

文章编号:1671-8879(2018)02-0042-08

钢管混凝土复合桩竖向承载特性离心模型试验

冯忠居¹,王富春¹,张其浪²,甄东晓³,席称心^{1,2},

苏航州^{1,4},尹洪桦^{1,5},田江磊³,靳子良³

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 广东省南粤交通投资建设有限公司,广东 广州 510100;
3. 广中江高速公路项目管理处,广东 江门 529000; 4. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,
陕西 西安 710065; 5. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司,广东 广州 510000)

摘 要:为研究水域环境中的钢管混凝土复合桩的竖向承载特性,选取钢管埋深和钢管挤土区土体模量为变量,通过离心模型试验方法,研究钢管埋深为 8、12、16、20 cm 时和挤土区模量为 1.1E、1.2E、1.3E、1.4E、1.5E (E 为非挤土区土体模量)时钢管混凝土复合桩的竖向承载特性,得到了钢管混凝土复合桩的荷载(P)-位移(S)曲线、桩身轴力曲线及桩侧摩阻力曲线。研究表明:钢管埋深在 12 cm 范围内增大时,能明显提高钢管混凝土复合桩竖向极限承载力,超过 12 cm 后继续增大钢管埋深,仍能提高钢管混凝土复合桩竖向极限承载力,但增幅已不明显,钢管埋深从 8 cm 增大到 20 cm 时,钢管混凝土复合桩竖向极限承载力影响度从 3.1%增大到 6.7%;随着钢管挤土区土体模量的增加,钢管混凝土复合桩钢管段侧摩阻力逐渐变大,钢管挤土区土体模量从 1.1E 增大到 1.5E 时,钢管混凝土复合桩竖向极限承载力影响度从 3.1%增大到 5.1%。提出的适用于钢管混凝土复合桩的竖向承载力计算公式及工程建议,可为水域环境中钢管混凝土复合桩的设计与施工提供可靠的理论依据与技术支持。

关键词:桥梁工程;钢管混凝土复合桩;离心模型试验;竖向承载特性

中图分类号:U443.15 **文献标志码:**A

Centrifuge model tests of vertical bearing characteristics of steel pipe concrete composite pile

FENG Zhong-ju¹, WANG Fu-chun¹, ZHANG Qi-lang², ZHEN Dong-xiao³, XI Chen-xin^{1,2}
SU Hang-zhou^{1,4}, YIN Hong-hua^{1,5}, TIAN Jiang-lei³, JIN Zi-liang³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Guangdong Nanyue Transportation Investment and Construction Co., Ltd., Guangzhou 510100, Guangdong, China; 3. Guangzhongjiang Highway Project Management Department, Jiangmen 529000, Guangdong, China; 4. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 5. Guangdong Province Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China)

Abstract: In order to study the steel pipe concrete composite pile in the aquatic environment, soil moduli of steel pipe depth and steel pipe soil compaction zone were selected as variables. Vertical bearing characteristics of steel pipe concrete composite pile with 8, 12, 16, 20 cm of steel pipe

收稿日期:2017-09-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41272285)

作者简介:冯忠居(1965-),男,山西万荣人,教授,博士研究生导师,E-mail:ysf@gl.chd.edu.cn。

depth and $1.1E$, $1.2E$, $1.3E$, $1.4E$, $1.5E$ (where E is soil modulus in non-compaction zone) of steel pipe soil compaction zone soil modulus were studied by centrifuge model tests, and the load (P)-displacement(S) curve, axial force curve and lateral friction curve of steel pipe concrete composite pile were obtained. The results show that vertical bearing characteristics of steel pipe concrete composite pile improves obviously when the steel pipe depth increases in the range of 12 cm. Vertical bearing characteristics of steel pipe concrete composite pile still improves when the steel pipe depth increases out of 12 cm, but the increase is not obvious. When the steel pipe depth increases from 8 to 20 cm, vertical bearing characteristics of steel pipe concrete composite pile increases from 3.1% to 6.7%. With the increase of the soil modulus in steel pipe soil compaction zone, the lateral friction of steel pipe concrete composite pile increases gradually. When the steel pipe soil compaction zone soil modulus increases from $1.1E$ to $1.5E$, vertical bearing characteristics of steel pipe concrete composite pile increases from 3.1% to 5.1%. The proposed formulas for calculating of the vertical bearing characteristic of steel pipe concrete composite pile and engineering suggestion provides a reliable theoretical basis and technical support for design and construction of steel pipe concrete composite pile in aquatic environment. 1 tab, 11 figs, 20 refs.

