

文章编号:1007-9629(2023)08-0853-09

大体积混凝土中功能轻集料的应用与控温技术

庞超明^{1,2,*}, 刘 钊³, 冒云瑞^{1,2}, 张春鹏^{1,2}

(1. 东南大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 211189;
2. 东南大学 江苏省土木工程材料重点实验室, 江苏 南京 211189;
3. 中交路桥建设有限公司, 北京 100027)

摘要:研究了 2 种功能轻集料(保温细集料和储热粗集料)在 C55 和 C30 大体积混凝土中的应用技术及其对水泥水化过程的影响,并测试了功能轻集料掺量对混凝土新拌性能、力学性能和峰值温度、升降温速率等的影响规律;提出了功能轻集料使用时宜采用半饱和状态、通过适当降低用水量来控制工作性能相近的应用技术.结果表明:保温细集料和储热粗集料均具有一定的早强作用和控温功能,且储热粗集料的效果更优;保温细集料对于混凝土凝结硬化速率影响不大,但储热粗集料因其相变储能作用,在早期可以起到原位自热养护的作用,明显加快凝结硬化速率.

关键词:大体积混凝土;储热相变轻集料;保温轻集料;控温;水化进程

中图分类号:TU528

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.08.005

Functional Lightweight Aggregates in Mass Concrete: Application and Temperature Control Technology

PANG Chaoming^{1,2,*}, LIU Zhao³, MAO Yunrui^{1,2}, ZHANG Chunpeng^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Civil Engineering Material, Southeast University, Nanjing 211189, China;
3. Road & Bridge International Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: Application techniques of two functional light aggregates (thermal insulation fine aggregate and thermal storage coarse aggregate) in C55 and C30 mass concrete and their effects on the hydration process of cement were investigated. The influence of functional light aggregate admixture on the fresh concrete properties, mechanical properties, peak temperature, and rate of temperature rise was measured. An application technique under semi-saturated conditions and controled comparable working performance by decreasing water content was proposed. The results indicate that both thermal insulation fine aggregate and thermal storage coarse aggregate have certain early strength and temperature control functions, in which the thermal storage coarse aggregate is better. The thermal insulation fine aggregate has little effect on the setting and hardening rate of concrete, whereas the thermal storage coarse aggregate can play the role of in-situ self-heating curing in the early stage due to its phase change energy storage, which obviously speeds up the setting and hardening rate.

Key words: mass concrete; thermal storage phase-change lightweight aggregate; thermal insulation lightweight aggregate; temperature control; hydration process

参照 GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》,大体积混凝土是指结构物实体最小几何尺寸不

小于 1 m 的大体量混凝土.现代建筑工程中,许多重要结构如大型桥梁的索塔承台、大坝、大型设备基础

收稿日期:2022-10-18; 修订日期:2022-12-12

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFB3802000,2021YFB3802004);中交路桥建设有限公司技术服务项目

第一作者(通讯作者):庞超明(1977—),女,湖南宁乡人,东南大学高级工程师,博士.E-mail:pangchao@seu.edu.cn

等结构^[1-2]均被设计为大体积混凝土;中国著名的长江三峡工程是目前世界上浇筑量最大的大体积混凝土工程^[3].大体积混凝土胶凝材料水化产生的总热量较大,如不采取措施,易引起较大的温度应力,引起混凝土的张拉开裂.传统温度裂缝防控方法通常采用掺加大掺量矿物掺合料^[4]或预埋冷却水管、外加表面覆盖保温材料的“内散外蓄”方式来降低温升^[5].

近年来很多学者将合适温度的相变材料制备成相变骨料掺入到混凝土中^[6],利用相变材料在相变过程中吸收或放出热量的特点,来实现控温防裂^[7-8].邢娟娟等^[9]将掺量5%的自制相变材料直接掺入水泥浆体中,测得水泥水化热的峰值温度降低了约20.0℃,同时峰值出现的时间延长了约3 h.冯茜等^[10]向油井水泥中外掺15%的微胶囊型热控材料,浆体水化最高温度下降了22.3℃.高桂波等^[11]用铁管封装相变材料,再将铁管置入大体积混凝土中,当相变材料预填埋量为水泥质量的10%~30%时,混凝土120 h绝热温升下降了4.3~12.1℃,降低幅度为10.2%~28.6%.史魏等^[12]向混凝土中直接掺加了2%和4%石蜡,有效延缓了混凝土的降温速率,但使得混凝土抗压强度相应地降低了7.8%和18.3%.杨勇康等^[13]将 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 制成相变砂,等质量取代30%普通砂,混凝土内外温差降幅可达19℃,但抗压强度降低了40%~50%.尚建丽等^[14]利用多孔钢渣粗集料真空吸附液态石蜡,取代全部钢渣粗集料,混凝土峰值温度可降低4.9℃,但抗压强度降低20%~40%.张永娟等^[15]将癸酸与有机膨润土制备成相变砂,当掺入25%相变砂后,混凝土峰值温度降低了4.5℃,降幅为9.3%,但强度降低不到2%.总体而言,相变材料的掺加对混凝土温升的控制效果明显,但会使混凝土强度降低.

