

文章编号: 1007-2993(2024)05-0554-06

# 基于含水率改变的抗剪强度指标折减方法在膨胀土基坑支护设计计算中的应用

李凌峰 王沁沅 王俊阳

(中航勘察设计研究院有限公司, 北京 100089)

**【摘要】** 通过膨胀土室内试验, 得到了膨胀土含水率与抗剪强度指标的定量关系。试验研究表明, 抗剪强度指标随含水率的增加呈逐渐降低的趋势, 与内摩擦角  $\phi$  相比, 黏聚力  $c$  对含水率的变化更加敏感, 含水率每增加 5%, 黏聚力  $c$  降低 7.5 kPa, 内摩擦角  $\phi$  降低  $3^\circ$ 。在此基础上, 提出了适用于膨胀土基坑支护设计计算的基于含水率改变的抗剪强度指标折减方法, 并通过工程实例计算与现场监测验证了该方法在膨胀土基坑支护设计中的适用性。

**【关键词】** 膨胀土基坑; 含水率; 抗剪强度指标; 基坑支护设计计算

**【中图分类号】** TU432; TU443

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.05.008

## Shear Strength Index Reduction Method Based on Water Content Change in Design and Calculation of Foundation Supporting in Expansive Soil

Li Lingfeng Wang Qinyuan Wang Junyang

(Avic Institute of Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 100089, China)

**【Abstract】** Based on the laboratory test of expansive soil, the quantitative relationship between water content and shear strength index was statistically analyzed. Research shows that the shear strength index gradually decreases with the increase of water content. Compared with the internal friction angle  $\phi$ , the cohesive force  $c$  is more sensitive to changes in water content. For each 5% increase in water content, cohesion  $c$  decreases by 7.5 kPa and internal friction angle  $\phi$   $3^\circ$  lower. On this basis, a shear strength index reduction method based on changes in water content was proposed for the design and calculation of expansive soil foundation pit support. The applicability of this method in the design of expansive soil foundation pit support was verified through engineering case calculations and on-site monitoring.

**【Key words】** expansive soil foundation pit; water content; shear strength index; design and calculation of foundation pit support

### 0 引言

膨胀土含有较多的亲水性黏土矿物, 吸水急剧膨胀, 失水严重收缩, 其胀缩特性对工程建设具有很大的危害性。近年来, 随着城市建设的发展, 膨胀土深基坑工程也逐渐增加, 更出现了大量膨胀土深基坑支护结构失效, 基坑倒塌事件<sup>[1-3]</sup>。图 1 为某膨胀土基坑倒塌现场照片。

关于膨胀土胀缩机理及其改良方法, 专家学者开展了大量研究。李生林等<sup>[4]</sup>研究了膨胀土的微观结构特性、胀缩性, 并采用塑性图法判别膨胀土。陈善雄等<sup>[5]</sup>建立并验证了一种新的膨胀土判别与分类方法。唐朝生等<sup>[6]</sup>研究了膨胀土的收缩开裂特性。贾景超<sup>[7]</sup>分析研究了膨胀土的膨胀机理及细观膨胀

模型。耿建彬<sup>[8]</sup>通过调查研究了膨胀土地区地裂的形成发育及其危害防治。孟庆云等<sup>[9]</sup>通过大量室内试验研究了膨胀土胀缩时程曲线特征。陈善雄<sup>[10]</sup>提出了膨胀土的填筑控制标准及骨架防护与植物防护相结合的坡面综合防护方案。惠会清等<sup>[11]</sup>研究了石灰、粉煤灰改良膨胀土性质机理。丁金华<sup>[12]</sup>研究了土工格栅对膨胀土膨胀变形的约束效果及其对边坡浅层稳定的改善作用。杨和平等<sup>[13]</sup>研究了南宁外环膨胀土路基处治技术。贾欣媛等<sup>[14]</sup>研究了机械扩大头锚索在成都膨胀土地区深基坑支护中的应用。刘军等<sup>[15]</sup>分析了土的标准吸湿含水率与土的颗粒组成关系。丁国权等<sup>[16]</sup>对膨胀土边坡常用防护方法进行了详细的分析和比较。



