

# 多级配砾石土反滤设计方法试验研究

刘 杰 张 雄

(中国水利水电科学研究院岩土所, 北京, 100044)

**文 摘** 多级配砾石土反滤层工作机理及设计方法的研究, 国内外均刚开始。本文通过试验研究, 主要阐明以下几个问题: ①反滤层研究的主要内容是确定极限反滤的等效粒径值。多级配土极限等效粒径的确定原则是在反滤进口能形成自滤的反滤层, 从而保证土的渗透稳定性。②多级配砾石土是不均匀系数大于 100 的土, 具有较多无粘性土的渗透稳定性质, 因此可以直接采用无粘性土反滤设计的一般数学模型。③控制粒径出现的机率不再是常数, 它随土的渗透稳定性质而变化, 文中给出了控制粒径确定的方法。④给出反滤层的设计准则。

**关键词** 多级配砾石土, 极限反滤, 允许等效粒径, 控制粒径, 自滤反滤。

## 1 前 言

当前高度大于 100m 的土石坝中以多级配砾石土作防渗体的坝占多数。这类土的共同特点是, 颗粒级配的范围较广宽, 粒径级数在 10 个以上, 至少变化于粉粒与圆砾之间; 不均匀系数 100 至 1000; 小于 0.5mm 颗粒的塑性指数以 5 左右居多数; 渗透和渗透稳定性具有较多无粘性土的性质。以前, 反滤层的设计多半参照太沙基的无粘性均匀土的设计方法, 由于控制粒径定为固定的机率, 不适用于不均匀土。因其值过大, 往往导致工程失事。英国 49m 高的巴特海得坝的渗透破坏就是一例<sup>[1]</sup>。

反滤层在这方面的研究, 除我们研究了高塑性的砂页岩风化料反滤层的设计方法外<sup>[2]</sup>, J. L. 谢拉德在 1989 年根据少量试验资料曾建议冰碛土的反滤层按  $D_{15} \leq 0.5 \sim 1.5\text{mm}$  来设计。Jean Laflear 前进了一步, 其研究工作的特点是, 颗粒级配范围变化大, 并和我们 80 年代研究多级配无粘性土反滤层设计方法的观点相类似。将多级配土首先分为级配连续、不连续和管涌型三类土, 并明确指出, 控制粒径  $d_k$  不应继续采用  $d_{85}$ , 应随颗粒级配曲线形状而变化, 其反滤层设计的数学模型应为  $D_{15} = 5d_k$ <sup>[3]</sup>。

根据世界坝工建设发展水平及国内情况, 我国将多级配砾石土、冰碛土的反滤设计方法研究列为“八五”攻关项目, 本文为此项目的研究内容。通过试验研究提出了反滤层设计方法。

## 2 试验土料的基本性质、试验仪器及方法

### 2.1 试验土料的基本性质

试验结合四川大渡河高 188m 的瀑布沟堆石坝防渗体反滤层的设计问题, 土料取自黑马

料场,为多级配冰碛土。颗粒组成的特点,各种土料中小于5mm的组成及性质基本相同,级配曲线的差别主要是粗料的含量。图1是所研究土料的颗粒级配曲线,曲线1',1分别是各土料中小于5mm和2mm部分的颗粒组成,曲线2,4分别代表最细和最粗的两条曲线,3是平均线。无论粒径变化的范围、曲线的形状以及最大粒径,均能代表目前世界坝工建设中常见的多级配土,其特征如下:①细料的塑性差于我们曾经研究的多级配风化料,与世界已建坝的多级配土塑性相一致;②不均匀系数及最大粒径均大于Jean Laflear的试验土料,不均匀系数变化于500~1000之间;③渗透稳定性能也具有广泛的代表性,土<sub>1'</sub>、土<sub>2</sub>代表级配连续型土,其渗透破坏为流土型。土<sub>4</sub>接近管涌土(内部结构不稳定的土)<sup>[4]</sup>。因而,反滤试验结果完全可以揭示多级配土反滤层的工作性状及设计方法。土料的基本性质列于表1。

表1 冰碛土的物理性质

试样 编号	颗粒组成(%)				比重	塑性指标 <sup>①</sup> (%)			压实性 <sup>②</sup>		渗透稳定性	
	< 5mm	< 2mm	< 0.1	$C_u$		$w_L$	$w_P$	$I_P$	$\rho_{dmax}(g/cm^3)$	$w_{op}(\%)$	$J_{破坏}$	破坏形式
1'	100	80	48	129	2.75	22.9	13.2	9.7	2.04	10.5		流土
2	70	56	34	574	2.75				2.19	7.0	10.9	流土
3	50	40	26	1000	2.75				2.24	6.5	6.0	过渡
4	35	28	17	700	2.75				2.25	6.2	2.2	过渡

