

双桥静力触探法研究及钻探一体化设备 工程应用

王凯, 郑昂, 姚占勇, 姚凯

(山东大学 齐鲁交通学院, 山东 济南 250002)

摘要: 静力触探是一种常用的原位测试方法, 目前在岩土工程勘察中得到了广泛应用, 用于评估土壤的工程性质和地层结构。其主要应用包括土层划分、确定土壤的物理力学参数、砂土液化评估、桩基承载力计算等方面。为深入探究常用的双桥静力触探试验如何通过数据实现土层划分, 本文针对常用静力触探不同方法以及使用原理进行调研分析, 探讨所获参数在土层划分中的作用。同时, 提出了将双桥静力触探设备与搅拌桩施工设备结合改进的建议, 并且应用于现场施工, 通过搜集分析实验数据, 探究其工程适用性, 以推动静力触探技术的发展。

关键词: 静力触探; 土层划分; 土分类图法; 搅拌桩; 设备改造

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)S1-0111-06

Double-bridge cone penetration test method research and application of drilling integrated equipment

WANG Kai, ZHENG Ang, YAO Zhan-yong, YAO Kai

(School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China)

Abstract: Cone penetration test is a commonly used in-situ testing method, which has been widely applied in geotechnical engineering survey to assess soil properties and stratigraphy. Its main applications include soil stratification, determination of physical and mechanical parameters of soil, assessment of liquefaction potential in sandy soils, and calculation of pile bearing capacity. In order to deeply study how the commonly used double-bridge cone penetration test achieves soil layers delineation through data, this study investigated different methods and their principles, and explored the role of the obtained parameters in soil classification. At the same time, the proposal of integrated double-bridge cone penetration test equipment with the mixing pile construction equipment was put forward. The drilling integrated equipment was applied in field construction. Experimental data were collected and analyzed to explore the engineering applicability, aiming to advance cone penetration test technology.

Key words: cone penetration test; soil stratification; soil classification chart; mixing pile; equipment modification

0 引言

近年来, 我国交通基础设施建设不断发展完善, “十四五”规划中再次强调建设现代化基础设施体系、加快建设交通强国的要求。地质勘察技术是交通建设工程的基础, 对于工程建设的风险、寿命以及性能、设计和施工有着重要作用, 必须加强对地质勘察工作技术的研究。静力触探技术作为一种典型的原位测试手段, 可广泛应用于海洋工程^[1]和岩土工程等诸多领域。

在岩土工程领域, 静力触探技术广泛应用于土层划分、土层类别判定、软硬夹层识别、土层水平和垂直均匀性检测, 以及评估地基土工程特性。此外, 静力触探还能探寻并确定桩基的持力层, 预测桩基打入土壤的可行性和单桩承载能力, 检验人工填土密实度和地基加固效果。这些应用体现了静力触探技术在岩土工程中的广泛需求^[2]。但是, 静力触探作为一种前期勘察手段有一定的滞后性, 不能及时和工程现场施工联动起来。

本文针对静力触探法进行调查研究, 重点探究

双桥静力触探法现场试验划分土层原理,结合地基工程中常用的搅拌桩施工技术,综合考虑试验数据准确性和工程经济适用性,针对双桥静力触探和搅拌桩技术进行设备研发改造,通过现场试验、数据处理、结果分析等工作,最终实现工程施工和土层探测的同时进行,探索出一条静力触探发展的新道路。

1 双桥静力触探法发展现状

静力触探试验(CPT)以其出色的测试连续性、精度和重现性等特点在我国岩土工程勘察领域得到广泛应用^[3-4]。根据不同的探头设计,静力触探分为单桥、双桥和孔压静力触探3个类型。

单桥静力触探是我国独有的一种静力触探试验类型,以其探头性能稳定、精度高、防水性好等特点在我国工程勘察实践中积累了丰富的数据和经验^[5-6]。单桥静力触探试验的测试结果只能获得唯一参数比贯入阻力 P_s ,比贯入阻力为静力触探锥探头贯入土层时所受总贯入阻力与探头平面投影面积的比值,其反映的是端尖阻力和侧摩阻的综合力学效应。但是单桥静力触探试验在实验过程中会贯穿不同土层,不同土层内 P_s 的统计特性(包括趋势性和离散性)可能存在显著差异。由于 P_s 是单桥静力触探试验唯一指标,土层变化界面处的测量值会受到相邻土层影响^[7],根据 P_s 单一参数进行分层结果并不准确,一般会配合其他钻孔资料进行土层划分^[8-9]。此外,根据钻孔资料进行土层划分也会依靠工程经验,因而划分的土层具有主观性,无法完全取决于 P_s 的统计特性。如何在考虑 P_s 的统计特性条件下,客观、合理地划分复杂土层仍是岩土工程勘察中面临的一个关键问题^[10-12]。

