

高速公路 Y 形沉管灌注桩软基处理试验研究

徐立新^{1,2}, 杨少华², 段冰²

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310027)

摘要: Y 形沉管灌注桩是在传统沉管灌注桩的基础上研制出的一种新型沉管灌注桩, 2003 年首次在申苏浙皖高速公路工程中被应用于桥头段深厚软基的处理。本文介绍了申苏浙皖高速公路工程中 Y 形桩试验段的桩土应力、桩土表面沉降、分层沉降、侧向变形、孔隙水压力等项目的现场观测成果, 并对路堤荷载作用下 Y 形沉管灌注桩加筋路堤的性状及其处理效果进行了分析。

关键词: Y 形沉管灌注桩; 软土地基; 现场试验; 桩土应力比; 沉降; 孔隙水压力

中图分类号: TU472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2007)01-0120-05

作者简介: 徐立新(1966-), 男, 浙江兰溪人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事公路软基处理设计及研究工作。

E-mail: eduancoolm@163.com。

Field tests on Y-shaped vibro piles to improve soft clay ground under the expressways

XU Li-xin^{1,2}, YANG Shao-hua², DUAN Bing²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Zhejiang Provincial Plan Design & Research

Institute of Communications, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Y-shaped vibro piles were special vibro-piles applied in Shen-Su-Zhe-Wan Expressway to improve soft clay ground in 2003. Based on the field tests on Y-shaped vibro piles, the stress of piles, settlement, lateral displacement and pore water pressure of soil were presented. The performance and feasibility of the Y-shaped vibro piles were discussed in detail.

Key words: Y-shape vibro pile; soft clay ground; field test; pile-soil stress ratio; settlement; pore water pressure

0 引言

浙江地处东南沿海, 软土分布广泛, 尤其是宁波、台州、温州和湖州等地区, 不但软土层深厚, 而且力学指标极差, 因此软基处理已成为浙江省高等级公路建设中一个需要解决的重点技术。为了探索新型的软基处理方法, 2003 年浙江省交通厅在申苏浙皖高速公路工程中对 Y 形沉管灌注桩科研立项并进行了试验研究, 取得了阶段性成果。

Y 形灌注桩始见于法国, 原名 Barrette, 译名为壁板桩、巨型桩, 它是用地下连续墙幅拼构成的特大形桩。比利时也有过用 Y 形碎石桩构筑复合地基的工程范例。Y 形沉管灌注桩是根据国外先进的 Y 形桩设计理念结合国内传统沉管灌注桩的施工工艺研制出的一种新型沉管灌注桩。Y 形桩的断面形状为三段弧线弧面向内组成的曲边三角形, 如图 1 所示, 它采用普通沉管桩的成桩工艺, 仅将原有的圆管形桩模改为 Y 形桩模, 这样既保持了沉管灌注桩施工快捷、价格低廉的优势, 又发挥了等截面非圆形桩侧表面积增大、摩阻力提高的特点, 从而在等工程量的前提下大幅提高

了桩基的承载能力。

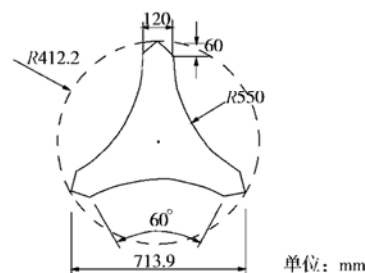


图 1 Y 形桩的截面图

Fig. 1 Section of Y-shaped vibro piles

1 试验路段概况^[1]

1.1 工程地质条件

试验场地位于申苏浙皖高速公路浙江段, 桩号为 K24+080~K24+155 和 K24+959~K25+049 的两桥头路段。试验场地在地貌上属于冲海积平原, 以淤泥和

基金项目: 浙江省交通科技创新项目 (2004H195)

