

DOI: 10.11779/CJGE2016S1006

# 高堆石坝面防渗土工膜锚固区夹具效应破坏模型试验

吴海民, 束一鸣, 滕兆明, 蒋善平, 刘云锋

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 针对高堆石坝面防渗土工膜锚固区易因夹具效应而发生拉伸破坏的问题, 运用自研锚固结构模型试验装置对堆石坝面膜防渗体周边锚固结构处土工膜“夹具效应”破坏特性进行了一系列模型试验验证和分析。试验结果表明, 在坝基和防渗墙或者坝面与岸坡岩体间发生差异沉降后, 锚固区极小范围内的土工膜随接触材料一起发生位移而无法发生相对运动是夹具效应破坏的根源; 传统直线型、折叠式及缠绕式铺膜锚固方式均无法避免因夹具效应而发生拉伸破坏; 相同差异位移条件下, PVC膜承受差异变形的能力相对于PE和HDPE膜更强, 在深覆盖层上高堆石坝防渗中应该首先考虑使用。

**关键词:** 堆石坝; 土工膜防渗体; 锚固结构; 夹具效应; 模型试验

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S1-0030-07

**作者简介:** 吴海民(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事土石坝与堤防工程、土工合成材料工程应用方面的科研和教学工作。E-mail: wuhaimin@hhu.edu.cn。

## Model tests on failure properties of geomembrane anchorage due to clamping effect in surface barrier of high rock-fill dam

WU Hai-min, SHU Yi-ming, TENG Zhao-ming, JIANG Shan-ping, LIU Yun-feng

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Tension failure of geomembrane in anchorage zone of surface barrier for high rock-fill dams will be inevitably caused by clamping effect. A set of model tests are performed to verify and analyze the failure properties of geomembrane due to the clamping effect in the anchorage zone of surface barrier using self-developed devices. The test results show that the geomembrane cannot move freely and yield tension failure when differential settlement occurs between dam foundation and cutoff wall or dam surface and rock of bank slope. The excessive friction between the geomembrane and the contacting material is the main reason of tension failure of the geomembrane in small anchorage zone. The traditional anchoring structures including line-shaped anchorage, spirally wrapped anchorage and folded anchorage will all inevitably induce the excessive tension deformation of geomembrane next to their connection to anchorage structure. Under the same differential settlement, PVC geomembrane exhibits a stronger adaptability to the differential deformation compared with to PE and HDPE geomembranes. So the PVC geomembrane should be a preferred selection when used as the surface barrier for high rock-fill dam on thick pervious foundation.

**Key words:** rock-fill dam; geomembrane surface barrier; anchorage structure; clamping effect; model test

## 0 引 言

建在深厚覆盖层上的土工膜上游面防渗堆石坝, 一般会在坝体填筑完成后进行土工膜铺设和安装, 此时坝体堆石因自重产生大部分变形已经完成, 蓄水后坝面周边锚固部位的变形主要由水压力荷载产生的相对于基岩锚固槽和混凝土防渗墙的相对沉降位移。当土工膜随坝体或坝基的变形一起位移时, 由于巨大水压作用产生的摩阻力, 使膜与接触材料之间难以产生相对位移, 锚固端部极小范围内的土工膜如拉伸试验时被紧紧夹在一端的夹具中一样, 而土工膜的另一

端则锚固着, 如同拉伸试验时被夹在另一端夹具中, 两端夹具相互紧贴, 由此在锚固端部极小区域内产生的拉伸应变极可能超出膜的承受能力(因锚固端部土工膜只能在极小区域内产生较大的拉伸变形, 相当于土工膜拉伸试验伸长率计算公式中分母很小而分子很大, 所以此处的土工膜伸长率极易超出其极限延伸

**基金项目:** 长江科学院开放研究基金项目(CKWV2015210/KY); 国家自然科学基金项目(51409083, 51379069); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