在单桥静力触探技术受限的情况下,双桥静力触探技术蓬勃发展。双桥探头常以一定规格的圆锥形设计,借助机械或液压设备以恒定速率(通常为2 cm/s)缓慢穿透土壤。这一方法在贯穿土壤的过程中,同时测量端尖阻力 q_c 和侧摩阻力 f_s 随深度变化,为原位测试提供了关键数据。双桥静力触探试验钻孔参数示意图如图1所示,并且可通过测试结果计算摩阻比 R_f ,见式(1)。

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \times 100\% \quad (1)$$

孔压静力触探则是在双桥静力触探的基础上优化,增加了孔隙水压力 u 这一参数,对土质参数考虑更为全面,该试验过程中可以进行孔压消散,

从而得到孔压消散曲线^[13]。

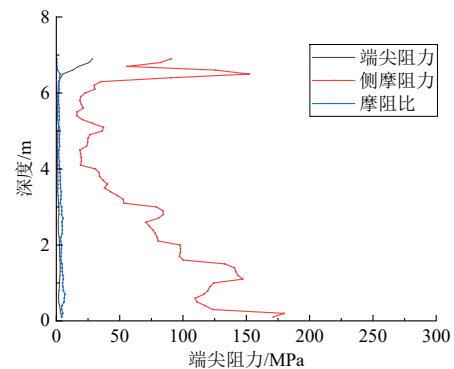


图1 双桥静力触探试验钻孔参数示意图

Fig. 1 Parameters of double-bridge cone penetration test

双桥静力触探作为一项原位测试和勘探技术,与传统勘探技术手段相比,具有迅速、精准、经济、省时等诸多优点。在桩基工程勘察中,其能够准确识别桩端持力层等特征,这是其他常规方法所无法比拟的^[14-15]。双桥静力触探采用端尖阻力 q_c 和侧摩阻力 f_s 两个指标综合区分土层类别,从而使记录更加真实、准确、详细。静力触探法作为一种工程中广泛使用的现场测试方法,在不考虑经济因素下优先选择准确度更高的孔压静力触探法,但是综合考虑三者的经济适用性和试验准确性,双桥静力触探法是首选。因此,本文主要针对双桥静力触探法进行研究和后期的设备改造。

2 双桥静力触探法划分土层

目前国内外学者对静力触探法的土层划分方法进行了广泛深入的研究。王刚等^[16]针对双桥静力触探两个参数与深度关系得出端尖阻力-深度和侧摩阻力-深度曲线关系参照结果,对土层进行了系统的划分研究;WORTH^[17]针对双桥静力触探法及其试验,提出了基于无量纲变量的双桥测试参数解译方法,并引入了2个新概念,即归一化端尖阻力 Q_t 和归一化摩阻比 F_t ;同时ROBERTSON等^[18]针对静力触探获得参数进行分析并且提出了 $Q_t - F_t$ 分类图,并提出土类指数 I_c 这一新型定义;周剑波等^[19]在开封等地区进行静力触探现场试验,进行细致的土层分类,结果表明该土类指数法划分土层在开封具有较高适用性;刘松玉等^[20]依据国外经验,建立了适用于国内的静力触探土类指数法,为实际工程应用提供了可靠的土层分类依据。

目前我国常用的方法为国家铁路局发布的《铁路工程地质原位测试规程》(TB 10018—2018)^[8]中的基于双桥静力触探参数的土分类图法。根据静

力触探所得实验参数 f_s 、 q_c ，由式 (1) 得到 R_f ，再根据双桥探头触探参数判别土层图进行判别：当 $q_c < 0.7 \text{ MPa}$ 时，可划分为软土； $q_c \geq 0.7 \text{ MPa}$ 时，根据 $R_f - q_c$ 双桥探头触探参数判别土层，如图 2 所示。