① < 0.5mm 的颗粒。

② 压实功能 865kN·m/m<sup>3</sup>。

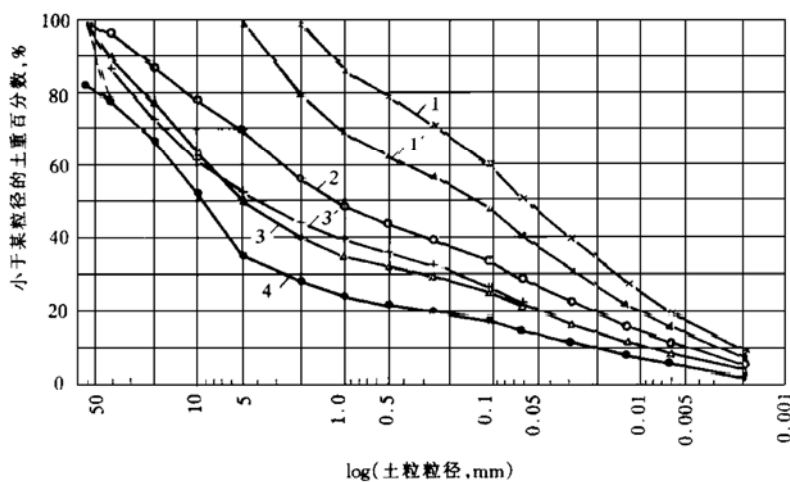


图1 试验用料颗粒级配曲线

1和1'为2,3,4曲线的细料,3'为1989年试样

## 2.2 试验仪器及设备

由于四种土料中有三条曲线的 $d_{90}$ 小于40mm,仅土<sub>4</sub>大于40mm粒径部分占22%,因此仪器选用常用的直径20cm的垂直管涌仪。仪器壁为有机玻璃筒,可以直接观察接触带土样的渗透破坏性状。供水为专用水箱,供水压力为0.15MPa。仪器如图2所示。

## 2.3 试验方法

### (1) 试验布局

原计划按我们以前研究粘性土反滤料的经验,将全部试验分为无缝完整和有缝两种情况布局试验内容。经比较土<sub>1'</sub>有缝和无缝两种情况下的试验结果,发现所得的极限反滤粒径基

本相同。又分析了早期对黑马料场的一个土样在有缝及有洞两种情况下的试验结果, 试样与土<sub>3</sub> 相接近 (见图 1 曲线 3'), 而极限反滤粒径与土<sub>3</sub> 无缝条件下的试验结果相一致。另外渗透稳定试验结果表明, 四种土偏于无粘性土的性质, 裂缝或孔洞不会明显影响土体本身的渗透稳定性。为此, 我们认为试样在无缝而完整情况下确定的极限反滤粒径, 基本上能代表该类土严格的极限反滤粒径。因此土<sub>2</sub>、土<sub>3</sub>、土<sub>4</sub> 的反滤试验只研究了试样完整无缝的情况。

(2) 试样制备

每个试样均按要求的颗粒级配曲线, 分级称重后拌合成混合料, 并提前制备到最优含水量, 静置一天。为保证试样的均匀性, 分两层装样。

(3) 施加水头的大小及方法

将反滤层置于最下层, 渗流由上而下, 最大渗水压力为 0.15MPa, 一次施加于试样上表面。试样实际承受的水力比降相应为 90~ 140。根据我们多年的研究经验, 试样承受的水力比降达 100 左右, 而且采用一次施加的方法, 在极限反滤的条件下, 在反滤层表面形成一层牢固而稳定的接触带, 能够承受更大的外界水头<sup>[5]</sup>。实际工程中的水力比降一般都小于 10, 试验资料用于工程实际将具有足够的安全系数。

