

基于载荷试验振沉钢管桩承载力计算方法研究

刘 举¹, 王 政²

[1.上海城建市政工程(集团)有限公司,上海市 200333; 2.同济大学,上海市 200092]

摘 要:振沉工艺是一种较为新颖的预制桩施工工艺,对于采用这种工艺施工的桩基的桩-土作用研究相对较少,尤其是钢管桩的桩-土作用。针对这一问题,采用慢速单桩竖向抗压静载试验方法获得了一组振沉压入钢管桩的单桩承载力变化规律。随后,根据可能存在的4种桩土作用模式,采用力学平衡法分别计算了桩的竖向极限承载力,并依据规范建议考虑振沉影响对计算结果进行了修正。通过试验结果与理论计算结果的对比,揭示了振沉工艺下钢管桩的桩-土作用特征,研究成果对振沉桩单桩极限承载力的计算具有一定的指导意义。

关键词:振沉桩;载荷试验;设计规范;钢管桩

中图分类号: U443.15

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)06-0263-04

0 引 言

桩基础是一种广泛应用于各类工程的基础形式,尤其在地质条件较差的场地中有着较好的适用性^[1]。衡量桩基性能的一个重要指标是桩的轴向受荷强度,常有学者报道了因轴向受荷能力不足而导致建筑物产生较大的沉降、不均匀沉降等工程问题^[3-4]。相关研究表明,单桩竖向抗压极限承载力主要受桩周土的物理力学性质、桩的几何尺寸、成桩工艺等因素影响。

诸多学者围绕上述因素对桩的竖向承载能力进行了广泛的研究,但这些研究中较少涉及近年来在我国开始逐渐使用的振沉沉桩工艺。通常来说,预制桩基的施工工艺主要包括静压法、锤击法和振沉法三种。静压法施工是通过高荷载反力装置将预制桩直接压入地层,主要优点是噪声小,但施工速度缓慢,且压桩设备通常过于庞大而不适用于在城市建筑密集区域施工^[5-6];锤击法是通过落锤连续击打桩体,使桩顶产生冲击力,抵抗土层抗力,使桩底刺穿地层,完成桩基安置,该方法施工速度较快,但噪声大、挤土效应明显,不适用于市内区域施工^[7-8]。振动沉桩是预制桩沉桩的方式之一,最早出现于20世纪30年代的苏联、德国。我国在20世纪50年代,首次应用了振沉工艺来修建武汉长江大桥的桩基。其原理主要是通过振动降低桩周土阻力进而推动桩体下

沉,具有挤土效应弱、设备轻便、施工效率高且环境影响小的优点,因而近年来被广泛的应用于城市内的桩基施工^[9-10]。然而,振动沉桩会导致桩体周围土阻力的下降和孔隙水压力的上升,因而采用振动沉桩所形成的桩体承载能力也有别于常见的锤沉桩和静压桩^[11-12]。

当前我国现行的规范中较少对采用振动沉桩工艺所沉入桩体的承载力进行准确的说明和规定,仅有《公路桥涵地基与基础设计规范》和《铁路桥涵地基和基础设计规范》在现有的静压桩和打入桩承载力计算成果的基础上,给出了部分土类型、桩径范围的修正系数^[13-19]。

本文采用振沉工艺在粘性土地带打入桩径0.7 m的薄壁开口钢管桩,并按照试验规程对桩的承载性能进行了观测。随后,又根据桩-土可能的作用形式,采用极限平衡法计算了多种可能的桩-土作用形式下桩的极限承载力。通过理论计算与现场试验的对比分析,揭示了振沉工艺条件下开口钢管桩桩-土作用的机理。

1 单桩竖向抗压静载试验

试验所选取的钢管桩直径0.7 m,壁厚14 mm,单桩压入深度为65 m,场地以黏性土为主。经地勘,该桩共穿透10层土层,结合当地经验根据土类型及分布深度获取了土层物理力学性质指标,土层详细指见表1,土层摩阻力随深度分布见图1,桩端土层(⑧₂层)的端阻力为4 500 kPa。

