

农业灌溉水渠防渗土工膜的温度敏感性及其张拉力评价

许四法, 张 豪

(浙江工业大学建筑工程学院, 杭州 310032)

摘 要: 为了了解农用水渠中防渗土工膜的温度敏感性, 针对农用水渠防渗土工膜的变形和温度应力问题进行研究, 采用力传感器、热电偶和位移传感器等对温度变化后的防渗土工膜端部张拉力进行了测量, 提出温度变化引起的防渗土工膜端部张拉力评价方法。试验结果表明: 外界环境温度变化对防渗土工膜端部张拉力有较大影响, 特别是高密度聚乙烯防渗土工膜; 铺设无纺布能有效降低防渗土工膜的温度; 温度变化较大时, 防渗土工膜产生较大变形, 最大变形超过 60 mm。基于极限平衡理论, 考虑弹性模量与温度的关系, 提出了温度变化引起的防渗土工膜端部张拉力评价方法, 并与试验结果进行了比较, 结果表明所提评价方法能有效评价温度变化引起的防渗土工膜张拉力, 对实际工程有一定的参考价值。

关键词: 渗漏, 土工膜, 温度应力, 膨胀, 张拉力, 有限元分析, 防渗土工膜, 线膨胀系数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.04.002

中图分类号: S277, TV698.7 文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-04-0007-05

许四法, 张 豪. 农业灌溉水渠防渗土工膜的温度敏感性及其张拉力评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 7-11.

Xu Sifa, Zhang Hao. Experiment and evaluation on temperature sensitivities and tensile forces of anti-seepage geomembrane of farmland irrigation canal [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 7-11. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

我国已建输水渠系防渗工程近 60 万 km, 仅占渠系总长的五分之一, 每年渠系总输水损失量为 1 730 亿 m³ 左右, 占渠首总引水量的 50%, 一些土质较差的渠道损失高达 70%^[1-2]。一方面地表水和地下水的大量使用产生许多水土环境问题^[3-4], 另一方面渠道渗漏严重^[5]。随着农业的快速发展, 水资源不足将成为影响我国农业可持续发展的一个重要原因。因此灌溉渠道防渗成为节水工程的一个重要方面。渠道采取防渗措施后, 既可提高水的利用率, 缓解农业用水供需矛盾, 又可降低地下水位, 防止和改良盐碱地和沼泽地, 有利于生态环境和农业现代化建设^[6]。我国从上世纪 50 年代开始在灌溉渠道采取防渗措施^[7], 60 年代开始使用土工膜防渗^[8], 目前主要的防渗方法有黏性土防渗、水泥土防渗、砌石防渗、混凝土防渗以及土工膜防渗, 但是黏性土和水泥土防渗抗冻较差, 混凝土易受冻胀开裂造成渗漏^[9-10], 因此土工膜防渗近几年发展较快^[11]。目前常用的土工膜有高密度聚乙烯 (high density polyethylene, HDPE)、低密度聚乙烯 (low density polyethylene, LDPE)、聚氯乙烯 (polyvinylchloride, PVC) 以及热塑性聚乙烯 (thermoplastic elastomer, TPE(PE)) 等, 因土工膜为高分子材料且多为黑色, 性能受温度影响很大^[12]。由于土工膜上端部被土固定防滑, 外界温度变化会使土工膜受力, 温差过大有可能造成端部张拉力过大而滑落, 或因变形过大土工膜上砌块等保

护层滑落失去防渗能力, 特别是在施工阶段或未输水期间更易发生破坏。有关渠道防渗土工膜的研究, 主要侧重于构造和施工方面, 而对于土工膜的温度敏感性和变形评价方面研究还很少, 有材料性能与温度之间关系的研究^[13-14], 而进行应用研究和模拟试验的较少。

本文主要研究几种常用防渗土工膜的温度变形和张拉力评价方法, 为渠道防渗土工膜的使用提供一些参考。

2 材料与方法

2.1 所用材料

试验中使用的防渗土工膜为高密度聚乙烯 (HDPE)、低密度聚乙烯 (LDPE) 以及热塑性聚乙烯 (TPE(PE)), 各材料的性能见表 1。

表 1 材料特性
Table 1 Characteristics of material

指标	厚度/mm	密度/(g·cm ⁻³)	破坏强度/(N·cm ⁻¹)	弹性模量/MPa
高密度聚乙烯	1.5	0.95	262	784
低密度聚乙烯	1.5	1.02	238	350
热塑性聚乙烯	1.5	0.94	118	186
短纤维无纺布	1.5	0.12	41	6.5

