

粗粒土冻胀性分类

王正秋

(哈尔滨建筑工程学院)

一、粗粒土的冻胀特点

本文讨论的粗粒土,包括碎石土及除粉砂以外的砂类土。粗粒土冻结时水分迁移的特点与细粒土有质的差异。砂土颗粒可以有吸着水但无薄膜水,当粉粘粒含量小于某数值时,砂土中不存在连续结合水膜,因此就不像细粒土那样产生薄膜水正向迁移(水分向冻结面迁移)。相反,由于上部土层孔隙中自由水冻结后体积膨胀,对下层土体内孔隙水产生超静水压力,在有水分排出条件时,使水分反向迁移,即水分离开冻结面^[1-3]。根据博任诺娃所进行的土冻胀试验发现:在冻结粘土中,愈接近冷锋面水分含量愈增加,冻结后试样上部含水量达80.9%,下部含水量只有36.8%,平均含水量为63.9%;相反,在中等粒径的砂土中,愈接近冷锋面水分含量愈减少,土样上部含水量为16.9%,下部为18.6%,平均含水量为17.3%。哈尔滨建筑工程学院进行大量室内砂土冻胀试验表明:当饱和度 $S_r = 0.9$,细砂基本上是不冻胀的。如果充分饱和,则其冻胀量大小不仅与排水条件有关,也与其冻结速度有关,冻后土样的含水量都不同程度减少^[1]。在粉粒含量小于9%或粘粒含量小于3%时,饱和砂土冻结时水分是排出的^[4]。

由上可见,由于粗粒土极少存在薄膜水,即使有一些粉粘粒含量,只要它不足以构成连续水膜,冻结时主要是孔隙水转变为固态冰所产生的膨胀,不产生水分正向迁移,有时反而排出,故冻胀量不大。这是粗粒土冻结与粘性土冻结在水分迁移方面所表现的质的差异。

二、土的粒度成分对粗粒土冻胀的影响

砂土的冻胀因素中,土的分散程度(粒度成分)是一个很重要的物理指标,其中特别是粗粒土中粉粘粒含量起重要作用,因为粉粘粒决定着薄膜水的含量和连续性。

G.具斯柯等认为大于0.1mm(S.泰伯、A.Я.杜拉也夫认为可降至0.07mm)颗粒的饱和土中不存在水向冻结面迁移^[5]。我院根据各粒组相对含量对冻胀影响的统计分析认为,砂土组(>0.05mm)含量的增多可减少砂土的冻胀性^[2]。

大量室内试验表明,粗粒土中粉粘粒含量增加将使冻胀性增加。粘粒含量每增加1%,使冻胀率增加约0.6%。粉粒(0.05—0.005mm)含量小于12%时,每增加1%,增加冻胀率约0.18%;含量大于12%时,每单位粉粘粒含量影响冻胀率约0.6%。考虑

粒度成分(分散度)评价粗粒土冻胀敏感性时可以用单位体积内土颗粒表面积总和(比表面)作为判断指标。比表面除了反映分散度外,一定程度也能反映矿物成分的作用,实质上能较充分说明土颗粒自由表面能的影响。比表面 S 与砂土冻胀率 K_d 的关系呈指数关系〔4〕:

$$K_d = 0.59e^{1.7\alpha S} (\%),$$

式中: α ——比例常数, $\alpha = 10^{-3} (\text{cm})$; S ——比表面(cm^2/cm^3)。

$\alpha S \leq 0.5$ 时冻胀是不敏感的, $\alpha S > 0.5$ 时冻胀是可疑的,应根据其他条件,如地下水、含水量等,综合评价。

上述说明粉粘粒在粗粒土冻胀过程中的作用,因此粗粒土冻胀分类中应充分考虑粉粘粒的影响才是合理的。

在粗粒土中粘粒和粉粒起的作用也不相同。粘粒含量对水分积聚的影响远比粉粒为大。这点恰好与粘性土中相反。因为土冻胀敏感性强弱除了有足够数量颗粒自由表面能所引起的薄膜水之外,还应具良好透水性,以减少水分迁移阻力。粘性土中粘粒含量增加导致水分迁移减少(图1)〔1〕,在密度增大时更为明显。因为粘粒使颗粒自由表面能增加,但也使不参与水分迁移积聚和土冻胀过程的强结合水数值增加,堵塞水分迁移通道,冻胀反而减弱。若粘性土中粉粒占优势,则可保证水分迁移的最有利条件。在粗粒土中透水性良好,一旦颗粒自由表面能增加即可导致水分迁移增加〔4〕。

