

文章编号: 1007-2993(2024)05-0624-07

合肥弱膨胀土力学特征及饱水扰动影响

罗光财¹ 周紫薇² 王智超² 哈吉章¹ 吴佳欣³

(1. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南长沙 410000; 2. 湘潭大学土木工程学院, 湖南湘潭 411105;

3. 甘肃铁科建设工程咨询有限公司 甘肃兰州 730030)

【摘要】 为了研究合肥地区弱膨胀土遇水及扰动对其强度和变形等力学性质的影响,对合肥地铁 7 号线徽富路站深基坑内弱膨胀土的原状样及饱和扰动样,分别开展了 50 kPa, 100 kPa 和 200 kPa 三种围压下常规饱和三轴压缩(CTC)和三轴拉伸(CTE)以及原状非浸水样双压力室三轴压缩试验。通过对比原状样与饱和扰动样的应力-应变、强度指标以及变形模量的差异,探讨了饱水扰动对膨胀土力学性质的影响,且采用 XRD 衍射测试了膨胀土的矿物成分及含量。试验结果表明:(1)合肥地铁 7 号线基坑土质为弱膨胀土,黏土矿物中蒙脱石含量占 46%;(2)合肥地铁 7 号线基坑的弱膨胀土强度的降低主要表现为黏聚力的降低,原状样较扰动饱和重塑样黏聚力下降了 56%,而内摩擦角的变化并不显著;(3)合肥地铁 7 号线基坑内弱膨胀土有超固结现象,表现为原状样具有剪胀软化特征;(4)合肥地铁 7 号线基坑弱膨胀土原状样遇水扰动后初始模量下降了 20% 左右,水的浸润大幅降低了膨胀土抗变形能力。

【关键词】 弱膨胀土; 抗剪强度指标; 变形模量; 饱水扰动; 体变测量

【中图分类号】 TU411.3

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.05.019

Mechanical Characteristics of Slight-Expansive Soil in Hefei and its Effect by Saturation Disturbance

Luo Guangcai¹ Zhou Ziwei² Wang Zhichao² Ha Jizhang¹ Wu Jiaxin³

(1. China Construction Fifth Engineering Bureau Co., Ltd., Changsha 410000, Hunan, China; 2. College of Civil Engineering, Xi-

angtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China; 3. Gansu Tiekong Construction Engineering Consulting Co.,

Ltd., Lanzhou 730030, Gansu, China)

【Abstract】 To study the influence of water and disturbance on the strength and deformation of weak-expansive soil in the Hefei area, the undisturbed samples and saturated disturbed samples of weak-expansive soil in the deep foundation pit of Huifu Road Station of Hefei Metro Line 7 were subjected to conventional saturated triaxial compression (CTC) and triaxial tension (CTE) under three confining pressures of 50 kPa, 100 kPa and 200 kPa, and the undisturbed non-immersed samples were subjected to a triaxial compression test. By comparing the differences of stress-strain, strength index, and deformation modulus between undisturbed and saturated disturbed samples, the influence of saturated disturbance on the mechanical properties of expansive soil was discussed, and the mineral composition and content of expansive soil were tested by XRD diffraction. The test results show that: (1) The soil of the foundation pit of Hefei Metro Line 7 is cohesive weak expansive soil, and the montmorillonite content in clay minerals accounts for 46%. (2) The decrease of cohesion mainly manifests the decrease of strength of Hefei weak-expansive soil. The cohesion of the undisturbed sample is 56% lower than that of the disturbed saturated remolded sample, while the friction angle change is insignificant. (3) The weak-expansive soil in the foundation pit of Hefei Metro Line 7 has the phenomenon of over-consolidation, characterized by the dilatancy softening of the undisturbed sample. (4) The initial modulus of Hefei weak-expansive soil decreased by about 20% after water disturbance, and water infiltration significantly reduced the deformation resistance of expansive soil.

【Key words】 weak-expansive undisturbed soil; shear strength index; deformation modulus; saturation disturbance; volume variation measurement

基金项目: 湖湘高层次人才聚集工程—创新团队(2019RS1059); 湖南省教育厅优秀青年项目(17B260)

作者简介: 罗光财, 男, 1979 年生, 汉族, 湖南汉寿人, 硕士, 高级工程师, 主要从事基础设施项目施工技术研究。E-mail: 350460420@qq.com

通讯作者: 王智超, 男, 1980 年生, 汉族, 湖北荆州人, 博士, 教授, 主要从事岩土流变学等方面的教学和科研。E-mail: wzc98231@163.com

