



软弱土在预压荷载作用下的强度增长分析

王 坤, 林佑高, 谢万东

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 从强度增长的公式出发, 以实际工程为例, 对影响软弱土强度增长的主要因素进行了探讨, 并分析了预压荷载作用下软弱土实测强度增长值与规范计算值存在差异的主要原因。

关键词: 软弱土; 强度增长; 预压荷载

中图分类号: TU 473.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)02-0189-05

Soft soil's strength growth after preloading

WANG Kun, LIN You-gao, XIE Wan-dong

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: The main factors affecting the soft soil's strength after preloading are discussed according to the formula of soil strength growth based on the actual project. The difference between the measured value of soft soil's strength growth and the calculated value from the standard formula is analyzed and some suggestions are proposed.

Key words: soft soil; strength growth; preloading

港口工程建设中不可避免地要在软弱土甚至超软弱土上修建码头堆场、临时围堰、护岸或者防波堤等结构, 在软弱土不能直接承受上覆荷载时, 常采用打设塑料排水板、砂桩甚至挤密砂桩等来设置竖向排水通道, 加速软弱土固结, 进而提高软弱土强度。因此软弱土在竖向荷载作用下的强度增长直接影响到加载速度和加载大小, 并关系到工程施工期和运营期安全。本文从强度增长计算公式出发, 对目前工程中影响软弱土强度增长的主要因素进行探讨。

1 强度增长计算公式

目前强度增长计算有两种思路, 一是有效应力法, 有效应力法从土体的有效应力指标出发, 考虑剪切面上由外荷载引起的有效法向应力增量, 因而理论上更合理, 对于正常固结饱和软黏土, 由于地基固结而增长的强度为:

$$\Delta\tau_{fc} = \Delta\sigma' \tan\varphi' \quad (1)$$

式中: φ' 为土体的有效内摩擦角; $\Delta\sigma'$ 为剪切面上给定点的法向有效应力增量。

随着荷载的增加, 地基中剪应力也在增大, 在一定条件下, 由于土体剪切蠕变可能导致其强度衰减, 此时地基中某一点的抗剪强度增量可表示为:

$$\Delta\tau_f = \Delta\tau_{fc} - \Delta\tau_{fc} \quad (2)$$

式中: $\Delta\tau_{fc}$ 为由于剪切蠕变而引起的抗剪强度衰减量。

由于式(2)中 $\Delta\tau_{fc}$ 目前尚难计算, 同时考虑剪切蠕变及其它因素的影响, 从工程实用的角度将式(2)改写为:

$$\Delta\tau_f = \eta\Delta\tau_{fc} \quad (3)$$

式中: η 为考虑剪切蠕变及其它因素对强度影响的折减系数。

另一种方法是有效固结压力法, 该方法忽略剪力作用下的附加压缩, 只考虑压力作用下的排水固结过程, 土的强度变化采用剪切前的有效固

收稿日期: 2013-11-12

作者简介: 王坤(1984—), 男, 工程师, 主要从事软黏土力学及地基基础设计与研究工作。

结压力 $\Delta\sigma$ 来表示。对于正常固结饱和软黏土,由于地基固结而增长的强度为:

$$\Delta\tau_f = \Delta\sigma \tan\varphi_c \quad (4)$$

式中: φ_c 为直剪固结快剪内摩擦角。

2 预压荷载下的强度增长计算改进公式

目前规范^[1-2]中采用式(4)计算预压荷载作用下土体的强度增长值,对堆载预压和真空预压过程中的土体强度增长的不同并未进行区分,且采用竖向有效附加应力作为其有效固结压力,然而真空预压和堆载预压的加固机理并不相同,真空预压过程中土体承受等向的固结压力,而堆载预压过程中土体近似 k_0 固结,因而真空预压引起土体强度的增长与堆载预压有所不同。

文献[3]通过分析堆载预压和真空预压不同的加固机理,基于有效固结压力法,分别推导获得了堆载预压和真空预压条件下的强度增长公式。

对于堆载预压,其强度增量表达式为:

$$\Delta\tau_f = \Delta\sigma U_i (1 + \sin^2\varphi_c) \tan\varphi_c \quad (5)$$

