

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.039

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



水胶比对超高性能混凝土施工与力学性能的影响

李传习, 聂洁, 潘仁胜, 石家宽, 曾宇环, 贺君

(长沙理工大学 桥梁工程安全控制教育部重点实验室, 长沙 410114)

摘要: 兼顾优异施工及力学性能超高性能混凝土(UHPC)研制的重点之一是确定合适的水胶比。为此, 以 150 MPa 级 UHPC 的原材料和配合比均不变(除用水量外)为前提, 研究水胶比(0.15~0.2)对 UHPC 施工与力学性能的影响规律。通过相关试验得到了 UHPC 不同湿拌时间的扩展度、充分湿拌时间、静停一段时间的扩展度、抗压、抗折强度、四点弯曲应力-挠度曲线、四点弯曲出现可视裂纹时下缘等效拉应力; 对抗压、抗折强度进行了变异性分析; 利用应力-挠度曲线, 基于规范法得到了弯曲韧性指标, 并提出了其改进方法。结果表明: UHPC 达最佳扩展度所需湿拌时间(充分湿拌时间)为 6 min; 水胶比由 0.16 增至 0.19 时 UHPC 扩展度基本呈线性增长, 水胶比每增加 0.01, UHPC 扩展度平均增幅为 109 mm; 当水胶比、静停时间分别为 0.19、4 h 时, 扩展度损失 40 mm, 损失率仅 5.9%; UHPC 抗压强度、抗折强度及弯曲韧性指标随水胶比的增大皆呈先增后减趋势, 当水胶比分别为 0.18、0.16 和 0.16 时达到最优; 应力峰值前的应力-挠度曲线并不是典型全凸形曲线; 可视初裂抗折强度约为抗折强度的 0.85 倍; UHPC 试件的弯曲韧性较好, 宜采用可视初裂挠度作为初始变形参考进行韧性指标计算; 为保证 UHPC 兼顾良好施工与力学性能, 建议湿拌时间、水胶比分别为 6 min、0.18 或 0.185。

关键词: 超高性能混凝土; 施工性能; 力学性能; 水胶比; 初裂挠度; 弯曲韧性

中图分类号: TU528.31; U444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2020)04-0164-11

Effect of water-to-binder ratio on construction and mechanical properties of ultra-high performance concrete

Li Chuanxi, Nie Jie, Pan Rensheng, Shi Jiakuan, Zeng Yuhuan, He Jun

(Key Laboratory of Bridge Engineering Safety Control of Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, P. R. China)

Abstract: One of the key points for developing ultra-high performance concrete (UHPC) with good

收稿日期: 2019-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(51778069); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB057700); 湖南省研究生科研创新项目(CX2016B386); 长沙理工大学南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方联合工程实验室开放基金(16BCX01)

作者简介: 李传习(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事大跨度桥梁结构计算理论与新材料、新技术、新工艺研究, E-mail: lichuanxi2@163.com。

Received: 2019-11-17

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51778069); Major State Basic Research Development Program of China (973 Program) (No. 2015CB057700); Hunan Postgraduate Research Innovation Project (No. CX2016B386); Open Fund of National Joint Engineering Research Laboratory for Long-term Performance Improvement Technology for Bridges in Southern China (CSUST) (No. 16BCX01)

Author brief: Li Chuanxi (1963-), PhD, professor, doctoral supervisor, main research interests: structure calculation theory, new materials, new technologies and new processes of long-span bridge, E-mail: lichuanxi2@163.com

construction is to determine the suitable water-binder ratio. Based on the premise that the typical raw materials and mix ratio of 150MPa grade UHPC remained unchanged (except water consumption), the influence of water-to-binder ratio (0.15~0.2) on the construction and mechanical properties of UHPC were studied. Through relevant tests, the extension degree, compression resistance, bending strength, four-point bending stress-deflection curve, and equivalent tensile stress of UHPC under different wet mixing time (full wet mixing time, static stop for a period of time) were obtained. Subsequently, the variability of compressive strength and flexural strength results were analyzed; Using the stress-deflection curve, the index of bending toughness was obtained based on the standard method. At the same time, an improved method for calculating flexural toughness index of UHPC was proposed. The test results show that the full wet mixing time of UHPC is 6 min. The extensibility of UHPC increases linearly when the water-to-binder ratio increases from 0.16 to 0.19. And at this time, the average extensibility rate of UHPC increases to 109 mm with the water-to-binder ratio increases by 0.01. The extensibility loss of UHPC is 40mm, and the loss rate is only 5.9%, when the water-to-binder ratio and standing time are 0.19 and 4h. The compressive strength, flexural strength and flexural toughness index of UHPC all increase first and then decrease with increasing of water-to-binder ratio, and when the water-to-binder ratio is 0.18, 0.16 and 0.16 respectively, the three mechanical properties reach the best. The stress-deflection curve before the stress peak is an atypical full convex curve. The strength of visible first crack is about 0.85 times that of flexural strength. The flexural toughness of UHPC is good, so it is better to use visible first crack deflection as the initial deformation reference to calculate the flexural toughness index. In order to ensure the good construction and mechanical properties of UHPC, the wet mixing time and water-to-binder ratio should be 6min, 0.18 or 0.185 respectively.

