

养护温度对 UHPC 力学性能的影响

侯庆刚¹, 乔大玮¹, 胡凤娇¹, 蒋雪妮², 张爱勤², 王日升²

1. 威海市公路勘察设计院有限公司, 山东 威海 264200; 2. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357

摘要:为分析标准养护(20℃)、高温养护(70℃)对超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)力学性能的影响规律,在不同养护方式与养护龄期(3、7、28 d)下对不同配合比制备的 UHPC 进行抗压、抗折、抗拉及弹性模量试验,测试 UHPC 的力学性能。结果表明:高温养护能有效改善 UHPC 的力学性能,抗压强度增长均匀,抗折强度增幅显著,养护 7 d 时 UHPC 的抗压、抗折强度的增幅均最大,养护 28 d 时 UHPC 的抗压与抗折强度增大缓慢;UHPC 抗拉强度及弹性模量的增大规律基本一致,养护 7 d 时达到最大抗拉强度与弹性模量,养护 28 d 时,抗拉强度与弹性模量不再增大或略有下降。选择在(70±2)℃进行高温养护,养护龄期为 7 d。

关键词: UHPC; 标准养护; 高温养护; 强度; 弹性模量

中图分类号: U416.216; U414

文献标志码: A

文章编号: 1672-0032(2024)02-0042-05

引用格式: 侯庆刚, 乔大玮, 胡凤娇, 等. 养护温度对 UHPC 力学性能的影响[J]. 山东交通学院学报, 2024, 32(2): 42-46.

HOU Qinggang, QIAO Dawei, HU Fengjiao, et al. The influence of maintenance temperature on the mechanical properties of UHPC[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(2): 42-46.

0 引言

超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)是近年备受关注的新型水泥基工程材料^[1-3],与传统混凝土相比,具有较好的力学性能和耐久性。在制备 UHPC 过程中减小了水胶比,不使用粗骨料,增大水泥用量,成本相应增大。为降低 UHPC 的制备成本,常将粉煤灰、矿渣粉、炉渣等工业掺合料引入胶凝材料体系,代替部分水泥或硅灰^[4-5]。

在标准养护条件下, UHPC 中的水泥、硅灰常因缺水难以参与水化反应,只充当填充材料,限制了 UHPC 力学性能的发展,高温养护可加速水泥熟料的水化和火山灰反应,使 UHPC 在较短时间内获得优异的力学性能^[6]。热养护能加速 UHPC 的水化过程,比标准养护下制备的试件具有更高的早期抗拉压强度和更致密的微观结构^[7-8];高温高湿的养护环境有助于水泥二次水化,优化孔隙结构,对 UHPC 力学性能的改善效果优于干热养护^[9];采用 40、60℃热水养护,养护 28 d 的 UHPC 试件的抗压强度为 160、180 MPa^[10],采用 80℃热水养护,养护 28 d 的 UHPC 试件的抗折强度增大 8%~15%^[11];经 85℃蒸养 3 d 的 UHPC 的抗压、抗折强度比标准养护 90 d 的 UHPC 分别增大 33.3%、3.23%^[12];热养护能显著提高 UHPC 的早期抗拉压强度,但不利于后期抗拉压强度的发展,在 150℃干热养护条件下,养护 120 d 的 UHPC 的抗压强度减小 3%^[13-15];试件经 250℃干热养护后接触水分,后期抗拉压强度明显减小,在 90℃蒸养条件下,是否接触水分对试件的强度和微观结构的影响均较小^[16];高温养护升温速率不宜大于 20℃/h,升温速率过大易导致试件内外温差较大,产生微裂缝^[17]。关于养护温度对 UHPC 性能的影响尚未有统一的定论。

收稿日期: 2022-11-22

基金项目: 山东省交通运输科技计划项目(2023B90)

第一作者简介: 侯庆刚(1979—),男,辽宁庄河人,高级工程师,主要研究方向为道路与桥梁设计, E-mail: 19861835974@139.com。

本文通过制备不同配合比的UHPC,对UHPC进行抗拉、抗折、抗压强度和弹性模量试验,分析标准养护和高温养护对UHPC力学性能的影响,研究不同养护温度对UHPC力学性能影响的变化规律,以此确定UHPC工业化的最优技术参数和指导措施。

