

饱和黄土工程降水沉降计算方法研究

邓国华, 高虎艳, 郑建国, 于文龙, 亢佳伟

Calculation method of dewatering settlement in saturated loess stratum

DENG Guohua, GAO Huyan, ZHENG Jianguo, YU Wenlong, and KANG Jiawei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312039>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

初始孔隙比对高吸力下非饱和土土水特性的影响

Effect of initial void ratio on the soil water characteristics of unsaturated soil at high suctions

陈嘉伟, 李泽, 韩哲, 高游, 熊勇林, 丁瑞旋 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 47-54

不同应力路径下饱和重塑黄土的力学特性

Mechanical properties of saturated remolded loess under different stress paths

赵丹旗, 付昱凯, 侯晓坤, 李同录, 李萍, 李燕, 张林 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 74-80

颗粒级配与孔隙比对粗粒土渗透系数的影响

Effects of gradation and void ratio on the coefficient of permeability of coarse-grained soil

丁瑜, 饶云康, 倪强, 许文年, 刘大翔, 张恒 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 108-108

超载预压处理软土的次固结特征及沉降计算

Secondary consolidation characteristics and settlement calculation of soft soil treated by overload preloading

陈立国, 吴昊天, 陈晓斌, 贺建清 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 138-145

浅埋洞口段黄土公路隧道施工变形性状现场测试研究

Field test on the construction deformation characteristics for a loess highway tunnel at the shallow portal section

邱明明, 杨果林, 张沛然, 段君义 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 135-143

北京不同区域明挖基坑地表沉降变形特征研究

Characteristics of surface settlement and deformation of open cut foundation pit in different areas of Beijing

张建全, 张克利, 程贵方 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 131-139



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312039

邓国华, 高虎艳, 郑建国, 等. 饱和黄土工程降水沉降计算方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 174-185.
DENG Guohua, GAO Huyan, ZHENG Jianguo, et al. Calculation method of dewatering settlement in saturated loess stratum[J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 174-185.

饱和黄土工程降水沉降计算方法研究

邓国华^{1,2}, 高虎艳³, 郑建国⁴, 于文龙⁵, 亢佳伟¹

(1. 西安理工大学土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安黄土地下工程技术咨询有限公司, 陕西 西安 710000; 3. 西安市轨道交通集团有限公司, 陕西 西安 710018; 4. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043; 5. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 在周边环境复杂的地下工程建设中, 合理地预测和评价降水对周边环境的影响是控制工程可行性的关键性问题。目前, 基于分层总和法的工程降水沉降计算方法主要取决于经验系数的选择, 取值过于笼统, 不能完整反映层厚和土性变化的影响, 预测结果与实际情况相差较大。为相对合理、准确地预测黄土降水沉降, 在分析饱和黄土物性沉积状态的基础上, 提出用孔隙比(e)和液性指数(I_L)反映降水过程中黄土失水的可变性和能变性的思路, 同时提出失水敏感性指标, 建立了饱和黄土地层降水沉降实用化计算方法 $e-I_L$ 法, 并开展了多个场地的沉降验证。研究成果表明: (1) 饱和黄土视其上覆压力和地下水作用方式的不同, 可形成欠压密饱和黄土和压密饱和黄土, 两类饱和黄土物性和工程降水沉降差异较大; (2) 影响降水沉降变形的物性指标是孔隙比和液性指数, 可分别反映饱和黄土的可变性和能变性, 即失水敏感性; (3) 6 个场地的计算与实测结果对比表明, 黄土地区工程降水沉降主要发生在大孔隙结构依然存在的欠压密饱和黄土层中。考虑失水敏感性的降水分层沉降计算 $e-I_L$ 法, 能够全面反映饱和黄土降水沉降规律, 可为黄土地区降水工程的设计和施工提供可靠的理论依据。

关键词: 饱和黄土; 工程降水沉降; 孔隙比; 液性指数; 能变性; 可变性

中图分类号: TU433

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)03-0174-12

Calculation method of dewatering settlement in saturated loess stratum

DENG Guohua^{1,2}, GAO Huyan³, ZHENG Jianguo⁴, YU Wenlong⁵, KANG Jiawei¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Xi'an Loess Underground Engineering Technology Consulting Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China; 3. Xi'an Rail Transit Group Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710018, China; 4. Mechanical Industry Survey and Design Research Institute Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China; 5. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co. Ltd., Guangzhou, Guangdong 510010, China)

Abstract: In the construction of underground engineering with complex surrounding environment, reasonable prediction and evaluation of the influence of precipitation on the surrounding environment is a key problem to control the feasibility of the project. At present, the calculation of dewatering-induced settlement using the layered summation method heavily relies on empirical coefficients, leading to significant variability in predictions and

收稿日期: 2023-12-25; 修订日期: 2024-03-01

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178355)

第一作者: 邓国华(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事黄土力学与工程的研究工作。E-mail: gh_deng@163.com

deviations from actual observations. To predict the precipitation settlement of loess reasonably and accurately, based on the analysis of the physical properties of saturated loess, the void ratio and liquid index were introduced as key indicators to characterize both deformation potential and the deformation's difficulty in the dewatering process. The practical calculation method of dewatering settlement of saturated loess stratum was established, and settlement verification was carried out at multiple sites. The results show that depending on the overlying pressure and groundwater action mode, saturated loess can form uncompacted saturated loess and compact saturated loess. The physical properties and dewatering settlement deformation of the two types of loess are different. The main physical property indexes affecting dewatering deposition deformation are the porosity ratio and liquid property index in the initial state, reflecting the deformation potential and the difficulty of deformation of saturated loess, respectively. The comparison between the calculation and measurement of six sites shows that the dewatering subsidence in the loess area mainly occurs in compact saturated loess where the macroporous structure still exists. The proposed $e-I_L$ method, incorporating void ratio and liquid index, effectively captures the settlement behavior of saturated loess. This study provides effective technical method for designing and constructing dewatering engineering in the loess area.

Keywords: saturated loess; dewatering settlement; void ratio; liquid index; deformation potential; deformation difficulty

在黄土地区,降水是影响工程建设安全和高效施工的重要因素。降水可提高土体自身强度,降低侧压力系数,提高自承载能力,而且无水作业,便于施工,可提高作业效率,更有效地控制投资。现阶段,在黄土地区工程建设中,尤其是地下工程建设中,降水是应用最广泛、最有效、最经济的地下水控制措施^[1]。但工程降水,必然会引起地层沉降,在周边环境复杂的地下工程建设中,合理地预测和评价降水对周边环境的影响是控制工程可行性的关键问题。

在我国现行国家标准^[2]、行业标准^[3]中,计算地基变形时均采用分层总和法。在计算降水沉降时引入了降水沉降经验系数(φ_w),该经验系数取值主要依赖地区工程经验,如无经验时主要参考压缩模量作为取值依据。但在黄土地区实践过程中,利用沉降实测结果反算可以发现, φ_w 在0.1~1.5之间变化。换句话说,根据经验系数选择的不同,降水沉降计算的结果相差可达15倍,这说明理论计算方法可能忽略了某些重要影响因素,这种方法完全取决于技术人员对该区域实施工程降水的经验,计算精度差。无经验时,预测结果与实际情况相差较大,直接影响后期工程方案的决策和可实施性。一方面,工程降水沉降预测过小,实际沉降较大,在实施过程中被动修改方案或造成安全事件的发生;另一方面,降水沉降预测过大,造成不必要的浪费。

