

DOI: 10.11779/CJGE2019S2016

钙质砂热传导性能试验

付慧丽^{1, 2}, 莫红艳², 曾召田^{1, 2}, 郑川^{1, 2}, 徐云山²

(1. 广西建筑新能源与节能重点实验室(桂林理工大学), 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 基于热针法测得了不同条件下南海钙质砂的热传导性能, 探讨了含水率、干密度、温度、颗粒粒径等因素对钙质砂热导率的影响。研究表明: 钙质砂热导率随含水率、干密度的增大而增大, 且含水率越大, 干密度对热导率的影响越明显; 相对于随干密度的变化, 钙质砂热导率随含水率的变化尤为显著; 钙质砂热导率随温度升高而增大, 但是热导率在不同温度下随含水率的增长趋势不同; 颗粒粒径对钙质砂热导率的影响甚微; 在钙质砂中掺入一定量石英砂有助于改善其导热性能。

关键词: 钙质砂; 热传导; 热针法; 含水率; 温度

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S2-0061-04

作者简介: 付慧丽(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为环境岩土工程。E-mail: 312942004@qq.com。

Experimental study on thermal conductivity of calcareous sand

FU Hui-li^{1, 2}, MO Hong-yan², ZENG Zhao-tian^{1, 2}, ZHENG Chuan^{1, 2}, XU Yun-shan²

(1. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The thermal conductivity of calcareous sand in the South China Sea is measured under different conditions by the thermal probe method, and the effects of water content, dry density, temperature, particle size and other factors on the thermal conductivity of calcareous sand are discussed. The results show that the thermal conductivity of calcareous sand increases with the increase of the water content and dry density, and the higher the water content, the more significant the influences of dry density on thermal conductivity. The thermal conductivity of calcareous sand increases with the increase of the temperature, but the thermal conductivity of calcareous sand varies with the increasing trend of water content at different temperatures. The particle size has little effect on the thermal conductivity of calcareous sand. Adding a certain amount of quartz sand into the calcareous sand helps to improve its thermal conductivity.

Key words: calcareous sand; thermal conduction; heat probe method; water content; temperature

0 引言

钙质砂是一种海洋生物成因的特殊岩土介质, 其矿物成分主要为碳酸钙(>50%), 具有多孔隙、形状不规则、易破碎、颗粒易胶结等特点, 在中国南海海域、太平洋群岛大部分海域均有钙质砂的分布^[1-2]。近年来, 中国对南海诸岛的开发和保卫力度日益加大, 岛礁和海上现代化工程数量也日益增多, 众多学者对于钙质砂的研究也日渐深入: 虞海珍等^[3]进行了钙质砂动强度试验研究; 张家铭等^[4]对钙质砂进行了不同围压下的三轴排水剪切试验, 研究钙质砂的剪切特性; 王帅等^[5]研究了侧限条件下高压对钙质砂颗粒破碎的影响。尽管众多学者对钙质砂的物理力学特性、工程地质特征、颗粒破碎等方面进行了相关研究, 但是有关钙质砂热传导性能的研究却鲜有报道。

岩土的热传导性能在深埋高压电缆^[6]、地下油气

管道^[7]、地下贮热技术等工程应用领域具有重要作用。对岩土热传导性能进行深入研究是为了探求岩土介质传热的基本规律、寻求传热强化和削弱的技术途径。Tang等^[8]、王铁行等^[9]、曾召田等^[10]、庄迎春等^[11]分别对压实膨润土、黄土、红黏土、砂土混合材料的热传导性能进行了研究, 分析了含水率、干密度、掺砂量对不同岩土体热传导性能的影响。在上述基础上, 对钙质砂热传导性能进行试验是一个非常值得探讨的课题。

本文基于热针法测定了不同试验条件下钙质砂

基金项目: 国家自然科学基金项目(51568014); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA138182); 广西建筑新能源与节能重点实验室资助课题(桂科能17-J-21-2)