图1 某膨胀土基坑倒塌

由此可见,目前关于膨胀土的研究很多,但大多集中于膨胀机理、膨胀特征及膨胀土的改良处理,研究偏重理论,忽略了与实际工程的结合应用,特别是缺乏统一的膨胀土深基坑支护设计计算方法和标准。

本研究通过膨胀土室内试验,统计了含水率与抗剪强度指标的关系,得到了含水率与抗剪强度指标的定量关系,提出了适用于膨胀土基坑支护设计计算的基于含水率改变的抗剪强度指标折减方法,并通过工程实例计算与现场监测对其进行了验证,以期更加深入研究膨胀土基坑支护设计方法,并为相关工程提供参考。

### 1 基于含水率改变的抗剪强度指标折减方法

影响膨胀土膨胀特性的首要因素是土的含水率,尤其是含水率改变引起的抗剪强度指标的改变,膨胀土吸水后,土的抗剪强度降低,在实际工程中,一般根据经验对抗剪强度指标进行适当折减,但缺乏抗剪强度指标折减系数取值的合理依据。

#### 1.1 含水率与抗剪强度指标的定量关系

根据区域资料,成都地区膨胀土大气影响深度为3 m,大气影响急剧深度为1.35 m。为此,本次研究使用薄壁取土器采用快速静力连续压入法采取地坪标高以下3 m深度范围内的黏性土原状土样,原状土取样长度不小于30 cm,在24 h内送土工试验室进行试验,采用烘干法进行含水率试验,采用直接剪切试验进行抗剪强度试验,得到每组土样的含水率 $w$ 及抗剪强度指标——黏聚力 $c$ 及内摩擦角 $\varphi$ ,并根据最终试验结果绘制含水率 $w$ 与黏聚力 $c$ 、内摩擦角 $\varphi$ 关系曲线(见图2、图3)。

由图2、图3可知,随着膨胀土含水率的增加,黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 呈逐渐降低的趋势。拟合得到黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 与含水率 $w$ 近似呈线性关系,其关系式为:

$$c = -2.0499w + 99.172 \quad (1)$$

$$\varphi = -0.9464w + 40.292 \quad (2)$$

式中: $c$ 为土体黏聚力,kPa; $\varphi$ 为土体内摩擦角,(°); $w$ 为含水率,%。

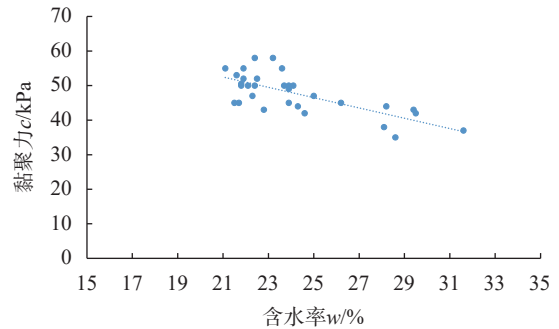


图2 含水率与黏聚力关系曲线

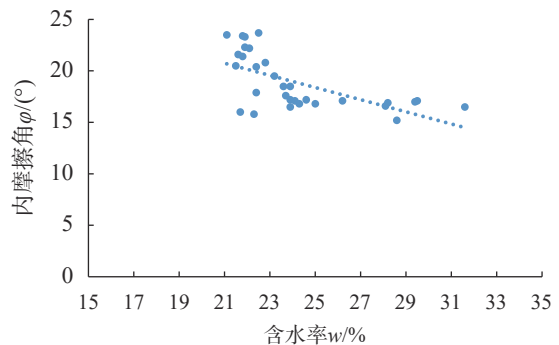


图3 含水率与内摩擦角关系曲线

由式(1)、式(2)可知,与内摩擦角 $\varphi$ 相比,膨胀土黏聚力 $c$ 对含水率 $w$ 的变化更加敏感,膨胀土的含水率每增加5%,黏聚力 $c$ 降低7.5 kPa,内摩擦角 $\varphi$ 降低3°。

