

DOI: 10.11779/CJGE201501012

多桩型刚性承台下刚性长短桩复合地基载荷试验分析

周同和¹, 王 非^{1,2}, 赵 宏², 高广运²

(1. 郑州大学综合设计研究院有限公司, 河南 郑州 450001; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 通过两组四桩多桩型刚性桩复合地基现场载荷试验, 分析了多桩型刚性长短桩复合地基桩-土应力、荷载分担及其发展变化的工作性状; 基于复合地基桩土应力及加载过程中深层土体水平位移实测结果, 讨论刚性桩复合地基的应力扩散角理论; 讨论了多桩型刚性长短桩复合地基承载力采用应力复合法计算参数的取值方法。相关成果将有助于复合地基特别是多桩型刚性桩复合地基的理论研究和工程应用, 同时表明进一步进行多桩型复合地基现场试验研究与工程实测的必要性与紧迫性。

关键词: 多桩型; 刚性桩复合地基; 承载力; 发挥系数; 刚度比

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)01-0105-07

作者简介: 周同和(1964-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事地基处理方面的研究与标准编制。E-mail: zth1964@126.com。

Bearing capacity tests on multi-type-pile composite foundation with rigid cap

ZHOU Tong-he¹, WANG Fei^{1,2}, ZHAO Hong², GAO Guang-yun²

(1. Multi-Functional Design and Research Academy of Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on two groups of four-pile field tests on a multi-type-pile composite foundation, the pile-soil stress, load sharing mechanism and its development character of the multi-type-pile composite foundation are analyzed. Based on the test results of horizontal displacement of deep soils in multi-type-pile stress and loading process, the theory of stress diffusion angle of the multi-type-pile composite foundation is discussed. The problems of stress compound method in calculating parameters for the bearing capacity of composite foundations are discussed. This work will contribute to the theoretical and technical development of the composite foundation. Moreover, to solve these problems needs effective tests and filed measurements in the future.

Key words: multi-type-pile; composite foundation; bearing capacity; exerting coefficient; ratio of rigidity

0 引 言

随着复合地基技术及理论的发展, 多桩型复合地基由于可以避免单一桩型的不利因素和融合各桩型的优点在工程中得到应用^[1-3]。由两种或两种以上桩型组成的复合地基称为多桩型复合地基。不同的桩型, 其荷载传递模式和破坏模式不同^[4], 为了充分发挥复合地基的承载力、节约投资, 人们根据工程的不同地基处理需要、工程地质与水文地质特点, 逐渐开始使用多桩型复合地基, 比如刚性桩与柔性桩的组合, 刚性长短桩的组合等。柔性桩强度低不能有效地传递荷载至桩端, 因而难以发挥全长范围的侧摩阻力; 而刚性桩由于桩身强度大、承载力高, 可以有效地传递荷载, 用于复合地基的承载力与变形控制, 避免了柔性桩的一些缺陷。相比而言, 柔性桩则可以用于消除黄土的

湿陷性、砂土的液化, 通过排水固结等作用机理提高软黏土强度和变形模量, 为刚性桩的使用和施工创造条件。因此, 采用刚性桩与柔性桩、长桩与短桩的组合, 可以充分发挥各自桩型的优势, 极大地提高了复合地基的适应性, 同时还可以节约工程造价。多桩型复合地基技术的出现, 扩大了复合地基的应用范围。

以往对多桩型复合地基研究主要集中在刚柔增强体组合的多桩型复合地基现场试验和数值模拟。Liang等^[5]采用有限元分析了桩长、桩径、桩弹性模量以及褥垫层厚度、弹性模型对多桩型复合地基性状的影响等。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978235)

收稿日期: 2014-04-22

表 1 土层参数

Table 1 Parameters of soil layers

层号	类别	层底深度/m	平均厚度/m	承载力特征值/kPa	压缩模量/MPa	压缩性评价
7	粉质黏土	-11.20	1.90	120	4.6	高
7-1	粉土	-13.30	2.10	120	7.1	中
9	粉砂	-17.00	3.70	280	24.0	低
10	粉砂	-19.70	2.70	300	26.0	低
11	粉土	-23.60	3.90	280	20.0	低
12	细砂	-28.50	4.90	310	28.0	低
13	粉质黏土	-38.90	10.40	310	12.4	中
14	粉质黏土	-48.40	9.50	320	12.7	中

