



高桩码头刚接 PHC 管桩新型接桩结构设计

张卓先¹, 潘金霞², 章立东³, 王飞朋⁴

(1. 浙江省海港投资运营集团有限公司, 浙江宁波 315000; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;
3. 浙江海港海洋工程建设有限公司舟山分公司, 浙江舟山 316000;
4. 宁波中交水运设计研究有限公司, 浙江宁波 315000)

摘要: PHC 管桩对工程地质适应性较强, 在港口工程中被广泛应用。当其以坚硬黏土层、密实砂层或基岩作为持力层且上述土层起伏变化剧烈、无规律可循时, 沉桩质量极难控制, 易造成打高或打低等异常桩问题。对于打低桩而言, 为保证工程进度和节省投资费用, 一般优先考虑采取接桩措施。针对打低桩接桩方案, 重点探讨了一种 PHC 管桩新型接桩结构, 即根据实际桩顶高程偏差程度, 采用桩芯槽钢加强或联合桩顶外包圆柱形混凝土处理, 以达到桩基与上部结构之间刚性连接的要求。实践结果表明: 该种新型接桩结构适用于不同斜度的打低桩, 通过调整上部结构尺度, 能够有效规避常规接桩所导致的额外结构自重和施工难度增加偏大、整体外观质量较差等弊端。

关键词: 高桩码头; PHC 管桩; 刚性连接; 打低桩; 接桩结构

中图分类号: U 656. 1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0049-06

Structure design of a new type of pile connection for rigid PHC pipe pile of high pile wharf

ZHANG Zhuo-xian¹, PAN Jin-xia², ZHANG Li-dong³, WANG Fei-peng⁴

(1.Zhejiang Provincial Seaport Investment & Operation Group Co., Ltd., Ningbo 315000, China;

2.CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

3.Zhoushan Branch of Zhejiang Provincial Seaport Ocean Engineering Construction Co., Ltd., Zhoushan 316000, China;

4.Ningbo China Communication Water Transportation Design and Research Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: PHC pipe piles have strong adaptability to engineering geology, and are widely used in port engineering. When it takes hard clay layer, dense sand layer or bedrock as the bearing layer, and the above soil layers fluctuate violently and irregularly, the pile sinking quality is very difficult to control, which is easy to cause the problem of sinking abnormal piles such as high or low. For sinking low pile, in order to ensure the project progress and save investment cost, pile connection measures are generally given priority. Aiming at the connection scheme of sinking low pile, this paper focuses on a new type of pile connection structure of PHC pipe pile, that is, according to the actual elevation deviation of pile top, the pile core channel steel is used to strengthen or combine the pile top with cylindrical concrete, so as to meet the requirements of rigid connection between pile foundation and superstructure. The practice results show that the new pile connection structure is suitable for sinking low piles with different slopes, which can effectively avoid the disadvantages of additional structural weight, increased construction difficulty and poor overall appearance quality caused by conventional pile connection by adjusting the scale of superstructure, and can provide reference for similar projects.

Keywords: high piled wharf; PHC pipe pile; rigid connection; sinking low pile; pile connection structure

PHC 管桩已在港口码头工程中被广泛应用，具有桩身混凝土强度高、抗弯能力强、防腐蚀性能好、工厂标准化生产质量可靠、机械化施工程度高、施工速度快、造价低等优点。一般而言，PHC 管桩对工程地质适应性较强，但当其以坚硬黏土层、密实砂层或基岩作为持力层且上述土层起伏变化剧烈、无规律可循时，沉桩施工质量极难控制，实际桩顶高程易高于或低于设计值，即沉桩施工存在打高或打低等异常桩问题。对于打高桩而言，经反复锤击后其贯入度均能满足设计要求，若低应变检测桩身完好，则仅需人工或机械凿除超高部分即可。对于打低桩而言，工况复杂且处理技术难度较大，措施不当可能导致废桩而需另外补桩，造成工期延长和经济损失。为保证工程进度和节省投资费用，一般优先考虑接桩。若贯入度或高应变检测承载力满足设计要求、桩身完整且桩顶位于可施工潮位附近，常规可通过调整上部结构整体高度或局部增加桩帽与打低桩连接，但该种接桩措施会显著增加结构自质量和施工难度，并影响外观质量，尤其当桩基倾斜角较大时，为满足外包宽度要求，往往使得上部结构调整尺寸过大，造成施工材料和投资费用浪费。目前，不改变上部结构尺度的接桩措施的相关研究和应用较少，尚无完善的理论体系和指导方法。笔者探讨了一种 PHC 管桩打低桩接桩方案，不需调整上部结构尺度即能够满足桩基与上部结构之间刚性连接的要求，为保证工程进度和降低变更费用提供了技术支撑，可应用于类似工程实践。

