

# 煤矸石的强度特征试验研究

刘松玉<sup>1</sup>, 邱钰<sup>2</sup>, 童立元<sup>1</sup>, 缪林昌<sup>1</sup>

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 广东省路桥建设发展有限公司, 广东 广州 510635)

**摘要:** 通过中型三轴试验及现场大型直剪试验对煤矸石的强度特性进行了系统研究, 得到了煤矸石强度包线的形式和参数以及煤矸石抗剪强度随粗颗粒(粒径  $D > 5.0$  mm)含量的变化规律, 并对试验中最大主应力差及颗粒破碎量进行多元统计分析, 得到围压、孔隙比及粗料含量的变化规律。

**关键词:** 岩石力学; 煤矸石; 强度特性; 抗剪强度公式; 粗料; 颗粒破碎

**中图分类号:** TU 457

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)01 - 0199 - 07

## EXPERIMENTAL STUDY ON STRENGTH PROPERTIES OF COAL WASTES

LIU Song-yu<sup>1</sup>, QIU Yu<sup>2</sup>, TONG Li-yuan<sup>1</sup>, MIAO Lin-chang<sup>1</sup>

(1. College of Transportation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. Guangdong Provincial Road and Bridge Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510635, China)

**Abstract:** Based on the medium-sized triaxial test and the large-scale field direct shear test, the strength properties of coal wastes from Xuzhou in China, are systematically studied. The results show that the strength of coal wastes can be described by Coulomb's equation or De Mello equation for shear strength. The parameters for these formula are presented. When the coarse grain( $D > 5.0$  mm) proportion in samples changes from 30% to 60%, the shear strength is seen with obvious changes differently with the pure coarse or fine samples. The influential factors on the coarse crush are also compared, in which the confining pressure and the coarse grain content are the primary factors. In the end of the paper, it is indicated that the cohesion of coal waste from the field shear test is smaller than that from laboratory test; while the friction angle from the field test is larger than that from the laboratory test. The mechanism for above results is achieved.

**Key words:** rock mechanics; coal wastes; strength properties; shear strength formula; coarse grain; grain crush

## 1 引言

煤矸石是一种特殊的粗粒类土, 其粗颗粒多为次软岩石或极软岩石, 强度较低, 易破碎, 水稳性差, 与一般粗粒土相比, 有其自身的特殊性, 表现出不同的工程力学特性。由于煤矸石可能发生不良的工程力学行为, 一般工程中应尽量避免使用。然而该类土在矿区储量丰富, 近年来在高速公路路堤

填筑中得到了一定的应用<sup>[1]</sup>。

由于煤矸石粗颗粒(粒径  $D > 5.0$  mm)含量过高而细颗粒含量过低<sup>[2]</sup>, 常规的土工试验仪器已经不能适用, 因此, 需采用大型土工试验仪器, 且粒状体材料的强度特性受到多种因素的影响, 如材料自身的物理性质、应力条件和试验条件等, 在试验过程中, 任何条件的改变, 都可能引起材料的强度特性的变化, 而实际中不可能对所有的影响因素都进行分析。大量的研究结果<sup>[3]</sup>表明: 对粗粒土的强度

**收稿日期:** 2004 - 06 - 29; **修回日期:** 2004 - 11 - 22

**作者简介:** 刘松玉(1963 -), 男, 博士, 1983年毕业于合肥工业大学水工专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事特殊地基处理、环境岩土工程等方面的教学与研究工作。E-mail: liusy@seu.edu.cn.

与变形特性主要影响因素是围压、孔隙比与粗料含量。本文即围绕这3个因素对煤矸石作为高速公路路堤用材料的强度特性进行了系统的研究，并借助多元统计方法对煤矸石的特性及影响因素进行了分析。

## 2 试验用料及试样尺寸

统计研究结果<sup>[4]</sup>表明，粗粒土试样直径与试样粒径之间的经济合理关系为： $D \geq 5d_{max}$ ，本次试验试样直径与试样粒径即采用此关系，即采用 $\phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ， $\phi 101.0 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 两种尺寸试样，试验用料为江苏省徐州大黄山矿煤矸石。

