

非饱和土空间分布与城市地铁基坑支护设计方法

李连祥^{1,2,3}, 郭龙德^{1,2}, 王锬毅⁴, 王培琰^{1,2}, 车秀熙^{1,2}, 邱叶凡^{1,2}

(1.山东大学基坑与深基础工程技术研究中心, 山东 济南 250061; 2.山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061; 3.山东高速岩土工程有限公司, 山东 济南 250102; 4.中铁十七局集团第一工程有限公司, 山东 青岛 030006)

摘要:为推进非饱和土理论在基坑支护设计中的应用,以济南市为例,明确济南市非饱和土厚度分布;利用基质吸力监测手段,结合非饱和土强度试验数据,建立适用于济南非饱和土的简化土-水特征曲线;基于总黏聚法,推导了基于饱和度参数的支护结构非饱和土水平抗力系数比例系数及土压力公式,获得适合实际工程应用的非饱和土支护一般设计方法,并用地铁基坑案例证明该方法的适用性。案例分析表明:与饱和土理论相比,采用非饱和土理论计算的支护结构内力及位移大大减小,且更加接近实际监测值。研究结果显示:现行工程勘察水平下,仅需进行典型基质吸力测量便可获得城市区域简化土-水特征曲线,建立饱和度与基质吸力关系曲线,进行非饱和土基坑支护设计。

关键词:非饱和土;基坑工程;支护设计;土-水特征曲线;基质吸力

中图分类号:TU92

文献标志码:A

引用格式:李连祥,郭龙德,王锬毅,等.非饱和土空间分布与城市地铁基坑支护设计方法[J].山东大学学报(工学版),2025,55(4):84-92.

LI Lianxiang, GUO Longde, WANG Kunyi, et al. The spatial distribution of unsaturated soil and support design method of urban subway foundation pit[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(4):84-92.

The spatial distribution of unsaturated soil and support design method of urban subway foundation pit

LI Lianxiang^{1,2,3}, GUO Longde^{1,2}, WANG Kunyi⁴, WANG Peiyan^{1,2}, CHE Xiuxi^{1,2}, QIU Yefan^{1,2}

(1. Research Center of Foundation Pit and Deep Foundation Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. School of Civil Engineering and Water Conservancy, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 3. Shandong Hi-Speed Geotechnical Engineering Co., Ltd., Jinan 250102, Shandong, China; 4. China Railway 17th Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Qingdao 030006, Shandong, China)

Abstract: In order to promote the application of unsaturated soil theory in foundation pit support design, the thickness distribution of urban unsaturated soil was defined based on Jinan City. A simplified soil-water characteristic curve suitable for Jinan unsaturated soil was established by using matrix suction monitoring and unsaturated soil strength test data. Based on the total cohesion method, the formula of horizontal resistance coefficient and soil pressure of unsaturated soil in support structure expressed by soil saturation was derived, and the general design method of unsaturated soil support suitable for practical engineering application was obtained. The applicability of this method was demonstrated by using a subway foundation pit case. The case analysis showed that the internal force and displacement of the supporting structure calculated by the unsaturated soil theory were greatly reduced compared with the saturated soil theory, and were closer to the actual monitoring value. The research result showed that under the current engineering investigation level, the typical matrix suction measurement could be used to obtain and simplify soil-water characteristic curves in urban areas, establish the relationship between saturation and matrix suction, and complete the support design of unsaturated soil foundation pit, which could provide references for the design of urban unsaturated soil foundation pit.

Keywords: unsaturated soil; foundation pit engineering; support design; soil-water characteristic curve; matric suction

0 引言

地铁工程建设成本约为5亿元/km,以基坑支护为主的土建工程成本约占总成本的1/3,是成本重点控制的对象^[1]。在工程实践中绝大部分土体为非饱和土。大量研究表明,相同土体条件下,非饱和土强度一般要高于饱和土^[2-4],现行基坑支护设计规范以饱和土理论为基础^[5],导致设计保守、资源浪费。

近年来,已有学者逐渐将非饱和土理论^[6-14]应用到基坑工程实践中。主要包括以下两方面:(1)土压力。文献[6]将非饱和土有效应力中的 $\chi(u_a - u_w)$ 定义为吸应力,并依据朗肯土压力理论,推导出非饱和和基坑土体有效大、小主应力以及非饱和土朗肯主动和被动土压力;文献[7]建立了非饱和膨胀黏土基坑挡墙土压力计算方法;文献[8]证明了挡土墙外侧非饱和主动土压力约为不考虑基质吸力影响时主动土压力的一半。(2)支护结构内力与位移。文献[9]讨论了非饱和土基质吸力对基坑支护的影响,指出考虑基质吸力能显著减小支护结构的内力;文献[10]借助土-水特征曲线及工程勘察,得到有效应力参数,基于非饱和土理论设计的支护结构弯矩及最大位移是基于饱和土理论设计的50%~80%;文献[11-12]借助位移反分析技术,间接考虑非饱和土特性,建立了基于现行规范的非饱和土地区基坑挡土结构内力分析的平面杆系结构弹性支点法,通过非饱和土强度试验获得有效应力参数,与饱和土设计方法对比,节省了大量投资;文献[13-14]提出非饱和土应同时考虑净应力和基质吸力,并通过有限元分析量化了吸力对支护结构变形的影响。

上述研究表明,采用非饱和土理论设计支护结构具有良好的经济效益,但工程应用中非饱和土有效应力参数的获取是通过土-水特征曲线试验间接获得或非饱和土强度试验直接获得^[15-16],非常耗时,在实际工程中无法满足建设进度需要,因此建立非饱和土一般设计方法具有工程设计价值和必要性。

