

· 优秀论文一等奖 ·



吹填造陆超软土地基加固理论与工艺技术创新

董志良, 张功新, 陈平山, 李 燕

(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510231)

摘要: 软基处理工程具有面积大、工期紧、施工难度高等特点。如何有效、经济而又快捷地加固大面积的超软弱地基成为岩土工程界的一个难题。分别从理论、工艺、监测及检测、环保节能4个方面, 系统地阐述了这些创新理论与技术, 可用于指导大面积超软弱地基加固的设计、施工、监测及检测等工作。

关键词: 大面积; 超软弱地基; 加固; 真空预压; 创新

中图分类号: TU 447

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)S1-0003-10

Innovation of theories and techniques on improvement of large-area and super-soft foundation

DONG Zhi-liang, ZHANG Gong-xin, CHEN Ping-shan, LI Yan

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

Abstract: The improvement of soft foundation is characterized by large-area, tight construction period and great working difficulties. It turns to be a knot to treat the large-area and super-soft foundation effectively and rapidly at a low price. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute has been engaged in the research on the treatment technology of the soft foundation and obtained many innovations. This paper introduces systematically these innovations from the theory, technology, monitoring and checking, as well as energy saving, which can be helpful for the design and construction of treatment for the large-area and super-soft foundation.

Key words: large-area; super-soft foundation; improvement; vacuum preloading; innovation

据统计, 至2020年, 全国建设用地缺口约为800万 hm^2 。“十一五”期间, 我国沿海地区就有10余个国家级区域发展规划相继获得国务院批复, 沿海产业带的蓬勃兴起将使得土地资源短缺的矛盾日益突出。而沿海地区拥有较长的海岸线和丰富的海滩资源, 采用围海造陆的方式就成为沿海地区解决土地资源紧缺的重要途径, 因此掀起了大规模的围海造陆热潮, 如天津、连云港、温州、厦门、广州南沙港以及深圳等地区, 数百万平方公里的吹填造陆区域已列入发展规划中。

围海造陆大部分集中在浅海滩涂, 传统的围海造陆采取开山填海或挖砂填海等方式, 但这种做法的直接后果就是生态环境遭到严重破坏、不

可再生资源紧缺及工程成本增加。另一方面, 我国每年产生约有 $12 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的疏浚土, 但国家允许倾倒的平均每年仅 $1 \times 10^8 \sim 2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 大量的疏浚土需要处理, 因此变“废”为“宝”, 充分利用吹填疏浚土造陆就成为沿海地区围海造陆的主要方法。

然而, 新吹填的疏浚土具有高含水率(150%~200%)、高压缩性、高孔隙比、承载力低(几乎为0)、低渗透性等工程特性, 并且一次性吹填面积大且深厚, 由此而形成的地基极其软弱, 必须先进行地基处理方可使用。传统的众多地基处理方法中, 排水固结法是国内外普遍采用的最为经济和环保的大面积软土地基处理方

收稿日期: 2011-08-19

作者简介: 董志良(1965—), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事软基处理、环境岩土工程等方面的研究工作。

法,包括堆载预压和真空预压法。对大面积吹填疏浚土造陆形成的超软土地基而言,因堆载预压法的堆载料短缺、工期长、大量的堆载料易造成环境破坏且造价高、易滑坡失稳造成工程事故等弱点而极少采用。因此,真空预压法就成为加固大面积软土地基的主要方法,但应用于新吹填的大面积超软土地基时,仍存在如下世界性技术难题:

1) 无法在新吹填的超软弱淤泥上直接进行施工。

2) 理论远远落后于工程实践,一直沿用堆载预压条件下砂井地基的固结理论,在设计计算过程中假定土体变形为小应变问题,无法合理解释真空预压过程规律和加固效果质量等问题。

3) 天津、大连、广州南沙、深圳等地均出现过以下情况:真空预压卸载后,在3~5 m深度范围加固效果较差甚至加固后软土仍处于流动状态,此时真空预压已不能继续进行,为此需要进行二次处理,大大延长了工期,增加了成本。

4) 虽然真空预压是一种比较环保的地基处理方法,但仍需耗费大量的电能,也会对周边地基产生侧向位移和沉降等不利影响,如何进一步节能减排、开发防护技术并降低真空预压对周边地基的影响等还属空白。

中交四航工程研究院有限公司长期以来致力于软基处理技术的理论与工程实践,成功地解决了上述难题。本文旨在总结多年来研究院软基处理技术在理论、工艺、监测与检测、节能环保技术等方面的创新成果,可指导类似工程的设计及施工。

1 理论创新

1.1 正负压条件下砂井地基的固结解析解

1992年,董志良考虑径、竖向渗流及涂抹作用,利用等应变条件,建立了砂井地基在正压、负压、正负压3种情况下的固结方程,并求得了其解析解^[1],其中,地基内任一点的孔压 u_r 表达式如式(1)所示:

$$u_r = \begin{cases} (P_0 + P_1) \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{K_h B_r}{K_s \lambda F_a} \left(\ln \frac{r}{r_w} - \frac{r^2 - r_w^2}{2r_e^2} \right) + \frac{\lambda - B_r}{\lambda} \right] \cdot \\ e^{-B_r t} \frac{2}{M} \sin\left(\frac{M}{H} z\right) - P_0 & r_w \leq r \leq r_s \\ (P_0 + P_1) \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ \frac{B_r}{\lambda F_a} \left(\ln \frac{r}{r_s} - \frac{r^2 - r_s^2}{2r_e^2} \right) + \frac{K_h}{K_s} \left(\ln s - \frac{s^2 - 1}{2n^2} \right) \right\} + \frac{\lambda - B_r}{\lambda} \left\{ \frac{2}{M} e^{-B_r t} \sin\left(\frac{M}{H} z\right) - P_0 \right\} & r_s \leq r \leq r_e \end{cases} \quad (1)$$

