



挤密砂桩KS-REACT工法施工技术应用

马宗豪, 张青海, 王翔

(中交一航局第二工程有限公司, 山东青岛266001)

摘要: 为了更好地改善国内沿海和内河地区的软土地基, 解决水上建筑物的稳定问题, 采用挤密砂桩对软土地基进行人工处理的方法在近年得到广泛应用。挤密砂桩KS-REACT工法是在振动作用下, 通过控制套管内空气压力实现砂桩挤密扩径。该方法在港珠澳大桥人工岛软基处理中得到应用, 具有成桩质量高、地基加固快、砂损失率低等特点。针对施工中出现的问题给予了合理解决, 为今后挤密砂桩施工提供了宝贵建议。

关键词: 挤密砂桩; 软土地基; KS-REACT; 港珠澳大桥; 地基加固

中图分类号: TU 473.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0184-07

Application of construction technology for sand compaction pile by KS-REACT's method

MA Zong-hao, ZHANG Qing-hai, WANG Xiang

(No.2 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qingdao 266001, China)

Abstract: For improving the soft soil foundation of domestic coastal and inland areas and guarantee the stability of over-water buildings, the sand compaction pile of artificial processing methods of soft soil foundation is widely used in recent years. The sand compaction pile by KS-REACT's method is that under the action of vibration, the sand pile is expanded in diameter through controlling the air pressure inside the pipe. The application of this method to the soft foundation treatment in the Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge resulted in perfect pile quality, fast foundation reinforcement, and low sand loss rate. The measures taken for dealing with the problems in construction provide valuable reference for the compaction pile constructions in the future.

Key words: sand compaction pile; soft soil foundation; KS-REACT; Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge; foundation reinforcement

20世纪80年代, 砂桩在处理软土地基、提高地基强度方面有了很大的进展^[1]。据国内外经验, 在软弱黏性土地基中使用砂桩可以构成砂桩复合地基, 对它再进行加载预压, 就可以显著提高地基强度, 改善地基的整体稳定性, 并减小地基沉降量。对于挤密砂桩, 日美等国家研究较早, 并取得了很大的进展。挤密砂桩在软弱黏性土中, 能提高地基承载力, 加快固结沉降。A.Asaoko等^[2]研究了挤密砂桩对深层软黏土的加固作用。1996年在广东汕头珠池港区7[#], 8[#]集装箱码头工程中,

中交三航院首次采用砂桩法加固满堂式码头后的斜坡堤驳岸; 连云港三期吹填围堤工程、宝钢马迹山港扩建工程的围堤工程中相继采用挤密砂桩工艺施工; 上海洋山深水港区四期工程中9个5万吨级集装箱泊位, 码头接岸结构采用砂桩进行地基加固^[3]。张春生等^[4]介绍了上海洋山深水港区二期工程码头及接岸结构工程软土地基处理采用的振动式砂桩工艺。KS-REACT工法是控制套管内空气压力实现砂桩挤密扩径的施工方法, 该方法在日本得到了广泛应用, 效果显著。本文介绍KS-REACT工法, 详细

收稿日期: 2012-04-19

作者简介: 马宗豪(1983—), 男, 硕士, 从事港口与航道工程。

阐述了几个关键设备的应用机理, 重点研究了港珠澳大桥西人工岛外侧挤密砂桩施工中的技术难点及挤密砂桩(即SCP)成桩的关键问题。

1 KS-REACT工法

KS-REACT工法是指套管内的中粗砂在振动锤作用下被振密压缩, 引拔套管过程中依靠控制套管内空气压力和砂面高度在黏土中形成砂柱, 随后进行套管打回, 套管内压力抵御周围土压力并强制将砂柱挤密扩径, 每个循环制造长度为1 m的SCP桩, 重复施工直至达到设计高程。