Zheng 等^[6]用 ANSYS 软件模拟了 CFG 桩和灰土桩组成的多桩型复合地基，分析了桩径、桩长、褥垫层厚度等参数对复合地基的性状的影响。Sari 等^[7]采用 PLAXIS 有限元软件分析了用多桩型复合路基的固结沉降，表明多桩型的复合地基的固结沉降速率明显，路基也更稳定。葛忻声等^[8]对软土中由钢筋混凝土桩与水泥搅拌桩组合而成的长短桩复合地基荷载传递利用有限元进行了研究。闫明礼等^[9]从复合模量入手给出了一种评估多桩型复合地基承载力和变形的计算方法。王士杰等^[10]通过现场测试，讨论了碎石桩与 CFG 桩复合桩型在沿海软土地基处理中的运用，分析了桩土应力变化规律、桩土共同作用机理及荷载分担比的变化。王明山等^[11]结合工程实例分析了多桩型复合地基的桩土应力比、荷载分担比、桩与土承载力发挥等。Liu 等^[12]通过工程实例分析了桩承式加筋高速公路复合地基中的桩及桩间土受力、孔隙水压力、沉降和水平位移，表明复合地基中存在土拱效应。

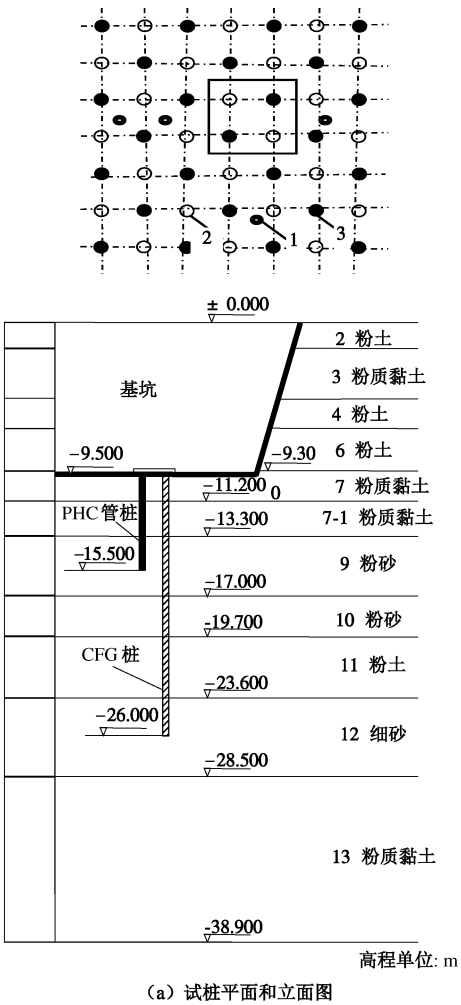
以上主要研究局限在刚柔增强体组合的多桩型复合地基方面，对多桩型刚性长短桩复合地基的试验研究目前较少。加之，目前多桩型刚性长短桩复合地基的受力机理尚不十分明确，现有经验计算方法中经验系数均需要通过现场试验进行验证。为此，本文根据郑州某工程场地多桩型复合地基的现场试验，研究了该试验条件下多桩型复合地基桩土应力、桩土应力比变化规律，增强体桩侧负摩擦阻区与上刺入量、复合地基应力扩散的关系，并探讨了多桩型复合地基增强体单桩与桩间土承载力发挥系数的影响因素与取值建议。

1 现场载荷试验概况

现场单桩和四桩（CFG 桩和 PHC 桩组合）复合地基静载荷试验依托郑州市十二里屯城中村改造项目。场地内潜水埋深 7.0~29.0 m，主要土层为粉土、

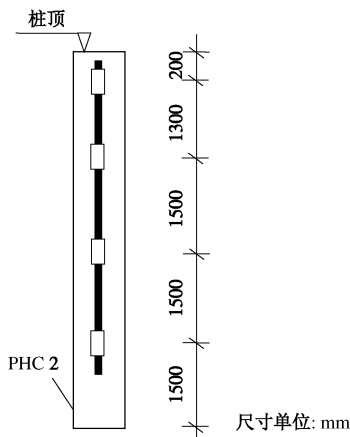
粉质黏土、粉砂和细砂层，其中粉土、粉质黏土和粉砂层为弱透水层，中砂层为强透水层。地层分布及土体物理力学性质指标如表 1 所示。

本次进行了 3 根 PHC、3 根 CFG 单桩承载力和由 PHC 与 CFG 组成的 2 组四根长短桩组成的复合地基静载荷试验，试验采用慢速维持荷载法。试验桩施工次序为：先进行 PHC 桩静压后进行 CFG 桩施工（采用 C30 级混凝土），为消除边桩效应，采用正方形布置 10×10 根 PHC 和 CFG 桩增强体，桩间距 1.3 m。试验位置和布桩示意、现场照片如图 1 所示。

