

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0139

陈能远, 孟庆山. 水位波动作用下软土的变形强度特性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 165-170. CHEN N Y, MENG Q S. Study on deformation and strength of soft soil under water level fluctuation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 165-170. (in Chinese)

水位波动作用下软土的变形强度特性研究

陈能远^{1,2,3}, 孟庆山³

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710054; 2. 信息产业部电子综合勘察研究院 陕西省岩土工程技术研究中心, 西安 710054; 3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 在我国沿海地区, 过量抽取利用地下水引发了明显的地面沉降, 限制开采量、人工回灌地下水对减轻地面沉降具有显著效果。开采与回灌地下水促成了地下水水位的大幅波动, 使得沿海地区广泛分布的软土层发生了明显的沉降与回弹变形。为了研究软土在水位波动作用下的变形和强度特性, 利用沉降柱试验装置模拟地下水水位波动, 对不同水位波动次数作用后的软土试样进行了高压固结试验、直剪试验和三轴试验, 研究了水位波动次数对软土变形性状的影响, 给出了用初始强度指标和含水量表示的、不同水位波动次数作用后的软土残余强度表达式。试验结果表明: 随着水位波动次数的增加, 软土的变形特性增强而强度特性降低, 黏聚力和内摩擦角随波动次数的增加呈近似线性降低; 相同水位波动次数下软土试样的强度指标随含水量的增加呈明显下降趋势。研究成果对于探索城市地下水水位波动对地面沉降和承载力变化的作用机理, 提高科学决策水平及减轻环境地质灾害有着重要实际意义和应用价值。

关键词: 软土; 水位波动; 强度指标; 含水量; 衰减系数

中图分类号: TV 223 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)05-0165-06

Study on deformation and strength of soft soil under water level fluctuation

CHEN Nengyuan^{1,2,3}, MENG Qingshan³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Electric Comprehensive Survey Institute of Information Industry Department, Shaanxi Province Soil Engineering Technology Research Center, Xi'an 710054, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The excessive extraction of groundwater caused obvious ground subsidence in the southeastern coastal areas of China. Exploitation restriction and artificial recharge of groundwater have significant effects on mitigating the ground subsidence. These measures lead to drastic fluctuations of water level and significant settlement and rebound deformation of the widespread soft soil in the coastal areas. In order to investigate the deformation and strength of soft soil under water level fluctuation, by using the cylinder model experiment device to simulate water level fluctuation, we conducted high pressure consolidation test, direct shear test, and triaxial test on the soft soil after different times of water level fluctuation. Based on the analysis of the influence degree of water level fluctuation on the deformation behavior and strength characteristics of soft soil, we presented a relational expression of the residual strength of soft soil after different times of water level fluctuation using initial strength and water content. The test results showed that as the frequency of water level fluctuation increased, the deformation properties of the soft soil were enhanced and the strength was reduced. The cohesion and internal friction angle decreased linearly with the increase of water level fluctuations. The strength index of the soft soil under the same times of water level fluctuation declined sig-

收稿日期: 2018-01-08 修回日期: 2018-05-08 网络出版时间: 2018-05-17

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180514.1703.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(40902092)

Fund: National Natural Science Foundation of China(40902092)

作者简介: 陈能远(1987-), 男, 工程师, 主要从事岩土体稳定与防治研究工作。E-mail: cenny@aliyun.com

nificantly with the increase of water content. The results have important practical significance and application value on exploring the action mechanism of water level fluctuation on ground subsidence and bearing capacity changes, improving the level of scientific decision making, and mitigating environmental geological disasters in coastal cities.

Key words: soft soil; water level fluctuation; strength index; water content; attenuation coefficient

目前,我国东部沿海地区地面沉降和海平面上升已成为科学界和政府决策部门共同关注的重要环境问题。我国 16 个省(区、市)有 96 个城市和地区发生了不同程度的地面沉降,其中 80% 分布在东部沿海地区^[1]。地面沉降在长三角地区造成了巨大的经济损失,上海地面每沉降 1 mm,就会造成经济损失 1 000 万元^[2]。全球范围内还有 60 多个国家和地区发生了地面沉降。日本 1981 年有 59 个地区沉降明显,美国 1995 年在全部 50 个州都发现有地面沉降^[3-4]。过量抽取地下水进而引发土体压缩变形是产生地面沉降的最主要原因。限制开采量、人工回灌地下水对减轻地面沉降具有显著效果^[5]。大量开采与回灌地下水会促成地下水位的反复下降与回升,形成地下水位的大幅波动。而沿海地区的第四纪地层中分布着大量软土,在地下水位大幅波动作用下会发生明显的沉降与回弹变形。因此,进行地下水人工回灌时需要分析地下水位波动带内软土的变形强度特性,进而确定科学的地下水开采与回灌方案。

