



变截面砂桩技术及其工程应用

刘家才, 许增会, 程泽坤, 黄明毅

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 介绍一种新的地基加固方法——变截面砂桩技术。对该技术的基本原理、设计计算方法和施工工艺进行探讨, 明确了该方法的适用范围。通过工程实例, 对该方法的实施效果进行分析, 说明变截面砂桩技术是一种安全、经济的地基加固方法。

关键词: 变截面; 砂桩; 层状软土; 软弱面

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)10-0203-05

Method of variable cross-section sand pile and its application in engineering

LIU Jia-cai, XU Zeng-hui, CHENG Ze-kun, HUANG Ming-yi

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: A new method for foundation reinforcement technology, variable cross-section sand pile, is presented. The basic principle, design calculation method and construction technology of this technique are discussed, and the application scope of this method is defined. The effect of its application in engineering cases shows that the variable cross-section sand pile technique is a safe and economical method for foundation reinforcement.

Key words: variable cross-section; sand pile; laminated soft soil; weak layer

近年来,随着洋山深水港和港珠澳大桥等重大工程的建设,水上大直径砂桩地基加固技术得到了广泛的应用,积累了丰富的工程经验,极大地提升了我国水运界在砂桩设计和施工方面的技术水平。采用大直径砂桩加固软土地基,具有适用范围广、地基改善效果好、上部荷载施加速度快、对环境影响小等优点。然而,由于须采用大型船机设备,以及砂料资源日趋紧张等原因,该方法和传统地基加固技术如塑料排水板排水固结法、爆破挤淤法等相比,存在单位面积(或单位长度)地基加固费用较高的缺点。面积置换率是决定砂桩法加固费用的关键参数,在目前的设计和已经实施的工程中,砂桩的面积置换率在深度方向一般是统一的,即砂桩设计截面沿深度不

变,它根据地基承载力、沉降和整体稳定性等要求来确定。实际工程中,因地质年代沉积环境的变化,要加固的软土地基一般成层分布,地基承载力、沉降和整体稳定性往往取决于地基中最软的土层,即砂桩截面是按照最软的土层来设计的。为降低砂桩法的单位经济指标,有必要根据地基中各土层的力学指标和分布特点对砂桩截面进行优化,即不同土层采用不同的设计截面,即变截面砂桩。

另外,随着砂桩法应用日益广泛,工程中遇到了一些特殊的地质条件,如基岩上直接覆盖厚层软土的情况,传统的砂桩工艺由于在套管端部采用活瓣,活瓣成锥体状(图1),锥尖在遇到基岩面时无法继续下沉,在套管上拔提升的过程中

收稿日期: 2013-08-10

作者简介: 刘家才(1970—),男,硕士,教授级高级工程师,从事水运工程陆域形成、地基处理及道路堆场设计。

才能将活瓣打开,使套管内砂柱依靠重力排出,形成砂桩。在套管已经提升、而砂柱尚未排出的情况下,软土在上覆土层重力作用下填补了套管提升后留下的空间,不可避免地在软硬界面处留下了软弱面(图2)。若基岩倾斜度较大,将构成潜在的滑动面,为安全留下隐患。在这样特殊工况下,为消除软弱面,采用变截面砂桩是一种可靠的处理措施。



图1 活瓣

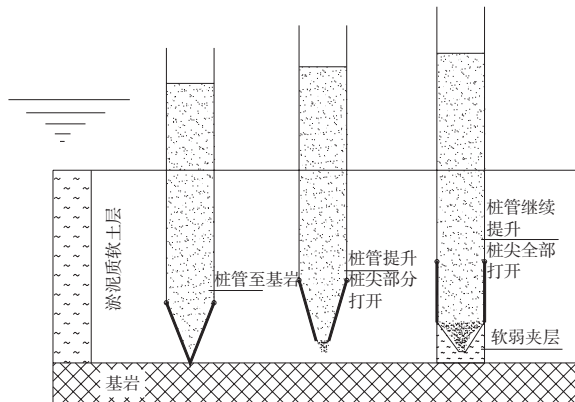


图2 普通砂桩法形成的软弱面

1 变截面砂桩技术

1.1 基本原理

变截面砂桩技术是中交第三航务工程勘察设计院有限公司拥有的一项实用新型专利技术^[1]。它采用变截面的构思,综合采用普通砂桩和挤密砂桩各自的优点,针对软弱界面和不同特性的土层采用不同的施工工艺,在一般土层中采用正常直径和一次拔管工艺,在较差的土层中和薄弱部位则采用加压复打工艺以扩大砂桩直径(图3),从而减少工程量,避免软弱夹层,消除安全隐患,降低工程费用。

