

文章编号: 1000-7598 (2014) 03-871-10

增湿条件下膨胀土隧道衬砌破坏数值分析

曾仲毅¹, 徐帮树¹, 胡世权², 陈 诚¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061; 2. 中铁十四局集团第二工程有限公司, 山东 泰安 271000)

摘 要: 针对小河沟膨胀土隧道降雨增湿塌方现象, 以围岩含水率分布变化引起膨胀应力场为主要研究内容, 展开增湿对隧道支护结构的影响研究。首先, 利用热传导能量平衡方程与孔隙渗流连续方程数学描述相似性, 推导出热传导膨胀模拟增湿膨胀的替代方程。然后, 结合室内试验和文献资料, 率定膨胀土膨胀力及渗流参数。最后, 在正确考虑地质构造影响的基础上运用有限差分软件 FLAC^{3D} 热-力耦合模块进行建模计算, 分别对不同膨胀力模型的增湿过程进行仿真模拟, 得出支护结构受力变形随含水率分布及膨胀力大小的变化规律。分析得到了对隧道支护结构造成不良影响的关键含水率和膨胀力值。研究成果可以有效指导膨胀性黄土隧道支护设计和变形控制。

关 键 词: 膨胀土; 隧道; 热力耦合; 降雨增湿; 膨胀力

中图分类号: U451.2 **文献标识码:** A

Numerical analysis of tunnel liner failure mechanism in expansive soil considering water-increased state

ZENG Zhong-yi¹, XU Bang-shu¹, HU Shi-quan², CHEN Cheng¹

(1. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250012, China;

2. Second Engineering Co., Ltd., China Railway Fourteenth Group Corporation, Tai'an, Shandong 271000, China)

Abstract: In light of the collapse of an expansive soil tunnel owing to rainfall infiltration, swelling stress field caused by the change in the moisture content distribution of surrounding soil was taken into consideration to solve the problem. At first, due to the similarity of continuum heat conduction energy-balance equation and seepage continuity equation, an alternative expansive equation is derived based on the theory of heat conduction expansive to simulate water-increased expansion of expansive soil, and then determine the swelling force and seepage parameters by laboratory test and engineering simulation. Finally, considering the proper geologic factors, a numerical model of tunnel is established by means of thermal-mechanical coupling of FLAC^{3D}. And by the simulations of tunnel with different swelling forces under water-increased state, relation curves are acquired between liner deformation and moisture content, swelling force. According to the above analysis, turning points of moisture content and swelling force to prevent liner from failure are proposed, which can effectively guide the design and deformation controlling of tunnel liner in expansive soil.

Key words: expansive soil; tunnel; thermal-mechanical coupling; rainfall infiltration; swelling force

1 引 言

膨胀土是自然地质变化过程中, 形成的一种对建筑工程有特殊危害的地质体, 它有胀缩性、裂隙性和超固结性的工程性质, 在我国分布十分广泛, 每年因膨胀土造成的经济损失估计达数百亿元。膨胀土工程危害性表现在土中含水率变化时其富含的膨胀性岩土矿物会产生显著的湿胀干缩变形, 对路基、边坡、隧道支护结构造成不利影响。国内外学

者已对膨胀土增湿过程中的工程特性做了一定研究^[1-5]。丁振洲等^[4]试验研究了自然膨胀力随增湿程度变化规律以及膨胀力随增湿程度、干密度、初始含水率等因素的变化规律。朱豪等^[5]试验研究得出, 膨胀力的对数与初始含水率以及干密度之间满足线性关系, 提出预测膨胀力的计算公式。在工程应用研究方面, 刘龙武等^[6]研究了膨胀土边坡路堑含水率、膨胀量等变化特征。刘义高等^[7]利用有限差分方法, 对膨胀土路堑边坡各种增湿状态仿真模拟, 并

收稿日期: 2013-03-29

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(No.50909056); 山东省自然科学基金青年基金(No.ZR2011DQ008)。

第一作者简介: 曾仲毅, 男, 1989 年生, 硕士, 研究方向为岩土工程数值计算与工程应用。E-mail: fengzhilg@163.com

通讯作者: 徐帮树, 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 研究方向为岩土工程数值计算理论与应用及 GIS 软件系统开发与集成。E-mail: xubangshu@sdu.edu.cn

实现膨胀土各种土性参数随含水率的同步变化, 以此研究含水率与地质构造对边坡稳定性的影响。膨胀土对隧道工程的影响研究方面的研究较少, 周坤^[8]对膨胀土吸水膨胀后对衬砌作用做了一定研究, 但没有考虑围岩增湿分布对膨胀土膨胀力的影响。

综合分析发现, 对于膨胀土的研究多是室内试验研究, 结合工程实践应用领域研究尚处于初级阶段, 特别是膨胀土隧道工程领域方面的研究较少。本文结合在建的膨胀土隧道工程实例, 对膨胀土围岩增湿引起的衬砌变形受力做了一定研究和探索。

众所周知, 含水率变化是影响膨胀土力学性质的主要因素, 但目前大多数膨胀土隧道工程并未很好地研究膨胀土围岩湿度场变化, 以及湿度场变化引起的膨胀变形对隧道结构的影响。本文利用温度应力场模拟膨胀土增湿产生的湿度应力场, 借鉴膨胀力随增湿程度变化规律已有的研究成果, 结合室内试验和现场地质勘探数据, 针对山西新建太兴铁路小河沟膨胀土隧道降雨增湿导致隧道初期支护破坏塌方的状况, 利用有限差分法进行热力耦合计算, 并对不同膨胀力模型的增湿过程进行仿真模拟, 分析降雨增湿对膨胀土隧道衬砌的影响。

2 温度场模拟湿度场理论基础

膨胀土围岩膨胀力作用主要由含水率变化引起, 因此, 分析膨胀力的作用效果首先要分析土中含水率的变化情况。区域土体内的含水率的变化一般通过基于 Darcy 定律的瞬态渗流分析进行模拟^[9]。考虑到温度场热传导问题类似于渗流问题, 即在某个热源作用下, 物体内会形成一个受热传导方程控制的温度变化场。而在某个水源作用下, 土体内也会形成一个受水分扩散控制的湿度变化场, 并且渗流问题的控制方程与温度场热传导的控制方程在数学形式上相似。同时, 膨胀土吸水后产生体积膨胀, 恰好类似材料的温度升高产生体积膨胀效应, 利用温度场热传导问题的热膨胀特性可以很好地模拟膨胀土的膨胀特性。因此, 可利用数值软件 FLAC^{3D} 的热分析模块模拟渗流。如下为热传导问题与渗流问题控制方程的对比情况。

