

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)

束一鸣^{1,2}, 吴海民^{1,2}, 姜晓桢^{2,3}

(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:面膜堆石坝是指上游坝面用土工膜防渗的堆石坝。综述了面膜堆石坝半个世纪以来的发展状况, 分析了该坝型的特点及该坝型技术在我国的使用现状与需求; 面膜防渗结构具有渗透性低微、差异变形适应性强、施工简捷、工期短、造价低等特点; 由于国外专利保护等原因, 面膜堆石坝技术未能如面板堆石坝和碾压混凝土坝那样广泛交流与推广, 自国外第一座面膜堆石坝建成以来, 国内尚未建成一座高面膜堆石坝, 而我国水电清洁能源的需求、许多深覆盖层坝址与黏土防渗体取土受到环境生态制约的状况, 需要高面膜堆石坝发挥其作用, 相应的设计分析技术需要较系统深入的研究梳理和集成。概述了该坝型关键技术研究的初步成果, 包括高面膜堆石坝的周边夹具效应与设计方法、面膜双向拉伸分析方法、数值精细模拟方法、非散粒体面膜垫层技术、膜顶胀损缺性状量化分析方法。

关键词:面膜堆石坝; 防渗结构; 土工膜; 面膜垫层; 夹具效应; 聚合物透水混凝土; 数值分析方法; 综述
中图分类号:TV641.4; TV223.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)01-0001-09

Need and key technology on development of high membrane faced rockfill dam; key technology of high membrane faced rockfill dam (I) // SHU Yiming^{1,2}, WU Haimin^{1,2}, JIANG Xiaozhen^{2,3} (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: In this paper, the characteristics and the development status of rockfill dam with surface impermeable geomembrane (i. e., membrane faced rockfill dam, MFRD) during half a century is summed up and the technology status and constructing requirement on MFRD in China is analyzed. The overall advantage of MFRD is that it is impermeable, suitable to differential deformation, brief to construct and cheap. Due to overseas protection of patents, unlike the concrete faced rockfill dam and the roller compacted concrete dam, the technology of MFRD lacks of wide dissemination and application. Since the first MFRD was built elsewhere, no high MFRD has ever been constructed in China. For the demand of clean energy of hydropower and conditions of ecological environment, MFRD is required to play an important role, and corresponding technology of design and analysis on MFRD demand further studies as well as a systematic and deeper integration. Recent preliminary studies on the result of key technology of MFRD are summarized, which include mechanism of anchoring influence at perimeter of MFRD and eliminating approach, biaxial tensile mechanical property of geomembrane used as surface barrier of high rockfill dam, analysis of stress and deformation characteristics of geomembrane surface barrier for rockfill dam, experimental research on engineering property of non-granular cushion for geomembrane surface barrier of high rock-fill dam, and probabilistic analysis of geomembrane puncture on rockfill dam surface.

Key words: membrane faced rockfill dam (MFRD); impermeable structure, geomembrane, cushion of faced membrane, anchoring influence, permeable polymer concrete, numerical analyzing approach, summarizing

据国际大坝委员会(ICOLD)2010年不完全统计,全球已有167座大型土石坝采用土工膜防渗^[1]。新建的膜防渗堆石坝(土石坝)一般采用两种坝型:面膜堆石坝(membrane faced rockfill dam, MFRD)和芯膜堆石坝(membrane cored rockfill dam, MCRD)。

面膜堆石坝类似于面板堆石坝,防渗膜位于堆石坝上游面;芯膜堆石坝类似于心墙堆石坝,防渗膜位于堆石坝中央位置。以前国内借用土料防渗体的称谓,分别称它们为土工膜斜墙堆石坝和土工膜心墙堆石坝,但以“膜”称“墙”不甚贴切。

由于芯膜堆石坝的防渗膜施工与堆石支撑体施工需同步进行,两种材料、两种施工工艺相互影响甚至相互干扰,使膜防渗堆石坝的施工快捷优势削弱;一旦膜严重受损需要修补或更换,又由于防渗膜位于堆石坝中央而难以实现,所以,面膜堆石坝的发展自然优先于芯膜堆石坝。然而,面膜堆石坝的设计及运行性态比芯膜堆石坝复杂得多,一般而言,芯膜堆石坝的防渗膜主要随坝体沉降位移,而面膜堆石坝的防渗膜还有不可忽视的顺河向位移分量;芯膜与坝体支撑体之间不存在稳定问题,而面膜不仅有一般稳定问题,还需防止库水位骤降时由于反向水压导致防渗膜失稳的问题,等等。所以,面膜堆石坝的诸多技术问题更需研究解决。

一般而言,大坝越高,坝的设计和建造难度越大,面膜堆石坝也不例外。碾压式土石坝的高坝,水利行业定义为 70 m 以上^[2],而电力行业定义为 100 m 以上^[3],坝高超过 150 m 的混凝土面板堆石坝称为超高面板坝^[4],笔者团队将高度达 150 m 的面膜堆石坝作为研究对象,以适应近、中期该技术的国内外发展趋势和建设发展需求。在国家自然科学基金的资助下,笔者团队取得了一些初步研究成果,本文通过对国内外面膜堆石坝建设过程的梳理,分析我国面膜堆石坝建设的现状和发展需求,概述面膜堆石坝关键技术的研究初步成果,以促进提升该坝型的技术水平,增强该坝型建设的活力。

1 面膜堆石坝结构及特点

面膜堆石坝与面板堆石坝结构相近,只是将钢筋混凝土面板换成素混凝土护坡板,板下面铺设防渗膜,膜周边锚固。两者最大区别是将混凝土面板防渗体转换成面膜防渗体,后者无需设缝及止水。面膜堆石坝可分为支撑体和防渗体,结构如图 1 所示。本节着重阐述面膜堆石坝的防渗结构。

