

# 城市环境下粘性土的热力学行为初探

## Thermal Mechanics Conductivity of the Clayey Soil in Urban Environment

吴恒 欧孝夺 周东

Wu Heng Ou Xiaoduo Zhou Dong

(广西大学土木建筑工程学院 南宁市大学路 100号 530004)

(College of Civil Architectural Engineering, Guangxi University,  
100 Daxuelu, Nanning, Guangxi, 530004, China)

**摘要** 在广西大学东门附近取沉积相粘性土,用切土盘将土样切削成直径 39.1 mm,高 80 mm 的试样,并将橡皮膜套在试样外,分别在 +40℃, +60℃ 的环境中静置 48 h, 120 h, 168 h 后在相应的水温条件下完成三轴(不固结不排水)试验。试验结果表明,当温度由室温(+18℃)及+40℃升至+60℃时,原状土试样主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )有所增大;土体中不与大气连通的封闭气体对土的工程性质影响较大;同一温度作用下,时间越长,主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )越大。说明温度升高粘性土的强度提高,而且其作用时间越长,强度越高。

**关键词** 粘性土 热力学 城市环境

中图法分类号 TU431; TU411.3

**Abstract** The clayey soil which dug from the rivers near the east door of the Guangxi University were cut into blocks which the diameter is 39.1 mm and the height is 80 mm. The blocks were put into the thin coatings and had the experiments in the relevant temperature of water after been put in the 40 degree, 60 degree for 48 h, 120 h, 168 h. It has been proved that when the temperature rises from room temperature (18℃) to 40℃, and from 40℃ to 60℃, the strength of the clayey soil will be improved, and the strength will be more strengthened with the role time grows. The air in the soil will affect the mechanical character of the soil mostly. Under the same temperature, the strength of the clayey soil will rise with the time. It shows the strength of the clayey soil will be strengthened with the rising of the temperature, and the more time the more strength.

**Key words** clayey soil, thermal mechanics, urban environment

城市化是未来发展的方向。目前,世界上已有 1/3 的人口生活在城市里,到本世纪末可达 2/3。我国也不例外,未来 50 年,中国的城市化率将从现在的 37% 提高到 75% 以上<sup>[1]</sup>。随着城市规模的不断扩大及人口的进一步集中,“热岛”现象也变得越来越严重。在加拿大温哥华,20 世纪 70 年代(1972 年 7 月 4 日)测定的城市热岛强度(城市热岛强度指城乡出现的最大温差)达 11℃,而在德国的柏林则为 13℃,我国的北京市也测到 9℃,城市热岛强度令人震惊<sup>[2]</sup>。这将致使城市下覆岩土体内的温度场发生变化<sup>[3]</sup>,影响或改变土颗粒之间的连接性状。

随着现代工业的迅猛发展,在热源附近的建筑物

(如发电站、管道、烟囱、热车间等)地基亦受到温度变化的影响,其变化范围可达几十摄氏度或更高,如此反复作用,粘性土热动力平衡遭到破坏,土体的变形、强度如何发生变化,是否存在温度作用的累积,是否会影响到城市建筑物的安全,这些是城市可持续发展关心的问题,也是城市岩土工程的前沿课题。

### 1 温度变异对粘性土结构强度影响的研究现状

土的工程性质取决于几种相互影响的复合效应及相互联系的因素。这些因素可分为 2 类:成份因素和环境因素。成份因素包括矿物的种类、矿物的含量、吸附阳离子的种类、颗粒的形状、粒径分布及孔隙水的成分;环境因素包括含水量、密度、围压、温度、

结构及水的有效性。前者决定土性的潜在范围值，后者决定土性的实际价值。

国内外研究表明，气温变化引起土体中能量的传递和温度场的改变是不争的事实，且其强度与土层、含水量和地下水等因素有关<sup>[4,5]</sup>。显而易见，土体中温度场变化将“扰动”土体结构强度，然而，这方面的研究是偏少的。现有著作中的大部分述及的是高温（100~ 200℃）对改变岩石矿物成份的作用，对于较低温度（小于 100℃）对土体结构强度的影响问题只有零星报道，而他们所引出的结论又完全不同<sup>[6]</sup>。Mitchell（1964年）对 San Francisco Bay 淤泥进行不同温度下（0~ 35℃）的试验，其结论是，如果其它因素不变，温度的增加将导致强度的减少，温度对强度的影响见图 1<sup>[7]</sup>。

