

引文格式:杨宏天,李北星,田常兵,等.基于索塔大体积混凝土实体温度匹配养护的 C50 混凝土性能研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(3):26-33.

YANG Hongtian, LI Beixing, TIAN Changbing, et al. Study on properties of C50 concretes with match curing based on entity temperature of mass concrete for bridge cable tower[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(3): 26-33.

DOI:10.19815/j.jace.2022.05004

基于索塔大体积混凝土实体温度匹配养护的 C50 混凝土性能研究

杨宏天¹, 李北星¹, 田常兵², 钟翔¹

(1. 武汉理工大学 硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2. 湖北嘉鱼长江公路大桥有限公司, 湖北 咸宁 430051)

摘要:为探究桥梁索塔结构内部混凝土的实际性能发展规律,将某长江公路大桥索塔 C50 大体积混凝土施工时的芯部温度作为混凝土的匹配养护温度,对比研究了标准养护和温度匹配养护对纯水泥、单掺 20% 粉煤灰、复掺 20% 粉煤灰和 15% 矿粉 3 种 C50 混凝土试件的强度发展规律、抗氯离子渗透性和水化产物微观形貌的影响。结果表明:温度匹配养护下的高水化温度显著激发了掺有粉煤灰和矿粉的复合胶凝材料的水化活性,复掺粉煤灰和矿粉的混凝土在温度匹配养护下的 3 d 抗压强度和抗折强度较标准养护分别提高 45% 和 30% 以上;温度匹配养护抑制了纯水泥混凝土的后期强度发展,且增大了其脆性,降低了抗氯离子渗透性,而单掺粉煤灰或复掺粉煤灰和矿粉可以改善或消除上述不利影响;无论是标准养护还是温度匹配养护,复掺粉煤灰和矿粉的混凝土具有最高强度、最大折压比和最好的抗氯离子渗透性,适合索塔大体积混凝土结构施工使用。

关键词:养护温度;索塔;矿物掺合料;强度;抗氯离子渗透性;水化

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)03-0026-08

Study on properties of C50 concretes with match curing based on entity temperature of mass concrete for bridge cable tower

YANG Hongtian¹, LI Beixing¹, TIAN Changbing², ZHONG Xiang¹

(1. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. Hubei Jiayu Yangtze River Highway Bridge Co., Ltd., Xianning 430051, Hubei, China)

Abstract: In order to explore the development law of the actual performance of concrete for the bridge cable tower structure, the core temperature of C50 mass concrete construction of the cable tower of a Yangtze River highway bridge was used as the matching curing temperature of concrete. The effects of standard curing and temperature matching curing on the strength development law, resistance to chloride ion permeability and microstructure of hydration products of three kinds of C50 concrete specimens of pure cement, addition of 20% fly ash (FA), mixed with 20% FA and 15% ground granular blast furnace slag (GGBS) were compared and studied. The results show that the high hydration temperature under the temperature matching curing

significantly stimulates the hydration activity of the composite cementitious material mixed with FA and GGBS. The 3 d compressive strength and flexural strength of the concrete mixed with FA and GGBS under temperature matching curing condition are increased by more than 45% and 30% respectively than those under standard curing condition. Temperature matching curing inhibits the later strength development of pure cement concrete, increases its brittleness and reduces its resistance to chloride ion permeability, and the above adverse effects can be improved or eliminated by addition of FA or mixed FA and GGBS. Whether under standard curing or temperature matching curing, the concrete mixed with FA and GGBS has the highest strength, the maximum ratio of folding pressure and the best resistance to chloride ion penetration, which is suitable for the construction of mass concrete structure of cable tower.

Key words: curing temperature; cable tower; mineral admixture; strength; resistance to chloride ion penetration; hydration

Author resume: LI Beixing(1970-), male, PhD, professor, E-mail:libx0212@126.com.

0 引言

湖北黄石某新建长江公路大桥为主跨 1 038 m 的双塔单跨钢箱梁悬索桥,南、北索塔塔柱高度分别为 157 m 和 165 m。塔柱下设置 2 个分离式矩形承台,每个承台顶面设置 1 个棱台形塔座,塔座顶面尺寸为 13 m×10.5 m,底面尺寸为 17 m×14.5 m,高度 2 m。塔柱采用钢筋混凝土单箱单室箱形断面,下塔柱标准断面壁厚为 1.2 m,塔柱底部设置 4 m 高的实心段,塔底平面尺寸为 9.8 m×7.8 m。由于塔座和下塔柱实心段均为强度等级 C50 的大体积混凝土,而 C50 混凝土的胶凝材料用量大,水化释放的大量热量难以散发,使大体积混凝土构件内部温度升高,其内部温度经常达 65℃以上^[1-4],一旦产生较大的内表温差则极易引起塔座和下塔柱实心段出现温度裂缝^[5-8]。

