

# 含泥量对砂砾土冻胀特性的影响

岑国平<sup>1</sup>, 龙小勇<sup>1</sup>, 洪刚<sup>1</sup>, 刘培荧<sup>1</sup>, 李洪磊<sup>2</sup>

1. 空军工程大学机场建筑工程系, 西安 710038
2. 空军工程大学校务部, 西安 710051

**摘要** 为得到含泥量对砂砾土冻胀特性的影响规律, 为实际工程防冻胀设计提供理论依据, 利用改进的冻胀实验装置进行室内实验, 研究了不同含泥量、相同饱和度条件下及相同含泥量、不同含水率条件下砂砾土的冻胀特性。研究表明, 在封闭条件下, 饱和度一定时, 冻胀率随含泥量增大而增大, 说明过高的含泥量能够产生较大的冻胀, 因此控制含泥量是防止砂砾土冻胀的有效措施; 含泥量一定时, 冻胀率随含水率增大而增大, 说明砂砾土的冻胀率受含泥量和含水率共同影响, 因此要同时注意防排水和控制含泥量。传统研究通常认为, 砂砾土由于粒径较大冻胀不明显, 但本实验结果表明, 具有一定的含泥量和含水率的砂砾土也能产生比较明显的冻胀, 对工程建设有较大影响, 因此在工程实际中不能忽视砂砾土的冻胀。

**关键词** 砂砾土; 冻胀; 季冻区; 土工建设

**中图分类号** TU411.99

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.05.012

## Influence of silt content on frost heaving properties of gravel soil

CEN Guoping<sup>1</sup>, LONG Xiaoyong<sup>1</sup>, HONG Gang<sup>1</sup>, LIU Jiying<sup>1</sup>, LI Honglei<sup>2</sup>

1. Department of Airport Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China
2. Department of Administrative Affairs, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China

**Abstract** This paper aims to explore the influence of silt content on frost heaving properties of gravel soil, and provide theoretical basis for anti-freezing expansion design in practical engineering. A series of indoor frost heave tests were conducted to study the heaving properties of gravel soil under the same degree of saturation with different silt content, and under the same silt content with different moisture content using the improved experiment device. The test results show that the frost heaving ratio increased with the increase of silt content at unchanged degree of saturation in sealed environment, indicating high silt content can result in large frost heaving, so the control of silt content is an effective measure for prevention of gravel soil frost heaving. The frost heaving ratio increased with the increase of moisture content at unchanged silt content in sealed environment, indicating the frost heaving ratio is influenced by both the silt content and moisture content, so waterproof and drainage and control of the silt content are both important. It is conventionally believed that gravel soil does not have obvious frost heave due to large grain size; however, our research results indicate that gravel soil with a certain amount of silt and moisture can also generate obvious frost heave, which may exert considerable influence on the construction. Therefore, gravel soil frost heave in practical engineering cannot be ignored.

**Keywords** gravel soil; frost heaving; seasonal frozen area; geotechnical construction

中国季节冻土面积为 $513.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 约占全国国土面积的53.5%。其中青藏高原季冻区是中国主要季冻区之一, 其自然条件严酷、气温低、负温期长、冻深大, 而且进入负温后降温缓慢, 冻结线在某一地带停留时间较长, 更容易引起土

壤水分向冻结区迁移, 造成冻胀加剧。另外, 青藏高原地区大部分土壤为砂砾土和粉土, 砂砾土中含泥量分布不均匀, 容易造成不均匀冻胀。这些特点与平原地区有较大差异, 以往研究较少。传统研究通常认为, 砂砾土因粒径较大, 冻胀

收稿日期: 2014-09-29; 修回日期: 2015-01-09

基金项目: 民航科研专项资金项目(MHRD20140216)

作者简介: 岑国平, 教授, 研究方向为机场道面材料与施工、机场排水设计, 电子信箱: cenguoping@163.com; 龙小勇(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为机场道面材料与结构防冻, 电子信箱: 64544043@qq.com

引用格式: 岑国平, 龙小勇, 洪刚, 等. 含泥量对砂砾土冻胀特性的影响[J]. 科技导报, 2015, 33(5): 78-82.

