

连续分布超径粗粒土的级配缩尺方法与适用条件

朱 晟^{1,2}, 张露澄^{1,2}

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 结合国内若干座典型高坝, 分析堆石料和砂砾料的填筑级配特性; 在此基础上, 结合大石峡和长河坝坝料室内相对密度试验和大型压缩试验, 研究超径粗粒土级配缩尺方法的合理选择问题。结果表明: (1) Weibull模型对于反映筑坝粗粒土的级配构成具有较好的适应性, 也可以反映级配的分形特性; (2) 连续分布的粗粒土级配, 剔除法、等量替代法、相似级配法等常见缩尺方法可采用统一的级配缩尺公式表示, 可以准确计算缩尺试验级配; (3) 使用最优颗粒充填关系对应的临界 P_5 值, 代替规范建议的小于5 mm颗粒质量百分含量 P_5 不大于15%的标准, 作为相似法的使用条件, 即可避免过度使用混合法带来的缩尺试验误差, 也不会出现相似法导致缩尺级配的“砂化”问题, 可最大限度地保证缩尺前后级配的几何相似, 有效提高缩尺试验结果的精度; (4) 利用临界分形维 D_c 与最大粒径无关的性质, 对于不同分布类型级配的超径粗粒土, 可采用分形级配公式计算缩尺级配的临界 P_5 值, 并根据原级配参数确定相应的缩尺方法。研究成果可用于超径粗粒土的缩尺试验, 具有较强的应用价值。

关键词: 土力学; 粗粒土; 堆石坝; 缩尺效应; 土工试验; 分形理论; Weibull模型

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)09 - 1895 - 10

A gradation scale method for continuously distributing super-diameter coarse-grained soils and its application conditions

ZHU Sheng^{1,2}, ZHANG Lucheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Hydroelectric College, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Based on several typical high dams in China, the grading characteristics of rockfill and gravel were analyzed, and soil grade reasonable scale method of the super-diameter coarse particles was studied combined with the indoor relative density test and large compression test of Dashixia and Changheba dam materials. The results show that Weibull model can well reflect the gradation and fractal characteristics of dam coarse-grained soils and that common scale methods such as knockout method, equal replacement method and similar grading method can be expressed by a unified grading scale formula to accurately calculate the scale test gradation based on Weibull grading model. Using the critical P_5 value corresponding to the optimal particle filling relationship as the condition of the similar scale method instead of less than 5 mm particle mass percentage P_5 not more than 15% recommended by codes, the scale test error due to excessive use of the mixing method can be avoided and the scale grading “sanding” problem can also be eliminated. At the same time, the geometric similarity of the grading can be ensured and the accuracy of the scale test results can be improved effectively. For the super-diameter coarse-grained soil with different distribution types, based on the property of the critical fractal dimension D_c

收稿日期: 2019 - 01 - 08; **修回日期:** 2019 - 02 - 27

作者简介: 朱 晟(1965 -), 男, 博士, 1988年毕业于河海大学水利水电工程专业, 现任教授, 主要从事土石坝及环境岩土力学方面的教学与研究工作。E-mail: 949507145@qq.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0008

independent of the maximum particle size, the critical P_5 value can be calculated by the fractal grading formula and the corresponding grading scale method can be directly selected according to the parameters of the original graded soil. The research results can be used for the scale test of super-diameter coarse-grained soil and have strong application value.

Key words: soil mechanics; coarse-grained material; rockfill dam; scale method; geotechnical test; fractal theory; Weibull model

1 引言

堆石坝中广泛使用的堆石料或砂粒料,最大粒径一般为 60~80 cm,而与之对应的试验仪器却发展并不平衡, E. B. Holl 首次制造了三轴压缩试验仪^[1],在 Isabera 坝试验中,试样尺寸为直径 45.7 cm、高 91.4 cm,为超大粒径粗粒土力学特性的测试手段奠定了基础。R. J. Marsal^[2]研制了一种超大型三轴压缩仪,该仪器试样筒直径 113 cm,高度 250 cm,压力室外壳直径达 4.20 m;试验最大围压 3.0 MPa,最大允许应变为 20%,并利用该仪器对 EI Infiernillo 坝的 3 种堆石料饱和试样进行了排水剪切试验研究。我国也已经研制了直径 100 cm 的超大型三轴试验平台^[3]。大型试验仪器能够容纳更大粒径的尺寸,因而可以有效减弱缩尺效应的影响,是解决缩尺效应的最有效方法。但是,即使尺寸最大的三轴试验仪,仍然不能满足目前原级配粗粒土试验的要求。堆石料的缩尺试验,依然是现阶段研究其物理力学性质的主要手段。

缩尺试验首先面临的是缩尺方法选择。规范^[4-5]建议主要有剔除法、等量替代法、相似法和混合法。

E. Fumagalli^[6]认为相似法是反映原级配颗粒料性质的合理缩尺方法,国外研究者也大都采用相似法^[7-9],国内研究者则大多采用混合法^[10-11]。对于缩尺方法对粗粒土物理力学性质的影响,研究成果主要体现在密实度和力学参数方面^[12-13],得到了相似法缩尺试验的干密度或力学参数更高的结论。

相关研究认为,超径粗粒土缩尺后 $P_5 < 15\%$ 时可以采用相似级配法,若超过 15% 则应以透水性相似的原则,修正小于 5 mm 颗粒曲线段的缩尺级配^[14]。规范^[4-5]规定,由于混合法的缩尺试验干密度更接近于现场,因此推荐混合法作为超径粗粒土级配的主要缩尺方法,并规定了粗粒土用小于 5 mm 颗粒百分含量 P_{5k} 来控制超径颗粒级配的缩尺,即:
(1) 先采用相似法缩尺,如果缩尺后 $P_5 \leq 15\%$ 时,直接采用此缩尺级配作为试验级配; (2) 若 $P_5 >$

