•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201700849

堤基侵蚀型管涌的砂槽试验研究

倪小东[1,2],左翔宇[1,2],孙达明[1,2],刘　忠[1]

(1.水利部 堤防安全与病害防治工程技术研究中心,河南 郑州 450003;2.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)

摘　要:堤基侵蚀型管涌是汛期堤防工程中常见的一种渗透变形现象,其发生完全位于堤基或坝体内部,通常不易被发现,难以及时采取相应措施予以控制。同时,随着侵蚀型管涌的发展,堤基进一步会产生不均匀沉降,最终威胁大坝的安全,因而其发展机理和破坏特性的研究一直是国内外研究的热点和难点。为探究堤基侵蚀型管涌的发生发展过程及破坏规律,通过引入多色填充砂示踪方法实现了对土样中填充细料颗粒运移的顺序和方向进行判别,从而更直观地揭示管涌发展过程。根据不同管涌土判别方法选取了3种间断级配的土样进行侵蚀型管涌双层堤基砂槽模型试验,并对现有管涌土判别方法的有效性进行了比较。同时,考虑变水头条件和土料级配两种因素对管涌侵蚀结果的影响,分析"扰动"作用与管涌发展的关系。通过研究表明:侵蚀型管涌破坏始于管涌口周围的细料流失,随着渗透侵蚀的发展,细料起动和流失位置均逐渐向上游发展;侵蚀过程中细料的流失具有明显的渐进性,而细料起动可以发生在侵蚀范围之外;外部因素或渗流稳定因素造成的"扰动"作用对侵蚀型管涌过程具有促进作用。

关键词:双层堤基;侵蚀型管涌;彩色砂示踪;模型试验

中图分类号:TU443　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:2096-3246(2018)02-0024-08

Study on the Piping Erosion in Levee Foundation by Sand Box Model Test

NI Xiaodong[1,2], *ZUO Xiangyu*[1,2], *SUN Daming*[1,2], *LIU Zhong*[1]

(1.Research Center on Levee Safety & Disaster Prevention,Ministry of Water Resources,Zhengzhou 450003,China;
2.Key Lab. of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Eng.,Hohai Univ.,Nanjing 210098,China)

Abstract: Embankment piping erosion is a common infiltration deformation in flood embankment projects.Its occurrence is completely inside the embankment or dam body.It is usually not easy to find and it is difficult to take timely measures to control it.At the same time,with the development of the eroded pipe,the embankment will further produce uneven settlement and finally threaten the safety of the dam.Therefore,the research on its development and failure characteristics has been a hot and difficult topic.In order to explore the occurrence and development of eroded pipe pits and the failure rules,the multi-color sand-filling tracer method was used to distinguish the order and direction of the fine particles migration in the soil samples so as to reveal the development of piping in a more direct way.Three types of intermittent gradation soil samples are selected,according to different discriminant method of soil piping,and a model test of double-layer dike foundation in a flume is used to conduct the test.The effectiveness of the existing methods for determining soil piping were compared to each other.In the same time,considering the influence of water head and material gradation on the results of piping erosion,the relationship between"disturbance"and piping development was analyzed.It is shown that the piping erosion begins with the loss of fine particles around the piping outlet.With the further development of erosion,the starting point and the loss of fine material are gradually moved to the upstream.The study also shows that the loss of fine particles in the process of erosion is progressive obviously and the starting of loss can occur outside of erosion range.The external factors or seepage stability factors that lead to"disturbance"have the effect of enhancing the process of piping erosion.

Key words: double-layer dike foundation;piping erosion;color sand tracer;model test

收稿日期:2017 – 10 – 12

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC1502600);国家自然科学基金资助项目(51779083);水利部堤防与病害防治工程技术研究中心开放课题基金资助项目(2016004);中央高校专项科研基金资助项目(2016B08114)

作者简介:倪小东(1981—),男,副研究员,硕士生导师. 研究方向:堤防渗透灾变. E-mail: lulingnxd@126.com

网络出版时间:2018 – 03 – 20 14 : 12 : 50　　**网络出版地址**: http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180320.1411.007.html

管涌的发生发展是一个受多因素影响的复杂问题，其机制研究一直是岩土工程界关注的问题之一。管涌一般发生在下游或堤内无保护的渗流出口处，发生时常伴有砂沸或流土等明显征兆，若及时发现并做有效处理，完全有可能抑制其继续发展。而侵蚀型管涌的发生完全位于堤基或坝体内部，发生时无明显迹象，隐蔽性强，难以控制。侵蚀型管涌的发展将进一步加剧堤基或填充区材料物理力学性质的不均匀性，如细颗粒运移引起的孔隙率、渗透系数、强度指标不均匀变化等，造成堤基不均匀沉降，破坏坝体心墙或坝基混凝土防渗墙，甚至引起面板与堆石体脱开，威胁大坝安全。国内对于堤后薄弱区及堤内发生细料侵蚀导致的由内部侵蚀引起的管涌研究较少。

