

反滤料级配设计的思考

孙君实, 相彪

(中国水电昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051)

摘 要: 反滤料的级配设计是土石坝设计的核心问题之一。反滤料设计除了要满足规范中滤土、排水、保护被保护土裂后自愈的要求外, 还应能适应较大剪切变形, 起到变形过渡的作用。将土料分为“骨架粗料”和“填充细料”两部分, 并用此模糊概念, 将《碾压式土石坝设计规范》的反滤料设计观念具体化: ①探讨了含有大于 5 mm 颗粒的防渗混合土的宏观概念, 指出其细粒组含量 $\eta_{0.075}$ 与大于 5 mm 颗粒的含量 P_5 是一对“因土而异”的特征值, 可沿用美国垦务局的反滤准则中对被保护基土的四个分类及各类的反滤关系, 但得到的反滤料的 D_{15} 应视为反滤料“填充细料”的 D_{15} ; ②从刘杰对渗透变形的分类研究中, 可引伸出反滤料的“骨架粗料”和“填充细料”的分界粒径 d_f 和“填充细料”的临界含量 η_f , 并将反滤料的设计依据归结为九项条件; ③通过实例, 详细地解说了反滤料的实用设计方法。

关键词: 土石坝; 反滤料; 级配设计; 骨架粗料; 填充细料

中图分类号: TU521

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)08-1153-06

作者简介: 孙君实(1942-), 男, 湖北黄梅人, 高级工程师, 主要从事水工设计方法的研究。E-mail: sjs42@126.com。

Thoughts on gradation design of filter materials

SUN Jun-shi, XIANG Biao

(HydroChina Kunming Engineering Corporation, Kunming 650051, China)

Abstract: The gradation design of filter materials is one of the key problems in design of earth rockfill dams. The design of the filter materials, besides meeting the standard requirements of soil filtering, water drainage and protecting the protected soil by self-healing after cracking, should adapt to large shear deformation and make the effect of deformation transition. The soil materials are divided into two parts, coarse skeleton materials and fine filling materials. Based on this fuzzy concept, the design idea of the filter materials in the design code for rolled earth-rock fill dams (SDJ218-84) in China is specified as follows: (1) The macroscopic concept of mixed impervious soil containing particles which exceed 5 mm in diameter is discussed. The content $\eta_{0.075}$ for fine particles and the content P_5 for particles exceeding 5 mm in diameter are a pair of eigenvalues and different for different soils. The four classifications of protected soils and their filter relationship in each classification in the filter criterion of US Bureau of Reclamation can still be used, but the particle size D_{15} should be that of the fine filling materials in filter soil instead; (2) From the classification of leakage deformation in Liujie's study, the demarcation particle size d_f between the coarse skeleton materials and the fine filling materials, and the critical content η_f for the fine filling materials are proposed. Furthermore, the design basis of filter materials is summarized to be nine conditions; (3) through an example, the practical design method for the filter materials is introduced.

Key words: earth rockfill dam; filter material; gradation design; coarse skeleton material; fine filling material

0 引言

反滤料的级配设计是土石坝设计的核心问题之一。设计反滤料的依据是防渗料, 因此, 反滤料设计首先要研究防渗料的特性, 若需掺料, 还应认真研究掺料后的特性, 然后才是反滤料自身的设计。

1 中国现行规范的反滤料设计观念

《碾压式土石坝设计规范》已明确提出: 用宽级

配被保护土的“细粒部分”来设计宽级配反滤料的“细粒部分”的设计观念。规范的 2001 版本 (SL274-2001) 和 2007 版本 (DL/T5395-2007) 采纳了美国垦务局的反滤设计准则^[1], 接受了美国垦务局强调反滤料级配均匀的观点。而美国垦务局的反滤准则是在 Sherard 等^[2-3]的反滤料设计准则的基础上, 对以往的试验研究