Key words: bridge engineering; steel pipe concrete composite pile; centrifuge model test; vertical bearing characteristic

0 引言

穿越水系发达地区的公路桥梁基础主要采用桩基础。通常情况下施工中钢护筒因后续施工需要且护筒埋深较大,在成桩后一般不再回收,从而与钢筋混凝土材料一起形成复合桩基础,呈现上大下小的变截面桩。钢护筒金属材料的工程特性优于钢筋混凝土材料,这使得钢管混凝土复合桩有着比普通钢筋混凝土桩更好的力学特性。相同直径钢管混凝土复合桩较普通钢筋混凝土桩承载力的安全储备大大过剩。事实上,钢管混凝土复合桩在中国穿越江、河、湖、泊的桥梁结构基础工程施工中已得到普遍应用^[1],但基本上是将钢护筒作为基础的安全系数考虑,鲜有人认为该安全系数的保留表明了设计技术上的不合理性。

目前,国内外学者在钢管混凝土柱抗压承载特性方面进行了一系列研究工作。苏杨等采用模型柱法和非线性有限元法对钢管混凝土偏压柱的力学性能进行研究,提出一种新的圆钢管混凝土偏压柱承载力实用计算公式,其计算结果与试验结果吻合较好^[2];骆涛涛等利用 353 根钢管混凝土柱轴心受压试验结果,提出适用于长细比为 4~38.5 的钢管混凝土柱轴心受压承载力折减系数计算公式^[3];任旭强等通过室内模型试验研究桩周土含水率变化对钢管桩土复合结构承载力的影响^[4];李春燕等通过模型试验研究了有无钢管、有无剪力环、有无泥皮、有

无防腐涂层等条件下钢管复合桩的承载力和变形特性^[5];张敏等通过 5 组钢管复合桩模型试验,比较和分析试件的荷载-变形曲线、截面变形规律、钢管与剪力环变形等^[6-8];蔡健等基于核心高强钢管混凝土桩轴压性能试验,分析了核心柱的钢管含率、纵筋配筋率、配箍率和截面形式等因素对其性能的影响^[9];汪春雨利用试验研究了二重钢管混凝土桩头的传力特点、二重钢管的作用以及桩端破坏形态,指出二重管构造可有效提高钢管混凝土桩桩端承载力^[10];王怀忠假定钢管和混凝土在界面处的变形是一致的,利用乐甫位移函数得出厚壁圆筒在两端和内、外壁分别受均布压力作用下的空间轴对称问题解^[11]。欧洲 EC4(94)规程中提出的钢-混凝土组合结构设计规范,考虑到钢管对核心混凝土的套箍约束作用而使得轴压承载力提高,修正了简单叠加的全截面塑性承载力^[12]。日本 AIJ-CFT(97)规程在计算圆钢管混凝土构件承载力时,考虑了钢管对核心混凝土的约束效应^[13]。综上所述,目前缺乏针对钢管混凝土复合桩与其周围岩土体相互作用的竖向承载特性研究。桥梁桩基础与钢管混凝土柱在使用功能上的差异性,导致钢管混凝土复合桩的竖向承载特性有别于钢管混凝土柱的抗压承载特性,因此有必要对钢管混凝土复合桩竖向承载特性进行研究。

基于笔者在桥梁桩基础方面取得的研究成果^[14-18],本文通过离心模型试验研究钢管混凝土复合桩在钢管埋深和钢管挤土区土体模量变化下的竖

向承载特性,从钢管混凝土复合桩的 P - S (荷载-位移)曲线、桩身轴力曲线和桩侧摩阻力曲线分析钢护筒对桩基竖向承载特性的影响规律,为水域环境中桥梁桩基础的设计和施工提供保障。

1 试验原理与设备

本试验采用等应力相似原理,根据离心力与重力等效的原理,将尺寸缩小的模型放在离心加速度场中,实现模型与其原型在应力、应变各方面等效。比例因数为原型与模型两者相应变量之比,本试验中比例因数取 100(相应的离心加速度取 $100g$)。

本试验采用 TLJ-3 型土工离心机,有效旋转半径为 2 m,吊篮容量为 700 mm×360 mm×500 mm,离心机容量为 $60g \cdot t$ 。

2 试验方案

2.1 地基土层设计

2.1.1 模型土制备

本离心模型试验用土采用黄土人工制备,具体步骤为:①一次性称取试验用黄土 0.6 m^3 ,以确保不同组试验中土样物理学性质相同;②通过室内击实试验确定土样的最佳含水率;③将土样风干或烘干,然后碾碎土样;④将碾碎的土样过 2 mm 筛;⑤用烘干法测定过筛后土的含水率;⑥为确保土工试验具有代表性,土样均按最佳含水率 13.5% 配制,根据所取土的含水率和最佳含水率计算土样中所需加水量;⑦用喷水设备将水均匀喷在土样上,喷完后将土样充分搅匀贮存 24 h;⑧测定土样的含水率,如所测含水率与最佳含水率之差大于 1%,则重新调配土样的含水率;⑨土样制备完毕后,根据各分层土样质量称重分装于密封塑料袋内;⑩待试验完成后将可回收土样按上述步骤重复利用。

2.1.2 钢管挤土区地层模拟

为了真实反映原型桩的受力情况,通过改变钢管挤土区(本试验取 $0.5D$, D 为钢管直径)土体模量的方法模拟钢管挤土效应对钢管混凝土复合桩竖向承载特性的影响。由于模型箱内空间有限,不便于操作,本试验利用自主设计的挤土模具对钢管挤土区的地基土提前制备^[19]。试验中钢管埋深设置为 8、12、16、20 cm 这 4 种工况。

