

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.S1.003

# 锚杆锚固对节理岩体剪切性能影响试验 研究及机制分析

刘泉声<sup>1,2</sup>, 雷广峰<sup>1,3</sup>, 彭星新<sup>1,3</sup>, 魏 莱<sup>1,3</sup>, 刘建平<sup>1,3</sup>, 潘玉丛<sup>1,3</sup>

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室,湖北 武汉 430071;  
2.武汉大学 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室,湖北 武汉 430072; 3. 中国科学院大学,北京 100049)

**摘 要:**为研究锚杆锚固对节理岩体剪切性能的影响规律及锚杆抗剪作用机制,开展不同锚杆倾角及不同法向应力作用下加锚节理岩体室内剪切试验研究,探究加锚节理岩体在法向力及剪切力作用下的变形和受力特征,对比分析节理岩体锚固前与锚固后的剪切变形规律,讨论锚杆倾角、节理面法向应力等因素对节理岩体抗剪性能的影响。试验结果表明,锚杆锚固能够有效地增加节理面的黏聚力和内摩擦角,提高节理岩体的抗剪强度;锚杆倾角对加锚节理岩体的抗剪强度及剪切变形规律有重大影响,较大的锚杆倾角有利于发挥锚杆的“销钉”抗剪作用;节理岩体施加锚杆后其剪力-位移曲线存在弹性阶段、屈服阶段及塑性变形阶段 3 个区段;在锚杆倾角相同的条件下加锚节理岩体的抗剪强度随节理面法向应力的增加而增大。分析试验后试件破坏形态可知,加锚节理岩体中锚杆的屈服破坏主要发生在节理面附近的区段,岩体材料由于锚杆横向的挤压作用,也会在节理面附近发生局部破坏现象。

**关 键 词:**锚杆锚固;节理岩体;剪切性能;试验研究

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2017) 增 1 - 0027 - 09

## Experimental study and mechanism analysis of influence of bolt anchoring on shear properties of jointed rock mass

LIU Quan-sheng<sup>1,2</sup>, LEI Guang-feng<sup>1,3</sup>, PENG Xing-xin<sup>1,3</sup>, WEI Lai<sup>1,3</sup>, LIU Jian-ping<sup>1,3</sup>, PAN Yu-cong<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Key Laboratory of Safety for Geotechnical and Structural Engineering of Hubei Province, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The indoor shear tests of anchored jointed rock mass under different bolt angles and different normal stresses are carried out to study the law and the shear resistance mechanism of bolt anchoring on shear properties of jointed rock mass. The deformation and stress characteristics of anchored jointed rock mass under the action of normal and shearing force are explored; the shear deformation law of the jointed rock mass before and after anchoring is compared and analyzed; and the effects of bolt angle, normal stress of the joint surface and other factors on the shear resistance of jointed rock are discussed. The experimental results show that the shear strength of jointed rock mass can be greatly improved by bolt anchoring as the increase of the cohesive force and internal friction angle after bolting; the bolt angle has significant influence on the shear strength and shear deformation of the anchored jointed rock mass; and the larger bolt angle is helpful to mobilize the shear resistance of the bolts. The shear-displacement curves of the jointed rock mass have three segments after anchoring, i.e. the elastic stage, the yield stage and the plastic deformation stage. The shear strength of anchored jointed rock mass is improved with the increase of the normal stress of joint plane under the same bolt angle. It is found that the yield failure of bolts in the jointed rock mass occurs mainly in the section near the joint plane; and the local damage of the rock material occurs near the joint plane due to the lateral compression of the bolts.

**Keywords:** bolt anchoring; jointed rock mass; shear properties; experimental study

收稿日期: 2017-01-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No.41130742); 国家自然科学基金面上项目 (No.51474205)。

This work was supported by the Key Project of the National Natural Science Foundation of China(41130742) and the Surface Project of the National Natural Science Foundation of China(51474205).

第一作者简介: 刘泉声, 男, 1962 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩石工程方面的教学与研究工作。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn

通讯作者: 雷广峰, 男, 1990 年生, 博士, 主要从事岩土工程锚杆锚固机理方面的研究工作。E-mail: glei\_whrsm@foxmail.com

## 1 引 言

锚杆锚固技术因其工艺简便、经济高效的特点,已被广泛应用于矿山隧道、堤坝边坡等岩土加固工程各个领域。针对锚杆锚固作用机制方面的研究多集中于讨论锚杆的抗拉拔效应,随着研究与认识的深入,锚杆抗剪切性能在加固节理岩体领域的重要性引起了业内专家学者的高度重视。锚杆锚固是提高节理岩体力学性能的有效方法,对节理岩体而言,施加锚杆后主要通过锚杆杆体自身的抗剪作用提高岩体节理面的抗剪强度,进而增强节理岩体的整体性与稳定性。由于节理岩体所处地质力学环境复杂以及锚固工程所涉及的工艺设备等因素众多,锚杆锚固节理岩体的力学机制十分复杂,几十年来岩土工程领域诸多专家学者开展了大量节理岩体锚杆锚固机制方面的试验研究与理论探讨<sup>[1-3]</sup>,极大推动了锚固技术在岩土加固工程中的应用。

