



新近吹填超软土地基 浅层加固技术卸载标准探讨*

陈伟东^{1,2}, 鲍树峰^{1,2,3}

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230; 3. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要: 新近吹填超软土地基浅层加固对沉降控制要求不严格, 因此, 现有的卸载标准不完全适用于该类地基。鉴于此, 通过理论方法建立了该类地基表层加固卸载标准的判别条件, 并结合工程应用证实该判别条件是现有卸载标准的有效补充方法之一。

关键词: 新近吹填超软土地基; 浅层加固技术; 卸载标准

中图分类号: TU 43

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0144-05

Unloading criterion on improvement technique of shallow ultra-soft soil foundation formed by hydraulic reclamation

CHEN Wei-dong^{1,2}, BAO Shu-feng^{1,2,3}

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation, Guangzhou 510230, China;

3. School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: For the treatment technique of shallow ultra-soft soil foundation formed by hydraulic reclamation, the ground settlement is not strictly controlled, so the existing unloading criterion does not apply to such foundations. In view of this, the unloading criterion is established by theoretical methods for the treatment technique of shallow ultra-soft soil foundation formed by hydraulic reclamation. Then it is demonstrated in engineering practice that the theoretical criterion is one of the effective complement methods for the existing unloading criterion.

Key words: shallow ultra-soft soil foundation; improvement technique; unloading criterion

排水固结法(如真空预压法、堆载预压法、真空联合堆载预压法等)加固软基的卸载标准直接关系到地基处理工程建设经济性,更关系到工程建设质量。许多学者从理论分析、工程应用方面都做了大量研究,取得了丰富成果。

刘吉福等^[1]基于一维固结理论,推导了工后沉降与沉降速率之间的关系,然后根据设计固结度、工后沉降等指标确定卸载时刻的沉降速率指标。娄炎等^[2]对真空预压加固的沉降稳

定标准进行了分析和讨论,指出其存在的不足,并通过多个实际工程实例加以例证,经过详细分析,提出了“比较恰当的是将沉降速率改为1.0~2.0 mm/d,并应在条文说明中强调一下什么情况下取大值,什么情况下取小值,以实现合理取值”。孙治林等^[3]提出:黄骅港真空预压加固软基卸载条件应为,由实测地表沉降曲线推算的固结度大于90%以及最终连续10 d实测沉降速率不大于2 mm/d。李忠林^[4]提出:深圳某填海工程

收稿日期: 2013-01-24

*基金项目: 中交交通基础工程环保与安全重点实验室科研资助项目(院科Y2013D27)

作者简介: 陈伟东(1965—),男,高级工程师,从事工程项目管理。

堆载预压加固中卸载标准应为沉降速率在 0.1 ~ 0.5 mm/d。曹永华等^[5]从一维固结出发, 分析了影响土体沉降速率的主要因素, 并基于工程中常用的指标“固结度和剩余沉降”作为标准, 分析了沉降速率与固结度、剩余沉降之间的联系, 提出不同工程采用同一沉降速率做为控制标准是不合理的。张照华^[6]提出: 厦门港海沧港区 14[#] ~ 15[#]泊位后方陆域形成软基处理工程所采用的卸荷标准应为, 连续 10 d 沉降速率小于 2 mm/d, 根据沉降观测曲线推算固结度达 85% 以上, 且残余变形不大于 30 cm。文献[7-8]介绍了深圳前海湾新吹填超软土地基处理情况, 原有设计卸荷标准为固结度大于 85%, 且连续 10 d 沉降速率小于 2 mm/d, 而实际监测成果和推算, 发现固结度达到 85%, 沉降速率普遍在 3 ~ 5 mm/d, 不满足卸荷标准, 后经讨论分析和钻孔检验, 认为卸荷标准中固结度不小于 85% 与连续 10 d 沉降速率小于 2 mm/d 是不匹配的, 并将卸荷标准修改为固结度大于 85%, 且连续 10 d 沉降速率小于 4.5 mm/d。而在天津临港产业区某路超软基加固工程中, 由于排水板打设深度浅, 采用的是卸载标准基本在 2.5 mm/d 左右, 根据各区的不同情况有所不同^[9]。JTS 147-2—2009《真空预压加固软土地基技术规范》明确规定^[10]: 对控制沉降的工程, 卸载标准应根据地基沉降量、残余沉降量、平均应变固结度和沉降速率确定; 对控制地基承载力或抗滑稳定性的工程, 卸载标准应根据地基土强度、平均应力固结度和沉降速率确定; 卸载时加固深度范围内地基平均总应变固结度不宜小于 80%。

