

垫层渗透系数的计算和细粒含量的合理取值

楚金旺, 朱 晟

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 基于室内渗透实验成果, 讨论了面板坝垫层料的级配、渗透系数、压缩模量和强度对垫层稳定的影响, 推导了计算渗透系数的经验公式, 建议了垫层细粒含量合理范围, 并通过实例分析验证了所阐述结论的合理性。

关键词 垫层; 渗透系数; 孔隙率; 细粒含量

中图分类号: TV641.4+3

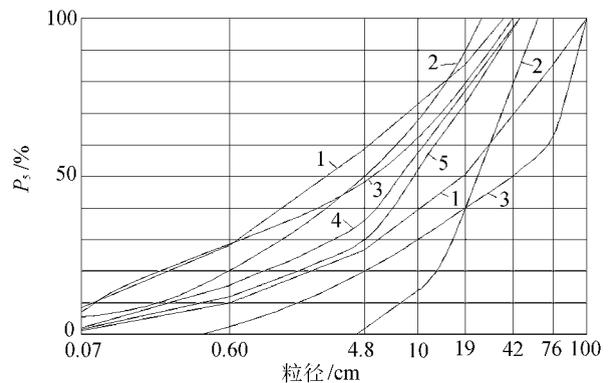
文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2005)S1-0034-03

混凝土面板堆石坝以其在安全可靠、经济性和适应性三个方面的明显优势成为当今世界上主要坝型之一, 我国在建大坝中有一半以上为混凝土面板堆石坝。坝体的大量变形和混凝土面板及垫层的防水性能是影响大坝安全运行的关键因素。垫层是混凝土面板堆石坝中最重要的部位之一, 它既是防渗面板的可靠基础, 又是坝体防渗的第二道防线。垫层的设计一直为坝工所重视, 设计思想的演变过程大体分为均匀垫层、级配垫层和半透水质配垫层三个阶段^[1]。半透水质配垫层应具有内部渗透和渗流稳定性、低压缩性和高抗剪强度等特性。垫层中细粒含量过多, 会降低垫层的压缩模量, 易于产生不均匀变形, 同时会减小抗剪强度, 影响上游坝坡的稳定; 过少就会增大垫层的渗透系数, 影响渗透稳定。目前, 常用细粒含量(即小于 5 mm 颗粒的含量, 文中用 P_5 表示)作为控制标准。

1 垫层料的级配

级配良好的垫层料, 其细粒能填满粗料的孔隙, 可压实到很高的密度, 具有较高的变形模量, 对面板起很好的支承作用。不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 是评价垫层级配好坏的重要指标, 一般认为, 当 $C_u \geq 5$, $C_c = 1 \sim 3$ 时, 垫层的级配是良好的。国内已建混凝土面板堆石坝中, 多数 $C_u > 20$, 最大粒径 80 mm, $P_5 = 25 \sim 45\%$, $P_{0.1} \approx 5\%$ 。实践证明它们的级配都是良好的。刘杰^[2]根据中国水利水电科学研究院和国家电力公司昆明勘测设计研究院的渗透试验得出了垫层料的最佳粒径级配范围(见图 1)。



1—刘杰得出的垫层料最佳粒径级配范围; 2—Mackintosh 坝垫层料粒径级配范围; 3—阿里亚河口坝垫层料粒径级配范围; 4—本文试验垫层料 $P_5 = 35\%$ 粒径级配曲线; 5—本文试验垫层料 $P_5 = 30\%$ 粒径级配曲线

图 1 垫层料的级配曲线

2 渗透系数计算与渗透破坏准则

垫层自身应有足够的抗渗强度, 其抗渗比降应能满足所承受工作水头作用下渗流稳定性的要求, 垫层必须具有半透水性, 当面板和止水系统一旦失效时, 可以起到限制进入坝体渗流量的作用, 降低垫层以及坝体内的水位, 改善坝体的稳定性。当垫层料的渗透系数为 10^{-3} cm/s 时, 它对防渗料便可以起到一定的反滤作用。运行期产生漏水的情况下, 可抛土让渗流把细粒土带入缝中, 堵塞渗流通道而起自愈作用。