热传导问题热能平衡方程如下:

$$-q_{i,i} + q_v = \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: q_i 为热流传输速度 (W/m^2); q_v 为单位体积内的产热强度 (W/m^3); ρ 为材料的密度; C_v 为材料的比热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$), 定义为单位质量物体每增加 (或降低) 1°C 需吸收 (或释放) 的热量; T 为温度。

Fourier 热传导方程如下:

$$q_i = -\lambda_i T_{,i} \quad (2)$$

式中: λ 为热传导系数 $\text{W}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ (注: 方程右端对 i 不求和)。材料内部无热源时 $q_v = 0$, 将式 (2) 代入式 (1) 有如下热传导的微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

降雨入渗应属于非饱和和渗流范畴的问题。对于三维的非饱和和渗流问题有如下体积连续方程 (不考虑流体压缩):

$$-\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) dx dy dz = \frac{\partial V_w}{\partial t} \quad (4)$$

式中: v 为流速; V_w 为土单元体中水的体积。方程左边为单元体进出水体积差, 方程右边为单元体中单位时间的水体积变化量。渗流问题的 Darcy 定律如下:

$$v_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (5)$$

式中: k 为渗透系数; h 为总水头。因此, 式 (4) 整理为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{\partial (V_w / V_0)}{\partial t} \quad (6)$$

式中: $V_0 = dx dy dz$ 。土单元体单位时间由净法向应力 $\sigma_v - u_a$ 变化和基质吸力 $u_a - u_w$ 变化造成的水体积变化根据如下方程 (7) 确定^[10]。

$$\frac{\partial (V_w / V_0)}{\partial t} = m_{1k}^w \frac{\partial \sigma_v - u_a}{\partial t} + m_{2k}^w \frac{\partial u_a - u_w}{\partial t} \quad (7)$$

式中: σ_v 为体积应力; u_a 为孔隙气体压力; u_w 为土基质吸力; m_{1k}^w 和 m_{2k}^w 为相应于法向应力和基质吸力变化的水体积系数。在非饱和和渗流过程中, 一般假设总应力随时间变化为 0, 即 $\partial \sigma_v / t = 0$, 假设孔隙气压力与大气压相同或随时间变化不大, 则 $\partial u_a / t = 0$ 。而水头 h 取重力水头和基质吸力水头之和, 其表达式为

$$h = y - u_w / (\rho_w g) \quad (8)$$

式中: ρ_w 为水的密度。

因此, 式 (6) 整理为如下方程:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial u_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial u_w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial u_w}{\partial z} \right) \right] \cdot \left(-\frac{1}{\rho_w g} \right) + \frac{\partial k_y}{\partial y} = -m_{2k}^w \frac{\partial u_w}{\partial t} \quad (9)$$

当土中含水率不接近饱和含水率时, 基质吸力水头随含水率的变化是显著的, 在这种情况下, 方程 (9) 中左边最后一项与左边括号中的第 2 项相比

可以忽略不计^[10]。设基质吸力水头 $u = -u_w / (\rho_w g)$, 因此, 非饱和渗流问题微分方程化简如下:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho_w g m_{2k}^w \frac{\partial u}{\partial t} = C_w \frac{\partial u}{\partial t} \quad (10)$$

式中: C_w 为比水容量(1/m), 即单位体积的土体内, 土壤基质势(或吸力)下降或上升一个单位水头时, 土壤可释放或吸收的水量。对比式(3)与式(10)可知热传导问题与渗流问题的微分方程在形式上具有相似性, 而且各自相关变量的物理含义也有相似性^[11], 例如温度 T 相对应于基质吸力水头 u , 热流传导定律对应 Darcy 定律, 水流量对应热流量, 水流速对应热流密度, 渗透系数对应导热系数, 比水容量对应比热密度。因此, 在用热传导问题代替渗流问题时只需将对应参数互换, 即 $\lambda \sim k$, $\rho C_v \sim C_w$ 。求解热传导方程的温度场 T 即是渗流问题的基质吸力场 u , 通过 u 可求出单位土体水的体积变化量为 $\Delta\omega = C_w \Delta u$, 因此, 可求解出湿度场。热力学的热膨胀方程表述如下:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \alpha \Delta T \delta_{ij} \quad (11)$$

式中: α 为热膨胀系数(1/°C); $\Delta\varepsilon_{ij}$ 为温度变化引起的应变增量; δ_{ij} 为 Kronecker 记号。

湿度影响膨胀土的变形的方程表述如下:

$$\Delta\varepsilon_{ij}^w = \beta \delta_{ij} \Delta\omega = \beta \delta_{ij} C_w \Delta u \quad (12)$$

式中: β 为膨胀土的膨胀系数; $\Delta\omega$ 为单位体积的土含水体积变化量。联立式(11)、(12)就可得

$$\alpha = \frac{\beta \Delta\omega}{\Delta T} = \frac{\beta C_w \Delta u}{\Delta T} \quad (13)$$

由于温度场的热膨胀性质与膨胀土遇水膨胀的性质的数学表述一致, 通过参数换算就可借助于温度场来模拟湿度场, 通过热-力耦合分析, 从而得到土体中湿度变化时膨胀土变形受力特性。

3 工程概况

新建太兴铁路 TXXS-2 标段小河沟隧道位于山西省太原市娄烦县向阳村附近, 该段为黄土梁、崩地貌, 山峰相连, 冲沟发育, 多呈“V”字形, 地表多为种植土, 出露巨厚的第四系上更新统 (Q_3^{col+al}) 风积冲积形成的砂质黄土, 具有 II 级自重湿陷性, 湿陷最大深度为 13 m, 土呈黄褐色, 松散~密实, 稍湿, 成分以砂质黄土为主, 层厚 > 50 m, 承载力 $\sigma = 150 \sim 200$ kPa; 在地表下 20~60 m (洞身范围) 为上第三系 (N) 膨胀性黄土, 膨胀潜势等级为中, 土呈红褐色, 硬塑, 结构致密, 呈菱形状, 土内分

布有裂隙, 斜交剪切裂隙较发育, 由细腻的胶体颗粒组成, 断口光滑, 局部夹钙质结核。隧道进出口都为黄土所覆盖。隧道为双线隧道, 全长为 1 803 m, 最大埋深约为 82 m, 最小埋深为 5 m。施工采用三台阶七步预留核心土开挖工法, 2011 年 7 月施工至 DK75+190 附近发生大塌方, 埋深为 28 m, 位于偏压地带, 该断面的地质情况如图 1 所示。