国内外学者就软土的力学性质进行了大量研究,但针对水位波动作用下软土的变形强度特性的研究尚不多见。Duncan^[6]论述了传统固结理论的局限性,认为预测软土的固结沉降量及速率是一项重要工作。Akagi、邓永锋、徐建平、牟春梅等分析了扰动、含水量、有机质含量对软土力学性质的影响^[7-10]。孟庆山等^[11]就冲击荷载下饱和软黏土的孔压和变形特性进行了卓有成效的研究。戚国锋^[12]综合分析了室内直剪试验、三轴试验数据及现场原位测试结果,提出了东南沿海地区合理的强度计算方法。陈能远等^[13]设计了新的渗透固结试验仪器,分析了上海软土在不同荷载和水头作用下的变形、渗透特性。在地下水位与地面沉降关系的研究方面,张云、郭拴宁、骆祖江等分析了上海地下水位的五种变化模式下土层的变形特征^[14],研究了地下水位升降带中的地基土含水量的变化规律和特征^[15],初步建立了地下水位升降与地面沉降变形的三维数学模型^[16],但其计算参数的获取仍然是困难的。

本文利用沉降柱试验装置模拟水位波动,对不

同水位波动次数作用后的软土试样进行高压固结试验、直剪试验和三轴试验,分析水位波动对软土变形强度特性的影响规律,为滨海地区采灌水过程中软土的早期强度预测及地面沉降分析提供可靠依据。

1 试验方案

1.1 试验装置及方法

采用图 1 所示的沉降柱试验装置,试验筒材料为有机玻璃,结构为圆柱状,由 4 个直径 400 mm × 540 mm 的圆筒对接而成,用法兰盘连接,每节试验筒中部侧壁处设有直径为 8 mm 的小孔,通过橡皮管与玻璃量管相连,用于观察试验筒内的水位变化情况。试验筒底部支架上设置有透水石和多层土工布,用于隔离泥浆,防止土颗粒大量流失。支架中心设有直径为 20 mm 的圆孔,通过水管与水箱相连,利用电机实施增压降水补给,从而实现试验筒内水位的反复波动。



图 1 沉降柱实验装置

Fig. 1 The cylinder model experiment device

采用 3 个沉降柱试验装置,在无上部荷载作用的条件下让筒内水位在 50~150 cm 范围内循环波动,让筒内试样在不同水位波动次数作用下自由固结,分别控制水位波动 1、4、7 次,静置一段时间待筒内土样固结稳定后,在水位波动带中部不同深度处取样进行固结试验、直剪试验和三轴试验,分析水位波动次数对软土变形特性及残余强度的影响规律。

1.2 试样的物理性质指标

本次试验所用软土试样取自上海五号沟地区,取样深度为 3~4 m,将现场取回的散土料风干过 5 mm 筛后装入沉降柱试验装置中,模拟水位波动进行试验。试验用料的物理性质指标及填装密度见表 1。

表1 试验用料的物理性质指标

Tab.1 The physical indexes of the experimental material

试样	液限 w_L (%)	塑性指数 I_P	比重 G_s	风干含水量 w (%)	填装密度 $\rho_s / (g \cdot cm^{-3})$
软土	38	20	2.71	7.8~9.7	1.5

2 波动次数对变形强度特性的影响

2.1 水位波动次数对固结变形特性的影响

控制3个试验筒内水位在50~150cm范围内分别循环波动1、4、7次后,在水位波动带中部100cm处取3个含水量相近的试样,进行高压固结试验,得到不同水位波动次数下软土试样的压缩模量 E_s 和压缩系数 α_{1-2} 见表2。

表2 软土的高压固结试验结果

Tab.2 The results of high pressure consolidation test

波动次数	初始含水量 w (%)	初始孔隙比 e_0	压缩系数 α_{1-2}	压缩模量 E_s / MPa
1	25.2	1.219	0.522	3.92
4	24.7	1.249	0.558	3.76
7	25.5	1.298	0.591	3.63

