

长短桩组合桩基础模型试验及承载性能分析

朱小军^{1,2}, 杨敏¹, 杨桦¹, 李锋利¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200433; 2. 上海申元岩土工程有限公司, 上海 200011)

摘要: 长短桩组合桩基础作为一种新型的桩基形式, 对其承载性状、工作机理的研究很有必要。本文在室内模型试验的基础上, 对长短桩组合桩基础的荷载与沉降的关系、桩身侧摩阻力分布、桩身内力以及长短桩组合桩基础中长桩和短桩承载性状发挥状况等问题进行了分析, 得到了一些规律性的、有价值的结论。

关键词: 长短桩组合桩基础; 模型试验; 荷载分担比; 承载机理

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)04-0580-07

作者简介: 朱小军(1981-), 男, 河南信阳人, 硕士, 从事岩土工程科研、设计工作。E-mail: xj_zhu0801@163.com。

Study on bearing behaviors and model tests of composite pile foundation with long and short piles

ZHU Xiao-jun^{1,2}, YANG Min¹, YANG Hua¹, LI Feng-li¹

(1. Shanghai Shenyuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200011, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Composite pile foundation with long and short piles is a new kind of pile foundation. It is necessary to study the bearing mechanics and working behavior. In this paper, the relation between bearing capacity and settlement & distribution of the axial force and skin friction along pile and the bearing mechanics of composite pile foundation with long and short piles were studied based on laboratory tests. The conclusions were valuable for engineering practice.

Key words: composite pile foundation with long and short piles; modeling test; share of load; bearing mechanics

0 引言

近年来关于桩基础相互作用问题的研究已非常多, 但往往都是针对坐落于同一持力层的相同桩长的桩, 不同桩长尤其是不同持力层的长短桩之间的相互作用问题至今鲜见报道。然而长短桩组合桩基础作为一种新的基础形式, 提出了一系列新的问题, 包括在不同持力层土层条件下长、短桩能否协调发挥作用, 如何确定长桩和短桩的数量, 如何计算长短桩组合桩基础的沉降, 如何确定长短桩组合桩基础的承载力及其总安全度, 如何确定长桩和短桩的荷载分担比例, 长、短桩布桩方式对沉降性状的影响, 长、短桩桩侧摩阻力的分布规律如何等一系列问题。这些问题, 在广泛的工程应用之前, 是需要作系统深入的研究的。本文通过长短桩组合桩基础室内模型试验对长短桩组合桩基础的承载性能和破坏机理进行了初步的探讨分析。

1 试验方案

在长桩和短桩的单桩试验基础上, 进行了三桩(1

长2短, 桩间距4d及6d)、九桩(全短桩、1长8短及1长8短长桩带扩大头)下的长短桩组合桩基础试验, 平面布置如图1所示。

试验所用承台为2cm厚的钢板, 模型槽是一个长160cm、宽40cm、高120cm由钢板和有机玻璃接成的方箱, 模型桩为空心铝管, 直径2cm, 管壁厚2mm, 选用人工筛选天然风干河砂为模型填料(物理力学指标如表1所示)。

表1 填料物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of the sand

比重 G	最大干 密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	最小干 密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	试验挤密		
			平均密 度	内摩擦 角 $/(^{\circ})$	相对密 度
2.67	17.90	14.64	16.27	44	0.389

