

# 基于室内实验的深基坑工程设计参数分析及位移预测

Design Parameter Analysis and Displacement Prediction of Deep Foundation Pit Engineering based on Indoor Experiments

秦磊<sup>1</sup>, 张静<sup>2</sup>, 张贺<sup>3</sup>, 刘军达<sup>4</sup>, 王华<sup>5</sup>

- (1. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101; 2. 川藏铁路有限公司, 四川 成都 610031;  
3. 中交铁道设计研究总院有限公司, 北京 100088; 4. 中建交通建设集团有限公司, 北京 100071;  
5. 中铁二十五局集团有限公司, 广东 广州 510600)

**摘要:** 为了推求基于参数估算法的车站围护结构水平位移, 以南京市某地铁车站深基坑工程为研究对象, 采用解析计算法求解土层的有效内摩擦角和静止土压力系数, 并与室内试验结果进行对比; 采用现场监测的得到基坑变形实测值, 与基于解析计算得到的车站围护结构的水平位移进行对比。结果表明: 基于 Mayne 和 Campanella 计算得到的结果具有较高的预估精度, 可适用于南京地区砂性土的有效内摩擦角计算; Hossain 公式的静止侧压力系数计算精度比 Baldi 公式更高, 预测误差在  $\pm 20\%$  范围内, 室内试验低估了土层的静止侧压力系数; 基于孔压静力触探参数和扁铲侧胀参数求解的地下连续墙水平位移与实测值接近, 实测值与计算值的绝对比值范围为 0.90 ~ 1.54。

**关键词:** 静力触探试验; 扁铲侧胀试验; 深基坑工程; 原位测试; 参数分析; 位移预测

**中图分类号:** TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 06-0084-05

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.016

QIN Lei<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>2</sup>, ZHANG He<sup>3</sup>, LIU Junda<sup>4</sup>, WANG Hua<sup>5</sup>

- (1. Beijing Urban Construction Explorations & Surveying Design Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China;  
2. Sichuan Tibet Railway Co., Ltd., Chengdu 610031, China; 3. CCCC Railway Consultants Group Co., Ltd., Beijing 100088, China; 4. China Construction Communications Engrg. Group Corp. Ltd., Beijing 100071, China;  
5. China Railway 25th Bureau Group Corporation Limited, Guangzhou 510600, China)

**Abstract:** In order to calculate the horizontal displacement of the station enclosure structure based on parameter estimation method, a deep foundation pit project of a subway station in Nanjing was taken as the research object. The effective internal friction angle and static soil pressure coefficient of the soil layer were solved using analytical calculation method, and compared with indoor test results; Compare the measured deformation values of the foundation pit obtained through on-site monitoring with the horizontal displacement of the station enclosure structure obtained based on analytical calculations. The results indicate that the results calculated based on Mayne and Campanella have high estimation accuracy and can be applied to calculate the effective internal friction angle of sandy soils in the Nanjing area; The calculation accuracy of the static lateral pressure coefficient of Hossain formula is higher than that of Baldi formula, with a prediction error within  $\pm 20\%$ . Indoor experiments underestimated

**作者简介:** 秦磊 (1987—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 岩土工程勘察。

**通信作者:** 张静 (1983—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 桥梁工程施工及建设管理。

**收稿日期:** 2023-10-25

the static lateral pressure coefficient of soil layers; The horizontal displacement of the underground continuous wall solved based on the static penetration parameters of pore pressure and the lateral expansion parameters of the flat shovel is close to the measured values, and the absolute ratio range of the measured values to the calculated values is 0.90–1.54.

