

DOI: 10.11779/CJGE201704004

反滤层设计原理与准则

刘 杰, 谢定松

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048)

摘 要: 太沙基反滤层设计准则为反滤层的研究奠定了基础, 对均匀无黏性土有足够的安全性, 但对不均匀无黏性土是不安全的, 而且不适用于其它类型的土料。阐述了在太沙基准则的基础上对渗透破坏型式各异的各种类型土反滤准则的研究结果, 提出了不同类型土控制粒径确定的原则与方法, 扩大了准则的适用范围。试验研究结果表明, 不均匀无黏性土的反滤层, 应当保护其中的细颗粒不流失, 试验研究了确定细料的原则与方法, 采用细料中的 d_{70} 为控制粒径, 并回归为整个土体控制粒径的确定方法, 最后给出了各类土保护细料的反滤层设计准则。该研究成果可为实际工程的反滤层设计提供借鉴和指导意义。

关键词: 反滤层; 等效粒径; 控制粒径; 砾石土; 无黏性土

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)04 - 0609 - 08

作者简介: 刘 杰(1933 -), 男, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程渗流及渗流控制研究。E-mail: xieds@iwhr.com。

Design principles and guidelines of filters

LIU Jie, XIE Ding-song

(China State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: The design criteria of Terzaghi filter layer have laid the foundation for the researches on filter layers, which are safe enough for uniform cohesionless soil, but not secure for uneven cohesionless soil, and they are not suitable for other types of soil. The existing research results are reviewed based on the design criteria of Terzaghi filter layer for various types of filters with different permeability damages. The control principles and methods are put forward to determine the control grain sizes of different types of soil so as to expand the scope of the criteria. The research results show that for the uneven non-viscous filter layer of soil, the fine particles should be protected. Some experiments are performed to confirm the principles and methods to get the particle sizes of the fine materials. In the process of experiments, Using d_{70} of fine materials to be the control grain size, and the regression method is used to get the results to determine the control grain sizes of the entire soil. Finally, the design criteria of filter layers for different kinds of soil are obtained. The results may provide reference and guiding significance for engineering design of practical filter layers.

Key words: filter; equivalent diameter; dominant diameter; gravel soil; cohesionless soil

0 引 言

反滤层是水工建筑物渗流控制的关键措施之一, 经过近一个世纪的广泛应用, 设计准则不断完善, 渗流控制理论从以防渗为主的理念发展为防渗排渗和反滤层三结合的原理, 从此, 土石坝的结构型式有了质的变化, 均质坝型改变为混合型, 坝体分为防渗体和支撑体两大部分, 防渗和排渗相结合, 反滤层在中间起过渡作用, 从此土石坝采用当地材料坝的优势更明显。至 20 世纪 60 年代—80 年代, 高土石坝有了飞跃发展, 世界上 100 m 以上的高土石坝达 200 多座, 近期中国在建的两河口水电站, 土石坝的高度达 295 m, 是全球第二高的土石坝。

反滤层的广泛使用, 使防渗体防止渗透破坏的能力显著提高, 薄心墙坝广为流行, 渗透系数 $<10^{-5}$ cm/s 的任何土料都可作为防渗土料。中国 70 年代建成的辽宁柴河大坝, 心墙边坡坡比仅为 1 : 0.0642, 承受的平均水力比降高达 8.4, 为世界之最^[1]。104 m 高的鲁布革堆石坝, 心墙土料为砂页岩风化料, 边坡 1 : 0.175。

反滤层设计方法的不断完善, 使高土石坝防渗体裂缝问题纳入了渗流控制范畴, 按有裂缝的原则设计

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 项目 (2014CB047004)

收稿日期: 2015 - 11 - 10

防渗体的反滤层, 裂缝可以自愈。从此, 70年代—80年代工程中广为采用的防止心墙水力劈裂的一些措施, 如斜心墙和拱型坝轴线的工程措施, 逐渐被淡化。

总结 60 多年的工程经验, Sherard^[3]指出, 今后土石坝的防渗体只起防渗作用, 主要是减小渗漏量, 防止渗透破坏的功能, 由反滤层来承担。

太沙基建立的反滤层设计准则, 充分彰显了反滤层的功能和设计原理。反滤层具有滤土和排水的双重功能, 是防和排的统一体, 既要防止土颗粒不带走, 又要保证渗流畅通无阻地排向坝体以外。

太沙基反滤准则的理论基础, 被保护土和反滤层都是均匀无黏性土, 渗透破坏的型式呈整体性, 要求反滤层的不均匀系数小于 5^[4]。

近一个世纪以来, 反滤层的研究有了蓬勃发展, 到目前为止, 其方法有 30~40 种, 仔细分析各种方法, 均脱离不了太沙基原理, 产生不同方法的根本原因是对土的特征粒径的取值问题。现代反滤层设计方法的特点, ①由均匀无黏性土扩大到各种类型的土; ②考虑了土的渗透稳定性, 不仅研究了流土破坏型的土, 而且研究了管涌破坏型的土。在渗透稳定性方面, 以颗粒组成的几何稳定为基础, 同时考虑了被保护土承受的水力比降。通过试验研究, 认识到被保护土的控制粒径出现的概率不再是早期单一的固定值, 如 d_{85} , 而是随土的颗粒级配曲线形状变化。从被保护土的控制粒径而言, 太沙基方法为单点法, 现今发展为多点法^[5]。

