

粗粒土初始结构效应对颗粒破碎的影响研究

赵天丞¹, 魏玉峰¹, 薛元^{1,2}, 查浩¹, 胡舒寒¹, 潘远阳¹

1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031

[摘要] 为研究粗粒土的初始结构综合特征对其颗粒破碎程度的影响, 采用一种改进的直剪试验, 获得不同初始结构条件下粗粒土剪切破坏参数, 结合图像识别技术, 获取直剪过程中粗粒土的结构特征。通过主成分分析法, 建立了初始结构综合参数 Y_0 , 以此对不同初始结构粗粒土的结构特征进行定量描述。最终, 构建了一种离散元数值模型, 该模型真实地反映了颗粒破碎过程。研究表明: (1) 不同粒径组的颗粒自身破碎程度受其质量分数影响, 且整体破碎程度主要由粗颗粒质量分数决定; (2) 颗粒破碎程度随法向应力增大呈现线性变化规律, 而加权裂离率 B_d 与初始结构综合参数 Y_0 则呈指数函数关系; (3) 在相同法向应力条件下, 当颗粒特征强度越大时, 不同初始结构间颗粒破碎差异越小, 并根据颗粒特征强度 σ_c 与加权裂离率 B_d 曲线建立了二者的函数关系式; (4) 结合试验结果, 最终构建了考虑初始结构效应的粗粒土破碎程度预测模型, 并通过相关文献验证了该模型的适用性。

[关键词] 初始结构; 颗粒破碎; 粗粒土; 量化指标; 可视化直剪试验

[分类号] TU43

[文献标志码] A

Study on the initial structural effects of particle breakage in coarse-grained soils

ZHAO Tiancheng¹, WEI Yufeng¹, XUE Yuan^{1,2}, ZHA Hao¹,
HU Shuhan¹, PAN Yuanyang¹

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China

Abstract: Improved direct shear test to determine the parameters of coarse-grained soil under initial structural conditions. The aim to investigate the impact of the comprehensive initial structural characteristics Y_0 of coarse-grained soil on the extent of particle breakage. The structural

[收稿日期] 2023-08-15。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(42072303)。

[第一作者] 赵天丞(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 岩土工程, E-mail: 1258060501@qq.com。

[通信作者] 魏玉峰(1979—), 男, 教授, 研究方向: 地质工程、岩土工程, E-mail: weiyufeng@cdut.edu.cn。

[引用格式] 赵天丞, 魏玉峰, 薛元, 等, 2024. 粗粒土初始结构效应对颗粒破碎的影响研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(3): 489-499+512.

Zhao T C, Wei Y F, Xue Y, et al., 2024. Study on the initial structural effects of particle breakage in coarse-grained soils[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(3): 489-499+512.

characteristics of coarse-grained soil direct shear were obtained using image recognition technology initial structures, discrete element numerical model that accurately represent the particle break. The results: (1) degree of different particle size influenced by their content, the overall degree mainly determined by the presence of coarse particles (2) degree of particle breakage increase linearly with normal stress, while relationship between the weighted separation (B_d) and the comprehensive parameter (Y_0). (3) The greater the characteristic strength under the same normal stress, the smaller the difference between different initial structures. A functional relationship established between the characteristic strength of the particles (σ_c) and the curve of the weighted cleavage (B_d). (4) the test results predict the degree of coarse-grained soil the initial verified literature.

Key words: initial structure; particle breakage; coarsegrained soil; quantitative index; visual direct shear test

粗粒土常被当作道砟用在铁路路基中。然而,在应力集中作用下其会发生颗粒剪切破碎现象,从而改变其原始级配,导致地基不均匀沉降而影响工程安全。目前,研究多集中于粗粒土宏观力学特征,鲜有研究其细观力学特征对颗粒破碎影响(孟敏强等,2022)。因此,研究粗粒土初始细观结构对颗粒破碎的影响有着重要意义。为了度量颗粒破碎程度,Marsal(1967)采用颗粒破碎前后的粒组质量分数来定义颗粒破碎率 B_g ; Hardin(1985)基于颗粒极限破碎理论定义相对破碎率 B_r ; Einav(2007)将极限分形级配作为终止级配,重新修正了相对破碎率 B_E ; 郭万里等(2019)利用初始级配与破碎大小的关系再次对 B_E 进行修正,得到了 B_w , 并建立应力应变到级配分布的转换关系式; 徐日庆等(2013)利用颗粒破碎在粒径间的分布关系,获取从粒组至颗粒整体综合评价粗粒土破碎情况,得到裂离比 R_s , 以破碎前粒径组含量为权重定义加权裂离率 B_d 。这些量化指标都在研究颗粒破碎规律上得到了广泛应用。

粗粒土大多为不同粒径颗粒的聚合物,在初始条件下表现出一定的结构状态。王洋等(2022)利用 AHP-熵权法探讨了初始结构效应中各量化指标的影响因子; 张晨曦等(2022)探讨了不同初始结构条件下结构强度与抗剪强度关系; 姜景山等(2009)通过数值分析方法获取了颗粒剪切过程中的结构信息,从而获取颗粒剪切破坏的运动规律。由此看出,粗粒土的初始结构决定着其力学机制的复杂性。同时,粗粒土的结构特征也直接影响着颗粒破碎程度。当试验材料、试验条件相同时,粗粒土通过其多尺度结构直接影响着颗粒的破碎程度。刘汉龙等(2005)提出在三轴试验

中,当围压和材料试验参数已知时可直接预估颗粒破碎率; 陈镠芬等(2015)根据破碎前的分形维数和拟合参数来估计不同围压下粗粒土的相对破碎率; 程壮等(2022)运用离散元方法讨论钙质砂颗粒形状与级配对颗粒破碎的影响; 谢宝香等(2022)通过红砂岩粗粒料进行固结不排水试验发现:粗颗粒质量分数越高,颗粒破碎程度越大; Zhao et al. (2022)运用离散元方法模拟单颗粒破碎试验和测压仪试验探讨了配位数对堆石料颗粒破碎的影响。

综合前人研究成果发现,目前关于初始结构对颗粒破碎程度的影响研究大多集中于初始结构中的单个方面,且研究内容主要为试验结束状态下颗粒破碎指标的变化规律,不能综合评价初始结构对粗粒土颗粒破碎的影响。因此,本文通过分析粗粒土中各粒径组对颗粒破碎程度的影响,借助图像识别技术,定量评价粗粒土的结构状态,采用主成分分析确定唯一初始结构综合参数,并揭示粗粒土破碎率与初始结构的内在联系,进一步考虑颗粒强度对破碎率的影响,最终建立考虑初始结构效应的粗粒土破碎程度预测模型,为研究粗粒土破碎演化规律提供参考。

1 直剪试验及粗粒土结构获取

1.1 试验材料

粗粒土的颗粒形态特征、排列特征、接触特征皆为颗粒骨架效应的具体呈现。为研究粗粒土初始结构对颗粒破碎的影响,本文依据 3 种特征在试样中的差异,参考梁彭等(2022)划分结果,将粗粒土试样初始结构类型分为悬浮密实、密实骨架、松散接触与骨架孔隙结构(图 1)。并通过改变试样粒径组成来实现 4 种结构类型。