本研究基于济南市工程地质,结合地下水位历史资料,明确济南市非饱和土厚度空间分布规律,建议地铁基坑建设在非饱和土应用区域。根据一般工程岩土勘察报告,建立基于饱和度参数的非饱和土基坑支护结构水平刚度系数比例系数和主、被动土压力计算方法,通过试验与现场监测数据对比证明该方法有效。

1 非饱和土空间分布与地铁基坑应用

1.1 济南市非饱和土厚度分布与应用区域

非饱和土厚度分布与孔隙水位密切相关,在工程中一般认为稳定孔隙潜水水位以上的土体为非饱和土。通过分析济南市地面高程与孔隙潜水等水位线,将城市地面高程与孔隙水位高程做差,初步确定非饱和土厚度及分布规律,进而为非饱和土理论的应用奠定基础。

济南市孔隙水水位线图如图1所示。

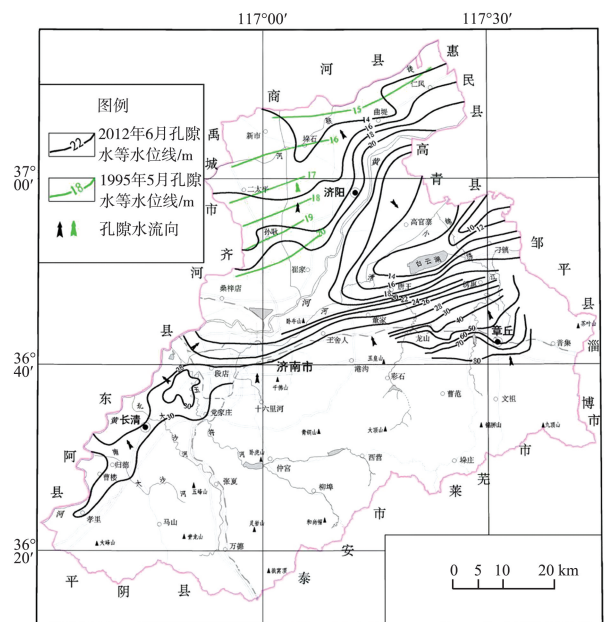


图1 济南市孔隙水水位线图

Fig.1 Pore water level map of Jinan City

(资料来源:济南城市地质调查报告)

由图1可知,长清区及济南市区孔隙水水位约为28 m,绝对标高为25~50 m;济阳区孔隙水位约为20 m,绝对标高约为23 m;章丘区孔隙水水位约为60 m,绝对标高约为80 m。

济南市非饱和土空间分布如图2所示。济南市中心城区和东部城区非饱和土空间分布详图如图3所示,图3中数字为非饱和土层厚度。

由图2、3可知,济南市中心城区的非饱和土层厚度约为14 m,由南向北、由东向西非饱和土厚度逐渐减小,直至小清河及大明湖附近区域,非饱和土层厚度不足5 m;济南市东部城区非饱和土层厚度由南向北呈逐渐减小的总体趋势,大部分地区非饱和土厚度大于20 m,厚度较大,但在白云湖等湖泊、河流处,非饱和土厚度较小。

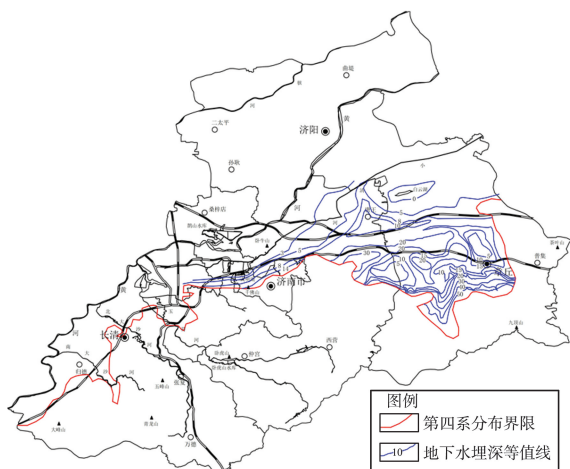
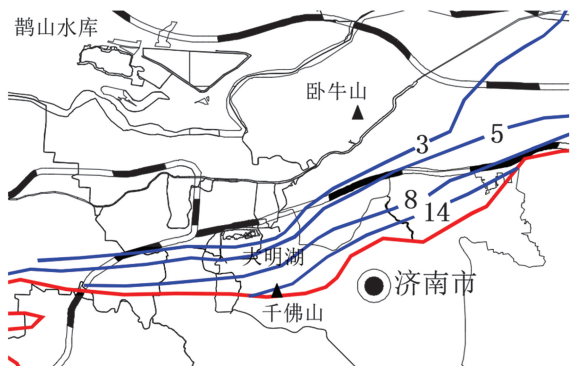


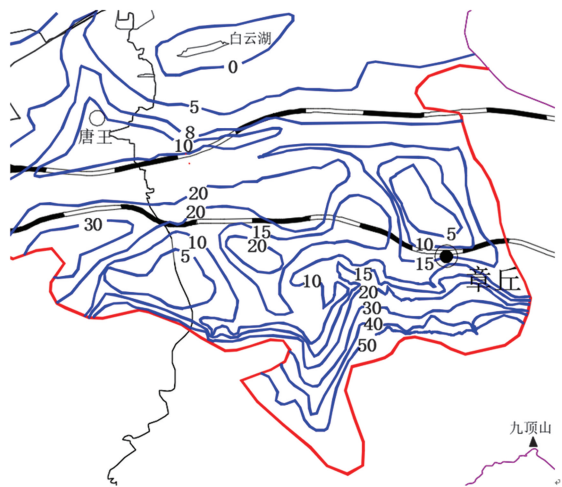
图2 济南市部分非饱和土空间分布

Fig.2 Spatial distribution of unsaturated soil in Jinan City

(资料来源:济南非饱和土空间分布与基坑支护设计方法研究及应用课题)