大体积混凝土内部的高温水化环境对水泥和矿物掺合料的水化过程和强度发展有显著影响。Lothenbach 等^[9]认为水泥的水化速率随温度提高而加快。Kjellsen 等^[10]发现高温下纯水泥浆体在水化早期孔隙率低,后期孔隙率高,过高的水化速率会在短时间生成大量的水化产物,但其堆积搭叠结构较为混乱,致使浆体微结构疏松。Al-Gahtani^[11]认为早期高温养护产生的多孔结构是导致高温养护混凝土试件后期强度倒缩的主要原因。李响等^[12]认为高温养护增强了粉煤灰的火山灰活性,显著提高了早龄期水泥-粉煤灰体系的水化程度,但不利于后期水化程度的提高。谭克锋等^[13]认为,高温养护的混凝土后期抗压强度较常温养护混凝土有较大幅度的降低,掺入硅灰、粉煤灰、矿渣可以消除这种高温

负面效应。阎培渝等^[14]对比研究了标准养护和高温养护(50℃)对水泥-矿渣粉和水泥-粉煤灰-硅灰复合胶凝材料高强混凝土抗压强度发展规律的影响,发现高温养护下两组复合胶凝材料混凝土的 3 d 强度提高 1 倍以上且后期强度持续增长,但高温养护对纯水泥混凝土的后期强度发展有抑制作用。

在实验室进行混凝土配合比试验或施工现场进行混凝土质量验收时,均以标准条件(温度 20℃、相对湿度 95%以上)下养护、标准立方体混凝土试件的 28 d 抗压强度是否达到要求为依据,这一养护温度与大体积混凝土结构内部真实温度状况相差甚远,致使所得试件强度不能反映实体结构内部混凝土的性能。为此,需采用温度匹配养护,即将混凝土试件置于与实体混凝土温度发展历程相同的条件下进行养护,以评价混凝土的实际性能增长情况。目前,许多学者基于混凝土绝热温升曲线进行温度匹配养护^[14-15],然而,大体积混凝土实体结构的内部温度不仅与绝热温升有关,而且与混凝土的浇筑温度、浇筑层厚和冷却水管降温效果等因素有关^[16],因此以混凝土绝热温升为温度参考依据来模拟大体积混凝土早龄期的变温养护过程,并不能真实地反映实体结构的混凝土性能发展过程。

为了研究索塔大体积混凝土结构内部的水化热温升对其强度和耐久性能的影响,探讨试件与实体结构内部混凝土性能的关系,对比研究了标准养护和基于某长江大桥下塔柱实心段大体积混凝土实体工程内部监测的温度曲线的温度匹配养护对纯水泥、单掺粉煤灰 20%、复掺 20%粉煤灰和 15%矿粉等不同胶凝材料体系配制的 C50 混凝土强度和抗氯离子渗透性的影响。

1 试验概况

1.1 原材料

水泥为 P. O42.5 水泥,3 d 抗压强度为 29.8 MPa,28 d 抗压强度为 48.0 MPa;粉煤灰为 F 类 I 级粉煤灰,矿粉为 S95 级磨细矿渣粉。粗集料为石灰岩碎石,由 4.75~9.5 mm 和 9.5~19 mm 粒级按 2:8 质量比级配而成。细集料为河砂,2 区级配,细度模数 2.84。减水剂为缓凝型聚羧酸高性能减水剂,含固量为 24.6%,pH 值为 5.8。

表 1 混凝土配合比
Table 1 Mix proportions of concrete

配比编号	水胶比	各材料用量/(kg·m ⁻³)						
		水泥	粉煤灰	矿粉	水	砂	碎石	减水剂
F0	0.32	480	0	0	148	737	1 105	5.28
F20	0.31	384	96	0	148	737	1 105	5.58
F20K15	0.31	312	96	72	148	737	1 105	5.28

1.3 试验方法

用于混凝土抗压强度试验的试件为 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体,用于抗折强度试验的试件为 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体,用于抗氯离子渗透性试验的试件为 Φ100 mm×50 mm 的圆柱体。试件成型后分别采用标准养护和温度匹配养护的制度进行养护,具体养护过程为:

