

不同颗粒强度人工模拟粗粒土三轴试验研究

吴天昊¹, 彭文明², 吴刚^{3,4}, 王少良^{3,4}, 朱俊高^{1*}, 孙鹏飞⁵

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610016; 3. 华能西藏水电安全工程技术研究中心, 西藏 拉萨 850000; 4. 华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司, 西藏 拉萨 850000; 5. 融创房地产集团有限公司, 江苏 南京 210019)

摘要: 通过制备不同强度水泥球形颗粒, 并以一定级配制成人工模拟粗粒土, 以此进行三轴固结排水剪试验, 研究了颗粒强度对粗粒土强度及变形特性的影响。试验结果表明: 颗粒强度对粗粒土强度和变形特性均有明显影响, 颗粒强度的提高引起抗剪强度的增大以及体积变形的减小。低围压下, 高颗粒强度的粗粒土表现为应变软化, 低颗粒强度的粗粒土则表现为应变硬化, 体积变形均为剪胀; 高围压下各种颗粒强度的土均表现为应变硬化, 体变表现为剪缩。线性强度指标 c 、 φ 和邓肯 E-B 模型参数 K 、 K_b 与模拟料颗粒强度的关系均可用直线表示, 非线性指标 φ_0 、 φ 与颗粒强度关系则近似用二次曲线表示。峰值摩擦角 φ_f 与粗粒土颗粒强度也呈线性关系, 颗粒强度每增大 1 MPa, 峰值摩擦角 φ_f 增大 0.066 5°。

关键词: 颗粒强度; 人工模拟粗粒土; 强度; 变形; 三轴试验

中图分类号: TU411

文献标识码: A

Study on Triaxial Test of Artificial Simulation Coarse Grained Soil with Different Grain Strengths

WU Tianhao¹, PENG Wenming², WU Gang^{3,4}, WANG Shaoliang^{3,4}, ZHU Jungao^{1*}, SUN Pengfei⁵

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 610016, China; 3. Huaneng Tibet Hydropower Safety Engineering Technology Research Center, Lhasa, Tibet 850000, China; 4. Huaneng Tibet Yarlungzangbo River Hydropower Development and Investment Co., Ltd., Lhasa, Tibet 850000, China; 5. Sunac China Real Estate Development Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210019, China)

Abstract: Triaxial consolidated drained shear tests were carried out to study the influence of particle strength on the strength and deformation characteristics of the coarse grained soil by preparing cement spherical particles with different strengths and artificial coarse grained soil with a certain grade. The test results show that the particle strength has an obvious influence on the strength and deformation characteristics of the coarse grained soil. The increase of the particle strength causes the increase of the shear strength and the decrease of the volume deformation. Under low confining pressures, the coarse grained soil with high particle strength shows strain softening, while the coarse grained soil with low particle strength shows strain hardening, and the volume deformation for all the coarse grained soil is dilatation. Under high confining pressures, the coarse grained soil with various particle strengths shows strain hardening and the volumetric deformation shows shear shrinkage. The relationship between the linear strength index c , φ and Duncan E-B model parameter K , K_b and the particle strength of the simulated material can be expressed by a straight line, while the relationship between the nonlinear index φ_0 , φ and the particle strength can be expressed by a quadratic curve approximately. The peak friction angle φ_f also has a linear relationship with the particle strength of the simulated material. When the particle strength increases by 1 MPa, the peak friction angle φ_f increases by 0.066 5°.

收稿日期: 2022-10-10

基金项目: 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金重点支持项目(U2040221); 华能集团总部科技项目(HNKJ20-H45); 西藏自治区“十四五”时期清洁能源科技重大专项(XZ202201ZD0003G); 河海大学大型仪器设备共享基金(GX202205B)

作者简介: 吴天昊(1999-), 男, 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要从事土体基本性质及本构关系、土石坝工程研究。

* 通讯作者: 朱俊高(1964-), 男, 江苏兴化人, 博士, 教授, 研究方向为土体基本性质及本构关系、土石坝工程等。

Key words: particle strength; artificial simulation of coarse grained soil; strength; deformation; triaxial test

粗粒土被广泛应用于土石坝等建设工程中^[1]。准确把握堆石料等粗粒土的基本力学性质对高土石坝变形预测精度十分重要。粗粒土多由人工爆破而来,颗粒形状不规则,细颗粒与粗颗粒强度与变形性质差异大^[2-3]。在高应力下粗粒土颗粒破碎严重,使得颗粒形态及强度改变,故而以天然粗粒土为室内试验材料时不能有效研究颗粒强度对其强度及变形性质的影响,因此需对粗粒土进行人工模拟^[4-6]。

