

文章编号:1673-5005(2011)05-0114-06

桩顶与承压板新型构造方式下的单桩承载特性

李 静¹, 吴葆永², 姜 琳¹, 王林富¹, 李 娟¹

(1. 中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266555; 2. 山东信诚建筑规划设计有限公司, 山东 东营 257000)

摘要:首次提出在桩顶黏贴一块 10 mm 厚的聚苯乙烯泡沫板,并在泡沫板上铺设 150 mm 厚砂垫层的一种新型构造方式。在山东省东营市伟浩中央花园,通过不同状态下的现场静载荷试验,对竖向荷载作用下,承压板与桩顶新型构造方式下的粉喷桩单桩复合地基以及自由单桩的承载特性进行了对比研究。结果表明:承压板与桩顶新型构造方式下的粉喷桩单桩复合地基承载力比自由单桩承载力增加很多;承压板与桩顶新型构造方式可有效利用土的承载力,减少桩顶应力过分集中,同时可使桩间土压缩提前发生,强化桩土相互作用,使得桩土更趋于整体沉降,达到有效减小工后沉降的目的。

关键词:粉喷桩;复合地基;褥垫层;桩间土承载力

中图分类号:TV 64 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2011.05.021

Bearing characteristics of single pile with new construction between pile's top and bearing plate

LI Jing¹, WU Bao-yong², JIANG Lin¹, WANG Lin-fu¹, LI Juan¹

(1. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;

2. Xincheng Architecture Programming Company Limited, Dongying 257000, China)

Abstract: In order to improve the bearing capacity of composite foundation, a new type of construction between the top of pile and bearing plate was proposed for the first time. A polystyrene foam board with the thickness of 10 mm was pasted on the top of pile, and the sand cushion layer with the thickness of 150 mm was placed on it. The static load tests under different states were done in Weihao Central Park in Dongying, Shandong province. The comparable research on the dry powder cement single pile in composite foundation and the free single pile was done. The results show that the capacity of dry powder cement single pile in composite foundation is much higher than that of a free single pile. The new type of construction between the pile top and bearing plate could mobilize the bearing capacity of soil effectively, and reduce the stress concentration at pile top. In the meantime, the soil surrounding the piles was compacted earlier than that of conventional composite foundation under the same load, which would make piles and soil settle together. The post-construction settlement may be reduced.

Key words: dry powder cement single pile; composite foundation; cushion; bearing capacity of soil surrounding piles

复合地基是指由两种不同刚度(或模量)的材料所组成,在相对刚性基础上两种材料共同分担荷载,并协调变形的地基,强调桩间土承载力的充分利用,许多学者对其工作机制进行了研究^[1-4]。相关研究成果^[5-9]和工程实践均表明复合地基的桩顶与承压板之间的连接方式是核心技术之一,它在保证桩土共同作用、改善复合地基承载特性、控制沉降等方面有重要意义。Cao^[10]针对地震区或可能承受较大

风荷载的桩基,提出了将桩顶脱离筏板一定高度的做法;Wong 等^[11]研究了桩筏脱离情况下不同桩长、不同布桩方式筏板-桩-土的相互作用;Poulos^[12]用数值分析的方法研究了桩顶设置变刚度垫块后对基础沉降和承台下不同位置桩顶反力分布的影响;郑刚等^[13]采用室内模型试验对桩顶与承台的不同构造形式进行了研究,揭示了砂土地上预留净空,可强化桩土相互作用。桩顶预留净空或设置可压缩垫

收稿日期:2010-10-22

作者简介:李静(1967-),女(汉族),山东蓬莱人,副教授,博士,主要从事岩土工程与结构工程的教学与科研工作。

块是一种新型连接构造形式,越来越受到国内外学者的重视。笔者针对新型构造方式下复合地基中的单桩承载特性与自由单桩承载特性有何异同这一问题,通过现场载荷试验,对在桩顶黏贴了一层 10 mm 厚的聚苯乙烯泡沫板,并在泡沫板上铺设 150 mm 厚砂垫层的新型构造方式下,粉喷桩复合地基中的单桩以及自由单桩进行对比试验研究,得出两种状态下粉喷桩单桩的工作性状,为实际工程应用提供试验依据。

