

灰岩地区超大吨位荷载下嵌岩桩承载力特性分析

程秉坤, 傅根根

(广西建筑工程质量检测中心, 南宁 530004)

摘 要: 基于南宁市灰岩地区进行的超大吨位桩基静载试验, 对桩身轴力和变形进行了测量, 并利用有限元软件分析了桩长、桩径、长径比 3 个因素对灰岩地区嵌岩桩承载特性的影响。试验结果表明: 嵌岩深度约为 10 m 的试验桩最大试验荷载在 31 000 ~ 36 000 kN, 能够达到设计承载力要求, 而嵌岩深度约为 5 m 的试验桩承载力均达不到设计承载力要求; 嵌岩深度对灰岩地区嵌岩桩的承载特性影响最大, 嵌岩段越长, 桩的承载力越高。

关键词: 嵌岩桩; 承载特性; 超大吨位桩; 灰岩地区; 静载试验

中图分类号: TU473.11 **文献标志码:** A

随着高层和超高层建筑的增多, 建筑桩基础的承载力要求也越来越高, 为减小建筑沉降, 提高桩基承载力, 嵌岩桩被广泛应用于各大工程中^[1]。嵌岩桩的桩身全部或部分嵌入岩层中, 可充分利用岩层的承载力和嵌岩部分的嵌固力提高桩基的水平 and 竖向承载力^[2], 还能减小建筑沉降并提高抗震性能。目前对嵌岩桩承载力的研究较多, 刘会球^[3]针对岩溶区的嵌岩桩进行数值模拟, 分析溶洞直径、顶板厚度及嵌岩深度对嵌岩桩承载力的影响规律; 钱明等^[4]提出钻孔灌注桩的承载力的桩侧/桩端阻力与荷载成正比, 在一定深度范围内与地层无关, 地层仅仅是侧摩阻力大小的主控因素; 刘兴远等^[5]经研究嵌岩段参数得到岩石强度、嵌岩深度与嵌岩段极限承载力成线性关系; 张建新等^[6]、龚成中等^[7]分别用有限元数值模拟的方法和自平衡试桩法对嵌岩桩尺寸效应对桩体的桩端阻力和桩侧阻力进行了研究。目前对灰岩地区桩承载力特性的研究成果较少, 穆锐等^[8]对强风化泥质灰岩桩的承载性能进行试验测试, 分析了桩身轴力、桩身侧摩阻力和桩端阻力随荷载的变化规律以及其对极限抗压承载力的影响。

本文结合南宁市恒大国际中心工程, 基于大量的现场静载荷试验数据分析得到大吨位竖向荷载

下嵌岩桩的承载特性及受力特征, 并利用有限元数值模拟方法分析嵌岩桩的桩长、桩径、长径比等因素对桩体承载特性的影响, 为灰岩地区嵌岩桩的设计和施工提供参考。

1 工程概况

南宁市恒大国际中心, 位于歌海路歌韵路交叉口, 场地原为低山丘陵, 地形较低, 上部结构为框架-核心筒结构(主塔高约 300 m), 根据钻探以及场地附近工程地质资料分析, 该地区上覆地层为第四系邕江河流冲洪积层, 上部为硬塑状含砾粘土, 下部为中风化灰岩, 桩端持力层为中风化灰岩。根据现场地质勘察报告, 具体地质及材料参数见表 1。

2 基桩静载荷试验分析

2.1 试验方法

采用国际上公认的最直观、最可靠的方法——

| 表 1 地质及材料参数 | | | | | | |
|--|--------|---------|---------|----------|------|--------------------------|
| Table 1 Geological and material parameters | | | | | | |
| 材料名称 | 土层厚度/m | 摩擦角/(°) | 黏聚力/kPa | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 重度/(kN·m ⁻³) |
| 硬塑状含砾粘土 | 2 | 8 | 22 | 0.017 | 0.39 | 18 |
| 中风化灰岩 | 38 | 33 | 230 | 21.7 | 0.14 | 20.8 |
| C55 混凝土 | - | - | - | 35.5 | 0.2 | 25 |

