

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201911011

排弃物料力学性质大型三轴剪切试验研究

刘小平^{1,2}, 刘天林², 曹晓毅², 张宝元², 王玉涛²

(1. 西安理工大学土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 中煤科工集团西安研究院有限公司工程地质研究所, 陕西 西安 710077)

摘要: 露天矿剥离堆积的排弃物料力学性质是矿山排土场设计与稳定性控制之关键科学问题。文章以西南某露天矿剥离排弃物料为研究对象, 采用室内相似级配模拟试验制作了不同物质组成、级配、相对密度条件下的试样, 采用剪后筛分试验研究了各试样在不同应力状态下的颗粒破碎机理及破碎率变化关系, 采用大型三轴剪切试验测试了各试样的应力-应变关系及抗剪强度参数。试验结果表明: 排弃物颗粒剪切破碎力学机制复杂, 颗粒破碎率与物料组分、级配、相对密度及围压条件密切相关, 与抗剪强度参数相关性强。应力-应变曲线无明显峰值强度, 具有应变硬化特征, 分析认为其与围压、相对密度水平较低有关。试验数据拟合曲线均表明: $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ε_1 为线性关系, $-\varepsilon_3$ 与 ε_1 为抛物线关系, 相关系数均大于 0.9。据此拟合曲线, 求解出排弃物料的切线泊松比 μ , 修正了邓肯-张模型。对相同试验条件下对比试样 (QG-B-3) 应力-应变关系, 采用邓肯-张模型 (修正) 进行了预测, 预测结果与试验测试数据基本一致, 验证了邓肯-张模型 (修正) 能够描述排弃物料力学特征。研究排弃物料剪切破碎机理与应力-应变特征, 对露天矿排土场边坡变形控制具有重要的理论意义。

关键词: 排弃物料; 大型三轴剪切试验; 颗粒破碎; 抗剪强度; 邓肯-张模型

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)04-0191-08

A study of large-scale triaxial shear test of the mechanical properties of abandoned materials

LIU Xiaoping^{1,2}, LIU Tianlin², CAO Xiaoyi², ZHANG Baoyuan², WANG Yutao²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: The mechanical properties of materials discharged by stripping and stacking in open-pit mines are the key scientific problem in dump slope design and stability control. In engineering practice, the empirical method and the engineering geological analogy method are often used to estimate the mechanical parameters, but the effect of abandoned material properties and stress state on the mechanical properties is not fully considered, and the reliability of the stability calculation results of the dump slope is low. In this study, the abandoned materials of an open-pit mine in southwest China is taken as the research object, the experimental samples with different material compositions, gradation and relative densities were made by the similar gradation simulation experiment. The particle crushing mechanism and mechanical properties of each sample under different stress conditions were examined by the post shear screening experiment and large-scale triaxial shear experiment. The experimental results show that the particle breakage rate is closely related to the material compositions, gradation, relative densities and confining pressure conditions, and is strongly related to the shear strength parameters. Under the condition of low confining pressure and low relative density, the

收稿日期: 2019-11-21; 修订日期: 2019-12-25

基金项目: 中煤科工集团西安研究院科技创新项目 (2013XAYCX025)

第一作者: 刘小平 (1983-), 男, 博士研究生, 副研究员, 从事矿山地质灾害防治的科研及生产工作。E-mail: 153296962@qq.com

stress-strain curve has no obvious peak strength and is of the characteristic of strain hardening. The fitting curves of experimental data show that $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ and ε_1 has a linear relation, $-\varepsilon_3$ and ε_1 has a parabola relation. Based on that fitting curve, the tangent line Poisson's ratio μ_1 of the abandon material is obtained, and the Duncan-Chang model is modified. The experimental test data of the contrast sample (QG-B-3) under the same experimental conditions prove that the Duncan-Chang model (modified) can describe the stress-strain characteristics of the abandon material. The shear crushing mechanism and stress-strain characteristics of the abandon materials are of important theoretical significance for dump slope deformation control in the open pit mines.