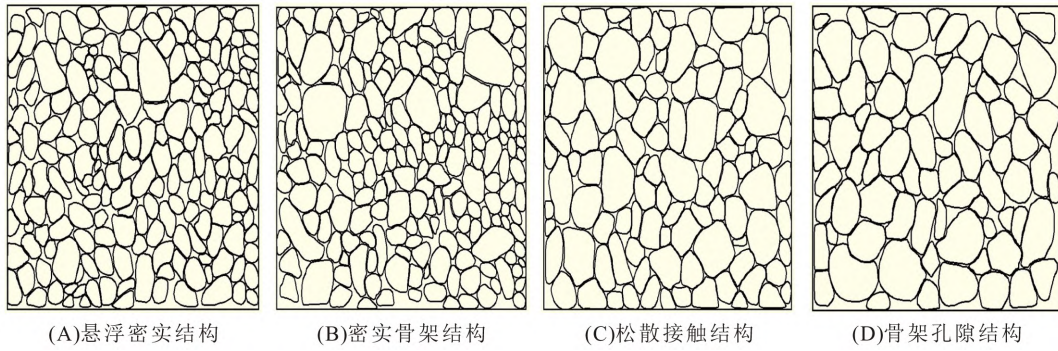


图 1 粗粒土初始结构类型
Fig. 1 Initial structure of coarse-grained soil

蔡正银等(2016)研究了不同级配、密度、围压条件下堆石料的颗粒破碎现象,发现破碎颗粒粒径主要集中在 20 mm 以上的颗粒。因此,试验选取岷江沿岸中兴镇段直径在 10~40 mm

的卵石颗粒,颗粒强度具有相似性,并对试验材料 10~15 mm, >15~20 mm, >20~30 mm 以及 >30~40 mm 4 个粒径组进行分组研究,材料配比见表 1。

表 1 试验前颗粒配比信息
Table 1 Particle ratios of the samples before the test

结构类型	各粒径组颗粒质量分数/%			
	>30~40 mm	>20~30 mm	>15~20 mm	10~15 mm
悬浮密实	5	10	30	55
密实骨架	15	25	30	30
松散接触	30	30	25	15
骨架孔隙	45	35	10	10

1.2 改进直剪试验

由于三轴试验的局限性,本文采用改装后的可视化直剪仪获取粗粒土的结构状态(图 2),并使用图像采集系统获取有效的实时记录。

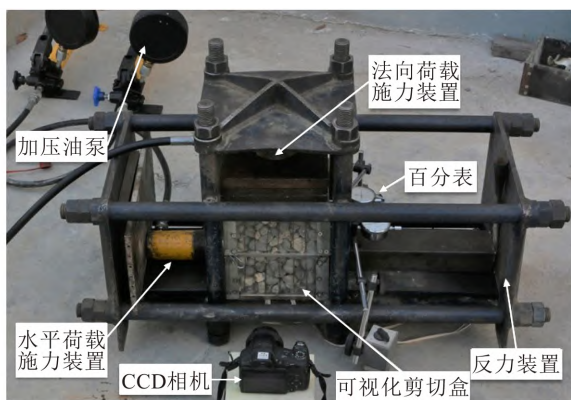


图 2 可视化直剪装置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the apparatus used for the visual direct-shear tests

对 4 种结构类型的粗粒土试样在 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 400 kPa 法向应力下进行直剪

试验。装样时需将粗粒料振捣密实分层装入剪切盒;剪切时先施加法向应力,待固结稳定后再施加水平剪切力;经预试验得知,试样剪切位移在 15~20 mm 时经过剪胀作用逐渐密实,已经基本发生剪切破坏,颗粒破碎效应大大减小,因此设置剪切位移达到 25 mm 停止试验,并进行筛分获得颗粒破碎后的颗粒级配分布。

1.3 粗颗粒结构特征获取

这里借助改进后的可视化直剪仪,利用数码相机记录直剪过程中的结构信息,并结合 MATLAB 软件对图像进行二值化处理,最终通过 Image-pro 软件进行图像识别和信息提取(图 3)。



图 3 粗粒土照片图像处理
Fig. 3 Processing of images of coarse-grained soil samples

传统分析颗粒结构一般借助分形理论研究。分形理论从形态角度出发,探讨不规则事物尺度变换下的不变性,但本身作为单一指标不能很好地刻画不同结构下的颗粒特点,在反映颗粒直剪过程中定量表达明显单薄。本文采用颗粒形态特征、排列特征、接触特征等多角度影响因素,来体现粗粒土结构差异性。分别从初始结构中提取圆度、定向角、概率熵、配位数与平面孔隙率(Wadell,1932;刘士伟,2017)。

圆度: $S = P^2/4\pi A$; 概率熵: $H_m = - \sum_{i=1}^n P_i \log {}_t P_i$; 配位数: $C_n = \sum_{n=1}^{N_d} n_c^{(d)} / N_d$; 平面孔隙率: $n = S_v / S$ 。

式中: P 为不规则颗粒的最大横截面周长; A 为不规则颗粒的最大横截面面积; P_i 为颗粒单元体定向角; t 为颗粒排列方向的方位区数, $t=18$; N_d 为颗粒总数目; n_c 为 d 颗粒的接触数目; S_v 为平面孔隙总面积; S 为总面积。

计算结果见表 2(圆度、定向角和概率熵结果为平面所有颗粒的平均值)。

表 2 初始结构参数表
Table 2 Initial structural parameters of soil

初始结构类型	法向应力/kPa	圆度	定向角/(°)	概率熵	配位数	平面孔隙率/%
悬浮密实	100	1.29	87.40	0.964	4.63	23.06
	200	1.30	85.27	0.965	4.74	21.41
	300	1.32	86.01	0.975	4.65	16.39
	400	1.32	87.39	0.969	4.69	17.52
密实骨架	100	1.33	88.25	0.967	4.71	15.87
	200	1.31	85.53	0.974	4.67	24.82
	300	1.32	91.72	0.971	4.61	18.56
	400	1.34	88.59	0.974	4.64	24.58
松散接触	100	1.30	87.21	0.969	4.56	18.91
	200	1.32	91.25	0.940	4.64	19.07
	300	1.34	95.30	0.959	4.67	13.48
	400	1.34	89.50	0.957	4.51	20.80
孔隙骨架	100	1.31	91.96	0.952	4.72	19.86
	200	1.33	95.31	0.943	4.54	20.52
	300	1.32	92.45	0.960	4.58	17.30
	400	1.33	96.28	0.938	4.45	15.93

