

钻孔内径向挤扩土压力的岩土勘察原位测试方法

何伟兵¹, 蒲春平², 张国梁³

(1. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507; 2. 广东省路桥建设发展有限公司, 广东 广州 510635; 3. 北京支盘地工科技开发中心, 北京 100143)

摘要: 挤扩支盘桩自20世纪80年代末面世以来, 在提高桩基承载力、减少沉降、提高桩基安全度、降低工程造价等方面都起到了重要作用。挤扩压力值是确定支盘数量、位置、间距的关键指标, 直接决定了挤扩支盘桩基承载力。目前, 挤扩压力值是在挤扩支盘桩施工时进行实时采集, 无法在设计阶段获取。本文提出将挤扩机进行小型化改造, 使其能放入钻孔内进行挤扩作业, 通过钻孔内侧向挤扩土体获得挤扩压力值, 既能用于挤扩支盘桩设计, 也能分析研究岩土层的承载力等力学指标。本方法作为一种新型的常规岩土工程勘察原位测试方法, 具有重要的研究意义和广阔的应用前景。

关键词: 挤扩支盘桩; 挤扩机; 挤扩压力值; 钻孔; 原位测试

中图分类号: TU413.9

文献标识码: A

In-situ Test Method of Radial Extrusion Earth Pressure in Borehole for Geotechnical Investigation

HE Weibing¹, PU Chunping², ZHANG Guoliang³

(1. Guangdong Province Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510507;
2. Guangdong Road and Bridge Construction Development Co., Ltd., Guangzhou 510635;
3. Beijing Zhipandi Engineering Science and Technology Development Center, Beijing 100143)

Abstract: Since the introduction of squeezed branch pile in the late 1980s, it has played an important role in improving the bearing capacity of pile foundation, reducing settlement, improving the safety of pile foundation and reducing project cost. The extrusion pressure value is the key index to determine the number, position and spacing of the squeezed branch, which directly determines the bearing capacity of the squeezed branch pile foundation. At present, the squeezing pressure value is collected in real time during the construction of squeezed branch pile, which cannot be obtained in the design stage. In this paper, it is proposed to carry out the miniaturization transformation of the extruder, which can be put into the borehole to carry out the extrusion operation, and obtain the extrusion pressure value through the inner side of the borehole to the soil. It can not only be used for the design of the squeezed branch pile, but also analyze and study the mechanical indexes such as the bearing capacity of the rock and soil layer. As a new type of in-situ test method for conventional geotechnical engineering investigation, the research is of great significance and has broad application prospects.

Key words: squeezed branch pile; extruder; extrusion pressure value; drilling; in-situ test

挤扩支盘桩是一种异形桩, 是在原有等截面钻孔灌注桩的基础上, 在桩身适当部位通过专用挤扩设备形成“分支”或“承力盘”, 因而称之为“挤扩支盘灌注桩”, 又称多级扩盘桩、多支盘钻孔灌注桩、挤扩多支盘 DX 灌注桩, 或简称“DX”桩^[1], 挤扩支盘桩见图1。支盘桩是依据

收稿日期: 2024-02-27

作者简介: 何伟兵, 高级工程师, 硕士, 研究方向为公路工程地质勘察、岩土工程

树根的抗压、抗拔机理, 结合变截面钻孔灌注桩的形状进行构思、研究而发明的一种新桩型, 是对灌注桩技术的改进。桩身的支、盘受土体的支撑作用, 不仅改善了桩身刚度, 提高了桩的抗压、抗拔力, 而且增加了桩的稳定性, 提高了抵抗水平荷载和地震荷载的能力^[2-3]。

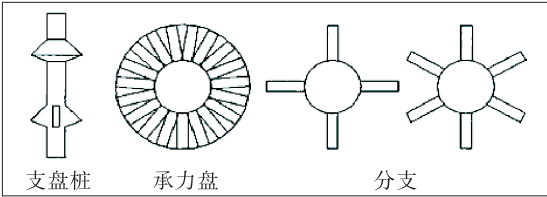


图1 挤扩支盘桩示意图

挤扩支盘桩是在原有的普通混凝土灌注桩的基础上, 在直桩成孔后及混凝土灌注前增加了下放挤扩机的挤扩工序, 施工工艺见图2。由于每个支、盘都对挤扩压力值有要求, 通过挤扩时进行实时采集, 动态调整支、盘的位置。在相同的承载力要求下, 挤扩支盘桩可缩短桩长, 减小桩径, 减少桩数, 从而使工期大大缩短, 因此具有可观的经济效益和社会效益^[4-5]。

