

悬挂式防渗墙控制管涌发展的模型试验研究

张超^{1,2}, 陈建生^{1,2}, 张华^{1,2}, 袁克龙^{1,2}, 张家甫^{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:利用室内砂槽试验,对有无悬挂式防渗墙以及不同土层结构的3种堤基管涌破坏过程进行了模拟,研究了悬挂式防渗墙控制管涌发展的机理以及悬挂式防渗墙对管涌发展过程的影响。试验结果表明,在双层和三层堤基中设置悬挂式防渗墙,可以改变砂砾层内部渗透压力的分布和管涌破坏发展的路径,提高管涌破坏的水力梯度,降低管涌破坏的流量、出砂量和破坏范围。但是,含悬挂式防渗墙的双层堤基和三层堤基的管涌破坏形式不同,双层堤基中,防渗墙上游侧的管涌破坏在砂砾层内部发展,而在三层堤基中防渗墙上游侧的管涌破坏在砂层顶面发展。

关键词:管涌;悬挂式防渗墙;堤基;涌砂量;水力梯度

中图分类号:TV871

文献标识码:A

Experimental researches on piping development control by means of suspended cut-off wall in double and three layer embankment

ZHANG Chao^{1,2}, CHEN Jian-sheng^{1,2}, ZHANG Hua^{1,2}, YUAN Ke-long^{1,2}, ZHANG Jia-fu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

Abstract:Based on the laboratory test, the destruction process of with or no suspended cut-off wall and different soil structure of 3 kinds of embankment piping were simulated, studied the mechanism of suspended cut-off wall control piping development and the impact of suspended cut-off wall on the development process of piping. The test results show that, set of the suspended cut-off wall in double layer and three layer embankment, the suspended cut-off wall can change the distribution of the osmotic pressure inside the gravel layer and the development path of piping failure, improve the hydraulic gradient of piping failure, can reduce the flux, the sand content and the extent of damage when the piping occurred. However, the piping failure forms of double and three layer embankment with the suspended cut-off wall are different, in double layer embankment, on the upstream side of the cut-off wall the piping failure was developed in the internal sand, but in three layer embankment, on the upstream side of the cut-off wall the piping failure was developed on the top surface of the sand layer.

Key words:piping; suspended cut-off wall; embankment; erosion mass; hydraulic gradient

管涌作为一种主要的渗透破坏形式,严重危害堤防工程的安全,前人对此进行了大量的研究工作,取得了一系列成果。如陈建生^[1]、毛昶熙^[2]等根据井流理论研究了管涌集中渗漏通道发展的机理;丁留谦^[3]等通过试验研究了三层堤基管涌

破坏的机理;王霜^[4]、陈建生^[5]等通过模型试验研究了土层结构变化对管涌的影响;毛昶熙^[6]、张家发^[7]等通过砂槽模型试验,研究了不同贯入度下悬挂式防渗墙控制管涌发展的效果;丁留谦^[8]等通过砂槽模型试验研究了双层堤基设置悬挂式防

渗墙情况下管涌发展的过程;王保田^[9]等研究发现堤基的临界表观水力梯度随悬挂式防渗墙贯入度的增加而有较大的增加;周晓杰^[10]等结合理论分析,研究了二元堤基结构在不同防渗墙深度、位置条件下渗透变形的发生、发展过程。而目前针对悬挂式防渗墙控制作用机理以及其对三层堤基的控制效果的研究比较少。本文在前人研究的基础上,开展有无悬挂式防渗墙以及不同堤基结构管涌试验,模拟了不同堤基管涌的破坏过程。分析总结测压管水位、流量和涌砂量等的变化规律,对悬挂式防渗墙控制管涌发展的机理做了初步的探讨。

1 试验装置及步骤

1.1 试验装置

图1为自制的有机玻璃槽,模型槽为100 cm×30 cm×30 cm。模型槽左侧为进水室,试样与进水室之间由透水板隔开。模型槽顶部为刚性有机玻璃盖板,刚性盖板下设置5 cm厚度的黏土层模拟弱透水的上覆地层。盖板右侧距离进水室65 cm处预设有直径为4 cm的出水口,模拟上覆地层破坏后形成的管涌口,距离进水室25 cm处设置一高度为11 cm(其中深入土层深度为6 cm)、厚度为1 cm的有机玻璃板,模拟悬挂式防渗墙,试验