15%,则采用混合法确定缩尺级配,且控制缩尺后的 P_5 在 30% 以内。但是,采用上述与缩尺比无关的 $P_5 = 15\%$ 指标,作为区分相似法和混合法的使用条件,其合理性尚未见相关的研究成果报道。

朱晟等^[15]基于现场大型相对密度试验手段,得到相似法缩尺级配的试验结果更接近于填筑干密度的结论,认为混合法缩尺破坏了原级配颗粒之间的充填关系,相似法的缩尺级配更合理地反映了原级配粗粒土的物理力学性质。

但是,由于土体颗粒不能无限小,即使采用相似法,级配缩尺后仍存在截尾误差^[15],实际缩尺后并非严格意义的相似级配。而且,缩尺后由于细粒含量增加,还可能出现渗透系数减小^[13],当细粒过多时甚至可能出现“砂化”问题,需要更为深入的研究。

综上所述,粗粒土的缩尺问题,从 20 世纪 40 年代开始至今一直是坝工界和岩土界研究的世界性难点和热点问题,研究成果也较为丰富。但不同缩尺方法得到缩尺试验料的物理力学性质不同,究竟何种缩尺方法可以更客观反映现场超径粗粒土的工程性质,以及如何合理利用缩尺试验成果为工程服务等方面的成果,却较为稀缺,这也阻碍了缩尺研究成果在高土石坝等工程实践中的推广应用。为此,本文在满足 Weibull 分布粗粒土级配模型的基础上,推导了级配缩尺计算公式,并结合室内相对密度试验,重点研究不同缩尺方法的使用条件或范围。

2 连续分布粗粒土级配方程

2.1 级配方程

Weibull 模型可以较好地反映生长型曲线^[16],其公式为

$$P = a - be^{-cx^n} \quad (1)$$

式中: a, b, c, n 为模型参数。

令 $x = \frac{d_i}{d_{\max}}$, 则当 $c \neq 0$ 且 $n > 0$ 时,式(1)即可用

于描述连续分布的粗粒土级配。其中, d_i 和 d_{\max} 分

别为级配的粒组粒径和最大粒径。

采用式(1)描述级配方程时, 必须满足: ① 当 $d_i = d_{max}$ 时, $P = 100\%$; ② 当 $d_i = 0$ 时, $P = 0$ 。将其代入式(1), 可得

$$P = \frac{1 - e^{-cx^n}}{1 - e^{-c}} \times 100 \quad (2)$$

式(2)即为连续分布的粗粒土级配方程。

特别地, 当 $c \rightarrow 0$ 时, 有

$$\lim_{c \rightarrow 0} \left(\frac{e^c - 1}{c} \right) = 1 \quad (3)$$

则由式(2)可得

$$\lim_{c \rightarrow 0} P = 100x^n \quad (4)$$

可见, 两参数级配方程即可转化为粒度分形维 $D = 3 - n$ 的分形分布曲线。

2.2 级配方程的工程适应性验证

为了检验方程式(2)对于粗粒土级配的适用性, 选取国内外几座 200~300 m 级高坝的粗粒土填筑级配进行验证分析。

表 1 为采用式(2)分别拟合水布垭、大石峡等工程堆石料、砂砾料和过渡料平均级配的模型参数, 图 1 为相应坝料填筑级配的拟合曲线。可见, 上述各级配拟合的相关系数不低于 0.97, 式(2)具有较强的反映粗粒土级配的能力。其中长河坝堆石料的级配参数 $c = 0.013$, 接近于 0, 可近似认为其级配基本满足分形分布。

表 1 高坝超径填筑粗粒土的平均级配参数

Table 1 Average gradation parameters of coarse-grained soil with over-diameter filling

坝料	工程名称	c	n	相关系数
砂砾料	大石峡	1.706	0.406	0.99
	茨哈峡	2.281	0.578	0.99
	猴子岩	1.041	0.359	0.98
	Hypek	1.554	0.553	0.99
	Aguamilpa	2.751	0.577	0.98
	Salvajina	4.837	0.710	0.99
堆石料	水布垭	2.106	0.616	0.99
	江坪河	1.645	0.667	0.98
	猴子岩	1.507	0.606	0.98
	长河坝	0.013	0.457	0.99
	两河口	2.329	0.739	0.99
	水布垭	3.523	0.725	0.99
过渡料	江坪河	2.007	0.693	0.98
	长河坝	1.406	0.625	0.99
	两河口	1.734	0.800	0.97

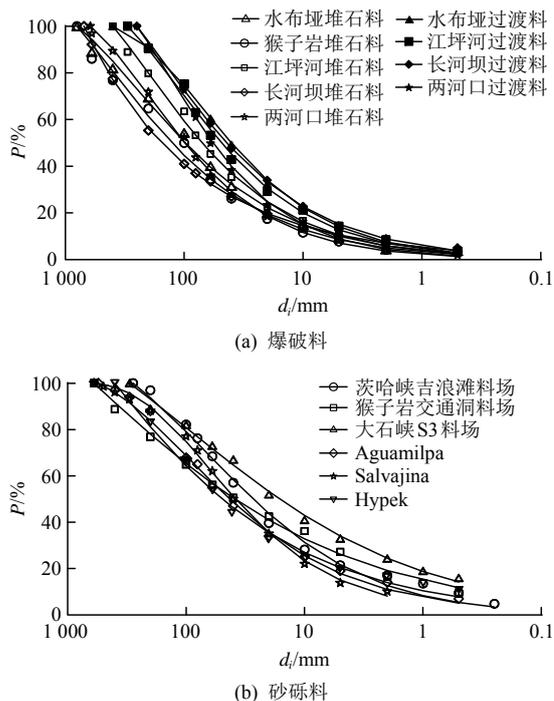


图 1 高坝粗粒土的填筑级配拟合曲线

Fig.1 Filling gradation fitting curves of high dam coarse-grained soil

3 连续分布粗粒土级配的缩尺公式

本节推导剔除法、相似法、等量替代法和混合法缩尺前、后级配方程参数间的关系。

根据级配方程式(2), 原级配曲线可以表示为

$$P^0 = \frac{1 - e^{-c_0 x_0^{n_0}}}{1 - e^{-c_0}} \times 100 \quad (5)$$

其中,

$$x_0 = \frac{d_{0i}}{d_{0max}} \quad (6)$$

式中: d_{0max} , c_0 , n_0 和 d_{max} , c , n 分别为原级配和缩尺级配的参数。只需求取最大粒径为 d_{max} 的缩尺级配 c , n 两个参数。

