

相变储能大体积混凝土的控温性能

史巍^{1,2}, 张雄¹, Juergen Dreyer³

(1. 同济大学 建筑材料研究所, 上海 200092; 2. 东北电力大学 建筑工程学院, 吉林 吉林 132012;
3. 维也纳工业大学 土木工程学院, 维也纳 1040)

摘要: 提出相变控温储能材料机敏控制混凝土结构温度裂缝技术途径. 在混凝土浇注过程中将相变材料掺入使之与混凝土结构一体化, 利用相变材料在特定温度范围的热效应控制混凝土内部温度场, 从而机敏控制温度应力防止温度裂缝. 通过自行设计的温度测试系统, 对相变控温混凝土控温性能进行实测研究, 结果表明: 相变材料不但可以降低大体积混凝土的最高绝热温升值, 而且可以降低大体积混凝土升温速度和降温速度, 从根本上防止了大体积混凝土温度裂缝的出现.

关键词: 大体积混凝土; 温度裂缝; 相变材料; 温度控制
中图分类号: TU 528 **文献标识码:** A

Temperature Control Properties of Mass Concrete with Phase Change Material

SHI Wei^{1,2}, ZHANG Xiong¹, Juergen Dreyer³

(1. Building Material Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Civil Engineering Institute, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 3. Vienna University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Vienna 1040, Austria)

Abstract: Phase change materials (PCM) can be applied in mass concrete to prevent thermal cracks. Phase change material was added to fresh concrete when casting, latent heat in phase change material was released or absorbed in a certain temperature to control temperature in mass concrete. Temperature measurement system was designed to test temperature-control properties of PCM concrete. The results show that phase change material can reduce maximum temperature in concrete; furthermore, it can reduce temperature increase and decrease velocity so as to prevent thermal cracks in mass concrete.

Key words: mass concrete; temperature cracks; phase change materials; temperature control

大体积混凝土温度裂缝是由于混凝土结构内部温度场温差形成温度应力导致混凝土结构开裂, 如大型建筑的基础、桥梁、大坝、建筑物的墙板、楼板等均存在不同程度的温度裂缝. 混凝土与其他材料一样具有热胀冷缩的性质, 混凝土每升高 1 °C, 每米膨胀 0.01 mm. 在混凝土水化硬化初期, 水泥水化释放大量热量, 由于混凝土是热的不良导体, 混凝土内外之间形成较大温差, 产生较大的拉应力, 导致混凝土开裂. 如长江三峡大坝工程和东海大桥桥墩大体积混凝土结构都出现了不同程度的温度裂缝. 在混凝土结构使用期间, 由于环境温度的变化使混凝土内外或不同区域形成温度场差, 也会导致温度裂缝的形成^[1-2].

目前, 工程上控制温度裂缝措施主要有^[3-5]: 通过选用低热水泥、以冰屑代替部分拌和水以及表面保温养护等措施来控制混凝土水化硬化过程的温度应力; 对于大体积混凝土结构(如大型桥墩、大坝等), 通过预埋冷却水管, 通循环冷却水进行控制混凝土内部温度场. 上述措施工艺复杂、工程造价高, 而且不能有效控制温度裂缝的形成, 目前混凝土构筑物几乎都不同程度存在温度裂缝, 需耗费大量的人力和物力维修温度裂缝. 温度裂缝问题已经成为国际范围土木工程亟待解决的问题.

1 相变控温储能是机敏控制混凝土结构温度裂缝技术途径

结构混凝土内部温度场随环境温度和混凝土水化热变化而变化, 其温度应力变化具有随机性和方向交替变化的特点, 采用构造配筋措施抗裂难以奏

收稿日期: 2007-09-10

基金项目: 上海市科委专项基金资助项目(0452nm04)

作者简介: 史巍(1973—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为新型建筑材料. E-mail: shiwei73@hotmail.com

张雄(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为建筑功能材料. E-mail: xiong_zhang@vip.sina.com

效.因此,控制温度的机制需与混凝土结构有机一体化,才可能同步感应内部温度变化,实时启动控制温度机制,防止温度裂缝的形成.因此,根据结构混凝土内部温度应力变化具有随机性和方向交替变化的特点,探索利用相变材料 PCM (phase change material) 在特定温度范围的热效应控制混凝土内部温度,以达到机敏控制温度应力防止温度裂缝目的,为机敏控制混凝土结构温度裂缝开辟了新的技术途径.

