

吴双右,相彪,刘文杰,等.基于细观力学特性的堆石料三轴数值模拟及尺寸效应研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(3):283-292.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240306

WU Shuangyou, XIANG Biao, LIU Wenjie, et al. Triaxial numerical simulation and size effect of rockfill materials based on meso-mechanical properties[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(3): 283-292. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240306

基于细观力学特性的堆石料三轴数值模拟及尺寸效应研究

吴双右¹, 相彪^{1*}, 刘文杰¹, 周艳梅², 李本豪¹

(1. 云南农业大学水利学院, 云南昆明 650201; 2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南昆明 650051)

摘要: 为阐明玄武岩堆石料受载时力学特性的尺寸效应规律, 采用颗粒流数值模拟与室内试验相结合的方法, 引入室内单粒压缩试验所得的颗粒强度和弹性模量的尺寸效应规律, 依据三轴压缩试验的标定结果调整不同级配料的细观参数, 开展原型及缩尺级配堆石料三轴数值模拟。研究表明: 随着颗粒粒径的增大, 试样中易形成应力集中, 从而发生破坏, 主要表现为剪缩体变。提出邓肯-张 $E-B$ 模型参数 K 、 K_b 、 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 受粒径尺寸效应影响的修正公式, 揭示参数 K 、 K_b 、 φ_0 随颗粒粒径增大而减小、参数 $\Delta\varphi$ 随颗粒粒径增大而增大的变化规律。研究结果为坝体应力变形预测提供参考。

关键词: 堆石料; 尺寸效应; 邓肯-张 $E-B$ 模型; 三轴数值模拟; 强度及变形特性; 颗粒粒径

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)03-0283-10

Triaxial numerical simulation and size effect of rockfill materials based on meso-mechanical properties

WU Shuangyou¹, XIANG Biao^{1*}, LIU Wenjie¹, ZHOU Yanmei², LI Benhao¹

(1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Power China Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, China)

Abstract: To elucidate the size effect laws governing the mechanical characteristics of basalt rockfill materials under loading, a combined methodology incorporating particle flow numerical simulation and laboratory testing was employed, and by introducing size-dependent patterns of particle strength and elastic modulus derived from single-particle compression tests, mesoscopic parameters of graded aggregates were calibrated based on triaxial compression test results, and numerical simulations of triaxial tests were subsequently conducted for both prototype and scaled gradation rockfill materials. The research results demonstrate that increasing particle size promotes stress concentration within specimens, leading to structural failure predominantly manifested as shear shrinkage volumetric deformation; modified formulas were proposed for the Duncan-Chang $E-B$ model parameters K , K_b , φ_0 and $\Delta\varphi$ to account for particle size effects, revealing that parameters K , K_b and φ_0 exhibit decreasing trends with increasing particle size, while parameter $\Delta\varphi$ shows an inverse correlation. These research outcomes provide valuable references for predicting stress-deformation behavior in dam structures.

Keywords: rockfill; size effect; Duncan-Chang $E-B$ model; triaxial numerical simulation; strength and deformation characteristics; particle size

收稿日期: 2024-09-22 修回日期: 2025-01-03 接受日期: 2025-02-25 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国家自然科学基金项目(42367025); 云南省基础研究计划农业联合专项项目(202301BD070001-191)

作者简介: 吴双右(1997-), 男, 云南曲靖人, 硕士研究生, 主要从事土石坝筑坝堆石料尺寸效应方面的研究。E-mail: 491644102@qq.com

通信作者: 相彪(1979-), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 正高级工程师, 主要从事土石坝筑坝材料本构关系、坝体结构及工程措施方面的研究。E-mail: 103931114@qq.com

0 引言

堆石料的工程力学参数对于土石坝的变形控制至关重要。目前,在国内外堆石料室内土工试验研究中,三轴试验是一种常规的用来标定强度及变形指标的方法^[1]。随着中国土石坝建设步入坝高300 m级时代,筑坝堆石料也向宽级配、大粒径方向发展,最大粒径已达米级,远超常规三轴试验中60 mm的最大颗粒尺寸限制。因此,为近似得到堆石料应力应变特性,需将原型级配堆石料进行缩尺处理后再开展三轴试验,但这种处理方式易引发尺寸效应问题^[2]。

YAN等^[3]开展多组不同粒径和加载速率的单颗粒破碎试验,发现颗粒破碎强度随加载速率的增大而增大,尺寸效应对颗粒破碎强度的影响逐渐减弱。胡沈江等^[4]研究表明堆石料颗粒形状和受力方向对颗粒破碎强度存在显著的尺寸效应。在相同等效粒径下,球状、椭球状、扁平状颗粒的平均破碎特征强度依次降低。杨少博等^[5]采用相似级配法和混合法对弱风化堆石料进行缩尺,制备4种不同最大粒径的堆石料,并以三轴试验缩尺后替代料的应力变形特性为研究对象,分析缩尺方法和最大粒径对堆石料临界状态及临界状态方程的影响。吴帅峰等^[6]建立了变形特性参数尺寸效应理论模型,分析压缩模量与颗粒破碎率的变化规律,并与试验结果对比,验证模型的可行性。ZHAO等^[7]、ZHANG等^[8]研究了堆石料颗粒的细观参数对其破碎特性的影响,认为细观分析及DEM建模是深入研究颗粒破碎行为的有效方法。同时,在堆石料的宏观本构模型方面,张石等^[9]提出了邓肯-张E-B模型参数的经验公式,该公式能较高精度预测不同板岩含量、不同孔隙率砂板岩堆石料的力学特性指标。邵晓泉等^[10]推导得出邓肯-张E-B模型参数的粒径尺寸效应相关性。邹德高等^[11-12]从动力变形特性方面分析超大型三轴试验、常规大型三轴试验得到的沈珠江等效线性模型参数 K_1 、 K_2 及 λ_{max} 之间的倍数关系,并提出邓肯-张E-B、E- ν 模型参数尺寸效应修正系数,为工程动力响应分析及变形预测提供试验与计算依据。

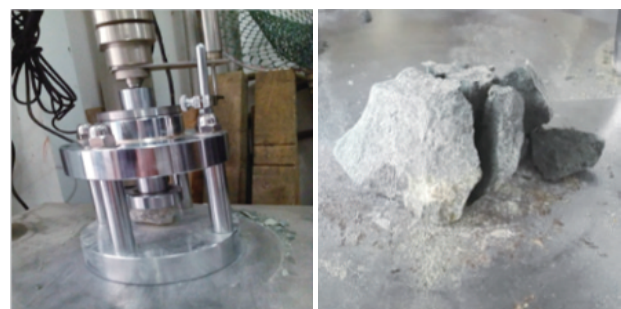
上述研究成果从加载速率、颗粒形状、堆石料缩尺方法、建立特定数值模型及宏细观本构关系模拟等方向,分析了堆石料力学性能的尺寸效应,虽然取得了较多成果,但仍缺乏具体且宏观的堆石料工程力学参数修正方法。目前,工程界广泛采用邓肯-张E-B模型进行土石坝的应力变形预测^[10]。然而,室内试验受尺寸限制,无法准确获