图1 挤密砂桩船施工

1.1 挤密砂桩施工工艺

挤密砂桩施工工艺见图2, 施工顺序采取由近岸到远岸、S型隔桩跳打的方法, 防止周围土体挤压过大, 造成砂桩倾斜或断桩。

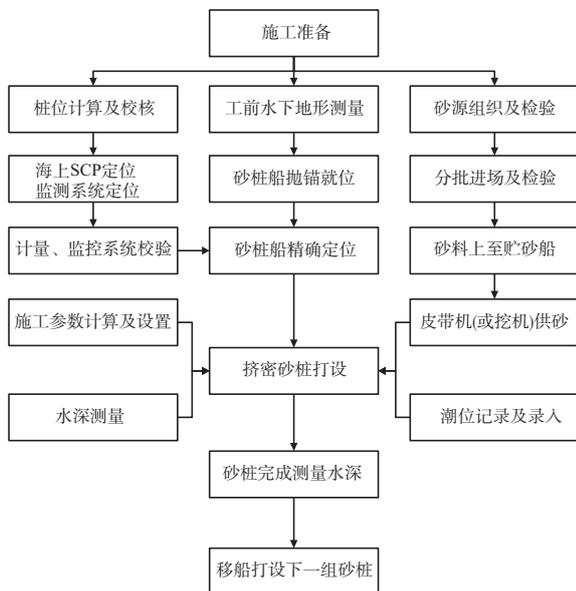


图2 挤密砂桩工艺流程

1.2 关键设备应用机理

1.2.1 套管内底盘工作原理

套管采用法兰连接, 根据打设深度, 选择合适长度的套管, 套管底端为开口式结构, 为保证砂量的节约, 在底端以上1 m位置焊接一个直径小于套管内径的铁盘, 依靠焊接在套管内的两肋板托住铁盘, 厚度50 mm, 直径420 mm。底盘工作原理: 打桩结束后防止套管内砂量流失; 套管贯入过程中, 防止泥、碎石等过多进入套管内, 增加排泥的难度; 套管打回过程依靠圆盘挤压砂柱, 见图3。



图3 套管底盘位置

1.2.2 GL系统工作原理

GL计是测量套管底端贯入水下的深度的设备。直径为8 mm的钢丝绳一端连接套管, 一端连接桩架上方的旋转计数器, 套管移动过程中钢丝绳发生位移变化, 计数器记录数值, 并将数值同步传送给主控电脑与演算器。考虑钢丝绳的拉伸变形, 施工前应进行GL系统的主卷系数测量, 保证GL数值的精确, 见图4。

1.2.3 ASL系统工作原理

ASL系统又称为砂面控制系统, 是砂桩施工过程中控制成桩质量的一个非常重要的设备。它是由ASL信号处理器、同轴电缆、信号校正器、励振器等组成, 励振器安装在套管F管内, 通过发射电磁波测量套管内砂面的高度, 从而精确控制下砂高度; 信号校正器对接收回的电磁波进行过滤、整理, 通过同轴电缆发送到ASL信号处理器, 同时将信号传输到主控电脑和演算器电脑, 主控电脑预先设置的ASL参数自动控制套管内下砂量。如果施工中ASL系统发生故障, 可以通过ASL信号处理器屏幕显示, 及时维修。ASL系统布置见图5。