国内外学者对人工模拟类的颗粒材料已进行一定研究与探索,如选用钢珠^[6]、玻璃珠^[7-9]、水泥球^[10]、石膏^[11]等。孔德志等^[6]采用不同粒径钢珠混合的集合作为模拟料,通过常规三轴排水实验,研究了颗粒间的滑移对强度和变形特性的影响。董启朋等^[8]采用钢珠和玻璃球对颗粒材料开展常规三轴试验,探讨了围压、粒径、孔隙比等因素对粗粒土强度、变形特性的影响。唐晨景等^[9]利用玻璃珠模拟堆石料,基于中型三轴仪研究了颗粒组构对强度和变形特性的影响。除采用钢珠和玻璃珠外,孔德志等^[10]也采用水泥净浆浇筑不同粒径及强度的椭球颗粒,研究了颗粒破碎率对堆石体应力应变特性的影响。杨贵等^[12]采用水泥净浆浇筑等体积不同形状的粗颗粒作为模拟料,通过三轴剪切试验研究了不同围压下颗粒形状对人工模拟堆石料的强度和变形特性的影响。孔德志等^[10]人在模拟堆石料时所制人工模拟颗粒试样中间会存在明显薄弱面,该面强度较低会对试验结果的规律变化产生较大影响。杨贵等^[12]所制试样只能为棱台状,这与常见的天然粗粒土的颗粒有很大的差异性。两种制样方式虽存在局限,但水泥为原材料的优势显著,故而本文采用水泥球对粗粒土进行人工模拟。

现有对人工模拟粗粒土的试验研究多着眼于颗粒间滑移、颗粒组构、颗粒形状等外部影响因素^[13-15],其土颗粒自身强度对粗粒土力学特性影响研究较少。故本文在充分考虑了上述局限的基础之上采用了一种新型制备水泥球的方法,即硅胶模具定位成球法,制备了试验用的粗粒土水泥球。开展了四种不同颗粒强度粗粒土三轴固结排水试验,研究了人工模拟粗粒土颗粒强度对于试样的强度和变形特性的影响。

1 试验制备及试验方法

1.1 制样方法

本文采用的制备水泥球的方法是所谓的“硅

胶模具定位成球法”,即利用硅胶浇筑模具,按所需水泥球的尺寸,制作外模。而后借助建模软件建立3D模型,并用3D打印机将所建模型打印,得到模具外框,而后将硅胶导入外框,可以浇筑出不同尺寸、不同形状的模具。通过该模具制备的水泥球颗粒可以减少因水泥料浇筑不均产生薄弱点或薄弱面,且颗粒形状可以做到自主控制。制备完成的水泥球实物图如图1所示。



图1 水泥球实物图

Fig. 1 Physical drawing of cement ball

为了研究颗粒强度对粗粒土力学特性的影响,利用硅胶模具制备了4种强度的水泥球,其标准抗压强度 $f_c = 28, 50, 65, 75$ MPa。水泥球粒径有三种,即20、10、5 mm。同时,由于天然粗粒料的颗粒粒径分散,不是集中在几个粒径范围,为了使试验用模拟料级配与天然粗粒料(双江口心墙坝堆石料缩尺后级配)有一定的相似性,作者在前面这三种粒径中填充5~10 mm、2~5 mm的填充料。填充料用与水泥球颗粒相同强度的水泥质标准立方块凿碎后筛分而得。将相同强度的这三种粒径的颗粒以及10~5 mm和5~2 mm粒组的填充料按表1给出的粒组含量混合,形成一组试样,并以此作为本文试验用的人工模拟粗粒土(以下简称粗粒土)。这里,采用控制不同外加掺料和养护龄期的水泥料来制备强度不同的水泥球颗粒,其强度直接通过制备相应的标准立方体试块(70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm)的抗压强度来表征。试验前,将土样饱和,确保孔隙压力系数 B 值达到0.95以上进而进行后续固结及剪切试验。

试验用人工模拟粗粒土级配如表1所示,其级配曲线见图2。不同颗粒强度粗粒土的试样采用相同击实功制备,即按照表1的级配配置好土料,将每个试样土料等量分成5份,分别放入制样筒内,并击实相同击数。

