

黄河中下游冲积平原深长桩桩侧极限摩阻力研究

董三升, 赵均海, 雷自学

(长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要:对于黄河中下游冲积平原砂性土层深长桩桩侧极限摩阻力问题, 根据该地区的地质特性、采用有限元软件 ABAQUS 对大量不同参数的深长桩进行了建模分析, 结果表明: 桩顶荷载与桩侧摩阻力近似呈线性关系, 桩长、桩径、桩-土界面条件、桩周土的力学性质等对桩侧摩阻力影响程度不同。根据有限元计算结果推导出了砂性土层深长桩桩侧极限摩阻力的计算公式, 用其对工程实例进行验算, 并将计算结果与静载试验实测结果进行了对比, 二者吻合较好, 说明有限元建模方法、参数设置及结论可靠, 计算公式较准确。该研究可为该地区深长桩的优化设计提供参考。

关键词:深长桩; 极限摩阻力; 砂性土; 有限元

中图分类号: TU473.1+2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)04-0507-07

深长桩单桩竖向承载力一般取决于桩周岩土体对桩的阻力, 土对桩的阻力由侧阻力和端阻力两部分组成^[1-2]。通过对深长桩荷载传递特性^[3-5]分析可知, 桩侧阻力先于端阻力起作用, 上部土层的侧阻力先于下部土层发挥作用。由于深长桩桩身压缩量大, 常以桩顶位移量限值来判定桩基极限承载力, 但会出现桩端阻力未发挥至极限的情况^[6]。有人提出桩侧摩阻力和桩端阻力采用不同分项系数的方法, 这样虽遵从了深长桩的荷载传递特点, 但由于侧阻力及端阻力的发挥度难以判断, 使得分项系数的取值成为难题^[7-8]。因此如何准确计算桩侧摩阻力是确定深长桩极限承载力的前提。

大量研究表明^[9-11], 影响桩侧摩阻力的因素有桩周土的性质、桩-土相对位移或相对运动趋势、桩侧向有效压应力、桩-土界面条件、桩的几何特征等, 而现有桩侧摩阻力计算方法 α 法、 β 法、 λ 法均是仅考虑了部分因素的影响, 不能适用于所有土质。有限元法可同时考虑影响桩侧摩阻力的诸多因素, 真实模拟地基土的非线性及不均匀性、桩土之间的作用等, 因此运用有限元法对桩侧摩阻力的极限值进行研究。

1 工程背景

郑州黄河公铁两用桥位于黄河中下游冲积平原地区, 地层以第四系河流相粉、细、中砂为主, 其间多夹粉土、粉质粘土薄层或透镜体。其主桥公路、铁路采用上下层布置, 公路桥长 11.575 km, 铁路桥长 14.887 km, 公铁合建段长 9.177 km。桥墩基础采用直径 1.2~1.5 m、桩长 68~95 m 的钻孔灌注桩。

2 桩侧极限摩阻力的有限元模拟

2.1 基本参数

为研究黄河中下游冲积平原区桩侧极限摩阻力, 结合该区地质主要以砂性土为主的特点, 利用有限元软件 ABAQUS 对均质砂性土层中的深长桩进行建模分析。建模时根据该地区地质情况取桩、土弹性模量 $E_p = 3 \times 10^4$ MPa、 $E_s = 15$ MPa, 桩、土泊松比 $\mu_p = 0.2$ 、 $\mu_s = 0.25$, 桩周土重度 $\gamma_s = 19.5$ kN/m³, 桩周土粘聚力 $C = 5$ kPa。考虑到桩周土内摩擦角 φ 、桩-土摩擦系数 μ 、桩长 L 及桩径 D 的改变可以体现

*收稿日期: 2010-12-28 修改稿日期: 2011-06-13

基金项目: 河南省交通厅基金资助项目(2007P325)

