



PHC桩在沉桩过程中出现纵向裂缝的原因分析及相应对策

胡东, 黄松涛

(中交水运规划设计院深圳有限公司, 广东深圳 518067)

摘要: PHC桩在沉桩过程中经常出现纵向裂缝, 桩直径越大、锤型越重产生纵向裂缝的几率越大。通过对沉桩过程中的作用机理进行分析, 提出采用外加钢抱箍的工程措施可以有效避免纵向裂缝的产生。

关键词: PHC桩; 纵向裂缝; 钢抱箍

中图分类号: U 655.54*4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972 (2013) S1-0189-07

Cause analysis and countermeasures for the longitudinal cracks in PHC piles during pile driving

HU Dong, HUANG Song-tao

(CCCC Water Transportation Consultants(Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518067, China)

Abstract: Longitudinal cracks of PHC piles often occur during pile driving. The larger the pile's diameter and the heavier the hammer is, the greater the probability of the occurrence of the longitudinal cracks will be. Based on the analysis of the pile driving mechanism, we propose to adopt PHC piles plus steel hoop to prevent effectively the longitudinal cracks in pile driving.

Key words: PHC pile; longitudinal crack; steel hoop

1 工程概况

深圳前海片区某码头位于深圳港妈湾港区燃机电厂以北、大铲湾南岸规划岸线上, 岸线的方位角为 $9^{\circ}59' 50'' \sim 189^{\circ}59' 50''$ (图1)。本

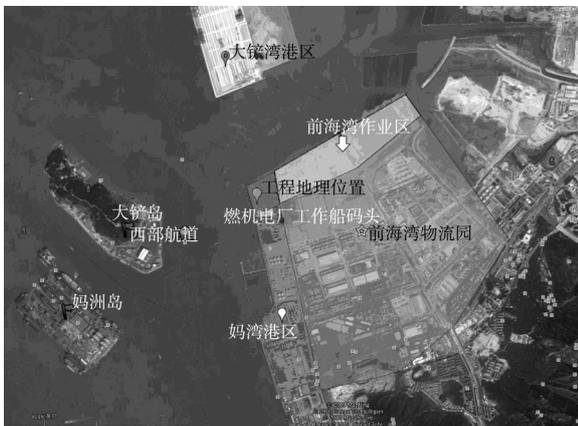


图1 码头区域位置

工程设计岸线长为200 m, 陆域纵深为300 m。码头南侧与电厂码头和陆域接壤, 北侧未建码头。

2 结构方案

码头总长200 m, 桩台宽29.1 m。码头结构采用高桩梁板式结构。码头上的门机轨距10.5 m, 前轨距码头前沿线3 m。码头基桩采用全直桩结构, 排架间距9.0 m, 前后轨道梁下双桩布置, 采用2根 $\phi 1\ 000$ PHC桩, 其余基桩采用 $\phi 1\ 200$ PHC桩, 每榀排架4根 $\phi 1\ 000$ PHC桩, 3根 $\phi 1\ 200$ PHC桩 (图2)。靠近电厂陆域处, 由于在陆域形成时抛了大量块石, 故采用 $\phi 1\ 200$ 的钻孔灌注桩。后来经过地基加固好挖泥, 并探明部分区域已经没有石头后, 局部区域改为