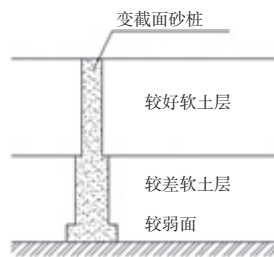


图3 变截面砂桩

变截面砂桩技术具有能适应土层变化、针对性强的优点,是对传统砂桩工艺的改进和创新。

1.2 设计计算

变截面砂桩的沉降、承载力和整体稳定性验算和砂桩复合地基的计算方法一致^[2]。在不同土层中和潜在软弱面处的截面设计参数按下列步骤确定:

1) 首先通过整体稳定性验算、沉降分析,假定若干个不同的砂桩置换率进行试算,最终得到满足设计标准的边坡整体稳定抗力分项系数和工后沉降,对潜在软弱面,要考虑复式滑动的可能。

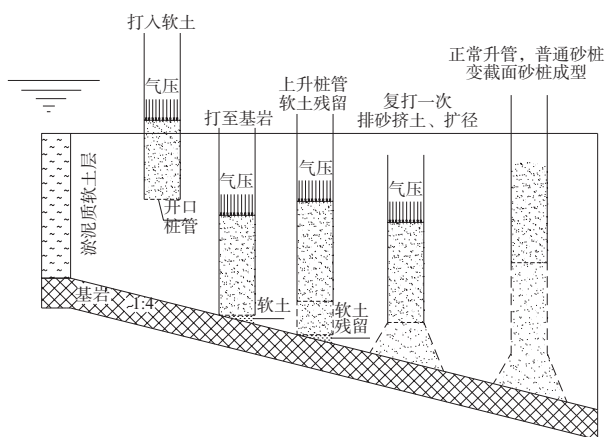
2) 据此确定各土层和软弱面处所需要的砂桩置换率,换算得到不同位置的砂桩截面积,然后,根据砂桩截面积计算出每延米灌砂量。

3) 选择套管直径使普通砂桩的一次插拔管工艺能满足一般土层(一般指加固土层中最好的土层)要求,对计算要求砂桩截面积大于套管截面积的土层或界面,采用挤密砂桩的反复插拔管工艺,通过施加气压挤开周围土体以扩大桩径,直到灌砂量不小于计算灌砂量,形成沿深度方向连续的但截面变化的砂桩。

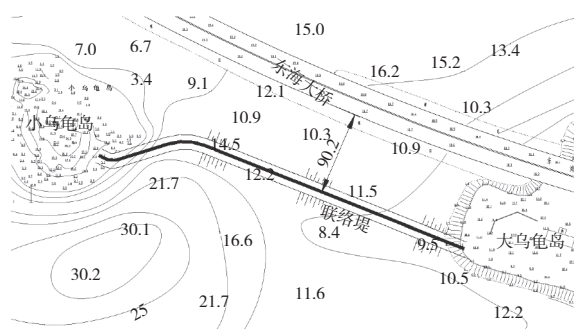
1.3 施工工艺

变截面砂桩须采用挤密砂桩工艺,套管底部为开口,通过在套管内加气压使砂柱排出,并可以反复插拔套管,形成的砂桩直径可以大于套管直径,在软硬界面处应用变截面砂桩的施工工艺流程和消除软弱夹层的原理如图4所示。

如图,采用开口桩管,在砂柱顶面加压后打至基岩,然后提升套管1~2 m高,加压排出砂柱,再次向下压桩复打,从而将留在软土中的砂再一次向下压入土层,并通过套管内的高压向下排砂,挤走残留在砂桩和基岩之间的软土,消除