结合模型槽尺寸, 试验所用短桩桩长为40cm, 长桩桩长为70cm。桩身上的应变片数据由YE2539高速静态应变仪采集获得, 应变片布置示意图如图2

所示。不同荷载下的长短桩组合桩基础位移量测采用对称布置的两个 3 cm 的百分表, 精度为 0.01 mm。

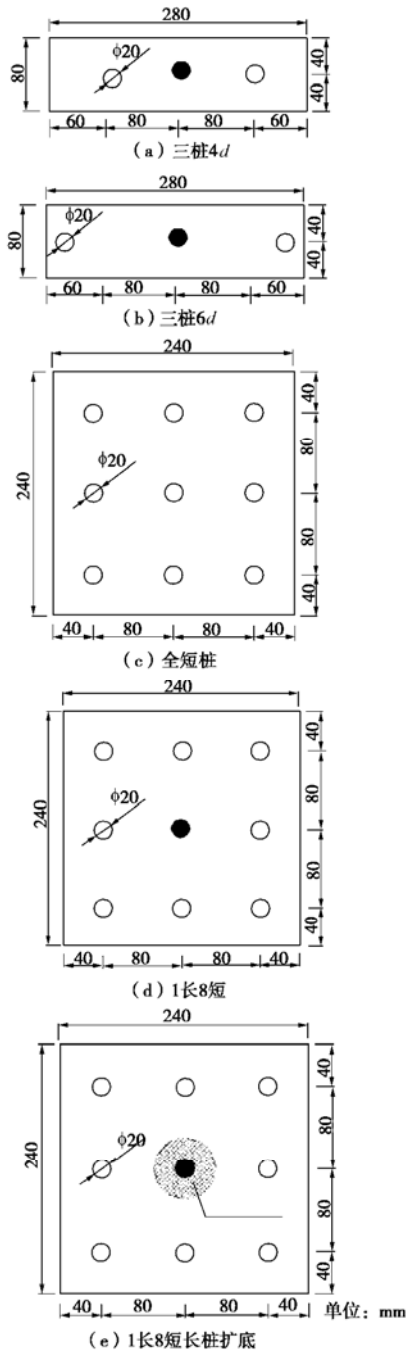


图 1 试验方案布置图

Fig. 1 Arrangement of pile groups for test

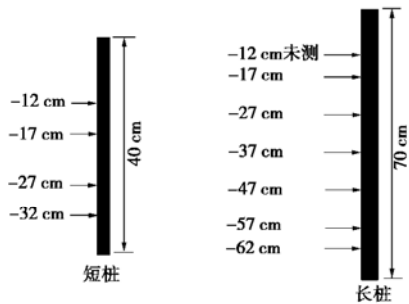


图 2 应变片布置示意图

Fig. 2 Arrangement of strain gauges on piles

2 单桩试验结果

从图 3 单桩的荷载 (Q) - 沉降 (s) 曲线, 可以看出短桩极限承载力约为 0.65 kN, 长桩极限承载力约为 1.52 kN; 同时可清楚地看到, 桩的 $Q-s$ 曲线都有陡降段, 呈刺入破坏的典型特征。

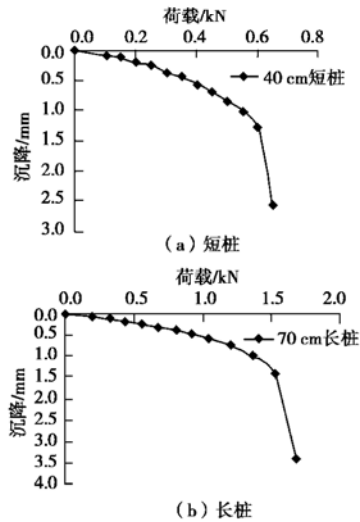


图 3 单桩荷载 (Q) - 沉降 (s) 曲线

Fig. 3 The load-settlement curves of single pile

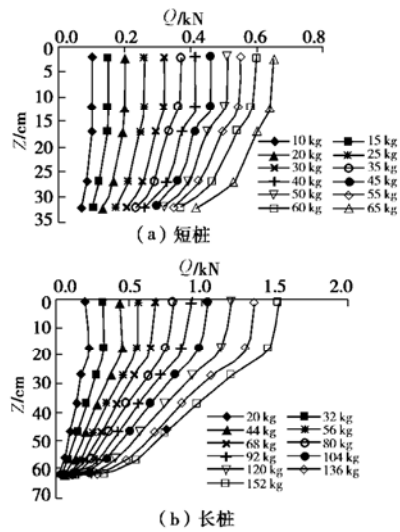


图 4 单桩轴力传递曲线

Fig. 4 Transmission of axial force in single pile

本次模型试验得出的桩身轴力沿深度传递规律和传统理论及有关文献报道的基本一致。竖向荷载施加于桩顶时, 桩身的上部首先受压而产生相对于土的向下的位移, 相对位移导致了周围土对桩侧界面向上的摩擦力。荷载沿桩身向下传递的过程就是不断克服摩擦力并通过它向土中扩散的过程, 从而导致桩身的轴力沿着深度逐渐地减小。由于桩侧摩擦力的存在, 使得桩身轴力沿深度衰减很快。

从图 5 中桩侧摩擦力曲线特征可看出, 桩身上部

的摩阻力曲线斜率接近, 随荷载增加基本保持同一比例增长, 而桩身下部的摩阻力曲线斜率较大, 随着荷载增加, 桩身下部侧摩阻力增长较快, 桩的上、下部侧摩阻力差值呈增大趋势。