对节理岩体锚固效应的早期研究多以试验研究为主,1974年 Bjurstrom<sup>[4]</sup>开展了锚杆锚固节理岩体的剪切试验,指出锚杆切向抗剪能力对于提高节理岩体整体稳定性具有重要作用。Haas<sup>[5]</sup>在石灰岩和页岩中分别施加不同类型的锚杆,然后将两种锚固体在剪切试验机上进行剪切试验,表明施加锚杆后岩体节理面的抗剪强度及抗变形能力极大提高,锚杆在节理岩体中主要发挥其抗剪作用。Yoshinaka<sup>[6]</sup>通过锚固节理岩体剪切试验,研究了裂隙面粗糙度对节理岩体剪切强度的影响规律,得出了锚杆数量、锚杆倾角等参数与节理岩体抗剪强度之间的关系。Spang 等<sup>[7]</sup>通过物理试验,探究了锚杆在不同性质岩体中的加固效应,指出岩体自身的抗变形能力是影响锚固节理岩体抗剪强度的重要参数之一。Li 等<sup>[8]</sup>通过剪切试验,比较了纤维锚杆、岩石锚杆与锚索三者之间对节理岩体剪切强度的影响程度,表明岩体节理面的剪切刚度受锚杆材料刚度及预应力大小的影响显著。Li 等<sup>[9]</sup>研究了双剪切试验中锚固支护系统对节理面抗剪强度的贡献,认为喷射混凝土及薄层衬砌等加固方式可以有效地增加节理岩体的黏结强度,同时与锚杆共同作用,增加了节理岩体的强度及稳定性。Chen<sup>[10]</sup>通过大型的物理模型试验,研究了拉-剪复合应力作用下节理岩体中锚杆变形特征,并提出了一种评估岩石锚杆锚固性能的新方法。Ferrero<sup>[11]</sup>开展了加锚节理岩体的直剪试验,探究了锚杆材料、锚固方式及杆体尺寸等因素对节理岩体抗剪强度的影响规律。葛修润等<sup>[12]</sup>其理论分析结合物理试验验证,研究了锚杆锚固对节理面抗

剪强度的影响规律,提出了估算加锚节理面抗剪强度和锚杆最优安装角的公式。张治强等<sup>[13]</sup>通过室内模拟试验,研究了不同锚杆锚固方式条件下节理岩体剪切刚度及位移变形特征,认为节理岩体施加锚杆后抗剪强度及切向刚度增强,节理面塑性变形明显。

虽然锚杆锚固技术在岩土加固工程中应用甚广,但由于其锚固机制及加固机制较为复杂,理论研究落后于工程实践,导致目前锚固工程的设计与施工多依赖经验、半经验的方法。锚杆加固作用机制这一科学问题作为岩土工程中一个研究热点与难点,一直以来受到业内专家学者的广泛关注,分析总结该方向已有研究成果不难发现,锚杆的抗剪性能在加固节理岩体方面的重要性得到一致认可,国内外专家学者从不同角度对节理岩体锚固机制做了大量研究,但对不同锚固倾角作用下,尤其是将节理面法向应力这一变量考虑在内的研究很少,并且仅有的少数研究多为理论分析或者数值模拟,缺少相关物理试验作为支撑。为研究不同锚杆倾角及节理面法向应力条件对节理岩体剪切性能的影响,确定加锚节理岩体剪切变形特征,分析锚杆加固节理岩体的抗剪作用机制,揭示不同锚固倾角的锚杆杆体本身的剪切变形规律,笔者开展了一系列加锚节理岩体的室内剪切试验,讨论分析了试验结果,研究结论可为锚杆锚固节理岩体力学机制的研究提供借鉴与参考。

## 2 试验准备

### 2.1 试件制作

选取合适的试验材料及合理的各组分配比是室内物理试验的关键,笔者查阅相关文献并开展了岩石相似材料的模型试验,同时考虑到试件成型方便及节理面产状应符合试验要求。本次采用水泥砂浆预制节理岩体,水泥选用 32.5 普通硅酸盐水泥,石英砂选用 80 目中细砂,各组分配比为水:水泥:石英砂=1:2:4。锚杆材料选用 HRB400 型螺纹钢,直径  $\phi$  为 12 mm,长度为 145 mm,屈服强度为 400 MPa。节理岩体试件分上下两盘分别浇筑,下盘浇筑振捣均匀密实后养护 1 d,然后浇筑上盘,上下盘中间预留水平节理面,试件整体尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm。在浇筑过程中,锚杆倾角为 90°的试件上下两盘的中间插一根直径为 16 mm 的 PVC 管,在水泥砂浆初凝时将其拔出,留下的贯穿空洞作为锚杆钻孔,用于后期施加锚杆并注入水泥浆液。其他工况的试件不预留锚杆钻孔,浇筑时直接将锚

杆按照预定的角度浇筑在岩石材料中，试件浇筑过程见图 1。试件浇筑完成后在室内整体养护 28 d，养护完成后在预留钻孔内施加锚杆，并在锚杆与孔洞之间灌注素水泥浆，水灰比为 0.42。施加锚杆并完成注浆的试件见图 2，本文中锚杆倾角为锚杆轴线与节理面之间的夹角，见图 3。

