

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.05.012

基于离心模型试验的砂土管涌特性研究

隋海宾,安超,张鹏

(黄河勘测规划设计有限公司工程设计院,河南 郑州 450003)

摘要:根据离心模拟技术的特点,运用自行研制的离心模拟试验装置,对几种不同颗粒组成的砂土进行了 $1g$ 重力加速度和 Ng 离心加速度下的室内管涌试验。在相同试验容器内进行相同颗粒含量、相同密度和相同尺寸的砂土常规试验和离心模拟试验。砂土离心模拟试验结果表明,离心模拟技术可以用来模拟砂土的管涌特性。砂土在 Ng 离心加速度下的临界水力梯度与 $1g$ 重力加速度下的临界水力梯度之比为 $0.8 \sim 1.0$ 。

关键词:离心模拟;渗透破坏;管涌;临界水力梯度

中图分类号:TU411.3 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2010)05-0545-05

我国南方地区暴雨季节极易形成洪水,洪灾分布范围较广^[1]。长江下游平原的堤基广泛分布着深厚的粉砂、细砂土层,厚 $30 \sim 100\text{ m}$,颗粒均匀,抗渗能力低,容易发生管涌。大量洪灾资料表明,管涌的危害最大^[2],因此研究管涌的形成机理和防治措施显得尤为重要。土工离心模拟试验将土工模型置于高速旋转的离心机中,让模型承受大于重力加速度的离心加速度作用,来补偿因模型尺寸缩小而导致土工构筑物自重的损失。所以,离心模拟试验对模拟以自重为主要荷载的岩土结构物并研究其性状特别有效^[3-6]。离心模拟试验能很好地反映原型的应力、应变特性,比通常静力条件下的物理模拟更接近于实际^[7]。利用土工离心模拟技术研究水在土体中的渗透特性时,水在模型中的渗透速度是原型中的 N 倍,用公式表示为 $v_m = Nv_p$ ^[8],这个结果已经被试验所验证^[9]。由于渗流速度不同,如果用同样的土和水,模型和原型中的雷诺数 Re 不同。Singh 等^[10-11]通过试验验证,只要保证 $Re < 1$,达西定律在离心机中还是有效的。

本文利用离心模拟技术研究了砂土在不同重力加速度水平下的管涌特性,并与 $1g$ 重力加速度室内试验的管涌结果进行了相应对比,本次试验的研究成果可以进一步应用于溃坝的离心模拟研究中。

1 砂土管涌 $1g$ 重力加速度室内试验

目前,管涌的数值分析大多局限于有限元渗透模拟范围内,不能很好地考虑水土相互作用,故无法全面解释管涌发生机理;现场试验条件复杂恶劣,影响因素多,往往不能得到正确的结果,所以大多数研究人员采取室内试验进行研究。室内试验原理相对简单明了,现象直观,得出的结论具有一定的意义^[12]。

依据达西定律,本文自行设计了管涌试验装置。试验所采用的模型筒为有机玻璃试样筒,透明的筒身便于观察试验现象,过水方式为“下进上出”,从模型筒下部供水,水渗透过砂样后从上部溢流而出。试验装置如图 1 所示。

1.1 试样制备

管涌 $1g$ 重力加速度室内试验所采用的砂子主要由 2 种粒径组成,分别为 $3 \sim 5\text{ mm}$ 和 $0.25 \sim 0.5\text{ mm}$ 。为了以后描述方便,本文将 $3 \sim 5\text{ mm}$ 的砂命名为粗砂,将 $0.25 \sim 0.5\text{ mm}$ 的砂命名为细砂。 $1g$ 重力加速度室内试

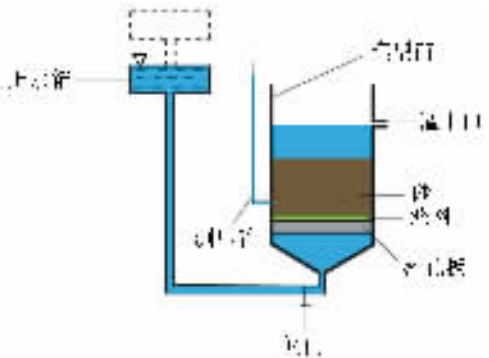


图 1 管涌试验装置示意图
Fig. 1 Test device for piping

验中将粗砂与细砂分别按照质量比 5:1 和 6:1 进行配置,并测出其孔隙率、相对密度,对不同配比下的砂样绘制相应的颗分曲线(图 2)。将粗、细 2 种砂均匀搅拌后分层填筑到透明的有机玻璃模型筒内。