为了在不降低混凝土性能的同时,实现混凝土温度控制的目的,针对某长江大桥北塔C55和锚碇

C30超大体积混凝土的温度控制要求,添加适量具有保温和相变储能功能的2种轻集料,对比研究普通轻集料的保温作用和相变材料的控温作用,对不同强度等级混凝土工作性能、力学性能、水化过程以及绝热温升曲线中峰值温度、升降温速率等的影响规律,以解决功能轻集料的应用技术问题,并从原材料根源上提出一种简单且有效的大体积混凝土控温防裂技术.

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

研究采用亚东P·II 52.5水泥,密度为3 090 kg/m³,比表面积为338 m²/kg;采用I级粉煤灰,其密度为2 460 kg/m³,烧失量¹⁾和细度分别为2.5%和8.0%,需水量比为94%,活性指数为83%;S95矿粉,密度为2 860 kg/m³,比表面积为436 m²/kg,流动度比为95%;减水剂为苏博特公司生产的聚羧酸系高效减水剂,掺量为0.9%时,减水率为25%.

采用细度模数2.8的河砂,其饱和面干含水率为0.84%,表观密度为2 630 kg/m³.粗集料为粒径5~20 mm连续级配的玄武岩,其饱和面干吸水率为0.92%,表观密度为2 826 kg/m³.研究采用具有保温功能的普通轻细集料和储热功能的轻粗集料.保温细集料(IFA)为粒径5 mm以下的圆球型免烧水泥基轻集料;储热粗集料(SCA)的制备方法参考文献[16],为核壳结构,以石蜡颗粒为内核,经界面处理后,采用水泥基体为外壳层进行包裹封装.功能轻集料的性能如表1所示,其吸水率随时间的变化趋势如图1所示.石蜡的差示扫描量热(DSC)曲线如图2所示.由图2可知,石蜡相变并不是在峰值温度40.99℃和58.05℃这2个固定温度,而是处于34.1~43.0℃和51.1~60.8℃的相变区间,其对应相变焓分别为15.93、162.23 J/g.

表1 功能轻集料的性能
Table 1 Performance of functional aggregates

Aggregate	Particle size/ mm	Loose bulk density/ (kg·m ⁻³)	Compact bulk density/(kg·m ⁻³)	Apparent density/ (kg·m ⁻³)	Bulk porosity(by volume)/%	Strength in a cylinder/MPa
IFA	0-5	935	964	1 816	48.5	11.2
SCA	5-8	912	933	1 600	43.0	7.8

1.2 试验方法

混凝土新拌性能依据GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法》测试,抗压强度试验依

据GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行.采用尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件,试件脱模后放置于标准养护室中养

1)文中涉及的烧失量、掺量和水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比.

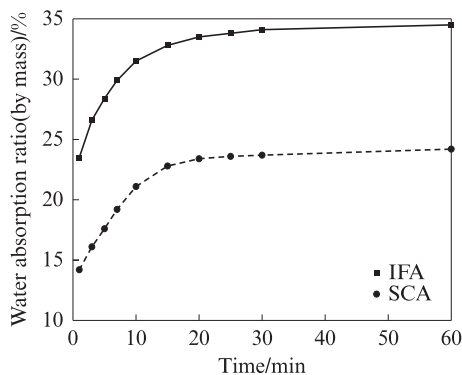


图1 功能轻集料的吸水率

Fig. 1 Water absorption ratio of functional aggregates

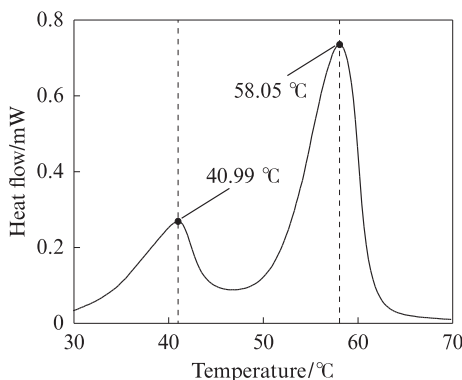


图2 石蜡的DSC曲线

Fig. 2 DSC curve of paraffin

护至规定龄期,考虑到小尺寸试件测得强度偏高,对峰值荷载除以面积后得到的抗压强度,乘以尺寸换算系数0.95,获得抗压强度标准值。

将胶凝材料、水、外加剂和功能轻集料采用砂浆搅拌机搅拌均匀,制备水泥浆体,倒入体积约1.7 L的圆环形透明试模中,该圆环有效内径为208 mm、有效外径为282 mm、高度为54.5 mm,密封圆环试件表面,控制室温为20℃,采用CCR-2型非接触无电极电阻率测定仪,每60 s自动记录1次电阻率数据。

导热系数测试依据GB/T 10294—2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法》进行,采用2块尺寸为300 mm×300 mm×30 mm的混凝土板,其中热板温度设置为40℃,冷板温度设置为20℃。

绝热温升试验采用直径400 mm、高400 mm的圆柱体试件,将其置于机器内部并在其中心插入温度传感器,数据记录频率为1 min/次。

采用半绝热温升试验来更好地模拟大体积混凝土的实际升降温过程,使用内部尺寸为直径400 mm、高250 mm的圆柱型测温桶,在桶四周和底部粘贴厚度为50 mm的丁腈橡胶复合材质保温棉,桶上侧加盖50 mm厚的高密度保温棉,并在上方增加配重以