#### 1.2 使用方法

根据前述膨胀土抗剪强度指标随含水率的变化关系,可在膨胀土基坑支护设计时根据含水率对膨胀土抗剪强度指标进行适当折减后再进行计算。具体使用方法如下:

(1)获得场地内膨胀土的含水率 $w$ 范围值、标准值及抗剪强度指标——黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 。

(2)场地内膨胀土按饱和状态考虑,取适当的最大含水率 $w$ ,根据含水率 $w$ 与黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 的关系,对抗剪强度指标进行相应的折减,得到最大含水率 $w$ 下的黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 。

(3)依据折减后的黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 进行基坑支护设计计算。

在使用该方法时需注意,由于基坑土体处于不同的边界条件和状态,大气降雨、地下水位甚至城市管网的渗水都造成土体含水率的不同,从而导致抗剪强度的差异。因此,在对抗剪强度指标进行折减时,

应重点考虑工程地理位置、气候条件、周边环境条件、季节及防水措施的差异,从而选择合适的含水率对抗剪强度指标进行折减。

## 2 工程实例

### 2.1 工程概况

该项目基坑最大开挖深度为 17.60 m。场地地层从上至下主要为:人工填土层( $Q^{ml}$ )、一般第四系冲洪积层粉质黏土及黏土( $Q^{al+pl}$ )、古近系粉砂质泥岩层(E)。其中一般第四系冲洪积层黏性土自由膨胀率为 47.0%~62.0%,具有弱膨胀性,该层平均层厚达 13.20 m。

场地内存在一层上层滞水,以绿化灌溉、大气降水、积雪融水等为主要补给方式,以蒸发为主要排泄

方式,地下水变化无规律,受人为活动影响较大。

### 2.2 基坑支护设计与计算

#### 2.2.1 场地防排水措施

在基坑顶部距离上口线不小于 1.5 m 处设置砖砌挡水台,基坑顶面一倍基坑深度范围内进行硬化处理,肥槽内设置排水沟,并沿排水沟按间距不大于 30 m 设置集水井。

#### 2.2.2 基坑支护方案

基坑地表以下 3.0 m 范围内采用放坡喷锚方式处理,3.0 m 以下采用桩锚支护。护坡桩桩径 1.00 m 桩间距 1.60 m,桩长 19.0 m,嵌固深度 4.4 m,设置 5 道预应力锚索,一桩一锚布置,基坑支护剖面图见图 4。

