

· 施 工 ·



软土地基围堤外侧桩基础施工时机*

杨 何, 汤明高, 李东明

(成都理工大学, 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 在软土地基上修筑港口工程时, 外侧栈桥桩基础的施工时机和工程安全直接受到围堤填筑加载过程的制约和影响。依托某一级渔港工程, 通过围堤加载过程中软土地基侧向变形分析及深层水平位移跟踪监测数据的多元回归拟合, 分析预测了地基水平位移随围堤加载过程的变化规律和发展趋势, 在此基础上通过 ANSYS 三维建模分析围堤加载过程中灌注桩的内力及变形, 最终确定了外侧灌注桩基础的施工时机。研究表明: 该软土地基在加载过程中的侧向变形符合指数函数变化规律; 围堤加载而导致软土地基产生的侧向变形对外侧灌注桩位移的影响作用比对其自身内力影响要大; 当地基土体上部产生最大水平位移 150 mm 时, 灌注桩混凝土的屈服应力安全度仍较大, 据此可提出外侧栈桥灌注桩基础的施工时机, 该方法可供类似工程设计与施工借鉴。

关键词: 港口工程; 灌注桩; 水平位移; 回归分析; 施工时机

中图分类号: TV 92

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0166-07

Construction time of pile foundation outside embankment on soft soil

YANG He, TANG Ming-gao, LI Dong-ming

(State Key Laboratory of Geohazards Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: During construction of the port engineering on the soft soil foundation, the loading of embankment has enormous influence on the construction time and structural safety of the lateral pile foundation of the approach bridge. Based on a fishing port engineering, we study the lateral displacement of soft soil foundation of loading embankment and the regression of follow-up tracing data of deep horizontal, and forecast the change law and trend of development of later horizontal displacement of the foundation with the loading of embankment. According the ANSYS three-dimensional modeling, we analyze the internal force and deformation of bored piles with the loading of the embankment, and determine the construction time of lateral bored piles foundation. The research result shows that the lateral deformation of soft soil is consistent with the deformation law of index function in the process of load; under the action of lateral deformation of the soft soil foundation lateral deformation, the effect on the lateral displacement of the bored piles is bigger than its internal force influence; when the soft soil occurs 150 mm maximum horizontal displacement in the upper, the safety degree of yield stress of the surface concrete of bored pile is still larger, and accordingly we may know the construction time of the lateral bored piles foundation of approach bridge. This research may serve as reference for the design and construction of similar projects.

Keywords: port engineering; bored pile; horizontal deformation; regression analysis; construction time

收稿日期: 2015-11-02

*基金项目: 国家自然科学基金项目(41002111); 中国电建集团科研专题项目(AQ2013-1); 国电大渡河猴子岩电站科研专题项目(CGC-HZY201310)

作者简介: 杨何(1985—), 男, 硕士, 工程师, 从事地质灾害预测评价研究。

近年来,我国沿海港口工程建设发展迅速,但大多工期较紧。其中渔港工程具有点多、单体投资小、分项工程多的特点,一般包含码头、围堤、栈桥、防波堤、陆域回填等工程项目。需要利用软土地基海岸修建围堤,在此基础上修建栈桥和码头设施等。然而,围堤在加载过程中和加载完成后将会产生持续缓慢水平位移。如果外侧栈桥桩基施工过早,围堤水平位移对其结构会产生重大影响,可能导致栈桥桩基础产生较大变形,进而引起结构破坏。如果等待围堤变形趋于稳定后再进行栈桥桩基施工,建设工期太长,又无法满足工程建设需求。因此,合理确定栈桥桩基础的施工时间是保证码头工程施工与运营安全的关键问题之一。

目前,国内对软土地基在加载作用下的侧向变形规律研究较少,对软土侧向变形作用下邻近桩基础变形研究也不多。李国豪^[1]以建立桩土体系的弹性平衡微分方程得出解析解,对钢管桩在水平位移作用下的性状进行了分析;杨敏等^[2]基于土体变形采用耦合的弹性理论法,对土体侧向位移作用下的桩基进行分析;梁发云等^[3]采用两阶段的土体位移法,分析了受土体水平位移作用下PHC桩的受力性状。本文通过围堤施工中软基深层侧向变形及位移的回归分析,建立数学模型,预测围堤地基后期水平位移发展趋势;在此基础上建立ANSYS三维模型,采用有限元分析的方法计算分析灌注桩所受的内力及变形,确定了灌注桩的施工时机。

