



低桩承台挡土墙基础结构设计计算

杨杰, 马兴华, 黄荳荳

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 介绍了低桩承台挡土墙基础结构采用竖向弹性地基梁法计算的两种模型: 一种是由桩基础承担承台底面以上全部荷载作用, 另一种是由地基土与桩基共同承担承台底面以上全部荷载作用。提出两种计算模型的判别条件以及设计时必须遵循的要求, 为低桩承台挡土墙结构的设计和计算提供了依据。

关键词: 低桩承台挡土墙; 计算模型; 竖向弹性地基梁法; 复合桩基

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)12-0074-04

Design and calculation of low pile cap retaining wall base structure

YANG Jie, MA Xing-hua, HUANG Dou-dou

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: This paper describes the two models by using vertical elastic foundation beam method to calculate the low pile cap retaining wall base. In one model, piles undertake all load above underside of the cap; in the other model, subsoil and piles work together to undertake all load above underside of the cap. Meanwhile, this paper describes design requirements and discriminant conditions of the two computational models. This paper provides reference to design and calculation of low pile cap retaining wall structure.

Key words: low pile cap retaining wall; computational model; vertical elastic foundation beam method; composite pile foundation

挡土墙在市政、港口、水利工程中应用广泛, 种类繁多, 包括挡土墙、锚杆挡土墙、加筋土挡土墙、板桩式挡土墙等。常见的挡土墙根据基础类型分为天然浅基础挡土墙和低桩承台挡土墙。

在国内, 低桩承台挡土墙广泛应用于挡土高度不大于6 m的码头、护岸等水工结构。该结构基础通常布置双排桩或多排桩, 桩基可采用预应力混凝土管桩、预制混凝土方桩或钻孔灌注桩; 上部结构可采用浆砌块石挡墙、钢筋混凝土悬臂式挡墙或钢筋混凝土扶壁式挡墙。结构形式可见图1。

天然浅基础挡土墙稳定及结构计算理论成熟, 计算方法明确, 而采用桩基础的挡土墙结构至今没有一个公认的计算方法, 相关文献涉及较少。本文将介绍低桩承台挡土墙(图1)采用竖向

弹性地基梁法计算的两种模型, 一种是桩基础承担承台底面以上全部荷载的结构形式(简称常规桩基挡土墙)^[1], 另一种是地基土与桩基共同承担底板底面以上竖向及水平荷载的结构形式(简称复合桩基挡土墙)。

1 判断原则

只有当底板下地基土承担一定荷载时底板底面与地基土的摩擦力才能发挥作用, 本文参照上海市《地基基础设计规范》复合桩基的判断原则进行假定:

1) 当作用在承台底面的竖向荷载准永久组合值大于复合桩基中各桩的单桩极限承载力标准值之和时, 桩承担相当于各单桩极限承载力标准值

收稿日期: 2012-09-27

作者简介: 杨杰(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事港航工程设计。

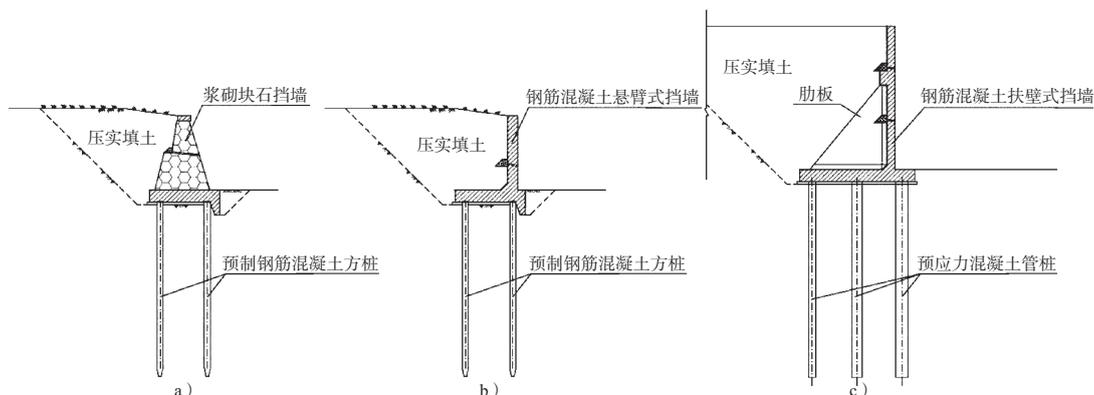


图1 低桩承台挡土墙结构

之和的荷载、底板下地基土承担余下之荷载；对于水平荷载，底板下地基土承担相当于“余下之荷载”乘以底板与地基土摩擦系数之值的荷载，桩承担余下之水平荷载。该结构体系按复合桩基挡土墙计算模型进行分析。