2.1 渗透系数的计算公式

垫层的渗透系数主要由孔隙率 n 、不均匀系数 C_u 、粒径的大小和分布情况等因素来决定。根据渗流试验(垫层料 P_5 为 35% 和 30% 粒径级配曲线如图 1 所示, 并将刘杰得出的垫层料最佳粒径级配范

围、Mackintosh 坝垫层料粒径级配范围、阿里亚河口坝垫层料粒径级配范围绘在图 1 中,这两条级配曲线在它们的范围之内,结果,以 $-\ln(1.8n)$ 为坐标轴横轴, $-\ln k$ 为纵轴作渗透系数 k 与孔隙率 n 之间的关系曲线,如图 2 所示.由图中可见,所得曲线呈线性变化,且不同细粒含量的关系曲线相互平行,由此推出 k 与 n 的 5 次方成线性关系.即:

$$k = an^5 + b \quad (1)$$

式中: a 为斜率,是个常数; b 为截距,随细粒含量 P_5 而变化.

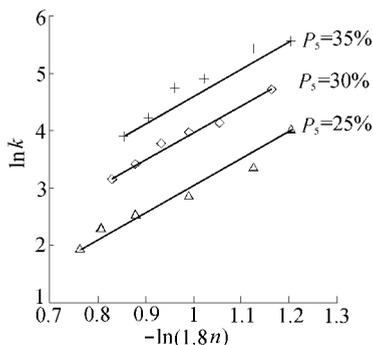


图 2 渗透系数 k 与孔隙率 n 的关系曲线

再以 $1/\exp(P_5^{0.5})$ 为坐标轴横轴,渗透系数 k 为纵轴作渗透系数与细粒含量之间的关系曲线,如图 3 所示.可得到渗透系数 k 与 $P_5^{0.5}$ 的关系:

$$k = \frac{d}{e^{10P_5^{0.5}}} \quad (2)$$

式中: d 为参数.李普斯^[3]曾推出渗透系数 k 与不均匀系数 C_u 成正比.因此有:

$$k = \frac{AC_u n^5}{e^{10P_5^{0.5}}} \quad (3)$$

式中: A 为系数,可取 100,由于 C_u , n 和 P_5 都是无量纲量,定义 A 的单位为 cm/s .由公式(3)不难看出孔隙率 n 对渗透系数 k 影响最大,最大限度的压实垫层料,减小孔隙率,将会大大降低渗透系数,在设计和施工时尤其要重视这个问题.细粒含量 P_5 对

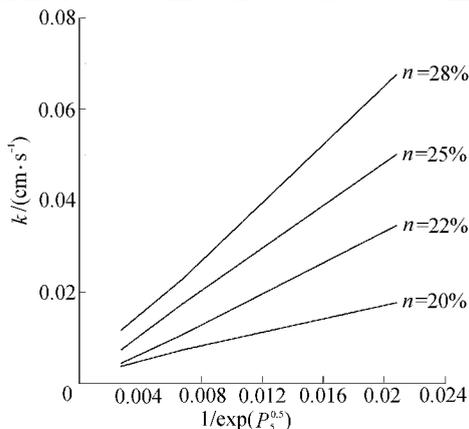


图 3 渗透系数 k 与细粒含量 P_5 的关系曲线

渗透系数影响为其次,但也是不可忽视的重要因素.

渗透系数 k 与水的运动黏滞性系数成反比,运动黏滞性系数大,渗透系数小,运动黏滞性系数小,则渗透系数大^[4].运动黏滞性系数的大小又与温度有关,温度高,运动黏滞性系数小,相反,温度低,运动黏滞性系数大.公式(3)是在常温状态下得出来的,如果实际温度与之相差较大,要进行修正:

$$k_t = k \frac{\nu_t}{\nu_0} \quad (4)$$

式中: ν_t 为实际温度下的运动黏滞性系数; ν_0 为常温状态下的运动黏滞性系数; k_t 为实际温度下的渗透系数.

2.2 P_5 的取值

Sherard 提出了较高的细粒含量 P_5 (35% ~ 55%) 是以 0.2 ~ 0.25 m 厚的超薄面板和简单的接缝止水为前提条件的,而我国面板厚度均在 0.5 m 以上,且设有较好的接缝止水.由渗透系数的计算公式可以得到细粒含量 P_5 的取值范围:当要求 $k \leq 1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 时, $P_5 = 25\% \sim 40\%$.值得注意的是:当 P_5 由 20% 减少到 15% 时, k 增大速度有一个很大的变化,如图 4 所示.当 $P_5 < 15\%$ 时, k 随着 P_5 的减小而急剧增大,当 $P_5 > 20\%$ 时, k 随着 P_5 的变化较为平缓,这是由于细粒不能填满粗料的缝隙所致,故 P_5 不宜低于 20%.

