

DOI: 10.11779/CJGE20220102

粗粒土抗剪强度的缩尺效应规律试验研究

蒋明杰^{1,2}, 吉恩跃³, 王天成^{1,2}, 栗书亚^{*1,2}, 朱俊高⁴, 梅国雄^{1,2}

(1. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西 南宁 530004;
3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 4. 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 210024)

摘要: 抗剪强度是评价土体稳定性的重要指标, 研究缩尺效应对粗粒土抗剪强度的影响, 对高土石坝工程土体强度估算有重要的理论意义和应用价值。根据前人的研究, 颗粒最大粒径 d_{\max} 和级配结构两部分变化是导致缩尺后试样存在缩尺效应的主要原因, 其中级配结构可由级配面积 S 作为特征参数表示。通过改变试样的 d_{\max} 和 S , 设计了 24 组不同级配试样, 利用大型直剪仪对各组试样进行直剪试验, 从而定量研究颗粒最大粒径和级配结构对粗粒土抗剪强度的影响规律。研究表明: 粗粒土的抗剪强度指标黏聚力 c 和内摩擦角 φ 均表现出随着 d_{\max} 增大而增大的规律, 且 c 和 φ 均与 d_{\max} 呈对数函数关系; 黏聚力 c 和内摩擦角 φ 随着 S 的减小而增大, 到达某一特定值后呈略微减小的趋势, 并根据相应试验数据分别建立 c 和 φ 与 S 的关系式。最后, 基于试验结果建立了考虑缩尺效应的粗粒土抗剪强度的预测模型, 并用相关文献试验数据验证了该模型对不同类型粗粒土的适用性。

关键词: 粗粒土; 缩尺效应; 抗剪强度; 颗粒最大粒径; 级配结构

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)04-0855-07

作者简介: 蒋明杰(1990—), 男, 湖南邵阳人, 讲师, 主要从事粗粒土力学特性等方面科研。E-mail: 20180121@gxu.edu.cn。

Experimental study on laws of scale effects of shear strength of coarse-grained soils

JIANG Mingjie^{1,2}, JI Enyue³, WANG Tiancheng^{1,2}, LI Shuya^{1,2}, ZHU Jungao⁴, MEI Guoxiong^{1,2}

(1. Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Guangxi University, Nanning 530004, China;

3. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 4. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The shear strength is one of the important evaluation indices for the stability of soils. The investigation into the influences of the scale effects on the shear strength of coarse-grained soils has important theoretical significance and application for the strength estimation of soils in high earth-rock dam projects. According to the previous studies, the variations of the maximum particle size d_{\max} and gradation structure can be seen as the main reasons resulting in the scale effects, and the gradation structure can be expressed by a characteristic parameter, the gradation area (S). By changing d_{\max} or S , 24 groups of samples with different gradations of coarse-grained soils are designed. The direct shear tests on all the samples are conducted by a large-scale direct shear apparatus to quantitatively study the multiple influences of the maximum particle size and gradation structure on the shear strength of coarse-grained soils. The results show that the cohesion (c) and the internal friction angle (φ) of coarse-grained soils tend to increase with the increasing d_{\max} , and thus a logarithmic equation relationship between c/φ and d_{\max} is proposed. Both c and φ tend to increase with the decrease of S , and then decrease slightly after S reaches a certain level. As a consequence, an empirical relationship between c/φ and s is established based on the corresponding test results. Furthermore, a new prediction model for the shear strength of coarse-grained soils considering the scale effects is proposed, and the test results in the relevant literatures verify that the proposed model can be applied to different types of coarse-grained soils.

Key words: coarse-grained soil; scale effect; shear strength; maximum particle size; gradation structure

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878185, 52178321, 52108309); 国家自然科学基金委员会-雅砻江流域水电开发有限公司雅砻江联合基金项目(U1865104); 长江水科学研究联合基金重点支持项目(U2040221); 广东省海洋土木工程重点实验室开放基金项目(LMCE202103); 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金项目(2020ZDK003); 广西省自然科学基金项目(2021GXNSFBA196091)

收稿日期: 2022-01-21

*通信作者(lishuya@st.gxu.edu.cn)

0 引言

粗粒土的力学性质对高土石坝工程的安全性有决定性的作用,抗剪强度是工程中评价粗粒土强度特性的重要力学指标,准确把握其抗剪强度特性有重要的工程意义。高土石坝工程中广泛采用的粗粒土颗粒最大粒径可达 800~1000 mm,部分工程甚至达到了 1200 mm^[1]。由于室内仪器尺寸限制,无法直接测试现场粗粒土抗剪强度,需要对其级配进行缩尺^[2]。然而,无论采取何种缩尺方法,必然产生缩尺效应,即缩尺后的试验结果可能无法准确反映粗粒土的真实抗剪强度。因此,有必要深入研究缩尺效应对抗剪强度的影响规律,把握缩尺试样与现场粗粒土间抗剪强度的差异,找出基于室内试验结果能够准确推求出现场粗粒土抗剪强度的方法。