**收稿日期:** 2015-11-30

率), 这种变形破坏机制称作“夹具效应”<sup>[1]</sup>。坝基及岸坡锚固结构处土工膜“夹具效应”分别如图 1 和图 2 所示。

文献[2]通过数值模型计算发现大坝承受的水位越高时, 坝面上的越大部分的土工膜被夹在上下两层接触材料之间不能移动。尤其是对于 50 m 以上的高坝, 即使是土工膜拉伸强度高达 30 kN/m, 摩擦系数小到 0.1 左右, 也有近一半坝体高度的膜在垫层和保护层之间不能移动, 这样就导致锚固结构端部的土工膜极易因“夹具效应”而受拉破坏。而在坝面与岸坡及混凝土防渗墙三者连接部位, 土工膜还处于双向拉伸的“夹具效应”机制中, 而在双向拉伸中, 膜的特征延伸率会显著降低<sup>[3]</sup>, 更容易拉伸破坏。因此, 揭示坝面防渗土工膜锚固部位的受力变形特性及破坏机理, 对于提出避免拉伸破坏的合理锚固结构型式和指导工程设计均具有重要意义。

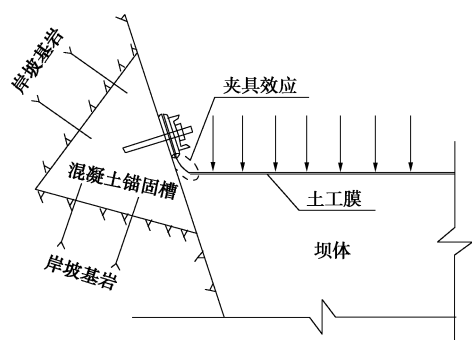


图 1 岸坡锚固部位土工膜“夹具效应”

Fig. 1 Clamping effect of geomembrane next to connection of bank slope

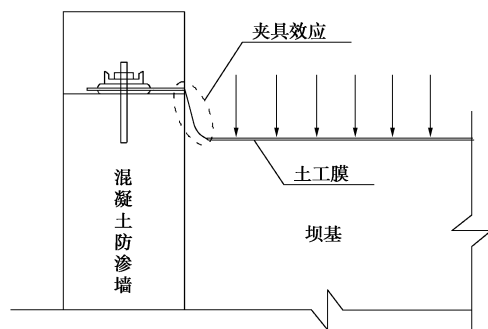


图 2 坝基锚固部位土工膜“夹具效应”

Fig. 2 Clamping effect of geomembrane next to connection of concrete cutoff wall

在有关土工膜锚固结构方面, 也有一些研究成果报道。如 Giroud 通过理论分析和推导, 提出土工膜与结构物连接设计方法, 但该方法是针对水头较低的防渗工程, 允许发生局部拉伸且是在诸多假定前提下推

导出的, 无法适用于复杂结构型式的高堆石坝防渗土工膜锚固结构<sup>[4]</sup>; Donald 等在总结现有土工膜防渗体顶部土体锚固槽设计方法基础上, 提出以土工膜不被拔出为出发点的设计方法存在缺陷, 应该考虑土工膜拉伸和撕裂破坏的可能, 在考虑土工膜拉伸强度和延伸率的基础上进行锚固槽设计<sup>[5]</sup>; Giroud 等研究了垃圾填埋场防渗土工膜在风荷载作用下沟槽中用重物锚固设计方法及措施<sup>[6]</sup>; 束一鸣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土工膜集中变形的思路<sup>[7-8]</sup>; 花加凤等通过数值分析方法初步论证了周边锚固部位极小区域防渗膜“夹具效应”的存在性<sup>[2]</sup>; Imaizumi 等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, 柔软土工膜的锚着能力更强<sup>[9]</sup>。