收稿日期: 2010-10-25

作者简介: 胡东 (1982—), 男, 工程师, 港口航道工程设计工作。

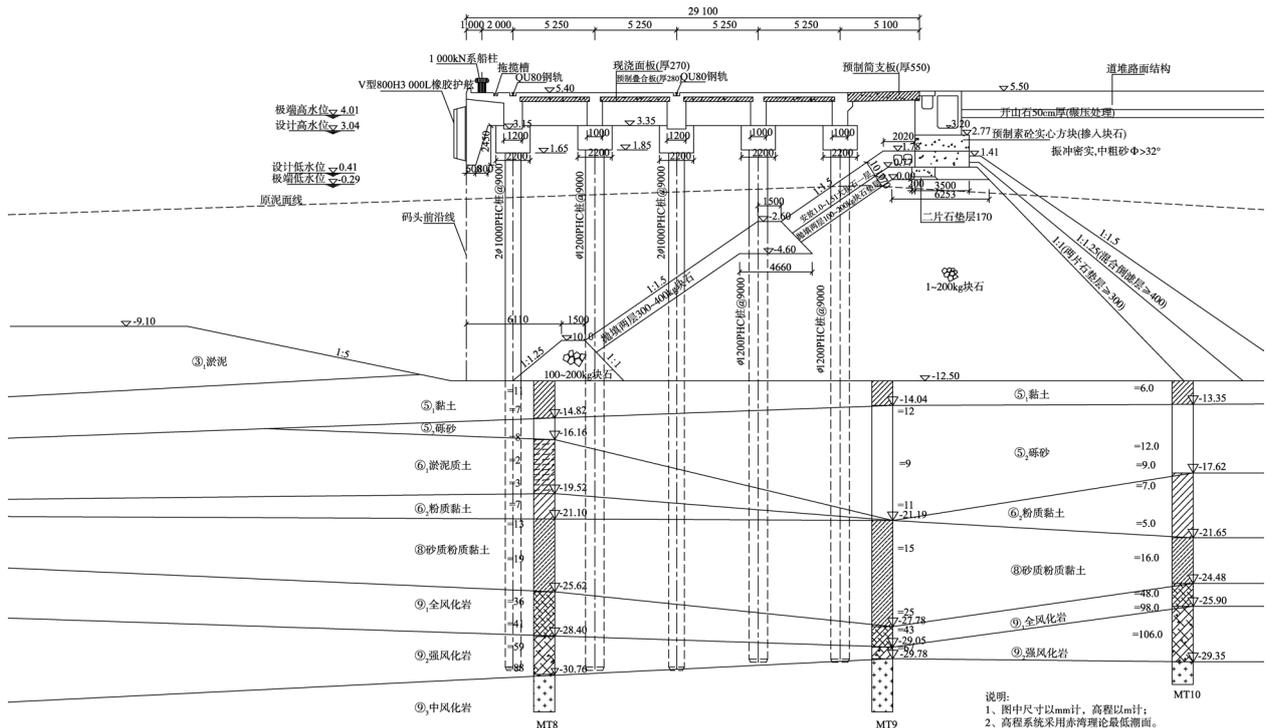


图2 码头结构断面

φ 1 200PHC桩。桩端以强风化岩为持力层，当强风化岩层较薄时（厚度小于3 m），按穿透强风化岩层，直接到中风化岩顶面。码头上部结构，从下到上分别位为桩帽、现浇横梁、预制纵梁轨道梁、叠合面板。桩帽及横梁施工采用整体现浇的施工方法，轨道梁、纵向联系梁采用叠合梁。面板为叠合板，预制厚度0.28 m，现浇厚度0.27 m。桩基平台后方设筒支板与接岸结构联接，接岸结构为斜坡抛石结构，上部采用1.0~1.5 t大块石护

面，坡度1:1.5。接岸结构后方设倒滤结构后回填开山石。根据靠泊船型的需要设置相应附属设施^[4]。

工程所在地场区地层自上而下为流泥、淤泥、黏土、砾砂、粉质黏土、全风化、强风化及中风化，钻孔揭示部分区域在-20~-15 m的范围（即砾砂层与黏土层附近）存在0.5~5.1 m厚的淤泥质黏土。在码头南端靠近燃机电厂码头区域表层为人工填石及人工填砂。强风化岩层顶高程介于-33.81~-21.62m，厚度0.50~15.60 m（图3）。