注: 表中弹性模量为 0℃时值。

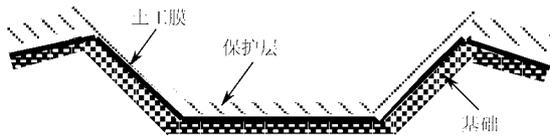
2.2 试验方案和方法

我国常见沟渠断面构造如图 1 所示^[15-16]。铺设在坡面上的防渗土工膜受温度影响较大, 因此为了了解坡面防渗土工膜的温度敏感性, 室外制作了一个高 300 cm, 边坡为比 1:1 的模拟灌溉沟渠 (图 2)。

收稿日期: 2010-10-18 修订日期: 2011-03-30

基金项目: 浙江省自然科学基金项目资助 (Y1090092)

作者简介: 许四法 (1967-), 男, 浙江平湖人, 浙江工业大学建筑工程学院副教授, 博士, 主要从事环境岩土技术研究。Email: xusifa@zjut.edu.cn



注：保护层为 20cm 厚压实的粘土。

图 1 沟渠断面
Fig.1 Section of canal

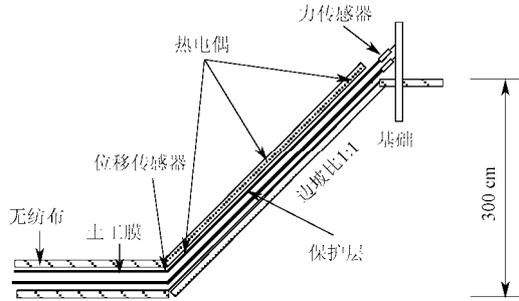


图 2 模拟试验灌溉沟渠示意图
Fig.2 Simulation test cross section of irrigation canal

边坡和底面为夯实的黏土，铺设防渗土工膜以及保护层，保护层为 20 cm 厚压实的黏土。为了了解铺设无

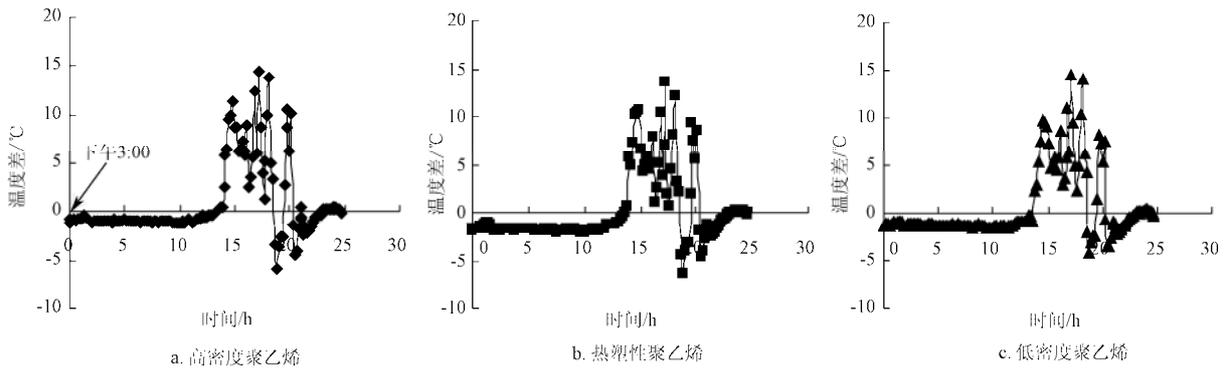
纺布后的降温效果，防渗土工膜与保护层之间分为设置和未设置无纺布 2 种情况。

防渗土工膜上部端部通过力传感器被固定在桩上，防渗土工膜表面每 20 cm 设置一个应变片，同时在边坡部防渗土工膜上设置了 3 个热电偶观测温度变化情况。另外，边坡部与底面转角处设置了位移传感器，了解伴随温度变化边坡部防渗土工膜的变形情况。试验在温度最高的午后 3:00 左右开始，上端部防渗土工膜与力传感器相接，伴随温度的下降观测防渗土工膜的温度变化、张拉力和变形等。