**Keywords:** piezocone penetration test; flat dilatometer test; deep foundation pit engineering; in-situ test; shear strength; displacement prediction

## 0 引言

随着地下空间的大量开发,深基坑工程也逐渐增多。复杂的城区环境、高度开发的边界条件对深基坑工程设计及施工提出了极为严苛的要求<sup>[1]</sup>。岩土工程勘察是基坑工程设计最为重要的前置条件,勘察参数的可靠性和详细性直接影响基坑工程的安全性和稳定性。大量的工程实践表明,基坑工程支护结构失效、基底涌水、地表大沉降等不良事件与基坑设计输入参数偏差密切相关<sup>[2]</sup>。

原位测试方法具有精度高、测试快、经济性好、不受人为因数干扰等优点,以孔压静力触探试验为代表的原位测试方法可以获得连续剖面,具有理论成熟、高精度和鲁棒性好的特点<sup>[3]</sup>。王立平<sup>[4]</sup>以厦门地铁轨道交通地铁2号线海沧湾公园站为研究对象,基于扁铲侧胀试验求解了土体的静止侧压力系数,并应用于车站钻孔灌注桩围护结构的水平位移计算,指出基坑围护结构实测变形值与基于扁铲侧胀试验静止侧压力系数的围护结构变形计算值相近;张国超等<sup>[5]</sup>以江苏省海太过江通道工程为研究对象,联合扁铲侧胀试验和孔压静力触探试验求解土层的强度特征参数,指出孔压静力触探试验参数得到的砂土有效内摩擦角偏大,而扁铲侧胀参数得到的有效内摩擦角则略小,侧限模量与锥尖阻力之间具相关性;陆顺<sup>[6]</sup>综合应用扁铲侧胀试验和孔压静力触探试验求解上海软黏土的超固结比和压缩模量,指出上海地区的超固结比随深度的增加而减小,锥尖阻力与压缩模量之间存在显著的线性关系,推求的参数已应用于上海轨道交通市域线机场联络线工程的设计中。张艳玲等<sup>[7]</sup>研究了深大基坑地表沉降机理和超挖后架设支撑对基坑稳定性分析,研究结果对相关理论和实践具有指导意义。

综上所述,这些研究以原位测试方法为主要目的,存在的问题包括不同测试方法得到的土层强度

特征参数存在偏差、在基坑设计中土体的强度指标、变形参数的确定不统一;不同规范或规程中土层参数选用存在差异,设计输入参数多依靠现场取样、室内试验获得的参数。取样代表性不足、试样受扰动大、高质量取样和制样成本高等。基于此,以江苏省南京市某深基坑工程为研究对象,将基坑变形实测值与基于推求参数估算值进行对比,以验证参数的可靠性和精度,研究成果可为长江三角地区地下空间设计提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 工程概况

江苏省南京市7号线某地铁站深基坑工程采用明挖顺作法施工,端头井基坑设计开挖深度19.8 m,宽度22.5 m,标准段开挖深度19.0 m,宽度18.5 m,基坑围护结构为厚800 mm、宽度6 000 mm、深度36.7~42.0 m的地下连续墙。场区内地层以粉土、粉砂、细砂和淤泥质土为主。试验采用孔压静力触探试验和扁铲侧胀试验对地层进行测试,采用测斜仪对地下连续墙的深层水平位移进行实测<sup>[8-9]</sup>,试验孔和监测孔的布置如图1所示。

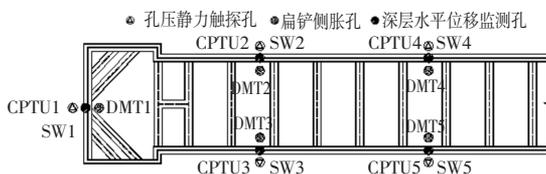


图1 试验孔与监测点平面布置图

Fig. 1 Layout plan of test holes and monitoring points

为对比孔压静力触探试验和扁铲侧胀试验结果更为准确,场区钻孔后对淤泥质土采取薄壁取土器、砂土采取固定活塞取土器获取高质量原状样,现场蜡封并以低扰动运输方式,将试样运送至试验室内进行密度试验、天然含水率试验、颗粒分析试验、液塑限试验等,土体的基本物理力学参数见表1。

## 岩土力学

表 1 场区各层土的基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of each layer of soil in the field area

