

高面膜堆石坝关键设计概念与设计方法

束一鸣

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:针对高面膜堆石坝的特点,分析高面膜堆石坝防渗面膜变形原理和几种主要防渗面膜材料的变形特点,阐述防渗面膜选择与设计、防渗面膜铺设设计以及周边锚固设计等方法。梳理和分析防渗面膜变形安全校核方法,提出较为系统的面膜变形安全校核方法;指出以往研究中关于颗粒垫层上防渗面膜液胀变形校核方法存在的问题,提出了比较符合工程实际且易于工程设计应用的液胀变形校核方法。

关键词:高面膜堆石坝;防渗面膜;变形特性;设计与校核方法;夹具效应

中图分类号:TV641.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2019)01-0046-08

Key design concepts and approaches of high membrane faced rock-fill dams//SHU Yiming (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the properties of high membrane faced rock-fill dams (MFRD), deformation principles of the seepage-proofing face membrane and the deformation characteristics of the main materials are analyzed. The design and selection of face membranes and their spread out and periphery anchorage are expounded. The safety check method of the anti-seepage membrane deformation is analyzed and a systematic safety check method for face membrane deformation is proposed. After pointing out the defects about safety check method for liquid expansion of face membranes on gravel cushion in early research, a more feasible safety check method in engineering design and application is proposed.

Key words: high MFRD; seepage-proofing face membrane; deformation principle; method of design and safety check; fixture effect

以高分子聚合物土工膜作为防渗主体铺设在上游坝面(以下称“面膜”或“防渗面膜”)的堆石坝称作面膜堆石坝(membrane faced rock-fill dam, MFRD)^[1]。面膜堆石坝整体结构与面板堆石坝相近,前者相较后者的显著区别是将防渗混凝土面板转换成高分子防渗面膜后不设缝及止水。面膜堆石坝主要结构分为支撑体和防渗体。

面膜堆石坝具有以下特点:①膜防渗性能高,作为工业化产品,质量保证率高;②结构设计简单明了,“前堵后排”的水工设计基本思想体现充分;③施工程序流畅,施工速度快、工期短、效率高^[2];④面膜位于坝面,运行维护简单方便;⑤高面膜堆石坝不同部位应变差异极大,需精心设计;⑥施工质量控制要求高。

高面膜堆石坝的适用条件包括:①因无合适料场只能用软岩石料建造混凝土面板坝;②地震烈度 8 度以上深覆盖层的高坝坝址;③河床覆盖层深厚

且附近无合适防渗土料或采土受生态环境保护限制难以采用黏性土心墙(或斜心墙)高堆石坝方案的坝址;④高寒地域建造沥青混凝土心墙高堆石坝施工质量难以控制的坝址;⑤建造高面板堆石坝的造价和工期难以满足业主预期;⑥当前高面膜堆石坝的建造高度在 150 m 以内为宜。

在面膜堆石坝设计的研究方面:全苏水工科学研究院(现为全俄水工科学研究院股份公司,下同)通过铺设在砾石垫层上聚乙烯(PE)膜的水力顶胀试验,建立了膜厚与水压力、砾石直径、膜弹性模量及允许拉应力之间的关系式^[3,4];文献[3]中 Girard 基于狭长缝上液胀薄膜圆弧变形的假定,推导了防渗膜受水力顶胀后应力和应变的计算公式;Girard 等^[4]调查一座聚氯乙烯(PVC)土工膜防渗土坝保护层滑坡事件时对 PVC 土工膜/土工织物界面抗剪强度进行复核,发现在低法向压力下应用斜板仪取代直剪仪测试土工膜界面的抗剪强度是可行的;顾

滄臣^[5]基于薄膜理论给出特定水头下土工膜拉力及变形计算方法;束一鸣^[6]通过试验分析土工膜的拉伸力学性能参数,得出土石坝防渗膜的弹性应变指标比拉伸强度指标更为重要,并给出复合土工膜获得最大延伸率的方法;Giroud等^[7]通过理论分析提出以土工膜拉伸变形余能评价其抵抗差异变形能力的概念,并表明PVC膜适应差异变形的能力远大于HDPE膜;Giroud等^[8]通过理论分析提出土工膜在结构物拐角连接处变形的计算公式;束一鸣等^[9-13]通过水力顶胀(以下简称“液胀”)试验分别对PVC土工膜及损伤土工膜进行工程仿真,获得土工膜损伤程度与切线变形模量及液胀强度之间的关系,并通过理论分析、数值计算、模型试验等方法阐述了防渗膜随主体结构位移在周边锚固区域狭小部位会产生较大拉伸变形而发生威胁防渗膜安全的“夹具效应”;Cazzuffi等^[14]综述全球面膜坝工程后指出,合适的高弹性应变膜与全服役期裸露使用的防渗膜已成为发展趋势。

