

新吹填淤泥浅表层加固中“土桩” 形成机理及数值分析*

陈平山, 董志良, 张功新

(中交四航工程研究院有限公司, 广州 510230)

摘要: 新近吹填的淤泥经浅层加固后出现凹凸不平的“土桩”现象, 结合现场试验, 分析了孔压监测和静力触探试验结果, 同时根据大变形固结理论, 对“土桩”现象进行了数值模拟, 并与常规真空预压法进行了比较, 试验及数值计算结果表明: “土桩”是排水板周围土体细颗粒在渗透力作用下向排水板聚集的结果, 其形状呈倒锥形, 横截面近似椭圆状, 深度不大于 1.6 m, 在此深度以下, 土体强度较为均匀; 在同一水平面上, 距离排水板越近, 土体强度越高, 桩间土存在“软弱带”; 考虑土体参数随固结过程的变化可以反映“土桩”的形成。最后提出了避免或减少“土桩”的建议, 所得结论可供类似工程参考。

关键词: 吹填淤泥; 浅层加固; 土桩; 机理; 数值分析

中图分类号: TU 443

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)02-0088-07

Mechanism and numerical simulation of the “soil piles” in the fresh hydraulic mud fill treated by surface-layer improvement technique

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

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

Abstract: The surface settlements are uneven after improving the surface-layer of the newly hydraulic mud fill and the named “soil piles” are usually produced. Based on the monitored data of pore water pressure and CPT in the soft foundation treatment engineering, this paper analyzes the formation mechanism of soil piles. It is shown that the soil piles are essentially caused by the uneven settlement between the soil around the plastic drainage plates, and the figure of pile seems to be an inverted cone and the cross section is in shape of ellipse approximately. The depth of piles is less than 1.6 m, and the strength of the soil beneath 1.6 m is more even. In the horizontal direction, the strength of soil decreases as the distance to the plastic drainage plates increases. The research indicates that the numerical results agreed well with the facts observed in the field when considering the variations of the soil parameters with the consolidation process. The advices of avoiding or decreasing soil piles are put forward and the conclusions would be helpful for similar engineerings.

Keywords: hydraulic silt fills; surface-layer improvement; soil piles; mechanism; numerical simulation

近年来, 大规模的围海造陆工程不断地在沿海地区兴起, 以满足工业用地的需求。为加快建设进度, 建设方往往要求吹填完毕后即对吹填淤泥进行加固, 但新近吹填的淤泥通常是流泥甚至

是浮泥^[1], 表层几乎为“泥浆水”。相比经过自然晾晒、颗粒分选并沉积后所形成的软弱地基, 新近吹填淤泥的物理力学性质很差, 具有细颗粒性、高塑性、高含水率等特性, 属超软土^[1-2]。

收稿日期: 2011-06-22

***基金项目:** 科技部科研院所技术开发研究专项资金 (2008EG124222, 2009EG124217, 2010EG124227)

作者简介: 陈平山 (1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事软基处理研究工作。

对于这种大面积超软弱地基,目前较多的是采用“浅表层超软弱土快速加固技术”或“浅层处理联合真空预压法”进行处理^[3-4]。然而,在天津、连云港及温州等地区的工程实践中却发现,采用该技术处理新近吹填的淤泥后,加固场地均会出现所谓的“土桩”,即近似以排水板为中心轴、自上而下直径不等的不规则柱状体,反映在地表就是“桩头”直径可达50~60 cm,凸起部分可高达10~20 cm,如图1所示。相比常规真空预压法加固天然软基,后者并无明显的“土桩”现象。另外,检测结果表明,“桩体”范围内土体的强度比周围土体强度高1.5~2.0倍,这意味着加固后土体的强度呈现明显的不均匀性。文献[4-5]介绍了采用浅层加固技术处理新近吹填淤泥的工艺及加固效果,其中没有提及“土桩”现象。文献[6]提到了“土桩”现象,但并没对此作较深入的分析。在真空预压法加固新吹填淤泥的国内外文献中,尚未见探讨“土桩”形成机理及对此进行数值模拟的相关报道。