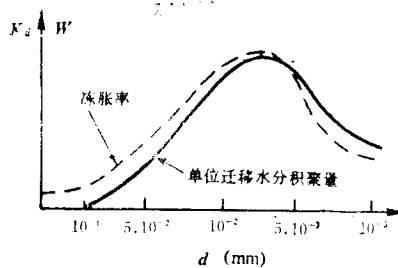


图1 冻胀率(K_d)及迁移水分积聚量(W)与土颗粒尺寸(d)关系

Fig. 1 Frost heave ratio and water migration vs grain size

三、含水量和地下水对粗粒土冻胀的影响

冻胀是以土在冻结前的湿润情况为基本条件的。土的湿润情况包括两方面内容:1)冻结前土的含水量;2)地下水通过毛细管移动的补给情况。

当冻结前土的含水量超过起始冻胀含水量时,冻胀随含水量增加而增大。含粉粘粒颗粒 $>12\%$ 的砾石土的冻胀率与含水量有近似直线关系〔6〕。如果把产生冻胀率 $\leq 1\%$ 时的含水量定义为安全临界含水量 W_{cr} ,对粗粒土 W_{cr} 值如表1所示。

大气降雨和浅藏的地下水是土变湿的基本原因。距冻结面足够近的地下水,在整个冬季通过毛细管作用不断向冻结面迁移和补充。因此,地下水对冻结土不发生影响的最

表 1 粗粒土安全临界含水量

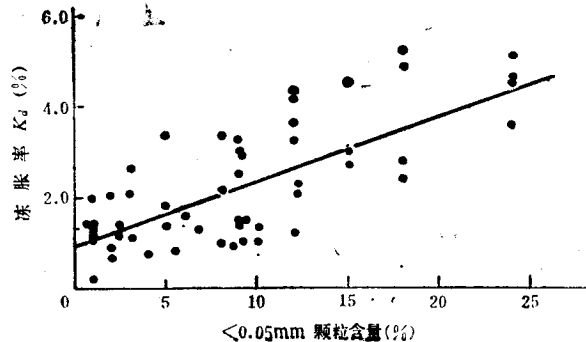
Table 1 Available critical water content of coarse grain soil

土 的 名 称	$W_{cr}(\%)$	资 料 来 源
粉粘粒含量>12%的卵砾石土	10—12	[6]
粉粘粒含量<12%的卵砾石土	8—10	[6]
砂 土 (粗-细)	9—12	[6]
细 砂	10—12	[4]
粗颗粒土(碎石土、砂类土)	12	[7]
>0.1mm颗粒不超过全重85%的细砂	14	[8]

小距离就是毛细上升最大高度。毛细上升高度与土的粒度成分和矿物成分有关。我院对几种级配的中、细砂在室内测定,得出毛细上升最大高度不超过 60cm。辽宁省水利科学研究所野外冻土试验场观察得到无冻胀层距潜水位的高度:粗砂为40cm,细砂为60cm^[3]。我国有关规范均规定为1.5m。B.O.奥尔洛夫等建议在实用上按1.5m考虑^[5]。可见细砂等土规定地下水补给高度为1.5m是有足够安全储备的。因此,笔者建议地下水距冻结线最小距离:中砂以上粗粒土为0.5m;细砂为1.0m。