下面推导缩尺级配参数 c , n 与已知参数的关系, 得到缩尺后的级配公式。

对于等量替代法和剔除法, 需要计算原级配的超粒径含量 $P_{>d_{max}}^0$, 由图 2 可见, $P_{>d_{max}}^0$ 与缩尺最大粒径 d_{max} 对应原级配中的比例为

$$P_{>d_{max}}^0 = 100 - P_{d_{max}}^0 \quad (7)$$

$P_{d_{max}}^0$ 值根据式(2)可写成:

$$P_{d_{max}}^0 = \frac{1 - e^{-c_0 \left(\frac{1}{B}\right)^{n_0}}}{1 - e^{-c_0}} \times 100 \quad (8)$$

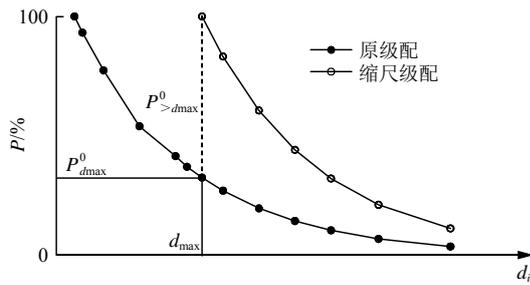


图2 粗粒土的 $P^0_{>d_{max}}$ 示意图
Fig.2 $P^0_{>d_{max}}$ diagram of coarse-grained soil

其中,

$$B = \frac{d_{0max}}{d_{max}} \tag{9}$$

由 x 的定义和式(9)可得

$$x_0 = \frac{x}{B} \tag{10}$$

对于等量替代法, 还需计算原级配中 5 mm 以下颗粒含量 P^0_5 , 根据式(5), P^0_5 可表示为

$$P^0_5 = \frac{1 - e^{-c_0 \left(\frac{5}{d_{0max}}\right)^{n_0}}}{1 - e^{-c_0}} \times 100 \tag{11}$$

3.1 剔除法

采用剔除法缩尺时, 剔除原级配超粒径颗粒后, 某粒组含量 ΔP_{0i} 对应缩尺级配粒组含量 ΔP_i 为

$$\Delta P_i = \frac{100 \Delta P_{0i}}{100 - P^0_{>d_{max}}} \tag{12}$$

将式(7)代入式(12), 可得

$$\frac{\Delta P_i}{\Delta P_{0i}} = \frac{100}{P^0_{d_{max}}} = k \tag{13}$$

将式(8)代入式(13), 得

$$k = \frac{1 - e^{-c_0}}{1 - e^{-c_0 \left(\frac{1}{B}\right)^{n_0}}} \tag{14}$$

考虑到小于某粒径 d_i 的含量是由小于 d_i 的各个粒组的含量累加而成, 设剔除法缩尺后粒径小于 d_i 的含量为 P^T , 则有下列式:

$$\left. \begin{aligned} P^0 &= \sum_{d < d_i} \Delta P_{0i} \\ P^T &= \sum_{d < d_i} \Delta P_i \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

由式(13)和(15)可得

$$P^T = kP^0 \tag{16}$$

代入式(2), (5), (10), (14), 得

$$\frac{1 - e^{-cx^n}}{1 - e^{-c}} = \frac{1 - e^{-c_0 \left(\frac{x}{B}\right)^{n_0}}}{1 - e^{-c_0 \left(\frac{1}{B}\right)^{n_0}}} \tag{17}$$

要使式(17)对任意 $x \in [0, 1]$ 均成立, 比较等式两边系数, 可得

$$\left. \begin{aligned} c &= c_0 \left(\frac{1}{B}\right)^{n_0} \\ n &= n_0 \end{aligned} \right\} \tag{18}$$

因此, 按剔除法缩尺的级配曲线方程, 可表示为

$$P^T = \frac{1 - e^{-c_0 \left(\frac{x}{B}\right)^{n_0}}}{1 - e^{-c_0 \left(\frac{1}{B}\right)^{n_0}}} \times 100 \tag{19}$$

3.2 相似法

相似法是根据原级配曲线的粒径, 按照几何相似条件, 等比例地缩小至仪器允许的粒径, 缩小后的土样级配应保持不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 不变。

相似法的粒径和级配按下式计算:

$$\left. \begin{aligned} d_i &= \frac{d_{0i}}{B} \\ B &= \frac{d_{0max}}{d_{max}} \end{aligned} \right\} \tag{20}$$

$$P^X = P^0 \tag{21}$$

式中: d_{0i} 为原级配某粒径, d_i 为 d_{0i} 缩小为原来的 $\frac{1}{B}$ 后的粒径(mm), B 为粒径缩小系数, P^X 为相似法缩尺后粒径小于 d_i 的含量。

由 x_0, x 的定义和式(20)可得 $x_0 = x$; 再将式(2)和(5)代入式(21), 得

$$\frac{1 - e^{-cx^n}}{1 - e^{-c}} = \frac{1 - e^{-c_0 x^{n_0}}}{1 - e^{-c_0}} \tag{22}$$

要使式(22)对任意 $x \in [0, 1]$ 均成立, 比较等式两边系数, 可得

$$\left. \begin{aligned} c &= c_0 \\ n &= n_0 \end{aligned} \right\} \tag{23}$$

因此, 按相似法缩尺后的级配曲线方程可表示为

$$P^X = \frac{1 - e^{-c_0 x^{n_0}}}{1 - e^{-c_0}} \times 100 \tag{24}$$

3.3 等量替代法

等量替代法是用粒径在 5 mm ~ d_{max} 范围的颗粒按比例等质量替换超粒径。

缩尺前、后各粒组含量计算关系式为

$$\Delta P_i = \frac{P_{>5}^0}{P_{>5}^0 - P_{>d_{\max}}^0} \Delta P_{0i} \quad (25)$$

