

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.06.014

南水北调工程穿黄隧洞衬砌垫层淤堵试验

定培中,张 伟,张家发

(长江科学院,湖北 武汉 430010)

摘要 对南水北调工程穿黄隧洞衬砌施工期及运行期有可能对衬砌垫层渗透性造成影响的几个因素如压力、混凝土浇筑、混凝土析出物、气泡含量等进行试验研究。认为水中过高的气泡含量是造成土工织物淤堵的主要因素。提出了可减少衬砌垫层淤堵的复合土工材料的结构形式。该种新型的复合土工膜已在南水北调工程穿黄隧洞现场试验模型中得到成功运用和验证。

关键词 南水北调工程 穿黄隧洞 衬砌垫层 气泡含量 土工织物淤堵 复合土工膜

中图分类号 :TV672+.1 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2009)06-0054-04

Clogging test of liner cushion layer in Yellow-River-crossing tunnel liner of South-to-North Water Transfer Project//
DING Pei-zhong, ZHANG Wei, ZHANG Jia-fa (Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract :Experimental study of factors in the permeability of the liner cushion layer in the Yellow-River-crossing tunnel liner of the South-to-North Water Transfer Project was conducted. Pressure, concrete pouring, concrete precipitates and bubble content were examined. It was concluded that too high a content of bubbles in the water is the key factor in geotextile sludge plugging. A new structure of geocomposite that can reduce the plugging of the liner cushion layer is proposed. The new composite geomembrane has been successfully applied in the field test model of the Yellow-River-crossing tunnel of the South-to-North Water Transfer Project.

Key words :South-to-North Water Transfer Project ; Yellow-River-crossing tunnel ; liner cushion layer ; bubble content ; geotextile sludge plugging ; composite geomembrane

1 工程背景

南水北调工程穿黄隧洞采用双层衬砌,外层为装配式管片拼装结构,内层为现浇钢筋混凝土或预应力整体结构。内、外层衬砌间由软垫层分隔,使内、外衬砌相互独立工作,即:外层衬砌主要承受外围土压力、外水压力和黄河河床冲淤变化引起的附加荷载,内水压力主要由内层衬砌来承担。考虑到内、外衬砌单独受力,要求在内衬砌浇筑前,先将外管片所有的坑、孔回填抹平,并在内、外衬砌间铺设好软垫层。由于结构尺寸要求,软垫层采用厚度较薄的 3 层复合土工膜材料,中间层为土工膜隔水层,两侧为土工织物透水层,分别作为内衬砌和外衬砌渗漏水的排泄通道,3 层衬砌总厚度不超过 1 cm,衬砌结构形式见图 1。由于内衬砌为现浇预应力钢筋混凝土,其施工以及混凝土析出物对软垫层土工织物渗透性的影响就成为需要关注的问题。同时,在试验过程中,土工织物排水能力随着试验时间的延

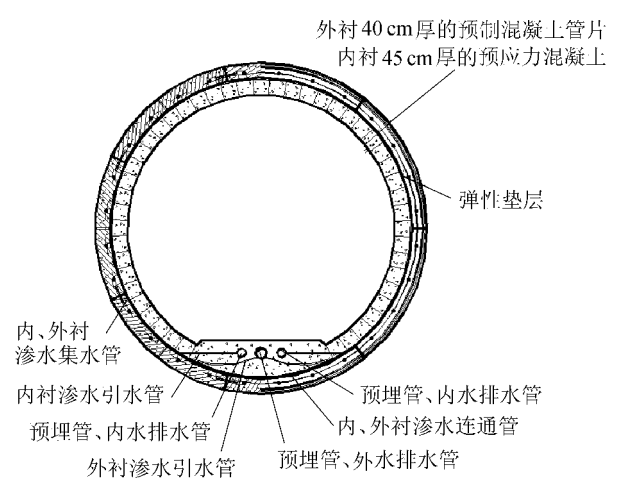


图 1 南水北调工程穿黄隧洞衬砌结构形式示意图
长有逐步降低的趋势,综合分析其中的原因以及对类似工程情况,认为土工织物对水中气泡具有很强的过滤作用,因此引起土工织物渗透系数显著降低,严重影响了土工织物的排水能力。为此,推荐选用一种新型的复合土工膜作为南水北调工程穿黄隧

