

DOI: 10.11779/CJGE2018S1042

黄土地区长短组合桩的承载力及变形特性试验研究

马天忠^{1,2}, 朱彦鹏^{1,2}, 任永忠³, 令永强^{1,2}

(1. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;

3. 兰州工业学院兰州工业学院土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 黄土地区新型桩基问题研究匮乏, 为了在黄土地区引入并推广长短组合桩基础, 需深入研究该桩基的承载性状。研制了室内模型试验装置, 在单桩、4根组合桩及8根组合桩工况下通过伺服加载系统对试验装置进行了加载, 全面地分析了桩身承载力和变形特性。结果表明: 桩身轴力和侧摩阻力的发挥具有异步性, 长桩的破坏形式为刺入型破坏, 但短桩不是很明显; 在4根桩组合试验工况中, 桩身承载力极限值与单桩略相等, 桩侧摩阻力最大值出现的位置与单桩相比有所不同, 长桩分担的荷载比例比短桩高; 在8根桩组合试验工况中, 在每级荷载作用下角桩的桩身荷载均比边桩、中心桩都大, 与单桩承载力相比, 其长桩(角桩、边桩)和短桩(中心桩)的桩身承载力及桩侧摩阻力均有显著的提高, 角桩的桩顶荷载分担比略高于边桩。

关键词: 长短组合桩; 承载力; 桩侧摩阻力; 模型试验; 荷载分担比

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S1-0259-07

作者简介: 马天忠(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要从事基坑、边坡支挡结构及地基处理方面的研究工作。E-mail: matz0914@163.com。

Bearing capacity and displacement characteristics of long-short composite piles in loess areas

MA Tian-zhong^{1,2}, ZHU Yan-peng^{1,2}, REN Yong-zhong³, LING Yong-qiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology,

Lanzhou 730050, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. College of Civil Engineering, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou

730050, China)

Abstract: The researches on new pile foundation are insufficient in loess areas. In order to introduce and promote the composite pile foundation with long and short piles in the loess areas, the bearing characteristics of pile foundation need to be further studied. The laboratory model test apparatus is developed. The model test apparatus is loaded through servo loading system under the single-pile, four-pile and eight-pile working conditions, and the bearing capacity of pile and deformation characteristic are comprehensively analyzed and studied. The results show that the axial force of pile and the side friction play with asynchrony, and the failure mode of the long pile is the pricking destruction, but the short pile is not obvious. Under the composite test of four-pile working condition, the limit value of bearing capacity of the pile is equal to that of the single pile, and the occurrence of the position of the maximum of skin friction is different from that of the single pile. The load-sharing ratio of the long pile is more than that of the short pile. Under the composite test of eight-pile working condition, the load among the corner pile is more than that of the edge pile and center pile under each stage loading, and the bearing capacity and the skin friction of the long piles (corner pile, edge pile) and short piles (center pile) obviously decrease compared with those of the single pile. The load sharing ratio of the corner pile is a little more than that of the edge pile.

Key words: long-short composite pile; bearing capacity; skin friction of pile; model test; load sharing ratio

0 引言

基于减沉桩分析原理, 采用变形控制设计原则, 在黄土地区根据长桩主要控制变形、短桩主要提供承载力的思路提出了长短桩组合桩基^[1-3]; 其工作原理为

当地基土中存在两层或多层持力层时, 长桩基础全部坐落于深层持力层上, 短桩基础全部坐落于浅层持力

层上,用长短桩相结合的形式来提供所需的承载力及变形控制。

目前针对长短桩组合桩基承载力的研究较多,但在湿陷性黄土地区相关深入研究并不多见。郭院成等^[1-2]通过现场试验研究了复合地基承载力的计算方法及变刚度概念设计。文献[3~5]通过试验对长短桩的荷载与沉降关系、桩侧摩阻力分布、荷载分担比及桩身内力进行了分析。代国忠等^[6]论述了长短桩组合多元复合桩基的设计原理,分析了复合桩基承载力和地基沉降的计算方法。林本海等^[7]以考虑不同桩体长度、刚度和考虑周围多层土体分布的长短桩相互作用计算模型为依据,对某高层建筑进行长短桩复合地基的分析设计计算。黄茂松等^[8-10]采用离心模型试验和三维有限元法,探讨荷载下长短桩组合路堤桩的荷载分担规律。王忠瑾等^[11]在考虑桩土相对位移、桩土接触力学行为的非线性的情况下,推导了均质土层单桩的沉降计算公式。左珅等^[12]通过现场试验对路堤填筑过程中桩土应力比、荷载分担比以及桩土沉降差的变化规律进行了分析。梁发云等^[13]采用 Biot 固结方程,分别以等长和不等长两桩为分析对象,将受竖向荷载作用的桩土体系分解成半空间饱和扩展土和虚拟桩,基于竖向应变协调关系建立桩土相互作用的第二类 Fredholm 积分方程,求解出不同固结状态时的桩身轴力分布。

