

土石坝坝面防渗膜中的夹具效应

花加凤^{1a}, 束一鸣^{1a}, 张贵科^{1b}, 周维垣²

(1. 河海大学 a. 水利水电工程学院 b. 土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 清华大学水力发电工程系, 北京 100084)

摘要 对土石坝上游坝面防渗土工膜的夹具效应进行分析, 用力学平衡法对膜的受力及与坝体的相对位移进行计算, 论证了坝体与岸坡及坝基锚固处的土工膜存在夹具效应的可能性。用 FLAC^{3D} 软件对整个坝体及坝面上的膜进行仿真数值模拟, 结果表明, 土石坝坝面防渗膜中确实存在夹具效应, 且坝体与岸坡锚固处膜中的夹具效应比坝体与坝基锚固处明显。

关键词 土石坝; 土工膜; 锚固; 夹具效应

中图分类号: TV441 文献标识码: B 文章编号: 1006-7647(2007)02-0066-03

Clamping effect in geomembranes used for seepage control of upstream surface of earth-rock dams//HUA Jia-feng^{1a}, SHU Yi-ming^{1a}, ZHANG Gui-ke^{1b}, ZHOU Wei-yuan² 1a. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 1b. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract : The stress of the geomembranes and their relative displacement with the dam body were calculated by use of the mechanical equilibrium method. It was verified that the clamping effect might occur in the geomembranes at the anchorage places of the dam body with bank slope and dam foundation. Then the software FLAC^{3D} was employed for numerical simulation of geomembranes on the whole dam body and dam surface. The result shows that the clamping effect really exists in the anti-seepage geomembranes on the dam surface, and that the effect is more evident at the anchorage place of the dam body with bank slope than that at the anchorage place of the dam body with dam foundation.

Key words : earth-rock dam; geomembrane; anchorage; clamping effect

土工膜用于土石坝防渗具有投资少、施工便利、工期短等优点。但对土工膜薄易被刺破撕裂、易产生施工薄弱环节等问题仍存在疑虑^[1]。这些问题中有些可通过规范施工工艺得到解决, 而有一些涉及结构机理的力学问题则必须深入研究。笔者拟对土工膜用作土石坝上游坝面防渗体时锚固处膜的夹具效应进行探讨。

1 夹具效应存在性分析

土工膜铺设在土石坝坝体上游面作为防渗斜墙或面板, 一般在坝体填筑至坝顶后再铺膜, 此时坝体大部分的竖向位移已经完成, 土工膜主要随蓄水引起坝体的位移(主要是水平位移)而产生变形^[2]。在混凝土槽内的锚固形式, 因由型钢锚紧, 类似于拉伸试验中一端的夹具; 锚固边缘外侧因水压力作用将坝体材料与膜压紧并向下游位移, 类似于拉伸试验中另一边的夹具, 此时就如同量距极其微小(两夹具紧靠)的试样^[3], 倘若锚固边缘外区域膜与坝体材料

之间犹如未被夹紧的膜试样, 实际上即大大增加了试样的量距长度。需指出, 膜是随坝体而位移的, 膜的刚度不足以约束坝体位移^[4]。所以, 对坝体内的膜而言, 类似于拉伸行程一定(因在一定工况下, 坝体位移一定)的试样拉伸, 试样量距长度越长, 拉伸变形率越小; 反之, 拉伸变形率越大。上述结构作用机理可从物理模型和数学模型中得到验证。在实际工程中的膜锚固处(坝基与两岸), 通常膜只在半侧范围内有移动的可能, 坝底附近, 因水压力最大, 将会产生最大的摩擦力, 而坝体水平位移最大处, 一般不在坝底, 所以水平位移最大的两岸处, 可能是最危险的地方, 其次是上游坝趾部位。

2 坝面膜的受力分析及相对位移估算

取坝面上某一点处土工膜作受力分析(图 1), 为便于编程, 此处假设上游水压力对膜法线方向上的力被坝体对膜的反作用力完全抵消, 得公式如下:

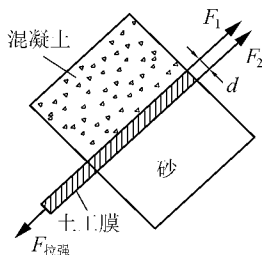


图1 坝面膜的简单受力分析

$$\begin{cases} F_{\text{拉强}} = F_1 + F_2 \\ F_1 = f_1 N_{\text{水}} \\ F_2 = f_2 N_{\text{水}} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $F_{\text{拉强}}$ 为膜的单宽(单宽 $b = 1\text{ m}$)拉伸强度， kN/m ； f_1, f_2 分别为膜与其上垫层及下垫层之间的摩擦系数，可取 $0.12 \sim 0.37^{[4]}$ ； $N_{\text{水}}$ 为上游坝面水深 h 处的水压力， $N_{\text{水}} = \rho gh$ ，其中水的密度 $\rho = 1000\text{ kg/m}^3$ ，重力加速度 $g = 9.8\text{ m/s}^2$ 。