软土夹层，同时砂桩直径得到扩大，必要时可以使相邻的砂桩相连，进一步挤走软弱土层，使砂桩底面和基岩形成良好的接触。复打结束后，可按普通砂桩工艺继续施工，形成底部直径大，上部直径小的变截面砂桩。扩径部分解决了软弱土层残留，加强了底部砂桩与基岩的接触，消除复式滑动的可能，上部正常直径的砂桩也起到了排水、置换的作用。



1.4 适用范围

变截面砂桩技术适用于水运工程中海堤、接岸结构的成层软土的地基处理,特别是对基岩上直接覆盖软土层的情况有很强的针对性。

2 工程应用实例^[3]

2.1 工程概况

大-小乌龟联络堤是上海国际航运中心洋山深水港区四期工程陆域北边界的组成部分,总长414.742 m,通过连接大乌龟岛和小乌龟岛,封堵汉道,在施工期作为四期工程吹砂成陆的围堤,采用抛石斜坡堤结构,堤顶高程7.3 m,平面位置如图5所示。由图5可知,联络堤轴线位置距离东海大桥最近处仅90.2 m。堤身范围内水深普遍在-10 m以下,靠近小乌龟岛处发育一深坑,最深达-30.2 m,从堤身轴线至深坑的自然地形坡度达1:4。

联络堤深坑段典型地质横断面如图6所示。天然地基为承载能力很差的淤泥质黏土,厚度在7~25 m范围,淤泥质黏土下层直接为基岩,且基岩的倾斜程度基本平行自然泥面,达1:4。

2.2 关键问题

本工程水下地形呈马鞍型,堤轴线处水深较浅,两侧水深逐渐加深,由于鞍部较窄,且南侧向深坑方向地形较陡,北侧方向受东海大桥限制,又是软土地基条件,因此属于建堤不利地段。地质方面,基岩面上直接覆盖较大厚度的软弱土层,软硬界面倾斜度较大,极有可能形成潜在的软弱滑动面。为确保堤身安全,减少对东海大桥影响,并减小堤身工程量,设计方案必须采用能加固淤泥和淤泥质黏土、并能够消除软弱面、减小堤身宽度的地基加固方法,地基处理方法在施工工艺上必须有对环境影响小的优点。因此地基加固方案的选择是本工程的关键问题。

2.3 地基加固方案

在洋山深水港区工程的筑堤实践中,采用的地基处理方法主要有爆破挤淤法、塑料排水板排水固结法和水上大直径砂桩法等。

爆破挤淤法是处理海堤软基的一种较为经济的方法,有较多成熟的工程经验,比较适合本工程地质条件,但其施工对环境的影响较大。爆破施工时产生的振动、冲击波以及飞散物可能对周围环境造成危害,需保证人员、设备和其它保护

对象有足够的安全距离（指爆炸源与保护对象的距离），常规的安全距离一般大于200 m。在特殊建筑物附近爆破时应进行爆破地震效应的监测和专门试验研究。本工程的重点保护对象是东海大桥，它是洋山深水港区的唯一进出港道路，其安全运营不能受丝毫影响。根据平面布置，联络堤轴线距东海大桥桥面南边线约90 m，若采用爆破挤淤方案，最近的爆炸源离大桥仅70 m左右，即使采用控制药量、毫秒延期爆破技术，也不能完全杜绝大桥的不利影响。综合考虑大桥安全和因此带来的工期风险，不考虑较经济的爆破挤淤方案。

塑料排水板排水固结法的地基处理费用较低，它利用塑料排水板，使软土在堤身材料自重下排水固结而增加强度，但是，为保证堤身稳定，需要较宽的反压平台和较慢的筑堤速度。经验表明，本方案在堤脚处往往产生较大的土体水平位移。在工期较为宽松、周边无重要建筑物的情况下是较为合理的方案。本工程联络堤堤顶中心线距东海大桥桥面南边线仅90 m，若采用塑料排水板方案，堤脚将达东海大桥桩基处，施工对大桥的影响较大。由于南侧存在深坑，较宽的反压平台在深坑处将产生新的稳定问题，因此也不适宜在本工程使用。