1 试 验

1.1 概 况

采用粉喷桩单桩竖向承载以及粉喷桩复合地基两种形式。粉喷桩桩长 9.0 m,桩径 500 mm。对东营市某一场地进行了 1 组粉喷桩单桩竖向抗压静载试验和 1 组粉喷桩复合地基载荷试验,具体试验概况见表 1。

表 1 试验概况
Table 1 Test overview

试验方法	桩径 <i>d</i> /mm	桩顶设计标高 <i>h</i> /m	承压板面积 <i>A</i> /m ²	设计最大加载 压力 <i>P</i> /kN	试验 数量/组
粉喷桩自由单桩竖向抗压静载	500	-4. 15		400	1
粉喷桩复合地基单桩载荷	500	-4. 15	1. 5×1. 5	675	1

1.2 地质条件

根据东营市某勘察测绘有限公司提供的《岩土工程勘察报告》,预估地基承载力极限值为 150 kPa,场地地层及其特性自上而下如表 2 所示。

表 2 试验场地地质条件
Table 2 Geological conditions of site

层底埋深 <i>H</i> /m	土层名称	土层特性
0. 20 ~ 1. 60	素填土	灰褐色,土质不均匀,局部为杂填土,以粉土为主,夹砖块、石屑等建筑垃圾;土的含水量为 25. 2%,孔隙比为 0. 686,液限为 29. 1%,塑限为 22. 2%,塑性指数为 6. 9,液性指数为 0. 43,土的黏聚力为 8 kPa,压缩系数为 0. 14 MPa ⁻¹ ,压缩模量为 11. 76 MPa
1. 00 ~ 2. 60	粉土	黄褐色,土质较均匀,黏粒含量较高,干强度低,韧性低,无光泽反应,摇震反应中等,中密,湿,场区普遍分布;土的含水量为 25. 2%,孔隙比为 0. 778,液限为 32. 8%,塑限为 20. 2%,塑性指数为 12. 6,液性指数为 0. 59,土的黏聚力为 19 kPa,压缩系数为 0. 31 MPa ⁻¹ ,压缩模量为 6. 11 MPa
1. 90 ~ 3. 50	粉质黏土	灰黄色,土质较均匀,局部夹有薄层黏土,干强度中等,韧性中等,软塑,场区普遍分布;土的含水量为 32. 8%,孔隙比为 0. 901,液限为 34. 6%,塑限为 22. 1%,塑性指数为 12. 5,液性指数为 0. 85,土的黏聚力为 16 kPa,压缩系数为 0. 38 MPa ⁻¹ ,压缩模量为 5. 01 MPa
3. 10 ~ 6. 20	粉土	黄褐色,土质不均匀,含有氧化铁斑,干强度低,韧性低,无光泽反应,摇震反应迅速,中密,场区普遍分布;土的含水量为 27. 7%,孔隙比为 0. 779,液限为 29. 6%,塑限为 22. 2%,塑性指数为 7. 5,液性指数为 0. 75,土的黏聚力为 19. 7 kPa,压缩系数为 0. 16 MPa ⁻¹ ,压缩模量为 11. 36 MPa
4. 20 ~ 7. 70	粉质黏土	灰色,土质较均匀,含有氧化铁斑,干强度中等,韧性中等,稍光泽反应,软塑-可塑,场区普遍分布;土的含水量为 31. 6%,孔隙比为 0. 873,液限为 33. 3%,塑限为 21. 2%,塑性指数为 7. 5,液性指数为 0. 75,土的黏聚力为 19. 7 kPa,压缩系数为 0. 16 MPa ⁻¹ ,压缩模量为 11. 36 MPa
5. 50 ~ 10. 40	粉土	灰色,土质较均匀,无光泽反应,干强度低,韧性低,摇震反应迅速,中密,湿,场区普遍分布;土的含水量为 27. 7%,孔隙比为 0. 779,液限为 29. 6%,塑限为 22. 2%,塑性指数为 12. 2,液性指数为 0. 86,土的黏聚力为 19 kPa,压缩系数为 0. 36 MPa ⁻¹ ,压缩模量为 5. 26 MPa
6. 40 ~ 11. 50	粉质黏土	灰色,土质较均匀,局部夹有薄层粉土,干强度中等,韧性中等,稍有光滑,软塑,场区普遍分布;土的含水量为 31. 9%,孔隙比为 0. 883,液限为 33. 8%,塑限为 21. 6%,塑性指数为 12. 1,液性指数为 0. 84,土的黏聚力为 20 kPa,压缩系数为 0. 34 MPa ⁻¹ ,压缩模量为 5. 47 MPa