表 1 人工模拟粗粒土级配

Tab. 1 Gradation of artificial simulated coarse-grained soil

粒径/mm	粒组含量/%
20	11.24
15	14.55
10	27.33
10~5	22.91
5~2	23.97

1.2 试验方法

本次常规三轴试验是在应变控制式三轴剪切仪上进行的,试样直径为 101 mm,高为 200 mm。

为了探究不同的颗粒强度对粗粒土强度和变形特性的影响,本文对 4 种不同强度 ($f_c = 28、50、65、75$ MPa) 球形水泥颗粒模拟料在 4 种围压 (200、500、800、1 200 kPa) 下开展了 16 组三轴固结排水试验,当试样轴向应变达到 $\varepsilon_a = 15\%$ 时,结束试验。

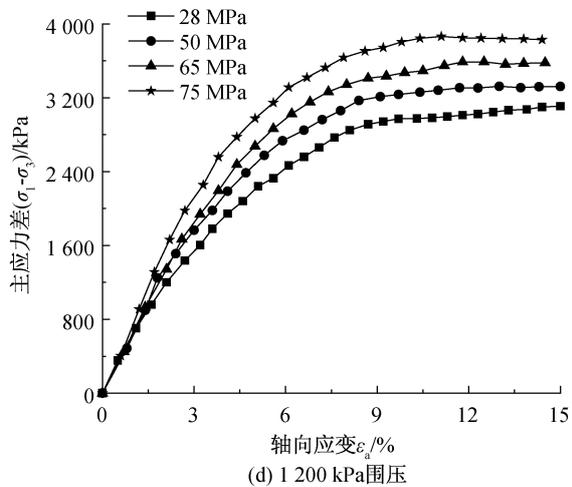
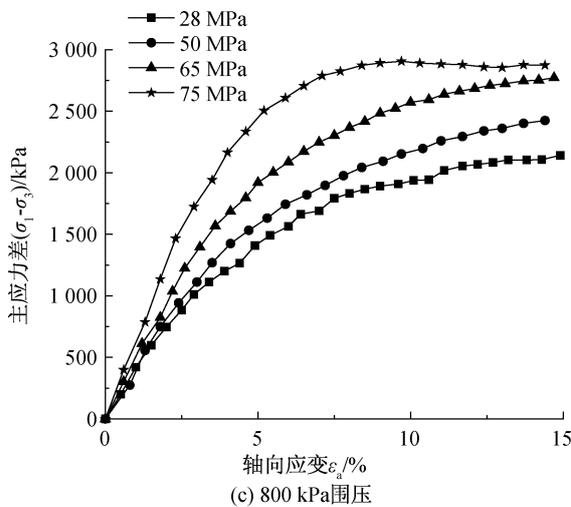
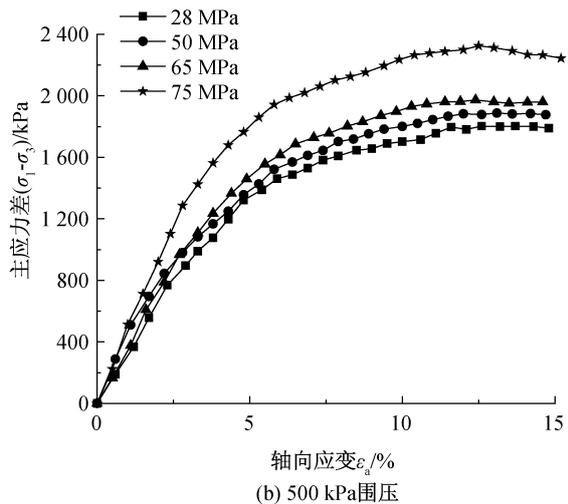
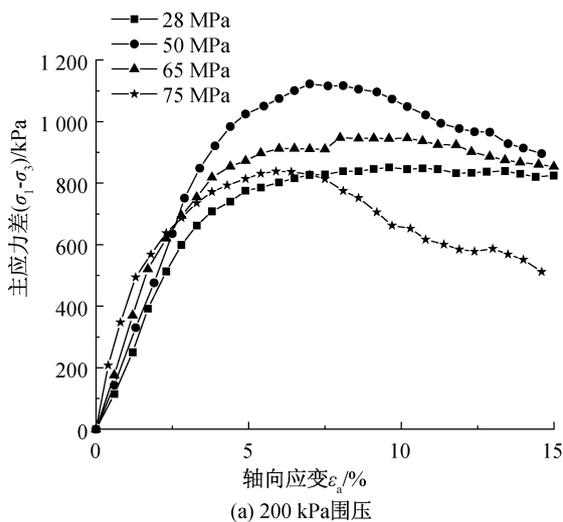
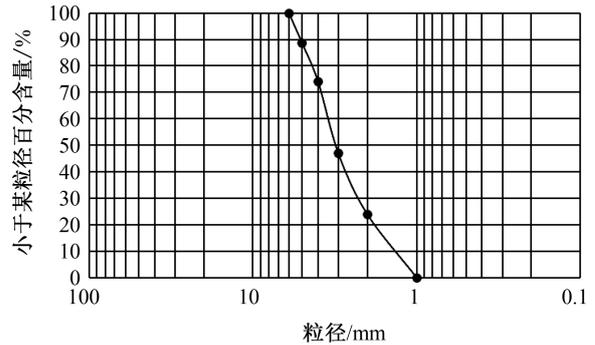
图 3 不同颗粒强度 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 曲线Fig. 3 Relationship between $(\sigma_1 - \sigma_3)$ and ε_a of soils with different particle strengths