对于真空预压,其强度增量表达式为:

$$\Delta\tau_f = \Delta\sigma U_i (1 + \sin\varphi_c) \tan\varphi_c \quad (6)$$

式中: $\Delta\sigma$ 为预压荷载引起计算点的竖向附加应力; U_i 为计算点的应力固结度。

若预压法处理土体内摩擦角变化范围为 $10^\circ\sim 20^\circ$,在其它条件相同的情况下,对于堆载预压,按式(5)计算获得的强度增量约为规范公式的0.88~0.97倍,而真空预压按式(6)计算获得的强度增量约为规范公式的1.17~1.34倍。

在实际工程中,实测强度值与规范计算值常存在明显差别,从式(5)和(6)可以看出预压荷载、土的抗剪强度指标等因素都对强度增长值产生影响。

3 工程案例分析

3.1 湛江宝满集装箱码头一期工程

3.1.1 工程概况

湛江港宝满集装箱码头一期工程面积约为 66.9万m^2 ,陆域主要由吹填淤泥形成,采用堆载预压处理,堆载料采用中细砂,总荷载约 120 kPa 。主要处理土层性质如下:②淤

泥:流塑, $\omega=72.3\%$, $e=1.968$, $I_L=1.99$, $q_u=19.4\text{ kPa}$, $C_q=6.4\text{ kPa}$, $\phi_q=1.3^\circ$, $C_{cq}=5.7\text{ kPa}$, $\phi_{cq}=13.5^\circ$, $a_{v1-2}=2.102\text{ MPa}^{-1}$, $C_h=0.54\times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{s}$, $C_v=0.43\times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{s}$,为含水量高、孔隙比大、强度低、压缩性高的软弱土。

本工程加固处理从加载到卸载总计约230 d,卸载时固结度达到83%,根据文献[4],地基处理前后十字板强度对比见表1。

表1 地基处理前后十字板强度对比结果

高程/m	剪切强度/kPa	
	处理前	处理后
1.5	12.2	36.4
0.5	14.3	38.0
-0.5	16.4	35.7
-1.5	18.7	34.5
-2.5	22.3	53.4
-3.5	21.4	39.4
-4.5	22.5	37.8
-5.5	25.8	40.8
-6.5	28.8	44.0

3.1.2 强度增长分析

从表1可以看出,地基处理前后平均十字板强度分别为 20.3 kPa 和 40 kPa ,强度增长 19.7 kPa ,根据规范及式(5)计算获得强度增长值见表2。

表2 原状淤泥实测强度增长值、规范公式计算值及改进公式计算值比较

总荷载/kPa	平均固结度/%	强度/kPa		
		实测强度增长值	规范公式计算强度增长值	式(5)计算强度增长值
120	83	19.7	23.9	22.6

由表2可知,根据规范公式和式(5)计算获得的强度增长值稍大于实测值,但差距不大,式(5)较规范公式更接近实测值。

3.2 惠州港荃湾港区国际集装箱码头工程长期晾晒吹填土试验区

3.2.1 工程概况

工程场地位于惠州市荃湾港区,拟建设2个5万吨级和1个3000吨级集装箱专用泊位及相应的配套设施,港区陆域用地面积约 59.3万m^2 ,其中填海造陆 34.3万m^2 ,现有回填区 25.0万m^2 。为获得大规模软基处理设计施工的相关参数,在拟建码头东侧开展软基处理试验。该试验区区域部

分为吹填淤泥区, 已晾晒近10 a, 表面已晾干。该试验区主要处理土层参数如下: ②₁流泥-淤泥: $\omega=91.1\%$, $e=2.220$, $\omega_L=70.3\%$, $\omega_p=39.4\%$, $I_p=30.8$, $I_L=1.41$, $q_u=17.5$ kPa, $C_q=7.2$ kPa, $\Phi_q=0.9^\circ$, $C_{cq}=6.3$ kPa, $\Phi_{cq}=15.2^\circ$, $\rho=1.48$ g/cm³; $a_{v1-2}=2.232$ MPa⁻¹, $C_{v1-2}=0.69 \times 10^{-3}$ cm²/s, 为含水量高、孔隙比大、强度低、压缩性高的软弱土。

