

文章编号:0253-9993(2010)05-0729-05

岩体结构面锚固剪切特性的数值分析

王中文^{1,2},方建勤²

(1. 华中科技大学 土木工程与力学学院,湖北 武汉 430074;2. 广东省长大公路工程有限公司,广东 广州 510620)

摘要:为了探讨锚杆加固情况下,岩体结构面的力学和变形特征,利用数值分析方法建立结构面直剪三维计算模型,分别改变结构面的表面形态和锚杆倾角,分析其对于结构面强度和变形特征的影响,结果表明:结构面加锚后,剪切强度得到提高,并且等效黏结力的提高幅度较大;结构面起伏角为0时,锚杆倾角为15°对应的剪切强度最大;随着锚杆倾角的增大,试样的剪切强度逐渐减小;结构面起伏角为17°时,剪切强度最大值均出现在锚杆倾角为30~50°的范围内。

关键词:岩体;结构面;剪切强度;锚杆

中图分类号:TU457 **文献标志码:**A

Numerical analysis for the shear characteristic of structure plane reinforced by rock bolt in rock mass

WANG Zhong-wen^{1,2}, FANG Jian-qin²

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong Science and Technology University, Wuhan 430074, China; 2. Guangdong Changda Road Engineering Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: In order to study the mechanical and deformation characteristic of structure plane in rock mass, under the situation of reinforcing by bolt, the numerical analysis method was adopted. The three dimensional calculation model was founded for simulation the direct shear test of structure plane. The structure plane surface situation and bolt inclination were changed to study their effect to the strength and deformation characteristic of structure plane. The analysis results show that after reinforced by bolt, the shear strength of structure plane is improved, and the equivalent cohesion has the larger degree of improvement, and when the undulating angle of structure plane is 0, it will get its maximum shear strength when bolt angle is 15°, and then with the increase of bolt angle, the shear strength of structure plane reduces gradually, and when the undulating angle of structure plane is 17°, the shear strength of structure plane exist for the bolt angle in the range of 30~50°.

Key words: rock mass; structure plane; shear strength; bolt

结构面在岩土工程中广泛存在,破坏了岩体的连续性和完整性,使之具有不均一性和各向异性,并控制着岩体的稳定性,研究结构面的剪切强度和变形特征具有重要意义^[1]。许多学者通过人工制备不同起伏程度的结构面对其特性进行研究^[2-4],如蒋宇静等^[2]研究了不同接触状态下的岩石断裂节理试件剪切过程中力学性质的变化情况;李海波等^[3]利用锯齿状的混凝土岩石节理试样,研究不同剪切速率下各

种岩石节理起伏角度岩石节理的强度特征;杜守继等^[4]基于不规则的人工岩石节理经历不同剪切变形历史的剪切试验,分析了岩石节理剪切变形特性及与变形历史的依存关系。这些研究中的结构面主要处于原始状态,未进行加固处理;而实际工程中,设计者为了稳定岩体往往采用各种手段对其进行支护,其中,全长黏结式锚杆作为岩体的重要加固手段已得到广泛的运用;但是,锚杆加固情况下结构面的力学和

变形效应的研究还较少,主要是由于结构面锚杆加固模型制备条件的限制;而近年来,随着计算机技术的不断发展,采用数值模拟方法分析岩土工程问题成为新的趋势^[5-6],从而为结构面锚固特性研究开辟了新的道路。其中,快速拉格朗日元法(FLAC^{3D})适用于绝大多数的工程力学问题,尤其适用于材料弹塑性以及几何边界复杂情况的数值模拟^[7-9]。因此,本文拟采用FLAC^{3D}分析三维结构面试样与锚杆的耦合效应,研究不同表面形态和锚杆倾角对结构面强度和变形特征的影响。