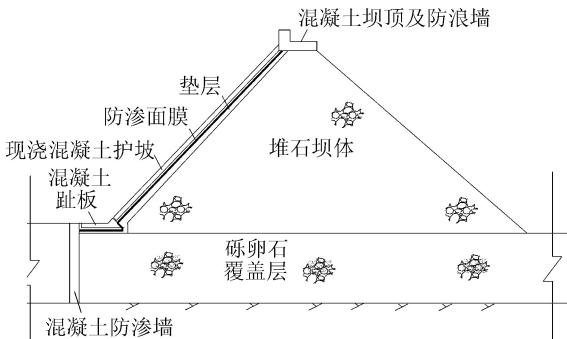


图 1 面膜堆石坝结构示意图

1.1 坝体支撑结构

爆破开采的非软岩堆石坝体,可不设排水体;若采用河床砾卵石作为坝体,则需视堆石体的渗透性确定是否需设置上昂式排水-水平排水-棱体排水系

统。下游坝坡坡比与混凝土面板堆石坝相当,上游坝坡坡比根据面膜垫层和保护层(护坡)的形式不同,可与混凝土面板堆石坝相当或略缓。

1.2 坝体防渗结构

对于面膜堆石坝,在堆石体过渡层上的即为防渗结构。防渗结构除防渗膜本身以外,通常包括膜或复合膜下部的垫层或支持层、膜或复合膜上部的保护层或护坡等。

1.2.1 防渗膜

高面膜堆石坝采用的防渗膜的厚度应在 2 mm 以上,至今应用较多的材质主要为 PVC(聚氯乙烯)膜和 PE/HDPE(聚乙烯/高密度聚乙烯)膜。由于厚度 1 mm 以上的 PE 膜材质较硬,既不利于在较陡的坡面上铺设拼接,也难以适应蓄水后垫层的变形^[5],所以高面膜堆石坝宜采用相对柔软的 PVC 膜。

膜一侧或两侧热粘针刺无纺布物即为一布一膜型复合膜或两布一膜型复合膜。若复合工艺可保证膜的物理力学性能满足设计与规范要求,应优先采用复合膜,织物不仅可以在运输、铺设过程中保护防渗膜免受损伤,而且可提供平面排水通道,有利于膜体稳定。对于高面膜堆石坝,应采用规格为 400 g/m² 以上的针刺无纺布物。

若膜的上下两面分别采用铺设针刺无纺布物的措施,则需校核膜与织物之间的界面稳定性。

1.2.2 垫层

处于堆石体过渡层上的即为垫层,垫层的形式一般有颗粒型和非颗粒型。

对于高面膜堆石坝而言,切不可采用黏性土作为垫层形成所谓组合式防渗结构(芯膜堆石坝可采用该组合防渗结构形式),因为大面积膜体难以避免一些细小缺陷存在,低透水性材料不利于膜下游侧排水,通过这些细小缺陷的渗水会积聚在膜与黏性土之间,当库水下降至积水部位以下时,将影响该部分膜体的稳定。因此,不管是颗粒型垫层还是非颗粒型垫层,均应为透水性垫层。

若采用颗粒型垫层,宜用河床开采的细砾,厚度不宜小于 30 cm,一般表面需喷洒乳化沥青或水泥砂浆,以加强颗粒垫层表面的稳定性,利于防渗膜的铺设及膜与垫层之间的平整接触;此外,颗粒型垫层应该是自滤的,能抵御渗透变形。

非颗粒型垫层可在颗粒垫层上增设,总厚度仍不小于 30 cm。非颗粒型垫层也应为透水垫层,可为水泥透水混凝土或聚合物透水混凝土,厚度 10 cm 以上。透水混凝土垫层适于防渗膜的铺设、拼接。

1.2.3 保护层

膜-无纺布物或复合膜之上即为保护层。对于高面膜堆石坝,趋于省略颗粒保护层,直接采用混凝

土板或混凝土块,既作为坝面护坡又作为防渗膜的保护层,厚度宜在 20cm 以上。混凝土保护层可预制也可现浇,但都应设置排水。

预制混凝土因抗风浪需要较大面积,搬运铺设过程中较易损伤防渗膜;由于钢筋施工同样容易损伤防渗膜,所以现浇混凝土一般采用素混凝土,趋于采用聚丙烯纤维混凝土。

随着 PVC 膜的抗老化性能大幅度增强,越来越多的大坝采用裸露 PVC 膜防渗形式,尤其在高压混凝土中,例如 2002 年建成的哥伦比亚高 188 m 的 Miel 1 碾压混凝土重力坝^[6]和 2003 年建成的美国加州高 97 m 的 Olivenhain 碾压混凝土重力坝^[7],在我国龙滩坝建成以前 Miel 1 坝是世界上最高的碾压混凝土重力坝,该坝填筑至坝顶后,在直立上游坝面上先安装聚合物复合排水,再安装 PVC 膜,该渗控措施使碾压混凝土坝体几乎不涉及渗流,纯粹成为支撑体,设计理念具有创新意义,防渗膜不设保护层,完全裸露。与此不同,堆石坝面 PVC 膜上设置保护层并没有碾压混凝土坝直立上游面设置膜保护层的施工那样麻烦,所以,据 2010 年国际大坝委员会的统计,面膜土石坝中仍有 70% 设置膜保护层,以有效防止风浪、漂杂物、冰、温变、紫外线辐射及人为因素等对防渗膜产生的损伤。

1.3 面膜堆石坝特点

与混凝土面板堆石坝、黏性土心墙堆石坝相比,面膜堆石坝具有其自身的特点。

a. 膜防渗性能高。无产品缺陷和施工缺陷的 PVC 膜的渗透系数约为 10^{-11} cm/s 量级,透水性极小。

b. 防渗膜质量易于控制。相对于现场施工的防渗体,PVC 膜产品在工厂生产,质量控制的可靠性高;现场拼接及锚固的质量检测设备及技术已臻成熟,现场施工质量控制的保证率越来越高。

c. 防渗膜适应坝体平均变形的能力强。PVC 膜处于弹性阶段的应变率在 10% 以上,足以适应不到坝高 1% 的坝体位移对应的平均变形量;与混凝土面板堆石坝相仿,坝体堆石可分区,可采用软岩,适宜建造在覆盖层上。

d. 适应地域宽广。接近北极圈的冰岛 2005 年建成的高 196m 的 Karahnjukar 面板堆石坝^[8],坝下部分面板主要接缝采用膜防渗;意大利利用防渗膜加固了建于阿尔卑斯山脉的 8 座混凝土坝^[8],有的高程在 2200 m 以上,即使裸露膜也要求使用寿命在 50 a 以上。

e. 施工工艺比较简便,易于修复和更换。面膜堆石坝的总体施工程序简单明了,与面板堆石坝相仿,很少受气候影响的堆石体、过渡层、颗粒垫层的

填筑可先行完成,然后进行防渗膜的铺设、拼接及保护层的施工。若经几十年运行后需要更换防渗膜也相对简单。

f. 面膜不同部位应变差异极大,需精心设计。尽管 PVC 膜的有效应变率很大,在适应绝大部分坝体变形方面具有卓越表现,但在特殊部位,例如中下部坝体周边锚固部位,常规设计仍难保证其变形安全,需作专门设计。

g. 施工质量控制要求高。应防止防渗膜拼接缺陷、垫层表面凹坑、尖锐颗粒和多个粗颗粒聚集的存在,虽然表面凹坑和粗颗粒聚集不直接造成防渗膜漏水,但使其在长期运行中承受随坝体位移产生的变形和水压液胀变形的共同作用,有效使用寿命将受到较大影响。此外施工需避免极端环境条件,如高、低气温和大风等。

