

宽级配砂土基料-滤层系统的室内模型试验研究

白彦峰

(上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

【摘要】 基料-滤层利用数码可视化跟踪技术、计算机信息实时处理技术和土体变形无标点量测技术,对宽级配基料-滤层系统进行了渗透室内模型试验。探讨了滤层准则的适用性,研究了不同滤层厚度和加压速率对管涌发生发展的影响。结果表明:传统太沙基滤层准则不适用于宽级配砂土,建议采用可移动颗粒中的 d_{85} 进行滤层准则设计;增加滤层厚度可提高系统的抗渗透破坏能力,但提高滤层厚度对提高整个系统抵抗渗透能力作用不大;水力梯度增加较快不利于系统的稳定。

【关键词】 管涌;宽级配砂土;基料-滤层;模型试验

【中图分类号】 TV 139.16;TV 223.4

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2012.01.001

Lab Model Testing on Piping – filter Prevention in Broadly Graded Sandy Soil

Bai Yanfeng

(Shanghai Municipal Engineering Design General Institute (Group) Co. Ltd, Shanghai 200092, China)

【Abstract】 By using visual tracing techniques, real-time digital process techniques and non-target measuring techniques, the lab model tests on base soil-filter of broadly graded sandy soil were carried out. The applicability of the filter-layer standard has been discussed; different filter layer thickness and compression rate on piping development influence has invested. The results proved that; the traditional Terzaghi filter guideline is improper for broadly graded sand, d_{85} of moving particles can be used in the design guideline; Increasing filter layer thickness could improve that the system of the seepage failure, but the system penetration ability only improved a little; hydraulic gradient increases faster is not conducive to the stability of the system.

【Key words】 piping; broadly graded sandy soil; base soil-filter; model testing

0 引言

由于管涌的复杂性,数值分析方面还存在很多疑难点,而室内模型试验原理简单明了,现象直观,得出的结论具有一定意义,它是管涌防治研究的有效方法之一^[1]。在管涌的防治方面,国内外的学者也已基本达成共识,土石坝渗流控制原则应是防排结合,反滤层是关键,以防守为主导的思想已不适合土石坝的发展^[2-5]。但是目前滤层准则的应用仍存在问题,主要原因是以前的研究主要针对均匀滤料和基料,从宏观角度出发,未重视颗粒的移动造成的基料和滤料特性的变化以及整个系统的水力特性和几何特性的变化等一些重要信息,忽略了宽级配料在渗流过程中的不同现象^[6]。

本文进行不同基料-滤层组合的渗流试验模拟,笔者以前撰文分析了不同层间系数比等参数对管涌

发展的影响、系统的水力特性以及颗粒的运动特点^[7],本文主要探讨滤层准则的适用性、分析滤层厚度及加压速率对管涌发展的影响。

1 试验装置

本文进行的是渗流方向垂直向上的渗透试验。这与实际工程中,土石坝堆石棱体及褥被排水中与透水地基相邻的反滤层的情况类似。试验装置主要包括三方面:模型箱、加压装置和数据采集系统。试验装置示意图见图 1。其中模型箱长×宽×高为 500 mm×100 mm×600 mm,采用 8 mm 厚的玻璃制成,不同高度处共设置了口径为 3 cm 的出水口 3 个,模型箱底部设置了口径为 6.3 cm 的主进水口,并在之上铺设了 15 cm 厚的粗砂,在各进出水口处均设置了可控制水流大小的阀门。加压装置采用膜盒压力表量测实时压力,量程为 10 kPa,精度为 0.0001 m³。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50379037)

