

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.149

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



增湿条件下膨胀土隧道围岩的稳定性

陈纤¹, 吴宝游², 罗文俊¹, 徐鑫洋¹

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 南昌 330013; 2. 中铁电气化局集团有限公司, 北京 100036)

摘要:增湿条件下,膨胀土的强度会降低并产生膨胀力,在两者的共同作用下,膨胀土隧道围岩稳定性会严重降低,有必要研究增湿条件下膨胀土隧道围岩的变形和衬砌受力。采用室内试验和数值模拟的方法对膨胀土隧道围岩稳定性进行研究,对不同含水率的重塑膨胀土进行剪切试验,得出摩擦角、黏聚力与含水率的拟合关系式,运用 ABAQUS 有限元软件对膨胀土隧道开挖过程进行仿真分析,并利用温度场模块模拟隧道围岩增湿膨胀,得出隧道增湿前后应力与位移的变化规律,同时设计正交试验,分析各因素对膨胀土浅埋隧道稳定性的影响。结果表明:围岩增湿之后,围岩拱腰处的应力值增加明显,拱顶和拱底处应力值减小;衬砌的拱底处纵向位移值增加,拱顶处纵向位移值减小。通过设计正交试验,采用极差和方差分析得到对膨胀土浅埋隧道围岩稳定性影响最大的因素为增湿强度,其次为覆跨比、膨胀厚度和膨胀系数。

关键词:膨胀土;隧道围岩;室内试验;数值模拟;正交试验

中图分类号: U451 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)02-0026-09

Stability of expansive soil tunnel surrounding rock under humidity condition

CHEN Xian¹, WU Baoyou², LUO Wenjun¹, XU Xinyang¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China;

2. China Railway Electrification Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100036, P. R. China)

Abstract: Under the humidification condition, the strength parameters of the expansive soil will decrease and the expansion force will be generated. Under the combined action of the two, the stability of the surrounding rock of the expansive soil tunnel will be seriously reduced. Therefore, it is necessary to study the deformation and lining stress of the surrounding rock of expansive soil tunnel under the condition of humidification. In this paper, laboratory tests and numerical simulations are used to study the stability of the surrounding rock of the expansive soil tunnel. First, the shear experiment is carried out on the remolded expansive soil with different water contents, and the fitting relationship between friction angle and cohesion and water content is obtained. Then, the ABAQUS finite element software is used to simulate and analyze the excavation process of tunneling in the expansive soil. The temperature field module is used

收稿日期: 2020-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(51768022, 51978265); 江西省主要学科学术和技术带头人培养计划(20194BCJ22009); 江西省优势科技创新团队建设计划(20181BCB24011)

作者简介: 陈纤(1997-), 男, 主要从事膨胀土隧道增湿变形研究, E-mail: 861140136@qq.com.

罗文俊(通信作者), 女, 教授, 博士, E-mail: lwj06051979@163.com.

Received: 2020-07-01

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51768022, 51978265); Jiangxi Provincial Major Academic and Technology Leader Training Program (No. 20194BCJ22009); Jiangxi Province Advantage Science and Technology Innovation Team Building Plan Project (No. 20181BCB24011)

Author brief: CHEN Xian (1997-), main research interest: humidification deformation of expansive soil tunnel, E-mail: 861140136@qq.com.

LUO Wenjun (corresponding author), professor, PhD, E-mail: lwj06051979@163.com.

to simulate the humidification and expansion of the surrounding rock of the tunnel, and the stress and displacement of the tunnel before and after swelling were obtained. At the same time, the orthogonal experiment was designed to analyze the influence of various factors on the stability of the shallow buried tunnel in the expansive soil. Results show that after humidification, the stress value at the arch waist of the surrounding rock increases significantly, the stress value at the vault and arch bottom decreases. The longitudinal displacement value at the lining arch bottom increases, and the longitudinal displacement value at the arch top decreases. By designing orthogonal experiments and using range and variance analysis, the most influential factor on stability of the surrounding rock of the expansive soil shallow tunnel is the humidification strength, followed by the over-span ratio, the swelling thickness and the swelling coefficient.

Keywords: expansive soil; tunnel surrounding rock; laboratory test; numerical simulation; orthogonal test

膨胀土在中国分布广泛,随着公路、铁路隧道等设施的快速增多,隧道线路不可避免遭遇膨胀土地层。由于膨胀土具有吸水膨胀、失水收缩且反复变形的特点^[1],易造成隧道支护体系变形加剧,严重时会造成隧道坍塌,例如,穿越膨胀性黄土地层的山西娄烦县小河沟隧道,由于降雨入渗之后围岩含水率增加,支护结构产生破裂变形,隧道多次塌方,造成巨大经济损失^[2]。因此,研究膨胀性围岩增湿对隧道的稳定性影响具有重要的实际工程意义。

