

高面膜堆石坝面膜局部顶破、刺破概率分析方法

——高面膜堆石坝关键技术(六)

姜晓桢^{1,2}, 束一鸣^{2,3}

- (1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024;
2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对堆石坝面膜与垫层颗粒间接触状态存在较大的随机性和无序性的问题,结合土工膜材料力学强度与抗顶破、刺破能力之间的关系,建立了一种简化条件下计算土工膜发生局部顶破、刺破概率的方法,并分析了垫层颗粒不同粒径、不同压力与土工膜局部顶破、刺破概率之间的关系,同时以某面膜防渗堆石坝为例,给出了在土工膜整体受力变形条件下堆石坝面膜防渗结构安全概率的分布情况。分析结果表明:压力越大、颗粒粒径越大,土工膜发生顶破、刺破的可能性越高,并且由于局部土工膜所受到的不平衡力的方向的不确定性,所以土工膜发生顶破、刺破的概率与颗粒粒径和压力具有明显的两段函数关系。

关键词:面膜堆石坝;面膜防渗;土工膜;顶破;刺破;垫层颗粒;接触力;概率分析

中图分类号:TV641.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)01-0037-05

Probability analysis of local bursting and piercing of geomembrane on high membrane faced rockfill dam; key technology of high membrane faced rockfill dam (VI)//JIANG Xiaozhen^{1,2}, SHU Yiming^{2,3} (1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For the randomness and disordered issues of the contact status of earth-rock dam geomembrane and granular cushion, combined with the relationship between the mechanical strength of geomembrane and ability to resist bursting and piercing, a calculation method of probability of bursting and piercing in local geomembrane under simplified conditions is established. Also, this paper analyzed the relation between different granular size and pressures of granular cushion and bursting and piercing probability of local geomembrane. Considering a certain earth-rock dam with impermeable membrane as an example, this paper provided probability distribution of the safety of impermeable membrane structure under overall geomembrane force-deformation condition. The results show that: the greater the pressure, the larger the particle size, the higher the possibility of bursting and piercing of geomembrane, and due to the uncertain imbalance force direction of the local geomembrane, the mentioned relationship presents two functions.

Key words: membrane faced rockfill dam (MFRD); impermeable membrane; geomembrane; burst; pierce; granular cushion; contact force; probability analysis

土工膜作为一种新型的堆石坝防渗材料,相较于混凝土、黏土等传统的防渗材料,其最大的优势在于能够适应较大变形^[1]。通常情况下土工膜这种柔性材料,一般需要与其他工程材料一起组成一定的防渗结构来发挥其防渗作用。目前堆石坝土工膜防渗主要以坝面面膜防渗为主,在面膜防渗结构中,膜下垫层的设计和选材较为关键。垫层除了对土工

膜起到传递水压力荷载的作用外,还必须具有良好的渗透性,以便能在库水位降落时能够及时有效地排水,提高防渗结构的稳定性。颗粒体材料或颗粒体聚合物由于孔隙大、渗透性好、抗压强度大等特点非常适合作为堆石坝面膜防渗结构的垫层^[2],但是由于颗粒体材料或颗粒体聚合物表面凹凸不平,在水压力作用下,土工膜会顺着垫层中某些突出颗粒

或颗粒间隙发生局部的变形,当水压力过大或垫层表面较粗糙(局部凹凸度较大)时,土工膜就容易在颗粒间隙内发生水力顶破或被突出颗粒刺破,从而导致防渗结构部分甚至全部失去防渗功能。

