

吕文龙, 林逸峰, 付强. 孔内深层强夯复合地基桩土应力比试验研究 [J]. 华南地震, 2024, 44(1): 119-125. [LYU Wenlong, LIN Yifeng, FU Qiang. Experimental Study on Pile-soil Stress Ratio of the Composite Foundation with Down-hole Dynamic Compaction[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(1): 119-125]

## 孔内深层强夯复合地基桩土应力比试验研究

吕文龙<sup>1</sup>, 林逸峰<sup>2</sup>, 付强<sup>2</sup>

(1. 广东省建筑科学研究院集团股份有限公司, 广州 510500; 2. 广州大学土木工程学院, 广州 510006)

**摘要:** 通过开展孔内深层强夯单桩复合地基现场静载试验和桩土应力测试, 获取了不同荷载作用下孔内深层强夯复合地基的平均桩顶应力、桩间土应力、桩土应力比、荷载分担比及其变化规律。试验结果表明: 孔内深层强夯复合地基的桩间土承担了主要的上部荷载, 约占 50%~63%, 随着荷载增大, 桩间土承担的荷载比例逐步增大; 对于孔内深层强夯复合地基, 随着荷载的增大, 桩土应力比随荷载的增大而减小, 数值介于 2~5 之间; 对粘性素填土地基, 孔内深层强夯复合地基在处理后的桩间土地基承载力比处理前可提高 220%。

**关键词:** 孔内深层强夯; 复合地基; 桩土应力比; 桩间土应力; 地基承载力; 荷载分担比

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)01-0119-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.01.14

## Experimental Study on Pile-soil Stress Ratio of the Composite Foundation with Down-hole Dynamic Compaction

LYU Wenlong<sup>1</sup>, LIN Yifeng<sup>2</sup>, FU Qiang<sup>2</sup>

(1. Guangdong Provincial Academy of Building Research Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** By conducting on-site static load tests and pile-soil stress tests on the composite foundation with down-hole dynamic compaction, the average pile top stress, soil stress between piles, pile-soil stress ratio, load sharing ratio, and their variation patterns of the deep dynamic compaction composite foundation in the hole under different loads were obtained. The test results show that: the soil between piles of the deep dynamic compaction composite foundation in the hole bears the main upper load, accounting for about 50% - 63%. As the load increases, the proportion of load borne by the soil between piles gradually increases; for the deep dynamic compaction composite foundation in the hole, the pile-soil stress ratio decreases with the increase of load, with a value between 2 and 5; for foundation with cohesive plain soil filling, the bearing capacity of the deep dynamic compaction composite foundation in the hole after treatment can be increased by 220% compared with that before treatment.

**Keywords:** Down-hole dynamic compaction; Composite foundation; Pile-soil stress ratio; Soil stress between piles; Foundation bearing capacity; Load sharing ratio

收稿日期: 2023-12-30

基金项目: 住房和城乡建设部科技计划资助项目(2017-k10-006)

作者简介: 吕文龙(1981-), 男, 博士, 正高级工程师, 一级注册结构工程师, 注册岩土工程师, 主要从事建筑地基基础方面的研究。

E-mail: midworm@163.com

0 引言

孔内深层强夯法采用机械设备先干作业成孔至预定深度，然后自下而上分层填料强夯或边填料边强夯，在形成高承载力的竖向增强体的同时形成强力挤密的桩间土的地基处理方法<sup>[1]</sup>。

以往文献对孔内深层强夯法做了应用及研究，主要手段有数值模拟和工程试验。

吕文龙等<sup>[2]</sup>结合现场试验，通过改变夯击次数、夯击能和持力层情况，研究施工参数对地基处理效果的影响，结果表明，适当增加夯击次数，能有效提高孔内深层强夯法对地基的处理效果，且桩体的持力层力学性质越好，工后沉降量越小。

俞宗卫等<sup>[3]</sup>结合现场试验，对孔内深层强夯桩复合地基的加固机理、设计参数、处理效果、经济效益进行分析与讨论，结果表明，其能大幅度提高桩周土的承载力，降低土的压缩性、且经济效益明显，为湿陷性黄土地区建筑物地基处理提供工程经验。

