

文章编号: 1000-7598 (2011) 06-1736-05

高承台钢管桩受压稳定性的试验研究和数值分析

贾 强, 郑爱萍, 张 鑫

(山东建筑大学 山东省建筑结构鉴定加固与改造重点实验室, 济南 250013)

摘 要: 利用微型钢管桩进行基础托换是既有建筑物地下增层改造的有效方法。钢管桩的下端插入到混凝土桩头内, 上端与托换承台相连, 桩四周的土方开挖后稳定性降低, 其受压极限承载力无法按现行规范求出。分别用 1:2 模型试验和非线性屈曲数值分析的方法得到了钢管桩顶部受压的应力分布和极限承载力, 并进一步确定出其计算长度系数和受压稳定性系数。用模型试验求得钢管桩受压稳定性的计算长度系数为 0.616, 数值分析的结果为 0.683, 此时钢管处于底端固定、顶端铰接的约束状态。用数值分析得到的钢管桩受压极限承载力偏安全, 可为工程设计提供参考。

关 键 词: 钢管桩; 计算长度系数; 屈曲分析; 地下托换

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

Test study and numerical analysis of stability of high-level cap steel tubular pile under compression loads

JIA Qiang, ZHENG Ai-ping, ZHANG Xin

(Shandong Provincial Key Laboratory of Appraisal and Retrofitting in Building Structures, Shandong Jianzhu University, Jinan 250013, China)

Abstract: Steel tubular pile underpinning technology is an effective method to develop underground space in retrofitting of existing buildings. The bottom of steel tubular pile inserted into concrete pile while top connected with underpinning cap. The stability of the pile under compression load decreased after the soil around the pile dug, but the stability coefficient and length factor of steel tubular pile can not be obtained by currently code. According to the 1:2 model test and nonlinear buckling analysis respectively, the stress distribution and the ultimate bearing capacity of the pile is derived. The effective length factor for stability calculation is 0.616 gotten by test study; and the numerical result is 0.683. So the pile is restricted with base edge fixed and top edge articulated. More safety stability of the pile can be obtained by buckling numerical analysis which can provide reference for pile design.

Key words: steel tubular pile; effective length factor; buckling analysis; underpinning

1 引 言

对埋置在土体中的混凝土桩在计算桩身轴心抗压强度时, 一般不考虑压曲的影响, 即取稳定系数 $\varphi=1.0$, 但对于上部处于没有土体约束的自由状态的高承台桩, 应对桩的压曲稳定性进行验算^[1]。《建筑桩基技术规范》^[2]第 5.5.3 条的规定, 应根据桩顶约束情况、桩身露出地面的自由长度、桩的入土长度、桩侧和桩底的土质条件确定计算长度。早在 20 世纪 20 年代 Forsesn 就提出了拼柱式高桥墩桩的稳定性问题^[3], 研究桩基屈曲稳定的难点在于桩周土体的约束作用不易确定, 胡人礼^[4]首先基于“m”法提出一组桩身计算长度 l_c 的经验计算公式, 现仍被

有关规范采用。之后, 许多学者采用引入最小势能原理、变分法、伽辽金法能量法等对桩的屈曲稳定性进行了理论研究^[5]。另有部分学者采用钢轨桩、钢管桩、铜桩、木桩以及铝桩对桩的屈曲稳定性进行试验研究, 取得大量的研究成果^[6-8]。

利用微型钢管桩进行基础托换是既有建筑物地下增层的有效方法。用该方法对一墙下条形基础的砖混结构建筑物地下增层的施工过程如图 1 所示, 其中图 1(b)~1(d)是 A-A 剖面的托换过程: ①泥浆护壁成孔, 成孔至坚硬持力层, 见图 1(b)。②清孔后, 在孔的下部灌注细石混凝土或水泥砂浆, 直到拟建地下室的底板位置。在拟建地下室高度范围插入钢管。钢管下端锚入下部的混凝土或水

