

DOI: 10.11779/CJGE2025S10014

冻土离心模型试验机上冻结装置研制与性能测试

周洁^{1,2}, 郭仲秋¹, 石振明^{1,2}, 刘成君¹, 周华德¹, 班超¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学隧道及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 离心模型试验是解决大时间跨度下冻土工程问题的有效方法, 但现有冻土离心模型试验装置制冷端只能起到控制温度边界功能, 无法在土体内形成连续冻结墙。为模拟人工地层冻结过程中土体内管状冷源冻结过程, 基于同济大学 TJ-150 岩土离心机, 自主设计一套采用半导体制冷与可控液氮冻结的冻土离心试验装置。试验过程中, 半导体制冷设备可实现对冻结墙边界温度的控制, 液氮冻结装置能够实现对液氮的稳定存储和定点输送。基于此套试验装置开展了离心机微型孔压静力触探试验以探究冻融前后软土渗透系数变化规律试验, 在 15g 离心超重力下检验了该装置的性能, 并初步探究了通过离心机微型孔压静力触探装置测定软黏土冻融前后原位渗透系数差异的可行性。

关键词: 冻土; 离心模型试验; 半导体制冷; 液氮冻结; 试验设备

中图分类号: TU445 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)S1-0036-05

作者简介: 周洁(1986—), 女, 教授, 主要从事冻融软土力学研究。E-mail:zhoujie1001@tongji.edu.cn。

Development and performance testing of centrifugal model test equipment for frozen soil

ZHOU Jie^{1,2}, GUO Zhongqiu¹, SHI Zhenming^{1,2}, LIU Chengjun¹, ZHOU Huade¹, BAN Chao¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground

Engineering (Tongji University), Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The centrifugal model test is an effective method to solve the problem of frozen soil engineering in a long time span. But the refrigeration end of the existing centrifugal model test devices can only control the temperature boundary, and can not form a continuous freezing wall in the soil body. In order to simulate the freezing process of tubular cold source in soil during artificial formation freezing, a set of frozen soil centrifugal test equipment using semiconductor refrigeration and controlled liquid nitrogen freezing is independently designed based on the TJ-150 geotechnical centrifuge of Tongji University. During the test process, the semiconductor refrigeration equipment can realize the control of the boundary temperature of the freezing wall, and the liquid nitrogen freezing devices can realize the stable storage and fixed point transportation of liquid nitrogen. Based on this set of test equipment, a centrifuge micro-pore pressure static penetration test is carried out to explore the change rules of permeability coefficient of soft soil before and after freeze-thaw. The performance of the devices is tested under 15g centrifugal super-gravity, and the feasibility of measuring the permeability coefficient of soft clay before and after freeze-thaw by using the centrifuge micro-pore pressure static penetration test devices is preliminarily explored.

Key words: frozen soil; centrifugal model test; semiconductor refrigeration; liquid nitrogen freezing; test equipment

0 引言

近年来, 随着中国经济发展, 沿海城市地下空间被高强度开发, 地下工程建设环境日益复杂。人工地层冻结法(AGF)是一种安全性高、普适性好的绿色工法, 有效解决了地下开挖出水量高、地层薄弱承载力差、土性敏感变形量大的问题, 被广泛应用于城市地铁隧道及越江跨海隧道等工程建设。但越来越多工程案例表明, 在软黏土地层区人工地层冻结法施工后出现了不均匀沉降及工后渗漏的问题^[1]。冻融后土层渗

透系数差异性分布是造成冻结法工后地层不均匀沉降的根本原因。与寒区土体受冻融作用沉降机理一致, 人工地层冻结法的冻融过程破坏了原有软黏土地层土水结构, 增大土体渗透性, 致使孔隙水压力消散最终造成地不均匀沉降^[2-3]。如能通过模型试验对冻结地层冻融后渗透性分布进行预测, 并对潜在冻融沉降区域进行针对性注浆则可有效解决冻结法融沉渗漏问题。

基金项目: 教育部青年长江学者计划 (Q2022101); 国家重点研发计划 (2023YFC3008300&2023YFC3008305)