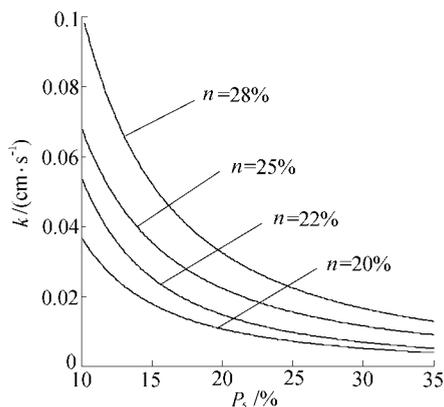


图 4 渗透系数 k 与细粒含量 P_5 的关系曲线

2.3 垫层渗透破坏准则

流土破坏往往发生在颗粒均匀的透水层中,且透水层没有设滤层保护或设置的滤层压重不够.而垫层是由粗粒料和细料构成,通常只会发生管涌.当细料在渗透压力的作用下不断从孔隙中移动并被渗流带走,使垫层的内部形成连通渗流管道且管道孔径不断扩大或使垫层的坡面发生破坏,我们就认为垫层发生了渗透破坏.在渗流的作用下,垫层是否发生渗透破坏,主要取决于抗渗强度.南京水利科学研究院^[5]提出了垫层是否发生管涌的公式:

$$P_z = \alpha \frac{\sqrt{n}}{1 + \sqrt{n}} \quad (5)$$

式中： n 为孔隙率； α 取 0.95。如果 $P_5 > P_z$ ，则不会发生管涌。葛祖立^[6]又提出了内部渗透稳定性的判别公式： $d_{30} C_u^{0.5} \leq 40$ 是稳定的，大于 40 是不稳定的，远远小于 40 或远远大于 40 时，稳定或不稳定的程度加剧，在设计时可以作为参考。

2.4 特殊情况

地处寒冷地区的面板堆石坝，当面板防水失效产生局部渗漏时，如果渗入垫层的水不能及时排出，就会出现局部冻胀，使面板产生不均匀变形，导致了漏水现象更加严重，而当气温回升时，冰冻融化，曾经冻胀的区域就会发生冻融破坏，压实密度降低，孔隙率增大，渗透系数变大，抗剪强度减小。而位于水位以下的垫层部分处于非冻结状态，不存在冻融破坏问题。抽水蓄能电站水库上的面板坝，水位变化很大，当水位迅速降低时，垫层内的孔隙水若不能及时排出，就会发生反渗透现象，对面板产生反向渗透压力，造成面板失稳和止水损坏。

对上述两种情况，可考虑按材料对垫层进行分区，上面的分区可以适当减少细粒含量，增加渗透系数，取 $k = (1 \sim 5) \times 10^{-2} \text{cm/s}$ ，垫层中的水能够自由排出，避免了冻胀或反渗透现象，而在上部区域，作用水头较小，不易发生渗透破坏。此时计算可得 $P_5 = 20\% \sim 30\%$ 。

3 变形和强度

垫层的变形和强度应满足面板、过渡层和主堆石区的变形协调关系，有足够的抗剪强度，以保证坝坡的稳定性，具有低的压缩性和较高的变形模量，确保在水压力作用下变形极小，以防止面板开裂和止水系统破坏而失去防渗性能。

郭诚谦、陈玉暖等在垫层料的压缩性和抗剪强度方面分别做了大量的实验，得到相同的结论：当小于 5 mm 的粒径为 30% ~ 40% 时，垫层的孔隙率最小，压实干容重最大，压缩性最低，而且此时的抗剪强度最大^[7,8]。这与郭庆国、刘萌成等^[9-11]的主张：当粗粒料含量达到 60% ~ 70% 时，粗、细粒形成最佳组成，各部分强度得到充分发挥，抗剪强度为最大是一致的，只是表述不同而已。