收稿日期: 2019-04-29

***通讯作者:** (E-mail: zengzhaotian@163.com)

表 1 钙质砂的基本物理性质指标

| Table 1 Basic physical properties of calcareous sand | | | | | | | | | | | |
|--|---|---|----------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|-----------|----------|---------|-------|-------|
| 土粒相对 密度 G_s | 最小干密度 $\rho_{dmin}/(g\cdot cm^{-3})$ | 最大干密度 $\rho_{dmax}/(g\cdot cm^{-3})$ | 相对密 实度 Dr | 限制粒径 d_{60}/mm | 有效粒径 d_{10}/mm | 不均匀系数 $C_u(d_{60}/d_{10})$ | 颗粒组成/% | | | | |
| | | | | | | | <0.075 mm | <0.25 mm | <0.5 mm | <1 mm | <2 mm |
| 2.73 | 1.04 | 1.39 | 0.53 | 0.420 | 0.138 | 3.04 | 2.9 | 29.8 | 67.8 | 94.6 | 100 |

的热传导性能，探讨了含水率、干密度、温度、颗粒粒径等因素对钙质砂热导率的影响，通过在钙质砂中掺入一定量石英砂分析了石英砂掺量对钙质砂热导率的影响，旨在为不同工况中岩土导热参数的合理选取以及钙质砂导热性能的改良提供一定的理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用钙质砂取自中国南海海域，呈白色，颗粒粒径一般大于 0.075 mm，采用筛分法进行颗粒级配分析；以煤油为液体进行了土粒相对密度试验；钙质砂样品的基本物理性质指标见表 1。

1.2 试样制备及测试过程

为了研究含水率 w 、干密度 ρ_d 、温度 T 、颗粒粒径 d 等因素对钙质砂热导率的影响，本次试验按照试样完全干燥到饱和 ($S_r>80\%$)， $\rho_d=1.05\sim1.35\text{ g/cm}^3$ ， $T=20^\circ\text{C}\sim75^\circ\text{C}$ ， $d=1\sim2$ ， $0.5\sim1$ ， $0.25\sim0.5$ ， $0.075\sim0.25\text{ mm}$ 四个粒组等条件制备试样，详见表 2。

表 2 试样制备的控制条件

| Table 2 Control conditions for sample preparation | | | | | |
|---|--------------------|-------------------------------|-----------------|------------|------------------------|
| 控制条件 | 含水率 w /% | 干密度 $\rho_d/(g\cdot cm^{-3})$ | 温度 $T/^\circ C$ | 粒径 d/mm | 掺砂量 $P_s/\%$ |
| ω | 0~35, $\Delta w=5$ | 1.2 | 20 | < 2 | 0 |
| ρ_d | 0~20, $\Delta w=5$ | 1.05 | 20 | < 2 | 0 |
| | | 1.15 | | | |
| | | 1.25 | | | |
| | | 1.35 | | | |
| T | 0~35, $\Delta w=5$ | 1.2 | 20 | < 2 | 0 |
| | | | 40 | | |
| | | | 60 | | |
| | | | 75 | | |
| d | 0~35, $\Delta w=5$ | 1.2 | 20 | 0.075~0.25 | 0 |
| | | | | 0.25~0.5 | |
| | | | | 0.5~1 | |
| | | | | 1~2 | |
| P_s | 10 | 1.2 | 20 | <2 | 0~100, $\Delta P_s=10$ |

试样制备及测试过程如下：①将风干后的钙质砂过标准筛，放置在烘箱中（105℃）烘干至恒重，按照 $\Delta\omega=5\%$ 的梯度分别配制表 2 中规定含水率的钙质砂试样（喷雾法或抽真空饱和法），用密封袋封存 24 h，以保证试样内水分均匀。②根据既定干密度称取一定质量的钙质砂置于 PVC 管模具中，分 2 层击实（层间用金属器具轻轻刮毛），试样尺寸为：高 $h=60\text{ mm}$ ，直径 $\varphi=75\text{ mm}$ 。③将密封好的试样放置在恒温恒湿箱中静置 12 h，待试样温度稳定后采用 Decagon 公司研制的

KD2 Pro 土壤热特性分析仪多次测量试样的热导率，取平均值作为试验结果^[10]；试样测试完毕后，取热探针附近的一定质量钙质砂用烘干法实测试样含水率。

2 试验结果与讨论

2.1 含水率的影响

20℃条件下钙质砂热导率与含水率的关系如图 1 所示。由此可知，当干密度一定时（ $\rho_d=1.2\text{ g/cm}^3$ ），钙质砂热导率随含水率增大而递增，热导率和含水率呈明显的线性关系（见图 1），饱和状态下（ $w=35\%$ ）钙质砂的热导率值可达到其干燥状态时的 4.5 倍。