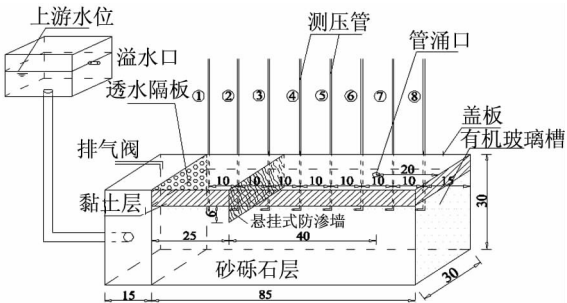


图1 试验装置图 (尺寸单位: cm)
Fig.1 Experimental device (size unit: cm)

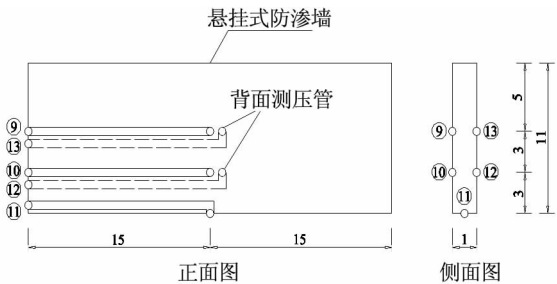


图2 悬挂式防渗墙模型及测压管布置 (尺寸单位: cm)
Fig.2 Schematic of suspended cut-off wall model and arrangement of piezometric tubes (size unit: cm)

时将悬挂式防渗墙与模型槽侧壁接触处用胶水密封。模型槽侧面设有8根测压管,横向深入试样2 cm,相邻测压管之间间隔为10 cm,其中悬挂式防渗墙上布置5根测压管(图2),用于测定试验过程中砂层内部的孔隙水压力。

1.2 试验材料

图3为试验所用试样砂砾石和细砂层的颗粒级配曲线,其中细砂粒径范围为0.075~0.5 mm。为了清楚观察悬挂式防渗墙上游侧管涌破坏的情况,有机玻璃帷幕上游侧细颗粒用彩砂装样,其粒径与普通砂相同。三层堤基中细砂层的厚度为1 cm。表1为试验材料的物理力学性质参数。

1.3 试验步骤

- (1)分层装样后饱和。配置试样,并按预定密实度分层填筑,每层厚度5 cm,击实至预定密实度再填筑另一层。悬挂式防渗墙上游侧彩砂分三层装样,每层2 cm共6 cm至设计标高,从下到上彩砂颜色依次为蓝色、红色、绿色,宽度为3 cm。砂砾石层上部覆盖黏土层,向模型槽注水饱和24 h以上。
- (2)试验过程中分级提升上游水位,待渗流稳定后记录测压管水位和流量,并收集试验过程中涌出的砂。
- (3)管涌通道形成后,试验结束,观察试样管涌破坏情况。

2 试验过程

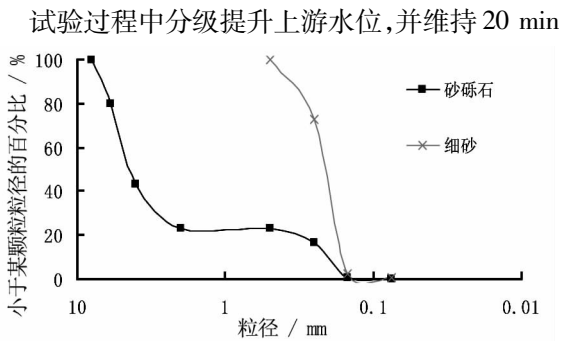


图3 试样颗粒级配曲线
Fig.3 Graded distribution curve of test materials

表1 试验材料物理力学性质参数
Tab.1 Physical and mechanical parameters of materials

试验用土	d_{60} /mm	d_{30} /mm	干密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	相对密度	孔隙率	渗透系数 / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
砂砾石	4.95	2.98	1.75	2.65	0.30	6.10×10^{-3}
细砂	0.19	0.16	1.36	2.65	0.49	7.05×10^{-4}

左右,待渗流稳定后再提升下一级水位。试验时以模型槽顶面为零势面。

一般来说,当堤基中的水力梯度大于细颗粒的临界启动水力梯度时,细砂颗粒将沿着水力梯度最大的方向涌出。通过比较防渗墙上游和下游侧的水平与垂直方向的水力梯度,分析确定防渗墙周围管涌破坏的发展方向。图4中 i_1 、 i_2 分别表示防渗墙下游侧水平、垂直水力梯度, i_3 、 i_4 分别表示防渗墙上游侧水平、垂直水力梯度。其中 i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 分别为测压管⑪和④、⑪和⑬、③和⑪、⑨和⑪之间的水力梯度。本文通过公式 $i = H/L$ 求得管涌破坏时的水平表观水力梯度,式中 H 为上游水位与管涌口之间水位差, L 为渗径。