综上,长短桩是以不等长的桩体通过不同的持力层将上部荷载传递于地基土中,既有关于长短桩组合桩基的研究大多集中在承载力及沉降变形方面,湿陷性黄土地区关于长短桩桩体的承载特性及发挥程度等问题研究较少。基于此,本文将长短桩组合桩基础引入本地区桩基优化设计,通过自行设计的长短组合桩室内模型试验装置对上述问题进行探讨,成果可为今后本地区长短桩设计及数值分析提供一定的参考。

1 室内试验方案

1.1 试验方案的确定

依据实际工程的需要及试验的可实施性,本次试验共设计 3 个工况:①单桩承载力试验;②4 根桩(2 根短桩+2 根长桩)承载力试验;③8 根桩(4 根短桩+4 根长桩)承载力试验。长短组合桩试验方案见表 1,试验桩位布置图见图 1。

表 1 长短组合桩试验方案

Table 1 Test schemes of long-short composite piles					
工 况	桩数 /根	长桩 /根	短桩 /根	参与工况 长桩编号	参与工况 短桩编号
①	2	1	1	7	2
②	4	2	2	4, 10	5, 9
③	8	4	4	1, 3, 11、 13	2, 6, 8, 12

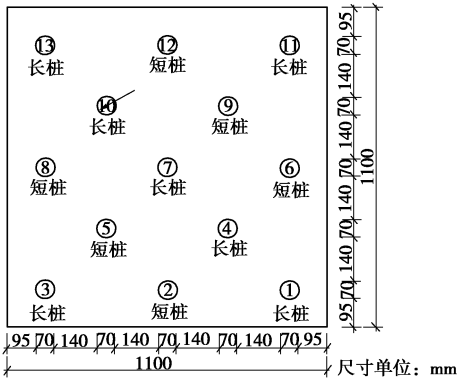


图 1 试验桩位布置图

Fig. 1 Layout of test piles

1.2 试验模型制作

(1) 模型箱

模型箱尺寸长×宽×高为 1.1 m×1.1 m×1.2 m,模型箱侧边及顶边采用 L90×6 规格的角钢加以固定,四周采用 12 mm 厚的有机玻璃,底板采用 20 mm 的钢板,试验模型三维示意图见图 2。

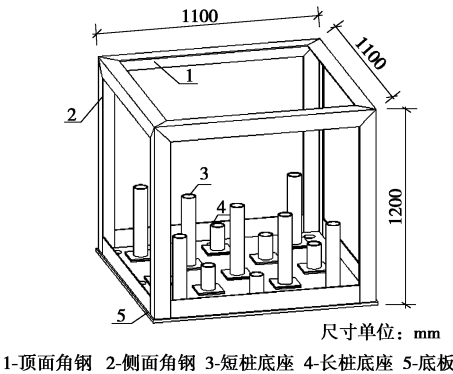


图 2 试验模型三维示意图

Fig. 2 3D Sketch of test model

(2) 桩底弹簧

在本试验中采用弹簧来分析桩底土体的变形特性^[14],通过万能试验机测得弹簧的变形参数,然后选择与桩底土体相匹配的弹簧,该试验所选择的弹簧刚度系数为 22.3 kN/m,长桩的弹簧长度为 0.1 m,短桩的弹簧长度为 0.35 m,详见图 3 所示。

(3) 模型桩

试验桩制作模具采用 PVC 管,其外径为 75 mm,内径为 70 mm。首先采用直径为 4 mm 的铁丝 4 根放置于 PVC 管四周,通过细扎丝间隔 0.3 m 将其固定,铁丝相当于桩身纵筋,然后用细扎丝以间隔为 25 mm 环绕铁丝笼,细扎丝相当于螺旋箍筋,形成的铁丝笼直径为 50 mm。其次将 PVC 管一侧切开后通过细扎丝和胶带环绕绑扎,目的为方便后续拆模,桩身采用强度等级为 C25 的混凝土,最后将铁丝笼放置于 PVC 管中灌注混凝土形成桩体,然后搁置 2 d 之后拆除

