

· 地基与基础 ·



复合桩基础在航道护岸工程中的应用

陈明阳¹, 顾海英², 曹利利¹, 顾宽海¹

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;

2. 浙江浙能温州发电有限公司, 浙江 温州 325062)

摘要: 由于复合桩基础的经济性, 近年来受到越来越多的关注, 但在航道护岸工程中应用较少, 究其原因是航道护岸低桩承台复合桩基础受力更加复杂、技术上较难把握。通过分析航道护岸低桩承台复合桩基础竖向承载力和水平承载力, 提出了复合桩基础设计控制原则: 1) 坚向整体安全度 $K \geq 2$, 地基承载力利用率 $\psi \geq 0.5$ 。2) 桩土联合承担水平力。制定了航道护岸复合桩基础的设计方法及流程, 为类似工程提供参考。

关键词: 复合桩基础; 护岸; 低桩承台

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0180-05

Application of composite pile foundation in waterway revetment

CHEN Ming-yang¹, GU Hai-ying², CAO Li-li¹, GU Kuan-hai¹

(1.CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2.Zhejiang Zheneng Wenzhou Power Generation Co., Ltd., Wenzhou 325602, China)

Abstract: Due to the economics of composite pile foundations, it has received more and more attention in recent years, but it has been less used in waterway revetment projects. The reason is that the force of composite pile foundations with low pile caps on waterway revetments is more complicated and technically difficult. By analyzing the vertical bearing capacity and horizontal bearing capacity of the composite pile foundation of low pile caps retaining wall of waterway revetments, the design control principle of the composite pile foundation is proposed: 1) Vertical overall safety $K \geq 2$, fulfilled rate of subsoil bearing capacity $\psi \geq 0.5$. 2) Pile and soil jointly bear horizontal force. The design method and procedures of the composite pile foundation of waterway revetments is formulated to provide a reference for similar projects.

Keywords: composite pile foundation; revetment; low pile cap retaining wall

航道工程护岸结构形式多样, 有斜坡式、重力式、桩基式、板桩式等, 在长三角地区遇有软土地基时通常采用低桩承台结构。近年来, 复合桩基础的理论得到发展, 主要用于建筑工程, 带来了可观的经济效益。JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》^[1]对复合桩基的使用方法做了原则上的规定; 上海市 DGJ 08-11—2010《地基基础设计规范》^[2]结合上海工程情况进行了补充; HG/T 20709—2017《复合桩基础设计规范》^[3]对近年的理论进行了总

结, 并进一步完善了设计使用原则, 发布了行业标准。复合桩基础在航道护岸工程中采用的较少, 低桩承台不同于建筑结构主要承受竖向荷载, 其同时要承受较大的水平力, 且工况复杂多变, 受力机理复杂, 设计质量较难把控。

宰金珉^[4]针对大桩距的低承台建筑, 提出了整体承载力和沉降量双重控制的复合桩基础设计方法; 周峰等^[5]对软土地区复合桩基础适用条件进行了探讨; 杨杰^[6]对低桩承台挡土墙结构考虑

桩土共同承担荷载的计算模型进行了初步的探讨。大量实践表明: 传统的桩基础设计容易导致底板与地基脱离, 形成防渗的薄弱点。同时随着对桩基础优化的呼声愈来愈高, 对复合桩基础在航道护岸工程中的应用进行研究非常有意义。

综上, 目前对航道护岸的复合桩基础研究较少, 也不系统。本文将重点探讨设计控制原则、设计方法流程等, 为此类应用提供参考和指导。

1 复合桩基础竖向承载力

复合桩基础介于完全桩基与完全土基之间, 根据现行建筑桩基规范要求, 桩基、地基及复合桩基均采用整体安全系数法进行设计, 要求极限承载能力 Q_{uk} 为设计特征值 R_s 的 2 倍, 桩基、地基、复合桩基的荷载位移曲线见图 1。

