

文章编号:1006-2106(2011)11-0040-06

新吹填淤泥地基加固试验研究^{*}

朱群峰^{**} 汪璋淳 高长胜 张 凌 杨守华

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 南京 210024)

摘要:研究目的:新吹填淤泥地基具有含水量大、压缩性高、强度几乎为零等特点。这种比较特殊的地基处理是目前沿海地区围海造陆等工程中比较棘手的问题,为了探究这种比较特殊地基处理行之有效的方法,为沿海地区工程建设提供技术支撑,现场采用小间距排水板、土工格栅等土工合成材料结合堆载预压加固地基,设计要求地基加固后的吹填淤泥十字板强度大于 10 kPa。

研究结论:试验结果表明:地基加固结束时的实测沉降量达 1 800 mm,地基平均固结度达 95%;实测水平位移很小,在整个加载过程中,地基一直处于安全状态,说明地基处理方案是合理可行的。现场实测地基加固后的吹填淤泥十字板强度达 12 kPa,吹填淤泥的土性指标得到了不同程度的改善,地基加固达到了预期的加固效果;土工格栅等土工合成材料的应用,解决了新吹填淤泥上难以直接堆载的技术难题,在类似工程中可进一步推广应用;新吹填淤泥地基单位厚度的压缩量超过 200 mm/m,说明吹填淤泥地基的压缩变形属于大变形问题,理论计算时应考虑这一因素。

关键词:新吹填淤泥;监测;沉降;固结度;强度

中图分类号:TU 443 **文献标识码:**A

Experimental Study on Improvement of Foundations with New Hydraulic Fill Muck

ZHU Qun - feng , WANG Zhang - chun , GAO Chang - sheng , ZHANG Ling , YANG Shou - hua

(Geotechnical Engineering Department of Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing , Jiangsu 210024 , China)

Abstract: Research purposes: The foundation with new hydraulic fill muck is characterized by high water content , high compressibility and weak strength of about zero. At present , the treatment of such special kind of foundation is a troublesome problem in land reclamation projects in coastal areas. In order to explore the effective methods for the foundation treatment and to provide technical support for the project construction in the coastal areas , the geosynthetic materials such as drainage plates with small intervals and geogrids are employed to improve the in - situ foundation combined with surcharge pre - loading. The vane strength of the new hydraulic fill muck should be larger than 10 kPa after reinforcing the foundation according to the design requirements.

Research conclusions: The test results indicate that the observed settlement of the foundation is up to 1800 mm , and the mean consolidation degree of the foundation is 95% . The observed horizontal displacement is very small. During the whole loading process , the foundation has been in the state of safety. It is shown that the treatment scheme for the foundation is rational and feasible. The observed vane strength of the new hydraulic fill muck of the foundation reaches 12 kPa after improvement. The soil indices of the new hydraulic fill muck are improved to some extent. The anticipative

^{*} 收稿日期:2011-05-20

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK2009052);南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目(Y300901)

^{**} 作者简介:朱群峰,1966 年出生,男,高级工程师。

efficiency is achieved for the foundation improvement. The utilization of geosynthetic materials such as geogrids successfully solves the technical problem of difficulty of direct surcharge on the new hydraulic fill muck ,and it can be further popularized in similar projects. The per - unit - thickness compression amount of the foundation with new hydraulic fill muck is larger than 200 mm/m , indicating that the compressive deformation of the new hydraulic fill muck belongs to large deformation problems and it should be considered in theoretical calculations.

