

西霞院水电站工程土石坝复合土工膜选型

曹国利,刘宗仁,代巧枝

(黄河勘测规划设计有限公司,河南 郑州 450003)

摘要 通过对国内土工合成材料的分析,选择适合西霞院电站工程防渗体的复合土工膜材料。通过不同的复合土工膜计算方法比较,结合西霞院工程的实际情况,提出了适合西霞院电站工程防渗体的复合土工膜选择方法。

关键词 西霞院电站工程;复合土工膜;三维有限元;应力应变分析

中图分类号:TV641;TV441 文献标识码:B 文章编号:1006-7647(2009)S1-0185-03

西霞院电站工程位于黄河干流中游河南省境内,上距小浪底工程 16 km,下距郑州市 145 km。工程规模为大(2)型 II 等工程。主要建筑物由挡水土石坝、河床式电站、排沙洞、泄洪闸和引水闸等组成。坝顶总长度为 3 122.0 m,其中土石坝段长 2 609 m,最大坝高 20.2 m。

坝址附近有充足的土料和砂砾石料,为少占耕地,挡水土石坝选用复合土工膜斜墙砂砾石坝,复合土工膜用量达 12.8 万 m²。土石坝坝顶宽 8.0 m,上游坝坡 1:2.75,下游坝坡 1:2.25 和 1:2.5。土石坝剖面见图 1。

西霞院电站工程土石坝为 2 级建筑物,SL 274—

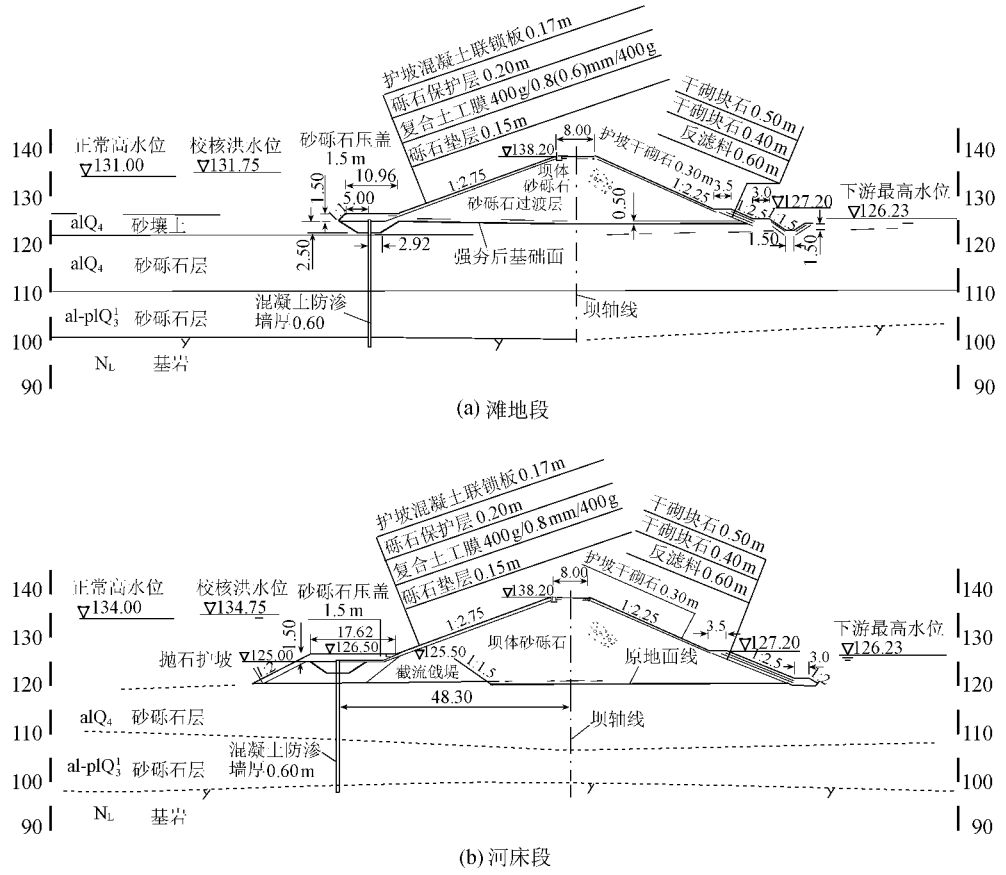


图 1 西霞院电站工程土石坝剖面(单位:m)