为了解不同粗料( $d > 5.0 \text{ mm}$ )、细料比例对强度与变形的影响，进行了如表1所示的多组中型三轴试验。

表1 三轴试料与试样描述

Table 1 Triaxial samples and description

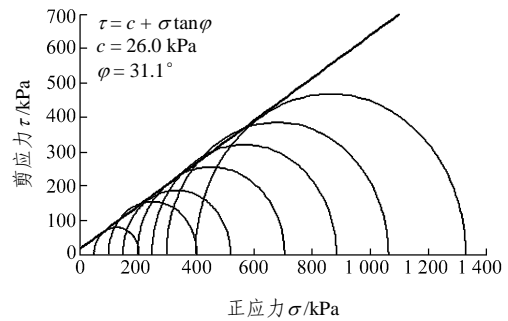
| 试料种类   | 粒径/mm   | 试样直径/mm | 制样密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) |                  |
|--------|---------|---------|--|------------------|
| 细料     | 1       | <5.0    | 39.1                                     | 1.60, 1.75, 1.90 |
|        | 2       | 0.5~5.0 | 39.1                                     | 1.60, 1.75, 1.90 |
| 粗料 40% | <20.0   | 101.0   | 2.00                                     |                  |
|        | <20.0   | 101.0   | 2.00                                     |                  |
| 粗细混合料  | 粗料 80%  | <20.0   | 101.0                                    | 2.00             |
|        | 粗料 100% | <20.0   | 101.0                                    | 1.90             |
| 天然料    | <20.0   | 101.0   | 2.00                                     |                  |

## 3 煤矸石抗剪强度公式的形式及参数

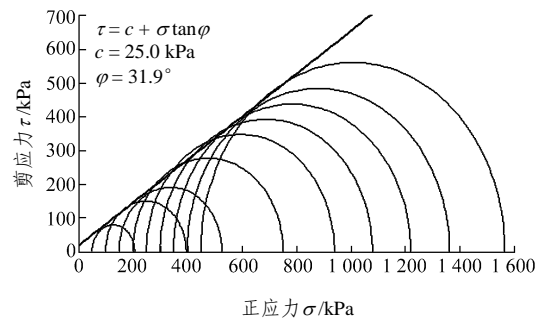
国内外学者提出了多种强度包线的公式<sup>[5~8]</sup>，主要有库仑公式、De Mello 公式<sup>[5]</sup>、Duncan 公式<sup>[6]</sup>、张启岳和郭庆国等公式<sup>[7, 8]</sup>。强度包线非线性特征比较明显。以下将根据三轴试验结果来考察煤矸石强度包线的形式及其参数。

### (1) 细料

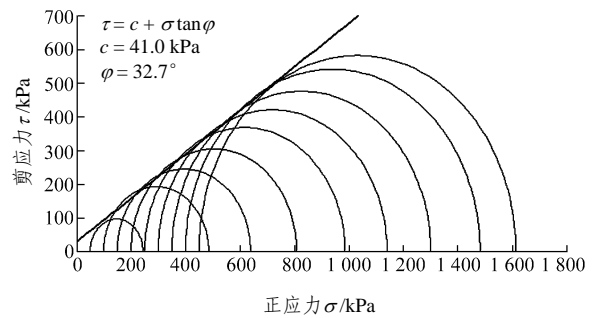
图1, 2 分别为试料1, 2 不同干密度下的应力圆及强度包线。由图1, 2 可以看出，其强度包线呈线性性质。不同围压下的破坏剪应力分别用库仑公式、De.Mello 公式、Duncan 公式进行参数拟合，结果见表2。



(a)  $\rho_d = 1.60 \text{ g/cm}^3$



(b)  $\rho_d = 1.75 \text{ g/cm}^3$



(c)  $\rho_d = 1.89 \text{ g/cm}^3$

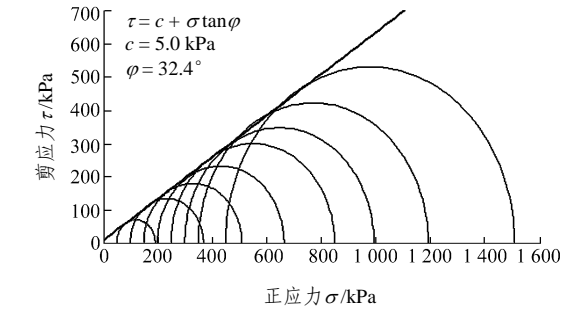
图1 试料1 不同干密度下的应力圆及强度包线  
Fig.1 Stress circles and strength envelope of sample No.1 with various dry densities

由表2 可见，库仑公式与 De. Mello 公式拟合，其相关系数均在 0.998 0 以上；Duncan 公式拟合，其相关系数相对较低，但也在 0.900 0 以上。考虑到煤矸石含有一定量的细颗粒，且颗粒间存在黏聚力，因此，细料煤矸石的强度公式应采用库仑公式。