收稿日期: 2025-04-06

岩土离心模型试验可通过土工离心机产生的超重力场来模拟实际土体应力场, 既能克服缩尺模型试验应力差异过大, 又能解决现场试验监测时间过长的问题。人工地层冻结法的离心模型试验还需要在应力场的基础上施加温度场。由于离心模型试验的超重力环境, 多数制冷设备的关键组件循环泵和压缩机难以正常使用。

为实现离心机机上冻结过程, 相关学者进行了许多尝试, 1983年, Langhorne等^[4]设计了第一台具有机上冻结功能的离心试验装置。其采用了液氨、干冰等多种制冷剂, 通过制冷剂沸腾吸热以降低模型表面温度, 该种方法可控性差安全性低。半导体制冷技术基于半导体元件通电后的珀耳帖效应, 即当直流电通过两种不同半导体材料串联成的电偶时, 在电偶的两端分别吸收和放出热量, 可在不使用制冷剂的情况下实现制冷, 该制冷方法具有装置简单、安全性高及可在超重力情况下运行的优点。基于半导体制冷技术陈湘生等^[5]研制了中国第一套土壤冻胀融沉离心模拟试验装置, 总制冷功率216 W。同样基于半导体制冷技术, 黄英豪等^[6]依托南京水利科学研究院TJ-60A土工离心机, 研制了一套湿干冻融离心模拟试验系统。该系统冻结模块由12组半导体制冷元件组成。运行时置于模型箱顶部通过空气对流方式向下部模型输送冷量。为保证半导体制冷系统制冷效率, 需及时转移半导体制冷元件发热端产生的热量, 因此半导体制冷系统通常由制冷面和发热面的散热系统构成, 难以模拟人工地层冻结过程中线冷源冻结过程。

为探究人工地层冻结法过程中各区位土体冻融前后特性。本文结合工程中常用液氮冻结技术, 将半导体制冷技术与液氮冻结方法进行结合研制出一套既能模拟低温边界, 又能冻结土体内部的冻土离心模型试验装置, 并通过相关软黏土地层冻结试验检验装置性能。

1 冻土离心试验机上冻结装置组成

冻土离心试验装置依托同济大学TJL-150型岩土离心机设计, 系统组成图如图1所示。装置主要由液氮冻结系统、半导体制冷系统、保温模型试验箱及温度监测系统构成。其中, 液氮冻结系统可储存并输送液氮, 用于冻结特定区位土体; 半半导体制冷装置可实现对冻结区域边界温度的控制; 保温试验箱可起到保温、隔热、防渗作用; 温度监测系统能够实时监测箱内各探点温度变化。下面介绍各分系统的主要结构和功能。



图1 冻土离心模型试验机上冻结装置

Fig. 1 Photo of centrifugal model test equipment for frozen soil

1.1 液氮冻结系统

液氮是人工地层冻结法中常用的冷媒介质, 因单位体积吸热量大, 降温速度快, 可在短时间内提高冻土强度, 多用于工程抢险等急难险重的地层冻结任务。具有无毒、无色、无味、不易燃易爆和化学物质稳定的特点, 相较于其他冷媒安全性高。液氮冻结装置无传统冻结装置需要的回流循环系统, 仅需设计液氮的单向排出控制装置和用于热交换的汽化装置即可实现定点冻结过程。本套冻土离心试验装置中采用两组自增压压力储罐(图2(a))存放并输出液氮。单个储罐最大容量11 L, 自增压装置能在15g离心力情况下持续释放液氮。压力储罐与控制阀门(图2(b))相连接, 通过控制阀门开度可实现对液氮流量的控制。液氮输送管道采用不锈钢耐压波纹管, 表面做保温处理。储罐输出的液氮经压力管道输入至土体中预埋微型气化器内。气化器外直径8 mm, 为双层结构, 外管使用紫铜管铸造以增大热交换效率, 液氮经内管输送入气化器后气化带走土体内部热量, 产生的低温氮气经由隔热管道排出土体外部。通过改变土体内气化器的结构和位置能够实现对试验箱内不同位置和尺寸的土体的冻结。为确保装置安全性, 加厚储罐壁以提高机械强度, 并在液氮储罐罐口及压力管道设有安全阀防止管道内压过大。

