

文章编号:1000-582X(2008)01-0017-05

超高强大体积混凝土的水化温升及温差测试

王 冲,蒲心诚

(重庆大学 材料科学与工程学院,重庆 400045)

摘 要:用超高强混凝土浇注了尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的 4 组大体积构件,所用混凝土最低水胶比为 0.16,最高胶凝材料用量达 900 kg/m^3 ,矿物掺料最高掺量为 50%。分析了所用胶凝材料的水化热,测试了混凝土的水化放热温升及构件内外温差,试验表明:矿物掺合料的加入,显著降低了胶凝材料的水化热。同时,由于混凝土水胶比极低,胶凝材料水化程度较小,文中制备的大体积混凝土水化放热温升最高为 $52\text{ }^\circ\text{C}$,混凝土构件的内外温差最高只有 $23\text{ }^\circ\text{C}$ 。保温层增加了大体积混凝土温升的同时,对混凝土的降温速度的控制及降低混凝土内外温差是有利的。在有保温层的条件下,超高强混凝土完全可以用于大体积工程。

关键词:超高强大体积混凝土;水化温升;温差

中图分类号:TU528.31

文献标志码:A

Test of Temperature Rise and Temperature Difference between Center and Surface of Super High Strength Mass Concrete

WANG Chong, PU Xin-cheng

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, 400030, P. R. China)

Abstract: This investigation aims to explore temperature rise and temperature difference between center and surface of concrete caused by hydration of super high strength mass concrete with $1\ 000\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$ test samples which has a minimum water/binder ratio of 0.16, a maximum binder content of 900 kg/m^3 , and highest 50% replacement of cement. The research conformed that the addition of mineral additives significantly diminishes the heat of hydration caused by hydration of binders. Since water/binder ratio of concrete is very low, so is the hydration degree of binder, the maximum temperature rise of $52\text{ }^\circ\text{C}$ and maximum temperature difference of $23\text{ }^\circ\text{C}$ were measured. The thermal insulation layer increases the temperature and temperature rise of concrete, and reduces the temperature disparity between the center and surface of the concretes. The results indicate that super high strength concrete can be applied into mass concrete construction when thermal insulation layer is used at the same time.

Key words: super high strength mass concrete; temperature rise caused by hydration; temperature Difference

近 20 年来,随着建筑物向超高层、超大跨方向发展,高强、超高强高性能混凝土的应用越来越广泛,混凝土工程体积越来越大。

高强高性能混凝土的配比主要特点之一是高胶凝材料用量。因此,水泥混凝土的水化放热温升就

是一个值得注意的重要问题,并且这一问题已成为高强高性能混凝土在工程应用中的一个障碍。冯修吉^[1]认为,高性能混凝土水泥用量多,水化热大,绝热温升高,会使水泥混凝土的长期性能受影响。在《高强混凝土结构设计与施工指南》^[2]中明确规定了 C70

收稿日期:2007-09-10

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(59338120)

作者简介:王冲(1972-),重庆大学副教授,博士,主要从事水泥混凝土材料研究,(E-mail) wangchxn@126.com。

与 C80 混凝土的水泥用量不宜超过 500 kg/m^3 , 胶凝材料总量不超过 600 kg/m^3 。对胶凝材料用量加以限制, 主要考虑的就是混凝土的温升。

此外, 高强高性能混凝土还有水胶比低的特点。混凝土水化温升与水胶比有着直接的关系。水胶比越低, 水化程度越小, 水化温升也越小。清华大学测定了高性能混凝土的水化热, 研究了不同水胶比条件下的水化放热温升问题^[3], 结果表明: 水胶比在 $0.236 \sim 0.400$ 之间时, 混凝土的最高温升随水胶比的降低而降低(试验所用的胶凝材料用量为 550 kg/m^3)。文献[4-5]的结论也表明, 水胶比越低, 混凝土温升也越低。

