

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.05.020

砾石土心墙料-反滤料联合抗渗研究进展

邹玉华 陈 群

(四川大学水利水电学院山区河流开发与保护国家重点实验室 四川 成都 610065)

摘要 基于国内外砾石土心墙料-反滤料联合抗渗研究成果,比较砾石土料单独抗渗与砾石土心墙料-反滤料联合抗渗性能,总结砾石土心墙料-反滤料联合抗渗机理、抗渗规律和联合抗渗模型的研究进展以及保护砾石土料的反滤准则,并提出该领域有待研究的关键问题。

关键词 砾石土;心墙料-反滤料联合抗渗;抗渗机理;反滤准则

中图分类号 :TV441 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)05-0089-06

Progress in research on anti-permeability properties of gravelly soil core material and filter material//ZOU Yu-hua ,CHEN Qun(*State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering , College of Water Resources and Hydropower , Sichuan University , Chengdu 610065 , China*)

Abstract :Based on gravelly soil core material and filter material anti-permeability research results from China and elsewhere , the anti-permeability properties of gravelly soil are compared with the combined anti-permeability properties gravelly soil core material and filter material . The impermeability mechanism ,impermeability law ,progress in anti-permeability models ,and filter criteria for gravelly soil are discussed and summarized . Key points for further research in this field are proposed .

Key words :gravelly soil ; core material and filter material joint anti-permeability ; impermeability mechanism ; filter criteria

含砾石质量分数在 20% 以上的含砾土、黏土质砾、风化料及碾压后可破碎成砾石土的风化岩石统称为砾石土^[1],其特点是填筑密度大、抗剪强度高、沉陷变形小且广泛存在于自然界中^[2]。20 世纪 40 年代美国修建泥山坝时就开始用砾石土作心墙料;50~60 年代瑞士、法国、加拿大、瑞典、奥地利也相继将其用作高土石坝心墙料^[3];80 年代后砾石土在国内高土石坝中的应用越来越普遍。但砾石土料应用初期,用太沙基保护黏土反滤准则为宽级配心墙料(如冰碛土)设计的反滤料太粗,一些大坝出现了管涌破坏情况并失事,如英国的 Balderhead 坝和新西兰的 Matahina 坝等^[4]。目前的反滤准则适用于保护黏土心墙,且主要建立在经验基础上,缺乏理论依据,致使砾石土渗透变形控制存在不确定性。因此有必要深入研究砾石土防渗和反滤联合抗渗机理,为科学设计反滤层,有效提高防渗体抗渗能力提供依据。

笔者对近几十年来国内外砾石土心墙料-反滤料联合抗渗研究进行较详尽的综述,总结了砾石土心墙料-反滤料联合抗渗特性、联合抗渗机理的研究

进展和保护砾石土反滤的准则,并提出该领域有待研究的相关问题。

1 砾石土心墙料-反滤料联合抗渗性能研究

1.1 心墙无裂缝时的反滤保护性能

1984 年 Sherard^[5]明确指出防止土石坝渗流破坏的首道防线不是防渗体,而是下游反滤层。反滤层是防止土体渗透破坏最直接、最有效的方式^[6]。参考国内 5 座高土石坝工程实践,比较风化料、冰碛土、碎石土等砾石土料在无反滤保护和有适当反滤保护时的抗渗性能,得出下游设置适当反滤层后砾石土心墙的抗渗透变形能力可提高近 5 倍甚至更高的结论^[7-13](见表 1)。

1.2 心墙有裂缝时的反滤保护性能

裂缝问题是土石坝防渗体设计首先要关注的问题。20 世纪 50 年代国外的工程师就开始了整治土石坝裂缝的工作^[5]。随着砾石土心墙在国内高坝中的应用,国内专家也对砾石土的裂缝反滤保护作用进行了一些试验研究^[7,9,14-17]。

基金项目 国家自然科学基金(50709022)

