

DOI: 10.11779/CJGE201909023

缩尺效应对粗粒料压实密度影响的试验研究

吴二鲁^{1, 2}, 朱俊高^{1, 2}, 郭万里³, 陈 鸽^{1, 2}

(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 210024; 2. 河海大学江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210024;
3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘 要: 堆石料的级配缩尺后的试验替代料与原级配料的试验结果之间存在一定的差异, 弄清这种差异对准确把握原级配堆石料的力学性质十分重要。将缩尺效应归结为最大粒径和级配结构两部分变化产生的影响。利用土的连续级配方程结合相似级配法缩尺的思路, 设计了大量最大粒径分别为 20, 40 和 60 mm 的试验级配。对各级配粗粒料进行了表面振动压实试验, 研究了最大粒径和级配结构对粗粒料压实密度的影响。最大粒径和级配结构对粗粒料压实密度的影响可以用一定的函数形式定量表述, 建立了考虑缩尺效应的粗粒料压实密度的预测模型, 探讨了该模型对不同性质粗粒料的适用性, 并用多组室内最大干密度试验数据进行了验证。此外, 提出了一种能够定量研究粗粒料缩尺效应的思路。

关键词: 粗粒料; 级配; 最大粒径; 相似级配法; 最大干密度

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2019)09 - 1767 - 06

作者简介: 吴二鲁(1993 —), 男, 博士, 主要从事土体基本性质及本构关系、土石坝工程研究。E-mail: 170804010004@hhu.edu.cn。

Experimental study on effect of scaling on compact density of coarse-grained soils

WU Er-lu^{1, 2}, ZHU Jun-gao^{1, 2}, GUO Wan-li³, CHEN Ge^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: There is a certain difference in compact density of rockfill materials between the real gradation and corresponding scaling gradation. In order to describe the difference quantitatively, the scaling effect can be divided into two parts, changes of the maximum particle size and the gradation structure. With the mentality that the continuous gradation is combined with the similar gradation method, many gradations of rockfill materials are designed, and their maximum particle sizes are 60, 40, 20 mm. The surface vibration compaction tests are conducted to study the effects of the maximum particle size and gradation structure on the compact density of rockfill materials respectively. The effects of the maximum particle size and gradation structure on the compact density can be described quantitatively by using the proposed function form. The prediction model for the compact density of rockfill materials is proposed, which considers the effects of the maximum particle size and gradation structure, the applicability of different rockfill materials is discussed, and the accuracy of this model is verified through a number of laboratory compaction test data. In addition, a way for quantitatively studying the scaling effect of rockfill materials is proposed.

Key words: coarse-grained soil; gradation; maximum particle size; similar gradation method; maximum dry density

0 引 言

近年来随着高土石坝建设的需要, 对作为主要筑坝材料之一的堆石料的力学性质的准确了解提出了更高的要求。实际土石坝工程中, 筑坝堆石料的最大粒径越来越大, 有的甚至达 1000 mm 的量级^[1], 但是室内试验土料的最大粒径一般为 60 mm, 因此, 需要对现场堆石料级配进行缩尺, 才能进行相应的室内试验,

从而通过对级配缩尺后粗粒料的试验结果来推求原级配堆石料的力学性质。但是, 将原级配堆石料按照一定方法缩尺之后, 必然产生缩尺效应, 即级配缩尺后

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0404801); 国家自然科学基金项目 (U1865104, 51479052)

收稿日期: 2018 - 12 - 29

***通讯作者 (E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn)**

替代料的试验结果与原级配料真实性质之间存在一定的差异。

目前,对粗粒料缩尺效应的研究大部分致力于通过寻找缩尺后替代料的强度变形特性指标和物理性指标与原级配料之间差异的规律,从而利用替代料室内试验结果推求原级配料的物理力学性质^[2-5]。如郇能惠等^[6]利用相似级配法缩尺,通过大量的室内试验研究,提出考虑缩尺效应的确定原级配粗粒料性质的方法;赵娜等^[7]基于分形理论研究了不同缩尺方法对最大干密度的影响;傅华等^[8]研究了不同缩尺方法对粗粒料物理力学性质的影响;翁厚洋等^[9]分别研究了 4 种缩尺方法对粗粒料强度及压实性带来的差异;朱俊高等^[10]通过振动压实试验,研究了不同缩尺方法对密度的影响,并提出极值干密度与土料级配参数、最大粒径之间的关系。但是,总体上缩尺后替代料与原级配料的力学特性之间的关系难以定量描述,有些研究结论甚至相左。因此,关于粗粒料缩尺效应的问题仍需进一步的研究。

