

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.03.008

固结煤矸石抗剪强度特征试验

李东升^{1,2,3}, 刘东升³

(1.重庆大学 a.土木工程学院;b.山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400045;

2.重庆市地质矿产勘察开发局,重庆 400039)

摘要:依据现场大型剪切试验和室内直剪试验,研究了固结煤矸石的抗剪强度特性。试验剪应力—剪位移过程曲线表明,一定含水率条件下的固结煤矸石呈现明显的粘塑性体力学特性。以现场大型剪切试验煤矸石作为试样配料进行了室内直剪试验,分析了含水率和密实度对良好固结煤矸石试样剪应力—剪位移试验曲线以及抗剪强度参数的影响,在此基础上探讨了试样内煤及其它细颗粒的状态变化对固结煤矸石抗剪强度的弱化作用机理,最后对比分析了现场大型剪切试验抗剪强度参数值和室内直剪试验抗剪强度参数值的差异及其产生的主要原因。

关键词:矸石;固结;抗剪强度;直剪试验;含水率

中图分类号:TU485

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2015)03-0059-08

Experimental research on the shear strength of consolidation gangue

LI Dongsheng^{1a,1b}, LIU Dongsheng²

(1a.College of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R.China; 2. Chongqing Institute of Geology & Mineral Resources Survey, Chongqing 400039, P.R.China)

Abstract: According to in-situ direct shear test and indoor direct shear test, the shear strength features of solidification gangues are researched. The experimental curve of shearing strength-shearing displacement shows that with the increase of the moisture content of the sample, the solidification gangue sample has shown obvious characteristics of viscoplastic body. Based on the on-site sieve grading of gangue samples, the moisture content and compactness of samples are adjusted to determine the influence of the changes on the shear strength of solidification gangue, and meanwhile the influence mechanism of the fine particle states changes on the shearing strength of solidification gangues is under research. The last, by the comparison of the shear strength test parameters of in-situ direct shear test and indoor direct shear test of gangue samples, the main causes of differences in shear strength parameters of consolidation gangue samples is analyzed.

Key words: gangue; consolidation; shear strength; direct shear test; moisture content

煤矸石是煤炭开采、洗选加工过程中的废弃物,也是我国排放及积存量最大、占用堆积场地最多的矿业废弃物。就重庆地区而言,现有较大规模矿山废渣堆放点 2 741 处,年排放量为 $1\ 507.97 \times 10^4$ t,累计积存量已达 $37\ 277.08 \times 10^4$ t,存量巨大。同时,由于重庆地跨川、鄂低山峡谷和川东平行岭谷低山丘陵区,北靠大巴山麓,南依云贵高原北缘,区域地形地貌复杂,制约了煤矸石山的堆积形态,使得重庆煤矸石山堆积类型以单

收稿日期:2014-12-17

基金项目:中央高校基本科研业务费(CDJZR12200009)。

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities.

作者简介:李东升(1979-),男,重庆大学博士,副教授,从事岩土工程减灾的研究,(E-mail) lids@cqu.edu.cn。

面靠山堆积、山间开阔地堆积、沟谷地内填筑、低洼地内填充以及老矸石山上续堆为主,形式更为复杂。加之煤矸石山在排放时多采用重力倾矸,煤矸石自身结构相对疏松,稳定性较差,当堆积高度过高,受暴雨侵蚀时易形成坍塌滑坡重力灾害。近年来,重庆市发生较大规模的矿山地质灾害就有 254 起,如 2002 年“五一”期间永荣矿区韦家沟煤矸石山滑坡灾害以及 2004 年 6 月 5 日万盛东林煤矿矸石山垮塌地质灾害等。