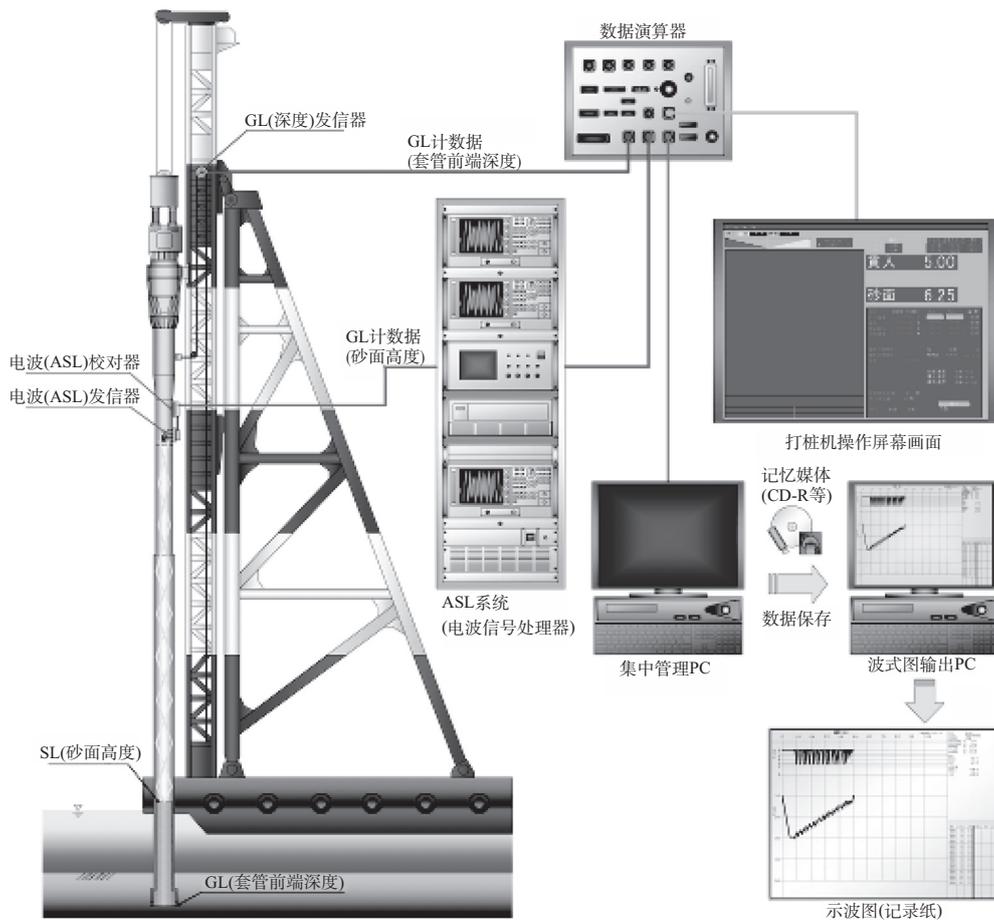


图4 打桩管理系统

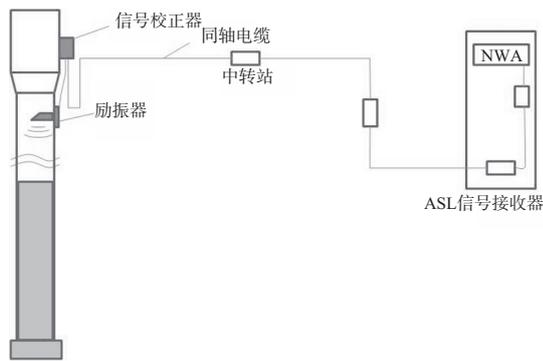


图5 ASL系统流程

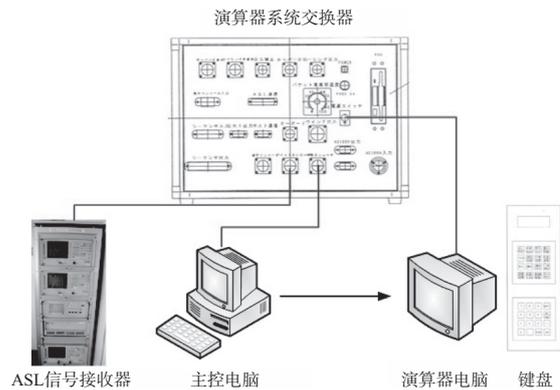


图6 打桩软件系统流程

1.2.4 主控电脑及演算器工作原理

挤密砂桩船为自动化打桩船，打桩系统是将需要在SCP运算装置上进行处理的数据，利用主控电脑进行计算，并对计算结果进行处理的系统。打桩操作前，在 主控电脑设定基本参数，并由主控电脑发送给3台演算器电脑，随后进行打桩操作，系统流程见图6。

1.2.5 J1, J2工作原理

J1, J2气阀安装在B型套管上，两者间距2 m，是挤密砂桩船套管内控制下砂量的关键设备。被振动锤振密的砂粒之间存在很大的作用力，如果不对管内的砂柱施加侧向作用力，就会下砂不畅，形成拱塞。J1启动，下落的砂刚好是成桩1 m所需要的砂量；J2启动，下落的砂刚好补

充成桩1 m使用的砂量。通过控制J1, J2气阀开启的时间, 合理控制砂量, 避免下砂不畅或浪费, J1, J2布置见图7。

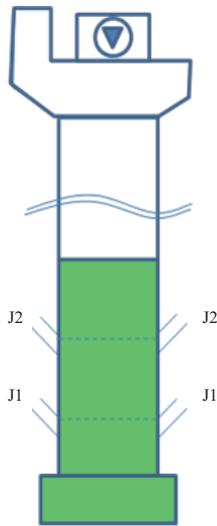


图7 J1, J2位置

2 技术难点分析

2.1 地质条件分析

复合地基的置换率根据地质勘查得到的地质资料进行设计计算。据日本地基处理规范, 满足标贯击数 $N > 15$ 的地基能满足一般建筑物的承载力要求; 对于不同承载力要求的复合地基, 通过改变置换率来满足设计要求; 对于回淤严重的地质采取先铺砂+碎石层的方式, 保证地基沉降的速率及碎石层横向排水的作用。