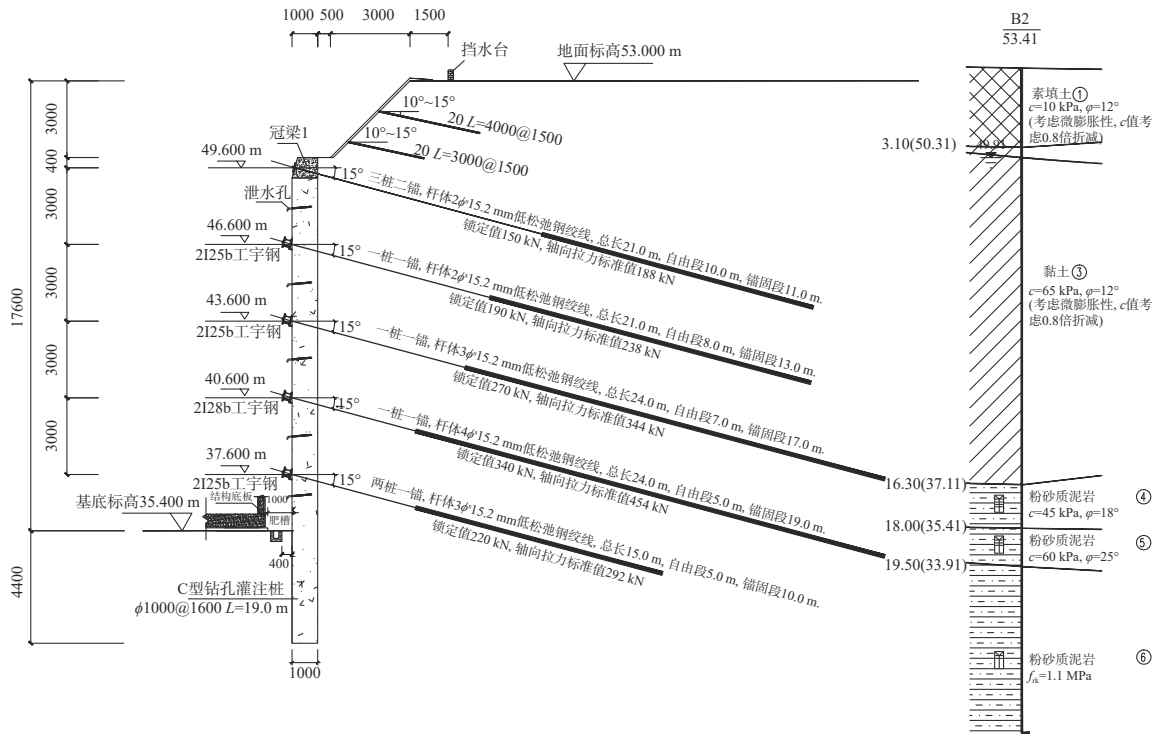


图 4 基坑支护设计剖面图(单位:mm)

#### 2.2.3 计算参数

本次计算利用上述适用于膨胀土基坑支护设计的基于含水率改变的抗剪强度指标折减方法。首先保证场地防、排水措施有效,场地内原状黏性膨胀土的含水率为 17.6%~27.9%,标准值为 24.1%,饱和度为 79.8%~97.2%,标准值为 94.8%,在计算时按膨胀土达到饱和状态、饱和度 100%、最大含水率 35% 考虑,得到黏聚力  $c$  的折减系数为 0.77,内摩擦角  $\varphi$  的折减系数为 0.60。基坑支护设计计算最终参数见表 1。另外,为了对折减系数进行验证,本次研究对黏土进行饱和状态下的直剪试验,得到饱和状态

下的抗剪强度指标如表 2 所示,饱和状态下的实测黏土抗剪强度指标与拟合得到的抗剪强度指标基本吻合。

表 1 基坑支护设计参数表

地层名称	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	压缩模量 $E_{s1-2}/\text{MPa}$
素填土	19.2	10	12	7.0
黏土	20.0	51	9	12.0
全风化粉砂质泥岩	20.5	45	18	15.0
强风化粉砂质泥岩	21.6	60	25	20.0
中等风化砂质泥岩	22.4	60	40	不可压缩

表 2 饱和状态下黏土实测抗剪强度指标统计表

地层名称	统计指标	黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\phi$ /( $^{\circ}$ )
黏土	统计个数	15	15
	最大值	55	12.0
	最小值	45	7.5
	平均值	51	9.5
	变异系数	0.05	0.13
	标准差	2.60	1.26
	修正系数	0.976	0.939
	标准值	50	8.9

2.2.4 计算结果

本次基坑支护设计采用理正深基坑 7.5 进行计算, 采用排桩计算模型, 土体抗剪强度参数按表 1 取值, 坡顶荷载考虑 20 kPa 的均布荷载, 得到的支护结构位移如图 5 所示。由图 5 可知, 基坑最大水平位移发生在中部, 其值为 15.42 mm。由此可见, 支护结构对基坑起到了一定的约束作用, 可有效控制土体的变形。