围绕土工膜在工程应用中所存在的局部顶破和刺破的破坏形式,美国德雷塞尔大学的土工合成材料研究机构利用3个等间距布置的锥形体来模拟垫层颗粒对土工膜的顶破、刺破作用,通过对膜上施加不同的水压力来确定土工膜的抗顶破、刺破的能力^[3]。不同的研究者利用上述的试验装置分别进行了不同的试验研究,基于这些试验的数据,提出了不少土工膜抗顶破、刺破的设计方法^[4-9],但由于模拟的锥形体的尺寸、间距等是人为设定,具有一定的主观性,无法真实有效地模拟实际工程中随机堆积的散粒体对土工膜顶破、刺破的影响,所以结论并不具备普适性^[10]。Brachman等^[11-13]采用真实的颗粒体(粗粒料)作为垫层进行试验,通过膜下的塑性垫层(类似橡皮泥材料)记录了土工膜表面起伏的变形情况,初步对颗粒形状、大小以及接触点间距进行了详细记录和定性描述,对土工膜产生的压痕和应变进行了定性观测。Hornsey等^[14]采用更为先进的激光扫描装置将Brachman等试验中的土工膜起伏变形结果进行更精确的数字化处理,得出的土工膜应变也更精确和可靠。上述两种采用真实颗粒垫层的试验,虽然都得出土工膜在真实工程中的变形情况,但都只是做了一些简单定性的分析,未能从试验结果中进一步给出定量的分析方法来预测土工膜在垫层颗粒上发生顶破、刺破的可能性。目前国内在土石坝面膜防渗结构的设计中,对于土工膜顶破、刺破的分析最早可追溯到1985年,顾淦臣根据承压土工膜受力平衡原理和几何边界条件推导出薄膜理论公式,并根据土工膜垫层孔隙不同形状和尺寸给出特定水头下土工膜厚度计算方法^[15]。这种方法与20世纪七八十年代前苏联提出的经验公式以及1982年Giroud提出的铺在窄缝上的膜变形近似公式是目前国内工程界在工程设计中最常用的方法,但这3种方法各有各的应用范围,而且对同一个问题往往会得出差距较大的不同结论^[16-18],最重要的是这3种方法均对颗粒垫层中的颗粒形状或者颗粒间空隙的形状进行了假定,其实质上也是一种确定性的分析,对于可能出现的其他非假定情况,只能通过添加安全系数的方法来考虑,并且安全系数的取值只能通过类似工程的经验来确定,没有统一的科学标准。本文通过分析土工膜与垫层颗粒间接触状态的随机性,提出一种计算土工膜局部顶破、刺破概率的方法,并结合堆石坝面膜防渗结构的整体受力

变形特性,给出一种定量分析堆石坝面膜防渗结构可靠性的方法。

1 土工膜与垫层颗粒接触的特点分析

图1为土工膜与垫层散粒体颗粒接触的3种情形,散粒体颗粒均为圆形颗粒,在实际情况下,散粒体颗粒的形状往往并不都是圆形,本文为了分析和说明方便做了一定的简化处理。从图1可以观察到,无论颗粒是紧密排列还是松散排列,只要是按一定规则进行堆积和排布,其与土工膜的接触点间距都是一样的。当颗粒紧密排列时,由于单位面积上分担压力 W 的接触点较多,所以每个接触点上的接触力必然小;当颗粒排列较松散时,单位面积上分担压力的接触点变少,所以每个接触点上的接触力也变大;而且只要颗粒是规则排列的,当压力一定时,土工膜与散粒体颗粒间的接触力就是唯一确定的量。当颗粒排列不规则时,由于接触点的分布变得不均匀,有的区域接触点较多,接触力自然就小,而有的区域接触点少,接触力就较大。因此当颗粒排列不规则时,土工膜与散粒体颗粒之间的接触力就不再是唯一确定的量,而是变成了1个不确定的随机变量。既然土工膜与散粒体颗粒之间的接触力是1个随机变量,则分析问题的方法就不能采用传统的确定性问题的分析方法,而是应该采用不确定性问题的分析方法来看待问题。

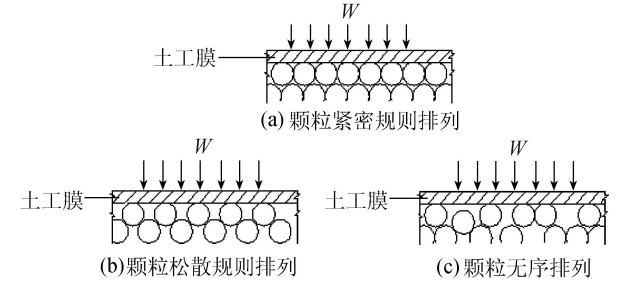


图1 土工膜与垫层颗粒接触特点示意图

根据上述土工膜与垫层颗粒之间接触特点的分析可知,土工膜与散粒体颗粒之间的接触力是1个随机变量。一般来说对于某个随机变量,都有1个概率密度函数与之相对应,通过概率密度函数,可以确定该随机变量中某个值或者某个区间的值出现的概率,从而使得该随机变量的性质和特点得以比较清晰的确认和界定。Jiang等^[19]通过最大熵原理对土工膜与垫层颗粒之间的接触力大小分布的概率密度函数进行了推导,得出了在不同上覆压力下均一圆球颗粒随机排列堆积时土工膜与垫层颗粒接触点上接触力应该满足如下的分布规律:

$$P(f_c) = \frac{N_c}{W} e^{-\frac{N_c}{W} f_c} \quad (1)$$

其中
$$N_c = \frac{1 - v_{2d}}{\pi R^2} \quad (2)$$

式中: $P(f_c)$ 为土工膜与垫层颗粒之间接触力大小分布的概率密度函数; W 为膜上压力; f_c 为接触力大小; N_c 为单位面积上接触点个数; v_{2d} 为垫层颗粒体二维孔隙率; R 为圆球颗粒半径。由于一般情况下散粒体孔隙率都是对于三维空间来说的体积孔隙率,所以在二维和三维孔隙率之间需要进行一定的转换。2007 年 张刚^[20] 借鉴砂土密实度的概念提出了孔隙率在三维和二维情况下的转化公式:

$$v_{2d} = 1 - \left(\frac{1 - v_{3d}}{\xi} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

其中
$$\xi = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi\sqrt{3}}} + D_r \left(\frac{2}{\sqrt{\pi\sqrt{3}}} - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi\sqrt{3}}} \right) \approx 0.606 + 0.251 D_r \quad (4)$$

式中: v_{3d} 为垫层颗粒体三维孔隙率; D_r 为密实度。

2 土工膜局部顶破、刺破的概率计算

由前文分析可知,在一个较大的范围内整体的接触力合力一定是与土工膜所受的压力平衡的,但是由于接触力大小具有随机性,在土工膜局部某一个部位的接触力不一定与压力平衡,从而在垂直受压面的方向上使得土工膜产生变形(挠度),同时在土工膜内产生张力使该接触点重新达到力平衡状态。当这个不平衡力过大,造成的张力超过土工膜本身的强度时,就会发生土工膜局部的顶破、刺破现象,所以只要能够确定接触力大小的概率分布情况,也就能对不同压力下土工膜局部顶破、刺破的发生概率进行计算。

Giroud 等^[21] 分析了土工膜顶破、刺破类室内试验(主要是 CBR 试验和刺破试验)中顶杆和土工膜的理论受力和试验结果,认为土工膜抗顶破、刺破能力是由土工膜自身性质所决定的,并可通过以下公式计算得出:

$$F_{pr} = \pi R \sigma_y t_{GM} Z^2 \quad (5)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\arcsin Z}{Z} - 1 \quad (6)$$

式中: F_{pr} 为土工膜的抗顶破、刺破强度; ε_y 为土工膜屈服应变; t_{GM} 为土工膜的厚度; σ_y 为土工膜的屈服应力; Z 为与 ε_y 有关的函数值。

根据土工膜接触点处的受力分析可得接触点处土工膜所受的合力 F_p :

$$F_p = |\pi R^2 W - f_c| \quad (7)$$

当接触点合力小于土工膜抗顶破、刺破强度时,土工膜就是安全的,由此可得如下表达式:

$$|\pi R^2 W - f_c| \leq \pi R \sigma_y t_{GM} Z^2 \quad (8)$$

结合式(5)~(8)可知,对于某种特定的土工膜,其屈服应力、屈服应变以及厚度已知,并且在土工膜所受压力以及散粒体颗粒粒径已知的条件下就能对式(8)进行求解,得出接触力的安全区间 Ω ,继而对接触力大小的概率密度函数在区间 Ω 上进行积分,从而得出土工膜顶破、刺破的概率 P_p ,具体数学表达式如下:

$$P_p = 1 - \int_{\Omega} P(f_c) df_c = 1 - \int_{\Omega} \frac{N_c}{W} e^{-\frac{N_c}{W} f_c} df_c \quad (9)$$

由于式(8)中含有绝对值符号,所以实际的接触力安全区间可能是非连续的,即有可能是若干段区间,所以无法给出安全区间的显式解析解,但是其数值解可以通过代入具体的参数值求解,所以本文在此处代入参数: $\sigma_y = 14.75 \text{ MPa}$, $t_{GM} = 1.5 \text{ mm}$, $\varepsilon_y = 12\%$, $Z = 0.728$,对均一圆球颗粒条件下土工膜在不同压力 and 不同颗粒半径下局部的顶破、刺破概率进行了数值求解,并对压力与颗粒半径这两个参数对顶破、刺破概率的敏感性进行了分析,数值求解的结果如图 2~4 所示。