2.1.3 非挤土区地层模拟

非挤土区地层采取以每层 2 cm 的厚度分层压实填筑,非挤土区土层模量 $E=19.76\text{ MPa}$ 。

2.2 模型桩设计

模型材料的选取需满足材料的相似条件以及可加工性的要求。本试验采用外径 30 mm、壁厚 2 mm 的不锈钢管材模拟钢护筒(钢管长度分别为 13、17、21、25 cm),钢管弹性模量为 $1.64 \times 10^{11}\text{ Pa}$;采用外径 25 mm、壁厚 2 mm 的铝合金管材模拟钢筋混凝土桩(桩长 35 cm),铝合金管的弹性模量为 $6.33 \times 10^{10}\text{ Pa}$ 。为近似模拟实际施工过程中混凝土桩体与桩侧土体的接触特性,对铝合金管表面进行粗糙化处理。

采用 BE120-3AA 应变片(灵敏系数 2.0~2.2,电阻值 120 Ω),为了保证电阻式应变片在埋入土层后具有较高的存活率,试验中将管材纵向剖开,在其内壁两侧按一定间距对称布设 6 对应变片。桩身应变测点布设如图 1 所示。

挤土模具采用分节式设计,如图 2 所示。

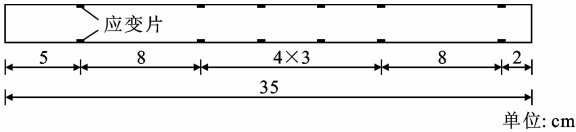


图 1 应变片布设
Fig. 1 Strain gauges arrangement

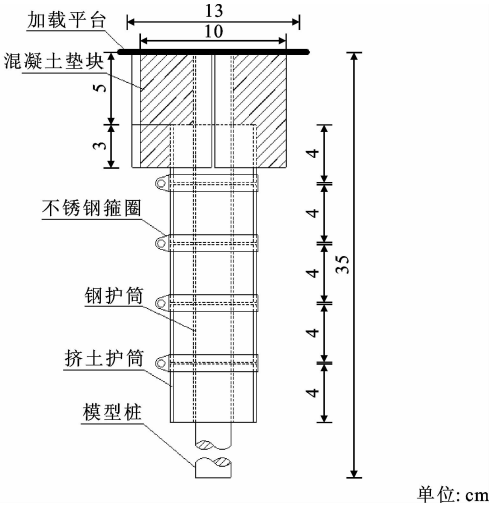


图 2 挤土模具
Fig. 2 Soil compaction mold

2.3 试验加载装置与测量装置

本试验选定 TLJ-3 型土工离心机配套的大模型箱(尺寸 700 mm×360 mm×500 mm,净重 200 kg)作为试验箱;采用自主设计的加载系统进行竖向分级加载^[20],通过向模型桩顶的加载平台逐级添加荷载砝码来实现(其中加载平台即视为第 1 级加载),每级加载达到稳定后加下一级荷载。竖向加载分 8 级,每级加载 225 N,加载范围为 225~1 800 N。采

用 WDL-25 直滑式导电塑料位移计对桩顶沉降进行测量,试验加载与测量装置如图 3 所示。

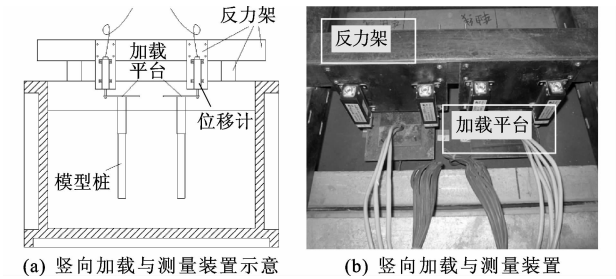


图 3 竖向加载布置

Fig. 3 Arrangement of vertical loading

2.4 试验工况

本试验选定钢管埋深 H 、钢管挤土区土体模量 2 个变量,试验工况见表 1。

表 1 试验工况		
Tab. 1 Test conditions		
桩型	钢管埋深/cm	钢管挤土区土体模量/MPa
对比桩	0	1.0E
试验桩	8、12、16、20	1.1E
	8	1.1E、1.2E、1.3E、1.4E、1.5E

3 试验结果分析

3.1 钢管埋深对桩基竖向承载特性的影响

3.1.1 钢管埋深对桩基竖向极限承载力的影响

钢管埋深变化时,钢管混凝土复合桩的 P - S 曲线如图 4 所示。

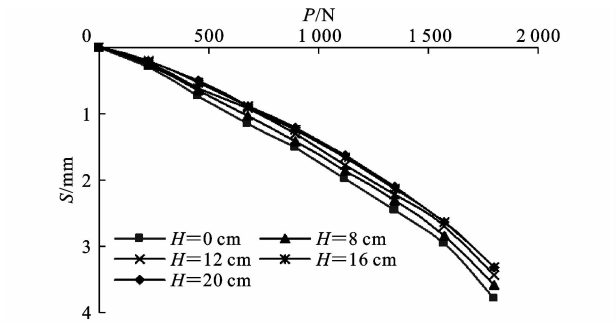
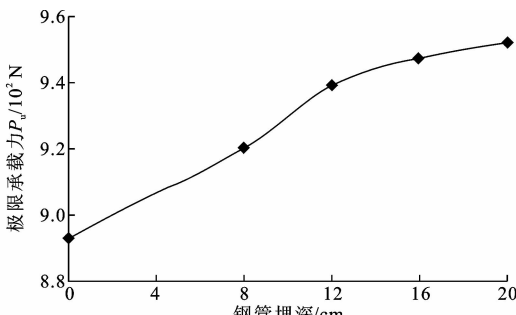


