

DOI: 10.11779/CJGE201910014

连续分布的粗粒土级配方程与压实性能

朱 晟

(1. 河海大学水文水资源与水利水电工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 以 Morgan 等人提出的生长曲线为基础, 提出了可反映粗粒土“S型”以及“上凸型”颗粒分布的 2 参数级配方程及参数取值范围; 当形状参数 a 趋向无穷大时, 则级配方程转化为分形分布公式。在此基础上, 提出了采用相对密度试验手段确定最优压实性能级配的方法。建议级配方程对于长河坝、大石峡、两河口等高坝的填筑级配, 具有很好的适用性。利用所得研究成果, 对大石峡砂砾料进行室内相对密度试验, 结果表明: ①对于最大粒径 60 mm 的不同分布规律的粗粒土而言, 随着级配参数的变化, 其最大、最小干密度均存在极值点或拐点, 且对应的临界 P5 值都在 35% 附近。②临界 P5 值对应粗粒土的极优压实性能级配; 颗粒级配越接近分形分布, 压实性能越好, 临界 P5 值对应的分形分布级配, 即为最优压实性能级配。接近分形分布的长河坝堆石料, 较低的现场压实参数却获得了较高的填筑干密度, 也佐证了这一结论的合理性。③利用临界分形维数的尺度无关性, 可以方便地将室内最优压实性能级配的研究成果推广至现场不同最大粒径的工程级配。结论可用于粗粒土的级配设计以及压实性能评价。

关键词: 粗粒土; 级配; 压实特性; 相对密度; 分形理论

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)10-1899-08

作者简介: 朱 晟(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土石坝等水工岩土与环境岩土方面的研究。E-mail: szhu@hhu.edu.cn。

Gradation equation and compaction characteristics of continuously distributed coarse-grained soil

ZHU Sheng

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on the growth curve proposed by Morgan et al., a two-parameter gradation equation that can reflect the "upward convex" and "S-shaped" particle distributions of coarse-grained soil is proposed. When the shape parameter a goes to infinity, the gradation formula is transformed into a fractal distribution equation. On this basis, a method for determining the optimal compaction performance gradation by using the relative density test method is proposed. The suggested gradation equation has good applicability to the filling gradation of high-rockfill dams in Changheba, Dashixia and Lianghekou. Using these research results, the indoor relative density tests on Dashixia gravel material are conducted. The results show that: (1) For the coarse aggregates with gradation of $d_{\max}=60$ mm and different distribution laws, with change of gradation parameters, the maximum and minimum dry densities both have extreme points or inflection points, and the corresponding critical P5 values are approximately 35% and remain basically unchanged. (2) The critical P5 value corresponds to the excellent compaction performance gradation. The test value of dry density obtained by the fractal distribution gradation is the largest. When the particle gradation is close to the fractal distribution, the compaction performance is satisfactory, and the critical P5 value corresponding to the fractal distribution gradation is the optimal compaction performance gradation. The rockfill of Changhe dam with fractal distribution has a higher filling density under the lower field compaction parameters, which proves the rationality of this conclusion. (3) According to the scale independence of the critical fractal dimension, the research results of the indoor optimal compaction performance can be conveniently extended to different maximum particle size gradations on site. The conclusion can be used for the gradation design and compaction performance evaluation of coarse-grained soil.

Key words: coarse-grained soil; gradation; compaction characteristic; relative density; fractal theory

0 引言

颗粒材料的级配设计分为最大密度曲线经验方

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404801)

收稿日期: 2018-08-28

法、干涉理论和分形理论。Fuller 等^[1]通过混凝土集料试验得到了一种连续粒径级配最紧密堆积的经验曲线, 认为细料分布近似为椭圆一部分、粗料的级配为与椭圆相切的直线的级配堆积最为紧密, 后来经过改进为抛物曲线级配的密度最大:

$$P = \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^{0.5} \times 100\% , \quad (1)$$

式中, P 为粒径小于 d_i 的颗粒质量百分比, d_{\max} 为最大粒径。

Talbot 等^[2]通过混凝土配合比试验, 认为集料级配式 (1) 的幂值在 0.3~0.6 时的密度最大; 曾凡等^[3]通过试验证明, 式 (1) 的幂值在 0.3~0.5 的范围内最易于压实。

Weymouth^[4]提出了干涉理论, 认为达到最大密度, 前一级颗粒之间的孔隙由次一级颗粒充填, 剩余孔隙再由更次一级的颗粒充填, 但充填的颗粒粒径不得大于其间隙的距离, 保证大小颗粒之间不发生干涉现象。粒子干涉理论适合于描述连续和非连续级配, 在混凝土和沥青混凝土性能研究方面应用较多^[5-6]。朱俊高等^[7]提出了一个描述连续级配土体的经验公式。

将分形理论应用于颗粒材料级配设计, 是近年发展起来的一种方法。分形理论最先用于研究颗粒材料的破碎性质, 研究者们^[8-10]认为任何初始级配, 破碎后都将趋向一种自相似分布, 在极限高压下颗粒级配达到或接近分形分布。由于采用深孔梯段爆破方法开采的堆石料, 经过原岩爆破的破碎过程, 仍然基本满足统计自相似特性, 笔者^[11]提出了基于分形理论的堆石料级配设计方法, 并在此基础上提出了相应的优化方法^[12, 18]。

