

砂石滤层准则的研究与进展

郭庆国¹, 金亚玲²

(1. 国家电力公司西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710043; 2. 陕西省水电工程局, 陕西 西安 710068)

摘要:叙述滤层准则研究的历史和现状, 将滤层准则研究的历史划分为4个发展阶段: 反滤层的启蒙阶段、太沙基滤层准则及均匀滤层的应用阶段、滤层准则在宽级配料中的应用阶段、滤层准则研究与应用的新发展阶段, 详细介绍了每个发展阶段的特点和一些代表性滤层准则, 以及鉴别宽级配、自滤、内部稳定料和土料调整的方法。

关键词:反滤层; 滤层准则; 被保护料; 宽级配料; 土石坝

中图分类号:TV139.11

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2002)01-0051-05

修建土石坝, 是以拦水蓄库为目的, 库水位的抬高, 必将在坝体、地基土体形成渗透水流, 有产生渗流破坏的可能, 故设计土石坝时, 既要满足稳定要求, 又要采取措施, 防止产生渗透破坏, 满足渗透稳定的要求, 保证土石坝的安全运行。

实践证明, 土体的渗透破坏机理是先从渗流出口开始, 然后逐渐向深处发展, 最后形成渗透破坏而失事。据此, 只要保护好渗流出口不遭破坏, 土颗粒不流失, 也就不会向深处发展, 土体的结构在水流作用下处于稳定状态, 具体保护方法是在渗流出口设置反滤层, 起滤土(防止颗粒流失)和减压(使渗透水流入反滤层后, 很通畅地排走, 渗透压力减小, 甚至消失)作用, 从而达到渗透稳定的目的。反滤层是防止渗透破坏最有效的措施, 但自然界土的类型繁多, 性能差异很大, 如何使设置的反滤层既经济又能体现被保护土的特征, 保证渗透稳定性, 采用妥善的滤层准则至关重要。关于滤层准则的研究、应用与发展也同其他学科一样, 始于工程, 用于工程。概括地讲, 自用反滤层过滤生活饮用水开始, 滤层准则至今已经历了4个发展阶段, 本文着重对这4个发展阶段的特点及一些有代表性的滤层准则作一介绍。

1 反滤层的启蒙阶段

早在19世纪, 人们已开始利用均匀细砂($D_{50} = 0.3 \sim 0.4 \text{ mm}$)过滤生活用水、建立滤水厂等, 这是生产实践启蒙了反滤层“滤土”功能。1910年布来(Bli-hg)^[1,2]基于对冲刷和流失的研究, 提出 $H/L \leq J_{\text{允}}$ 准则, 第一次阐明了水头、渗径、允许水力坡降的本

构关系, 其主导思想是减小单位土体长度上水头压力, 用较小允许水力坡降防止渗透破坏, 此点启蒙了反滤层的减压功能。因此, 可以说1922年以前时段为反滤层的滤土、减压原则奠定了思想基础, 故称为反滤层、滤层准则的启蒙阶段。

2 太沙基滤层准则及均匀滤层的应用阶段

这一阶段主要指1922~1960年间, 太沙基(Terzaghi)^[2]运用渗透流网、下游趾压重、建筑物下游趾扬压力、水库逆向管涌等概念, 从土体结构方面论证了土体渗透破坏的机理, 从防止在渗透水流作用下颗粒移动方面论证了反滤作用, 从减小扬压力方面论证了排水作用; 从平衡扬压力方面论证了压重作用。依据北非在均匀砂基修建堆石坝时, 为防止渗透水经过潜在的混凝土防渗墙的裂缝将砂带入堆石造成渗透破坏而设计反滤层的工程实践经验, 以及大量的实验室试验研究工作, 于1922年提出著名的用反滤层防止土体渗透破坏的理论和滤层准则: $D_{15}/d_{85} < 4$ 和 $D_{15}/d_{15} > 4$ (D 和 d 分别指反滤料与被保护料的粒径, 下标指小于该粒径的土料在级配曲线上所占的含量)。太沙基用反滤层防止渗透破坏的理论和滤层准则问世之后, 不但明确了土的渗透破坏机理、反滤层的滤土和减压(排水)作用及拦水与排水的辩证关系, 而且还为设计反滤层提供了具体方法。