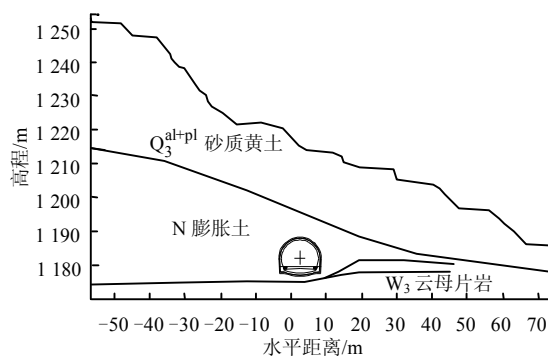


图1 隧道塌方段地质断面图
Fig.1 Geological profile of tunnel in collapse area

自 2011 年 7 月份进入雨季以来, 连续降雨, 其中 28—29 日, 降雨量较大达到 37.0~49.3 mm, 30 日上午发现隧道洞外 DK75+180~DK75+245 段地表出现可见的裂纹, 同时洞内 DK75+220~DK75+235 里程段初期支护有轻微纵向开裂变形, 并有水滴。施工方采取措施对掌子面挂网喷锚封闭, 加强洞内监测及地表观察, 对 DK75+222.4~DK75+216.4 段初支增加临时支撑及斜向支撑。30 日下午至晚间, 地表裂缝急剧加大, 洞内初期支护开裂明显, 监控量测数据显示拱顶下层及水平收敛均不同程度加大。7 月 31 日凌晨, DK75+240~DK75+260 段初期支护变形加剧, 拱腰处的喷射混凝土开始剥蚀、掉块, 初支钢架扭曲变形, 临时支撑弯曲变形, 监控录像显示初期支护喷射混凝土开始逐渐剥落, 掉块, 几分钟之后, 支护突然垮塌, 整个初期支护段和二衬台车完全被土体压埋, 土体涌入了到二次衬砌端头, 如图 2 所示。同时地表 DK75+160~DK75+270 段山体发生坍塌、滑移, 坍塌深度达 5 m 以上, 如图 3 所示。



图2 隧道洞内塌方
Fig.2 Tunnel collapse



图3 洞外地表坍塌
Fig.3 Surface collapse

4 数值计算

4.1 地质力学参数

小河沟隧道试验段主要分布第四系上更新统(Q_3^{col+al})风积冲积形成的砂质黄土和上第三系(N)膨胀性黄土,云母片岩,前期地质勘探和土工试验所得地质参数如表1所示。

表1 各层土物理力学性质参数

Table 1 Physico-mechanical properties of soils

土层	密度 (g/cm ³)	土颗相对 密度 G_s	含水率/%	孔隙比 e	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 (°)	渗透系数 (m/d)
砂质黄土	1.790	2.69	17.9	0.77	7.56	0.35	21	27	1.2
膨胀土	1.916	2.71	16.7	0.65	8.41	0.35	25	30	0.5
云母片岩	2.020	2.80			60.00	0.33	24	33	0.2

4.2 膨胀力与膨胀系数的确定

膨胀力是指土体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压力值。在此过程中,压力值大小随含水率增加而变化。谢云^[12]、朱豪^[5]、丁振洲^[4]、周葆春^[13]等的研究表明,影响膨胀土膨胀力大小的内部因素主要有膨胀土矿物组成、级配以及自由膨胀率,外部因素主要有土的初始含水率、干密度。为研究膨胀土的性质特别是膨胀特性,对本工程的膨胀土进行了钻孔勘测,进行了阳离子交换、蒙脱石含量测定和膨胀土自由膨胀率测定等一系列的试验,试验结果如表2所示。

表2 膨胀土膨胀性试验结果统计

Table 2 Results of swelling test of expansive soil

钻孔 编号	孔口标高 /m	深度 /m	阳离子交换 量 CEC (mmol/kg)	蒙脱石 含量 M /%	自由膨 胀率 FZ /%	膨胀土 初判 $FZ \geq 40$	膨胀潜 势分级
1 [#]	1 207.8	27.0	103.6	29.33	80	是	中等
		35.0	94.8	25.33	70	是	中等
2 [#]	1 221.9	42.5	88.4	25.33	80	是	中等
		46.6	147.4	31.00	87	是	中等
		37.0	113.1	26.00	69	是	中等
3 [#]	1 223.5	43.0	113.1	24.00	80	是	中等
		49.0	103.6	28.00	79	是	中等

基于膨胀土膨胀力的大量试验研究,以及较多的工程实践可借鉴的考虑,本工程膨胀土膨胀力的

确定,主要依据膨胀土蒙脱石含量、自由膨胀率、初始含水率试验并结合前人的研究成果^[14],通过工程类比,确定其膨胀力的大致变化范围。

经比较文献[5]中膨胀土与本工程膨胀土(见表3)参数,可知文献[5]工程土样参数与本工程土样的物理参数很相近,因此,根据其研究所得膨胀力与初始含水率的关系曲线和膨胀力与干密度的关系曲线,可求得本工程膨胀土膨胀力的参考值。最终,通过其它相关工程试验数据的比选,确定本工程膨胀土膨胀力可能取值范围为100~180 kPa。

表3 膨胀土物理参数对比表

Table 3 Comparison of physical parameters of expansive soils

土样	天然 密度 (g/cm ³)	天然含 水率 /%	液限	塑限	自由膨 胀率 /%	干密度 (g/cm ³)	膨胀性矿物 含量
文献[5] 中土样	1.85	26.6	50.1	26.8	82	1.46	蒙脱石占 16%~22%, 高岭石 8%
本工程 土样	1.92	16.7	49.5	20.5	69~87	1.65	蒙脱石含量 24%~31%