相变材料可以在等温或近似等温情况下,发生相变转化吸收或释放的一定相变潜热,与周围介质或环境进行热量的存储和交换,从而达到热能储存和温度调控功能^[6-8].与显热式贮热相比,潜热式贮热的贮热密度高,材料的相变潜热要远远高于材料的显热,而且潜热式贮热的贮、释热过程近似等温.将掺入相变材料并具有一定的控温效果的混凝土称为相变控温(PCM)混凝土.

2 实验方法

2.1 原材料选择与相变材料的取代方法

水泥标准采用的是欧洲标准, Portlandkompositzement, EN197-1-CEMIII/A-M(S-L) 42.5N WT38, 为波特兰复合水泥,其水泥熟料质量分数为 80%~94%,含有高炉渣和石灰石 2 种矿物掺和料,为强度等级 42.5 MPa 的非早强型水泥.

选择石蜡作为温控相变材料.石蜡作为储热相变材料的优点是:相变潜热高、性能稳定、无毒、无腐蚀性、价格便宜、无过冷及析出现象.而且石蜡具有适合于建筑使用的特性,如石蜡本身具有一定抗张强度、一定的粘结性、柔韧性和密封性,在建筑上可用于防水,提高建筑物耐久性.在选择相变材料的相变温度范围时,相变温度不能太低,否则会在混凝土运输和浇筑过程中发生相转变,损失一部分潜热,如在夏季施工过程中,环境温度可达 30 ℃,太阳辐射物体表面温度可达四十几度.同时相变材料的相变温度范围应在大体积混凝土最高温度范围之内,通常大体积混凝土内部温度最高可达 70 ℃ 左右,因此相变材料相转变温度范围在 50~60 ℃ 间即可.试验中所用石蜡相变温度范围为 54~58 ℃,潜热为 200 J·g⁻¹,为德国 Sasolwax 公司生产.

石蜡的掺入方法采用体积代砂法,即采用石蜡取代等体积的细骨料即砂的体积的方法.由于石蜡取代细骨料的用量,因而石蜡与细骨料的颗粒级配将直接

影响相变控温混凝土的物理力学性质.混凝土配合比为 $m_C : m_W : m_S : m_G = 350 : 200 : 700 : 1100$.石蜡掺量为混凝土质量分数的 4%,其中 m_C, m_W, m_S, m_G 分别为水泥、水、砂子、石子的质量.按照体积代砂法,按比例称取一定量石蜡和细骨料混合物进行筛分试验.试验结果见表 1,石蜡颗粒采用体积代砂法后,颗粒级配符合要求,满足 II 区的筛分曲线.

表 1 筛分试验结果

Tab.1 Sieve analysis experiment results

筛孔尺寸/mm	累计筛余/%	标准的级配区 (II区)/mm
5.000	3.62	10~0
2.500	22.11	25~0
1.250	49.38	50~10
0.630	69.73	70~41
0.315	87.60	92~70
0.160	95.76	100~90

2.2 试验方法设计

(1) 测温试件尺寸设计.实际工程中,大体积混凝土水泥水化产生水化热,这部分热量一部分用于混凝土内部温度的升高,另一部分通过混凝土表面散发出去.由于大体积混凝土体积较大,长度和宽度远大于厚度,故可假设混凝土热量主要由混凝土上表面散发出去.由于试验场地和试验条件所限,可制作尺寸较小的混凝土试件,在混凝土试件的四周和底面用 100 mm 厚的聚苯板和 27 mm 厚的木板做外保温层.木板之间用螺丝拧紧,苯板之间用胶密封.可近似认为此时混凝土四周处于绝热状态,水泥水化产生的热量主要通过上表面散发出去,来模拟大体积混凝土一维散热情况的温度分布.

混凝土长度和宽度方向尺寸远大于厚度时,混凝土主要是靠上表面的辐射、对流和基底传导方式散热,对于此类大体积混凝土从边缘和角点向内进去 2 倍厚度以上的区域的散热条件是接近的,在此范围内有着极其相近的温度场分布,因此试件水平方向上的尺寸可小些;散热主要是靠竖直方向进行散热,试件应在纵向具有一定深度,以测试不同厚度位置上混凝土层的温度分布.权衡以上各因素后,将试件尺寸制为 160 mm × 160 mm × 400 mm,试件的四周和底面为 100 mm 厚的聚苯板和 27 mm 厚的木模板,如图 1 所示.