0 引言

合肥市作为华东地区重要的交通枢纽, 正处在地铁建设快速发展时期, 然而在地铁建设过程中面临膨胀土地层以及地铁近接施工对周边结构安全性影响大等众多难题^[1], 需要对该地区的膨胀土强度及变形特征进行深入研究。膨胀土主要由强亲水性黏土矿物蒙脱石和伊利石组成, 具有膨胀结构、多裂隙性、强胀缩性、高塑性和强度衰减性^[2]。膨胀土在天然状态下常处于较坚硬状态, 但对气候和水文因素有较强的敏感性, 这种敏感性对工程建筑物会产生严重的危害^[3-4]。合肥地区梅雨季节长, 干湿交替频繁, 对地层膨胀土力学性质影响显著^[5], 给全年时段基础设施建设带来很大挑战。针对膨胀土的特殊性质, 目前已有许多学者开展研究。Karalis^[6]对希腊非饱和膨胀土的变形特征进行了研究; Dobrowolsky 和 Vrettos^[7]对意大利特殊膨胀土变形进行了试验研究和理论分析; Cui 等^[8]对膨润土与砂混合土体变形特性进行了深入研究。国内研究中, 王春周^[9]对荆门城南区域的膨胀土的矿物成分和力学性质进行分析; 谭波等^[10]对南宁膨胀土进行了三向膨胀变形研究; 崔伟等^[11]对济南、淄博地区改性膨胀土的室内物理力学性质进行了研究。通过以上研究发现膨胀土具有高度的区域性。不同地区的膨胀土含水率、比重、膨胀率等具有差别, 相应的性质也会有所改变。除此之外, 戴福初等^[12]用直剪仪对南水北调中段的膨胀土进行了快剪试验; 童军^[13]等用 GDS 非饱和土直剪系统对南阳膨胀土吸力与应力关系进行探究; 李新明等^[14]用 GDS 三轴试验系统进行了固结不排水三轴剪切试验, 研究了速率和围压对抗剪强度的影响; 杨庆等^[15]研究了黑山和梅山重塑膨胀土强度与膨胀力之间的关系。以上对于膨胀土的研究中, 多是对重塑膨胀土的力学性能进行研究, 对于原位取土且能精确测定膨胀土应力-应变和体变关系的文献较少。此外, 庄心善等^[16]运用 GDS 动三轴仪研究了合肥膨胀土动弹性模量与阻尼比之间的关系; 张爱军等^[17]以陕西安康压实重塑膨胀土为对象, 研究了人工压实膨胀土的膨胀变形规律; 曾召田等^[18]研究了干湿交替环境下南宁膨胀土变形规律, 发现初始切线模量与残余体变率有一定的关联。以上膨胀土变形的研究中, 对于分析水和扰动对膨胀土强度以及变形模量研究的文献较少。

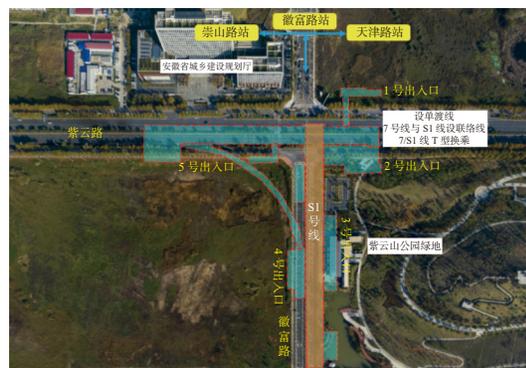
结合以上讨论, 本研究针对合肥地铁 7 号线徽富路站深基坑中的膨胀土原状样及饱水扰动样展开研究。通过 GDS 非饱和三轴仪, 精确测量土样的应

力应变及体变等力学参数, 对合肥膨胀土的力学性质及变形模量展开分析。

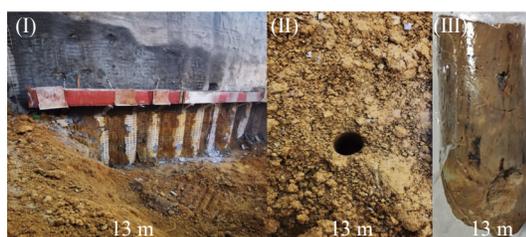
1 合肥弱膨胀土的基本物理性质

1.1 现场取土

本研究使用的膨胀土取自合肥地铁 7 号线徽富路车站基坑。徽富路站为合肥地铁 7 号线一期工程的第 14 座车站, 与 S1 线采用节点“T”型换乘, 如图 1(a) 所示。