固结度 U_r 表达式为

$$U_r = \begin{cases} U_r = \frac{P_1 - u_r}{P_1 + P_0} & (\text{相对}-P_0 \text{真空压力状态}) \\ 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{K_h B_r}{K_s \lambda F_a} \left(\ln \frac{r}{r_w} - \frac{r^2 - r_w^2}{2r_e^2} \right) + \frac{\lambda - B_r}{\lambda} \right] \cdot \\ \frac{2}{M} e^{-B_r t} \sin\left(\frac{M}{H} z\right) & r_w \leq r \leq r_s \\ 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ \frac{B_r}{\lambda F_a} \left[\left(\ln \frac{r}{r_s} - \frac{r^2 - r_s^2}{2r_e^2} \right) + \frac{K_h}{K_s} \left(\ln s - \frac{s^2 - 1}{2n^2} \right) \right] + \frac{\lambda - B_r}{\lambda} \right\} \frac{2}{M} e^{-B_r t} \sin\left(\frac{M}{H} z\right) & r_s \leq r \leq r_e \end{cases} \quad (2)$$

某一深度 z 处的平均固结度为:

$$\bar{U}_r = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} e^{-B_r t} \sin\left(\frac{M}{H} z\right) \quad (3)$$

整个地基的平均固结度为:

$$\bar{U}_{r\text{总}} = \frac{1}{H} \int_0^H \bar{U}_r dz = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-B_r t} \quad (4)$$

提出的固结模型在考虑砂井井阻与涂抹效应的基础上,该公式较全面地诠释了正、负压单独或同时作用下砂井地基内的孔压变化规律,是目前国内外唯一能够考虑真空联合堆载条件下的地基固结解析解。经多个真空预压和真空联合堆载预压工程验证,计算值与实测值吻合程度良好,见图1和图2。在此基础上,董志良1993年推导了砂井地基渗流量的计算公式^[2],将加固区渗流总量分成3部分:排水板渗流总量 $Q_{\text{总板}}$ 、地基竖向渗流总量 $Q_{\text{总竖}}$ 、加固区内外渗流总量 $Q_{\text{总渗}}$ 。

$$Q_{\text{总}} = Q_{\text{总板}} + Q_{\text{总竖}} + Q_{\text{总渗}} \quad (5)$$

$$Q_{\text{总板}} = N(P_0 + P_1) \frac{\pi r_w^2 K_w}{r_w^0 H} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda - B_r}{\lambda} e^{-B_r t} \quad (6)$$

$$Q_{\text{总竖}} = \frac{2K_v A(P_0 + P_1)}{H r_w^0} \sum_{m=0}^{\infty} e^{-\frac{M^2}{H^2} C_v t} \quad (7)$$

解析解(5)~(7)的合理性与准确性已被多个工程实例验证,见图3。利用上述解析解,可

计算负压条件下加固时间和固结度, 并优化水平排水系统, 为巴基斯坦瓜达尔港工程中成功采用细砂代替中粗砂作为水平排水垫层提供了理论依据, 解决了当地无中粗砂的困难, 突破了现行规范对水平排水垫层必须采用中粗砂的限制, 进而提出了软土地基无砂垫层预压排水固结法, 为开发超软土浅表层快速加固技术及工法奠定了坚实的基础。

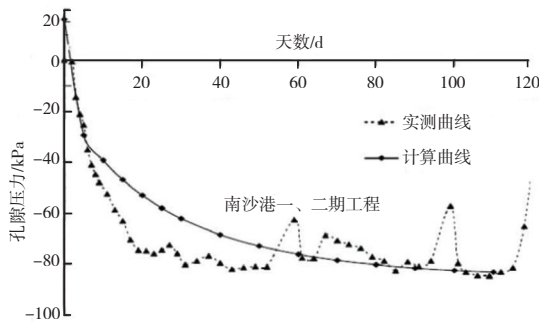


图1 超孔隙水压力-时程曲线

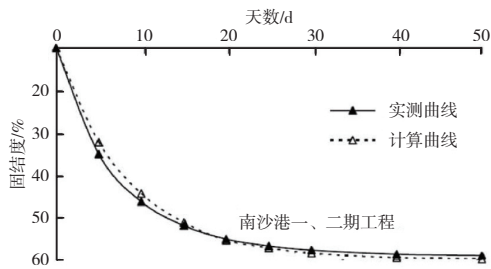
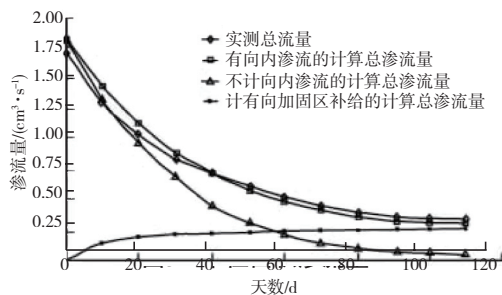


