

较高土石坝膜防渗结构设计方法探讨

束一鸣¹ 李永红²

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2.国家电力公司成都勘测设计研究院,四川 成都 610072)

摘要 根据不同防渗体位置的土石坝受荷位移规律与土工膜受力变形特点,分析了坝内土工膜的变形机理,并以四川瀑布沟 186 m 的心墙堆石坝为例,提出了土工膜与土心墙联合防渗的思路及设计原则。分析表明,坝内绝大部分区域的土工膜能够承受坝体位移引起的变形,但在刚性锚固部位,由于“夹具效应”,土工膜可能会产生局部过大变形而发生破坏。对于高水头土石坝,土工膜尤其适用于存在缺陷的黏性土料心墙的联合防渗。四川瀑布沟 186 m 的心墙堆石坝,如果采用土工膜与土心墙联合防渗设计方案,则不仅可以提高防渗安全的可靠性,而且与原设计方案相比,技术上更先进,经济上更合理。

关键词 土工膜;高土石坝;变形机理;膜土联合防渗

中图分类号 TV641.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2006)01-0060-05

与塑性的黏性土和刚性的混凝土相比,作为柔性材料用于土石坝防渗的土工膜具有适应变形能力强、重量轻、造价省、施工便捷等优点。因此,土工膜在土石坝工程中的应用日益增多。在国外,有些国家已将土工膜用于较高土石坝的防渗工程。例如,阿尔巴尼亚在高 91 m 的 Bovilla 堆石坝的上游面铺设了 Sibelon 单面复合土工膜^[1]。在我国,在重要堤防和病坝防渗加固中采用土工膜的工程较多,但在新建土石坝中采用土工膜防渗的坝高限制在 50 m 以内。例如,1992 年建成的广西柳州田村土工膜堆石坝^[2],坝高只有 48 m。其原因是人们对土工膜堆石坝运行的安全性存在疑虑。本文对于膜在坝内如何适应坝体受很大荷载后产生的位移,尤其对于防渗土料存在缺陷的 100 m 以上的高水头土石坝,采用土工膜与缺陷土料联合防渗的设计理念,从坝体变形规律与土工膜防渗特性加以分析与探讨。

1 高土石坝防渗膜的变形机理和设计原理

1.1 高土石坝防渗膜的变形机理

与低土石坝中的土工膜相比,高土石坝中土工膜的如下 2 类变形要大很多。一是土工膜随结构位移产生的变形。由于水头和坝体都较高,坝体位移大,土工膜产生的变形会随之增大。二是由于水头高,膜后支持层若有孔隙,则土工膜因水力顶胀产生的顶胀变形也会随之增大。本文主要分析土工膜随坝体结构位移产生的变形。

水头在 100 ~ 150 m 之间的较高土石坝,若其最大累计竖向位移以坝高的 1.0% 计,最大水平位移以坝高的 0.5% 计,则最大累计竖向位移和最大水平位移分别为 100 ~ 150 cm 和 50 ~ 75 cm,发生的位置大致在坝体中部。它们对土工膜防渗结构的主要影响如下。

a. 将土工膜铺设在坝体上游面以形成防渗斜墙(可简称“前置土工膜”),一般在坝体填筑至坝顶时再铺膜。此时坝体大部分的竖向位移已经完成,土工膜主要由于蓄水引起的坝体水平位移而产生变形。一般地,土工膜完全能够承受由原来的平面状变成锅面状而产生的平均拉伸变形。若坝高 100 m、坝长 150 m,则膜沿坝长方向的平均应变量为 0.2%。但是,在坝基及岸坡土工膜锚固端^[3],由于刚性锚固和巨大的水压力作用,该处呈现“夹具效应”(即拉伸试验时,夹具内的膜受拉伸的影响很小),所以该处(地基或岸坡)与坝体之间较大的相对位移只在膜的很小区域内产生变形,即伸长率公式中分母很小而分子很大。此处的膜变形最易超出其承受能力。因此,当土工膜铺设在坝体上游面且蓄水后坝体向下游位移时,锚固在地基及岸坡处的土工膜

