

# 位移调节器用于端承型桩筏基础的模型试验研究

周峰<sup>1,2</sup>, 郭亮<sup>1</sup>, 刘壮志<sup>1</sup>, 王旭东<sup>1</sup>, 王继果<sup>2</sup>

(1. 南京工业大学交通学院, 江苏 南京 210009; 2. 三江学院土木工程学院, 江苏 南京 210012)

**摘要:** 位移调节器是用于调节物体支接触点之间位移的特殊装置, 可用来保证端承型桩筏基础桩-土的变形协调和共同作用。为研究端承型桩筏基础中位移调节器的设置对桩-土-筏相互作用的影响, 进行了位移调节器设置前后端承型桩筏基础的室内模型对比试验。试验测量了桩身轴力、筏板沉降及桩间土反力, 分析了不同荷载级别下端承型桩筏基础的荷载传递规律、整体沉降与差异沉降分布特征以及桩土荷载分担比等内容, 结果表明: 与常规端承型桩筏基础相比, 位移调节器的设置改变了桩筏基础的荷载传递规律, 顺利实现了桩土的共同作用, 同时适当支承刚度的调节器可优先且充分地发挥筏底土体承载能力, 优化桩土荷载分担比。结论可为进一步理论研究提供试验依据。

**关键词:** 位移调节器; 端承型桩筏基础; 桩土共同作用; 荷载传递规律

**中图分类号:** TU470

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2012)02-0373-06

**作者简介:** 周峰(1979-), 男, 江苏阜宁人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事桩土共同作用方面的理论与工程实践。E-mail: nutzhoufeng@163.com。

## Model tests on end-bearing pile foundation by use of settlement adjustor

ZHOU Feng<sup>1,2</sup>, GUO Liang<sup>1</sup>, LIU Zhuang-zhi<sup>1</sup>, WANG Xu-dong<sup>1</sup>, WANG Ji-guo<sup>2</sup>

(1. College of Transportation Science & Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. College of Civil

Engineering, Sanjiang University, Nanjing 210012, China)

**Abstract:** Settlement adjustor is a special device used to adjust the displacement between contact points of structures. The installation of the settlement adjustor can ensure the deformation coordination and the interaction for pile-soil of end-bearing piled raft foundation. In order to study the influence of the settlement adjustor on the interaction with pile-soil-raft of end-bearing piled raft foundation, laboratory model tests are performed before and after the installation of the settlement adjustor. The axial forces of pile, the settlement of raft and the raft-soil contact pressure are measured. Then, the pile-soil load transfer mechanism, the settlement and difference settlement of raft and the pile-soil load sharing ratio of end-bearing piled raft foundation under different load levels are analyzed. The results show that, as compared with the conventional end-bearing piled raft foundation, the installation of the settlement adjustor has changed the load transfer rule of piled raft foundation and achieved the interaction of pile-soil. Suitable bearing stiffness of the settlement adjustor can give priority and full play to the bearing capacity of the soil beneath the raft and optimize the pile-soil load sharing ratio. The conclusions can provide the experimental basis for further theoretical researches.

**Key words:** settlement adjustor; end-bearing piled raft foundation; pile-soil interaction; load transfer rule

## 0 引言

考虑桩土共同作用的复合桩基理论长期以来一直备受工程界及学术界专家学者的关注, 已有大量的研究成果<sup>[1-10]</sup>。须指出的是, 上述成果大多只适用于以摩擦型桩筏基础为主的软土地区, 而在以端承型桩筏基础为主的非软土地区却无法应用或难以达到理想效果。究其原因, 主要是非软土地区地基承载力较高, 多层建筑往往直接采用天然地基; 而高层建筑下的天然地基承载力虽高却难以达到设计要求, 此时采用桩筏(箱)基础, 桩端持力层压缩量较低, 基础整体沉降