1 工程概况

浙江省某一级渔港建设工程主要建筑物由围堤、码头、道路堆场及综合执法办证中心等组成。该工程^[4]包括围堤1 180 m(堤防等级4级),浮码头6座,陆域回填约 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,港区道路 $1.26 \times 10^4 \text{ m}^2$,综合执法办证中心800 m^2 ,港区水、电、通信、监控等配套设施。工期18个月。围堤堤型采用斜坡式断面土石混合坝结构,地基采用塑料排水板进行排水固结处理,排水板采用正方形布置,间距1.4 m,深度20 m。堤身回填抛石混合料,即未风化块石,含泥量不大于5%,混合料粒径20~60 cm占60%~70%,级配良好。灌注桩直径1 m,深度38~42 m,桩端进入⑦层圆砾土层深度不小于2.5 m控制。渔港工程平面布置、浮码头结构断面A-A'见图1、2。

本工程主要地质情况自上而下为^[5]: ③₁淤泥:灰色,饱和,流塑,厚层状构造,含较多有机质和少量贝壳碎片,局部为淤泥质黏土;顶板高程-2.5~2.60 m;层厚10.10~22.60 m。③₂淤泥质黏土:灰色,饱和,流塑,厚层状构造,含较多有机质和少量贝壳碎片,局部为淤泥质粉质黏土,夹薄层粉土;顶板高程-22.30~-9.55 m;层厚5.20~15.60 m。③₃黏土:灰色,局部浅黄色,饱和,软塑,含少量贝壳,局部夹粉细砂层;顶板高程-28.80~-24.16 m;层厚3.90~28.10 m。

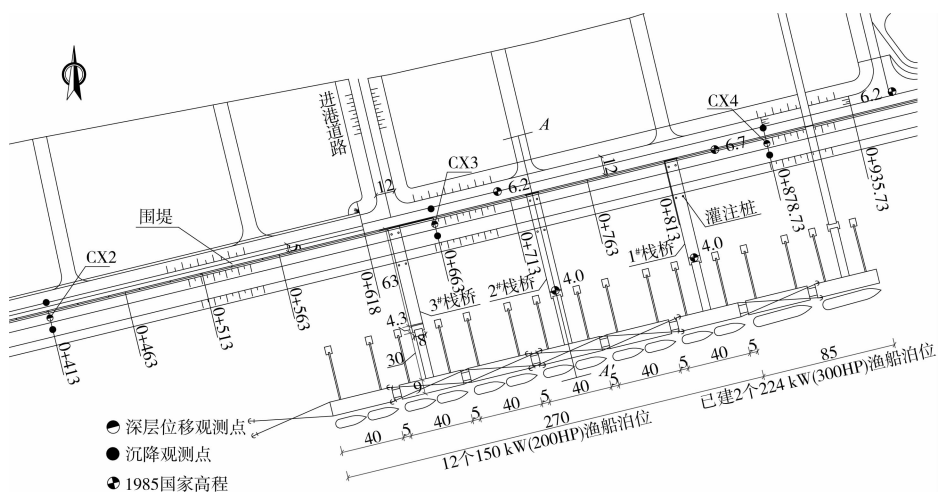


图1 渔港工程平面布置(单位:m)