图2 实测与理论计算地基固结度-历时曲线



1.2 “双指标”卸载判别标准

目前真空预压设计计算以及卸载标准基本上是参照堆载预压法的做法, 以沉降稳定作为卸载标准, 但该标准一方面会造成有些工程实际上并没有完成加固就停止, 留下了较大的工后沉降量, 给后续使用带来隐患; 另一方面, 又可能因该标准过于苛刻, 按照实测沉降推算, 其工后沉降量已能满足要求, 受各种因素的影响, 要完全

达到该沉降速率标准可能需要花费很长时间, 由此大幅度增加工程成本, 但由此增加的加固效果并不十分明显。

根据1.1节的理论推导, 考虑到土体固结主要以水平向固结为主, 为简化分析, 忽略垂直向固结, 真空预压下仅考虑径向固结时, 均质地基在某时刻 t 所具有的固结度与正压条件下相同, 为

$$U_t = 1 - e^{-\beta t} \quad (8)$$

式中:

$$\beta = \frac{8C_h}{F_n d_e^2} \quad (9)$$

$$F_n = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad (10)$$

在某时刻 t 地面沉降可以表示为

$$S_t = U_t S_\infty = (1 - e^{-\beta t}) S_\infty \quad (11)$$

式(11)与实测数据拟合的方程一致, 也就是说, 即使软土地基非均质, 在某时刻地面沉降也可以用式(11)表示, 只不过所用的固结系数为整个土层的加权平均固结系数。根据现场沉降监测数据的拟合分析结果, 假定固结系数在加固过程中为常数, 则根据式(11)可知 β 为常数。将式(11)对 t 求导, 则 t 时的沉降速率 V_t 为

$$V_t = \beta e^{-\beta t} S_\infty \quad (12)$$

由式(11)得 t 时的剩余沉降量 S_t 为

$$S_t = S_\infty - S_t = S_\infty e^{-\beta t} \quad (13)$$

由式(12)和式(13)可得

$$V_t = S_t \beta \quad (14)$$

根据式(14)可知, 对应相同的工后沉降要求, 沉降速率标准取决于 β 值的大小。根据式(9), β 值与固结系数、加固参数等有关。当排水体间距越大, 固结系数越小, 则 β 值越小, 在工后沉降量一定时, 其要求的沉降速率标准就越低。当 β 值一定时, 要求的工后沉降量越小, 则要求的沉降速率就越低。因此当软土的固结系数较小, 排水体间距又较大时, 《港口工程地基规范》规定的2 mm/d的卸载标准会导致工程未完成加固就停止抽真空。对有些排水体间距比较小, 固结系数又比较大, 使用要求又不高即容许工后沉降量比较大的情况下, 如果仍然按《港口工程地基规范》的卸载标准进行卸载, 势必增加真空预压工期, 同时大幅

度增加工程成本。

因此,若仅采用沉降速率作为控制标准,可操作性比较差,未必能如实反映工程的加固效果。实测结果表明,当停泵数量较多时,沉降速率会快速下降,甚至反弹,造成可以卸载的假象,因此单一沉降速率作为卸载标准不能真实反映加固效果。

为此引进液性指数作为评价加固效果的附加指标,该指标可体现软土的物理状况及加固效果,其数值大小可反映软土的加固程度。根据抽真空过程中土工参数的试验结果和同类工程的统计分析,成果表明软土经真空预压加固后,其液性指数基本上在0.6~0.8。研究表明,当液性指数小于0.8时,说明抽真空效果良好,已达到加固效果,如果卸载时液性指数还比较大,大于0.8,说明加固效果不好,应认真分析原因。

因此,真空预压卸载标准可定为,首先估算具备卸载条件时的沉降速率,待实测沉降速率达到计算值时,按实测沉降曲线推算最终沉降量和工后沉降量,若推算工后沉降量满足要求,即可取土通过室内试验获得加固后各层软土的液性指数,采用这种“双指标”卸载判别标准可为真空预压卸载提供更为科学和可靠的依据。

1.3 超静孔隙水压力的修正计算方法

地基固结的沉降位移将引起孔压计测点位置改变,真空抽水也将引起周边地下绝对水位变化,这2个因素将导致超静孔隙水压力测量值偏离实际值,而目前的孔压测量技术和分析理论无法消除上述因素产生的误差。为此,结合广州南沙某真空预压加固软基工程中,土体压缩和地下水位变化对超静孔隙水压力的影响,提出了超静孔隙水压力的修正计算方法,见式(15)。

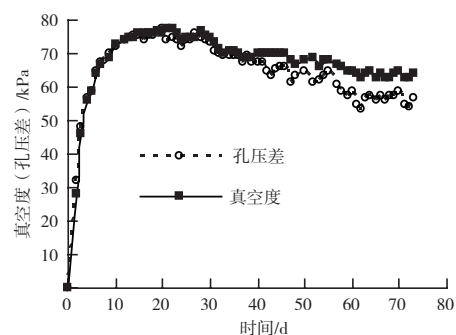
基于气体状态方程和力学平衡关系,建立了测点真空度读数与孔隙水压力读数的关系,如式(16)所示,并提出真空度和负压的正确测试方法。广州南沙多项真空预压软基加固工程的实践证明,理论计算结果与实测结果基本吻合(图4),证实上述理论的正确性,为真空预压法的施工监

