

文章编号: 1000-7598-(2008) 02-541-04

桩端阻力与桩侧阻力相互作用研究

张建新^{1,2}, 吴东云¹

(1. 天津城市建设学院 土木工程系, 天津 300384; 2. 天津市软土特性与工程环境重点实验室 天津 300384)

摘 要: 以嵌岩桩为例, 通过进行室内模型试验分析, 研究了桩端阻力与桩侧阻力的相互作用。结果表明, 桩端岩层对桩侧阻力有较大影响, 表现为随着桩端岩石强度的越高, 桩侧阻力有增大现象, 但这种桩侧阻力的增强效应并不发生在整个桩侧, 只集中在桩端附近, 反过来, 较好的桩侧岩层又可使桩端阻力增大。利用此种相互作用关系可提高桩的承载力, 优化桩基设计。

关 键 词: 嵌岩桩; 桩端阻力; 桩侧阻力; 相互作用

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Research on interaction between resistance at pile and lateral resistance of pile

ZHANG Jian-xin^{1,2}, WU Dong-yun¹

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin 300384 China)

Abstract: The interaction between the resistance at pile end and the resistance of pile is researched through the indoor model test on the rock-socketed pile. The result shows that the rock stratum at the pile end influences the lateral resistance of pile; as the increase of strength of rock at the end, the lateral resistance of pile will increase; but the enhancement effect doesn't occur at the whole side of pile, only near the end of pile. Inversely a good lateral rock stratum also increases the resistance at pile end. The load-bearing capability of pile will be improved by using the interaction relationship so as to optimize the design method of pile.

Key words: rock-socketed pile; resistance at pile end; lateral resistance of pile; interaction

1 引 言

现行桩基规范^[1]认为, 桩侧阻力与桩端阻力互不影响的, 桩的承载力是端阻与侧阻的线性叠加, 因此, 在计算桩侧阻力时认为侧阻只与桩的设计尺寸、桩周岩土条件及成桩方式有关, 在这些因素确定的情况下桩侧单位面积上的阻力就是一个常数。然而, 近年来的研究^[2-4]表明, 桩在外荷载作用下桩侧、桩端共同承力, 二者在桩的总阻力中所占比例不相同, 发挥也不同步, 端阻与侧阻间存在着相互影响和相互制约的关系, 在设计荷载作用下由于桩的位移较小, 此种相互作用表现得不太明显, 因而研究者不太重视, 但当桩身位移较大或桩的阻抗因某种因素而强化时这种相互作用就显得十分突出。

本文以嵌岩桩为例, 基于多组室内模型试验,

对桩侧阻力与桩端阻力间的相互作用进行了详细研究。相互作用的存在对传统的桩基承载力计算模式有了新的认识, 并可能由此萌发出桩基设计优化的新思路, 利用此种相互作用关系对提高桩的承载力, 节约工程投资具有十分重要的现实意义。

2 桩端条件对桩侧阻力影响试验研究

2.1 模型试验情况

模型试验要求原型与模型之间存在某种相似关系^[5,6], 根据轴向受力桩微分方程, 定义相似常数, 利用相似关系, 本文确定几何比例系数为 25, 应力比例系数为 20~30。

模拟试验的岩石是砂子、碳酸钙和石膏的混合物, 水中加 2 % 的动物胶作为缓凝剂。各材料间的配比不同, 其强度参数不同, 模拟不同强度岩石情

况。本次先做了试块为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 强度试验, 得出单轴抗压强度, 以其作为单目标控制参数, 按应力比要求初步确定配比, 然后确定该配比下的弹性模量和泊松比及其他力学参数, 逐渐调整配比, 使这些参数亦尽量满足相似比要求。模型桩采用直径为 3.5 cm 、有效长度为 14 cm 的有机玻璃棒, 侧表面粗糙程度相同, 主要要求模型桩的弹性模量与原型混凝土桩相似。

根据试验内容和条件, 在模型桩不同断面位置粘贴电阻应变片, 用于量测该断面纵、横向的应变值, 进而求得各断面处桩的应力和应变。在桩底不同位置埋置土压力盒, 量测不同试验条件下桩底及岩体内应力的分布情况。本文共做了 3 组平行试验, 分别为实底桩 (A-1~A-9), 虚底桩 (B-10~B-12), 3 组试验结果基本一致, 本文以其中一组为例加以讨论。试验模型见图 1, 试验条件及结果见表 1。