作者简介:白彦峰,1983 年生,男,河南商丘人,博士,工程师,主要从事特殊土地基处理、路基路面等设计科研工作。E-mail: b6y6f6@163.com

数据采集系统主要采用孔压计和静态应变采集仪实时采集渗流过程中土体内部的水头和水力梯度的分布特点。

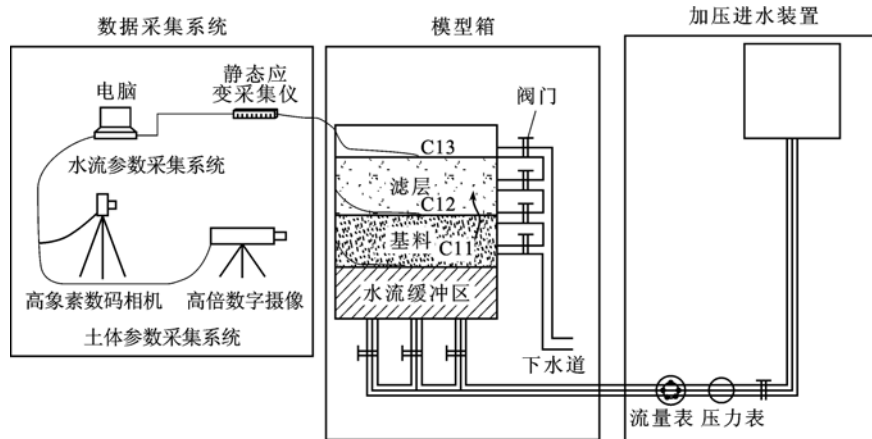
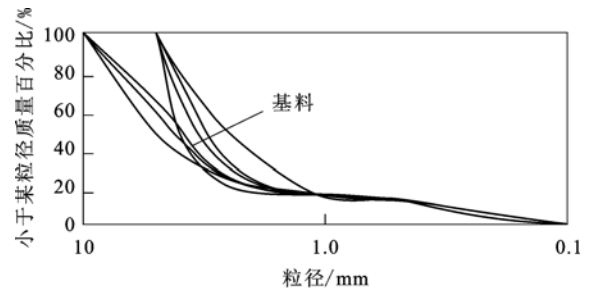


图1 实验装置示意图

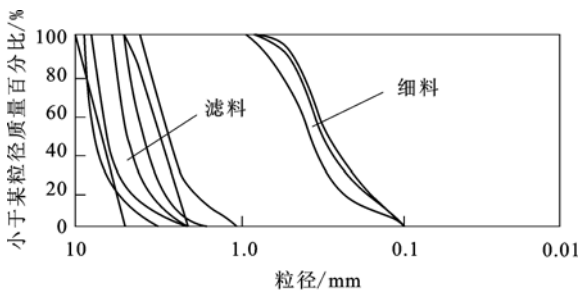
2 试验砂样配制

首先依据试验需要筛分配置各种级配的砂样，然后检测得到砂样的各项指标：内摩擦角为 $35^{\circ} \sim 39^{\circ}$ ，自然状态下的孔隙率为 $0.36 \sim 0.42$ ，砂密度为 $2.55 \sim 2.65 \text{g/cm}^3$ 。滤料采用级配较窄的中粗砂；基料用粗料和细料（指基料中可移动的颗粒）根据要求按一定比例混合得到。基料级配较宽，并具有以下特点： C_u （不均匀系数）为 12.33 ；缺中间粒径的土，即粒径 $0.5 \sim 2 \text{mm}$ 之间的含量 $< 6\%$ ； $< 1 \text{mm}$ 的粒径的土含量 $< 25\%$ 。具体的级配曲线见图2。



(b) 基料的级配曲线

图2 砂样的级配曲线



(a) 滤料和细料的级配曲线

3 试验方案

根据试验需要，进行层间系数比固定的滤料和基料的不同组合。共进行六组实验，其中S1-S4四组试验用于研究滤层厚度对管涌影响，采用相似的条件，加压力率均为 0.2 kPa/min ，基料厚度为 10 cm ，滤层厚度分别为 5 cm 、 10 cm 、 15 cm 、 20 cm ；S1、S5、S6三组试验用于研究加压力率对管涌影响，基料厚度和滤层厚度比均为 $10 \text{ cm} : 10 \text{ cm}$ ，加压力率依次为 0.2 kPa/min 、 0.5 kPa/min 、 0.8 kPa/min 。具体各参数详见表1。