太沙基的这些贡献, 很快被工程界接受并得到应用, 不但在土坝中成功应用, 而且在1940年崛起的土质斜墙、心墙堆石坝^[3], 1960年崛起的碾压式

作者简介: 郭庆国(1934—), 男, 陕西华县人, 教授级高级工程师, 从事岩土工程研究。

堆石坝中成功应用。如卡萨格兰德(Casagrande)于1937年在《大坝渗漏》论文中报道了在土坝中的成功应用^[2]。格鲁登(Growdon)在南特伯(Nantabola)土质心墙抛填堆石坝中应用均匀多层反滤(①纯净砂12.7mm;②12.7~75mm;③75~250mm),该工程尽管堆石有大量沉降变形,心墙存在潜在裂缝问题,但一直没有发生管涌。20世纪五六十年代,该准则在碾压式斜墙、心墙堆石坝中广泛应用,典型的细反滤料粒径 $d=0.2\sim40\text{mm}$,粗反滤料 $d=5\sim100\text{mm}$,未发生管涌现象^[2]。这种反滤料应用后,解决了渗透稳定问题,使允许水力坡降比布来方法大大提高。高土石坝、堆石坝发展很快,超百米大坝增多。总之,在1922~1960年间,土坝、土石坝、堆石坝采用按太沙基设置的均匀、多层反滤层的工程,都没有发生管涌破坏。即使从1960年至今,使用太沙基准则均匀多层反滤层的工程,也是成功的。

在太沙基滤层准则问世后的几十年里,有许多学者也提出了许多滤层准则^[1],如:①贝契姆(Bertram)通过用均匀砂和渥太华砂作反滤料保护粉细砂的试验研究,于1939年提出滤层准则: $D_{15}/d_{85}\leq6$; $D_{15}/d_{15}\leq9$ 。②水道试验站(USACE WES)通过一系列试验研究,于1940年提出用天然砾石作反滤料保护由粗到细均匀砂的反滤准则: $D_{15}/d_{85}\leq5$; $D_{15}/d_{15}\leq20$; $D_{50}/d_{50}\leq20$;同时还要满足反滤料与被保护料的级配曲线必须平行、反滤料的级配良好。③卡波夫(Karpoff)通过用人工级配均匀反滤料来保护人工混合的不均匀系数为 $C_u=1.8\sim28$ 之间的各种被保护料的试验研究,于1955年提出滤层准则: $5\leq D_{50}/d_{50}\leq50$ (均匀被保护料); $10\leq D_{50}/d_{50}\leq58$ (不均匀被保护料);反滤料的最大粒径 $D_{\max}\leq76.2\text{mm}$;小于 0.075mm 颗粒含量小于5%;被保护料最大粒径小于5mm;反滤料与被保护料级配曲线应相互平行。以及后来的谢拉德(Sherard)和莱夫勒(Lafleur)等提出的滤层准则,都进一步证明了太沙基滤层准则的合理性及适用范围,而且不同学者提出的滤层准则均是遵循太沙基滤层减压原则的。正如谢拉德所说:“太沙基滤层准则是偏于安全的,而且不为之过分,应该继续使用。而目前采用的 D_{50}/d_{50} 和 D_{15}/d_{15} 两种滤层准则,得不到实验和理论的支持,应该废弃。反滤料与被保护料的级配曲线形状不一定要平行。太沙基的 $D_{15}/d_{15}>4$ 可用作排水条件”^①。

3 滤层准则在宽级配料中的应用阶段

滤层准则在宽级配料中的应用阶段是指20世

纪六七十年代,其间出现的“宽级配料可以自行调整,分离不是一个大问题,反滤料与被保护料级配曲线必须平行”的观点,导致了在工程中用单一的宽级配反滤料替代人工加工的均匀级配多层反滤料的趋势,结果发生了许多管涌现象。此点正如1977年卡萨格兰德(Casagrande)给旦斯科(Dasral)的信中所说“很不幸的是太沙基滤层准则被曲解,并错误地应用。太沙基滤层准则适用均匀级配料,这种料没有分离问题。后来有人用单一宽级配料代替均匀多层反滤料,但在实际上,宽级配分离是不可避免的,并且在较窄的反滤区,粗料相对集中而发生空穴,心墙料很容易通过空穴进入堆石区发生管涌。另一个严重的错误是用太沙基滤层准则为宽级配心墙料(如冰碛土)设计反滤料,导致设计的反滤料太粗。”^[2]