作者简介: 董三升(1973-), 男, 陕西大荔人, 讲师, 工学博士, 从事建筑结构的教学和科研工作。

桩周土力学性质、桩-土界面条件、桩的几何参数对桩侧摩阻力的影响,共建立了 24 个模型,详见表 1。根据许宏发、吴华杰等^[12]的研究成果, μ 分别取值 0.5、0.6、0.7。

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameters

No.	L/m	D/m	μ	$\varphi/^\circ$	No.	L/m	D/m	μ	$\varphi/^\circ$
I ₁₁	40	0.8	0.5	30	III ₁₁	80	1.0	0.5	30
I ₁₂	40	0.8	0.5	38	III ₁₂	80	1.0	0.5	38
I ₂₁	40	0.8	0.6	30	III ₂₁	80	1.0	0.6	30
I ₂₂	40	0.8	0.6	38	III ₂₂	80	1.0	0.6	38
I ₃₁	40	0.8	0.7	30	III ₃₁	80	1.0	0.7	30
I ₃₂	40	0.8	0.7	38	III ₃₂	80	1.0	0.7	38
II ₁₁	40	1.0	0.5	30	IV ₁₁	80	1.5	0.5	30
II ₁₂	40	1.0	0.5	38	IV ₁₂	80	1.5	0.5	38
II ₂₁	40	1.0	0.6	30	IV ₂₁	80	1.5	0.6	30
II ₂₂	40	1.0	0.6	38	IV ₂₂	80	1.5	0.6	38
II ₃₁	40	1.0	0.7	30	IV ₃₁	80	1.5	0.7	30
II ₃₂	40	1.0	0.7	38	IV ₃₂	80	1.5	0.7	38

2.2 模型建立

在建模和计算过程中考虑主要因素,忽略次要因素,结合具体问题进行简化,采用以下几点假定:

(1) 竖向荷载作用下,试件按二维平面轴对称问题进行分析,桩体采用轴对称八节点减缩单元(CAX8R)离散,土体采用轴对称四节点减缩单元(CAX4R)离散;

(2) 桩仅考虑弹性,土体采用 Mohr-Consolid 弹塑性模型,且为各向同性体;

(3) 土体的弹性模量和泊松比不因桩的存在而改变;

(4) 桩土接触界面力学行为采用罚函数模拟,分析过程中桩土间的摩擦系数不变。

建模过程中,为满足边界条件,将分析区水平方向宽度取为桩长的 1 倍,大于 25D^[13-14],满足计算要求;又因桩体长度较大,桩端下的距离取为桩长的 1 倍。

在划分单元网格时,紧靠桩身和桩端的部位应力、应变变化剧烈,为了使此范围内的土体变形、应力达到满意的精度,对此处的单元进行加密;同时在桩的外侧与桩周土、桩端与桩端土间设置了接触面,以全面反映桩和土体的接触特性。模型单元网格划分见图 1。

在模型的两侧施加水平约束,底部施加水平和垂直两个方向的位移约束。进行桩基有限元分析时,考虑到土体、桩的自重对桩侧压力、土与桩发生摩擦及粘聚的影响,首先进行了地应力的平衡:

将重力荷载先施加于模型,并施加相应的边界约束,计算得到重力荷载下的应力场,再将应力场和重力荷载一起施加于原始有限元模型,得到既满足平衡条件又不违背屈服准则的没有位移的初始应力场。地应力平衡前、后的位移场、竖向应力场分别见图 2。