从表2可以看出,随着水位波动次数的增加,软土试样的孔隙比、压缩系数均相应的增加,压缩模量下降。在水位波动过程中,土体反复经历着增饱和-减饱和和循环过程,土体中的孔隙被水和气体轮换交替填充。水位上升过程中,土颗粒受到浮力作用,使得土颗粒之间的联结力降低,破坏了土体原有的稳定结构。当水位突然下降时,土颗粒受到的浮力消失,土颗粒重新排列组合,形成新的松散结构。同时,在水位波动引起的孔隙水渗流作用下,土颗粒会受到孔隙水流的冲刷和拖拽,导致土体中的微小颗粒不断迁移流失,在水位波动反复多次循环作用下,软土试样的孔隙比不断增大,从而导致其压缩变形特性增强。

2.2 水位波动次数对强度特性的影响

考虑地下水开采与回灌过程中水位快速反复波动的特性,控制3个试验筒内水位在50~150cm范围内分别波动1、4、7次后,在水位波动带中部90cm处取出7个含水量相近的试样,进行固结快剪试验和三轴固结排水剪试验,得到不同水位波动次数下软土的强度指标如表3所示。

表3中的试验结果表明,随着水位波动次数的增加,软土试样的强度值和强度指标均有所下降。软土具有高压缩性和触变性,在水位波动作用下,土样原有结构受到反复多次扰动并重组,使其强度特性明显被削弱、降低。三轴试验能更好模拟试样的应力状态和软弱破坏面,固结排水剪试验下的强度

指标 C_d 、 φ_d 和有效强度指标很接近,并稍大于固结快剪强度指标。直剪试验虽然简单,破坏面单一,但由其求得的强度指标是偏于保守和安全的。

表3 软土试样的强度指标

Tab.3 The strength index of soft soil

波动次数	含水量 w (%)	固结快剪		三轴试验	
		C/kPa	$\varphi_{cu} / (^\circ)$	C_d / kPa	$\varphi_d / (^\circ)$
1	25.2	13.42	14.3	16.0	15.5
4	24.7	11.52	14.1	14.8	14.2
7	25.5	8.91	12.2	11.0	12.5

3 含水量对软土变形强度特性的影响

3.1 含水量对软土固结变形特性的影响

土体的固结过程实质是孔隙水被排出,孔隙水压力逐渐消散的过程。在水位快速波动过程中,部分水分会残留于土体孔隙中,无法及时排出,从而使土体含水量升高,同时影响其固结变形特性。为分析含水量对软土变形特性的影响规律,分别在不同水位波动次数作用后,于不同深度处取出含水量不同的6个软土试样进行高压固结试验。图2、图3给出了1、4、7次水位波动次数下软土压缩系数和压缩模量随含水量的变化关系曲线。

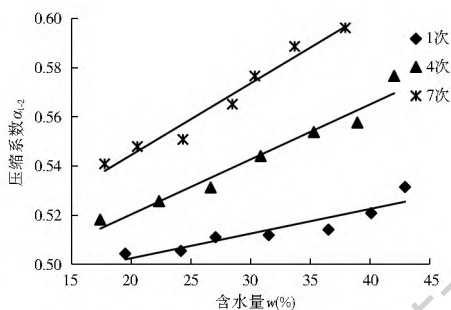


图2 压缩系数 α_{1-2} 与含水量 w 的关系曲线

Fig.2 Relationship between α_{1-2} and w

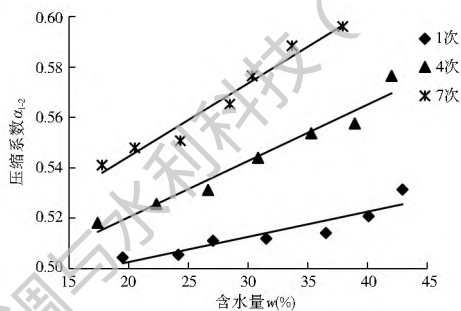


图3 压缩模量 E_s 与含水量 w 的关系曲线

Fig.3 Relationship between E_s and w

从图2、图3可以看出:随着水位波动次数的增加,相近含水量的软土试样的压缩系数和压缩模量的衰减速率也相应的增大;随着含水量的升高,压缩

系数并非严格线性增加,个别试样存在明显突变效应,说明软土试样灵敏性高。对比图 2、图 3 还可以发现,随着压缩系数的增加,压缩模量的变化存在一缓降带,说明含水量影响了软土试样释水固结过程中的孔隙变化情况,随着孔隙水不断挤压排出,试样的孔隙比迅速减小。高含水量提高了土体的变形特性,加快了软土试样的孔隙闭合进程和固结变形速率。