(1)标准养护(SC)。试件成型后,表面覆盖塑料薄膜置于(20±2)℃的室内静置 24 h 后拆模,之后置于标准养护室养护至规定龄期。

(2)温度匹配养护(TMC)。混凝土试件成型后,表面覆盖塑料薄膜静停 3 h,之后带模置于 GD-JS-408 型号的可程式高低温交变湿热试验箱中进行温度匹配养护 7 d。匹配养护的温度为索塔左幅下塔柱实心段采用 F20K15 配比混凝土进行施工时的芯部温度监测数据(测点位于 2.1 m 高度处),如图 1 所示,实体结构内部最高温度为 64.9℃。试验箱的匹配养护温度按照图 1 所示温度历程通过编程进行设置,温度匹配养护结束后,试件移出高低温交变湿热试验箱、冷却至常温后拆模,再移至标准养护室继续养护至预设龄期。强度试验龄期为 1、3、7 d 的试件只进行相应龄期的温度匹配养护。

按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)测定混凝土 1、3、7、28、56 d 龄期的抗压强度和抗折强度;按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)测定混凝土 56 d 龄期的氯离子扩散系数

1.2 混凝土配合比

增加矿物掺和料掺量尤其是粉煤灰掺量是降低大体积混凝土水化热温升的有效方式,但对于索塔 C50 混凝土而言,考虑到模板周转、混凝土养护的难度和碳化耐久性问题,通常采用中等掺量的矿物掺合料进行配制。本试验设计了 3 个不同胶凝材料体系的 C50 混凝土配合比进行对比(表 1),F0 代表纯水泥混凝土,F20 代表单掺 20%粉煤灰的混凝土,F20K15 代表复掺 20%粉煤灰和 15%矿粉的混凝土(索塔塔座和塔柱实心段施工所用混凝土)。

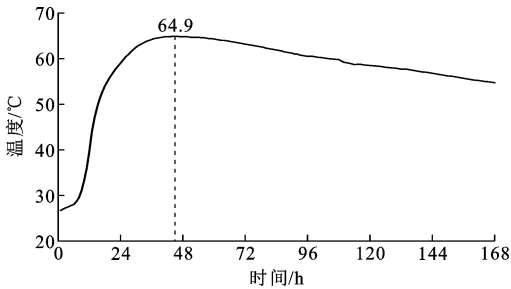


图 1 混凝土试件匹配养护温度历程
Fig.1 Match curing temperature history of concrete specimen

(RCM 法)。

胶凝材料浆体水化产物形貌采用 JSM-IT300 型扫描电镜(SEM)进行观察,胶凝材料浆体成型水胶比为 0.31,标准养护和温度匹配养护制度与上述混凝土的相同。

2 试验结果与分析

2.1 混凝土强度发展规律

表 2 为混凝土在标准养护和温度匹配养护条件下不同龄期的抗压强度与抗折强度。图 2、3 分别为 3 组不同矿物掺合料混凝土在不同养护条件下的抗压强度与抗折强度发展规律对比。

2.1.1 抗压强度

由表 2 和图 2(a)可知:在标准养护条件下,1 d 龄期时,F20、F20K15 的抗压强度显著低于基准混凝土 F0,分别降低 26.7%和 39.7%,这是由于矿物掺合料在 1 d 时未发生水化,仅起到物理填充作用;

表 2 不同养护条件下的混凝土抗压强度和抗折强度

Table 2 Compressive strength and flexural strength of concrete under different curing conditions

养护条件	配比编号	抗压强度/MPa					抗折强度/MPa					折压比/%				
		1 d	3 d	7 d	28 d	56 d	1 d	3 d	7 d	28 d	56 d	1 d	3 d	7 d	28 d	56 d
SC	F0	34.5	47.6	55.4	63.5	67.3	4.4	5.6	6.8	7.3	7.4	12.8	11.8	12.3	11.5	11.0
	F20	25.3	44.6	51.9	64.8	69.5	3.1	5.3	6.4	7.4	8.4	12.3	11.9	12.3	11.4	12.1
	F20K15	20.8	45.2	53.5	64.4	71.5	2.5	5.3	6.5	7.6	8.7	12.0	11.7	12.1	11.8	12.2
TMC	F0	38.3	46.9	54.5	58.4	59.6	4.6	5.3	6.1	6.4	6.7	12.0	11.3	11.2	11.0	11.2
	F20	40.5	56.5	64.1	65.9	67.5	4.8	6.4	6.9	7.4	7.7	11.9	11.3	10.8	11.2	11.4
	F20K15	38.2	65.8	67.5	67.6	69.1	4.7	6.9	8.2	8.2	8.3	12.3	10.5	12.1	12.1	12.0