赵治海等<sup>[4]</sup>结合西安某粮库湿陷性黄土地基处理项目，对桩身填料灰土和渣土的孔内深层强夯挤密桩进行试验，对两种填料的挤密桩承载力、挤密系数、湿陷性等进行研究。结果表明，两种填料挤密桩均能消除黄土湿陷性，灰土挤密桩理效果优于渣土挤密桩，桩间土的承载能力均得到很大改善，桩间土平均承载能力为处理前1.6倍。

毛正君等<sup>[5]</sup>结合了西安地区某垃圾填埋场进行

地基处理的实例，探讨了孔内深层强夯桩结合灌注桩两种处理方法在地基处理中的应用。在满足设计地基承载力的要求，同时降低了工程造价、提高了工程的进度和质量，取得了良好的社会效益和经济效益。

彭明清<sup>[6]</sup>结合某高层住宅楼工程实例，利用ABAQUS有限元软件对孔内深层强夯桩桩及其复合地基在竖向荷载作用下的承载性能进行了细致深入的对比分析研究，建立不同单桩桩长、桩径、桩体弹性模量、桩周土变形模量及桩端土变形模量的五大类模型，分析模拟所得结果总结各因素对孔内深层强夯桩桩复合地基承载性能的影响。

本文基于在广东省惠东县开展的孔内深层强夯单桩复合地基静载试验和桩土应力比试验，获取了平均桩顶应力、桩间土应力、桩土应力比、荷载分担比及其变化规律，获取桩土复合地基整体承载力变化规律，以期为孔内深层强夯桩桩加固软土地基承载力理论和实践提供一定的理论和数据支持，为工程设计及施工提供技术指导。

1 试验方案

1.1 试验场地地质条件

试验场地原始地貌为冲积阶地及剥蚀残丘，勘察时场地为荒地、平地及小山坡，地形起伏不大。场地地下水位埋深为0.5~2.7 m，场地土层分布及主要的物力力学性质指标展示如下表1所示。

表1 地基土物理力学性质指标  
Table 1 Physical-mechanical indexes of soil layers

地层 编号	岩土名称	承载力特征 值 $f_{ak}/(\text{kPa})$	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	液性指 数 $I_L$	压缩系数 $a_{1-2}/(\text{MPa}^{-1})$	压缩模量 $E_s/(\text{MPa})$	黏聚力 $C/(\text{kPa})$	内摩擦 角 $\varphi/(^{\circ})$	天然孔 隙比 $e$	天然含水 率 $\omega/(\%)$
1	粘性素填土	120	18.0	/	/	/	8.0	5.0	/	/
2-1	淤泥质粘土	60	16.9	1.23	0.988	2.25	4.3	2.6	1.235	43.1
2-2	粉质粘土	130	19.1	0.60	0.623	2.95	13.5	7.5	0.829	29.5
3	砂质粘性土	160	19.3	0.35	0.383	4.77	20.8	11	0.768	27.1

1.2 试验设计

采用孔内深层强夯挤密桩处理地基，竖向增强体按正方形布置，间距3.5 m×3.5 m。增强体成孔直径1.2 m，成孔深度8.0 m，各试验点的竖向增强体入土情况见表2。竖向增强体施工采用的夯锤

重7.42 t，锤高12 m，空夯锤击数3击，每层填料的夯击数4击，最顶面一层填料夯击数2击，每层填料2.5 m<sup>3</sup>，填料采用土与碎石以5：5的比例混合成的碎石土作为填料。竖向增强体成桩直径1.8 m，成桩施工完成后使用平底夯锤满夯2遍，采用夯锤重10 t，提升高度10 m，夯击能量1000 kN·m，夯

击次数2击。施工完成28 d后,在场地内布置5组孔内深层强夯桩桩试验点进行静载荷试验,静载荷试验加载装置如图1所示。载荷试验承压板边长为3.5 m,承压板面积12.25 m<sup>2</sup>,最大试验荷载为2940 kN,加压系统为630 t油压千斤顶,测读系统方式采用全自动沉降观测仪,静载荷实验采用分级加荷、慢速维持法。桩土应力比试验和单桩复合地基静载试验同时进行。