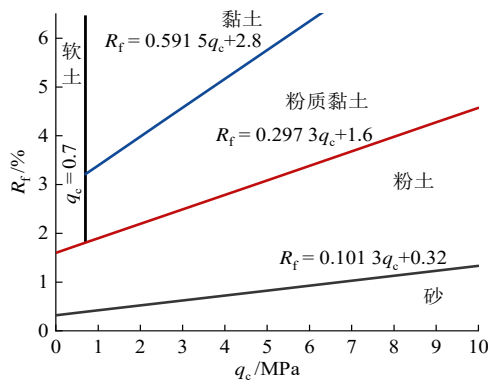


图 2 双桥探头触探参数判别土层图

Fig. 2 Soil classification based on parameters of double-bridge cone penetration test

3 工程验证

3.1 设备改造思路

静力触探设备的改良大多集中在设备本身以及测试装置的优化改进上，并未将静力触探设备和其他工程设备充分结合。陈偲等^[7]针对静力触探车进行改造，使其可以连续贯入或起拔；朱栋梁等^[21]基于静力触探原理设计了一种在微重力落塔实验中运用的全定位静力触探测试系统及使用办法。朱志铎等^[22]发明了一种水泥土搅拌桩施工时的钻头压力实时测量装置，但由于仅考虑单一压力因素，误差较大。本文将最常用的双桥静力触探法和地基处理工程中的搅拌桩施工技术相结合，以研发新型装备，钻探一体改造设备如图 3 所示。

通过解决探头和搅拌桩设备结合的 3 个关键问题，进行设备改造：

(1) 钻头旋转和静压探头连接问题。研发新型连接部件，确保钻头在钻进过程中能够保持竖直向下的静压状态。

(2) 双桥静力触探探头信号线路连接问题。确保线路具备防水防浆通电的条件。

(3) 测试装备信号接收器线路改造的问题。通过解决上述问题，在搅拌桩进行地基处理的过程中，静力触探探头能够提前实时探测土层状况，从而根据不同土层情况调整搅拌桩的施工参数（下钻速度、提升速度、浆压等），以满足工艺要求，并可在在此基础上减少材料消耗，降低施工成本。

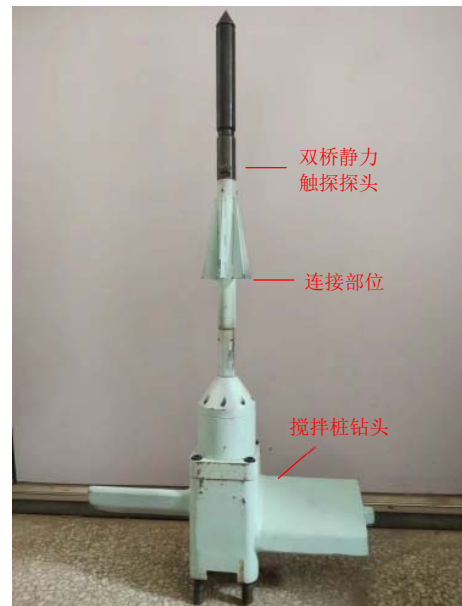


图 3 钻探一体改造设备

Fig. 3 Drilling integrated equipment

3.2 现场试验方案

本次试验选址位于山东省泰安市泰山区。工程场地的表面 0~2 m 为粉质黏土，2~6 m 为黏土，6~7 m 为砂土层，表现出多样性的土类土层组合。基于现场试验可进行土层划分并测试改造设备的效果。

试验包括 2 组常规双桥静力触探组和 2 组钻探与搅拌桩施工改造设备（以下简称钻探一体设备）组进行。为减小误差，1 号、2 号采用常规双桥静力触探试验，使用静压法实现下探；3 号、4 号采用钻探一体设备，在下钻过程中不进行喷浆。4 组试验钻孔间距为 3 m，以正方形布置，确保每个探点之间的间隔一致，便于规划和现场实施，简化数据的整理和分析，提高数据的一致性和可靠性。现场试验方案布置如图 4 所示。所有组的试验下钻速度保持一致，以 90 cm/min 的速度、75 kW 的功率向下钻进。1~4 号组均采用同一型号双桥探头。实验过程中，通过图 5 所示的静力触探测量仪读取试验数据，试验结束利用软件读取测量仪数据后进行分析，针对双桥法数据和改造后的钻探一体数据进行对比，分析其土层划分的准确性。