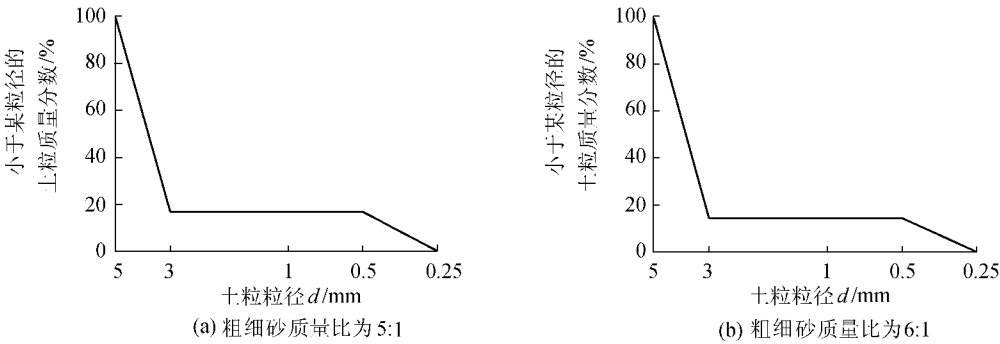


图 2 颗分曲线
Fig. 2 Curves of grain size distribution

1.2 试验过程

将模型筒固定到基座上以后,连接好输水管线即可进行试验。试验过程中通过输水管对上水箱持续供水,让上水箱始终保持溢流状态,以保证上水箱的水位稳定。模型筒底部放置一块密孔板,密孔板上部的滤网可以防止砂样中的细砂通过密孔板漏下堵塞水阀门;上部敞开口可以消除动水压力的影响,同时也方便从模型筒上部观察试验现象。溢出口设置在模型筒侧壁,便于量测下游溢出口水位高度。

试验开始后,用吊车将上水箱吊到一定高度。通过每次升高上水箱 1 cm 来改变模型筒内试样的上下游水位差。待试验形成稳定渗流后,用秒表和量筒测量溢出口的流量,这样就获得了这一水位差下的流量。再依次升高上水箱改变上下游水位差,同时测量对应的流量。

1.3 试验结果

临界水力梯度 i_{cr} 有 2 种判别方法,一种是理论解,另一种是根据试验曲线判别^[13]。本文主要根据水力梯度 i 与流速 v 的关系曲线判别临界水力梯度。砂样粗细颗粒大小不同,受骨架颗粒的制约条件也不同。当自由颗粒在水流作用下开始启动,发生位置变化的时候,模型筒内土体的结构已经开始了调整的过程,但是当这种调整还很少或者只是局部调整的时候,并不会从根本上影响反映砂样宏观性质的渗透系数。只有当模型筒内的砂样颗粒开始大面积位置调整和顺着孔隙涌出的时候,渗透系数才会发生变化。从试验过程来看,这种砂样颗粒大面积调整基本上是在水力梯度达到某一特定值的时候立即发生的,因此可以认为这个特定的水力梯度就是临界水力梯度。表现在试验结果的 $i-v$ 曲线图上,就是当流速和水力梯度不成线性变化开始的位置,即可认为是发生管涌破坏的临界水力梯度^[13]。根据试验数据分别绘制粗细砂质量比为 5:1 和 6:1 时 $i-v$ 关系曲线,见图 3,发生管涌前后试样表面特征见图 4。