收稿日期: 2005-10-26

表 1 主要土层物理力学性质指标表
Table 1 The physico-mechanical properties of soil layers

分层代号	土层名称	含水率 $w/\%$	孔隙 比 e_0	塑性 指数 I_p	渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)		压缩模量 E_s/MPa	固结系数 $\frac{C_v}{C_h}/(\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	固结快剪	
					K_v	K_h			黏聚力 c_u/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
I ₁	亚黏土	27.2	0.806	11.5	7.5×10^{-6}	5.8×10^{-6}	5.30	5.12×10^{-3} 8.15×10^{-3}	31.5	12.4
II ₃	淤泥质 亚黏土	48.4	1.318	16.5	5.0×10^{-6}	8.8×10^{-6}	2.07	1.22×10^{-3} 1.05×10^{-3}	12.5	3.7
IV ₁	亚黏土	27.8	0.782	10.0	7.2×10^{-6}	8.6×10^{-6}	5.94	4.52×10^{-3} 5.23×10^{-3}	34.0	5.7
IV ₅	淤泥质 黏土	42.3	1.176	20.5	4.2×10^{-6}	6.4×10^{-6}	4.62	6.2×10^{-4} 6.5×10^{-4}	21.0	4.9
V ₄	亚黏土	31.7	0.877	12.6			7.50		30.5	11.5

淤泥质土为主。第一层为软塑亚黏土, 厚 2.5~3.0 m; 第二层为淤泥质亚黏土, 厚 11.0~16.0 m; 第三层为软塑偏硬状黏土, 厚约 13.0 m; 第四层为软塑黏土, 厚 5.0~6.5 m; 第五层为亚黏土, 厚 8.0~10.0 m, 试验段地下常水位为 1.0 m, 其具体物理力学指标见表 1 所示。

1.2 Y 型桩设计

Y 形桩桩身采用 C25 标号的混凝土, 其截面积为 0.191 m^2 , 周长为 2.143 m, 如图 1 所示。试验段 Y 形桩在平面上呈三角形布置, K24+080~K24+113 和 K24+113~K24+155 两路段的设计桩距和设计桩长分别为 2.2 m/19 m、2.7 m/19 m; K24+959~K24+989、K24+989~K25+019 和 K25+019~K25+049 三路段的桩距和桩长分别为 2.2 m/13.5 m、2.7 m/13.5 m 和 2.2 m/13.5 m。

圆形桩帽采用标号为 C25 的混凝土现场浇筑而成, 其直径 1.4 m, 厚 0.35 m。桩帽顶铺设一层断裂延伸率为 3%、抗拉强度为 80 kN/m 的钢塑格栅。

1.3 Y 形桩施工

2003 年 6 月 2 日在 K24+080~K24+155 段进行试桩, 采用 DZ-90 振动沉管打桩机进行施工。首次试打按一般沉管灌注桩工艺操作, 混凝土坍落度控制在 150~170 mm, 拔管速度 1~1.2 m/min, 此时混凝土充盈很大, 充盈系数超过 1.8。2003 年 6 月 8 日~6 月 15 日通过逐步调整工艺参数继续试桩。根据少扰动土层、低混凝土灌压的原则, 采取先将桩管振动穿透表层硬土后改为静压沉管, 在桩架抬起后再振动沉管至设计高程, 混凝土灌入后振动拔管, 拔起 7~8 m 后将连续振动改为间歇振动。拔管采取加一斗料拔一段管, 保持管内混凝土面不高过地面 2.5~3 m, 混凝土的坍落度控制在 130~150 mm, 拔管速度 1.5~2 m/min 能顺利成桩, 且充盈系数保持在 1.25 以内。工艺归纳为“静压贯入、轻振拔出、分级加料、逐斗提升”的施工原则。10 月中旬, 两试验路段的 Y 形桩施

工全部完成, 10 月下旬开始浇筑圆形桩帽。

1.4 观测仪器的布置

因篇幅所限, 以下主要阐述 K24+959~K25+049 路段的观测布置, 该路段按不同桩间距分别布设了 Y3、Y4 和 Y5 三个观测断面, 其具体布置见图 2。