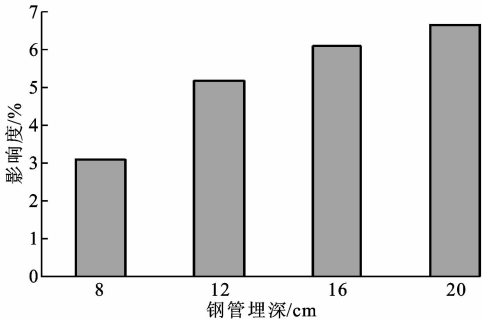
图 4 钢管埋深变化时桩基的 P - S 曲线

Fig. 4 P - S curves of pile foundation when pipe depth changes

从图 4 可以看出,随着钢管埋深的增加,钢管混凝土复合桩竖向承载力呈逐渐增大趋势。由于 P - S 曲线为缓变型,没有明显拐点,故取桩顶位移 $6\%D$ (即 1.5 mm) 对应的荷载作为桩基的竖向极限承载力 P_u 。令 α_v 为极限承载力影响度, $\alpha_v = (P_u - P_0) / P_0 \times 100\%$, 其中, P_0 为无钢管桩基的竖向极限承载力。钢管埋深变化对桩基极限承载力及影响度 α_v 的影响如图 5 所示。



(a) 桩基竖向极限承载力



(b) 桩基竖向极限承载力影响度

图 5 钢管埋深变化对桩基竖向极限承载力的影响

Fig. 5 Effects of vertical ultimate bearing capacity of pile foundation when pipe depth changes

从图 5 可以看出,钢管混凝土复合桩竖向极限承载力比普通钢筋混凝土桩竖向极限承载力大,且随着钢管埋深的增加,钢管混凝土复合桩竖向极限承载力呈逐渐增加趋势。当钢管埋深在 12 cm 范围内增大时,能明显提高桩基竖向极限承载力;当钢管埋深大于 12 cm 后,桩基竖向极限承载力仍继续提高,但增幅已不明显。钢管埋深从 8 cm 增大到 20 cm 时,钢管混凝土复合桩竖向极限承载力影响度从 3.1% 增大到 6.7% 。

3.1.2 钢管埋深对桩身轴力的影响

桩顶荷载变化时,桩身轴力随钢管埋深变化的规律相同,以桩顶荷载 900 N 为例进行分析,桩身轴力沿桩长方向变化规律如图 6 所示。

从图 6 可以看出:钢管混凝土复合桩桩身轴力

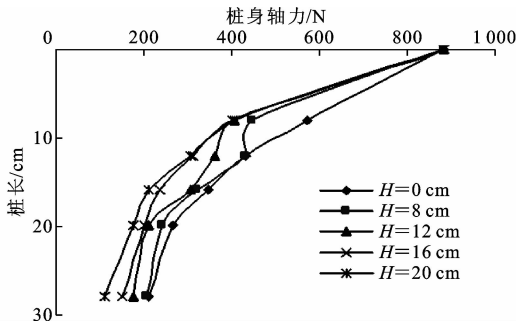


图 6 钢管埋深变化时桩身轴力变化规律

Fig. 6 Variation laws of pile axial force when pipe depth changes

曲线比普通钢筋混凝土桩桩身轴力曲线陡;在同一深度,普通钢筋混凝土桩比钢管混凝土复合桩的桩身轴力大,随着钢管埋深的增大,钢管混凝土复合桩桩身轴力逐渐减小,钢管段桩身轴力降低较快,钢管以下一定深度范围内桩身轴力降低较慢,轴力曲线出现拐点,且拐点位置随钢管埋深的增加向下移动。

3.1.3 钢管埋深对桩侧摩阻力影响

桩顶荷载变化时,桩侧摩阻力随钢管埋深的变化规律相同,以桩顶荷载 900 N 为例进行分析,如图 7 所示。

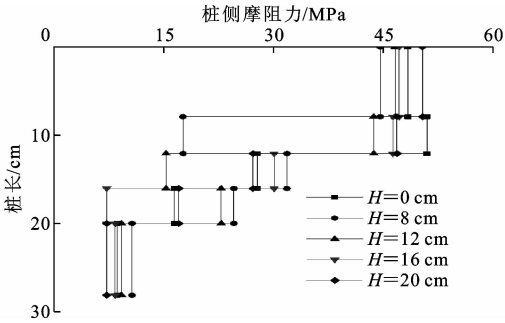


图 7 钢管埋深变化时桩侧摩阻力变化规律

Fig. 7 Variation laws of side friction of pile when pipe depth changes

从图 7 可以看出,钢管混凝土复合桩的侧摩阻力在钢管埋深为 8、12 cm 时出现双峰现象,且随着钢管埋深的增加,桩侧摩阻力曲线下凹段向下移动,当钢管埋深大于 12 cm 时,双峰现象消失。这是因为在桩顶竖向荷载作用下,桩基发生桩-土相对位移,而钢管的存在,使得钢管以下一定深度范围内的土体与桩身协调变形,相对位移较小,导致桩侧摩阻力较小,故此范围内桩侧摩阻力曲线出现下凹现象。