较小, 桩土变形难以协调, 上部荷载仍由桩基承担, 难以实现桩土共同作用。因此要实现端承桩与筏板底土体的共同作用, 必须保证桩、土的变形协调<sup>[11]</sup>。为此, 宰金珉等<sup>[12-13]</sup>, 周峰等<sup>[14]</sup>自主研发了桩端位移调节装置(由1~3台位移调节器组成, 调节器见图1), 该装置能够根据荷载调节自身变形, 可解决非软土地区端承型桩筏基础中桩土变形协调的难题。

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目(51008159); 住房和城乡建设部研究开发项目(2010-K3-4)

**收稿日期:** 2011-01-06

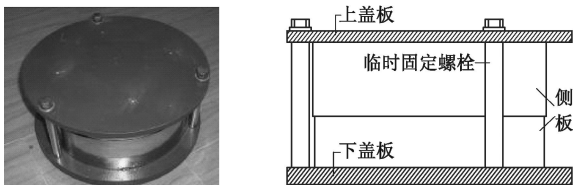


图 1 位移调节器

Fig. 1 Settlement adjustor

位移调节器的典型受力曲线见图 2，调节器支承刚度  $K_d$  可在生产期间根据具体使用要求人为设定(通常可达  $20\sim 80\text{ kN/mm}$ )，变形调节范围亦可根据需要事先设定(通常可达  $30\sim 100\text{ mm}$ )，在具有特殊使用要求的复杂情况下还可将多组装置串、并联灵活组合，以满足不同接触反力及多种调节量的要求，从而扩展其应用领域。

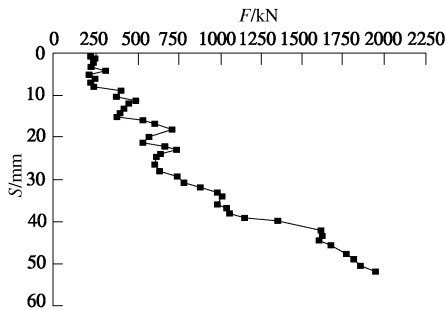


图 2 位移调节器受力变形特征

Fig. 2 Load-settlement curve of settlement adjustor

设置位移调节器的端承型桩筏基础桩-土-筏板的工作性状、受力特性及荷载传递机理均较常规桩筏基础复杂，国内外学者尚未涉及此方面的研究<sup>[15]</sup>，笔者通过室内模型试验对比分析位移调节器设置前后端承型桩筏基础桩身轴力及桩侧摩阻力分布形式、筏板沉降规律以及桩土荷载分担比，初步探索设置位移调节器的端承型桩筏基础承载特性与荷载传递机理。

1 试验方案

根据本文桩筏基础模型试验的设计，采用型钢支架和钢化玻璃设计制作成尺寸为  $2.0\text{ m}\times 1.0\text{ m}\times 1.5\text{ m}$  (高)室内模型试验槽。内部分层充填均质密实的粉质黏土与粉土，尽可能模拟地基土实际性状，各层土体物理力学性质指标见表 1。

表 1 地基土物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

层厚 /m	名 称	w /%	$\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	e	$\alpha_v$ / $\text{MPa}^{-1}$	$E_s$ /MPa
1.0	黏土	20.6	17.3	0.878	0.24	7.66
0.5	粉土	18.6	18.2	0.767	0.20	9.32

遵循物理相似原则并便于试验操作，选取有机玻璃棒和玻璃板分别制作桩体和筏板，其几何、弹性模量、刚度、应力、变形及所加荷载与原型的相似比分别为  $1:30$ 、 $1:10$ 、 $1:300$ 、 $1:10$ 、 $1:30$ 、 $1:300$ ；

另外本试验中位移调节器至关重要，其相似材料选择合理与否很大程度上决定了试验的成败，在分析若干材料的荷载-变形曲线后采用硅胶垫片模拟，该材料的荷载-变形曲线见图 3。对比图 2、3 知，两者受力特性在加载前期基本一致，但变形后期硅胶垫呈现更显著的“硬化”特性。