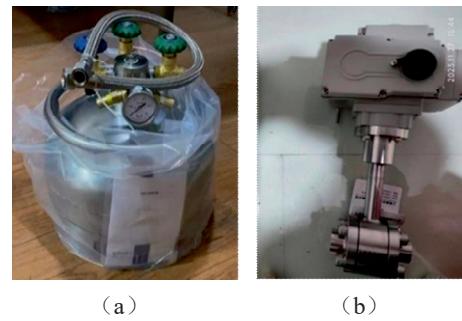


图2 自增压压力储罐及控制阀门

Fig. 2 Self-boosting pressure tank and control valve

1.2 半半导体制冷系统

半导体制冷系统主要由制冷半导体元件及对应的散热器构成。共计4组14片半导体制冷元件, 单个制

冷元件最大制冷功率 96 W, 供电电压 12 V。每组半导体制冷元件独立供电, 可分别控制上下左右 4 个方向的冻结过程如图 3 (a) 所示。半导体制冷原件布置于模型试验箱外侧, 制冷面紧贴试验箱, 制冷区域边界采用隔热材料与试验箱体进行隔离, 如图 3 (b) 所示, 以减少冷量在试验箱侧壁的传导。散热端采用散热鳍片与风扇将半导体制冷元件产热面产生的热量吹离试验箱。

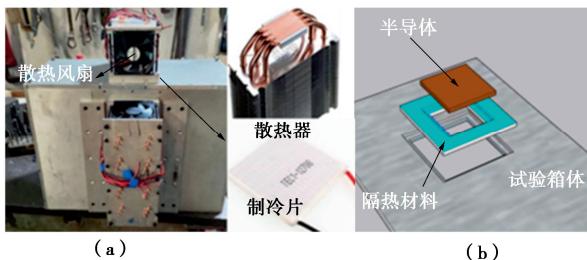


图 3 半导体制冷系统及制冷面结构

Fig. 3 Semiconductor refrigeration system and structure of refrigeration surface

1.3 保温模型试验箱及温度监测系统

保温模型试验箱主要起到保温隔热作用, 同时为液氮冻结和半导体制冷系统的换热部分提供支撑和连接。试验箱实物图和模型图分别为图 4 (a), (b) 所示。外部为厚度为 10 mm 不锈钢拼接而成, 尺寸为 600 mm×200 mm×350 mm, 内部及外部布设有保温材料以增强保温性能。内衬铺设有特氟龙薄膜以降低边界效应, 边角预留有排水通道, 可促进土体固结过程。试验箱侧壁连接有半导体制冷片, 侧面开孔供液氮输送管道固定。

温度采集系统主体采用 Keithley-2700 型万用表, 配备 Keithley-7700 型 20 通道采集模块。温度传感器为 TT-T-30-SLE 热电偶测点。原理为通过测定温度变化下两种金属触点电势值反算温度值。热电偶测点尺寸 $\phi 0.5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 监测温度范围 $-200 \sim 350^\circ\text{C}$ 。测点布置沿气化器轴线均匀布置, 温度采集数据通过离心机局域网络实时传输至控制室, 可通过温度数据监测对试验装置运行情况进行实时判断。

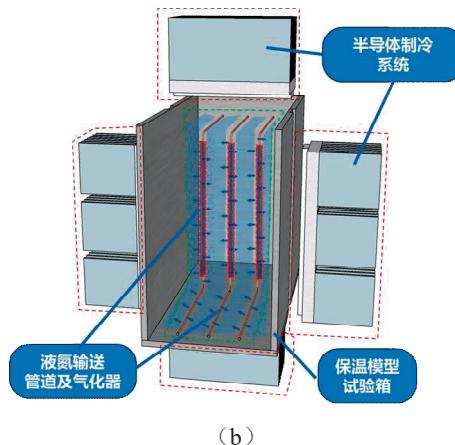
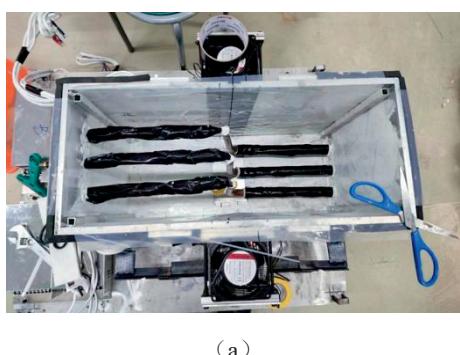