PVC 管并养护, 如图 4 所示。

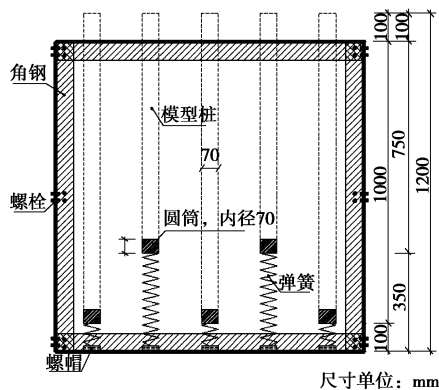


图 3 试验模型立面图

Fig. 3 Elevation of test model



(a) PVC 管及铁丝笼 (b) 养护模型桩

图 4 模型桩

Fig. 4 Model piles

(4) 桩周土筛选及装填

由于原状土取样较为困难，本次试验采用西北地区兰州湿陷性黄土作为桩周土。桩周土的制备经过粉碎、过筛、增湿等工序，最后制备成所需的桩周土。试验测得完成后的土体的含水率为 12.98%，最大干密度 $\rho=1.76\text{ kg/m}^3$ 。填土时，按照每层 100 mm 厚度分层铺填，保持每层土的下落高度一致，以保证土体的均匀性，如此直至填筑完成。在土层铺填过程中需注意桩周土体的密实度，最后通过对填土取样进行压实系数的测试，可知填土的压实度系数为 0.91，满足试验的要求。

(5) 应变片及位移计的布置

为测定模型试验中桩身轴力，在模型桩身上安装应变片，根据胡克定律将测得的应变值转化为应力值。桩身上的应变片数据由静态应变测试系统 (DH3816) 获取，应变片对称布置，长桩应变片共布置 7 对 (14 个)，短桩应变片共布置 5 对 (10 个)，具体布点位置见图 5 所示。长短组合桩的竖向和水平位移均采用位移计，其精度为 0.01 mm，满足试验的要求。

(6) 桩的安置及加载过程

模型桩采用预先埋入法。桩周土装填至弹簧顶面

后放置模型桩，在保证桩垂直度的前提下按照前述桩周土的装填方法继续填筑，直至装填至预定高度。

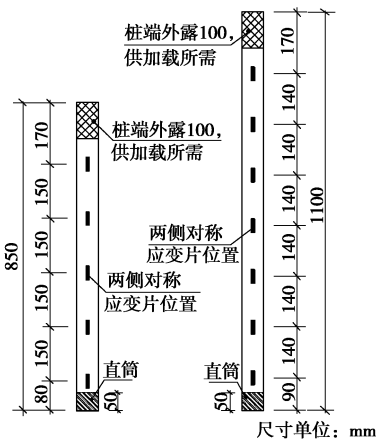


图 5 应变片布置示意图

Fig. 5 Arrangement of strain gages on piles

将装填好的模型箱移至伪静力实验加载系统支撑架上进行加载。在本试验中桩身采用细石混凝土和铁丝作为主要材料制成，针对此模型桩的试验相关研究较少。依据《建筑桩基技术规范》(JGJ94—2008) [15] 对此模型桩的承载力进行估算，预定单桩每级加载量为 0.5 kN，群桩每级加载量为单桩每级加载量的 n 倍 (n 为群桩的个数)，直至加载破坏为止。图 6 为试验加载过程。

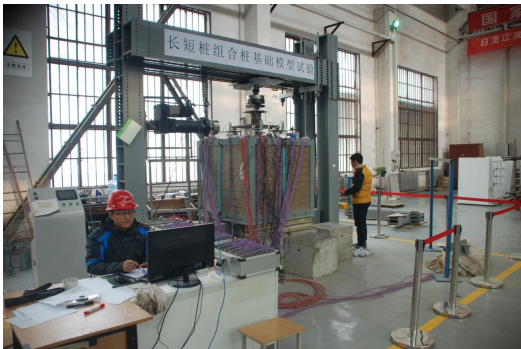


图 6 试验加载过程

Fig. 6 Process of loading in tests

2 试验结果及分析

2.1 单桩试验结果分析

(1) 单桩桩顶荷载与位移试验结果

为了确定模型桩的单桩承载特性，对短桩 (#2) 和长桩 (#7) 进行了单桩竖向荷载作用下桩身承载力试验。图 7 为单桩桩顶荷载 - 沉降曲线。从图中可以看出，当桩顶荷载小于 2.75 kN 时长短桩桩顶沉降量基本趋于一致，其长短桩顶沉降位移均匀发展。当桩顶荷载超过 2.75 kN 时，短桩桩顶沉降量差增大，而长短的沉降量差变化比较稳定，最后依据《建筑地基