粗粒料级配常用的缩尺方法有相似级配法、等量替代法、剔除法和混合法^[11]。无论哪种缩尺方法,缩尺后级配与原级配都会有很大差异。剔除法虽然使用方便,方法简单,但剔除了部分超粒径颗粒,使得细粒含量增大;等量替代法虽然保持了原级配的粗颗粒含量,但缩尺后级配的粒径范围变小,均匀性增大;相似级配法保持了颗粒之间的相对大小不变,不均匀系数的曲率系数不变;混合法先用相似级配法按一定的比例缩小级配粒径后,再用等量替代法缩制试样,但是需采用 P_5 含量这个经验指标控制缩尺料的级配, (P_5 与缩尺比或缩尺料的最大粒径无关),乃是一种经验方法,准确性很难保证。

在目前的研究中,缩尺后级配料与原级配料的力学特性之间的关系难以定量描述的一个重要原因就是级配没有一个准确且统一的数学表述。朱俊高等^[12]通过对大量的实际工程中应用的土体级配曲线形态进行的研究,提出了一个普遍适用于一般连续级配土体的级配方程,如下:

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

式中, P 为小于某粒径的颗粒含量, d 为粒径, b 和 m 称为级配参数, b 和 m 决定了级配曲线形态 (本文称之为级配结构), d_{\max} 为最大粒径。

本文将基于该方程,定量研究缩尺后级配料与原级配料的压实密度之间的关系。无论采用何种方法进行缩尺,缩尺后的级配与原级配的差别无疑是级配结构和最大粒径两方面的差异。采用控制变量法分别研

究缩尺后级配结构和最大粒径变化对粗粒料压实密度的影响。根据式 (1) 可知,通过等量替代法、剔除法和混合法进行缩尺,不仅导致最大粒径不同,还会使级配结构发生变化,使得不能单一地研究级配结构和最大粒径变化带来的影响。而将原级配利用相似级配法缩尺后,只有最大粒径发生变化,级配结构并没有变化^[13],可以单一地研究缩尺中最大粒径变化对粗粒料压实密度产生的影响。因此,本文利用级配方程和相似级配法,设计了大量级配,对这些级配的粗粒料进行了表面振动压实试验,研究级配缩尺后粗粒料与原级配粗粒料之间压实密度的关系,分析粗粒料缩尺效应中最大粒径和级配结构对压实密度的影响。

1 试验方法与试验土料

采用表面振动压实法测定不同级配粗粒料的最大干密度,振动频率为 50 Hz,试验振动历时取 8 min。试验土料取大石峡土石坝砂卵石粗粒料 (大石峡料),大石峡料是砂卵石混合料,其颗粒呈浑圆形。本文试验粗粒料级配共 24 组,级配最大粒径分别为 60, 40, 20 mm。对试验粗粒料级配进行编号,级配参数及编号如表 1 所示。试验粗粒料级配曲线见图 1。

表 1 同时给出了级配曲线面积 S ,其具体定义在第 2.1 节给出。对表 1 所示的 24 种不同级配粗粒料进行了表面振动压实试验,对应的最大干密度值见表 1。

表 1 级配参数和曲线面积

Table 1 Gradation parameters and curve areas					
编号	d_{\max}/mm	m	b	S	$\rho_{\text{dmax}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
#1	60	1	0.6	0.578	2.215
#2	60	1	0.3	0.466	2.200
#3	60	1	0.2	0.366	2.136
#4	60	1	-1	0.283	1.962
#5	60	0.8	0.6	0.660	2.246
#6	60	0.8	0.3	0.542	2.243
#7	60	0.8	-0.2	0.432	2.191
#8	60	0.8	-1	0.338	2.061
#9	60	0.6	0.6	0.754	2.190
#10	60	0.6	0.3	0.638	2.271
#11	60	0.6	-0.2	0.521	2.284
#12	60	0.6	-1	0.415	2.214
#13	60	0.4	0.6	0.859	2.038
#14	60	0.4	0.3	0.758	2.142
#15	60	0.4	-0.2	0.644	2.251
#16	60	0.4	-1	0.530	2.220
#17	40	0.4	-0.2	0.644	2.216
#18	40	0.6	-1	0.415	2.197
#19	40	0.8	0.6	0.660	2.206
#20	40	1	0.3	0.466	2.178
#21	20	0.4	-0.2	0.644	2.165
#22	20	0.6	-1	0.415	2.149
#23	20	0.8	0.6	0.660	2.157
#24	20	1	0.3	0.466	2.136