提高密封效果。在测温桶中心插入紫铜管并埋入测温热电偶,数据记录频率为5 min/次,控制测试环境温度为20℃,连续测试7 d,完整记录混凝土在半绝热条件下的升降温曲线。试验装置如图3所示,由保温隔热层、保温试验桶、混凝土试件、测温元件和控制记录仪组成。

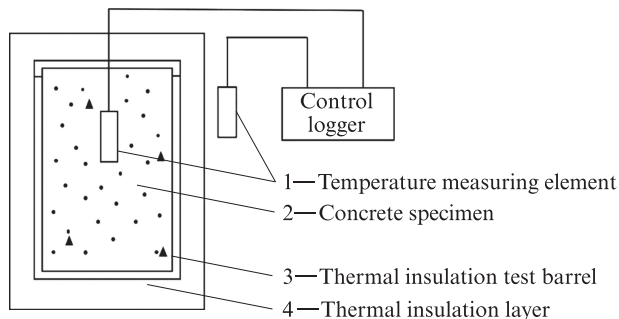


图3 半绝热温升测定仪工作原理图

Fig. 3 Working principle diagram of semi adiabatic temperature rise tester

2 结果与分析

2.1 功能轻集料在C55大体积混凝土中的应用

2.1.1 C55混凝土的配合比与基本性能

对于C55大体积混凝土,结合实际工程中高强、高抗裂、高均质和高外观质量等要求,通过设计与多次试配,最终确定水胶比 m_w/m_B 为0.32,用水量为 150 kg/m^3 ,胶凝材料总量为 469 kg/m^3 ,采用粉煤灰和矿渣微粉双掺,其中粉煤灰的掺量为25%,矿渣微粉的掺量为15%,基准混凝土的砂率为40%。通过多次试验,确定减水剂掺量为1.30%,以控制坍落度在 $(220 \pm 20) \text{ mm}$,且工作性能优异。

采用 $50 \sim 80 \text{ kg/m}^3$ (占混凝土总质量的2.1%~3.3%)储热粗集料等体积替代部分石子,或采用保温细集料等体积替代部分中砂,C55混凝土的配合比和性能见表2,其中 t_{500} 为扩展直径流动到500 mm时所需的时间。由于完全饱和预湿的轻集料会导致混凝土水胶比增大,将使混凝土性能劣化^[17-18];而限制轻集料初始含水量^[19],使其在混凝土内部继续吸收水分,可以增强水泥浆体与集料的附着力,从而提高混凝土强度和耐久性^[20]。因此功能轻集料在掺加时采用半饱和状态,即参考功能轻集料的吸水率曲线,在配制混凝土前,将功能轻集料预湿约3~7 min,此时吸水率为24 h吸水率的70%~80%。

由表2可见,控制水胶比和用水量不变,适当添加半饱和状态的功能轻集料,可略微提高C55混凝土的工作性能,且储热粗集料对工作性能的提升明

表 2 C55 混凝土的配合比和性能
Table 2 Mix proportion and properties of C55 concrete

Specimen	Mix proportion/ (kg·m ⁻³)		Sand ratio/%		Fresh mix performance			Density/ (kg·m ⁻³)	Compressive strength/MPa			
	IFA	SCA	By mass	By volume	Slump/mm	Flow diameter/mm	t ₅₀₀ /s		3 d	7 d	28 d	56 d
C55OPC	0	0	40	42	220	540	20	2 442	35.1	57.6	68.3	76.5
C55IFA50	50	0	37	38	220	560	19	2 430	35.3	55.2	66.1	74.3
C55IFA80	80	0	34	35	225	585	17	2 426	35.6	52.7	65.9	73.5
C55SCA50	0	50	41	42	230	600	17	2 413	36.7	51.6	62.2	72.8
C55SCA80	0	80	42	42	235	630	15	2 402	37.1	49.5	61.7	71.5

显高于保温细集料.值得注意的是:与基准组(C55OPC组)相比,掺保温细集料的C55混凝土3 d抗压强度无降低,掺储热粗集料的C55混凝土3 d抗压强度则有所增长;各组的7~56 d抗压强度均略微降低,其中7 d抗压强度的降幅为4.2%~14.1%,28 d时降幅为3.2%~9.6%,56 d时降幅为2.9%~6.5%.这说明功能轻集料的掺加具有早强作用,且储热粗集料的早强作用更显著.掺功能轻集料混凝土抗压

强度降幅随着龄期的增加逐渐减小.掺储热粗集料组的抗压强度下降幅度大于掺保温细集料组,这是因为作为弱相的材料尺寸越小,对抗压强度的影响越低.

2.1.2 C55混凝土的早期水化进程

为了研究C55混凝土早期强度提高的机理,进一步探究功能轻集料对水泥早期水化进程的影响,将不同掺量的功能轻集料掺入同配比的水泥浆体中进行电阻率测试,结果如图4所示.

