

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.03.007

细砂层埋深对堤基管涌影响的试验研究

陈建生^{1,2}, 袁克龙^{1,2}, 王 霜^{1,2}, 张 华^{1,2}, 何文政^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 不同土层结构的堤基, 其管涌发生和发展的情形不同。以前的研究多集中于双层堤基的情况。事实上, 含夹砂层堤基中, 位于砂砾石层内的细砂层会对堤基管涌的发生产生重大影响, 并且这些影响随细砂层在砂砾石层中的位置不同而不尽相同。利用室内砂槽试验, 模拟当细砂层位于砂砾石层内部不同深度时含夹砂层堤基管涌的发展过程, 研究细砂层埋深对堤基管涌的影响。试验结果表明, 细砂层埋深存在一个临界深度, 当细砂层埋深较浅时, 堤基的临界水力梯度较小, 易于发生管涌, 且管涌发生以后, 堤基被侵蚀的速率较大, 出砂较多; 堤基破坏的临界水力梯度随着细砂层埋深的增加而增大, 当细砂层埋深大于临界埋深时, 堤基的临界水力梯度基本不变, 同时堤基抵抗管涌破坏的能力较强, 其破坏形式与双层堤基相类似。

关 键 词: 管涌; 临界水力梯度; 涌砂量; 侵蚀

中图分类号: TV 871

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 03-653-07

Experimental research on piping development considering buried depth of fine sand

CHEN Jian-sheng^{1,2}, YUAN Ke-long^{1,2}, WANG Shuang^{1,2}, ZHANG Hua^{1,2}, HE Wen-zheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Different foundation structure has different types of embankment piping. Previous researches have always focused on two-stratum dike foundation. In fact, the buried depth of fine sand has a significant influence on the piping development of foundations with fine sand. A series of simulated experiments is carried out to study the development process and mechanism of three-stratum dike foundations when the buried depth of fine sand changes. The results of experiments indicate that the burial depth of fine sand has a critical value. When the burial depth of fine sand is small, the critical hydraulic gradient is low and it's easy to cause piping. After the occurrence of piping, more sand pours out of the embankment, and it leads to faster erosion. The critical hydraulic gradient increases as the buried depth of fine sand increases. While the buried depth is greater than the critical depth, the buried depth has almost no influence on the critical hydraulic gradient; meanwhile, the foundation has a strong ability to resist piping; its development of piping is similar to two-stratum dike foundation.

Keywords: piping; critical hydraulic gradient; sand production; erosion

1 引 言

管涌是危害堤防工程安全的主要原因之一, 前人对此进行了大量的研究, 取得了一系列的成果。李广信^[1]利用模型槽试验, 研究了二元堤基及不同防渗墙深度条件下堤基管涌发生发展的过程; 毛昶熙^[2]指出, 管涌的发生与堤基内砂层的厚度、出口水头损失以及砂基的结构性质等因素有关; 刘杰等^[3]通过双层堤基试验, 论证了双层堤基中的渗透破坏会在砂砾石层上部形成一条由纯砾石构成的管涌通道,

从而导致堤基的流量剧增, 加剧上部黏土层的破坏; 姚秋玲等^[4]对典型的单层和双层堤基的管涌破坏机制进行了试验研究; 倪小东等^[5]利用砂槽模型试验和颗粒流数值模拟, 分析了管涌发展过程中试样的细观变化规律; 梁越等^[6]研究了双层堤基上覆层变形能力对管涌的影响; 罗玉龙等^[7]利用其自行研制的剪切渗透仪进行试验, 探究了不同应力状态对堤基渗透破坏的影响; 陈建生等^[8]根据井流理论, 研究了管涌的发生范围及发展过程; 殷建华^[9]将有限元方法引入管涌的研究; 周健等^[10]利用 PFC 颗粒流程序对管涌

收稿日期: 2014-07-18

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(No.CXZZ13_0243)。

第一作者简介: 陈建生, 男, 1955年生, 教授, 博士生导师, 主要从事同位素水文学、渗流理论与示踪探测技术的研究。E-mail: jschen@hhu.edu.cn