2 试验结果分析

为全面度量颗粒破碎程度,参照裂离参量

(徐日庆等,2013)的计算方法,依据级配分布,对粗粒土 $d_{min} \sim d_{max}$ 里取 n 个界限粒径,裂离比 R_k 就是针对同一粒组颗粒的破碎情况提出的量化参数,表示粒组颗粒破碎后,按照粒径大小排除在原来的粒组之外的颗粒质量占碎裂体总质量的百分比,对单组粒径和土体整体破碎情况进行定量描述,加权裂隙率 B_d 具体表述为:

$$B_d = \frac{1}{100\%} \sum_{k=1}^{n+1} W_k R_k \quad (1)$$

式中:裂离比 R_k 表示单个粒径组破碎程度,可由等比级数计算得出; W_k 为破碎前颗粒位于粒组的质量分数。

计算求得粗粒土不同法向应力下的粒径组破碎程度,做出不同初始结构试样的破碎率对比图(图 4):

(1)对于粒径 $>30 \sim 40$ mm 与 $>20 \sim 30$ mm 粒径组,不同的初始结构状态破碎程度出现差异化。粗颗粒的含量增多就意味着粗颗粒接触的颗粒数减少,接触点变少,棱角处更易发生应力集中破碎,使粗颗粒自身破碎程度变高。因此,对于相同的大粒径颗粒,骨架孔隙结构与松散接触结构试样表现出更易破碎的性质,粒径在 $>15 \sim 20$ mm 时,不同粗粒含量的颗粒破碎程度较为接近,而密实骨架试样的裂离比 R_k 明显高于其他组,通过可视化窗口发现,密实骨架结构试样相对悬浮密实结构试样所含细颗粒更少,粒径在 $>15 \sim 20$ mm 颗粒在直剪过程中配位数更少,因此颗粒更容易破坏;当粒径减小至 $10 \sim 15$ mm 时,在一定法向应力变化范围内,随着试样中细颗粒含量增加粒径组裂离比也相对增加的趋势,说明细颗粒含量也对粒径组破碎程度有一定影响。

(2)一般来说,粗颗粒存在缺陷多于细颗粒,破碎程度更高。密实骨架结构试样与悬浮密实结构试样 2 组试样在不同粒径组裂离比 R_k 比较接近,这是由于这 2 组试样中粗颗粒含量较少,细颗粒能较好地填充孔隙,颗粒充分接触,在试样结构状态中占主导地位。Rahman et al. (2011) 提出颗粒骨架状态从细颗粒占主导地位与粗颗粒骨架状态之间会有一个过渡区。而粗颗粒质量分数在 $40\% \sim 60\%$ 时正处于这个过渡区,粗颗粒含量增大,粒径组颗粒破碎程度出现明显变化。

最终,计算获取不同初始结构试样在法向应力下的加权裂离率 B_d (图 5):在法向应力较小

(100 kPa)时,不同初始结构的加权裂离率较为接近,随着应力增大,加权裂离率出现差异,且在研究的法向应力范围内呈现线性增加趋势。李雪梅等(2015)对 2 种粗粒料进行大型直剪试

验中发现:粗粒料在法向应力 300~1 200 kPa 作用下,加权裂离率呈现线性变化趋势。因此,加权裂离率在中高法向应力范围内随法向应力呈现线性递变规律。

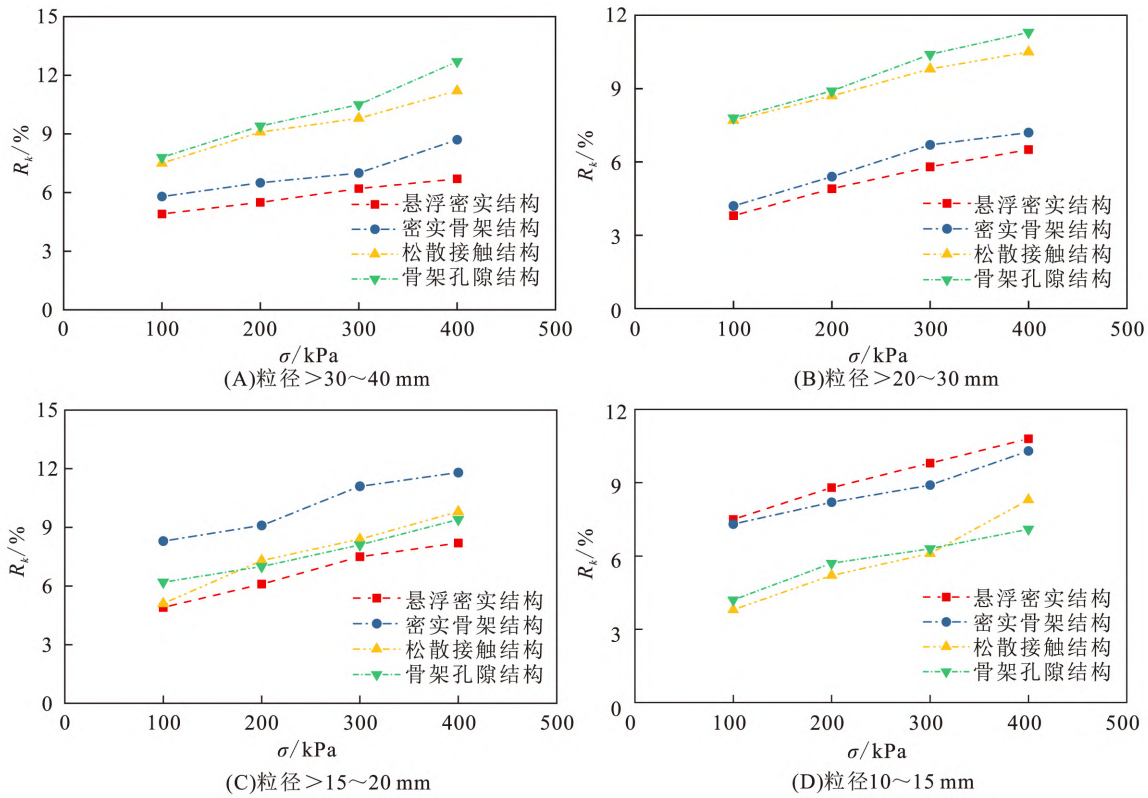


图 4 各粒组下粗粒土 $R_k-\sigma$ 关系图

Fig. 4 $R_k-\sigma$ of curve of each group of particles of coarse-grained soil

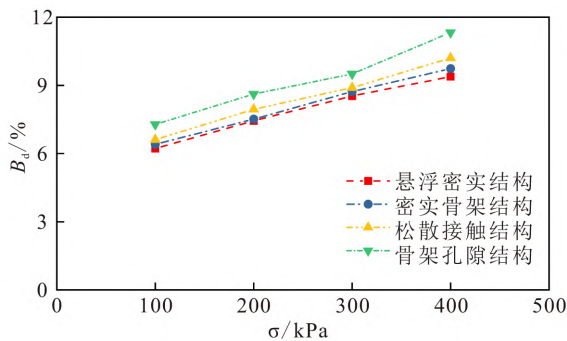


图 5 不同初始结构粗粒土 $B_d-\sigma$ 关系图

Fig. 5 $B_d-\sigma$ curves of coarse-grained soils with different initial structures