国内外很多学者对降水沉降预测方法进行了研究,主要可分为经典理论计算和半理论半经验计算。

缪俊发等^[4]、许胜等^[5]采用黏弹性越流模型理论解释了大型深井点降水引起的地面沉降的非线性特征及复杂机理,采用数值有限元计算方法实现降水沉降预测;胡长明等^[6]通过分层考虑围护结构侧摩阻力对沉降的约束作用,提出了适用于黄土地区潜水层、成层土地质下降水引起地面沉降的简化计算公式;张志红等^[7]通过考虑降水过程中土体孔隙比和压缩指数的变化,提出了考虑止水帷幕设置深度的坑外地面沉降计算方法;杨健^[8]对渗透固结过程中孔隙比、渗透系数、压缩系数之间的相关性进行讨论,得到修正后的有效应力表示式;于祺等^[9]通过引入给水度指标提出工程降水过程中考虑黏性土性质的附加应力的修正计算方法;梁发云等^[10]通过对比室内试验获得的剪切模量、抽水试验反算得到的剪切模量及土体小应变初始剪切刚度3个指标间的对应关系,提出考虑实际应变范围的土体弹性参数取值方法;杨光华等^[11]、王志亮等^[12]通过引入孔隙比确定沉降修正系数因子的方法来考虑土体侧胀特征下的沉降变形。另外,诸多学者提出了采用BP神经网络^[13]、机器学习^[14-15]等一系列的沉降预测方法。

工程降水过程中,土体中的一部分水被疏干,地层被压缩,其变形过程是一个孔隙水压力消散、自由水流出、土性改善、新的状态逐步形成的复杂过程。部分土体在降水过程中有效应力增长显著,变形发展能力强,失水变形量大,即失水沉降敏感性强;部分土体孔隙连通性差,降水工程中有效应力增长相对较

小,变形发展能力一般,失水变形量相对较小,即失水沉降不敏感。现有降水沉降计算公式中 φ_w ,实际上反映了土体降水沉降的敏感性,而这一敏感性必然与饱和土的初始物理性质密切相关。研究人员已经认识到了物性在这一过程中的变化,但现有预测方法均无法反映物性对降水沉降的影响。为此,本文结合作者在黄土地区十余年的降水实践,充分挖掘影响饱和黄土降水沉降的关键物性指标,拟提出能反映土体失水变形敏感性的指标,并基于此提出工程降水沉降计算方法,并开展了多个场地的沉降验证。

1 饱和黄土降水沉降影响因素

《工程地质手册》(第五版)^[16]明确指出,饱和黄土可根据其浸湿后的应力历史分为两类:一类是湿陷性黄土浸湿后,未经过湿陷压密作用,称为未压密饱和黄土,本文称之为欠压密饱和黄土;另一类是黄土受水浸湿已经过湿陷压密作用,称为已压密饱和黄土,本文称之为压密饱和黄土,两类饱和黄土的工程性能有很大的差异。黄土地区的地貌单元主要包括黄土塬、黄土梁洼和河流阶地,在工程建设范围内,涉及到的黄土地层主要有全新统(Qh)新近堆积黄土、上更新统(Qp₃)新黄土及古土壤、中更新统(Qp₂)老黄土及古土壤几类。在天然沉积过程中,黄土形成了特殊的颗粒(团粒)排列方式和胶结作用,表现出了结构性、湿陷性及水敏性,浸水、失水过程中变形规律复杂^[17]。在上覆压力和地下水或地表水(河流、降水、灌溉等)的作用下,在历史的长河中,逐渐向稳定的状态过渡。在水的作用下,黄土的排列和胶结都将发生改变,形成新的结构。由于其上覆压力和地下水作用方式的不同,黄土遇水变形稳定后,也表现出不同的工程性质。一是压密饱和黄土,上覆压力较大,其大孔隙结构已基本被破坏,孔隙比相对较小,性质较为稳定,一般呈现为可塑状态;二是欠压密饱和黄土,上覆压力较小,其大孔隙结构未被破坏,孔隙比介于同类地层湿陷性黄土与压密饱和黄土之间,性质较为不稳定,一般呈软塑或流塑状态,现行有关规范中^[18],常称其为饱和软黄土,形成机理如图1所示。

天然饱和黄土视其压密状态的不同,其物理力学性质及工程性能存在较大的差异。相较于湿陷性黄土,饱和黄土结构性已不再显著,决定其力学和工程性质的主要因素是密实状态和含水状态,其物性沉积特征、分布与否与地下水的作用方式、地层结构等因素关系密切。依据《西安城市工程地质图集》(1998

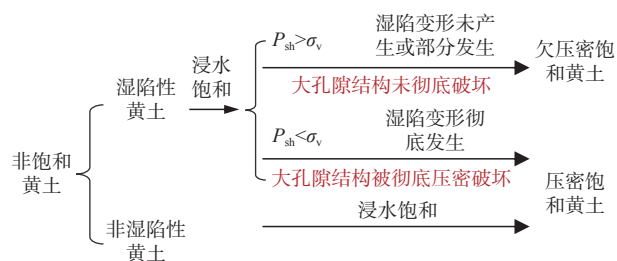


图1 两类饱和黄土的形成

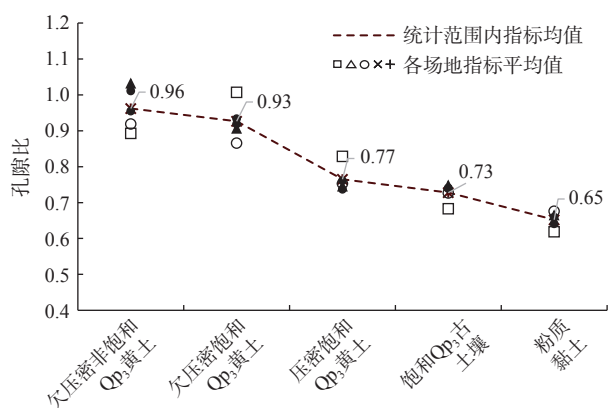
Fig. 1 Formation of two types of saturated loess

注: P_{sh} 为湿陷起始压力; σ_v 为上覆土重度。

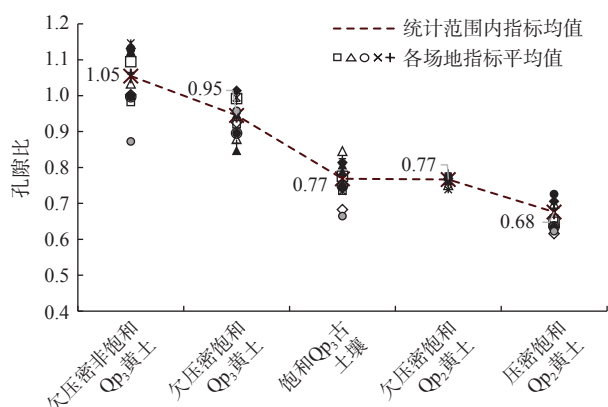
年版)^[19],结合近年来地下工程实践可以发现,欠压密饱和黄土在黄土梁洼地貌单元中广泛分布,埋藏浅、厚度大且工程性质差;在二级阶地的西部北二环西北段以北段有所分布;三级阶地仅局部地段存在饱和软黄土;在泾河二、三级阶地及塬区,由于地势高,地下水位埋深大,不存在欠压密饱和黄土;皂河一级阶地、渭河一级阶地和黄土台塬区未见欠压密饱和黄土。通过对西安地区22个黄土场地(具体场地分布可参考文献[20])的试验和数据统计,区分黄土梁洼和河流阶地2个地貌单元,按照地层自浅至深的揭露顺序,将欠压密饱和黄土典型地层条件下,各类土层的特征物性指标汇总对比如图2—3所示。