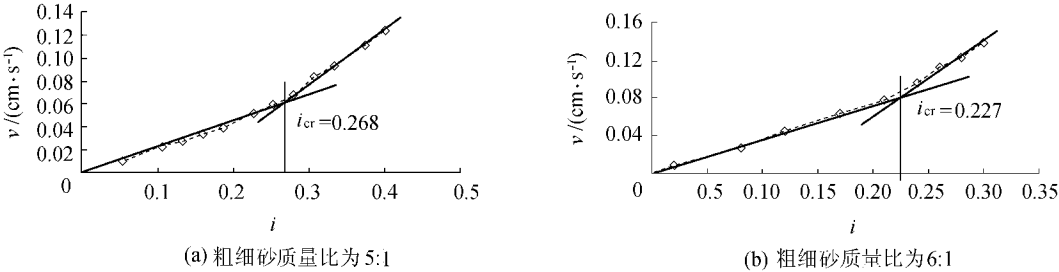


图 3 $i-v$ 关系曲线
Fig. 3 Relationship between hydraulic gradient and velocity

2 砂土管涌特性的离心模拟试验

2.1 试验方法

作为对比试验,砂土管涌特性的离心模拟试验采用的试样与常规管涌 1 g 重力加速度室内试验相同,试样的制备也相同。

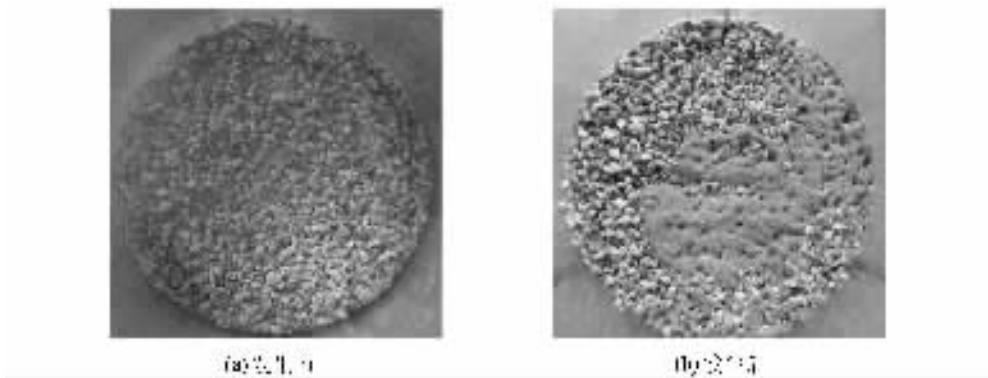


图 4 管涌发生前后的模型试样

Fig. 4 Samples before and after piping

砂土管涌特性的离心模拟试验是将常规管涌 $1g$ 重力加速度室内试验所用的试验装置搬到离心机中进行. 在试验装置的设计上考虑了离心试验的特点, 对重点部位进行结构稳定计算. 针对离心机中水流流速增大可能会对砂样底部带来的集中冲刷的情况, 在模型筒的下部预留有一定空间; 当上下游水位差增大时, 水流流量会增大. 为避免这种不利情况的影响, 事先在模型筒下部的空间内铺设一些大颗粒的砂子, 在水流较大时可以起到缓冲水流的作用. 将水压力传感器分别置于砂样的底部和顶部, 用以量测试验过程中上下游的水位差, 并用模型筒侧壁的测压管进行校核, 通过离心机控制室的大屏幕监测试验过程中发生的现象(图 5).

2.2 试验过程

离心机启动后, 先将离心机加速到指定的离心加速度, 然后稳定几分钟后开始向水箱内注水. 待水箱内的水位稳定在一定水位时, 表明此时通过砂样渗透的水量和水箱的供水量平衡. 记录此时的测压管水头高度, 并标记水压力传感器的值. 同时通过上下 2 个水表量测水箱的供水量, 即渗透量. 为保证有足够的时间发生渗透破坏, 每一级水头下均稳定足够时间. 待量测并记录完相应数据, 达到合理的稳定时间后, 开始加大供给水箱的水量. 依次提升水箱内水头, 以改变试验的水力梯度, 记录每一级下的相关数据. 离心模拟试验分别测定了离心加速度 $5g$ 和 $10g$ 时砂土的管涌特性.

离心模拟试验过程中, 通过监控大屏幕可以清晰地看到管涌发生的过程(图 6). 判断管涌破坏的 i_{cr} , 依然采用与 $1g$ 重力加速度室内试验相同的判别方法, 即当 v 和 i 不成线性变化开始的位置, 可认为是发生管涌破坏的 i_{cr} .



图 5 离心机监控屏幕

Fig. 5 Monitoring screen of centrifuge



图 6 离心模拟试验过程中的管涌现象

Fig. 6 Piping phenomenon during centrifuge modeling process

2.3 结果分析

在砂土管涌特性 $1g$ 重力加速度室内试验中, 通过 $i-v$ 关系曲线来判别 i_{cr} . 对离心模拟的数据也分别绘制 $i-v$ 关系曲线, 见图 7 和图 8.