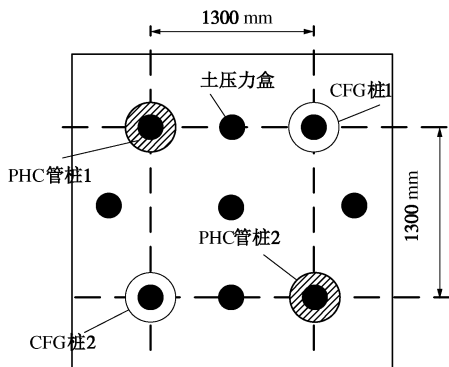




(b) 现场照片



(c) PHC桩芯混凝土应力计布置



(d) 土压力盒测点布置

图 1 多桩型复合地基试验布置

Fig. 1 Layout of multi-type-pile composite foundation tests

复合地基试验荷载板为 3.2 m×3.2 m 刚性板, 褥垫层采用粗砂、厚度 100 mm。分别对距荷载板边一定距离的深层土体水平位移、PHC 桩身轴力、桩顶与土应力、荷载板沉降进行了监测。现场监测布点布置和试验相关参数分别详见图 1、表 1~3。

表 2 增强体桩参数

Table 2 Pile parameters in field tests						
类别	桩型	编号	混凝土强度等级	桩长 /m	桩径 /mm	褥垫层厚度 /mm
短桩	PHC 管桩	PHC1	C80	6.0	400	100
		PHC2	C80	6.0	400	100
长桩	CFG 桩	CFG1	C30	16.5	400	100
		CFG2	C30	16.5	400	100

表 3 CFG 桩和 PHC 桩侧阻力特征值与端阻力特征值

Table 3 Characteristic values of shaft resistance and end resistance of CFG and PHC piles

层号	CFG 桩		PHC 桩	
	q_{sia}/kPa	q_{pa}/kPa	q_{sia}/kPa	q_{pa}/kPa
7	18		17	
7 ₁	28		29	
9	32		43	1100
10	36			
11	32			
12	38	500		

注: CFG 桩桩端在第 12 层土中; PHC 桩桩端在第 9 层土中。

2 试验结果与分析

2.1 单桩静载荷试验结果

依据《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2012)^[13]初步估算 PHC 管桩、CFG 桩单桩承载力特征值分别为 367 kN 和 761 kN。依据现场试验结果(表 4), 取 PHC 桩 R_{a1} =500 kN, CFG 桩 R_{a2} =1280 kN。两者相比, 单桩静载荷试验中 CFG 桩承载力偏大些。

表 4 单桩竖向抗压静载荷试验结果

Table 4 Results of vertical compressive static load tests on a single pile

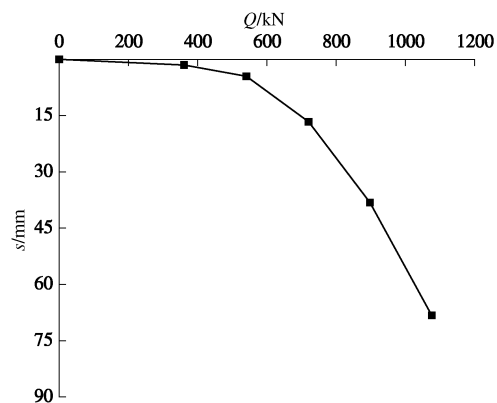
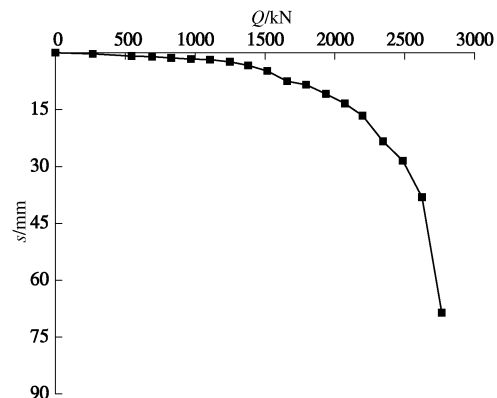
桩型	编号	对应桩号	最大加载量/kN	最大沉降量/mm	极限承载力/kN
PHC-400A95	0001	32	1080	68.27	900
	0002	24	1440	76.89	1200
	0003	41	1080	80.00	900
CFG 桩	0004	55	2760	68.49	2622
	0005	57	2208	62.81	2210
	0006	54	3174	67.08	2898