基础设计规范》(GB 50007—2011)^[14]给出的桩身极限承载力判定准则可知,长桩的极限承载力为 3.8 kN,短桩的极限承载力为 2.8 kN。

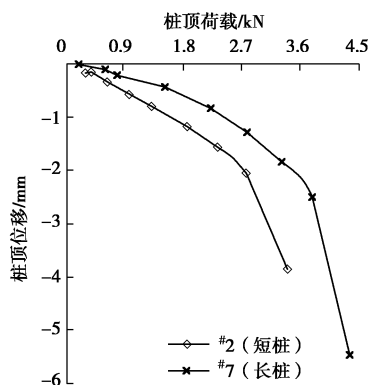


图 7 单桩桩顶荷载 - 沉降曲线

Fig. 7 Load-settlement curves of single pile

(2) 单桩轴力及桩侧摩阻力试验结果分析

图 8 为单桩轴力分布曲线。从曲线分布来看,随着桩埋深的增加,桩身轴力逐渐减小,这与传统理论研究结论一致。由图 8 (a)、(b) 两图比较可得,短桩在桩埋深范围内桩身轴力减小程度较为均匀,但长桩在 0~-0.49 m 范围内轴力变化较为均匀,超过-0.49 之后轴力减小很快,这与桩侧摩阻力有关。

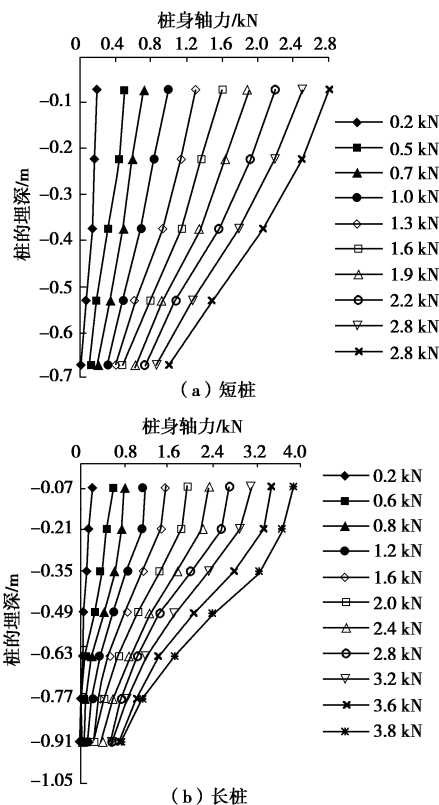


图 8 单桩轴力分布曲线

Fig. 8 Distribution of axial force in single pile

图 9 为单桩桩侧摩阻力分布曲线。在桩身埋深为 0.00~-0.42 m 范围内桩侧摩阻力随着桩顶荷载的增大逐渐增大,在桩埋深-0.42 m 位置处时,在每级荷载作用下桩侧摩阻力达到了最大值;当桩埋深超过-0.42 m 之后桩侧摩阻力逐渐减小。从曲线来看,尽管在每级荷载作用下桩侧摩阻力大小有所浮动,但总体上随着荷载的增加,桩侧摩阻力也增加。长桩与短桩相比较,长桩的桩侧摩阻力在桩埋深超过-0.42 m 之后衰减很快。

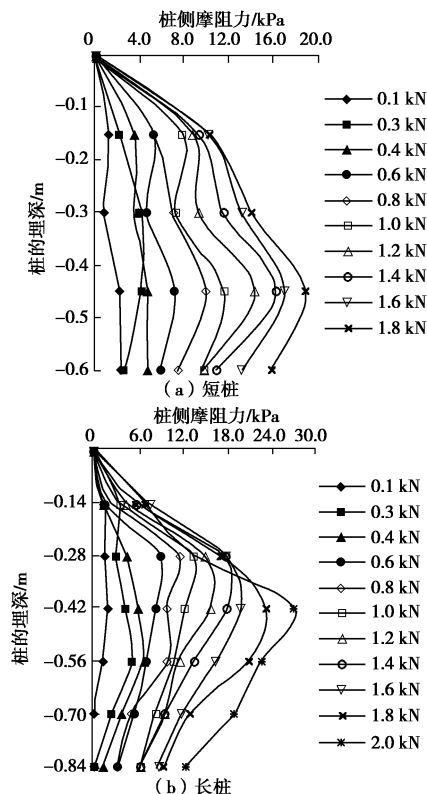


图 9 单桩桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 9 Distribution of skin friction in single pile