Keywords: ultra-high performance concrete; construction performance; mechanical properties; water-binder ratio; first crack deflection; bend ductility

超高性能混凝土,简称 UHPC,是近 30 年来最具创新性的水泥基材料,其拥有两方面“超高”,即超高耐久性和超高力学性能^[1-2]。其中,超高强度和超高韧性是 UHPC 最重要也是最基本的力学特性^[3],前者主要来源为水泥、微硅粉等的水化产物 CSH 凝胶^[4];超高韧性主要源自钢纤维对 UHPC 基体内裂缝的抑制作用^[5-6]。超高韧性不仅体现了混凝土材料抗弯性能,亦可在一定程度间接反映材料的抗拉性能^[7-8];而扩展度决定了 UHPC 的施工性能^[9]。

Wille 等^[10]研究发现,随着水胶比的增大, UHPC 抗压和抗折强度均呈下降趋势,当水胶比超过 0.2 时,下降幅度显著增加,扩展度则基本呈线性增长;Aïtcin^[11]的研究结果表明,水胶比的大小直接影响到混凝土的孔隙率、密度和力学性能。其中,随着水胶比的降低,混凝土强度有着较显著提升。文献^[12-16]的研究成果也表明,当水胶比增大时, UHPC 抗压强度降低,流动性增强;Lee 等^[17]研究却表明,超高强混凝土抗压强度随水胶比增大总体呈“上下波动”;Rao^[18]的试验结果显示,不同养护龄

期、不同硅灰掺量下,混凝土抗压强度随水胶比增大均呈先增后减趋势;鞠杨等^[19]研究表明, UHPC 的抗压、抗折强度随水胶比(0.16~0.19)的增大呈“先增后减”趋势,并在水胶比为 0.17 时达最优;刘娟红等^[20]认为,水胶比过低时, UHPC 混合料的粘度很大,在振捣过程中,其内部的空气难以排出,较大程度影响了密实度。由此可见, UHPC 扩展度随水胶比增大的变化规律明晰,但抗压、抗折强度的变化规律尚无统一结论。

UHPC 试件强度的变异性影响设计强度值的确定,也是其性能稳定性的重要指标。制作 UHPC 所需的搅拌时间影响生产效率,新拌 UHPC 的扩展度及其静停一段时间的扩展度直接决定了它的施工性能。但是,对 UHPC 试件的强度变异性、制作 UHPC 的搅拌时间和搅拌后静停时间对扩展度影响的研究,除李传习等^[16]外,还未见报道。文献^[16]针对上述影响规律等进行了研究,但研究的对象是强度等级稍低的 UHPC(120 MPa 级)。其基础配比中,用粉煤灰和石英粉部分代替了水泥和超级

矿粉,虽有利于减少资源消耗,但强度等级有限。因原材料有所变化,水胶比影响规律、强度变异性、扩展度的湿拌时间与静停时间影响规律必然不同。目前,关于 UHPC 弯曲韧性(尤其是水胶比对 UHPC 弯曲韧性影响)的报道较少,且主要是通过分析应力-挠度曲线的变化趋势或比较曲线所包围面积^[16, 21-23],存在较显著的局限性。而诸如 ASTM C 1018(美国规范)^[24]、JSCE-SF4(日本规范)^[25]及借鉴两者并有所拓展的中国规范 CECS13:2009^[26]等虽规定了详细的评判标准,但在 UHPC 领域鲜有应用,有必要进一步计算验证。另外,文献[16]运用规范 CECS 13:2009 确定弯曲初裂挠度时易产生人为误差,导致弯曲韧性指标计算不够精确等不足。因此,有必要对规范法进行一定改进并通过特定方法以提高计算精度。

笔者以研制施工性能和力学性能优良的 150 MPa 级 UHPC 为目标,在水胶比(water-to-binder ratio, W/B)0.15~0.2 范围内首先考察 UHPC 扩展度(不同搅拌时间和静停时间)、抗压强度及抗折强度(包括抗压、抗折强度的变异性)的变化趋势;采用 CECS 13:2009 及其改进后的方法计算 UHPC 弯曲韧性指标随水胶比的变化趋势。还将运用一种由加拿大学者 Banthia 等^[27]提出的基于应力-挠度曲线来计算材料韧性指标的 Nemkumar 法,该方法最大的优点是不依赖初裂挠度的同时亦可充分利用下降段曲线,使计算结果几乎零误差,该方法可作为 CECS 13:2009 及其改进方法的最佳对比评判标准。

1 试验方案

1.1 UHPC 材料组成

水:选用城市自来水;水泥:选用 P. O 52.5 级普通硅酸盐水泥,实测抗压和抗折强度分别为 33.8、6.6 MPa(3 d)、61.37、8.5 MPa(28 d),细度(80 μm)1%,比表面积 342 m^2/kg ,烧失量 1.95%;微硅粉:SiO₂ 含量为 95% 的灰色粉末,其余化学组分及物理特性见文献[16];石英砂:26~40 目的精制石英砂;纳米矿粉:粒径为 8 000 目,外观呈白色;减水剂:聚羧酸系高效减水剂,减水效率 30% 以上;钢纤维:镀铜平直钢纤维,尺寸和体积掺量分别为 13 mm \times 0.2 mm 和 2.5%。

1.2 试件制作与养护机制

试件尺寸及数量见表 1,试件制作过程及养护制度分别见图 1 和图 2。蒸汽养护时,升温速度控制在 12 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$,升温至 95 $^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 后,保持 48 h。然后以不超过 15 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的降温速度使得试件表面温度降至环境温度,然后进行试验(GB/T 31387—2015)。

表 1 试件尺寸及数量		
Table 1 Size and amount of UHPC specimens		
试验类型	尺寸	数量
抗压	100 mm \times 100 mm \times 100 mm	6
抗折	100 mm \times 100 mm \times 400 mm	3