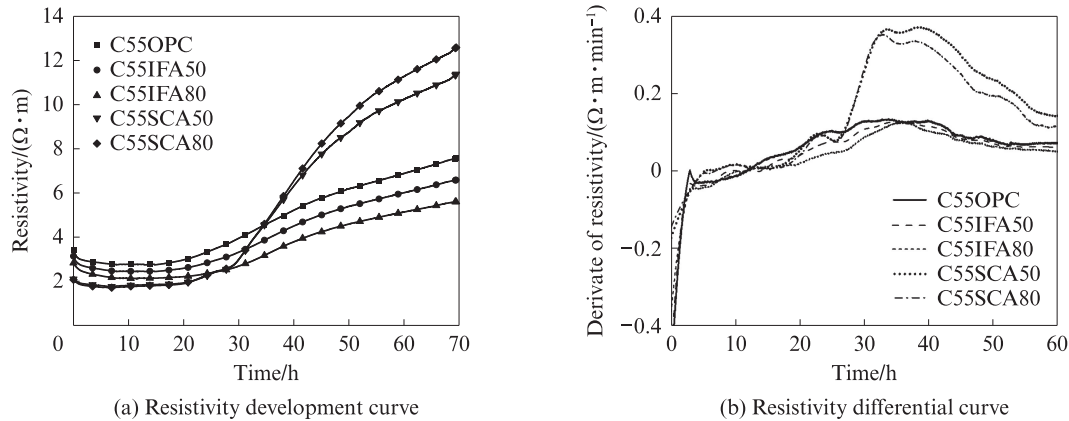


图 4 功能轻集料对水泥浆体电阻率的影响
Fig. 4 Effect of functional aggregates on resistivity of cement pastes

电阻率的变化可以反映水泥水化的4个进程:溶解期、诱导期、凝结期和硬化期^[21].由图4可见:电阻率变化曲线的最低点左侧为溶解期,此阶段大量离子溶解到液相中,导致液相离子浓度增大,浆体电阻率降低^[22];掺入功能轻集料的几组试件在反应初期电阻率均较低,这是由于轻集料自身电阻率较低,且为预先饱水的多孔结构,实际含水量更高;试件C55OPC电阻率微分曲线最先达到最低点,且其第1个峰的出现时间最早,这表明掺入功能轻集料延缓了自由离子的溶解,使溶解期延长,揭示了储热粗集料可以延缓水泥早期的水化速率;水化进入诱导期后,溶解与结晶趋于动态平衡,各组试样的电阻率变化均较小.

当反应时间超过20 h后,试样进入凝结期,电阻

率整体变化不大,说明此时掺入保温细集料对于凝结硬化速率影响不大.但掺储热粗集料组的电阻率急剧增大.这是由于储热粗集料在水化放热时可以吸收热量,当温度下降时又可将热量放出,从而发挥热延迟效应,起到原位自热养护、加速凝结硬化的作用.这抵消了部分功能轻集料自身强度低而产生的负面效应,从而使混凝土3 d抗压强度提高,随着龄期的增长,自热养护对强度的贡献越来越低.而长龄期(28~56 d)强度降幅的减小,则应归因于功能轻集料的内养护效应.在长期养护的混凝土中,功能轻集料预湿吸收的水分将逐渐释放,加强了对基体的养护,使得周围水泥石结构变得更加致密^[23-24].这在一定程度上弥补了强度损失,使得长龄期混凝土的强度降幅减小.

2.1.3 C55配合比的优化与性能

前述研究表明,掺加功能轻集料后混凝土的流动性增加,但长期力学性能略有降低.考虑到工作性能的增加,预湿集料中水分的释放可能也会导致集料周围实际水胶比的增大;另外,在实际工程中,对

工作性能的要求往往是固定的.因此,应尽量控制混凝土的工作性能相近,采用相同的外加剂,略微降低用水量,重新优化配合比(其余配合比参数与表2一致),再次进行工作性能和力学性能的测试,结果如表3所示.后文讨论均针对优化后的混凝土.

表3 优化后C55混凝土的工作性能和力学性能
Table 3 Workability and mechanical properties of optimized C55 concretes

Specimen	Water dosage/(kg·m ⁻³)	Slump/mm	Flow diameter/mm	t ₅₀₀ /s	Density/(kg·m ⁻³)	Compressive strength/MPa	
						7 d	28 d
C55OPC	150	220	540	20	2 442	57.6	68.3
C55IFA50	147	220	545	18	2 428	56.3	67.6
C55IFA80	145	220	545	18	2 403	55.2	67.1
C55SCA50	145	225	550	17	2 413	53.6	66.7
C55SCA80	142	230	560	15	2 381	51.8	65.3

由表3可见:在相同胶凝材料用量下,如保证坍落度和坍落扩展度与C55OPC组相近,等体积替代的保温细集料用水量可以降低3~5 kg/m³,等体积替代的储热粗集料用水量则更大,可降低5~8 kg/m³;通过降低用水量,掺入功能轻集料的各混凝土抗压强度降幅减小,其中7 d抗压强度的降幅为2%~10%,28 d抗压强度的降幅为1%~4%,可以认为抗压强度基本不降低;随着龄期从7 d增长到28 d,由于轻集料的内养护作用,使得混凝土抗压强度降幅减小;C55IFA80-2组与C55SCA50-2组抗压强度相近,略低于C55OPC组,仅降低2%,而C55SCA80-2组抗压强度略低于C55OPC组,降幅仅4%.