本文主要介绍中国水利水电科学研究院关于各种类型土反滤层设计准则多年的研究成果。

1 土的类型及其工程一般特性

1.1 土的种类

自然界中的土类, 根据颗粒组成特性, 可以归纳为 3 类。一类是无黏性土, 包括砂土和砂砾石; 第二类是黏性土, 也称细粒土。第三类是黏粒含量 < 10%, 含砂、砂砾石和卵石的砾质土。各类土的直观特性常用颗粒组成来表征, 如图 1 所示。图中又将无黏性土分成 3 种情况, 绘成 3 条曲线, 其中不均匀无黏性土有两条, 一条为级配连续型土, 另一条为缺乏中间粒径的土。

1.2 各类土的特征粒径

土的颗粒组成曲线是表征土的工程性质的基本方法, 特征粒径是其代表性粒径, 在一定程度上反映土的部分特性, 是制定反滤层设计准则的基础和依据, 反滤层的设计必须首先研究土的颗粒组成特性。

在表征渗透特性方面, 特征粒径分为控制粒径、

等效粒径和分界粒径 3 种。控制粒径是指对土的渗透稳定及强度起主要控制作用的代表性粒径; 等效粒径带有一定的虚拟性质, 可以代表天然土的全部颗粒组成, 能以应用等粒径球体颗粒的研究理论研究土体的孔隙平均直径及渗透系数。试验结果表明, 按此理论研究的结果, 将与天然土的实际情况基本相一致, 故称该粒径为等效粒径。分界粒径是概略地将天然不均匀土的颗粒组成分为骨架与填料的粒径。

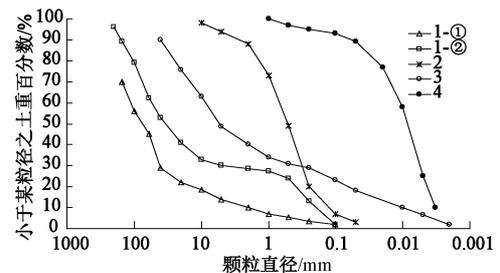


图 1 各类土颗粒组成变化范围及特征

Fig. 1 Variation ranges and characteristics of all kinds of soil particle compositions

(1) 土的控制粒径

目前, 反滤层设计中出现的控制粒径有 d_{85} , d_{70} , d_{60} 和 d_{50} , 即土中小于该粒径的土重占 85%, 70%, 60%和 50%。最早哈金提出的控制粒径为 d_{60} , 太沙基采用 d_{85} , 刘杰采用 d_{70} 。

(2) 土的等效粒径

曾出现的等效粒径有 d_{10} , d_{15} , d_{17} , d_{20} 和 d_{50} 即土中小于该粒径的土重分别占有 10%, 15%, 17%, 20%和 50%。最早哈金采用 d_{10} , 太沙基采用 d_{15} , 前苏联采用 d_{17} , 刘杰采用 d_{20} ^[6]。

早期太沙基以 d_{85} 为控制粒径, d_{15} 为等效粒径给出反滤层的设计准则。随着水利工程建设的不断发展, 出现大量的多级配的不均匀土, 太沙基根据工程实践经验, 在其专著《工程实用土力学》中特别提出, 现在看来土的控制粒径采用 d_{70} , 等效粒径采用 d_{20} 更能反映土的性质^[7], 实践表明太沙基的见解是正确的。

(3) 土的分界粒径

分界粒径是将不均匀土区分为粗料和细料两个部分的粒径, 常用 d_{30} 表示。

1.3 工程中常用参数

不均匀系数

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (1)$$

式中, d_{60} , d_{10} 代表小于该粒径的土体分别占总土重的 60%和 10%。

一般都把土性按 C_u 值的大小区分为均匀土和不均匀土。 $C_u \leq 5$ 的土称均匀土, 各个颗粒之间彼此有

很好地制约能力。 $C_u > 5$ 的土称不均匀土，中粗细粒径相互之间的关系较疏远，存在骨架与填料之别。

1.4 土的渗透稳定性

近代反滤层设计方法的特点，在确定被保护土的控制粒径时首先要分析土体本身的渗透稳定特性。黏性土的渗透稳定性，除分散性土外，在渗流作用下主要呈流土破坏的型式。无黏性土中，对于 $C_u \leq 5$ 的均匀土，主要是流土破坏。对于 $C_u > 5$ 的不均匀土，渗透破坏的形式有流土、管涌和过渡型3种形式。