据式(1)用FORTRAN语言编写计算程序，以判断土工膜不可移动的区域。编写程序的思路是：用三重循环结构，第一重循环为膜的拉伸强度变化，变化范围为 $1 \sim 30\text{ kN/m}$ ；第二重循环为膜的双面摩擦系数(即 $f_1 + f_2$ ，这里适当扩大范围)的变化，变化范围为 $0.12 \sim 0.74$ ；第三重循环为膜位于水下深度的变化，变化范围为 $0 \sim 50\text{ m}$ 。程序中当处于第一重循环与第二重循环中的某个值时，对第三重循环中的每一个值都要进行膜受力平衡校核，当处于临界状态时便可得出该膜强度与摩擦系数下的膜滑移的临界位置在水下的深度，输出所有的临界值，便可绘出如图2所示的曲线。其中横轴为土工膜与土的摩擦

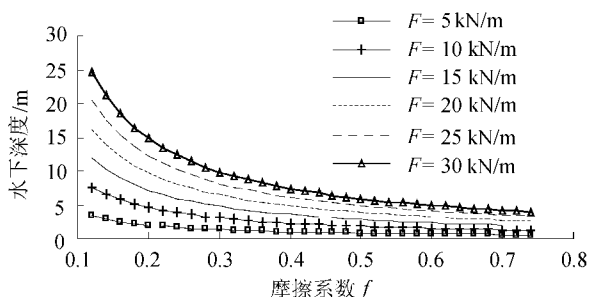


图2 不同强度的夹具效应反映

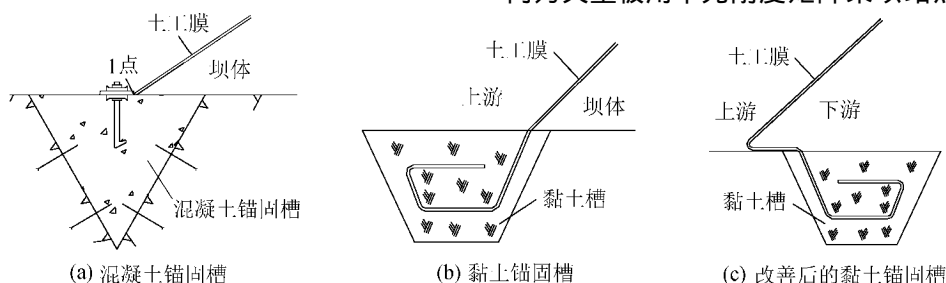


图3 坝面上的膜与岸坡的连接方式

系数范围，纵轴为膜无切向相对蠕动处位于水下的深度，即在该深度下膜被法向相邻材料压紧，沿切向不可蠕动。

计算表明，随着膜拉伸强度的增加，膜的切向蠕动与不可蠕动区域界线在水下的位置越深；而在同一膜强度下，膜的切向蠕动与不可蠕动区域界线在水下的深度随着膜与其垫层和覆盖层材料的摩擦系数的增加而减小，它们之间的关系呈现比较光滑的曲线关系。所以，当水位越高时，坝上大多数膜是不能被拉动的。特别是对于大于 50 m 以上的高坝，即使是膜拉伸强度达 30 kN/m ，摩擦系数小到 0.1 左右，也有近一半坝体高度的膜不能移动，这时膜易产生夹具效应。

3 夹具效应的仿真数值模拟

据以上分析，由于摩擦力最大或位移最大的原因，膜最易产生夹具效应的部位在锚固处，膜在坝面上与河床或岸坡的连接，主要有混凝土槽锚固和黏土槽埋置锚固两种方式^[2]，如图3所示。为能直观地观察夹具效应，笔者使用岩土结构分析的商用软件FLAC^{3D}对其进行了简单的仿真数值模拟。该商用软件采用的分析方法是一种基于三维显式有限差分法的数值分析方法，它可以模拟岩石或土体及其他材料的三维力学行为。在该软件中提供了多种本构模型和结构单元。笔者采用摩尔库仑弹塑性本构模型来模拟坝体及其地基的本构关系，用土工格栅结构单元来模拟土工膜结构。考虑结构-土体耦合的土工格栅结构单元由一般的有限元单元加接触单元(耦合弹簧)组成，前者一般服从弹性变形原理(如果某处定义了塑性铰，则为理想弹塑性)，后者一般服从理想弹塑性的库仑接触条件。土工格栅结构单元是三结点、平面有限单元，它能抗张力而不能抵抗弯矩荷载，在切向上它与土体是相互摩擦的作用，在法向，它的结点随土体网格的运动而动。土工格栅结构单元内部各力的计算过程如下：首先在结构单元内存储了一个内力矢量，在每一个计算时间步内，内力矢量被用单元刚度矩阵乘以结点位移增量(结

点速度乘以时间步)更新。程序算完时,调用应力恢复命令作后处理时,通过力的平衡原理来计算合力 N_x, N_y, N_z 和 M_x, M_y, M_z ,再用公式计算应力。对锚固处的模拟,是将土工格栅结构单元固结于地基。因为土工格栅结构单元的上述一些特点类似于土工膜,所以这里用其来模拟土工膜。选择图 3(a)的锚固方式作为模拟对象,地基范围 x 向取坐标值为 $0 \sim 1080\text{ m}$, y 向取坐标值为 $0 \sim 200\text{ m}$, z 向取坐标值为 $0 \sim 100\text{ m}$,坝体范围取坝高 70 m ,顶宽 10 m ,坝体坡度 $1:2.5$,水深取 50 m 。材料参数选取如表 1 所示。坝体网格及计算结果云图见图 4 和图 5。