文献[4]研究了增湿过程中膨胀土膨胀压力随含水率变化的曲线,指出在一定范围内含水率与膨胀压力基本呈线性变化,对于初始含水率为15%的土体,在含水率上升到23%时,膨胀力就已发挥了90%以上,后期随含水率的增加膨胀力变化缓慢,且不呈线性变化。本工程初始含水率为16.7%,塌方后测得洞内土含水率为22.8%。假定本工程含水率达22.8%时,其膨胀力发挥了100%,根据其线性关系,数值计算中膨胀力与温度的关系如下:

$$\Delta P_s = 3K\Delta T\alpha \quad (14)$$

式中: ΔP_s 为膨胀力增量; K 为土的体积模量; ΔT 为温度变化量; α 为膨胀系数。通过热力场模拟湿度场,则含水率变化可表示为 $C_w\Delta T(1+e)/G_s$, 若初始含水率为 ω_0 , 则可得含水率有如下计算公式:

$$\omega = \frac{C_w\Delta T(1+e)}{G_s} + \omega_0 \quad (15)$$

现场渗流过程中隧道含水率变化介于16.7%~22.8%之间,从 Fredlund^[15]用颗粒分析试验得出的土-水特征曲线中可求得当含水率介于16.7%~22.8%时 $C_w \approx 0.0846 \text{ m}^{-1}$, 设 $T_0 = 0$ 对应于初始含水率 $\omega = \omega_0 = 16.7\%$ 。最终含水率为22.8%,通过式(15)可以得到对应的温度 $T_1 = 1.184$, $\Delta T = T_1 - T_0 = 1.184$, 从而可依据膨胀力 ΔP_s 由式(15)计算出热膨胀系数 α 的值。可得不同膨胀力对应的膨胀力大小,如表4所示。

表4 不同膨胀力对应的膨胀系数

Table 4 Expansion ratios of different swelling pressures

膨胀力/kPa	100	110	120	130	140	150	160	170	180
膨胀系数/ 10^{-3}	3.01	3.32	3.62	3.92	4.22	4.52	4.82	5.12	5.43

4.3 数值试验边界条件与有限元模型

数值试验选取塌方断面为对象进行三维数值分析。为减小边界效应的影响，模型的左、右及下边界距离取5倍的隧道的开挖直径，即左、右边界为60 m，下边界为50 m，上边界为地表，隧道轴线方向取1 m。

数值试验中采用热传导模拟渗流，因此，采用热-力耦合（单向耦合）计算方法。围岩力学模型采用摩尔-库仑弹塑性本构模型，左、右、前、后边界和下边界均为法向约束，上边界为自由边界。围岩的热力学模型采用各向同性的热传导模型，下边界和左、右、前、后为绝热边界条件，上表面设置为恒温边界 T_s ，因为上表面降雨，可认为含水率达饱和含水率，据此可通过式（15）求出 T_s 。热传导初始条件（初始温度场）设置为 $T_0=0$ 。非饱和和渗流中，渗透系数是基质吸力的函数，可根据 Gardner 等在大量试验结果基础上提出的用以描述非饱和土渗透系数与吸力之间关系的经验公式求得^[16-17]，经计算在其渗透系数变化范围不超过饱和渗透系数的25%，因此，为简化计算，本次数值试验不考虑渗透系数随基质吸力的变化。计算模型的局部截图如图4所示。

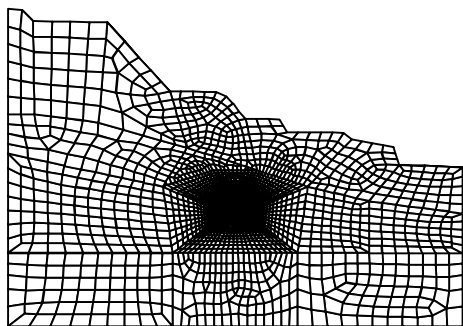


图4 数值模型
Fig.4 Numerical model

4.4 支护参数选取

小河隧道的断面采用的是V级围岩加强（黄土）复合式衬砌断面设计，隧道初期支护主要由间距80 cm的20b工字钢拱架（含仰拱）和厚25 cm的C20喷射混凝土、钢筋网和系统锚杆组成，系统锚杆为边墙普通砂浆锚杆。每榀钢拱架之间用 $\phi 22$ mm的钢筋连接，并与超前注浆小导管或者超前锚杆焊为一体，与围岩密贴形成承载结构。

为简化计算，将由初期支护钢拱架、钢筋网和喷射混凝土构成的初期支护和临时仰拱按照弯矩等效为相应厚度的材料，等效后利用壳单元模拟初期支护，其等效后的刚度计算如下式：

$$EI = E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 \quad (16)$$

式中： E 为等效后梁单元的弹性模量； E_1 为喷射混凝土的弹性模量； E_2 为钢筋网的弹性模量； E_3 为钢拱架的弹性模量； I 为等效支护结构抗弯惯性矩； I_1 为原设计喷射混凝土层抗弯惯性矩； I_2 为原设计衬砌中钢筋的抗弯惯性矩； I_3 为原设计钢拱架的抗弯惯性矩。等效后梁单元的计算参数见表5。

表5 等效的梁单元计算参数

Table 5 Calculation parameters of equivalent beam element

名称	密度 (g/cm^3)	弹性模量 (GPa)	泊松比	厚度 (cm)	惯性矩 (cm^4)
等效初衬	2.5	30.36	0.25	30	2.25×10^6
等效临时仰拱	2.5	43.41	0.25	20	6.67×10^5

4.5 试验工况设计

模拟的过程首先是初始自重应力场的平衡，然后进行隧道开挖模拟，形成最初的隧道开挖后的应力场和位移场，之后设置热力边界条件，打开热力耦合计算模式模拟渗流和膨胀性作用。

隧道采用的是台阶法开挖，平衡后的初始自重应力场和开挖平衡后的应力场如图5、6所示。

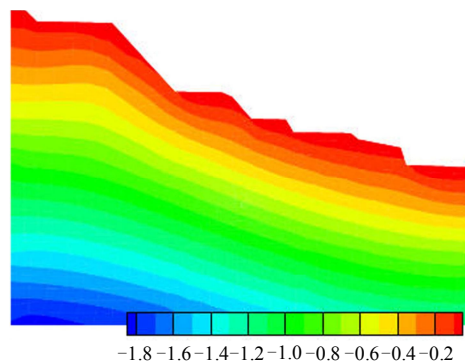


图5 竖向自重地应力（单位：MPa）
Fig.5 Vertical geostresses before excavation(unit: MPa)

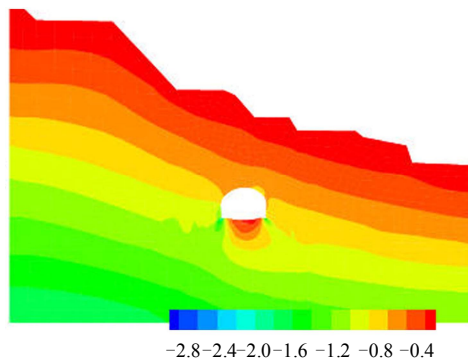


图6 开挖后垂直地应力（单位：MPa）
Fig.6 Vertical geostresses after excavation(unit: MPa)