图 4 保温模型试验箱

Fig. 4 Insulation model test chamber

2 冻土离心模型试验过程

为检验此冻土离心模型试验机上冻结装置性能, 开展了 15g 重力条件下软黏土冻融离心模型试验。并通过机载孔压静力触探设备测定了软黏土冻融前后不同区位渗透系数变化。在试验过程中对机上冻结设备进行了性能测试

2.1 软黏土冻融离心模型试验简介

本试验主要探究软黏土在冻融前后渗透性差异, 试验材料选取上海市人工地层冻结法施工过程中冻融沉降最为严重的第④层软黏土重塑土土样, 含水率 =48%, 重度=17.0 kN/m, 液限=43.9%, 塑限=24.6%, 黏聚力=13 kPa, 内摩擦角=11.4°。渗透系数测定方法采用王君鹏等^[7]提出的基于孔压静力触探确定土体渗透系数的方法。微型孔压静力触探探头选取西澳大学研制的适配岩土离心机的微型孔压静力触探探头。贯入设备为研究团队自研超重力三维机械手, 贯入速率选取为 2 mm/s。

软黏土冻融离心模型试验过程: ①试样制备与传感器布置。对于重塑软黏土采用泥浆法制备试样, 通过分层填充控制重塑土样含水率及重度与原状土样一致。温度测点沿冻结区域中心向外间距 10 mm 均匀分布, 分别测定距离液氮冻结气化器中心各位置温度数值。同时设置温度边界测点, 以监测半导体制冷系统控制的边界温度。②机上冻结与温度监测, 待试样制备完成, 检查各控制线路后, 试验准备工作完成。岩土离心机运行稳定后先后开启半导体制冷系统和液氮冻结系统冻结土体。通过温度监测系统监测土体冻结与自然解冻过程。③定点孔压静力触探, 待软黏土自然解冻后根据预设点位对土体进行孔压静力触探, 依据孔压静力触探结果求算不同区位渗透系数, 进而对冻融软黏土渗透系数分布做出预测。

为降低试验风险, 本次试验选取 15g 这一较低的超重力环境对装置进行性能测试, 同时降低液氮罐内液氮储量至 40% 以降低试验风险。液氮冻结装置运行时间约 596 s, 为检验冻结效果, 液氮冻结完毕后立即停止离心机运行拍摄土体冻结图像后继续运行离心机直至试验结束。

2.2 机上冻结设备运行过程及风险评估

机上冻结设备运行过程如图 5 所示, 因液氮长期储存会出现损耗, 故在离心试验前灌装液氮。液氮罐装完毕立即进行离心模型试验。因超重力环境会影响风扇运行, 在离心机运行前开启半导体制冷系统风扇, 待离心机转速达预定值后再启动半导体元件进行制冷, 待预设温度边界达指定温度后开启液氮冻结系统。考虑到液氮输送管道预冷会造成一定量的冷量损失, 在前期加大液氮流量缩短管道预冷时间, 在后期减小流量使得液氮在气化器内充分气化, 充分利用液氮储罐冷量。待区域完全冻结后, 关闭液氮阀门停止降温过程, 等待土体自然解冻后进行孔压静力触探。试验结束后及时卸除液氮储罐, 释放压力排空液氮。

