

冻土抗拉强度与冻温及含水率关系的试验研究

赵景峰

(长春工程学院, 吉林长春 130012)

[摘 要]通过用 CBR-1 型承载比试验仪实测不同冻结温度和不同含水率下冻土的强度,建立了抗拉强度与冻结温度和含水率关系的数学模型,并进行了科学的分析,找出之间变化的规律:含水率在 14%~25% 且一定时,温度在 0℃~-20℃ 内抗拉强度随着冻结温度的降低而逐渐增加,在 -20℃ 达到抗拉强度最大值;而冻结温度在 -20℃ 以下,抗拉强度随着冻结温度的降低而降低。冻结温度在 -1℃~-24℃ 且一定时,冻土的抗拉强度随着含水率的增加而逐渐降低;冻结温度在 -5℃ 以下,含水量大于 17% 时,冻土的抗拉强度随着含水率的增加而降低缓慢。文章结论对寒区的工程建设提供更加准确的设计和施工依据。

[关键词]冻土 抗拉强度 冻结温度 含水率

[中图分类号]TU432 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2011)06-1158-4

Zhao Jing-feng. An experimental study on the relationship between tensile strength and temperature and water ratio of frozen soil [J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(6): 1158-1161.

冻土抗拉强度与温度关系的研究课题是现代冻土力学界致力研究的重点课题之一(肖忠华, 2007)。目前,国内外冻土界专家对冻土的抗压强度研究较多,而对冻土的抗拉强度研究较少,只有中国科学院国家冻土实验室、北京交通大学等少数几家单位对冻土抗拉强度进行过研究,但并没有提出冻土抗拉强度随温度、含水率变化的规律(张晨曦等, 2010)。由于冻土抗拉强度指标是冻土地区挡土墙等工程设计、施工的重要指标,但目前缺乏工程设计依据,因此课题研究具有重要的理论研究和工程应用价值(陈有亮等, 2009)。而冻土抗拉强度与冻土温度和含水率关系研究是该课题重要和关键的研究内容。如何有效地测定与分析冻土抗拉强度指标是该课题研究的技术关键,承载比测试技术是一种科技含量高且广泛应用于岩土工程行业的新技术(李积彦等, 2007; 马巍等, 1998),近年来在冻土力学及冻土工程中逐渐得到应用,因此,课题研究组利用 CBR-1 型承载比试验仪对长春地区粉质粘土在不同负温、不同含水率下进行了抗拉强度测试,基于抗拉强度测定结果建立了抗拉强度与温度和含水率关系的数学模型,并进行了科学的分析,找出了

之间变化的规律。众所周知,冻土冻结温度、含水率不同,其冻土抗拉强度也不相同(马芹永, 1996; 何平等, 2002)。一般说来,在一定范围内,冻结温度越低、含水率越高,抗拉强度越大,但存在临界冻结温度,低于这个温度,冻土抗拉强度将发生相反的变化(沈忠言等, 1995; 彭万巍, 1998; 马芹永等, 2002)。基于这个原理,根据抗拉强度影响因素,进行科学实验,并对实验数据进行科学分析,找出冻结粉质粘土抗拉强度的影响规律,进而为冻土工程设计与施工提供参考依据。

1 试验研究

1.1 试验土质

试验土质选用长春地区 3~15 m 段的粉质粘土,天然密度为 1.93 g/cm³,塑性指数为 10.02,液性指数为 0.015,颗粒组成(魏智等, 2008)如表 1 所示。

表 1 粉质粘土颗粒组成

Table 1 Grain composition of frozen clay

粒径/mm	>2.00	2~1	1~0.1	0.1~0.01	<0.001
含量/%	1.95	0.31	19.86	76.76	1.13

[收稿日期] 2011-05-23; [修订日期] 2011-08-06; [责任编辑] 郝情情。

[基金项目] 吉林省科技厅基金项目(20090477)。

[第一作者] 赵景峰(1971 年—),男,2010 年毕业于长春工业大学,获硕士学位。长春工程学院助理研究员, E-mail: zhcc0423@163.com。

