

DOI: 10.11779/CJGE201509011

加锚多组有序裂隙类岩体单轴破断试验分析

王平^{1, 2}, 冯涛^{2, 3}, 朱永建^{2, 3}, 余伟健^{2, 3}

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 湖南科技大学煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411201;

3. 湖南科技大学能源与安全工程学院, 湖南湘潭 411201)

摘要: 为研究锚杆对多组有序裂隙岩体的作用机制, 以水泥砂浆预制多组有序裂隙类岩体, 采用玻璃纤维塑料筋材(GFRP)模拟锚杆, 对预制的类岩体进行全长锚固, 制作多组不同锚固条件下的试件。将预制试件在 RMT-150 伺服试验机进行单轴压缩破断试验。根据试验结果提出了主控裂纹的概念, 认为主控裂纹的贯通导致了试件强度的弱化。分别从细观上研究了锚杆对多组有序裂隙类岩体主控裂纹的起裂、扩展和贯通影响机制; 从宏观上研究锚杆对多组有序裂隙岩体峰值强度、残余强度以及抗变形能力的影响。研究发现: 锚杆锚固后多组有序裂隙类岩体主控裂纹由纵向—倾斜—横向贯通为主的扩展、贯通模式转变为横向—纵向—倾斜的模式, 主控裂纹路径更长且贯通过程受到锚杆锚固限制, 具体表现为锚杆锚固改变了裂纹尖端的应力强度因子使得类岩体试件抗变形能力更大、试件的峰值强度和残余强度更高。但并非加锚密度越大, 类岩体强度越高, 适当的加锚密度才能获得更好的支护效果。

关键词: 加锚多组有序裂隙类岩体; 破断试验; 应力强度因子; 岩石力学

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)09-1644-09

作者简介: 王平 (1987-), 男, 博士研究生, 主要从事深井开采理论与技术研究工作。E-mail: 674053967@qq.com。

Fracture experiments on anchoring ordered multi-crack body in rock-like materials under uniaxial compression

WANG Ping^{1, 2}, FENG Tao^{2, 3}, ZHU Yong-jian^{2, 3}, YU Wei-jian^{2, 3}

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory

of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. School of Energy and

Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the anchoring mechanism of bolts on the ordered multi-crack body, the full-thread glass fiber reinforced plastic (GFRP) is taken as anchor bolts to fully grout the multi-crack body made from cement mortar to prefabricate test pieces under different anchor conditions. The fracture uniaxial compression tests on these pieces are performed using the RMT-150 servo testing machine. According to the results, the concept of the master crack is proposed, and it is recognized that the strength weakening of the ordered multi-crack body is caused by the perforation of master crack. The work mechanisms of the anchor bolts on the crack generation, expansion and perforation of multi-ordered crack rock-like body are studied from the microscopic aspect, and their effects on the peak strength, residual strength and deformation resistance are investigated from the macroscopic aspect. The result shows that the perforation pattern of the ordered multi-crack rock-like body is changed by the anchor bolts from the longitudinal-incline-horizontal pattern to the horizontal-longitudinal-incline one. The master cracks have longer perforation path and are limited by the anchor bolts. It is specifically indicated that the stress intensity factor of the pieces is changed, and the resistance to deformation, peak strength and residual strength are enhanced after anchored by bolts. However, it is not the situation that the more anchor bolts, the more strength of the ordered multi-crack rock-like body, that is, an appropriate density of anchor bolts will get a better support effect.

Key words: anchoring ordered-multi crack rock-like body; breaking test; stress intensity factor; rock mechanics

0 引言

在工程岩体中分布着许多节理、裂隙甚至断层, 它们控制着岩体的力学特性, 是影响工程失稳的重要因素。众多学者对此进行了深入研究。赵延林等^[1-2]

对压剪条件下含预制裂纹类岩体的流变断裂和裂纹亚

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51374106); 湖南省教育厅科学研究重点项目 (14A045); 湖南省煤矿安全开采技术重点实验室开放基金项目 (201404)

收稿日期: 2014-09-28

临界扩展进行了试验研究, 探讨了裂隙试件的变形破坏规律, 构建了流变断裂模型。此外, 他还提出主控岩桥贯通模式的概念等^[3], 并对类岩体的翼型断裂进行了数值模拟。黎立云等^[4-5]、车法星等^[6]对多裂纹类岩材料进行了大量单轴和双轴加载试验, 得出了类岩材料的宏观等效强度、等效弹模以及泊松比随裂纹倾角和裂纹密度的变化规律; 蒲成志等^[7]结合数值模拟研究了不同裂隙密度和倾角条件下多裂隙类岩石材料的单轴抗压强度变化发现: 裂隙倾角对类岩体强度的影响更大, 裂隙密度在裂隙倾角较小时对类岩体强度的改变更明显; 张平等^[8-10]对动载下2条、3条断续裂隙的贯通机制进行了研究, 构建了该类岩体的渐进破坏本构模型。总的来看, 针对加锚条件下裂隙岩体的细观裂纹扩展与宏观变形破坏的研究尚不多见, 裂隙岩体的锚杆锚固作用机制还没有统一的认识, 有限的研究也是基于一定的理论模型进行的分析^[11]。锚杆支护是地下工程应用最广泛的支护形式之一, 它能够显著改善岩体的力学特性, 提高岩体的强度和承载能力^[12]。GFRP 筋材是一种抗拉强度高、抗疲劳特性好、不易腐蚀的轻质新型锚杆材料, 近年来, 逐步应用地下工程岩体支护^[13]。鉴于节理、裂隙分布的多维性、随机性以及多变性, 很难采用现场原位分析法研究节锚杆对裂隙岩体力学性能影响。因此, 本文拟采用加锚预制含多组有序裂隙的类岩体试件, 通过试验室试验, 从锚杆限制预制裂隙岩体主控裂纹扩展的角度对锚杆的锚固作用进行深入分析。因此, 结合 GFRP 锚杆的工程特性, 研究不同锚固条件下多裂隙类岩体的细观裂纹扩展和宏观变形破坏, 以及在裂隙试件受载过程中锚杆的作用机制进行探讨, 对深部工程裂隙围岩控制具有一定的理论价值和实际意义。