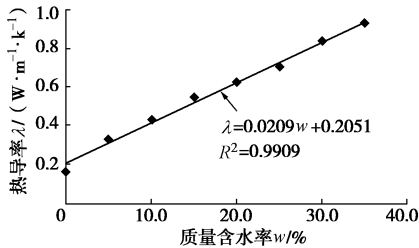


图 1 钙质砂热导率与质量含水率的关系曲线

Fig. 1 Relationship between thermal conductivity and water content

钙质砂热导率随含水率的变化规律可以如此解释：钙质砂是由固、液、气三相组成的多孔介质，液相（水）的热导率为 0.605 W/(m·K)，气相的热导率为 0.024 W/(m·K)，前者将近为后者的 25 倍，因此钙质砂的含水率状况直接决定了它的热导率；含水率较低时，砂通过颗粒点接触方式传递热量，传递方式单一，因而热导率值较小；随着含水率的增大，热导率值较大的水分逐渐取代了孔隙间的空气，热导率增加，而且水分的增加在砂内部形成的对流传热也导致热导率增加，因此，在以上各方面的影响下钙质砂的热导率随含水率的增大而递增，这与黏性土热导率随含水率的变化具有类似规律^[8-10]。

2.2 干密度的影响

图 2 为 20℃条件下钙质砂热导率与干密度的关系曲线。由图 2 可知，同一含水率条件下，钙质砂热导率随干密度的增加而增大，但在不同含水率条件下增长趋势并不相同。完全干燥的钙质砂，热导率随干密度增大而增大的趋势并不明显；含水率为 5% 时，钙质砂热导率随着干密度的增大先平缓增长而后急剧增加；随着含水率的增加（10%~20%），钙质砂热导率随干密度的增大而增大的趋势趋于一致，基本上都呈明显的线性关系。

钙质砂热导率随干密度的变化趋势可以解释为: 砂土干密度越大, 固态颗粒的质量与土的总体积之比就越大, 也就是说, 单位体积砂土中含有的固相物质就越多, 土颗粒排列的也就越紧密, 颗粒之间的接触面积相应的也就增加了, 导致其热导率值增大^[8-10]。

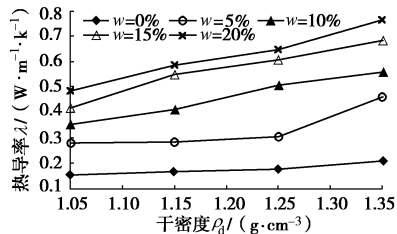


图 2 钙质砂热导率与干密度的关系曲线

Fig. 2 Relationship between thermal conductivity and dry density

2.3 温度的影响

图 3 为钙质砂热导率与温度的关系曲线。由图 3 可知: 干密度一定时, 钙质砂热导率随温度的增加而递增, 且温度越高增长越快, 但温度对于完全干燥的钙质砂却几乎没有影响。这是因为温度对于热导率的影响主要是由于水汽潜热传输效应, 即水蒸气在土壤孔隙中迁移促进传热^[12]; 在完全干燥情况下, 由于缺少了水分, 即缺少了造成这一影响的必要条件, 因此温度对于完全干燥的钙质砂并不会产生影响。

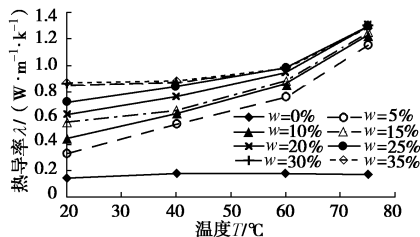


图 3 钙质砂热导率与温度的关系曲线

Fig. 3 Relationship between thermal conductivity and temperature

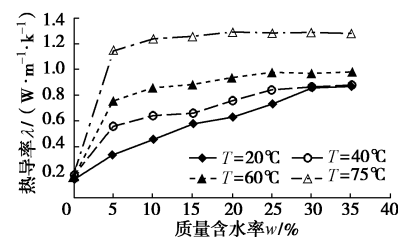


图 4 不同温度下钙质砂热导率与质量含水率的关系曲线

Fig. 4 Relationship between thermal conductivity and moisture content under different temperatures

图 4 为不同温度下钙质砂热导率与含水率的关系曲线。由图 4 可知, 温度不同, 钙质砂热导率随含水率的变化趋势不尽相同。T=20℃时, 热导率随含水率呈线性变化; T 大于 20℃时, 热导率随含水率的增大先急剧增大, 随后增长缓慢, 最后热导率值几乎保持不变, 且温度越高, 热导率在低含水率 (w=10%) 下急剧增大的幅度越明显。笔者认为, 在较高温度下热导率较早增加的原因是由于水蒸气潜热的释放, 砂土孔隙中的传热增加。温度升高, 水分的相变不仅会使