而煤矸石物质构成较为复杂,其软硬岩混杂并普遍含有煤和一定量的胶体成分^[1],在堆放成山后自重固结,经长期物理化学影响后,煤矸石表现出不同于一般粗粒土散体材料的力学特性。而目前关于煤矸石力学特性的研究由于受到煤矸石综合利用技术的影响,更多的集中在煤矸石作为工程及井下填充料的压实特性的研究上^[2-6],主要关注煤矸石级配与其强度变形特性的关系^[7-14],也有部分研究从理论上对煤矸石山强度破坏模型进行了相关分析,但有关煤矸石自身强度破坏特性的试验研究相对较少,其中臧亚军等^[15]通过现场大型剪切试验、推剪试验研究了矸石山体的抗剪特性,分析了矸石山不同部位的抗剪强度特性。段巍等^[16]基于二维颗粒离散元模拟了煤矸石现场推剪试验的推力-位移曲线,从细观力学角度验证了推剪试验中矸石颗粒的运动规律。

因此,针对煤矸石山工程治理的现实需要,文中特别选取良好固结煤矸石作为试验对象开展现场大型剪切试验和室内直剪试验研究,讨论分析堆载固结后煤矸石的力学特性,为煤矸石山地质灾害的治理提供依据。

1 现场直剪试验与成果

现场大型剪切试验试坑开挖位于重庆中梁山南矿煤矸石山西 261°坡中平台部位,其上最高堆放矸石高度 15 m 左右,后因综合利用被清除,堆积年限在 25 年左右,如图 1 所示。

1.1 试验设备及安装

现场大型剪切试验法向荷载系统包括千斤顶、油泵、钢垫板、压力表、滚轴排和传力筒。剪切荷载系统包括千斤顶、前后座钢垫板和传力筒。测量系统则由大量程百分表以及磁力表座组成。

法向系统安装:在制备完成的试样顶部铺一层矸石细颗粒并找平,使其与预定剪切面平行,辅上钢垫板后在其上依次安放滚轴排、垫板及千斤顶,安装时确保法向合力通过剪切面中心,同时安装大量程百分表测定试样的法向变形。水平系统安装:将水平千斤顶放置于水平顶槽内,确保千斤顶轴线平行于预定剪切面,并与剪切面距离不大于试样边长的 5%。同时沿剪切方向在试样两侧各布置一水平向大量程百分表以测读试样的剪切位移,并确保试验过程中水平推力平行于预定剪切面,磁力表座安装时避开剪切时的应力影响区。现场大型剪切试验法向应力由垂直向液压千斤顶提供,反力装置由钢梁及上载沙袋组成;剪应力采用试坑后壁煤矸石加垫钢板提供水平向液压千斤顶反力加载,现场大型剪切试验布置如图 2 所示。

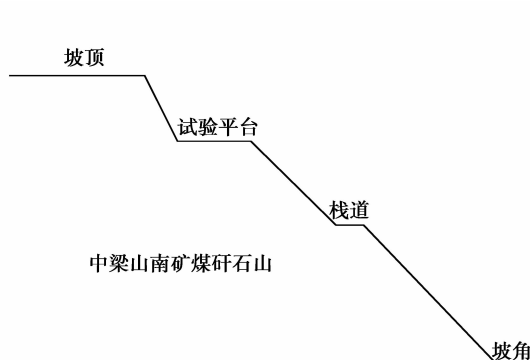


图 1 现场大型剪切试验试坑位置图

Fig.1 Location of gangue field direct shear test

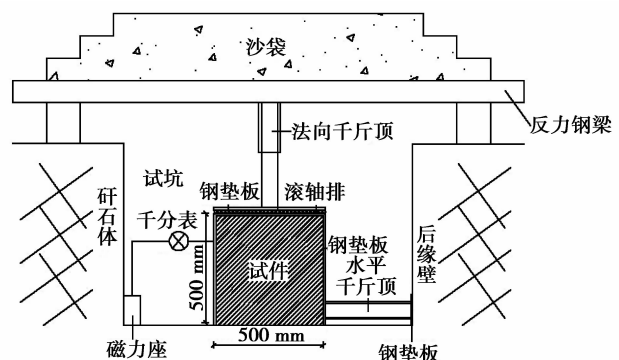


图 2 现场大型剪切试验布置图

Fig.2 Plan of field shear test

1.2 试验方法

试验参照水利水电工程粗粒土试验规程(DL/T 5356—2006)相关要求,采用应力控制的平推法。开挖试坑制备试样时注意避免对试样的扰动,制备完成后清除试样周围的浮土,并将剪切盒与试样间的间隙