目前,学者们对增湿条件下的膨胀土进行了大量研究。缪协兴等^[3-4]受温度应力场的启发,提出一种分析岩体受水作用而产生的应力-应变场的湿度应力场理论,再在给定湿度基础上,推导出圆形洞室围岩中的湿度应力场解析解。卢爱红^[5]基于湿度应力场理论,推导了膨胀性圆形洞室在增湿条件下围岩应力场分布的解析解,并提出了湿度应力场的数值分析方法。Anagnostou^[6]将隧道围岩的膨胀变形看作是流-固耦合过程,认为围岩变形是开挖边界处含水率的变化导致的。Ng等^[7]通过对非饱和膨胀土边坡进行现场人工降雨试验,得出膨胀土边坡失稳的内在原因。Wittke等^[8]借助有限差分法程序分析了由围岩膨胀引起的应力和位移情况。王明年等^[9]基于数值模拟与工程实测,分析了膨胀土地层增湿对浅埋暗挖台阶法的影响。周坤等^[10]通过有限元软件模拟了隧道围岩增湿膨胀过程,得出了隧道埋深、膨胀土膨胀率、膨胀圈厚度对支护结构受力和围岩变形的影响规律。Hotineanu等^[11]对强膨胀土和弱膨胀土在周期性冻融条件下进行工程特性的研究,发现在冻融条件下膨胀土的剪切强度会受影

响。曾仲毅等^[12]、陈尤^[13]利用温度场与湿度场的相似性,采用有限差分法软件FLAC^{3D}内置温度场模块模拟了降雨条件下膨胀土增湿变形,郑俊杰等^[14]在上述方法的基础上编制FLSH程序,考虑了在非饱和渗流过程中基质吸力和强度软化的效应。

由于施工的原因,工程中常见隧道围岩局部增湿。但在以往的研究中,大部分只分析了降雨增湿条件,而对膨胀土隧道施工造成的增湿研究较少,或者考虑了隧道围岩的局部增湿,但没有研究膨胀土软化效应和膨胀效应两者共同作用对隧道的影响。笔者结合以往膨胀土隧道增湿变形的研究方法,通过重塑膨胀土室内试验得到强度参数随含水率变化的关系式,并编写Python子程序实现膨胀土在增湿过程中强度参数不断减小。利用ABAQUS软件对膨胀土开挖隧道进行仿真分析,并利用温度场模块模拟隧道围岩增湿膨胀,研究膨胀土隧道围岩的稳定性。根据正交试验设计原理设计正交试验方案,分析影响膨胀土浅埋隧道围岩稳定性的因素,以保证施工安全。

1 膨胀土试验

膨胀土的液限、塑限、塑性指数能间接反映其胀缩性,界限含水量是粘土颗粒与水相互作用的一种属性。膨胀土主要由亲水矿物成分组成,同时,土颗粒较细,故具有比表面积大、扩散双电层厚的特点,因而膨胀土中黏土颗粒表面的水膜比一般细粒土的厚,所保持的薄膜水总量也较多,因此,膨胀土一般具有高液限、高塑性指数的特点。液塑限试验结果如表1所示。

表 1 试验结果
Table 1 Test results

试验次数	液限/%	塑限/%	塑性指数
1	45.3	23.6	21.7
2	48.5	24.8	23.7
3	46.2	25.1	21.1
4	44.6	24.5	20.1
5	45.7	23.9	21.8
6	46.4	25.0	21.4
平均值	46.1	24.5	21.6

根据多指标综合判别分类及膨胀土胀缩性与表征胀缩性指标分类法,液限含水量>48%、塑性指数>25 属于强膨胀土,液限含水量在 40%~48%之间、塑性指数在 18~25 之间的膨胀土属于中膨胀土。由表 1 可知,试验区域的膨胀土液限平均含水量为 46.1%,塑性指数平均为 21.6,按上述分类法可知,该膨胀土为中膨胀土。

试验土样取自合肥市某地铁段的施工区域,为保证土样的均质性,采用重塑土制样。首先,采用烘干法和环刀法分别测试出初始含水率和密度,试验测得初始含水率为 13.4%,干密度为 1.76。然后,将土样风干,用木碾碾碎,过 2 mm 土工标准筛,配备与初始含水率相同的土样,在特制的击实器中分 5 层击实制样,得到的圆柱体试样尺寸为 Φ50 mm×100 mm,将试验用的切土环刀内壁涂抹薄层的凡士林,刃口向下,放在制备的土样上,用切土刀将制样切削成比环刀稍大直径的土柱,然后将环刀向下压,边压边削,至土样伸出环刀停止。对制备好的试样进行固结试验,试验结果见表 2。通过表 2 中的数据画出孔隙比与固结压力对数的拟合曲线,见图 1,根据卡萨格兰德法得出前期固结压力为 156.43 kPa。