2001《碾压式土石坝设计规范》规定,3级低坝经过论证可采用土工膜防渗体坝。西霞院土石坝采用复合土工膜防渗已突破规范。笔者介绍西霞院电站工程复合土工膜的选型,希望给同行提供借鉴。

1 复合土工膜厚度计算方法选用

西霞院电站工程中,土工膜的厚度计算采用了2种方法,一种是利用曲线交会法计算复合土工膜厚度,这种方法预计膜下垫层可能产生的裂缝宽度进行计算;另一种是利用有限单元法计算选择复合土工膜的厚度,这种方法先进行坝体、坝基三维应力应变计算,求出土工膜工作应变,再进行土工膜的厚度计算。

1.1 利用曲线交会法计算复合土工膜厚度

SL/T 225—98《水利水电工程土工合成材料应用技术规范》给出了基于薄膜理论的曲线交会法确定膜厚的计算方法。预计膜下垫层可能产生的裂缝宽度,采用公式(1)绘制 $T \sim \epsilon$ 曲线,在同一图上绘出选用土工膜的试验曲线(图2),交点对应的应变即裂缝宽度为 b 、拉力为 T 时膜的拉伸应变。

$$T = 0.024 \frac{pd}{\sqrt{\epsilon}} \tag{1}$$

式中: T 为单宽土工膜所受拉力, kN/m ; p 为薄膜上作用的水压力, kPa ; b 为预计膜下地基可能产生的裂缝宽度, m ; ϵ 为膜的拉应变, %。

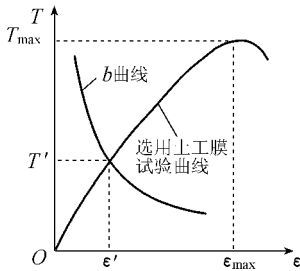


图2 曲线交会法计算简图

若选用土工膜的极限抗拉强度为 $T_{\max}$,相应应变为 $\epsilon_{\max}$,工作拉力为 T ,工作拉应变为 ϵ ,则拉力与应变的安全系数 K_s 和 K_ϵ 分别为

$$K_s = \frac{T_{\max}}{T} \quad K_\epsilon = \frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon} \tag{2}$$

式中: $T_{\max}$ 为复合土工膜极限抗拉强度(极限单宽拉力); T 为复合土工膜工作应力(工作单宽抗力); $\epsilon_{\max}$ 为复合土工膜极限拉应变; ϵ 为复合土工膜工作拉应变。

土工合成材料受拉力时,高应力水平时老化快,低应力水平时老化慢,应力水平超过 20% 则聚合物结构缺陷区扩张,老化加快。应力水平限制在 20% 以下,则使用寿命可达 100 a 以上。因此土工膜应力应变要求的安全系数 $K = 4 \sim 5$ 。若 K 不满足时,则需重

新选择复合土工膜做试验,直到满足要求为止。

1.2 利用有限单元法计算选择复合土工膜厚度

基于薄膜理论的曲线交会法是针对坝基或坝体存在裂缝或不同级配的卵石情况下推得的,该方法适用于砂砾石坝基有裂缝情况下膜厚的选择,但没有考虑到土石坝蓄水后坝体及坝基沉降变形对复合土工膜应力应变的影响。事实上,对于以复合土工膜防渗的土石坝来说,坝体及坝基蓄水后沉降变形将影响复合土工膜的变形,采用曲线交会法求解其精度将受到影响,故采用计入坝体坝基变形的有限单元法进行计算。

有限元计算采用曲线应力应变法,即根据有限元计算得到应变 ϵ ,在土工膜试验应力应变曲线上得到相应于应变位置的拉力(图3),再由该拉力和应变及土工膜极限抗拉强度和相应的应变求得安全系数,选择满足要求的复合土工膜。