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划(2006BAB04A11) 水利部岩土力学与工程重点实验室开放基金(G07-14)

作者简介 定培中(1971—),男,湖北武汉人,高级工程师,从事岩土工程研究。E-mail :marco.ding@126.com

洞衬砌垫层,并在现场试验模型中应用,收到很好的效果。

2 南水北调工程穿黄隧洞衬砌垫层淤堵影响因素

复合土工膜是一种理想的防渗材料,具有一定的排水功能,在我国堤坝工程、垃圾填埋工程、隧洞工程^[1-4]都有广泛的应用。南水北调工程穿黄隧洞施工过程中,可能对复合土工膜材料中起排水作用的土工织物渗透性产生影响的主要因素包括混凝土现浇过程中混凝土的塌落度、振捣时间、振捣方式、压力等。上述因素对土工织物渗透性的影响主要体现在混凝土浸入土工织物的程度不同,从而造成对土工织物渗透性的影响不同。不同的土工织物结构,混凝土的渗入程度不一样。在试验过程中,通过长期渗透试验,发现土工织物对水中气泡具有很强的过滤作用,气泡淤堵会严重影响土工织物的透水性。为了了解这些因素对土工织物渗透性的影响,进行了以下试验研究。

2.1 内衬砌混凝土施工产生法向压力对土工织物渗透性的影响

土工织物随着法向压力的增加,其渗透性逐步降低^[5-8]。南水北调工程穿黄隧洞内衬砌采用混凝土现浇,会对软垫层材料产生一定的法向压力。南水北调工程穿黄隧洞的混凝土浇筑最大高度为9 m左右,混凝土密度按2.4 t/m³计算,那么土工织物承担的最大压力为9×2.4=21.6 t/m³,相当于软垫层局部承受的最大压力为200~220 kPa。试验中测定了不同法向压力条件下土工织物的厚度以及水平渗透系数,以了解随着内衬砌混凝土不断浇筑,软垫层土工织物的透水性变化情况。随着法向压力的增大,土工织物厚度变小,当厚度压缩到原厚度的50%时,压缩量明显变小(图2)。土工织物的水平渗透系数随着法向压力的增加而降低,最后趋近于一稳定值。最大压力为200~220 kPa时土工织物的厚度能够保持在原厚度的40%左右,土工织物的水平渗透系数降低为无压状态下的13%~20%(表1)。

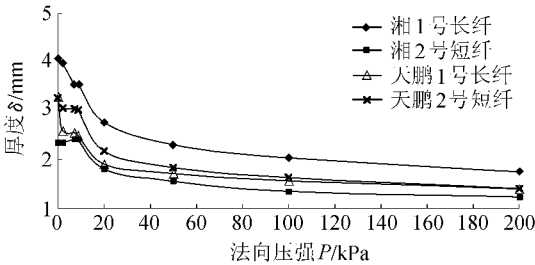


图2 土工织物厚度~压强关系曲线

表1 不同压力条件下复合土工膜中土工织物的渗透系数

压强/ kPa	渗透系数/(cm·s ⁻¹)			
	湘1号 长纤	湘2号 短纤	天鹏1号 长纤	天鹏2号 短纤
0.00	0.16	0.33	0.23	0.33
6.98	0.19	0.23	0.18	0.25
20.00	0.18	0.19	0.15	0.21
50.00	0.17	0.04	0.07	0.16
100.00	0.17	0.06	0.06	0.11
200.00	0.03	0.06	0.03	0.05