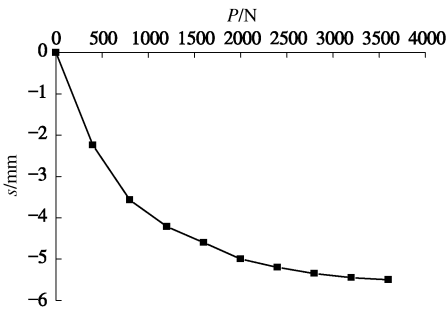


图 3 硅胶垫片的荷载-变形曲线

Fig. 3 Load-deformation curve of silica gel

考虑到有机玻璃棒表面光滑，与实际桩体存在较大差异，玻璃棒埋入土体之前用环氧树脂在其表面均匀胶黏一层细砂以增大棒周摩擦。为了最大限度减小加载设备对筏板刚度的影响并兼顾实际操作，将模型简化为条形筏板下六根单桩并排布置的桩筏基础。另外通过在桩端设置荷载板的方式(类似于桩端扩大头)增加桩端的荷载分担，以模拟基桩的端承特性。

试验方案、加载值及模型图分别见表 2、3 及图 4。另外为了突显试验对比效果，同组内各试验除硅胶垫片有无之区分外，其余如土质条件、试验模型、加载方式及测试元件布置方式等均相同。

表 2 模型试验方案及参数

Table 2 Schemes and parameters applied in model tests

试验项目	桩数/ 根	桩长/ 桩径 /cm	筏板尺寸 (长×宽× 高)/cm	位移调节器 (数量×直径× 厚度)/mm
常规端承型桩筏基础	6	75/3	70×12×1	—
设置位移调节器端承型桩筏基础	6	75/3	70×12×1	6×24×10

2 试验加载与观测

试验采用慢速维持荷载法分级加载，分级量取最大试验荷载的  $1/10$ ，最大试验荷载在计算值基础上参考相似试验选取<sup>[16]</sup>。其中第一级按 2 倍分级量加载，沉降观测按每级加载后间隔 10、10、10、15、15 min，以后每隔 0.5 h 进行，若连续 2 h 沉降量小于  $0.1\text{ mm/h}$ ，则认为该级荷载沉降趋于稳定，可施加下一级荷载，桩身电阻应变仪及土压力盒读数时间与位移计读数时间相同，加载终了，每两级荷载卸载一次，每 0.5 h 测读一次位移计、桩身应变仪及土压力盒读数，直至卸载完毕。