收稿日期: 2010-04-22

基金项目: 住房和城乡建设部科技计划资助项目 (No. 2007-K6-13)。

第一作者简介: 贾强, 男, 1970 年生, 博士, 副教授, 主要从事工程鉴定加固方面的研究。E-mail: jiaqiang@sdjzu.edu.cn

泥砂浆中; 钢管上端与托换承台和托换梁相连, 托换梁在墙体两侧通过连接键夹住墙体。见图 1(a)、1(c)。③凿除原条形基础, 开挖土体至拟建地下室底板标高。浇注地下室墙体、底板和顶板混凝土, 见图 1(d)。④回收钢管。

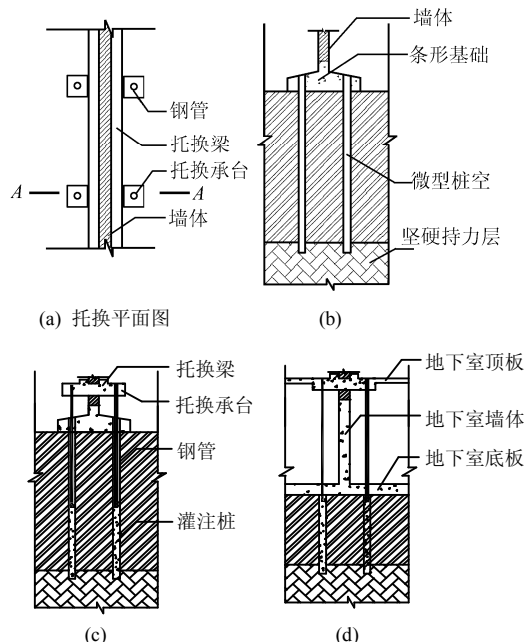


图1 利用微型钢管桩地下托换示意图
Fig.1 Underpinning by steel tubular pile

随着地下室土方的开挖, 钢管四周的土体对钢管的约束逐步减小, 钢管的稳定性降低。由于微型桩和钢管在墙体的两侧, 钢管轴线与墙体荷载有一偏心距, 使得钢管成为偏心受压构件。钢管的下端嵌固在混凝土或水泥砂浆的桩头内, 上端与托换承台相连, 是典型的高承台受压钢管桩。计算该钢管桩的屈曲稳定性时, 由于上、下端的约束条件复杂, 很难由现行规范确定其计算长度。因此, 通过试验研究和数值分析确定该钢管的计算长度系数, 进一步确定其受压承载力很有必要。

在 2 根钢管和承台所形成的平面的垂直方向上托换梁和上部的墙体刚度很大, 出现平面外失稳的可能性很小。当沿着托换梁方向进行土方开挖时, 钢管桩两侧会出现土方的高差, 从而产生作用在钢管桩上的土压力。土压力过大时, 会对平面外稳定性产生不利影响, 因此地下室的土方开挖应分层、对称进行。

2 试验研究

2.1 试验设计

试验按照 1:2 缩尺模型进行设计, 构件的尺寸如图 2 所示。选用直径为 235 mm、壁厚 6 mm 钢

管, 下端插入混凝土块中进行锚固, 上端与钢板焊接, 如图 3 所示, 钢板用螺母固定在植入托换承台的螺栓上。现场照片见图 4, 图中, 左侧钢管为钢管 1, 右侧钢管为钢管 2。

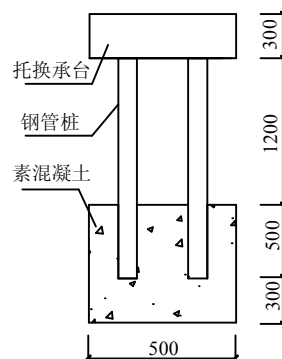


图2 试验构件的尺寸 (单位: mm)
Fig.2 Sketch and size of test component (unit: mm)



图3 钢管上端与钢板焊接
Fig.3 Top of steel pile and steel plate combination with welding



图4 构件现场照片
Fig.4 Photo of test component

为了防止构件在平面外失稳, 利用固定在反力架的 4 个角钢在侧面顶住托换承台, 见图 5。在钢管的上、下两端和中央位置的内、外两侧都贴了应变片, 用静态电阻应变仪测定其应变值。同时, 在相应位置安放百分表, 测量钢管屈曲变形的挠度。加载装置采用 2 000 kN 液压千斤顶。