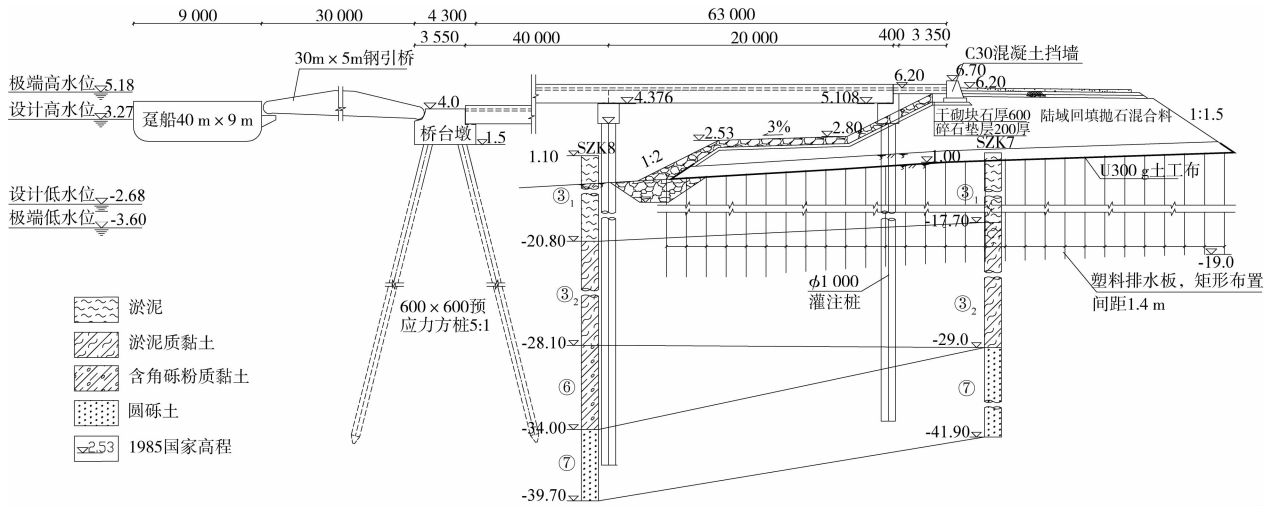


图2 浮码头结构断面 A-A' (高程: m; 尺寸: mm)

2 围堤分级加载过程中软土地基的侧向变形规律及趋势拟合

2.1 变形规律分析

为了能够准确地预测桩基后期变形量,在此以靠近新建浮码头的3个代表性监测断面为对象进行分析。由于实际施工控制不一以及断面形状的差异,每个断面加载量略有不同,3个断面处围堤分级加载的荷载条件见图3。围堤分级加载过程中进行了软基深层位移监测,监测点平面布置见图1。深层位移监测采用钻孔倾斜仪定期进行人工数据采集,观测频率为每周一次,实际观测中视加载施工情况与水平位移数据变化适当加密。软基侧向水平位移监测数据及变化曲线见图4。

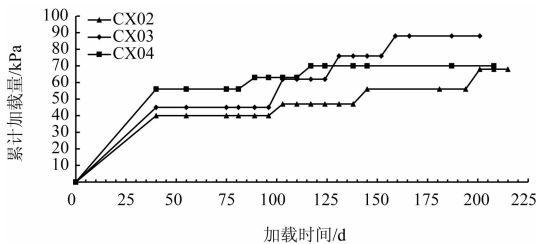


图3 3个断面处围堤分级加载的荷载-时间曲线

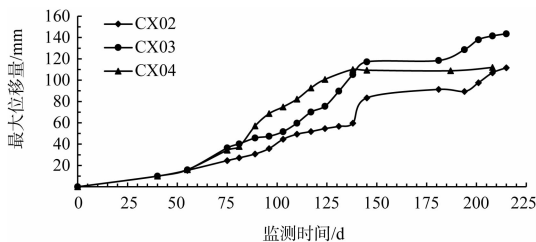


图4 实测累计最大水平位移随时间变化曲线

实测结果显示(图4):软基侧向水平位移随围堤分级荷载的增加而呈阶梯状变化,侧向水平位移与荷载具有较明显的相关性。最初加载时,水平位移量较小,位移曲线较平缓;施加二级荷载后,每级加载位移曲线起始段较陡,而后逐渐趋于平缓。分析认为:由于围堤分级加载作用,软基发生沉降固结的同时会产生侧向变形。在初期加载时,由于荷载较小,软土地基主要表现为竖向压缩,侧向水平位移较小;随着荷载的增加,软土地基在继续沉降固结时,逐步产生侧向蠕动变形,且随着荷载的增加而逐级增长。

