

Research on the Filling Index D_r and P_d of Overdiameter Coarse Grain Earth Dam Materials

Jie Gao

The Second Engineering Company of China Hydroelectric Construction Group 15th Engineering Bureau Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710016, China

Abstract

The determination of the maximum dry density of overdiameter coarse grain soil is the basis for the quality control of face rockfill dam filling. In fact, the dam material particle size is much larger than the maximum particle size allowed by the experimental protocol. The maximum dry density of the prototype level ingredients is determined by determining the minimum and maximum dry density of the model level ingredients.

Keywords

rockfill dam; relative density; maximum dry density; gravel content

超径粗粒土坝料填筑指标 D_r 与 P_d 的研究

高杰

中国水电建设集团十五工程局有限公司第二工程公司, 中国·陕西 西安 710016

摘要

超径粗粒土最大干密度的测定是进行面板堆石坝坝体填筑质量控制的依据。实际上坝料粒径远大于实验规程允许的最大粒径。通过测定模型级配料的最小、最大干密度, 原型级配料的最小干密度, 进而确定原型级配料的最大干密度。

关键词

堆石坝; 相对密度; 最大干密度; 砾石含量

1 引言

随着水利工程机械化程度越来越高, 高土石坝、堆石坝、面板堆石坝建设工期愈来愈短, 如何确定超径粗粒土最大干密度是迫切需要解决的问题。为此, 许多工程技术人员进行了大量研究, 有相似级配法, 剔除法, 等量替代法。论文介绍了用等量替代法确定超径粗粒土最大干密度的试验方法和试验成果, 具有操作性强、可靠性强等特点。

2 相关规范、规程

根据规范 SL228—2013《混凝土面板堆石坝设计规范》, 面板堆石坝各区坝料填筑标准的确定, 有如此规定: 面板堆石坝的垫层区、过渡区、主堆石区及下游的次堆石区石料填筑标准, 应根据坝的等级、高度、河谷形状、地震烈度及坝料特性等因素, 参考同类工程经验, 经综合分析论证后确定。各种石料填筑标准应同时规定孔隙率(或相对密度)和碾压参数。填筑标准应通过碾压试验复核和修正, 并确定相应的碾压施工参数(碾重、行车速率、铺料厚度、加水量、碾压

遍数)。坝料压实质量检查, 应采取碾压参数和干密度(孔隙率)等参数控制, 以控制碾压参数为主。

孔隙率指标主要是针对爆破岩石, 作为坝料的控制指标, 相对密度指标主要是指河床砂砾石作为坝料的控制指标, 这两个指标的区别就是: 根据孔隙率评定土体的密实程度没有考虑级配的影响, 同样密实程度, 当土体颗粒均匀时, 孔隙率较大, 而当颗粒大小级配好, 孔隙率就小。级配不同的土体, 即使孔隙率相同, 但它们改变密实状态的趋势不相同, 而 D_r 不仅能反映土体的密实程度, 而且能反映内在的颗粒级配^[1]。

根据 D_r 定义式, $D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$, $e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V}{V_s} - 1$, 即

$$1 + e = \frac{V}{V_s}$$

而 $\rho_d = \frac{m_s}{V}$, $v = \frac{m_s}{\rho_d}$, 则 $1 + e = \frac{m_s}{V_s} \cdot \frac{1}{\rho_d}$

$1 + e_{\max} = \frac{m_s}{v_s} \cdot \frac{1}{\rho_{d\min}}$, $1 + e_{\min} = \frac{m_s}{v_s} \cdot \frac{1}{\rho_{d\max}}$

所以: $D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{(1 + e_{\max}) - (1 + e)}{1 + e_{\max} - (1 + e_{\min})}$

$$= \frac{\frac{m_s}{v_s} \cdot \frac{1}{\rho_{d\min}} - \frac{m_s}{v_s} \cdot \frac{1}{\rho_d}}{\frac{m_s}{v_s} \cdot \frac{1}{\rho_{d\min}} - \frac{m_s}{v_s} \cdot \frac{1}{\rho_{d\max}}} = \frac{\rho_{d\max} \cdot \rho_d - \rho_{d\min}}{\rho_d \cdot \rho_{d\max} - \rho_{d\min}}$$

【作者简介】高杰(1966-), 男, 中国陕西泾阳人, 本科, 工程师, 从事水利工程质量管理研究。

ρ_d 、 ρ_{dmax} 、 ρ_{dmin} 三个参数中， ρ_d 、 ρ_{dmin} 较易得到，而 ρ_{dmax} 相对而言较难。所以， D_r 的确定实质上就是 ρ_{dmax} 的测定。

