

南阳压实膨胀土膨胀变形规律研究

王 顺, 李涛涛, 王 林, 聂 琼

(中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:以南水北调中线一期工程南阳陶岔-沙河南渠段中等膨胀土为研究对象,对压实膨胀土的膨胀变形进行了研究探讨,并对不同初始含水率、压实度和上部荷载的线胀率进行了拟合分析,得到压实膨胀土在有侧限约束条件下的有荷膨胀率与上部荷载之间呈半对数关系,在此基础上,提出了同时考虑压实度、含水率和上部荷载的拟合方程,并可用此方程对实际工程的膨胀变形量进行简单计算.结果表明:用一定厚度的非膨胀土填盖中等膨胀土渠坡,可以有效抑制渠坡的膨胀变形.

关键词:南水北调工程; 压实膨胀土; 膨胀率; 初始含水率; 膨胀变形

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2011)03-0036-06

南水北调工程是为缓解我国北方水资源严重短缺局面而兴建的重大战略性水利基础设施,其中线工程全长 1 240 km,需穿越膨胀土地区.膨胀土的吸水膨胀、失水收缩特性会对渠线造成不利影响,例如破坏土体结构、降低其力学强度,影响渠坡稳定和破坏渠道衬砌.大量事实表明:膨胀土的胀缩变形是其对建筑物产生危害的主要原因^[1-2].因此对膨胀土膨胀变形的研究具有现实意义.

对膨胀土变形的研究,国外开展得较早,Huder-Amberg 在 1970 年采用常规固结仪对泥灰岩进行了单轴膨胀应变试验,提出轴向膨胀应变与轴向应力的对数呈线性关系.国内学者徐永福等^[3-5]研究了宁夏膨胀土的膨胀变形,并认为在相同上覆荷载作用下,膨胀土膨胀量与初始含水率(指质量分数,下同)呈线性关系;李献民等^[6]研究表明,膨胀力曲线和膨胀量曲线的变化规律均为指数关系;张爱军^[7]和章为民^[8]等研究了考虑初始含水率、初始干密度和上覆压力 3 个因素耦合变化的膨胀变形计算模式,并得到膨胀土的膨胀模型.在膨胀土的实用变形研究方面,大多数研究者只是建立了膨胀应变与初始含水率、土体上覆压力、干密度间的单变量关系式,而膨胀土的膨胀应变与其初始含水率、干密度(压实度)以及所处的应力条件有密切关系,单因素关系式并不能完全反映膨胀土的膨胀变形,因此有必要研究膨胀应变与其初始含水率、干密度(压实度)及上覆荷载三者之间的关系,建立膨胀应变与膨胀土初始状态之间的关系.

结合南水北调中线工程的膨胀土问题,笔者对南阳陶岔-沙河南渠段的膨胀土样进行了大量试验研究,并分析其膨胀特性及变形规律.该规律对定量研究膨胀土的膨胀变形、预测膨胀土渠坡可能产生的变形危害有着非常重要的意义,并可为该渠段渠坡的设计和施工提供科学依据.

1 试 验

试验土样取自南水北调中线工程南阳市卧龙区桩号 101+850~102+550 某处,颜色呈棕黄色,其中混有钙质结核,将土样拌匀,剔除结核类物质,并将土样尽量捣碎.土样的物理力学性质见表 1.膨胀土的粒度成分为粒径 $d \geq 5.0$ mm 的占 1.4%, $2.0 \text{ mm} \leq d < 5.0 \text{ mm}$ 的占 0.8%, $0.5 \text{ mm} \leq d < 2.0 \text{ mm}$ 的占 3.0%, $0.25 \text{ mm} \leq$

收稿日期: 2010-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972185)

作者简介: 王 顺(1986-),男,湖北武汉人,博士研究生,主要从事岩土体工程性质及稳定性研究.

