

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211120050

能源桩试验材料热力学参数测试研究*

亓学栋¹, 黎海星¹, 崔宏志¹, 史嘉鑫¹, 包小华¹, 齐贺²

(1. 深圳大学滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060;
2. 中建科技集团有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 提出在传统混凝土能源桩的基础上加入相变材料和钢纤维来提高能源桩的换热效率, 通过钢球封装相变材料不仅将相变材料应用于混凝土, 而且钢纤维和钢球的高导热特性可以改善相变材料导热性能上的不足, 提高相变储能混凝土的导热性, 为相变材料在能源桩工程的应用提供参考依据。通过相变钢纤维混凝土材料不同热力学参数测试的具体过程和结果发现纤维增强型混凝土破坏时没有明显的碎块和崩落, 是因为钢纤维与裂缝两边混凝土之间的粘结应力起着约束裂缝开展的作用, 从而降低混凝土脆性破坏程度; 另外钢纤维可以很好的补偿低导热的相变材料所带来的缺陷, 使能源桩整体的导热性能得以提高; 钢纤维会降低混凝土的比热容, 但砂率对混凝土的比热容有明显的影响。此结果会为后续评估和优化能源桩热交换系统提供参数指导。

关键词: 能源桩; 混凝土; 相变钢球; 钢纤维; 热力学参数

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-0929-08

Measurement of Thermodynamic Parameters of Energy Pile Test Materials

QI Xuedong¹, LI haixing¹, CUI Hongzhi¹, SHI Jiabin¹, BAO Xiaohua¹, QI He²

(1. Key Laboratory for Resilient Infrastructures of Coastal Cities, MOE,
College of Civil and Transportation Engineering, ShenZhen University, Shenzhen 518060, China;
2. China Construction Science and Technology Group Co.Ltd, Shenzhen 518000, China)

Abstract: This paper proposes to add phase change materials and steel fibers to the traditional concrete energy pile to improve the heat transfer efficiency of the energy pile. By encapsulating phase change materials with steel balls, the phase change materials are not only applied to concrete, but also the high thermal conductivity of steel fibers and steel balls can improve the thermal conductivity of phase change materials and improve the thermal conductivity of phase change energy storage concrete. It provides a reference basis for the application of phase change materials in energy pile engineering. Through the specific process and results of different thermodynamic parameters of phase change steel fiber reinforced concrete, it is found that there is no obvious fragment and collapse in the failure of fiber reinforced concrete. Because the bond stress between steel fiber and concrete on both sides of the crack restricts the development of crack, so as to reduce the brittle failure degree of concrete. In addition, the steel fiber can well compensate for the defects caused by low thermal conductivity phase

* 收稿日期:2021-11-20;修回日期:2021-12-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51925804)资助

作者简介:亓学栋(1996—),男,硕士研究生。主要从事能源地下结构方面研究工作。

E-mail:1900471024@email.szu.edu.cn

通讯作者:崔宏志(1974—),男,教授,博士,博导。主要从事高性能混凝土和能源地下结构方面研究工作。

E-mail:h.z.cui@szu.edu.cn

change materials to improve the overall thermal conductivity of the energy pile. The Steel fiber will reduce the specific heat capacity of concrete, but the sand ratio has an obvious effect on the specific heat capacity of concrete. This result will provide parameter guidance for the subsequent evaluation and optimization of the energy pile heat exchange system.

Keywords: energy pile, concrete, phase change steel ball, steel fiber, thermo-mechanical parameter