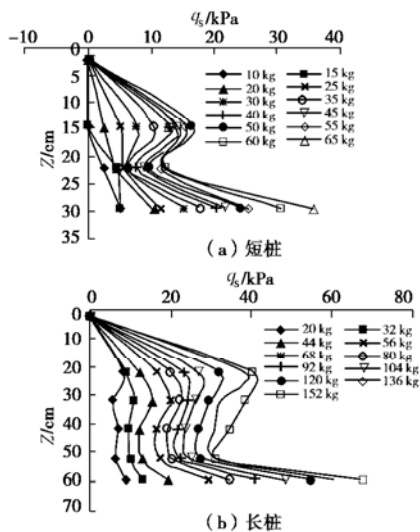


图 5 单桩桩侧摩阻力分布曲线
Fig. 5 Distribution of skin friction in single pile

3 三桩组合试验结果

不同桩距的三桩组合桩基础荷载 (Q) - 沉降 (s) 曲线如图6所示。从桩的荷载 (Q) - 沉降 (s) 曲线, 可清楚地看到, 桩的 $Q-s$ 曲线都有陡降段, 呈刺入破坏的典型特征。

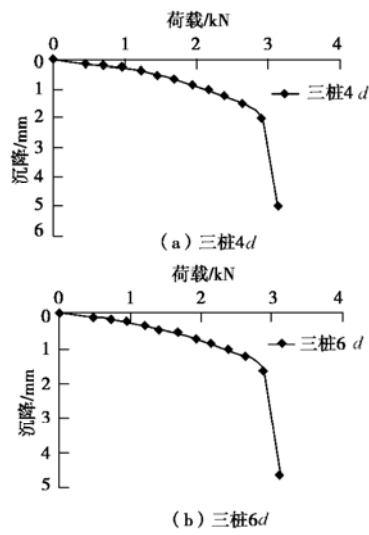


图 6 三桩组合荷载-沉降曲线
Fig. 6 The load-settlement curves of pile group with three piles
高承台情况下, 不同桩距的三桩组合桩基础极限承载力均为 2.88 kN, 基本上等于各桩单桩极限承载力之和 ($0.65 \times 2 + 1.52 = 2.82$ kN)。

图 7, 8 为桩身轴力传递曲线, 可看出 4d 桩距三

桩组合时, 工作荷载 ($Q_u/2$) 下短桩桩顶反力与极限荷载下桩顶反力之比为 0.52, 长桩桩顶反力与极限荷载下桩顶反力之比为 0.47; 6d 桩距三桩组合时, 工作荷载下短桩桩顶反力与极限荷载下桩顶反力之比为 0.54, 长桩桩顶反力与极限荷载下桩顶反力之比为 0.49。这说明了各桩在工作荷载下均发挥了约 50% 的极限承载力, 其承载能力安全度是有保证的。

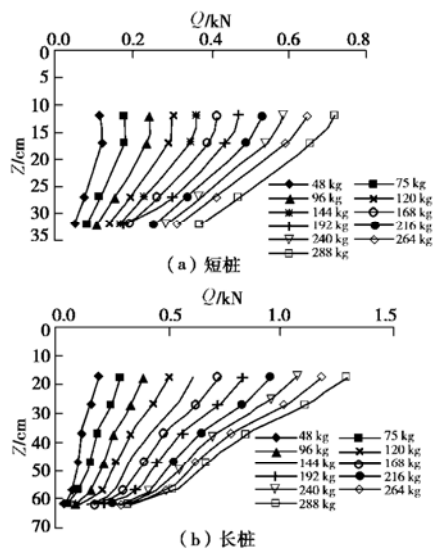


图 7 三桩 4d 桩身轴力传递曲线
Fig. 7 Transmission of axial force in pile group with three piles (4d)

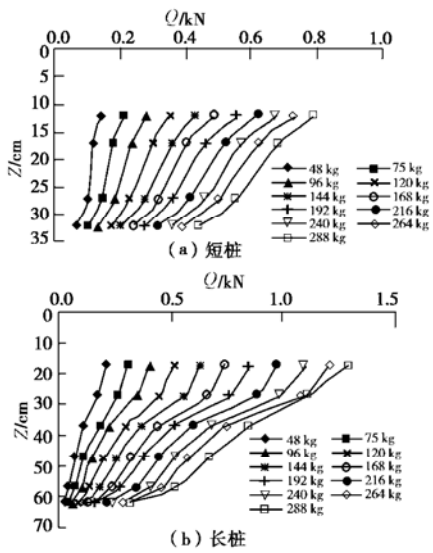


图 8 三桩 6d 桩身轴力传递曲线
Fig. 8 Transmission of axial force in pile group with three piles (6d)