2.2 变形趋势拟合

回归分析是根据大量试验观测数据以确定两种或两种以上变量间相互依赖的定量关系的一种统计分析方法。由于围堤深层位移是随着时间推移、累计加载量增加而逐渐增大变化的,所以这里选取时间与累计加载量为自变量,以断面深层水平位移最大值为因变量。通过回归分析,建立三者的数学回归模型,分析软土地基的变形规律,预测其后期水平位移量。回归方程由实测数据,包括时间、累计荷载、最大水平位移,经过回归分析得到。本文采用SPSS软件进行统计回归分析,并通过线性与非线性两种回归模型分析比较,最后选择符合侧向变形规律的模型进行预测。

2.2.1 多元线性回归模型

$$y_i = ax_1 + bx_2 + c \quad (1)$$

式中: a 、 b 为模型回归系数; c 为模型常数项; x_1 为距离监测基准日期的天数; x_2 为围堤累计加载量; y_i 为断面深层最大水平位移量; i 为监测断面号。

通过图3与图4中的数据,回归分析得每个断面的回归函数如下:

$$\begin{cases} y_2 = 0.45x_1 + 0.792x_2 - 39.071 \\ y_3 = 0.654x_1 + 0.901x_2 - 57.822 \\ y_4 = 0.231x_1 + 4.234x_2 - 224.368 \end{cases} \quad (2)$$

2.2.2 多元非线性回归模型

根据图4实测累计最大水平位移曲线的形态,在每级荷载下,随着时间的推移水平位移将逐渐减小至稳定的变化规律,因此以具有收敛特性的指数函数^[6]进行曲线拟合:

$$y_i = \frac{x_2}{p} a e^{-b/x_1} \quad (3)$$

式中: a 、 b 为模型回归系数; p 为需总加载量 102 kPa; x_1 为距离监测基准日期的天数; x_2 为围堤累计加载量; y_i 为断面深层最大水平位移量; i 为监测断面号。

通过图3与图4中的数据,回归分析得每个断面的回归函数如下:

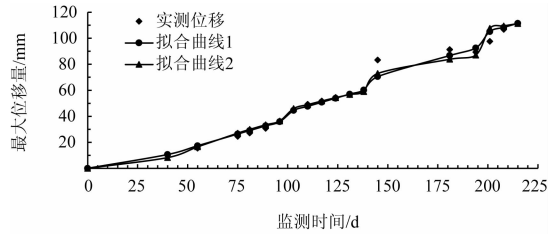
$$\begin{cases} y_2 = \frac{x_2}{102} \cdot 268.161 \cdot e^{-101.869/x_1} \\ y_3 = \frac{x_2}{102} \cdot 291.102 \cdot e^{-104.395/x_1} \\ y_4 = \frac{x_2}{102} \cdot 291.891 \cdot e^{-97.497/x_1} \end{cases} \quad (4)$$

2.3 回归结果分析

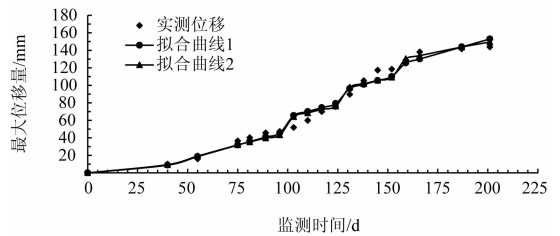
两种回归分析曲线的拟合度见表1。根据实测数据与拟合曲线分别绘制出每个断面的实测位移时间曲线与回归拟合曲线,见图5。每个断面的位移速率-时间曲线见图6。其中拟合曲线1指线性回归曲线,拟合曲线2指非线性回归曲线。