引言

能源桩通过桩内热交换管中的循环流体向地层中提取和存贮热量,其传热过程涉及到多种不同的媒介,因此使得能源桩的热传输过程十分复杂。掌握能源桩桩身材料参数是优化设计的前提,也是对能源桩系统性能评估与经济性评价的首要条件。传热过程一直是能源桩换热性能的研究重点,不同的桩身材料将直接影响桩体的热属性和换热效率。为了提高能源桩的换热效率,学者们从换热管管材,布管形式等方面都进行了大量研究。S. Selamat等^[1]和S. Lee等^[2]证明具有优良导热性的管道材料可以延迟管壁内的热积聚从而延长换热的有效期,但管道材料对有效换热率的影响很小。S. Lee等^[2]研究了采用新型钢管热交换器能源桩的适用性,发现钢管换热器现浇能源桩的热性能比传统的现浇能源桩高30%。许多学者针对能源桩各种不同的布管形式,包括U型^[3],双U型^[4],3U型,W型,螺旋型,锥螺旋型等方式都进行了详细研究,发现热交换能力与安装密度及管长并不完全成正比,过小的间距会在热交换管的各回路之间产生热干扰。然而单纯改变换热管材质和形状并不能直接提高桩身的热物理性质,所以也有许多学者改变桩身材料提升混凝土的导热及储热能力,从而达到提高能源桩换热性能的目的。Q. Li等^[5]、赵嵩颖等^[6]、黄维等^[7]通过加入高导热的石墨粉、纤维等材料来增强能源桩的传热性能,发现改变桩身混凝土材料的传热效率是提高能源桩系统换热效率的有效方法。L. R. Ingersoll等^[8]提出了无限长线热源模型并应用于分析能源桩传热问题。肖建庄等^[9]研究了混凝土中各个因素对其导热系数的影响,发现干湿状态、骨料的取代率对混凝土的导热系数影响较大。G. H. Go等^[10]认为能源桩钻孔壁的温度是影响热响应的一个重要因素,基于有效钻孔热阻的回归方程分析各项参数时认为导热系数对于钻孔热阻的影响最大。

另外,桩身材料的蓄热量对能源桩的换热效率

也起着至关重要的作用^[11],S. Park等^[12]发现混凝土的蓄热量在短期内对能源桩的热性能的影响更大。基于此,本文提出了四种不同桩身材料的能源桩,在传统能源桩的基础上加入相变材料和钢纤维来提高能源桩的换热效率,该方法不仅将相变材料应用于混凝土,同时钢球本身的高强度也很好的保证了混凝土的耐久性能,还利用钢纤维和钢球的高导热特性来改善相变材料导热性能上的不足,提高了相变储能混凝土的导热性,这为相变材料在能源桩领域的实际应用提供了研究基础。但改变桩身材料直接导致能源桩桩身的热参数改变,所以本文系统阐述了相变混凝土能源桩的不同热力学参数测试的具体过程和结果,为后续评估和优化能源桩系统提供参数指导。

1 试样制作

1.1 相变钢球

本文相变钢球的详细制作方法以及过程参考Z. Dong等^[13]文献,采用不锈钢空心钢球来封装石蜡,规格为外径为19 mm,厚度为0.3 mm,开孔直径为2.5 mm。封装过程为先将加工好的带孔空心钢球放入钢桶,并倒入液体石蜡浸没,确保石蜡液面高出钢球一定高度。随后将钢桶放入真空干燥箱中,设置温度为60℃,抽真空静置12 h后取出,用拉铆钉封住钢球的小孔,并用树脂封闭铆钉孔,以确保石蜡不出现泄漏。如图1所示为封装好相变材料的钢球,其作为一个整体的储能介质具有一定的强度,测得其综合密度为1.5 g/cm³。

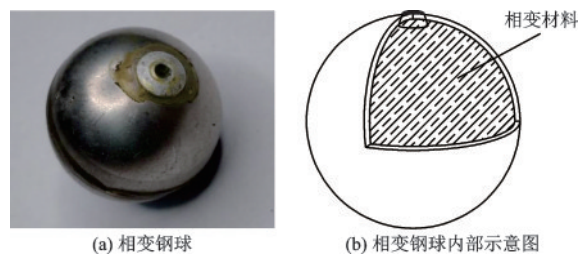


图1 封装相变材料的钢球

Fig.1 Steel ball encapsulated with phase change materials

1.2 混凝土材料配合比

本文在普通素混凝土和相变混凝土的基础上提出了新型纤维增强型普通混凝土和纤维增强型相变混凝土:纤维增强型普通桩(将钢纤维按照总体积的0.5%掺入桩内);纤维增强型相变桩(将钢纤维按照总体积的0.5%掺入桩内,另外用空心钢球封装石蜡代替部分粗骨料),其中钢纤维的规格为2×13 mm(直径为2 mm,长为13 mm)。封装相变材料石蜡的空心钢球材质能够作为传热媒介提高桩体的导热系数,以实现与相变材料的快速热交换,石蜡的主要参数见表1。混凝土的材料配合比参照《自密实混凝土应用技术规程》^[14]。用等体积法以封装有相变材料的钢球替代普通混凝土中的10~19 mm的粗骨料,普通混凝土和相变混凝土的砂率比纤维增强型普通混凝土和纤维增强型相变混凝土的砂率低3%,桩体浇筑配合比见