相关学者曾在管涌研究方面开展系列试验研究，并取得了相应成果。姚秋玲等[1]从宏观和微观角度共同阐释了管涌发生、发展的机理；毛昶熙[2–3]等对模型试验的比尺问题以及管涌土与非管涌土的判别方法进行了充分的研究；刘杰等[4]对模型试验的有效性进行了详细的讨论；姚秋玲等[5]通过研究表明单层、双层堤基管涌发展的机理类似；丁留谦[6]、刘昌军[7]等对接触管涌机理进行了充分的研究和讨论。上述针对常规管涌现象的研究得到的试验结果大都为管涌和接触冲刷现象的结合，未明确揭示侵蚀型管涌发生发展过程的本质特点。

王霜等[8]通过研究进一步表明不同的土层结构对管涌的发生发展有着很大影响；陈建生等[9]通过设置不同颗粒级配的夹砂层研究了其对管涌发生发展的影响，研究表明侵蚀型管涌的发生与水力条件、颗粒组成、应力状态等诸多因素相关，目前尚未形成统一结论。为了开展对侵蚀型管涌发生发展机制的研究，评估现有管涌土判别方法并进行颗粒级配的选择以创造侵蚀型管涌的几何条件，通过在盖板与砂层间设置黏土层以避免出现接触冲刷型管涌[10–11]；在装样过程中引入彩色填充细料来表征不同区域细料，以达到直接观察侵蚀型管涌发生及发展过程并进行相应分析的目的[12–14]。试验考虑了变水头条件和土料级配两种因素对管涌侵蚀结果的影响，并讨论了“扰动”作用与管涌发展的关系。相关成果可为今后进一步开展管涌侵蚀问题研究提供重要依据。

1　模型和试验方案设计

1.1　试验装置

为开展侵蚀型管涌机理研究，参考已有的管涌试验相关文献[10, 15]所给出的试验装置及方法，设计了图1所示的模型试验装置。模型槽为有机玻璃材质，试验模型槽长1.3 m，宽0.3 m，高0.3 m，土样装填区长1.1 m。装置前端为高850 mm的进水室，每隔50 mm开一溢流口，用以控制进水室水位恒定。土样表面盖板距离进水室800 mm的居中位置处开有一直径为45 mm的圆形开口，添加护环后的实际管涌口直径为40 mm。

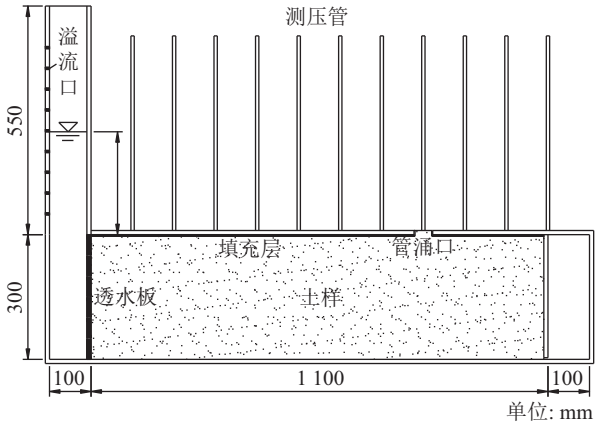


图 1　双层堤基砂槽模型

Fig.1　Sand-bank model of double-layer dike foundation

在砂样和盖板间铺设致密黏土层，并使其与土样表面紧密结合，避免砂样与盖板之间出现接触冲刷现象[10–11]。以测压管与上游进水室距离描述土样中相应位置，其中，80 cm处测压管对应管涌口的中心位置。试验过程中测量水头等级、测压管高度和管涌口出水流量，通过摄像机观察记录试验现象。

1.2　土样分组

为分析试验土样的级配和孔隙率对试验结果的影响，试验选用了3种间断级配的混合土样。3组试样的具体组成为：1）A组土样为2～7 mm粗砾与0.25～1.00 mm粗砂混合；2）B组土样为14 mm直径玻璃珠与0.25 ～1.00 mm粗砂混合；3）C组土样为2～7 mm粗砾与0.075～1.000 mm河沙混合。颗粒分析曲线见图2。

