

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0826-06

刚柔复合桩基性状的有限元分析

张世民¹, 魏新江¹, 魏 纲¹, 吴 宏²

(1. 浙江大学 城市学院, 杭州 310015; 2. 浙江省交通工程建设集团 第三交通工程有限公司, 杭州 310013)

摘 要: 通过建立的 6×6 桩刚柔桩基模型, 对复合桩基协同工作性状进行了三维有限元分析。研究了在不同刚、柔性桩数比例与不同荷载水平下桩顶荷载、地基中应力与应变的变化规律。如果刚、柔性桩数比例不变、桩承受荷载小于其承载力极限值, 则在不同荷载水平下刚、柔性桩顶所受荷载比值基本不变; 同一荷载水平下存在刚性桩数与总桩数的一个经济比例 (不大于 40%), 当刚性桩数与总桩数比小于该比例时, 增加刚性桩数量能有效减少浅层土中的应力, 减沉效果明显; 当刚、柔性桩数比例大于该比例时, 增加刚性桩数量, 地基中应力与应变减少效果不显著。

关 键 词: 刚柔复合桩基; 有限元分析; 刚柔桩荷载比; 应力; 沉降

中图分类号: TU 473; TB 115

文献标识码: A

Finite element analysis of rigid-soft composite pile foundation

ZHANG Shi-min¹, WEI Xin-jiang¹, WEI Gang¹, WU Hong²

(1. City College, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China;

2. The Third Transportation Engineering Co. Ltd., Zhejiang Provincial Transportation Engineering Construction Group, Hangzhou 310013, China)

Abstract: A model of 6×6 piles rigid-soft-pile foundation was established to analyze coordinative working performance of composite pile foundation with the three-dimensional FEM. When the ratio of the rigid-soft -pile-number and loading level becomes, the changing rule of loading on the top of the piles and strain-stress in the foundation was researched. If the rigid-soft-piles-number ratio is constant and the piles' loading is lower than their ultimate loading capacity, under different loading levels, the rigid-soft-pile-loading ratio is nearly invariable. Under the same loading level, there is economical ratio (lower than 40 %) of the rigid-total-piles-number. When the rigid-total-pile-number ratio is lower than it, the stress in superficial layer reduces effectively with the number of rigid piles increased. And the effect of decreased-settlement is also obvious. When the rigid-total-pile-number ratio is higher than it, increased the number of rigid piles reduces the stress and strain in the foundation un-apparently.

Key words: rigid-soft composite pile foundation; finite element analysis; rigid-soft pile load ratio; stress; settlement

1 引 言

刚柔复合桩基由刚性桩和柔性桩组合而成, 且大都为长短桩相结合的形式, 是一种比较新的基础形式, 亦是相对于刚性桩复合地基、柔性桩复合地基而提出的一个新概念^[1]。

在刚性基础底板及褥垫层下刚性桩、柔性桩与土体共同承担上部荷载并协调变形, 由于复合桩基中刚性桩刚度远比桩间土大, 在刚性基础底板下等量变形时地基中应力以材料模量进行分布, 因此大部分荷载由桩体承担, 而桩间土应力相对较小, 形成“桩体效应”^[2]。柔性桩与土体共同作用, 形成的复合土层性能远优于原天然土层, 类似换土垫层

作用, 可起到均匀地基应力和增大应力扩散角的作用, 形成“垫层效应”^[3], 这样刚柔复合桩基就形成“桩体效应”和“垫层效应”的双重作用, 从而得到高强度的地基。

目前许多学者对刚柔复合桩基的性状进行了研究, 包括利用有限元方法研究得出刚柔桩复合地基由于长桩的存在使浅层土应力减少、较深层土的沉降值降低^[4]; 对复合桩基承台底土阻力群桩效应系数的研究得出承台底土阻力及其群桩效应系数随承台宽与桩长之比、桩距增大而增大, 随桩数增多而减小^[5]的结论; 用有效应力分析法建立三维复合桩基模型, 用于固结变形分析^[6]等。但在总桩数不变, 且在不同荷载水平作用下, 柔性桩数和刚性桩