(2) 测点的布置.由于试件的四周结构尺寸小,而且周围的绝热材料具有保温作用减少热量的散

失,水平方向上温度差别不大,因此在水平方向未设计温度测点.在竖直方向上布置了4个测温点,由基底向表面方向上分别为:测温点1、测温点2、测温点3和测温点4,以测试不同深度混凝土温度变化情况.测温点1位于混凝土试件和基底相接触处,反映的是混凝土与基础相邻处的温度变化情况;测温点2和测温点3反映中心点温度;测温点4距离混凝土表面只有40 mm,反映混凝土表面温度变化;测温点2~4又可以反映混凝土内温度分布随厚度变化规律;相邻两测温点间的距离均为120 mm.



图1 普通混凝土和PCM混凝土的温度监测
Fig.1 Temperature measurement of concrete and PCM concrete

测温系统共有9个测温点,为使测得普通混凝土和PCM混凝土温度场分布具有可比性,同时对此进行温度监测,普通混凝土和PCM混凝土试件各布4个测温点,外加1个大气温度测点.对于热电偶测点的定位埋设,经过多方案试验比较选定后,将热电偶固定在细金属丝上,保证热电偶不会发生移动,即测点不跑位、不断线.

2.3 测温方法设计

采用自行设计的测温系统,对普通混凝土和PCM混凝土的温度变化规律进行研究.将温度传感器一同浇筑到混凝土中,测试混凝土内部的温度变化.

进行了由水泥水化热引起的混凝土温度变化的温度监测试验,称为自然温升试验,如图1所示.但是由于试件尺寸有限,水泥水化产生的热量也是有限的,单纯依靠试件中水泥的水化产生的热量难以使混凝土内部温升达到实际工程中大体积混凝土内部温度值,因此,设计了含有热源的混凝土测温试验.将试件带模放入模拟房中,对模拟房加热,并控制模拟房内温度在所需的范围内,如图2所示.模拟房由具有保温绝热功能的硅酸钙板制作,内设热源,外部有数字温度控制器,可将模拟房内部温度控制在所要达到的温度范围,来模拟大体积混凝土内部的热环境.热环境引起混凝土内部温度的上升,在传热方向与混凝土水化放热方向是相反的,但是对

单纯的大体积混凝土一维导热的升温过程具有一定模拟意义,而且普通混凝土和PCM混凝土热环境相同,各点温度变化具有可比性,可间接反映PCM混凝土的温控能力.



图2 大体积混凝土内部热环境模拟房
Fig.2 Chamber simulating temperature condition of mass concrete

3 试验结果与分析

3.1 自然温升模拟大体积混凝土温度场分布

图3和图4分别是PCM混凝土和普通混凝土在室温条件下,由水泥水化热引起的混凝土内部温度随时间变化的曲线.由图可见,混凝土所处的环境温度在25℃左右,普通混凝土的内部最高温升为46.64℃,PCM混凝土内部最高温升为46.12℃;普通混凝土的表面最高温升为40.06℃,掺有石蜡的PCM混凝土表面最高温升为38.21℃.可以看出尽管混凝土的最高温升未达到石蜡的相变温度范围,但仍有一定的控温效果.

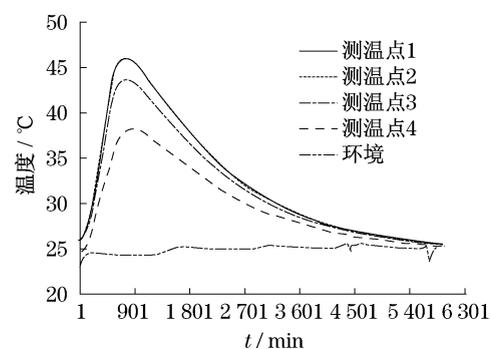


图3 石蜡掺入质量分数为4%的PCM混凝土自然温升过程

Fig.3 Temperature development of concrete with 4% PCM

普通混凝土和PCM混凝土不同深度各点温度场分布随厚度变化趋势是相同的,沿着混凝土深度方向,温度随着测温点深度的增加而增加.由图可见,测温点1和测温点2的温度曲线近乎重合,从测

温数据可知测温点2略高于测温点1的温度,这是由于测温点2周围是混凝土,而测温点1的底侧与苯板接触,无水化热;其次是测温点3的温度,测温点4温度最低.在环境温度为25℃条件下,测温点4距离混凝土表面虽然只有40mm,其温度值仍可达到40℃,比环境温度高15℃.