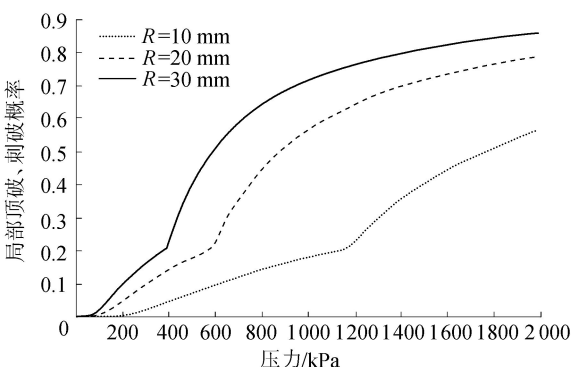


图 2 土工膜局部顶破、刺破概率与土工膜所受压力之间的关系

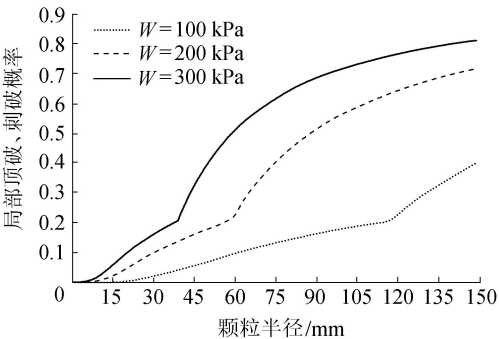


图 3 土工膜局部顶破、刺破概率与散粒体颗粒半径之间的关系

从图 2 可以发现土工膜局部顶破、刺破的概率随着压力增大而增大,并且颗粒越大,其顶破、刺破的概率也相对越大,同时可以发现,每条关系曲线上都存在一个拐点,拐点前后的曲线斜率有明显的不同。

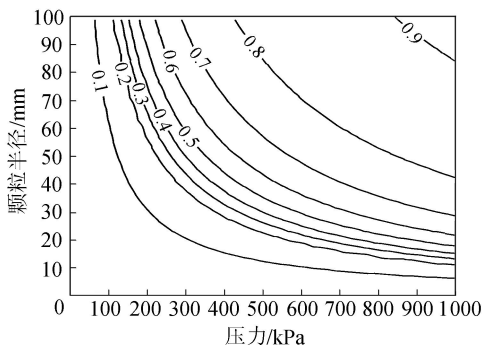


图4 土工膜局部顶破、刺破概率等值线

同,当压力位于拐点之前时,土工膜局部顶破、刺破的概率增长较慢,而当压力超过拐点时,概率增长就很快。图3 土工膜局部顶破、刺破概率随着膜下散粒体颗粒半径的增大而增大,而且压力越大的情况下,其顶破、刺破的概率也相对越高。与图2 相同的是,在3 条曲线中同样存在拐点,而且拐点前后的曲线斜率存在着明显差异。同时可将颗粒半径与土工膜所受压力作为平面上的两个轴,从而绘制出土工膜局部顶破、刺破概率与颗粒半径和土工膜所受压力两者之间关系的等值线图。从图4 可以看出颗粒半径越大,土工膜所受压力越高,那么土工膜局部顶破、刺破的概率就越大,这也符合人们对土工膜局部顶破、刺破规律的一般认识。根据等值线图的疏密程度,可以发现概率上升梯度在顶破、刺破概率等于0.2 ~ 0.4 的几条等值线附近较大,而其他区域则较小。联系图2 与图3 曲线的特点,可以判断等值线较密处,也就是图2 和图3 拐点所在的位置。分析这种现象的原因,可以概括如下:由于式(8)中存在绝对值符号,所以接触力的安全区间可能不是连续的,而是由几段区间组成,反映到图2 和图3 曲线或曲面就会存在拐点和由拐点连接而成的折线,同时也说明拐点前后或者折线两侧的区域,土工膜在接触点处的受力状态有比较大的差异。

3 堆石坝面膜的安全概率分布

堆石坝面膜除了由于防渗结构变形过大引起的整体拉伸破坏外,局部顶破、刺破的破坏也是比较常见的,过去的分析方法往往是将两者割裂开来,而且一般数值分析方法也只能针对土工膜整体拉伸破坏来分析,没有进一步在整体应力应变计算结果上考虑局部的顶破、顶破的破坏形式。