表 2 试验结果
Table 2 Test results

压力/kPa	试样总变形量/mm	压缩后试样高度/mm	孔隙比	压缩系数/MPa ⁻¹	压缩模量/MPa
0	0	20	0.950		
50	0.138	19.862	0.936	0.26	7.50
100	0.201	19.799	0.930	0.12	16.25
200	0.268	19.732	0.924	0.06	32.5
400	0.365	19.635	0.914	0.04	48.75

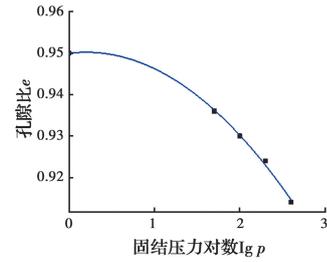


图 1 固结过程 e-lg p 曲线

Fig. 1 Compression curve of consolidation process

工程中常见超固结膨胀土与正常固结膨胀土,为了判断它们对土体强度参数的影响,对膨胀土进行固结快剪试验,试验垂直压力采用 100、200、300、400 kPa,剪切速度为 0.8 mm/min,试验结果如表 3 所示。图 2 为土样剪切强度与垂直压力的关系图,从图 2 可以看出,当垂直压力小于先期固结压力 156.43 kPa,在这样的固结压力作用下剪切,土体不会产生压缩,能够保持其结构强度,因此,土体的抗剪强度与垂直压力没有关系,强度-应力线接近水平。当垂直压力大于 156.43 kPa,试样被压缩,土颗粒与颗粒之间产生新位移,颗粒之间的距离缩短,土的抗剪强度随着垂直压力的增大而显著增大。由此可见,膨胀土的超固结性对土体强度影响显著。

表 3 试验结果

Table 3 Test results

试验编号	垂直压力/kPa	抗剪强度/kPa
1	100	165.34
	200	183.97
	300	216.24
	400	287.73

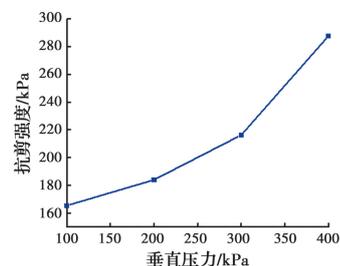


图 2 垂直压力与抗剪强度关系曲线

Fig. 2 Curve of relationship between vertical pressure and shear strength

制备不同含水率的膨胀土试样进行直接剪切试验,探究膨胀土在含水率不断变化时土体的强度参数变化规律。采用 ZJ-4 型四联直剪仪对重塑膨胀

土进行快剪试验。试验制备 5 种不同含水率土样, 试样为直径 6.18 cm、高 2 cm 的圆柱体。试样含水率分别为 14%、18%、22%、26%、30%。含水率相同的试样制备 5 组, 一共 25 个试样。试验结束后马上取剪坏试样进行含水率验证, 分别对应 13.78%、18.12%、23.01%、25.78%、31.25%, 试验计算结果见表 3。

表 3 试验结果
Table 3 Test results

含水率/%	不同垂直压力对应剪切强度/kPa				摩擦角/(°)	粘聚力/kPa
	100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa		
13.78	130.12	172.16	214.56	275.23	28.56	78.59
18.12	110.78	150.67	198.76	240.12	25.86	66.06
23.01	95.56	145.32	175.73	210.83	22.01	62.81
25.78	90.93	132.39	159.07	198.97	20.49	57.64
31.25	50.65	88.13	120.65	140.62	17.46	24.41

图 3 为摩擦角、黏聚力与含水率的拟合关系曲线, 从图 3 可以看出, 土体摩擦角随着含水率的增大呈线性减小; 土体黏聚力随着含水率的增大呈二次抛物线减小。这与文献[15]中结论一致, 拟合的函数关系式分别为

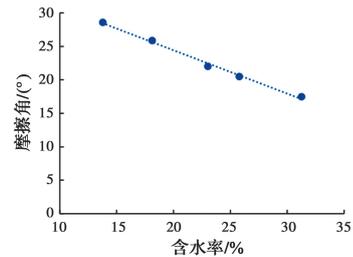
$$\varphi = -0.65\omega + 37.39 \quad (1)$$

$$c = -0.16\omega^2 + 4.61\omega + 43.24 \quad (2)$$

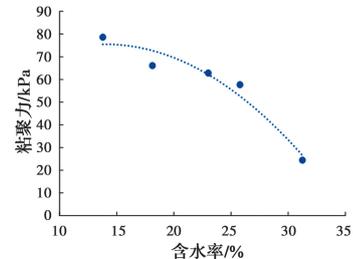
2 仿真模型

2.1 模型的建立

以合肥市某地铁线路为工程背景, 该膨胀土隧



(a) 摩擦角与含水率的关系



(b) 粘聚力与含水率的关系

图 3 强度参数随含水率变化关系拟合曲线

Fig. 3 The fitting curve of the relationship between strength parameters and water content