收稿日期: 2023-06-16

作者简介: 刘举(1990—),男,本科,工程师,从事工程项目技术管理工作。

表 1 试验土层物理力学性质

层号	土层名称	层底深度 /m	厚度 /m	层底标高 /m	w	G _s	γ	e	S _r	WL	WP	IP	IP
① ₁	填土	2.7	2.7	2.38									
② ₁	褐黄~灰黄色粉质黏土	4.5	1.8	0.58	31.2								
② ₃	灰黄~灰色砂质粉土夹粉质黏土	9.8	5.3	-4.72		2.7	18.5	0.9	96.0				
③	灰色淤泥质粉质黏土	11.8	2	-6.72	51.8								
④	灰色淤泥质黏土	18.7	6.9	-13.62	46.5	2.8	16.7	1.5	97.5	47.8	25.8	22.0	1.2
⑤ ₁	灰色黏土	24.5	5.8	-19.42	25.15	2.7	17.1	1.3	97.0	45.6	26.0	19.7	1.1
⑥	暗绿~黄色粉质黏土	28.7	4.2	-23.62	28.15	2.7	19.8	0.7	99.0	35.5	19.8	15.8	0.3
⑦	灰黄~灰色砂质粉土	34.9	6.2	-29.82	38.2	2.7	19.0	0.8	96.5				
⑧ ₁	灰色粉质黏土	60.7	25.8	-55.62	29.7	2.7	17.8	1.1	96.1	41.4	22.9	18.4	0.8
⑧ ₂	灰色粉砂夹黏土	70	9.3	-64.92		2.7	18.3	0.9	90.5	29.7	17.3	12.4	1.4

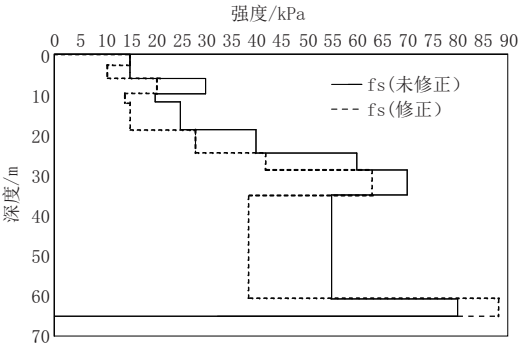


图 1 土侧摩阻力随深度分布图(单位:m)

单桩竖向抗压静载试验是获取单桩竖向承载力的主要方法，该方法相比于理论计算方法具有成果可靠,指导作用显著等优点。抗压静载试验主要包括慢速法和快速法两种。慢速法要求每级荷载施加后按第 5 min、15 min、30 min、45 min 和 60 min 测读桩顶沉降量，在此之后每隔 30 min 测读一次。快速法则要求各级荷载施加后第 5 min、15 min、30 min 测读桩顶沉降量，此后以 15 min 为间隔进行测读。快速法和慢速法均要求每级荷载施加后持荷 1 h。慢速法是一种被广泛认可的桩基承载力试验方法，本文中的试验采用慢速法进行。试验获取的载荷 - 沉降曲线见图 2，沉降 - 时间曲线见图 3。

试验结果表明,试验桩在 8 000 kN 荷载下承载力仍具有一定的增长趋势,其极限承载能力在 8 000 kN 以上。

2 理论计算

竖向受荷桩体在压入土地后，主要受土体对于桩身的摩阻力和桩端的支承力作用，这两种桩土作用力是竖向受荷桩承载力的主要来源。当桩为实心预制桩时，土体对于桩的侧摩阻力仅存在于桩的外表面，土体对于桩端的支撑力则作用于桩端的整个截面上；而当桩为开口钢管桩时,由于桩在压入过程

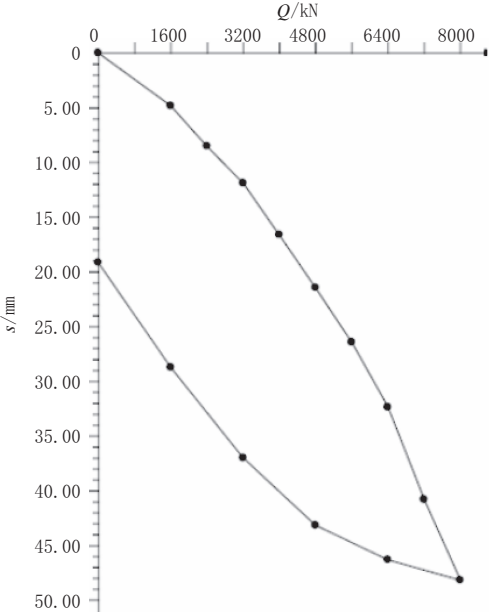


图 2 载荷 - 沉降曲线(单位:mm)