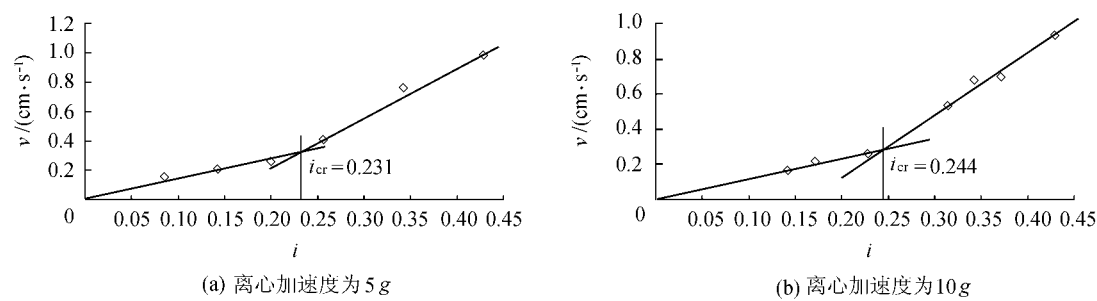


图7 粗细砂质量比为5:1时的*i-v*关系曲线

Fig. 7 Relationship between hydraulic gradient and velocity under ratio of coarse to fine particle of 5:1

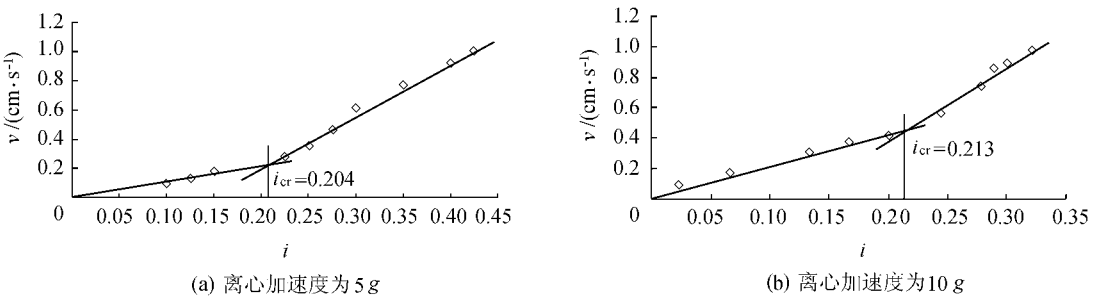


图8 粗细砂质量比为6:1时的*i-v*关系曲线

Fig. 8 Relationship between hydraulic gradient and velocity under ratio of coarse to fine particle of 6:1

为了说明砂土离心模拟试验的结果,表1列出了砂土管涌离心模拟试验和1*g*重力加速度室内试验的*i_{cr}*,给出了砂土管涌离心模拟试验的临界水力梯度*i_{cr,an}*与常规1*g*重力加速度室内试验的临界水力梯度*i_{cr,p}*之间的比值*α*。

通过对试验数据的分析可以看出,虽然在离心机中水的密度增大了,导致渗透水头比1*g*重力加速度情况下增大了*N*倍(*N*为离心机的离心加速度水平),但由于砂体的密度也增大了

*N*倍,抵抗渗透破坏的能力也相应地近似增加了*N*倍。从图7、8和表1中可以看出,在低离心加速度下砂土管涌离心试验的临界水力梯度与常规1*g*重力加速度室内试验的临界水力梯度间的比值*α*为0.8~1.0,在粗细砂质量比为5:1和6:1的情况下,离心模型试验比较好地模拟了砂土的管涌特性。

在砂土管涌特性的离心模拟试验中,砂土中水流的最大雷诺数大于10,超出了达西定律的适用范围,但从试验结果可以看出,在*Ng*的重力场下,与1*g*重力加速度室内试验相比,砂土抵抗管涌破坏的能力只有略微降低。针对本次试验采用的砂土,试验结果表明,在低离心加速度下,离心模拟试验可以用来模拟砂土管涌的渗透破坏特性。

3 结 语

本文运用自行设计的试验装置,对相同的饱和砂土试样分别进行了常规1*g*重力加速度室内试验和5*g*、10*g*离心加速度下的离心模拟试验。试验过程中克服了常水头水位稳定、管涌现象难观测等困难,取得的科研成果具有一定的实用意义。通过分析2种模拟试验的临界水力梯度的变化关系,表明离心模拟技术在研究渗透破坏方面具备可行性,为进行溃坝等深入研究提供了一定的依据。本文试验中仍然存在一定的不确定性,如:试样与试样筒侧壁的摩擦力、水的黏滞系数不随重力加速度变化等影响,这些还有待于进一步研究。