Keywords: abandoned materials; large-scale triaxial shear test; particle breakage; shear strength; Duncan-Chang model

露天矿山剥离或井巷掘进过程中产生的松散排弃物料力学性质与排(矸)土场容量、堆积高度及坡角密切相关,直接影响露天矿山采场工程设计、生产安全及经济效益。露天矿剥离产生的排弃物料成分多样,块度差异较大,块体破碎及力学响应机制复杂。杨幼清等^[1]研究了排土场土体物理力学性质以及植物根系数量与根-土复合体抗剪强度之间的关系;丁小华等^[2]采用人工合成透明土揭示了排弃物料受力状态下颗粒的运移规律;侯殿昆等^[3]、虎万杰等^[4]、张默等^[5]分别采用室内试验及数值计算方法研究了排土场物料的力学性质;王党朝等^[6]对胜利一号露天矿排土场土壤性质进行了研究;黄达等^[7]对基于排弃物料力学参数软化数值模拟了排土场稳定性。因此,排弃物料力学性质一直是矿山工程研究的热点及难点。

排弃物料与水利坝体堆石料、路基填料均属于散体颗粒材料。水利筑坝及道路修筑路基中,对所涉及的散体颗粒材料物理力学性质有较为深入的研究。史江伟等^[8]基于粗颗粒土三轴固结排水剪试验建立了HLP非线性 $E-\nu$ 模型。贾宇峰^[9]对无黏性散粒状材料采用相关联流动法则推导出考虑颗粒破碎的粗粒土剪胀性“统一本构模型”,建立了初始状态参量与模型参数之间的关系。孙海忠等^[10]建立了考虑颗粒破碎的粗粒土临界状态弹塑性本构模型,采用离散单元法模拟一维压缩颗粒破碎试验结果。田堪良等^[11]揭示了堆石料的强度及应力-应变变化规律,对邓肯模型进行了修正。刘萌成等^[12]构建了可以反映堆石料强度与变形特性的非线性弹性本构模型。丁瑜等^[13]通过试验研究了粗粒土颗粒级配与孔隙比等物理性质。陈开圣^[14]揭示了黄土路基填料抗剪强度特性、CBR值和回弹模量的变化规律。胡焕校等^[15]研究了花岗岩残积土路用特性变化特性。利用大型三轴剪切试验对散体颗粒物料力学性质进行测试,应力状态明确,可严

格控制试样排水条件,在水利坝体堆石料及路基填料力学性质研究中应用广泛^[16-17],是研究散体颗粒填料力学性质的有效手段。上述试验成果及测试经验为矿山排弃物料力学性质研究提供了参考。

露天矿山排矸场边坡稳定性计算时,大多采用经验法、工程地质类比法对排弃物料力学参数进行选取后进行计算,并未充分考虑物料性质及应力状态对其力学性质的影响^[16-19]。与堆石料及填料相比,排弃物料为多种物源,应力状态低,相对密度小,颗粒破碎及力学机制需要进一步深入研究。本文以西南某矿区排弃物料为研究对象,采用相似模拟级配、剪后筛分、大型三轴剪切试验方法,研究不同物料组成、级配及压实度等条件下的排弃物料破碎机理、抗剪强度及应力-应变关系,为露天矿山排土场边坡稳定性分析与变形控制提供依据。

1 试验方案

试验仪器采用水利部西北水利科学研究所试验中心研制的YSZ-200型三轴剪切试验仪(图1),试样应力及应变状态见图2,仪器参数见表1。



图1 YSZ-200型三轴剪切试验仪

Fig.1 YSZ-200 triaxial shear tester

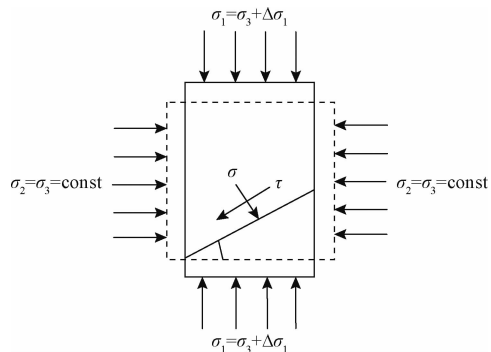


图 2 试样应力与应变状态示意图

Fig.2 Schematic diagram of the stress and strain states of samples

表 1 YSZ-200 型大型三轴剪切仪参数

Table 1 Parameters of the YSZ-200 large-scale triaxial shear apparatus

仪器型号	试样尺寸/ mm	最大轴 荷载/kN	最大围压/ MPa	轴向变形速率/ (mm·min ⁻¹)	最大轴向 行程/mm
YSZ-200	Φ300×600	2 000	5.0	0~30	300

试验物料来源于西南某矿区排矸场。本次采用相似模拟级配法对现场采取的排弃物料进行缩尺($M=5$),缩尺后最大粒径不超过 80 mm,设计了不同级配的试样参数(表 2)。

表 2 相似模拟级配参数

Table 2 Parameters of similar simulation gradation

序号	级配状态	d_{60}	d_{30}	d_{10}	C_c	C_u
1	不良	14.00	12.00	3.00	3.40	4.70
2	一般	7.90	3.95	1.12	1.76	7.05
3	良好	10.00	3.80	0.70	2.06	14.29