(a) 徽富路站示意图



(b) 13 m 取土



(c) 18 m 取土

图 1 现场取土情况

根据地质勘察报告, 此站点膨胀土分布深且广, 站点结构复杂, 施工将形成深基坑群。其周边分布有重要建筑物, 对基坑变形控制严格。施工过程中, 开挖卸载及持续的干湿循环等作用下, 易造成主、附属结构开裂和不均匀沉降, 也会诱发基坑边坡坍塌失稳。取土区域为地铁车站结构临近土层(如图 1(b)和图 1(c)), 分别获取了距地面 13 m 和 18 m 深土层原状土样(薄壁取土器)以及扰动土样(散装土)。土样呈棕黄色、色泽灰暗、夹带灰色黏土条带、呈硬塑-坚硬状态等典型特性; 且有比较粗的硬块, 有滑腻感, 遇水后黏性较强, 可塑性高。

1.2 基本物理性质及矿物成分

对取回的弱膨胀土参照《土工试验方法标准》^[19](GB/T 50123—2019)进行常规的基本物理试验,测得合肥地铁基坑土干密度为 1.6 g/cm^3 , 含水率为 21.7%, 塑限为 25.3%, 塑性指数为 31.9, 自由膨胀率 55.6%。其基本物理性质指标如表 1 所示。为了进一步了解此基坑土的矿物成分及含量,进行 XRD 衍射,所得结果如图 2 所示。可见,该土样的主要黏土矿物成分为蒙脱石(46%)和伊利石(37%),蒙脱石和伊利石是造成合肥地铁地铁 7 号线基坑内弱膨胀土吸水膨胀,失水收缩的主要原因。

表 1 土样基本物理性质

比重	含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	自由膨胀率/%
2.716	21.7	57.2	25.3%	31.9	55.6

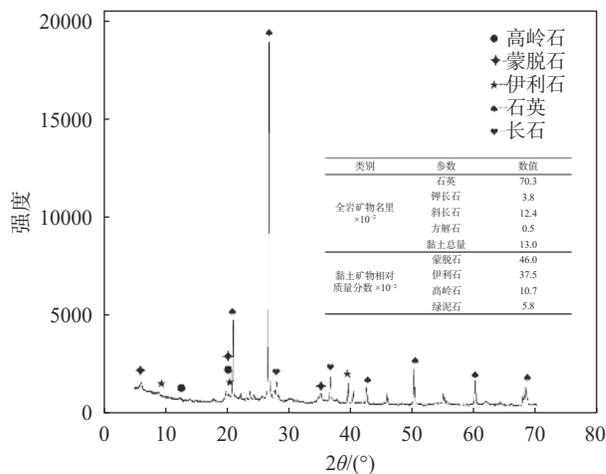


图 2 土样 X 射线衍射结果

根据《膨胀土地区建筑技术规范》^[20](GB 50112—2013)规定膨胀土的膨胀潜势应按表 2 中的标准进行划分。由试验测得的膨胀土基本物理性质及表 2 中的膨胀土划分标准,可以将合肥地铁 7 号线基坑土质定性为弱膨胀土。

表 2 膨胀土膨胀潜势划分

自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$	膨胀潜势
$40 \leq \delta_{ef} < 65$	弱
$65 \leq \delta_{ef} < 90$	中
$\delta_{ef} \geq 90$	强

2 饱和扰动样及原位弱膨胀土三轴试验

2.1 试验方案

为了便于研究,将合肥膨胀土分为原状原位样和饱和扰动样两大组,分别进行常规三轴压缩(CTC)和三轴拉伸(CTE)试验。采用 GDS 三轴仪双压力室,

更加精确地测量膨胀土体积的变化,具体试验方案如表 3 所示。

表 3 试验方案

试验编号	取样深度/m	试验类型	围压/kPa	试验条件
1			50	原状样
2	13	双压力室三轴压缩(CTC)	100	
3			200	
4			50	
5	18	双压力室三轴压缩(CTC)	100	
6			200	
7			50	饱和扰动样
8	13	单压力室三轴压缩(CTC)	100	
9			200	
13			50	
14	13	单压力室三轴拉伸(CTE)	100	
15			200	

2.2 原状样非浸水体变测量

非饱和土的体积变化量的精确测量是室内试验的难题,为了更加精确地测量合肥 7 号线徽富路站基坑所取得弱膨胀土的非浸水体积变化量,采用 GDS 双压力室进行试验(见图 3)。