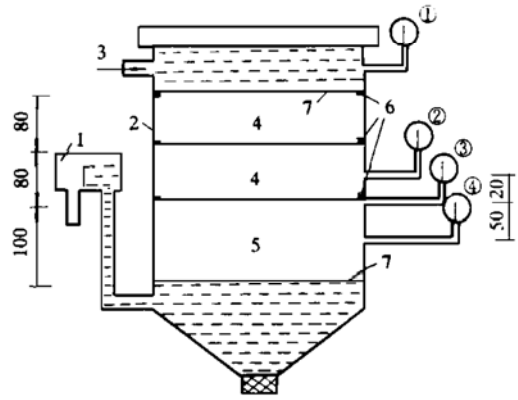


图 2 反滤试验仪器设备

- 1. 出水口 2. 有机玻璃筒 3. 进水口 4. 试验土样
- 5. 反滤 6. 橡皮泥 7. 透水板 ①②③④测压计

### 3 反滤层控制多级配土渗透稳定的机理

众所周知, 反滤层的作用是滤土排水, 以保证地基或坝体的渗透稳定。研究反滤层的目的在于寻求反滤层的极限等效粒径, 从而给出反滤层设计的允许粒径范围。对多级配土极限反滤层滤土排水的机理目前论述较少, 研究结果表明, 多级配土极限反滤层滤土的机理都是首先在接触带形成一层自滤的反滤层。所谓自滤反滤层就是土体本身按接触稳定要求, 自己形成

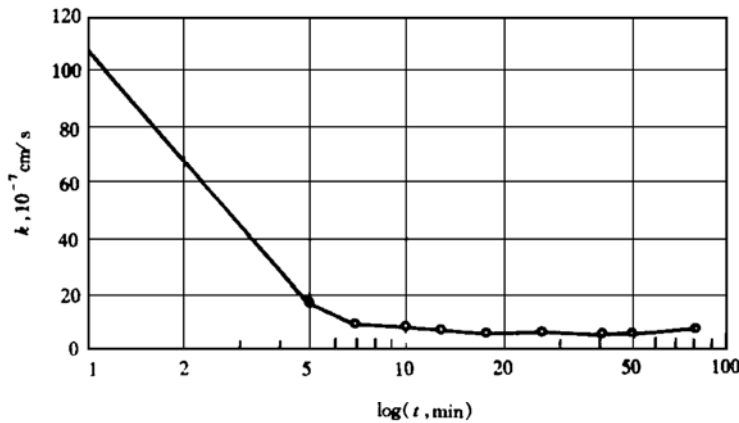


图 3 流土型土反滤较细时渗透压密特征  
土<sub>2</sub>, 反滤 5~ 9.5mm

的一层稳定的接触带。土性不同形成自滤反滤的过程不完全相同。流土型土由于内部结构是稳定的,具有较强的整体性。如果反滤层的粒径处于极限状态,则被保护土在施工铺填过程中靠土体自重反滤层表面就会形成一层稳定的接触带。然后过渡到原土层,从而保证被保护土具有很高的抗渗强度。对于管涌型土,内部存在可移动的细颗粒,自滤反滤的形成主要依靠运行初期的渗透力。渗流带走了土体中一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的进口,从而形成了自滤反滤层,不仅阻止其余颗粒的移动和带走,而且保证整个被保护土稳定性。这种反滤层的运行特点是,由于反滤进口出现一层结构稳定的细颗粒,使进口的渗透阻力加大,水头损失提高,被护土中的水头损失相应减少。过渡型土介于上述二者之间,高密度状态时自滤反滤的形成过程接近流土型土,低密度时接近管涌型土。

如果反滤层实际选用的等效粒径细于极限粒径,本身就可直接保证接触带的渗透稳定性,在反滤进口不需要再形成自滤的反滤层。

多级配土渗透稳定性的判别,可用文献[4]和[6]中建议的无粘性土的判别方法。

### 3.1 流土型土自滤反滤形成过程

根据渗透稳定试验及理论分析,土<sub>1</sub>和土<sub>2</sub>属流土型,反滤试验表明,当反滤层的等效粒径接近极限值时,在高水头作用下,土体只会产生渗透压密,无渗透破坏,渗出水流一直清澈。图3为土<sub>2</sub>在5~9.5mm的反滤保护下因渗透压密渗透系数随时间减小的情况。

试验后进一步查明,在接触带形成了一层颗粒组成细于原始反滤层,而粗于被保护土的自滤反滤层,其中粗粒部分即为原始反滤层,细粒部分与被保护土中细料的组成完全相一致。试验过程中未观察到任何细颗粒的流失现象,渗水一直清澈,说明这种自滤反滤层主要是在施工过程中形成,与渗流的作用无直接关系。图4为土<sub>2</sub>试验结束后从反滤接触带取样颗粒分析的结果。曲线2为反滤层与土的分界面上上下各1.5cm内自滤反滤层的颗粒组成。