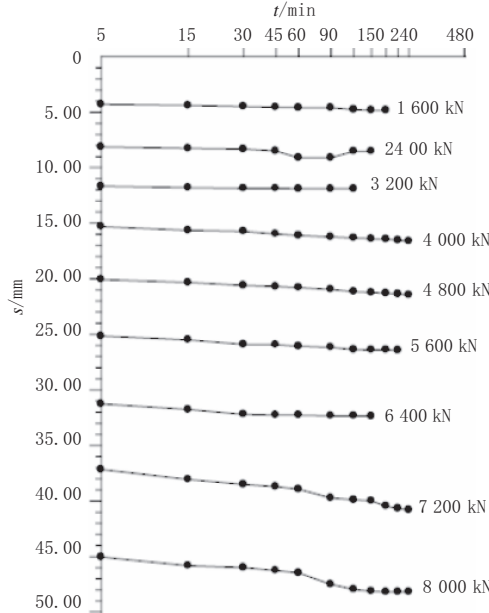


图 3 沉降 - 时间曲线(单位:mm)

中土体不可避免的进入桩内管内，土体对于桩身的侧摩阻力有可能同时存在于桩身外侧和内部管内表

面,土体对于桩端的支撑力则有可能仅作用于管桩的圆环形截面,也有可能同时作用于管桩圆形截面和管内部分区域或是全部区域(桩端部分土塞或桩端完全土塞)。

为了进一步揭示,振沉桩工艺对于开口单桩承载力的影响,本文拟针对试验所用开口钢管桩,考虑四种可能的管桩桩-土作用情况,采用理论方法对四种工况下的管桩承载力进行计算。统过计算结果与试验结果的对比,来揭示管桩在振沉工艺下可能存在的桩-土作用模式。四种工况下桩-土作用的假设及桩竖向承载力的计算见图 4。

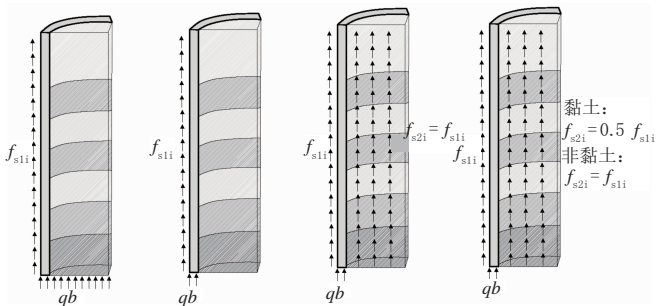


图 4 各工况下开口管桩受力图(四分之一桩体)

工况 1:考虑各土层对钢管桩外侧的摩阻力,以及桩端土塞对于桩端的支撑作用,桩端受力等效于闭口桩桩端。此时钢管桩受力主要包括桩身外侧土体摩阻应力 f_{s1} 和桩端土体对桩端的支承力 q_b 该工况下,桩体的竖向承载力有:

$$Q_1=U_{\text{outter}}\sum f_{s1i}L_i+q_b(A_c+A_s) \tag{1}$$

式中: f_{s1i} 为第 i 层土对桩身外侧的侧摩阻力; L_i 为桩体的嵌入第 i 层土的深度; U_{outter} 为桩截面外周长; q_b 为桩端阻力; A_c 为管桩截面面积; A_s 为桩内管内投影面积。

工况 2:不考虑桩内管内土塞的影响,即假定桩体仅承受桩外土体对桩身的摩阻力及桩端土体对桩的支承力,桩端土体的支承力分布于桩圆环形截面上。该工况下,桩体的竖向承载力计算如下:

$$Q_2=U_{\text{outter}}\sum f_{s1i}L_i+q_bA_c \tag{2}$$

工况 3:考虑桩内土体对桩身的摩阻影响,即桩身同时承受内、外两侧土体的摩阻力。桩端按开口桩考虑,即桩端未形成土塞,土对桩端的作用力分布于圆环形桩截面。

$$Q_3=U_{\text{outter}}\sum (f_{s1i})L_i+U_{\text{inner}}\sum (f_{s2i})L_i+q_bA_c \tag{3}$$