最易发生破坏。

b. 将土工膜铺设在坝体中央以形成防渗心墙(可简称“中置土工膜”),膜的铺设与坝体填筑同步进行。由于碾压需要,土工膜常呈“之”字状上升。若为基岩岸坡,膜常被锚固其中。如上所述,坝体中部的竖向位移最大。该处位移除了土石料自身压缩变形外,还包括其以下部位土石料的压缩变形,所以该处铺设的土工膜需承受由于该处以上坝体填筑产生的该处位移。同样,蓄水后,该处土工膜还需承受坝体较大的水平位移引起的变形。若两端岸坡处锚固,则锚固处的局部拉伸变形量很大。

1.2 土工膜适应变形的机理

1.2.1 结构所受荷载很大,而膜中受力有限

高土石坝所受的自重荷载和水压荷载均很大,但土工膜中的拉力则取决于膜随坝体结构产生的变形量。膜变形量小,则膜中拉力就小。这种机理可从“变形受限制弹簧的拉伸原理”中得到借鉴,见图 1。图中: k 为弹簧劲度(kN/m); h 为砝码位移量,即 $1/2$ 弹簧伸长量(m); W 为砝码荷载(kN)。

从图 1 可见,由于荷载 $W \gg 2hk$, 弹簧几乎不能阻止荷载作用下产生的伸长变形,但由于弹簧变形受到砝码位移的限制,其拉力 P 也会受到限制:

$$P = 2hk \tag{1}$$

从在整体上讲,膜的平均拉伸是有限的,但在刚性锚固端的局部区域,由于“夹具效应”,其变形量很大。结构设计的目的就是要让膜尽量有效无损地吸收局部区域的大位移量。

1.2.2 土工膜应具有适应结构较大位移的能力

坝体内膜的变形主要受制于坝体结构位移,其本身对位移的限制作用很小。分析计算结果表明,计入与不计入土工膜劲度对较高土石坝结构的位移影响不甚明显,即

$$K_{e+g} \approx K_e \tag{2}$$

式中: K_{e+g} ——计入土体单元及膜单元劲度的结构整体矩阵; K_e ——仅计入土体单元劲度的结构整体矩阵。膜单元的劲度矩阵 k^e 对整体结构的劲度矩阵 K 的贡献甚小,即使不考虑界面滑移机理对膜与坝体协调变形的减弱因素,膜对坝体位移的限制作用仍几乎难以察觉。

综上所述:

- a. 从平均意义上看,无论前置还是中置防渗土工膜,均能适应高水头土石坝的结构位移。
- b. 尽管坝体所受荷载和位移量较大,但反映到土工膜上,主要在刚性锚固部位的局部产生很大的变形,使膜内产生很大拉力,容易造成破坏。
- c. 依靠土工膜的高模量、高强度难以抵御结构位移对膜安全产生的负面影响。其原理可用图 2 加以说明。

如图 2 所示,曲线 1 为高模量、高强度复合膜(称“膜 1”)的拉伸曲线,拉伸强度为 P_1 、拉伸变形为 ϵ_1 时,割线模量为 E_1 ;曲线 2 为具有“伸长释放”功能的复合膜(称“膜 2”)的拉伸曲线,残余拉伸强度(注意不是复合膜中纯膜的残余强度)为 P_2 、拉伸变形为 ϵ 时,割线模量为 E_2 ;曲线 3 为厚单层膜(称“膜 3”)的拉伸曲线,拉伸强度为 P_3 、拉伸变形为 ϵ 时,割线模量为 E_3 。如前所述,坝体结构局部较大位移产生的应变 ϵ 对应的力 W 远大于膜的强度,即

$$W \gg P_1 = E_1 \epsilon_1 \tag{3}$$

而
$$\epsilon_1 < \epsilon \tag{4}$$

膜 1 变形达到 ϵ_1 时,膜已被拉断,此时变形尚未达到对应的结构局部较大位移量的终值 ϵ 。而膜 2、膜 3 中的拉力有

$$P_2 = E_2 \epsilon < P_3 = E_3 \epsilon < P_1 \tag{5}$$

膜 2、膜 3 产生变形 ϵ 时,仍可发挥防渗作用。因此,选膜时应注重膜的伸长率,而不是膜的抗拉强度。较佳的膜应既具有较高的伸长率又具有较高的强度,即余能^[5]较大。