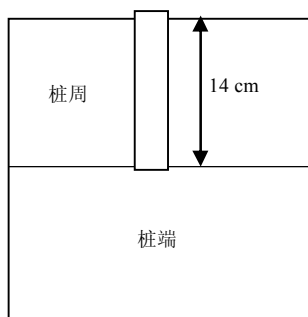


图 1 模型试验条件图
Fig.1 Model test conditions

表 1 模型试验条件及结果
Table 1 Conditions and results of model tests

桩号	桩侧围 岩强度 / kPa	桩端岩 石强度 / kPa	桩端 条件	极限承 载力 / kN	极限侧 阻力 / kPa	极限端 阻力 / kPa
A-4	154	154	实底	2.25	100	735
A-5	154	247	实底	3.25	149	985
A-6	154	312	实底	3.50	165	1 040
B-10	154		虚底	1.50	93	0

2.2 试验结果分析

由试验可知, 随着桩端岩石强度的提高, 实底桩桩端阻力与总阻力的比值降低, 即由 31.4% 降为 29.1% , 又降为 28.5% , 而桩的侧阻力与总阻力的比值则随着岩石强度的增加而增加, 且桩侧阻力承担了大部分外荷载, 这与原位试验的结果基本一致。另外, 还存在虚底时的桩侧阻力小于实底时的桩侧阻力的现象。由表 1 中虚底桩 B-10 与实底桩 A-4 的对比可知, 在相同围岩强度条件下, 当桩端由虚

底变为实底后, 极限承载力、桩侧阻力和桩端阻力都有不同程地提高, 极限承载力增长了 50% , 桩侧阻力增长了 7.5% , 桩的承载特性也有了很大变化, B-10 桩表现为纯摩擦桩, 而 A-4 桩表现为端承摩擦桩。比较试桩 A-5 与 A-4 相比, 桩端岩石强度提高后, 极限承载力增大了 45% , 极限平均侧阻力增大了 49% , 而端阻增大了 34% 。试桩 A-6 与 A-5 相比, 各阻力又有进一步的提高。从模型试验结果对比分析得知, 桩端岩层对桩侧阻力有较大影响, 表现为桩端岩石强度越高, 侧阻增长越大, 这种现象称之为桩侧阻力的增强效应。从试验中还可以看到, 固然桩侧阻力随桩端岩石强度增加而增大, 但侧阻的增加, 大多体现在桩端断面以上一定范围内, 桩上半段侧阻变化并不明显。图 2 为各模型桩达到极限荷载时的桩侧阻力随深度的变化曲线, 表明桩端岩石强度对桩侧阻力的增强效应并不发生在整个桩侧, 而只集中在桩端附近, 该试验均表现为在应变测试的最下一个量测段内深度范围为桩端断面以上 $1.0d$ ($10.5 \sim 14\text{ cm}$)。图 3 为 A-6 桩桩侧阻力沿深度的分布曲线, 从图中可见桩侧阻力沿桩身的分布呈“R”型, 荷载增加到 3.0 kN 后, 桩端岩石强度逐步发挥作用, 桩的下段桩侧阻力值不断增大。

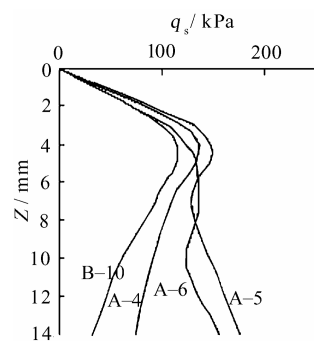


图 2 桩侧阻力-深度变化关系
Fig.2 Curves of resistance on the side surface of pile vs. depth

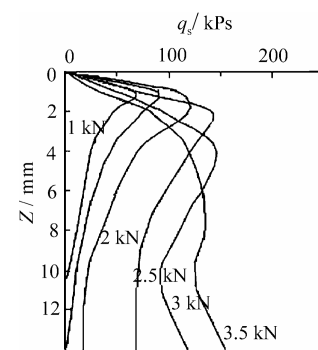


图 3 A-6 桩桩侧阻力分布
Fig.3 Curves of resistance on the side surface of A-6 pile vs. depth

2.3 桩侧阻力增强效应机理分析

桩端附近桩侧阻力大小与桩端岩土层强度有关, 并随桩端持力层强度增大而有所提高的现象, 在国内外刊物上很少见到系统地阐述, 而对增强效应的讨论大多从桩基础破坏模式上加以解释。梅耶霍夫 (Meyerhof) 在求解深基础的极限承载力时采用了图 4 的破坏模式, 诸多文献^[7,8]也套用该模式探讨了桩侧阻力增强效应机制, 认为在外荷载作用下桩身向下运动使桩身土层产生压缩, 桩的端阻得以发挥, 当压缩超过一定限度后会在地基中形成剪切滑动面, 图 4 中 I 区土体首先向下运动并通过 II 区和 III 区的土体作用于 IV 区, 桩端土层强度越高, 其剪切破坏面达到桩身侧面对桩身下部增加的附加径向应力越大, 作用的结果将引起桩端附近土体的挤密而导致桩侧阻力增加, 这种观点是基于桩基础破坏模式下的机制解释。实际上, 侧阻的增强效应在桩基没有达到破坏时已显示出来, 图 3 中, 当荷载为 3.0 kN 时桩端附近的侧阻已明显增大, 而此时尚未达到极限荷载。对于嵌岩桩, 由于桩端位移较小, 下覆岩层较土层硬得多, 大多数表现为硬性破坏, 能否形成如图 4 所示的破坏圈仍值得探讨。