单桩竖向抗压静载荷试验法,在桩身埋设钢弦式应变计,获取桩侧各土层的分层抗压侧阻力和桩端支撑力。根据设计要求,对6根试验桩进行了单桩竖向抗压静载荷试验,试验桩为桩径1 m的嵌岩灌注桩,桩长5.1~37.8 m,嵌岩深度3.5~11.5 m,桩身混凝土强度等级为C55,预估承载力极限值在20 000~40 000 kN。本次试验采用特定研发的50 000 kN堆载平台,如图1所示。图2为钢弦式应变计安装现场,表2为6根试验桩的基本参数。



图1 基桩静载荷试验
Fig.1 Pile static load test



图2 基桩内力测试传感器安装
Fig.2 Sensor installation of pile internal force test

表2 试验桩参数

Table 2 Parameter of the testing piles

| 序号 | 试验桩编号 | 桩长/m | 嵌岩深度/m | 最大堆载量/kN |
|----|--------|------|--------|----------|
| 1 | SZH3-1 | 16.9 | 10.5 | 39 721 |
| 2 | SZH3-2 | 21.8 | 10.3 | 43 196 |
| 3 | SZH3-3 | 37.8 | 11.5 | 37 637 |
| 4 | SZH3-4 | 21.4 | 5.2 | 43 196 |
| 5 | SZH3-5 | 12.3 | 5.2 | 43 196 |
| 6 | SZH3-6 | 5.1 | 3.5 | 43 196 |

2.2 嵌岩桩轴力分析

试验桩轴力变化分为两种情况:均匀逐级递减型和突变型。试验桩 SZH3-1、SZH3-2、SZH3-3 的嵌岩深度均在10 m以上,属于均匀逐级递减型。如图3所示,嵌岩深度10 m以上的试验桩 SZH3-3

桩身轴力呈线性递减分布,变化较均匀。SZH3-4、SZH3-5、SZH3-6 的嵌岩深度均约5 m,属于突变型。如图4所示,在荷载较小的情况下,荷载的增加对试验桩 SZH3-4 桩身轴力的影响较小,轴力对荷载的敏感性较低,当加载超过10 000 kN时,桩身轴力随荷载变化较为明显,与前一荷载等级相比有突变趋势。