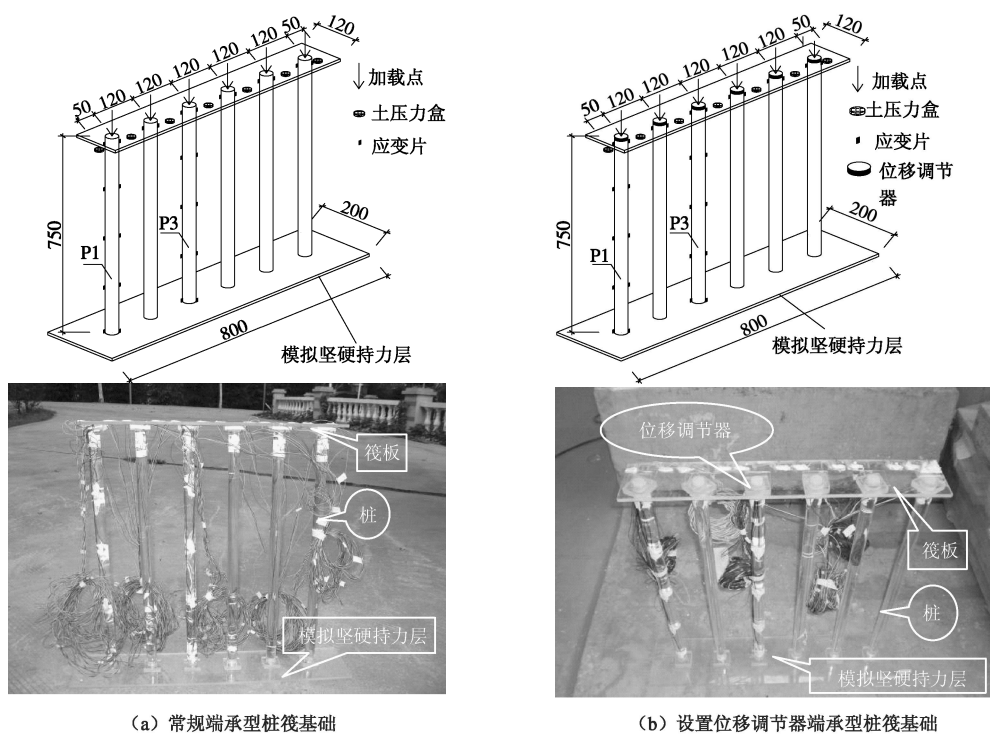


图 4 试验模型示意图  
Fig. 4 Sketch map of model tests

表 3 不同模型试验加载值

Table 3 Load increment applied in different model tests

分级数/级	常规 端承型桩筏基础		设置位移调节器 端承型桩筏基础	
	加载点分 荷载/kN	桩基总荷 载/kN	加载点分 荷载/kN	桩基总 荷载/kN
1	1.0	6	1.0	6
2	1.5	9	1.5	9
3	2.0	12	2.0	12
4	2.5	15	2.5	15
5	3.0	18	3.0	18
6	3.5	21	3.5	21
7	4.0	24	4.0	24
8	4.5	27	4.5	27
9	—	—	5.0	30
10	—	—	5.5	33

本试验要求对各单桩施加相对独立的集中荷载和垂直筏板的线荷载来模拟实际工程中的柱荷载和墙荷载, 同时还要求加载装置不影响筏板的差异沉降, 即加载装置不改变筏板刚度, 本次试验尝试新的加载方式: 在每组工字钢下安装特制铰支座将千斤顶施加的反力荷载均分至下部两根单桩, 通过控制每组千斤顶的加载值相等, 可得误差相对较小的等量集中荷载或线荷载 (具体荷载形式受控于铰支座类型), 见图 5。试验结果显示此加载效果良好。

采用布置于筏板上对应于桩间部位的电子位移计量测筏板 (地表) 沉降; 采用粘贴于桩体两侧的多组电阻应变片量测桩体不同部位轴力; 采用埋设于筏板下方 2 cm 处地基土中的钢弦式土压力盒测量桩间土反力, 详见图 4, 5 所示。

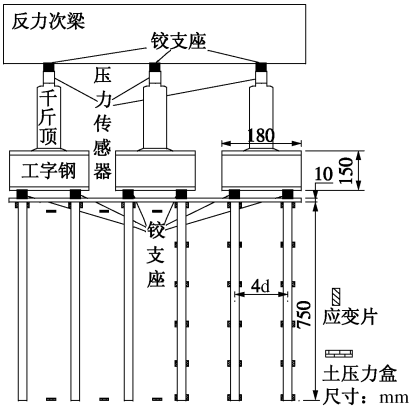


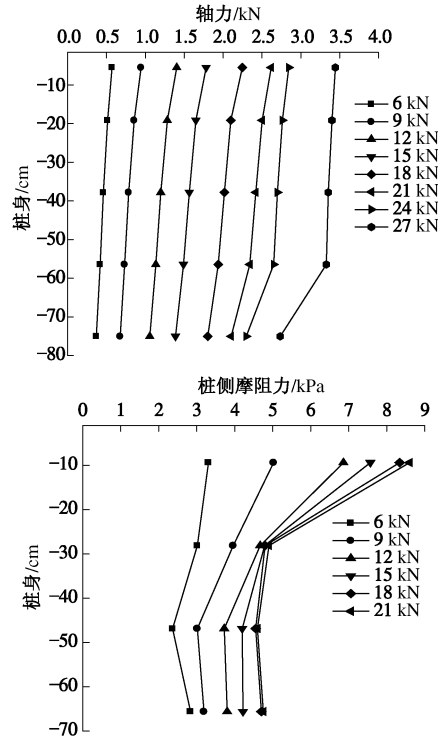
图 5 加载系统示意  
Fig. 5 Sketch of innovative loading system