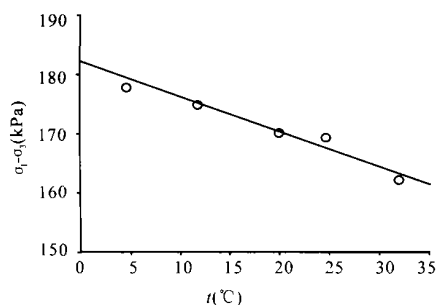


图 1 温度对 San Francisco Bay 淤泥的剪切阻力的影响

Fig. 1 Effects of temperature on the shear stress of San Francisco Bay

## 2 河流相粘性土（原状）的热效应试验研究

### 2.1 材料与方法

试验土样取自广西大学通道桥附近的河流沉积相粘性土，试验按如下步骤进行。

(1) 用切土盘将土样切削成直径为 39.1 mm 高为 80 mm 的试样。

(2) 将切削好的试样称量，准确至 0.1 g。同一组原状试样，密度的差值不宜大于 0.03 g/cm<sup>3</sup>，含水率差值不宜大于 2%。

(3) 将橡皮膜套在试样外，分别在 + 40℃、+ 60℃ 的环境中静置 48 h、120 h、168 h。

(4) 在相应的水温条件下完成三轴（不固结不排水）试验，围压分别为 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa，每一级围压进行 4 次试验，共完成 96 个土样的试验。

### 2.2 试验结果及分析

#### 2.2.1 粘聚力的本质及其变化规律

粘聚力  $c$  是土的重要剪切强度参数之一，它可以定义为土在法向应力  $e = 0$  时的抗剪强度  $f_0$ 。岩石的抗剪强度与正应力有关，即正应力越大，抗剪强度也

越大。但当正应力为零时，抗剪强度并不为零，而为某一常数，依定义它就是粘聚力。它是一个与土性有关的参数，即不同的土质其粘聚力也不相同，而且只有土中存在化学胶结时，其值才很显著，因此粘聚力与土的胶结强度密不可分。

表 1 粘性土粘聚力及内摩擦角数值

Table 1 Cohesion strength and angle of internal friction of clay

温度 Temperature (°C)	时间 Time (h)	$c_u$ (k Pa)	$H_u$ (°)
+ 18 <sup>g</sup>	-	26.6	3.1
+ 40	48	21.9	3.0
	120	34.1	1.3
+ 60	48	36.7	1.3
	120	53.1	1.0
	168	60.6	1.7

\* 室温 Room temperature.

由表 1 可以看出，温度升高与作用时间延长后粘性土的粘聚力  $c$  明显增大，这表明土样的结构连结强度明显增大，而内摩擦角  $H$  却有减少的趋势，说明土样在热对流过程中会引起一些矿物的溶解和另一些矿物的沉淀，但未形成大的凝聚体颗粒。

#### 2.2.2 主应力差与温度的关系

试验结果见图 2~ 图 5。

分析图 2~ 图 5，可得到粘性土结构强度随温度和时间变化的变化规律。

(1) 温度升高，原状土试样主应力差 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 有所增大。原因是粘土矿物、盐类及土中原存的水溶液发生物理化学反应生成难溶的沉淀或结晶物，使某些元素、离子由水溶液中固结于土孔隙中或晶格体上，从而导致胶结作用加强。

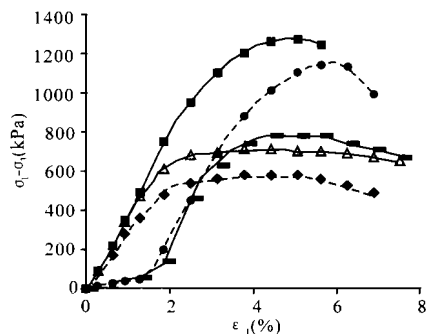


图 2  $\sigma_3 = 100$  kPa

Fig. 2  $\sigma_3 = 100$  kPa

—△—: 室温 Room temperature; —◇—: +40°C (48 h).  
—■—: +60°C (48 h); —●—: +60°C (120 h); —■—: +60°C (168 h).