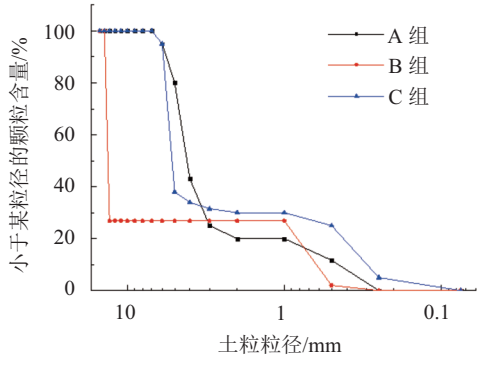


图 2　土样颗粒分析曲线

Fig.2　Grading curves of soil samples

其中：粗砾的平均粒径约为5.5 mm；河沙的平均粒径约为0.5 mm；粗砂级配较均匀，平均粒径约为0.8 mm；玻璃珠为标准14 mm粒径。

按照沙金煊[16]、蒋国澄[17]等的建议，对于缺乏中间粒径的砂砾料，细料含量小于25%～30%的土样为

管涌土。因此，按照这一建议，该试验的细料含量具体为A组20%，B组26.8%，C组30%，以满足管涌的几何条件。

土样参数见表1。其中：A组细料含量最小，C组细料含量最大；C组孔隙率是3组中最小的。

Kenney等[18]认为粒径越小，越难被其他颗粒捕捉。因此，能阻止颗粒流失的稳定级配条件是：砂土细颗粒（假设其粒径为D）的流失能被其他大颗粒（粒径为D～$4D$）所阻止。在此基础上，提出的渗流稳定判别式为：

$$\left(\frac{H}{F}\right)_{\min} \geq 1.0 \tag{1}$$

式中，F为小于任意粒径D的土体质量百分数，H为粒径D～$4D$对应的土体质量百分数。3组土样的$(H/F)_{\min}$值见表1，表1中G_S为土粒比重。

表 1　各组土样基本参数

Tab.1　Parameters of soil sample

土样	骨架颗粒	细料颗粒	细料含量/%	孔隙率	不均匀系数	$(H/F)_{\min}$
A组	2～7 mm粗砾(Gs=2.83)	0.25～1 mm粗砂(Gs=2.83)	20.0	0.20	10.4	1.51
B组	14 mm玻璃珠(Gs=2.63)	0.25～1 mm粗砂(Gs=2.83)	26.8	0.28	16.7	0
C组	2～7 mm粗砾(Gs=2.83)	0.075～1 mm河沙(Gs=2.63)	30	0.15	17.3	0.44

为了比较两种管涌判别方法的有效性，基于判别式（1）将3组土样分为两类：A组土样$(H/F)_{\min}$值大于1，为稳定级配，初步评估应不能发生管涌；B、C组土样$(H/F)_{\min}$值小于1，为非稳定级配，应能发生管涌。显然，两种判别方式针对上述3组土样的初步判别存在差异性，若试验结果与判别结果相符，则表明判别式（1）比细料含量判别法更有效。

1.3　土样装填和试验步骤

1）土样装填采取了两种不同方式：

对于C组土样，同样进行分层装填。每一层先填入并压实约1 cm厚骨架颗粒。然后，一边沿该层表面均匀撒入细料，一边进行轻微而连续的敲打，使细料自然下落并填充骨架颗粒之间的孔隙。细料添加至该层表面无明显骨架孔隙为止，方能进行下一层的装填。

由于A、B组土样的细料成分不足以完全填充骨架颗粒间隙，若采用C组的装填方法会使得细料沿间隙下沉造成分层不均匀。

因此，对于A、B组土样，采取将骨架颗粒和细料颗粒按照相同孔隙比计算的质量比进行搅拌混合均匀后，分层装填并压实以达到相对密实的状态。

2）土样装填完毕后，在土样顶面铺设一层薄膜包裹的黏土层以避免接触冲刷的发生。在槽壁覆盖一圈橡胶垫，并按照指定位置盖上盖板。

3）通过水龙头控制进水流量，先以较小的进水流量往装置进水室输水，使水位缓慢上升。当前后水位相同且稳定，试验可以正式开始。

本试验采用逐级升高水头的方式进行，控制进水流量的增速保持在较慢的水平，直到进水室水位与该级溢流口上沿相平。第1级水头下进水室水位高度与管涌口水位高度之差为5 cm，之后每增加一级，水头差增加5 cm。试验期间观察管涌口现象，记录渗流量和测压管水位变化。以渗流量和测压管水位均保持稳定，管涌口水流清澈且没有细料颗粒被带出作为渗透变形稳定的判别标准。稳定后进行下一级水头试验。当渗流量和测压管水位极为不稳定、颗粒持续大量流失或上游水头无法保持稳定时，结束试验，揭开盖板和黏土层，观察浅层形成的侵蚀区域形态，获取孔口周边球形区域颗粒侵蚀特征。

2　试验现象与分析

2.1　土样A组的试验

本组试验的细料采用5种颜色，为直观区分骨架颗粒和细料颗粒，骨架颗粒采用红色砂，细料颗粒采用灰色砂。此外，在图3所示的相应位置处设置了4处100 mm×100 mm×100 mm的异色细料颗粒填充区域，以直观判断土样中细颗粒侵蚀运移。