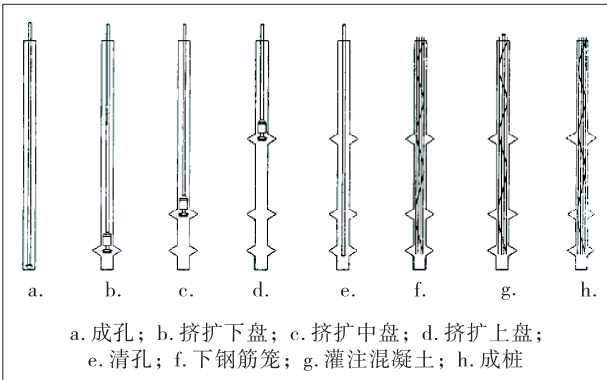


图2 挤扩支盘桩施工工艺流程示意图

目前, 挤扩压力值的获取主要是在桩基施工挤扩过程中进行实时采集, 是设计后获取, 无法在勘察阶段查明, 与工程设计项目必须先勘察后设计的规定相违背。在现行《桥梁挤扩支盘桩》(JTJ/T855—2013)中, 是根据勘察阶段获得的标贯值、静力触探锥尖阻力等指标, 通过查表来推测挤扩压力值, 再进行挤扩支盘桩设计, 这样势必会存在设计及质量风险, 也不利于挤扩支盘桩技术长期发展。常规的原位测试技术中, 标准贯入和圆锥动力触探试验是最常规的手段, 但在钻杆超过20 m后无修正公式, 超过20 m的标贯锤击数不能直接体现岩土层的力学性质, 且试验深度浅, 无法满足目前常规桩基设计的需

求, 且锤击操作繁琐复杂, 自动化程度低^[6-7]。钻孔内旁压试验中, 能获得岩土层的旁压模量及旁压剪切模量, 但操作过程繁琐, 功效低, 且旁压器与砂层的耦合性普遍不好, 尤其是较松散砂层, 砂土层易扰动、塌孔, 较难根据旁压曲线获得相关力学指标^[8-10]。静力触探目前发展较为迅速, 现有的重型静力触探车已将贯入深度突破至50~60 m, 但静力触探主要适用于黏性土、粉性土及中密以下的砂性土, 对卵碎石等粗粒土以及全风化层则因难以贯入而不能适用^[11-12]。关于土工试验, 往往由于取样的质量差、送样扰动、开样不及时等原因, 导致实验结果偏差大。因此, 本文提出一种新型的基于钻孔内径向挤扩土体获得挤扩压力值的岩土工程勘察原位测试方法^[13]。

1 挤扩支盘机

1.1 挤扩支盘机原理

挤扩测试设备主要由挤扩支盘机、动力油缸、钻机连接杆、油管及液压泵站等组成, 总体构成图见图3。施工过程中, 由液压工作站为其提供液压动力, 通过液液压管将动力传至支盘挤扩机, 推动上臂挤扩。当液压站供油时, 液压站内活塞杆推出致使弓臂轻向外伸, 直至达到最大行程, 当液压缸反向供油时, 活塞杆回缩, 拖动弓臂回缩复位, 即为一次挤扩。通过记录高压泵站压力值来获取挤扩压力值。

