



大直径 PHC 桩沉桩过程中 常见工程质量问题及对策

蔡小红¹, 黄松涛²

(1. 中交水运规划设计院海南有限公司, 海南 海口 570105; 2. 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发生桩顶击碎、纵向裂缝、横向裂缝等工程质量问题。对沉桩过程中常见工程质量问题的机理进行分析, 并提出有效的应对措施。同时, 对已经发生质量问题的 PHC 桩提出修复建议。

关键词: PHC 桩; 桩顶击碎; 裂缝

中图分类号: U 655.55

文献标志码: B

文章编号: 1002-4972(2015)10-0177-05

Common quality problems and countermeasures of large-diameter PHC piles' driving

CAI Xiao-hong¹, HUANG Song-tao²

(1. Hainan Branch, CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Haikou 570105, China;

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

Abstract: The crush on the top of PHC pile, vertical cracks and horizontal cracks are common problems in PHC pile driving that usually endanger the project's quality. This paper analyzes the mechanism of common engineering quality problems during the PHC pile's driving, and proposes effective counter measures. Moreover, advices on restoration of PHC piles with quality problems are presented.

Keywords: PHC pile; crash on pile top; crack

港口工程的钢筋混凝土桩基经历了预应力混凝土方桩、后张法预应力混凝土大管桩(简称大管桩)、先张法高强度预应力混凝土管桩(简称 PHC 桩)3 个阶段的发展历程。由于目前已能一次预制 50 m 长的 PHC 桩管节, 通过在工厂拼接, 桩长可达 70~80 m, 只要桩架高度和起吊能力允许, 可以拼接更长的桩, 且有 $\phi 700$ 、 $\phi 800$ 、 $\phi 1\,000$ 、 $\phi 1\,200$ 、 $\phi 1\,400$ mm 不同直径的管桩, 每种管桩有 2~4 种不同抗弯能力的型号。但是随着 PHC 桩的广泛使用, 在沉桩过程中多次发生不同程度的工程质量问题, 主要表现为桩顶击碎、纵向裂缝、泥面下的横向裂缝等。

上述质量问题在小直径的 PHC 桩较少发生,

主要发生在 $\phi 1\,200$ mm PHC 桩的沉桩过程中, 有几个工程桩损率高达 30% 以上, 给业主、施工单位和管桩制造厂家带来不小的损失, 也给设计人员带来困惑, 以至于不敢采用 $\phi 1\,200$ mm PHC 桩而改用钢管桩。因此, 对桩损的原因进行分析, 并提出改进措施非常必要。

实际上桩顶击碎、纵向裂缝和横向裂缝这 3 种情况在预应力方桩和大管桩的应用初期都发生过, 后来人们通过检测找出原因, 并对结构进行改进, 类似的工程质量问题大大减少。PHC 桩由于其结构和制作工序的特殊性, 无法改进, 故质量问题仍时有发生。笔者通过工程实践, 对施工条件和施工措施提出一系列技术要求后, 工程质量问题可大为减少。

收稿日期: 2015-02-10

作者简介: 蔡小红(1984—), 女, 工程师, 从事港口航道工程设计工作。

1 桩顶击碎

桩顶击碎通常是因为桩顶混凝土抗锤击能力较弱、桩顶的弹性垫层材料随着锤击数的增加失去弹性造成的。此外还有一种情况是波浪对锤击的影响,在施打长桩时由于桩架较高,在波浪的作用下船体左右摇摆造成偏心锤击,引起桩顶一边破碎,随着锤击,破碎扩散到整个桩顶。

1.1 提高桩顶混凝土抗锤击能力

对于桩顶混凝土抗锤击能力较弱的问题,可以从结构上加以改进。预应力混凝土方桩通过在桩顶加 5 层钢筋网的方法提高其抗锤击能力,大管桩在桩顶增加 2 m 长的一段特殊管节,即在混凝土中掺钢纤维以提高其抗锤击能力,通过以上结构处理措施,桩顶在沉桩过程中被击碎的概率大幅降低。但 PHC 桩,由于其特殊的生产工艺,上述两种结构处理措施很难实施,若在 PHC 桩顶加钢筋网,可能导致桩在离心时仅使小颗粒的石子和砂浆流入钢筋网,而大颗粒石子无法或部分进入钢筋网,造成混凝土级配不合理,从而降低混凝土的强度;若 PHC 桩内掺钢纤维,由于流动性变差,可能造成离心时管壁厚薄不均匀。故从结构上改善 PHC 桩桩顶抗击能力的可行性不大,因此考虑从其它途径改善桩顶抗锤击能力。