表2 各测点的竖向增强体土层情况

Table 2 Soil layers of vertical reinforcement at each measuring point

试验点	土层情况
P1	0~8.0 m 为粘性素填土
P2	0~8.0 m 为粘性素填土
P3	0~8.0 m 为粘性素填土
P4	0~3.4 m 为粘性素填土,3.4~8.0 为淤泥质黏土
P5	0~6.4 m 为粘性素填土,6.4~8.0 m 为淤泥质黏土

试验采用压力盒测量桩顶和桩间土压力,土压力盒埋设平面布置示意图如图2所示。试验仪器为振弦式压力计,测量桩间土压力的土压力盒量程为0~0.6 MPa,测量桩顶压力的土压力盒0~2 MPa。埋设采用砂垫层法,埋设时将埋设处的地基削平,将桩顶削平使桩顶和桩间土表面在同一高程上,安装在桩顶土压力盒底部应采用中砂垫平,桩间土压力盒底部填入20 mm深中砂压实垫平,然后再安装压力盒就位。安装好后,在上方及周围覆盖200 mm厚的褥垫层,后夯实。褥垫层材料采用级配砂石材料,褥垫层材料的配合比为瓜米石:中砂=2:1。土压力盒埋设如图3所示,桩顶采用0~2 MPa的土压力盒,桩周土采用四个0~0.6 MPa的土压力盒,土压力盒间距1 m。试验时,承压板下铺设200 mm厚砂垫层,以防桩顶受力过于集中。桩顶和桩间土压力盒电缆均逐一编号和妥善保护。承压板水平放置在试验点上,且对准桩中心。压重平台安装水平,混凝土配重安放无偏载现象。

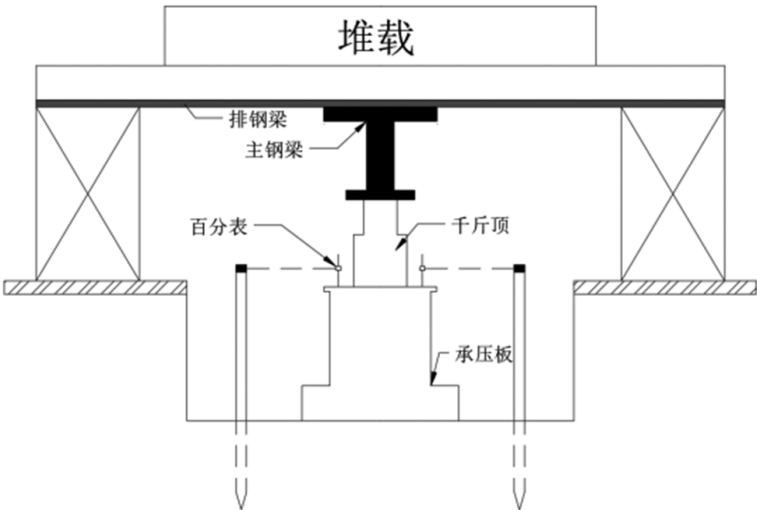


图1 静载荷试验加载装置图

Fig.1 Static load test loading device diagram

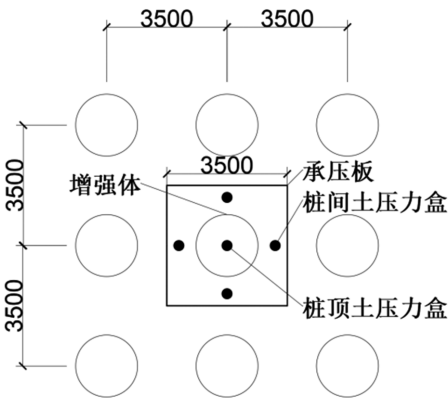


图2 土压力盒埋设平面布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the plan layout of the buried earth pressure box



图3 土压力盒埋设图

Fig.3 Burial diagram of earth pressure box

每级荷载稳定后，使用钢弦式频率仪测读桩顶和桩间土各土压力计的频率值。根据土压力计频率与荷载关系标定系数，计算得到不同荷载压力作用下的桩顶应力、桩间土应力、平均桩顶应力、平均桩间土应力和桩土应力比。

