双层土体结构对超长桩承载性状的影响

姚 波1,徐 闪2,张齐兴3

(1. 浙江省湖州市港航管理局,浙江 湖州 313000; 2. 江苏省交通厅苏北航务管理处,江苏 淮安 223002;3. 河海大学 农业工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:利用三维有限元方法,研究了双层地基土中超长桩的承载性状.利用线弹性模型模拟桩身混凝土的应力 应变关系,邓肯-张非线性弹性模型模拟地基土,河海大学薄单元模型模拟桩-土间的非连续变形.计算结果表 明,对上硬下软地基土结构,当硬土层厚度不大于桩身人土深度时,随硬土层厚度的增大,桩顶极限荷载、桩侧 极限阻力均呈非线性增大;对上软下硬地基土结构,当软土层厚度不大于桩身人土深度时,随软土层厚度的增 大,桩顶极限荷载、桩侧极限阻力均呈非线性减小;桩身轴力和桩侧阻力沿深度的分布随地基土结构而异,桩侧 摩阻力在硬、软土层分界处有急剧变化现象;超长桩的失稳由桩侧土体的破坏引起.

关 键 词:超长桩;双层地基土;承载性状;桩身轴力;桩侧摩阻力 中图分类号:TU443 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-640X(2008)04-0084-07

Numerical study on behaviors of lengthy pile in two-layer soil

YAO Bo¹, XU Shan², ZHANG Qi-xing³

(1. Port-Shipping Management Bureau of Huzhou City, Huzhou 313000, China; 2. Subei Administration of Navigational Affairs, Jiangsu Provincial Communications Department, Huaian 223002, China; 3. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on a 3-dimensional finite element method (3D FEM), the behaviors of lengthy pile in two-layer soil have been studied. The stress-strain relationships of pile concrete are simulated by a linear elastic model, and that of the soil is simulated by a nonlinear elastic model developed by Duncan and Chang. A special thin-layer element model developed by Hohai University is used to simulate the non-linear displacement between pile and soil. The calculated results show that, for the hard-soft two-layer soil structure, in which the upper soil is hard but lower soil is soft, both of the ultimate load acting on pile cap and the ultimate friction resistance acting along the pile side are increasing nonlinearly with increasing the thickness of the upper hard soil from zero to the length of pile; and for the soft-hard soil structure, in which the upper soil is soft but lower soil is hard, both of the ultimate load and the ultimate friction resistance are decreasing nonlinearly with increasing the thickness of the upper soil is hard, both of the ultimate load and the ultimate friction resistance are decreasing nonlinearly with increasing the thickness of the upper soil is hard, both of the ultimate load and the ultimate friction resistance are decreasing nonlinearly with increasing the thickness of the upper soil is hard, both of the ultimate load and the ultimate friction resistance are decreasing nonlinearly with increasing the thickness of the upper soft soil from zero to the length of pile. The distributions of the shaft load and side resistance along the depth are different for different hard-soft and/or soft-hard soil structures. The large changes in side resistance can be found at interface where soil

收稿日期: 2008-03-30

作者简介:姚 波(1968-),男,浙江宁波人,高级工程师,主要从事航道工程建设管理工作. E-mail: zhangqx63@ sina. com

changes from hard to soft or from soft to hard. The instability of the lengthy pile is resulted from the fail of the soil around the pile.

Key words: lengthy pile; two-layer soil; behavior; shaft load; side resistance

超长桩在我国第四纪覆盖层深厚地区的大型桥梁、高层建筑中的应用越来越多,如苏通大桥主桥索塔基 础超长桩长为116 m^[1].研究表明,除超长桩桩底地层为坚硬土体或基岩外,超长桩的承载性状属于摩擦 桩^[2-5].由于超长桩现场静载试验具有影响因素众多、成本高及工期长等缺点,因此,愈来愈多地想利用数值 方法研究超长桩的承载性状^[6].虽然对超长桩承载性状及荷载传递机理已有一些研究报道^[7-10],但对地基 土为双层结构(包括上硬下软结构和上软下硬结构两种情况)的简单情况,尚未见针对性的研究报道.本文 基于非线性三维有限元分析方法,对该问题进行探讨,以期获得一些对工程有益的认识.

