

土工合成材料抢护管涌理论分析与试验

严 驰 赵明善 张 磊 于久鹏 冯启磊

(天津大学建筑工程学院 天津 300072)

摘要 通过室内管涌抢护模拟试验 ,验证了有关土工合成材料反滤层充当催化剂 ,催化土体本身天然反滤层形成的理论。试验结果表明 ,相比于小孔径土工布 ,较大孔径的土工滤网是反滤材料的更优选择。为消除现行管涌抢护措施的某些弊病 ,结合试验装置适用条件及试验结果 ,提出了一种装配式围井搭配纯土工合成材料作为整体新型操作平台的设想。

关键词 管涌 ;破坏机理 ;土工合成材料 ;反滤机理

中图分类号 :TV871.3 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2009)06-0044-05

Theoretical analysis and experiment of application of geosynthetics in rescuing piping emergencies//YAN Chi ,ZHAO Ming-shan ,ZHANG Lei ,YU Jiu-peng ,FENG Qi-le(School of Civil Engineering , Tianjin University , Tianjin 300072 , China)

Abstract :It is verified through experiments of rescuing piping in laboratories that geosynthetics can be used as a catalyst for the formation of the natural filter layer of soil. The results show that geonets with bigger holes perform better as filter material than geotextiles with smaller holes. To eliminate some fatal drawbacks of the traditional methods for rescuing piping emergencies , according to the experiment device and experiment , a new kind of operation platform consisting of wells and geosynthetics is put forward.

Key words :piping ; failure mechanism ; geosynthetics ; filter mechanism

相比于传统的砂、石和混凝土等材料 ,土工合成材料具有性能优良、价格低廉、运输施工方便、节能环保等优点 ,因而土工合成材料的应用 ,特别是在排水、反滤和防渗等方面的应用逐渐为人们所重视。然而 ,土工合成材料在排水、反滤等方面的应用仍存在许多问题。土工合成材料的选择和应用不合理 ,工程建设的安全性和经济性就会受到很大影响。材料选择不当、施工方法不严谨将直接导致工程失败 ,甚至引发管涌现象此消彼长。工程抢险时间紧迫 ,有利战机稍纵即逝。因此 ,对土工合成材料的选择方法以及利用土工合成材料施工的方法进行研究 ,显得非常必要。笔者通过室内管涌抢护模拟试验 ,验证了有关土工合成材料反滤层充当催化剂 ,催化土体本身天然反滤层形成的理论 ,并结合试验装置适用条件及试验结果 ,提出了一种装配式围井搭配纯土工合成材料作为整体新型操作平台的设想。

1 管涌的破坏机理

防汛抢险中所谓的管涌通常可分为 3 类 :①一般管涌。在渗透力的作用下 ,土体中的细颗粒沿着

土体骨架颗粒间的孔道被流速过大的渗水带出土体 ,便形成管涌。管涌通常发生在砂砾石地层中。在管涌出口处可发现冒水翻砂现象 ,有时在孔周围堆成沙丘。管涌的发生表明土体内有一部分细颗粒没有紧密接触 ,甚至处于自由状态 ,粗颗粒无法制约细颗粒 ,所以抗渗强度低。②流土。在渗透力的作用下 ,土体中的渗水压力将整块土体顶起而流失 ,这一现象即为流土。流土在黏性土和无黏性土中均可以发生 ,在渗流出口处可发现地面有松动隆起现象。发生流土破坏的土体 ,其土颗粒之间是紧密结合的 ,相互之间具有较强的约束力 ,可以承受的水头较大。③挟砂水喷出的管涌。如果以上 2 种渗流破坏未能及时处理 ,或地表土层存在某些缺陷 ,在渗流力的作用下 ,表层土体内将形成渗流通道。若同时底部承受很大的水压力 ,造成集中冲刷 ,挟砂水将喷涌而出 ,在孔口处形成一定高度的水柱。此类管涌与上述管涌和流土具有截然不同的特性 ,险情也最为严重^[1]。

事实上 ,管涌和流土的区别并不是绝对的。当管涌型土发生管涌破坏 ,管涌通道贯通上游后 ,若渗

流坡降继续增大,管涌型土也会发生流土破坏。另一方面,虽然在破坏机理、破坏形式上略有区别,但通常的处理方法、应对措施却基本相同,故一般对这几类管涌破坏形式不加以区分,统称为管涌。