1 试件制备及加载

1.1 试件制备及锚固方式

采用设计和研制的钢质模具制作试件, 试件净尺寸为: $280\text{ mm} \times 185\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 。采用薄铁片预制闭合穿透型裂隙, 裂隙尺寸: $50\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$, 裂隙倾角均为 45° 。为避免钻孔对试件强度的扰动影响, 在裂隙两侧预埋锚杆模拟全长砂浆锚固锚杆。在模具两侧设置对称小圆孔, 用于安装锚杆, 锚杆选用 GFRP 全螺纹筋材, 尺寸为 $\Phi 4.0\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 。考虑到试件的方便成型以及岩体特性的相似程度, 采用 C32.5 的普通硅酸盐水泥, 自来水以及粒径为 $0 \sim 0.84\text{ mm}$ 的黄砂配制试件, 材料配比为: 水: 水泥: 砂 = $1: 2.5: 4.5$ 。为研究锚杆对有序裂隙岩体的影响, 预制 3 条 $\times 5$ 排两种加锚裂隙类岩体试件。试验组分别安装

1, 2, 4, 6 根锚杆, 对比组不安装锚杆。总共设计有五组试验方案, 每组试件制备 3 个, 试件浇筑后振捣成型, 在常温且湿度大于 90% 的条件下养护试件超过 28 d 后进行加载试验。裂隙试件模型及锚杆布置见图 1 所示。

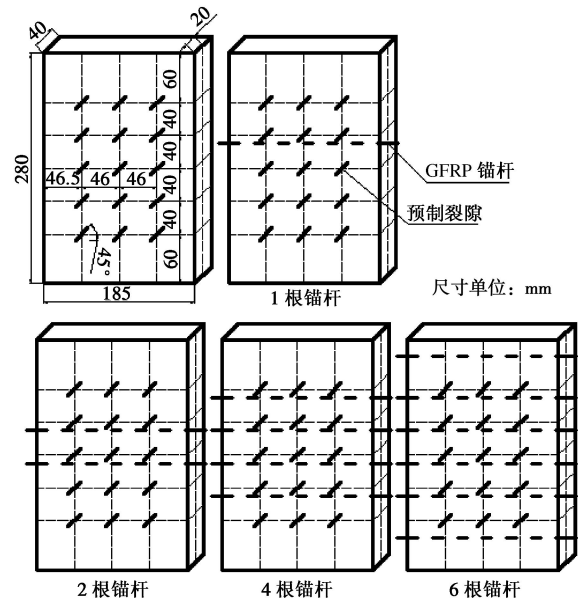


图 1 试验组模型

Fig. 1 Experimental models

1.2 加载方式

采用高精度的 RMT-150 岩石力学试验机进行单轴加载见图 2 所示。该试验机属于伺服试验机, 能够保证试验加载的稳定性和可靠性。剪切变形误差不超过 $\pm 0.5\%$, 垂直和横向位移误差不超过 $\pm 0.1\%$, 应力误差不超过 $\pm 0.2\%$ 。为达到静力加载, 采用速度为 0.01 mm/s 的位移加载。记录加载过程中试件纵向载荷、位移以及监测试件横向位移 (通过千分表), 设备自动绘制出试件的全应力 - 应变曲线。加载过程之前将试件受压两端打磨平整并加垫涂抹了黄油的橡胶垫以减小端部效应的影响。



图 2 RMT-150 岩石三轴试验机

Fig. 2 Rock triaxial testing machine RMT-150

2 对比组单轴加载试验

2.1 主控裂纹和次主控裂纹的概念

根据裂纹扩展与试件破坏之间的关系,通过观察总结了多组试验结果,提出主控裂纹的概念:即首先贯通整个试件,使试件失去最大承载力的一条或一组贯通性裂纹。主控裂纹的贯通直接导致了试件峰值强度的降低,主控裂纹贯通路径上岩体的强度和主控裂纹本身的强度是决定试件峰值强度的关键。处于主控裂纹贯通路径上的预制裂隙即为主控裂隙,主控裂隙控制和引导了主控裂纹的扩展路径。主控裂纹贯通后试件失去峰值强度进入强度弱化阶段,原主控裂纹和强度弱化阶段新产生的裂纹构成了次主控裂纹,即在试件的残余强度阶段对试件残余强度起控制作用的裂纹称为次主控裂纹。同样,次主控裂纹扩展路径上岩体的强度和裂纹本身的强度决定了试件的残余强度。

2.2 无锚试件主控裂纹的贯通规律

无锚单轴压缩条件下,试件裂纹以压剪复合裂纹扩展及劈裂拉伸裂纹扩展为主,裂纹贯通方式主要是排间纵向贯通和排间倾斜贯通,如图3所示。

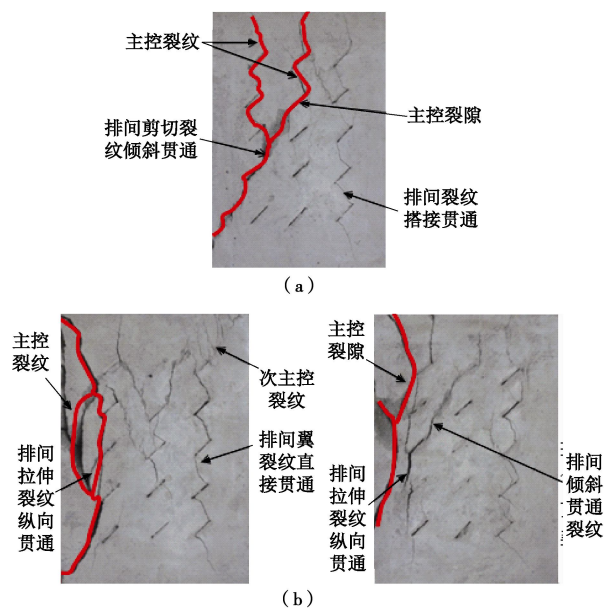


图3 无锚试验组加载

Fig. 3 Loading of test pieces without bolts

主控裂纹贯通过程:首先是右边裂隙尖端附近翼型拉裂纹起裂、扩展,在排间以剪切裂纹搭接贯通或翼型裂纹直接贯通形成纵向排间贯通裂纹。接着试件左侧产生排间倾斜压剪复合裂纹、劈裂拉伸裂纹与预制裂隙贯通并扩展至试件表面。由于排内裂纹间距较大且无侧向压力,没有出现排内裂纹的横向贯通。无锚试件破坏的主控裂纹分为两类:第一类以拉伸翼型裂纹+倾斜压剪裂纹为主,如图3(a)所示;第二类