(a) 中心城区



(b) 东部城区

图3 济南市部分非饱和土空间分布详图

Fig.3 Detailed spatial distribution map of unsaturated soil in partial areas of Jinan City

济南市城市轨道交通建设规划图(2019—2024)如图4所示。

由图4可知,未来济南地铁建设沿线非饱和土厚度多为5~30 m,建设区域为图4中蓝色线内部分,分析非饱和土层厚度对地铁车站及沿线基坑支

护内力和位移的影响,以引导和推进非饱和土基坑支护设计。



图4 济南市城市轨道交通建设规划图

Fig.4 Urban rail transit construction planning of Jinan City

(资料来源:济南市城市轨道交通(2019—2024)建设规划)

1.2 基质吸力分布规律

基质吸力决定非饱和土强度,但随土体深度和季节变化,掌握基质吸力随土体深度的变化规律可以为非饱和土基坑设计提供参考。选择某工程场地进行全年基质吸力监测。监测结果如图5所示。

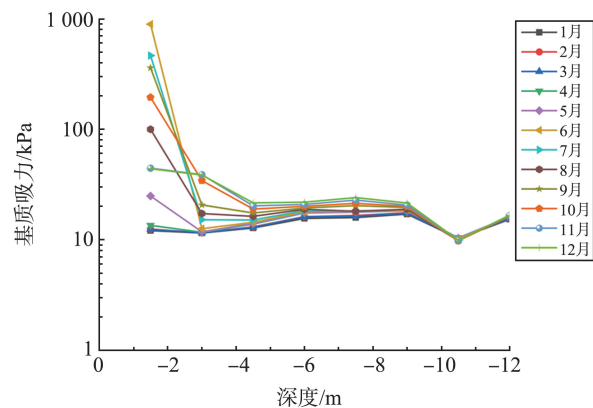


图5 济南市某工程土体基质吸力随深度的变化规律

Fig.5 Variation of soil matric suction with depth in Jinan City

由图5可知,将济南-3.0 m以上土层划分为非饱和活动带,该部分土层受大气影响显著,基质吸力变化明显;-3.0 m以下至地下水位土层划分为非饱和稳定带,大气影响较小,基质吸力变化较为稳定,在设计时着重考虑稳定带的非饱和土特性。

2 非饱和土基坑一般设计方法

2.1 挡土结构弹性支点法

目前设计师主要采用弹性支点法分析并设计挡土结构,其优势在于能考虑支挡结构的平衡条件和结构与土的相互作用,计算模型如图6

所示。

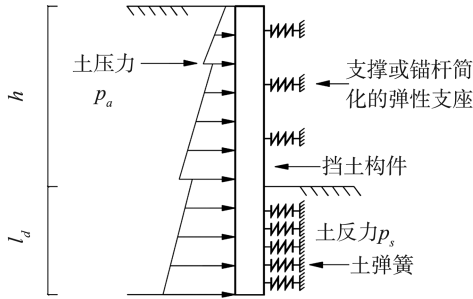


图6 弹性支点法计算模型

Fig.6 Elastic fulcrum method calculation model

作用在挡土构件上的分布土反力

$$p_s = k_s v + p_{s0}, \quad (1)$$

式中: p_s 为分布土反力, kPa; k_s 为基坑内侧土的水平反力系数, kN/m³; v 为挡土构件在分布土反力计算点的水平位移, m; p_{s0} 为挡土构件初始分布土反力, kPa。

基坑内侧某一地层处土体水平抗力系数 k_{si} 与水平抗力系数比例系数 m_i 的关系为

$$k_{si} = m_i(z-h), \quad (2)$$

式中: z 为计算点与地面的距离, m; h 为计算工况下基坑开挖深度, m。

m_i 可表达为与土体强度指标相关的经验公式, 即

$$m_i = \frac{0.2\varphi_i^2 - \varphi_i + c_i}{v_b}, \quad (3)$$

式中: φ_i 为第 i 层土的内摩擦角, (°); c_i 为第 i 层土的黏聚力, kPa; v_b 为挡土构件在坑底处的水平位移, 当此处的水平位移不大于 10 mm 时取 10 mm。

文献[12]采用总黏聚力法^[17], 将 Bishop 非饱和土抗剪强度公式^[18]中吸应力对强度的贡献计入总黏聚力中, 建立了基于规范的非饱和土挡墙结构弹性支点法, 得到非饱和土的水平抗力系数比例系数

$$m_i = \frac{0.2\varphi_i^2 - \varphi_i + c'_i + \chi_i(u_a - u_w)_i \tan \varphi'_i}{v_b}, \quad (4)$$

式(4)中, 关于不同土层的内摩擦角 φ_i 、有效黏聚力 c'_i 及有效内摩擦角 φ'_i 在岩土工程勘察中明确给出, 要进行非饱和土地铁基坑设计, 关键是要确定不同土层有效应力参数 χ_i 及基质吸力 $(u_a - u_w)_i$ 。

2.2 基质吸力的确定

对于实际工程, 基质吸力的获取一般通过现场监测或量测获得, 但周期太长。为获得确定基质吸力的一般方法, 本研究运用简化的土-水特征曲线, 结合岩土勘察得到的饱和度估算不同土层的基质