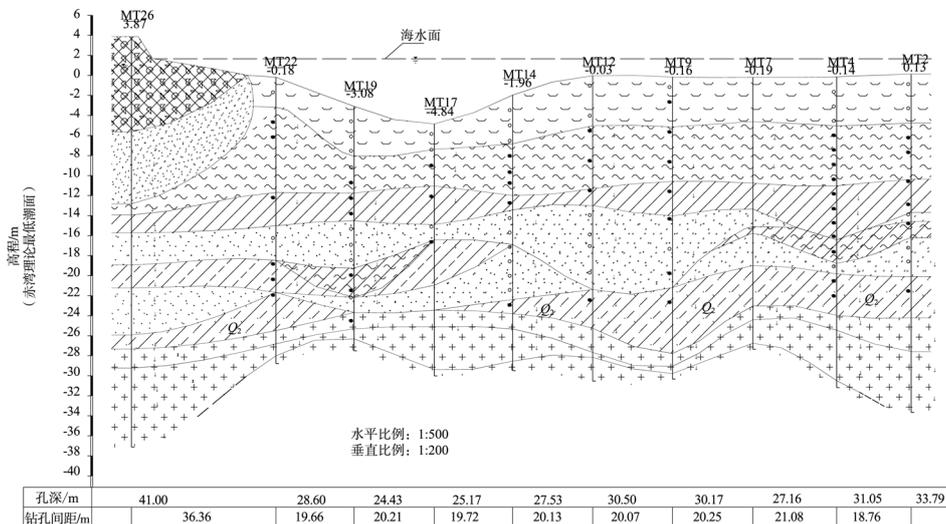


图3 地质剖面

码头区的地质情况如下^[4]:

码头区上部有厚度为10~12 m厚的淤泥, 为保证抛石岸坡的稳定, 在打桩前已经挖除。

土层从上至下分别是:

1) 黏土 (全码头长度有, 厚度3~5 m, 标贯7~10击);

2) 砾砂 (靠南侧厚, 北侧失却, 厚度1~8 m, 标贯9~15击);

3) 淤泥质土 (局部有, 主要分布在北侧, 厚度1~4 m, 标贯2~3击);

4) 粉质黏土 (局部有, 主要分布在北侧, 厚度1~4 m, 标贯5~7击);

5) 粗砂 (全码头长度有, 北侧厚, 南侧薄, 厚度0.5~3.0 m, 标贯12~21击);

6) 全风化细粒花岗岩 (全码头长度有, 厚度2~7 m, 标贯25~41击);

7) 强风化细粒花岗岩 (全码头长度有, 厚度2~10 m, 标贯52~100击);

8) 中等风化细粒花岗岩 (全码头长度有, 未钻透, 大于100击);

3 桩基设计

轨道下 ($\phi 1\ 000$ PHC桩) 按最不利组合, 考虑了各项分项系数后的计算桩力值为4 299 kN, 再根据土质的不均匀和动测的误差乘1.4系数后的最大桩力为6 018.6 kN, 其它纵梁下桩 ($\phi 1\ 200$ PHC桩) 的计算桩力为4 920 kN, 乘以1.4系数后的最大桩力为6 888 kN。设计桩尖进入强风化层2 m。桩长34~38 m, 桩尖有500 mm和1 000 mm的钢桩靴2种。初步确定停锤标准D100锤, 3挡油门, 最后一阵平均锤击贯入度3~5 mm。施工图设计说明^[4]中要求正式施工前后排桩在有钻孔处先进行试打桩3根, 试打桩时进行动测, 以调整桩长和停锤标准。以后在 $\phi 1\ 000$ PHC桩处及地质不同处试打桩4根。

4 试打桩

工程开始前, 试打桩3根, 钻孔距桩位2 m以

内, 代表性较好。桩型均为 $\phi 1\ 200$ PHC桩, 试打桩的桩长比设计桩长长2m。锤型D100, 油门3挡。

第1根桩: 桩位编号C-06, 对应钻孔MT2。压锤后, 桩尖穿过3.3 m厚的黏土层, 1 m厚的砾砂层和1.6 m厚的淤泥质土, 落在粗砂层顶面。开锤后桩尖穿透3.9 m厚标贯12击的粗砂层时锤击贯入度由30 mm降至11 mm。穿透4.1 m粉质黏土时锤击贯入度由14 mm增至38.5 mm。穿透3.4 m厚标贯38击的全风化层时锤击贯入度由31 mm降至15 mm。进入标贯58击的强风化层后贯入度马上降至9 mm, 进入强风化层1 m以后贯入度锐减至3 mm。最后进入强风化层1.8 m时停锤, 总锤击数858击, 最后一阵平均贯入度2 mm。动测初测桩力7 947 kN, 桩顶比设计桩顶高程高出0.5 m。

第2根桩: 桩位编号C-02, 对应钻孔MT7。压锤后, 桩尖穿过2.6 m厚的黏土层, 落在砾砂层顶面以下0.2 m处。开锤后桩尖穿透1.5 m的砾砂层时锤击贯入度由75 mm降至25 mm, 穿过0.7 m厚的淤泥质土时贯入度增加至250 mm, 穿透3.2 m的粗砂层时贯入度由166 mm降至25 mm, 穿透4 m厚的粉质黏土时贯入度在19~24 mm, 穿透1.36 m厚的全风化层时贯入度由33 mm降至8 mm, 进入0.7 m的强风化层时贯入度马上锐减至1~4 mm。停锤时PHC桩本体进入中风化层0.1 m, 钢桩靴进入中风化层0.6 m。总锤击数734击, 最后一阵平均贯入度0.6 mm。动测初测桩力9 069 kN, 桩顶比原设计桩顶高程低了1.4 m。