表1 砂土管涌离心模拟试验与常规1*g*重力加速度室内试验的临界水力梯度对比

试验参数	粗细砂质量比为5:1		粗细砂质量比为6:1	
	<i>i_{cr}</i>	<i>α</i>	<i>i_{cr}</i>	<i>α</i>
常规1 <i>g</i> 重力加速度	0.268		0.227	
5 <i>g</i> 离心加速度	0.231	0.862	0.204	0.899
10 <i>g</i> 离心加速度	0.244	0.910	0.213	0.938

参考文献：

[1] 胡龙成. 历史上的长江洪灾[J]. 大自然 ,1995(5) :28-31.(HU Long-cheng. The Yangtze River floods in the history[J]. China Nature ,1995(5) 28-31.(in Chinese))

[2] 周应虎. 江河大堤渗流破坏机理和控制措施研究[D]. 合肥 :合肥工业大学 ,2006.

[3] 白冰 ,周健. 土工离心模型试验技术的一些进展[J]. 大坝观测与土工测试 ,2001 ,25(1) :39-42.(BAI Bing ,ZHOU Jian. Some advances in geotechnical centrifuge model test technology[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests ,2001 ,25(1) :39-42.(in Chinese))

[4] 包承纲 ,饶锡保. 土工离心模型的试验原理[J]. 长江科学院院报 ,1998 ,15(2) 2-4.(BAO Cheng-gang ,RAO Xi-bao. Principle of the geotechnical centrifuge model tes[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute ,1998 ,15(2) 2-4.(in Chinese))

[5] 邢建营 ,邢义川 ,梁建辉. 土工离心模型试验研究的进展与思考[J]. 水利与建筑工程学报 ,2005 ,3(1) :29-33.(XING Jian-ying ,XING Yi-chuan ,LIANG Jian-hui. Development and thoughts of geotechnical centrifuge modeling[J]. Jorunal of Water Resources and Architectural Engineering ,2005 ,3(1) 29-33.(in Chinese))

[6] 包承纲. 我国离心模拟试验技术的现状和展望[J]. 岩土工程学报 ,1991 ,13(6) 92-97.(BAO Cheng-gang. The state and prospect of centrifugal model test in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,1991 ,13(6) 92-97.(in Chinese))

[7] 包承纲 ,饶锡保 ,李玫 ,等. 离心模拟试验及若干应用特例[C]//中国水利学会 2007 学术年会物理模拟技术在岩土工程中的应用分会场论文集. 北京 :中国水利水电出版社 ,2007 :47-57.

[8] SCHOFIELD A N. Cambridge geotechnical centrifuge operations[J]. Geotechnique ,1980 ,30(3) 227-268.

[9] ARULANANDAN K ,THOMPSON P Y ,KUTTER B L ,et al. Centrifuge modeling of transport processes for pollutants in soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering ,ASCE ,1988 ,114(2) :185-205.

[10] SINGH D N ,GUPTA A K. Modelling hydraulic conductivity in a small centrifuge[J]. Canadian Geotechnical Journal ,2000 ,37(5) :1150-1155.

[11] GOODINGS D J. Centrifuge modeling water effects in geotechnical models[J]. Journal of Geotechnical Engineering ,ASCE ,1984 ,120(2) :1-23.

[12] 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) 37-41.(ZHOU Jian ,YAO Zhi-xiong ,BAI Yan-feng ,et al. Meso-mechanical study on piping in sandy soil[J]. Journal of Tongji University :Natural Science ,2008 ,36(6) 37-41.(in Chinese))

[13] 张刚. 管涌现象细观机理的模型试验与颗粒流数值模拟研究[D]. 上海 :同济大学 ,2007.

Piping characteristics of sand based on centrifugal model tests

SUI Hai-bin , AN Chao , ZHANG Peng

(Institute of Engineering Design , Yellow River Survey , Programming and Designing Co. , Ltd. , Zhengzhou 450003 , China)

Abstract : According to the characteristics of centrifuge modeling technology , laboratory piping tests on sand composed by several kinds of particles were performed under gravitational acceleration of 1g and centrifugal acceleration of Ng by use of the self-developed experimental device. The routine tests and the centrifugal model tests on sand samples with the same grain size distribution , density and size were conducted in the same container. The test results show that the centrifuge modeling technology can be used to simulate the piping characteristics of sand. The ratio of the critical hydraulic gradient of sand under Ng to that under 1g is between 0.8 and 1.0.

Key words : centrifuge modeling ; seepage failure ; piping ; critical hydraulic gradient