1.2 冻土的抗拉强度试验

1.2.1 试验原理

像金属那样直接拉伸土样的试验方法比较复杂,在试验技术上有许多难以处理的困难,所以国际岩石力学委员会推荐用间接的巴西试验法(彭万巍等,1994;杨平等,1997;李栋伟等,2004)。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(张少宏等,2001;朱占元等,2008)。

1.2.2 试验设备

试验使用 CBR-1 型承载比试验仪(李海鹏等,2003;商翔宇,2006),承载仪由主机、量力环及贯入杆、加载板、百分表、膨胀量测定装置等组成。主要参数:最大荷载:30 kN,50 kN(可选);载荷速度:1.0 mm/min;工作台行程:50 mm;试件模:152 mm×170 mm(李海鹏等,2003;商翔宇,2006)。

1.2.3 试验步骤

接通电源,扳动按钮使平台匀速上升,当平台与顶板间的距离差不多能放下试样时,关掉按钮,从冰箱中取出冻土试样,并测量该试样的长度,将试样放在试验仪平台与顶板之间,扳动按钮使平台匀速上升,记录冻土试样破坏时的仪表读数,根据换算公式求出该试样破坏时的荷载 P ,进一步算出该试样的抗拉强度(朱元林等,1992)。

计算公式:根据弹性理论,推出的抗拉强度计算公式为:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dl}$$

P —土样被拉断时的荷载, N; d —土样直径, mm; l —土样长度, mm。

1.2.4 试验测试结果

试验试样按规范(GB50324-2001,冻土工程地质勘查规范)高径比大于2的要求制作,试样直径为50 mm、长度为100 mm。控温精度为±0.1℃,含水量为14%、17%、19%、20%、22%、23%、25%的试样分别在-1℃、-5℃、-10℃、-15℃、-20℃、-24℃冻结,用不同含水量、不同冻温的试样进行冻土的抗拉强度试验(GB/T50123-1999,土工试验规范),试验测试结果如表2。

2 数据分析

(1) 一定含水率下温度与抗拉强度的关系曲线:
通过以上数据处理和回归分析可的以下回归方程:
含水率 14% 时, $y = -0.0008x^2 + 0.0353x + 0.0688, R = 0.9564$;

表2 不同温度、不同含水量下的抗拉强度(MPa)
Table 2 Measured results of tensile strength under different temperature and moisture content(MPa)

	-1℃	-5℃	-10℃	-15℃	-20℃	-24℃
14%	0.089	0.258	0.325	0.38	0.48	0.42
17%	0.08	0.249	0.31	0.36	0.41	0.36
19%	0.061	0.201	0.3	0.33	0.38	0.299
20%	0.041	0.161	0.28	0.32	0.36	0.265
22%	0.035	0.146	0.23	0.32	0.32	0.258
23%	0.017	0.105	0.2	0.26	0.3	0.23
25%	0.009	0.1	0.153	0.146	0.156	0.134

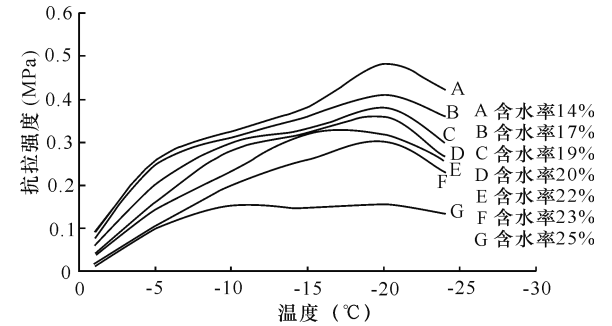


图1 含水率一定时温度与抗拉强度关系图
Fig. 1 Relationship between temperature and tensile strength under the condition of certain moisture content

含水率 17% 时, $y = -0.001x^2 + 0.0371x + 0.0578, R = 0.9618$;

含水率 19% 时, $y = -0.0011x^2 + 0.0382x + 0.0278, R = 0.9757$;

