

十字板强度在确定真空预压验收标准中的实际应用

孙锐, 单晓辉*

(化学工业第一勘察设计院有限公司, 河北 沧州 061001)

摘要: 针对当前真空预压施工质量验收中出现强度低、难以验收的问题, 本文讨论了在设计阶段如何合理确定验收标准, 尽量避免此类问题发生。提出了应用实测十字板测试数据, 确定处理后地基土强度验收标准的必要性。提出了用十字板随深度回归值线估算初始值, 迭代运算淤泥土内摩擦角, 进而推算预压后地基强度的方法。对于现行标准基于有效固结应力法, 计算的土体固结产生的强度增量大于实测结果, 实际工作中应该如何应用的情况, 建议依据处理前十字板随深度回归值线直接预估处理后增长的强度, 作为处理后最低要求的观点, 方便行业内实际操作。对真空预压设计单位给出了相应建议, 不能只要求固结度、地基土承载力特征值等主要参数, 还应规定对应深度的十字板应达到的抗剪强度及最低值, 以指导施工, 方便参建单位多方验收。

关键词: 真空预压; 十字板强度; 回归直线; 迭代法; 内摩擦角; 验收标准

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)03-0248-07

Practical application of vane strength in determining acceptance standard of vacuum preloading

SUN Rui, SHAN Xiao-hui*

(First Survey and Design Institute of Chemical Industry Co., Ltd., Cangzhou 061001, Hebei, China)

Abstract: Aiming at the problems of low strength and difficulty acceptance in the current period of vacuum preloading construction quality acceptance, this work discusses how to reasonably determine the acceptance standards in the design stage to avoid such problems as much as possible. The necessity of applying the test data of the vane plate to determine the acceptance standard of the strength of the treated foundation soil is developed. A method of estimating the initial value with the regression value line of the vane plate along with the depth is proposed, then iteratively calculating the internal friction angle of the silt soil, and finally estimating the method of the foundation strength after preloading. The strength increment of soil consolidation calculated based on the effective consolidation stress method in the current standard is greater than the measured results. Therefore, this paper proposes to directly predict the growth intensity after treatment according to the regression value line of vane plate before treatment with depth, as the minimum requirement after treatment. Some suggestions are proposed for the vacuum prepressing design company: not only the characteristic parameters of consolidation and foundation soil bearing capacity; also the shear strength and the lowest value that the vane plate at the corresponding depth should be specified to guide the construction and facilitate the acceptance of the participating companies.

Key words: vacuum preloading; vane strength; regression line; iterative method; internal friction angle; acceptance criteria

0 引言

真空预压法是处理淤泥、软黏土常用的一种施工

工艺, 处理后可以消除土体自重固结造成的较大沉降量, 改善土体的物理力学性质指标, 提高土体的承载力水平, 从而路基和一般建筑物基础可直接利用天然

收稿日期: 2022-07-14

作者简介: 孙锐(1971—), 男, 河北沧州人, 高级工程师, 主要从事岩土工程检测及监测工作。E-mail: sunrui001@126.com。

*通信作者: 单晓辉(1974—), 男, 河北沧州人, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察工作。E-mail: shanxiaohui@126.com。

地基土作为基础持力层,消除桩基负摩阻等。但如果处理不好,如加固后土体仍然是流塑状,实测十字板强度很低,后期施工机具进场和行进将非常困难,基坑支护费用较高,桩基施工也容易出现挤土效应,产生一系列问题,为此该工艺参数选择,确定验收标准、检测手段等是必须面对的工程问题。

1 确定十字板强度验收标准的必要性

近些年来发生了不少真空预压质量事故,尤其是沿海地区围海造地,大面积应用该工艺处理淤泥,当地政府为缩短后期建设周期,自己组织设计和施工单位进行真空预压,处理好再交付建设单位使用。后期检测单位提供检测报告显示预压处理期间的地基沉降较大,加固效果明显,土体固结度满足设计要求,多方验收合格,交付建设单位使用。但是后期建设单位进场后,勘查发现场地依然是强度很低,不满足施工机具行进条件,为此不得已采取翻晒换填措施,甚至再次使用真空预压处理,造成工期延长、工程造价提高的现象。