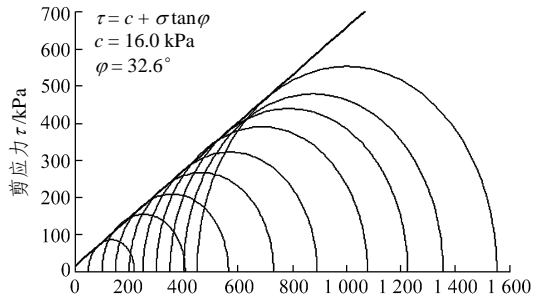
### (2) 粗细混合料

图3 为粗细混合料不同粗料含量下的应力圆及强度包线。由图3 可见，即使是含有 30%~60%粗料的煤矸石其强度包线仍呈线性性质。不同围压下的破坏剪应力分别用库仑方程、De. Mello 公式、Duncan 公式进行参数拟合，拟合结果见表3。

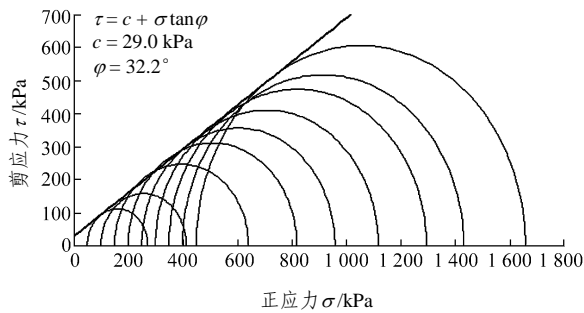
由表3 可见：库仑公式与 De. Mello 公式拟合，其相关系数均在 0.998 0 以上；Duncan 公式拟合，



(a)  $\rho_d = 1.60 \text{ g/cm}^3$



(b)  $\rho_d = 1.76 \text{ g/cm}^3$



(c)  $\rho_d = 1.90 \text{ g/cm}^3$

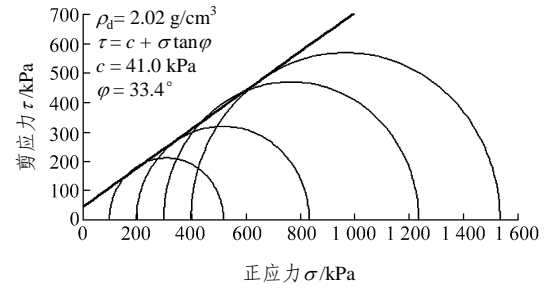
图2 试料2不同干密度下的应力圆及强度包线

Fig.2 Stress circles and strength envelope of sample No.2 with various dry densities