目前,国内外学者关于缩尺效应对粗粒土抗剪强度的影响开展了大量的研究,所得到的结论存在较大差异,部分结论甚至完全相反^[3]。究其原因,制样标准的差异对试验结果影响较大^[4]。制样标准为同一干密度时,试验结果一般表现为随着颗粒最大粒径 d_{\max} 的增大,抗剪强度呈减小的趋势。如: Marsal^[5]、Marachi 等^[6]、Varadarajan 等^[7]、孔宪京等^[8]及孟宪麒^[9]等分别通过试验证明了抗剪强度随颗粒 d_{\max} 的增大而减小的规律。

然而,制样标准为同一相对密度时,缩尺效应对抗剪强度的影响没有统一的认识^[10]。如: 郇能惠等^[11]和李翀等^[12]认为内摩擦角 φ 随着颗粒最大粒径 d_{\max} 的增大而增大,而 Lee^[13]和 Hu 等^[14]认为颗粒最大粒径 d_{\max} 对峰值内摩擦角 φ 影响不大;魏厚振等^[15]发现内摩擦角 φ 随着细粒含量的减小而增大,而李振等^[16]研究得到内摩擦角 φ 在细粒含量较小时稳定在某一特定值,后随着细粒含量的增大而迅速减小的规律。

综上,由于受缩尺方法、级配特性和制样密度等因素的影响,缩尺试样与原级配料的力学特性之间的关系难以定量描述,对缩尺后粗粒土抗剪强度特性的变化规律认识仍有不足,还处于定性研究阶段^[3-4, 10]。因此,开展缩尺效应对粗粒土抗剪强度影响的定量试验研究十分必要。

朱俊高等^[17]对国内外工程项目中的典型的土体级配曲线形态进行整理归纳,提出了一种可准确描述粗粒土级配的方程,表达式为

$$P = \frac{1}{(1-b)(d_{\max}/d)^m + b} \times 100\% \quad (1)$$

式中: P 为小于粒径 d 的土粒含量 (%); d 为土体粒

径 (mm); d_{\max} 为土体颗粒最大粒径 (mm); b 和 m 为级配方程参数,分别决定级配曲线的形状和倾斜程度(统称为级配结构)。

根据吴二鲁等^[18-19]的研究,无论采用规范^[2]推荐的何种缩尺方法,缩尺试样和原级配料的差异主要为颗粒最大粒径和级配结构两部分,故缩尺效应可视为由试样颗粒最大粒径和级配结构变化耦合作用所导致的结果。因此,本文通过改变颗粒最大粒径或级配结构设计了 24 组试样,在同一初始相对密实度制样的条件下,对各组试样进行直接剪切试验,采用单一变量法分别研究颗粒最大粒径和级配结构对粗粒土抗剪强度的影响,探求缩尺效应对粗粒土抗剪强度的影响规律。最后基于室内试验结果准确推求出现场原级配粗粒土的抗剪强度,从而消除缩尺效应对粗粒土抗剪强度的影响,提高岩土工程设计的安全性和可靠性。

1 试验介绍

试验采用 Shear Trac III 型室内大型直剪仪,剪切盒尺寸长×宽×高分别为 305 mm×305 mm×200 mm。据土工试验方法与标准^[2]规定,试验土料粒径应小 1/5~1/6 的仪器尺寸,即本仪器可对最大粒径在 50.8 mm 以下的试样进行剪切。经预试验确定,本次试验垂直压力为 50, 100, 150 和 200 kPa,剪切速度为 4 mm/min(符合固结快剪要求)。

试验土料取自某工程施工现场砂卵石粗粒土,颗粒呈浑圆形,如图 1 所示。在土石坝工程中,粗粒土的级配参数 m 和 b 的常用取值区间为: $0 < m < 2$ 和 $-2 < b < 1$,故本文通过设定一系列参数 m 和 b 的值,共设计 24 组级配试样,相应的级配参数和制样密度列于表 1,其中参数 S 表示级配曲线面积,具体定义见第 2 节。A1-4~A12-4 为颗粒最大粒径相同但级配结构不同的 12 组试样,对应的级配曲线见图 2(a)。D1-4~D1-1, D2-4~D2-1, D3-4~D3-1, D4-4~D4-1 分别为级配结构相同而颗粒最大粒径不同的 4 组试样,对应的级配曲线见图 2(b)。

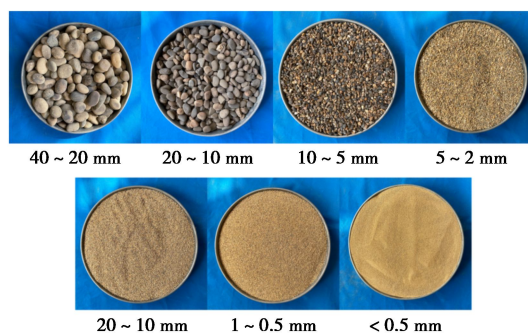


图 1 不同粒组砂卵石料样本

Fig. 1 Sandy pebble samples of different grain groups

表 1 级配参数和密度信息汇总表
Table 1 Summary of gradation parameters and densities of samples

