

高面膜堆石坝周边的夹具效应机制与消除设计方法

——高面膜堆石坝关键技术(二)

束一鸣^{1,2}, 吴海民^{1,2}, 姜晓桢^{2,3}, 顾克¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 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. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210029)

摘要:针对在一定水深下,面膜周边锚固处将形成“面膜夹具”进而产生影响面膜安全的夹具效应这一高面膜堆石坝研究和设计中首先需面对的关键技术问题,在材料试验和工程结构分析的基础上分析了形成夹具效应的机制,提出了产生夹具效应的必要条件和充分条件;模拟工程实际设计了面膜堆石坝周边锚固处夹具效应的室内结构模型试验,初步试验验证了按常规设计的传统膜铺设方式难以避免夹具效应的产生;在充分考虑实际施工工艺的基础上,以夹具效应产生的充分条件为切入点提出了消除夹具效应的设计思路为:在保证面膜免受损伤条件下增大“面膜夹具”间的初始标距,在坝体位移过程中设法使“面膜夹具”间面膜的有效几何变形取代材料变形;设计方法是将铺膜线平面设置高于锚固线平面,坝面位移后使铺膜线回到锚固线附近。

关键词:面膜堆石坝;土工膜;夹具效应;周边锚固;膜拉伸试验;结构模型试验;设计方法

中图分类号:TV641.4;TV223.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)01-0010-06

Mechanism of anchoring influence at perimeter of high membrane faced rockfill dam and eliminating approach: key technology of high membrane faced rockfill dam(II)//SHU Yiming^{1,2}, WU Haimin^{1,2}, JIANG Xiaozhen^{2,3}, GU Ke¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China; 3. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: A key technology issue firstly faced in studding and designing membrane faced rockfill dam (MFRD) is that at perimeter of surface membrane, under definite depth of water, “anchorages of surface membrane” are formed and then “anchoring influences”, affecting the safety of faced membrane, are produced. Based on material test and structure analysis, the forming mechanism of anchoring influence is analyzed and the necessary and sufficient conditions of anchoring influence formed are proposed. After designing structure experiment model of anchoring influence at perimeter of surface membrane on MFRD, it is proved by preliminary experiment that anchoring influence cannot be avoid if surface membrane is placed on dam according to traditional way. Based on a full consideration of construction technology and sufficient conditions of anchoring influence formed, the idea of eliminating anchoring influence under the condition of no damage of surface, one should increasing the initial gauge length between anchorages of surface membrane in order to substitute geometry deformation for the material deformation between anchorages of surface membrane during dam displacement. The approach of design is that the paving line of surface membrane is high to anchoring line, thus the paving line of surface membrane goes back to anchoring line after displacement of the dam surface.

Key words: membrane faced rockfill dam (MFRD); geomembrane; anchoring influence; perimeter anchoring; membrane tension test; structure model experiment; design approach

钢筋混凝土面板堆石坝与面膜堆石坝的不同之处为:面板为相对刚性的混凝土,而面膜为柔性体,不会产生如面板脱空、面板结构性裂缝和面板竖缝挤压破损那样的破坏。两者的相似之处为:①防渗体设置在上游坝面上,均需坚实的垫层与大坝堆石体作为支持层;②防渗体周边与两岸岩体及地基均需作防渗连接处理;③坝体的位移变形均对防渗体产生影响,尤其是防渗体周边接缝处的矢量变形。国内一些面膜堆石坝的防渗体破坏主要发生在周边锚固处,早期锚固不实,防渗体脱开漏水;改进锚固方式后,则锚固边缘处面膜损伤破坏导致漏水。这种现象实质上反映了面膜堆石坝防渗体安全存在着