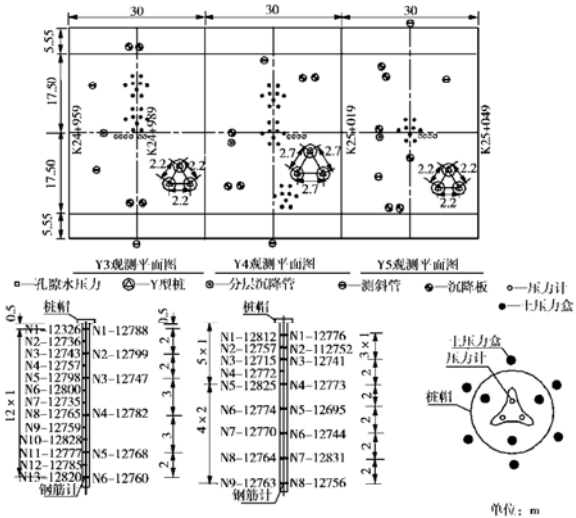


图 2 观测仪器布置图

Fig. 2 The arrangement of observation instruments

- (1) 沉降观测仪器: 每个观测断面布设了沉降板、深层沉降标和分层沉降管。
- (2) 土压力盒: 每个观测断面布置了土压力盒, 在桩帽底部按 120°布置 3 只土压力盒, 在桩帽外围的桩间土按 60°布置 6 只土压力盒。
- (3) 轴力计及钢筋应力计: 在 Y3、Y4 断面布置了轴力计及钢筋应力计, 每桩布置 3 个轴力计, 同时沿桩身每隔一定距离布设一个振弦式钢筋应力计。
- (4) 测斜管和孔隙水压力计: 每个观测断面布置 2~4 根测斜管, 同时在中路和路肩两部位, 每个部位沿深度设置 4~6 只孔隙水压力计。

2 观测成果及分析

试验段路基宽度为 35 m, 路基设计高度为 3.8~

4.5 m, 采用土石混和料进行填筑, 2003 年 10 月 15 日完成 Y 形桩的施工后, 10 月 20 日开始填筑桩帽及桩帽间的填土施工, 2004 年 2 月铺设土工格栅并开始填筑, 至 2004 年 7 月填筑至路基顶面标高, 压实后的填料平均重度为 23 kN/m^3 , 8 月 7 日再填筑约 0.7 m 至路面顶标高, 试验段路堤填筑过程如图 3 所示。

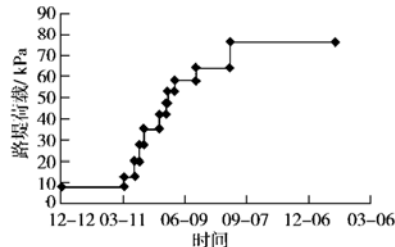


图 3 试验段路堤荷载-时间关系曲线

Fig. 3 The curves of load of fill vs time

2.1 桩顶和桩间土的沉降

如图 4 所示, 桩间土的沉降量均大于桩顶沉降, 特别是在路堤填土初期, 桩土间沉降差显著增加, 从而在路堤中引起土拱效应。填土达到 2.0 m 左右时, 土拱效应形成, 上部填土荷载大部分由桩来承担, 桩土间沉降差基本保持不变。随着软基的固结, 桩顶沉降和桩间土沉降随荷载及时间继续增大。

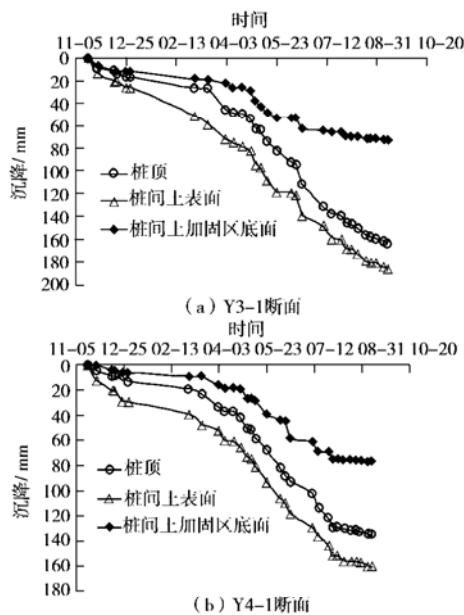


图 4 断面桩顶和桩间土的沉降

Fig. 4 The settlements of piles and soil between piles

2.2 分层沉降

在 Y1~Y5 观测断面共布置了 5 根磁环式分层沉降管。观测结果表明, 接近地表的沉降 Y3-1 断面为 131 mm, Y4-1 断面为 148 mm。根据沉降板测得 Y3-1 和 Y4-1 断面桩间土的沉降为 159 mm 和 184 cm, 略大于分层沉降观测结果。分析原因为, 出于对分层沉降管的保护, 碾压时, 碾压机具离分层沉降管较远,