和实践经验总结。

规范对反滤层提出了滤土、排水、保护被保护土裂后自愈的要求,但未强调反滤层应具有适应较大剪切变形的能力。客观上,坝壳堆石体和心墙的变形模量常存在较大的差异,若其间的反滤层能承受较大的剪切变形,起到变形过渡的作用,无疑对保护防渗心墙的安全是有利的。当然还可以增设过渡层。

宽级配的反滤料当然比均匀级配的反滤料具有更好的适应剪切变形的能力。若增设的过渡层过于均匀,可能也难以起到“刚度”过渡的作用。事实上,反滤料未必一定要级配均匀。中国鲁布革水电站心墙坝的第一层反滤料的不均匀系数 C_u 达 12 以上,柴河心墙坝的第一层反滤料的不均匀系数 C_u 达 48^[4]。而在日本,反滤料的最大粒径达 100~200 mm 的工程实例并不在少数,通过 #200 筛 (0.075 mm) 的颗粒含量 $\eta_{0.075} > 5\%$ 的工程也不止一个。它们的不均匀系数 C_u 当然远大于 5。

如何设计宽级配的反滤料正是本文探索的目的。

2 反滤料设计的理念和设计条件

2.1 设计的理念

不论是黏性土,还是非黏性土,只要土颗粒相互挤紧,即被“压实”,就只能发生流土而不是管涌。发生流土,土料的结构首先要被破坏,其临界条件取决于土体的应力状态和破坏条件,而不单纯是渗透力的作用。

Sherard 等^[2-3]以及刘杰等^[4-5]的试验研究成果证实,可以对防渗料采用“开裂—自愈”假设:防渗料由于某种原因产生了裂缝,依靠反滤层的保护,裂缝会重新闭合或淤填并通过渗透固结而愈合。从而,回避了土体结构破坏条件的难题,允许用渗流通道的直径以及通道中流动颗粒直径的概念来设计反滤料的级配。

将土分为“骨架粗料”和“填充细料”两部分。“骨架粗料”是土体的承载骨架,不存在单纯渗透力作用下的渗透变形稳定问题。渗透变形稳定问题只对“填充细料”提出。用反滤料的“填充细料”来保护被保护土的“填充细料”是反滤料设计的本质。

“填充细料”刚好填满“骨架粗料”的孔隙,并与其共同发挥承载和防渗作用的临界含量 η_f 以及它们的分界粒径 d_f 是设计的核心概念。

以下将用 P_d 表示粒径 $> d$ 的含量, η_d 表示粒径 $< d$ 的含量, d_η 表示小于粒径 d 的含量为 η 对应的粒径。

2.2 土的统一分类体系揭示的各粒组的临界含量

为讨论方便,限定巨粒组的含量 $< 15\%$,可以不

考虑,并且只讨论无机土。

土的统一分类体系(中国“土的工程分类标准”GB/T5014-2007、美国垦务局的统一分类体系等)认为:土的工程特性取决于土的级配和各个特征粒组的含量,对于粒径小于 0.075 mm 的细粒土,其特性还取决于塑性指数 I_p 和液限 w_L 。

设计者关心的问题是:对土的工程性质有影响的各类颗粒的临界含量以及大于 5 mm 的颗粒含量的可能范围。

“统一分类体系”揭示的各粒组的临界含量如下:
①对粗粒土,当细粒组的含量 $\eta_{0.075}$ 从小于 5% 增加到不小于 15% 时,其对粗粒土的性能,从无影响变化到有实质性影响。此过渡范围的细粒组含量的代表值可取为 10% 或 12%。
②若砂粒的含量 $< 15\%$,对各类土的工程特性不产生影响。
③在砂类土中,若砾粒的含量 $< 15\%$,对土的工程特性不产生影响。
④对细粒土,粗粒组含量 $P_{0.075}$ 不大于 25% 时,其对细粒土的特性不会产生实质性的影响。美国垦务局的分类体系认为 $P_{0.075} < 15\%$ 时,粗粒组不对细粒土的特性产生影响。