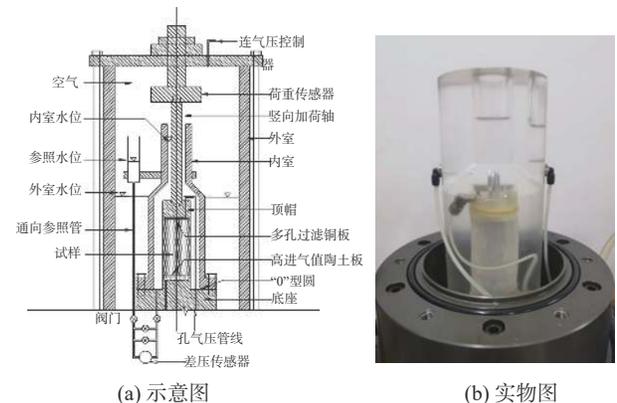


图 3 双压力室

图 3 为在外压力室内再安装一个内压力室,因内压力室是敞口,可以保证试验时内、外压力室的水压完全相等,内压力室不会因为水压而产生变形,内压力室内的水位变化能够通过差压传感器自动连续的测量,即能够准确地获得试样体积的变化量。试验过程为:首先按照《公路土工试验规程》^[19](JTG 3430—2020)对原状土进行处理,制作标准三轴试样,其次在安装好试样后安装内压力室,内压力室和参照管与差压传感器的两根管道相连,通过内压力室的管道给内压力室注水,通过吸耳球对参照管注水,然后排出差压传感器管路中的气泡。完成后安装外压力室,安

装时要避免压力杆与内压力室碰撞。外压力室安装完成后进行注水,注水完成后进行加压检查。最后打开 GDSLAB 系统,进行相关软件操作来采集数据。

2.3 原状样三轴试验及结果

水的进入对膨胀土的强度和变形有一定影响,为了量化确定影响的大小,先对从基坑取得的原位弱膨胀土原状样进行双压力室三轴试验。双压力室可以减少因为围压造成压力室体积变形引起的试验误差,提高了体变测量的准确度,从而不用土样浸水饱和就能较为精确地测得其体变量。埋深 13 m 和 18 m 原状样应力应变曲线和体变曲线见图 4。

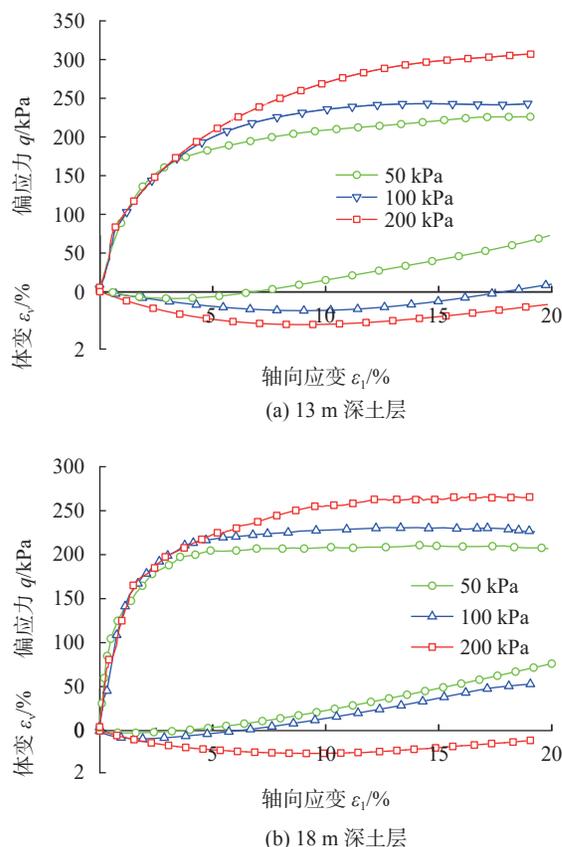


图 4 原状样三轴试验曲线

从图 4 可知: (1)合肥膨胀土应力应变关系表现为剪切硬化的特点,在轴向变形较小时,在不同围压下偏应力并没有很大的差别,在 5% 的轴向应变之后,在不同围压下,偏应力值的区别才逐渐增大。取 15% 的轴向应变所对应的强度为其峰值强度,200 kPa 围压较 100 kPa 围压下,峰值强度增加了 23.1%。但 100 kPa 较 50 kPa 围压下峰值强度仅增加了 9.5%。围压越大,膨胀土的抗剪强度越强; (2)体变曲线出现了剪胀现象,且围压越小,剪胀现象越明显,表明合肥基坑内原状弱膨胀土具有超固结性。在相同围压下 18 m 深土层在轴向应变为 2% 时开始出现剪胀现象,

13 m 深土层在轴向应变为 3% 时开始出现,越深的土层越早出现剪胀现象。

2.4 饱水扰动重塑样三轴试验及结果

为探究水和重塑扰动对膨胀土试样的影响,将从基坑取得的散装土制成三轴饱和重塑样,分别开展 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa 围压下的排水三轴拉伸 (CTE)和三轴压缩 (CTC) 试验(见图 5)。