不明显,但从工程实际反馈看,砂砾土造成的冻胀破坏不容忽视。因此,探索砂砾土的冻胀特性,尤其是了解含泥量对砂砾土冻胀特性的影响规律,为防冻胀设计提供理论依据,已成为青藏高原季冻区工程建设亟需满足的要求。

1961年,Everett<sup>[1]</sup>提出第一冻胀理论,掀起了国内外关于冻胀研究的热潮。随着冻胀研究的不断深入,在细粒含量对粗粒土冻胀特性影响方面也进行了一定的研究,Vinson等<sup>[2]</sup>、Chen等<sup>[3]</sup>通过实验研究认为,细粒土粒径大小是影响粗粒土冻胀敏感性的重要因素。Konrad等<sup>[4,5]</sup>进一步研究认为,粗粒土中细粒土的质量分数小于7%时,粗粒土的冻胀量相对较小,但补水量却很明显,且将1%的冻胀率作为判别粗粒土冻胀敏感性的标准。同时,研究认为,细粒土和黏土矿物质量分数增加将提高粗粒土的冻胀敏感性,叶阳升等<sup>[6]</sup>、许建等<sup>[7]</sup>的研究结果也证明了这一结论。张以晨等<sup>[8]</sup>则认为,相比于粗粒土中的含泥量,含水率是粗粒土产生冻胀最主要的因素。赵成江等<sup>[9]</sup>指出了道床中由于粉黏粒含量超标引起的冻胀率一般小于4%,道床冻胀是道砟含泥量和道床内含水率共同作用的结果。王天亮等<sup>[10]</sup>通过实验得到同时满足冻胀率和压实效果的最大细粒土质量分数为9%。

综上所述,细粒土是影响粗粒土冻胀敏感性的一个重要因素,然而粗粒土中最大细粒土质量分数的确定缺乏统一的标准,研究结果相差较大,而且上述研究几乎不涉及季冻区砂砾土的冻胀特性。因此,本文拟利用改进的冻胀实验装置进行室内实验,研究不同含泥量、相同饱和度条件下及相同含泥量、不同含水率条件下砂砾土的冻胀特性,探索含泥量对砂砾土冻胀特性的影响规律,为防冻胀设计提供理论依据。

## 1 实验概况

### 1.1 颗粒级配及土样制备

实验所用土样取自果洛自治州大武机场现场段,将土样装袋并用货车运送至西安,在实验室内进行过滤杂质、风干等处理。实验土样包括天然砂砾土和表层粉土,天然砂砾土为主要实验对象,表层粉土为对照实验对象。通过筛分实验,测得天然砂砾土中直径小于0.075 mm的颗粒的质量分数(含泥量)为6.9%,表层粉土的含泥量为50%,将这2种土样按不同的比例掺合均匀,即可得到试验所需的含泥量为10%、15%、20%、25%、45%的土样。已有研究表明,土样颗粒级配对土样的冻胀有明显的影[10]。按《JTG E40—2007 公路土工试验规程》规定的方法,通过颗粒分析实验得到2种土样的颗粒级配曲线(图1)。由图1可知,天然砂砾土和表层粉土级配良好,属于冻胀敏感性土类。

### 1.2 实验方法及装置

土样的冻胀特性主要用土样的冻胀量和冻胀率表示。冻胀量是地表由于土样冻结而引起的竖向位移,土样在无侧向变形的条件下,经单向冻结,其纵向高度的增量与试样原始高度的比值称为冻胀率(也称冻胀强度或冻胀系数),通常

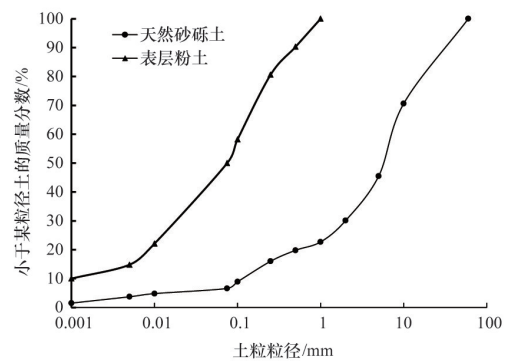


图1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curve

用高度比表示,公式<sup>[11]</sup>为

$$\eta = \frac{\Delta h}{H_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $\eta$ 为冻胀率,%; $\Delta h$ 为冻胀量,mm; $H_t$ 为冻结土层的厚度,mm。

试样制备过程严格按照中华人民共和国行业标准《JTG E40—2007 公路土工试验规程》进行。由于原状土样的采取、运输、保存等存在一定的困难,室内试验中采用重塑扰动土样进行冻胀率实验。实验具体方案如表1所示。