表1 回归拟合度

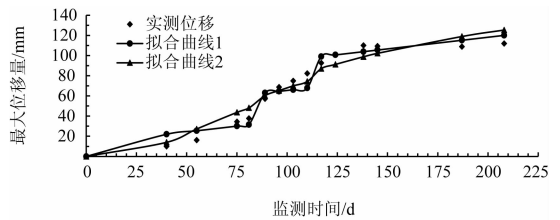
断面桩号	拟合度 R^2	
	多元线性回归模型	多元非线性回归模型
CX02 (K0 + 413)	0.984	0.982
CX03 (K0 + 663)	0.975	0.979
CX04 (K0 + 878)	0.951	0.940



a) CX02



b) CX03



c) CX04

图5 实测位移与拟合曲线

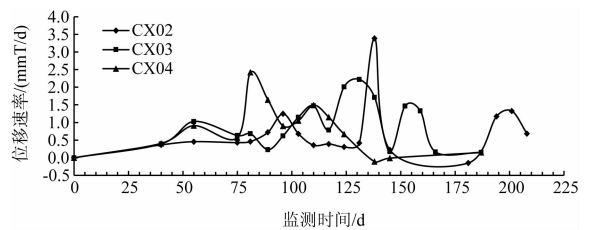


图6 位移速率-时间曲线

比较及拟合分析回归模型得出:

- 1) 多元线性回归模型与多元非线性回归模型拟合曲线的相关系数在 0.94 以上,两者拟合度皆较好。
- 2) 根据围堤分级加载过程中软基侧向水平位移变形规律及特征分析(图4),每级加载后,侧

向水平位移呈逐渐收敛特征，这与指数函数的特性更一致。多元非线性回归的指数函数模型比多元线性回归更能反映实际情况。因此选择多元非线性回归模型进行最终水平位移量预测。

3) 软土地基在每级加载后，位移速率将会快速增大，随着时间的推移，速率将会逐渐减小。位移速率有一峰值，峰值出现的时间与分级加载时间、荷载大小有关。

3 灌注桩施工时机的确定

3.1 时机确定的方法

采用上述的回归分析方法，可以求得监测点3的每一个深度的回归曲线，以此可以得到每个深度的最终水平位移量 $y_{i总}$ 。假设在某个日期灌注桩浇筑完成，根据回归曲线求得每个深度的该时期的水平位移量 y_{it} 。灌注桩施工完成至土体最终位移完成的土体水平位移量 Δy_i 为：

$$\Delta y_i = y_{i总} - y_{it} \quad (5)$$

将 Δy_i 输入 ANSYS 桩土三维模型中，进行数值分析，计算桩受的结构内力与变形，与混凝土抗拉抗压强度比较，是否满足强度要求。这样经过多次调整试算，以确定灌注桩的施工时间。

3.2 土体最终位移曲线的确定

为了减少回归分析的计算量，选取 3.5、-5.5、-10.5、-15.5、-20.5 m 处的数据进行回归分析，得出最终水平位移量，见表 2；-27 m 及其以下位移为 0。然后，以此位移量采用如下公式进行拟合^[1]：

$$y = ae^{-bx} [\sin(bx) + \cos(bx)] \quad (6)$$

即可以得到每个深度的最终水平位移量。式中： a 、 b 为回归系数； x 为深度(m)； y 为最终水平位移量(mm)；深度符号与高程表示一致。

以表 2 中数据采用 SPSS 进行数据回归，得到土体各深度最终水平位移曲线(图 7)，拟合度 0.98，函数如下：

$$y = 290.933e^{0.087x} [\sin(-0.087x) + \cos(-0.087x)] \quad (7)$$

表 2 CX03 深度回归分析结果

深度/m	最终位移量/mm	回归函数	拟合度
3.5	201.278	$y = \frac{x_2}{102} \cdot 201.278 \cdot e^{-134.628/x_1}$	0.963
0.5	291.102	$y = \frac{x_2}{102} \cdot 291.102 \cdot e^{-104.395/x_1}$	0.979
-5.5	254.997	$y = \frac{x_2}{102} \cdot 254.997 \cdot e^{-143.784/x_1}$	0.991
-10.5	163.321	$y = \frac{x_2}{102} \cdot 163.321 \cdot e^{-155.114/x_1}$	0.981
-15.5	85.563	$y = \frac{x_2}{102} \cdot 85.563 \cdot e^{-180.479/x_1}$	0.970
-20.5	32.826	$y = \frac{x_2}{102} \cdot 32.826 \cdot e^{-150.468/x_1}$	0.968