编号	d_{\max}/mm	m	b	S	$\rho_{\min}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_{\min}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
A1-4	40	1.0	0.6	0.539	1.905	2.163	2.106
A2-4	40	1.0	-0.2	0.350	1.815	1.994	1.955
A3-4	40	1.0	-1.0	0.273	1.750	1.959	1.913
A4-4	40	0.8	0.3	0.504	1.878	2.122	2.068
A5-4	40	0.8	-0.2	0.408	1.838	2.049	2.003
A6-4	40	0.8	-1.0	0.322	1.782	1.961	1.922
A7-4	40	0.6	0.6	0.673	1.877	2.171	2.105
A8-4	40	0.6	0.3	0.581	1.909	2.197	2.133
A9-4	40	0.6	-0.2	0.482	1.894	2.127	2.076
A10-4	40	0.4	0.6	0.749	1.857	2.152	2.086
A11-4	40	0.4	0.3	0.672	1.899	2.199	2.132
A12-4	40	0.4	-1.0	0.486	1.897	2.149	2.093
D1-4	40	1.0	0.3	0.441	1.833	2.106	2.045
D1-2	20	1.0	0.3	0.441	1.764	2.044	1.981
D1-1	10	1.0	0.3	0.441	1.641	1.977	1.899
D2-4	40	0.8	0.6	0.603	2.086	2.426	2.349
D2-2	20	0.8	0.6	0.603	1.906	2.155	2.174
D2-1	10	0.8	0.6	0.603	1.741	2.115	2.028
D3-4	40	0.6	-1.0	0.390	1.906	2.155	2.100
D3-2	20	0.6	-1.0	0.390	1.820	2.092	2.031
D3-1	10	0.6	-1.0	0.390	1.664	2.002	1.924
D4-4	40	0.4	-0.2	0.581	1.973	2.302	2.228
D4-2	20	0.4	-0.2	0.581	1.842	2.199	2.117
D4-1	10	0.4	-0.2	0.581	1.688	2.028	1.949

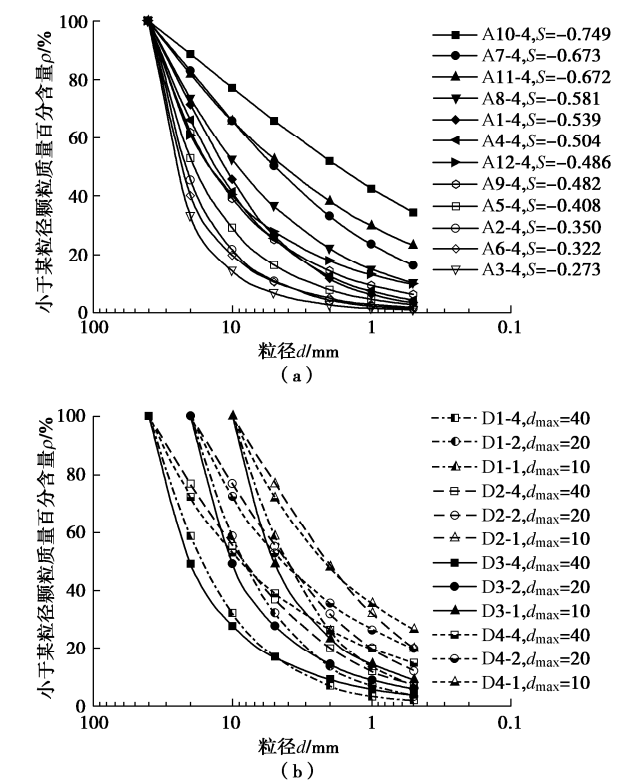


图 2 试验粗粒土级配曲线

Fig. 2 Gradation curves of experimental coarse-grained soils

2 缩尺效应研究方法

为了能够定量研究颗粒最大粒径 d_{\max} 和级配结构

对粗粒土抗剪强度的影响, 本文利用能准确定量表述粗粒土级配方程式中的参数 d_{\max} , m 和 b , 通过建立这 3 个参数与抗剪强度指标 c 和 φ 的关系式来描述级配对粗粒土抗剪强度的影响规律。通过对试验数据分析总结, 笔者发现 c 和 φ 与式参数 b 和 m 都不存在规律性的关系, 但与级配面积 S 存在可量化的规律性关系。级配面积 S 由级配方程曲线、坐标横轴、颗粒最大粒径 $d=d_{\max}$ 线及 $d=d_{\max 0}$ 线所围成^[18, 20] (如图 3 所示), 计算公式如下:

$$S = \frac{\ln(1 - kb) - \ln(1 - b)}{mb \ln 10}, \tag{2}$$

式中,

$$k = \frac{1}{(1 - b)(d_{\max} / d_{\max 0})^m + b}. \tag{3}$$

由上式可知, 级配曲线面积由参数 b , m 与 $d_{\max} / d_{\max 0}$ 共同决定, 如果能确定 $d_{\max} / d_{\max 0}$ 为一个常数, 此时, 级配曲线面积 S 只与级配参数 b 和 m 有关, 而级配结构由参数 b 和 m 决定, 故可由级配面积作为特征参数来表示级配结构的变化。郭庆国^[1]建议将 5 mm 作为砂与砾石的分界粒径, 故本文将 d_{\max} 取为 40 mm, $d_{\max 0}$ 取为 5 mm。因此本文只需要保证缩尺前后的级配曲线面积 S 相同, 即可采用单一变量法来研究颗粒最大粒径对粗粒土抗剪强度的影响。