注: C_c 是曲率系数, C_u 为不均匀系数。

排弃物料为该露天矿剥离的二叠系龙潭组泥岩和砂岩混合物料。把泥岩($R_c=260$ MPa)及砂岩($R_c=560$ MPa)混合物料,按照不同质量比($A:B=3:7,5:5,7:3,A$ 为泥岩质量、 B 为砂岩质量),制备了直径为 300 mm、高 600 mm 的 8 组共 32 个试样,进行不同围压条件下($\sigma_3=100,200,300,400$ kPa)的三轴剪切试验(表 3)。

表 3 试验设计表

Table 3 Experimental design

序号	试样编号	$A:B$	级配	相对密度	试验条件	含水状态
1	QG-A	3:7	一般	0.65	UU	天然
2	QG-B-1	5:5	一般	0.65	UU	天然
3	QG-B-2	5:5	一般	0.65	UD	饱和
4	QG-C-1	7:3	一般	0.55	UU	天然
5	QG-C-2	7:3	一般	0.65	UU	天然
6	QG-C-3	7:3	一般	0.80	UU	天然
7	QG-D	3:7	良好	0.65	UU	天然
8	QG-E	3:7	不良	0.65	UU	天然

注:UU 是不固结不排水试验,UD 为不固结排水试验。

2 排弃物料颗粒破碎及抗剪强度性质

2.1 颗粒破碎分析

排弃物料加载时,颗粒间相互作用而发生破碎,颗粒破碎对力学性质影响明显。采用 B_g (Marsal 法)定量描述破碎情况,对同一物料剪切前、后不同粒径含量质量百分比的差值 ΔW_k 进行求和,数值范围为 0~1。本试验对大型三轴剪切试验后 8 组共 32 个试样分别进行了颗粒筛分试验,采用 Marsal 法计算了所有试样在不同围压状态下的颗粒破碎率 B_g ,绘制了 QG-A、QG-D 及 QG-E 试样剪切前后级配曲线(图 3~5)。图 3~5 说明,剪切过程颗粒发生了显著破碎,破碎程度为:级配不良(QG-E)>级配一般(QG-A)>级配良好(QG-D);另外,颗粒间在剪切力作用下,围压越大颗粒破碎对级配影响越明显。

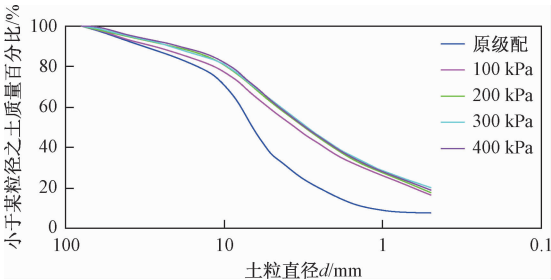


图 3 QG-A 试样(级配一般)剪切前后级配曲线

Fig.3 Grading curve of sample QG-A before and after shearing

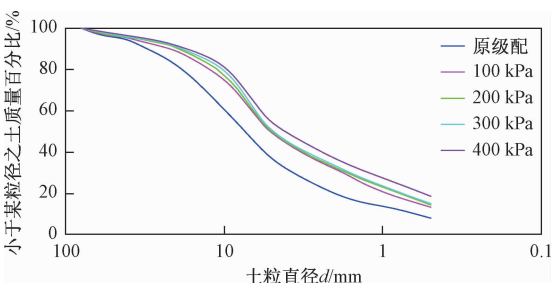


图 4 QG-D 试样(级配良好)剪切前后级配曲线

Fig.4 Grading curve of sample QG-D before and after shearing

对试验设计的 8 组共 32 个试样剪切试验前后的颗粒粒径进行了筛分,试验结果统计见表 4~6,分析如下:

(1)物料组分对破碎率 B_g 的影响。表 4 表明,同一围压条件下,随着泥岩含量增加,泥岩颗粒受砂岩颗粒剪切破坏几率增加,试样破碎率逐步增加;当泥岩与砂岩质量比由 5:5 增加至 3:7,砂岩颗粒之间剪切破坏