关键技术问题。

Giroud 等^[1-2]研究了防渗膜在沟槽中用重物锚固以防止风作用下沿坡上、坡下和向上 3 个方向滑动,给出了计算公式,并对垃圾填埋场封盖膜锚固进行了研究,提出了 3 个方面的改进;Doi 等^[3]通过开展防渗膜的混凝土锚固槽野外试验,得到了混凝土锚固破坏的 4 种模式;Imaizumi 等^[4]对垃圾填埋场防渗膜(HDPE/LLDPE)锚固进行了小型现场试验,结果表明最大拔出力取决于锚固物的重量,柔软膜的锚着能力更强;束一鸣^[5-6]在阐述防止锚固渗漏措施和总结土工膜施工经验中均提出避免锚固处膜的集中变形的思路;Chareyre 等^[7]通过两种土质斜坡坡顶槽中锚固膜及织物的足尺拉拔试验与离散单元的数值分析得到该锚固方式的相关结论;Shu 等^[8]在分析较高土石坝面膜防渗变形时提出了膜基岩锚固边缘夹具效应的概念;花加凤等^[9]通过数值计算初步论证了夹具效应的存在性;邢玉玲等通过数值分析论证了高堆石坝土工膜与砾质心墙组合防渗形式对心墙拱效应的改善^[10]。

综上所述,关于膜锚固的大量研究主要集中在垃圾填埋场防渗膜周边土槽混凝土压重锚固的锚固件稳定分析方面;对于高堆石坝面膜周边锚固的夹具效应尚未作较为深入的分析。本文通过理论结合实践分析和初步试验揭示高面膜堆石坝夹具效应的形成机制,进而提出改进设计的思路与方法。

1 面膜周边锚固处的夹具效应

1.1 “面膜夹具”的形成

膜拉伸试验中要求膜拉伸至破坏时夹具内的膜无任何滑移,若有极少部分滑移,则需设置标距线,膜的拉伸变形仅计算标距内的变形值。拉伸试验的每端夹具两个夹片施加在膜上的压力产生的摩阻力应大于膜的拉伸强度。

高面膜堆石坝的面膜周边锚固在基岩或混凝土构件上,锚固设计要求锚着力产生的摩阻力大于膜的拉伸强度,相当于拉伸试验中的一端夹具,这是维持面膜稳定所必需的(见图 1);而另一端夹具,位于毗邻锚着处坝面,膜下垫层与膜上现浇混凝土护坡相当于两个夹片,库水压力相当于锚着力,总体上,只要膜上下两面产生的摩阻力之和大于膜的拉伸强度,这一端的夹具即形成。摩阻力的大小跟膜与上下两面材料间的界面特性及库水压力有关;当护坡为透水颗粒料或预制板块时,库水压力只产生膜与垫层间一面的摩擦力。为区分于实际夹具,此处称其为“面膜夹具”,可类比面板堆石坝周边缝铜片止水的岸坡一端浇筑在趾板内,坝面一端浇筑在面板

内,当止水浇筑于两端混凝土内的摩阻力大于止水强度时,大坝运行时随着坝体位移增大,止水发生几何变形和材料变形直至断裂破坏,止水浇筑的两端混凝土履行了夹具的功能,否则止水的破坏形式将被拔出。