研究含砾细粒土(FG)。其细粒组的最大含量 $\eta_{0.074}$ 为 50%,砾粒的最少含量 $P_2 = 25\%$,可以认为对土的特性有影响的大于 5 mm 的颗粒的最小含量约为 $P_5 = 20\% \sim 25\%$ 。

研究黏土质砾(GC)。其细粒组的临界含量 $\eta_{0.074} = 15\%$,如果不含砂,该防渗料的级配将呈缺级配的椅子形,颗粒间的传力将极不均匀,这是人们所不希望的。取砂的临界含量为 15%,则大于 5 mm 的颗粒最大含量 P_5 约为 70%。

由此引伸出含有大于 5 mm 颗粒的混合土料的宏观概念:①细粒组含量 $\eta_{0.075} > 10\% \sim 15\%$;②工程上习惯用大于 5 mm 的颗粒作为粗料控制粒径,其含量 P_5 的范围大约从 20%~25% 到 70%。

上述之 $\eta_{0.075}$, P_5 的临界含量只是反映宏观概念的代表值,应允许有波动。

2.3 反滤料的设计条件 1

设计条件:防渗料的 $\eta_{0.075}$ 与 P_5 的临界含量是一对相关的特征值。

必须指出:土的统一分类体系,并不是专为防渗料设计的,它并没有考虑防渗对土的要求。虽然,统一分类体系命名曲率系数 C_c 等于 1~3 的土为良好级配。但这并不能反映防渗料最重要的概念:细料必须填满粗料的孔隙。

在工程上,防渗料的“骨架粗料”和“填充细料”的分界粒径 d_f 有两种说法:①日本取 25 mm 为分界粒径,用粒径小于 25 mm 的被保护料来设计反滤层^[6];②美国垦务局的反滤准则,用 #4 筛的孔径 4.75 mm 作

为分界粒径。

中国现行规范沿用美国垦务局的反滤准则, 用 5 mm 作为防渗料的“骨架粗料”和“填充细料”的分界粒径。对于级配不连续的土, 级配曲线存在缺级配的平缓段, 呈椅子形, 缺少的粒径常为 1~5 mm。“骨架粗料”和“填充细料”的分界粒径 d_f 可取缺级配的平缓段的最小粒径或最大和最小粒径的平均值。

刚好填满骨架孔隙的“填充细料”的临界含量 η_f 应和土料的如下特征相关联: ①干密度达到最大值; ②渗透系数 K 达到最小值; ③填充细料刚好填满骨架粗料的孔隙, 土料颗粒相互挤紧, 只能发生流土。

已有研究表明^[7-8]: 当大于 5 mm 的颗粒含量 P_5 值不大时, 最大干密度随 P_5 的增大而增加; 当 P_5 大于某一临界含量(P_5)_f 时, 由于填充细料不能填满骨架粗料的孔隙, 也不能充分压实, 最大干密度将会随之降低, 渗透系数也将加大, 抵抗渗透变形的能力也将降低。换言之, 此时只有增大填充细料的含量才能满足填满骨架粗料孔隙的要求。

日本的大白川坝^[6], 细粒组含量 $\eta_{0.075}$ 的代表值约为 11%, 当大于 4.8 mm 颗粒的含量 $P_{4.8}$ 不超过 60% 时, 最小渗透系数几乎不变。而日本的枚尾坝^[6], 细粒组含量 $\eta_{0.075}$ 的代表值约为 13%, 当 $P_{4.8}$ 超过 40% 时, 渗透系数急骤加大, 这两座坝的最大粒径为 150 mm。

对于一个具体工程而言, 无需刻意去寻求临界含量(P_5)_f 的范围, 能满足防渗要求的 $\eta_{0.075}$ 和 P_5 便是一对好指标。已有工程的大体概念是: 在日本, 最大粒径达 150~200 mm 居多, 其对应的细粒组含量 $\eta_{0.075}$ 大多在 10%~20% 范围内, $P_{4.8}$ 的范围为 25%~70%; 在欧美, 最大粒径不超过 75 mm 居多, 其对应的细粒组含量 $\eta_{0.075}$ 大于 20%。