随着法向应力提高,粗颗粒含量高的土样与低含量土样在同等受荷条件下差异性会扩大。而骨架孔隙结构试样加权裂离率 B_d 明显高于其他组,这表明土体粗颗粒含量较多时,土体整体破碎程度会出现显著提高。同时,即使不同粒径组颗

粒破碎裂离比不同,但相同级配的粗粒土的加权裂离率仍随法向应力呈线性变化,这与徐日庆等(2013)在关于粗粒土三轴剪切试验的成果具有一致性。

3 初始结构特征对破碎影响研究

3.1 结构综合参数计算与分析

PCA 方法(武仁杰等,2018)基于线性组合数据变异最大原则,通过分析不同结构量化指标间的潜在因素,从相互关联的指标里提取互不关联的主成分低维指标,保证新提取的主成分指标相互独立,方程式如下:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= a_{11} X_1 + a_{12} X_2 + \dots + a_{15} X_5 \\ Y_2 &= a_{21} X_1 + a_{22} X_2 + \dots + a_{25} X_5 \\ &\vdots \\ Y_5 &= a_{51} X_1 + a_{52} X_2 + \dots + a_{55} X_5 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 分别表示为粗粒土试样圆度、定向角、概率熵、配位数与平面孔隙率指标。方程式满足: $a_{i1} + a_{i2} + \dots + a_{i5} = 1$, 并且, 提取出来的 Y_1, Y_2, \dots, Y_5 间互不相关; Y_1, Y_2, \dots, Y_5 的方差之和与 X_1, X_2, \dots, X_5 的方差之和相等。

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 1 & 0.396 & -0.255 & -0.236 & -0.04 \\ 0.396 & 1 & -0.833 & -0.629 & 0.233 \\ -0.255 & -0.833 & 1 & 0.617 & -0.222 \\ -0.236 & -0.629 & 0.617 & 1 & -0.526 \\ -0.04 & 0.233 & -0.222 & -0.526 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由矩阵样本相关系数可知, 数据间存在相关性, 信息相互重叠相互影响, 多元回归受到影响。经检验 KMO 取样试切量数(用于比较变量间相关系数指标)为 $0.667 > 0.6$, 检验显著性为 0.01 , 符合 PCA 分析要求。

(2) 计算矩阵 Σ 的特征值并将其由大到小排序编号, 即 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_5$, λ_i 为相应的主成分 Y_i

PCA 分析步骤如下:

(1) 将原始数据矩阵中的变量做标准化处理, $X' = \frac{X - \mu}{\sigma}$, X, X' 分别表示标准化前后变量。计算各原始变量间的协方差矩阵 Σ , 求得相关矩阵为

的方差, Σ 的特征向量矩阵 T_n 为式(3)的系数矩阵。

(3) 当前 k 个主成分的方差累积贡献率, 即 $\sum_{i=1}^k \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i \geq 80\%$ 时, k 个主成分变量包含了原始数据的大部分信息, 可用于下一步计算, 结果见表 3。

表 3 初始特征值与方差贡献率表
Table 3 Initial eigenvalues and contributions of variance

成分	初始特征值		
	总计	方差百分比/%	累积/%
1	2.718	54.369	54.369
2	1.121	22.412	76.781
3	0.705	14.090	90.871
4	0.304	6.077	96.948
5	0.153	3.052	100.000

前 2 个主成分累计方差贡献率达到 76.781%, 由于试样的颗粒结构特征存在一定的离散型, 提取前 2 个主成分(特征根 $\lambda > 1$) 进行计算得到主成分与变量数据的关系表达式为:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= 0.0983X_1 + 0.2007X_2 \\ &\quad - 0.1941X_3 - 0.1898X_4 + 0.1080X_5 \\ Y_2 &= 0.5602X_1 + 0.1728X_2 \\ &\quad - 0.1011X_3 + 0.2201X_4 - 0.62726X_5 \end{aligned} \right\} (4)$$

根据各主成分方差与最终累计方差关系, 确定最终综合参数 Y 表达式:

$$Y = 0.2331X_1 + 0.1926X_2 - 0.1669X_3 - 0.0702X_4 - 0.1066X_5 \quad (5)$$

由式(5)可知, 综合参数 Y 与圆度、定向角之间具有较强的正相关性, 相关系数大于 0.15, 与平面孔隙率、概率熵、配位数之间存在较强负相关, 说明综合参数 Y 一定程度上能够反映结构的有序性与接触特征。

3.2 初始结构与临界破碎率关系

通过试验得到粗粒土初始结构综合参数 Y_0 如表 4 所示。

由表 4 可以看出, 相同初始结构的试样在综合参数上存在差异, 但参数大小在一定范围区间内, 且不同的初始结构综合参数所在范围区间不同, 说明结构综合参数取值能够有效地将不同初始结构区分, 具有一定的代表性。对于相同的初始结构试样, 采用平均综合参数量化其初始结构。

为探讨初始结构对颗粒破碎程度的影响, 整理出结构平均综合参数与加权裂离率的变化点(图 6)。由图可知, 颗粒综合参数对粗粒土颗粒破碎特性有较大的影响。王萌等(2020)在开展粗颗粒旋转压实试验后, 也得出了在粗粒土的四中初始结构中, 粗颗粒含量越大, 颗粒破碎情况越严重这一结论。

表 4 不同初始结构综合参数 Y_0 指标计算

Table 4 Calculated values of Y_0 of the integrated parameters of different initial structures

结构类型	法向应力	综合参数 Y_0	平均综合参数
悬浮密实	100	-0.607	-0.49
	200	-0.663	
	300	-0.351	
	400	-0.339	
松散接触	100	-0.529	0.22
	200	0.236	
	300	0.759	
	400	0.402	
密实骨架	100	-0.087	-0.17
	200	-0.633	
	300	-0.121	
	400	-0.026	
骨架孔隙	100	-0.046	0.45
	200	0.649	
	300	0.251	
	400	0.935	

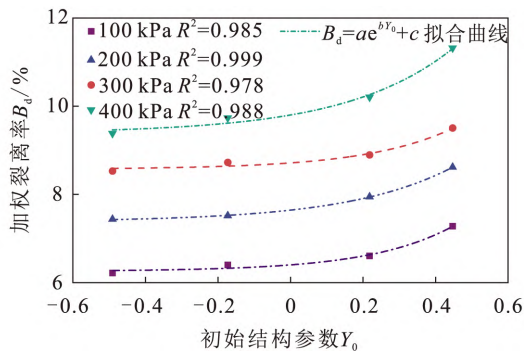


图 6 加权裂离率与初始结构综合参数 Y_0 的关系

Fig. 6 Relationship between weighted discarding ratio and the comprehensive parameter of the initial structure