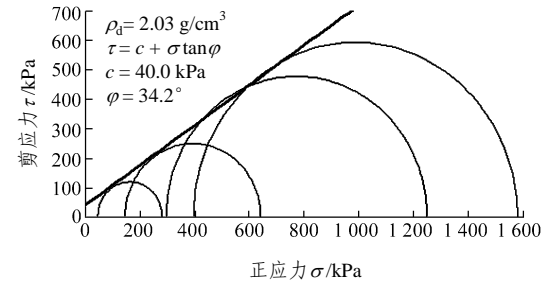
表2 细料煤矸石强度参数拟合表

Table 2 Fitting strength parameters of fine-grain samples

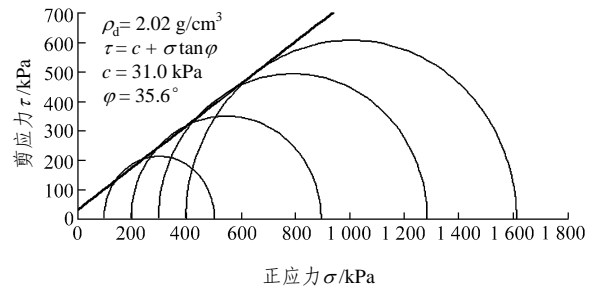
| 试料种类      | 库仑公式                                   |         | De. Mello 公式                      |         | Duncan 公式   |         |
|-----------|--|---------|-----------------------------------|---------|---|---------|
|           | 参数                                     | 相关系数    | 参数                                | 相关系数    | 参数  | 相关系数    |
| 细料1 (低密度) | $\tau = 26.0 + \sigma \tan 31.1^\circ$ | 0.998 6 | $\tau = 0.958 5 \sigma^{0.915 2}$ | 0.998 9 | $\varphi = 36.9 - 7.11 \text{g}(\sigma_3/\text{Pa})$  | 0.911 2 |
| 细料2 (低密度) | $\tau = 5.0 + \sigma \tan 32.5^\circ$  | 0.999 5 | $\tau = 0.625 6 \sigma^{0.978 6}$ | 0.999 9 | $\varphi = 34.5 - 3.21 \text{g}(\sigma_3/\text{Pa})$  | 0.968 6 |
| 细料1 (中密度) | $\tau = 25.0 + \sigma \tan 31.9^\circ$ | 0.998 8 | $\tau = 0.861 8 \sigma^{0.934 3}$ | 0.999 7 | $\varphi = 36.8 - 5.61 \text{g}(\sigma_3/\text{Pa})$  | 0.955 1 |
| 细料2 (中密度) | $\tau = 16.0 + \sigma \tan 32.6^\circ$ | 0.999 9 | $\tau = 0.866 7 \sigma^{0.933 1}$ | 0.999 9 | $\varphi = 36.9 - 5.91 \text{g}(\sigma_3/\text{Pa})$  | 0.976 2 |
| 细料1 (高密度) | $\tau = 41.0 + \sigma \tan 32.5^\circ$ | 0.999 9 | $\tau = 1.274 \sigma^{0.882 3}$   | 0.999 9 | $\varphi = 40.9 - 10.31 \text{g}(\sigma_3/\text{Pa})$ | 0.966 6 |
| 细料2 (高密度) | $\tau = 29.0 + \sigma \tan 33.2^\circ$ | 0.999 8 | $\tau = 1.158 \sigma^{0.896 4}$   | 0.999 6 | $\varphi = 40.4 - 9.51 \text{g}(\sigma_3/\text{Pa})$  | 0.974 3 |



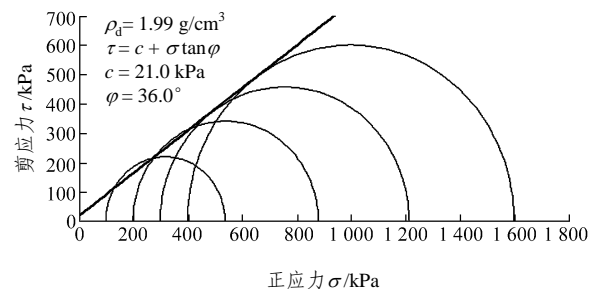
(a) 30%粗料



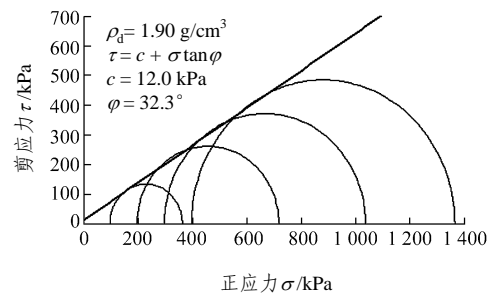
(b) 40%粗料



(c) 50%粗料



(d) 60%粗料



(e) 50%粗料

图3 粗细混合料不同粗料含量下的应力圆及强度包线  
Fig.3 Stress circles and strength envelope of mixed samples

表3 粗细混合料煤矸石强度参数拟合表  
Table 3 Fitting strength parameters of mixed samples

| 密度<br>( $g \cdot cm^{-3}$ ) | 粗粒含量<br>/% | 库仑公式                                   |         | De. Mello 公式                      |         | Duncan 公式                                |         |
|-----------------------------|------------|--|---------|-----------------------------------|---------|--|---------|
|                             |            | 参数                                     | 相关系数    | 参数                                | 相关系数    | 参数                                       | 相关系数    |
| 2.02                        | 30         | $\tau = 45.0 + \sigma \tan 33.4^\circ$ | 0.998 8 | $\tau = 1.309 0 \sigma^{0.883 0}$ | 0.998 2 | $\varphi = 42.2 - 10.7 \lg(\sigma_3/Pa)$ | 0.931 1 |
| 2.03                        | 40         | $\tau = 40.0 + \sigma \tan 34.2^\circ$ | 0.998 4 | $\tau = 1.107 0 \sigma^{0.908 2}$ | 0.999 3 | $\varphi = 40.1 - 9.5 \lg(\sigma_3/Pa)$  | 0.939 2 |
| 2.02                        | 50         | $\tau = 31.0 + \sigma \tan 35.6^\circ$ | 0.999 3 | $\tau = 1.007 0 \sigma^{0.914 0}$ | 0.999 7 | $\varphi = 38.5 - 7.4 \lg(\sigma_3/Pa)$  | 0.987 6 |
| 2.02                        | 60         | $\tau = 21.0 + \sigma \tan 36.0^\circ$ | 0.999 7 | $\tau = 1.374 0 \sigma^{0.878 0}$ | 0.999 9 | $\varphi = 43.0 - 11.2 \lg(\sigma_3/Pa)$ | 0.962 1 |
| 1.90                        | 50         | $\tau = 12.0 + \sigma \tan 32.3^\circ$ | 0.999 2 | $\tau = 0.703 7 \sigma^{0.962 0}$ | 0.999 4 | $\varphi = 34.9 - 3.3 \lg(\sigma_3/Pa)$  | 0.761 1 |