2.2 功能轻集料在C30大体积混凝土中的应用

对于C30混凝土,结合锚锭的工程实际,确定其水胶比为0.40,胶凝材料用量为380 kg/m³,采用粉煤灰和矿渣微粉双掺,其中粉煤灰的掺量为30%,矿渣微粉的掺量为20%.基准混凝土的用水量为152 kg/m³、砂率为39%.通过多次试验,确定减水剂掺量为1.0%,以控制坍落度为(220±20)mm,且工作性能优异.由于C30强度要求较低,使得功能轻集料对混

凝土力学性能的影响减弱.为增强控温防裂的效果,提高功能轻集料用量到80、120、160 kg/m³,分别占混凝土总质量的3.3%、5.2%、6.9%,采用等体积替代.参考前述C55混凝土配合比优化方法,为保持工作性能相近而降低用水量,得到优化后混凝土配合比及其性能,如表4所示.

由表4可见:控制混凝土工作性能相近,掺入80~160 kg/m³的功能轻集料,各C30混凝土用水量可以减少5~10 kg/m³,其中储热粗集料的减水量要高于保温细集料,且混凝土力学性能得以提高;掺入保温细集料的各组混凝土7 d抗压强度均高于基准组(C30OPC组),其中C30IFA80组的7 d抗压强度最高,当龄期达到28 d时仍高于C30OPC组,而掺入120、160 kg/m³保温细集料的2组试件28 d抗压强度与基准组相近,其最大降幅为1.7%;掺入储热粗集料的3组混凝土抗压强度较基准组略微下降,7 d最大降幅为2.6%,28 d最大降幅为2.3%.

2.3 温控性能研究

2.3.1 C55大体积混凝土的绝热温升

为了探究功能轻集料对大体积混凝土的控温作

表4 优化后C30混凝土的配合比及其性能
Table 4 Mixture proportion and properties of optimized C30 concretes

Specimen	m_w/m_B	Mix proportion/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)			Sand ratio/%		Slump/mm	Density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Compressive strength/MPa	
		IFA	SCA	Water	By mass	By volume			7 d	28 d
C30OPC	0.40	0	0	152	39	41	205	2 413	35.2	47.2
C30IFA80	0.39	80	0	147	33	34	205	2 368	36.1	47.7
C30IFA120	0.39	120	0	147	31	31	210	2 352	35.8	47.0
C30IFA160	0.38	160	0	145	28	29	210	2 341	35.5	46.4
C30SCA80	0.38	0	80	145	40	41	205	2 345	35.1	47.1
C30SCA120	0.38	0	120	143	41	41	210	2 310	34.8	46.5
C30SCA160	0.37	0	160	142	42	41	210	2 285	34.3	46.1

用,进行了比热容(c)和导热系数(κ)的测试.采用各组成物质含量加权平均的方法计算了大体积混凝土的比热容,如式(1)所示.各物质比热容计算取值如表 5 所示.

$$c = \frac{\sum w_i c_i}{\sum w_i} \tag{1}$$

式中: w_i 为第 i 项物质的含量; c_i 为第 i 项物质的比热容.

表 5 各物质比热容计算取值
Table 5 Calculation value of specific heat capacity of each substance

kJ/(kg·℃)							
Water	Cement	Fly ash	Slag	Sand	Gravel	IFA	SCA
4.18	0.82	0.75	0.84	0.75	0.67	1.05	3.20

表 6 C55 混凝土的热学性能和绝热温升性能
Table 6 Thermal properties and adiabatic temperature rise performance of C55 concretes

Specimen	Molding temperature/℃	Peak temperature/℃	Temperature rise/℃	Decrease of temperature rise/℃	$\kappa/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$c/(kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$
C55OPC	17.5	71.3	53.8	0	1.77	0.93
C55IFA50	17.7	70.8	53.1	-0.7	1.55	0.94
C55IFA80	18.0	70.3	52.3	-1.5	1.42	0.95
C55SCA50	17.9	67.8	49.9	-3.9	1.31	0.99
C55SCA80	17.8	66.5	48.5	-5.3	1.20	1.02

图 5 给出了 C55 混凝土绝热温升曲线.由图 5 可见:C55OPC 基准组在加水拌和 10 h 后中心温度急剧增长,升温持续时间较短,当加水拌和 2 d 后,温升接近最大值,升温趋势放缓,中心最高温度趋于稳定;而功能轻集料对混凝土的控温效果明显,各试件最大温升均有所下降,温升曲线斜率变小,混凝土达到峰值温度的时间延长;加入功能轻集料的 4 组试件绝热温升曲线相较于 C55OPC 组后移,且峰值温度随着功能轻集料掺量的增加而降低;储热粗集料的控温效果要优于保温细集料.其中掺入 50、80 kg/m³ 保温细集料的混凝土中心最高温度分别下降了约 0.7、1.5℃,降幅为 1.3%~2.8%.保温细集料的控温作用可归因于导热系数的降低和比热容的增大,从而使得温差变小.掺入储热粗集料的混凝土绝热温升曲线后移更明显,在拌和后 24 h 温度才加速增长,3 d 后温升接近最大值,相较于 C55OPC 组延后了约 24 h,同时温度发展趋势更加平缓,温升峰值更低,C55SCA50 和 C55SCA80 两组的温度分别下降 3.9、5.3℃,降幅为 7.2%~9.8%.这是由于储热粗集料的内核为石蜡,具有相变潜热大和热力学效率高的特点^[26],可在发生相变的过程中吸收部分水泥水化所放出的热量,减少了总的放热量,从而降低了混凝土

结合实际工程温控计算的需要,且为了让经验丰富的工程人员充分而直观地了解功能轻集料对峰值温度的影响,测定了 C55 高强大体积混凝土内部温度随时间的变化关系.