(1) 无黏性土渗透稳定性的判别方法^[8]

a) 均匀土

$$C_u \leq 5 \quad (\text{流土破坏}) ; \quad (2)$$

b) 不均匀土

$$C_u > 5$$

可用细料含量法

$$\left. \begin{aligned} P < 25\% & \quad (\text{管涌型}), \\ P > 35\% & \quad (\text{流土型}), \\ P = 25\% \sim 35\% & \quad (\text{过渡型}), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中， P 代表土中的细料含量。

粗料和细料的区分原则，根据颗粒组成曲线的特征确定，总结国内外天然无黏性土颗粒组成特征，颗粒组成曲线中部往往在 1~5 mm 粒径出现平台段，颗粒含量 < 6%，组成的微分曲线呈双峰型，级配呈不连续型，故以 2 mm 的粒径作为粗细料的区分粒径。对于级配连续型土，采用几何平均粒径，人工配制的土，按实际配制土样情况而定。几何平均粒径按下式计算

$$d_q = \sqrt{d_{70}d_{10}} \quad , \quad (4)$$

式中， d_q 为粗料和细料之间的区分粒径。 d_{10} ， d_{70} 为小于该粒径之土重在土中分别占 10% 和 70%。

(2) 砾石土渗透稳定性的判别方法

同样可以采用细料含量法，砾石土的颗粒级配曲线，若以几何级数为标准，至少有 15 个粒径级数，曲线中段每级粒径含量也只有 3%~5%，所以难以缺乏中间粒径的概念来评价土的颗粒组成特点，应以连续级配的概念采用细料含量法判别渗透稳定性。可将细料恰好填满粗料孔隙体积时的细料含量称谓最优细料含量^[9]。

$$P_{op} = \frac{0.30 - n + 3n^2}{1 - n} \quad , \quad (5)$$

式中， P_{op} 为最优细料含量， n 为砾石土的孔隙率，以小数计。

以最优细料含量判别砾石土渗透破坏型式的准则

$$\left. \begin{aligned} P_x < 0.9P_{op} & \quad (\text{管涌型}), \\ P_x > 1.1P_{op} & \quad (\text{流土型}), \\ P_x = (0.9 \sim 1.1)P_{op} & \quad (\text{过渡型}), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中， P_x 为颗粒级配曲线上实际出现的细料含量值粗料和细料区分粒径的确定方法，同于无黏性连续级配型土，采用几何平均粒径，即按式 (4) 确定。

(3) 黏性土的渗透破坏特性^[8]

完整的黏性土主要是流土破坏型式，有裂缝时主要是裂缝渗流冲蚀，渗透强度明显降低，所以黏性土的反滤层设计，不需专门考虑土的渗透稳定特性。

黏性土抗裂缝渗流冲蚀的渗透强度试验结果绘成图 2 的形式，并可表示为

$$J_{LKP} = \frac{50e_L^2}{\sqrt{D_{20}} - 0.4} \quad , \quad (7)$$

$$e_L = w_L G_s \quad , \quad (8)$$

式中， e_L 为土的液限孔隙比， G_s 为土的比重， w_L 为液限含水率，以小数计。

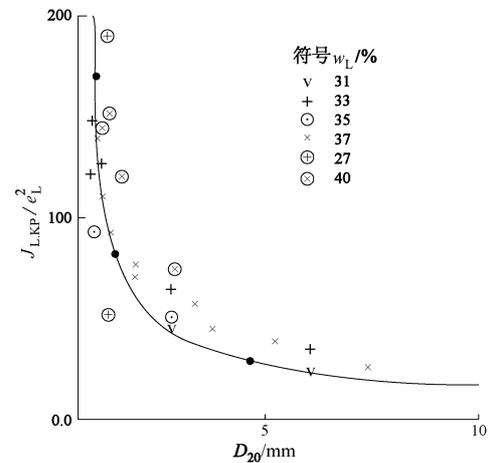


图 2 裂缝土的渗透强度与反滤层等效粒径关系

Fig. 2 Relationship between permeability of cracks and particle size of filter layers

2 反滤层滤土排水减压的基本原理

2.1 基本原理

反滤层有滤土和排水减压的双重功能，它是矛盾的统一体。滤土准则确定的是允许的最粗颗粒组成，排水减压准则确定的是允许的最细颗粒组成。二者共同构成反滤层颗粒组成允许的变化范围，工程实际采用的颗粒组成应在此变化范围。

解析太沙基反滤层设计准则，基本原理可用下列公式作表述：

(1) 滤土原理^[10]

$$D_0 \leq \alpha d_k \quad , \quad (9)$$

式中， D_0 为反滤层的孔隙平均直径， d_k 为土中对渗透破坏能起整个控制作用的粒径，称谓控制粒径， k 表示该粒径在土中出现的概率， α 为成拱系数，被保护土中被移动的最大颗粒在反滤层出口易形成拱架，阻