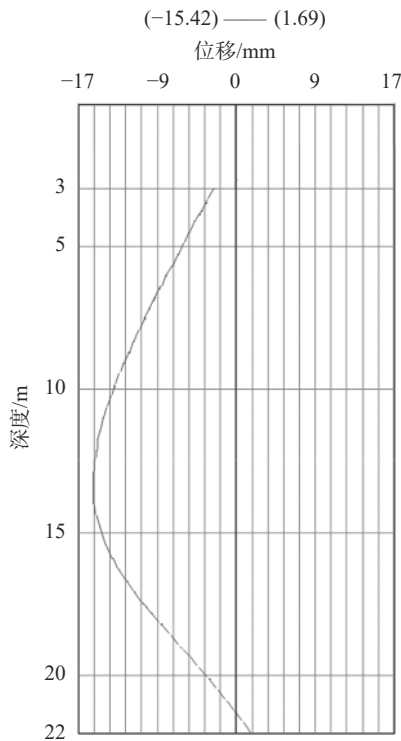


图 5 基坑支护计算位移图

2.3 数值结果分析

为了对基坑支护方案及支护设计计算方法做进一步验证, 本次研究采用 Midas GTS NX 软件对该段剖面进行数值模拟分析。

2.3.1 模型建立

本构模型: 围护桩、锚杆选用弹性本构模型, 岩

土体选用修正莫尔-库仑本构模型。

结构单元: 岩土体采用实体单元模拟, 围护桩采用梁单元模拟, 锚杆采用植入式桁架单元模拟。

边界条件: 约束模型的东、西、南三侧, 北侧不施加约束。

荷载: 按坡顶 20 kPa 的均布荷载。

计算参数: 岩土计算参数如表 1 所示, 支护构件参数见表 3。

表 3 支护构件参数表

支护构件名称	重度 $\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	备注
支护桩	25	20	弹性材料
锚杆	25	20	弹性材料

2.3.2 施工阶段模拟

本次数值分析模拟基坑施工全过程, 共分为以下 9 个阶段, 各阶段模型如图 6 所示。

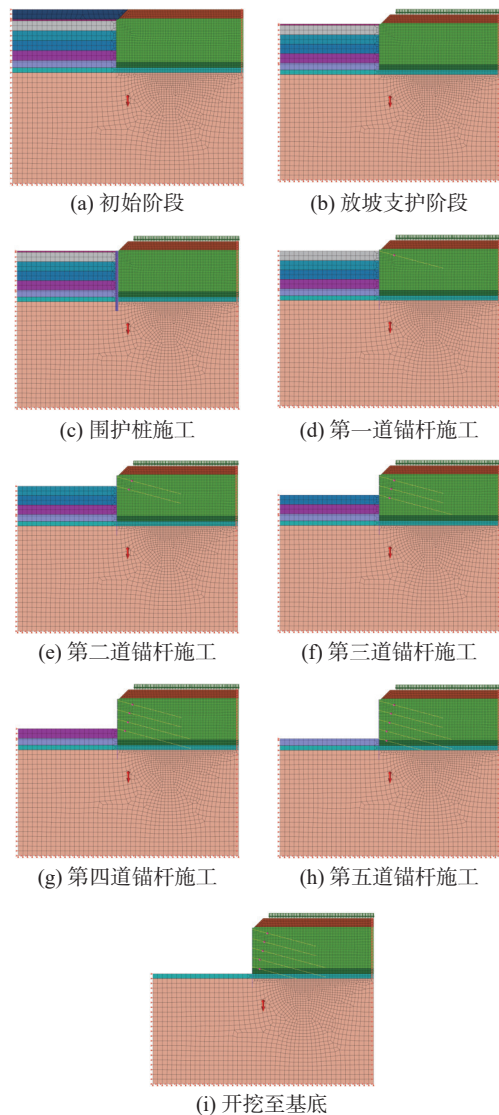


图 6 基坑支护各施工阶段模型图

- a 阶段: 初始阶段, 未进行施工;
- b 阶段: 开挖至-3.0 m, 进行放坡支护;
- c 阶段: 进行围护桩施工;
- d 阶段: 开挖至-3.4 m, 施工第一道锚杆;
- e 阶段: 开挖至-6.4 m, 施工第二道锚杆;
- f 阶段: 开挖至-9.4 m, 施工第三道锚杆;
- g 阶段: 开挖至-12.4 m, 施工第四道锚杆;
- h 阶段: 开挖至-15.4 m, 施工第五道锚杆;
- i 阶段: 开挖至-17.6 m(基底标高)。