道为单洞圆形隧道, 半径为 3 m, 埋深为 12 m。为简化计算, 采取平面应变模型, 宽度设为 1 m。隧道开挖影响范围根据隧道设计规范为 3~5 倍洞径, 模型的几何尺寸根据该规则取长度为 60 m, 高度为 45 m。对模型两侧施加水平约束, 对底部采取固定。模型两侧及底部均设置不透水边界, 在 ABAQUS 中默认为不透水边界, 固为默认值。在仿真模拟中, 假设围岩含水率处于初始状态, 设为 13.4%。围岩采用摩尔-库伦弹塑性模型, 衬砌采用弹性模型, 厚度为 30 cm, 围岩和衬砌的材料参数根据重塑膨胀土的室内试验和文献[9]获取, 具体数值列于表 4。

表 4 材料参数

Table 4 Material parameters

材料	密度/(g · cm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(m · s ⁻¹)	膨胀系数
膨胀土	1.76	0.012	0.35	0.81	28.99	5 × 10 ⁻⁵	0.1
衬砌	2.5	20	0.2				

2.2 隧道开挖和增湿膨胀

2.2.1 隧道开挖 图 4 为整个仿真的流程图, 在开挖隧道之前, 围岩的应力状态称为初始状态, 即土在原始荷载作用下处于平衡状态。由于本文没有考虑外部荷载, 即在土的自重应力场作用下围岩处于平衡, 不会产生变形。

图 5 为初始应力场和位移场, 初始应力从上到下随着深度逐渐增大, 初始位移最大为 1 × 10⁻¹⁴ m,

小于 10⁻⁵ m 可忽略不计。为了符合实际工程经验, 隧道开挖部位的弹性模量逐渐减小, 在 ABAQUS 软件中设置场变量, 使开挖部位土体的弹性模量释放到最初的 0.4 倍。隧道开挖之后添加衬砌, 围岩与衬砌之间采用绑定约束。

2.2.2 增湿膨胀 考虑隧道周边含水率的变化对隧道围岩稳定性的影响, 膨胀土在增湿过程中产生的自由膨胀应变增量与含水率的关系式为

$$\Delta \epsilon_{ij} = \beta \delta_{ij} \Delta \omega \quad (3)$$

式中: $\Delta \epsilon_{ij}$ 为湿度变化引起的增量; β 为土体湿度线膨胀系数; δ_{ij} 为 Kronecker 符号; $\Delta \omega$ 为含水率变化量。

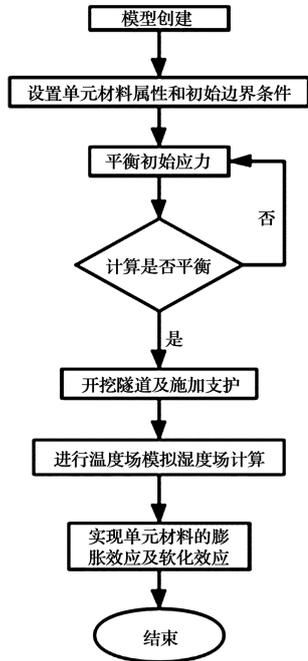
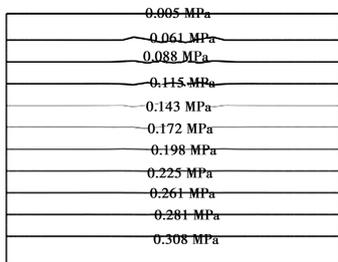
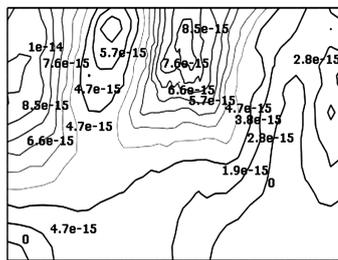


图 4 流程图

Fig. 4 Flow chart



(a) 应力场分布



(b) 位移场分布

图 5 初始应力场和位移场

Fig. 5 Initial stress field and displacement field

但是, 由于外部的约束条件和内部的约束条件, 膨胀应变并不能自由产生, 这时就产生了湿度应力, 这部分应力会引起附加应变, 总应变就是增湿产生的应变和附加应变之和, 总应变可表示为

$$\epsilon_{ij} = \frac{1+\mu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\mu}{E} \delta_{ij} \sigma_v + \beta \delta_{ij} \Delta \omega \quad (4)$$

式中: μ 为土体泊松比; E 为弹性模量; σ_{ij} 为总应力分量 ($i, j=1, 2, 3$); σ_v 为体积应力。

式(4)可以改写成

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\mu} \epsilon_{ij} + \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \delta_{ij} e - \frac{E \beta}{1-2\mu} \delta_{ij} \Delta \omega \quad (5)$$