笔者参与了几次类似项目的方案论证,发现问题有:预压前勘察资料不完善,设计参数确定不够合理,施工质量控制不严格以及检测单位没有客观公正评价等;更主要的是设计单位只要求了固结度,没有对地基土强度提出要求;还有提到了处理后地基土承载力特征值不小于某个数值,但基于当前勘察测试技术,行业内难以具体操作。

当前真空预压加固效果评价检测方法主要采用平板载荷试验、十字板测试和土工试验3种测试手段^[1],也有些项目要求进行静力触探试验。检测单位一般做法是:对于浅部的土层,采用载荷板试验确定承载力;对于载荷试验影响深度以下的土层,依据十字板试验、静力触探试验以及土工试验来确定承载力。现行国标《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)^[2]提出承载力特征值标准定义,承载力特征值是“载荷试验测定的地基土压力变形曲线线性段内规定的变形所对应的压力值”,由于该规范是母规范,其他相关的标准都应遵循。其他理论计算、查表及原位测试得出的承载力特征值都是建立在大量对比数据统计后的推算结果。现场检测时表层用载荷板试验获得的承载力达到了设计要求,下部土层十字板强度虽然很低,但由于难以用载荷试验验证,部分检测单位提出的检测结论依然是预压后地基土物理力学指标改善明显,载荷板试验承载力满足设计要求,回避了深层强度问

题,这也就是前述事故产生的主要原因。

行业内共识采用原位十字板剪切试验是评价软土强度的最有效方法^[3-4],但下部土层是用十字板强度确定承载力。由于地域经验、土质情况及参照标准不同,十字板强度取值不同,从而影响评价效果^[3,5-6]。为此在设计时提出经过真空预压处理后对应深度的十字板抗剪强度,明确了加固的目的,尤其下部土层十字板抗剪强度的重要性。这样检测单位便于实际实施,同时兼顾了土体不均匀、工艺适宜性等现实情况,也便于参建单位竣工验收。

2 现行行业标准规定

当前设计单位计算预压荷载下饱和黏性土地基中某点的抗剪强度,按下式^[7]计算:

$$\tau_{ft} = \tau_{f0} + \Delta\sigma_z U_t \tan\varphi_{cu} \quad (1)$$

式中: τ_{ft} 为 t 时刻,该点土的抗剪强度, kPa; τ_{f0} 为地基土天然的抗剪强度, kPa; $\Delta\sigma_z$ 为预压荷载引起的该点附加竖向应力, kPa; U_t 为该点土的固结度; φ_{cu} 为三轴固结不排水压缩试验求得的土的内摩擦角,°。 τ_{f0} 由计算点土的自重应力和三轴固结不排水试验指标 φ_{cu} 计算或由原位十字板剪切试验直接测定。

规范^[7]对应条文说明也指出:“饱和软黏土根据其天然固结状态可分成正常固结土、超固结土和欠固结土。显然,对不同固结状态的土,在预压荷载下其强度增长是不同的,由于超固结土和欠固结土强度增长缺乏实测资料,本规范暂未能提出具体预估方法。”

3 实际应用

真空预压工艺处理的淤泥多数是欠固结状态,经过真空预压,卸载后,土体前期固结压力大于自重应力,又属于超固结状态。对此,计算公式(1)用于估算卸载后的强度又该如何运用呢?在此,笔者结合现场数据举例说明。

某真空预压工地预压前岩土勘察资料^[8]显示,地表10 m内分布吹填淤泥及淤泥质土强度较低,含水率较高,最高部位为地表下3 m处,达到60%,预压前地基土物理力学指标见表1。预压前实测十字板数据见表2。

通过土工试验求得的 $\varphi_{cu}=6.8^\circ$ 受土样样本的结构扰动、土样试验受力环境和原位受力环境差异性

较大等诸多因素的影响,与实际有差距,且预压前淤泥多属于欠固结状态,因此采用十字板抗剪强度推算实际强度比较合理^[9]。数据具体如何确定,下面逐步分析。

表1 土工试验汇总表(预压前)

Table 1 Summary of geotechnical experimental results (before preloading)