Key words: new hydraulic fill muck; monitoring; settlement; consolidation degree; strength

随着现代化建设的不断提速,我国的土地资源日趋紧张,沿海各地都兴起了围海造地的高潮。从渤海湾到深圳沿海,围海造地面积已超过数百平方公里^[1]。如何快速、高效处理围海造地形成的新吹填淤泥地基,为加快现代化建设赢得宝贵的时间,是岩土工程界面临的新课题。

对于新吹填淤泥地基,目前比较普遍采用的加固方法是真空预压法。该方法加固软基的最大优点就是加载速度快,在加固过程中不会出现地基失稳问题,但在加固新吹填淤泥地基时也存在加固效果不尽如人意的情况^[1]。传统的堆载预压法恰恰相反,既要合理控制加载速率,又要密切关注被加固地基的稳定问题,该方法一般用来处理有一定初始强度的天然软土地基。对于初始强度几乎为零的新吹填淤泥地基,如何运用堆载预压法来进行加固,还需要通过工程实践来探讨总结。本文根据工程现场的具体情况,采用小间距排水板和土工格栅等土工合成材料来处理新吹填淤泥地基,达到了预期的加固效果^[2]。现场选择有代表性的断面布置原观仪器,进行现场监测,取得了较为丰富的

监测资料,主要包括孔隙水压力、水平位移、地表沉降、分层沉降等等。

1 工程概况和地质条件

1.1 工程概况

某新吹填淤泥地基处理工程,占地面积二十多万平方米。吹填泥面原平均标高约 4.0 m,受邻近地块施工作业影响,吹填泥面壅高至 +5.5 ~ +7.0 m,平均标高接近 +6.5 m;由于场地周边排水不畅,在吹填泥面上有大量积水,吹填泥呈流态。

1.2 地质条件

根据勘察报告,场地地基自上而下依次为新吹填淤泥、原地基淤泥、粉质黏土、残积土、全风化岩、强风化岩和中风化岩等,其中主要不良土层为新吹填淤泥层,分布于整个场地表面,其厚度变化较大(5 ~ 7 m)。吹填淤泥层具有含水量大、压缩性高、透水性差、强度极低、有机质含量高等特性,其主要物理力学性指标如表 1 所示。

表 1 淤泥层的主要物理力学性指标

地层名称	$\Omega/\%$	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	e	$C_v/(\times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s})$	C_{cu}/kPa	$\varphi_{cu}/(^{\circ})$
新吹填淤泥层	120	14.0	3.3	2.0	4.5	11.0
天然淤泥层	67.8	15.8	1.7	3.0	6.5	13.1

2 地基加固程序

由于本工程的特殊性——新吹填淤泥处于流态,施工人员、机械都无法直接进场作业,给地基加固工作带来了极大的困难。根据现场的具体情况,及工程的进度要求,经充分论证后,铺设砂垫层之前尽快排干吹填泥表面积水,结合场区道路布置情况,采用抛砂挤淤的方法对场地进行分区。针对吹填淤泥处于流态这一具体情况,先铺一层土工布和两层土工格栅,然后人工铺设 1.5 m 中粗砂垫层,这样就形成了一个相对硬壳层,基本能满足小型机械进场施工。上述工作完成后,再打设塑料排水板。排水板间距 0.7 m,正方形布置,打穿淤泥层。排水板打设完毕,整平砂垫层,再铺一层土

工格栅,然后分级进行堆载。

3 原型监测

根据地质情况选择代表性断面进行原型监测,利用原型监测结果对施工过程进行监控,提出合理的加载速率,防止地基失稳,确保施工过程中地基的安全稳定;根据现场监测资料推求地基固结度、最终沉降量、工后沉降量、强度增长量等参数,为工程验收、验证设计提供依据;完整可靠的现场监测资料对工程建设起着极其重要的指导作用。