在大坝建设方面:意大利于1959年建成Contrada Sabetta大坝,坝高32.5 m,在坡比为1:1的上游坝面上铺设厚2 mm的聚异丁烯膜作为堆石坝的防渗体^[15],是第一座高度超过30 m的面膜堆石坝;1996年建成的高91 m地处南欧的Bovilla面膜堆石坝^[16],在结构设计、防渗材料及工艺等方面均取得长足进步;我国自20世纪80年代开始新建膜防渗土石坝以来,1994年建成第一座高于30 m的面膜堆石坝——浙江小岭头堆石坝^[17];2007年建成蓄水的西霞院面膜砾石坝,为我国大江大河上建造的第一座面膜土石坝^[18];2009年建成蓄水的四川田湾河梯级水电站仁宗海面膜堆石坝高达56 m^[19];高度超过70 m的面膜堆石坝目前只有我国投资并设计的老挝南欧江六级软岩面膜堆石坝,坝高87 m,2015年10月建成蓄水^[2]。

应该指出,由于国际专利保护,我国土工膜防渗土石坝是在加固工程(坝体变形基本完成)及中低土石坝(坝体变形不大)建设过程中摸索发展起来的,原有的一些设计误区尚未产生明显不良后果,但对于70~150 m的高面膜堆石坝,需严格按高堆石坝及防渗膜自身变形特点进行合理设计和精心施工,才能确保大坝运行安全并达到设计服役周期。本文基于数十年的研究与实践,针对高面膜堆石坝防渗面膜设计中的一些模糊认识展开讨论,阐述其部分设计概念与方法。

1 堆石坝面膜变形特性与膜类选择

1.1 防渗面膜的变形特性

a. 面膜堆石坝坝面锅底状变形最大处的变形

值较大,但应变远小于防渗面膜的弹性应变;在深窄河谷中,堆石体因流变产生挤压变形,而柔软的面膜则产生弯曲变形。

b. 面膜铺设于坝面且变形模量低,其对坝体位移产生的约束甚微,所以面膜需适应坝体的位移变形以保证自身运行安全。

c. 中等高度大坝底部所受水压足以使具有孔隙的垫层上的防渗面膜产生液胀变形。

d. 受水压后,坝面周边与河床及两岸基岩之间将产生较大差异位移,因面膜周边锚固在基岩或混凝土构件上,将承受该处较大的差异变形。值得指出,参照我国已建200 m级面板堆石坝周边缝的实测最大矢量位移值为105 mm^[20],所以锚固处面膜的集中变形量可以预测。

1.2 已建中低面膜堆石坝防渗膜类型及其主要特性

我国境内建造的面膜堆石坝属中、低高度,坝体的位移变形相对较小,施工难度相对较低,对防渗膜选择的要求相对宽松,主要有3个品种,即低密度聚乙烯(LDPE)膜、高密度聚乙烯(HDPE)膜、聚氯乙烯(PVC)膜。LDPE膜常以复合膜形式(膜厚度0.8 mm以下)用于防渗水头小于或等于30 m的工程,其柔软性适中,由于其幅宽较大,拼接接缝少,现场焊接施工工作量较小。HDPE膜主要用于防渗水头大于50 m的工程,厚度在1 mm以上,因其柔软性极差,施工可操作性差;又因其弹性极限延伸率在15%以内,适应局部较大差异位移变形的能力较弱。PVC膜主要用于防渗水头30 m以上的工程,其弹性应变可达60%以上。区别于20世纪八九十年代的PCV膜,当前生产的PVC膜塑化剂不易流失,国外较大坝采用PVC膜全服役期裸露运行。

1.3 高面膜堆石坝防渗膜类型选择

高面膜堆石坝防渗膜的选择应考虑现有防渗膜产品的适应差异变形性能、施工操作性(柔软性能)、抗损伤性能等主要因素。

a. 变形性能。无回收料的PVC膜的拉伸极限伸长率约为250%,应力-应变曲线无明显的屈服点,4℃库水温度环境中的弹性变形阶段末端值在60%~70%之间^[21]。HDPE膜的拉伸极限伸长率在500%以上,弹性变形阶段伸长率在15%以内,拉伸屈服强度约为拉伸断裂强度的2/3,其应力-应变曲线形状与理想弹塑性曲线相仿;LDPE膜的弹性变形量比HDPE膜稍大^[22]。如前所述,适应大坝位移变形是防渗膜的安全之道,PVC防渗膜的变形特性更有利于自身运行安全。

b. 柔软性能。PVC膜柔软优越性体现于:膜的拼接以及在锚固件上的安装等操作都易于实施;而

厚度 1 mm 以上的 HDPE 膜平面呈板状,施工操作较为困难。此外,PVC 膜能自然贴合在细观相对不平整的垫层表面,受水压后膜内基本不产生附加张拉变形;而呈板状的 HDPE 膜,受水压后将发生附加张拉变形。

c. 抗损伤性能。防渗膜储存、运输、施工过程中难免会对膜产生不同程度的损伤,复合膜比纯膜的抗损伤性能高,只要复合工艺可靠,应优先选择两布一膜型复合膜;若复合工艺可靠性不足,可选择一布一膜型复合膜。

d. 抗老化性能。近 30 多年国内外膜防渗大坝工程的实践表明,只要防渗膜上设置防护层,防渗膜在服役期的抗老化性能是能满足工程要求的。

综上所述,对于高面膜堆石坝的防渗膜而言,选择复合型 PVC 膜是合适的。

2 面膜厚度拟定方法

2.1 现行厚度拟定方法的局限性

全苏水工科学研究所、美国学者基劳德等先后提出了基于防渗膜在垫层上受水压顶胀的应力-应变计算公式,国内相关文献作了介绍和推荐^[3](以下简称上述文献),使符合适用条件的防渗膜液胀应力-应变计算校核有公式可循。然而,人们逐渐将上述文献液胀应力-应变公式用以设计防渗膜的厚度,其结果与高面膜堆石坝实际运行状态差异较大。