用开挖出的矸石细颗粒填实,试样尺寸为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 。

试验时,法向荷载一次施加压力完毕,并在试验过程中通过调节法向千斤顶保持垂直荷载恒定。剪切荷载按预估最大剪切荷载分 8~10 级分级施加。当剪切荷载出现峰值,峰值剪切荷载即为试样破坏值并应继续试验至位移达到试样边长的 10% 结束试验。当剪切荷载无峰值,剪切位移达到试样边长的 10% 时的剪切荷载即为试样破坏值,具体现场大型剪切试验如图 3 所示。

1.3 试验曲线及数据

现场大型剪切试验剪应力-剪位移曲线如图 4 所示。



图 3 现场大型剪切试验

Fig.3 Field shear test

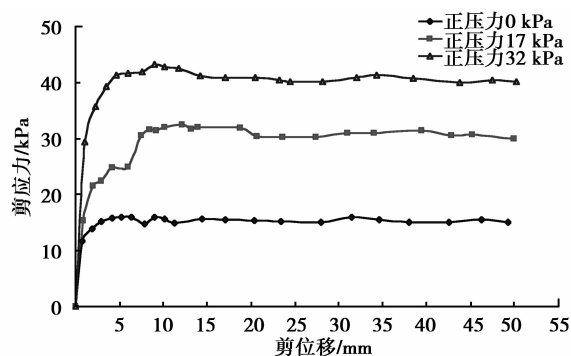


图 4 矸石试样现场大型剪切试验曲线

Fig.4 Curve of gangue direct shear test

试件的天然密度采用灌沙法确定,天然含水率通过试验后取样密封至试验室测定,试样矸石灼失量由通过灼失量法试验确定,抗剪强度参数采用最小二乘法确定,如表 1 所示。

表 1 矸石大型剪切试验参数值

Table 1 The parameter value of in-situ direct shear test

试样干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	天然含 水率/%	内粘聚 力/kPa	内摩擦 角/ $(^{\circ})$	灼失量 /%
1.60	10.9	16.48	$40^{\circ}33'$	24.69

从试验曲线可以看出,试样剪应力随剪位移的增加近似水平滑移,在达到其峰值强度后稍有下降,但直至试样剪位移达到试样边长的 10% (此时在试样剪切面上上下下已可见明显错动) 试验结束,试验残余强度值降低的幅度也并不明显。同时从试验完成后的试样剪切面形状可以看出试样矸石颗粒间胶结良好,剪切试验完成后,试样矸石颗粒仍可保持良好的整体性,剪切以塑性搓动滑移为主,如图 5 所示。

现场大型剪切试验中固结煤矸石试样表现出的这种粘塑性体力学特性以及试验曲线塑性滑移的特点可以从其物质成分及颗粒构成上分析。首先从固结矸石试样的灼失量试验可知矸石试样中存在较高的有机质含量。同时,矸石试样在化学组成上又包含有碳、氢、氧和硫等元素,物质构成复杂且化学成分不稳定。在堆载自重作用下经过长期物理化学作用,固结形成的胶体成分及细煤颗粒使煤矸石具有良好的胶结性,且这种粘结性在一定含水率条件下可以得到良好的体现,试样表现出良好的粘结变形能力,固结煤矸石所表现出的这种粘塑性体力学特性在后面进行的室内直剪试验中也有明显体现。



图 5 现场大型剪切试验试样剪切面

Fig.5 The shearing surface of direct shear tests

2 不同含水率固结煤矸石室内直剪试验

2.1 试验参数的确定

在室内剪试验前,首先依据《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999)对采集的固结煤矸石样本进行烘干筛分试验,确定试验煤矸石颗粒级配如表2所示。

表2 试样颗粒级配

Table 2 Grain size gradation of gangue sample								mm
<40	<20	<10	<5	<2	<1	<0.5	<0.25	<0.075
100	87.3	67.6	45.7	22.0	17.0	9.8	6.6	0.9