孔隙比反映了土体内部孔隙体积总量和土颗粒体积的比值,宏观表征了黄土在长期水力作用下大孔隙结构的压密破坏程度。由图2可知,随着土层埋藏深度增加,土体的孔隙比在逐渐减小,欠压密饱和Qp₃黄土的孔隙比在0.80~1.10之间,均值为0.95左右,较同处于水位下的压密饱和Qp₃黄土层相比,孔隙比存在0.16~0.18左右的增量。欠压密饱和Qp₂黄土的孔隙比均值为0.77,较同处于水位下的压密饱和Qp₂黄土层相比,孔隙比存在0.07左右的增量。综合来看,两类饱和黄土在地层内邻近分布,其欠压密特征存在一定差异;孔隙比整体呈现欠压密饱和Qp₃黄土>欠压密饱和Qp₂黄土>压密饱和Qp₃(Qp₂)黄土的基本规律。孔隙比的差异决定了降水过程中,各特征土层在力、水作用下可变形空间的大小。

液性指数反映了土体的稠度状态,主要由天然含水量与界限含水量之间的相对关系计算得到,反映了土体的软硬程度。由图3可知,欠压密饱和Qp₃黄土的液性指数在0.77~1.20之间,均值为0.97,较同处于水位下的压密饱和Qp₃黄土相比,其液性指数普遍存在0.40左右的增量,均处于软塑或流塑状态;欠压密饱和Qp₂黄土的液性指数在0.60~0.80之间,与压密



(a) 梁洼地貌



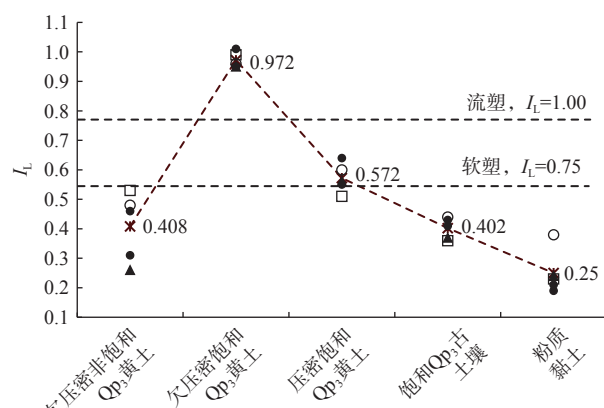
(b) 阶地地貌

图 2 西安地区黄土地层孔隙比演化曲线

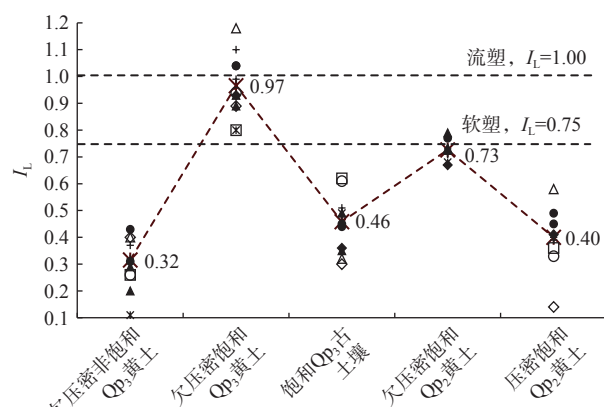
Fig. 2 Evolution of pore ratio of loess stratum in Xi'an area

饱和 Qp_2 黄土相比, 液性指数存在 0.30 左右的增量, 可呈现软塑或可塑状态。综合来看, 未被彻底压密的饱和黄土存在相对充分的赋水空间, 在长期的水力作用下, 多呈现软塑或流塑状态, 土体抵抗外力变形的能力显著降低; 对于压密饱和黄土, 均呈现可塑状态, 抵抗外力变形能力一般。液性指数整体呈现出欠压密饱和 Qp_3 黄土 > 欠压密饱和 Qp_2 黄土 > 压密饱和 $Qp_3(Qp_2)$ 黄土/古土壤的基本特征。液性指数的差异决定了工程降水过程中, 各特征土层在力、水作用下可变形能力的大小。

综上, 两个沉积年代下的欠压密饱和黄土, 其孔隙比和液性指数指标与压密饱和黄土相比, 均存在一定的差异, 在欠压密饱和 Qp_3 黄土中更加显著。由黄土的沉积规律可知, 原状黄土是一种具有结构强度的典型欠压密土, 水的作用只改变了其部分结构排列和胶结作用, 不同沉积状态、不同外部作用下会形成性质差异较大的饱和黄土。部分黄土在浸水饱和过程中, 在外部环境的作用下, 其湿陷性完全消除, 大孔隙



(a) 梁洼地貌



(b) 阶地地貌

图 3 西安地区黄土地层液性指数 (I_L) 演化曲线

Fig. 3 Evolution curve of liquidity index of loess stratum in Xi'an area

结构被充分压密破坏, 孔隙比较小, 形成相对稳定的饱和黄土, 即压密饱和黄土; 另一部分黄土, 在浸水饱和过程中仅产生一定的压缩变形, 大孔隙结构未被充分压密, 性质较为软弱, 即欠压密饱和黄土。

为进一步揭示欠压密饱和黄土的微观结构特征, 在典型场地 6 (图 4) 取样并完成扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 测试。为减小取样过程对欠压密饱和黄土的扰动, 采用三重管薄壁取样器得到 I 级未扰动土样^[21]; 在原状饱和黄土试样中部取尺寸约 $5.0\text{ cm} \times 2.0\text{ cm} \times 2.0\text{ cm}$ 的微观试样, 在室内自然状态下阴干; 待试样体干燥后取尺寸约 $1.5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$ 的块体试样进行 SEM 测试。取样深度分别为 7, 12, 16, 21 m, 其初始孔隙比为 0.92、0.75、0.88、0.72。分析欠压密饱和 Qp_3 黄土、饱和 Qp_3 古土壤、压密饱和 Qp_2 黄土和欠压密饱和 Qp_2 黄土的微观结构特征如图 5 所示。