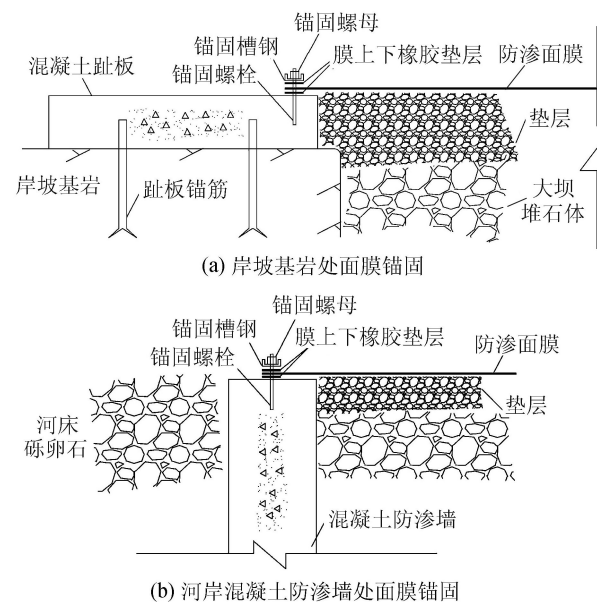


图 1 面膜周边锚固示意图

1.2 “面膜夹具”的负效应

相比混凝土面板、黏土或沥青斜墙等土石坝传统防渗材料,膜的伸长率大,适应变形的能力强,当坝面发生位移变形时面膜不会发生如上述材料的结构性裂缝,因为大坝防渗的面膜材料 PVC(聚氯乙烯)、LLDPE(线性低密度聚乙烯)及 LDPE(低密度聚乙烯)的极限伸长率 $\varepsilon_1 > 200\%$,其单向拉伸试验应力应变关系曲线如图 2 所示。

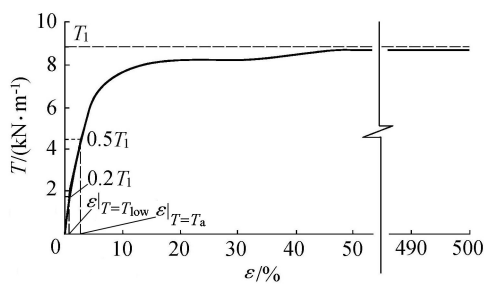


图 2 LDPE 膜拉伸曲线

伸长率 ε 的表达式为

$$\varepsilon = \frac{L_i - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: L_i 为试样某一拉伸状态时的标距; L_0 为试验初始标距,一般为 100 mm, L_0 不同, ε 稍有波动,为便于分析比较,试验对初始标距 L_0 值加以规定^[11]。图 2 中拉伸曲线延伸至末端的横坐标即为拉伸极限伸长率 ε_1 。

然而,面膜优越的变形适应性在周边锚固处仍

难以发挥作用。由于面膜的刚度在大坝整体刚度中所占比例极小,所以在坝体整体位移中面膜显现的只是自身的拉伸变形,而对坝体位移的约束作用几乎可以忽略不计。当大坝堆石体的几何尺寸和物理力学性质确定后,在一定水头作用下,大坝的位移量也就确定了,相当于式(1)中 L_i 首先是一个定值, ε 值就取决于 L_0 值,而如前所述,“面膜夹具”间的距离就是岸坡基岩与坝面垫层之间的分界线的宽度,约为毫米数量级。式(1)中当 L_0 趋于无穷小时, $\varepsilon \rightarrow \infty$, 即当坝面相对于岸坡基岩的位移 L_i 一定时,面膜夹具间的距离 L_0 越小,面膜产生的应变值 ε 就越大,当两端夹具靠在一起时(见图3),膜需要极大的伸长率才能避免破坏。当设计的面膜材料选定后,其允许的应变值 ε_a 也已定,若有 $\varepsilon > \varepsilon_a$,则面膜就不满足安全要求。可见,面膜周边锚固处“面膜夹具”的存在使常规设计的面膜铺设形式难以适应坝体位移变形而产生的负面效应,简称为“夹具效应”。