综上所述, 目前排水固结法加固软基时主要以固结度和沉降速率这两项指标来确定是否卸载, 但主要是针对一般软基而言的, 仍然存在着局限性。

然而, 新近吹填超软土地基浅层加固的主要目的是为深层软基处理提供施工平台, 即加固后的地基能满足后续施工机械荷重的承载要求(一般为 30 ~ 40 kPa)。由于对沉降控制要求不严格, 因此, 对于该类地基而言, 排水固结法加固软基现有

的卸载标准是不全面的, 但目前尚无相关规范明确规定。因此, 本文基于新近吹填超软土地基浅层加固的目的对该类地基的卸载标准进行探讨。

1 新近吹填超软土地基浅层加固技术卸载标准理论分析

根据新近吹填超软土地基浅层加固的主要目的可知, 该类地基的卸载标准可归结为“施工设备荷载作用下地基临塑荷载的计算”这一问题。

一般来说, 新近吹填超软土地基浅层加固主要依次进行以下 3 个工况:

- 1) 工况 1: 水力吹填厚度为 h_1 中细砂(细砂或粉细砂)垫层;
- 2) 工况 2: 履带式推土机铺设厚为 h_2 的中粗砂垫层, 推土机荷载为 P_1 ;
- 3) 工况 3: 履带式深层插板机进行深层排水板施工, 深层插板机荷载为 P_2 。

工况 2 和工况 3 属于“地基受力层范围内存在软弱下卧层的地基承载力计算问题, 且此处的地基是指经土工合成材料加筋后的地基”。因此, 对于工况 2 和工况 3, 软弱下卧层的地基承载力均应符合下式要求^[11-12]:

$$p_z + p_{cz} \leq p_{cr} + p_{cz} \leq f_{az} \quad (1)$$

$$p_z = \frac{bp_k}{b + 2z \tan \theta} \quad (2)$$

$$p_{cr} = cN_c \quad (3)$$

$$p_{cz} = \rho g z \quad (4)$$

式中: p_z 为相应于荷载效应标准组合时, 软弱下卧层顶面处的附加压力值; p_{cz} 为软弱下卧层顶面处土的自重压力值; p_{cr} 为临塑荷载; N_c 为太沙基承载力系数, $N_c = \frac{\pi \cot \varphi}{\cot \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}}$; c 为土的粘聚力; f_{az} 为加筋垫层承载力特征值; b 为设备基底的宽度; z 为设备基底底面至软弱下卧层顶面的距离; θ 为地基压力扩散线与垂直线的夹角, 按上述规范中要求选用; p_k 为相应于荷载效应标准组合时, 设备基底处的平均压力值; ρ 为软弱下卧层顶面以上土的密度; z 为软弱下卧层顶面以上土的厚度。

对式(1)~(4)进行整理后得:

$$\frac{bp_k}{b + 2z \tan\theta} \leq \frac{c\pi \cot\varphi}{\cot\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} \quad (5)$$

对于加筋地基承载力的计算, 需要考虑筋材的垂直分量作用、筋材的旁压作用、筋材抗拉强度发挥系数以及垫层沉降作用。具体如下^[13]:

$$f'_u = f_u + \Delta f \quad (6)$$

$$f'_u = Kf_{ak} \quad (7)$$

$$\Delta f = (\rho_m g + \frac{T}{r})N_q + \frac{2T \sin\beta}{b} \quad (8)$$

式中: f'_u 为加筋地基承载力极限值; f_u 为下卧软基承载力极限值; Δf 为土工合成材料加筋引起的承载力增量; K 为安全系数, 取值范围为 2.0 ~ 3.0; ρ_m 为下卧软弱地基土的密度 (t/m^3); s 为地基最终沉降量 (m); T 为考虑变形控制的筋材拉力, $T = \alpha NT_s$; T_s 为一定应变下的筋材拉力; α 为抗拉强度发挥系数, 宜通过试验确定, 无试验数据时, 单层加筋, 取为 1.0, 两层拉筋, 可取 0.85 ~ 0.95; N 为加筋层数; r 为加筋垫层两侧假想隆起圆的半径, 一般取为 3 m, 或者对较浅的软基取其厚度的一半; N_q 为太沙基承载力

系数, $N_q = \frac{\cot\varphi + \varphi + \frac{\pi}{2}}{\cot\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}}$, φ 为下卧软基的内摩擦角; β 为土工合成材料拉力与水平面夹角, 宜通过试验确定。

