

文章编号:1007-2284(2021)07-0146-05

岩溶地区水库库盆及库岸防渗复合土工膜应力应变分析

杨 洋¹, 刘 辉², 黄诗渊^{2,3}, 李玉桥²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122; 2. 重庆交通大学 重庆市高校水工建筑物健康诊断技术与设备工程研究中心, 重庆 400074; 3. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074)

摘要:为探讨复合土工膜在水库防渗应用中的应力应变特性,以位于岩溶地区的白沙塘水库采用复合土工膜进行库盆及库岸防渗处理为例,采用有限元软件MIDAS GTS NX对复合土工膜的应力和应变进行了计算分析。结果表明:复合土工膜与水库剖面的变形规律一致,其最大变形量略小于水库剖面的最大变形量;在库水位和地下水位变动作用下,库岸土体会向库盆发生横向变形;水库蓄水达到校核水位,地下水下降至基岩面时为最危险工况,水库剖面及复合土工膜的最大下沉变形分别为30.83和29.67 cm,最大横向变形分别为9.92和8.58 cm,拉力安全系数及拉应变安全系数均小于允许安全系数5.0。

关键词:复合土工膜;有限元软件;应力应变特性;安全系数

中图分类号:TV62 **文献标识码:**A

杨 洋, 刘 辉, 黄诗渊, 等. 岩溶地区水库库盆及库岸防渗复合土工膜应力应变分析[J]. 中国农村水利水电, 2021(7):146-150.

YANG Y, LIU H, HUANG S Y, et al. Stress-strain analysis of anti-seepage composite geomembrane of reservoir basin and reservoir bank in karst areas[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(7):146-150.

Stress-strain Analysis of Anti-seepage Composite Geomembrane of Reservoir Basin and Reservoir Bank in Karst Areas

YANG Yang¹, LIU Hui², HUANG Shi-yuan^{2,3}, LI Yu-qiao²

(1. Huadong Engineering Corporation Limited, China Power Engineering Consulting Group Corporation, Hangzhou 311122, China;

2. Engineering Research Center of Diagnosis Technology and Instruments of Hydro-Construction, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to explore the stress-strain characteristics of composite geomembrane in the application of reservoir seepage control, the Baishatang Reservoir in karst areas uses composite geomembrane for reservoir basin and bank seepage control as an example, the finite element software MIDAS GTS NX is used to calculate and analyze the stress and strain of the composite geomembrane. The results show that the deformation law of the composite geomembrane is consistent with that of the reservoir profile, and its maximum deformation is slightly smaller than the maximum deformation of the reservoir profile. Under the action of changes in the reservoir water level and groundwater level, the soil on the reservoir bank will deform laterally toward the reservoir basin. Reservoir storage reaches the check level, and when the underground water drops to the bedrock surface, it is the most dangerous working condition. The maximum sinking deformation of the reservoir profile and composite geomembrane are 30.83 and 29.67 cm, and the maximum lateral deformation is 9.92 and 8.58 cm, respectively. The tensile safety

收稿日期:2020-11-18

基金项目:重庆市技术创新与应用示范(社会民生类)一般项目(cstc2018jscx-msybX0328);重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjA1642)。

作者简介:杨 洋(1982-),男,高级工程师,博士,从事水环境工程

及水利工程方面的研究工作。E-mail:25742857@qq.com。

通讯作者:黄诗渊(1991-),男,博士后,主要从事岩土材料工程特性方面的研究工作。E-mail:419485188@qq.com。

factor and tensile strain safety factor are both less than the allowable safety factor 5.0.