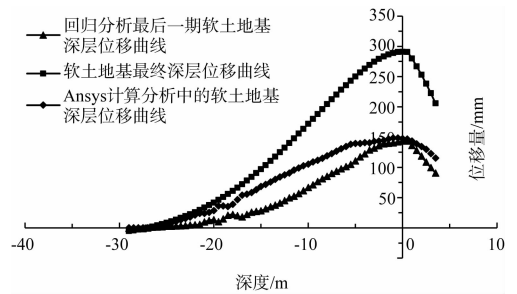


图 7 软土地基深层水平位移曲线

从表 2 中可见，深度 3.5 m 处的最终水平位移量较深度 0.5 m 及 -5.5 m 处的最终水平位移量要小。这是由于上部为混合料下部为淤泥，混合料的密度大，且两者之间摩擦衔接，上部混合料的水平位移是在下部淤泥层的水平位移影响下发生的，因此无论监测数据还是回归分析数据上部水平位移要小于下部淤泥的水平位移(图 7)。

3.3 Ansys 建模验证分析灌注桩受力情况

根据实际情况，建立桩-土模型(图 8)。灌注桩长 40 m，土层厚 40 m、每 0.5 m 为 1 层、分为 80 层，土层按从上至下，分为混合料、淤泥、淤泥质黏土、黏土，其主要物理力学指标见表 3。灌注桩是主要研究对象，网格密度比土层的大，在两种材料的交界区域，网格由密变稀，呈过渡性变化，单元类型采用六面体，单元尺寸 0.25 ~ 1.0 m。灌注桩混凝土强度为 C35，桩土之间设为摩擦接触，综合摩擦系数^[7]设为 0.4。根据实测位移曲线

将土层 -27 m 及其以下位移设为 0, 土层 -27 m 以上输入计算的水平位移量, 最底层设为固定。假设在实测回归分析数据最后一期灌注桩施工完成, 将最终水平位移量与该期的位移量之差作为

地基土体的后期水平位移量进行计算分析, 即本次 Ansys 计算分析中的软土地基深层位移曲线 (图 7)。通过计算, 可获得灌注桩的应力、水平位移 (图 9、10)。

表 3 围堤及软土地基各层主要物理力学指标

地基土层	含水量/ %	层厚/m	密度/ (t/m ³)	弹性模量/ MPa	泊松比	固快(固结不排水)	
						粘聚力 C/kPa	摩擦角 φ/(°)
混合料层		4	1.70	10.0	0.20	0	40.0
淤泥	52.4	18	1.70	0.3	0.45	11.8	7.9
淤泥质黏土	50.9	12	1.69	2.0	0.40	14.1	9.7
黏土	40.9	20	1.70	5.0	0.35	16.1	29.5

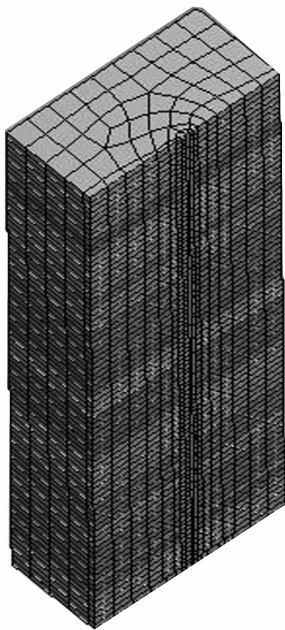


图 8 桩-土模型

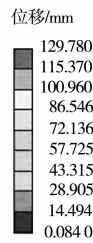


图 10 灌注桩水平位移

由图 9 可知, 灌注桩表面混凝土所受最大拉应力为 0.022 MPa, 最大压应力为 0.14 MPa, 远小于 C35 混凝土的抗拉、抗压强度, 灌注桩表面不会产生裂缝。由图 10 可知, 灌注桩最大位移为 129.78 mm, 大于港口工程内河灌注桩施工桩位偏差 3 cm, 对于这个问题可以在施工放样中采用设置提前量得以解决。

若按灌注桩施工偏位 100 mm 控制, 不设提前量, 根据回归分析及 Ansys 计算分析, 灌注桩只能承受约 116.63 mm 的土体最大水平位移, 则灌注桩施工时间将在前述的时间上延后约 45 d, 这不满足施工工期要求。