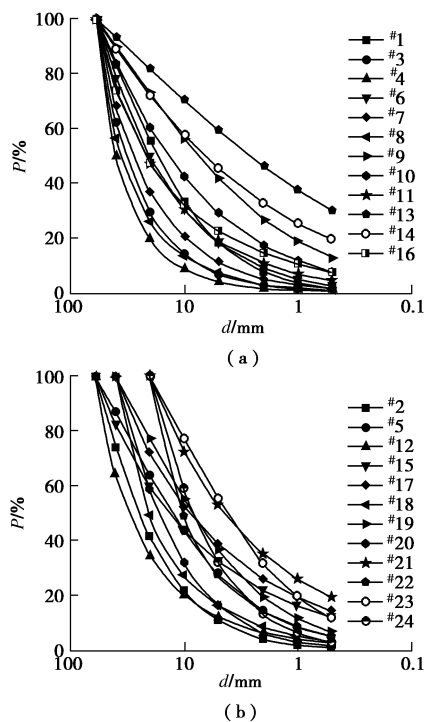


图1 试验粗粒料级配曲线

Fig. 1 Gradation curves of experimental coarse-grained soils

2 试验结果分析

2.1 缩尺效应研究方法

粗粒料的级配一旦确定, 那么它的最大干密度也随之确定, 两者是一一对应的, 所以级配参数 (b , m 和 d_{\max}) 与最大干密度之间必然存在着某一数学关系。为了能够定量描述级配对粗粒料最大干密度的影响, 希望能够直接建立级配参数与最大干密度的数学关系。但是, 对上述试验结果初步总结发现, 级配参数 b 和 m 与最大干密度之间并不存在规律性的关系, 无法直接建立“最大干密度-级配参数 b 和 m ”的关系。

尽管找不到 $\rho_{d\max}$ 与级配参数 b 和 m 之间规律性的关系, 但是, 笔者发现级配曲线与横坐标轴、最大粒径线和 $d=d_k$ 线围成的面积-级配曲线面积 (如图 2 所示) 与 $\rho_{d\max}$ 之间存在显著的规律性关系。

根据级配方程式 (1), 可以推得级配曲线面积 S 的计算公式如下:

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

式中,

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

由式 (2), (3) 可以看出, 级配曲线面积与级配参数 b 和 m 之间存在定量关系, 因此, 笔者认为, 虽然 $\rho_{d\max}$ 随着两个级配参数 b 和 m 单独的变化规律是有序的, 但是, 采用能综合考虑参数 b 和 m 影响的级配

曲线面积, 来研究级配结构与最大干密度的关系是可行的。至于 $\rho_{d\max}$ 与 S 的关系, 将在 2.3 节研究。

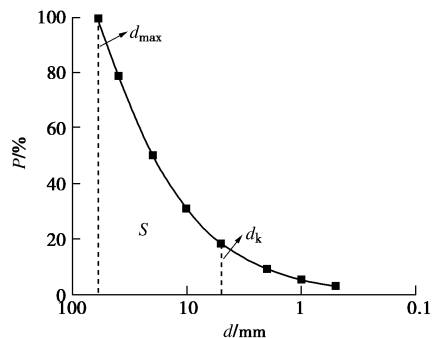
图2 级配曲线面积 S

Fig. 2 Gradation curve area

为研究最大粒径对粗粒料最大干密度的影响, 需保证通过相似级配法缩尺时, 缩尺后与缩尺前级配曲线面积相同。利用相似级配法缩尺后, 级配参数 b 和 m 与原级配参数相同, 通过式 (2), (3) 可知, 只需保证在缩尺前后 d_{\max} / d_k 值不变, 那么缩尺后与缩尺前的级配曲线面积相同。一般将大于 5 mm 的颗粒含量作为粗颗粒含量^[1]。为此, 本文中将 d_{\max} 取为 60 mm, d_k 取为 5 mm, 进行级配曲线面积的求解。此时级配曲线面积只与级配参数 b 和 m 有关, 而级配结构由级配参数 b 和 m 确定, 所以采用级配曲线面积作为反映级配结构特征参数。