2) 当作用在承台底面的荷载准永久组合值小于等于复合桩基中各桩的单桩极限承载力标准值之和时，桩承担全部竖向和水平荷载，该结构体系按常规桩基挡土墙计算模型进行分析。

2 计算模型

基本假定：假定地基土是弹性介质，地基反力系数随深度变化。

根据相关行业规范的构造要求，低桩承台挡土墙中承台厚度均大于等于400 mm，刚度较大，可将结构简化为平面或空间刚架进行计算，取单位长度或一整段作为计算对象。可不考虑桩尖处沿桩身方向的位移影响，桩入土段按竖向弹性地基梁考虑，承台可按梁单元（二维）或壳单元（三维）考虑。土体采用文克勒地基模型，假设土体对桩的地基反力与桩位移成正比，地基弹性系数采用 m 法确定。桩的地基弹性系数按下式确定：

$$k_h = mzb_0 \quad (1)$$

式中： k_h 为墙前泥面以下深度 z 处桩的地基线弹性系数（ kN/m^2 ），若在有限元软件中建模时采用节点弹性系数，应取该节点处的 k_h 与上下节点间距的乘积； z 为计算点距墙前泥面的深度（m）； b_0 为桩的换算宽度（m），取 $2d$ ， d 为桩受力面的桩径或桩宽； m 为桩侧土的水平地基抗力系数随深度增

长的比例系数（ $\text{kN} \cdot \text{m}^4$ ）。

2.1 常规桩基挡土墙结构

对于常规桩基挡土墙结构，可按图2所示弹性嵌固与地基中的二维平面或三维空间刚架进行有限元分析。常规桩基挡土墙结构中， F_k 、 M_k 由桩的竖向承载力来承担； V_k 由桩的水平承载力来承担。需要注意的是，若 F_k 已包括承台自重则建模时承台密度设为0。

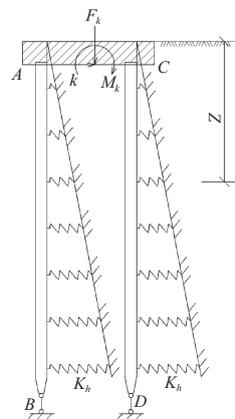


图2 常规桩基挡土墙结构计算图示

图中： F_k 为挡土墙底板底面以上所有竖向作用标准组合值（ kN ），包括底板、挡墙、覆土自重及墙顶活荷载，地下水位以下应扣除浮力； V_k 为挡土墙底板底面以上所有水平作用标准组合值（ kN ），包括主动水压力、剩余水压力等水平作用，用于带缆的还要考虑系缆力； M_k 为挡土墙底板底面以上所有作用对底面中心的弯矩标准组合值（ $\text{kN} \cdot \text{m}$ ），包括竖向作用系和水平作用系。