注：表中粗粒含量系剪后粗粒含量。

其相关系数相对较低，但也在 0.900 0 以上。考虑到煤矸石中可能含有一定量的细颗粒，且颗粒间存在黏聚力，De. Mello 公式虽然拟合性较好，但其公式中不能反映出粒间黏聚力。因此，对于围压小于 500 kPa 的情况，煤矸石的强度包线用直线近似，强度公式采用库仑公式。

#### 4 煤矸石抗剪强度随粗料含量变化情况

煤矸石的强度特性是由细料、粗料特性以及粗细料比例所决定的。在粗料含量小于 30% 时，煤矸石的强度特性主要由细料的特性所决定；在粗料含量大于 60% 后，煤矸石的强度特性主要由粗料的特性所决定；当粗料含量为 30%~60% 时，煤矸石的强度特性受细料、粗料特性共同影响。

图 4 为煤矸石强度参数随粗料含量变化情况。由图 4 可见，在粗料含量小于 30% 时，其强度参数基本与细料的强度参数相当；随着粗料含量的增加，煤矸石的黏聚力开始降低，而摩擦角开始增加；当

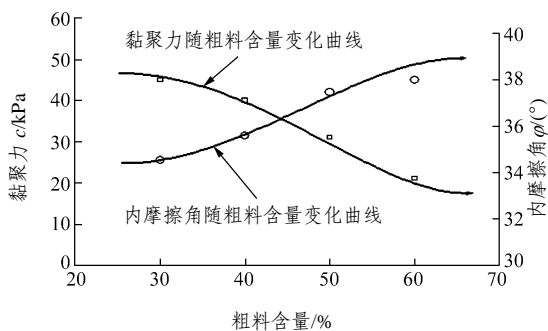


图 4 煤矸石强度参数随粗料含量变化情况图

Fig.4 State of strength parameters according to coarse grain proportion

粗料含量增加到 60% 后，细料不能填充粗料孔隙，粗料开始形成架空结构，若要达到一定的密度，必有一定的粗料破碎以形成密实、稳定的结构，粗料愈多，颗粒破碎量愈大，故黏聚力与摩擦角基本不再变化。

另外由表 4 可见，当粗料含量小于 60% 时，三轴制样与试验中粗料破碎量相对较少，仅 10%；但若粗料含量大于 60% 时，随粗料含量的增加，粗料破碎量迅速增多，当粗料含量为 100% 时，三轴制样及剪切过程中粗料破碎量可达 50%。

表 4 三轴制样与试验中粗料破碎量

Table 4 Quantity of coarse-grain sample breaking during preparation and testing

| 试料种类      | 粒径范围 /mm | 制样密度 /( $g \cdot cm^{-3}$ ) | 剪后粗料含量/% | 粗料破碎量/% |
|-----------|----------|-----------------------------|----------|---------|
| 粗料 40%    | <20.0    | 2.00                        | 30       | 10      |
| 粗细 粗料 50% | <20.0    | 2.00                        | 40       | 10      |
| 混合 粗料 60% | <20.0    | 2.00                        | 50       | 10      |
| 料 粗料 80%  | <20.0    | 2.00                        | 60       | 20      |
| 粗料 100%   | <20.0    | 1.90                        | 50       | 50      |