通讯作者: 袁克龙, 男, 1989年生, 硕士研究生, 主要从事渗流测试及渗流计算的研究。E-mail: yuan736974363@163.com

通道内的颗粒做了细观数值模拟。

纵观国内外关于管涌的研究,多集中于双层堤基的情况,对于3层及3层以上堤基的管涌发生发展过程研究甚少。丁留谦等^[11]曾对由弱透水层、细砂层、强透水砂砾石层组成的3层堤基的管涌发展过程进行了研究,指出3层堤基的管涌破坏区域和涌砂量要明显大于双层堤基;王霜等^[12]研究了不同土层结构对堤基管涌发生发展过程的影响,通过对细砂层位于砂砾石层内部和表面的不同试验结果的对比指出,与双层堤基相比,3层堤基中砂砾石层内夹有细砂层时,将会提高堤基的临界水力梯度,但破坏一旦发生,则侵蚀速率和涌砂量都有所提高,对工程的危害较大。上述研究主要集中在细砂层埋深对管涌破坏的影响与双层堤基管涌破坏的对比上,而对细砂层在砂砾石层内部的深度变化对管涌的影响未予关注。

实际工程中的地质条件千差万别,经常会出现细砂层位于砂砾石层内部的情况,对于该种工况的研究就显得相当重要。本文将实际工程中的一些因素进行简化,在自制的砂槽内研究当细砂层位于砂砾石层内部不同深度时堤基管涌的发生及发展情况,通过对测压管水位、流量及涌砂量变化的分析,定性地找出其中的规律,确定含夹砂层堤基中细砂层埋深对堤基管涌发展的影响机制,并为工程实际提供指导。

2 试验装置及步骤

2.1 试验装置

试验在自制的有机玻璃槽中进行,槽长为120 cm,宽为30 cm,高为30 cm,如图1所示。槽的左侧为进水室,以透水板与砂槽隔开,使水流均匀地流入砂槽。在砂槽内铺设黏土层以模拟天然上覆土层,并加刚性玻璃盖板进行密封。距进水室85 cm处预设有直径为4 cm的出水口,以模拟堤基渗透破坏后的管涌口。在砂槽内布设9根测压管,用来测量试验过程中试样内部的孔隙水压力,各测压管之间距离为10 cm,横向深入试样内2 cm,具体布设位置如图1所示。

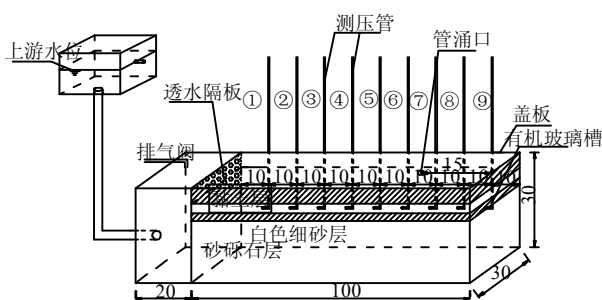


图1 试验装置图(单位: cm)

Fig.1 Experiment apparatus (unit: cm)

2.2 试验材料

本次共设计了4组试验,分别改变弱透水层在下伏层中的位置,以研究其对管涌的发生及发展的影响。天然上覆土层一般渗透系数很小,因此,在试验中采用黏土进行模拟。下伏层则采用级配间断的砂砾石,这种砂砾石属于管涌型土。弱透水层由白色细砂组成,该细砂颗粒均匀,渗透系数小,因此,可以用于模拟弱透水层,而且还能区别普通砂,便于试验现象的观察。普通砂和白细砂的级配曲线如图2所示,物理参数见表1。

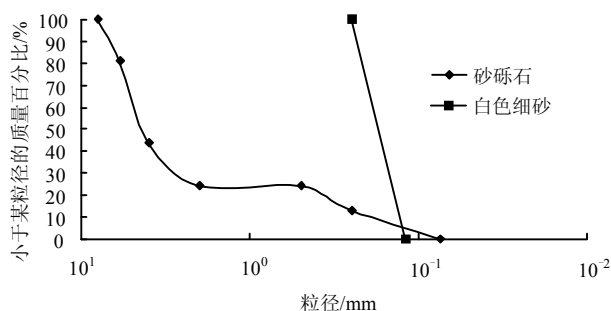


图2 试验材料级配曲线

Fig.2 Gradation curves of materials

表1 试验所用材料的物理力学指标

Table1 Physico-mechanical properties of materials

试验 用土	d_{60} /mm	d_{30} /mm	干密度 /(g/cm ³)	相对 密度	孔隙率 /%	渗透系数 /(cm/s)
白细砂	0.19	0.15	1.35	2.65	49	3.1×10^{-3}
砂砾石	5.00	2.90	1.86	2.65	30	1.5×10^{-2}