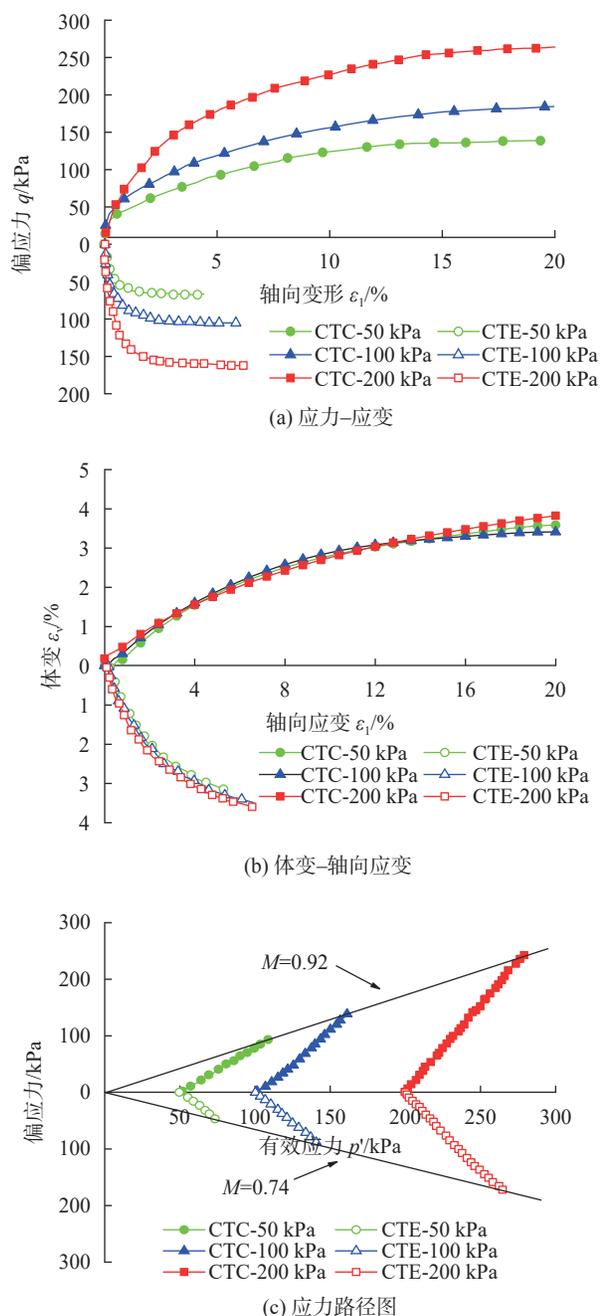


图 5 13 m 饱和和重塑土三轴试验结果

从图 5 可知: (1)在三轴压缩试验中,以轴向应变 20% 作为试验终止条件,但在三轴拉伸试验中,在轴向应变为 7% 左右时,试样即被拉伸破坏。在相同

围压下,压缩强度比拉伸强度提高了 61.7%,证明合肥地铁 7 号线膨胀土需要考虑中主应力的影响;(2)饱和和重塑样在不同围压下三轴压缩和拉伸的应力-应变关系差异显著,而其体变变化规律差异不显著,这与原状样的体变规律不一致;(3)CTC 试验的 M 值 (M 值为应力路径图中以 q/p' 表示的临界状态线斜率)为 0.92, CTE 试验的 M 值为 0.74。

3 弱膨胀土变形及强度指标分析

3.1 水对弱膨胀土强度的影响

膨胀土主要由强亲水性黏土矿物蒙脱石和伊利石组成,水的进入会大大降低膨胀土的强度。膨胀土对水具有敏感性,难以测量含水率与强度的直接关系。故对合肥弱膨胀土相同深度的原状样和重塑饱和样两种极端情况进行对比分析(见图 6)。