在不同荷载下, 短桩与长桩荷载分担比变化不大, 几乎为一条直线, 如图 9 所示。从图中可以看出随着桩距的增大, 短桩分担荷载的比例减小, 长桩分担荷

载的比例增加。

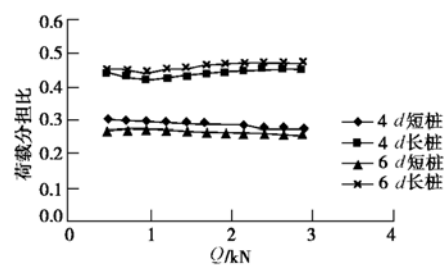


图 9 长、短桩荷载分担比

Fig. 9 Load sharing ratios between long pile and short pile

对比图 10 (a) 和图 11 (a) 三桩组合中短桩侧阻曲线, 可以看出: 4 倍桩距和 6 倍桩距下短桩侧阻性状有所不同。

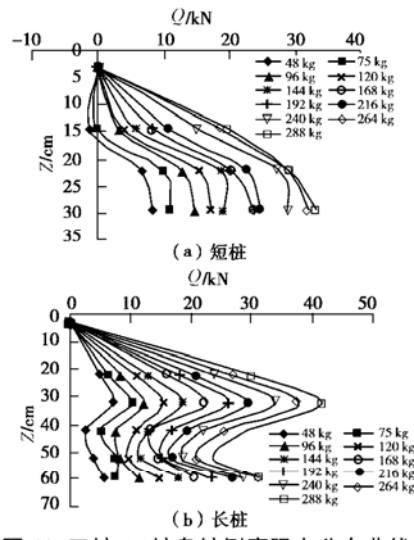


图 10 三桩 4d 桩身桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 10 The distribution of skin friction in pile group with Three piles (4d)

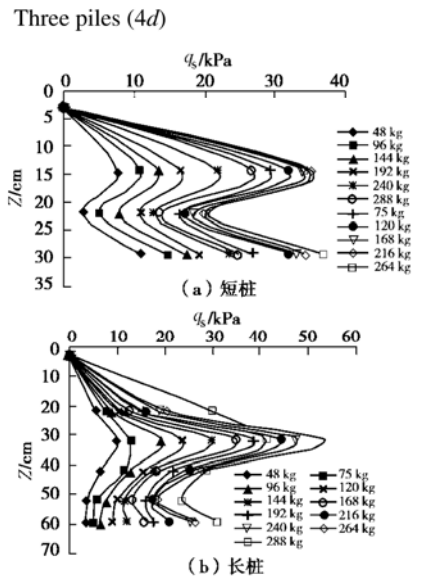


图 11 三桩 6d 桩身侧摩阻力分布曲线

Fig. 11 The distribution of skin friction in pile group with Three piles (6d)

图 10 (b) 和图 11 (b) 分别为 4 倍桩距和 6 倍

桩距的三桩组合中长桩的侧阻曲线, 可以看出两者曲线基本形状类似, 但 4 倍桩距时长桩上部侧阻随荷载增加而增加, 6 倍桩距时则增加不明显。

对比三桩组合桩基础中短桩、长桩侧摩阻力分布情况与单桩的试验结果, 可以发现, 三桩试验时短桩桩身侧阻发挥明显大于单桩试验, 而长桩下部桩身侧阻发挥明显小于单桩试验, 导致三桩试验时极限荷载下短桩分担荷载大于单桩试验时极限荷载, 长桩分担荷载小于单桩试验时极限荷载。这可能是由于人工装砂引起的密实度不同所致。另外, 从图 10, 11 可以看出, 最后几级荷载下, 短桩侧阻值几乎没有增加, 说明短桩侧阻先于长桩发挥到极限。

4 组合试验结果

从图 12 (a) 可以看出, 全短桩试验方案群桩基础的极限承载力为 5.84 N, 约为各桩单桩极限承载力之和 ($0.65 \times 9 = 5.85$ N)。

从图 12 (b) 可以看出, 1 长 8 短组合桩基础试验方案的极限承载力为 6.72 kN, 也约为各桩单桩极限承载力之和 ($0.65 \times 8 + 1.52 = 6.72$ kN)。