2.2 4 根桩组合试验结果分析

(1) 4 根桩桩顶荷载与沉降曲线

图 10 为 4 根桩桩顶荷载沉降曲线。由图中可得,在桩顶荷载逐级增加下,桩顶沉降位移量也逐渐增大。在 0~6.0 kN 范围内,桩顶沉降量基本在 0~0.5 mm 范围内浮动,当桩顶荷载超过 6.0 kN 之后,其沉降量急剧增大。当桩顶荷载超过 11 kN 之后, #4, #5 与 #9, #10 桩顶沉降量增大的比例有所不同, #4, #5 桩顶沉降量比 #9, #10 桩顶沉降量要大,同时变化的速率也很快,其主要原是由于模型箱内土体为人工填土,其密实度不均匀;并且桩顶并非均处于绝对的同水平面,其承受荷载大小略有不同。

从图 10 中可以看出,桩端并未发生刺入式破坏的特征,即沉降位移量发展都较为均匀。当桩顶荷载超

过 15 kN 时 4 根桩后一级桩顶沉降量比前一级沉降量大于 2 倍, 同时通过桩顶的总荷载来控制时, 其桩顶总荷载为 15 kN, 依据单桩承载力所知, $3.8\text{ kN}\times 2+2.8\text{ kN}\times 2=13.2\text{ kN}$, 即桩顶总荷载略小单桩承载力之和, 这是由于群桩效应导致的结果。

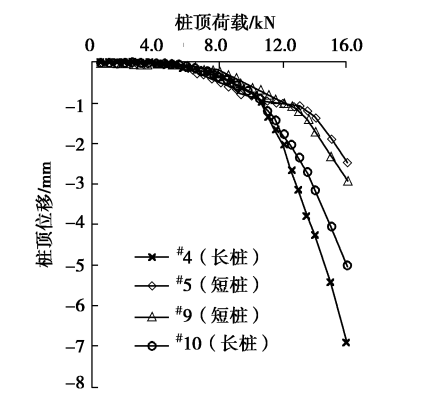


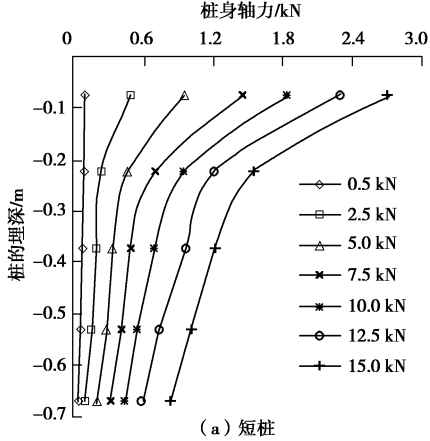
图 10 4 桩桩顶荷载 - 沉降曲线

Fig. 10 Load-settlement curves of pile group with four piles

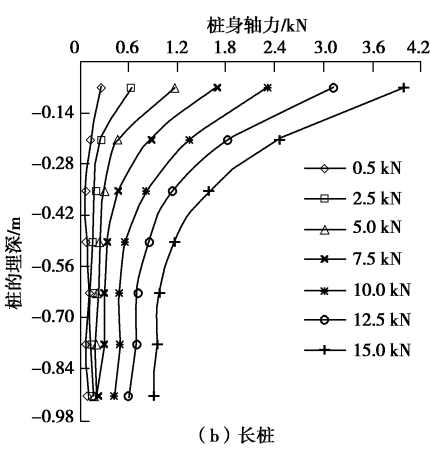
(2) 4 根桩桩身轴力及桩侧摩阻力试验结果

4 根桩组合试验由 2 根短桩和 2 根长桩对角布置组成。图 11 (a)、(b) 分别为长、短桩桩身轴力随桩的埋深分布曲线。由图可以看出, 4 根组合桩与单桩桩身轴力分布曲线总体趋势较为一致, 均是随着桩的埋深轴力逐渐减小, 但是其减小的过程有明显不同。单桩试验时其桩身轴力随桩埋深减小速率较慢, 但 4 根组合桩试验时桩身轴力在 $0\sim 0.3h$ (h 为桩的埋深) 范围内递减速率很快, 超过 $0.3h$ 之后其递减速率较为平缓。长桩与短桩桩身轴力相比较可知, 在同等荷载条件下长桩比短桩桩身随桩的埋深减小速率快。