另外, 对混凝土水化放热温升影响较大的因素还有胶凝材料的组成成分。在高性能混凝土的制备中, 都要掺入硅灰、磨细矿渣或粉煤灰等活性矿物掺合料, 由文献[3-6]可知, 硅灰、磨细矿渣、粉煤灰等掺合料可以大幅度降低水化热及放热温升, 而 B. W. Langan^[7]认为, 高水胶比下硅灰加速了水泥的水化, 而低水胶比下则降低了水泥的水化; 刘连新的研究表明, 硅灰部分取代水泥后, 只增加了混凝土早期温升。

控制温升对大体积混凝土危害的技术之一, 是加强混凝土的保温保湿养护。D. S. Guo 等人^[8]的

工程应用分析结果表明, 只要作好混凝土的保温处理措施, 即使混凝土中心温度很高, 混凝土内部的温升并不会对混凝土产生致命性的破坏。

笔者所在课题组已经研制成功强度 $\geq 150 \text{ MPa}$ 的超高高性能混凝土, 其中胶凝材料用量最高达到 $800 \sim 900 \text{ kg/m}^3$, 水胶比 $0.16^{[9-10]}$, 这样的混凝土是否满足实际工程要求, 其水化放热温升是必须要考虑的重要指标之一。

1 原材料及配合比

1.1 原材料

1) 胶凝材料: 水泥, 重庆腾辉地维水泥有限公司生产的 P. O52.5 水泥; 硅灰, 挪威埃肯公司提供的半聚集态硅微粉; 磨细矿渣, 重庆钢铁公司生产的水淬高炉矿渣, 在振动磨中磨细 2 h 使用; 石灰石粉, 将重庆歌乐山机制砂在振动磨中磨细 2 h 使用。胶凝材料的化学成分、表观密度及比表面积见表 1。

2) 集料: 粗集料, 重庆小泉石灰石碎石, 最大粒径 20 mm ; 细集料, 四川简阳中砂, 细度模数 2.3。

3) 高效减水剂: 氨基磺酸盐系。

1.2 试验用配合比

试验用混凝土配合比见表 2。按试验结果^[9], 混凝土 28 天抗压强度均超过 120 MPa 。

表 1 胶凝材料的化学成分比表面积

种类	化学成分/%								比表面积 $/(\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	Loss	
水泥	59.37	20.86	9.28	2.07	3.74	0.47	2.49	1.47	3 300
硅灰	/	95.19	/	0.80	0.13	/	/	2.81	约 20 万
磨细矿渣	50.44	38.36	1.69	1.84	0.34	0.57	/	2.42	8 700
石灰石粉	52.12	3.45	1.47	0.77	0.24	/	/	40.22	6 000

表 2 水化放热温升试验混凝土配合比

配比	胶凝材料用量 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	胶凝材料组成/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$				用水量 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	水胶比	细集料 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	粗集料 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	高效减水剂/%	备注
		水泥	硅灰	磨细矿渣	石灰石粉						
WS-1	900	450	90	180	180	144.0	0.16	622.4	933.6	2.0	加厚保温层
WS-2	540	450	90	0	0	115.2	0.21	777.9	1 166.9	2.0	加厚保温层
WS-3	720	450	90	180	0	115.2	0.16	705.9	1 058.9	2.0	加厚保温层
WS-4	720	450	90	180	0	115.2	0.16	762.0	1 142.9	2.0	不做保温层

2 试验用胶凝材料的水化热分析

为制得放热适度的超高高性能混凝土, 笔者在胶凝材料中降低了水泥用量, 掺入了较多的矿物掺合料, 除硅灰、磨细矿渣外, 还掺入了相对来说是惰性掺合料的石灰石粉。在研究混凝土放热温升之前, 首先测定了所用胶凝材料的水化热。试验委托重庆腾辉地维水泥有限公司完成, 测定方法采用直