3.2.2 试验方案

试验区布置在东侧已回填淤泥区, 包括真空联合堆载预压试验区和堆载预压试验区, 其中真空联合堆载预压试验面积1.1万m², 编号SY1区; 堆载预压试验区面积9 504m², 编号SY2区。真空联合堆载预压试验区联合堆载高度2.0 m, 砂垫层厚度约2.8 m, 施工期总荷载约169.5 kPa (其中堆载93.5 kPa, 真空预压荷载76 kPa), 根据排水板型号、间距以及排水方式的不同又分为SY1-1~SY1-5共5个试验区; 堆载预压试验区堆载高度5.0 m, 砂垫层厚度约1.5 m, 施工期总荷载约110.5 kPa, 根据排水板型号、间距的不同又为SY2-1~SY2-5共5个试验区。

3.2.3 强度增长分析

监测单位在地基处理前仅在SY2-3区进行了一个十字板试验, 离散性较大, 因此试验区域平均十字板强度采用勘察报告数值(表3)。

卸载前, 利用实测沉降资料, 对各区域平均固结度进行了分析, 确认达到设计标准后卸载, 卸载后监测单位对SY1-1~SY1-5区及SY2-3~SY4

区进行十字板试验。卸载时地基平均固结度和卸载后的实测强度值见表4。

将上述试验区域分成真空联合堆载预压和堆载预压两个区域整体考虑, 预压结束后的强度增长量与规范计算值比较见表5。

表3 地基处理前十字板平均强度

高程/m	十字板强度/kPa
1.00	2.27
2.00	3.35
3.00	4.43
4.00	4.84
5.00	5.38
6.00	6.65
7.00	7.59
8.00	7.80
9.00	7.86
10.00	8.72
11.00	8.69
平均值	6.14

注: 孔口高程-3.02 m。

表4 卸载后实测强度值

区域	平均固结度/%	卸载后实测强度值/kPa
SY1-1	85.1	22.36
SY1-2	93.4	18.02
SY1-3/SY1-4	86.5	20.61
SY1-5	83.5	22.14
SY2-3	94.0	19.07
SY2-4	92.4	21.64

注: SY1-3和SY-4区域固结度接近, 而实测强度值较离散, 按一个区域取均值考虑。

表5 长期晾晒吹填土实测强度增长值、规范公式计算值及改进公式计算值比较

区域	平均固结度/%	施工期总荷载/kPa	固快内摩擦角/(°)	实测强度值/kPa			规范公式计算强度增长值/kPa	改进公式计算强度增长值/kPa
				卸载前	卸载后	增长值		
SY1	87.0	169.5	15.2	6.14	20.75	14.61	40.03	43.23
SY2	93.2	110.5	15.2	6.14	20.36	14.22	27.97	26.04

从表5可以看出, 由规范公式或改进计算获得的强度增长值是实测强度增长值2~3倍, 分析原因可能主要有如下两点:

1) SY1区(真空联合堆载预压区)和SY2区(堆载预压区)在固结度相差不大, 而SY1区施工期荷载达到SY2区荷载1.5倍的情况下, 卸载后两个区域实测强度增长值相差不大, 可见在真空联合

堆载预压过程中真空平均荷载并未达到设计预期, 真空度沿深度损失较大。朱群峰等^[7]研究表明: 真空度沿深度衰减明显, 对于新吹填淤泥, 真空度衰减平均值达10~13 kPa/m; 对于天然淤泥, 真空度衰减平均值为2~6 kPa/m。对于SY1区, 塑料排水板打设长度达到17 m, 若考虑真空荷载影响深度为塑料排水板打设深度, 假定真空度沿深度均匀递减,