取原型级配堆石料的力学参数,如何确定原型级配料力学特性的尺寸效应公式以及强度、变形参数的尺寸效应公式,成为目前亟待解决的问题。本文克服传统连续介质分析方法在研究岩石类非均质材料时的局限性,采用颗粒流数值分析方法^[13],从细观层面揭示岩石的力学行为。通过三轴数值模拟与室内单粒压缩试验、三轴试验相结合,反演符合堆石料原型级配力学性能的大尺寸颗粒流数值模型,并选择适于模拟岩石材料的平行黏结模型(parallel bond model, PBM)作为细观本构模型,采用离散元碎片替代法(fragment replacement method, FRM)模拟颗粒破碎过程。根据模拟结果,基于邓肯-张E-B模型建立强度、变形参数及颗粒粒径的联系,提出考虑尺寸效应的堆石料宏观本构模型参数的修正方法,为坝体应力变形分析提供理论参考。

1 单粒尺寸效应分析

1.1 单粒压缩试验

以云南省某水电站玄武岩堆石料为研究对象,采用DYQ-1型单粒岩块强度测试仪开展单粒压缩试验。单粒压缩试验仪器及玄武岩颗粒见图1。以单粒直径为分界指标,设置8个粒组,粒径分别为(5,10] mm、(10,15] mm、(15,20] mm、(20,24] mm、(24,28] mm、(28,32] mm、(32,36] mm、(36,40] mm。选取各粒组中形状较规则、饱满的颗粒开展试验,每个粒组样本试验100次,通过Weibull分布求得颗粒的破碎强度。试验前记录颗粒的粒径和质量,以0.25 mm/min的速率进行加载。根据实时输出的轴向载荷与变形曲线,分析玄武岩单颗粒抗压强度和弹性模量的尺寸效应规律。单粒抗压强度分布见图2,单粒弹性模量分布见图3。