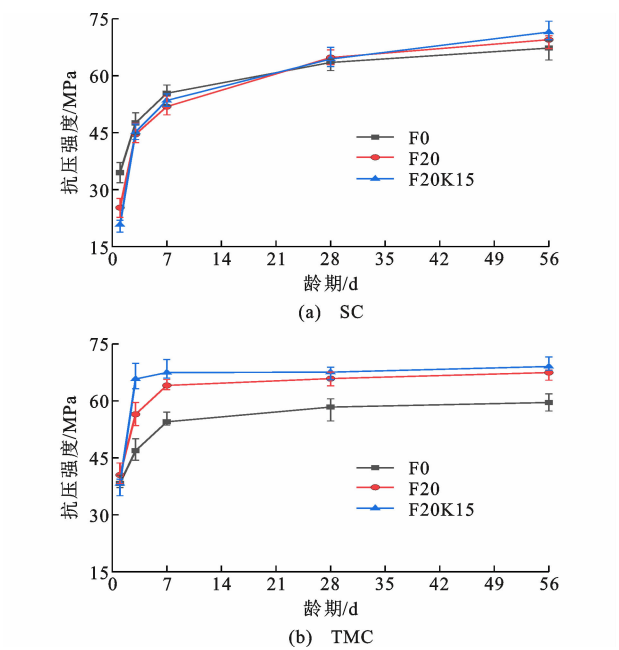


图 2 不同养护条件下混凝土抗压强度发展规律对比
Fig. 2 Comparison of compressive strength development law of concrete under different curing conditions

F20 和 F20K15 的 7 d 抗压强度则分别比 F0 降低 6.3%和 3.4%,抗压强度降低率已低于矿物掺合料的掺率,这说明矿物掺合料尤其是矿渣粉的火山灰活性已开始发挥,掺合料的二次水化反应生成的水化产物对混凝土的抗压强度发展有了贡献^[17];28 d 和 56 d 龄期时,F20 和 F20K15 的抗压强度已超过 F0,表明粉煤灰和矿粉的火山灰效应对混凝土的后期抗压强度发展的影响非常显著。

由表 2 和图 2(b)可知:温度匹配养护条件下,1 d 龄期时,F20 的抗压强度超过 F0,F20K15 略低于 F0;3 d 龄期时,F20K15 的抗压强度大幅增长,达到 65.8 MPa,较 F0 和 F20 同龄期抗压强度分别高出 40.3%、16.5%,甚至高于 F0 的 28 d 和 56 d 抗压强度。矿物掺合料的水化活性低于水泥,但在图 1 所示的温度匹配养护条件下,16 h 以后混凝土的养护温度就超过 50 ℃,最高温度达 64.9 ℃,直至第

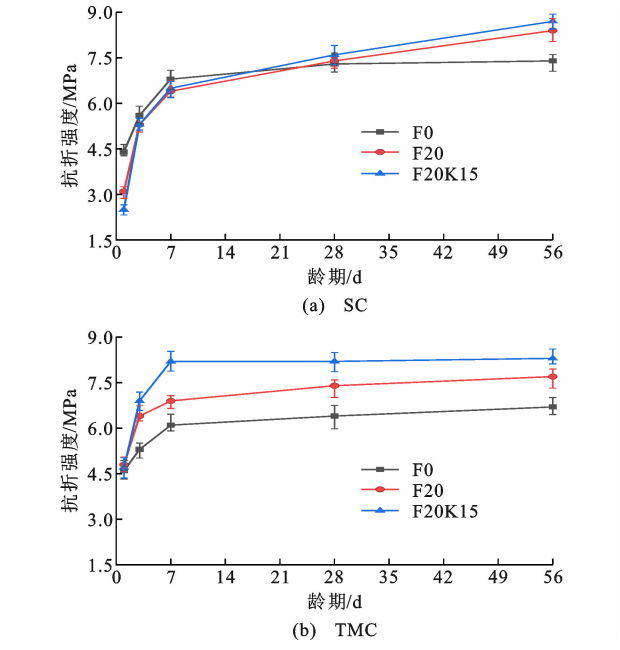


图 3 不同养护条件下混凝土抗折强度发展规律对比
Fig. 3 Comparison of flexural strength development law of concrete under different curing conditions