2 面膜堆石坝发展现状及需求

2.1 发展现状

由于二战期间天然橡胶的短缺,美国在 20 世纪 40 年代采用聚合物膜作为渠道防渗体;后相继应用于蓄水池防渗等,第一座面膜堆石坝为意大利于 1959 年建成的 Contrada Sabetta Dam^[9],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;1960 年加拿大建成高 65 m 的堆石坝 Terzaghi Dam,采用 PVC 膜防渗。在以后的数十年中,欧洲建成了数十座膜防渗的中等高度以下的土石坝。1996 年南欧阿尔巴尼亚建成高 91 m 的面膜堆石坝 Bovilla Dam^[10],在上部坝坡 1:1.55 和下部坝坡 1:1.6 的上游坝面垫层上铺设厚 3 mm PVC 热粘 700 g/m² 聚酯无纺布的复合膜,PVC 膜上面再铺设 800 g/m² 的聚丙烯无纺布,其上护坡为厚 20 ~ 30 cm 的现浇混凝土板。Bovilla Dam 原设计为钢筋混凝土面板堆石坝,考虑到坝址属于 9 度强震区及工期较紧,开工前变更设计为面膜堆石坝。

据国际大坝委员会 2010 年统计,全世界用 0.7 mm 以上厚度的膜防渗的土石坝,PVC 膜为 54 座,占 43%,其他各类膜均低于 20%。

此外,PVC 膜尤其适于加固年久老化的钢筋混凝土面板,美国加州 1916 年建成的高 50 m 的 Strawberry Dam 和 1931 年建成的高 100 m 的 Salt Spring Dam^[11-12]两座钢筋混凝土面板堆石坝在 2000 年后均采用 PVC 膜铺设于混凝土面板表面或接缝表面实现防渗加固。

国内土工膜用于大坝始于防渗加固,辽宁桓仁混凝土单支墩大头坝高 79 m^[13],因裂缝漏水于 1967 年采用 2 层厚度 1 mm 的沥青-聚合物膜粘贴锚固在上游坝面进行防渗加固;浙江亭下混凝土重力

坝高 76.5 m,因渗漏于 1984 年在上游直立坝面用胶粘丁基橡胶膜进行防渗加固;陕西石砭峪沥青混凝土斜墙堆石坝^[14]因严重漏水于 2000 年采用厚 1 mm PVC 的两布一膜型复合膜铺设于坝面进行防渗加固,上覆 15 cm 现浇混凝土护坡。

在我国,用于大型工程的土石坝坝面防渗修复始于 20 世纪 90 年代初,河北临城水库黏土斜墙土石坝高 31 m^[15],上游坝坡 1 : 2.5,坝面采用铺设 PVC 两布一膜型复合膜作为防渗体。

我国第一座大面积应用膜防渗的大坝为甘肃酒泉夹山子水库大坝^[16],坝高 32.5 m,坝顶长 720 m,坝左右两岸防渗长度 1 700 m,库底防渗面积 56.6 万 m²,库盘及两岸均分别采用厚 0.2 ~ 0.4 mm 的 PE 复合膜防渗,膜自下而上在坝面铺设 26 m,与黏土斜墙连接,1988 年开工,1995 年竣工蓄水。

我国第一座高于 30 m 的面膜堆石坝为浙江小岭头堆石坝^[17],坝高 36 m,上下游坝坡均为 1 : 1.3,在上游无砂混凝土垫层上铺设 250 g/m²/0.5 mm/400 g/m² 的 PVC 复合膜,保护层(护坡)为 10 cm 厚的预制混凝土板,1991 年开工,1994 年建成蓄水。

我国第一座建于大江大河上的大型工程面膜土石坝为黄河干流西霞院土石坝^[18-19],其为小浪底水利枢纽的配套工程,坝长 2 609 m,坝高 20.2 m,上游坝坡 1 : 2.75,不同坝段分别采用 400 g/m²/0.8 mm/400 g/m² 和 400 g/m²/0.6 mm/400 g/m² 的 LDPE 膜-聚酯长丝针刺无纺布两布一膜型复合膜铺设于坝面细砾石垫层上,保护层也为砾石,上覆块体护坡。该坝于 2007 年建成蓄水。

我国第一座大型工程、高于 50 m 的面膜堆石坝为四川田湾河梯级水电站仁宗海面膜堆石坝^[20],坝高 56 m,为大(2)型工程的 1 级建筑物,上游坝坡 1 : 1.8,坝面铺设 400 g/m²/2 mm/400 g/m² 的 HDPE 复合膜防渗,复合膜上为预制混凝土板护坡。工程于 2004 年开工,2009 年建成蓄水。

纵观我国面膜堆石坝建设,多数为 30 m 以下低坝,从 20 世纪 90 年代上半叶的坝高 36 m 发展至 21 世纪 10 年代下半叶的坝高 56 m,从小流域小支流上的工程走向大江大河上的工程,从建造大型工程的围堰(长江三峡工程二期围堰膜防渗^[21]方案始于 20 世纪 80 年代)跨越到建设大型工程的大坝,花了约 20 年时间。一些工程的设计方案经过反复审查,属于不得已而为之。例如黄河西霞院土石坝若采用黏土心墙防渗,征地采土对周边生态、环境、社会的影响不容忽视,而采用面膜坝方案超出了规范规定。国内水电设计院为国外工程面膜堆石坝设计的方案坝高已达 90 m,属于高面膜堆石坝,然而国内工程中多在高围堰中采用膜防渗方案。概括之,我国面