表2,纤维增强型相变混凝土拌合物如图2所示。

表1 工业石蜡的热物理特性

Table 1 Thermophysical properties of industrial paraffin

热物 理性 参数	密度/ (kg·m ⁻³)	导热系数/ (W·(m·K) ⁻¹)	比热容/ (J·(g·°C) ⁻¹)	相变 温度/ (°C)	潜热/ (J·g ⁻¹)
固态	833.8	0.3	2.16	23±1	188.04
液态	786.7	0.167	2.02		

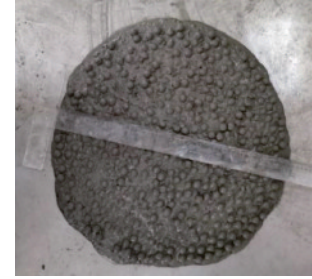


图2 相变钢球混凝土

Fig.2 Concrete with phase change steel balls

表2 1 m³混凝土材料用量

Table 2 Material contents in 1 m³ concrete

材料	水	水泥	粉煤灰	砂	5~10 mm 碎石	10~19 mm 碎石	相变 钢球	钢纤维	减水剂/ %
普通混凝土	162.8	407.1	174.5	600	162	864	—	—	0.250
相变混凝土	162.8	407.1	174.5	600	162	—	480	—	0.205
纤维增强型普通混凝土	162.8	407.1	174.5	649	110	864	—	3.9	0.241
纤维增强型相变混凝土	162.8	407.1	174.5	649	110	—	480	3.9	0.192

表3 混凝土抗压强度

Table 3 Compressive strength of concrete

混凝土试样类型	7 d立方体 抗压强度/ MPa	28 d立方体 抗压强度/ MPa
普通混凝土	56.08	66.54
相变混凝土	25.51	25.83
纤维增强型普通混凝土	49.62	69.56
纤维增强型相变混凝土	32.8	40.5

2 材料热力学参数测试

2.1 抗压强度及弹性模量

2.1.1 抗压强度

混凝土的抗压强度是衡量混凝土力学性能最重要的一项指标,对其力学性能以及热学性能起着决定性作用^[15],本文根据GB 50081—2019规范^[17]要求,混凝土强度等级为C40时,加载速率应在0.5~0.8 MPa/s,实验采用的加载速率为0.65 MPa/s,抗压强度测试采用尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的非标准立方体试块,最终的计算结果乘以0.95的折减系数,最终测试结果如表3和图3所示。从结果可以看出,相变混凝土相较于普通混凝土其7 d,28 d抗压强度均有较大下降,分别下降了55%,61%;纤维增强型相变混凝土相较于纤维增

强型普通混凝土的7 d,28 d抗压强度分别下降了34%,42%,而且相变钢球混凝土的强度随龄期增长相对缓慢。这主要是因为钢球的表面很光滑,代替石子加入混凝土后,与石子相比,其在混凝土中的机械咬合力及黏结力都要明显变弱,从而导致混凝土强度下降,但依然满足桩基设计规范中对混凝土抗压强度的要求。如图4所示,钢纤维的掺入虽

然没有较明显提高其抗压强度,但纤维增强型混凝土破坏时没有明显的碎块和崩落,具有较好的完整性。这是因为钢纤维的加入能跨越裂缝两边,使钢纤维与裂缝两边混凝土之间的黏结应力起着约束裂缝开展作用。