7 d 养护温度仍高于 50 ℃,逐渐升高的养护温度会对矿物掺合料产生持续的热激发作用^[18],提高其早期火山灰反应程度,增加水化产物量,同时不断消耗水泥水化产生的结晶粗大、胶凝性不良的 Ca(OH)₂ 晶体,通过二次水化反应将其转化为水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝性更强的产物,使得浆体结构更为致密,且能改善界面过渡区结构,导致混凝土 3 d 抗压强度大幅提高。由于高温对矿渣粉的热激发作用高于粉煤灰^[19],加上粉煤灰和矿粉复合掺合料的微集料填充效应优于单一的粉煤灰,使 F20K15 混凝土的 3 d 抗压强度最高。

7 d 温度匹配养护结束后转入标准养护,混凝土的后期强度进一步增长,但增幅很小,远低于标准养护的增幅。相比于标准养护,F0、F20、F20K15 三组温度匹配养护混凝土的 56 d 抗压强度分别降低 11.4%、2.9%、2.4%。这是由于早期较高的养护温

度提高了水泥水化速率,但早期快速水化生成的大量 C-S-H 凝胶包覆在水泥颗粒表面阻止了水泥的后续水化,致使后期水化反应程度降低^[12]。同时,水泥早期快速生成的水化产物具有结晶粗大和分布不均的特点^[20-21],形成的硬化浆体结构较为疏松^[10],而后期生成的水化产物数量较少,不足以填充其内部空隙,对浆体结构改善不多,导致温度匹配养护的混凝土早期强度高,但后期强度增幅减小,致使后期强度低于标准养护的。

总体而言,F0 的长期抗压强度在标准养护和温度匹配养护两种制度下都是最低的,F20K15 的长期强度在两种养护制度下都是最高的,而且在实体结构内部温度匹配养护条件下,其早期强度提高也最为明显,说明适当配比的复掺粉煤灰和矿物掺合料适用于配制索塔 C50 混凝土。

2.1.2 抗折强度

混凝土抗折强度能在一定程度上反映混凝土的韧性大小。一般来说,混凝土强度越高,折压比(抗折强度与抗压强度之比)越低,脆性越大^[22]。本节针对索塔 C50 混凝土的抗折强度进行了两种养护制度下的对比分析。

由图 3(a)可知,标准养护条件下 F0 的后期抗折强度增幅很小,而 F20、F20K15 增幅较大。56 d 龄期时 F20、F20K15 抗折强度比 F0 分别高出 13.5%、17.6%,此时 F20、F20K15 抗压强度仅比 F0 分别高出 3.3%、6.2%[图 2(a)],这表明标准养护条件下,C50 混凝土掺入适量矿物掺合料对后期抗折强度的提升作用要高于抗压强度,这与 Sun 等^[17]的研究结果一致。

由图 3(b)可知,在温度匹配养护条件下,F20K15 的早期抗折强度增幅相比于其他 2 组更高,7 d 抗折强度较 F0 增长 34.4%,但后期抗折强度几乎没有增长。56 d 龄期时,F20K15 的抗折强度仍较 F0 增长 23.9%,而此时抗压强度增高 15.9%,表明温度匹配养护条件对 F20K15 后期抗折强度的增益效果也比抗压强度更优,对 F20 的抗折强度与抗压强度增益相近。

整体而言,3 组混凝土在两种养护条件下的抗折强度总体发展规律与抗压强度较为类似,即温度匹配养护的混凝土早期抗折强度高,但后期增幅小,导致后期抗折强度低于标准养护。56 d 龄期时,F0、F20、F20K15 在温度匹配养护下的抗折强度较标准养护的抗折强度分别降低 9.5%、8.3%和 4.6%。就混凝土折压比结果(表 2)来看,F0 和 F20

在温度匹配养护下的各龄期折压比基本上是低于标准养护的,说明温度匹配的高温养护增加了这 2 组混凝土的脆性^[23],而 F20K15 在温度匹配和标准养护条件下同龄期的折压比有高低,总体差别不大,表明复掺矿粉和粉煤灰在一定程度上改善了温度匹配养护下混凝土脆性高的问题。

2.2 混凝土氯离子扩散系数

图 4 为不同养护条件下混凝土氯离子扩散系数对比。由图 4 可知,不管是标准养护还是温度匹配养护下,F20、F20K15 的氯离子扩散系数较 F0 均有显著降低,表明单掺粉煤灰或复掺粉煤灰和矿渣粉均能明显改善混凝土的抗氯离子渗透性能。相比于标准养护,温度匹配养护条件下 F0 的氯离子扩散系数有一定程度增加,而 F20、F20K15 有所降低,氯离子扩散系数最低的混凝土为温度匹配养护的 F20K15。温度匹配养护使混凝土快速获得较高强度,但由于其内部微结构相对较差,尤其是胶凝材料为纯水泥的混凝土,水泥在不断提高的温度作用下很快水化,早期快速水化产生的大量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、钙矾石和 C-S-H 凝胶等水化产物混乱堆叠无法扩散^[24],虽然获得了较高的强度,但混凝土内部微结构变差,降低了抗渗性。矿物掺合料的掺加缓解了温度匹配养护对抗氯离子渗透性这种不利情况的发生,因为温度匹配养护激发了粉煤灰和矿渣粉的早期活性,加速了二者的水化反应,且后期仍有一部分矿粉和粉煤灰在缓慢水化,并不断填充混凝土内部孔隙,提高混凝土密实度,从而降低氯离子的渗透。