接法(GB2022)。试验结果如图 1。

经过进一步分析计算, 得到不同胶凝材料组成时的胶凝材料水化热见表 3 中。

从表 3 及图 1 中的结果来看, 掺入矿物掺合料时, 胶凝材料的水化热(包括水泥水化与矿物掺合料的“二次水化”)显著降低。

1) 硅灰的掺入, 胶凝材料的水化热从纯水泥的 283 kJ/kg 降低到 261 kJ/kg 。

表 3 各胶凝材料组成的水化热

配比	胶凝材料比例/%				3 d		7 d	
	水泥	硅灰	磨细矿渣	石灰石粉	水化热/(kJ/kg)	水化热相对值/%	水化热/(kJ/kg)	水化热相对值/%
H-1	100	0	0	0	253	100	283	100
H-2	90	10	0	0	234	92.5	261	92.2
H-3	70	10	20	0	201	79.4	231	81.6
H-4	50	10	20	20	173	68.4	208	73.5

2)再掺入磨细矿渣 20% 后,胶凝材料的水化热从 261 kJ/kg 降低到 231 kJ/kg。

3)石灰石粉对胶凝材料的水化热降低也十分明显。当再掺入 20% 的石灰石粉后,整个胶凝材料的水化热降低到 208 kJ/kg。

石灰石粉对水化热的降低作用并不是随掺量有比例的降低。配比 H-4 中的胶凝材料在配比 H-3 的基础上,用 20% 的石灰石粉取代了水泥,但是其水化热比配比 H-3 仅下降了 8.1%。这说明石灰石粉还是有某种活性,至少,它对水泥水化及矿物掺合料的二次水化有促进作用。

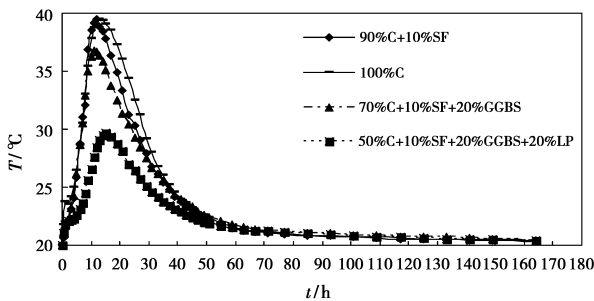


图 1 试验用胶凝材料水化放热曲线

3 混凝土水化放热温升

3.1 测试方法

1)构件尺寸:试验所用的混凝土构件尺寸为长、宽、高各 1 m 的立方体试件。根据 JCJ/T55-96 的定义,大体积混凝土是得结构断面最小尺寸 ≥ 1 m 的混凝土,根据这一定义,研究所用的试件即是大体积混凝土。

2)测点布置:共有 3 个测温点——中心点、混凝土表面点及模具外表面点,测点布置见图 2。

3)保温层处理:有 3 组混凝土表面采用保温材料进行保温,保温层主要由 6.0 cm 厚的保温泡沫板组成,最外层是 1.8 cm 厚的木工板模板。保温泡沫板导热系数为 0.22 W/m·K,考虑到室内风速、混凝土表面等因素,根据文献[9]介绍的方法,计算得到,保温层相当于 3.6 m 左右的混凝土虚厚度,加上混凝土原来的 1.0 m 厚度,文中测试的混凝土相当

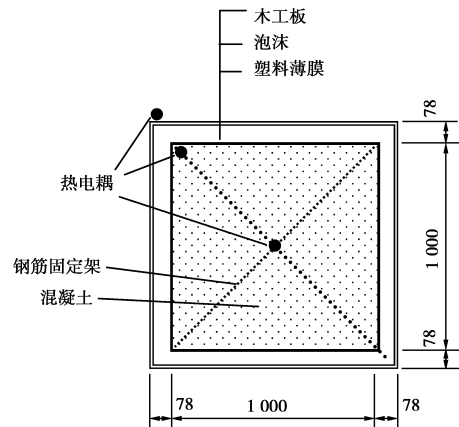


图 2 温升试验模具及测点布置示意图(单位:mm)

于 4.6 m 的大体积混凝土。

为防止混凝土中的水分进入保温层影响保温效果,保温层与混凝土之间用塑料薄膜隔离。

同时,为验证保温层对温升的影响,另外准备了一套不加塑料泡沫的模具。

4)测温装置:热电偶采用 Pt100 型,温度显示器为 DMM-DT 型数显万能表。

5)测温热电偶预埋:混凝土浇注前按测点布置先预埋测温热电偶,为保证检测精度,热电偶先进行防水密封处理、温度校验,并用钢筋架绑扎牢固,固定在要求的位置,以免移位或损坏;测温线也预先与钢筋架绑扎牢固。