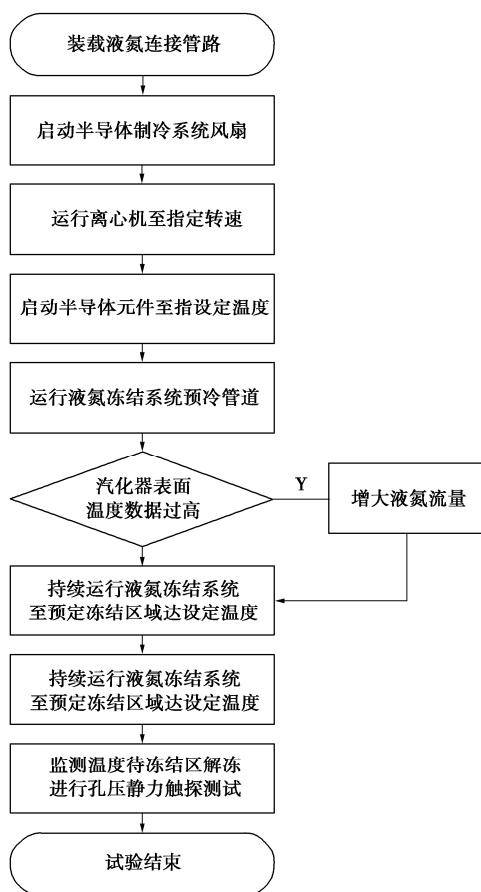


图 5 软黏土冻融离心模型试验流程图

Fig. 5 Flow chart of freeze-thaw centrifugal model tests on soft clay

因液氮超低温特性, 试验过程中存在一定风险, 因此需在试验前检查所有管路安全阀运行情况。液氮

灌装后, 液氮罐装卸及管路连接过程操作人员应佩戴防护用具, 并密切关注储罐压力。随时间推移, 液氮储罐压力会逐渐升高, 当超过安全阀阈值时会排出罐内气体, 试验开始前适当降低罐体内压, 以延长液氮在离心机运行时的储存时间。

3 冻土离心模型试验结果

3.1 温度监测结果与冻结效果

液氮冻结过程后采集的冻结土体图像如图 6 所示, 土体冻结尺寸约为长 150 mm, 宽 30 mm, 高 300 mm, 冻土总体积约 0.0018 m³。因液氮管道预冷造成了一定的冷量损失, 故增加初始液氮储量可增大冻结范围。

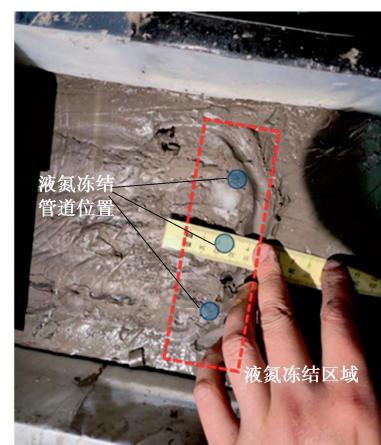


图 6 冻结软黏土分布示意图

Fig. 6 Distribution of frozen soft clay

试验过程中温度检测数据如图 7 所示, 距离气化器 1 cm 处温度最低值约为 -2℃, 冻土和未冻土边界处于 #1, #2 传感器间, 依据温度数据判断冻结区域位置, 为下一步孔压静力触探确定点位。

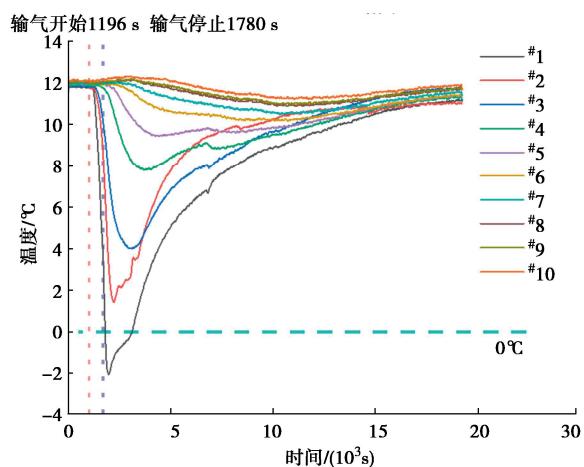


图 7 冻土离心试验温度监测数据

Fig. 7 Temperature data of centrifugal model tests on frozen soil

3.2 孔压静力触探结果与冻融软黏土

通过微型孔压静力触探所得试验数据可计算贯入

区域土体渗透系数, 探点位置如图 8 所示, ①, ②, ③计算所得渗透系数为 1.33×10^{-6} , 1.38×10^{-6} , 1.45×10^{-6} cm/s。结果显示②, ③区域冻融后软黏土渗透系数较未冻结区域①增大, 且②位置冻结中心区软黏土渗透系数略小于③位置冻结区与未冻结区交界区域, 这一结果说明冻融作用会增加软黏土地层渗透性, 区域渗透性最大区域位于冻结区与未冻结区交界区域。