4 实例分析

a. 万安溪面板坝是我国较早建成的混凝土面板堆石坝，建前进行了大量的试验和研究。它的垫层细粒含量 P_5 占 32.2% ~ 35.6%，平均为 33.9%，不

均匀系数 47.1 ~ 55，平均为 51，现场测试平均渗透系数为 $3.6 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ^[8]。用本文推出的公式计算渗透系数为 $4.6 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ，与实测较为接近。

b. 紫坪铺混凝土面板堆石坝的垫层采用尖尖山料场灰岩破碎筛分配制而成，控制最大粒径 80 ~ 100 mm，细粒含量 P_5 不大于 35%，小于 0.075 mm 含量不大于 5%，相对密度大于 0.9，设计干密度 2.3t/m^3 ，不均匀系数 94.8 ~ 130，曲率系数 1.72 ~ 2.14，渗透系数 $2.5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ^[12]。用本文推出的公式计算渗透系数为 $5.73 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ，与设计值较为接近。

c. 卡浪古尔面板坝位于我国西北部，属大陆性寒温带，年平均气温在 0℃ 以下，其垫层细粒含量 $P_5 = 28\%$ ，不均匀系数 $C_u = 49$ ，渗透系数为 $1.4 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 。用本文推出的公式计算渗透系数为 $4.6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ，考虑到温度对渗透系数的影响，利用公式(4)进行修正，得到 $k = 2.82 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 。

以上实例都是不会发生渗透破坏，满足渗透稳定性要求的。

6 结 语

a. 文中给出垫层料 P_5 含量的合理范围，需结合筑坝材料性能的现场试验，考虑渗透系数、压缩模量和抗剪强度等因素进一步确定。

b. 在设计和施工时，垫层的填筑密度应当尽可能地高些，达到较小的孔隙率，这样不仅降低了渗透性，而且增加垫层的压缩模量。

c. 对于垫层的渗透系数，可以考虑分档要求： $k = i \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 时，取 $P_5 = 30\% \sim 40\%$ ； $k = i \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 时，取 $P_5 = 25\% \sim 35\%$ ； $k = i \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 时，取 $P_5 = 20\% \sim 30\%$ 。这样对工程而言更为经济合理。

d. 垫层可考虑分区设计，尤其是超高面板堆石坝（坝高大于等于 150 m），在上部区域，作用水头较小，不易发生渗透破坏，可适当减少细粒的含量，增加垫层的压缩模量和抗剪强度，而在下部的分区，增加细粒的含量，减少渗透性，保证渗透稳定。

参考文献：

- [1] 傅志安，夙家骥. 混凝土面板堆石坝 [M]. 武汉：华中理工大学出版社，1993：75-76.
- [2] 刘杰. 混凝土面板坝碎石垫层料最佳级配试验研究 [J]. 水利水运工程学报，2001(4)：1-6.
- [3] 钟家驹. 卡浪古尔混凝土面板堆石坝设计特点 [C]// 中国混凝土面板堆石坝十年学术研讨会论文集. 北京：中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会，1995：303.

(下转第 62 页)

2.3 骨料状态对混凝土性能的影响

2.3.1 对混凝土强度的影响

从上述对比试验数据看,三者的 28 d 强度差值为 ± 0.1 MPa,说明在配制混凝土时,骨料所处状态对混凝土强度几乎没有影响;从表面上看,单位用水量不同,水灰比似乎有改变,强度应该受到影响,但从理论上分析,3种配比的骨料含水量与单位用水量之和是相等的,骨料在饱和面干状态下,单位用水量完全以自由水的形式对混凝土和易性起作用,而骨料在自然风干及烘至干燥状态下,单位用水量并不完全以自由水的形式对混凝土拌和物和易性起作用,有相应的一小部分水要被骨料吸收而达到饱和,也就是说3种拌和物的自由水最终是相等的,实际的水灰比并未改变,故强度自然也不会受到影响。