6)混凝土浇注:每次混凝土总浇注量为 1 000 L,为保证设备的正常运转,实验室混凝土搅拌机每次最大搅拌容量只能为 120 L,分 9 次搅拌、浇注,每次混凝土加料、搅拌、出料、浇注、密实时间不超过 5 min,每次混凝土浇注工作限定在 1 h 内结束。

3.2 测试结果及分析

混凝土浇注完毕后立即开始测温,并作为温度测试的基准点。在达到温度最高点之前,测试频率为 2 h/次,开始降温后,测试频率为 8 h/次,测试直到混凝土温度接近室温时结束。

测试时环境温度为 20 ~ 29 ℃。

图 3 为结束测温,混凝土拆模后的情形。



图 3 测温结束拆模后的混凝土温度测试结果见表 4,并示于图 4-10。

表 4 大体积混凝土测温结果

配比	混凝土入模温度/°C	快速温升时间/h	达到最高温度时间/h	中心点最高温度/°C	混凝土表面最高温度/°C	最大温升值/°C	混凝土内外温差最大值/°C	备注
WS-1	28	20	36	80	70	52	11	加厚保温层
WS-2	27	16	28	75	70	43	8	加厚保温层
WS-3	27	20	44	78	65	51	13	加厚保温层
WS-4	29	20	44	67	46	40	23	不做保温层

1) 不同配合比混凝土的温升

配合比参数中,对混凝土水化放热温升影响显著的因素主要是胶凝材料用量和水胶比。

比较 WS-1、WS-2 及 WS-3 三组混凝土配比的温升结果(见图 4),配比 WS-2 的胶凝材料最少(540 kg/m³),温升最小,但因为其水胶比相对最大(W/B=0.21),因此温升速度却是最快的。并且因为水胶比相对较大,相对含水量也最多,因此,热量传递速度也相对较快,这就是为什么配比 WS-2 的中心点温度与外表温度的温差最小的原因。

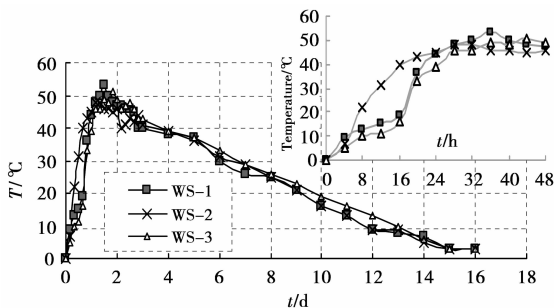


图 4 不同配合比混凝土温升比较

根据文献[9,12]的试验结果推断,试验所浇注的混凝土在测试龄期内的水化程度低于 33%。由于水胶比极低,以及掺加了较多的矿物掺合料,因而研究所配制的超高强高性能混凝土的温升并不是很高。即使是胶凝材料用量为 900 kg/m³(配比 WS-1)的中心最高点温度也只有 80 °C,最大温升温度为 52 °C;而胶凝材料用量 720 kg/m³(配比 WS-3)时的最高温度为 78 °C,最大温升 51 °C;胶凝材料用量为 540 kg/m³(配比 WS-2)时的最高温度为 75 °C,最大温升为 43 °C。

超高强高性能混凝土的温升速度比较快,胶凝材料用量为 900 kg/m³(配比 WS-1)快速温升在 20 h 就已经开始,在 36 h 就已经达到最高温度,胶凝材料用量为 720 kg/m³(配比 WS-3)快速温升在 20 h 就已经开始,在 44 h 就已经达到最高温度,而胶凝材料用量为 540 kg/m³(配比 WS-2)快速温升在 16 h 就已经开始,在 28 h 时就已经达到最高温度。