#### 5 煤矸石强度特性的多元统计分析

##### 5.1 最大主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )<sub>f</sub> 的多元统计分析

三轴试验中主应力差即反映了试验中的剪应力，对其进行分析即是对抗剪强度进行分析。

运用统计软件 SAS<sup>[9]</sup>，对三轴试验的最大主应力差进行影响因素分析，并且对参数估计的精确性进行了检验。统计涉及到的影响因素为围压、压实状态(三轴试验固结后的孔隙比  $e_h$ )、粒径大于 5.0 mm 的含量  $P_5$ ；影响因素的变化范围：围压为 50~450 kPa、固结后孔隙比为 0.304 4~0.614 9 以及

$P_5$  为 30%~60%。所采用的回归方程为

$$\lg(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \alpha_0 + \alpha_1 \lg(\sigma_3) + \alpha_2 \lg(e_h) + \alpha_3 \lg(P_5) \quad (1)$$

回归模型为

$$y = x\alpha + \varepsilon \quad (2)$$

且有

$$E(\varepsilon) = 0$$

$$\text{cov}(\varepsilon) = \sigma^2(I)$$

$$y = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{Bmatrix}$$

$$x = \begin{Bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{Bmatrix}$$

$$\alpha = \begin{Bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{Bmatrix}$$

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix}$$

多元回归分析结果如表 5 所示。根据回归模型对最大主应力差进行估算，实测与推算结果比较见图 5, 6, 图中直线的方程为  $y=x$ 。从表 5, 图 5, 6 可以得出以下结论:

(1) 相关系数都在 0.980 0 以上, 回归方程与实测值相关性极高, 回归高度显著。

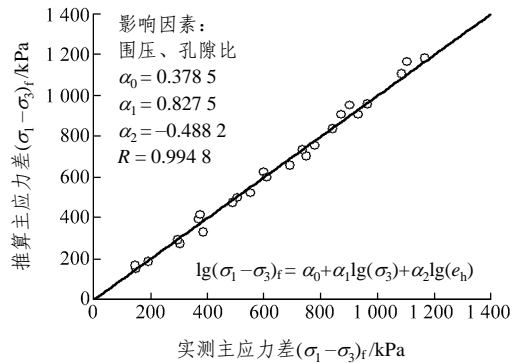
(2) 围压回归系数  $\alpha_1$  为正, 说明随周围压力的增高, 最大主应力差增加, 但不同试料围压的参数在 0.8 左右, 说明围压对最大主应力差的影响并不因为试料的变化而有很大的变化。

(3) 孔隙比回归系数  $\alpha_2$  为负, 说明随孔隙比的减小(密度增加), 最大主应力差增加; 不同试料的回归系数相差较大, 说明不同试料孔隙比的变化对最大主应力差的影响程度有较大差别。

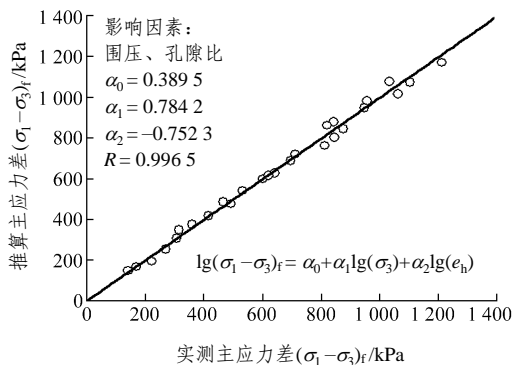
表 5 细料、粗细混合料推算主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 多元回归分析结果表

Table 5 Multi-regression analysis results of  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$

| 试料种类  | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | 常数项 $\alpha_0$ | 相关系数 $R$ | 样本数 |
|---|------------|------------|------------|----------------|----------|-----|
| 试料 1( $d < 5.0 \text{ mm}$ )                  | 0.827 5    | -0.488 2   | -          | 0.378 5        | 0.994 8  | 25  |
| 试料 2( $0.5 \text{ mm} < d < 5.0 \text{ mm}$ ) | 0.784 2    | -0.752 3   | -          | 0.389 5        | 0.996 5  | 27  |
| 粗细混合料( $d < 20.0 \text{ mm}$ )                | 0.789 6    | -1.172 1   | 0.100 6    | 0.303 1        | 0.992 2  | 28  |



(a) 试料 1



(b) 试料 2

图 5 细料实测最大主应力差与推算值相关关系  
Fig.5 Relation between tested and calculated maximum principal stress difference for fine-grain coal wastes