表1 冻胀实验方案

Table 1 Frost heaving test program

实验组别	饱和度	含泥量/%	实验组别	含泥量/%	含水率/%
相同饱和度、不同含泥量	0.8	10	相同含泥量、不同含水率	25	3
		15			5
		20			7
		25			9
相同含泥量、不同饱和度	0.9	10	45	10	6.43
		15			7.35
		20			8.27
		25			9.19
相同含泥量、不同饱和度	1.0	10	45	10	10
		15			12
		20			14
		25			16
					18

注:含水率均为质量含水率,压实度为95%,上覆荷载为20 kPa,初始冻结温度为-2℃;饱和度:土体中孔隙水体积与孔隙体积的比值。

结合砂砾土的特点,本文采用改进的冻胀室内实验装置进行研究。实验装置由试样筒、恒温箱和温控系统、温度检测系统、位移检测系统、数据采集终端和气动平衡装置组成,如图2所示。由于砂砾土的粒径较大,经过改装后,试样筒由内径15 cm,高16 cm,壁厚1 cm的有机玻璃筒制作,沿高度每隔2 cm设温度传感器插入孔。底板为中空结构,有负温循

环液进出口。本文不考虑外界补水的影响,因此所有实验均在封闭条件下进行。

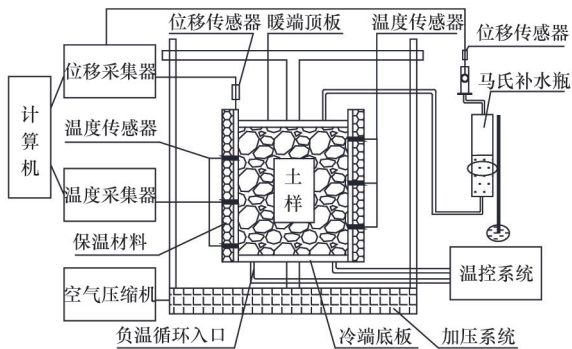


图2 冻胀实验装置系统示意

Fig. 2 Schematic diagram of frost heaving test device

### 1.3 实验步骤

1) 试件配备及成型。试件在有机玻璃内成型,试样直径15 cm、高13.5 cm。首先按一定的含泥量、含水率配料、闷料24 h,以保证试样的含水率均匀一致,根据压实度称取一定质量的湿土,于试样筒中分5层进行击实,静压成型。为防止实验过程中水分流失,在试样顶面和底面各放1张滤纸,然后放上顶板,并稍加力,使土样与顶、底板接触紧密。

2) 将2个试样盒放入恒温箱内,试样周侧、底板内放入温度传感器,周侧包裹厚5 cm橡塑海绵保温材料。连接底板冷冻液循环管路、安装位移传感器。将温度和位移传感器与数据采集终端连接。开启加压装置,并调节到所需压力。

3) 开启恒温箱及底板冷浴,设定恒温箱为1℃,底板冷浴为-15℃;试样恒温12 h,并监测温度和变形,待试样初始温度均匀达到1℃后,开始冻结;底板温度调至-15℃并持续0.5 h,使试件迅速从底面冻结;然后底板温度调至-2℃,并以0.2℃/h速度下降;保持箱温和顶板温度均为1℃。

4) 打开电脑上的阿尔泰测控系统读取、保存数据。实验持续至位移量读数恒定不变方可结束(约72 h)。

5) 实验结束后,迅速从试样盒中取出试样,量测试样高度并测定冻结深度。从阿尔泰测控系统读取位移和温度数据并计算结果<sup>[11]</sup>。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 冻胀过程分析

从实验结果中取1组典型数据,绘制冻胀量随时间的变化关系,结果见图3。由图3可知,土样冻胀基本可以分为4个阶段:

1) 冻缩阶段:这一阶段内,冻胀率为负值,即土样发生冻缩现象,约4~8 h后土样体积增大,冻胀开始。由于土样颗粒受冷收缩,孔隙水结冰后增大的体积,不足以抵消土样颗粒收缩的体积;水在4℃时密度最大,土样所含水分的体积最小,这对于土样的冻缩有一定的影响。此外,给土样加载的