上述观点之所以被接受并得到应用,除了忽视太沙基滤层准则的基础和条件之外,还有如下客观原因:

a. 土力学的发展,计算水平的提高,对坝体填筑材料放宽,料源扩大,如利用风化石、砾质土、冰碛土等宽级配料作防渗土料。

b. 大型土石方机械的发展,重型振动碾的应用,使土石坝的施工方法发生了巨大变化,需要有加工简单,施工方便,适应机械化快速施工的单一材料。

c. 太沙基滤层准则设计的均匀多层反滤料,一是多为人工加工,要求严格,费用昂贵;二是层厚约为 $(4\sim5)d_{\max}$,多为20~40cm,厚度薄,层次多,施工麻烦;三是反滤和心墙接触处事先还要求对压实心墙土料进行人工削坡,施工难度大。

d. 宽级配反滤料,多为天然砂砾料,即使加工也只是简单地筛选出某一级大颗粒,加工简单,费用低,厚度一般在2~4m之间,各种料之间可以平起填筑碾压等,施工方便,有利于机械化施工。

e. 在应用宽级配料中使用了太沙基准则,表明该准则在人们心目中的权威性或习惯性,但忽视了该准则的应用条件和基础。

另外,太沙基准则只有下限要求,如 $D_{15}/d_{85}=4$,而对 $D_{15}/d_{85}<4$ 小到多少为止, $D_{15}/d_{15}>4$ 大到多少为止,没有限量的要求。而宽级配料的特点是颗粒范围宽,大小颗粒相差悬殊,往往是 D_{15} 和 d_{15} 值小, d_{85} 值大,有 $D_{15}/d_{85}=0.1\sim0.001$ 和 $D_{15}/d_{15}=10\sim1000$ 的比值范围,满足 $D_{15}/d_{85}<4$ 和 $D_{15}/d_{15}>4$,但小于4又小得太多,大于4也大得太多,变化范围太大,级配太宽、太粗,这表明太沙基准则不适用于宽级配料。由于太沙基准则没有限量值的限制,

① J.L.谢拉德等 砂石反滤料的基本特性,郭诚谦译,水利水电规划设计研究院,1984。

给使用者造成一定困难,容易犯将准则用于宽级配的错误。

总之,该阶段的教训是将基于均匀料的太沙基滤层准则,错误地用于宽级配反滤料。但是宽级配料在自然界大量存在,应该加以利用,机械化施工方法的发展也需要加工方便、费用低、适于机械化快速施工的反滤料,这就向研究者提出了新的课题。

4 滤层准则研究与应用的新发展阶段

20 世纪七八十年代及以后,许多学者基于太沙基准则不宜用于宽级配土料的教训,又鉴于机械化快速施工及坝料放宽需要,对各种类型的被保护土料与砂砾(石)反滤料开展了大量研究工作,提出了许多有价值的滤层准则,下面列出有代表性的几种:

a. 伏恩 (Vaughan) 和索若斯 (Soares) 滤层准则^[2]。白尔德赫 (Balderhead) 大坝粘土心墙于 1967 年发生裂缝和内部冲蚀,观测到冲蚀物的分离,反滤料未能阻滞细颗粒。分析认为粘土心墙裂缝张开着并相对稳定,不能依靠冲蚀物阻塞裂缝。伏恩和索若斯为寻找粘土絮片大小与反滤级配关系,通过试验,发现被反滤料阻滞的颗粒粒径与其反滤料渗透系数有如下关系: $K = (8.7 \times 10^{-6}) d_{85}^{1.52}$, 用此渗透系数比用颗粒级配更适于定量描述反滤料的特性,对设计非粘性反滤料提供一个可选择的方法。

b. 肯尼 (Kenney) 的滤层准则^[2]。依据一些学者提出的反滤料孔径尺寸用被冲刷通过反滤孔隙的最大粒径来确定反滤料级配的方法,经试验分析和理论研究,表明控制收缩尺寸 D_c (D_c 为可通过一定厚度的反滤料可能最大粒径) 与颗粒分布曲线的形状和反滤层厚没有多大关系,但与反滤料细颗粒的级配有关,其关系式为 $D_c < 0.25 D_5$ 或 $D_c < 0.2 D_{15}$ (D_5, D_{15} 分别为反滤料级配曲线上含量占 5%、15% 的粒径)。该方法把控制收缩尺寸概念问题的焦点放在最临界状况下可通过反滤料的最大粒径上,所以它是很有用的。但试验研究建议该方法适用于不均匀系数 $C_u < 6$ 的散粒体反滤料,对 $C_u > 6$ 的散粒体料和粘性土料不适用。