3 结果与分析

3.1 上部无纺布的降温效果

防渗土工膜与保护层之间铺设无纺布后的降温效果如图 3 所示。从图 3 可知，防渗土工膜上部使用无纺布后，无论是哪种防渗土工膜，最大降温都在 15℃ 左右，降温效果明显。试验在午后 3:00 左右开始，经过 15 h 即第二天上午 10:00 左右，伴随外界气温的上升，防渗土工膜表面温度上升，无纺布对防渗土工膜表面降温明显。由于温度降低，防渗土工膜变形减小且张拉力减小，更有利于防渗系统的完整性和耐久性。



注：图中温度差为没有铺设无纺布与铺设无纺布后的土工膜温度之差

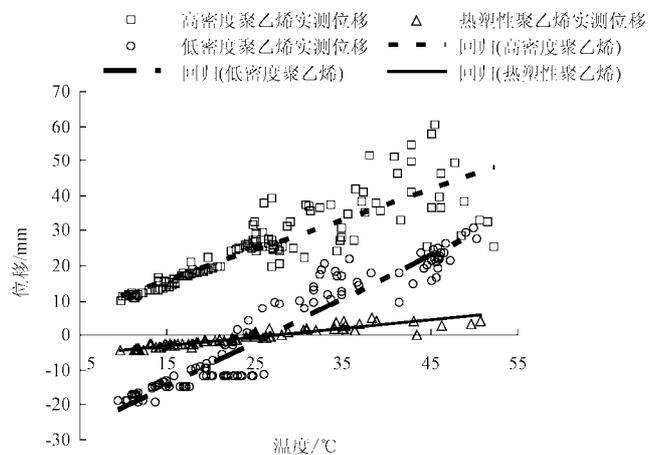
图 3 防渗土工膜与保护层之间铺设无纺布后的降温效果

Fig.3 Effect of temperature decreasing under using the non-woven geotextile between anti-seepage geomembrane and protective layer

3.2 温度与位移

伴随温度变化，高分子材料制成的防渗土工膜发生收缩或膨胀，变形大小与防渗土工膜的特性有关。图 4 为防渗土工膜表面温度与边坡下端部位移量之间关系，由于受温度、风向和天气状况影响很大，数据有波动，为了减小误差图中显示了 2 d 的数据。从图 4 可知，3 种防渗土工膜的温度敏感性差别很大，HDPE 防渗土工膜对温度最敏感，最大位移达到了 60 mm，TPE(PE)防渗土工膜的温度敏感性最弱，伴随温度变化产生的变形最小。

防渗土工膜的变形过大，使防渗土工膜与保护层之间发生相对位移，导致保护层开裂或脱落，影响到防渗土工膜的安全性。另外，防渗土工膜周期性的胀缩，有可能出现疲劳破坏，影响到耐久性。



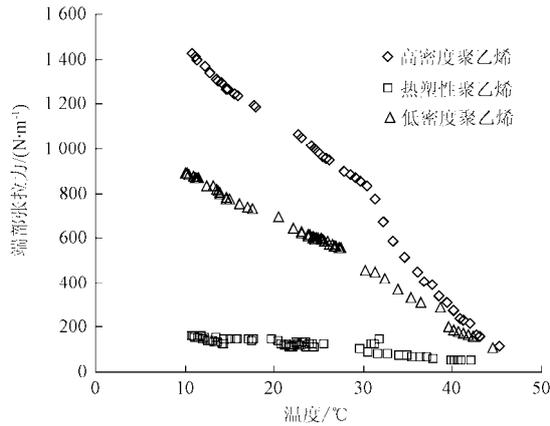
注：土工膜与保护层之间覆盖无纺布的数据

图 4 土工膜表面温度与边坡下端部位移量之间关系

Fig.4 Relationship between temperature of geomembrane and deformation at the toe of slope

3.3 端部张拉力

由于防渗土工膜上端部被固定，渠底部分被保护层压盖，所以当外界温度下降时防渗土工膜收缩产生温度应力，防渗土工膜温度变化与端部张拉力之间的关系如图 5 所示。从图 5 可看出，3 种防渗土工膜的张拉力差别非常明显，HDPE 防渗土工膜的张拉力最大，超过 1 400 N/m，而 TPE(PE)的张拉力最小，不到 200 N/m，产生差异的主要原因如图 4 所显示的那样，每种防渗土工膜的温度敏感性不一样，以及弹性模量的差异性，如表 1 所显示的 HDPE 防渗土工膜的弹性模量高出 LDPE 防渗土工膜 1 倍，而 TPE(PE)防渗土工膜的弹性模量只有 HDPE 防渗土工膜的 24 % 左右。