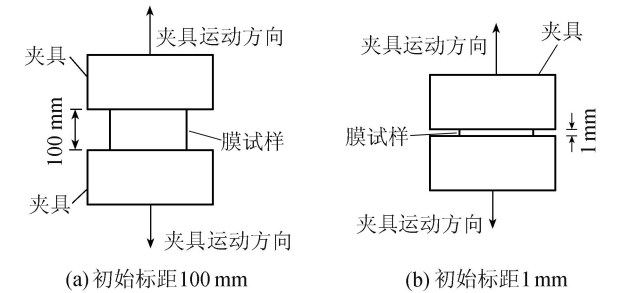


图3 夹具初始位置示意图

1.3 夹具效应的不同形成机制

实际工程中面膜周边锚固处拉伸变形模式与实验室拉伸试验有区别,除了“面膜夹具”通常不在同一个平面内以外,“面膜夹具”并不一定具有两个夹片,且所谓的夹片也不一定规整。从目前国际面膜防渗结构形式考量,不管是喷胶黏剂的颗粒垫层、无砂混凝土垫层还是聚合物透水混凝土垫层,只要水压力达到一定值,面膜与垫层之间的必定形成“面膜夹具”的一个下层夹片;而面膜与护坡之间是否形成“面膜夹具”的一个上层夹片,需具体分析:①裸露面膜(不设护坡,国内尚未建造),不形成上层夹片;②预制混凝土板块(包括其下有颗粒垫层)护坡,虽与面膜接触,但因其透水,水压力直接施加在面膜上,护坡只在面膜上增加了自身浮重,所以也不形成上层夹片;③现浇混凝土板护坡,尽管护坡分缝或还设置排水孔,但现浇混凝土的砂浆浸透复合膜织物纤维的空隙(或混凝土直接浇筑在非复合的面膜上),库水压力基本上通过护坡施加在面膜上,此时形成上层夹片。“面膜夹具”坝面端受力变形示意图见图4。

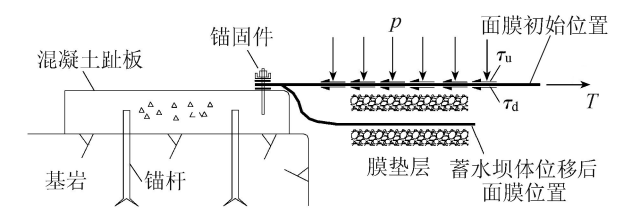


图4 面膜坝面端受力变形示意图

为了保证面膜正常运行的耐久性以实现大坝整体的有效服役期,应使面膜长期处于弹性变形阶段的低应力水平状态运行,笔者在作低应力水平值的后续研究前先参照相关规范^[12]给出面膜低应力水平拉力值 T_{low} 和膜允许拉力值 T_a 分别为

$$T_{low} \leq 0.2 T_1 \tag{2}$$

$$T_a = 0.5 T_1 \tag{3}$$

式中 T_1 为面膜的极限拉伸强度, kN/m 。由此,在具有上下两层夹片和仅有下层夹片时形成有负面影响的“面膜夹具”的必要条件分别为

$$T = \int_0^L (\tau_u + \tau_d) dx = \int_0^L p (\tan \varphi_u + \tan \varphi_d) dx \geq T_{low} \tag{4}$$

$$T = \int_0^L \tau_d dx = \int_0^L p \tan \varphi_d dx \geq T_{low} \tag{5}$$

而对应的导致面膜不安全的“面膜夹具”的必要条件分别为

$$T = \int_0^L (\tau_u + \tau_d) dx = \int_0^L p (\tan \varphi_u + \tan \varphi_d) dx \geq T_1 \tag{6}$$

$$T = \int_0^L \tau_d dx = \int_0^L p \tan \varphi_d dx \geq T_1 \tag{7}$$

式中: T 为膜内单位宽度拉力, kN/m ; p 为水压力, kPa ; τ_u 、 τ_d 分别为膜上、下面单位面积摩阻力, kPa ; φ_u 、 φ_d 分别为面膜与上下层接触材料间的摩擦角, $(^\circ)$; L 为坝面端面膜夹具的长度, m ,理论上为某考察高程坝面左右岸端长度的一半,实际考虑有效摩阻效应,宜取 $L = 1 m$ 。

式(4)和(6)中“面膜夹具”上层夹片应考虑现浇混凝土砂浆与复合膜织物纤维之间的粘结力以及库水渗入织物对摩擦力的减小量,由于这两项作用均与砂浆对织物的浸入率有关,浸入率与各个工程的混凝土配方、施工工艺、施工气候等因素有关,为便于应用,上述两项作用统一以界面摩擦力考虑。