肯尼和罗 (Lau) 在研究水流通过粒状材料时,发现有细料被带走会引起内部不稳定,而细料不被带走内部是稳定的,因此提出确定稳定与不稳定界限方法,如 $H = 1.3 F$ (其中 H 为粒径 d 和 $4d$ 间颗粒含量的百分数, F 为细料 (粒径小于或等于 d 的颗粒) 含量百分数); 后来他在 1985 年的论文中认为上述界限的试验条件是严格的,而且是保守的,并将上式改为 $H = F$ 。

c. 谢拉德、詹姆斯 (James) 和美国水土保持局

(USDASCS) 反滤准则^[2]。谢拉德对土石坝裂缝、管涌问题很感兴趣,并于 20 世纪 80 年代在美国水土保持局的林肯奈布莱斯科 (Nebraska) 土力学试验室进行研究,研究成果被美国水土保持局、垦务局列入反滤设计标准,见表 1。该研究的结论还包括:①反滤料的特性在 D_{50} 和 d_{50} 或 D_{15} 和 d_{15} 之间没有发现相关性,以前滤土准则 D_{50}/d_{50} 或 D_{15}/d_{15} 的关系应该弃用, $D_{15}/d_{15} \geq 4$ 的要求可以用来保证反滤料有足够的渗透性;②对粗冰碛料,从细料到卵石的级配料和其它类似级配不透水土料,美国水土保持局的研究证明 $D_{15} \leq 0.7 \text{ mm}$ 的砂或砾石砂,对于要求严格的下游反滤料是必要的;③垂直管涌反滤试验,优于早期研究缝隙泥浆试验;④试验研究和坝体运用经验皆认为,充足的反滤料将对土石坝中来自心墙的集中渗漏提供可靠的密封和控制作用。

表 1 美国水土保持局反滤料准则 (1986)

分类	被保护料 ^①		反滤料 ^②
	名称	$d < 0.075 \text{ mm}$ 颗粒含量/%	
1	细砂、粘土	> 85	$D_{15} \leq 9 d_{85}$ ^③
2	砂、粉砂、粉质粘土、粉质砂	$40 \sim 85$	$D_{15} \leq 0.7 \text{ mm}$
3	砂、粉质砂、砂砾石	$15 \sim 39$	$D_{15} \leq \frac{40 - A}{40 - 15} \cdot (4 d_{85} - 0.7) + 0.7$ ^④
4	砂和砂砾石	< 15	$D_{15} \leq 4 d_{85}$ ^⑤

注:①土料包括 $d > 4.75 \text{ mm}$ 颗粒,但被保护料已被调整为 $d < 4.75 \text{ mm}$ 颗粒占 100%;②反滤料 $D_{\max} = 75 \text{ mm}$, $d < 0.075 \text{ mm}$ 颗粒含量 $\leq 5\%$, $I_p = 0$ (为使用均匀级配的反滤料,以防止填筑中发生分离); I_p 用 $d < 0.425 \text{ mm}$ 料按 ASTM D4318 测定,为了保证足够渗透性, $D_{15} \geq 4 d_{15}$ 但不应小于 0.1 mm ;③当 $9 d_{85} < 0.2 \text{ mm}$ 时,用 0.2 mm ;④ A 等于经过任何重新调整之后, $d < 0.075 \text{ mm}$ 颗粒含量百分数;⑤ $4 d_{85} < 0.7 \text{ mm}$ 时,用 0.7 mm ;⑥第 4 类中, d_{85} 可用含有 $d > 4.75 \text{ mm}$ 颗粒的未调整原级配曲线确定。

d. 约色夫 (Josef) 等提出的滤层准则^[2]。约色夫等根据与水流垂直和平行的反滤料和被保护料界面情况做了大量的反滤料研究,特别是威特 (Witt)^[2] 从理论和试验等方面进一步分析了反滤机理,1987 年提出了反滤准则 (表 2)。