E-mail: ziyefeng2015@163.com

$d < 0.5$ mm 的占 1.7%, 0.075 mm $\leq d < 0.255$ mm 的占 1.2%, 0.005 mm $\leq d < 0.075$ mm 的占 44.7%, 0.002 mm $\leq d < 0.005$ mm 的占 17.8%, $d \leq 0.002$ mm 的占 29.4%。根据《膨胀土地区建筑技术规范》^[9]可以判别试验土样为高液限中膨胀性黏土。

表 1 膨胀土的基本性质

Tab. 1 Basic property of expansive soil

天然含水率/ %	风干含水率/ %	密度/ (g·cm ⁻³)	液限/ %	塑限/ %	塑性指数	液性指数	自由膨胀率/ %
22.2	2.73	1.96	64.4	26.1	38.3	-1.2	79
击实试验		直剪(最优含水率)			收 缩		
最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最优含水率/ %	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ °	体缩/ %	缩限/ %	收缩指数/ %	
1.63	24.4	68.3	23.8	17.8	6.67	0.59	

本试验模拟南阳地区由于季节和降雨量的变化,压实膨胀土内部含水率周期性变化时渠坡填土发生反复胀缩变形的过程. 试验采用重塑土,制样采用质量控制法,制备 3 种初始含水率(含水率为 22.4%, 24.4% 和 26.4%, 其中最优含水率为 24.4%), 相应试样的设计压实度为 90%, 93% 和 96%。

试样制备:①将碾碎的风干土样过 2 mm 筛,充分拌匀;②测定风干含水率,计算配置含水率为 22.4%、24.4% 和 26.4% 土样所需的加水量;③用喷雾器喷洒预计的含水率,然后将搅拌的土样装入塑料袋,扎紧袋口后放置于保湿缸内静置 24 h 以上,以确保土样吸水均匀;④用烘干法量测土样的含水率(烘箱温度 $T = 105 \sim 110$ °C, 烘干时间 $t \geq 8$ h). 对各种含水率试样分别按最大干密度的 90%, 93% 和 96% 控制密度制备试样,进行无荷膨胀量(率)试验、膨胀力试验和有荷膨胀量(率)试验(竖向荷载 6.25, 12.5, 25, 50, 100 和 125 kPa, 最大竖向荷载应大于其膨胀力), 试验结果如表 2 所示。

表 2 膨胀土膨胀率与竖向压力的关系

Tab. 2 Relationships between expansion ratio and vertical load

含水率/ %	压实度/ %	不同竖向压力下的膨胀率/ %							膨胀力/ kPa
		0	6.25 kPa	12.5 kPa	25 kPa	50 kPa	100 kPa	125 kPa	
22.4	90	13.2	5.14	3.15	1.35	-1.21	-3.85	-4.92	37.5
	93	13.5	6.00	4.25	3.12	0.97	-2.15	-3.88	65.3
	96	14.2	7.02	5.12	3.80	1.87	-0.90	-2.70	85.5
24.4	90	11.1	3.56	2.43	1.00	-1.08	-3.12	-3.87	34.2
	93	11.9	3.92	2.62	1.43	0.08	-1.93	-2.43	50.1
	96	12.9	4.20	2.73	1.75	0.76	-1.01	-1.70	66.3
26.4	90	5.19	2.47	1.66	0.41	-0.72	-2.20	-2.69	32.1
	93	6.48	3.02	2.02	0.86	-0.34	-1.64	-2.07	39.1
	96	8.43	3.77	2.43	1.26	0.13	-1.1	-1.45	54.2

2 压实膨胀土膨胀变形规律分析

从表 2 试验结果可以看出,在上部荷载一定的条件下,有荷膨胀率随初始含水率的增加而减小,随压实度的增大而增大. 本文对不同压实度下的有荷膨胀率曲线进行回归分析,发现膨胀率与上覆荷载在半对数坐标系上线性关系较好,图 1 给出了压实度为 96% 的压实素土在不同初始含水率下有荷膨胀率与上部荷载的半对数关系曲线. 利用 Matlab 对试验数据进行拟合分析,得到的膨胀率和上覆荷载的回归方程为:

$$\delta_p = a_1 \ln p + b_1 \quad (1)$$

式中: δ_p 为有荷膨胀率(%); p 为上部荷载(kPa); a_1, b_1 为拟合参数,其值由所用土的性质决定,在干密度一定的条件下,与初始含水率有关。

因为 a_1, b_1 与初始含水率有关,因此,可分别将 a_1, b_1 值与对应的初始含水率进行拟合(见图 2),可见参数 a_1, b_1 与初始含水率 w_0 成线性关系. 线性关系式为:

$$a_1 = e_1 w_0 + f_1 \tag{2}$$

$$b_1 = e_2 w_0 + f_2 \tag{3}$$

式中: w_0 为压实素土的初始含水率; e_1, e_2, f_1 和 f_2 为拟合参数,与压实度(压实素土的干密度)和土颗粒本身的膨胀特性有关. 将式(2),(3)同时代入式(1)中,整理出压实度为 96% 的压实素土的有荷膨胀率与上部荷载和初始含水率的拟合关系式,即

$$\delta_p = a_1 \ln p + b_1 = e_1 w_0 \ln p + f_1 \ln p + e_2 w_0 + f_2 \tag{4}$$