2 试验过程

2.1 粉喷桩自由单桩竖向抗压静载试验

2.1.1 设 备

试验设备主要有堆重平台 1 套, QW-320 型油压千斤顶 1 台, 50 mm 百分表 4 块, 精密压力表 1 块及其他辅助设备。

2.1.2 试验设计与方法

试验设计标高为-4.15 m, 试坑尺寸为 15 m×10 m, 挖至试验标高。试坑保持平整, 避免扰动, 保持其原状结构和天然湿度。试验对应的基桩桩号为 1[#], 执行《建筑基桩检测技术规范》(JGJ106-2003) 的有关规定。采用堆载反力梁装载, 试验前组装配重物 100 t, 加载级差为 40 kN, 分 10 级加载。第一级加载量为分级荷载的 2 倍, 用油压千斤顶以慢速维持荷载法加荷, 用精密压力表(RS-JYB 型全自动静载荷测试仪)控制荷载力示值, 用百分表(位移传感器)测量各级荷载作用下桩顶的沉降量。每级荷载施加后按 5、15、30、45、60 min 测桩顶沉降量, 以后每隔 30 min 测读一次。沉降相对稳定标准: 每小时内的桩顶沉降量不超过 0.1 mm, 并连续出现两次(从分级荷载施加后第 30 min 开始, 按 1.5 h 连续三次每 30 min 的沉降观测值计算)。当桩顶沉降速率达到相对稳定标准时, 即施加下一级荷载。试验期间持续降水, 保证试坑内干燥, 水位处于试验标高以下。

2.2 粉喷桩复合地基单桩载荷试验

2.2.1 设 备

主要设备采用堆重平台 1 套, QW-320 型油压千斤顶 1 台, 50 mm 百分表 4 块, 精密压力表 1 块, 1.5 m×1.5 m 承压板 1 块及其他辅助设备。

2.2.2 试验设计

试坑尺寸为 15 m×10 m, 挖至试验标高-4.15 m。试坑保持平整, 避免扰动, 保持其原状结构和天然湿度。试验对应的基桩桩号为 2[#], 采用在桩顶黏贴一块 10 mm 厚的聚苯乙烯泡沫板, 并在泡沫板上铺设 150 mm 厚砂垫层的新型构造方式, 承压板与桩顶新型构造方式如图 1 所示。载荷试验期间持续降水, 保证试坑内干燥, 水位处于试验标高以下。

试验前组装配重物 100 t, 采用面积为 2.25 m² (1.5 m×1.5 m) 的承压板。加载级差约为 38 kPa, 分十级加载。技术标准执行《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2002) 附录 A, 用油压千斤顶以慢速维持荷载法加载, 用精密压力表控制荷载示值, 用百分表测量各级荷载作用下承压板的沉降量。每加一级荷

载前后各读记承压板沉降量一次, 以后每 30 min 读记一次。当 1 h 内沉降量小于 0.1 mm 时, 即可加下一级荷载。砖墙垒砌方法及施工现场见图 2。

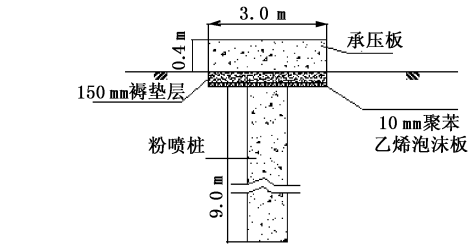


图 1 桩顶与承压板新型构造方式示意图

Fig.1 Sketch map of new type of construction between pile top and bearing plate

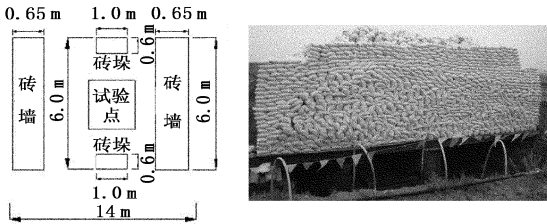


图 2 砖墙垒砌方法平面示意图和粉喷桩复合地基静载试验施工现场

Fig.2 Sketch map of brick wall building method and static load test of powder sprayable pile composite foundation in construction site