作者简介 邹玉华(1984—),女,江西新余人,博士研究生,从事岩土体渗透特性研究。E-mail :sczouyuhua@yahoo.cn

表 1 砾石土心墙有无反滤保护时的抗渗性能比较

大坝名称	防渗料的颗粒质量分数(平均值)/%			土料类别	渗透系数	无反滤料保护 临界坡降	有适当反滤层保护	
	$d > 5\text{ mm}$	$d < 0.074\text{ mm}$	$d < 0.005\text{ mm}$				临界坡降	破坏坡降
鲁布革		40 ~ 70		风化料	10^{-5}	40		165
水布垭	36.4	53	20 ~ 46	页岩全风化料	$10^{-5} \sim 10^{-7}$	11 ~ 14		> 60
瀑布沟	50.24	22.6	5.5	冰碛土	$10^{-5} \sim 10^{-7}$	8.0	55 ~ 57	> 100
糯扎渡	37.6	36.1	18.6	掺砾风化料	$10^{-5} \sim 10^{-6}$	25		> 200
硃 磬	20 ~ 50	15	5 ~ 20	碎石土	$10^{-6} \sim 10^{-7}$	6.53	50.7 ~ 55.7	

注 : d 为防渗料颗粒直径。

刘杰等^[7,14]研究鲁布革风化料在反滤保护下的自愈效果,指出在适当的反滤料保护下缝中冲蚀流速逐渐变小,裂缝可自愈,其自愈能力与细粒质量分数有关,细粒质量分数小于 40% 的风化料自愈能力最好。

朱建华等^[15]结合瀑布沟工程,系统地研究了宽级配砾石土的渗透稳定性,比较反滤保护下具有贯穿性和非贯穿性裂缝的不同密度防渗体的抗渗性,指出提高防渗体密度有助于限制冲蚀在其内部发展。

宋加升等^[17]结合糯扎渡工程,指出砾石土裂缝起伏差加大,沿裂缝的渗流水力坡降低,缝壁粗颗粒可限制沿裂缝的渗流冲蚀,反滤保护下裂缝的自愈效果亦较好。

上述试验研究均表明,当砾石土心墙存在裂缝时,只要在裂缝出口处有适当的反滤层作保护,即使裂缝中承受的水头很高,塌落后的土颗粒也不会从反滤孔隙中流失,从而达到裂缝自愈的效果,并且自愈后的防渗体抗渗性能可基本恢复^[6,18]。

2 砾石土心墙料-反滤料联合抗渗机理研究

国内外对砾石土心墙料-反滤料联合抗渗,以下简称联合抗渗,机理研究主要从 2 个方面进行:一是以土颗粒为对象,研究由渗流引起的联合抗渗系统土颗粒级配变化或土颗粒重分布规律,即渗透变形机理;二是以土体孔隙内水流为对象,研究联合抗渗系统中的水流流态和渗透规律。

2.1 联合抗渗系统渗透变形机理研究

2.1.1 心墙无裂缝时的反滤保护机理

Lafleur 等^[19]研究指出在渗流作用下,靠近反滤层的部分被保护土会进行颗粒重分布,并利用公式计算出颗粒重分布土体高度 H_{SF} 。联合抗渗系统自滤反滤层形成过程见文献^[19]。

Schuler 等^[20]指出反滤形成过程即土颗粒的移动过程,较宽级配心墙料-反滤料联合抗渗过程可分为 4 类:①所有反滤料孔径都小于被保护土料粒径,无土颗粒移动;②土颗粒粒径和反滤料孔径参差变

化,大部分被保护土颗粒进入反滤料中,直至几何平衡;③部分被保护土冲出反滤层,直至足够粗的被保护土颗粒形成骨架并阻止土颗粒继续冲失;④反滤料孔径都大于被保护土粒径,不可能形成稳定反滤层。

1987 年国内最早将鲁布革风化料(砾质土)用作高土石坝心墙料,刘杰等对砾石土防渗-反滤联合抗渗展开了一系列研究^[6-7,14,21-22]。

刘杰等^[21]指出多级配砾石土都是先在接触带形成自滤反滤层,不同被保护土的自滤反滤层形成过程不同。①流土型:在施工铺填过程中靠土体自重反滤层表面形成 1 层稳定的接触带,然后过渡到原土层,使被保护土有很高的抗渗强度;②管涌型:主要靠运行初期的渗透力带走土中部分可移动的很细颗粒,同时将另一部分较粗的细颗粒很快地淤填在反滤层进口,形成自滤反滤层并阻止其余颗粒移动;③过渡型介于上述两者之间。