2.3 灰岩地层桩承载力分析

灰岩地层下桩体承载力和沉降的变化规律,不同荷载下桩基沉降变化规律如图5~图6所示。

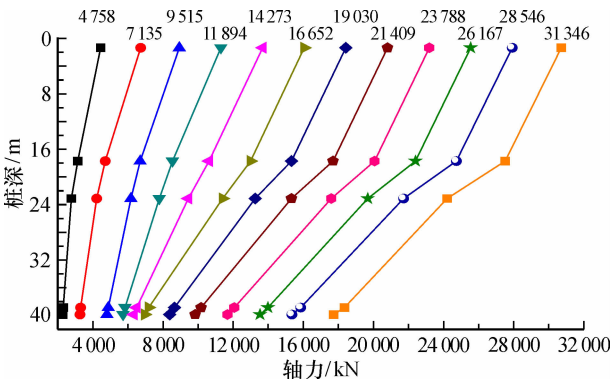


图3 SZH3-3 轴力分布图
Fig.3 Axial force distribution diagram of Pile SZH3-3

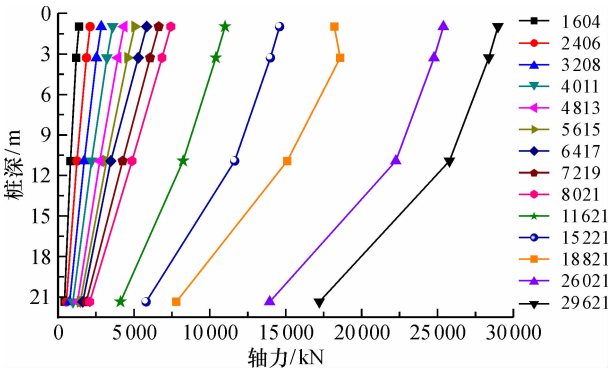


图4 SZH3-4 桩身轴力分布图
Fig.4 Axial force distribution diagram of Pile SZH3-4

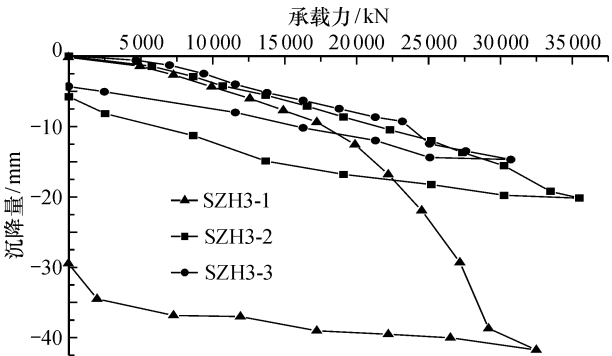


图5 试验桩 SZH3-1、SZH3-2、SZH3-3 的承载力-沉降曲线
Fig.5 Load-settlement curves of Pile SZH3-1, SZH3-2 and SZH3-3

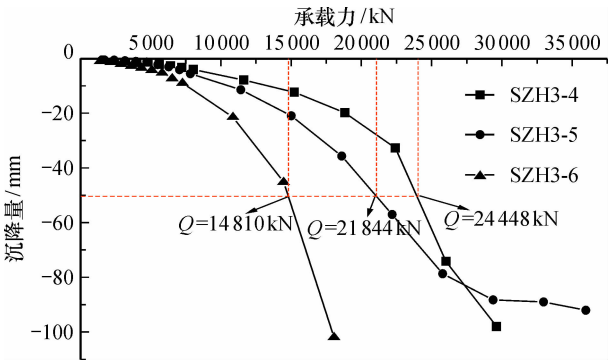


图 6 试验桩 SZH3-4、SZH3-5、SZH3-6 的承载力 - 沉降曲线

Fig. 6 Load-settlement curves of Pile SZH3-4, SZH3-5 and SZH3-6

试验桩 SZH-1、SZH-2、SZH-3 的桩长分别为 16.9、21.8、37.8 m，嵌岩深度分别为 10.5、10.3、11.5 m，最大试验荷载约为 32 000 kN，最大沉降量分别约为 40、20、15 mm，卸荷后的最终沉降量分别约为 30、6、4.5 mm，回弹量分别约为 10、14、10.5 mm，回弹率(回弹量与最大沉降量之比)分别约为 25%、70%、70%。因此，在相同荷载作用下，嵌岩深度也基本相同时，桩长越长，沉降量越小，回弹量越大，回弹率越高。

试验桩 SZH3-4、SZH3-5、SZH3-6 的桩长分别为 21.4、12.3、5.1 m，嵌岩深度分别为 5.2、5.2、3.5 m，根据《建筑基桩检测技术规范》判定基桩的极限承载力分别为 24 448、21 844、14 810 kN。可知，嵌岩深度对灰岩地区嵌岩桩的承载特性影响最大，嵌岩深度越长，桩的承载力越高。

2.4 数值模拟分析

选取 SZH3-1 号基桩进行数值模拟分析，考虑到数值模型尺寸效应的影响，为减小分析误差，使模型具有较好的可比性，设计三维模型的尺寸为长×宽×高=16 m×16 m×50 m，采用 C3D8R 单元，三维数值模拟模型、网格划分如图 7 所示，桩土间设置接触，土层简化为覆盖土层及岩层，具体材料参数见表 1。

图 8 为 SZH3-1 号基桩实测承载力与沉降量($Q-S$)曲线与数值模拟计算的 $Q-S$ 曲线对比情况。实际情况下的 $Q-S$ 曲线与计算结果非常相近，实测沉降量略小于计算值，实测结果偏安全，两者 $Q-S$ 曲线均呈抛物线状，数值模拟与实测情况有相近似的规律与结果。