即考虑真空度衰减平均值5 kPa/m，则塑料排水板加固范围内平均真空荷载约为膜下真空度的一半，即42.5 kPa，则施工期总荷载仅为136 kPa。

2) 对于大面积堆载预压而言，荷载传递较为明确，不存在真空度衰减的问题，可能原因在于土的力学参数—固快指标偏大。目前规范[4]提出了一种用十字板剪切强度回归抗剪强度指标的计算公式：

$$\phi_c = \tan^{-1} \left[a \frac{H + \frac{1}{3}D}{(K_0 H + \frac{1}{3}D) U_i \rho' g} \right] \quad (7)$$

式中： a 为十字板强度与深度回归方程的斜率； K_0 为土层的侧压力系数； D 为十字板的直径（m）； H 为十字板的高度（m）； U_i 为土的平均固结度； ρ' 为土的有效密度，水位以上取天然密度，以下取浮密度。

规范中根据十字板强度反算固快内摩擦角时考虑了土体强度的各向异性，由于规范中强度增长公式采用竖向有效附加应力作为其有效固结压力，因此当采用规范公式计算土体强度增长值时，建议用于强度增长计算的内摩擦角根据天然地基十字板剪切试验值和测定点土自重压力的比

值确定：

$$\phi_c = \tan^{-1} \left[\frac{a}{\rho' g} \right] \quad (8)$$

根据表3可得如图1所示十字板强度随深度变化曲线，由图可知 $a=0.6546$ ，因此采用规范公式计算强度增长的内摩擦角为 $\phi_c = 8.27^\circ$ 。

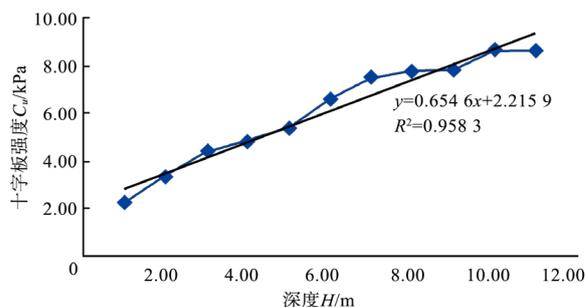


图1 十字板强度沿深度变化

考虑上述因素，对内摩擦角及真空预压荷载进行修正，根据规范计算获得的强度增长量与实测值比较见表6。

由表6可知，考虑真空度衰减及土的力学参数修正后，根据规范计算获得的强度增长值与实测值较为接近，证明了本文分析的合理性。

表6 长期晾晒吹填土实测强度增长值与修正后规范计算值比较

区域	平均固结度/%	施工期总荷载/kPa	强度计算内摩擦角/(°)	强度/kPa		
				卸载前实测强度值	实测强度增长值	规范公式计算强度增长值
SY1	87.0	136	8.27	6.14	14.61	17.18
SY2	93.2	110.5	8.27	6.14	14.22	14.97

3.3 惠州港荃湾港区国际集装箱码头工程新近吹填土试验区

3.3.1 试验概况

惠州港荃湾港区国际集装箱码头工程除上述已长期晾晒场地外，仍有部分场地采用吹填成陆，土工试验表明这些新近吹填淤泥平均含水量高达180.8%，孔隙比达5.0，液限为67.6%，由于绞吸吹填，土体结构遭到破坏，同时尚未经过自重压密和排水固结，强度基本为零，工程上常被称为超软地基^[5]。由于建设工期的原因，这类地基来不及晾晒，需要进行浅层预处理，尽快提高浅层地基承载力，以满足后续工程建设的需要。为此，对该部分区域进行浅层预处理试验，以检验

预处理效果。

本工程浅层预处理试验区面积28 838 m²，主要施工工艺流程如下：搭设浮桥便道→铺设编织布及无纺布→陆上预绑管→铺设滤管及主管→人工插设塑料排水板（排水板深度4.5 m）→铺设无纺土工布→铺膜并布设真空泵→试抽真空→真空预压恒载→检测、卸载。

3.3.2 强度增长分析

浅表层预处理试验区抽真空时间共计约60 d，施工期沉降平均约0.975 m，膜下真空度恒载期间平均约70 kPa。卸载后对试验区3个点位进行了十字板剪切试验，试验结果见表7。