因此, 对于防渗混合土, 必须在前述含有大于 5 mm 颗粒的混合土料的宏观概念的基础上, 添加如下补充概念:

(1) 细料填满粗料孔隙。细粒组含量 $\eta_{0.075}$ 与大于 5 mm 颗粒的含量 P_5 的范围是一对“因土而异”的特征值。土的级配曲线在累计级配曲线图上的位置不同, 其“骨架粗料”的孔隙体积也不同, 填满该孔隙所需“填充细料”的含量当然也不同。

(2) 细粒组中黏粒含量应大于 5%。若防渗料的细粒组是不含黏粒或少黏粒的粉土类, 那么, 这种土是不能用作防渗料的。因为, 美国垦务局的反滤准则, 实际上是默认了“黏粒包围粉粒形成团粒, 使渗流通道中实际流动的颗粒变大”的机制。团粒的大小当然和土的种类有关, 即反滤料的通道 D_{15} 的界限值和被保护土的种类有关。反滤层并不能保护被保护土的全

部细颗粒不流失。虽然, 已有通过加大压实功能, 迫使土颗粒破碎以增加细粒组和黏粒含量的工程实例, 但这远不如直接在土料中掺加黏土类土料更为可靠。

归根结底, 根据工程的实际条件, 可以通过两种土料掺合的办法, 来解决单一土料缺少细粒、黏粒, 或缺少砾、砂, 或缺级配等问题, 从而设计出较为理想的反滤料。

综上所述, 反滤料的设计条件 1: 用 5 mm 作为防渗料的“骨架粗料”和“填充细料”的分界粒径; 沿用美国垦务局的反滤准则对被保护基土的 4 个分类及各类的反滤关系, 但得到的反滤料的 D_{15} 应视为反滤料的“填充细料”的 D_{15} 。

2.4 反滤料的设计条件 2

设计条件: 反滤料的“填充细料”填满“骨架粗料”孔隙的临界条件。

刘杰^[4-5]建议用几何平均粒径来确定粗料和细料的分界粒径,

$$d_f = \sqrt{d_{70}d_{10}} \quad (1)$$

用细料含量 η_c 来判别渗透变形的类型: $\eta_c < 25\%$ 为管涌型; $\eta_c > 35\%$ 为流土型; $\eta_c = 25\% \sim 35\%$ 为过渡型。

沿用刘杰的建议, 可以认为反滤料的“填充细料”的临界含量 $\eta_f = 25\% \sim 35\%$ 。

它本身就是一种模糊概念, 应有一个界限范围, 可取 30% 作为它的代表值, 对应之分界粒径 d_f 也应有一个粒径范围, 可用式 (1) 计算它的代表值。

2.5 反滤料的设计条件 3~5

设计条件 3: 鉴于对反滤料临界状态的试验研究都是建立在均匀级配基础上的, 因此, 反滤料的“骨架粗料”和“填充细料”都应满足不均匀系数 C_u 不大于 5 的要求。

设计条件 4: 为保证反滤料的半透水性, 鉴于细粒组的含量 $\eta_{0.075} < 5\%$ 将对粗粒土的性能不产生影响, 可对反滤料的级配提出 $\eta_{0.075} < 5\%$ 、塑性指数 $I_p = 0$ 的原则要求。若反滤料的细粒组中不含有黏粒, 那么也可突破这一要求。

设计条件 5: 将反滤料的“骨架粗料”的级配曲线和“填充细料”的级配曲线合成为反滤料的全料的级配曲线时, 要求全料的级配曲线连续, 且大体上光滑, 满足良好级配曲线的曲率系数 $C_c = 1 \sim 3$ 的要求。

$$C_c = d_{30}^2 / (d_{10}d_{60}) \quad (2)$$

这样得到的全料级配曲线的不均匀系数 C_u 可大可小。

众所周知: 将土颗粒理想化为等直径球体, 并按立方体排列时, 孔隙率 $n = 0.476$, 若其孔隙被次一级球体填充时, $n = 0.125$, 若对孔隙逐级填充, 可达最密