从图 2 计算结果中知,地应力平衡后的位移大概在 10^{-6} m 量级上,满足工程精度要求;竖向应力在地应力平衡前后一致,与实际相符。

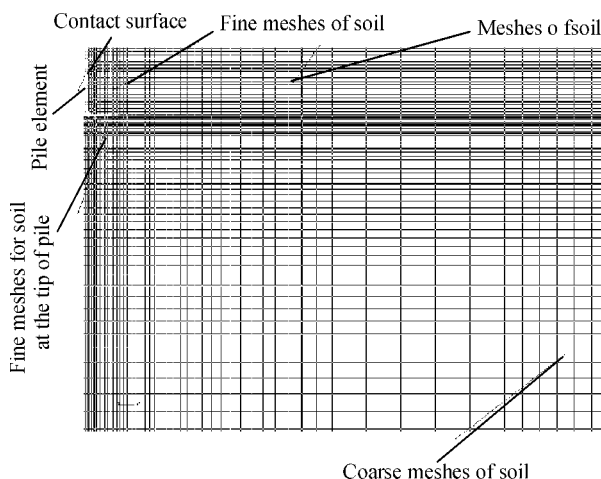


图 1 模型网格划分图

Fig. 1 Meshing of model

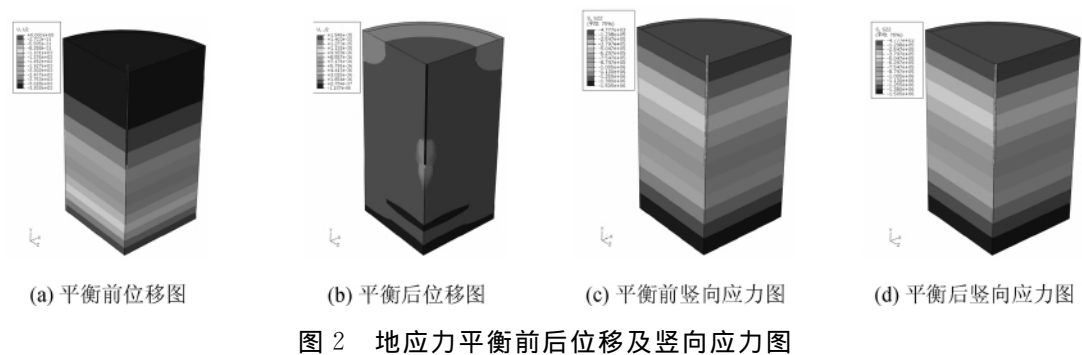


图 2 地应力平衡前后位移及竖向应力图

Fig. 2 Displacement and vertical stress contours before and after balancing geostatic stress

2.3 模拟结果

对模型加载时,根据《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTGD63-2007)的相关要求,按照《建筑桩基检测技术规范》(JGJ106-2003)规定的加载方式,在桩顶分级施加集中荷载。

以Ⅱ₂₁桩为例列出计算结果:桩顶荷载及位移情况见表 2,桩顶荷载-位移(Q-S)曲线见图 3。

表 2 桩Ⅱ₂₁荷载-位移数据统计表

Tab. 2 Statistic data of load-displacement for pileⅡ₂₁

Loading stage	Load/kN	Displacement/mm	Loading stage	Load/kN	Displacement/mm
2	2 000	8.1	9	7 750	36.3
3	4 000	16.6	10	8 250	39.7
4	5 250	22.4	11	8 750	43.4
5	5 750	24.9	12	9 250	47.7
6	6 250	27.6	13	9 750	53.1
7	6 750	30.3	14	10 250	67.9
8	7 250	33.2	15	10 750	94.5

由表 2 及图 3 可以看出,在 14 级荷载作用时,桩顶位移由 53.1 mm 增至 67.9 mm,曲线出现明显拐点。因此该桩极限承载力应在 13 级荷载附近,约为 10 000 kN。

根据有限元计算结果,整理各级荷载作用下桩侧摩阻力-埋深($q-h$)曲线见图 4。

对图 4 进行分析可以得出以下结论:

(1) 桩顶荷载较小时,桩上部摩阻力近似与埋深成线性关系;当荷载增至一定值时桩侧摩阻力不再增加,曲线出现“平台”。其原因是桩-土相对位移在该处降为零,仅有相对运动的趋势,发生静摩擦,这体现了桩-土相对位移与桩侧向有效压应力相互制约的关系;

(2) 当荷载达到桩基承载力极限状态时,“平台”几近消失,桩侧极限摩阻力与埋深近似成线性关系;