注：图中数据为覆盖无纺布后的试验结果
图 5 温度与端部张拉力

Fig.5 Relationship between temperature and tensile force

一般沟渠防渗土工膜端部用土或沟槽填土固定，沟槽的横截面尺寸约 400 mm×400 mm，如压实后土的重度为 18 kN/m³，那么极限压重为 2.9 kN/m。沟槽固定能力大小与很多因素相关，包括界面之间的摩擦特性和沟槽中填埋物的转动等，故实际的固定能力远没有那么大。另外，试验中的最大温差只有 40℃左右，而我国西北干旱地区昼夜温差很大，可能超过 50℃，因此极有可能端部张拉力超过沟槽的固定能力使防渗土工膜滑落。

4 张拉力评价

4.1 温度变化引起的张拉力评价模型

温度下降，防渗土工膜收缩产生张拉力，同时由于防渗土工膜的收缩使得土工膜上下界面之间发生相对位移产生摩擦应力，摩擦应力与温度应力方向相反，端部总张拉力：

$$\sigma = \sigma_t + \sigma_f \quad (1)$$

式中： σ_t 为温度变化产生的应力，MPa； σ_f 为温度变化引起的摩擦应力，Mpa。

防渗土工膜两端被固定时，当温度从 t_1 (°C) 变化到 t_2 (°C) 时，温度应力计算公式为^[17]：

$$\sigma_t = -\int_{t_1}^{t_2} \beta E_0 10^{-a\Delta t} dt \quad (2)$$

式中， E_0 为 0℃时防渗土工膜的弹性模量，MPa； β 为防渗土工膜的线膨胀系数，10⁻⁵/°C； a 为土工膜的温度系数，

无量纲，其中 HDPE 土工膜为 0.0102，TPE(PE)土工膜为 0.0129，LDPE 土工膜为 0.0108。

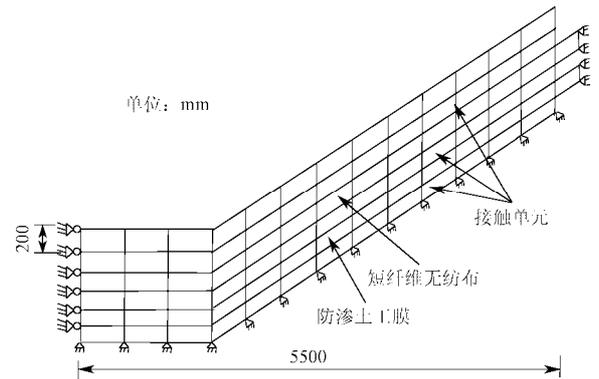


图 6 有限元分析模型
Fig.6 Finite element mesh

温度下降防渗土工膜收缩，层间产生摩擦力，此应力采用有限元计算。防渗土工膜胀缩引起的张拉力解析模型如图 6 所示，无纺布与防渗土工膜的上端部被完全固定，在高度方向假设保护层能自由变位，材料界面之间采用平面四节点接触单元。材料界面之间采用摩擦（接触）单元，土和界面的应力应变关系采用非线性本构模型，割线模量 E_t 表达式为

$$E_t = \left(1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right)^2 k P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (3)$$

式中， σ_1 和 σ_3 为大小主应力，MPa； R_f 为破坏比； P_a 为大气压力，Pa； c 为黏聚力，kPa； ϕ 为摩擦角，(°)； k 和 n 由试验确定的参数。

4.2 参数选取

防渗土工膜的膨胀系数表征变形受温度影响的大小，对图 4 中温度与变形关系进行回归，得到线膨胀系数，由于室外测试受气候影响很大，线膨胀系数为近似回归，HDPE、TPE(PE)和 LDPE 防渗土工膜的线膨胀系数分别为 22×10⁻⁵、6×10⁻⁵和 26×10⁻⁵°C⁻¹，3 个线膨胀系数回归的相关系数分别为 0.88、0.96 和 0.94，说明相关性较好。