土样编号	取土深度/m	含水率/%	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数	固结快剪	
								黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
Z02-01	1.0~1.5	54.6	1.51	34.9	18.3	16.6	2.19	—	—
Z10-01	1.0~1.5	54.4	1.51	32.8	17.5	15.3	2.41	19.0	7.4
Z02-02	2.0~2.5	44.2	1.21	32.5	17.4	15.1	1.77	—	—
Z03-02	2.0~2.5	56.7	1.55	38.6	19.7	18.9	1.96	—	—
Z10-02	2.0~2.5	50.8	1.41	30.2	16.5	13.7	2.50	13.0	14.6
Z02-03	3.0~3.5	60.6	1.82	36.1	18.7	17.4	2.41	—	—
Z09-03	3.0~3.5	49.8	1.37	37.9	19.4	18.5	1.64	12.0	8.7
Z10-04	4.0~4.5	49.3	1.34	32.0	17.2	14.8	2.17	—	—
Z03-05	5.0~5.5	56.0	1.62	35.8	18.6	17.2	2.17	—	—
Z09-05	5.0~5.5	40.4	1.13	29.1	16.1	13.0	1.87	—	—
Z06-06	6.0~6.5	56.8	1.66	35.4	19.9	15.5	2.38	15.0	7.1
Z09-06	6.0~6.5	53.1	1.51	41.7	20.8	20.9	1.55	—	—

表2 预压前十字板试验原状土强度汇总表

Table 2 Summary of strength of undisturbed soil of Tane Shear Test before preloading

深度/m	孔号																平均
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	2.7	2.3	2.6	4.5	4.9	3.9	2.9	2.7	1.1	1.3	1.6	1.3	2.9	2.0	2.2	1.5	2.5
2	2.3	2.4	3.4	4.3	5.9	2.2	2.7	2.0	1.2	1.3	2.0	1.9	3.3	2.4	—	1.7	2.6
3	3.2	2.9	4.1	7.1	8.1	3.2	3.2	2.4	1.6	1.7	3.3	2.8	5.1	3.0	1.3	2.3	3.5
4	3.7	3.7	7.0	7.3	8.7	5.1	4.0	3.0	2.3	2.1	6.2	4.5	5.9	3.9	2.1	3.8	4.6
5	—	5.6	5.6	7.8	6.8	—	4.2	3.9	7.0	8.3	—	6.9	—	—	3.4	5.0	5.9
6	—	9.6	—	10.1	7.5	16.7	6.4	9.6	7.5	12.9	—	—	7.0	—	11.9	—	9.9
7	—	11.9	16.3	10.4	11.2	—	7.8	9.9	8.6	11.7	—	—	—	—	—	—	11.0
8	16.0	10.4	—	21.3	19.7	21.3	23.4	—	—	21.0	20.9	—	—	—	—	—	19.3
9	22.6	—	—	20.8	—	—	—	14.6	—	—	—	—	—	—	—	—	19.3
10	17.4	—	—	—	—	—	—	18.4	—	—	—	—	—	—	—	—	17.9

3.1 回归曲线法估算 φ_{cu} 初始值

本工地预压前实测 16 个孔的十字板数据,测试深度为 10 m,预压前十字板试验原状土强度最低为 0.6 kPa,最高为 23.4 kPa,具体见表 2,统计后十字板标准值为 5.7 kPa。

按照浮重度 7 kN/m³ 将表 2 中的深度转换成测试点对应的自重应力,统计的实测值的回归直线,见表 3,其斜率为 7.1°,截距为 1.2 kPa,对应图 1 中 A 线。