2.1 试验一:无悬挂式防渗墙的双层堤基

根据试验过程中各测压管水位变化曲线(图5)以及流量曲线(图6),试验过程按以下几个阶段进行分析:

试验初始阶段,各测压管水位随上游水位大致呈线性增长关系(图5)。各测压管数值相差很小,管涌口水流清澈而稳定,流量很小并随着上游水位的增加而增加(图6)。当上游水位为32.1 cm时,管涌口有砂涌出,渗流量增加,说明渗

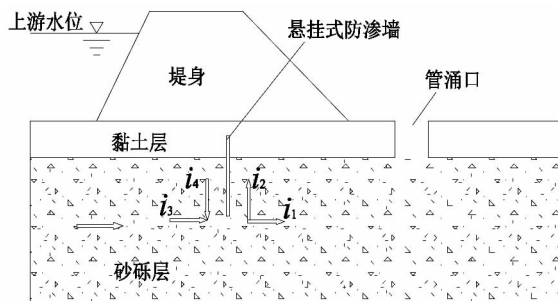


图4 悬挂式防渗墙周围水力梯度计算示意图

Fig.4 Schematic of calculation the hydraulic gradient around the suspended cut-off wall

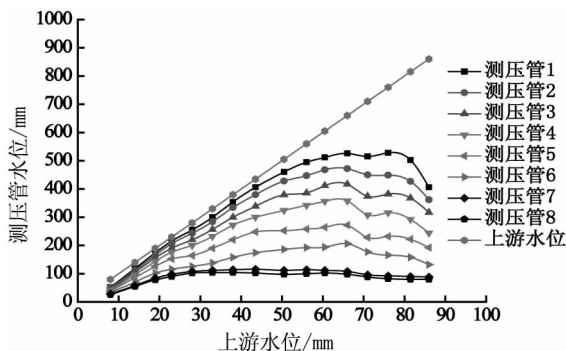


图5 试验一测压管水位变化曲线

Fig.5 Change of hydraulic head with upstream water level in experiment 1

透破坏已经发生;继续提升上游水位,待上游水位增加至43.5 cm时,涌砂量有所增加,流量较上一级水位增长较快;待管涌口水流清澈后,继续增加上游水位。当上游水位提升到70.8 cm,流量突然增加,测压管水位突然下降,说明渗透破坏发生后使试样内部水头重新分布,同时管涌口变浑浊,有大量细颗粒涌出;当上游水位抬升到86 cm时,对应的水力梯度为1.32,流量增加显著,测压管水位急剧下降,同时管涌口一次涌出大量细砂,观察到测压管水位和流量趋于稳定,说明管涌通道已经贯通,结束试验。

静置一段时间后,揭开盖板,观察砂砾石层的破坏情况(图7),发现在砂砾石层表面形成管涌通道,通道深度为1.5 cm左右,管涌通道宽度约占模型宽度的1/2,且通道范围内细颗粒大量流失。

2.2 试验二:含悬挂式防渗墙的双层堤基

试验二过程中测压管水位和防渗墙周围水力梯度变化曲线如图8、图9所示。试验初始阶段,流量(图6)、各测压管水位以及防渗墙下游侧水力梯度 i_1 和 i_2 随上游水位的增加而增加,且基本保持线性增长,但防渗墙上游侧水力梯度 i_3 和 i_4 增加到一定值后近似趋于恒定。