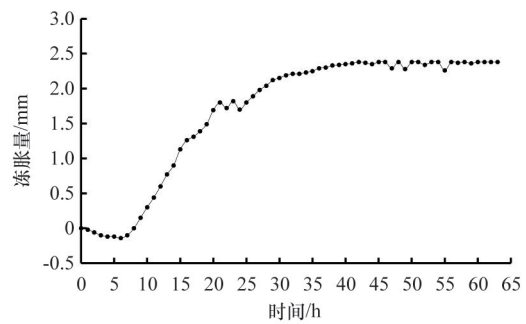


图3 冻胀量随时间变化

Fig. 3 Variation of frost heaving amount with time

20 kPa的上覆荷载,也抑制了土样体积的增长。因此,在起始阶段,土样体积不增反小。随着温度继续降低,土样开始持续冻胀,当冻胀引起的体积增量超过土样颗粒收缩导致的体积减量时,才能观测到冻胀现象。

2) 快速冻胀阶段:这一阶段冻胀量快速增长,是由于此时冰析作用非常强烈,聚集在冻结锋面处的水分冻结成冰时,将挤开土颗粒而形成零散的细小冰透镜体,出现冰分凝现象,因此体积快速增大。

3) 缓慢冻胀阶段:这一阶段冰分凝已经比较充分,冻结锋面附近形成的冰透镜体的厚度及连续程度加大,使得冻胀量增长的幅度慢慢减小。

4) 稳定阶段:这一阶段冻结锋面基本稳定,冰透镜体停止生长,冻胀率几乎停止增长,保持不变状态。

从实验结果中取1组典型数据,绘制不同高度处温度随时间的变化关系,结果见图4。从图4中可以看出,不同高度处,土样降温的速率是不同的,其中4 cm处降温速度最快,12 cm处降温速度最慢。

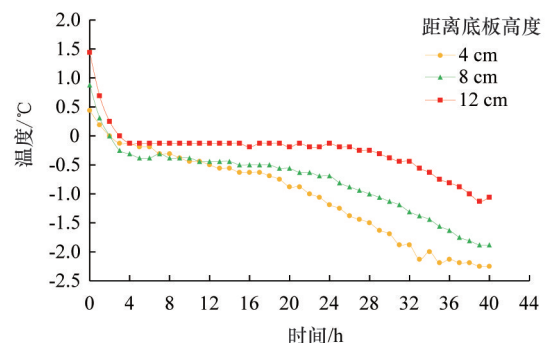


图4 距离底板不同高度处温度随时间变化

Fig. 4 Variation of temperature with time

### 2.2 不同含泥量、相同饱和度下的冻胀特性

不同含泥量、相同饱和度下的冻胀实验结果如表2、图5所示。分析可知,在饱和度一定的情况下,土样的冻胀率随着含泥量的增大而增大。含泥量为10%时,土样的冻胀率较小。分析其原因为:土颗粒越细,其比表面积越大,表面能越高,与水相互作用的能量也越高。具体来讲,土颗粒表面都

会吸附一定厚度的水膜,细颗粒较高的表面能可将水膜紧紧吸附在土粒周围,土粒间的相互连接构成利于水分连续迁移的薄膜通道,因此,冻胀率更大。冻胀率的增幅随着含泥量的增大呈现减小的趋势,且含泥量小于20%时,冻胀率的增幅较大,含泥量大于20%时,冻胀率的增幅逐渐减小。这是由于,随着含泥量的增加,土样当中的细颗粒的含量也在逐渐增加,颗粒直径特别小时,巨大的表面能使得土粒与未冻水的结合作用增大,从而使土粒表面吸附水膜的厚度增大,减小了供水分迁移的薄膜通道,降低了土样的水分渗透性能,甚至土颗粒外围水膜过厚造成叠加,完全阻塞迁移通道,

从而导致水分迁移能力大大减弱,对冻胀率产生抑制作用。

表2 不同含泥量下的冻胀率实验结果  
Table 2 Test results of frost heaving ratio under different silt content

饱和度	冻胀率/%			
	10%	15%	20%	25%
0.8	0.10	0.46	0.75	0.99
0.9	0.19	0.71	1.01	1.28
1.0	0.28	0.88	1.28	1.46