Key words: composite geomembrane; finite element software; stress-strain characteristics; safety factor

我国是一个多岩溶地区国家,尤其是西南地区,其岩溶面积约占全国岩溶总面积 15.97%^[1]。由于岩溶地区溶沟、溶槽、落水洞等溶蚀现象十分发育,工程地质条件较差,在该地区修建水库主要面临水库渗漏问题^[2,3]。随着水利工程的快速发展,水库的数量在与日俱增,而地质良好的土地资源有限,因此,部分水库不得不修建在岩溶较为发育的地区。即使是在岩溶十分发育的地区,只要做好地质勘察工作及处理措施等工作,在岩溶地区修建水库还是可行的^[4]。复合土工膜作为一种新型防渗材料,相比于传统防渗材料(沥青混凝土和黏土等)更能适应地基的不均匀沉降变形和更优良的防渗性能,并且具有良好的抗拉能力、使用成本低、容易施工等优点,目前在水利工程中广泛应用于土石坝防渗和水库防渗等工程中^[5-7]。

水库采用复合土工膜进行防渗处理,阻断了库水对地下水的补给作用,导致地下水位下降。蓄水后,在库水压力及地下水水位变动作用下,库盆及库岸地基土体会发生一定的下沉变形,使得复合土工膜存在下沉变形以及与之相关的横向拉伸变形。若变形量不大,复合土工膜能够适应,对水库安全没有影响,但是,若变形量过大,可能导致复合土工膜局部应力变形过大或受力过大而出现损坏,进而影响水库安全。因此,对复合土工膜的应力应变特性进行研究对实际工程的安全性具有重要意义。姜海波^[8]采用邓肯张 E-B 模型,对正常高水位情况下土石坝防渗复合土工膜的应力应变特性进行了计算分析,指出复合土工膜对土石坝的应力变形有一定的改善作用。黄举^[9]等对堆石坝防渗复合土工膜应力应变特性进行了计算分析,指出采用复合土工膜进行防渗处理后的坝体应力变形要比不处理的小。文献^[10]通过对四氟乙烯无纺布基材(ETFE)膜分别在

不同温度条件和拉伸速率条件下进行下拉伸试验,证明了温度对 ETFE 膜的应力和应变的影响大于拉伸速率。文献^[11,12]对土工膜进行不同类型的拉伸试验研究,并在试验基础上推导了土工膜的应力-应变方程。

综上所述可知,关于复合土工膜应力应变特性的研究,主要是有两类途径,即试验研究和有限元计算分析两类。鉴于此,本文采用有限元分析软件 MIDAS GTS NX,以白沙塘水库采用复合土工膜进行库盆及库岸防渗处理为工程实例,对复合土工膜的应力和应变进行计算分析,从而确定复合土工膜在工程应用中是否具有足够的安全性。

1 工程概况

白沙塘水库是在建的“重庆市黔江区三塘盖三塘工程”涉及到的 3 个水库工程之一,该水库坝址控制流域面积为 4.32 km²,河长 2.6 km,河道平均比降 13.919‰。水库正常蓄水位为 1 399.5 m,设计洪水位为 1 400.53 m,校核洪水位为 1 400.75 m,总库容为 22.6 万 m³。白沙塘水库建设内容由蓄水区主坝、副坝、泄水建筑物、放空建筑物、护岸防渗建筑物及泄洪隧洞扩建组成。

库区位于岩溶地层中,其地层岩性主要为第四系人工堆积(Q4s)杂填土、残坡积(Q4eld)黏土夹碎石、第四系冲积(Q4al)卵砾石、二叠系下统栖霞组(P1q)灰岩,局部夹少量页岩。根据物探成果与钻探成果得知库盆底部溶蚀现象十分发育,存在库首及库底渗漏问题。为解决这一问题,工程决定采用复合土工膜对库岸和库盆进行防渗处理,其防渗结构体自下而上主要由支持层、下垫层、复合土工膜及保护层等四层组成,如图 1 所示。