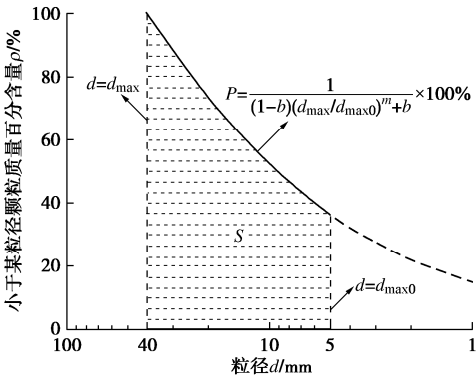


图 3 级配曲线面积示意图

Fig. 3 Schematic diagram of gradation curve area

综上, 采用单一变量法, 设定一系列相同颗粒最大粒径和不同级配面积, 以及相同级配面积和不同颗粒最大粒径的初始条件, 来研究颗粒最大粒径、级配结构与抗剪强度关系的研究思路是可行的。

3 试验结果分析

3.1 抗剪强度指标与颗粒最大粒径关系

基于土料 D1-1~D4-4 直剪试验结果, 整理了颗粒最大粒径 d_{\max} 与抗剪强度指标 c 和 φ 的变化关系, 如图 4, 5 中离散点所示。由图可知, 颗粒最大粒径对

粗粒土抗剪强度特性有较大影响, 无论何种级配结构, 黏聚力 c 和内摩擦角 φ 均随着颗粒最大粒径增大而逐渐增大。邴能惠等^[11]对堆石料开展的三轴剪切试验结果与本文试验得到的 c 和 φ 与 d_{\max} 的变化规律相似。此外, 王永明等^[21]采用 DEM 数值模拟方法探究粗粒料缩尺效应, 结果也表明 c 和 φ 随着 d_{\max} 的增大而增大。

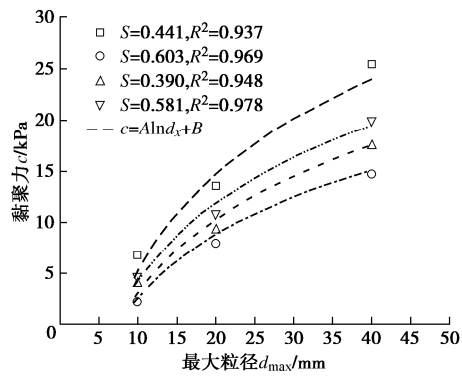


图 4 黏聚力与颗粒最大粒径的关系

Fig. 4 Relationship between internal maximum particle size and cohesion

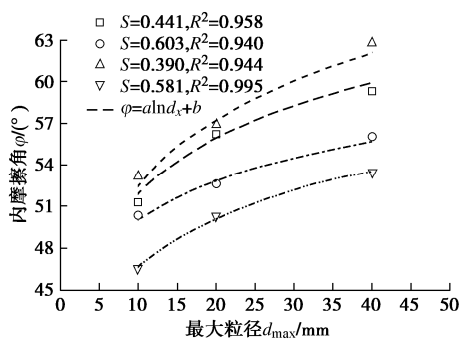


图 5 内摩擦角与颗粒最大粒径的关系

Fig. 5 Relationship between maximum particle size and internal friction angle

进一步分析 d_{\max} 对 c 和 φ 的影响规律, 发现 d_{\max} 与 c 和 φ 的关系可以用对数函数表示。因此, 粗粒土 d_{\max} 与 c 和 φ 的关系式可表示为

$$\left. \begin{aligned} c &= a_1 \ln(d_{\max}/d_{\max0}) + c_0 \\ \varphi &= a_2 \ln(d_{\max}/d_{\max0}) + \varphi_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $d_{\max0}$ 为砂与砾石分界粒径值, 取 5 mm; a_1 , a_2 , c_0 和 φ_0 为参数, c_0 和 φ_0 分别表示颗粒最大粒径 d_{\max} 为 5 mm 时试样的黏聚力及内摩擦角, 单位分别为 kPa 和 ($^{\circ}$); a_1 与 a_2 分别表示颗粒最大粒径为 5 mm 时试样黏聚力及内摩擦角的变化率, 单位分别为 kPa 及 ($^{\circ}$)。