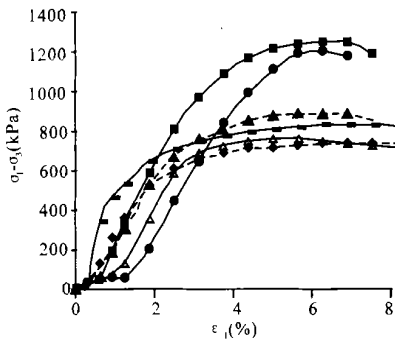


图 3  $\sigma_3 = 200$  kPa

Fig. 3  $\sigma_3 = 200$  kPa

—△—: 室温 Room temperature; —◆—: +40 C (48 h).  
 —■—: +60 C (48 h); —▲—: +40 C (126 h); —●—:  
 +60 C (120 h); —■—: +60 C (168 h).

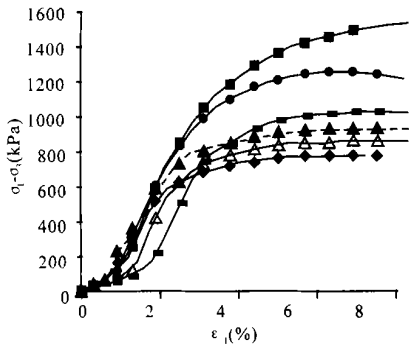


图 4  $\sigma_3 = 300$  kPa

Fig. 4  $\sigma_3 = 300$  kPa

—△—: 室温 Room temperature; —◆—: +40 C (48 h).  
 —■—: +60 C (48 h); —▲—: +40 C (126 h); —●—:  
 +60 C (120 h); —■—: +60 C (168 h).

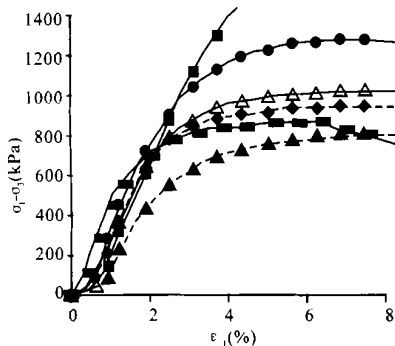


图 5  $\sigma_3 = 400$  kPa

Fig. 5  $\sigma_3 = 400$  kPa

—△—: 室温 Room temperature; —◆—: +40 C (48 h).  
 —■—: +60 C (48 h); —▲—: +40 C (126 h); —●—:  
 +60 C (120 h); —■—: +60 C (168 h).

(2) 土体中不与大气连通的封闭气体对土的工程性质影响较大。它增大了土的弹性,减少了土的渗透性,延缓了土的压缩和膨胀。变形随时间的发展过程。温度作用破坏了一些封闭气体,由于此作用改变了土的气体的含量,这些作用就有可能提高土的物理力学性质

(3) 同一温度作用下,时间越长,主应力差

( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 越大。这可能是温度效应的累积造成的,或者土体具有类似于混凝土“养护温度”的性质

### 3 结束语

通过初步研究,可以得出以下几点结论:

(1) 从环境观点的角度看,随着城市热岛效应不断加强,温度升高,城市下覆土体的结构强度将发生变化

(2) 可能存在适合土体结构强度增长的“养护温度”,这需要大量的试验数据进一步证明。这一现象将与土体中的冻结法施工、地基处理的电渗加固一样,为土体工程施工开辟新的道路

世界气象组织(WMO)观测发现,全球表面的平均气温一直在上升。由于岩土界面上的热传播,导致岩土介质中温度变化,从而引起土体中化学作用的改变。另外,地下水变异(尤其是酸性介质)对土体侵蚀已形成共识<sup>[11]</sup>,其侵蚀程度与反应温度关系密切。因此,从城市可持续发展的角度出发,可以从以下方面开展粘性土热效应研究:(1)土体中的液相、固相在温度场下的物理化学作用发生改变;(2)天然温度场被“扰动”后,土体的颗粒连接、吸附及其性状发生变化

采用三轴试验测定土体强度、CT或扫描电镜观察作用后土的结构特征,以及通过“液相组分、场强(温度场)和作用时间等”相互不同的配比试验和结果对比,分析“固-液耦合+外加物理场”在不同组合下的细观特性,剖析城市建设环境下温度变异触发的地下水、土体结构、胶结组份及强度的变化与相互作用,探讨土体中的热力-结构-胶结组份-强度的变化及相互关系,揭示温度单体因素作用下引起土体结构变化的“印迹”和变化机理。

### 参考文献

- 1 中国市长协会《中国城市发展报告》编委会. 2001~ 2002 中国城市发展报告. 北京: 西苑出版社, 2002. 12.
- 2 窦建奇. 关于城市“热岛效应”的思考. 武汉城市建设学院学报, 2001, 18(3~ 4): 76~ 78
- 3 Changnon S A. A rare long record of deep soil temperatures defines temporal temperature changes and an urban heat island. Journal of Climatic Change, 1999, 42(3): 531 ~ 538
- 4 汤连生. 水-土化学作用的力学效应及机理分析. 中山大学学报(自然科学版), 2000, 39(4): 104~ 109.