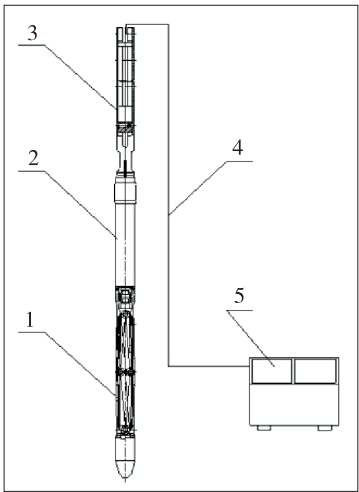


图3 挤扩测试设备总体构成图

1—挤扩支盘机; 2—动力油缸; 3—钻机连接杆;
4—油管; 5—液压泵站

1.2 小型化改造

为了适应勘察钻孔内测试, 根据地质勘察钻探设备的相关技术参数, 将挤扩设备进行小型化

改造（直径 90 mm），小型挤扩机结构示意图见图 4。

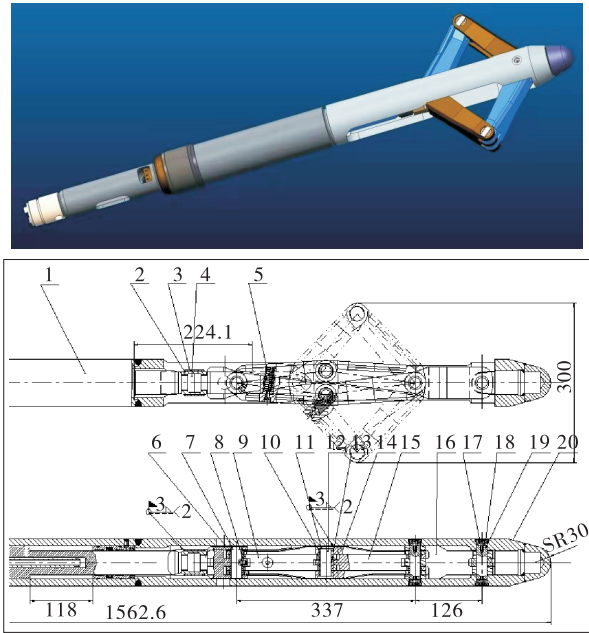


图 4 小型挤扩机结构示意图

1—动力油缸；2—油缸柱塞；3—连接卡套；4—法兰盘；5—机体；6—卡槽；7—定位键；8—压头；9—上弓臂；10—弓臂耳板；11—中轴挡板；12—中轴；13—轴套；14—下弓臂耳板；15—下弓臂；16—变径过度凳；17—下轴挡板；18—下轴套；19—下轴；20—导向帽

具体参数：①YZJ300 挤扩支盘机的最小外形尺寸：长度 1800 mm，油缸、机体的直径 90 mm，弓臂支出后 300 mm；②旁压勘察挤扩支盘机的参数：YZJ300 完全张开后盘径 300 mm，弓臂宽度 60 mm，弓臂收回后最小回转直径 92 mm，上下弓臂等长， $L=170$ mm，上弓臂内侧安装弹簧，克服自锁角；③油缸参数：内径/杆径×行程 = $63/45\times118$ mm，当泵压 = 31.5 MPa 时，推力 = 9260 kg；回收时的压力 = 15 MPa，拉力 = 2290 kg；当泵压 = 50 MPa 时，推力 = 14 700 kg；④油缸进液口的规格：油缸的接口为 KJ10（A10），与导向套的防松螺钉方向一致的进液孔为活塞腔接口，容许压力为 62 MPa。

1.3 地面液压油泵站的选择

液压泵站的型号规格应与挤扩支盘机的型号相匹配，以准确获取挤扩压力值，其相关参数见表 1。

表 1 挤扩测试用液压泵站参数表

名称	设备运行空载 压力/MPa	支收行程 速度/s	泵流量/ (L/min)
高压泵站	0.5	30 + 20（支 + 收）	0.5 ~ 1.0

2 测试工艺研究

（1）测试准备。测试前应对测试区域进行现场踏勘和调查，并了解后期可能的挤扩支盘桩设计、施工方案，根据踏勘和调查情况，结合勘察目的、场地岩土条件及设计施工方案等确定测试技术方案，编制测试工作大纲。

（2）钻探成孔。采用 $\varnothing 91\sim108$ mm 钻头成孔，满足常规取样、标贯测试等要求。对淤泥、松散砂层等易塌孔地层，需采用 $\varnothing 108\sim127$ mm 套管进行隔离护壁。达到预设终孔深度后，再采用扩孔钻头进行扩孔至挤扩测试孔径，挤扩测试孔径（ $d_{孔}$ ）应按式（1）确定：

$$d_{孔} = \frac{d_{桩}}{d_{施挤}} \cdot d_{测挤}$$

(1)