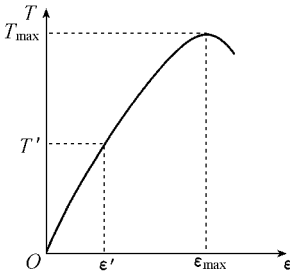


图3 曲线应力应变法计算简图

1.3 计算方法选择

曲线交会法是预计膜下地基可能产生的裂缝宽度进行计算,不能完全反映坝体、坝基变形引起的土工膜的应力应变情况,且这种方法得到的安全系数偏高,如采用 0.6 mm 厚的膜计算得到的安全系数达 88.9,而实际情况可能不会如此。

有限单元法能比较合理地反映土工膜的应力应变情况,根据土工膜的工作应变确定土工膜的规格,更能找到适合工程需要的复合土工膜。因此,西霞院电站工程采用有限单元法计算复合土工膜的厚度。

2 三维应力应变计算

西霞院电站大坝左岸坝段坝轴曲线呈 S 形弯曲,包含河床坝段(坝高最大坝段)、滩地坝段,坝体土工膜受力复杂,因此选用左岸坝段(桩号 0+0.00~1+050.0)进行三维有限元计算。三维有限元计算材料本构关系采用 Duncan-changE-B 模型。有限元计算网格见图4。

由各种工况下坝面应变计算结果可知:①最大拉应变出现在校核水位情况下,最大值为 -6.86%,其他各种工况的拉应变均小于此值;②西霞院电站大坝左岸布置成‘S’形,其应变与直线段的结果不

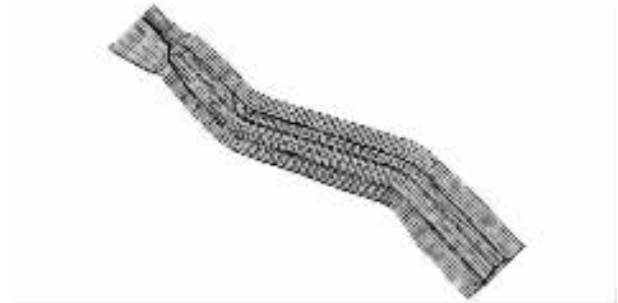


图4 西霞院电站大坝左岸坝体及坝基有限元计算网格

同,拐弯处的拉应变值最大;③2个拐弯段相比较,拉应变又以河床拐弯段大于河岸拐弯段,这一方面与水压力大小有关,另一方面2个拐弯段的方向相反,河床拐弯段凹向上游易受拉,河岸拐弯段凸向上游,略呈拱作用,则拉应变减小。

根据上述计算和分析,为了合理地选择复合土工膜,达到经济的目的,同时考虑到复合土工膜的幅宽(4 m)和施工方便等,将坝坡面复合土工膜分为3个区。Ⅰ区为130.30 m高程以上0+0.00~1+050.0坝段之间,Ⅱ区为130.30 m高程以下0+0.00~0+530.0坝段之间,Ⅲ区为130.30 m高程以下0+530.0~0+1+050.0坝段之间。

各分区复合土工膜的最大拉应变值见表1。

工 况	应变最大值/%		
	Ⅰ 区	Ⅱ 区	Ⅲ 区
正常水位	< -3.49	-5.24	-5.82
设计水位	< -4.01	-4.53	-6.22
校核水位	-4.01	-5.50	-6.86

根据土石坝三维非线性有限元分析,结合土石坝右岸滩地段平直、坝低(最高16 m)、河槽、左岸滩地段弯曲、坝高(最高20.2 m)的实际情况,并考虑安全余度,对河槽、左岸滩地段的复合土工膜采用Ⅲ区应力应变计算结果,对右岸滩地段采用Ⅱ区计算结果。

3 复合土工膜的选型

3.1 复合土工膜材质选择

工程常用土工膜有聚氯乙烯(PVC)和聚乙烯(PE)2种。PVC膜幅宽一般为1.5~2.0 m,PE膜可达4.0~8.0 m,PE膜接缝比PVC膜减少50%以上。在物理性能、力学性能、水力学性能相当的情况下,大面积土工膜施工,选用PE膜则可减少接缝数量。本工程采用PE膜,幅宽大于4 m。