(下转第 215 页 Continue on page 215)

各种判别方法都较复杂,计算量大。我们利用计算机图形的特点,在绘制好所有(闭合的)等值线后,根据填充的区域内外不同颜色,将区域外的部分隐去,而只显示区域内的曲线,即可达到目的

至此,降雨量等值线的绘制已经顺利完成,具体效果如图 3 所示

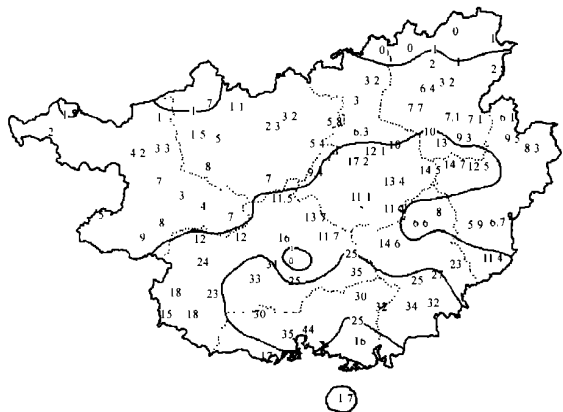


图 3 2002 年 11 月 28 日广西降雨量等值线图 (单位: mm)  
Fig. 3 Precipitation isogram of Guangxi in 28th of Dec. 2002 (Unit mm)

#### 4 结语

本文针对气象要素及其分布特点,以广西降雨量为例,详细分析了计算机绘制气象要素等值线的实现

过程,同时在网格插值及等值线追踪、顺滑、显示等方面都提出了新颖、有效的思路,并给出具体算法程序实现简单,速度较快,输出等值线光滑、美观,结果满足气象图形的要求。另外该设计可以进一步包装制作成功能模块嵌套入其他分析软件,或编译成动态链接库以供其它程序调用,利于推广。

#### 参考文献

- 1 王 忠,刘浩吾,柴贺军.等值线的栅格图形自动生成.水利学报,2001,(4): 53~ 56.
- 2 成建梅,陈崇希,孙红林.三角网格等值线自动生成方法及程序实现.水利学报,1998,(10): 23~ 26.
- 3 王新芝.利用实测资料绘制等值线图.新疆气象,1996,(1): 28~ 32.
- 4 王继元,杨元琴.现代天气工程学.北京:气象出版社,2000.267.
- 5 单九生,张 瑛,周建雄.细网格推算流域雨量方法应用浅析.江西气象科技,2001,(2): 10~ 13.
- 6 贺 俐,陈桂兴.计算方法.武汉:武汉水利电力大学出版社,1998.
- 7 冯建设,吕红梅.不连续场等值线的微机自动分析.山东气象,1996,(4): 39~ 41.

(责任编辑:邓大玉 曾蔚茹)

(上接第 207 页 Continue from page 207)

- 5 Garriellsson A, Bergdahl U, Moritz L. Thermal energy storage in soils at temperatures reaching 90 degrees C. Journal of Solar Energy Engineering, 2000, 122(1): 3~ 8.
- 6 ПИ 兹洛切夫斯卡娅, B A 科罗列夫.土中结合水译文集.李生林,薄遵昭,秦素娟等译.北京:地质出版社,1982.
- 7 Mitchell.岩土工程土性分析原理.高国瑞等译.南京:南京工学院出版社,1988.301~ 318.
- 8 Peters-Lidard C D, Blackburn E, Liang X, et al.. The effect of soil thermal conductivity parameterization on surface energy fluxes and temperatures. Journal of the Atmospheric Sciences, 1998, 55(7): 1209~ 1223.
- 9 Lafleur P M, McCaughy J H, Joiner D W et al.. Seasonal

- trends in energy, water, and carbon dioxide fluxes at a northern boreal wetland. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(24): 9~ 20.
- 10 Rees S W, Adjali M H, Zhou Z et al.. Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2000, 4(3): 213~ 65.
- 11 吴 恒,张信贵,易念平等.水土作用与土体细观结构研究.岩石力学与工程学报,2000,19(2): 199~ 204.

(责任编辑:黎贞崇 邓大玉)