状态时, $n=0.1^{[9]}$, 即宽级配土的孔隙率的可能变化范围比均匀级配土宽得多。在标准击实试验中, 若对均匀级配的反滤料提出过低的孔隙率的要求, 试验将不能达到孔隙率的标准。常规三轴压缩试验表明: 均匀级配反滤料的模量常接近坝壳堆石料的模量, 远高于防渗料的模量, 在相同的荷载增量作用下, 宽级配反滤料可提供更大的剪切变形, 而均匀级配反滤料可资用的变形空间将远低于宽级配反滤料。

2.6 反滤料的设计条件 6~8

通常认为: 若相邻土层的渗透系数相差不小于 100 倍, 则其中一土层相对于另一土层是不透水的。若相邻土层的渗透系数相差不足 25 倍, 那么, 它们可视为同一透水性的土层。

由土料的渗透系数 K 与 D_{15} 的平方关系估算式^[2]

$$K = (0.2 \sim 0.6) D_{15}^2, \quad (3)$$

式中, 渗透系数 K 的单位为 cm/s , 平均值为 $0.35 D_{15}^2$ 。

可以得到:

设计条件 6: 同一透水性的相邻土层的 D_{15} 与 d_{15} 之间的关系 $D_{15}/d_{15} < 5$ 。

设计条件 7: 不同透水性的相邻土层的 D_{15} 与 d_{15} 之间的关系 $D_{15}/d_{15} > 5$ 。

设计条件 8: 相对不透水的土层的 D_{15} 与 d_{15} 之间的关系 $D_{15}/d_{15} > 10$ 。

对于宽级配的土, 其渗透性是由“填充细料”决定的, 只要取“填充细料”的 d_{15} 估算渗透系数 K 即可。

由此可见, 坝壳料和心墙料的渗透系数比值应大于 100 倍, 对心墙料渗透系数 $K < 10^{-5} \text{cm/s}$ 的要求, 应是一个量阶的概念。同样, 反滤料和心墙料以及坝壳料和反滤料的渗透系数比值应大于 25 倍。

2.7 反滤料的设计条件 9

自滤能力是指土的“骨架粗料”对自身的“填充细料”起反滤作用。即土的“骨架粗料”的 D_{15} 与自身的“填充细料”的 d_{85} 的比值满足反滤准则。

只有当土的“填充细料”的含量 η_c 不小于临界含量 η_f 并且自身的“骨架粗料”对“填充细料”有自滤能力, 才能认为该土的内部颗粒结构是稳定的。

设计条件 9: 反滤料的“骨架粗料”的 D_{15} 应不大于“填充细料”的 d_{85} 的 4 倍, 以保证其内部的颗粒结构是稳定的。

3 算 例

3.1 解的特点

设计反滤料, 是寻求不等式条件下反滤料级配曲线的解, 此解不唯一。可预设初值, 通过调整级配曲线来求解。当反滤料的最大、最小粒径选定之后, 求

得的级配曲线的解, 位置相近, 可视为在同一条带内。

3.2 算例

以下将用 Excel 2003 介绍反滤料设计的步骤。设计条件: 人工加工反滤料, 取第一层反滤料的最大粒径为 40 mm, 第二层反滤料的最大粒径为 60 mm。

(1) 对取得的防渗料的级配曲线进行分析

从料源取得的防渗料, 剔除大于 100 mm 的颗粒后, 最大粒径 100 mm, 大于 5 mm 的颗粒含量 $P_5=50.63\% \sim 73.46\%$, 小于 0.074 mm 的颗粒含量 $\eta_{0.074}=9.97\% \sim 20.97\%$, 黏土颗粒含量 $\eta_{0.005}=6.17\% \sim 14.26\%$, 级配曲线大体上光滑连续, 如图 1 所示。压实后, 细料应可填满粗料孔隙。

