

充填管袋堆积体应力-渗流耦合模型试验

詹美礼,梁洪坤,盛金昌,孙孝安

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:为探讨充填管袋堤坝管袋堆积体渗透各向异性及应力-渗流耦合关系,采用室内大尺度应力-渗流耦合模型试验,研究了多个管袋搭接形成的堆积体采用不同布置方式时上覆应力对管袋堆积体渗透特性以及渗透各向异性的影响。结果表明:管袋间接缝是堆积体渗流的主要通道,管袋按接缝平行渗流方向布置时,堆积体渗透系数远大于垂直方向布置,且易发生渗透破坏;随上覆应力增加,管袋堆积体的渗透系数逐渐减小,渗透各向异性逐渐增强,但不同布置方式时上覆应力的增加对堆积体渗透性的影响程度不同。

关键词:充填管袋;堤坝;渗透特性;各向异性;应力-渗流耦合

中图分类号:TV139.16;TV641.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)03-0048-06

Model experiments on stress-seepage coupling effect of filled geotubes//ZHAN Meili, LIANG Hongkun, SHENG Jinchang, SUN Xiaolan(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: In order to investigate the permeability anisotropy and stress-seepage coupling effect of the filled tube assemblage for geotube dams, a large-scale model experiment on stress-seepage coupling was used to study the effect of overburden pressure on the permeability and its anisotropy of the geotube assemblage under different arrangement modes. The experimental results show that the joints between geotubes are the main seepage channel of the assemblage. If the joints between geotubes are arranged parallel to the direction of seepage, the permeability coefficient of the assemblage is much larger than that of the vertical arrangement, and seepage damage is easy to occur. With the increase of the overburden stress, the permeability coefficient of the assembly decreases gradually and the anisotropy of permeability gradually increases. The influence of overburden pressure increase on permeability is different for different arrangement modes.

Key words: filled geotubes; embankment; permeability; anisotropy; stress-seepage coupling

充填管袋筑堤作为国内的新型工程技术,被越来越多地应用到了围海造地、围堤、路堤、河流航道治理等工程中^[1-2]。充填管袋筑堤技术与传统的堆石和混凝土筑堤方式相比,具有可就地取材、造价低廉、施工工艺简单、施工速度快、对软土地基适应能力较强等优势^[3]。20 世纪五六十年代,国外开始在构筑长期海岸工程中使用充填管袋技术,例如著名的三角洲工程;而国内直到 21 世纪初才开始逐渐在工程中应用此项技术,如长江口深水围堰工程、天津南港东堤工程、连云港徐圩港区围堤工程等^[4-6]。天津南港东堤工程为适应软土地基筑堤的特点,堤身采用了大型水力充填管袋填筑,由于堤身与堤基抛填砂在施工上难以保证统一的施工标准,导致堤身与堤基的渗透性分布不均;而海水潮位的变化又产生了双向渗流问题,堤基抛填砂在渗流作用下可能

会沿着管袋间接缝流失,发生接触渗透破坏。因此对充填管袋堤坝的防渗提出了更高要求。

目前,针对充填管袋堤坝的研究更多的是在堤坝结构稳定、管袋尺寸和材料特性等方面,林刚等^[7]研究了充填管袋堤坝的稳定性计算方法;刘海笑等^[8]进行了充填管袋堤坝的稳定性试验研究;Kim 等^[9]提出了用于确定土工管袋几何尺寸和应力的二维分析和数值解的方法。充填管袋堤坝作为一种挡水建筑物,管袋间形成的缝隙较多,甚至缝隙可能相互连通,这对其渗透稳定控制非常不利。目前已有部分学者针对充填管袋堤坝的渗透特性做了研究,例如 Recio 等^[10]通过模型试验研究了在低水头作用下管袋不同搭接方式对渗透性的影响;刘斯宏等^[11]采用落水头法研究了膨胀土袋搭接体的渗透性,认为土袋之间的缝隙是渗流的主要通道;蔚成亮