膜堆石坝起步较早,发展滞缓,原因如下:

a. 机理研究不足。高面膜堆石坝防渗结构的运行性态与变形破坏机理研究不深,以致在方案选择时缺乏信心。工程实践中也确实缺少针对特殊部位防渗膜易产生损伤的有效措施,导致一些工程膜防渗系统在运行中破坏。

b. 施工队伍及装备不够专业。高面膜堆石坝防渗结构的施工与质量控制需一些专有工艺及装备,例如防渗膜的铺设、拼接、周边锚固及其质量检测等,更重要的是缺少娴熟掌握工艺的专业施工队伍,具有膜防渗结构特点的施工组织设计不够完善,一些工程施工中膜防渗结构就遭受严重损伤。国内固体废弃物填埋场膜防渗工程的起步远远迟于大坝膜防渗工程,但由于其强制性规范的引导,又由于市场面广量大,膜防渗工程专业施工队伍迅速发展,出现一些大坝膜防渗工程由填埋场膜防渗工程专业队伍来施工的局面。

c. 建设协调不精细。面膜堆石坝与面板堆石坝相比似乎仅多了一层防渗膜,实际上多出许多细小环节,有些还需多方协调,而细节往往决定工程的成败。例如,除河床段外,其余坝段的复合膜底端均需按设计作特型裁剪并预留复合膜布-膜间不粘面积,建设方或施工方需将设计方的细部设计提供给材料承包商,类似这些细节往往被忽视。

d. 国内材料品种不足。早在 20 世纪 80 年代和 90 年代初,国内大坝防渗膜多采用 PVC 复合膜,由于当时的 PVC 膜的塑化剂易于流失而老化,以后即被 PE 膜所取代。但对于高面膜堆石坝所采用的膜厚度一般为 1.5 mm、2 mm 或以上,此厚度的 HDPE 膜硬如板一般,施工难以操作。而国外柔软易于施工操作的 PVC 膜已改性成可以长久裸露使用的极耐老化的建材,国内此类品种相对偏少。

e. 国际交流和国内导向环境缺乏。同样兴起于 20 世纪 80 年代的钢筋混凝土堆石坝(CFRD)和碾压混凝土坝(RCCD)在我国发展迅猛,筑坝高度和筑坝技术已在国际名列前茅。而面膜堆石坝技术,一些国外咨询公司/承包商申请了专利保护,从材料供应、结构设计、施工建造实行一条龙承包,对于一些具体技术与建造经验也不作交流,国内需要自主研发;另一方面,由于国内缺乏系统深入的研发,碾压式土石坝设计规范^[3]规定“3 级低坝经过论证可采用土工膜防渗体坝”,无形中增加了实践的难度。

2.2 发展需求与发展基础

2.2.1 发展需求

我国西部地区水能资源丰富,如金沙江、澜沧江、怒江、雅砻江和大渡河等,其上游需建 300 m 级的高坝形成龙头水库,以提高梯级电站的补偿调节性能。

许多坝址位于经济落后、交通闭塞、河床覆盖层深厚区域,适合建造高 150 m 以上堆石坝的有 10 多座^[22]。堆石坝的防渗体可采用黏性土心墙或斜心墙、混凝土面板,也存在较强的建造面膜堆石坝的潜在需求。

a. 深覆盖层上高心墙堆石坝合格防渗土料开采日趋困难。深覆盖层上建高堆石坝采用黏性土心墙或斜心墙防渗体的技术相对成熟,相对于混凝土面板,黏性土心墙对高堆石体和深覆盖层的位移适应性强,但受到以下因素制约:其一,黏性土施工受气候影响大,工期长;其二,坝址附近难觅合格的黏性土料;其三,黏性土料的开采对环境生态产生的负面影响越来越受到社会重视,这是最主要的制约因素,以心墙黏性土料 260 万 m^3 ^[23] 为例,若开采深度 2 m,则需开采 1.3 万 hm^2 。

b. 深覆盖层高面板堆石坝的变形控制复杂。面板堆石坝从最初建造在岩基上逐步发展到建造在较深的覆盖层上,我国的察汗乌苏面板堆石坝^[24] 高 151.6 m,覆盖层深 46 m;九甸峡面板堆石坝^[25] 高 136 m,覆盖层深 54.5 m。国内正在研究建造在 100 m 级深覆盖层上 200 m 级高面板坝^[26],然而遇到覆盖层地层组成较复杂时,就需对坝基、坝体变形进行有效控制。例如河南河口村面板堆石坝^[27],坝高 122.5 m,趾板处覆盖层深 31 m,地震烈度 7 度,除挖除覆盖层上部的砂质透镜体、黏性土夹层及含土量偏高的砂卵石并采用过渡料回填外,对防渗墙下游边缘向下游方向 50 m 范围内采取变桩距高压旋喷桩复合地基处理措施,以减小连接板与混凝土防渗墙之间的缝间变形,同时逐步过渡至天然地基。

c. 面膜材料不断改性完善更适应高堆石坝运行性状。坝高超过 90 m 的南欧 Bovilla 面膜堆石坝建造在 9 度地震区的陡峻山谷中,防渗体需经受大坝堆石体的工后流变与强烈地震的考验。该坝是即将施工时将面板堆石坝方案改为面膜堆石坝方案的,主要考虑因素为工期紧迫和需抵抗强震。相对于高面板堆石坝,高面膜堆石坝无面板结构性裂缝、周边缝止水变形过大、分期施工面板脱空等施工、运行问题。近 10 多年来,防渗面膜材料通过改性完善已对大坝防渗结构的施工与运行管理以极大的便利,如 100 m 级甚至 200 m 级的碾压混凝土坝采用裸露面膜防渗,无需设置垂直保护层,一些堆石坝也采用裸露面膜防渗结构,不仅工序简化、工期缩短,而且运行检查、维护检修十分方便。

d. 面膜堆石坝适宜在我国高原及深谷、高低纬度广大区域建造。国外采用面膜防渗形式的大坝分布于从热带的印度尼西亚到北极圈的冰岛,从太平洋东海岸到中欧阿尔卑斯山 2 000 m 高程处,说明其建造施工和安全运行的适应性。我国建坝的纬度与