根据式(8)所定义的土工膜受力安全区间,在叠加至堆石坝面膜的安全分析中时,还必须考虑土工膜已经承受的整体变形应力状态,可得出如下的表达式:

$$|\pi R^2 W - f_c| \leq \pi R \sigma_{ybl} t_{GM} Z^2 \quad (10)$$

式(9)与式(8)中最大的区别为原来的土工膜拉伸屈服强度 σ_y 变成了双向拉伸应力条件下土工膜拉伸屈服强度的富余值 σ_{ybl} ,其代表了原有的土工膜的拉伸屈服强度减去土工膜已有的整体变形所产生的拉伸应力后,还剩余的一部分屈服强度值。

根据式(10)可以在堆石坝面膜整体应力变形分析的基础上,对土工膜进行局部顶破、刺破分析,得出在面膜整体受力变形条件下的土工膜的安全概率分布,为了说明和分析问题方便,本文在一个已完成的堆石坝面膜整体受力变形计算结果的基础上,分别对垫层颗粒半径为2.5 mm、5 mm 和10 mm 的3 种情况进行分析,得出土工膜在坝面上的安全概率分布情况如图5 所示。由图5 可知,土工膜的安全概率基本随着坝体高程的升高而升高,坝体底部由于水压力较大,而且底部的土工膜整体应力也较大,所以此处的土工膜更容易发生破坏。同时也可以发现,由于坝基与岸坡交汇处的土工膜整体应力较其他处要高,所以土工膜的安全系数等值线均在这些地方发生了一定的升高和偏转。堆石坝面膜的安全概率还与所采用垫层颗粒有关,从图5 可以发现,当采用的垫层颗粒粒径越小,土工膜也就越安全,其中当颗粒半径为2.5 mm 时,整个坝面的土工膜安全概率不小于0.82;而颗粒半径为10 mm 时,坝面底部的土工膜安全概率已经不到0.25 了,这意味着坝体底部的土工膜极易发生破坏,而且由于此处水头较大,土工膜一旦发生破坏,很有可能会带来渗透变形等不利因素,所以需要在此处对土工膜采取一定的措施,以提高其安全概率,其中最简单有效的办法是减小坝体底部垫层颗粒的粒径,同时在坝体底部铺设较厚

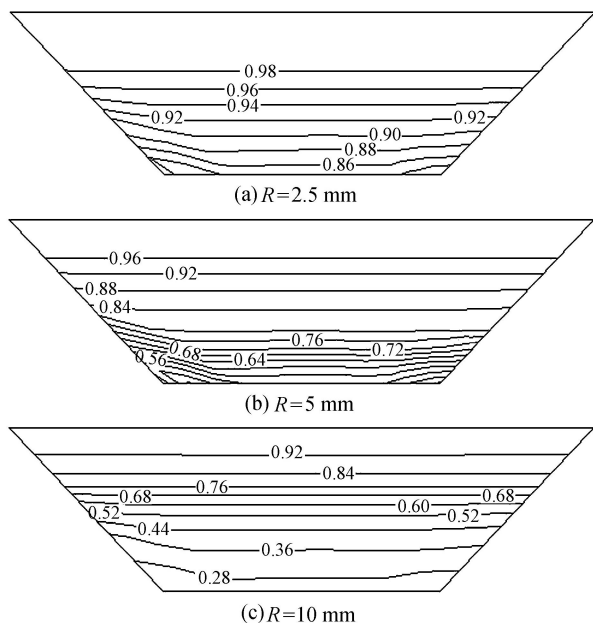


图5 堆石坝面膜蓄水末期安全概率分布等值线

的土工膜。

4 结 论

a. 对于同一种土工膜,其下垫层颗粒的粒径越大,其上所受的压力越大,土工膜发生顶破、刺破的可能性也就越高,由于局部土工膜所受到的不平衡力的方向可以是垂直膜面向坝体内部,也可以是垂直膜面向坝体外部,所以土工膜发生顶破、刺破的概率与颗粒粒径和压力均呈现出明显的两段函数关系。

b. 面膜安全概率的等值线基本与坝面上的水位高程线平行,即水压力越大,土工膜的安全概率越低,同时在靠近坝面底部与岸坡相连处,由于该处的土工膜所受应力较大,其安全概率也较同一高程处的坝面中心部分要低。