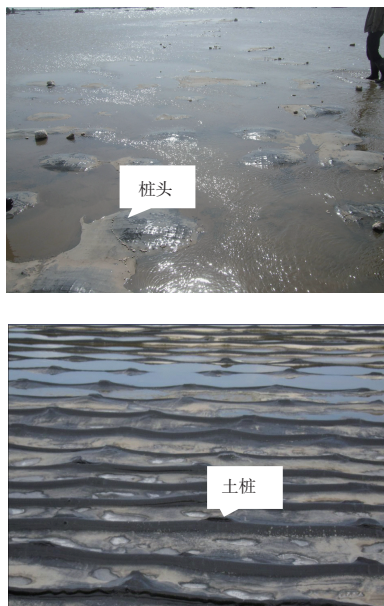


图1 现场“土桩”实物

本文依托实际工程,根据现场试验结果探讨了“土桩”的形成机理,并按大变形固结理论对其进行数值模拟,最后提出了避免或减少出现“土桩”现象的建议,可为今后类似工程的设计与施工提供参考。

1 工程概况

2009年6月,浙江省温州丁山垦区民营科技产业基地采用浅层加固技术对新近吹填的淤泥进行处理。新吹填淤泥含水率高达130%以上,黏粒含量达49%,吹填厚度平均约为3.0 m,其下为原状淤泥,具有中-高压缩性,处于可塑-流塑状。

浅层加固技术的施工工艺包括:1)铺设一层200 g/m²的编织布;2)陆上将排水板头外裹无纺布土工布与软式透水滤管绑扎连接,同时用塑料胶带密封排水板底端;3)将预剪好的排水板与滤管连接,并布设水平排水滤管,滤管间距80 cm;4)人工插设塑料排水板,插深为3.0 m;5)铺设一层200 g/m²的无纺布;6)铺设两层厚0.12~0.16 mm的密封膜;7)按1 000 m²/台布设7.5 kW射流泵;8)抽真空恒载时间90 d后卸载(真空度不小于80 kPa)。具体施工流程可参见文献[5]。在进行大面积施工之前,先实施试验工程,试验区面积约为14×10⁴ m²,共分为5个小区,其中,试验A区面积约2×10⁴ m²,试验B区约3×10⁴ m²。