控制室内直剪试验干密度同现场大型剪切试验试样一致,均为 $\gamma_g=1.60\text{ g/cm}^3$ 。控制试验试样含水率分别为3%,10%,18%,21.5%及24.2%(饱和),其中饱和试样含水率采用浸水饱和法制备后烘干测定。

室内直剪试验在后勤工程学院粗粒土试验室完成,试验控制同样依据水利水电工程粗粒土试验规程(DL/T 5356—2006)相关要求,采用应力控制的平推法,固结矸石室内直剪试样尺寸为 $0.25\text{ m}\times 0.25\text{ m}\times 0.25\text{ m}$,满足剪力盒边长与试样中最大颗粒直径比不小于5的要求。室内直剪仪系统如图6所示。

2.2 室内直剪试验剪应力-剪位移曲线

从试验剪应力-剪位移曲线来看,矸石试件在含水率较小时,试验曲线存在较明显的峰值破坏强度,试样剪应力在峰值破坏强度后下降明显。但随着试样含水率增大,试验剪应力-剪位移曲线也渐变为缓慢上升线,各含水条件下固结煤矸石试验曲线如图7所示。

在含水率较小时,试样中的细煤颗粒及其它胶体成分处于坚硬状态,加之室内直剪试验试样为室内重塑样,试样矸石颗粒间的胶结作用很弱,试样组成上就与一般散体材料极其相似,此时试样剪切就表现出明显的散体材料特性,剪应力达到峰值强度后,试件的残余强度下降明显。而随着试样含水率的增加,试件中的细煤颗粒及其它胶体成分就由坚硬状态进入到硬塑或软塑状态,胶结作用得到加强。加之,此粘结作用主要是由于煤矸石中的较软岩以及细煤颗粒在排弃后经过长期潮解风化,泥化固结产生的胶体成分,试验剪切过程对此并无明显削弱作用。反而随着剪位移的增大,试样剪切面面积减少,随着剪力盒对试样颗粒约束增大,试验剪应力还出现稍有增加的趋势,这一趋势随着含水率的增加而表现得更为明显。

2.3 试验结果及分析

室内直接剪切强度参数值采用最小二乘法进行计算,如表3所示。

表3 矸石试样直剪试验强度参数值

Table 3 Direct shear strength parameters of gangue			
干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/%	C/kPa	$\phi/(\text{°})$
1.60	3.0	2.61	$55^{\circ}34'$
	10.0	16.55	45°
	18.0	20.30	29°
	21.5	18.90	$16^{\circ}15'$
	24.2	15.50	$3^{\circ}32'$