①面膜变形并非仅液胀形式。水库蓄水后,防渗面膜变形主要有两种,最普遍的是随坝体位移而产生的变形,其次才是局部垫层存在凹凸处产生的水力顶胀变形;此外还有施工期需承受的施工操作受力变形。所以仅以液胀变形拟定面膜厚度,具有较大局限性。②厚度计算值远低于设计采用值。上述文献公式提出的背景,分别针对相对粗放的垫层与固体废弃物。对于现代高面膜堆石坝,即使采用颗粒型垫层,对垫层颗粒粒径控制的要求严格,一般为粗砂细砾,最大粒径不大于 10 mm,平均粒径约 4~6 mm,颗粒间形成的孔隙更加微小,用上述文献液胀计算公式得到的防渗膜厚度有的甚至不足 1 mm,需放大若干倍才能作为设计值,而放大的倍数存在较大的任意性。③计算公式应用需一膜一试验,即需通过多轴拉伸试验分别获取不同规格防渗膜的应力-应变关系,而不是常规单向拉伸的应力-应变关系。④若采用 GB/T 50290—2014《土工合成材料应用技术规范》中允许抗拉强度的计算式作为防渗面膜厚度的设计方法,因该公式主要适用于在结构中承受拉力、发挥加筋作用的材料,将其作为防渗面膜的厚度计算公式,适用性偏离严重。

2.2 合理的厚度拟定方法

由于采用上述文献中液胀应力-应变公式计算厚度存在局限性,实际工程中最终还是由设计者参考已建工程拟定,或者将计算安全系数放大,使设计厚度满足已建工程的经验值。

实际上,影响防渗面膜设计厚度的主要因素是大坝高度,其直接影响大坝位移、防渗面膜随位移的变形、防渗面膜水力顶胀变形、施工困难程度及防渗面膜施工受力变形、防渗面膜擦划损伤概率及程度等。由于其中较多指标难以精确量化,因此参照已建工程经验以坝高拟定防渗膜厚度的方法相对比较明智。这并不是从以前的定量化设计倒退到现在的定性化设计,而是选择一种更加符合现阶段坝高对防渗面膜厚度要求的科学合理设计方法。由于绝大多数大坝坝高即为挡水水头,参照国内外已建工程,按照面膜堆石坝挡水水头拟定防护层下的 PVC 防渗面膜厚度见表 1。

表 1 面膜堆石坝不同挡水水头 PVC 防渗面膜设计厚度(防护层覆盖下运行)

挡水水头/m	PVC 膜厚度/mm
30~40	1.0
40~70	1.0~2.0
70~100	2.0~3.0
>100	>3.0

3 颗粒垫层面膜液胀变形设计校核方法

3.1 相对繁复的现行校核方法

a. 基劳德公式只涉及径向水压力、孔隙直径、膜内拉力,除非对不同规格的防渗膜均分别开展多轴拉伸试验,否则难以得知面膜所受该水压力下的实际内力及其应力-应变关系。

b. 应用仅涉及膜厚度而未涉及弹性模量的计算公式需要专门针对不同规格防渗膜做多轴拉伸试验,以获取其应力-应变关系。不同种类、不同规格的 PVC 等防渗膜具有不同的弹性模量,在相同水压力作用下将产生不同的应力-应变关系。全苏水工科学研究所以允许应力 $[\sigma]$ 控制的厚度计算公式虽然包含防渗膜的弹性模量,但正如公式适用条件所述,仅适用于某一区间粒径垫层上某一区间厚度的 PE 膜,并不适用于所有类型、规格的防渗面膜。

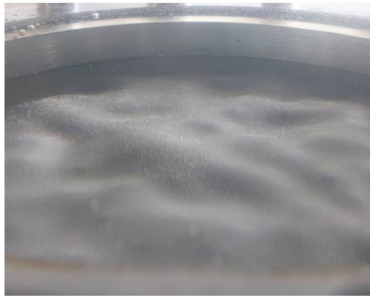
c. 水压顶胀变形并不遵循单向拉伸变形规律。由于不同荷载作用下面膜顶胀变形的弧面形状(曲率)的改变,遵循多轴拉伸或双向拉伸变形的规律,其与单向拉伸变形不尽相同,所以采用单向拉伸试验的变形曲线作图获得设计膜厚的方法难免偏差很大。

d. 实际水压顶胀变形并非无限度发展直至破

坏。一般防渗面膜铺设于透水混凝土垫层或透水挤压边墙垫层之上,即使铺设于颗粒垫层之上,颗粒间孔隙的孔深一般小于周围颗粒粒径厚度的1/2,防渗面膜顶胀变形触底后就不可能再继续变形。