式中: μ 为土体泊松比; E 为弹性模量; σ_{ij} 为总应力分量 ($i, j=1, 2, 3$); σ_v 为体积应力; e 为体应变。

在不计孔隙水压的情况下, 将式(5)带入一般弹性体平衡方程计算得到湿度应力场的平衡微分方程

$$\frac{\sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho F_i - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{E \beta \Delta \omega}{1-2\mu} \right) = 0 \quad (6)$$

式中: ∂x_j 为 j 方向的坐标; ρ 为膨胀土的质量密度; F_i 为 i 方向上的体积力。

由于湿度场与温度场的相似性, 可将湿度场的各个参数替换为温度场参数, 利用温度升高土体材料膨胀来模拟膨胀土的增湿膨胀变形^[16]。热力学中物体受热膨胀产生的应变表示为

$$\Delta \epsilon_{ij} = \alpha \delta_{ij} \Delta T \quad (7)$$

式中: α 为土体温度线膨胀系数; ΔT 为温度变化量, $^{\circ}\text{C}$ 。

联立式(3)、式(6)、式(7)可得

$$\frac{\sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho F_i - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{E \alpha \Delta T}{1-2\mu} \right) = 0 \quad (8)$$

湿度场变化同时会导致强度变化, 由式(1)、式(2)可知强度参数与含水率的变化关系式。通过湿度场与温度场的参数对应关系, 可将强度参数转化为与温度的变化关系式, 利用 Python 子程序实现材料强度随着温度升高不断减小。温度场采用稳态传递, 即与传递时间无关, 考虑膨胀厚度为 2 m, 由开挖面逐渐向外扩散。图 6 为初始湿度场和增湿后的湿度场分布图。

2.3 计算结果

根据仿真计算结果对支护结构和围岩的应力场和位移场进行分析, 从模型中获取关键点研究盾构法对膨胀土隧道稳定性的影响。图 7 所示为 4 个主要控制点的位置。

2.3.1 围岩的数值分析 图 8、图 9 分别为隧道真实路径在开挖各个步骤的应力曲线和隧道的 4 个主要控制点在开挖各个步骤的应力曲线。由图 5 和图 8 可知, 在开挖部分的弹性模量折减之后, 应力分

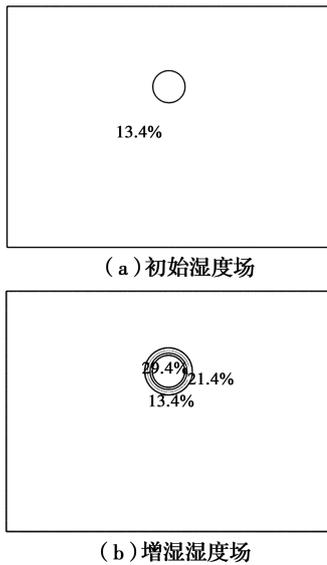


图 6 湿度场分布图

Fig. 6 Humidity distribution cloud

布较平衡之后的应力分布有了较明显的变化,在折减之前,应力是随着深度逐渐增大,折减之后产生了应力重分布,拱腰应力大于拱顶应力。开挖之后,隧道两侧应力最大,拱顶和拱底应力最小。施加衬砌之后围岩拱顶和拱底应力增加,拱腰应力减小。在膨胀土隧道围岩增湿之后,隧道围岩应力分布较非膨胀土有了明显的分布变化。如图 9 所示,在开挖折减之后,隧道拱腰部位的应力值比拱顶和拱底大,控制点的应力值都增加,拱腰部位的应力值增加显著,达到 0.31 MPa。施加衬砌之后,拱腰的应力值减小,拱顶和拱底的应力值增加。围岩增湿之后,拱腰的应力值增加,拱顶和拱底的应力值都减小,由于有限元模型的左右约束和底部约束,易造成隧道向上托起,拱腰变形加剧。

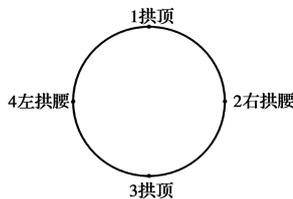


图 7 隧道主要控制点

Fig. 7 Main control points of the tunnel

图 10 为隧道主要控制点在不同步骤的位移绝对值。开挖部位的弹性模量降低之后,隧道的位移值增加,其中隧道拱顶的位移值最大为 35 mm。开挖部分完全开挖之后,隧道围岩的位移值显著增加,其中隧道拱顶和拱底的位移值比拱腰的大。因为土体开挖,导致应力重分布,隧道拱顶向下移动,位移

值为 93 mm。覆盖在隧道拱底上面的土体移除,拱底向上反弹,位移值为 120 mm,可见,在隧道施工过程中拱底的位移同样不可忽略。施加衬砌之后,围岩的位移值大幅减小,因此,在隧道施工时,衬砌应该及时施加,以免造成隧道不可恢复的变形。在增湿之后,由于膨胀力和软化效应,隧道拱顶位移值减小,拱腰和拱底的位移值增加。