1 计算模型

由于FLAC^{3D}在建模以及单元网格划分等前处理问题上存在一定困难^[10-12],因此,本文首先利用ANSYS建立数值模型,然后通过自编的ANSYS-FLAC^{3D}的转换程序,导入FLAC^{3D}进行计算。结构面试样模型尺寸为4 m×4 m×4 m,将结构面视为软弱结构面,其厚度为0.1 m;为了探讨不同几何形态结构面的特性,设置结构面起伏角 $\beta=0、17^\circ$,如图1所示,相应模型的节点数为1 951、1 673,单元数分别为9 420、7 485。

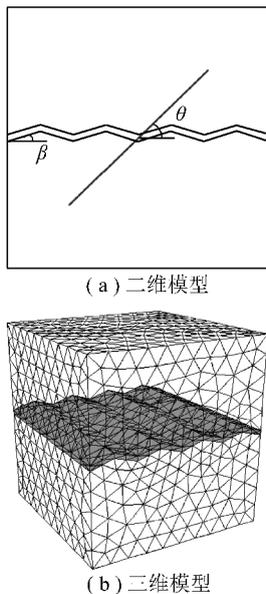


图1 数值计算模型

Fig. 1 Numerical calculation models

为了分析锚杆对于结构面剪切效应的影响,在结构面中央布置不同倾角的锚杆单元,岩体与锚杆的相互作用采用弹簧单元进行模拟,可分别考虑锚杆的轴向拉伸作用,轴向摩擦作用以及弯曲作用,具体单元性质见文献[9]。

模型的边界条件:底部固定约束,下部岩体的侧面分别约束水平方向的位移,模型上部为自由边界。

数值试验过程中,模型顶部加载法向应力,上部岩体的施加位移荷载,位移大小为 1×10^{-3} mm/计算时步,使其发生移动。

计算采用Mohr-Coulomb准则,岩体参数:弹性模量2.0 GPa,泊松比0.2,黏结力0.8 MPa,容重23.0 kN/m³,膨胀角32.0°,内摩擦角37.0°,抗拉强度0.4 MPa;结构面参数:弹性模量200 MPa,泊松比0.3,黏结力0.050 MPa,容重19.0 kN/m³,膨胀角20.0°,内摩擦角24.0°,抗拉强度0.05 MPa。锚杆长度3 m,倾角 θ 分别为15、30、45、60、75、90°。

2 分析与讨论

2.1 应力应变曲线特征

直剪试验过程中,在加锚和未加锚情况下,结构面的应力变形特征(图2)显示,二者剪应力-剪位移关系曲线在达到峰值前较为一致,为接近直线的试样弹性特征阶段;当曲线达到峰值后,则表现出较为不一致的特征:对于无锚状态的结构面,曲线峰值后表现为应变软化特征,随着剪切位移的增大剪切应力逐渐减小;当黏结键均受到破坏后,试样发生滑动,此时提供的抵抗力为结构面和上下岩体之间的相互摩擦,因此出现滑移曲线,即随着剪切位移的增加,试样的剪切应力基本保持不变,此时的剪切应力为试样的残余强度。而对于加锚状态下的结构面,曲线峰值后表现为应变强化特征,结构面的峰值剪切应力和峰值剪切强度得到一定提高。

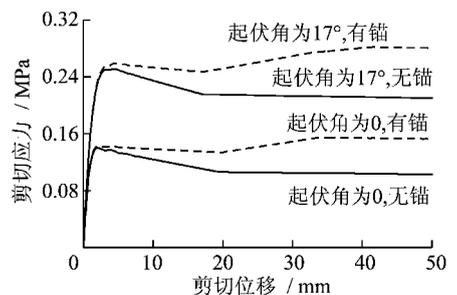


图2 有锚和无锚状态的应力应变关系对比
Fig. 2 Comparison of the stress-strain relationship of structure plane with and without bolt reinforcement

2.2 剪切强度特征

为了对比结构面加锚状态下的剪切强度的变化规律,记录不同结构面起伏角下(0、17°),结构面正应力和试样剪切强度之间的关系,如图3所示。

从图3中可以看出,结构面加锚后试样的剪切强度得到提高,并且试样剪切强度 τ_s 与结构面正应力 σ_n 之间呈现显著的线性关系,可用线性Mohr-Coulomb准则进行拟合,建立拟合方程,即