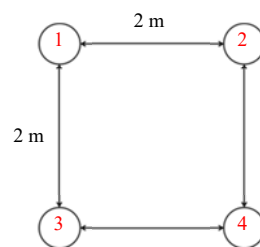


图 4 现场试验方案布置

Fig. 4 Layout of field test scheme



图5 静力触探测量仪

Fig. 5 Cone penetration measuring instrument

3.3 试验数据分析

将得到的4组数据进行整理分析,对于1号和2号两组数据的参数 f_s 、 q_c 分别取平均数,得到最终的双桥静力触探数据;同样对于3号和4号两组数据进行相同处理,得到钻探一体设备的数据。双桥静力触探法和钻探一体设备 f_s - h 分布如图6所示,双桥静力触探法和钻探一体设备 q_c - h 分布如图7所示,双桥静力触探法和钻探一体设备 R_f - q_c 分布如图8所示。

由图6~7可知,双桥静力触探法与改造后钻探一体设备的 f_s 、 q_c 数据基本吻合,曲线的变化趋势及基本走向符合土层状况。为量化表征双桥静力触探法与钻探一体设备数据之间的相似程度,采用式(2)计算对应数据组之间的皮尔逊系数 r ,如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})(D_i - \bar{D})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}} \quad (2)$$

式中: T_i 为第 i 个数据点双桥静力触探法所测数据(包括 f_s 、 q_c); \bar{T} 为双桥静力触探法所测数据的算数平均数; D_i 为第 i 个数据点钻探一体设备所测数据(包括 f_s 、 q_c); \bar{D} 为钻探一体设备所测数据的算数平均数; n 为数据点总数量。

针对 f_s 情况:皮尔逊系数 r 高达0.9558,在深度0~2 m处大部分 $f_s \geq 50$ kPa,2~6 m处大部分 $f_s \leq 50$ kPa,土层偶有突变,6 m以下大部分 $f_s \geq 100$ kPa。针对 q_c 情况:皮尔逊系数 r 为0.8131,在深度0~2 m处大部分 $2 \text{ MPa} \leq q_c \leq 4 \text{ MPa}$,2~6 m处大部分 $1 \text{ MPa} \leq q_c \leq 2 \text{ MPa}$,土层偶有突变,6 m以下大部分 $q_c \geq 3 \text{ MPa}$ 。由此可得,钻探一体设备所得到数据和常规双桥静力触探数据基本吻合,相似程度与相关性系数很高。因此,双桥静力触探法可在设备改造及实际工程中予以应用。

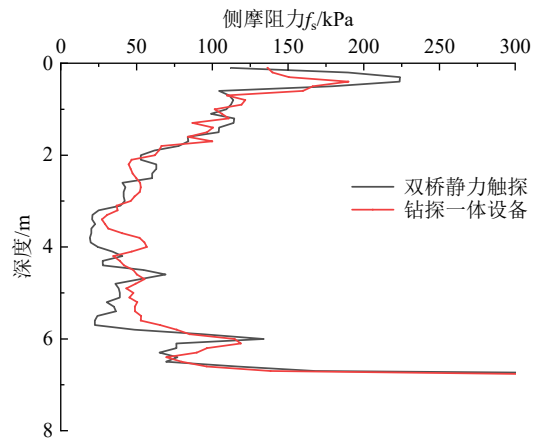


图6 双桥静力触探法和钻探一体设备 f_s - h 分布

Fig. 6 f_s - h distribution of double-bridge cone penetration test and drilling integrated equipment

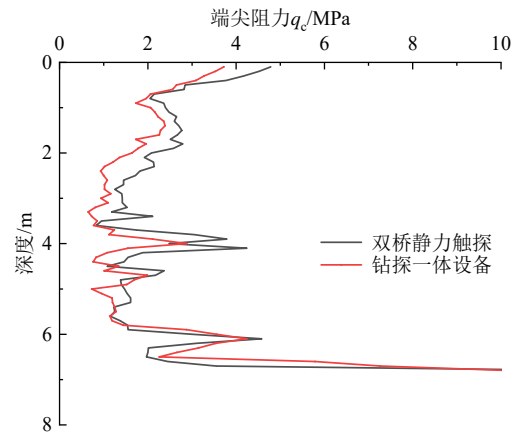


图7 双桥静力触探法和钻探一体设备 q_c - h 分布

Fig. 7 q_c - h distribution of double-bridge cone penetration test and drilling integrated equipment