将测试数据和 A 线比较,浅层测试强度偏高,而 2 m 以下基本接近,这主要是因为地表存在硬壳层^[10-11]。为此去除这些异常值,统计 5 m 内的数值,

统计随自重应力增长的结果见图 1 中的 B 线,斜率为 8.9°,截距为 0.3 kPa。

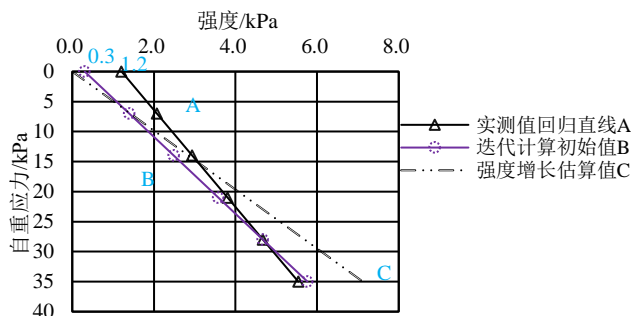


图1 预压强度增长计算示意图

Fig. 1 Calculation of preloading strength increase

表 3 预压强度增长计算

Table 3 Calculation of preloading strength increase

自重应力/kPa	实测值/kPa	实测值回归直线 A			迭代计算初始值 B			强度增长估算值 C	
		截距/kPa	斜率/(°)	计算值/kPa	截距/kPa	斜率/(°)	计算值/kPa	斜率/(°)	计算值/kPa
0	—			1.2			0.3		0.0
7	2.5			2.1			1.4		1.4
14	2.6			2.9			2.5		2.8
21	3.5	1.2	7.1	3.8	0.3	8.9	3.6	11.5	4.3
28	4.6			4.7			4.7		5.7
35	5.9			5.5			5.8		7.1

3.2 迭代法计算内摩擦角 φ_{cu}

依据式 (2) [9,12] 及图 2 计算 φ_{cu} :

$$\left. \begin{aligned} \tan\varphi_{cu} &= 3S_u / [(1+2K_0)\sigma'_p] \\ K_0 &= 1 - \sin(1.2\varphi_{cu}) \\ \sigma'_p &= \bar{\gamma}(d - \Delta d) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: S_u 为 S_u-d 回归直线上任意点处的十字板强度, kPa; K_0 为土的静止土压力系数; σ'_p 为对应于 S_u 所在深度 d 处的有效自重压力计算值, kPa; Δd 为回归直线在 d 轴上的截距, 应区分正负, 地面以上为负, 以下为正。

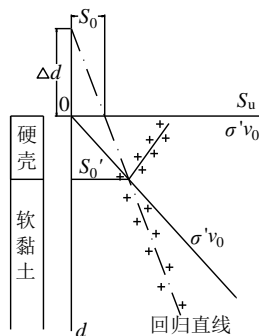


图 2 φ_{cu} 计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculation φ_{cu}

计算 φ_{cu} 值时, 使用迭代法运算。在此用图 1 中 B 线, 斜率为 8.9° 作初始值迭代计算, 表 4 为计算数据, 迭代差值最小值对应于 φ 为 $11^\circ \sim 12^\circ$, 在此取 11.5° , 即三轴固结不排水试验指标 $\varphi_{cu} = 11.5^\circ$, 对应图 1 中的 C 线斜率。

3.3 确定 τ_{f0}

式 (1) 中 τ_{f0} 可用处理前原位十字板试验测定, 实际操作时, 由于土体的不均匀, 表层有硬壳, 数据离散, 且十字板强度与深度存在相关性, 故采用实测数据统计出的回归直线, 即图 1 中的 A 线, 用式 $\tau_{f0} = 1.2 + \sigma \times \tan 7.1^\circ$ 将自重应力 σ 代入计算, 处理后, 地下水位不小于 1.0 m, 土体重度取 17.0 kN/m^3 , 处理深度为 10 m, 具体计算结果见表 5。

表 4 迭代法计算 φ_{cu}

Table 4 Iterative calculation φ_{cu}

$\varphi_{cu}/(^\circ)$	K_0	差值/(°)
8.9	0.82	2.47
10.0	0.79	1.53
11.0	0.77	0.71
12.0	0.75	-0.10
13.0	0.73	-0.91
14.0	0.71	-1.72
15.0	0.69	-2.52
16.0	0.67	-3.31
17.0	0.65	-4.10

3.4 推算预压后十字板强度 τ_{fn}

该项目设计要求真空预压膜下真空度不小于 85 kPa, 膜上覆水深度按 0.5 m 考虑, 则 $\Delta\sigma_z$ 取 90 kPa, 固结度要求不小于 85%, 套用式 (1) 估算地基预压后应该达到强度 τ_{fn} , 见表 5。经过处理后, 理论推算地基强度总体增长 15.56 kPa, 如果处理前强度 τ_{f0} 为 0, 处理后的强度也应该达到 15.56 kPa。