表 1 计算模型所用材料参数

材 料	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	黏聚力 c/kPa	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
地基材料	1 100	0.29	40	38 400	2 210
坝体材料	34	0.3	30	1.5	1 840
土 工 膜	100	0.3	20		



图 4 坝体网格及其上膜布置

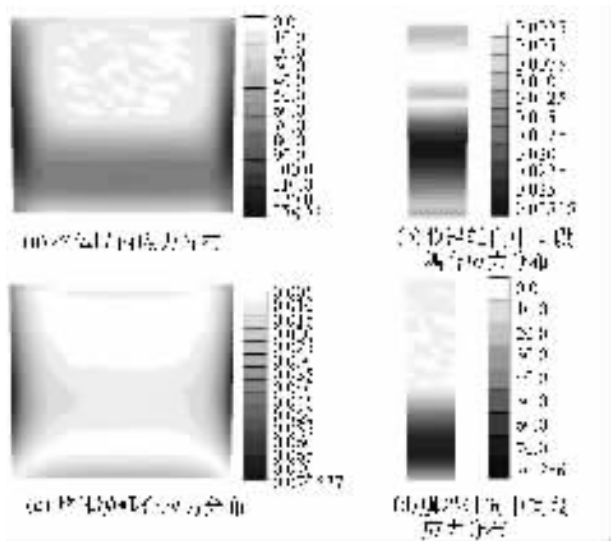


图 5 计算结果云图(单位: kPa)

数值模拟表明:膜面的最大应力为 126.2 kPa ,膜在坝体中间段的最大应力为 70.3 kPa ,膜在边界处的最大耦合应力为 0.07 kPa ,在坝体中间段的最大耦合应力为 0.03 kPa 。由图 5(a)可以看出,云图两侧(即两岸坡处)的颜色较深,说明左右岸坡锚固处膜的内部应力较大,图 5(b)在坝基处颜色比较深,说明坝基处膜的内应力比较大,这两幅图明显地表示了夹具效应。图 5(c)与图 5(d)间接地反映了膜与土的相对位移情况,无论是整体膜的云图还是中间段的云图都可

以看出中间偏下部分的颜色明显深于其他部位,说明这些地方的相对位移较大,但是在锚固处的位移还是比较小的,膜的夹具效应可见一斑。

4 结 语

a. 整个膜上的应力分布在两岸处的中下段最大,中间段膜的应力在坝基处最大。这两处均为锚固处,仿真数值模拟很好地证明了夹具效应的存在。

b. 两岸锚固处的应力大于坝基处的应力,可见膜在两岸处破坏危险性大于坝基处,在实际工程中应该注意两岸处的锚固处理。

c. 从耦合应力分布看出,膜与坝面间的相对蠕动在坝体中下段最大,与理论分析有所偏差,这是因为理论分析时仅从力学方面来考虑,且忽略了坝面法向上的力,是一种简化计算。因此,真实工况下的膜与坝面间的相对蠕动有待进一步研究。

d. 对存在夹具效应的部位的处理,可通过改变锚固方式来加以改善,如采取类似于图 3(c)的锚固方式来代替图 3(b)所示的锚固方式。对此,笔者也做了仿真数值模拟,发现对夹具效应略有改善,但在其经济性与施工处理方面仍需进一步分析。

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[K].2版.北京:中国建筑工业出版社,2000:118-126.
[2]束一鸣.防渗土工膜工程特性的探讨[J].河海大学学报,1993,21(4):1-4.
[3]SHU Yi-ming, LI Yong-hong. Design principles for high head earth-rock dams with geomembrane[C]//ICOLD 72nd Annual Meeting Proceedings Workshop on Dam Safety Problems and Solutions-Sharing Experience, Seoul, Korea, INTERCOM Convention Services, Inc. 2004:628-639.
[4]束一鸣.土工膜连接和缺陷渗流量计算与缺陷渗流影响[J].人民长江,2003(3):26-28.

(收稿日期:2005-10-09 编辑:马敏峰)

·小资料·

“世界水日”和“中国水周”

为了缓解世界范围内的水资源供需矛盾,根据联合国《21世纪议程》第18章有关水资源保护、开发、管理的原则,1993年1月18日,联合国第47次大会通过了193号决议,决定从1993年开始,确定每年的3月22日为“世界水日”。决议提请各国政府根据自己的国情,在这一天举办一些具体的宣传活动,以提高公众节水意识。

2007年3月22日是第15届“世界水日”,3月22~28日是第20届“中国水周”。联合国确定2007年“世界水日”的宣传主题是“应对水短缺”。我国纪念2007年“世界水日”和开展“中国水周”活动的宣传主题为“水利发展与和谐社会”。

(本刊编辑部供稿)