止其它颗粒继续进入反滤层,表示能够形成拱架的最多颗粒数,一般不会超过3个颗粒。

式(9)表明,反滤层工作的基本原理是孔隙平均直径,必须小于被保护土的控制粒径,此式属于几何稳定原理。

(2) 排水减压原理

土体的排水能力,主要决定土的渗透系数,渗透系数愈大,排水能力愈强,减压效果愈好,太沙基排水原理可用土体渗透系数的大小来表示。即

$$\frac{k_{\text{反}}}{k_{\text{保}}} \geq 4 \sim 16, \quad (10)$$

式中, $k_{\text{反}}$ 及 $k_{\text{保}}$ 分别代表反滤层和被保护土的渗透系数。

式(10)的基础是渗透理论,如果反滤层的渗透系数是被保护土的16倍,则进入反滤层后的剩余水头,只有被保护土的1/16^[11],因此,按式(10)的原则选择反滤层允许的渗透系数,则进入反滤层中的渗水压力基本消失。

2.2 滤土和排水减压原理具体的表达形式

太沙基准则的基本原理,可用下式具体来表示。

(1) 滤土方面

反滤层滤土原理式(9)表明其中包含反滤层的孔隙平均直径和被保护土的控制粒径两个因子。可见,无黏性土反滤层的研究内容主要是确定土的孔隙平均直径及被保护土的控制粒径两个方面,关于土的孔隙平均直径,已有研究表明,对于均匀土,可表示为^[13]

$$D_0 = 0.25D_{15}。 \quad (11)$$

若取成拱系数 $\alpha = 1.0$, $d_k = d_{85}$, 则式(9)可表达为

$$D_{15}/d_k = D_{15}/d_{85} \leq 4, \quad (12)$$

即为著名的太沙基滤土准则。

早期规定反滤层只能采用 $C_u \leq 5$ 的均匀无黏性土,等效粒径采用 D_{15} 是可行的。实践表明,对于不均匀无黏性土,土的孔隙直径选用下式,更能反映土的孔隙特性^[6]。

$$D_0 = 0.63nD_{20}。 \quad (13)$$

为使无黏性土孔隙直径的表达式具有更广泛的适用性,在研究反滤层准则的设计中将式(11)改为式(13)的形式。若土的孔隙率选用 $n=0.4$, 则式(13)简化为

$$D_0 = 0.25D_{20}。 \quad (14)$$

若选取 $\alpha = 1 \sim 2$, 则各类均匀和不均匀土的反滤层滤土准则的一般表达式表示为

$$\frac{D_{20}}{d_k} \leq 4 \sim 8。 \quad (15)$$

式(15)是选择不均匀无黏性土反滤层滤土准则的一般表达式,称为反滤层的层间系数,适用于各类土料。从安全出发,建议对于无黏性土采用

$$\frac{D_{20}}{d_k} \leq 6。 \quad (16)$$

对于砾石土采用

$$\frac{D_{20}}{d_k} \leq 7。 \quad (17)$$

关于控制粒径 d_k 确定问题,将在下面反滤层的设计准则中作出专门论述。

(2) 排水减压方面

确定土的渗透系数,有试验和计算两种方法,已有研究成果表明,不均匀无黏性土的渗透系数可近似的用土的等效粒径来确定^[6],即

$$k = Ad_{20}^2。 \quad (18)$$

表示排水减压功能的式(10)可进一步表示为

$$D_{20}/d_{20} \geq (2 \sim 4), \quad (19)$$

式中,2适用于管涌型土,4适用于非管涌型土,即太沙基的排水准则。

3 各类土反滤层设计准则

3.1 概述

(1) 控制粒径

控制粒径 d_k 是反滤准则中的关键因子。

太沙基的控制粒径选用 d_{85} , 其真实概念是保护土中15%的粗颗粒不流失,对均匀无黏性土是可行的,因为均匀土中各个颗粒之间彼此都有紧密联系,每一级颗粒群体对土体都有控制作用,小概率是可以的,但是不科学的,故太沙基在晚年提出应以 d_{70} 为控制粒径,至于不均匀土控制粒径如何确定更需进一步研究。

(2) 研究不均匀无黏性土控制粒径的原则及方法

不均匀无黏性土控制粒径的研究,首先由均匀土开始,以 d_{20} 为等效粒径,以式(15)为基础,选择反滤层,试验研究被保护土能以承受的临界水力比降,然后以此水力比降为基础,再通过试验研究的方法进一步反求不均匀土的控制粒径。本方法的特点,在几何稳定的基础上增加了水力稳定的条件。

反滤试验结果进一步表明,级配连续型土,当土的 $C_u \leq 5$ 时,以 d_{70} 作为控制粒径,式(16)设计极限反滤层,则被保护土的临界水力比降将达8.0以上,如果被保护土的 $C_u = 5 \sim 10$, 以 d_{70} 作为控制粒径设计的极限反滤层,则抵抗渗透破坏的水力比降就不易达8.0。被保护土的不均匀系数愈大,试验中要达到8.0的临界水力比降,则控制粒径出现的概率愈小。如果铺设反滤层后,被保护土的渗透水力比降达8.0以上,