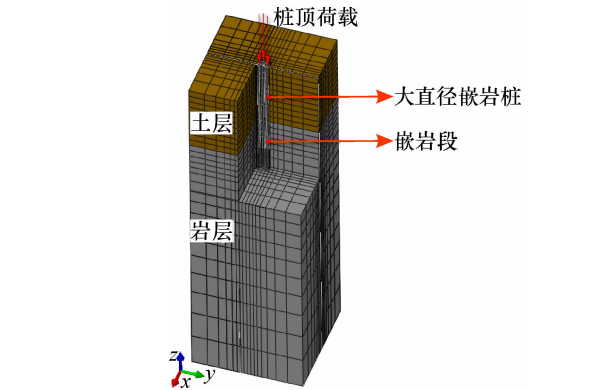


图 7 嵌岩桩三维模型

Fig. 7 3D model of rock-socketed pile

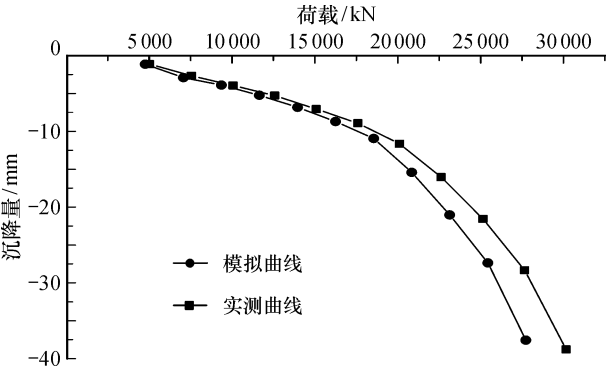


图 8 实测与计算的 $Q-S$ 曲线对比

Fig. 8 Comparison between measured and calculated $Q-S$ curves

3 承载特性影响因素分析

为研究嵌岩桩的承载特性，根据桩身荷载传递机理，设计了 5 组方案，保持桩长与嵌岩深度不变，改变桩径；保持桩径与嵌岩深度不变，改变桩径。具体模拟方案参数如表 3 所示。

| 表 3 嵌岩桩数值模拟方案 | | | | | |
|---------------|--|-----|-------|------|---|
| Table 3 | Numerical simulation scheme of rock-socketed piles | | | | m |
| 方案 | 桩长 | 桩径 | 覆盖层厚度 | 嵌岩深度 | |
| 1 | 15 | 1.0 | 5 | 10 | |
| 2 | 20 | 1.0 | 10 | 10 | |
| 3 | 25 | 1.0 | 15 | 10 | |
| 4 | 20 | 1.5 | 10 | 10 | |
| 5 | 20 | 2.0 | 10 | 10 | |

3.1 桩长对桩承载力的影响分析

同样采用 C3D8R 单元建立数值模拟模型进行计算分析，图 9 为不同桩长情况下的 $Q-S$ 曲线对比情况。当桩径均为 1.0 m、嵌岩深度均为 10 m 时，荷载条件相同的前提下，桩长越长，桩体弹性压缩量越大，桩顶沉降也越大；但在同一荷载等