含水量的增加使得软土在相同荷载条件下的压缩变形增大,做好软土地基使用期间的含水量控制工作,根据土体实际含水量的变化情况预先进行土体安全评价,对实际工程是十分有意义的。

3.2 含水量对软土强度特性的影响

为分析地下水位波动带内软土强度随含水量的变化规律,对水位波动 1 次后不同含水量的软土试样进行了固结快剪试验。图 4、图 5 分别给出了不同含水量试样的黏聚力 C 和内摩擦角 φ_{cu} 的变化曲线。

从图 4、图 5 可以看出:随着含水量的增加,软土的黏聚力和内摩擦角均呈明显的下降趋势。低含水量试样具有较高的黏聚力和内摩擦角,随着含水量的增加,软土试样的黏聚力迅速降低,其衰减幅度较内摩擦角明显,进而导致其抗剪强度也相应降低。

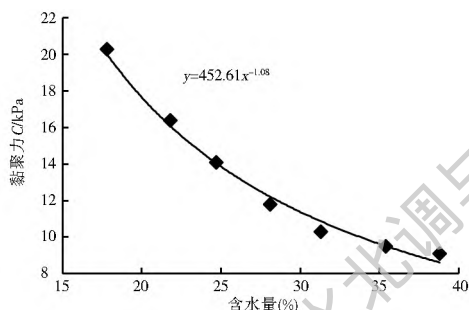


图 4 黏聚力 C 与含水量 w 的关系曲线

Fig. 4 Relationship between C and w

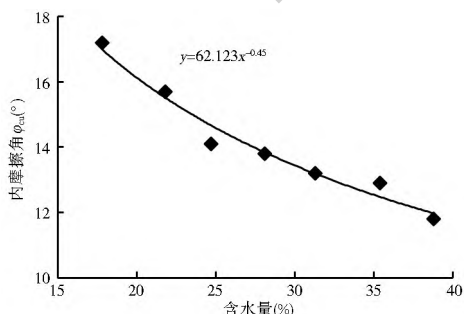


图 5 内摩擦角 φ_{cu} 与含水量 w 的关系曲线

Fig. 5 Relationship between φ_{cu} and w

用幂函数可较好拟合黏聚力 C 和内摩擦角 φ_{cu} 与含水量 w 的变化曲线。式(1)、式(2)分别给出了水位波动 1 次后 C 和 φ_{cu} 拟合结果。

$$C = 452.6w^{-1.08} \quad (1)$$

$$\varphi_{cu} = 62.12w^{-0.45} \quad (2)$$

此时,强度公式 $\tau = \alpha \tan \varphi_{cu} + C$ 仍然适用,若用式(1)、式(2)来描述软土试样的黏聚力和内摩擦角,可得到用含水量表达的强度公式(3):

$$\tau = A_1 w^{B_1} + \alpha \tan(A_2 w^{B_2}) \quad (3)$$

式(3)中: A_1, A_2, B_1, B_2 为常数,可通过室内直剪试验求得。利用式(3)分析和预测某特定区软土的强度与含水量的关系,对于工程设计与施工、工程安全检测,尤其对软土地基安全的早期预测较有实际意义。在实际工程应用中,还可用饱和度这一状态量来代替式(3)中含水量 w 。

4 水位波动下软土强度衰减规律

水位波动的反复作用会破坏软土试样原有的稳定结构,使其强度被削弱。为分析水位反复波动作用下,软土试样的残余强度衰减规律,对水位波动次数 N 为 1、4、7 次后的软土试样,进行了大量室内固结快剪试验,并制备了含水量和干密度相近的重塑土样进行对比分析。整理室内固结快剪试验的成果,图 6 和图 7 分别给出了不同水位波动次数作用下,不同含水量软土试样的黏聚力和内摩擦角衰减曲线。从中可以看出,在水位波动作用下,软土试样的黏聚力 C_r 和内摩擦角 φ_r 随水位波动次数 N 的增加呈线性降低。相同水位波动次数作用下,软土试样的强度指标均随含水量的升高而降低。

