

湖相沉积土层中等直径劲性复合桩的承载力计算与分析

李红波¹, 胡锦涛², 王咸东², 盛光祺²

(1. 云南省城市建设投资集团有限公司, 云南 昆明, 650000; 2. 昆明军龙岩土工程有限公司, 云南 昆明, 650000)

摘要: 本文采用目前五个具有代表性规范对湖相沉积土层中劲性复合桩桩身承载力进行计算复核与分析, 得出了在采用与芯桩等直径原位注浆搅拌情况下, 土体经注浆搅拌后对桩身承载力依然具有较大的影响的结论。给出了在特定工程条件下注浆搅拌对桩身承载力的贡献值。劲性复合桩侧阻力调整系数对桩身承载力有较大的影响, 工程中需结合地区经验综合考虑, 才能得出符合实际、安全的计算结果, 为工程带来合理的经济环境效益。

关键词: 劲性复合桩; 桩身承载力; 桩侧阻力调整系数;

中文分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号:

Bearing capacity calculation and analysis of strength composite piles with the same diameter in the lacustrine sedimentation

Li Hongbo¹, Hu Jinwei², Wang Xiandong², Sheng Guangqi²

(1. Yunnan Metropolitan Construction Investment Group Co.,Ltd, Kunming Yunnan 650000 P.R. China 2. Kunming Junlong Geotechnical Engineering Co.,Ltd, Kunming Yunnan 650000 P.R. China)

Abstract: We calculated and analyzed the bearing capacity of strength composite piles which located in the lacustrine sedimentation with five method that used by engineers. The resulted showed that cement-soil have major impact on the bearing capacity of strength composite piles. We found cement-soil share of the bearing capacity of strength composite piles with the same diameter in the lacustrine sedimentation, and found that factor of the side resistance of pile have major impact on the bearing capacity of strength composite piles. We will get the practical and safe results while considering the various factors on the influence of the bearing capacity of strength composite piles, and achieve economic and environmental benefit.

Keywords: Strength Composite Piles, Bearing Capacity, factor of the side resistance of piles

1、引言

昆明市西南部边缘与滇池交接处属于典型滇池盆地湖相沉积平原地貌, 分布着厚度较深的软弱土层, 建构物基础选型受到极大限制, 浅基础基本无法满足要求, 桩基中以管桩应用最为广泛。

水泥土搅拌桩或注浆搅拌是软土地区常用的地基处理形式, 具有施工方便灵活, 施工周期

短, 造价低的特点, 但桩身承载力较低, 桩周侧摩阻力往往得不到充分利用。管桩尤其是预应力管桩, 其桩身承载力较高, 但是由于采用离心浇筑而成, 材料密实, 表面光滑, 侧摩阻力较低。根据相关学者研究表明, 与采用振捣法浇筑的桩相比, 管桩桩周侧摩阻力仅为 65%~75%^[1], 桩身材料强度得不到发挥。

劲性复合桩是在经注浆搅拌的注浆混合体初凝前插入刚性芯桩形成的一种复合型结构^[2],

结合了土体注浆搅拌侧摩阻力大和管桩桩身材料强度高的特点，具有承载力高、造价低等优点^[3,4]，在工程中有很好的应用前景。

2、劲性复合桩的承载力计算方法

根据芯桩长 l 与注浆搅拌长度 l_c 的比值 α_1 的不同，将劲性复合桩分为长芯劲性桩 $\alpha_1 > 1$ 、短芯劲性桩 $\alpha_1 < 1$ 和等芯劲性桩 $\alpha_1 = 1$ ^[5,6,7]。

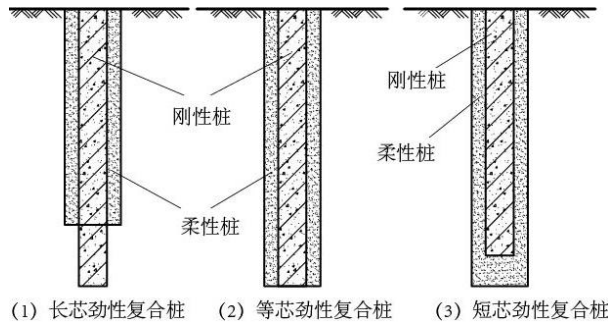


图 1 劲性复合桩示意图

Fig. 1 Diagram of strength composite pile

劲性复合桩的承载力主要由劲性复合段承载力、非劲性复合段承载力和桩端承载力构成。目前，劲性复合桩并没有统一的承载力计算方法。根据芯长比的不同，计算方法也不尽相同，但所有的计算方法均在单桩竖向承载力^[3]的计算基础上进行不同程度的改进。劲性复合桩承载力计算方法主要有①河北省《混凝土芯水泥土组合桩复合地基技术规程》(DB13(J) 50-2205)，②河北省《刚性芯夯实水泥土桩复合地基技术规程》(DB13(J)70-2007)，③《劲性复合桩技术规程》(JGJ/T 327-2014) ④云南省《加芯搅拌桩技术规程》(YB-2007) ⑤江苏省《劲性复合桩技术规程》(DBJ32-TJ 151-2013)。上述五本规范都考虑了桩周侧摩阻力和桩端阻力，通用承载力计算式可归纳如下^[8]：