注: d_{60} 和 d_{30} 分别为粒径分布曲线上小于某粒径的土粒含量为60%和30%时所对应的粒径。

2.3 试验步骤

本次试验的试验步骤如下:

(1) 装样饱和。拌合试样,采用水下分层填筑的方法进行填筑;每层填筑5 cm,压实至预定高度以后填筑另一层;填筑结束后盖上盖板,注水饱和和24 h以上。

(2) 逐级提升上游水位进行试验,每级水位下待渗流稳定时记录各测压管水位,测量流量,如有涌砂则收集涌砂。

(3) 管涌通道形成以后,结束本次试验,准备下一组试验。

3 试验过程

3.1 试验1: 白色细砂层在砂砾石层内1 cm处

逐级提升上游水位,每级水位施加以后维持20 min左右,直到渗流达到稳定以后再施加下一级水位。根据流量变化曲线(见图3)和测压管水位

变化曲线(见图4)可以分析出试验主要经历了以下阶段:

试验初期,测压管水位和流量都随着上游水位的增加而增加,大致呈线性关系(见图3、4)。管涌口处水流清澈而稳定,无砂沸现象。

当上游水位提升到25.8 cm时,管涌口出现砂沸,随即出现第1次涌砂。涌出的砂为普通砂和白色砂的混合物,其中以白色砂居多。待测压管稳定后继续提升上游水位,流量和测压管水位都有所增加,且增加速率比上一级水位作用下的要大。涌出的砂中白色颗粒的含量逐步减少,但总的出砂量则比前一阶段大。

继续提升上游水位至36.2 cm时,管涌口再次发生涌砂,涌出的砂中白色砂粒的含量不多,主要为普通砂颗粒,颗粒粒径比之前涌出的砂大。提升上游水位,流量随着上游水位的增加而增加,且增加的速率比前一阶段要大(见图3);距离管涌口较近的测压管水位则随着上游水位的增加而减小(见图4)。

待渗流稳定以后,逐级提升上游水位直到管涌通道贯通。这一阶段流量逐渐增大,测压管水位则有所降低(见图3、4)。

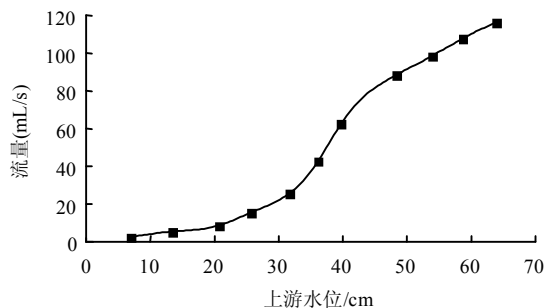


图3 试验1流量随上游水位变化曲线

Fig.3 Flux variation with upstream water level of experiment 1

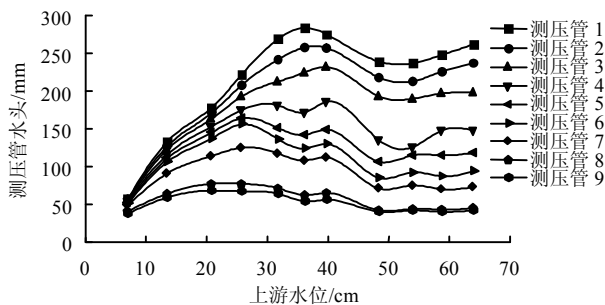


图4 试验1测压管水位随上游水位变化曲线

Fig.4 Hydraulic head variation with upstream water level of experiment 1

试验结束后静置一段时间,揭开有机玻璃盖板,

观察试样渗流通道的发展情况,发现砂砾石层顶部的细颗粒已经大量流失并形成管涌通道。管涌口附近的白色细砂大量流失,形成较大的破坏区域,如图5所示。

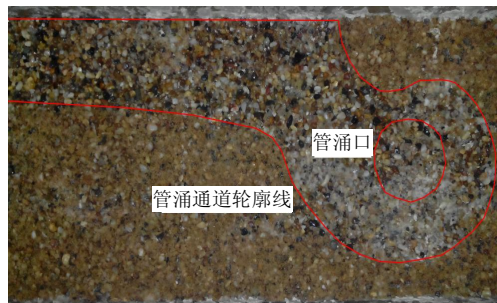


图5 试验1结束后的管涌通道

Fig.5 Piping channel after experiment 1

3.2 试验2: 白色细砂层在砂砾石层内2 cm处

试验2的试验现象在试验初期与试验1基本相同。随着试验的进行,当上游水位提升到28 cm时,管涌口突然大量涌砂,涌出的为普通砂和白色细砂混合物。此时流量和各测压管水位也发生急剧变化,流量突然增大(见图6),各测压管水头则有不同程度的降低(见图7)。待渗流稳定以后继续提升上游水位,流量随之而增加。测压管1和测压管2随上游水位的增加而出现先增加后减小的趋势,其他的测压管则出现时升时降的变化。