图 12 (a)、(b) 分别为长、短桩桩侧摩阻力随桩的埋深分布曲线。从图中可以看出, 随荷载的增加桩侧摩阻力逐渐增大, 但是其最大值均发生在桩的埋深 $1/3$ 处, 超过 $1/3$ 之后随着桩的埋深逐渐减小。说明此模型桩为典型的摩擦型桩, 其桩底所承受的荷载很小。



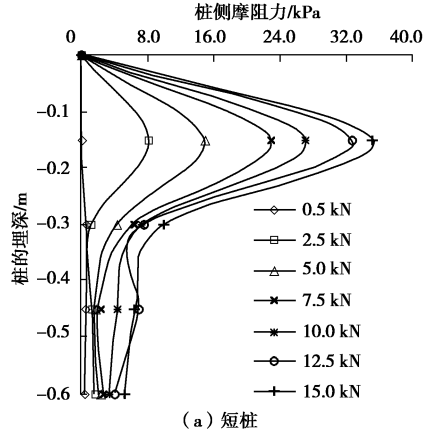
(a) 短桩



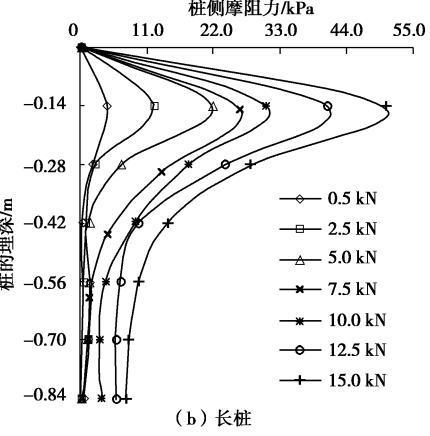
(b) 长桩

图 11 4 根桩桩身轴力分布曲线

Fig. 11 Distribution of axial force in four-pile group



(a) 短桩



(b) 长桩

图 12 4 根桩桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 12 Distribution of skin friction in four-pile group

2.3 8 根桩组合试验结果分析

(1) 8 根桩桩顶荷载与位移试验结果

图 13 为 8 根桩桩顶荷载沉降曲线。从图中可以看出, 8 根桩桩顶荷载沉降曲线变化趋势符合现有相关理论试验的结论。在群桩中长短桩的承载力差异不是很明显, 但是总体而言, 长桩较短桩的承载力高。8 根桩组合试验同 4 根桩组合试验类似, 依据桩顶总荷载量控制加载过程, 8 根桩的桩顶总荷载量为 32 kN,

即平均每根单桩的承载力为 4.0 kN，依据单桩承载力所知， $3.8\text{ kN}\times 4+2.8\text{ kN}\times 4=26.4\text{ kN}$ ，与 4 根桩所得结论较为一致。

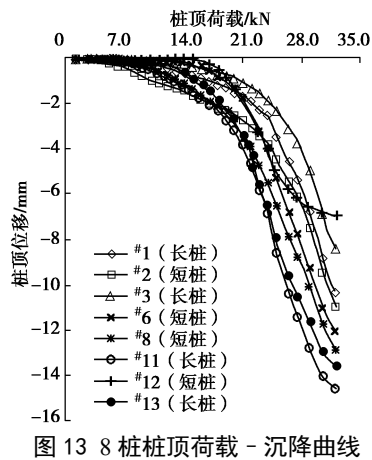
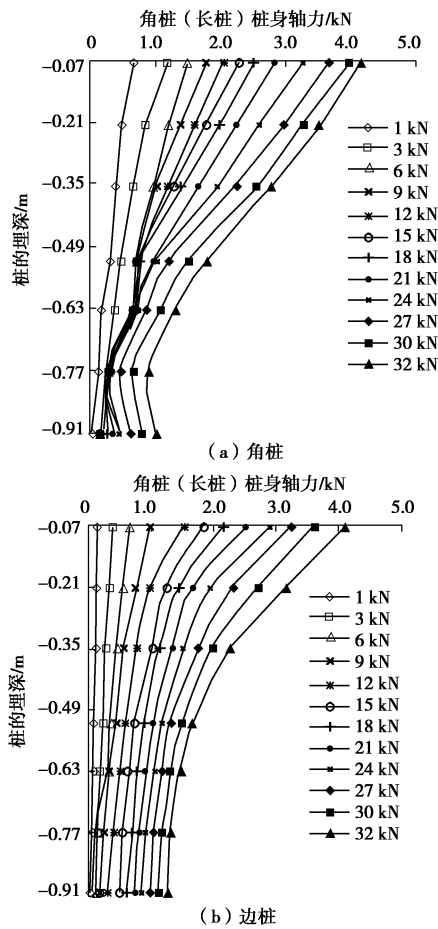