当上游水位提升至37.7 cm时,管涌口处有细颗粒涌出,但涌砂量较少。继续抬升上游水位

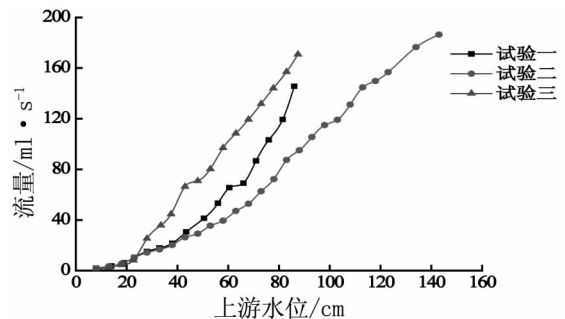


图6 各试验过程中流量与上游水位变化曲线

Fig.6 Flux changing with upstream water level

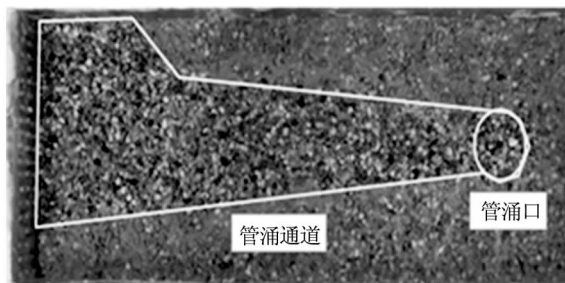


图7 试验一试样破坏情况

Fig.7 Destruction of specimen in experiment 1

进行试验,在此过程中各测压管水位值逐渐增加且各测压管数值差距越来越大,悬挂式防渗墙附近测压管数值基本保持逐渐增加的趋势。当上游水位提升到 73.2 cm,管涌口有大量蓝色彩砂涌出,当上游水位增加至 82.8 cm 时,有极少量红色彩砂涌出。

当上游水位为 153.5 cm 时,观察到各测压管水位明显下降,水量很大来不及记录数据,说明管涌通道已经贯通,结束试验。在整个试验过程中并未有绿色彩砂涌出,说明管涌通道并未绕悬挂式防渗墙发展。管涌通道贯通时水力梯度为 1.99,约为双层堤基无防渗墙时的 1.51 倍。

试验结束后,揭开有机玻璃盖板,观察到在悬挂式防渗墙下游侧渗漏通道位于砂砾石层上部(图 10),通道深度约为 2.5 cm 左右,而防渗墙上游侧砂砾石层表面未见管涌通道;通过开挖发现,在防渗墙上游,管涌通道则位于砂砾石层内部,通道深度范围在砂砾石层下部 5~7 cm 之间,即厚度大约为 2 cm。

2.3 试验三:含悬挂式防渗墙三层堤基

试验三为砂砾石层上部覆盖一层 1 cm 厚细

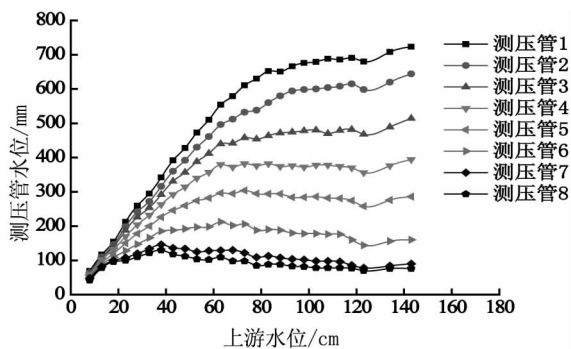


图8 试验二测压管水位变化曲线

Fig. 8 Change of hydraulic head with upstream water level in experiment 2

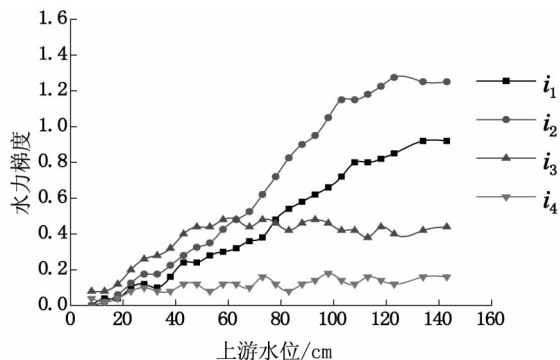


图9 试验二悬挂式防渗墙周围水力梯度变化曲线

Fig. 9 Change of hydraulic gradient with upstream water level around the suspended cut-off wall in experiment 2

砂层的三层堤基。试验现象与试验一、二均不相同,且该试验管涌破坏速度较快。图 6、图 11 和图 12 分别为试验过程中流量、测压管水位以及防渗墙周围水力梯度变化曲线。试验初始阶段,水流速度较小,管涌口清澈。当上游水位升至 22.7 cm 时,渗流一段时间后,管涌口附近测压管水位下降,流量增大,同时,管涌口变浑浊,出现第一次涌砂,涌砂较多。

当水位抬升至 28.1 cm 时,流量突然增大,测压管水位突然下降,防渗墙下游侧水平、垂直水力梯度增幅较大,说明试样内部水头进行了重新分布。同时管涌口持续出砂,涌砂量较大,随后观察到沿程各测压管水位均有不同程度的下降,且防渗墙周围的测压管水位值降低幅度最大;当水位增加至 33.5 cm 时,管涌口先后有蓝色彩砂和红色彩砂涌出,说明此时渗透破坏以及发展到悬挂