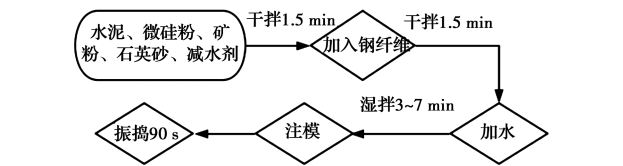


图 1 UHPC 试件制作流程图
Fig. 1 Flow chart of UHPC specimen making

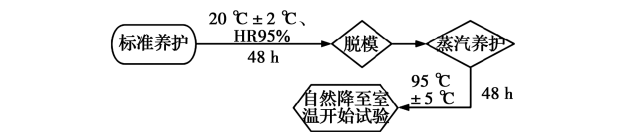


图 2 试件养护制度
Fig. 2 Maintenance system of UHPC specimens

1.3 试验方法

扩展度、抗压强度及弯曲韧性(抗折强度)试验方法同见文献[16]。其中,弯曲韧性(抗折强度)试验的加载控制模式为位移控制,加载速度为 0.02 mm/min。

2 试验结果分析

2.1 水胶比对 UHPC 扩展度的影响

图 3 给出了水胶比增大时,UHPC 扩展度随之变化曲线(湿拌 6 min、除加水量外其他材料掺量及搅拌制度不变,下同)。图 4 给出了水胶比为 0.19、湿拌 6 min 的条件下,静停时间与 UHPC 扩展度的关系曲线。同时,考虑到湿拌时间对 UHPC 扩展度的影响,图 5 给出了水胶比、湿拌时间与新拌 UHPC 扩展度的对应关系。由图 3~图 5 可见:1)UHPC 扩展度随着水胶比的增大显著改善。当水胶比从 0.15 增至 0.2 时,UHPC 扩展度平均增加达

76 mm。当水胶比以 0.16 为起点均匀增至 0.19 时,UHPC 扩展度基本以线性增长,平均增加达 109 mm。2)当水胶比为 0.19 时,UHPC 混合料在静停时间 1.5 h 以内的扩展度损失仅有 5 mm。随着静停时间继续增长,UHPC 扩展度损失率增大,4 h 静停后的扩展度损失 40 mm,损失率仅 5.9%。3)搅拌时间与 UHPC 扩展度之间存在“正相关”的关系。但当搅拌时间超过 6 min 后,UHPC 混合料的扩展度基本不再增加,该时间称为充分湿拌时间。因此,后续的 UHPC 抗压及弯曲韧性试验中均将湿拌时间控制为 6 min,即采用充分湿拌时间。

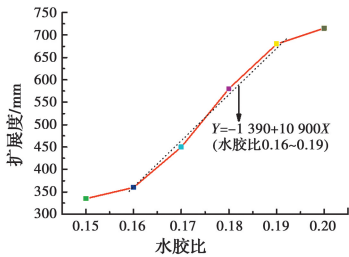


图 3 水胶比对 UHPC 扩展度的影响

Fig. 3 Influence of water-to-binder ratio on extensibility of UHPC

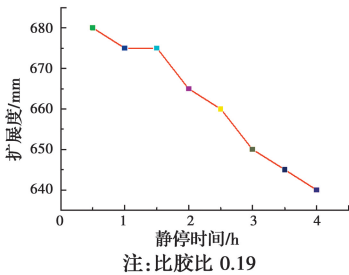


图 4 静停时间对 UHPC 扩展度影响

Fig. 4 Influence of standing time on extensibility of UHPC

表 2 抗压及抗折强度平均值、标准值、标准差与变异系数

水胶比	f_{cc}/MPa				f_{cf}/MPa				f_{cfa}/MPa
	μ	δ	c_v	$f_{cc,k}$	μ	δ	c_v	$f_{cc,k}$	μ
0.15	150.38	5.086	0.034	142.01	32.20	0.317	0.010	31.68	27.64
0.16	152.88	10.270	0.067	135.98	42.07	1.457	0.035	39.67	35.20
0.17	172.03	6.475	0.038	161.38	36.80	0.567	0.015	35.87	32.83
0.18	172.58	6.370	0.037	162.10	33.01	1.575	0.048	30.42	27.12
0.19	154.82	8.971	0.058	140.06	30.37	1.007	0.033	28.71	25.91
0.20	145.52	11.700	0.080	126.28	28.05	1.795	0.064	25.10	23.83

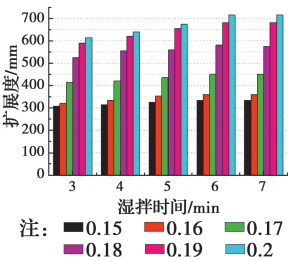


图 5 不同水胶比及湿拌时间时 UHPC 扩展度

Fig. 5 The extensibility of UHPC with different water-to-binder ratio and mixing time

2.2 水胶比对 UHPC 强度的影响

表 2 给出了不同水胶比时 UHPC 抗压强度 (f_{cc}) 及抗折强度 (f_{cf}) 的平均值 μ 、标准值 ($f_{cc,k}/f_{cf,k}$, 见式(1))、标准差 δ 和变异系数 c_v 。此外,还包括可视裂纹抗折强度 f_{cfa} 的平均值。图 6 和图 7 给出了抗压强度和抗折强度的平均值和标准值随水胶比增大的折线图;图 8 为不同水胶比 UHPC 受压破坏形态(从左至右水胶比依次为 0.15、0.16、…、0.2)。

$$f_{cc,k}(f_{cf,k}) = \mu - 1.645\delta \tag{1}$$

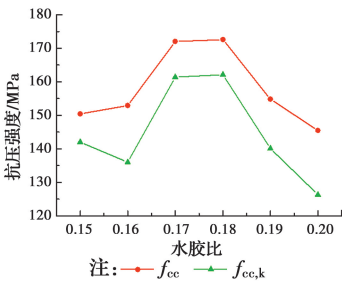


图 6 水胶比与抗压强度对应关系

Fig. 6 Corresponding relationship between water-to-binder ratio and compressive strength of UHPC

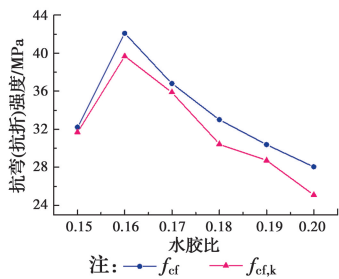


图 7 水胶比与抗折强度对应关系

Fig. 7 Corresponding relationship between water-to-binder ratio and flexural strength of UHPC