表 1 土层参数

Table 1 Soil parameters

土层名称	状态	天然密度 ρ (g/cm ³)	天然含水量 $w(\%)$	压缩模量 E_{s1-2} (MPa)	抗剪强度		承载力特征值 f_{ak} (kPa)	桩侧阻力 q_{sik} (kPa)
					内聚力 c (kPa)	内摩擦角 $\phi(^{\circ})$		
③ ₂ 泥炭质土	流塑	1.31	203.6	1.38	12.7	2.3	45	20
③ ₃ 粉土	中密	1.85	30.2	15.00	27	12	140	48
③ ₅ 粉土	中密	1.87	24.7	11.33	27.4	11.6	165	45
④ ₁ 泥炭质土	可塑	1.29	152.5	2.34	28.5	5.2	110	30
④ ₂ 黏土	可塑	1.78	41.1	4.18	28.3	5.5	165	70

$$R_a = u \sum \xi_{si} q_{sia} l_i + u^c \sum q_{sja}^c l_j + \alpha \xi_p q_{pa} A_p \quad (1)$$

R_a 为单桩竖向承载力特征值， u 、 u^c 分别为劲性复合段和非劲性复合段桩身周长， ξ_{si} 、 ξ_p 为第 i 为层侧阻力调整系数和桩端阻力调整系数， q_{sia} 、 q_{sja}^c 为劲性复合段和非劲性复合段第 i 层土侧阻力特征值， l_i 、 l_j 为劲性复合段和非劲性复合段第 i 层土层厚度， α 为桩端阻力折减系数， q_{pa} 为桩的端阻力特征值， A_p 为桩端截面积。根据芯长比，住建部行业标准、云南省地方标准和江苏省地方标准区分不同计算方法，根据芯长比不同，计算式略有不同。

住建部行业标准《劲性复合桩技术规程》(JGJ/T 327-2014)要求区分劲性复合桩桩侧破坏面发生于内外芯界面或外芯与桩周土界面进行计算。云南省《加芯搅拌桩技术规程》(YB-2007)还要求进行桩身顶端材料强度确定的单桩竖向承载力 R_{a2} 、芯桩周和芯桩端水泥土抗力确定的单桩竖向承载力 R_{a3} 和芯桩范围内桩周土和芯桩端水泥土抗力确定的单桩竖向承载力 R_{a4} 计算，并选取最小值作为桩身承载力特征值。上述两本规范实质是根据劲性复合桩破坏模式选用不同的计算模型。

3、计算实例

3.1 工程概况与水文地质条件

昆明滇池国际会展中心项目位于昆明盆地西南部边缘，距离滇池水域约 1.0km。场地范围内为滇池盆地湖相沉积平原地貌，地表普遍分布厚约 2~5m 杂填土层，其下主要为第四系冲洪积及湖沼相沉积地层，以黏性土层和粉土层为主，地质及水文条件如图 1 所示。

④ ₂ 粉土	中密	1.9	28.7	5.97	20.8	14.3	150	50
⑤ ₁ 泥炭质土	可塑	1.26	141.9	3.75	41.6	6.7	125	35
⑤ ₂ 粉土	中密	1.88	28.1	7.32	31.7	13.6	170	70
⑤ ₂ 泥炭质土	可塑	1.35	105.6	3.57	34.6	6.6	130	40