根据上述方法可求得试验粗粒料级配曲线面积, 见表 1。利用上述方法亦可以尝试进行定量研究缩尺效应对粗粒料强度、变形特性的影响。

2.2 最大干密度与最大粒径关系

同种级配结构不同最大粒径的试验粗粒料的最大干密度随其最大粒径的变化关系曲线如图 3 所示。从图 3 中可见, 最大粒径对粗粒料压实特性影响较为明显。为分析最大粒径对最大干密度的影响, 图中没有整理图 1 (a) 所示级配的粗粒料试验结果。

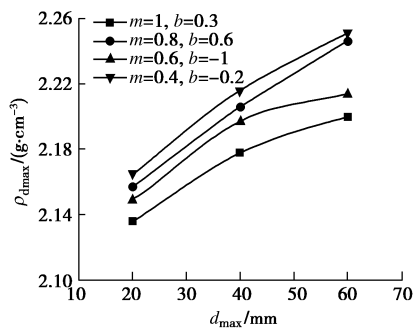


图3 最大粒径与最大干密度关系

Fig. 3 Relationship between maximum particle size and maximum dry density

史彦文^[14]、冯冠庆等^[15]通过相似级配法进行缩尺, 研究了粗粒料最大干密度与其级配最大粒径的关

系, 均得出了最大干密度与最大粒径在半对数坐标系中呈线性关系。此外, 总结了岩屋大坝筑坝料的最大干密度试验成果^[16], 及双江口土石坝坝壳主堆石料的最大干密度试验成果^[10], 如图 4 所示。图 4 所示的最大干密度与最大粒径在半对数坐标中也呈现了明显的线性关系。

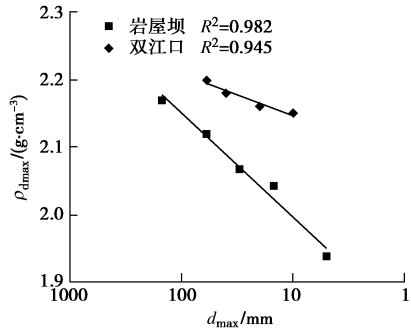


图 4 最大干密度与最大粒径的关系^[10, 16]

Fig. 4 Relationship between maximum dry density and maximum particle size^[10, 16]

因此, 在半对数坐标中, 给出了本文试验所得到的不同级配试验粗粒料的最大干密度与最大粒径的数据点, 并利用直线拟合了最大干密度与最大粒径之间的关系, 结果如图 5 所示。

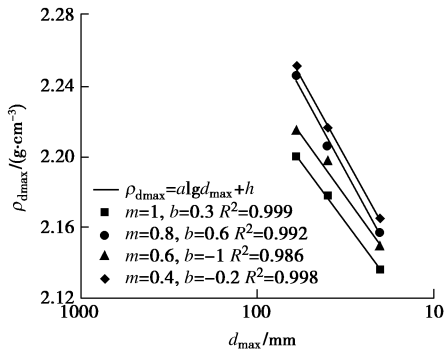


图 5 最大干密度与最大粒径关系

Fig. 5 Relationship between maximum dry density and maximum particle size

由图 5 可知, 拟合效果较好。所以缩尺效应中最大粒径对粗粒料压实密度的影响可用下式定量表述:

$$\rho_{dmax} = a \lg d_{max} + h \quad (4)$$

式中, d_{max} 的单位规定为 mm, a, h 为参数。由式 (4) 可知, h 相当于最大粒径为 1 mm 的最大干密度, 单位为 g/cm^3 , a 相当于最大粒径为 1 mm 时最大干密度的变化率与 $\ln 10$ 的乘积, 单位为 $\text{g}/(\text{cm}^3 \lg \text{mm})$ 。

2.3 最大干密度与级配曲线面积之间的关系

不同级配的试验粗粒料的最大干密度试验结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 级配结构对粗粒料压实特性影响较为明显。为分析级配结构对最大干密度的影响, 图中整理了 16 组最大粒径为 60 mm 的不同级配粗粒料试验结果。可见, 最大干密度与级配曲线面积的关系呈二次曲线型, 利用二次曲线拟合得到,