吸力。

典型的土-水特征曲线图如图7所示。

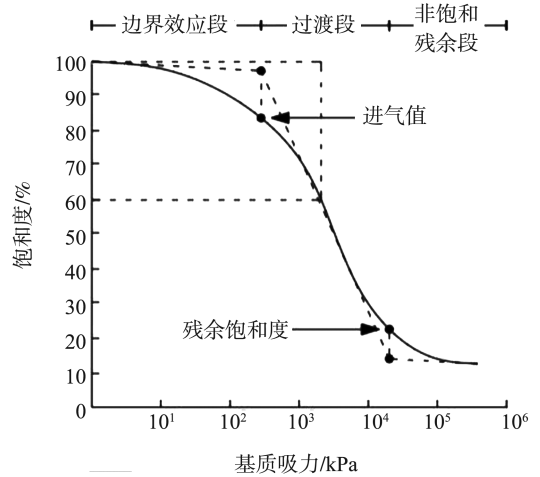


图7 典型的土-水特征曲线

Fig.7 Typical soil-water characteristic curve

由图7可知, 工程中的基质吸力一般在中低吸力区(0~1.5 MPa), 而完整的土-水特征曲线一般要测到高吸力区(大于 1.5 MPa)。为在实际工程中更方便地利用土-水特征曲线, 将其简化为线性曲线。选取图7中虚线框部分曲线进行简化, 土-水特征曲线与简化示意图如图8所示。

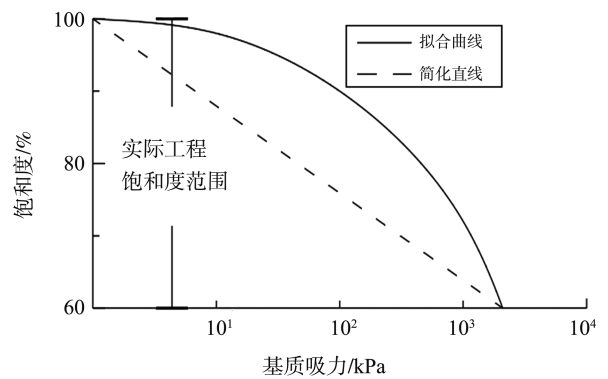


图8 土-水特征曲线与简化线示意图

Fig.8 Soil-water characteristic curve and simplified diagram

由图8得到的简化公式为

$$S_1 = a \lg(u_a - u_w)_1 + b, \quad (5)$$

$$S_2 = a \lg(u_a - u_w)_2 + b, \quad (6)$$

$$a = \frac{S_1 - S_2}{\lg(u_a - u_w)_1 - \lg(u_a - u_w)_2}, \quad (7)$$

$$b = \frac{S_2 \lg(u_a - u_w)_1 - S_1 \lg(u_a - u_w)_2}{\lg(u_a - u_w)_1 - \lg(u_a - u_w)_2}, \quad (8)$$

式中, S_1 、 S_2 为土壤饱和度, $(u_a - u_w)_1$ 、 $(u_a - u_w)_2$ 分别为土壤饱和度 S_1 、 S_2 对应的基质吸力, a 、 b 分别为直线的斜率和截距。

将土体饱和度与基质吸力的关系简化为线性

关系后的饱和度 S 与基质吸力 $(u_a - u_w)$ 分别为

$$S = a \lg(u_a - u_w) + b, \quad (9)$$

$$(u_a - u_w) = 10^{\frac{S-b}{a}}. \quad (10)$$

2.3 有效应力参数的确定

有效应力参数 χ 与饱和度或基质吸力相关,通过测定试样破坏时的应力间接获得^[19]。然而,非饱和土强度试验由于需要平衡基质吸力,耗时较长。

2.3.1 Vanapalli 抗剪强度理论

Vanapalli 抗剪强度理论公式中考虑了残余饱和度的影响,将有效饱和度 S_e 等效为有效应力参数 χ 预测非饱和土的抗剪强度^[20],计算公式为

$$\chi = S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r}, \quad (11)$$

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + S_e (u_a - u_w) \tan \varphi', \quad (12)$$

式中: σ 为作用在剪切面上的总应力, kPa; S_e 为土壤有效饱和度, %; S 为土壤饱和度, %; S_r 为土壤残余饱和度, %; c' 为有效黏聚力, kPa; φ' 为有效内摩擦角, (°)。

2.3.2 修正系数

残余饱和度 S_r 由常规土-水特征曲线作图确定, 具有较强主观性, 文献[6]提供了砂土、粉土、黏土 3 种不同土壤残余饱和度 S_r 的范围, 分别为 5%~10%、8%~15% 及 10%~20%。不同土壤类型的修正系数如表 1 所示, 对修正系数保守取值, 按土壤饱和度 S 为 70%, 残余饱和度 S_r 取文献[6]中最大值, 计算出有效饱和度 S_e , 得到其修正系数 μ 。

表 1 砂土、粉土、黏土修正系数

土壤类型	$S/\%$	$S_r/\%$	$S_e/\%$	$\mu(S_e/S)$
砂土	70	10	67	0.95
粉土	70	15	65	0.92
黏土	70	20	63	0.89

将 2.2 小节中的基质吸力公式(10)代入式(12), 并将 μS 作为有效应力参数, 最终形成与土壤类型及饱和度相关的抗剪强度提升项, 基于 Vanapalli 的非饱和土强度理论公式变为

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + \mu S (10^{\frac{S-b}{a}}) \tan \varphi', \quad (13)$$