防渗土工膜上下界面的摩擦特性通过直接剪切试验获得，通过不同垂直应力下界面相对位移与界面摩擦应力的关系，得到计算参数。防渗土工膜与其他材料界面之间相对位移与摩擦应力的关系，一般为垂直应力一定时随着相对位移的增大界面摩擦应力增加，但相对位移达到一定值后，摩擦应力趋于稳定并不再增加，如图 7 中所示的 LDPE 防渗土工膜与黏土之间相对位移与摩擦应力的关系曲线。使用库仑抗剪强度表达式，采用最小二乘法对最大摩擦应力与荷载之间的关系求得界面之间的摩擦特性值摩擦角 ϕ 和黏聚力 c ，计算后获得 LDPE 防渗土工膜与黏土之间的摩擦角 ϕ 和黏聚力 c 。保护层与无纺布、无纺布与 HDPE 防渗土工膜以及 HDPE 防渗土工膜与黏土的摩擦角 ϕ 和黏聚力 c 分别为 33.4°和 4.5 kPa、11.2°和 0.66 kPa 以及 24.2°和 1.7 kPa，无纺布与 TPE(PE)

防渗土工膜以及 TPE(PE)防渗土工膜与黏土的摩擦角 ϕ 和黏聚力 c 分别为 17.7° 和 6.1 kPa 、 29.7° 和 2.8 kPa ，无纺布与 LDPE 防渗土工膜以及 LDPE 防渗土工膜与黏土的摩擦角 ϕ 和黏聚力 c 分别为 10.4° 和 3.3 kPa 、 21.0° 和 1.72 kPa 。HDPE 防渗土工膜、LDPE 防渗土工膜以及 TPE(PE) 防渗土工膜与无纺布之间的 k 和 n 为 2877 和 0.89 、 1831 和 0.83 ，以及 1063 和 0.79 。

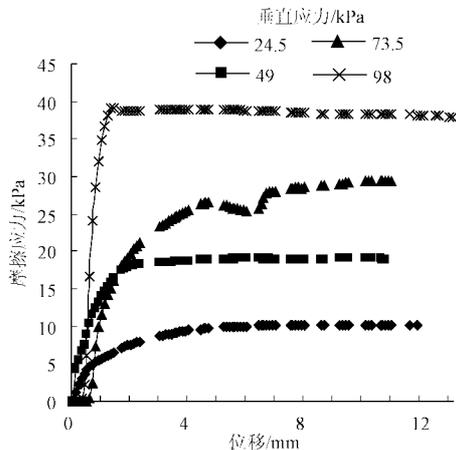
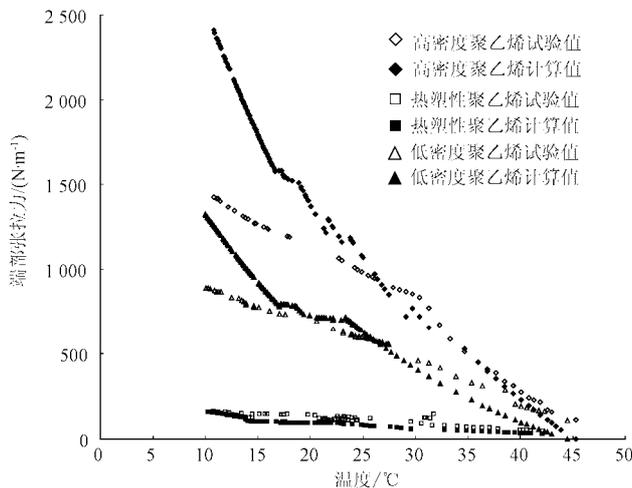


图7 低密度聚乙烯防渗土工膜与黏土界面之间摩擦特性
Fig.7 Friction characteristics between LDPE anti-seepage geomembrane and clay

4.3 张拉力评价结果

HDPE、TPE(PE)和 LDPE 防渗土工膜保护层铺设完成及上端部被固定时的温度分别为 45.3 、 42.1 和 44.5°C ，这之后温度升降引起端部张拉力。根据式 (2) 和有限元计算得到的端部张拉力如图 8 所示。



注：高密度聚乙烯、热塑性聚乙烯和低密度聚乙烯防渗土工膜保护层铺设完成上端固定时的温度分别为 45.3 、 42.1 和 44.5°C

图8 温度变化引起的张拉力试验值与评价值比较

Fig.8 Comparison of calculated and test results caused by the change of temperature