依据式 (4) 对 D1-1~D4-4 试验数据进行拟合, 拟合结果如表 2 所示, 拟合曲线见图 4, 5。可以看出

拟合曲线与数据点吻合度较高, c 和 φ 的拟合值与对应试验点误差基本小于 4% 和 1%, 最大误差不到 6.98% 和 1.38%, 决定系数均在 0.937 以上, 因此可以认为缩尺效应中 d_{\max} 对 c 和 φ 的影响可用式 (4) 定量描述。

表 2 砂卵石料式 (4) 拟合结果

Table 2 Fitting results of Eq. (4) for sand pebble soils						
S	黏聚力			内摩擦角		
	a_1 /kPa	c_0 /kPa	R^2	$a_2/$ ($^{\circ}$)	$\varphi_0/$ ($^{\circ}$)	R^2
0.441	13.489	-4.067	0.937	5.764	47.927	0.958
0.603	9.017	-3.667	0.969	4.097	47.167	0.940
0.390	10.460	-4.233	0.948	6.918	47.660	0.944
0.581	11.037	10.271	0.978	4.977	43.201	0.995

3.2 抗剪强度指标与级配面积之间的关系

整理土料 A1-4~A12-4 直剪试验结果, 相同 d_{\max} 的粗粒土黏聚力 c 和内摩擦角 φ 随级配面积 S 的变化规律如图 6 和图 7 所示。由图 6 和图 7 可以看出, 随着级配面积的减小, c 和 φ 分别由 11.0 kPa 和 44.83° 逐渐增加到 32 kPa 和 59.88° , 级配面积的继续缩小, c 和 φ 又呈略微减小的趋势。 c 和 φ 的最大值与最小值相差分别为 65% 和 16%。显然, 级配面积对粗粒土抗剪强度指标黏聚力 c 和内摩擦角 φ 均有较为显著的影响。这可能是因为级配面积 S 值较大或较小时, 粗细颗粒填充程度较差, S 在 0.4 左右时, 粗细颗粒填充效果较好, 土料抗剪强度较高。

借助计算机软件对试验数据进行拟合, c 和 φ 与 S 的关系式可表示为

$$\left. \begin{aligned} c &= \frac{1 + bS}{c_1 + d_1 S} \\ \varphi &= \frac{1}{c_2 + d_2 S^e} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: b , c_1 , c_2 , d_1 , d_2 , e 均为方程参数。

依据式对编号 A1-4~A12-4 土样的试验数据进行拟合, 拟合结果如表 3 所示, 拟合曲线绘于图 6 和图 7。由图可知, 拟合曲线与试验点吻合度较高, c 和 φ 拟合值和试验值误差大多不到 5% 和 2%, 最大误差不到 10.52% 和 3.87%, 决定系数均在 0.936 以上, 因此可以认为缩尺效应中级配结构对 c 和 φ 的影响可用式 (5) 定量描述。

表 3 砂卵石料式 (5) 拟合结果

Table 3 Fitting results of Eq. (5) for sand pebble soils						
黏聚力拟合参数				内摩擦角拟合参数		
b	c_1 /kPa $^{-1}$	$d_1/$ kPa $^{-1}$	R^2	$c_2/$ ($^{\circ}$) $^{-1}$	$d_2/$ ($^{\circ}$) $^{-1}$	e
-1.180	0.027	-0.020	0.936	0.017	0.041	6.832

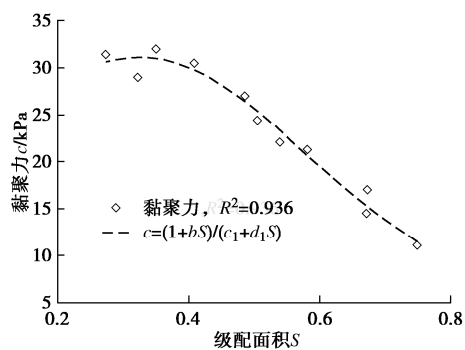


图 6 黏聚力与级配面积关系

Fig. 6 Relationship between gradation curve area and cohesion

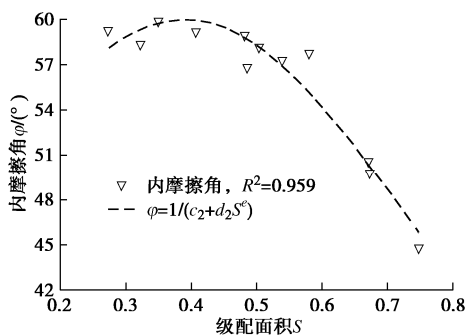


图 7 内摩擦角与级配面积关系

Fig. 7 Relationship between gradation curve area and internal friction

3.3 抗剪强度经验公式的推求

综上，颗粒最大粒径不变时粗粒土黏聚力 c 和内摩擦角 φ 与级配面积的关系满足式（5），由于式（4）中 c_0 和 φ_0 分别表示颗粒最大粒径为 5 mm 时试样的黏聚力 c 及内摩擦角 φ ，故 c_0 和 φ_0 与级配面积 S 关系也可分别用式（5）表示，因此颗粒最大粒径和级配结构对缩尺后粗粒土抗剪强度的耦合影响可用下式定量描述：

$$\left. \begin{aligned} c &= a_1 \ln(d_{\max} / d_{\max 0}) + (1 + bS) / (c_1 + d_1 S), \\ \varphi &= a_2 \ln(d_{\max} / d_{\max 0}) + 1 / (c_2 + d_2 S^e). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