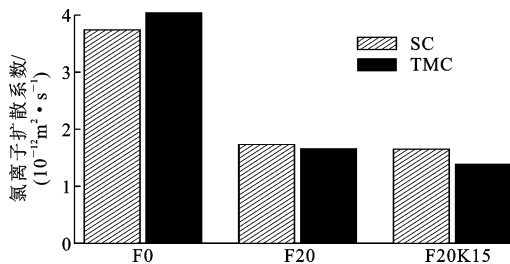


图 4 不同养护条件下混凝土氯离子扩散系数对比

Fig. 4 Comparison of chloride diffusion coefficient of concrete under different curing conditions

2.3 水化产物微观形貌

图 5 为不同胶凝材料在标准和温度匹配两种养护条件下水化 3 d 的 SEM 照片。对比图 5(a)和图 5(b)可知,相比标准养护的 F0-SC 浆体,温度匹配养护的 F0-TMC 浆体中生成了更多絮凝状的 C-S-H 凝胶,并存在数量更多的结晶粗大、呈叠片状分布的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体,这是由于水泥在温度匹配养

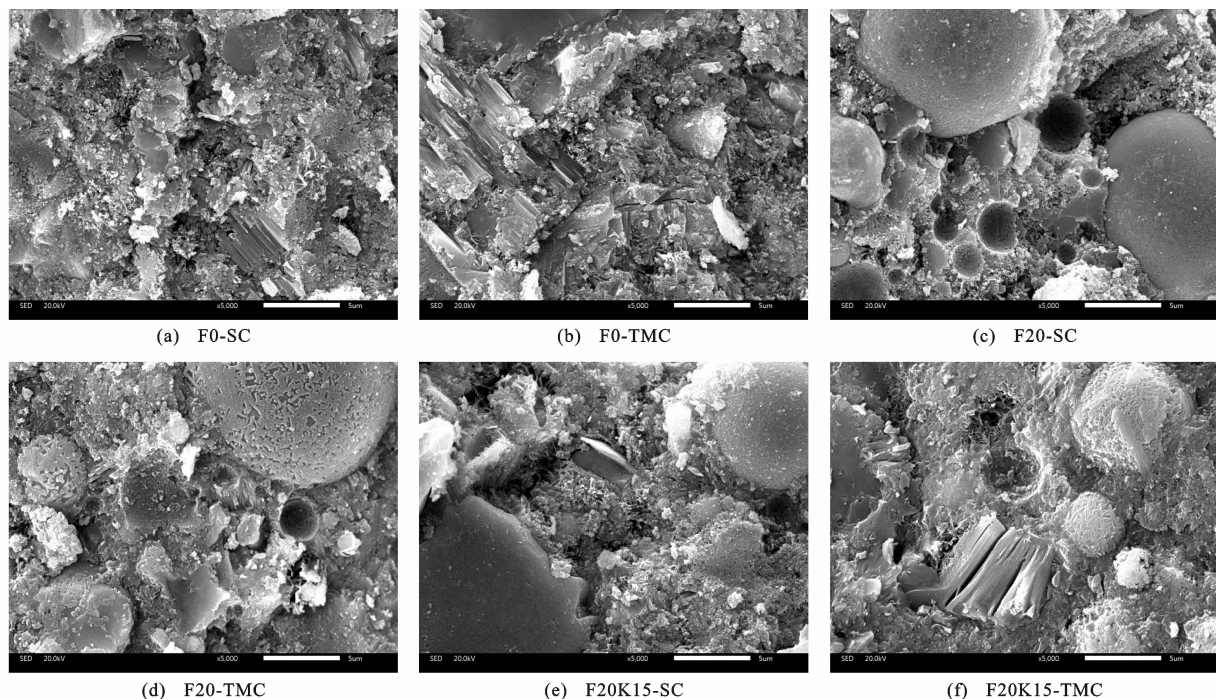


图5 不同胶凝材料浆体在不同养护条件下水化3 d的SEM照片

Fig. 5 SEM photographs of binder pastes with different mineral admixtures hydrated for 3 d under different curing conditions