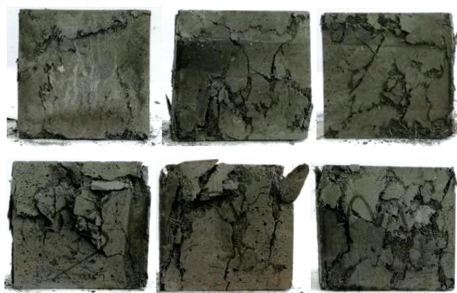


图 8 UHPC 抗压破坏形态

Fig. 8 Compression destructive form of UHPC

表 3 水胶比为 0.185 时 UHPC 扩展度、抗压强度及抗折强度

Table 3 Extensibility, compressive strength and flexural strength of UHPC when the water-to-binder ratio is 0.185

水胶比	扩展度/mm	f_{cc}/MPa				f_{cf}/MPa			
		μ	δ	c_v	$f_{cc,k}$	μ	δ	c_v	$f_{cf,k}$
0.185	620	165.74	4.38	0.026	158.54	31.98	1.63	0.051	29.3

UHPC 试件下缘等效名义弯曲应力(下文称应力)-挠度曲线如图 9 所示。由图 9 可见,达到最大荷载之前的应力-挠度曲线为非典型 UHPC 材料应力-挠度曲线^[28-29](即非完全上凸型曲线)。如图 10 所示(水胶比为 0.16),可将曲线划分为以下 4 个阶段:

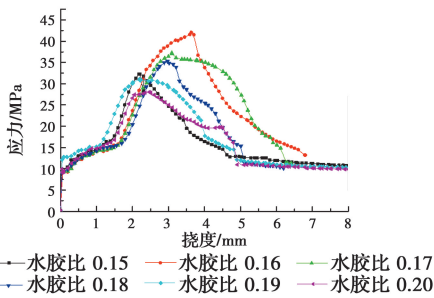


图 9 应力-挠度曲线

Fig. 9 Flexural stress-deflection curves of UHPC

可以看出:1)随着 W/B 的增大,UHPC 抗压强度平均值和标准值均呈“先增后减”的趋势,且水胶比为 0.18 时强度最高。2)UHPC 抗折强度平均值和标准值均“先增后减”,且在 W/B 为 0.16 时最优。3)UHPC 抗压强度和抗折强度等的变异系数随水胶比变化则无明显的规律性,但总体上看,UHPC 抗折强度的变异系数大于其抗压强度。

另外,由图 6、图 7 可见,水胶比由 0.18 增至 0.19 时 UHPC 抗压强度及抗折强度下降幅度较大(平均值分别下降 11.47%、8.69%),而扩展度由 580 mm 增加至 680 mm(见图 3),增加明显。因此,进一步测试了水胶比为 0.185 的 UHPC 扩展度、抗压及抗折强度,结果见表 3。由表 3 可以看出:水胶比为 0.185 时的 UHPC 施工和力学综合性能较优,既能确保 UHPC 力学性能(抗压超 150 MPa,抗折超 29 MPa),又具有良好施工性能(扩展度达到或超过 600 mm 者基本可自流平)。

2.3 弯曲韧性指标

2.3.1 应力-挠度曲线与破坏过程 不同水胶比时,

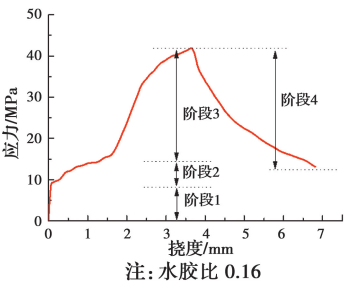


图 10 阶段划分(水胶比为 0.16)

Fig. 10 Stage division ($W/B=0.16$)

阶段 1,加载初期,UHPC 试件受弯应力随单位挠度的增长速率远大于其他阶段,此时由 UHPC 基体和钢纤维共同承载,试件抗弯刚度最大。阶段 2,受弯 UHPC 试件下缘无纤维断面处出现微裂缝,应力-挠度曲线大幅变缓,试件抗弯刚度大幅变小。阶段 3,微裂缝从截面下缘向上扩展中遇到钢纤维,钢

纤维发挥桥接作用,试件刚度有所增大,应力-挠度曲线较阶段 2 变陡;微裂缝逐渐发展为宏观可见,当荷载增加至峰值荷载的 85%左右时,试件跨中 1/3 区域内开始出现竖向可视裂缝,随荷载增加迅速增大至宽度约 0.1~0.2 mm,并可清晰听到钢纤维被拔出的声音。此阶段由未被拔出的钢纤维和未被拉裂的 UHPC 基体共同承载。阶段 4,当上述宏观可视裂缝逐步发展至纤维处时,纤维对其起到较强的约束作用。因此,应力-挠度曲线的下降段并没有出现荷载突降,整个下降段曲线较为平缓;同时,竖向裂缝不断向上延伸,裂缝宽度不断增大,可持续听到钢纤维被拔出的声音,裂缝处不断有 UHPC 碎末掉出,试件表现为负抗弯刚度。当下降段曲线趋于平稳或竖向裂缝即将贯穿整个试件截面时,停止试验,此时 UHPC 试件裂缝最大可达 20 mm 左右。不同 W/B 的 UHPC 弯曲破坏形态大体相似,最终破坏形态见图 11。