高程分布区域大,从热带至北温带,从东南沿海高程数百米的抽水蓄能电站上水库到高程 3 000 m 的青藏高原,面膜堆石坝可满足不同区域的需要。

2.2.2 发展基础

a. 高面板堆石坝建造与性态研究成果可供借鉴。由于面膜堆石坝与面板堆石坝的防渗体位置相同,两者的堆石体结构组成相同,防渗体支持结构基本相同,堆石体运行变形规律相似,所以我国 30 多年建造与研究高面板堆石坝的经验可供高面膜堆石坝借鉴。

b. 国内已有中等高度面膜堆石坝的建坝经验。我国已有建造坝高超过 50 m 的面膜堆石坝的成功经验,并且正在设计施工境外坝高达 90 m 的面膜软岩堆石坝,而坝高 50 m 以下的新建及加固膜面坝就更多,一些经验可以供高面膜堆石坝借鉴。

c. 设计规范对膜防渗坝的限制逐渐放开。早在 1991 年国际大坝委员会的公报中就指出,没有理由对填筑坝土工膜的采用推荐具体的高度限制。虽然国内相关规范长期将膜防渗土石坝的高度限制在 3 级建筑物以下的低坝,但随着国内面膜堆石坝建造规模和高度逐渐增大,相关设计规范修订后将放宽对膜防渗堆石坝高度的限制。

d. 建设面膜堆石坝的潜在意愿强烈。面膜堆石坝防渗体由工厂制造质量保证率高,防渗结构施工简便、受气候影响小、工期短、造价低、维修方便,只是对高坝的一些技术问题缺少系统深入研究,有些部门现行规范尚有些限制,所以建设者处于一种想建又顾虑经验不足的纠结状态。已有许多低坝采用膜面坝形式,大量中小型病险土石坝采用面膜防渗加固方案,不少高坝大库的高围堰^[28] 采用膜防渗形式,这些现象预示国内建造高面膜堆石坝已为期不远。

3 高面膜堆石坝关键技术

关键技术研究不足是制约高面膜堆石坝建造与发展的因素之一,在国家自然科学基金资助下,笔者团队在面膜防渗结构的组成、运行的力学机理、设计方法与分析方法等方面取得一些研究初步成果,后续研究仍在进行中,现概述如下。

3.1 高面膜堆石坝周边的夹具效应与设计方法

3.1.1 面膜周边锚固的夹具效应

高面膜堆石坝周边锚固的所谓“夹具效应”^[29-30],是指面膜周边锚固在基岩或混凝土上的锚着力产生的摩阻力大于膜的拉伸强度时,相当于拉伸试验中的一端夹具,位于毗邻锚着处坝面由库水压力产生膜与上、下界面的摩阻力相当于锚着力而形成另一端夹具;尽管相对于基岩面膜随坝体位移只有厘米至分米量级,但上述两端夹具间的距离

(即坝体与基岩的距离)只有毫米量级,膜产生的伸长率超过 100%,甚至达到 1000%,使该处面膜破坏或因长期疲劳而破坏。

形成导致面膜不安全的夹具效应的必要条件为

$$p \geq \frac{T_l}{2(\tan \varphi_u + \tan \varphi_d)} \quad (1)$$

式中: p 为水压力, kN/m ; φ_u 、 φ_d 分别为面膜与上、下层接触材料间的摩擦角, $(^\circ)$; T_l 为面膜的极限拉伸强度, kN/m 。

形成导致面膜不安全的夹具效应的充分条件为

$$\frac{n - n_0}{n_0} \geq \varepsilon \Big|_{T=T_a} \quad (2)$$

式中: n 为水库满蓄后所考察部位坝面相对于基岩发生矢量位移的绝对值, mm ; n_0 为所考察部位坝面与基岩间的初始距离, mm ; $\varepsilon \Big|_{T=T_a}$ 为设计面膜的拉伸曲线上允许拉力 T_a 对应的伸长率。

3.1.2 消除夹具效应的设计方法

由于坝面与基岩的初始水平距离不能改变,但是相对于这两者之间水平距离的垂直距离是可以改变的,这样一方面增大了两端夹具的标距,另一方面在坝体位移过程中使两端夹具间的面膜的有效几何变形取代了面膜的材料变形。

具体方法为:铺膜线(施工铺膜坝面跟基岩的交线)高于锚固线(面膜周边基岩锚固线),水库满蓄坝面位移后使铺膜线回到锚固线附近,而整个过程两端夹具间的面膜几乎只有几何变形,极少发生材料变形,夹具效应可得以消除。

3.2 高面膜堆石坝面膜双向拉伸分析方法

3.2.1 防渗膜双向拉伸试验方法

目前土工膜防渗设计计算及安全评价主要以单向拉伸试验结果为依据,然而土工膜作为一种平面构造的柔性高分子材料,位于结构物表面或内部时,多处于平面多向受力状态,其主应力应为双向拉伸应力状态。土工膜采用单向拉伸试验方法时,试样变形无侧向限制,为单向受力状态,可见试验过程中的应力变形状态与实际运行性态不一致。单向拉伸试验方法得到的力学特性只能用来进行不同土工膜产品指标参数的横向比较,无法用来进行工程设计计算;此外,单向拉伸试验方法得到的应力-应变关系为名义应力(拉伸力除以横截面初始面积)-名义应变(两个拉伸夹具之间距离的伸长率,即整个试样的平均应变)关系,难以直接用于土工膜受力变形性态的数值分析与安全评价。笔者团队自主研发了“十”型和“筒”型两种双向拉伸试验装置及相应的试验方法,利用图像测试及分析方法获得试样真应变,根据测试试样截面积变化规律结合理论推导获得试样真应力,进而得到土工膜双向拉伸状态下

的基本力学特征及真应力-真应变关系。

3.2.2 防渗膜双向拉伸力学特性

面膜堆石坝一般在坝体填筑完成时沿坝坡铺设土工膜,此时堆石坝体大部分竖向沉降已完成,土工膜主要由蓄水引起坝体向下游垂直于坝面的位移而产生变形,由原来的平面变成向下游凸出的锅面形状,因承受沿着坝坡和坝轴线两个方向的拉力而处于双向受力状态;此外,在坝面周边锚固处的极小区域内,土工膜受到双向拉伸和夹具效应双重作用而极易发生破坏。