大直径砂桩法是通过在软黏土中打入一定数

量的砂桩，一方面起置换作用，另一方面起排水固结作用。砂桩通过这两方面的作用，使得加固区土体强度提高，堤身整体稳定性提高。由于砂桩具有置换作用，相同固结度下采用砂桩方案的联络堤断面比排水板方案的联络堤断面要小，同时砂桩的侧向约束作用可有效减小地基的水平位移。从本工程的地层情况来看，联络堤地基加固范围内没有很厚的砂层和砂石透镜体，轴线上及轴线以北软土层底高程均在-32 m以上，仅有轴线南侧接近坡脚的个别位置的软土层底高程达到-45 m左右，若采用砂桩进行地基加固，洋山深水港区已经具备了施工设备和丰富的施工经验。

经多方案论证及专家评审，最终推荐采用砂桩法加固地基。

根据联络堤整体稳定性计算的要求（图7），综合考虑减小地基土体沉降和侧向位移，砂桩加固设计采用如下参数：普通砂桩的设计直径1.0 m，考虑砂桩加固软土时，软土强度增长幅度和附加应力大小成正比，堤脚附近的堤身因附加应力较小，所以在堤脚区域砂桩置换率取30%，每米灌砂率 1.15 m^3 ，以弥补强度增长较小的不足，在堤脚处采用较大的砂桩置换率也有利于减小地基土体的侧向位移及增加堤身整体稳定，砂桩采用三角形布置，砂桩间距1.74 m。

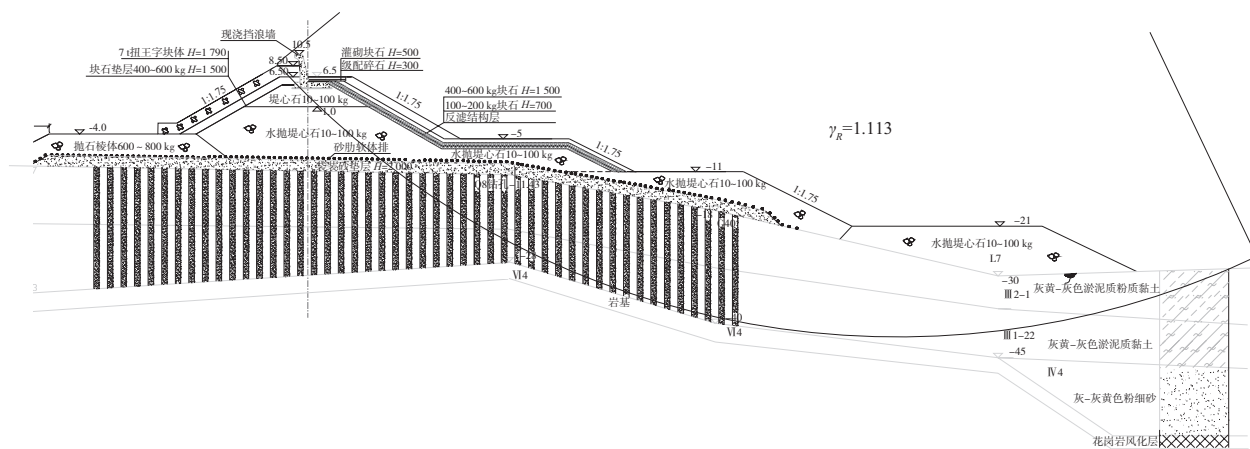


图7 采用变截面砂桩加固的联络堤整体稳定性

针对淤泥与倾斜基岩直接接触的特点，为防止在基岩顶面出现软弱层，采用了变截面砂桩技术，用以消除潜在的淤泥残留，要求在基岩面以上1 m高度范围内采用挤密砂桩工艺，加大砂桩直

径，每米灌砂率提高至 2.1 m^3 。堤身中心区域附加应力较大，中线两侧各25 m范围内砂桩置换率取20%，采用三角形布置，砂桩间距2.14 m。通过挤密砂桩工艺强行挤淤，形成了最底部扩大的变截