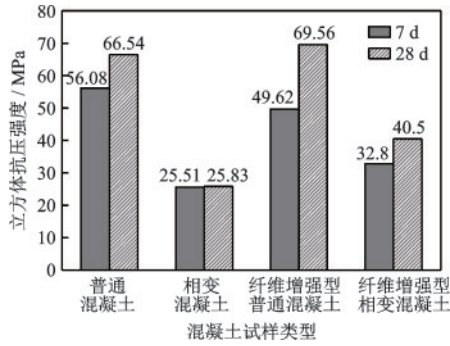
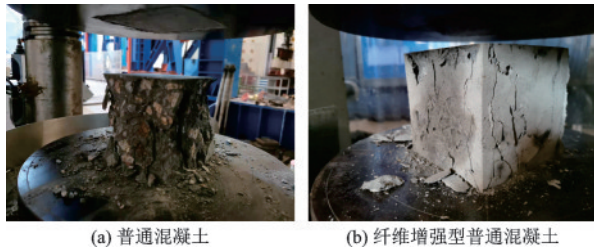


图3 混凝土抗压强度对比

Fig.3 Compressive strength test of concrete



(a) 普通混凝土 (b) 纤维增强型普通混凝土

图4 混凝土抗压强度试验

Fig.4 Comparison of concrete compressive strength

2.1.2 弹性模量

混凝土的弹性模量一般定义是单向应力状态下应力除以该方向的应变,由单轴压缩实验测得,试验采用100 mm×200 mm的圆柱体混凝土试块,由3 000 kN的Mechanical Testing & Simulation-2000型数显压力机,以及位移和压力传感器组合完成。如图5所示,四个位移计被铝制框架固定,框架分为上下两层,分别固定在试样的上下两端,两端距离为10 cm。试样的变形带动位移计拉压,从而测出试样轴向的位移,并计算出应变。MTS压力机的加压由位移控制,速率为0.2 mm/min。根据混凝土单轴压缩实验求得的普通混凝土与相变混凝土的弹性模量分别为34.8、20.1 GPa;纤维增强型普通混凝土与纤维增强型相变混凝土的弹性模量分别为35.6、14.1 GPa。可以看出,与普通混凝土相比,相变钢球的加入对混凝土弹性模量的影响明显,下降了42%;与纤维增强型普通混凝土相比,相变钢球的加入使混凝土的弹性模量下降了60%。但是对比普通混凝土和纤维增强型普通混凝土,钢纤维

的加入使混凝土的弹性模量提高了2.2%,说明钢纤维不能显著提高混凝土的力学性能,测试结果如表4和图6所示。



(a) 圆柱体混凝土试块 (b) 弹性模量实验装置

图5 弹性模量试验 (100 mm×200 mm 试块)

Fig.5 Elastic modulus test (100 mm×200 mm specimens)

表4 混凝土的弹性模量

Table 4 Elastic modulus of concrete

混凝土试样类型	弹性模量/GPa
普通混凝土	34.8
相变混凝土	20.1
纤维增强型普通混凝土	35.6
纤维增强型相变混凝土	14.1

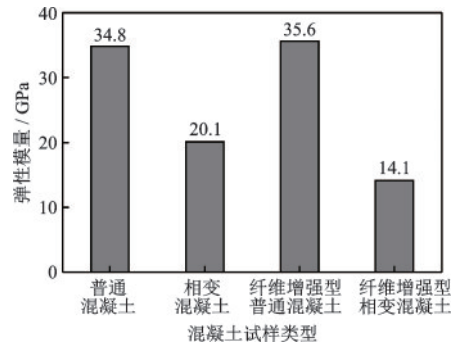


图6 混凝土弹性模量对比

Fig.6 Comparison of concrete elastic moduli

2.2 导热系数

2.2.1 混凝土导热系数

导热系数是材料热物性参数之一,对热传导有着重要影响,其参数值的准确性有着重要的理论和实用价值^[16]。利用多层平壁稳定导热原理测试桩体的导热系数,通过已知的低导热系数平板材料与待测高导热系数平板材料叠加复合测试,然后反算出高导热材料的导热系数。多层稳定导热测量如图7所示,根据式(1)傅立叶定律:

$$q = \frac{\lambda_T}{\delta} \Delta T \quad (1)$$

其中, q 是热流量, λ_T 是在平均温度 T 下样品的导热



图7 多层平壁稳定导热测量

Fig.7 Measurement of stable thermal conductivity of the multi-layer flat-wall

系数, δ 是厚度, ΔT 是温差。假设各层之间接触严密, 不考虑接触热阻, 则此接触面温度相等, 在稳定导热下通过各层平壁的单位面积热流量相等, 因此两个平板之间的导热系数关系可以用如式(2)表示:

$$\frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_t}{\lambda_t} = \frac{\delta_{total}}{\lambda_{total}} \quad (2)$$