式中： $d_{桩}$ 为设计桩基直径（mm）； $d_{施挤}$ 为支盘桩施工用挤扩机直径（mm）； $d_{测挤}$ 为钻孔内挤扩测试用挤扩机直径（mm）。

（3）挤扩测试。钻孔挤扩测试作为新型原位测试手段，有其特有的外业操作方法。其采用常规地质勘探钻机进行成孔作业，然后将小型化改造后的挤扩机放入孔内预定深度处进行挤扩作业，并记录挤扩压力值和设备上抬值。主要流程及要求：①利用钻杆、连接接手等将挤扩支盘机下放孔内，使得上下弓臂中点处于既定深度处，从最深（下）的一个测试点开始挤扩，做完该测点后上提挤扩机做下一个测点；②每个测试点宜在正交垂直方向测 2 组数据，并同时记录挤扩压力值和设备上抬值；③挤扩压力值通过液压泵站的压力表读取，应取挤扩弓臂张开挤扩过程中的液压表上的局部峰值为其代表值，读取精确到 0.1 MPa；④设备上抬值可通过在地表钻杆顶部，通过固定卡尺直接量取，精确到 1 mm；⑤每个测试点都应校核连接杆长度，确保测试深度满足要求；⑥连接挤扩机头与液压泵站的油管，随着挤扩机头下放到测试点深度，采用铁线将油管与钻杆捆绑，每节钻杆应至少一个捆绑点；⑦提升挤扩机头时，应同步上拔油管，避免对油管造成损坏；⑧当该孔内所有测试点测试完毕后，可拔除设备及管材，进行下一测试孔的作业。

3 测试数据采集与整理

3.1 数据采集

本研究在粤东地区韩江三角洲的某高速公路项目中进行了挤扩测试数据采集，测试点位于一

互通立交范围内, 分布在各条匝道共 13 个钻孔点。在常规的地质钻探基础上, 加密了标准贯入试验、圆锥动力触探试验、取样的密度。钻孔终孔后, 在钻孔内进行了挤扩测试, 获取了各土层的挤扩压力值, 并在部分钻孔旁做了静力触探、十字板剪切、旁压试验等对比试验, 获取了丰富的岩土物理力学参数。

3.2 数据整理

首先, 以深度为纵轴, 在常规钻孔地质柱状图的基础上, 将修正后的挤扩压力值和设备上抬值标示在柱状图右侧, 并使测试点深度与相应标高及层位对应, 形成钻孔内挤扩测试综合地质柱状图 (见图 5)。

