

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0869-06

变参数刚-柔性桩复合地基研究

朱 奎¹, 徐日庆¹, 郭 印¹, 周鹏飞²

(1. 浙江大学 土木工程学系, 杭州 310027; 2. 温州大学, 温州 325000)

摘 要: 为了研究刚-柔性桩复合地基的承载和变形特性, 在温州地区进行了 6 个大型不同试验参数条件下刚-柔性桩复合地基试验, 并在静荷载试验中对刚性承压板下压力盒进行同步检测。根据检测结果较系统地分析了褥垫层的设置与否、褥垫层厚度及材料、刚性桩置换率对刚-柔性桩复合地基特性的影响, 为工程设计提供一些可以借鉴的结论。

关 键 词: 褥垫层; 刚-柔性桩复合地基; 静荷载试验; 置换率; 破坏模式

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Study on composite foundation with rigid-flexible piles under variable parameters

ZHU Kui¹, XU Ri-qing¹, GUO Yin¹, ZHOU Peng-fei²

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Wenzhou University, Wenzhou 325000, China)

Abstract: In order to study the load-bearing and deformation characteristics of composite foundation with rigid-flexible pile, six static load tests of composite foundation with rigid-flexible piles are carried out under variable parameters, and pressure cells beneath bearing plate are monitored in the process of static load tests. On basis of the test result, the authors analyze systematically the influences of different cushion parameters and replacement ratios, and some meaningful conclusions are obtained.

Key words: cushion; composite foundation with rigid-flexible piles; static load test; replacement ratio; failure model

1 引 言

刚-柔性桩复合地基在温州、杭州等沿海地区有所应用, 取得了良好的工程效果。所谓刚-柔性桩复合地基是相对于散体材料桩复合地基、刚性桩复合地基、柔性桩复合地基而提出的新概念, 是指通过刚性桩、柔性桩和桩间土体变形协调共同承担荷载作用的复合地基, 兼具刚性桩复合地基和柔性桩复合地基的优点, 弥补了柔性桩复合地基沉降量大、刚性桩复合地基承载力不大的缺点, 目前工程界已对这种新型复合地基初步研究^[1~5], 但对其工作机理认识仍不深入。

笔者开展了 6 个不同类型刚-柔性桩复合地基试验, 对不同情况下刚-柔性桩复合地基的承载机理进行研究, 以期深化对刚-柔性桩复合地基的认

识, 为设计施工人员提供有益的参考。

2 工程概况

试验场地位于温州市新桥镇西堡锦园, 刚性桩采用人力简易钻孔灌注桩, 柔性桩采用水泥搅拌桩。人力简易钻孔灌注桩桩长 44 m, 桩径为 500 mm, 桩混凝土强度为 C20, 内配 6 ϕ 12 mm 通长布置的钢筋。水泥搅拌桩桩长 13.5 m, 桩径为 500 mm, 采用水泥变掺量施工方法, 即上部 1/3 处(0~4.5 m)复搅拌一次, 水泥掺量比为 18%, 下部 2/3 处(4.5~13.5 m)水泥掺量比为 12%。该场地具有典型深厚软土分布特征, 土物理力学性质指标见表 1。各静荷载试验点垫层情况见表 2。T1 和 T5 承压板下压力盒布置如图 1 所示。

收稿日期: 2006-04-25

基金项目: 浙江省建设厅科研项目(No. 20050568); 温州市科技技术局资助社会发展项目(S2005A013); 温州市瓯海区科技技术局资助社会发展软课题(No. 200522)。

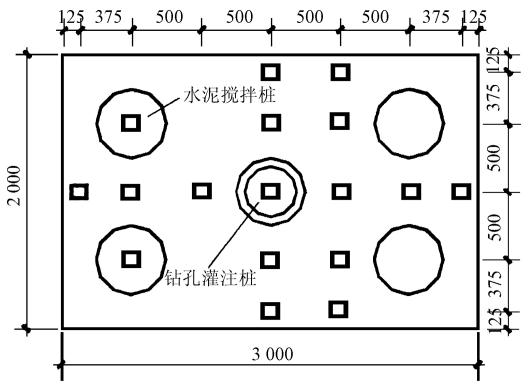
作者简介: 朱奎, 男, 1975 年生, 博士研究生, 主要从事复合地基和桩基研究。E-mail: wzzhukui@sina.com