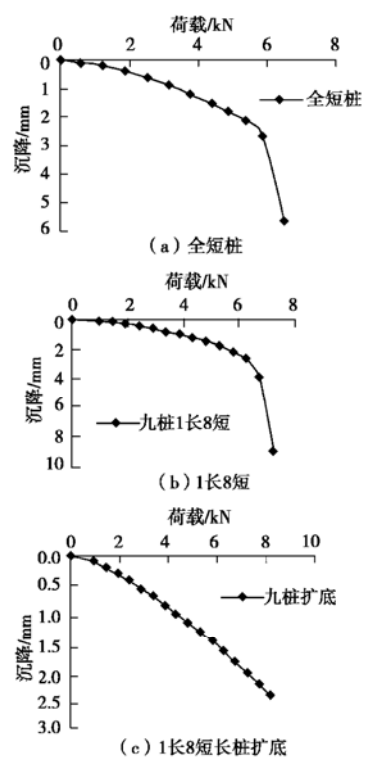


图 12 九桩荷载沉降曲线

Fig. 12 The load-settlement curves of pile group with nine piles

对于 1 长 8 短长桩扩底组合桩基础试验方案, 是为近似模拟不同持力层情况下, 研究长短桩组合桩基础的承载性状和荷载传递机理而进行的。试验中, 在 1 长 8 短组合桩基础的基础上, 给长桩桩端加一个扩

大头(图 1(e), 扩大头直径 6 cm), 以此减少基础沉降, 用以模拟长桩深入承载性能较好的持力层。

从图 12(c) 可看出, 长桩加上扩大头后, 基础承载力显著提高, 加载至 8.16 kN 时仍未破坏, 而未加扩大头时极限荷载仅为 6.72 kN。加载至 8.16 kN 时发现加载设备(杠杆)有变形过大, 弯曲明显, 因担心加载设备破坏遂终止试验, 故未加载至试验破坏。

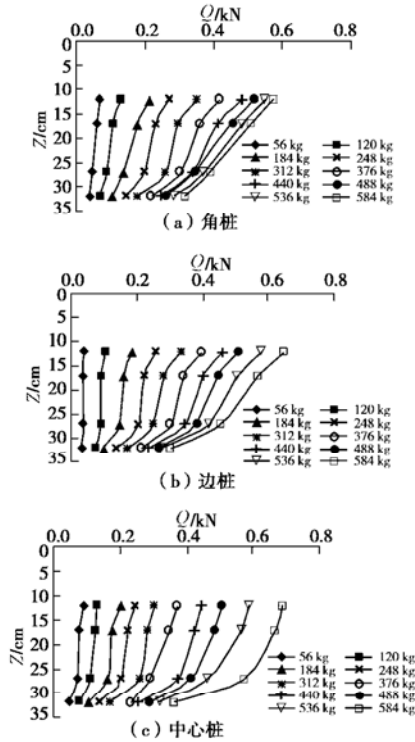


图 13 全短桩桩身轴力分布图

Fig. 13 Transmission of axial force in pile group with nine short piles

整理全短桩试验结果发现, 短桩出现了角桩反力小于边桩、边桩反力小于中心桩的反常现象, 这与传统的桩基理论和桩基测试结果相矛盾。这可能是由于试验中各桩桩头调整不平所致。

但是仅从全短桩各桩轴力分布曲线形状对比短单桩桩身轴力分布曲线(图 13(a)), 可以发现由于群桩效应的影响, 群桩中各单桩的轴力分布性状与单桩分布有了很大的不同, 主要表现在角桩桩身轴力随深度增加而递减, 且其衰减的曲率比较均匀, 其特征与单桩桩身轴力传递规律基本相同; 边桩衰减的曲率下部明显变大; 中心桩这种趋势更加显著, 表现出与单桩完全不同的性状。

图 14(a) 和 (b) 分别为 1 长 8 短组合桩基础中角、边短桩桩身轴力分布, 根据桩身 12 cm 处的轴力对比可得出, 各级荷载下角桩桩顶反力均大于边桩桩顶反力, 其比值从加荷初期的 1.46 倍逐渐下降到极限荷载时的 1.11 倍, 并趋于短桩单桩极限承载力。

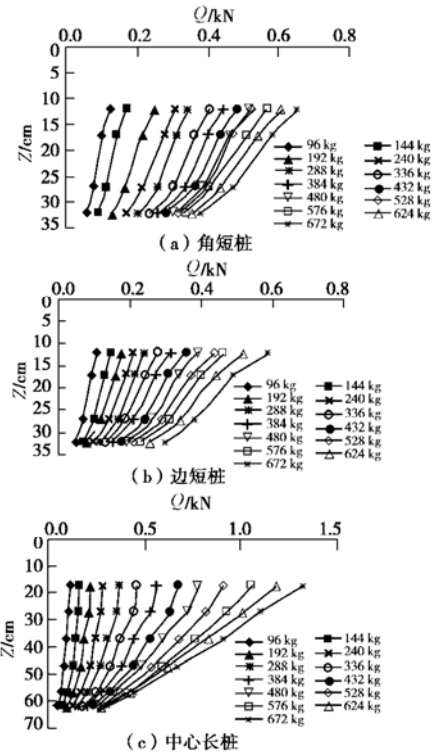


图 14 1 长 8 短组合桩身轴力分布图

Fig. 14 Transmission of axial force in pile group with one long pile and eight short piles