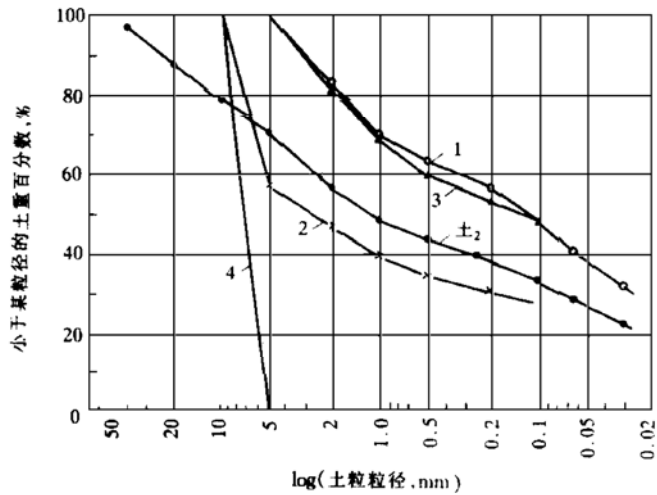


图4 流土型土反滤接触带自滤反滤的颗粒组成

- 1. 土<sub>2</sub>中<5mm颗粒组成
- 2. 接触带-0.5~1.0cm范围内颗粒组成
- 3. 曲线2中<5mm的颗粒组成
- 4. 原始反滤组成

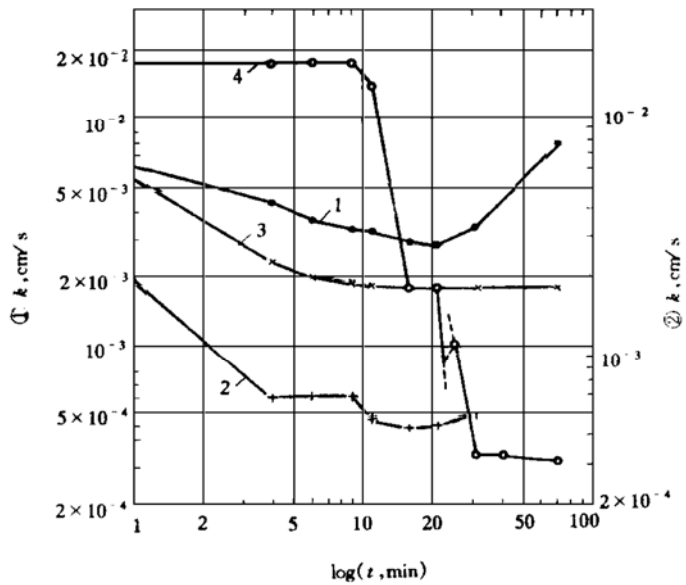


图5 管涌型土土<sub>4</sub>自滤反滤形成后渗透性的变化

- 1. 反滤以上2~16cm
- 2. 反滤以上0~2cm
- 3. 平均渗透系数
- 4. 反滤以下0~2cm
- ①曲线1, 2, 3
- ②曲线4

### 3.2 管涌型土自滤反滤形成过程

#### (1) 渗流特性

土<sub>4</sub> 的试验结果表明, 管涌土在接近极限反滤的保护下, 施加高水头后开始渗流量较大, 水色浑浊, 但迅速减小并转清, 5 分钟后变稳定。仔细观察则可发现, 5 分钟后反滤进口承受的水头显著增加, 直到 30 分钟达稳定, 进口 2cm 范围内承受的水力比降高达 500 之多。与此同时, 试样出口的渗透性相应减小, 并与反滤进口相接近, 如图 5 曲线 2, 4 所示。这种现象表明, 在反滤层进口形成了一层渗透性与土体渗流出口基本相同的弱透水层, 它可以承受 500 以上的水力比降, 具有可靠的渗透稳定性, 能保证整个土体在较大水头作用下的渗透稳定性。

#### (2) 接触带自滤反滤层的颗粒组成特征

试验后取样颗粒分析结果, 土与反滤接触带 ±0.5cm 范围内出现了一层细料含量明显增多、渗透性低于被保护土的一层土, 从而阻止了土中细颗粒的继续流失。图 6 是颗粒分析结果, 曲线 3 是接触带出现的一层弱透水层。土中细颗粒的流失量依次为: 下层 3%, 中层 1%, 上层未变。表明新土层的分布呈反滤的特征。由此说明, 管涌型土极限反滤层的工作机理是在渗流的作用下, 土体与反滤接触带在淤填的同时首先形成自滤反滤层, 以保证整个土体的渗透稳定性。

### 3.3 反滤控制过渡型土渗透稳定的机理

过渡型土在极限反滤保护下的渗透稳定有以下特征:

#### (1) 土密度不同, 极限反滤的等效粒径也不同。

由表 2 可知, 土<sub>3</sub> 为过渡型土, 干密度由 2.24g/cm<sup>3</sup> 提高到 2.31g/cm<sup>3</sup>, 同用 2~5mm 的反滤作保护, 高密度时土是渗透稳定的, 而低密度时土的出口产生了明显冲蚀。相反, 土<sub>4</sub> 为管涌型土, 干密度由 2.25g/cm<sup>3</sup> 提高到 2.42g/cm<sup>3</sup> 后, 成功的反滤层的粒径并未得到提高。

#### (2) 过渡型低密度土, 反滤为极限情况时, 和管涌土一样, 在高压渗流作用下被冲蚀的细颗粒首先截堵在反滤进口, 5~7 分钟内形成一弱透水层, 同时土中也出现了自滤反滤层。图 7

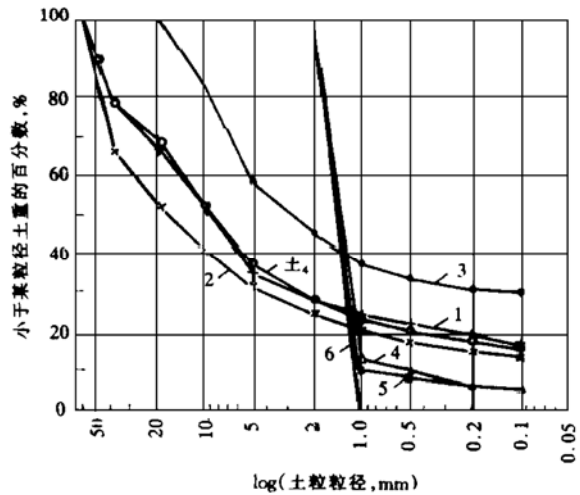


图 6 管涌型土土<sub>4</sub> 渗流形成的自滤反滤组成

- 1. 试样中层 4~8cm
- 2. 试样下层 0.5~4cm
- 3. 反滤接触带 -0.5~0.5cm
- 4. 反滤以下 0.5~2cm
- 5. 反滤以下 2~4cm
- 6. 原始反滤

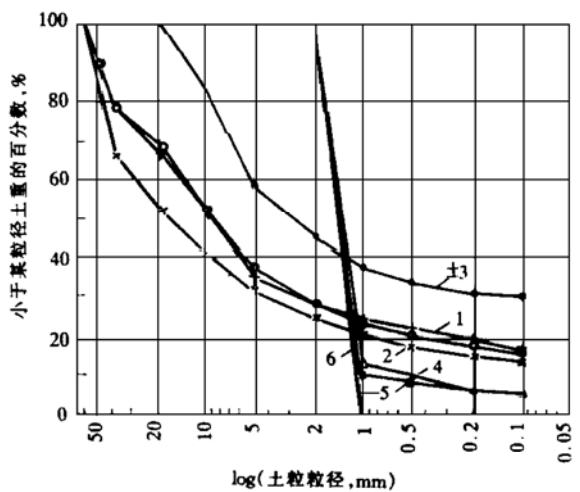


图 7 过渡型土土<sub>3</sub> 渗流形成的自滤反滤组成

- 1. 试样中层 4~8cm
- 2. 试样下层 0.5~4cm
- 3. 反滤接触带 -0.5~0.5cm
- 4. 反滤以下 0.5~2cm
- 5. 反滤以下 2~4cm
- 6. 原始反滤层

为土<sub>3</sub>在反滤接触带颗粒组成的变化情况,同时表明了土层也呈由粗到细的反滤结构形式。

## 4 多级配土的反滤试验研究

### 4.1 反滤层研究的一般模型

如上所述,多级配土在渗透性方面具有无粘性土的性质,根据无粘性土反滤层的工作特性,它的基本模型为

$$D_0/d_K \leq \alpha \quad (1)$$

式中  $d_K$  为被保护土控制粒径;  $D_0$  为反滤层孔隙平均直径,不均匀无粘性土可用下式确定:

$$D_0 = 0.63nd_{20} \quad (2)$$

从文献[6]可知,无粘性土反滤层设计的一般数学模型可进一步写为

$$D_{20}/d_K \leq 4 \sim 12 \quad (3)$$

式中 4~12 称为反滤层层间系数,4 适用于管涌土,12 适用于流土型土,过渡型土介于二者之间。从简化设计、加大流土型土反滤设计的安全系数出发,将流土型和过渡型土的层间系数取同一值,并略小于平均数,于是适用的多级配土反滤层设计的数学模型可写为

