

# 岩土工程勘察中冻土可钻性的影响因素分析

王要锋<sup>1</sup>, 王汉席<sup>1,2</sup>, 潘殿琦<sup>1</sup>, 单春雪<sup>1,2</sup>, 孙巍锋<sup>1</sup>

(1. 长春工程学院, 吉林 长春 130021; 2. 长春市海威市政工程设计有限公司, 吉林 长春 130062)

**摘要:**对含水率为13%~27%的粉质粘土,在0~-25℃之间进行冻结,测定冻土的单轴抗压强度、抗拉强度、抗剪强度、波速等。试验结果表明,当粉质粘土含水率在18%~25%,冻土温度为0~-18℃的条件下,温度一定时,随着含水率的增大,抗压、抗拉和抗剪强度总体呈降低趋势,可钻性级别呈降低趋势;含水率一定时,冻土的抗压、抗拉和抗剪强度随着温度的降低而增大,可钻性级别提高。冬季勘察时,受冻土影响,可通过在钻孔内加热水提高钻进的方法提高成孔效率。

**关键词:**冻土;温度;抗压强度;抗拉强度;可钻性;岩土工程勘察

**中图分类号:**TU432 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2015)03-0048-05

**Analysis on the Influence Factors of Frozen Soil to Drillability in Geotechnical Engineering Investigation/WANG Yao-feng<sup>1</sup>, WANG Han-xi<sup>1,2</sup>, PAN Dian-qi<sup>1</sup>, SHAN Chun-xue<sup>1</sup>, SUN Wei-feng<sup>1</sup>** (1. Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin 130021, China; 2. Changchun Haiwei Civil Works Design Co., Ltd., Changchun Jilin 130062, China)

**Abstract:** The silty clay with water content of 13%~27% is frozen at 0~-25℃ to measure the uniaxial compressive, tensile, shear strength and wave velocity of frozen soil. The test results show that when the silty clay water content is 18%~25% and the temperature of frozen soil is 0~-18℃, along with the increase of moisture content, the compressive, tensile and shear strength of frozen soil decrease under a certain temperature and drillability shows decreasing trend; at certain water content, along with the decrease of temperature, the compressive, tensile and shear strength of frozen soil increase and the drillability grade is improved. For the investigation in winter, the drilling speed can be improved by adding hot water in drilling hole to reduce the influence of frozen soil.

**Key words:** frozen soil; temperature; compressive strength; tensile strength; drillability; geotechnical engineering investigation

## 0 引言

冻土是温度低于0℃且含有冰的各种岩石及土壤。按现行标准<sup>[1-2]</sup>,冻土分为季节性冻土和多年冻土,季节性冻土为地表层寒季冻结、暖季全部融化的土,而冻结状态持续时间≥2年的土(岩石)为多年冻土。冻土可钻性是钻进时冻土破碎的难易程度,即指冻土对钻进工具钻头的抵抗程度<sup>[3]</sup>。我国大部分地区为季节性冻土区,多年冻土区也占有一定的比例。对于东北地区,主要为季节性冻土区,冻深在1.2~2.6 m之间。对于碎(卵)石、砾砂、粗砂和中砂,当粒径<0.075 mm的颗粒含量<15%,而对于细砂粒径<0.075 mm的颗粒含量<10%时,只要冻结前不处于饱和状态,也即地下水位以上,对于建筑工程是不考虑冻胀性的影响<sup>[1,4]</sup>。对于交通工

程,当碎石土、砾砂、粗砂、中砂,当粉粘粒含量≤15%时,不考虑冻胀影响<sup>[2]</sup>。岩土工程勘察的过程中,当冻深范围内为碎石土和砂类土时,冻胀后强度提高较小,不会给岩土工程勘察带来困难,而粘性土冻胀性影响较大,给冬季开展岩土工程勘察工作带来困难,因此开展以粘性土为研究对象,研究冻土的可钻性具有重要意义。

目前关于冻土的研究较多,但大都处于室内试验研究阶段,且多数为常规的物理指标试验,与工程实际结合研究的较少<sup>[5]</sup>。对于冻土的应用研究,目前侧重于将冻土技术应用于工程,特别是基坑围护结构,利用土的低温冻胀提高土体强度特性,达到稳定土体的目的。研究角度侧重于冻胀模拟等模型的研究,应用于工程实例也不多<sup>[6-10]</sup>。关于冻土可钻