3 影响粗粒土密度的主要因素及内在规律

无粘性粗粒土属单粒结构土，是由大小不等，性质不一的颗粒靠自身重力作用而形成的散粒体，一般由粗颗粒形成骨架，细颗粒填充孔隙，级配越好，充填的越好，密度也就越高。所以，决定无粘性粗颗粒的密度，既有外在因素，又有内在因素。外在因素就是压实方法，压实参数及对土所做的压实功，内在因素是土的颗粒组成，包括粗粒含量、最大颗粒、颗粒级配、性质形状等。当然，主要决定于内在因素。

3.1 粗粒含量 P_5 (砾石含量) 对无粘性粗粒土密度的影响

无粘性粗粒土尽管料场不同、性质不同、最大粒径不同，但它们 $\rho_{dmax}-P_5$ 关系曲线与 $\rho_{dmin}-P_5$ 关系曲线相似，且都有明显的峰值(见图1)。

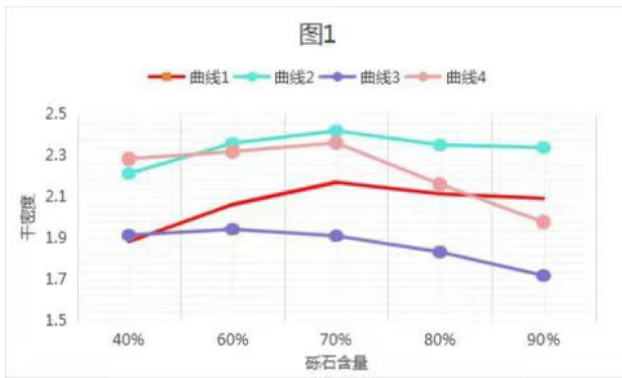


图1 $\rho_{dmax}-P_5$ 与 $\rho_{dmin}-P_5$ 图

在峰值点左侧，干密度随 P_5 (砾石含量)的增大而增大；而峰值点右侧，干密度随 P_5 (砾石含量)的减小而减小。这是因为：在峰值点左侧，细粒料占主要组成部分，粗粒料骨架之间的空隙已被细粒料充满且细粒料略有盈余，但粗粒料增多时，空隙也增多，当达到峰值点时，粗粒料之间的空隙正好被细粒料填充完，这时干密度最大。在峰值右边，粗粒料比例增大所形成的空隙也增大，这时细粒料比例小，不足以充满空隙，所以干密度就减小，随着粗粒料比例增加，其不能填充的空隙也增加，故干密度就减小。

3.2 最大粒径对干密度的影响

①同一料场，同一个 d_{max} 的粗粒土，不仅 $\rho_{dmax}-P_5$ 曲线与 $\rho_{dmin}-P_5$ 曲线相似，而且 $[P_5]$ 即最优砾石含量也近乎相等。

②同一料场，不同的 d_{max} 的粗粒土，各粗粒土的 $\rho_{dmax}-P_5$ 中的 $[P_5]$ 及 $\rho_{dmin}-P_5$ 中的 $[P_5]$ 值，由于 d_{max} 不同， $[P_5]$ 值也略有不同。

$d_{max}=40\text{mm}$ 时， $[P_5]=60\%$

$d_{max}=300\text{mm}$ 时， $[P_5]=70\%$

这是因为，当最大粒径增大时，粗粒料的上限增大，粗颗粒之间需要充填的空隙相应地也增大，无形中，粗细

颗粒之间地分界粒径($d=5\text{mm}$)也有所增大，这时若仍用 $d=5\text{mm}$ 作为划分粗细颗粒的粒径，对于 d_{max} 较大的粗粒土，它的 P_5 也相对大一点，在 $\rho_{dmax}-P_5$ 和 $\rho_{dmin}-P_5$ 中的 $[P_5]$ 也就相对大一点。

③同一料场，同一类型的粗粒土， ρ_d [ρ_{dmax} 、 ρ_{dmin}] 随着 d_{max} 不同而不同。

当 P_5 也相同时， $\rho_{dmax}-d_{max}$ 曲线与 $\rho_{dmin}-d_{max}$ 曲线相似，且不同的 d_{max} 所对应的 $\Delta\rho_d=\rho_{dmax}-\rho_{dmin}$ 接近。

其次，随着 d_{max} 的变大， $\Delta\rho_d$ 变小。

一般情况下，随着 d_{max} 的增大，只要 P_5 不变， ρ_d [ρ_{dmax} 、 ρ_{dmin}]也增大，但当 d_{max} 的增大，导致了 P_5 的增大，使得 $P_5>[P_5]$ ，这时， ρ_d [ρ_{dmax} 、 ρ_{dmin}]非但不增加，反而会减小。