大量石块被挤入土中, 导致分层沉降管测得的沉降偏小。

2.3 侧向位移

对侧向位移的观测从 2004 年 2 月开始。观测得到的最大侧向位移发生在地表, 为 18 mm。侧向位移基本随路堤荷载和时间增长。填筑结束后, 侧向位移速率减缓, 仅为 1.7~2 mm/月, 表明路堤和路基基本稳定。

2.4 孔隙水压力

第一次填土施工时, 各深度处孔压均有一定程度的增长, 其中 2 m 处的孔压 Y3 断面达到 6.5 kPa, Y4 断面达到 9.3 kPa, 见图 5。随着路堤荷载的增加, 2 m 和 8 m 处的孔压变化较小, 而 14 m 处的孔压达到最大值, 分析其原因, 在桩身上部约 1/2 桩长范围内, 桩土间存在负摩阻力, 大部分荷载均由桩体来承担; 在桩身下部, 由于摩阻力的存在, 桩承担的荷载向桩间土转移, 因此孔隙水压力增大。

观测结果中发现初始有一定孔压, 分析其原因, 成桩过程中因为挤土效应产生超静孔压, 观测初期孔隙水压力值并未完全消散。为了缩短工期, 在 2004 年 8 月 7 日又铺设了厚约 0.7 m 的填土, 孔隙水压力随之再次上升。

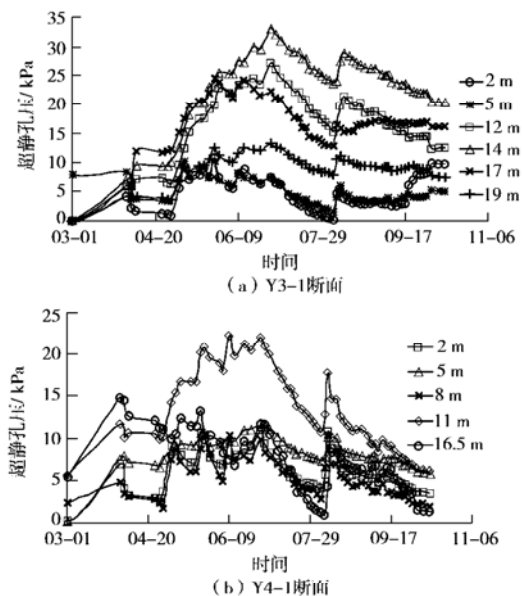


图 5 孔隙水压力随时间变化曲线

Fig. 5 The curves of pore water pressures vs time

2.5 路堤荷载下的土压力

图 6 为 Y3 断面测得的桩帽下土压力随时间的变化曲线, 图 7 为测得的桩间土压力随时间的变化曲线, 其他断面的土压力变化情况与此相似。

观测结果表明, 桩帽下及桩间土压力在加载初期随时间有所增大, 因为桩的模量远大于土体的压缩模量, 随着填土高度的增加, 桩土不再保持变形一致,

桩帽与土体的接触减弱, 桩帽以下的土压力变小; 同时因为不协调变形, 在路堤中产生了土拱效应, 桩间土压力通过土拱向桩顶转移, 因此, 桩间土压力在填筑初期有增长较大, 但是当土拱形成后桩间土压力基本维持不变甚至有所降低。

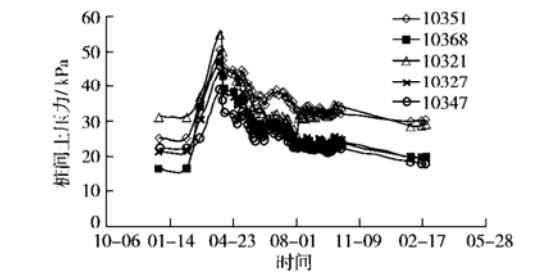


图 6 桩帽下土压力随时间变化曲线
Fig. 6 The curves of soil pressures under pile cap vs time

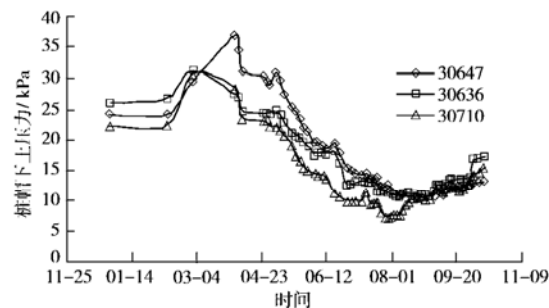


图 7 桩间土压力随时间变化曲线
Fig. 7 The curves of soil pressures between piles vs time

2.6 桩顶压力变化规律

采用桩顶的 3 个压力计来测定桩顶所受的压力, 其随时间的变化曲线如图 8 所示。从图上可见, 桩顶压力呈非均匀分布, 说明受到的往往是偏心荷载。压力计 8006 出现较大的降低, 分析其原因为偏心荷载引起桩帽的倾斜, 导致 3 个压力重新分配。