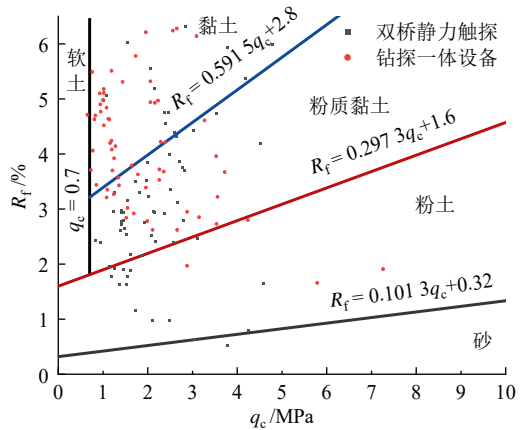


图8 双桥静力触探法和钻探一体设备 R_f - q_c 分布

Fig. 8 R_f - q_c distribution of double-bridge cone penetration test and drilling integrated equipment

在双桥静力触探参数判别土层的过程中,双桥静力触探参数可以将土层进行显著区分,和已知地质信息吻合。当双桥静力触探法应用于钻探一体设备时,钻探一体设备土层分类统计如表1所示。

表 1 钻探一体设备土层分类统计

Table 1 Soil classification statistics for drilling integrated equipment

| 土类 | 项目 | (0,2]/m | (2,6]/m | (6,7]/m | 汇总 |
|------|------|---------|---------|---------|-------|
| 黏土 | 数据点 | 12 | — | — | 12 |
| | 合格点数 | 10 | — | — | 10 |
| | 准确率 | 83.3% | — | — | 83.3% |
| 粉质黏土 | 数据点 | — | 42 | — | 42 |
| | 合格点数 | — | 26 | — | 26 |
| | 准确率 | — | 61.9% | — | 61.9% |

根据表 1 的数据显示, 钻探一体设备在对黏土和粉质黏土的判别方面表现出较高的准确率, 其中对粉质黏土的判别准确率达到 61.9%, 对黏土的判别准确率高达 83.3%。这些高准确率的判别结果为土层分类提供了可靠的依据。后续需对一体化设备进行进一步的因素分析并改进, 以提高对该类土层的准确判别能力。

4 结 论

本文基于地基加固处理中的搅拌桩技术与地质勘察手段中的双桥静力触探技术, 研发新型钻探一体设备并应用于现场试验, 根据试验结果可知:

(1) 双桥静力触探法可较为精准识别及判定土层, 该方法集成了搅拌桩施工设备, 可实现钻探一体, 改造后的设备同样具备良好的土层探测功能。

(2) 改造钻探一体设备区分黏土与粉质黏土的准确率很高, 可以成功应用于现场土层探测与参数分析。

(3) 改造钻探一体设备针对粉土和砂土的区分尚未明确, 后续需要进一步开展设备研发与优化, 以提高探测-识别-参数分析过程中的准确率, 在实际工程中达到实时勘察和调整施工参数的目的。

(4) 静力触探设备可与搅拌桩技术结合, 为后续实现施工过程中的土层探测和搅拌桩工艺参数的实时调整积累经验。

参考文献

[1] 杜宇, 闻博. 孔压静力触探试验在菲律宾某填海项目中的应用[J]. 地基处理, 2023, 5(2): 167-173.
DU Yu, WEN Bo. The application of CPTU tests to a land

reclamation project in Philippines[J]. Journal of Ground Improvement, 2023, 5(2): 167-173.

- [2] VAN DER LINDEN T I, DE LANGE D A, KORFF M. Cone penetration testing in thinly inter-layered soils[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2018, 171(3): 215-231.
- [3] 付超. 静力触探实验在土层划分中的应用研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2013, 26(2): 305-308.
FU Chao. Studies on the application of soil stratification based on cone penetration test[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2013, 26(2): 305-308.
- [4] 顾宝和. 《岩土工程勘察规范》中的静力触探问题[J]. 工程勘察, 2008(10): 4-5, 10.
GU Bao-he. The problems of CPT in Code for Investigation of Geotechnical Engineering[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2008(10): 4-5, 10.
- [5] 陈维家, 汪火旺. 静力触探中土层界面效应试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2003(2): 25-27.
CHEN Wei-jia, WANG Huo-wang. Research of soil-layer interface effect in cone penetrafiion test[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003(2): 25-27.
- [6] 郑硕, 曹子君, 李典庆, 等. 基于比贯入阻力的土体力学分层自动划分方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(8): 679-687.
ZHENG Shuo, CAO Zi-jun, LI Dian-qing, et al. Identification of underground stratigraphy based on specific penetration resistance[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(8): 679-687.
- [7] 陈偲, 甄浩越. 连续贯入式静力触探方法: 中国, CN202311058970.2[P]. 2023-11-10.
CHEN Cai, ZHEN Hao-yue. Continuous penetration type cone penetration method: China, CN202311058970.2[P]. 2023-11-10.
- [8] 国家铁路局. 铁路工程地质原位测试规程: TB 10018—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2019.
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for In-situ Testing of Railway Engineering Geology: TB 10018—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2019.
- [9] 曹子君, 郑硕, 李典庆, 等. 基于静力触探的土层自动划分方法与不确定性表征[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 336-345.

