

静压管桩超静孔隙水压力对桩基承载力检测的影响研究

——基于邯郸某高层住宅工程

许亚男

河北天艺建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]静压预应力混凝土管桩因施工速度快、环境污染小、桩身质量可靠等优势,在华北地区高层住宅地基基础工程中应用广泛。但该桩型属于典型挤土桩,沉桩过程会在桩周土体中产生显著超静孔隙水压力,尤其在含水率高、渗透性弱的粉质黏土地层中,孔压消散缓慢,直接导致桩基侧阻力与端阻力短期内无法正常发挥,若过早开展静载试验易出现承载力不满足设计要求的假象。文中通过分析超静孔隙水压力产生、消散规律及其对桩基承载力的影响,探讨粉质黏土地层静压管桩合理休止时间,提出同类工程施工与检测控制要点,为类似地质条件下挤土桩工程质量控制提供参考。

[关键词]静压管桩;挤土效应;超静孔隙水压力;休止期;静载试验;粉质黏土;桩基承载力

DOI: 10.33142/sca.v9i6.19792

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

Study on the Influence of Excessive Pore Water Pressure on the Bearing Capacity Detection of Static Pressure Pipe Piles — Based on a High-rise Residential Project in Handan

XU Yanan

Hebei Tianyi Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Static pressure prestressed concrete pipe piles are widely used in high-rise residential foundation engineering in North China due to their advantages of fast construction speed, low environmental pollution, and reliable pile quality. However, this pile type belongs to a typical squeezed soil pile, and the pile driving process will generate significant excess pore water pressure in the soil around the pile, especially in the silty clay layer with high moisture content and weak permeability. The slow dissipation of pore pressure directly leads to the inability of the lateral and end resistance of the pile foundation to function normally in the short term. If the static load test is carried out too early, it is easy to create the illusion that the bearing capacity does not meet the design requirements. By analyzing the generation and dissipation laws of excess pore water pressure and its impact on the bearing capacity of pile foundations, this article explores the reasonable resting time of static pressure pipe piles in silty clay layers, and proposes key points for construction and testing control of similar projects, providing reference for quality control of squeezed soil pile engineering under similar geological conditions.

Keywords: static pressure pipe pile; soil squeezing effect; ultra static pore water pressure; dormant period; static load test; powdery clay; pile foundation bearing capacity

引言

近年来,随着城市化进程的加快,预应力混凝土管桩因适用性强、造价适中、施工便捷等特点,在华北平原地区高层住宅中成为最常用的基础形式之一。静压法施工无噪声、无振动、无泥浆污染,在城市建成区项目中常用。但静压管桩属于完全挤土桩,桩体在压入过程中对周围土体产生很大的侧向挤压,使土体结构发生剧烈扰动,土颗粒原有排列方式被破坏,孔隙水短时间内无法排出,因而

会在土体中积聚大量超静孔隙水压力。

超静孔隙水压力的存在会降低土体有效应力,使桩周土抗剪强度、桩侧摩阻力及桩端阻力暂时下降,表现为桩基早期承载力偏低、沉降偏大。但随着时间的推移,孔隙水在水头差作用下逐渐渗流排出,超静孔压逐步消散,土体发生固结压密,有效应力恢复并提高,桩基承载力会随之缓慢增长并最终趋于稳定。这一过程在砂土中较快,在粉土、粉质黏土中较慢,在接近液限的软塑黏性土中则极

为缓慢。

在工程实践中,项目受工期压力影响,往往仅按照规范最低要求控制休止时间,而忽视场地地层的特殊性、地下水位高低、土类及含水率差异,导致静载试验结果失真,出现“虚假不合格”现象,不仅造成不必要的返工、补桩、设计复核等经济损失,还会延误工期、引发参建各方争议。目前国内相关规范虽对桩基检测休止时间作出规定,但使用时,未充分结合挤土桩效应强弱、土性指标(含水率、液限、塑限、渗透系数)进行细化。许多施工及检测人员对超静孔隙水压力消散机理认识不足,简单将早期静载不合格直接判定为桩基质量问题或设计承载力不足,缺乏科学系统的原因分析。