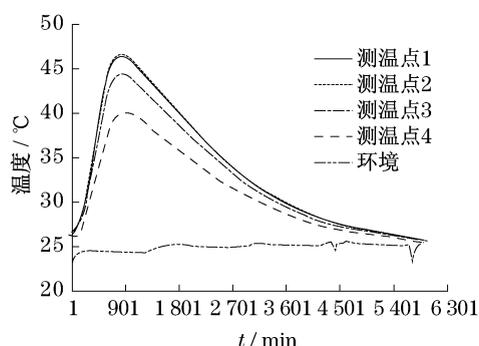


图4 普通混凝土自然升温过程

Fig.4 Temperature development of concrete

自然升温试件尺寸小、水化热小,因而试件内部温度变化受模板散热情况影响大.以热源模拟大体积混凝土内部热环境,热源提供热量较大,模板情况的影响不大,可更准确地模拟大体积混凝土内部各点温度分布情况.

3.2 热源模拟大体积混凝土温度场分布

将混凝土试件带模放入试验模拟房后,开启热源对模拟房进行加热,并控制模拟房内温度在70℃左右,则普通混凝土和PCM混凝土温度开始上升;当普通混凝土和PCM混凝土内部温度与模拟房内温度接近时,关掉热源,普通混凝土和PCM混凝土温度下降.测温系统对此过程进行全程温度监测.

由图5可见,PCM混凝土从起始温度23℃时开始,就具有一定控温效果;温度在55~65℃范围时控温效果明显增强;当温度达到60℃时,控温效果最大.周围环境温度在73℃左右,可以看出PCM混凝土温度仍低于普通混凝土对应点的温度.关掉热源,环境温度下降,普通混凝土和PCM混凝土内部温度也开始下降.降温过程中,随着时间的增加,尽管普通混凝土最高温升值大于PCM混凝土,但是由于普通混凝土降温速度大于PCM混凝土,所以当温度达到60℃左右时,PCM混凝土控温效果明显增强,普通混凝土温度反而低于PCM混凝土对应点温度,直至温度降到室温,即使在距离混凝土表面只有4cm的测温点4,PCM混凝土仍然起到很好的控温效果.测温点2~4与测温点1温度变化趋势是相同的.PCM混凝土在温度变化过程中没有出现相变平

台,但是仍然可以明显地看到相变过程.

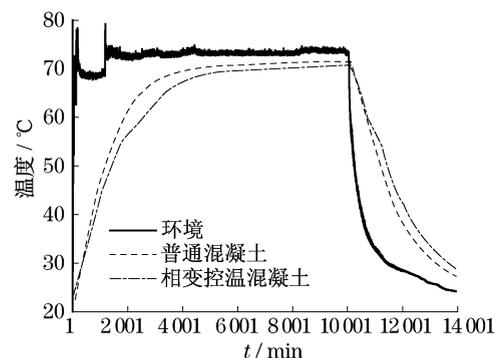


图5 普通混凝土和PCM混凝土测温点1温度场分布

Fig.5 Temperature field distributions of concrete and PCM concrete at point 1

图6纵坐标为普通混凝土和PCM混凝土温度差值.由图可见,在温度上升过程中,温度差值为正,说明普通混凝土温度始终高于PCM混凝土温度值,且差值不断增大.在降温过程中,温度差值为负,说明普通混凝土温度始终低于PCM混凝土温度值.可见,PCM混凝土在升温 and 降温过程中均有较好的控温效果.由测温数据可知,当温度升高到64℃左右时温差最大.

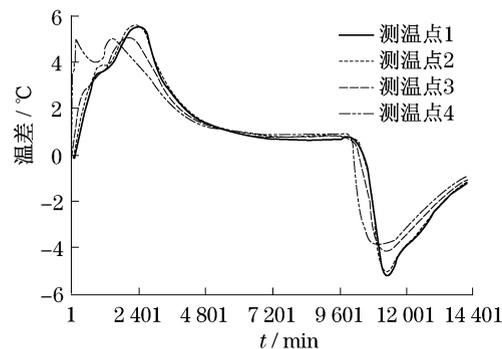


图6 不同测温点控温效果比较

Fig.6 Temperature control effect at different positions

比较这4个测温点温度场分布,如图6所示,测温点1和测温点2的温度控制情况非常接近.同时可以看到,中心点的温控效果好于边缘区域的温控效果,而且在距离表面只有40mm区域仍有较为明显的控温效果.中心点升温和降温过程中最大温差值分别为5.56℃和5.25℃,距离混凝土表面40mm的表面点在升温和降温过程中最大温差值分别为5.03℃和3.88℃.试验过程中,环境温度在73℃左右持续7d,所提供的热量远大于实际情况下大体积混凝土内部水泥水化放热量,因而石蜡相变控温实际能力应高于试验中的控温能力.