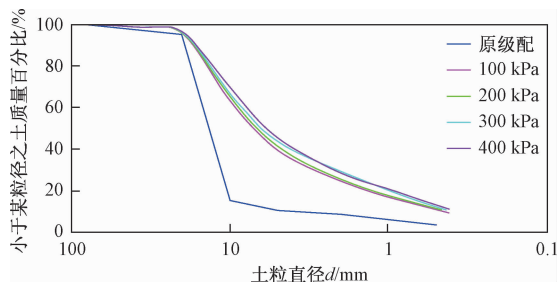


图5 QG-E 试样(级配不良)剪切前后级配曲线

Fig.5 Grading curve of sample QG-E before and after shearing

概率增加,由于砂岩强度很大,在低围压状态下砂岩颗粒破碎效应减弱。当泥岩与砂岩比例较小时,围压对颗粒破碎影响显著,随着围压增大,其破碎率逐步增加;当泥岩与砂岩比例逐步增加,围压对颗粒破碎率影响逐步减弱。

表4 不同物料组分及围压条件下的破碎率

Table 4 Statistics of the crushing rate under different material composition and confining pressure

试样编号	A:B	σ_3/kPa			
		100	200	300	400
QG-A	3:7	21.6	25.5	26.4	25.8
QG-B-1	5:5	23.4	27.4	28.3	27.6
QG-C-2	7:3	20.2	21.3	22.0	21.2

(2)物料级配对破碎率 B_g 的影响。表5表明,相同围压条件下,随着级配由不良变为良好,颗粒破碎率大幅降低。分析认为,颗粒级配变好的过程中,颗粒之间接触逐步密实,粗颗粒之间棱角接触而产生的应力集中现象逐步减弱,破碎效应降低,破碎率也大幅减小。在级配相同条件下,随着围压的增大颗粒间接触趋于紧密,颗粒棱角接触的应力集中逐步增强,破碎率也呈现逐步增大的特点。

表5 不同级配及围压条件下的破碎率

Table 5 Statistics of the crushing rate under different grading and confining pressure

试样编号	级配	σ_3/kPa			
		100	200	300	400
QG-E	不良	48.1	50.4	51.7	54.3
QG-A	一般	21.6	25.5	26.4	25.8
QG-D	良好	14.3	16.6	18.8	20.2

(3)相对密度对破碎率 B_g 的影响。表6表明,排弃物在堆积过程中自然堆放,未进行机械碾压,相对密度很低(一般为0.55~0.80)。由于试验的围压为100~400 kPa,剪切试验在围压加载过程中,松散颗粒首先发生挤密,当围压达到100 kPa时,颗粒已经密实

(相对密度接近或超过0.80)。试样无论在加载前相对密度如何,当它们加载围压后均达到了密实程度,所有试样几乎是在相同密实条件下进行剪切试验的。所以,受本次试验条件限制,表6数据不能很好地体现相对密度对破碎率的影响。但一般来讲,低围压条件下,相对密度越大,破碎率越高。表6的试验数据也能基本揭示此现象,只不过加载过程中的围压条件将破碎率变化梯度弱化,变化率不再显著。

表6 不同相对密度及围压条件下的破碎率

Table 6 Statistics of the crushing rate under different relative density and confining pressure

试样编号	相对密度	σ_3/kPa			
		100	200	300	400
QG-C-1	0.55	22.2	22.8	22.1	27.2
QG-C-2	0.65	20.2	21.3	22.0	21.2
QG-C-3	0.80	19.1	20.6	21.0	21.8

上述试验结果表明:排弃物料颗粒破碎与物料组分、级配、相对密度及围压条件密切相关,呈非线性相关性。

2.2 抗剪强度分析

对本次试验方案(表3)中的试样进行大型三轴剪切试验,并绘制了8组32个试样应力-应变曲线及莫尔圆,计算物料抗剪强度值内摩擦角(φ_u)与黏聚力(c_u)。试验结果分析如下:

(1)本次试验均为低围压状态(100~400 kPa),且试样相对密度较低,试样中颗粒在剪切作用下发生挤密、压实、破碎。试验的8组32个试样应力-应变曲线均无明显的峰值强度,表现为应变硬化特征(图6)。

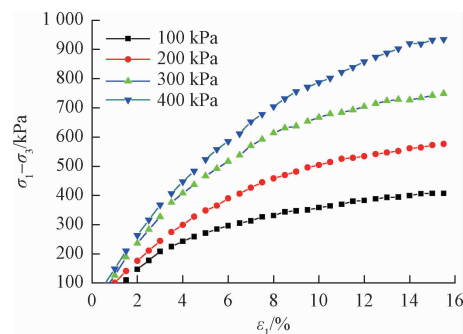


图6 QG-A 试样应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curve of sample QG-A

(2)物料组分对抗剪强度的影响。表7表明,随着泥岩含量增加,黏聚力增大,当泥岩含量增加至一定比例时,黏聚力随之降低;内摩擦角随泥岩含量增加而降低。表4和表7对比分析可知,黏聚力与破碎率变化趋势基本一致。