其次, 将基本土工试验成果 (基本物理指标、

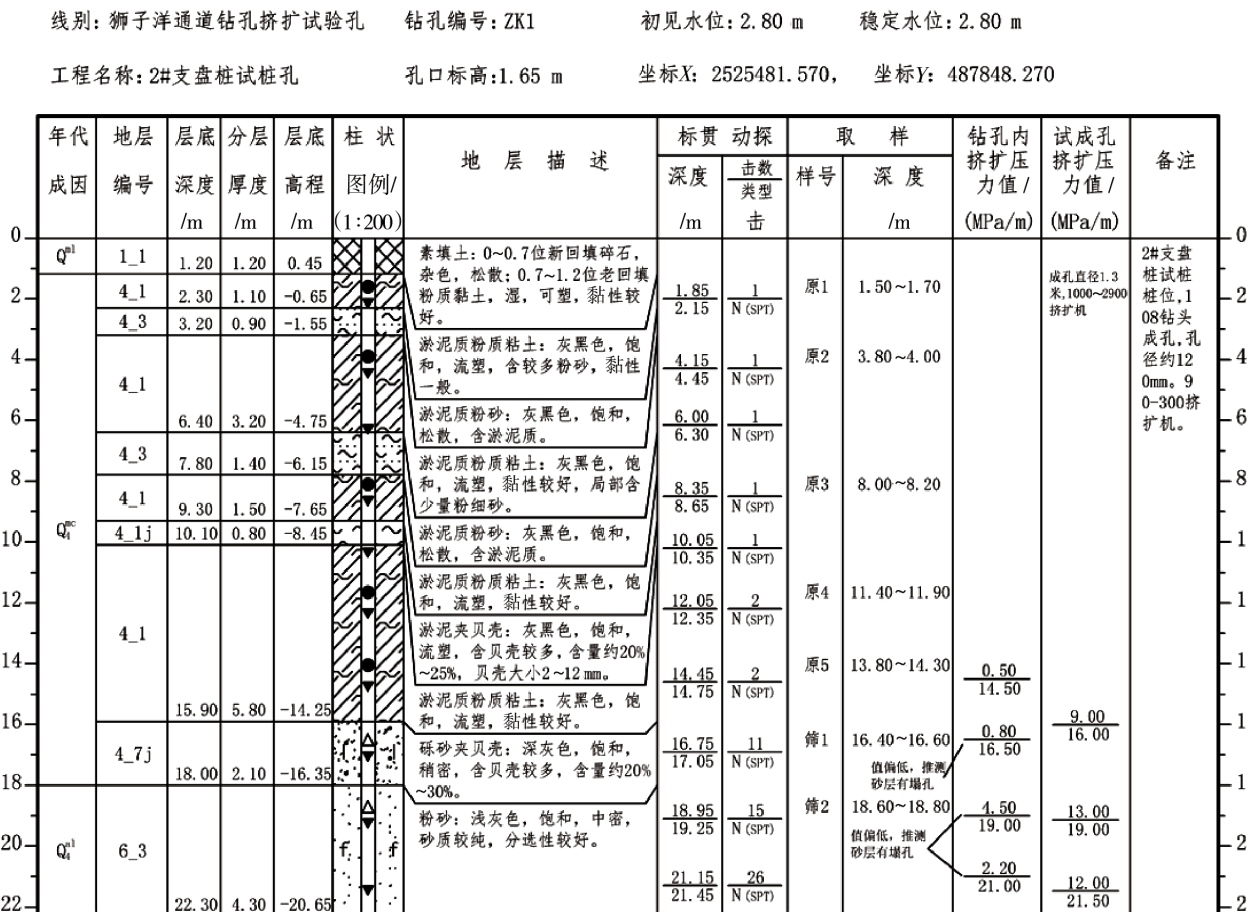


图 5 钻孔内挤扩测试综合地质柱状图

固结试验、剪切试验等)、常规原位试验成果 (标准贯入试验、静力触探试验、十字板剪切试验及旁压试验等)、挤扩测试成果 (挤扩压力值和设备上抬值), 按照地质分层进行统计, 得到各岩土层的物理力学参数分层统计表 (见表 2)。

最后进行相关性分析。将测试获得的挤扩压力值与同一层位土体的其他力学指标进行相关性分析, 包括: 压缩模量、剪切强度指标、标贯击数、地基承载力特征值、桩侧摩阻力标准值、旁压模量、锥尖阻力、十字板剪切强度等。整体来说, 相关性较好, 表明根据挤扩压力值来换算或推导各土层的力学指标参数是可行的。以地基承载力特征值为例进行说明, 注意相关性系数 $R^2 \in [0.7, 1]$ 为强关系, $R^2 \in [0.3, 0.7]$ 为中等

关系, $R^2 \in [0, 0.3]$ 为弱关系。

(1) 粉质黏土的挤扩压力值与地基承载力特征值之间具有较好的正线性相关性, 挤扩压力值在 8 ~ 12 MPa 范围内, 地基承载力特征值在 140 ~ 160 kPa 之间。

(2) 砂层 (中砂、粗砂、砾砂) 的挤扩压力值与地基承载力特征值之间具有较好的正线性相关性, 挤扩压力值在 14 ~ 25 MPa 范围内, 地基承载力特征值在 300 ~ 500 kPa 之间。

(3) 花岗岩残积土的挤扩压力值与地基承载力特征值之间具有较好的正线性相关性, 挤扩压力值在 7 ~ 10 MPa 范围内, 地基承载力特征值在 200 ~ 240 kPa 之间。