通过自主研发的两种双向拉伸试验装置对防渗膜进行了大量双向拉伸试验研究^[31-33],试验得到土工膜在双向状态下的延伸率远低于单向拉伸试验结果,不仅揭示了面膜在真实工作状态中的双向拉伸受力变形特性及破坏机理,而且试验获得的设计分析中所需的双向拉伸真应力-真应变关系和参数,比单向拉伸试验结果更加可靠合理。通过双向拉伸试验得到真应力-真应变关系及相应参数可对面膜防渗堆石坝进行数值计算和分析,能实现对高面膜堆石坝运行双向拉伸性态和安全度更加精确的预测和评价。

3.3 高面膜堆石坝数值精细模拟方法

3.3.1 面膜堆石坝数值计算现状

高面膜堆石坝中土工膜的受力变形机理主要有以下 3 个方面:①由于蓄水所产生随着坝体的变形而变形,这种变形会在坝轴线方向上和坝坡方向两个方向上同时给土工膜带来拉伸变形;②在双向拉伸变形的同时,土工膜还会与两侧的垫层和保护层产生沿着接触面的剪切错动,所以土工膜与两侧材料接触面的力学特性,也影响着土工膜的受力变形特性;③土工膜周边锚固在河床和岸坡的刚性基岩或混凝土构件上,由于坝体和岸坡基岩之间材料性质差异较大,往往会发生较大的差异变形,由于此时接近锚固处的土工膜在水压力作用下,被紧紧压在坝面上,无法均匀和有效地伸展开来,所以在接近锚固处极小的长度范围内,产生一个较大的拉伸变形,从而引起土工膜的拉伸破坏,这种受力特点也被形象地称为夹具效应。所以对高面膜堆石坝进行数值精细模拟必须能够较好地反映出上述 3 个土工膜主要的受力变形机理。

由于商业软件二次开发接口的问题,在大多数的计算模拟中土工膜材料的本构关系采用线弹性模型进行近似分析,鲜见采用非线性本构模型进行分析的实例,而土工膜在双向拉伸条件下的本构关系往往具有较强的非线性特性;采用有限元方法进行数值模拟计算时,往往没有考虑土工膜与其他材料接触界面的相互作用,或者仅以土石坝表面土体的应变作为土工膜的应变进行近似计算,采用传统的接触面单元考虑

土工膜与垫层间接触界面作用时,接触面两侧的单元节点其坐标必须相同,如此就造成了土工膜单元网格的密度与坝体单元的网格密度相同。事实上,土工膜在坝体与岸坡基岩以及坝基等连接处的应力和变形比较复杂,存在夹具效应,所以往往要求这些部位的土工膜网格尺寸不宜过大,则势必造成土石坝坝体单元和土工膜单元在网格尺寸上的不匹配。这也是目前面膜堆石坝数值计算的一个难点。

3.3.2 高面膜堆石坝精细数值计算方法

对于土工膜与垫层之间的接触面的模拟,采用土工膜连接单元改变了传统接触面单元以“面对面”的连接方式,而改用“点对面(体)”的连接方式,从而使得接触面两侧的单元节点不再需要重合,所以土工膜单元网格与坝体三维实体网格可以采用各自不同的网格密度相互独立划分。对于夹具效应的模拟,传统的网格划分手段是将土工膜单元网格与岸坡基岩的单元网格采用“共节点”的形式连接,网格节点是连续的,如此则无法体现出坝体和岸坡以及坝基等处的差异变形。高面膜防渗堆石坝精细数值计算方法^[34]通过将原来的锚固处的节点分离开来,并在土工膜节点与基岩节点之间建立新的三维空间弹簧单元的方法对锚固处土工膜的受力变形情况进行分析。

3.4 高面膜堆石坝非散粒体面膜垫层技术

3.4.1 面膜垫层工程性态分析

高面膜堆石坝垫层是面膜防渗体的持力层和传力层,同时又兼顾排除膜下积水的功能,所以垫层必须在水力学特性和力学性能上满足透水性、自稳性、高强度和变形协调性要求。目前常用的面膜垫层主要有颗粒垫层及非散粒体垫层两类。我国建造的中低面膜堆石坝中,通常采用砂砾石垫层,为满足防渗结构稳定,坡比一般需大于1:1.8,较缓的坝坡将影响高面膜堆石坝的经济性,所以对于坝坡较陡的高面膜堆石坝应考虑采用非散粒体垫层。

目前工程中采用的非散粒体垫层主要有砂砾石或碎石喷乳化沥青和无砂混凝土。喷乳化沥青可增强颗粒垫层的稳定性,但喷洒过多易降低垫层透水性,难以排除通过缺陷渗漏到膜下的积水,库水骤降时易导致膜后反压而引起防渗体失稳。无砂混凝土具有较高的强度和承载力,也能维持自身稳定性,但其脆性特性显著在抗压试验中均出现粉碎性破坏。对于建造在深厚覆盖层坝基上的软岩堆石坝体,蓄水后坝面会产生较大挠曲变形,无砂混凝土垫层在坝面发生较大挠曲变形时会发生较多较大的结构性裂缝,增加了面膜液胀破坏的风险度。据此,笔者团队开发了一种韧性较好的非散粒体垫层材料——聚合物透水混凝土。

3.4.2 聚合物透水混凝土工程特性

聚合物透水混凝土是一种新型弹性蜂窝状多孔材料,利用聚合物胶本身的黏结性将碎石颗粒粘接成一个坚实的整体结构。对该材料的透水性能、抗折及抗弯力学性能、界面抗剪强度试验及位于防渗体中的变形破坏特性等进行了大量试验研究^[35-36],并与无砂混凝土材料进行了对比试验和分析,论证了其对于高面膜堆石坝面膜垫层的适应性。材料试验结果表明:该新材料渗透系数可达1 cm/s以上,在具有较高抗压和抗折强度的同时,具有良好的韧性,弹性模量不到无砂混凝土的1/20,能保证位于较陡坝坡上的稳定性;其透水性能和变形协调性均高于无砂混凝土。防渗结构模型试验结果表明:聚合物透水混凝土能与防渗结构各层材料协调变形,能够适应坝面较大的挠曲变形;此外,该新型垫层材料还具有施工工艺简单、养护期短(2 d可达终凝强度的80%以上)等优点。相对于传统面膜垫层材料,更适合应用于深覆盖层上高软岩堆石坝的面膜垫层。