表 1 土物理力学性质指标
Table 1 Physical and mechanical properties of soils

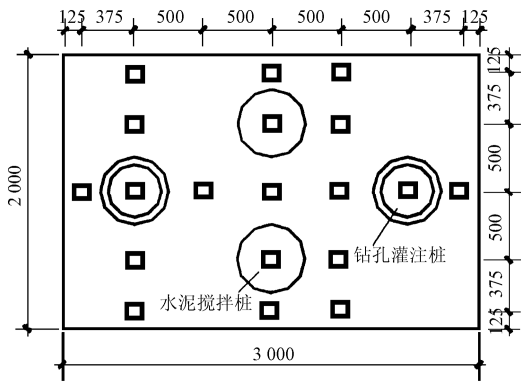
层序	土层名称	层厚 / m	ω / %	ρ / g · cm ⁻³	e_0	W_L / %	W_P / %	I_P	I_L	E_s / MPa
①	杂填土	1								
②	粉质黏土	2	29.6	1.86	0.90	43.0	26.7	16.3	0.48	3.71
③-1	淤泥	11	79.2	1.51	2.27	61.0	36.5	24.5	1.74	0.91
③-2	淤泥	8	58.4	1.64	1.65	57.0	38.0	19.0	1.07	1.57
④	淤泥质黏土	8	48.7	1.71	1.38	47.0	29.0	18.0	1.06	3.66
⑤	粉质黏土	8	39.3	1.81	1.10	44.0	27.0	17.0	0.72	5.25

表 2 各静荷载试验点垫层情况
Table 2 Static load test parameters

试验点	褥垫层参数
T1	20 cm 碎石灌砂褥垫层
T2	钻孔桩标高下降 10 cm, 其他同 T1
T3	无褥垫层
T4	20 cm 卵石灌粗砂褥垫层
T5	20 cm 碎石灌粗砂褥垫层
T6	无褥垫层



(a) T1 承压板下



(b) T5 承压板下

图 1 承压板下压力盒布置图 (单位: mm)

Fig.1 The distribution of earth pressure cell under bearing plate of T1 and T5 (unit: mm)

3 试验方法

静荷载试验采用慢速维持荷载法, 用砂包压重反力装置。试验 T1~T4 为 4 根水泥搅拌桩和 1 根钻孔灌注桩组成的复合地基, T5、T6 为 2 根水泥搅拌桩和 2 根钻孔灌注桩组成的复合地基。桩应力及土应力均取图中相应传感器的平均值。

4 试验成果及分析

4.1 沉降特性分析

复合地基 $Q-S$ 曲线是地基承载性状和破坏模式的宏观反映。图 2 为 T1~T6 的 $Q-S$ 曲线。测试结果表明, T1、T2、T4、T5 的 $Q-S$ 曲线为缓变形, 即使加荷至极限状态亦无明显拐点, 仅根据 $Q-S$ 曲线很难判断其承载力特征值, 可结合 $S-\lg t$ 曲线以及相对沉降量进行综合确定(略)。T3、T6 的 $Q-S$ 曲线为陡降形, 极限荷载时曲线出现拐点, 曲率明显变陡, 可以从 $Q-S$ 曲线中确定承载力特征值, 因此有褥垫层刚-柔性桩复合地基承载特征值可根据“沉降原则”进行判定, 而无褥垫层刚-柔性桩复合地基承载力特征值可根据“承载力原则”进行确定。表 3 为不同试验参数下的承载力特征值及相应沉降值。表中反映有褥垫层刚-柔性桩复合地基承载特征值所对应的相对沉降量 $s/b = 0.002 \sim 0.003$ (其中 b 为承压)。无褥垫层刚-柔性桩复合地基承载力特征值所对应沉降值很小, 显然不能用相对沉降量来衡量。

从图 2 发现 T2 的沉降值略大于 T1 的沉降值, 说明刚性桩标高下降后 (也可视作刚性桩褥垫层单独增厚), 沉降有所增大。T4 沉降值比 T1 要大, 表明褥垫层模量降低后 (由于 T4 褥垫层卵石粒相对碎石大, 孔隙比碎石大得多, 故粗砂比例是 T1 褥垫层粗砂掺入量的 2 倍, 因此 T4 褥垫层模量比 T1 低得多), 沉降会相应增大。T3 沉降值明显小于 T1 沉降值, 有褥垫层复合地基比无褥垫层复合地基