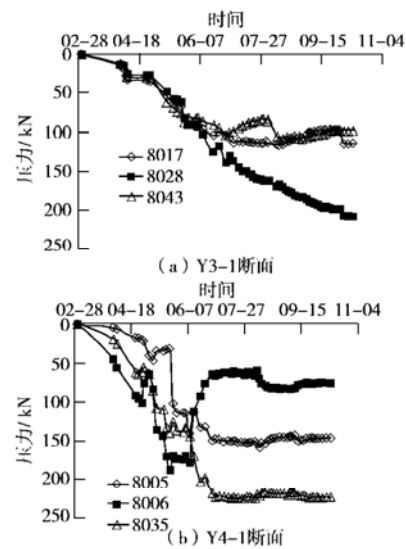


图 8 桩顶压力变化曲线
Fig. 8 The curves of loads on top of piles vs time

2.7 桩土应力比

定义桩土应力比为桩顶的应力与桩间土压力的比值, 桩体荷载分担比为桩承担的荷载占总荷载的百分比, 根据 Y3、Y4 断面土压力盒和压力计的观测结果, 考虑测量值的离散性, 取土压力盒测量的平均值进行计算, 整理得到桩土应力比和桩体荷载分担比随时间的变化曲线 (图 9、10)。从图上可以进一步看出, 随着路堤荷载的增加, 桩间荷载向桩顶转移, 桩土应力比和桩体荷载分担比逐渐增大, 当达到 Y 形桩的极限荷载后, 桩体和桩间土根据荷载分担比来共同承担上部的路堤荷载。

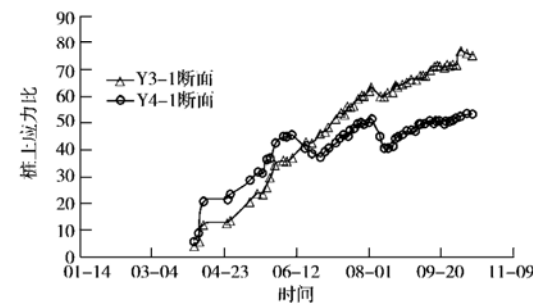


图 9 桩土应力比随时间变化曲线
Fig. 9 The curves of pile-soil stress ratio vs time

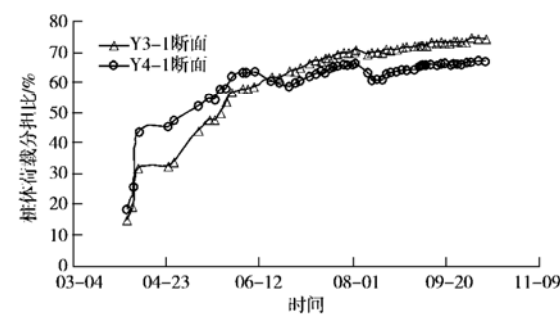


图 10 桩体荷载分担比随时间变化曲线
Fig. 10 The curves of load sharing ratio vs time

2.8 桩身轴力

将钢筋应力计的观测数据进行整理, 得到 Y 形桩的桩身轴力随深度变化情况 (图 11), 从图上可以看出, 沿桩长上部 0~7.5 m 范围内存在着负摩阻力的分布, Y3-1 截面其平均值为 21.76 kPa, Y4-1 截面其平均值为 5.4 kPa, 桩身轴力在中性点处达到最大值。

3 结 语

(1) 根据现场观测结果, 在填筑初期, 填土高度较小的情况下, 桩顶和桩间土承担的荷载基本相同, 随着荷载的增大, 桩间土的沉降大于桩顶的沉降, 路堤中产生土拱效应, 路堤荷载逐渐向桩身转移, 桩土应力比随之增大。