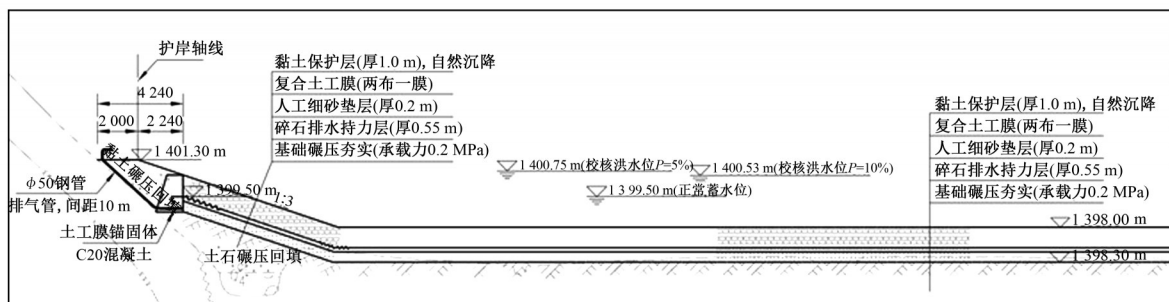


图 1 复合土工膜防渗布置图(单位:mm)

Fig.1 Layout plan of composite geomembrane seepage prevention

其中,复合土工膜由山东联拓新材料有限公司生产,单位面积质量为 1 000 g/m²,膜厚为 0.5 mm,主要力学指标如表 1 所示,表中指标可参照 GB/T 17642-2008《土工合成材料 非织造布复合土工膜》规范。由表 1 可知,实际检测值均在规范要求范围内,说明工程所用复合土工膜的力学性质满足规范要求。

2 有限元计算分析

2.1 模拟方法

(1)岩土体材料本构模型。水库库盆及库岸土体均为非线

性材料,其应力-应变关系与应力的状态、路径等相关,且呈非线性。莫尔-库伦材料模型适用于一般岩土体的非线性分析,通常能够得到满足一般工程要求的结果。因此,本文采用莫尔-库伦材料模型来模拟库盆及库岸土体的非线性。

(2)复合土工膜模拟方法。复合土工膜作为柔性材料,具有抗拉而不抗压的特点,可采用线弹性本构模型^[13],并用 1D 土工格栅单元对复合土工膜进行模拟(土工格栅单元特性表现为仅受拉)。此外,考虑到复合土工膜与上下接触土体材料属性有所差异,在分析过程中设置界面接触单元用以模拟实际工程

表1 复合土工膜主要力学指标

Tab.1 Main mechanical indexes of composite geomembrane

测试项目	方向	指标	实际检测值
断裂强度/(kN·m ⁻¹)	纵向	≥20.0	33.0
	横向	≥20.0	28.7
断裂伸长率/%	纵向	30~100	47.9
	横向	30~100	43.2
梯形撕裂强度/(kN·m ⁻¹)	纵向	≥0.7	1.029
	横向	≥0.7	0.927
CBR 顶破强度/(kN·m ⁻¹)	-	≥3.2	4.071

情况。

复合土工膜的拉力安全系数 F_s 及拉应变安全系数 F_ε 可由下式得到:

$$\begin{cases} F_s = \frac{T_{max}}{T} \\ F_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon} \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_{max} 为复合土工膜的极限单宽拉力; T 为复合土工膜的单宽工作拉力; ε_{max} 为复合土工膜的极限拉应变; ε 为复合土工膜的工作拉应变。

为保证复合土工膜在使用中不被损坏,安全系数 F_s 及 F_ε 应远大于 1, 根据 SL/T225《水利水电工程土工合成材料应用技术规范》指出许可抗拉强度 T_a 可由下式计算得到:

$$T_a = \frac{1}{F_{id}F_{cr}F_{cd}F_{bd}} \quad (2)$$

式中: F_{id} 为考虑施工破坏影响系数; F_{cr} 为考虑材料蠕变影响系

数; F_{cd} 为化学破坏影响系数; F_{bd} 为考虑生物破坏影响系数。文献[14]指出,土工合成材料的应力水平限制在 20% 以下时,其使用寿命能够达到 100 年以上。因此,本文选取的允许安全系数 $F=5.0$ 。