3.2 本文实用校核方法

为避免对同类不同规格的防渗膜分别开展液胀试验以复核其液胀变形安全性,笔者认为可从工程实际出发,基于设计要求提出可能最大有限变形(即面膜顶胀变形终止于孔洞底部,状态见图1^[23])的计算公式。该公式应满足以下条件:①能反映颗粒垫层的特征因素;②以更符合防渗面膜破坏规律的应变量作为安全校核物理量;③校核指标值需考量面膜持续长久变形对服役期的影响;④校核计算尽量简单明了、使用方便。



(a) 承受0.2 m水头



(b) 承受30 m水头(面膜孔触底)

图1 颗粒垫层上PVC膜承受不同水头卸载后状态

上述校核方法的思路基于垫层颗粒以可能最不利排列方式开展试验,其并不涉及面膜的应力-应变关系,而面膜材料的本构关系将在拟定材料的允许应变值中体现。

3.2.1 垫层颗粒排列试验假设

颗粒垫层采用扁圆砾,最大粒径 $d_{\max} \leq 10 \text{ mm}$,渗透系数 $k \geq 5 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。垫层颗粒可能最不利排列试验按 $d_{\max} = 10 \text{ mm}$ 、意外混入的超常砾石粒径 $D \approx 20 \text{ mm}$ (半径 $R \approx 10 \text{ mm}$)开展,如图2所示。依据工程实际,垫层表面大致平整,经量测,扁圆砾厚度 T 可表达为

$$T = R/i \quad (1)$$

经量测,本试验处于表面的超常颗粒按环形排列形成的孔隙(孔洞)深度 h 为

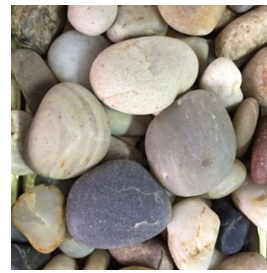


图2 4个超常扁圆砾石形成星形孔洞(俯视)

$$h = T/j \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得到:

$$h = R/ij = R/m \quad (3)$$

式中: i 和 j 为计算系数; m 为宽深比, $m > 2$ 。试验中超常扁圆形砾石的厚度 $T \approx D/4 = R/2$,即 $h \approx T/2 = R/4$ 。

基于设计垫层颗粒可能的最不利排列方式进行试验,需对校核方法建立以下一些必要假设。

a. 以3个或4个超常粒径的扁圆形砾石聚集在一起时形成的孔隙(孔洞)作为面膜水压顶胀的架空空间,其中尤以4圆砾间孔隙(孔洞)面积更大,因此以4圆砾聚集状态计算水压顶胀变形,如图3所示。

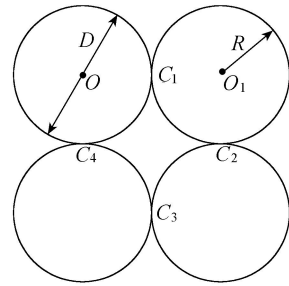


图3 4个扁圆砾形成星形孔洞(俯视)

b. 如图3所示,由圆砾间交点 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 构成的星形孔隙(孔洞)可用等面积圆(等效圆)替代,即当 D 一定时,如图4所示的等效圆半径 R_b 就得以确定。提出孔隙等效圆概念基于以下考虑:①超常颗粒任意排列,形状各异,统一将其简化以等效圆表征;②等效圆的校核结果偏于安全,因为大变形材料在各向同等应变下最先达到屈服。

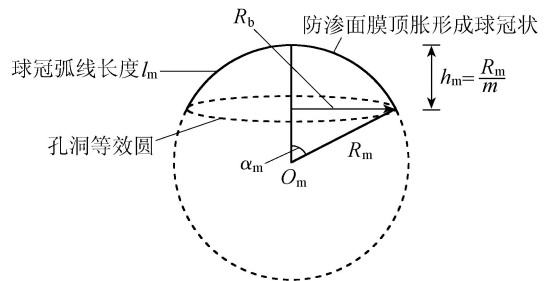


图4 面膜顶入孔洞形成球冠状(立视后倒转180°示意图)

c. 受水压后防渗面膜顶入等效圆的变形与孔

隙(孔洞)形状有关,可能为圆弧状,也可能为椭圆弧状或非光滑弧面状等,依据讨论,假定为球冠状是最合理的,如图4所示,图中 h_m 为球冠的弦高, R_m 为球冠所在球体的半径。

d. 本文研究对象为高面膜堆石坝,产生面膜水压顶胀变形的颗粒垫层孔隙(孔洞)位置分布是完全随机的。以可能的最不利状况考虑,即出现在所设计大坝的下部,承受大坝最大水头。