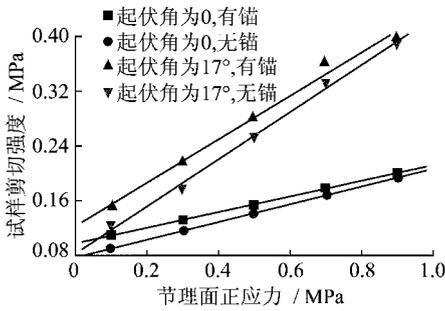


图3 有锚和无锚状态结构面的剪切强度对比
Fig.3 Comparison of shear strength for structure plane with and without bolt reinforcement

$$\tau_s = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (1)$$

式中, c 和 φ 分别为结构面的等效黏结力和内摩擦角。

通过曲线拟合得到表1。从表1可以看出,当起伏角为0和17°时,结构面加锚后主要提高结构面的等效黏结力,提高程度分别为26.82%和48.42%,而等效内摩擦角较加锚前略有降低;可见当结构面起伏角较小时,锚杆主要发挥拉拔作用,从而等效提高了结构面的黏结力。

2.3 锚杆倾角对剪切强度的影响

记录结构面起伏角为0时,不同锚杆倾角下试样

的剪切强度如图4所示。对于结构面起伏角为0的试样剪切试验,锚杆倾角为15°时对应的试样剪切强度最大;随着锚杆倾角的增大,试样的剪切强度呈现逐渐减小的趋势,并且曲线的斜率也逐渐减小;锚杆倾角位于15~30°时,曲线的斜率最大,继续增大锚杆倾角,曲线则变得较为平缓;这是由于锚杆倾角较小时,锚杆轴线与试样的滑移方向夹角较小,随着试样的滑移,锚杆的拉拔力得到充分发挥,而锚杆所受到的横向剪切力较小,不易破坏;随着锚杆倾角的增大,锚杆所受到的横向剪切力逐渐增大,在轴向拉拔力仍未得到充分发挥时,锚杆的横向剪切力即达到锚杆的横向剪切作用,使锚杆发生破坏,因此,对应锚杆倾角为90°时,试样的剪切强度最小。

表1 剪切强度拟合关系
Table 1 Fitting for the shear strength

起伏角	黏结力 c /MPa	拟合参数 $\tan \varphi$	内摩擦角 φ /(°)	相关系数 R
0,有锚	0.097 59	0.114 30	6.52	0.999 86
0,无锚	0.076 95	0.129 55	7.38	0.999 44
17°,有锚	0.122 64	0.317 15	17.59	0.994 38
17°,无锚	0.082 63	0.344 50	19.00	0.998 58