以拉伸翼型裂纹+倾斜压剪裂纹+拉伸劈裂裂纹为主,如图3(b)。产生这种差异的原因在于裂隙间岩桥强度的差异,这与试件的制作有关,从同一组中试件的试验结果来看以第二类主控裂纹居多。加载过程中试件的横向变形明显,试件均是向左侧破坏甚至崩落,表明裂隙的倾角控制了试件的变形破坏方向。预制有序裂隙引导了裂纹扩展、贯通过程,预制裂隙的密度控制试件的峰值强度和残余强度。从试验结果来看,多组裂隙试件主控裂纹的贯通都是以左右两侧的预制裂隙处开始起裂、扩展并最终贯通。其原因在于在预制裂隙将整个试件在纵向上划分为“四根岩柱”,在横向没有约束的情况下两侧的“岩柱”横向弯曲鼓出,引起裂纹起裂扩展,同时在纵向的压应力作用下沿预制裂隙产生剪切裂纹起裂,这两类裂隙组合作用下形成了主控裂纹。在预制倾斜裂隙的作用下,裂隙试件左右两边的主控裂纹有所差异,左侧以拉伸劈裂裂纹为主,而右侧以压剪复合裂纹为主。

3 加锚试验组单轴加载

3.1 不同锚固条件下裂纹的贯通规律

多组有序裂隙试件在锚杆锚固之后,主控裂纹的起裂、扩展和贯通过程发生了变化,试件峰值强度、残余强度以及试件变形破坏形式也有所不同。不同锚固条件下多组有序裂隙试件的单轴破坏试验见图4。

如图4(a)、(b)和(c)所示,在单根锚杆锚固条件下,试件右侧裂隙翼型拉裂纹的纵向贯通受到限制,锚杆两侧的预制裂隙基本没有产生翼型拉裂纹,试件左侧产生倾斜裂纹贯通整个试件,在此过程中,右侧一系列裂隙逐渐产生翼型裂纹并贯通,中间裂隙产生逆倾向(预制裂隙倾向)倾斜裂纹贯通。主控裂纹为:倾斜压剪复合裂纹+逆倾向压剪裂纹+拉伸劈裂裂纹贯通。与无锚试件相比,主控裂纹横向发展,穿过整个试件,纵向拉伸劈裂裂纹受到限制,主控裂纹路径更长,试件强度更大。

如图4(d)、(e)和(f)所示,在两根锚杆锚固条件下,裂隙尖端拉伸翼型裂纹纵向贯通进一步受到限制,出现排内裂隙裂纹贯通。试件出现裂纹时间较晚,但贯通迅速,在主控裂纹贯通之后,其他裂隙端部产生翼型裂纹并贯通,试件鼓出现象明显,出现了裂纹不穿过锚杆的主控裂纹。主控裂纹为:压剪复合裂纹+拉伸翼型裂纹+拉伸劈裂裂纹贯通。

如图4(g)、(h)和(i)所示,在4根锚杆锚固下,锚固范围的进一步扩大,试件以压剪裂纹为主,接着是裂隙翼型裂纹产生并贯通,由于锚固范围增大,试件强度增加,试件的横向变形受到限制,正面鼓出

明显。主控裂纹为：压剪复合裂纹+拉伸翼型裂纹贯通。

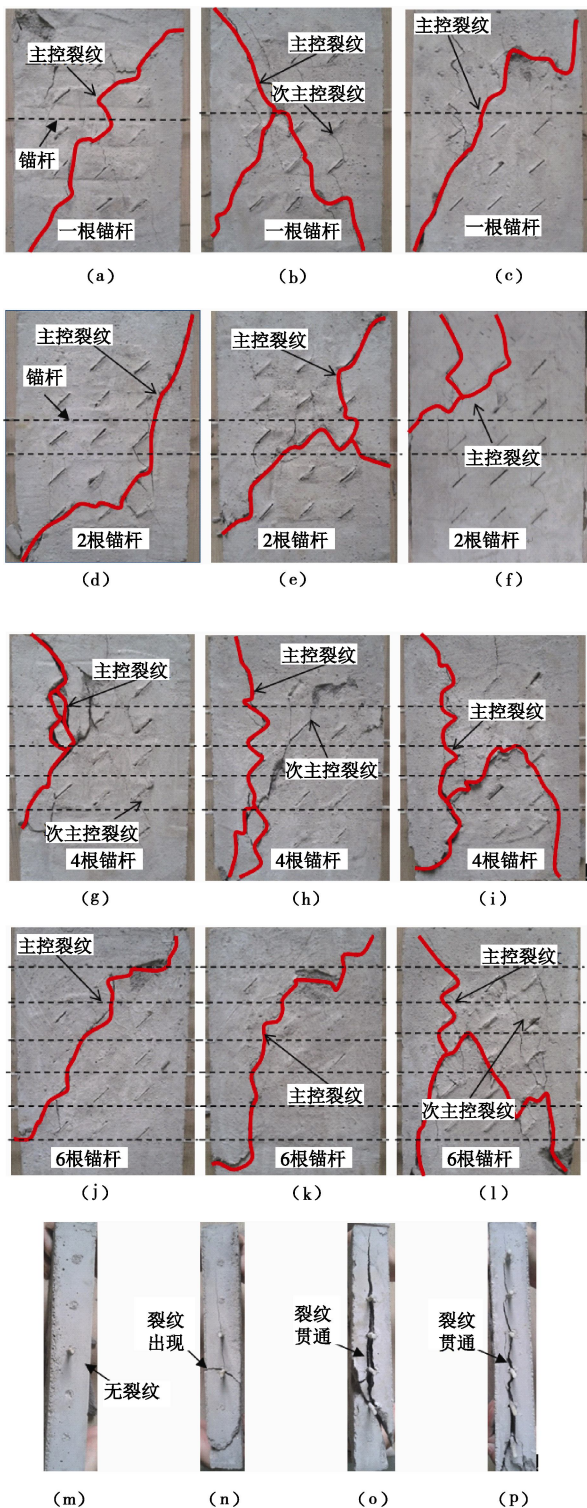


图4 不同加锚试验组加载

Fig. 4 Loading of test pieces with bolts

如图4(j)、(k)和(l)所示,在6根锚杆的锚固作用下,裂隙裂纹扩展与4根锚杆大致相同,均是以压剪裂纹为主,拉伸翼型裂纹和倾斜剪切裂纹贯通。但是在锚固范围进一步扩大的同时,锚杆孔的密度也