以上关于土工膜锚固连接结构方面的研究主要集中在垃圾填埋场等水头较低的防渗工程中, 其锚固部位的荷载及边界条件与高堆石坝防渗体具有较大差异, 如土工膜垫层均为黏性土或中细砂; 且研究方法也仅限于基于诸多假定的理论分析, 并未经有效的试验验证; 这些研究成果无法直接应用于高堆石坝面膜防渗体周边锚固结构的设计计算。因此, 本文自研了一套基于万能试验机加载的土工膜锚固结构模型试验装置, 以周边锚固部位差异变形为边界条件, 采用局部静力结构模型试验对堆石坝面膜防渗体周边锚固结构处土工膜“夹具效应”破坏进行验证, 对锚固部位土工膜拉伸变形破坏模式及机理进行分析。

## 1 试验方案与装置

### 1.1 试验方案

本文采用局部结构模型试验方法对堆石坝面土工膜防渗体周边锚固结构处土工膜夹具效应及土工膜拉伸变形破坏模式及机理进行试验验证和分析。

试验主要针对堆石坝面周边锚固结构中 3 种传统锚固型式进行试验验证和分析。

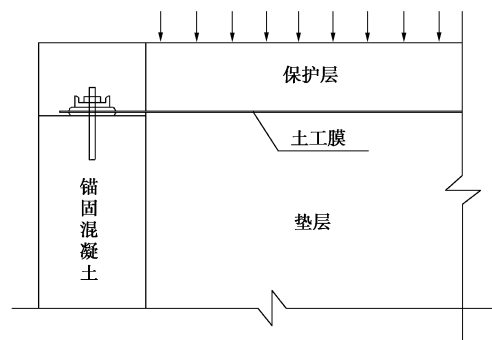


图 3 直线型铺膜锚固型式

Fig. 3 Anchorage structure with line-shaped geomembrane

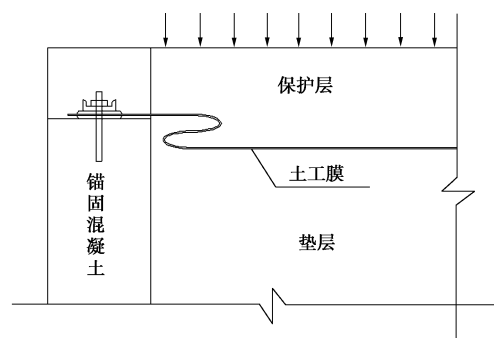


图 4 缠绕式伸缩节锚固型式

Fig. 4 Anchorage structure with spirally wrapped geomembrane

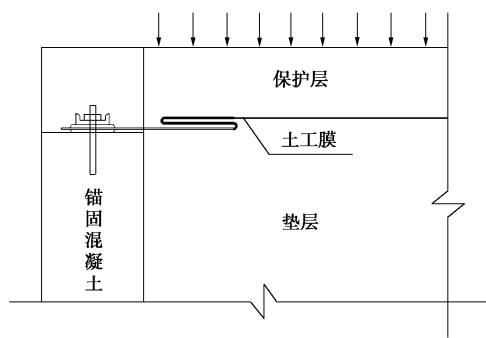


图 5 折叠式伸缩节锚固型式

Fig.5 Anchorage structure with folded geomembrane

第一种锚固结构是如图 3 所示的常规直线型铺膜方式;另外两种分别是如图 4 和图 5 所示的在锚固处设置伸缩节的铺膜方式,这两种伸缩节型式在以往工程中曾被采用过<sup>[10]</sup>,但目前仍存在较大争议,认为这两种伸缩节不能解决土工膜锚固处土工膜的“夹具效应”问题,所以本文专门针对这一问题进行试验论证。

针对以上 3 种土工膜锚固型式进行结构模型试验,通过观测试验中土工膜的受力变形结果来验证这几种最常见的锚固结构型式土工膜“夹具效应”存在以及土工膜拉伸变形破坏模型及机理。