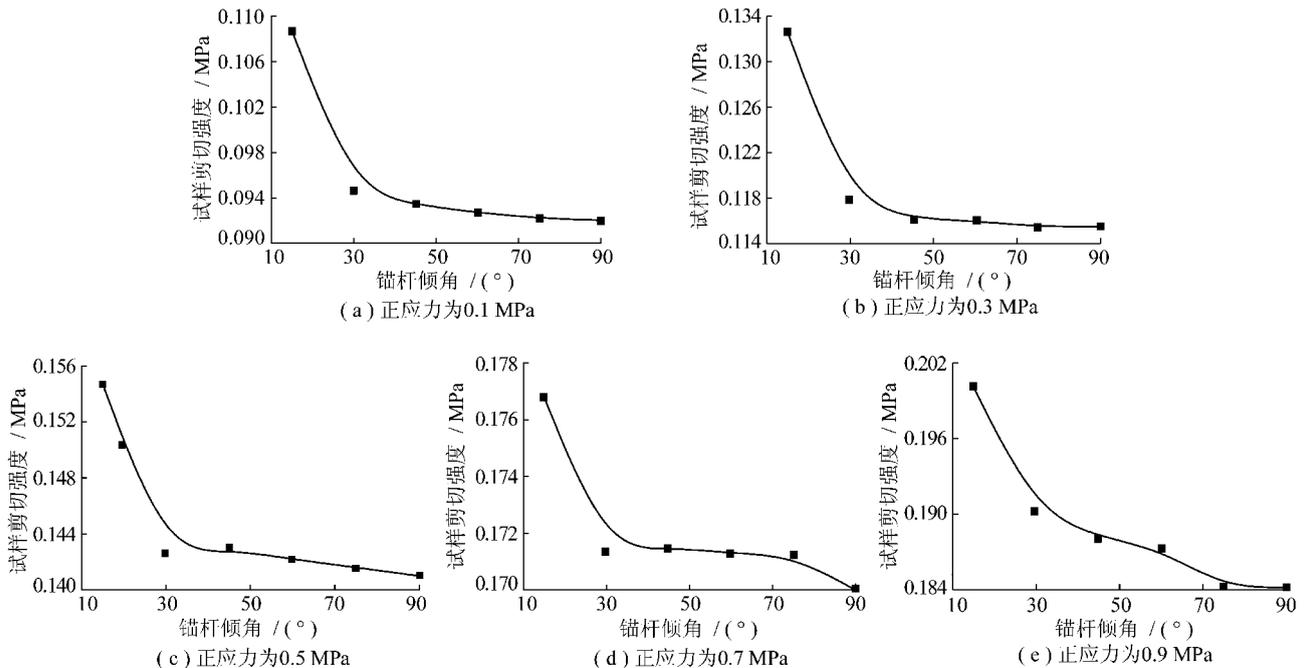


图4 结构面起伏角为0时不同正应力和锚杆倾角下试样的剪切强度

Fig.4 Shear strength for the 0 undulating angle of structure plane with different normal stress and bolt inclination

为进一步说明锚杆对结构面剪切强度的贡献,以试样正压力为0.1 MPa为例,记录试验过程中,锚杆的轴力和横向剪力的大小,见表2。

从表2可以看出,锚杆倾角较小时,锚杆轴力能够得到充分发挥,且锚杆横向剪力较小,此时锚杆的破坏形式主要为轴向的拉伸破坏;随着锚杆倾角的增

大,如锚杆倾角为 $60 \sim 90^\circ$ 的情况,锚杆轴力无法完全发挥,此时锚杆横向剪力逐渐增大,破坏形式主要为拉剪破坏。

表 2 结构面起伏角为 0° 时锚杆的受力情况

Table 2 Stress of bolt for 0° undulating angle of structure plane

锚杆倾角/ $^\circ$	锚杆轴力/kN	锚杆横向剪力/kN
15	1 228.00	0.45
30	1 228.10	2.97
45	1 227.90	6.19
60	1 228.00	8.96
75	968.82	11.13
90	534.37	12.55

对于结构面起伏角为 17° 的试样剪切试验如图 5 所示,其结果与结构面起伏角为 0° 时试样剪切试验的

结果并不相同,随着锚杆倾角的增大,试样剪切强度呈现先增大后减小的趋势,并且不同正应力下,剪切强度最大值均出现在锚杆倾角为 $30 \sim 50^\circ$ 的范围内;这是由于此时结构面的起伏角为 17° ,锚杆倾角为 15° ,上部试样受到结构面切向力和法向力的作用,其滑动方向与锚杆轴线方向成一定夹角(图 6(a)),锚杆轴力无法得到充分发挥;当锚杆倾角为 $30 \sim 50^\circ$ 时,其轴线与上部滑动试样的滑动方向基本平行(图 6(b)),从而使锚杆轴力得到最大发挥。

另外,随着结构面起伏角的增大,上部试样滑动方向逐渐发生逆时针旋转,因此,只有增大锚杆倾角才能够减小锚杆轴线与上部试样滑动方向之间的夹角,即起伏角越大时,试样剪切强度最大值对应的锚杆倾角也越大,当结构面起伏角为 17° ,剪切强度最大值均出现在锚杆倾角为 $30 \sim 50^\circ$ 的范围内。

