

南水北调中线工程膨胀土渠道保护层厚度研究

王 磊¹, 王东祥², 刘 巍¹, 冷星火¹, 赵 鑫³

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司 规划处, 湖北 武汉 430010; 2. 淄博市水利勘测设计院, 山东 淄博 250020; 3. 长江岩土工程总公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:为有效确定膨胀土渠道保护层厚度,以南水北调中线工程河南南阳境内膨胀土渠道为例,从平衡膨胀力和维持膨胀土含水率相对稳定两个方面,对中、强膨胀土进行了研究。结果表明:平衡膨胀力时所需的膨胀土保护层厚度,可根据膨胀土的膨胀率、天然密度和保护层填筑施工前的初始含水率,通过 K_0 应力状态下膨胀土的有荷膨胀率模型计算;根据现场试验数据的分析结果,水泥改性土的渗透系数不大于 10^{-5} cm/s 时,埋深 1 m 以下的膨胀土含水率已基本不受外部环境的影响。

关 键 词:膨胀土; 膨胀模型; 膨胀力; 保护层厚度

中图法分类号: TV67

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.17.017

膨胀土的胀缩性是因为其吸水膨胀、失水收缩引起的。因此,膨胀土含水率的变化是导致其胀缩的关键因素。膨胀土的胀缩特性,易引起土体强度降低、造成膨胀土工程边坡失稳;受约束的胀缩,会使以膨胀土为地基的构筑物发生变形破坏。目前,保护、隔离措施是工程上常采用的消除膨胀土胀缩危害的方法。

在南水北调中线工程膨胀土渠道中,消除膨胀土胀缩危害的处理措施是采用水泥改性土或非膨胀土进行换填保护。换填保护层的作用主要有:维持膨胀土相对稳定的含水率,压重、吸收膨胀土的膨胀变形,确保膨胀土渠坡以及以膨胀土为基础的构筑物避免因膨胀土胀缩变形危及工程安全。

膨胀土的自由膨胀率、自然密度(压实度)和初始含水率不同,其膨胀潜能也不同。因此,如何确定膨胀土保护层的厚度,既关系到工程安全,又影响工程投资。

本文以南水北调中线工程河南南阳境内膨胀土渠道为例,从平衡膨胀力和维持膨胀土含水率相对稳定两个方面,研究分析中、强膨胀土渠道保护层厚度的确定方法。

1 K_0 应力状态膨胀土膨胀模型

在实用膨胀模型研究方面,主要有两种:一种是在固结仪上试验得到的 K_0 应力状态膨胀模型^[1-3];另一种是通过三轴膨胀试验得到的三维非线性膨胀模型^[4-5]。考虑多因素耦合影响的三维非线性膨胀模型与 K_0 应力状态膨胀模型相比具有更高的精度,但是,有关三轴膨胀模型研究的成果不如 K_0 应力状态膨胀模型研究成果丰富,而且往往由于设备功能问题,无法对进水速率、进水量、轴向接触、轴向变形及体变测试进行严格控制。因此,就实用性而言,在仅考虑压实度、初始含水率及上覆荷载几个因素的情况下, K_0 应力状态膨胀模型已满足要求^[1-5]。

1.1 中膨胀土 K_0 应力状态膨胀模型

膨胀土膨胀力的大小与初始含水率、膨胀性(自由膨胀率)和压实度(天然密度)有关,“十一五”国家科技支撑计划课题“膨胀土(岩)地段渠道破坏机理及处理技术研究”提出了 K_0 应力状态中膨胀土的有荷膨胀率模型:有荷膨胀率与荷载的对数成较好的线性关系,其表达式为