基于上述背景,本文以邯郸市某高层住宅真实工程案例,结合场地土工试验指标、桩基设计参数、两次静载试验结果,分析超静孔隙水压力对静压管桩承载力检测结果的影响规律,论证规范休止时间在特殊地层中的使用,提出适合场地的控制标准,为同类工程技术决策提供理论支撑与实践借鉴。

1 工程概况

1.1 项目基本信息

本工程位于河北省邯郸市主城区,为住宅小区单体建筑,结构形式为剪力墙结构,地下2层,负二层设计为人防工程,地上32层,建筑高度93.300m,基础底面积730m²。属于典型高层住宅建筑。场地周边为建成区,环保及文明施工要求高,因此基础施工选用静压预应力管桩工艺。

建筑±0.000 绝对标高为56.10m,基础底板底标高-9.300m,基坑开挖深度较大。场地地下水稳定水位标高为49.13~50.584m,地下水位埋深浅,基底及桩身穿越土层长期处于饱和状态,为超静孔隙水压力积聚与缓慢消散提供了客观环境条件。

1.2 工程地质条件

根据岩土工程勘察报告,勘探深度60.0m范围内地层均为第四系冲洪积沉积物,自上而下共划分11个工程地质主层及多个透镜体、亚层,地层物理力学性质差异明显,上部以软塑~可塑粉质黏土、粉土为主,下部逐渐过渡为可塑~硬塑粉质黏土,夹细砂、中粗砂薄层及姜石,地层详细特征如下:

(1) ①层杂填土:杂色,松散,主要由碎砖块、粉质黏土组成,结构松散,局部为①₁层素填土。

(2) ①₁层素填土:杂色,松散,以粉质黏土为主,均匀性差。

(3) ②层粉质黏土:黄褐色,软塑~可塑,韧性及

干强度低,粉粒含量高,含铁锰氧化物与云母,标贯击数3.0~7.0击,平均4.3击。

(4) ③层粉土:褐黄色,湿~很湿,稍密~中密,土质均匀,摇振反应迅速,标贯击数3.0~9.0击,平均5.2击。

(5) ④层粉质黏土:褐灰色,软塑~可塑,土质较均匀,韧性中等,切面稍光滑,标贯击数4.0~10.0击,平均7.2击。

(6) ⑤层粉质黏土:褐黄色~褐灰色,可塑,中压缩性,韧性中等,标贯击数8.0~10.0击,平均9.0击。

(7) ⑥层粉质黏土:褐黄色,可塑,含灰色条纹,局部渐变为粉土,仅局部钻孔揭露。

(8) ⑦层粉质黏土:黄褐色,可塑,含姜石,局部含量约15%,中压缩性,标贯击数16.0~24.0击,平均19.1击。

(9) ⑧层粉质黏土:黄褐色,硬塑,局部混砂颗粒,含姜石,含量10%~15%,中压缩性,标贯击数12.0~22.0击,平均17.8击。

(10) ⑨层黏土:褐黄色,硬塑,含灰绿色黏土团及姜石,中压缩性,标贯击数15.0~23.0击,平均20.0击,底部分布⑨₁层细砂透镜体。

(11) ⑩层粉质黏土:褐黄色,硬塑,含铁锰氧化物及钙质条纹,承载力较高,标贯击数23.0~38.0击,平均30.1击,底部为⑩₁中粗砂透镜体。

(12) ⑪层粉质黏土及⑪₁中粗砂:硬塑粉质黏土夹密实砂层,标贯击数高,工程性质优良。

根据土工试验结果,场地③层粉土含水率28.7%,液限29.3%,土体接近流动状态;④层粉质黏土含水率29.0%,液限36.9%,处于软塑状态,土颗粒间孔隙微小,渗透系数低,孔隙水排出困难,是超静孔隙水压力难以快速消散的主要地层。