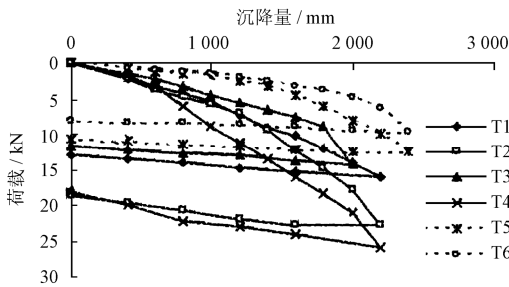


图 2 $Q-S$ 曲线
Fig.2 Curves of $Q-S$

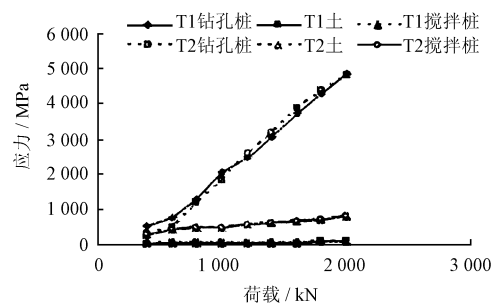
沉降要大许多。T5、T6 承载力特征值时沉降值比 T1 要小得多,说明刚-柔性桩复合地基中刚性桩置换率提高后,沉降量会显著下降,由此得出刚性桩是控制沉降的主要构件,它对控制刚-柔性桩复合地基的沉降起了关键性作用。

表3 不同试验参数下的承载力特征值及相应沉降值
Table 3 Characteristic values of bearing capacity and settlement

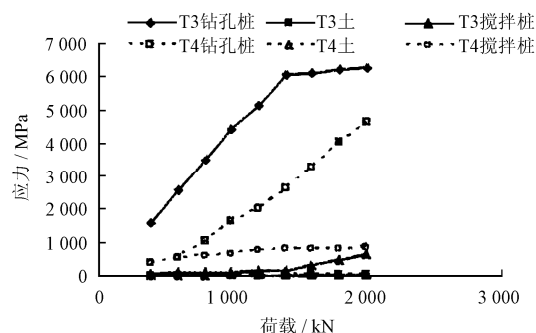
参数	试验点					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
承载力特征值/kN	1 000	1 000	800	1 000	1 200	1 000
沉降值/mm	5.49	5.44	3.44	6.03	3.9	2.06
相对沉降量 s/b	0.002 75	0.002 92	0.001 12	0.003 02	0.001 95	0.001 03

4.2 承载特性分析

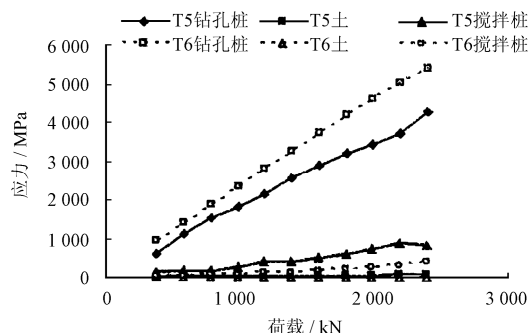
(1) 桩土应力特性 图 3 为应力曲线。由图可见 T1、T2、T4 中桩的土应力随荷载增加呈稳步上升状态,说明复合地基中刚性桩、柔性桩和土三者共同作用良好。比较 T2 与 T1 可见,水泥搅拌桩、土在受荷初期应力较高,当荷载大于承载力特征值后,T2 和 T1 应力比较接近,说明钻孔灌注桩褥垫层单独增厚后在受荷初期有利于水泥搅拌桩和土的应力发挥,而对受荷中后期的桩土应力特性影响不大。T3 中钻孔灌注桩应力在受荷初期增长较快,并较早地进入塑性状态。受荷后期钻孔灌注桩应力曲线出现水平段,表明钻孔灌注桩应力已发挥到极限,而土和水泥搅拌桩应力增长相对于 T1 要缓慢得多,应力得不到充分发挥,这与桩土共同作用原理相悖。比较 T4 与 T1 可见,同等荷载下土应力略高,水泥搅拌桩应力提高幅度较大,钻孔灌注桩应力有所下降,这说明褥垫层材料改变会导致应力分配的重新调整。褥垫层的流动性增强,钻孔灌注桩应力降低,而水泥搅拌桩和土应力则相应提高。比较 T5 与 T1 可见,同等荷载下钻孔灌注桩、水泥搅拌桩和土应力增长缓慢,因此刚-柔性桩复合地基在满足承载和变形条件下采取刚性桩低置换率设计显得更合理。



