

李家坪隧道膨胀性围岩力学特性试验及塌方原因分析

张毅^{1,2}, 折学森¹, 高学伸³

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064; 2. 河南省收费还贷高速公路管理中心, 河南郑州 450000; 3. 东南大学建筑设计研究院有限公司, 江苏南京 210096)

摘要: 为研究三淅高速公路李家坪隧道膨胀土软弱围岩性质, 通过三轴强度试验和膨胀特性实验等室内试验研究了含水率、干密度对膨胀土三轴强度的影响。试验结果表明: 含水率和干密度对膨胀土强度影响较大, 对黏聚力的影响尤为显著, 但在膨胀土的干密度较大时, 干密度对内摩擦角的影响不明显。较小初始含水率的膨胀土吸水膨胀时将产生非常大的膨胀率和膨胀力, 因此, 工程上应对膨胀土区域采取防渗措施。此外, 根据收敛约束法的理念推导了膨胀土围岩特征曲线, 结果表明含水率的变化会使围岩压力发生很大变化。基于此, 进一步分析了李家坪隧道塌方冒顶的原因, 雨季施工造成膨胀土含水量增大, 产生巨大的膨胀力, 而支护体系薄弱, 造成隧道冒顶塌方。

关键词: 膨胀土; 软弱围岩; 三轴强度试验; 膨胀试验; 力学特性; 隧道塌方原因

中图分类号: TV223.1; TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)01-0203-06

Experimental study on mechanical characteristics of Lijiaping tunnel expansive surrounding soils and analysis of tunnel collapse

ZHANG Yi^{1,2}, SHE Xuesen¹, GAO Xueshen³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Henan Province Highway Management Center of Toll and Loan, Zhengzhou 450000, China; 3. Architects & Engineers Co., Ltd. of Southeast University, Nanjing 210096, China.)

Abstract: In order to study the expansive soft rock properties of Li Jia Ping tunnel in San Xi highway, the impact of water content and dry density on expansive soil three-axis strength were investigated by three-axis strength test and expansion experiments. The test results showed that water content and dry density have a significant impact on the expansive soil strength, especially on the cohesion. However, the effects of dry density on the internal friction angle is not obvious when the dry density of the expansive soil is large. The expansive soil with small initial moisture content will produce very large expansion rate and expansive force when absorbing water and becoming expanded. Therefore, anti-seepage measures should be taken to the expansive soil area. In addition, according to the idea of convergence constraint method, the characteristic curve of surrounding rock of expansive soil is deduced. The structure shows that the change of water content will cause great change of surrounding rock pressure. Based on this, further analysis of the cause of roof collapse was analyzed. Constructing during the rainy season increased the water content of expansive soil, the poor support can not resist the enormous expansive force. As a result, the roof collapsed.

Key words: expansive soil; soft rock; three-axis strength test; expansion experiments; mechanical characteristics; roof collapse reason

1 研究背景

膨胀土等复杂的地质条件给我国公路、铁路建设带来了很大的困难。膨胀土黏粒成份主要由强亲水性矿物质组成, 具有吸水膨胀、失水收缩并往复变

形的性质。膨胀土具有较高的膨胀潜势, 与它含水量的变化有关。如果含水量为定值, 则其体积不会发生变化。在工程施工中, 含水量发生轻微的变化就足以使建造在黏土上的构造物产生有害的膨胀。能否有效解决这些工程问题取决于人们对非饱

收稿日期: 2017-07-24; 修回日期: 2017-10-03

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研项目(20110205110003)

作者简介: 张毅(1984-), 男, 河南郑州人, 在读博士研究生, 主要从事公路交通工程、岩土工程等领域的研究。

和膨胀土变形和强度特性的认识。前人已在膨胀土变形特性方面开展了大量的试验研究^[1-8]。其中,吴道祥等^[1]采用理论分析和现场试验研究相结合的方法,对膨胀土的特性、胀缩机理及其影响因素进行研究;李皎^[2]采用三轴压缩试验测定了膨胀土在不同干密度和含水率情况下的三轴强度,结果表明含水率对膨胀土三轴强度的影响非常显著;谢舒雷等^[3]采用室内试验等手段对于干湿循环作用下合肥地区膨胀土的表现形态和工程特性开展了研究,探讨了干湿循环作用形成裂隙与土中水在破坏膨胀土土体过程中的相互关联;徐彬等^[5]通过直剪试验和三轴试验研究了膨胀土含水率变化过程中强度的变化规律。这些研究为探究弱膨胀土的胀缩机理、水理特性及其影响因素提供了基础。黄志全等^[8]采用滤纸法研究了非饱和膨胀土任意含水率变化下的土水特征。以上研究均只针对膨胀土物理力学性质进行了研究,并没有与实际的隧道工程施工相结合。

