrounding rock and bolt. Shear tests of bolted jointed rock specimens were carried out to study characteristics of jointed shear stress and the cable deformation under three conditions of no-anchored, end-anchored and full-anchored specimens. The results show that obvious differences were found in curves of shear-jointed rock displacement with various anchoring ways. The no-anchor specimen was characterized as brittle. For the end-anchored specimen, a turning point was found in the slightly decreased shear when adjusting the shear strength of anchor. Compared with the above two specimens, the best matching was achieved by the full-anchored specimen with the joint, which indicates that the bolted specimen could bear the greatest shear force. For both the end-anchored bolt and the full-anchor bolt, their deformation characteristics can be divided into the tensile zone, shear-tension zone and compression zone. Under the combined action of shear and tension, the failure of the anchored bolt occurred in the shear-tension zone. With different anchorage modes, the distribution of axial force varied as well during the shear test. The axial force of full-anchored bolt was mainly distributed in the vicinity of the joint. Moreover, it decreased rapidly with the increase of the joint distance. While the distribution of axial force was relatively uniform in the end-anchored bolt.

Keywords: tunnel engineering; anchorage mode; shear test; jointed rock mass; failure mode

1 引 言

锚杆系统自被应用到矿山巷道支护以来, 以其快速、高效、占用空间位置少、经济等优点得到工程技术人员的认可, 目前已广泛应用于矿山、隧道、水利、边坡等岩土工程中。锚杆的锚固效果取决于对其锚固机制的理解, 而锚杆作用机制是一个极为复杂的力学传递过程, 尤其是对于节理岩体, 锚杆

对节理岩体的加固作用主要是增强岩体节理面的抗剪能力, 阻止岩体沿节理面发生层间错动^[1-2]。影响锚杆对节理面加固效果的因素较多, 如锚杆尺寸、钻孔直径、预紧力、注浆体及锚固岩体强度等。国内外学者在这些方面做了较全面的研究, 取得了丰富的成果, 积累了较多的经验, 加深了对节理岩体锚固机制的认识。

Bjurstrom^[3]于 1974 年对花岗岩在全长锚固下

收稿日期: 2016-10-08

基金项目: 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主课题重点项目 (No. 2011DA105287-ZD201504)。

This work was supported by Scientific Research Foundation of State Key Lab. of Coal Mine Disaster Dynamics and Control (2011DA105287-ZD201504).

第一作者简介: 腾俊洋, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程围岩稳定性研究工作。E-mail: jteng89@hotmail.com

的剪切性能进行了系统的研究,指出了锚杆切向抗剪能力可显著提高节理岩体稳定性。随后国外学者针对影响节理岩体锚固效果的因素进行了系统而丰富的研究。主要包括岩石类型^[4-6]、锚杆材质及力学参数、节理粗糙度^[5, 7-8]和锚固角度^[9]等。如 Haas^[4]研究了锚杆对石灰岩和页岩剪切性能的影响,指出锚杆可提高岩体节理面抗剪能力。Yoshinaka 等^[5]通过节理岩体锚固试验分析了节理岩体抗剪刚度与锚杆数量、弹性模量、倾角、岩体变形参数和截面几何参数等的关系。Spang 等^[6]研究了锚杆对不用岩体材料的抗剪作用,指出岩体的变形能力对锚固岩体的抗剪性能有着重要的影响。Ferrero^[8]进行了加锚混凝土剪切试验,指出了锚杆杆体材质、尺寸和岩石类型对锚固体抗剪强度的影响。Jalalifar 等^[10]通过室内剪切试验和数值模拟方法研究了不同强度岩体在施加不同预应力全锚锚杆作用下的荷载传递机制和力学特性,指出岩体强度和预应力大小对节理面抗剪能力、剪切位移和锚固体破坏特征均有较大影响。Kim 等^[7]综合分析认为,加锚试件力学性质与锚杆材料性质有关,但随着锚杆材料刚度增加,最终影响加锚试件力学强度的最主要因素是岩石试件自身的力学性质。Grasselli^[11]分析了普通锚杆与注浆锚杆在试件抗剪试验中的作用机制,并采用数值模拟的方法进一步对现场应用进行研究。国内学者采用实验室模拟的方法对上述问题也做了较多的研究。葛修润等^[12]针对影响锚杆支护效果的影响因素,用相似试件试验的方法针对锚杆尺寸、材料,锚杆安装角度以及试件本身强度等进行了抗剪试验研究。陈文强等^[13]在此基础上,建立了结构面加锚试件抗剪强度计算公式,并通过相似试件验证公式的正确性。张波等^[14]研究了含裂隙岩体在试件加锚条件下单轴压缩时的力学性质,进一步验证了锚杆的作用于含裂隙岩体的销钉作用。陈璐等^[15-16]采用原岩试件加锚的方法,对原岩进行抗拉、抗压、压剪试验,对加锚试件的裂纹起裂、扩展等进行了详细的规律总结,同时验证了加锚对增强试件力学强度(抗拉、抗压、抗剪)的关系,进一步分析了其加锚机制。刘爱卿等^[17]采用物理模拟的方法,研究了锚杆预应力对岩体抗剪能力的影响。张伟等^[18-19]则采用实验室模拟试验(物理模拟)的方法,针对含节理面的模型材料进行加锚剪切试验研究,研究发现,普通端锚锚固方式无法限制层面剪切错动,认为锚杆抗剪作用是在节理面已经发生剪切错动后利用锚杆的销钉作用实现的。