等^[12]采用室内试验与图像分析方法研究了单向水流作用下管袋坝芯砂体破坏并沿袋间接缝流失的问题;满晓磊等^[13-14]对充填管袋坝芯吹填砂沿袋间接缝流失问题和管袋内充填砂从管袋侧壁缺损处外漏流失问题进行了研究,得到了在波浪工况下冲刷稳定性的判定指标;陆建辉等^[15]为解决管袋围堤渗透问题,提出高压摆喷结合旋喷形成防渗墙的方案;张海龙等^[16]针对围堰防渗问题,提出了防渗土工膜和充填管袋结合的围堰防渗形式。充填管袋的断面尺度和长度方向尺度差异较大,呈长条状,同样的充填管袋堆积体的缝隙尺度在不同方向上也有较大差异,并且不同的管袋布置方式缝隙结构和分布也不同。充填管袋堆积体的渗透性也因缝隙结构的方向性,在不同的渗流方向上有所差异,具有各向异性。另外,充填管袋堆积体的缝隙在上覆应力作用下缝隙被压缩,其渗透性也将产生变化。目前关于充填管袋堆积体渗透各向异性及应力-渗流耦合的研究报道还较少。针对上述问题本文通过大尺度应力-渗流耦合模型试验,以多个管袋搭接形成的堆积体为研究对象,设计两种管袋布置方式,研究了充填管袋堆积体的渗透各向异性以及应力-渗流耦合关系,以期在实际工程的渗流控制提供试验依据。

1 模型试验方法

1.1 试验材料及装置

试验用砂土取自天津南港东堤,分别为堤基抛填砂(简称抛填砂)、堤身管袋充填砂(简称充填砂),经烘干去除杂质后,采用颗粒筛分仪对两种沙土分别筛分,其颗粒级配组成如图 1 所示。试验用管袋材料为聚丙烯编织土工织物,设计两种砂袋尺寸,宽度分别为 10 cm 和 5 cm,高度均为 4 cm,长度根据模型槽的尺寸分别取 100 cm 和 30 cm。

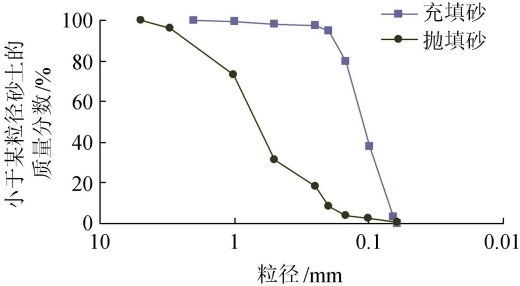


图 1 试验用砂土颗粒级配曲线

试验采用河海大学自行研制的大尺度应力-接触渗透冲刷耦合模型槽试验装置,如图 2 所示。试验装置的内槽尺寸为长 100 cm、宽 30 cm、高 50 cm。该装置由数据采集系统(包括位移传感器、压力传感器等)和轴向压力系统组成。

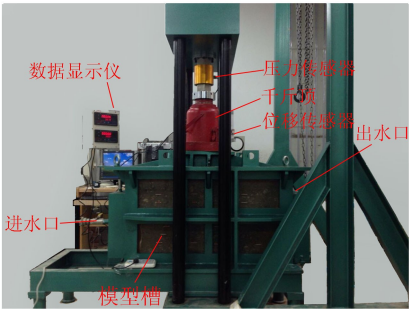


图 2 模型槽试验装置

1.2 试验设计

为研究充填管袋堤坝渗透性的各向异性,如图 3 所示,设计两种管袋布置方式:①方案 1,管袋间接缝平行于渗流方向,在模型槽中纵向排列;②方案 2,管袋间接缝垂直于渗流方向,在模型槽中横向排列。模型内试样填筑时,首先在模型槽底部分别按干密度 1.65 g/cm^3 和 2.00 g/cm^3 填筑 3 cm 厚的黏土和 5 cm 厚的抛填砂,然后在抛填砂上分层填筑装有充填砂的管袋。为防止试验过程中水流沿着模型侧壁与管袋接触缝隙流失,使用黏土封堵管袋与模型侧壁的缝隙。模型填筑完毕后试样高为 45 cm,内部主要存在 3 种缝隙:管袋端部形成的空隙、相邻管袋间接缝和管袋端部与底部砂层形成的空隙。

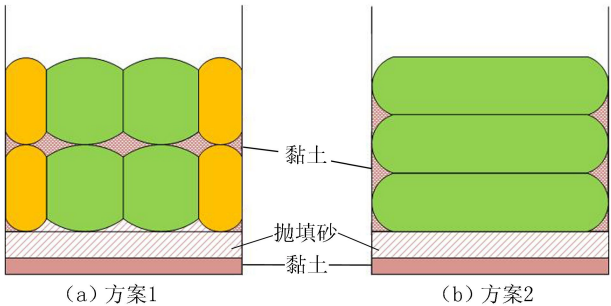


图 3 管袋布置示意图

另外试验过程中通过施加不同上覆应力(0.05 ~ 0.3 MPa)来研究应力场-渗流场的耦合作用,方案 1 施加的上覆应力为 0.1 MPa、0.2 MPa 和 0.3 MPa,方案 2 施加的上覆应力为 0.05 MPa、0.1 MPa、0.2 MPa 和 0.3 MPa。