由于膨胀土的胀缩性、强度等工程特性,导致在建隧道变形坍塌事故时有发生。因此,不少学者结合工程实际针对膨胀土力学机理及隧道破坏机理进行了研究。马晓宁等^[9]借助电子显微镜和 X 射线衍射试验从微观角度研究了某高速公路沿线膨胀土的矿物成分及微观结构;王清标等^[10]采用有限元数值分析方法对膨胀性黄土地层中的静游隧道开挖进行了模拟,揭示了在降雨条件下膨胀性黄土隧道围岩失稳与支护破坏的机理;周奎等^[11]针对复杂地质条件下遇水软化围岩的公路隧道边坡工程,探讨了减小雨水渗流等防护方法;朱经志^[12]采用三维有限元数值模拟分析方法模拟了某铁路隧道洞口削坡、隧道开挖过程,揭示了膨胀土隧道洞口处围岩变形规律和失稳机理;郭瑞等^[13]采用数值方法模拟了成都地铁 2 号线穿越膨胀性地层时管片结构的内力与变形;曾仲毅等^[14]研究了增加围岩含水率对隧道支护结构的影响,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;胡世权^[15]结合工程实践,探索了过膨胀土隧道变形失稳段的施工技术,提出了大管棚超前支护,并对传统的“三台阶七步法”施工工艺进行了改进。但是由于膨胀土的性质与其物理成分有着密切的关系,不同类型的膨胀土表现出来的工程性质相差很大,而且隧道的塌方不仅取决于围岩特性,还与隧道施工工艺、工序等密切相关。

由于膨胀土的类型和含水率对其性质影响较大,因此在膨胀土地区进行隧道施工的各种工法不能普遍适用,需类比相似工程作进一步研究。本文

以三浙高速公路李家坪隧道膨胀土软弱围岩为研究对象,通过三轴强度试验和膨胀特性实验等室内试验研究了膨胀土隧道软弱围岩性质,对隧道出现灾害的原因进行了分析。由于取得现场的原状土比较困难,因此,需要依靠室内制备重塑土来获得隧道围岩土体的物理、力学特性试验参数,但重塑土是否具有代表性,是否能代表隧道围岩的实际情况,首先这些重塑土的样本均来自现场的开挖出来的膨胀土。其次,本文在进行重塑土试验时,在参数选取上保证重塑土样本的含水率和密度与原状土天然含水率和密度一致,当然在进行含水率试验时这些参数会根据试验需要进行调整。

2 工程概况

三浙高速公路李家坪隧道位于河南省西峡县西坪镇低山区,隧道总体走向呈南北向曲线展布。隧道最大埋深约 92 m,隧道进口段围岩为 V 级,表层为强风化石英闪长岩,结构松散,埋深较浅,下部为中风化石英闪长岩,岩体完整性差。隧道洞身围岩为 IV 级和 III 级,岩性为中-微风化石英闪长岩,岩体较完整,工程地质条件较好。隧道出口段围岩为 V 级。部分地段为坡积黏土,通过对其进行钻孔勘测,并进行蒙脱石含量测定和膨胀土自由膨胀率测定等试验,发现其自由膨胀率为 50%~53%,属于弱膨胀土。试验结果如表 1 所示。

表 1 膨胀土膨胀性试验结果 %

试样编号	蒙脱石含量	自由膨胀率	膨胀潜势分级
1	17.3	50.2	弱膨胀土
2	19.2	53.1	弱膨胀土
3	18.6	52.5	弱膨胀土
4	19.6	53.8	弱膨胀土
5	16.1	49.6	弱膨胀土

李家坪隧道处于当地侵蚀基准面以上的低山区,附近无地表水体并远离地表水体,隧道处于地下水位以上,洞体围岩主要为元古界石英闪长岩。上部灰黄色,中下部灰白色,块状构造。强-中风化岩体,节理裂隙发育,岩体松散破碎;中-微风化岩体,节理发育,岩体较破碎,呈碎石状压碎结构-块石状镶嵌结构。