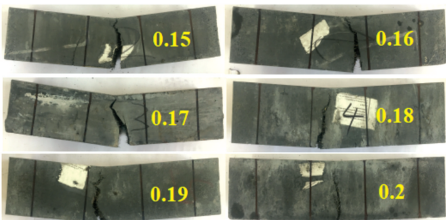


图 11 UHPC 弯曲破坏形态

Fig. 11 Flexural failure mode of UHPC specimens

2.3.2 基于 CECS 13:2009 及其改进的弯曲韧性指标 《纤维混凝土试验方法》(CECS 13:2009)中规定计算 UHPC 受弯韧性指标时的初始参考点初裂挠度为线性偏离初裂挠度 δ_{cr} 。各组 UHPC 试件弯曲线性偏离初裂挠度试验结果见表 4。对 UHPC 而言,因应力-挠度曲线线性偏离点并未发现可视裂纹,且初裂挠度的不同倍数(3.0、5.5、10.5)均未达到峰值挠度,无法充分运用应力-挠度曲线(尤其是下降段)来评价 UHPC 弯曲韧性。因此,初裂挠度采用这一规定是否合理,相应强度规定是否过于保守,值得商榷。文献[30]认为按规范方法确定 UHPC 初裂挠度存在因不同试验和量测方法带来的不确定性,因此,通过研究提出基于钢纤维含量的初裂挠度计算公式(式(2)),用 $E\delta_{cr}$ 表示,单位为 mm)。此外,笔者采用可视初裂挠度(即第 1 条肉眼

可见裂缝对应挠度,记为 δ_{cra})。可以看出(见表 4),分别采用规范法、文献[30]公式、可视初裂挠度作为初始参考点,韧性指标计算所需初裂挠度结果相差很大,需要分别计算。

$$E\delta_{cr}=0.22+2.9\rho_v+185.7\rho_v^2(0\%\leq\rho_v\leq3\%)$$

(2)

式中: ρ_v 为钢纤维体积掺量,%。

表 4 线性偏离初裂挠度与文献[30]初裂挠度对比

Table 4 Comparison of linear deviation from first crack deflection and first crack deflection in literature [30]

水胶比	$E\delta_{cr}/\text{mm}$	δ_{cr}/mm	δ_{cra}/mm
0.15	0.41	0.075	2.71
0.16	0.41	0.091	2.52
0.17	0.41	0.053	2.55
0.18	0.41	0.063	2.29
0.19	0.41	0.072	1.71
0.20	0.41	0.046	1.82

基于 CECS 13:2009 规定的初始参考点(即线性偏离挠度 δ_{cr})来计算不同水胶比时 UHPC 试件的各项弯曲韧性指标。包括:韧性指数 I (见图 12)、等效弯曲强度 f_e (见式(3))、韧性比 R_e (见式(4))、能量吸收值(曲线包围面积) D_n 、韧性指标 FT (挠度为 $L/150$ 曲线包围面积)、剩余强度 $R_{5,10}$ 和 $R_{10,20}$ (见图 12)。以上所述各项指标计算结果见表 5,其中, δ 为应力-挠度曲线峰值挠度、 f_{cf} 为弯曲试件抗折强度、 f_{cr} 为线性偏离初裂强度。

$$f_e=\frac{\Omega_k L}{bh^2\delta_k}$$

(3)

式中: Ω_k 为跨中挠度为 $L/150$ (即 2 mm)的应力-挠度曲线下的面积, $\text{N}\cdot\text{mm}$; δ_k 为跨中挠度为 $L/150$ 时的挠度值(即 2 mm); b 为试件平均宽度; h 为试件平均高度。

$$R_e=f_e/f_{cr}$$

(4)

由表 5 计算结果可以看出:1)当水胶比为 0.16 时,UHPC 试件峰值荷载或抗折强度 f_{cf} 及所有弯曲韧性指标都达到最优。2)随着水胶比的增大,UHPC 试件的抗折强度 f_{cf} 、弯曲韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 、剩余强度 $R_{5,10}$ 和 $R_{10,20}$ 以及能力吸收 D_n 呈先增

后减趋势,与前文中 UHPC 抗压、抗折强度变化规律相同。3)对于理想弹塑性材料, I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 分别等于 5、10 和 20^[31],而本试验的 UHPC 的弯曲韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 在水胶比为 0.15~0.17 时大于 5、10 和 20。这是因为,理想弹塑性材料受弯曲荷载

时,其应力-挠度曲线经过初裂点后立即变为水平段,此时,应力不再增长。而对于 UHPC 来说,其受弯应力-挠度曲线在经过初裂点后还有稳定的强化段(图 10 中阶段 2 和 3),且在规定的计算挠度 ($10.5\delta_{cr}$)内,UHPC 的抗弯强度仍大于初裂荷载。

表 5 基于 CECS 13:2009 的 UHPC 弯曲韧性指标

Table 5 Flexural Toughness index of UHPC specimens based on CECS 13:2009												
水胶比	f_c /MPa	f_{cr} /MPa	δ /mm	f_e /MPa	R_e	FT /(kN·mm)	I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$	D_n /(kN·mm)
0.15	32.20	9.27	2.21	17.61	1.9	117.41	5.33	11.53	26.22	123.9	146.9	435.66
0.16	42.08	9.86	3.64	19.51	1.98	130.07	6.12	12.64	27.26	130.5	146.2	532.42
0.17	36.80	9.32	3.11	16.85	1.81	112.33	4.93	10.41	22.56	109.8	121.5	509.60
0.18	33.01	9.15	2.88	16.06	1.76	107.07	4.74	9.87	19.08	102.6	92.1	411.44
0.19	30.37	9.12	2.19	18.30	2.01	122.01	4.60	9.10	17.57	90.0	84.7	422.92
0.20	28.05	9.18	2.46	16.26	1.77	108.40	4.41	8.72	16.79	86.2	80.7	412.04

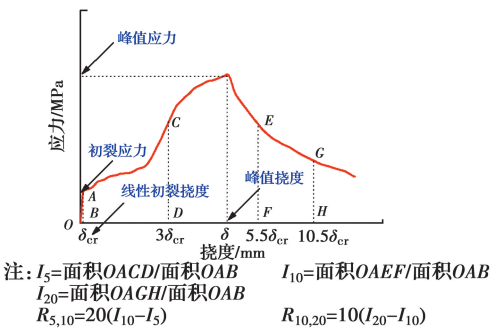


图 12 规范法计算 UHPC 弯曲韧性指数原理图

Fig. 12 The schematic diagram for calculating the flexural toughness index of UHPC based on the standard method