收稿日期: 2006-04-27

作者简介: 张世民, 男, 1974 生, 硕士, 主要从事复合地基和桩基础方面的教学与研究。E-mail: zhangsm@zucc.edu.cn

数所占比例不同时刚柔复合桩基性状的数值分析尚未见报道。本文采用三维有限元程序对刚柔复合桩基进行了数值模拟,分析得到刚柔复合桩基中刚性桩和柔性桩受力与变形性状的规律。

2 有限元模型及参数确定

2.1 模型尺寸确定

采用有限元程序对一刚柔复合桩基 6×6 桩的群桩及承台模型进行计算,该模型承台、荷载和边界条件等均具有对称性,故取模型的 $1/4$ 作为研究对象。通过试算,该刚柔性桩复合桩基模型的计算范围平面尺寸确定为横向 $28D$ ($D=500$ mm, 为方桩边长),如图 1 所示。该对象是一个三维体系,其三维坐标示意图见图 2。该计算模型的侧立面及三维透视见图 3。

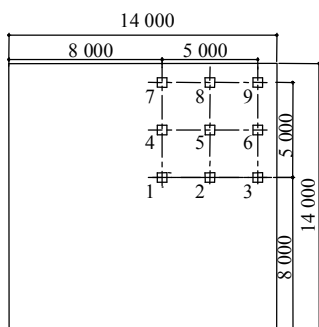


图 1 计算范围平面尺寸(单位: mm)

Fig.1 Plane of size in calculation area(unit: mm)

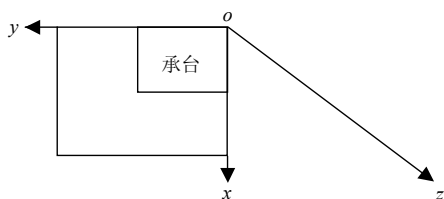


图 2 三维坐标图

Fig.2 Three-dimensional coordinates

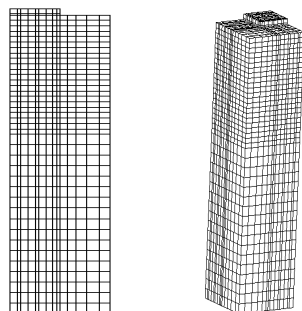


图 3 立面和三维透视

Fig.3 Elevation appearance and shadow perspective

2.2 材料参数与本构模型

刚性长桩、柔性短桩、承台和碎石砂垫层以及土层各计算参数^[7,8]取值见表 1。

表 1 材料物理力学性质指标

Table 1 Physico-mechanical properties of materials

计算 涉及 材料	厚度或 长度 / m	侧阻 极限 / kPa	端阻 极限 / kPa	单桩极限 承载力 / kN	E_s / MPa	c / kPa	φ / (°)	μ
承台	0.5				28 000			0.2
砂石垫层	0.3				9.2	24.5	29.9	0.3
刚性桩	22			1 290	28 000			0.2
柔性桩	10			500	65			0.29
淤泥土层	17	16	550		2.65	14.4	3.1	0.4
黏土层	38	50	1 800		6.23	29.8	14.1	0.35

在 $X=0$ 和 $Y=0$ 面上为对称约束, Z 方向计算深度定为 2.5 倍刚性桩长,在 2.5 倍刚性桩长度处,设为铰接约束。对刚性桩与承台采用线弹性本构模型,对柔性桩和砂石垫层采用弹塑性本构模型,对土体采用 Drucker-Prager 本构模型^[9]。在桩土界面不设接触单元,即假定桩土界面无相对滑移;在承台与桩的界面不设接触单元,即假定桩、砂石垫层和承台界面均无相对滑移。以此模拟地基土、刚柔性桩、垫层和承台在工作荷载作用下的性状。经试算,考虑在 110, 82.5 kPa 和 55 kPa 三种不同荷载水平作用下^[10],刚柔性桩的布置按以下 4 种不同方案进行分布: a: 全为刚性桩; b: $1/3$ 为柔性桩, $2/3$ 为刚性桩,即 1, 5, 9 号桩为柔性桩,其余为刚性桩; c: $2/3$ 为柔性桩, $1/3$ 为刚性桩,即 1, 5, 9 号桩为刚性桩,其余为柔性桩; d: 全为柔性桩。分别计算不同荷载水平和刚柔性桩比例下复合桩基性状。