从图 8 可看出，无论哪种防渗土工膜，张拉力试验值与评价值变化趋势一致。在温度高于 20°C 时，HDPE 防渗土工膜张拉力试验值与评价值基本一致，评价值与试验值的比值在 $0.95\sim 1.15$ 之间，两者吻合度很高，当

温度低于 20°C 即温差变大时评价值逐渐偏离试验值，评价值是试验值的 $1.3\sim 1.7$ 倍。

TPE(PE)防渗土工膜张拉力的评价值与试验值较接近，评价值与试验值的比值在 $0.75\sim 1.30$ 之间，温度高于 15°C 时评价值小于试验值，但当温度低于 15°C 时评价值高于试验值，这一方面可能是试验尺寸比较大，如降雨等对测试结果有影响，另一方面也与线膨胀系数的取值有关。LDPE 防渗土工膜张拉力的评价值与试验值较为接近，评价值是试验值的 $0.90\sim 1.45$ 倍。

3 种防渗土工膜张拉力的评价值与试验值相比，当温度较低时，均表现出了评价值偏离试验值，这主要是由于参数选取的问题，特别是防渗土工膜的线膨胀系数取值，计算中使用的是一定值，而从室内试验数据分析，线膨胀系数虽受温度影响较小，但不是一个常数，温度较低时线膨胀系数较小，而温度较高时线膨胀系数相对大一些，而计算中取了平均值，因此造成了温度较低时评价值与试验值偏差偏大的原因。

5 结论

- 1) 防渗土工膜上覆盖无纺布能有效降低表面温度，减小防渗土工膜的变形和张拉力。
- 2) 同样情况下，HDPE 防渗土工膜的变形最大，LDPE 防渗土工膜的变形次之，TPE(PE)防渗土工膜的变形最小。
- 3) 通过计算温度变化引起的防渗土工膜端部张拉力以及采用有限元分析方法计算层间摩擦应力，计算所得防渗土工膜端部张拉力与试验值较为接近，说明所提的评价方法能用于农用灌溉沟渠边坡防渗土工膜端部因温度变化引起的张拉力评价。
- 4) 当温差超过 40°C 后，防渗土工膜中产生的张拉力很大，有可能超过沟槽的固定能力，因此建议防渗土工膜施工时避免在中午温度最高时施工。

[参考文献]

- [1] 曹政权, 齐广平, 李涛, 等. 灌溉渠道防渗措施应用现状分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2008, 41(4): 116-120.
Cao Zhengquan, Qi Guangping, Li Tao, et al. Application analysis of anti-seepage measure of irrigation canal[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2008, 41(4): 116-120. (in Chinese with English abstract)
- [2] Swamee P K, Mishra G C, Chahar B R. Design of minimum water-loss canal sections[J]. Journal of Hydraulic Research, 2002, 40(2): 215-220.
- [3] Swamee P K, Mishra G C, Chahar B R. Design of minimum seepage of loss canal sections with drainage layer at shallow depth[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2001, 127(5): 287-294.
- [4] 姚素梅, 吴大付, 杨宏伟, 等. 河南省农业灌溉系统中的水土环境问题及其解决途径[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(3): 35-42.
Yao Sumei, Wu Dafu, Yang Hongwei, et al. Preliminary study on problems and solutions in soil and water-environment of agricultural irrigation system in henan province[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, 21(3): 35