1 试验材料与配合比

1.1 UHPC原材料

以P.O 42.5普通硅酸盐水泥为原材料,对其进行化学分析和物理、力学性能检测,主要成分MgO、SO₃、CaO、Al₂O₃、Fe₂O₃、SiO₂的质量分数分别为4.26%(技术标准为不大于6.00%)、2.37%(技术标准为不大于3.50%)、60.31%、5.14%、3.02%、20.13%。硅酸钙矿物(CaO和SiO₂)的质量分数为80.44%,满足不小于66.00%的标准要求,CaO与SiO₂的质量比为2.99,满足不小于2.00的要求^[18]。

P.O 42.5普通硅酸盐水泥的主要物理及力学性能指标如表1所示。标准稠度用水量为28.6%,密度为2.62 g/cm³。由表1可知,P.O 42.5普通硅酸盐水泥的物理与力学性能指标符合标准要求^[18]。

表1 P.O 42.5普通硅酸盐水泥的主要物理及力学性能指标

项目	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	安定性/mm	烧失量/%	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
				初凝	终凝	3 d	7 d	3 d	7 d
实测结果	388	1.0	4.77	212	285	5.0	8.5	25.4	54.2
技术标准	≥300	≤5.0	≤5.00	≥45	≤600	≥4.0	≥6.5	≥17.0	≥42.5

UHPC的细集料为工业级石英砂,SiO₂的质量分数为98.8%;选取粒径分别为0.63~1.25 mm(粗砂)、0.315~0.63 mm(中砂)进行二级掺配,推荐粗砂与中砂的质量比为70:30。

以减水率为30%的固态粉末状聚羧酸减水剂为UHPC的外加剂。采用长12~16 mm、直径为0.18~0.22 mm、抗拉强度为2 080 MPa的平直形短钢纤维。

1.2 试验配合比

以强度等级UHPC100为目标,以低水胶比、各组分用量规定和要求为设计原则进行UHPC配合比试验研究^[19-20]。设计2组UHPC试验配合比如表2所示。

表2 UHPC试验配合比

组别	水胶比	质量/g					
		水泥	矿物掺合料	粗砂	中砂	钢纤维	减水剂
A ₁	0.17	915	0	660	420	167	9.15
A ₂		630	360	810	358	180	9.90

2 制备工艺与养护方法

采用振动搅拌机将称量好的水泥、减水剂、掺合料干拌1 min,加入水,在搅拌锅内慢搅3 min,加入钢纤维、石英砂后快搅1 min,停拌30 s,再快搅1 min。拌制后,采用分层震动法将UHPC试件振实成型。将浆体倒入模具,满1/3处停止倾倒,将模具放置在振动台上,振跳25次后沿试模内壁进行插捣,再倒入剩余浆体,重复此步骤至浆体填满模具,刮除模具表面多余拌合物并抹平,用湿塑料薄膜覆盖试件表面,置于室内24 h后拆模,进行试件养护。

采用标准养护、高温养护2种养护方式。基础养护方法为标准养护,采用标准养护箱,将养护温度调至(20±2)℃,试件拆模后放入养护箱,表面浸没水中,养护龄期分别为3、7、28 d,定期更换水槽内的水确

保水质的清洁程度。对比养护方式为高温养护,即将试件放置在恒温水浴中,保持升温速度小于 $12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,升温至 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,保证恒温箱内温度为 $(70\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$,分别养护3、7、28 d,完成养护后进行抗压、抗折、抗拉等力学性能试验。

3 力学试验与结果分析

3.1 抗压强度与抗折强度

按照文献[21]要求进行试件的抗压、抗折强度试验。采用长、宽、高分别为160、40、40 mm的小梁试件,由每3个试件的平均抗压、抗折强度确定最终破坏荷载。各组试件养护3、7、28 d的抗压强度、抗折强度如表3所示,技术要求抗压强度不小于100 MPa,抗折强度不小于12 MPa^[19]。