对于直线型铺膜锚固结构,分别选用 PE、HDPE 和 PVC 3 种土工膜材料进行“夹具效应”验证试验。其中 PE 膜分别进行了沉降位移为 2, 3, 4, 5 cm 4 种情况下的锚固结构模型试验,主要是想通过在土工膜顶部施加荷载使锚固端产生不同的沉降位移,揭示不同沉降位移对土工膜“夹具效应”的影响。

HDPE 和 PVC 土工膜也分别进行了沉降位移为 5 cm 情况下的锚固结构模型试验,通过比较和分析 3 种土工膜在沉降位移均为 5 cm 情况下的变形破坏状态,可以揭示不同类型土工膜对于“夹具效应”的承受能力。土工膜“夹具效应”模型试验的具体方案见表 1。

表 1 土工膜“夹具效应”验证试验方案

Table 1 Verification schemes program of clamping effect of geomembrane

试验 编号	1	2	3	4	5	6	7	8
锚固 结构	直线	直线	直线	直线	直线型	直线型	缠绕 式	折叠 式
铺膜方 式	型	型	型	型	型	型	伸缩 节	伸缩 节
差异沉 降量/cm	2	3	4	5	5	5	5	5
土工膜 类型	PE	PE	PE	PE	PVC	HDPE	PE	PE

1.2 模型试验装置

锚固结构模型试验在钢制框架的模型箱内进行。模型箱如图 6 (a) 所示,模型箱体平面尺寸: 400 mm × 400 mm, 高 600 mm。箱体前侧为 2.7 cm 厚的透明有机玻璃板,可以观察内部结构变形情况,其他 3 个侧板及底板均为钢板。上部最大设计荷载为 10 t, 最大压缩沉降约为 200 mm, 箱体结构需满足设计荷载下的强度及刚度要求。模型箱左侧为两块“L”型钢板构成的锚固构件,用来锚固土工膜。

模型试验采用河海大学水工结构实验中心的液压万能试验机来施加竖向荷载。试验机照片如图 6 (b) 所示, 该设备为上海华龙测试仪器有限公司生产的 WEW—600B 型液压万能试验机, 能提供最大荷载为 600 kN, 压缩最大行程为 380 mm, 试验机加载平台最大尺寸为 550 mm × 550 mm, 试验机自带测力和位移的传感器, 测力传感器最小分辨率为 0.01 kN, 位移传感器最小分辨率为 0.01 mm。



(a) 模型箱 (b) 万能试验机

图 6 模型试验装置

Fig. 6 Model test equipment

2 试验材料及过程

2.1 试验材料

试验中需要用到的材料有土工膜、垫层材料、保护层材料以及模拟模型沉降变形所需的压缩层材料。

不同试验方案中土工膜分别采用如表 1 中的土工膜材料类型。其中, PE 土工膜厚度为 1.0 mm, PVC 土工膜厚度为 1.5 mm, 均为工程中常用的土工膜。PE 土工膜之所以采用 1.0 mm 厚的膜, 主要是考虑模型中布置缠绕式和折叠式伸缩节时, 膜如果太厚无法按图中伸缩节形状和尺寸铺设。

垫层及保护层是锚固结构模型试验最关键的材料, 因为垫层和保护层直接与土工膜接触, 与土工膜接触界面的摩擦力学特性是“夹具效应”的主要控制因素。为了揭示实际工程中“夹具效应”现象以及土工膜变形破坏模式, 模型试验中采用与实际工程一样的河床石英砂作为垫层和保护层。河床砂粒径为 1~5 mm, 颗粒形状为原形或者椭圆形, 没有尖锐棱角, 与土工膜接触时不会发生刺破损伤。

为了模拟锚固结构中土工膜端部的差异沉降变形, 需要在模型底部铺设压缩层, 以便在顶部荷载作用下锚固端部发生较大沉降变形。压缩层也采用跟第五章模型试验中相同的橡胶粒子, 粒径为 1~3 mm。