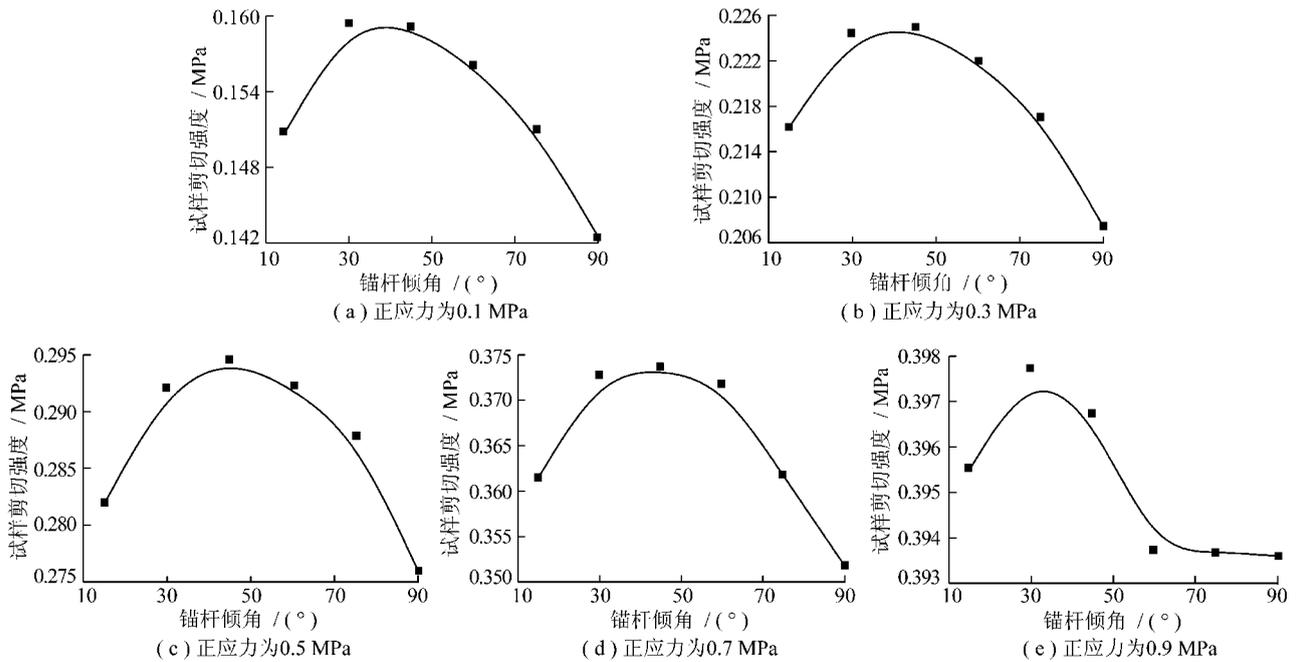


图 5 结构面起伏角为 17° 时不同正应力和锚杆倾角下试样的剪切强度

Fig. 5 Shear strength for the 17° undulating angle of structure plane with different normal stress and bolt inclination

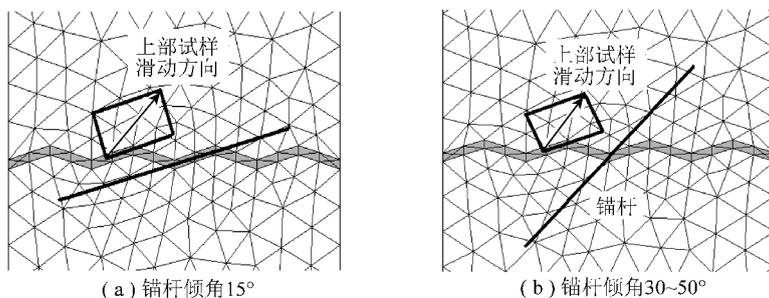


图 6 试样的滑动方向与锚杆轴线方向的关系

Fig. 6 Relationship between the slip direction and bolt axis

3 结 论

(1) 结构面加锚后,剪切强度得到提高,并且等效黏结力的提高幅度较大。

(2) 结构面起伏角为 0° 时,锚杆倾角为 15° 对应的剪切强度最大;随着锚杆倾角的增大,试样的剪切强度逐渐减小。

(3) 结构面起伏角为 17° 时,随着锚杆倾角的增大,试样剪切强度呈现先增大后减小的趋势,并且不同正应力下,剪切强度最大值均出现在锚杆倾角为 $30^\circ \sim 50^\circ$ 的范围内。