1 有限元模型及模型参数

1.1 有限元模型

假定超长桩入土长度为90m,桩径2.4m.在建立有限元模型时,将圆形截面桩按侧面积相等等效为方形截面.为了考虑桩土共同作用,桩和地基土均用8结点等参单元模拟,桩土间设置具有一定厚度的薄单元,

以考虑桩和地基土间可能存在的非连续变形,以及桩施工对 地基土的扰动.目前,对桩土接触问题的处理通常有两种方 法:一是用无厚度的接触面单元,如 Goodman 单元;二是用有 厚度的薄单元,如 Desai 对薄单元.无厚度的接触面单元可以 模拟沿界面的非连续变形,而有厚度的薄单元可以考虑桩周 一定范围的较大剪切变形,因而更适合于模拟桩土相互作 用.桩周薄单元高度为5m,厚度为0.3m,即厚度/长度= 1/16.7,满足 Desai 对薄单元厚度取长度的1/100~1/10的 建议^[11].为满足边界条件,有限元模型影响范围水平方向取 30 倍桩径,即72m,桩底以下取110m,约为桩长的1.2倍. 三维有限元模型如图1 所示.



1.2 模型参数

高强度混凝土在破坏前的应力应变关系可近似为线弹性,故桩身混凝土采用线弹性模型模拟,弹性模量 *E*=3.3×10⁴ MPa, 泊松比 ν=0.167. 考虑到我国超长桩应用地区的地下水位通常较高, 混凝土桩、地基土及桩 周薄单元的重度均取浮重度计算. 取桩身混凝土的浮重度 γ'=14 kN/m³.

假定地基土为两层结构,主要考虑上部地层较硬而下部地层较软(简称上硬下软结构)和上部地层较软 而下部地层较硬(简称上软下硬结构)两种情况.两层地基土的应力应变关系均用邓肯-张 E-ν 非线性弹性 模型模拟^[12].各模型参数取值见表1(表中硬层模型参数参考苏通大桥索塔地基中的中粗粒砂层取值,软层 模型参数参考苏通大桥索塔地基中的粉细砂层取值,详见文献[1,2]).

Tab. 1 Values of parameters for foundation soil								
	K	R	n	C	arphi	с	γ'	
	Λ	\mathbf{R}_{f}	п	6	/ °	∕ kPa	$/ (kN \cdot m^{-3})$	
硬土	668	0.8	0.55	0.40	38	28	11.2	
软土	321	0.8	0.61	0.40	31	24	9.8	

表1 地基土模型参数取值表

注:模型参数 F、D 均取为零

桩周薄单元的本构模型用河海大学薄单元模型模拟^[13]. 桩周薄单元的模型参数对超长桩承载性状的影响很大,应综合考虑地基土的力学性质、成桩工艺等因素,最好能够结合试验确定. 本文对薄单元模型参数的取值方法没有进行深入研究,考虑到相同施工工艺下,薄单元的模型参数应与地基土的力学性质相关,同时结合文献[14]的研究,薄单元的模型参数按以下原则取值:内摩擦角 φ 取地基土内摩擦角的 2/3,粘聚力 c 取地基土粘聚力的 1/2,浮重度取与地基土浮重度相等. 薄单元模型参数取值见表 2.

表 2 薄单元模型参数取值

	K	R_{f}	n	G	φ ∕(°)	c ∕ kPa	γ' $\langle (kN \cdot m^{-3})$
硬土薄单元	100	0.9	0.66	0.40	25.3	14	11.2
软土薄单元	100	0.9	0.66	0.40	20.7	12	9.8

Tab. 2 Values of parameters for thin-layer element

注:模型参数 F、D 均取为零

2 上硬下软地层超长桩承载性状

2.1 计算方案

假定地基土由上下两层构成,且上层较硬,下层较软.为了研究上层较硬地基土厚度对超长摩擦桩承载 性状的影响,对表 3 所示的 13 种方案进行计算.

Tab. 3 Schemes for hard-soft two-layer soil structure								
序 县	硬层底埋深*	硬层厚度*		硬层底埋深*	硬层厚度*			
71 - 2	/ m	/ m	71	/ m	/ m			
1	0	0	8	70	70			
2	10	10	9	80	80			
3	20	20	10	90	90			
4	30	30	11	100	100			
5	40	40	12	110	110			
6	50	50	13	120	120			
7	60	60						

表 3 上硬下软地层结构计算方案

注: 当计算方案为上软下硬地层时,硬层底埋深和硬层厚度分别代表软层底埋深和软层厚度.