表 6 给出了 C55 混凝土的热学性能和绝热温升性能.由表 6 可见:当掺入功能轻集料后,C55 混凝土的导热系数降幅均较大,掺保温细集料组和储热粗集料组的降幅分别为 12.4%~19.8%、26.0%~32.2%;储热粗集料的导热系数显著低于保温细集料.而文献[25]中掺加 2% 和 4% 石蜡的气干状态砂浆导热系数仅降低 4%~14%,原因除了石蜡本身导热系数较低(仅 0.18 W/(m·K))之外,还与轻集料的多孔结构有关.

的最大温升^[27],使其达到最大温升的时间延长,温升更平缓.储热粗集料的控温机理除了导热系数的降低和比热容的增大之外,还包括原位养护作用和储热作用.

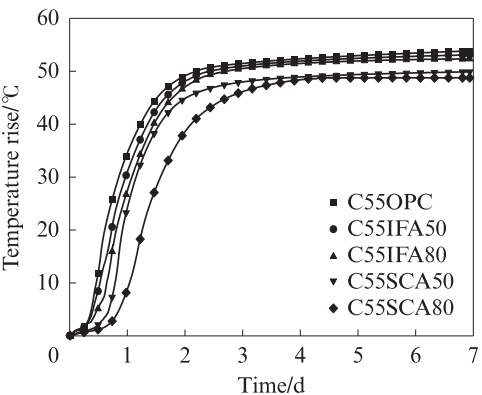


图 5 C55 混凝土绝热温升曲线
Fig. 5 Adiabatic temperature rise curves of C55 concretes

2.3.2 C30 大体积混凝土的半绝热温升曲线

由于绝热温升无法观察降温阶段的情况,为了更好地模拟大体积混凝土浇筑后升降温的变化情况,采用半绝热的方式测量了掺功能轻集料的 C30 混凝土 0~7 d 升降温曲线,如图 6 所示.表 7 为 C30 混凝土的半绝热温升试验结果.

由图6可见:各C30混凝土中心温度在浇筑14 h之前变化不明显,而当浇筑时间达到14 h后,中心温度急剧增长,在2 d左右达到最大值;随着龄期的进

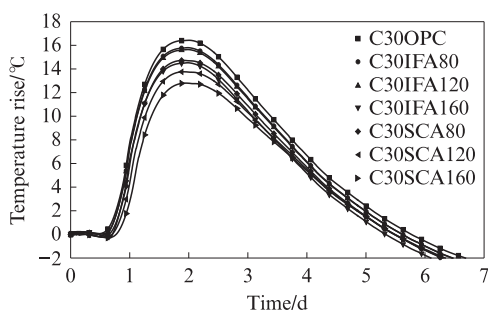


图6 C30混凝土的半绝热升降温曲线

Fig. 6 Semi-adiabatic temperature rise-fall curves of C30 concretes

表7 C30混凝土的半绝热升温试验结果

Table 7 Semi-adiabatic temperature rise results of C30 concretes

Specimen	Molding temperature/°C	Peak temperature/°C	Maximum temperature rise/°C	Average heating rate/(°C·d ⁻¹)	Average cooling rate/(°C·d ⁻¹)
C30OPC	26.7	43.1	16.4	8.16	3.78
C30IFA80	26.8	42.6	15.8	7.92	3.74
C30IFA120	26.5	42.2	15.7	7.87	3.72
C30IFA160	26.8	41.3	14.5	7.27	3.62
C30SCA80	27.0	41.7	14.7	7.31	3.58
C30SCA120	27.1	40.5	13.4	6.69	3.32
C30SCA160	26.9	39.7	12.8	6.39	3.16

掺入储热粗集料后,各C30混凝土半绝热升降温曲线上早期温度平台持续的时间增加,说明储热粗集料不仅可以降低混凝土的峰值温度,还可以减缓混凝土的升温速率和降温速率.与基准组相比,C30SCA80、C30SCA120、C30SCA160组试件平均降温速率分别下降了5.3%、12.2%和16.4%.其中C30SCA160组开始升温时间较基准组延后了约6 h.由表7可见,与C30OPC组相比,掺入80、160 kg/m³储热粗骨料的C30混凝土平均升温速率分别下降了0.85 °C/d(降幅10.4%)和1.77 °C/d(降幅21.7%).峰值温度的降低、升温速率和降温速率的减缓,这三者共同作用,有利于大幅降低大体积混凝土早期开裂的风险.

掺入保温细集料的3组C30混凝土中心温度的下降趋势与C30OPC基准组相同,而储热粗集料在降温阶段有效缓解了C30混凝土的降温速率,这是因为储热粗集料具有储热和放热的功能,在温度下降的过程中,会将之前吸收的热量放出.由图6可以看出,掺入储热粗集料的C30混凝土半绝热降温曲线明显放缓,与C30OPC基准组的半绝热降温曲线相交.