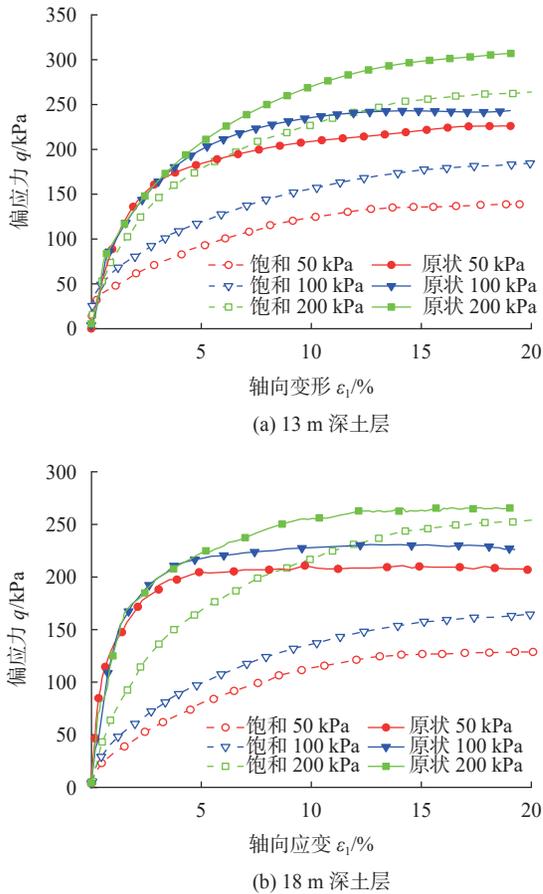


图 6 弱膨胀应力-应变曲线

从图 6 中可知:(1)原状样与饱和重塑样都是剪切硬化类型;(2)相同围压下,未浸水原状样强度高于重塑饱和样强度。相同深度土层,在低围压(50 kPa)下,未浸水原状样较饱和样强度提高了 63%,中围压(100 kPa)提高了 36%,高围压(200 kPa)仅提高了 16%;(3)通过库伦公式计算得到原状样 c 为 70.7, ϕ

为 17.3;饱和重塑样 c 为 30.8, ϕ 为 14.5。由此可见,水的进入主要影响弱膨胀土的黏聚力。

3.2 围压对膨胀土强度的影响

应力历史既包括天然土在过去地质年代中受到的固结和地壳运动的作用,也包括土在实验室或施工中受到的应力过程,对于黏性土一般指其超固结历史。由于基坑开挖施工卸载,导致本文取自不同深度的基坑弱膨胀原状土形成超固结土。为了探究浸水饱和样和原状样两种极端情况下,不同围压(即不同应力历史)对膨胀土强度的影响,测得其体变规律如图 7 所示。从图 7 可知:(1)合肥弱膨胀土原状样有剪胀现象,而重塑饱和样没有,证明原状样具有一定的超固结性,而饱和重塑土为正常固结土,所以表现为剪缩;(2)原状土样产生的回弹大小与围压增加呈现反比现象,其中 50 kPa 围压状态下,体变曲线峰值出现的最早,曲线回弹最大;(3)13 m 深土层在高围压(200 kPa)下峰值为 1.13%,18 m 深土层峰值为 1.07%。土层深度对膨胀土变形影响不大。

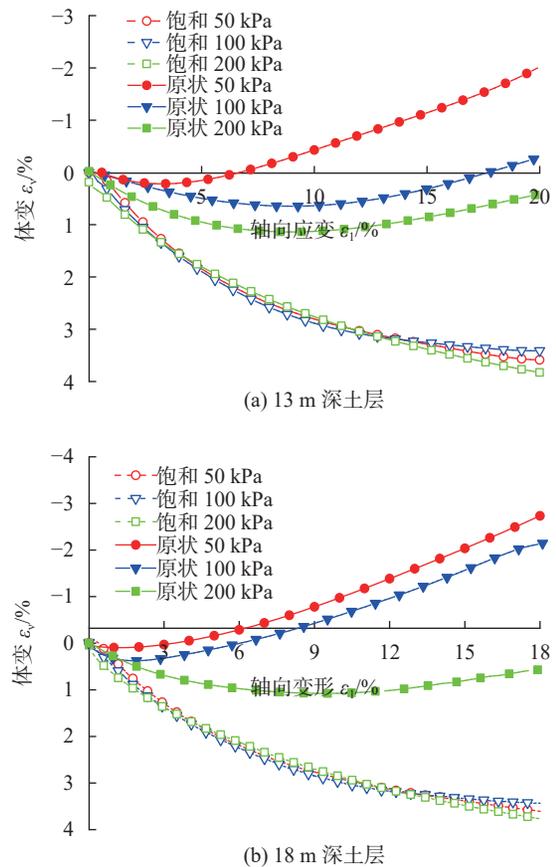
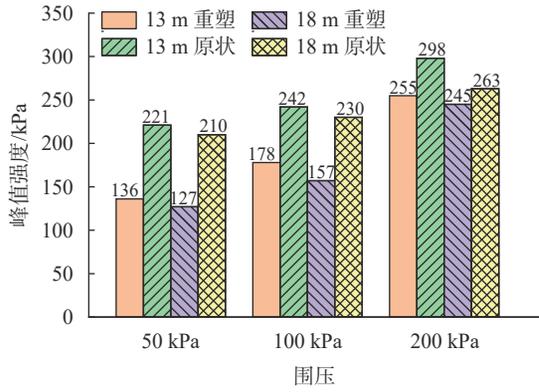