采用文献[30]所确定的初裂挠度 $E\delta_{cr}$ 及可视初

裂挠度 δ_{cra} 计算的 UHPC 弯曲韧性指标值见表 6 及表 7。需说明的是,研究表明,人的肉眼可见宽度最小值大约在 0.05 mm 左右,且 UHPC 结构中裂缝宽度小于 0.05 mm 的裂缝对结构性能影响很小^[32-33]。结合使用裂缝观测仪(ZBL800 型,摄像头对准试件跨中 1/3 处),当裂缝宽度达 0.05 mm(此时裂缝肉眼可见)时,确定可视初裂挠度 δ_{cra} 及其所对应弯曲应力 f_{cfa} 。可以看出:基于文献法确定的初裂挠度及可视初裂挠度(0.02~0.05 mm)所计算的 UHPC 弯曲韧性指标随水胶比的变化趋势与 CECS 13:2009 计算结果有所出入,因此,有必要通过特定方法加以评定。

表 6 基于文献[30]的 UHPC 弯曲韧性指标

Table 6 Flexural Toughness index of UHPC specimens based on literature [30]									
水胶比	f_{cra} /MPa	δ_{cra} /mm	f_e /MPa	R_e	I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
0.15	12.17	0.41	17.61	1.45	3.96	10.05	20.80	121.8	107.5
0.16	12.21	0.41	19.51	1.60	4.41	11.95	26.48	150.9	145.3
0.17	11.34	0.41	16.85	1.49	4.01	8.95	26.65	99.1	176.9
0.18	11.42	0.41	16.06	1.41	3.91	8.40	22.86	89.9	144.6
0.19	12.55	0.41	18.30	1.46	3.84	9.02	20.16	103.7	111.3
0.20	12.11	0.41	16.26	1.34	3.79	9.77	21.40	119.5	116.3

表 7 基于可视初裂挠度为初始参考的 UHPC 弯曲韧性指标

Table 7 Flexural toughness index of UHPC specimens based on initial reference deformation of visible first crack deflection									
水胶比	f_{cra}/MPa	δ_{cra}/mm	f_e/MPa	R_e	I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
0.15	27.64	2.71	17.61	0.64	3.83	4.97	4.97	22.75	0
0.16	35.2	2.52	19.51	0.55	4.18	5.8	5.8	32.32	0
0.17	32.83	2.55	16.85	0.51	4.02	5.46	5.46	28.63	0
0.18	27.12	2.29	16.06	0.59	3.76	4.57	4.57	16.11	0
0.19	25.91	1.71	18.30	0.71	3.92	4.70	4.70	15.60	0
0.20	23.83	1.82	16.26	0.68	3.69	4.45	4.45	15.32	0

2.3.3 基于 Nemkumar 法弯曲韧性指数 采用 Nemkumar 法计算 UHPC 韧性指标时无需通过初裂挠度,因此,其计算结果具有较高的精确度,同时,可在一定程度评判前文所用 3 种方法(即规范法及其改进法)的计算结果。Nemkumar 计算方法如图 13 所示(以 $W/B=0.16$ 为例)。

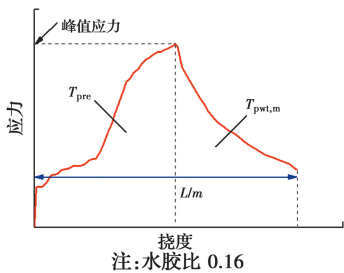


图 13 Nemkumar 法原理图

Fig. 13 Schematic diagram of Nemkumar

基于 Nemkumar 法韧性指数 PCS_m 的定义为

$$PCS_m = \frac{T_{pwt,m}L}{\left(\frac{L}{m} - \delta\right)bh^2}, \left(\frac{L}{m} > \delta\right) \tag{5}$$

式中: $T_{pwt,m}$ 为峰值荷载后应力-挠度曲线所包围面积; L 、 δ 、 b 、 h 上文中定义相同; m 为 50 的整数倍,为满足式(5)要求,取 $m=50$ 。

表 8 给出了不同水胶比时 UHPC 试件的受弯 PCS_m 指数,与表 5~表 7 的计算结果(弯曲韧性指数 I_5 、 I_{10} 和 I_{20})对比如图 14~图 16 所示。

表 8 PCS_m 指数计算结果

Table 8 Caculation results of PCS_m index			
水胶比	PCS_m	水胶比	PCS_m
0.15	24.54	0.18	23.55
0.16	30.46	0.19	23.94
0.17	30.27	0.20	22.20

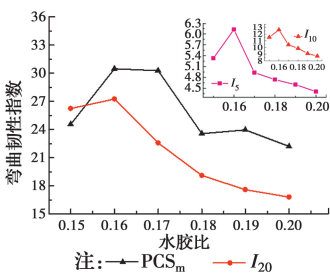


图 14 基于线性偏离初裂挠度的弯曲韧性指数与 PCS_m 比较

Fig. 14 Comparison of flexural toughness index based on linear deviation of first crack deflection with PCS_m index

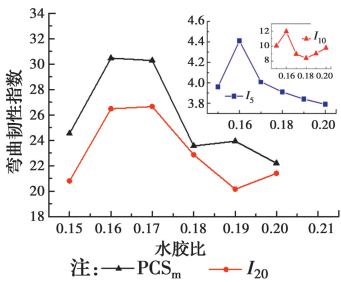


图 15 基于文献[30]确定初裂挠度的弯曲韧性指数与 PCS_m 比较

Fig. 15 Comparison of flexural toughness index based on the first crack deflection in literature [30] with PCS_m index