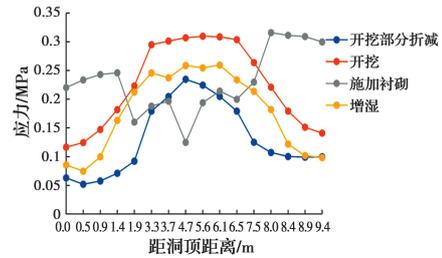


图 8 隧道围岩真实路径应力

Fig. 8 Real path stress of tunnel surrounding rock

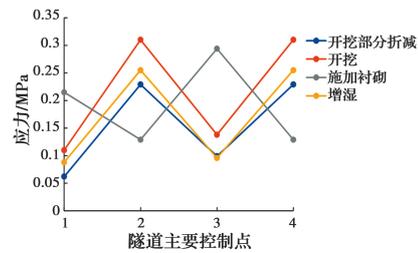


图 9 主要控制点应力

Fig. 9 Stress at main control points

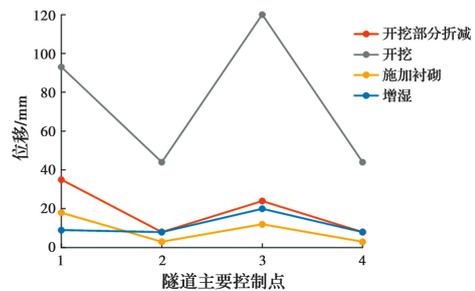


图 10 主要控制点位移

Fig. 10 Displacement of main control points

2.3.2 衬砌的数值分析 图 11 为衬砌真实路径在隧道增湿之前和之后的主应力图,在增湿之前,拱顶、拱腰和拱底的应力比其他部位大,监测的时候应该重视这些位置。在增湿之后,衬砌的应力值普遍降低,是因为膨胀力抵消了一部分围岩压力。图 12 为衬砌真实路径的纵向位移图,在增湿之前,衬砌拱顶位置的纵向位移值最大为 9.90 mm,衬砌拱底位置的纵向位移值为 4.80 mm。在增湿之后,衬砌整体向上移动,衬砌拱顶位置的纵向位移值减小到

1.10 mm, 衬砌拱底位置的纵向位移值增加到12.60 mm。

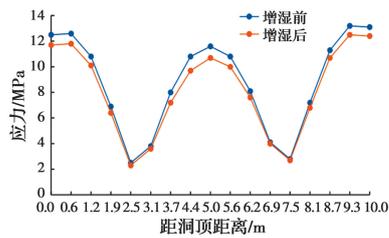


图 11 衬砌真实路径应力

Fig. 11 Lining true path stress

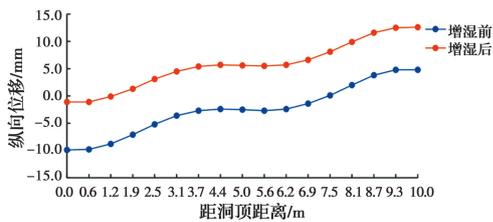


图 12 衬砌真实路径纵向位移

Fig. 12 Longitudinal displacement of lining real path

3 正交实验

3.1 试验方案设计

影响膨胀土浅埋隧道增湿变形的参数很多,可分为内因和外因。内因包括土体本身的强度、初始含水率、膨胀系数、渗透系数和膨胀潜势等;外因包括隧道的埋深、开挖的扰动程度、增湿强度和施工方案等。为了探究众多因素对膨胀土浅埋隧道稳定性影响的重要性,采用正交试验设计法。正交试验是通过有限的试验方案获得最大的试验效果,缩短试验时间,迅速找到最优方案的一种科学方法^[17]。根据膨胀土特性以及地铁隧道的设计规范^[18],得出试验主要因素分别为:膨胀系数、增湿强度、膨胀厚度、覆跨比。将 4 个试验因素都取为 4 水平。根据正交试验表的设计原则,进行 16 次仿真计算,选择拱顶位移值作为因变量。表 5 为具体的试验参数,其他参数按照表 4 取值,仿真模型的建立、计算跟上述模型的步骤一致。

3.2 计算结果分析

对表 3 数据进行极差分析,分析的结果如表 6 所示。其中, A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 分别为 4 个因素下各水平的平均值,极差值为因素各水平中最大值与最小值的差值。图 13 为 4 个因素的效应图。由图 13 和表 6 可知,增湿强度的极差最大,这说明含水率对膨胀土浅埋隧道的影响最大,其次是覆跨比,随着隧道

的埋深增加,膨胀土的膨胀效应对隧道影响越低。然后是膨胀厚度,膨胀圈厚度越厚,对隧道影响越大。最后是膨胀系数,当膨胀系数在 0.05~1 范围内变化时,对膨胀土隧道影响相差不大。