(3) 各级荷载作用下, $q-h$ 图直线段斜率在 4 左右,变化不大,桩顶荷载越大,直线的斜率相对较大。

令:

$$\chi=\frac{q}{K\gamma_ch}\tag{1}$$

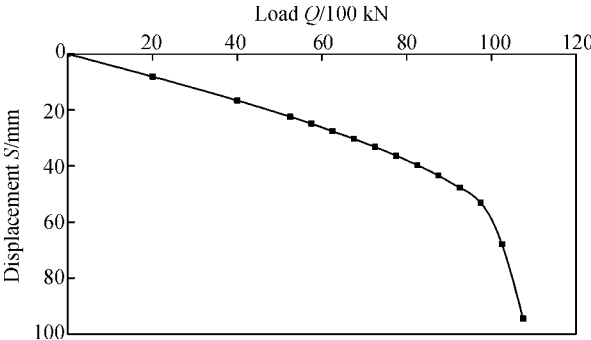


图 3 Ⅱ₂₁桩 Q-S 曲线

Fig. 3 Q-S curve of pileⅡ₂₁

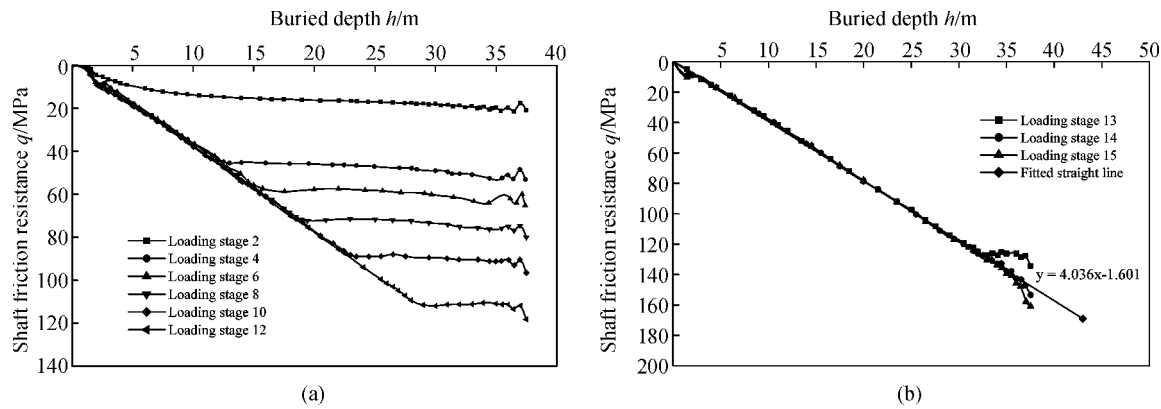


图 4 各级荷载作用下 $q-h$ 图

Fig. 4 $q-h$ curves at each loading stage

式中: χ 为无量纲系数, q 为桩侧摩阻力 (kPa), h 为埋深 (m), K 为土压力系数, γ_s 为桩周土重度 (kN/m³).

绘制 13—15 级荷载作用下系数 χ 曲线如图 5.

由图 5 可以看出, χ 值在桩承载力达到极限状态时基本保持不变.

3 桩侧极限摩阻力确定

通过有限元分析得知各情况下桩侧摩阻力分布规律相似, 表 3 列出了各种情况下的 χ 值.