图 2 试验用人工模拟粗粒土级配曲线

Fig. 2 Grading curve of artificial simulated coarse-grained soil for testing

2 试验结果分析

2.1 颗粒强度对粗粒土强度特性影响

依据上述试验方案,进行了多组三轴试验,得到了应力-应变曲线。为便于分析粗粒土颗粒强度对应力应变特性的影响,将同围压下不同颗粒强度的粗粒土的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 曲线绘制于同一图中,如图 3 所示。

由图 3 可知,低围压下,颗粒强度高的粗粒土表现出明显的应变软化特性,低颗粒强度土则表现为应变硬化特性。高围压下,高颗粒强度的粗粒土为应变硬化,而低颗粒强度土表现出硬化特性。

为了更直观地反映颗粒强度对粗粒土强度的影响,整理出不同围压下的粗粒土峰值强度(峰值轴向附加应力)与颗粒强度关系,如图 4 所示。由图 4 可知,同一围压下,高颗粒强度的粗粒土峰值强度明显高于低颗粒强度土。不同围压下,高颗粒强度粗粒土峰值强度增幅明显大于低颗粒强度土,表明颗粒强度的增大能够较显著地提高粗粒土强度。

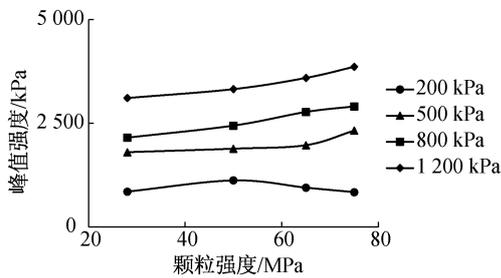


图 4 不同颗粒强度粗粒土峰值强度

Fig. 4 Peak strength of artificial simulation of coarse grained soil with different particle strengths

粗粒土的强度指标分为线性强度指标和非线性强度指标。表 2 给出了粗粒土的线性强度指标 c 、 φ 以及非线性强度指标 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 。

表 2 粗粒土强度指标

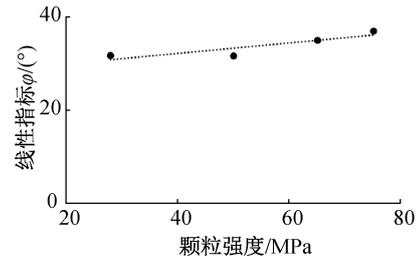
Tab. 2 Strength indexes of coarse grained soil

颗粒强度 /MPa	线性指标		非线性指标	
	c /kPa	φ /($^{\circ}$)	φ_0 /($^{\circ}$)	$\Delta\varphi$ /($^{\circ}$)
75	1.18	36.75	45.68	5.88
65	1.40	34.74	47.95	9.84
50	2.04	31.37	52.05	15.83
28	1.41	31.47	46.81	11.73

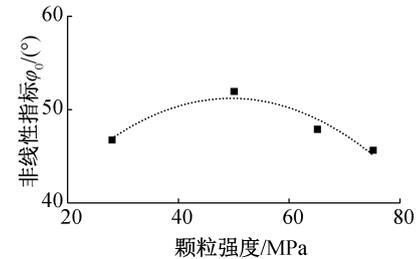
由表 2 整理出线性强度指标及非线性强度指标随颗粒强度的变化关系,发现规律较好,可用合适的曲线进行拟合。线性强度指标 c 变化范围较小,在 1.2~2.1 kPa 之间,可认为是常数。 φ 可近似用直线拟合(图 5(a)),并发现 φ 随着粗粒土颗粒强度增大而增大。拟合得到的关系式如式(1)所示:

$$\varphi = k_1 f + m_1 \quad (1)$$

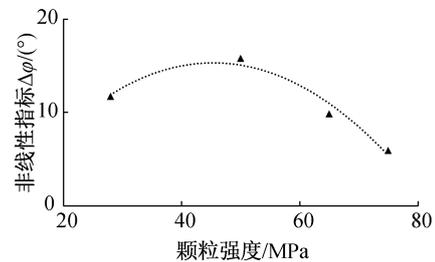
式中, f 为颗粒强度(以下出现的 f 均为此含义),MPa; k_1 和 m_1 为拟合参数,分别为0.114和27.362,其决定系数 R^2 为0.788。



(a) 线性指标 φ 与颗粒强度关系



(b) 非线性指标 φ_0 与颗粒强度关系



(c) 非线性指标 $\Delta\varphi$ 与颗粒强度关系

图 5 线性及非线性强度参数与颗粒强度关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between linear and nonlinear strength parameters and particle strength

非线性强度指标 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 整体上表现为随粗粒土颗粒强度增大而降低。可用二次多项式拟合,且拟合程度较高,计算得出的决定系数 R^2 分别为 0.913 和 0.959。拟合方程如式(2)和式(3)所示。

$$\varphi_0 = k_2 f^2 + m_2 f + n_1 \quad (2)$$

$$\Delta\varphi = k_3 f^2 + m_3 f + n_2 \quad (3)$$

式中, k_2 、 k_3 、 m_2 、 m_3 和 n_1 、 n_2 为拟合参数,分别为 -0.009 4、-0.011 4、0.934、1.032 和 28.219、-8.082。

为进一步分析颗粒强度对粗粒土强度的影响,整理出了每个试样各围压下的峰值摩擦角(即 $\sigma - \tau$ 坐标系中过坐标原点的破坏莫尔圆切线的倾角,用 φ_f 表示),如表 3 所示。

表 3 不同颗粒强度粗粒土峰值摩擦角(单位: $^{\circ}$)

Tab. 3 Peak friction angle of coarse grained soil with different particle strengths (unit: $^{\circ}$)

围压/kPa	颗粒强度/MPa			
	28	50	65	75
200	42.9	47.5	44.7	42.6
500	40.0	40.8	41.6	44.4
800	35.0	37.2	39.4	40.2
1 200	34.4	35.5	36.9	38.1

由表3可知,除200 kPa围压外,整体上,相同围压下,随着粗粒土颗粒强度的增大,峰值摩擦角增大,且颗粒强度与峰值摩擦角的关系可近似用直线拟合。拟合得到的直线斜率由低围压至高围压分别为-0.005 6、0.080 9、0.112 7、0.077 9,取均值为0.066 5。这里,直线斜率的物理含义为粗粒土颗粒强度每增大1 MPa,粗粒土峰值摩擦角 φ_f 的提高值。因此,对于试验用土,颗粒强度每增大1 MPa,其摩擦角提高0.066 5°。由此可知,粗粒土颗粒强度的提高对其强度提高有较显著的影响。

2.2 颗粒强度对粗粒土变形特性影响

通过三轴试验获得了体变-轴向应变曲线,曲线中剪胀为负、剪缩为正。将同一围压下不同粗粒土颗粒强度的 $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ 曲线绘制于图6中。

低围压下,不同颗粒强度的粗粒土在体变-轴向应变曲线中初始剪切段均表现为剪缩,随着剪切发展,剪胀性凸显。高颗粒强度的粗粒土剪胀性明显强于低颗粒强度土,其剪胀剪缩临界点出现明显早于低颗粒强度土,且其最终体积应变

远大于低颗粒强度土。如75 MPa颗粒土在轴向应变达到1.3%时出现临界点,最终体变值为-4.10%,而28 MPa颗粒土则在轴向应变达到3.8%时才出现临界点,且最终体变值仅为-0.80%。

随着围压升高,低颗粒强度粗粒土相较于高颗粒强度土较早表现出较强的剪缩性。高围压下,各颗粒强度土均表现出较强的剪缩性,且随着颗粒强度增大峰值体变应变值减小。

为进一步研究粗粒土颗粒强度对土体变形特性的影响,依据试验结果整理得邓肯E-B模型参数,如表4所示,表4中的参数为强度按非线性考虑时所得参数。

由表4可知, R_f 的值在0.72~0.75之间, m 均为0.01, n 的值变化范围同样较小,故而可认为 R_f 、 m 、 n 值受粗粒土颗粒强度影响较小。相反, K 、 K_b 则随颗粒强度变化而显著变化。