1.3 桩基设计参数

基底位于③层粉土与④层粉质黏土交界面,天然地基承载力仅100~120kPa,无法满足高层建筑沉降及承载力要求,设计采用静压预应力混凝土管桩基础。

桩型选用国标图集《预应力混凝土管桩》10G409中PHC 500 AB 125-30型管桩,桩径500mm,壁厚125mm,桩长约30m,单桩竖向承载力特征值 $R_a \geq 2100\text{kN}$,对应单桩竖向极限承载力标准值 $Q_{uk} \geq 4200\text{kN}$ 。

设计以⑨层粉质黏土为桩端持力层,要求桩端全截面进入持力层 $\geq 1.0\text{m}$,施工采用入土深度与终压值双控标准,确保桩基承载力可靠性。

桩侧与桩端阻力设计参数如表 1 所示。

表 1 桩基极限侧阻力与端阻力标准值

地层编号及岩性	极限侧阻力 标准值 q_{sik} (kPa)	极限端阻力 标准值 q_{pk} (kPa)
④层粉质黏土	45	—
⑤层粉质黏土	65	—
⑥层粉质黏土	70	—
⑦层粉质黏土	75	—
⑧层粉质黏土	85	3300 ($16m < L \leq 30m$)
⑨层粉质黏土	90	5500 ($16m < L \leq 30m$)
⑩层粉质黏土	90	5800 ($L > 30m$)
⑪层粉质黏土	95	5800 ($L > 30m$)

2 施工与检测过程

2.1 桩基施工概况

本工程桩基总量为 208 根，全部采用静压桩机施工。因位于市区中心区，不允许夜间施工及振动施工，静压工

艺能满足环保要求。施工过程连续作业，桩机行走、压桩、接桩、移机流程顺畅，单桩平均施工时间合理，全部桩基 8 天内施工完成。

桩长约 30m，分节制作、现场焊接接桩，桩端进入⑨层粉质黏土持力层深度满足设计要求。施工记录显示终压值稳定，桩身垂直度、桩位偏差均在规范允许范围内，未出现断桩、缩径、接头开裂等质量缺陷，施工过程可控能保障。

2.2 第一次静载试验（休止 15 天）

按照《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106-2014 第 3.2.5 条对休止时间的要求，结合场地以粉土、粉质黏土为主的特点，设计、监理、施工三方共同确定桩基检测休止时间为 15 天。

成桩 15 天后，第三方检测机构进场开展单桩竖向抗压静载试验，随机抽取 3 根工程桩进行检测，试验结果如表 2 所示。

表 2 第一次静载试验结果汇总表

检测序号	施工桩号	桩径 (mm)	实际桩长 (m)	有效桩长 (m)	极限承载力 (kN)	设计极限承载力 (kN)	设计特征值 (kN)
J001	30#	500	40.0	32.30	5000	4200	2100
J002	166#	500	40.0	32.30	5000	4200	2100
J003	34#	500	38.5	30.80	4500	3700	1850

根据规范统计方法，3 根试桩有效桩长范围内极限承载力平均值为 4033kN，极差 500kN，小于平均值的 30%，统计结果有效。折算单桩竖向抗压承载力特征值为 2016kN，小于设计要求的 2100kN，静载试验结论为不满足设计要求。

2.3 原因初步分析与二次检测安排

第一次静载不合格后，参建各方立即开展原因分析及情况排查：

(1) 核查施工记录，桩长、桩径、接桩质量、终压值均满足要求，无质量缺陷；

(2) 复核设计计算书，侧阻力、端阻力取值符合规范及勘察报告，安全储备合理；

(3) 分析地质资料，发现③、④层土体含水率极高，接近液限，渗透性差，沉桩产生的超静孔隙水压力难以在 15 天内充分消散；

(4) 对比桩-土相互作用机理，判断桩基承载力仍处于增长阶段，15 天检测结果不能反映真实承载力。

因项目恰逢春节假期，现场暂停施工，桩基进入自然休止状态。20 天假期结束后，土体超静孔隙水压力已基

本消散，桩侧阻力与桩端阻力充分恢复，参建各方组织第二次静载检测，结果显示桩基承载力完全满足设计要求，沉降均匀且回弹良好，Q-s 曲线呈缓变型，无陡降段，证明前期不合格为孔压未消散导致的假象。