3.1 原型监测项目

结合工程现场情况,选择有代表性的试验区进行现场试验研究。试验区布置的监测(检测)项目及具

体数量如表 2 所示。

表 2 原型监测项目及数量表

地表沉降 /点	孔隙 水压力 /点	土体深层 沉降/孔	地质钻探 /孔	十字板 试验 /孔	土体深层 水平位移 /孔
1	4	1	4	8	1

3.2 监测仪器布置

监测仪器布置剖面示意图如图 1 所示。

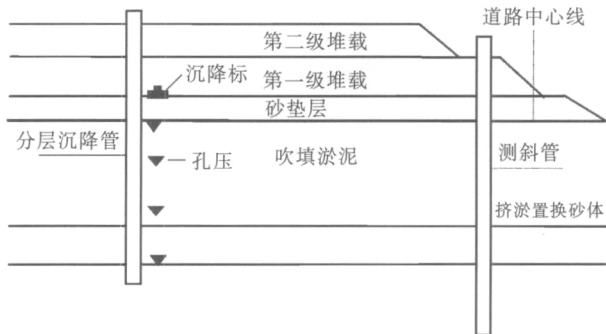


图 1 监测仪器布置剖面示意图

4 监测结果分析

根据上述监测项目和仪器布置进行原型监测,取得了大量的监测资料,主要包括地表沉降、孔隙水压力、分层沉降、水平位移等,下面对监测资料进行简要分析。

4.1 沉降

沉降包括地表沉降和分层沉降。

4.1.1 地表沉降

实测地表沉降结果如表 3 所示,过程线如图 2 所示。

从图 2、表 3 中可以看出实测沉降量达 179 cm,该沉降量不包括前期施工(铺砂垫层、打设塑料排水板

表 3 地表沉降观测结果

历时/d	地表沉降/mm	最大沉降速率/(mm/d)
346	1 792	15

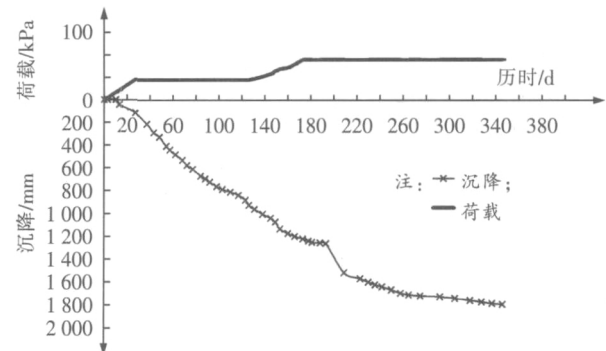


图 2 荷载-时间-沉降过程线

等)所发生的沉降,前期实测施工沉降为 45 cm。实测最大沉降速率达 15 mm/d,沉降过程线随加载过程而变化,表现出良好的规律性。

4.1.2 分层沉降

分层沉降由预埋在分层沉降管外不同深度的沉降环测得,不同深度处测得的沉降值即为此深度以下土体发生的沉降。接近原地面高程的沉降环(顶环)的实测沉降即相当于地表沉降,埋设最深的沉降环(底环)的实测沉降即相当于下卧层的沉降,顶环和底环之间的沉降即为主要压缩层(吹填淤泥)所发生的沉降。顶环、底环的实测沉降量如表 4 所示,实测分层沉降过程线如图 3 所示。