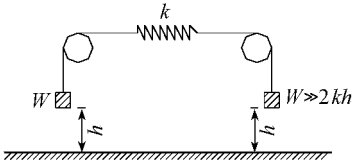


图 1 变形受限制弹簧的拉伸原理
Fig.1 Tension principle of a deformation-limited spring

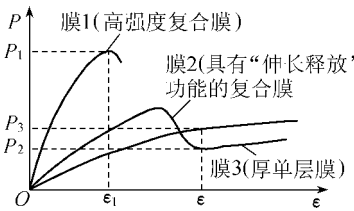


图 2 3 种膜的拉伸曲线
Fig.2 Tension curves of 3 kinds of geomembranes

1.2.3 关键部位的铺膜与选膜原则

要使土工膜能在高土石坝中安全运行,必须减小结构的位移量或土工膜的变形量.要减小结构的位移量,应从颗粒岩性、颗粒形状、颗粒级配以及优化碾压参数等方面入手提高坝体的变形模量.减小关键部位(主要为刚性锚固部位)土工膜的变形量应遵循的原则是(a)按土工膜产生很小变形的方式铺设,即该方式可吸收较大的坝体位移(b)上述方式不应使土工膜遭受损伤,即避免土工膜伸长率大幅度降低^[6].

为了满足锚固和埋置的需要,关键部位应采用单层膜.这有利于膜与周边防渗材料的结合,增强抗渗能力.坝体周边,尤其是地基部位,水头大,若为刚性锚固,还存在“夹具效应”,该处膜的拉伸量较大,1.5~2 mm厚的膜抵御拉伸与顶胀组合变形的能力相对较强.此外,厚膜在提高其自身摩擦性能方面具有一定的潜力.

2 中置土工膜(膜心墙)与黏性土料的联合防渗

高水头土石坝应特别注重防渗的可靠性.对于防渗土料存在缺陷的情况,采用土工膜与防渗缺陷土料联合防渗的方案是可行的.这种方案尤其适用于中置土工膜和土料心墙的情况.

对于存在缺陷的防渗土料,单独将其作为防渗心墙来直接面对高水头作用下的渗流,渗透稳定性令人担忧.单独由土工膜防渗,目前尚缺乏膜高水头防渗的工程经验.在心墙防渗土料的上游面设置土工膜,两者组成联合防渗系统,可有效规避坝体防渗效率降低或局部失效的风险.据文献[7]介绍,铺设后的土工膜每1 000 m²约有4个缺陷处,然而这些可能的缺陷与防渗土料的明显缺陷部位一一对应的可能性很小.由于膜后防渗土料的存在,通过膜缺陷将不会形成具有危害性的渗流.

然而,一般不采用前置土工膜(即“膜斜墙”)与黏性土料联合防渗的方案.其原因是:防渗膜铺设在上游面时,若膜后填筑黏性土,不仅因为高水头土石坝的坝坡需放缓而会增加造价,而且通过膜缺陷处的水体不易排除,当上游水位骤降时,膜受到反向渗压作用时易失稳.

3 心墙堆石坝膜辅助防渗设计思路

以四川大渡河水电站瀑布沟砾石土心墙堆石坝为分析对象.该坝河床覆盖层以上最大坝高186 m,心墙上游2层反滤层厚度分别为4 m和6 m,下游2层反滤层厚度分别为6 m和9 m.河床覆盖层采用2道厚度均为1.4 m的混凝土防渗墙防渗.2墙之间的净距为12 m,墙顶插入心墙15 m,伸入基岩0.8~1.0 m.断面布置如图3所示.