1 PHC 管桩桩顶受力分析

PHC 管桩在高桩码头中承受压力、拉力、剪力和弯矩作用，尤其在船舶撞击和波浪作用下，桩基与上部结构连接处的拉力和弯矩较大，易造成连接处上部结构混凝土开裂和剥离剥落，甚至

导致桩基从上部结构中被拔出。因此，当抗拔和抗弯要求较高时，PHC 管桩与上部结构之间的连接设计尤为关键，应保证抗拔和抗弯承载力满足结构受力要求。

PHC 管桩与上部结构连接处的抗拔承载力由桩身侧面与上部结构混凝土之间的黏结剪应力以及管桩端部与上部结构混凝土之间的黏结拉应力组成，其中黏结强度与上部结构混凝土强度、管桩桩径、表面粗糙程度、伸入上部结构长度、界面黏结剂类型、桩芯混凝土等有关^[1-2]；连接处的抗弯承载力由管桩和桩芯混凝土构成的复合截面共同发挥作用，抗弯能力与上部结构混凝土强度、管桩桩径、型号、壁厚和伸入上部结构长度、桩芯混凝土等有关^[3-5]。当桩芯纵向钢筋伸出管桩桩顶并满足锚固长度要求时，能够显著提高连接处的抗拔和抗弯承载力并增加连接处发生破坏时的延性^[6-7]，限制和延缓桩身裂缝开展，有效改善管桩变形能力，避免脆性破坏。

根据上述桩顶受力分析，对于具体高桩码头工程而言，当基础采用 PHC 管桩且桩型确定后，一般可考虑通过调整管桩伸入上部结构的长度和桩芯混凝土配筋提高连接处抗拔和抗弯承载力。

2 刚接 PHC 管桩规范设计要求

根据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[8]，当 PHC 管桩与桩帽或横梁连接处抗弯要求较高、按刚性连接设计时，应满足下列要求：1) 管桩伸入桩帽或横梁的长度 L 应满足抗拔和受弯要求，且不小于 0.75 倍桩径 ($\geq 0.75D$)；2) 桩芯混凝土伸入桩帽或横梁底面以下的长度应满足受力要求，且不小于 1.5 倍桩径 ($\geq 1.5D$)；3) 桩帽或横梁的外包宽度不小于 0.4 倍桩径 ($\geq 0.4D$)；4) 桩芯纵向钢筋伸出桩顶的长度 L_0 应满足锚固要求。见图 1。

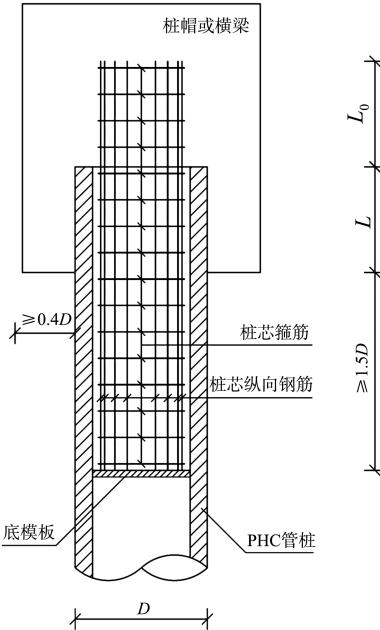


图 1 刚接 PHC 管桩与桩帽或横梁连接结构

2.1 管桩伸入桩帽或横梁的长度 L 的确定原则

当按刚性连接设计时, 抗拔试验要求 PHC 管桩伸入桩帽或横梁的最小长度应满足 0.75 倍桩径, 而 PHC 管桩与桩帽或横梁连接点(图 2)的受弯承载力可按下式验算:

$$\frac{6M}{DL^2} + \frac{4V}{DL} \leq a f_c \quad (1)$$

式中: M 为作用于桩帽或横梁底部、管桩中心位置处的弯矩设计值($N \cdot mm$); L 为管桩伸入桩帽或横梁的长度(mm); V 为作用于桩帽或横梁底部的剪力设计值(N); D 为管桩外径(mm); a 为桩帽或横梁混凝土挤压强度系数, 取 2.7; f_c 为桩帽或横梁混凝土的轴心抗压强度设计值(N/mm^2)。