从功能原理分析,功是力和作用距离的乘积,同样的功,力的作用距离越大,力就越小,因此可以采用增加桩顶与锤之间弹性的方法以减少冲击力。

桩顶的弹性材料由两部分组成,一部分在桩顶与替打之间,另一部分在锤与替打之间。

桩顶与替打之间弹性材料常用的有牛皮纸、多层胶合板、麻绳,材料厚度 > 100 mm。各种材料各有优缺点:牛皮纸锤击后期完整性较好,但锤击后期弹性逐步减少;多层胶合板锤击后期虽然仍有一定的弹性,但由于多层胶合板的胶结材料为高分子材料,在锤击过程中弹性材料会升温,故多层胶合板会冒烟甚至燃烧;麻绳在锤击后期

弹性比上述两种材料弹性更大,但原来捆绑在一起的麻绳容易散架。上述常用弹性材料的缺陷会造成桩顶受力较大或受力不均匀,因此当各种材料在锤击过程中有较多的桩顶碎损时,采用牛皮纸作为弹性材料,可在锤击一定锤击数后加一层 50 mm 后的牛皮纸;采用多层胶合板,可在使用前一两天浇水处理;采用麻绳,可加强麻绳的捆绑,对于极限承载力达 9 000 kN 以上的 PHC 桩建议采用麻绳做桩垫材料。

锤与替打之间的材料,一般采用钢丝绳,钢丝绳需经常更换,建议沉桩 10 根左右更换一次钢丝绳。

1.2 降低波浪对锤击的影响

波浪对锤击的影响主要体现在波浪使得打桩船晃动,连带桩架的摆动引起偏心锤击,造成桩顶击碎。解决的措施是可以通过陆上的仪器进行观察,当桩架摇摆幅度较大时停止锤击,施工条件允许时,可以调整打桩船的方向,使打桩船的轴线与波浪方向的夹角尽量小,尽可能减少排架的摆动从而避免偏心锤击。

2 桩身纵向裂缝

PHC 桩在锤击过程中,除了桩身混凝土受压以外,其管桩壁也会产生拉力,当拉力超过混凝土的抗拉能力时,管桩表面就会出现裂缝^[1]。

针对 $\phi 1\ 200$ mm PHC 的桩身纵向裂缝进行试验。 $\phi 1\ 200$ mm PHC 桩的管壁厚度为 150 mm,将管桩截取一个高 150 mm 的圆环,再将圆环切成宽 150 mm 的块体,形成一个近似 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的六面体。对六面体进行锤击时的受力进行分析^[1]。当锤击贯入较小时,六面体的上部承受锤击压力、下面承受支撑反力,按弹性理论,六面体的前后左右 4 个面会向外膨胀,左右面受相邻块体的约束无法膨胀。后侧(里侧)由于是圆形曲面,向内膨胀意味周长变短,混凝土受压;而六面体的外侧(管桩表面)膨胀,意味周长变长,混凝土受拉。当拉力超过混凝土抗拉能力时,

表面就出现裂缝, 随着锤击数的增加, 裂缝由外向内扩展直到贯通, 裂缝同时也向上向下扩展, 因此有的裂缝长度可达 7 m。

从动测的应力图^[3]看 (图 1~4), 在桩顶以下 1.5~2.0 m 处应力最大, 另外根据现场观察也发现, 最先出现裂缝是桩顶以下 1.5~2 m 处, 二者基本吻合。锤击桩顶时其能量并不是同时到桩尖, 锤击能量的传递与光、电、声音一样有一个传递速度, 锤击能量以压力波的形式传递。当锤击的瞬间压力最大时, 受压长度最短, 随着向下传递, 压力逐步减少, 受压长度变长, 类似于一块石子扔在水中形成波浪, 中心点波浪高、波长短; 离中心点越远波高越小、波长越大。在 PHC 桩的桩顶结构上有一块 20 mm 厚的钢板, 张拉器通过钢板张拉固定在钢板上的钢筋, 在钢板下设置 200 mm 高的薄钢环, 作用是防止在混凝土离心成型时漏浆, 且该薄钢环在锤击时起到约束管壁向外膨胀的作用。钢环下的混凝土受的压力比桩顶下 1.5~2 m 处的压力大, 管桩外壁向外膨胀的力也大, 由于顶面受钢环内混凝土的约束, 所以并没有出现裂缝, 但随着锤击能向下传递, 这种约束力越来越小, 故最早出现裂缝的位置在桩顶以下 1.5~2 m 处。