由图 5 可知, 两个沉积年代下的欠压密饱和黄土内部仍存在集粒和碎屑所构成的架空-接触式联结形

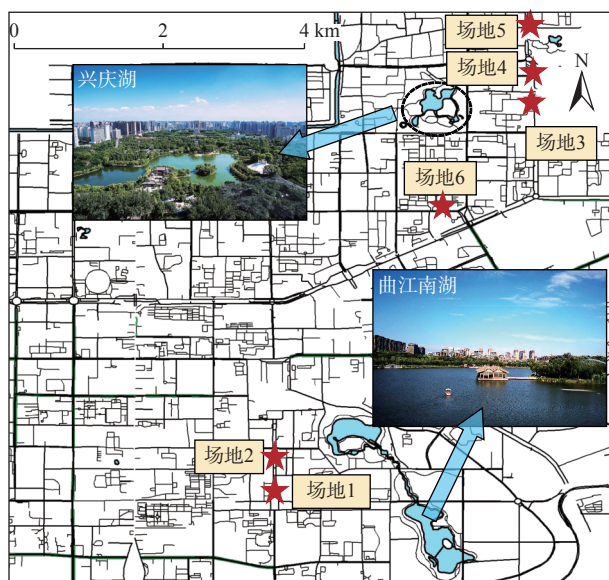


图4 验证场地平面分布图

Fig. 4 Verification of site layout

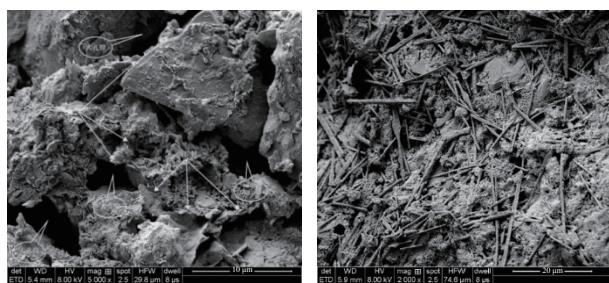
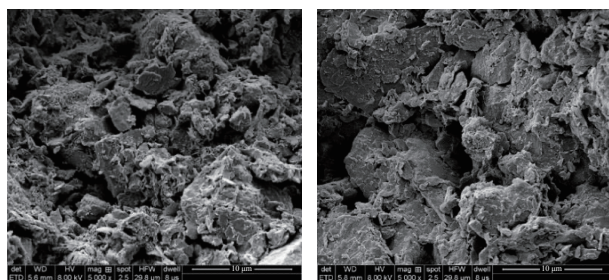
(a) 欠压密饱和和 Q_{p3} 黄土(b) 饱和和 Q_{p3} 古土壤(c) 压密饱和和 Q_{p3} 黄土(d) 欠压密饱和和 Q_{p3} 黄土

图5 黄土地层内部特征土层 SEM 图像对比

Fig. 5 Comparison of SEM images of soil layers with internal characteristics in loess strata

式,形成典型的大孔隙结构特征,符合以往对黄土孔隙结构的基本认识^[22]。

进一步对比两类饱和黄土的微观结构,如图5(c)(d)所示,可以发现,在压密饱和黄土内部,粒状架空结构体系已基本崩溃破坏,骨架颗粒逐步充填至架空孔隙的空腔内部^[23-24],大孔隙结构明显减少,基本处于压密稳定状态。而在欠压密饱和黄土内部,大孔隙结构基本保持完整。这一结构特征,一方面增加了土

体内部的赋水空间,表现为高含水量性质;另一方面,加剧了土颗粒-水分间的相互作用,从而引起其物性沉积状态和力学性能的明显变化。

饱和黄土视其压密状态的不同,存在较大的工程性能差异,当处于压密状态时,土体呈现可塑状态,力学及工程性质较为稳定。当处于欠压密状态时,具有失水变形大和饱水软弱的显著特征^[1, 18, 25-27]。具体表现为:一是失水过程地层变形大,以往工程经验和研究^[27]表明,水位降深在5~20 m变化时,地面无超载工况下,工程降水可引起地面产生50~300 mm的压缩变形,甚至更大;二是饱水软弱性,欠压密饱和黄土往往处于软塑或流塑状态,属于中或高灵敏度土体,严重影响地下工程的安全,塌方、涌泥事故时有发生,其软弱性质与所具有的欠压密程度密切相关,即土体孔隙比越大,饱和状态下软弱特征越显著,失水过程中压缩变形越大。

综上所述,孔隙比指土体内部孔隙体积与土颗粒体积之比,是反映材料密实程度的重要物理性质指标,是表征土体受外部作用后孔径分布的一个宏观指标,代表了土体受载后可发生变形空间的大小,在一定程度上反映了土的沉积状态和应力历史。降水过程中,孔隙比较大,压缩变形量也必然较大。而液性指数表征土的稠度状态,反映土体的软硬程度或其抵抗外力引起变形或破坏的能力,代表土体受载后发生变形的难易程度,而这一能力从微观结构上分析由土颗粒的组成、排列及颗粒间的联结决定,也间接表征了土的含水状态。液性指数越大,工程降水过程中越易变形。以上2个物理指标是影响饱和黄土降水沉降最关键的状态参量。

2 饱和黄土降水沉降实用计算方法

2.1 降水沉降计算方法的提出

2.1.1 饱和黄土失水敏感性

工程实践表明,饱和黄土的降水沉降与孔隙比和液性指数密切相关。孔隙比可反映土体的压密状态,孔隙比越大,失水过程中可产生压缩变形的空间就越大,反映了失水变形空间的大小,将其定义为饱和黄土失水的可变性;液性指数可反映土体的软弱程度,液性指数越大,失水过程中越容易产生压缩变形,反映了饱和黄土失水变形的难易程度,将其定义为饱和黄土失水的能变性。只有可变性和能变性都较强时,饱和黄土才能在失水过程中被充分压密,产生较大的变形。若饱和黄土的可变性较强,但能变性较弱,其

天然沉积的结构可能仍较为稳定,如湿度大但未完全饱和的黄土,即便是有较大的压缩空间,但在失水过程中变形不一定充分发生。若饱和黄土的能变性较强,但可变性较弱时,即便土体较软弱,虽然变形容易发生,但受其可变空间不足的影响,产生的压缩变形仍然不大,如压密饱和黄土。上述 2 个指标体现了饱和黄土失水变形的敏感性,即二者均较大时,失水变形才能充分发生;二者均较小时,失水变形不能充分发生。因此,将孔隙比与液性指数乘积定义为饱和黄土的失水敏感性指标。同时,从孔隙比和液性指数自身的物理意义上不难看出,饱和黄土的可变性和能变性也反映了土的沉积规律、颗粒排列和联结特征以及力学特性,而这些特性,是现有工程降水沉降计算方法中所无法反映的。

2.1.2 饱和黄土工程降水沉降计算方法

基于对饱和黄土失水敏感性的认识,考虑应力状态,本文提出以下降水沉降计算方法:

$$s = \sum_{i=1}^n \varphi_{wi} \times \frac{\Delta\sigma_{zi}\Delta h_i}{E_{si}} \tag{1}$$

$$\varphi_{wi} = e_i \times I_{Li} \tag{2}$$

式中: s ——降水引起的地面沉降量/m;
 $\Delta\sigma_{zi}$ ——降水引起的地面下第 i 土层中心点处的有效应力增量/kPa,取降水结束时土的有效应力增量,其计算方法与现行规范^[2-3]保持一致;
 Δh_i ——第 i 层土的厚度/m;
 E_{si} ——按实际有效应力段确定的第 i 层土的压缩模量/MPa;
 φ_{wi} ——第 i 层土的沉降经验系数;
 e_i ——降水影响范围内第 i 土层的孔隙比,取饱和状态下土体的测试数据;
 I_{Li} ——降水影响范围内第 i 土层的液性指数,取饱和状态下土体的测试数据。

式(1)的计算方法与规范^[2-3]中降水沉降的分层总和法相比,共同点是均采用分层总和法的基本思想;不同点是引入了失水敏感性指标,将影响饱和黄土降水沉降最关键的孔隙比和液性指数引入了计算公式,回避了原沉降计算公式中经验系数 φ_w 取值过于笼统、精确度差等问题,且能够反映饱和黄土的失水敏感性。此方法简单易行,物理意义明确,一般的岩土工程勘察报告均可提供计算参数,便于工程应用。