隧道采用三台阶预留核心土法施工。施工期间正值雨季,丰富的降雨渗入坡体形成浅层松散层孔隙裂隙水。表层膨胀土因其胀缩特性,造成土体开裂,形成的裂缝成为降水及地表水入渗通道,加速了

水渗入土体,造成土体抗剪强度降低。隧道进洞口48 m处掌子面在钢拱架安装准备时出现塌方,造成后方11 m已初支段全部破坏,塌方后方13 m处拱顶出现环向较大裂缝。洞内坍塌后掌子面上方地表出现直径约12m、深4~5 m陷坑。洞内塌方土体约760 m³,如图1所示。

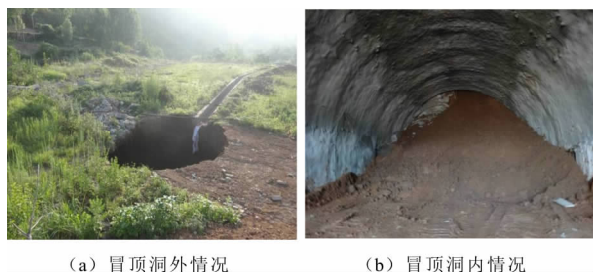


图1 隧道出口附近冒顶灾害

3 膨胀土三轴强度试验

3.1 含水率对膨胀土三轴强度的影响

为研究含水率对膨胀土三轴强度的影响,取5个膨胀土样本进行试验。试验采用重塑膨胀土土样,图2为5组膨胀土试样的击实曲线。

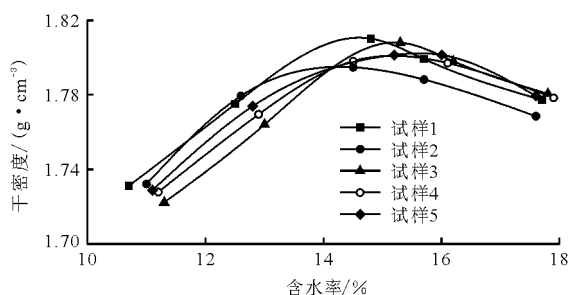


图2 干密度随含水率的变化曲线

从图2可以看出,5组膨胀土试样的平均最大干密度约为1.81 g/cm³,平均最优含水率约为15.3%。

为了研究膨胀土的含水量对三轴强度的影响,在开始试验之前,将膨胀土晒干碾压过2 mm细筛子,配置6组含水率分别为12%~22%的膨胀土标准试样,在控制相同的围压条件下进行三轴强度试验。不同含水率的膨胀土三轴强度曲线如图3所示,试验中土体最大干密度为1.81 g/cm³。

通过图3可知,在含水率小于16%时,随着膨胀土含水率的增加,土体的黏聚力和内摩擦角都逐渐增大,当含水率从12%增加到16%时,黏聚力增加了约88%,内摩擦角增加了33%,显然,黏聚力增大的幅度较高,内摩擦角增加的幅度相对较小。在

含水率大于16%时,膨胀土的黏聚力和内摩擦角都显著降低,含水率从16%增加到22%时,黏聚力降低了83%,内摩擦角降低了67.5%。可以看出,相对于内摩擦角而言,膨胀土黏聚力受含水率的影响更加显著。

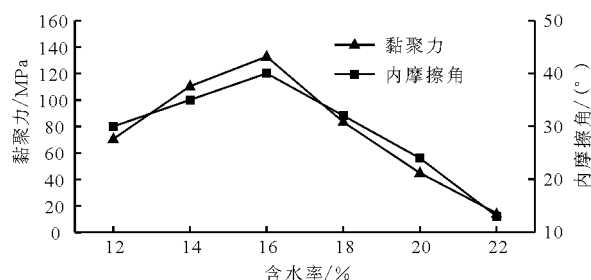


图3 不同含水率条件下的膨胀土三轴强度

影响膨胀土黏聚力的因素包括水膜连接、颗粒之间的引力作用和化学键的连接作用、胶结作用。其中,最主要的影响因素是膨胀土中的水膜连接。从微观角度来讲,膨胀土颗粒被水膜包裹,随着含水率的增加,水膜厚度也会相应地增加,较厚的水膜会大大削弱土颗粒间的连接强度,在宏观上表现为膨胀土黏聚力的大幅降低。而颗粒间的咬合力(或摩擦力)的大小是影响膨胀土内摩擦角大小的主要因素,虽然含水率的增加会在一定程度上降低颗粒之间的咬合和摩擦力,但总体上其影响不显著。