取 2 的安全系数, 允许水力比降可达 4.0, 可以保证工程的渗透稳定性, 故在控制粒径的试验研究中, 以临界水力比降大于 8 为研究控制粒径的标准。

不均匀土如果以其中 $C_u = 5$ 的细粒部分为母体, 选取控制粒径, 并取其中的 d_{70} , 则 $C_u = 5$ 的细粒部分的 d_{70} 在整个土体中出现的概率如图 3 所示, 图中表明, 当土的 $C_u > 5$ 时随着土的不均匀系数的增大, 控制粒径出现的概率在不断减小, 对于 $C_u > 100$ 的土体, 控制粒径为 d_{25} 。

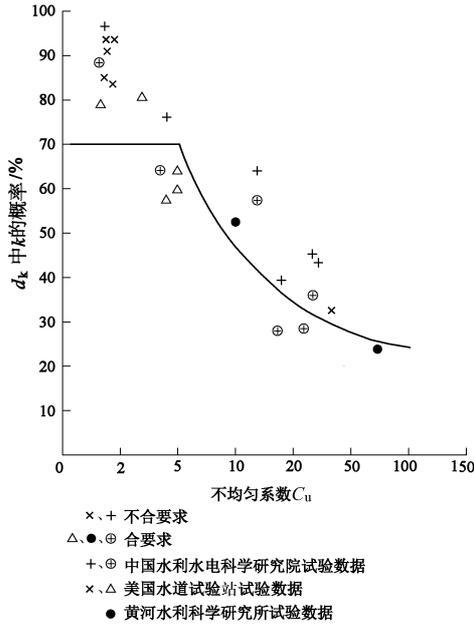


图 3 级配连续土的控制粒径 $k = f(C_u)$

Fig. 3 Control particle sizes of graded continuous soil $k = f(C_u)$

对于级配不连续型土, 试验结果表明, 应当保护土中的细粒不流失, 故控制粒径 d_k 直接选取细粒部分的 d_{70} , 试验结果绘于图 4。

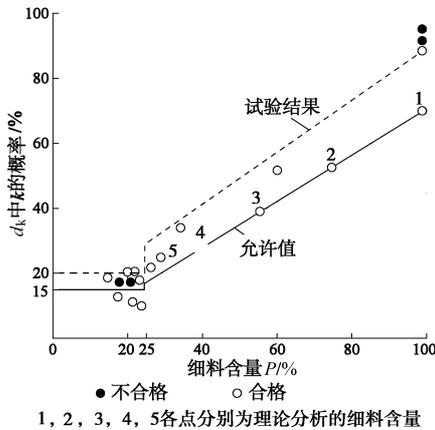


图 4 缺乏中间粒级土的控制粒径 $k = f(P)$

Fig. 4 Control particle sizes in absence of intermediate particles

对于管涌型土, 以保护 30% 的细粒不流失为立足点, 按式 (22) 控制粒径 $d_k = d_{0.3 \times 70 = 21}$, 计算中取 $d_k = d_{20}$, 试验结果表明, 用反滤层保护后, 管涌型

土临界水力比降可以提升到 0.8~1.0, 允许水力比降可达 0.4~0.6。

表 1 各类土确定控制粒径时细粒部分的确定方法

Table 1 Determination methods for fine grains of control particle size of various types of soil

土类	基本特性	颗粒组成特性	细粒区分粒径	
			非管涌型土	管涌型土
无黏性土	均匀土	颗粒级数较少	全体土料	
	不均匀土	级配连续型	$C_u = 5$	d_{30}
		级配不连续型	< 2 mm	d_{30}
砾石土			< 2 mm	d_{30}

所谓级配不连续的土, 也就是缺乏中间粒径的土, 该种类型的土, 颗粒级配曲线中段出现一平台段, 平台的粒径级至少有两个级数, 颗粒含量总共 < 6%, 如图 1 曲线 1-②所示。

总的原则是被保护土的控制粒径采用 d_{70} , 对于 $C_u \leq 5$ 的均匀土, d_{70} 固定不变, 对于不均匀土, 从 $C_u = 5$ 细粒部分来观察, 控制粒径出现的概率 d_{70} 是不变的, 但对整个土体而言, 控制粒径随土的颗粒组成不同而变化。这种反滤层设计方法, E.A 鲁巴契柯夫称之为多点法^[5]。结合试验结果, 分析不均匀土中 $C_u = 5$ 的细粒部分的 d_{70} 与 C_u 的关系, 最后绘成图 3, 以省去试算的步骤, 图 4 为级配不连续型土的细料含量与 d_{70} 的关系, 图中同时绘有试验结果。试验结果表明, 按建议的确定不均匀土控制粒径的方法设计的反滤层是可信的, 可以保证被保护土的渗透稳定性。

3.2 无黏性土反滤层设计准则^[13]

(1) 反滤层的滤土准则, 即

$$\frac{D_{20}}{d_k} \leq 6, \tag{20}$$

式中, D_{20} 为反滤层的等效粒径 (mm), d_k 为被保护土的控制粒径 (mm)。

控制粒径的确定方法:

$C_u \leq 5$ 的均匀土

$$d_k = d_{70}. \tag{21}$$

$C_u > 5$ 的非管涌型被保护土:

a) 颗粒级配曲线连续型土, d_k 值按图 3 确定。

b) 颗粒级配曲线不连续型土, 按图 4 确定, 并可表示为

$$d_k = d_{70}p. \tag{22}$$

c) $C_u > 5$ 的管涌型土, 控制粒径

$$d_k = d_{20}. \tag{23}$$

(2) 反滤层的排水减压准则

$$D_{20}/d_{20} \geq (2 \sim 4). \tag{24}$$

(3) 反滤层的不均匀系数

反滤料可允许的不均匀系数

$$C_u \leq 20 \sim 40 \quad (25)$$

式中 C_u 为土的不均匀系数, d_k 为被保护土的控制粒径; D_{20} , d_{20} 分别代表反滤层和被保护土的等效粒径。 P 为级配不连续型土中细料的含量, 以小数计; d_{70} 为被保护的均匀土的控制粒径, 小于该粒径土重占总土重的 70%。

反滤层可允许的不均匀系数, 主要取决于反滤层在施工过程中的分离问题, 反滤层在施工过程中不允许存在粗细分离问题。一般情况下, 若采用 $C_u \leq 20$ 的砂砾石作反滤料, 施工过程中施工方法正确, 不会出现粗细分离问题, 所以, 目前反滤料多采用 $C_u \leq 20$ 的天然砂砾石材料。

3.3 砾石土的反滤层设计准则

(1) 基本原则保护细颗粒不流失

砾石土是颗粒组成中黏粒含量 $< 10\%$ 的多级配土, 粒径变化于 $0.001 \sim 200 \text{ mm}$ 范围之内。

就成因而论, 多数是坡积、冲洪积或冰碛, 无水流搬运过程中的筛选作用, 颗粒组成不易存在缺乏中间粒径问题。既或出现缺乏中间粒径的问题, 也多数出现在 $0.1 \sim 2 \text{ mm}$ 之间。试验结果表明, 如果按照无黏性土, 反滤层设计理论, 保护 $< 2 \text{ mm}$ 的颗粒不流失, 则试验时的水力比降 $J \geq 100$, 整个土体将是渗透稳定的, 因此对砾石土仍采用保护细颗粒粒径的方法, 即控制粒径法。控制粒径是按保护其中 $< 2 \text{ mm}$ 的颗粒不流失, 并选择其中的代表性粒径 d_{70} 作为整个土体的控制粒径 d_k 。当砾石土中的黏粒含量 $> 10\%$ 时, 应按黏性土的原则设计反滤层^[14]。

砾石土的渗透稳定特性, 同样有流土和管涌两种形式, 对管涌土而言, 控制粒径 $d_k = d_{20}$ 。

(2) 滤土准则

$$\frac{D_{20}}{d_k} \leq 7 \quad (26)$$

被保护土的控制粒径在土体中出现的概率, 按下式确定:

a) 非管涌型土

$$k = (< 2)P \cdot 70 \quad (27)$$

式中, $(< 2)P$ 代表 $< 2 \text{ mm}$ 的颗粒在土体中的含量; $(< 2)P \cdot 70$ 代表单元体为 $< 2 \text{ mm}$ 粒径组在总体中所占的比例为 P 时, 细料中 70% 的含量, 若以总土重为单元体, 在总土中所占的比例数, 即