1.3 试验过程

- a. 上覆应力加载过程。模型安装完成后,利用千斤顶缓慢施加加载上覆应力,加载至设计上覆应力后,停止加压并保持应力恒定。
- b. 模型土体饱和过程。打开进水阀、出水阀,然后将溢流水箱内水位提升至略高于模型内试样的位置,饱和 4 ~ 5 h,同时对测压管及下游出水管进行排气。
- c. 渗透压力加载过程。在保持上覆应力不变的情况下,提高溢流水箱位置增加渗透压力,待上下

游测压管内水位稳定后,测量记录此时的模型渗流量,每 10 min 测量 1 次渗流量至稳定不变后,继续施加下一级渗透压力。

在完成此级上覆应力的试验后,重新装填试样,改变上覆应力,重复此试验过程。

2 试验结果及分析

2.1 模型试样的渗流量

模型试样的渗流量可以分为流经底部抛填砂层的渗流量、管袋间缝隙的渗流量和管袋内充填砂的渗流量 3 部分。通过试验获得在不同围压下抛填砂与充填砂本身的渗透系数如表 1 所示。由于两种砂土在不同围压下的渗透性变化较小,为了方便计算,选取围压为 0.15 MPa 时两种砂土的渗透系数作为后续计算渗流量时的参数,并假定其在上覆应力变化过程中保持不变。根据模型砂层的填筑尺寸与试验中测量得到的水力梯度,由达西定律可以近似得出在某一水力梯度下通过模型中两种砂土的渗流量。

表 1 不同围压下的渗透系数

砂 土	$k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$				
	$p=0.05 \text{ MPa}$	$p=0.10 \text{ MPa}$	$p=0.15 \text{ MPa}$	$p=0.20 \text{ MPa}$	$p=0.25 \text{ MPa}$
抛填砂	0.008 4	0.007 3	0.007 2	0.007 1	0.006 6
充填砂	0.003 5	0.003 3	0.003 1	0.003 1	0.003 0

2.1.1 管袋间接缝平行渗流方向

试验过程中,分级升高上游水头,随着渗透压力的持续增加,水力梯度总体升高幅度较小,流量增加较快;在施加不同上覆应力的情况下,各组试验流量与水力梯度变化不大。经计算,流经底部抛填砂层和管袋内充填砂的渗流量相加不足总渗流量的 1%,总渗流量可近似认为是流经管袋间缝隙的渗流量,可见此时管袋间缝隙是影响渗流的主要因素,这与刘斯宏等^[11]的研究结论相符合。

由于底部抛填砂层的渗透性对于模型整体渗透性影响较小,因此试验中模型整体的渗透性可以近似看作充填管袋堆积体的渗透性。不同上覆应力作用下的渗流流速与水力梯度的关系见图 4。在施加 0.1 MPa 上覆应力试验中,当水力梯度小于 0.038 时,渗流流速与水力梯度近似呈线性关系,符合达西定律,此时渗流流速和渗透系数较大;当水力梯度大于 0.038 时,继续增加渗透压力,水力梯度增加幅度很小,而堆积体渗透性突然增大,渗流流速增加迅速。因此判断在施加 0.1 MPa 上覆应力情况下,当水力梯度达到 0.038 时,堆积体发生渗透破坏。增加上覆应力,堆积体渗流流速略微减小,临界水力梯度并未明显提高,当水力梯度达到 0.04 附近时,发生渗透破坏。

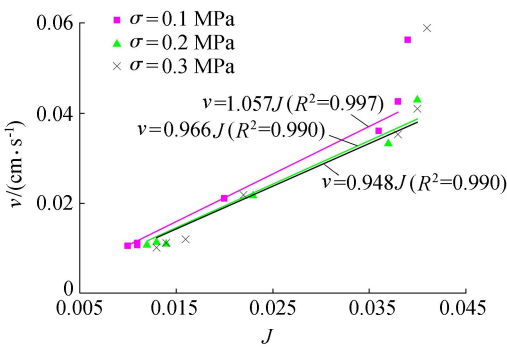


图 4 方案 1 不同上覆应力作用下渗流流速与水力梯度关系

在试验过程中堆积体的渗流流量和流速很大,渗透性很强,这是因为管袋按其接缝平行于渗流方向布置,管袋端部的空隙和相邻管袋间的接缝易形成贯通上下游的渗流通道,所以其渗透性较强。模型发生渗透破坏时,管袋本身并未发生破坏,而是模型内管袋间形成的缝隙在水力作用下尺度增大,渗流通道扩大。在未发生破坏时,管袋端部与底部抛填砂层间的空隙中有部分抛填砂存在,没有形成贯通的渗流通道,但这部分砂粒较为松散,孔隙率较大,因此在水力梯度较低的情况下就易被冲刷,进而形成新的渗流通道,造成模型渗透性突然增大。