目前我国的土工布最主要的品种有涤纶(聚酯)土工布、丙纶(聚丙烯)土工布。涤纶土工布的耐久性(抗老化性)以及强度等均强于丙纶土工布。本工程采用土工涤纶织物。土工织物分长丝和短丝。短

丝材料中可能添加有回收料,其耐久性(抗老化性)较长丝差。鉴于西霞院电站工程的重要性,土工织物选用长丝。

3.2 复合土工膜规格确定

根据国内的一些工程实例以及SL/T225—98规范要求,初步确定膜厚在0.6 mm、每平方米土工布质量在250 g以上。收集国内有实力的大厂的复合土工膜进行试验,根据三维有限元计算的土工膜工作应变及土工膜的试验曲线,选择符合应力应变安全系数的复合土工膜。

考虑校核工况的偶然性,确定正常水位、设计水位及校核水位工况下的允许安全系数分别为5,5,4。

不同规格的复合土工膜纵横向抗拉试验成果表明在膜厚一定的条件下,增加土工布的质量可以改善复合土工膜的应力状况(使安全系数提高);不同厂家的复合土工膜质量有所差别。因此,复合土工膜的选择需要慎重,不能简单地按照材料设计指标选择,需要满足应力应变安全系数的要求。

考虑西霞院电站工程的重要性、土工膜厚度的不均一性以及运输和施工过程中可能对复合土工膜造成损伤,宜选择较厚的膜和质量较大的土工布作为安全储备。西霞院电站工程复合土工膜规格选定为右岸滩地坝段400 g/0.6/400 g,河槽、左岸滩地坝段400 g/0.8/400 g。

3.3 复合土工膜指标确定

根据不同厂家复合土工膜的拉伸试验成果,经过分析、对比、加权平均(以350 g/0.6/350 g为基础),提出复合土工膜(长丝,规格400 g/0.8/400 g)的主要设计控制指标见表2。

表2 复合土工膜主要设计控制指标							
极限抗拉强度/ (kN·m ⁻¹)		极限延伸 率/%		撕裂强度/ kN		CBR 顶破 强度/ kN	刺破 强度/ kN
纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向		
≥55.0	≥45.0	≥50.0	≥50.0	≥1.5	≥1.3	≥10.0	≥1.4
				≥10 ⁻¹¹			

4 认识与体会

a. 西霞院电站工程2007年6月下闸蓄水以来,土工膜防渗效果良好,特别是挖开检查,土工膜后即使架空其质量仍然完好无损,说明复合土工膜的选择是合适的。

b. 从现场施工情况看,采用0.8 mm的土工膜,其硬度大,施工比较困难。而且,材料试验结果表明,土工膜的厚度并非越厚越好,厚度越大,弹性模量高,承担的拉力也越大,其安全系数反而降低。应研究降低膜厚的可能性,既满足应力应变要求,又便于施工。

(下转第195页)

立合理的复合层变形渗透模型、开展数值模拟分析是深入研究其机理的基础。

参考文献：

[1] 徐超,黄亮,李志斌.影响土工织物膨润土垫水力和力学特性的因素[J].新型建筑材料,2006(11):42-43.

[2] 周正兵,王钊,费香泽.用于固体废弃物填埋场中的两种复合防渗系统的比较[J].环境工程,2002,20(3):55-59.

[3] 吕宏洋.膨润土防水毯 GCL 和土工膜 GM 作为危险废物填埋场复合场衬垫系统的研究[J].有色冶金设计与研究,2007,28(23):131-140.

[4] KOERNER R M. 土工合成材料膨润土垫 (GCL) [M]. 王维,夏启星,孙秋菊摘译.产业用纺织品,2002,142(20):35-38.

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

[6] ROWE R K, QUIGLEY R M, BRACHMAN R W I, et al. Barrier systems for waste disposal facilities [M]. London: Taylor&Francis Books Ltd(E&F N Spon), 2004:587.