四、粗粒土冻胀性分类的特征粒径的确定

上面已详细地讨论了粉粘粒含量在粗粒土冻胀中的作用。在国内外判别标准中虽然大多数以粉粘粒来区别,但也有以<0.1mm颗粒含量来控制的。那么在冻胀分类中究竟应以何种粒径作为分类标准?为了弄清此问题,以冻胀率 K_d 分别与<0.1mm颗粒及<0.05mm颗粒进行相关分析。根据文献[1、2]资料¹⁾,粒度成分与冻胀率关系的室内试验和场地试验数据(68例)绘成散点图(图2、3),并各用两种回归方程进行拟合,其结果如表2所示。

图 2 $K_d-p_{0.05}$ 散点图Fig. 2 K_d vs $p_{0.05}$

1) 青藏线冻土力学若干性质的初步研究,中国科学院兰州冰川冻土研究所青藏冻土力学研究小组,1972。

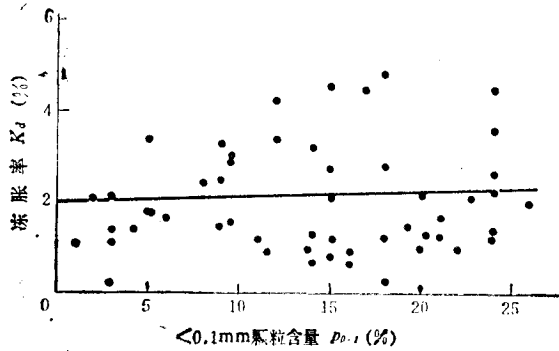


图 3 $K_d-p_{0.1}$ 散点图

Fig. 3 K_d vs $p_{0.1}$

表 2 回 归 方 程

Table 2 Regression formulas

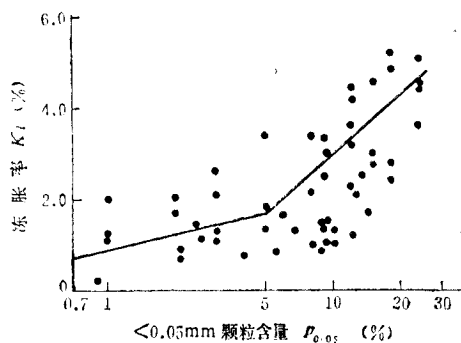
粒 径 (mm)	数据 对数 (n)	回 归 方 程	相 关 系 数 (r)	相 关 系 数 检 验				显 著 性 检 验 (方 差 分 析)						剩 余 标 准 差
				t_y	$t_{0.01}$		回 归 平 方 和		剩 余 平 方 和		F	$F_{0.01}$		
							回 归	自 由 度	随 机	自 由 度				
<0.05	64	$K_d = 0.95 + 0.14p_{0.05}$	0.745	8.78	2.39	通过	56.61	1	45.53	63	77.09	7.08	很显著	0.85
	60	$K_d = 0.97p_{0.05}^{0.37}$	0.590	5.56	2.39	通过	7.83	1	14.68	59	30.93	7.08	很显著	0.50
<0.1	57	$K_d = 2.01 + 0.01p_{0.1}$	0.094	0.700	2.39	通不过	1.166	1	131.47	56	0.49	7.08	不显著	1.54
	55	$K_d = 1.3p_{0.1}^{0.112}$	0.145	1.068	2.39	通不过	0.53	1	24.01	54	1.17	7.08	不显著	0.68

注： $p_{0.05}$ ——小于0.05mm 颗粒百分含量(%)； $p_{0.1}$ ——小于0.1mm 颗粒百分含量(%)。

由表 2 可见，冻胀率 K_d 与 <0.05 mm 颗粒含量的关系是密切的，而与 <0.1 mm 颗粒含量关系不显著。据此并参考国内外有关冻胀分类标准，在粗粒土冻胀分类中采用 0.05mm 作为特征粒径。