当原级配曲线 P^0 和 d_{\max} 确定后, $P_{>5}^0$ 和 $P_{>d_{\max}}^0$ 为定值, 则 $\frac{P_{>5}^0}{P_{>5}^0 - P_{>d_{\max}}^0}$ 也为定值, 假定 $\frac{P_{>5}^0}{P_{>5}^0 - P_{>d_{\max}}^0} = s$, 则式(25)可简化为

$$\Delta P_i = s \Delta P_{0i} \quad (26)$$

其中,

$$s = \frac{100 - P_5^0}{P_{d_{\max}}^0 - P_5^0} \quad (27)$$

考虑到小于某粒径 d_i 的含量是由小于 d_i 的各个粒组的含量累加而成, 设等量替代法缩尺后粒径小于 d_i 的含量为 P^D , 则有下式:

$$\left. \begin{aligned} P^D &= P_5^0 + \sum_{5 < d < d_i} \Delta P_{0i} \\ P^D &= P_5^0 + \sum_{5 < d < d_i} \Delta P_i \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

将式(26)代入式(28), 化简可得

$$P^D = s P^0 + (1-s) P_5^0 \quad (29)$$

设 $(1-s) P_5^0 = A$, 代入式(27), 可得

$$A = \frac{P_{d_{\max}}^0 - 100}{P_{d_{\max}}^0 - P_5^0} P_5^0 \quad (30)$$

注意到当粒径取为缩尺后最大粒径 d_{\max} 时, $P_{d_{\max}}^D = 100$, 则有

$$100 = s P_{d_{\max}}^0 + A \quad (31)$$

即

$$s = \frac{100 - A}{P_{d_{\max}}^0} \quad (32)$$

因此, 式(29)可表示为

$$P^D = \frac{100 - A}{P_{d_{\max}}^0} P^0 + A \quad (33)$$

代入式(5), (8)和(10), 得

$$P^D = (100 - A) \frac{1 - e^{-c_0 \left(\frac{x}{B}\right)^{n_0}}}{1 - e^{-c_0 \left(\frac{1}{B}\right)^{n_0}}} + A \quad (34)$$

因此, 按等量替代法缩尺后的级配曲线方程可表示为

$$P^D = \begin{cases} (100 - A) \frac{1 - e^{-c_0 \left(\frac{x}{B}\right)^{n_0}}}{1 - e^{-c_0 \left(\frac{1}{B}\right)^{n_0}}} + A & (d \geq 5 \text{ mm}) \\ P^0 & (d < 5 \text{ mm}) \end{cases} \quad (35)$$

其中,

$$A = \frac{P_{d_{\max}}^0 - 100}{P_{d_{\max}}^0 - P_5^0} P_5^0$$

从式(35)可以看出, 当 $P_5^0 = 0$ 时, $A = 0$, 此时 $P^D = P^T$, 即原级配中颗粒粒径都大于 5 mm 时, 剔除法和等量替代法缩尺公式是相同的。可见, 剔除法实质上是等量替代法的一种特例。

3.4 混合法

混合法先将原级配曲线 P^0 经过相似级配法缩尺为过渡曲线 P^G , 使 P^G 的细粒含量 P_5 满足要求, 假设此时仍有超径粒径, 再对 P^G 用等量替代法进行缩尺, 最终得到混合法缩尺级配曲线 P^H 。

因为 P^G 是由 P^0 经相似级配法缩尺得到, 故由式(22)可得

$$P^G = \frac{1 - e^{-c_0 x_G^{n_0}}}{1 - e^{-c_0}} \times 100 \quad (36)$$

其中,

$$x_G = \frac{d_i}{d_{G\max}} \quad (37)$$

式中: $d_{G\max}$ 为过渡曲线 P^G 的最大粒径(mm)。

由于 P^G 经过点 $(5/d_{G\max}, P_5)$, 代入式(36)可得

$$P_5 = \frac{1 - e^{-c_0 \left(\frac{5}{d_{G\max}}\right)^{n_0}}}{1 - e^{-c_0}} \times 100 \quad (38)$$

化简后得

$$d_{G\max} = 5 \times \left\{ \frac{-c_0}{\ln[1 - 0.01 P_5 (1 - e^{-c_0})]} \right\}^{\frac{1}{n_0}} \quad (39)$$

由于 P^H 是在 P^G 的基础上进行等量替代法缩尺得到的, 故需求出 $d_i = d_{\max}$ 时过渡曲线 P^G 对应含量, 用 $P_{d_{\max}}^G$ 表示, 则有

$$P_{d_{\max}}^G = \frac{1 - e^{-c_0 \left(\frac{1}{B_G}\right)^{n_0}}}{1 - e^{-c_0}} \times 100 \quad (40)$$

其中,

$$B_G = \frac{d_{G\max}}{d_{\max}} \quad (41)$$

由 x 的定义和式(37), (41)可得

$$x_G = \frac{x}{B_G} \quad (42)$$

由式(39), (40)可得, 当 P^0 和 P_5 确定后, $d_{G\max}$ 和 $P_{d_{\max}}^G$ 相继确定, 则 A 也可确定。

因此，按混合法缩尺后的级配曲线方程可表示为

$$P^H = \begin{cases} (100 - A) \frac{1 - e^{-c_0 \left(\frac{x}{B_G}\right)^{n_0}}}{1 - e^{-c_0 \left(\frac{1}{B_G}\right)^{n_0}}} + A & (d \geq 5 \text{ mm}) \\ \frac{1 - e^{-c_0 \left(\frac{x}{B_G}\right)^{n_0}}}{1 - e^{-c_0}} \times 100 & (d < 5 \text{ mm}) \end{cases} \quad (43)$$