2.1.2 心墙裂缝自愈的反滤保护机理

刘杰在文献^[6]中总结了裂缝自愈机理,裂缝自愈是土体遇水湿化崩解性能反映的结果。当黏粒含量较多时,裂缝遇水后的愈合形式主要是闭合型,而黏粒含量较少时,主要是愈合型,即裂缝完全消失,以极薄的低密度土层替代。并给出裂缝土抗渗强度与反滤粒径的关系式:

$$J_{L-KP} = \frac{50e_L^2}{\sqrt{D_{20}} - 0.4}$$

(1)

式中: J_{L-KP} 为裂缝土的抗渗强度; D_{20} 为反滤层的等效粒径; e_L 为液限孔隙比。

朱崇辉等^[23]通过试验比较黏土与砾质土裂缝冲刷对原反滤层结构的影响,揭示次生反滤层的形成规律和裂缝自愈机理。以上研究以不同方式描述联合抗渗机制,但未定性分析复杂应力状态和变形对抗渗的影响。

2.2 联合抗渗系统渗透规律研究

2.2.1 渗流半理论半经验公式

1927 年 Kozeny 最早提出渗透率与多孔介质材料属性相关的基本公式,1937 年 Carman 在其基础上

修正得到著名的 Kozeny-Carman 方程(式 2)^[24] 随后的研究中与多孔介质渗流规律相关的推导大多基于此式^[25-28]。

$$k = CD^2 \frac{\rho_w g}{\eta} \frac{e^3}{1 + e} \tag{2}$$

式中: C 为土体压实系数; D 为土粒有效粒径, 取 D_{15} ; ρ_w 为水的密度; η 为水流黏滞系数; e 为土体孔隙比。

另一些观点的学者从反滤料孔径对渗流的影响总结渗透规律^[29-31]。Indraratna 等^[29]推导出防渗-反滤渗透系数公式如下:

$$k = n \frac{\rho_w g}{\mu_w} \frac{d_0^2}{32} \tag{3}$$

式中: n 为孔隙率; μ_w 为水的黏滞系数; d_0 为反滤通道的最小孔径。

2.2.2 渗流经验公式

国内外对砾石土渗透规律的研究主要参考黏性土, 目前对砾石土渗透规律的研究并没有新的进展。这里借鉴黏性土的相关成果。Vaughan 等^[32]进行黏土心墙渗透试验时, 发现反滤层的渗透系数与被阻滞其中的被保护土粒径有关:

$$k = 8.7 \times 10^{-6} d_{85}^{1.52} \tag{4}$$

式中 d_{85} 为被保护土的特征粒径, 小于该粒径的颗粒占粒径小于 0.074 mm 颗粒总量的 85%。

式(4)定量反映了心墙-反滤联合渗透的特性, 为研究砾石土心墙-反滤渗透规律提供参考。

2.3 联合抗渗模型研究进展

Silveira^[33]首次从颗粒物质随机特性出发, 建立了粒状介质在密实状态下孔隙分布的数学公式; 用概率法进行向反滤层移动的被保护土量和入渗深度估计, 为反滤模型的发展及应用奠定了基础。

2.3.1 竖向渗流的反滤模型

Wittmann^[34]研究粒状介质的孔隙结构, 在实际孔隙尺寸的统计分析和随机分布规律基础上建立了向下渗流的反滤孔隙通道模型, 如图 1 所示。 d_0 决定了被保护土可通过反滤孔隙的最大粒径, 通过反滤料的最大粒径确定反滤料的级配曲线。