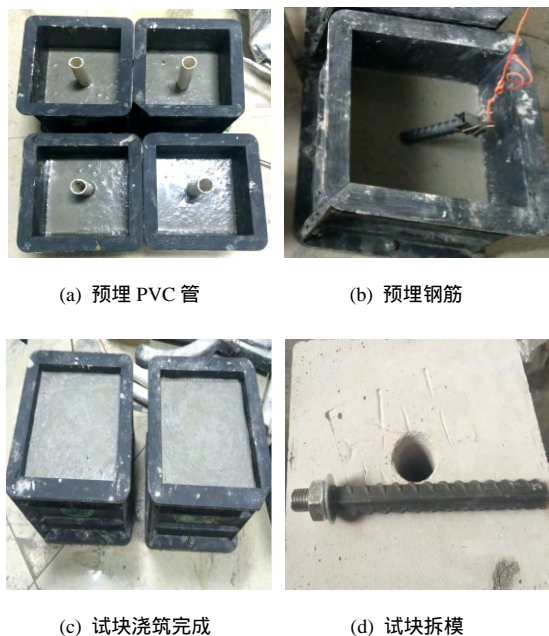


图 1 节理岩体试件浇筑过程

Fig.1 Pouring process of jointed rock mass specimen

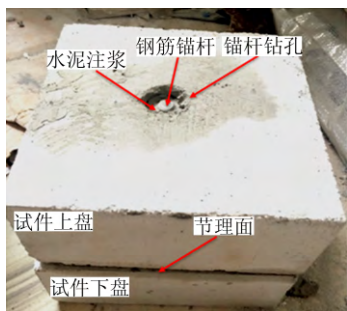


图 2 锚固成型试件

Fig.2 Anchoring-grouting specimen

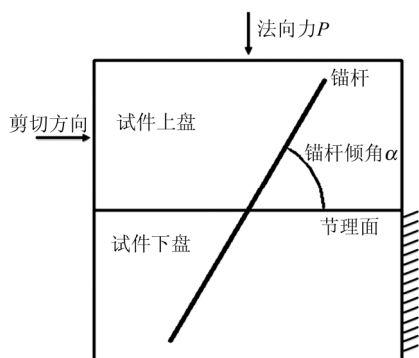


图 3 锚杆倾角示意图

Fig.3 Sketch of bolt inclination

## 2.2 材料参数测定

为确定试验选用配比（水：水泥：石英砂=1:2:4）的水泥砂浆的基本力学参数，制作高径比 2:1 的标准试件 5 块，进行相关力学试验，测定岩体材料的单轴抗压强度、弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角等基本力学参数，结果分别见表 1、2。

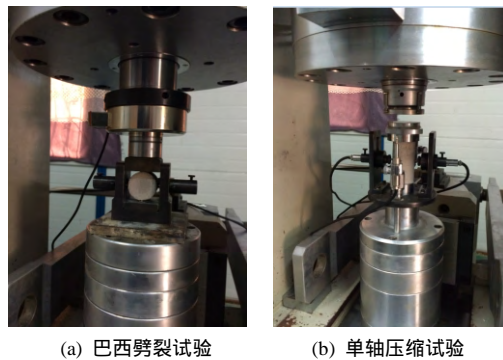


图 4 基本力学试验

Fig.4 Basic mechanical tests

表 1 巴西劈裂试验结果

Table 1 Results of Brazilian test

试块号	抗拉强度/ MPa
1	2.54
2	2.27
3	2.93
4	2.25
均值	2.50

表 2 试验配比材料基本参数

Table 2 Basic parameters of ratio of test materials

试块号	抗压强度/ MPa	弹性模量/GPa	泊松比
1	30.46	5.59	0.18
2	29.24	6.65	0.11
3	25.17	6.02	0.15
4	28.63	5.69	0.16
5	21.75	5.34	0.15
均值	27.05	5.86	0.15

## 2.3 试验方案设计

本次节理岩体锚杆锚固试验是研究锚杆倾角和法向应力对节理岩体抗剪切性能的影响，为实现这一目标，试验分为两部分，即相同法向应力作用下不同锚杆倾角的直剪试验、锚杆倾角  $\alpha$  分别为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  及无锚固试件，另一部分试验为保持节理岩体中锚杆的倾角相同 ( $\alpha = 90^\circ$ )，节理面处施加不同的法向应力，记录试验过程中不同工况条件下加锚节理岩体剪力-位移曲线，分析锚杆锚固对节理岩体抗剪性能的影响。

直接剪切试验采用中科院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室研制的 RMT-150C

岩石力学加载试验系统，见图 5。具体的试验操作过程为：首先对加锚节理岩体试件进行法向加载，加载方案见表 3。3 组法向力分别为 35.25、53.25、89.25 kN，换算后对应的法向应力幅值分别为 1.6、2.4、4.0 MPa，达到试验设定的法向应力值后施加水平剪切位移，位移速率为 0.01 mm/s，当试件的剪切位移达到 10 mm 时停止加载，剪切试验过程中试件水平剪切力-位移曲线由电液伺服系统全程记录。每组试验结束后取下试件，分析其剪切破坏形态。

表 3 直剪试验加载方案

Table 3 Loading scheme of direct shear tests

工况	锚杆倾角 / (°)	法向应力 /MPa	剪切位移终点 /mm	剪切位移极限 /mm
1	30	2.4	10	12
2	45	2.4	10	12
3	60	2.4	10	12
4	90	2.4	10	12
5	90	1.6	10	12
6	90	4.0	10	12
7	无锚杆	2.4	10	10
8	无锚杆	1.6	10	10
9	无锚杆	4.0	10	10