从渗透破坏所处堤基形式来看,管涌的渗透破坏分为单层堤基渗透破坏和双层(多层)堤基破坏。我国堤防大多建在第四纪冲积层的地面上,堤基表层为1~10 m厚的弱透水砂壤土或粉质黏土覆盖层,下部为黏性土夹细砂、中粗砂,深层为砂卵石,总厚度达数十米,为强透水层,即堤基下部为深厚强透水砂层、表层为弱透水层覆盖的双层堤基。当透水砂层地基的承压水顶穿表层弱透水的覆盖层时,即发生管涌破坏。此时,在覆盖层的管涌孔口底部出现1个或多个孔洞(图1)。由于管涌孔洞内的流速较大,砂粒不断随水流带出,使得该孔洞沿其流线逐渐向上游发展,加之孔洞内的流速与其周围的渗透流速不一致,存在一个流速梯度,若该流速梯度所产生的剪切力超过周围砂粒的摩阻力,则砂粒失去平衡而被水流带出,从而导致孔洞的孔径不断扩大^[2]。

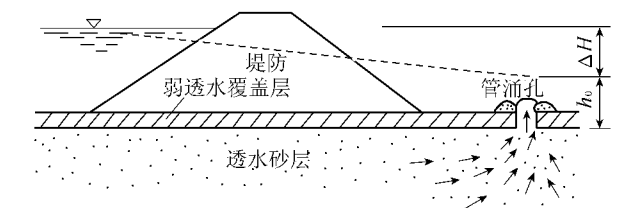


图1 堤防管涌示意图

2 土工合成材料排水抑砂机理

管涌抢护原则以排水抑砂为主。在实际防汛抢险中有效起到排水抑砂作用,是应用土工合成材料的最重要准则。排水抑砂的主要目的是保护堤防土体不大量流失的同时又使堤防土体具有足够的透水性。通过排水抑砂,一方面,管涌破坏渗出的水可以及时排走;另一方面,又不致由于渗压过大使周围土体出现管涌此消彼长的破坏现象。工程中无论采用何种形式的滤层,目的总是要让水能够自由通过,同时要阻止或减少土颗粒的流失,满足保土和排水准则的要求,而这2个准则在某种程度上是相矛盾的。但若这一矛盾体调和得当,既可以使砂层不再被破坏,又可以降低附近渗水压力,使险情得以控制和稳定。

以往在此类抢护工程中,为了防止管涌破坏,常需设置由砂石料组成的反滤层。由天然材料组成的反滤层一般由2~4层不同粒径的砂石料组成,各反滤层大体与渗流方向正交,粒径随着水流方向由细到粗地分布,可起到保护地基土及坝体土,防止土粒

被渗流带入排水通道的作用。但这种方法形式单一,成本高,效率低。土工合成材料的出现很好地解决了这一问题,各种不同材料、结构的土工合成材料可以应用于实际情况迥异的工程。

与传统的砂砾反滤层截然不同,土工合成材料并不是依靠自身的多孔结构直接过滤被保护土层结构。土工合成材料滤层在管涌这种典型的单向渗流情况下,运行初期允许紧靠土工合成材料滤层的一部分细颗粒通过滤层空隙被带走,直到向土体内部发展到一定深度后达到新的平衡为止。此平衡说明土工合成材料滤层与被保护土之间已形成了一种稳定的反滤结构(图2)。紧靠土工合成材料的某一范围内的被保护土土层,反滤一开始细颗粒被冲出,形成架空层,同时连续不断地向被保护土土层延伸过渡,直到达到新的平衡为止。因为初始大量细颗粒流失,与土工合成材料相邻的土层便剩下无法进入土工合成材料孔隙的较大土粒,这一土粒层挡住了粒径比它略小的土粒,依此类推,被保护土自身一定深度内形成了粒径由大到小的有序排列,最终挡住土中最细颗粒,细颗粒不再流失,水流仍然畅通。在以上过程中,土工合成材料不是直接起反滤作用,而是催化原土形成天然反滤层,即起催化作用^[3]。



图2 土工合成材料催化土体产生的天然反滤层

3 土工合成材料抢护管涌的室内试验

3.1 试验概述

需要指出的是,虽然同为Ⅱ型反滤层(反滤层在保护土之上)^[4],土工合成材料抢护堤防管涌破坏时所表现出来的滤层特性,不同于其作为堤坝常规滤层时的情形。土工合成材料作为常规滤层时,预先铺设在保护土体的表面,且使用过程中,水流流速较小,土体颗粒移动缓慢,但土工合成材料用于抢护管涌时,水流流速大,水中含有大量运动的泥砂颗粒,且土工合成材料在堤防发生管涌破坏后再置于其上。