图 2, 3 分别为 PHC 桩与 CFG 桩单桩静载荷试验 $Q-s$ 曲线。从中可以看出, PHC 桩与 CFG 桩承载力特征值分别约为 500, 1280 kN 时, 桩顶沉降量分别约为 3.4, 2.6 mm。假定刚性桩达到其承载力特征值前的沉降变形为弹性或接近弹性变形, 二者变形刚度比为 3.4/2.6=1.3。该值与复合地基载荷试验中的 1.43 相差不大。

2.2 四桩复合地基静载荷试验结果

(1) 荷载-沉降($p-s$)曲线

四桩复合地基静载荷试验前, 依据文献[13]方法估算, 确定复合地基承载力特征值为 550 kPa。试验过程中发现加载达到 1100 kPa 时荷载板沉降量较小, 决定再追加二级荷载。受场地和加载条件限制, 考虑加载试验很难实现复合地基破坏, 最终确定终止荷载为 1320 kPa。

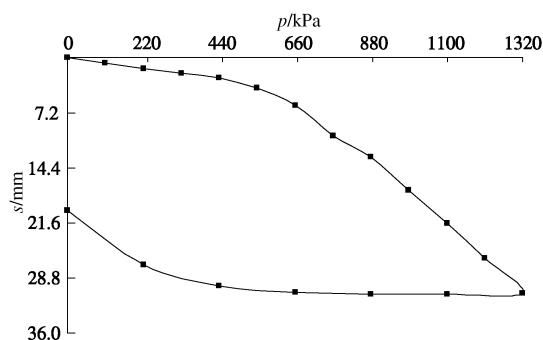
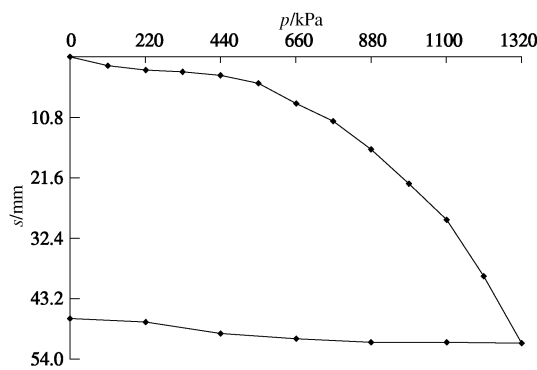
图 2 PHC 桩单桩静载荷试验 $Q-s$ 曲线Fig. 2 $Q-s$ curve of static load tests on a single PHC pile图 3 CFG 桩单桩静载荷试验 $Q-s$ 曲线Fig. 3 $Q-s$ curve of static load tests on a single CFG pile

两组试验 $p-s$ 曲线如图 4 所示, $p-s$ 曲线为缓变型, 沉降量均小于规范规定的最大沉降量 $s=0.01b$, 复合地基承载力特征值试验取值为 660 kPa, 对应沉降量分别为 6.3, 9 mm。

(2) 桩顶刺入变形与桩身轴力

a) 桩刺入变形

试验结束后, 将最终桩顶与桩间土顶沉降差近似视为桩顶上刺入量。第一组试验: CFG 桩 (长桩) 桩顶刺入量约为 12 mm, PHC 桩 (短桩) 桩顶刺入量约为 2.8 mm, 分别占总沉降的 40% 和 9%; 第二组试验: CFG 桩 (长桩) 桩顶刺入量约为 5.7 mm, PHC 桩 (短桩) 桩顶刺入量约为 0.4 mm, 分别占总沉降的 28% 和 2%。

(a) 第一组 4 桩组合式长短桩复合地基静载荷试验 $p-s$ 曲线(b) 第二组 4 桩组合式长短桩复合地基静载荷试验 $p-s$ 曲线图 4 两组复合地基 $p-s$ 试验曲线Fig. 4 $p-s$ curves of composite foundation tests

b) 桩身轴力

试验中, 预先在 PHC 桩管内填芯混凝土中埋设轴力计, 用以测量桩身轴力, 如图 5 所示。图中最大轴力点位于桩顶以下 1.5~3.0 m 间; 对应 660, 1320 kPa 时桩顶荷载平均值分别为 390, 710 kN。

上述试验结果表明: ①荷载越大、桩上部负摩阻力越大, 显然, 增强体桩的上刺入量也就越大; ②本次试验条件下刚性长短桩复合地基沉降变形中承载力较高的长桩对褥垫层的上刺入变形所占比例较大; ③由于褥垫层的存在, 复合地基增强体上部存在负摩阻力, 理论上在采用应力复合法进行复合地基承载力计算时, 由于计算平面位于桩顶平面, 所以应对自由单桩载荷试验得到的单桩承载力进行折减, 现行规范^[13]采用折减系数 λ 。