式中, λ_c 和 δ_c 分别是校准样品的导热系数和厚度。 λ_t 和 δ_t 分别是待测试样的导热系数和厚度。 λ_{total} 和 δ_{total} 分别是两个板的总导热系数和总厚度。

采用 HFM436 型导热系数测量仪进行测量, 其测量范围为 0.005~0.5 W/m·K, 采用尺寸为 200 mm×200 mm×45 mm 的混凝土试样板测量混凝土的导热系数。为了减少接触热阻的影响, 测试前在两块板之间均匀涂抹一层导热硅脂。最终测量并计算得到的不同类型能源桩桩身材料的导热系数见表 5, 对比相变混凝土和普通混凝土的结果, 可以发现加入相变材料使混凝土的导热系数降低了 36%, 加入钢纤维之后导热系数恢复到普通混凝土的水平, 说明钢纤维可以很好的补偿低导热的相变材料所带来的缺陷, 保持能源桩整体的导热性能。对比纤维增强型普通混凝土和普通混凝土, 也可以发现 0.5% 钢纤维的加入对导热系数的提升作用较大。因为混凝土试块测试环境为干燥状态, 而实际能源桩运行环境主要处于饱和或非饱和状态环境中, 孔隙水会产生对流传热, 进而提高混凝土的导热系数。

2.2.2 土体导热系数

采用西安夏溪电子科技有限公司生产的 TC—3000 型导热系数测量仪测量黏土的导热系数。测试前用土工环刀将含水率为 27.76% 的黏土按天然密度 1.914 g/cm³ 制作作为上下平整的均匀试样, 测量时将两块试样叠加放置并将导热测量仪的测量探头放到中央测量黏土的导热系数, 制作了三组黏土

表 5 材料导热系数

Table 5 Thermal conductivity of materials

材料种类	导热系数 W/(m·K)
饱和砂土	2.7
非饱和黏土	1.413
普通混凝土	1.61
相变混凝土	1.03
纤维增强型普通混凝土	1.89
纤维增强型相变混凝土	1.61

试样测试取平均值。砂土的导热系数测量也是基于相同原理, 最终测得土体的导热系数, 其中被测土体密度与模型箱中土体密度相同, 测试示意图如图 8 所示, 测得的导热系数如表 5 和图 9 所示。



(a) 导热系数测量仪

(b) 黏土导热系数测量



(c) 砂土导热系数测量

图 8 导热参数测量

Fig.8 Measurement of thermal conductivity parameters

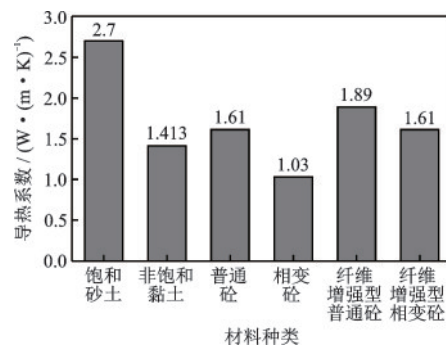


图 9 导热参数对比

Fig.9 Comparison of concrete thermal conductivity

2.3 比热容

比热容是指使 1 kg 被测试样温度升高 1K 需要消耗的热量,本节基于热量守恒原理^[18]设计了一套比热测量装置,装置示意如图 10 所示,测试设备由加热/降温设备、绝热钢筒、温度采集仪和温度传感器组成,为证明该装置的准确性,利用钢片进行检测,已知钢片比热容为 $0.46 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,经该装置多次测试比热容为 $0.48 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,误差小于 5%,证明该装置测试精度可靠。试验时先称量好混凝土试块的质量,再根据需要测量的状态,将试块放入水浴锅或者冰箱中,水浴加热时为排除混凝土浸水带来的误差,在试块外层包裹一个塑料袋。为确保实验的精确性,试块内外温度一致后,再放置一段时间以确保相变材料的温度充分均匀传递。待到试块内外温度充分均匀后,在隔热钢桶中称量并调节水温为 23°C ,保证试块放入桶中淹没一段高度即可,密封桶口稍微摇动几下保证水与钢桶温度均匀,然后将混凝土试块拿出迅速转移到盛水的隔热筒中并盖好桶盖。为加快传热以及保证测量水温的均匀性,测试时需要轻微摇晃测试桶,当水的温度和混凝土的温度达到平衡时,说明混凝土和水的交换完成。