### 3 试验结果与分析

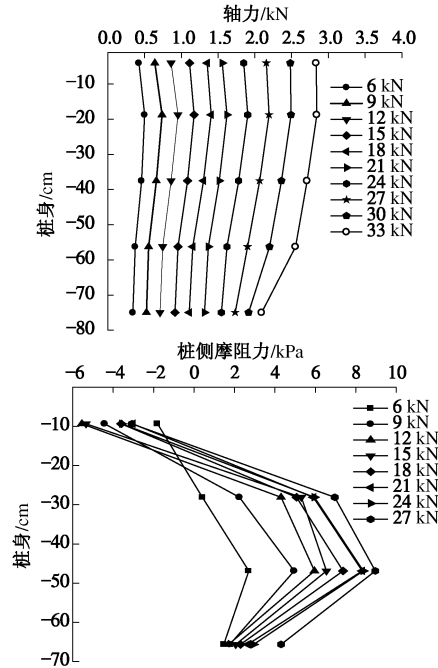
#### 3.1 桩身轴力及侧摩阻力对比分析

本试验桩筏基础及荷载均呈对称分布, 且 P1、P2、P3 桩具有相似形式的轴力及侧摩阻力分布, 故取典型的 P3 桩数据作各级桩基总荷载下的桩身轴力及侧摩阻力分布曲线图 (见图 6) 进行具体分析, 由图 6 可知: 位移调节器对端承桩基的轴力分布形式影响不大即每级荷载下两者轴力沿桩身变化都很小, 但同级荷载下位移调节器会显著减小桩身轴力, 说明该装置不改变端承桩桩体荷载分配关系即桩体荷载仍主要由桩端承担 (约占 80%), 但会显著减轻桩体的承担量, 优化桩土分担比; 每级荷载下常规端承桩基侧摩阻力沿桩身向下均呈渐小趋势, 随加载级数的增大侧摩阻

力也相应增加但变化量越来越小并渐趋稳定,可见此桩基侧摩阻力的发挥在前几级荷载下已基本完成,加至五级荷载后桩身上部已基本达极限侧摩阻力。



(a) 常规端承型桩筏基础



(b) 设置位移调节器端承型桩筏基础

图 6 桩筏基础中 P3 基桩轴力及侧摩阻力分布曲线

Fig. 6 Distribution of axial force and skin resistance along pile

另由图 6 知,位移调节器的设置使端承桩桩顶以下 6~7 倍桩径范围内出现负摩阻力,且量值随加载级数的增加呈先大后小趋势,分析原因是受荷后位移调节器与筏底土体均被压缩,但桩身位移较小,桩周土体出现相对桩身向下的位移,类似于桩顶“向上刺入”,

导致该部位出现负摩阻力。负摩阻力大小取决于桩土的相对位移量,加荷初期相对位移量随荷载增加而逐渐变大,加载至一定量级时土体趋于密实且调节器也渐至调节极限,此后相对位移量随加载级数增加渐小并趋于稳定,负摩阻力与桩土相对位移量呈现相同变化趋势。另外位移调节器的安装使端承桩桩身中部正摩阻力显著增加,调动了深层土体对基桩的支承力,提高了桩基整体承载能力。

3.2 筏板沉降对比分析

两种桩筏基础的最大沉降与加载关系见图 7,各级荷载下筏板沉降曲线见图 8。

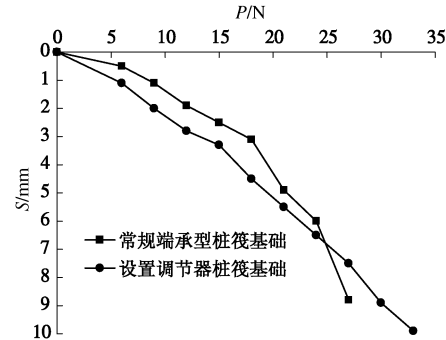


图 7 两种桩基最大沉降值与加载关系曲线

Fig. 7 Curves of largest settlement and loads in two kinds of piled raft foundations