(a) T1、T2 桩



(b) T3、T4 桩



(c) T5、T6 桩

图3 应力与荷载的关系曲线图

Fig.3 Stress variation with load

为了直观地比较各试验点的应力情况,给出加载极限状态时时桩土应力情况,见表4,可见 T2、T4 钻孔灌注桩应力均低于 T1,说明褥垫层增厚以及褥垫层模量减小会降低刚性桩的应力发挥度。从理论上讲,在复合地基破坏时桩、土均同时达到极限状态为最佳应力状态,实践中由于地质条件的

表4 极限状态时桩土应力情况
Table 4 Stresses of pile and soil under ultimate state

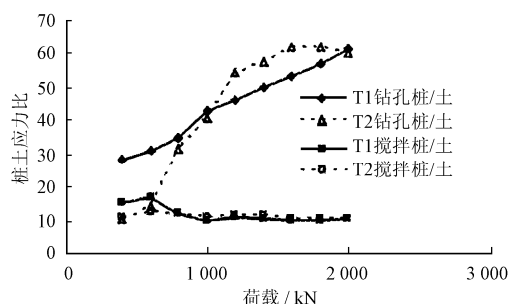
应力	T1			T2			T3			T4			T5			T6		
	钻孔桩	搅拌桩	土	钻孔桩	搅拌桩	土	钻孔桩	搅拌桩	土	钻孔桩	搅拌桩	土	钻孔桩	搅拌桩	土	钻孔桩	搅拌桩	土
/kPa	4 877	820	79	4 810	832	80	6 123	324	29	4 669	877	79	4 266	856	74	5 005	340	20

复杂性以及桩施工质量的不确定性很难达到理想状态,但可根据桩土刚度、强度情况采取适宜褥垫层厚度以及褥垫层材料,促进桩土应力同步发挥。

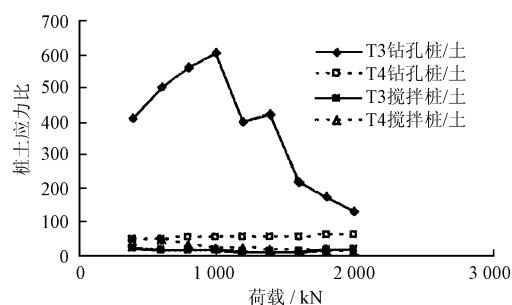
(2) 桩土应力比 其比值是一个变量,随上部荷载的变化而发生改变,即刚-柔性桩复合地基中刚性桩、柔性桩和桩间土承受荷载的能力会及时调整,并维持力的平衡,见图 4。图中表明,T1 钻孔灌注桩土应力比随荷载递增而缓慢提高,变化范围为 28~61,水泥搅拌桩土应力比后期比初期略有下降,波动幅度不大,大致为 15~10。T2 在第一、二级荷载时钻孔灌注桩土应力比低,第三级荷载时应力比剧增,由上一级荷载时 13 增大至 31。荷载超过承载力特征值后桩土应力比增长速度变缓,在接近极限荷载时桩土应力比有下降的趋势。钻孔灌注桩土应力比在 10~62 之间。水泥搅拌桩土应力比浮动不大,应力比范围在 10~12 之间。总体上看,比较 T2 与 T1 承载力特征值前者的应力比存在差别,T3 中钻孔灌注桩土应力比在受荷初期便达到峰值,最大值为 603,为 T1 应力比最大值的 10 倍左右。随荷载增加到一定程度,钻孔灌注桩土应力比逐渐下降,但钻孔灌注桩土应力比仍保持在高水平,最低值为 131,这是由于钻孔灌注桩承担了大部分荷载,土应力值较低所致。水泥搅拌桩土应力比数值与 T1 接近,应力比变化范围为 21~11,略高于 T1 相应应力比,T4 中钻孔灌注桩土应力比大体上随荷载增加而升高,在承载力特征值时达到峰值,此后桩土应力比变化不大,当加荷接近极限荷载时,桩土应力比略有下降。钻孔灌注桩土应力比变化范围在 42~68 之间。T4 中水泥搅拌桩土应力比在受荷初期便达到最大值,随荷载增加应力比依次递减。水泥搅拌桩土应力比变化范围在 11~44 之间。T5 中钻孔灌注桩土应力比在受荷初期便迅速上升,并达到峰值;在受荷中后期桩土应力比处于波动状态,但浮动幅度不大,说明在上部荷载作用下钻孔灌注桩土应力有一个自我调整的过程。钻孔灌注桩土应力比变化范围在 33~55 之间。水泥搅拌桩土应力比随荷载增加略有提高。水泥搅拌桩土应力比变化范围在 8~11 之间。T6 中钻孔灌注桩土应力比变化范围在 221~285 之间,明显高于 T5。水泥搅拌桩土应力比变化范围在 11~18 之间。