2 孔压监测及检测方案

为了解“土桩”及周围土体的孔压变化情况,在试验B区布置了3组孔压计,具体方案见表1及图2、图3。

为了解加固后“土桩”及周围土体强度的变化情况,按图4进行静力触探试验。

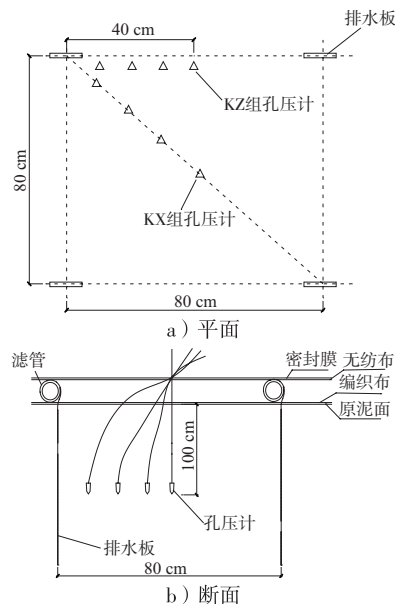


图2 KZ和KX组孔压计布置

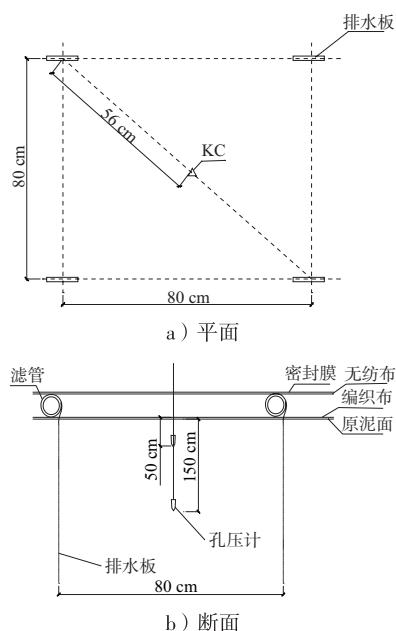


图3 KC孔压计布置

表1 孔压监测方案

孔压计组号	布置形式	孔压计编号	距离排水板/cm	埋设深度/m
KZ	沿正方形边 长方向布置	KZ1	10	1.0
		KZ2	20	1.0
		KZ3	30	1.0
		KZ4	40	1.0
KX	沿正方形对 角线布置	KX1	14	1.0
		KX2	28	1.0
		KX3	42	1.0
		KX4	56	1.0
KC	正方形中心	KC1	56	0.5
		KC2	56	1.5

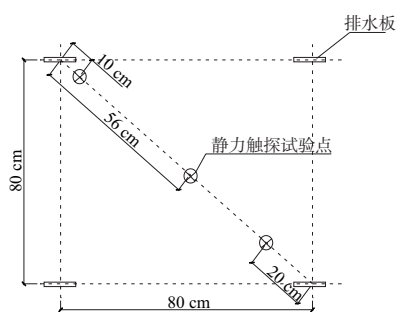


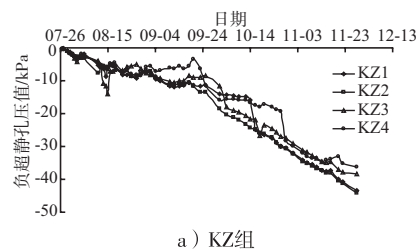
图4 静力触探试验点

3 监测及检测结果

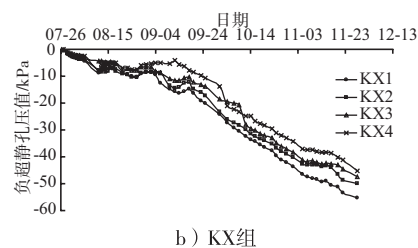
3.1 孔压变化情况

图5分别是KZ组、KX组负超静孔隙水压力随时间变化曲线,实际恒载时间约为110 d。从图6中可发现,尽管测点所在的深度相同,但由于与排水板的水平距离不同,其负超静孔压值也不一样。KZ组与KX组均表现出相同的规律:随着与排

水板水平距离的增大,相同时间内的负超静孔压变小。另外,KZ组与KX组相比,前者的负超静孔压较小,其原因是由于SPB-B型排水板横截面为狭长的矩形,通水面为正面,而非侧面,板内的真空度主要通过正面向周围扩散出去,而KZ组正对着排水板侧面布置(图2 a)),受排水板截面形状影响,其负超静孔压值相对较小,在“桩头”部位的直观反映就是朝排水板正面方向的直径较大,朝侧面方向直径较小,因此,“土桩”的横截面近似椭圆状,长、短轴方向对应的分别是排水板正面与侧面,这点与现场实际情况相吻合。



a) KZ组



b) KX组

图5 负超静孔压随时间变化曲线

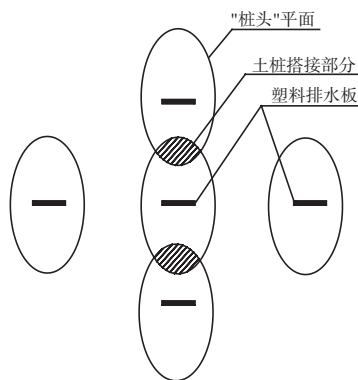


图6 “土桩”平面示意

3.2 静力触探试验结果

在试验B区共做了3组测点的静探试验,各测点位置如图4所示,各组测点的比贯入阻力值随深度变化曲线如图7所示。从中可看出,距离排水板10 cm处比贯入阻力值 P_s 最高,离排水板越远, P_s 值越小,这与前述的孔压消散规律相同。在0~1.0 m深度范围内,距离排水板10 cm处