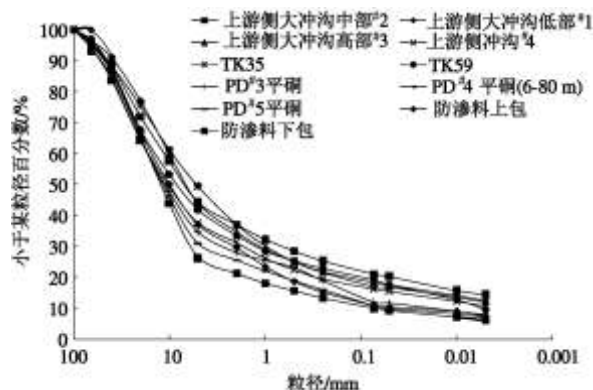


图 1 防渗料的级配曲线

Fig. 1 Grading curves of impervious materials

在“填充细料”中, 小于 0.074 mm 的颗粒含量 $\eta_{0.074}=29.05\% \sim 47.56\%$, 黏土颗粒含量 $\eta_{0.005}=19.78\% \sim 32.33\%$, 属黏土质砾, 如图 2 所示。其粗料的 D_{15} 小于细料 d_{85} 的 4 倍。按照土料的渗透性取决于“填充细料”的概念, 可以认为该防渗料应能满足防渗要求, 且具有良好的抗渗透变形能力。

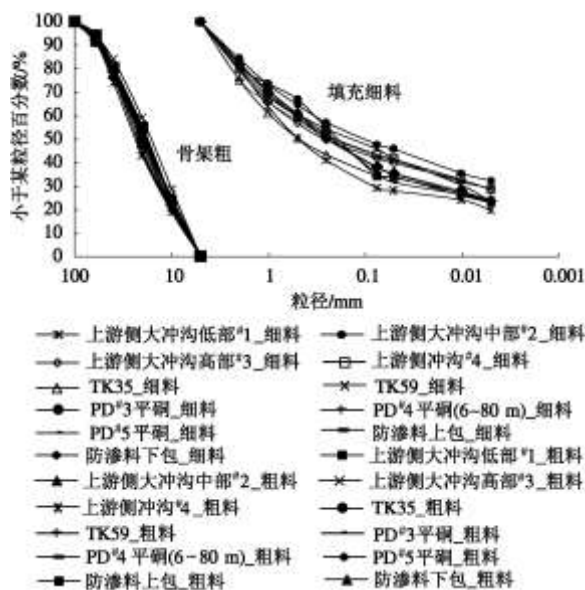


图 2 “骨架粗料”和“填充细料”的级配曲线

Fig. 2 Grading curves of coarse skeleton materials and fine filling materials

按规程, 该防渗料的“填充细料”属二、三类基土, 按二类基土控制, 要求的第一层反滤料的“填充细料”的 $d_{15} \leq 0.7 \text{ mm}$ 。

拟定允许的来料上、下包线。可先设定各点的 η_d 值, 再拖动图上各点的位置, 以获得满意的来料上、下包线。

(2) 初定第一层反滤料的下包线“填充细料”级配

已知 $\eta_{0.7}=15\%$, 估计“骨架粗料”和“填充细料”的分界粒径 d_f 值, 取 $d_{100}=d_f$ 。选取 $d_{10} (<0.7)$ 值, 按不均匀系数 $C_u=5$, 确定 d_{60} 值, 然后, 初选 d_{85} 值以及其它各点的 η_d 值。这样画出的下包线通常是不光滑的。在图上拖动各初估值点, 使下包线变得光滑, 并且满足不均匀系数 $C_u \leq 5$ 的要求。

(3) 初定第一层反滤料的下包线“骨架粗料”级配

已知设计选定的 d_{100} , 取分界粒径 d_f 值 (即下包线的“填充细料”的 d_{100}) 为下包线“骨架粗料”的 D_0 , 按照内部颗粒结构稳定要求, 取“骨架粗料”的 D_{15} 等于“填充细料” d_{85} 的 4 倍, 然后, 初选各 D 值点的 η_D 值。在图上拖动各初估值点, 使下包线变得光滑。

