

锚杆静压桩预埋锚筋设计验算方法探究

陈希铭, 林华国, 张元勇

广东省岩土勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510520

DOI:10.61369/ERA.2026010033

摘要 : 在锚杆静压桩设计中, 预埋锚筋的设计与验算直接关系到压桩力的大小与压桩安全性, 本文聚焦于锚杆静压桩预埋锚筋设计验算方法的研究。通过对相关规范和理论的深入剖析, 详细阐述了预埋锚筋在锚杆静压桩中的作用及设计要点。分别对锚筋的锚固长度和锚固抗拔力、杆体抗拉力进行理论推导与分析, 结合实际工程案例, 运用所提出的设计验算方法进行计算, 并与实测数据对比验证其准确性。研究成果为锚杆静压桩预埋锚筋的合理设计提供了可靠的方法与依据, 有助于提升锚杆静压桩工程的设计可靠性与压桩施工的安全稳定性。

关键词 : 预埋锚筋; 锚杆静压桩; 锚筋与混凝土粘结强度; 锚固长度; 锚固抗拔力

Research on Design Verification Methodology for Pre-embedded Anchor Bars in Anchor Static Piles

Chen Ximing, Lin Huaguo, Zhang Yuanyong

Guangdong Provincial Geotechnical Survey, Design and Research Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510520

Abstract : In the design of anchor rod static pressure piles, the design and checking calculations of pre-embedded anchor bars directly relate to the magnitude of pile-pressing force and the safety of pile pressing. This paper focuses on the research of design and checking calculation methods for pre-embedded anchor bars in anchor rod static pressure piles. Through an in-depth analysis of relevant codes and theories, the roles and key design points of pre-embedded anchor bars in anchor rod static pressure piles are elaborated in detail. Theoretical derivations and analyses are conducted on the anchorage length, anchorage pull-out resistance, and tensile resistance of the anchor bars. Combined with practical engineering cases, the proposed design and checking calculation methods are applied for calculations, and their accuracy is verified through comparison with measured data. The research results provide reliable methods and bases for the rational design of pre-embedded anchor bars in anchor rod static pressure piles, contributing to enhancing the design reliability of anchor rod static pressure pile projects and the safety and stability of pile pressing construction.

Keywords : pre-embedded anchor bars; anchor static pressure piles; the bond strength between anchor bars and concrete; anchorage length; anchorage pull-out resistance

引言

在预埋锚筋压桩工程中, 锚筋的设计至关重要。锚杆静压桩及免配重静压斜桩利用锚固于基础中的锚杆(锚筋)提供反力实施压桩。预埋锚筋作为连接压桩设备与基础或冠梁的关键部件, 其设计的合理性直接影响到压桩工程的整体性能。目前, 虽然预埋锚筋有相关的施工规范和经验做法^[1-2], 但在压桩工程中计算锚筋的锚固长度往往过长。目前, 对于预埋锚筋的设计验算方法, 仍缺乏系统深入的研究与总结。本文旨在通过对压桩预埋锚筋设计验算方法的探究, 为工程实践提供更科学、准确的设计依据。

一、预埋锚筋概述

锚杆静压桩是将锚杆与静力压桩相结合的一种施工方法。在施工过程中, 先在基础上预埋锚筋, 或在基础上钻孔植入锚筋, 然后通过锚筋将压桩设备与基础连接, 利用压桩设备的压力将桩

压入地基土中。预埋锚筋在锚杆静压桩中承担着传递压桩反力的关键作用。在老旧建筑的基础加固工程中, 由于场地狭窄等原因, 大型打桩设备难以进入, 锚杆静压桩凭借其所用机具简单、可在狭小空间作业的优势被广泛应用^[3-5], 此时预埋锚筋的可靠设计就成为保证加固效果的关键因素。

作者简介: 陈希铭(1995—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑岩土工程设计、研究等。

二、预埋锚筋设计相关理论

(一) 锚固长度理论

锚固长度是指受力钢筋依靠其表面与混凝土的粘接作用或端部构造的挤压作用而达到设计承受应力所需要的长度。对于压桩预埋锚筋,锚固长度的确定直接关系到锚筋能否有效地将桩的荷载传递给基础。根据钢筋与混凝土之间的粘结锚固理论,钢筋在混凝土中的锚固力主要由三部分组成:摩擦力、机械咬合力和机械锚固力。

摩擦力是钢筋与混凝土之间因相互挤压而产生的沿钢筋表面的阻力;机械咬合力则是由于钢筋表面的凹凸不平或变形钢筋的肋纹与混凝土之间形成的相互咬合作用;机械锚固力通常通过在钢筋端部弯钩、弯折,或在锚固区焊接短钢筋、短角钢等方法来提供。