在逐渐增大,试件正面鼓出越加明显。主控裂纹为：压剪复合裂纹+拉伸翼型裂纹+剪切裂纹贯通。

如图4(m)、(n)、(o)、(p)所示,当只有1根锚杆时,试件的侧向没有开裂现象,试件的破坏均集中在试件的预制裂纹面;当有2根锚杆锚固时,试件开始出现侧向开裂破坏;当锚杆数量增加到4根和6根时,试件的侧向开裂破坏非常严重,产生纵向劈裂贯通。即随着锚杆数量的增加,试件的横向变形明显减小,锚固岩体正面鼓出现象越加明显。说明一定数量的锚杆虽能抑制主控裂纹,但锚杆数量过多,在没有水平方向约束条件下单轴加载,试件强度反而会减小,表现在试件侧面锚杆孔间裂纹贯通。

根据加锚裂隙试件试验结果可以看出试件加锚之后排间纵向裂纹贯通明显减少,排间倾斜裂纹贯通较多,甚至出现了排内裂纹横向贯通。主控裂纹的起裂和扩展时间明显滞后于无锚条件下的试件。无锚试件主控裂纹以压剪复合型裂纹和劈裂拉伸裂纹贯通为主,而加锚试件以拉伸翼型裂纹和压剪复合裂纹贯通为主。加锚之后主控裂纹的扩展方向和顺序也发生了改变,多组有序裂隙类岩体主控裂纹的贯通模式由纵向扩展到倾斜扩展再到横向贯通的纵向—倾斜—横向模式变为横向—纵向—倾斜的扩展贯通模式。主控裂纹向中部和右侧发展,路径长度更大,试件受预制裂隙控制的程度减弱,逐渐向完整岩体特性转变。相比无锚试件加锚试件的主控裂纹的贯通过程较为混乱,试件加锚后主控裂纹的纵向贯通过程被锚杆“切断”,迫使主控裂纹在无锚区域扩展,这与加锚之后试件各部分应力和变形的不均匀性以及试件在制作过程中本身的非均匀性有关。

3.2 锚杆对试件强度的影响

在试验过程中,各试验组内试件的强度基本吻合,试验组之间试件的强度有所差异。为排除试验的偶然性因素对试件强度的影响,现将各组试件强度的试验值取平均数,绘制强度—时间或者应力—应变曲线,如图5所示。

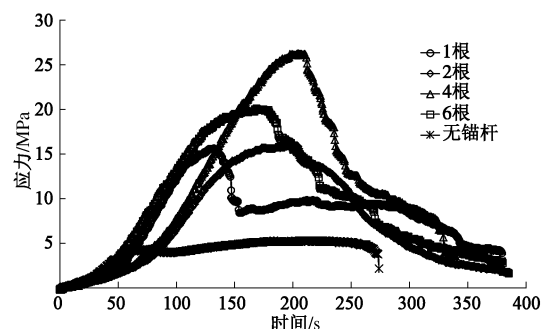


图5 各试验组强度曲线

Fig. 5 Strength curves of various test pieces

从强度曲线形态上看, 无锚试件强度较低, 呈平直状, 在加锚之后试件强度曲线与完整岩石试件的强度曲线相似, 很好地表现出裂隙弱化、锚杆强化围岩的过程。在单轴压缩条件下, 加锚试件和无锚固试件相比, 试件峰值强度普遍增大。在无锚条件下有序裂隙试件的峰值强度为 5.4266 MPa; 在加锚条件下, 1 根、2 根、4 根和 6 根锚杆锚固的裂隙试件峰值强度分别为: 15.7243, 16.1297, 26.386, 20.1743 MPa。相比于无锚固条件下试件的峰值强度分别提高了 189.76%, 252.52%, 386.24%, 271.77%。如图 6 所示。无锚条件下裂隙试件达到峰值强度的时间为 65.312 s, 在加锚条件下, 裂隙试件达到峰值强度的时间分别: 131.837, 203.177, 203.469, 168.469 s, 加锚之后试件达到峰值的时间分别延迟了 101.86%, 211.09%, 211.53%和 157.94%, 如图 6 所示。根据位移加载速度可得峰值强度时试件的压缩量, 见图 7。

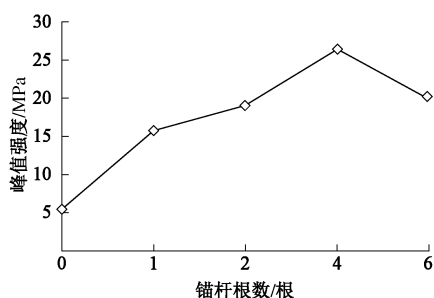


图 6 各试验组峰值强度

Fig. 6 The peak strength of each group

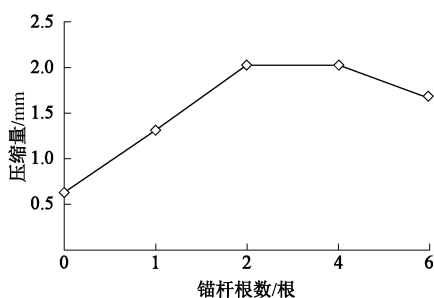


图 7 各试验组最大压缩量

Fig. 7 Maximum compressions of various pieces

不同加锚条件下试件峰值强度时的压缩量分别为: 0.7884, 1.495, 2.075, 2.025 mm 和 1.755 mm。

(注: 由于采用位移加载方式, 在一定的时间内试件加载方向的应变是相等的)。由图 6 和图 7 可以看出随着锚杆根数的增加多组有序裂隙试件的峰值强度先增大后略有减小, 在锚固 4 根锚杆时试件峰值强度最大; 试件达到峰值强度的时间和压缩量也是先增大后减小, 2 根锚杆时试件达到峰值强度的时间最长, 相应的压缩量也越大。