(a) DYQ-1 测试仪 (b) 玄武岩颗粒

图1 单粒压缩试验仪器及玄武岩颗粒

Fig.1 single grain compression test instrument and basalt particles

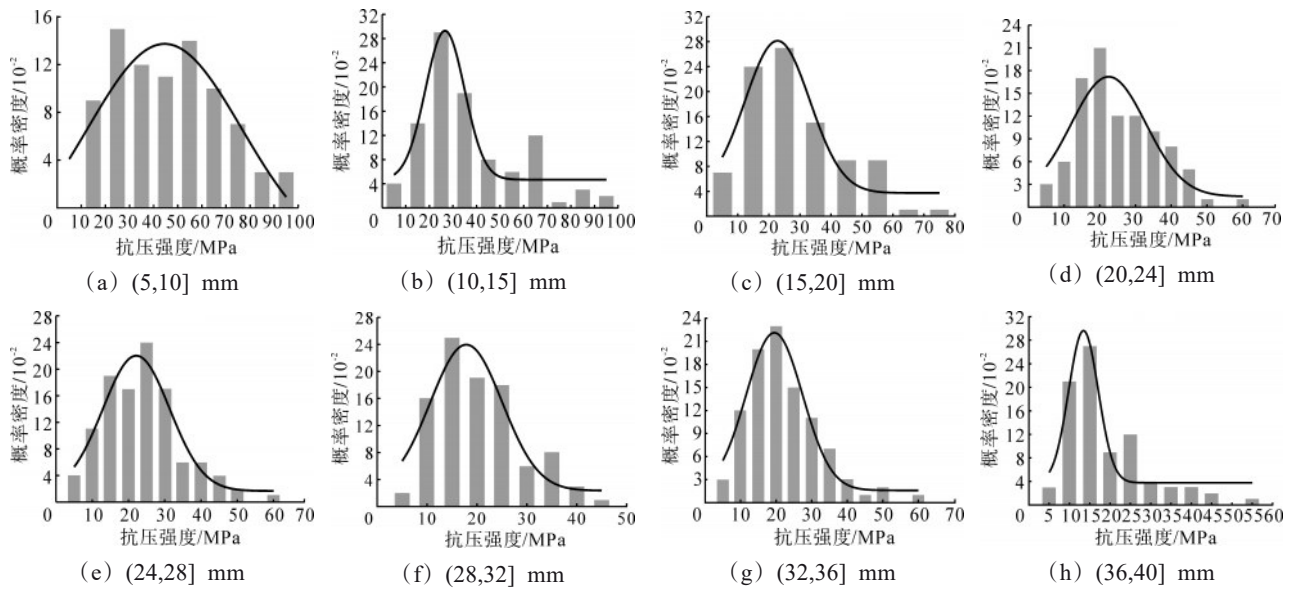


图2 单粒抗压强度分布

Fig.2 single particle compressive strength distribution

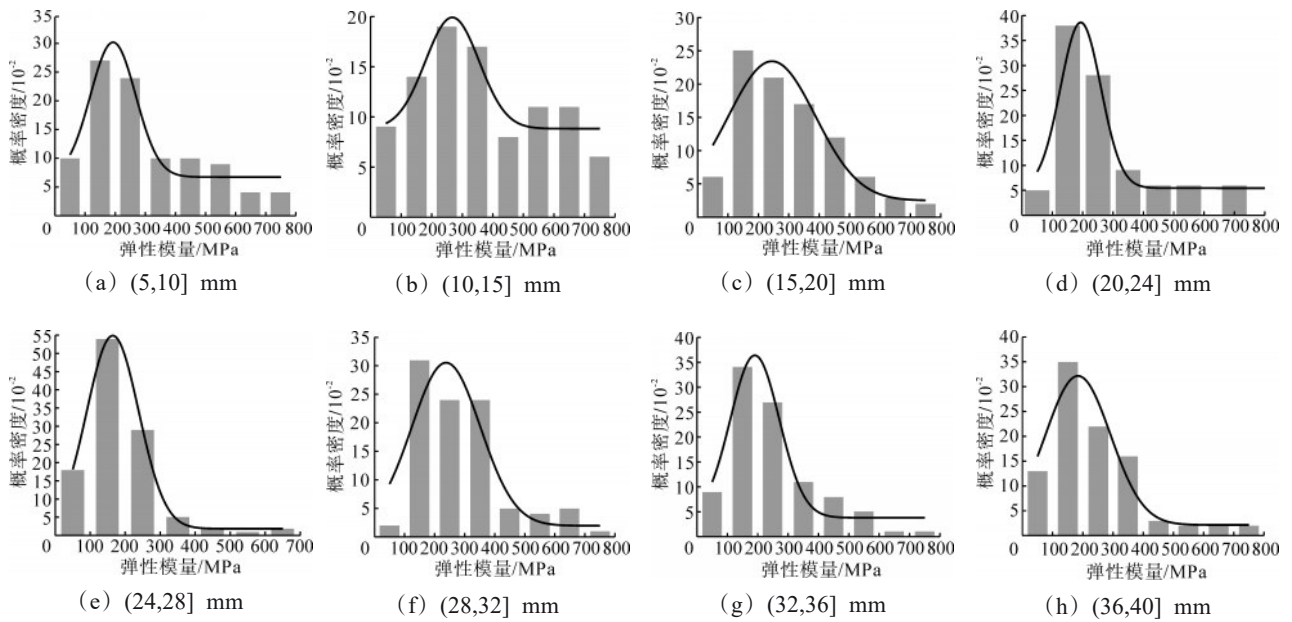


图3 单粒弹性模量分布

Fig.3 elastic modulus distribution of single particle

开展压缩试验时, 颗粒在传力柱的挤压下主要发生劈裂破坏, 颗粒破碎强度^[14]为

$$\sigma_f = F_f/d^2, \quad (1)$$

式中: F_f 为颗粒破坏时的轴向载荷, N; d 为颗粒粒径, mm。

堆石料的颗粒破碎强度常用Weibull分布来描述, 颗粒受压时, 未被破碎的概率^[14]为

$$P_s = \exp\left[-\left(\sigma_f/\sigma_0\right)^{m^*}\right], \quad (2)$$

式中: σ_0 为特征抗压强度, MPa, 即颗粒未被破坏

概率为37%时的破碎强度^[15]; m^* 为Weibull模量, 表征颗粒强度的离散程度。

当对一组一定数量的堆石料开展颗粒压缩试验时, P_s 表达式为

$$P_s = N_s/N, \quad (3)$$

式中: N 为同一粒组颗粒的总数量, 取100; N_s 为粒组颗粒在压力 σ 下未破坏的颗粒数。

对式(2)等式两边取对数, 则有

$$\ln[\ln(1/P_s)] = m^* \ln \sigma_f - m^* \ln \sigma_0. \quad (4)$$

1.2 单粒强度规律

根据式(2)、式(4)计算得到各粒组的 σ_0 和 m^* , Weibull拟合参数见表1。由表1可知, m^* 为1.172~2.275。对于同种岩性的颗粒,不同粒组 m^* 的平均值可视为该岩性材料的Weibull模量^[16]。因此,取平均Weibull模量 m_v^* 为1.832,作为本文玄武岩的Weibull模量,用于FRM模拟。

表1 Weibull拟合参数

Tab.1 Weibull fitting parameters

粒组/mm	特征粒径 d_t /mm	m^*	σ_0 /MPa
(5,10]	7.5	1.762	61.250
(10,15]	12.5	1.749	39.240
(15,20]	17.5	1.806	30.530
(20,24]	22.0	1.781	26.040
(24,28]	26.0	2.009	22.750
(28,32]	30.0	2.105	20.760
(32,36]	34.0	2.275	20.400
(36,40]	38.0	1.172	17.310

在堆石料的力学试验中,颗粒的抗压及抗拉强度是土石坝变形控制中不可忽略的关键参数。本文通过室内单粒压缩试验获取特征抗压强度,采用巴西劈裂试验数据^[17]作为抗拉强度。玄武岩颗粒抗压、抗拉强度与粒径的关系见图4。

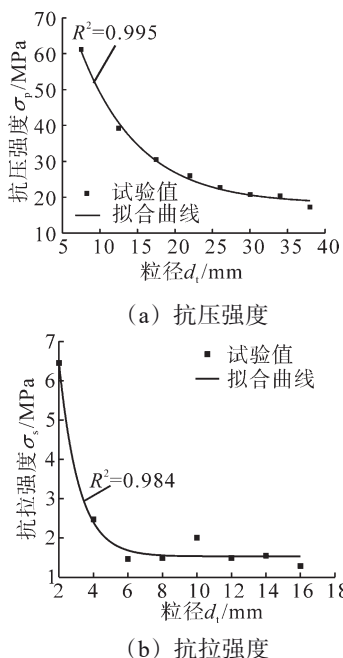


图4 玄武岩颗粒抗压、抗拉强度与粒径的关系

Fig.4 relationship between compressive strength, tensile strength and particle size of basalt particles

由图4可知,玄武岩的抗压及抗拉强度随着颗粒尺寸的增大而减小,最终趋于稳定。这是由于

随着颗粒尺寸的增大,岩石中天然缺陷的数量、贯通性及分布规律对尺寸效应影响显著。参考刘宝琛等^[18]的研究成果,利用式(5)描述玄武岩颗粒强度的尺寸效应,相关拟合参数见表2。

$$\sigma_p(\sigma_s) = \alpha \cdot \exp(-\beta d_t) + \gamma, \quad (5)$$

式中: σ_p 、 σ_s 分别为颗粒抗压、抗拉强度,MPa; α 、 β 和 γ 为拟合参数。

表2 强度公式拟合参数

Tab.2 fitting parameters of strength formula

强度类型	参数取值		
	α	β	γ
抗压强度 σ_p	109.991	0.127	18.165
抗拉强度 σ_s	27.986	0.868	1.529

1.3 单粒弹性模量变化规律

弹性模量是计算程序中衡量散体材料抗变形能力的关键参数,对数值模拟结果具有直接影响。颗粒的弹性模量为

$$E = \sigma_0 / \epsilon, \quad (6)$$

式中, ϵ 为颗粒发生破碎时的轴向应变。

经检验,颗粒的弹性模量符合正态分布。分析所有颗粒的弹性模量分布规律,颗粒的弹性模量随其尺寸的增大而减小,见图5。各组颗粒弹性模量特征值与粒径的关系可表示为

$$E = 275.760 23 d_t^{-0.09084}. \quad (7)$$

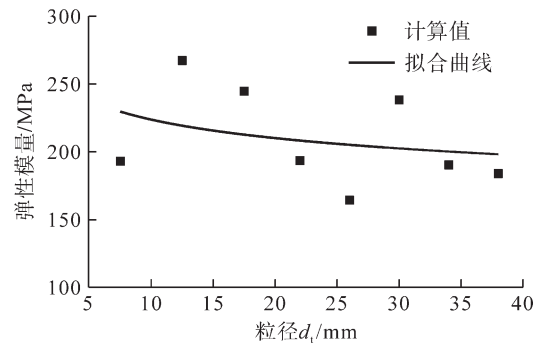


图5 玄武岩颗粒弹性模量与粒径的关系

Fig.5 relationship between elastic modulus and particle size of basalt particles

2 三轴试验

2.1 三轴数值模拟

采用FRM法模拟颗粒破碎过程时,需考虑碎片替换模式及颗粒破碎准则两个关键问题。其原理为:当颗粒受力达到预设破碎准则时,删除即

将发生破碎的原始颗粒,并在其位置以一组无黏结的小颗粒替代。基于八面体剪应力准则,当八面体剪应力 q 达到极限值 q_{lim} 时,可通过式(8)和式(9)描述任意粒径为 d 的颗粒破碎状态^[19],即

$$q = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}, \quad (8)$$

$$q_{lim} = \tau_0 \left[-\ln(1-u) \left(\frac{d_0}{d} \right)^{n_d} \right]^{\frac{1}{m^*}}, \quad (9)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为作用在颗粒上的大、中、小主应力,MPa; τ_0 为颗粒达到63%破碎概率时的强度^[19],MPa,取标定时的颗粒特征强度; u 为随机数, $\mu \in [0,1]$; d_0 为参考粒径,取 d_i ; n_d 为强度的尺寸效应参数,取3^[20]。