2.2 模型网格及荷载施加

由于白沙塘水库库盆 3-3 剖面的覆盖层分布最不均匀,且覆盖层深度最大,因此,本文将 3-3 剖面作为有限元分析的典型剖面,并采用有限元分析软件 MIDAS GTS NX 对其进行网格划分,其中,库盆及库岸土体材料区域 2D 网格对模型实体单元进行划分,复合土工膜采用 1D 网格进行划分,复合土工膜与黏土层和细砂层接触面可通过“分别注册界面网格组”选项,独立生成各方向的界面单元,模型共有 7 112 个节点,7 206 个单元,如图 2 所示。根据工程实际,对剖面左右两方向约束,对剖面底部进行 x 、 y 方向约束,复合土工膜两端进行刚性约束(x 、 y 、 z 方向)。

模型中水荷载主要作用于黏土层,由于存在岸坡,因此需要建立水荷载与深度的关系,采用软件中的空间函数,根据岸坡坡面的高程建立水荷载与深度的分布关系。随后,采用所建立的空间函数关系,对模型中黏土层施加压力荷载,施加水荷载后,还需考虑水位上升对黏土层的影响,此时黏土层容重应从天然容重改变为浮容重,强度参数和变形参数应从天然状态变为饱和状态,采用“改变属性”命令对黏土层参数进行转换。地下水位下降会引起复合土工膜下部局部土体的有效应力增加,将产生一定的变形,因此,需采用“改变属性”命令对基岩面和复合土工膜之间的岩土体参数进行转换。

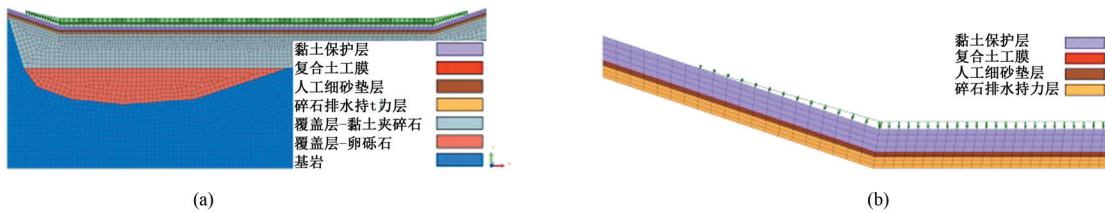


图2 白沙塘水库 3-3 剖面简化模型网格划分及荷载施加

Fig.2 Grid division and load application of simplified model of 3-3 section of Baishatang Reservoir

2.3 材料参数

各类岩土体材料参数如表 2 所示,表 2 中,参数 γ 、 E 、 μ 、 c 和 φ 分别表示材料的容重、弹性模量、泊松比、黏聚力及内摩擦角。

表2 库盆岩土体材料参数(天然/饱和)

Tab.2 Material parameters of reservoir basin rock and soil (natural/saturated)

材料	γ / (kN·m ⁻³)	E / kPa	μ	c / kPa	φ / (°)
黏土层	16.0/16.6	2 500/1 750	0.30	10/9	5/4
细砂层	18.0/18.4	6 000/4 200	0.28	0/0	22.0/17.6
碎石层	18/18.3	16 000/11 200	0.28	0/0	28.0/22.4
黏土夹碎石	16.1/17.0	2 500/1 750	0.30	10/9	5/4
卵砾石	16.1/17.0	18 000/126 000	0.27	0/0	30/28
基岩	18.5/19.0	1 900 000/1 330 000	0.31	350/180	27/26

2.4 分析工况

水库在运行过程中,主要面临以下几种情况,即:工况 1-1 时,水库蓄水达到正常水位,地下水位无变化时引起复合土工膜下沉变形;工况 1-2 时,水库蓄水达到校核水位,地下水位无变化时引起复合土工膜下沉变形;工况 2-1 时,水库蓄水达到正常水位,地下水位下降至 1/2 覆盖层厚度时引起复合土工膜下沉变形;工况 2-2 时,水库蓄水达到正常水位,地下水位下降至基岩面时引起复合土工膜下沉变形;工况 3-1 时,地下水位下降至 1/2 覆盖层厚度时引起复合土工膜下沉变形;工况 3-2 时,水库蓄水达到校核水位,地下水位下降至基岩面时引起复合土工膜下沉变形。