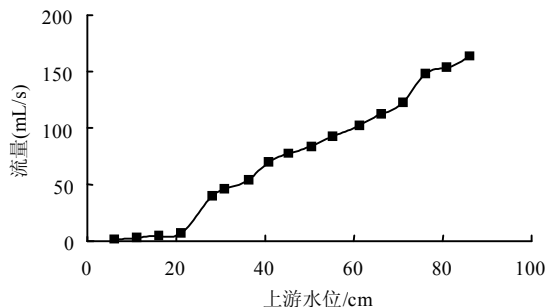


图6 试验2流量随上游水位变化曲线

Fig.6 Flux variation with upstream water level of experiment 2

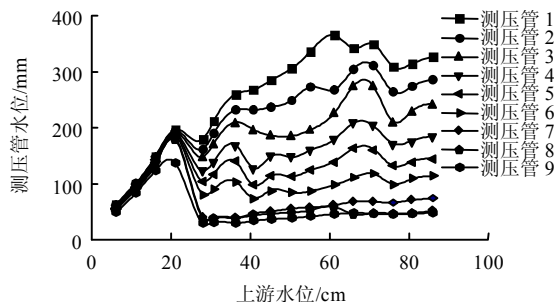


图7 试验2测压管水位随上游水位变化曲线

Fig.7 Hydraulic head variation with upstream water level of experiment 2

试验结束后, 揭开有机玻璃盖板观察管涌通道的发展情况。如图 8 所示, 砂砾石层中细颗粒大量流失, 形成渗漏通道。渗漏通道下部的白色细砂颗粒几乎全部流失, 在管涌口附近形成的破坏区域比试验 1 要小。

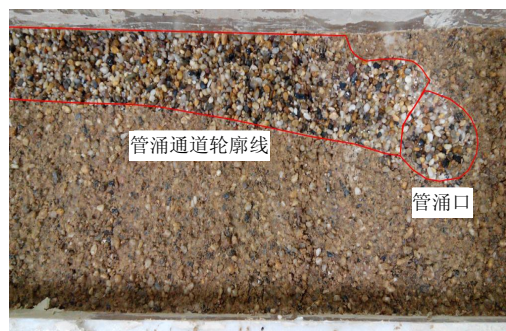


图 8 试验 2 结束后的管涌通道
Fig.8 Piping channel after experiment 2

3.3 试验 3: 细粒白砂在砂砾石层内 3 cm 处

试验 3 的现象与试验 1、2 不同。整个试验过程中, 流量和各测压管水位随着上游水位的增加而增加, 且基本保持线性关系 (见图 9、10)。

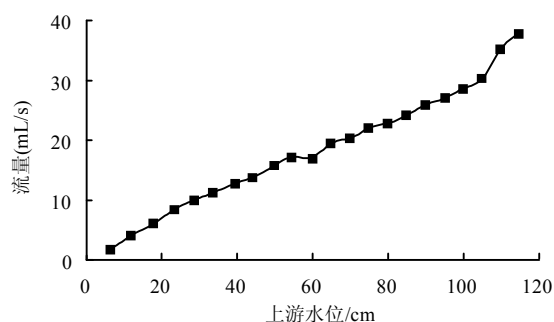


图 9 试验 3 流量随上游水位变化曲线
Fig.9 Flux variation with upstream water level of experiment 3

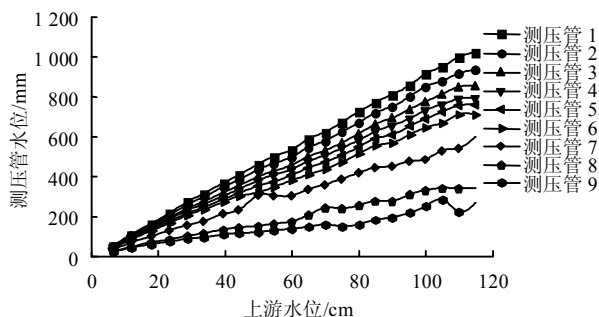


图 10 试验 3 测压管水位随上游水位变化曲线
Fig.10 Hydraulic head variation with upstream water level of experiment 3