3 试验结果及其分析

3.1 粉喷桩自由单桩竖向抗压静载

1[#]桩单桩竖向抗压静载试验数据如表 3 所示(测试日期 2010-07-20, 桩长 9 m, 桩径 500 mm), P-S 曲线及 S-lg t 曲线见图 3。

表 3 1[#]试桩自由单桩竖向抗压静载试验数据

Table 3 Vertical static load test data of 1[#] free single pile

荷载 P/kN	本级沉降量 S/mm	累积沉降量 S'/mm
	0.00	0.00
80	0.50	0.50
120	0.44	0.94
160	1.51	2.45
200	3.59	6.04
240	6.23	12.2
280	7.36	19.63
320	9.01	28.64
360	2.24	30.88
400	0.76	31.64
440	45.02	76.66

由图 3(a) 可以看出: 随着荷载的增加, 曲线斜率逐渐增大, 荷载加至 400 kN 时, 曲线末端出现陡降段, 桩顶沉降量为 31.64 mm; 荷载加至 440 kN

时,曲线出现陡降段,桩顶最大沉降量为 76.66 mm,终止加荷。

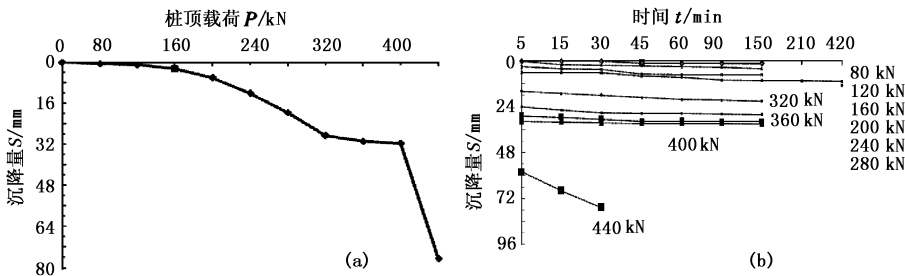


图 3 1#桩 P - S 曲线及 S - $\lg t$ 曲线
Fig.3 P - S and S - $\lg t$ curve of 1# pile

由图 3(b)可以看出:随着荷载的增加,曲线间距自上而下由密变疏。当荷载加至 440 kN 时,曲线尾部出现明显向下弯曲现象。

综合上述分析,根据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ106~2003)综合判定,1#试桩的单桩竖向抗压静载试验极限承载力确定为桩顶设计标高-4.15 m,最大加荷值 440 kN,单桩竖向抗压极限承载力 400 kN,单桩竖向承载力特征值 168 kPa。

3.2 粉喷桩单桩复合地基载荷

2#桩单桩复合地基静载试验数据如表 4 所示, p - S 及 S - $\lg t$ 曲线见图 4。

表 4 2#试桩单桩复合地基载荷试验数据
Table 4 Composite foundation load test data of 2# single pile

压力 p/kPa	本级沉降量 S/mm	累积沉降量 S'/mm
0	0.00	0.00
37	0.95	0.95
75	0.97	1.92
112	2.33	4.25
150	1.93	6.18
187	1.94	8.12
225	1.76	9.88
262	3.04	12.92
300	10.63	23.55
337	31.27	54.82
375	63.84	118.66

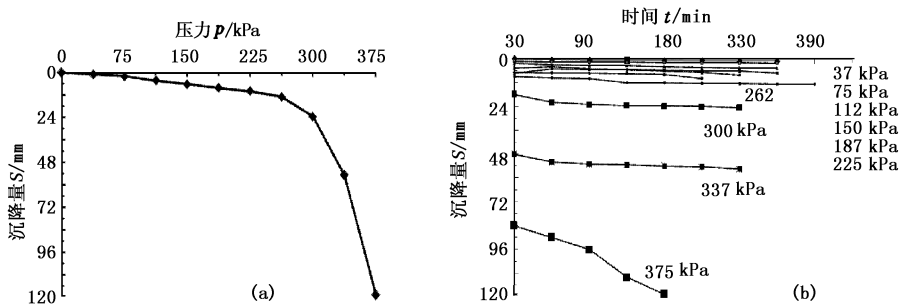


图 4 2#桩 p - S 和 S - $\lg t$ 曲线
Fig.4 p - S and S - $\lg t$ curve of 2# pile

由图 4(a)可以看出:随着承载压力增加,曲线斜率逐渐增大,承载压力加至 337 kPa 时,曲线末端出现陡降段,累积沉降量为 54.82 mm;加至 375 kPa 时,曲线出现陡降段,承压板累积最大沉降量为 118.66 mm,终止加荷。由图 4(b)可以看出,随着荷载的增加,曲线间距自上而下由密变疏,荷载加至 375 kPa 时,曲线尾部出现明显向下弯曲现象。