进一步分析结构综合参数 Y_0 对加权裂离率 B_d 的影响规律,发现两者满足指数函数关系。因此,粗粒土加权裂离率 B_d 可表示为:

$$B_d = ae^{bY_0} + c \quad (6)$$

式中: a, b, c 均为拟合参数。根据式(6)对试验数据拟合,可以看出决定系数 R^2 均在 0.95 以上,拟合程度较好,具有一定的可靠性。

结合图 5 所反映的法向应力与加权裂离率呈现线性关系,因此,法向应力也是影响加权裂离率的显著变量,可对式(6)进行修正为:

$$B_d = ae^{bY_0} + k \frac{\sigma}{p_a} + B_0 \quad (7)$$

式中: B_0 表示当 bY_0 足够小时,法向应力为 0 条件下颗粒直剪后的加权裂离率; p_a 为大气压强,

取 101 kPa; B_d 为最终加权裂离率;

将计算获取的 Y_0, σ 代入上述回归方程,得到加权裂离率拟合值与实际值对比(图 7)。从图中可以看出,试验值在计算理论平面附近,回归计算结果与试验值相符,具有较高的精度。

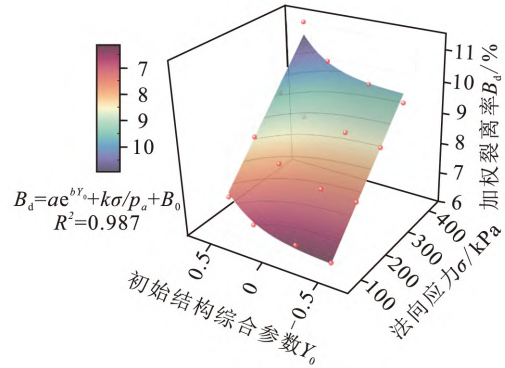


图 7 初始结构综合参数、法向荷载与破碎率关系平面

Fig. 7 Plane of the relationships among the initial structural parameters, normal load, and fracture ratio

4 初始结构对破碎程度预测模型

4.1 PFC 直剪试验模型

颗粒强度是影响颗粒破碎程度的重要指标,由于物理试验中选取的卵砾石整体强度较高,反映出的不同初始结构粗粒土最终破碎程度差异也较小。因此,为对比不同初始结构效应下的颗粒强度对整体破碎率的影响,采用数值模拟方法对物理试验进行复现,获取试验过程中破碎程度变化特征。

在 PFC^{2D} 中, Cluster 颗粒簇能够以颗粒黏结的方式模拟真实块石,当外荷载作用力超过黏结强度时,颗粒间黏结失效,破坏后的局部颗粒簇从原来整体颗粒簇脱落,复现了颗粒破碎过程的形态随机性。本次模拟导入在物理直剪试验中获取的试样结构特征(图 8),并通过多次试算确定最终的数值模拟细观参数如表 5 所示。

表 5 数值模型材料参数

Table 5 Material parameters of the numerical model

参数名称	标定值
块石颗粒刚度比	2.5
平行黏结半径系数	0.4
平行黏结切向刚度/MPa	1.5, 2.5, 3.5
接触黏结法向刚度/Pa	1×10^6
摩擦因数	0.6
平行黏结法向刚度/MPa	1.5, 2.5, 3.5
平行黏结弹性模量/Pa	5×10^9
接触黏结切向刚度/Pa	6×10^5

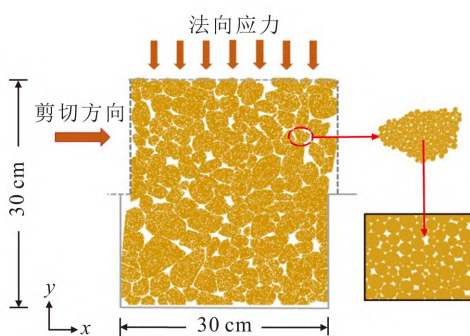


图 8 数值试验颗粒结构特征

Fig. 8 Particle structure characteristics of numerical test

通过调试的细观参数使其与物理试验结果一致,此时颗粒平行黏结键强度为 2.5 MPa,剪应力-应变曲线如图 9 所示,级配变化结果如图 10 所示。从图中可以看出,构建的 PFC 数值模型能比较准确地反映颗粒破碎对初始结构影响。

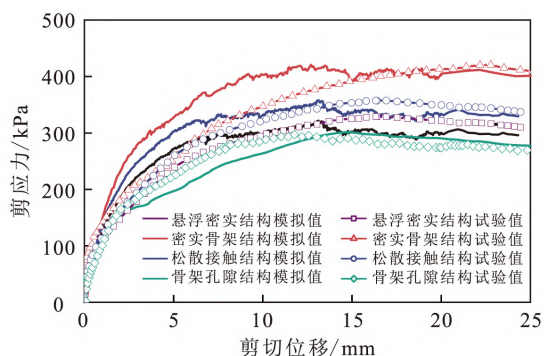


图 9 剪切曲线对比

Fig. 9 Comparison of shear curves

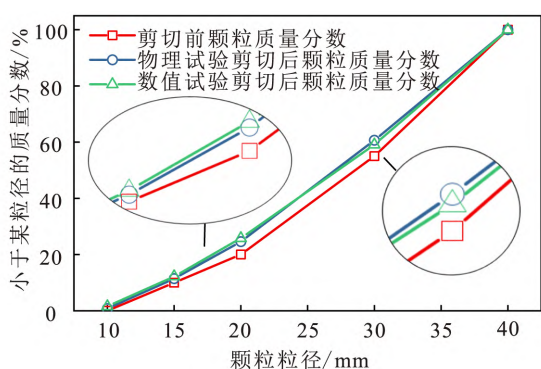


图 10 粒度变化曲线对比

Fig. 10 Comparison of curves of changes in the grain size

裂离比 R_k 的计算通过粒径组破碎以公比 P_k 依次向更小粒径组递减的规律得出,计算较为繁琐。为简化计算,在数值模拟中,引入粒径破碎样本 C_r 对 R_k 进行替换,定义如下:

$$C_r = \frac{N_{crushing}}{N_{total}} \quad (8)$$

式中: N_{total} 为计算粒径组中原本完整颗粒总数; $N_{crushing}$ 为粒径组发生破碎个数。

4.2 考虑颗粒特征破碎强度的初始结构效应

采用 3 组不同颗粒强度的模拟试验,通过单元子颗粒平行黏结键参数的变化来实现,模型选用平行黏结键强度 1.5 MPa, 2.5 MPa, 3.5 MPa。因不同初始结构条件下破碎率变化规律相似,此处仅给出 400 kPa 法向作用下 3 种初始结构的破碎率演化曲线。对于悬浮密实结构粗粒土,3 种颗粒特征破碎强度在剪切作用下起始破碎剪切位移出现差异,颗粒特征破碎强度更低的试样率先发生位移,破碎差异在不同的颗粒破碎特征条件下随着试验的进行逐渐扩大,表现出不同颗粒强度对剪切作用敏感度不同(图 11-A);对于更易破碎的骨架孔隙结构,起始破碎的剪切位移更小,随着试验进行差异更加明显(图 11-D)。同时对比不同颗粒特征强度破碎演化过程,发现颗粒强度较小的颗粒更先达到颗粒临界状态,即颗粒不再发生破碎。