为了确定冻胀与不冻胀的特征粒径的界限含量问题，将 K_d 与 <0.05 mm 颗粒含量关系置于半对数坐标系统中（图 4），可以发现，在含量为 5% 左右时存在拐点。以 $p_{0.05} = 5$ 代入回归方程（1）中（表 2），可得 $K_d = 1.65\%$ 。此值略大于 1%。但考虑到室内模拟试验不能定量地代表实际土层所产生的冻胀，而场地真型试验更具代表性，同时参考国内外文献中规定的不冻胀限制含量，所以确定以 $p_{0.05} = 5\%$ 作为不冻胀界限含量，定 $p_{0.05} > 5\%$ 细砂为弱冻胀级，再根据含水量和地下水条件区分为不冻胀、弱冻胀和冻胀三类。

关于砾砂、粗砂、中砂冻胀性问题，一般情况下是不冻胀的。当地下水较高，有一定 $p_{0.05}$ 含量且无排水面时，可考虑孔隙水冻结而产生之冻胀（弱冻胀级）。因为这些土持水能力差，湿润条件主要来源于地下水，故不另列含水量指标。当碎石土夹有较多粘性土充填物时，冻胀性可按粘性土确定。

图4 K_d - $\lg p_{0.05}$ 关系曲线Fig. 4 K_d vs $\lg p_{0.05}$

五、建议粗粒土冻胀性分类表

建议粗粒土冻胀性分类见表3。表中仅考虑了产生冻胀的主要因素，是按一定冻胀率确定的一种土的冻胀属性，不反映冻胀量对各种工程构筑物的影响，亦不反映冻胀量

表3 碎石土、砂石¹⁾冻胀性分类

Table 3 Frost heave classifications of crushed stones and sands

土 类	0.05mm颗粒含量 (%)	天然含水量 (%)	冻结期间地下水低于冻深的最小距离 (m)	冻 胀 类 别
碎石土、砾砂、粗砂、中砂	≤ 5	不 考 虑	不 考 虑	不 冻 胀
	> 5	不 考 虑	> 0.5 ≤ 0.5	不 冻 胀 弱 冻 胀 ²⁾
细 砂	≤ 5	不 考 虑	不 考 虑	不 冻 胀
		≤ 12	≥ 1.0 < 1.0	弱 冻 胀
	> 5	≤ 12	≥ 1.0 < 1.0	弱 冻 胀
		> 12	≥ 1.0 < 1.0	冻 胀

注：1) 不包括粉砂；

2) 在封闭体积条件下为弱冻胀，在有排水条件时不为冻胀。

对冻结深度的影响。不同地区的相同冻胀类别的地基，其冻胀量是不相同的。笔者认为这个问题应在地基基础设计中加以考虑。

参 考 文 献

- 〔 1 〕 徐攸在, 1962, 论细砂地基的冻胀性, 哈尔滨建筑工程学院学报, 第 1 期。
- 〔 2 〕 王正秋, 1980, 粒度成分对细砂冻胀性的影响, 冰川冻土, 第 2 卷第 3 期。
- 〔 3 〕 陈肖柏等, 1979, 用砂砾(卵)石换填粘性土防治冻胀, 科学通报, 第 24 卷第 20 期。
- 〔 4 〕 王正秋, 细砂土冻胀性分类, 第二届全国冻土学术会议论文选集, 甘肃人民出版社, 1983。
- 〔 5 〕 Б.О.Орлов, Ю.Д.Дубнов, Н.Д.Меренков, Лучение промерзающих и его влияние на фундаменты сооружений, Ленинград, Стройиздат, 1977。
- 〔 6 〕 吴紫汪等, 土的冻胀性实验研究, 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 第 2 号, 科学出版社, 1981。

Frost Heaving Classifications of the Coarse Grained Soil

Wang Zhengqiu

(Harbin Architectural and Civil Engineering College)

Abstract

Analysing the frost heaving characteristics and main affecting factors on them, such as granular composition, moisture, groundwater, the author indicated that the content of less than 0.05 mm grain can be used as a criterion of frost heave of coarse grained soil. He suggested that the five per cent of less than 0.05 mm grain might be a limit for non-heave of coarse soils.