由式(1)可以看出,同等条件下,土层孔隙比越

大,降水沉降计算值越大;液性指数越大,降水沉降计算值越大,反之亦然。本文将此方法命名为黄土地层降水沉降计算的 e - I_L 法。

2.2 参数敏感性分析

统计分析前述章节中场地降水范围内各特征土层的孔隙比和液性指数变化范围如表 1 所示。可以发现,对于饱和黄土,孔隙比和液性指数的变化主要受控于沉积年代、压密状态和颗粒组成等主要因素;孔隙比变化范围在 0.68~1.10 之间,液性指数的变化范围在 0.15~1.20 之间, e - I_L 指标变化范围为 0.16~1.32 之间,当土越密实、越硬时,其值越小,降水沉降值也将越小,当土越松散、越软时,其值越大,降水沉降值也将越大。该公式选用参数变化敏感,与现阶段黄土地区常用的经验系数 φ_w 取值为 0.1~1.5 及现行《建筑深基坑工程施工安全技术规范》(JGJ 311—2013)^[3]中所给出的 φ_w 取值为 0.2~1.2 具有较高的吻合度。

表 1 西安地区水位降深范围内特征土层物性指标统计表
Table 1 Statistical table of index of characteristic soil layers within the scope of water level drop in Xi'an

特征土层	e	I_L	φ_{wi}
欠压密饱和Qp ₃ 黄土	0.85~1.10	0.77~1.20	0.67~1.32
压密饱和Qp ₃ 黄土	0.74~0.76	0.22~0.64	0.16~0.49
饱和Qp ₃ 古土壤	0.73~0.91	0.29~0.51	0.23~0.46
欠压密饱和Qp ₂ 黄土	0.75~0.84	0.66~0.89	0.50~0.74
压密饱和Qp ₂ 黄土	0.70~0.75	0.21~0.58	0.27~0.44
饱和Qp ₂ 古土壤	0.68~0.74	0.15~0.58	0.27~0.43

2.3 参数相关性分析

式(1)中,压缩模量是具有明确物理意义的力学指标,反映了侧向受限条件下土的压缩变形能力,压缩模量越大,土抵抗压缩变形的能力越强。选择典型测试场地,分析降水范围内各特征土层的压缩模量与孔隙比的关系如图 6 所示,各特征土层的压缩模量与液性指数的关系如图 7 所示,各特征土层的压缩模量与 e - I_L 的关系如图 8 所示。

根据试验结果,水位降深范围内,各特征土层的压缩模量在 2~11 MPa 以内。当孔隙比处于 0.90~1.15 之间时,欠压密饱和 Qp₃ 黄土压缩模量和孔隙比之间表现出一定的相关性,即侧限约束条件下,饱和黄土的压缩特性在一定程度上受到其压密状态的影响;在孔隙比处于 0.75~0.90 之间时,各特征土层的压缩模量和孔隙比指标无明显相关性,整体分布较为离散。

处于地下水位下的古土壤和饱和黄土层,其液性指数指标在 0~1.4 之间。当压缩模量相近时,土体可

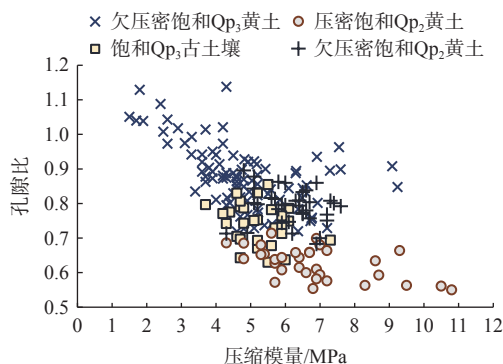


图6 降水范围内特征土层压缩模量-孔隙比相关性曲线

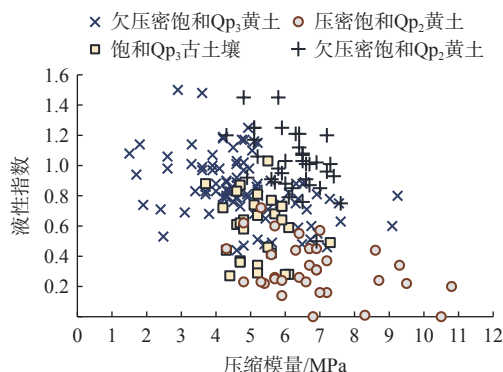
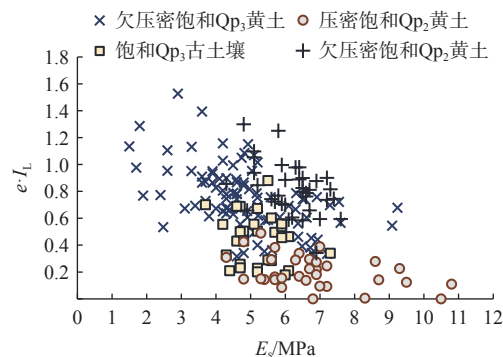
Fig. 6 Correlation between E_s and e of each characteristic soil layer within the dewatering range

图7 降水范围内特征土层压缩模量-液性指数相关性曲线

Fig. 7 Correlation between E_s and I_L of each characteristic soil layer within the dewatering range图8 降水范围内特征土层压缩模量- $e \cdot I_L$ 相关性曲线Fig. 8 Correlation between E_s and $e \cdot I_L$ index of each characteristic soil layer within the dewatering range

处于硬塑、可塑、软塑甚至流塑状态。综合来看,液性指数和压缩模量指标较为离散,相关性不强。该相关性分析结果说明原降水沉降计算公式中压缩模量的变化并无法反映土层初始状态下孔隙比和液性指数对降水沉降的影响。

由西安地区水位降深范围内各特征土层的 $e \cdot I_L$ 参数与压缩模量的相关性可知,对于欠压密饱和和黄

土,实测的结果离散性较大;对压密饱和和黄土,有一定的规律,但实测的结果也存在一定的离散性。

分层总和法计算降水沉降,以线弹性模型为基础,即有效应力增量除以压缩模量,但实际上,土体在降水过程中,其压缩模量逐步在增加,且并不符合线弹性变化规律。同时,原状饱和和黄土受其试验应力条件(侧向压缩)、取样扰动及土结构的影响,室内测试得到的压缩模量并不能全面、灵敏地体现其物性特征,这一差异在具有中或高灵敏度、呈现软塑或流塑状态下的欠压密饱和和黄土测试过程中尤为显著。

3 工程降水沉降计算方法验证

西安地铁工程近几年开展了大量的降水工程。目前,对于地下水位以下的基坑工程、施工竖井和浅埋暗挖隧道工程,约90%均采用了坑外管井降水的地下水控制方式。地铁线路敷设范围内主要地层为湿陷性黄土、饱和黄土及古土壤、粉质黏土和砂卵石,地下水位埋深5~35 m,均为潜水。工程降水沉降预测是西安地铁建设过程中的重大技术问题,是影响安全、进度、投资的关键控制环节。

3.1 验证场地基本概况

本次验证场地主要集中在西安兴庆湖和曲江南湖周边,受湖底防渗失效的影响,周边地下水位逐年抬升,是西安城区欠压密饱和黄土的典型分布区域。为有效区分工程降水、开挖和工程结构施作对地表沉降的影响,主要选择西安地区6个竖井类工程进行验证,该类工程在强支护条件下,自身变形较小,周边地表变形主要由工程降水引起。各工程场地平面分布如图9所示。

其中,场地1—2:距离曲江南湖约1.0 km,均为施工竖井类工程,竖井净空尺寸为7.9 m×4.6 m,采用倒挂井壁法进行施工,底板埋深28.3 m。工程降水采用大口径管井法,共布置22口降水井,井间距为8~16 m,降水井深度为50.0 m。