从工程上来讲, 锚杆越多锚固效果越好, 此处 6

根锚杆锚固试件出现强度和极限压缩量的减小, 主要原因在于本次试验采用的是单轴压缩, 而工程中大部分是双向受力, 一定程度上限制了岩体的横向变形。而且, 在一个水平方向上试件尺寸较小, 容易在该方向上鼓出破坏。说明一个问题, 锚杆由 4 根增加到 6 根, 岩体强度增加不明显, 且 6 根锚杆试件的主控裂纹开裂时间比 4 根锚杆锚固试件更早。因此, 可以推断在一定边界条件下的裂隙岩体并非锚杆越多锚固效果越好, 适当的锚杆数量才能达到最佳的锚固效果。

4 多组有序裂隙锚固机理分析

根据裂隙岩体受力条件建立力学模型如图 8 所示, 考虑到多组有序裂隙倾角均相同, 因此, 假设所有裂隙的远场应力分布均相同, 取其中一条裂隙进行力学分析。

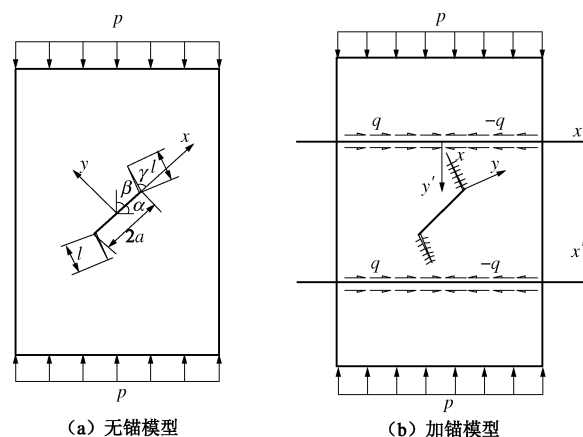


图 8 裂纹扩展力学模型

Fig. 8 Mechanical model for crack growth

通过应力分量的坐标变换得到裂隙岩体的远场应力为

$$\begin{cases} \sigma_x^\infty = p \cos^2 \beta \\ \sigma_y^\infty = p \sin^2 \beta \\ \tau_{xy}^\infty = p \sin \beta \cos \beta \end{cases} \quad (1)$$

由于裂纹面受压剪作用, 属于 II 型裂纹扩展问题, 裂纹表面会产生非均匀分布的摩擦力, 为简化计算, 认为该摩擦力服从莫尔-库仑准则有^[3]

$$\tau_f = f \sigma_y^\infty + c_f \quad (2)$$

式中, f 为裂纹表面摩擦系数, c_f 为裂纹表面黏聚力, 裂纹面上的等效剪应力为

$$\tau_e = \begin{cases} 0 & (\tau_{xy}^\infty \leq \tau_f) \\ \tau_{xy}^\infty - \tau_f & (\tau_{xy}^\infty > \tau_f) \end{cases} \quad (3)$$

裂隙端部裂纹扩展前的应力强度因子为^[14]

$$K_{II} = \tau_e \sqrt{\pi a} = (\tau_{xy}^\infty - \tau_f) \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

由式(1)~(3)可知当 $K_{II} \geq K_{IIc}$ 时 (K_{IIc} 为断裂韧度), 翼裂纹首先起裂扩展。裂纹起裂后的扩展过程中, 其起裂裂纹的受力状态变为了受拉应力状态, 应力强度因子也随之变化。翼型裂纹扩展 l 长度后, 其裂纹尖端强度因子变为 $K_I^1(l)$ [15]

$$K_I^1(l) = \frac{2a\tau_c \sin \gamma}{\sqrt{\pi(l+l^*)}} - \sigma_n' \sqrt{\pi l} \quad (5)$$

$$\sigma_n' = \frac{1}{2}[p + p \cos 2(\alpha + \gamma)] \quad (6)$$

式中 l 为翼型裂纹长度; $l^* = 0.27a$ 为引入的当量裂纹长度; σ_n' 为翼裂纹上的法向应力; α 为裂隙倾角; γ 为翼裂纹起裂角 (即: 裂纹的起裂方向与裂隙倾角方向之间的夹角, 根据最大周向应力理论 γ 可取 70.5°) [16]。

由于是多裂隙类岩体, 裂隙之间的相互作用引起的附加应力强度因子 $K_I^2(l)$ 为 [17]

$$K_I^2(l) = \sqrt{2} \sigma_1 a \gamma (l + a \gamma)^{\frac{1}{2}} \rho \cdot \left\{ \left[1 - \frac{2(l + a \gamma)^3 \rho \lambda}{a \gamma} \right] \cdot \left[1 - \frac{8(l + a \gamma)^3 \rho \lambda}{a \gamma} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中, $\lambda = 0$ 为侧压系数。因此, 扩展中的翼型裂纹尖端应力强度因子 $K_I'(l)$ 为

$$K_I'(l) = K_I^1(l) + K_I^2(l) \quad (8)$$

由式(5)~(8)可知在翼裂纹扩展过程中, 当 $K_I'(l) \geq K_{IIc}$ 时 (K_{IIc} 为断裂韧度) 裂纹持续扩展, 当 $K_I'(l) < K_{IIc}$ 裂纹停止扩展。