第3根桩: 桩位编号B-05, 对应钻孔MT9。压锤后, 桩尖进入标贯5击的黏土层2 m。开锤后剩余1.6 m黏土层, 锤击贯入度125 mm。穿透7 m厚标贯9~10击的砾砂层锤击贯入度由83 mm降至15 mm, 穿透6.5 m标贯15~25击的粉质黏土的锤击贯入度15~45 mm, 穿透厚度1.27 m标贯48击的全风化层锤击贯入度由11 mm降至2.2 mm, 在标贯87击厚0.73 m的强风化层贯入度为0.6 mm, 1 000 mm的钢桩靴进入中风化层0.4 m。总锤击数795击, 最后一阵平均贯入度0.6 mm。动测初测桩力8 945 kN, 桩顶比设计桩顶高程高出0.6 m (图4)。

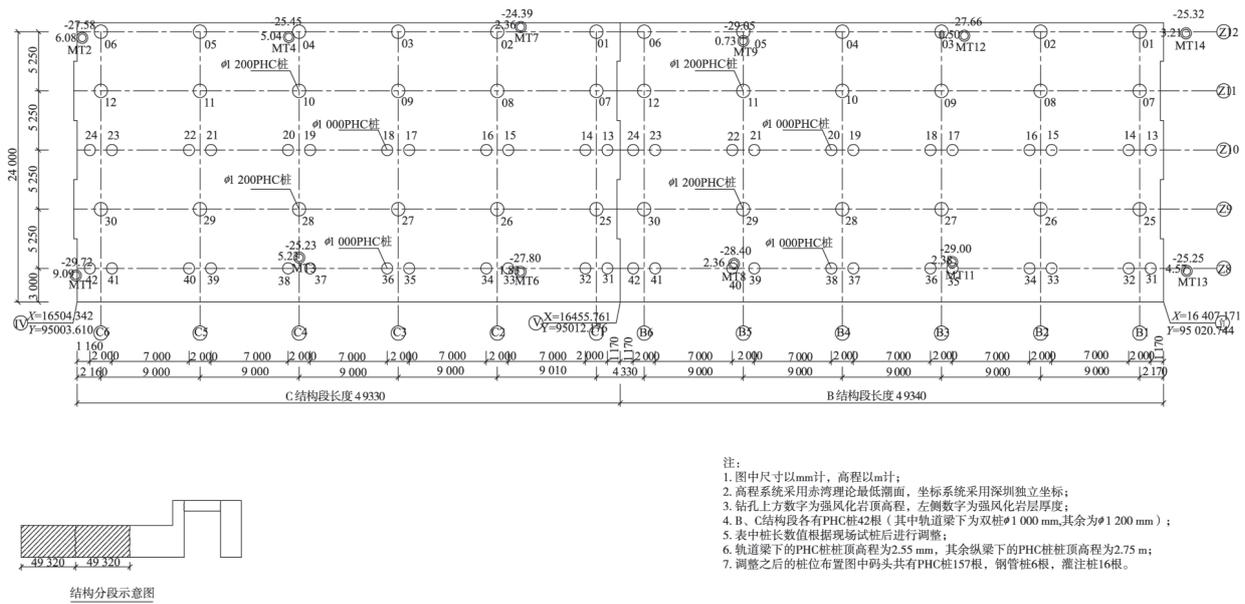


图4 B、C结构段桩位布置

分析试沉桩记录资料^[2]，说明以下几点：

1) $\phi 1\ 200$ PHC桩，在D100锤3挡油门情况下桩的自体可以进入标贯50~60击的强风化层1~2 m，锤击贯入度在3 mm左右。钢桩靴的长短对PHC桩自体进入强风化层深度影响不大。

2) 从动测应力波分析，在锤爆发的瞬间，当贯入度达到3 mm及以下时，位于桩顶以下2 m左右出现的压应力等于或大于C80混凝土的极限压应力。厂家提供的混凝土报告，混凝土达到C91~C94。故试打桩的3根桩完整性较好。