3 有限元计算结果分析

3.1 刚柔性桩比例与沉降量的关系

在不同荷载水平下复合桩基总沉降量的减少,随刚性桩数比例的增加呈现相同的变化趋势,如图 4 所示。可以看出,复合地基总沉降量随着荷载增加而增加;在同一荷载水平下,刚性桩所占总桩数的比例越大,基础地基沉降越小;无论在何种荷载水平下,当刚性桩所占总桩数的比例小于 40 % 时,增加刚性桩的比率,复合地基总沉降量明显减少,能充分发挥刚性桩减少沉降的作用,此时适当增加刚性桩的比率,可明显减少基础沉降,具有良好的适用性和经济性;当刚性桩所占总桩数的比例大于 40 % 时,再增加刚性桩数的比例,复合地基总沉降减少不明显;大于 60 % 后再增加刚性桩数量时,减沉效果可以忽略。

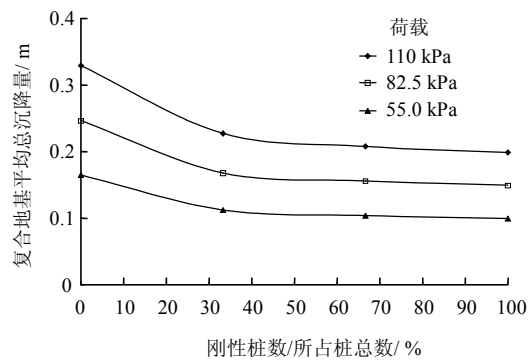


图 4 沉降量与刚性桩所占比例的关系
Fig.4 Relationship between settlement vs. ratio of rigid-total-pile-number

3.2 刚、柔性桩顶所受荷载比

刚性桩数与柔性桩数比例一定时,在不同荷载水平作用下,刚性桩顶与柔性桩顶所承受的荷载及其比值见表 2。可以看出,在刚柔性桩分布一定的情况下,当柔性桩实际承载力小于其极限承载力时,随着外加荷载的增加,刚性单桩和柔性单桩所承受的荷载都增加,但刚性单桩和柔性单桩所承受荷载的比值基本不变。

表 2 刚、柔性单桩承受荷载
Table 2 Loading on the top of rigid pile and soft pile

承台荷载 / kPa	刚性桩占总桩数比例 / %	刚性单桩桩顶荷载 / kN	柔性单桩桩顶荷载 / kN	刚性桩力 / 柔性桩力
55	3.33	364	118	3.085
	66.66	299	63	4.746
82.5	33.33	547	177	3.090
	66.66	448	97	4.619
110	33.33	641	207	3.097
	66.66	598	126	4.746

3.3 地基应力分析

荷载分别为 110, 82.5, 55 kPa 时,在布桩方案 a~d 情况下,计算范围内 XOZ 对称面上地基应力等值线图见图 5~7,其中 A~R 表示不同位置的土体中竖向附加应力。

从图 5~7 中可以看出,不论在何种荷载水平下地基应力都有相同的变化规律:刚性长桩的数量越少,地基中的大应力区越往上移。说明刚性桩的存在,能有效地把应力传递给较深土层,对软土地基来说,就是将部分荷载通过刚性桩直接传递给软土下的较好土层,从而减少软土层的附加应力。同

时也说明如果刚性桩数量在一定范围内增加,就能把更多的荷载传递给软土下的较好土层,这样就解决了软土地基承载力不足的问题,符合工程的实际需要。另外,随着刚性桩数量的增加,荷载在地基中的影响深度加大,但刚性桩数量增加到 66 % 以上时,再增加刚性桩数量,荷载在地基中的影响深度变化不明显。

3.4 地基沉降分析

荷载分别为 110, 82.5, 55 kPa 时,在布桩方案 a~d 情况下,计算范围内 XOZ 对称面上地基沉降等值线图如 8~10 所示,图中 A~R 表示不同位置的沉降量。