$$f_{s1i}=f_{s2i} \tag{4}$$

式中: U_{outter} 为管桩内圆周长; f_{s2i} 为第 i 层土对桩身内侧的侧摩阻力。

工况 4:在工况 3 的基础上,考虑预制管桩压入

过程中,桩管内黏性土摩阻力的降低影响。依据经验,桩管内黏性土摩阻力设定为桩外侧粘性土的 0.5 倍

$$Q_3=U_{\text{outter}}\sum (f_{s1i})L_i+U_{\text{inner}}\sum (f_{s2i})L_i+q_bA_c \tag{5}$$

$$f_{s1i}=0.5f_{s2i}(\text{黏性土层}) \tag{6}$$

$$f_{s1i}=0.5f_{s2i}(\text{非黏性土层}) \tag{7}$$

《公路桥涵地基与基础设计规范》和《铁路桥涵地基和基础设计规范》根据桩径、土体类型给出了振动沉桩的影响系数,见表 2。两个规范建议在进行桩承载力计算时,分别讲桩侧摩阻力和桩端端阻力乘以表中修正系数,以体现振动沉桩对于桩竖向承载力的影响。

表 2 振沉影响系数				
桩径	黏土	粉质黏土	粉土	砂土
$0.8\geq D$	0.6	0.7	0.9	1.1
$2\text{ m}\geq D>0.8\text{ m}$	0.6	0.7	0.9	1.0
$D>2\text{ m}$	0.5	0.6	0.7	0.9

本文在上述四种工况的基础上,参考《公路桥涵地基与基础设计规范》和《铁路桥涵地基和基础设计规范》建议,对上述四种工况的计算结果进行修正。最终获得了八组计算结果,见表 3 和图 5。

3 桩土作用机理

八种情况下试验桩极限承载力的理论计算值在 5 399.85~13 486.82 kN 范围内变化,这表明不同桩-土作用条件下极限承载力差别巨大,桩-土作用形势对桩基承载性能影响显著。

试验中所获取的单桩极限承载力大于 8 000 kN,以此为标准工况 1、工况 3、工况 4 与试验结果较为一致。工况 1 考虑桩端完全闭塞,桩端受力等同于闭口桩。工况 3 不考虑桩端土塞影响,但同时考虑了土对管桩内、外侧的摩阻力,且不考虑黏性土层中管内摩阻力的降低。工况 4 在工况 3 的基础上,考虑压桩过程对于土体扰动造成的黏性土摩阻力衰减,依照经验对管内粘性土的摩阻力进行了折减。与这种三种工况相比,工况 2 的计算值要小于试验值。工况 2 与其他工况的差异主要在于,工况 2 并未考虑桩管内土体对于管桩承载力的影响,而其他三种工况均对管内土体的影响做了不同程度、不同角度的考虑。与现场试验的对比表明,采用振沉工艺压入桩时,管内土体对于管桩的承载力有较大的影响,桩-土作用模式与实心桩不同。

按照《公路桥涵地基与基础设计规范》和《铁路

表3 考虑不同桩-土作用的计算结果 单位:kN

工况	外侧摩阻力	内侧摩阻力	端阻	总承载力	内侧摩阻力占比	外侧摩阻力占比	端阻力占比
1	6 811.76	0.00	1 731.80	8 543.56	0.000	0.797	0.203
1A	5 250.50	0.00	1 904.98	7 155.48	0.000	0.734	0.266
2	6 811.76	0.00	135.77	6 947.53	0.000	0.980	0.020
2A	5 250.50	0.00	149.35	5 399.85	0.000	0.972	0.028
3	6 811.76	6 539.29	135.77	13 486.82	0.485	0.505	0.010
3A	5 250.50	5 040.48	149.35	10 440.32	0.483	0.503	0.014
4	6 811.76	4 133.63	135.77	11 081.16	0.373	0.615	0.012
4A	5 250.50	3 374.73	149.35	8 774.57	0.385	0.598	0.017