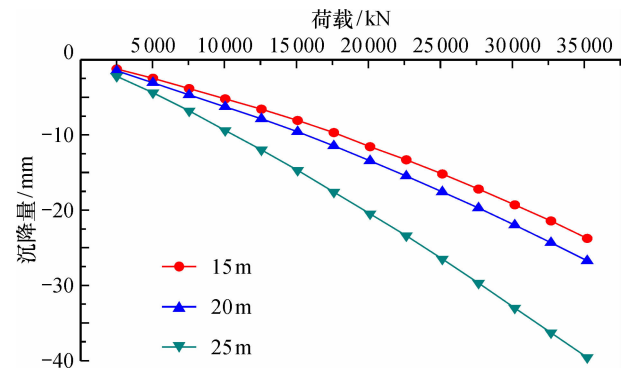


图9 不同桩长的 $Q-S$ 曲线
Fig. 9 $Q-S$ curves of different pile lengths

级下, 桩的沉降量相差并不大。在相同嵌岩深度条件下, 嵌岩位置对桩体承载力也有较大影响, 嵌岩段所处位置越深, 桩基沉降量越大, 受上覆荷载影响也越大。

3.2 桩长对侧阻力与端阻力的影响分析

桩长不同时, 桩端阻力与侧阻力也会有所不同。当桩径均为 1.0 m、嵌岩深度均为 10 m 时, 对不同桩长情况下桩端阻力与侧阻力变化情况进行研究, 当基桩达到极限承载状态时, 不同桩长时嵌岩段侧阻力、总侧阻力与桩端阻力值的变化情况如图 10 所示。

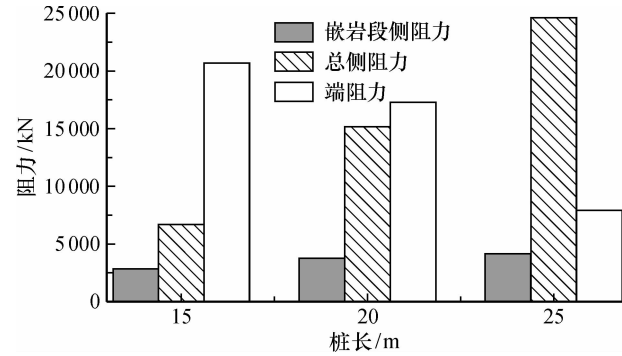


图10 不同桩长时的侧阻力与端阻力值
Fig. 10 Pile side and end resistance-load of different pile lengths

可以看出, 桩长为 15、20、25 m 时的嵌岩段侧摩阻力分别为 2 838.84、3 762.55、4 144.85 kN, 总摩阻力分别为 6 696.33、15 174.40、24 530.53 kN, 嵌岩段侧摩阻力占比分别为 42.39%、24.80% 和 16.90%, 随着非嵌岩段的长度逐渐增加, 其摩阻力也不断增大, 非嵌岩段侧摩阻力所占比例下降。

在桩长为 15 m 时, 端阻力 20 693 kN, 占总阻力值 27 389 kN 的 75.55%, 基桩承载力以端承为主; 在桩长为 20 m 时, 为摩擦端承桩, 摩阻力与

端阻力约各占一半; 在桩长为 25 m 时, 摩阻力为 32 551 kN, 占总阻力值的 75.67%, 该情况下更倾向于摩擦型桩。嵌岩深度不变(均为 10 m)时, 嵌岩段侧摩阻力值受桩长影响较大。随桩长的增加, 侧摩阻力对桩承载力的影响越来越明显, 而端阻力的影响会逐渐降低。

嵌岩桩的嵌岩段侧摩阻与持力层地质条件有关, 嵌岩段地层越好, 桩身围压越大, 侧摩阻越易发挥, 围压越大应硬化效应越明显。当然, 桩长不同时桩侧摩阻力也会有所不同, 对不同桩长情况下桩侧摩阻力的分布情况进行研究, 图 11 为不同桩长时的桩侧摩阻力沿深度变化情况, 可以看出在临近岩层与土层接触面位置桩身侧摩力最大, 最大位置位于接触面以下 1 m 的岩层中, 形成“上小下大”的摩阻力分布, 15~25 m 长的桩嵌岩段的桩身存在应力集中现象, 嵌岩段侧摩阻力随桩长增加而增大, 此时桩为摩擦型桩, 嵌岩段侧摩阻力发挥的承载力与非嵌岩段基本一致。

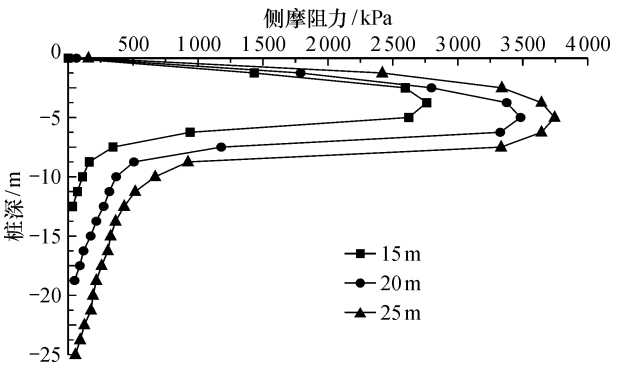


图11 不同桩长时的侧摩阻力分布情况
Fig. 11 Side resistance-load distribution of different pile lengths