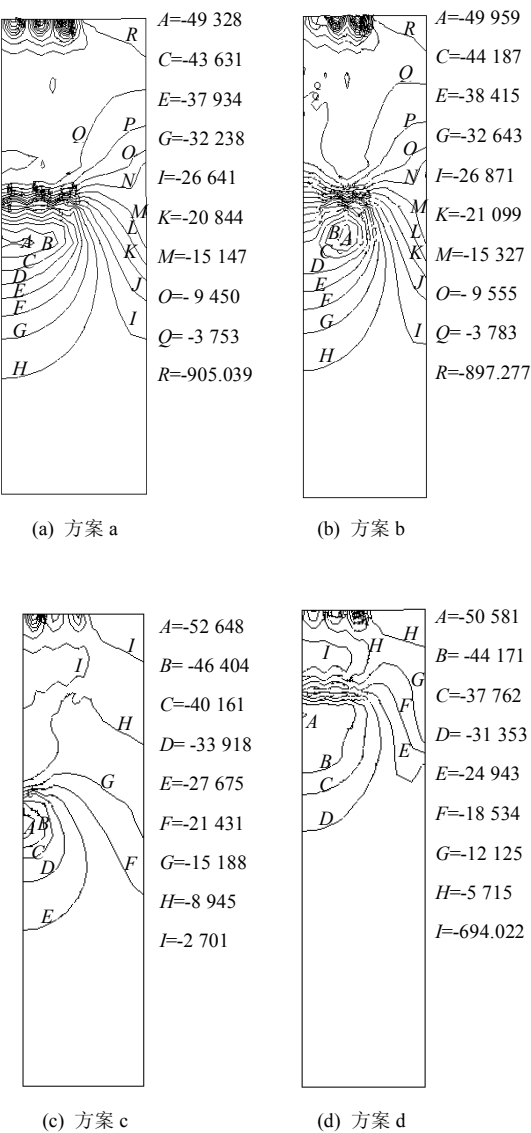


图 5 地基应力等值线图(荷载为 110 kPa) (单位: Pa)
Fig.5 The contour map of stress in soil (loading of 110 kPa, unit: Pa)

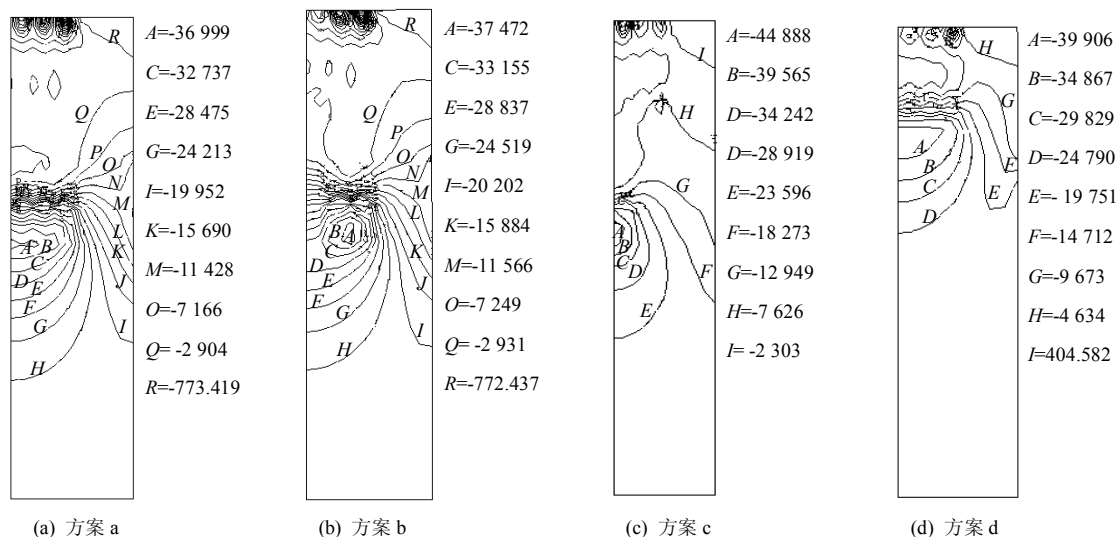


图 6 地基应力等值线图(荷载为 82.5 kPa) (单位: Pa)

Fig.6 The contour map of stress in soil (loading of 82.5 kPa, unit: Pa)