图 15(a) 和 (b) 分别为 1 长 8 短长桩扩底组合桩基础中角、边短桩桩身轴力分布, 根据桩身 12 cm 处的轴力对比可得出, 各级荷载下角桩桩顶反力均大于边桩桩顶反力。

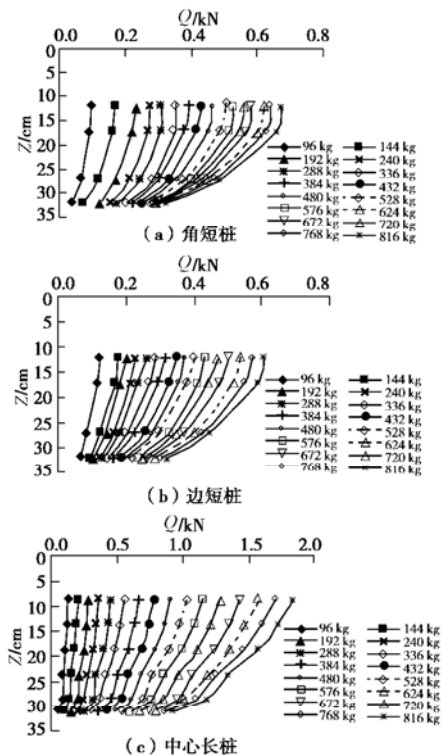


图 15 1 长 8 短长桩扩底组合桩身轴力分布图

Fig. 15 Transmission of axial force in pile group combining one with widened bottom long pile and eight short piles

由图 16 (b) 可知, 1 长 8 短组合桩基础试验下, 角短桩分担荷载随荷载的增大不断减小, 由初始的 13% 下降到 10% 左右, 且逐渐接近边短桩的荷载分担比; 边短桩分担荷载随荷载的增加稍微减小, 基本维持在 9% 左右; 长桩分担荷载的比例随荷载的增大显著提高, 由初始的 11% 增大至 21% 左右, 几乎为初始的两倍。

由图 16 (c) 可知, 1 长 8 短长桩扩底组合桩基础试验下, 角短桩分担荷载随荷载的增大不断减小, 由初始的 11.6% 下降到 9.6% 左右, 且逐渐接近边短桩的荷载分担比; 边短桩分担荷载随荷载的增加稍微减小, 基本维持在 8.7% 左右; 长桩分担荷载的比例随荷载的增大显著提高, 由初始的 13% 增大至 26% 左右, 几乎为初始的两倍。

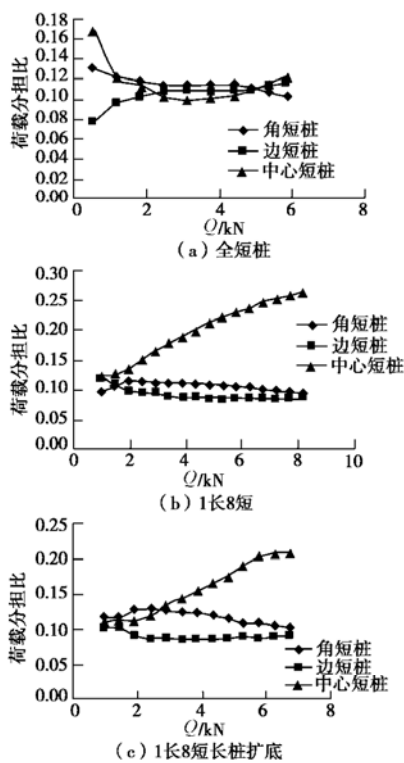


图 16 九桩组合单桩荷载分担比

Fig. 16 Load sharing ratios between nine piles

图 16 表明: 随着荷载的增大, 角短桩分担荷载的比例减小, 并与边短桩趋于相等; 中心长桩分担荷载的比例增加。长桩扩底情况下, 长桩分担荷载的比例大于不扩底的情况, 且随荷载的增加成线性增大。