岩土类型	密度 $\rho$ / ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	天然含水率 $w$ / %	天然孔隙比 $e$	饱和度 $S_r$ / %	液限 $w_L$ / %	塑限 $w_p$ / %	水下休止角 $\varphi_w$ / ( $^\circ$ )	三轴 UU 试验		直接剪切试验	
								黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ / ( $^\circ$ )	黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ / ( $^\circ$ )
③ <sub>5</sub> 粉土夹粉砂	1.95	26.3	0.731	93.8	26.9	18.2	—	21.2	17.0	13.6	16.3
④ <sub>1</sub> 淤泥质粉质黏土夹粉土	1.78	34.8	1.057	89.4	34.5	22.2	—	10.9	5.0	12.5	12.9
④ <sub>3</sub> 粉土夹淤泥质粉质黏土	1.77	32.1	1.017	85.4	30.5	20.7	—	14.0	9.8	13.8	19.6
④ <sub>4</sub> 粉砂夹粉土	1.90	25.6	0.792	86.3	—	—	26.5	—	—	14.8	21.5
⑤ <sub>2</sub> 为粉砂	1.95	21.2	0.694	83.1	—	—	28.8	—	—	11.4	32.5
⑤ <sub>2-1</sub> 粉质黏土	1.82	34.0	0.993	92.7	36.3	21.8	—	15.1	2.8	11.7	12.9
⑤ <sub>3</sub> 粉细砂	1.96	19.6	0.646	81.4	—	—	30.2	—	—	10.4	36.5

## 1.2 测试方法

## 1.2.1 孔压静力触探试验

孔压静力触探在基坑范围内布置测试孔 5 个, 编号为 CPTU1 ~ CPTU6。静力触探探头为 Geomil 公司生产的电测式静力触探 CPTU 探头, 还配备了 1 个压电传感器用来测量孔隙水压力、1 个加速度传感器用来测量 X 方向和 Y 方向的倾角, CPTU 探头规格和测试精度均符合 EN ISO 22476—1 标准, 可灵敏地测出夹薄层孔隙水压力, 极限孔隙水压力为 4 MPa, 锥头锥角为  $60^\circ$ , 锥底截面积为  $10 \text{ cm}^2$ , 侧壁摩擦套筒表面积为  $150 \text{ cm}^2$ , 面积比  $a$  为 0.8。透水石厚度为 5 mm。探头锥尖极限抗压强度为 50 MPa, 摩擦套筒极限强度为 10 MPa。

## 1.2.2 扁铲侧胀试验

扁铲侧胀试验在基坑范围内布置测试孔 5 个, 编号为 DMT1 ~ DMT6。扁铲侧胀试验钻孔与孔压静力

触探试验孔一一对应, 2 种试验钻孔之间的中心距离为 3.0 m。扁铲侧胀铲形探头的贯入可借助孔压静力触探试验液压贯入设备, 其探杆也可与孔压静力触探试验探杆共用。

扁铲侧胀试验测试点沿深度按 20 cm 间隔布置 1 个。扁铲侧胀试验测试覆盖土体的范围较大, 可获得土层的不排水抗剪强度范围 0.002 ~ 1.0 MPa、侧限压缩模量范围 0.4 ~ 400 MPa。

## 1.3 测试结果分析

## 1.3.1 孔压静力触探试验结果

图 2 为孔压静力触探试验成果。现场获得的静力触探参数数据连续, 可较为直观反映土体的性质, 能够识别夹薄层, 与实际钻探揭示土层相比, 静力触探数据的更为精细, 分层明确, 具备勘探和测试双重功能, 可为土层参数解译提供了多维度的基础数据。