2.2 计算成果及分析

2.2.1 桩顶荷载与桩顶沉降曲线 图 2 给出的是上层较硬土层厚度分别为 0、30、60、90 和 120 m 时的桩顶 荷载与桩顶沉降关系曲线.可见,随较硬土层厚度的增大,桩顶极限荷载也增大,但桩顶极限荷载并不随硬土 层厚度的增大呈均匀增大.另外,虽然不同厚度硬土层时的桩顶极限荷载不同,但桩顶极限荷载所对应的桩 顶沉降量却基本相等,约为 18 cm,即为桩长的 0.2%.因此,可以将桩顶沉降为 18 cm 作为本文超长桩失稳 的判定指标.

2.2.2 承载性状分析 图3给出了桩顶极限荷载和桩侧极限阻力随硬土层厚度的变化.可见,当硬土层厚度小于桩底埋深(90m)时,随硬土层厚度的增大,桩顶极限荷载和桩侧极限阻力均呈非线性增大,且两者几乎平行;当硬土层厚度大于桩底埋深时,随硬土层厚度的增大,桩顶极限荷载略有增大,而桩侧极限阻力则保持不变,表明此时桩顶极限荷载增大是由桩底土层变硬引起的.



2.2.3 桩身轴力分布 不同硬土层厚度在相同桩顶荷载作用下的桩身轴力分布见图 4. 可见,不同硬土层 厚度条件下,即使桩顶荷载相同,桩身轴力沿深度的分布也有所不同.当硬土层厚度为0时,桩身轴力总是 最大.



Fig. 4 Distributions of pile shaft load

2.2.4 桩侧阻力分布 不同硬土层厚度在相同桩顶荷载作用下的桩侧摩阻力分布见图 5. 可见,不同硬土 层厚度条件下,即使桩顶荷载相同,桩侧阻力沿深度的分布也不同.硬层厚度为 30 m 时,桩侧阻力在深度 30 m处存在急剧减小现象,这与地层结构相对应;同样,硬层厚度为60 m时,桩侧阻力在深度60 m处存在急 剧减小现象;而当硬层厚度为0、90和120m时则无此现象,因为在桩长深度范围内地层是均匀的.



Fig. 5 Distribution of pile side resistance

2.2.5 桩基失稳原因分析 邓肯-张非线性弹性模型中,应力水平被定义为当前主应力差与破坏时的主应 力差之比,其大小反映了土体强度的发挥程度.因此,可以用应力水平的大小反映土体的稳定状态,应力水平 小于1.0,表示处于稳定状态;等于1.0表示处于极限平衡状态或已破坏.

图 6 给出了表 3 中方案 4(即硬土层厚度 30 m)的超长桩,在桩顶荷载逐渐增大过程中,桩底地基土单元

(即:桩底土单元)、最上端桩周薄单元(即:桩顶薄单元)、桩 身中部桩周薄单元(即:桩中薄单元)和最下端桩周薄单元 (即:桩端薄单元)的应力水平变化.可见,随桩顶荷载的增 大,各薄单元的应力水平均增大,而桩底土单元应力水平的 变化很小;当桩顶荷载接近最大值时,不同位置桩周薄单元 的应力水平均已接近或等于1.0,而桩底土单元的应力水平 仅为0.53.表明在桩周薄单元发生剪切破坏时,桩底土单元 仍处于稳定状态,也就是说,桩基失稳是由桩侧土体的破坏 引起,而非桩端土体破坏所致.



Fig. 6 Relationships between load and stress level (I)

3 上软下硬地层超长桩承载性状

3.1 计算方案

假定地基土由上下两层构成,且上层较软,下层较硬.为了研究上层较软地基土厚度对超长摩擦桩承载 性状的影响,对表 3 所示的 13 种方案进行计算.

3.2 计算成果及分析

3.2.1 桩顶荷载与桩项沉降曲线 图 7 给出了上层软土层厚度分别为 0、30、60、90 和 120 m 时的桩顶荷载 与桩顶沉降关系曲线.可见,随软土层厚度的增大,桩顶极限荷载呈减小趋势,且不同情况桩顶极限荷载所对 应的桩顶沉降量基本相等,约为 18 cm.

3.2.2 承载性状分析 以桩顶沉降为18 cm 作为超长摩擦桩失稳的判定指标.图8 给出了桩顶极限荷载和 桩侧极限阻力随软土层厚度增加的变化.可见,当软土层厚度从0 增加到10 m 时,桩顶极限荷载和桩侧极限 阻力均显著减小;当软土层厚度从10 m 增加到90 m 时,桩顶极限荷载和桩侧极限阻力均呈非线性减小;当 软土层厚度大于90 m 时,随软土层厚度的增大,桩顶极限荷载和桩侧极限阻力的变化很小.