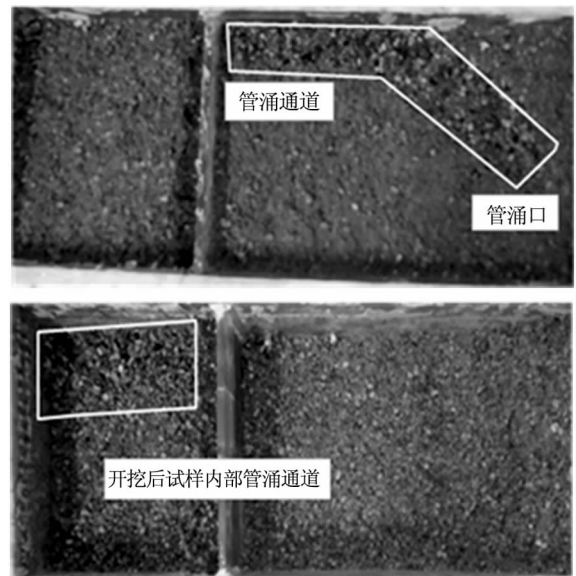


图10 试验二试样表面及内部破坏情况

Fig. 10 Destruction of the surface and internal specimen in experiment 2

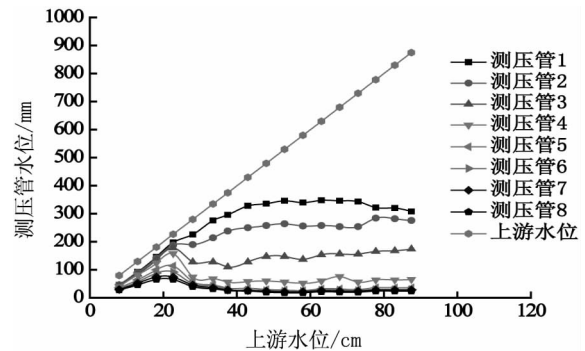


图11 试验三测压管水位变化曲线

Fig. 11 Change of hydraulic head with upstream water level in experiment 3

式防渗墙上游侧。当上游水位达到 37.5 cm, 管涌口处有蓝色、红色、绿色彩砂涌出, 且以绿色彩砂居多, 表明渗透破坏发展到防渗墙上游侧砂层顶面, 随后防渗墙上游侧水平、垂直水力梯度逐渐增大, 而下游侧水平、垂直水力梯度逐渐减小; 直到上游水位提升到 87.5 cm 时, 流量增加明显, 一次大量涌砂, 测压管水位下降幅度较大, 且靠近进水管的测压管降幅最大, 说明此时管涌通道贯通, 待流量和测压管水位基本稳定, 结束试验, 管涌通道贯通破坏时的水力梯度为 1.14, 约为三层堤基无防渗墙时的 2.38 倍^[5]。

试验结束后, 观察黏土层下部砂砾石层的破坏情况(图 13), 发现砂砾石层上部的细砂已经大量流失并形成强渗漏通道, 悬挂式防渗墙上游砂砾石层表面的绿色彩砂和细砂也已经部分流失。

3 试验结果分析

从上述试验现象可以看出, 堤基有无悬挂式防渗墙以及堤基结构形式的不同, 三组试验发生管涌的临界水位分别是 32.1、37.7、22.7 cm, 管涌通道贯通破坏的水位分别为 86、153、87.5 cm, 这说明悬挂式防渗墙和土层结构是影响管涌发展的重要因素。

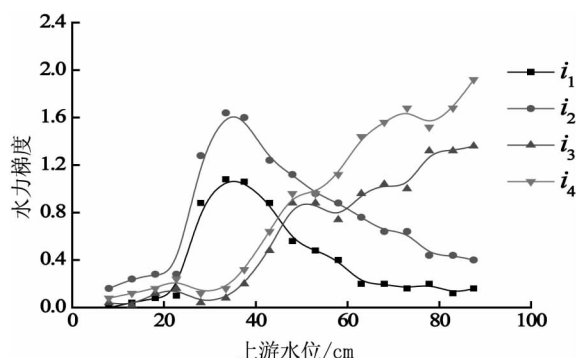


图12 试验三悬挂式防渗墙周围水力梯度变化曲线

Fig. 12 Change of hydraulic gradient with upstream water level around the suspended cut-off wall in experiment 3