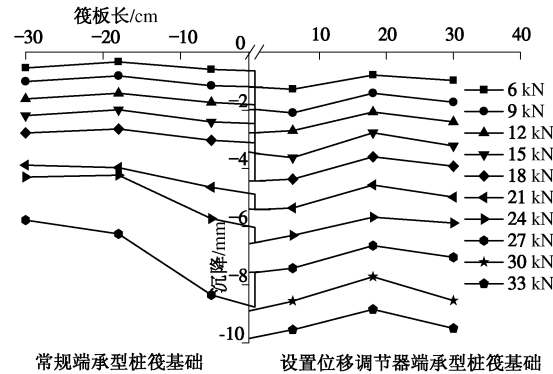


图 8 各级荷载下两种桩基筏板沉降对比

Fig. 8 Contrast curves for settlement distribution in two kinds of piled raft foundations

由图 7 可知,随着荷载增加两种桩筏基础的沉降量均呈增大趋势,但由于调节器支承刚度较小,设置位移调节器桩筏基础在同级荷载下沉降增加更为明显(如 6 kN 时沉降量由 0.53 mm 增至 1.16 mm,增加近 2.2 倍)。随着地基土逐渐参与承担上部结构荷载,在荷载水平相同的前提下,设置位移调节器桩筏基础的沉降速率小于常规端承型桩筏基础,在荷载达到 24 kN 时,两者沉降已基本一致。

另外由图 8 可以看出,常规端承型桩筏基础的差异沉降显著大于设置位移调节器桩筏基础,而且在下一级荷载下常规端承型桩筏基础差异沉降进一步加

大,并有破坏的趋势(荷载只加到27 kN)。而设置变形调节装置桩筏基础继续加载仍保持较小的整体沉降和差异沉降,这说明了变形调节装置的设置,充分调动了地基土承载力,并显著减小了桩筏基础的整体沉降和差异沉降。

### 3.3 筏板底土反力对比分析

各级荷载下筏板底土反力曲线见图9。由于本文试验仅模拟端承型桩而非嵌岩端承桩,荷载作用下基桩仍有少量沉降,因此两种桩筏基础筏底土反力仍随荷载相应增大。由于调节器的存在,同级荷载下安装位移调节器桩筏基础的筏底土反力显著大于常规端承桩桩筏基础,说明地基土承载力已得到很大程度的发挥。当荷载达到27 kN时,常规端承桩桩筏基础筏底反力急剧增大,且分布极不均匀,这主要因为桩筏基础此时已接近破坏。

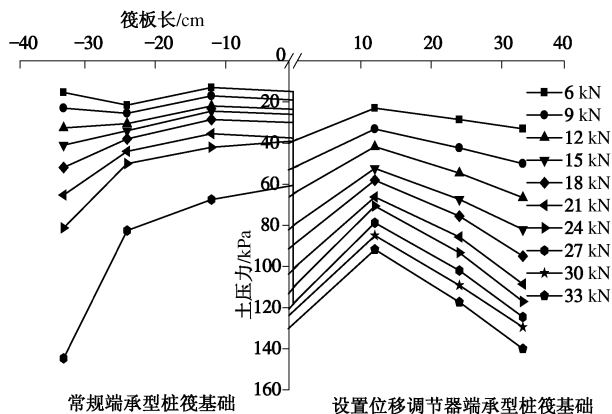


图9 筏底土反力分布曲线对比

Fig. 9 Contrast curve for distributions of soil reaction force

另外安装位移调节器后桩筏基础筏底土反力曲线逐渐由疏变密,原因是加载初期位移调节器压缩量显著,筏板沉降增加明显,筏底土承载能力迅速得到发挥,而当加载量增大,装置的调节能力发挥完毕,桩基的支承刚度迅速增大,筏板沉降趋于稳定,故筏底土反力亦趋于稳定。

### 3.4 桩顶反力对比分析

图10为常规端承型桩筏基础与设置位移调节器端承型桩筏基础的桩顶反力分布曲线。从图10可以看出,两种桩筏基础的桩顶反力均随加载级数增加而增大。但相同荷载级别下设置位移调节器桩基的桩顶反力小于常规桩基之桩顶反力,充分说明位移调节器能有效发挥筏底土承载能力,使得上部荷载大多被土体所分担。