参考文献:

[1] 速宝玉,张祝添.土工膜作为防渗体的设计考虑[J]. 河海科技进展,1991(4):52-60. (SU Baoyu, ZHANG Zhutian. Design consideration of geomembranes as waterproof material [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1991(4):52-60. (in Chinese))

[2] 滕兆明,束一鸣,吴海民等.无沙混凝土垫层配合比及力学性能试验研究[J]. 人民黄河,2012,34(10):139-141. (TENG zhaoming, SHU yiming, WU haimin, et al. Study of test on mixed proportions design and mechanical properties of no fines concrete cushion layer [J]. Yellow River, 2012, 34(10):139-141. (in Chinese))

[3] MULLER W. HDPE geomembranes in geotechnics [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2007:1400-1402.

[4] WILSON F R F, NAREJO D, KOERNER R M. Puncture protection of geomembrane: part I. theory [J]. Geosynthetics International, 1996, 3(4):605-628.

[5] NAREJO D, KOERNER R M, WILSON F R F. Puncture protection of geomembranes: part II. experimental [J]. Geosynthetics International, 1996, 3(4):629-653.

[6] KOERNER R M, WILSON F R F, NAREJO D. Puncture protection of geomembranes: part III. examples [J]. Geosynthetics International, 1996, 3(4):655-675.

[7] KOERNER R M, HSUAN Y G, KOERNER G R, et al. Ten year creep puncture study of HDPE geomembrane protected by needle-punched nonwoven geotextiles [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(10):503-513.

[8] NAREJO D B. A comparison of puncture behavior of smooth and textured HDPE geomembranes [J]. Geosynthetics International, 1995, 2(3):699-706.

[9] STARK T D, BOERMAN T R, CONNOR C J. Puncture resistance of PVC geomembranes using the truncated cone

test [J]. Geosynthetics International, 2008, 15(16):480-486.

[10] ALYSSA K, MICHAEL H. Evaluation of geomembrane puncture potential and hydraulic performance in mining applications [C]//Proceedings of the 12th International Conference on Tailings and Mine Waste. Orlando, USA: InfoMine, 2008:189-198.

[11] BRACHMAN R W I, GUDINA S. Gravel contacts and geomembrane strains for a GM/CCL composite liner [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(8):448-459.

[12] BRACHMAN R W I, GUDINA S. Geomembrane strains from coarse gravel and wrinkles in a GM/GCL composite liner [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(8):488-497.

[13] BRACHMAN R W I, SABIR A. Geomembrane puncture and strains from stones in an underlying clay layer [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(5):335-343.

[14] HORNSEY W P, WISHAW D M. Development of a methodology for the evaluation of geomembrane strain and relative performance of cushion geotextiles [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, 35(8):87-99.

[15] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 土工合成材料工程应用手册 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.

[16] 沈长松, 顾淦臣. 复合土工膜厚度计算方法研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(4):395-398. (SHEN Changsong, GU Ganchen. Calculation method for thickness of composite geomembrane [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32(4):395-398. (in Chinese))

[17] 李星, 沈长松. 阿克兰干水库复合土工膜厚度计算理论研究 [J]. 四川水利, 2002, 23(6):25-28. (LI Xing, SHEN Changsong. Theory research of composite-geomembrance design in Akelangan Reservoir [J]. Sichuan Water Conservancy, 2002, 23(6):25-28. (in Chinese))

[18] 盛芳芳, 俞佩斯, 管玲玉, 等. 复合土工膜厚度计算方法的应用比较分析 [J]. 水电能源科学, 2009, 27(4):145-147. (SHEN Fangfang, YU Peisi, GUAN Lingyu, et al. Application and comparison analysis of calculating methods of composite geomembrane thickness [J]. Water Resources and Power, 2009, 27(4):145-147. (in Chinese))

[19] JIANG Xiaozhen, SHU Yiming. Probabilistic analysis of random contact force between geomembrane and granular material [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(8):3309-3315.

[20] 张刚. 管涌现象微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.

[21] GIROUD J P, BADU T K, SODERMAN K L. Theoretical analysis of geomembrane puncture [J]. Geosynthetics International, 1995, 2(3):1019-1048.

(收稿日期:2014-10-29 编辑:周红梅)