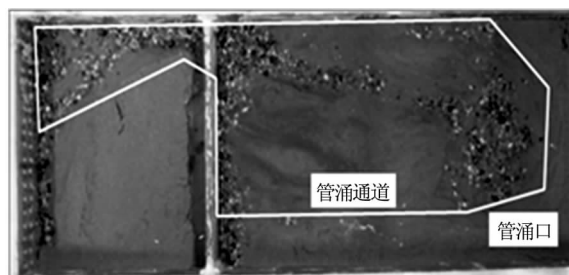


图13 试验三砂砾石层上部细砂层破坏情况

Fig. 13 Destruction of sand layer on the top of the sand gravel in experiment 3

3.1 悬挂式防渗墙作用机理分析

试验一为双层堤基, 管涌破坏主要发生于砂砾石层顶面, 管涌发展的速度快, 破坏程度大, 属于浅层管涌破坏^[4]。这种管涌破坏使得砂砾石层表面土体流失严重, 极易造成上部堤基产生较大渗透变形, 危害堤基的稳定。

试验二为含悬挂式防渗墙的双层堤基, 试样的管涌破坏过程与试验一不同。试验初期, 随着上游水位的增加, 管涌口附近达到临界启动水力梯度的细颗粒被渗透水流带出, 发生涌砂, 说明渗透破坏已经发生。随着管涌口附近砂层顶面的细颗粒逐渐流失, 管涌口附近黏土层与砂砾石层界面处并指向堤外的水平水力梯度逐渐增大, 渗透破坏将沿黏土层与砂砾石层接触的界面上水平向上游发展, 属于浅层管涌破坏。当破坏发展到悬挂式防渗墙处时, 由于防渗墙垂直截断了管涌发展的通道, 在渗透水流的作用下, 渗透破坏垂直沿防渗墙表面向砂层内部发展。当破坏发展到防渗墙底部时, 位于防渗墙底部的细颗粒被水流带出孔口, 由于防渗墙改变了其周围砂层内水头的分布, 并且随着通道前端细颗粒的不断流失, 进水管到防渗墙底部水平方向上的渗径逐渐减小, 导致防渗墙周围水平水力梯度增大, 因此, 在防渗墙上游侧水平方向将是渗透破坏的优先发展方向, 这就是在防渗墙下游侧垂直方向上的水力梯度 i_2 大于水平方向上的水力梯度 i_1 , 而在上游侧水平方向上的水力梯度 i_3 明显大于垂直水力梯度 i_4 的原因(图 9)。随着上游水位的增加, 管涌通道将在砂层内部沿近水平方向向上游发展直至贯通, 因此试验结束后可以观察到在防渗墙上游侧管涌通道位于砂层内部。综合来看, 在防渗墙下游侧的破坏主要是浅层管涌破坏, 而当通道发展到防渗墙上游侧, 这时的破坏则为在砂层内部的深层管涌破坏^[4], 这种深层管涌破坏导致砂砾石层中的细颗粒在粗颗粒孔隙中的流失, 但土层结构依然稳定, 保证了上部堤基的稳定, 这说明悬挂式防渗墙能够降低渗透变形对堤基的危害, 保证上部堤基的稳定。

试验三为三层堤基结构, 管涌破坏过程不同于王霜等^[5]所做的无防渗墙的三层堤基情况。试验初始阶段, 由于细砂层渗透系数小, 在细砂层的阻挡下, 渗透水流集中在下部砂砾石层中, 因此渗透破坏前的流量较小, 测压管数值相差不大(图 11)。