含水率 20% 时, $y = -0.0012x^2 + 0.0404x - 0.0044, R = 0.9776$;

含水率 22% 时, $y = -0.001x^2 + 0.0363x - 0.0073, R = 0.9818$;

含水率 23% 时, $y = -0.001x^2 + 0.0363x - 0.0073, R = 0.9818$;

含水率 25% 时, $y = -0.001x^2 + 0.0363x - 0.0073, R = 0.9818$;

上述方程中: x —温度, y —抗拉强度, R —相关系数。

综上所述:含水率在14%~25%且一定时,温度在0℃~-20℃内抗拉强度随着温度的降低而逐渐增加,冻土可钻性随温度的降低而降低,在-20℃达到抗拉强度最大值,冻土可钻性最低;而温度在-20℃以下,抗拉强度随着温度的降低而降低,冻土可钻性随温度的降低而增强。

在-20℃时,冻土抗拉强度达到最大值的原因是:在-20℃时,冻土由半塑性土变为脆性冻土,从而导致抗拉强度降低。

(2)一定温度下含水率与冻土抗拉强度的关系曲线:

通过以上的数据处理和回归分析可得以下的回归方程:

-1℃时, $y = -1.5465x^2 - 0.1894x + 0.1492$, $R = 0.9632$;

-5℃时, $y = -3.3896x^2 - 0.3422x + 0.3824$, $R = 0.9449$;

-10℃时, $y = -15.89x^2 + 4.5978x - 0.0074$, $R = 0.9934$;

-15℃时, $y = -12.868x^2 + 3.6603x + 0.0378$, $R = 0.9942$;

-20℃时, $y = -1.7771x^2 - 1.9525x + 0.876$, $R = 0.9837$;

-24℃时, $y = 2.134x^2 - 3.4977x + 0.8906$, $R = 0.9686$ 。

上述方程中: x —含水率, y —抗拉强度, R —相关系数。

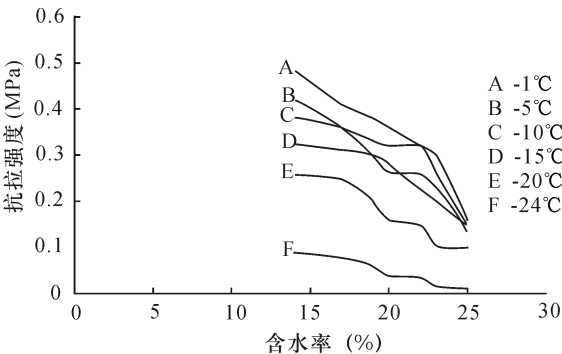


图2 温度一定时含水率与抗拉强度关系图
Fig. 2 Relationship between moisture content and tensile strength under the condition of certain temperature

综上可知:温度在-1℃~-24℃且一定时,冻土的抗拉强度随着含水率的增加而逐渐降低,冻土可钻性随着含水率的增加而增强。温度在-5℃以下,含水量大于17%时,冻土的抗拉强度随着含水率的增加而降低缓慢,冻土可钻性随着含水率的增加而增强缓慢。

3 结论

根据含水率、温度与冻土抗拉强度的关系,得出:含水率在14%~25%且一定时,温度在-1℃~-20℃内,抗拉强度随着温度的降低而逐渐增加,冻

土可钻性随温度的降低而降低,在-20℃达到抗拉强度最大值,冻土可钻性最低。而温度在-20℃以下,抗拉强度随着温度的降低而降低,冻土可钻性随温度的降低而增强;温度在-1℃~-24℃且一定时,含水率在14%~25%区间,冻土的抗拉强度随着含水率的增加而逐渐降低,冻土可钻性随着含水率的增加而增强。温度在-5℃以下,含水量大于17%时,冻土的抗拉强度随着含水率的增加而缓慢降低,冻土可钻性随着含水率的增加而缓慢增强。

在-20℃时,冻土抗拉强度达到最大值的原因是:在-20℃时,冻土由半塑性土变为脆性冻土,从而导致抗拉强度降低。

[References]

