

复合土工膜厚度计算方法研究

沈长松,顾淦臣

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 在复合土工膜厚度设计曲线交会法的基础上提出了确定复合土工膜厚度的割线模量迭代法和有限元曲线应力应变法,并介绍了这两种方法的基本原理和计算思路,给出了用有限元曲线应力应变法选择复合土工膜的实例.结果表明,有限元曲线应力应变法计算的复合土工膜厚度更符合大坝设计施工实际情况.

关键词 复合土工膜;工作应力;曲线交会法;割线模量迭代法;有限元曲线应力应变法

中图分类号 TV442 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2004)04-0395-04

复合土工膜在我国的发展非常迅速,应用也十分广泛.尤其对蓄水深度不大的丘陵水库、平原水库及老坝渗漏防治等工程来说,复合土工膜是一种施工速度快、防水效果好、投资费用低的防渗材料.但在复合土工膜这一新材料的应用中还存在一些技术难题,如复合土工膜种类选择、厚度计算方法等.为此,本文在复合土工膜厚度设计曲线交会法的基础上提出确定复合土工膜厚度的割线模量迭代法和有限元曲线应力应变法,并结合实际工程给出了用有限元曲线应力应变法选择复合土工膜的计算原理和关键技术.

1 复合土工膜厚度设计方法

1.1 曲线交会法

文[1]针对不同边界条件导出了相应的计算公式,其中级配不均匀的砂砾石上薄膜受水压力 p 作用时薄膜发生的单位宽度拉力与应变关系为

$$T = 0.122pd_0/\sqrt{\epsilon} \qquad d_0 = 0.535n^{1/6} \frac{n}{1-n}d_{17} \qquad (1)$$

式中: T ——薄膜单位宽度拉力, kN/m ; p ——薄膜上承受的水压力荷载, kPa ; ϵ ——薄膜产生的拉应变; d_0 ——不均匀砂砾石的平均孔隙直径, m ; n ——砂砾石孔隙率; d_{17} ——特征颗粒直径,表示小于此粒径的砂砾石质量所占比例为 17%.

式(1)可用图 1 中曲线 1 表示.但仅用曲线 1 不能确定选用多厚的复合土工膜,还必须知道复合土工膜在不同拉力条件下的应力应变关系才能确定选用多厚的复合土工膜.设选定的复合土工膜的应力应变关系如图 1 中曲线 2 所示,则图 1 中两曲线的交点为所选土工膜在试验拉力 T 作用下产生的应变 ϵ 与砂卵石孔隙上薄膜受水荷载产生的拉力、应变相等的点.该点所对应的单宽拉力 T_g 为工作应力,对应的应变 ϵ_g 为工作应变.由于不同密度、不同厚度复合土工膜的试验应力应变曲线不同,选择不同复合土工膜时,两曲线的交点 (ϵ, T) 位置也不相同.因此,应在不同复合土工膜试验曲线与图 1 中曲线 1 交会的基础上求得不同工作应力和不同工作应变,然后根据下述方法选定复合土工膜.

设复合土工膜的最大拉力为 $T_{\max}$ 、最大拉应变为 $\epsilon_{\max}$,材料的工作拉力为 T_g 、工作应变为 ϵ_g ,则所选材料抗拉能力和应变能力的安全系数分别为

$$K_s = T_{\max}/T_g \qquad K_{\epsilon} = \epsilon_{\max}/\epsilon_g \qquad (2)$$

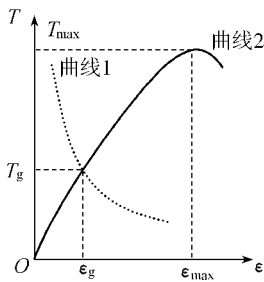


图 1 曲线交会法计算简图
Fig.1 Calculation diagram for curve intersection method

从安全角度考虑, K_s 和 K_e 应远大于 1.0. 据文献[2], 土工合成材料的容许抗拉强度为

$$T_a = \frac{1}{F_{iD}F_{cR}F_{cD}F_{bD}}T_{\max} \tag{3}$$

对堤坝来说, $F_{iD} = 1.1 \sim 2.0$, $F_{cR} = 2 \sim 3$, $F_{cD} = 1.0 \sim 1.5$, $F_{bD} = 1.0 \sim 1.3$, 本文取 $F_{iD} = 1.6$, $F_{cR} = 2.0$, $F_{cD} = 1.3$, $F_{bD} = 1.2$. 故 $T_a = T_{\max}/5$, 即安全系数 $K = 5$. 换言之, 土工膜的应力水平为 20%. 据研究, 应力水平在 20% 以下时土工膜不易老化, 使用寿命可达 50~100 a. 如果 $K < 5$, 则应重选复合土工膜来做试验, 直到满足要求为止.