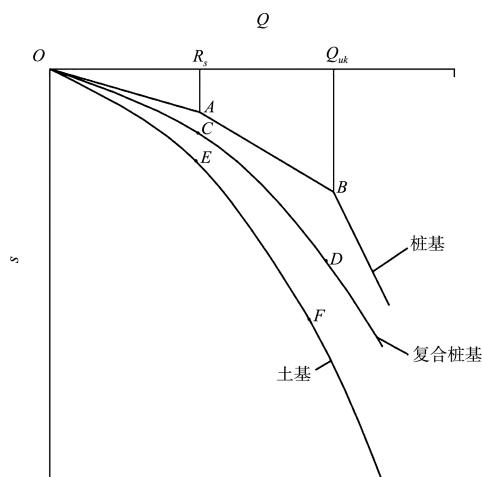


图 1 复合桩基 Q - s 曲线类型

完全桩基情况: OA 段桩基处于弹性受力阶段, B 点达到承载能力极限, $Q_{uk}=2R_s$ 。

完全土基情况: 地基变形无明显的转折点, E 点地基土处于近似弹性比例界限, F 点达到承载能力极限。

复合桩基情况: OC 段桩基、承台共同承担上部荷载, 桩基承台处于弹性阶段; CD 段桩基承载力完全发挥, 地基土承担余下荷载; D 点之后地基达到承载力极限。

根据复合桩基础的设计思想, 复合桩基础中基桩应选用摩擦桩或端承摩擦桩, 复合桩基础在

荷载作用下, 基桩易达到极限工作状态。由于复合桩基础中采用单桩极限承载力进行设计, 为了保证单桩在接近或者达到极限状态时其承载力不发生削弱的情况, 必须保证荷载-位移曲线不发生图 1 所示的超过 B 点的情况。

对于采用复合桩基础的低桩承台, 计算模式见图 2。

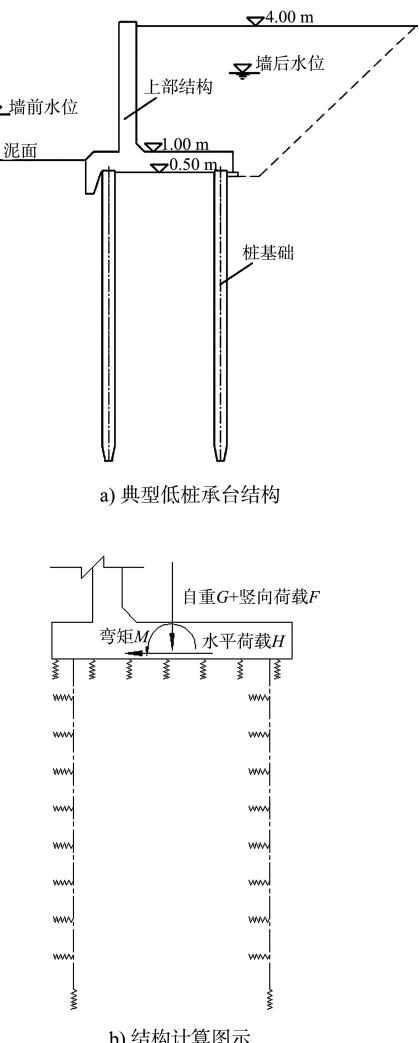


图 2 低桩承台及其结构计算图示

复合桩基由桩基与地基共同作用, 桩基承载力由桩基附近土体及桩端土体提供。实测显示当距离大于 6 倍桩径(d)时桩侧摩阻力引起的地基土变形可以忽略不计, 为了保证复合桩基础中基桩能达到极限工作状态, 减小群桩效应的影响, 桩间土发挥承载作用, 实现桩、承台板共同明确分担荷载的目标, 复合桩基桩距不宜小于 $5d$ 。

复合桩基础是介于天然地基和纯桩基之间的过渡型基础形式，核心设计思想是充分利用桩的承载能力，合理利用地基承载能力，使得复合桩基础中单桩工作荷载突破传统 R_s 的限制，扩大到接近极限荷载 R_{uk} (R_{uk} 值为 R_s 的 2 倍)，从而将剩余荷载明确交由地基承担，解决了设计过程中最不可知的桩土荷载分配问题。