3.5 高面膜堆石坝膜顶胀损缺性态量化分析方法

3.5.1 面膜顶胀损缺的随机性

通过观察土工膜与散粒体材料的接触面可以发现,当散粒体材料的颗粒性状(粒径、尖锐程度等)以及排列堆积方式有序和规律时,土工膜与散粒体材料的接触点、接触面积以及接触力是唯一确定的,而实际上,散粒体中的颗粒性状及其排列堆积方式是无序和随机的,所以其接触点位置,接触面积以及接触力必然是随机和无序的。局部颗粒粒径小且颗粒排布紧密时,土工膜与颗粒的接触点就多,间距小,单位面积上每个接触部位分摊的压力就小,接触力也就小,反之接触力则大,所以土工膜下垫层对其的接触力是一个随机变量。

从高面膜防渗堆石坝中土工膜整体的受力分析上来看,土工膜上部所受的压力与其下部垫层对其的接触力合力必然是相等的,但由于接触力是一个随机变量,每个接触部位的接触力大小并不相同,所以在某个局部会出现接触力与土工膜上部压力不平衡的现象,同时土工膜会在这个不平衡力的方向上发生变形并产生内力来使该处的力重新平衡。

3.5.2 面膜顶胀损缺的随机性分析方法

土工膜与垫层颗粒间接触力具有随机性,但各颗粒接触力的合力必然与土工膜上部的压力相等,即接触力随机变量的随机性受到其合力一定的约束条件所限制,考虑了接触力随机性最大化以及合力一定的约束条件后,通过“最大熵原理”可以得出接触力随机变量的概率分布^[37],从而进一步得出土工膜局部不平衡力的概率分布。

目前土工膜顶胀测试规范中所得出的土工膜抗

顶胀能力是在一定试验条件下获得的一个确定的值,其值与土工膜的厚度、材料力学特性具有唯一确定的关系,如此则可根据相关室内试验所得出土工膜的抗顶胀能力,并通过与局部不平衡力随机变量的比较,可计算出该土工膜在某种垫层颗粒性状(粒径、尖锐程度等)下的安全概率^[38]。在高面膜防渗堆石坝中,由于各个高程处土工膜所受的压力不同,坝面上土工膜由于整体受力变形后本身存在一定应力和变形,所以考虑高面膜防渗堆石坝上的顶胀损缺分析必须还要考虑到坝面不同位置处土工膜不同的受力变形特性。

4 结 语

高面膜堆石坝的防渗膜具有柔性,擅于以自身几何变形和材料变形适应较大的坝体位移和深覆盖层沉降,尤其适用于深覆盖层地基上的高软岩堆石坝建设,且其施工程序简单,造价低廉,施工期短。随着裸露防渗膜的应用,使设计施工又增加了多种选择。现在我国正值水利水电建设快速发展期,一方面高坝建设需求旺盛,另一方面存在不少条件不太理想的坝址,如覆盖层较深、黏性土料缺乏或开采受到限制等,所以,高面膜堆石坝建设的原理研究、技术及材料研发、设计施工规范编制将伴随在高面膜堆石坝的逐步建设得到深入发展和完善,高面膜堆石坝建设将历史性地在我国得到长足发展。

参考文献:

[1] ICOLD. Geomembrane sealing systems for dams: design principles and return of experience (Bulletin 135) [R]. Paris: The International Commission on Large Dams, 2010.

[2] DL/T 5395—2007 碾压式土石坝设计规范[S].

[3] SL 274—2001 碾压式土石坝设计规范[S].

[4] 马洪琪,曹克明.超高面板坝的关键技术问题[J].中国工程科学,2007(11):4-10. (MA Hongqi, CAO Keming. Key technical issues related to super-high concrete slab dam [J]. Engineering Sciences, 2007 (11): 4-10. (in Chinese))

[5] GIROUD J P, SODERMAN K L. Comparison of geomembranes subjected to differential settlement [J]. Geosynthetics International, 1995, 2(6):953-969.

[6] MARULANDA A, CASTRO A, RUBIANO N R. Miel I: a 188 m high RCC dam in Colombia [J]. The International Journal on Hydropower & Dams, 2002, 9(3):76-81.

[7] KLINE R. Design of roller-compacted concrete features for Olivenhain dam: dams, innovations for sustainable water resources [C]//Proceedings 22nd USSD Conference. Denver, USA; United States Society on Dams, 2002:23-34.

[8] SCUERO A, VASCHETTI G, KUWANO J, et al. The new

ICOLD bulletin on impervious geomembranes for dams [C]//Proceeding of the 8th International Conference on Geosynthetics (8ICG). Rotterdam: Millpress Science Publishers, 2006: 627-630.

[9] CAZZUFFI D, GIROUD J P, SCUERO A, et al. Geosynthetic barriers systems for dams, Keynote Lecture [C]//Proceeding of the 9th International Conference on Geosynthetics. Guaruj, Brazil; Brazilian Chapter of the International Geosynthetics Society, 2010: 115-163.

[10] SEMBENELLI P, SEMBENELLI G, SCUERO A M. Geosynthetic System for the facing of Bovilla Dam [C]//Proceedings Sixth International Conference on Geosynthetics. Atlanta: Industrial Fabrics Association International, 1998:1099-1106.

[11] LARSON E. KELLY R, DREESE T, et al. Repairing CFRDs in cold climates: the case of Salt Springs [J]. International Journal on Hydropower and Dams, 2005, 12 (4): 82-86.

[12] LARSON E, KELLY R, DREESE T, et al. A permanent solution [J]. International Water Power and Dam Construction, 2006, 58(4): 34-37.