若忽略界面特性的不均匀性,则式(4)~(7)可分别表示为

$$p \geq \frac{T_1}{5(\tan \varphi_u + \tan \varphi_d)} \tag{8}$$

$$p \geq \frac{T_1}{5 \tan \varphi_d} \tag{9}$$

$$p \geq \frac{T_1}{2(\tan \varphi_u + \tan \varphi_d)} \quad (10)$$

$$p \geq \frac{T_1}{2 \tan \varphi_d} \quad (11)$$

对具体工程而言,当设计面膜规格、上下层垫层类型确定,公式(8)~(11)中不等式右边各项因素均已确定,左边水压力即可确定,其表示在某个工况下,产生不同夹具效应在水面以下的深度。

与式(8)或(9)对应形成有负面影响的“夹具效应”的充分条件为

$$\frac{n - n_0}{n_0} \geq \varepsilon \mid_{T=T_{\text{low}}} \quad (12)$$

与式(10)或(11)对应形成导致面膜不安全的“夹具效应”的充分条件为

$$\frac{n - n_0}{n_0} \geq \varepsilon \mid_{T=T_a} \quad (13)$$

式中: n 为水库满蓄后所考察部位“面膜夹具”坝面端相对于锚固端发生的矢量位移的绝对值,mm; n_0 为所考察部位“面膜夹具”两端的初始距离,mm; $\varepsilon \mid_{T=T_{\text{low}}}$ 、 $\varepsilon \mid_{T=T_a}$ 分别为设计面膜的拉伸曲线 T_{low} 和 T_a 对应的伸长率,具体可参见图 2。

2 传统措施避免夹具效应效果试验

2.1 面膜“夹具效应”初步试验设计

人们在实践中发现面膜在周边锚固处最容易发生拉伸破坏,所以也采取一些措施以期避免。笔者团队对以往常用的面膜常规铺设形式与 Z 形及 S 形铺设形式进行了初步试验,其中后两种形式是以往人们为了避免夹具效应专门采取的措施。

初步试验在模型箱中进行。模型箱由角钢与高强玻璃制成;模型箱下部填充橡胶粒子,其在压力作用下可产生较大沉降变形,中上部填充细砾,两者之间以无纺布物隔离;在细砾中间铺设厚 1 mm 的 LDPE 膜,膜的一端锚固在模型箱箱壁上;细砾顶部放置刚性承载板,模型箱安置在反力架下,通过固定在反力架上的液压臂向承载板施加压力,箱内填充料在加载过程中压缩沉降 5 cm 时,观察锚固端附近膜的变形情况。

2.2 试验结果

a. 常规铺设。膜初始状态水平,如图 5 中水平线所示,经加载细砾填充料压缩沉降 5 cm 后膜呈现二次曲线状,图中膜下的细砾填充料变形也呈二次曲线层理状;从图 6 可见,沿锚固件边缘 LDPE 膜已经发生严重拉伸破坏,破坏处附件的膜已发生塑性变形,二次曲线变形的其他部位几乎恢复至原始状态。

b. Z 形铺设。Z 形是以往采用最多的一种避免



图 5 常规铺设初始与变形后的位置



图 6 常规铺设锚固处变形破坏状态

锚固处膜破坏的措施,被称之为“伸缩节”^[13],是认为在膜受力发生拉伸变形时,Z 形折叠能被舒展打开,进而以膜的几何位移补偿膜的材料变形。从以上面膜“夹具效应”的机理分析可知,该措施难以见效。如图 7 第一层线形所示,水平铺设的膜在距锚固件边缘约 13 cm 处折叠成 Z 形,填充料压缩变形 5 cm 后膜处于图中第二层线形位置,Z 形折叠并未舒展,只是 3 层膜更加贴紧,膜的主要变形发生在锚固处附近。从图 8 可见,锚固件边缘处的膜几乎已被拉断,破坏处附件的膜也发生了塑性变形,其他部位的膜与初始状态基本相同。