表 7 不同泥岩与砂岩比例条件下试样抗剪强度

Table 7 Statistics of the shear strength of samples with different mudstone and sandstone ratios					
试样编号	A:B	级配	相对密度	c_u/kPa	$\varphi_u/(\text{^\circ})$
QG-A	3:7	一般	0.65	49.24	28.0
QG-B-1	5:5	一般	0.65	85.42	27.0
QG-C-2	7:3	一般	0.65	73.35	25.0

(3)级配对抗剪强度影响。表 8 表明,随着试样级配由不良变为良好,颗粒之间充填及咬合作用加强,黏聚力也随着增加;内摩擦角变化较小。表 5 和表 8 对比分析可知,级配由不良变为良好过程中,黏聚力与破碎率变化趋势相反。

表 8 不同级配条件下试样抗剪强度

Table 8 Statistcis of the shear strength indexes of samples under different grading conditions					
试样编号	A:B	级配	相对密度	c_u/kPa	$\varphi_u/(\text{^\circ})$
QG-E	3:7	不良	0.65	41.28	27.0
QG-A	3:7	一般	0.65	49.24	28.0
QG-D	3:7	良好	0.65	55.49	27.0

(4)相对密度对抗剪强度的影响。表 9 表明,随着相对密度增加试样抗剪强度内摩擦角、黏聚力也有增加的趋势,但变化趋势不明显。对比表 6 和表 9 分析,二者的变化趋势相近,也是受到本次试验加载围压条件限制。

表 9 不同相对密度下试样抗剪强度

Table 9 Statistics of the shear strength indexes of samples with different relative densities					
试样编号	A:B	级配	相对密度	c_u/kPa	$\varphi_u/(\text{^\circ})$
QG-C-1	7:3	一般	0.55	73.35	25.0
QG-C-2	7:3	一般	0.65	75.72	28.0
QG-C-3	7:3	一般	0.80	79.78	30.5

3 排弃物料本构关系

邓肯-张模型是非线性弹性模型^[21],在水利坝体堆石料及公路填料数值计算中广泛应用。通过对上述 8 组 32 个试样的应力-应变曲线进行统计分析,认为邓肯-张模型不能够完全描述排弃物料的本构关系,需要进行修正。

3.1 应力-应变关系

邓肯-张模型在计算切线弹性模量 E_t 时,试样在不同围压下轴向应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 与轴向应变 ε_1 可以通过双曲线拟合,经变换后得到式(1):

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon_1 \tag{1}$$

式中: a 、 b ——试验常数。

根据第 3 组 QG-B-2 试样试验数据,绘制出 $\sigma_1 - \sigma_3$ 与 ε_1 的关系曲线(图 7),表明各围压条件下 $\sigma_1 - \sigma_3$ 与 ε_1 均呈线性关系。其余 7 组试样的应力-应变曲线也符合线性关系。由此说明,邓肯-张模型能够描述排弃物料的应力-应变关系。

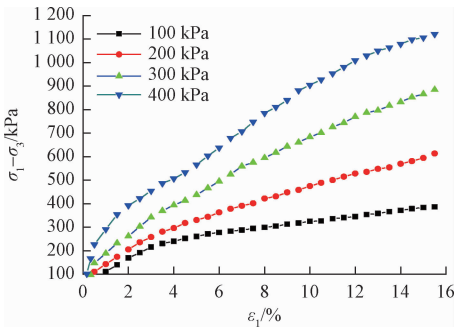


图 7 QG-B-2 试样应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curve of sample QG-B-2

3.2 径向应变与轴向应变关系

邓肯-张模型在计算切线泊松比 μ_t 时,径向应变 ε_3 与轴向应变 ε_1 通过双曲线拟合,经变换后得到式(2):

$$-\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} = f + D(-\varepsilon_3) \tag{2}$$

根据第 3 组 QG-B-2 试样试验数据,绘制出 $-\varepsilon_3/\varepsilon_1$ 与 $-\varepsilon_3$ 的关系曲线图(图 8)。曲线表明, $-\varepsilon_3/\varepsilon_1$ 与 $-\varepsilon_3$ 之间不呈线性关系。其余 7 组试样的 $-\varepsilon_3/\varepsilon_1$ 与 $-\varepsilon_3$ 关系曲线特征与第 3 组一致,也不符合线性关系。因此,排弃物料的体变特征无法用邓肯-张模型准确描述。