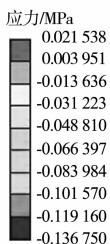


图 9 灌注桩应力

4 结论

1) 软基侧向水平位移随围堤分级荷载的增加而呈阶梯状变化, 侧向水平位移与荷载具有较明

显的相关性。每级加载后,位移变化趋势呈逐渐收敛特征。与多元非线性回归模型的指数函数变化特征一致。基于施工跟踪监测数据,采用指数函数回归拟合分析与 Ansys 三维建模计算相结合,可以较好地预测土体及灌注桩的变形情况,并准确计算灌注桩所受内力,预留桩位变形量,进而确定灌注桩施工时间。

2) 在软土地基围堤加载过程中,软土地基的侧向蠕动变形对外侧灌注桩的位移影响比对其内力影响要大。分析认为在软土地基围堤上部发生最大位移 150 mm 时,最大拉应力出现在桩顶下 5 ~ 10 m 范围,灌注桩尚未达到屈服应力,桩身混凝土表面不会产生裂缝,尚具有一定安全度。

3) 对于本工程栈桥灌注桩的施工时机,在分析数据的最后一期后即可开始施工,但需预留桩位变形提前量 5 ~ 10 cm 为宜。

4) 对于类似工程的施工,建议在软土地基位移量达到约 50%、加载量完成约 85%、该级水平位移基本稳定之后开始桩基的施工。由于工程地质与设计的差异,具体工程应当具体分析,但是完全可以按照本文所述方法计算确定桩基的施工时机。

参考文献:

- [1] 李国豪. 关于桩的水平位移、内力和承载力的分析[J]. 上海力学, 1981(1): 1-10.
- [2] 杨敏, 周洪波. 承受侧向土体位移桩基的一种耦合算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4 491-4 497.
- [3] 梁发云, 于峰, 李镜培, 等. 土体水平位移对邻近既有桩基承载性状影响分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 449-454.
- [4] 长江航运规划设计院. 浙江省某一级渔港建设项目施工图[R]. 武汉: 长江航运规划设计院, 2011.
- [5] 长江航运规划设计院. 浙江省某一级渔港建设项目施工图设计阶段工程地质勘察报告[R]. 武汉: 长江航运规划设计院, 2010.
- [6] 路军富, 王明年, 贾媛媛, 等. 高速铁路大断面黄土隧道二次衬砌施作时机研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 843-848.
- [7] 杜智超, 许芸芸. 基于 Ansys 的预应力抗拔灌注桩荷载位移分析[J]. 唐山学院学报, 2012, 25(6): 97-100.
- [8] JTJ 248—2001 港口工程灌注桩设计与施工规程[S].
- [9] JTJ 254—1998 港口工程桩基规范[S].
- [10] JTS 257—2008 水运工程质量检验标准[S].
- [11] 夏巍巍, 万佳威, 丁妍, 等. 基于小波去噪和回归分析的滑坡深部位移预测研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(10): 109-112.
- [12] 崔绍峰, 王玉良. 基于多元回归分析的堤防滑坡预报研究[J]. 中国水运: 下半月, 2012, 12(10): 66-67.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

深中通道试挖槽项目开工

近日,广航局承建的深圳至中山跨江通道工程试挖槽项目开工,这是中国交建继港珠澳大桥岛隧工程后承担的另一大型跨海、江沉管隧道基槽专题试验项目,将使得已成功应用于港珠澳大桥岛隧工程的深水基槽精挖施工工艺和专用设备进一步有效推广。

该工程桥岛隧的结构与港珠澳大桥工程基本相似,但其岛隧工程所处海域的水文、水砂及地质情况更为复杂。为了科学合理地制订该项试验工作计划,广航局前期做了大量的准备工作。此次试挖槽的成槽任务计划在4月底汛期来临前完成,随后,广航局将开展为期一年的基槽边坡稳定、回淤观测,以及淤积物采样分析、水沙环境监测和数学模型分析等工作。

(来源:广航局)