隧道开挖稳定后，开始模拟膨胀土围岩在降雨入渗增湿条件下对隧道的影响，即热-力耦合计算分析。降雨入渗造成岩体含水率变化的过程是一种瞬

态变化的过程,不同的时间对应不同的含水率分布,产生不同的应力分布,在降雨入渗过程中,通过监

控隧道顶部围岩含水率,得到不同阶段含水率分布对应隧道的位移、应力状态,如图7~10所示。

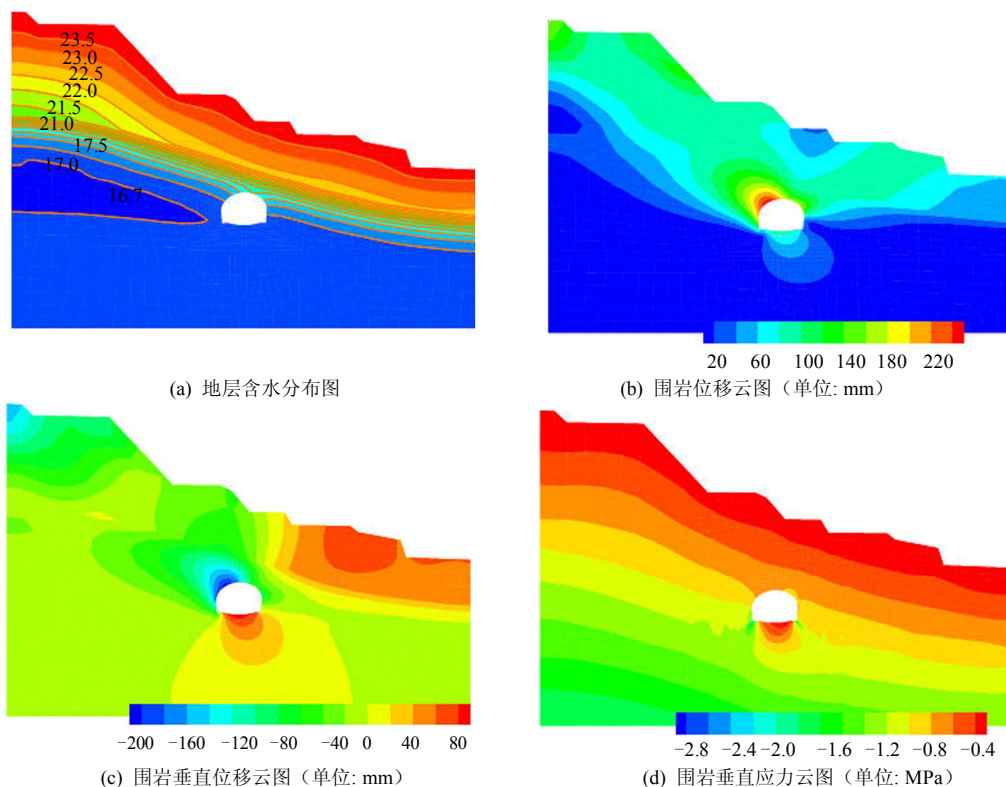


图7 拱顶围岩含水率达18.2%时湿度分布及位移应力云图

Fig.7 Nephograms of moisture content, displacement and stress of surrounding rock when moisture content at vault area reaches 18.2%

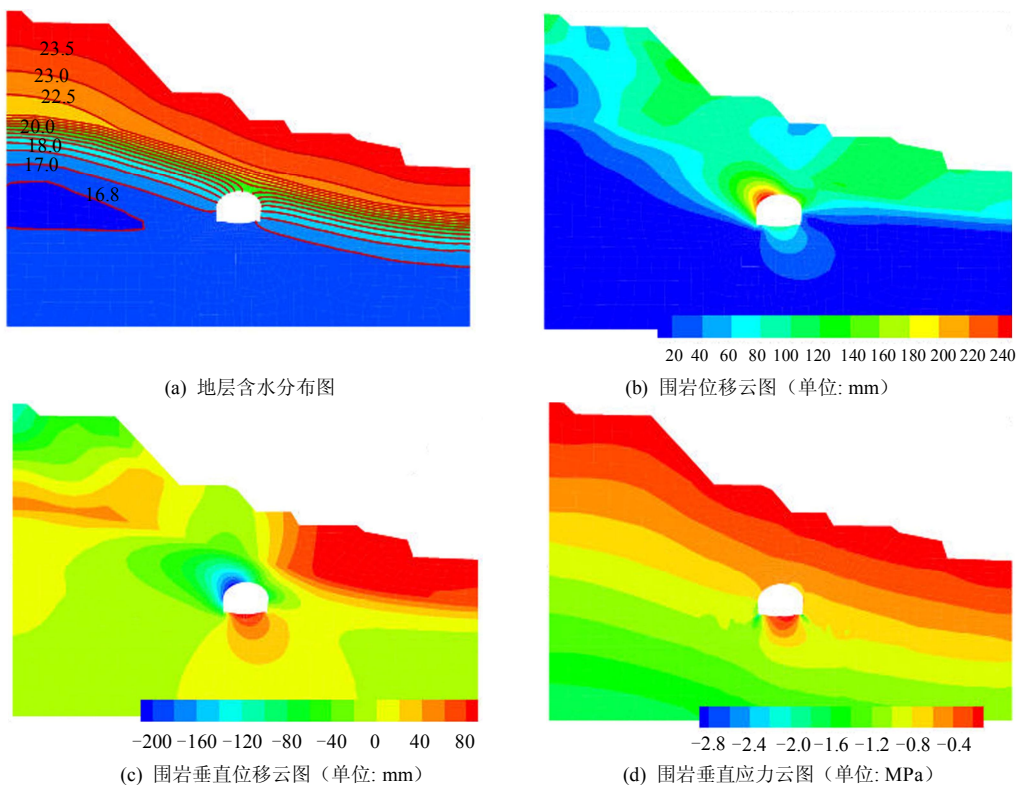


图8 拱顶围岩含水率达19.8%时湿度分布及位移应力云图

Fig.8 Nephograms of moisture content, displacement and stress of surrounding rock when moisture content at vault area reaches 19.8%