用半对数曲线的线性内插公式,

$$d = d_1 \cdot \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{\frac{\eta - \eta_1}{\eta_2 - \eta_1}} \quad (4)$$

由相邻两点 (d_1, η_1) 、 (d_2, η_2) 内插 η ($\eta_1 \leq \eta \leq \eta_2$) 对应的 d 值, 求得 d_{10} , d_{15} , d_{60} , 并且要求不均匀系数 $C_u \leq 5$ 。若不满足此要求, 则拖动图上各点的位置, 使其满足。

(4) 合成第一层反滤料的下包线级配

将下包线的“填充细料”级配曲线和“骨架粗料”级配曲线的点集成下包线选定点的 d_η 点集。对初定下包线的“填充细料”级配曲线, 补充“骨架粗料”级配曲线的点集对应各点的 η_d 值为 100, 而对初定下包线的“骨架粗料”级配曲线, 补充“填充细料”级配曲线的点集对应各点的 η_d 值为 0。

将下包线的“骨架粗料”的级配曲线 (d_ζ, ζ_d) 和“填充细料”的级配曲线 (d_ζ, ζ_d) :

$$\eta_d = (1 - \eta_\zeta) \zeta_d + \eta_\zeta \zeta_d \quad (5)$$

合成为反滤料的全料的级配曲线 (d_η, η_d) , 此时, 曲线通常并不光滑。在图上拖动“填充细料”及“骨架粗料”级配曲线的点, 使该曲线变得光滑, 如图 3 所示。

用内插算式 (5) 求得全料级配曲线的 d_{10} , d_{15} , d_{30} , d_{60} , d_{70} , C_u , C_c 诸值。

用式 (1) 求“骨架粗料”和“填充细料”的分界

粒径 d_f , 并将该值绑定到 Excel 表的细料级配曲线的 d_{100} 项和粗料级配曲线的 d_0 项上。若求得的分界粒径 d_f 值和原设定值不同, 那么, 图上的曲线将重新变得不光滑。重新在图上拖动“填充细料”和“骨架粗料”级配曲线的相关点, 使曲线变得光滑。

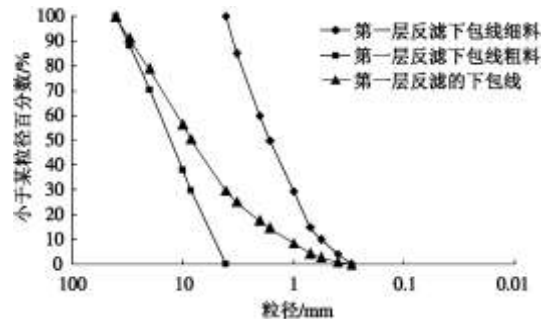


图 3 第一层反滤料的下包线级配曲线

Fig. 3 Lower envelopes of the grading curves for first layer filter materials

检查反滤料的设计条件是否得到满足, 若曲率系数 C_c 值等于 1~3 的要求或其它诸条件不满足, 则需在图上重新拖动“填充细料”及“骨架粗料”级配曲线的相关点, 使诸条件得到满足。

(5) 第一层反滤料的上包线级配

第一层反滤料的上、下包线, 勾划了同一土层的上、下界线。因此, 上包线的“填充细料”级配曲线的 d_{15} 可取为下包线“填充细料”的 $d_{15}/5$, 初估上包线的分界粒径 d_f , 即为上包线的“填充细料”级配曲线的 d_{100} , 余者均同下包线的做法, 同时需复核是否满足设计条件 4。

(6) 第二层反滤料的级配

第二层反滤料与第一层反滤料是不同土层, 因此, 第二层反滤料下包线的“填充细料”级配曲线的 d_{15} 的初估值应大于第一层反滤料下包线“填充细料”级配曲线的 $5d_{15}$, 且小于第一层反滤料下包线“填充细料”级配曲线的 $4d_{85}$, 余者均同第一层反滤料的做法。