## 2.2 模型制备

模型中的垫层和保护层均为河床石英砂, 虽然石英砂颗粒均为圆形或椭圆形, 但砂颗粒与模型箱侧壁的摩擦阻力也非常大。摩擦阻力的存在, 将使模型内部尤其是靠近侧壁边缘处的受力和变形都不均匀, 这将影响锚固端部土工膜的实际受力变形。所以, 必须采取措施减小侧壁的摩擦阻力。试验采用光滑的聚四氟乙烯(最光滑的固体物质)薄膜黏贴在模型箱体内部来尽量减小侧壁的摩擦阻力。锚固结构模型按照如下步骤进行制备:

(1) 首先在模型箱左侧壁、后侧壁及右侧壁黏贴聚四氟乙烯薄膜, 用高强万能胶黏贴, 风干 24 h 完全凝固黏牢。

(2) 在模型箱底部填筑压缩层橡胶粒子到设计高度, 并用高强无纺土工织物覆盖隔离。

(3) 在隔离后的压缩层上部填筑石英砂垫层, 并碾压密实。

(4) 在垫层上按各试验方案中的模型结构型式铺设土工膜, 并在端部运用螺栓进行锚固。

(5) 在锚固好的土工膜上部填筑石英砂保护层, 填筑到距离模型箱顶部 1 cm 左右高度。

(6) 在填筑好的保护层上覆盖一块柔软硅胶垫, 以便使模型顶部施加的荷载均匀分布, 然后在硅胶垫上放置刚性加载板; 最后将结构模型吊装到万能试

验机的加载平台上准备试验。

## 2.3 加载与量测

采用万能试验机抗压试验模式在锚固结构模型顶部加载板上方提供竖向均布荷载, 加载速率控制在 0.1 kN/min, 利用万能试验机自带测力传感器和位移计记录加载板的竖向荷载和竖向位移。

土工膜变形的测量采用图像分析法, 模型试验开始加载前, 在侧面有机玻璃上标记好土工膜的初始位置; 试验中利用架设在外侧的高清摄像设备观测记录模型的变形运动轨迹; 然后通过图像处理和分析得到土工膜变形轨迹。

## 3 试验结果

### 3.1 直线型铺膜锚固型式

图 7 为直线型铺膜锚固结构在遭受差异沉降变形时典型运动轨迹照片。由图可知, 3 种不同类型的土工膜在不同沉降变形情况下均按照这个模式产生位移和变形。土工膜变形主要集中在锚固端极小长度范围内。在这个范围之外的土工膜只随上部和下部的砂层一起向下位移, 但与砂层之间没有明显相对剪切位移, 即除了左端的极小范围内土工膜会向左运动, 这个范围之外右边的土工膜不会向左运动。这种变形模式就是“夹具效应”产生的根源。



图 7 直线型铺膜锚固结构中典型土工膜变形模式照片

Fig. 7 Deformation of line-shaped geomembrane next to anchorage structure

图 8 为直线型铺膜锚固结构在差异沉降变形前后土工膜轨迹变化图。对于 PE 土工膜, 不同沉降位移情况下土工膜的变形模式基本相同, 土工膜均在锚固端附近发生拉伸变形, 直线形状的土工膜变形后均呈抛物线形状。随着模型顶部沉降量的增加, 土工膜沉降位移和变形也不断增大。3 种土工膜在沉降位移为 5 cm 情况下的变形模式也基本相同, 在锚固端部小范围内, 直线型土工膜变形后也呈抛物线形。