测提供了有效的理论依据^[3-4]。

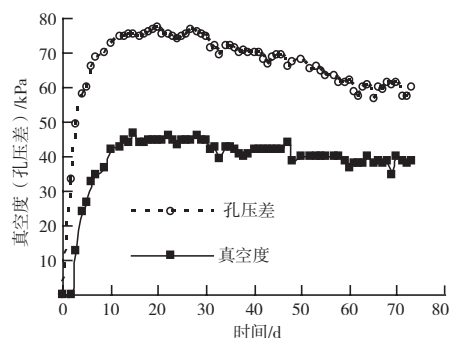
$$\Delta P_w = P_{w1} - P_{w0} = \rho_w g (-\Delta S + h_{w0} - h_{w1}) \quad (15)$$

$$P_a = \frac{P_w - \rho_w g \Delta S + P_0 + \rho_w g L_0}{2} \quad (16)$$

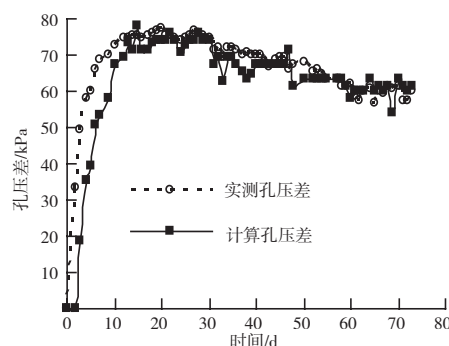
$$\sqrt{\frac{(P_w - \rho_w g \Delta S + P_0 + \rho_w g L_0)^2 - 4(P_w - \rho_w g \Delta S)P_0}{2}}$$



a) 膜下0.5 m处



b) 膜下3 m处



c) 膜下3 m处实测与计算对比

图4 真空度与孔压差对比及真空度实测与计算值对比曲线

1.4 土体渗透系数变化对固结的影响

从固结系数的定义出发,视压缩系数为变量,利用室内试验数据,拟合了固结系数与固结应力的关系式,如式(17)所示,并以此建立了渗透系数与固结应力的微分方程,从而求得了考

考虑前期固结压力时, 正常固结土的渗透系数随固结应力变化关系, 如式 (18) 所示^[5]。

$$C_v = \begin{cases} C_{v0} \exp[a(\sigma' - p_c)] & \sigma' < p_c \\ C_{v0} & \sigma' = p_c \\ C_{v0} \exp[a(p_c - \sigma')] & \sigma' > p_c \end{cases} \quad (17)$$

$$k = \begin{cases} \frac{k_0}{1 + A \{1 - \exp[a(p_c - \sigma')]\}} k_0 & \sigma' \leq p_c \\ \frac{k_0}{1 + A \{\exp[a(\sigma' - p_c)] - 1\}} k_0 & \sigma' > p_c \end{cases} \quad (18)$$

考虑正常固结状态下前期固结压力对渗透系数的影响, 并将渗透系数随固结应力的变化关系应用于真空预压下单井的三维有限元计算, 如图 5, 6 所示。计算结果表明: 考虑渗透系数随固结应力的变化, 其表面沉降要比渗透系数保持不变的沉降量小, 固结过程较慢, 相应的固结时间要长; 前期固结压力越大, 表面沉降将越小, 达到相同固结度时所需固结时间也越长^[6]。

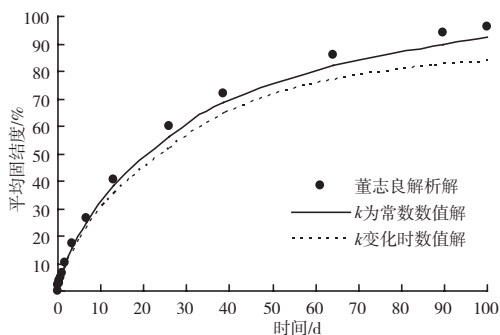


图5 平均固结度随时间变化曲线

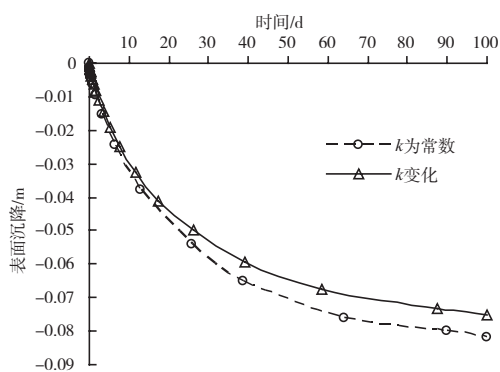


图6 表面沉降随时间变化曲线

2 工艺创新

2.1 浅表层快速加固技术

众所周知, 新吹填淤泥含水率经常高达

150%~200%, 其胶黏粒含量高 (通常在60%以上), 渗透性差, 处于流动状态而不具备承载力, 传统真空预压法无法直接实施。对于上述高含水率超软土地基加固, 通常须先行采取自然晾晒法、土工织物竹材加筋联合垫层法或化学固化等方法作浅表层预处理。自然晾晒法将耗时1~2 a, 甚至更长时间, 且形成硬壳层的厚度小而难于支撑加固下卧软土的机械设备荷载; 土工织物竹材加筋联合垫层法造价高, 工期长, 且导致后续砂垫层厚度不均, 易形成淤泥包致插板冒浆污染垫层而显著降低排水效果, 竹子的大量使用也将造成生态的破坏; 化学加固法则造价极高 (处理3 m深, 约需200元/m²), 并影响后续预压固结的排水效果, 且可致严重环境污染。