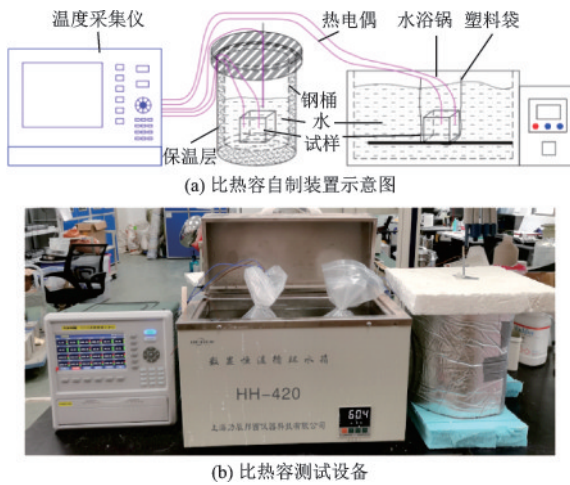


图 10 比热容测试

Fig.10 Specific heat capacity test

由于相变材料存在相变温度 23°C ,会出现相态的变换,所以为测量出相变材料处于固态和液态时的比热容,在两种温度设定中进行测量,分别为水温和混凝土温度高于和低于相变温度。根据能量守恒,混凝土释放的热量等于水和容器吸收的热量,已知水的比热容,即混凝土比热容根据以下公

式计算:

$$C = \frac{(m_{\text{water}} + E)C_{\text{water}}(T_{\text{balanced}} - T_{\text{water}})}{m_{\text{concrete}}(T_{\text{concrete}} - T_{\text{balanced}})} \quad (3)$$

式中, m_{water} 为水的质量, E 为容器质量换算的水当量(水温与容器温度一致), C_{water} 为水的比热容, T_{water} 为水的初始温度, T_{concrete} 为混凝土的初始温度, T_{balanced} 为平衡后的温度。最终测量结果如表 6 和图 11 所示。赵若红等^[19]发现单掺钢纤维混凝土的比热容随掺量增加而减小,从结果看出普通混凝土的比热容小于纤维增强型普通混凝土比热容,说明砂率会影响混凝土的比热容。对比相变混凝土和纤维增强型相变混凝土的测试结果可以发现,不同相态的比热容会略有差别,这是因为相变混凝土本身为复合材料,所以同一配比试块的测试结果也会存在较大的离散性,但单次测试结果取平均值后较为准确。

表 6 材料的比热容

Table 6 Specific heat capacity of materials

材料种类	比热容/ $(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$
普通混凝土	856
相变混凝土	990(液态)
	1255(固态)
纤维增强型普通混凝土	944.7
纤维增强型相变混凝土	1069.9(液态)
	1196(固态)

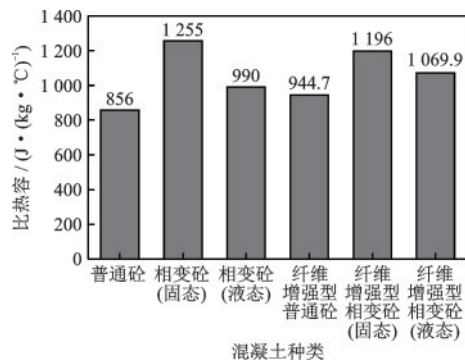


图 11 混凝土比热容对比

Fig.11 Comparison of concrete specific heat capacity

2.4 热膨胀系数

热膨胀系数是量度固体材料热膨胀程度的物理量,是其长度或体积的相对变化量。热膨胀系数的测量参考张国梁等^[20]提及的方法,使用应变片对试块在不同温度下分别进行测量,通过温度与应变