(7) 反滤料级配的最终确定

设计者出于各方面的综合考虑, 可以对已完成的反滤料的设计级配进行修正。修正首先对第一层反滤料的下包线进行, 在第一层反滤料的下包线上部拟定一条新的下包线 (反滤 1 下包), 如本例中, 首先选定反滤 1 下包的 $d_{15}=1 \text{ mm}$, 它相当于其“填充细料”级配曲线的 $d_{15} \leq 0.5 \text{ mm}$ 。对修正后的级配曲线 ($d_f=3.1 \text{ mm}$, $\eta_f=31.8\%$), 同样应检查前述设计条件是否能得到满足。修正了第一层反滤料的下包线的级配曲线后, 其它各个级配曲线也必须遵循前述设计方法做出调整, 修正成果见图 4。

坝壳料与相接的反滤料间当然要满足反滤准则。如果坝壳料中小于 5 mm 含量 $\eta_5 < 15\%$, 则可以按全料计算坝壳料的 D_{15} 。

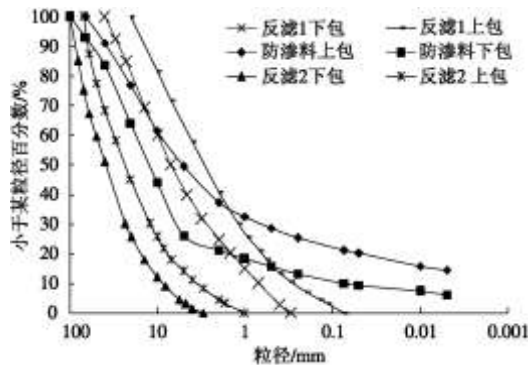


图 4 反滤料的级配曲线

Fig. 4 Grading curves of filter materials

完成的反滤料设计级配, 只有通过试验验证, 才能最终确定。

4 结 语

运用本文的设计理念和设计方法, 反滤料的最大粒径和不均匀系数 C_u 可大可小, 更易于根据工程的实际条件, 设计出较满意的反滤料级配。

参考文献:

- [1] 水利部科技教育司, 水利水电规划设计总院. 国外水利水电标准文献译文[8]: “填筑坝-第二章填筑坝设计”[S]. 1994. (Science and Technology Education Department Of Water Resources Ministry, Planning and design institute of water conservancy and hydropower. The literature translation of foreign water conservancy and hydropower standards[8]: “Embankment dams-Chapter 2 embankment design”[S]. 1994. (in Chinese))
- [2] SHERARD J L, DUNNIGAN L P, TALBOT J R. Basic properties of sand and gravel filters[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1984, **110**(6): 684 - 700.
- [3] SHERARD J L, DUNNIGAN L P, TALBOT J R. Filters for silts and clays[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1984, **110**(6): 701 - 718.
- [4] 刘 杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1992. (LIU Jie. Leakage stability and seepage control of soil[M]. Beijing: China Water Power Press, 1992. (in Chinese))
- [5] 刘 杰. 土石坝渗流控制理论基础, 工程经验教训[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (LIU Jie. Theoretical basis of seepage control of earth-rock dams, engineering experience and lessons[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))
- [6] 日本电力土木技术协会. 最新土石坝工程学(修订版)[M]. 陈慧远, 等译. 北京: 水利电力出版社, 1986. (Technical Association of Electric Power and Civil Engineering of Japan. The latest earth rockfill dam engineering (revised edition)[M]. CHEN Hui-yuan, et al trans. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1986. (in Chinese))
- [7] 屈智炯, 何昌荣, 刘双光, 等. 新型石渣坝: 粗粒土筑坝的理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (QU Zhi-jiong, HE Chang-rong, LIU Shuang-guang, et al. A new-style rock ballast dam: the theory and application of dam construction for coarse grained soil[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002. (in Chinese))
- [8] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998. (GUO Qing-guo. The engineering properties and application of coarse grained soil[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 1998. (in Chinese))
- [9] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (MAO Chang-xi. Seepage calculation analysis and seepage control[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))