3 计算结果及分析

由于计算工况较多,所有工况计算结果云图较为相似,因此,本文仅给出工况 3-1 的计算结果云图。结果中变形以竖直

向上为正,向下为负,横向变形以水平向右为正,向左为负。

3.1 水库剖面及复合土工膜变形分析

图3为工况3-1条件下,白沙塘水库3-3剖面及复合土工膜的变形结果云图。由图3(a)和3(c)可知,3-3剖面及复合土工膜最大下沉变形均发生在覆盖层最深处,其值分别为28.25和

27.12 cm。由图3(b)和3(d)可知,3-3剖面及复合土工膜最大横向变形均发生在左岸处,其值分别为9.25和8.00 cm。由图3(a)和3(b)可知,库盆地基土体下沉变形大于库岸土体下沉变形,在库盆地基土体和库岸土体下沉变形的同时库岸土体会向库盆发生横向变形,符合复合土工膜在库盆及库岸防渗中的一般变形规律^[15]。

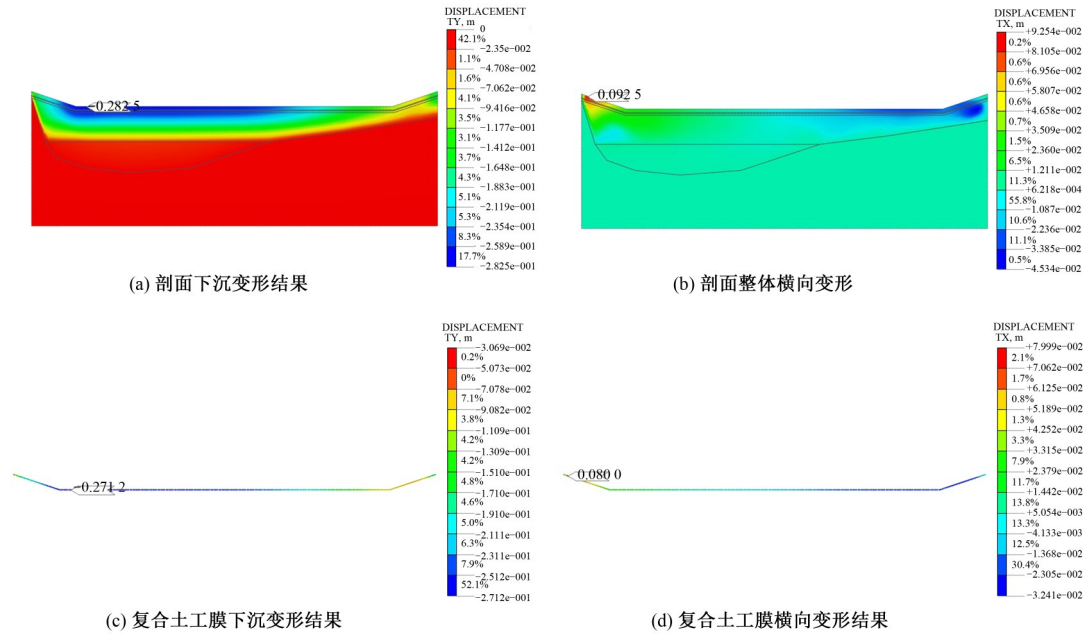


图3 白沙塘水库3-3剖面及复合土工膜变形结果

Fig.3 Section 3-3 of Baishatang Reservoir and deformation results of composite geomembrane