综上所述可见,虽然国内外学者利用理论、室内试验和相似模拟试验等方法对影响锚固节理岩体剪切特性各因素进行了较多的分析。但针对不同锚固方式下锚杆抗剪性质研究较少,不同锚固方式下的锚固体剪力-位移形态规律差异性鲜有讨论,锚杆破坏形态研究不够深入,锚杆轴力分布特点亦不清楚。本文应用室内剪切试验的方法研究不加锚杆、端部锚固和全长锚固下锚杆剪切特性,从而分析不同锚固方式下的锚固体剪力-位移形态规律及锚杆变形、破坏形态,试验过程中通过锚杆上的高敏应变片数据对锚杆轴力分布情况进行分析。

2 加锚剪切试验过程

2.1 试件制备

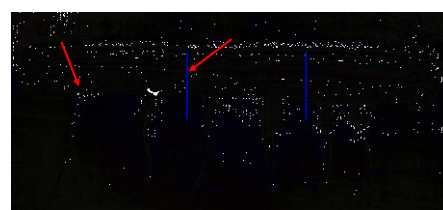
试件材料采用较为常见的 C15 水泥配合河沙、生石灰,配合质量比为 C15 水泥:河沙:生石灰=1:3:1.5,促凝剂选用熟石灰,与水泥等量使用,试件尺寸为 50 mm×100 mm×100 mm,常温下养护 28 d。

2.2 锚杆安装

锚杆选取 45 号钢加工成的螺杆,直径为 5 mm,长 160 mm。锚杆锚固剂选用矿用化学浆液配合酒精适当弱化,将其力学性质与普通锚杆进行对比,如表 1 所示。锚杆上黏贴高敏应变片以测量剪切试验过程中锚杆轴向应变值。应变片布置示意图 1。

表 1 普通锚杆与选用螺杆力学参数
Table 1 Mechanical parameters of blot and screw

材料	直径 / mm	抗拉强度 / MPa	抗剪强度 / MPa	锚固力 / MPa
普通锚杆	16~22	200~600	260~600	≥50
选用锚杆	5	350	400	30~40



(a) 应变片布置



(b) 锚杆

图 1 应变片布置及黏贴有应变片锚杆示意图
Fig.1 Photos of strain gauge layout and bolts with strain gauge

试验考虑 3 种加锚方式，即无锚、端部锚固、全长锚固，为便于表述，以下简称无锚、端锚、全锚。无锚即不对节理岩体施加锚杆，仅按图 2 所示方式采用环氧树脂将 3 块试件进行黏结组合。端部锚固是仅在锚杆端头 20% 范围内注入锚固剂，全长锚固则在钻孔内注满锚固剂后安装锚杆，即锚杆与岩体为全长黏结。每种锚固方式加工 3 个试件以减小试验结果的离散性。锚杆钻孔直径为 9 mm，安装时不考虑锚杆预应力及安装角度的影响，即各组试件锚杆预应力均为 10 kN，锚杆与节理面垂直安装。试验方式及锚杆安装部位如图 2 所示。