图 17 (a)、(b) 分别为角短桩和边短桩桩身侧阻曲线, 可知角桩和边桩侧阻分布曲线形式相似, 呈上大下小 “R” 型分布, 且与短单桩侧摩阻力分布图 3 (a) 相似。

图 17 (c) 为 1 长 8 短组合桩基础中长桩桩身侧阻分布。从图中可以看出, 在工作荷载 ($Q_u/2$) 下, 即施加荷载 336 kg 时, 长桩桩身上部侧阻远未发挥, 在 22 cm 处桩身侧阻仅有 2.55 kPa, 远小于长桩单桩

在工作荷载下的侧阻发挥。另外从图中还可看出, 在本次试验条件 (均质砂) 下, 随着荷载增加, 长桩上部桩身侧阻逐渐得以发挥, 在极限荷载下, 其侧阻值接近于单桩在该处的侧阻值。并且, 在极限荷载下, 长桩桩顶反力亦接近单桩极限承载力。

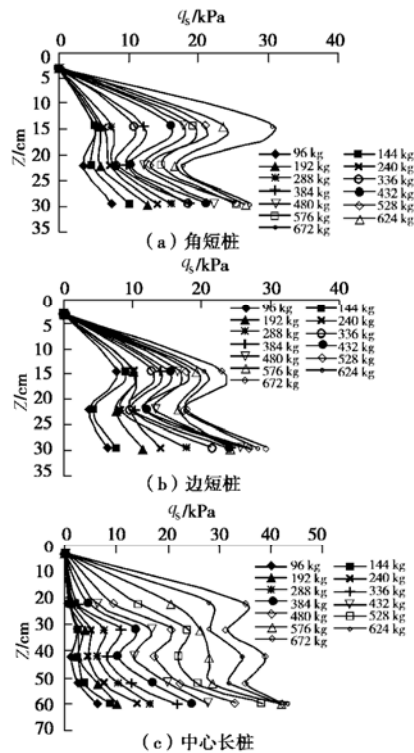


图 17 1 长 8 短组合桩桩身侧摩阻力分布图

Fig. 17 The distribution of skin friction in pile group with one long pile and eight short piles

工作荷载下, 长桩桩顶反力与极限荷载下桩顶反力之比为 0.35, 小于三桩组合; 短桩角桩两反力之比为 0.61, 短桩边桩为 0.47, 短桩发挥大于长桩。这说明在长、短桩组合比例较低的情况下 (本方案为 1:8), 工作荷载下长桩承载力发挥较小, 随着荷载进一步增加其承载能力才逐渐发挥。

图 18 (a)、(b) 分别为 1 长 8 短带扩大头组合桩基础角短桩和边短桩桩身侧阻曲线, 可以看出角桩和边桩侧阻分布曲线形式相似, 呈斜直线状, 但与单桩及长桩无扩大头时有较大不同。

图 18 (c) 为 1 长 8 短带扩大头组合桩基础长桩桩身侧阻分布。由图中曲线形式可以看出增加扩大头后对侧阻性状产生了较大的影响。增加扩大头后, 较好地控制了沉降, 对比图 12 (b)、(c) 可知, 在所加荷载为 6.72 kN (即无扩大头时的极限荷载) 时, 沉降减小了 30%; 在小荷载下, 桩身侧阻发挥较小, 端阻所占比例较高; 随着荷载及基础的增加, 桩身各处侧阻均有所增加, 但桩端附近侧阻增加更为明显; 对比同级荷载下, 6.72 kN 作用下, 长桩无扩大头时, 桩身

上部 22 cm 处的侧阻值为 35 kPa, 而长桩带扩大头时该处侧阻仅为 13 kPa, 当荷载为 3.36 kN 时, 两者侧阻值几乎相等。与无扩大头时 1 长 8 短组合相类似的是, 在工作荷载下, 短桩承载能力发挥程度大于长桩。