对于粗粒土级配的整体分布特性而言, 目前尚未引起工程界足够的重视。如对筑坝材料而言, 规范^[13-14]对堆石料、砂砾料仅笼统提出了 P_5 (小于 5 mm 颗粒百分含量) 不超过 30% 或 20%, 以及细粒含量 (小于 0.075 mm) 不超过 5%~8% 的要求, 但是 P_5 是与级配最大粒径相关的量^[11], 当最大粒径大于 400 mm 时, P_5 超过 20% 时就可能成了不良级配料。由于级配整体分布的研究资料偏少, 学者们^[15-17]只能引入 C_u 、 C_c 以及平均粒径等特征指标, 描述级配对粗粒土力学性质的影响。考虑到级配对高应力工作条件下堆石坝变形控制的重要性^[18], 寻求合理描述级配整体的分布规律, 以及如何评价更适合于高土石坝碾压施工和性能更优的级配, 无论对于特高坝坝料工程性质研究还是大坝安全, 均彰显重要性和紧迫性。为此, 本文在已有资料的基础上, 研究连续分布粗粒土的级配方程以及压实性能。

1 级配方程与适用性分析

1.1 级配方程

Morgan 等^[19]提出的 S 型生长曲线即 MMF 模型, 已经广泛应用于地基沉降拟合预测等方面^[20-21], 其表达式为

$$P = \frac{b \cdot c + a \cdot x^n}{b + x^n} , \quad (2)$$

式中, a 、 b 、 c 和 n 为模型参数。

由于连续级配曲线需通过图 1 中的原点 $O(0, 0)$ 和 A 点 $(1, 100\%)$, 令

$$x = \frac{d_i}{d_{\max}} , \quad (3)$$

则式 (2) 可化为

$$P = \frac{a \cdot x^n}{(a-1) + x^n} \cdot 100\% . \quad (4)$$

当 $a \neq 0$ 时, 将式 (3) 代入式 (4), 可得

$$P = \frac{d_i^n}{\left(1 - \frac{1}{a}\right) \cdot d_{\max}^n + \frac{1}{a} \cdot d_i^n} \cdot 100\% , \quad (5)$$

式 (5) 即为文献[7]建议的经验级配方程。

下面讨论式(4)作为描述连续级配方程的适应性。

将式 (4) 对 x 求导, 得到

$$P' = \frac{a \cdot (a-1) \cdot n \cdot x^{n-1}}{\left[(a-1) + x^n\right]^2} . \quad (6)$$

根据式 (6), 可知: ①当 $a=0$ 时: $P'=0$, 但此时 $P=0$, 式 (4) 不能用于描述土体级配; ②当 $0 < a < 1$ 时: $P' < 0$, P 为单调递减函数, 不能用于描述土体连续级配; ③当 $a=1$ 时: $P'=0$, $P=100\%$, 表示单一粒径分布的土体; ④当 $a>1$ 或 $a<0$ 时: $P' > 0$, P 为单调递增函数, 式 (4) 可用于描述连续级配土体。

可见, 只有当 $a>1$ 或 $a<0$ 时, 式 (4) 才可用于描述连续分布土体的级配曲线。为进一步分析式 (4) 反映的曲线形状, 将式 (6) 再对 x 求导, 得

$$P'' = \frac{a \cdot (a-1) \cdot n \cdot x^{n-2} \cdot [(n-1) \cdot (a-1) - (n+1) \cdot x^n]}{\left[(a-1) + x^n\right]^3} . \quad (7)$$

对于式 (7), 一般 $1 > n > 0$, 于是有: ①当 $a>1$ 时, $P'' < 0$, 式 (4) 均为凸型曲线; ②当 $a<0$ 时, 令 $P''=0$, 求得式 (4) 级配曲线拐点的 x 坐标:

$$x_c = \sqrt[n]{\frac{(1-a)(1-n)}{1+n}} , \quad (8)$$

拐点位置见图 1 中所示 C 点。

若使级配曲线出现拐点 (参见图 1 中的 C 点), 则需满足: $x_c = \sqrt[n]{\frac{(1-a)(1-n)}{1+n}} \leq 1$, 得到

$$0 > a \geq \frac{2n}{n-1} \quad (9)$$

可见, 当 $a < 0$ 时, 式(4)的曲线型式又分为两种情况:

(1) 当 $0 > a \geq \frac{2n}{n-1}$ 时, 土体级配曲线式(4)为 S型分布, 即存在拐点C, 且当 $x < x_c$ 时, $P'' < 0$, 为凸型曲线段; 反之, 当 $x > x_c$ 时, $P'' > 0$, 为凹型曲线段;