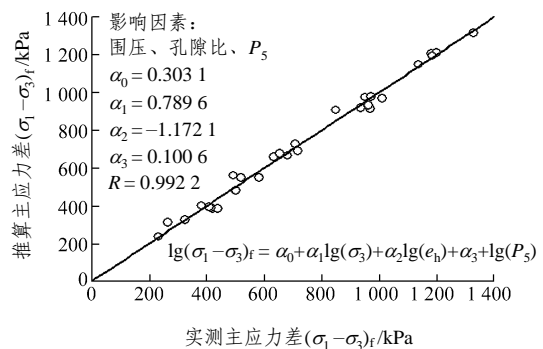


图 6 粗细混合料实测最大主应力差与推算值相关关系  
Fig.6 Relation between tested and calculated maximum principal stress difference for fine-grain coal wastes

(4) 粗细混合料  $P_5$  的回归系数  $\alpha_3$  为正, 说明随  $P_5$  的增加, 最大主应力差增加, 但其对最大主应力差的影响程度远不如前 2 个因素, 主要原因为软岩成分浸水后强度极低、极易破碎所致。

(5) 粗颗粒愈多, 最大主应力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  对孔隙比(密度)的依赖性更强, 而对围压的依赖性将减弱。

### 5.2 颗粒破碎量的多元统计分析

一方面, 煤矸石颗粒的破碎有利于压实, 形成稳定的结构, 获得较大的承载能力, 减低压缩性; 另一方面, 颗粒过度破碎, 会减小颗粒间的摩擦, 使强度降低。因此, 了解煤矸石的颗粒破碎问题是研究煤矸石强度特性的关键之一。

图 7 为粗细混合料颗粒破碎量的实测与推算值相关关系(此处破碎量用  $P_5$  的减少量来表示)。

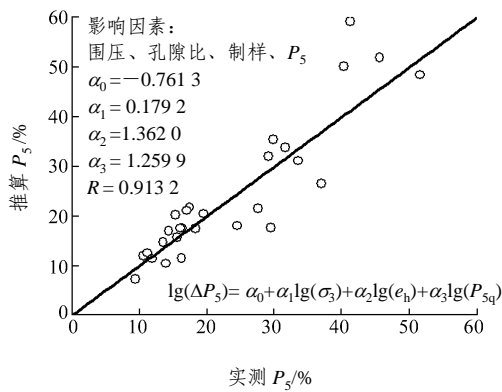


图 7 粗细混合料颗粒破碎量的实测与推算值相关关系  
Fig.7 Relation between tested and calculated breaking quantity for the mixed coal wastes

从图 7 可以看出:

(1) 煤矸石在制样、剪切过程中的颗粒破碎量随围压、密度及  $P_5$  的增加而增加。其原因是: 制样密度要求愈高, 则能量要求愈大, 故破碎量增加; 被制试料的  $P_5$  愈高, 则颗粒不均匀系数减小, 颗粒间点接触愈多, 故破碎量增加; 剪切过程中, 围压愈高, 则破碎量也要增加。

(2) 从回归方程中各影响因素的系数大小可知, 煤矸石在制样过程中, 对制样密度、 $P_5$  这 2 个因素依赖性较强, 而对剪切过程中的围压依赖性较弱。其原因是, 对于煤矸石, 颗粒极容易破碎, 在击实制样过程中的颗粒破碎量远大于剪切过程中破碎量, 所以破碎量对围压的依赖性较低。若仅考虑剪切过程中的破碎量, 则其对围压的依赖性将相对增大。

## 6 煤矸石路堤的现场大型直剪试验

大型直剪试验原理与室内直剪试验基本相同, 但由于试件尺寸大且在现场进行。因此, 能把土体的非均匀性质及软弱面等对抗剪强度的影响更真实地反映出来。该试验适用于求测各类岩土体以及岩土体沿软弱结构面和岩土体与混凝土接触面或滑动面的抗剪强度。现场大型直剪试验有大剪仪法和推滑平衡法, 本次试验段的大型直剪试验采用推滑平衡法<sup>[10]</sup>, 现场进行了 2 个试样的测试, 试样 1, 2 的黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  值依次为 14.4 kPa, 45.1° 和 21.3 kPa, 42.4°。

从测试结果来看, 煤矸石的路基填筑层的黏聚力相对室内试验结果稍低, 内摩擦角  $\varphi$  值则比室内试验结果大 7.0°~10.0°。其原因是室内试验时, 煤矸石中剔除了硬岩成分, 主要为软岩, 且室内为饱和试样, 粒间水的润滑, 致使室内的黏聚力  $c$  值偏高, 摩擦角  $\varphi$  值大幅度降低。