当桩径为 1 m 时, 长径比分别为 15、20、25, 长径比越大, 相同荷载下沉降量也越大, 摩阻力受力面积增加, 侧摩阻力更能发挥作用, 上部荷载传递到桩端的力也越来越小。

3.3 桩径对 $Q-S$ 曲线的影响分析

假定桩长为 20 m, 嵌岩深度为 10 m, 对桩径分别为 1.0、1.5、2.0 m 的数值模型进行计算分析, 如图 12 所示 $Q-S$ 曲线。在相同等级荷载条件下, 桩径越大沉降量越小, 当加载至 27 654 kN 时, 桩径为 1.0、1.5、2.0 m 时的沉降量分别为 17.20、11.7、5.89 mm, 可见桩径对嵌岩桩竖向沉降量的影响很大。

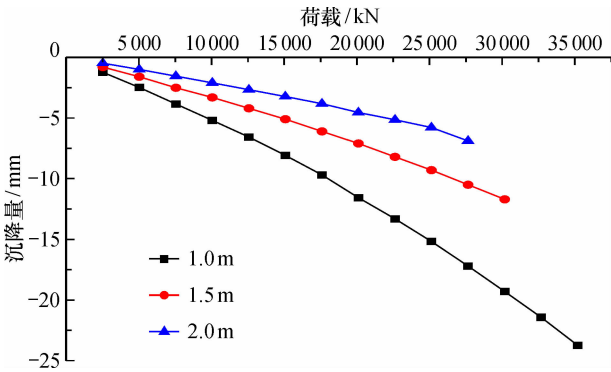


图 12 不同桩径时的 $Q-S$ 曲线

Fig. 12 $Q-S$ curves of different pile diameters

3.4 桩径对侧阻力与端阻力的影响分析

桩径的变化会影响桩端阻力与侧摩阻力的分配。假定桩长为 20 m，嵌岩深度为 10 m，当基桩达到极限承载状态时，不同桩径的嵌岩段侧摩阻力、总侧摩阻力和端阻力值如图 13 所示，桩径为 1.0 m 时，桩端阻力为 17 278 kN，端阻力约占总阻力值的 50%；桩径为 1.5 m 时，端阻力为 45 198 kN，端阻力占总阻力值的 72.45%；桩径为 2.0 m 时，端阻力为 68 138 kN，端阻力占总阻力值的 78.67%。当桩长不变，仅改变桩径时，嵌岩段侧摩阻力与总侧摩阻力变化不大，而桩端阻力受桩径影响较大，桩径越大桩端阻力更容易发挥；但当桩径大于 1.5 m 时，随桩径的增大，端阻力增加的幅度会逐渐减小。另外，嵌岩桩侧摩阻力受桩长影响较大，桩径变化对桩侧摩阻力的影响很小。