利用式（6）对本次 24 组砂卵石料试验强度指标值进行拟合，结果表 4。给出了不同级配试验粗粒土抗剪强度指标实测值与公式计算值的对比，如图 8 所示。由图可知式（6）得到的 c 和 φ 拟合值与对应试验点误差基本不到 7% 和 3%，最大误差为 18.85% 和 5.31%，决定系数均在 0.865 以上，处于可接受的范围。所以，缩尺效应对粗粒土抗剪强度的影响可以用式（6）定量描述。

表 4 砂卵石料式（6）拟合结果

Table 4 Fitting results of Eq. (6) for sand pebble soils

黏聚力拟合参数		内摩擦角拟合参数	
参数	数值	参数	数值
a_1/kPa	14.506	$a_2/(^\circ)$	4.916
b	-6.11	$c_2/(^\circ)^{-1}$	0.020
c_1/kPa^{-1}	0.572	$d_2/(^\circ)^{-1}$	0.053
d_1/kPa^{-1}	-0.518	e	6.142
R^2	0.865	R^2	0.894

利用式（6）来反映颗粒最大粒径和级配结构对抗剪强度的耦合作用具有重要的应用价值。只需对缩尺土料进行一系列抗剪强度试验来确定式（6）中材料参数，即可推出现场原级配粗粒土的抗剪强度，从而消除缩尺效应对粗粒土抗剪强度的影响，提高岩土工程设计的安全性和可靠性。

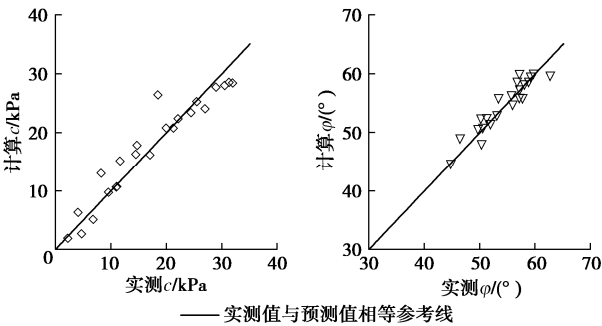


图 8 砂卵石抗剪强度指标的实测值与计算值

Fig. 8 Measured and calculated values of shear strength parameters of sandy pebble soils

4 抗剪强度经验公式验证

本文只进行了砂卵石料的抗剪强度试验，为验证上述抗剪强度预测公式适用于不同种类粗粒土，上述结论需要用更多的试验数据来支撑。武利强等^[22]采用同一分形维数级配设计方法和同一相对密度制样标准，对堆石料开展了一系列不同颗粒最大粒径和级配结构的大三轴试验。试验采用片麻岩堆石料，为中硬岩。分形维数 $D=2.3, 2.6$ 和 2.7 ，分别代表了粗级配料、中间级配料和细级配料，见图 9。整理围压为 3000 kPa 时黏聚力 c 和内摩擦角 φ 值以及对原级配曲线进行最优化拟合得到级配参数值，见表 5^[22]。

表 5 堆石料试验数据拟合汇总

Table 5 Fitting results of rockfill materials

原维数	d_{\max}	m	b	S	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
$D=2.3$	60	0.7	0.003	0.512	185.808	39.68
	40	0.7	0.003	0.512	177.727	39.40
	20	0.7	0.003	0.512	153.650	35.58
$D=2.6$	60	0.4	0.02	0.686	204.094	41.41
	40	0.4	0.02	0.686	200.382	41.14
	20	0.4	0.02	0.686	193.541	40.10
$D=2.7$	60	0.3	0.09	0.779	209.852	41.72
	40	0.3	0.09	0.779	197.401	39.78
	20	0.3	0.09	0.779	202.085	40.07

利用式（6）对上述 d_{\max} 为 40, 20 mm 堆石料抗剪强度试验结果进行拟合，将拟合参数列于表 6，拟合曲线绘于图 10。由图 10 可知，式（6）得到的 c 和 φ 拟合值与对应试验点误差基本不到 4% 和 3%，最大误差为 6.17% 和 3.59%，且决定系数均在 0.866 以上，拟合效果较好。显然，式（6）可以准确描述任何类型粗粒土抗剪强度与级配的关系。

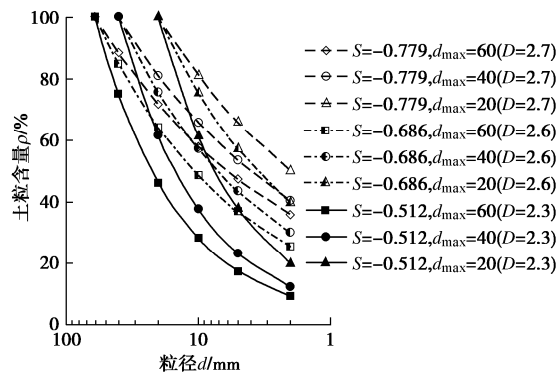


图 9 文献[22]堆石料级配曲线

Fig. 9 Gradation curves of rockfill materials in Reference [22]