桩顶反力的分布与筏板底土反力的分布相对应,相同的外荷载下,筏板底土反力大则桩顶反力小,反之亦然。

### 3.5 桩土平均荷载分担比对比分析

图11为常规端承型桩筏基础与设置位移调节器

端承型桩筏基础的桩土平均荷载分担比曲线。由图可知,端承型桩筏基础中位移调节器可以起到优化桩土荷载分担比的作用,即位移调节器能使土体首先发挥出承载优势(第一级荷载下土分担比占72%),待土体承载能力被充分调动后再逐步将后续荷载分至桩体承载(最后一级荷载下桩分担比约占65%);常规端承型桩筏基础桩土荷载分担比相对固定,即桩荷载分担比始终约占80%,而土荷载分担比始终约占20%,应该指出,如果此处为嵌岩端承桩则地基土承载力基本无法发挥。此处位移调节器的存在使上部结构总荷载在桩土之间优化调节最终达到动态平衡,进而满足桩土协调变形并共同承担上部结构荷载。

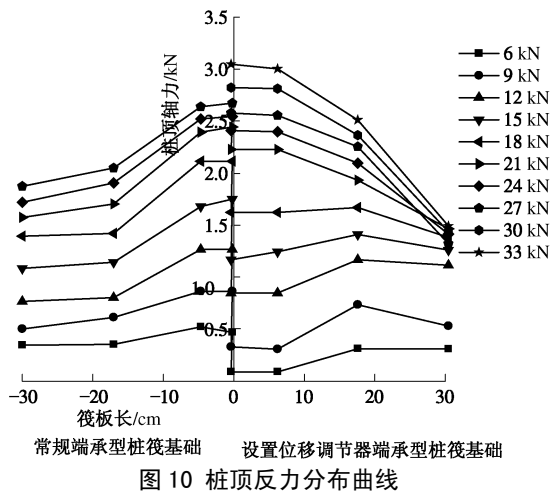


图10 桩顶反力分布曲线

Fig. 10 Curves for distribution of vertical reaction force at pile top

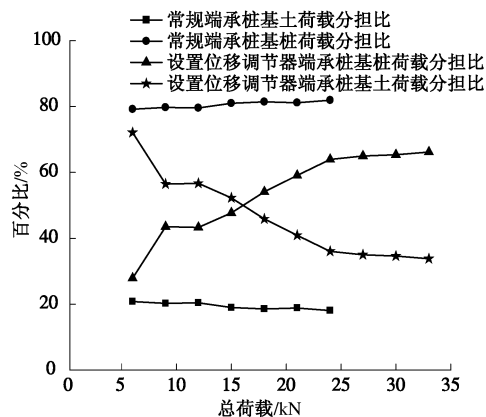


图11 桩土平均荷载分担比曲线

Fig. 11 Contrast curves of load share ratio

## 4 结 论

(1) 位移调节器设置于端承型桩筏基础后,起到协调桩-土变形、改善荷载传递特征、减小基础差异沉降、优化桩土荷载分担比等作用,同时可顺利实现端承型桩筏基础的桩土共同作用。

(2) 设置位移调节器的端承型桩筏基础桩顶下一定范围内有负摩阻力分布,且随上部荷载增加其数值有先增后减之趋势,实际工程设计计算时应考虑其不

利影响。

(3) 位移调节器改变了常规端承型桩筏基础的荷载传递规律, 优先调动筏板底土体承载能力的同时合理动态分配上部荷载最终至优化状态, 从而改善桩筏基础整体受力性能, 提高基础安全等级。