软地基处理: 软基中打设SCP时, 为保证成桩质量, 每次回打比计算值多10~20 cm; 软基侧向土压力较弱, 套管内压力控制不好会造成砂柱扩径过大, 砂量损失, 可采取控制J1, J2开启时间, 同时将等待送砂的过程设定在打回完成前20~30 cm, 保证砂柱密实度。

较硬地基处理: 硬地基打设SCP时注意出现硬夹层问题。施工过程中出现套管在硬夹层中较长时间难以振沉的情况时, 可以采取套管空管入泥, 同时将管内压力减为负压, 大量的水进入套管, 入泥后通过水的重力加大对夹层的冲击; 随后套管内加压, 向上提套管, 反复进行几次操作后即可冲破硬夹层。此过程对振动锤的破坏也是最大的, 这种情况一般出现在中粗砂夹层中。

桩头处理模式是影响复合地基能否顺利沉降的重要因素。日本工程中发现, 不同挤密砂桩船打设的SCP桩在经过1 a的沉降观测, 桩头处理正确的复合地基沉降了50 cm, 而未处理到位的复合地基沉降了20 cm, 造成此差距的原因是桩顶下3 m内的桩头处理不同。正确的桩头处理: 采取非隆起桩头处理, 打设终了不能立即提管结束, 而是在该位置进行自检并不断地提管、下砂、挤压, 达到套管自沉小于30 cm满足要求。

2.2 设计计算

2.2.1 土压力计算

土压力计算有两种方式: 朗肯土压力和库伦土压力, 根据日本AOMI公司试验得出朗肯土压力计算与SCP桩贯入、提升试验得出的结果较为吻合, 这里采用朗肯土压力公式计算。

$$\text{套管内压力 } P_A = (P_a + P_p) / 2 \quad (1)$$

$$\text{主动土压力 } P_a = (\rho_w g Z_w + \rho_s g Z) - 2C_v \quad (2)$$

$$\text{被动土压力 } P_p = (\rho_w g Z_w + \rho_s g Z) + 2C_v \quad (3)$$

式中: Z_w 为海水深度; ρ_w 为海水密度; Z 为土层厚度; C_v 竖向固结力。

2.2.2 置换率计算

置换率是将原地基设为1的砂桩的体积比例, 砂土或陆上黏土的置换率在0.3以内, 海底黏土的置换率范围大多在0.3~0.8。砂桩按照正方形、三角形、平行四边形布置, 见图8。

1) 正方形、平行四边形布置:

$$a_s = A_s / A = A_s / x^2 \quad (4)$$

或 $a_s = A_s / (x_1 x_2) \quad (5)$

2) 正三角形布置:

$$a_s = A_s / A = (\sqrt{3} / 2) (A_s / x^2) \quad (6)$$

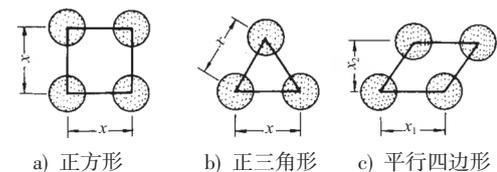


图8 挤密砂桩置换率分布

2.2.3 地基强度计算

地基强度计算公式

$$q_u = az + b \quad (7)$$

式中: q_u 为软弱地基快剪强度 (Pa); z 为地基土

的深度 (m, 原泥面起算)。

将公式输入已编程好的Excel表格中进行其它参数的计算, 主要涉及的参数有套管内压力设定值、J1/J2设定值、竖向固结力、J1/J2喷射时间、套管先端部压力等。

2.2.4 贯入时间理论计算

SCP造桩时, 套管下沉受到以下几个力的影响: 套管设备重力、浮力、套管侧摩阻力、套管端阻力等。振动锤启动后, 还受到上部振动锤产生的激振力的作用, 见图9。

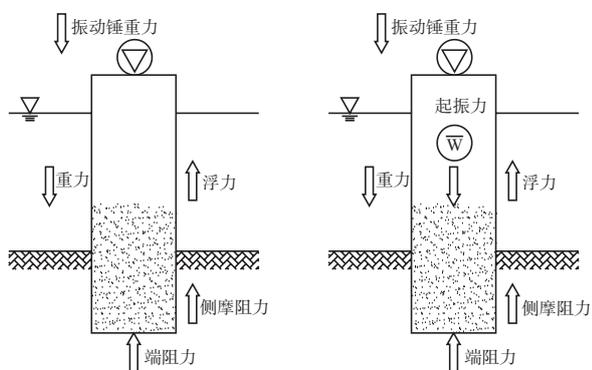


图9 套管下沉中作用力

套管下沉过程贯入时间的公式:

$$v = P/F \tag{8}$$

$$t = L/v \tag{9}$$

式中: v 为套管下沉的速度 (m/min); P 为套管下沉累计总功率 (kW); F 为套管下沉受到的力 (kN); L 为套管下沉的距离 (m)。

2.2.5 砂桩GL, SL高度计算

SCP施工的关键是确定每根砂桩的成桩砂量, 即套管底端的深度和套管内砂面的高度。监测套管底端深度的装置称为深度计 (GL计); 监测砂面高度的装置称为砂面计 (SL计), 监测到的数据自动进行记录并显示。

挤密砂桩施工采用KS-REACT循环往复式制桩, 每个循环制造1 m砂桩, 套管的提升高度和下沉高度计算如下 (图10)。

底端套管外径 $\phi 1\ 016\ \text{mm}$, 上部套管内径 $\phi 748.8\ \text{mm}$, 砂桩直径 $\phi 1\ 600\ \text{mm}$ 。

1) 直径 $\phi 1\ 600\ \text{mm}$, 高1 m砂桩的体积: $V = 1.6^2 \times \pi / 4 = 2.011\ \text{m}^3$ 。

2) 提管高度: $H = V/A' = 2.48\ \text{m}$, A' 为底端

套管的外径横断面积, $A' = 0.811\ \text{m}^2$ 。

3) 打回高度: $H' = H - 1.0\ \text{m} = 1.48\ \text{m}$ 。

4) 提管时, 套管内排出砂量长度: $S_L = V/A = 4.56\ \text{m}$, A 为上部套管的内径横断面积 (m^2), $A = (0.749\ \text{m}^2) \times \pi / 4 = 0.441\ \text{m}^2$ 。

5) 实际用砂量 $V_{\text{实}} (\text{m}^3)$: $V_{\text{实}} = \alpha V$, α 为体积变化率。

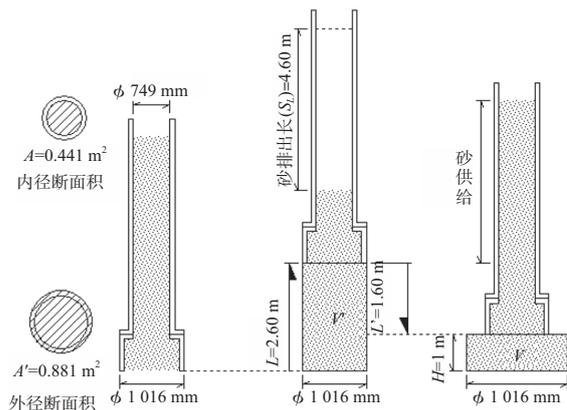


图10 挤密砂桩砂量排出示意图

体积变化率是指在振动锤开启的作用下, 砂量进入套管前与管内振密后的体积变化比。据日本多年的实测经验, 体积变化率在1.3 ~ 1.5, 主要取决于砂料材质, 港珠澳大桥岛隧工程中SCP的体积变化率取1.4左右。

2.2.6 J1, J2开启时间计算

J1, J2的开启时间由设计程序计算得出, 在实际打桩过程中, 根据不同地质情况进行调整。一般采取套管打回等待加砂时开启J1, J2, 或者打回的中间位置开启J1, J2; 引拔套管时注意观察演算器的砂残量变化, 砂面高度变化显著时依次关闭J1, J2, 保证砂量顺利下落。如果J1, J2开启时间过长, 平衡会被打破, J1, J2的高压气体由于空间的压缩急剧增大, 通过砂粒空隙向上运动, 气流顺管壁上升到砂顶部, 吹起砂粒, 造成ASL系统信息混乱, 需要重新施打该过程砂桩, 如图11所示。