本次试验力求对喷砂管涌的实际情况和特点进行模拟,并采用土工合成材料、土工网和土工滤网等经分析适于排水抑砂的典型土工合成材料对其进行抢护,然后对试验结果进行理论分析,最后提出关于抢护管涌选择和应用土工合成材料的一些建议。

3.2 试验装置

采用自行设计的有机玻璃桶模拟喷砂管涌的破坏。该装置由有机玻璃圆筒、法兰盘、底座和 U 形管组成,其中法兰盘和底座均为铁铝合金打造。圆筒面积约为 960 cm²,高 60 cm,且具有上部的进水口和底部的出水口。试验仪器装置尺寸和外形如图 3 所示。

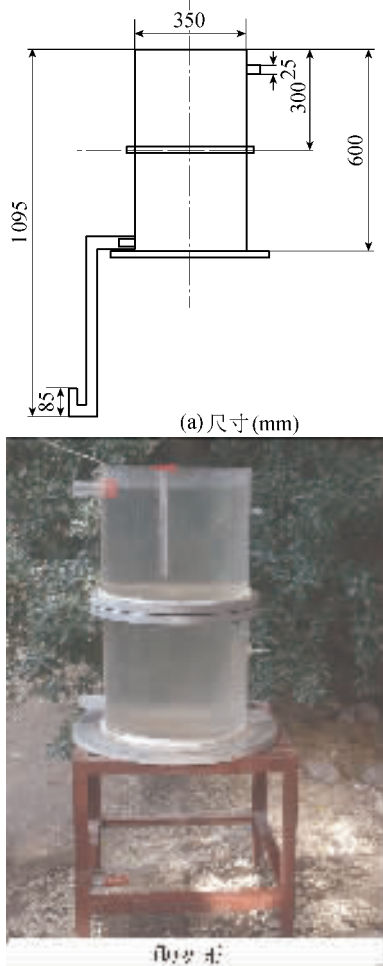


图 3 试验仪器装置尺寸和外形

3.3 试验材料

- a. 土工合成材料。热黏无纺布物,厚 0.47 mm,质量 200 g/m²,等效孔径 $O_{90} = 0.17$ mm。
- b. 土工网。采用 2 种规格的土工网:①大孔土工网,孔径为 1.4 mm,开孔面积约为总面积的 50%;②小孔土工网,孔径为 0.7 mm,开孔面积约为总面积的 40%。
- c. 土工滤网。土工滤网为天津金属网厂生产的标准土工滤网,准备了目数分别为 12,14,16,18,20,22,24 的 7 种土工滤网,线径分别为 0.41 mm,0.35 mm,0.3 mm,0.3 mm,0.3 mm,0.3 mm,0.25 mm。由公式 $O_{90} = \frac{25.4 - \text{目数} \times \text{线径}}{\text{目数}}$ 计算得到的各种土工滤网 O_{90} 分别为 1.707 mm,1.464 mm,

- 1.288 mm,1.110 mm,0.970 mm,0.854 mm,0.808 mm。
- d. 砂样。本次试验只选用 1 种类型的细砂,共 3 组砂样,控制干密度分别为 1.56 g/cm³,1.45 g/cm³ 和 1.40 g/cm³。试验砂样特征参数见表 1。

表 1 试验砂样特征参数

砂样组别	质量分数/%					C_u	C_c
	$d \leq 0.075$ mm	$d = 0.25 \sim 0.5$ mm	$d = 0.075 \sim 0.1$ mm	$d = 0.5 \sim 1.0$ mm	$d = 0.1 \sim 0.25$ mm		
细砂 1	1.444	0.407	42.255	55.012	0.882		
细砂 2	2.716	0.532	58.475	35.856	2.421		
细砂 3	7.546	13.333	46.477	32.644	0		
砂样组别	$d_{10}/$ mm	$d_{30}/$ mm	$d_{50}/$ mm	$d_{60}/$ mm	$d_{80}/$ mm	C_u	C_c
细砂 1	0.14	0.18	0.27	0.32	0.40	2.29	0.73
细砂 2	0.12	0.16	0.21	0.25	0.37	2.08	0.85
细砂 3	0.08	0.13	0.17	0.21	0.27	2.29	1.01