水分发生迁移, 也会产生水汽潜热传输效应 (LHT), 温度越高, LHT 越明显, 砂土热导率越大^[12]。当热导率达到极值后, 即使再增加水分含量, 水汽扩散的空间也受到了约束, 因而热导率趋于一个常数。

2.4 粒径的影响

图 5 表示不同含水率条件下钙质砂热导率与粒径的关系曲线。由图 5 可知, 对于不同粒组的钙质砂, 当含水率较低 (0%~10%) 和含水率较高 (30%~35%) 时, 钙质砂热导率随粒径不同略有浮动; 当含水率处于中间含水率 (15%~25%) 时, 钙质砂热导率随着粒径不同则基本保持不变。笔者认为, 在含水条件下, 水分成为影响钙质砂热导率的主导因素, 粒径对其影响则显得微乎其微, 这与文献[13]所得结果类似。

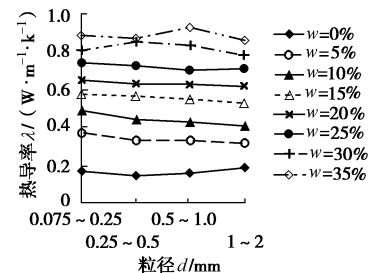


图 5 钙质砂热导率与粒径的关系曲线

Fig. 5 Relationship between thermal conductivity and particle size

2.5 钙质砂与石英砂的比较

图 6 为同一条件下钙质砂与石英砂热导率随含水率的变化曲线。由此可知: 钙质砂与石英砂热导率均随含水率呈明显的线性关系; 同一含水率条件下, 石英砂热导率比钙质砂热导率大, 干燥条件下前者约为后者的 4 倍, 饱和条件下将近 2 倍, 这与石英砂本身的热物理性质有关; 石英砂中含有大量的石英, 而石英与水、空气之间的热导率比值为 333:2:1^[14], 即当岩土中的石英含量较多时, 热导率相对会比较大。

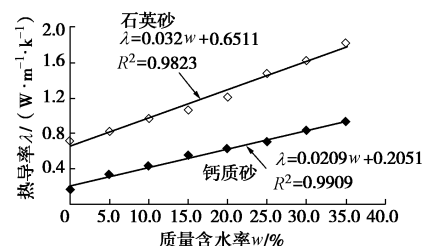


图 6 钙质砂与石英砂的热导率随含水率变化曲线

Fig. 6 Variation curves of thermal conductivity with content in calcareous sand and quartz sand

图 7 为钙质砂热导率随石英砂掺量变化的关系曲线。由图 7 可知, 钙质砂热导率随石英砂含量的增加而递增, 当混合砂中石英砂含量增加时, 热量更多的由石英砂传递, 整体导热性能提高, 所以钙质砂中掺入一定量石英砂可以改善其导热能力。另外, 石英砂化学稳定性好、导热性能高、价格低廉, 从实用经济性考虑, 石英砂是改善钙质砂热导率的良好添加剂。

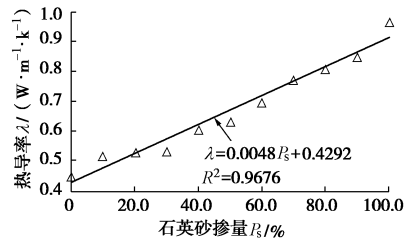


图7 钙质砂热导率随石英砂掺量变化曲线

Fig. 7 Variation curves of thermal conductivity of calcareous sand with content of quartz sand

3 结 论

(1) 其它条件一定时, 钙质砂热导率随含水率的增大而增大, 呈较好的线性关系; 钙质砂热导率随干密度的增大而增大, 当含水率为 0% 时, 增长趋势并不明显, 随着含水率越大, 干密度对热导率的影响越显著, 几乎呈明显的线性关系。

(2) 钙质砂的热导率随温度的升高而增大, 且温度越高增长越快, 但温度对于完全干燥的钙质砂几乎没影响; 不同温度下钙质砂热导率随含水率变化趋势也不相同, 温度为 20℃, 钙质砂热导率随含水率呈线性关系; 温度大于 20℃ 时, 钙质砂热导率随含水率的增大先急剧增大, 随后增长缓慢, 最后热导率值几乎保持不变, 而且温度越高, 热导率在低含水率 ($w=10\%$) 下急剧增大的幅度越明显。