当上游水位达到 95.3 cm 时开始涌砂, 涌出的砂均为普通砂颗粒, 涌砂质量远小于试验 1 和试验 2。试验结束后, 揭开有机玻璃盖板, 发现只有管涌

口下方的一小块区域砂砾石层发生破坏, 破坏区域开展深度为 1.9 cm, 如图 11 所示。

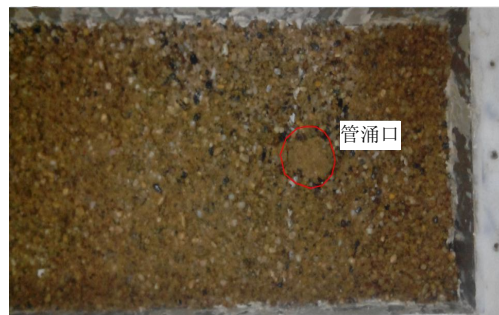


图 11 试验 3 结束后的管涌通道
Fig.11 Piping channel after experiment 3

3.4 试验 4: 细粒白砂在砂砾石层内 5 cm 处

试验 4 试验过程中流量和各测压管水位随上游水位的变化曲线如图 12、13 所示。与试验 3 的试验现象相类似, 试验 4 在整个试验过程中, 流量和各测压管水位也随着上游水头的增加而增加, 并基本保持线性关系。

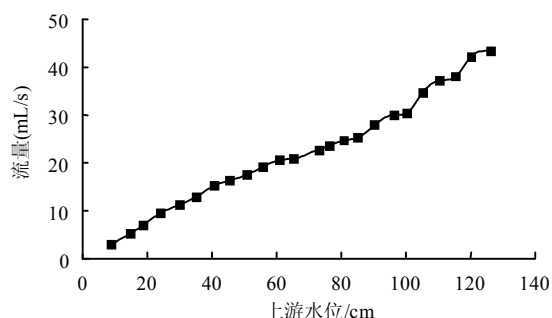


图 12 试验 4 流量随上游水位变化曲线
Fig.12 Flux variation with upstream water level of experiment 4

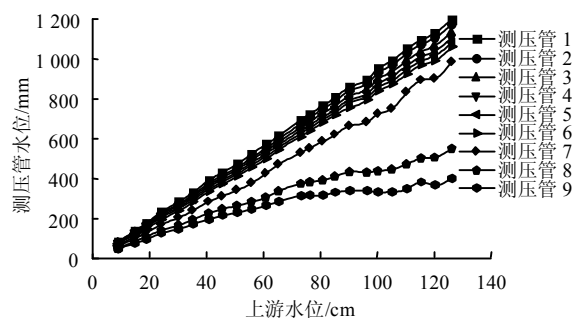


图 13 试验 4 测压管水位随上游水位变化曲线
Fig.13 Hydraulic head variation with upstream water level of experiment 4

当上游水头达到 96.4 cm 时, 管涌口处开始涌砂, 所涌出的砂均为天然砂颗粒, 涌砂量远小于试验 1、2。试验结束后, 揭开有机玻璃盖板观察管涌通道的发展状况, 如图 14 所示, 破坏区域只出现在