针对新吹填超软弱淤泥加固的技术难题, 根据负压条件下砂井地基固结理论及渗流量计算公式, 开发了超软弱土浅表层快速加固技术 (图7), 并成功研发了可在高含水量流动状淤泥上无回带插打塑料排水板的轻型施工船和插设装置 (图8)、无砂垫层水平滤排水管路系统、大面积流动状淤泥分区加固中间分隔装置、水上土工布快速铺设装置, 形成了浅表层快速加固整套技术, 解决了传统真空预压法在高含水量流动状淤泥地基上无法直接实施的技术难题^[7]。该技术于2007年首次应用于厦门海沧港区试验区, 取得了良好的加固效果 (图9), 随后在天津曹妃甸和临港工业区、温州丁山垦区、连云港新城区等大面积超软弱地基加固工程中推广应用, 获得了巨大的经济和社会效益。

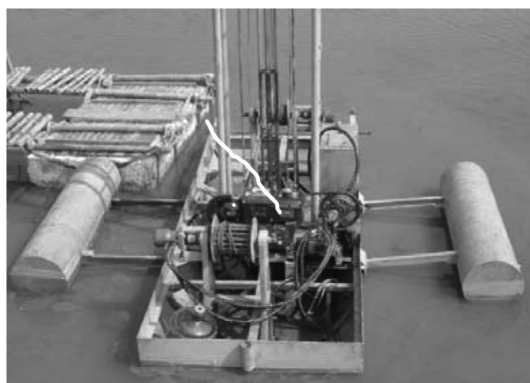


图7 浅表层插板装置

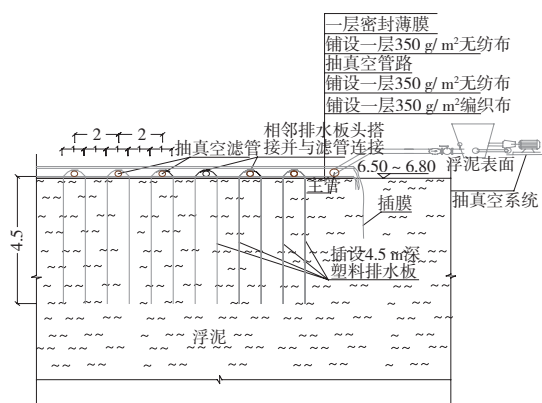


图8 浅表层快速加固断面

工程实践表明,浅表层快速加固处理技术具有加固效果好、工期短(缩短工期半年以上)、安全环保、造价低(每平方米造价比常规方法节约20~40元,比化学加固法每平方米节约150元以上)等优点。仅以天津、连云港、温州三地待加固面积约400 km²为例,采用本技术平均可节约投资近120亿元,因此该技术具有极其广阔的应用前景。



a) 加固前



b) 加固后

图9 超软弱土浅表层加固前后对比

2.2 真空预压联合强夯技术

单纯的真空预压卸载后的再压缩沉降仍然较大,而且其承载力有限。同时真空预压后期能量利用率低,维持后期真空度来继续提高地基强度和变形性能的做法很不经济。利用真空预压形成

的地基前期强度和残留的负压对强夯加固的有利条件,在砂井地基负压固结理论及“双指标”卸载判别标准基础上,提出了真空预压联合强夯技术(图10)。

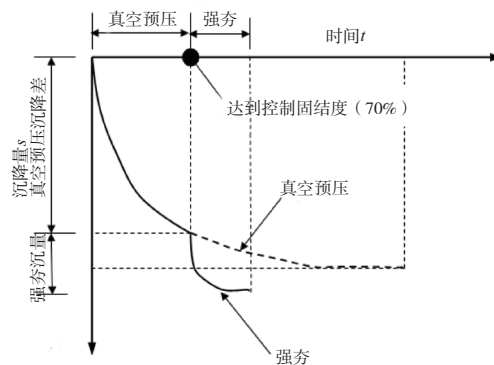


图10 真空预压联合强夯加固原理

通过短时间的真空预压达到一定的固结度(50%~70%),快速提高浅层地基的承载力和强度,为强夯施工创造必要的施工条件。真空预压处理达到预定的固结度后,再联合强夯法,利用已有的塑料排水板和砂垫层所形成的良好排水条件,提高强夯过程中超静孔隙水压力的消散速度。地基在夯锤冲击能作用下,经过能量转换、固结压密和触变固化3个阶段后,承载力和强度得以进一步提高。该技术充分发挥真空预压和强夯动力固结2种方法的各自优点,有效地同时克服了软土强夯的“橡皮土”现象和真空预压后期效率低的缺陷。经中国南玻绿色能源产业园软基处理工程、厦门海沧港区14[#]~19[#]泊位试验区、珠海长隆国际旅游度假区地基等多个项目的工程实践证明(图11),该技术加固的软土地基承载力

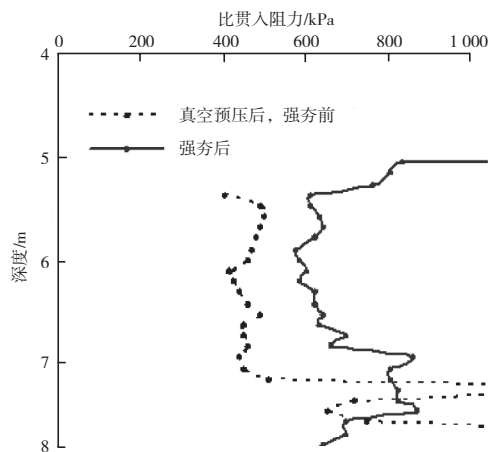


图11 强夯前后静力触探对比

高、工后沉降小、工期短, 造价低, 能耗低, 经济和社会效益显著。

2.3 深井降水联合强夯加固技术 (WDDC)