(3) 对于不同粒组钙质砂, 颗粒粒径对钙质砂热导率影响甚微。

(4) 在相同条件下, 钙质砂热导率较石英砂热导率低, 这是因为石英这种矿物热传导性能良好, 当钙质砂中掺入一定量石英砂时, 可有效改善其导热性能。

参考文献:

- [1] 刘崇权, 杨志强, 汪 稔. 钙质土力学性质研究现状与发展[J]. 岩土力学, 1995, **16**(4): 74 - 83. (LIU Chong-quan, YANG Zhi-qiang, WANG Ren. Research status and development of mechanical properties of calcareous soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, **16**(4): 74 - 83. (in Chinese))
- [2] SPLADING M D, RAVILIOUS C, GREEN E P. World atlas of coral reefs[M]. Berkeley: University of California Press, 2001.
- [3] 虞海珍, 汪 稔. 钙质砂动强度试验研究[J]. 岩土力学, 1999, **20**(4): 6 - 11. (YU Hai-zhen, WANG Ren. Experimental study on dynamic strength of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, **20**(4): 6 - 11. (in Chinese))
- [4] 张家铭, 张 凌, 刘 慧, 等. 钙质砂剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**: 3010 - 3015. (ZHANG Jia-ming, ZHANG Lin, LIU Hui, et al. Experimental study on shear properties of calcareous sand[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**: 3010 - 3015. (in Chinese))
- [5] 王 帅, 雷学文, 孟庆山, 等. 侧限条件下高压对钙质砂颗粒破碎影响研究[J]. 建筑科学, 2017, **33**(5): 80 - 87. (WANG Shuai, LEI Xue-wen, MENG Qing-shan, et al. Effect of high pressure on calcareous sand particle breakage under lateral conditions[J]. Architectural science, 2017, **33**(5): 80 - 87. (in Chinese))
- [6] KING S Y, HALFTER N A. Underground power cables[M]. London: Longman, 1982.
- [7] SLEGEL D L, DAVIS L R. Transient heat and mass transfer in soils in the vicinity of heated porous pipes[J]. J Heat Transfer 1977, **99**(4): 541 - 546.
- [8] TANG A M, CUI Y J, LE T T. A study on the thermal conductivity of compacted bentonites[J]. Applied Clay Science, 2008, **41**(3): 181 - 189.
- [9] 王铁行, 刘自成, 卢 靖. 黄土导热系数和比热容的实验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(4): 655 - 658. (WANG Tie-xing, LIU Zi-cheng, LU Jing. Experimental study on coefficient of thermal conductivity and specific volume heat of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(4): 655 - 658. (in Chinese))
- [10] 曾召田, 范理云, 莫红艳, 等. 土壤热导率的影响因素实验研究[J]. 太阳能学报, 2018, **39**(2): 377 - 383. (ZENG Zhao-tian, FAN Li-yun, MO Hong-yan, et al. Experimental study on factors affecting soil thermal conductivity[J]. ACTA Energiæ Solaris Sinica, 2018, **39**(2): 377 - 383. (in Chinese))
- [11] 庄迎春, 谢康和, 孙友宏. 砂土混合材料导热性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(2): 261 - 265. (ZHUANG Ying-chun, XIE Kang-he, SUN You-hong. Experimental study on thermal conductivity of sand and soil mixtures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(2): 261 - 265. (in Chinese))
- [12] 徐云山, 曾召田, 吕海波, 等. 高温下红黏土热导率的变化规律试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, **25**(6): 1465 - 1473. (XU Yun-shan, ZENG Zhao-tian, LÜ Hai-bo, et al. Experimental study on the variation of thermal conductivity of red clay at high temperature[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, **25**(6): 1465 - 1473. (in Chinese))
- [13] 周媛媛, 江海峰, 李 辉, 等. 含水砂土导热系数实验研究[J]. 工程热物理学报, 2015, **36**(2): 265 - 268. (ZHOU Yuan-yuan, JIANG Hai-feng, LI Hui, et al. Experimental study of the thermal conductivity of sand with different moisture content[J]. Journal of engineering Thermophysics, 2015, **36**(2): 265 - 268. (in Chinese))
- [14] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. (SHAO Ming-an, WANG Quan-jiu, HUANG Ming-bin. Soil physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese))

(责编: 孙振远)