3.2 挤土效应对桩基竖向承载特性的影响

为了真实反映钢管混凝土复合桩的受力情况,通过改变钢护筒挤土区土体模量的方法模拟钢管挤土效应对桩基承载特性的影响。通过室内侧限压缩试验得出挤土区压缩模量-密度的对应关系,由此确定土样质量,并将其分层放入挤土模具中,压实至指定高度后即可得所需的土体模量。

3.2.1 挤土效应对桩基竖向极限承载力的影响

钢管挤土区土体模量 E' 变化时,钢管混凝土复合桩的 $P-S$ 曲线如图 8 所示。

从图 8 可以看出,随着钢管挤土区土体模量的增加,钢管混凝土复合桩竖向极限承载力逐渐增大。仍取桩顶位移 $6\%D$ (即 1.5 mm) 对应的荷载作为桩基的竖向极限承载力 P_u ,钢管挤土区土体模量对桩基竖向极限承载力及影响度的变化规律如图 9 所示。

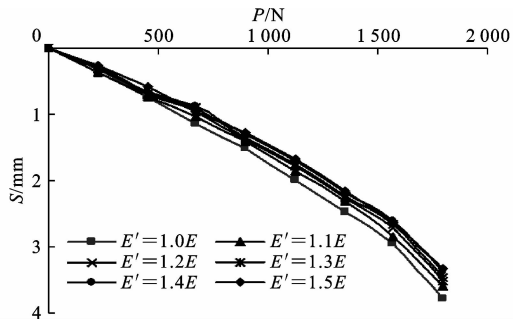
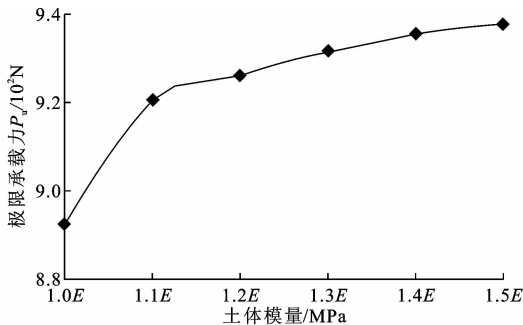
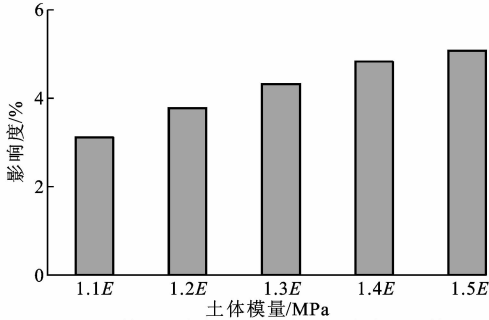


图 8 钢管挤土区土体模量变化时桩基的 $P-S$ 曲线

Fig. 8 $P-S$ curves of pile foundation when soil modulus in compaction zone of steel pipe changes



(a) 桩基竖向极限承载力变化规律



(b) 桩基竖向极限承载力影响度变化规律

图 9 钢管挤土区土体模量变化时桩基竖向极限承载力变化规律

Fig. 9 Variation laws of pile foundation's vertical bearing capacity when soil modulus in compaction zone of pipe changes

从图 9 可以看出:钢管混凝土复合桩的竖向极限承载力比普通钢筋混凝土桩大,且随着钢管挤土区土体模量的增加,钢管混凝土复合桩竖向极限承载力逐渐增大,但增幅较小;钢管挤土区土体模量从 1.1E 增大到 1.5E 时,钢管混凝土复合桩竖向极限承载力影响度从 3.1% 增大到 5.1%。

随着钢管挤土区土体模量的增加,桩基的竖向极限承载力呈增加趋势,但增幅较小。说明钢管的存在,对桩侧土体有一定程度的挤土效应,但挤土效应对钢管混凝土复合桩竖向极限承载力的影响较小。

3.2.2 挤土效应对桩身轴力的影响

桩顶荷载变化时,桩身轴力随钢管挤土区土体模量变化规律相同,以桩顶荷载 900 N 为例进行分

析,如图 10 所示。

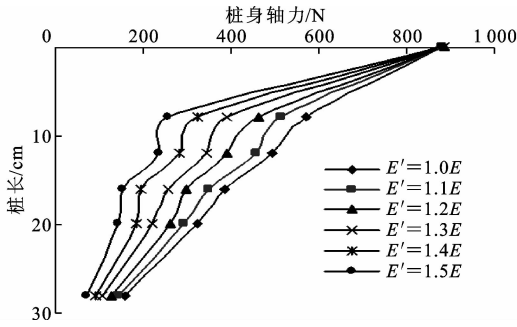


图 10 钢管挤土区土体模量变化时桩身轴力变化规律

Fig. 10 Variation laws of pile axial force when soil modulus in compaction zone of steel pipe changes