强夯法一般应用于碎石土、砂土、低饱和度的粉土、黏性土、湿限性黄土、素填土和杂填土等地基处理中, 但对地下水位较高的饱和软黏土地基, 尤其是淤泥或淤泥质土并不适用。为充分利用该法设备简单和加固快速的优点, 通过改进施工工艺、增设竖向排水体或与其他加固方式相结合的办法, 使之可用于加固饱和软黏土地基。其加固机理为: 插设塑料排水板以增大地基的渗透性能, 并在加固区周边打设泥浆搅拌墙以阻断外界水源补给, 然后通过井点抽水降低地下水位, 减小新地下水位面以上浅层软土中的含水量和饱和度, 使其转换为非饱和土, 并增加原地下水位面以下软土层的有效应力, 对深部软土形成预压固结。当地下水位降低 5 m 以上时, 即可以同时开展强夯施工。巨大的夯击能, 对表层非饱和和软土层进行压密加固, 并促使浅部和深部的软土层产生超孔隙水压力, 由于地基内设置了塑料排水板, 超孔压易于消散, 孔隙水不断排出, 土体强度随之增加, 与降水预压共同形成“上-下”双层加固模式, 可有效消除残余沉降、不均匀沉降, 提高加固深度。该技术大大拓展了强夯法和井点降水预压法的适用范围, 并可获得更良好的加固效果^[8-9]。在广州港南沙港区粮食及通用码头工程软基处理试验区中, 采用了 WDDC 技术, 不仅工艺简单、造价低廉, 而且充分发挥了井点降水和强夯法各自的优点, 地基处理效果良好, 见图 12 和图 13, 具有明显的经济、社会效益。

3 监测及检测技术创新

3.1 抽真空过程中的钻孔取样技术

为实时观察真空预压过程中土体的加固效果, 需在抽真空过程中取土样, 为此, 研发了钻孔取样技术, 该技术采用砂包袋加密封膜灌淤泥的方案, 如图 14 所示, 能很好地适应地基沉降变形, 且仅是在取土瞬间才灌淤泥浆而破膜, 取土一结束即

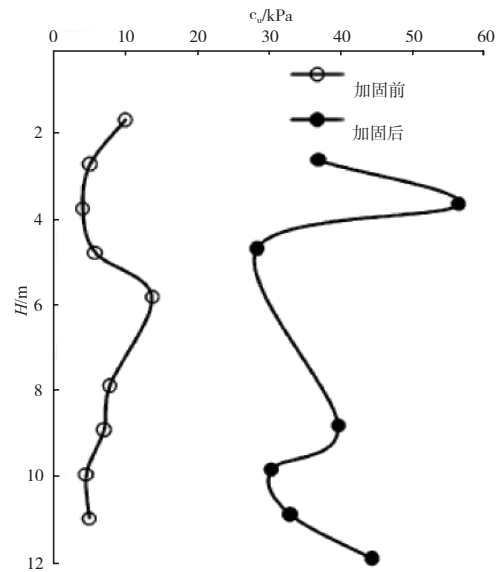


图12 加固前后十字板剪切试验结果

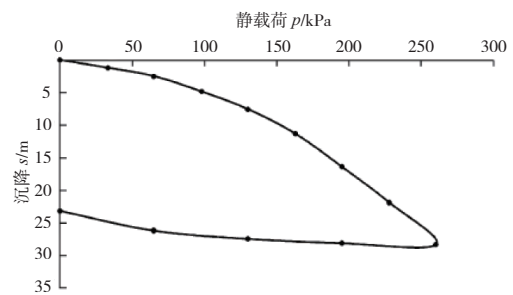


图13 载荷板试验曲线

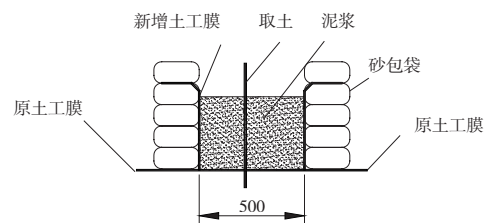


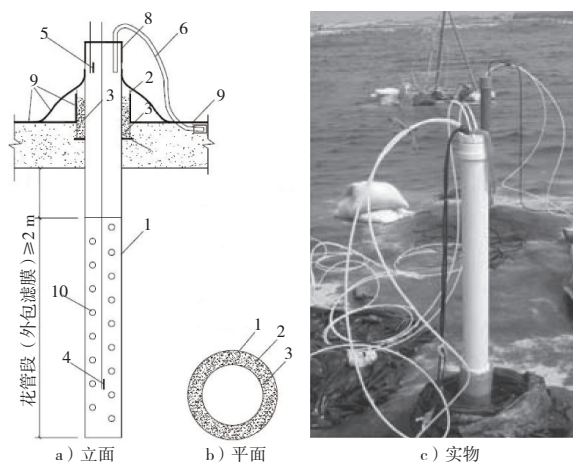
图14 真空预压过程中钻孔取样示意

可将新增土工膜粘合, 不需不断灌淤泥, 因此维护较容易, 且对砂垫层的渗透性影响较小。此技术在广州南沙港等多个工程中成功应用^[10]。

3.2 新型地下水位测试技术

采用传统水位管由于无法保证管内真空度与膜下真空度不一致而导致边界压力不一致, 从而易引起测试误差。根据力学平衡原理, 改进了真空预压中地下水位测试装置。该装置由孔压计、真空表、水位管 (UPVC 塑料管做成, 下部为花管并用滤膜包住)、塑料外包短套管、塑料软管、密封材料 (如油膏或泥浆)、管口密封膜