图 13 8 根桩桩顶荷载 - 沉降曲线

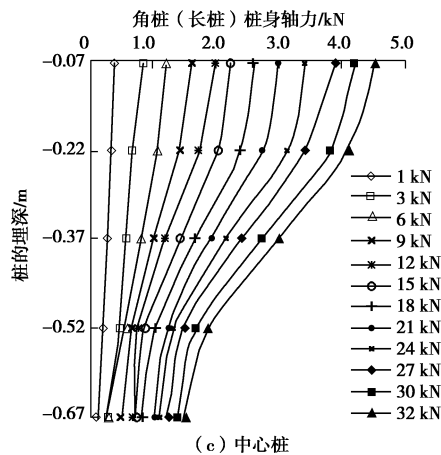
Fig. 13 Load-settlement curves of pile group with eight piles

(2) 8 根桩桩身轴力及桩侧摩阻力试验结果

图 14 分别为在 8 根群桩下角桩、边桩及中心桩桩身轴力分布曲线。从整体桩身轴力曲线分布与单根桩曲线分布来看，其角桩与边桩有明显的不同，而中心桩较为相似。主要表现为角桩和边桩随桩的埋深增加其桩身轴力衰减速率很快，角桩在桩底部位轴力略有增大的趋势，而中心桩桩身轴力衰减速率较为均匀。



(b) 边桩



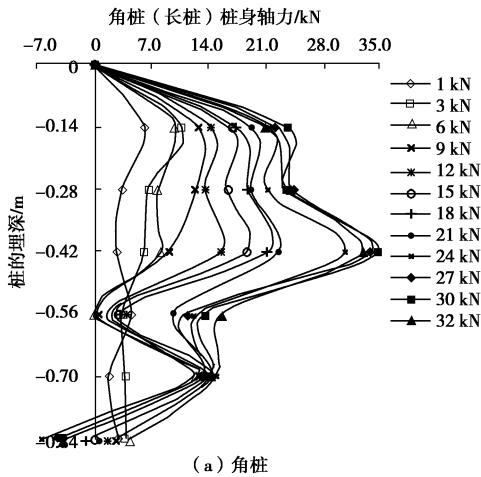
(c) 中心桩

图 14 8 根桩桩身轴力分布曲线

Fig. 14 Distribution of axial force in eight-pile group

从图 14 桩顶荷载来看，角桩和边桩的桩顶荷载分别为 4.15、4.08 kN，而中心桩的桩顶荷载为 3.16 kN，与单桩桩顶荷载相比，角桩、边桩和中心桩桩顶荷载分别提高了 9.2%，7.4%，12.8%，由于群桩效应使得桩顶荷载均略有提高，中心桩提高的幅度最大。

图 15 分别为在 8 根群桩下角桩、边桩及中心桩桩侧摩阻力分布曲线。从曲线来看其总体趋势均为随着桩的埋深桩侧摩阻力先增大后减小，但曲线分布形态有明显的不同。角桩在桩埋深-0.28 m 和-0.56 m 处其桩侧摩阻力有所减小，当桩顶总荷载小于 18 kN 时，在-0.56 m 处其桩侧摩阻力几乎为零，超过 18 kN 后桩侧摩阻力略有增加。在桩底部位桩侧摩阻力出现负值，即正摩阻力变为负摩阻力，出现这种现象是由于桩侧土为人工填土，密实度的均匀性较难保证。边桩的桩侧摩阻力与单桩（长桩）相比总体分布形态类似，但最大值出现的位置不同。单桩最大桩侧摩阻力出现在桩埋深-0.42 m，而群桩中边桩桩侧摩阻力出现在桩埋深的-0.14 m 处。而中心桩与单桩（短桩）桩侧摩阻力分布来看很类似。从桩侧摩阻力的最大值来看均有