表 4 分层沉降观测结果

历时/d	底环沉降/mm	顶环沉降/mm	淤泥厚度/m	淤泥单位厚度压缩量/(mm/m)
303	96	1 520	7	203

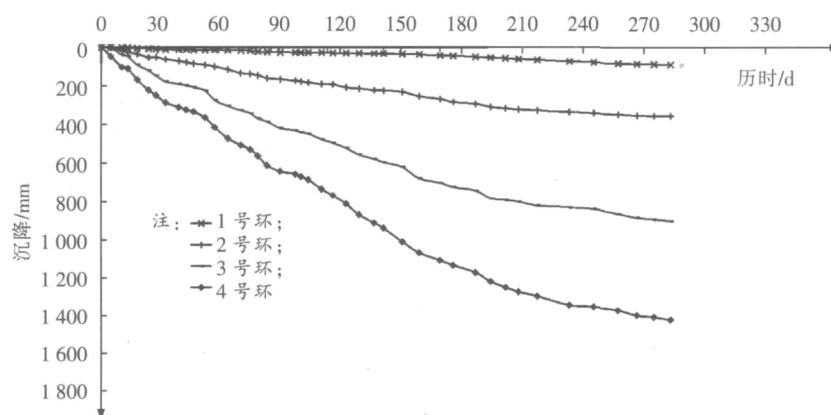


图 3 分层沉降过程线

从图 3、表 4 中可以看出,下卧层的压缩量小于 10 cm,占整个压缩量的比例较小,说明地基土体的沉降主要来自处于流态的吹填淤泥,吹填淤泥的单位厚度压缩量达到 203 mm/m,这个数值还不包括前期施工沉降 450 mm,如果考虑前期施工沉降和由于沉降管损坏漏测的沉降,则淤泥层单位厚度的压缩量将大于 306 mm/m。比较地表沉降和分层沉降顶环的沉降量,可以看出分层沉降顶环的沉降量明显小于对应的地表沉降量,而理论上二者应该基本一致,究其原因,主要是由于现场意外因素致使分层沉降管损坏,使部分沉降量漏测。

4.1.3 最终沉降、工后沉降及固结度

根据实测的沉降过程线,利用双曲线法^[3]即可推求最终沉降量,利用实测沉降和最终沉降还可推求固结度。推求结果如表 5 和图 4 所示。

表 5 沉降、固结度结果汇总表

实测总沉降 /cm	推求最终沉降 /cm	工后沉降 /cm	推求固结度 /%
224	234	10	95

表 5 中实测总沉降包括前期施工沉降。可以看出,工后沉降小于 20 cm,在现有荷载情况下,地基平均固结度达到 95%,地基加固达到了预期的效果。

4.2 孔隙水压力

现场监测地基软土层在填筑荷载作用下的孔隙水

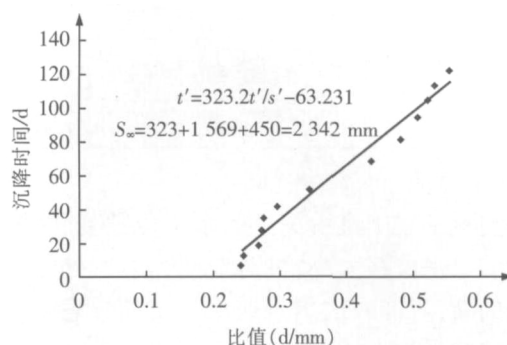


图 4 推求最终沉降量过程线示意图

压力变化情况。根据实测结果及所加荷载量的大小可直接求出孔压系数,孔压系数是判断地基是否稳定的重要指标。

通过孔隙水压力监测,可以得到孔隙水压力—时间过程线,根据过程线可以推求地基的固结系数和固结度^[4-6],并可计算出孔隙水压力系数。根据孔压系数的大小,可直接判断地基当时所处的状态,据以控制现场加荷速率,防止地基失稳,确保施工安全。

淤泥层不同深度处实测孔隙水压力过程线如图 5 所示。从图 5 可以看出,孔压在填筑期间上升,停载后逐渐消散,填筑强度大,孔压上升快,呈现出良好的规律性。

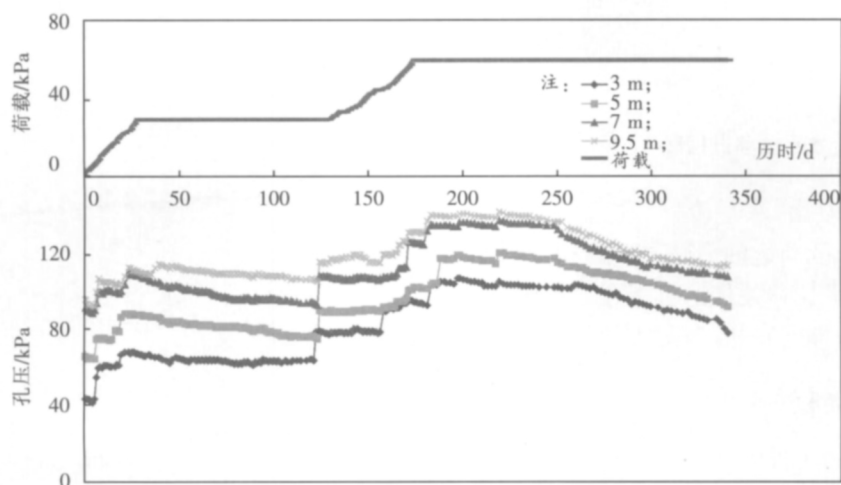


图 5 荷载—时间—实测孔隙水压力过程线

如果不考虑孔压的消散,可以计算出累计超静孔压值,其与实际施加荷载的比值即为孔隙水压力系数。典型的孔隙水压力系数计算结果如表 6 所示,从表 6 可以看出,根据实测资料计算的孔隙水压力系数超过监测控制临界值 0.6^[7],说明现场加载速率过快,虽然