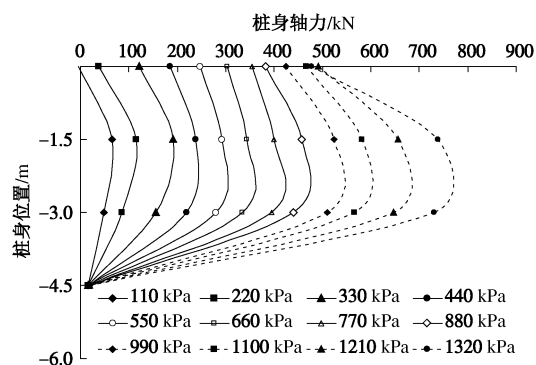


图 5 复合地基中 PHC 桩桩身轴力典型分布

Fig. 5 Typical distribution of axial force of PHC pile in composite foundation

(3) 桩-土应力与桩土压力比

试验中, 通过在桩和桩间土顶部分别布设土压力盒测量桩、土应力。随着荷载增加, 桩间土应力先快速增大, 后缓慢增至最大值, 随后略有减小。表明加载前期桩间土承载力发挥较大, 随着承台板沉降增加, 褥垫层调节桩土应力的功能逐渐显现, 桩逐步承担更多荷载。且长桩 (CFG 桩) 分担荷载明显大于短桩

(PHC 桩)。

表 5~7 分别给出了两组试验桩顶与压板底土的应力、桩土应力比。对应于荷载 660, 1320 kPa 时, CFG

表 5 分级荷载下桩间土应力

Table 5 Soil stresses between piles under grading load (kPa)

荷载级数	1 组	2 组	荷载级数	1 组	2 组
预压	30	42	7	129	142
1	55	66	8	137	147
2	93	82	9	136	151
3	102	100	10	142	152
4	113	112	11	144	163
5	120	123	12	141	172
6	126	134	卸 1	140	158

表 6 桩顶与桩间土应力 (对应 660 kPa)

Table 6 Pile top and soil stresses between piles

项目	第一组试验			第二组试验		
	应力 /MPa	平均桩土应力比 n	桩顶荷载/kN	应力 /MPa	平均桩土应力比 n	桩顶荷载/kN
CFG 桩	—	86	1360	—	89	1500
PHC 桩	3.740	29.7	470	2.470	18.4	310
桩间土	0.126	1	—	0.134	1	—

桩与 PHC 桩平均桩土应力比分别为 87.5/24.1 和 167.5/37, 即由 3.6/1 增加到 4.5/1, 说明承载力较高的 CFG 桩土应力比远高于承载力较低的 PHC 桩。同时表明, 随荷载增加, CFG 桩承载力发挥度逐渐大于 PHC 桩。

试验得到的桩间土应力平均值对应于荷载 660, 1320 kPa 时, 分别为 130, 157 kPa, 后者为前者的 1.2 倍, 增加量小于荷载增量。与此同时, CFG 桩测得的荷载增量平均为 1.91 倍, PHC 桩测得的荷载增量平均为 1.54 倍。考虑到二者单桩承载力特征值之比为 2.56, 初步分析认为: 多桩型复合地基中不同增强体桩的桩土应力比, 很难直接与承载力之比发生关系, 应更可能与其竖向承载的变形刚度相关。这一判断对多桩型复合地基承载力计算时, 各增强体桩承载力的发挥系数取值的确定有重要意义。毫无疑问, 对于多桩型刚性长短桩复合地基, 尚需要考虑短桩桩端应力对长桩承载力的增强效应。

表 7 桩顶与桩间土应力 (对应 1320 kPa)

Table 7 Pile top and soil stresses between piles

项目	第一组试验			第二组试验		
	应力 /MPa	平均桩土应力比 n	桩顶荷载/kN	应力 /MPa	平均桩土应力比 n	桩顶荷载/kN
CFG 桩	—	183	3240	—	152	3280
PHC 桩	6.21	44	780	5.12	30	640
桩间土	0.141	1	—	0.172	1	—

(4) 增强体桩与土承载力发挥度

前已述及, 2 组四桩复合地基载荷试验得到的桩间土应力平均值对应于荷载 660, 1320 kPa 时, 分别为 130, 157 kPa, 后者为前者的 1.2 倍; 测得的 CFG 桩桩顶荷载平均值分别为 1430, 3260 kN, 荷载增量为 1.91 倍; 测得的 PHC 桩桩顶荷载平均值分别为 390, 710 kN, 荷载增量为 1.54 倍。