2.1.2 管袋间接缝垂直渗流方向

经计算,在不同上覆应力作用下,流经底部抛填砂层的渗流量占总渗流量的 2.0% ~ 4.3%,流经管袋内充填砂的渗流量占 7.0% ~ 15.5%,管袋间的缝隙仍是影响渗流的主要因素。因此与方案 1 相同,底部抛填砂层对于模型整体渗透性的影响可以忽略,将模型总渗透性近似看作充填管袋堆积体的渗透性。

各上覆应力作用下渗流流速与水力梯度的关系如图 5 所示。在不同上覆应力作用下的水力梯度与渗流流速均具有良好的线性关系,线性拟合的相关系数均在 0.99 以上,结果符合达西定律。随着上覆应力增加,在相同水力梯度下,堆积体渗流流速明显减小。

对比方案 1 与方案 2 的试验结果可知,方案 2

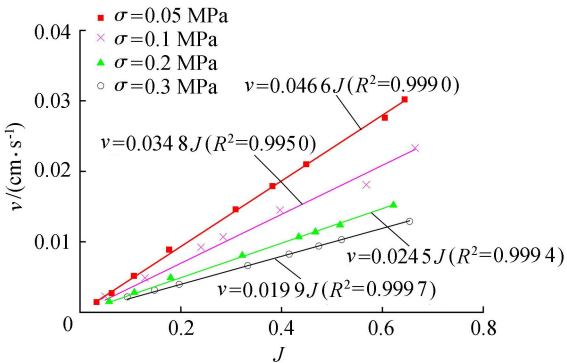


图 5 方案 2 不同上覆应力作用下渗流流速与水力梯度关系

的渗透性明显小于方案1;虽然方案2未发生渗透破坏,但其临界水力梯度也远大于前者的0.04。这种差异是因为管袋接缝垂直渗流方向布置时,相邻管袋间的接缝和管袋端部与底部砂层间的空隙垂直于渗流方向,管袋与底部抛填砂层紧密接触而没有空隙。所以模型在方案2布置方式下,内部没有形成贯通的渗流通道,其渗透性也明显小于方案1。

两种试验方案模型渗透性差异明显,这意味着对于同一个模型来说,其渗透性具有明显的方向性,而模型底部抛填砂层的渗透性一般认为是各向同性的,所以认模型试样表现出的渗透各向异性是由充填管袋堆积体本身的渗透特性造成的。

2.2 充填管袋堆积体应力-渗流耦合分析

管袋间缝隙是渗流的主要通道,所以管袋间缝隙的尺度在上覆应力作用下的变化是影响渗透性的主要因素。因为底部抛填砂层的渗透性较小,所以忽略其对整体渗透性的影响,充填管袋堆积体渗透系数与上覆应力关系如图6所示。将管袋间的缝隙类比为岩体中裂隙,参考 Louis 在 1974 年提出的平均渗透系数与应力的经验公式^[17]:

$$k = k_0 \exp(-\alpha \sigma) \tag{1}$$

式中: k_0 为地面或参考的渗透系数; α 为系数,取值与介质的材料有关; σ 为上覆岩层产生的压强。渗透系数与应力呈负指数关系。

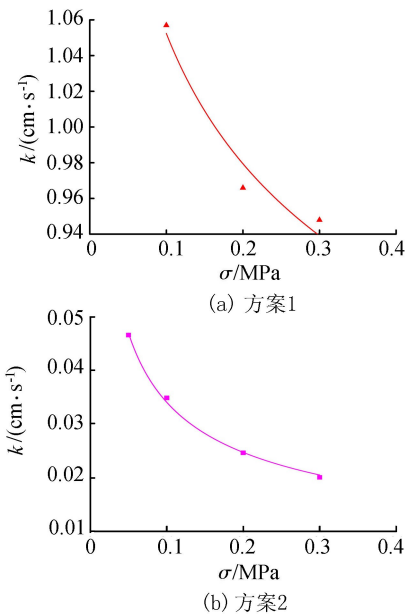


图6 渗透系数与上覆应力的关系

由图6可见,两种试验方案堆积体的渗透系数都随上覆应力增大而逐渐减小,通过曲线拟合发现两者近似满足负指数关系,拟合相关系数分别为0.9178和0.9964。根据式(1),管袋堆积体与岩体的渗流-应力耦合规律有一定相似性,都呈负指数关系。方案1堆积体渗透系数减小约10%,且下降