2) 混凝土内外温差分析

《块体基础大体积混凝土施工技术规程》(YBJ224-91)中^[11]规定,混凝土内外温差只要不超过 25 °C,混凝土的温升值就是安全的,不会因此对

混凝土的耐久性产生大的影响,文中分别就表 2 的几个不同配合比的混凝土的内外温差进行了测试分析,试验结果示于图 5-8。

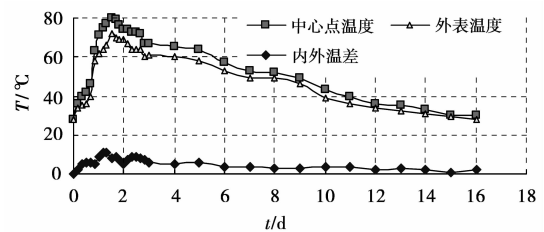


图 5 WS-1 温度发展及温差

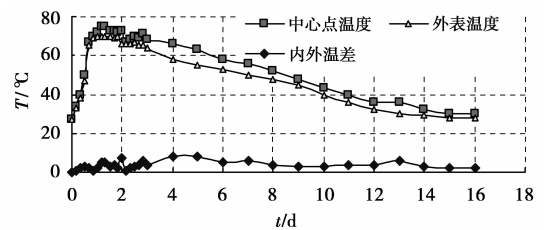


图 6 WS-2 温度发展及温差

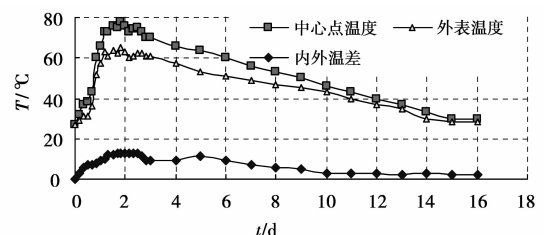


图 7 WS-3 温度发展及温差

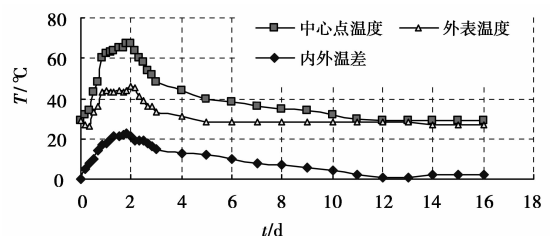


图 8 WS-4 温度发展及温差

从表 4 及图 5-8 中可以得出以下结论:虽然温升速度比较快,最大温升值也达到 52 °C,但因为混凝土采用了保温处理,3 个配合比中,混凝土中心点与表面点内外温差最大值为 15 °C,即使是未进行保温处理的混凝土(WS-4),内外温差最大值也只有 23 °C。

3) 有无保温层时温升与内外温差比较

对保温层不同的温升结果进行分析(见图 9),很明显,保温层对混凝土温升值影响较大。根据测

算,6.0 cm厚度的保温泡沫板相当于3.6 m虚厚度的混凝土尺寸,试验所用的WS-3与WS-4的配合比相同,因为WS-3加做了6.0 cm的保温层,因此其温度最高达到78℃,最大温升为51℃,而WS-4的最高温度只有67℃,最大温升值只有40℃,并且WS-3加做保温层后,温升速度虽快于WS-4,降温速度则慢于WS-4,而大体积混凝土工程实际施工时,往往要求其降温速度不能过快,保温层即可起到这样的作用。