注: d 为砂样粒径; $d_x(x = 10,30,50,60,80)$ 表示小于该孔径砂的质量占砂样总质量的百分比为 $x\%$; C_u 为不均匀系数; C_c 为颗粒级配曲线曲率系数。

3.4 试验步骤

- a. 将试验所用的有机玻璃桶装满水,U 形管出水口处用喉箍固定所用的过滤材料,按照含砂量 10% 计算出所需干砂质量,按照计算出的砂质量称砂样,将砂样放入装满水的有机玻璃桶中均匀搅拌,使砂样在水中均匀分布。
- b. 打开 U 形管出水口处的开关,观测和记录试验分析所需的相关数据和现象。
- c. 当出水口处水流清澈且流动明显减弱时,停止试验。

3.5 试验结果

- a. 为最大程度模拟真实管涌,试验采用自下而上的喷水水流,用 U 形管模拟管涌出口,并在 U 形管出口处覆盖土工合成材料模拟现场抢险。试验中,各孔径土工滤网出现了十分近似的试验现象,细砂样 1 的试验中以 18 目土工滤网试验现象最为明显,细砂样 2 的试验中以 22 目土工滤网试验现象最为明显。由于 3 组砂样特征参数相近,所得相应试验结果也类似,与工程实际相符,可不细致区分。具体试验现象见表 2。
 - b. 试验前,U 形管出水口处不安装过滤材料,试验仪器中装清水时,测得放水开始时水柱喷出高度 25 cm,放水历时 33 s,放水总水量 50000 cm³。当 U 形管出水口处安装过滤材料并且为挟砂水时,试验数据见表 3。
- 3.6 试验结果分析
- 3.6.1 天然反滤层的形成
- 试验后,土工布后面有薄薄的一层砂层,近似认为是天然反滤层。
- 当土工滤网作为过滤材料时,分别用细砂样 1

表 2 试验现象描述		
砂样组别	U 形管出口 过滤材料	试验现象
细砂样 1	200 g/cm ² 土工布	放水后只有少量浑水渗出,且很快停止,变为清澈的微渗水流
	18 目土工滤网 (孔径 1.12 mm)	放水后有多股挟砂水喷射而出,数秒后喷水量大大减少,变为微量清水渗出
细砂样 2	200 g/cm ² 土工布	放水后只有少量浑水渗出,且很快停止,变为清澈的微渗水流
	22 目土工滤网 (孔径 0.86 mm)	放水后有多股挟砂水喷射而出,数十秒后喷水量大大减少,变为微量清水渗出
细砂样 3	200 g/cm ² 土工布	放水后只有少量浑水渗出,且很快停止,变为清澈的微渗水流
	土工网 (孔径 0.7 mm)	放水后有多股挟砂水喷射而出,数十秒后喷水量大大减少,变为微量清水渗出

表 3 试验数据					
砂样组别	U 形管出口 过滤材料	放水开始 时水柱喷出高度/ cm	放水 历时/ s	放水总 水量/ cm ³	排出的 干砂 质量/ g
细砂样 1	200 g/cm ² 土工布	1	5	1 440	5
	18 目土工滤网 (孔径 1.12 mm)	15	12	9 600	252
细砂样 2	200 g/cm ² 土工布	2	7	1 920	20
	22 目土工滤网 (孔径 0.86 mm)	12	14	8 600	381
细砂样 3	200 g/cm ² 土工布	2	6	1 860	16
	土工网 (孔径 0.7 mm)	9	13	4 500	300

和细砂样 2 对应于各种土工滤网进行试验,试验结束后取下土工滤网,发现土工滤网后淤堵有大量的砂样。孔径为 1.12 mm 的 18 目土工滤网和孔径为 0.86 mm 的 22 目土工滤网分别在砂样 1 和砂样 2 对应的试验中淤堵现象最为突出。但考虑到土工滤网作为过滤材料时出水量较大,且滤网后淤堵砂样粒径较大,此淤堵砂样应为在土工滤网催化作用下所形成的天然反滤层。