2.2 复合桩基挡土墙结构

复合桩基挡土墙结构计算见图3。

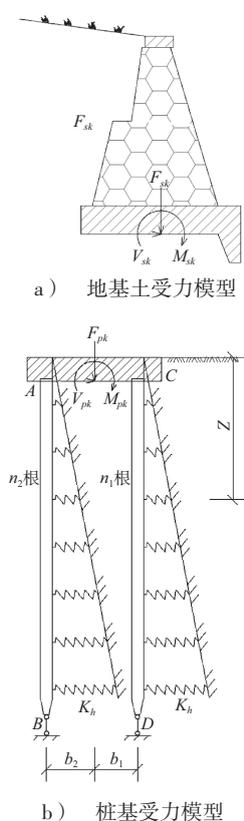


图3 复合桩基挡土墙结构计算图示

图中： n_1 为在某一结构段中前排桩数量， n_2 为在某一结构段中后排桩数量， n 为总桩数， $n=n_1+n_2$ ； b_1 为沿水平力方向前排桩中心至承台中心的距离（m）， b_2 为沿水平力方向后排桩中心至承台中心的距离（m）； F_{pk} 为复合桩基挡土墙某一结构段中桩基承担的竖向作用标准组合值（kN）， $F_{pk}=nR_k$ ， R_k 为单桩竖向极限承载力标准值（kN）； V_{pk} 为复合桩基挡土墙某一结构段中桩基承担的水平作用标准组合值（kN）， $V_{pk}=V_k-\frac{\mu(F_k-nR_k)}{K_c}$ ， μ 为承台底面与地基土的摩擦系数； M_{pk} 为复合桩基挡土墙某一结构段中桩基承担的所有作用对承台底面中心的弯矩标准组合值（kN·m）， $M_{pk}=n_1R_kb_1-n_2R_kb_2$ ； F_{sk} 为复合桩基挡土墙某一结构段中地基土承担的竖向作用标准组合值（kN）， $F_{sk}=F_k-nR_k$ ； V_{sk} 为复合桩基挡土墙某一结构段中地基土承担的水平作用标准组合值（kN）， $V_{sk}=V_k-V_{pk}=\frac{\mu(F_k-nR_k)}{K_c}$ ； M_{sk} 为复合桩基挡土墙某一结构段中地基土承担的所有作用对承台底面中心的弯矩标准组合值（kN·m）， $M_{sk}=M_k-M_{pk}$ ； K_c 为挡土墙沿基底面的抗滑稳定安

全系数。根据挡土墙级别， K_c 可取120~1.35，具体可参考SL 379—2007《水工挡土墙设计规范》^[2]表3.2.7。

复合桩基挡土墙结构中， F_k 和 M_k 由桩与地基土的竖向承载力共同承担； V_k 由桩的水平承载力与地基土的摩擦力共同承担。与常规桩基挡土墙相似，复合桩基挡土墙结构可按图3所示弹性嵌固与地基中的二维平面或三维空间刚架进行有限元分析；且确定基础底面积时应符合式（2）和式（3）的要求。

$$\frac{F_{sk}}{A_c - nA_p} \leq f_a \quad (2)$$

$$\frac{F_{sk}}{A_c - nA_p} + \frac{M_{sk}}{W} \leq 1.2f_a \quad (3)$$

式中： A_c 为承台底面积（m²）； A_p 为单桩截面积（m²）； W 为承台底面力矩作用方向的抵抗矩（m³）； f_a 为承台下地基土承载力特征值（kPa）。上述刚架结构在进行承载力极限状态设计时，设计值应按（ F_k ， V_k ， M_k ）或（ F_{pk} ， V_{pk} ， M_{pk} ）乘以综合分项系数1.40确定；在进行正常使用极限状态设计时，设计值应按（ F_k ， V_k ， M_k ）或（ F_{pk} ， V_{pk} ， M_{pk} ）乘以综合分项系数0.85确定^[3]。

在结构计算时需要注意的是，桩基与承台的连接一般以固结考虑，桩端负弯矩绝对值远远大于桩身正弯矩绝对值，桩基截面设计时往往以桩端负弯矩控制，截面偏大。为了充分利用桩基正弯矩承载力，可在有限元软件中将桩基与承台的连接由固结修改为弹性连接，目的是使桩端负弯矩绝对值同桩身正弯矩绝对值尽可能相近。这样，就可以实现桩基承受均衡的正负弯矩，优化桩截面设计，提高经济性。但桩端刚度释放后桩端水平位移要大于释放前桩端水平位移，桩顶位移应满足相关规范的限值要求。

3 设计要求

3.1 通用要求

1) 无论是常规桩基挡土墙还是复合桩基挡土墙，当采用 m 法计算时，桩的入土深度不小于桩相对刚度的4倍，桩相对刚度可按式（4）确定^[4]。

$$T \leq \sqrt[5]{\frac{EI}{mb_0}} \quad (4)$$

式中: T 为桩的相对刚度(m); E , I 分别为桩材料的弹性模量(kN/m^2)及桩截面的惯性矩(m^4); m 为桩侧土的水平地基抗力系数随深度增长的比例系数(kN/m^4)。当地基成层时, m 采用承台底面以下 $1.8T$ 深度范围内各土层 m 的加权平均值; b_0 桩的换算宽度(m), 取 $2d$, d 为桩受力面的桩径或桩宽。