从图 10 可以看出,钢管混凝土复合桩桩身轴力曲线比普通钢筋混凝土桩桩身轴力曲线陡。在同一深度,钢管混凝土复合桩桩身轴力比普通钢筋混凝土桩桩身轴力小,且随着钢管挤土区土体模量的增大,钢管混凝土复合桩桩身轴力逐渐减小。这是因为随着钢管挤土区土体模量的增大,钢管段侧摩阻力增大,导致桩身轴力减小较快。

3.2.3 挤土效应对桩侧摩阻力的影响

桩侧摩阻力在不同荷载作用下随钢管挤土区土体模量的变化规律相同,以桩顶荷载 900 N 为例进行分析,如图 11 所示。

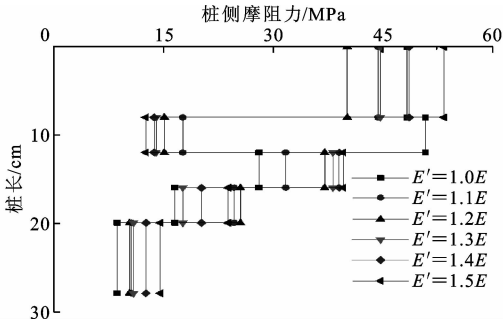


图 11 钢管挤土区土体模量变化时桩侧摩阻力变化规律

Fig. 11 Variation laws of pile side friction when soil modulus in compaction zone of steel pipe changes

从图 11 可以看出,随着钢管挤土区土体模量的增大,钢管段桩侧摩阻力呈逐渐增大趋势。钢管混凝土复合桩的桩侧摩阻力沿桩长方向出现双峰现象,第 1 个峰值在钢管段,第 2 个峰值在混凝土段;在钢管与混凝土交界处,桩侧摩阻力较小。钢筋混凝土桩的桩侧摩阻力沿桩长方向呈递减趋势,无双峰现象。

由于钢管的存在,使得桩身与周围土体接触面积增大,且钢管对周围土体有一定的挤密作用,导致桩周土体对桩身的约束作用加强,因此钢管段桩侧

摩阻力较大;由于钢管的扩径效应,钢管以下一定深度范围内的土体与混凝土桩身协调变形,产生的桩-土相对位移较小,故此范围内桩侧摩阻力较小。

4 竖向承载力计算

通过对钢管混凝土复合桩竖向承载特性的分析可知,钢管混凝土复合桩竖向承载力是由钢管段侧摩阻力、钢管以下混凝土段侧摩阻力、钢管端部的端阻力以及桩端阻力组成,用公式表示为

$$R_a = K_1 T_1 + K_2 T_2 + \mu_1 R_1 + \mu_2 R_2 \quad (1)$$

式中: R_a 为钢管混凝土复合桩竖向承载力; K_1 、 K_2 分别为上段桩体和下段桩体侧摩阻力修正数; μ_1 、 μ_2 分别为钢管端变截面处和桩端处土体反力修正系数; T_1 、 T_2 分别为钢管段和钢管以下混凝土段侧摩阻力; R_1 、 R_2 分别为钢管端阻力与桩端阻力。

4.1 摩擦桩竖向承载力计算公式

考虑到桩周土层的分层,且便于与《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)(下文简称规范)中桩基竖向承载力公式比较,对式(1)作转换,

$$\text{令 } K_1 = \frac{1}{2}\zeta, K_2 = \frac{1}{2}, T_1 = u_1 \sum_{i=1}^m q_{i1} l_{i1}, T_2 = u \sum_{i=1}^n q_i l_i, \mu_1 R_1 = A_{p1} q_{r1}, \mu_2 R_2 = A_p q_r, \text{得}$$

$$R_a = \frac{1}{2}\zeta u_1 \sum_{i=1}^m q_{i1} l_{i1} + \frac{1}{2}u \sum_{i=1}^n q_i l_i + A_{p1} q_{r1} + A_p q_r \quad (2)$$

$$q_{r1} = m_1 \lambda_1 [f_{a01} + k_1 \gamma_1 (h_1 - 3)] \quad (3)$$

$$q_r = m_0 \lambda [f_{a0} + k_2 \gamma_2 (h - 3)] \quad (4)$$

式中: ζ 为钢管段侧摩阻力修正系数, ζ 考虑了钢管打入过程中对周围土体的挤密效应, $\zeta > 1$; m 、 n 分别为钢管段和钢管以下混凝土段土层数; q_{i1} 为钢管段各土层 i 侧摩阻力标准值(kPa); l_{i1} 、 l_i 分别为钢管段与非钢管段周围各土层高度(m); A_{p1} 为钢管端变截面处圆环面积(m^2); q_{r1} 为钢管端变截面处土层承载力(kPa); u_1 、 u 分别为钢管段和钢管以下桩横截面周长(m); q_r 为桩端处土体承载力(kPa); A_p 为桩端截面面积(m^2); A_{p1} 为钢管端变截面处圆环面积(m^2); λ_1 、 λ 为修正系数; m_0 为清底系数; h_1 、 h 分别为钢管段与非钢管段埋置深度(m); f_{a01} 、 f_{a0} 分别为钢管段与非钢管段承载力(kPa); k_1 、 k_2 为钢管段与非钢管段承载力随深度变化的系数; γ_1 、 γ_2 分别为钢管段与非钢管段各土层的加权平均系数。

$$\text{规范中相应的公式为 } R_a = \frac{1}{2}u \sum_{i=1}^n q_{ik} l_i + A_p q_r,$$

$[q_{ik}$ 为非钢管段第 i 层土的侧摩阻力标准值(kPa)]; 与规范中公式相比, 式(2)增加了 $A_{p1}q_{r1}$ 和 $\frac{1}{2}\zeta_{u1}\sum_{i=1}^mq_{r1}l_{i1}$ 项。