3.2 干密度对膨胀土三轴强度的影响

为研究干密度对膨胀土三轴强度的影响,取5个膨胀土样本进行试验。配置5组干密度为1.46~1.81 g/cm³的膨胀土标准试样,在控制相同的围压条件下进行三轴强度试验。不同干密度的膨胀土三轴强度曲线如图4所示。

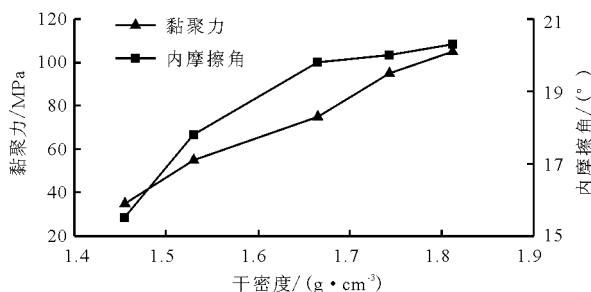


图4 不同干密度条件下的膨胀土三轴强度

通过图4可知,膨胀土的黏聚力和内摩擦角随干密度变化基本呈线性关系,当膨胀土的干密度从1.46 g/cm³增加到1.81 g/cm³,黏聚力增加了约2倍,内摩擦角增加了24.5%,可以看出,膨胀土的干密度对黏结强度的影响大于内摩擦角。当干密度大

于 1.65 g/cm^3 后,内摩擦角还有一定的增加,但不明显。这是因为干密度的增加会缩小膨胀土颗粒间的距离,因此颗粒间的相互作用得到增强。此外,颗粒间的咬合(或摩擦)作用会大幅增加,这是最关键的。因此,随着膨胀土干密度的增大,其内摩擦角在前期增长速度较快;当膨胀土干密度接近最大干密度时,颗粒间的咬合强度随干密度的增加速度明显降低。因此,当膨胀土干密度接近最大干密度时,该参数不会对内摩擦角产生较大的影响。

4 膨胀土的膨胀特性试验

4.1 膨胀率测试

膨胀率是试样在有限条件下浸水膨胀增量与初始试验高度的比值,本试验中没有施加垂直荷载,属于无荷膨胀率试验。因为无荷膨胀率可以反映膨胀土试样的吸水膨胀能力,因此该指标可以比较可靠地衡量土体膨胀的趋势。

配置含水率分别为 12%、18%、22%、26%、30% 的 5 组膨胀土试样进行浸水膨胀试验,记时观察土体膨胀全过程,记录数据,并绘制膨胀率与时间的关系曲线如图 5 所示。

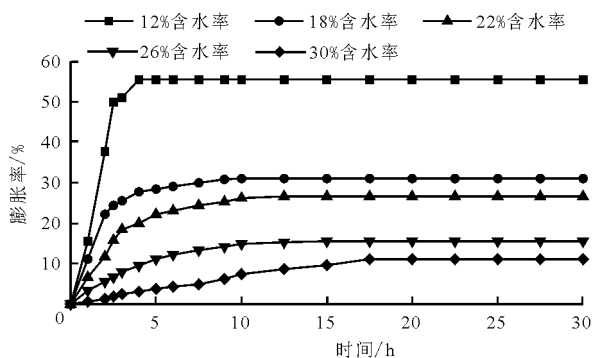


图5 膨胀率随时间变化曲线

从图5可以看出,含水量越大,试样达到膨胀平衡(试样膨胀率保持稳定、不再继续膨胀)所需要的时间越长,其最终的膨胀率也越小。尽管试验的膨胀土的初始含水率不同,但是在膨胀过程大致都可以分为快速膨胀、减速膨胀和缓慢膨胀3个阶段。快速膨胀是因为土体中有较多的孔隙,在土体遇到水之后立刻吸水膨胀,此阶段土体的膨胀显著;待土体中水分达到一定程度,土体中的空隙变小,土体的膨胀开始变得缓慢;最后,其膨胀趋势趋近于定值,土体内的大部分空隙均被水充满,吸水膨胀作用几乎停止。