表3 各组试件的抗压强度、抗折强度 单位:MPa

组别	抗压强度			抗折强度		
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
A _{1-a}	70.0	102.0	106.8	24.3	27.5	30.6
A _{1-b}	78.8	112.0	117.6	27.5	34.3	36.2
A _{2-a}	98.0	116.7	124.8	30.2	34.1	36.8
A _{2-b}	106.7	130.8	136.6	33.4	38.8	42.1

注:a为标准养护,b为高温养护。

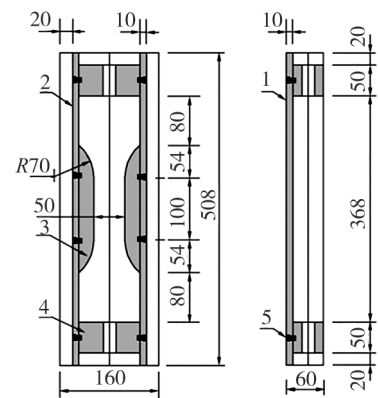
由表3可知:试件分别经过高温养护与标准养护3、7、28 d后的抗压强度、抗折强度均随养护龄期的增加而增大;与同龄期标准养护试件相比,高温养护A₁、A₂组试件的抗压强度分别增大9.8%~12.6%、8.9%~12.1%,高温养护后抗压强度的增幅较均匀;高温养护3、7、28 d试件的抗折强度比标准养护试件的增大较显著,A₁试件分别增大13.2%、24.7%、18.3%,A₂试件分别增大10.6%、13.8%、14.4%;A₂试件在2种养护条件下的抗压与抗折强度均比A₁试件大,A_{2-b}组试件养护3、7、28 d的抗压强度、抗折强度比A_{1-a}组试件均有大幅增大,分别增大27.9%~52.4%、37.4%~41.1%;2种养护条件下,A₁、A₂试件养护7 d的抗压强度与抗折强度均高于UHPC的标准要求^[22]。推荐A₁、A₂试件的最佳养护条件为高温养护7 d;若能严格控制高温养护条件,从经济因素考虑选择A₂组,并适当考虑养护龄期为3 d。

高温养护能提高水泥的早期水化速度,同时矿物掺合料中具有反应活性的成分能与水泥的水化产物Ca(OH)₂反应生成大量C-S-H凝胶体,增大UHPC的早期密实度。矿物掺合料与高温养护的共同作用大大改善UHPC的力学性能。UHPC的早期水化产物可强化其与钢纤维的黏结力,在高温养护环境中,A_{1-b}与A_{2-b}试件的抗折强度增幅比标准养护环境下试件大。

3.2 抗拉强度

参照文献[22]要求进行抗拉强度试验,试验机为MTS-810材料动态测试系统,采用工字形试件,加工试模的结构如图1所示,各组试件养护3、7、28 d的抗拉强度如表4所示。

由表4可知:在高温养护条件下,A₁组试件在养护3、7、28 d时的抗拉强度随养护龄期的增加而先增大后缓慢减小,在标准养护条件下,UHPC的抗拉强度随龄期的增加而线性增大;A₂组试件在2种养护条件下的抗拉强度均随龄期增加而增大。2种养护条件下,A₁、A₂组试件养护7 d的抗拉强度均满足



a) 主视图

b) 左视图

1—块板;2—厚超板;3—带弧度厚板;
4—带孔质板;5—螺丝。

单位:mm。

图1 抗拉试件试模结构示意图

UHPC 不小于 5.0 MPa 的技术要求^[22],高温养护环境下,UHPC 的抗拉性能明显更优,2 组配比试件的抗拉强度比标准养护试件分别提高 49.1%、16.2%;高温养护条件下,A₁ 养护 28 d 的抗拉强度比养护 7 d 略小,A₂ 养护 7 d 的抗拉强度与养护 28 d 相差不多,为 0.3 MPa,高温养护环境对提高后期抗拉强度的效果不大。高温养护 7 d 为最优养护龄期。依据抗拉强度技术要求,A₂ 组在高温养护条件下也可考虑选择养护龄期为 3 d。