3.2.2 本文校核方法及结果分析

根据垫层颗粒排列试验,基于以上假设,经过推导(因篇幅所限,此处略去推导过程)可分别得到面膜液胀呈球冠状后的平均面积应变 ε_A 和平均线应变 ε_1 为

$$\varepsilon_A = \frac{\pi}{(4 - \pi)m^2} - 1 \quad (4)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\pi}{180} \frac{\left(\frac{2m}{\pi} - \frac{m}{\pi} + \frac{1}{2m}\right) \arcsin \frac{\sqrt{\frac{4}{\pi} - 1}}{\sqrt{\frac{4}{\pi} - 1}}}{\left(\frac{2m}{\pi} - \frac{m}{\pi} + \frac{1}{2m}\right)} - 1 \quad (5)$$

将 m 以不同数值代入式(4)(5)可得相应的平均面积应变 ε_A 和平均线应变 ε_1 ,见表2。

表2 不同 m 值对应的 ε_A 和 ε_1

m	$\varepsilon_A/\%$	$\varepsilon_1/\%$
2	91.3	43.4
3	40.6	22.3
4	22.8	12.4
5	14.6	7.5
6	10.1	4.7

m 的计算公式如下:

$$m = \frac{R}{h} \quad (6)$$

液胀变形的面积应变和线应变校核公式分别为

$$\varepsilon_A \leq [\varepsilon]_A \quad (7)$$

$$\varepsilon_1 \leq [\varepsilon]_1 \quad (8)$$

式中: $[\varepsilon]_A$ 、 $[\varepsilon]_1$ 分别为液胀面积应变、液胀线应变允许值。

从表2与式(4)(5)可知:①面膜在接触颗粒垫层上的液胀变形与形成星形孔隙(孔洞)的颗粒粒径有关;②应变与孔隙(孔洞)半径及深度有关,即孔隙(孔洞)的 m 越大,应变越小;③ m 相同时,面积应变比线应变大得多。

由此可得到如下结论和启示:①颗粒垫层上面膜液胀变形量取决于孔隙(孔洞)的宽深比。本文校核公式的工程意义在于,设计者或施工质量控制者根据垫层可能的超常粒径极易得到面膜可能产生的最大液胀变形应变,无须纠缠于极难合理模拟

的水压力从小至大的变形过程。②评估接触颗粒垫层时,一方面考量是否有超常大颗粒聚集,而更重要的是考量其颗粒孔洞的宽深比,这可以从美国 Salt Spring 堆石坝混凝土面板工程^[19]中得到印证,已运行70多年的面板混凝土老化剥蚀形成凹坑,修复时去除松动部分,将防渗面膜直接铺设于凹坑并未填平的混凝土面板上,尽管凹坑直径很大,但深度不大,即宽深比较大,运行1年后水库放空检查,变形后贴紧坑底的防渗面膜仍安全运行。但若按上述文献的公式计算,面膜会因孔隙直径超大而破坏。③面膜液胀变形处于多向应力状态,以允许面积应变变量校核顶胀变形更加符合工程实际。④相同的球冠变形,面积应变比线应变大得多,从偏于安全考虑,以允许面积应变变量校核顶胀变形更加保险。⑤由双向拉伸和单向拉伸的比较试验可知,相同的面膜材料,双向或多向拉伸的极限伸长率远小于单向拉伸的极限伸长率,即双向或多向拉伸允许应变变量远小于单向拉伸允许应变变量,因此以允许面积应变变量校核液胀变形更加合理。

4 高面膜堆石坝防渗膜变形安全校核原理及方法

4.1 面膜安全校核物理量选择

面膜在大坝运行中的力学行为主要表现为:①随坝体位移发生伸长变形;②垫层局部凹凸、孔隙(孔洞)产生液胀变形;③以上两种变形的叠加。在工程结构材料安全校核中通常以强度与其对应拉、压应力作为校核指标,例如混凝土的抗压强度及抗拉强度、土体的抗剪强度等。

然而,高面膜堆石坝防渗面膜的安全校核应以拉伸变形应变变量作为校核物理量,原因如下:①面膜的受力变形主要是随着坝体位移而产生拉伸变形以及局部可能发生的液胀变形;②长期持续变形后极限伸长率的损失比极限拉伸强度的损失更突出;③在有限元等数值计算与原型观测中,变形及应变都是直接计算或量测的物理量,而应力是由应变计算得出的。

4.2 面膜应变变量计算

a. 面膜随坝体位移变形应变变量。堆石坝为散粒体结构,设计阶段的坝面位移通常采用三维有限单元法或三维差分法等分析方法获得堆石坝位移的数值解,进而计算面膜的应变值。由于面膜是在坝体填筑、坝面垫层处理后再铺设的,所以不应计入坝体填筑时发生的位移,只计算初蓄水至正常蓄水位或最高水位时产生的部分坝体位移;计算应考虑面膜与垫层间的界面特性,故应选取防渗面膜最大应

变量作为应变安全校核对象。

b. 面膜局部液胀变形应变量按式(4)或式(5)计算。

c. 周边锚固处面膜变形应变量。面膜堆石坝周边锚固部位极小区域内由于夹具效应将产生甚至超过防渗面膜变形极限的应变量。高面膜堆石坝设计要求对周边锚固部位面膜铺设方式进行专门设计,以避免或大量削减该处产生的拉应变。在进行三维有限单元法或三维差分法等计算时,极小区域内的面膜应变量计算应通过堆石坝常规计算程序的专门处理实现。