4.2 膨胀力测试

膨胀土的膨胀力是土体在吸水过程中产生的最

大膨胀应力。在本次膨胀力测试过程中保证土样的体积不变,测量土体因吸水膨胀作用在竖向产生的最大膨胀应力。配置5组含水率分别为12%、18%、22%、26%、30%的膨胀土试样进行浸水膨胀试验,记时观察土体膨胀全过程并记录数据,绘制膨胀力与时间的关系曲线如图6所示。

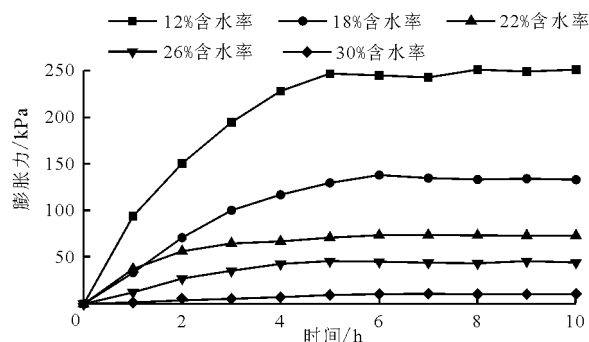


图6 膨胀力随时间变化曲线

从图6可看出,膨胀力随时间的变化曲线与膨胀率随时间的变化曲线相似,两者均经历“快速膨胀-减速膨胀-缓慢膨胀”的3个阶段。土样的初始含水率越大,试样达到膨胀平衡所需要的时间越长,其膨胀力也越小。含水率为12%的膨胀土试样最终膨胀力是初始含水率为30%试样的25倍。可见,不同初始含水率条件下,土样吸水膨胀产生的膨胀力差异十分明显,较小初始含水率的膨胀土吸水膨胀时将产生非常大的膨胀率和膨胀力,膨胀土“干缩湿胀”效应显著,因此工程上经常遇到边坡的失稳、不均匀沉降等变形灾害现象,应考虑采取防渗措施。

5 李家坪隧道破坏原因分析

根据传统的收敛-约束法的理念,对于圆形隧道假设围岩为各向同性、均一的岩土介质,在经简化的荷载模式下(即在边界上施加均布荷载)按弹塑性本构模型可以得到与围岩形变压力对应的洞壁收敛位移关系的解析解。对于深埋圆形隧道,假定围岩的侧压力系数为1,并满足均匀、连续、各向同性,假设岩体为弹性材料。其力学模型如图7所示。

对于弹性区,平衡方程为:

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + (\sigma_r - \sigma_\theta) = 0 \quad (1)$$

边界条件:

$$\sigma_r|_{r=a} = p_i, \quad \sigma_r|_{r=b} = p_0 \quad (2)$$

假设围岩含水率变化函数 $W(r)$ 分布情况为:

$$W(r) = \frac{W_{\max} R_0^2}{r^2} \quad (3)$$

式中: σ_r 和 σ_θ 分别为围岩的径向和切向应力, MPa; r 为围岩中任意一点到隧道中心的距离, m; p_i 为支护压力, MPa; p_0 为原岩应力, MPa; R_0 为隧道开挖半径, m; $W_{\max}$ 为最大含水率变化值, 假设隧道洞室周边处含水率变化最大, 越往远处含水率变化越小。

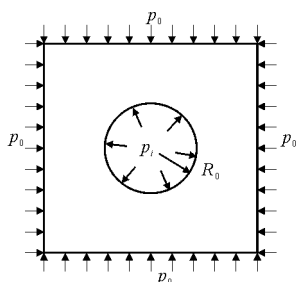


图7 隧道力学模型

考虑膨胀变形的物理方程:

$$\varepsilon_r = \frac{1-\nu^2}{E} \left[\sigma_r - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_\theta \right] + (1+\nu)\alpha W \quad (4)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1-\nu^2}{E} \left[\sigma_\theta - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_r \right] + (1+\nu)\alpha W \quad (5)$$