3 超静孔隙水压力对桩基承载力的影响机理

3.1 挤土效应与超静孔隙水压力产生机制

静压管桩沉桩过程中，桩体以静力方式置换原位土体，对桩周土产生径向挤压力，土体发生侧向与竖向位移。在饱和土体中，土颗粒不可压缩，孔隙水体积也不会压缩，当土体渗透系数较小时，沉桩速度远大于孔隙水渗流排出速度，孔隙水被封闭在土体骨架内部，形成高于静水压力的超静孔隙水压力。

本工程③、④层土含水率接近液限，处于软塑状态，土体结构松散，对扰动敏感，沉桩挤土效应尤为显著，孔压峰值可达到较高水平，导致桩周土体处于“近流体状态”，无法提供有效侧向约束，使得桩侧摩阻力显著降低。

3.2 超静孔隙水压力对桩侧阻力的影响

该项目桩基竖向承载力主要由桩侧摩阻力与桩端阻力两部分组成，而侧阻力占比达 70%~90%。桩侧摩阻力

依赖于桩-土界面摩擦力和土的抗剪强度，而抗剪强度直接接受有效应力控制。

根据有效应力原理： $\sigma' = \sigma - u$ 式中： σ' 为有效应力； σ 为总应力； u 为孔隙水压力。

当超静孔压 u 较高时，有效应力 σ' 显著降低，土体抗剪强度下降，桩侧摩阻力无法充分发挥。在沉桩初期及休止时间不足够长时，桩周土处于扰动软化状态，侧阻力远低于正常值，表现为静载试验沉降大、承载力偏低。

随着时间的增长，孔隙水缓慢渗流， u 值逐渐减小， σ' 恢复，土体固结压密，随着抗剪强度的回升，侧阻力增加，桩基承载力逐步提高。

3.3 超静孔隙水压力对桩端阻力的影响

桩端阻力取决于持力层土体强度、压缩性及桩端土压密效果。沉桩过程中，桩端下方土体同样受到强烈挤压，产生较高超静孔隙水压力，使桩端土处于扰动状态，土体结构松散。

当孔压消散后，桩端土发生固结，密实度提高，桩端阻力显著回升并最终达到设计预期。本工程桩端位于⑨层硬塑粉质黏土，该层本身强度较高，对于桩的影响较小。

3.4 地层渗透性对消散速度的控制作用

超静孔隙水压力消散速度主要取决于土体渗透系数。

本工程③、④层土含水率接近液限，渗透系数极小，属于低渗透性饱和软土，15 天仅能消散部分孔压，土体尚未完成固结，因此静载结果偏低。经过春节假期长时间休止后，孔压基本消散完毕，承载力达到真实水平。

4 规范依据与休止期合理性分析

4.1 规范条文要求

《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106-2014 第 3.2.5 条明确规定桩基承载力检测前的休止时间，如表 3 所示。

表 3 规范休止时间最小值

土类	休止时间（天）
砂土	≥ 7
粉土	≥ 10
非饱和黏性土	≥ 15
饱和软黏土	≥ 25

本工程场地以粉土、粉质黏土为主，地下水位高，土体饱和，按规范最低要求采用 15 天休止期，满足规范要求，但未考虑挤土效应强度及含水率接近液限这一关键特殊条件。

4.2 规范休止期的局限性

规范给出的休止时间为通用最低限值，适用于地质条

件常规、挤土效应一般、含水率适中的地层。对于以下特殊情况，宜延长要求：

- （1）静压桩挤土效应强于锤击桩，孔压积聚更高；
- （2）土体含水率接近或超过液限，渗透性极低；
- （3）桩长较长（ $\geq 30\text{m}$ ），扰动土层厚度大；
- （4）桩间距小，群桩挤土效应叠加。