$$D_{20}/d_K \leq 4 \sim 7 \quad (4)$$

### 4.2 目前确定被保护土控制粒径方法的水平

纵观无粘性土反滤层的研究现状,目前反滤层的研究特点可归纳为三点:①反滤层的基本模式可用式(1)概括;②被保护土控制粒径出现的概率不再是某一固定值;③反滤层的孔隙平均直径可用等效粒径表示。J. L. 谢拉德认为无粘性不均匀土的等效粒径变化于  $d_{15} \sim d_{25}$  之间<sup>[7]</sup>。我们的研究结果认为,不均匀(多级配)反滤层取  $d_{20}$  更有代表性<sup>[6]</sup>。

从 80 年代开始,反滤层的研究多趋向于研究被保护土控制粒径出现的概率,概率一定就可直接采用反滤层设计的一般模式,我们在研究不均匀无粘性土的反滤设计中首先采用了此方法。

在研究控制粒径的工作中我们通过大量试验资料的分析与比较,最后提出保护细料的原则,并建议取细料的  $d_{70}$  作为全体土料的控制粒径。随后 J. L. 谢拉德建议含砂砾的粘性土以小于 0.074mm 细粒中的  $d_{85}$  作为全体土料的控制粒径。

如前所述, Jean Laflear 研究的是真正多级配土,他的进步在于确定控制粒径时考虑了土的渗透稳定性,并将土分为级配连续、不连续和管涌型三种类型。级配连续型土取  $d_k = d_{50} \sim d_{80}$ , 级配不连续土取  $d_k = d_p$ ,  $p$  为细料含量<sup>[3]</sup>。这一结论与我们 80 年代提出的无粘性土反滤层设计方法基本相类似。

我们认为,以细料的  $d_{70}$  粒径作为全体土的控制粒径,这一概念相对比较成熟。但在细料的概念方面,对级配不连续土,以颗粒级配曲线的不连续点,即接近水平段的平均粒径作为粗细料的区分粒径,这一概念逐渐为较多人所接受,但级配连续土细料的区分方法仍在探索阶段。

### 4.3 多级配土控制粒径的确定方法

在研究多级配土控制粒径的方法中我们采用了反算法,即利用反滤设计模式(4),用代表性的试验资料反求控制粒径,然后经过分析整理,提出一般性的方法。表 2 列出了四种典型土的反滤试验结果。

在分析前人研究成果的基础上共选择了四种细料粒径区分法:①以粒径 0.1mm;②以粒

径 0.5 mm; ③以几何平均粒径, 即  $d_d = \sqrt{d_{70} \cdot d_{10}}$ ; ④以 2mm 粒径。计算分析结果, 用几何平均法求得的区分粒径  $d_d$  变化于 0.5mm 左右, 接近于第二种区分方法, 因而最后只剩三种方法。进一步计算分析结果, 若以颗粒小于 0.1mm 部分的  $d_{70}$  为控制粒径, 对成功的试验计算结果,  $D_{20}/d_K$  的比值变化于 31~ 164 之间。以颗粒小于 0.5mm 部分的  $d_{70}$  为控制粒径,  $D_{20}/d_K$  变化于 12~ 62 之间, 二者均与式(4)中的 4~ 7 相差较大。若以小于 2mm 中的  $d_{70}$  为控制粒径, 成功反滤层的层间系数, 呈流土型破坏的土<sub>2</sub> 为 21, 管涌型土<sub>4</sub> 为 4.4。比较结果与式(4)最接近。表 3 列入计算结果, 其中同时列有土<sub>1</sub>' 及图 1 中曲线 3' (土<sub>3</sub>') 有孔情况下的试验资料。