整理出 K 、 K_b 随颗粒强度变化关系,如图7所示。对 K 、 K_b 与颗粒强度之间进行曲线拟合,发现直线拟合效果较好。拟合关系式如式(4)和式(5)所示:

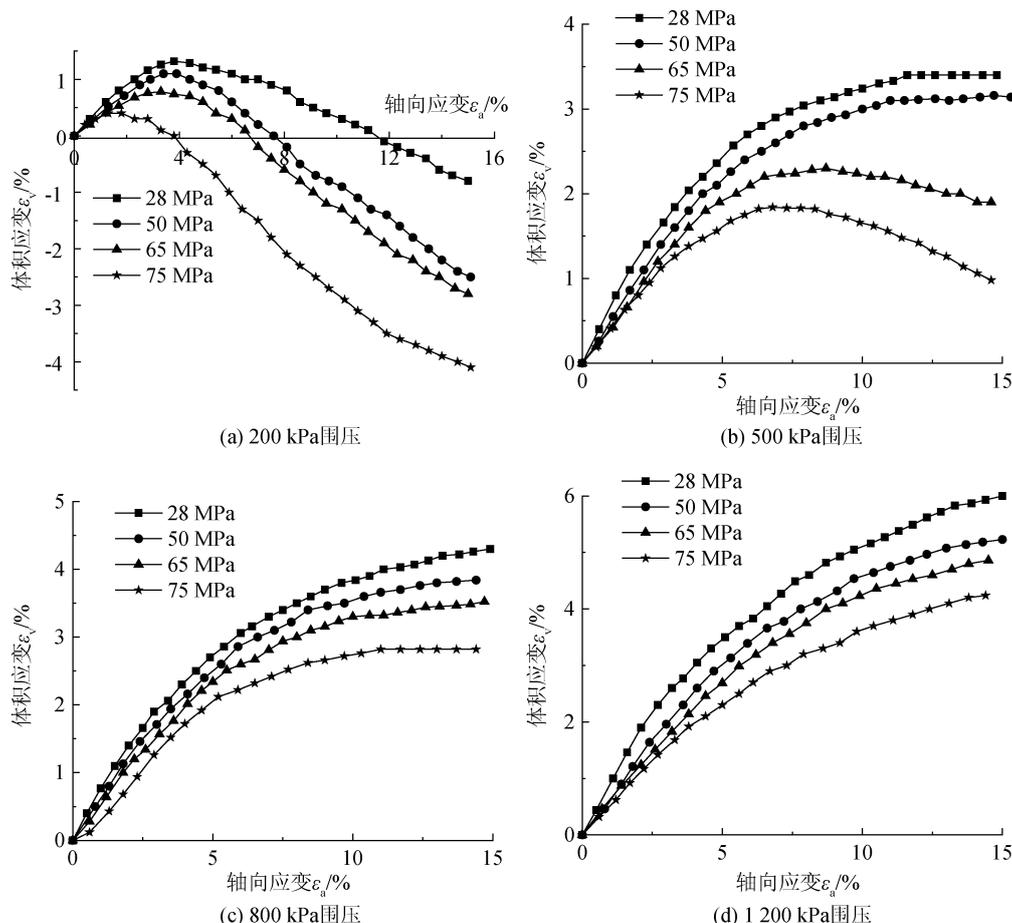


图6 不同颗粒强度 $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ 曲线

Fig. 6 Relationship between ε_v and ε_a of soils with different particle strengths

表 4 邓肯 E-B 模型参数

Tab. 4 Duncan E-B model parameters

颗粒强度/MPa	R_f	K	n	K_b	m
28	0.723 4	174.035	0.599 3	178.460	0.01
50	0.719 4	195.923	0.594 1	223.765	0.01
65	0.720 3	217.895	0.582 3	287.778	0.01
75	0.746 4	294.815	0.550 1	386.762	0.01

$$K = p_1 f + q_1 \quad (4)$$

$$K_b = p_2 f + q_2 \quad (5)$$

式中, p_1 、 p_2 和 q_1 、 q_2 为拟合参数, 分别为 2.265、4.161 和 97.226、42.398, 计算得出的决定系数 R^2 分别为 0.775 和 0.887。