(3) 荷载分担比特性 图 5 为荷载分担比曲线。由图可知,T1 中钻孔灌注桩在受荷初期承载比例并不高,随着荷载增加钻孔灌注桩承载作用逐渐凸显出来,而水泥搅拌桩荷载分担比规律与钻孔灌注桩相反,随荷载增加水泥搅拌桩荷载分担比下

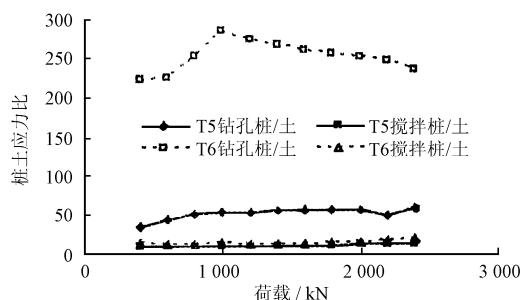
降。土和水泥搅拌桩在承担荷载过程中发挥了不可忽视的作用,其中极限承载力时土荷载分担比为 19.9%,水泥搅拌桩分担比为 32.2%。T2 在受荷初期水泥搅拌桩在荷载分担比占主导地位,第一级荷载时荷载分担比达到 54.1%,此后水泥搅拌桩荷载分担比下降,受荷后期稳定在 32%左右。钻孔灌注桩荷载分担比的变化规律与水泥搅拌桩的变化规律相反,由受荷初期的 13.4%递增到 48.1%,当荷载超过承载力特征值后,钻孔灌注桩在荷载分担比中发挥主要作用。土荷载分担比波动不大,大致在 20%附近波动。与 T1 相比钻孔灌注桩在受荷初期荷载分担比小得多,第一级荷载时荷载分担比仅为 T1 的 53.8%。T3 中钻孔灌注桩自始至终在荷载分



(a) T1、T2 桩



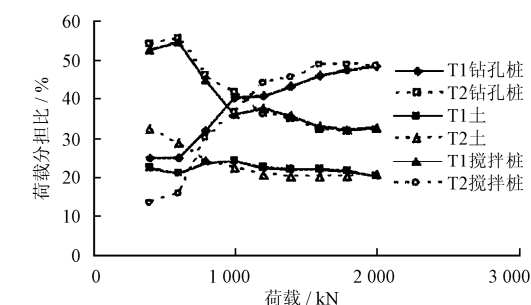
(b) T3、T4 桩



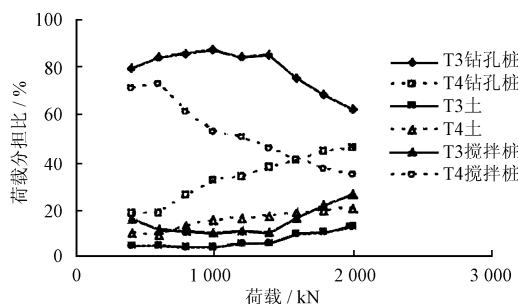
(c) T5、T6 桩

图 4 桩土应力比随荷载变化图

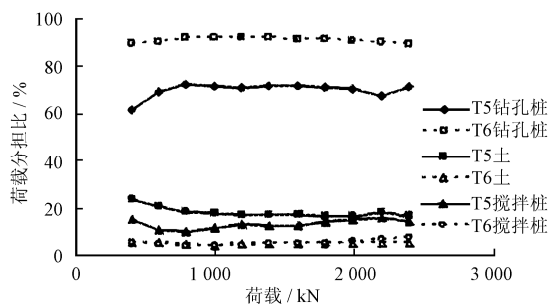
Fig.4 Pile-soil stress ratio variation with load



(a) T1、T2 桩



(b) T3、T4 桩



(c) T5、T6 桩

图5 桩土荷载分担随荷载变化图

Fig.5 Pile-soil load sharing variation with load

担比中起主导作用。受荷初期钻孔灌注桩荷载分担比在 80 %左右, 受荷后期水泥搅拌桩和土逐渐参与承担荷载, 钻孔灌注桩荷载分担比有所下降, 但即使在极限荷载时钻孔灌注桩荷载分担比仍达到 62 %, T4 在受荷初期水泥搅拌桩在荷载分担比中比例较大, 土荷载分担比相对较少, 荷载变化改变了三者的荷载分担比, 钻孔灌注桩荷载分担比随荷载增加而不断递增, 水泥搅拌桩荷载分担比变化趋势与钻孔灌注桩荷载分担比变化趋势相反, 土荷载分担比稳步上升。T5 中钻孔灌注桩荷载分担比自始至终保持较高的比例, 而水泥搅拌桩和土荷载分担比处于次要地位。与 T1 相比, 钻孔灌注桩荷载分担比明显提高, 水泥搅拌桩和土荷载分担比显著下降。T6 中钻孔灌注桩荷载分担比在全过程中占统