表 2 威特反滤准则

反滤料	滤层准则		
	$C_u \leq 3$	$3 < C_u \leq 6$	$C_u > 6$
$D_5 < 0.5 \text{ mm}$	$D_{30}/d_{95} \leq 2.5$	$D_{10}/d_{95} \leq 2.5$	$D_5/d_{95} \leq 2.5$
$D_5 > 0.5 \text{ mm}$	$D_{30}/d_{85} \leq 2.5$	$D_{10}/d_{85} \leq 2.5$	$D_5/d_{85} \leq 2.5$

注: C_u 为被保护料的不均匀系数; d_{95}, d_{85} 分别为颗粒含量占 95%、85% 时的粒径, mm; D_5, D_{10}, D_{30} 分别为反滤料颗粒含量为 5%、10%、30% 时的粒径, mm。

e. 莱夫勒滤层准则^[2]。莱夫勒指出,肯尼方法中的两种土料级配曲线和模型曲线 (细料含量 F 与粒径 d 与 $4d$ 间颗粒含量的关系曲线, 图 1), 当部分模型曲线位于 $F \leq 20\%$ 的倾斜界限以上时, 可能发

生一些内部颗粒移动,如1号土料;相反,完全低于该界限,便认为内部是稳定的,如2号土料。

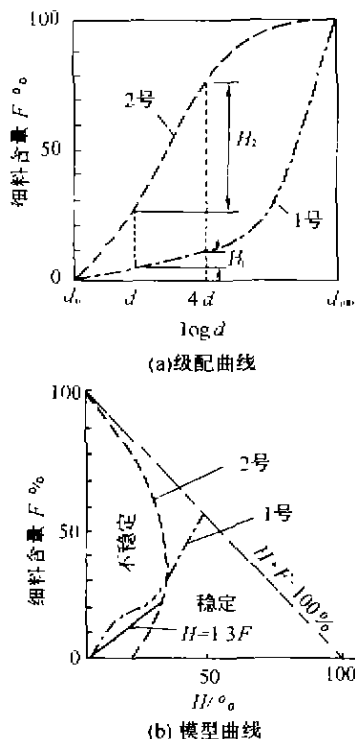


图1 用肯尼的方法评价粒状料的内部稳定性

经对许多冰碛土资料分析,级配曲线可分为如图2所示的线性级配、间断级配、上凹级配三种类型。对此分别按肯尼方法进行对材料内部的敏感性分析及大量的相容性(被保护料对于反滤料)试验。试验结论认为:在选择宽级配土料的粒状反滤料时,考虑发生在被保护料和反滤料界面上的过渡过程,相对于细粒土选择反滤料孔隙的大小是不实际的,使用土料的 d_{85} 也是不正确的,因为大量被保护料被冲走后,反滤料孔隙的大小,必须考虑到与最小限度颗粒移动的保护料粒径相协调。对于线性级配料,最小的表示粒径值应等于 d_{50} ,并且过渡过程将导致一种平衡过程;对于间断级配土料,发现这些土料的粗粒不介入这种过渡, d_{50} (初始过渡的被保护料特征粒径)应相应于间断级配的下部颗粒。莱夫勒提出设计粒状反滤料滤土准则为 $D_{15} \leq 4d_{50}$,用太沙基 $D_{15} \geq 4d_{15}$ 作为透水条件,其中 d_{50} 、 D_{15} 确定方法如表3所示。

f. 中国水利水电科学研究院滤层准则。刘杰在文献[1]中,系统地报道了他与同事们多年来对不同类型土的渗透稳定性及渗流控制方面的研究成果,考虑土料性质、颗粒组成特征、不均匀系数渗透破坏形式等因素的中国水利水电科学研究院滤层准则如表4所示。

该阶段的特点,一是围绕反滤是建立在被保护料的基础上,对各种类型被保护料性质进行广泛、深

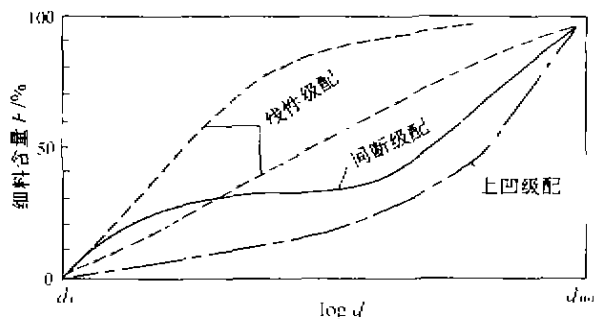


图2 宽级配料的级配曲线分类(1989年)