(4) 13a_35 全风化花岗岩的挤扩压力值与地

表 2 各岩土层物理力学参数分层统计表

层号	土层名称	项目	基本物理指标		液塑限				剪切试验			静力触探		旁压试验		挤扩压力值/MPa	
			含水率 $W/\%$	孔隙比 e	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	凝聚力 c_0/kPa	内摩擦角 $\phi_0/^\circ$	标准贯入试验 $N/\text{击}$	锥尖阻力 q_c/MPa	侧摩阻力 f_s/kPa	旁压模量 E_m/MPa	旁压剪切模量 G_m/MPa	钻孔 130 mm	桥梁支盘桩 1600 mm
5_1k	粉质黏土	最大值	85.7	2.225	57.6	37.2	20.4	2.38	29.9	24.1	17	2.93	43.9	14.1	5.4	6	7
		最小值	20.5	0.656	27.6	19	8.6	0.17	2	4.6	5	0.88	28.8	8.1	3.1	3.5	7
		平均值	35.2	0.951	39.3	25.1	14.2	0.61	19.8	12.1	12	1.45	35.6	11.5	4.4	4.3	7
		个数	12	12	12	12	12	12	12	12	28	128	128	4	4	5	1
		标准差	17.26	0.44	8.16	4.75	3.53	0.59	7.9	5.7	3	0.64	24.86				
		变异系数	0.49	0.46	0.21	0.19	0.25	0.98	0.4	0.47	0.26	0.3	0.3				
		标准值	44.2	1.18	35.1	22.6	12.4	0.92	15.6	9.1	11	1.25	34.8				
6_4zm	细砂	最大值									28	21.88	72.5	7.6	2.9	15.5	22
		最小值									17	3.63	28.4	3.8	1.3	15.5	14
		平均值									22	15.94	36.4	5.2	2.1	15.5	18.3
		个数									9	64	64	2	2	1	5
		标准差									3.61	2.93	11.77				3.56
		变异系数									0.16	0.18	0.32				0.19
		标准值									20	15.31	33.9				

基承载力特征值之间具有较好的正线性相关性，挤扩压力值在 7 ~ 16 MPa 范围内，地基承载力特征值在 280 ~ 320 kPa 之间。

各土层地基承载力特征值的相关性方程见表 3。

表 3 挤扩压力值与地基承载力特征值的相关性分析

岩土类别	相关性方程	R^2	相关系评价
粉质黏土	$y = 5.5x + 96.5$	0.73	中等
砂	$y = 19.951x - 18.528$	0.855	强
花岗岩残积土	$y = 13.491x + 109.263$	0.969	强
13a_35 全风化花岗岩	$y = 4.007x + 250.772$	0.926	强

4 结论

(1) 挤扩压力值是挤扩支盘桩设计的重要力学指标，直接关系到挤扩支盘桩的承载能力。找到一种在勘察阶段就能有效获取挤扩压力值的勘察方法至关重要。

(2) 小型化改造后的挤扩设备可与钻机的钻具设备进行连接，结构简单、易于控制。采用钻探成孔—扩孔—挤扩测试的工艺，现场操作方便、成本可控、优质高效。

(3) 本研究在粤东地区韩江三角洲的某高速公路立交中采集的挤扩测试数据表明，挤扩压力值与土体相关力学指标，均存在较好的相关性（相关性系数 R^2 大于 0.7， $R^2 \in [0.7, 1]$ 为强关系），利用勘察钻孔内径向挤扩土压力获得的

挤扩压力值来进行岩土工程勘察原位测试分析研究是可行的。

(4) 本文提出的新型岩土工程勘察原位测试方法，适用于淤泥质土、黏性土、砂土、稍密的卵砾石土、残积土、全及土状强风化层等土层。

(5) 建议在更多项目上采集更丰富的岩土物理力学参数，进行全面的相关性数据分析，更准确地推导出挤扩压力值与地基承载力特征值等重要力学指标之间的关系及经验公式，扩大适用范围，为岩土工程勘察技术水平的进一步提升做出贡献。

参考文献：

[1] 王安福, 张国梁. 挤扩支盘桩承载特性及其应用发展[J]. 广东公路交通, 2019, 5: 35-41.

[2] 黄月超, 李勇, 等. 挤扩支盘桩地震动力特性数值分析[J]. 公路. 2021, 6: 139-144.

[3] 王伊丽, 徐良英, 李碧青, 等. 挤扩支盘桩竖向承载力特性和影响因素的数值研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48 (S2): 158-162.

[4] 王少华, 孙克强, 刘广宇, 等. 桥梁挤扩支盘桩施工工艺与智能化装备[J]. 广东公路交通, 2019, 5: 55-58.

[5] 李键, 付佰勇, 石海洋. 挤扩支盘桩盘体质量检查方法研究[J]. 广东公路交通, 2019, 5: 60-66.

[6] 张宗联. 分析岩土工程勘察中标准贯入试验(SPT)的 N 值运用及校正[J]. 基础工程设计, 2020, 10: 63-65.