基于颗粒流程序构建的三轴试样见图6。

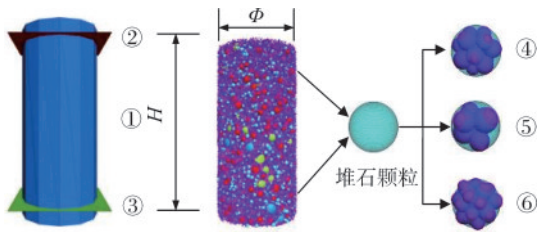


图6 三轴数值模拟示意

Fig.6 triaxial numerical simulation

图6中,①为柔性圆柱筒(类似橡皮膜),用于施加围压;②、③分别为上下部刚性加载板,用以施加轴向载荷;④、⑤、⑥为碎片替换模式的颗粒破碎模型。将堆石料设为均一介质的圆球颗粒集合体,采用混合法制样,根据级配、孔隙

率及各粒组含量生成颗粒。为便于对不同级配堆石料平行黏结模型的细观参数进行赋值,选取平均粒径 d_{50} (即 d_i)作为各级配的特征粒径,不同级配模型的尺寸参数见表3。

表3 不同级配的模型尺寸参数

Tab.3 model size parameters of different gradations

缩尺方法	级配编号	最大粒径 d_{max}/mm	d_{50}/mm	试样直径 Φ/mm	试样高 H/mm
室内级配	A	60	25	300	600
混合法	B	100	44	500	1 000
混合法	C	400	155	2 000	4 000
原型级配	D	800	223	4 000	8 000

2.2 数值模拟参数标定

试验仪器采用中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司的大型三轴仪。制备试样的材料取自云南省某水电站石料场。试样直径为700 mm,最大粒径为60 mm。采用分层制样法,分7层装填。围压分别取100 kPa、300 kPa、800 kPa、1 600 kPa和3 200 kPa,制样干密度为2.23 g/cm³,相对密度为0.85 g/cm³,开展固结排水剪切试验。剪切速率为1.0 mm/min,剪切过程中利用计算机采集试样的轴向载荷、轴向应变(简称应变) ϵ_1 和体积应变(简称体变) ϵ_v ,并同步绘制应力-应变-体变曲线,直至试样破坏或试样轴向应变达到0.15。不同围压下室内试验结果见表4。

表4 不同围压下室内试验结果

Tab.4 laboratory test results under different confining pressures

围压 100 kPa			围压 200 kPa			围压 300 kPa			围压 400 kPa			围压 500 kPa		
$(\sigma_1 - \sigma_3)/kPa$	$\epsilon_1/10^{-2}$	$\epsilon_v/10^{-2}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)/kPa$	$\epsilon_1/10^{-2}$	$\epsilon_v/10^{-2}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)/kPa$	$\epsilon_1/10^{-2}$	$\epsilon_v/10^{-2}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)/kPa$	$\epsilon_1/10^{-2}$	$\epsilon_v/10^{-2}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)/kPa$	$\epsilon_1/10^{-2}$	$\epsilon_v/10^{-2}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70.98	0.03	0.01	79.08	0.03	0.01	238.57	0.06	0.01	102.32	0.03	0.01	336.54	0.03	0.01
113.56	0.06	0.02	344.97	0.10	0.05	448.07	0.12	0.04	467.48	0.10	0.03	1 162.67	0.17	0.10
212.83	0.13	0.05	560.36	0.17	0.08	650.09	0.19	0.06	744.63	0.17	0.04	1 980.02	0.46	0.31
304.88	0.20	0.07	947.33	0.32	0.12	1 312.98	0.40	0.15	1 718.95	0.46	0.11	2 643.60	0.76	0.55
439.02	0.34	0.08	1 247.20	0.46	0.14	1 901.41	0.69	0.28	2 428.86	0.76	0.24	3 203.79	1.05	0.78
593.90	0.49	0.07	1 453.09	0.60	0.15	2 286.16	0.98	0.38	3 006.54	1.05	0.39	3 654.76	1.34	1.03
705.69	0.63	0.03	1 550.79	0.75	0.14	2 496.63	1.27	0.47	3 443.67	1.34	0.52	4 187.20	1.63	1.32
788.72	0.77	-0.04	1 648.17	0.89	0.12	2 601.31	1.42	0.50	3 742.56	1.63	0.66	4 898.53	2.21	1.68
906.46	0.92	-0.11	1 702.21	1.04	0.09	2 670.06	1.56	0.54	4 227.85	2.21	0.92	5 653.10	2.79	2.10
939.78	1.06	-0.16	1 748.93	1.18	0.05	2 942.88	2.14	0.67	4 578.90	2.79	1.14	6 406.63	3.37	2.43
972.45	1.20	-0.26	1 780.92	1.33	0	3 028.08	2.43	0.72	4 840.61	3.37	1.35	6 971.96	3.95	2.72