Chen You-liang, Wang Ming, Xu Shan, Chang Le-qun, Yin Zhen-zhen. 2009. Tensile and compressive strength tests on artificial frozen soft clay in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 31(7):1046-1051 (in Chinese with English abstract)

GB/T50123-1999. 1999. Standard for soil test method[S] (in Chinese)

GB50324-2001. 2001. Code for engineering geological investigation of frozen ground[S] (in Chinese)

He Ping, Cheng Guo-dong, Yang Cheng-song, Hao Su-ping. 2002. Analysis of Strength of Unsaturated Frozen Soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 24(3):260-263 (in Chinese with English abstract)

Li Dong-wei, Wang Ren-he. 2004. Frozen soil ant-shear strength characterand testing study[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology(Natural Science). 24(5):53-55 (in Chinese with English abstract)

Li Hai-peng, Lin Chuan-nian, Zhang Jun-bing. 2003. Comparative testing study on strength behaviour of undisturbed and remolded frozen clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 22: 2861-2864 (in Chinese)

LI Ji-yan, He Chang-rong, Tang Hui. 2007. Experimental study in contrast on tensile strength of cohesive soil[J]. Subgrade Engineering, 2: 104-105 (in Chinese with English abstract)

Ma Qin-yong, Peng Wan-wei. 2002. Research on Relationship amog Longitudinal and Transverse Wave Velocities and Temperature of Artificially Frozen Clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 21(2):291-293 (in Chinese with English abstract)

Ma Qin-yong. 1996. Tensile strength, uniaxial compressive strength test on artificially frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 17(3):76-81 (in Chinese with English abstract)

Ma Wei, Zhu Yuan-Lin, Xu XiaoZu. 1998. The state key laboratory of frozen soil engineering: review and prospect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 20(3): 16-19 (in Chinese with English abstract)

Peng Wan-wei, Shen Zhong-yan, Zhang Chang-qin. 1994. Preliminary analysis on several test methods of frozen soil tensile strength[R]. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering Annual Report, 1: 126 (in Chinese with English abstract)

Peng Wan-wei. 1998. Tensile strength of frozen loess varying with strain rate and temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineer-

ing,20(3):31-33(in Chinese)

Shang Xiang-yu. 2006. Cold and temperature-changing experimental research on the artificially frozen soil[J]. Shanxi Architecture, 32(11):5(in Chinese with English abstract)

Shen Zhong-yan, Peng Wan-wei, Liu Yong-zhi. 1995. Tensile strength of frozen saturated loess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 17(4):315-321(in Chinese with English abstract)

Wei Zhi, Jin Hui-jun, Luo Chong-xu, Zhang Jian-ming, Lu Lan-zhi, Yang Si-zhong, Ji Yan-jun. 2008. Characteristics of atmospheric environmental changes of permafrost in northeastern China in 50 years[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science), 44(3):40-42(in Chinese with English abstract)

Xiao Zhong-hua. 2007. Experimental investigation on engineering properties of Shanghai soft soils under secondary freeze-thaw action[D]. Shanghai: Tongji Univossity, 46-57 (in Chinese)

Yang Ping, Li Qiang, Yu Chu-hou. 1997. A experimental study on the acoustic wave parameters of artifical frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 19(2):149-153(in Chinese with English abstract)

Zhang Chen-xi, Yu Ming. 2010. Experimental study on temperature field of artificial frozen soil wall in seasonally frozen soil[J]. Temperature Architecture Technology, 144(6):94-96(in Chinese with English abstract)

Zhang Shao-hong, Guo Min-xia, Xing Yi-chuan. 2001. Test technology on triaxial extension[J]. Northwest Water Resources & Water Engineering, 12(2):24-27(in Chinese)

Zhu Yuan-lin, Zhang Jia-yi. 1992. Constitutive relations of frozen soil in uniaxial compression[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 14(3):210-217(in Chinese with English abstract)

Zhu Zhan-yuan, Li Jing, Zou Zu-yin, Mo You. 2008. Study on deformation characters of frozen soil under long-term dynamic loading[J]. Low Temperature Architecture Technology, 122(2):112-114(in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

GB/T50123-1999. 土工试验规范[S].