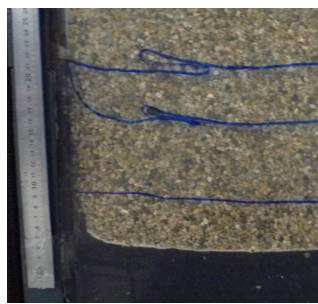


图 7 Z 形铺设初始与变形后的位置

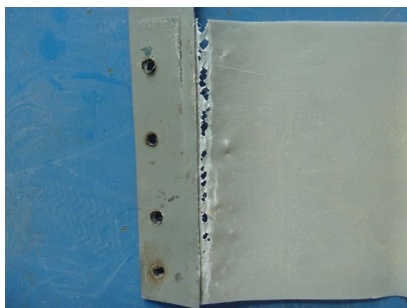


图 8 Z 形铺设锚固处变形破坏状态

c. S形铺设。与Z形伸缩节相比,S形铺设的曲折形状更加宽松,如图9中第一层线形所示,宽松曲折距离锚固处边缘约9 cm,上下相距近6 cm。加载使填充料压缩沉降5 cm后,膜处于图9中的第二层线形处,可见S形状变化很小,只是向下平移了位置,膜的主要变形也主要发生在锚固处附近。从图10可见,锚固处边缘的膜大部分发生了塑性破坏,程度比前两种铺设方式轻一些,附近的膜产生了塑性变形,其他部位与初始状态基本相同。

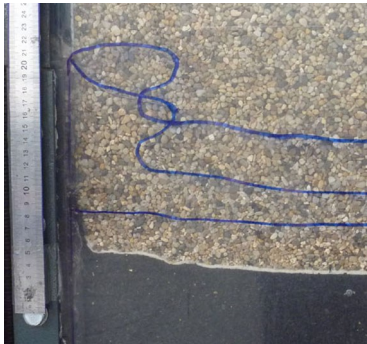


图9 S形铺设初始与变形后的位置

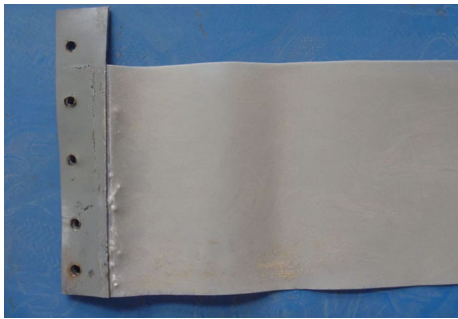
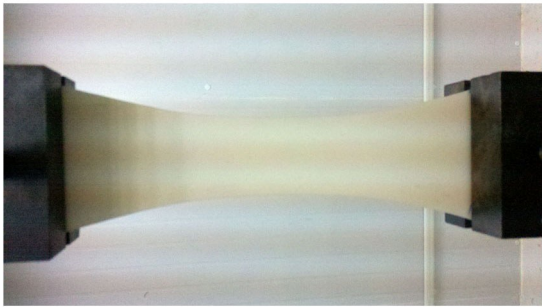


图10 S形铺设锚固处变形破坏状态

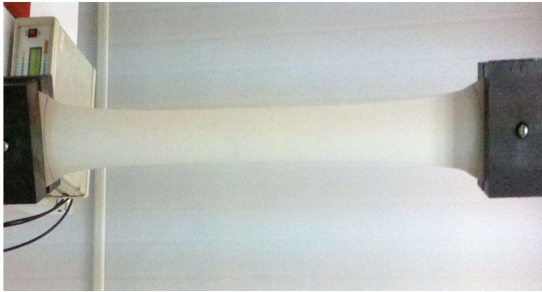
2.3 结果分析

从定性角度分析,由图5~10可见,上述3种铺设方式的膜均发生程度不同的拉伸破坏,而且均发生在锚固件边缘处,说明“面膜夹具”机制的存在。

从定量角度分析,以普通铺设方法为例,图5所示二次曲线部分膜长度比对应88 mm直线长度的伸长量为17 mm,若以88 mm为标距,则其伸长率为19.3%;图6所示膜破坏状态若与如图11所示的该膜在100 mm初始标距中伸长100 mm和500 mm的状态相比,可知其拉伸初始标距只能是如前所述“面膜夹具”两端的距离,图7拉伸试验的拉伸曲线参见图2。从图5~10观测,“面膜夹具”两端的距离为2~3 mm,伸长率为470%~750%,已经接近或超过了该膜的极限伸长率。以上分析表明:①只要“面膜夹具”产生夹具效应,上游坝面发生厘米数量级的位移,锚固处边缘的膜就可能发生拉伸破坏;②不管采用Z形或S形铺设方式,只要没有解决锚固边缘处“面膜夹具”间的标距问题,采取的措施效果甚微。