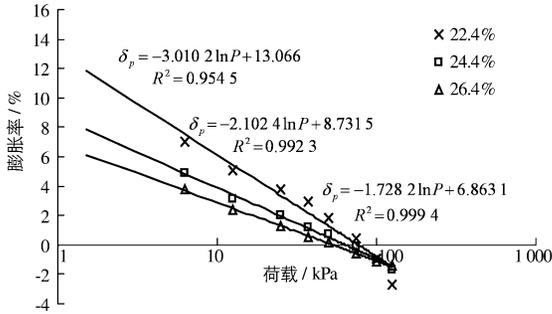


图 1 96% 压实度不同含水率上覆荷载与膨胀率半对数关系曲线
Fig. 1 Curves of expansion ratio vs upper load with different moisture content under 96% compaction

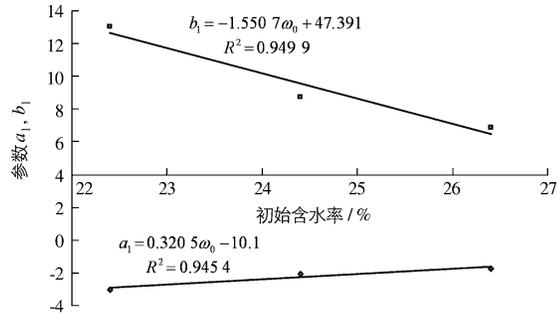


图 2 参数 a_1, b_1 与土样初始含水率的拟合关系
Fig. 2 Fitting curves of initial moisture content vs. parameters of a_1 and b_1

将压实度为 96% 的压实素土有荷膨胀率试验中得到的参数 e_1, e_2, f_1 和 f_2 代入式(4)得:

$$\delta_p = (0.320 5 w_0 - 10.1) \ln p - 1.550 7 w_0 + 47.391 \tag{5}$$

对于同一种土料,不同压实度下的有荷膨胀率大小与试样的压实度之间存在一个相关参数^[10]. 笔者将该参数设为 ξ ,则初始含水率一定的情况下,压实素土的有荷膨胀率 ξ_p 与上覆荷载 p 的半对数关系式可以用下式描述,即

$$\delta_p = \xi(a \ln p + b) \tag{6}$$

式中: ξ 为相关性系数, $\xi = f(\lambda)$, λ 为压实度,干密度一定的条件下与初始含水率有关; a, b 为拟合参数.

通过分析发现压实度的比值可以用 $\xi = \lambda/96$ 来描述. 因此将表 2 中的不同压实度和含水率的土样在不同上部荷载下得到的膨胀率乘以相关性系数 ξ ($\xi = \lambda/96$),然后将处理后的膨胀率与上部荷载绘制在半对数坐标上(见图 3). 由于 a, b 与初始含水率有关,因此,可分别将 a, b 值与对应的初始含水率进行拟合,发现参数 a, b 与初始含水率 w_0 呈线性关系(见图 4). 线性关系式为:

$$a = e w_0 + f \tag{7}$$

$$b = i w_0 + h \tag{8}$$

式中: e, f, i 和 h 为拟合参数.

将式(7),(8)同时代入式(6)中,整理出压实素土的有荷膨胀率与上部荷载和初始含水率的拟合关系式:

$$\delta_p = \xi(a \ln p + b) = \xi(e w_0 \ln p + f \ln p + i w_0 + h) = \xi[(0.349 3 w_0 - 10.825) \ln p - 1.485 2 w_0 + 45.05] \tag{9}$$

绘制采用式(9)计算得到的压实素土的有荷膨胀率与上部荷载的半对数关系,如图 5 所示.

通过图 5 可见,式(9)可以较好地拟合该地区中膨胀土有荷膨胀率随上部荷载和初始含水率的变化关系,为计算不同初始条件的膨胀应变提供了途径,在工程应用中可以通过原状膨胀土的膨胀性试验获取上述拟合参数,然后以此推算出膨胀土的变形或对工程产生的破坏程度.