2#试验点的单桩复合地基极限承载力及承载力特征值确定为最大加荷值 375 kPa,最大加荷值对应的沉降量 118.6 mm, $S/b=0.006$ (S 为 9.0 mm) 所对应的载荷值 206 kPa,单桩复合地基极限承载力 337 kPa,单桩极限承载力特征值 168 kPa。

复合地基承载力特征值的确定应通过现场复合

地基载荷试验确定,设计时估算为

$$f_{\text{spk}} = mR_a/A_p + \beta(1-m)f_{\text{sk}}$$

式中, f_{spk} 为复合地基承载力特征值, kPa; m 为面积置换率; R_a 为单桩竖向承载力特征值, kPa, A_p 为桩的截面积, m^2 ; β 为桩间土承载力折减系数; f_{sk} 为处理后桩间土承载力特征值, kPa。

出于对工程安全的考虑,希望公式计算值接近但不大于载荷试验结果,而大量试验结果表明,公式计算结果一般不大于载荷试验结果。

由图 4(b)可以看出:加载在 0~150 kPa 内,图线接近直线,说明加载初期,随着荷载的逐渐增加,桩顶黏贴 10 mm 的泡沫板逐渐被压密实,桩向褥垫层逐渐刺入,桩承担的荷载逐渐增加;加载大于 150

kPa 以后,桩周围土和桩的沉降量接近一致,桩周围土与桩共同承担荷载,施加荷载的增量主要由桩承担,桩承担的荷载比重逐渐增加,沉降的增加开始加快;荷载加至 375 kPa 时, p - S 曲线出现陡降段,复合地基达到极限承载力。因此,整个加载过程中,桩所受荷载大小的变化速率开始缓慢增加,中间接近匀速,最后增加的速率变快。

3.3 两种状态下单桩承载性状对比

图 5 为复合地基中单桩与自由单桩的荷载-沉降曲线对比(复合地基中的单桩桩长 9.0 m,承压板尺寸为 1.5 m×1.5 m)。由图 5 可以看出:在相同荷载作用下,自由单桩的桩顶沉降量较新型构造方式下复合地基中单桩的桩顶沉降量大很多;相同桩顶沉降下,复合地基中单桩承载力要比自由单桩承载力大。

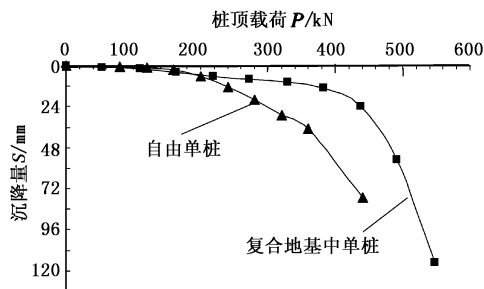


图 5 复合地基中单桩与自由单桩的荷载-沉降曲线

Fig. 5 Load-settlement curves for one single pile in composite foundation and for a free single pile

由于桩间土应力在桩侧土中产生一个较大的竖向应力增量,使得复合地基中单桩的承载特性与自由单桩不同^[4],如图 6 单桩受力示意图所示(文献[4]中)。

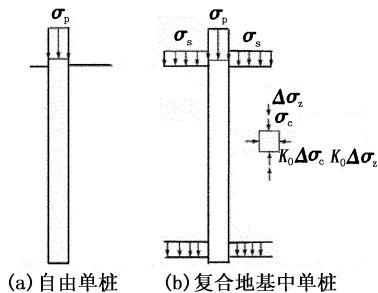


图 6 复合地基中单桩与自由单桩的受力对比

Fig. 6 Bearing capacity contrast between single pile in composite foundation and free single pile

图 6(a)中桩顶应力为 σ_p ,桩间土应力 $\sigma_s = 0$ 。图 6(b)中在桩侧产生附加应力 $\Delta\sigma_z$,桩身则受到一正向应力增量 $k_0\Delta\sigma_z$ (k_0 为静止土压力系数),导致