没有造成地基的整体失稳,但对地基造成局部塑性破坏是不可避免的,这对地基的强度增长极其不利。在今后类似工程中一定要引以为戒,合理规划,循序渐进,用实测结果指导施工,尽可能让地基加固达到最佳效果。

表 6 孔隙水压力系数计算结果

不考虑消散孔压 累计值/kPa	荷 载/kPa	孔压系数
38	60	0.63

4.3 水平位移

监测地基软土层沿深度的水平位移变化情况,根据实测的水平位移大小,可对地基当时所处的状态作出初步判断,对堆载的填筑速率提出指导意见。实测水平位移结果如表 7 所示,水平位移沿深度变化过程线如图 6 所示。

表 7 水平位移观测结果

最大位移 /mm	最大位移发生深度 /m	最大位移速率 /(mm/d)
56	1	1.5

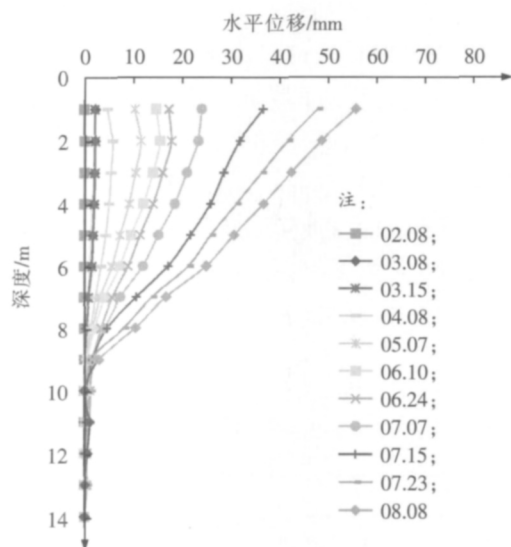


图 6 水平位移过程线

从图 6、表 7 可以看出,水平位移和位移速率都不大,这主要是由于加固区周边的道路由抛砂挤淤形成,砂土路基对淤泥的水平位移发展起到了很好的限制作用,说明选择的地基处理方案是可行的。

5 地基加固效果检验

加固效果检验采用土性对比试验及现场十字板试验进行,对比分析地基加固前后的试验结果,即可对地基加固效果作出评判。

5.1 取原状土样对比试验

地基加固前后分别在现场相邻位置取土进行室内试验,比较加固前后的土性指标变化情况,对地基加固效果作出评价^[7-8]。地基加固前后土性指标试验结果如表 8 所示。

地基加固前后的土性指标试验结果表明,地基加

固后淤泥的土性指标得到了不同程度的改善,地基加固效果显著。

表 8 地基加固前后淤泥土性指标对比

项目	含水率 /%	密度 /(kN/m^3)	孔隙比	备注
加固前	120	14	3.3	各指标为试验 结果平均值, 负号表示减少
加固后	69	15.7	1.882	
增长量	-51	1.7	-1.418	

5.2 现场十字板剪切试验

现场十字板强度试验可得到不同阶段十字板强度沿深度的变化情况,试验所得到的强度指标是检验地基加固效果的重要指标^[9],也为后续填筑及竣工验收提供重要依据。

试验区在不同阶段分别进行了 5 次现场十字板剪切试验,试验结果如表 9 所示,十字板强度沿深度分布曲线如图 7 所示。

表 9 现场十字板强度试验结果汇总(单位:kPa)