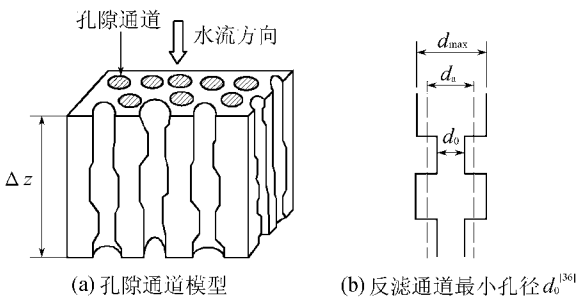


图 1 向下渗流的反滤孔隙通道模型

Kovacs^[35]推导出 d_0 的计算公式:

$$d_0 = 2.67 \frac{n}{1 - n} \frac{D_h}{\alpha} \tag{5}$$

其中

$$D_h = \frac{1}{\sum \frac{\Delta S_i}{D_i}} \tag{6}$$

式中: α 为颗粒形状系数; ΔS_i 为第 i 段内颗粒的质量分数; D_i 为颗粒分布曲线上某一段 (i 段) 内的平均粒径。

Indraratna 等^[36]研究竖向渗流时, 在 Wittmann 孔隙通道模型和 Kovacs 最小孔径公式基础上用质量和动量守恒描述土颗粒的运动, 建立了无黏性土颗粒冲蚀模型, 该模型可模拟防渗料-反滤料系统的颗粒分布、渗透性、孔隙率随时间的变化, 也适用于水流为其他任意方向的渗透系统。

2.3.2 多向渗流的反滤模型

Kenney 等^[30]提出控制管径 (D_c) 的概念, D_c 即反滤孔隙通道最窄处的直径, 相当于可通过反滤孔隙的最大粒径, 如图 2 所示。指出 D_c 与反滤层厚度、级配曲线形状关系不大, 而与反滤料的细粒级配有关。这样即可直接通过 D_c 得到反滤料的细料级配, 但该方法只适用于 $C_u < 6$ 的粒状反滤料。

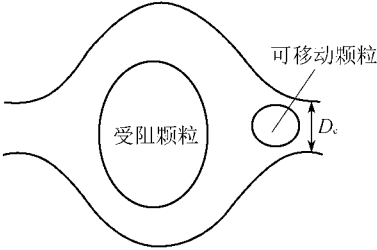


图 2 控制管径 D_c 示意图^[37]

基于 Kenney 的控制管径理论, Witt 1986 年建立了球体和管道联结成的三维孔隙通道网络模型^[20], 如图 3 所示。该模型由球体和管道 2 部分组成: ①直径不等的球体模拟孔隙通道较宽部分; ②细管道模拟被土体挤压成的较细孔隙通道。假定每个球体有很多可能移动通道, 最大的孔隙通道(最大的管道)决定颗粒能否从孔隙中移动。Witt 利用此模型

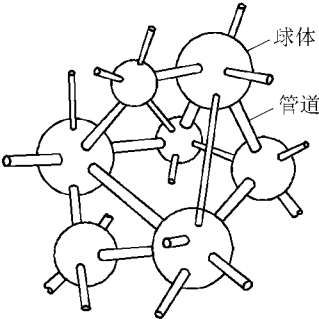
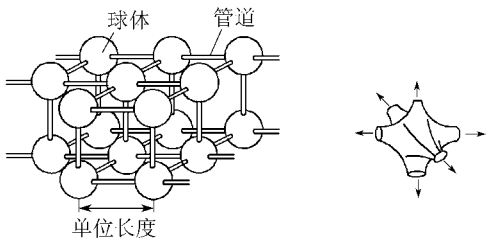


图 3 孔隙通道网络模型^[20]

得到对应不同反滤料类型的反滤准则。

Schuler^[31]从颗粒尺寸出发,用蒙特卡罗近似的方法得出被保护土颗粒在反滤层中的入渗深度计算公式,此外,通过对渗透孔隙系统进行观察,建立了球体-管道的规则立方体孔隙通道网络模型(图4)。



(a)孔隙通道立方体网络模型 (b)1个球体与6条管道相连^[39]