图5 托换承台平面外固定方式
Fig.5 Underpinning cap fixing way out-of-plane

2.2 试验结果

(1) 钢管应力-荷载关系

对托换结构加载至 1 120 kN, 钢管出现明显屈曲变形, 可以认为结构到极限承载力, 单根钢管的屈曲承载力为 560 kN。用静态电阻应变仪测得加载过程中钢管的相应荷载下的应变, 得到钢管 1、2 中间内侧位置的荷载-应变曲线, 见图 6。将钢管 1 各应变片位置的应变值换算为应力值见表 1。

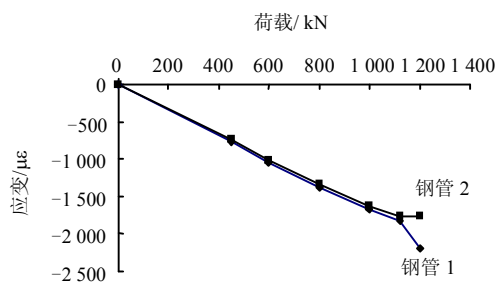


图6 钢管中间内侧位置的荷载-应变曲线
Fig.6 Load-strain curves of steel tubular pile in middle position

表1 钢管 1 的相应荷载下的应力值
Table 1 Stress of steel tubular pile under relevant loads

加载 /kN	应力/MPa					
	上端 外侧	上端 内侧	中间 外侧	中间 内侧	下端 外侧	下端 内侧
0	-0.6	0	-0.2	0.2	-0.2	0
450	-162	-154	-159	-157	-161	-168
600	-220	-204	-213	-215	-211	-222
800	-290	-283	-299	-284	-277	-295
1 000	-351	-339	-347	-344	-342	-357
1 120	-392	-380	-385	-375	-375	-388

从图 6 可以看出, 2 根钢管在达到极限承载力 (1 120 kN) 之前的荷载-应变曲线基本一致, 且呈正比例关系, 达到极限承载力之后, 钢管 1 出现屈曲, 应变明显增大; 钢管 2 的应变没有变化。从表 1 看出, 钢管 1 在整个加载过程中处于受压状

态, 上端外侧压应力大于内侧, 下端外侧压应力小于内侧, 这与荷载偏心产生的弯矩有关。

(2) 钢管计算长度系数的确定

钢管桩的稳定性可按单根钢管桩在压弯荷载作用下进行计算, 也可按 2 根钢管与上、下混凝土构件形成的格构体系中间对称轴的轴心受压构件计算。由于格构式体系计算得到的长细比比单根钢管按实腹式构件计算得到的长细比小, 且荷载只有压力没有弯矩, 因此钢管桩的稳定性应按单根钢管在压弯荷载作用控制设计。

将试验极限状态下的结果代入钢结构压弯构件的稳定性计算公式, 可以试算出钢管计算长度系数 φ_x [9]:

$$\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_x M_x}{\gamma_x W_{1x} \left(1 - 0.8 \frac{N}{N_{Ex}} \right)} \leq f \quad (1)$$

式中: N 为计算构件段范围内的轴心压力, 此处取单根钢管受压极限承载力 560 kN; φ_x 为弯矩作用平面内的轴心受压构件稳定性系数, 此处是需要试算的值; A 为钢管的截面积, 直径为 235 mm、壁厚 6 mm 型钢管截面积为 4 314 mm²; β_{mx} 为等效弯矩系数, 此处 $\beta_{mx} = 1$; M_x 为计算构件段范围内的最大弯矩, 此处用钢管受压极限承载力 560 kN 乘以偏心距 0.175 m 得到 98 kN m; γ_x 为截面塑性发展系数, 取 1.15; W_{1x} 为弯矩作用平面内, 对较大受压纤维的毛截面模量, 取值为 240 856 mm³; N'_{Ex} 为参数, 与稳定性系数 φ_x 相关; f 取钢管的抗拉强度, 根据材料的试验报告取值为 405 MPa。