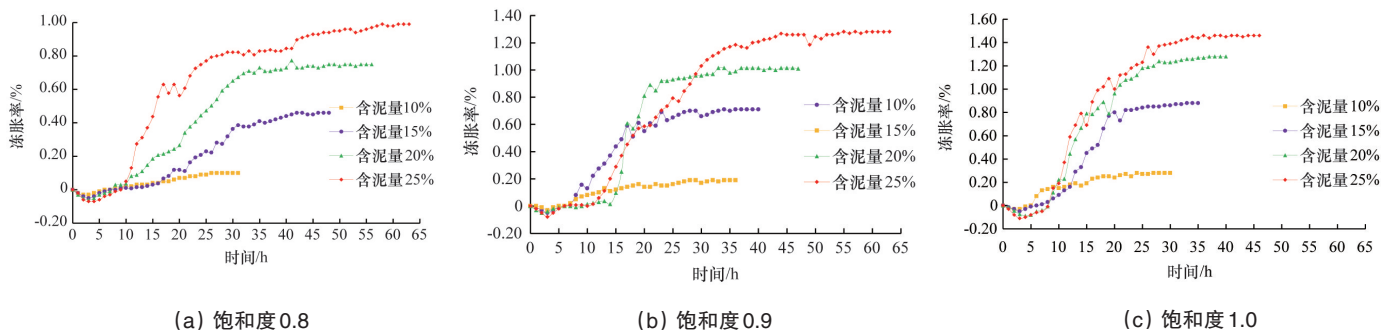


图5 不同含泥量时冻胀率随时间变化

Fig. 5 Variation of frost heaving ratio with time under different silt content

### 2.3 相同含泥量、不同含水率下的冻胀特性

相同含泥量、不同含水率下的冻胀实验结果如表3和图6所示。分析可知,在含泥量一定的情况下,土样的冻胀率随着含水率的增大而增大。分析其原因:含泥量一定,则干密度一定,在干密度一定的情况下,土样的饱和度随着含水率的增大相应增大,孔隙中的水分黏结更为紧密,水分连续迁移更加明显,冻结时孔隙冰体积增加,因而产生的总的冻胀量增大。

表3 冻胀率实验结果

Table 3 Tests results of the frost heaving ratio

含泥量/%	含水率/%	冻胀率/%
15	3	0.43
	5	0.26
	7	0.71
	9	1.72
25	6.43	0.81
	7.35	0.99
	8.27	1.28
	9.19	1.46
45	10	0.88
	12	1.32
	14	1.64
	16	1.98
	18	2.28

### 3 结论

1) 传统研究通常认为,砂砾土由于粒径较大冻胀不明显,但从本研究结果可知,含泥量15%的砂砾土在含水率为9%的条件下,其冻胀率能够达到1.02%;含泥量25%的砂砾土在含水率为8.27%的条件下,其冻胀率能够达到1.28%;含

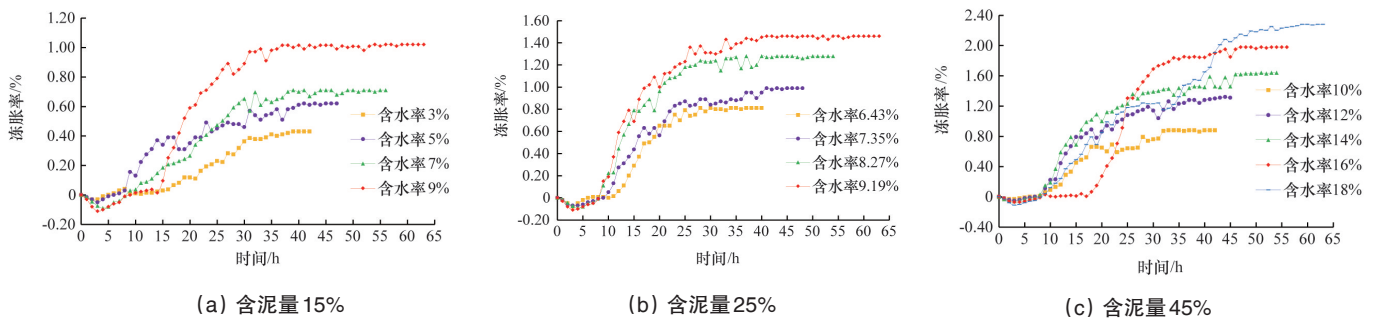


图6 不同含水率时冻胀率随时间变化

Fig. 6 Variation of frost heaving ratio with time under different moisture content

泥量45%的砂砾土在含水率为12%的条件下,其冻胀率能够达到1.32%。说明具有一定含泥量和含水率的砂砾土也能产生比较明显的冻胀,对工程建设有较大影响,因此在工程实际中不能忽视砂砾土的冻胀。