由图 7 可知, K 值较其他参数数值较小, 是由于试样制样密度较低, 得到的粒组数较少, 孔隙较大, 小颗粒无法完全填充孔隙。 K 、 K_b 均随着粗粒土颗粒强度的增大而增大, 这表明粗粒土颗粒强度的提高对体积变形有显著影响, 随着颗粒强度的增大, 粗粒土体积变形减少。依据拟合直线的斜率可知, 颗粒强度每增加 1 MPa, K 、 K_b 分别增加 2.265 和 4.161。

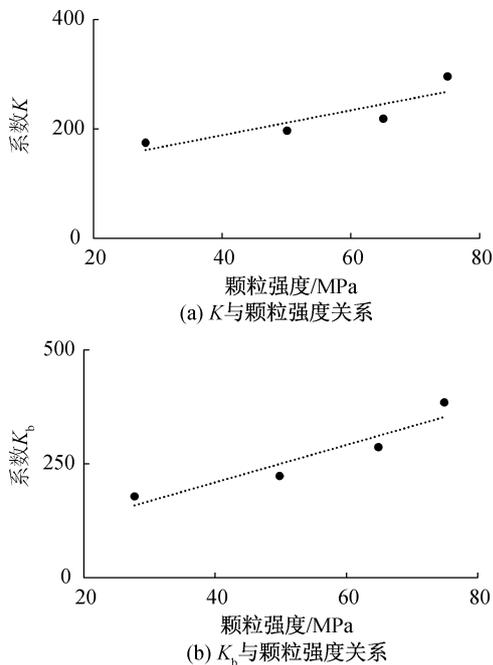


图 7 邓肯 E-B 模型参数与颗粒强度关系曲线
Fig. 7 Relationship curve between Duncan E-B model parameters and particle strengths

3 结论

本文通过一种新型人工模拟粗粒土制备方法

(硅胶模具定位成球法) 制备了不同颗粒强度的粗粒土, 开展了三轴固结排水剪试验, 研究了颗粒强度对人工模拟粗粒土强度和变形特性的影响, 得出如下结论:

1) 低围压下, 高颗粒强度粗粒土表现出明显的应变软化特性, 低颗粒强度土则为应变硬化。随着围压升高, 高颗粒强度粗粒土由应变软化转变为应变硬化, 低颗粒强度土则均表现为应变硬化。

2) 线性强度指标 c 值受粗粒土颗粒强度影响小, φ 与颗粒强度的关系可近似用直线拟合, 且 φ 则随着颗粒强度增大而增大。非线性强度指标 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 与颗粒强度关系都可用二次多项式拟合。

3) 峰值摩擦角 φ_f 与粗粒土颗粒强度呈线性关系, 颗粒强度每增大 1 MPa, 峰值摩擦角 φ_f 提高 0.0665° 。

4) 低围压下, 不同颗粒强度的粗粒土表现出不同程度的剪胀性; 高围压下, 各颗粒强度土均表现出较强剪缩性。

5) 邓肯 E-B 模型参数中的 K 、 K_b 与粗粒土颗粒强度的关系可用直线拟合, K 、 K_b 均随着粗粒土颗粒强度的增大而增大。颗粒强度对粗粒土体积变形影响较大, 随着颗粒强度的增大, 粗粒土体积应变减小。

参考文献:

[1] 郭熙灵, 胡辉, 包承纲. 堆石料颗粒破碎对剪胀性及抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 1997(3): 86-91.
 [2] 胡有方, 袁俊平, 卢毅. 孔隙空间分布对粗粒土强度变形特性影响研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2021, 38(1): 26-31.
 [3] 李小梅, 关云飞, 凌华, 等. 考虑级配影响的堆石料强度与变形特性[J]. 水利水运工程学报, 2016(4): 32-39.
 [4] 高玉峰, 张兵, 刘伟, 等. 堆石料颗粒破碎特征的大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1237-1240+1246.
 [5] 蒋明杰, 吉恩跃, 王天成, 等. 粗粒土抗剪强度的缩尺效应规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(4): 855-861.
 [6] 孔德志, 张丙印, 孙逊. 钢珠模拟堆石料三轴试验研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 210-215+221.
 [7] 于钱米. 粗粒土颗粒破碎演化规律研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
 [8] 董启朋, 姚海林, 詹永祥. 钢珠和玻璃珠模拟粗粒土的三轴试验研究[J]. 人民长江, 2016, 47(8): 88-93.