(2) 当 $a < \frac{2n}{n-1}$ 时, $P'' < 0$, 式(4)为凸型曲线。

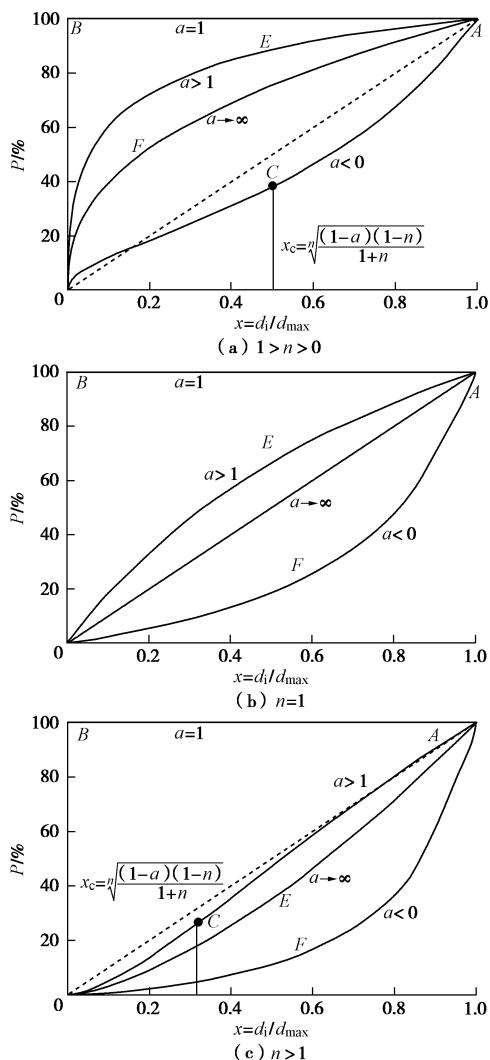


图1 级配方程曲线的型式

Fig. 1 Types of gradation equation curve

对于式(7), 当 $n > 1$ 时, 有①当 $a < 0$ 时, $P'' > 0$, 式(4)均为凹型曲线; ②当 $a > 1$ 时, 令 $P'' = 0$, 级配曲线式(4)的拐点坐标见式(8)。当 $x < x_c$ 时, $P'' > 0$, 为凹型曲线段; 反之, 当 $x > x_c$ 时, $P'' < 0$, 为凸型曲线段, 可见级配曲线为反S型分布。

对于式(7), 当 $n = 1$ 时, 为双曲线分布。

需要指出的是, 当 a 趋于无穷大时, 式(4)为

$$\lim_{a \rightarrow \infty} P = x^n \cdot 100\% \quad (10)$$

此时, 颗粒级配服从严格分形分布, 令 $n=3-D$, 即可求得粒度分形维 D 。

1.2 级配方程的工程验证

为了检验级配方程对于筑坝粗粒料的适用性, 选取国内几座 200~300 m 级高坝的填筑级配料进行验证分析。

表1为采用式(4)分别拟合大石峡等工程砂砾料、堆石料、过渡料和反滤料平均级配的模型参数, 图2示出各工程坝料的填筑级配拟合曲线。表2给出了堆石料施工填筑参数。

表1 高坝填筑料平均级配参数

Table 1 Average grading parameters of high dam filling materials

坝料名	a	n	相关系数	
大石峡砂砾料	2.957	0.335	0.99	
茨哈峡砂砾料	1.376	0.607	0.98	
猴子岩	砂砾料 堆石料	2.200 1.669	0.380 0.670	0.99 0.99
江坪河	堆石料 过渡料	1.730 1.584	0.697 0.718	0.99 0.99
长河坝	堆石料 过渡料 反滤料	-367085 1.852 1.269	0.458 0.661 0.933	0.99 0.99 0.97
水布垭	堆石料 过渡料	1.437 1.191	0.684 0.847	0.99 0.99
两河口	堆石料 过渡料 反滤料	1.406 1.665 1.501	0.811 0.844 0.975	0.99 0.99 0.96