对桩间土, 勘察报告提供的相应土层天然地基承载力特征值为 120 kPa。可见, 刚性桩复合地基中桩间土承载力发挥系数可取 1.0。此外, 当荷载超出复合地基承载力特征值后, 继续增加荷载至极限值, 桩间土的承载力发挥系数由 1.0 左右增加到 1.2, 增幅较小。表明: 假定试验条件下复合地基作用荷载到达其极限承载力, 桩间土承载力发挥系数最大为 1.2, 意味着桩将承担较多的增量荷载, 这为进行承载力深度修正后的复合地基中桩身强度验算提供了实测依据。

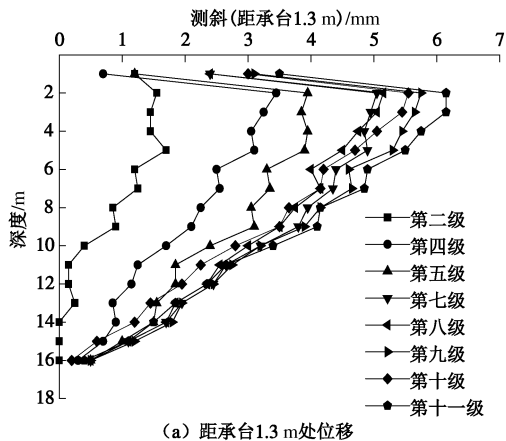
对承载力较高 (变形刚度较大) 的 CFG 桩, 对应于复合地基承载力特征值和 2 倍该值时, 承载力发挥系数平均为 1.12, 1.27 (相对单桩极限承载力), 均大于 1.0。分析认为, 桩长较短的 PHC 桩在荷载作用下, 产生的较大桩端应力对 CFG 桩相应段桩侧产生的挤密效应和环向应力增加效应的作用, 提高了 CFG 桩的承载力。因此, 在多桩型刚性桩复合地基中, 当桩身强度得到保证时, 长桩的单桩承载力发挥系数有大于 1.0 的可能。

对应于复合地基承载力特征值和 2 倍该值时, PHC 承载力发挥系数平均为 0.78、0.71 (相对单桩极限承载力), 均小于 1.0。与 CFG 桩相比发挥系数比分别为 1.43 和 1.79。

综合上述分析, 基础刚度足够大时, 竖向沉降变形刚度较小的复合地基增强体的承载力发挥系数小于竖向沉降变形刚度较大的复合地基增强体。

(5) 深层水平位移

图 6 为第一组试验中分级荷载下距荷载板 (承台) 边缘 1.3, 3.6 m 处深层土体水平位移曲线。随荷载增



(a) 距承台 1.3 m 处位移

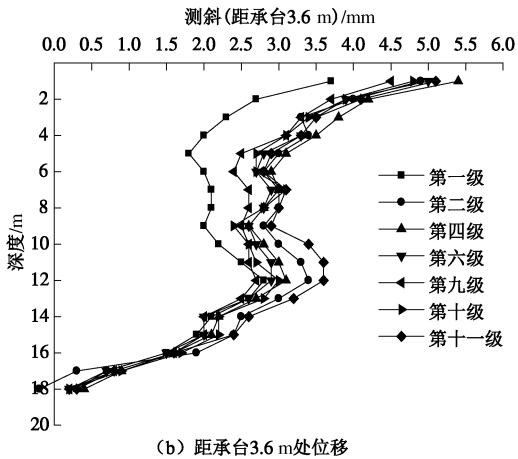


图 6 深层土体侧向位移曲线

Fig. 6 Lateral displacement curves of deep soils

加, 深层土体侧向位移逐渐增加, 加载初期变形增速较快, 后期变化减小。

表 8 给出了最大深层土体水平位移监测结果。第一组试验中, 距承台边 1.3 m 处测孔, 第八级荷载后土的水平位移量变化较小; 距承台边 3.6 m 处测孔, 第四级荷载后土体水平位移变化不大。加载至 1210 kPa, 水平向距承台板边缘 1.3, 3.6 m 处, 垫层底平面土体水平位移分别为 6.4, 5.5 mm。

表 8 最大深层土体水平位移

Table 8 Maximum horizontal displacements of deep soils

测斜孔		最大水平位移 s_v/mm	对应荷载值 $/\text{kPa}$	与压板边距 $/\text{m}$	对应压板沉降 s/mm	位移比 s_v/s
I	cx ₁ -1	6.4	1210	1.30	28	0.23
	cx ₁ -2	3.6	1210	3.60	28	—
II	cx ₂ -1	14	1210	1.35	39	0.36
	cx ₂ -2	7.3	1210	3.70	39	—