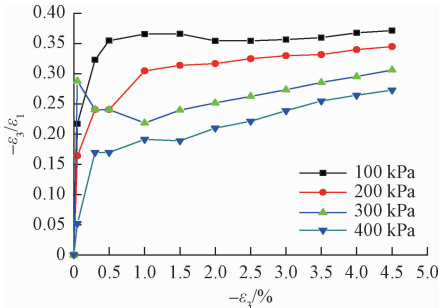


图 8 QG-B-2 试样 $-\varepsilon_3/\varepsilon_1 - (-\varepsilon_3)$ 关系图

Fig.8 $-\varepsilon_3/\varepsilon_1 - (-\varepsilon_3)$ curve of sample QG-B-2

3.3 对切线泊松比改进及验证

对不同围压条件下 QG-B-2 试样的 $-\varepsilon_3$ 与 ε_1 数据拟合分析发现, $-\varepsilon_3$ 与 ε_1 关系符合抛物线关系(图 9),抛物线参数见表 9,相关系数 R^2 均趋近于 1。

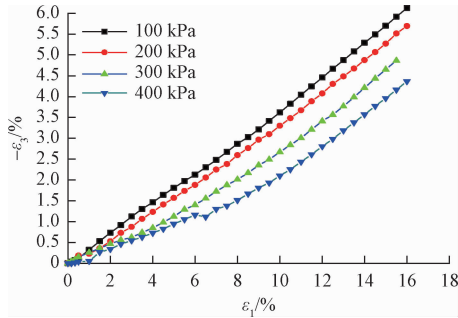


图9 QG-B-2 试样 $-\varepsilon_3$ - ε_1 拟合曲线关系图

Fig.9 $-\varepsilon_3$ - ε_1 curve of sample QG-B-2

表9 QG-B-2 试样 $-\varepsilon_3$ - ε_1 抛物线拟合参数

Table 9 $-\varepsilon_3$ - ε_1 curve fitting parameters of sample QG-B-2

σ_3/kPa	α	β	R^2
100	0.002 6	0.339 8	0.999 6
200	0.004 3	0.287 8	0.999 7
300	0.008 1	0.186 6	0.999 7
400	0.009 2	0.124 5	0.997 8

对所拟合的 $-\varepsilon_3$ 与 ε_1 抛物线关系式中的 ε_1 进行求导,得切线泊松比 μ_t 的计算公式:

$$\mu_t = 2a\varepsilon_1 + \beta \quad (3)$$

如此就得到排弃物料邓肯-张本构关系(修正)。

为了验证排弃物料邓肯-张模型(修正)的可靠性,另外新制备了 QG-B-3 试样,调整泥岩与砂岩比

例、级配、相对密度试验条件(表 10),开展 QG-B-2 试样的对比试验研究。

表 10 QG-B-3 试样大型三轴剪切试验条件

Table 10 Large triaxial shear test conditions of sample QG-B-3

序号	试样编号	A:B	级配	相对密度	试验条件	含水状态
9	QG-B-3	3:7	良好	0.85	UD	饱和

对 QG-B-3 试样试验结果 $-\varepsilon_3$ 与 ε_1 数据进行拟合,拟合结果(表 11)表明:QG-B-3 试样的 $-\varepsilon_3$ - ε_1 采用抛物线拟合的相关系数为 0.99,相关性好。

表 11 QG-B-3 试样 $-\varepsilon_3$ - ε_1 曲线拟合参数

Table 11 $-\varepsilon_3$ - ε_1 curve fitting parameters of sample QG-B-3

σ_3/kPa	α	β	R^2
100	0.005 0	0.306 2	1.000 0
200	0.008 6	0.424 4	0.998 6
300	0.016 2	0.626 7	0.999 2
400	0.018 5	0.752 4	0.997 6

采用 QG-B-2 试样所拟合的 $-\varepsilon_3$ 与 ε_1 抛物线关系式(3)及表 11 中 α 及 β 值,对体变与轴向应变关系进行了预测(图 10)。