由式(1), (6)及(7)整理得

$$f_u \geq K(p_{cr} + p_{cz}) - \Delta f \quad (9)$$

$$f_u = Kf_{ak} \quad (10)$$

$$f_{ak} \geq p_{cr} + p_{cz} - \frac{\Delta f}{K} \quad (11)$$

式中: f_{ak} 为下卧软基承载力特征值。

式(5)和式(11)即为新近吹填超软土地基浅表层加固后的地基承载力须满足的条件, 因此, 这两个条件可作为该类地基的卸载标准。

2 工程应用

2.1 工程概况

温州民营经济科技产业基地滨海园区丁山垦

区一期造陆工程位于温州中心城市东部龙湾区海城街道东南滩涂上, 东濒东海, 北邻机场, 南连瑞安。该工程地块区面积约为 138 万 m^2 , 新近吹填超软土厚度平均约为 3.5 m, 其表层 0 ~ 1.5 m 深度范围内的土体没有强度, 含水量高达 130%, 而 1.5 ~ 3.5 m 深度范围内的土体由于吹填淤泥的落淤沉积作用而具备少许的强度。

2.2 浅层加固方案及交工要求

该工程地块采用典型的浅层加固方案, 具体为: 在吹填淤泥面上铺设一层 200 g/m^2 的编织布; 人工插设 SPB-B 型塑料排水板, 间距为 80 cm, 正方形布置, 插设深度为 3.5 m; 水平排水通道为 $\phi 60$ mm (内径 50 mm) 的塑料软式滤管, 滤管间距为 80 cm, 单管单排; 铺设一层 200 g/m^2 的无纺布; 铺设两层聚乙烯薄膜作为密封层, 并沿场地周围将膜踩入密封沟, 踩深不小于 1.0 m; 真空泵均匀布置, 布置密度为 1 200 m^2 /台, 在真空度不小于 80 kPa 的恒载下抽真空时间为 110 d。

浅层加固后, 水力吹填厚度为 1.0 m 厚的中细砂垫层, 然后铺设厚为 0.6 m 的中粗砂垫层。

交工要求为: 0 ~ 1.5 m 深度内地基承载力特征值 $f_{ak} \geq 50$ kPa。

2.3 计算参数选取与卸载标准理论判断

图 1 为工程加固区域的地表沉降随时间变化曲线, 累计沉降量平均值为 $s = 1.041$ m。

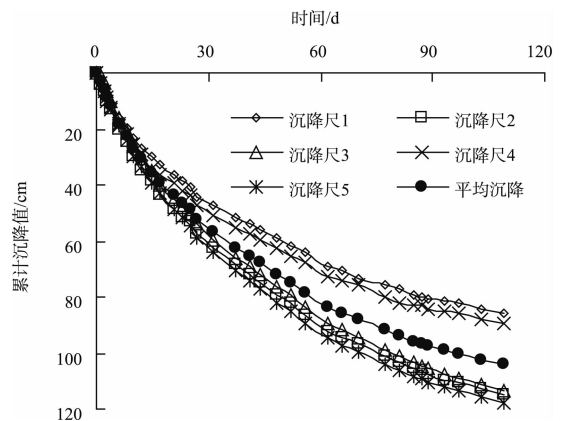


图 1 地表沉降随时间变化曲线

卸载前, 取 4 组土样, 每组在同一孔内沿深度每 0.5 m 取一个, 取至 2 m 深, 共取土样 16 个, 选两个含水率最大和两个含水率最小的土样的试

验数据列于表1。三轴试验过程中, 由于试验操作者的人为误差以及三轴仪系统本身带来的一定误差, 如试样的不均匀性、试样中带有砂粒、试样制备过程中的误差、试验数据的滞后性等等, 往往导致强度包络线有一定程度的失真。鉴于这些误差的存在, 使用了归一化的方法对抗剪强度指标进行处理。

表1 加固后土工试验结果

试验土样	含水率 $\omega/\%$	天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	土粒比重 G_s	粘聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
1	49.2	1.62	2.76	10.0	10.4
2	48.3	1.63	2.75	10.3	10.2
3	44.5	1.77	2.75	13.2	10.8
4	45.0	1.76	2.74	12.9	10.3
平均	46.8	1.70	2.75	11.6	10.4

根据表1, ρ_m , c , φ 按平均值选取, 分别为 $1.7 t/m^3$, $11.6 kPa$, 10.4° , 则 $N_q = 1.78$, $N_c = 4.22$ 。

土工合成材料加筋层数 $N = 2$, $\alpha = 0.85$, $T_s = 28 kN/m$, 则 $T = 47.6 kN/m$; 土工合成材料拉力与水平面的夹角 $\beta = 8^\circ \sim 11^\circ$; $r = 3.0 m$ 。