等组成^[11], 如图15所示。



注: 1. UPVC塑料水位管 (直径约70 mm); 2. 塑料短套管; 3. 泥浆或油膏; 4. 孔压计; 5. 真空表; 6. 塑料软管; 7. 隔水板或密封膜; 8. 封管口用密封膜; 9. 原地真空密封膜; 10. 花管孔

图15 真空预压地下水位测试装置

该装置成功应用于广州南沙港的真空预压工程中, 与传统的地下水位测试方法相比, 前者所获取的数据更具科学性, 可如实地反映地下水位的变化情况。

3.3 孔压计的埋设技术

孔压计传统的埋设方法容易导致测试数据缺乏对比性、测试结果不准确、上下孔压计连通等情况, 针对这些缺陷, 对封孔装置进行了改进, 如图16所示。

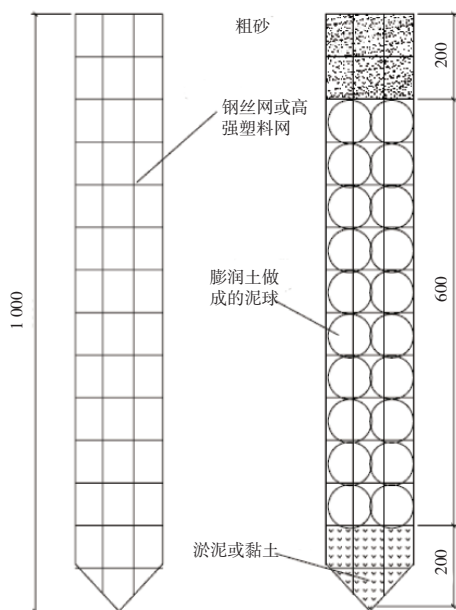


图16 孔压计封孔装置

该装置的优点: 1) 铁丝笼因周边有许多孔眼, 不会阻止泥球的膨胀, 故不会影响其封孔效果; 2) 泥球受周边铁丝笼的约束, 不会在下沉过程中散开; 3) 铁丝笼装上材料后较重, 下沉速度快, 因此施工效率高, 不会影响现场施工; 4) 容易控制封孔高程^[10]。

利用该装置, 在广州南沙港软基处理工程中, 有效地实现一孔埋设多个孔压计, 获得的数据均具有很强的可比性与真实性。

上述3种技术, 使得动态控制真空预压工程质量由难变易, 更为如实地评价地基加固效果提供了可靠的方法。

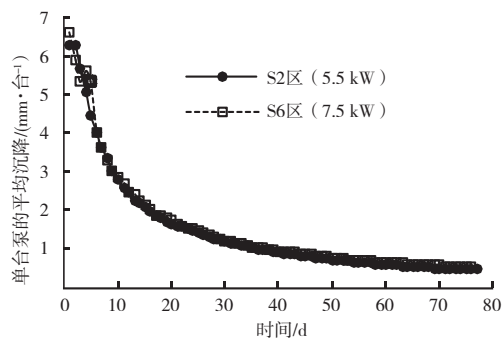
4 真空预压节能环保技术创新

4.1 节能技术

真空预压法消耗的能源主要为电能, 真空泵的数量和功率大小及运行时间决定耗电量。真空预压法加固软土地基时前期沉降较快, 而后期沉降较慢, 但其费用随抽真空的时间延长而正比例增长, 因此其后期能量利用率较低。传统的真空预压法通常根据经验按每台泵 (功率7.5 kW) 加固900~1 100 m²进行固定布置, 耗电能较高, 因此产生的CO₂排量也较大。加固时间平均按110 d计算, 每平方米约耗电22 kW·h; 以燃煤发1 kW·h电产生CO₂约为1.0 kg计算, 每加固1 m²地基CO₂排放量约为22 kg, 因此真空预压法施工的节能减排尤为重要。

通过真空泵开启数量对真空预压地基加固效果的影响试验与分析, 揭示了真空泵运行数量对软土地基加固效果的影响。试验结果表明在抽真空的前期真空泵的数量对真空加固效果影响较大, 而抽真空前期, 增加真空泵数量, 膜下真空度变化不大, 但地表沉降速率加快, 加固效果提高, 抽真空后期增加真空泵数量, 对加固效果的影响不大。基于此提出了真空预压抽真空系统的设计及优化原则, 结合“双指标”判别标准, 即沉降速率与液性指数2个指标, 与传统真空预压相比可节约能耗20%~25%。

同时,通过试验研究,开发了5.5 kW节能真空射流泵系统,试验证明该节能真空射流泵系统可达到常规7.5 kW的真空射流泵系统同等的加固效果(图17)。仅此一项,又节约了约30%能耗。以上2项技术相加可节约能耗40%。仅按天津、连云港、温州三地待加固面积计算(约400 km²),就将节约耗电35.2亿kW·h,减排CO₂352万t,极为显著的经济社会效益^[12]。