由式(1)可得刚接 PHC 管桩在满足受弯要求时其伸入桩帽或横梁的长度 L 应满足:

$$L \geq \frac{2}{a} \left(\frac{V}{f_c D} \right) + \sqrt{\frac{4}{a^2} \left(\frac{V}{f_c D} \right)^2 + \frac{6}{a} \left(\frac{M}{f_c D} \right)} \quad (2)$$

由式(2)可得刚接 PHC 管桩在满足受弯要求时其伸入桩帽或横梁的最小长度为:

$$L_{min} = \frac{2}{a} \left(\frac{V}{f_c D} \right) + \sqrt{\frac{4}{a^2} \left(\frac{V}{f_c D} \right)^2 + \frac{6}{a} \left(\frac{M}{f_c D} \right)} \quad (3)$$

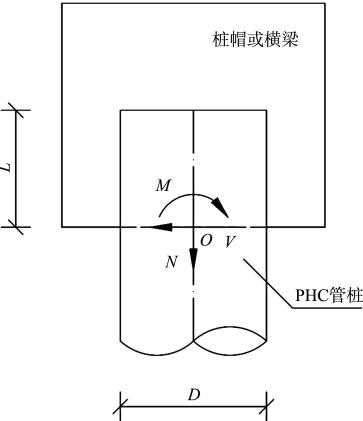


图 2 PHC 管桩与桩帽或横梁连接计算

根据相关试验研究成果, 当桩基受弯时, 若管桩伸入桩帽或横梁的长度不小于 0.5 倍桩径, 则桩身最先产生破坏, 而管桩与桩帽或横梁连接处完好。由此判断, 刚接 PHC 管桩在满足受弯要求时其伸入桩帽或横梁的最小长度 L_{min} 一般不大于 0.5 倍桩径。

综上所述, 刚接 PHC 管桩伸入桩帽或横梁的长度 L 在满足抗拔要求时的最小值为 0.75 倍桩径, 在满足受弯要求时的最小值为 L_{min} , 设计时应取两者之间的较大值 0.75 倍桩径, 即为规范要求的限值。

2.2 桩芯纵向钢筋伸出桩顶的长度 L_0 的确定原则

参照 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》^[9]对受拉钢筋锚固长度的要求, 可按下式计算桩芯纵向钢筋伸出管桩桩顶的长度 L_0 :

$$L_0 = \alpha \cdot \frac{f_y}{f_t} \cdot d \quad (4)$$

式中: L_0 为受拉钢筋的锚固长度(mm); α 为钢筋的外形系数; f_y 为钢筋的抗拉强度设计值(N/mm^2); f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值(N/mm^2); d 为钢筋直径(mm)。

3 打低桩接桩条件

为尽可能降低变更费用并减少对工程进度的影响, 在沉桩施工过程中, 若 PHC 管桩实际桩顶高程低于设计值, 一般优先考虑采取接桩措施,

但在接桩之前，应确保打低桩满足以下条件，否则应按废桩处理并选择合适位置进行额外补桩：1) 贯入度(最终 10 击的平均贯入度)满足设计要求，且低应变检测桩身完整或基本完整；2) 贯入度不满足设计要求，但高应变检测桩基轴向承载力满足设计要求且桩身完整或基本完整；3) 实际桩顶位置适宜，不至于过低，工程海域潮位条件可满足接桩施工要求。

需特殊说明的是若原设计 PHC 管桩伸入桩帽或横梁的长度留有一定富余，即大于 0.75 倍桩径，则当 PHC 管桩沉桩贯入度满足要求、实际桩顶高程低于设计值但不小于 0.75 倍桩径时，可不进行接桩处理，根据相关试验研究成果，结构可靠性能够满足要求。

4 接桩结构设计方案

4.1 常规接桩结构设计方案

当刚接 PHC 管桩沉桩实际桩顶高程低于设计值时，通常将上部结构整体或局部降低，同时根据其外边缘至桩基之间的距离考虑是否加宽，以满足 PHC 管桩伸入长度和外包宽度要求，达到 PHC 管桩与上部结构之间刚性连接的要求。该种接桩结构对于垂直或倾斜角较小的打低桩而言较为适用，上部结构调整的尺度不大；但对于倾斜角较大的打低桩而言，特别是当实际桩顶高程与设计值相差较大时，该种接桩结构的弊端尤为突出，原因是为达到 PHC 管桩刚性连接要求，上部结构尺度将显著增大、施工麻烦、产生较大的额外自质量，并影响整体外观质量。