式中: $10^{\frac{S-b}{a}}$ 为简化的基质吸力; S 为饱和度; μ 为考虑残余饱和度的修正系数, 与土壤类型有关, 修正系数取值见表 1。

2.4 济南土-水特征曲线与试验强度验证

选取济南市非饱和土案例, 通过基质吸力与饱和度的监测数据, 取最大、最小基质吸力, 运用公式(7)、(8)计算得 a 、 b , 并通过非饱和土三轴剪切试

验值与本研究方法计算值对比, 验证 2.3 小节方法的适用性。

2.4.1 简化的土-水特征曲线

济南某基坑基质吸力-饱和度的监测数据与简化分布图, 如图 9 所示。

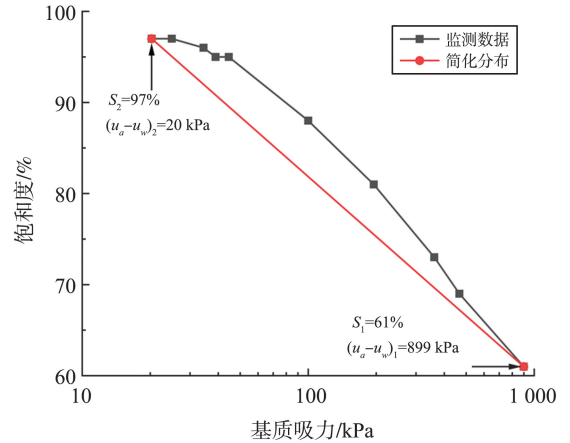


图 9 济南土层基质吸力与饱和度关系
Fig.9 Relationship between soil matrix suction and saturation in Jinan

将基质吸力与饱和度的关系简化为线性关系, 取监测数据的两个端点, 计算得简化分布的参数 a 、 b 以及基质吸力与饱和度关系式为

$$a = \frac{0.61 - 0.97}{\lg 899 - \lg 20} \approx -0.22,$$

$$b = \frac{0.97 \lg 899 - 0.61 \lg 20}{\lg 899 - \lg 20} \approx 1.25,$$

$$S = -0.22 \lg(u_a - u_w) + 1.25,$$

$$(u_a - u_w) = 10^{\frac{S-1.25}{-0.22}}.$$

2.4.2 非饱和土强度试验验证

试验土样类型为粉质黏土^[12], 修正系数 μ 取 0.89, 给定了基质吸力, 饱和度 S 用公式(9)计算。试验土样 1 抗剪强度试验值与本研究方法计算值对比, 如表 2 所示。试验土样 2 抗剪强度试验值与本研究方法计算值的对比, 如表 3 所示。

表 2 试验土样 1 抗剪强度试验值与计算值对比
Table 2 Comparison between the shear strength test value and the calculated value of test soil sample 1

单位: kPa			
净法向应力	基质吸力	抗剪强度试验值	本研究方法计算值
150	50	103.4	102.8
	100	119.2	116.1
250	150	133.6	128.6
	50	143.2	143.2
250	100	157.8	156.5
	150	172.9	169.0

表 3 试验土样 2 抗剪强度试验值与计算值对比
Table 3 Comparison between the shear strength test value and the calculated value of test soil sample 1

单位: kPa

净法向应力	基质吸力	抗剪强度试验值	本研究方法计算值
	50	128.5	127.3
200	100	145.3	140.8
	150	161.5	153.4
300	50	168.6	168.1
	100	184.6	181.6
	150	200.7	194.2

由表 2、3 可知,试验土样 1 试验值与计算值最大误差为 3.75%,试验土样 2 试验值与计算值最大误差为 4.99%,可以看出,本研究方法预测效果较好,能较准确地描述非饱和土强度特性,且与试验强度相比,还有一定的安全冗余,证明了该方法的可行性。

2.5 非饱和土土压力及 m_i

采用总黏聚力法^[17],得到非饱和土总黏聚力公式为

$$c_{us} = c' + \mu S(10^{\frac{S-b}{a}}) \tan \varphi' \quad (14)$$

采用朗肯土压力理论计算作用在支护结构上的土压力^[5],公式为

$$p_{ak} = \sigma_{ak} K_{ai} - 2c_i \sqrt{K_{ai}} \quad (15)$$

$$p_{pk} = \sigma_{pk} K_{pi} + 2c_i \sqrt{K_{pi}} \quad (16)$$

式中: p_{ak} 、 p_{pk} 分别为支护结构外侧第 i 层土中计算点的主动、被动土压力强度标准值, kPa; σ_{ak} 、 σ_{pk} 分别为支护结构外侧、内侧计算点的土中竖向应力标准值, kPa; K_{ai} 、 K_{pi} 分别为第 i 层土的主动、被动土压力系数。

将式(14)代入式(15)、(16)中,得到非饱和土主动土压力及被动土压力,公式为

$$p_{ak} = \sigma_{ak} K_{ai} - 2[c' + \mu S(10^{\frac{S-b}{a}}) \tan \varphi'] \sqrt{K_{ai}} \quad (17)$$

$$p_{pk} = \sigma_{pk} K_{pi} + 2[c' + \mu S(10^{\frac{S-b}{a}}) \tan \varphi'] \sqrt{K_{pi}} \quad (18)$$

将式(14)代入到式(3)中,则非饱和土水平抗力系数比例系数为

$$m_i = \frac{0.2\varphi_i^2 - \varphi_i + c'_i + \mu S(10^{\frac{S-b}{a}}) \tan \varphi'_i}{v_b} \quad (19)$$

饱和土与非饱和土土压力对比如图 10 所示。

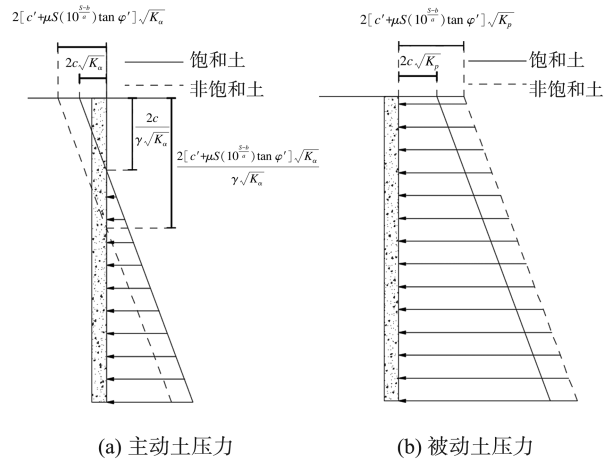


图 10 饱和土与非饱和土土压力对比
Fig.10 Comparison of soil pressure between saturated soil and unsaturated soil