图6 室内直剪试验

Fig.6 Indoor direct shear test

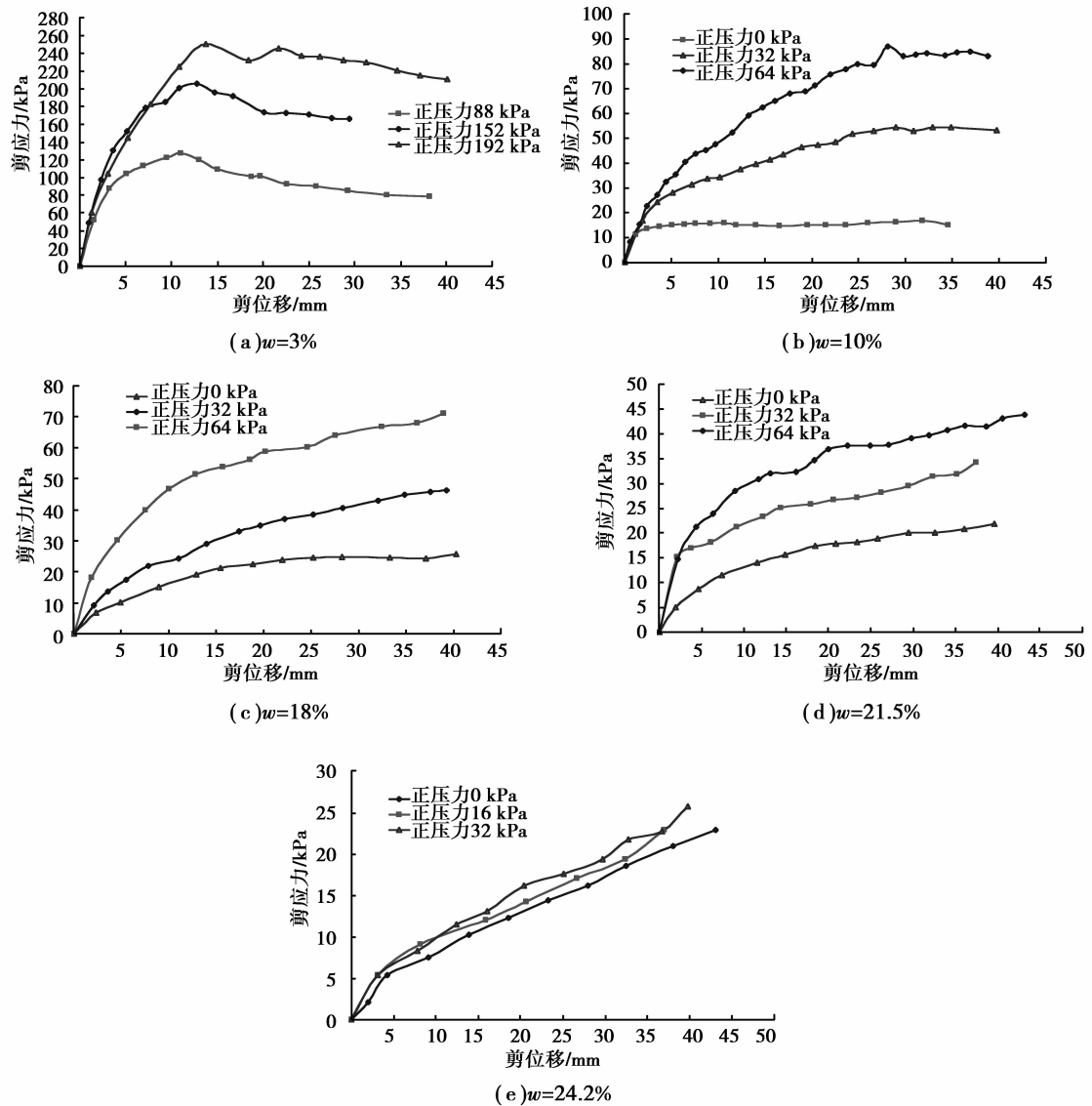


图 7 矸石室内直剪试验曲线

Fig.7 Curve of gangue direct shear test

从抗剪强度参数值来看,随着含水率的增加,试样的内摩擦角直线下降,特别是固结矸石试样在含水率临近饱和时,内摩擦角随含水率下降的趋势明显增大。而内粘聚力则呈现先增加后下降的趋势,但至饱水含水率时仍保持一较高值,如图 8 所示。

固结煤矸石试样抗剪强度参数的变化主要与试样中细颗粒的状态相关。在试件含水率较小时,矸石试样中的煤与其胶体成分处于坚硬或硬塑状态,其胶结作用较弱,从而表现出较小的内粘聚力,此时试样的抗剪强度则主要由内摩擦角决定。当试样含水率继续增加时,试样中煤与其它用胶体成分由坚硬或硬塑进入到可塑或软塑状态,从而表现出良好的粘结能力,在试验参数上表现为内粘聚力持续增加。与此同时,试样中的细颗粒进入可塑或软塑状态,不

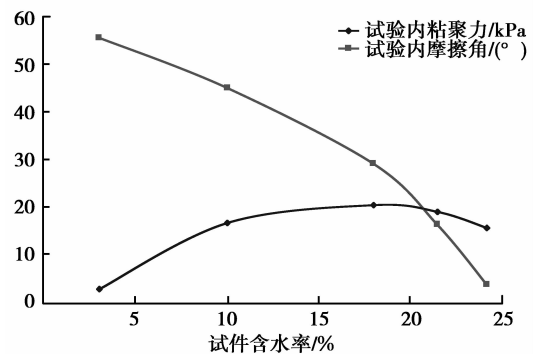


图 8 试验内粘聚力和内摩擦角-含水率曲线

Fig.8 Curve of the internal cohesive force, internal friction angle and moisture content