2.3.2 对混凝土和易性能的影响

在原材料用量相同的情况下,既然骨料所处状态对混凝土强度没有什么影响,那么笔者所关心的就是混凝土和易性能。采用3种状态骨料所配制的混凝土拌和物坍落度值相比较,偏差为 $\pm 5 \sim \pm 10$ mm,拌和物和易性能略有不同。在拌制混凝土时,采用饱和面干状态骨料,单位用水量完全以自由水的形式对混凝土拌和物和易性起作用;采用烘干或风干状态骨料,由于骨料本身要吸收一小部分水分而达到饱和,若要维持实际水灰比不变,在单位用水量中需增加骨料相应的吸水量。但是,由于骨料本身吸收水分达到饱和需要一定时间,再加上拌和过程中骨料表面裹有水泥、粉煤灰胶凝材料,从而延迟了骨料吸收水分达到饱和的时间,所以按理论计算所增加的用水量在拌制过程中是不可能完全被骨料吸收的,还有一小部分暂时以自由水的形式存在,进而导致了混凝土拌和物和易性能稍有不同。

在工程建筑施工工地,料仓大多是在露天,施工现场拌制混凝土所用骨料一般是处于自然风干状态,如果试验室以饱和面干状态骨料为基准提供的配合比用于施工现场,那么施工方在调整单位用水量时,需增加按理论计算骨料达饱和所吸收的水分,这对于远距离运输混凝土来说,考虑到运输过程中水分缓慢渗入骨料而达到饱和,一般不会影响到施工和易性,但是对于近距离浇筑混凝土势必会受到影响。

鉴于上述分析,试验室在进行混凝土配合比设计时,以哪种状态的骨料为基准,首先要考虑到混凝土运输距离的远近。对于近距离浇筑混凝土,最好选用自然风干或烘干状态骨料试配来提供施工配合比;对于远距离运输浇筑混凝土,可以根据现场实际

施工条件并参考相关设计规程、规范来确定配合比。

3 结 语

通过上述两例对比试验可以看出,在生产混凝土时,如果采用了含泥量较大的骨料,混凝土强度有不同程度的损失。另外,试验室在进行混凝土配合比设计时,对于拌和骨料状态——自然风干、饱和面干及烘干3种状态的选择也是不容忽视的,虽然它对混凝土强度没有什么影响,但直接影响混凝土拌和物和易性能。所以,在进行混凝土配合比设计时,拌和骨料选用何种状态,在参考相关设计规程、规范的前提下,还要根据浇筑混凝土运输距离的远近及现场的实际施工条件而定,这样提供的配合比用于施工现场更合理、更有利于施工,既能保证混凝土强度,又能保证施工和易性。

参考文献:

- [1] JGJ55—2000,普通混凝土配合比设计规程[S].
 - [2] DL/T5144—2001,水工混凝土施工规范[S].
(收稿日期 2004-09-19 编辑 高建群)
- +++++
- (上接第36页)
- [4] 顾慰慈.渗流计算原理及应用[M].北京:中国建材工业出版社,2000.
 - [5] 顾淦臣,戴永志.株树桥混凝土面板堆石坝漏水事故分析[G]//刘璞珍,王育阳.土石坝建设中的问题和经验.西安:陕西人民出版社,2001:137-140.
 - [6] 葛祖立.堆石坝面板垫层的渗透稳定可靠性分析和存在问题[C]//蒋国澄,张博庭,秦明豪.国际高土石坝学术研讨会论文集.北京:中国水力发电工程学会,1993:118-120.
 - [7] 郭诚谦.论混凝土面板堆石坝设计的若干问题[C]//蒋国澄,张博庭,秦明豪.国际高土石坝学术研讨会论文集.北京:中国水力发电工程学会,1993:144-148.
 - [8] 陈玉暖,刘复明,陈伊冰.万安溪混凝土面板堆石坝掺配风化花岗岩粗砂垫层料特性及试验研究[C]//蒋国澄,张博庭,秦明豪.国际高土石坝学术研讨会论文集.北京:中国水力发电工程学会,1993:75-78.
 - [9] 郭庆国.粗粒土的工程特性及应用[M].西安:西安交通大学出版社,1998:1-43.
 - [10] 刘萌成,高玉峰,刘汉龙,等.粗粒料大三轴试验研究进展[J].岩土力学,2002(4):217-218.
 - [11] MARSAL R J. Larger scale testing of rockfill material[J]. ASCE JSMFD, 1967(2):93-27-43.
 - [12] 王伯乐.中国当代土石坝[M].北京:中国水利水电出版社,2004:197-198.

(收稿日期 2005-09-01 编辑 熊水斌)