多组有序节理岩体在单轴压缩条件下的破坏是以主控裂纹的扩展、贯通表现出来。主控裂纹主要包括拉伸裂纹、压剪复合裂纹和剪切裂纹。因此, 本文重点分析锚杆对主控裂纹的扩展、贯通作用来分析锚杆的锚固作用机制。锚杆在单轴加载过程中, 在裂纹扩展穿过锚杆之前通过轴力在锚杆表面提供一定的横向剪切应力限制岩体横向变形。加锚后在起裂裂纹的解除面上产生一个附加应力场, 该附加应力场限制裂纹面的张开, 见图8(b)所示。锚杆的剪切作用力可等效为半平面边界上受切向均布剪应力的作用, 将锚杆对岩体的剪应力看作是微元体上的切向集中力, 结合边界条件可得到应力分量的塞如提 (Cerruti) 解 [18-19]。

$$\sigma_x = \sigma_p \sin^2 \varphi = 2q \cdot \frac{x^3 y}{(x^2 + y^2)^2} \quad (9)$$

式中, $(\rho^2 = x^2 + y^2)$ 。

代入式(6)得

$$\sigma_n'' = \frac{1}{2}[(p + \sigma_x) + (p + \sigma_x) \cos 2(\alpha + \gamma)] \quad (10)$$

代入式(5)得

$$K_I^1(l) = \frac{2a\tau_c \sin \gamma}{\sqrt{\pi(l+l^*)}} - \sigma_n'' \sqrt{\pi l} \quad (11)$$

结合式(7)、(8)和式(11)可以看出, 随着锚杆的剪应力的增加, 裂纹附加应力强度因子增加, 裂纹扩展受到限制。而锚杆剪应力随着岩体变形量的增大而呈指数形式增大, 因此, 可以预测随着岩体横向变形的增加, 锚杆的锚固效果越明显。

5 数值模拟

5.1 模型的建立及加载

为验证本次试验结果, 应用 FIAC^{3D} 软件对无锚和加锚情况下的多组有序裂隙类岩体进行数值模拟。根据试验试件实际尺寸, 首先采用 MATLAB 编程精确采集裂隙控制点的坐标, 然后将采集的控制点导入 ANSYS 中建立模型并合理划分网格, 使得裂隙周边网格相对较密, 利于分析裂隙周围裂纹的扩展和锚杆的锚固作用, 数值计算模型见图9所示。

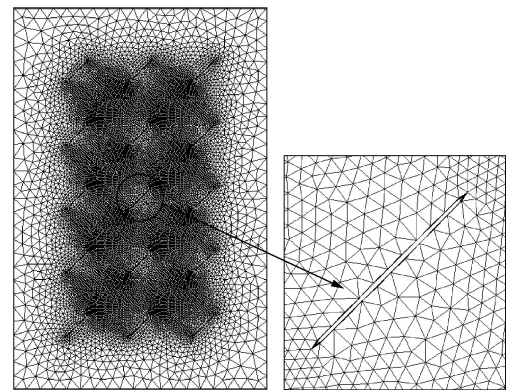


图9 数值计算模型

Fig. 9 Numerical model

然后, 将建立的模型导入 FIAC^{3D} 中并赋予相应的材料参数和边界条件之后加载。计算拟采用锚索单元模拟锚杆, 选用最能刻画试验材料特性的应变硬化/软化模型作为屈服准则, 根据试验实际设置计算边界条件, 试件顶部为位移边界、底部为固定边界, 试件前、后、左、右均为自由边界。采用位移加载, 为达到静力加载的目的, 加载速率控制在 2×10^{-7} m/s。此外, 根据试验所用水泥砂浆的配比和养护条件同时制作标准试件, 对试件材料参数进行测定, 计算参数见表1。

5.2 无锚多组有序裂隙试件的加载

根据前面的分析可知多组有序裂隙试件的破坏是以倾斜压剪复合裂纹+劈裂拉伸主控裂纹的贯通为主。FLAC^{3D} 是基于有限差分法的数值分析软件, 试件的开裂过程和破裂结果不能直接模拟。根据试验室试验结果和塑性区的数值模拟对比发现两者相关性很

表 1 数值模拟参数

Table 1 Parameters for numerical simulation

裂隙岩体	材料	弹模/GPa	泊松比 ν	内摩擦角/($^{\circ}$)	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa
	水泥砂浆	2.81	0.21	42	0.5	4.5
锚杆	材料	直径/mm	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹模/GPa	抗剪强度/MPa	抗拉强度/MPa
	GFRP	4	2.2	>40	>150	1500

好。因此，认为凡是超过抗拉、抗剪极限的塑性单元近似作为翼型裂纹的扩展轨迹。无锚和加锚多组有序裂隙试件主控裂纹的模拟结果见图 10 所示。

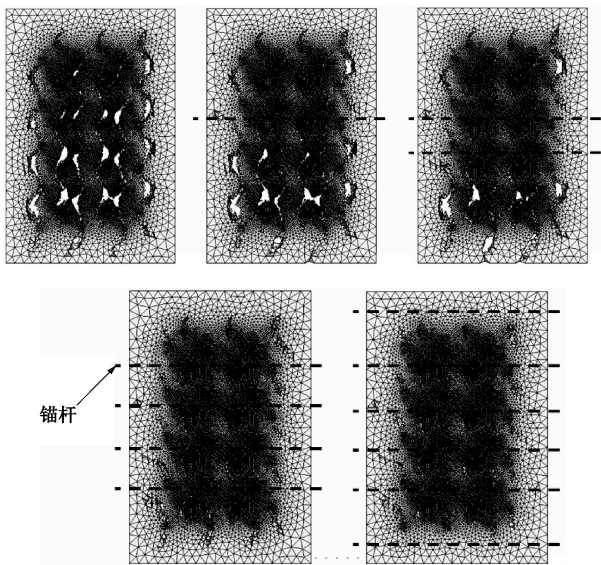


图 10 相同加载条件下各试验组试件的破裂

Fig. 10 Fraltures of various pieces under same loaded

根据图 10 可以看出，单轴加载时在预制裂隙尖端出现翼型裂纹扩展，并纵向贯通，同时，产生了倾斜剪切型裂纹并扩展，两种共同构成了试件强度弱化的主控裂纹。加锚之后，随着锚杆的增加，在相同的加载条件试件主控裂纹的扩展受到明显的遏制，围岩强度得到强化。对各组试件的横向变形进行了监测，结果见图 11 所示。