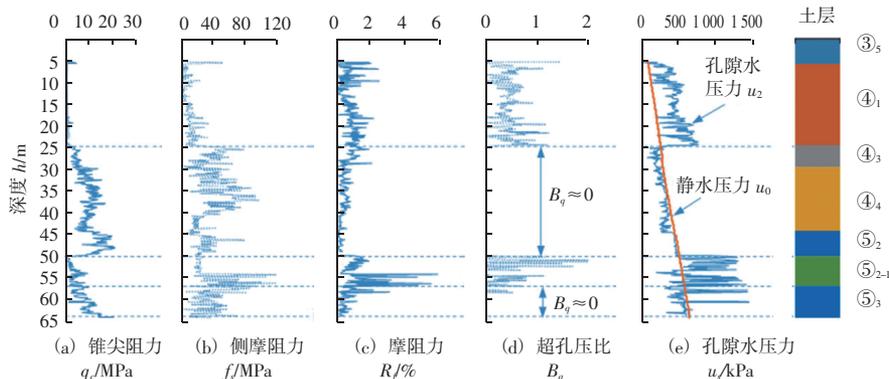


图 2 孔压静力触探试验曲线

Fig. 2 Static cone penetration test curve of pore pressure

## 1.3.2 扁铲侧胀试验结果

图 3 为扁铲侧胀试验成果。现场获得的扁铲侧胀参数众多, 原位测试深度达到 60 m, 测试结果可较

为直观反映土体的性质, 与实际钻探揭示土层相结合, 综合解析可提供准确的基坑设计参数。

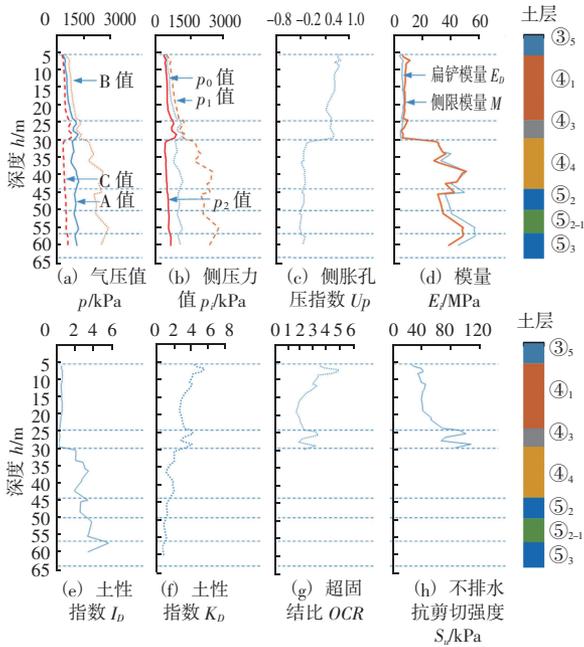


图3 扁铲侧胀试验曲线

Fig.3 Flat shovel lateral expansion test curve

1.3.3 测试参数对比分析

图4为基于扁铲侧胀试验和孔压静力触探试验得到的土层有效内摩擦角剖面图。

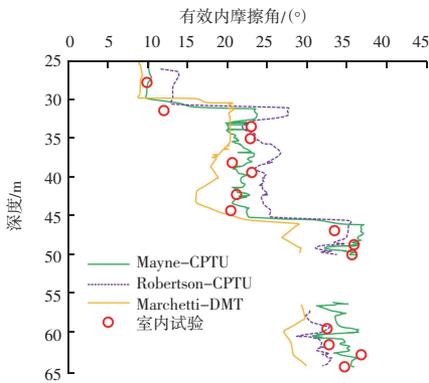


图4 不同测试方法计算砂性土有效内摩擦角对比

Fig.4 Comparison of different testing methods for calculating effective internal friction angle of sandy soil

与室内三轴剪切试验结果相比，基于扁铲侧胀试验和孔压静力触探试验得到的土层有效内摩擦角呈现不同程度的离散，但均能够较好地反映地层剖面，变化趋势上表现为不同性质土层的内摩擦角相互分离，相同性质土层的内摩擦角无显著异常值，④<sub>3</sub>粉土夹淤泥质粉质黏土的有效内摩擦角约为10°，④<sub>4</sub>粉砂夹粉土的有效内摩擦角变化范围为20°~25°，⑤<sub>2</sub>为粉砂、⑤<sub>3</sub>粉细砂的有效内摩擦角变化范围为30°~35°；与室内三轴剪切试验结果相比，基于