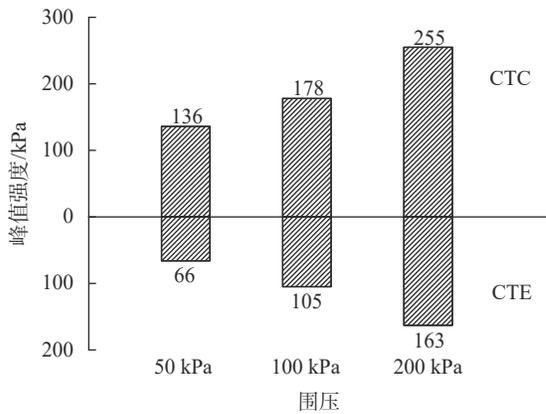
图 7 微膨胀体变曲线

图 8 为不同深度原状样和饱水重塑样在不同围压下的峰值强度。由图 8 可知:(1)随着围压的增加,

峰值强度随之增强。在 200 kPa 的围压下, 原状样与重塑样强度差别最小, 仅在 10% 左右, 故围压越高, 水的进入对膨胀土的影响越小; (2) 不论原状样还是重塑样, 13 m 深土层较 18 m 深土层强度高 10 kPa 左右, 说明该基坑土存在一定硬壳覆盖层下卧软弱层, 基坑开挖时需注意软弱层的强度降低; (3) 三种不同围压下 CTC 与 CTE 峰值强度对比, 表明合肥膨胀土抗压强度明显高于抗拉强度。



(a) 原状样与饱和重塑样



(b) 饱和重塑样三轴压缩与拉伸

图 8 不同围压下峰值强度

3.3 变形特征

在三轴状态下, 偏应变 ε_d 和体积应变 ε_v 定义为

$$\varepsilon_d = \frac{2}{3} |\varepsilon_1 - \varepsilon_3| \quad (1)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad (2)$$

广义胡克定律可以表达为

$$\Delta\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\Delta\sigma_1 - \nu(\Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3)] = \frac{1}{E} (\Delta\sigma_1 - 2\nu\Delta\sigma_3) \quad (3)$$

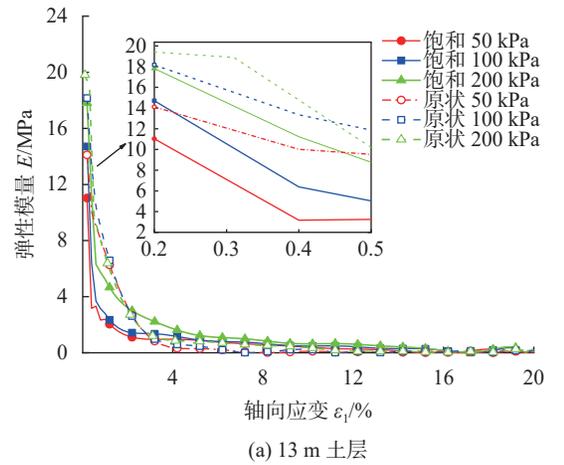
式中: ν 为材料的泊松比; E 为土体弹性模量, 亦有

$$E = \frac{\Delta\sigma_1 - 2\nu\Delta\sigma_3}{\Delta\varepsilon_1} \quad (4)$$

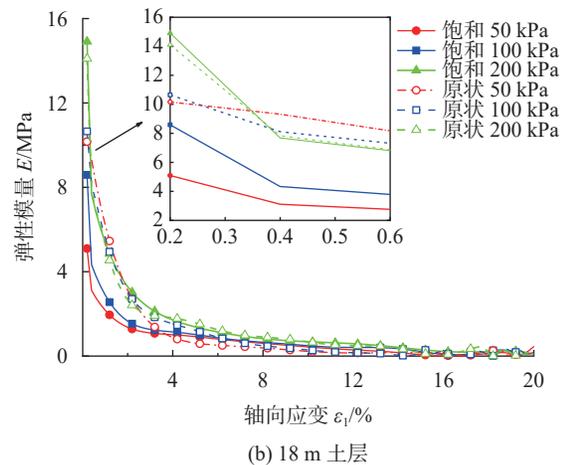
式中材料的泊松比定义为

$$\nu = \frac{\Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_1} \quad (5)$$

由于三轴排水试验能直接测得应力 σ_1, σ_3 , 应变 ε_1 和 ε_3 , 从而不同深度土层经过上述公式处理, 绘制轴向应变与弹性模量关系见图 9。从图 9 可知: (1) 初始的剪切模量最大, 随着轴向应变的增加, 弹性模量呈急速下降趋势, 最后趋于 0, 符合土样压缩变形的规律; (2) 13 m 深土层弹性模量较 18 m 深土层弹性模量有 4~6 MPa 的提升, 证明 13 m 深度土层更加坚固, 变形更小。



(a) 13 m 土层



(b) 18 m 土层

图 9 弱膨胀土弹性模量曲线图

图 10 为不同土层膨胀土原状样与重塑样弹性模量对比柱状图, 从图中可知相同土层饱和重塑样弹性模量相较于原状样, 模量降低了 3 MPa 左右, 说明了水的浸入将降低土体抵抗变形的能力, 在施工过程中要尽量避免水浸入土中。