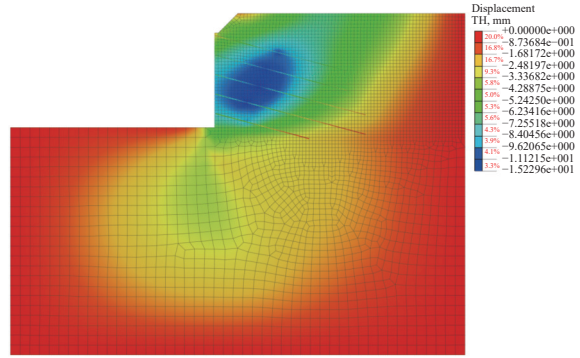


图9 基坑最终位移结果图

### 2.3.3 结果分析

在基坑顶部设置监测点, 统计各个施工阶段的竖向和水平位移(见图7、图8)。基坑支护完成基坑最终位移如图9所示。由图可知, 随着施工的进行, 坑顶竖向及水平位移呈现先增大后减小的趋势, 坑顶竖向位移在13 mm以内, 坑顶水平位移在7 mm以内。基坑施工完成后的侧壁最大水平位移为15.23 mm, 主要发生在坑壁的中部。数值分析结果与理正深基坑计算结果基本吻合。

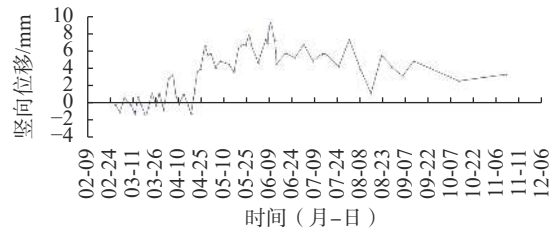


图10 坡顶竖向位移曲线图

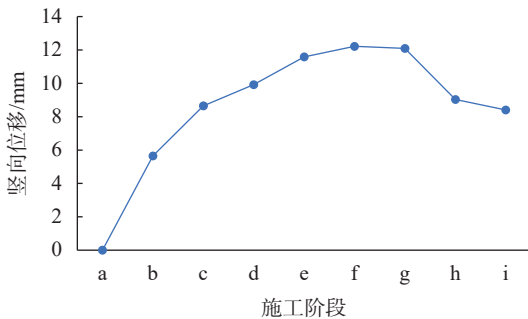


图7 坑顶竖向位移各阶段统计图

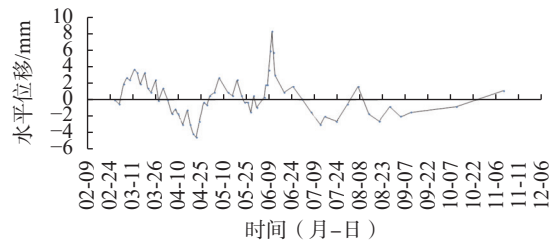


图11 坡顶水平位移曲线图

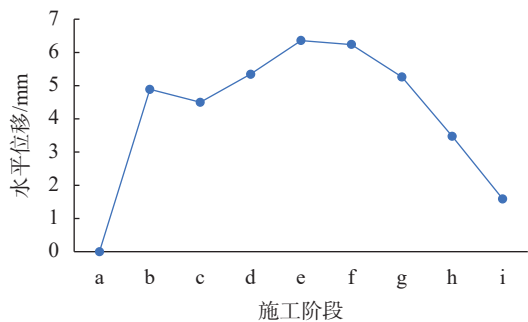


图8 坑顶水平位移各阶段统计图

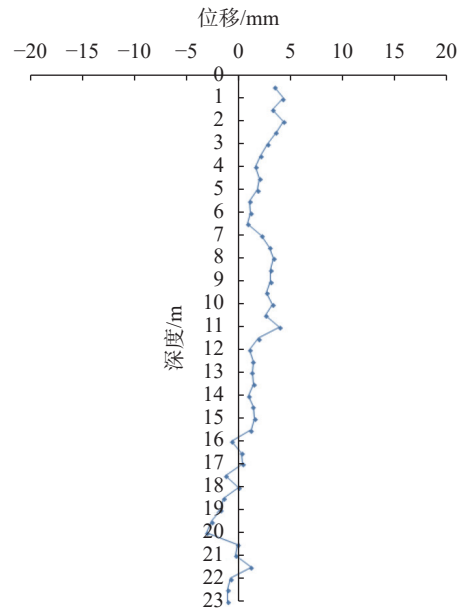


图12 支护结构深度水平位移包络图

### 2.4 基坑监测分析

为了验证前述膨胀土基坑支护设计计算方法(基于含水率变化的抗剪强度指标折减法)的适用性, 本次研究对该基坑施工全过程的基坑顶部竖向沉降、水平位移及支护结构深部水平位移监测结果进行了统计整理, 其结果如图10—图12所示。