至此,形成了非饱和土地铁基坑一般设计方法,主要环节如图 11 所示。

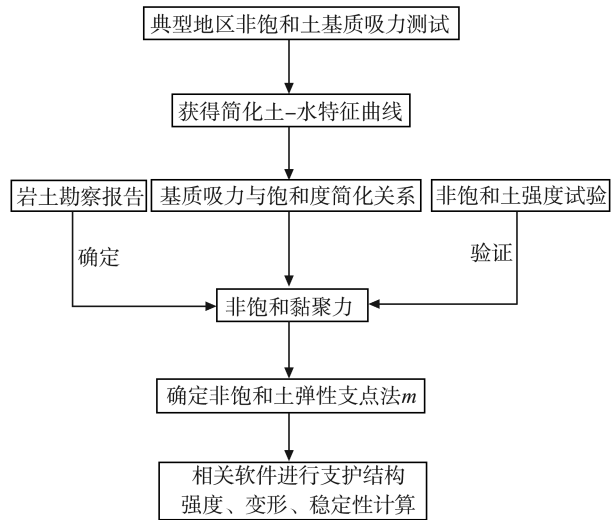


图 11 非饱和土地铁基坑一般设计方法流程图
Fig.11 Flow chart of general design method for iron foundation pit in unsaturated soil

3 案例分析

3.1 工程概况

济南地铁 4 号线唐冶站地铁基坑位于图 4 中蓝圈部分,地下水位埋深 45~60 m,非饱和土厚度大,处于非饱和土地铁建设区域。地铁基坑支护结构采用钻孔灌注桩+内支撑的支护方式,唐冶站饱和土及非饱和土物理力学参数如表 4、5 所示,支护结构设计方案及地层剖面图如图 12 所示,施工工况如表 6 所示,内支撑信息如表 7 所示,围护桩桩身配筋图如图 13 所示。

表4 饱和土物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of saturated soil

层号	土层名称	埋深/m	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
① ₁	素填土	0~-2.3	17.3	8	15
⑧	黄土	-2.3~-6.0	18.0	16	21
⑩ ₁	粉质黏土	-6.0~-14.5	18.0	17	19
⑯ ₁	粉质黏土	-14.5~-20.7	19.0	28	17
⑲ ₂	强风化闪长岩	≥ -20.7	20.0	20	30

表5 非饱和土物理力学参数

Table 5 Physical and mechanical parameters of unsaturated soil

层号	土层名称	c'/kPa	$\varphi'/(\text{°})$	$S/\%$	c_{us}/kPa
⑧	黄土	16	21	81.9	41.5
⑩ ₁	粉质黏土	17	19	80.9	42.0
⑯ ₁	粉质黏土	28	17	81.1	49.9

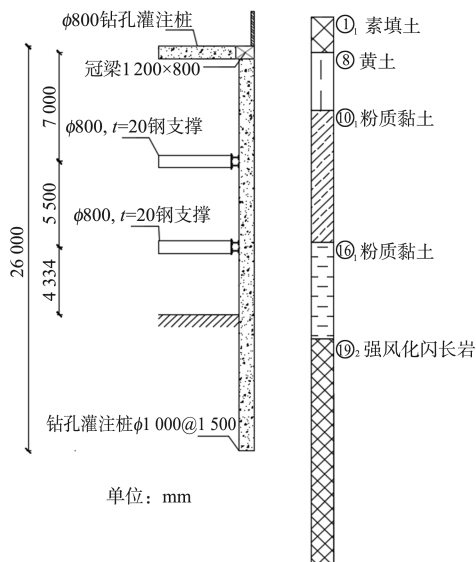


图12 支护结构设计方案及地层剖面图

Fig.12 Support structure design and stratum profile

表6 施工工序

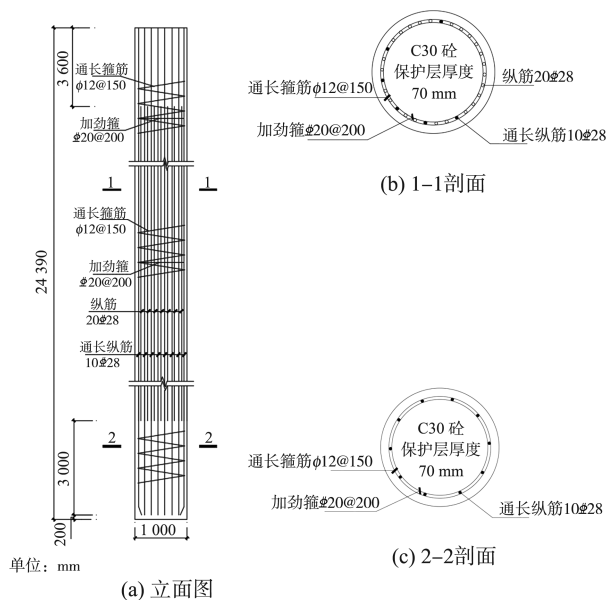
Table 6 Construction process

工序	工况类型	深度/m	支撑道号
1	基坑第一次开挖	-2.66	
2	设置第一道混凝土支撑	-2.16	①
3	基坑第二次开挖	-9.66	
4	设置第二道钢支撑	-9.16	②
5	基坑第三次开挖	-15.16	
6	设置第三道钢支撑	-14.66	③
7	基坑开挖到底	-18.99	