$$d_k = d_{(< 2)P \cdot 70} \quad (28)$$

b) 管涌型土

$$d_k = d_{20} \quad (29)$$

式中, d_{20} 为被保护土的等效粒径。

砾石土反滤层等效粒径与控制粒径关系的试验结果绘于图 5。

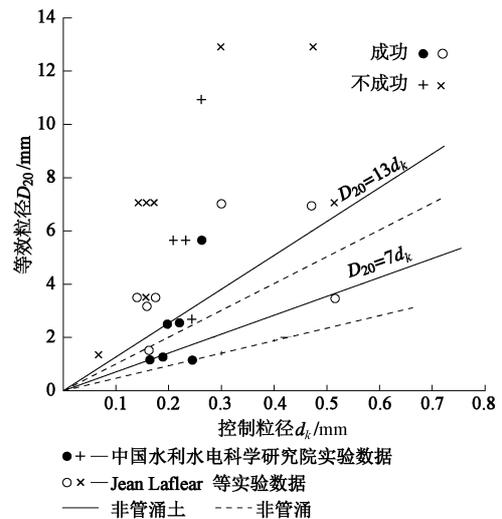


图 5 砾石土反滤层的等效粒径与被保护土控制粒径的关系

Fig. 5 Relationship between equivalent particle size of gravel soil

filter layer and control particle size of protected soil

(3) 排水减压准则

非管涌型土

$$\frac{D_{20}}{d_{20}} \geq 4 \quad (30)$$

管涌型土

$$\frac{D_{20}}{d_{20}} \geq 2 \quad (31)$$

式中, D_{20} , d_{20} 分别代表反滤层和被保护土的等效粒径 (mm)。

(4) 被保护土能承受的水力比降 $J > 10$

3.4 黏性土反滤层设计准则

(1) 基本原则

黏性土是指 $< 0.005 \text{ mm}$ 的黏粒含量大于 10% , 液限含水率 $w_L > 26\%$ 的土, 在水利工程中主要用作防渗体的材料。根据在工程中的工作性状, 黏性土又可分为完整型和存在裂缝型两种状况。防渗体一旦出现裂缝, 则抗渗透破坏的能力显著降低。工程运行实际情况表明, 当土石坝防渗体的心墙边坡坡比大于 $1 : 0.5$ 时, 防渗体不可能产生上下游贯穿性的水平裂缝, 可按无裂缝的原则来设计反滤层。当土石坝防渗体的心墙边坡坡比 $< 1 : 0.5$ 时, 心墙中可能会出现横向贯穿性的水平裂缝, 应按有裂缝的原则来设计。

黏性土的颗粒在自然状态下都呈粒团存土, 通常所述的颗粒大小及含量是在实验室加入一定量的分散剂后测定的, 用实验室测定的颗粒组成曲线, 不能完全反映黏性土的工程特性, 因而在反滤层设计准则的制定中, 不直接采用控制粒径的方法而采用以液限含

水率指标代表黏性土设计反滤层的特性指标。

(2) 反滤层设计准则

a) 黏性土反滤层滤土准则

① 无裂缝土反滤层滤土准则:

反滤层允许的等效粒径^[8]

$$D_{20} \leq 6.4w_L - 110 \quad (32)$$

② 裂缝土反滤层滤土准则:

反滤层允许的等效粒径^[8], 取 $J_{KP} = 50$, 则

$$D_{20} \leq 53.1w_L^4 + 5.8w_L^2 + 0.16 \quad (33)$$

根据式(33), 裂缝自愈条件下反滤层允许的等效粒径可按表2确定。

表2 裂缝土反滤层的 D_{20} 与土的液限的关系

Table 2 Relationship between D_{20} and content of liquid limit in soil of crack

$w_L/\%$	≤ 25	26~30	30~40	40~50	≥ 50
D_{20}/mm	≤ 0.7	≤ 1.0	≤ 2.5	≤ 4.5	≤ 5.0

③ 按土的分散度确定反滤层的等效粒径

$$D_{20} \leq \frac{0.25}{0.1 + D - 0.6D^2} \quad (34)$$

式中, D 为土的分散度, 以小数计。

表3 反滤层的 D_{20} 与土的分散度的关系

Table 3 Relationship between D_{20} and dispersion of soil

D	D_{20}/mm
≤ 0.2	≤ 1.0
0.3	≤ 0.8
≥ 0.5	≤ 0.5

试验结果见图6^[2]。

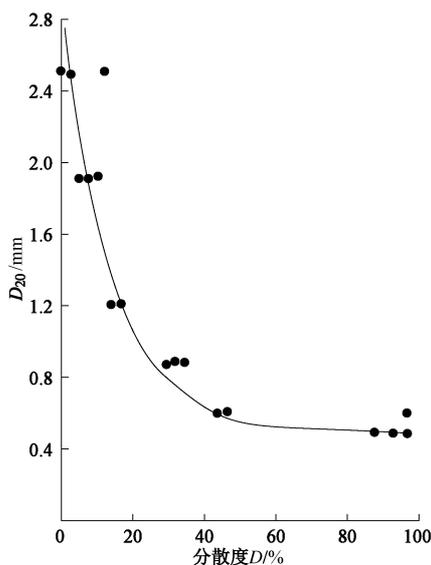


图6 反滤层的等效粒径与分散度的关系图

Fig. 6 Relationship between equivalent particle size and dispersion degree of filter layers

b) 黏性土反滤层排水减压准则

为使设计的反滤层同时能够起到释放防渗体中的

渗透水压力, 反滤层必须要有足够的排水能力, 要求反滤层的渗透系数至少要达 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$, 才能起到排水作用。若以等效粒径来表示, 则

$$D_{20} \geq 0.1 \text{ mm} \quad (35)$$

才能使反滤层有自由排水的能力。

4 结 论

(1) 太沙基反滤层设计准则, 充分彰显了反滤层的功能及结构型式, 为反滤层的广泛应用和理论的发展奠定了基础。

(2) 太沙基反滤层设计理论是建立在均匀无黏性土渗透破坏的理论基础之上。本文在太沙基反滤层设计理论的基础上试验研究了不均匀无黏性土、砾石土及黏性土的反滤层设计准则, 给出了适合这些土类的反滤层的设计方法。

(3) 文中主要论述了不均匀无黏性土控制渗透稳定的代表性粒径的确定原理, 并在大量试验资料的基础上, 通过理论分析给出了确定控制粒径的方法, 最后将各种类型土的反滤层设计准则纳入太沙基反滤层设计理论的范畴。给出了自然界3种类型土反滤层的设计方法。

(4) 无黏性管涌土, 渗流流失的土颗粒主要是小于30%的细颗粒, 反滤层设计原理主要是直接保护土中30%的细颗粒不流失, 是否需要保护30%的细颗粒, 这一问题有待今后进一步的研究。