[13] 顾淦臣,复合土工膜或土工膜堤坝实例述评[J]. 水利水电技术, 2002, 33 (12): 26-32. (GU Ganchen. Review of dams and dikes with composite geomembrane impervious structure [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, 33 (12): 26-32. (in Chinese))

[14] 顾淦臣,应用复合土工膜加固石砭峪沥青混凝土斜墙坝[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24 (1): 10-14. (GU Ganchen. Reinforcement of Shibianyu asphalt concrete slopewall rockfill dam with composite geomembrane [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24(1): 10-14. (in Chinese))

[15] 赵志清.土工膜在我国水利防渗的首次应用[J]. 中国建材防水材料, 1991 (3): 16-18. (ZHAO Zhiqing. The first application of geomembranes in water conservancy anti-seepage in China [J]. China Building Waterproofing, 1991 (3): 16-18. (in Chinese))

[16] 阎兴武,周学敏.夹山水库塑膜防渗施工技术[J]. 防渗技术, 1996, 2 (4): 35-38. (YAN Xingwu, ZHOU Xuemin. The engineering technique of construction for controlling seepage with plastic film in Jiashanzi Reservoir [J]. Technique of Seepage Prevention, 1996, 2 (4): 35-38. (in Chinese))

[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 Xixiayuan earth-rock dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6): 70-73. (in Chinese))
- [19] SHU Y M, YUAN Q Y, CHEN Q. Technology of geomembrane on earth-rock dam for seepage prevention [C]//Proceeding of the 9th International Conference on Geosynthetics. Guaruj, Brazil; Brazilian Chapter of the International Geosynthetics Society, 2010: 1265-1268.
- [20] 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 geomembranes construction technique of renzonghai dam [J]. Sichuan Water Power, 2011, 30(5): 32-35. (in Chinese))
- [21] 束一鸣, 顾淦臣, 向大润. 长江三峡二期围堰土工膜防渗结构前期研究 [J]. 河海大学学报, 1997, 25 (5): 71-74. (SHU Yiming, GU Ganchen, XIANG Darun. Study on geomenbrane for impervious structure of second-stage cofferdam of the Three Gorges Project [J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(5): 71-74. (in Chinese))
- [22] 杨泽艳, 周建平, 蒋国澄, 等. 中国混凝土面板堆石坝的发展 [J]. 水力发电, 2011, 37 (2): 18-23. (YANG Zeyan, ZHOU Jianping, JIANG Guocheng, et al. Development of concrete faced rockfill dam in China [J]. Water Power, 2011, 37(2): 18-23. (in Chinese))
- [23] 刘培, 吴静, 庞彬. 瀑布沟水电站砾石土心墙堆石坝填筑进度分析 [J]. 人民长江, 2012 (4): 43-45. (LIU Pei, WU Jing, PANG Bin. Analysis of filling progress of gravel soil core rockfill dam of Pubugou Hydropower Station [J]. Yangtze River, 2012, (4): 43-45. (in Chinese))
- [24] 李为, 苗喆. 察汗乌苏面板坝监测资料分析 [J]. 水利水电工程学报, 2012, (5): 31-35. (LI Wei, MIAO Zhe. Stress and deformation analysis of Chahanwusu Concrete Face Rockfill Dam (CFRD) based on monitoring data [J]. Hydro-Science and Engineering, 2012, (5): 31-35. (in Chinese))
- [25] 刁慧贤, 束一鸣, 姜晓桢. 深覆盖层高面板坝连接板型式优化分析 [J]. 水电能源科学, 2014, (11): 78-83. (DIAO Huixian, SHU Yiming, JIANG Xiaozhen. Optimization of connection plate in CFRD foundation with deep overburden [J]. Water Resources and Power, 2014, (11): 78-83. (in Chinese))
- [26] XU Zeping. Technical progress of CFRD constructed on deep alluvium [M]//Modern Rockfill Dams: 2009. Beijing: China Waterpower Press, 2009: 45-51.
- [27] 李红亮, 翟建, 熊建清, 等. 河口村水库面板堆石坝施工动态三维可视化仿真研究 [J]. 水电能源科学, 2011 (11): 164-166. (LI Hongliang, ZHAI Jian, XIONG Jianqing, et al. Study of dynamic three dimensional visual simulation for concrete faced rockfill dam construction [J]. Water Resources and Power, 2011 (11): 164-166. (in Chinese))
- [28] 盛乐民, 张朝金. 复合土工膜在向家坝围堰工程中的应用 [J]. 水利水电科技进展, 2009, 29 (6): 86-89. (SHENG Lemin, ZHANG Chaojin. Application of composite geomembrane in Xiangjiaba earth-rock fill cofferdam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6): 86-89. (in Chinese))
- [29] SHU Yiming, LI Yonghong. Design principles for high head earth-rock dams with geomembranes [C]//Dam Safety Problems And Solutions-Sharing Experience; ICOLD 72nd Annual Meeting Proceedings. Seoul, Korea; INTERCOM Convention Services, Inc., 2004: 628-639.
- [30] 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))
- [31] 束一鸣, 吴海民, 林刚, 等. 土工合成材料双向拉伸蠕变测试仪: 中国, 201019026078. X [P]. 2011-04-11.
- [32] 姜晓桢, 束一鸣, 吴海民, 等. 土工膜内压薄壁圆筒试样双向拉伸试验装置及试验方法: 中国, 201210117437. 4 [P]. 2014-05-07.
- [33] 吴海民, 束一鸣, 曹明杰, 等. 土工合成材料双向拉伸多功能试验机的研制及初步应用 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (1): 170-175. (WU Haimin, SHU Yiming, CAO Mingjie, et al. Development and application of multi-functional biaxial tensile testing machine for geosynthetics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (1): 170-175. (in Chinese))
- [34] 姜晓桢, 土石坝坝面防渗土工膜运行性态及其分析方法 [D]. 南京: 河海大学, 2013.
- [35] 滕兆明, 束一鸣, 吴海民, 等. 无沙混凝土垫层配合比及力学性能试验研究 [J]. 人民黄河, 2012, 34 (10): 139-141. (TENG Zhaoming, SHU Yiming, WU Haimin, et al. Study of test on mixed proportions design and mechanical properties of no fines concrete cushion layer [J]. Yellow River, 2012, 34 (10): 139-141. (in Chinese))
- [36] 蒋善平, 束一鸣, 吴海民, 等. 堆石坝面防渗膜-垫层料界面力学特性试验研究 [J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2014, 36 (1): 10-14. (JIANG Shanping, SHU Yiming, WU Haimin, et al. Experimental study of mechanical properties of interfaces between geomembrane applied to rockfill dam and cushion materials [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2014, 36 (1): 10-14. (in Chinese))
- [37] JIANG Xiaozhen, SHU Yiming. Probabilistic analysis of random contact force between geomembrane and granular material [J]. Journal of Central South University, 2014, 21 (8): 3309-3315.
- [38] JIANG Xiaozhen, SHU Yiming, ZHU Jungao. Probabilistic analysis of geomembrane puncture from granular material under liquid pressure [J]. Journal of Central South University, 2013, 20 (11): 3256-3264.

(收稿日期: 2014-10-29 编辑: 熊水斌)