根据图 11 可以看出多组有序裂隙试件左侧上部横向变形大于左下部，而右侧下部横向变形大于上部，这与预制裂隙的倾角有关，这也是试验中主控裂纹首先在试件左上部产生贯通甚至崩裂的主要原因。此外，无锚试验组的横向变形最大，随着锚杆数量的增加，在多组有序裂隙试件的横向变形在逐渐减小，6 根锚杆试验组试件的横向变形最小，还可以看出在加锚的位置试件的横向变形明显减小，横向变形产生非均匀分布。加锚部位的横向变形减小，加锚试件的体积变形减小，且锚杆数量越多，体积变形越小，说明锚杆限制了试件的扩容，增大了试件的刚度和强度。但是试验结果表明试件的强度随着锚杆数量的增加呈现先

增加后减小的趋势，这说明锚杆并非是越多越好，存在着一个最优的支护密度。这也是工程中需对锚杆支护参数进行优化的原因。

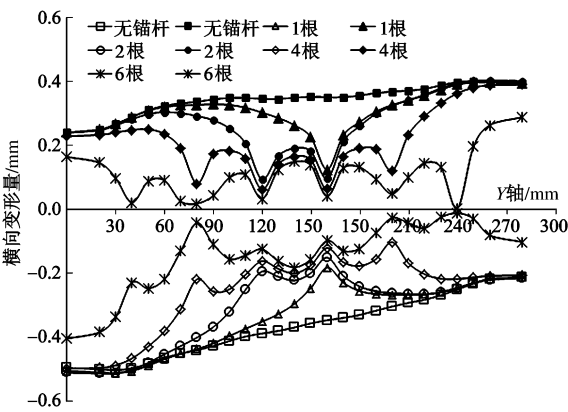


图 11 各组试件的横向变形值

Fig. 11 Values of lateral deformation of various test pieces

6 结 论

(1) 多组有序裂隙试件强度较低但变形能力较强，在加锚之后试件的抗变形能力显著增加，试件强度增加率随着锚杆数量的增加先增大后减小，锚杆数量和试件峰值强度之间存在一个最优值，本次试验条件下 4 根锚杆为最优。

(2) 提出了主控裂纹和次主控裂纹的概念，在单轴压缩条件下试件主控裂纹的贯通标志着试件进入峰后强度阶段。预制裂隙对主控裂纹的扩展贯通路径起到了引导和控制作用，使得试件的变形和破坏均具有方向性，裂隙的倾角是主要的控制因素。

(3) 多组有序裂隙试件在起裂之前，预制裂隙端部裂纹扩展属于Ⅱ型裂纹扩展，裂纹起裂后应力强度因子变为Ⅰ型和Ⅱ型的混合型裂纹扩展，考虑到锚杆和多裂隙之间的附加应力强度因子，得到了加锚之后主控裂纹的应力强度因子表达式。随着横向变形的增加，锚杆附加的应力强度因子呈指数形式增加，锚杆止裂效果明显。

(4) 多组有序裂隙试件加锚之后，能够有效地限制试件在单轴压缩下的横向扩容，提高试件的强度和刚度，但锚杆的限制范围有限，在实际工程中还需辅之以其他形式的支护，均匀地限制工程岩体的横向变

形。

参考文献:

- [1] 赵延林, 万 文, 王卫军, 等. 类岩石裂纹压剪流变断裂与亚临界扩展试验及破坏机制[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(6): 1050 - 1059. (ZHAO Yan-lin, WAN Wen, WANG Wei-jun, et al. Rheologic fracture failure test of compressive-shear rock-like cracks and subcritical crack propagation test and fracture mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(6): 1050 - 1059. (in Chinese))
- [2] 赵延林, 曹 平, 万 文, 等. 岩石裂纹亚临界扩展试验与压剪流变断裂模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, **45**(1): 276 - 286. (ZHAO Yan-lin, CAO Ping, WAN Wen, et al. Rock cracks subcritical propagation test and compression-shear rheological fracture model[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, **45**(1): 276 - 286. (in Chinese))
- [3] 赵延林, 万 文, 王卫军, 等. 类岩石材料有序多裂纹体单轴压缩破断试验与翼形断裂数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(11): 2097 - 2108. (ZHAO Yan-lin, WAN Wen, WANG Wei-jun, et al. Fracture experiments on ordered multi-crack body in rock-like materials under uniaxial compression and numerical simulation of wing cracks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(11): 2097 - 2108. (in Chinese))
- [4] 黎立云, 车法星, 卢晋福, 等. 单压下类岩材料有序多裂纹体的宏观力学性能[J]. 北京科技大学学报, 2001, **23**(3): 199 - 203. (LI Li-yun, CHE Fa-xing, LU Jin-fu, et al. Macro-mechanical properties of regular cracks body in rock-like materials under uniaxial compression[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2001, **23**(3): 199 - 203. (in Chinese))
- [5] 黎立云, 刘大安, 史孝群, 等. 多裂纹类岩体的双压试验与正交各向异性本构关系[J]. 中国有色金属学报, 2002, **12**(1): 165 - 170. (LI Li-yun, LIU Da-an, SHI Xiao-qun, et al. Biaxial compression experiments and orthotropic constitutive relationship for regular cracks in replicated rock mass[J]. The Chinese Journal of nonferrous Metals, 2002, **12**(1): 165 - 170. (in Chinese))
- [6] 车法星, 黎立云, 刘大安. 类岩材料多裂纹体断裂破坏试验及有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(3): 295 - 298. (CHE Fa-xing, LI Li-yun, LIU Da-an. Fracture experiments and finite element analysis for multi-cracks body of rock-like material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(3): 295 - 298. (in Chinese))
- [7] 蒲成志, 曹 平, 赵延林, 等. 单轴压缩下多裂隙类岩石材料强度试验与数值分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(11): 3661 - 3666. (PU Cheng-zhi, CAO Ping, ZHAO Yan-lin. Numerical analysis and strength experiment of rock-like materials with multi-fissures under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(11): 3661 - 3666. (in Chinese))
- [8] 张 平, 李 宁, 贺若兰, 等. 动载下两条断续预制力学贯通机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(6): 1211 - 1217. (ZHANG Ping, LI Ning, HE Ruo-lan, et al. Mechanism of fracture coalescence between two pre-existing flaws under dynamic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(6): 1211 - 1217. (in Chinese))
- [9] 张 平, 李 宁, 贺若兰, 等. 动载下 3 条断续裂隙岩样的裂缝贯通机制[J]. 岩土力学, 2006, **27**(9): 1457 - 1464. (ZHANG Ping, LI Ning, HE Ruo-lan, et al. Fracture coalescence mechanism of three-intermittent-flaws rock specimen under dynamic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(9): 1457 - 1464. (in Chinese))
- [10] 张 平, 李 宁, 贺若兰. 含裂隙类岩石材料的局部化渐进破损模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(10): 2043 - 2050. (ZHANG Ping, LI Ning, HE Ruo-lan. Research on localized progressive damage model for fractured rocklike materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(10): 2043 - 2050. (in Chinese))
- [11] 张 宁, 李术才, 吕爱钟, 等. 拉伸条件下锚杆对含表面裂隙类岩石试样加固效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(5): 769 - 776. (ZHANG Ning, LI Shu-cai, LÜ Ai-zhong, et al. Experimental study on reinforced effect of bolts on 3D surface fractured rock under uniaxial tension[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(5): 769 - 776. (in Chinese))
- [12] 侯朝炯, 勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(2): 342 - 345. (HOU Chao-jiong, GOU Pan-feng. Mechanism study on strength enhancement for the rocks surrounding roadway supported by bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(2): 342 - 345. (in Chinese))
- [13] 刘颖浩, 袁 勇. 全螺纹 GFRP 黏结型锚杆锚固性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(2): 394 - 400. (LIU Yin-hao, YUAN Yong. Experimental research on anchorage performance of full-thread GFRP anchor bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(2): 394 - 400. (in Chinese))
- [14] 李世愚, 和泰名, 尹祥础. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010. (LI Shi-yu, HE Tai-ming,