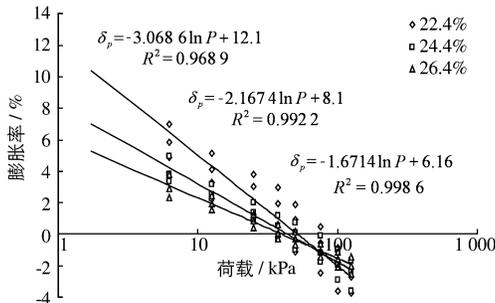


图3 压实素土在不同含水率下处理后的有荷膨胀率与上部荷载的半对数关系

Fig. 3 Curves of expansion ratio vs. upper load with different initial moisture content

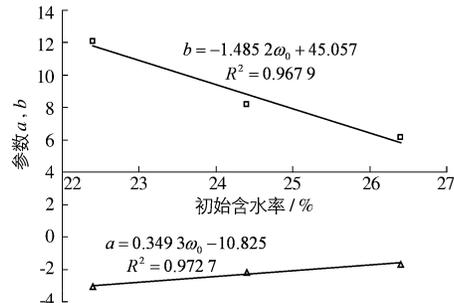


图4 参数 a, b 与土样初始含水率的拟合关系曲线

Fig. 4 Fitting curves of initial moisture content vs parameters of a and b

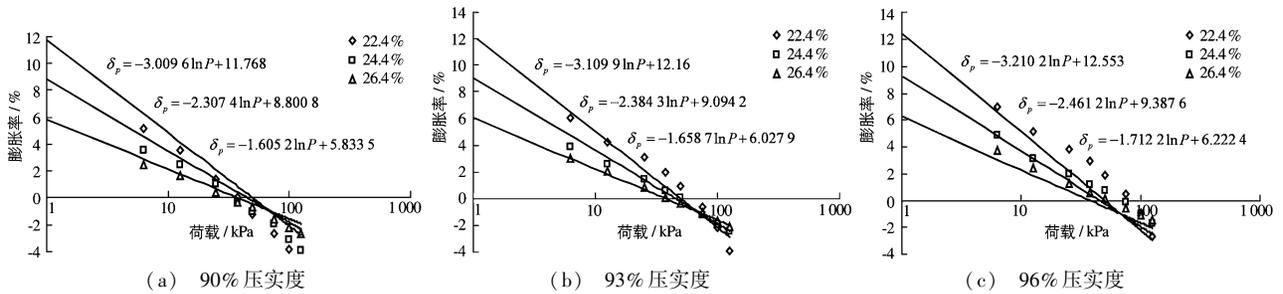


图5 压实素土的有荷膨胀率与上部荷载的试验数据与拟合曲线对比

Fig. 5 Test data of swelling ratio and vertical load compared with fitting curves

3 采用压实素土填筑的渠道膨胀变形量计算

陶岔-沙河南渠段某处需要用膨胀土填筑渠道, 填筑高度约 6 m, 坡度 1/2.0 ~ 1/2.5, 初步设计为填方段下部用压实中膨胀土填筑, 上部拟用非膨胀土作为盖层, 因此需对其可能产生的膨胀变形进行预测. 由于沿线土层分布均匀、地势平坦, 因此影响填土竖向变形的最大因素就是盖层填筑厚度. 所用非膨胀土盖层土的干密度为 1.68 ~ 1.70 g/cm³, 饱和密度为 2.14 g/cm³; 压实中膨胀土最优含水率为 24.4%, 最大干密度为 1.63 g/cm³. 根据刘特洪^[11]的研究, 压实度为最大干密度的 90% 左右, 可以达到较好的填筑效果, 因此选用压实度为最大干密度的 93% 的中膨胀土填筑, 计算简图见图 6.