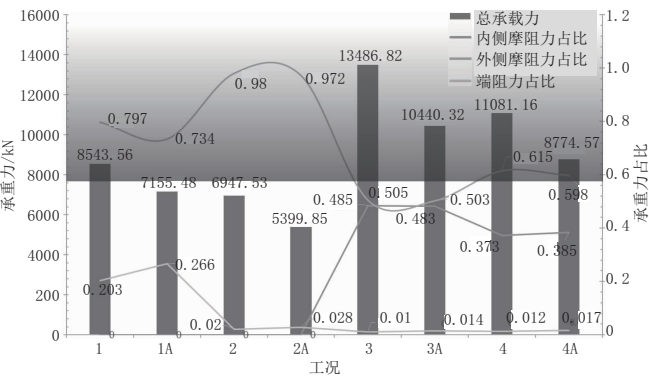


图5 考虑不同桩-土作用的计算结果(单位:kN)

《公路桥涵地基和基础设计规范》对振沉工艺的影响加以考虑,即按照桩径和土类型选定修正系数对计算所得的桩极限承载力进行修正。规范中对除了砂土之外的土的摩阻力和端阻力均做了较大程度的折减,这种折减考虑振沉条件下土体由于扰动而导致的强度丧失。经过修正后,计算所得的四种工况下桩基的极限承载力均有下降,工况3和工况4在修正后极限承载力大于8 000 kN,与试验吻合。这表明,在充分考虑振沉扰动所造成的土抗力衰减后,桩管内侧的摩阻力是管桩承载力提高的主要因素。管内土体与桩管内侧的摩阻力在管桩极限承载力计算的过程中不能忽略。

4 结 语

针对振沉桩桩-土作用研究相对较少的现状,本文采用慢速单桩竖向抗压静载试验测试了一根采用振沉方式压入的单桩承载力,获得了振沉桩荷载-沉降曲线、沉降-时间曲线等试验成果。随后,基于管桩可能存在的桩土作用模式,采用力学平衡方法进行了四种情况下的单桩极限承载力,并按照《公路桥涵地基与基础设计规范》和《铁路桥涵地基和基础设计规范》建议考虑振沉影响对结果进行了修正。

八组理论计算结果与试验结果的对比表明:在振沉条件下,桩管内土体对管桩的极限承载力有较大的影响,桩-土作用力不再仅仅局限于桩外侧土体的摩阻力和桩端土体对桩截面的支撑作用,桩端土塞效应及管内摩阻力的影响不能被忽略;振沉效应引起的土体扰动,将会降低土体抗力,在振沉条件下,桩内土体的摩阻力对桩承载性能的提高影响显著。

参考文献:

[1] 李卫超,庞玉麟,金易,等.基于CPT的振动沉桩贯入分析理论模型[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(11):185-194.

[2] Hanson S.Foundation engineering[M].75. Newnes, 1994.

[3] 邹北龙.某管桩基础厂房地面沉降事故分析[J].广东土木与建筑, 2006(1):58-59.

[4] 刘用俊.冲孔灌注桩基础事故的处理与分析[J].中华民居(下旬刊), 2011(7):243-244.

[5] White D J, Sidhu H K, Finlay T C, et al. Press-in piling: the influence of plugging on driveability [C]//Proceedings of the 8th international conference of the Deep Foundations Institute, New York, 2000.

[6] 李林,李镜培,孙德安,等.考虑时效性的静压桩荷载-沉降关系预测方法[J].岩土工程学报,2017,39(12):2327-2334.

[7] 严凯,庞玉麟,李卫超,等.基于CPT的锤击桩贯入分析理论模型[J].建筑科学,2020,36(S1):68-76.

[8] Mohan S, Khotan V, Stevens R, et al. Design and construction of large diameter impact driven pipe pile foundations new east span san francisco-oakland bay bridge[Z].

[9] 聂庆科,胡建敏,商卫东.深厚软土地基上振动沉拔钢管对周围土体扰动影响的研究[J].岩土工程学报,2008,30(1):128-132.

[10] 邓俊杰,陈龙珠,邢爱国,等.液压高频振动沉桩的饱和土超静孔压及单桩静载特性试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(2):203.

[11] Adejumo T W, Boiko I. Effect of installation techniques on the allowable bearing capacity of modeled circular piles in layered soil[J]. International Journal of Advanced Technology and Engineering Research, 2013, 2(8):1536-1542.