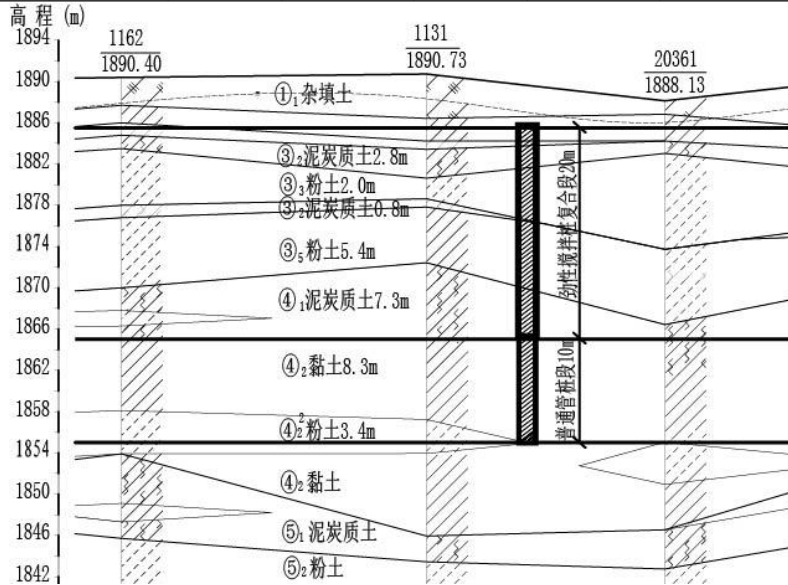


图 2 典型地质剖面图

Fig. 2 Typical geology sections

主体结构地上三层，地下一层，平面形状为同心圆组成的半圆环，外弧长度约 1600 米，内弧长度约 1200 米，径向长度约 190 米，会展及配套商业总面积 1171410 m²。地下室层高 5.4 米，主要功能为车库；1 层和 2 层层高均为 7.0m，其中 1 层主要功能为展厅、商业、车库和设备用房；二层主要功能为展厅、商业及配套洽谈会议中心；3 层层高 15.0 米，主要功能为展厅，为大跨度屋盖结构。车库和展厅采用钢筋混凝土框架结构体系，屋盖采用钢筋混凝土筒体（框架柱）-拉索拱架钢结构体系。框架柱轴力标准值约 6200kN 和 7800 kN。大跨度屋盖结构中支承筒体最大轴

力标准值约 105000kN，支承框架柱轴力标准值约 9500kN。

通过计算，如采用端承型摩擦桩，则总桩数为 1680 根，工程量 50400m，工程量极大，且存在严重的挤土效应问题，施工难度大。如采用灌注桩将会存在充盈系数大、成桩困难、质量不易保证的问题。在以往施工经验的基础上，提出采用在设计桩位上进行搅拌注浆施工，在水泥土混合体初凝前压入管桩的优化方案。

3.2、桩基承载力计算与分析

根据提出的优化方案，注浆搅拌与管桩（芯桩）直径相同，弹性复合桩设计参数如表 2 所示。

表 2 弹性复合桩参数

Table. 2 The parameters of strengthened composite piles

类别	桩径 (mm)	桩长 (m)	混凝土强度等级	水灰比	壁厚 (mm)	备注
水泥土搅拌桩	500	20.0	/	1.6	/	/
管桩(芯桩)	500	30.0	C80	/	100	PHC-AB500-100

采用上述五本规范计算所得桩身承载力标准值如下所示，其中河北省《混凝土芯水泥土组合桩复合地基技术规程》(DB13 (J) 50-2205)

明确要求芯长比 $\alpha_1 \leq 1$ ，故分为复合段和非复合段进行计算。

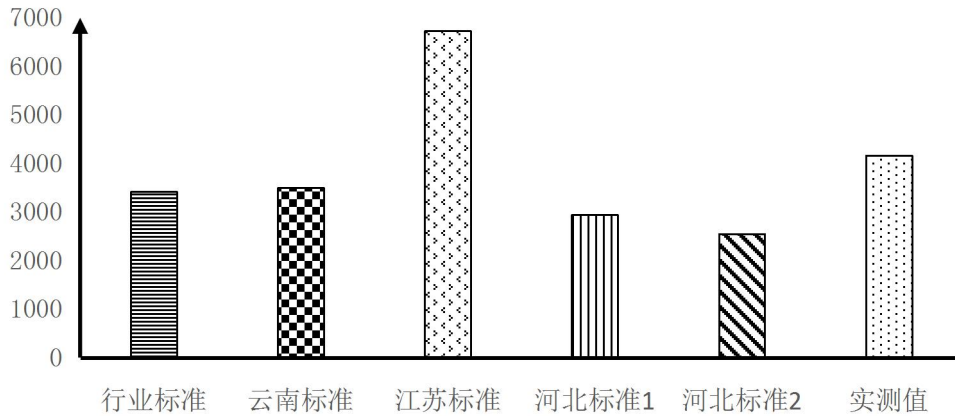


图3 实测值和计算值比较图

Fig. 3 Comparison of the measured and calculated values

最终实测值和各计算值误差详见表3。

表3 实测值与计算值误差

Table 3 Deviation of measured and calculated values

	行业标准	云南标准	江苏标准	河北标准1	河北标准2	实测值
误差	-17.95%	-15.97%	61.65%	-29.34%	-38.78%	0

对比表3和图3数据,可以看出当注浆搅拌桩径与混凝土桩径相同的情况下,云南标准计算值最接近实测值,误差为15.97%,其次为行业标准,误差最大为江苏标准,误差达61.65%。反观分析计算过程中所选用的数值,可以明显看出行业标准、江苏标准和云南标准均采用了桩侧阻力调整系数 ξ_s ,导致最终计算结果出现差异。行业标准调整系数根据土层不同采用不同的调整系数,取值范围为1.3~2.3,结合本项目地质条件,调整系数取值范围为1.3~1.9;云南标准建议值为1.1~1.6,不区分土层;江苏标准根据面积比确定,面积比定义为芯桩桩身截面积与劲