1.2 割线模量迭代法

曲线交会法虽然能用于坝基或坝体存在裂缝或已知卵石粒径情况下复合土工膜的厚度设计, 但该法未考虑土石坝蓄水后坝体及坝基变形对复合土工膜应力应变的影响. 对用复合土工膜防渗的堆石坝或土石坝来说, 选择复合土工膜时应考虑坝体及坝基蓄水后受力变形对复合土工膜应力应变所产生的影响. 为了更符合工程实际, 应利用有限单元法计算复合土工膜连同坝体坝基受力后的应变. 由于复合土工膜在拉力作用下, 拉力与应变不呈线性关系(见图 2), 因此其模量在计算前为未知量, 需预估赋初值. 根据经验, 复合土工膜工作应变为 5%~12%. 因此, 首次计算时用原点至应变 10% 之间的割线模量作为复合土工膜单元的劲度. 由此可得到膜在假定模量下的应变. 从而可从图 2 中找到该应变所对应的模量. 如果该模量与假定的模量不等, 则需按第 1 次假定模量下的计算应变在图 2 中重新找出新的割线模量再进行计算. 如此迭代两三次即可满足要求. 本文将该法称之为割线模量迭代法. 由该法求得复合土工膜各单元的

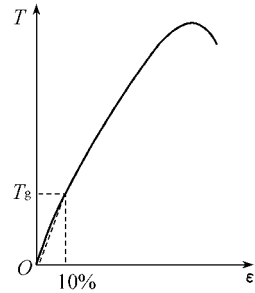


图 2 割线模量迭代法计算简图
Fig.2 Calculation diagram for secant modulus iteration method

的应力应变后可用式(3) 计算 K_s 和 K_e . 将 K_s 和 K_e 的计算值与规范值进行比较即可确定所选材料是否满足要求.

1.3 有限元曲线应力应变法

将复合土工膜连同坝体一起进行有限元分析的割线模量迭代法, 其精度较高, 不仅能反映各种结构的受力情况, 而且计入了复合土工膜的抗拉能力. 但该法仅适用于没有松弛度的情况. 实际上, 复合土工膜是在坝体全部填筑完成或部分填筑完成后铺设的, 铺设时不要求将其绷紧, 而是预留了一定的松弛度. 这时, 可不计复合土工膜的抗拉作用, 而以坝坡表面单元应变 ϵ 作为复合土工膜工作应变, 直接从拉伸曲线上查得对应的拉力(见图 3). 由该拉力 T_g 和对应的应变 ϵ_g 以及 $T_{\max}$, $\epsilon_{\max}$, 用式(3)就可求得各自的安全系数. 该法称为有限元曲线应力应变法.

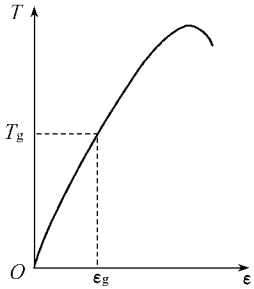


图 3 有限元曲线应力应变法计算简图
Fig.3 Calculation diagram for finite element stress-strain curve method

2 应用实例

2.1 工程概况^[3]

石砭峪水库位于西安市长安县. 该水库坝高 85 m, 坝顶高程 735 m, 坝顶长 265 m. 1973 年定向爆破堆石筑坝至高程 705 m, 再由人工搬运坝体轮廓线外爆破块石从高程 705 m 堆筑至高程 735 m. 1980 年初修建了沥青混凝土斜墙. 沥青混凝土斜墙厚 20 cm, 坡率自下至上分别为 1:2.25, 1:6, 1:4, 1:2.25, 1:8. 一般认为, 堆石填筑完工已 7 a, 沉陷变形应基本稳定, 且沥青混凝土能适应较大变形. 但事实并非如此. 1993 年 7 月 27 日蓄水至 715.6 m 时, 靠近右岸高程 690~698 m 处沥青混凝土斜墙出现了长 4.5 m、宽 4 m 的塌坑, 漏水达 1.72 m³/s. 维修以后蓄水位控制在 700 m 以下, 不能正常运行. 采用在沥青混凝土面板上铺贴复合土工膜防渗方案^[3]后, 加固处理获得成功.

2.2 加固前应力应变分析

三维有限元计算得到的沥青混凝土斜墙在正常高水位 731 m 时的拉应变等值线大于或等于 0.10 的范围较大, 最大拉应变为 0.136, 大于沥青混凝土的极限拉应变, 因此沥青混凝土会产生裂缝. 与现场对比结果表

明,裂缝区域与实际沉陷坑、塌坑位置一致.