表 5 正交试验

Table 5 Orthogonal test

试验次数	覆跨比	增湿强度/%	膨胀厚度/m	膨胀系数	拱顶位移/mm
1	1	17.4	0.5	0.05	18.1
2	1	29.4	2	0.5	70.2
3	1	25.4	1.5	0.1	10.1
4	1	21.4	1	1	17.6
5	2	17.4	1	0.1	17.2
6	2	25.4	2	0.05	14.9
7	2	29.4	1.5	1	57.6
8	2	21.4	0.5	0.5	13.1
9	3	17.4	1.5	0.5	9.3
10	3	29.4	1	0.05	13.9
11	3	25.4	0.5	1	1.2
12	3	21.4	2	0.1	12.2
13	4	17.4	2	1	6.7
14	4	21.4	1.5	0.05	8.4
15	4	29.4	0.5	0.1	7.8
16	4	25.4	1	0.5	3.1

表 6 极差分析

Table 6 Range analysis

因素	覆跨比	增湿强度/%	膨胀厚度/m	膨胀系数
A_1	29.00	12.82	10.00	13.83
A_2	25.70	12.83	12.95	11.82
A_3	9.15	7.30	21.35	23.93
A_4	6.50	37.00	26.00	20.78
极差	22.50	29.70	16.00	12.11

通过极差分析虽然已经分析出结果,但无法区分是因素不同还是误差引起的试验结果差异^[19],因此,有必要对正交试验结果进行方差分析。表 7 为方差分析表,表中数据包括偏差平方和、自由度、均方、F 比、显著性。增湿强度对膨胀土浅埋隧道影响最大,这与极差分析结果一致。综合方差分析和极差分析,可以得出增湿强度对膨胀土浅埋隧道的影响最大,其次是覆跨比、膨胀厚度和膨胀系数。

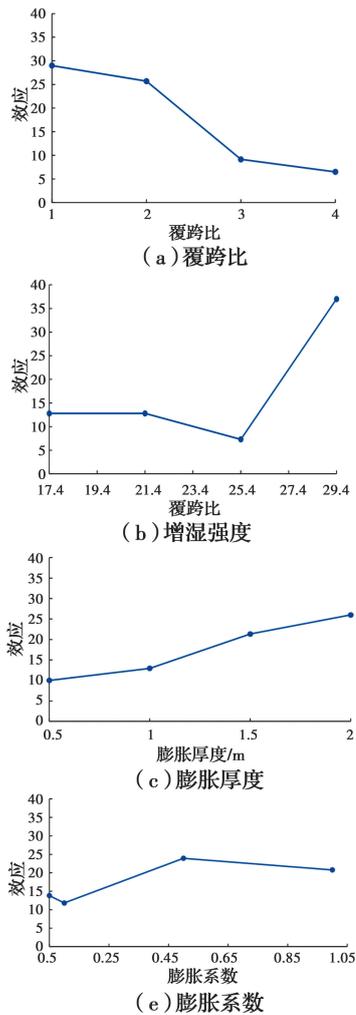


图 13 各因素效应图

Fig. 13 Effect diagram of various factors

表 7 方差分析

Table 7 Variance analysis

因素	偏差平方和	自由度	均方	F 比	显著性
覆跨比	1 560.7	3.000	520.24	2.748	0.214
增湿强度/%	2 168.900	3.000	722.969	3.818	0.150
膨胀厚度/m	625.987	3.000	217.662	1.150	0.456
膨胀系数	390.7	3.000	130.2	0.688	0.617
误差	568.1	3.000	189.3		

4 结论

通过膨胀土室内试验、ABAQUS 有限元软件模拟膨胀土隧道开挖及增湿膨胀,采用正交试验法对膨胀土浅埋隧道围岩稳定性进行分析,得到如下结论:

1)通过对不同含水率的膨胀土试样进行直接剪切试验,得到膨胀土强度参数与含水率的关系式,结

合液塑限试验和固结试验,可知此强度关系式适用于合肥地区中膨胀土工程。随着含水率的增加,试样抗剪强度、摩擦角与黏聚力不断下降,含水率与摩擦角呈线性关系,与黏聚力呈二次抛物线关系。

2)从围岩、衬砌的应力与位移变化规律可以看出,在围岩增湿之后,隧道拱腰的应力增加,拱底和拱顶的应力减小,易造成隧道挤压变形。增湿之后,隧道拱顶的位移减小,这是因为膨胀力的存在,抵消了一部分围岩压力。由于有限元模型的左右侧约束和底部约束,增湿之后产生的膨胀力和围岩强度软化造成隧道整体向上移动,两侧的变形加剧,为避免支护结构变形过大造成隧道塌方,在此类工程中,建议设置锚杆,且锚固长度应大于膨胀圈厚度,同时,在刚度一定时,采用柔韧性较好的衬砌。