图 5 RMT 试验加载系统  
Fig.5 The RMT test loading system

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 不同锚固倾角作用下剪切变形特性

锚杆倾角不同对结构面产生的力学效应就不同，为探究不同锚杆倾角作用下加锚节理岩体剪切变形特性，开展了 4 组直剪试验，锚固倾角分别为 60°、45°、30° 和无锚杆锚固，试验过程中节理岩体试件的剪力-位移曲线如图 6 所示。从图中曲线可知，加锚试件完整的剪力-位移曲线大致可分为弹性、屈服和塑性变形 3 个阶段。剪切变形初期，剪力增长较快，试件经历很小的剪切变形就达到屈服

点，加锚节理岩体的屈服极限与锚杆屈服强度及岩石抗压强度有关<sup>[14]</sup>；屈服阶段曲线的斜率降低，剪力增加缓慢，锚杆开始发生屈服变形；屈服阶段后期，试件剪切变形持续增加，剪力基本保持不变，进入塑性变形阶段，锚杆发生屈服破坏。未施加锚杆的节理岩体剪力-位移曲线大致分为弹性变形及塑性变形两个阶段，裂隙岩体在经历弹性变形之后直接进入塑性变形破坏阶段，与岩石本身的力学特性较为吻合，剪切过程中节理岩体的屈服强度及极限强度见表 4。

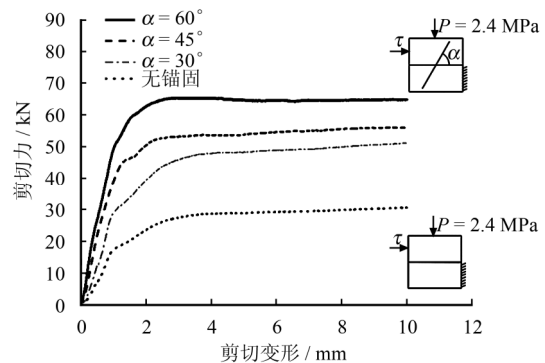


图 6 不同锚固倾角试件剪力-位移曲线  
Fig.6 Shear-displacement curves of specimens with different anchorage angles

表 4 不同锚固倾角试件的强度参数

Table 4 Strength parameters of specimens with different anchorage angles

工况	锚杆倾角 / (°)	法向应力 /MPa	屈服强度 /kN	剪切位移 /mm	极限强度 /kN
1	30	2.4	37.78	1.83	51.25
2	45	2.4	47.89	2.05	56.19
3	60	2.4	58.88	2.51	65.49
4	无锚杆	2.4	21.19	1.62	30.77

对比加锚前后裂隙岩体剪力-位移曲线可以得出加锚前后裂隙岩体剪力随位移变化特征，如图 7 所示。OA 段：弹性阶段，剪力-位移曲线基本呈直线，位移较小，剪力迅速增大，此时加锚节理岩体的剪切刚度明显高于未锚固岩体剪切刚度。AB 段：屈服阶段，随着水平剪切力的增大，作用于锚杆与节理面交界处的应力达到岩体的抗压强度或锚杆的屈服强度，曲线斜率降低，剪力增加缓慢，此时锚杆开始发生屈服。BC 段：塑性变形阶段，此阶段剪力基本保持不变，位移持续增加。与加锚节理岩体不同的是，未锚固的节理岩体剪力-位移曲线只有两个阶段。OD 段：弹性变形阶段，此时岩体的剪切刚度小于加锚岩体。DE 段：塑性变形阶段，随剪力增加，达到节理岩体的抗压强度极限，岩体发生破坏。

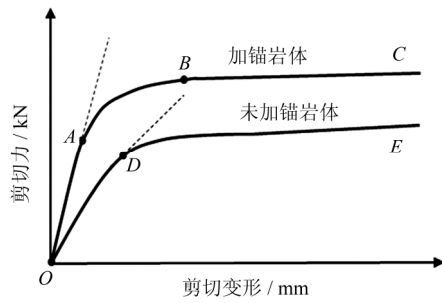


图 7 加锚与无锚试件剪切力-剪切变形曲线特征图  
Fig.7 Feature map of shear force - deformation of anchor and non-anchor specimens

比较 3 组不同锚固倾角条件下加锚节理岩体剪力-位移曲线不难发现，当锚杆倾角为 60° 时加锚节理岩体剪切强度最高。锚杆倾角为 45° 时剪切强度次之，锚杆倾角 30° 时剪切强度最小，说明在一定的范围内加锚节理岩体的抗剪强度正比于锚杆倾角  $\alpha$ 。图 8 为不同倾角试件剪切试验后锚杆变形形态， $\theta$  为剪切角。分析产生上述现象的原因：当锚杆倾角较小时剪切方向与锚杆轴线方向夹角较小，使得剪切位移在锚杆轴向存在较大分量，如图 9 所示。剪切过程中锚杆与岩体界面承受较大的拉拔作用，随剪切位移增加，锚杆与岩体界面会发生滑脱或者拉剪破坏，锚杆表面的肋部会残留“滑脱岩渣”，（见图 8(a)），此时锚杆切向变形较小，未能较好地发挥锚杆的抗剪作用，加之岩石材料的抗拉强度远低于抗剪强度，故当锚杆倾角较小时加锚节理岩体抗剪强度较低，当锚杆倾角较大时剪切位移方向与锚杆轴线近乎垂直，随剪切位移增大，锚杆会发生明显的剪切变形，其“销钉”抗剪效应显著，并对界面岩体产生挤压作用，岩体抗压强度远高于抗拉强度，故此时加锚节理岩体抗剪强度较高。