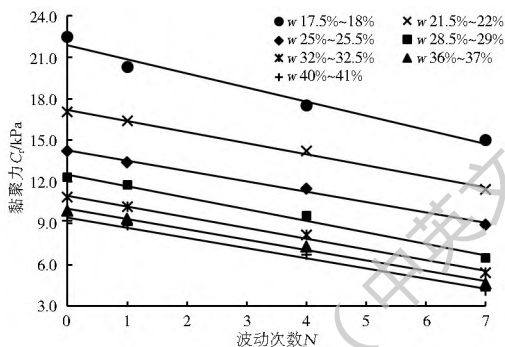


图 6 黏聚力 C_r 与水位波动次数 N 的关系曲线

Fig. 6 Relationship between C_r and N of soft soil

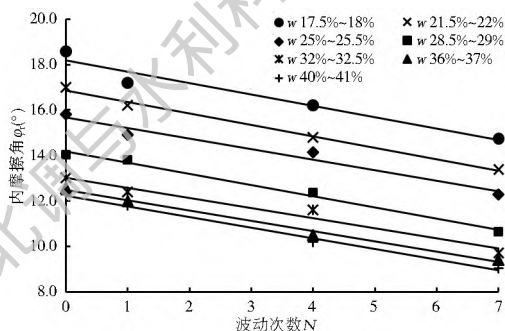


图 7 内摩擦角 φ_r 与水位波动次数 N 的关系曲线

Fig. 7 Relationship between φ_r and N of soft soil

若将相近含水量和干密度的重塑土样的强度指标作为软土试样在水位波动作用之前的初始强度指标,可以得到不同水位波动次数作用下软土试样黏聚力和内摩擦角的衰减系数 C_r/C_0 和 φ_r/φ_0 。图 8 和图 9 分别给出了衰减系数 C_r/C_0 和 φ_r/φ_0 与水位波动次数 N 的关系曲线。

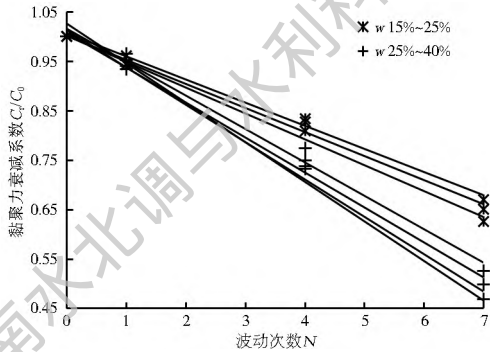


图 8 黏聚力衰减系数与水位波动次数 N 的关系曲线

Fig. 8 Relationship between C_r/C_0 and N of soft soil

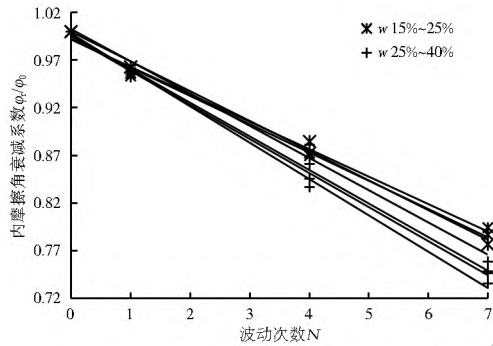


图 9 内摩擦角衰减系数与水位波动次数 N 的关系曲线

Fig. 9 Relationship between φ_r/φ_0 and N of soft soil

从图 8 可以看出,黏聚力衰减系数 C_r/C_0 和水位波动次数 N 之间存在线性关系。其中含水量为 15%~25% 之间的软土试样的衰减速率较 25%~45% 之间的软土试样低,两者线性拟合后的斜率均值分别为 -0.049 和 -0.073。进而可以得到式(4)形式的黏聚力衰减关系式。

在图 9 中,由于内摩擦角的衰减速率较黏聚力低,其衰减系数曲线也相对集中和平缓,其线性拟合后的斜率均值为 -0.035。同样可以得到类似于式(5)的内摩擦角衰减关系式(5):

$$C_r = (a_1 N + 1) C_0 \quad (4)$$

$$\varphi_r = (a_2 N + 1) \varphi_0 \quad (5)$$

式中: C_r , φ_r 为水位波动作用后的残余黏聚力和内摩擦角; C_0 , φ_0 为试样进行水位波动之前的初始强度指标; N 为水位波动次数; a_1 , a_2 为常数,通过室内直剪试验求得。