(a) 100%应变状态



(b) 400%应变状态

图11 厚1 mm的LDPE膜单向拉伸试验状态

3 消除夹具效应的思路与设计方法

3.1 消除夹具效应的思路

根据以上形成夹具效应的机制分析和初步试验可知,在一定水深下就可产生满足形成“面膜夹具”的必要条件,消除夹具效应的措施应从产生夹具效应的充分条件入手:

a. 减小坝面位移量,使锚固边缘处面膜变形量小于产生破坏效应或负面效应的量值。但是坝高、坝址地质地形、当地堆石料力学特性一定,能在原有基础上减小的坝面位移量幅度很小。

b. 增大“面膜夹具”两端夹具间的初始标距,避免夹具间面膜变形在毫米量级长度中发生,而使其在厘米或分米量级长度中发生,以“面膜夹具”间面膜的有效几何变形替代材料变形,措施效果更明显。

因此,消除夹具效应的思路应该是设法在保证面膜免受损伤条件下增大“面膜夹具”间的初始标距,在坝体位移过程中设法使“面膜夹具”间面膜的有效几何变形取代材料变形。

3.2 消除夹具效应的设计方法

基于上述消除夹具效应的思路,归纳出以下消除夹具效应的设计方法:

a. 类比已建高混凝土面板堆石坝原型观测周边缝最大矢量位移值以及参照设计坝有限元分析坝面周边最大矢量位移值,设定该坝周边坝面相对于基岩的位移最大值,称其为常规铺设时面膜夹具间距终值。

b. 施工铺膜坝面跟基岩的交线称作铺膜线,面

膜周边基岩锚固线简称锚固线,见图 12。按常规面膜铺设方式,铺膜线与锚固线基本处于同一平面,如前所述,若铺膜线与锚固线处于同一平面,则将产生夹具效应;若将铺膜线平面设置高于锚固线平面,高出的值略大于该坝的常规铺设时面膜夹具间距终值(参见图 12),水库满蓄坝面位移后使铺膜线回到锚固线附近,而整个过程“面膜夹具”间的面膜几乎只有几何变形,极少发生材料变形,夹具效应得以消除。

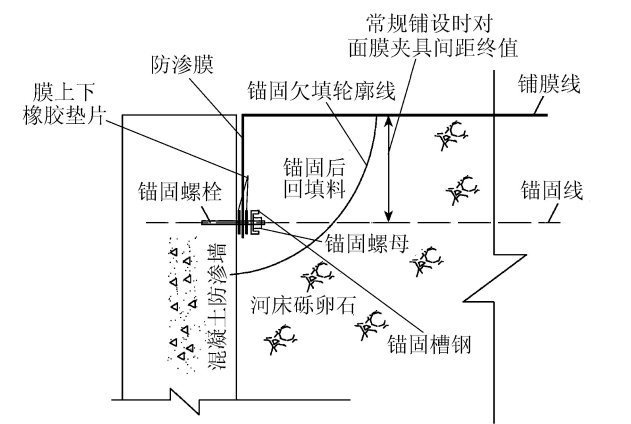


图 12 消除夹具效应设计方法示意图

c. 上述铺膜线高于锚固线的设计方法,涉及一些工艺技术细节,例如怎样处理先锚后填(垫层)以及夹具两端间面膜免受损伤等问题,各个工程需根据具体情况精心设计,此不赘述,可参考文献[14]。