当上游水位达到 22.7 cm 时,当管涌口周围细砂层承受的渗流力超过了细砂颗粒的临界起动水力梯度时,细砂层被冲破,涌出大量细砂,发生垂直渗透破坏。随着细砂颗粒逐渐流失,原本由砂砾石层承担的渗流力转由细砂层和砂砾石层共同承担,又由于细砂颗粒的临界水力梯度较小,砂砾层顶部的细砂逐渐流出管涌口,位于砂砾层与细砂层交界面上的细砂逐渐流失,发生深层管涌破坏,这就是管涌破坏后大量涌砂的原因。随着上游水位的提升,当渗透破坏发展到防渗墙处时,在防渗墙有效阻挡下,渗透破坏绕防渗墙发展,由于防渗墙截断了渗流路径,改变了防渗墙周围的水头分布,并且细砂颗粒很细无黏性,很容易被侵蚀,在砂层内部水压力和细颗粒自重作用下,砂砾石层上部的细砂颗粒随渗透水流垂直绕过防渗墙流出,当防渗墙上游侧砂砾石层上部细砂颗粒逐渐流失后,在细砂层下部与砂砾石层交界面处形成管涌通道,随后将在此交界面发生水平渗透破坏向上游发展,这就是防渗墙下游侧的垂直水力梯度 i_2 高于水平水力梯度 i_1 ,同时防渗墙上游侧的垂直水力梯度 i_4 高于水平水力梯度 i_3 的原因(图 12)。试验三在细砂层下部与砂砾石层接触的界面上发生深层管涌破坏,随后在深层管涌和浅层管涌共同作用下垂直绕悬挂式防渗墙向上游发展,但防渗墙上游侧破坏范围明显小于下游侧(图 13)。这说明悬挂式防渗墙能在一定程度上降低管涌破坏范围,控制堤基的渗透变形。

3.2 流量分析

试验过程中,每次提升上游水位后,通过测定各组试验的流量,作出各组试验流量变化曲线(图 6)。从图中可见,未发生管涌破坏前,流量较小,且与上游水位基本保持线性增长关系。试验发生渗透破坏后,由于管涌后砂层内细颗粒流失,渗透系数增大,因此也导致了流量增速较快,流量曲线以较快的速度线性增长。试验二在悬挂式防渗墙对水流的作用下,改变了砂层内部的渗流场的分布,消散了砂砾石层内部的水头,使得试验初期的沿砂砾石层表面的浅层管涌破坏逐渐转变为在砂层内部的深层管涌破坏,渗透破坏速度较慢,流速增加缓慢,因此试验二的流量曲线继续沿近似直线变化。而试验三虽然试验初期的渗流量很小,但是一旦发生渗透破坏后,管涌口周围的细砂在深层管涌破坏下基本流失,随着破坏向上游发展,在深层管涌和浅层管涌的共同作用下,形成强渗

漏通道,流量曲线开始向上偏转,曲线斜率增加明显,随后在悬挂式防渗墙的作用下,改变了渗透破坏的路径,管涌通道发展速度减慢,流量增速也变缓,曲线斜率有所减小。因此,从对流量分析的角度来看,悬挂式防渗墙对管涌破坏前流量的影响很小,但是对于发生渗透破坏后能显著减小流量增加的速度,减缓管涌破坏的速度,在一定程度上控制堤基渗透变形的发展。

3.3 涌砂量分析

各组试验的瞬时涌砂量与上游水位变化曲线如图 14 所示。试验一和试验二均为双层堤基,试验一在试验过程中瞬时涌砂量基本保持逐渐增加的趋势,管涌通道贯通时的涌砂量最大,管涌破坏范围较大。试验二在悬挂式防渗墙的有效阻挡下,管涌破坏速度较慢,试验初期管涌口出砂量逐渐增加,试验后期涌砂量随着上游水位的增加上下波动,说明当渗透破坏发展到悬挂式防渗墙处时,随渗透水流带出的细颗粒在悬挂式防渗墙处时而堵塞,时而疏通,涌砂量比试验一要小,说明试验二的管涌破坏过程比较缓慢,表明悬挂式防渗墙能够有效控制管涌出砂,降低管涌破坏的程度和范围。相比于试验一、二,试验三在较小的上游水头下就开始出砂,且出砂量明显高于试验一、二,这主要是深层管涌破坏引起的,随后在悬挂式防渗墙的作用下,涌砂量有所减少,试验后期涌砂量呈明显的上下波动趋势,与三层堤基无防渗墙的情况^[5]相比,涌砂量较小,说明管涌破坏的速度比较慢,且悬挂式防渗墙上游侧的管涌破坏范围明显小于下游侧(图 13),表明防渗墙能够有效降低管涌破坏的范围。因此,结合各组试验黏土层

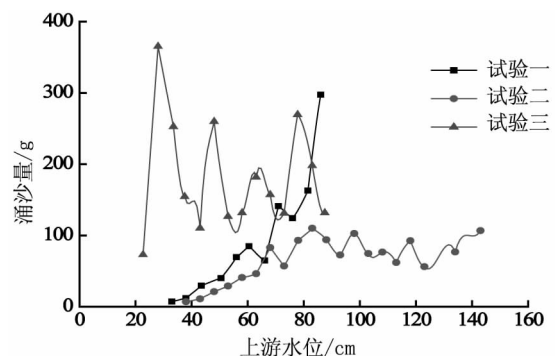


图14各试验瞬时涌砂量的变化曲线

Fig. 14 Instantaneous eroded sand changing with upstream water level

(下转第 62 页)