本工程同时满足以上多项特殊条件，15 天休止期过小，导致检测结果失真。

4.3 合理休止时间确定建议

结合本工程实践及同类项目经验，针对邯郸及华北地区粉质黏土地层静压管桩，建议：

- （1）常规粉质黏土：休止时间 ≥ 15 天；
- （2）含水率接近液限、软塑状态粉质黏土：休止时间 $\geq 25 \sim 30$ 天；
- （3）群桩密集、桩长大于 30m：休止时间 ≥ 30 天；
- （4）当条件允许时，可通过埋设孔压计实测孔压消散情况，科学确定检测时间。

5 工程经验与控制要点

5.1 施工阶段控制要点

- （1）合理安排施工顺序，采用“由内向外、间隔跳打”方式施工，减小挤土叠加效应；
- （2）控制沉桩速度，避免过快施工导致孔压急剧升高；
- （3）必要时设置排水板、砂井等排水措施，加速超静孔压消散；
- （4）加强桩位、桩身垂直度监测，避免因土体隆起导致桩身上拔、偏移。

5.2 检测阶段控制要点

- （1）静载试验前必须结合土工试验指标（含水率、液限、塑限、渗透性）综合确定休止时间，最好高于规范最低值；
- （2）对软塑、高含水率粉质黏土地层，应适当延长休止时间，建议 25~30 天；
- （3）首次静载不合格时，应优先分析孔压、土体扰动、休止时间等因素，不宜直接判定桩基质量不合格；
- （4）必要时可进行低应变检测验证桩身完整性，排除结构缺陷。

5.3 设计阶段控制要点

- （1）勘察阶段应重点提供土层渗透性、含水率、液限、塑限等指标，为休止时间确定提供依据；
- （2）设计承载力计算应考虑挤土扰动影响，合理预留安全储备；

(3) 对高含水率软土地层, 可根据具体情况采用部分挤土桩或非挤土桩替代方案。

6 结论

(1) 静压管桩属于典型挤土桩, 在饱和粉质黏土、高含水率地层中会产生显著超静孔隙水压力, 导致桩基早期承载力偏低, 静载试验易出现虚假不合格。

(2) 本工程 15 天休止期虽满足规范最低要求, 但因③、④层土体含水率接近液限、渗透性极低, 孔压未充分消散, 导致检测结果不满足设计要求; 经长期自然休止后, 孔压消散、土体固结, 承载力完全达标。

(3) 有效应力原理是解释桩基承载力随时间增长的核心理论, 超静孔压消散过程即为土体有效应力恢复、强度提高、桩基承载力增长的过程。

(4) 满足规范休止时间, 但在高含水率、低渗透性、强挤土效应地层中应适当延长, 粉质黏土接近液限时建议休止时间 $\geq 25 \sim 30$ 天。

(5) 工程中遇到早期静载不合格时, 应综合分析地

质、施工、孔压消散等因素, 切勿盲目返工补桩, 减少经济损失与工期延误。

(6) 本工程案例充分证明, 对挤土桩工程而言, 合理的休止时间与科学的技术判断, 同施工质量、设计合理性同等重要, 是保证桩基检测结果真实可靠的关键环节。

[参考文献]

[1] JGJ106-2014. 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 8-12.

[2] JGJ94-2008. 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 109-112

[3] 李广信. 土力学与地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2022.

[4] 王建华. 沉桩挤土效应及单桩承载力时间效应研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.

作者简介: 许亚男 (1977—), 女, 汉族, 河北辛集人, 高级工程师, 河北建筑科技学院毕业, 现就职于河北天艺建筑设计有限公司, 从事结构设计工作。