为了更加直观对比初始结构效应对破碎结果影响,提取 400 kPa 法向作用力下不同初始结构最终破碎率结果(图 12)。在颗粒特征强度为 3.5 MPa 时,各初始结构试样破碎率差别很小,从局部结果来看,仅骨架孔隙结构试样略大于其他组试样,说明在颗粒特征强度较大时,粗颗粒含量变化在骨架孔隙、密实骨架与松散接触结构试样中影响较小。而随着颗粒特征强度减小,所有试样破碎率逐渐提高,且不同初始结构间破碎率呈现明显差异。图 12 总体规律上与图 6 规律相一致,初始结构参数越大,颗粒破碎率也越大。

从加权裂离率 B_d 与颗粒特征强度 σ_{c0} 散点图(图 12)分布规律来看,在悬浮密实与密实骨架结构中,特征点基本呈现线性变化。而对于松散接触与骨架孔隙结构,特征点变化为上凹状。选择幂函数对加权裂离率 B_d 与颗粒特征强度 σ_{c0} 进行拟合,具体表达式为:

$$B_d = m\sigma_{c0}^\alpha \quad (9)$$

式中: m, α 为试样拟合参数。

从拟合结果来看,加权裂离率 B_d 的拟合值与对应模拟结果误差基本小于 2.5%,决定系数在 0.98 以上,因此,可认为加权裂离率 B_d 与颗粒特征强度 σ_{c0} 符合幂函数关系。

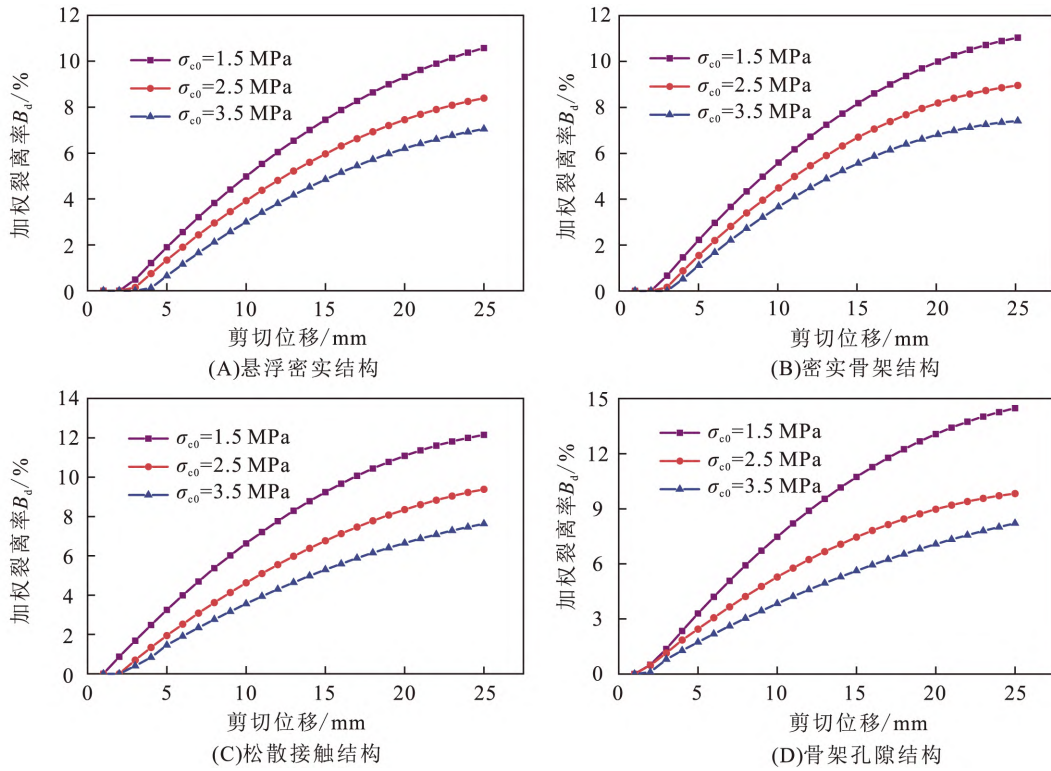


图 11 不同初始结构粗粒土破碎程度演化

Fig. 11 Evolution of coarse-grained soils with different initial structures

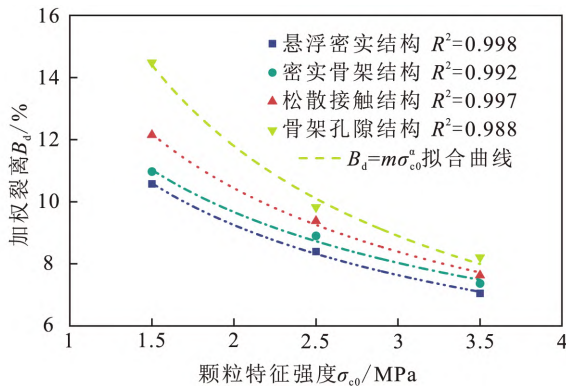


图 12 加权裂离率与颗粒特征强度关系

Fig. 12 Relationship between weighted discarding parameter and characteristic strength

4.3 加权裂离率综合经验公式推求

综合物理试验与数值模拟试验结合,加权裂离率 B_d 和颗粒特征强度 σ_{c0} 满足式(9),而式(7)中 B_0 表示为极限条件下颗粒破碎的加权裂离率,也可用式(9)来表示,故不同初始结构对粗粒土破碎率的耦合影响可用下式定量表示:

$$B_d = a e^{b\sigma_{c0}} + k \frac{\sigma}{p_a} + m \sigma_{c0}^a \quad (10)$$

利用式(10)对 4.2 节 3 组颗粒特征强度的粗粒土破碎程度进行拟合,结果见(表 6)并给出了

不同初始结构下粗粒土加权裂离率计算值与实测值对比(图 13)。

表 6 数值试验拟合结果

Table 6 Results of fitting of the numerical test

拟合参数	数值	拟合参数	数值
a	0.433	b	2.736
k	0.838	m	9.734
α	-0.674	R^2	0.915

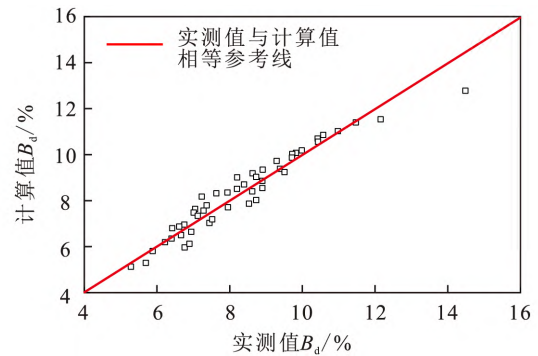


图 13 粗粒土加权裂离率 B_d 实测值与计算值对比

Fig. 13 Comparison the measured and calculated values of the weighted discarding ratio B_d of coarsegrained soil