场地3—5:距离兴庆湖1.0~3.0 km,为施工竖井、盾构始发/接收井类工程,竖井净空尺寸均小于10 m,采用倒挂井壁法进行施工。工程降水采用大口径管井法,降深为5~15 m,降水井布置间距6~8 m。各场地平面位置相距1 km以内。

场地6:距离兴庆湖约2.1 km,为施工竖井类工程,净空尺寸为6.5 m×5.0 m,采用倒挂井壁法进行施工,底板埋深为28.7 m,水位降深为23.5 m,共布置12口降水井,为目前西安地区欠压密饱和黄土揭露厚度

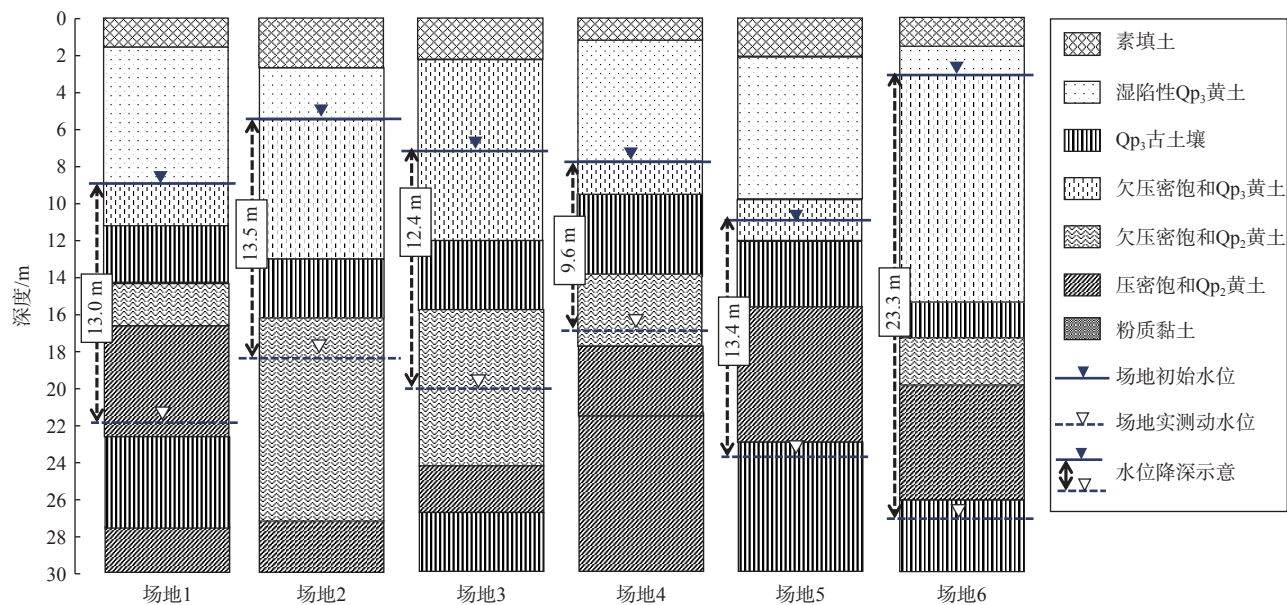


图 9 6 个场地地层与降水深度示意图

Fig. 9 Schematic diagram of stratum and dewatering depth of six sites

最大、降水沉降变形量最大的场地。

各场地均处于黄土梁洼地貌,地质剖面如图 9 所示。工程降水涉及到的土层自上而下依次为 Qp_3 黄土及 Qp_3 古土壤,再下为 Qp_2 黄土和粉质黏土。分析各场地特征土层的相关参数范围值如表 2 所示。

表 2 验证场地位置各特征土层相关参数			
Table 2 Range values of each characteristic soil layer at the site location			
特征土层	e	I_L	$e \cdot I_L$
欠压密饱和和 Qp_3 黄土	0.85 ~ 1.01	0.92 ~ 1.04	0.84 ~ 1.05
饱和 Qp_3 古土壤	0.74 ~ 0.80	0.24 ~ 0.65	0.18 ~ 0.50
欠压密饱和和 Qp_2 黄土	0.77 ~ 0.79	0.66 ~ 0.77	0.51 ~ 0.60
压密饱和和 Qp_2 黄土	0.69 ~ 0.76	0.54 ~ 0.75	0.41 ~ 0.51

结合图 9 和表 2 可知,本次验证场地中欠压密饱和和 Qp_3 黄土均分布在地下水位附近,处于流塑或软塑状态;欠压密饱和和 Qp_2 黄土分布在第一层 Qp_3 古土壤以下,处于可塑或软塑状态。 Qp_3 古土壤、压密饱和 Qp_2 黄土和 Qp_2 粉质黏土的孔隙比均小于 0.80,液性指数均处于 0.55 以下,处于可塑状态。

各验证场地的地表沉降发展历程曲线如图 10 所示。在工程降水过程中,欠压密饱和黄土内部水分排出,力学性质持续改善,原处于软塑和流塑状态的欠压密饱和黄土逐步转变为可塑状态的非饱和黄土,同时伴随着土层变形持续发展。由图 10 可知,各场地中地面快速变形持续时间普遍为 3~6 个月。其中,场地 1、6 受降水井关停和二次开启的影响,地表变形

历程曲线存在多个沉降快速发展阶段。这一现象说明欠压密饱和黄土失水速率慢,失水后强度增长所需要的时间较长,降水位往复变化对地面沉降影响显著。各场地的地面变形监测持续时间为 300~600 d,截至停止观测时,均已进入地面变形稳定阶段。因此,本次验证过程中以降水期间地表沉降变形实测最大值作为降水沉降取值依据;以竖井周边观测井内实测潜水位作为水位降深的确定依据;以竖井周边邻近钻孔的地层信息和试验测试资料为依据,开展降水沉降变形预测。

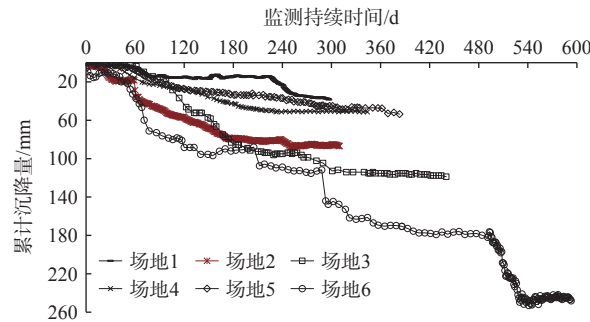


图 10 各场地处地表沉降变形历程曲线汇总

Fig. 10 Summary of surface settlement and deformation history curves at each site

3.2 规范建议方法

利用各场地位置处的降水沉降实测资料,反算得到各场地处的 φ_w ,汇总如表 3 所示。

由表 3 可知,利用现场实测沉降结果反算得到的

表 3 现行规范建议方法反算结果

Table 3 Summary of empirical coefficients for backcalculation of current norms and recommended methods

	实测沉降量 /mm	沉降计算量 (未经修正)/mm	反算得到 φ_w
场地1	38.4	92.1	0.42
场地2	86.9	163.1	0.53
场地3	118.8	154.9	0.77
场地4	51.3	144.3	0.36
场地5	53.6	86.7	0.62
场地6	253.0	375.7	0.67

φ_w 在 0.36 ~ 0.77 之间。平面位置相近的场地, φ_w 存在明显差异。以场地 3、4 为例, 未经修正的沉降计算量为 140 ~ 160 mm, 而现场实际测得到的变形量最大相差约 67.5 mm。进一步分析可知, 在场地 4 中, 水位降深小, 即有效应力增量小, 水位下降范围内古土壤层厚度为 3.2 m, 占总降深的 33%; 场地 2、5 处水位下降范围内分布有较大厚度的欠压密饱和黄土, 其古土壤