总体而言，与未加锚岩体相比，加锚节理岩体屈服强度和极限强度都有较大幅度提高，如图 10 所示。由加锚节理岩体剪力-位移曲线（见图 6）可知，节理岩体在不同锚固倾角作用下弹性段剪切刚

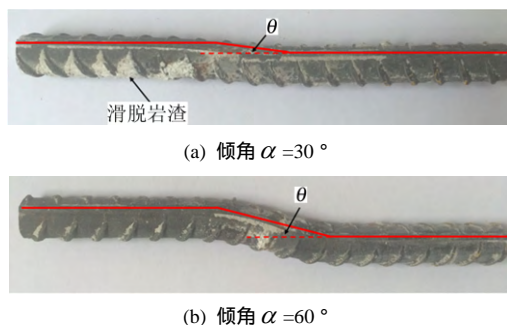


图 8 不同锚固倾角锚杆变形形态  
Fig.8 Deformation of anchor bolts with different anchorage angles

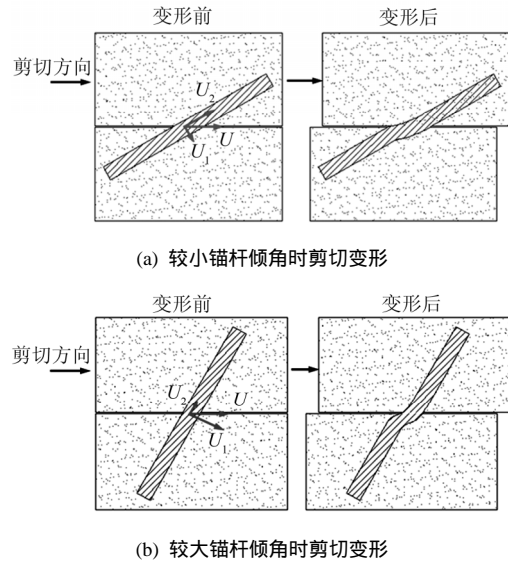


图 9 加锚节理岩体受剪示意图  
Fig.9 Shear sketch of anchored jointed rock mass

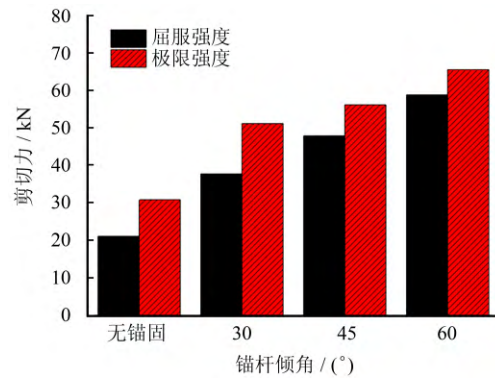


图 10 不同锚固倾角试件的屈服强度与极限强度  
Fig.10 Yield strengths and ultimate strengths of specimens with different anchor inclinations

度基本相同，说明不同的锚杆倾角主要影响节理岩体屈服阶段及塑性变形阶段的抗剪性能。不同锚杆倾角的节理岩体剪力-位移曲线走向趋势一致。

### 3.2 不同法向应力作用下剪切变形特性

加锚节理岩体切向剪力-位移特性受裂隙面法向应力影响较大<sup>[15]</sup>，为研究不同法向应力对加锚节理岩体切向变形特征的影响规律，设置了 3 组对比试验，法向应力分别为 1.6、2.4、4.0 MPa，锚杆锚固倾角为 90°，即垂直于节理面。试验结果与无锚杆情况下节理岩体剪切试验做对比，进而突显锚杆对节理岩体抗剪性能的影响。试验中所得的 3 组试件的剪力-位移曲线如图 11 所示，其强度参数见表 5。从图 11 中可以看出，锚杆倾角为 90° 时，3 组不同法向应力作用下的锚固节理岩体的剪力-位移曲线趋势基本一致，依然可分为弹性阶段、屈服阶段和塑性变形阶段。剪切位移初期，曲线为近乎直线的弹性阶段，3 组加锚节理岩体的剪切刚度基本

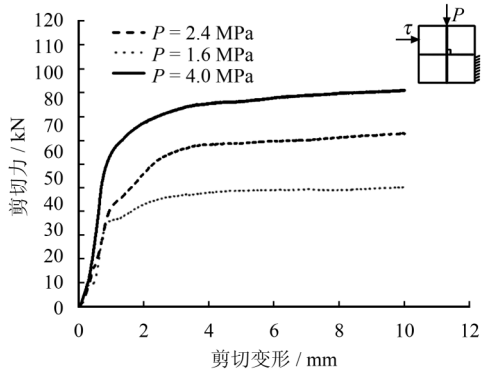


图 11 不同法向应力条件下试件的剪力-位移曲线  
Fig.11 Shear-displacement curves of specimens under different normal stresses

表 5 不同法向应力试件的强度参数

Table 5 Strength parameters of specimens under different normal stresses

工况	锚杆倾角 / (°)	法向应力 / MPa	屈服强度 / kN	剪切位移 / mm	极限强度 / kN
1	90	2.4	44.85	2.12	73.27
2	90	1.6	37.36	1.47	50.31
3	90	4.0	68.39	2.98	91.25
4	无锚杆	2.4	21.19	1.62	30.77
5	无锚杆	1.6	18.21	1.34	26.62
6	无锚杆	4.0	27.34	1.87	38.26