将式(4)、式(5)代入强度表达式 $\tau = \alpha \tan \varphi + C$ 中,可得到水位波动作用下的残余强度衰减公式

(6),考虑含水量对软土强度的影响,将试样的初始强度指标用含水量表示,可得到水位波动带内软土试样的强度表达式如式(7)所示:

$$\tau = (a_1 N + 1) C_0 + \alpha \tan[(a_2 N + 1) \varphi_0] \quad (6)$$

$$\tau = (a_1 N + 1) A_1 w^{B_1} + \alpha \tan[(a_2 N + 1) A_2 w^{B_2}] \quad (7)$$

式中: τ 为水位波动作用后的残余抗剪强度; σ 为试样发生剪切破坏时的正应力; C_0 , φ_0 为试样进行水位波动之前的初始强度指标; w 为试样含水量; a_1 , a_2 , A_1 , A_2 , B_1 , B_2 为试验常数。

在本次直剪试验中,

$$a_1 = \begin{cases} -0.049, & w \in (15\%, 25\%) \\ -0.073, & w \in (25\%, 45\%) \end{cases}$$

$$a_2 = -0.035, A_1 = 452.6, A_2 = 62.12, B_1 = -1.08, B_2 = -0.45。$$

在测得原状土样的初始强度指标 C_0 , φ_0 后,可用式(6)分析和预测土体在地下水位快速反复下降与回升作用下的残余强度发展规律,这对分析沿海地区地下水位波动带内软土的变形强度特性有着重要的现实意义和应用价值。若考虑不同含水量对软土强度特性的影响,可用式(7)来分析水位波动作用后不同含水量试样的残余强度衰减规律。实际应用中,只需测定土样的含水量或饱和度指标,同时结合历史地下水位监测资料,对强度指标进行修正,从而分析和预测土体在地下水位波动作用下的强度发展规律,为沿海滨海相沉积软土地区的早期强度预测提供了可靠依据。式(7)还可同时用于地下水位下降引起的地面沉降分析和预测,具有很好的工程应用价值。

5 结论

利用沉降柱试验装置模拟地下水位波动,对不同波动次数作用后的软土试样进行高压固结试验、固结快剪试验和三轴固结排水剪试验,分析了水位波动下软土的变形和强度特性,主要结论如下。

(1) 随着水位波动次数的增加,软土孔隙比增大,压缩系数增加、压缩模量下降,压缩变形特性增强。相近含水量试样的压缩系数和压缩模量的衰减速率随着水位波动次数的增多而逐渐增大。

(2) 含水量影响了软土试样释水固结过程中的孔隙变化情况。随着含水量的升高,压缩系数的增大存在突变效应,而压缩模量的变化存在一缓降带。高含水量加快了软土试样的孔隙闭合进程和固结变形速率,增强了土体的变形特性。

(3) 软土的黏聚力随着含水量的增加迅速降低,

其衰减幅度较内摩擦角明显。用幂函数可较好拟合黏聚力和内摩擦角与含水量的变化曲线,得到的强度公式(3)可用于分析特定地区软土的强度与含水量的关系,对于软土地基安全的早期预测较有实际意义。

(4)在水位波动作用下,软土的黏聚力和内摩擦角随波动次数的增加呈线性降低。以相近含水量和干密度的重塑土样的强度指标为初始强度指标,建立了黏聚力和内摩擦角的衰减系数与波动次数之间的关系表达式,给出了用初始强度指标和含水量表示的水位波动作用下软土的残余强度衰减公式。

(5)在实际应用中,只需测定土样的含水量、饱和度或初始强度指标,结合历史地下水位监测资料,对初始强度指标进行修正,通过本文给出的残余强度衰减公式即可分析和预测地下水位波动作用下软土的抗剪强度,这对沿海滨海相沉积软土地区的早期强度预测及地面沉降分析有着重要实际意义和应用价值。

参考文献(References):