图4 球体-管道的规则立方体孔隙通道网络模型

Locke等^[38]在Schuler以及Indraratna等模型基础上,提出防渗-反滤自滤形成过程的模型。该模型可描述联合抗渗系统中土颗粒运动的速率,预测被保护土体达到稳定平衡或形成大范围管涌的时间。Locke在文献[39]中总结了其模型比Silveira模型、Witt模型、Schuler模型等所具备的优点,并将其用于保护无黏性均匀土、良好级配和宽级配土的反滤设计。

2.3.3 其他渗透模型

Aberg^[40]从颗粒和孔隙几何特性出发,建立了不连续级配土和松散颗粒土被冲蚀颗粒数学模型和无黏性土自滤公式。Kakuturu等^[41]用理想的四单元一维连续介质模型模拟被保护土-裂缝-反滤料系统,建立了土石坝心墙裂缝自愈机理力学模型,并用工程实例对该模型进行了验证。此外,Kakuturu等^[41-42]基于该模型得出被保护土的自身冲蚀、反滤层中渗透流速小于临界流速是裂缝自愈的2个关键因素的结论。

3 砾石土心墙料反滤设计准则的发展

20世纪60~70年代刚刚采用宽级配砾石土防渗料时,其反滤设计出现2个严重错误:①认为反滤料级配曲线必须与被保护土料平行,工程中采用单一的宽级配反滤料,造成许多管涌破坏;②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^[43-44]。

20世纪70年代后,基于上述失败教训,国内外开始进行砾石土防渗-反滤料联合抗渗试验研究,并建立了一些保护砾石土的反滤准则(下文中 D_i 和 d_i 分别表示反滤料、被保护土料累计含量为 $i\%$ 时的颗粒粒径)。

Sherard等^[45]研究指出反滤料与被保护土料的级配曲线形状不一定要平行,反滤准则 $D_{15}/d_{85} \leq 5$ 偏保守,但仍可用(内部不稳定或缺级的宽级配砾石

土除外)。

Sherard等^[46]对宽级配防渗料的细粒部分进行抗冲蚀试验研究,提出宽级配防渗料的反滤准则:反滤料等效粒径 $D_{15} \leq 0.7 \text{ mm}$ 。

Witt用其渗透孔隙通道模型得到不同类型反滤料对应的反滤准则,见表2^[20]。

表2 Witt 反滤准则

反滤料 控制粒径	反滤料的分类		
	$C_{uf} \leq 3$	$3 < C_{uf} \leq 6$	$C_{uf} > 6$
$D_5 < 0.5 \text{ mm}$	$D_{30}/d_{95} \leq 2.5$	$D_{10}/d_{95} \leq 2.5$	$D_5/d_{95} \leq 2.5$
$D_5 > 0.5 \text{ mm}$	$D_{30}/d_{85} \leq 2.5$	$D_{10}/d_{95} \leq 2.5$	$D_5/d_{95} \leq 2.5$

注: C_{uf} 表示反滤料的不均匀系数。

Honjo等^[47]提出保护无黏性土的反滤准则:

$$D_{15}/d_{85} \leq 5.5 - 0.5 \times d_{95}/d_{75} \quad (7)$$

$$d_{95}/d_{75} \leq 7 \quad (8)$$

Jean等将砾石土分为非宽级配土和宽级配土,宽级配土又分为线性级配土、间断级配土和上凹级配土,分析其内部敏感性,得出反滤料的透水和滤土准则^[19 43-44]:被保护土为无黏性土时,透土准则为 $D_{15}/d_{15} \geq 4$,滤土准则为 $D_{15}/d_{SF} \leq 4$ 。其中 d_{SF} 为被保护土料的自滤粒径,对宽级配料与非宽级配料其取值不同(文献[43])。

刘杰等^[14]试验研究鲁布革心墙风化石料,得出等效粒径相同时均匀反滤和不均匀反滤等效、风化石料的严格反滤层极限等效粒径应取 $D_{20} < 2.5 \text{ mm}$ 的结论。