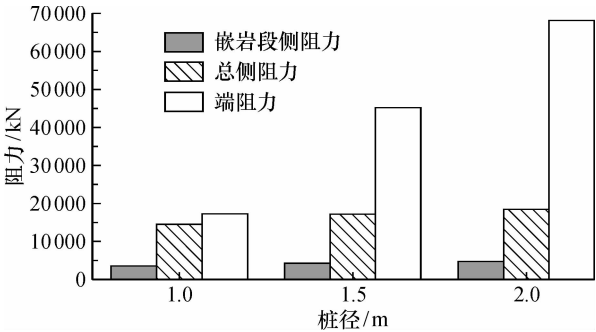


图 13 不同桩径时的侧阻力与端阻力值

Fig. 13 Pile side and end resistance-load of different pile diameters

假定桩长为 20 m，嵌岩深度为 10 m，桩径分别为 1.0、1.5、2.0 m 时，侧摩阻力随桩体深度的变化情况如图 14 ~ 图 16 所示。

结果可知，侧摩阻力主要集中在嵌岩段，最大侧摩阻力断面位于岩层与土体接触面 1 m 以下的岩层中(即桩顶以下 6 m 处)。随着桩顶荷载的增大，

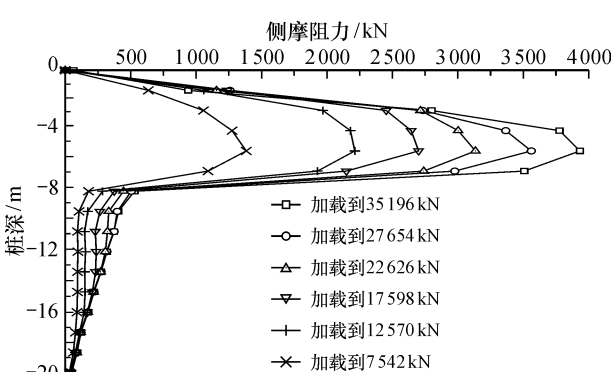


图 14 1.0 m 桩径时的侧摩阻力分布情况

Fig. 14 Side resistance-load distribution of 1.0 m pile diameter

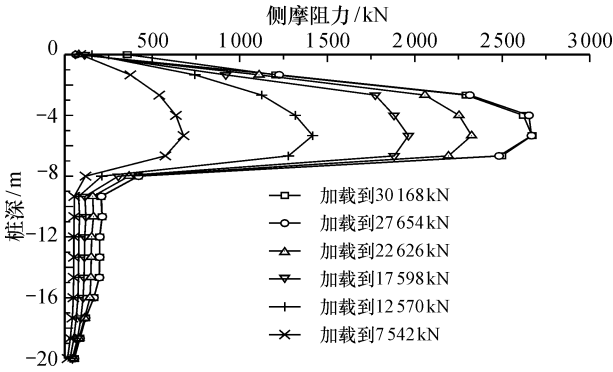


图 15 1.5 m 桩径时的侧摩阻力分布情况

Fig. 15 Side resistance-load distribution of 1.5 m pile diameter

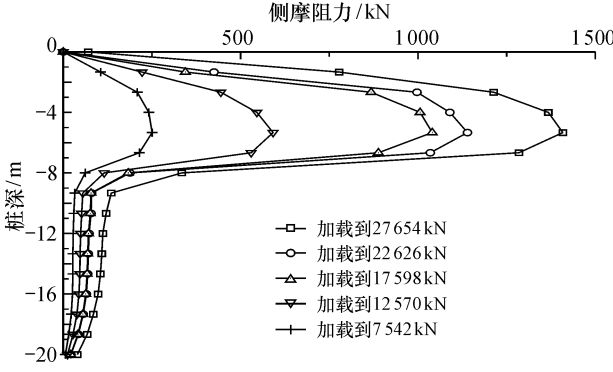


图 16 2.0 m 桩径时的侧摩阻力分布情况

Fig. 16 Side resistance-load distribution of 2.0 m pile diameter

最大侧摩阻力断面处的侧摩阻力也显著增加。不同桩径情况下，桩径越大侧摩阻力最大值越小，应力集中现象也明显减弱，侧摩阻力分布更为均匀；桩体越细，应力越集中，桩侧摩阻力越大。因此，在桩基础设计时需要考虑嵌岩段的侧摩阻力，尤其要考虑岩层与土体接触面 1 m 以下截面附近的应力集中现象。