幅度并不均匀,应力由0.1 MPa增加至0.2 MPa时渗透系数下降幅度较大,继续增加应力下降幅度减缓;而方案2堆积体渗透系数减小约57%,降幅较为均匀。可见两种试验方案堆积体的渗透性对于应力增加的敏感程度不同,方案1与方案2渗透系数的比值随应力增加而增大。

随着上覆应力的增加,充填管袋堆积体内的空隙、缝隙还有砂粒间的孔隙都将被压缩,但由于管袋断面尺寸的影响,管袋端部的空隙和相邻管袋间的接缝不能被完全压缩消失。在方案1情况下,堆积体内部的渗流通道被压缩,渗透性降低,但管袋形变达到一定程度后,空隙无法被继续压缩,渗流通道继续存在于堆积体内部;对于方案2的管袋堆积体,相邻管袋间接缝和管袋端部与底部抛填砂层间的空隙随应力增加越来越小,接触更加紧密,所以渗透性逐渐减小。另外根据土力学理论,同一位置的砂土所受的竖向压力大于侧向压力,所以对相邻管袋间的接缝,水平方向时所受压力要大于竖向时,渗透性则相反。因此方案1充填管袋堆积体的渗透性对于上覆应力增加的敏感度要弱于方案2。

2.3 充填管袋堆积体渗流各向异性分析

在充填管袋堤坝中,管袋缝隙并不是沿某一方向贯通的,不同的管袋搭接布置方式,缝隙结构不同,在堤坝内部易形成缝隙网络。由前文可知不同搭接方式的管袋堆积体渗透性差异较大,具有明显的各向异性。

根据各向异性渗透介质的达西定律,二维渗透张量可由渗透圆方法^[18]求解,可表示为

$$K = \begin{bmatrix} \frac{k_1 + k_2}{2} - \frac{k_1 - k_2}{2} \cos 2\theta & \frac{k_1 - k_2}{2} \sin 2\theta \\ \frac{k_1 - k_2}{2} \sin 2\theta & \frac{k_1 + k_2}{2} + \frac{k_1 - k_2}{2} \cos 2\theta \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中: k_1, k_2 为渗透张量的主值; θ 为渗透系数与主方向 x 轴的夹角。

通过管袋间接缝平行(方案1)与垂直(方案2)渗流方向的试验分析可以看出,堆积体渗透系数对于应力增加的敏感程度不同,渗透性的各向异性系数 k_1/k_2 随应力增加而增大,说明堆积体渗透各向异性随应力增加越来越明显。

为验证充填管袋堆积体的渗透各向异性对堤坝渗流场的影响,以某海堤工程资料为依据建立三维有限元计算模型。该海堤采用充填管袋技术筑堤,堤顶高程为8.80 m,上游堤坡坡度为1:3,下游堤坡坡度为1:2.5。堤身采用充填管袋填筑,管袋下部为堤基抛填砂层,并在上游坡脚设置防渗墙。

堤坝模型 x 方向为水平面上垂直堤坝轴线方

向, y 方向为水平面上平行堤坝轴线方向, z 方向为
竖直方向;有限元网格节点总数为 14 421 个,单元
总数为 12 600 个。模型边界条件:上游水面线以下
为已知水头边界,下游为出渗边界,模型两侧和底部
边界为不透水边界,计算模型的标准剖面如图 7 所
示。堤坝各分区和堤基的渗透系数如表 2 所示,管
袋层的渗透系数根据上覆应力为 0.2 MPa 时方案 1
和方案 2 的充填管袋堆积体渗透系数选取。

表 2 渗流场计算参数

材 料	$k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$		
	x 方向	y 方向	z 方向
粉砂层	9.8×10^{-3}	9.8×10^{-3}	9.8×10^{-3}
中粗砂垫层	5.8×10^{-3}	5.8×10^{-3}	5.8×10^{-3}
坡脚块石	0.1	0.1	0.1
混凝土栅栏板	0.1	0.1	0.1
防浪墙	1.2×10^{-7}	1.2×10^{-7}	1.2×10^{-7}
防渗墙盖板	1.2×10^{-7}	1.2×10^{-7}	1.2×10^{-7}
防渗墙	1.2×10^{-7}	1.2×10^{-7}	1.2×10^{-7}
管袋(垂直渗流方向)	2.45×10^{-2}	0.966	2.45×10^{-2}
管袋(平行渗流方向)	0.966	2.45×10^{-2}	2.45×10^{-2}

计算工况:①工况 1,管袋层 1 管袋垂直渗流方
向布置;②工况 2,管袋层 1 管袋平行水流方向布
置;③工况 3,管袋层 1 管袋垂直水流方向布置,但
未考虑管袋渗透系数各向异性。