2) 前后排桩中心距宜大于等于 $6d\sim 8d$ 。

3.2 常规桩基挡土墙中桩基础设计应符合的要求

1) 桩基入土深度除满足弹性长桩的要求外, 还应满足竖向承载力的要求。

2) 挡土墙桩基础通常宜采用摩擦型桩, 桩底宜位于土质较好的持力层。

3) 桩的设计按桩承担基础底面以上全部荷载确定。

4) 预制桩的中心距不应小于 $3d$, 灌注桩的中心距不应小于 $2.5d$ 。墙高在5 m以下的挡土墙可选用墙底宽度与墙高之比为 $0.5\sim 0.8$ 进行试算。

$$5) F_k \leq n \frac{R_k}{2}$$

3.3 复合桩基挡土墙中桩基础设计应符合的要求

1) 宜采用桩身截面边长小于等于300 mm, 桩长满足弹性长桩要求的预制方桩。

2) 预制桩的中心距不宜小于 $5d\sim 6d$ 。

$$3) F_k \leq \frac{A_c f_k + n R_k}{\gamma_R} \quad (5)$$

$$\text{且} \quad F_k \leq \eta A_c f_a \quad (6)$$

式中: f_k 为底板下地基土极限承载力标准值(kPa); γ_R 为复合桩基承载力综合分项系数, 取 $2.0\sim 2.2$; η 为经验系数, 宜取 $1.5\sim 1.7$ 。当式(5)和(6)不能满足时, 宜调整承台底面积。

4 算例

某悬臂式钢筋混凝土挡土墙墙高4.5 m, 底板宽度3.6 m, 每10 m一段。墙顶均布荷载为 10 kN/m^2 , 挡墙前后水头差1 m, 地基土承载力特征值 $f_a=85 \text{ kPa}$ 。可计算出该段结构 $F_k=3\ 244.4 \text{ kN}$, $V_k=755.3 \text{ kN}$, $M_k=1\ 751.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。该结构按复合桩基挡土墙设计。

1) 若采用截面为 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 的C30预制方桩, 桩入土深度为6 m, 前排4根, 后排2根,

$b_1=b_2=1.5 \text{ m}$, $R_k=240 \text{ kN}$, μ 取为0.45, K_c 取为1.3。按前文方法计算可得, 地基土承担的作用 $F_{sk}=1\ 804.4 \text{ kN}$, $V_{sk}=624.6 \text{ kN}$, $M_{sk}=1\ 031.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 桩基承担的作用 $F_{pk}=1\ 440.0 \text{ kN}$, $V_{pk}=130.7 \text{ kN}$, $M_{pk}=720.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 每根桩承担21.8 kN水平力, 经建模分析及验算, 桩基竖向承载力、水平承载力及地基土承载力均满足要求。

2) 若将桩入土深度加大至8 m, 桩底位于稍好的土层, $R_k=370 \text{ kN}$, 其余条件均不变。计算可得地基土承担的作用 $F_{sk}=1\ 024.4 \text{ kN}$, $V_{sk}=354.6 \text{ kN}$, $M_{sk}=641.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 桩基承担的作用 $F_{pk}=2\ 220.0 \text{ kN}$, $V_{pk}=400.7 \text{ kN}$, $M_{pk}=1\ 110.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 每根桩承担66.8 kN水平力, 经建模分析及验算, 桩基水平承载力不能满足要求。

3) 若将桩数增加至10根, 前排6根, 后排4根, 其余条件同(1)。计算可得地基土承担的作用 $F_{sk}=844.4 \text{ kN}$, $V_{sk}=292.3 \text{ kN}$, $M_{sk}=1\ 031.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 桩基承担的作用 $F_{pk}=2\ 400.0 \text{ kN}$, $V_{pk}=463.0 \text{ kN}$, $M_{pk}=720.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 每根桩承担46.3 kN水平力, 经建模分析及验算, 桩基水平承载力不能满足要求。

5 结论

1) 当作用在承台底面的竖向荷载准永久组合值 $0.8F_k \leq$ 各桩的单桩极限承载力标准值之和 nR_k , 结构体系按常规桩基挡土墙计算模型进行分析; 当 $0.8F_k > nR_k$, 结构体系按复合桩基挡土墙计算模型进行分析。

2) 无论是常规式还是复合式桩基挡墙结构体系, 都可以将按弹性嵌固与地基中的二维平面或三维空间刚架进行结构分析, 只是承受的竖向作用和水平作用有所不同。本文计算模型依托于竖向弹性地基梁法, 明确了地基弹性系数同影响深度成正比的关系, 故桩长需满足弹性长桩的要求。

3) 前后排桩的横向间距不宜过小, 宜满足大于等于 $6d\sim 8d$ 的要求, 水平承载力可按单桩设计, 否则需考虑群桩效应。

4) 若将桩基视为固结于承台, 则设计不经济; 本模型计算的关键点在于桩端刚度释放, 使

(下转第82页)