锚杆安装时用扭矩扳手对锚杆施加 10 kN 预应力。安装后将加锚试件在常温下静置 7 d，使锚固剂完全凝结后方进行室内剪切试验。

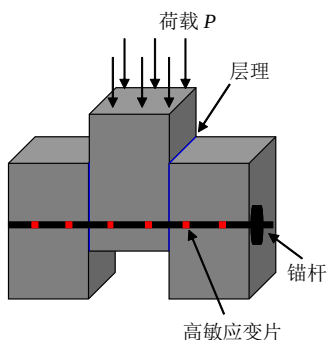


图 2 剪切试验加锚试件尺寸图

Fig.2 Size diagram of anchor specimen and shear test

2.3 试验过程

将加锚试件放在 MTS815 岩石力学试验系统上进行剪切试验，试验采用位移控制加载，加载速率为 0.1 mm/min。试验过程中记录试件加载应力-位移曲线及高敏应变片的应变-时间曲线。加锚试件编号见表 2，试验仪器见图 3。

3 试验结果分析

3.1 剪力-位移曲线

剪力-位移曲线是加锚试件剪切过程的最直观反映，国内外学者常根据曲线形态特点对其进行分段描述。Grasselli^[11]和 Jalalifar 等^[10]根据式 (1) 计算锚杆在剪切过程中的贡献率，得到锚杆贡献率-



图 3 MTS815 岩石力学测试系统

Fig.3 MTS815 rock mechanics testing system

剪切位移曲线，并将该曲线分为线性、非线性和塑性 3 个阶段。

$$T = \frac{T_v - 2N \tan \varphi}{2nF_{\max}} \quad (1)$$

式中： T_v 为剪切荷载； φ 为节理面内摩擦角； N 为轴力； n 为过节理面锚杆数； $F_{\max}$ 为锚杆极限拉伸荷载。

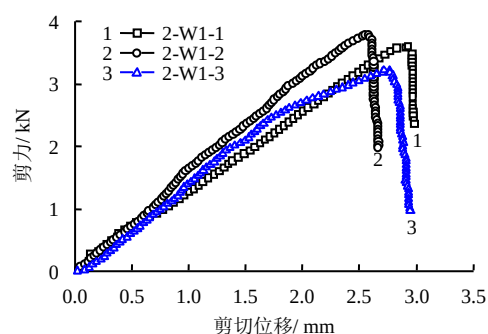
刘爱卿等^[17]根据锚杆增阻特点将剪力-位移曲线分为急增阻、缓增阻和降阻 3 个阶段。张伟等^[18]研究了不同锚固方式、不同强度岩体剪切过程，认为端锚和全锚的剪力-位移曲线形态类似，均可分为弹性阶段、屈服阶段和塑性强化阶段。本文对不同锚固方式下剪力-位移曲线进行分析发现，无锚、端锚和全锚剪力-位移曲线形态有着明显的差别，因此，统一地对 3 种锚固方式的剪力-位移曲线进行分段是不合适的。

试验所得不同锚固方式下剪力-位移曲线见图 4。3 种锚固方式下的曲线形态明显不同，其所能承受的最大剪力也有较大差异。无锚、端锚和全锚试件的平均最大剪力分别为 3.55、15.34、17.35 kN，由此可知，端锚试件最大剪力相对于无锚提高了 332.11%，全锚试件最大剪力相对于端锚提高了 13.10%。无锚试件的剪力-位移曲线主要反应了节理面的剪切变形过程，图 4(a)显示不加锚杆时加载到极限荷载时试件即失稳破坏，并失去承载力，表现为脆性特征。相比于无锚和全锚试件，端锚试件在完全屈服破坏前会有一个剪力突降后又上升的转折点，如图 4(b)所示。该点可作为端锚试件锚杆发挥抗剪作用与否的判定点。该点之前，主要是由节理面来承受剪切作用，节理面的剪切刚度大小由界面的摩擦力和锚杆预应力大小来决定。到达该点时节理面受到剪切破坏，两侧试件发生相对错动，从而调动锚杆自身的抗剪强度，因此，该点也可称作节