采用土工网作为 U 形管出口过滤材料时所出现的试验现象与采用土工滤网时相似,可以观察到较明显的天然反滤层。

总体来说,不论何种土工合成材料作用在何种砂样上,在排水反滤的过程中都起到了相似的功能,只是效果有所区别。在土工合成材料的催化作用下,平均粒径大于原土体平均粒径的天然滤层的形成清晰明了,印证了对土工合成材料发挥排水反滤机理的理论分析结果。

3.6.2 大孔径土工合成材料对防汛抢险的有效性

由排水抑砂作用是在实际防汛抢险中能否应用土工合成材料的最重要准则可知,能保护堤防土体不大量流失的同时又具有足够的透水性的材料即为抢护管涌的最优选择。在大孔径土工合成材料的作

用下,砂样中的小颗粒流失,较大的砂颗粒被过滤层材料先拦截下来,然后在此基础上较大的砂颗粒拦截比它小的颗粒,最终在土工滤网后面形成一层天然反滤层。这种天然反滤层可起到排水抑砂的作用。因此,看似矛盾的排水与抑砂实质上有一个完美的平衡点。能均衡完成这 2 项任务的材料便是防汛抢险所需要的最优选择。

从试验现象和试验数据的分析结果可知,应用小孔径的土工布抢护管涌的拦砂率可达 95% 以上,但是排水效果不好,无论是排水速率还是排水总量都远不及孔径更大的土工网或土工滤网,且淤堵十分明显,土工布后残余了大量的粒径细砂。此细砂与原砂样级配几乎相等,直接导致土体内渗压过大,可能引发抢护失败。更有甚者,当抢护高水头的管涌时,渗水若不能及时排出,在上负重物的压盖作用下,渗水产生的过大渗压就会直接作用在管涌的侧壁上,导致管涌孔径扩大,甚至产生新的渗水点等危害。因而,虽然应用小孔径的土工布抢护管涌时,抑砂效果十分显著,但考虑到其排水效果不佳给实际工程可能带来的危害,此类小孔径土工布不宜作为抢护管涌材料。

相比于小孔径的土工布,采用大孔径的土工滤网抢护管涌时会流失掉一部分土颗粒,即抑砂效果较小孔径土工布稍差,但从整体上看,大孔径土工合成材料排水效果好,而且土体主要构成没有破坏,抢护效果反而比土工布要好。但选取的滤网孔径也不应过大,过大孔径的土工滤网同样不利于形成优秀的天然反滤层,不能起到良好的排水抑砂作用。

从另一方面考虑,无土工合成材料作用时的管涌挟砂水流能量一定,因而有土工合成材料作用时挟砂水流流速越小,则在土工合成材料发挥排水抑砂功能的过程中损耗的能量就越大。从能量守恒原理和工程实践可知,这部分能量消耗在管涌通道的出水口附近侧壁上,将直接导致孔口不断扩大。因此,大孔径土工合成材料在这一方面得天独厚的优势使得其更适合作为抢护管涌最优材料。

4 纯土工合成材料与新型围井结合抢护管涌新设想

现行的抢护管涌的一般原则是迎水侧堵渗,背水侧导渗,制止涌水带砂,使渗水变清流出。抢护措施一般为在管涌发生处构筑围井和反滤层。根据导渗材料的不同,可将抢护措施分为以下 3 种:①反滤围井。通过在管涌口处用编织袋或麻袋装土抢筑围井,井内同步铺填反滤料方法来制止涌水带砂,以防险情进一步扩大。这种方法适用于发生在地面的单个管

涌或管涌数目虽多但比较集中的情况。②土工合成材料反滤。当堤坝背水侧出现大面积管涌或管涌群时,首先对管涌口附近进行清理平整,清除尖锐杂物,然后用粗料充填管涌口,以消减涌水压力,消除浑水现象。铺土工合成材料前,先铺一层 20~50 cm 厚的粗砂,然后选择合适的土工合成材料铺上,最后在土工合成材料上面铺设强透水材料压盖。③蓄水反压。通过抬高管涌区内的水位来减小堤坝内外的水头差,以降低渗透压力,减小逸出水力坡降,从而达到制止管涌破坏和稳定管涌险情的目的^[5]。

以上几种抢护措施的不足也十分明显:①反滤围井的构筑较为复杂,在突发险情时抢护工作显得有些乏力。②现行土工合成材料反滤层铺设时,往往必须在其上铺设粗砂、碎石等透水性强且可充当负重的材料。这样,成本与传统的砂砾反滤层基本一样。③现行土工合成材料反滤法与蓄水反压法存在的问题是,采取负重或者抬高管涌区内水位的措施来降低渗透压力,会加大对管涌通道侧壁的压力,可能导致管涌孔径扩大或者产生新管涌口的危险。