设置位移调节器的桩筏基础作为一种新的基础形式, 相关设计理论与方法还需完善, 笔者期望同行们对其进行进一步的探索与研究。

#### 参考文献:

- [1] BURLAND J B, BROMS B B, DE Mello V F B. Behavior of foundation and structures[C]// Proc 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, 1987: 495 - 546.
- [2] COOKE R W. Piled raft foundations on stiff Clay-A contribution to design philosophy[J]. Géotechnique, 1986, 36(2).
- [3] HOPPER J A. Review of behavior of piled raft foundation on soft ground[C]// Proc 8th Asian Regional Conference. SMFE. 1987.
- [4] 黄绍铭, 王迪民, 裴捷, 等. 减少沉降量桩基的设计与初步实践[C]// 第六届土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991. (HUANG Shao-ming, WANG Di-min, PEI Jie, et al. Design and practice of reduce settlement pile foundation[C]// Proceedings Sixth Annual Conference of Soils Mechanics and Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 1991. (in Chinese))
- [5] 黄绍铭, 王迪民, 裴捷, 等. 按沉降量控制的复合桩基设计方法(上)[J]. 工业建筑, 1992, 22(7): 34 - 36. (HUANG Shao-ming, WANG Di-min, PEI Jie, et al. Design method of controlled-settlement composite piled foundation( I ) [J]. Industrial Construction, 1992, 22(7): 34 - 36. (in Chinese))
- [6] 黄绍铭, 王迪民, 裴捷, 等. 按沉降量控制的复合桩基设计方法(下)[J]. 工业建筑, 1992, 22(7): 41 - 44. (HUANG Shao-ming, WANG Di-min, PEI Jie, et al. Design method of controlled-settlement composite piled foundation( II ) [J]. Industrial Construction, 1992, 22(7): 41 - 44. (in Chinese))
- [7] 宰金珉. 桩土明确分担荷载的复合桩基及其设计方法[J]. 建筑结构学报, 1995, 16(4): 66 - 74. (ZAI Jin-min. Composite pile foundation with distinct load distribution in piles and soils and its design method[J]. Journal of Building Structures, 1995, 16(4): 66 - 74. (in Chinese))
- [8] 杨敏, 艾智勇. 以沉降控制为基础的桩基础设计理论与工程实践[C]// 中国土木工程学会第八届年会论文集. 1998: 432 - 436. (YANG Min, AI Zhi-yong. Design theory and practice of pile foundation based on controlling settlement[C]// Proceedings Eighth Annual Conference of China Civil Engineering Society. 1998: 432 - 436. (in Chinese))
- [9] 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. (GONG Xiao-nan. Theory and practice of composite foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese))
- [10] 罗宏渊, 尤天直, 张乃瑞. 北京嘉里中心基础底板下垫泡沫板的设计[J]. 建筑结构, 1997(7): 44 - 47. (LUO Hong-yuan, YOU Tian-zhi, ZHANG Nai-rui. Design method of the basis of the following with foam board in JiaLi center[J]. Journal of Building Structures, 1997(7): 44 - 47. (in Chinese))
- [11] ZAI J M, MEI G X, WANG X D, et al. Concept of plastically bearing pile and its engineering application[C]// 6th international conference on tall buildings. HongKong: World Science Press, 2005.
- [12] 宰金珉, 周峰, 梅国雄, 等. 自适应调节下广义复合基础设计方法与工程实践[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 93 - 99. (ZAI Jin-min, ZHOU Feng, MEI Guo-xiong, et al. Design method and practice of generalized composite foundation by use of self-adaptable adjustor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 93 - 99. (in Chinese))
- [13] 宰金珉, 周峰, 王旭东, 等. 端承桩复合桩基及其设计方法[J]. 工业建筑, 2008, 38(1): 60 - 64. (ZAI Jin-min, ZHOU Feng, WANG Xu-dong, et al. End-bearing composite pile foundation and its design method[J]. Industrial Construction, 2008, 38(1): 60 - 64. (in Chinese))
- [14] 周峰. 广义复合桩基设计理论与方法[D]. 南京: 南京工业大学, 2007. (ZHOU Feng. Design theory and method of generalized composite foundation[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [15] 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): 89 - 92. (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): 89 - 92. (in Chinese))
- [16] 江宝. 桩梁和桩筏复合群桩基础模型试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2005. (JIANG Bao. Model test of pile-strip and pile-raft composite pile group foundation[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2005. (in Chinese))