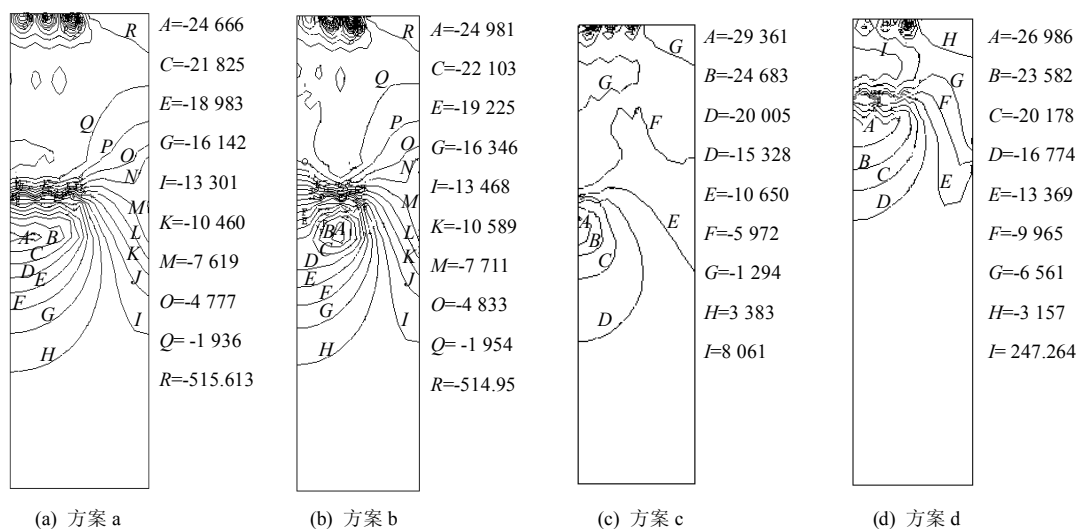


图 7 地基应力等值线图(荷载为 55 kPa) (单位: Pa)

Fig.7 The contour map of stress in soil (loading of 55 kPa, unit: Pa)

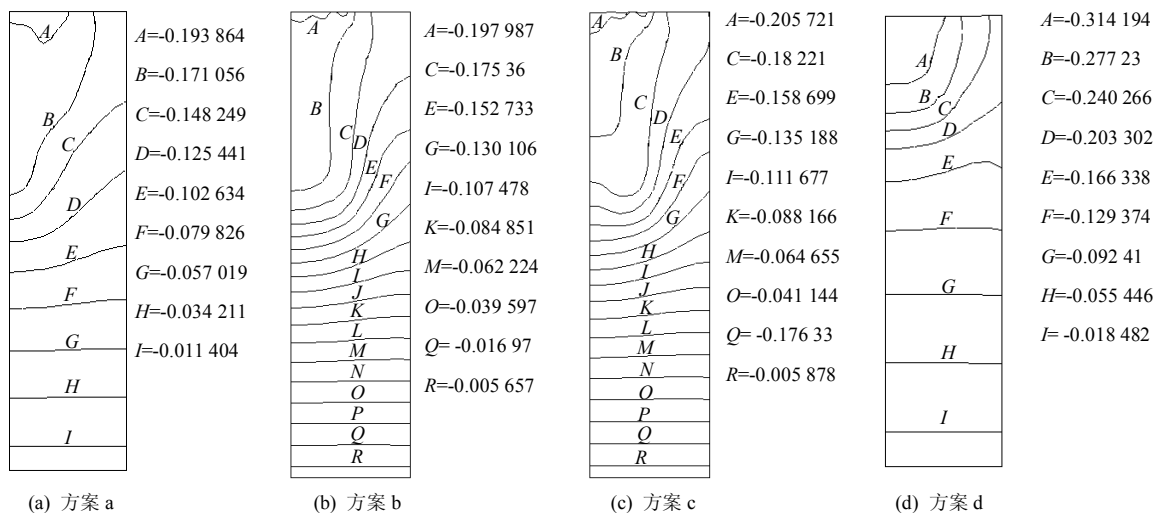


图 8 地基沉降等值线图(荷载为 110 kPa) (单位: Pa)