续表 4

围压 100 kPa			围压 200 kPa			围压 300 kPa			围压 400 kPa			围压 500 kPa		
$(\sigma_1-\sigma_3)/\text{kPa}$	$\varepsilon_1/10^{-2}$	$\varepsilon_v/10^{-2}$	$(\sigma_1-\sigma_3)/\text{kPa}$	$\varepsilon_1/10^{-2}$	$\varepsilon_v/10^{-2}$	$(\sigma_1-\sigma_3)/\text{kPa}$	$\varepsilon_1/10^{-2}$	$\varepsilon_v/10^{-2}$	$(\sigma_1-\sigma_3)/\text{kPa}$	$\varepsilon_1/10^{-2}$	$\varepsilon_v/10^{-2}$	$(\sigma_1-\sigma_3)/\text{kPa}$	$\varepsilon_1/10^{-2}$	$\varepsilon_v/10^{-2}$
984.05	1.35	-0.36	1 805.84	1.47	-0.05	3 119.52	2.72	0.76	5 189.44	3.95	1.50	7 540.71	4.53	3.00
995.51	1.49	-0.46	1 830.27	1.61	-0.11	3 264.32	3.29	0.79	5 434.56	4.53	1.63	8 267.35	5.40	3.38
1 032.72	1.77	-0.61	1 865.18	1.90	-0.22	3 325.28	3.58	0.81	5 706.11	5.40	1.84	8 835.54	6.28	3.67
1 048.37	2.06	-0.81	1 871.34	2.19	-0.35	3 364.67	3.87	0.81	5 817.09	5.84	1.91	9 334.48	7.15	3.92
1 063.37	2.35	-1.06	1 884.54	2.48	-0.47	3 441.99	4.45	0.81	5 920.00	6.27	1.97	9 710.10	8.02	4.13
1 064.48	2.63	-1.30	1 890.55	2.77	-0.59	3 582.32	5.32	0.79	6 080.08	7.14	2.09	10 044.88	8.89	4.29
1 066.02	2.92	-1.51	1 896.24	3.05	-0.73	3 642.98	6.18	0.72	6 311.18	8.02	2.20	10 336.49	9.76	4.43
1 060.49	3.21	-1.74	1 901.82	3.34	-0.87	3 680.56	7.05	0.64	6 357.41	8.89	2.25	10 508.35	10.63	4.54
1 048.11	3.49	-1.98	1 893.74	3.63	-0.99	3 682.06	7.48	0.59	6 381.55	9.32	2.26	10 638.24	11.51	4.61
1 029.64	3.78	-2.17	1 899.19	3.92	-1.13	3 682.44	7.92	0.53	6 378.44	9.76	2.27	10 698.22	11.94	4.65
1 010.95	4.06	-2.41	1 891.41	4.21	-1.24	3 690.68	8.35	0.50	6 381.51	10.19	2.27	10 730.76	12.38	4.69

注: $(\sigma_1-\sigma_3)$ 为偏应力。

采用“试错法”标定玄武岩堆石料的室内三轴试验曲线,室内试验与数值模拟结果对比见图 7。由图 7 可知,在峰值偏应力和胀缩转换点(即由剪缩到开始发生剪胀的点)对应的体变特征处,数值模拟曲线逐渐偏离室内试验曲线,模拟所得偏应力和体变相对较小。这是由于堆石料颗粒形状较复杂,尽管 FRM 法可模拟颗粒的受力破碎过程,但颗粒是简化的球体,颗粒之间的咬合力和摩擦阻力较小,影响颗粒的强度和变形行为。整体来看,数值模拟得到的曲线变化趋势与室内试验结果一致性较好,且两者的峰值应力和胀缩转换点处体变差值较小,数值模拟结果较可靠。数值模拟标定的基本细观参数见表 5。

表 5 数值模拟标定的颗粒基本细观参数

Tab.5 numerical simulation calibration of basic mesoscopic parameters

参数	标定值	参数	标定值
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 790	半径乘子	1
孔隙率 $n/\%$	20	平行黏结有效模量 \bar{E}_v/GPa	0.165
接触模量 E_c/GPa	0.165	平行黏结刚度比 \bar{k}_n/\bar{k}_s	2.5
接触刚度比 k_n/k_s	2.5	平行黏结抗拉强度 $\bar{\sigma}_c/\text{GPa}$	0.650
接触摩擦系数 μ	0.67	平行黏结抗压强度 $\bar{\tau}_c/\text{MPa}$	0.680
弯矩贡献系数	1	平行黏结粒间摩擦角 $\varphi/(\circ)$	34

注: k_n 、 k_s 分别为颗粒接触法向刚度和颗粒接触切向刚度,N/m; \bar{k}_n 、 \bar{k}_s 分别为平行黏结法向刚度和平行黏结切向刚度,N/m。

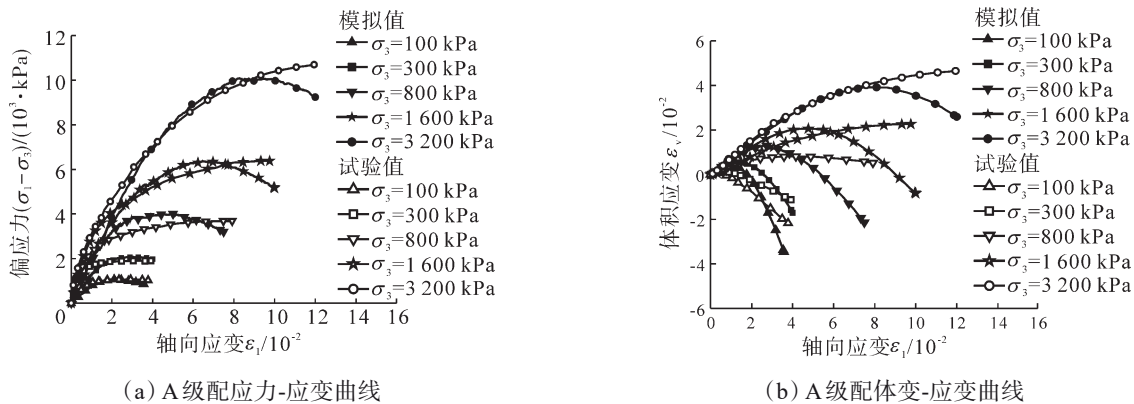


图 7 室内试验值与模拟值对比

Fig.7 comparison of indoor test values and simulated values

2.3 不同尺寸三轴数值模拟

玄武岩颗粒的力学性能受粒径大小的影响,呈现尺寸效应。将表3中不同级配的 d_{50} 代入式(5)、式(7),得到各级配材料的抗压强度、抗拉强度和弹性模量。与A级配材料相比,分别计算B、C、D级配材料抗压强度、抗拉强度和弹性模

量的变化率,见表6。基于表5中标定的基本细观参数,根据表6强度和模量变化率,得到不同级配下的细观参数,见表7。其中,变形参数采用表6的弹性模量变化率进行计算,强度参数中 $\bar{\sigma}_c$ 采用表6的抗拉强度变化率进行计算,其他强度参数采用表6的抗压强度变化率进行计算。

表6 岩石强度和弹性模量随粒径的变化率

Tab.6 change rate of rock strength and elastic modulus with particle size

级配编号	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量变化率/%	抗压强度变化率/%	抗拉强度变化率/%
A	205.85	22.76	28.92			
B	195.54	18.58	28.47	5.01↓	18.39↓	1.55↓
C	174.41	18.17	25.99	15.27↓	20.20↓	10.13↓
D	168.74	18.17	24.58	18.03↓	20.20↓	14.99↓

注:“↓”表示减小。

表7 不同尺寸堆石料的细观参数

Tab.7 mesoscopic parameters of rockfill materials with different sizes

级配编号	基本物理参数		变形参数				强度参数			
	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$n/\%$	E_c/GPa	k_n/k_s	\bar{E}_c/GPa	\bar{k}_n/\bar{k}_s	μ	$\bar{\sigma}_c/\text{GPa}$	$\bar{\tau}_c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{°})$
A	2 790	20	0.165	2.50	0.165	2.50	0.67	0.650	0.680	34.00
B	2 790	20	0.157	2.37	0.157	2.37	0.55	0.640	0.555	27.75
C	2 790	20	0.140	2.12	0.140	2.12	0.53	0.584	0.543	27.13
D	2 790	20	0.135	2.05	0.135	2.05	0.53	0.553	0.543	27.13