- CAO Zi-jun, ZHENG Shuo, LI Dian-qing, et al. Probabilistic characterization of underground stratigraphy and its uncertainty based on cone penetration test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 336-345.
- [10] DASENBROCK D. Improved site stratigraphy and layer characterization using cone penetration testing methods on Minnesota DOT projects[C]//Proceedings of Geo-Frontiers 2005, Site Characterization and Modeling. 2005.
- [11] CARUTHERS C, HARTSFIELD R, YOUNG A G, et al. Case study of geotechnical site investigation using a seafloor drilling unit, large-diameter cores, and coring-vessel-deployed cone penetration tests in the Gulf of Mexico[C]//Offshore Technology Conference. 2014.
- [12] 曹文庆. 基于静力触探的土层分类划分方法综述[J]. 中国水运(下半月), 2012, 12(6): 232-233.
- CAO Wen-qing. Review of soil classification and delineation methods based on static cone penetration testing[J]. China Water Transport, 2012, 12(6): 232-233.
- [13] 孟高头, 张德波, 刘事莲, 等. 推广孔压静力触探技术的意义[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 314-318.
- MENG Gao-tou, ZHANG De-bo, LIU Shi-lian, et al. The significance of piezocone penetration test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 314-318.
- [14] 吴伟. 双桥静力触探法在估算预应力混凝土管桩单桩承载力中的应用[J]. 城市勘测, 2014(1): 173-176.
- WU Wei. Estimating the prestressed concrete pipe pile bearing capacity of single pile by double bridge cone penetration data[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2014(1): 173-176.
- [15] 张继红, 顾国荣. 双桥静力触探法判别上海薄夹层粘土地基液化研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1652-1656.
- ZHANG Ji-hong, GU Guo-rong. Study of CPT for liquefaction estimation of sands with thin clay interlayer in Shanghai Area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1652-1656.
- [16] 王刚, 江巍, 陈宗清, 等. 双桥静力触探试验在土层划分中的应用研究[J]. 岩土工程技术, 2020, 34(6): 365-371.
- WANG Gang, JIANG Wei, CHEN Zong-qing, et al. Application of cone penetration test for soil layers division[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2020, 34(6): 365-371.
- [17] WROTH C P. The interpretation of in situ soil tests[J]. Géotechnique, 1984, 34(4): 449-489.
- [18] ROBERTSON P K, WRIDE C E. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 442-459.
- [19] 周剑波, 杨子跃, 徐鹏. 开封地区静力触探土层实用分类方法研究[J]. 工程勘察, 2020, 48(9): 35-40.
- ZHOU Jian-bo, YANG Zi-yue, XU Peng. Soil classification method in Kaifeng based on cone penetration test[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2020, 48(9): 35-40.
- [20] 刘松玉, 蔡国军, 邹海峰. 基于CPTU的中国实用土分类方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1765-1776.
- LIU Song-yu, CAI Guo-jun, ZOU Hai-feng. Practical soil classification methods in China based on piezocone penetration tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1765-1776.
- [21] 朱栋梁, 王浩, 杨庆, 等. 一种微重力静力触探测试系统及其使用方法: 中国, CN202310654289.8[P]. 2023-09-15.
- ZHU Dong-liang, WANG Hao, YANG Qing, et al. A microgravity cone penetration test system and its usage method: China, CN202310654289.8[P]. 2023-09-15.
- [22] 朱志铎, 万瑜, 高波, 等. 一种水泥土搅拌桩施工时的钻头压力实时测量装置: 中国, CN201810268491.6[P]. 2021-08-24.
- ZHU Zhi-duo, WAN Yu, GAO Bo, et al. A kind of real-time measuring device for drill bit pressure during the construction of cement soil mixing piles: China, CN201810268491.6[P]. 2021-08-24.