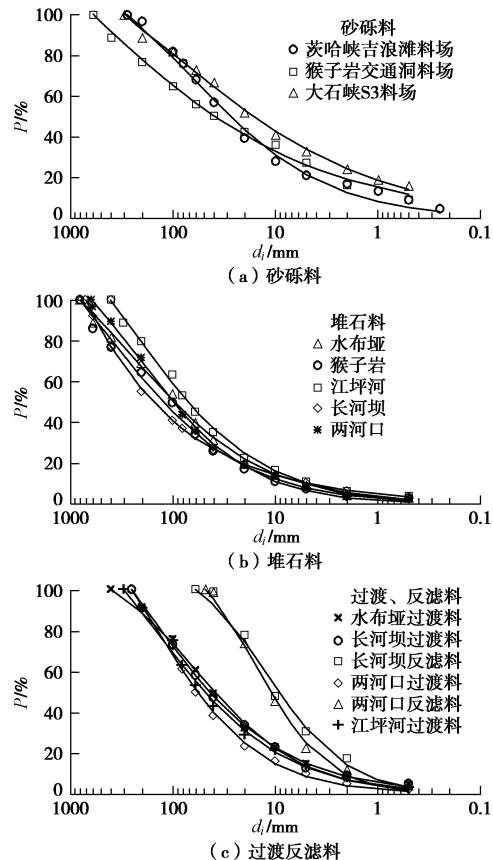


图2 高堆石坝的粗粒料填筑级配拟合

Fig. 2 Fitting curves of filling gradation of high rockfill dams

可见, 各工程级配拟合相关系数达到 0.96 以上, 拟合精度较高, 级配方程式(4)具有较强的反映筑坝粗粒料级配分布曲线的能力。

值得注意的是, 表 1 中长河坝堆石料拟合的参数 a 达到 -367085, 绝对值远大于其他工程, 根据 1.1 节的分析, 可认为其级配呈现较好的分形分布, 图 3 示出了长河坝下游堆石料的填筑检测级配, 并采用式(10)进行了分形分布拟合, 可见其包线内填筑级配均较好地符合分形分布规律。结合表 2 的堆石料施工填筑参数可知, 长河坝堆石料达到 0.19 孔隙率时的需要碾压遍数最少, 仅为同样采用硬岩堆石料筑坝的猴子岩堆石坝碾压遍数的一半, 与满足分形分布堆石料压实性能更好有着重要的关系。

表 2 高坝堆石料施工填筑参数

Table 2 Filling and rolling parameters of high rockfill dam

工程名	岩性	孔隙率	碾压参数
长河坝	花岗岩	≤ 0.19	层厚 0.8 m, 32 t 中大振动碾碾压 6 遍
猴子岩	变质灰岩	≤ 0.19	层厚 0.8 m, 32 t 中大振动碾碾压 12 遍
水布垭	灰 岩	≤ 0.20	层厚 0.8 m, 25 t 宝马振动碾碾压 8 遍
两河口	砂板岩	≤ 0.19	层厚 1.0 m, 32 t 中大振动碾碾压 10 遍

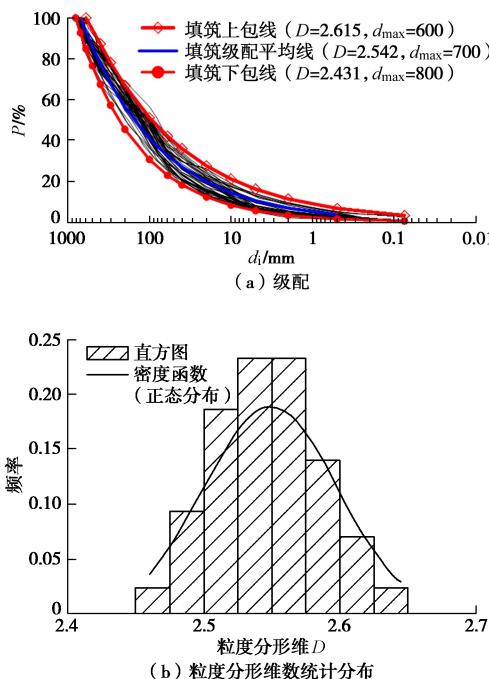


图 3 长河坝下游堆石区的填筑检测级配

Fig. 3 Rockfill gradation of Changhe dam

2 级配对粗粒土压实性能的影响

2.1 级配参数与不均匀系数和曲率系数的关系

对于级配方程(4), 计算级配的不均匀系数和曲率系数分别为

$$C_u = \left[\frac{6 \cdot (a - 0.1)}{(a - 0.6)} \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (11)$$

$$C_c = \left[\frac{3 \cdot (a - 0.1) \cdot (a - 0.6)}{2 \cdot (a - 0.3)^2} \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (12)$$

对于无黏性粗粒土而言, 起骨架作用的主要颗粒大于 5 mm 的颗粒^[22], 这里假定粒径 5 mm 以下颗粒含量为 P_5 , 对应图 1 的横坐标为 $x_5 = 5.0/d_{max}$, 即式(4)的级配曲线过 (x_5, P_5) 点, 则需满足

$$n = \frac{\ln \frac{(a-1) \cdot P_5}{a - P_5}}{\ln x_5}. \quad (13)$$

将式(16)对 a 求导, 得

$$n' = \frac{a}{\ln x_5 \cdot (a - P_5) \cdot P_5}. \quad (14)$$

可见, 无论 $a > 1$ 还是 $a < 0$, $n' < 0$, 式(13)均为递减函数, 则不均匀系数式(11)和曲率系数式(12)均为 a 的单调递增函数, 可根据 C_u , C_c 初判土体的工程性能。

2.2 不同颗粒分布级配的室内相对密度试验

结合大石峡 S3 料场砂砾料, 进行室内相对密度试验, 分析验证颗粒粒径分布规律对充填关系的影响。室内最大干密度试验采用表面振动法^[23], 采用自制表面振动器, 试样表面静载为 14 kPa, 振动频率为 47.5 Hz, 试验土体最大粒径取 60 mm。

(1) 试验方案

a) 不同分布类型级配对压实性能的影响

为比较不同类型级配曲线对压实性能的影响, 根据式(13), 选取 $P_5=30\%$ 的 3 个级配, 进行室内相对密度试验, 其中第 1 个级配 T_1 取 $a=2.75$, $n=0.62$, 为第①类凸型分布, 第 2 个级配 T_2 取 $a=-0.5$, $n=0.232$, 为第②类 S 型分布; 第 3 个级配 T_3 , 取 a 趋向无穷大, $n=0.485$, 即满足分形分布, 粒度分形维 $D=2.515$, 3 组不同分布类型的级配见图 4。