厚度占比仅约 20%, 且水位降深相对较大, 具有较大的有效应力增量, 使得降水沉降充分发展, 具体表现为 φ_w 反算值有所增大。

综上, 可以得到:

(1) 现有规范^[2-3]建议公式中, 仅依赖单一的压缩模量指标, 无法灵敏、全面地反映饱和黄土在降水过程中的实际变形发展能力。

(2) 采用来笼统 φ_w 修正沉降变形量的计算方法, 不能完整、灵敏地反映水位降深、层厚变化等因素对工程降水沉降变形的影响, 更不能计算分层沉降。

3.3 建议方法

表 4 给出了 6 个场地的地层信息、压缩模量、孔隙比、液性指数、预测沉降、实测沉降变形量, 降水沉降预测量均按照本文所提出的 $e-I_L$ 法计算。图 11 给出了本文降水沉降计算值和地表沉降实测值的对比结果。

表 4 典型场地地层信息与验证表

Table 4 Stratum information and verification of typical site

场地编号	特征土层	E_{s1-2} /MPa	E_{s2-3} /MPa	E_{s3-4} /MPa	e	I_L	$e \cdot I_L$	预测沉降量/mm	实测沉降量/mm
场地1	欠压密饱和Qp ₃ 黄土	4.1	3.5	—	0.910	0.92	0.84	42.5	38.4
	饱和Qp ₃ 古土壤	6.1	8.2	—	0.764	0.24	0.18		
	欠压密饱和Qp ₂ 黄土	5.2	7.2	9.2	0.778	0.66	0.51		
	饱和Qp ₂ 古土壤	—	—	—	0.684	0.24	0.16		
场地2	欠压密饱和Qp ₃ 黄土	4.1	3.5	—	0.910	0.92	0.84	94.1	86.9
	饱和Qp ₃ 古土壤	6.1	8.2	—	0.764	0.24	0.18		
	欠压密饱和Qp ₂ 黄土	5.2	7.2	9.2	0.778	0.66	0.51		
场地3	欠压密饱和Qp ₃ 黄土	3.5	6.1	—	0.955	1.04	0.99	103.8	118.8
	饱和Qp ₃ 古土壤	6.3	8.3	—	0.744	0.44	0.33		
	欠压密饱和Qp ₂ 黄土	5.7	8.1	11.3	0.776	0.77	0.60		
场地4	欠压密饱和Qp ₃ 黄土	4.1	3.5	—	0.985	0.99	0.98	66.4	51.3
	饱和Qp ₃ 古土壤	6.1	8.2	—	0.809	0.51	0.41		
	欠压密饱和Qp ₂ 黄土	5.2	7.2	9.2	0.785	0.73	0.57		
场地5	欠压密饱和Qp ₃ 黄土	6.5	6.1	—	1.008	1.04	1.05	46.3	53.6
	饱和Qp ₃ 古土壤	3.6	5.2	—	0.748	0.45	0.34		
	压密饱和Qp ₂ 黄土	5.5	7.9	—	0.696	0.75	0.52		
	粉质黏土	6.8	9.5	13	0.698	0.40	0.28		
场地6	欠压密饱和Qp ₃ 黄土	4.1	3.5	—	0.845	1.01	0.87	209.3	253.0
	饱和Qp ₃ 古土壤	6.1	8.2	—	0.771	0.65	0.50		
	欠压密饱和Qp ₂ 黄土	5.2	7.2	9.2	0.768	0.66	0.51		
	压密饱和Qp ₂ 黄土	6.9	10.1	13.5	0.759	0.54	0.41		

注: 场地1、2、6采用单米预测方法, 表中所列数值为对应土层范围内的测试均值; 场地3、4、5中所列数值取自于详细勘察报告中的设计参数标准值。一指预测过程中不涉及该参数; E_{s1-2} 、 E_{s2-3} 、 E_{s3-4} 为不同荷载段内的压缩模量。

由表 4、图 9、图 11 综合分析, 可以得到:

(1) 利用本文所提出的 $e-I_L$ 计算方法, 降水沉降计算值和现场实测值吻合度较高, 预测误差为 4.4% ~ 21.2%。这一验证结果进一步说明通过引入 e 和 I_L 指

标, 不仅能够反映物性对降水沉降的控制作用, 而且可灵敏地反映水位降深、土性状态和地层组合差异对降水沉降变形量的影响。

(2) 以各场地位置处的地表沉降计算值为基准,

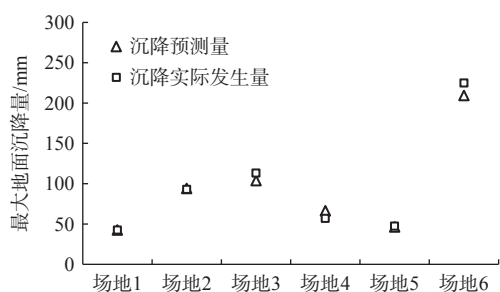


图 11 6 个场地失水沉降预测值与现场实测值对比图

Fig. 11 Comparison between predicted water loss settlement values and field measured values of six sites

对该类特征土层的沉降比例进行归一化处理,绘制各场地处的分层变形发展特征曲线如图 12 所示。

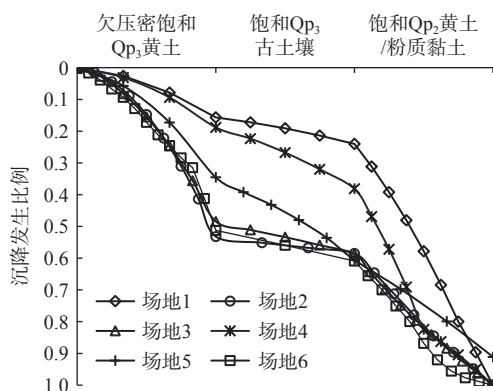


图 12 各场地位置处降水沉降归一化曲线

Fig. 12 Normalization curve of precipitation settlement at each site location

由图 12 可知,欠压密饱和黄土是工程降水引发地面沉降发生的主地层,占到总沉降量的 80% 以上。欠压密饱和黄土的孔隙比和液性指数越大,同等有效应力增量下,沉降归一化曲线斜率越大,即沉降变形越大。水位下降范围内,欠压密饱和黄土占比越高,沉降变形占比越大。以场地 2、3、6 为例,欠压密饱和 Q_{p3} 黄土的分层沉降发展比例大于 50%,结合图 9、表 3 可知,所述场地中欠压密饱和 Q_{p3} 黄土层厚占总降深的 47%~62%, $e-I_L$ 分别为 0.84、0.99、0.87,土体可变性和能变性均较强,变形充分发展; Q_{p3} 古土壤层和压密饱和黄土层对降水沉降量贡献有限,其中, Q_{p3} 古土壤层的沉降占比约 10%~20%。

4 结论

(1)由于上覆压力和浸水方式的不同,饱和黄土在形成过程中可表现出两种状态,一是欠压密状态,二是压密状态,两种状态饱和黄土物理力学性质差异较大。孔隙比和液性指数是控制饱和黄土降水沉降

的关键因素。

(2)提出了用孔隙比反映饱和黄土失水的可变性、液性指数反映饱和黄土失水能变性的思路,首次定义了饱和黄土的失水敏感性指标。

(3)在分层总和降水沉降计算方法中,引入了失水敏感性指标,分析了参数的敏感性及相关性,提出了饱和降水沉降计算的 $e-I_L$ 法。该方法简单易行,能反应降水沉降的主控因素,具有较大的应用优势。