由图 13 可知,计算值拟合程度较好,决定系数 R^2 在 0.915 以上。因此,在实际工程中,只

需对粗粒土进行一系列直剪试验与强度试验, 获取其试验参数, 即可推求不同初始结构的破碎情况。

4.4 加权剥离率经验公式验证

本文针对不同初始结构的粗粒土进行了图像识别, 获取了针对砂卵石料的结构综合参数, 由于不同种类粗粒土结构特征不同, 获取其他学者大量试验图像较为困难。因此, 本文选择同属砂卵

石的试验数据, 采用相同的权重获取其初始结构综合参数。潘远阳(2020)针对条状、块状、磨圆状 3 种颗粒形态粗粒土, 开展了大量直剪试验来探究颗粒形状对粗粒土剪切破碎力学特性影响。经过统计整理, 颗粒平行黏结键强度为 2.15 MPa, 图像识别后 3 种形状颗粒的初始结构综合参数如表 7, 以剪切位移在 20 mm 结束时破碎率作为计算结果(图 14)。

表 7 粗粒土试验数据汇总
Table 7 Summary of test data on coarse-grained soil

颗粒形状	圆度	定向角/(°)	概率熵	配位数	平面孔隙率/%	初始结构综合参数
条状颗粒	1.61	97.51	90.486	6.18	22.47	1.220
块状颗粒	1.31	90.21	92.119	6.93	14.75	0.240
磨圆状颗粒	1.15	85.28	91.154	5.78	12.92	-0.303

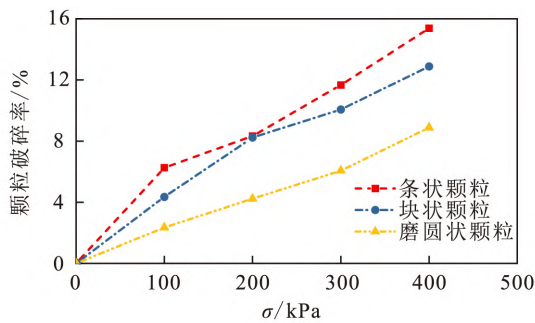


图 14 文献 23 粗粒土破碎情况
Fig. 14 Conditions of breakage of the particles of coarse-grained soil

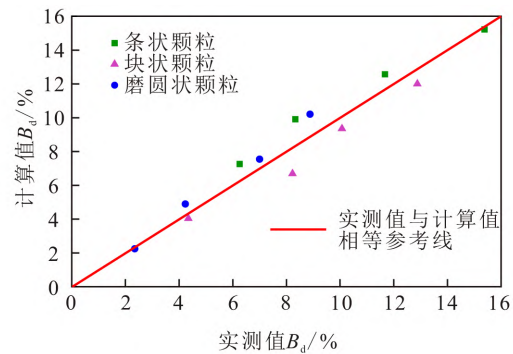


图 15 不同形状粗粒土破碎率的实测值与计算值
Fig. 15 The measured and calculated values of the crushing rate of coarse-grained soils with different shapes

利用式(10)对上述粗粒土破碎率试验结果进行拟合, 拟合参数见表 8。将拟合出的计算值与实际破碎率进行对比(图 15)。

拟合值与对应点误差基本不到 4.5%, 决定系数 R^2 达到 0.89, 拟合效果较好。显然, 式(10)能够较好地预测粗粒土的破碎情况, 具有一定的适用性。同时, 对于不同形状的粗粒土, 其初始结构综合参数中不同指标权重不同, 在实际运用过程中需进行大量图像扫描, 获取颗粒的结构特征, 提高破碎率计算的准确性。

表 8 数值试验拟合结果
Table 8 Results of simulations of coarse-grained soils of different shapes

拟合参数	数值	拟合参数	数值
a	296.8500	b	0.0110
k	2.6790	m	-26.0936
α	3.1740	R^2	0.8900

5 结论

本文通过开展可视化直剪试验, 结合离散元数值模拟方法, 分析了在直剪过程中粗粒土破碎规律, 从初始结构综合参数入手, 建立考虑初始结构效应的粗粒土破碎程度的预测模型, 主要研究成果如下:

- a. 在悬浮密实与密实骨架结构里, 细颗粒在土体骨架里占主导地位, 当粗颗粒质量占土体 40%~60% 时, 粗颗粒将承担土体骨架支撑作用, 并且整体破碎程度主要由初始结构决定。
- b. 粗粒土自身破碎程度受其形态、接触与排列组合特征影响, 采用 PCA 分析法构建了初始结构综合参数 Y_0 , 从而实现了初始结构对颗粒破碎程度影响的量化表征。

c. 粗粒土在中高法向应力条件下,最终加权剥离率呈现线性变化;在相同的法向应力条件下,粗粒土的最终加权剥离率随初始结构综合参数增大而增大,二者呈指数函数关系;当粗粒土初始结构与法向应力条件一致时,加权剥离率随颗粒特征强度增加而降低,呈现幂函数关系式。

d. 结合试验分析与数值计算,最终建立了考虑初始结构效应的破碎程度预测模型,消除了颗粒强度对颗粒破碎程度影响,并通过引用相关文献数据验证了模型可靠性。

[参 考 文 献]