(二) 抗拔力理论

锚固抗拔力是指预埋锚筋在承受拉拔力时,能够抵抗拔出的能力。其主要由锚筋与混凝土之间的粘结力、锚筋自身的抗拉强度以及可能存在的附加锚固措施所提供的抗力组成。当拉拔力作用于预埋锚筋时,首先通过锚筋与混凝土之间的粘结力将力传递给混凝土,如果粘结力不足以抵抗拉拔力,则锚筋会开始滑动,此时锚筋自身的机械咬合力开始发挥作用。在一些特殊设计中,可能会采用设置弯钩、机械锚固等附加锚固措施,这些措施能够进一步增加锚固抗拔力。

(三) 影响因素分析

众多因素会对预埋锚筋的锚固长度产生影响。混凝土强度等级是一个关键因素,混凝土强度越高,其与锚筋之间的粘结性能越好,所需的锚固长度就可以相对缩短。钢筋的种类和直径也会影响锚固长度,精轧螺纹钢、带肋钢筋由于其表面的肋纹能增强与混凝土的机械咬合力,相比光圆钢筋,在相同条件下所需的锚固长度更短。

钢筋直径越大,在考虑充分利用钢筋抗拉强度时,为保证相同的粘结锚固效果,其锚固长度要求也越长。在抗拔力相同的情况下,钢筋直径越大,其锚固长度要求越短。

此外,构件的受力状态、环境条件等也会对锚固长度产生影响。在抗震设防地区,考虑到地震作用下结构的反复受力,对锚筋锚固长度的要求会更加严格;在有侵蚀性介质的环境中,为防止钢筋锈蚀影响锚固性能,也可能需要适当增加锚固长度。

三、锚固抗拔力理论

(一) 基于规范计算模型

目前,用于计算锚固抗拔力的模型有多种。常见的有基于粘结滑移理论的模型,该模型通过建立钢筋与混凝土之间的粘结滑移本构关系,来计算在不同拉拔力作用下锚筋的位移和抗拔力。

根据规范和理论研究,对于普通钢筋在混凝土中的锚固长度,当考虑充分利用钢筋的抗拉强度时,锚固长度计算公式^[1]:

$$l_{ab} = \alpha \frac{f_y}{f_t} d \quad (1)$$

式中: l_{ab} 为基本锚固长度; α 为形状系数; f_y 为钢筋抗拉强度设计值; f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值; d 为锚固钢筋直径。

对于由锚板和对称配置直锚筋所组成的受力预埋件,只受法向拉力时,法向拉力计算公式^[1]:

$$N \leq 0.8\alpha_b f_y A_s \quad (2)$$

式中: N 为作用在预埋件上的法向拉力设计值; α_b 为锚板弯曲变形折减系数,当采取防止锚板弯曲变形的措施时,取 1.0; f_y 为锚筋的抗拉强度设计值, A_s 为锚筋的总截面积。

这些计算模型在实际工程应用中,需要根据具体的工程情况进行合理选择和修正,以确保计算结果的准确性。

四、预埋锚筋设计验算方法

(一) 预埋锚筋锚固长度设计

1. 基于规范公式的粘结强度确定方法

现有规范并没有直接提供钢筋与混凝土的粘结强度设计值,但可以用规范中基本锚固长度计算公式^[1]进行反算出钢筋与混凝土的粘结强度。其本质是钢筋的拉力等于混凝土提供的粘结力总和,公式可表示为:

$$F = \pi d l_{ab} f_b \quad (3)$$

式中: F 为钢筋的拉力; πd 为锚固钢筋的周长; l_{ab} 为锚固长度; f_b 为混凝土与钢筋粘结强度。

2. 混凝土与带肋钢筋粘结强度

混凝土与带肋钢筋的粘结强度,反算方法如下:

首先,假定设计条件,计算出基本锚固长度。其次,考虑充分利用钢筋的抗拉强度,可把钢筋抗拉力做为拉力设计值。最后,根据粘结强度理论,反算出带肋钢筋与混凝土的粘结强度。

例如:直径 25mm 带肋钢筋 ($f_y=360\text{MPa}$), 外形系数 α 取 0.14, 在 C30 混凝土 ($f_t=1.43\text{MPa}$) 中基本锚固长度 l_{ab} 为: $l_{ab}=0.14 \times 360/1.43 \times 25=881\text{mm}$ 。

钢筋的抗拉力设计值 F 为: $F=3.14 \times 25 \times 25/4 \times 360=176724\text{N}$ 。

带肋钢筋与 C30 混凝土的粘结强度设计值为: $f_{bd}=176724/(3.14 \times 25 \times 881) = 2.55\text{MPa}$

同理,采用不同强度等级的混凝土进行反算,可得:

表 1 混凝土与带肋钢筋粘结强度设计值一览表

混凝土强度等级	C25	C30	C35	C40	C45
f_t (MPa)	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80
f_{bd} (MPa)	2.27	2.55	2.80	3.05	3.21

注: f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值; f_{bd} 为混凝土与带肋钢筋粘结强度设计值。

3. 混凝土与精轧螺纹钢粘结强度

大吨位锚杆静压桩锚筋常用精轧螺纹钢,考虑到精轧螺纹钢的螺纹与带肋钢筋的螺纹不一致。外形系数 α 直接反映钢筋表

面肋形对粘结性能的增强效果，精轧螺纹钢因肋高更高、间距更密，其 α 值小于普通带肋钢筋，表明其粘结强度更高，锚固长度需求更短。参考规范取值，螺旋肋类型外形系数 α 可取0.13。根据上述反算方法，采用不同强度的混凝土进行反算，可得：

表2混凝土与精轧螺纹钢粘结强度设计值一览表

混凝土强度等级	C25	C30	C35	C40	C45
f_t (MPa)	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80
f_{bj} (MPa)	2.65	2.98	3.27	3.56	3.75

注： f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值； f_{bj} 为混凝土与精轧螺纹钢粘结强度设计值。

4. 混凝土与预埋锚筋粘结强度

根据上述方法，得出的结果是粘结强度设计值，锚杆静压桩、免配重静压斜桩的锚筋是属于短暂设计工况，基于规范及工程实践经验，结构重要性系数可取0.9考虑，因此用在设计锚筋时，粘结强度可以考虑在上表的基础上放大。放大后粘结强度设计值如下表。

表3混凝土与预埋锚筋粘结强度设计值一览表

混凝土强度等级	C25	C30	C35	C40	C45
f_t (MPa)	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80
f'_{bd} (MPa)	2.52	2.84	3.12	3.39	3.57
f'_{bj} (MPa)	2.71	3.06	3.35	3.65	3.85

注： f'_{bd} 为混凝土与压桩带肋钢筋锚筋粘结强度设计值； f'_{bj} 为混凝土与压桩精轧螺纹钢锚筋粘结强度设计值。

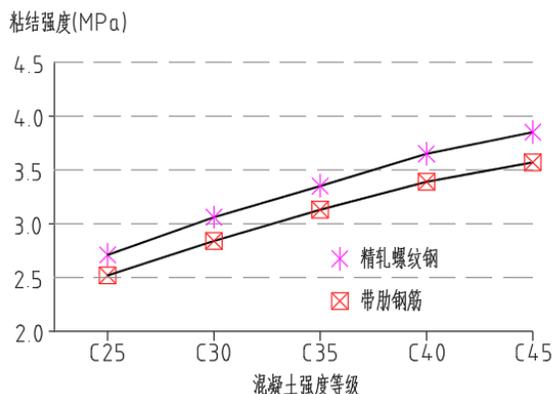


图1 不同钢筋类型粘结强度对比

从以上对比图可以看出，混凝土强度等级越高，粘结强度设计值越大，呈显著的正相关关系。粘结强度的增加值随混凝土强度提高而略有减缓，属非线性增长。

5. 锚固长度的修正

在实际工程中，在当基础厚度受限时，还需要考虑一些特殊因素对锚固长度进行修正。按现行规范^[1]常用的修正做法有：

当基础混凝土保护层厚度较大时，钢筋与混凝土之间的粘结性能会有所改善，此时可适当减小锚固长度。根据规范规定，当保护层厚度大于3d时，锚固长度可乘以修正系数0.8。

当钢筋末端采用弯钩或机械锚固措施，且符合规定时，锚固长度可乘以修正系数0.6。

锚固长度修正还需考虑带肋钢筋直径、涂层、施工扰动等情况。

(二) 压桩预埋锚筋杆体设计

锚筋杆体可以选用精轧螺纹钢、带肋钢筋等作为受拉锚杆。精轧螺纹钢强度高，表面具有外旋的螺纹在任何位置裁断进行螺母或者其它工具连接，施工操作便捷，作为受拉锚筋杆体具有效率高、成本低等优点，优先选用精轧螺纹钢作为受拉锚杆。

$$F = K_b \frac{P_p}{N} \quad (4)$$

式中： F 为锚筋杆体抗拉设计值； K_b 为锚筋杆体抗拉安全系数； P_p 为设计最大压桩力； N 为锚筋根数。

表4精轧螺纹钢杆体抗拉承载力设计值一览表

直径 (mm)	截面积 (mm ²)	杆体抗拉承载力设计值 (kN)			
		PSB785	PSB830	PSB930	PSB1080
18	254.5	200	211	237	275
25	490.9	385	407	457	530
32	804.2	631	667	748	869
40	1256.6	986	1043	1169	1357