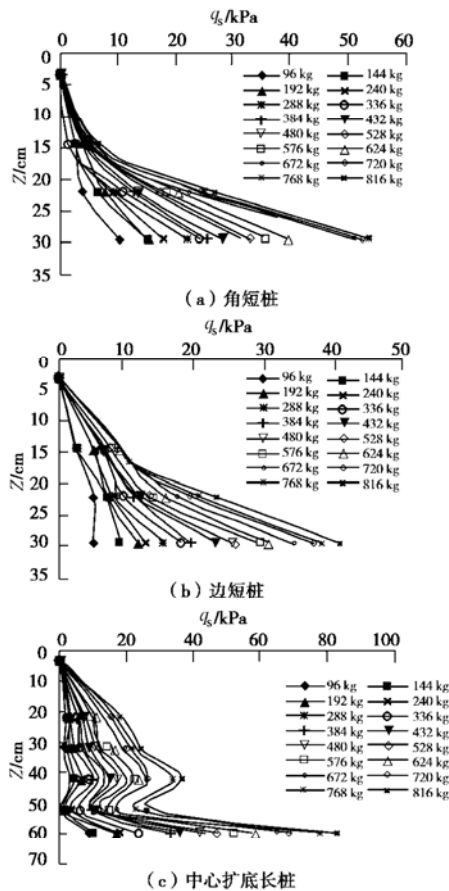


图 18 1 长 8 短长桩扩底组合桩身侧摩阻力分布图

Fig. 18 The distribution of skin friction in pile group combining one long pile with widened bottom and eight short piles

5 结 论

(1) 单桩和组合桩的荷载 (Q) - 沉降 (s) 曲线都有明显的陡降段, 呈刺入破坏的典型特征。

(2) 三桩组合中, 在不同荷载下, 短桩与长桩荷载分担比变化不大, 且随着桩距的增大, 短桩分担荷载的比例减小, 长桩分担荷载的比例增加。

(3) 九桩组合试验中, 随着荷载的增大, 角短桩分担荷载的比例减小, 并与边短桩趋于相等; 中心长桩分担荷载的比例增加。

(4) 1 长 8 短试验中, 长桩扩底情况下, 长桩分担荷载的比例大于不扩底的情况, 且随荷载的增加成线性增大。增加扩大头后, 较好地控制了沉降, 所加荷载为 6.72 kN (即无扩大头时的极限荷载) 时, 沉降减小了 30%。

(5) 高承台下, 长短桩组合桩基础的极限承载力可以是各桩极限承载力相加。各桩在工作荷载下均发

挥了约 50% 的极限承载力, 短桩发挥略大于长桩, 其承载能力安全度是有保证的。

(6) 侧阻的发挥性状的与桩数有较大的关系。当桩数较少时 (如三桩组合), 长桩桩身侧阻能充分发挥; 当桩数较多且长、短桩桩数之比较小时 (如九桩 1:8 等), 工作荷载下, 长桩桩身上部侧阻发挥较小, 但随着荷载及基础沉降增加, 上部侧阻能逐渐发挥。

长短桩组合桩基础工作性状与很多因素有关, 如荷载大小、土层条件、长短桩相对桩长、桩数及布桩方式等。本次试验仅进行了均质砂中高承台试验, 但试验设计、试验方案及试验条件等均存在着一些缺陷, 得出的结论尚不全面, 有待于后继试验进一步研究。

参考文献:

- [1] WHITAKER T. Experiments with model piles in groups[J]. Geotechnique, 1957, 7(4): 147 - 167.
- [2] 梁发云. 混合桩型复合地基工程性状的理论与试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2004. (LIANG Fa-yun. Theoretical and experimental studies on composite foundation with hybrid piles[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2004. (in Chinese))
- [3] 管自立. 广义复合桩基[J]. 建筑结构, 2003, 33(4). (GUAN Zi-li. Conventional composite pile foundations[J]. Building Structure, 33(4). (in Chinese))
- [4] 王伟, 杨敏, 杨桦. 长短桩桩基础与其他类型基础的比较分析[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(1): 124 - 129. (WANG Wei, YANG Min, YANG Hua. Comparison and analysis between long-short-pile pile foundation and other types of foundations[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(1): 124 - 129. (in Chinese))
- [5] CHOW Y K. Analysis of vertically loaded pile groups[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1986.
- [6] 左东启, 等. 模型试验的理论和方法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984. (ZUO Dong-qi. Theory & method of modeling test[M]. Beijing: Water and Electricity Press, 1984. (in Chinese))
- [7] LIANG Fa-yun, CHEN Long-zhu, SHI Xu-guang. Numerical analysis of composite piled raft with cushion subjected to vertical load[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30: 43 - 53.
- [8] 杨敏, 王伟, 杨桦. 嵌岩长桩下长短桩桩基础设计的初步探讨[C]//地基基础技术发展与应用, 北京: 知识产权出版社, 2004: 105 - 112. (YANG Min, WANG Wei, YANG Hua. Analysis of long-short-pile pile foundation with long-pile embedded rock[C]//Development and Application of Foundation Engineering Technology. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2004: 105 - 112. (in Chinese))