[12] 陈东升,周标和,吴春燕,等.沉桩方式及桩型对湛江组结构性黏土中单桩承载力时效性的影响 [J]. 科学技术与工程,2020,20(29):

3.4 高韧沥青混合料的碾压

(1)高韧超薄沥青磨耗层在摊铺机熨平板的基础上通常能够实现90%以上的密实度,因此建议使用11~13 t的双钢轮压路机,进行一遍静压和一至两遍前后静碾压^[4],随即静压滚压收光整平,确保最终的压实效果达标,碾压次数不宜超过三遍。

(2)做碾压时,要遵循“紧跟慢压”的原则。摊铺完成后,为了防止磨损石料、石料、石料结构的损坏,必须立即在尽可能高的温度下开始碾压,避免在低温状态下进行多次碾压。碾压段长度控制在20~30 m为宜,轮胎式压路机严禁使用。

(3)使用静载压路机时,应保证压路机覆盖压路机碾压宽度的1/3至1/4。不得将油类或油水混合物喷涂在压路机轮面上,喷水系统也不能经常开启,喷上清水或含有隔离物质的水溶液,只在需要时喷喷上时应呈雾状,以防车轮粘连。严禁使用混合物进行柴油、机油喷洒作业。

(4)检查需要设置专门的岗位,保证初压温度和厚度、终压的温度和厚度达到要求。如果发现过度碾压的迹象,如粗骨料碎化或离析,应立即停止碾压,并分析原因。

3.5 高韧沥青混合料的接缝处理

(1)对于纵向裂缝处理,同步摊铺作业过程中,两台摊铺机应保持10~20 cm宽度的混合料不作碾压,并作为后续基准高程。热接缝宽度控制5~10 cm之间,作为重叠碾压的宽度。最后进行跨缝碾压处理消除纵向裂缝。

(2)对于横向裂缝处理,1、3 m尺用于摊铺段端

部,以摊铺层与尺子脱离接触点为定位,剪除尺子,呈悬臂状。然后,继续摊铺时,将接缝位置清洗干净,抹上少量黏层沥青,再从接缝处开始摊铺,保证铺好的部位都被摊铺机的熨平覆盖住。

3.6 养护及开放交通

高韧超薄沥青研磨层只有在路面温度低于50℃的情况下,才允许在碾压完成后通过。维修时,为防止因车辆行驶轨迹影响平整度,禁止车辆驶入磨耗层路面。

4 结 语

针对奉贤区四条公路的道路养护工作,采用18~20 mm PG88型高韧超薄沥青磨耗层技术,总结了其特点和施工质量控制要点,以提高公路养护工作的效率和经济效益。

高韧超薄磨耗层技术^[3]的运用有效提高了道路的安全性、适用性和耐久性能等各项性能。在道路养护领域应用这一技术,不仅加快了施工周期,也实现了材料和机械的节约,符合当前绿色施工的趋势。这种技术的应用为同类型沥青路面磨耗层施工提供了宝贵的工程参考。

参考文献:

- [1] 葛哈.高韧超薄沥青磨耗层在粤赣高速公路的应用[J].工程科技Ⅱ辑,2021(4):35-36.
- [2] 张书文.超薄沥青磨耗层技术在高速公路养护中的应用[J].交通世界,2022(11):49-51.
- [3] 姚坤.高韧超薄沥青磨耗层在市政道路工程中的应用[J].城市道桥与防洪,2022(8):202-204.
- [4] 虞将苗.高韧超薄沥青磨耗层在港珠澳大桥珠海人工岛通道上的应用[J].清华大学学报(自然科学版),2020,60(1):48-56.

~~~~~  
(上接第266页)

252-258.

- [13] 上海市住房和城乡建设管理委员会.地基基础设计标准(上海市工程建设规范)[S].2019.
- [14] 中华人民共和国原城乡建设环境保护部.建筑地基基础设计规范[S].2011.

[15] JTG 3363—2019,公路桥涵地基与基础设计规范[S].

[16] TB 10093—2017,铁路桥涵地基和基础设计规范[S].

[17] 中华人民共和国建设部.建筑桩基技术规范[S].2008.

[18] 中国铁道科学研究院/铁路工程基桩检测技术规程[S].2008.

[19] 交通部第一公路工程总公司.公路桥涵施工技术规范[S].2011.