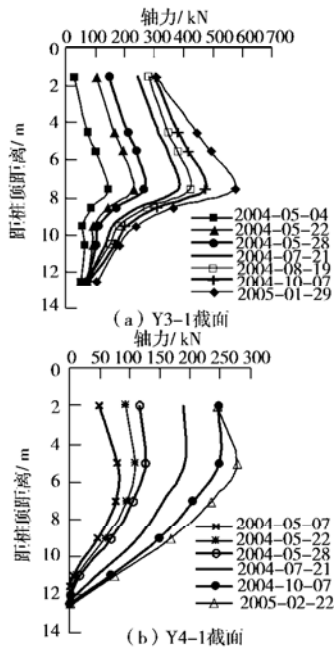


图 11 桩身轴力-深度变化曲线

Fig. 11 The distribution of axial load of pile along depth

(2) 根据孔隙水压力和桩身轴力的观测结果,在路堤荷载作用下,桩身上部约 $1/3 \sim 1/2$ 的范围内存在负摩阻力的分布,桩土间存在一定的不协调变形。

(3) 通过现场试验,表明 Y 形沉管灌注桩具有施工简便,经济实用以及较好的成桩完整性,为高速

公路桩承式路堤的一种较为经济合理的桩型。然而这种新型的灌注桩相对等面积的圆形截面桩,其受力和变形有何不同之处,还有待进一步的对比试验研究。

参考文献:

- [1] 浙江省交通规划设计研究院. 申苏浙皖高速公路工程施工图设计 [R]. 2002. (Zhejiang Provincial Plan Design & Research Institute of Communications. Construction documents design of Shen-Su-Zhe-Wan Expressway [R]. 2002. (in Chinese))
- [2] 陆见华, 等. Y 形沉管灌注桩现场工艺试验报告 [J]. 浙江建筑, 2004, 21(1): 19 - 21. (LU Jian-hua, et al. The field test report of technology of Y-shaped vibro-Piles [J]. Zhejiang Construction, 2004, 21(1): 19 - 21. (in Chinese))
- [3] JGJ 94—94 建筑桩基技术规范 [S]. (JGJ 94—94 The technical specification of pile foundation [S]. (in Chinese))
- [4] 浙江省交通规划设计研究院. 申苏浙皖高速公路工程监测成果内部资料 [R]. 2005. (Zhejiang Provincial Plan Design & Research Institute of Communications. Monitoring report of Shen-Su-Zhe-Wan Expressway [R]. 2005. (in Chinese))

第九届全国振动理论及应用学术会议 征文通知

中国振动工程学会、中国力学学会、中国航空学会、中国机械工程学会和中国宇航学会联合主办的“第九届全国振动理论及应用学术会议”拟定于 2007 年 10 月在杭州召开。会议由浙江大学承办,浙江省振动工程学会协办,暨南大学刘人怀院士担任会议主席,浙江大学朱位秋院士担任会议执行主席。此次会议期间,将庆祝中国振动工程学会成立二十周年,选举中国振动工程学会第六届理事会。会议还将邀请国内外著名专家作特邀专题学术报告。

会议将出版论文集(光盘)和论文摘要(纸制),并选择优秀论文刊登于《振动工程学报》、《宇航学报》、《振动与冲击》等刊物。欢迎振动工程领域的研究人员踊跃参加会议。会议期间,将组织有关振动测试仪器和设备的展览,欢迎有关研究机构、企业参展。

1. 时间要求

(1) 2007 年 01 月 15 日前 用 E-mail 形式提交 500 字左右的中文摘要及相应的英文摘要,注明作者单位、通讯地址、

邮编、E-mail 地址、投稿所属征文范围等详细信息。

(2) 2007 年 02 月 28 日前 发出论文摘要录用通知及论文格式。

(3) 2007 年 05 月 31 日前 提交论文全文。

(4) 2007 年 06 月 30 日前 发出论文录用通知。

(5) 2007 年 07 月 31 日前 收到出席学术会议回执。

2. 联系方式

联系人: 陈章位 何 闻

地址: 浙江省杭州市浙大路 38 号浙江大学机械与能源工程学院

电话: 0571-8795-1269 0517-8795-2627

传真: 0571-8795-1269

邮政编码: 310027

E-mail: nvta2007@zju.edu.cn

网址: <http://www.zj-zd.com/nvta2007/>

(第九届全国振动理论及应用学术会议组委会 供稿)