[7] DICKINSON S, BRACHMAN R W I. Deformations of a geosynthetic clay liner beneath a geomembrane wrinkle and coarse gravel[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24(5):285-298.

[8] FOX P J, De BATTISTA D J, MAST D G. Hydraulic performance of geosynthetic clay liners under gravel cover soils[J]. Geotextiles and Geomembrane,2000,18:179-201.

[9] GUDINA S, BRACHMAN R W I. Physical response of geomembrane wrinkles overlying compacted clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 132(10):1346-1353.

[10] SOONG T Y, KOERNER R M. Laboratory study of high density polyethylene geomembrane waves [C]//Proceedings of Sixth International Conference on Geosynthetics, vol 1. Atlanta: Industrial Fabrics Association International, 1998:301-306.

[11] 陈小红,王协群.土工合成材料膨润土垫层性能探讨[J].长江科学院院报,2007,24(4):53-54.

[12] TRIPLETT E J, FOX P J. Shear strength of HDPE geomembrane/geosynthetic clay liner interfaces[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001, 127(6):543-552.

[13] 陈小红. GCL 室内剪切试验研究及在垃圾填埋场的应用[D]. 武汉:武汉理工大学, 2007.

[14] VUKELIC A, SZAVITS-NOSSAN A, KVASNICKA P. The influence of bentonite extrusion on shear strength of GCL/geomembrane interface [J]. Geotextiles and Geomembrane, 2007, 26:82-90.

[15] FITZSIMMONS J H, STARK T D. Theoretical effect of bentonite migration on contaminant transport through GCLs

[C]//Proceeding of Seventh International Conference on Geosynthetics, Nice, France, September, 23, 2002:757-760.

[16] SAIDI F, TOUZE-FOLTZ N, GOBLET P. Numerical modeling of advective flow through composite liners in case of two interacting adjacent square defects in the geomembrane [J]. Geotextiles and Geomembrane, 2008, 26:196-204.

[17] KOERNER G R, KOERNER R M. Geomembrane leakage arising from broken needles with GCLs [C]//Proceedings of the International Symposium on Geosynthetic Clay Barriers, Nuremberg, Germany, 2002:209-217.

[18] HARPUR W A, WILSON-FAHMY R F, KOERNER R M. Evaluation of the contact between geosynthetic clay liners and geomembranes in terms of transmissivity [C]// WILSON-FAHMY K. Geosynthetic Liner Systems: Innovations, Concerns and Design. Proceedings of a Geosynthetic Liner Systems Seminar held in Philadelphia, USA, 1993:143-154.

[19] BARROSO M, TOUZE-FOLTZ N, Von MAUBEUGE K, et al. Laboratory investigation of flow rate through composite liners consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner [J]. Geotextiles and Geomembrane, 2006, 24:139-155.

[20] BOUAZZA A, VANGPAISAL T. Laboratory investigation of gas leakage rate through a GM/GCL composite liner due to a circular defect in the geomembrane [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24(2):110-115.

(收稿日期 2009-07-30 编辑 高建群)

(上接第 187 页)

c. 采用两布一膜复合土工膜, 在施工过程中不易发现土工膜的缺陷, 在以后的工程运用中, 宜研究下列方式的可行性: 采用一布一膜, 铺设时, 膜在上面, 其下覆设 1 层布, 用胶等将布与一布一膜处理形成整体。

d. 薄膜理论的曲线交会法是针对坝基或坝体存在裂缝或不同级配的卵石情况下推得的, 该方法适用于砂砾石坝基有裂缝情况下膜厚的选择, 但没有考虑到土石坝蓄水后坝体及坝基沉降变形对复合土工膜应力应变的影响。事实上, 对于以复合土工膜防渗的土石坝来说, 坝体及坝基蓄水后沉降变形将影响复合土工膜的变形, 采用曲线交会法求解其精度将受到影响, 采用计入坝体坝基变形的有限单元法进行计算更能反应实际。

参考文献：

[1] 《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 [S]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.

(收稿日期 2009-07-28 编辑 高建群)