2.3 空气压力控制

气压控制套管内的砂能否正常下落。经计算分析, 施工过程需满足套管内压力与管节、砂自重之和应大于套管外界的压力和, 图12为几个重要的压力控制过程。

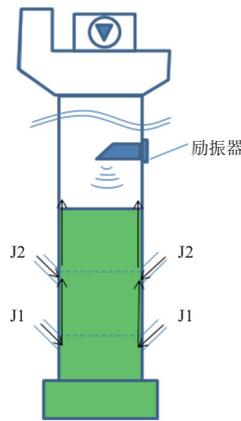


图11 ASL系统不稳定示意图

1) 二次排泥。

为了减小套管贯终后二次排泥的难度, 防止套管底部混有泥, 保证桩底的成桩质量, 首先

在贯入中等深度的位置进行一次排泥, 开启J1, J2, 保证下砂速度。

2) 先端处理。

套管贯终后, 需进行先端处理。将套管提起, 开启J1和J2, 确认管内砂面高度发生变化, 随即贯入到底高程。造桩过程中引拔套管下砂不畅时, 可以在引拔高度上补偿或重新开始这个循环的造桩过程。

3) 二次减压。

造桩过程中, 随着土层厚度的降低, 土压力逐渐减小, 套管内J1, J2的压力也应相应减小。正确的方法: 距离桩顶高度约10 m时进行一次减压, 距离桩顶高度约5 m时进行二次减压, 保持管内砂量正常下落, 具体减压高度根据实际情况适当调整。

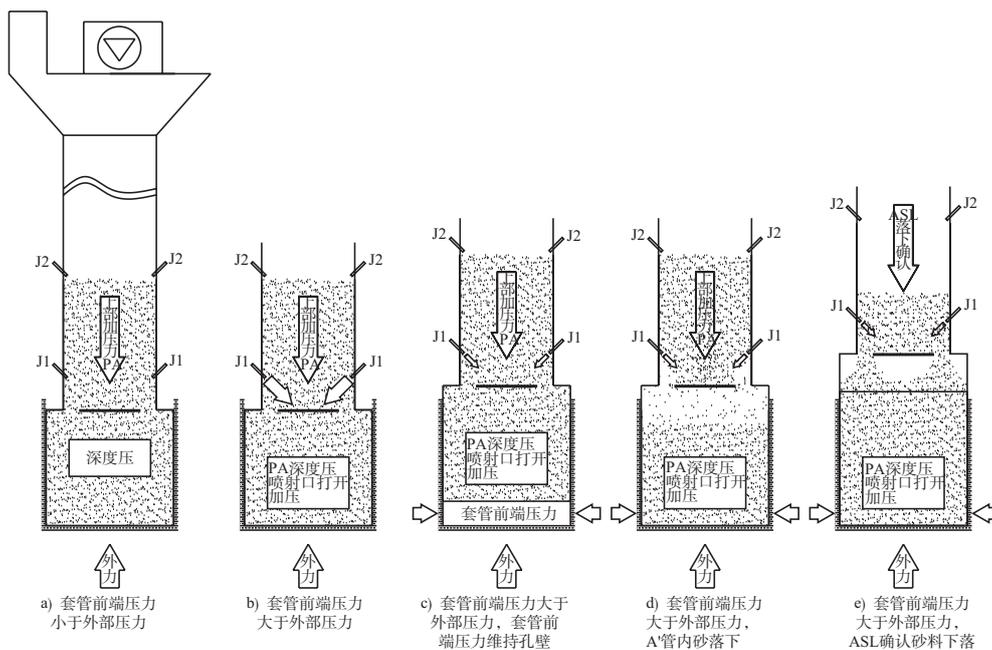


图12 SCP桩套管受力

2.4 ASL系统控制

ASL系统在控制成桩质量方面起到了决定性作用, 需要做到以下几点:

- 1) 保持ASL整个装置的无尘化或防尘化;
- 2) 新的工程开始前需要进行ASL信号处理器的基本参数校正;
- 3) 打桩开始前确认ASL系统是否正常;
- 4) 演算器中ASL曲线出现不稳定时会有以下可疑故障: J1和J2开启时间过长, 气流顺管壁吹到砂顶部造成信号失真; 信号校正器、同轴电

缆、励振器三者之一出现故障; 励振器连接的天线逆止阀出现故障。

2.5 GL系统控制

GL系统是准确控制套管底端高度的重要设备, 工程施工前需要确认主卷的补偿倍率。由于主卷钢丝绳在受力过程中出现拉伸问题, 实际长度与演算器记录值之间存在误差, 假如每造1 m桩误差为2 cm, 那么一根20 m的桩可能与实际相差0.5 m左右。每天施工前将主卷倍率通过小键盘输入演算器, 然后进行GL系统的调零处理, 以水面