4.2 单桩轴向受压承载力

支承在基岩上或嵌入基岩内的钻(挖)孔桩、沉桩的单桩轴向受压承载力的计算公式为

$$R_a = c_1 A_{p1} q_{r1} + c_1 A_p f_{rk} + u \sum_{i=1}^m c_{2i} h_i f_{rki} + \frac{1}{2} \zeta_s u_1 \sum_{i=1}^{n_i} q_{rk1} l_{i1} + \frac{1}{2} \zeta_s u \sum_{i=1}^n q_{ik} l_i \quad (5)$$

式中: n_i 为钢管段土层数; q_{rk1} 钢管段桩侧第 i 层土的侧摩阻力标准值(kPa); c_1 、 c_{2i} 分别为变截面处以及桩底端阻发挥系数; f_{rk} 为桩端岩石的单轴抗压强度标准值(kPa); f_{rki} 为第 i 层的 f_{rk} 值; h_i 为桩嵌入各岩层的厚度(m); ζ_s 为侧阻力发挥系数。

规范中相应的公式为 $R_a = c_1 A_p f_{rk} + u \sum_{i=1}^m c_{2i} h_i f_{rki} + \frac{1}{2} \zeta_s u \sum_{i=1}^n l_i q_{ik}$; 与规范中公式相比, 式(5)增加了 $c_1 A_{p1} q_{r1}$ 和 $\frac{1}{2} \zeta_s u_1 \sum_{i=1}^{n_i} q_{ik1} l_{i1}$ 项。

5 工程建议

通过对钢管混凝土复合桩竖向承载特性的分析, 并基于钢管混凝土复合桩竖向承载力计算公式, 提出以下工程建议:

(1) 由于钢管的作用, 钢管混凝土复合桩的钢管段侧摩阻力较大, 因此在工程设计时, 应对钢管混凝土复合桩钢管段桩侧摩阻力进行修正, 使其设计更加经济、合理。

(2) 由于钢管端部的扩径效应, 钢管混凝土复合桩的端阻力由桩端阻力和钢管端阻力两部分组成, 因此在工程设计时, 应充分考虑钢管端阻力对钢管混凝土复合桩竖向承载力的影响, 将其纳入钢管混凝土复合桩承载力计算体系。

6 结 语

(1) 钢管混凝土复合桩较普通钢筋混凝土桩竖向极限承载力有所提高; 钢管埋深从 8 cm 增大到 20 cm 时, 钢管混凝土复合桩竖向极限承载力影响度从 3.1% 增大到 6.7%。钢管挤土区土体模量从 $1.1E$ 增大到 $1.5E$ 时, 钢管混凝土复合桩竖向极限承载力影响度从 3.1% 增大到 5.1%。

(2) 钢管混凝土复合桩桩身轴力曲线较普通钢

筋混凝土桩桩身轴力曲线陡; 钢管混凝土复合桩钢管段桩身轴力降低较快, 钢管段以下桩身轴力降低较慢。

(3) 钢管埋深小于 12 cm 时, 桩侧摩阻力曲线出现双峰现象, 当钢管埋深大于 12 cm 时, 桩侧摩阻力曲线双峰现象消失; 随着钢管挤土区土体模量的增加, 钢管混凝土复合桩钢管段侧摩阻力逐渐变大。

(4) 基于试验成果, 提出适用钢管混凝土复合桩的竖向承载力计算公式, 为其设计提供理论指导。

(5) 建议进一步开展钢管混凝土复合桩静载破坏试验, 通过现场静载破坏试验结果验证钢管混凝土复合桩的竖向承载力计算公式。

参考文献:

References:

- [1] 余志武, 丁发兴. 圆钢管混凝土偏压柱的力学性能[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 40-46.
YU Zhi-wu, DING Fa-xing. Mechanical behavior of concrete filled circular steel tube columns under eccentric compression[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 40-46.
- [2] 苏 杨, 高宗余. 大直径钢管混凝土桩的设计、施工及试验[J]. 桥梁建设, 2012, 42(2): 79-84.
SU Yang, GAO Zong-yu. Design, construction and testing of large diameter concrete-filled steel tube piles[J]. Bridge Construction, 2012, 42(2): 79-84.
- [3] 骆涛涛, 李 娜, 张 涛, 等. 圆钢管混凝土柱轴心受压承载力计算[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2014, 47(6): 764-768, 773.
LUO Tao-tao, LI Na, ZHANG Tao, et al. Bearing capacity of circular concrete-filled steel tube columns under axial compression[J]. Journal of Wuhan University: Engineering Edition, 2014, 47(6): 764-768, 773.
- [4] 任旭强, 徐 勋, 于 海, 等. 微型钢管桩水平加载试验研究[J]. 中国水运, 2013, 13(4): 260-262.
REN Xu-qiang, XU Xun, YU Hai, et al. Study on horizontal loading test of micro steel pipe pile[J]. China Water Transport, 2013, 13(4): 260-262.
- [5] 李春燕, 兰 军, 吴 涤. 钢管混凝土复合桩模型试验方案设计[J]. 结构工程师, 2013, 29(1): 118-123.
LI Chun-yan, LAN Jun, WU Di. Steel tube concrete pile model design for testing[J]. Structural Engineer, 2013, 29(1): 118-123.
- [6] 张 敏, 马建林, 苏权科, 等. 考虑剪力环、泥皮和防腐涂层作用的钢管复合桩工作性能模型试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 389-396.

- ZHANG Min, MA Jian-lin, SU Quan-ke, et al. Model test research on work performance of steel tubular composite pile with shear ring, drilling mud skin and anticorrosion coating[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 389-396.
- [7] 张敏, 马建林, 苏权科, 等. 钢管复合桩承载特性模型试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(2): 312-318.
- ZHANG Min, MA Jian-lin, SU Quan-ke, et al. Model test on bearing capacity characteristics of steel tubular composite piles[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(2): 312-318.
- [8] 张敏, 马建林, 苗树, 等. 考虑剪力环、泥皮和防腐涂层作用的钢管复合桩推出试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增2): 174-179.
- ZHANG Min, MA Jian-lin, MIAO Shu, et al. Push-out test research on steel tubular composite pile with shear ring, drilling mud skin and anticorrosion coating[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 174-179.
- [9] 蔡健, 谢晓锋, 杨春, 等. 核心高强钢管混凝土桩轴压性能的试验研究[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2002, 30(6): 81-85.
- CAI Jian, XIE Xiao-feng, YANG Chun, et al. An experimental research on the composite column with core of high-strength concrete filled steel tube under axial compression loading[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2002, 30(6): 81-85.
- [10] 汪春雨. 钢管混凝土桩的力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010.
- WANG Chung-yu. Study on mechanical properties of concrete filled steel tube piles[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2010.
- [11] 王怀忠. 轴向压力作用下空心钢管混凝土桩体空间轴对称问题解析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 763-767.
- WANG Huai-zhong. Analytical solution to spatial axisymmetric problem of axially loaded hollow concrete filled steel tubular pile member[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 763-767.
- [12] EN 1994-1-1: 2004, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings[S].
- [13] AIJ, Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures (1997)[S].
- [14] 冯忠居. 特殊地区基础工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- FENG Zhong-ju. Foundation engineering in special areas[M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [15] 冯忠居, 冯瑞玲, 赵占厂, 等. 黄土湿陷性对桥梁桩基承载力的影响[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(3): 60-63.
- FENG Zhong-ju, FENG Rui-ling, ZHAO Zhan-chang, et al. Effect of collapsible loess on pile foundation bearing capacity[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(3): 60-63.
- [16] 冯忠居, 谢永利, 张宏光, 等. “滇西红层”区大直径桥梁桩基承载力影响因素综合研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 540-544.
- FENG Zhong-ju, XIE Yong-li, ZHANG Hong-guang, et al. Comprehensive analysis on influencing factors of bearing capacity of large diameter pile foundation for red bed in west Yunnan[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 540-544.
- [17] 冯忠居, 谢永利, 李哲, 等. 大直径超长钻孔灌注桩承载性状[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(1): 24-27.
- FENG Zhong-ju, XIE Yong-li, LI Zhe, et al. Bearing property of large diameter over length nonplacement pile[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(1): 24-27.
- [18] 冯忠居, 王富春, 苏航州, 等. 黄土洞穴对桥梁桩基竖向承载特性影响的离心模型试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2017, 37(2): 35-44.
- FENG Zhong-ju, WANG Fu-chun, SU Hang-zhou, et al. Centrifuge model test on effect of underground loess cave on vertical bearing characteristic of bridge pile foundation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2017, 37(2): 35-44.
- [19] 冯忠居, 张其浪, 王增贤, 等. 一种土工离心模型试验用桩周挤土模具: 中国, 201420735623. 9[P]. 2015-04-01.
- FENG Zhong-ju, ZHANG Qi-lang, WANG Zeng-xian, et al. A soil compaction pile mold of pile side for geotechnical centrifuge model test: China, 201420735623. 9[P]. 2015-04-01.
- [20] 冯忠居, 张其浪, 王增贤, 等. 基于土工离心机模拟桩基竖向和横向承载特性的试验装置: 中国, 201420774029. 0[P]. 2015-04-29.
- FENG Zhong-ju, ZHANG Qi-lang, WANG Zeng-xian, et al. A test apparatus based on geotechnical centrifuge for vertical and horizontal bearing characteristics of pile: China, 201420774029. 0[P]. 2015-04-29.