4.3 面膜变形安全校核公式及指标

4.3.1 安全校核公式

a. 坝面防渗面膜变形应变量安全校核。考虑最不利情况,应将可能产生最大液胀(水力顶胀)应变量与随坝体位移产生最大拉伸应变量相叠加后校核其变形安全,即

$$\varepsilon_t = \varepsilon_f + \varepsilon_m \leq [\varepsilon] \quad (9)$$

式中: ε_f 为数值计算面膜变形应变最大值(顺坡向或沿坝轴线向),%; ε_m 为可能产生的最大液胀应变计算值,%; ε_t 为上述两种面膜变形叠加后的应变值,%; $[\varepsilon]$ 为防渗面膜的允许应变(若为面积应变,以 $[\varepsilon]_A$ 表示;若为线应变,以 $[\varepsilon]_l$ 表示),%。

b. 锚固部位变形应变量安全校核。锚固部位防渗面膜常规平面铺设时的变形应变安全校核公式为

$$\varepsilon_c = \frac{L_c - L_0}{L_0} \times 100\% \leq [\varepsilon]_l \quad (10)$$

式中: ε_c 为面膜从锚固件出口相对刚性结构边缘至同一平面内接触大坝散粒体材料的长度内的应变量,%; L_0 为面膜从锚固出口边缘至同一平面内接触大坝散粒体材料的长度,cm; L_c 为锚固部位防渗面膜从相对刚性结构边缘至同一平面内接触大坝散粒体材料的长度在水库满蓄变形后的长度,可通过数值分析或工程类比获得,cm。

锚固部位防渗面膜逆坝面位移方向铺设(图5(a))时的变形应变量安全校核公式为

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 0 & L \leq 2L'_0 - h_a \\ \frac{L - 2L'_0 + h_a}{L'_0} \times 100\% \leq [\varepsilon]_l & L > 2L'_0 - h_a \end{cases} \quad (11)$$

式中: ε_n 为逆坝面位移方向铺设时面膜从锚固件出口边缘沿坝面位移方向变形的应变量,%; L 为锚固部位坝面相对该处岸坡(河床)基岩(或混凝土结构)的位移量,设计阶段可通过数值分析或工程类比获得,cm; L'_0 为面膜从锚固出口边缘至坝面铺膜平

面的间距,cm; h_a 为面膜锚固件的长度,cm。

锚固部位防渗面膜顺坝面位移方向铺设(图5(b))时的变形应变安全校核公式为

$$\varepsilon_p = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \times 100\% \leq [\varepsilon]_l \quad (12)$$

式中: ε_p 为顺坝面位移方向铺设时面膜从锚固件出口边缘沿坝面位移方向变形的应变量,%; L_1 为面膜从锚固出口边缘顺坝面位移方向铺设至沟槽底部之间的直线段长度,cm(参见图6中堆石所在平面与混凝土防浪墙所在平面之间的垂直距离); L_2 为坝面位移后沟槽底部至锚固件出口处的距离,即面膜拉伸变形后从锚固件出口顺坝面位移方向至沟槽底部的实际长度,设计阶段可通过数值分析或工程类比获得,cm。

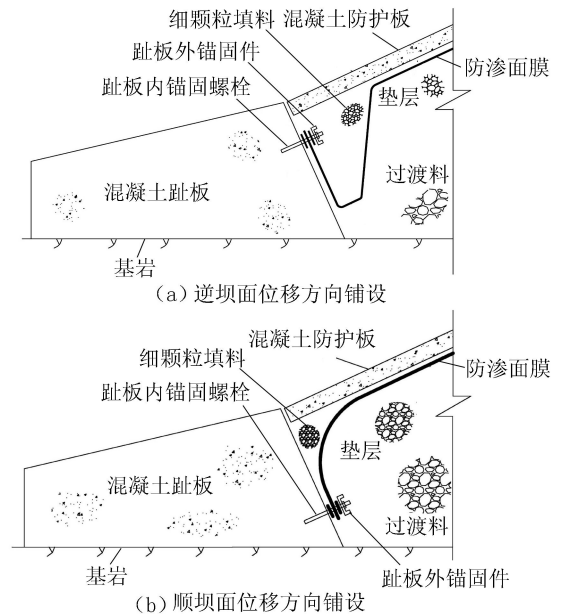


图5 两种铺设锚固方式

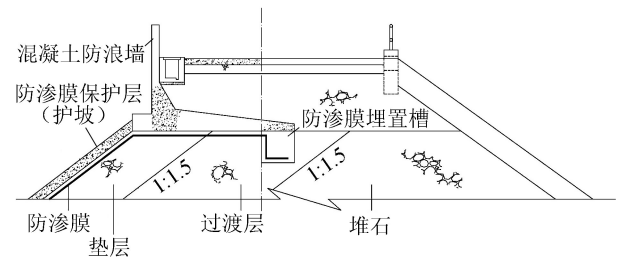


图6 防渗面膜在坝顶防浪墙底部

4.3.2 安全校核指标

a. 单向拉伸应变量。当校核部位的防渗面膜明显处于单向拉伸状态时,按单向拉伸校核应变量。允许应变量 $[\varepsilon]_l$ 为单向拉伸试验应力峰值应变量的20%。

b. 双向拉伸应变量。当校核部位的防渗面膜明显处于双向拉伸状态时,按双向拉伸校核应变量。允许应变量 $[\varepsilon]_A$ 为双向拉伸试验应力峰值应变量