收稿日期:2014-09-19; 修回日期:2015-02-15

基金项目:吉林省科技厅“无结构废弃物基坑挡土墙成墙工艺与设备系统的研究”(20090477)

作者简介:王要锋,男,汉族,1989年生,在读硕士研究生,从事岩土治理和冻土工程方向的研究,吉林省长春市同志街3066号,wyfservice@gmail.com;

通讯作者:王汉席,男,汉族,1978年生,注册土木工程师(岩土),硕士,从事岩土工程及环境岩土方向研究,wanghanxizs1982@126.com。

性的研究,开展较早,但与实际结合的研究并不多见。目前尚未发现针对东北地区特点,开展与岩土工程勘察相结合的冻土可钻性研究。

由于岩土工程勘察工作量大,冬季钻探施工不可避免,为方便展开勘察工作,研究冻土的可钻性有重要意义。对冻土可钻性的影响因素较多,主要包括外因和内因,外因主要是温度、钻速和钻压等,内因包括土的结构组成、含水率以及密实性等。本文主要以粉质粘土为例,研究内因影响,同时结合外因,探讨冻土钻探方法,为冻土地区岩土工程勘察提供参考。

### 1 试验方法

取长春地区分布范围较广,易受冻胀影响的粉质粘土,取土样 104 个,制备含水率为 13% ~ 27%,每个含水率制备 8 个,用于单轴抗压强度试验;取土样 42 个,制备含水率为 14%、17%、19%、20%、22%、23% 和 25%,每个含水率制备 6 个;取土样 28 个,制备含水率为 14%、17%、19%、20%、22%、23% 和 25%,每个含水率制备 4 个。采用 LT-60A2 型低温制冷循环器对土样进行制冷,冷冻时间为 100 ~ 180 h。通过冷冻设备调控土样温度,在分组进行单轴抗压强度、抗拉强度和抗剪强度试验之前,进行波速测试和钻速钻压测试。波速测试的土样数为 132 个,每个含水率为 12 个。

### 2 冻土的温度、含水率与强度的关系

#### 2.1 冻土的温度、含水率与单轴抗压强度的关系

对含水率 13% ~ 27% 冻胀后的粉质粘土进行单轴抗压强度试验,结果如图 1 所示<sup>[3]</sup>。可知,当含水率一定的时候,温度在 -1 ~ -18 °C 时,总的趋势是:随着温度的降低,冻土的单轴抗压强度逐渐增大,含水率在 13% ~ 17% 和 19% 时,增大范围在 25.1% 左右,并不是很明显。而含水率在 18%, 20% ~ 27% 时,增大范围较大,在 73.2% 左右。当温度一定时,随着含水率的增大,抗压强度总体呈降低趋势,特别是含水率在 13% ~ 17% 与 20% ~ 27% 之间存在明显降低。

我国东北地区,粉质粘土的含水率多在 18% ~ 25% 之间,冻土温度在 0 ~ -18 °C,冻土强度随着温度的降低而增大,根据试验数据分析可知,强度与温度的关系建立公式为:

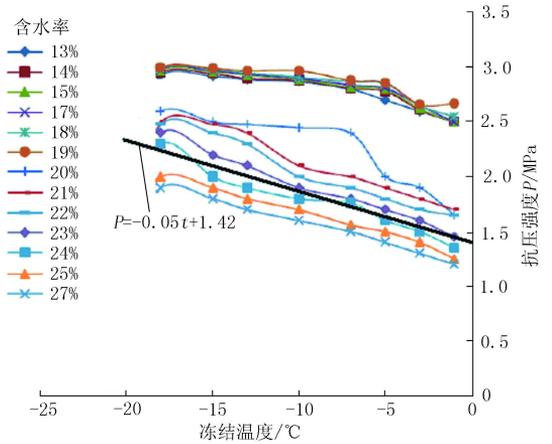


图 1 温度与抗压强度关系曲线

$$P = -0.05t + 1.42 \quad (1)$$

#### 2.2 冻土的温度、含水率与抗拉强度的关系

对含水率为 14%、17%、19%、20%、22%、23% 和 25% 的粉质粘土土样在 -1 ~ -25 °C 情况下进行抗拉强度试验。试验方法采用国际岩石力学委员会推荐的巴西试验法,该法是采用圆柱试样母线上受均匀分布的载荷时其横向受拉的原理。为了使直径方向上的压力集中,在试样与压板之间垫直径的细钢丝。根据弹性理论,推出的抗拉强度计算式为:

$$\sigma = 2p / (\pi dl) \quad (2)$$

式中: $p$ ——土样被拉坏时的荷载, N;  $d$ ——土样直径, mm;  $l$ ——土样长度, mm。

通过对 42 个土样进行试验,根据试验结果绘制温度与抗拉强度的关系曲线如图 2 所示。从曲线可以看出,随着温度的降低,抗拉强度增大,抗拉强度范围在 0 ~ 0.5 MPa 之间。在 -20 °C 达到抗拉强度最大值,而温度在 -20 °C 以下,抗拉强度随着温度的降低而降低,这是因为在 -20 °C 时,冻土由半塑性土变为脆性冻土,从而导致抗拉强度降低。

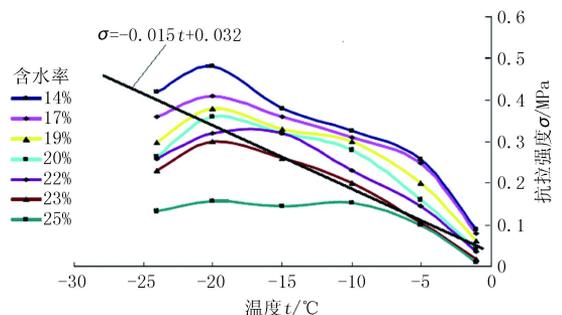


图 2 温度与抗拉强度关系曲线

从图 2 可以看出,当温度一定时,随着含水率的

降低,抗拉强度呈现增加趋势。在东北地区,岩土工程勘察冻土深度范围内,含水率多在18%~25%之间,土的温度在0~-18℃,通过对数据进行分析,建立抗拉强度与温度的关系公式如下:

$$\sigma = -0.015t + 0.032 \quad (3)$$

### 2.3 冻土温度、含水率与抗剪强度的关系

土的抗剪强度是指土体抵抗剪切破坏的极限能力,土的抗剪强度测定方法主要有直接剪切试验、三轴压缩试验、无侧限抗压强度试验、十字板剪切试验等<sup>[11]</sup>。本试验采用三轴压缩试验,通过对28个粉质粘土土样进行冻结后试验,结果如图3所示。

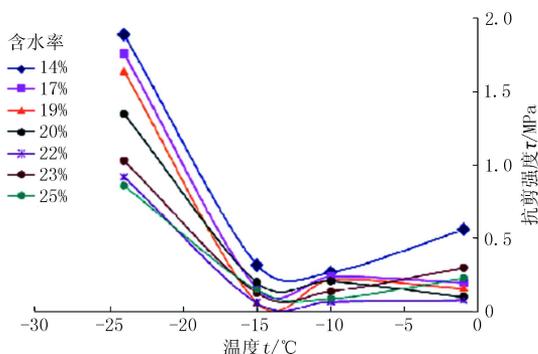


图3 温度与抗剪强度关系曲线图

从图3可以看出,含水率在14%、17%、19%、20%、22%、23%和25%时,温度在-15~-25℃范围内,随着温度的降低,其抗剪强度增加,根据数理统计,抗剪强度增长3.5~9.2倍,变化较明显。而在-15℃以内,抗剪强度随着温度的降低而趋于减小。温度在-15℃附近,抗剪强度存在拐点,其主要原因是随着温度的降低,土体内冰的体积逐渐增大,产生冻胀,粘聚力减小,而随着温度的再次降低,相邻的冰裹体胶结在一起,冻土的抗剪强度则随温度的降低而增加。