4.2 新型接桩结构设计方案

新型接桩结构的外包方向与桩体轴线一致，有效规避了常规接桩结构存在的问题，不改变上部结构尺度、额外自质量增加较小、施工简单、费用较低，可适用于不同斜度的打低桩。根据 PHC 管桩打低桩实际桩顶高程偏差程度可分为两种工况，对应采用不同的接桩结构。

4.2.1 工况 1: $L_{\min} \leq L' < 0.75D$

当打低桩实际可伸入上部结构的长度 L' 不小于满足受弯要求的最小长度 L_{\min} 但小于 0.75 倍桩径时，可采用桩芯槽钢加强处理：管桩桩芯采用槽钢加强，槽钢沿管桩内缘均匀布置，净距不宜大于 250 mm，伸入桩帽或横梁的长度不宜小于 $0.75D + L_0$ (桩芯纵向钢筋锚固长度)，下边界至桩芯混凝土底模板处，其余结构同原设计。见图 3。

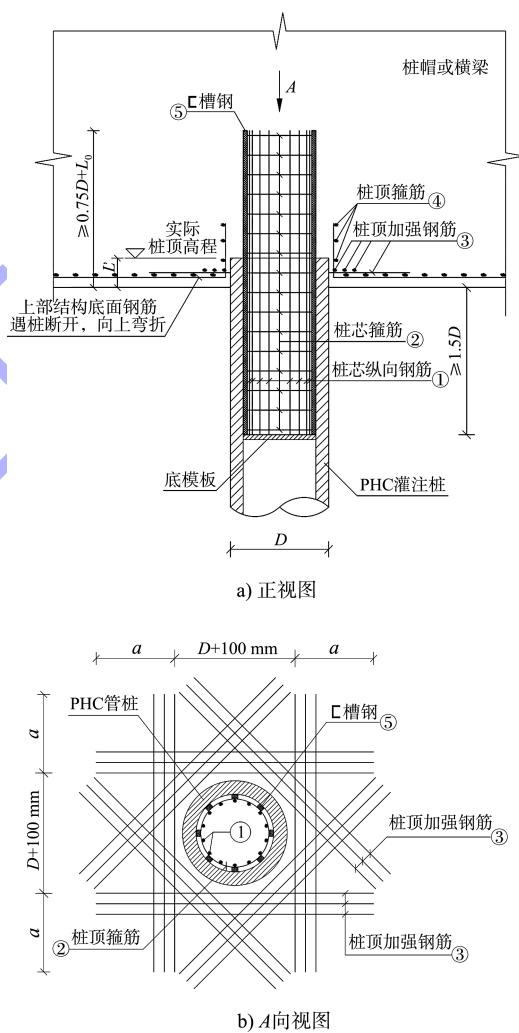


图 3 工况 1 桩芯槽钢加强打低桩接桩结构

4.2.2 工况 2: $0 \leq L' < L_{\min}$ 或 $L' < 0$ (打低桩实际桩顶低于上部结构底面)

当打低桩实际可伸入上部结构的长度 L' 小于满足受弯要求的最小长度 L_{\min} 或低于桩帽或横梁等上部结构底面时，可采用桩芯槽钢加强并外包圆柱形混凝土进行接桩处理(图 4)，具体要求如下：

1) 桩顶外包圆柱形混凝土。

①外包范围根据实际桩顶位置确定:若桩顶高于上部结构底面,外包范围为上部结构底面以上100 mm至上部结构底面以下不小于1.5倍桩径处;若桩顶低于上部结构底面,外包范围为上部结构底面以上100 mm至实际桩顶以下不小于1.5倍桩径处。

②外包混凝土厚度不小于0.4倍桩径。

③外包混凝土配筋可参照灌注桩设计,计算时连接处荷载作用考虑全部由外包混凝土承受。在桩顶弯矩和轴力作用下,外包混凝土最大裂缝开展宽度应满足规范对不同腐蚀条件和腐蚀部位的限值要求。

④纵向主筋采用HRB400级钢筋,数量不宜少于12根,直径不宜小于16 mm,应沿桩身周边均匀布置。主筋伸入桩帽或横梁的长度不宜小于40倍钢筋直径,净保护层厚度为海港不应小于70 mm、河港不应小于50 mm。螺旋箍筋采用不宜小于直径8 mm的HPB300级钢筋,间距宜为100~150 mm。