管涌口下方的小块区域内, 开展深度为 2.1 cm。

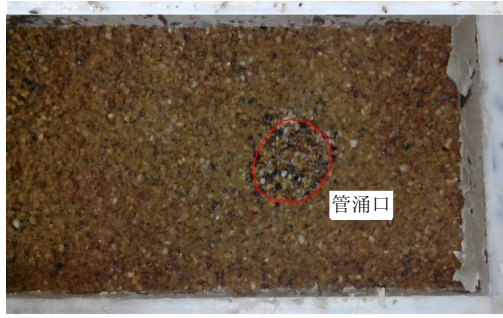


图 14 试验 4 结束后的管涌通道
Fig.14 Piping channel after experiment 4

4 试验结果分析

4.1 管涌发展过程分析

从上述试验现象可以看出: 随着细砂层埋深的变化, 各组试验的临界水位分别为 25.8、28、95.3、96.4 cm, 这说明细砂层埋深是影响含夹砂层堤基管涌发生和发展的重要因素。当白色细砂层埋深很浅时, 由于其颗粒粒径较小, 级配均匀, 渗透系数小, 能有效地阻隔水量向上传递^[12], 因此, 水量主要集中在白色细砂层下部的砂砾石层中, 即白色细砂层底部将承受较大的水压力。在所受水压力随上游水位的增加而不断增加的情况下, 由于白色细砂层上部所覆盖的砂砾石层很薄, 所受的压力较小, 当上游水位达到临界水头时, 白色细砂层和砂砾石层发生流土破坏, 砂砾石层中的细颗粒和白色砂一起涌出。随着上游水位提升, 白色细砂颗粒由于临界水力梯度较小且被带出管涌口的渗径较短, 因此, 易于流失。白色细砂大量流失后, 在管涌口附近形成一个较大的破坏区域 (见图 5)。此时, 下部砂砾石层中的巨大的水压力将主要由白砂层上部的砂砾石层来承受, 达到临界水力梯度的普通砂颗粒不断涌出, 且颗粒越来越大, 而白砂颗粒则基本不再涌出。不断提升上游水头, 渗漏通道逐渐向上游发展, 最终达到贯通。试验 1 的管涌发生发展即属于此种情形。

增大细砂层的埋深, 堤基的管涌发展状况将有所不同。开始阶段, 试验发展过程与试验 1 类似, 即由于白色细砂层的渗透系数较小, 其底部会承受较大的水压力。但此时的上覆砂砾石层厚度大于试验 1, 细砂层不易发生破坏。相比于试验 1 白色细砂层所受的水压力消散较小, 白色细砂层下部和上部之间的压力差远小于试验 1, 从而导致临界水位大于试验 1, 且当上游水位达到临界水头时, 试样

会发生突然涌砂和流量及测压管水头急剧变化的现象。随着上游水位不断提高, 白色细砂层下部和砂砾石层接触处的白砂颗粒会在砂砾石层中较大水压力的作用下被冲出, 发生所谓的“深层破坏”^[11]。当上游水位提升到一定程度时, 白色细砂层及其上部砂砾石层共同发生破坏 (见图 8)。试验 2 的管涌发展过程即是如此。

当细砂层埋深增大到一定程度时, 堤基管涌发展过程和上述所讨论的两种情况都不同。由于白色细砂层上部所覆砂砾石层较厚, 即白色砂层所受上覆压力较大, 所以能够承受下部砂砾石层中传递来的较大的水压力。同时由于上部砂砾石层本身较厚, 会集中一定的水量, 所以当上游水位提升到一定程度时, 上部砂砾石层首先发生水平向渗透破坏, 其管涌破坏形式与双层堤基破坏类似。试验 3 和试验 4 的堤基管涌发展状况属于此种情况。

4.2 细砂层临界埋深的确定

由上述分析可以看出, 细砂层埋深对于堤基管涌的发生发展机制具有重大影响。埋深较浅时, 堤基发生竖直方向上的流土破坏, 临界水位较低; 埋深较深时, 堤基的破坏形式与普通双层堤基类似, 发生的是水平方向上的管涌型渗透破坏。当堤基同时发生水平向和竖直向的管涌破坏时, 此时的细砂层埋深即为临界埋深。

对于细砂层埋深大于临界埋深的情况, 堤基发生的是水平方向上的管涌破坏, 其破坏的临界水力条件为^[13]

$$\frac{H}{L} = i_{cr} = 2.2(G_s - 1)(1 - n_1)^2 \frac{d_5}{d_{20}} \quad (1)$$

$$H = 2.2(G_s - 1)(1 - n_1)^2 L \frac{d_5}{d_{20}} \quad (2)$$

式中: G_s 为砂砾石的相对密度; n_1 为砂砾石的孔隙率; d_5 为小于该粒径的土粒含量为 5%; d_{20} 为小于该粒径的土粒含量为 20%; L 为进水室与管涌口中心之间的距离; H 为堤基临界水位; i_{cr} 为堤基临界水力梯度。

可见当细砂层埋深处于临界埋深以下时, 细砂层埋深对堤基发生管涌破坏的临界水基本无影响。

当细砂层的埋深小于临界埋深时, 堤基发生竖直方向上渗透破坏的临界水位为^[12]

$$H = \frac{\gamma'_1(1 - n_1)}{\gamma_w} h_1 + \frac{\gamma'_2(1 - n_2)}{\gamma_w} h_2 \quad (3)$$

式中: γ'_1 为砂砾石的浮重度; γ'_2 为细砂的浮重度;