注: S2区为5.5 kW, S6区为7.5 kW

图17 5.5 kW和7.5 kW效果对比

4.2 环保技术

真空预压对环境产生的影响是双方面的:一方面会影响自身的加固效果,另一方面会影响加固区周围构筑物等的正常使用。如果不能很好地解决这一问题,会影响真空预压方案的整体效益,因此需采取一定的防护措施来减少其对周围环境的影响。真空预压对周围环境的影响主要有:1)周围土体向加固区的水平位移;2)降水预压引起的不均匀沉降。针对前者,可借鉴基坑支护的方法采取支挡结构或者借鉴防震沟的做法将加固区与构筑物之间的土体断开;针对后者,可设止水帷幕减少周围土体地下水渗流和降水预压强度,从而可减小周围土体的沉降。

以南沙港区真空预压软基处理工程为依托,对影响区采取了水泥搅拌桩和砂桩联合的防护措施,从而保护了高压电缆沟的安全,并达到了预期防护效果;从防护角度来说,旋喷桩止水和支护作用明显,达到了预期的防护目的,但高压旋喷桩和底层交界面是刚性或半刚性与柔性结构的过渡面,抽真空容易被拉裂,孔压变化结果表明旋喷桩与土层交界面的裂缝、影响区内已施工的

排水板和密封墙的密封性能等影响了加固效果。因此,真空预压防护设计时,为减小防护工程对真空预压加固区的影响,应加大高压旋喷桩防护体与真空预压区边界的间距。

5 结语

本文归纳总结了近年来中交四航工程研究院有限公司在软基处理技术理论及工艺等方面的创新成果,这些成果已成功应用于多个工程实例中,并取得了巨大的社会 and 经济效益,具有广阔的推广应用空间。随着软基处理工程朝大规模、低造价及短工期的趋势发展,开发有效、经济而又快捷的软基处理技术愈发重要。本文所介绍的各种技术不仅可以满足目前大面积超软弱地基处理的需要,而且能动态地监控加固质量,为客观评价这些新技术的有效性提供了有力的手段。任何一项科学技术从萌芽到成熟,从来不是一蹴而就的,都须不断地通过实践的检验,软基处理技术也同样须经历该过程,只有不断地坚持科技创新,才能逐步完善软基处理技术,适应社会经济发展的需求。

参考文献:

- [1] 董志良. 堆载及真空预压砂井地基固结解析理论[J]. 水运工程, 1992(9): 1-7.
- [2] 董志良. 堆载及真空预压-塑料排水板加固地基渗流量的分析与计算[C]//第二届全国排水板学术研讨会论文集. 南京: 河海大学出版社, 1993.
- [3] 张功新, 董志良, 莫海鸿, 等. 真空预压中真空度及其测试和分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2005, 33(10): 57-61.
- [4] 张功新, 莫海鸿, 董志良, 等. 真空预压中真空度与孔隙水压力的关系分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1 949-1 952.
- [5] 吕卫清, 董志良, 陈平山, 等. 正常固结软土渗透系数与固结应力关系研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 769-773.
- [6] 董志良, 陈平山, 莫海鸿, 等. 真空预压下软土渗透系数对固结的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1 452-1 456.
- [7] 中交四航工程研究院有限公司. 浅表层超软弱土快速加固技术研究[R]. 广州: 中交四航工程研究院有限公

- 司, 2009.
- [8] 刘嘉, 罗彦, 张功新, 等. 井点降水联合强夯法加固饱和淤泥质地基的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2 222-2 227.
- [9] 中交四航工程研究院有限公司. 深井降水联合强夯软基加固技术研究[R]. 广州: 中交四航工程研究院有限公司, 2009.
- [10] 中交四航工程研究院有限公司. 真空预压加固大面积软弱地基及其对周边环境与防护技术研究[R]. 广州: 中交四航工程研究院有限公司, 2007.
- [11] 张功新, 董志良, 莫海鸿, 等. 真空预压地下水位测试技术探讨与改进[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1 899-1 903.
- [12] 张功新. 真空预压加固大面积超软弱吹填淤泥土试验研究及工程应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2006.
- (本文编辑 郭雪珍)

《水运工程》优秀论文评选

评委点评:

作者针对超软土地基处理, 从理论上做出了深入探讨研究, 提出了“双指标”卸载判别标准等创新理论; 同时, 根据超软土地基强度低、渗透系数小、难于固结的特点, 采用的“浅表层快速加固技术”、“真空预压联合强夯技术”、“深井降水联合强夯加固技术”等处理工艺具有创新性, 是对传统工艺的有效改进和补充; 在监测和检测技术上, 提出的3点技术创新, 可确保监测和检测工作的客观和有效性, 值得推广应用; 在现场节能和环保方面, 文中也有独到的见解。

本文从理论及实践两方面提出了针对超软土地基处理的方法, 具有较高的理论水平和实践应用价值, 对于指导超软土地基处理具有重要的指导意义。该文概念清晰, 逻辑严谨, 是一篇值得一读的好论文。

李宗哲

2012年12月

评委简介:

李宗哲, 博士, 教高, 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司总工程师。

一级注册结构工程师, 参加过交通运输部《码头结构设计规范》、《船闸施工技术规范》、《港口工程基桩静载荷试验规程》等多项水运工程标准、规程的编制工作。