3.2.3 桩身轴力分布 图9为不同软土层厚度在相同桩顶荷载作用下的桩身轴力分布图.可见,软土层厚 度不同时,即使桩顶荷载相同,桩身轴力沿深度的分布也有所不同,当软土层厚度为0时,同一深度处桩身轴 力总是最小.随桩顶荷载的增大,同一深度处桩身轴力的差异程度有所减小.



3.2.4 桩侧阻力分布 不同软土层厚度的桩侧摩阻力分布见图 10. 可见,不同软土层厚度条件下,即使桩顶荷载相同,桩侧阻力沿深度的分布也不同;软层厚度为 30 m 时,桩侧摩阻力在深度 30 m 处有急剧增大现象;软层厚度为 60 m 时,桩侧摩阻力在深度 60 m 处有急剧增大现象. 这表明,桩侧阻力沿深度分布的变化,反映了桩长深度范围内地层的变化.



3.2.5 桩基失稳原因分析 图 11 给出了表 3 中方案 4(即软土层厚度 30 m)的超长桩,在桩顶荷载逐渐增 大过程中,桩底土单元、桩顶薄单元、桩中薄单元和桩端薄单元应力水平的变化.比较图 11 和图 6 可见,应力 水平随桩顶荷载的变化特点基本相同,表明在上软下硬地基土中,桩基失稳的原因也是桩侧土体的破坏,而 非桩端土体的破坏.



Fig. 11 Relationships between load and stress level (II)

4 结 语

超长摩擦桩的承载性状受地层结构的影响,本文以双层地基土为例,利用三维有限元方法对此进行了研究,得出以下几点认识:

(1)对上硬下软双层地基土结构,当硬土层厚度不大于桩身入土深度时,随上部硬土层厚度的增大,桩 顶极限荷载、桩侧极限阻力均呈非线性增大,但桩顶极限荷载所对应的桩顶沉降相差不大;桩身轴力和桩侧 阻力沿深度的分布随硬土层厚度的不同而异,桩侧摩阻力在由硬土层过渡到软土层处有急剧减小的现象;

(2)对上软下硬双层地基土结构,当软土层厚度不大于桩身入土深度时,随上部软土层厚度的增大,桩 顶极限荷载、桩侧极限阻力均呈非线性减小,但桩顶极限荷载所对应的桩顶沉降相差不大;桩身轴力和桩侧 阻力沿深度的分布随软土层厚度的变化有所不同,桩侧摩阻力在由软土层过渡到硬土层处有急剧增大的现象;

(3) 双层土体中,超长桩的桩侧阻力和桩端阻力不是同时达到极限;超长桩的失稳是由桩侧土体的破坏 引起,而非桩端土体破坏所致.

参考文献:

- [1] 河海大学岩土工程研究所.苏通长江公路大桥跨江大桥工程主桥索塔群桩基础与土体共同作用数值模拟分析研究报告[R].南京:河海大学,2003.
- [2] 王俊杰,朱俊高,魏 松.不同桩底地层超长桩工作性能的数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 328-331.
- [3] 张忠苗, 辛公锋. 软土地基超长桩受力性状分析[J]. 工程勘察, 2003, (3): 10-13.
- [4] 朱向荣,方鹏飞,黄洪勉. 深厚软基超长桩工程性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 76-79.
- [5] 蒋建平, 高广运, 汪明武. 大直径超长桩有效桩长的数值模拟[J]. 建筑科学, 2003, 19(3): 27-29.
- [6] 陈开旭, 安关峰, 鲁 亮. 采用有厚度接触单元对桩基沉降的研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 92-96.
- [7] 曾友金,章为民.用有限单元法分析超长单桩的荷载传递[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 803-806.
- [8] 阳吉宝. 超长桩承载机理分析与有效桩长确定[J]. 力学与实践, 1995, 17(5): 17-18.
- [9] 池跃君,顾晓鲁,周四思,等. 大直径超长灌注桩承载性状的试验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(8): 26-29.
- [10] 肖宏彬,钟辉虹,张亦静,等. 单桩荷载-沉降关系的数值模拟方法[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 592-596.
- [11] Desai C S, Lightner J G, Siriwardane H J, et al. Thin-layer element for interfaces and joints[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1984, 8(1): 19–43.
- [12] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算(第二版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [13] 殷宗泽,朱 泓,许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 14-22.
- [14] 张齐兴,姚 波,俞中奇.超长摩擦桩承载性状有限元法研究[J].河海大学学报(自然科学版),2007,35(6):681-685.