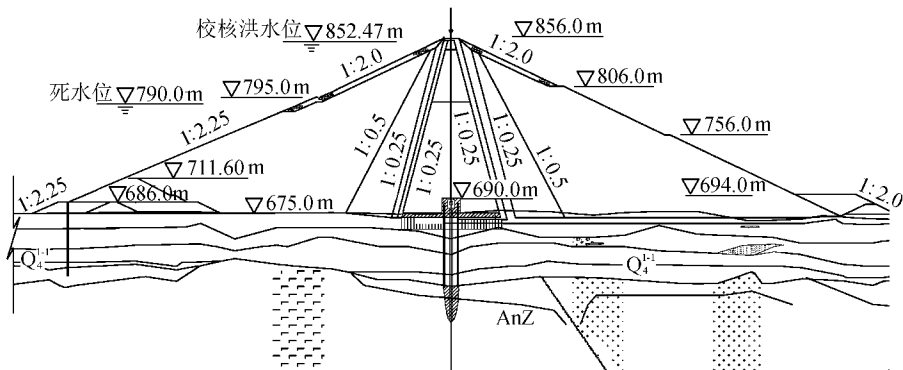


图3 瀑布沟砾石土心墙堆石坝^①

Fig.3 Rockfill dam with gravel soil core in Pubugou project

3.1 工程特点

- a. 心墙砾石土需作处理.心墙下部高度115 m处采用的砾石土需剔除大于80 mm的颗粒后才能满足防渗指标的要求,心墙上部高度64 m的土料强度和变形指标较差,故用于心墙上部.
- b. 心墙底部和岸坡均设置高塑性黏土层.为降低心墙与混凝土防渗墙连接处的渗透坡降,在心墙与河床覆盖层、岸坡之间分别设置厚5 m和3 m的高塑性黏土垫层.

① 国家电力公司成都勘测设计研究院.瀑布沟心墙堆石坝设计简介.2003.

3.2 土工膜辅助联合防渗布置

由于心墙砾石土主料需作处理,防渗性能刚好满足要求,可靠性需论证.在此情况下,利用土工膜辅助于砾石土联合防渗,可以大大提高坝体的防渗可靠性.

a. 膜铺设在砾质土心墙上游面,底部锚贴在混凝土防渗墙上.土工膜设置在砾石土心墙与上游反滤层之间,延伸到心墙底部平铺在心墙与地基覆盖层之间直至混凝土防渗墙,再沿混凝土防渗墙直至防渗墙顶部.膜锚贴在混凝土防渗墙面上,若包括心墙底部厚5 m的高塑性土层高度,膜与防渗墙的黏结长度达到20 m,接触渗透坡降为9.1,KS胶的渗透系数为 3.5×10^{-12} cm/s,其接触防渗效果比高塑性土强几个数量级.在膜与防渗墙黏结的底部转为水平铺设的转角处,可将膜设计成能适应由于地基沉降产生的1.0~1.2 m位移差机制的形状,使其既能有效地吸收位移,又不会使膜产生折叠损伤.

b. 岸坡部位膜埋置在扩大的心墙断面的黏土内.设计中两岸岸坡开挖至基岩,土工膜可埋置在基岩深约3 m的压实黏土沟槽中.沟槽位于心墙中轴线偏上游处,膜进槽前应沿岸坡向上游铺设2 m,使膜能吸收蓄水后坝体向下游的位移而不至于产生较大变形.采用岸坡柔性埋置的优点在于坝体心墙与埋置槽内的土体有几乎相同的沉降量,不会如刚性锚固那样在膜局部产生很大变形而发生破坏.

c. 选用一布一膜型复合膜和单层膜,防渗膜(不包括复合织物)厚度均大于1.5 mm,复合膜一面加糙,单层膜两面加糙.与坝体心墙接触的部分采用一布一膜型复合膜,无纺布的膜面加糙.膜面与砾石土心墙接触,加糙膜面利于膜与土的结合,从而可形成联合防渗系统,织物面与上游反滤层接触,织物面也为一反滤层^[8].在高水头工况下,厚膜抵御冲击损伤、擦痕损伤、水力顶胀产生的影响及其与土体结合的能力是薄膜不能比拟的^[9].在与混凝土防渗墙黏结、与岸坡黏土沟槽连接处,采用厚单层膜.与混凝土防渗墙黏结的膜不加糙,与岸坡连接的膜两面均加糙.