治地位, 荷载分担比维持在 90 %左右。水泥搅拌桩和土的荷载分担比相近, 在 5 %附近波动。受荷后期水泥搅拌桩荷载分担比略高于土荷载分担比。三者荷载分担比接近于水平线, 说明荷载施加对荷载分担比大小影响不大。以上表明刚-柔性桩复合地基在未设置褥垫层情况下, 当刚性桩置换率较高时, 刚性桩在承载中起控制作用, 刚性桩复合地基承载特性与刚性桩承载特性相仿。刚性桩置换率的提高使刚性桩承载贡献率明显升高。

5 破坏模式

刚-柔性桩复合地基破坏模式一般有 3 种: (1) 刚性桩刺入破坏或桩身破坏。(2) 柔性桩桩身压碎破坏。(3) 土剪切破坏。试验结果表明, T3 桩、T6 桩属于第一种类型中刺入破坏, 从试验中发现 T3 桩、T6 桩中刚性桩应力集中现象严重, 应力水平较高, 当复合地基加载至极限值时桩端土开始发生剪切破坏, 在破坏荷载下桩端土抗剪强度突然丧失, 桩身持续下沉, 形成刚性桩刺入破坏, 所以无褥垫层复合地基的破坏事先无明显征兆, 具有突然性。试验结果表明 T1、T2、T4、T5 各桩破坏形式为第 3 种类型。在极限荷载下, 以上 4 种复合地基中的土应力有所下降, 出现应力应变软化现象。土逐渐由弹性阶段过渡到塑性阶段, 开始出现局部剪切破坏。在破坏荷载下局部剪切破坏区加宽加深, 并逐渐贯通, 形成复合地基破坏。由此可见, 有褥垫层复合地基的破坏具有渐进性。顺便指出, 在褥垫层模量较低、流动性较强 (如采用粗砂褥垫层)、搅拌桩桩顶强度不高的情况下第 2 种破坏模式出现的可能性较大。

6 结 语

(1) 有褥垫层刚-柔性桩复合地基 $Q-S$ 曲线为缓变形, 可从沉降角度来判别其承载特征值, 本次试验中相对沉降值 s/b 在 0.002~0.003 之间。无褥垫层刚-柔性桩复合地基 $Q-S$ 曲线为陡降形, 可从承载力角度判定其承载力特征值。

(2) 褥垫层设置与否、褥垫层厚度、褥垫层材料以及复合地基中刚性桩置换率对复合地基变形特性影响较大。降低褥垫层变形模量、增大褥垫层厚度、减小刚性桩置换率均会增大沉降。

(3) 此外从承载力角度存在着优化设计, 使褥垫层、置换率等参数良好的匹配, 也使刚-柔性桩复合地基承载合理、经济实用。

(4) 不同参数条件下刚-柔性桩复合地基破坏

模式存在差异。有褥垫层刚-柔性桩复合地基破坏特征为渐进性,而无褥垫层刚-柔性桩复合地基破坏特征为突然性。从地基安全角度,刚-柔性桩复合地基不设置褥垫层是不可取的。

参 考 文 献

- [1] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 刘奋勇, 杨晓斌, 刘学. 混合桩型复合地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 71—75.
LIU Fen-yong, YANG Xiao-bin, LIU Xue. Field test of a composite foundation including mixed pile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(1): 71—75.
- [3] 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): 1 432—1 436.
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): 1 432—1 436.
- [4] 陈龙珠, 梁发云, 严平, 等. 带褥垫层刚-柔性复合地基工程形状的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(3): 125—129.
CHEN Long-zhu, LANG Fa-yun YAN Ping, et al. Experimental study on behavior of rigid-flexible pile raft foundation with cushion[J]. **Journal of Building Structure**, 2004, 25(3): 125—129.
- [5] 刘海涛, 谢新宇, 程功, 等. 刚-柔性桩复合地基试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 303—306.
LIU Hai-tao, XIE Xin-yu, CHENG Gong, et al. Experimental study of the rigid-flexible pile composite foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 303—306.