不同阶段现场十字板试验结果					强度增量	
加固前	加固中 1	加固中 2	加固中 3	加固后	实测	计算
τ_0	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	$\tau_4 - \tau_0$	S_u
1.2	2.1	4.5	8.9	12	11	12.3

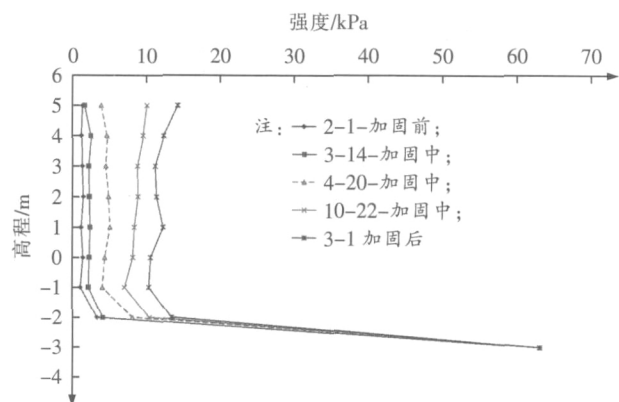


图 7 加固前后十字板强度对比曲线

按实际荷载量及竣工验收时地基的平均固结度来计算平均强度增长量^[10],理论计算结果如表 9 所示。从表 9 可以看出,实测强度增长量小于理论计算值。分析原因,现场加荷速率过快对软土强度增长的负面影响应该是导致十字板强度实测值小于理论计算值的主要原因,在今后类似工程中应引起高度重视。

从图 7、表 9 可以看出,地基加固后十字板强度有较大幅度增长,说明地基加固效果明显,达到了预期的加固效果。

地基强度增长是一个循序渐进的过程,它不但与上部荷载、排水条件、预压时间等因素有关,还与现场

加载速率之间存在着一种微妙的关系,适宜的加载速率对地基的强度增长十分有利,过快的加载速率反而会有损地基的强度增长。

5.3 强度增长机理

堆载预压前后,土体中的有效应力摩尔圆变化如图 8 所示。堆载前,对于自重应力作用下的正常固结土,土体处于 K_0 固结状态^[11],即:

$$\sigma'_{30} = K_0 \sigma'_{10} \quad (1)$$

此时土体应力摩尔圆的直径为:

$$\sigma'_{10} - \sigma'_{30} = (1 - K_0) \sigma'_{10} \quad (2)$$

堆载后,土体中总应力增加,产生超静孔隙水压力,随着超静孔隙水压力的逐渐消散,土体中有效应力逐渐增加^[12]。土体固结完成时,大主应力增量为 $\Delta\sigma'_1 = p$ (p 为堆载在此处产生的附加应力),小主应力增量为 $\Delta\sigma'_3$,此时应力摩尔圆的直径为:

$$\begin{aligned} \sigma'_{1堆} - \sigma'_{3堆} &= (\sigma'_{10} + \Delta\sigma'_1) - (\sigma'_{30} + \Delta\sigma'_3) \\ &= (1 - K_0) \sigma'_{10} + p - \Delta\sigma'_3 \end{aligned} \quad (3)$$

堆载前土体的抗剪强度为 τ_0 。堆载后,水平向的应力增量并不满足 K_0 条件,即 $\Delta\sigma'_3 \neq K_0 \Delta\sigma'_1$ 。随着深度的增加,水平向应力增量衰减程度逐渐大于竖向应力增量的衰减速度,即 $\Delta\sigma'_3 < K_0 \Delta\sigma'_1$ 。因此应力摩尔圆向右移动,直径增大,同时土体的抗剪强度增加为 τ_1 。堆载卸除后,土体的应力状态恢复到初始的 K_0 状态,而强度则按超固结强度包线退荷,此时土体的抗剪强度为 τ'_0 ,所以经过堆载预压后,土体增加的抗剪强度 $\Delta\tau$ 为:

$$\Delta\tau = \tau'_0 - \tau_0 \quad (4)$$

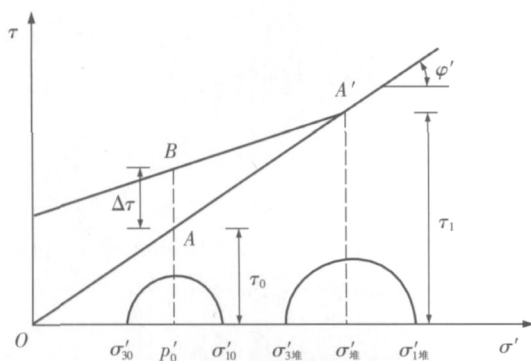


图 8 堆载预压前后土体有效应力摩尔圆变化示意图

6 结论

(1) 地基加固后的效果检测结果表明,吹填淤泥的平均十字板强度达 12 kPa,强度增长量为 11 kPa;吹填淤泥的土性指标得到了不同程度的改善;地基加固达到了预期的加固效果。

(2) 地基加固过程中孔隙水压力系数超过控制临

界值 0.6,说明现场加载速率过快,虽然没有造成地基的整体失稳,但对地基的强度增长不利。

(3) 采用小间距排水板结合土工格栅等土工合成材料处理吹填淤泥地基,解决了吹填淤泥上难以直接堆载的难题,大大提高了堆载预压法的处理效率。

(4) 吹填淤泥单位厚度的压缩量超过 20 cm/m,说明吹填淤泥的沉降问题属于大变形问题,尽快建立简单实用的吹填淤泥变形计算模型,是解决吹填淤泥地基处理的当务之急。

(5) 对于堆载料充足、工期比较富裕的工程,传统的堆载预压法仍是加固吹填淤泥地基的经济实用方法。

参考文献:

- [1] 赵维炳,刘国楠,高长胜. 工程排水与加固技术理论与实践[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.
Zhao Weibing, Liu Guonan, Gao Changsheng. Theory and Practice of Drainage and Reinforcement Engineering [C]//Proceedings of the 7th Symposium on Drainage and Reinforcement Engineering. Beijing: China Water Power Press, 2008.
- [2] 朱群峰. 超软淤泥地基处理试验研究[D]. 南京:南京工业大学,2009.
Zhu Qunfeng. Experimental tests on Foundation Treatment in Super-soft muck [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2009.
- [3] 孙更生,郑大同. 软土地基与地下工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1984.
Sun Gensheng, Zheng Datong. Foundation And Underground Engineering In Soft Clay [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1984.
- [4] 姜远文,吉随旺. 由实测孔隙水压力数据推算软粘土的固结系数和固结度[J]. 路基工程,2001(2):26-28.
Jiang Yuanwen, Ji Suiwang. Derive Coefficient and Degree of Consolidation of Soft Clay from Pore Water Pressure Data of Actual Measurement [J]. Subgrade Engineering, 2001(2):26-28.
- [5] 侯健飞. 利用真空预压实测孔隙水压力推算土体固结度的计算方法探讨[J]. 中国港湾建设,2005(1):13-15.
Hou Jianfei. Calculation of Consolidation Degree of Soil Mass with Pore Water Pressure Measured in Vacuum Preloading Works [J]. China Harbour Engineering, 2005(1):13-15.
- [6] 王煜霞,许波涛. 软土固结系数确定方法的研究及应用[J]. 岩土工程技术,2010(5):217-220.

(下转第 81 页)

T3 - T21 节段重量在 123.5 ~ 213.3 t, 塔柱节段重量在最底节和最顶节最重, 通过经济性比选和钢塔施工的特点研制一台国内外最大吨位塔吊 D5200 吊装。塔吊参数为: 起重力矩为 5 200 t · m, 最大吊重为 t21 节段, 重 213.3 t, 考虑吊具和 100 m 以上钢丝绳的重量, 最大吊重 235 t, 最大吊重时吊幅 22 m, 最大起升高度为 200 m。塔吊的节段安装位置布置如图 6 所示。