[7] 沈振, 屈鹏飞, 孟轲荆, 等. 旁压试验和标准贯入试验与砂土变形模量的相关性[J]. 岩土工程技术, 2021, 12: 416-417.

表 1 机器人各程序点定义

序号	点名称	注释	备注
1	X1	码垛台工件坐标 X1 点	需示教
2	X2	码垛台工件坐标 X2 点	需示教
3	Y1	码垛台工件坐标 Y1 点	需示教
4	Phome	机器人码垛定义原点	需示教
5	P10	码垛取料中间点	需示教
6	Ppick01	码垛取料点	需示教
7	P30	解垛放料中间点	需示教
8	Pplce01	解垛放料点	需示教
9	Ppal01B	左码垛基准点	需示教
10	Ppal02B	右码垛基准点	需示教

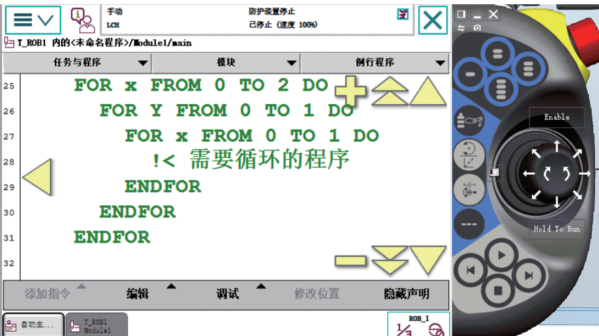


图 6 程序循环示意图

最后再使用循环指令，将需要循环的程序进行循环，如图 6 所示，左侧为循环指令由三个 FOR 循环组成，右侧为将要循环的程序，放入 FOR 循环当中实现程序的复用，使代码更加简洁。

4 结语

本文对工业机器人课程教学内容和存在的问题进行分析，提出引入企业项目作为课程内容，可以解决教学中出现的问题。本文以蔬菜无土栽培项目作为典型应用案例，该项目所应用的工业机器人知识点几乎涵盖了所有授课内容。项目从引出任务到分析任务，再到确定方案，最后到练习技能，逐步引导学生思考。在教学过程中引导学生结合工业机器人相关功能和指令进行应用，经过思考—学习—练习的过程，达到激发兴趣、学以致用、逐步加深印象的效果，为高职院校解决教学资源缺乏问题及校企合作课程案例提供新思路 and 有益参考。

参考文献：

[1]高茂源,王好臣,丛志文,等. 基于 RobotStudio 的机器人码垛优化研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(11):38-41.

[2]叶元杰. 基于 RobotStudio 的教学示教板设计与应用[J]. 广州城市职业学院学报,2022,16(2):59-63.

[3]李硕,强华. 工业机器人实验教学平台[J]. 实验技术与管理,2018,35(4):166-170.

[4]吴振宇,刘禹彤,冯林. 机器人实践教学体系改革探索[J]. 实验室研究与探索,2017,36(6):192-195.

[5]卢峰,官文. 高职院校工业机器人编程与操作课程教学思考[J]. 造纸装备及材料,2020,49(4):211-212.

[6]朱勤,朱巍峰. RobotStudio 软件在 ABB 工业机器人课程教学中的应用[J]. 黑龙江科学,2022,13(17):5

(上接第 12 页)

[8]蒲春平,何伟兵,贺佐跃. 潮汕地区桥梁挤扩支盘桩旁压试验分析[J]. 公路, 2024, 1: 151-156.

[9]汪浩,白文胜,曾祥勇. 基于旁压试验的贵阳红黏土力学性质分析[J]. 中国水运, 2021, 21 (3): 118-120.

[10]马宗利,黄佳铭,楼康明,等. 旁压试验在广州地铁勘察工程中的应用[J]. 城市勘测, 2013, 1: 156-160.

[11]张晓伦,黄俊光,陈奇,等. 多桥静力触探在临海深厚层超软土地区工程勘察中的应用与展望[J]. 广东土木与建筑, 2023, 5: 20-23.

[12]朱鹏程. 软土地区静力触探试验影响因素及机理研究[J]. 建筑技术开发, 2023, 5: 158-160.

[13]葛宁玲. 基于相关性分析的多维数据融合方法[D]. 北京:北京邮电大学, 2020.