从图3可以看出,随着含水率的增加,抗剪强度呈现降低的趋势。在东北地区,岩土工程勘察冻土深度范围内,粉质粘土的含水率多在18%~25%范围,土的温度在0~-18℃,根据试验统计,抗剪强度值在0.50 MPa以内。

### 3 温度与钻进速度之间的关系

冻土的钻进速度能够直接反映冻土可钻性,通常情况下,冻土的钻进速度越高,冻土的可钻程度越高。冻土的钻进速度与钻压、转速有关,在压力一定的情况下,转速与钻速呈正相关。在转速一定的

情况下,钻压与钻速呈正相关。

对含水率为14%、17%、19%、20%、22%、23%和25%的粉质粘土土样,在含水率一定时,开展不同温度下的钻探工作,如图4所示。从图中可以看出,其钻速随着温度的降低而降低,同一温度下,随着含水率的升高,钻进速度增大。经数理统计,温度与钻进速度的关系建立公式如下:

$$V = 1.079t + 40 \quad (4)$$

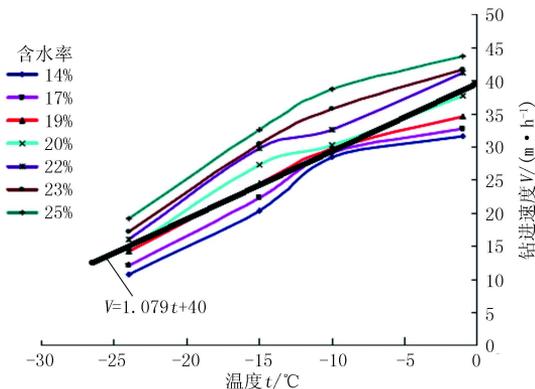


图4 温度与钻进速度的关系

### 4 波速与可钻性之间的关系

冻土可钻性分级的目的在于为冻土区的开挖与钻进选择合理的施工工艺、设备及参数,提高施工的效率,为冻土工程的施工与设计提供一个科学的依据。依据潘殿琦<sup>[3]</sup>等人研究结果,将纵波和横波分为4级,如表1和表2所示。

表1 纵波波速冻土可钻性分级标准

波速/(m·s <sup>-1</sup> )	<1000	1000~2000	2000~3000	>3000
级别 S	1	2	3	4

表2 横波波速冻土可钻性分级标准

波速/(m·s <sup>-1</sup> )	<500	500~1000	1000~1500	>1500
级别 M	1	2	3	4

潘殿琦等人2006年采用SYC-2型超声波测试仪和20 kHz超声换能器测不同温度和不同含水率下冻结粉质粘土的纵波波速。结果表明,含水率一定时,总的趋势是,冻结粉质粘土纵波波速随冻结温度的增加而降低<sup>[12]</sup>。潘殿琦2010年测定的结果表明,含水率一定时,总的趋势是冻结粉质粘土纵波波速随冻结温度的降低而增加,-7℃是波速增长的拐点,-20℃是波速快速增长的拐点;冻结温度一定时,其纵波波速和冻土强度随含水率的增加有下降的趋势,含水率>24%时,纵波波速增长趋于平

缓<sup>[13]</sup>。

依据试验数据,建立纵波波速与可钻性级别的回归分析与级别数学模型,得出纵波波速与可钻性级别的回归方程如下式<sup>[14]</sup>:

$$y = 26.188X^2 - 149.9X + 1248.4R \quad (5)$$

式中: $y$ ——可钻性级别; $X$ ——温度; $R$ ——回归系数, $R = 0.9978$ 。

本次纵波试验采用 13% ~ 25% 含水率,在 0 ~ -25 °C 之间制备土样 132 个冻土样,进行纵波波速试验,测定结果如图 5 所示。当温度在 0 ~ -20 °C 时,纵波分级可钻性在 1 级 ~ 2 级之间;含水率一定时,当温度继续降低时,可钻性级别提高,在 -20 °C 为可钻性的拐点。从图上也可以看出,当温度一定,含水率增加时,可钻性级别降低趋势,在 -15 °C 以下,这种趋势更加明显。