相同, 在经历大致相同的剪切位移后进入屈服阶段, 屈服强度不同, 与法向应力相关。不难发现, 3 组试件的剪切强度极限不同, 锚杆倾角相同的条件下加锚节理岩体剪切强度极限与裂隙面法向应力幅值近似成正比关系如图 12 所示, 可见法向应力不会改变加锚节理岩体弹性变形阶段的剪切刚度, 但会对试件整体的剪切强度极限产生较大影响。

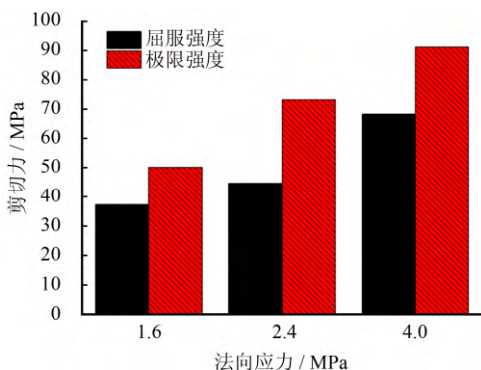


图 12 不同法向应力作用下的屈服强度与极限强度  
Fig.12 Yield strengths and ultimate strengths of specimens under different normal stresses

加锚节理岩体与未加锚节理岩体在不同节理面法向应力作用下对应的剪切强度见表 6。节理岩体抗剪强度符合摩尔-库仑强度准则, 即  $\tau = c +$

$\sigma \tan \phi$ 。由试验测得的数据拟合得出锚杆倾角为  $90^\circ$  和未锚固情况下节理岩体剪切强度与节理面法向应力之间的关系如图 13 所示。对比后不难发现, 加锚节理岩体拟合曲线的斜率及纵轴截距都大于未加锚情况, 说明锚杆对节理岩体抗剪强度的贡献显著, 能够有效地增加节理岩体的黏聚力与内摩擦角。

表 6 加锚试件法向应力与剪切强度关系

Table 6 Relationships between normal stress and shear strength of anchored specimen

试件	锚杆倾角 / (°)	法向应力 / MPa	剪切强度 / MPa
1	90	1.6	2.24
2	90	2.4	3.27
3	90	4.0	4.06
4	无锚杆	1.6	1.18
5	无锚杆	2.4	1.37
6	无锚杆	4.0	1.70

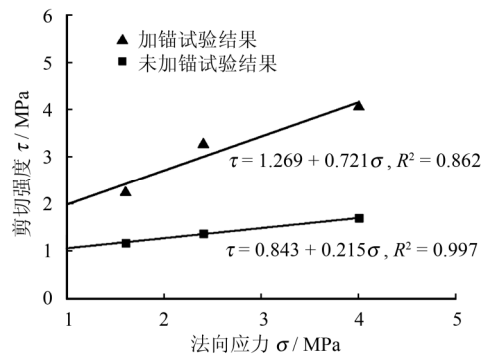


图 13 节理岩体剪切强度与法向应力的关系

Fig.13 Relationships between shear strength and normal stress of jointed rock mass

分析对比试验结果可知, 锚杆锚固能够显著改善节理岩体的切向力学特性, 节理面法向应力越大, 加锚节理岩体的抗剪强度越高。由于锚杆自身抗剪作用明显, 与未加锚岩体相比, 节理岩体施加锚杆后节理面剪切刚度增加, 剪切强度极限大幅提高。

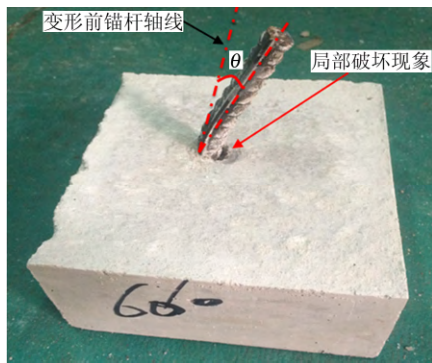
### 3.3 加锚节理岩体破坏形态分析

节理岩体施加锚杆后剪切刚度及强度皆有较大幅度增加, 二者的提高是以锚杆在剪切过程中发生屈服变形为前提, 分析剪切试验后锚杆及块体破坏变形形态, 有利于进一步理解加锚节理岩体抗剪作用机制。

剪切试验结束后, 取下试件, 将试件上盘敲碎, 露出变形后的锚杆及时间下盘, 见图 14(a), 锚杆由于剪切作用, 剪切角为  $\theta$ , 即锚杆轴线发生剪切偏移的角度。由图可知, 虽然加锚节理岩体经历了较大的剪切位移, 但锚杆与岩块之间仍然“粘结完好”, 未发生大范围的错动破坏, 仅在靠近节理面与锚杆

的交界处发生局部破坏现象，且锚杆的剪切变形也主要发生在节理面附近区段。经过量测得出，锚杆发生明显剪切变形的区段长度约为 3 倍锚杆直径，与已有研究结论有较好的一致性。

加锚节理岩体产生上述破坏形态的原因是试验机对加锚节理岩体施加水平剪切力，随剪切位移的增加，锚杆在节理面附近的区段(约 3 倍锚杆直径)发生剪切变形，锚杆和孔壁界面产生很大的挤压力，导致部分胶结料及孔壁被压碎，节理面附近发生局部破坏。分析锚杆的变形形态可知，加锚节理岩体发生失稳破坏时，锚杆会发生不同程度的近“S”形变形<sup>[16]</sup>，见图 14(b)，主要是由于水平剪切位移会产生平行锚杆轴线与垂直锚杆轴线两个方向的分量，使得锚杆杆体同时产生轴向变形与横向变形，锚杆轴向变形与横向变形叠加后，宏观表现为近“S”形变形。