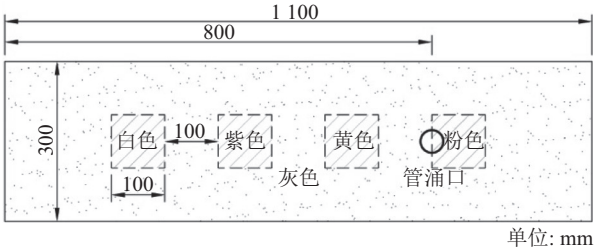
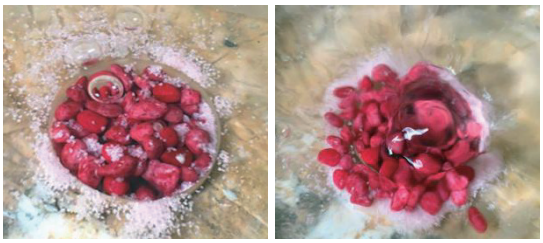


图 3　土样A组的彩砂区域分布

Fig.3　Distribution of colored sand in soil sample A

在第1级水头下，管涌口仅有极少量表面的灰色和粉色细料被水流带出。最终未涌出的粗细颗粒在管涌口处保持静止，流量基本未发生变化。

在升高至第2级水头的过程中，出砂量明显增加，水流出时夹带着气泡，如图4（a）所示。出砂仅维持1 min左右。在升高至第3级水头的过程中，管涌口表面的骨架颗粒和其下的填充细料翻滚的逐渐剧烈，最终被水流带出，形成流土现象，如图4（b）所示。



(a) 第2级水头　　(b) 第3级水头

图 4　土样A管涌口的现象

Fig.4　Phenomenon of piping mouth of soil sample A

在第4级水头下，骨架颗粒继续混合填充细料流出，渗流量不能保持稳定。渗透试验结束后，去除盖板和黏土层观察土样变化。挖开土样，管涌口下方约3 cm深度未发现细料，考虑为第3级水头期间带出了部分细料，在第4级水头期间持续被带出。观察各异色细料颗粒填充区域分界处均未发现细料侵入。另外，也未曾观测到深层土粒向管涌口运移的迹象。因此，从试验结果可以判断A组土样为渗流稳定的非管涌土。这与Kenney等[18]的渗流稳定判别式（1）的判别结果吻合，证明了Kenney渗流稳定判别理论具有更好的适应性。

试验结果显示，在水头差小于20 cm时，即已发生流土现象，分析原因由于$(H/F)_{min}$>1，粗细颗粒间形成强力链，共同承担水头降，在孔口汇流效应下，渗透力较大，突破抵抗力引起流土破坏。

2.2　土样B组的试验

本组试验与A组采用同一装置，细料亦采用5种颜色，在如图5所示的相应区域设置了异色填充料分区。由于采用玻璃珠作为骨架颗粒，粒径较大，土样表面与黏土层接触不够紧密。因此，在土样表面再铺设一薄层粗砾以形成与A组相同的上边界条件，以避免接触冲刷。

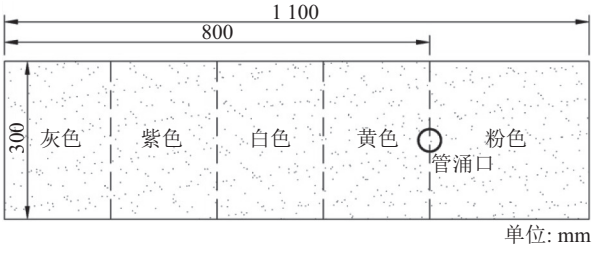


图 5　土样B组的彩砂区域分布

Fig.5　Distribution of colored sand in soil sample B

在升至第1级水头的过程中，少量管涌口表面的黄色粉色细料被水流带出孔口，并伴随大量气泡。最终少量黄色和粉色细料在管涌口翻腾而未被带出，如图6（a）所示。

在升至第2级水头的过程中，仍伴随有气泡。管涌口有细料析出，黄色居多。细料在管涌口堆积成环状堆体，部分细料在管涌口保持翻滚状态，如图6（b）所示。将管涌口环状堆积体清除，细料重新开始在管涌口附近堆积，持续时间长，但具有明显的间歇性。管涌口状态如图6（c）所示。涌出细料的主要成分为黄色细料，黄色细料来自管涌口上游，粉砂来自管涌口下游。这证明管涌侵蚀通道主要沿着逆流发展。