朱建华等^[15]结合瀑布沟工程系统研究了宽级配砾石土的防渗性和渗透稳定性,提出了宽级配砾石土抗冲蚀破坏的极限反滤标准,见表3。

表3 朱建华等的反滤准则

$P_{<0.1}/\%$	级配连续土	缺级土
< 30	$D_{15}/d_{85}^{\Delta} \leq 15 \sim 17$	$D_{15} \leq 1.1 \text{ mm}$
> 30	$D_{15}/d_{85}^{\Delta} \leq 20$	$D_{15} \leq 1.1 \text{ mm}$

注: $P_{<0.1}$ 表示粒径小于0.1mm的细粒质量分数; d_{85}^{Δ} 表示小于此粒径的颗粒质量分数占粒径小于0.1mm的颗粒总量的85%。

刘杰等^[21]指出多级配砾石土不均匀系数大于100,其具有较多无黏性土的渗透稳定性质,可采用无黏性土反滤设计的一般数学模型模拟,得到多级配砾石土的反滤准则如下:对于流土型和过渡型土, $D_{20}/d_k \leq 7$;对于管涌型土, $D_{20}/d_k \leq 4$ 。其中 D_{20} 和 d_k 分别为反滤料和被保护土料的控制粒径, d_k 可按文献[21]确定。

李思慎等^[16]针对水布垭宽级配防渗料,通过反滤保土、冲刷自愈试验,给出宽级配防渗料的反滤准则如下:反滤料等效粒径 $D_{15} = 0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ 。

Indraratna等^[48-49]从控制管径理论出发得到适用于无黏性土的反滤准则(式9),但尚未对砾石土

的适用性做相应研究。

$$\frac{D_{c35}}{d_{85SA}} < 1 \quad (9)$$

式中: D_{c35} 为反滤控制管径; d_{85SA} 为被保护土料代表粒径。

目前国内外对保护黏土心墙的反滤准则研究已较成熟,而对砾石土心墙反滤准则的研究还未形成科学统一的标准。

4 待研究的关键问题

综观目前国内外对砾石土心墙料-反滤料联合抗渗的研究,不难发现现有的研究成果远不能清楚说明砾石土心墙料和反滤料的联合抗渗力学机理。砾石土心墙料-反滤料联合抗渗研究尚待深入,应主要考虑以下几个方面的问题。

a. 复杂应力条件下联合抗渗机理的研究。刘杰^[6]曾开展过土中渗透应力特性的相关研究,指出裂缝与渗透压密(土的干密度 ρ_d)关系密切,而土体渗透压密性能取决于渗透应力的大小及分布(图5)。

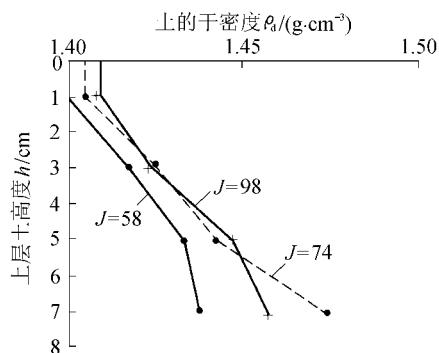


图5 渗透压密试验结果^[6]

Tomlison等^[50]研究围压、反滤料厚度和水力坡降对反滤料保护下粗粒土管涌破坏的影响,指出反滤料和被保护土料的粒径比 D_{15}/d_{85} 是导致管涌破坏的最主要因素,粒径比较小时,渗透稳定性随围压的增大而减小。

上述研究表明,渗透破坏与土体应力状态有关(没有考虑轴向压力和变形等应力条件的影响)。国内外至今的相关研究还很少。目前国内砾石土心墙坝已向300m级高度发展,防渗-反滤系统的应力状态成为影响其抗渗性能不可忽略的因素。高应力和复杂应力下的联合抗渗机理和渗透特性研究有待深入。

b. 联合抗渗模型的完善。由于土体中渗流通道分布的随机性,规则的联合抗渗模型不能充分模拟,因此在模型的设计中应考虑使模型的特征参数服从一定的概率分布及在不同应力状态,尤其在高

应力下分布函数的相应变化。

c. 保护砾石土防渗料反滤准则的规范统一。随着砾石土防渗料的广泛应用,迫切需要科学系统的反滤设计准则来指导工程实践,保证防渗料和反滤料的选材及施工经济合理,保障大坝防渗体渗透稳定。