的 P_s 值约是距离56 cm处的2.0~2.5倍;1.0 m深度以下,距离排水板20 cm处的 P_s 值约与56 cm处的 P_s 值相当,说明在1.0 m以下范围内,土桩的半径小于20 cm;当深度达到1.6 m以下时,各测点的 P_s 值几乎相同,说明在“土桩”所抵及的深度不超过1.6 m,如图8所示,距离排水板56 cm即4根排水板中心一定深度范围内的土体为相邻两根“土桩”的搭接部位,其强度稍高,但搭接部位以下,则是土体的“软弱带”。位于此范围内的土体受真空度影响小,从另一个侧面也说明浅表层加固中塑料排水板的有效影响范围较有限。

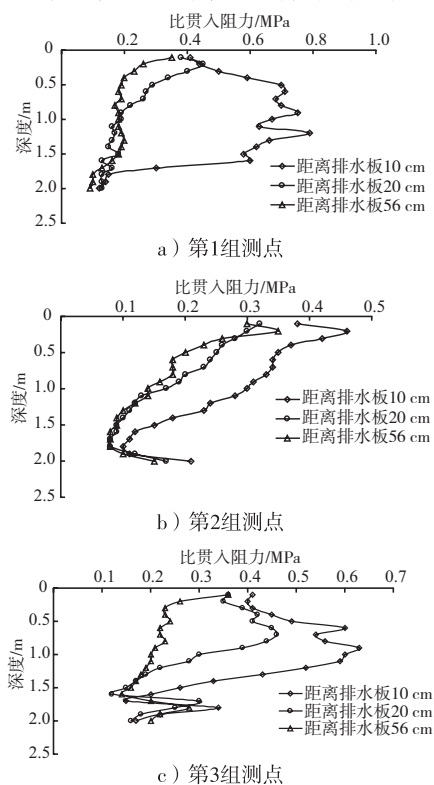


图7 各组测点静力触探试验结果曲线

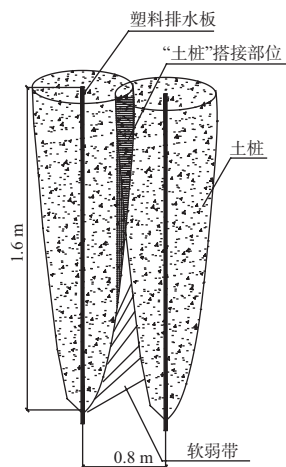


图8 “土桩”立面

4 “土桩”的形成机理

新近吹填淤泥的物理力学性质差,以工程为例,施工时淤泥表层含水率达130%以上,黏粒含量高达49%,而天津、连云港等地区的黏粒含量则更高。在富含自由水的吹填淤泥中,黏粒不会因自重而下沉,而是能够长期悬浮在水中,且在海水中,盐类离子浓度大,减少了颗粒的排斥力,土粒常呈面与边接触,从而形成絮凝结构^[7]。经落淤分选后,细颗粒呈悬浮状,粗颗粒则在自重作用下沉淀于底部,形成“上细下粗”的层状地基。

笔者认为,浅层加固技术中由于没有铺设砂垫层,地表除排水板插设位置外,其余处均不透水,真空度对土体作用的效果甚微,因为淤泥表层为“泥浆水”,排水板传递的真空度几乎全部由土中水承担,而水是不可压缩的,因此这段时间的沉降量主要是由于抽吸大量自由水后,地下水位下降而使上层土体的浮容重变为有效容重后引起的土体压缩量。