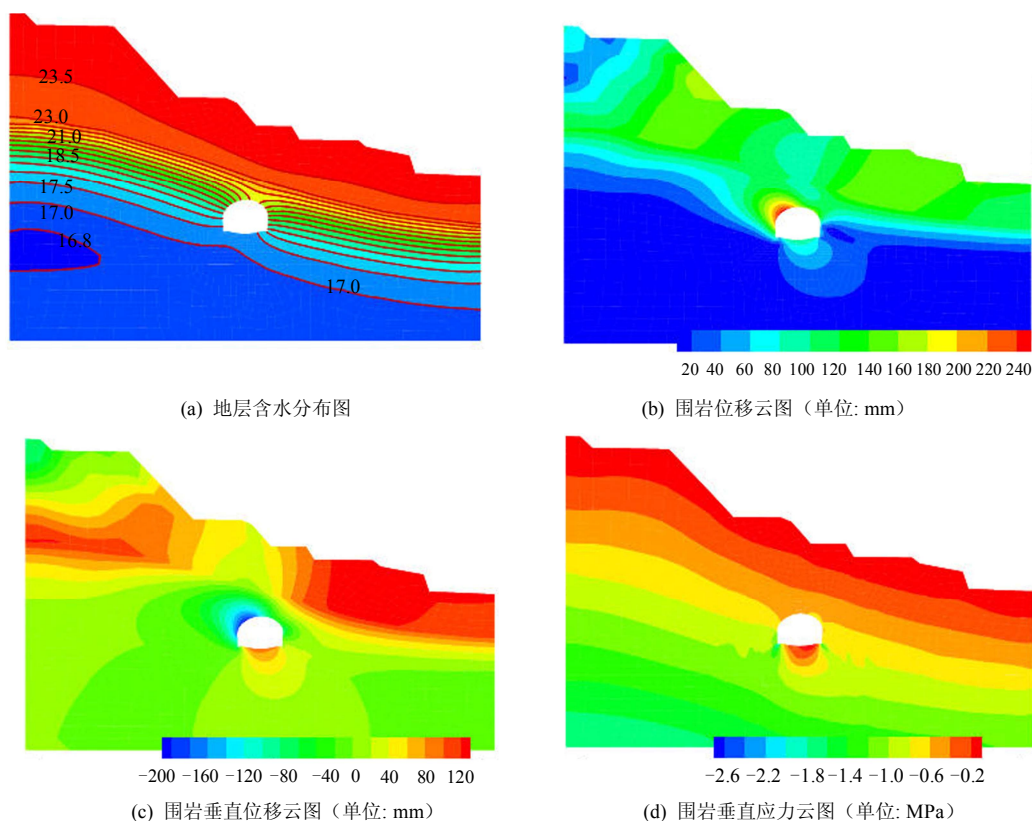


图 9 拱顶围岩含水率达 21.3% 时湿度分布及位移应力云图
Fig.9 Nephograms of moisture content, displacement and stress of surrounding rock when moisture content at vault area reaches 21.3%

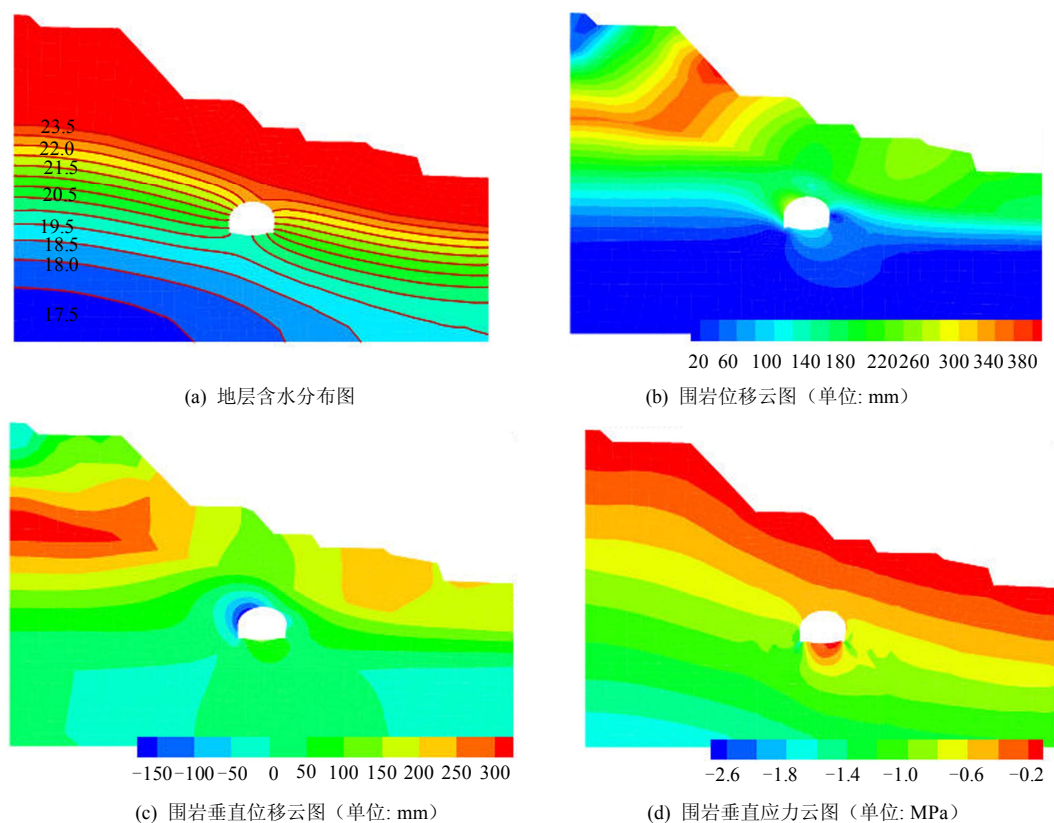


图 10 拱顶围岩含水率达 22.8% 时湿度及位移应力云图
Fig.10 Nephograms of moisture content, displacement and stress of surrounding rock when moisture content at vault area reaches 22.8%

5 数据分析与讨论

5.1 支护受力变形与含水率关系

对于膨胀性黄土隧道围岩力学的受力特性分析,很重要的一部分就是增湿过程中膨胀力对围岩支护作用效果分析,数值试验过程中选取围岩初期支护上的9个关键点进行变形受力监测,位置如图11所示。