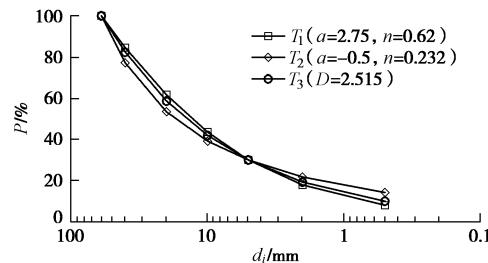


图 4 3 种典型分布的试验级配

Fig. 4 Three typical test gradation distributions

b) 同类型级配不同粒径分布对压实性能影响

参考 S3 料场的级配范围, 第一组在包线内取 7

组级配 $T_4 \sim T_{10}$, 其参数 a 介于 1.676~6.333, n 介于 0.594~0.650。图中也示出了增加 1 条 P_5 含量为 35% 的级配 T_{11} , 其参数 $a=1.02$, $n=1.8349$ 。第二组级配的参数 a 取无穷大, 即满足分形分布的 8 条级配 $T_{12} \sim T_{19}$ (粒度分形维数在 2.489~2.704), 各级配曲线见图 5 所示。

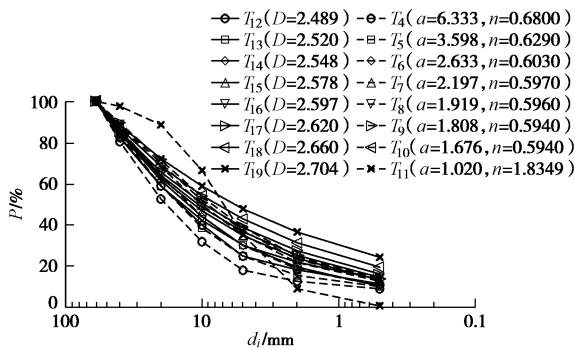


图 5 两组不同分布形式的试验级配

Fig. 5 Two sets of test gradations with different distribution forms

(2) 试验结果分析

表 3 列出图 4 级配的相对密度试验结果。对于 P_5 含量相同的级配, T_2 级配 (S 型分布) 的干密度最小, T_3 级配 (分形分布) 的干密度最大, 其中最大干密度差异达 2%, 最小干密度差异达 4%。可见, 即使 P_5 相同, 颗粒的分布特性对干密度结果存在明显的影响, 级配曲线越接近分形分布, 试验干密度值越大。

表 3 不同级配试验干密度

Table 3 Relative density test results of different grading

试验值	级配		
	T_1	T_2	T_3
最大干密度/(g·cm ⁻³)	2.325	2.312	2.354
最小干密度/(g·cm ⁻³)	1.850	1.827	1.894

对于图 5 级配的相对密度试验结果整理, 考虑到级配方程存在 2 个参数, 无法在平面图上绘制测量干密度与级配之间的关系曲线。为便于分析, 采用公式 (13), 计算对应的 P_5 含量, 然后绘制 P_5 和试验干密度的关系曲线, 两组级配的相对密度试验结果示于图 6。

可见, ①对于凸型分布级配而言, 第一组 $T_4 \sim T_{10}$ 级配, 参数 a 在 1.676~6.333 之间取值时, 最小干密度试验值从 1.795 g/cm³ 先增大到 1.868 g/cm³, 然后逐步减小到 1.841 g/cm³, 最大干密度试验值从 2.232 g/cm³ 先增大到 2.353 g/cm³, 然后逐步减小到 2.305 g/cm³, 最小/最大干密度的极值点均对应 $a=2.197$ 、 $n=0.597$ 的级配; 第二组为满足分形分布的 $T_{12} \sim T_{19}$ 级配, 无论是最小干密度还是最大干密度, 其变化规律都与第一组试验结果相同, 但量值有所增加, 如最小/最大干密度的极值增大为 1.901/2.367 g/cm³, 对应

级配的粒度分形维数为 2.578。②对于不同类型的级配分布曲线而言, 虽然干密度试验值有所差异, 但都存在拐点, 在该位置级配料的颗粒充填关系最优, 拐点位置对应的 P_5 , 可称为临界 P_5 值, 用 P_{5c} 表示。两组相对密度试验干密度测量值的拐点位置对应的 P_5 基本不变, 都在 35% 附近, 与堆石料的试验结果一致^[11]。

2.3 临界 P_5 值与工程最优压实性能级配

研究级配分布规律的目的, 主要是为了寻求最优压实性能的级配。

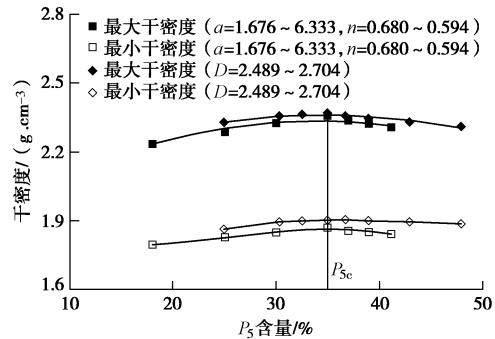


图 6 两组级配砂砾料室内相对密度试验结果

Fig. 6 Indoor test results of relative density of two sets of gradations

对于满足式 (4) 颗粒连续分布的粗粒土而言, 最优压实性能 (干密度最大) 对应的级配, 其 P_{5c} 需满足:

$$\frac{a \cdot \left(\frac{5}{d_{\max}}\right)^n}{(a-1) + \left(\frac{5}{d_{\max}}\right)^n} = P_{5c} \quad (15)$$