本场地设计单位综合多种因素, 要求预压后淤泥原位十字板平均值大于 22 kPa, 最低值不小于 15 kPa。

3.5 预压后检测结果分析

满载 90 d 后, 实测沉降曲线推算固结度已达到 85%, 卸载前根据设计要求停泵进行十字板检测。14 个加固区, 共检测 15 个原位十字板测试孔, 检测深度 9 m, 剔除大于 40 kPa 的异常点, 共有 80 个十字板测试数据。如表 6 所示, 平均值为 21.6 kPa, 最小值为 2.5 kPa, 最大值为 39.9 kPa。表 7 是预压前后十字板实测强度的对比结果, 数据反映出预压后强度增长, 强度增长幅度 3~6 m 最明显, 表层和深部次之, 平均增长了 15.52 kPa, 用式 (1) 按有效荷载 90 kPa, 固结度 85% 反算 φ_{cu} , 结果为 $7.6^\circ \sim 14.3^\circ$, 平均为 11.45° , 和前面计算结果接近。

表 7 中处理后的十字板测试数据低于 15.56 kPa 的值占比约 22%, 如严格按照此标准执行, 将有部分

区域不满足，施工单位也提出异议。根据文献[13]，抗剪强度的增量计算，计算的土体固结产生的强度式(1)的理论基础是有效固结应力法，只适合进行增量明显大于实测结果，其结果偏于不安全。

表5 预压后强度推算数据表
Table 5 Predicted strength after preloading

深度/m	自重应力 σ /kPa	τ_{f0} /kPa	$\Delta\sigma_z$ /kPa	U_t	$\varphi/(\circ)$	$\Delta\tau$ /kPa	τ_{fv} /kPa	$\varphi_0/(\circ)$	τ_{fmin} /kPa
0	0	1.2					16.77		9.50
1	17	3.3					18.88		11.60
2	24	4.2					19.74		12.50
3	31	5.0					20.61		13.40
4	38	5.9					21.47		14.30
5	45	6.8	90.0	0.85	11.50	15.56	22.34	7.10	15.10
6	52	7.6					23.21		16.00
7	59	8.5					24.07		16.90
8	66	9.4					24.94		17.70
9	73	10.2					25.81		18.60
10	80	11.1					26.67		19.50
平均	—	—					24.45		16.51

表6 预压后十字板试验原状土强度汇总表
Table 6 Undisturbed soil strength obtained by vane shear test after preloading kPa

深度/m	孔号														平均	
	1	2	3-7	3-9	3-5	3-6	3-4	3-2	3-1	3-3	3-10	3-11	3-12	3-13		3-14
1	25.8	25.2	23.8	15.6	9.4	30.7	12.9	2.5	5.6	32.4	10.2	8.1	5.5	13.7	—	15.8
2	15.9	19.2	—	22.7	14.6	23.9	21.8	3.5	11.6	25.5	27.1	9.1	10.4	34.5	26.5	19.0
3	—	39.3	29.4	18.7	—	20.1	32.4	7.3	17.9	—	20.8	—	15.3	28.5	—	23.0
4	—	39.2	29.9	19.2	26.8	18.6	22.6	8.2	18.3	35.3	—	—	21.7	9.4	—	22.7
5	—	—	20.5	—	29.0	30.6	18.2	—	17.2	—	33.8	—	32.1	15.0	—	24.5
6	—	9.7	25.2	31.3	38.3	21.7	17.0	22.8	—	—	16.4	—	39.4	20.2	—	24.2
7	—	4.6	—	33.0	25.3	25.2	20.7	—	—	—	39.5	—	—	—	—	24.7
8	—	10.3	—	28.3	—	39.1	39.9	—	—	—	—	—	—	—	—	29.4
9	—	3.7	—	—	—	19.3	—	—	35.3	—	—	—	—	—	—	19.4

表7 预压前后十字板实测强度对比
Table 7 Comparison of measured vane shear strength before and after preloading

深度/m	处理前/kPa	处理后/kPa	强度增长/kPa	$\varphi_{cu}/(\circ)$
1.00	2.53	15.82	13.30	9.90
2.00	2.60	19.01	16.40	12.10
3.00	3.46	22.98	19.50	14.30
4.00	4.58	22.66	18.10	13.30
5.00	5.86	24.54	18.70	13.70
6.00	9.92	24.21	14.30	10.60
7.00	10.98	24.74	13.80	10.20
8.00	19.25	29.40	10.10	7.60
9.00	19.33	—	—	—
平均	—	—	15.52	11.45