图 9 为直线型铺膜锚固结构中土工膜变形破坏状



态照片。由图可知,对于 PE 土工膜,不同沉降位移情况下锚固端附近土工膜的变形破坏越来越严重,在 2 cm 沉降位移下,锚固端附近土工膜也出现了明显的不可恢复变形。沉降位移为 3 cm 时,锚固端附近宽度方向上的大部分都土工膜发生了断裂破坏,沉降位移达 5 cm 时,锚固端附近土工膜基本上完全断裂。由此可见,对于直线型铺设锚固结构,土工膜“夹具效应”无法避免,甚至在 2 cm 如此小的差异沉降都会导致土工膜发生较大的拉伸变形。所以,对于土工膜锚固结构,如果存在差异沉降,就必须考虑土工膜“夹具效应”对土工膜安全的影响。

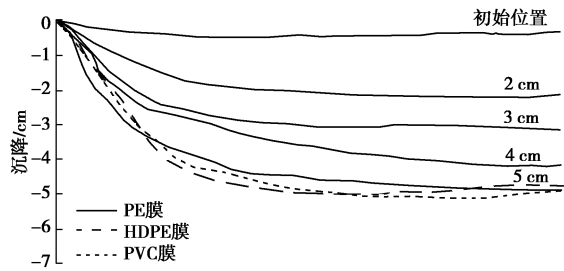


图 8 直线型铺膜锚固结构变形前后土工膜轨迹变化

Fig. 8 Trajectory of line-shaped geomembrane next to anchorage structure fore-and-aft tests

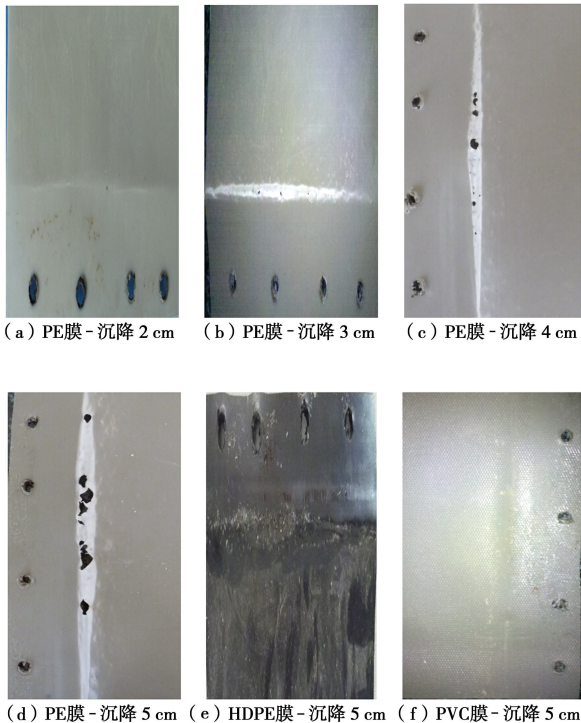


图 9 直线型铺膜锚固结构中土工膜变形破坏状态

Fig. 9 Deformation and failure states of line-shaped geomembrane next to anchorage structure

在 5 cm 沉降位移下,虽然 3 种土工膜的运动轨迹

基本一致,但变形破坏程度差异很大,PE 土工膜基本完全断裂,HDPE 土工膜出现明显拉伸变形痕迹,而 PVC 土工膜没有明显的不可恢复变形痕迹。这与 3 种土工膜的力学特性有关,PE 和 HDPE 两种土工膜屈服点延伸率很低,在单向拉伸状态下不到 10%,在双向拉伸状态下不到 5%,而 PVC 土工膜是一种弹性很好的材料,没有明显的屈服点,变形能够恢复。所以,3 种土工膜中,PVC 土工膜承受差异变形的能力最强,在深覆盖层上高堆石坝防渗中应该首先考虑使用。

3.2 缠绕式伸缩节锚固型式

图 10 (a)、(b) 分别为缠绕式伸缩节在 5 cm 沉降变形前后的位置变化和土工膜变形破坏状态照片。由图可知,在整个结构发生沉降变形时,缠绕式伸缩节并未按照设想的方式被拉开,而是整体向下平移。锚固端部土工膜仍然发生了拉伸变形,已经接近破坏状态,说明锚固端部土工膜仍存在“夹具效应”。