预测结果表明: ε_v - ε_1 关系曲线中预测值与 QG-B-3 试验室实测值较为吻合,故肯-张模型(修正)可以描述排弃物体变特征。

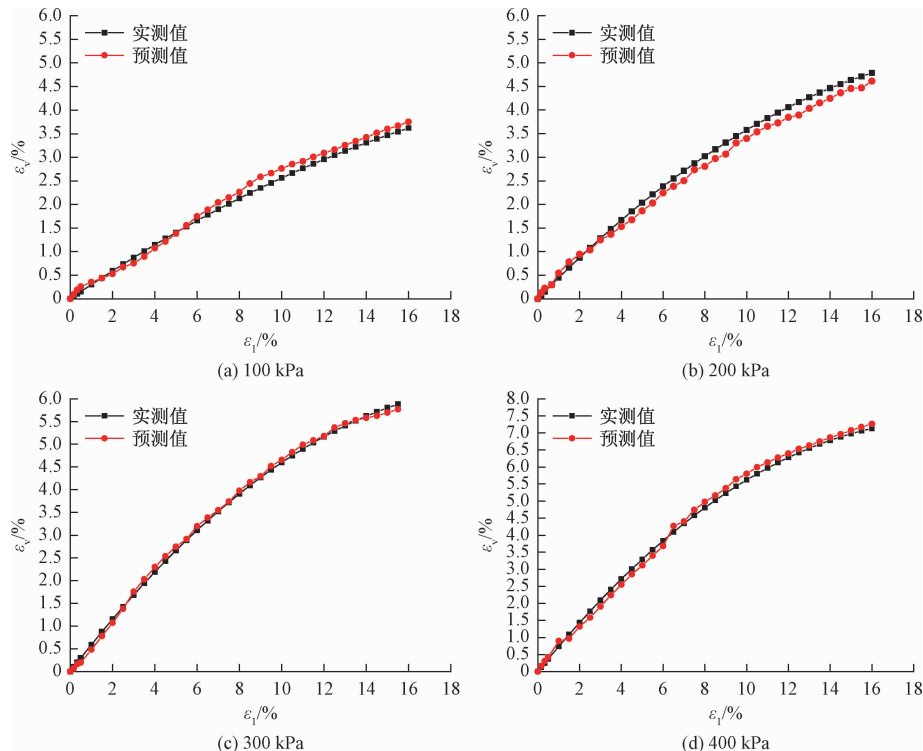


图 10 ε_v - ε_1 试验值与预测值对比关系图

Fig.10 Comparison of experimental and predicted ε_v - ε_1 values

4 结论

(1) 排弃物料为散体颗粒材料, 剪切破碎及力学机制复杂。本试验所采用材料级配模拟、大型三轴剪切及剪后颗粒筛分方法是研究排弃物物理力学性质的有效手段。

(2) 排弃物料颗粒破碎与物料组分、级配、相对密度及围压条件密切相关, 呈非线性相关性。

(3) 试验发现, 排弃物试样均无明显的峰值强度, 应力-应变关系具有应变硬化特征, 分析认为与低围压状态及相对密度较小有关。排弃物料抗剪强度与颗粒破碎密切相关, 受物料组成、颗粒级配、相对密度及围压等因素影响。

(3) 排弃物料不固结排水试验表明: 各组试样在不同围压下, $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ε_1 均呈线性关系, $-\varepsilon_3$ 与 ε_1 呈抛物线关系, 据此对邓肯-张模型进行了修正, 修正后的邓肯-张模型能够描述排弃物料应力-应变关系特征。

参考文献 (References):

- [1] 杨幼清, 胡夏嵩, 李希来, 等. 高寒矿区草本植物根系增强排土场边坡土体抗剪强度试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(6): 105 - 113. [YANG Y Q, HU X S, LI X L, et al. An experimental study of the soil shear strength reinforcement of a mine dump slope by herbaceous root systems in alpine regions [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(6): 105 - 113. (in Chinese)]
- [2] DING Xiao-hua, ZHOU Wei, LU Xiang, et al. Physical simulation test of soil-rock mixture from synthetic transparent soil[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(12): 3085 - 3097.
- [3] 侯殿昆, 宗成军, 宋秀琴. 露天矿排土场相似材料模型试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007(6): 813 - 815. [HOU D K, ZONG C J, SONG X Q. Study on similar material model experiment of open-pit mine dump [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007(6): 813 - 815. (in Chinese)]
- [4] 虎万杰, 李爱兵, 邹平, 等. 某矿山排土场的散体岩土试验及其 FLAC^{3D}数值模拟[J]. 现代矿业, 2019, 35(3): 53 - 58. [HU W J, LI A B, ZOU P, et al. Rock and soil test and FLAC^{3D} numerical simulation of loose bodies in a mine dump [J]. Modern Mining, 2019, 35(3): 53 - 58. (in Chinese)]
- [5] 张默, 邱宇, 曹作忠, 等. 某排土场散体物料力学性质的试验[J]. 现代矿业, 2018, 34(8): 176 - 190. [ZHANG M, QIU Y, CAO Z Z, et al. Test of the mechanical property of the bulk material of a dump [J]. Modern Mining, 2018, 34(8): 176 - 190. (in Chinese)]
- [6] 王党朝, 刘慧芳, 肖武, 等. 胜利一号露天煤矿北排土场土壤物理性质空间分布研究[J]. 中国煤炭, 2018, 44(11): 135 - 140. [WANG D C, LIU H F, XIAO W, et al. Research on spatial distribution of soil physical properties in north dump of Shengli No. 1 opencast coal mine [J]. China Coal, 2018, 44(11): 135 - 140. (in Chinese)]
- [7] 黄达, 何兴江, 裴向军, 等. 煤矿排土场边坡变形失稳特征 FLAC^{3D}模拟分析[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 61 - 65. [HUANG D, HE X J, PEI X J, et al. FLAC^{3D} simulation for deformation failure characteristics of mine waste accumulation slope of a coalmine [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(6): 61 - 65. (in Chinese)]
- [8] 史江伟, 朱俊高, 王平, 等. 一个粗粒土的非线性弹性模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 154 - 159. [SHI J W, ZHU J G, WANG P, et al. Nonlinear elastic model for coarse-grained soils [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(2): 154 - 159. (in Chinese)]
- [9] 贾宇峰, 迟世春, 林皋. 考虑颗粒破碎的粗粒土剪胀性统一本构模型[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1381 - 1388. [JIA Y F, CHI S C, LIN G. Dilatancy unified constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1381 - 1388. (in Chinese)]
- [10] 孙海忠, 黄茂松. 考虑颗粒破碎的粗粒土临界状态弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1284 - 1290. [SUN H Z, HUANG M S. Critical state elasto-plastic model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(8): 1284 - 1290. (in Chinese)]
- [11] 田堪良, 张慧莉, 骆亚生. 堆石料的剪切强度与应力-应变特性[J]. 岩土力学与工程学报, 2005, 24(2): 657 - 661. [TIAN K L, ZHANG H L, LUO Y S. Shear strength and stress-strain properties of rockfill materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 657 - 661. (in Chinese)]
- [12] 刘萌成, 黄晓明, 高玉峰. 堆石料强度变形特性与非