从表7可以看出，浅层预处理结束后表层硬

表7 浅层预处理结束后十字板强度

试点深度 /m	十字板强度 C_u /kPa			
	测点1	测点2	测点3	平均
0.2	2.7	11.0	7.2	7.0
0.5	1.3	3.0	2.0	2.1
1.0	0.9	0.9	0.2	0.7
1.5	1.6	1.8	0.3	1.2
2.0	2.7	2.4	0.7	1.9
2.5	2.2	3.2	1.4	2.3
3.0	3.0	2.2	1.2	2.1
3.5	0.5	1.0	1.1	0.9
4.0	0.7	1.1	1.6	1.1

壳层厚度约为20 cm, 平均十字板强度7 kPa, 与文献[6]硬壳层厚度15~30 cm和平均十字板强度4~9 kPa接近, 硬壳层以下土层平均(排水板范围内)十字板强度仅为1.5 kPa, 即实际强度增长值仅为1.5 kPa甚至小于1.5 kPa, 若按规范公式计算, 考虑膜下真空度70 kPa, 固结度70%, 采用上节固快内摩擦角 8.27° , 则计算获得的强度增长值为5.09 kPa, 是实测值的3.4倍, 分析可能原因在于: 1) 在新吹填淤泥中, 真空度衰减更为明显, 真空度在新吹填淤泥中的传递损失明显大于天然淤泥^[7]; 2) 对于新近吹填淤泥的内摩擦角并不是固定不变的, 而是与固结度密切相关, 随着固结的不断进行, 其内摩擦角也在逐步增加^[8], 内摩擦角的不确定性给规范公式的应用增加了难度; 3) 由于吹填淤泥内部没有形成稳定的颗粒骨架, 在真空预压过程中土中黏粒向排水板移动, 并吸附在排水板周围, 影响了真空度的水平向和竖向传递; 4) 在固结度较小时, 真空预压向上的真空吸力与土中黏粒自重下沉相互影响, 导致浅层预处理结束后, 在泥面下约1.0~1.5 m处十字板强度最低。上述一系列可能因素给新近吹填软土强度增长计算增加了难度, 实际上规范^[1-2]强度增长计算公式是以正常固结饱和黏性土为前提的, 并没有明确新近吹填超软土在真空预压荷载作用下的强度增长计算, 因此对于新近

吹填超软土尤其是浅层超软土在真空预压荷载作用下的强度增长有待进一步研究。

4 结论

1) 对于堆载预压而言, 软弱土抗剪强度指标对强度增长值影响较大, 对于正常固结饱和软黏土, 建议用于强度增长计算的內摩擦角根据天然地基十字板剪切试验值和测定点土自重压力的比值及直剪固结快剪內摩擦角综合比较确定; 对于真空预压而言, 除抗剪强度指标外, 真空度沿深度的传递对强度增长值影响也比较明显, 尤其对吹填土而言, 真空度衰减更为明显。

2) 目前规范强度增长计算公式是以正常固结饱和软黏土为前提的, 并没有明确新近吹填超软土在真空预压荷载作用下的强度增长计算, 因此对于新近吹填超软土尤其是浅层超软土在真空预压荷载作用下的强度增长有待进一步研究。

参考文献:

- [1] JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S].
- [2] JTS 147-1—2010 港口工程地基规范[S].
- [3] 王坤, 林佑高. 预压法引起土体强度的增长[J]. 中国港湾建设, 2013(5): 5-7.
- [4] 丁晓峰, 鲍胜国, 秦志光. 堆载预压法处理湛江地区吹填淤泥软基加固效果分析[J]. 中国水运, 2011, 11(1): 226-227.
- [5] 叶柏荣, 张敬, 张欣. 超软地基加固技术[J]. 港工技术, 1986(5): 1-7.
- [6] 董志良, 周琦, 张功新, 等. 天津滨海新区浅层超软土加固技术现场对比试验[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1 306-1 312.
- [7] 朱群峰, 高长胜, 杨守华, 等. 超软淤泥地基处理中真空度传递特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1 429-1 433.
- [8] 关云飞, 唐彤芝, 陈海军, 等. 超软地基真空预压浅层加固现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1): 97-101.

(本文编辑 武亚庆)