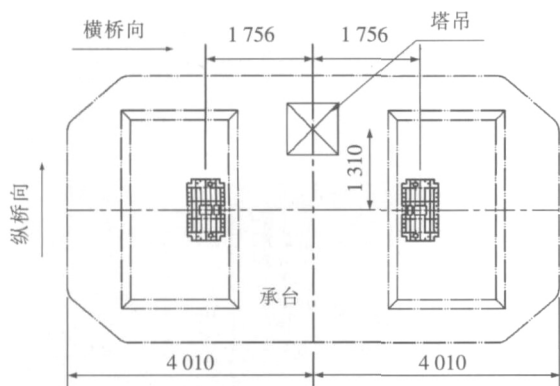


图 6 D5200 塔吊布置图(单位: cm)

5 结论

马鞍山中塔钢塔的施工通过对工艺试验的研究, 解决了大面积钢混凝土叠合段的密贴性和密实性问题, 吊装工艺的合理选择使得钢塔的吊装施工顺利实现“节

段工厂化预制、现场拼装”的施工理念, 缩短了施工工期。同时能满足中塔受力较大的钢塔的吊装施工技术为桥梁建设提供了更多的选择空间, 也为今后钢塔结构的设计、安装提供了借鉴的经验。

参考文献:

- [1] JTG/TF 50—2011, 公路桥涵施工技术规范[S].
JTG/TF 50—2011, Technical Specification for Construction of Highway Bridges and Culverts[S].
- [2] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S].
GB 50017—2003, Code for Design of Steel Structures[S].
- [3] 戴书学. 泰州长江公路大桥钢塔吊装施工[J]. 中国港湾建设 2011(4): 51—54.
Dai Shuxue. Hoisting Construction for Steel Pillar of Taizhou Yangtze River Highway Bridge[J]. China Harbour Engineering 2011(4): 51—54.
- [4] 刘琼, 黄彩萍, 等. 斜拉桥箱梁钢 - 混凝土结合段受力的实验研究[J]. 铁道工程学报 2009(9): 46—49.
Liu Qiong, Huang Caiping, etc. Experimental Research on the Load Carrying Performance of Steel - concrete Junction in Box Girder of Cable - stayed Bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(9): 46—49.
- [5] GB/T 714—2008, 桥梁用结构钢[S].
GB/T 714—2008, Structural Steel for Bridge[S].

(上接第 45 页)

- Wang Yuxia, Xu Botao. Application and Research for Determining Coefficient of Consolidation of Soft Clay [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2010(5): 217—220.
- [7] 赵维炳, 刘家豪, 高长胜. 排水固结加固软基技术指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
Zhao Weibing, Liu Jiahao, Gao Changsheng. Technical Guidelines for Soft foundation Improved by Drainage Consolidation [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [8] 王祥, 李小明, 周顺华. 真空联合堆载预压处理高速铁路软土地基效果检验 [J]. 铁道工程学报, 2008(12): 45—49.
Wang Xiang, Li Xiaohe, Zhou Shunhua. Effect of Treating Soft Soil Foundation of High-speed Railway with Vacuum - mound Preloading Method [J]. Journal of Railway Engineering Society 2008(12): 45—49.
- [9] 南京水利科学研究院土工所. 土工试验技术手册 [K].

北京: 人民交通出版社, 2003.

- Getechnical Engineering Department of Nanjing Hydraulic Research Institute. Guidelines for Geotechnical Testing Technology [K]. Beijing: China Communications Press 2003.
- [10] 魏汝龙. 软粘土的强度与变形 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
Wei Rulong. Strength and Deformation of Soft clay [M]. Beijing: China Communications Press, 1987.
- [11] 钱家欢. 土力学 [M]. 南京: 河海大学出版社, 1988.
Qian Jiahuan. Soil Mechanics [M]. Nanjing: Hohai University Press, 1988.
- [12] 林孔镏. 预压地基的强度增长与稳定计算问题 [J]. 岩土工程学报, 1998(1): 93—96.
Lin Kongzi. Strength Increase and Stability Analysis of Preloading Foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998(1): 93—96.