表1 模型试验相关参数及结果

土样	加压力率 $/(\text{kPa} \cdot \text{min}^{-1})$	滤料			基料			i_c	i_t	有无管涌
		高度/cm	D_{15}/mm	D_{min}/cm	高度/cm	d_{85s}/mm	C_u			
S1	0.2	10	5.31	2	10	0.46	12.33	0.42	0.78	有
S2	0.2	5	5.31	2	10	0.46	12.33	0.24	0.26	有
S3	0.2	15	5.31	2	10	0.46	12.33	0.61	0.85	有
S4	0.2	20	5.31	2	10	0.46	12.33	0.85	1.1	有
S5	0.5	10	5.31	2	10	0.46	12.33	0.34	0.36	有
S6	0.8	10	5.31	2	10	0.46	12.33	0.25	0.25	有

先在模型箱的底部铺设一定高度的粗砂作为水流缓冲层,让其在饱水状态下自然沉积几个小时;接着在粗砂上铺设一定高度的基料,让其在饱水状态下静置数小时;而后再在基料的上方铺设一定高度的滤料,再静置数小时。在铺设基料和滤料的同时在相应位置埋设孔压计和针筒,并让埋设在砂样内部的孔压计达到相对稳定状态。为了尽可能减小边界效应的影响,在不研究的区域采用粒径比较均匀的细沙(1 mm 左右)严密填充边界,需观察的区域设在模型箱的中部。在进行基料-滤层渗流试验时,由于是宽级配基料,为了防止装样时粗细料分离,装样前先洒适量的水,在潮湿状态下搅拌均匀后再装样。

4 试验结果分析

4.1 滤层准则探讨

太沙基准则认为,为了保证土样的稳定,只需保证基料中较粗的 15% 不被冲走就可以了,为了研究基料在渗流作用下表现出的特性,众多学者进行了试验研究。为了能较准确控制孔隙的尺寸,他们采用特殊的材料来代替砂,这样基料的特性就可以在简化的较易控制的边界条件下体现出来^[3-5]。这些试验表明,基料的稳定性确实与其中较粗的颗粒密切相关,他们观察到,颗粒源源不断流失,直到在滤层和基料的交界处,由相对较粗的颗粒形成一个屏障,阻止了更细的颗粒流失。该自滤层的形成,使得整个系统达到稳定,这就是我们经常所说的自愈合现象。所以基料的控制粒径取为 d_{85} 。然而这只是针对级配比较窄的情况,对于窄级配情况,太沙基准则是偏安全的,而对于宽级配情况,太沙基准则是不安全的。宽级配的情况,如仍用该准则,会导致设计的反滤层太粗,易发生渗透破坏。对于宽级配基料,会有粗细分离的问题,渗流过程中,在较窄的反滤区,粗料相对集中发生空穴,而细料易通过空穴进入滤层,发生管涌。以试验土样 S1 为例, d_{85} 为

4.8 mm,满足 $D_{15}/d_{85} < 4$,但是却很容易发生管涌,所以对宽级配的情况,滤层准则不能简单的取 $D_{15}/d_{85} < 4$,且基料的特征粒径不能取 d_{85} 。