渗流场计算结果见图 8,可以看出,工况 1 与工
况 2 的渗流场相比,两者渗流场差异明显。工况 1
堤坝的浸润线位置较低,相同位置水头也小于工
况 2,最大相差约 1m;工况 1 管袋层 1 处等水头线
较密集,水力坡降较大,而在堤坝中部水力坡降小于
工况 2。工况 3 与工况 1 相比,两者渗流场分布规
律相似。工况 1 的浸润线位置、相同位置处的水头
都要高于工况 3,可见在考虑渗透各向异性的情况
下,堤坝的浸润线和位置水头较高。

在充填管袋堤坝中因不同的搭接布置方式,内部
管袋堆积体的渗透各向异性较为显著,对堤坝的渗
流场分布影响很大;相同搭接布置方式的管袋,未
考虑其渗透系数的各向异性时,渗流场计算结果偏
小。因此在管袋应用中考虑渗透各向异性可以获得
更加准确的渗流场,可为工程的渗流稳定控制提供
依据。

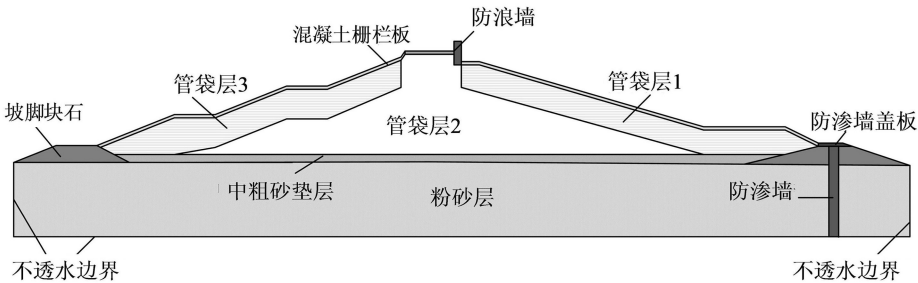


图 7 堤坝模型标准剖面

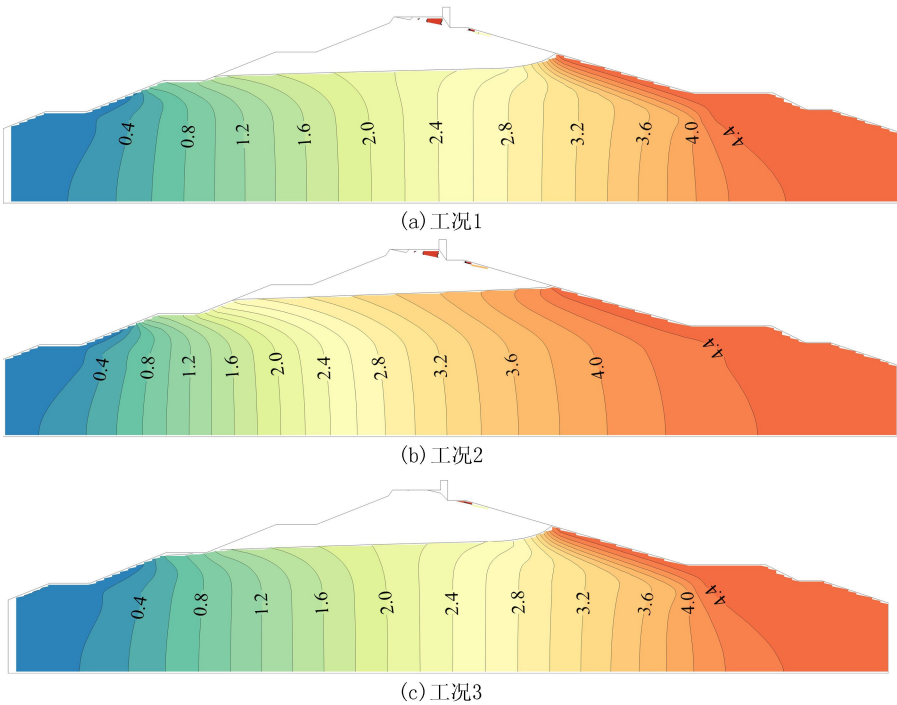


图 8 堤坝剖面渗流场水头分布(单位:m)