在抽吸自由水的过程中,由于渗透力的作用,土中细颗粒朝排水板方向聚集,部分极细颗粒将通过滤膜进入芯板并随水流被排出地表,现场表现为水箱内的循环水中含有细颗粒土体,但大部分细颗粒仍是粘附于排水板周围,并随着排水板内真空度不断向周围土体扩散,越来越多的土颗粒聚集在排水板周围,从而形成所谓的“土桩”。由于井阻的原因,浅层土体的真空度高于深层土体,随着深度增加,排水板周围土体内的压力差逐渐减小,同时,较深处的土体往往由粗颗粒组成,需较大的驱动力才能使其移动,而驱使颗粒移动的渗透力随深度逐渐减弱,距离排水板较远处的土体再难以移动,因此,“土桩”的直径自上而下是逐渐变小的,深层土体的强度反而较为均匀,这与监测及检测数据相吻合。土颗粒移动并重组,逐渐形成具有“土骨架”的结构体,并具备相当的压缩性,此时在地表形成的

“压力差”即真空度才开始发挥作用，在土体有效应力增加的情况下，土体孔隙的自由水被吸走和挤出，土体产生压缩，强度得以提高。“土桩”有效范围内土体的细颗粒不断聚集在排水板周围，导致有效范围外的土颗粒含量减少，土层孔隙比增大，压缩性较“土桩”附近的土体高，由此形成一个“软弱带”（图9），该带内土体沉降量较大，现场表现为“桩头”之间的弧形凹槽，“桩头”就是土层沉降差异的直观反映。

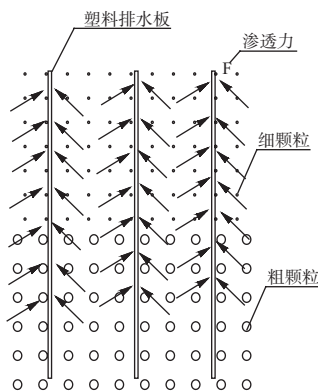


图9 新近吹填淤泥颗粒运动示意

表2是在距离排水板10 cm处取深度为0.2~0.5 m范围的土体，作加固前后的粒径分析对比结果。从中可看出，加固前黏粒含量为49%，加固后黏粒含量明显增加至58.14%，其中，胶粒含量高达26.3%，说明加固过程中细颗粒排水板方向聚集，细颗粒不断填充土体孔隙，致使排水板周围土体的密实度远高于较远处土体，这点从静力触探试验结果中也得到了体现。

表2 加固前后粒径分析对比结果

粒径/mm	加固前/%	加固后/%
2~0.5	0.0	0.00
0.5~0.25	0.1	0.06
0.25~0.075	0.6	0.40
0.075~0.05	5.8	3.20
0.05~0.01	25.3	21.80
0.01~0.005	19.2	16.40
<0.005	49.0	58.140
<0.002	16.8	26.30

5 数值模拟

关于常规真空预压法加固天然软基的数值模拟，国内外学者对此进行过大量的研究工作^[9-13]。新吹填淤泥为超软黏土，具有大变形非线性的固结特性，应考虑土体主要力学参数随固结过程的变化^[14]。由于固结方程的高度非线性，其精确解难以求得，往往是利用数值手段得到其近似解。本文仅为模拟“土桩”的形成，而数值计算结果的准确性并非研究重点，因此可简单地假定材料服从弹性本构，但变形模量、渗透系数分别随时间呈线性增加和递减，基于Biot固结理论，利用ADINA软件的重启动功能，在不同的计算时段内调整计算参数，以考虑土体参数的变化过程，计算步骤如下：