复合桩基础荷载标准值 P 为桩基荷载 Q_1 与地基荷载 Q_2 之和：

$$P = Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

桩基竖向极限承载力利用率 ζ_p 为：

$$\zeta_p = Q_1 / (nR_{uk}) \quad (2)$$

式中： n 为桩基根数； R_{uk} 为单桩的极限承载力。

地基承载力利用率 ζ_s 为：

$$\zeta_s = Q_2 / (f_a A_c) \quad (3)$$

式中： f_a 为地基承载力特征值； A_c 为承台底面积。

地基承载力满足率 ψ 为：

$$\psi = f_a A_c / P \quad (4)$$

综上，复合桩基础荷载设计值可表示为：

$$P = n\zeta_p R_{uk} + \psi\zeta_s P \quad (5)$$

桩基总的极限承载力 R_1 为：

$$R_1 = nR_{uk} \quad (6)$$

地基土极限承载力取 $2.0f_a$ ，底板基础地基土的极限承载力 R_2 为：

$$R_2 = 2.0f_a A_c \quad (7)$$

复核桩基础整体极限承载力 R_u 为：

$$R_u = R_1 + R_2 \quad (8)$$

则复合桩基础整体极限承载力可表示为：

$$R_u = nR_{uk} + 2.0\psi P \quad (9)$$

复合桩基础整体安全度 K 为：

$$K = \frac{R_u}{P} = \frac{1}{\zeta_p} + \left(2.0 - \frac{\zeta_s}{\zeta_p}\right)\psi \quad (10)$$

当单桩极限承载力利用率为 $\zeta_p = 1$ 时有：

$$K = 1 + (2.0 - \zeta_s)\psi \quad (11)$$

由此， K 与地基承载力满足率、地基承载力利用率的关系见图 3。

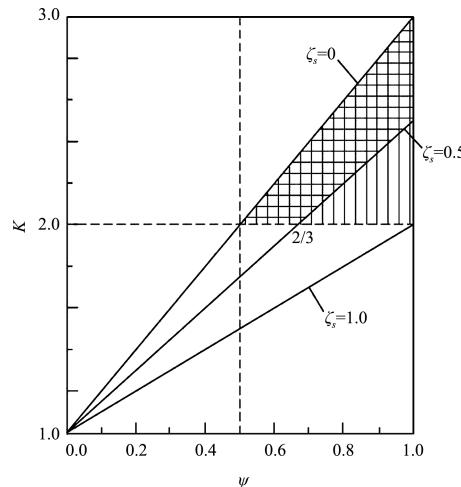


图 3 K 与 ψ 、 ζ_s 的关系 ($\zeta_p = 1$)

可以看出， ζ_s 和 ζ_p 的降低并不明显提高 K 值； ψ 对 K 的影响最显著。一般情况下， $\psi \geq 0.5$ 时，复合桩基础可取得良好效果；当 $\psi < 0.5$ 时，一般应按常规方法设计桩基。

地基承载力满足率用以反映地基土承担上部结构荷载的能力。复合桩基础中，天然地基应具有承担不小于 50% 的标准组合荷载效应的能力，以确保能形成有效的桩土共同作用状态，同时使复合桩基础更易满足整体安全度的要求。

由于单桩的承载能力用到极限荷载，因此地基的承载特性是确保复合桩基础整体安全的关键，分析表明，地基承载力利用率 $\zeta_s \leq 0.5$ 时，易满足复合桩基础整体安全度要求。

复合桩基础理论将桩基用到极限，即 $\zeta_p = 1$ ，但考虑到桩基受场地条件、施工等不确定因素以及群桩效应的影响，《复合桩基础设计规范》建议单桩竖向极限承载力利用率宜取 $\zeta_p = 0.8 \sim 0.9$ 。当成桩质量可靠、有当地经验时取 0.9。

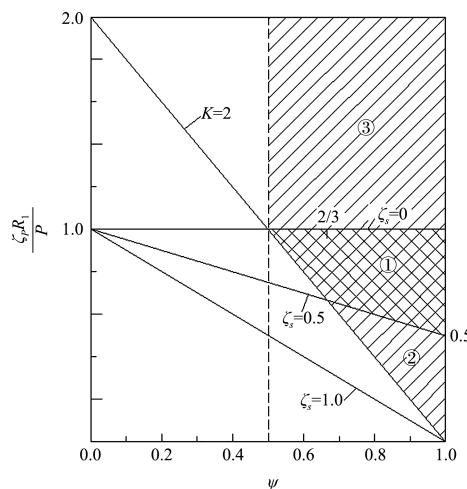
由式(5)、(6)得：

$$\frac{\zeta_p R_1}{P} = 1 - \zeta_s \psi \quad (12)$$

当 $K=2$ ，将式(11)代入式(12)得：

$$\frac{\zeta_p R_1}{P} = 2 - 2\psi \quad (13)$$

由此，桩基作用比例 $\zeta_p R_1 / P$ 与地基承载力满足率、地基承载力利用率的关系见图 4。

图 4 $\zeta_p R_i / P$ 与 ψ 、 ζ_s 的关系

由图 4 可知:

1) 在 $K=2$ 分界线上, 当 $\psi=0$ 时, 退化为全桩基情况; 当 $\psi=1$ 时, 退化为全地基情况。

2) 满足 HG/T 20709—2017《复合桩基础设计规范》要求 ($K \geq 2$ 、 $\psi \geq 0.5$ 、 $\zeta_s \leq 0.5$) 的复合桩基为①区, 此时 $\zeta_p R_i / P \geq 0.5$, 表明复合桩基础中荷载主要由桩基承担。

3) 由图 4 中①、②区知 $\zeta_p R_i / P \leq 1$, 表示桩基承载力标准值小于荷载标准值, 桩基地基同时受力, 此时地基承载力满足率 $\psi \geq 0.5$, 而 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》要求 $\psi \geq 0.6$, DGJ 08-11—2010《地基基础设计规范》要求 $\psi \geq 0.59$ 。

4) ②区不满足 HG/T 20709—2017《复合桩基础设计规范》中 $\zeta_s \leq 0.5$ 的要求, 而在 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》并没有相关规定, 此区表明地基应力超过地基承载力特征值的 1/2, 地基承受的份额变大, 为主要受力者, 桩基础承受份额减小, 为少量的疏桩基础。相对于完全桩基础设计, 该类桩基桩数大量减少, 桩基在提供少量承载力时还需由沉降来加以控制。对于航道护岸来说, 由于地基沉降限制不如建筑工程要求高, 采用该区设计具有较大的经济优势, 但由于航道护岸往往受较大水平力, 还须谨慎使用。

5) ③区 $\zeta_p R_i / P \geq 1$, 表明桩基承载力标准值大于荷载标准值, 坚向荷载全部由桩基承受, 水平荷载也全部由桩基承受。鉴于本区已有较好承载

满足性, 建议按 $\zeta_p = 2/3$ 取值, 即 $R_i / P \geq 1.5$, 但该设计目前案例较少, 还需经实践来验证。

由此, 根据航道护岸的特点, 提出复合桩基础竖向承载力控制原则: 航道护岸复合桩基础可按整体安全度 $K \geq 2$ 、地基承载力利用率 $\psi \geq 0.5$ 标准进行控制(即图 4 中①、②、③区)。对于其中不完全桩基情况(即③区)建议按 $R_i / P \geq 1.5$ 控制。

2 复合桩基础水平承载力分析

与传统建筑复合桩基主要承受竖向荷载不同, 航道低桩承台还要承受较大的水平向荷载, 坚向力由桩基受力 Q_1 和地基土受力 Q_2 组成, 水平荷载由桩基水平受力 H_1 和地基土受力 H_2 组成。地基承受水平力主要靠土的摩擦力, 而桩基承受水平力是依靠桩前土体提供抗力, 由于桩前土体抗力在水平位移发生后相应产生, 因此当水平力作用在低桩承台上, 首先由地基土承担摩擦力, 剩余部分由桩基承受。

桩基水平受力 H_1 为:

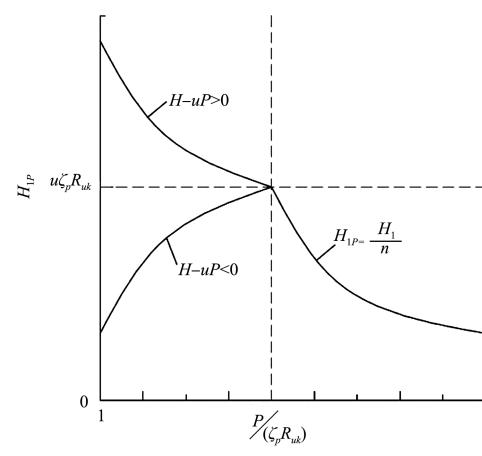
$$H_1 = H - u Q_2 \quad (14)$$

式中: u 为地基土摩擦系数。单根桩水平荷载为 $H_{1p} = H_1 / n$, 由式(1)、(2)、(14)得:

$$H_{1p} = \frac{H - uP}{n} + u \zeta_p R_{uk} \quad (P - n \zeta_p R_{uk} > 0) \quad (15)$$

$$H_{1p} = \frac{H}{n} \quad (P - n \zeta_p R_{uk} \leq 0) \quad (16)$$

由此, 单桩水平荷载 H_{1p} 与桩数量 n 的关系见图 5。

图 5 H_{1p} 与 n 的关系

由图 5 可知:

1) 当 $P-n\zeta_p R_{uk} > 0$ 时, 单桩水平荷载随着桩数的增加逐渐减小, 当桩数 $n=P/(\zeta_p R_{uk})$ 时, 退化为全桩基情况。

2) 当 $P-n\zeta_p R_{uk} \leq 0$ 时, 单桩水平荷载随着桩数的增加先增加, 当桩数 $n=P/(\zeta_p R_{uk})$ 时, 得到最大水平力 $H_{lp}=u\zeta_p R_{uk}$, 之后退化为全桩基情况, 随着桩数的增加而减小。

通过以上分析可知, 单桩的水平荷载与桩、土的竖向受力相关, 复合桩基础水平向承载力可根据实际受力状态按照桩土联合受力进行设计。

3 复合桩基低桩承台设计流程及方法

1) 首先根据地基满足率 $\psi \geq 0.5$ 确定承台的尺寸:

$$A_c = \psi P / f_a \quad (17)$$

2) 由于航道护岸中复合桩基础往往采用的是小直径的摩擦桩, 不同于建筑复合桩基竖向力控制, 航道护岸低桩承台桩往往是由桩的水平承载能力 H_{lpk} 控制桩基数量, 初步选定地基承载力利用率后, 即可明确地基和桩基受力比, 从而得到桩基总水平力及桩数:

$$n \geq \frac{H - u\zeta_s f_a A_c}{H_{lpk}} \quad (18)$$

3) 确定桩数后, 即可确定单桩竖向承载能力, 进而确定桩长:

$$R_{uk} \geq \frac{P - \zeta_s f_a A_c}{n\zeta_p} \quad (19)$$

$$R_{uk} \geq \frac{KP - 2f_a A_c}{n} \quad (K \geq 2) \quad (20)$$

4) 这样复合桩基初步方案确定后, 再次复核各满足系数, 如果不满足须进一步调整承台尺寸、桩基数量、桩基竖向承载力等参数, 使之落在图 4 中①区内。

5) 总体方案确定后, 按照图 2 计算模式进行空间计算, 确定桩基的布局及桩身内力。

6) 对于沉降有严格要求的低桩承台, 还须复核总体及差异沉降的满足性, 进而确定最终方案。

4 应用案例

长三角地区某航道护岸低桩承台设计运用复合桩基础, 断面见图 2, 墙前与墙后考虑 2.0 m 水头差, 该挡墙基底下卧层主要为软土地基, 地基天然承载力 50 kPa, 根据地基满足率 $\psi \geq 0.5$ 及结构其他尺度要求取底板宽度为 3.5 m, 每 10 m 分段挡墙竖向荷载为 $P = 2210$ kN, 水平向荷载为 $H = 887.5$ kN, 考虑软土力学性质差及地区经验, 工程拟采用图 4 中的③区进行设计, 此时 $R_1/P \geq 1$, 桩基承载力标准值大于荷载标准值, 水平荷载全部由桩基承担, 桩基础采用 300 mm×300 mm 预制方桩。经验算, 每根桩水平承载力为 55 kN, 则需 16 根桩(前排 10 根、后排 6 根), 按 $R_1/P \geq 1.5$ 确定 $R_{uk} \geq 207$ kN, 桩长为 9.5 m。竖向总承载力 $R_u = R_1 + R_2 = nR_{uk} + 2f_a A_c = 6860$ kN $\geq 2P$, 能满足整体安全系数 K 不小于 2 的要求, 同时适当考虑了地基土的作用, 优化缩短了桩长。目前, 该护岸已建设使用, 运行良好。

5 结论

1) 在航道护岸低桩承台中应用复合桩基础, 由于考虑了地基承载力的作用, 充分发挥了桩基的极限承载能力, 相对于传统桩基设计方法可以优化桩基数量、长度, 节约工程投资。

2) 分析了航道护岸复合桩基的竖向和水平向受力状况, 提出竖向整体安全度 $K \geq 2$ 、地基承载力利用率 $\psi \geq 0.5$ 及水平向桩土联合受力的复合桩基础设计控制原则。

3) 针对航道护岸复合桩基与传统建筑复合桩基的不同, 按照同时满足水平承载力和竖向承载力的原则, 制定了航道低桩承台复合桩基础的设计方法及流程, 为类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.