为检验孔内深层强夯桩桩对处理地基土的影响，推算处理后地基土的承载力特征值，本次试验布置了轻型动力触探试验孔30个。

2 试验结果及分析

2.1 荷载沉降

图4为五个测点的荷载—沉降曲线，表3为试验结果汇总表。由图4可知，五个试点的P-S曲线变化规律差别不大，沉降随着桩顶荷载的增大缓慢变大，加载过程中无明显拐点，最大加载值为240 kPa时，对应的桩顶最大沉降量分别为22.41 mm、26.04 mm、33.03 mm、42.21 mm、43.19 mm。

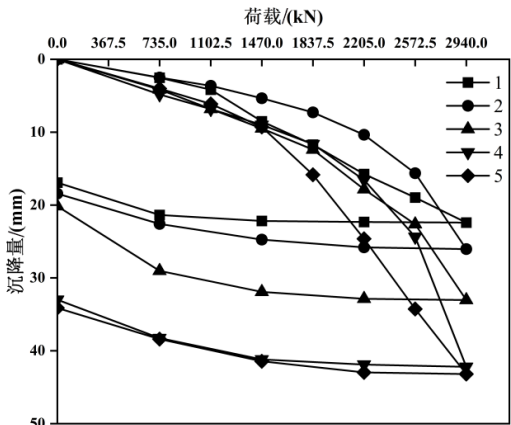


图4 静荷载试验荷载—沉降曲线

Fig.4 Load-settlement curve of static load test

表3 试验结果汇总表

Table 3 Summary of test results

试验序号	压板面积/(m <sup>2</sup> )	承载力设计特征值/(kPa)	最大试验荷载/(kN)	承载力检测特征值/(kPa)	最大沉降量/(mm)	残余沉降量/(mm)	回弹百分比/(%)	承载力特征值对应沉降/(mm)
1	12.25	120	2940	≥120	22.41	16.92	24.50	8.52
2	12.25	120	2940	≥120	26.04	18.44	29.19	5.35
3	12.25	120	2940	≥120	33.03	20.16	38.96	9.49
4	12.25	120	2940	≥120	42.21	32.99	21.84	9.00
5	12.25	120	2940	≥120	43.19	34.12	21.00	9.28

5组孔内深层强夯复合地基的静载试验的均为平缓的光滑曲线，无明显拐点，根据《建筑地基基础设计规范》<sup>[7]</sup>之附录B规定，地基承载力特征值可取s/d等于0.01，当采用边长或者直径大于2 m的承压板进行试验时，d按2 m计算，也就是沉降量等于20 mm时所对应的压力值。见图4，根据试验结果，桩体土地基承载力特征值取120 kPa时，即试验荷载为1470.0 kN时，对应的地基土沉降量分别为均小于20 mm；承载力加载至240 kPa时，对应的地基沉降量均小于120 mm(承压板的累计沉降量已大于其直径的6%，即120 mm)。因此，5个测点复合地基承载力特征值均不小于120 kPa。

2.2 桩土受力特性

将各荷载作用下的实测桩顶应力和4个方向的桩间土应力绘制成桩土应力随荷载变化曲线，如图5所示。在加载阶段，桩顶应力和各桩间土应力均随着荷载增加而增大，在前四级加载下，桩顶应力大小和增长率均明显高于桩间土应力，桩顶应力变化强烈，桩间土应力变化平缓，在第五级到第七级加载下，桩顶应力大小增长率逐渐减小，桩间土应力平缓增加。在卸载阶段，桩顶应力和桩间土应力均随着荷载的下降而减小，桩间土应力逐渐恢复至加载初期的应力水平，而桩顶应力仍然保持较大的应力水平。