履带式推土机荷载 $P_1 = 150 kN$, 设备基底宽度 $b_1 = 0.6 m$, 长度 $L_1 = 4.0 m$; 履带式深层插板机 $P_2 = 450 kN$, 设备基底宽度 $b_2 = 0.7 m$, 长度 $L_2 = 4.5 m$ 。

1) 对于工况2, 履带式推土机在 $1.0 m$ 厚的中细砂(细砂或粉细砂)垫层上铺设 $0.6 m$ 厚的中粗砂垫层。

根据条件式(5), $\frac{bp_k}{b+2z \tan \theta} = 14.4 kPa$,

$$\frac{c\pi \cot \varphi}{\cot \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} = cN_c = 48.95 kPa。$$

因此, $\frac{bp_k}{b+2z \tan \theta} < \frac{c\pi \cot \varphi}{\cot \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}}$, 满足要求。

根据条件式(11), $K = 3$, 且

$$f_{ak} \geq p_{cr} + p_{cz} - \frac{\Delta f}{K} = 53.7 kPa \geq 50 kPa, \text{ 满足}$$

要求。

2) 对于工况3, 履带式深层插板机在 $1.0 m$ 厚的中细砂(细砂或粉细砂)垫层和 $0.6 m$ 厚的中粗砂垫层上进行深层排水板施工。

根据条件式(5), $\frac{bp_k}{b+2z \tan \theta} = 16.04 kPa$,

$$\frac{c\pi \cot \varphi}{\cot \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} = cN_c = 48.95 kPa。$$

因此, $\frac{bp_k}{b+2z \tan \theta} < \frac{c\pi \cot \varphi}{\cot \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}}$, 满足要求。

根据条件式(11), $K = 3$, 且

$$f_{ak} \geq p_{cr} + p_{cz} - \frac{\Delta f}{K} = 64.5 kPa \geq 50 kPa, \text{ 满足}$$

要求。

综上所述, 在真空度不小于 $80 kPa$ 的恒载下抽真空时间为 $110 d$, 地基能满足施工机械荷重承载要求。

2.4 原位测试验证

图2为卸载前地基的比贯入阻力随深度变化曲线。

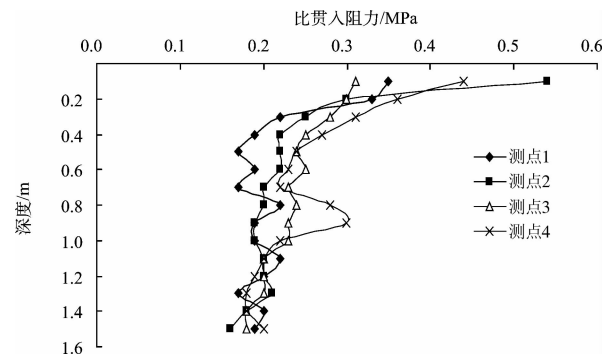
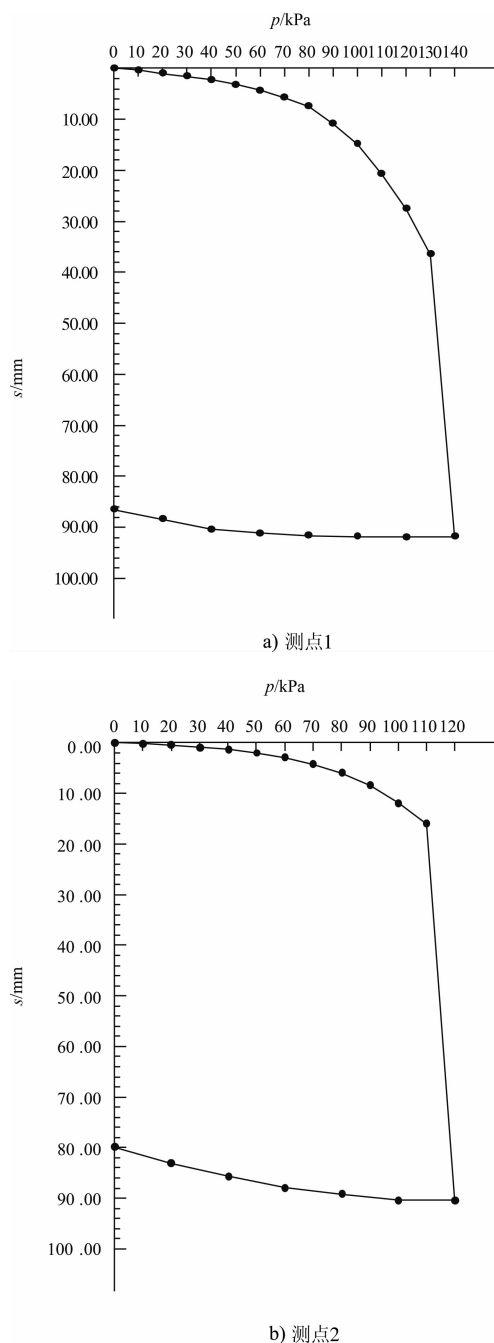