高温养护有助于水泥及掺合料水化产物的结晶生长,使其更紧密、均匀地分布在混凝土中,增大 UHPC 的致密性和均匀性,提高抗拉强度。高温养护条件下,水泥水化产物-钙矾石在混凝土表面聚集形成通道,混凝土界面过渡区出现明显的孔隙和微裂缝,随养护时间的延长而增长。UHPC 养护 28 d 的抗拉强度增大速度缓慢,随龄期继续增加,后期抗拉强度增幅减小。

3.3 弹性模量

依据文献[23]进行静力受压弹性模量试验,采用 TYE-2000B 型压力试验机,试件长、宽、高分别为 100、100、300 mm。各组试件养护 3、7、28 d 的弹性模量如表 5 所示。

由表 5 可知:1)UHPC 的弹性模量受养护条件影响产生的变化规律,与抗拉强度的变化规律基本一致。在 2 种养护条件下,A₁、A₂ 组试件的弹性模量均随养护龄期的延长而增大,养护超过 7 d 时,2 组试件的弹性模量均满足 UHPC 弹性模量不小于 40.0 GPa 的要求^[22]。2)高温养护环境下,A₁ 组试件养护龄期为 7、28 d 的弹性模量相差不多;A₂ 组试件的弹性模量始终保持线性增大,高温养护 28 d 时,UHPC 的弹性模量最大。高温养护条件下,UHPC 中的低密度 C-S-H 凝胶减少,高密度 C-S-H 凝胶比标准养护条件下明显增多,养护 28 d 的 UHPC 中低、高密度 C-S-H 凝胶的压痕模量分别提高约 4.0%、12.9%^[24],间接增大了 UHPC 的弹性模量。3)在标准养护下,A₁、A₂ 组试件的弹性模量后期增幅均较大,养护 28 d 试件的弹性模量与高温养护条件下养护 7 d 试件的弹性模量相当;高温养护使养护 7 d 试件的弹性模量迅速增大,后期增速较缓。

4 结论

1)研究 UHPC 在标准养护与高温养护条件下的抗压、抗折、抗拉强度和弹性模量,2 种养护条件下,UHPC 的抗压强度与抗折强度均随养护龄期的增加而增大,高温养护 UHPC 的抗压、抗折强度比标准养护条件下的试件均有明显增大。

2)UHPC 的抗拉强度与弹性模量受养护条件影响的变化规律基本一致,均为高温养护条件下无矿物掺合料的 A₁ 试件的抗拉强度与弹性模量随养护龄期增加而先增大后缓慢减小,A₂ 组线性增大;标准养护条件下,2 组试件的抗拉强度与弹性模量随养护龄期增加而线性增大。

3)2 种养护方式均有利于提高 UHPC 的力学性能,工厂化生产选择高温养护(70±2)℃,最佳养护龄期为 7 d。UHPC 现场施工尽可能采用较高温度养护至 28 d。

参考文献:

- [1] ARORA A, ALMUJADDIDI A, KIANMOFRAD F, et al. Material design of economical ultra-high performance concrete (UHPC) and evaluation of their properties[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104:103346.
- [2] 姚山,杨忠平,葛文杰,等.超高性能混凝土工作及力学性能分析[J].建筑结构,2023,53(2):142-147.

表 4 各组试件的抗拉强度

组别	抗拉强度/MPa		
	3 d	7 d	28 d
A _{1-a}	4.3	5.5	6.9
A _{1-b}	6.7	8.2	8.0
A _{2-a}	5.5	6.8	7.6
A _{2-b}	6.4	7.9	8.2

表 5 各组试件的弹性模量

组别	弹性模量/GPa		
	3 d	7 d	28 d
A _{1-a}	32.1	40.5	46.6
A _{1-b}	36.2	47.5	47.3
A _{2-a}	36.5	44.8	49.6
A _{2-b}	39.2	49.7	54.3