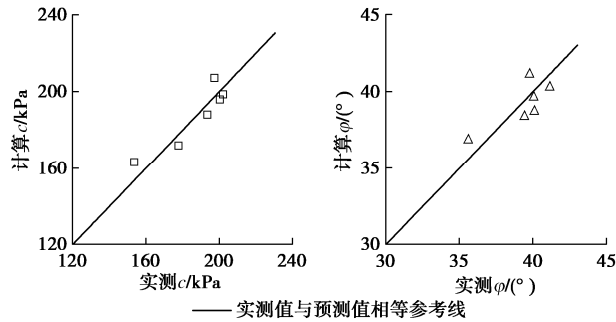


图 10 堆石料抗剪强度指标的实测值与计算值

Fig. 10 Measured and calculated values of shear strength parameters of rockfill materials

表 6 堆石料试验模拟结果

Table 6 Fitting results of rockfill materials

黏聚力拟合参数		内摩擦角拟合参数	
a_1/kPa	12.381	$a_2/(^\circ)$	2.191
b	1289.72	$c_2/(^\circ)^{-1}$	0.361
c_1/kPa^{-1}	2.592	$d_2/((^\circ)^{-1})$	-0.335
d_1/kPa^{-1}	3.787	e	0.016
R^2	0.866	R^2	0.915

为了验证式 (6) 能否准确预测任意级配粗粒土抗剪强度, 基于表中堆石料拟合参数, 利用式 (6) 预测文献[22]中不同分形维数下 d_{\max} 为 60 mm 时土料抗剪强度指标 c 和 φ 值, 将计算得到的 c 和 φ 预测值与表中对应的 c 和 φ 实测值, 同绘于图 11。

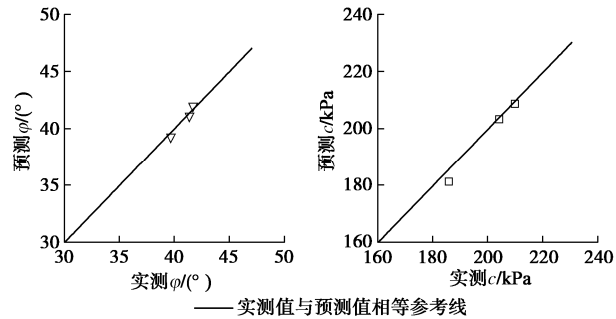


图 11 堆石料抗剪强度指标的实测值与预测值

Fig. 11 Measured and predicted values of shear strength parameters of rockfill materials

由图 11 可以看出, 预测值和实测值数据吻合度非常好, 黏聚力和内摩擦角误差分别为 1.15% 和 0.81%, 说明了该预测模型的可靠性和对不同类型粗粒土的适

用性。因此, 对于同一种粗粒土, 只要对一系列缩尺土料进行抗剪强度试验, 求得式 (6) 中各个参数, 就能通过式 (6) 较好的预测任意级配粗粒土的抗剪强度。

5 结 论

本文基于土的连续级配方程, 设计了 24 组颗粒最大粒径 d_{\max} 分别为 40, 20 和 10 mm 的试验级配, 利用 Shear Trac III 型室内大型直剪仪, 对同一相对密度制样条件下的不同颗粒最大粒径和级配结构粗粒土的抗剪强度进行了定量研究, 主要得到以下 4 点结论。

(1) 由于颗粒最大粒径和级配结构的改变是粗粒土出现缩尺效应的主要因素, 因此用单一变量法分别研究颗粒最大粒径和级配结构粗粒土抗剪强度的影响, 可以达到定量研究缩尺效应对粗粒土抗剪强度影响的目的。

(2) 当级配面积 S 一定, 即级配结构不变时, 黏聚力 c 和内摩擦角 φ 均随着颗粒最大粒径 d_{\max} 增大而逐渐增大, 且 c 和 φ 均与 d_{\max} 呈对数函数关系。

(3) 当颗粒最大粒径 d_{\max} 不变时, 黏聚力 c 和内摩擦角 φ 随着级配面积 S 的减小而迅速增大, 到达某一特定值后呈略微减小的趋势, 并分别建立 c 和 φ 与 S 的关系式。

(4) 建立了考虑颗粒最大粒径和级配结构影响的粗粒土抗剪强度预测模型, 利用相关文献试验数据验证了该模型预测任意级配粗粒土抗剪强度的可靠性, 并探究了该模型对不同类型粗粒土的适用性。

参考文献:

[1] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003. (GUO Qing-guo. Engineering Properties and Application of Coarse-Grained Soil[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))

[2] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (China Planning Press: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))