决定系数 R^2 为 0.927, 拟合的效果较好。

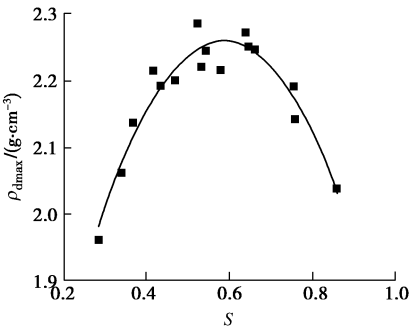


图 6 最大干密度与级配曲线面积关系

Fig. 6 Relationship between maximum dry density and gradation curve area

所以缩尺效应中级配对粗粒料压实密度的影响可用式 (5) 定量描述。

$$\rho_{dmax} = cS^2 + eS + f \quad (5)$$

式中, c, e, f 均为参数, 单位均为 g/cm^3 。

从图 6 中可以看出, 随着级配曲线面积的增加, 试验最大干密度由 $1.962 \text{ g}/\text{cm}^3$ 增长到 $2.284 \text{ g}/\text{cm}^3$ 再减小到 $2.038 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。图 6 所示不同级配粗粒料最大干密度值中最大者与最小者相差 16%, 这正是由级配的差异所导致。该现象表明, 当级配曲线面积过小或过大时, 级配颗粒之间的充填关系反而较差, 当级配曲线面积在 0.6 附近时, 颗粒之间的充填关系相对较好。结合图 1 可知, 级配曲线面积较小或较大时, 其压实性较差的原因就是细颗粒含量过多或过少。

通过以上分析可知, 缩尺效应中级配结构和最大粒径对粗粒料压实密度的影响可用下式定量描述。

$$\rho_{dmax} = (a_1 \lg d_{max} + b_1)S^2 + (a_2 \lg d_{max} + b_2)S + a_3 \lg d_{max} + b_3 \quad (6)$$

式中, a_1, a_2 和 a_3, b_1, b_2 和 b_3 均为方程参数, a_1, a_2 和 a_3 的单位为 $\text{g}/(\text{cm}^3 \lg \text{mm})$, b_1, b_2 和 b_3 的单位为 g/cm^3 。

利用式 (6) 对本次 24 组大石峡料试验最大干密度值进行拟合, 结果如表 2。

表 2 大石峡料试验拟合结果

Table 2 Fitting results of Dashixia rockfill							
a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	R^2	平均相对误差/%
$/(\text{g} \cdot (\text{cm}^3 \lg \text{mm})^{-1})$			$/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$				
-11.09	12.47	-3.23	16.70	-18.63	6.97	0.920	1.02

由表 2 可以看出, 平均相对误差仅有 1.02%, 决定系数在 0.9 以上, 拟合效果较好。为进一步展示预测效果, 给出了不同级配试验粗粒料最大干密度实测值与预测值的对比图, 见图 7。

利用式 (6) 来反映压实密度随级配结构及最大粒径的变化规律具有重要的实际应用价值。只需在室内进行一定量的缩尺料的压实试验, 确定式 (6) 中的参数, 就可根据此式确定现场粗粒料的合适级配, 从而,

避免现场碾压试验或实际填筑级配设计的盲目性。

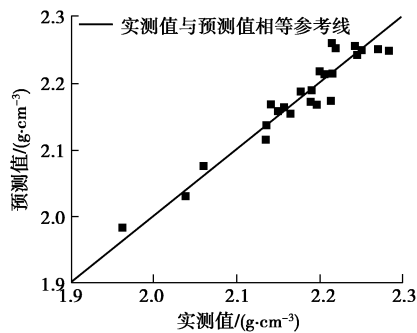


图 7 最大干密度的实测值与预测值
Fig. 7 Measured and predicted values of compact density

3 最大干密度经验公式验证

本文只进行了一种粗粒料的压实密度试验，上述结论需要用更多的试验数据来验证。为此，另外选取马吉土石坝坝壳粗粒料（马吉料），马吉料是具有多棱角的堆石料，母岩为片麻岩。进行了上述的 24 组级配粗粒料压实试验。利用式（6）拟合马吉料试验干密度与级配曲线面积及最大粒径之间的关系，结果见表 3。