3.3 无粘性粗粒土干密度的内在规律

从以上影响干密度的内在因素，不难得到最大干密度 ρ_{dmax} 、最小干密度有如下的函数关系：

$$\rho_{dmax}=\rho_{dmin}+\Delta\rho_d$$

$$\Delta\rho_d=\rho_{dmax}-\rho_{dmin}$$

ρ_{dmin} 为最小干密度，采用松填法可得到它，它反映了粗粒土自身的特性，包括颗粒大小、组成、性质，及粗细颗粒相互填充的效果。

$\Delta\rho_d$ 是密度增量，它反映了外力对粗粒土做功后，密度有增量。

而 ρ_{dmax} 是内因和外因作用共同效果。

4 实验室确定最大干密度的方法

4.1 试验用土样

根据土工试验规程SD128-87，试验室内只能做最大粒径为 $d_{max}=60\text{mm}$ 的粗粒土的相对密度试验，而上坝用料，最大粒径大多为 $d_{max}=400\text{mm}$ ，试验用料和上坝用料差异较大，如何解决这一矛盾，前人大多采用剔除法、等量代替法、相似级配法，对超径料进行处理，以满足实验用料要求，等量替代法在工程实践中应用较多。

等量替代法是按比例等量替换超径颗粒，替换后的砾石含量与替换前后砾石含量相等^[2]。

$$W_i = \frac{W_{\alpha}}{W_3 - W_{dmax}} \cdot W_3$$

W_i : 等量替代后的某粒径的质量分数。

W_{α} : 替代前某粒径质量分数。

W_3 : 为砾石含量(大于5mm粗粒质量分数)。

W_{dmax} : 为超径颗粒(超过实验最大粒径60mm)的质量分数。

4.2 试验用试样筒制作

①用钢板加工一个 $D=38.1\text{cm}$ ， $H=45.3\text{cm}$ ， $V=51620\text{cm}^3$ 的试样筒，及一个20kg重的铁盖，用来测定模拟级配料的最小、最大干密度。

②用钢板再加工一个 $D=120\text{cm}$ ， $H=77.8\text{cm}$ ， $V=0.879\text{m}^3$ 的试样筒，用来测定超径料(原级配料的最小干密度)。

4.3 试验方法

第一步：先测出模拟级配（即试验用料）的最小干密度 ρ'_{dmin} 和最大干密度 ρ'_{dmax} 。

最小干密度用松填法测得，最大干密度用振动台振动法测得。

第二步：用松填法测得原级配料（即超径上坝料）的最小干密度 ρ_{dmin} 。

4.4 试验数据处理

$$\begin{aligned} \rho_{dmax} &= \rho_{dmin} + \Delta\rho_d \\ &\approx \rho_{dmin} + (\rho'_{dmax} - \rho'_{dmin}) \end{aligned}$$

5 工程上用上述实验法进行试验的实例

以乌鲁瓦提工程为例，实验室用上述方法，先后对垫层料 ($d_{max} \leq 80\text{mm}$)，小区垫层料 ($d_{max} \leq 40\text{mm}$)，反滤料 ($d_{max} \leq 40\text{mm}$)，主堆石料 ($d_{max} \leq 400\text{mm}$) 进行了试验，试验结果如下：

①垫层料见表1。

表1 垫层料

P_5 (%)	40%	60%	70%	80%
ρ_{dmin}	1.889	1.941	1.908	1.825
ρ_{dmax}	2.203	2.298	2.269	2.111
$\Delta\rho_d$	0.314	0.357	0.361	0.286

②小区垫层料见表2。

表2 小区垫层料

P_5 (%)	20%	40%	60%	80%
ρ_{dmin}	1.720	1.759	1.776	1.661
ρ_{dmax}	2.068	2.152	2.202	1.982
$\Delta\rho_d$	0.348	0.393	0.426	0.321

③反滤料见表3、表4。

表3 ∇1864 高程以下反滤料

P_5 (%)	45%	65%	75%	85%	95%
ρ_{dmin}	1.922	1.963	1.885	1.797	1.680
ρ_{dmax}	2.249	2.263	2.194	2.001	1.904
$\Delta\rho_d$	0.327	0.300	0.309	0.204	0.224