对于级配比较宽的基料,存在明显的可自由移动的细颗粒,Honjo^[8]认为应把基料分成两部分:一部分是粗颗粒,另一部分是可自由移动的颗粒。并通过数值求解并和试验进行对比,结论一致。文中指出,刚开始细颗粒会逐渐流失,直到在滤层和基料的交界处有细颗粒中较粗的部分形成一个自滤层,此时细颗粒不再流失,整个系统达到稳定。还发现,当孔隙的尺寸大于细颗粒的 d_{90} 时,颗粒流失严重;当孔隙尺寸小于细颗粒的 d_{80} 时,颗粒流失量达到最小,所以细料中粒径在 d_{80} 和 d_{90} 之间颗粒是形成反滤自滤的关键,在此选用细颗粒的 d_{85} 为基料的特征粒径。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,这一概念也逐渐被大多数人所接受^[9]。观察图 2 中的砂样级配可知,1.0 mm 基本上级配曲线上接近水平段的平均粒径,且本文通过高倍数摄像设备可观察到,渗流过程中移动的颗粒基本上是小 1 mm 的颗粒,而大于 1 mm 的颗粒基本上不动或轻微移动,总体位置不变,所以建议取可移动颗粒中的 d_{85} 进行滤层准则设计。

4.2 滤层厚度的影响

虽然有相当的学者对滤层的特性进行研究,却很少有关于对滤层形式的研究,滤层中最基本的构造要求之一便是厚度。滤层的厚度对在滤层基料交界面形成自滤层并防止更细的颗粒进一步流失起着关键的作用。为了研究滤层厚度的影响,这里对比率 $D_{15}/d_{85s} = 11.5$ 情况进行了滤层厚度不同,而其它条件相同的试验。基料和滤层厚度比分成如下四种①10 cm : 5 cm;②10 cm : 10 cm;③10 cm : 15 cm;④10 cm : 20 cm。不同滤层厚度下得到的水力梯度变化情况见图 3。

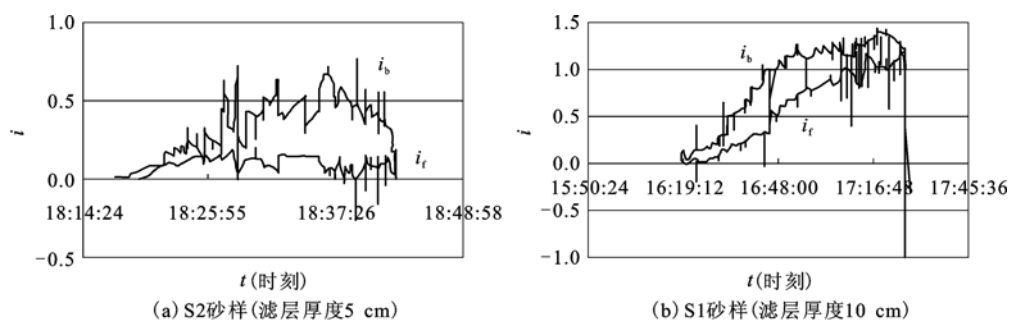


图 3 不同滤层厚度下得到的水力梯度变化情况(一)

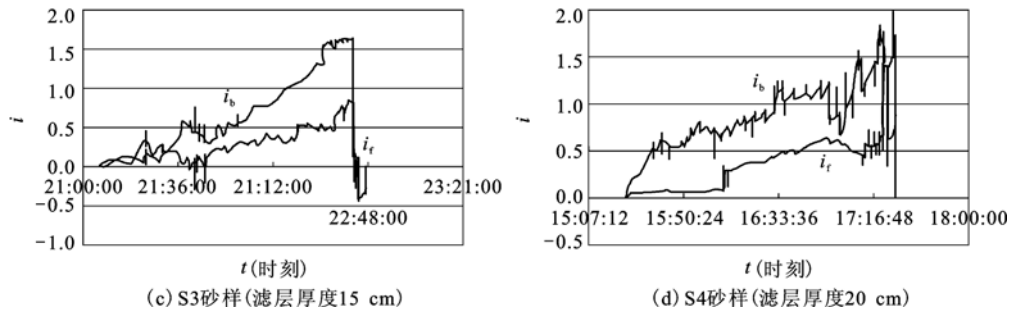


图3 不同滤层厚度下得到的水力梯度变化情况(二)