根据表3建立不同最大粒径级配的三轴试样模型,并将表7各尺寸堆石料的细观参数引入相应级

配的三轴数值模型中,开展原型及缩尺级配料的三轴数值模拟,结果见图8。

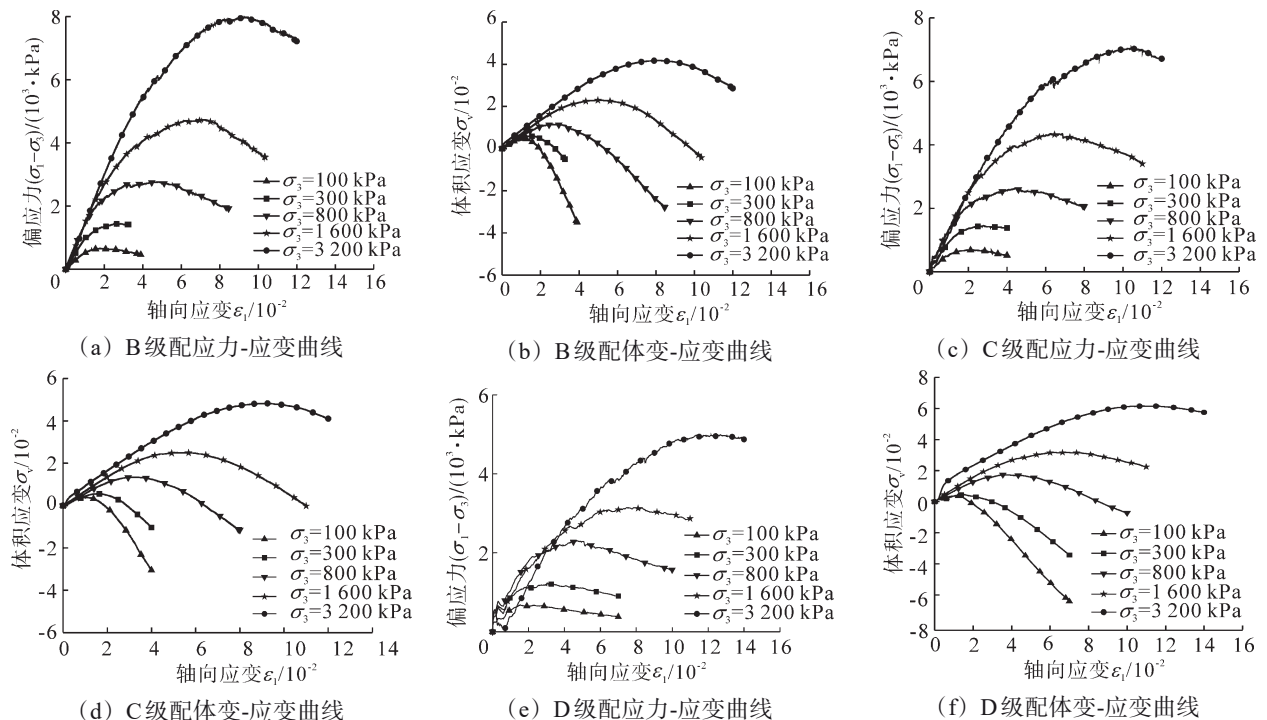


图8 原型及缩尺级配料三轴数值模拟结果

Fig.8 triaxial numerical simulation results of prototype and scale grading ingredients

由图 8 可知, 各级配试样的应力-应变曲线均呈先硬化后软化的一般曲线变化规律。同一级配试样, 随着围压的增大, 峰值强度和对应的轴向应变不断增大。围压一定的条件下, 随着颗粒粒径的增大, 峰值强度减小, 对应的轴向应变增大。同时, 体变-应变曲线均呈先剪缩后剪胀的一般曲线变化规律。同一级配下, 围压越大, 胀缩转换点处应变越大。围压一定的条件下, 胀缩转换点处应变随着颗粒粒径的增大而增大。

3 试验结果及尺寸效应分析

3.1 堆石颗粒运动演化分析

颗粒运动速度及方向矢量图见图 9。以图 9 中 D 级配 3 200 kPa 围压试样为例, 试样端部三角区域几乎仅产生竖向位移, 未形成剪切面, 属于弹性区域, 中间部分颗粒位移呈“X”型分布, 主要发生侧向变形, 靠近试样中间部分的堆石颗粒更倾向于发生水平方向偏转。堆石颗粒破坏会形成“X”型剪切带, 与 HALL 等^[21]的研究结论相符, 表明本文建立

的大尺寸模型符合客观试验规律。

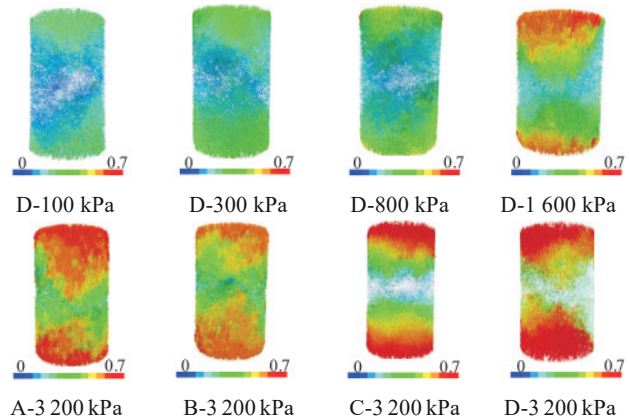


图 9 颗粒运动速度及方向矢量图(单位:mm/s)
Fig.9 particle velocity and direction vector diagram (unit: mm/s)

3.2 堆石料强度和体变尺寸效应规律

基于图 7、图 8 的数值模拟结果, 得到 4 种级配、5 种围压下的峰值强度 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 和胀缩转换点处体变 ε_v , 见表 8。

表 8 各级配和围压下的 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 和 ε_v

Tab.8 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ and ε_v under different gradations and confining pressures

级配 编号	围压 100 kPa		围压 300 kPa		围压 800 kPa		围压 1 600 kPa		围压 3 200 kPa	
	$(\sigma_1-\sigma_3)_f$ /kPa	$\varepsilon_v/10^{-2}$	$(\sigma_1-\sigma_3)_f$ /kPa	$\varepsilon_v/10^{-2}$	$(\sigma_1-\sigma_3)_f$ /kPa	$\varepsilon_v/10^{-2}$	$(\sigma_1-\sigma_3)_f$ /kPa	$\varepsilon_v/10^{-2}$	$(\sigma_1-\sigma_3)_f$ /kPa	$\varepsilon_v/10^{-2}$
A	1 070	0.004 15	2 080	0.005 35	4 000	0.012 9	6 370	0.020 6	10 100	0.039 2
B	657	0.004 83	1 430	0.006 13	2 760	0.011 5	4 730	0.023 0	7 980	0.041 8
C	691	0.004 12	1 450	0.013 40	2 620	0.013 4	4 350	0.025 0	7 050	0.048 3
D	676	0.003 65	1 220	0.004 54	2 300	0.017 3	3 150	0.031 7	4 990	0.061 5