1) 基于线性偏离初裂挠度的弯曲韧性指数计算结果与 PCS_m (图 14) 对比。随着水胶比的增大, UHPC 弯曲韧性指数与 PCS_m 指数走势吻合度较高,只是当水胶比为 0.19 时两者有所出入,此时 PCS_m 相较水胶比为 0.18 时,有小幅度的增长。原因:从图 7 和表 8 可以看出,水胶比为 0.19 时, UHPC 试块跨中挠度达到 5 mm 左右时其应力-挠度曲线趋于水平,直到试件丧失承载能力为止(峰值挠度达 8 mm 以上),表现出了相较于水胶比为 0.18

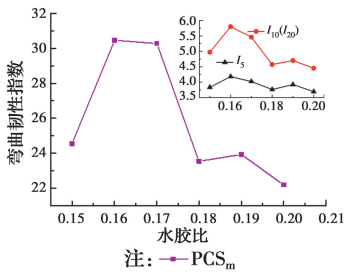


图 16 基于可视初裂挠度的弯曲韧性指数与 PCS_m 比较

Fig. 16 Comparison of flexural toughness index based on visible first crack deflection with PCS_m index

的 UHPC 试件更优的弯曲延性或能量吸收能力。

2) 基于文献[30]确定初裂挠度及可视初裂挠度的弯曲韧性指数计算结果与 PCS_m 对比(图 15、图 16)。基于文献确定的初裂挠度计算结果与 PCS_m 结果出入较大,尤其是当水胶比超过 0.18 后,两者的变化趋势差别较大;而基于可视初裂挠度计算弯曲韧性指数随水胶比变化趋势与 PCS_m 几乎可保持一致。

由表 7 可见,采用可视初裂挠度作为韧性初始参考变形,UHPC 受弯(抗折)试件仍具有较大的韧性。显然,当观测到微裂缝后,结构还具有的延性,更有工程价值,同时,有利于设计充分利用材料的强度。

由上述分析可知,采用可视初裂挠度作为韧性计算的初始参考点,对 UHPC 材料更为科学。

3 结论

开展了 150 MPa 级 UHPC 的不同水胶比下施工性能、抗压强度、抗折强度及弯曲韧性试验,得到以下结论:

1) 在卧式搅拌机 40 r/min 的转速下,UHPC 充分湿拌时间为 6 min;水胶比的增大可显著提升 UHPC 扩展度,其中,当水胶比由 0.16 增至 0.19 时,扩展度基本呈线性增长,此时,水胶比每增加 0.01,扩展度平均增加 109 mm;UHPC 拌合物静停时间 4 h 的扩展度损失约 40 mm,损失率仅 5.9%。

2) UHPC 抗压强度、抗折强度、弯曲韧性指数均随水胶比的增大先增后减。其中,当水胶比为 0.18 时抗压强度达最优,水胶比为 0.16 时,抗折强度和弯曲韧性指数达最优。UHPC 抗压、抗折强度最大值分别为 172.58、42.07 MPa,相应扩展度分别

为 580、360 mm;当水胶比由 0.18 增至 0.19 时,抗压、抗折强度下降幅度较大。

3) 应力峰值前的应力-挠度曲线并不是典型全凸形曲线;可视初裂抗折强度约为抗折强度的 0.85 倍。

4) UHPC 试件的弯曲韧性较好,宜采用可视初裂挠度作为初始变形参考进行韧性指标计算;宜采用可视初裂挠度对应的抗折强度作为设计抗折强度的确定依据。

5) 为兼顾良好的施工与力学性能,建议 UHPC 湿拌时间、水胶比分别为 6 min、0.18 或 0.185(扩展度为 620 mm,抗压标准强度 158.54 MPa,抗折标准强度 29.3 MPa)。

6) 不同水胶比时 UHPC 抗折强度的变异系数总体上大于其抗压强度,因此,在确定所需水胶比后,应着重关注 UHPC 抗折强度的变异性。

参考文献:

[1] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1501-1511.

[2] 邵旭东, 吴佳佳, 刘榕, 等. 钢-UHPC 轻型组合桥梁结构华夫桥面板的基本性能[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 218-225, 245.

SHAO X D, WU J J, LIU R, et al. Basic performance of waffle deck panel of lightweight steel-UHPC composite bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 218-225, 245. (in Chinese)

[3] AHMAD S, RASUL M, ADEKUNLE S K, et al. Mechanical properties of steel fiber-reinforced UHPC mixtures exposed to elevated temperature: Effects of exposure duration and fiber content [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 168: 291-301.

[4] WU Z M, SHI C J, KHAYAT K H. Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 174: 107021.

[5] WU Z M, SHI C J, HE W, et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 103: 8-14.

[6] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述 [J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.