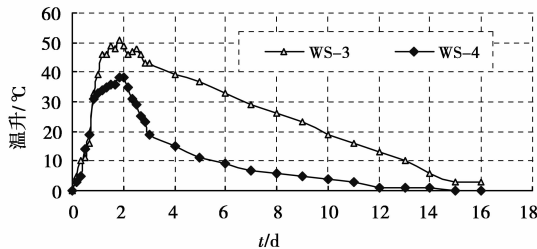


图9 有无保温层混凝土温升比较

保温层对内外温差的影响试验结果示于图10。

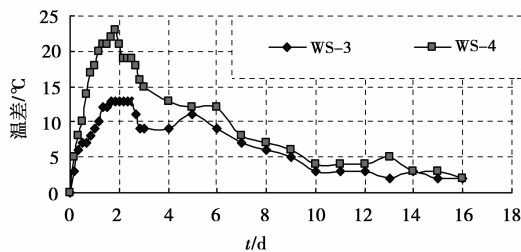


图10 有无保温层混凝土内外温差比较

从图10中可以看出,有保温层的情况下(WS-3),混凝土内外温差最高值只有13℃,而不加保温层时(WS-4),混凝土内外温差最大值为23℃。

由此可以看出,保温层加大了混凝土水化放热温升,保温层明显可以降低混凝土内外的温差。这一结论与大体积混凝土工程中必须加强混凝土保温措施的原因是一致的。

因此,保温层增加了大体积混凝土温升的同时,对混凝土的降温速度的控制及降低混凝土内外温差是有利的。

4 结论

1) 矿物掺合料降低水化热的作用非常明显,硅灰的掺入,使胶凝材料的水化热从283 kJ/kg降低到261 kJ/kg;掺入磨细矿渣后,使得整个胶凝材料的水化热从261 kJ/kg降低到231 kJ/kg;而石灰石粉对胶凝材料的水化热降低最为明显,再掺入20%的石灰石粉后,整个胶凝材料的水化热降低到只有208 kJ/kg。

2) 试验制备的超高强高性能混凝土的胶凝材料用量虽然很大,但是,由于水胶比很低,水泥等胶凝材料水化程度小,以及矿物掺合料的加入,因此,大

体积混凝土水化放热温升并不算很高,最高温升为52℃。所有混凝土内外温差均未超过25℃。

3) 保温层增加了大体积混凝土温升的同时,对混凝土的降温速度的控制及降低混凝土内外温差是有利的。在有保温层的条件下,超高强混凝土完全可用于大体积混凝土工程。

参考文献:

- [1] 冯修吉,杨德坡. 高性能水泥基复合材料的研究与发展状况[J]. 新世纪水泥导报,2002(5):3-6.
FENG XIU-JI, YANG DE-PO. The Situation of research and development of high performance cement based composite materials[J]. Cement Report of New Century, 2002(5):3-6.
- [2] 中国土木工程学会高强与高性能混凝土委员会. 高强混凝土结构设计与施工指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [3] 吴中伟,廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京:中国铁道出版社,1999.
WU ZHONG-WEI, LIAN HUI-ZHEN. High Performance Concrete[M]. Beijing:Railway Press of China, 1999.
- [4] ODD E. GjØry, High strength concrete[M]. Cement: Advances in concrete technology, 1992.
- [5] YUNSHENG ZHANG, WEI SUN, SIFENG LIU. Study on the hydration heat of binder paste in high-performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2002(32):1438-1448.
- [6] 刘连新,黄世敏. 高性能混凝土水化热试验研究[J]. 建筑技术,2003,34(1):26-28.
LIU LIAN-XIN, HUANG SHI-MIN. Study on test of heat of hydration of high performance concrete[J]. Building Technology, 2003,34(1):26-28.
- [7] B W LANGAN, K WENG, M A WARD. Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement[J]. Cement and Concrete Research,2002(32):1045-1051.
- [8] D S GUO, E Y CHEN, G L LOW, et al. Experimental modeling of temperature rise of mass concrete by FDM method[C]//The 8th International Symposium on Chemistry of Cement & Concrete by Chinese Ceramic Society, 2001.
- [9] 王冲. 特超强高性能混凝土的制备及其结构与性能研究[D]. 重庆:重庆大学博士学位论文,2005.
- [10] 蒲心诚. 超高强高性能混凝土(原理·配制·结构·性能·应用)[M]. 重庆:重庆大学出版社,2004.
- [11] 冶金工业部建筑研究总院. YBJ-224-91[M]. 北京:冶金工业出版社,1991.
- [12] H. JUSTNES. High Strength Concrete Binders Part A: Reactivity and Composition of Cement Paste with and without Condensed Silica Fume[C]//Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. Istanbul, Proceedings of 4th International Conference, 1992.

(编辑 陈移峰)