面砂桩。为尽量减小筑堤对东海大桥的影响, 砂桩加固深度按照全线均打穿软土层来设计。

2.4 实施效果

联络堤已经建成并投入使用, 施工过程中堤身安全稳定, 对相邻东海大桥未造成任何不利影响。为确保工程安全, 在联络堤施工过程中, 对砂桩施工质量进行了检测, 对堤下地基变形进行了观测。

1) 变截面砂桩施工质量及消除软弱夹层效果。

砂桩施工过程中, 对已经施工的砂桩进行了钻孔取芯检测。从取芯情况看, 砂桩沿深度方向是连续的, 在与基岩的结合面处, 未见软土残留, 说明变截面砂桩技术用于处理软-硬结合面、消除潜在软弱面是成功的。

2) 斜坡堤的稳定和变形。

为保证联络堤安全, 指导堤身抛填施工, 在斜坡堤上布设了沉降和深层水平位移观测点。从沉降板埋设 (-1 m 高程) 到联络堤建成后近半年, 堤顶累积沉降最大值仅 674 mm, 且沉降已稳定。图 8 是沉降随时间发展的过程曲线。

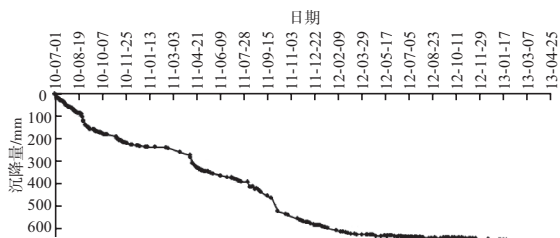


图8 堤中心处地基沉降-时间曲线

联络堤建成时, 土体深层水平位移基本呈上大下小的特征, 沿深度变化均匀, 在原泥面附近的位移最大 (图 9, 堤身除外), 说明变截面砂桩有效地改善了地基土特性, 消除了沿软-硬界面滑动的可能性。

3 结语

1) 变截面砂桩技术是对现有水上大直径砂桩技术的改进, 它综合利用了普通砂桩工艺和挤密

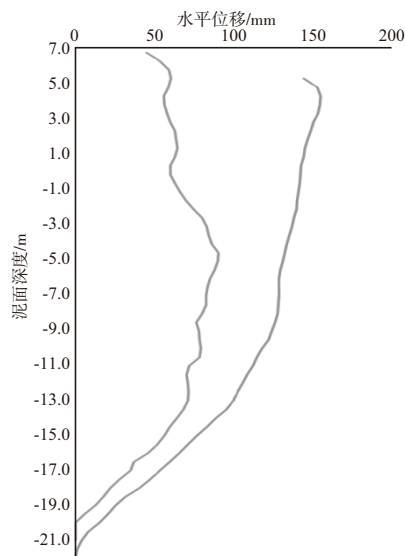


图9 联络堤深层土体水平位移

砂桩工艺的优点, 考虑了软土成层分布的特点, 在不同土层中采用变化的截面, 有利于节省工程费用。对外海岛礁附近基岩面上直接覆盖软土层的特殊地质情况具有很好的适应性, 可以消除软-硬交界处的潜在软弱面。本技术在水运工程软基处理领域具有良好的应用前景。

2) 变截面砂桩的设计和计算可以按砂桩法进行, 通过地基承载力、沉降和整体稳定性等验算选取在不同土层和软弱面处的砂桩截面。

3) 变截面砂桩技术在洋山深水港区四期工程大-小乌龟联络堤工程中得到了成功应用, 从砂桩质量检测和土体变形观测情况看, 该技术加固质量可靠, 对环境的影响小, 适合于在环境要求较为严格的工程中使用。

参考文献:

- [1] 刘家才, 许增会, 程泽坤, 等. 用于地基加固的变截面砂桩: 中国, ZL2011 2 0435017, 1[P]. 2012-07.
- [2] 刘家才. 水上砂桩置换法加固饱和软黏土地基的设计[J]. 中国港湾建设, 2007(5): 47-50.
- [3] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 大-小乌龟联络堤施工图[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2009.

(本文编辑 郭雪珍)