(a) 锚杆-岩块界面变形形态



(b) 锚杆变形形态

图 14 加锚节理岩体破坏形态图

Fig.14 Damage morphology of anchoring jointed rock

分析加锚节理岩体的破坏形态特征可知，当锚杆倾角较小时，剪切过程中锚杆与岩体界面承受较大的拉拔作用，破坏形式通常是钻孔中的锚杆与岩体产生滑脱或拉剪破坏；当锚杆倾角较大时，剪切位移方向与锚杆轴线近乎垂直，随剪切位移增大，锚杆会发生明显的剪切变形，其“销钉”抗剪效应显著，并对界面岩体产生挤压作用，此时破坏形式通常是压剪破坏。

#### 4 加锚节理岩体抗剪作用机制

自然界中的节理岩体，当应力达到其峰值强度时岩体会首先沿节理面等结构弱面发生错动破坏，具有脆性破坏特征。由于锚杆本身的物理力学特性优于脆性的岩石材料，锚杆锚固能够显著地提高节理岩体的抗剪强度，改善节理岩体剪切变形特性。在节理岩体中施加锚杆的重要作用之一，是能够限制节理面发生过大的剪切错动，同时锚杆将节理面两侧的岩体紧固在一起，提高了节理岩体的整体性和稳定性。

对比分析加锚试件与未加锚试件剪切力-剪切变形曲线(见图 7)可知，由于锚杆材料的剪切模量远大于岩石材料的剪切模量，导致相同剪切位移条件下加锚试件的剪切力远大于无锚试件的剪切力。加锚节理岩体剪切位移初期，较小的剪切位移就调动了锚杆的抗剪能力，锚杆较好地发挥了“销钉”作用，此时锚杆与岩石基体共同抵抗水平剪切力，试件宏观表现为剪切力随剪切位移增加迅速增大，且曲线为近似弹性直线段。随试件剪切位移的增加，节理面附近锚杆发生较大剪切变形，锚杆与岩石界面产生较大的挤压力，达到岩石材料的强度极限，部分岩石发生挤压破碎(见图 15)，此时破碎岩体失去抗剪能力，锚杆成为剪切力的承载主体，该阶段表现为剪切力随剪切位移缓慢增加，剪力-位移曲线斜率降低。剪切位移继续增大，锚杆在较大的剪力作用下发生屈服，宏观表现为剪切力基本不变，剪切变形持续增大。

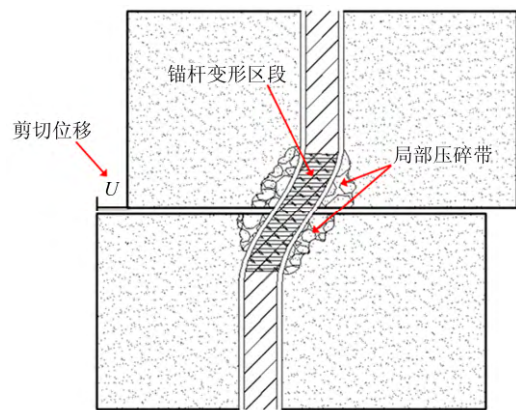


图 15 加锚节理岩体剪切变形示意图

Fig.15 Sketch of shear deformation of jointed rock mass

简而言之，加锚节理岩体由锚杆与岩石共同组成的锚固体承载剪切荷载，施加锚杆后节理面剪切强度在原有的黏聚力、摩擦力的基础上增加了锚杆的抗剪力，后者远大于前两者的总和。当剪切力达

到岩石的强度极限时,岩石发生破坏,锚杆作为承载主体依然可以承受较大的剪切荷载,且锚杆的剪切变形具有延性特征,故当节理岩体施加锚杆后不仅抗剪强度得到较大提高,而且变形破坏表现出延性特征。

## 5 结 论

(1) 不同锚杆倾角作用下加锚节理岩体直剪试验中的剪力-位移曲线可分为弹性阶段、屈服阶段和塑性变形阶段 3 个阶段。弹性阶段剪力增长较快、屈服阶段曲线斜率降低,剪力增加缓慢。塑性变形阶段剪力基本不变,位移持续增加。未加锚节理岩体的剪力-位移曲线分为弹性变形及塑性变形两个阶段,裂隙岩体在经历弹性变形之后直接进入塑性变形破坏阶段。

(2) 锚杆倾角对加锚节理岩体剪切变形特性具有较大影响。加锚节理岩体与未加锚岩体相比,剪切强度具有较大幅度提高,但锚杆倾角不同,提高幅度不同。一定范围内锚杆倾角越大,加锚节理岩体抗剪强度越高,较大的锚杆倾角有利于发挥锚杆的“销钉”抗剪效应。锚杆倾角不会改变加锚节理岩体弹性段剪切刚度,但对屈服阶段及塑性变形阶段的抗剪性能具有重大影响。不同锚杆倾角的加锚节理岩体,剪力-位移曲线走向趋势一致。

(3) 锚杆锚固能够有效增加节理面的黏聚力与内摩擦角。加锚节理岩体切向剪力-位移特性受节理面法向应力影响较大,不同法向应力作用下加锚节理岩体的剪切强度极限不同,法向应力越大,加锚节理岩体抗剪强度越高。节理面法向应力不会改变加锚节理岩体弹性段的剪切刚度,但会对其整体抗剪强度产生较大影响。