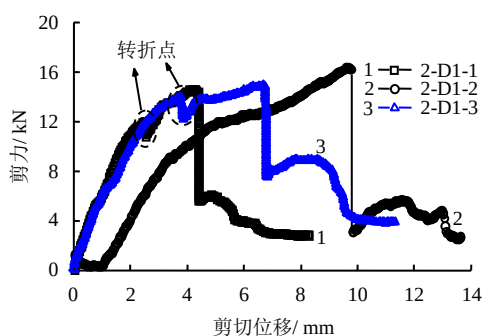
表 2 加锚试件编号

Table 2 Number of anchor specimen

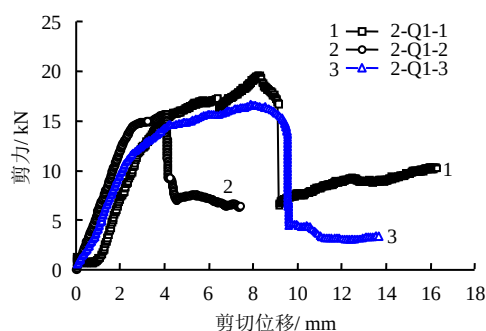
加锚类型	试件编号	试件形状
无锚	2-W1-1~2-W1-3	偏心试件
端部锚固	2-D1-1~2-D1-3	
全长锚固	2-Q1-1~2-Q1-3	



(a) 无锚



(b) 端锚



(c) 全锚

图4 剪力-位移曲线

Fig.4 Curves of shear force-displacement

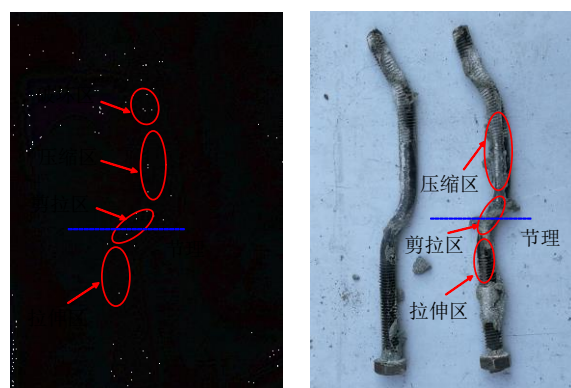
理界面的屈服点和锚杆抗剪强度调动点。该点之后锚杆杆体的抗剪强度使节理面综合抗剪性能得到增强,剪力随剪切位移的增加而缓慢增长,文献[18]、[10]分别将该阶段称为塑性阶段和塑性强度阶段,也有学者^[17]根据锚杆增阻特点将该阶段称为缓增阻阶段。即锚杆在该阶段沿节理面两侧产生塑性铰,关于塑性铰的产生及变形特征将在 3.2 节讨论。当锚杆或混凝土强度达到极限强度时,加锚试件即失稳破坏。由图 4(c)可知,全锚和端锚试件的剪力-位移曲线形态亦有所差异。全锚试件锚杆与混凝土块通过锚固剂紧密接触,荷载作用下锚杆能够立即发挥抗剪作用。在经历较小的剪切位移下剪力迅速增加,而后剪力随位移增加缓慢上升,直至试件失稳破坏。由此可见,全锚试件锚杆与节理面共同承

受剪切荷载,不会出现端锚试件的转折点,即避免了节理面和锚杆被各个击破的现象。全锚试件相对于无锚和端锚表现为所能承受的极限荷载更大,锚杆增阻更快,塑性强度阶段更长,失稳后残余抗剪能力更强。

3.2 破坏形态

剪切试验后锚杆变形形态可以很好地反映出锚杆在剪切试验过程中受力特征及其对节理面的锚固机制。试验后锚杆形态见图 5,由试验后锚杆变形形态可以得出规律:

(1) 剪切试验过程中锚杆在节理面附近产生塑性铰,若剪切荷载较高,锚杆变形过大,锚杆最终会在塑性铰点间破坏,如图 5(a)所示,端锚锚杆即在锚杆端部塑性铰点间破坏。在加锚试件失稳后,锚杆与锚固剂间黏结较为完整,表明试验过程中锚杆与锚固剂间未发生整体脱黏,而是锚固剂与混凝土间的破坏。



(a) 端锚

(b) 全锚

图5 剪切试验后锚杆形态

Fig.5 Bolt shapes after shear tests

(2) 无论端锚还是全锚锚杆,变形后锚杆均可分为拉伸区、剪拉区、压缩区。拉伸区和压缩区分布于节理面两侧,剪拉区受剪应力和拉应力综合作用,若荷载过大,锚杆即在该区域发生剪拉破坏,结合剪力-位移曲线分析锚杆剪拉破坏过程为:随剪力增加,锚杆逐渐达到屈服点并从杆体中心处产生微小裂缝,达到屈服点后,锚杆轴力持续增加而节理面处剪力几乎不变,杆体中心处裂缝在剪力和轴力的综合作用下不断向四周发展直至破坏,最终形成圆形或椭圆形断面,断口处有同程度的颈缩。锚杆在剪切试验过程中的受力状态示意图见图 6,锚杆杆体破坏断面形态见图 7。破坏处锚杆一侧混凝土受压破碎,一侧在拉应力作用下锚固剂与混凝土分离,形成扇形凹槽,如图 8 所示。