由表 8 可知, 在固定级配下, 随着围压的增大, 试样的峰值强度和胀缩转换点处体变均呈增大的变化趋势。当围压一定时, 堆石料的峰值强度随颗粒粒径的增大而减小。100 kPa 和 300 kPa 两种低围压条件下, 颗粒粒径对体变的影响不显著, 其他较高围压条件下, 体变量均与颗粒粒径正相关。从堆石料的细观角度分析其变形破坏机理, 当围压增大时, 颗粒间的密实度增大, 相互作用力增强, 可抑制内部颗粒破碎的扩展和发育, 提高试样整体峰值强度。同时, 颗粒之间的空间进一步被压缩, 在胀缩转换点附近, 颗粒间的相对运动受限较严重, 导致体积膨胀幅度较小。当级配中的最大粒径增大时, 颗粒之间的接触面积相对减小, 相互作用力增强。在压缩过程中, 大颗粒更易发生破碎和相对滑动, 形成应力集中点,

受力后更易达到破坏条件, 导致整体强度降低。随着偏应力的增大, 颗粒的位置调整和重新排列使颗粒之间的空间被进一步填充, 表现为试样主要发生剪缩体变, 胀缩转换点处体变增大。利用式 (10) 和式 (11) 描述峰值强度、胀缩转换点处体变与粒径 d 的尺寸效应, 即

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = ad + b, \tag{10}$$

$$\varepsilon_v = Ad + B, \tag{11}$$

式中: a 、 A 分别为峰值强度与粒径所呈线性关系的斜率和截距; b 、 B 分别为胀缩转换点处体变与粒径所呈线性关系的斜率和截距。

式 (10)、式 (11) 中的参数 a 、 b 、 A 、 B 见表 9。由表 9 可知, 随着围压的增大, 拟合相关性系数 R^2 逐渐趋于 1, 表明围压越大, 拟合效果越好。

表9 式(10)和式(11)中的参数

Tab.9 parameters in formula (10) and formula (11)

围压 /kPa	峰值强度			胀缩转换点处体变		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>R</i> ²
100	-1.014	842.829	0.190	-4.214	0.005	0.554
300	-2.682	1 781.915	0.428	-9.391	0.006	0.045
800	-5.763	3 467.618	0.518	2.500	0.011	0.667
1 600	-12.135	5 883.480	0.746	4.718	0.020	0.880
3 200	-20.056	9 552.964	0.805	1.006	0.037	0.920

3.3 邓肯-张 *E-B* 模型参数尺寸效应分析

邓肯-张 *E-B* 模型是分析土石坝应力变形时广泛采用的宏观本构模型^[22]。根据图7、图8中不同级配堆石料的数值模拟结果,整理得到邓肯-张 *E-B* 模型参数,见表10。

表10 不同级配下的邓肯-张 *E-B* 模型参数

Tab.10 Duncan-Chang *E-B* model parameters of different gradations

级配 编号	<i>d</i> ₅₀	<i>K</i>	<i>n</i>	<i>R_f</i>	<i>K_b</i>	<i>m</i>	<i>φ</i> ₀ (°)	<i>Δφ</i> (°)
A	25	1 580	0.356	0.642	620	0.120	51.49	11.02
B	44	1 510	0.355	0.643	510	0.121	49.56	14.82
C	155	1 405	0.355	0.641	350	0.122	48.70	17.69
D	223	1 250	0.356	0.642	214	0.121	48.48	18.47

注:*K*、*n*分别为初始弹性模量系数和初始模量指数;*R_f*为破坏比;*K_b*、*m*分别为体积模量系数和体积模量指数;*φ*₀为一个大气压下的摩擦角;*Δφ*为围压增加一个对数周期时,土体摩擦角的减小值。

由表10可知, *m*、*n*、*R_f*均随颗粒粒径的增大发生小幅度波动。整体来看,随着粒径的增大,邓肯-张 *E-B* 模型参数并未发生显著变化,因此可认为尺寸效应的影响并不显著。*K*、*K_b*、*φ*₀均随着颗粒粒径的增大而线性减小与粒径*d*的关系式可表示为

$$K = -1.499d + 1\ 603.852 \quad R^2 = 0.961, \quad (12)$$

$$K_b = -1.874d + 632.872 \quad R^2 = 0.970, \quad (13)$$

$$\phi_0 = -0.012d + 50.934 \quad R^2 = 0.711. \quad (14)$$

随着粒径的增大, *Δφ*呈线性增长的变化趋势,其拟合关系式为

$$\Delta\phi = 0.033d + 11.860 \quad R^2 = 0.821. \quad (15)$$

式(12)~式(15)即为邓肯-张 *E-B* 模型参数受粒径尺寸效应影响的修正公式。与A级配相比, *K*、*K_b*、*φ*₀、*Δφ*随粒径的宏观变化率见表11。

表11 各参数的宏观变化率

Tab.11 macroscopic change rate of every parameters

级配编号	<i>d</i> ₅₀ /mm	各参数变化率/%			
		<i>K</i>	<i>K_b</i>	<i>φ</i> ₀	<i>Δφ</i>
B	44	4.430↓	17.742↓	3.737↓	34.473↑
C	155	11.076↓	43.548↓	5.415↓	60.464↑
D	223	20.886↓	65.484↓	7.777↓	67.513↑

注:“↑”表示线性增大;“↓”表示线性减小。

4 结论

通过单粒压缩试验、室内三轴试验与三轴数值模拟相结合,研究某玄武岩堆石料三轴试验强度与变形特性的尺寸效应变化规律,得出如下结论。

(1) 玄武岩颗粒的抗压强度较好地服从Weibull分布,且粒径为5~40 mm颗粒的Weibull弹性模量为1.172~2.275,可取均值1.832作为玄武岩的Weibull弹性模量。

(2) 基于单粒抗压强度、抗拉强度和弹性模量的尺寸效应规律,反演得到不同颗粒粒径的三轴数值模拟细观模型参数。堆石料三轴数值模拟结果与室内试验结果相符,试样破坏剪切带呈“X”型分布。

(3) 通过分析原型及缩尺级配堆石料的三轴数值模拟结果,得到峰值偏应力和胀缩转换点处体变的尺寸效应公式。尺寸效应表现为:级配一定时,峰值强度和胀缩转换点处体变随着围压的增大而增大;围压一定时,峰值强度随颗粒粒径的增大而减小,低围压条件下,颗粒粒径对体变影响不显著,高围压条件下,体变量随颗粒粒径的增大而增大。

(4) 邓肯-张 *E-B* 模型参数受堆石料颗粒大小的影响存在明显的尺寸效应。*m*、*n*、*R_f*对颗粒粒径的变化不敏感, *K_b*、*φ*₀随着颗粒粒径的增大而减小, *Δφ*随颗粒粒径的增大而增大。提出了随粒径变化的尺寸效应修正公式。

参考文献(References):

[1] 崔熙灿,张凌凯,王建祥.缩尺效应对砂砾石料力学特性及其本构模型的影响[J].浙江大学学报(工学版),2024,58(6):1198-1208.
CUI Xican, ZHANG Lingkai, WANG Jianxiang. Influence of scale effect on mechanical properties and constitutive model of gravel materials[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2024,58(6):1198-1208.