表 3 马吉料试验拟合结果

Table 3 Fitting results of Maji rockfill							平均相对误差/%
a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	R^2	
/(g·(cm ³ lg mm) ⁻¹)			/(g·cm ⁻³)				
-6.65	7.61	-1.97	8.82	-10.04	4.64	0.913	1.09

由表 3 可知，平均相对误差仅有 1.09%，决定系数在 0.9 以上，拟合效果较好。为进一步展示预测效果，给出了不同级配粗粒料压实密度实测值与预测值的对比图，见图 8。

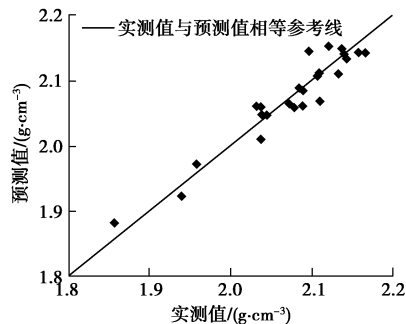


图 8 马吉料压实密度的实测值与预测值
Fig. 8 Measured and predicted values of compact density of Maji rockfill

由图 8 可知，式（6）对不同性质的粗粒料也适用，因此式（6）可以作为预测模型，对不同级配粗粒料的压实密度进行预测。

史彦文^[14]利用相似级配法这一缩尺方法，对石头河土石坝砂卵石料的压实密度缩尺效应进行了研究。A, B, C 分别为 3 条原级配曲线，通过最优化拟合可得级配参数 m 和 b ，见图 9。缩尺之后，级配最大粒径分别为 5, 10, 20, 40, 80 mm。

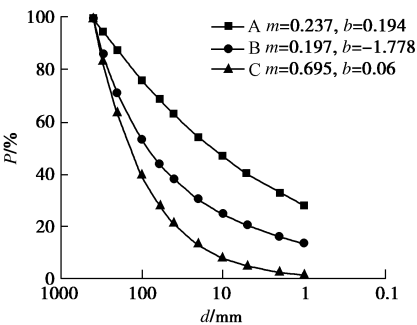


图 9 3 条原级配曲线^[15]
Fig. 9 Gradation curves of three sites^[15]
利用振动台法，测得不同级配粗粒料的压实密度，试验结果见图 10。

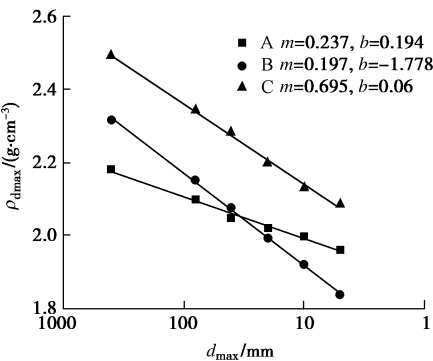


图 10 压实密度值^[15]
Fig. 10 Compact densities^[15]
利用式（6）拟合图 10 中试验数据，结果见图 11。平均相对误差仅 0.005%，决定系数 R^2 为 0.999，预测效果极好。

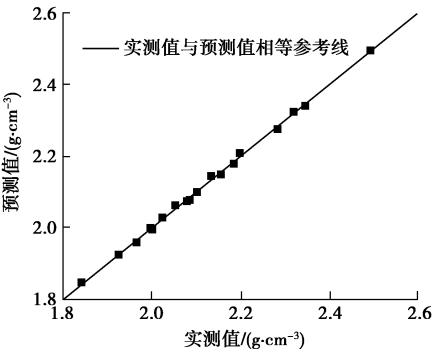


图 11 最大干密度的实测值与预测值
Fig. 11 Measured and predicted values of maximum dry density

4 结 论

缩尺效应对粗粒料压实密度的影响研究多集中于定性描述，定量研究极少。本文基于土的连续级配方程，利用相似级配法，深入定量地研究了缩尺效应对粗粒料最大干密度的影响。主要结论如下：

- (1) 利用土的连续级配方程结合相似级配法缩尺方法，可以达到定量研究最大粒径和级配结构对粗粒料压实密度影响的目的。
- (2) 级配结构对粗粒料压实密度的影响较大，并