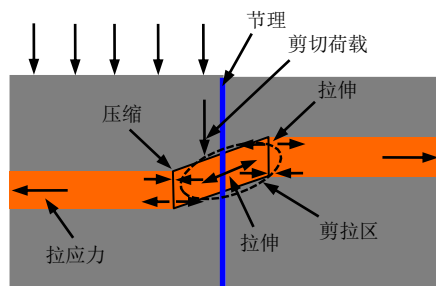


图 6 剪切过程锚杆受力状态示意图

Fig.6 Schematic of stress state of rock bolt during shearing process

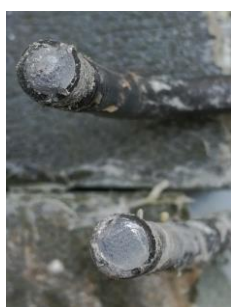


图 7 锚杆破坏断面

Fig.7 Section of failed bolts



(a) 混凝土挤压破碎

(b) 锚固剂与混凝土分离

图 8 锚杆破坏处节理面

Fig.8 Joints near failed bolt

(3) 图 9 是锚杆沿节理剪拉破坏区, AC 是两塑性铰间距离, 可以反映锚固混凝土强度, 混凝土强度越高, AC 越小, 预紧力对 AC 长度无显著影响。 α 是锚杆在剪切试验过程中弯曲角度, 锚杆变形量测试结果见表 3。

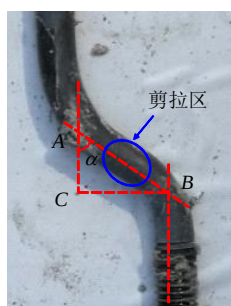


图 9 锚杆剪拉破坏区

Fig.9 Shear tensile failure zone of a bolt

表 3 锚杆变形量测试结果

Table 3 Results of bolt deformation

试件 编号	锚固 方式	α /($^{\circ}$)	α 平均值 /($^{\circ}$)	AC /mm	AC 平均值 /mm
2-D1-1	端锚	55.63		11.20	
2-D1-2	端锚	52.14	54.69	9.87	10.43
2-D1-3	端锚	56.31		10.21	
2-Q1-1	全锚	54.21		9.74	
2-Q1-2	全锚	53.01	53.02	9.97	10.02
2-Q1-3	全锚	51.84		10.36	

3.3 应变-位移规律

锚杆上高敏应变片值可以反映出锚杆轴力大小, 应变值越大, 轴力越大。试验所得典型端锚和全锚锚杆各部位应变分布曲线见图 10。由应变分布曲线可以看出:

(1) 锚杆轴力最大值在节理面附近, 并且在节理面两侧呈反对称分布。

(2) 全锚锚杆轴力主要集中在节理面附近, 与节理面距离增加时轴力迅速衰减, 端锚锚杆轴力分布则相对均匀。

(3) 塑性铰产生于节理面附近, 并且塑性铰的产生能有效阻止应力的进一步传播。塑性铰两端一端承受压应力一端承受拉应力。

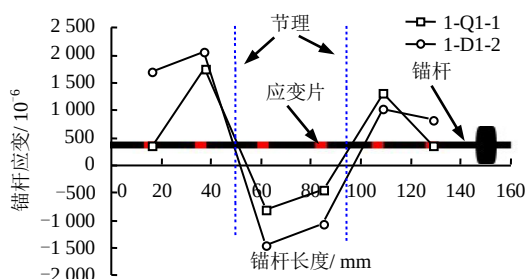


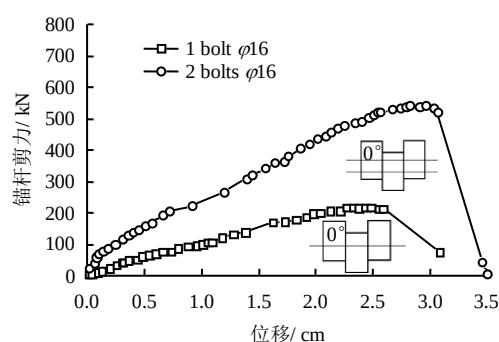
图 10 锚杆应变分布曲线

Fig.10 Strain distribution curves of bolts

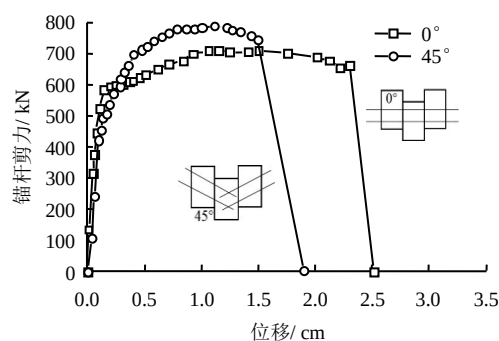
4 讨 论

(1) 本文采用室内剪切试验的方法研究了锚固方式对节理岩体抗剪性能的影响, 探讨了不同锚固方式下加锚试件剪力-位移曲线、锚杆及节理面处围岩破坏形态和锚杆轴力的差异。但限于试验条件和时间因素, 本文未考虑影响节理岩体抗剪性能的其他因素, 如锚固角度、锚杆直径、锚杆数量、混凝土强度等。而这些因素则是在进行锚杆支护系统设计时所必须考虑的, 对这些因素的研究具有较大的工程意义。虽然国内外学者围绕这些因素进行了较多的研究, 但往往因试验过程对参数进行了较多的简化而难以获得较为深入的结论。以 Grasselli^[11]为

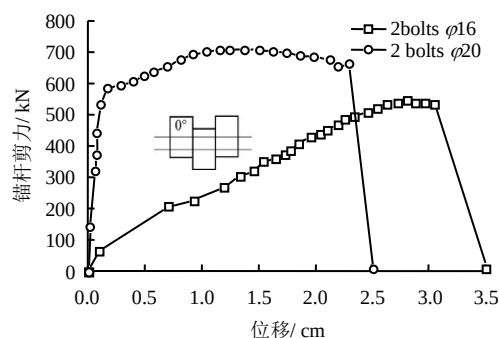
例, 通过室内大型剪切试验及数值模拟研究了锚杆数量、锚固角度和锚杆直径对锚杆剪切特性的影响, 如图 11 所示。在试验中, 锚杆数量仅考虑了 1 根和 2 根两种情况, 锚固角度仅考虑 15° 、 30° 和 45° 3 个角度, 锚杆直径仅考虑 16、20 mm 两种情况。各参数考虑过于单一, 结论难以工程应用, 如 2 根锚杆试件剪切强度大于 1 根, 但是否锚杆数量越多锚固效果越好, 若不是, 锚杆数量与锚固效果是怎样的关系, 在一定范围内是否存在一个合理的锚杆数量使得锚固效果最佳。锚固角度与锚杆直径有着类似的问题。因此, 本文提出对锚杆进行单因素多角度研究, 以深化对各影响因素的认识。



(a) 锚杆数量



(b) 锚固角度



(c) 锚杆直径

图 11 锚固参数对锚固效果影响(改自 Grasselli^[11])Fig.11 Influences of anchoring parameters on anchoring effect (Modified from Grasselli^[11])

(2) 节理面抗剪强度与岩石材料、表面粗糙度及充填物性质等因素有关, 本文采用环氧树脂对试块进行黏结, 黏结面平整度、环氧树脂层厚对节理面抗剪性能将产生影响, 也将影响试验结果的离散性, 为尽量减小试验结果的离散性, 在制作试件过程中对各个面进行了磨平处理, 环氧树脂在进行涂抹过程中尽量使其均匀, 但其层厚仍受人为操作影响较大, 是本试验结果离散性的主要来源之一。节理面抗剪能力的差异性可通过无锚试件的剪力-位移曲线(图 4(a))进行判断。另外, 端锚试件中的 2-D1-2 剪力-位移曲线没有出现剪力突降后又上升的转折点, 而是表现出全锚试件的锚杆被及时调动的状态, 分析其主要原因主要是节理面的力学性质不均匀性引起的: 通过无锚试件的剪力-位移曲线(图 4(a))可以看出, 节理面达到强度极限时, 其位移量约为 2~3 mm, 这一范围与端锚试件转折点位移量基本吻合, 但当节理面塑性较强时, 在剪切荷载持续作用下, 端锚锚杆杆体与孔壁接触时节理面仍未破坏, 锚杆抗剪作用被调动, 与节理面共同承担剪切荷载, 其剪力-位移曲线则不会出现转折点。