Fig.8 The contour map of settlement in soil (loading of 110 kPa, unit: Pa)

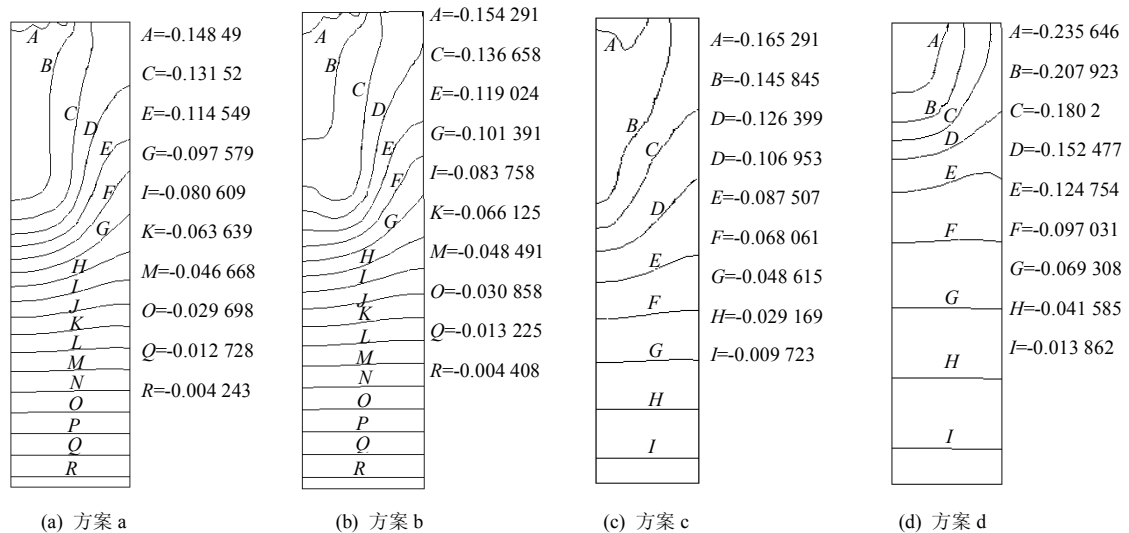


图 9 地基沉降等值线图(荷载为 82.5 kPa)(单位: Pa)

Fig.9 The contour map of settlement in soil (loading of 82.5 kPa, unit: Pa)

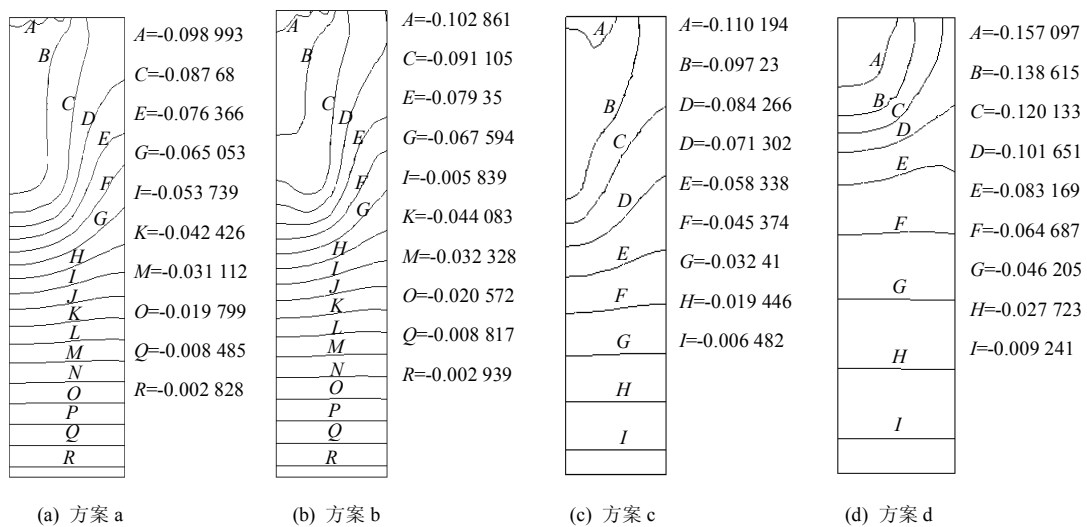


图 10 地基沉降等值线图(荷载为 55 kPa)(单位: Pa)