且这种影响可以用相应的数学关系式进行定量表述。

(3) 级配最大粒径对粗粒料压实密度的影响可以用相应的数学关系式进行定量表述。

(4) 缩尺效应中,建立了考虑最大粒径和级配结构影响的粗粒料压实密度的预测模型,探讨了该模型对不同种粗粒料的适用性,并利用其它文献里的试验数据验证了该预测模型的准确性。

(5) 提出了一种定量研究缩尺效应的思路。为以后定量研究缩尺效应对粗粒料强度、变形特性的影响提供基础。

参考文献:

- [1] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (GUO Qing-guo. Engineering properties and application of coarse-grained soil[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))
- [2] MARACHI N D, CHAN C K, SEED H B. Evaluation of properties of rockfill mechanicals[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, **98**(1): 95 - 114.
- [3] 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. (WEN Hou-yang, ZHU Jun-gao, YU Ting, et al. Status and tendency of study on scale effects of coarse-grained materials[J]. Journal of HoHai University (Natural Sciences), 2009, **37**(4): 425 - 429. (in Chinese))
- [4] 杨贵, 刘汉龙, 陈育民, 等. 粗粒料动力变形特性的尺寸效应研究[J]. 水力水电学报, 2009, **28**(5): 122 - 126. (YANG Gui, LIU Han-long, CHEN Yu-min, et al. Research on size effect of rockfill materials on dynamic deformation property[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, **28**(5): 122 - 126. (in Chinese))
- [5] 花俊杰, 周伟, 常晓林, 等. 堆石体应力变形的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(2): 328 - 335. (HUA Jun-jie, ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, et al. Study of scale effect on stress and deformation of rockfill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(2): 328 - 335. (in Chinese))
- [6] 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 Neng-hui, ZHU Tie, MI Zhan-kuan. Strength and deformation properties of transition zone material of Xiaolangdi dam and scale effect[J]. Water Resources and Power, 2001, **19**(2): 40 - 43. (in Chinese))
- [7] 赵娜, 左永振, 王占彬, 等. 基于分形理论的粗粒料级配缩尺方法研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(12): 3513 - 3519. (ZHAO Na, ZUO Yong-zhen, WANG Zhan-bin, et al. Grading scale method for coarse-grained soils based on fractal theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(12): 3513 - 3519. (in Chinese))
- [8] 傅华, 韩华强, 凌华. 粗粒料级配缩尺方法对其室内试验结果的影响[J]. 岩土力学, 2012, **33**(9): 2645 - 2649. (FU Hua, HAN Hua-qiang, LING Hua. Effect of grading scale method on results of laboratory tests on rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(9): 2645 - 2649. (in Chinese))
- [9] 翁厚洋, 景卫华, 李永红, 等. 粗粒料缩尺效应影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2009, **20**(3): 25 - 29. (WENG Hou-yang, JING Wei-hua, LI Yong-hong, et al. Analysis on the impact factor of scale effect by coarse-grained materials[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2009, **20**(3): 25 - 29. (in Chinese))
- [10] 朱俊高, 翁厚洋, 吴晓铭, 等. 粗粒料级配缩尺后压实密度试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(8): 2394 - 2398. (ZHU Jun-gao, WENG Hou-yang, WU Xiao-ming, et al. Experimental study of compact density of scaled coarse-grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(8): 2394 - 2398. (in Chinese))
- [11] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [12] 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.
- [13] 郭万里, 朱俊高, 余挺, 等. 土的连续级配方程在粗粒料中的应用研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(10): 1 - 7. (GUO Wan-li, ZHU Jun-gao, YU Ting, et al. Study on the application of gradation equation for coarse-grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(10): 1 - 7. (in Chinese))
- [14] 史彦文. 大粒径砂卵石最大密度的研究[J]. 土木工程学报, 1981, **14**(2): 53 - 58. (SHI Yan-wen. Study on the maximum density of large sized sandy gravels[J]. China Civil Engineering Journal, 1981, **14**(2): 53 - 58. (in Chinese))
- [15] 冯冠庆, 杨荫华. 堆石料最大指标密度室内试验方法的研究[J]. 岩土工程学报, 1992, **14**(5): 37 - 45. (FENG Guan-qing, YANG Yin-hua. Study on laboratory experimental ways of the maximum density of coarse-grained soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, **14**(5): 37 - 45. (in Chinese))
- [16] 日本土质工学会. 粗粒料的现场压实[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (The Japanese Geotechnical Engineering Association. Field compaction of coarse-grained soil[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))