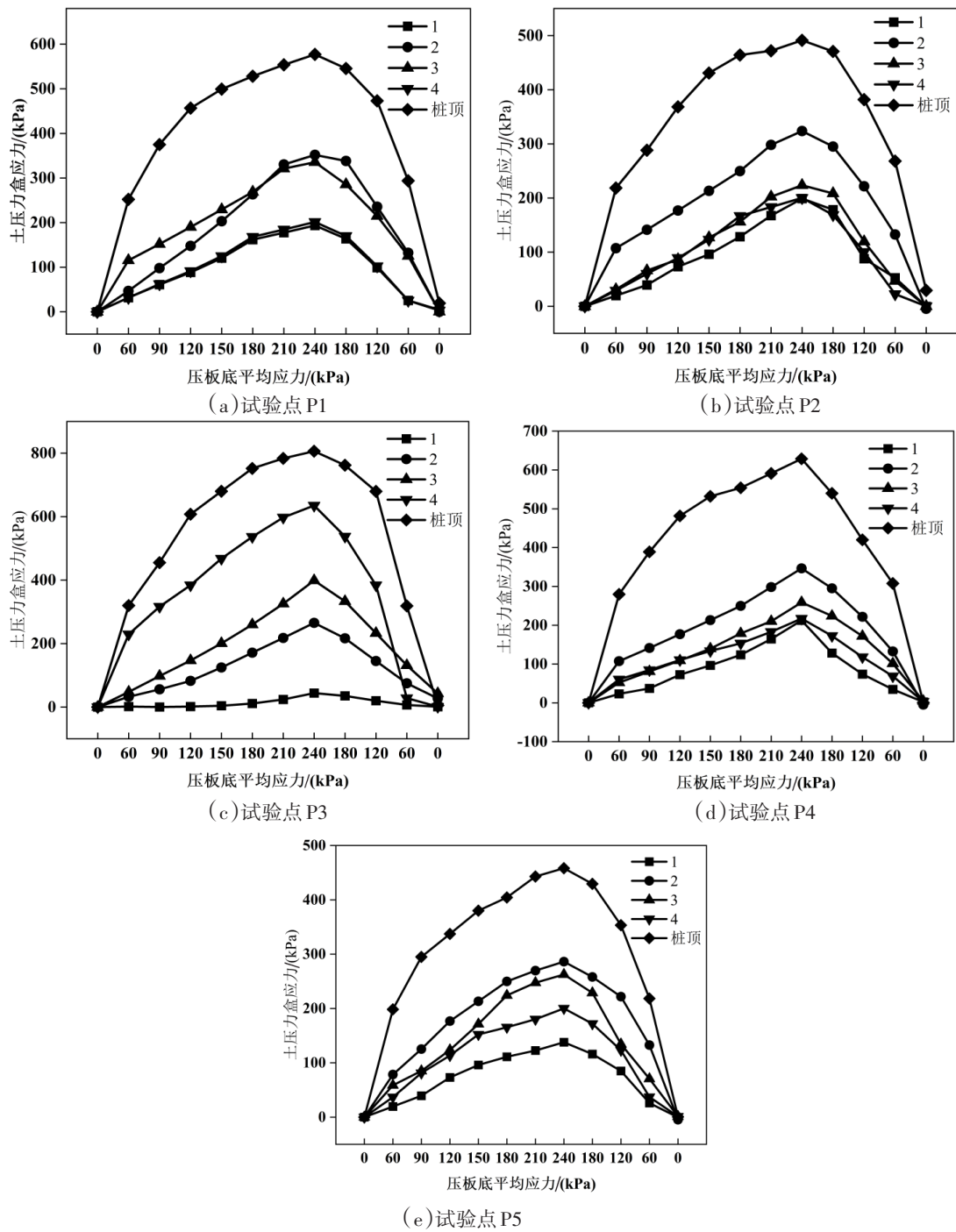


图5 各测点下桩、土应力分布

Fig.5 The distribution of pile top stress and soil stress between piles at each measuring point

在试验的承载力较小的时候,由图6和7可见,桩顶首先发挥其承载力,桩顶应力在200~300 kPa区间,桩间土应力平均值在58 kPa,随着荷载的提升,桩顶应力和桩间土应力也相应提升,在达到较高的荷载后,桩顶应力上升的幅度很小,桩顶最大应力平均值为592 kPa,桩间土最大应力平均值264 kPa。

### 2.3 桩土荷载分担比

各试验点桩土荷载分担比如图8所示。在第一级荷载下,桩顶承载力占比在53%左右,随着荷载的提升,桩间土承载力比例逐渐提高且大于桩顶承载力,在最大荷载下,桩顶承载力比例下降到37%左右,卸载期间,桩顶承载力又回升到50%左右,当荷载较小时,桩与土共同发挥其承载性能,当荷载较大时,桩间土承载力占大部分。