图 1 统计随自重应力增长曲线反映出, A 线对应回归直线的倾角为 7.1°。由于此数据统计是场地土处理前根据实地测试数据分析的结果, 按此预估处理后的增长强度应该更接近实际结果。另由于表层硬壳因素, 统计出的直线倾角低于 11.5°, 也低于 8.9°, 更安全。笔者在此建议用 7.1° 预估:

$$\tau_{fmin}=(\sigma+90\times 0.85)\times \tan 7.1^{\circ} \quad (3)$$

计算对应深度处理后应达到的最低强度, 具体结果见表 5, 可以看出自重应力为 0 时, 处理后地基土抗剪强度值应该达到 9.5 kPa。表 6 中 2 号孔效果最差, 有 4 个点低于 15 kPa, 补测后依然有 2 个点低于 15 kPa, 其他区还有 15 个点低于 15 kPa。考虑 3-2 区浅部土层强度依然很低, 是施工因素造成的, 为此剔除这些非正常因素, 剩余 72 个数据, 有 3 个点低于 9 kPa, 见表 8, 多数点强度大于 $\Delta\tau=9.5$ kPa。若按此标准将有 95% 的检测点满足要求, 基本达到行业内普遍认可的范围。

表 8 预压后十字板强度范围统计

测试点/个	条件/kPa	数量/个	占比/%
72	>15	60	83.3
72	12~15	3	4.2
72	10~12	3	4.2
72	9~10	3	4.2
72	8~9	1	1.4
72	<8	2	2.8

图 3 为处理后剔除前述异常数值后, 实测十字板强度情况, 可以看出部分点达到或超过计算值 D

表 9 部分项目真空预压处理后十字板试验原状土强度

项目名称	测孔数量	地点	处理时间	平均/kPa	最低/kPa
黄骅港一期工程东侧(东 2、3、7、8 区)真空预压地基处理	4	河北黄骅	2001 年 3 月	34.5	—
连云港碱厂电站真空预压	11	江苏连云港	1986 年 11 月	16.7~17.7	10.10
天津 LG 渤化 35 吨/氯乙烯项目真空预压地基处理工程	14	天津塘沽	2004 年 12 月	25~40	14.63
天津塘沽新港保税库区真空预压第四号区	8	天津塘沽	1988 年 5 月	20~40	11.10
中化泉州 1 001 万吨/年乙烯及炼油改扩建项目地基预处理	11	福建泉州	2015 年	20.0~37.9	15.20

4 结 论

(1) 建议在真空预压设计时, 应提供对处理后的原位十字板强度要求, 即对应深度的十字板应达到的抗剪强度及最低值, 以指导施工, 方便验收。

(2) 建议通过处理前原位十字板测试数据, 应用十字板随深度回归曲线法估算初始值, 迭代计

线 τ_n , 部分点在 D 线与计算最小值 E 线 τ_{fmin} 之间, 少量点小于 E 线, 平均值 F 线与 D 线接近。有 3 个点小于 G 线 9 kPa。

对于分布 E 线右侧的试验点, 检测单位应给出符合设计要求的结论, 介于 G 线和 E 线之间, 应给出加固效果有所改善的结论, 而对于 G 线左侧的点应给出未达到设计要求, 建议采取加固措施的结论。设计单位对于 E 线左侧的低值应结合现场实际分析对应区域原因, 客观评价, 并采取相应措施。

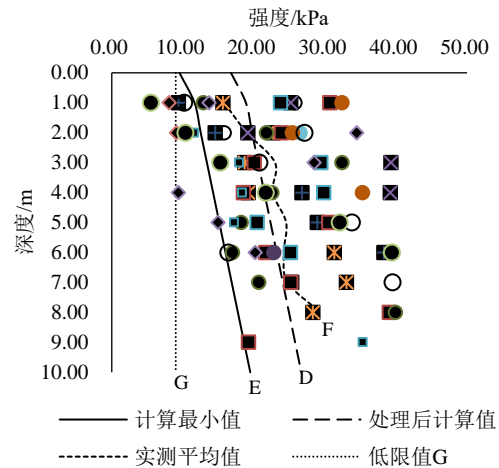


图 3 处理后十字板强度

Fig. 3 Vane shear strength after the treatment

表 9 是笔者收集到的国内部分真空预压代表项目的相关数据^[14]。这几个项目设计要求的卸载标准及验收条件都相同, 实际工程已运行多年, 也说明了设计要求预压后采用对应深度的十字板抗剪强度及最低值, 对地基处理效果进行评价是合理的, 也是切实可行的。

算淤泥及淤泥质土内摩擦角, 估算预压处理增长强度, 结合场地实际情况, 确定真空预压加固目标。

参考文献

[1] 赵汉亮. 软土地基真空预压处理效果评估方法应用研究[J]. 广东土木与建筑, 2018, 25(8): 41-43.