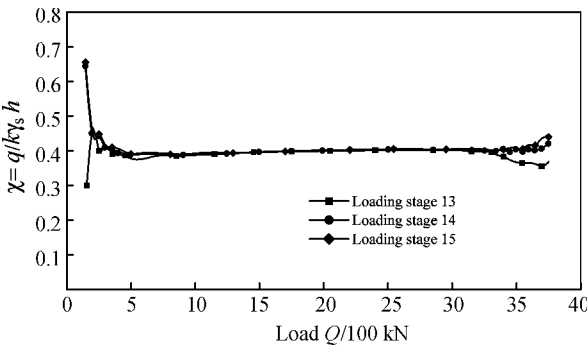


图 5 13-15 级荷载作用下 χ 曲线

Fig. 5 χ curves at loading stages 13-15

表 3 各情况下 χ 值

Tab. 3 Values of χ under different conditions

φ		30°				38°			
μ		0.5	0.6	0.7	Average	0.5	0.6	0.7	Average
$L=40\text{ m}$	$D=0.8\text{ m}$	0.314	0.415	0.508	0.412	0.411	0.533	0.645	0.530
	$D=1.0\text{ m}$	0.307	0.393	0.489	0.396	0.406	0.497	0.609	0.504
$L=80\text{ m}$	$D=1.0\text{ m}$	0.311	0.396	0.491	0.399	0.424	0.499	0.613	0.512
	$D=1.5\text{ m}$	0.291	0.368	0.455	0.371	0.395	0.468	0.569	0.477

注: 表中 L 为桩长, D 为桩径, φ 为桩周土内摩擦角, μ 为桩-土摩擦系数.

对表中数据进行分析可以得出结论:

(1) χ 值与桩几何参数有关, 但桩长影响相对较小, 因此可不计入桩长的影响; 桩径则对 χ 值的影响较大, 桩径越小 χ 值越大, 桩径越大 χ 值越小;

(2) 桩-土界面条件对 χ 值有较大影响, 界面条件越优即 μ 值越大, 相应的 χ 值越大; μ 值越小, χ 值则越小. 但对单桩尤其是深长钻孔灌注单桩来说, 桩-土接触情况复杂, 界面条件优越与否难以用单个 μ 值来定量表达, 因此可对 χ 值取平均值;

(3) 桩周土力学性质对极限侧摩阻力影响最大, 几乎起着决定作用: φ 值越大, χ 值越大; φ 值越小, χ 值则越小.

由表 3 数值统计归纳得:

$$\chi = \left(\frac{0.8}{D}\right)^{\frac{1}{3}} \tan \frac{3}{4} \varphi \tag{2}$$

式中: D 为桩径(m).

由式(1)、式(2)可得砂性土层中桩侧极限摩阻力

$$q_u=K\chi\gamma_s h=K\gamma_s h\left(\frac{0.8}{D}\right)^{\frac{1}{3}}\tan\frac{3}{4}\varphi$$

(3)

式中: q_u 为桩侧极限摩阻力(kPa), φ 为桩周土内摩擦角($^{\circ}$),其余参数意义见前文.

式(3)不仅考虑了桩周土力学性质、桩侧向有效压应力对侧摩阻力的影响,而且在推导过程中综合考虑了桩-土界面条件的作用及桩侧摩阻力的尺寸效应等因素影响.

4 结果分析

根据黄河公铁两用桥北岸 GN137-3 号试桩(混凝土标号为 C30,桩长 75 m,桩径 1.5 m,实测混凝土弹性模量 3.065×10^4 MPa)静载荷试验实测极限侧摩阻力值,对公式(3)的计算结果进行对比验证.试验量测结果及公式(3)的计算结果见表 4.

表 4 北岸 GN137-3 试桩桩侧极限摩阻力

Tab. 4 Limit shaft friction resistance of testing pile GN137-3 on the north bank

Soil stratum	Elevation/m	Limit shaft friction resistance/kPa		(Calculated value-measured value)/ Calculated value /%
		Calculated value	Measured value	
Silt	82.80—81.84	2.2	25.6	−91.4
Silty clay	81.84—81.04	2.7	51.5	−94.7
Silt	81.04—79.84	7.7	45.2	−83.0
Silty sand	79.84—74.84	27.6	24.6	12.2
Silty clay	74.84—71.44	40.7	45.8	−11.1
Silty sand	71.44—66.34	44.8	42.9	4.5
Fine sand	66.34—64.34	45.7	42.7	7.0
Medium sand	64.34—55.34	43.0	42	2.3
Medium sand	55.34—50.34	48.1	46.7	3.0
Fine sand	50.34—46.34	73.9	72.5	2.0
Medium sand	46.34—39.74	80.0	77.4	3.3
Medium sand	39.74—34.84	90.6	88.7	2.1
Fine sand	34.84—32.34	43.1	41	5.2
Medium sand	32.34—28.34	86.5	83.1	4.1
Medium sand	28.34—25.34	73.8	70.4	4.8
Silty clay	25.34—23.84	65.9	63.9	3.1
Silty sand	23.84—21.34	42.8	27.3	56.9
Silty clay	21.34—12.34	47.9	53.7	−10.8
Silty sand	12.34—7.80	59.3	55.7	6.5