Robertson等<sup>[10]</sup>推导出的公式并不适合所有土层，计算得到④<sub>3</sub>粉土夹淤泥质粉质黏土、④<sub>4</sub>粉砂夹粉土的有效内摩擦角明显偏大(图5中Robertson-CPTU)，而⑤<sub>2</sub>为粉砂、⑤<sub>3</sub>粉细砂的有效内摩擦角与室内试验结果较为接近；基于Mayne等<sup>[11]</sup>和Campanella<sup>[12]</sup>推导出的公式计算得到各土层有效内摩擦角均与室内试验结果具有较好的一致性(图中Mayne-CPTU)，而基于Marchetti<sup>[13]</sup>推导出的公式计算得到各土层有效内摩擦角均比室内试验结果略小。由此表明，基于Robertson和Campanella推导出的公式对于含黏粒较少、无夹薄层的砂性土有效内摩擦角预估较为准确，而对于“混合土”则过高估计了土层真实有效内摩擦角，基于Marchetti推导出的公式低估了砂性土的真实有效内摩擦角，基于Mayne和Campanella推导出的公式具有较高的预估精度，可适用于南京地区砂性土的有效内摩擦角计算。

图5为基于扁铲侧胀参数和孔压静力触探参数得到静止土压力系数与室内试验成果对比。与室内试验相比，Hossain<sup>[14]</sup>提出的静止侧压力系数计算精度比Baldi<sup>[15]</sup>提出的计算方法更高，预测误差在±20%范围内，Baldi的预测结果比室内试验结果明显偏大，这是因为所测试土层包含了淤泥质土、粉土、粉砂、粉细砂，淤泥质土层为灵敏性土层，粉土和粉细砂土层中含有较高的粉粒，具有低化学固结性，粉砂和粉细砂为结构性土层，具有微超固结性，室内试验无法复现应力释放导致的土层结构性特性丧失，使得其低估了土层的静止侧压力系数。

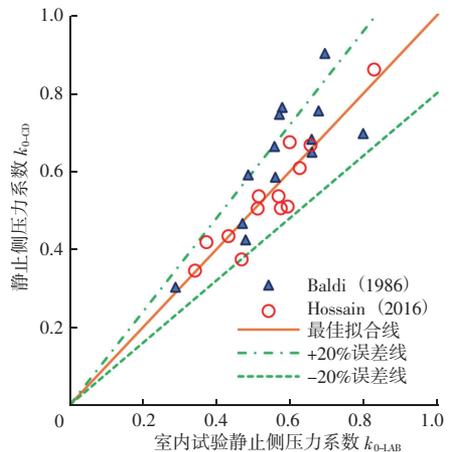


图5 原位测试方法与室内试验方法计算静止侧压力系数对比  
 Fig.5 Comparison of in-situ testing method and indoor testing method for calculating static lateral pressure coefficient

## 岩土力学

### 2 基于 CPTU 和 DMT 的工程应用

为了验证预估参数的准确性和可靠性,采用理论计算得到参数作为设计输入参数,验算地下连续墙的深层水平位移,并与监测结果进行对比,结果如图 6 所示。基于孔压静力触探参数和扁铲侧胀参数求解的地下连续墙水平位移与实测值具有基本一致的变化趋势,表明参数确定与工程符合性较好,求取同一深度实测值与计算值的比值,比值范围为 0.90 ~ 1.54。

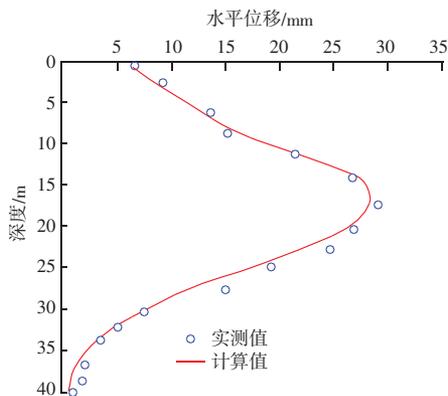


图 6 地下连续墙深层水平位移计算值与实测值对比

Fig. 6 Comparison between calculated and measured values of deep horizontal displacement of underground continuous walls