(4) 节理岩体施加锚杆后抗剪强度有较大幅度的增加,以锚杆在剪切过程中发生屈服变形为前提。水平剪切位移会产生平行锚杆轴线与垂直锚杆轴线两个方向的分量,使得锚杆杆体同时产生轴向变形与横向变形,锚杆轴向变形与横向变形叠加后,宏观表现为近“S”形变形。锚杆的剪切变形主要发生在节理面附近区段,长度约为 3~5 倍锚杆直径。剪切过程中岩体自身的挤压破碎也仅发生在锚杆与节理面交界处的局部范围内。

(5) 加锚节理岩体剪切位移初期,锚杆与岩石基体共同抵抗水平剪切力,剪切力达到岩石材料的强度极限时,节理面附近岩石发生挤压破碎,此时锚杆成为剪切力的承载主体,表现为剪切力随剪切位移缓慢增加。当锚杆在较大的剪切力作用下发生

屈服破坏后加锚节理岩体宏观表现为剪切力基本不变,剪切变形持续增大。

## 参 考 文 献

- [1] 李术才, 陈卫忠, 朱维申, 等. 加锚节理岩体裂纹扩展失稳的突变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1661 - 1666.  
LI Shu-cai, CHEN Wei-zhong, ZHU Wei-shen, et al. Catastrophe model of crack propagating in bolt-supported jointed rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(10): 1661 - 1666.
- [2] 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.
- [3] 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.  
CHEN An-min, GU Jin-cai, SHEN Jun, et al. Model testing research on the variation of tension force of anchor cable with time in reinforcement of soft rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(2): 251 - 256.
- [4] BJURSTRÖM S. Shear strength of hard rock joints reinforced by grouted un-tensioned bolts[C]// Proceedings of the 3rd International Congress on Rock Mechanics. Denver: [s. n.], 1974: 1194 - 1199.
- [5] HAAS C J. Shear resistance of rock bolts[J]. *AIME Transactions*, 1976, 260(1): 32 - 41.
- [6] YOSHINAKA R, SKAGUCHI S, SHIMIZU T, et al. Experimental study of the bolt reinforcement in discontinuous rock[C]//Proceeding of 6th International Conference on Rock Mechanics. Rotterdam: BALKEMA A A, 1987, 133(113): 117 - 127.
- [7] 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 - 209.
- [8] LI Xu-wei, AZIZ N, MIRZAGHORBANALI A, et al. Behavior of fiber glass bolts, rock bolts and cable bolts in shear[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(7): 2723 - 2735.
- [9] LI L, HAGAN P C, SAYDAM S, et al. Shear resistance contribution of support system in double shear test[J].



- Tunnelling and Underground Space Technology**, 2016, 56: 168 - 175.
- [10] CHEN Y. Experimental study and stress analysis of rock anchorage performance[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2014, 6: 428 - 437.
- [11] FERRERO A M. The shear strength of reinforced rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1995, 32(6): 590 - 600.
- [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 of the shear resistance behaviour of bolted rock joints[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1988, 10(1): 8 - 19.
- [13] 张治强, 张国, 赵赤云. 边坡预应力锚固结构的实验研究[J]. **东北大学学报**, 1999, 20(5): 536 - 539.  
ZHANG Zhi-qiang, ZHANG Guo, ZHAO Chi-yun. Experimental study on prestressly anchoring structure of slope[J]. **Journal of Northeastern University(Natural Science)**, 1999, 20(5): 536 - 539.
- [14] 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 pre-stressed anchor bolt based on shear test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(8): 2231 - 2240.
- [15] PELLET F, EGGER P. Analytical model for the mechanical behavior of bolted rock joints subjected to shearing[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1996, 29(2): 73 - 97.
- [16] CHEN G, CAI Y Q, LIU F Y, et al. Dynamic response of a pile in a transversely isotropic saturated soil to transient torsional loading[J]. **Computers and Geotechnics**, 2008, 35(2): 165 - 172.

### 城市地下综合体建设技术指南

著译者：徐日庆 版次：第一版 出版时间：2016-07 开本：小 16 开

出版单位：中国建筑工业出版社 装帧：平膜 标准书号：978-7-112-19444-5

【内容简介】本书系统地介绍城市地下综合体建设中涉及的基本理论、工程设计、施工和监测检测等方面。全书共有 10 章，包括绪论、地下水与土的工程性质、基坑工程设计与施工技术、盾构法隧道设计与施工技术、顶管法管道设计与施工技术、暗挖法通道设计与施工技术、地下工程地下水控制技术、综合体开发的监测技术、综合体开发环境效应与保护技术和工程实例。本书可供从事地下工程设计、施工及管理的工程技术人员以及高等院校相关专业的师生参考阅读。

【读者对象】本书可供从事地下工程设计、施工及管理的工程技术人员以及高等院校相关专业的师生参考阅读。

【目录】第 1 章 绪论；第 2 章 地下水与土的工程性质；第 3 章 基坑工程设计与施工技术；第 4 章 盾构法隧道设计与施工技术；第 5 章 顶管法管道设计与施工技术；第 6 章 暗挖法通道设计与施工技术；第 7 章 地下工程地下水控制技术；第 8 章 综合体开发的监测技术；第 9 章 综合体开发环境效应与保护技术；第 10 章 工程实例。

(信息来源：中国建筑书店网站)