计算表明,正常高水位 731 m 时,沥青混凝土斜墙的最大主应力(即压应力)为 2.38 MPa.在此应力下,沥青混凝土将被严重压碎.另外,在反弧处亦出现 1.27 MPa 的拉应力,如图 4 所示.这说明,原防渗体不满足设计要求,必须采取加固措施.

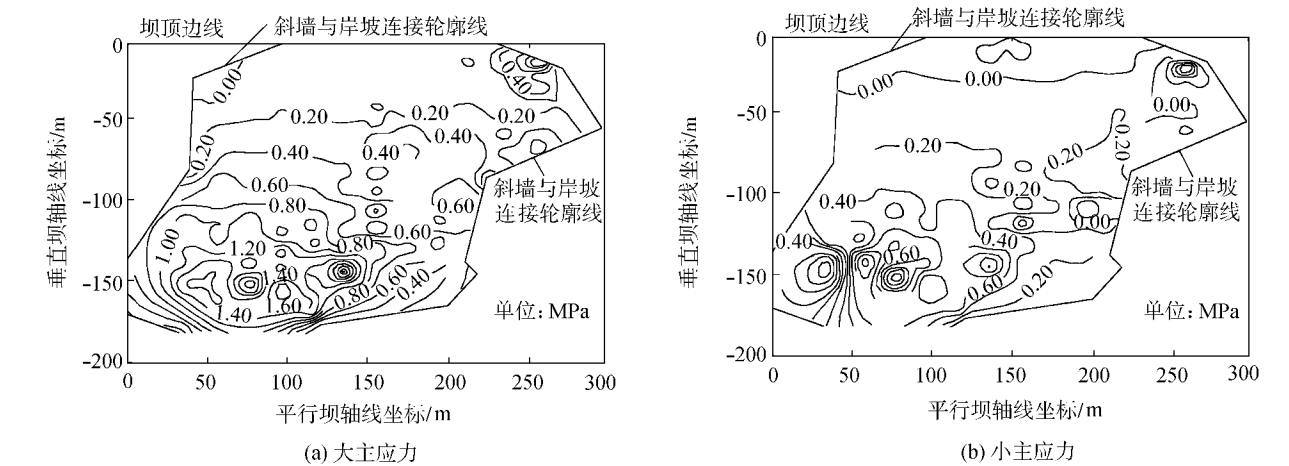


图 4 731 m 水位时沥青混凝土斜墙应力等值线
Fig.4 Stress isolines of inclined asphalt concrete wall(water level 731 m)

2.3 复合土工膜选择

因原防渗体为表面平整的沥青混凝土,故不宜采用曲线交会法.因此,笔者采用三维有限元应力应变法,并按复合土工膜与沥青混凝土斜墙之间的抗滑稳定要求,用沥青把复合土工膜粘贴在沥青混凝土斜墙面上,以保证稳定.这样,连在一起的复合土工膜与沥青混凝土斜墙,其应变值相同,所以,沥青混凝土斜墙的应变即复合土工膜的工作应变.据此,可用沥青混凝土斜墙各部位的拉应变值在复合土工膜单宽拉力与拉应变关系试验曲线 $T-\epsilon$ 上查得各部位复合土工膜的工作应力(即单宽拉力).

试验选定了 450/1.0PVC/450 和 450/1.0PE/450 两种复合土工膜,以这两种复合土工膜纬向(即横向)的 $T-\epsilon$ 曲线为例(见图 5),首先算得复合土工膜与沥青混凝土斜墙受水压力后的工作应变和工作应力(即单宽拉力),然后利用式(2)算得应力安全系数 K_s 和应变安全系数 K_ϵ ,如表 1 所示.