GB50324-2001. 2001. 冻土工程地质勘察规范[S].

陈有亮,王明,徐珊,常乐群,尹珍珍. 2009. 上海人工冻结软黏土抗压抗拉强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 31(7):1046-1051

何平,程国栋. 2002. 非饱和冻土的强度分析[J]. 冰川冻土, 70(20):32

李栋伟,王仁和. 2004. 冻土抗剪强度特性及试验研究[J]. 安徽理工大学学报, 24(5):53-55

李海鹏,林传年,张俊兵. 2003. 原状与重塑人工冻结黏土抗压强度特征对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 22:2861-2864

李积彦,何昌荣,唐辉. 2007. 黏性土抗拉强度试验对比研究[J]. 路基工程, 2:104-105

马芹永,彭万巍. 2002. 冻结黏土纵-横波速与温度的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 21(2):291

马芹永. 1996. 人工冻土单轴抗压,抗拉强度的试验研究[J]. 岩土力学, 17(3):76-81

马巍,朱元林,徐学祖. 1998. 冻土工程国家重点实验室的回顾与展望[J]. 冰川冻土, 20(3):16-19

彭万巍,沈忠言,张长庆. 1994. 简析确定冻土抗拉强度的几种试验方法[J]. 冻土工程国家重点实验室年报, 1:126

彭万巍. 1998. 冻结黄土抗拉强度与应变率和温度的关系[J]. 岩土工程学报, 20(3):31-33

商翔宇. 2006. 变冷端温度的人工冻土冻结试验研究[J]. 山西建筑, 32(11):5-6

沈忠言,彭万巍,刘永智. 1995. 冻结黄土的抗拉强度的实验研究[J]. 冰川冻土, 17(4):315-321

魏智,金会军,罗崇旭,张建明,吕兰芝,杨思忠,吉延军. 2008. 东北地区东土 50 年来的气温环境变化[J]. 兰州大学学报, 44(3):40-42

肖忠华. 2007. 上海软土二次冻融土工程试验研究[D]. 上海:同济大学, 46-57

杨平,李强. 1997. 人工冻土声波参数试验研究[J]. 冰川冻土, 19(2):150

张辰曦,于明. 2010. 季节冻土层下人工冻土墙温度场试验研究[J]. 低温建筑技术, 144(6):94-96

张少宏,郭敏霞,邢义川. 2001. 三轴拉伸试验技术研究[J]. 西北水资源与水工程, 12(2):24-27

朱元林,张家懿. 1992. 冻土的单轴压缩本构关系[J]. 冰川冻土, 14(3):210-217

朱占元,李静,邹祖银,莫忧. 2008. 动力荷载作用下冻土影变形特性技术研究[J]. 低温建筑技术, 122(2):112-114

An Experimental Study on the Relationship between Tensile Strength and Temperature and Water Ratio of Frozen Soil

ZHAO Jing-feng

(Changchun Institute of Technology, Changchun, Jilin 130012)

Abstract: With the practical measurement of frozen soil strength under different frozen temperatures and water ratios by the CBR-1 bearing ratio tester, the relationship between tensile strength and frozen temperature and water ratio is built, and their regularities are developed. When the water ratio lies between fourteen and twenty-five percent, the tensile strength is gradually increased accompanied with the reduction of temperature when between zero and twenty degrees below zero, the strength reaches its maximum. When the temperature is below twenty degrees below zero, the tensile strength is lowered with the reduction of frozen temperature. When the temperature is between one degree below zero and twenty-four degrees below zero, it is also lowered with the increasing water ratio; when the temperature is below five degrees below zero and the water ratio is more than seventeen percent, the strength is slowly reduced with the increase of water ratio. This conclusion will provide more accurate design and construction basis for the engineering construction in the cold area.

Key words: frozen soil, tensile strength, frozen temperature, water ratio