[2] 陈银红,伍法权,乔磊,等.小尺寸岩样尺寸效应特性研究[J].工程地质学报,2023,31(2):460-468.
CHEN Yinhong, WU Faquan, QIAO Lei, et al. Study on size effect characteristics of small size rock samples[J]. Journal of Engineering Geology, 2023,31(2):460-468.

- [3] YAN S H, CHI S C, GUO Y, et al. Statistical evaluation of the effect of size and strain rate on particle strength of rockfill materials[J]. *Granular Matter*, 2024, 26(2):51.
- [4] 胡沈江, 郭宁, 杨仲轩, 等. 堆石料颗粒破碎强度的尺寸和形状效应隐式离散元研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(2):433-440.
HU Shenjiang, GUO Ning, YANG Zhongxuan, et al. Implicit DEM analyses of size and shape effects on crushing strength of rockfill particles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(2): 433-440.
- [5] 杨少博, 邱珍锋, 王爱国, 等. 考虑缩尺效应对颗粒破碎影响的堆石料临界状态研究[J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(2):122-128.
YANG Shaobo, QIU Zhenfeng, WANG Aiguo, et al. Critical state of rockfill in consideration of scale effect on particle breakage[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(2): 122-128.
- [6] 吴帅峰, 孙森军, 麻志刚, 等. 筑坝土石料尺寸效应模型及试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(增刊1):11-15.
WU Shuaifeng, SUN Miaojun, MA Zhigang, et al. Model tests on size effects of dam rockfill materials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(Suppl.1):11-15.
- [7] ZHAO X L, ZHU J G, JIA Y, et al. Experimental and numerical study of size effects on the crushing strength of rockfill particles[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2022, 46(11):2060-2086.
- [8] ZHANG P T, SUN X J, ZHOU X J, et al. Experimental simulation and a reliable calibration method of rockfill microscopic parameters by considering flexible boundary[J]. *Powder Technology*, 2022, 396: 279-290.
- [9] 张石, 吴世勇, 吴忠, 等. 超高沥青混凝土心墙坝砂板岩堆石料试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(增刊1):191-196.
ZHANG Shi, WU Shiyong, WU Zhong, et al. Experimental study on sand slate rockfill materials for ultra-high asphalt concrete core dams[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(Suppl.1):191-196.
- [10] 邵晓泉, 迟世春. 堆石料变形参数的粒径尺寸相关性研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(9):1715-1722.
SHAO Xiaoquan, CHI Shichun. Particle size correlation of deformation parameters for rockfill materials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(9):1715-1722.
- [11] 邹德高, 宁凡伟, 刘京茂, 等. 基于超大型三轴仪的堆石料动力特性缩尺效应研究[J]. *水利学报*, 2024, 55(5):528-536.
ZOU Degao, NING Fanwei, LIU Jingmao, et al. Experimental study on scale effect of dynamic characteristics on rockfill materials using super large-scale triaxial apparatus[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, 55(5):528-536.
- [12] 邹德高, 刘京茂, 宁凡伟, 等. 基于超大型三轴试验和原型监测的堆石料模型参数缩尺效应修正[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(12): 2476-2483.
ZOU Degao, LIU Jingmao, NING Fanwei, et al. Modification of scale effects of constitutive model parameters using super large-scale triaxial tests and in-situ monitoring data[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(12):2476-2483.
- [13] 王能龙, 徐兴倩, 肖思友, 等. 胶凝风化料配合比三轴试验颗粒流细观模拟[J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(9):3622-3635.
WANG Nenglong, XU Xingqian, XIAO Siyou, et al. Mesoscale simulation study on triaxial test of cementitious weathered material mix proportion based on PFC[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(9):3622-3635.
- [14] 王晋伟, 迟世春, 闫世豪, 等. 室内缩尺级配堆石料力学参数的表征单元体体积[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2023, 57(7):1418-1427.
WANG Jinwei, CHI Shichun, YAN Shihao, et al. Representative elementary volume of mechanical parameter of rockfill material with laboratory scaled gradation[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2023, 57(7):1418-1427.
- [15] 程家林, 张贵科, 邓韶辉, 等. 干湿循环对不同粒径堆石料颗粒破碎强度的影响研究[J]. *岩土力学*, 2024, 45(增刊1):95-105.
CHENG Jialin, ZHANG Guike, DENG Shaohui, et al. Effect of cyclic wetting-drying on the crushing strength of rockfill grains with different sizes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024 45(Suppl.1): 95-105.
- [16] WANG J W, CHI S C, SHAO X Q, et al. Determination of the mechanical parameters of the microstructure of rockfill materials in triaxial compression DEM simulation[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 137:104265.
- [17] 张轩. 岩石拉伸强度的物理试验与数值模拟研究[D]. 大连:大连理工大学, 2018:46-48.
- [18] 刘宝琛, 张家生, 杜奇中, 等. 岩石抗压强度的尺寸效应[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(6):611-614.
LIU Baochen, ZHANG Jiasheng, DU Qizhong, et al. A study of size effect for compression strength of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(6):611-614.
- [19] 邵晓泉, 迟世春, 陶勇. 堆石料剪切强度与变形的尺寸效应模拟[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(10):1766-1772.
SHAO Xiaoquan, CHI Shichun, TAO Yong. Numerical simulation of size effect on shear strength and deformation behavior of rockfill materials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(10):1766-1772.
- [20] LIM W L, MCDOWELL G R, COLLOP A C. The application of Weibull statistics to the strength of railway ballast[J]. *Granular Matter*, 2004, 6(4):229-237.
- [21] HALL S A, BORNERT M, DESRUES J, et al. Discrete and continuum analysis of localised deformation in sand using X-ray μ CT and volumetric digital image correlation[J]. *Géotechnique*, 2010, 60(5): 315-322.
- [22] 赵勇博, 张振东, 卞士海, 等. 考虑应力路径效应的堆石料剪胀方程研究[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(4): 479-485.
ZHAO Yongbo, ZHANG Zhendong, BIAN Shihai, et al. Dilatancy equation for rockfill materials considering stress path effect[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2024, 43(4):479-485.