γ_w 为水的重度; h_1 为砂砾石层的厚度; h_2 为细砂层的厚度; n_2 为细砂层的孔隙率。

综上所述, 含夹砂层堤基的临界水位随着细砂层埋深的增加而增加, 但当细砂层埋深大于临界埋深时, 临界水位的大小基本不受埋深的影响。

由式(2)可以计算出当细砂层埋深大于临界埋深时, 堤基临界水位的理论值为 98.2 cm。试验中, 试验 3、4 的堤基分别在上游水位达到 95.3 cm 和 96.4 cm 时破坏, 与 98.2 cm 接近。可见理论值与试验结果基本相吻合。

通过上述理论公式推导发现, 临界水位随着细砂层埋深增加而增加, 但当细砂层埋深超过临界埋深时, 埋深基本不对临界水位的大小产生影响。因此, 在工程实际中可以用此方法作为提高堤基破坏时临界水位的一种手段, 只需要将细砂层埋置在临界埋深处即可最大限度地提高堤基破坏的临界水位。

4.3 涌砂量分析

各组试验的累计出砂量随上游水位的变化曲线如图 15 所示。试验 1 在较低水位下即发生涌砂, 累计涌砂量随上游水位的增加而增加, 且增加速率较大; 试验 2 的破坏水位也较低, 累计涌砂量变化曲线与试验 1 类似, 但出砂量远大于试验 1, 这主要是由试验 1、2 管涌机制不同造成的。首先试验 2 管涌发展的过程是流土破坏和深层管涌破坏共同发展的过程, 天然砂和白砂颗粒一起涌出, 出砂量较大; 试验 1 初期白色颗粒和天然砂颗粒会一起涌出, 后期由于水压力主要由白砂层上部的砂砾石层承受, 所以白砂颗粒基本不再涌出, 破坏主要集中于白砂层上部的砂砾石层, 出砂量远小于试验 2。试验 3、4 的管涌发生发展机制基本相同, 其管涌破坏都发生于砂砾石层内, 与双层堤基的破坏相类似, 细砂颗粒仅在砂砾石层表面起动被带出, 因此, 管涌通道开展深度及出砂量基本相同, 涌砂量比试验 1、2 要小很多。

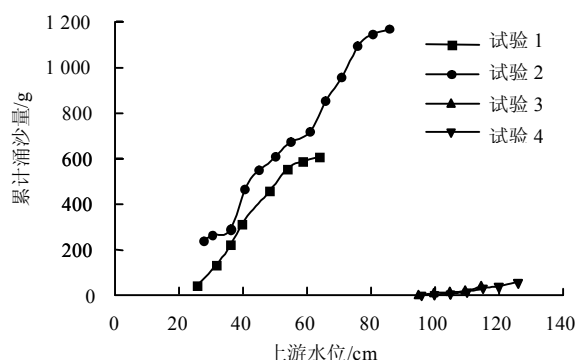


图 15 各试验累计涌砂量随上游水位的变化曲线

Fig.15 Cumulative sand production variation with upstream water level

5 结 论

(1) 细砂层的埋深不同, 堤基临界水力梯度不同。细砂层埋深小于临界埋深时, 临界水力梯度较低, 且随埋深增加而提高; 细砂层埋深大于等于临界埋深时, 堤基临界水位较高, 且基本不受细砂层埋深的影响。

(2) 细砂层的埋深不同, 对堤基渗透破坏机制有很大影响。细砂层埋深小于临界埋深时, 由于所受的上覆压力较小, 下部承受砂砾石层传递来的较大的水压力, 导致细砂层易被冲破, 发生竖直向的渗透破坏; 细砂层埋深大于临界埋深时, 由于上覆压力较大, 细砂层不会被直接冲破, 堤基将在细砂层上部的砂砾石层内发生水平向的渗透破坏。