### 3 结论

(1) 孔压静力触探试验和扁铲侧胀试验的测试精度高、原位参数多,在土层原位应力状态、天然含水量状态获得测试结果更能反映土体的真实工程物理力学性质,在基坑工程设计参数的确定中具有显著优势。

(2) 基于 Robertson 和 Campanella 推导出的公式对于含黏粒较少、无夹薄层的砂性土有效内摩擦预估较为准确,而对于“混合土”则过高估计了土层有效内摩擦角,基于 Marchetti 推导出的公式低估了砂性土的有效内摩擦角,基于 Mayne 和 Campanella 推导出的公式具有较高的预估精度,可适用于南京地区砂性土的有效内摩擦角计算。

(3) 与室内试验相比, Hossain 提出的静止侧压力系数计算精度比 Baldi 提出的计算方法更高,预测误差在  $\pm 20\%$  范围内, Baldi 的预测结果比室内试验结果明显偏大,室内试验无法复现应力释放导致的

土层结构性特性丧失,使得其低估了土层的静止侧压力系数。

(4) 对比分析基于孔压静力触探参数和扁铲侧胀参数求解的地下连续墙水平位移与实测值,两者具有基本一致的变化趋势,参数确定与工程符合性较好,实测值与计算值的绝对比值范围为 0.90 ~ 1.54。

### 参 考 文 献

- [1] 陈锦. 静力触探试验在地铁车站工程勘察中的应用 [J]. 福建建材, 2021 (4): 20-23.
- [2] 杨溢军. 基于 CPTU 测试的深基坑工程土体设计参数应用研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [3] 李炜. 双桥静力触探试验在南通地铁车站工程勘察中的应用 [J]. 中国勘察设计, 2021 (12): 98-102.
- [4] 王立平. 基于扁铲侧胀试验的软土静止侧压力系数计算研究 [J]. 福建建设科技, 2022 (3): 57-60.
- [5] 张国超, 余颂, 张军杰, 等. 水域 CPTU 与 DMT 在土体强度特性评价中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (z1): 180-184.
- [6] 陆顺. 孔压静力触探与扁铲侧胀试验在上海软黏土中的应用研究 [J]. 岩土工程技术, 2022, 36 (6): 494-501.
- [7] 张艳玲, 王新宇, 刘淑红. 考虑超挖深大基坑地表沉降机理及基坑稳定性分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (6): 41-45.
- [8] 皇富强. 静力触探与扁铲侧胀试验在工程勘察中的综合应用 [J]. 水科学与工程技术, 2021 (2): 84-88.
- [9] 魏晋攀, 李瑞园, 容洪流, 等. 扁铲侧胀试验确定砂土内摩擦角方法研究 [J]. 中外公路, 2020, 40 (5): 253-256.
- [10] ROBERTSON P K, CAMPANELLA R G. Interpretation of cone penetration tests. Part I: Sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20 (4): 718-733.
- [11] MAYNE P, CAMPANELLA R. Versatile site characterization by seismic piezocone [C]. Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2005: 721.
- [12] CAMPANELLA R G, ROBERTSON P K. Use and interpretation of a research dilatometer [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28 (1): 113-126.
- [13] MARCHETTI S. The in Situ determination of an "extended" overconsolidation ratio [J]. Proc. 7th ECSMFE, Brighton, 1979, 2: 239-244.
- [14] HOSSAIN A M, ANDRUS R D. At-rest lateral stress coefficient in sands from common field methods [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142 (12): 06016016.
- [15] BALDI G, BELLOTTI R, GHIONNA V, et al. Flat dilatometer tests in calibration chambers [C]. Use of in Situ Tests in Geotechnical Engineering, 1986: 431-446.