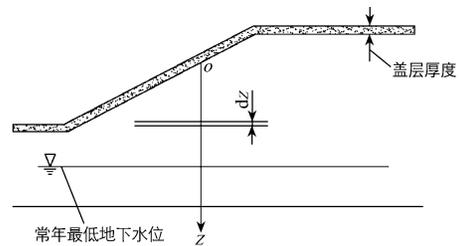


图6 膨胀土渠道横剖面

Fig. 6 Cross-section schematic diagram of expansive soil channel

以非膨胀土盖层和压实填土交界处为计算零点(见图 6), 则某深度 z 处厚度 dz 土层的膨胀量 $ds = \delta_{pi} dz$, 含水率变化范围内土层的膨胀量 $S = \int ds = \int \delta_{pi} dz$. 要计算膨胀土的变形, 先要计算出发生膨胀变形的土层厚度, 即找出膨胀率为 0 的土层埋置深度 z_0 (即膨胀变形临界深度). 令 $\delta_p = 0$, 根据式(9)得:

$$\delta_p = \xi(a \ln p + b) = \xi(ew_0 \ln p + gw_0 + h) = 0 \tag{10}$$

只要确定填土的压实度、含水率和上部荷载, 代入上式即可得到发生膨胀变形的临界深度 z_0 . 不同深度土层的上部压力等于盖层荷载 p_0 和压实填土的自重应力之和, 因此该断面处地下水位上升至地表后, 不同深度填土的上覆压力为:

$$p(z) = \rho'gz + p_0 \quad (11)$$

式中: p_0 为盖层荷载(饱和时用浮密度计算); ρ' 为填土的浮密度,根据资料取值 1.04 g/cm^3 ; z 为盖层以下填土的深度.填土的初始含水率分别选用22%,24%和26%;盖层厚度选用1.0,1.5和2.0 m 3种方案,得到不同盖层厚度和不同初始含水率填土条件下的临界深度 z_0 .可得土层的膨胀量为:

$$S = \int_0^{z_0} ds = \int_0^{z_0} \delta_{pi} dz = \int_0^{z_0} \xi [(ew_0 - f) \ln p(z) - iw_0 + h] dz \quad (12)$$

将系数 $\xi=93/96$, $e=0.3493$, $f=10.825$, $i=1.4852$, $h=45.05$, $\rho=1.04$, z_0 和式(11)代入式(12),得到的结果如下:盖层厚度为1.0 m时,填土初始含水率为22%,24%和26%的相应膨胀量为6.71,4.46和2.36 mm;盖层厚度为1.5 m时,相应的膨胀量为4.56,2.91和1.40 mm;盖层厚度为2.0 m时,相应的膨胀量为2.97,1.77和0.74 mm.

可见,填土区膨胀量随着填土含水率增加和盖层厚度的加大而减小,当盖层厚度为1.0 m时,膨胀量为2.36~6.71 mm;当盖层加厚到2.0 m时,膨胀量为0.74~2.97 mm.当填土初始含水率为26%时,膨胀量不足3 mm.为了减少从他处拖运非膨胀土的费用,应在允许膨胀量的范围内,选择最小盖层厚度,通过比较发现,选择非膨胀土覆盖层厚度为1.5 m、膨胀填土初始含水率为26%为最优化方案.

4 结 语

(1)通过膨胀土室内试验和数值拟合分析,提出了综合考虑初始含水率、初始干密度和上覆压力3个因素耦合变化的膨胀变形计算公式,用该计算式得到的膨胀率便于工程实践应用.

(2)利用拟合得到的公式计算了不同方案的压实素土填筑的渠道膨胀变形量,结果表明采用93%压实度和26%初始含水率的中膨胀土填筑填方渠道,在其上覆盖1.5 m左右厚度的非膨胀土,可以有效控制填方渠道的膨胀变形,得到最优的填筑效果.

参 考 文 献:

- [1] 蔡耀军, 阳云华, 何爱文, 等. 南水北调中线一期工程渠线工程地质工作概述[J]. 人民长江, 2007, 38(9): 1-4. (CAI Yao-jun, YANG Yun-hua, HE Ai-wen, et al. The engineering geology works in the canal of middle route project of South-to-North Water Transfer[J]. Yangtze River, 2007, 38(9): 1-4. (in Chinese))
- [2] 王宝田, 张福海. 膨胀土改良技术与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (WANG Bao-tian, ZHANG Fu-hai. Expansive soil improvement technology and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))
- [3] 徐永福, 吴正根, 刘传新. 膨胀土的击实条件与膨胀变形的相关性研究[J]. 河海大学学报, 1997, 25(3): 57-60. (XU Yong-fu, WU Zheng-gen, LIU Chuan-xin. Relativity between compaction conditions and swelling deformation of expansive soils[J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(3): 57-60. (in Chinese))
- [4] 徐永福. 宁夏膨胀土膨胀变形特征的试验研究[J]. 水利学报, 1997(3): 90-95. (XU Yong-fu. Test on the expansive characteristics of expansive soils in Ningxia[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(3): 90-95. (in Chinese))
- [5] 徐永福, 史春乐. 宁夏膨胀土的膨胀变形规律[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 95-98. (XU Yong-fu, SHI Chun-le. Research on the expansive characteristics of expansive soils in Ningxia[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(3): 95-98. (in Chinese))
- [6] 李献民, 王永和, 杨果林, 等. 击实膨胀土工程变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 826-830. (LI Xian-min, WANG Yong-he, YANG Guo-lin, et al. Test study on engineering deformation characteristics of compacted expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 826-830. (in Chinese))
- [7] 张爱军, 哈岸英, 骆亚生. 压实膨胀土的膨胀变形规律与计算模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1236-1241. (ZHANG Ai-jun, HA An-ying, LUO Ya-sheng. Swelling deformation and calculation methods of compacted soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1236-1241. (in Chinese))
- [8] 章为民, 王年香, 顾行文, 等. 膨胀土的膨胀模型[J]. 水利水运工程学报, 2010(1): 70-72. (ZHANG Wei-min, WANG

- Nian-xiang, GU Xing-wen, et al. An expansive model for expansive soil[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(1): 70-72. (in Chinese))
- [9] GBJ 112-87, 膨胀土地区和建筑技术规范[S]. (GBJ 112-87, Technical specifications for construction ground in expanding soil areas[S]. (in Chinese))
- [10] 张福海, 王保田, 刘汉龙. 压实膨胀土路基的膨胀变形规律研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 206-210. (ZHANG Fu-hai, WANG Bao-tian, LIU Han-long. Research on deformation disciplines of compacted expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 206-210. (in Chinese))
- [11] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Te-hong. The problems of expansive soils in engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))

Research on deformation disciplines of compacted expansive soil in Nanyang

WANG Shun, LI Tao-tao, WANG Lin, NIE Qiong

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper takes the Nanyang medium expansive soil at the Taocha-Shahe test zone as a study example. The compacted expansive soil's swelling deformation is discussed. And then, the linear regression analysis for expansive soil with different vertical loads, initial water content and dry density is carried out, and some results have been obtained. The results show that the swelling ratio is of hyperbolic relationship versus vertical loads in semi-logarithmic coordinates. Using the corresponding formulas to calculate the swelling deformation is feasible in actual project, and it is effective to restrain the deformation with certain thickness of non-expansive soil covering on the medium expansive soil slope. The research can supply scientific reference for the design and construction of expansive soil slope in the middle-route of the South-to-North Water Diversion Project.

Key words: South-to-North Water Diversion Project; compacted expansive soil; expansion ratio; initial moisture content; swelling deformation

征订《水利科技与经济》月刊

欢迎投稿 订 阅 刊 登 广 告

刊号: ISSN1006-7175
CN23-1397/TV

*《水利科技与经济》是中国核心期刊(遴选)数据库刊源,中国期刊网收录期刊,中国学术期刊(光盘版)全文数据库,美国《剑桥科学文摘》CSA 数据库刊源,俄罗斯《文摘杂志》AJ 数据库刊源,被美国《气象学与地球天体物理学文摘》网络数据库收录。

*《水利科技与经济》是国家新闻出版署、国家科委批准的正式科技期刊,是哈尔滨市水务科学研究院主办的综合性技术期刊,国内外公开发行,具有权威性高、信息量大、可读性强的特点,受到广大读者及水利经济界专家的欢迎。

*《水利科技与经济》的对象主要是从事水利水电建设的规划、勘测、设计、施工、科研、监理、生产运行和管理等方面人员,以及大专院校师生。

*《水利科技与经济》为月刊,月末(30日)出版,邮发代号 14-316;国内定价:每期 10 元,全年定价 120 元(含邮费),读者可通过邮局或本刊发行部订阅。

主管单位:哈尔滨市水务局

主 编:郭 胜

主办单位:哈尔滨市水务科学研究院

电 话:(0451)2711207-8205/8206

哈尔滨市水利规划设计研究院

传 真:(0451)82724300

哈尔滨市水利学会

联系人:杨 文