3.2 复合土工膜应力应变分析

图4为复合土工膜应力-应变计算结果云图,由图4可知,

复合土工膜两端均处于拉伸状态,并在白沙塘水库3-3剖面左岸端部处有最大单宽拉力和拉应变,其值分别为6.38 kN/m和13.29%。

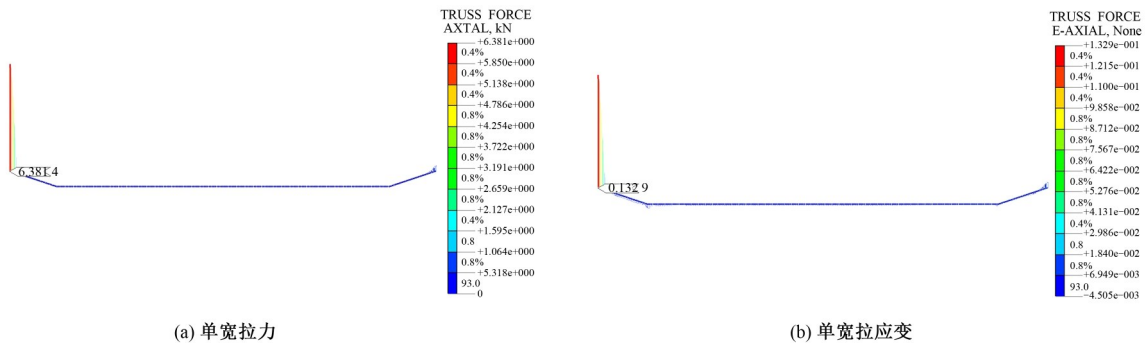


图4 复合土工膜应力和应变计算结果

Fig.4 Calculation results of stress and strain of composite geomembrane

将所有工况的计算结果汇于表3中,由表可知,在工况3-2条件下,复合土工膜的应力和应变有最大值,该工况即为白沙塘水库运行时的最危险工况(水库蓄水达到校核水位,地下水下降至基岩面)。该工况下,水库剖面及复合的最大下沉变形分别为30.83和29.67 cm,最大横向变形分别为9.92和8.58 cm,复合土工膜最大单宽拉力为6.86 kN/m,最大单宽拉应变为14.30%。

3.3 复合土工膜安全系数

根据表1实际检测值中复合土工膜的各类力学指标,取复

合土工膜横向断裂强度和横向断裂伸长率的检测值28.7 kN/m和43.2%,通过式(1)计算得到拉力安全系数 $F_s=28.7/6.86=4.18$,拉应变安全系数 $F_e=43.2/14.3=3.02$,均小于允许安全系数5.0,由此可知,白沙塘水库所用复合土工膜其安全系数不能满足要求。

4 结论

(1)复合土工膜与水库剖面变形规律一致,其变形量略小于水库剖面的变形量,因此,在缺乏界面参数资料时,可直接计

表3 白沙塘水库3-3剖面下沉变形计算结果

Tab.3 Calculation results of subsidence and deformation of section 3-3 of Baishatang Reservoir

类别	工况 1-1	工况 1-2	工况 2-1	工况 2-2	工况 3-1	工况 3-2
水库剖面最大下沉变形/cm	10.15	16.95	21.80	24.34	28.25	30.83
水库剖面最大横向变形/cm	3.34	3.84	7.89	8.44	9.25	9.92
复合土工膜最大下沉变形/cm	9.39	15.45	21.26	23.82	27.12	29.67
复合土工膜最大横向变形/cm	2.78	3.18	6.87	7.48	8.00	8.58
复合土工膜最大单宽拉力/(kN·m ⁻¹)	2.63	2.82	5.37	5.83	6.38	6.86
复合土工膜最大单宽拉应变/%	5.48	5.87	11.18	12.15	13.29	14.30

算水库剖面的变形量来估算复合土工膜的变形量。

(2)在库水位和地下水位变动作用下,库盆地基及库岸土体会发生下沉变的,此外,库岸土体还会向库盆处发生横向变形。

(3)水库蓄水达到校核水位,地下水下降至基岩面时为最危险工况(工况3-2),此时水库剖面及复合土工膜的最大下沉变形分别为30.83和29.67 cm,最大横向变形分别为9.92和8.58 cm。

(4)在最危险工况下,复合土工膜的最大单宽拉力为6.86 kN/m,最大拉应变为14.30%,通过计算得到拉力安全系数 F_s 为4.18,拉应变安全系数 F_ϵ 为3.02,均小于允许安全系数5.0,复合土工膜适应库盆下部土体变形能力较差,不满足允许安全系数要求。□