可见, P_{5c} 不但与级配参数 a , n 相关, 也与级配的最大粒径 d_{\max} 相关, 最大粒径越大, P_{5c} 越小, 量值可根据不同级配的相对密度试验结果确定。

(1) 基于室内相对密度试验结果分析

根据第 2.2 节砂砾料的室内相对密度试验结果, 取 $d_{\max}=60$ mm, P_{5c} 为 35%, 代入式 (15) 可得

$$n = \frac{\lg \frac{a - 0.35}{0.35 \cdot (a - 1)}}{\lg 12} \quad (16)$$

为便于分析, 将满足式 (16) 的级配参数关系绘于图 7 (a), 对应的典型级配曲线见图 7 (b)。可见, 满足粒径 5 mm 以下颗粒含量等于临界 P_5 含量的级配, 分为 $a>1$ 和 $a<0$ 两组, 每组都有无数条级配。

下面以工程应用较广泛的凸型级配 ($a>1$) 相对密度试验结果, 分析其压实特性。为便于分析, 定义指定最大粒径时满足粒径 5 mm 以下颗粒百分含量等于 P_{5c} 的级配, 为极优压实性能级配。这样, 满足式 (16) 的级配都为极优压实性能级配。

将上述 S3 料场包线内 $T_4 \sim T_{10}$ 级配的参数, 绘于图 7 (a)。可见, 只有 T_7 级配 ($a=2.197$, $n=0.597$) 参数满足式 (16), 位于图中的 $n \sim a$ 曲线上, 即为该料场的最优压实性能级配。由于工程粗粒土一般采用设计包线以及内插级配来反映其物理力学性质, 这样, 同一最大粒径条件下的级配曲线就不会相交, P_5 含量等于 P_{5c} 的级配曲线不会超过一条, 该级配就是料场的最优压实性能级配。

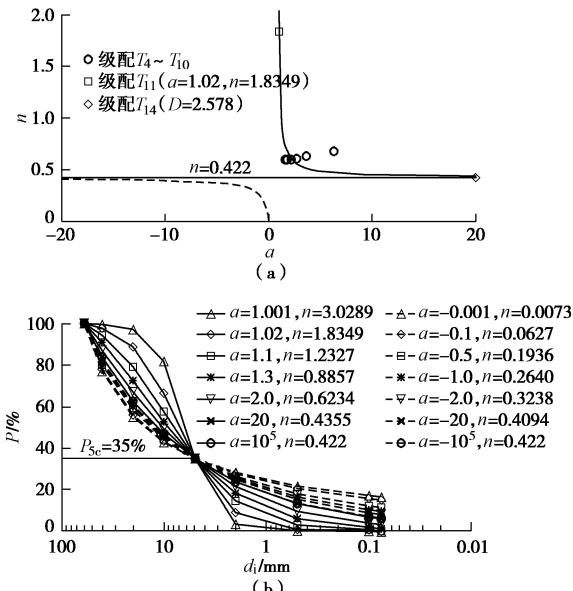


图 7 极优压实性能级配的参数与典型级配

Fig. 7 Gradation parameters and typical gradations with excellent compaction performance

但是, 上述方法确定的料场最优压实性能级配, 仅仅满足式 (16), 也即级配的 P_5 含量等于 P_{5c} , 实质上只是一种极优压实性能级配。为此, 利用图 5 或图 7 (a) 中满足式 (16) 参数关系的 T_{11} , T_7 , T_{15} 3 条级配土体的相对密度试验结果, 进行最优压实性能级配分析。

表 4 为 T_{11} , T_7 , T_{15} 等 3 组级配的试验结果, 可见对于极优级配而言, 随着参数 a 的增大, n 逐渐变小, 最大干密度和最小干密度都呈现出逐渐增大趋势, 说明土体的压实性能越来越好; 当 $a \rightarrow \infty$ 时, $n=0.422$, 土体颗粒呈现严格的分形分布, 试验干密度的极值达到最大值, 即为最优压实性能级配。

表 4 极优级配的相对密度试验结果

Table 4 Relative density test results of extremely superior grades

试验值	级配		
	T_{11}	T_7	T_{15}
最大干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2.238	2.353	2.367
最小干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.782	1.868	1.901

为便于设计压实性能优良的人工爆破或机械破碎的粗粒土, 定义料场最优级配(极优级配)和满足分形分布的(最优)级配土体的相对密度试验干密度的比值, 作为评价土体压实性能指标, 即

$$C_r = \frac{(\gamma_{d \max})_{\text{料场}}}{2(\gamma_{d \max})_{\text{分形}}} + \frac{(\gamma_{d \min})_{\text{料场}}}{2(\gamma_{d \min})_{\text{分形}}} \quad (17)$$