表 2 多级配土反滤试验结果

试验编号	被保护土		反滤料		最大水力比降	被保护土带出量 (%)			反滤淤填		被保护土渗透系数 (cm/s)		反滤承受最大水头 (cm)	试样现象描述
	w (%)	干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	粒径 (mm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )		上	中	下	淤填量 (%)	d <sub>70</sub> (mm)	初始	终了		
1'-5	10.7	2.04	2~5	1.65	144						5.1×10 <sup>-7</sup>	3.6×10 <sup>-7</sup>	7.5	下沉约 1mm, 其它无变化
1'-6	9.7	2.04	5~9.5	1.65	142	25	39	41	14	1.5	9.5×10 <sup>-7</sup>	4.8×10 <sup>-4</sup>	33	表面中心有一塌坑, 下部无细料
2-4	7.0	2.19	2~5	1.65	129						6.2×10 <sup>-6</sup>	3.3×10 <sup>-6</sup>	4	始终无变化
2-5	7.4	2.19	5~9.5	1.67	90						1.7×10 <sup>-5</sup>	2.6×10 <sup>-6</sup>	8.5	始终无变化
2-6	7.4	2.19	9.5~19.1	1.65	88	3	3	15	16	2.0	1.8×10 <sup>-4</sup>	7.4×10 <sup>-3</sup>	467	表面中心有一塌坑, 下部为松散干净砂
3-4	6.5	2.24	5~9.5	1.68	120	1.5	7	10	12	1.9	7.9×10 <sup>-3</sup>	3.6×10 <sup>-3</sup>	> 100	有上下贯通的两个小孔
3-5	6.5	2.31	5~9.5	1.67	125	2	8	8	15	1.6	4.2×10 <sup>-4</sup>	1.2×10 <sup>-3</sup>	48	有一上下贯通的小孔
3-6	6.5	2.31	2~5	1.67	89						5×10 <sup>-5</sup>	4.1×10 <sup>-6</sup>	4	始终无变化
3-7	6.5	2.24	2~5	1.67	94	0	5.5	15	9.5	1.2	6.4×10 <sup>-4</sup>	1.1×10 <sup>-3</sup>	2.5	表面有三个细小的管涌孔
4-2	6.2	2.25	1~2	1.65	121						1.6×10 <sup>-5</sup>	2.4×10 <sup>-5</sup>	0	始终无变化
4-4	6.2	2.27	5~9.5	1.67	126	0	0	9	16	1.2	2.3×10 <sup>-3</sup>	2.3×10 <sup>-3</sup>	2.5	表面有三个 φ5mm 的管涌孔
4-5	6.2	2.42	2~5	1.67	101	3	5	5	19	0.5	1.8×10 <sup>-3</sup>	1.2×10 <sup>-3</sup>	2.5	有一粗粒渗流通道, 四周无变化
4-6	6.2	2.25	1~2	1.64	94	0	1	3	13	0.39	6.2×10 <sup>-3</sup>	1.7×10 <sup>-3</sup>	> 1000	下部略冲蚀, 反滤表面有一层干净砂

表 3 冰碛土的极限反滤粒径

试样编号	控制粒径 d <sub>K</sub> (mm)			极限反滤粒径 (mm)				D <sub>20</sub> /d <sub>k</sub>		成功反滤		
	< 2mm (%)	d <sub>k</sub>		成功		不成功		成功	不成功	n	D <sub>0</sub> (mm)	D <sub>0</sub> /d <sub>k</sub>
		(%)	(mm)	粒径	D <sub>20</sub>	粒径	D <sub>20</sub>					
1'	80	56	0.22	2~5	2.5	5~9.5	5.6	11	26	0.37	0.56	2.5
1''	80	56	0.22	2~5	2.5			11		0.42	0.66	3.0
2	56	39	0.27	5~9.5	5.6	9.5~1.91	11	21	41	0.38	1.38	5.1
3	40	28	0.20	2~5	2.5	5~9.5	5.6	12	21	0.38	0.57	2.9
4	28	20	0.25	1~2	1.1	2~5	2.5	4.4	10	0.39	0.27	1.1
3'	44	31	0.19	1~2	1.1			5.8				

注: 1'', 3' 为试样中有贯穿性的孔洞或有缝条件下的试验结果。

根据上述分析与比较, 我们认为, 对于多级配土以 2mm 的粒径将其分为粗细两部分, 控制

渗透稳定时以保护 2mm 以下的颗粒不流失, 将具有一定的实用和可靠性。除试验资料的分析与比较有一定规律性外, 还有以下意义。

(1) 2mm 是土力学中砂和砾石的区分粒径, 它将多级配土分为砂性土和砾石两部分。

(2) 分析自然界多级配不连续土的颗粒级配曲线特征, 其中缺少的粒径, 多数在 0.5~5mm 范围之内, 取 2mm 为区分粒径, 同时能反映多级配不连续土颗粒组成的特征。

为此建议多级配土的控制粒径按下式确定:

$$d_k = d_{(< 2)p} \cdot 70 \quad (5)$$

式中角标 (< 2)<sub>p</sub> 表示小于 2mm 颗粒含量, 以小数计。

图 8 为试验结果按式(5)确定的控制粒径与反滤层的等效粒径绘成的关系图。图中同时绘有 Jean 等人的试验结果。图中表明, 流土型和过渡型土极限反滤等效粒的范围是

$$D_{20} = 7d_k \sim 13d_k \quad (6)$$

管涌型土

$$D_{20} = 5d_k \sim 10d_k \quad (7)$$

显然, 式(4)中管涌型土的反滤采用  $D_{20} \leq 4d_k$ , 流土型和过渡型的反滤采用  $D_{20} \leq 7d_k$  有足够的的安全系数。