计算得到钢管的稳定系数 $\varphi = 0.822$, 计算长度系数 $\mu = 0.616$ 。计算长度系数在 0.5~0.7 之间, 按照欧拉压杆稳定原理, 试验中钢管两端的嵌固方式是介于两端嵌固与一端嵌固一端铰接之间的状态。

3 数值分析

数值分析与试验研究相比具有大量重复模拟计算的优势, 计算结果可为工程设计提供参考。数值分析利用 ANSYS 有限元程序, 利用特征值 (或线性) 屈曲分析和非线性屈曲分析相结合的手段求得高承台钢管桩的受压承载力。

3.1 建模

为了具有可比性, 数值分析钢管和承台的形状和尺寸与试验模型相同。钢管和承台均采用 8 节点的 solid45 单元分别进行三维实体建模, 用“glue”布

尔运算“粘”在一起。

为了模拟钢管下端在混凝土微型桩中的嵌固状态,将钢管下端节点的自由度输入“0”。同理,为了保证托换承台不在平面外失稳,将托换承台平面外自由度输入“0”。

3.2 数值分析过程

3.2.1 屈曲稳定性特征值的计算

首先,采用特征值屈曲分析求得钢管屈曲稳定性的上限值:在托换承台顶部中央位置施加一单位荷载,求得该钢管屈曲稳定性特征值为 0.428×10^8 ,与单位荷载相乘得到钢管屈曲稳定性上限值为 4.27×10^4 kN。

3.2.2 屈曲承载力的计算

将计算得到的钢管屈曲稳定性的上限值施加到托换承台顶部,进行非线性屈曲分析。通过描绘出的屈服点变形与时间曲线图,找到屈服点对应时间和子步数,进一步求出托换结构的屈曲承载力为 1 061 kN,即单根钢管的屈曲承载力为 530 kN,略小于试验结果。钢管屈曲前的应力云图如图 7 所示,加载至钢管达到屈曲状态时的应力云图见图 8。

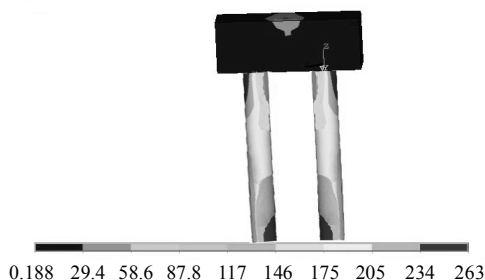


图7 钢管桩屈曲前的应力云图(单位: GPa)

Fig.7 Stresses of steel tubular pile before buckling
(unit: GPa)

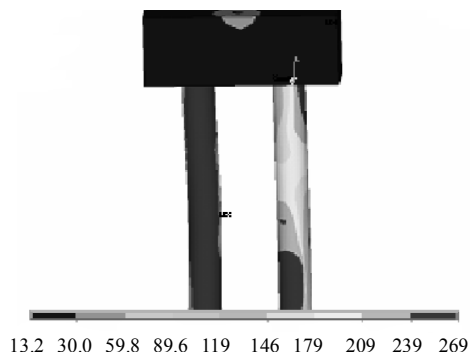


图8 钢管桩屈曲后的应力云图(单位: GPa)

Fig.8 Stresses of steel tubular pile after buckling
(unit: GPa)

从图 7 可以看出,由于钢管桩的应力是由托换承台传递来的压力和弯矩所引起,钢管上端外侧应

力强度大于内侧,而钢管下端内侧应力强度大于外侧,两根钢管的应力分布基本对称。从图 8 可以看出,左侧钢管首先出现了屈曲,最大应力在钢管中部;右侧钢管仍为屈曲前的应力分布。

3.2.3 钢管计算长度系数的确定

将数值分析得到的钢管桩屈曲承载力代入式(1),计算得到钢管的稳定系数 $\varphi = 0.778$,计算长度系数 $\mu = 0.683$,更接近于钢管一端嵌固一端铰接的嵌固状态。

4 结 论

(1) 利用微型钢管桩进行基础托换是既有建筑物地下增层的有效方法。利用基础两侧施工的微型钢管桩、托换承台和托换梁托住上部结构,可进行土方开挖以及地下室的施工。钢管桩可回收利用。