4 结论

(1) 在混凝土中掺入相变材料石蜡后,可以降低大体积混凝土内部最高温升值,当石蜡质量分数为4%时,中心点最高温升值可降低5.56℃.

(2) 大体积混凝土中掺入相变材料,可以降低大体积混凝土升温速度和降温速度,从而防止混凝土因降温过快而产生的温度裂缝.

(3) 石蜡作为相变材料掺入混凝土后,在较低的温度范围内仍然具有一定的控温效果,因而可以阻止环境温度波动、拆除模板等因素对大体积混凝土温度的影响.

(4) 石蜡相变控温混凝土在靠近混凝土边缘只有4 cm的地方仍具有一定的控温效果,减小了边缘相变材料的浪费.

参考文献:

- [1] Krauss P D, Rogalla E A. Transverse cracking in newly constructed bridge decks[R]. Washington D C: Transportation Research Board, 1996.
- [2] 陈肇元. 高强与高性能混凝土的研究发展与应用[J]. 土木工程学报, 1997(5): 3.
- [3] CHEN Zhaoyuan. Development and utilization of high-strength and high-performance concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 1997(5): 3.
- [3] 朱伯芳. 大体积混凝土的温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- ZHU Bofang. Temperature stress and temperature control in mass concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [4] Helowicz Andrzej. Analysis of thermal field in mass concrete caused by the heat of cement hydration[D]. Poland: Politechnika Wroclawska, 2004.
- [5] 朱凯, 李惠霞. 大体积混凝土基础裂缝的控制措施[J]. 建筑技术开发, 2007, 34(4): 58.
- ZHU Kai, LI Huixia. Precautions of cracking in mass concrete foundation [J]. Building Technique Development, 2007, 34(4): 58.
- [6] 陆沈磊, 张雄. 我国生态建筑研究进展综述[J]. 上海建材, 2007(1): 9.
- LU Shenlei, ZHANG Xiong. Overview of ecologic buildings research development [J]. Shanghai Building Materials, 2007(1): 9.
- [7] 张东, 吴科如. 孔结构对有机相变物质相变行为的调节作用[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(9): 1163.
- ZHANG Dong, WU Keru. Tuning effect of porous structure on phase changing behavior of organic phase changing matters[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(9): 1163.
- [8] Griffiths P W, Eames P C. Performance of chilled ceiling panels using phase change material slurries as the heat transport medium [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27: 1756.
- [1] Krauss P D, Rogalla E A. Transverse cracking in newly constructed bridge decks[R]. Washington D C: Transportation Research Board, 1996.
- [2] 姚祖康. 水泥混凝土路面设计理论和方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- YAO Zukang. Theory and method of cement concrete pavement design[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [4] 赵军, 唐伯明, 谈至明, 等. 基于弯沉指数的水泥混凝土路面板角脱空识别[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(3): 335.
- ZHAO Jun, TANG Boming, TAN Zhiming, et al. Identification of void beneath cement concrete slab corner based on deflection index[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(3): 335.
- [5] 周玉民, 谈至明, 刘伯莹. 水泥混凝土路面脱空状态下的荷载应力[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 341.
- ZHOU Yumin, TAN Zhiming, LIU Boying. Loading stresses in cement concrete pavement slab with void underneath [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(2): 341.
- [6] 谈至明, 熊军, 朱晶. 移动集中力作用下的局部脱空地基梁的振动[J]. 应用力学学报, 2007, 24(1): 137.
- TAN Zhiming, XIONG Jun, ZHU Jing. Vibration of foundation beam with local void moving concentrated load [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, 24(1): 137.
- [7] 谈至明, 刘伯莹, 唐伯明. 水泥混凝土路面断板的原因分析[J]. 公路, 2005, 12: 63.
- TAN Zhiming, LIU Boying, TANG Boming. Analysis of contrast experiments on erosion stability of red bed soft rock slope with and without vegetation protection[J]. High Way, 2005, 12: 63.
- [8] 唐伯明. 刚性路面板脱空状况的评定与分析[J]. 中国公路学报, 1992, 5(1): 40.
- TANG Boming. Evaluation and analysis for rigid pavements under void conditions[J]. The Journal of China Highway, 1992, 5(1): 40.
- [9] 袁捷. 机场刚性道面结构参数反演方法研究[D]. 上海: 同济大学道路与机场工程系, 2008.
- YUAN Jie. Research on parameters backcalculation method for airport rigid pavements [D]. Shanghai: Tongji University. Department of Road and Airport Engineering, 2008.

(上接第 556 页)