关系计算混凝土热膨胀系数。测量装置原理如图12所示,首先将应变片对称贴在混凝土试块表面,并涂上防水胶,在试块底部涂油,并用防水袋封好。为保证试块尽可能无约束自由膨胀,在水浴箱底部放一块玻璃平板,平板上放置金属圆管,然后将试块平放在金属圆管上。设置水浴箱温度从25℃开始,以10℃温差逐级上升,直至55℃。每个温度保持2h以确保混凝土试块变形完全,由应变采集仪记录数据。试验结束后,绘制应变随温差变化的散点图,并进行线性拟合,拟合曲线的斜率即为被测混凝土的热膨胀系数。最终得到结果如表7和图13所示,对比普通混凝土和纤维增强型普通混凝土,可以发现钢纤维的加入使热膨胀系数增加了16.2%;分别对比普通混凝土和相变混凝土、纤维增强型普通混凝土和纤维增强型相变混凝土,能看出相变钢球的加入使该系数增加了50.8%、49.9%。

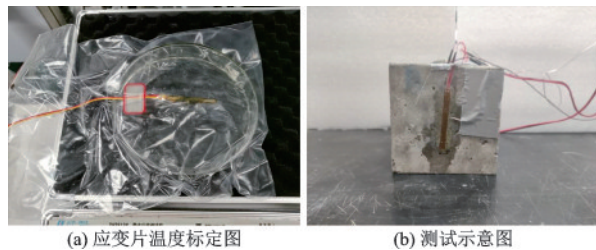


图12 热膨胀系数测试

Fig.12 Thermal expansion coefficient test

表7 混凝土的热膨胀系数

Table 7 Thermal expansion coefficient of concrete

试样材料	热膨胀系数/ $(10^{-6} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$
普通混凝土	6.77
相变混凝土	10.21
纤维增强型普通混凝土	7.87
纤维增强型相变混凝土	11.80

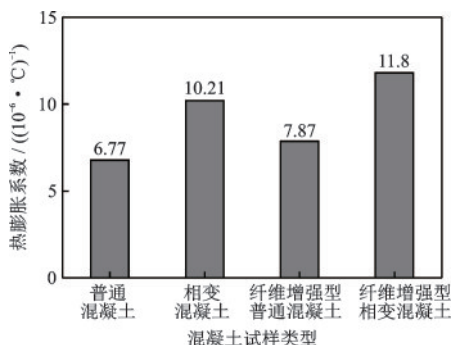


图13 混凝土热膨胀系数对比

Fig.13 Comparison of thermal expansion coefficient of concrete

3 结论

本文系统阐述了能源桩测试中相关参数的测试方法及试验细节,包括单轴抗压强度、弹性模量、导热系数,比热容、热膨胀系数,通过测试四种不同类型能源桩不同参数可以对比出各自的优势和劣势。相变材料可以提高桩身潜热,但是会大幅度降低桩体的热物理性参数,而钢球和钢纤维能够在一定程度上弥补低导热相变材料所带来的缺陷,进而提高能源桩的桩土间换热,提高换热效率。可以总结出以下几点:

(1) 钢纤维和相变钢球的加入降低了混凝土的弹性模量,但钢纤维的加入使混凝土的弹性模量提高不明显,说明钢纤维不能显著提高混凝土的力学性能。

(2) 因为钢纤维的加入能跨越裂缝两边,使钢纤维与裂缝两边混凝土之间的黏结应力起着约束裂缝开展作用。

(3) 加入相变钢球,混凝土导热性能大幅度降低,钢纤维可以很好的补偿低导热的相变材料所带来的缺陷,使能源桩整体的导热性能得以提高。

(4) 钢纤维会降低混凝土的比热容和增大材料的热膨胀系数,而相变材料在不同相态时的混凝土比热容会有相反的差异。

参考文献:

- [1] Selamat S, Miyara A, Kariya K. Numerical study of horizontal ground heat exchangers for design optimization[J]. Renewable Energy, 2016, 95: 561-573.
- [2] Lee S, Park S, Kim D, et al. Dual performance of novel steel pipe heat exchangers equipped in cast-in-place energy pile[J]. Energy and Buildings, 2021, 234(2): 110725.
- [3] 陈忠购,赵石烧,张正威. 内置并联U形埋管能量桩的换热性能研究[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 238-243. Chen Z G, Zhao S Y, Zhang Z W. Heat transfer analysis of energy piles with parallel connected U-Tubes[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 238-243. (in Chinese)
- [4] Gashti E, Uotinen V M, Kujala K. Numerical modeling of thermal regimes in steel energy pile foundations: a case study[J]. Energy & Buildings, 2014, 69(2): 165-174.