其中，

$$A = \frac{P_{d_{\max}}^G - 100}{P_{d_{\max}}^G - P_5} P_5$$

综上所述，4种缩尺方法的级配方程可统一表示为

$$P = (100 - A) \frac{1 - e^{-cx^n}}{1 - e^{-c}} + A \quad (44)$$

缩尺级配参数的计算公式如表2所示。

表2 Weibull模型级配曲线的4种缩尺方法参数
Table 2 Parameters of four grading scale methods of 2-parameter Weibull model

缩尺方法	c	n	A	B 或 B_G
原级配	c_0	n_0	0	-
剔除法	$c_0 \left(\frac{1}{B}\right)^{n_0}$	n_0	0	$\frac{d_{0\max}}{d_{\max}}$
相似法	c_0	n_0	0	-
等量替代法	$c_0 \left(\frac{1}{B}\right)^{n_0}$	n_0	$\frac{P_{d_{\max}}^0 - 100}{P_{d_{\max}}^0 - P_5^0} P_5^0$	$\frac{d_{0\max}}{d_{\max}}$
混合法	$c_0 \left(\frac{1}{B}\right)^{n_0}$	n_0	$\frac{P_{d_{\max}}^G - 100}{P_{d_{\max}}^G - P_5} P_5$	$\frac{d_{G\max}}{d_{\max}}$

需要指出的是，对于等量替代法，缩尺级配 $d < 5 \text{ mm}$ 部分与原级配相同；对于混合法，缩尺级配 $d < 5 \text{ mm}$ 部分由式(43)给出。

4 级配不同缩尺方法的适用条件

4.1 剔除法

对于原级配而言，当超径含量 $P_{>d_{\max}}^0 \leq 10\%$ 时，直接采用剔除法剔除超径土颗粒，采用式(19)计算缩尺级配，缩尺后基本接近原级配。

4.2 相似法

对于满足式(2)的粗粒土级配而言，最优充填关系(即极值干密度最大)对应级配小于 5 mm 颗粒质

量百分含量，应满足：

$$P_{5c} = \frac{1 - e^{-c \left(\frac{5}{d_{\max}}\right)^n}}{1 - e^{-c}} \times 100 \quad (45)$$

可见， P_{5c} 不但与级配参数 c ， n 相关，也与级配的最大粒径 d_{\max} 相关， d_{\max} 越大， P_{5c} 越小。

下面结合大石峡砂砾料，说明如何根据相对密度试验结果，确定不同 d_{\max} 级配的临界 P_5 含量，即 P_{5c} 。

根据大石峡砂砾料级配上、下包线参数，生成最大粒径 60 mm 的包线级配，同时内插生成共7组试验级配，进行室内相对密度试验，级配与试验结果如图3所示。为便于比较，还进行了8组满足分形分布级配砂砾料的室内相对密度试验，级配与试验结果也示于图3。

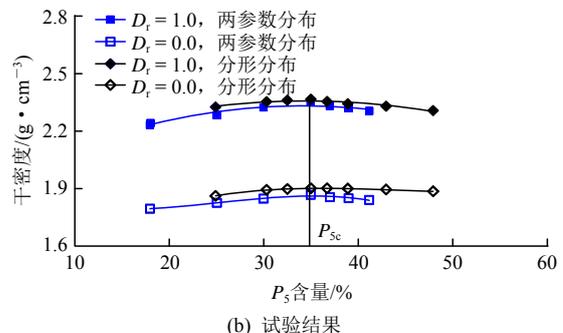
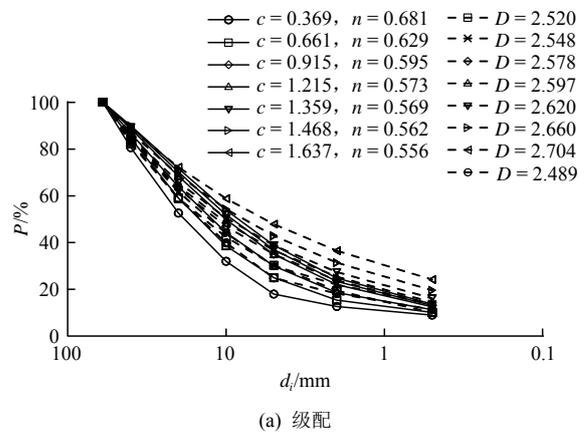


图3 大石峡砂砾料的室内相对密度试验

Fig.3 Indoor relative density test of DSX gravel

可见，无论是分形分布级配还是两参数连续非分形级配，随着 P_5 的增加，最大干密度和最小干密度都呈现出先增大后减小的规律。其中两参数连续级配的最大、最小干密度的极值分别为 2.353 和 1.868 g/cm^3 ，对应小于 5 mm 颗粒百分含量为 35.3% ；分形分布级配的最大、最小干密度极值分别为 2.367 和 1.901 g/cm^3 ，其临界分形维为 2.578 ，对应小于 5 mm 颗粒百分含量同样为 35% 。

根据图3的相对密度试验结果，取 $d_{\max} = 60 \text{ mm}$ ，

$P_{5c} = 35\%$, 代入式(45), 可得

$$n = \frac{\ln \left\{ \frac{-c}{\ln[1 + 0.35(e^{-c} - 1)]} \right\}}{\ln 12} \quad (46)$$

式(46)即为最优充填级配的参数关系式, 将其曲线绘于图 4。将图 3(a)的试验级配参数也绘于图 4 中, 得到本次试验 $P_{5c} = 35\%$ 的级配: 两参数级配 M 点处: $c = 1.152, n = 0.577$; 分形级配 F 点处: $D_c = 2.578, n = 0.422$ 。