从图3试验结果看出,滤层厚度对发生颗粒流失的临界水力梯度影响不大,即基本上都是在0.6左右开始发生颗粒运动,但是滤层厚度对系统的破坏水力梯度影响比较大。前已分析过,加了滤层后,达到临界水力梯度并不意味着系统立即失去抗渗能力,还有一个过程。当基料滤层厚度比为10 cm : 5 cm时,抗渗能力不是很强,整个系统比较不稳定,在水力梯度达到0.6左右,颗粒逃窜很快,整个系统的水头波动现象比较剧烈,这是由于颗粒的快速流失,造成整个土体结构时时在变,流态非常不稳定所致。整个试验过程持续时间比较短,大约在0.5 h就结束了,过程中基本上看不到自滤现象,这可能是因为滤层厚度太薄,小于颗粒的潜在移动距离,还来不及形成自滤过程。细颗粒很快穿过滤层,滤层的平均粒径大小并无发生较大变化,故滤层中的水力梯度与基料中的相比一直较小。当滤层厚度为10 cm : 10 cm时,整个系统的抗渗强度有所提高,破坏水力梯度达到1.0左右,试验时间持续较长,将近1 h,试验过程中看到了自滤现象。这是因为滤层越长,移动颗粒中较粗的部分碰到控制收缩尺寸的几率就越大,这就有可能截住更小颗粒,在交界处形成自滤层。继续增大滤层厚度到15 cm时,破坏水力梯度达到1.5左右,提高了将近50%,试验时间持续将近1.5 h,如继续提高滤层厚度,到20 cm,发现效果并不是很明显了,破坏水力梯度提高不大,试验时间持续了将近2 h。试验中还发现,滤层越厚,试验结束后,砂样表面的细颗粒越少。这也证明了,当细颗粒有可能在较厚的滤层中截住时,却能轻易穿过较薄的滤层,所以滤层太薄不足以使基料滤层系统在交界处形成完全的自滤区。

综合本试验结果,滤层厚度变化,颗粒发生运动的临界水力梯度变化不大,可见提高滤层厚度对提高整个系统抵抗渗透能力作用不大。如果在滤层粒径一样的情况下,即使滤层加厚,基料中的细颗粒开

始运动的水力梯度基本上是一样的,但土体发生渗透破坏的时间往后延迟了,这可为抢险赢得时间,这从某个角度证明了滤层的作用,且土体抵抗渗透破坏的水力梯度明显提高。但滤层加厚到一定程度,整个系统的抗渗能力就达到一定值,如继续加大滤层厚度,提高效果就不明显了,此时加厚的部分更多的是起加压盖重的效果,意义并不大,而且滤层加厚会给施工带来难度,如厚度较大滤层中出现施工薄弱环节反而会带来隐患,所以建议不应过度依靠加厚滤层来提高整个系统的抗渗能力,而应控制好滤层和基料的控制粒径比,即滤层本身的粒径选取才是防治管涌的关键。因此,滤层厚度的合理选取,对于能否形成自滤也是关键的。至于厚度的选取,很多学者在研究,仍存在争议,一般认为滤层的厚度不小于30 cm。

4.3 加压速率的影响

上面已经分析了,水力梯度的临界值是决定管涌发生的关键,而不是水流持续作用的时间。前人工作中比较少提到的还有水力梯度的增加速率对管涌发生的影响,因此这里也进行了水头增加速度不同情况下管涌的发展情况,在此取 $D_{15}/d_{85} = 11.5$ 的土样,水头增加速率分别为0.2 kPa/min、0.5 kPa/min和0.8 kPa/min三种情况,其它试验条件保持不变。结果发现,以正常加载速率的,即0.2 kPa/min的,得到的结果和前面的类似,临界水力梯度和破坏水力梯度基本上0.4和0.8左右,试验持续时间大约1 h左右。而以0.5 kPa/min速率加压的,当水力梯度加到0.3~0.5时,土体就基本上失去了抗渗能力,临界水力梯度和破坏水力梯度并没有明显的界限,试验不到0.5 h就结束了,可见破坏时间明显提前。如以0.8 kPa/min速率加压,刚连续加两次,系统就基本上破坏了,基料内的水力梯度在0.25左右,该值只有以正常速率加压的25%~30%,试验时间持续10 min就结束了,可见系统抗渗透破坏能力显