Fig.10 The contour map of settlement in soil (loading of 55 kPa, unit: Pa)

从图 8~10 中可以看出,无论是在高荷载水平下,还是在低荷载水平下地基内土体的沉降都有同一个总趋势:刚性长桩的数量越少,地基中相同深度处的沉降量越大。没有刚性桩,地基的沉降主要发生在浅层范围内,且沉降量也比较大;有少数刚性桩时沉降量明显减少;当刚性桩占总桩数的比例在 60% 以上时再增加刚性桩的数量,沉降量减少不明显,说明在确定的工程条件下,刚性桩所占总桩数的比例存在着一个合适值,在这个值附近,经济效益最明显,当刚性桩比例大于该值再增加刚性桩数量就不经济。

4 结 论

(1) 在刚柔性桩分布一定的情况下,当柔性桩实际承载力小于其极限承载力时随着外加荷载的增加,刚性单桩和柔性单桩所承受的荷载都增加,但其比值基本不变。

(2) 刚柔复合桩基中,总桩数不变时刚性长桩数量所占总桩数的比例对地基附加应力场的分布和沉降影响较大。长桩数量所占总桩数的比例较小时,上部软弱土层中的附加应力较大,基础沉降也较大;增加长桩所占比例,能够有效地将上部土层中的附加应力向下传递,使应力扩散范围增大,局

部应力集中程度减弱, 从而可充分利用上部土层的承载力, 沉降也明显减小; 长桩数量所占总桩数的比例较大时, 再增加长桩所占比例, 对地基中应力分布有一定的影响, 但影响程度大大减弱, 减沉效果也不明显。故刚性桩数占总桩数的比例存在一个不大于 40 % 的经济值, 当刚性桩数占总桩数的比例小于 40 % 时, 增加刚性桩数的比例, 减少沉降效果明显; 当刚性桩数占总桩数的比例大于 40 % 时, 再增加刚性桩数的比例, 不能明显减少地基沉降。

(3) 基础沉降随刚性桩数与总桩数比的变化曲线, 可作为按沉降控制设计理论的实现工具之一。

参考文献

- [1] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.
- [2] 许明军, 方磊, 姜在田. 碎石桩处理液化地基抗液化研究现状及存在问题[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3): 99—104.
- XU Ming-jun, FANG Lei, JIANG Zai-tian. Current state and unsolved problems in researches of liquefaction resistance by gravel columns[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2003, 23(3): 99—104.
- [3] 费康, 刘汉龙, 高玉峰. 路堤下现浇薄壁管桩复合地基工作特性分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1 390—1 396.
- FEI Kang, LIU Han-long, GAO Yu-feng. Performance of cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile composite foundation under road embankment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(9): 1 390—1 396.
- [4] 葛忻声, 龚晓南, 张先明. 长短桩复合地基有限元分析及设计计算方法探讨[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(4): 91—96.
- GE Xin-sheng, GONG Xiao-nan, ZHANG Xianming. Finite element analysis and design of long-short-pile composite foundation[J]. **Journal of Building Structure**, 2003, 24(4): 91—96.
- [5] 汤斌, 王月香, 雷学文. 承台底土阻力群桩效应系数有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 804—808.
- TANG Bin, WANG Yue-xiang, LEI Xue-wen. Analysis of pile group effect coefficient of soil resistance under pile cap using finite element method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(5): 804—808.
- [6] 徐洋, 谢康和, 何丽波, 等. 三维复合模型及其在散体桩复合地基分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 405—3 412.
- XU Yang, XIE Kang-he, HE Li-bo, et al. Establishment of three-dimensional composite model and its application to composite foundation with granular piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(20): 3 405—3 412.
- [7] 张土乔. 水泥土的应力应变关系及搅拌桩破坏特性研究[博士学位论文D]. 杭州: 浙江大学, 1991.
- [8] 龚晓南. 土工计算机分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [9] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999.
- [10] 张世民. 深厚软土中刚柔复合桩基沉降计算及设计分析[硕士学位论文D]. 杭州: 浙江大学, 2004.