(4)利用 6 个典型场地数据验证本文提出的计算方法,预测结果与实测结果吻合度高,表明了该方法的可靠性。

(5)理论预测和实践表明,黄土地区降水地层沉降主要发生在欠压密饱和黄土地层中,占到总沉降量的 80% 以上。

参考文献 (References) :

- [1] 陈东山,王鸣晓.西安地铁土建工程设计与施工[M].西安:陕西人民出版社,2017. [CHEN Dongshan, WANG Mingxiao. Civil engineering design and construction of Xi'an metro[M]. Xi'an: Shaanxi People's Publishing House, 2017. (in Chinese)]
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2012. [Ministry of Housing and urban-rural development of the people's republic of china. Code for design of building foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)]
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑基坑工程施工安全技术规范:JGJ 311—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for construction safety of deep building foundation excavations: JGJ 311—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)]
- [4] 缪俊发,吴林高,王璋群.大型深井点降水引起地面沉降的研究[J].岩土工程学报,1991,13(3): 60—64. [MIAO Junfa, WU Lingao, WANG Zhangqun. Study on ground subsidence caused by dewatering with large deep well[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(3): 60—64. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 许胜,缪俊发,魏建华,等.深基坑降水与地面沉降的三维黏弹性全耦合数值模拟[J].岩土工程学报,

- 2008, 30(增刊 1): 41 - 45. [XU Sheng, MIAO Junfa, WEI Jianhua, et al. Numerical simulation of dewatering of foundation pits and land subsidence based on 3D viscoelastic coupling model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(Sup1): 41 - 45. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 胡长明, 林成. 黄土深基坑潜水区降水诱发地面沉降的简化算法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 76 - 83. [HU Changming, LIN Cheng. Simplified calculation of settlement due to dewatering of phreatic aquifer in loess area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 76 - 83. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张志红, 郭晏辰, 凡琪辉, 等. 悬挂式止水帷幕基坑降水引起坑外地面沉降计算方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(9): 1329 - 1334. [ZHANG Zhihong, GUO Yanchen, FAN Qihui, et al. Calculation method for land subsidence induced by dewatering of foundation pit with suspended waterproof curtains[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2021, 42(9): 1329 - 1334. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 杨健. 工程降水引发的地面沉降研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2005. [YANG Jian. The research on land subsidence caused by engineering dewatering[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2005. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 于祺. 降水引起成层土附加应力及地表沉降的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 166 - 172. [YU Qi. Research on additional stress and ground settlement caused by dewatering in layered soils[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 166 - 172. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 梁发云, 贾亚杰, 邓航, 等. 深基坑降水沉降计算土体弹性参数取值方法探讨[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 2): 29 - 32. [LIANG Fayun, JIA Yajie, DENG Hang, et al. Discussions on elastic parameters of soil for land subsidence caused by decompression of confined aquifer in deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(Sup2): 29 - 32. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 杨光华, 黄致兴, 李志云, 等. 考虑侧向变形的软土地基非线性沉降计算的简化法[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1697 - 1704. [YANG Guanghua, HUANG Zhixing, LI Zhiyun, et al. Simplified method for nonlinear settlement calculation in soft soils considering lateral deformation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1697 - 1704. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王志亮, 李永池, 殷宗泽. 考虑土体侧胀性的路堤沉降计算探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1772 - 1777. [WANG Zhiliang, LI Yongchi, YIN Zongze. Discussion on settlement calculation of embankment considering lateral dilation behavior of soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1772 - 1777. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王翠英, 黄理兴, 段卫昌, 等. 深基坑降水引起周边地面沉降量值计算修正系数 MS 的确定[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 1011 - 1016. [WANG Cuiying, HUANG Lixing, DUAN Weichang, et al. Determination of coefficient MS during calculation of surrounding ground settlement due to foundation pit dewatering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 1011 - 1016. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 秦胜伍, 张延庆, 张领帅, 等. 基于 Stacking 模型融合的深基坑地面沉降预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1316 - 1323. [QIN Shengwu, ZHANG Yanqing, ZHANG Lingshuai, et al. Prediction of ground settlement around deep foundation pit based on stacking model fusion[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1316 - 1323. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘贺, 张弘强, 刘斌. 基于粒子群优化神经网络算法的深基坑变形预测方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(5): 1609 - 1614. [LIU He, ZHANG Hongqiang, LIU Bin. A prediction method for the deformation of deep foundation pit based on the particle swarm optimization neural network[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2014, 44(5): 1609 - 1614. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. [Editorial Committee of the Engineering Geology Handbook. Engineering geology handbook[M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)]
- [17] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3 - 13. [XIE Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3 - 13. (in Chinese with English abstract)]

- English abstract)]
- [18] 陕西省住房和城乡建设厅. 西安城市轨道交通岩土勘察规程: DBJ 61/T 162—2019[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2020. [Shaanxi Provincial Department of Housing and Urban Rural Development. Code for geotechnical investigation of Xi'an urban rail transit; DBJ 61/T 162—2019[S]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2020. (in Chinese)]
- [19] 西安市城市规划管理局, 西安市勘察测绘院. 西安市工程地质图集 [M]. 西安: 西安地图出版社, 1998. [Xi'an Urban Planning and Management Bureau, Xi'an Survey and Mapping Institute. Xi'an urban engineering geological atlas[M]. Xi'an: Xi'an Map Publishing House, 1998. (in Chinese)]
- [20] 康佐, 亢佳伟, 邓国华. 欠压密饱和黄土基本物理力学性质研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44(11): 3117—3127. [KANG Zuo, KANG Jiawei, DENG Guohua. Study on basic physical and mechanical properties of uncompacted saturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(11): 3117 — 3127. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 三重管单动回转取土器: JG/T 555—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. [Ministry of Housing and urban-rural development of the people's republic of china. Triple tube swivel type rotary corer: JG/T 555—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.]
- [22] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论 [J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 1—10. [GAO Guorui. Structural theory of loess collapsible deformation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4): 1—10. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 范文, 魏亚妮, 于渤, 等. 黄土湿陷微观机理研究现状及发展趋势 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 144—156. [FAN Wen, WEI Yani, YU Bo, et al. Research progress and prospect of loess collapsible mechanism in micro-level[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 144 — 156. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 等. 冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 109—115. [LIU Leqing, ZHANG Wuyu, ZHANG Bingyin, et al. Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(4): 109 — 115. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 高虎艳, 邓国华. 饱和软黄土的力学与工程性质分析 [J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(3): 38—42. [GAO Huyan, DENG Guohua. Analyses for mechanical and engineering characteristics of saturated soft loess[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(3): 38 — 42. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 曹平, 李冀伟, 卢致强, 等. 大厚度饱和软黄土地层矿山法地铁隧道施工技术研究 [J]. 现代隧道技术, 2020, 57(6): 177—185. [CAO Ping, LI Jiwei, LU Zhiqiang, et al. Study on construction technology of mined metro tunnel in large-thickness saturated Soft loess stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(6): 177 — 185. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 马钢, 康佐, 高虎艳, 等. 饱和软黄土城市地铁隧道安全风险分析及应对措施研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(增刊1): 425—433. [MA Gang, KANG Zuo, GAO Huyan, et al. Analysis on safety risk of urban metro tunnel construction in saturated soft loess stratum and its countermeasures[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(Sup1): 425 — 433. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 宗 爽