护条件下迅速水化,短时间内形成大量水化产物, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 形成后来不及转移。

对比图5(c)和图5(d)可知,标准养护的F20-SC浆体微结构中存在着形态完整的粉煤灰微珠,其表面致密、光滑,未见明显的水化迹象和水化产物存在。而温度匹配养护的F20-TMC浆体中,粉煤灰表面出现明显的刻蚀痕迹,许多粉煤灰颗粒表面被C-S-H凝胶水化产物包覆,这说明温度匹配养护促进了粉煤灰在3 d龄期发生二次水化反应。

对比图5(e)和图5(f)可知,标准养护的F20K15-SC浆体中的圆球形粉煤灰颗粒和不规则的矿粉颗粒边缘清晰、表面致密,基本未见水化痕迹。温度匹配养护条件下F20K15-TMC浆体中的粉煤灰形态已经完全模糊,圆形轮廓已完全消失,表面被大量水化产物覆盖。另外,矿粉颗粒形态也已不完整,边缘出现了大量二次水化产物,这再一次证明粉煤灰和矿粉在温度匹配养护不断提高的温度作用下其水化活性得到很好的激发,在3 d龄期已经有相当程度的水化,导致F20K15混凝土具有很高的强度。

3 结语

(1)单掺20%粉煤灰、复掺20%粉煤灰和15%矿粉的C50混凝土在标准养护条件下的早期强度

低于纯水泥混凝土,后期强度高于纯水泥混凝土。温度匹配养护对混凝土早期强度具有很大的促进作用,尤其是复掺粉煤灰和矿粉的混凝土早期强度增进作用最为明显,但温度匹配养护对混凝土的后期强度发展具有抑制作用,尤其是纯水泥混凝土的后期强度显著低于标准养护。

(2)无论是标准养护还是温度匹配养护条件下,复掺粉煤灰和矿粉对混凝土后期抗折强度的提高作用均优于纯水泥混凝土抗压强度。温度匹配养护增大了纯水泥混凝土的脆性,复掺粉煤灰和矿粉可以在一定程度上改善这一不利影响。

(3)温度匹配养护降低了纯水泥混凝土的抗氯离子渗透性能,而适量掺加粉煤灰或复掺粉煤灰和矿粉可以消除这一不利影响。

(4)温度匹配养护较高的水化温度提高了矿物掺合料的水化活性,粉煤灰和矿粉在3 d龄期已参与水化,促进了矿物掺合料混凝土早期强度的快速发展,但早期快速水化生成大量水化产物形成的硬化浆体结构较为疏松,会阻碍水泥后续进一步水化,导致混凝土后期强度发展减小。

(5)温度匹配养护条件下,复掺中等掺量粉煤灰和矿粉配制的索塔C50混凝土早期强度发展最快,后期强度最高,折压比最大,抗氯离子渗透性能最好,较为适合索塔大体积混凝土结构施工使用。

参考文献:

References:

- [1] 纪登贵,肖 义.索塔实心段高强度大体积混凝土施工控裂技术研究及效果评价[J].建筑安全,2017,32(12):4-8.
JI Denggui, XIAO Yi. Research and effect evaluation of crack control technology for high strength mass concrete construction in solid section of cable tower [J]. Construction Safety, 2017, 32(12): 4-8.
- [2] 王 涛.嘉鱼长江公路大桥主墩混凝土配制及防裂技术研究[D].武汉:武汉理工大学,2017.
WANG Tao. Research on preparation and crack control technology of main pier concrete in Jiayu Yangtze River highway bridge [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [3] 周乾大,魏剑峰.安九铁路鳊鱼洲长江大桥桥塔防裂技术[J].世界桥梁,2022,50(1):40-45.
ZHOU Qianda, WEI Jianfeng. Pylon anti-cracking techniques for Bianyuzhou Changjiang River bridge of Anqing-Jiujiang railway [J]. World Bridges, 2022, 50(1): 40-45.
- [4] 徐 文,闫志刚,张士山,等.沪通长江大桥主航道桥桥塔温度场与膨胀调控抗裂技术[J].桥梁建设,2020,50(1):44-49.
XU Wen, YAN Zhigang, ZHANG Shishan, et al. Technique of controlling temperature field and concrete expansion to limit cracking in pylons of main navigational channel bridge of Hutong Changjiang River bridge [J]. Bridge Construction, 2020, 50(1): 44-49.
- [5] 马春生,王 萍.某大桥桥塔裂缝成因分析[J].公路,2002,47(8):44-47.
MA Chunsheng, WANG Ping. Analysis of crack causes of certain bridge tower [J]. Highway, 2002, 47(8): 44-47.
- [6] 成文佳,强士中,夏招广.重庆李家沱长江大桥裂缝成因分析与对策[J].四川建筑,2005,25(3):81-83.
CHENG Wenjia, QIANG Shizhong, XIA Zhaoguang. Cause analysis and countermeasures of cracks in Lijiatuo Yangtze River bridge in Chongqing [J]. Sichuan Architectural, 2005, 25(3): 81-83.
- [7] 甘应朋.夷陵大桥斜拉桥主塔下塔柱裂缝分析与处理[J].交通科技,2004(3):51-53.
GAN Yingpeng. Analysis and treatment of cracks in tower column under main tower of cable-stayed bridge of Yiling bridge [J]. Transportation Science & Technology, 2004(3): 51-53.
- [8] 徐小华,谢俊凡,夏伟航,等.矿物掺合料对桥塔混凝土性能与微结构的影响[J].中国港湾建设,2021,41(2):40-45.
XU Xiaohua, XIE Junfan, XIA Weihang, et al. Influence of mineral admixtures on performance and microstructure of bridge tower concrete [J]. China Harbour Engineering, 2021, 41(2): 40-45.
- [9] LOTHENBACH B, WINNEFELD F, ALDER C, et al. Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(4): 483-491.
- [10] KJELSEN K O, DETWILER R J, GJORV O E. Development of microstructures in plain cement pastes hydrated at different temperatures [J]. Cement and Concrete Research, 1991, 21(1): 179-189.
- [11] AL-GAHTANI A S. Effect of curing methods on the properties of plain and blended cement concretes [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(3): 308-314.
- [12] 李 响,阎培渝.高温养护对复合胶凝材料水化程度及微观形貌的影响[J].中南大学学报:自然科学版,2010,41(6):2321-2326.
LI Xiang, YAN Peiyu. Effect of high temperature curing on hydration degree and micro-morphology of complex binders [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(6): 2321-2326.
- [13] 谭克锋,刘 涛.早期高温养护对混凝土抗压强度的影响[J].建筑材料学报,2006,9(4):473-476.
TAN Kefeng, LIU Tao. Effect of high temperature curing on compressive strength of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(4): 473-476.
- [14] 阎培渝,崔 强.养护制度对高强混凝土强度发展规律的影响[J].硅酸盐学报,2015,43(2):133-137.
YAN Peiyu, CUI Qiang. Effects of curing regimes on strength development of high-strength concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(2): 133-137.
- [15] SHI M X, WANG Q, ZHOU Z K. Comparison of the properties between high-volume fly ash concrete and high-volume steel slag concrete under temperature matching curing condition [J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 649-655.
- [16] 水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规范:JTS 202-1—2010[S].北京:人民交通出版社,2010.
Technical specification for thermal cracking control of mass concrete of port and waterway engineering: JTS 202-1—2010 [S]. Beijing: China Communications

Press,2010.

[17] SUN J W,ZHANG P. Effects of different composite mineral admixtures on the early hydration and long-term properties of cement-based materials;a comparative study[J]. Construction and Building Materials, 2021,294:123547.

[18] WANG Q,FENG J J,YAN P Y. An explanation for the negative effect of elevated temperature at early ages on the late-age strength of concrete[J]. Journal of Materials Science,2011,46(22):7279-7288.

[19] XU G D,TIAN Q,MIAO J X,et al. Early-age hydration and mechanical properties of high volume slag and fly ash concrete at different curing temperatures [J]. Construction and Building Materials,2017,149: 367-377.

[20] JUNG W,CHOI S J. Effect of high-temperature curing methods on the compressive strength development of concrete containing high volumes of ground granulated blast-furnace slag[J]. Advances in Materials Science and Engineering,2017,2017:7210591.

[21] YANG K H,MUN J S,CHO M S. Effect of curing temperature histories on the compressive strength development of high-strength concrete[J]. Advances in Materials Science and Engineering,2015,2015:965471.

[22] CUI H Z,LO T Y,ALI MEMON S,et al. Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 149-158.

[23] LOU B X,MA F H. Crack extension resistance of steam-cured concrete under different curing temperature conditions[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2022,119:103331.

[24] 江守恒. 大体积混凝土实体强度发展规律及其评价方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.

JIANG Shouheng. Study on the development law and evaluation method of solid strength of mass concrete [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2006.