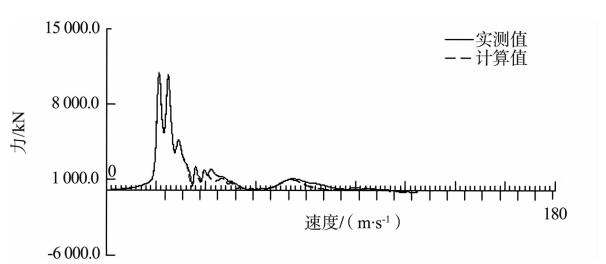


图 1 实测速度和应力曲线

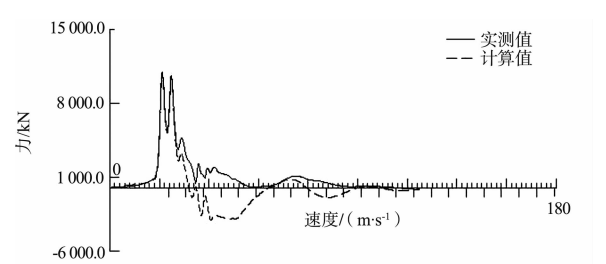


图 2 拟合力曲线

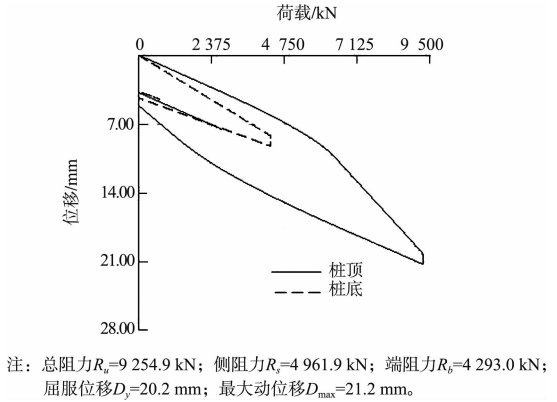


图 3 模拟静载试验的荷载-沉降 (P-S) 曲线

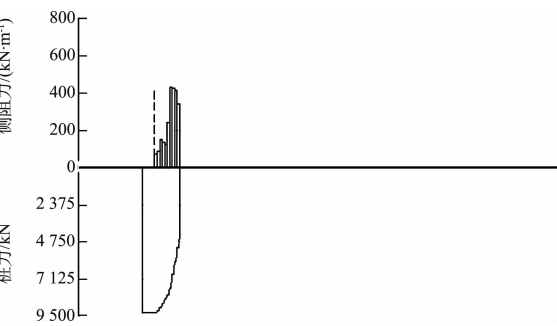


图 4 桩身侧阻力的分布

预应力方桩在锤击过程中也会出现纵向裂缝。现在采取的结构处理措施为: 1) 加长桩顶实心的长度; 2) 加大桩顶以下 6~8 m 范围内箍筋的密度; 3) 箍筋由通常的弯钩改成直角钩加电焊。经改进后, 纵向裂缝大为减少。图 5 为箍筋改进示意。针对大管桩锤击过程中可能出现的纵向裂缝采取的结构处理措施为: 在大管桩桩顶增加 2 m 长掺钢纤维的管节, 既增加桩顶抗锤击力, 又加强混凝土的环向抗拉能力, 但在海水中使用须进行抗腐蚀处理。

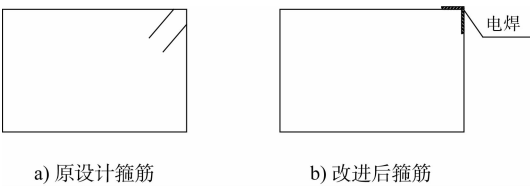


图 5 箍筋改进

由于特殊的生产工艺, PHC 桩同样无法采取上述预应力方桩和大管桩采取的结构处理措施来解决桩身纵向裂缝。某些工程曾要求加密桩顶 7 m 内的箍筋, 但效果不明显, 为了解其原因, 取 $\phi 1200$ mm PHC 桩 (壁厚 150 mm) 的一节管壁进

行分析, 150 mm 厚的管壁里侧受压、外侧受拉, 而箍筋位于中心即中和轴附近, 故箍筋对管节表面的混凝土的抗拉几乎没有帮助, 因此在结构上无法解决 PHC 桩抗拉的情况下, 只能从施工措施方面来解决。分析得知, 管桩的纵向裂缝是由于锤击时管桩的膨胀引起的, 因此采取措施约束其膨胀, 避免产生纵向裂缝, 方法是在 PHC 桩的桩顶加钢抱箍 (图 6)^[1]。