$$\delta_{ep} = a + b\ln(1 + \sigma) \tag{1}$$

式中， δ_{ep} 为膨胀土有荷膨胀率，%； σ 为上覆荷载，kPa； a 、 b 为试验参数。

1.2 强膨胀土 K_0 应力状态膨胀模型

通过对中、强膨胀土的化学成份、微观结构等物理特性比较分析来看，中、强膨胀土并无本质区别，因此强膨胀土的有荷膨胀率模型同样可以采用式(1)来模拟。

为了寻找强膨胀土有荷膨胀率与初始含水率之间的关系，选取天然密度和自由膨胀率相近土样的试验数据进行拟合。不同荷载下，强膨胀土样有荷膨胀率试验成果见表 1 所示。

表 1 南阳强膨胀土原状样有荷膨胀率试验成果

含水率/%	不同竖向压力下的膨胀率/%				
	25kPa	50kPa	100kPa	150kPa	200kPa
31.8	-0.2	-0.7	-1.1	-1.5	-1.8
28.4	0.2	-0.4	-1.0	-1.7	-2.6
26.8	0.9	0	-0.9	-1.5	-2.2

不同初始含水率的强膨胀土有荷膨胀率随荷载变化的半对数拟合曲线如图 1 所示。

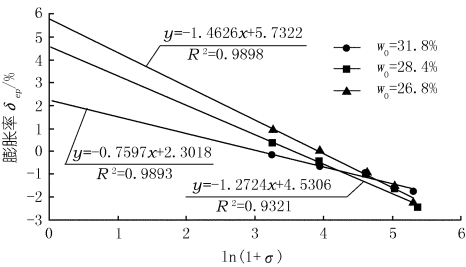


图 1 不同初始含水率强膨胀土有荷膨胀率随荷载变化关系

从图 1 可以看出，强膨胀土的有荷膨胀率与荷载的对数线性关系较好，采用式(1)来模拟相同膨胀率和自然密度下的强膨胀土有荷膨胀率与初始含水率的关系是可行的。图 1 中 3 条曲线的线性回归分析结果见表 2。

表 2 强膨胀土不同初始含水率下线性回归系数 a 、 b 及 R^2

含水率/%	a	b	R^2
31.8	2.3018	-0.7597	0.9893
28.4	4.5306	-1.2724	0.9321
26.8	5.7322	-1.4626	0.9898

以初始含水率为横坐标， a 、 b 为纵坐标，得到 a 、 b 分别随初始含水率的变化关系如图 2 所示。

可见，参数 a 、 b 与初始含水率的变化呈良好的线性关系，经线性回归可得强膨胀土有荷膨胀率与初始含水率和上覆荷载的关系，见(2)式。“十一五”期间研究得出的南阳中膨胀土有荷膨胀率与初始含水率和

上覆荷载的关系见(3)式。

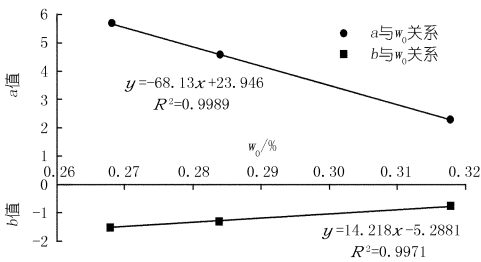


图 2 a 、 b 随初始含水率的变化关系曲线

$$\delta_{ep强} = (-68.13w_0 + 23.946) + (14.218w_0 - 5.2881)\ln(1 + \sigma) \tag{2}$$

$$\delta_{ep中} = (-51.9w_0 + 21.047) + (0.9883w_0 - 2.5932)\ln(1 + \sigma) \tag{3}$$

2 膨胀土保护层厚度研究

2.1 平衡膨胀力

膨胀土在有侧限条件下充分吸水，使其保持不发生竖向膨胀所需施加的最大压力值即为膨胀力。中、强膨胀土不同初始含水率的膨胀力可根据 K_0 应力状态下膨胀土的有荷膨胀率模型(2)、(3)式求得。不同初始含水率下，中、强膨胀土膨胀力大小见表 3。

表 3 不同初始含水率下中、强膨胀土膨胀力

含水率/%	上覆竖向荷载/kPa		含水率/%	上覆竖向荷载/kPa	
	中膨胀土	强膨胀土		中膨胀土	强膨胀土
0.25	30.21	52.94	0.30	9.86	29.85
0.28	15.65	40.5	0.32	6.03	17.25