的20%。

以上允许应变量指标取值为应力峰值应变量的20%，主要考虑面膜运行变形的安全余幅，同时考虑面膜长期持续变形后力学性能的衰减对服役期的影响。

5 面膜周边锚固原理及方法

5.1 周边锚固处夹具效应

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，这是维持防渗面膜稳定所必需的；而另一端夹具，位于毗邻锚固处的坝面，库水压力相当于锚固压力，只要防渗面膜与垫层之间的摩阻力大于膜的拉伸强度，这一端的夹具即已充分形成^[18]。按照防渗面膜的常规铺设方法，上述这两个夹具之间的距离约为数毫米至十数毫米，而蓄水以后两者之间的位移值若以混凝土面板堆石坝周边缝矢量位移较大值60~80 mm估算，此处防渗面膜的应变量将超出500%，超出任何一种防渗面膜的弹性变形极限，导致防渗面膜安全受到极大威胁。

5.2 避免或削弱夹具效应的设计概念与方法

a. 以防渗面膜的几何变形替代自身材料变形。将出锚固构件的一段防渗面膜逆坝面位移方向铺设，使蓄水运行后的防渗面膜随坝体位移回到与锚固线同一平面附近，在此位移过程中防渗面膜几乎不产生拉应力，如图5(a)所示。

b. 增加夹具间标距，减小防渗面膜的材料变形。使出锚固构件的一段防渗面膜紧贴沟槽壁即顺坝面位移方向铺设，增大两夹具间的初始距离(标距)，因坝面位移最终值一定，则标距越大，拉伸应变就越小，如图5(b)所示。

5.3 与两岸岩坡连接锚固的布置

防渗面膜与两岸岩石坝坡的连接锚固结构布置见图5(a)，逆坝面位移方向铺设布置步骤如下^[24]：
①布置防渗面膜锚固趾板；②布置防渗面膜锚固线与坝面铺膜线；③将防渗面膜由上部进入锚固件锚固。

5.4 与坝顶混凝土防浪墙连接锚固的布置

防浪墙底部处于正常蓄水位以上时，防渗面膜与坝顶混凝土防浪墙的连接可采用埋置方式，见图6。防浪墙底部处于正常蓄水位以下时，可采用锚固方式将防渗面膜锚着在混凝土防浪墙上游面。

5.5 与坝基混凝土防渗墙连接锚固的布置

河床为砂砾石深覆盖层时，河床段防渗面膜的底部与混凝土防渗墙连接，应将防渗面膜锚固在混凝土防渗墙墙帽的下游侧，锚固方式与锚固在混凝土

土趾板情况相仿，见图7。

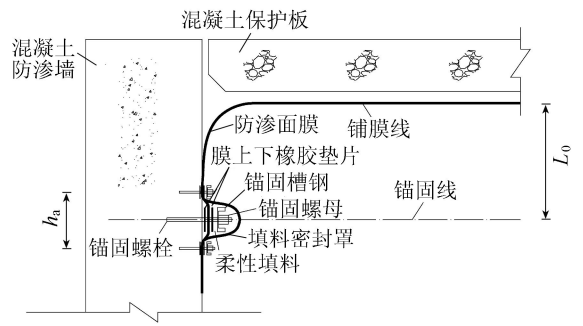


图7 防渗面膜锚固在混凝土防渗墙下游侧

6 结语

本文首先指出低水头面膜土石坝的传统设计方法并不适合于高面膜堆石坝，之后基于高面膜堆石坝面膜变形原理，阐述防渗面膜类型选择、面膜厚度设计方法，推导提出面膜液胀变形的设计校核方法，并提出完整的面膜变形安全校核方法，阐述了具有创新意义的面膜合理锚固方法，基本回答了当前高面膜堆石坝设计所面临的一些概念尚不完全清楚和方法尚不完全明确的问题。

面膜堆石坝具有寒带及热带地域的施工及运行适应性、弱坝基及弱坝体材料运行适应性，适用于高寒、深覆盖层、地震烈度大、坝体填筑软岩、无防渗土料或采土对环境生态负面影响大的水库工程，随着防渗面膜材料性能的提升、防渗结构的优化以及施工工艺的完善，其应用前景会更加广阔。

参考文献：

- [1] 束一鸣, 吴海民, 姜晓桢. 高面膜堆石坝发展的需求与关键技术: 高面膜堆石坝关键技术(一)[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(1): 1-9. (SHU Yiming, WU Haimin, JIANG Xiaozhen. Need and key technology on development of high membrane faced rock-fill dam: key technology of high membrane faced rock-fill dam(1)[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(1): 1-9. (in Chinese))
- [2] 蔡斌, 宣李刚, 唐存军. 南欧江六级水电站大坝复合土工膜施工[J]. 水利水电施工, 2015(5): 26-29. (CHAI Bin, XUAN ligang, TANG Cunjun. Construction of composite geomembrane on the dam at six-level hydropower station along Nan'ou River in Laos [J]. Water Conservancy and Hydropower Construction, 2015(5): 26-29. (in Chinese))
- [3] 刘宗耀. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [4] GIRARD H, FISCHER S, ALONSO E. Problems of friction posed by the use of geomembranes on dam slopes:

- examples and measurements [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1990,9(2) : 129-143.
- [5] 顾淦臣. 承压土工膜厚度计算的研究 [C] // 全国第三届土工合成材料学术会议论文集. 天津: 天津大学出版社, 1992: 249-257.
- [6] 束一鸣. 防渗土工膜工程特性的探讨 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 1993, 21 (5): 1-6. (SHU Yiming. Engineering characters of geomembrane [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 1993, 21(4) : 1-6. (in Chinese))
- [7] GIROUD J P, SODERMAN K L. Comparison of geomembranes subjected to differential settlement [J]. Geosynthetics International, 1995, 2(6) : 953-969.
- [8] GIROUD J P, SODERMAN K L, PELTE T, et al. Design method to prevent geomembrane failure in tank corners [J]. Geosynthetics International, 1995, 2(6) : 971-1018.
- [9] 束一鸣, 叶乃虎. LDPE 土工膜液胀极限荷载的工程仿真实验 [J]. 水利水电科技进展, 2003, 23 (5): 1-3. (SHU Yiming, YE Naihu. Simulation test for mullen burst limitload of LDPE geomembrane [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003, 23(5) : 1-3. (in Chinese))
- [10] 束一鸣, 潘江. 损伤土工膜液胀强度试验研究 [J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(6) : 34-36. (SHU Yiming, PAN Jiang. Mullen strength experiment on damagedgeomembrane [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25 (6): 34-36. (in Chinese))
- [11] SHU Yiming, LI Yonghong. Design principles for high head earth-rock dams with geomembranes [C] // ICOLD 72nd Annual Meeting Proceedings Workshop on Dam Safety Problems and Solutions-sharing Experience. Seoul: [s. n.], 2004.
- [12] 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))
- [13] 束一鸣, 吴海民, 姜晓桢, 等. 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) [J]. 水利水电科技进展, 2015, 35 (1): 10-15. (SHU Yiming, WU Haimin, JIANG Xiaozhen, et al. Mechanism of anchoring influence at perimeter of high membrane faced rock-fill dam and eliminating approach (II) [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(1) : 10-15. (in Chinese))
- [14] CAZZUFFI D, GIROUD J P, SCUERO A, et al. Geosynthetic barriers systems for dams [C] // Proceeding of the 9th International Conference on Geosynthetics. Guaruj. Brazilian: [s. n.], 2010: 115-163.
- [15] CAZZUFFI D. The use of geomembranes in Italian dams [J]. International Water Power & Dam Construction, 1987, 39(3) : 17-21.
- [16] SEMBENELLI P, SEMBENELLI G, SCUERO A M. Geosynthetic system for the facing of bovilla dam [C] // Sixth International Conference on Geosynthetics. Atlanta: [s. n.], 1998.
- [17] 王高明, 小岭头水库堆石坝复合土工膜防渗坝面的设计与施工 [J]. 防渗技术, 1995, 1 (2): 29-34. (WANG Gaoming. Design and construction of seepage-proof compound geomembrane surface of the rock-fill dam at Xiaolingtou Reservoir [J]. Technique of Seepage Prevention, 1995, 1(2) : 29-34. (in Chinese))
- [18] 束一鸣, 张利新, 袁全义, 等. 西霞院反调节水库土石坝膜防渗工艺 [J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(6) : 70-73. (SHU Yiming, ZHANG Lixin, YUAN Quanyi, et al. Geomembrane seepage control techniques of Xixiyuan Earth-Rock Dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29 (6): 70-73. (in Chinese))
- [19] 褚清帅. 仁宗海水库大坝 HDPE 复合土工膜施工技术 [J]. 四川水力发电, 2011, 30 (5): 32-35. (CHU Qingshuai. HDPE compound geomembrane construction technique of renzonghai dam [J]. Sichuan Water Power, 2011, 30(5) : 32-35. (in Chinese))
- [20] 郇能惠. 中国高混凝土面板堆石坝性状监测及启示 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (2): 165-173. (LI Nenghui. Performance of high concrete face rock-fill dams in China and its inspiration [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (2): 165-173. (in Chinese))
- [21] 张宪雷. 高面膜堆石坝中 PVC 土工膜运行性态研究 [D]. 南京: 河海大学, 2016.
- [22] GIROUD J P. Analysis of stresses and elongations in geomembranes [C] // Proceedings of the International Conference on Geomembranes. Paris: RILEM, 1984: 481-486.
- [23] 戴林军. 堆石坝面膜防渗结构聚氨酯无砂砾垫层工程特性 [D]. 南京: 河海大学, 2012.
- [24] 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办法: CN104060580A [P]. 2014-09-24.

(收稿日期: 2018 - 04 - 27 编辑: 骆超)