参考文献:

- [1] 宋德荣,杨思维.中国西南岩溶地区生态环境问题及其控制措施[J].中国人口·资源与环境,2012,22(增刊1):49-53.
- [2] 杨良权,雷安平,吴广平,等.综合勘察技术在天开水库渗漏分析中的应用[J].科学技术与工程,2018,18(24):28-37.
- [3] 韩凯,陈玉玲,陈贻祥,等.岩溶病害水库的渗漏通道探测方法:以广西全州县洛潭水库为例[J].水力发电学报,2015,34(11):116-125.
- [4] 陶秋生,刘健,郑道华.岩溶地区利用天然坝体修建水库的尝试:以孔梁水库为例[J].水利水电技术,2009,40(11):99-102.
- [5] ICOLD. Geomembrane sealing systems for dams: design principles

and return of experience (Bulletin 135)[R]. Paris: The International Commission on Large Dams, 2010.

- [6] 周奕琦,沈振中,王伟,等.复合土工膜库盆防渗上水库应力变形形态分析[J].南水北调与水利科技,2014,12(2):160-163,174.
- [7] 岑威钧,温朗昇,和浩楠.水库工程防渗土工膜的强度、渗漏与稳定若干关键问题[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(6):1183-1192.
- [8] 姜海波.复合土工膜心墙与斜墙高土石坝应力应变研究[J].长江科学院院报,2014,31(1):53-57,76.
- [9] 黄举.堆石坝中复合土工膜的应力变形分析[J].水利规划与设计,2017(2):115-119.
- [10] de FOCATIS S A, GUBLER L. Uniaxial deformation and orientation of ethylene-tetrafluoroethylene films[J]. Polymer Testing, 2013, 32(8):1423-1435.
- [11] MERRY S M, BRAY J D. Size effects for multi-axial tension testing of HDPE and PVC geomembranes[J]. Geotechnical Testing Journal, 1995, 18(4):441-449.
- [12] BOURDEAU P L, MERRY S M, BRAY J D, et al. Axisymmetric tension testing of geomembranes[J]. Geotechnical Testing Journal, 1993, 16(3):384-392.
- [13] 尚层,李玉建,徐千军,等.复合土工膜不同锚固型式对膜应力变形的影响研究[J].中国农村水利水电,2012(10):72-75.
- [14] 岑威钧,沈长松,童建文.深厚覆盖层上复合土工膜防渗堆石坝筑坝特性研究[J].岩土力学,2009,30(1):175-180.
- [15] 孔凡辉,花俊杰,王丽华,等.深厚覆盖层上水库全库盆防渗复合土工膜应力变形分析[J].中国农村水利水电,2018(5):152-155.

(上接第145页)

- [23] 沈峰,章青,黄丹,等.冲击荷载作用下混凝土结构破坏过程的近场动力学模拟[J].工程力学,2012,29(增刊1):12-15.
- [24] 郁杨天,章青,顾鑫.含单边缺口混凝土梁冲击破坏的近场动力学模拟[J].工程力学,2016,33(12):80-85.
- [25] GU X, ZHANG Q. A modified conjugated bond-based peridynamic analysis for impact failure of concrete gravity dam [J]. Meccanica, 2020,55(3):547-566.
- [26] 张钰彬,刘一鸣,黄丹.水力劈裂问题的态型近场动力学建模[J].计算力学学报,2019,36(1):21-26.
- [27] 乔丕忠,张勇,张恒,等.近场动力学研究进展[J].力学季

刊,2017,38(1):1-13.

- [28] WU L, HUANG D, XU Y, et al. A non-ordinary state-based peridynamic formulation for failure of concrete subjected to impacting loads [J]. CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2019, 118(3): 561-581.
- [29] ERDOGAN M, ERKAN O. Peridynamic theory and its applications springer link [M]. Springer, New York, NY, 2014.
- [30] SILLING S A, ASKARI E. A meshfree method based on the peridynamic model of solid mechanics [J]. Computers & Structures, 2005, 83(17-18):1526-1535.