3 结 论

- a. 不同上覆应力下模型水力梯度与渗流流速呈线性关系,符合达西定律。充填管袋堆积体内的缝隙是渗流的主要通道,管袋间接缝与渗流方向平行时,堆积体的渗透性远大于管袋间接缝与渗流方向垂直时。
- b. 渗透系数与上覆应力两者近似满足负指数关系,渗透系数随上覆应力的增加逐渐减小。不同的布置方式充填管袋堆积体渗透性对于上覆应力增加的敏感度不同,管袋间接缝与渗流方向垂直时随应力增加渗透系数减小更明显。
- c. 充填管袋堆积体的渗透性呈明显的各向异性,不同搭接布置方式的堆积体的渗透各向异性对堤坝渗流场的影响较大。充填管袋堤坝工程中应注意管袋渗透各向异性对渗流稳定控制的影响。

参考文献:

[1] 陈亮,雷国辉,赵仲辉. 充泥过程中土工织物管袋的受力和变形分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015,43(1):22-27. (CHEN Liang, LEI Guohui, ZHAO Zhonghui. Analysis of force and deformation of geosynthetic tube filling with slurry[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2015, 43(1):22-27. (in Chinese))

[2] 束一鸣. 我国管袋坝工程技术进展[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(1):1-11. (SHU Yiming. Advances in technology of geotube dam engineering in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018,38(6):1-11. (in Chinese))

[3] 朱朝荣,束一鸣,姜俊红,等. 管袋堤坝在水流作用下的稳定性模型试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008,36(3):333-336. (ZHU Chaorong, SHU Yiming, JIANG Junhong, et al. Experiment on the stability of geotube embankments in river current [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2008, 36(3):333-336. (in Chinese))

[4] 张文斌,谭家华. 土工布充砂袋的应用及其研究进展[J]. 海洋工程, 2004(2):98-104. (ZHANG Wenbin, TAN Jiahua. Application of sand-filled geotextile tubes and the state of the art of their researches [J]. The Ocean Engineering, 2004(2):98-104. (in Chinese))

[5] 陆健辉,卢伟华. 土工织物在长江口深水围堰中的应用[J]. 水利技术监督, 2013(1):58-60. (LIU Jianhua, LU Weihua. Application of geotextile in deep water cofferdam of Yangtze Estuary [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2013(1):58-60. (in Chinese))

[6] 何宁,沈雪松,周彦章,等. 大型疏浚土充填袋筑堤技术

研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3):440-445. (HE Ning, SHEN Xuesong, ZHOU Yanzhang, et al. Embankment construction technology using large geotextile bags filled with dredged soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3):440-445. (in Chinese))

[7] 林刚,束一鸣,毛文龙. 扁平管袋裸坝基于波浪作用的稳定性公式推求[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(1):12-18. (LIN Gang, SHU Yiming, MAO Wenlong. Derivation of structural stability formulae for uncovered flat geotubes under wave action[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018,38(1):12-18. (in Chinese))

[8] 刘海笑,束一鸣,王晓娟. 管袋堤坝在深水水流作用下的稳定性试验[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(6):67-69. (LIU Haixiao, SHU Yiming, WANG Xiaojuan. Experimental study on geotube embankment stability with deep currents[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6):67-69. (in Chinese))

[9] KIM H J, WON M S, JAMIN J C, et al. Numerical and field test verifications for the deformation behavior of geotextile tubes considering 1D and areal strain[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(2):209-218.

[10] RECIO J, OUMERACI H. Hydraulic permeability of structures made of geotextile sand containers; laboratory tests and conceptual model [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(6):473-487.

[11] LIU Sihong, BAI Fuqing, WANG Yisen, et al. Treatment for expansive soil channel slope with soilbags[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 26(4):657-666.

[12] 蔚成亮,束一鸣,曹明杰,等. 管袋坝芯砂体沿袋间接缝流失的试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(10):1231-1238. (YU Chengliang, SHU Yiming, CAO Mingjie, et al. Experimental research on core sand losses through seam between tubes of geotube dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(10):1231-1238. (in Chinese))

[13] 满晓磊,束一鸣,曹明杰,等. 管袋坝袋间接缝坝芯吹填砂流失模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(1):28-35. (MAN Xiaolei, SHU Yiming, CAO Mingjie, et al. Experimental study on dam core sand scouring through seams between tubes of a geotube dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 38(1):28-35. (in Chinese))

[14] 满晓磊,束一鸣,李少鹏,等. 管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(1):36-43. (MAN Xiaolei, SHU Yiming, LI Shaopeng, et al. Experimental study on scouring along seams between tubes of a punctured geotube dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 38(1):36-43. (in Chinese))

(下转第 65 页)