4 结 语

以传统设计方法,高面膜堆石坝周边锚固处夹具效应不可避免,夹具效应与规范规定的拉伸试验的相同之处是两者均具有夹具,不同之处是后者初始标距一定,不同性能的膜具有不同的最终标距,而前者拉伸最终标距一定,不同性能的膜需要不同的初始标距才能保证自身运行安全。消除夹具效应的思路是使“面膜夹具”间面膜的有效几何变形取代材料变形,设计方法为铺膜线高于锚固线,其值取决于锚固处坝体相对于基岩的位移值。笔者团队已研制专门仪器设备^[15]继续作深入研究,分析揭示夹具效应形成的机理规律,开发更加完善避免夹具效应的工艺措施。

参考文献:

[1] GIROUD J P, GLEASON M H, ZORNBERG J G. Design of geomembrane anchorage against wind action [J]. Geosynthetics International, 1999, 6(6): 481-507.

[2] GIROUD J P, WALLACE R B, CASTRO C J. Improved methodology for geomembrane wind uplift design [C]// KOSEKI J. Proceeding of the 8th International Conference on Geosynthetics (8ICG). Rotterdam: Millpress Science

Publishers, 2006: 225-230.

[3] DOI Y, IMAIZUMI S. Field modelled tests for estimating an anchorage ability of geomembrane liner [C]// Geosynthetics Asia 97 Conference. Bangalore, India: [s. n.], 1997: 357-364.

[4] IMAIZUMI S, SEKIYA T, OZAWA K, et al. Ability of concrete anchorage for geomembrane barrier in landfill [C]// CCIGS. Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering: 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics, Shanghai, China. Rotterdam: Springer, 2008: 502-507.

[5] 束一鸣. 土工膜连接和缺陷渗漏量计算与缺陷渗流影响[J]. 人民长江, 2002, 33(3): 26-28. (SHU Yiming. Geomembrane connection and analysis of defect leakage [J]. Yangtze River, 2002, 33(3): 26-28. (in Chinese))

[6] 束一鸣. 土工膜施工工艺及其经验教训[J]. 水利水电技术, 2002, 33(4): 19-21. (SHU Yiming. Summarizing on construction technology of impermeable geomembrane [J]. Water Resources and Hydropower, 2002, 33(4): 19-21. (in Chinese))

[7] Chareyre B, Briancon L, Villard P. Theoretical versus experimental modeling of the anchorage capacity of geotextiles in trenches [J]. Geosynthetics International, 2002, 9(2): 97-123.

[8] SHU Yiming, LI Yonghong. Design principles for high head earth-rock dams with geomembranes [C]// Korea National Committee on Large Dams, Dam Safety Problems And Solutions: Sharing Experience, ICOLD 72nd Annual Meeting Proceedings. Seoul: INTERCOM Convention Services, Inc., 2004: 628-639.

[9] 花加凤, 束一鸣, 张贵科, 等. 土石坝坝面防渗膜中的夹具效应[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(2): 66-68. (HUA Jiafeng, SHU Yiming, ZHANG Guike, et al. Clamping effect in geomembranes used for seepage control of upstream surface of earth-rock dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(2): 66-68. (in Chinese))

[10] XING Yuling, SHU Yiming, HUA Jiafeng, et al. Improvement of arch action at clay core-wall of high rockfill dam by united seepage control with geomembrane [C]// Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering, Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics in Shanghai China. Rotterdam: Sping-Verlag, 2004: 780-784.

[11] SL/T 235—1999 土工合成材料测试规程[S].

[12] SL/T 225—1998 水利水电工程土工合成材料应用技术规范[S].

[13] DL/T 5129—2001 碾压式土石坝施工规范[S].

[14] 束一鸣, 吴海民, 姜晓桢, 等. 补偿位移消除高面膜堆石坝防渗膜锚固处夹具效应的工艺技术: 中国, 201410248046. 5 [P]. 2014-06-05.

[15] 束一鸣, 吴海民, 姜晓桢, 等. 一种柔性防渗体接缝结构机械动态试验仪及试验方法: 中国, 201410687174X [P]. 2014-11-25.

(收稿日期: 2014-10-29 编辑: 熊水斌)