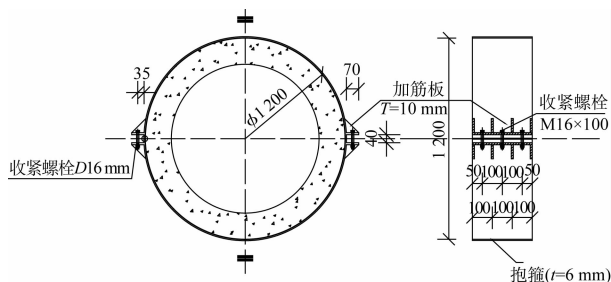


图 6 钢抱箍

根据最先出现裂缝的位置, 在桩顶以下 1、2、3 m 处加钢抱箍。为了不影响沉桩速度, 钢抱箍在工厂出运前安装, 沉桩结束后拆除, 可反复使用。

工程实践证明, 加钢抱箍后可有效避免纵向裂缝的出现。但有一个工程加钢抱箍后仍发生纵向裂缝, 分析得知, 出现纵向裂缝的原因是: 钢抱箍在锤击震动下, 螺帽松动了。为避免上述情况的发生, 对钢抱箍的螺帽进行改进: 加长螺栓, 用 2 个螺帽, 螺帽与钢板、螺帽与螺帽之间放置橡胶垫圈防止松动, 改进后在沉桩时纵向裂缝再没有发生过。

3 横向裂缝

横向裂缝不是每个工程都会发生的, 通常在采用长桩, 且在硬、软土层相间明显的地质情况下才会发生, 主要是因为打桩拉应力过大引起横向裂缝。因此桩基规范从 1980 规范一直到最新的 2012 规范都有相关规定, 以 JTS 167-4—2012《港口工程桩基规范》为例, 规范第 5.2.4.2 条: 拉应力标准值的取值应根据锤型、锤击速度、桩垫性能、桩长及土质情况等综合考虑。符合下列情况之一时可取较小值:

- 1) 锤型和锤击速度较小时;
- 2) 采用弹性较大的软桩垫;
- 3) 桩长小于 30 m;
- 4) 无较明显的硬、软土层相间情况^[2]。

通常在上部是厚度 3 m 以上的粉质黏土和粉细砂, 下部是深厚淤泥的地质情况下, 容易产生横向裂缝, 混凝土桩出现横向裂缝一般在好土层下 3~7 m 处。该情况在 20 世纪 80 年代预应力方桩沉桩过程中曾多次发生。为了解发生横向裂缝发生的机理, 有关单位请科研单位进行检测分析, 检测方法是在桩身钢筋每 1 m 贴上一个应力片。检测结果发现, 在沉桩过程中, 当桩身穿过好土并进入淤泥一定深度以后, 每次锤击在好土下部会出现较大的拉力。这种现象解释为锤击过程中, 好土损失了部分桩侧阻力, 但仍有大部分阻力, 而下部淤泥的桩侧阻力大部分消失, 当压力波传到桩尖时就在好土下出现最大拉力。好土的桩侧阻力就像手握住桩的上部, 桩身自重及桩尖的压力波就像另一手拉桩, 所以在好土下出现拉力, 当拉力超过桩身的抗拉能力时, 桩身就出现横向裂缝。

规范第 4 款的用词是: “无较明显的硬、软土层相间情况”, 这提示人们上硬下软的土层容易产生较大的打桩拉应力。

为避免沉桩时出现横向裂缝, 主要采取如下措施: 1) 选用有效预应力更大的桩型; 2) 在容易出现最大拉应力的区域增加非预应力钢筋; 3) 在桩身上部某区域涂环氧树脂以降低好土的桩侧阻力; 4) 当桩身进入淤泥一定深度后, 沉桩停停打打, 直至桩尖进入好土后再连续沉桩。

4 其他问题及对策

4.1 泥面上 1 m 处小应变反映桩身反射波不规则问题

某工程小应变检测结果反映在泥面以上 1 m 处反射波不规则。潜水员检测得知其桩身情况良好, 用水下摄影检查也完好, 最后在管桩内水下摄影检查发现, 桩身泥面以上 1 m 处混凝土破损, 个别地方甚至混凝土剥落、露出钢筋, 几根桩出

现破损的位置基本相同。经分析,其原因可能是在混凝土布料时,一罐混凝土与另一罐混凝土衔接脱节,离心后混凝土中的粗骨料呈“V”形分布,“V”型内是砂浆和一些细骨料,抗压强度低,在锤击时容易压碎。