3) 初打动测桩的承载力已经满足设计桩力，故锤击贯入度不需小于3 mm。正常施工时贯入度控制在3~5 mm。

4) 根据动测情况，对照地质资料需对部分桩的桩长进行调整。

5 沉桩施工

码头沉桩从北面第C分段开始，共计42根桩，其中24根 $\phi 1\ 000$ PHC桩，18根 $\phi 1\ 200$ PHC桩，以及第B分段的2根 $\phi 1\ 200$ PHC桩，施工正常，未发生桩顶打坏和桩出现纵向裂缝情况。总锤击数900~1 500击，锤击平均贯入度1.5~3.0 mm。

但打第2分段第3根桩（图5），准备停锤时发现了纵向裂缝，纵向裂缝1条，裂缝从桩顶开始向

下3 m。截桩以后在设计桩顶以下还有1.2 m。发现纵向裂缝时锤击贯入度2.9 mm，总锤击数754击。该桩附近1 m处有钻孔MT4，对照柱状图，桩尖已经进入强风化层4 m。



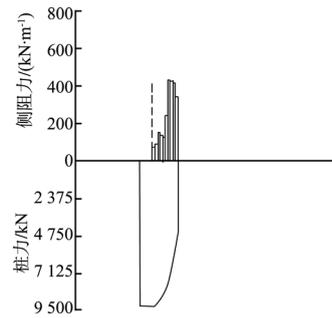
图5 B、C结构段桩顶纵向裂缝

在等待处理时，施工单位将打桩船移至南面电厂附近打，结果连续2根出现纵向裂缝（图5）。E02总锤击数1 041击，贯入度15.7 mm，E05总锤击数502，贯入度27 mm。从打桩记录看，在穿透上层6 m粗砂层时贯入度在6~10 mm，停锤时在粉质黏土的底部，接近全风化层顶部。工程沉桩暂停。

6 纵向裂缝原因分析

在沉桩过程中桩身混凝土会产生压应力这是众所周知的；但同时会产生环向拉力，这一点理解的人不多。而正是这环向拉力使得混凝土桩出现纵向裂缝。

如果从桩身上取出一个正方体, 当锤击时正方体的上方受到向下的压力, 正方体的下方就有一个向上的反力, 锤击贯入度越小, 反力越大。当立方体受到上下的夹击力时, 立方体就会向前后左右4个方向膨胀。立方体的里面一侧由于壳的原理无法向里突出(就像鸡蛋壳, 尽管很薄, 但很难用手捏碎); 立方体的左右两侧受到相邻立方体的约束, 也无法变形; 立方体只有向没有约束的外侧膨胀。向外膨胀意味着周长的增加, 也就是在桩的表面出现拉力, 混凝土是脆性材料, 当混凝土的强度小于拉力时, 只能以裂缝的形式满足它的膨胀, 于是出现初步的表面裂缝, 随着继续锤击, 裂缝向里发展, 直至贯通, 同时裂缝向上下发展。通常裂缝发生在桩顶以下5 m范围内。从动测的应力图^[3]看(图6), 在桩顶以下2 m左右压应力最大, 也是裂缝最早出现的部位。



d) 桩身侧阻力的分布

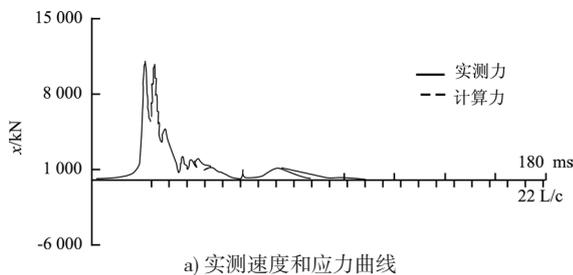
图 6 桩顶应力曲线分布

目前我国预应力钢筋混凝土桩有3种: 预应力方桩、预应力大管桩、预应力PHC桩。预应力方桩混凝土强度等级为C40或C45, 预应力大管桩的混凝土强度等级为C60, 预应力PHC桩的混凝土强度等级为C80^[1]。在沉桩过程中出现纵向裂缝概率最多的是混凝土强度等级最高的PHC桩, 其次预应力方桩。PHC桩中直径越大出现纵向裂缝的几率越大。这可能与混凝土的密实度有关, 与锤击能量有关, 与箍筋密度关系不大。