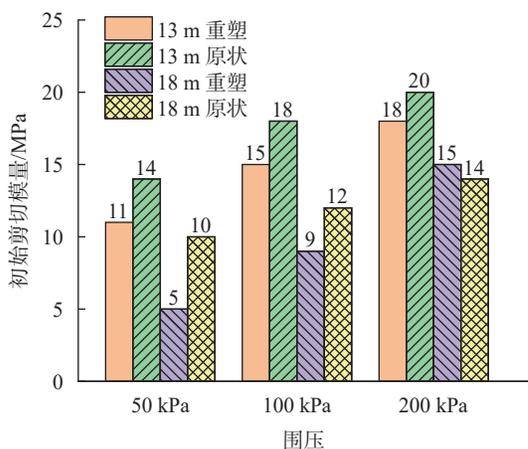


图 10 不同围压下初始剪切模量

4 结论

通过对合肥地铁 7 号线徽富路站深基坑内弱膨胀土进行常规 CTC、CTE 及双压力室试验,研究合肥弱膨胀土原状样力学特征及饱水扰动对其强度和变形的影响,得到主要结论如下:

(1)合肥地铁 7 号线基坑弱膨胀土的液限为 57.2%、塑限为 25.7%、自由膨胀率为 55.6%,主要黏土矿物为蒙脱石(46%)和伊利石(37.5%),定性为黏性弱膨胀土。

(2)合肥弱膨胀土强度受水进入而降低显著,但主要影响弱膨胀土的黏聚力,原状样黏聚力由 70.7 kPa 下降至 30.8 kPa,饱水扰动后黏聚力下降了 56%,而内摩擦角由 17.3°下降至 14.5°,仅下降了 16%;且围压越高,水的进入对膨胀土的影响越小。

(3)基坑内弱膨胀土具有超固结剪胀现象,越深的土层越早出现剪胀,而其重塑饱和样则没有该现象。饱水扰动后原位原状样的初始模量由 14 MPa 下降至 11 MPa,下降了 21%左右,水的进入降低了合肥弱膨胀土抵抗变形稳定性的能力,需做好膨胀土的防排水措施。

参 考 文 献

[1] 陈炜韬,董宇苍,方霖,等.合肥膨胀土地层浅埋双洞地铁隧道施工参数优化研究[J].隧道建设(中英文),2018,38(2):191-198.

[2] 孙长龙,殷宗泽,王福升,等.膨胀土性质研究综述[J].水利水电科技进展,1995,15(6):11-15.

[3] 包承纲.南水北调中线工程膨胀土渠坡稳定问题及对策[J].人民长江,2003,34(5):4-6.

[4] 李生林,施斌,杜延军.中国膨胀土工程地质研究[J].自然杂志,1997,19(2):82-86.

[5] 廖世文.膨胀土与铁路工程[M].北京:中国铁道出版社,1984.

[6] KARALIS T K. On the elastic deformation of non-saturated swelling Mechanica, 1990, 84(2): 19-45.

[7] DOBROWOLSKY M, VRETTOS C. Assessment of swelling deformation of unsaturated Kaolinite clay. In: Experimental Unsaturated Soil Mechanics[C]. Springer Proceedings in Physics, 2007, 112(3): 285-293.

[8] CUI S L, DU Y F, WANG X P, et al. Influence of temperature on swelling deformation characteristic of compacted GMZ bentonite-sand mixtures[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(2): 2819-2830.

[9] 王春周.荆门城南区域膨胀土膨缩特性及抗剪强度研究[J].中国勘察设计,2021(2):104-107.

[10] 谭波,徐良,李亚奇.南宁灰白重塑膨胀土三向膨胀室内试验研究[J].科学技术与工程,2020,20(35):14612-14618.

[11] 崔伟,李华鑫,穆乃敏.石灰改性膨胀土工程性质的试验研究[J].岩土力学,2003,24(4):606-609.

[12] 戴福初,董文萍,黄志全,等.南水北调中线段原状膨胀土抗剪强度试验研究[J].工程科学与技术,2018,50(6):123-131.

[13] 童军,胡波,龚壁卫.原状膨胀土直剪特性研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(3):613-617.

[14] 李新明,贾亚奎,王志留,等.原状膨胀土剪切力学特性的应变速率效应[J].岩土力学,2022,43(12):1-9.

[15] 杨庆,张慧珍,栾茂田.非饱和膨胀土抗剪强度的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(3):420-425.

[16] 庄心善,赵汉文,王俊翔,等.合肥膨胀土动弹性模量与阻尼比试验研究[J].浙江大学学报,2020,54(4):759-76.

[17] 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.

[18] 曾召田,刘发标,吕海波,等.干湿交替环境下膨胀土变形试验研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(3):72-76.

[19] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,2019.

[20] GB 50112—2013 膨胀土地区建筑技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

收稿日期:2023-07-17