参考文献:

- [1] 任金明. 土石坝心墙宽级配砾质土质量控制方法研究[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2001.
- [2] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.
- [3] 屈智炯. 宽级配砾质土在土石坝防渗体中的应用及其渗流控制的进展[J]. 水电站设计, 1992, 8(3): 46-53.
- [4] SHERARD J L. Sinkholes in dams of coarse, broadly graded soils [C]//SAKHMANDER S. Technology Review, Transactions, 13th Congress on Large Dams, India, New Delhi, 1979: 25-35.
- [5] SHERARD J L. Trends and debatable aspects in embankment dam engineering[J]. International Water Power and Dam Construction, 1984, 36(12): 26-32.
- [6] 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, 2005.
- [7] 刘杰, 缪良娟. 风化料在鲁布革土石坝防渗体中的应用[J]. 水利水电技术, 1987, 11(2): 2-7.
- [8] 郭熙灵, 李思慎. 水布垭水利枢纽页岩风料击实和渗透特性试验研究[J]. 人民长江, 1996, 27(12): 18-20.
- [9] 雷泽宏. 瀑布沟水电站黑马1区防渗料的选择[J]. 水电站设计, 2001, 17(3): 73-76.
- [10] 雷泽宏. 瀑布沟心墙砾质防渗料防渗与抗渗性能研究[J]. 水力发电, 1995, 21(1): 27-31.
- [11] 冯业林, 孙君实, 刘强. 糯扎渡心墙堆石坝防渗土料研究[J]. 水力发电, 2005, 31(15): 43-45.
- [12] 保华富, 张永全, 沈蓉, 等. 掺砾风料作为高坝心墙防渗体的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2008, 4(1): 34-37.
- [13] 王寿根. 碾盘水电站大坝碎石土防渗料工程特性及土料设计[J]. 中国工程科学, 2004, 6(7): 88-92.
- [14] 刘杰, 缪良娟. 鲁布革土石坝风料心墙反滤层的试验[J]. 水利水电技术, 1989, 12(1): 16-22.
- [15] 朱建华, 游凡, 杨凯虹. 宽级配砾石土坝料的防渗性及反滤[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(6): 18-27.
- [16] 李思慎, 王满兴, 赵蜀鸣. 水布垭心墙堆石坝宽级配防渗料的反滤研究[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(1): 33-36.
- [17] 宋加升, 张四和. 糯扎渡水电站心墙防渗土料工程地质特性研究[J]. 水力发电, 2005, 31(5): 35-36.
- [18] 屈智炯. 对粗粒土渗透变形研究的进展[J]. 水电站设计, 2008, 24(1): 48-55.
- [19] LAFLEUR J, MLYNAREK J, ROLLIN A L. Filtration of