桩的侧阻力增加。因此,复合地基中单桩承载力要比自由单桩承载力大,这与图 6 的试验结果相吻合。

4 结 论

(1)在桩顶黏贴 10 mm 聚苯乙烯泡沫板,并在泡沫板上铺设 150 mm 砂垫层的新型构造型式,可以有效减少桩顶应力集中,加载初期使桩承受的荷载逐渐向土转移,在桩向褥垫层刺入的过程中不断地补充到桩间土上,而其中的泡沫板则起到了流动补偿作用,从而对整个复合地基的不均匀沉降起到很好的调节作用。

(2)桩顶与承压板新型构造方式下单桩复合地基的破坏过程为:桩周土首先承担较大荷载,使其从局部剪切破坏开始,逐步向整体剪切破坏发展,而后随着桩承担荷载的增加,桩承载力达到极限而破坏,进而复合地基发生破坏。

(3)现场载荷试验是确定复合地基承载力的重要手段。粉喷桩复合地基中的单桩和自由状态下的单桩表现出不同的荷载-沉降特性。在相同荷载作用下,自由单桩的桩顶沉降量较新型构造方式下复合地基中单桩的桩顶沉降量大;相同桩顶沉降下,前者承载力比后者要小得多。

参考文献:

- [1] SASTRY VVRN. MEYERHOF G G. Behaviour of flexible piles in layered clays under eccentric and inclined loads[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995,32(3): 387-396.
- [2] 张伟丽,蔡健,林奕禧,等. 水泥土搅拌桩复合地基荷载传递机理的试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43(6):116-121.
- [3] ZHANG Wei-li, CAI Jian, LIN Yi-xi, et al. Experimental study of the load transfer mechanism of cement-soil pile composite foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2010,43(6):116-121.
- [4] 丁邦颖. 带褥垫层的多元复合地基荷载传递规律研究[D]. 长沙:湖南工业大学土木工程学院,2007.
- [5] DING Bang-ying. Research on load transfer laws of multi-element composite foundation with cushion[D]. Changsha: College of Civil Engineering in Hunan University of Technology, 2007.
- [6] 佟建兴,胡志坚,闫明礼,等. CFG 桩复合地基承载力确定[J]. 土木工程学报,2005,38(7):87-91.
- [7] TONG Jian-xing, HU Zhi-jian, YAN Ming-li, et al. Identification of the bearing capacity of CFG pile composite foundation[J]. China Civil Engineering Journal,2005,38

(7):87-91.

[5] FLEMING W G K, WELTMAN A J, RANDOLPH M F, et al. Pile foundation[M]. 2nd. New York: John Wiley & Sons, 1990.

[6] CAO X D, WONG I H, CHANG M F. Behavior of model rafts resting on pile reinforced sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(2):129-138.

[7] 郑刚,裴颖洁. 预留净空桩在调整建筑物差异沉降中的应用研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(增刊): 317-324.

ZHENG Gang, PEI Ying-jie. Research on the application of pile with gap between pile top and raft to control the differential settlement of pile raft[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(sup):317-324.

[8] 郑刚,高喜峰,任彦华,等. 承台(基础)-桩-土不同构造形式下的相互作用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3):307-312.

ZHENG Gang, GAO Xi-feng, REN Yan-hua, et al. A study on the interaction of cap (foundation), pile and soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3):307-312.

[9] 郑刚,刘冬林,李金秀. 桩顶与筏板多种连接构造方式工作性状对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1):1-6.

ZHENG Gang, LIU Dong-lin, LI Jin-xiu. Experimental study on behaviors of piled foundation with connected and disconnected piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1):1-6.

[10] CAO X D. Performance of raft foundation with settlement reducing piles[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 1998.

[11] WONG I H, CHANG M F, CAO X D. Raft foundation with disconnected settlement reducing piles[M]. London: Thomas Telford, 2000:469-486.

[12] POULOS H G. Use of stiffness inserts in pile groups and piled rafts[J]. Geotechnical Engineering, 2006, 159(3):153-160.

[13] 郑刚,刘双菊,裴颖洁,等. 用于调整差异沉降的预留净空桩筏基础模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5):636-641.

ZHENG Gang, LIU Shuang-ju, PEI Ying-jie, et al. Piled raft with gap between pile top and raft to adjust differential settlement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5):636-641.

(编辑 沈玉英)