参考文献:

- [1] 白世伟,任伟中,丰定祥,等. 共面闭合断续节理岩体强度特性直剪试验研究[J]. 岩土力学,1999,20(2):10-16.
Bai Shiwei, Ren Weizhong, Feng Dingxiang, et al. Research on the strength behaviour of rock containing coplanar close in termittent Joints by direct shear test [J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20 (2):10-16.
- [2] 蒋宇静,王刚,李博,等. 岩石节理剪切渗流耦合试验及分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(11):2 254-2 259.
Jiang Yujing, Wang Gang, Li Bo, et al. Experimental study and analysis of shear-flow coupling behaviors of rock joints [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (11): 2 254-2 259.
- [3] 李海波,冯海鹏,刘博. 不同剪切速率下岩石节理的强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(12):2 435-2 440.
Li Haiibo, Feng Haipeng, Liu Bo. Study on strength behaviors of rock joints under different shearing deformation velocities [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (12): 2 435-2 440.
- [4] 杜守继,朱建栋,职洪涛. 岩石节理经历不同变形历史的剪切试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(1):56-60.
Du Shouji, Zhu Jiandong, Zhi Hongtao. Shear tests on rock joints under different shear deformation histories [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (1): 56-60.
- [5] Xu Guoyuan, Yan Changbin. Numerical simulation for influence of

- excavation and blasting vibration on stability of mined-out area [J]. Journal of Central South University of Technology, 2006, 13 (5): 577-583.
- [6] 林杭,曹平,李江腾,等. 基于广义Hoek-Brown准则的边坡安全系数间接解法[J]. 煤炭学报,2008,33(10):1 147-1 151.
Lin Hang, Cao Ping, Li Jiangteng, et al. The indirect calculation method for the safety factor of slope based on generalized Hoek-Brown criterion [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33 (10): 1 147-1 151.
- [7] 徐涛,唐春安,王述红,等. 岩石破裂过程围压效应的数值试验[J]. 中南大学学报(自然科学版),2004,35(5):840-844.
Xu Tao, Tang Chun'an, Wang Shuhong, et al. Numerical tests on confining pressure effect in rock failure process [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2004, 35 (5): 840-844.
- [8] Grasselli G. 3D Behaviour of bolted rock joints: experimental and numerical study [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2005, 42: 13-24.
- [9] Itasca Consulting Group. Theory and background [Z]. Minnesota: Itasca Consulting Group, 2002.
- [10] 林杭,曹平,李江腾,等. 基于SURPAC的FLAC^{3D}三维模型自动构建[J]. 中国矿业大学学报,2008,37(3):339-342.
Lin Hang, Cao Ping, Li Jiangteng, et al. Automatic generation of FLAC^{3D} model based on SURPAC [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37 (3): 339-342.
- [11] 罗周全,吴亚斌,刘晓明,等. 基于SURPAC的复杂地质体FLAC^{3D}模型生成技术[J]. 岩土力学,2008,29(5):1 334-1 338.
Luo Zhouquan, Wu Yabin, Liu Xiaoming, et al. FLAC^{3D} modeling for complex geologic body based on SURPAC [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (5): 1 334-1 338.
- [12] 廖秋林,曾钱帮,刘彤,等. 基于ANSYS平台复杂地质体FLAC^{3D}模型的自动生成[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(6):1 010-1 013.
Liao Qiulin, Zeng Qianbang, Liu Tong, et al. Automatic model generation of complex geologic body with FLAC^{3D} based on ANSYS platform [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (6): 1 010-1 013.