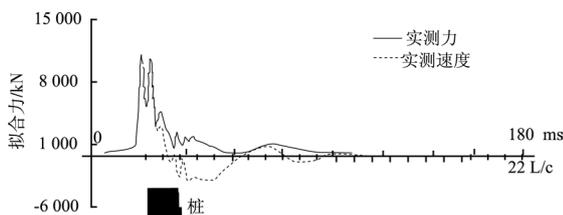
1) 与混凝土的密实度有关。

3种桩的制作工艺不同, 混凝土的密实度也不同。预应力方桩的混凝土采用振捣的方法使混凝土密实, 比较密实; 大管桩采用震动加碾压的方法使混凝土密实, 最密实; PHC桩采用离心的方法使混凝土密实, 密实度最差。密实度越差, 混凝土的耐锤击抗拉能力越低, 出现纵向裂缝的几率越大。

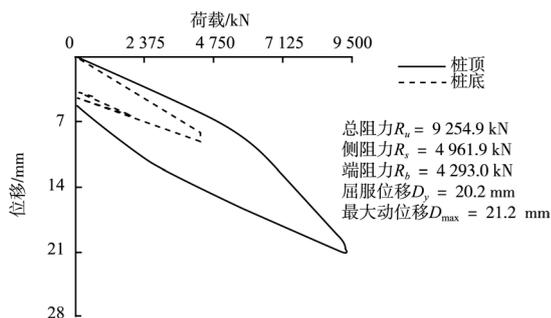
最近在深圳我院连续设计了2个高桩梁板式码头并先后投入施工, 其中一个集装箱码头采用 $\phi 1\ 200$ 大管桩, 沉桩采用D125锤, 另一个散杂货码头采用 $\phi 1\ 200$ 和 $\phi 1\ 000$ PHC桩, 沉桩采用D100锤, 2个码头相距3 km, 桩尖持力层均选择在强风化层。采用大管桩的码头无一根出现纵向裂缝, 而采用PHC桩的码头在打了50根左右后有3根桩相继出现纵向裂缝。从理论上讲PHC桩混凝土强度等级是C80比大管桩C60的抗拉强度高, 但工程实践反映PHC桩比大管桩出现纵向裂缝的几率大, 可能与混凝土的密实度有关。密实度大



a) 实测速度和应力曲线



b) 拟合力曲线



c) 模拟静载试验的荷载-沉降曲线

总阻力 $R_w = 9\ 254.9$ kN
 侧阻力 $R_s = 4\ 961.9$ kN
 端阻力 $R_b = 4\ 293.0$ kN
 屈服位移 $D_y = 20.2$ mm
 最大动位移 $D_{max} = 21.2$ mm

的混凝土膨胀率低，出现的拉力小，故不容易出现纵向裂缝。

2) 与锤击的能量有关。

锤击能量越大出现纵向裂缝的几率越大，改用低一档油门沉桩，桩尖进入强风化层后再改用高一档油门，短时间大能量沉桩发生裂缝的几率也大大减少，但沉桩时间大大增加。

3) 与箍筋密度的关系。

有的工程出现纵向裂缝后，要求厂家加密箍筋间距，加密的范围由通常的桩顶以下2.5 m增加到6 m，但仍无法避免纵向裂缝的出现。其原因是箍筋采用 I 级钢，延伸率较大，需有一定的延伸后才能达到设计值，而混凝土是脆性材料，裂缝出现时箍筋尚未完全受力，另外管桩的外壁周长比箍筋的周长大，外壁混凝土受拉时，箍筋尚未受拉。根据上面立方体的受力分析，管桩在锤击应力下可能外壁受拉内壁受压，而箍筋在中和轴，故箍筋对增加管桩外壁的抗拉能力帮助不大。但加密的箍筋可以防止裂缝迅速从外向里贯通，也可防止出现纵向裂缝后迅速断桩。

7 对策

本工程的PHC桩已经全部预制完毕，通过改善PHC桩结构的方法已无可能。根据工地上已有用于夹桩的钢抱箍的情况，设计提出：在桩顶以下1.5 m，2.5 m，3.5 m处外加钢抱箍，通过钢抱箍的环向约束，避免桩身混凝土出现大的拉应力。抱箍高度为300 mm。抱箍的示意图见图7。