## 5 结 语

(1) 多级配土是指含有多种粒径级的土, 至少包括粉粒、砂粒及砾石类粒径, 不均匀系数大于 100 以上。按成因分类, 可能是冰碛的, 也可能是坡积或是冲积的。

(2) 多级配土具有较多的无粘性土的渗透特征, 有些土 < 2mm 的颗粒含量少于 30% 时渗透破坏可能是管涌型, 但比无粘性土仍有较大的抗渗比降。

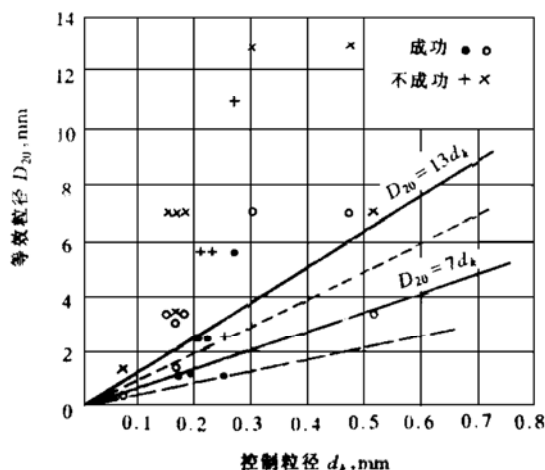


图 8 反滤层等效粒径与控制粒径的关系

·+ 中国水利水电科学研究院 ·× Jean Lafleur 等

—非管涌土, ---管涌土

(3) 在建议的反滤层保护下, 各类多级配土都可以承受 100 以上的水力比降, 只要渗透系数满足要求, 都可用来作土石坝的防渗体。



(4) 反滤层的等效粒径可按式确定:

$$D_{20} \leq (4 \sim 7) d_k$$

已知等效粒径的允许值, 再根据施工及用料场的条件, 进一步确定反滤料允许的不均匀系数后, 反滤料的整个组成就可确定。

(5) 土的控制粒径  $d_k$  应按控制细粒土渗透稳定的原则确定。土中粒径小于 2mm 的部分为细粒, 取其  $d_{70}$  为整个土体的控制粒径, 并可表示为

$$d_k = d_{(< 2)p \cdot 70}$$

### 参 考 文 献

- 1 Vaughan P R et al. Cracking and Erosion of the Rolled Clay Core of Balderhead Dam and the Remedial Works Adopted for Its Repair. Tenth ICOLD 1970, Q36.
- 2 刘杰, 缪良娟. 鲁布革土石坝风化料心墙反滤料的试验研究. 水利水电技术, 1989(12).
- 3 Jean Laflear, Jack Mlynarek Andre Rollin. Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils. J Geotech Engrg ASCE, 1989, **115**(1).
- 4 刘杰, 缪良娟. 砾石土宽级配土料防渗性渗透稳定性的试验研究. 中国水利水电科学研究院, 1994.
- 5 刘杰, 罗玉再. 高土石坝心墙裂缝自愈机理与反滤层的保护作用. 水利学报, 1989(7).
- 6 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制. 水利电力出版社, 1992.
- 7 Sherard J L, Dunnigan L P, Talbot J R. Basic Properties of Sand and Gravel Filters. J Geotech Engrg ASCE, 1984, **110**(1).

## Study on Filter Design of Broadly- Graded Soil

*Liu Jie*

*Zhang Xiong*

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044)

**Abstract** It has just begun to study the mechanism and design method of broadly-graded soil filter. By tests in this paper the following main question are solved: ①to determine the equivalent grain size of critical filter under the principle of forming self-filtration layer in the interface between filter and soil to make soil seepage stability; ②the general model of cohesionless soil filter design is used in the filter design of broadly-graded soil, because the seepage stability of broadly-graded soil with coefficient of uniformity greater than 100, is similar with that of cohesionless soil; ③the appearing probability of control size changes with seepage stability of broadly-graded soil, and it is not a constant, so the method to design control size,  $d_k = d_{(< 2)p \cdot 70}$  is presented in the paper; ④the criterion for filter design is  $D_{20} \leq (4 \sim 7) d_k$ .

**key words** broadly-graded soil, critical filter, allowable equivalent grain size, control size, self-filtration.