式中: E 为围岩的弹性模量; ν 为泊松比; α 为膨胀土的膨胀系数。

联立弹性力学中的几何方程, 可以解得弹性区围岩应力和位移:

$$\sigma_r = p_0 + (p_i - p_0) \frac{R_0^2}{r^2} + \frac{E\alpha W_{\max} R_0^2}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \ln \frac{R_0}{r} \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = p_0 - (p_i - p_0) \frac{R_0^2}{r^2} - \frac{E\alpha W_{\max} R_0^2}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \left(1 + \ln \frac{R_0}{r} \right) \quad (7)$$

$$u = \frac{1+\nu}{E} \left[\frac{R_0^2}{r} (p_0 - p_i) - (2\nu - 1)p_0 r \right] + \frac{(1+\nu)\alpha W_{\max} R_0^2}{(1-\nu)r} (\ln R_0 - (1-2\nu) \ln r + 2(1-\nu)) \quad (8)$$

假设围岩本构为理想弹塑性模型, 满足莫尔-库仑屈服准则。

莫尔-库仑屈服准则:

$$\frac{\sigma_r^p + c \cot \varphi}{\sigma_\theta^p + c \cot \varphi} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (9)$$

式中: c 为围岩的黏聚力, MPa; φ 为围岩的内摩擦角, ($^\circ$); σ_r^p 和 σ_θ^p 分别为塑性区的围岩径向和切向应力, MPa。

联立式(1)和式(6), 并根据边界条件: $\sigma_r|_{r=R_0} = p_i$, 可得:

$$\ln(\sigma_r^p + c \cot \varphi) = \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \ln r + \ln(p_i + c \cot \varphi) - \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \ln R_0 \quad (10)$$

于是, 塑性区应力为:

$$\sigma_r^p = (p_i + c \cot \varphi) \left(\frac{r}{R_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cot \varphi \quad (11)$$

$$\sigma_\theta^p = (p_i + c \cot \varphi) \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \left(\frac{r}{R_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cot \varphi \quad (12)$$

根据弹塑性界面的位移连续性条件, 可得到洞壁处径向位移与塑性形变压力的关系为:

$$u = \frac{(1+\nu)R_p}{ER_0} \left[\frac{R_0^2}{R_p} (p_0 - p_i) - (2\nu - 1)p_0 R_p \right] + \frac{(1+\nu)\alpha W_{\max} R_0}{(1-\nu)} (\ln R_0 - (1-2\nu) \ln R_p + 2(1-\nu)) \quad (13)$$

式中: R_p 为弹塑性区界面的半径, m。

膨胀土具有吸水膨胀的特性, 含水率的变化会使围岩压力发生很大变化。图8给出了不同含水率变化值条件下的围岩压力随洞径的变化曲线, 计算参数如表2所示。

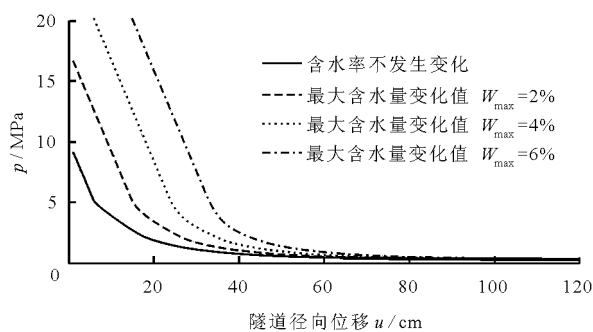


图8 不同含水率变化情况下的膨胀性围岩压力随洞径变化曲线

表2 膨胀土物理力学计算参数

重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c / kPa	摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	开挖半径 R_0 / m	剪切模量 G / GPa	泊松比 ν	膨胀系数 α
18	30	25	6	1.0	0.5	6.5%

由图8可知, 膨胀岩对含水率变化非常敏感, 尤其是围岩变形较小时, 膨胀压力可以达到塑性形变压力的数倍。由此可见, 由于李家坪隧道施工适逢

雨季, 地表水沿既有裂缝下渗, 围岩含水量增大, 吸水膨胀后产生巨大的膨胀应力, 导致隧道自稳能力下降, 出现拱部失稳、边仰坡开裂情况。

在支护方面,由于支护参数相对较薄弱,土体含水量增大后加大对初期支护钢拱架的压力,隧道开挖经过超前管棚段后采用超前小导管注浆施工,根据坍塌冒顶现场显示,在两侧拱腰连接板薄弱位置被剪切压垮,拱架扭曲变形严重。塌方段掌子面失稳后引起后方已支护段落 11 m 范围内塌方冒顶,塌方冒顶段掌子面距离超前管棚支护末端 12 m,超前管棚段除了对隧道支护结构进行加固外,对于灾害的产生有一定限制作用,可见其在隧道浅埋段刚性支撑的重要性。