- (CEN Weijun. Advances in research of defects and leakage of (composite) geomembrane in earth-rock dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(1): 1-7. (in Chinese))
- [8] NOSKO V, TOUZE-FOLTZ N. Geomembrane liner failure; modeling of its influence on contaminant transfer [C]//Proceedings of the 2nd Eurogeo Geosynthetics Conference. Bologna:[s.n.], 2000: 557-560.
- [9] GIROUD J P. Design of geotextiles associated with geomembranes [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles. Las Vegas: NV, 1982: 37-42.
- [10] 岑威钧,和浩楠,温朗昇. 防渗土工膜的缺陷特性与缺陷渗漏研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017,45(1): 36-44. (CEN Weijun, HE Haonan, WEN Langsheng. Research progress on defect property and defect induced leakage of impermeable geomembrane[J]. Journal of Hohai University(Nature Science), 2017, 45(1): 36-44. (in Chinese))
- [11] GIROUD J P, BONAPARTE R. Leakage through liners constructed with geomembranes-part: I [J]. Geomembrane liners, Geotextiles and Geomembranes, 1989, 8(1): 27-67.
- [12] GIROUD J P, BONAPARTE R. Leakage through liners constructed with geomembranes-part: II [J]. Geomembrane liners, Geotextiles and Geomembranes, 1989, 8(2): 71-111.
- [13] GIROUD J P, KHIRI M V, MCKELVEY J A. Rate of leachate migration through a defect in a geomembrane underlain by a saturated permeable medium [J]. Geosynthetics International, 1997, 4(3/4):323-334.
- [14] ELOY-GIORNI C, PELTE T, PIERSON P. Water diffusion through geomembranes under hydraulic pressure [J]. Geosynthetics International, 1996, 3(6):741-769.
- [15] 岑威钧,和浩楠,李邓军. 土工膜缺陷对土石坝渗流特性的影响及控制措施[J]. 水利水电科技进展,2017,37(3): 61-65, 71. (CEN Weijun, HE Haonan, LI Dengjun. Influence of geomembrane defect on seepage property of earth-rock dams and measures of seepage control [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 61-65, 71. (in Chinese))
- [16] 岑威钧,王蒙,杨志祥. (复合)土工膜防渗土石坝饱和-非饱和渗流特性[J]. 水利水电科技进展, 2012,32(3): 6-9. (CEN Weijun, WANG Meng, YANG Zhixiang. Partial saturated seepage properties of (composite) geomembrane earth-rock dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 6-9. (in Chinese))
- [17] 介玉新,李广信. 有限元计算中土工合成材料渗流问题的处理[J]. 水利水电科技进展,2009,29(6):42-43, 62. (JIE Yuxin, LI Guangxin. FEM calculation of seepage through geosynthetics [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6): 42-43,62. (in Chinese))
- [18] 高康,兰吉武. 电学渗漏探测法用于垃圾填埋场防渗土工膜施工的破坏分析[J]. 环境卫生工程,2008,16(1):16-18. (GAO Kang, LAN Jiwu. Analysis about construction destruction of impervious geomembrane using electrical seepage measurement method in waste landfill sites[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2008,16(1):16-18. (in Chinese))

(收稿日期:2017-06-15 编辑:骆超)

(上接第 53 页)

- [15] 陆健辉,阮龙飞,王永庆. 长江口软土地基水库围堤的防渗体结构探讨[J]. 岩土工程学报,2016,38(增刊1): 195-202. (LU Jianhui, RUAN Longfei, WANG Yongqing. Impervious structure of reservoir embankment in soft soil foundation of Yangtze Estuary [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Sup1): 195-202. (in Chinese))
- [16] 张海龙,马斌,梁亚平. 充填袋装砂围堰防渗结构研究[J]. 陕西水利,2017(1):102-104. (ZHANG Hailong, MA Bin, LIANG Yaping. Study on anti-seepage structure of filled sand-bag cofferdam [J]. Shaanxi Water Resources,2017(1):102-104. (in Chinese))
- [17] MULLER L. 岩石力学[M]. 李世平,冯震海,译. 北京:煤炭工业出版社,1981:276-278.
- [18] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005:115-118.

(收稿日期:2017-05-24 编辑:熊水斌)

(上接第 25 页)

- [16] 吉飞,李志伟,赵汗青. 水动力作用下泥沙对磷的吸附特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(1): 56-62. (JI Fei, LI Zhiwei, ZHAO Hanqing. Characteristics of adsorption of phosphorus by sediment under hydrodynamic action [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(1):56-62. (in Chinese))
- [17] 肖洋,余维维,成浩科,等. 淮中游泥沙对磷吸附/解吸规律[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(4):307-312. (XIAO Yang, YU Weiwei, CHENG Haoke, et al. Phosphorus adsorption and desorption behavior of sediments in midstream of Huaihe River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(4): 307-312. (in Chinese))

(收稿日期:2017-06-06 编辑:熊水斌)