受承台和增强体桩上部负摩阻区的影响, 距承台 1.3 m 处浅层土的侧向变形小于深层土。承台底面以下 2 m 左右深度平面处侧向位移最大, 侧向水平位移随深度增加逐渐减小 (图 6 (a))。距承台 3.6 m 处, 随着测点与承台距离增加, 土体受承台的作用产生的水平位移较大的区域为承台底面以下 1~5 m 之间, 随荷载增加这一区域逐渐加深。表明土体已产生剪切位移且剪切面逐步加深 (图 6 (b))。

以上表明, 在上部荷载作用下, 土体发生较大剪切位移且发展到一定深度后, 无边载情况下, 上部更多荷载逐步由桩承担。

此外, 如图 6 (b) 所示, 至荷载板边外 3.6 m, 长桩桩端以上深层土体仍可产生 1.5~5.5 mm 的侧向位移, 说明复合地基中存在明显的应力扩散现象, 且应力可能从某一深度 (可能的中性点^[14]) 开始以一定角度 θ 发生扩散 (图 7)。

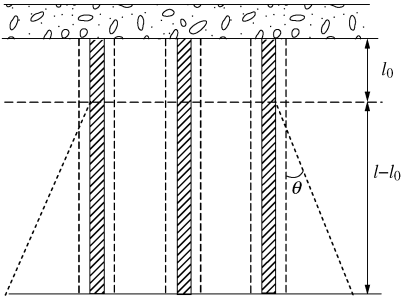


图 7 复合地基应力扩散模型

Fig. 7 Stress diffusion model of composite foundation

3 复合地基桩土承载力发挥系数取值

笔者曾对郑州企业总部基地某工程刚性长短桩复合地基进行了桩土承载力发挥系数实测试验, 在工程主体竣工后一定时间, 桩间土承载力发挥系数为 0.87~1.01, 结合本次试验成果, 参照规范^[13]进行多桩型刚性桩复合地基承载力估算时, 桩间土发挥系数可取 1.0。当有超载时, 桩间土可以承担比其特征值更大的荷载。

对于单桩, 承载力发挥度除与竖向沉降变形刚度、短桩桩端应力对长桩产生的增强效应相关外, 还应与褥垫层材料以及厚度有关。当然, 长桩与短桩直径不同时, 褥垫层厚度的影响将更加复杂化。根据以往试验成果, 垫层厚度相同的多桩型刚性等长桩复合地基承载力估算时, 竖向承载沉降变形刚度较大的增强体单桩承载力发挥系数可按文献^[13]取 $\lambda_1=0.8\sim0.9$, 竖向沉降变形刚度较小的增强体单桩承载力发挥系数可按式 (1) 取值:

$$\lambda_2 = \lambda_1 / n \quad (1)$$

式中, n 为刚度较大增强体与刚度较小增强体单桩竖向变形刚度比, 可由单桩载荷试验或地区经验得到。对垫层厚度相同等长度不同直径刚性桩复合地基, 无试验资料和经验时也可采用计算的单桩承载力特征值比 (可假定刚度比等于承载力之比), 同时对 λ_2 进行一定的折减。对垫层厚度相同的多桩型刚性长短桩复合地基承载力估算时, 竖向承载沉降变形刚度较大的长桩单桩承载力发挥系数可取 0.8~1.0, 短桩承载力发挥系数按式 (1) 由竖向抗压承载变形刚度比确定。

4 结论与建议

通过本次单桩和多桩型复合地基现场试验, 分析了复合地基荷载分配和传递机理、桩与土的承载力发挥度、以及应力扩散等问题。主要研究结论如下:

(1) 刚性基础条件下复合地基中刚性桩上部存在负摩阻力, 受负摩阻力的作用, 单桩承载力的发挥系数一般小于 1.0。本文试验条件下 (垫层厚度为桩直径

的 1/4), 多桩型刚性桩复合地基桩间土承载力发挥系数可达 1.0; 受到短桩桩端应力的影响, 竖向沉降变形刚度较大的长桩承载力发挥系数可能大于 1.0。

(2) 刚性长短桩复合地基中, 竖向沉降变形刚度较小的增强体单桩承载力发挥系数小于沉降变形刚度较大的增强体单桩。

(3) 垫层厚度相同条件下, 同直径刚性长短桩复合地基, 增强体桩承载力发挥系数与其竖向沉降变形刚度成一定的比例关系。

(4) 受到负摩阻区的影响, 复合地基应力扩散起点应在垫层底下一定深度 (可能位于长短桩中性点平面位置), 分析应力扩散起点位置和应力扩散角对复合地基下卧层强度验算具有重要工程价值, 今后应加强此方面理论与工程实测研究。