(a) 第1级　　(b) 第2级开始阶段　　(c) 第2级持续涌砂阶段

图 6　土样B管涌口的现象

Fig.6　Phenomenon of piping mouth of soil sample B

进一步提升水头等级至第3级和第4级，试样未继续发生涌砂。渗透试验结束后，将盖板与黏土层拆除。根据Horikoshi等[19]的试验所描述的细料沉积现象，由于细颗粒在饱和状态下对骨架颗粒的附着作用消失，部分细颗粒沿骨架孔隙自然下落。因此试验后土样表面的细料含量较试验前有所减少。挖开土样中白色砂与黄色砂填充区域的分界处，发现部分白色砂进入黄色砂区域；在紫色与白色砂填充区域的分界处，发现少量紫色砂渗入白色砂区域。挖开管涌口位置，下方5 cm深处黄色砂侵入了粉色砂填充区域，如图7所示。分析可知，管涌口为中心半径约4～6 cm半球体范围内土样颗粒松动最剧烈，流速最大，因此将最先发生细料流失。随后，侵蚀路径逐渐沿上游发展，至结束阶段管涌口应存在沉积下来未能冲出的黄砂，与观察结果吻合。

图 7　黄砂在管涌口下方沉积

Fig.7　Sand deposited beneath the piping mouth

根据试验揭露现象，将土样B组的管涌侵蚀范围绘制于图8中，上溯侵蚀距离为203.2 mm，相当于5倍管涌口直径。侵蚀范围具有明显的沿上游发展的趋势，贯穿了黄色砂填充区域，因此在白砂区域和黄砂区域分界处出现部分白色砂进入黄砂区域的现象。

侵蚀范围未能扩展至紫砂区域，但紫色砂与白色砂分界处仍出现了少量紫色砂进入白砂区域的现象。这说明细料颗粒在渗流作用下穿过骨架颗粒形成的孔隙发生了运移。此外，侵蚀范围未呈中心轴对称发展，这与内部颗粒结构组成及受“扰动”作用的随机性有关。

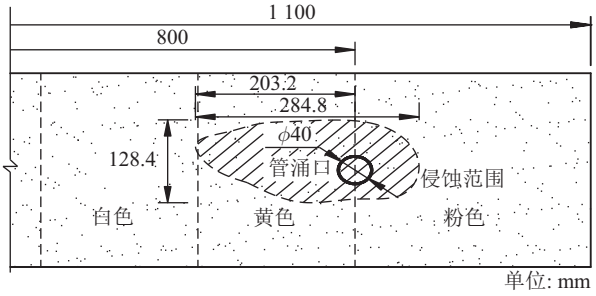


图 8　土样B组的管涌侵蚀范围

Fig.8　Erosion range of piping of soil sample B

2.3　土样C组的试验

A、B组试验结果表明内部侵蚀型管涌发展的渐进性，因此本组试验的细料仅采用单色的河沙，通过观察试验后形成的侵蚀通道来判断管涌发展的情况。

第1级水头下，由于水力梯度和渗透系数都非常小，导致管涌口出水流量也非常小，约为1.6×10^{-3} mL/min。管涌口除少量气泡排出以外无明显异常。

第2级水头下，出水流量上升至3.1×10^{-3} mL/min，仅有气泡产生而未观察到明显的细料流失。

在升至第3级水头的过程中，管涌口开始出现异常。首先，管涌口陆续出现几注细料随水流从表面骨架颗粒间隙中流失形成的喷泉，并迅速发展成管涌口的全面喷涌，同时在管涌口周围形成了环状堆积体，如图9(a)所示。随后，出砂速率减慢，约20 mim后出砂速率降为零，管涌口仍有细料颗粒翻滚但始终不能被带出。

(a) 3级水头　　(b) 4级水头

图 9　土样C组管涌口现象

Fig.9　Phenomenon of piping mouth of soil sample C

升高至第4级水头，立刻出现砂沸现象，如图9(b)所示。经过大约10 min，涌砂停止。最后在第5、6、7级水头下，管涌口均只在最开始几分钟涌出少量细料，持续时间短。

试验到第7级水头结束，将盖板和黏土层卸下。管涌口附近35 mm半径内的圆形区域内未发现细料。挖至5 cm深，侵蚀痕迹已非常明显，如图10所示。C组试验土样管涌向上游侵蚀距离为101.5 mm，相当于2.53倍管涌直径，侵蚀深度达69 mm。