⑤外包混凝土宜采用微膨胀混凝土,强度等级不应低于桩帽或横梁等上部结构混凝土强度等级。打低桩在外包混凝土范围内应对桩身外表面进行适当凿毛处理,并在新旧混凝土结合面之间涂刷界面黏结剂,以提高外包混凝土与管桩之间黏结强度。

⑥当桩顶外包混凝土浇筑完成并达到设计强度后,应及时拆除临时施工用钢护筒,避免因护筒锈蚀而影响结构耐久性,并对桩身表面缺陷进行修复。

2) 桩芯混凝土。桩芯混凝土宜采用微膨胀混凝土,强度等级不应低于上部结构混凝土强度等级,浇筑边界需根据管桩外包混凝土范围确定,其下边界应位于外包混凝土底面以下不小于1.5倍桩径处。纵向主筋采用HRB400级钢筋并沿管桩内缘均匀布置,伸入桩帽或横梁的长度不宜小于 $0.75D+L_0$ (L_0 为纵向钢筋锚固长度)。伸入桩帽或

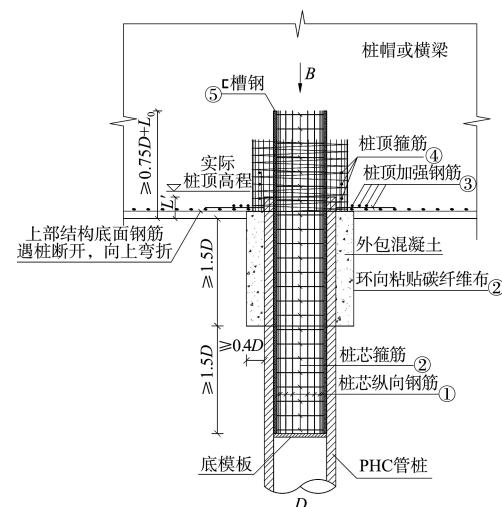
横梁的纵向主筋可根据受力情况采用直筋伸入或喇叭形伸入方式,当桩顶弯矩较大时宜采用直筋伸入,当上部结构承受较大冲切力时宜采用喇叭形。螺旋箍筋采用直径8~12 mm的HPB300级钢筋,间距可取150~200 mm。

3) 桩芯加强槽钢。管桩桩芯采用槽钢加强,槽钢布置间距、长度和范围等要求同工况1。

4) 桩顶加强钢筋。若原设计上部结构底面桩顶加强钢筋与外包混凝土外伸钢筋冲突,可适当调整其位置,或将其外移至外包混凝土外伸钢筋外侧。若外移桩顶加强钢筋位置,应注意同步调整其长度,保证搭接长度不小于30倍钢筋直径。

5) 环向粘贴高强度碳纤维布。当外包混凝土达到设计强度后,可在其外表面环向粘贴2~3层高强度碳纤维布,能够对外包混凝土的横向变形起到约束作用,抑制裂缝开展、混凝土剥离剥落和纵筋屈曲,从而提高外包混凝土的延性和抗剪能力。粘贴之前应对外包混凝土表面进行必要的处理,清除破损劣化部位并修补填平坑槽凹陷,确保基面平整,使得碳纤维布在粘贴后与混凝土之间能够牢固结合,防止碳纤维布起鼓、脱离和错位。

6) 表面防腐涂层。外包混凝土底面以及碳纤维布外表面均涂刷防腐涂料进行保护,设计保护年限不小于10 a。涂刷防腐涂料之前,应在碳纤维布外表面喷射厚度不小于20 mm的丙乳砂浆。



a) 桩芯槽钢加强打低桩接桩结构($0 < L' < L_{\min}$)