表6 乌鲁瓦提大坝填筑质量检验统计表

项目	垫层小区	垫层	过度料	主堆石	次堆石	
检验次数	151	221	145	401	457	
干密度	均值 (g/cm^3)	2.17	2.27	2.35	2.34	2.33
	设计值 (g/cm^3)	2.15	2.25	2.25	2.25	2.23
	合格率 (%)	100	100	100	100	100
	离差系数	0.003	0.006	0.016	0.011	0.008
相对密度	均值	0.95	0.93	0.92	0.93	0.92
	设计值	0.9	0.85	0.85	0.85	0.80
	合格率	100	100	100	100	100
	离差系数	0.013	0.037	0.036	0.045	0.057
单元工程优良率 (%)		77	75	77	70	
质量等级		优良	优良	优良	优良	

表4 ∇1864 高程以上反滤料

P_5 (%)	40%	60%	70%	80%	90%
ρ_{dmin}	1.914	1.942	1.910	1.832	1.718
ρ_{dmax}	2.284	2.319	2.362	2.161	1.977
$\Delta\rho_d$	0.370	0.377	0.352	0.329	0.259

④主堆石料见表5。

表5 主堆石料

P_5 (%)	40%	60%	70%	80%	90%
ρ_{dmin}	1.882	2.067	2.130	2.114	2.092
ρ_{dmax}	2.213	2.360	2.420	2.352	2.339
$\Delta\rho_d$	0.331	0.293	0.290	0.238	0.247

有了上述试验成果，结合不同坝料现场碾压试验得到的干密度成果，对设计上提出的双指标（相对密度、干密度）进行了复核，选择合适的施工机械和碾压参数，筑坝施工。在现场质量控制中，现场质检人员依据相对密度、干密度指标对填筑的每一层坝料进行检验，严格控制干密度和相对密度^[3]。

6 上述试验成果和设计指标在工程上的具体运用

在现场质量检验中，现场质检人员根据试验干密度 ρ_d 及筛分得到的砾石含量 P_5 ，直接在 ρ_d - P_5 - D_r 三因素相

关图中，查得相对密度 D_r 。也可根据此式计算 $D_r = \frac{\rho_d - \rho_{dmin}}{\rho_{dmax} - \rho_{dmin}}$ 。

如现场检测得到 $\rho_d = 2.30$ ， $P_5 = 60\%$ 。

查 ρ_d - P_5 - D_r 三因素相关图， $P_5 = 60\%$ ， $\rho_d = 2.30$ ，得 $D_r = 0.81$ ，再用式子计算， $P_5 = 60\%$ 时， $\rho_{dmax} = 2.36$ ， $\rho_{dmin} = 2.06$ 。

$$D_r = \frac{\rho_d - \rho_{dmin}}{\rho_{dmax} - \rho_{dmin}} = \frac{2.30 - 2.067}{2.36 - 2.067} = 0.82$$

表6为乌鲁瓦提大坝填筑质量检验统计表。

7 结论

①决定无粘性粗粒土密度特性的因素，除了压实方法外，主要取决于自身的颗粒级配、形状、性质及大小颗粒相互填充效果。

②不同类型无粘性粗粒土，它的 $\rho_{dmax}-P_5$ 关系曲线与 $\rho_{dmin}-P_5$ 关系曲线相似，且都有明显的单峰点。

③同一料场，同一类型的无粘性粗粒土，当压实方法相同时，不仅 $\rho_{dmax}-P_5$ 与 $\rho_{dmin}-P_5$ 相似，而且， $\rho_{dmax}-d_{max}$ 和 $\rho_{dmin}-d_{max}$ 也相似，且各 $\Delta\rho_d = \rho_{dmax} - \rho_{dmin}$ ，随 d_{max} 的增大而基本接近。

④根据上述规律，最大干密度与最小干密度有下列关系：

$$\begin{aligned}\rho_{dmax} &= \rho_{dmin} + \Delta\rho_d \\ &= \rho_{dmin} + (\rho'_{dmax} - \rho'_{dmin})\end{aligned}$$

上述关系式中， ρ_{dmin} 是对原级配料的检测值， ρ'_{dmax} 、 ρ'_{dmin} 是对模拟料的检测值。

⑤该方法经过许多工程实践验证，证明是可行的、可靠的、科学的。

参考文献

- [1] 郭庆国.关于粗粒土应力应变特性及非线性参数的试验研究[J].水利学报,1983(11):44-50.
- [2] 何建新,刘亮,张敬东.超径粗粒土现场干密度确定方法[J].人民黄河,2012,34(2):121-122+125.
- [3] 朱晟,张露澄.连续分布超径粗粒土的级配缩尺方法与适用条件[J].岩石力学与工程学报,2019,38(9):1895-1904.