5 结 论

(1) 不同锚固方式下剪力-位移曲线形态有较大差异。无锚试件达到极限荷载即失稳, 表现为脆性特征; 端锚试件在完全屈服破坏前会有一个剪力突降后又上升的转折点, 该点之后锚杆杆体的抗剪强度使节理面综合抗剪性能得到增强; 全锚试件锚杆与节理面共同承受剪切荷载, 不会出现端锚试件的转折点, 即避免了节理面和锚杆被各个击破的现象。全锚试件相对于无锚和端锚表现为所能承受的极限荷载更大, 锚杆增阻更快, 塑性强度阶段更长, 失稳后残余抗剪能力更强。

(2) 无论端锚还是全锚锚杆, 变形后锚杆均可分为拉伸区、剪拉区和压缩区。拉伸区和压缩区分布于节理面两侧, 剪拉区受剪应力和拉应力综合作用, 若荷载过大, 锚杆即在该区域发生剪拉破坏。

(3) 破坏处锚杆一侧混凝土受压被挤压破碎, 一侧在拉应力作用下锚固剂与混凝土分离, 形成扇形凹槽。

(4) 锚杆轴力最大值在节理面附近, 并且在节理面两侧呈反对称分布。全锚锚杆轴力主要集中在节理面附近, 当与节理面距离增加时轴力迅速衰减, 端锚锚杆轴力分布则相对均匀。

参考文献

- [1] 刘泉声, 雷广峰, 彭星新. 深部裂隙岩体锚固机制研究进展与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 312—332.
- LIU Quan-sheng, LEI Guang-feng, PENG Xing-xin. Advance and review on the anchoring mechanism in deep fractured rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(2): 312—332.
- [2] 杨松林, 徐卫亚, 朱焕春. 锚杆在节理中的加固作用[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 604—607.
- YANG Song-lin, XU Wei-ya, ZHU Huan-chun. Reinforcement of bolt in joints[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(5): 604—607.
- [3] BJURSTROM S. Shear strength of hard rock joints reinforced by grouted untensioned bolts[C]//Proceedings of the Proceedings of the 3rd International ISRM Congress. [S. l.]: [s. n.], 1974: 1194—1199.
- [4] HAAS C J. Shear Resistance of Rock Bolts[M]. Rolla: University of Missouri, 1976.
- [5] YOSHINAKA R, SAKAGUCHI S, SHIMIZU T, et al. Experimental study of the bolt reinforcement in discontinuous rock[C]//Proceedings of 6th IRSM Congress. Montreal: International Society for Rock Mechanics, 1987: 1329—1332.
- [6] SPANG K, EGGER P. Action of fully-grouted bolt in jointed rock and factors of influence[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1990, 23(3): 201—229.
- [7] KIM H J, HU J W, HWANG W S. Cyclic testing for structural detail improvement of CFT column-foundation connections[J]. **Sustainability**, 2015, 7(5): 5260—5281.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] JALALIFAR H, AZIZ N. Experimental and 3D numerical simulation of reinforced shear joints[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2010, 43(1): 95—103.
- [11] GRASSELLI G. 3D behaviour of bolted rock joints: Experimental and numerical study[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2005, 42(1): 13—24.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 张波, 李术才, 杨学英, 等. 含交叉裂隙节理岩体锚固效应及破坏模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 996—1003.
- ZHANG Bo, LI Shu-cai, YANG Xue-ying, et al. Bolting effect and failure modes of jointed rock masses with cross-cracks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(5): 996—1003.
- [15] 陈璐, 谭云亮, 臧传伟, 等. 加锚岩石力学性质及破坏特征试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 413—422.
- CHEN Lu, TAN Yun-liang, ZHANG Chuan-wei, et al. Test study of mechanical properties and failure characteristics of anchored rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(2): 413—422.
- [16] 陈璐, 臧传伟, 于凤海, 等. 加锚岩石抗弯特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3451—3459.
- CHEN Lu, ZHANG Chuan-wei, YU Feng-Hai, et al. Experimental study of flexural behavior of anchored rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(12): 3451—3459.
- [17] 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.
- [18] 张伟, 刘泉声. 基于剪切试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.
- [19] 张伟, 刘泉声. 节理岩体锚杆的综合变形分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1067—1074.
- ZHANG Wei, LIU Quan-sheng. Synthetical deformation analysis of anchor bolt in jointed rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 1067—1074.