[3] 周伟, 马刚, 刘嘉英, 等. 高堆石坝筑坝材料宏观微观变形分析研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(10): 1068-1080. (ZHOU Wei, MA Gang, LIU Jiaying, et al. Review of macro-and mesoscopic analysis on rockfill materials in high dams[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2018, 48(10): 1068-1080. (in Chinese))

[4] 武利强, 朱晟, 章晓桦, 等. 粗粒料试验缩尺效应的分析研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2187-2197. (WU Liqiang, ZHU Sheng, ZHANG Xiaohua, et al. Analysis of scale effect of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics,

- 2016, **37**(8): 2187-2197. (in Chinese))
- [5] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, **93**(2): 27-43.
- [6] DEAN MARSCHI N, CHAN C K, SEED H B. Evaluation of properties of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972, **98**(1): 95-114.
- [7] VARADARAJAN A, SHARMA K G, VENKATACHALAM K, et al. Testing and modeling two rockfill materials[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(3): 206-218.
- [8] 孔宪京, 宁凡伟, 刘京茂, 等. 基于超大型三轴仪的堆石料缩尺效应研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(2): 255-261. (KONG Xianjing, NING Fanwei, LIU Jingmao, et al. Scale effect of rockfill materials using super-large triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(2): 255-261. (in Chinese))
- [9] 孟宪麒, 史彦文. 石头河土石坝砂卵石抗剪强度[J]. 岩土工程学报, 1983, **5**(1): 90-101. (MENG Xianqi, SHI Yanwen. Shear strength of sandy-gravels in Shitouhe River dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, **5**(1): 90-101. (in Chinese))
- [10] 翁厚洋, 朱俊高, 余挺, 等. 粗粒料缩尺效应研究现状与趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, **37**(4): 425-429. (WENG Houyang, ZHU Jungao, YU Ting, et al. Status quo and tendency of studies on scale effects of coarse-grained materials[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, **37**(4): 425-429. (in Chinese))
- [11] 郇能惠, 朱铁, 米占宽. 小浪底坝过渡料的强度与变形特性及缩尺效应[J]. 水电能源科学, 2001, **19**(2): 39-42. (LI Nenghui, ZHU Tie, MI Zhankuan. Strength and deformation properties of transition zone material of Xiaolangdi Dam and scale effect[J]. Hydroelectric Energy, 2001, **19**(2): 39-42. (in Chinese))
- [12] 李翀, 何昌荣, 王琛, 等. 粗粒料大型三轴试验的尺寸效应研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(增刊 1): 563-566. (LI Chong, HE Changrong, WANG Chen, et al. Study of scale effect of large-scale triaxial test of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(S1): 563-566. (in Chinese))
- [13] LEE D M. The Angles of Friction of Granular Fills[D]. Cambridge: University of Cambridge, 1992.
- [14] SUITS L D, SHEAHAN T C, HU W, et al. Effect of sample size on the behavior of granular materials[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, **34**(3): 103095.
- [15] 魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, **29**(1): 48-51, 57. (WEI Houzhen, WANG Ren, HU Mingjian, et al. Strength behaviour of gravelly soil with different coarse-grained contents in Jiangjiagou Ravine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(1): 48-51, 57. (in Chinese))
- [16] 李振, 邢义川. 干密度和细粒含量对砂卵石及碎石抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2006, **27**(12): 2255-2260. (LI Zhen, XING Yichuan. Effects of dry density and percent fines on shearing strength of sandy cobble and broken stone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(12): 2255-2260. (in Chinese))
- [17] ZHU J G, GUO W L, WEN Y F, et al. New gradation equation and applicability for particle-size distributions of various soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, **18**(2): 04017155.
- [18] 吴二鲁, 朱俊高, 郭万里, 等. 缩尺效应对粗粒料压实密度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(9): 1767-1772. (WU Erlu, ZHU Jungao, GUO Wanli, et al. Experimental study on effect of scaling on compact density of coarse-grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(9): 1767-1772. (in Chinese))
- [19] 吴二鲁, 朱俊高, 郭万里, 等. 基于级配方程的粗粒料压实特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(1): 214-220. (WU Erlu, ZHU Jungao, GUO Wanli, et al. Experimental study of compaction characteristics of coarse-grained soil based on gradation equation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(1): 214-220. (in Chinese))
- [20] 郭万里, 朱俊高, 温彦锋. 对粗粒料 4 种级配缩尺方法的统一解释[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(8): 1473-1480. (GUO Wanli, ZHU Jungao, WEN Yanfeng. Unified description for four grading scale methods for coarse aggregate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(8): 1473-1480. (in Chinese))
- [21] 王永明, 朱晟, 任金明, 等. 筑坝粗粒料力学特性的缩尺效应研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(6): 1799-1806, 1823. (WANG Yongming, ZHU Sheng, REN Jinming, et al. Research on scale effect of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(6): 1799-1806, 1823. (in Chinese))
- [22] 武利强, 叶飞, 林万青. 堆石料力学特性缩尺效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊 2): 141-145. (WU Liqiang, YE Fei, LIN Wanqing. Experimental study on scale effect of mechanical properties of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S2): 141-145. (in Chinese))