性复合桩桩身截面积之比,本项目中由于水泥土桩直径与管桩直径相同,计算所得面积比大于40%,桩侧阻力调整系数 $\xi_s > 3.0$,导致最终计算结果偏大;河北省两本规范均未对桩侧阻力进行调整,即取值为1.0,在水泥土搅拌桩桩径与混凝土桩径相同,导致采用河北省规范计算无法体现出水泥土搅拌桩的作用,计算值与普通管桩计算值相差不大。

表4为劲性复合桩在水泥土注浆搅拌作用下桩身承载力提高值与不考虑水泥土注浆搅拌作用的桩身承载力提高值之比。

表4 水泥土搅拌桩对桩身承载力的影响

Table 4 Influence of cement soil mixing pile on bearing capacity of composite pile

	行业标准	云南标准	江苏标准	河北标准1	河北标准2	实测值	普通管桩
误差	28.47%	31.57%	153.10%	10.63%	-4.14%	56.58%	0

根据表4,可以看出在水泥土注浆搅拌作用下行业标准、云南标准、江苏标准和河北标准1计算桩身承载力均有一定提高,这与工程经验是相匹配的。河北标准2桩身承载力反而下降,主要原因是本项目水泥土注浆搅拌桩径与混凝土桩径相同,根据河北标准2桩侧阻力未得到提高,桩端阻力反而因为采用复合桩型计算进行折减,导致最终计算承载力值较低。

4、结论

通过工程实例,对比分析五本规范计算水泥土注浆搅拌桩径与混凝土桩径相同情况桩身承载力,并进行了比较分析,得出以下几点结论:

(1) 在水泥土注浆搅拌桩径与混凝土桩径相同的情况下,水泥土注浆搅拌对劲性复合桩

桩身承载力依然有较大的贡献值。

(2) 在本项目中,当水泥土注浆搅拌桩径与混凝土桩桩径相同的情况下,劲性复合桩桩身承载力提高约 1.56 倍。即在劲性复合桩提供的承载力中水泥土注浆搅拌的贡献值约为 35.9%。如不考虑水泥土注浆搅拌对劲性复合桩桩身承载力有利作用,将会造成较大的浪费。

(3) 桩侧阻力调整系数 ξ_s 对桩身承载力具有较大影响,具有很强的地域性,在具体使用过程中应根据地区经验综合考虑各种因素后选用。

(4) 采用水泥土注浆搅拌桩径与混凝土桩桩径相同劲性复合桩施工工艺不仅可以解决管桩施工过程中的挤土效应问题,对桩身承载力的提高也有较大作用,该工艺具有较强的适用性。

参考文献 (Reference)

- [1] 张日红,吴磊磊,孔清华. 静钻根植桩基础研究与实践[J]. 岩土工程学报[J], 2013, 35 (增 2):1200-1203.
- [2] 顾士坦, 施建勇, 王春秋, 谭云亮. 劲性搅拌桩芯桩荷载传递规律理论研究[J]. 岩土力学. 2013, 32 (8):2473-2478.
- [3] 丁永君, 荣晓巍, 李进军. 关于劲性复合桩的若干问题[J]. 低温建筑, 2006, 114 (6): 97-99.
- [4] 丁永君, 李进军, 李辉. 劲性搅拌桩的发展现状[J]. 低温建筑, 2005, 108 (6): 100-101.
- [5] 河北省建设厅. 刚性芯夯实水泥土桩复合地基技术规程 (DB13(J)70-2007) [S]. 石家庄: 河北省建筑科学研究院, 2008
- [6] 江苏省住房和城乡建设厅. 劲性复合桩技术规程 (DBJ32-TJ 151-2013) [S]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2013
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 劲性复合桩技术规程 (JGJ/T 327-2014) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014
- [8] 李立业, 刘松玉, 章定文, 邓亚光. 劲性复合桩承载力计算方法探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11 (增 1): 43-47.
- [9] 盛桂琳, 鲁书甜, 鲍鹏等. 劲性搅拌桩承载力的主要影响因素分析和计算公式探讨[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2008, 38 (1): 96-100.

作者简介: 李红波(1964 -), 男, 1985 年中专毕业于云南建筑工程学校,1993 年大学专科毕业于云南工业大学工民建专业, 现任云南城投集团工程中心工程部长,会展工程建设指挥部副指挥长,主要从事工程项目建设组织与管理。