- CHEN B C, JI T, HUANG Q W, et al. Review of research on ultra-high performance concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31 (3): 1-24. (in Chinese)
- [7] 王海涛, 王立成. 钢纤维高强轻骨料混凝土弯曲韧性与抗冲击性能[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(6): 1082-1086.
- WANG H T, WANG L C. Flexural toughness and impact resistance of steel fiber reinforced high-strength lightweight aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(6): 1082-1086. (in Chinese)
- [8] 邓宗才, 刘国平, 杜超超, 等. 新型粗聚烯烃纤维高性能混凝土弯曲韧性[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(2): 228-233.
- DENG Z C, LIU G P, DU C C, et al. Flexural toughness of a new kind of macro-polyolefin fiber reinforced high performance concrete [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17 (2): 228-233. (in Chinese)
- [9] HANI N, NAWAWY O, RAGAB K S, et al. The effect of different water/binder ratio and nano-silica dosage on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 165: 504-513.
- [10] WILLE K, NAAMAN A, EL-TAWLL S. Optimizing ultra-high-performance fiber-reinforced concrete [J]. Concrete International, 2011, 33(9): 35-42.
- [11] AİTCİN P C. The importance of the water-cement and water-binder ratios [M]. Science and Technology of Concrete Admixtures, Elsevier, 2016: 3-13.
- [12] YE B B, ZHANG Y T, HAN J G, et al. Effect of water to binder ratio and sand to binder ratio on shrinkage and mechanical properties of high-strength Engineered Cementitious Composite [J]. Construction and Building Materials, 2019, 226: 899-909.
- [13] 史才军, 肖江帆, 曹张, 等. 材料组成对UHPC性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(6): 1005-1011.
- SHI C J, XIAO J F, CAO Z, et al. Effects of UHPC constituents on its properties [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(6): 1005-1011. (in Chinese)
- [14] 王秋维, 王志伟, 陶毅, 等. 配合比及养护制度对活性粉末混凝土强度影响的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(3): 382-387.
- WANG Q W, WANG Z W, TAO Y, et al. Experimental research on effect of mix ratio and curing system on the strength of reactive powder concrete [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2017, 49(3): 382-387. (in Chinese)
- [15] 吴炎海, 何雁斌. 活性粉末混凝土(RPC200)的配制试验研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4): 44-49.
- WU Y H, HE Y B. Experimental research on proportion of reactive powder concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4): 44-49. (in Chinese)
- [16] 李传习, 聂洁, 潘仁胜, 等. 水胶比对掺粉煤灰超高性能混凝土施工与力学性能影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(1): 14-21.
- LI C X, NIE J, PAN R S, et al. Effect of water-to-binder ratio on the construction and mechanical properties of ultra-high performance concrete mixed with fly ash [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(1): 14-21. (in Chinese)
- [17] LEE K H, YOON H S, YANG K H. Tests on magnesium potassium phosphate composite mortars with different water-to-binder ratios and molar ratios of magnesium-to-phosphate [J]. Construction and Building Materials, 2017, 146: 303-311.
- [18] RAO G. Role of water-binder ratio on the strength development in mortars incorporated with silica fume [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(3): 443-447.
- [19] 鞠杨, 刘红彬, 孙华飞. 活性粉末混凝土的制备与物理力学性能[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 26-28.
- JU Y, LIU H B, SUN H F. Preparation and physical mechanics of reactive powder concrete [M]. Beijing: Science Press, 2017: 26-28. (in Chinese)
- [20] 刘娟红, 宋少民. 活性粉末混凝土——配制、性能与微结构[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 69.
- LIU J H, SONG S M. Reactive powder concrete-preparation, properties and microstructure [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 69. (in Chinese)
- [21] 陈敬卫, 丁学超, 马腾. RPC材料弯曲韧性试验研究[J]. 公路交通技术, 2012, 28(1): 23-25.
- CHEN J W, DING X C, MA T. Experimental study on flexural ductility of RPC material [J]. Technology of Highway and Transport, 2012, 28(1): 23-25. (in Chinese)

- [22] 邓宗才. 混杂纤维增强超高性能混凝土弯曲韧性与评价方法[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6): 1274-1280.
DENG Z C. Flexural toughness and characterization method of hybrid fibers reinforced ultra-high performance concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(6): 1274-1280. (in Chinese)
- [23] 梁兴文, 胡翔翔, 于婧, 等. 钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 722-731.
LIANG X W, HU A X, YU J, et al. Effect of steel fibers on the flexural response of ultra-high performance concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(3): 722-731. (in Chinese)
- [24] COMMITTEE C. Test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading) [S]. West Conshohocken: ASTM International.
- [25] JCI. Method of test for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete: JSCE-SF4 [S]. Tokyo: Japan Concrete Institute, 1984: 45-51.
- [26] 中国工程建设协会. 纤维混凝土试验方法标准: CECS 13: 2009 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010: 54-59.
China Association for Engineering. Standard test methods for fiber reinforced concrete: CECS13: 2009 [S]. Beijing: China Planning Press, 2010: 54-59. (in Chinese)
- [27] BANTHIA N, TROTTIER J F. Test methods for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete: some concerns and a proposition [J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(1): 48-57.
- [28] 张哲, 邵旭东, 朱平, 等. 基于超高性能混凝土弯曲拉伸特性的二次倒推分析法[J]. 土木工程学报, 2016, 49(2): 77-86.
ZHANG Z, SHAO X D, ZHU P, et al. Twice inverse analysis method based on four-point bending test results for UHPC tensile behavior characterization [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(2): 77-86. (in Chinese)
- [29] 张哲, 邵旭东, 李文光, 等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 50-58.
ZHANG Z, SHAO X D, LI W G, et al. Axial tensile behavior test of ultra high performance concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 50-58. (in Chinese)
- [30] 鞠杨, 刘红彬, 陈健, 等. 超高强度活性粉末混凝土的韧性与表征方法[J]. 中国科学(E辑: 技术科学), 2009, 39(4): 793-808.
JU Y, LIU H B, CHEN J, et al. High strength and toughness of reactive powder concrete characterization methods [J]. Science in China(Series E: Technological Sciences), 2009, 39(4): 793-808. (in Chinese)
- [31] 高丹盈, 赵亮平, 冯虎, 等. 钢纤维混凝土弯曲韧性及其评价方法[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 783-789.
GAO D Y, ZHAO L P, FENG H, et al. Flexural toughness and its evaluation method of steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 783-789. (in Chinese)
- [32] 张哲, 邵旭东, 李文光, 等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 50-58.
ZHANG Z, SHAO X D, LI W G, et al. Axial tensile behavior test of ultra high performance concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 50-58. (in Chinese)
- [33] MAKITA T, BRÜHWILER E. Tensile fatigue behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) [J]. Materials and Structures, 2014, 47(3): 475-491.

(编辑 王秀玲)