由图10、图11可知, 桩顶部竖向位移、水平位移均呈曲线变化, 但无明显峰值, 均维持在10 mm以

内, 远小于基坑及坡顶建筑的变形要求。由图12可知, 支护结构基坑深度范围内变形在5 mm以内。由于在施工时对基坑顶面一倍基坑深度范围内进行了硬化处理, 且设置了排水沟及挡水墙, 能控制大气降

水、施工用水的下渗,而且可以及时排出坑顶积水,防止积水下渗,故与理正深基坑计算结果、数值分析结果相比,基坑实际位移值相对较小,但三者结果基本吻合。

通过上述基坑支护设计结果、数值模拟结果、现场监测数据分析,表明基于含水率改变的抗剪强度指标折减的计算方法在膨胀土基坑设计中基本适用。

### 3 结论

(1)基于膨胀土室内试验,统计了含水率与抗剪强度指标的关系。抗剪强度指标随含水率的增加呈逐渐降低的趋势,与内摩擦角  $\varphi$  相比,黏聚力  $c$  对含水率的变化更加敏感,含水率每增加 5%,黏聚力  $c$  降低 7.5 kPa,内摩擦角  $\varphi$  降低  $3^\circ$ 。

(2)提出了适用于膨胀土基坑支护设计计算的基于含水率改变的抗剪强度指标折减方法。

(3)通过工程实例计算、数值模拟分析及现场监测数据分析,对该方法进行了验证,结果表明该方法在膨胀土基坑支护设计中具有一定的适用性。

### 参 考 文 献

- [1] 邓安,彭涛. 成都某膨胀土深基坑支护事故分析[J]. 四川地质学报, 2015, 35(1): 126-131.
- [2] 邓长茂,李镜培. 合肥膨胀土基坑工程事故分析与预防[J]. 结构工程师, 2011, 27(1): 105-109.
- [3] 李朝阳,谢强,康景文,等. 成都某膨胀土基坑边坡失稳机理分析[J]. 建筑科学, 2015, 31(9): 8-12.
- [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(2): 82-86.
- [5] 陈善雄,余颂,孔令伟,等. 膨胀土判别与分类方法探讨[J]. 岩土力学, 2005(12): 1895-1900.
- [6] 唐朝生,施斌,刘春. 膨胀土收缩开裂特性研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 663-673.
- [7] 贾景超. 膨胀土膨胀机理及细观膨胀模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [8] 耿建彬. 膨胀土地区地裂的形成发育及其危害防治[J]. 岩土工程技术, 1998(1): 21-23,34.
- [9] 孟庆云,杨果林. 膨胀土胀缩特性试验研究[J]. 岩土工程技术, 2006(5): 256-259.
- [10] 陈善雄. 膨胀土工程特性与处治技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [11] 惠会清,胡同康,王新东. 石灰、粉煤灰改良膨胀土性质机理[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006(2): 34-37.
- [12] 丁金华. 膨胀土边坡浅层失稳机理及土工格栅加固处理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [13] 杨和平,王静,湛文涛,等. 南宁外环膨胀土路基处治技术及设计方案研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 359-365.
- [14] 贾欣媛,岳大昌,李明. 机械扩大头锚索在成都膨胀土地区深基坑支护中的应用[J]. 岩土工程技术, 2018, 32(2): 55-58,99.
- [15] 刘军,赵文月. 土的标准吸湿含水率与土的颗粒组成关系分析[J]. 岩土工程技术, 2022, 36(5): 421-424.
- [16] 丁国权,袁俊平. 膨胀土边坡防护机理分析及防护方法比较[J]. 岩土工程技术, 2018, 32(2): 83-87.

收稿日期: 2023-02-07