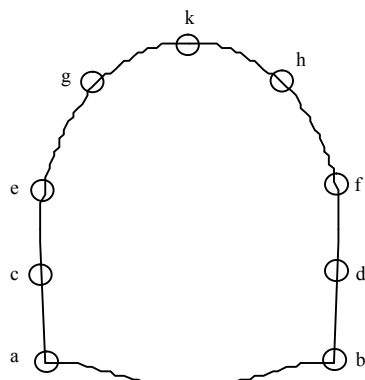


图 11 围岩监测点布置
Fig.11 Disposal of measured points

由于膨胀土膨胀压力增湿递增,因此,围岩中不同的含水率分布对应的围岩弯矩和变形不同,图12所示为膨胀力为180 kPa时,初期支护结构监测点弯矩随含水率变化的关系曲线。可以看出,衬砌的最大正负弯矩分别出现在结构的左右拱腰处,这主要是受隧道偏压地质条件影响。在膨胀压力作用下,左右拱腰的弯矩均随土中含水率升高而增大,当含水率超过19.5%后弯矩增大明显。最终的弯矩增长较大,超过了结构屈服强度,达到破坏。拱顶弯矩随含水率的增大反而有所下降,原因主要是膨胀力的作用增强了压力拱的水平推力,保持的拱部承受压力的较好形态。其余地方的结构的弯矩增大趋势不明显。数值模拟的结构弯矩变化与隧道塌方时的情形相符,先是左右拱腰处出现裂纹,初期喷射混凝土剥蚀掉块,然后整个隧道结构破坏,围岩坍塌,危险和破坏区在拱腰处。

图13所示是膨胀力为160 kPa时支护结构的位移随含水率的变化情况,其中 k_0 是现场实测的拱顶累计沉降变化曲线。如图所示,随含水率的增长衬砌拱顶和拱腰位移逐渐增大,特别是当含水率超过20%以后,位移增长速度较快。位移变化最大的点是拱腰处,与图12中弯矩最大也在拱腰处相符。对比拱顶位移变化与现场监测的数据,变化趋势相似,但计算结果要比现场监测的值要小,原因可能是隧

道衬砌开裂后刚度减小,变形增大。对比图12、13隧道衬砌弯矩与位移随含水率变化图,可知,当含水率在20%~22.8%段,拱腰弯矩位移增长较快,且呈不收敛状态,该阶段拱腰处于高危险期,极易发生破坏。

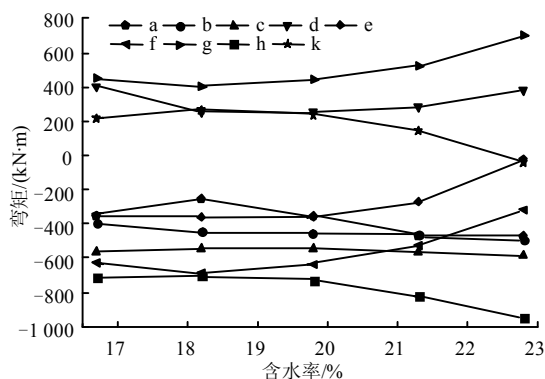


图 12 膨胀力为180 kPa时支护弯矩随含水率变化关系
Fig.12 Relations between liner bending moment and soil moisture content at a swelling pressure of 180 kPa

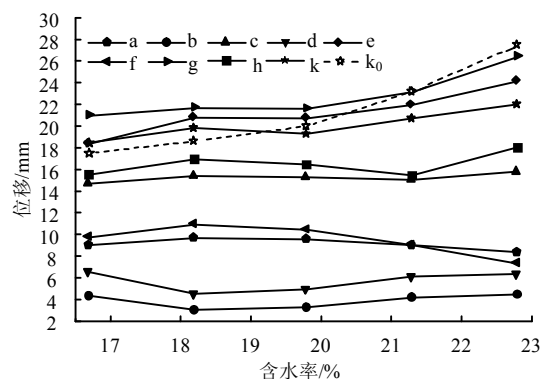


图 13 膨胀力为180 kPa时支护位移随含水率变化关系
Fig.13 Relations between liner displacement and soil moisture content at a swelling pressure of 180 kPa

5.2 支护受力变形与膨胀土膨胀力的关系

膨胀土本身膨胀力的大小也是决定支护结构的变形受力的重要因素。图14、15显示了采用不同膨胀力的膨胀土,进行计算模拟,计算至拱顶含水率达22.8%时,支护结构各监测点的弯矩、位移随膨胀土膨胀力的变化情况。

图14中显示,随膨胀土膨胀力的值取的增高,正负弯矩增长最大的分别在左拱腰和右拱腰处。当膨胀力小于140 kPa时,拱腰处弯矩变化较为平缓,超过140 kPa后弯矩变化明显增大。对比图15的位移变化图,位移随膨胀力增长较快的点也在拱腰和拱顶,其中左拱腰位移最大,是左部受到地势偏压力和膨胀力共同作用的结果。变化趋势同图14中的弯矩变化,在膨胀力在140 kPa以前位移发展较平缓,超过140 kPa后拱部位移增长迅速,说明膨胀

力为 140 kPa 是该工程安全控制的临界点。膨胀力超过 140 kPa, 在降雨作用下对工程施工的风险就会大大增加。

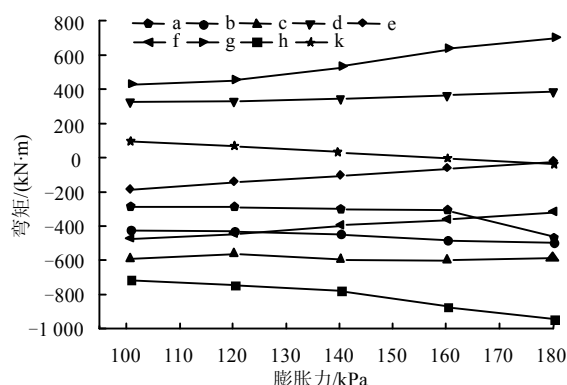


图 14 支护结构弯矩随膨胀力的变化关系

Fig.14 Relations between lining bending moment and swelling pressure

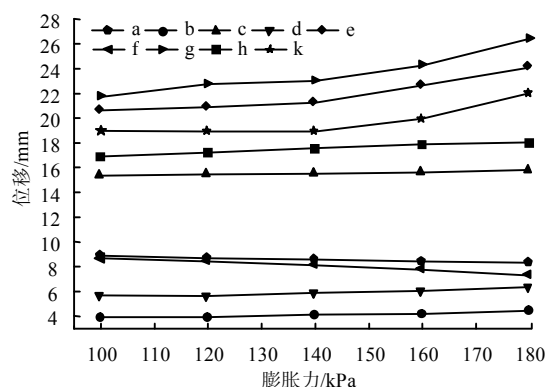


图 15 支护结构位移随膨胀力变化关系

Fig.15 Relations between lining displacement and swelling pressure

6 结 论

(1) 膨胀土性质与围岩含水率分布变化密切相关, 考虑温度热传导问题与渗流问题数学描述的相似性, 利用温度场模拟湿度场, 从而得到岩土体含水率分布变化, 并据此利用温度膨胀特性相似模拟膨胀土膨胀特性, 在本膨胀土隧道的计算模拟中取得了较好的效果, 与现场观测和监测数据相一致。