参考文献:

- [1] 周德泉, 张可能, 刘宏利. 组合桩型复合地基计算与应用分析[J]. 岩土力学, 2004, **25**(9): 1432 - 1436. (ZHOU De-quan, ZHANG Ke-neng, LIU Hong-li. Application and calculation analysis of combined pile composite foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(9): 1432 - 1436. (in Chinese))
- [2] 王步云, 赵秀芹. 砂石桩与低强度混凝土桩组合型复合地基在软土地基中的应用 (I) [J]. 岩土工程技术, 1997(1): 8 - 14. (WANG Bu-yun, ZHAO Xiu-qin. The application in the soft soil ground of the composite foundation of sand-stone pile and concrete pile with low strength (I)[J]. Geotechnical Engineering Technique, 1997(1): 8 - 14. (in Chinese))
- [3] 王步云, 赵秀芹. 砂石桩与低强度混凝土桩组合型复合地基在软土地基中的应用 (II) [J]. 岩土工程技术, 1997(2): 3 - 5. (WANG Bu-yun, ZHAO Xiu-qin. The application in the soft soil ground of the composite foundation of sand-stone pile and concrete pile with low strength(II)[J]. Geotechnical Engineering Technique, 1997(2): 3 - 5. (in Chinese))
- [4] 崔 激, 闫澍旺, 周宏杰. 多桩型复合地基的荷载传递机理研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(2): 290 - 294. (CUI Wei, YAN Shu-wang, ZHOU Hong-jie. Load transfer behavior of multi-type-pile composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(2): 290 - 294. (in Chinese))
- [5] LIANG Fa-yun, CHEN Long-zhu, SH Xu-guang. Numerical analysis of composite piled raft with cushion subjected to vertical load[J]. Computers and Geotechnics, 2003, **30**(6): 443 - 453.
- [6] ZHENG Jun-jie, ABUSHARAR S W, WANG Xian-zhi. Three-dimensional nonlinear finite element modeling of composite foundation formed by CFG-lime pile[J]. Computers and Geotechnics, 2008, **35**(4): 637 - 643.
- [7] ABUSHARAR S W, ZHENG Jun-jie, CHEN Bao-guo. Finite element modeling of the consolidation behavior of multi-column supported road embankment [J]. Computers and Geotechnics, 2009, **36**(4): 676 - 685.
- [8] 葛忻声, 龚晓南, 张先明. 长短桩复合地基设计计算方法的探讨[J]. 建筑结构, 2002, **32**(7): 3 - 4, 7. (GE Xin-sheng, GONG Xiao-nan, ZHANG Xian-ming. FEM analysis and design of long-short-pile composite foundation[J]. Journal of Building Structures, 2002, **32**(7): 3 - 4, 7. (in Chinese))
- [9] 闫明礼, 王明山, 闫雪峰, 等. 多桩型复合地基设计计算方法探讨[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(3): 352 - 355. (YAN Ming-li, WANG Ming-shan, YAN Xue-feng, et al. Study on the calculation method of multi-type-pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(3): 352 - 355. (in Chinese))
- [10] 王士杰, 何满潮, 李凤琴, 等. 多桩型复合地基承载特性的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, **3**(5): 64 - 69. (WANG Shi-jie, HE Man-chao, LI Feng-qin, et al. Testing study on bearing characteristics of multi-type-pile composite foundation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, **3**(5): 64 - 69. (in Chinese))
- [11] 王明山, 王广驰, 闫雪峰, 等. 多桩型复合地基承载性状研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**((10)): 1142 - 1146. (WANG Ming-shan, WANG Guang-chi, YAN Xue-feng, et al. In-situ tests on bearing behavior of multi-type-pile composite subgrade[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(10): 1142 - 1146. (in Chinese))
- [12] LIU H L, NG Charles W W, ASCE M, et al. Performance of a geogrid-reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay: case study[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(12): 1483 - 1493.
- [13] JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 2012. (JGJ 79—2012 Technical code for ground treatment of buildings[S]. 2012. (in Chinese))
- [14] 范跃武, 周同和, 范永丰. “柔性基础”刚性桩复合地基试验分析与变形计算[J]. 建筑结构学报, 2007, **28**(6): 203 - 209. (FAN Yue-wu, ZHOU Tong-he, FAN Yong-feng. Working mechanism analysis and deformation calculation on rigid pile reinforced soil with flexible foundation[J]. Journal of Building Structures, 2007, **28**(6): 203 - 209. (in Chinese))