侯英杰等^[6]设计了一种由单元板、固定件、排水系统和止水系统等构成的装配式围井。这种装配式围井的优势相比传统围井十分明显:围井大小可根据险情和实际情况现场组装;井内水深可根据实际需要调节;安装简捷,能提高抢险效率;可重复使用的模板大大节省抢险成本。但这种装配式围井与传统围井一样,也存在严重的缺点:抢险方式未能根本性变革,即便后来所进行的土工合成材料反滤试验较为成功,实际应用中仍需应用砂石等负重的问题依然制约着这种装配式围井的实际功效。其根本问

题在于土工合成材料的应用必须在其上加以负重。通过分析便可发现,广泛应用于房建中现浇混凝土楼板滑升模板的方法有极大的借鉴价值。也就是说,将土工合成材料固定在装配式围井内杆类支撑上,以液压千斤顶等工具作为动力,一方面可以取代传统的砂石负重来稳定土工合成材料,保障排水抑砂的稳定有序,另一方面可以更主动地利用动力系统来调整土工合成材料的位置。

这一设想模型是与本试验模型想吻合的:①U形管出口为刚性材料,与装配式围井的井壁相符。②试验中土工合成材料上并无负重作用,贴近设想模型。③试验用土工合成材料固定在U形管口,并可根据试验需要进行调整。

遗憾的是,由于试验条件、场地等诸多因素的限制,未能专门设计中间试验对此设想进行验证。

参考文献:

[1] 刘宗耀.关于抢护管涌险情问题的商榷[C]//全国第六届土工合成材料学术会议论文集.西安[s.n.],2004:505-508.
[2] 陶同康,鄢俊.堤防管涌的破坏机理和新型滤层结构设计[J].水利水运工程学报,2003(4):7-13.
[3] 周蓉.土工合成材料反滤机理研究[J].青岛大学学报,2000,15(4):41-43.
[4] 乔英卉.拜耳法赤泥坝中无黏性土反滤层设计方法[J].轻金属,2006(6):61-64.
[5] 杨昌军.堤坝管涌险情的判别和抢修[J].中国西部科技,2006(1):15.
[6] 侯英杰,鄢俊,陶同康.堤坝管涌破坏抢护新技术[J].中国水利,2006(8):83.

(收稿日期 2009-08-31 编辑 陈吉平)

(上接第 38 页)

铺土工膜防渗,坝上游河底用土工膜铺盖,形成一个不透水簸箕,使渗透比降小于 0.09;另一是青海省温泉水库,该水库位于海拔 4 000 m 以上高寒地区,是小干沟等一系列水电站的龙头水库,该水库坝高 40 m,如果采用黏土心墙防渗,由于其施工期极短导致困难较大。为此笔者建议在坝的上游坡用复合土工膜防渗,底部透水地层用高压喷射灌浆防渗。目前这两项工程都已运用 10 余年,防渗效果尚好。但这两个工程都有加强防渗的余地:前者可向上游加长簸箕状防渗工程;后者可加深高压喷射灌浆达到黏土地层。

参考文献:

[1] 苏虹,李岳军,万文功.泰安抽水蓄能电站上水库土工膜防渗设计[J].水力发电,2001,27(4):19-22.

[2] 李岳军,周建平,何世海,等.抽水蓄能电站水库土工膜防渗技术的研究和应用[J].水力发电,2006,32(3):67-80.
[3] 王云祥.复合土工膜在金殿水库防渗处理工程中的应用[C]//王钊,陆士强.第五届土工合成材料学术会议论文集.香港:现代知识出版社,2000:330-333.
[4] 侍克斌,李玉建,马英杰,等.土工膜全库盘防渗技术在胜利水库的应用及有关问题探讨[J].水利水电技术,2005(11):143-147.
[5] 顾淦臣,沈长松,吴江斌.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.
[6] 沈长松,顾淦臣.复合土工膜厚度计算方法研究[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(4):395-398.
[7] 顾淦臣,沈长松,朱晟,等.塘房庙复合土工膜心墙堆石坝的设计、施工和应力应变有限元分析[J].水力发电学报,2004(1):21-26.

(收稿日期 2009-08-31 编辑 马敏峰)