一步增加,混凝土中心温度开始逐渐下降;与C30OPC基准组相比,掺入保温细集料和储热粗集料均有利于降低混凝土中心峰值温度,且达到峰值温度的时间有所延迟,升温速率和降温速率均有所减缓;随着功能轻集料掺量的增加,温升降幅更明显.结合表7可见:保温细集料的控温效果明显不如储热粗集料,掺入保温细集料的各组混凝土最大温升下降0.6~1.9 °C,降幅为3.7%~11.6%,而掺入储热粗集料的3组混凝土最大温升下降1.7~3.6 °C,降幅为10.4%~22.0%,削峰效应明显;掺入80 kg/m³储热粗集料的C30混凝土升降温曲线与掺入160 kg/m³保温细集料组相近,说明储热粗集料对混凝土的控温效果要优于保温细集料.

3 结论

(1)采用半饱和状态的功能轻骨料,控制混凝土工作性能相近,适当降低用水量,可使其中长期抗压强度基本不降低,明显削弱功能轻集料因自身强度较低带来的负面影响.当功能轻集料在C55混凝土中掺量为50~80 kg/m³时,可减水3~8 kg/m³,而在C30混凝土中掺量为80~120 kg/m³,可减水5~10 kg/m³,其中储热粗集料的减水量要高于保温细集料.

(2)掺入50~80 kg/m³的功能轻集料后,混凝土的溶解期延长;保温细集料对于凝结硬化速率影响不大,但储热粗集料可以明显加速凝结硬化速率,在早期起到原位自热养护的作用.随着龄期的增长,储热粗集料对混凝土抗压强度的贡献越来越低.

(3)适量掺入保温细集料和储热粗集料,均有利于混凝土早期强度和控温性能的提高,且储热粗集料的早强作用和控温效果均显著优于保温细集料.

(4)功能轻集料的掺加,可降低混凝土的中心峰值温度,延缓其达到峰值温度的时间,减缓升温速率

和降温速率,并控制混凝土强度基本不降低.掺入 $50\sim 80\text{ kg/m}^3$ 功能轻集料的C55混凝土绝热温升曲线中的峰值温度降低 $0.7\sim 5.3\text{ }^\circ\text{C}$,降幅约 $1.3\%\sim 9.8\%$.对于掺入 $80\sim 160\text{ kg/m}^3$ 功能轻集料的C30混凝土,其半绝热温升曲线中的峰值温度降低 $0.6\sim 3.6\text{ }^\circ\text{C}$,降幅达 $3.7\%\sim 22.0\%$.

参考文献:

- [1] 王晗.筏板基础大体积混凝土施工裂缝控制研究[D].大连:大连理工大学,2013.
WANG Han. Research on control of construction crack of mass concrete raft-foundation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [2] 边真.大体积混凝土温度应力时效分析与控制研究[D].长安:长安大学,2012.
BIAN Zhen. Study of dynamic analysis and control on temperature stress of mass concrete[D]. Chang'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [3] 徐俊.大体积混凝土温度应力场与温控措施研究[D].淮南:安徽理工大学,2014.
XU Jun. Research on mass concrete temperature field, stress field and the temperature control measures [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [4] 王宇平,董祥生,郝白龙,等.巴东长江大桥5号承台控制裂缝的措施[J].公路交通技术,2004(5):94-95, 129.
WANG Yuping, DONG Xiangsheng, HAO Bailong, et al. Measures for controlling cracks of No. 5 base slab of Badong Yangtze River Bridge[J]. Technology of Highway Transport, 2004(5):94-95, 129. (in Chinese)
- [5] 苟季.大体积混凝土水化热对结构的影响研究[D].南宁:广西大学,2008.
GOU Ji. Study on the effect of mass concrete hydration heat on structure[D]. Nanning:Guangxi University, 2008. (in Chinese)
- [6] 张东,周剑敏,吴科如,等.相变储能混凝土制备方法及其储能行为研究[J].建筑材料学报,2003,6(4):374-380.
ZHANG Dong, ZHOU Jianmin, WU Keru, et al. Study on fabrication method and energy storing behavior of phase changing energy storing concrete[J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(4):374-380. (in Chinese)
- [7] PASUPATHY A, ATHANASIOS L, VELRAJ R, et al. Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material(PCM) for thermal management[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(5/6):556-565.
- [8] 高桂波,钱春香,庄园,等.用相变材料降低大体积混凝土内部温升的研究[J].水力发电学报,2010,29(1):197-201
GAO Guibo, QIAN Chunxiang, ZHUANG Yuan, et al. Research on use of phase change materials for reduction of internal temperature rise of mass concrete[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010,29(1):197-201. (in Chinese)
- [9] 邢娟娟,管小军.相变材料在水泥水化热温度控制方面的研究[J].建材技术与应用,2006(6):4-6.
XIN Juanjuan, GUAN Xiaojun. Study on the control over the cement hydration heat of the phase change materials[J]. Research and Application of Building Materials, 2006(6):4-6. (in Chinese)
- [10] 冯茜,刘先杰,彭志刚,等.低水化热水泥浆用微胶囊型热控材料制备及应用[J].精细化工,2019,36(7):1453-1457.
FENG Qian, LIU Xianjie, PENG Zhigang, et al. Preparation and application of microcapsule type thermal control material for low hydration heat cement slurry[J]. Fine Chemicals, 2019, 36(7):1453-1457. (in Chinese)
- [11] 高桂波,钱春香,岳钦艳,等.预填埋相变材料对混凝土水化热温升的降低效果[J].山东大学学报(工学版),2011,41(6):91-96.
GAO Guibo, QIAN Chunxiang, YUE Qinyan, et al. The effect of pre-embedded phase change materials on temperature rise caused by the hydration heat evolution of concrete[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2011,41(6):91-96. (in Chinese)
- [12] 史巍,侯景鹏,张雄.石蜡相变控温大体积混凝土性能[J].建筑材料学报,2010,13(3):414-417.
SHI Wei, HOU Jingpeng, ZHANG Xiong. Properties of paraffin phase-change-material (PCM) mass concrete for temperature control[J]. Journal of Building Materials, 2010,13(3):414-417. (in Chinese)
- [13] 杨勇康,张雄,陆沈磊.相变材料用于控制混凝土水化热的研究[J].混凝土与水泥制品,2007(5):9-11.
YANG Yongkang, ZHANG Xiong, LU Shenlei. Study on controlling the hydration heat of concrete by using PCM[J]. China Concrete and Cement Products, 2007(5):9-11. (in Chinese)
- [14] 尚建丽,张天国.相变钢渣粗骨料的制备及相变钢渣混凝土性能试验研究[J].硅酸盐通报,2015,34(7):1844-1849.
SHANG Jianli, ZHANG Tianguo. Preparation of phase change steel slag coarse aggregate and performance of phase change steel slag concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(7):1844-1849. (in Chinese)
- [15] 张永娟,张雄,郑雯,等.复合相变纳米元件用于大体积混凝土控温研究[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(9):1335-1339.
ZHANG Yongjuan, ZHANG Xiong, ZHENG Wen, et al. Research on complex nano-element used for controlling temperature in mass concrete[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(9):1335-1339. (in Chinese)
- [16] PANG C M, ZHANG C P, MENG X X, et al. Preparation of novel core-shell non-sintered lightweight aggregate and its application in wallboard for better properties[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2022, 37(5):840-847.
- [17] DOMAGATA L. The influence of porous aggregate on microstructure of the interfacial transition zone in lightweight concrete[J]. Cement, Wapno, Beton, 2011, 16(2):101-104.
- [18] FUJIKI K, KOKUBU K, HOSAKA T. Freezing and thawing resistance of lightweight aggregate concrete[C]//CANMET/