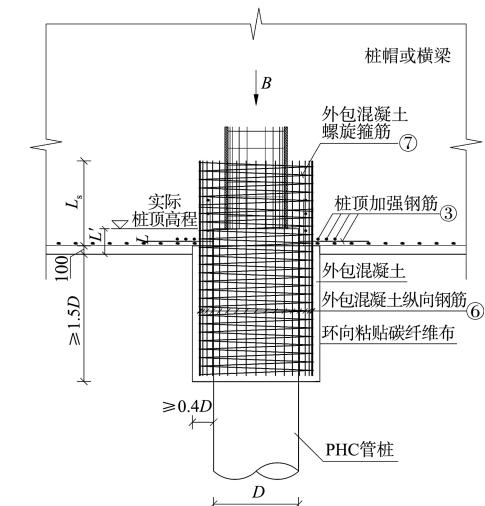
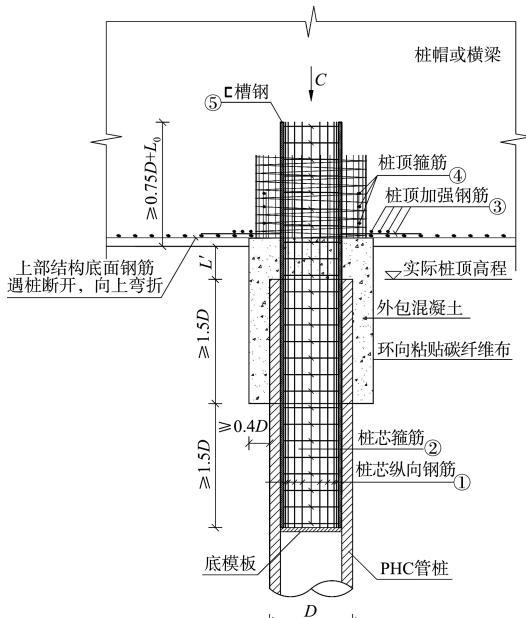
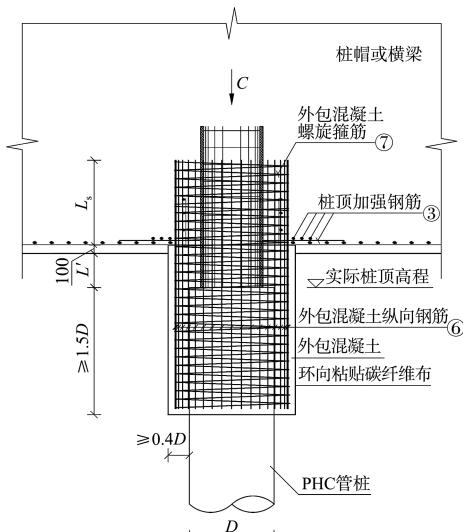
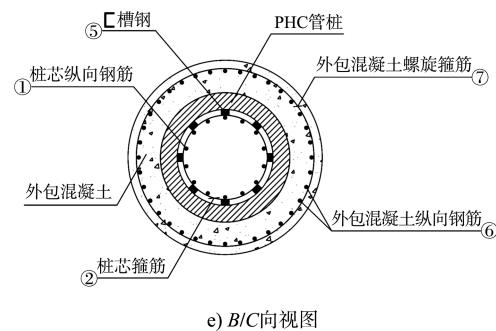
b) 桩顶外包圆柱形混凝土打低桩接桩结构($0 < L' < L_{\min}$)c) 桩芯槽钢加强打低桩接桩结构($L' < 0$)d) 桩顶外包圆柱形混凝土打低桩接桩结构($L' < 0$)

图 4 桩芯槽钢加强并外包圆柱形混凝土进行接桩处理

5 结论

- 1) 若 PHC 管桩按刚接设计，则管桩伸入桩帽或横梁的长度、桩芯混凝土伸入桩帽或横梁底面以下的长度、桩帽或横梁的外包宽度、桩芯纵向钢筋伸出桩顶的长度均应满足规范要求。
- 2) 打低桩可接桩的前提条件为满足沉桩贯入度或桩基轴向承载力、桩身完整性以及施工等要求，可通过高应变或低应变检测确定桩基状况。
- 3) 针对刚接 PHC 管桩打低问题，可根据实际桩顶高程偏差程度，采用桩芯槽钢加强或联合桩顶外包圆柱形混凝土进行接桩处理，以达到桩基与上部结构之间刚性连接的要求。该新型接桩结构适用于不同斜度的打低桩，能够有效规避常规通过调整上部结构尺度进行接桩所导致的额外结构自质量和施工难度增加偏大、整体外观质量较差等弊端。

参考文献：

- [1] 李平先, 赵国藩, 张雷顺. 预应力混凝土大管桩与桩帽连接的轴拔性能和粘结滑移特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 33(22): 3846-3852.
- [2] 张忠. 预应力混凝土管填芯混凝土抗拔试验研究及理论分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [3] 崔向东. 桩头加强型预应力管桩与承台节点处抗弯性能试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [4] 唐孟雄, 戚玉亮, 周治国, 等. 空心与填芯 PHC 管桩抗弯试验及其理论计算研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 1075-1080.

(下转第 58 页)