3.3 土工膜辅助联合防渗的效应

a. 砾石土心墙的防渗风险大大降低.若设计合理、施工到位,膜的防渗作用能充分发挥,则土心墙中浸润线就会很低,若膜存在若干缺陷,其渗流量也极小,则对土心墙的渗透稳定产生影响的可能性极小.有土工膜辅助防渗,可考虑砾石土不作处理(即不剔除大于80 mm的颗粒)而直接用于心墙填筑.

b. 心墙上游反滤层可改为过渡层,心墙下游反滤层可减少厚度.心墙上游的反滤层可在很大程度上降低要求,当上游水位降落或骤降时,反向渗流通过土工膜缺陷才能形成,而通过缺陷形成的渗流非常有限.因通过膜缺陷形成的渗流非常有限,渗流带出的颗粒量更少,所需反滤层厚度可减小.

c. 心墙底部高塑性土可以取消.由于膜与混凝土防渗墙锚贴,两者之间的接触渗透稳定问题已经解决,可取消垫在心墙底部5 m厚的高塑性土.岸坡的高塑性土可保留,但厚度可减小,用于膜与岩坡的连接.

d. 心墙应力状态改善,出现裂缝的可能性大幅度降低.由于膜的存在,心墙与坝壳之间存在一界面,心墙固结沉降中所受到的坝壳的限制影响很小,心墙的“拱效应”大幅度降低,大主应力增大,产生水平裂缝的可能性很小.由于通过膜缺陷产生的渗流量很小,发生水力劈裂已无可能.因心墙底部厚5 m的高塑性土被取消,混凝土防渗墙顶以上土体与其临近土体之间的沉降差减小,心墙产生竖向裂缝的可能性降低.

必须指出,上述未涉及土工膜液胀问题,是因为与膜接触的一面是反滤层,最大粒径为4 mm,另一面是砾石土心墙,即使局部粒径80 mm的砾石成堆,砾石间形成的空隙最大约15 mm,2 mm厚的单层膜加复合织物足以能抵御由该空隙形成的液胀破坏.

4 结 论

- 心墙土料不理想的高水头堆石坝,采用土工膜与土心墙联合防渗方案是安全经济的.
- 防渗土工膜在坝体中的绝大部分位置均能适应坝体位移.
- 坝体的较大位移反映到土工膜上,控制指标是膜的变形,而不是膜的模量和强度.
- 在刚性锚固处,由于“夹具效应”,膜局部会产生很大变形.
- 瀑布沟砾石土心墙堆石坝,若采用土工膜辅助联合防渗方案,一方面可大大降低渗透稳定风险,另一方面又可改善土心墙内的应力状态,大大降低心墙产生裂缝的可能性.

参考文献:

- [1] Taking a synthetic approach[J]. International Water Power & Dam Construction 2000(1):28-29.
- [2] 《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[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000:466-470.
- [3] DONALD E H, LEONARD J S. Design concerns and performance of geomembrane anchor trenches[J]. Geotextiles & Geomembranes, 1997(6):403-416.
- [4] 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):1-3.
- [5] GIROUD J P. Mathematical model of geomembrane stress-strain curves with a yield peak[J]. Geotextiles & Geomembranes, 1993(1):1-22.
- [6] BERG R R, BONAPARTE R. Long-term allowable tensile stresses for polyethylene geomembranes[J]. Geotextiles & Geomembranes, 1993(4):281-306.
- [7] GIROUD J P, BONAPARTE R. Leakage through liners constructed with geomembranes: part 1 geomembranes[J]. Geotextiles & Geomembranes, 1989(1):27-67.
- [8] 束一鸣. 针刺织物用于粉土反滤的实践[J]. 水利学报, 2002(11):95-98.
- [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):1-4.

Design of impervious structure with geomembrane for high earth-rock dams

SHU Yi-ming¹, LI Yong-hong²

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute of SPC, Chengdu 610072, China)

Abstract The mechanism of geomembrane deformation in earth-rock dams was analyzed according to the characteristics of stress and deformation of geomembrane as well as the law of earth-rock dam deformation under loads with impervious structures at different positions. Regarding to the core wall rockfill dam of 186m at Pubugou of Sichuan Province, an idea and design principle of united seepage control measure with geomembrane and earth core was proposed. It is pointed out that geomembrane in most regions of the dam body can withstand the dam deformation caused by the displacement of the dam body, but geomembrane in rigid anchoring regions may be damaged by intolerable deformation due to the "clamping effect", and that geomembrane is particularly suitable for united seepage control of high earth-rock dams with defective clay core. As a result, the adoption of united seepage control scheme with geomembrane and soil core for the rockfill dam at Pubugou can improve the reliability of seepage control, and it is advanced and economical as compared with the original design scheme.

Key words geomembrane; high earth-rock dam; mechanism of deformation; united seepage control with geomembrane and soil