1) 假定初始时刻 t_0 的变形模量为 E_{s0} ，渗透系数为 k_0 ，计算 $t_0 + \Delta t_1$ 时间内的固结状态C1。

2) 在下一个时间段 Δt_2 内，按线性变化计算变形模量 E_{s1} 、渗透系数 k_1 ，并以C1作为初始状态，计算固结状态C2。

3) 在 $\Delta t_3, \Delta t_4, \dots, \Delta t_n$ 时间段内，重复步骤2)，直至计算时间达到设定的固结时间为止。

当 Δt_i 足够小时，假定计算参数按线性变化是成立的，但计算量将大大增加。

计算模型如图10所示，模型高度为4.0 m，排水板插设深度为3.0 m，间距0.8 m，边界条件为：

- 1) 地表孔压为-80 kPa，位移自由且为透水面；
- 2) 模型两侧及底部分别是水平、竖向位移约束，均为不透水面。

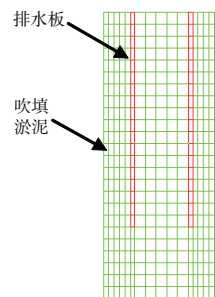


图10 二维模型网格剖分图

图11分别是数值模拟常规真空预压法加固、浅层加固的土体沉降云图。从中可看出,由于新近吹填淤泥加固前后土体参数变化较大,排水板位置处的沉降量明显小于周围土体,因而表现为“桩头”;而常规真空预压法的数值模拟不考虑土体参数的变化,计算结果中并不存在明显的“土桩”,反而在排水板位置处的沉降量稍大于周围土体,因而该处地表稍微下凹,原因是在对常规真空预压法进行数值模拟时,对于土体参数相同的区域,根据Biot固结理论,应力最大处,其变形最大,而排水板位置处真空度最大,位于该处的土体沉降值理应较大,因而表现为地表下凹。而浅表层加固的数值模拟中,因为淤泥处于流动态,严格讲不可能符合Darcy定律,因而不适宜采用Biot固结理论,该问题将在今后的研究中作进一步探讨,此处假定仍符合Biot固结理论,由于排水板与土体的变形模量(表现为压缩性)相差较大,淤泥细颗粒在渗透力的作用下朝排水板方向聚集,致使其周围土体的压缩性越来越小,表现为其刚度矩阵增大,而较远处土体因细颗粒不断流失,逐渐形成孔隙比较大的土骨架,其压缩性反而较大,因此在真空压力作用下形成了凹凸不平的“土桩”现象。

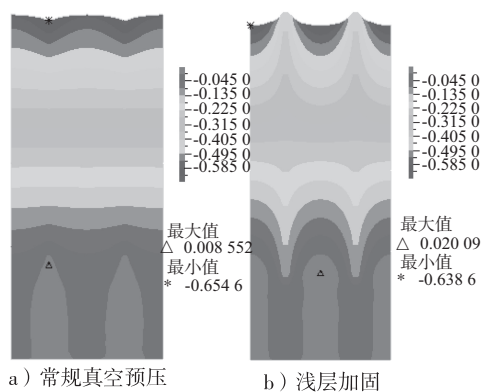


图11 土体沉降云图

6 结语

1) 在相同深度处,随着与排水板水平距离的增加,土体的负超静孔压值减小,排水板有效影响范围小于80 cm。

2) 依托工程中所形成的“土桩”呈倒锥形,横截面呈椭圆状,深度不大于1.6 m,在此深度以下,土体强度较为均匀;同一水平面上距离排水板越近,土体强度越高,桩间土较软弱;“土桩”是排水板周围土体细颗粒在渗透力作用下向排水板聚集的结果。

3) 适当缩小排水板间距,充分利用排水板的有效影响范围,增大“土桩”之间相互搭接区域,使处于“软弱区”的桩间土范围减小,但这将增加工程成本。

4) 调整排水板滤膜等效孔径,如在浅层土体中的排水板可用较大孔径的滤膜,使大量的细颗粒可以穿过滤膜进入排水板,进而被排至地表,使浅层土体的粒径分布趋于均匀;而深层土体的排水板仍采用等效孔径为 $O_{98} < 0.075$ mm的滤膜,此方案有望避免或减少“土桩”现象,但其可行性需在今后的现场试验中进行论证。