通过模型试验, 在 A-6 桩桩端埋设土压力盒, 结合桩身粘贴的应变片测试结果, 量测得到桩端附近应力的变化情况。结果表明, 桩在荷载较大时, 桩端附近 (大约为 1~2 d) 应力集中现象明显, 图 5 为 A-6 桩在桩顶荷载为 3.0 kN 时桩端附近应力情况示意图 (由于测点数有限, 图形做了适当的修改)。分析认为, 竖向荷载传至桩端后, 桩底基岩受到压缩, 在桩端面以下一定范围内形成压缩区, 随着荷载的加大, 桩端岩层受力越来越大, 而桩端变形较小, 当桩端岩层较桩侧岩层强度高得多时, 应力逐渐集中于桩端并且对桩端平面上桩侧岩层有较大影响, 产生应力成拱作用, 这样对该段桩身增加了附加的径向应力, 而在这一影响范围内又存在上覆岩层压力的约束, 因而造成了成拱作用影响区桩身侧壁上的水平应力增加, 极限桩侧阻力得以增强。而且, 桩端岩层强度越大, 产生的应力集中越明显, 其向上影响范围也越大, 甚至可扩延到桩端以上 2d 范围。

以上对桩侧阻力增强效应机制的解释实际上是基于库仑 (Coulomb) 强度理论:

$$\tau = c + \sigma_h \tan \varphi \quad (1)$$

式中: τ 为桩-岩侧界面的极限抗剪强度, 即为桩侧极限阻力; c 、 φ 为桩侧岩石或桩-岩界面的凝聚力

和内摩擦角; σ_h 为桩端岩层对应力成拱影响区桩身侧面应力强化而引起的水平应力与上覆岩土层在该段引起的侧向应力之和, 显然该侧向应力越大, 桩侧阻力越大。

桩侧极限阻力显然随应力成拱区的水平侧向应力 σ_h 的增加而增大。桩端岩石越硬, 成拱区附加的径向应力越大, 则桩侧极限阻力有显著增加。

图 5 的桩端应力分布只是基于等径的灌注嵌岩桩得出的试验结果, 而对于有扩底情况的嵌岩桩桩端应力情况本文没有研究。

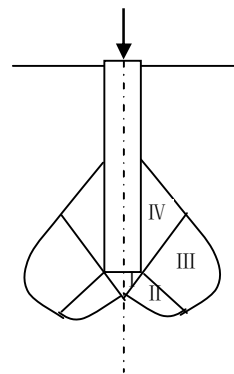


图4 Meyerhof 桩基础破坏模式
Fig.4 Meyerhof destroy model of pile

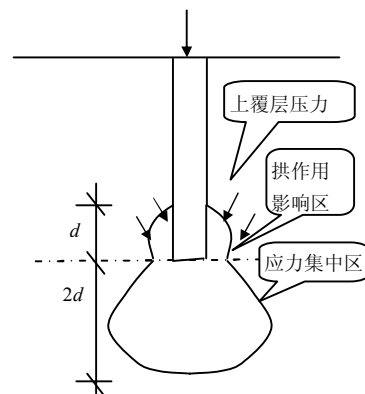


图5 A-6 桩桩端应力示意图
Fig.5 Stress at the end of A-6 pile

3 桩侧条件对桩端阻力的影响

为说明桩侧条件对桩端阻力的影响, 又设计了另一组试验, 共 3 根桩, 做成桩周围岩强度均大于桩底岩石强度的桩-岩体系, 以其中之一的 A-10 桩为例, 桩周围岩强度 σ_{cr} 为 254 kPa, 桩底岩石强度 σ_{cb} 为 154 kPa, 桩侧岩石较桩底岩石强度要高。在最大加荷为 3.5 kN 时, 测得桩侧极限平均阻力为 176 kPa, 极限端阻为 825 kPa, 对比前述 A-4 桩, 桩侧围岩强度的增加, 桩侧阻力、桩端阻力都有相应的增加, 增加率分别为 76 % 和 12.2 %, 说明桩侧