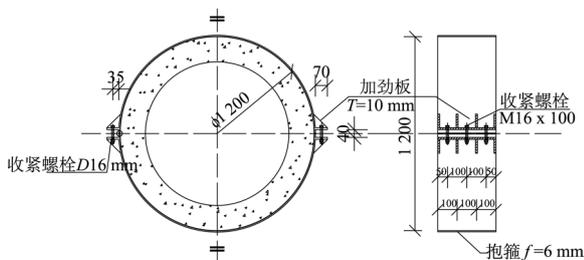


图7 ϕ 1 200 mm PHC桩抱箍示意

8 实施效果

根据设计的建议，施工单位进行试打桩，连续打了11根桩，均未出现纵向裂缝。其中1根

E2-03桩，上部是10 m经旋喷加固后的淤泥，在穿透该层时锤击贯入度为6~12 mm，共计打了2 438锤，最终贯入度3 mm，入土深度25 m，也未出现纵向裂缝。工程结束时剩余的100根左右的桩采用外加钢抱箍的方法沉桩均未出现纵向裂缝，很好地解决了上述问题。

9 结论

1) PHC桩在重型锤的锤击下，当锤击引起的环向拉应力大于混凝土的抗拉能力时，出现纵向裂缝的几率很高，已经严重影响到大直径PHC桩的应用。目前，在PHC桩结构没有改变前，采用外加钢抱箍的措施，可以有效控制纵向裂缝的发生，避免不必要的损失。钢抱箍待沉桩结束后拆下，可以反复使用。

2) 由于在桩船上加钢抱箍每根桩需用时间约1 h，增加了打桩船的台班费用，建议在厂家进行钢抱箍批量的加工制作，并安装在桩顶适当位置，这样可以减少在现场的操作时间，加快桩基沉桩进度；同时，出现纵向裂缝的原因仅仅是个人在实际工作中的分析与总结，没有试验数据证明，因此建议有条件的厂家进行以下2点试验和改进措施：①进行PHC桩环向拉应力的测试，了解环向拉应力分布规律、范围；②在PHC桩预制时采取结构措施，增加PHC桩的环向抗拉能力。

参考文献：

[1] JTJ 254—1998港口工程桩基规范[S].

[2] 中交第三航务工程有限公司深圳公司. 西部政府码头工程锤击沉桩记录[R]. 深圳: 中交第三航务工程有限公司深圳公司, 2010.

[3] 广州港湾工程质量检测有限公司. 深圳前海片区码头工程桩基动测报告[R]. 广州: 广州港湾工程质量检测有限公司, 2010.

[4] 中交水运规划设计院深圳有限公司. 深圳港西部政府码头工程施工图设计[R]. 深圳: 中交水运规划设计院深圳有限公司, 2009.

(本文编辑 郭雪珍)

《水运工程》优秀论文评选

评委点评:

PHC桩在高桩码头等工程中应用广泛,沉桩过程中出现纵向裂缝的情况时有发生,但一直没有很好的解决。本文结合具体工程沉管时PHC桩混凝土受力和变形特点,分析了PHC桩沉桩时纵向裂缝出现的原因,提出针对性的措施,工程实践证实了原因分析的正确性和措施的合理性。

文关于PHC桩沉桩时纵向裂缝的原因分析及其对策,对类似工程具有较好的参考价值。为弥补缺少试验数据支持的缺憾,建议类似工程增加沉桩测试表面环向应变,以进一步验证原因及采取正确对策。



2012年12月

评委简介:

刘吉福,博士,教高,中国铁建港航局集团有限公司副总工程师。

已发表40余篇科技论文,获得7项省部级科学技术奖,1项省级优秀勘察设计奖。

· 消 息 ·**《水运工程》2013年专辑(增刊)征集公告****全国水运工程各单位:**

本刊已取得自1992年以来全部连续6版(每4年一版)全国中文核心期刊的市场地位。《水运工程》专辑(增刊)以特有的单位整体专业学术氛围建设水平与单位技术实力展示载体,已然成为支持单位和个人事业愿景提升的平台。

为扎实做好专辑(增刊)的组织工作,特向你们征集2013年专辑(增刊)的出版申请。

本刊2013年专辑、增刊指标共4个,以独家单位和《水运工程》编辑部通过甲乙双方协议的形式确认。

联系电话:010-64066347,联系人:陈路华

欢迎垂询!

《水运工程》编辑部