著降低了。所以如果加载速率比较大,基料滤层系统在某个水力梯度下本来是稳定的也有可能变的不稳定。水头增加较快,有可能使那些可移动的颗粒在瞬间启动,颗粒流失严重,也没有充足的时间形成自滤过程。这正如 Kohler 在 1993 年的研究指出,滤层中的临时堵塞在突然增大的水头作用下,导致了孔隙水压力的瞬间加大,使土体内部的土拱失稳,破坏土体结构,使整个系统变的不稳定。这在实际工程中也随处可见,水位的突然增高或降低导致土体内产生过大超静孔隙水压力,从而引起整个结构的失稳。当然在大多数情况下,水位的增高还是缓慢的,所以本试验主要是研究水头缓慢增长情况下,整个系统的变化情况。

试验中还发现,在管涌发生的过程中,如在土样顶面施加荷载(加个砝码),颗粒的逃窜更加剧烈了。该荷载加速了系统的不稳定,可能是因为施加的荷载破坏了土体结构,使堵塞的颗粒被挤出,同时土拱效应被破坏,系统更加不稳定。所以在管涌发生的过程中,外部的扰动因素有可能加速土体结构的破坏,使整个系统不稳定。

5 结 论

本文通过对宽级配基料-滤层系统进行室内渗透模型试验,得出如下结论:

1)管涌防治,滤层是关键,对于宽级配砂土,传统太沙基准则已不适用,建议采用可移动颗粒的 d_{85} 进行滤层准则设计,即层间系数 D_{15}/d_{85s} 是决定滤层是否合格的关键。

2)增加滤层厚度可提高系统的抗渗透破坏能力,并可大大延迟系统破坏的时间。滤层太薄,不利自滤过程的形成,系统抗渗能力不强(临界水力梯度不大)。但滤层不宜过厚,只要满足要求便可,层间系数才是控制管涌是否发展的关键因素。

3)水力梯度增加较快不利于系统的稳定。水力梯度增加幅度大,系统内可移动的颗粒在较大水流的冲击下瞬间启动,这样不利自滤过程的形成,导致系统在较低的水力梯度下就可能引发管涌。

4)由于笔者试验条件有限,模型尺寸较小,难以避免尺寸效应,建议有条件时最好进行原型试验。

参 考 文 献

- [1] 姚志雄. 砂土管涌及滤层防治的细观机理研究[D]. 上海:同济大学,2008.
- [2] Arulanandan K, Edwaud B, Perry. Erosion in Relation to Filter Design Criteria in Earth Dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1983, 109(5): 682-699.
- [3] Sherman W C. Filter experiments and design criteria [R]. Vicksburg: US Army Waterways Expert Station, 1953.
- [4] 毛昶熙,段祥宝,冯玉宝. 管涌与滤层的研究 II: 滤层[J]. *岩土力学*, 2005, 26(5): 680-686.
- [5] 沙金焯. 多孔介质中的管涌研究[J]. *水利水运科学*, 1981(3): 89-93.
- [6] 周 健,姚志雄,白彦峰,等. 砂土管涌的细观机理研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(6): 733-737.
- [7] 周 健,白彦峰,姚志雄. 管涌型土滤层防治的细观试验研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(4): 390-397.
- [8] Honjo Y, Veneziano D. Improved filter criterion for cohesionless soils [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 15(1): 75-83.
- [9] 付恩怀,张 云,魏 鹏. 砂砾料反滤设计评述[J]. *西北水电*, 2005(4): 20-23.

收稿日期:2011-10-12