表3 莱夫勒滤层准则(d_{50} 、 D_{15} 的确定方法)

无粘性被保护土料				粘性被保护土料	
非宽级配	宽级配料 $C_u > 20$			非分散性粘土	分散性粘土
自滤料	线性级配	间断级配	上凹级配		
$d_{50} = d_{85}$	$d_{50} = d_{50}$	d_{50} 为间断下部粒径	$d_{50} = d_{50}$	$D_{15} \leq 0.4 \text{ mm}$	$D_{15} \leq 0.2 \text{ mm}$

注: D_{15} 是反滤料累计含量为15%时的颗粒粒径; C_u 、 d_{50} 、 d_{15} 、 d_{20} 、 d_{30} 分别为被保护料(基料)不均匀系数、自滤粒径及含量为15%、20%、50%时的粒径。

表4 中国水利水电科学研究院滤层准则

准则 类型	被保护土为无粘性土			被保护土 为粘性土
	$C_u < 5$	$C_u > 5$		
		非管涌型土	管涌型土	
滤土	$D_{20}/d_{70} \leq 7$	$D_{20}/d_{15} \leq 7$	$D_{20}/d_{15} \leq 7$	$D_{20}/d_{70} \leq 7$
透水	$D_{20}/d_{30} \geq 4$	$D_{20}/d_{20} \geq 4$	$D_{20}/d_{20} \geq 2$	$D_{20}/d_{20} \geq 4$

注: d_{15} 为保护土的控制粒径(即级配曲线含量为70%和15%的粒径); d_{70} 为被保护土的控制粒径,确定方法见文献[1]; D_{20} 为反滤料的等效粒径,一般为含量为20%时的粒径;被保护土为粘性土时 D_{20} 的确定方法见文献[1]。

入的滤层特性研究,不但论证了反滤料孔径与被保护料控制粒径之间的关系,又从被保护料的基本性质、细粒含量、不均匀系数、渗透破坏类型、颗粒组成、级配曲线的形状等方面论证了反滤料与被保护料的关系,提出了相应的滤层准则,使滤层准则在太沙基滤层准则的基础上更加完善和丰富;二是突出了研究了宽级配料,强调了宽级配料的分离问题,研究认为,宽级配料由于自身级配宽,大小颗粒相差悬殊,本身又是粒状散粒体料,使用过程中,分离是不可避免的,也许对某些宽级配料在试验室极小范围内的研究中,可以控制得很均匀,但在实际填筑中,由于量大、面积宽广,条件复杂,如施工时的堆存、装车、卸车、铺开以及在相邻料的结合位与埋设仪器处容易形成渗流通道,失去滤土功能,造成渗透破坏,故分离问题不是小事,应予以重视;三是对保护粘性土的滤层准则,在太沙基 $D_{15}/d_{85} < 4$ 的基础上有较大的发展,如谢拉德的 $D_{15}/d_{85} \leq 9$,及考虑土性的不同采用不同的准则,如莱夫勒对非分散性粘土为 $D_{15} \leq 0.4 \text{ mm}$,对分散性粘土为 $D_{15} \leq 0.2 \text{ mm}$;中国水利水电科学研究院 $D_{20}/d_{70} \leq 7$,其中南方粘土 $D_{20} \leq 2 \text{ mm}$,对北方一般粘土 $D_{20} \leq 0.8 \text{ mm}$,对黄土、分散

性土 $D_{20} \leq 0.5 \text{ mm}$; 四是提供了宽级配料、自滤料、内部稳定料的检查和调整方法. 具体检查方法有肯尼的计算法、莱夫勒的作图法和洛温(Lowe)的作图法等, 可见有关文献.

总之, 合适反滤料的设计, 先需对被保护土料的性质进行分析, 必要时还需要对级配进行调整, 消除宽级配料内部的不稳定, 使心墙土料性质得到改善, 此点是共同的. 但在调整方法上, 目前尚不一致, 如洛温和莱夫勒采用分析颗粒级配曲线法调整土料, 谢拉德采用 $d < 4.75 \text{ mm}$ 土料、芬兰采用 $d < 20 \text{ mm}$ 土料、挪威采用 $d < 60 \text{ mm}$ 土料等作为心墙土料, 此点仅供使用参考.