桩长为 20 m，桩径分别为 1.0、1.5、2.0 m 时，长径比分别为 20、13.3、10，当桩长一定时

长径比越小桩端阻力更能发挥作用,相同荷载下沉降量越小,桩侧摩阻力分布更为均匀。

4 结 论

基于现场试验对南宁市灰岩地区不同桩长及嵌岩深度的基桩承载特性进行研究,并利用数值分析将现场试验结果与数值模拟结果进行对比,结果吻合较好。从嵌岩桩尺寸效应角度出发,展开了桩长、桩径、长径比3个影响因素在不同情况下嵌岩桩的承载特性、侧摩阻力和端阻力的变化规律,得到以下结论:

(1) 嵌岩深度对灰岩地区嵌岩桩的承载特性影响最大,嵌岩深度越长,桩的承载力越高。在嵌岩桩桩基础设计时,应重点考虑嵌岩深度(即嵌岩段长度),在确定桩长时应合理考虑非嵌岩段长度与嵌岩段长度的分配比值。

(2) 在相同嵌岩深度条件下,嵌岩位置对桩体承载力也有较大影响,嵌岩段所处位置越深,桩基沉降量越大,受上覆荷载影响也越大。桩侧最大摩阻力截面位于岩层与土层接触面以下1 m的岩层中,在桩基础设计时应慎重考虑此截面附近的应力集中现象。

(3) 桩径对嵌岩桩竖向沉降量的影响很大,且桩径的变化会影响桩端阻力与侧摩阻力的分配。桩径对桩端阻力的影响较大,对桩侧摩阻力的影

响很小;但当桩径大于1.5 m时,随桩径的增大,端阻力增加的幅度会逐渐减小。

(4) 当桩长一定时长径比越小桩端阻力更能发挥作用,相同荷载下沉降量越小,桩侧摩阻力分布更为均匀;长径比越大,相同荷载下沉降量也越大,摩阻力受力面积增加,侧摩阻力更能发挥作用,上部荷载传递到桩端的力也越来越小。嵌岩桩桩长一定时,适当增大桩径有利于减小沉降,发挥桩端阻力。

参考文献:

- [1] 王卫东,吴江斌,聂书博.武汉绿地中心大厦大直径嵌岩桩现场试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(11):1945-1954.
- [2] 雷勇.嵌岩桩竖向承载机理及其承载力计算方法研究[D].长沙:湖南大学,2011.
- [3] 刘会球.嵌岩桩承载力影响因素数值分析[J].铁道科学与工程学报,2018,15(10):2535-2540.
- [4] 钱明,张志豪,朱子仁.钻孔灌注桩基承载力影响分析[J].桂林理工大学学报,2013,33(3):493-498.
- [5] 刘兴远,郑颖人.影响嵌岩桩嵌岩段特性的特征参数分析[J].岩石力学与工程学报,2000,19(3):383-386.
- [6] 张建新,吴东云,张淑朝.嵌岩桩尺寸效应的有限元分析[J].岩土力学,2007,28(6):1221-1224.
- [7] 龚成中,何春林,龚维明,等.基于自平衡试桩法大直径嵌岩桩尺寸效应分析[J].岩土力学,2012,33(8):2403-2407.
- [8] 穆锐,黄质宏,刘旻,等.强风化泥质灰岩桩基承载性能试验研究[J].施工技术,2018,47(14):67-71.

Analysis of bearing capacity characteristics of super tonnage rock-socketed piles in limestone area

CHENG Bing-kun, FU Gen-gen

(Guangxi Construction Testing Centre, Nanning 530004, China)

Abstract: Based on the static load test of super-large tonnage piles in limestone area of Nanning, the axial force and deformation of the pile were measured. The test results show that the maximum test load of the test pile with socketed depth about 10 m is 31 000-36 000 kN, which can meet the design bearing capacity requirement, while the bearing capacity of the test pile with the socketed depth about 5 m couldn't meet the design bearing capacity requirement. In the limestone area, the socketed depth has the greatest influence on the bearing characteristics of socketed piles. The longer the socketed section is, the higher the bearing capacity of the piles will be. The influence of pile length, pile diameter and length-diameter ratio on bearing characteristics of rock-socketed pile in limestone area is analyzed by finite element software.

Key words: rock-socketed pile; bearing characteristic; super-large tonnage pile; limestone area; static load test