为零点进行取值，水下为正，水上为负；打设过程中GL系统数值根据水深、潮位的变化进行自动调整。主卷倍率调整步骤见图13。

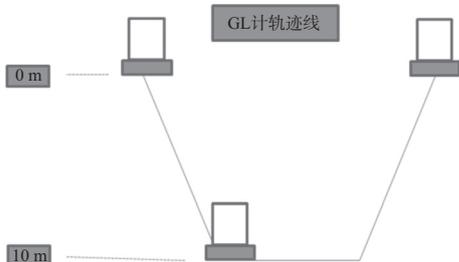


图13 主卷倍率的测定方法

3 结语

1) 挤密砂桩船几个重要的设备包含GL控制系统、ASL砂面控制系统、空气动力控制系统等。GL控制系统管理套管打设的高度，ASL砂面控制系统管理套管内砂面高度及下砂量，空气动力控制系统管理套管内压力及J1、J2喷气时间及强度。

2) 施工前根据不同的地质条件进行SCP的初步设计，包含套管内压力大小、贯入深度、J1和J2开启时间、地基置换率、砂桩GL和SL计算高度等。

3) 根据初步设计的计算结果进行主控电脑的参数调整，ASL信号处理器的信息校正，GPS控制

系统的参数输入，主卷钢丝绳、副卷钢丝绳倍率的测试，砂的体积变化率测算等。

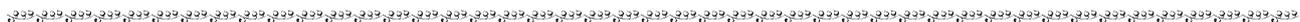
4) 以上校正工作完成后，进行正常的SCP施工。施工过程中经常注意砂桩船主要设备的维护保养工作，如桩架套管内的上下挡板、挡板轴、压力传感器、J1和J2气阀清洗等。

5) 据日本地基改良经验：SCP打设完成后立即进行地基检测，地基承载力强度较原地基有明显增加；由于原土层被破坏，1个月后发现改良的地基强度低于原地基强度，3个月后复合地基的强度大于原地基20%以上，达到预期目标。

参考文献：

- [1] 曾国熙, 卢肇钧, 蒋国澄, 等. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.
- [2] A Asaoko. 彭华, 译. 用挤密砂桩加固深水软黏土[J]. 地基与基础, 1994(2): 66-70.
- [3] 汪飞. 洋山深水港四期工程砂桩施工技术[J]. 中国港湾建设, 2010(2): 55-57.
- [4] 张春生, 赵利平. 水上挤密砂桩质量控制[J]. 水运工程, 2006(1): 88-91.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第172页)

所以，将U形预应力工艺应用在整体式闸室结构中是可行的，可以较好地解决当采用普通钢筋混凝土设计整体式闸室结构时存在的截面尺寸大、配筋量大及裂缝开展宽度不易满足的问题。

4 结论

本文建立整体式U形预应力闸室结构三维有限元模型，对闸室结构在检修期、施工期、使用期等工况在荷载作用下闸室结构的应力、变形情况进行了分析研究。通过计算分析发现，在预应力作用下闸室的位移非常小，闸室结构处于较低的拉应力水平，有些区域甚至处于压应力状态，闸室结构钢筋用量大幅减少，裂缝开展宽度易满足规范要求。因此，U形预应力筋在整体式闸室结构中的运用是可行的，采用该工艺可以使整体式闸室结构的经济性增强，从而减少工程投资。

参考文献：

- [1] 杜拱辰. 国外预应力混凝土的发展和应[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982: 44-62.
- [2] 李国平. 预应力混凝土结构设计原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000: 3-6.
- [3] 王有志, 薛云迈. 预应力混凝土结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [4] Saeed Moaveni. 有限元分析—ANSYS理论与应用[M]. 欧阳宇, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [5] 赵晓春. 无粘结预应力混凝土结构计算的接触分析方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2007: 26-48.
- [6] 杨铮. 预应力混凝土结构的三维有限元分析与研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 20-32.
- [7] JTJ 307—2001 船闸水工建筑物设计规范[S].
- [8] 河海大学, 大连理工大学, 西安理工大学, 清华大学. 水工钢筋混凝土结构学[M]. 3版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.

(本文编辑 武亚庆)