## 7 结 论

(1) 煤矸石的三轴试验研究表明: 无论是细料还是粗细混合煤矸石, 强度包线在围压小于 500 kPa 时, 可用直线近似, 强度公式采用库仑公式。煤矸石固结排水剪内摩擦角  $\varphi_0$  为 31.0°~36.0°; 黏聚力  $c_d$  由于细颗粒的含量不同变化较大, 最小为 5.0 kPa, 最大为 45.0 kPa。

(2) 不同粗料含量的煤矸石, 当粗料含量小于 30% 时, 其强度参数基本与细料的强度参数相当; 随着粗料含量的增加, 煤矸石的黏聚力开始降低, 而内摩擦角开始增加; 当粗料含量增加到 60% 后, 细料不能填充粗料空隙, 粗料开始形成架空结构, 若要达到一定的密度, 必有一定的粗料破碎以形成密实、稳定的结构, 粗料愈多, 颗粒破碎量愈大, 黏聚力与内摩擦角基本不变化。

(3) 对最大主应差的多元回归分析表明: 随围力的增加, 最大主应力差增加; 随孔隙比的减小(密度增加), 最大主应力差增加; 随  $P_5$  的增加, 最大主应力差增加, 但其对最大主应力差的影响程度远不如前 2 个因素。

(4) 煤矸石在制样、剪切过程中的颗粒破碎量

随围压、密度及  $P_5$  的增加而增加, 且对制样密度和  $P_5$  这 2 个因素依赖性较强, 而对剪切过程中的围压依赖性较弱。

(5) 现场大型直剪试验所测煤矸石填筑层黏聚力为 14.4~21.3 kPa, 内摩擦角为  $42.4^\circ \sim 45.1^\circ$ , 现场煤矸石黏聚力比室内三轴试验稍低, 但内摩擦角比室内试验结果大  $7.0^\circ \sim 10.0^\circ$ 。其原因是室内试验时, 煤矸石中剔除了硬岩成分, 且室内为饱和试样, 致使内摩擦角  $\varphi$  值大幅度降低。

### 参考文献(References):

- [1] 邱 钰, 缪林昌, 刘松玉. 煤矸石在道路建设中的应用研究现状及实例[J]. 公路交通科技, 2002, 19(2): 1 - 5.(Qiu Yu, Miao Linchang, Liu Songyu. Application study and practice of coal gangue applied to road construction[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(2): 1 - 5.(in Chinese))
- [2] 姜振泉, 赵道辉, 隋旺华, 等. 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 and Technology, 1999, 28(3): 212 - 216.(in Chinese))
- [3] 日本土工学会. 粗粒料的现场压实[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(Japanese Geotechnical Engineering Academy. Coarse Grained Material and in-situ Compaction[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))
- [4] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998. 187 - 188.(Guo Qingguo. Engineering Characteristics of Coarse Grained Soil[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 1998. 187 - 188.(in Chinese))
- [5] De Mello V F B. Reflection on decision of practical significance to embankment dams[J]. Geotechnique, 1977, 27(3): 281 - 355.
- [6] Duncan J M. Strength, stress-strain and bulk modulus parameter for finite element analyses of stress and movement in soil masses[R]. Report No. UCB/GT/80 - 01, 1980.
- [7] 张启岳, 司洪洋. 粗颗粒土大型三轴试验应力应变特性[J]. 水利学报, 1982, (9): 22 - 31.(Zhang Qiyue, Si Hongyang. Stress-strain properties of coarse grained soil by large scale triaxial testing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1982, (9): 22 - 31.(in Chinese))
- [8] 郭庆国. 关于粗粒土抗剪强度特性的试验研究[J]. 水利学报, 1987, (5): 59 - 65.(Guo Qingguo. Shear strength experiments of coarse grained soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987, (5): 59 - 65.(in Chinese))
- [9] 朱道元. 多元统计分析软件 SAS[M]. 南京: 东南大学出版社, 1999. 258 - 264.(Zhu Daoyuan. Multi-statistical Analysis and the SAS Soft[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1999. 258 - 264.(in Chinese))
- [10] 邱 钰. 软质粗粒土的工程力学特性与路基工程应用研究[博士学位论文][D]. 南京: 东南大学, 2002. 95 - 98.(Qiu Yu. Engineering properties of soft coarse grained soil and the application to embankments[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing: Southeast University, 2002. 95 - 98.(in Chinese))