(3) 细砂层的埋深不同, 涌砂速率不同。细砂层埋深大于临界埋深时, 涌砂速率小, 涌砂量少; 细砂层埋深小于临界埋深时, 涌砂量大, 堤基侵蚀较快。

参 考 文 献

- [1] 李广信, 周晓杰. 堤基管涌发生发展过程的试验模拟[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(6): 21—24.
LI Guang-xin, ZHOU Xiao-jie. Laboratory simulation on generation and evolution of piping in embankment foundation[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2005, 25(6): 21—24.
- [2] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金傍, 等. 堤基渗流无害管涌试验研究[J]. 水利学报, 2004, 35(11): 46—53.
MAO Chang-xi, DUAN Xiang-bao, CAI Jin-bang, et al. Experimental study on harmless seepage piping in levee foundation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(11): 46—53.
- [3] 刘杰, 谢定松, 崔亦昊. 江河大堤堤基砂砾石层管涌破坏危害性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1188—1191.
LIU Jie, XIE Ding-song, CUI Yi-hao. Destructive tests on piping failure of sandy gravel layer of river dikes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(8): 1188—1191.
- [4] 姚秋玲, 丁留谦, 孙东亚, 等. 单层和双层堤基管涌砂槽模型试验研究[J]. 水利水电技术, 2007, 38(2): 13—18.
YAO Qiu-ling, DING Liu-qian, SUN Dong-ya, et al. Experimental studies on piping in single and two-stratum dike foundations[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2007, 38(2): 13—18.
- [5] 倪小东, 王媛, 王飞. 管涌的砂槽试验研究及颗粒流模

- 拟[J]. 四川大学学报, 2009, 41(6): 51—57.
- NI Xiao-dong, WANG Yuan, WANG Fei. Study on piping by sand-bank model and simulation by PFC3D[J]. **Journal of Sichuan University**, 2009, 41(6): 51—57.
- [6] 梁越, 陈建生, 陈亮, 等. 双层堤基上覆层影响渗透破坏的试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(6): 15—19.
- LIANG Yue, CHEN Jian-sheng, CHEN Liang, et al. Effect of superstratum on seepage failure in two-stratum dike foundations[J]. **Advances in Science and Technology of Water Resources**, 2010, 30(6): 15—19.
- [7] 罗玉龙, 吴强, 詹美礼, 等. 考虑应力状态的悬挂式防渗墙-砂砾石地基管涌临界坡降试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 1): 73—78.
- LUO Yu-long, WU Qiang, ZHAN Mei-li, et al. Study of critical piping hydraulic gradient of suspended cut-off wall and sand gravel foundation under different stress states[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Supp.1): 73—78.
- [8] 陈建生, 李兴文, 赵维炳. 堤防管涌产生集中渗漏通道机制与探测方法研究[J]. 水利学报, 2000, 31(9): 48—54.
- CHEN Jian-sheng, LI Xing-wen, ZHAO Wei-bing. Study on piping leakage mechanism[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2000, 31(9): 48—54.
- [9] 殷建华. 土堤管涌区渗流的有限元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 679.
- YIN Jian-hua. FE modeling of seepage in embankment soils with piping zone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(6): 679.
- [10] 周健, 姚志雄, 张刚. 砂土渗流过程的细观数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 977—981.
- ZHOU Jian, YAO Zhi-xiong, ZHANG Gang. Mesomechanical simulation of seepage flow in sandy soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(7): 977—981.
- [11] 丁留谦, 姚秋玲, 孙东亚, 等. 三层堤基管涌砂槽模型试验研究[J]. 水利水电技术, 2007(2): 19—22.
- DING Liu-qian, YAO Qiu-ling, SUN Dong-ya, et al. Experimental studies on piping development in three-stratum dike foundations[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2007, 38(2): 19—22.
- [12] 王霜, 陈建生, 黄德文, 等. 土层结构对管涌发展影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2334—2341.
- WANG Shuang, CHEN Jian-sheng, HUANG De-wen, et al. Experimental researches on piping development considering the effect of foundation structure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(12): 2334—2341.
- [13] 卢廷浩. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2005.
- 析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1361—1365.
- LIU Jia-cai, ZAI Jin-min, MEI Guo-xiong, et al. Consolidation analysis of visco-elastic soil around a driven pile[J]. **Journal of Rock and Geotechnical Engineering**, 2009, 31(9): 1361—1365.
- [10] 童磊. 软土浅埋隧道变形、渗流及固结性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [11] 李金柱. 软黏土地基大应变流变固结特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

上接第 652 页

- [7] 赵明华, 占鑫杰, 邹新军, 等. 饱和软黏土中沉桩后桩周土体固结分析[J]. 工程力学, 2012, 29(10): 91—97.
- ZHAO Ming-hua, ZHAN Xin-jie, ZOU Xin-jun. Consolidation analysis around a driven pile in saturated clay[J]. **Engineering Mechanics**, 2012, 29(10): 91—97.
- [8] GUO W D. Visco-elastic consolidation subsequent to pile installation[J]. **Computers and Geotechnics**, 2000, 26(2): 113—144.
- [9] 刘加才, 宰金珉, 梅国雄, 等. 桩周黏弹性土体固结分