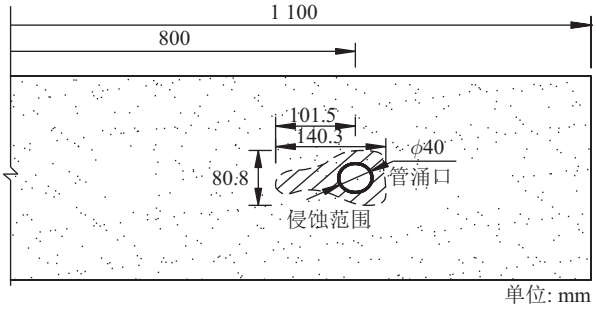


图 10　土样C组管涌侵蚀范围

Fig.10　Erosion range of piping of soil sample C

3　讨　论

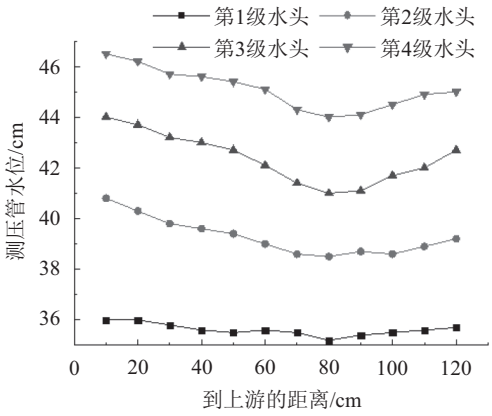
3.1　各级水头条件下的分布规律

为了直观比较，将3组试验的水头高度分布及变化信息展示于图11。总体上，每组试验的水头高度分布趋势都比较合理。随着水头等级的上升，水头高度自上游到下游先下降后上升的趋势逐渐明显。管涌口与进水室水位的差距逐渐增加，为管涌的发生发展提供了必要的水力条件。

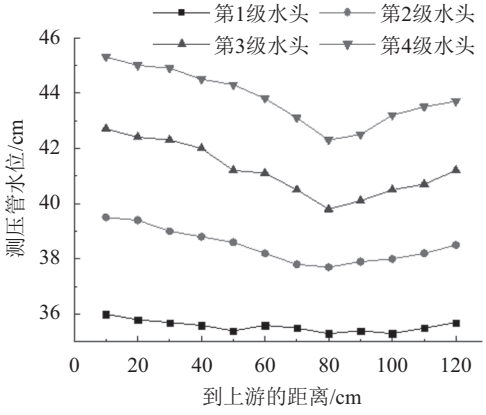
图11中：A组第2到第4级水头分布曲线在40～70 cm区段出现缓和平台，表明A组土样内部细料未发生运移，符合流土的特性；C组第3到第5级水头分布曲线在40～60 cm区段存在水头高度陡降现象，B组在60～80 cm区段也存在与C组相同的现象，这与空间汇流等值线分布呈现出一定差异。表明B、C两组在相关区段内存在细料运移，导致局部渗透系数变化。这符合管涌土的特征，与观察到的试验现象一致。

在管涌发生破坏时，管涌口发生汇流效应。在汇流效应的影响下，管涌口附近区域在空间上形成漏斗状汇流线，因而该效应影响范围内的水头高度由上游至近管涌口处呈降低趋势，下游测压管水头由远端至管涌口同样呈降低趋势。

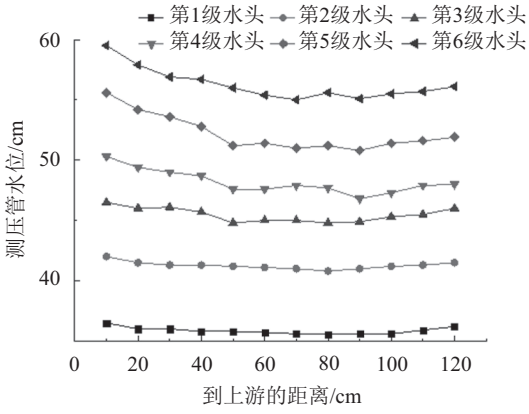
另外，从图11(a)及(b)中可看出，随着水头抬升，管涌口附近区域的能量损失逐渐增大，汇流效果更加显著，这与管涌口处细颗粒聚集导致渗透系数降低从而引起能量损失逐步增大的趋势一致。对比图11(c)，由于C组土样为流土型土，不存在细颗粒侵蚀汇聚效果，因此该趋势在图11(c)中并不十分明显。



(a) A 组试验



(b) B 组试验



(c) C 组试验

图 11　水头高度分布及变化曲线

Fig.11　Distribution curves of the height of the head

3.2　侵蚀过程土样渗透性变化规律

3.2.1　接触力链的组成形式对出砂量的影响

在本试验中，B、C两组虽均出现管涌现象，但其出砂量的变化规律却有所不同。在试验过程中，两组均出现明显的管涌衰减现象，即出砂速率随时间降低。同时，B组试验的出砂速率还呈现出一种波动降低的特征。为了直观反映两组不同的出砂量变化规律，将B、C两组在第2级水头情况下的出砂量用折线图表示出来，如图12所示。