- ACI/JCI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology. Tokushima:[s. n.], 1998.
- [19] DOMAGAŁA L. The effect of lightweight aggregate water absorption on the reduction of water-cement ratio in fresh concrete [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 108:206-213.
- [20] ZHANG M H, GJØRV O E. Penetration of cement paste into lightweight aggregate[J]. *Cement and Concrete Research*, 1992, 22(1):47-55
- [21] WEI X, LI Z. Study on hydration of Portland cement with fly ash using electrical measurement[J]. *Materials and Structures*, 2005, 38(3):411-417.
- [22] 刘志勇,张云升,姜骞,等.原位监测水泥基材料早期电阻率的变化过程[J].*东南大学学报(自然科学版)*,2012,42(2):378-382. LIU Zhiyong, ZHANG Yunsheng, JIANG Qian, et al. In-situ monitoring of early-age electrical resistivity change process of cement-based materials [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science)*, 2012,42(2):378-382. (in Chinese)
- [23] 吴芳,谭盐宾,杨长辉,等.高强轻集料混凝土抗氯离子渗透性能试验研究[J].*重庆建筑大学学报*,2007,29(6):117-120. WU Fang, TAN Yanbin, YANG Changhui, et al. An experimental study of anti-chloride permeability of high-strength structural lightweight aggregate concrete[J]. *Journal of Chongqing Jianshu University*, 2007,29(6):117-120. (in Chinese)
- [24] 孙德强,丁建彤,郭玉顺.普通混凝土与采用不同陶粒的轻质混凝土的水渗性和氯离子渗透性比较[J].*混凝土*,2005(2):36-38,53. SUN Deqiang, DING Jiantong, GUO Yushun. Comparison of water permeability and chloride permeability between normal-weight concrete and lightweight concrete made with different lightweight aggregates[J]. *Concrete*, 2005(2):36-38, 53. (in Chinese)
- [25] 侯景鹏,史巍,张雄.石蜡相变控温混凝土热性能研究[J].*建筑材料学报*,2012,15(6):767-770. HOU Jingpeng, SHI Wei, ZHANG Xiong. Thermal properties of phase-change concrete with paraffin[J]. *Journal of Building Materials*, 2012,15(6):767-770. (in Chinese)
- [26] 胡小芳,林丽莹,胡大为.石膏基陶粒吸附石蜡复合储能材料制备及性能[J].*天津理工大学学报*,2008(3):63-66,84. HU Xiaofang, LIN Liying, HU Dawei. Preparation and properties of gypsum-based ceramsite adsorption paraffin complex power storage material [J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2008(3):63-66,84. (in Chinese)
- [27] 王军.相变控温混凝土的理论基础研究和制备[D].武汉:武汉理工大学,2011. WANG Jun. Study on the basic theories and preparation of phase change temperature self-control concrete[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)