(2) 通过计算模拟降雨增湿过程, 随围岩含水率升高, 隧道初期支护弯矩和位移变化最大的点在拱腰处, 其中最大正负弯矩分别出现在左拱腰和右拱腰处。当含水率超过 19.5%, 弯矩和位移会迅速增大, 最终引发支护结构破坏, 故在膨胀土隧道工程实践中应特别注意和重视位移弯矩增速转折点对应的含水率, 作为安全施工的一项监控指标。

(3) 试验模拟了不同膨胀力的膨胀土隧道增湿

过程中衬砌弯矩位移的变化情况, 结果表明, 随膨胀土膨胀力的增大, 拱腰处的位移弯矩增长较大, 且在膨胀力超过 140 kPa 之后, 弯矩增长较为明显, 位移发展较快, 而膨胀力小于 140 kPa 时变化不明显。因此, 膨胀力 140 kPa 为该工程膨胀土危害性一个关键转折点, 若膨胀力超过 140 kPa, 则在设计和施工中要采取必要的安全措施。

参 考 文 献

- [1] RAO S M, REDDY B V V, MUTTHARAM M. The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils[J]. *Engineering Geology*, 2001, 60(7): 223—233.
- [2] Patrick Chege Kariuki, Freek van der Meer. A unified swelling potential index for expansive soils[J]. *Engineering Geology*, 2004, 72(3): 1—8.
- [3] Banu Ikizler S, Mustafa Aytekin, Mustafa Vekli, et al. Prediction of swelling pressures of expansive soils using artificial neural networks[J]. *Advances in Engineering Software*, 2010, 41(4): 647—655.
- [4] 丁振洲, 郑颖人, 李利晟. 膨胀力变化规律试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(7): 1328—1332.
DING Zhen-zhou, ZHENG Ying-ren, LI Li-sheng. Trial study on variation regularity of swelling force[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 1328—1332.
- [5] 朱豪, 王柳江, 刘斯宏, 等. 南阳膨胀土膨胀力特性试验[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(5): 11—14.
ZHU Hao, WANG Liu-jiang, Liu Si-hong, et al. Experimental study of the swelling force of Nanyang expansive soils[J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2011, 9(5): 11—14.
- [6] 刘龙武, 郑健龙, 缪伟. 广西南明膨胀土胀缩活动带特征及滑坡破坏模式研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(1): 28—33.
LIU Long-wu, ZHENG Jian-long, MIAO Wei. Researches on characteristics of swell and shrinking active zone of expansive soil and failure mechanism of landslides[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(1): 28—33.
- [7] 刘义高, 周玉峰, 郑健龙. 增湿条件下膨胀土路堑边坡稳定性数值分析[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(12): 1870—1875.
LIU Yi-gao, ZHOU Yu-feng, ZHENG Jian-long. Numerical analysis of cutting slope stability in expansive soils considering water-increased state[J]. *Chinese*

- Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(12): 1870—1875.
- [8] 周坤. 膨胀土隧道衬砌膨胀力数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [9] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [10] 廖红建. 岩土工程数值分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [11] 郑健龙, 杨和平. 公路隧道膨胀土工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [12] 谢云, 陈正汉, 孙树国, 等. 重塑膨胀土的三向膨胀力试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1636—1642.
- XIE Yun, CHEN Zheng-han, SUN Shu-guo, et al. Test research on three-dimensional swelling pressure of remolded expansive clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1636—1642.
- [13] 周葆春, 孔令伟, 郭爱国. 不同水化状态下的压实膨胀土应力-应变-强度特征[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 641—651.
- ZHOU Bao-chun, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Stress-strain-strength behaviour of compacted expansive soil under different hydration states[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(3): 641—651.
- [14] 徐彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 44—50.
- XU Bin, YIN Zong-ze, LIU Shu-li. Experimental study of factors influencing expansive soil strength[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(1): 44—50.
- [15] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: Wiley-Interscience, 1993.
- [16] GARDNER W R. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data[J]. **Soil Science Society of America Proceedings**, 1956, 20: 317—320.
- [17] GARDNER W R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. **Soil Science**, 1958, 85(4): 228—232.

第二届全国岩土多场相互作用及环境土工学术研讨会

(一号征文通知) 2014年10月31日至11月2日, 上海

1 会议简介

为进一步推动岩土多场相互作用及环境土工领域的发展, 促进学术成果的交流, 由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会环境土工专业委员会、中国城市环境卫生协会、中国土工合成材料协会、中国岩石力学与工程学会地下废物处置专业委员会联合主办; 同济大学承办; 浙江大学、上海交通大学、上海大学等单位协办的第二届全国岩土多场相互作用及环境土工学术研讨会将于2014年10月31日至11月2日在上海召开。

2 会议专题

岩土体多场相互作用理论及环境土力学; 环境土力学试验与地下环境监测; 城市固体废弃物力学及填埋处置; 工业固体废弃物工程特性及填埋处置; 废弃泥的工程特性、工程处置及资源化利用; 地下水土污染评价、控制与修复; 矿区环境岩土工程问题及尾矿处置; 土工合成材料在环境土工中应用; 固体废弃物资源化利用; 深地质处置中围岩、缓冲/回填材料研究的最新成果; CO₂存储研究的最新发展趋势; 岩土环境风险评价、管理和可持续发展等。

3 论文征集

论文请严格按《岩土力学》编排格式编排, 篇幅一般不超过6页。全文于2014年5月30日以前电子邮件发到大会议秘书处, 经专家审稿遴选的优秀论文将推荐到《岩土力学》期刊发表。

4 重要日期

2014年5月30日前提交论文初稿; 2014年7月30日前提交修改后的论文。

5 大会秘书处联系方式

200092上海市四平路1239号同济大学地下建筑与工程系 联系人: 陈永贵 陈宝 传真: 021-65985210

联系电话: 021-65981286, 65982252 E-mail: cyg@tongji.edu.cn; chenbao@tongji.edu.cn

(摘自 岩土力学编辑部 网站)