- [3] AL-TIKRITTE A, HADI M. Mechanical properties of reactive powder concrete containing industrial and waste steel fibres at different ratios under compression[J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 154: 1024–1034.
- [4] 朱从香, 杨鼎宜, 王群, 等. 养护制度对UHPC力学性能的影响研究[J]. *混凝土*, 2020(10): 43–46.
- [5] 崔存森. 养护制度对超高性能混凝土收缩徐变及其基本力学性能的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [6] 吴建东, 郭丽萍, 曹园章, 等. 蒸汽养护制度对超高性能混凝土早期力学性能及微观结构的影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(4): 744–752.
- [7] 徐翔波, 于泳, 金祖权, 等. 养护制度对超高性能混凝土微观结构和力学性能影响的研究综述[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(9): 2856–2870.
- [8] 钟维军, 金权, 贺智敏, 等. 养护对超高性能混凝土强度和显微硬度的影响[J]. *混凝土*, 2021(8): 33–37.
- [9] 孙嘉伦, 张春晓, 毛继泽, 等. 养护制度对超高性能混凝土强度的影响机理研究[J/OL]. *材料导报*. (2023-09-01) [2023-11-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20230831.1911.011.html>.
- [10] 杨胜江. 不同养护制度对RPC混凝土力学性能的试验[J]. *低温建筑技术*, 2013, 35(7): 20–22.
- [11] 牛旭婧, 朋改非, 尚亚杰, 等. 热水-干热组合养护对超高性能混凝土力学性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(8): 1141–1148.
- [12] 陈聪聪, 吴泽媚, 胡翔, 等. 钢纤维形状和养护制度对超高性能混凝土强度及韧性的影响[J/OL]. *材料导报*. (2023-07-12) [2023-11-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20230712.1538.003.html>.
- [13] 施范铎, 贺智敏, 刘畅, 等. 养护条件对UHPC强度和毛细吸水性的影响[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2022, 35(3): 10–18.
- [14] 张爽. 养护制度对活性粉末混凝土力学性能的影响机理分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [15] 欧阳利军, 钱鹏, 高皖扬, 等. 养护制度对超高性能混凝土高温损伤后残余力学性能的影响[J]. *工业建筑*, 2020, 50(8): 92–100.
- [16] 罗遥凌, 高育欣, 闫欣宜, 等. 热养护UHPC后期水稳定性[J]. *材料导报*, 2021, 35(增刊1): 242–246.
- [17] 牛志强, 郭阳. 蒸养参数对活性粉末混凝土抗氯离子渗透性的影响[J]. *新型建筑材料*, 2017, 44(8): 127–130.
- [18] 中华人民共和国工业和信息化部. 通用硅酸盐水泥: GB 175–2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [19] 全国混凝土标准化委员会(SAC/TC 458). 活性粉末混凝土: GB/T 31387–2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [20] 宋天威, 左彦峰, 姚越. 超高性能混凝土配合比设计及搅拌工艺研究综述[J]. *混凝土世界*, 2023(10): 86–90.
- [21] 全国水泥标准化技术委员会. 水泥胶砂强度检验方法: GB/T 17671–2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [22] 中国建筑材料联合会, 中国混凝土与水泥制品协会. 超高性能混凝土基本性能与试验方法: TCBMF 37—2018 TCCPA[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [23] 中国工程建设标准化协会混凝土结构专业委员会. 超高性能混凝土试验方法: T/CECS 864–2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [24] 王猛, 龙广成, 石晔, 等. 基于纳米压痕技术的蒸养高强水泥浆体微观力学性能试验研究[J]. *电子显微学报*, 2015, 34(6): 476–481.

The influence of maintenance temperature on the mechanical properties of UHPC

HOU Qinggang¹, QIAO Dawei¹, HU Fengjiao¹, JIANG Xueni²,
ZHANG Aiqin², WANG Risheng²

1. Weihai Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., Weihai 264200, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: To analyze the influence of standard maintenance (20 °C) and high-temperature maintenance (70 °C) on the mechanical properties of ultra-high performance concrete (UHPC), compressive tests, rupture
(下转第 59 页)