表7 内支撑信息

Table 7 Internal support information

支撑类型	水平间距/m	竖向间距/m	预加力/kN
混凝土支撑	8.0	2.0	0
钢支撑	4.0	7.0	1 200
钢支撑	4.0	5.5	1 200



(a) 立面图

图13 支护桩桩身配筋图

Fig.13 Reinforcement diagram of retaining pile body

由于地表土壤(0~-3.0 m)饱和度受大气影响较大,位于非饱和活动带,在计算时忽略地表非饱和土特性,将地表素填土及部分黄土按饱和土考虑。

土壤类型为黏土,修正系数 μ 取0.89,简化分布的参数 $a=-0.22$, $b=1.25$,以黄土为例,将饱和度 $S=81.9\%$ 代入式(14),得:

$$c_{us} = 16 + 0.89 \times 0.819 \times (10^{\frac{0.819-1.25}{-0.22}}) \times \tan 21^\circ \approx 41.5 \text{ kPa}。$$

3.2 内力变形分析

采用理正深基坑软件,运用弹性支点法计算支护结构单元的土压力、内力及变形,饱和土及非饱和土计算方法的土体物理力学参数分别取表4中的黏聚力 c 及表5中非饱和黏聚力 c_{us} ,其余输入参数均为饱和土参数。2种设计方法计算的主动土压力对比如图14所示。

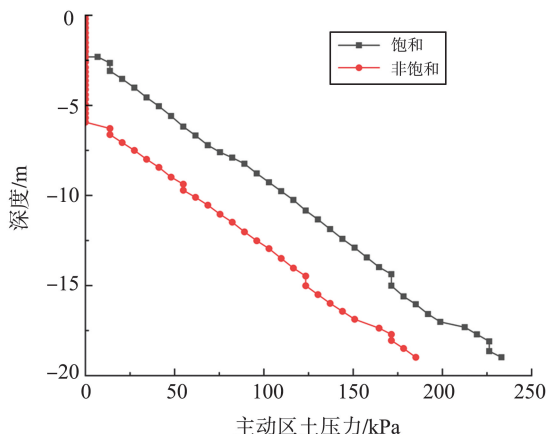
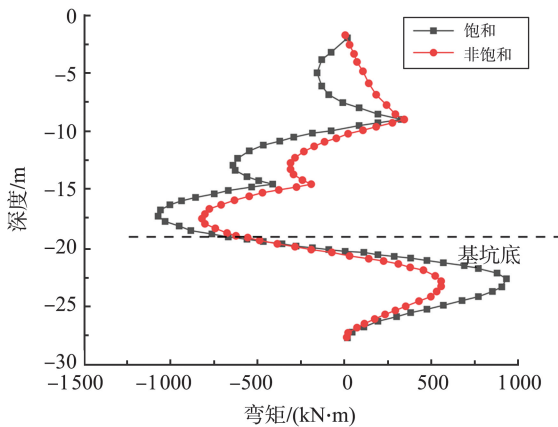


图14 桩身主动土压力对比

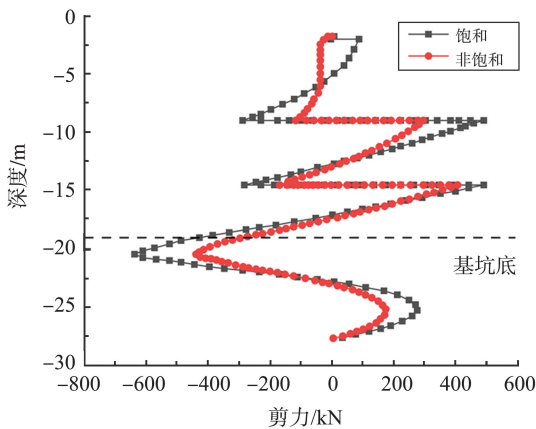
Fig.14 Comparison of active earth pressure of pile body

由图 14 可知,随着深度的增加,主动土压力增大,按非饱和土计算的主动土压力明显小于饱和土,按非饱和土计算的最大主动土压力约为饱和土的 79.4%,按饱和土计算的主动土压力临界深度约为-2.3 m,按非饱和土计算的主动土压力临界深度约为-5.9 m。这表明考虑基质吸力的非饱和土计算方法能有效减小支护结构的主动土压力,在设计时应积极考虑非饱和土特性,从而节省项目投资。

2 种计算方法的支护结构内力对比如图 15 所示。支护结构内力极值如表 8 所示。



(a) 桩身弯矩对比图



(b) 桩身剪力对比图

图 15 桩身内力对比

Fig.15 Internal force comparison of pile body

表 8 支护结构内力极值表

Table 8 Extreme value of internal force of supporting structure

计算方法	最大正弯矩/ (kN·m)	最大负弯矩/ (kN·m)	最大正剪力/ kN	最大负剪力/ kN
饱和	931.63	-1 068.96	489.89	-644.45
非饱和	561.25	-820.83	412.20	-443.39

由图 15 和表 8 可知,按非饱和土与饱和土设计方法计算的弯矩与剪力规律大致相同,使用非饱和

土方法的计算结果与饱和土相比,最大正弯矩和最大负弯矩分别减少 39.8%和 23.2%,最大正剪力和最大负剪力分别减少 15.9%和 31.2%。

桩身侧向位移对比如图 16 所示。支护结构位移如表 9 所示。

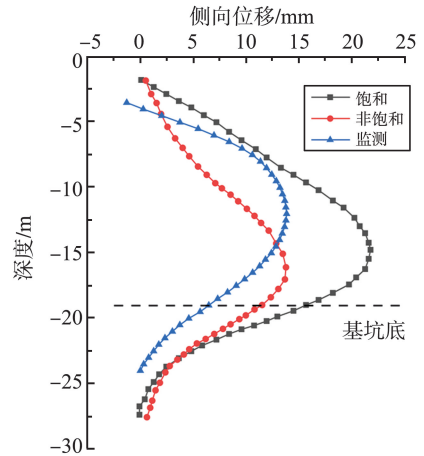


图 16 桩身侧向位移对比

Fig.16 Comparison of lateral displacement of pile body

表 9 支护结构位移

Table 9 Displacement of support structure

计算方法	最大位移出现处/m	最大位移/mm	基坑底部位移/mm
饱和	-14.8	21.8	15.7
非饱和	-16.1	13.8	11.5
监测	-12.0	13.9	6.5