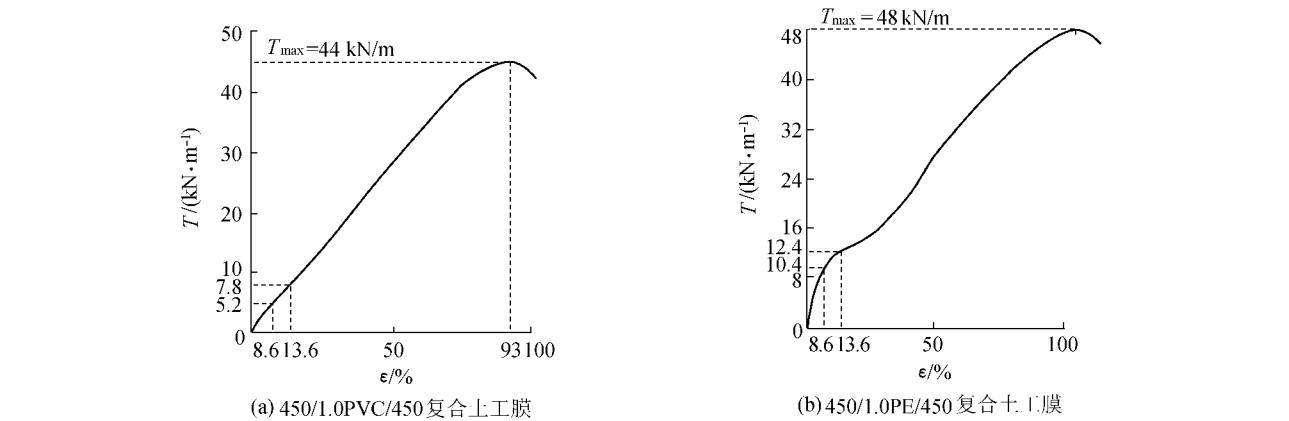


图 5 纬向 $T-\epsilon$ 曲线
Fig.5 $T-\epsilon$ curve

表 1 731 m 水位时两种复合土工膜应力安全系数及应变安全系数计算结果

土工膜种类	$T_{\max}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$		$T_{\text{E}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$		K_s		$\epsilon_{\max}/\%$		$\epsilon_{\text{E}}/\%$		K_ϵ	
	经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向
450/1.0PVC/450	46.0	44.0	12.2	7.8	3.8	5.6	80.0	93.0	13.6	13.6	5.9	6.8
450/1.0PE/450	46.5	48.0	13.4	12.4	3.5	3.9	86.0	105.0	13.6	13.6	6.3	7.7

计算结果表明,731 m 水位时,应变安全系数均满足规范要求,但应力安全系数经向不满足规范要求,纬向 450/1.0PVC/450 复合土工膜满足规范要求、450/1.0PE/450 复合土工膜不满足规范要求.因此,应选用更强的复合土工膜,才能使 731 m 水位时经向应力安全系数满足规范要求.据此,沥青混凝土斜墙 703 m 高程以上选用 500/1.0PVC/500 复合土工膜,703 m 高程以下选用 700/1.0PVC/700 复合土工膜.由单宽拉力-拉应变试验及安全系数计算得知,各种水位下所选土工膜均满足规范要求.

3 结 论

a. SL/T225—98《水利水电工程土工合成材料应用技术规范》规定的复合土工膜厚度计算方法——曲线交点法,可用于水头较低的土石坝坝面土工膜厚度、蓄水池池盘铺设土工膜厚度及混凝土建筑物以土工膜修补裂缝的土工膜厚度的计算.中高水头的土石坝,铺设复合土工膜后蓄水,坝体会产生较大变形,因此应采用以应力应变计算为基础的有限元应力应变曲线法.该法可应用于各种情况下复合土工膜厚度的设计.

b. 复合土工膜中膜起防渗作用,两侧的土工织物起抗拉和保护作用,土工织物的厚度(密度)和材质对应力、应变影响很大,因此选材时除了要求复合土工膜有较高的极限抗拉能力外,还要求复合土工膜有理想的应力应变曲线.

c. 坝体坝基的应力应变与施工顺序及筑坝材料的变形特性有关.如复合土工膜是在坝体填筑完工后铺设的,则只计蓄水引起的应变值.若坝体材料的蠕变变形较大,则还需计入蠕变引起的应变值.

d. 本文应用实例从施工工艺和安全裕度考虑,采用了有限元应力应变曲线法,即未考虑复合土工膜劲度的影响.这在沥青混凝土面板堆石坝面板劲度远大于复合土工膜劲度时是可行的.而在砂砾石材料劲度不是很小时,略去复合土工膜劲度的影响,会对计算结果产生一些影响,其影响程度既与真实模拟复合土工膜的模型有关,还与复合土工膜铺设松弛度有关.

参考文献:

- [1] 顾淦臣. 承压土工膜厚度计算的研究[A]. 见 全国第三届土工合成材料学术会议论文集[C]. 天津:天津大学出版社, 1992. 249—257.
- [2] SL/T 225—98 水利水电工程土工合成材料应用技术规范[S].
- [3] 顾淦臣,沈长松,吴江斌. 复合土工膜防渗加固石砗峪堆石坝的分析[A]. 见 土石坝建设中的问题与经验[C]. 西安:陕西人民出版社,2002. 363—371.

Calculation method for thickness of composite geomembrane

SHEN Chang-song, GU Gan-cheng

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the curve intersection method for the thickness calculation of composite geomembrane, the secant modulus iteration method and the finite element stress-strain curve method are put forward for determination of the thickness of composite geomembrane, and the basic principle and calculation procedure of the two methods are introduced. A case study for selection of the composite geomembrane with the finite element stress-strain curve method shows that the thickness of composite geomembrane determined with the method meets the requirement of dam design and construction.

Key words: composite geomembrane; operating stress; curve intersection method; secant modulus iteration method; finite element stress-strain curve method