(下转第 76 页)

- 建筑,2019,49(5):159-165.
- [3] 胡苏,苏庆田,吴冲.正交异性钢-混凝土组合桥面板截面优化研究[J].结构工程师,2015,31(2):131-137.
- [4] KIM H Y, JEONG Y J. Steel-concrete Composite Bridge Deck Slab with Profiled Sheeting[J]. Journal of Constructional Steel Research,2009,65(8-9):1751-1762.
- [5] 郭敏,张静,任伟新.波形钢-混凝土组合桥面板受力性能研究[J].世界桥梁,2016,44(3):73-77.
- [6] 朱伟庆,崔越,刘永健,等.开孔板连接件受剪承载力研究[J].建筑结构学报,2017,38(7):129-136.
- [7] KONG F L, HUANG P M, HAN B, et al. Experimental Study on Behavior of Borrugated Steel-concrete Composite Bridge Decks with MCL Shape Composite Dowels[J]. Engineering Structures,227(2021):111399.
- [8] 安然,王有志,周磊,等.剪力钉连接件拉剪复合作用试验及计算模型[J].长安大学学报:自然科学版,2020,40(3):42-52.
- [9] 孔凡磊,黄平明,梅葵花,等.改进螺旋线型组合销剪力连接件承载力试验研究[J].桥梁建设,2020,50(2):43-48.
- [10] 蒋洪波,邱洪兴,杨原,等.钢-混凝土组合螺栓连接件极限强度及剪力-位移关系[J].东南大学学报:自然科学版,2020,50(1):56-63.
- [11] 苏庆田,田乐,曾明根,等.正交异性折形钢板-混凝土组合桥面板基本性能研究[J].工程力学,2016,33(S1):138-142.
- [12] 张清华,程震宇,廖贵星,等.波形顶板-UHPC组合桥面板优化设计[J].西南交通大学学报,2018,53(4):14-22.
- [13] 徐宙元,赵人达,牟廷敏.带开孔钢板剪力连接件的钢-混凝土组合桥面板受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(S1):382-388.
- [14] KIM H Y, JEONG Y J. Ultimate Strength of a Steel-Concrete Composite Bridge Deck Slab with Profiled Sheeting[J]. Engineering Structures,2010,32(2):534-546.
- [15] 王涛,方淑君.PBL剪力键静承载能力试验研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(6):1249-1254.
- [16] 杨梦月.波形顶板-UHPC组合桥面板正弯矩作用下的受力性能研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- (责任编辑 王利君)

(上接第63页)

- [17] 张艳博,梁鹏,孙林,等.单轴压缩下饱水花岗岩破裂过程声发射频谱特征试验研究[J].岩土力学,2019,40(7):2497-2506.
- [18] 张艳博,于光远,田宝柱,等.花岗岩破裂过程声发射主频多元前兆信息识别[J].采矿与安全工程学报,2017,34(2):355-362.
- [19] 张艳博,梁鹏,田宝柱,等.花岗岩灾变声发射信号多参量耦合分析及主破裂前兆特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(11):2248-2258.
- [20] 赵奎,杨道学,曾鹏,等.单轴压缩条件下花岗岩声信号频域特征分析[J].岩土工程学报,2020,42(12):2189-2197.
- [21] GRASSBERGER P, PROCACCIA I. Characterization of Strange Attractors[J]. Physical Review Letters,1983,50(5):346.
- [22] 张艳博,梁鹏,孙林,等.基于HHT的粉砂岩破裂声发射信号频率特性研究[J].采矿与安全工程学报,2016,33(1):179-184.
- (责任编辑 王利君)

(上接第69页)

- [9] 唐晨景,杨贵,许建宝.玻璃球模拟堆石料强度和变形特性试验研究[J].防灾减灾工程学报,2016,36(6):861-865.
- [10] 孔德志,张丙印,孙逊.人工模拟堆石料颗粒破碎应变的三轴试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(3):464-469.
- [11] 何森林,黄昕,张子新.石膏试件的力学特性研究[J].地下空间与工程学报,2016(S1):7.
- [12] 杨贵,许建宝,孙欣,等.颗粒形状对人工模拟堆石料强度和变形特性影响的试验研究[J].岩土力学,2017,38(11):3113-3118+3153.
- [13] 周泳峰,王俊杰,王爱国,等.缩尺效应对堆石料颗粒破碎特性的影响[J].水电能源科学,2021,39(8):165-168+65.
- [14] 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.
- [15] 魏巍,姜程程,覃燕林,等.人工模拟堆石料颗粒破碎的分形特性[J].人民黄河,2014,36(12):126-129.
- (责任编辑 王利君)