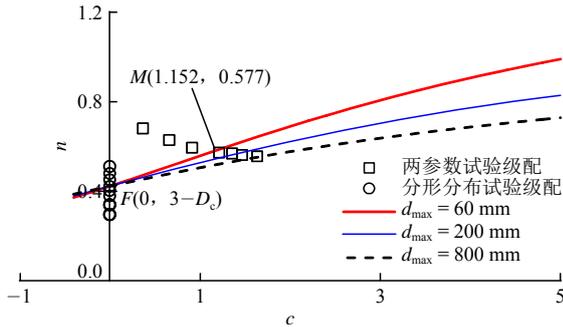


图 4 连续分布最优充填关系的级配参数曲线

Fig.4 Gradation parameters for continuous optimal distribution

需要说明的是, 图 4 中指定某一最大粒径满足式(45)最优充填关系的级配理论上存在无数组。根据图 3 试验结果, 颗粒满足分形分布时的干密度最大, 此时才是真正的最优级配; 其余级配虽然 P_5 与分形分布级配相同, 但由于试验干密度小于分形分布级配的干密度, 实际上只是一种极优级配。

定义函数:

$$g(c) = \frac{\ln \left\{ \frac{-c}{\ln[1 + 0.01P_{5c}(e^{-c} - 1)]} \right\}}{\ln \left(\frac{d_{\max}}{5} \right)} \quad (47)$$

假定控制原级配缩尺条件的小于 5 mm 颗粒质量百分含量为 P_{5k} , 取

$$P_{5k} = P_{5c} \quad (48)$$

将原级配曲线式(5)进行缩尺时, 对于最大粒径为 d_{\max} 的缩尺级配, 按式(47)计算 $g(c_0)$, 当 $n_0 \geq g(c_0)$ 时, 则缩尺后满足 $P_5 \leq P_{5k}$, 采用相似法缩尺, 用式(24)计算缩尺级配。

4.3 等量替代法或混合法

对于原级配曲线方程式(5), 对于最大粒径为 d_{\max} 的缩尺级配, 按式(47)计算 $g(c_0)$, 当 $n_0 < g(c_0)$ 时, 则可分为如下 2 种情况:

(1) 当原级配土体的最大粒径较小时, 试验缩尺比较小, 使得小于 5 mm 颗粒质量百分含量 $P_5^0 \geq P_{5k}$, 直接采用等量替代法, 令 $P_5 = P_5^0$, 根据式(35)计算缩尺级配;

(2) 当原级配土体的最大粒径较大时, 小于 5 mm 颗粒质量百分含量 $P_5^0 < P_{5k}$, 可采用混合法, 则缩尺级配的 P_5 需满足 $P_5^0 < P_5 < P_{5k}$, 用式(43)计算缩尺级配。此时, 如果原级配土体的小于 5 mm 颗粒质量百分含量接近于 P_{5k} , 也可取 $P_5 = P_5^0$, 即退化为等量替代法, 直接根据式(35)计算缩尺级配。

5 关于级配缩尺几个问题的讨论

5.1 关于 P_{5k} 的确定问题

根据上述分析, 结合原级配土体的分布范围, 通过对指定缩尺后最大粒径 d_{\max} 的一组级配的相对密度试验, 即可确定临界 P_5 值作为 P_{5k} ; 然后直接根据级配参数, 选择相似法或等量替代法进行缩尺。

由于粗粒土的 P_{5c} 随着级配最大粒径的变化而改变, 且目前缩尺试验仪器的直径已经突破 1.0 m, 级配缩尺后的最大粒径可达到 200~300 mm, 确定 P_{5c} 需要进行大量的现场大型相对密度试验, 费时费钱。下面讨论更简易确定 P_{5c} 的方法。

根据朱 晟等^[15]的研究成果, 对于满足分形分布的级配而言, P_{5c} 对应的临界分形维 D_c 具有尺度无关性, 即 D_c 与级配的最大粒径无关, 得到

$$P_{5c} = \left(\frac{5}{d_{\max}} \right)^{3-D_c} \times 100 \quad (49)$$

对于不同 d_{\max} , 根据式(49)计算 P_{5c} , 将其代入式(47), 即可得到相应最优充填关系的级配参数曲线。

图 4 中给出了 d_{\max} 分别取 60, 200 和 800 mm 时最优充填关系级配的参数曲线。可见, 虽然不同 d_{\max} 对应的级配参数 c, n 都在改变, 但是当 $c \rightarrow 0$ 时, 均收敛于竖轴上的点 F , 即该点坐标与最大粒径无关, 级配满足严格分形分布, 且 $n = 3 - D_c$ 。可见, 不同最大粒径、不同颗粒分布类型的连续级配的 P_{5c} , 可以直接采用式(49)计算确定。

根据图 3 砂砾料和以往堆石料的相对密度试验结果^[15, 17], 粗粒土的临界分形维 D_c 可取 2.58, 利用式(49), 将不同最大粒径缩尺级配的 P_{5c} 计算结果示于图 5。

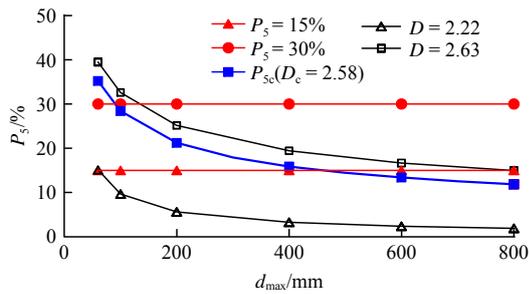


图5 不同分形维数级配的 P_5 与最大粒径之间关系曲线
Fig.5 Relationship of P_5 of different fractal dimension gradings and maximum particle size

5.2 关于相似法缩尺级配的砂化和渗透问题

本文定义级配的 $P_5 \leq P_{5k}$ 作为相似法缩尺的使用条件，其物理含义在于：当缩尺级配小于 5 mm 的颗粒质量百分含量低于颗粒间最优充填关系要求的 P_{5c} 时，采用相似法缩尺。可见相似法缩尺时，虽然 P_5 超过了现行规范 15% 的规定，但并不会出现由于细粒增加而导致缩尺后土体的砂化问题。