由图 16 可知,实际监测最大位移的深度约出现在-12.0 m,由饱和及非饱和弹性支点法计算的最大位移的深度分别出现在-14.8、-16.1 m,靠近基坑底部。这是由于弹性支点法是选取二维平面单元计算,没有考虑三维基坑支护结构的整体变形,导致计算最大位移出现位置相较实际监测最大位移位置偏下。

由表 9 可知,按饱和土计算的桩身最大水平位移为 21.8 mm,按非饱和土计算的桩身最大水平位移为 13.8 mm,实际监测的桩身最大水平位移为 13.9 mm。按非饱和土理论计算的桩身水平位移与饱和土理论相比,减少了 36.7%,更加接近实际监测值。

4 结论

(1) 提出了基于城市工程地质与地下水历史资料确定非饱和土空间分布规律的方法;明确济南市非饱和土厚度分布,结合地铁规划建议了济南市非饱和土地铁基坑建设区域;揭示了济南市基质吸

力的分布规律、强度规律及非饱和土活动带和稳定带深度。

(2) 基于典型土-水特征曲线和基质吸力监测与非饱和土强度试验, 提出简化的线性土-水特征曲线方法; 基于饱和度参数推导了非饱和土支护结构水平刚度系数和主、被动土压力计算公式; 提出适用于非饱和土地铁基坑工程的一般设计方法。

(3) 针对济南市工程实例, 采用非饱和土理论计算的支护结构与饱和土理论相比, 最大主动土压力减少约 20.6%, 最大弯矩减少约 23.2%~39.8%, 最大剪力减少约 15.9%~31.2%, 最大位移减少约 36.7%, 更加接近于实际监测值。

参考文献:

- [1] 沈建文. 对降低地铁工程造价的探讨[J]. 铁道标准设计, 2003, 47(12): 88-90.
SHEN Jianwen. Reducing the construction cost of metro [J]. Railway Standard Design, 2003, 47(12): 88-90.
- [2] 陈正汉, 郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 1-54.
CHEN Zhenghan, GUO Nan. New developments of mechanics and application for unsaturated soils and special soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 1-54.
- [3] 耿慧辉, 吴俊阳, 单仁亮, 等. 非饱和土强度的吸力贡献形式研究 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1598-1603.
GENG Huihui, WU Junyang, SHAN Renliang, et al. Contributions of matric suction to strength of unsaturated soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1598-1603.
- [4] 徐筱, 蔡国庆, 李舰, 等. 非饱和土的峰值强度特性及破坏包线模型 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(7): 1211-1219.
XU Xiao, CAI Guoqing, LI Jian, et al. Peak strength characteristics and failure envelope model of unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(7): 1211-1219.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ120—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [6] LU N, WILLIAM J. LIKO S. 非饱和土力学[M]. 韦昌富, 侯龙, 简文星, 译. 北京: 北京高等教育出版社, 2012.
- [7] PUF AHL D E, FREDLUND D G, RAHARDJO H. Lateral earth pressures in expansive clay soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(2): 228-241.
- [8] VAHEDIFARD F, LESHCHINSKY B A, MORTEZAEI K, et al. Active earth pressures for unsaturated retaining structures [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(11): 1-11.
- [9] 吴剑敏, 李广信, 王成华. 非饱和土基质吸力对基坑支护计算的影响 [J]. 工业建筑, 2003, 33(7): 6-10.
WU Jianmin, LI Guangxin, WANG Chenghua. Effect of matric suction of unsaturated soil on the estimation of the load and internal force on supporting structure for deep excavation [J]. Industrial Construction, 2003, 33(7): 6-10.
- [10] 杨建民, 张正, 窦国松, 等. 非饱和土土压力在孟县基坑工程中的应用 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 541-555.
YANG Jianmin, ZHANG Zheng, DOU Guosong, et al. Earth pressures for unsaturated retaining structures and application in supported excavation in Yu County [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(2): 541-555.
- [11] 李连祥, 刘嘉典, 李克金, 等. 济南典型地层 HSS 参数选取及适用性研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 4021-4029.
LI Lianxiang, LIU Jiadian, LI Kejin, et al. Study of parameters selection and applicability of HSS model in typical stratum of Jinan [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10): 4021-4029.
- [12] 李连祥, 李红波, 韩刚, 等. 济南非饱和土基坑支护设计 [J]. 山东大学学报(工学版), 2023, 53(3): 41-49.
LI Lianxiang, LI Hongbo, HAN Gang, et al. Support design of unsaturated soil foundation pit in Jinan [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2023, 53(3): 41-49.
- [13] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R. Stress state variables for unsaturated soils [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(5): 447-466.
- [14] 窦远明, 孙吉书, 刘熙媛, 等. 非饱和土深基坑支护结构变形的有限元分析 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊1): 91-94.
DOU Yuanming, SUN Jishu, LIU Xiyuan, et al. Finite element analysis of retaining structural deformation of deep foundation pits in unsaturated soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(Suppl. 1): 91-94.
- [15] 汪东林, 栾茂田, 杨庆. 重塑非饱和黏土的土-水特征曲线及其影响因素研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 751-756.
WANG Donglin, LUAN Maotian, YANG Qing. Experimental study of soil-water characteristic curve of remolded unsaturated clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 751-756.