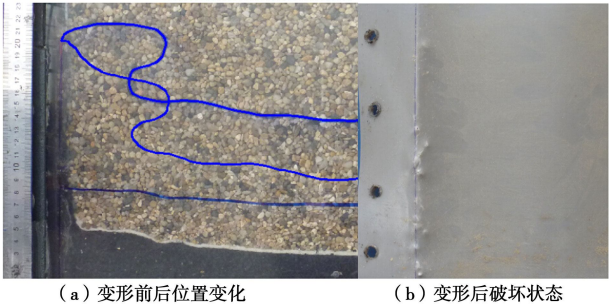


图 10 缠绕式伸缩节锚固结构中土工膜变形及破坏状态  
Fig. 10 Deformation and failure states of spirally wrapped geomembrane next to anchorage structure

图 11 为设置缠绕式伸缩节的锚固结构中 5 cm 沉降变形前后土工膜轨迹变化图。由图可知,结构变形前后,伸缩节的形状及大小基本没变化,相当于整体向下部平移。而发生拉伸变形的仍然是锚固端部的土工膜。

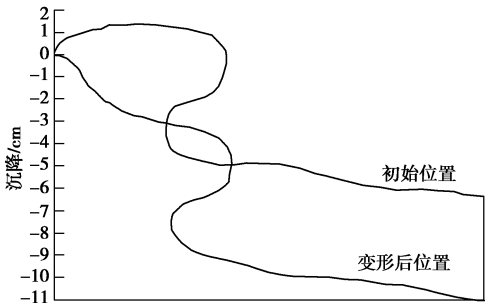


图 11 缠绕式伸缩节锚固结构变形前后土工膜轨迹变化

Fig. 11 Trajectory of folded geomembrane next to anchorage structure fore-and-aft test

由以上 3 个图中的试验结果分析可见在土工膜锚

固结构中设置缠绕式伸缩节无法避免土工膜“夹具效应”的发生,在整个结构发生差异沉降时,伸缩节在法向压力下由于界面摩擦力太大,无法被拉开,所以,仍然只有锚固端部小范围内土工膜承受拉伸变形,此处土工膜极易发生拉伸破坏。

### 3.3 折叠式伸缩节锚固型式

图 12 (a)、(b) 分别为折叠式伸缩节在 5 cm 沉降变形前后的位置变化和土工膜变形破坏状态照片。由图可知,在整个结构发生沉降变形时,折叠式伸缩节也未按照设想的方式被拉开,反而在整体向下平移的同时被压得更紧。锚固端部土工膜仍然发生了拉伸变形,并达到断裂破坏状态,说明锚固端部土工膜“夹具效应”很严重。

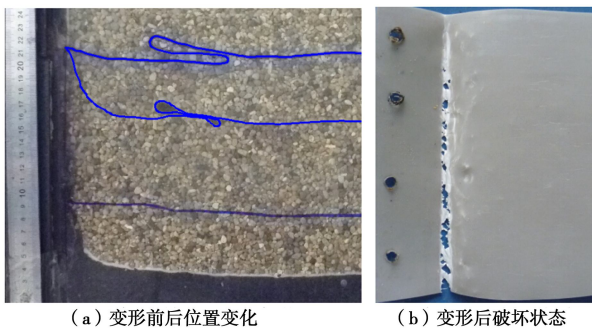


图 12 折叠式伸缩节锚固结构中土工膜变形及破坏状态  
Fig. 12 Deformation and failure states of spirally wrapped geomembrane next to anchorage structure