参考文献:

- [1] 曹永华,李卫,刘天韵.浅层快速超软基处理技术[C]//天津:港口岩土工程技术交通行业重点实验室.全国超软土地基排水固结与加固技术研讨会论文集,2010:49-56.
- [2] 叶国良,郭述军,朱耀庭.超软土的工程性质[C]//天津:港口岩土工程技术交通行业重点实验室.全国超软土地基排水固结与加固技术研讨会论文集,2010:12-25.
- [3] 张功新,陈平山.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,2009:1-9.
- [4] 张中捷,董志凌.浅层处理与真空预压联合处理法在超软地基加固工程中的应用[C]//天津:港口岩土工程技术交通行业重点实验室.全国超软土地基排水固结与加固技术研讨会论文集,2010:95-101.
- [5] 丁明武,林涌潮,陈平山,等.浅层加固技术在温州丁山垦区吹填及软基处理工程中的应用[C]//天津:港口岩土工程技术交通行业重点实验室.全国超软土地基排水固结与加固技术研讨会论文集,2010:102-105.
- [6] 董志良,陈平山,林涌潮,等.塑料盲沟在浅层加固技术中的应用研究[C]//天津:港口岩土工程技术交通行业

- 重点实验室. 全国超软土地基排水固结与加固技术研讨会论文集, 2010: 74-78.
- [7] 龚晓南. 高等土力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.
- [8] 刘汉龙, 彭劼, 陈永辉, 等. 真空-堆载预压处理高速公路软基的有限元计算[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1 029-1 033.
- [9] 岑仰润. 真空预压加固地基的试验及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [10] Hird C C, Pyrahic, Russell D. Finite element modeling of vertical drains beneath embankments on soft ground[J]. Geotechnique, 1992, 42(3): 499-511.
- [11] Bergrado D T, Long P V. Numerical analysis of embankment on subsiding ground improved by vertical drains[C]//New Delhi: Proc. Int'l. Conf. Soil Mech. And Found. Eng'g., 1994: 1 361-1 366.
- [12] Yun-Tae Kim, Seung-Rae Lee. An equivalent model and back-analysis technique for modeling in situ consolidation behavior of drainage-installed soft deposits[J]. Computers and Geotechnics, 1997, 20: 125-142.
- [13] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- (本文编辑 郭雪珍)

《水运工程》优秀论文评选

评委点评:

吹填淤泥造陆技术是目前国内外比较常用的围海造陆技术, 已在我国沿海得到了广泛应用。吹填淤泥表层快速加固技术是吹淤造陆技术中的关键难点之一, 也是当前研究的热点, 值得深入研究。该文针对新近吹填的淤泥经浅层加固后出现的“土桩”现象, 采用孔隙水压力监测、静力触探等原位测试方法, 辅以数值模拟分析, 揭示了“土桩”的形成机理, 并提出采取“缩小排水板间距”和“调整排水板滤膜等效孔径”等措施来避免或减少出现“土桩”现象的建议, 以提高淤泥浅层加固效果, 为今后类似工程的设计与施工提供了良好借鉴。建议进一步对不同类型、不同深度的吹填淤泥工程做测试分析工作, 使本研究结论具有更好的普遍性和实操性。

刘齐辉

2014年12月

评委简历:



刘齐辉, 硕士, 教授级高工, 中国铁建港航局集团有限公司副总经理、总工程师。主持工程项目曾获鲁班奖1项, 国家优质工程银质奖2项。曾获国家科技进步奖1项、省部级科技进步奖5项, 在国内外核心期刊发表论文20余篇, 参与编写《港口与航道工程管理与实务》等著作。现被聘为国家工程建设质量奖审定委员会专家、交通运输部水运工程专家、交通运输部水运工程建设技术与标准专家库专家。