仅对骨架粗颗粒的填充作用减弱,更由于湿软细颗粒填充在粗颗粒接触面间起到润滑作用,导致试样内摩擦角持续下降。随着试样含水率的进一步增加,试件的内粘聚力也进一步加大,直到含水率大至试样细颗粒接近流塑或进入流塑状态。因此,试件的内粘聚力呈现持续增加后下降的趋势。但对于内摩擦角而言,在煤及其它细颗粒从硬塑到可塑直至流塑的过程中,产生的润滑作用则是一步步持续增强,从而导致试样的内摩擦角持续下降,特别是细煤颗粒进入流塑达到饱和含水率后,内摩擦角值已下降到较小值,此时固结煤矸石试样的抗剪强度主要由内粘聚力提供。

3 不同密实度固结煤矸石室内直剪试验

3.1 试验剪应力-剪位移曲线

除去试样含水率外,试样的密实度是影响固结矸石抗剪强度指标的另一个重要影响因素。试验采用同级配固结煤矸石制备试样进行了 10% 含水率条件下不同试验干密度($\gamma_g = 1.5 \text{ g/cm}^3$, $\gamma_g = 1.65 \text{ g/cm}^3$)的室内直剪试验,以分析试样密实度对其抗剪强度参数的影响。

试验条件同上,获取的试验剪应力-剪位移曲线如图 9 所示。

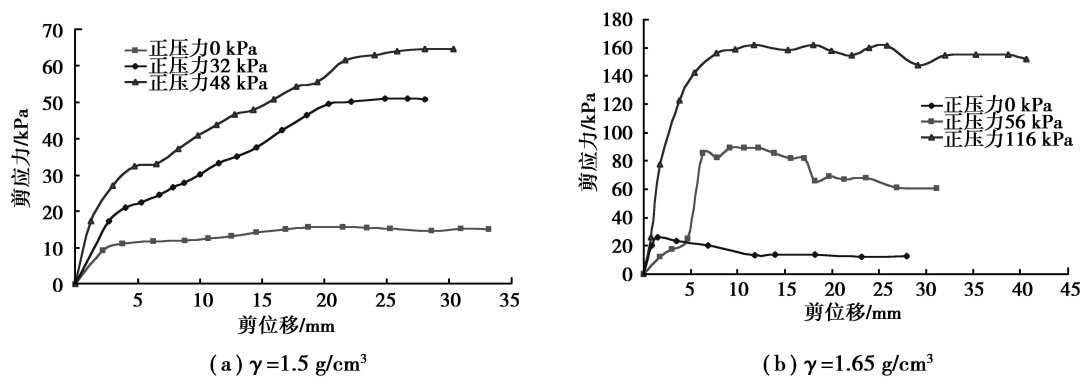


图 9 矸石室内直剪试验曲线 ($w = 10\%$)

Fig.9 Curve of gangue direct shear test ($w = 10\%$)

3.2 抗剪试验参数

试验数据处理同样采用最小二乘法进行计算,如表 4 所示。

表 4 矸石试样直剪试验强度参数值

Table 4 Direct shear strength parameters of gangue

含水率/%	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	C/kPa	$\phi/(\text{°})$
10	1.50	16.35	$45^{\circ}35'$
	1.60	16.55	45°
	1.65	25.14	$49^{\circ}45'$

从获取的强度参数值上可以看出,随试样干密度的增加,试样的内粘聚力和内摩擦角都随之增加,内粘聚力增加至原值的 1.54 倍,内摩擦角增大至原值的 1.09 倍,内粘聚力试验值增加幅度的相对较大,表明试样干密度对固结矸石试样试验内粘聚力值的影响更为显著。但对比来看,无论是试验内摩擦角值还是内粘聚力值,试样干密度对固结矸石抗剪强度参数的影响均小于含水率对其抗剪强度的影响。