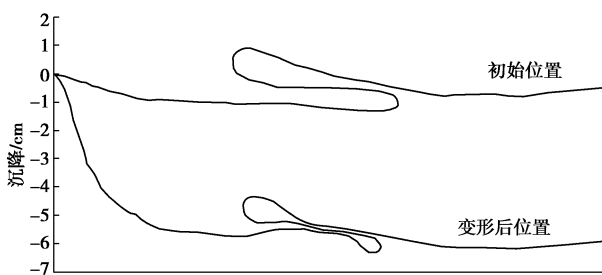


图 13 折叠式伸缩节锚固结构变形前后土工膜轨迹变化  
Fig. 13 Locations of folded geomembrane next to anchorage structure fore-and-aft tests

图 13 为设置折叠式伸缩节的锚固结构中,在 5 cm 沉降变形前后土工膜轨迹变化图。由图可知,结构变形前后,伸缩节的形状发生了微小变化,在整体向下部平移的同时,伸缩节被法向压力压的更紧。而发生拉伸变形的仍然是锚固端部的土工膜。

由以上 3 个图中的试验结果分析可见在土工膜锚固结构中设置折叠式伸缩节也无法避免土工膜“夹具效应”的发生,在整个结构发生差异沉降时,伸缩节只会被压得更紧,在法向压力下由于界面摩擦力太大,

无法被拉开,所以,仍然只有锚固端部小范围内土工膜承受拉伸变形,此处土工膜极易发生拉伸破坏。

## 4 结论与建议

运用自主研制的土工膜锚固结构模型试验装置进行土工膜锚固结构破坏模型试验研究。初步结论如下:

(1) 锚固结构部位土工膜变形主要集中在锚固端极小长度范围内,在这个范围之外的土工膜只随上部和下部的砂层一起向下位移,但与砂层之间没有明显相对剪切位移,即除了左端的极小范围内土工膜会向左运动,这个范围之外右边的土工膜不会向左运动,这种变形模式就是“夹具效应”产生的根源。

(2) 土工膜“夹具效应”模型试验验证结果表明,对于直线型铺设锚固结构,土工膜“夹具效应”无法避免。所以,对于土工膜锚固结构,如果存在差异沉降,就必须考虑土工膜“夹具效应”对土工膜安全的影响。相对于 PE 和 HDPE 土工膜, PVC 土工膜承受差异变形的能力最强,在深覆盖层上高堆石坝防渗中应该首先考虑使用。

(3) 通过模型验证试验结果可知,在整个结构发生差异沉降时,传统的缠绕式和折叠式伸缩节在法向压力下均无法被拉开,仍然只有锚固端部小范围内土工膜发生拉伸破坏。所以,锚固结构中缠绕式和折叠式伸缩节无法避免土工膜“夹具效应”的发生。

### 参考文献:

- [1] 束一鸣, 李永红. 较高土石坝膜防渗结构设计方法探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 60 - 64. (SHU Yi-ming, LI Yong-hong. Design of impervious structure with geomembrane for high earth-rock dams[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(1): 60 - 64. (in Chinese))
- [2] 吴海民, 束一鸣, 曹明杰. 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 Hai-min, SHU Yi-ming, CAO Ming-jie, 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))
- [3] 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 Jia-feng, SHU Yi-ming, ZHANG Gui-ke, 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))
- [4] 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.
- [5] HULLINGS D E, SANSONE L J. Design concerns and performance of geomembrane anchor trenches[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1997, **15**: 403 - 417.
- [6] GIROUD J P, GLEASON M H, ZORNBERG J G. Design of geomembrane anchorage against wind action[J]. *Geosynthetics International*, 1999, **6**(6): 481 - 507.
- [7] 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, 2008: 502 - 507.
- [8] 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*, 2002a, **33**(3): 26 - 28. (SHU Yi-ming. Geomembrane connection and defect leakage calculation and effect of defect flow[J]. *Yangtze River*, 2002a, **33**(3): 26 - 28. (in Chinese))
- [9] 束一鸣. 土工膜施工工艺及其经验教训[J]. *水利水电技术*, 2002b, **33**(4): 19 - 21. (SHU Yi-ming. Construction technology and experience on geomembrane[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2002, **33**(4): 19 - 21. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)