对于渠道工程，衬砌面板厚度小，若直接在中、强膨胀土面层施工，将无法达到限制土体膨胀所需的压力。因此，一般换填一定厚度的非膨胀土来满足这一要求。当中、强膨胀土保护层材料为水泥改性土（密度取值为 1.9 g/cm^3 ），且中、强膨胀土有荷膨胀率为 0 时，则所需水泥改性土的换填厚度与中、强膨胀土初始含水率之间的关系如图 3 所示。

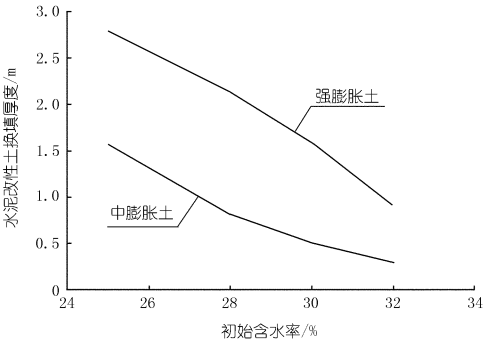


图 3 中、强膨胀土初始含水率与水泥改性土换填厚度关系

从表 3 和图 3 可以看出,当中、强膨胀土天然密度、初始含水率相同,且其有荷膨胀率为 0 时,强膨胀土需要的上覆荷载(水泥改性土换填厚度)相对较大;中、强膨胀土初始含水率高,当其有荷膨胀率为 0 时,需要的上覆荷载小。因此,仅从平衡膨胀土膨胀力角度看,膨胀土保护层填筑施工前应尽量维持膨胀土相对较高的含水率。

膨胀土保护层厚度,可根据膨胀土的膨胀率、天然密度和保护层填筑施工前的初始含水率,通过 K_0 应力状态下膨胀土的有荷膨胀率模型初步确定。南水北调中线工程总干渠陶岔渠首至鲁山南段渠道过水断面,中膨胀土的换填厚度一般不小于 1.5 m,强膨胀土的换填厚度一般不小于 2 m。

2.2 维持膨胀土稳定含水率

保护层的作用主要是维持膨胀土的稳定含水率。为验证膨胀土渠坡采用水泥改性土换填后,膨胀土体内含水量的变化情况,在南水北调中线总干渠某桩号渠道一级马道处,埋设了水份温度传感器对水泥改性土和膨胀土的水份变化情况进行了观测。该桩号换填水泥改性土厚度为 2 m,水泥改性土渗透系数不大于 10^{-5} cm/s。

监测结果表明,表层深度 0.5 m 以内的水泥改性土含水量受大气影响发生变化,但到一定深度后(埋深约 1 m 后),水泥改性土的含水量基本不受大气影响;被保护的膨胀土含水量基本不受大气环境的影响,土体含水量维持稳定。因此,水泥改性土起到了很好地隔离大气和保护膨胀土的作用,有效阻止了膨胀土体内水份与大气交换,使膨胀土土体含水量保持稳定。

从保护层维持膨胀土稳定含水率的作用来看,当膨胀土保护材料采用水泥改性土,且水泥改性土的渗透系数不大于 10^{-5} cm/s 时,保护层的厚度不宜小于 1 m。

3 结 论

本文以南水北调中线河南南阳境内中、强膨胀土

渠道为研究对象,从平衡膨胀力和维持膨胀土相对稳定的含水率两个方面,研究分析了中、强膨胀土渠道保护层厚度。根据研究成果,可得以下结论。

(1) 根据强膨胀土不同竖向上覆荷载和初始含水率下体积膨胀率试验数据,研究发现强膨胀土 K_0 应力状态下的膨胀模型,同样可以采用“十一五”期间研究得到的 K_0 应力状态下中膨胀土膨胀模型表示。