5 结 语

a. 土的渗透破坏机理, 是破坏先从渗流出口开始, 后向深处发展, 最后形成整体破坏而失事. 实践证明, 只要在渗流出口设置反滤层, 保护住渗流出口颗粒不流失, 并使渗透水流通畅排走, 渗透压力减小以至消失, 就保证了土体的渗透稳定性, 故反滤层是防止渗透破坏的有效措施.

b. 反滤层设计得经济合理与否, 关键是采用的滤层准则是否反映被保护土料的性质和具体条件.

c. 太沙基的滤层准则是基于保护均匀无粘性

土, 对于粘性土是偏于安全的也是可用的; 该准则设计的滤层是均匀级配层, 可以是单层或多层, 多层的层间关系也以此准则为基础. 该准则不适用于宽级配反滤料, 也不适用于为宽级配料设计反滤层. 但太沙基的排水准则可用作宽级配料的透水条件.

d. 由于设计水平的提高, 土石坝筑坝技术的发展, 宽级配风化料、砾石土、冰碛土被广泛应用, 需要加工简单的、适应机械化快速施工的反滤材料, 因此宽级配料的应用是当前的趋势.

e. 通过大量试验研究, 不但论证了太沙基滤层准则的合理性及适用条件, 并在此基础上提出了适用宽级配料的滤层准则及检查宽级配料、自滤料、内部稳定料和调整级配等具体方法.

f. 通过对被保护土的分析, 选用相应的滤层准则, 设计出经济合理的反滤层.

参考文献:

- [1] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. 91 ~ 130.
- [2] ICOL. ICOL BULLETIN[J]. 1994, 95. 25 ~ 60.
- [3] 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. 286 ~ 321.

(收稿日期: 2000-08-29 编辑: 韩水斌)

·小资料·

中国总库容在 20 亿 m^3 以上的水库

序号	水库名称	所在省区	所在河流	总库容/亿 m^3	序号	水库名称	所在省区	所在河流	总库容/亿 m^3
1	三 峡	湖 北	长 江	393	24	柘 溪	湖 南	资 水	35.7
2	三门峡	河 南	黄 河	354.0(初始)	25	桓 仁	辽 宁	浑 江	34.6
3	龙羊峡	青 海	黄 河	276.3	26	岩 滩	广 西	红水河	33.5
4	新安江	浙 江	新安江	220	27	松 涛	广 东	南渡江	33.4
5	丹江口	湖 北	汉 江	209.7	28	西 津	广 西	郁 江	30
6	水丰(中朝共有)	辽 宁	鸭绿江	146.7	29	潘家口	河 北	滦 河	29.3
7	新丰江	广 东	新丰江	139	30	安 康	陕 西	汉 江	29.3
8	洪泽湖	江 西	淮 河	135	31	西洱河一级	云 南	西洱河	27.7
9	小浪底	河 南	黄 河	126.5	32	陈 村	安 徽	青弋江	27.2
10	丰 满	吉 林	第二松花江	107.8	33	响洪甸	安 徽	淠 河	26.3
11	天生桥一级	贵州, 广西	南盘江	106.8	34	水 口	福 建	闽 江	26
12	东 江	湖 南	耒 水	91.5	35	红 山	内 蒙古	老哈河	25.6
13	柘 林	江 西	修 水	79.2	36	宝珠寺	四 川	白龙江	25.5
14	白 山	吉 林	第二松花江	68.1	37	花凉亭	安 徽	长 河	24
15	二 滩	四 川	雅砻江	61.8	38	梅 山	安 徽	史 河	23.4
16	刘家峡	甘 肃	黄 河	57	39	乌江渡	贵 州	乌 江	23
17	密 云	北 京	潮白河	43.8	40	万 安	江 西	赣 江	22.2
18	五强溪	湖 南	沅 水	42	41	棉花滩	福 建	汀 江	22.1
19	官 厅	河 北	永定河	41.6	42	大伙房	辽 宁	浑 江	21.9
20	东平湖	山 东	黄 河	40	43	观音阁	辽 宁	太子河	21.7
21	莲 花	黑龙江	牡丹江	39.2	44	乌溪江	浙 江	乌溪江	20.6
22	云峰(中朝共有)	吉 林	鸭绿江	39.1	45	湖南镇	浙 江	乌溪江	20.6
23	隔河岩	湖 北	清 江	37.7	46	漳 河	湖 北	沮漳河	20.3

(本刊编辑部供稿)