- broadly graded cohesionless soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering ,1989 ,115(12) :1747-1768.
- [20] SCHULER U ,BRAUNS J. Behaviour of coarse and well-graded filters[C]//BRAUNS J ,HELBAUM M ,SCHULER J. Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering. Rotterdam : Balkema ,1993 3-17.
- [21] 刘杰 ,张雄. 多级配砾石土反滤设计方法试验研究[J]. 岩土工程学报 ,1996 ,18(6) :1-9.
- [22] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京 :水利电力出版社 ,1992.
- [23] 朱崇辉 ,孙明星 ,李健晗. 黏土与含砾土裂缝冲刷反滤层的变化机理[J]. 水利与建筑工程学报 ,2003 ,1(3) :36-39.
- [24] TAYLOR D W. Fundamentals of soil mechanics[M]. New York : John Wiley and Sons Inc ,1948 :134-135.
- [25] BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York : Dover Publications Inc ,1972.
- [26] MBONIMPA M ,AUBERTIN M ,CHAPUIS R P ,et al. Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity[J]. Geotechnical and Geological Engineering 2002 20 :235-259.
- [27] SIVAKUMAR B G L ,SRIVASTAVA A. A procedure for the design of protective filters[J]. Canadian Geotechnical Journal , 2007 44(4) :490-495.
- [28] CHAPUIS R P ,AUBERTIN M. On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils [J]. Canadian Geotechnical Journal 2003 40(3) :616-628.
- [29] INDRARATNA B ,RADAMPOLA S. Analysis of critical hydraulic gradient for particle movement in filtration[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , 2002 ,128(4) :347-350.
- [30] KENNEY T C ,CHACHEL R ,CHIU E ,et al. Controlling constriction sizes of granular filters [J]. Canadian Geotechnical Journal , 1985 ,22(1) :32-43.
- [31] SCHULER U. Scattering of the composition of soil-an aspect for the stability of granular filters [C]//LAFLEURJ ,ROLLINAL. Proc Geofilters. Montreal , Canada : Bitech Publications ,1996 21-34.
- [32] VAUGHAN P R ,SOARES H F. Design of filters for clay cores of dams[J]. Journal of Geotechnical Engineering ,1982 ,108(1) :17-31.
- [33] SILVEIRA A. An analysis of the problem of washing through in protective filters[C]//ICSMFE M. Proc 6th ICSMFE. Toronto ,Canada :Univ of Toronto Press ,1965 551-555.
- [34] WITTMANN L. The process of soil filtration :its physics and the approach in engineering practice[C]//SMFE M. Proc 7th Eur Conf on SMFE. London :British Geotechnical Society , 1979 303-310.
- [35] KOVACS G. Seepage hydraulics[M]. Amsterdam , The Netherlands :Elsevier Scientific Publishing Company ,1981.
- [36] INDRARATNA B ,VAFAI F. Analytical model for particle migration within base soil-filter system [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ,1997 ,123(2) :100-109.
- [37] 刘忠玉 ,苗天德. 无黏性管涌型土的判定[J]. 岩土力学 , 2004 25(7) :1072-1076.
- [38] LOCKE M ,INDRARATNA B. A new model for the behaviour of granular filters[J]. Australian Geomechanics 2001 35 :31-39.
- [39] LOCKE M ,INDRARATNA B ,ADIKARI G. Time-dependent particle transport through granular filters[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ,2001 ,127(6) :521-529.
- [40] ABERG B. Washout of grains from filtered sand and gravel material[J]. Journal of Geotechnical Engineering ,1993 ,119(1) :36-53.
- [41] KAKUTURU S ,REDDI L N. Mechanism model for self-healing of core cracks in earth dams[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2006 ,132(7) :890-901.
- [42] KAKUTURU S ,REDDI L N. Evaluation of the parameters influencing self-healing in earth dams [J]. Journal of Geotechnical Engineering 2006 ,132(7) :879-889.
- [43] ICOLD. Embankment dams granular filters and drains : review and recommendation[C]//Naudascher. ICOLD Bulletin. New Delhi ,India :ICOLD ,1994 25-60.
- [44] 郭庆国 ,金亚玲. 砂石滤层准则的研究与进展[J]. 水利水电科技进展 ,2002 22(1) :51-55.
- [45] 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.
- [46] SHERARD J L ,DUNNIGAN L P. Filters and leakage control in embankment dams[C]//VOLPE R L ,KELLY W E. Proc Symposium on Seepage and Leakage from Dams and Impoundments. New York :ASCE ,1985 :1-30.
- [47] HONJO Y ,VENEZIANO D. Improved filter criterion for cohesionless soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering , 1989 ,115(1) :75-94.
- [48] INDRARATNA B ,RAUT A K ,KHABBAZ H. Constriction-based retention criterion for granular filter design[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2007 ,133(3) :266-276.
- [49] INDRARATNA B ,TRANI L D O ,KHABBAZ H. A critical review on granular dam filter behaviour-from particle sizes to constriction-based design criteria [J]. Geomechanics and Geoenvironmental Engineering 2008 2(4) :279-290.
- [50] TOMLISON S S ,VALID Y P. Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion [J]. Canadian Geotechnical Journal 2000 37(1) :1-13.

(收稿日期 2008-12-09 编辑 高建群)