4.2 加强沉桩过程中的观察

南方某工程沉桩全部结束后,由于个别区域强风化岩埋深较浅,需嵌岩,在浇筑混凝土时发现漏浆,经检查有纵向裂缝,然后对所有桩进行检查,发现 30% 的桩都有纵向裂缝。通常,在沉桩过程中,用陆上仪器对桩身加强观察,这样就能在沉桩过程中发现纵向裂缝,但本工程沉桩过程中未发现裂缝,分析认为,其原因是:在管桩的外壁涂了一层环氧树脂涂料,涂料的干膜有一定的韧性,其掩盖了裂缝,同时沉桩后,施工单位没有及时观察管桩内水位的变化(一般有裂缝后管桩的水位随着涨落潮而有一定的变化)。

4.3 停锤标准控制

沉桩过程中产生的裂缝大多与锤击贯入度有关,设计人员一般将停锤标准确定为最后一阵(10 击)平均贯入度 3 mm,并且整个工程的所有桩一个标准。对于 PHC 桩,3 mm 锤击贯入度过于严格,容易造成桩身损坏,建议采用 5~7 mm,同时对于一个排架有时最大桩力与最小桩力相差 50% 以上,建议在进行工程第 1 根试桩时,要求动测单位提供 10、8、6、4、3 mm 等不同锤击贯入度情况下的桩基承载力。当桩尖落在同一土层时对不同承载的桩可提出不同的锤击贯入度要求,可降低出现工程质量问题的概率。

4.4 桩帽与 PHC 桩的连接

某工程桩基采用 $\phi 1\,000\text{ mm}$ PHC 桩,桩深入桩帽 $0.8D$ (D 为桩外径),桩芯混凝土长 $2.5D$ 。某天晚上一条 400 t 施工方驳(方驳上仅有少量钢筋)靠在已浇筑完桩帽的桩上,桩帽浇筑已有 3 周,且桩帽混凝土基本达到设计强度,次日早晨发现方驳上的钢筋不见了,方驳边有明显划痕,有一个桩帽上拔了 200 mm 左右。为了解其原因,将桩帽吊起,检查发现桩帽和桩芯混凝土完好无

损,桩芯混凝土表面光滑,之后进行计算,方驳侧边产生的上拔力不超过 150 kN,说明桩帽与桩连接较弱,无法承受较大的上拔力。分析其原因,发现 PHC 桩离心成型后内壁有一层浮浆,根据钢筋混凝土规范规定,为保证新老混凝土的连接,老混凝土的表面需凿毛处理,而 PHC 桩的内壁是浮浆,连接更弱,因此对承受拉力的桩帽建议采取以下措施:

- 1) 要求厂家在 PHC 桩出运前将内壁 $3D$ 范围内的浮浆清除;
- 2) 桩芯混凝土的长度不小于 $3D$,且掺少量膨胀剂;
- 3) 桩伸入桩帽深度不小于 $0.75D$,有条件时伸入更多一些,桩外侧进行凿毛或刻痕处理;
- 4) 对于风化岩地区,由于桩顶高程无法控制,桩内壁清除浮浆的长度更长一些。对于施工中桩顶高程高于设计高程较多的,桩可采用二次凿除法:第 1 次将桩顶设计高程以上 1 m 处将桩截除,第 2 次将设计高程以上的混凝土凿除,保留桩身钢筋。

由于目前不管是高桩码头规范还是桩基规范和混凝土规范均没有对受较大拉力的桩帽、桩芯混凝土及 PHC 桩提出明确的结构处理要求,建议在下次规范修编时,经试验后提出明确的结构处理要求。

5 桩出现裂缝后的修复

桩出现裂缝的修复分泥面以上裂缝的修复和泥面以下裂缝修复,其修复方案如下:

- 1) 针对泥面以上裂缝的修复,在桩身上加一个钢套筒,钢套筒与桩身的间隙为 150 mm,内灌细石混凝土(图 7)。

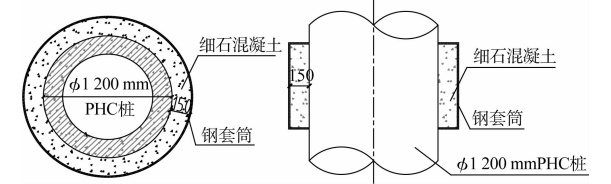


图 7 泥面以上桩身的修复

(下转第 187 页)