3)通过设计正交试验,采用极差和方差分析,得到对膨胀土浅埋隧道围岩稳定性影响最大的因素为增湿强度,且在隧道埋深越浅的时候,膨胀土围岩的局部增湿对隧道的稳定性影响越大。综合极差分析和方差分析结果,得出影响膨胀土浅埋隧道围岩稳定性的因素按照重要性排名依次为增湿强度、覆跨比、膨胀厚度和膨胀系数。

参考文献:

[1] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
LIAO S W. Expansive soil and railway engineering [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984. (in Chinese)

[2] 张万志, 徐帮树, 曾仲毅, 等. 降雨入渗下膨胀性黄土隧道围岩破坏演化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(4): 736-744.
ZHANG W Z, XU B S, ZENG Z Y, et al. Research on failure evolution process of surrounding rock of swelling loess tunnel under rainfall infiltration [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(4): 736-744. (in Chinese)

[3] 缪协兴, 杨成永, 陈至达. 膨胀岩体中的湿度应力场理论[J]. 岩土力学, 1993, 14(4): 49-55.
MIAO X X, YANG C Y, CHEN Z D. Humidity stress field theory in swelling rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, 14(4): 49-55. (in Chinese)

[4] 缪协兴. 用湿度应力场理论解圆形洞室遇水作用问题[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 86-90.
MIAO X X. Using the theory of humidity stress field

- to solve the problem of water action of circular chamber [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 86-90. (in Chinese)
- [5] 卢爱红. 膨胀岩体的湿度应力场理论及数值模拟[D]. 北京: 中国矿业大学, 2002.
LU A H. Humidity stress field theory and numerical simulation of swelling rock mass [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2002. (in Chinese)
- [6] ANAGNOSTOU G. Seepage flow around tunnels in swelling rock [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1995, 19(10): 705-724.
- [7] NG C W W, ZHAN L T, BAO C G, et al. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration [J]. Geotechnique, 2003, 53(2): 143-157.
- [8] WITTKER W, WITTKER M. Design construction and supervision of tunnels in swelling rock [C]//1st ITA World Tunnelling Congress, 2005: 1173-1178.
- [9] 王明年, 舒东利, 于丽, 等. 膨胀力对合肥市轨道交通浅埋暗挖隧道的影响研究[J]. 路基工程, 2017(1): 204-207.
WANG M N, SHU D L, YU L, et al. Research on effect of expansive force on shallow-buried tunnel of Hefei rail transit [J]. Subgrade Engineering, 2017(1): 204-207. (in Chinese)
- [10] 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.
ZHOU K. Numerical simulation study on expansive force of lining for tunnel in expansive soil [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [11] HOTINEANU A, BOUASKER M, ALDAOOD A, et al. Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays [J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 119: 151-157.
- [12] 曾仲毅, 徐帮树, 胡世权, 等. 增湿条件下膨胀土隧道衬砌破坏数值分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 871-880.
ZENG Z Y, XU B S, HU S Q, et al. Numerical analysis of tunnel liner failure mechanism in expansive soil considering water-increased state [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 871-880. (in Chinese)
- [13] 陈尤. 考虑裂隙影响的膨胀土路堑边坡稳定性及支护数值分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
CHEN Y. Numerical analysis of expansive soil slope stability and support considering cracks [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- [14] 郑俊杰, 郭震山, 崔岚, 等. 考虑非饱和渗流与增湿膨胀下的膨胀土隧道稳定性分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3271-3277.
ZHENG J J, GUO Z S, CUI L, et al. Stability analysis of expansive soil tunnel considering unsaturated seepage and moistening swelling deformation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(11): 3271-3277. (in Chinese)
- [15] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 非饱和膨胀土总强度指标随饱和度变化规律[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 58-62.
YANG H P, ZHANG R, ZHENG J L. Variation of the total shear strength of unsaturated expansive soils with degree of saturation [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(4): 58-62. (in Chinese)
- [16] 曾仲毅. 降雨入渗下膨胀性黄土隧道围岩力学特性及稳定性分析[D]. 济南: 山东大学, 2014.
ZENG Z Y. An analysis of mechanical characteristics and stability on swelling loess tunnel surrounding rocks under rainfall infiltration [D]. Jinan: Shandong University, 2014. (in Chinese)
- [17] 徐仲安, 王天保, 李常英, 等. 正交试验设计法简介[J]. 科技情报开发与经济, 2002(5): 148-150.
XU Z A, WANG T B, LI C Y, et al. Brief introduction to the orthogonal test design [J]. Sci/Tech Information Development & Economy, 2002(5): 148-150. (in Chinese)
- [18] 地铁设计规范: GB 50157—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Code for design of metro: GB 50157—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [19] 吴科亮, 丁春林. 基于正交试验法的边坡稳定因素敏感性分析[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(2): 114-120.
WU K L, DING C L. Sensitivity analysis on slope stability factor based on orthogonal test [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(2): 114-120. (in Chinese)