- 线性弹性本构模型研究[J]. 岩土力学, 2004, 25 (4): 798 - 802. [LIU M C, HUANG X M, GAO Y F. Research on strength-deformation characteristics and nonlinear elastic model of rockfills[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (4): 798 - 802. (in Chinese)]
- [13] 丁瑜, 饶云康, 倪强, 等. 颗粒级配与孔隙比对粗粒土渗透系数的影响[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 108 - 116. [DING Y, RAO Y K, NI Q. et al. Effects of gradation and void ratio on the coefficient of permeability of coarse-grained soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 108 - 116. (in Chinese)]
- [14] 陈开圣, 沙爱民. 禹(门口)阎(良)黄土路基填料强度规律[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(5): 44 - 48. [CHEN K S, SHA A M. Study on strength characteristic for loess subgrade filter of Yumenkou-Yanliang highway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(5): 44 - 48. (in Chinese)]
- [15] 胡焕校, 孙端阳, 周丁. 花岗岩残积土路用性能影响因素研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(5): 92 - 99. [HU H X, SUN D Y, ZHOU D. A study of influence factors on the road characteristics of granite residual soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5): 92 - 99. (in Chinese)]
- [16] 张启岳. 用大型三轴仪测定砂砾料和堆石料的抗剪强度[J]. 水利水运科学研究, 1980(1): 25 - 38. [ZHANG Q Y. The shear strength of gravel and rockfill measured by large triaxial apparatus[J]. Hydro - Science and Engineering, 1980(1): 25 - 38. (in Chinese)]
- [17] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 21 - 28. [LI G X. Higher soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 21 - 28. (in Chinese)]
- [18] 王光进, 杨春和, 张超, 等. 超高排土场的粒径分级及其边坡稳定性分析研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 905 - 913. [WANG G J, YANG C H, ZHANG C, et al. Research on particle size grading and slope stability analysis of super - high dumping site[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 905 - 913. (in Chinese)]
- [19] 杜炜平, 颜荣贵. 高台阶排土场技术及其发展趋势[J]. 矿冶工程, 1993, 18(1): 18 - 22. [DU W P, YAN R G. Techniques for high - bench dumping sites and its development[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1993, 18(1): 18 - 22. (in Chinese)]
- [20] 石建勋, 刘新荣, 廖绍波, 等. 矿区排土场堆载对边坡稳定性影响的分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 258 - 262. [SHI J X, LIU X R, LIAO S B, et al. Analysis of slope stability affected by load of waste dump of mining area[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(2): 258 - 262. (in Chinese)]
- [21] 闫勋念. 粗粒土力学特性三轴试验与模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. [YAN X N. Experimental study and simulation on the mechanical behavior of coarse grained soil[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese)]

编辑: 汪美华