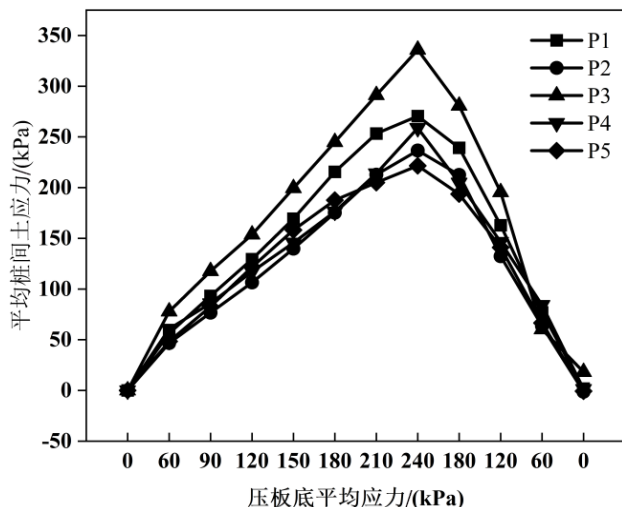


图6 各试验点平均桩间土应力大小

Fig.6 Average soil stress between piles at each measuring point

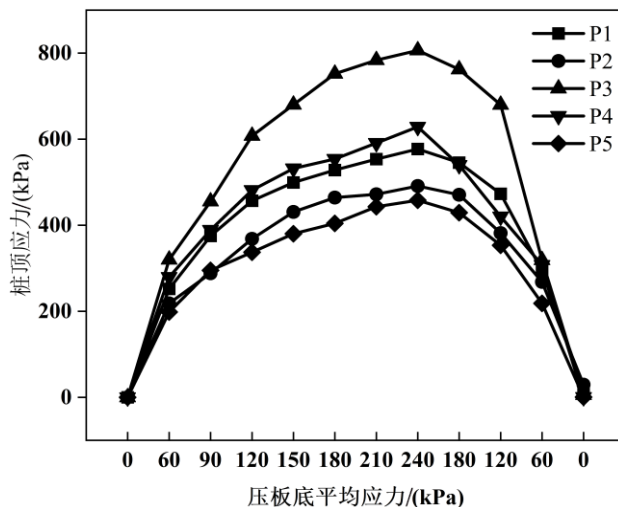


图7 各试验点桩顶应力大小

Fig.7 Pile top stress at each measuring point

## 2.4 桩土应力比

桩土应力比变化曲线如图9所示,在试验初期,桩土应力比较大,桩身要比桩周土要先发挥其承载性能,桩土应力比平均值为4.5,随着荷载的提升,桩和桩间土的不断变形,基底压力从

桩顶向桩周土转移,桩土应力比随荷载增加呈线性减小,这是由于桩身受力膨胀,向桩周土挤压,提高了桩间土的刚度,应力由桩身转移到桩间土,桩间土应力上升,桩土应力比达到最小值,其值区间为2.07~2.40。

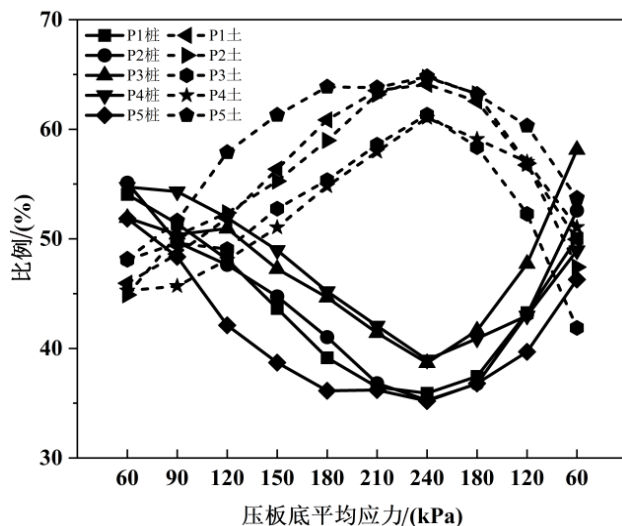


图8 各测点桩顶承载力与桩间土承载力的比值

Fig.8 Ratio of pile top bearing capacity to soil bearing capacity between piles at each measuring point