将现场大型剪切试验与室内直剪试验数据对比来看,相同含水率条件下,同密实度级配固结矸石试件现场大型剪切试验内粘聚力值同室内直剪试验内粘聚力值基本相同,内摩擦角值为室内直剪试验值的 0.9 倍。这可从固结煤矸石的组成和试验控制条件进行解释,由于试验煤矸石样本经长期堆载自重作用受物理化学固结影响后,在一定含水率条件下,试样内的细煤颗粒和形成的其它胶体成分使试验试样具有良好的粘结作

用。即使室内试验试样为重塑性,不具有现场大型剪切试验试样的天然结构性,但在制备碾压及法向应力作用下,其胶结作用仍能得到良好的体现,从而导致室内直剪试和现场大剪粘聚力值差别不大。由于室内直剪试样相对室外大剪试验试样尺寸相对偏小,室内试验时试样矸石颗粒受到的约束较现场大型剪切试验更为明显,试验时矸石颗粒相对错动更为困难,从而导致室内直剪试验的内摩擦角值相对现场试验值偏大。

4 结论

受堆载自重作用经长期理化学影响后的固结煤矸石试样在一定含水条件下呈现出明显的粘结力学特性。文中针对固结煤矸石进行了现场大型剪切试验及室内直剪试验研究,得到了以下结论。

1) 含水率较小时,固结煤矸石试件剪应力-剪位移试验曲线存在较明显的峰值破坏强度,试验剪应力在峰值后随剪位移量的增加随之下降。但随着试样含水率的增加,固结煤矸石试验剪应力-剪位移曲线发生渐变,此时试样的残余强度相对峰值破坏强度并没有明显下降的趋势,剪切过程呈现塑性粘结滑移特征。

2) 随着含水率的增加,固结煤矸石试样的内粘聚力呈现先增加后下降的趋势,但至饱和含水率时仍保持一较大值。同时,试样的试验内摩擦角值也随之下下降,特别是试样煤矸石临近饱和含水率时,试验内摩擦角值下降的趋势明显增大。至饱和含水率时,试样的内摩擦角已近零值,此时试样的抗剪强度主要由内粘聚力提供。固结煤矸石抗剪强度参数的这一变化规律主要与试样中的细颗粒状态相关。

3) 随着试样干密度的增加,固结煤矸石试样的内粘聚力和内摩擦角都随之增大,内粘聚力试验值增加幅度相对较大。与含水率对矸石抗剪强度参数的影响相比,试样干密度对固结煤矸石试样抗剪强度指标的影响明显偏小。

4) 同含水率条件下同试样干密度的级配固结煤矸石试件的现场大型剪切试验内粘聚力值同室内直剪试验值基本相等,而内摩擦角值则低于室内直剪试验值,这与试件内细颗粒的胶结作用和试验约束控制条件有关。

参考文献:

- [1] 姜振泉,赵道辉,隋旺华.煤矸石固结压密性与颗粒级配缺陷关系研究[J].中国矿业大学学报,1999,28(3):212-216.
JIANG Zhenquan,ZHAO Daohui,SUI Wanghua, et al. Study on relationship between consolidation-compactness and size grade shortage of coal gangue[J].Journal of China University of Mining & Technology,1999,28(3):212-216.
- [2] 李东升,刘东升,王渝昆.煤矿区矸石山塑性极限可靠度分析[J].重庆大学学报,2008,31(12):1441-1445.
LI Dongsheng, LIU Dongsheng, WANG Yukun. Plastic upper bound theory reliability analysis of coal gangue hills[J]. Journal of Chongqing University,2008,31(12):1441-1445.
- [3] 李东升,刘东燕,蒲清平.矸石散体塑性滑移的稳定性评价分析[J].重庆大学学报,2009,32(11):1334-1338.
LI Dongsheng, LIU Dongyan, PU Qingping. Plastic slip stability analysis of gangue granular media[J].Journal of Chongqing University,2009,32(11):1334-1338.
- [4] 董倩,刘东燕.矸石山坡体稳定性非线性极限分析上限法[J].煤炭学报,2007,32(2):131-135.
DONG Qian, LIU Dongyan. Nonlinear plasticity limit analysis upper bound method of gangue hill stability[J]. Journal of China Coal Society,2007,32(2):131-135.
- [5] 董倩,朱正伟,刘东燕.矸石山稳定性非线性破坏准则数值模拟分析[J].重庆大学学报,2009,32(2):212-217.
DONG Qian, ZHU Zhengwei, LIU Dongyan. Stability of various height waste dumps based on nonlinear strength criterion[J]. Journal of Chongqing University,2009,32(2):212-217.
- [6] 臧亚君,刘东燕,蒋克锋.重庆山区矸石山降雨入渗特性及其稳定性研究[J].土木工程学报,2009,42(7):85-89.
ZANG Yajun, LIU Dongyan, JIANG Kefeng. Characteristics of rainfall infiltration and stability of gangue hills in Chongqing mountainous area[J].China Civil Engineering Journal,2009,42(7):85-89.
- [7] 梁冰,姜利国.矸石山剖面颗粒分布规律的实验研究[J].实验力学,2010,25(6):704-711.
LIANG Bing, JIANG Ligu. Experimental studies for the particle size distribution of mine spoil pile cross section[J]. Journal of Experimental Mechanics,2010,25(6):704-711.
- [8] 胡炳南,郭爱国.矸石充填材料压缩仿真实验研究[J].煤炭学报,2009,34(8):1076-1080.
HU Bingnan, GUO Aiguo. Testing study on coal waste back filling material compression simulation[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(8):1076-1080.

- [9] 徐俊明,张吉雄,黄艳利,等.充填综采矸石-粉煤灰压实变形特性试验研究及应用[J].采矿与安全工程学报,2011,28(1):158-162.
XU Junming, ZHANG Jixiong, HUANG Yanli, et al. Experimental research on the compress deformation characteristic of waste fly ash and its application in backfilling fully mechanized coal mining technology[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(1): 158-162.
- [10] 查剑锋,郭广礼,刘元旭,等.矸石变形非线性及其对岩层移动的影响[J].煤炭学报,2009,34(8):1071-1075.
ZHA Jianfeng, GUO Guangli, LIU Yuanxu, et al. The nonlinear features of waste deformation and its impact on strata movement[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1071-1075.
- [11] 钱志,徐斗斗,郭广礼.原生矸石连续级配压缩实验研究[J].煤炭工程,2012(6):100-106.
QIAN Zhi, XU Doudou, GUO Guangli. Research on continued gradation compression experiment of primary coal rejects[J]. Coal Engineering, 2012(6): 100-106.
- [12] 张德辉,李辉.连续级配矸石压缩性能的试验研究[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2011,30(3):337-340.
ZHANG Dehui, LI Hui. Experimental study on compression performance of continuous grading gangue[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2011, 30(3): 337-340.
- [13] 刘松玉,童立元,邱钰,等.煤矸石颗粒破碎及其对工程力学特性影响研究[J].岩土工程学报,2005,27(5):505-510.
LIU Songyu, TONG Liyuan, QIU Yu, et al. Crushable effects on engineering mechanical properties of colliery wastes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 505-510.
- [14] 刘松玉,邱钰,童立元,等.煤矸石的强度特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(1):199-205.
LIU Songyu, QIU Yu, TONG Liyuan, et al. Experimental study on strength properties of coal wastes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 199-205.
- [15] 臧亚君,刘东燕,彭文轩,等.重庆矿区矸石山体特性现场试验研究[J].岩土工程学院,2009,31(4):558-563.
ZANG Yajun, LIU Dongyan, PENG Wenxuan, et al. Field tests on coal wastes in Chongqing [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 558-563.
- [16] 段巍,张孟喜.煤矸石推剪试验的颗粒离散元细观模拟[J].上海大学学报:自然科学版,2012,18(5):531-538.
DUAN Wei, ZHANG Mengxi. Mesomechanical simulation of push-shear tests on coal waste with particle flow code[J]. Journal of Shanghai University: Natural science, 2012, 18(5): 531-538.

(编辑 陈移峰)