从表 4 中可以看出,除表层土计算结果与实测值偏离较大外,大部分土层计算结果与实测值基本吻合.由于式(3)是依据砂性土的特性建模分析计算得出的结果,所以,对于表层粉土和粘性土,自然误差较大.

5 结 语

通过采用有限元软件 ABAQUS 对黄河中下游冲积平原均质砂性土层中不同参数的多个深长桩进行建模分析,可得以下结论:

- (1) 桩顶荷载与桩侧摩阻力近似呈线性关系,斜率随荷载的改变而变化不大.在荷载较小时曲线末端会出现“平台”,随着荷载的不断增大,此“平台”逐渐消失;
- (2) 桩长、桩径、桩-土界面条件、桩周土的力学性质等对桩侧极限摩阻力都有影响,其中桩长影响

较小,桩径影响较大,桩-土界面条件越优影响越大,桩周土的力学性质影响最大;

(3) 所得砂性土层中桩侧极限摩阻力的计算公式与工程试桩静载荷试验实测极限侧摩阻力值对比表明,两者吻合较好;

参考文献 References

- [1] 徐至钧. 建筑桩基设计与计算[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
XU Zhi-jun. Design and calculation of pile foundation for buildings[M]. Beijing:China Machine Press, 2010.
- [2] 孟续峰. 论通过静载荷试验测定桩侧摩阻力及桩端阻力[J]. 山西建筑,2009,35(36):151-152.
MENG Xu-feng. The discussion on shaft resistance and tip resistance of pile assayed through static load test[J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(36):151-152.
- [3] 周红波,陈竹昌. 上海地区钻孔灌注桩桩侧摩阻力性状研究[J]. 建筑结构,2006,36(11):51-53.
ZHOU Hong-bo, CHEN Zhu-chang. Study on behavior of side resistance of bored pile in Shanghai[J]. Building Structure, 2006, 36(11):51-53.
- [4] 赖天文,杨有海. 超长桩荷载传递机理及有效桩长研究[J]. 兰州交通大学学报:自然科学版,2007,26(6):16-19.
LAI Tian-wen, YANG You-hai. Study on load transfer mechanism and effective length of super long pile[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University: Natural Sciences Edition, 2007, 26(6): 16-19.
- [5] 阳吉宝. 超长桩荷载传递机理研究[J]. 岩土工程技术,1997(1): 25-29.
YANG Ji-bao. Study on the load transfer mechanism of super-long pile[J]. Geotechnical Engineering Technique, 1997 (1):25-29.
- [6] 蒋建平. 大直径超长桩的承载潜力问题探讨[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2006,38(3):333-338.
JIANG Jian-ping. Study on the potential bearing capacity of long diameter and super-long piles[J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. : Natural Science Edition, 2006, 38(3):333-338.
- [7] MOHAMED A, GARY M N, SHERIF E, et al. Mobilized side and tip resistances of piles in clay[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(7-8):858-866.
- [8] O'Neill, MICHAEL W. Side resistance in piles and drilled shafts[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(1):3-16.
- [9] 赵明华,贺 炜,邹新军. 计入桩侧摩阻力非线性特性的基桩承载力分析方法[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2007, 34(4):5-9.
ZHAO Ming-hua, HE Wei, ZOU Xin-jun. Calculation method for the bearing capacity of pile by considering the nonlinear character of side resistance[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition, 2007, 34(4):5-9.
- [10] 洪毓康,陈强华. 钻孔灌注桩的荷载传递性能[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(3): 22-35.
HONG Yu-kang, CHEN Qiang-hua. Load transfer behaviour of bored piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 7(3): 22-35.
- [11] 赵明华,徐学燕. 基础工程[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
ZHAO Ming-hua, XU Xue-yan. Foundation engineering [M]. Beijing: China Higher Education Press, 2003.
- [12] 许宏发,吴华杰,郭少平,等. 桩土接触面单元参数分析[J]. 探矿工程, 2002(5):10-12.
XU Hong-fa, WU Hua-jie, GUO Shao-ping, et al. Study on the parameters of pile soil contact surface element [J]. Exploration Engineering, 2002(5):10-12.
- [13] 钱德玲,张文彦,曹光暄,等. 基于 GTS 对单桩静载试验的有限元模拟分析[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2009, 32(2):234-237.
QIAN De-ling, ZHANG Wen-yan, CAO Guang-xuan, et al. Finite element simulation and analysis of static load testing of single piles based on GTS [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2009, 32(2):234-237.
- [14] 陈 晶,高 峰,沈晓明. 基于 ABAQUS 的桩侧摩阻力仿真分析[J]. 长春工业大学学报:自然科学版, 2006, 27(1):27-29.
CHEN Jing, GAO Feng, SHEN Xiao-ming. Simulation for pile friction based on ABAQUS[J]. Journal of Chang-chun University of Technology: Natural Science Edition, 2006, 27(1):27-29.