- YIN Xiang-chu. Introduction of rock fracture mechanics[M]. Hefei: China University of Technology Press, 2010. (in Chinese))
- [15] HORII H, NEMAT-NASSER S. Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, **90**(B4): 3015 – 3125.
- [16] ASHBY M F, HALLAN S D. The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states[J]. *Acta Metall*, 1986, **34**(3): 497 – 510.
- [17] ASHBY M F, HALLAM S D. The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states[J]. *Acta Metall*, 1986, **34**(3): 497 – 510.
- [18] ZHU Y J, CHEN C Y, WANG P. Effective anchorage radius of full-size anchored bolt research[J]. *Electronis Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **19**(B): 327 – 340.
- [19] 尤春安, 高明, 张利民, 等. 锚固体应力分布的试验研究[J]. *岩土力学*, 2004, **25**(增刊 1): 63 – 66. (YOU Chun-an, GAO Ming, ZHANG Li-min, et al. Experimental research on stress distribution in anchorage body[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(S1): 63 – 66. (in Chinese))

3rd International Conference on Transportation Geotechnics Call for Abstracts

Chairman address

The Transportation Geotechnics International Conference series began under the auspices of ISSMGE-TC3 and was initiated in 2008 at the University of Nottingham, UK, as an international event designed to address the growing requirements of infrastructure for societies. The 2nd International Conference on Transportation Geotechnics took place in 2012, at Sapporo, Japan, under the ISSMGELTC202 that follows the TC3 activities for the period 2009L2013. To continue the success of these conferences and the output of ISSMGELTC202, the 3rd was scheduled for 2016, at Guimarães, Portugal. Following the previous one, the challenges addressed by this conference will include a better understanding of the interactions of geotechnics on roads, rails, airports, harbours and other ground transportation infrastructure with the goal of providing safe, economic, environmental, reliable and sustainable infrastructures. The 3rd ICTG will be composed of workshops and several types of sessions, as well as a technical exhibition, for better disseminations of findings and best practices. A special attention will be paid to the publication of all the peer review papers. All accepted papers will be published by Elsevier as a *Procedia*, part of the Science Direct electronic service, and available without charge to users. The conference proceedings will be submitted to be indexed by Scopus and ISI Thomson Reuters Conference Proceedings Citation Index. On behalf of the organizing committee I am Honoured to invite you to the 3rd ICTG in the City of Guimarães, UNESCO World Heritage (Setember 4-7, 2016).

Who should attend

The 3rd ICTG is open to researchers, academics and students; engineers; planning, design construction and management engineering companies; decision makers; transport infrastructures

managers; owners and governmental bodies.

Important dates

March, 2015: Call for abstracts; May 15, 2015: Deadline abstract submission; June 12, 2015: Notify authors of accepted abstracts; Submission of papers: After abstract acceptance; November 6, 2015: Deadline paper submission; February 26, 2016: Notify authors of accepted papers; March 25, 2016: Submission of final camera-ready papers.

Conference themes

Theme 01: Optimized geomaterial (including hydraulically bound materials and asphalt mixtures) use, reuse and recycling; Theme 02: Unsaturated soil mechanics in transportation geotechnics; Theme 03: Earthworks design, technology and management; Theme 04: Slope stability, stabilisation, and asset management; Theme 05: Mechanistic-empirical design (road, railways and airfields); Theme 06: Rail track substructures, including transition zones; Theme 07: Subsurface sensing for transportation infrastructure; Theme 08: Macro and Nanotechnology applied to transportation geotechnics; Theme 09: Effect of climate change; Theme 10: Sustainability in transportaion geotechnics; Theme 11: Case histories.

Workshops themes

Workshop 01: Geosynthetics in transportation geotechnics; Workshop 02: Harbour geotechnics; Workshop 03: Non destructive technologies; Workshop 04: Ground improvement and soil stabilization.

Contact: 3rd ICTG Secretariat; University of Minho – School of Engineering; Campus de Azurém, 4800I058 Guimarães – PORTUGAL Tel.: (+351)253510218; Fax: (+351) 253510217; e-mail: 3ictgeo2016@civil.uminho.pt.