对于相似法缩尺级配的渗透性，傅华等^[13]对中硬砂岩堆石料采用相似法缩尺，粒径 5 mm 以下颗粒含量为 40% 时的渗透系数为 8.93×10^{-3} cm/s，仍为能自由排水性的无黏性粗粒土。规范^[5]第 5.01 条规定对于最大粒径为 60 mm 自由排水的粗粒土，小于 0.075 mm 的细粒含量不得大于 12%，而砂岩堆石料的临界粒度分形维可取 2.58^[17]，对应的 $P_{5c} = 35.2\%$ ，小于 0.075 mm 颗粒的百分含量为 6%，完全满足室内三轴固结排水试验的要求。

5.3 关于现行规范缩尺方法存在的问题

将原级配粗粒土缩尺到目前常用的最大粒径 60 mm 的试验级配时，根据规范^[4-5]，使用相似法缩尺时，要求小于 5 mm 颗粒的质量百分含量 $\leq 15\%$ ，利用式(4)，计算对应级配的粒度分形维：

$$D = 3 - \frac{\lg 0.15}{\lg \left(\frac{5}{60} \right)} = 2.236 \quad (50)$$

可见，根据规范缩尺条件，在粒度分形维大于 2.236 范围内粗粒土的级配缩尺，就只能采用混合法。由于工程良好级配粗粒土的粒度分形维数在 2.22~2.63 范围^[17]，则工程超径粗粒土的级配缩尺，基本上都要采用混合法，势必夸大混合法的使用范围，导致缩尺试验料的物理力学性质明显偏离原级配土体，难以合理反映工程的真实状态。

与规范方法相比，本文利用 P_{5c} 作为相似法缩

尺的使用条件，拓宽了相似法缩尺方法的使用范围，如 $d_{max} = 60$ mm 缩尺级配，使用相似法的范围，可由规范的 $P_5 \leq 15\%$ 拓展到 $P_5 \leq 35\%$ 。而且，由式(49)和图 5 可见，由于 P_{5c} 随最大粒径的改变而动态变化，以保证粗粒土缩尺前、后颗粒结构的几何相似，可以有效提高不同缩尺比条件下使用级配相似缩尺方法的精度。

6 超径连续级配粗粒土缩尺实例分析

6.1 砂砾料和堆石料的缩尺级配计算

结合图 1 给出的大石峡砂砾料和长河坝堆石料平均级配，说明如何计算确定室内试验 $d_{max} = 60$ mm 的缩尺级配。

首先，取临界分形维数 $D_c = 2.58$ ，根据缩尺级配的 $d_{max} = 60$ mm，由式(47)计算 2 种缩尺料的 $g(c_0)$ 分别为 0.649，0.421。可见，对于砂砾料而言，满足节 4.3 的 $n_0 < g(c_0)$ ，且原级配曲线小于 5 mm 颗粒质量百分含量达到 33.8%，已经接近于 P_{5k} ，可直接采用等量替代法缩尺，取 $P_5 = P_5^0$ ，根据式(43)和表 3 级配参数，计算的缩尺级配见图 6。

表 3 原级配粗粒土平均级配的参数

Table 3 Average parameters of primary grade coarse-grained soil

工程名称	类型	级配参数			d_{0max} /mm	P_{5c} /%
		c_0	n_0	$g(c_0)$		
大石峡	砂砾料	1.706	0.406	0.649	300	35.2
长河坝	堆石料	0.013	0.457	0.421	700	35.2

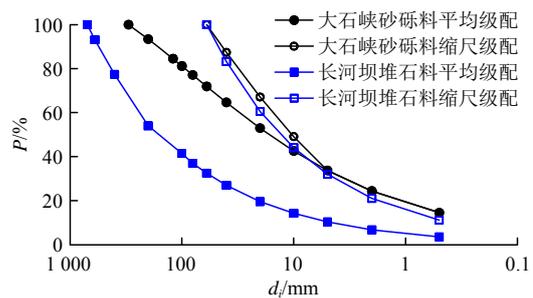


图 6 原级配粗粒土的缩尺试验级配

Fig.6 Scale test grading of primary grade coarse-grained soil

对于堆石料而言， n_0 满足节 4.2 的 $n_0 > g(c_0)$ ，采用相似法缩尺，用式(24)和表 3 级配参数，计算的缩尺级配，如图 6 所示。

利用式(49)计算缩尺级配的 P_{5c} 也示于表 3。

6.2 级配缩尺方法对粗粒土力学性质的影响

为了说明缩尺方法对于粗粒土力学性质的影

响, 利用河海大学 TYY - 800 型大型 k_0 测试仪, 结合长河坝填筑平均级配堆石料, 以现场检测相对密度为 0.65 的标准制样, 进行最大粒径 60 mm 相似缩尺级配的压缩试验。根据朱 晟等^[15]的室内相对密度试验结果, 计算室内试验制样干密度为

$$\gamma_d = \frac{1.865 \times 2.418}{(1 - 0.65) \times 2.418 + 0.65 \times 1.865} = 2.18 \text{ g/cm}^3$$

图 7 为压缩试验得到的应力 - 应变曲线, 根据试验结果, 计算不同加载区间的压缩模量见表 4。

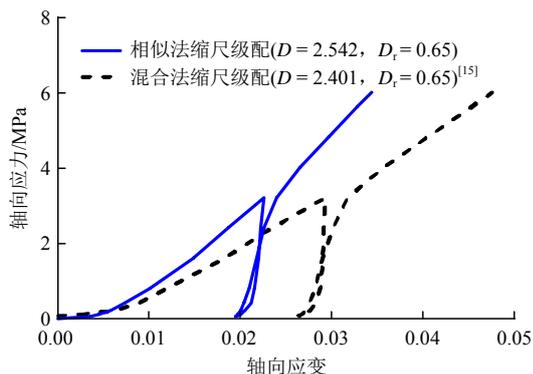


图 7 不同缩尺方案堆石料的压缩试验曲线

Fig.7 Compression test curve of rockfill under different scale schemes

表 4 不同缩尺方法级配的堆石料压缩模量试验值

Table 4 Compression modulus of different loading ranges

方案	压缩模量/MPa				
	0.4 - 1.6	1.6 - 2.4	2.4 - 3.2	3.2 - 0 - 3.2	3.2 - 6.4
朱 晟等 ^[15]	127.3	154.8	157.1	619.7	185.9
本文试验	158.8	192.5	204.8	662.7	286.3