式中, $0 < C_r \leq 1$, C_r 越大, 土体级配的压实性能越好。根据表 4 计算 T_{11} 的 $C_r=0.94$, T_7 的 $C_r=0.98$, T_{15} 为分形分布 $C_r=1.0$, 可见, T_{15} 级配的压实性能最好。

(2) 现场不同最大粒径土体的最优压实性能级配

根据式 (15) 和 2.3 节中 (1) 可知, 只要进行设定最大粒径的料场不同级配土体的相对密度试验, 确定了相应的临界 P_5 含量, 即可得到料场最优级配或极优级配; 而临界 P_5 含量对应的分形分布级配, 才是粗粒土的理论最优级配。

由于粗粒土的现场大规模相对密度试验耗钱费时, 下面讨论根据室内相对密度试验结果, 直接进行现场级配设计与优化的方法。

根据已有研究成果^[24], 满足严格分形分布的粗粒土, 其临界粒度分形维 D_c 对级配的最大粒径而言, 具有尺度无关性, 得到

$$P_{5c} = \left(\frac{5}{d_{\max}} \right)^{3-D_c} \cdot 100\% \quad (18)$$

对于本文砂砾料而言, 由 2.2 节中 (2) 可知 $D_c=2.578$ 。对于不同 d_{\max} , 根据式 (18) 算出 P_{5c} , 代入式 (15), 即可得到相应的极优压实性能级配的参数关系曲线, 其中分形分布即为最优级配。图 8 (a) 示出了 $d_{\max}=60, 200, 800$ mm 极优级配的参数关系曲线, 图 8 (b) 示出了 $d_{\max}=800$ mm 的极优级配, 其中最优压实性能级配即为严格分形分布级配。

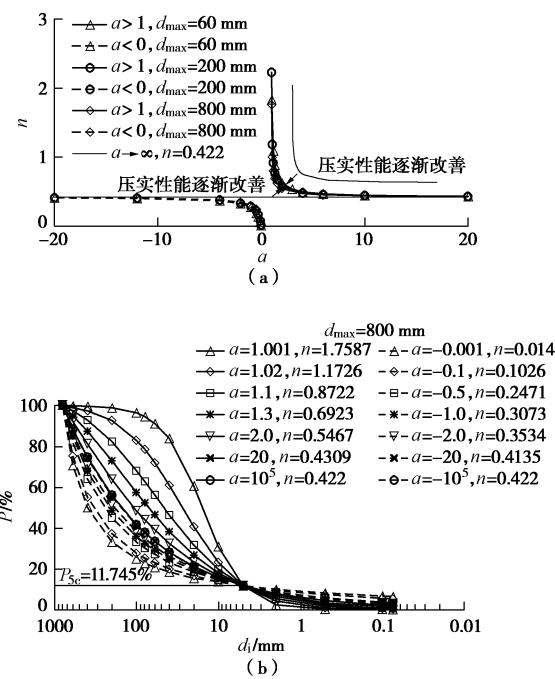


图 8 不同 d_{\max} 的极优级配参数与典型级配

Fig. 8 Excellent gradation parameters and typical gradations under different maximum particle sizes

3 结 论

(1) 提出了基于 MMF 模型的可包括粗粒土“S 型”、“上凸型”、分形分布的 2 参数统一级配方程及参数取值范围, 对描述高坝粗粒土的填筑级配, 具有很好的适用性。

(2) 对于不同粒径分布规律的粗粒土, 粒径小于 5 mm 颗粒含量等于 P_{5c} 对应的级配, 为极优压实性能级配; 当满足颗粒严格分形分布时, 则为最优压实性能级配, 可采用 C_r 指标描述其压实性能。

(3) 对于最大粒径 60 mm 的连续级配粗粒土而言, 室内试验的 P_{5c} 在 35% 附近。利用临界分形维的尺度无关性, 根据式(21)计算不同最大粒径下的临界 P_5 值, 即可得到较优压实性能的现场工程级配, 以及评价工程粗粒土的压实性能。

(4) 对于最大粒径和 P5 含量相同的连续级配粗粒土, 级配越接近分形分布, 压实性能越好, 颗粒结构越稳定, 越有利于减小坝体运行期变形。堆石料可结合现场爆破试验方案, 反滤料、垫层料等可结合破碎加工方案, 进行基于分形分布的适当级配优化。

参考文献:

- [1] FULLER W B, THOMPSON S E. The laws of proportioning concrete[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1906, 57(2): 67 - 143.
- [2] TALBOT A N, RICHART F E. The strength of concrete-its relation to the cement, aggregates and water[J]. Illinois Univ Eng Exp Sta Bulletin, 1923, 137: 1 - 118.
- [3] 曾 凡, 胡永平. 矿物加工颗粒学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995. (ZENG Fan, HU Yong-ping. Mineral processing granules[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1995. (in Chinese))
- [4] WEYMOUTH C A. Effect of particle interference in mortars and concrete[J]. Rock Products, 1933, 36(2): 26 - 30.
- [5] 陈忠达, 袁万杰, 郑东启. 级配理论应用研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2005, 24(4): 44 - 48. (CHEN Zhong-da, YUAN Wan-jie, ZHENG Dong-qi. Study on the application of grading theory[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(4): 44 - 48. (in Chinese))
- [6] 王立久, 刘慧. 矿料级配设计理论的研究现状与发展趋势[J]. 公路, 2008(1): 175 - 180. (WANG Li-jiu, LIU Hui. Current status and future trends of aggregate grading design theory[J]. Highway, 2008(1): 175 - 180. (in Chinese))
- [7] 朱俊高, 郭万里, 王元龙. 连续级配土的级配方程及其适用地性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10): 1931 - 1936. (ZHU Jun-gao, GUO Wan-li, WANG Yuan-long. Equation for soil gradation curve and its applicability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 108 - 115. (in Chinese))
- [8] McDOWELL G R, BOLTON M D, ROBERTSON D. The fractal crushing of granular materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1996, 44(12): 2079 - 2102.
- [9] TURCOTTE D L. Fractals and fragmentation[J]. Geophys Res, 1986, 91(B2): 1921 - 1926.
- [10] 张季如, 胡 泳, 张弼文. 石英砂砾破碎过程中粒径分布的分形行为研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 784 - 791. (ZHANG Ji-ru, HU Yong, ZHANG Bi-wen. Fractal behavior of practical-size distribution during particle crushing of quartz sand and gravel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 784 - 791. (in Chinese))
- [11] 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): 1151 - 1155. (ZHU Sheng, DENG Shi-de, NING Zhi-yuan, et al. Gradation design method of rockfill materials based on the fractal theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(6): 1151 - 1155. (in Chinese))
- [12] 朱 晟, 冯燕明, 冯树荣. 基于分形理论的爆破堆石料颗粒级配的优化方法: 中国, ZL201110125311.7[P]. 2011.12.14. (ZHU Sheng, FENG Yan-ming, FENG Shu-rong. Optimization method of particle size distribution of blasting rockfill based on fractal theory: China, ZL201110125311.7 [P]. 2011-12-14. (in Chinese))
- [13] DLT 5395—2007 碾压式土石坝设计规范[S]. 2007. (DLT 5395—2007 Design specification for rolled earth-rock fill dams[S]. 2007. (in Chinese))
- [14] DLT5016—2011 混凝土面板堆石坝设计规范[S]. 2011. (DLT 5016—2011 Design code for concrete face rockfill dams[S]. 2011. (in Chinese))
- [15] MENQ F Y. Dynamic properties of sandy and gravelly soils[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2003.
- [16] 李 罂, 刘映晶, 尹振宇, 等. 粒状材料临界状态的颗粒级配效应[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 452 - 457. (LI Gang, LIU Ying-jing, YIN Zhen-yu, et al. Grading effect on critical state behavior of granular materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 452 - 457. (in Chinese))
- [17] 杨 鸽, 朱 晟. 考虑堆石料空间变异性的土石坝地震反应随机有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1822

- 1832. (YANG Ge, ZHU Sheng. Seismic response of rockfill dams considering spatial variability of rockfill materials via random finite element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(10): 1822 - 1832. (in Chinese))
- [18] 朱 晟, 钟春欣, 郑希镭, 等. 堆石体的填筑标准与级配优化研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(1): 108 - 115. (ZHU Sheng, ZHONG Chun-xin, ZHENG Xi-lei. Filling standards and gradation optimization of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(1): 108 - 115. (in Chinese))
- [19] MORGAN P H, MERCER L P, FLODIN N W. General model for nutritional responses of higher organisms[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 1975, **72**(11): 4327 - 4331.
- [20] 王军保, 刘新荣, 李 鹏. MMF 模型在采空区地表沉降预测中的应用[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(3): 411 - 415. (WANG Jun-bao, LIU Xin-rong, LI Peng. Study on prediction of surface subsidence in mined-out region with the MMF model[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(3): 411 - 415. (in Chinese))
- [21] 张 莉, 苗连朋, 温仲明. 基于 MMF 模型估算植被与降雨变化对水沙的影响——以延河流域为例[J]. 自然资源学报, 2015, **30**(3): 446 - 458. (ZHANG Li, MIAO Lian-peng, WEN Zhong-ming. Estimating the effect of vegetation and precipitation on runoff and sediment using the MMF model: a case study in the Yanhe River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2015, **30**(3): 446 - 458. (in Chinese))
- [22] 刘 杰. 土的渗透稳定性与渗流控制[M]. 北京: 水利出版社, 1992. (LIU Jie. Seepage stability and seepage control of soil[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1992. (in Chinese))
- [23] DLT 5356—2006 水电水利工程粗粒土试验规程[S]. 2006. (DLT 5356—2006 Test code for coarse grained soil in hydropower and water conservancy projects[S]. 2006, (in Chinese))
- [24] 朱 晟, 王 京, 钟春欣, 等. 堆石料干密度缩尺效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(5): 1073 - 1080. (ZHU Sheng, WANG Jing, ZHONG Chun-xin, et al. Experimental study on scale effect of the dry density of rockfill material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2019, **38**(5): 1073 - 1080. (in Chinese))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先利用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

《岩土工程学报》编辑部