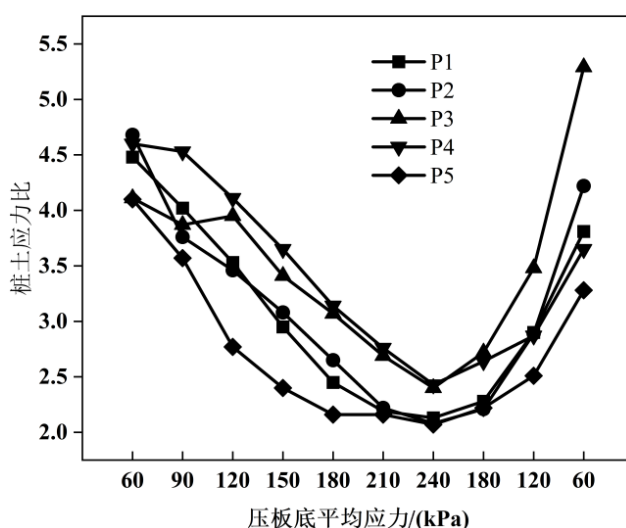


图9 各测点下桩土应力比变化曲线

Fig.9 Change curve of pile-soil stress ratio at each measuring point

## 2.5 孔内深层强夯对桩间土地基承载力的提升

通过标准贯入试验锤击数 $N$ 值,可对粘性土的物理状态,土的强度、变形参数、地基承载力、单桩承载力,成桩的可能性等做出评价,经勘察报告得,统计个数为50,此次粘性素填土的标贯修正

击数平均值 $N$ 为3.7,粘性素填土地基承载力特征值对应值为120 kPa<sup>[8]</sup>,孔内深层强夯工法处理之后,本次试验共完成30个孔内深层强夯轻型动力触探原位试验,结果为最大值78.5,最小值60.5,平均值71.7,轻型动力触探平均锤击数 $>50$ ,轻型动力触探推定的承载力特征值的可取为170 kPa<sup>[8]</sup>,

比勘察报告提供的地基承载力提高了41.7%，在做静载荷试验时，由图6可知，桩间土最大应力平均值为264 kPa，比勘察报告提供的地基承载力提高到220%。

### 3 结论

通过本文的试验研究，得出主要结论如下：

(1)孔内深层强夯复合地基的桩间土承担了主要的上部荷载，约占50%~63%，随着荷载增大，桩间土承担的荷载比例逐步增大。

(2)对于孔内深层强夯复合地基，随着荷载的增大，桩土应力比随荷载的增大而减小，数值介于2~5之间。在荷载较小时，桩土应力比在4~5之间，当荷载较大时，桩土应力比在2~3之间。

(3)对粘性素填土地基，孔内深层强夯复合地基在处理后的桩间土地基承载力比处理前可提高220%。

### 参考文献

- [1] 徐至钧,司炳文.地基处理新技术——孔内深层强夯[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [2] 吕文龙,沈仁良,王凯.孔内深层强夯法施工参数对珠江三角洲地区地基处理效果影响的试验研究[J].华南地震,2023,43(2):125-131.
- [3] 俞宗卫,许魁,张小伟.孔内深层强夯法在湿陷性黄土地区工程中的应用[J].建筑结构,2009,39(01):96-98.
- [4] 赵治海,徐张建,燕建龙,等.湿陷性黄土地孔内深层强夯挤密桩试验研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(04):1004-1011.
- [5] 毛正君,陶志怀,魏荣誉,等.SDDC桩结合灌注桩的垃圾填埋场地基处理施工技术[J].施工技术,2016,45(13):72-74.
- [6] 彭明清.自动脱挂钩技术条件下SDDC桩复合地基承载性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础设计规范:GB 50007-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [8] 广东省住房和城乡建设厅.建筑地基基础检测规程:DBJ/T 15-60-2019[S].北京:中国城市出版社,2019.