阻力增加幅度较大,桩端阻力也有增强,但效果不如桩端条件对桩侧阻力的影响明显。对该现象笔者认为,桩侧围岩的力学性质越好,对桩的约束作用越强,桩侧抗剪强度和水平应力都将增加,当桩向下运动时,将会带动桩身附近一个更宽的带状受力区向下运动,由此会在桩端断面上产生较大的附加应力,导致桩端下基岩将受到更大的垂直应力,桩端极限承载力将会增加。因此侧阻的增大,有助于端阻的强化,只是不如桩端硬岩对桩侧阻力增强效应明显。

4 结 论

(1) 桩端阻力与桩侧阻力是相互作用的。表现为:桩端岩层对桩侧阻力有较大影响,随着桩端岩石强度越高,桩侧阻力有增大现象,但这种桩侧阻力的增强效应并不发生在整个桩侧,而只集中在桩端附近。反过来,较好的桩侧岩层又可使桩端阻力增大。

(2) 由于岩层风化程度的分带性,上部岩层较软而下部基岩较硬,可充分利用硬岩对桩侧阻力的增强效应,改变规范中侧阻按“上大下小”分布的计算模式,计及桩侧阻力增强效应,桩的承载力就能得到很大提高。推广到软土地基,我国沿海软土地区一般浅部都存在一“硬壳层”,可充分利用硬层对侧阻的增强效应,没必要桩端进入更深的岩土层中增加施工难度。

(3) 可考虑采用桩端灌浆的方法,人为地提高桩端附近岩层强度,强化这种效果,以达到桩端附近桩侧阻力、桩端阻力同时加强的双重目的。

(4) 本文虽从试验结果得出了一些结论,但增强效应理论的量化表达目前还存在一定难度。

参 考 文 献

- [1] 中国建筑科学研究院. JGJ94—94 建筑科技规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [2] 张建新. 嵌岩桩承载性状及其优化设计方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京校区), 2003.
- [3] 吴兴序. 桩的端阻与侧阻相互作用及工程应价值[J]. 西南交通大学学报. 1997, 32(3): 313—319.
WU Xing-xu. Interactions between friction and tip resistance of piles and their significance in construction[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 1997, 32 (3): 313—319.
- [4] 刘利民, 陈竹昌. 桩的侧阻力强化效应[J]. 特种结构. 1998, (4): 27—29.
LIU Li-min, CHEN Zhu-chang. The Pile Side resistance strengthen effect[J]. **Special Structures**, 1984, (4): 27—29.
- [5] 林韵梅. 实验岩石力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [6] 李鸿昌. 矿山压力的相似模拟实验[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1988.
- [7] 姬晓辉, 吕福庆. 钻孔灌注嵌岩桩的变形与破坏[J]. 水利水电科技进展. 1996, 16(6): 16—19.
JI Xiao-hui, LÜ Fu-qing. Study of deformation and failure of diameter rock-socketed pile[J]. **Advances in Science and Technology of Water Resources** 1996, 16(6): 16—19.
- [8] 席宁中. 试论桩端土层强度对桩侧阻力的影响[J]. 建筑科学, 2000, 16(6): 51—60.
XI Ning-zhong. A discussion on influence of soil strength ssunderneath a pile on the pile shaft resistance[J]. **Buiilding Science**. 2000, 16(6): 51—60.
- JIANG Xin-liang, ZHAO Zhi-min. Application of image method in calculating tunneling-induced soil displacement[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2005, 27(6): 801—803.
- [1] 杨冠天, 项彦勇, 张峰. 基于间隙参数模型的盾构隧道周围土体位移分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 602—1606.
YANG Guan-tian, XIANG Yan-yong, ZHANG Feng. Analysis of ground movements due to shield tunneling by using a gap-parameter model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(10): 1 602—1 606.
- [2] 张冬梅, 黄宏伟. 地铁盾构推进引起周围土体附加应力的分析[J]. 地下空间, 1999, 19(5): 379—382.
ZHANG Dong-mei, HUANG Hong-wei. Analysis of superimposed stress due to propulsion of underground with shield[J]. **Underground Space**, 1999, 19(5): 379—382.
- [3] 胡昕, 黄宏伟. 相邻平行顶管推进引起附加荷载的力学分析[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 75—77.
HU Xin, HUANG Hong-wei. Mechanical analysis of superimposed load introduced by propulsion of adjacent parallel pipe[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(1): 75—77.
- [4] 黄宏伟, 胡昕. 顶管施工力学效应的数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 400—406.
HUANG Hong-wei, HU Xin. 3D numerical analysis of construction mechanics effect of pipe-jacking[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(3): 400—406.
- [5] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi infinite solid[J]. **Physics**, 1936, 7(5): 195—201.
- [6] 宋永辉. 上海地区粉土中EPB盾构施工扰动及不同土性改良方法的试验研究[硕士学位论文D]. 上海: 同济大学, 2003.
侯学渊, 钱达仁, 杨林德. 软土工程施工新技术[M]. 安徽: 安徽科学技术出版社, 1999.

上接第 534 页