- 蔡正银,李小梅,关云飞,等,2016. 堆石料的颗粒破碎规律研究[J]. 岩土工程学报,38(5):923-929.
- Cai Z Y, Li X M, Guan Y F, *et al.*, 2016. Particle breakage rules of rockfill materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 38(5):923-929. (in Chinese)
- 陈缪芬,高庄平,朱俊高,等,2015. 粗粒土级配及颗粒破碎分形特性[J]. 中南大学学报(自然科学版),46(9):3446-3454.
- Chen L F, Gao Z P, Zhu J G, *et al.*, 2015. Gradation of coarse grained soil and fractal geometry character of particle breakage[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 46(9):3446-3454. (in Chinese)
- 程壮,侯敏,王剑锋,2022. 考虑颗粒形状和破碎的胶结钙质砂力学行为离散元模拟研究[J]. 计算力学学报,39(3):315-323.
- Cheng Z, Hou M, Wang J F, 2022. Discrete element modelling of the mechanical behavior of cemented carbonate sand considering the effects of particle shape and breakage[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 39(3):315-323. (in Chinese)
- 郭万里,朱俊高,钱彬,等,2019. 粗粒土的颗粒破碎演化模型及其试验验证[J]. 岩土力学,40(3):1023-1029.
- Guo W L, Zhu J G, Qian B, *et al.*, 2019. Particle breakage evolution model of coarse-grained soil and its experimental verification [J]. Rock and Soil Mechanics, 40(3):1023-1029. (in Chinese)
- 姜景山,程展林,刘汉龙,等,2009. 粗粒土二维模型试验的组构分析[J]. 岩土工程学报,31(5):811-816.
- Jiang J S, Cheng Z L, Liu H L, *et al.*, 2009. Fabric analysis of two-dimensional tests for coarse-grained soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 31(5):811-816. (in Chinese)
- 李雪梅,李红文,方华建,2015. 基于大型直剪试验的粗粒料颗粒破碎对比研究[J]. 岩石力学与工程学报,34(增刊1):3581-3587.
- Li X M, Li H W, Fang H J, 2015. Comparative study of crushing of coarse-grained soils by large-scale direct shear tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34(S1):3581-3587. (in Chinese)
- 梁彭,魏玉峰,黄鑫,等,2022. 基于结构信息的粗粒土抗剪强度模型研究[J]. 铁道科学与工程学报,19(10):2930-2940.
- Liang P, Wei Y F, Huang X, *et al.*, 2022. Study on shear strength model of coarse-grained soil based on structural information[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 19(10):2930-2940. (in Chinese)
- 刘汉龙,秦红玉,高玉峰,等,2005. 堆石粗粒料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学,26(4):562-566.
- Liu H L, Qin H Y, Gao Y F, *et al.*, 2005. Experimental study on particle breakage of rockfill and coarse aggregates[J]. Rock and Soil Mechanics, 26(4):562-566. (in Chinese)
- 刘士伟,2017. 粗粒土结构量化评价及其强度的结构性研究[D]. 成都:成都理工大学档案馆.
- Liu S W, 2017. Quantitative Evaluation of Coarse-grained Soil Structure and Its Structural Study of Strength [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 孟敏强,肖杨,孙增春,等,2022. 粗粒料及粒间微生物胶结的破碎-强度-能量耗散研究进展[J]. 中国科学:技术科学,52(7):999-1021.
- Meng M Q, Xiao Y, Sun Z C, *et al.*, 2022. Recent progress on crushing-strength-energy dissipation of coarse granular soil and biocementation at contacts[J]. Scientia Sinica Technologica, 52(7):999-1021. (in Chinese)
- 潘远阳,2020. 颗粒形态对粗粒土剪切破碎力学特性的影响研究[D]. 成都:成都理工大学档案馆.
- Pan Y Y, 2020. Study on the Influence of Particle Morphology on Shear Mechanical Properties of Coarse Grained Soil [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 王萌,肖源杰,卢小永,等,2020. 重载铁路道砟旋转压实特性及参数优化试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,17(10):2503-2515.
- Wang M, Xiao Y J, Lu X Y, *et al.*, 2020. Laboratory investigation of gyratory compaction characteristics and optimal parameters for heavy haul railroad ballasts [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 17(10):2503-2515. (in Chinese)
- 王洋,魏玉峰,黄鑫,等,2022. 无胶结粗粒土结构强度及量化指标分析[J]. 水资源与水工程学报,33(1):190-198.
- Wang Y, Wei Y F, Huang X, *et al.*, 2022. Analysis of structural strength and quantitative indices of uncemented coarse-grained soil [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 33(1):190-198. (in Chinese)

- Press;4865—4872.
- Liu X, Luo Z C, Huang H Y, 2018b. Jointly multiple events extraction via attention-based graph information aggregation[C]//Proceedings of the Empirical Methods in Natural Language Processing, Brussels; Association for Computational Linguistics;1247—1256.
- Liu Z, Lin W, Shi Y, *et al.*, 2021. A robustly optimized BERT pre-training approach with post-training[C]//Proceedings of the 20th China National Conference on Computational Linguistics. Hohhot; Springer Science and Business Media Deutschland GmbH;471—484.
- Nguyen T H, Grishman R, 2018. Graph convolutional networks with argument-aware pooling for event detection[C]//Proceedings of the 32nd AAAI Conference on Artificial Intelligence, New Orleans; AAAI Press; 5900—5907.
- Qiao X M, Tang Y, Liu Y H, *et al.*, 2022. A event extraction method of document-level based on the self-attention mechanism[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Machine Learning for Cyber Security. Guangzhou; Springer Science and Business Media Deutschland GmbH;609—619.
- Saha S, Pal H, 2017. Bootstrapping for numerical open IE [C]//Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Vancouver; Association for Computational Linguistics;317—323.
- Sheng J W, Li Q, Hei Y M, *et al.*, 2021. A joint learning framework for the CCKS-2020 financial event extraction task[J]. *Data Intelligence*, 3(3):444—459.
- Xu N, Xie H H, Zhao D Y, 2020. A novel joint framework for multiple Chinese events extraction[C]//Proceedings of the 19th China National Conference on Computational Linguistics, Haikou; Chinese National Conference on Computational Linguistic;174—183.
- Yang H, Chen Y B, Liu K, *et al.*, 2018. Dcfee: A document-level Chinese financial event extraction system based on automatically labeled training data [C]//Proceedings of the 56th Annual Meeting of the Association-for-Computational-Linguistics, Melbourne; Association for Computational Linguistics;50—55.
- Zhang Y H, Qi P, Manning C D, 2018. Graph convolution over pruned dependency trees improves relation extraction[C]//Proceedings of the Empirical Methods in Natural Language Processing, Belgium; Association for Computational Linguistics;2205—2215.

(责任编辑:甘娟娟)



(上接第 499 页)

- 武仁杰,李海波,于崇,等,2018. 基于统计分级判别的爆破块度预测模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 37(1):141—147.
- Wu R J, Li H B, Yu C, *et al.*, 2018. Model for blasting fragmentation prediction based on statistical classification [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 37(1):141—147. (in Chinese)
- 谢宝香,高文华,易梅辉,等,2022. 红砂岩粗粒料颗粒破碎的分形维数指标及影响因素分析[J]. *应用力学学报*, 39(6):1117—1124.
- Xie B X, Gao W H, Yi M H, *et al.*, 2022. Analysis of fractal dimension index and influencing factors of red sandstone coarse granular material breaking[J]. *Chinese Journal of applied mechanics*, 39(6):1117—1124. (in Chinese)
- 徐日庆,畅帅,李雪刚,等,2013. 基于裂离参量的粒状土颗粒破碎量化方法[J]. *岩土工程学报*, 35(12):2179—2185.
- Xu R Q, Chang S, Li X G, *et al.*, 2013. Quantitative method for crushing of granular soils based on discarding parameters[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 35(12):2179—2185. (in Chinese)
- 张晨曦,王洋,魏玉峰,等,2022. 无胶结粗粒土初始结构强度研究[J]. *水文地质工程地质*, 49(2):54—63.
- Zhang C X, Wang Y, Wei Y F, *et al.*, 2022. Research on the critical strength of the initial structure of the uncemented coarse-grained soil [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 49(2):54—63. (in Chinese)
- Einav I, 2007. Breakage mechanics-part I: Theory[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55(6):1274—1297.
- Hardin B O, 1985. Crushing of soil particles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(10):1177—1192.
- Marsal R J, 1967. Large-scale testing of rockfill materials [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(2):27—43.
- Rahman M M, Lo S R, Baki M A L, 2011. Equivalent granular state parameter and undrained behaviour of sand-fines mixtures[J]. *Acta Geotechnica*, 6:183—194.
- Zhao X L, Zhu J G, Wu Y L, *et al.*, 2022. A numerical study on the influence of coordination number on the crushing of rockfill materials[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(10):6279—6300.

(责任编辑:魏 巍)