2) 在封闭且饱和度一定的条件下,砂砾土的冻胀率随含泥量增大而增大,说明过高的含泥量能够使砂砾土产生较大的冻胀,因此,控制含泥量是防治砂砾土冻胀的有效措施。

3) 在封闭且含泥量一定的条件下,砂砾土的冻胀率随含水率增大而增大,说明砂砾土的冻胀率受含泥量和含水率共同影响,因此,要同时注意防排水和控制含泥量。

### 参考文献(References)

[1] Everett D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. Transactions Faraday Society, 1961, 57: 1541-1551.  
 [2] Vinson T S, Ahmad F, Rieke R. Factors important to the development of frost heave susceptibility criteria for coarse-grained soils[J]. Transportation Research Record, 1986: 124-131.  
 [3] Chen X, Wang Y. Control of frost heave in geotechnical engineering[C]// Proceedings of the Eighth International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. New York American Society of Mechanical Engineers (ASME), 1989, 32: 148-153.  
 [4] Konrad J M, Lemieux N. Influence of fines on frostheave characteristics of a well-graded base-course material[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(2): 515-527.  
 [5] Konrad J M. Freezing-induced water migration in compacted base-course materials[J]. Canadian Geo-technical Journal, 2008, 45(7): 895-909.  
 [6] 叶阳升, 王仲锦, 程爱君, 等. 路基的填料冻胀分类及防冻层设置[J].

中国铁道科学, 2007, 28(1): 1-7.  
 Ye Yangsheng, Wang Zhongjin, Cheng Aijun, et al. Frost heave classification of rail subgrade filling material and the design of anti-freezing layer[J]. China Railway science, 2007, 28(1): 1-7.  
 [7] 许建, 牛富俊, 牛永红, 等. 换填法抑制季节冻土区铁路路基冻胀效果分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5): 1-7.  
 Xu Jian, Niu Fujun, Niu Yonghong, et al. Analysis on the effect of replacing-soil method on inhibiting frost heave of railway roadbed in seasonal frozen soil region[J]. China Railway Science, 2011, 32(5): 1-7.  
 [8] 张以晨, 李欣, 张喜发, 等. 季冻区公路路基粗粒土的冻胀敏感性及其分类研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1522-1526.  
 Zhang Yichen, Li Xin, Zhang Xifa, et al. Research on frost heave susceptibility and classification of coarse grained soil of highway subgrade in seasonally frozen ground region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(10): 1522-1526.  
 [9] 赵成江, 王晓荣, 夏琼, 等. 不同含泥量与含水率下铁路板结道床的冻胀特性[J]. 铁道工程学报, 2011, 156(9): 36-96.  
 Zhao Chengjiang, Wang Xiaorong, Xia Qiong, et al. Frost heaving behaviors of hardened ballast beds under different content of clay and water[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 156(9): 36-96.  
 [10] 王天亮, 岳祖润. 细粒含量对粗粒土冻胀特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 359-388.  
 Wang Tianliang, Yue Zurun. Influence of fines content on frost heaving properties of coarse grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 359-388.  
 [11] 交通部公路科学研究院. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 345-349.  
 The Ministry of Communications Highway Research Institute. JTG E40-2007 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communication Press, 2007: 345-349.

(责任编辑 王媛媛)

### · 学术动态 ·



## 麻疹中医药防治专家强调:发挥中医药 在麻疹防治中的特色优势

2015年2月3日,为了发挥中医药在麻疹防治中的特色优势,中华中医药学会在北京召开麻疹中医药防治专家座谈会,来自北京、天津、河南、山东、辽宁等地的12位中医、感染病专家出席,就中医药在麻疹防治中的特色优势等问题进行了交流,形成如下共识:

中医药在长期的临床实践中,对麻疹防治积累了丰富的经验,具有鲜明的特点,应当充分发挥作用,以有效应对疫情。要合理使用退烧药物,严格按照有关指征选用抗生素、激素,以免影响麻疹透发。中医药要早期介入治疗,减少逆证、重症、并发症的出现。在做好典型性麻疹诊治的同时,高度重视非典型性麻疹、成人麻疹的诊治,研究探索发病及演变规律,提高疗效。加强学术交流,实现资源、信息、经验共享,开展科研协作,尽快形成共识。加强麻疹预防调护知识的科学普及与宣传,做到规范接种,保持良好的卫生习惯和科学的生活方式。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35548/n38620/16218738.html>。