图2 加固区内各测点的比贯入阻力随深度变化曲线

由图2可知: 在 $0 \sim 1.0 m$ 深度范围内的比贯入阻力基本上都大于 $0.2 MPa$, 而在 $1.0 \sim 1.5 m$ 范围内的比贯入阻力则接近于 $0.2 MPa$ 。根据软弱地基承载力的估算公式: $f_0 = 0.103 P_s + 27$ (P_s 为比贯入阻力, 单位为 kPa), 当 $P_s = 0.2 MPa$ 时, $f_0 = 47.6 kPa$, 接近设计要求的 $50 kPa$ 。

同时, 当 $0 \sim 1.5 m$ 深度范围内的比贯入阻力均达到 $0.2 MPa$ 时, 进行现场载荷板试验, 承压板呈正方形, 面积为 $0.5 m^2$, 按每级 $5 kN$ 施加压力, 图3是测点1和测点2载荷板试验时的承载力与沉降关系。

由图3可知, 两个测点承载力分别达到 $65 kPa$ 和 $55 kPa$, 均大于设计要求的 $50 kPa$ 。

图3 $p-s$ 曲线

因此,现场原位测试结果进一步证实:通过理论计算方法来判断新近吹填超软土地基浅层加固后的卸载时机是排水固结法加固软基卸载标准现有判定方法的有效补充之一。

3 结论

1) 目前排水固结法加固软基时主要以固结度和沉降速率这两项指标来确定是否卸载,但主要是针对一般软基而言的,仍然存在着局限性。

2) 新近吹填超软土地基浅层加固的主要目的是为深层软基处理提供施工平台,即加固的地基能满足后续施工机械荷重的承载要求(一般为30~40 kPa)。由于对沉降控制要求不严格,因此,对于该类地基而言,排水固结法加固软基现有的卸载标准是不全面的。

3) 通过理论方法建立了新近吹填超软土地基浅表层加固卸载标准的判别条件,并结合工程应用证实该判别条件是排水固结法加固软基卸载标准现有判定方法的有效补充方法之一。

参考文献:

- [1] 刘吉福,陈新华.应用沉降速率法计算软土路堤剩余沉降[J].岩土工程学报,2003,25(2):233-235.
- [2] 娄炎,杨守华,高长胜.对真空预压加固中沉降稳定标准的讨论[J].中国港湾建设,2004(1):23-25.
- [3] 孙治林,牛恩宗,黄骅港堆场软基真空预压效果及监测[J].水运工程,2005(4):27-30.
- [4] 李忠林.排水固结法软基处理中的沉降监测与分析[J].土工基础,2006(4):27-28.
- [5] 曹永华,杨京方.真空预压沉降速率及卸载标准的影响因素[J].中国港湾建设,2008(4):23-26.
- [6] 张照华.真空联合堆载预压排水固结法在沿海吹填造地中的应用[J].水利与建筑工程学报,2009(3):123-126.
- [7] 王益国,熊明,于志强,等.深圳前海湾新吹填超软土地基的预压加固[C]//第七届全国工程排水与加固技术研讨会论文集.北京:中国水利水电出版社,2008.
- [8] 于志强,熊明.深圳前海湾新吹填超软淤泥土地基加固[C]//全国超软土地基排水固结与加固技术研讨会论文集.天津:港口岩土工程技术交通行业重点实验室,2010:79-85.
- [9] 曹永华,李卫,刘天韵.浅层快速超软基处理技术[C]//全国超软土地基排水固结与加固技术研讨会论文集.天津:港口岩土工程技术交通行业重点实验室,2010:49-56.
- [10] JTS 147-2—2009 真空预压加固软土地基技术规程[S].
- [11] GB 50007—2011 中华人民共和国国家标准[S].
- [12] 梅岭,梅国雄,易宗发. $K_0 \neq 1$ 时的地基临塑载荷和临界载荷近似计算公式[J].计算力学学报,2010,27(6):1 090-1 095.
- [13] 董彦莉.土工格栅加筋砂土的特性研究及加筋垫层的承载力计算[D].太原:太原理工大学,2011.

(本文编辑 武亚庆)