(a) 角桩

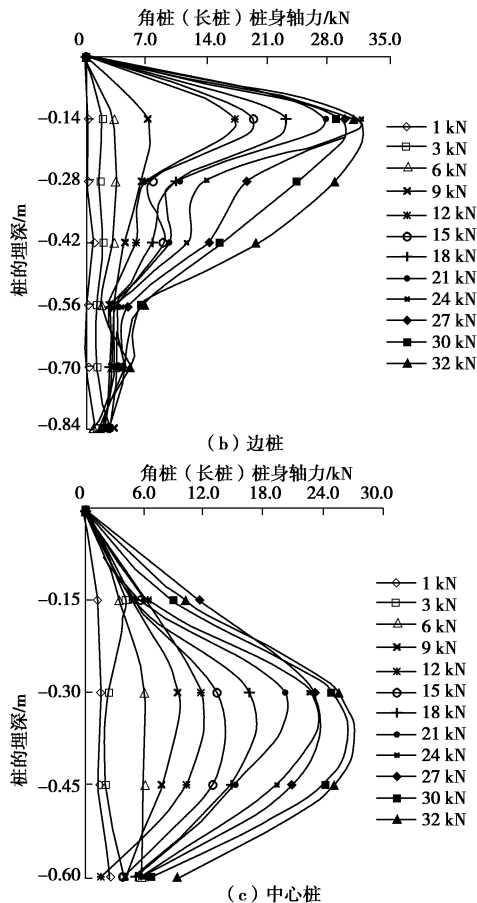


图 15 8 根桩桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 15 Distribution of skin friction in eight-pile group

增加,其角桩、边桩和中心桩分别提高了 27.4%, 13.3% 和 40%, 由此说明在群桩下随着荷载的增加, 桩侧摩阻力发挥程度有明显的增加。

3 结 论

(1) 黄土地基土层交互分布, 桩身轴力和侧摩阻力的发挥具有异步性, 模型桩能很好地模拟桩体的实际受力状态及工作性能, 证明采用长短组合桩基设计思想符合减沉桩原理。

(2) 通过单桩荷载试验可知, 长桩的荷载-沉降曲线有明显的拐点, 即形成“刺入”破坏, 但是短桩不是很明显。长桩的桩身承载力比短桩提高 35.7%。

(3) 在 4 根桩组合试验中, 4 根桩的桩身承载力极限值与单桩约相等, 桩侧摩阻力的最大值出现在桩埋深的 1/3 处, 超过 1/3 埋深后减小的速率较大。长桩所承担的荷载比例比短桩高 42%, 即与单桩试验中长桩桩身承载力比短桩提高的幅度基本一致。

(4) 在 8 根桩试验中, 角桩的桩身荷载比边桩、中心桩都大, 与单桩试验相比, 其长桩(角桩、边桩)和短桩(中心桩)的桩身承载力及桩侧摩阻力均有显著的提高。

参考文献:

- [1] 郭院成, 周同和. 刚性长短桩复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (GUO Yuan-cheng, ZHOU Tong-he. Theory and engineering application of rigid long-short pile composite foundation[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [2] 郭院成, 张四化, 李明宇. 长短桩复合地基试验研究及数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 232 - 235. (GUO Yuan-cheng, ZHANG Si-hua, LI Ming-yu. Test research and numerical simulation analysis of long-short piles composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 232 - 235. (in Chinese))
- [3] 朱小军, 杨 敏, 杨 桦, 等. 长短桩组合桩基础模型试验及承载性能分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 580 - 586. (ZHU Xiao-jun, YANG Min, YANG Hua, et al. Study on bearing behaviors and model tests of composite pile foundation with long and short piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 580 - 586. (in Chinese))
- [4] 宋建学, 李迎乐, 周同和. CFG-PHC 组合式长短桩复合地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 119 - 122. (SONG Jian-xue, LI Ying-le, ZHOU Tong-he. Static loading tests on long-short CFG-PHC pile integrated composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 119 - 122. (in Chinese))
- [5] 葛忻声, 鹿宏伟, 李 斌, 等. 长短桩复合地基荷载分担比的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2012, 43(3): 362 - 367. (GE Xin-sheng, LU Hong-wei, LI Bin, et al. Model test study on load sharing ratio of composite foundation with long-short piles[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2012, 43(3): 362 - 367. (in Chinese))
- [6] 代国忠, 李文虎, 林道富. 长短桩组合多元复合桩基技术的应用研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊 1): 640 - 644. (DAI Guo-zhong, LI Wen-hu, LIN Dao-fu. Research on application of technology of composite pile foundation with short and long piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1): 640 - 644. (in Chinese))
- [7] 林本海, 方 辉. 长短桩高强复合地基在高层建筑中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 302 - 307. (LIN Ben-hai, FANG Hui. Application of long and short piles high strength composite foundation to high-rise building[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1): 640 - 644. (in Chinese))