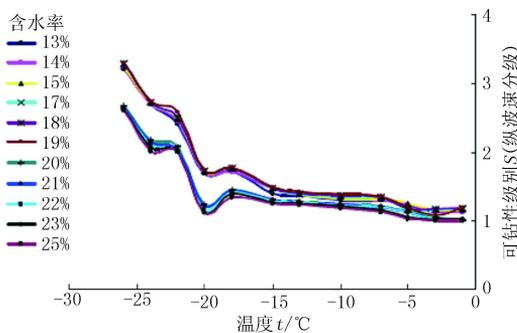


图 5 可钻性级别(按纵波波速分级)与温度的关系

本次纵波试验结果与以前的试验结果基本一致,在东北地区,岩土工程勘察冻土深度范围内,粉质粘土的含水率多在 18% ~ 25% 范围,土的温度在 0 ~ -18 °C,根据试验统计,可钻性级别在 1 ~ 2 级之间。

横波试验采用 14%、17%、20%、23% 和 25% 5 个含水率进行,在 0 ~ -25 °C 之间制备 30 个冻土样,进行横波波速试验,测定结果如图 6 所示。从图上可以看出,含水率一定时,随着温度的降低,可钻性级别提高;当温度一定,随着含水率的提高,可钻性级别降低趋势。根据数理统计,含水率一定时,可钻性级别与温度的关系建立公式如下:

$$M = -0.063t + 1.45 \quad (6)$$

本次横波试验结果与以前的试验结果基本一致,在东北地区,岩土工程勘察冻土深度范围内,粉质粘土的含水率多在 18% ~ 25% 范围,土的温度在 0 ~ -18 °C,根据试验统计,可钻性级别在 1 ~ 3 级之间。

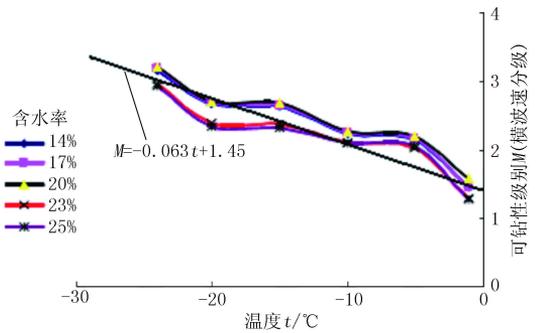


图 6 可钻性级别(按横波波速分级)与温度的关系

### 5 工程实例

2014 年在东北某地区对一城市道路进行改造,原道路宽度为 18 m,为城市次干道。改造后道路宽度为 25 m,采用沥青混凝土路面,结构厚度约为 63 cm,道路路基类型为一般路基。该地区标准冻深为 2.6 m,路基影响深度范围内地层情况见表 3。从经济合理的角度分析,对原道路两侧部分及原有道路路基破坏部分进行重点勘察,同时充分利用该道路原有勘察资料<sup>[15]</sup>。该地层冻深范围内第①层以粉质粘土为主,原有路基表层为旧有沥青路面和二灰土构成,旧有路基位置经过车辆碾压,呈硬塑,局部呈坚硬状态。该场地地下水位较低,在设计路面以下 5.6 ~ 6.3 m。

表 3 拟建场地地层情况一览表

层号	土层名称	平均层厚/ m	状态	天然含水率/ %	液限含水率/ %	塑限含水率/ %	液性指数
①	粉质粘土	2.7	硬塑	17.2	29.4	16.3	0.08
②	粉质粘土	3.3	可塑偏硬	20.6	30.7	17.2	0.27
③	粉质粘土	2.8	可塑	21.5	28.3	16.9	0.40

勘察工作在冬季进行,室外温度在 -22 ~ -26 °C,勘察采用冲击回转钻进,因冻胀影响,在冻深范围内钻进较困难。根据室内试验结果可知,粉质粘土含水率增加或温度升高时,抗压强度、抗拉强度和抗剪强度均降低,可钻性级别降低,因此,在钻探施工过程中,开孔后,加入热水,提高冻土层的含水率,提高冻土层的温度,钻速加快,大大提高钻进速度。采取措施后,每台钻机每天成孔由原来的 3 ~ 4 孔提高到 5 ~ 6 孔,平均提高效率 37.5%。