- [1] 刘昌明. 建设节水型社会,缓解地下水危机[J]. 中国水利, 2007(15): 10-13. (LIU C M, Building water saving society and alleviating groundwater crisis [J]. China Water Resources, 2007(15): 10-13. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2007.15.005.
- [2] CHAI J C, HEN S L, ZHU H H. Land subsidence due to groundwater drawdown in Shanghai[J]. Geotechnique, 2004, 54(2): 143-147.
- [3] HIROSHI P SATO, KAORU ABE, OSAMU OTAKI. GPS measured land subsidence in Ojiya city[J]. Niigata Prefecture, Japan. Engineering Geology, 2003, (67): 379-390.
- [4] TEATINI P, FERRONATO M, GAMBOLATI G. A century of land subsidence in Ravenna[J]. Italy. Environ. Geol., 2005, (47): 831-846.
- [5] 孟庆山, 陈能远, 杨超. 地下水位波动带内滨海软土性状研究进展[J]. 人民长江, 2011, 42(4): 29-32. (MENG Q S, CHEN N Y, YANG C. Research progress review of characters of marine soft clay in underground water fluctuating zone[J]. Yangtze River, 2011, 42(4): 29-32 (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2011.04.024.
- [6] DUNCAN. Limitations of conventional analysis of consolidation settlement[J]. J of Geotechnical Engineering, Vol. 119(9), 1993.
- [7] AKAGI T. Effect of mandrel-driven Sand Drains on Strength [A]. Proceeding of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, 1: 3-6.
- [8] 邓永锋, 刘松玉. 扰动对软土强度影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1940-1944. (DENG Y F, LIU S Y. Effect of sample disturbance on soft soil strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1940-1944 (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.09.029.
- [9] 徐建平, 潘树林. 软土力学性质随含水量变化的试验研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2002, 19(2): 10-12. (XU J P, PAN S L. Effect of sample disturbance on soft soil strength [J]. J. of Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Urban Science Edition), 2002, 19(2): 10-12 (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.2095-0985.2002.02.003.
- [10] 牟春梅, 李佰锋. 有机质含量对软土力学性质影响效应分析[J]. 水文地质工程地质, 2008(3): 42-46. (MU C M, LI B F. Influence of organic matter on mechanical character of soft soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008(3): 42-46 (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-3665.2008.03.011.
- [11] 孟庆山, 汪稔, 刘观仕. 冲击荷载下饱和软粘土的孔压和变形特性[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 467-472. (MENG Q S, WANG R, LIU G S. Experimental study on pore water pressure and axial strain of saturated soft clay under impact load [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(4): 467-472 (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2005.04.015.
- [12] 戚国锋. 东南沿海地区软土强度特性的探析[J]. 铁道勘察, 2008(1): 30-32. (QI G F. Analysis on Strength Characteristics of Soft Earth around Southeast Coast Areas [J]. Railway Investigation and Surveying, 2008(1): 30-32 (in Chinese)) DOI: 10.19630/j.cnki.tdkc.2008.01.013.
- [13] 陈能远, 孟庆山, 胡晓兰. 滨海相软土固结渗透联合测定试验研究[J]. 工程勘察, 2011, 34(12): 444-446. (CHEN N Y, MENG Q S, HU X L. Experimental study on combined determination of osmosis and consolidation on marine soft soil [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, 34(12): 444-446 (in Chinese))
- [14] 张云, 薛禹群, 叶淑君, 等. 地下水位变化模式下含水砂层变形特征及上海地面沉降特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(3): 103-109. (ZHANG Y, XUE Y Q, YE S J. Effect of sample disturbance on soft soil strength [J]. A analysis of deformation of sand strata and land subsidence based on modes of groundwater level changes in Shanghai City, 2006, 17(3): 103-109 (in Chinese)) DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2006.03.025.
- [15] 郭拴宁, 翟晓林. 利用饱和度对地下水位升降带含水量变化的定量预测[J]. 电力建设, 2000, (3): 38-39. (GUO S N, ZHAI X L. Quantitative forecast about the change of water content in groundwater level ascending and descending stripe by the saturation [J]. Electric Power Construction, 2000, (3): 38-39 (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2000.03.014.
- [16] 骆祖江, 刘金宝, 李朗. 第四纪松散沉积层地下水疏降与地面沉降三维全耦合数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 193-198. (LUO Z J, LIU J B, LI L. Three-dimensional full coupling numerical simulation of groundwater dewatering and land subsidence in quaternary loose sediments [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 193-198 (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2008.02.007.