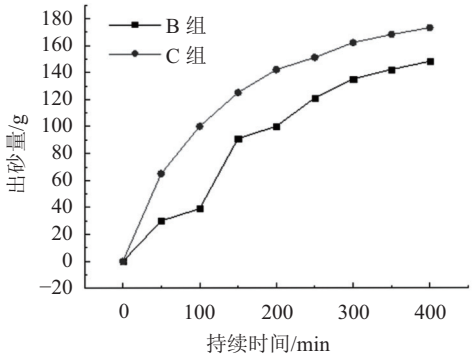


图 12　土样B、C组在2级水头情况下的出砂量

Fig.12　Sediment yield of soil samples B and C under two stage water head

出现这种现象是因为B、C两组不同的装填方式致使其内部土体结构截然不同，从而造成了这两组土体内部强接触力链组成形式的不同。

在颗粒物质力学[20]中，颗粒物质受到的外力大部分由直接传力的颗粒承受。这些受到强接触力的颗粒会形成强接触力链。对于B组土样，强力链成分不全由粗颗粒构成，粗颗粒之间非完全接触支撑；而C组的强力链成分全部由粗颗粒构成，粗颗粒能互相支撑形成稳定结构，即起到“骨架”作用。

另外，强接触力链附近分布着众多弱接触力链以支持强接触力链的稳定性。因此，B组试验中位于强力链附近充当弱力链成分的细料流失，将会造成强力链位置上的颗粒发生松动迁移，使强力链影响范围内的区域都产生一定变形，令水流带出部分砂粒，期间力链随时间调整过程即产生颗粒流失波动原因。

C组试验中，细料的流失不影响骨架颗粒，故在管涌侵蚀过程中很难因为细料颗粒的流失而导致区域性的“扰动”。因此，C组试验在一定水头等级下的出砂速率呈单调衰减趋势，且收敛速度快。同时，C组土样在第3到7级水头条件下均能出现涌砂现象，表明在满足结构条件的前提下，水力条件增强了对细料的驱动作用。

3.2.2　侵蚀过程中流量的变化

根据达西定律，土样在渗流过程中的流量Q与水力梯度i和土样表观渗透系数$\bar{k}$两者分别线性相关。虽然雷诺数超过一定值时流体流动会偏离达西定律，但在i保持一定时，流量Q仍与管涌口局部渗透系数k_i为正相关。

从整体过程来看，管涌口及侵蚀通道的局部渗透系数会逐渐增大，从而使得流量与水力梯度偏离线性关系上扬，如图13所示的B、C组流量变化曲线。同时，这也是管涌是否发生的重要判别依据，图13中

展示的A组流量变化曲线为线性，说明管涌并没有发生，与第2.1节中所述A组土样为稳定级配非管涌土的结论相符。

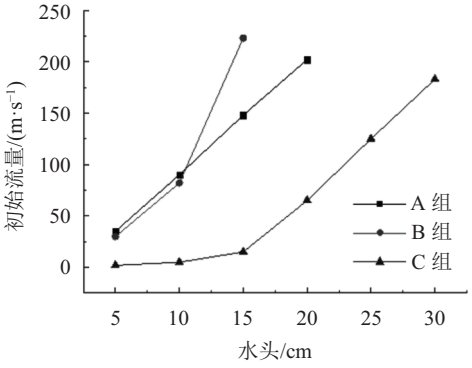


图 13　初始流量随水头等级变化曲线

Fig.13　Curves of initial flow changing with waterhead

从管涌侵蚀过程来看，管涌口及侵蚀通道的局部渗透系数会随时间变化，从而使得流量逐渐上升。

在B组第2级水头试验中，出口流量随时间逐渐增加，且增速逐渐减慢，偏离线性关系，意味着土样渗透系数的增大速率放缓，反映了土样内部结构趋于稳定，表明管涌现象逐渐衰减。

4 结　论

引入多色填充砂示踪方法，根据不同管涌土判别方法选取了3种间断级配的土样进行侵蚀型管涌双层堤基砂槽模型试验。得到的主要结论有：

1）地表存在出流口时，堤基侵蚀型管涌的发展前期，土体内部即存在颗粒运移。颗粒流失首先始于管涌口表面的细料起动。初期随着管涌口出砂量的增多，管涌口局部渗透系数增大，出砂速率呈短暂的上升趋势；随后管涌口细料持续翻涌，但出砂量大大减小；最后管涌口出砂速率降为零，状态趋于稳定，破坏终止。

2）细料起动范围比流失范围更广。只要满足一定的水力和结构条件，土样内部任意位置均可能发生细料起动，而侵蚀流失除管涌口周围以外只能沿逆流发展，具有明显的渐进性和侵蚀轮廓。

3）外部因素或渗流稳定因素造成的“扰动”作用对侵蚀型管涌过程具有促进作用。当部分细料参与强接触力链构成并在“扰动”作用下脱离时，扩大的影响范围会使细料的流失过程具有明显的间歇性。

参考文献：

[1] Yao Qiuling,Liu Changjun,Ding Liuqian,et al.Experimental study on the microcosmic mechanismof backward piping in dike foundations[J].Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2014,12(1):1–7.[姚秋玲,刘昌军,丁留谦,等.堤基管涌微观机理模型试验研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2014,12(1):1–7.]