2.2 现浇混凝土对土工织物渗透系数的影响

试验中比较了不同混凝土配合比、不同振捣方式和时间条件对不同厂家提供的土工织物渗透系数的影响。现浇混凝土对土工织物的淤堵试验模型见图3。试验时先将两布一膜的复合土工膜刮除一面土工织物后成为一布一膜的形式,然后将土工膜的一面黏结在仪器底板上,使土工织物朝上,再在土工织物上浇筑30 cm厚的混凝土,待混凝土凝固后测定土工织物的渗透系数。结果表明采用同样的振捣方式,不同混凝土配比条件下测得的多种土工织物的初始水平渗透系数没有明显差异。而不同混凝土振捣方式对土工织物的渗透性有影响。免振混凝土对土工织物渗透系数的影响最小,钢钎插捣和平板振捣时土工织物的渗透系数大多为 $1.31 \times 10^{-2} \sim 11.5 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$,土工织物渗透系数比未浇筑混凝土时降低了一个数量级。采用立式振捣器的试样,其渗透系数为 $2.50 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,土工织物的渗透系数比未浇筑混凝土时降低了2个数量级。从振捣的时间看,采用平板振捣时间分别为1 min, 2 min, 3 min时,对土工织物渗透系数影响的规律性不明显。该结果与有关文献的研究成果^[9]类似。



图3 混凝土对土工布渗透性影响试验实体模型

2.3 混凝土中可溶物质对织物渗透性的影响

南水北调工程穿黄隧洞衬砌混凝土中可溶性物质对土工织物造成的淤堵主要由水泥中溶于水的钙离子引起。采用无气水配制过饱和Ca(OH)₂溶液进行室内长期(2周)强化化学淤堵试验发现,由于Ca²⁺产生的沉淀造成化学淤堵,使土工织物的渗透系数由开始时的10⁻¹ cm/s降低到10⁻² cm/s。在下

游出口处发现白色结晶,而在土工织物中结晶很少。说明 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液渗透过土工织物后发生氧化结晶,并未对土工织物渗透性带来大的影响。

2.4 水中气泡对土工织物渗透性的影响

为了了解土工织物在较长使用周期内的渗透性变化情况,选取 8 个试样进行不同持续时间的较长期观测,试验成果见表 2 及图 4。通过分析土工织物渗透系数随时间的变化,可以初步认为土工织物渗透系数有急剧降低期、缓降期和相对稳定期。土工织物的渗透系数最终均稳定在 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ cm/s}$ 数量级。

表 2 土工织物长期渗透性试验成果

试验编号	观测历时/d	初始水平渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	试验停止时水平渗透系数/($10^{-4}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
2	23	0.089	6.180
10	74	0.125	1.980
12	11	0.133	0.800
16	64	0.065	3.590
17	56	0.058	2.300
22	16	0.144	3.980
23	14	0.470	5.940
24	109	0.300	0.648

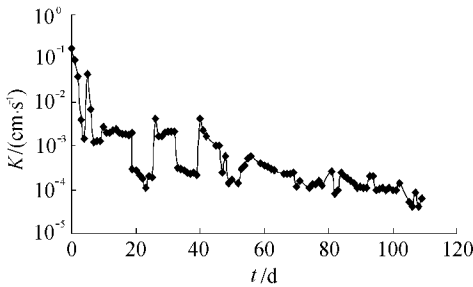


图 4 土工织物(24 号试样)渗透系数随时间变化曲线

根据前述研究成果,不同混凝土配比、振捣方式、时间、压力、混凝土析出物对土工织物渗透性的影响只能使其渗透系数降低到 10^{-2} cm/s 数量级,而长期渗透试验中土工织物的渗透系数降低到了 10^{-4} cm/s 数量级,说明还有其他因素在影响着土工织物的渗透性。

根据试验中观测到的现象以及其他工程经验,初步分析造成土工织物发生淤堵的主要原因是水中气泡的影响。为此,进行了水中气泡对土工织物渗透性影响的一系列试验工作。研究土工织物的长期渗透性,采用一种较高压力的水进行渗透试验,试验用水进入试样后由于压力的释放,水中气泡逸出,试验进行一段时间后,在相对恒定的比降条件下,明显可见水中气泡逐渐聚集在土工织物表面,使土工织物的过水断面面积逐渐减小,表现为渗透系数的逐渐减小,当渗透系数减小到 10^{-4} cm/s 左右时,土工织物气泡的淤堵达到饱和,表现为土工织物的渗透