- ZHAO Han-liang. Application research on evaluation method of vacuum preloading treatment effect on soft soil foundation[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2018, 25(8): 41-43.
- [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.
- [3] 李红文, 李雪梅, 邓成发, 等. 基于真空预压法的淤泥质吹填土地基强度检测[J]. 水电能源科学, 2017, 35(1): 138-140.
LI Hong-wen, LI Xue-mei, DENG Cheng-fa, et al. Strength testing of silt hydraulic soil foundation based on vacuum preloading[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(1): 138-140.
- [4] 张凤海, 徐明江, 宋兵. 基于十字板剪切试验的软基处理效果评价研究[J]. 广州建筑, 2019, 47(3): 19-23.
ZHANG Feng-hai, XU Ming-jiang, SONG Bing. Evaluation of soft foundation treatment based on vane shear test[J]. Guangzhou Architecture, 2019, 47(3): 19-23.
- [5] 马永刚. 十字板抗剪强度换算软基加固强度的公式对比[J]. 水运工程, 2019(增刊2): 104-108.
MA Yong-gang. Comparison of formulas for calculating strength of soft foundation reinforcement by shear strength of vane test[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(S2): 104-108.
- [6] 王影. 十字板剪切试验在软土地区地基处理检测中的应用[J]. 山西建筑, 2019, 45(12): 66-67.
WANG Ying. Application of cross plate shear test in ground treatment test in soft soil area[J]. Shanxi Architecture, 2019, 45(12): 66-67.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[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. Technical Code for Ground Treatment of Buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [8] 白兵. 南山裕龙石化有限公司裕龙岛2号、3号岛区专项勘察测量岩土工程勘察报告[R]. 沧州: 中国化学工程第一岩土工程有限公司, 2019.
BAI Bing. Geotechnical engineering investigation report of special investigation and survey in NO.2 and NO.3 islands of Nanshan Yulong Petrochemical Co., Ltd.[R]. Cangzhou: China Chemical Engineering First Geotechnical Engineering Co., Ltd., 2019.
- [9] 冯永乾, 马驰, 郭亚磊. 新填海场地深基坑设计淤泥强度的取值[J]. 铁道建筑, 2019, 59(5): 103-106.
FENG Yong-qian, MA Chi, GUO Ya-lei. Determination of design silt strength for deep foundation pit in new reclamation site[J]. Railway Engineering, 2019, 59(5): 103-106.
- [10] 陈富, 李宁. 基于修正剑桥模型的真空预压表面硬壳层不排水抗剪强度分析[J]. 地基处理, 2021, 3(4): 271-276.
CHEN Fu, LI Ning. Analysis of the undrained shear strength of hard crust in vacuum preloading based on Modified Cam Clay (MCC) constitutive model[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(4): 271-276.
- [11] 高彦斌, 陈忠清. 基于原位十字板强度的沿海地区软黏土超固结比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 35(10): 2572-2578.
GAO Yan-bin, CHEN Zhong-qing. Analysis of OCR of soft clay in coastal areas based on field vane strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 35(10): 2572-2578.
- [12] 国家铁路局. 铁路工程地质原位测试规程: TB 10018—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for In-situ Testing of Railway Engineering Geology: TB 10018—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.
- [13] 曹宇春. 固结后软黏土不排水抗剪强度简化计算方法比较[J]. 土木工程学报, 2014, 47(10): 107-116.
CAO Yu-chun. A comparison of simplified calculation methods of undrained shear strength of soft clays after consolidation[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(10): 107-116.
- [14] 孙锐, 单晓辉. 浅谈真空预压预处理加固效果评价及处理目标的确定[J]. 科协论坛, 2022, 470(3): 223-242.
SUN Rui, SHAN Xiao-hui. Talking about the evaluation of the reinforcement effect of vacuum preloading and the determination of the treatment target[J]. Science and Technology Association Forum, 2022, 470(3): 223-242.