注: 0.4 - 1.6 等为加载应力区间, 单位 MPa。

为便于比较, 图 7 和表 4 中同时列出了朱 晟等^[15]采用混合法缩尺级配的试验结果。可见, 混合法缩尺级配, 由于改变了原级配土体的颗粒充填关系, 导致其压缩模量明显低于相似法的缩尺试验结果, 不同加载区间的压缩模量降低幅度在 25%~35% 范围。

7 结 论

(1) 研究了基于 Weibull 分布的级配方程, 高坝填筑堆石料、过渡料和砂砾料的验证结果表明, 对于包含分形分布的连续分布粗粒土级配, 具有很好的适用性。

(2) 推导了连续级配粗粒土剔除法、相似法、等量替代法和混合法 4 种级配缩尺方法的统一缩尺

公式, 可用于直接计算缩尺试验级配。

(3) 规定了超径粗粒土剔除法、相似法、等量替代法和混合法 4 种级配缩尺方法的使用条件。通过采用最优充填关系级配对应的小于 5 mm 颗粒质量百分含量 P_{sc} , 作为区分粗粒土相似法、等量替代法和混合法的缩尺使用条件, 避免了过度使用混合法带来的缩尺误差, 可提高室内缩尺试验成果的精度。

(4) 混合法缩尺方法, 由于明显改变了粗粒土的原级配土体的颗粒充填关系, 压缩模量与相似法缩尺结果相差约 30%, 工程设计建设时应尽量避免使用。

(5) 利用临界分形维 D_c 对最大粒径具有尺度不变性的性质, 可采用式(49)计算不同分布类型级配的 P_{sc} , 作为选择超径粗粒土级配缩尺方法的依据, 使用简单、方便。

鉴于缩尺问题的复杂性, 对于颗粒破碎剧烈的软岩料以及不同粒组颗粒性质差异过大等粗粒土的级配缩尺, 尚需专门研究。

参考文献(References):

- [1] 日本土工学会. 粗粒料的现场压实[M]. 郭熙灵, 文 丹, 译. 北京: 中国水电出版社, 1999: 5.(Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Field compaction of coarsegrained materials[M]. Translated by GUO Xiling, WEN Dan. Beijing: China Water Power Press, 1999: 5.(in Chinese))
- [2] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1967, 93(SM2): 1 - 14.
- [3] 孔宪京, 刘京茂, 邹德高. 堆石料尺寸效应研究面临的问题及多尺度三轴试验平台[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 1 941 - 1 947. (KONG Xianjing, LIU Jingmao, ZOU Degao. Scale effect of rockfill and multiple-scale triaxial test platform[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(11): 1 941 - 1 947.(in Chinese))
- [4] 中华人民共和国行业标准编写组. SL 237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(The Professional Standards Compilation Group of the People's Republic of China. SL 237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))
- [5] 中华人民共和国行业标准编写组. DLT 5356—2006 水电水利工程粗粒土试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.(The Professional Standards Compilation Group of the People's Republic of China. DLT

- 5356—2006 Code for coarse-grained soil tests for hydropower and water conservancy engineering[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.(in Chinese))
- [6] FUMAGALLI E. Tests on cohesionless materials for rockfill dams[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1969, 95(1): 313 - 332.
- [7] MARACHI N D, 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.
- [8] FRASSONLA A, HEGG U, ROSSI P P. Large-scale laboratory tests for the mechanical characterization of granular materials for embankment dam[M]. ROME: ISMES, 1982.
- [9] VARADARAJAN A, SHARMA K G. Testing and modeling two rockfill materials[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(3): 206 - 218.
- [10] 马刚, 周伟, 常晓林, 等. 堆石料缩尺效应的细观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2 473 - 2 482.(MA Gang, ZHOU Wei, CHANG Xiaolin. Mesoscopic mechanism study of scale effects of rockfill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2 473 - 2 482.(in Chinese))
- [11] 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): 1 799 - 1 807.(WANG Yongming, ZHU Sheng, REN Jinming, et al. Research on scale effect of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1 799 - 1 807.(in Chinese))
- [12] 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): 2 394 - 2 398.(ZHU Jungao, WENG Houyang, WU Xiaoming, et al. Experimental study of compact density of scaled coarse-grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2 394 - 2 398.(in Chinese))
- [13] 傅华, 韩华强, 凌华. 堆石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): 2 645 - 2 649.(FU Hua, HAN Huaqiang, LING Hua. Effect of grading scale method on results of laboratory tests on rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2 645 - 2 649.(in Chinese))
- [14] 蒋国澄, 付志安, 凤家骥. 混凝土面板堆石坝工程[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997: 73.(JIANG Guocheng, FU Zhan, FENG Jiaji. CFRD Engineering[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1997: 73.(in Chinese))
- [15] 朱晟, 王京, 钟春欣, 等. 堆石料干密度缩尺效应与制样标准研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(5): 1 073 - 1 080.(ZHU Sheng, WANG Jing, ZHONG Chunxin, et al. Experimental study on scale effect of the dry density of rockfill material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(5): 1 073 - 1 080.(in Chinese))
- [16] WEIBULL W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 18(3): 293 - 297.
- [17] 朱晟, 邓石德, 宁志远. 基于分形理论的堆石料级配设计方法[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(6): 1 151 - 1 155.(ZHU Sheng, DENG Shide, NING Zhiyuan, et al. Gradation design method of rockfill materials based on the fractal theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(6): 1 151 - 1 155.(in Chinese))