性保持在一定的稳定数值范围。随后对土工织物进行排气或提升比降,土工织物中气泡的平衡被打破,部分气泡被排出,暂时增大了过水断面面积,使渗透系数短时间内有较大的增加。然后,随着水中气泡重新聚集,造成土工织物的过水断面面积再次减小,渗透系数又下降到 10^{-4} cm/s 左右。该试验证明了水中气泡含量过高造成的淤堵是土工织物渗透性下降的主要原因。

为了进一步证实以上结论,进行了 2 项对比试验。首先进行不同气泡含量的水质造成土工织物淤堵的比较试验,成果见图 5。采用无气水进行试验时土工织物的渗透系数保持在 10^0 cm/s 数量级,如果衬砌渗漏水气泡含量与普通江水类似,则土工织物的渗透系数可保持在 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$ 数量级,如果气泡含量过大,土工织物渗透系数可能衰减到 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ cm/s}$ 数量级。

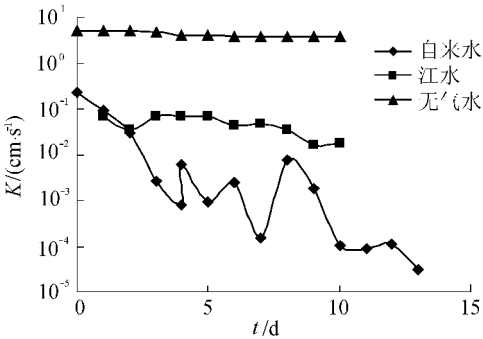


图 5 不同含气量水质下土工织物渗透系数随时间变化曲线

另一方面,对已经试验后的土工织物试样进行干燥处理后再进行第 2 次渗透试验,得到的初始渗透系数与第 1 次基本相同,甚至略高(图 6),从一个侧面说明土工织物渗透系数的降低不是受固体颗粒淤堵的影响,主要还是受气泡的影响。

不同的试验用水,水中气泡不一样,对比南水北调工程,预测将来的渗水气泡含量可能与长江江水类似,那么,土工织物渗透系数可保持在 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$ 数量级,难以满足实际工程排水要求。为此,需要选择排水性能更好且受气泡影响较小的材料作为实际工程的排水垫层。

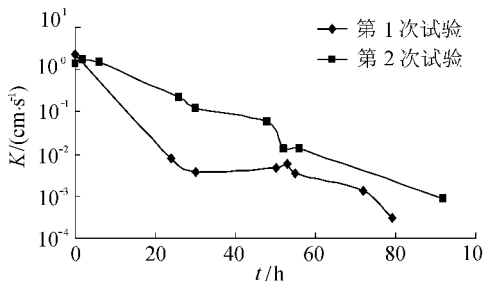


图 6 土工织物(湘长纤)渗透系数重复垂直试验曲线

3 新型防淤堵复合土工膜

根据以上试验成果及国内土工合成材料生产工艺的进展^[10],提出一种新型防淤堵复合土工膜材料,见图 7。该新型材料的过水断面由多个 3 层塑料网格构造的空腔组成,塑料网格材料强度大,抗压能力较好,在承受法向压力时引起过水断面的压缩很小,因此内衬砌混凝土对其产生法向压力造成的渗透性影响较小。外包的土工织物可作为滤层以阻止混凝土现浇时浆液中固体颗粒进入而阻塞排水通道。