参考文献:

[1] 刘杰, 缪良娟. 柴河土坝心墙渗流控制安全分析[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(1): 62 - 72. (LIU Jie, MIAO Liang-juan. Safety analysis of seepage control of Chai River dam core wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineerin, 1990, 12(1): 62 - 72. (in Chinese))

[2] 刘杰, 罗玉再. 高土石坝心墙裂缝自愈及反滤层的保护作用[J]. 水利学报, 1987, 7(1): 20 - 29. (LIU Jie, LUO Yu-zai. The protective effect of high rockfill dam crack self-healing and filter layer[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987, 7(1): 20 - 29. (in Chinese))

[3] SHERARD J L. Trends and debatable aspects in embankment dam engineering[J]. Water Power Dam Construction, 1984, 36(12): 29 - 32.

[4] BERTRAM G E. An experimental investigation of protective filters (Soil Mechanics Series)[R]. Harvard University, Graduate School of Engineering, 1940: 21.

[5] 全苏水工科学院. 水工建筑物反滤层设计规范[M]. 晏友仑译. 北京: 水利电力出版社, 1959. (Russia Hydraulic

- Research Institute. Design standard of filter of hydraulic building[M]. YAN You-lun, tran. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1959. (in Chinese))
- [6] 刘杰. 无黏性土的孔隙直径及渗透系数[M]// 水利水电研究论文集(第八集). 北京: 水力电力出版社, 1982. (LIU Jie. Pore diameter and permeability coefficient of non cohesive soil[M]// Water Resources and Hydropower Research Papers (No.8). Beijing: Hydraulic Power Press, 1982. (in Chinese))
- [7] 太沙基, 泼克. 工程实用土力学[M]. 蒋彭年, 译. 北京: 水力电力出版社, 1960. (TERZAGHI, Pork. Engineering practical soil mechanics[M]. JIANG Peng-nian, tran. Beijing: Hydraulic Power Press, 1960. (in Chinese))
- [8] 刘杰. 土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (LIU Jie. Theoretical foundation and engineering experience of seepage control for earth rockfill dam[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2006. (in Chinese))
- [9] 刘杰, 谢定松. 砾石土渗透稳定特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2632 - 2638. (LIU Jie, XIE Ding-song. Experimental study on seepage stability of gravel soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2632 - 2638. (in Chinese))
- [10] 刘杰. 土的渗透破坏及控制研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (LIU Jie. Study on the seepage failure and control of soil[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2014. (in Chinese))
- [11] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (MAO Chang-xi. Calculation analysis and control of seepage flow[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003. (in Chinese))
- [12] 刘杰. 无黏性土反滤料的试验研究[J]. 水利学报, 1981, 3(1): 73 - 79. (LIU Jie. Experimental study on anti filtering material of non cohesive soil[J]. Chinese Journal of Hydraulic Engineering, 1981, 3(1): 73 - 79. (in Chinese))
- [13] SHERARD J L, DUNNIGAN L P, TALBOT J R. Basic properties of sand and gravel Filters[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 110(6): 684 - 700.
- [14] 刘杰, 缪良娟. 鲁布革土石坝风化料心墙反滤层的研究[J]. 水利水电技术, 1989, 12(1): 16 - 22. (LIU Jie, MIAO Liang-juan. Experimental study on the reverse filter layer of weathered material[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 1989, 12(1): 16 - 22. (in Chinese))

2017年黄文熙讲座会议日程

时间: 2017年4月16日(星期日)

地点: 清华大学大礼堂

时间	内容
8:00-9:00	报到
9:00-9:15	开幕式
9:20-10:40	吴宏伟(香港科技大学) 题目: 大气-植被-土体相互作用: 理论与机理
10:50-11:20	陈祖煜(中国水利水电科学研究院) 题目: 水下爆破冲击波和气泡脉动损伤效应离心模型试验研究
11:20-11:50	吴伟(维也纳农业大学) 题目: 硬土中植物根生长的力学模型及验证
11:50-12:50	工作午餐
13:00-13:30	王兰民(中国地震局兰州地震研究所) 题目: 地震与降雨耦合作用下黄土边坡破坏特征及其抗震设计
13:30-14:00	刘松玉(东南大学) 题目: MgO水泥碳化固化软弱土技术研究
14:00-14:30	朱俊高(河海大学) 题目: 粗颗粒土本构模型研究
14:45-15:15	魏迎奇(中国水利水电科学研究院) 题目: 基于离心机双向振动台技术的土石坝动力响应试验研究
15:15-15:45	程晓辉(清华大学) 题目: 能源桩与能源隧道: 结构与传热耦合分析
15:45-16:00	闭幕式

注: ①4月15日(星期六)晚20:00-22:00在西郊宾馆第六会议室召开《岩土工程学报》编委会; ②4月16日(星期日)早上8:15, 住宿在西郊宾馆的编委在会议中心大门口集合乘车前往黄文熙讲座会场。