- 42. (in Chinese with English abstract)
- [5] Homayoon K. Seepage from lined canal using finite-element method[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2004, 130(5): 441—444.
- [6] 余长洪, 周明耀, 姜健俊, 等. 灌区节水改造中防渗渠道断面的优化设计[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 91—94. Yu Changhong, Zhou Mingyao, Jiang Jianjun, et al. Optimal design of anti-seepage channel section for water-saving transformation in irrigation district[J]. *Transactions of CSAE*, 2004, 20(1): 91—94. (in Chinese with English abstract)
- [7] 程祥飞. 丰乐灌区渠道渗漏的原因与防渗措施[J]. *安徽水利水电职业技术学院学报*, 2009, 9(增刊): 60—61. Cheng Xiangfei. Cause of channel seepage and anti-seepage method in Fengle irrigation area[J]. *Journal of Anhui Technical College of Water Resources and Hydroelectric Power*, 2009, 9(Supp): 60—61. (in Chinese with English abstract)
- [8] 窦宝松, 鲍维猛, 王长保. 土工合成材料在渠道防渗工程中的应用[J]. *水利水电技术*, 2009, 40(4): 27—29. Dou Baosong, Bao Weimeng, Wang Changbao. Discussion on application of geo-synthetic material to anti-seepage of canal[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2009, 40(4): 27—29. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李学军, 费良军, 李改琴. 大型U形混凝土衬砌渠道季节性冻融水热耦合模型研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(1): 13—17. Li Xuejun, Fei Liangjun, Li Gaiqin. Model of coupled heat-fluid transport of U-shape canal lining with concrete during seasonal freezing and thawing stage[J]. *Transactions of CSAE*, 2008, 24(1): 13—17. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王正中, 刘旭东, 陈立杰, 等. 刚性衬砌渠道不同纵缝削减冻胀效果的数值模拟[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 1—7. Wang Zhengzhong, Liu Xudon, Chen Lijie, et al. Computer simulation of frost heave for concrete lining canal with different longitudinal joints[J]. *Transactions of CSAE*, 2009, 25(11): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张慧莉, 田堪良, 娄宗科. 复合土工膜料在渠道防渗工程中的应用及其改性建议[J]. *水土保持*, 2002, 9(2): 34—36. Zhang Huili, Tian Kanliang, Lou Zongke. Application of composite geomembrane in canal seepage control and advices for its improvement[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(2): 34—36. (in Chinese with English abstract)
- [12] Swamee P K, Mishra G C, Chahar B R. Comprehensive design of minimum cost irrigation canal sections[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2000, 126(5): 322—327.
- [13] Koerner R M. *Designing with Geomembrane*(Second edition)[M]. New Jersey: Prentice hall, 1996.
- [14] Merry S M, Bray, J D, Yoshitomi S. Axisymmetric temperature and stress-dependent creep response of 'new' and 'old' HDPE geomembranes[J]. *Geosynthetics International*, 2005, 12(3): 156—161.
- [15] 王俊发, 马旭. 渠道防渗工程技术现状及塑膜衬砌机械化筑渠技术[J]. *吉林大学学报*, 2004, 34(2): 320—323. Wang Junfa, Ma Xu. Present status of canal leakproof technique and technology of canal building with mechanized plastic filming[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2004, 34(2): 320—323. (in Chinese with English abstract)
- [16] 孙美, 毛晓敏, 陈剑, 等. 夹砂层状土条件下渠道渗漏的室内试验和数值模拟[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 33—38. Sun Mei, Mao Xiaomin, Chen Jian, et al. Laboratory experiment and simulation on canal seepage through sand interlayer[J]. *Transactions of CSAE*, 2010, 26(8): 33—38. (in Chinese with English abstract)
- [17] 许四法, 杨杨, 洪波. HDPE 土工膜温度应力及其应力松弛评价[J]. *东南大学学报*, 2006, 36(5): 820—824. Xu Sifa, Yang Yang, Hong Bo. Evaluation of temperature stress and stress relaxation properties of HDPE sheet[J]. *Journal of Southeast University*, 2006, 36(5): 820—824. (in Chinese with English abstract)

Experiment and evaluation on temperature sensitivities and tensile forces of anti-seepage geomembrane of farmland irrigation canal

Xu Sifa, Zhang Hao

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhe Jiang University of Technology, Hang zhou, 310032, China)

Abstract: In order to understand the temperature sensitivity of anti-seepage geomembrane, the experimental study and analysis of the thermal stress and deformation were conducted for anti-seepage geomembrane of farmland irrigation canal. The tensile force at the fixed end of anti-seepage geomembrane was measured by loadcell, thermocouple, and displacement gauge with variation in temperature. Experimental results indicated that the temperature change had significant effect on the tensile force at the fixed end, especially for the HDPE anti-seepage geomembrane; The temperature of anti-seepage geomembrane could be effectively reduced when the non-woven geotextile was used between the anti-seepage geomembrane and the protective layer; The large deformation occurred with variations in temperature, the max displacement could reach 60 mm. Based on limit equilibrium theory, evaluation methods on the tensile forces caused by variation in temperature of anti-seepage geomembrane was proposed, the evaluation results considering the relationship between elastic modulus and temperature were in agreement with the experiment. The method proposed can effectively estimates tensile force of anti-seepage geomembrane with temperature variation. The test results can provide a certain reference for the engineering practice.

Key word: seepage, geomembranes, thermal stress, expansion, tensile stress, finite element analysis, anti-seepage geomembrane, expansion coefficient