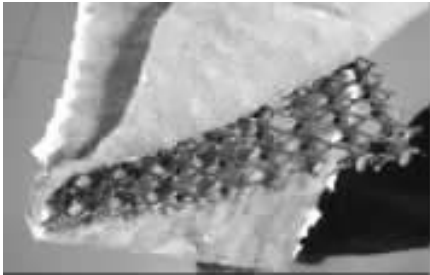


图 7 新型复合土工膜

对该新型材料进行了不同压力以及含气量大的试验用水条件下的渗透试验,结果见图 8 和图 9,其渗透系数维持在 10^0 cm/s 数量级,满足工程需要。表明塑料网格空腔的过水断面面积即使在承受较高压力的工况下也远大于水中气泡的面积,可有效避免气泡淤堵。同时,进行了混凝土浇筑条件下的相应试验,结果见图 9,渗透系数能保持在 $10^0 \sim 10^{-1}$ cm/s 数量级范围,优于上述复合土工膜。该新型复合土工膜已经在南水北调工程穿黄隧洞现场试验模型中得到成功运用和验证,并将在正式施工中大规模应用。

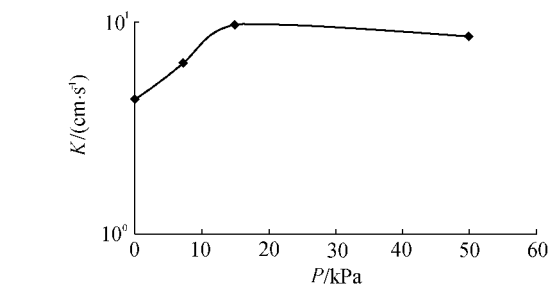


图 8 不同法向压力下的渗透系数变化

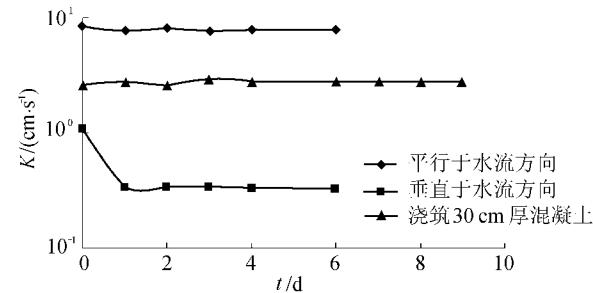


图 9 渗透系数随时间的变化

4 结 语

a. 影响南水北调工程穿黄隧洞衬砌垫层中起排水作用的土工织物渗透性的主要因素包括混凝土现浇过程中混凝土浆液的浸入以及衬砌长期运行过程中渗水中的气泡含量等。其中过高气泡聚集造成的淤堵是土工织物长期运行后渗透系数下降到 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ cm/s 数量级的主要原因。

b. 从改善土工合成材料在高压应力下保持相当过水断面面积的能力和增大土工织物过水断面面积两方面入手,选用三维结构的新型防淤堵复合土工膜,可以有效地减少气泡造成的淤堵,并已在工程实践中得到验证。

参考文献:

[1] 何凌坚,李世京.九景公路雁列山隧道复合式衬砌防排水的设计与施工[J].探矿工程,1999(6):39-41.
[2] 刘维洲,张振永,季生,等.复合土工膜在滨州黄河堤防防渗加固中的应用[J].水利水电科技进展,2002,22(5):53-54.
[3] 周敬超.HDPE 土工膜在城市生活垃圾卫生填埋场中的应用[J].水利水电科技进展,2003,23(3):53-56.
[4] 章香雅,朱奚冰,孙元元.海堤土工织物滤层的探讨[J].岩土力学,26(12):1941-1944.
[5] 崔中兴,王志刚.土工织物滤层的 P-K 与淤堵试验研究[J].西北水资源与工程,1995(3):36-39.
[6] 迟景魁,白建颖.土工合成材料应用机理及专项研究(Ⅰ)[J].产业用纺织品,1999(7):9-15.
[7] 迟景魁,白建颖.土工合成材料应用机理及专项研究(Ⅱ)[J].产业用纺织品,1999(9):10-15.
[8] 迟景魁,白建颖.土工合成材料应用机理及专项研究(Ⅲ)[J].产业用纺织品,1999(11):23-27.
[9] 任之忠,李学军.土工织物透水性能的研究[J].西北水资源与水工程,1997(4):24-27.
[10] 王正宏,包承纲,崔亦昊,等.土工合成材料应用技术知识[M].北京:中国水利水电出版社,2008:13-29.

(收稿日期:2009-08-22 编辑:高建群)