参考文献:

- [1] FHWA. Bridge formula weights[S].
- [2] GHOSN M. Development of truck weight regulations using bridge reliability model [J]. Journal of Bridge Engineering, 2000, 5 (4): 293 - 303.
- [3] GHOSN M, MOSES F. Effect of changing truck weight regulations on us bridge network [J]. Journal of Bridge Engineering, 2000, 5 (4): 304 - 310.
- [4] AASHTO. BR - MCEB - 2 - I2 Manual for condition evaluation of bridges (2nd Edition with 2001 and 2003 Interim

Revisions)[S].

- [5] AASHTO. LRFR - 1 Guide manual for condition evaluation and load and resistance factor rating (LRFR) of highway bridges [S].
- [6] 张红卫, 王文龙. 车辆超限、超载与公路运输安全性分析[J]. 公路交通科技, 2004, 21 (3): 132 - 136.
- [7] JTG B01 - 2003, 公路工程技术标准 [S].
- [8] 张喜刚. 公路桥梁汽车荷载标准研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.

(责任编辑 王利君)

(上接第 57 页)

下部砂层和砂层内部破坏情况进行分析对比, 悬挂式防渗墙对管涌发生条件的影响很小, 但是管涌发生后, 它能够减缓管涌发展的速度, 降低管涌出砂量和管涌破坏范围, 有效控制因发生管涌破坏导致堤基产生明显的渗透变形, 降低管涌对堤身的危害。

4 结论

1) 悬挂式防渗墙对于管涌通道贯通时的水力梯度有很大影响。含悬挂式防渗墙的双层堤基管涌通道贯通时的水力梯度约为无防渗墙时的 1.51 倍; 而对于含悬挂式防渗墙的三层堤基管涌通道贯通时的水力梯度约为三层堤基无防渗墙时的 2.38 倍。说明悬挂式防渗墙能够提高管涌通道贯通时的水力梯度。

2) 含悬挂式防渗墙的双层堤基和三层堤基的管涌破坏形式不同。土层结构为双层堤基时, 在悬挂式防渗墙的作用下, 防渗墙上游侧的管涌破坏在砂砾层内部进行; 土层结构为三层堤基时, 防渗墙上游侧的管涌破坏在砂层顶面发展。

3) 悬挂式防渗墙对管涌破坏的流量、出砂量和破坏范围有一定影响。对于无悬挂式防渗墙的堤基, 随着管涌破坏的进行, 出砂量基本保持增长的趋势, 管涌破坏范围较大。而含有悬挂式防渗墙的堤基, 防渗墙有效阻挡了渗透水流的传递, 管涌破坏的出砂量呈上下波动的趋势, 管涌出砂量和破坏范围降低, 流量有一定程度的减小。说明悬挂式防渗墙能够降低管涌破坏的出砂量和破坏

范围。

参考文献:

- [1] 陈建生, 李兴文, 赵维柄. 堤防管涌产生集中渗漏通道机理与探测方法研究[J]. 水利学报, 2000, 31 (9): 48 - 54.
- [2] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金榜, 等. 堤基渗流管涌发展的理论分析[J]. 水利学报, 2004, 35 (12): 46 - 50.
- [3] 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, 38 (2): 19 - 22.
- [4] 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.
- [5] 陈建生, 张华, 王霜, 等. 多层堤基中土层结构变化对管涌影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (12): 2213 - 2219.
- [6] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金榜, 等. 悬挂式防渗墙控制管涌发展的试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36 (1): 42 - 50.
- [7] 张家发, 吴昌瑜, 朱国胜. 堤基渗透变形扩展过程及悬挂式防渗墙控制作用的试验模拟[J]. 水利学报, 2002, 33 (9): 108 - 116.
- [8] 丁留谦, 姚秋玲, 孙东亚, 等. 双层地基中悬挂式防渗墙渗控效果的试验研究[J]. 水利水电技术, 2007, 38 (2): 23 - 26.
- [9] 王保田, 陈西安. 悬挂式防渗墙防渗效果的模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (Z1): 2766 - 2771.
- [10] 周晓杰, 丁留谦, 姚秋玲, 等. 悬挂式防渗墙控制堤基渗透变形发展模型试验[J]. 水力发电学报, 2007, 26 (2): 54 - 59.

(特约编辑 李军)