(2) 钢管桩在土方开挖阶段稳定性降低,是典型的高承台受压桩,其计算长度系数可以通过试验研究和数值分析的方法求出。经试验得到的钢管的计算长度系数为 $\mu = 0.616$,说明钢管两端的嵌固方式是介于两端嵌固与一端嵌固一端铰接之间的状态。数值分析得到的钢管的计算长度系数 $\mu = 0.683$,更接近于钢管一端嵌固一端铰接的状态。用数值分析得到的钢管的屈曲承载力与试验结果相比偏低,说明上述数值分析的结果偏安全。由于数值分析具有大量重复模拟计算的优势,其结果可为工程设计提供参考。

(3) 由于试验和数值分析中钢管下端均采用了嵌固的边界条件,当微型桩四周为软弱土时钢管计算长度会变长,其计算长度系数需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 贾强,应惠清,张鑫. 锚杆静压桩技术在既有建筑物增设地下空间中的应用[J]. 岩土力学. 2009, 30(7): 2053—2057.
JIA Qiang, YING Hui-qing, ZHANG Xin. Construction of basement in existing building by static bolt-pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(7): 2053—2057.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [3] BROMS B B. Precasting piling practice[M]. London: Thomas Telford LTD, 1981: 33—44.

- [4] 胡人礼. 桥梁桩基础分析和设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1987.
- [5] 邹新军. 基桩屈曲稳定分析的理论及试验研究[博士学位论文 D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- [6] BRANDTZAEG A, HARBOE E. Buckling test of slender steel piles in soft quick clay[C]//4th International Conference on Soil and Mechanics. London: [s. n.], 1957: 19—23.
- [7] BERGEFELT A. The axial and lateral load bearing capacity and failure by buckling of piles in soft clay[C]//4th International Conference on Soil and Mechanics. London: [s. n.], 1957: 8—13.
- [8] LEE K L. Buckling of partially embedded piles in sand[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1968, 94(1): 255—270.
- [9] 中华人民共和国建设部. GB50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.

第十一届全国土力学及岩土工程学术会议

(第二号通知, 论文出版方式)

2011 年 8 月 16 日~8 月 19 日兰州

第十一届全国土力学及岩土工程学术会议将于 2011 年 8 月 16 日~8 月 19 日在兰州举行, 8 月 16 日会议报到, 8 月 17~19 日开会, 8 月 20 日组织考察。

论文出版方式与格式

会议论文采取集中推荐 EI 收录期刊和国内核心期刊发表的方式。论文推荐发表方式为: 会议部分优秀论文将由《岩土力学》增刊(EI 收录)、《岩土工程学报》增刊发表; 其余会议论文分别推荐《西北地震学报》、《冰川冻土》、《铁道工程学报》增刊发表。所有论文由学会组织专家统一审阅, 决定是否录用、推荐具体发表刊物和形式。

每篇论文版面费以各刊出期刊收费标准而定。论文经审定确定刊出期刊后, 版面费直接交各刊出期刊编辑部。

论文模板请从附件 1 第十一届全国土力学及岩土工程学术会议论文模板或会议网址 www.gssb.gov.cn/csmge2011 文件下载栏点击下载。本次会议将提供论文集光盘和论文摘要集, 不刊印论文集。

征文时间及要求

即日起至 2011 年 1 月 15 日: 提交论文全文。2011 年 2 月 28 日: 发论文录用通知及修改意见。2011 年 5 月 31 日: 提交修改稿。

论文以邮件(word 电子文档)向会务组电子邮箱或会议网址投稿中心投稿, 论文全文请控制在 6 页以内, 大小不超过 10M。要求图表清晰、数据翔实。

联系方式

地址及邮编: 兰州市东岗西路 450 号中国地震局兰州地震研究所 730000, 吴志坚 博士、徐舜华 博士

会务组电子邮件地址: csmge2011@163.com

电话: 0931-8273050 (O) 13919182444 (M) 13893439771 (M) 传真: 0931-8273050

其他

投稿或欲参加会议的代表请填写会议回执并尽快通过电子邮件发送会务组电子邮箱(请从附件 2 参会回执或会议网址文件下载栏点击下载)。

(信息来源: 本刊网站)