- [5] Li Q, Chen L, Ma H, et al. Enhanced heat transfer characteristics of graphite concrete and its application in energy piles[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018: 1-12.
- [6] 赵嵩颖,蒋大伟,宋晓东. 能量桩储热技术材料选取研究[J]. *吉林建筑大学学报*, 2013, 30(6): 32-35.
Zhao S Y, Jiang D W, Song X D. The research on materials selection about heat accumulation technology of energy pile[J]. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 2013, 30(6): 32-35. (in Chinese)
- [7] 黄维,骆进,谢中识,等. 温度和应力下能源桩桩身加筋混凝土变形性质试验研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(7): 2491-2498.
Huang W, Luo J, Xie Z S, et al. Experimental study of deformation properties of reinforced concrete in energy piles under temperature and stress[J]. *Rock and Soil Mechanics*. 2018, 39(7): 2491-2498. (in Chinese)
- [8] Ingersoll L R, Zobel O J, Ingersoll A C. Heat conduction: with engineering geological and other applications [J]. *Physics Today*, 1955, 8(3): 17.
- [9] 肖建庄,宋志文,张枫. 混凝土导热系数试验与分析[J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(1): 17-21.
Xiao J Z, Song Z W, Zhang F. An experimental study on thermal conductivity of concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(1): 17-21. (in Chinese)
- [10] Go G H, Lee S R, Yoon S, et al. Design of spiral coil PHC energy pile considering effective borehole thermal resistance and groundwater advection effects [J]. *Applied Energy*, 2014, 125: 165-178.
- [11] Han C, Yu X B. An innovative energy pile technology to expand the viability of geothermal bridge deck snow melting for different United States regions: computational assisted feasibility analyses[J]. *Renewable Energy*, 2018, 123: 417-427.
- [12] Park S, Lee S, Oh K, et al. Engineering chart for thermal performance of cast-in-place energy pile considering thermal resistance [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 130: 899-921.
- [13] Dong Z, Cui H, Tang W, et al. Development of hollow steel ball macro-encapsulated PCM for thermal energy storage concrete[J]. *Materials*, 2016, 9(1): 59.
- [14] 自密实混凝土应用技术规程:JGJ/T283—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
Technical specification for application of self-compacting concrete: JGJ/T283—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [15] 阎继红,林志伸,胡云昌. 高温作用后混凝土抗压强度的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2002, 35(5): 17-19.
Yan J H, Lin Z S, Hu Y C. The effects of high temperature on compressive strength of concrete [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2002, 35(5): 17-19. (in Chinese)
- [16] 焦雯,黄海明. 导热系数对热传导的影响[C]//北京力学学会第17届学术年会论文集. 北京:北京力学学会, 2011:22-24.
Jiao W, Huang H M. The influence of thermal conductivity on heat conduction[C]//Proceedings of the 17th Annual Conference of Beijing Mechanics Society. Beijing: Beijing Mechanics Society, 2011: 22-24. (in Chinese)
- [17] 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.
- [18] 夏才初,张国柱,孙猛. 能源地下结构的理论及应用[M]. 能源地下结构的理论及应用, 2015.
Xia C C, Zhang G Z, Sun M. Theory and application of energy underground structure[M]. Theory and Application of Energy Underground Structure, 2015. (in Chinese)
- [19] 赵若红,甘可,傅继阳. 钢纤维石墨导电混凝土比热的试验研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2014,(2): 40-43.
Zhao R H, Gan K, Fu J Y. Experimental research on specific heat of conductive concrete with steel fiber graphite[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2014, (2): 40-43. (in Chinese)
- [20] 张国梁,李松,. 用应变片测量水泥混凝土热膨胀系数的试验方法[J]. *城市道桥与防洪*, 2012, 2: 112-114,12.
Zhang G L, Li S. Test method of strain gauge to measure thermal expansion coefficient of cement concrete [J]. *Urban Roads, Bridges & Flood Control*, 2012, 2: 112-114, 12. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)