此外,对于浅埋段土质隧道,大量调查发现即使是在埋深 40 m 的情况下,地表也会产生沉降或裂缝,说明土质隧道在开挖过程中容易产生整体沉降,因此选择合适的开挖方法是控制浅埋段膨胀土隧道施工的关键,隧道塌方冒顶段采用环形开挖预留核心土法施工,该方法对软弱围岩掌子面的变形能起到有效控制作用,但对于控制浅埋段隧道整体沉降效果一般。

李家坪隧道洞口段采用三台阶预留核心土法施工。图 9 为现场施工步距布置图。



图 9 现场施工步距布置图(单位:m)

由图 9 可知,距离洞口 48 m 处掌子面施工过程中隧道发生了塌方事故,导致后方 11 m 范围内已初支段全部破坏,土体位移迅速增大。李家坪隧道的破坏很大程度上与膨胀土的性质有关。

6 结 论

(1) 含水率对膨胀土黏聚力和内摩擦角影响较大,尤其是对黏聚力有非常显著的影响,含水率增加导致水膜之间的连接强度减弱,膨胀土的黏聚力急剧下降。

(2) 干密度对膨胀土黏聚力和内摩擦角也有较大的影响。干密度增大则土体黏聚力和内摩擦角也显著增加。但在膨胀土的干密度较大时,干密度对内摩擦角的影响不明显。

(3) 膨胀特性试验表明,膨胀土在吸水过程中经历快速膨胀、减速膨胀、缓慢膨胀 3 个阶段。膨胀

土“干缩湿胀”效应显著,较小初始含水率的膨胀土吸水膨胀时将产生非常大的膨胀率和膨胀力,因此,工程上经常遇到地表开裂、不均匀沉降等变形灾害现象,应考虑采取防渗措施。

(4) 李家坪隧道出口段坡积黏土属于弱膨胀土。雨季施工造成围岩含水量增大,吸水膨胀后释放应力,隧道自稳能力下降,加上支护体系相对薄弱,是造成隧道塌方的主要原因。

参考文献:

- [1] 吴道祥,熊福才,郭静芳,等.不同含水率膨胀土的无侧限抗压强度-电阻率试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2016,39(12):1688-1692.
- [2] 李 皎.干密度和含水率对膨胀土三轴强度特性的影响[J].中国水运,2017,17(1):224-225.
- [3] 谢舒雷,朱大勇,侯超群,等.干湿循环作用对合肥膨胀土的影响[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2017,40(3):368-372.
- [4] 何建新,刘 亮,热依拉,等.膨胀岩抗剪强度特性研究[J].水资源与水工程学报,2013,24(6):92-94.
- [5] 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.
- [6] 李晶晶,孔令伟,穆 坤.膨胀土原位孔内剪切试验与强度响应特征[J].岩土力学,2017,38(2):453-461.
- [7] 武 科,吴昊天,张 文,等.不同荷载作用下膨胀土的膨胀率与膨胀潜势试验[J].江苏大学学报(自然科学版),2016,37(6):713-718.
- [8] 黄志全,岳康兴,李 幻,等.滤纸法测定非饱和膨胀土土水特征曲线试验[J].南水北调与水利科技,2015,13(3):482-486.
- [9] 马晓宁,王选仓,孙进玲,等.陇南地区膨胀土微观结构与膨胀性[J].南水北调与水利科技,2016,14(3):111-114+149.
- [10] 王清标,张 聪,温小康,等.膨胀土胀缩机理及其在控制隧道沉降中的应用[J].地下空间与工程学报,2014,10(6):1426-1432.
- [11] 周 奎,曾雅颖,祝 文.复杂地质条件下遇水软化围岩的公路隧道边坡治理[J].水资源与水工程学报,2012,23(6):104-106+110.
- [12] 朱经志.膨胀土地区隧道洞口边仰坡垮塌机理与防治措施研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):226-231.
- [13] 郭 瑞,何 川,方 勇.膨胀土地层中盾构隧道管片结构受力分析与对策研究[J].现代隧道技术,2010,47(6):17-22.
- [14] 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.
- [15] 胡世权.过膨胀土隧道塌方段施工技术研究与应用[J].山东建筑大学学报,2013,28(1):73-77+81.