[2] Mao Changxi.Study on piping and filters:Part I of piging[J].Rock and Soil Mechanics,2005,26(2):209–215.[毛昶熙.管涌与滤层的研究:管涌部分[J].岩土力学,2005,26(2):209–215.]

[3] Mao Changxi,Duan Xiangbao,Cai Jinbang,et al.Experimental study on harmless seepage piping in levee foundation[J].Journal of Hydraulic Engineering,2004,35(11):46–53.[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.]

[4] Liu Jie,Cui Yihao,Xie Dingsong.Discussion on the experimental study on harmless seepage piping in levee foundation[J].Journal of Hydraulic Engineering,2005,36(11):1392–1395.[刘杰,崔亦昊,谢定松.关于堤基渗流无害管涌试验研究的讨论[J].水利学报,2005,36(11):1392–1395.]

[5] Yao Qiuling,Ding Liuqian,Sun Dongya,et al.Expermiental studies on piping in single-and two-stratum dike foundations[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2007,38(2):13–18.[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.]

[6] Ding Liuqian,Yao Qiuling,Sun Dongya,et al.Expermiental studies on piping development in three-stratum dike foundations[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2007,38(2):19–22.[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.]

[7] Liu Changjun,Yao Qiuling,Ding Liuqian,et al.Meso-experimental research on piping failure with smallsize model test for dike foudation[J].Journal of Hydraulic Engineering,2014(S2):90–97.[刘昌军,姚秋玲,丁留谦,等.堤基管涌小尺寸模型的细观试验研究[J].水利学报,2014(增刊2):90–97.]

[8] Wang Shuang,Chen Jiansheng,Huang Dewen,et al.Experimental study on piping development considering effect of foundation structure[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(12):2334–2341.[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.]

[9] Chen Jiansheng,Zhang Hua,Wang Shuang,et al.Experimental researches on effect of foundation structure on piping inmultilayer embankment[J].Chinese Journal of Geotechnical

Engineering,2014,36(12):2213–2219.[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.]

[10] Ni Xiaodong.Study on seepage failure in meso-level by particle flow code(PFC) and model test[D].Nanjing:Hohai University,2010.[倪小东.土体细观渗透破坏颗粒流理论[D].南京:河海大学,2010.]

[11] Dai Yuan,Ni Xiaodong,Zhou Ren.Experimental study and analysis of piping of levee[J].China Sciencepaper,2014(5):538–542.[代远,倪小东,周仁.堤防管涌试验研究与分析[J].中国科技论文,2014(5):538–542.]

[12] Li Guangxin,Zhou Xiaojie.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.[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.]

[13] Zhou Xiaojie.Research on the generation and evolution of seepage deformation in levee[D].Beijing:Tsinghua University, 2006.[周晓杰.堤防的渗透变形及其发展的研究[D].北京:清华大学,2006]

[14] Wang Shuang,Chen Jiansheng,Zhou Peng.Effect of thickness of fine sand layer on piping developmentin three-stratum dike foundation[J].Rock and Soil Mechanics,2015,36(10):2847–2854.[王霜,陈建生,周鹏.三层堤基中细砂层厚度对管涌影响的试验研究[J].岩土力学,2015,36(10):2847–2854.]

[15] Chen Jiansheng,Yuan Kelong,Wang Shuang,et al.Experimental research on piping development considering buried depth of fine sand[J].Rock and Soil Mechanics,2015,36(3):654–659.[陈建生,袁克龙,王霜,等.细砂层埋深对堤基管涌影响的试验研究[J].岩土力学,2015,36(3):654–659.]

[16] 沙金煊.渗流论文选集[M].北京:水利水电出版社,2007.

[17] Jiang Guocheng,Liu Hongmei.Seepage control of earth dam on grit foundation[J].Journal of Hydraulic Engineering,1962,(1):35–45.[蒋国澄,刘宏梅.砂砾地基上土坝的渗流控制[J].水利学报,1962,(1):35–45.]

[18] Kenney T C,Lau D.Internal stability of granular filters[J].Canadian Geotechnical Journal,1986,22(2):215–225.

[19] Horikoshi K,Takahashi A.Suffusion-induced change in spatial distribution of fine fractions in embankment subjected to seepage flow[J].Soils & Foundations,2015,55(5):1293–1304.

[20] 孙其诚.颗粒物质力学导论[M].北京:科学出版社,2009.

（编辑　张　琼）

引用格式: Ni Xiaodong,Zuo Xiangyu,Sun Daming,et al.Study on the piping erosion in levee foundation by sand box model test[J].Advanced Engineering Sciences,2018,50(2):24–31.[倪小东,左翔宇,孙达明,等.堤基侵蚀型管涌的砂槽试验研究[J].工程科学与技术,2018,50(2):24–31.]