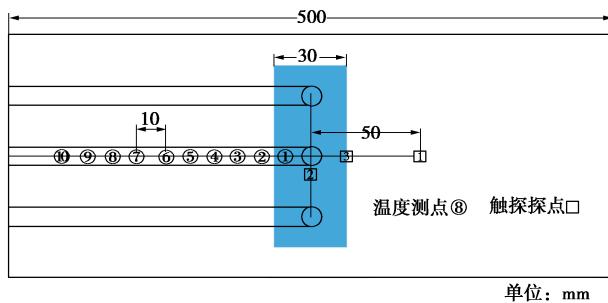


图 8 孔压静力触探探点及温度探点分布图

Fig. 8 Distribution of measuring points for CPTU and temperature

4 结论与展望

本文基于液氮冻结及半导体制冷技术研制了一套适配于同济大学 TJL-150 型岩土离心机的离心机机上冻结设备, 并对其系统组成、操作过程及设备性能做出了详细介绍, 并依托该套设备对冻融软黏土原位渗透性分布差异做出了初步判断。

依据 $15g$ 重力条件下离心模型试验过程中土体温度监测数据可以得出, 该套冻土离心模型试验机上冻结装置可以实现离心模型试验过程中的土体机上冻结过程。可依靠温度监测数据对土体冻结区域和未冻结区域进行划分。结合微型孔压静力触探数据可以得出冻融过程会增大软黏土渗透性, 且冻融后渗透性最大区域位于土体冻结区与未冻区交界处。

为更有效地实现更高重力环境下土体的冻结, 该冻结设备可做以下改进:

(1) 强化固定装置与模块化设计。通过设计强度更高的固定装具, 将液氮储罐与控制阀门整合成整体模块, 在增强连接强度和运行时安全性的同时, 能极大地提高液氮储罐装卸效率。

(2) 优化储罐结构与管路, 降低冷量损失。通过改进罐体结构, 提高罐体在离心机运行过程的保温性能, 优化部分冗余管路, 以减少在岩土离心机高重力长时间运行过程中的冷量损失。

(3) 提升半导体制冷片性能, 增强温度控制精度。为进一步提升半导体制冷片性能, 可采用水冷替代高重力环境下难以运行的风冷, 同时更换散热能力更好的散热装置, 以实现更精确的边界温度控制。

参考文献:

- [1] 鲁先龙, 陈湘生, 陈 磊. 人工地层冻结法风险预控[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(12): 2308-2314. (LU Xianlong, CHEN Xiangsheng, CHEN Xi. Risk prevention and control of artificial ground freezing(AGF)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(12): 2308-2314. (in Chinese))
- [2] TANG Y Q, YAN J J. Effect of freeze-thaw on hydraulic conductivity and microstructure of soft soil in Shanghai area[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(11): 7679-7690.
- [3] ZHOU J, TANG Y Q. Experimental inference on dual-porosity aggravation of soft clay after freeze-thaw by fractal and probability analysis[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 153: 181-196.
- [4] LANGHORNE P J, ROBINSON W H. Effect of acceleration on sea ice growth[J]. Nature, 1983, 305(5936): 695-698.
- [5] 陈湘生, 濮家骝, 罗小刚, 等. 土壤冻胀离心模拟试验[J]. 煤炭学报, 1999, 24(6): 615-619. (CHEN Xiangsheng, PU Jialiu, LUO Xiaogang, et al. Centrifuge modelling tests of soil freezing heave[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6): 615-619. (in Chinese))
- [6] 黄英豪, 蔡正银, 朱 锐, 等. 季冻区渠道湿干冻融离心模拟试验设备的研制[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(7): 1181-1188. (HUANG Yinghao, CAI Zhengyin, ZHU Rui, et al. Development of centrifuge model test equipment for canals in seasonal frozen areas under cyclic action of wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(7): 1181-1188. (in Chinese))
- [7] 王君鹏, 沈水龙. 基于孔压静力触探确定土体的渗透系数[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3335-3339. (WANG Junpeng, SHEN Shuiling. Determination of permeability coefficient of soil based on CPTU[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3335-3339. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)