(2) 中、强膨胀土膨胀力受膨胀率、初始含水率的影响较大;当初始含水率相同时,膨胀力随着膨胀率的增大而增大;当膨胀率相同时,膨胀力随着初始含水率的增大而减小。

(3) 膨胀土保护层厚度,可根据膨胀土的膨胀率、天然密度和保护层填筑施工前的初始含水率,通过 K_0 应力状态下膨胀土的有荷膨胀率模型初步确定。

(4) 从保护层维持膨胀土稳定含水率的作用来看,当膨胀土保护材料采用水泥改性土,且水泥改性土的渗透系数不大于 10^{-5} cm/s 时,保护层的厚度不宜小于 1 m。

(5) 结合南阳盆地中、强膨胀土的有荷膨胀率试验数据和本文研究成果来看:中膨胀土初始含水率不小于 25% 时,水泥改性土换填厚度不宜小于 1.5 m;强膨胀土初始含水率不小于 28% 时,水泥改性土换填厚度不宜小于 2 m。

参考文献:

- [1] 韦秉旭,周玉峰,刘义高,等. 给予工程应用的膨胀土本构模型[J]. 中国公路学报,2007,3(2):18-23.
- [2] 丁振洲,李利晟,郑颖人. 膨胀土增湿变形规律及计算公式[J]. 工程勘察,2006,(7):13-16.
- [3] 黄斌,何晓民,谭凡. K_0 应力状态膨胀土膨胀模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(增刊1):442-447.
- [4] 刘祖德,王园. 膨胀土浸水三向变形研究[J]. 武汉水利电力大学学报,1994,27(6):616-621.
- [5] 李振,周俊,邢一川. 三轴应力状态下膨胀土增湿变形特性[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(增刊1):3088-3095.

(编辑:徐诗银)

(下转第 78 页)



[6] 徐波,夏辉. 某混凝土重力坝温度线膨胀系数反演分析[J]. 水力发电,2010,36(10):34-37.
大学出版社,2011.

(编辑:郑毅)

[7] 卓金武. MATLAB 在数学建模中的应用[M]. 北京:北京航空航天大学

Inversion analysis on linear expansion coefficient of high arch dam concrete based on non – stress meter

WU Xianwei¹,BAO Ting²,LI Jinhe³

(1. *Anhui Jinzhai Pumped Storage Co. , Ltd, Jinzhai 237300, China*; 2. *North China Municipal Engineering Design & Research Institute Hefei branch, Hefei 230000, China*; 3. *China Three Gorges Corporation, Yichang 443002, China*)

Abstract: Aiming at the non – strict stress – free state existed in the non – stress meter embedded in the high arch dam, the structure and embedding ways of the square and circular tubes are designed, and they are compared with the common conical – tube. The in – situ tests show that the concrete linear expansion coefficient of conical – tube is smaller than that of square and circular tubes. The least square method, statistical regression method and genetic algorithm are adopted for the inversion analysis of the measured data of non – stress meter. The results of statistical regression method and the bionic genetic algorithm are basically identical; however, the results of least squares are different from the above two methods and it is easy to be affected by subjective factors.

Key words: high arch dam; non – stress meter; field experiment; linear expansion coefficient; inversion analysis

(上接第 69 页)

Research on protection layer thickness for expansive soil channel of Middle Route Project of South – to – North Water Diversion

WANG Lei¹, WANG Dongxiang², LIU Wei¹, LENG Xinghuo¹, ZHAO Xin³

(1. *Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China*; 2. *Zibo Water Conservancy Design Institute, Zibo 250020, China*; 3. *Changjiang Geotechnical Engineering Corporation (Wuhan) 430010, China*)

Abstract: For effectively determining the protection layer thickness for expansive soil channel, a typical channel of Middle Route Project of South – to – North Water Diversion in Nanyang area, Henan Province is selected as an example, and the medium and strong expansive soil are studied in terms of resisting expansion force and the water content maintaining soil body stable. The results show that the protection layer thickness required to resist the expansion could be determined by loaded expansion model of K0 stress condition, the model input parameters include expansion ratio, natural density and initial water content before protection layer construction. According to analysis results of the in – situ data, when the permeability coefficient of cement – modified soil is less than 10^{-5} , a protection layer with thickness of 1m could protect the water content of expansive soil from the influence of outside environment.

Key words: expansive soil; expansion model; expansion force; protection layer thickness