### 6 结论

通过室内冻土试验,结合现场岩土工程勘察工

程实践,得出主要结论如下:

(1)当粉质粘土含水率在18%~25%,冻土温度为0~-18℃,当温度一定时,随着含水率的增大,单轴抗压强度总体呈降低趋势;当含水率一定时,冻土的单轴抗压强度随着温度的降低而增大,建立抗压强度与温度的关系公式为: $P = -0.05t + 1.42$ 。

(2)当粉质粘土含水率在18%~25%,冻土温度为0~-18℃,当温度一定时,随着含水率的降低,抗拉强度呈现增加趋势;当含水率一定时,随着温度的降低,抗拉强度增大;建立抗拉强度与温度的关系公式为: $\sigma = -0.015t + 0.032$ 。

(3)当粉质粘土的含水率在18%~25%范围,土的温度在0~-18℃,根据试验统计,抗剪强度值在0.50 MPa以内;当温度高于-15℃时,抗剪强度随着温度的降低而趋于减小。

(4)对含水率为14%~25%的粉质粘土土样,在含水率相同时,其钻进速度随着温度的降低而降低;同一温度下,随着含水率的升高,钻进速度增大。温度与钻进速度的关系公式为: $V = 1.079t + 40$ 。

(5)纵波波速试验结果表明,当温度在0~-20℃时,粉质粘土冻结后纵波可钻性分级在1级~2级之间;含水率一定时,当温度继续降低时,可钻性级别提高,在-20℃为可钻性的拐点;当温度一定,含水率增加时,可钻性级别降低趋势,低于-15℃时,这种趋势更加明显。

(6)通过对含水率为14%~25%之间,冻结温度为0~-25℃之间的粉质粘土进行横波试验,可知当含水率一定时,随着温度的降低,可钻性级别提高;当温度一定,随着含水率的提高,可钻性级别降低趋势。可钻性级别与温度的关系公式为: $M =$

$-0.063t + 1.45$ 。

(7)在冬季勘察时,受季节冻土影响,钻探效率降低,可通过在钻孔加热水提高钻速的方法,提高成孔效率。

## 参考文献:

- [1] JGJ 118—2011,冻土地区建筑地基基础设计规范[S].
- [2] JTGC 20—2011,公路工程地质勘察规范[S].
- [3] 潘殿琦.冻土可钻性影响因素及其分级的试验研究[D].吉林长春:吉林大学,2006.
- [4] GB 50007—2011,建筑地基基础设计规范[S].
- [5] 邱良军.冻土试验方法浅析[J].铁道勘察,2011,(1):64-66.
- [6] 李宝花.冻土墙围护深基坑温度场和应力场耦合有限元分析[D].陕西西安:西安科技大学,2003.
- [7] 赵丽清,殷元元,于艳.深基坑工程中人工冻土墙的设计计算研究[J].山西建筑,2008,34(6):127-128.
- [8] 陈玉超,范建兵,杨更社,等.冻土墙围护深基坑开挖蠕变数值模拟[J].岩土工程界,2006,9(7):46-47.
- [9] 肖朝昀.人工地层冻结冻土帷幕形成与解冻规律研究[D].上海:同济大学,2007.
- [10] 吉植强,徐学燕.基于宏观冻胀模型的冻土墙基坑支护数值模拟[J].岩土工程学报,2008,30(S1):73-77.
- [11] 赵明华.土力学与基础工程(第3版)[M].湖北武汉:武汉理工大学出版社,2008:102-103.
- [12] 潘殿琦,吴银柱,彭第,等.冻土波速和强度指标下的冻土可钻性分级试验研究[J].长春工程学院学报(自然科学版),2011,12(2):1-4.
- [13] 潘殿琦,张祖培,潘殿彩,等.人工冻土纵波波速与温度和含水率的关系[J].吉林大学学报(地球科学版),2006,36(4):588-591.
- [14] 潘殿琦.波速测试法在冻结粉质黏土强度研究中的应用[J].长春工程学院学报(自然科学版),2010,11(3):126-129.
- [15] 王汉席,杨森,单春雪,等.市政道路工程勘察资料的时效性分析与探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(7):76-79,84.