注：PSB785、PSB830、PSB930、PSB1080表示精轧螺纹钢级别。

五、工程应用案例分析

(一) 案例分析

某厂房项目，由于场地地质条件复杂，基坑开挖到底后基础桩出现了断桩、偏桩的情况，需要进行补桩处理。经过综合比选，决定采用大吨位锚杆静压桩进行补桩加固。该区域基础为钢筋混凝土筏板基础，筏板厚度850mm，混凝土强度等级为C35。设计要求压入的预制管桩桩直径为500mm，单桩竖向承载力特征值为1600kN，最大压桩力为3200kN。

根据工程要求，选用精轧螺纹钢作为预埋锚筋，布置12根锚筋，单根锚筋杆体抗拉力值为3200/12=267kN。

选直径25mm的锚筋试算锚固长度： $l_{ab} = 267 \times 10^3 / 3.14 \times 25 \times 3.35 = 1041\text{mm}$ ，大于筏板厚度850mm，不满足工程要求。

选直径32mm的锚筋试算锚固长度： $l_{ab} = 267 \times 10^3 / 3.14 \times 32 \times 3.35 = 792\text{mm}$ ，计算锚固长度小于筏板厚度，可满足工程要求。



图2 预埋锚筋布置实景图

锚筋杆体设计验算按照前文所述的方法，计算锚筋杆体抗

拉设计值： $F=1.2 \times 3200/12=320\text{kN}$ 。查表4，直径32mm，PSB785级精轧螺纹钢杆体抗拉承载力设计值为 $631\text{kN}>320\text{kN}$ ，满足要求。同时，其所需锚固长度 $792\text{mm}<$ 筏板厚度 850mm ，也满足要求。

因此，最终设计选用直径32mm，PSB785级别精轧螺纹钢，布置12根锚筋。

(二) 施工过程监测

在锚杆静压桩施工过程中，通过对预埋锚筋的工作状态进行了实时监测。通过在锚筋上粘贴应变片，测量锚筋在压桩过程中的应力变化。同时，使用位移监测设备对桩顶和基础的位移进行监测。监测数据显示，在压桩初期，锚筋应力随着压桩力的增加而逐渐增大，但增长速率较为稳定；当压桩力接近最大压桩力时，锚筋应力增长速率略有加快，但仍在设计允许范围内。桩顶和基础的位移也在设计控制值以内，表明预埋锚筋的设计能够满足压桩施工的要求。

(三) 效果评估

压桩施工完成后，对基础进行了承载力试验，检测结果表明，单桩竖向承载力满足设计要求。通过对预埋锚筋的外观检查，未发现锚筋有明显的变形、滑移或开裂现象。将实际监测数据与设计计算结果进行对比分析，两者基本吻合，验证了本文所提出的压桩预埋锚筋设计验算方法在实际工程中的可行性和准确性。

六、结论

本文通过对压桩预埋锚筋设计验算方法的深入研究，得出以下结论：

(1) 详细阐述了预埋锚筋在锚杆静压桩和免配重静压斜桩中的重要作用及受力特点，明确了其设计对于压桩工程稳定性的关键意义。

(2) 深入分析了锚固长度和锚固抗拔力的相关理论，包括其基本原理、组成部分以及影响因素等，为设计验算方法的建立提供了坚实的理论基础。

(3) 本文通过反算得出混凝土与锚筋粘结强度设计值，按锚筋实际受力进行设计验算，提出了一套完整的压桩预埋锚筋设计验算方法，包括锚固长度的理论公式计算，以及锚筋杆体抗拉设计验算方法，为工程设计提供了科学、准确的手段。

(4) 通过实际工程案例分析，验证了所提出的设计验算方法在实际应用中的可行性和有效性，计算结果与监测数据及工程效果基本相符。

在未来的研究中，可以进一步考虑复杂受力条件和特殊荷载工况下对压桩预埋锚筋设计的影响，完善设计理论和方法。同时，结合新型材料和施工工艺的发展，探索更优化的预埋锚筋设计方案，以推动压桩工程技术的不断进步。

参考文献

- [1] GB50010-2010 混凝土结构设计规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2015.
- [2] JGJ 123-2012 既有建筑地基基础加固技术规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.
- [3] 詹金陵，水伟厚，宋美娜，石宝锋. 软土地区锚杆静压桩施工问题及解决方案 [J]. 岩土工程学报，2010，32(S2):566-569.
- [4] 李明. 软土地区高层建筑桩基加固技术的应用研究 [J]. 地基处理，2023，5(06):512-518.
- [5] 吴文龙. 超大吨位锚杆静压桩在高层建筑基础加固中的应用 [J]. 地基处理，2024，6(05):497-502.