(下转第 575 页)

Energy efficiency of rural dwellings in Ningxia Hui Autonomous Region

ZHANG Qun^{1,2}, LIANG Rui^{1,3}, LIU Jia-ping^{1,2}

- (1. School of Architecture, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;
2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xian 710055, China;
3. Department of Environment Design, Xi'an Academy of Fine Art, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to improve the thermal environment and reach the energy efficiency goal of rural house in Ningxia Hui Autonomous Region, the paper investigates a typical traditional vernacular, analyzes the index of heat loss of building envelop and discovers the main weak part in the building affecting on the energy consumption. Combining with the local conditions of climate and economy, this paper put forward the integrating designing project, including the function layout, room combination, solar energy utilization and construction of building envelop. A new project for improving the indoor thermal comfort and saving energy was given in this paper. The index of heating loss of two rural buildings are calculated in order to verify the effectiveness of the new project. At the same time, it is bproved that the improvement of the thermal environment and 65% energy efficiency goal can meet with by appropriate architectural designs.

Key words: *Ningxia Hui autonomous region; rural vernacular; energy efficiency in building; indoor thermal environment*

Biography: ZHANG Qun, Associate Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-29-82202943, E-mail: zhangqun029@126.com

(上接第 512 页)

Study on the limit shaft friction resistance of long piles in the middle and lower reaches of the Huanghe River alluvial plain

DONG San-sheng, ZHAO Jun-hai, LEI Zi-xue

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to investigate the limit shaft friction resistance of long piles in the middle and lower reaches of the Huanghe River alluvial plain of sandy soil, finite element software ABAQUS was adopted to simulate long piles with different parameters according to the geological characteristics in the region. The simulated results indicate that the load at the top of a pile is approximately in direct proportion to the shaft friction resistance of the pile; the length and diameter of the pile, the interface condition between pile shaft and surrounding soil, and the mechanical properties of surrounding soil may affect the shaft resistance of the pile to different extents. On the basis of simulation results, formulas for the calculation of limit shaft friction resistances of piles in sandy soil strata were derived and verified with a real project. Comparison of the computed results with those from static loading test showed good agreement between the two, indicating the validity of the finite element simulation method, selection of parameters and conclusions. The study is of reference value in the optimum design of long piles in the region.

Key words: *long pile; limit shaft friction resistance; sandy soil; finite element*

Biography: DONG San-sheng, Lecturer, Ph. D., Xi'an 710064, P. R. China, Tel: 0086-13720776575, E-mail: dongsansheng9225@163.com