

# 含碎石超高性能混凝土配制及其影响因素分析

李长吉, 孙俊丰

(中交一航局第五工程有限公司, 河北 秦皇岛 066002)

**摘要:** UHPC 是目前一种极具发展前景和应用价值的新型结构材料。通过试验分析了不同碎石含量和纤维种类对 UHPC 物理力学性能和耐久性能的影响。结果表明: 碎石的掺入降低了 UHPC 的流动性; UHPC 的抗压强度和轴心抗压强度随碎石含量的增加表现出先增大后减小的现象, 且其变化规律符合二次曲线拟合方程, 存在一个最佳含量使得 UHPC 的抗压性能最优。UHPC 的弯拉强度、弹性模量和抗氯离子渗透性能随碎石含量的增加均表现出不同幅度的降低现象。研究结论对于 UHPC 现场的实际应用具有一定的指导意义。

**关键词:** 超高性能混凝土; UHPC; 纤维; 强度; 耐久性

中图分类号: U654

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2023)09-0103-06

doi: 10.7640/zggwjs202309020

## Preparation of ultra-high performance concrete containing crushed stones and analysis of its influencing factors

LI Chang-ji, SUN Jun-feng

(No.5 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei 066002, China)

**Abstract:** UHPC is currently a new type of structural material with great development prospects and application value. This paper analyzes the effects of different gravel content and fiber types on the physical and mechanical properties and durability of UHPC through experiments. The results indicate that the addition of crushed stone reduces the fluidity of UHPC. The compressive strength and axial compressive strength of UHPC show a phenomenon of first increasing and then decreasing with the increase of gravel content, and their variation law follows the quadratic curve fitting equation. There is an optimal content that makes the compressive performance of UHPC optimal. The flexural strength, elastic modulus, and chloride ion permeability of UHPC show varying degrees of decrease with the increase of gravel content. The research conclusion has certain guiding significance for the practical application of UHPC on-site.

**Key words:** ultra-high performance concrete; UHPC; fiber; strength; durability

### 0 引言

UHPC 作为一种新型材料, 具有优异的力学性能和耐久性能, 纤维的掺入使 UHPC 的弯拉强度得到了极大地提高, 因此 UHPC 在建筑行业具有广阔的应用市场。但是 UHPC 高昂的造价限制了其应用范围, 目前市场上的 UHPC 产品基本不含碎石, 如果能在 UHPC 中加入一定比例的碎石, 并且使其能够保持原有的优异性能, 则可以极大地降低 UHPC 的成本。本研究通过在 UHPC 中

等量取代(胶凝材料+细集料)的方式掺入碎石, 研究碎石在不同用量条件下对 UHPC 工作性能、力学性能和耐久性能的影响, 为含碎石 UHPC 更好地应用于实际工程提供试验依据。

### 1 试验内容

#### 1.1 试验材料

1) 活性粉料: 采用江苏苏博特生产的超高性能混凝土用活性粉料。

2) 细骨料: 采用江苏地区石英砂粒径范围为

收稿日期: 2023-06-25 修回日期: 2023-07-31

作者简介: 李长吉 (1980—), 男, 辽宁铁岭人, 高级工程师, 无机非金属材料科学与工程专业, 从事工程试验检测管理工作。E-mail: 6189607@qq.com

0.16~1.25 mm, 二氧化硅含量 98.4%。

3) 碎石: 秦皇岛地区 5~10 mm 辉绿岩碎石, 含泥 0.5%, 泥块 0.1%, 针片状颗粒 4.1%, 压碎值 5.7%, 表观密度 2 720 kg/m<sup>3</sup>, 堆积密度 1 510 kg/m<sup>3</sup>。

4) 外加剂: 江苏苏博特生产聚羧酸高性能减水剂, 减水率 33%, 氯离子含量 0.01%, 碱含量 1.4%, 泌水率比 34%, 初凝时间差 140 min, 终凝时间差 160 min, 7 d 抗压强度比 136%, 28 d 抗压强度比 131%。

5) 水: 自来水。

6) 纤维: 采用江苏苏博特生产的合成纤维和钢纤维。

## 1.2 配合比

参照 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》<sup>[1]</sup>中的相关要求, 选定本次配合比用水胶比为 0.18, 碎石含量以碎石占活性粉料和细集料总量计选定含量为 0、20%、40%、70%、100%。合成纤维和钢纤维含量根据材料质量和特性选定能掺量分别为 2.1%和 13.6%。试验用配合比试验数据见表 1。

表 1 试验用配合比

Table 1 Test mix proportions

编号	碎石含量/%	混凝土原材料/(kg·m <sup>-3</sup> )						
		活性粉料	石英砂	5~10 mm 碎石	水	聚羧酸减水剂	纤维	
A1	0	1 081	1 081	0	195	22.82	20.5	合成纤维
A2	20	915	915	366	165	20.13	19.2	
A3	40	794	794	635	143	17.47	16.7	
A4	70	662	662	927	119	14.57	13.9	
A5	100	568	568	1 137	102	12.50	11.9	
B1	0	1 044	1 044	0	188	21.93	142.0	钢纤维
B2	20	891	891	357	160	18.72	121.2	
B3	40	778	778	622	140	16.33	105.8	
B4	70	653	653	914	118	13.71	88.8	
B5	100	563	563	1 125	101	11.81	76.5	

## 1.3 试验方法

按照表 1 中的配合比称量试拌用原材料质量, 用搅拌机试拌。搅拌完成后进行流动性测试, 并成型试块。成型完毕后在试模表面覆盖塑料薄膜防止水分蒸发, 静置 24 h 后拆模, 把试块放到标

准养护室进行养护。试块到期后按照文献[2-4]试验标准进行各项指标的检测。

## 2 试验结果分析

试块到龄期后分别测定其抗压、弯拉和轴心抗压强度, 其结果见表 2。

表 2 UHPC 物理力学性能试验结果

Table 2 UHPC physical and mechanical performance test results

编号	碎石含量/%	工作性/mm		抗压强度/MPa		弯拉强度/MPa		28 d 轴心抗压强度/MPa
		坍落度	扩展度	7 d	28 d	7 d	28 d	
A1	0	—	820	88.0	90.7	10.6	11.3	84.0
A2	20	240	590	90.8	94.6	11.5	12.6	98.3
A3	40	210	485	91.5	97.7	10.7	13.0	100.9
A4	70	165	394	87.0	92.9	10.8	12.0	97.4
A5	100	80	—	79.9	86.4	10.4	11.5	84.3
B1	0	—	800	106.5	117.8	12.9	13.4	102.2
B2	20	220	510	108.1	121.3	11.4	11.6	114.0
B3	40	200	460	106.5	122.8	11.9	12.2	120.7
B4	70	140	360	99.1	120.6	12.3	12.4	116.4
B5	100	50	—	87.2	108.2	11.6	12.0	102.3

## 2.1 碎石含量和纤维种类对新拌 UHPC 流动性的影响

由表 2 中的试验数据可知, 随着碎石的增加, 混凝土的流动性逐渐呈下降趋势, 当碎石含量大于 70% 后混凝土的流动性急剧减小。这是由于混凝土混合料接近于宾汉姆体, 其流变性质符合宾汉姆体流变方程<sup>[5]</sup>, 即混凝土的流变性质由剪切应力和黏度系数决定。碎石含量的增加使得新拌混凝土的剪切应力增大, 同时碎石含量的增加使得碎石的比表面积增大而砂浆体积减少导致碎石表面的砂浆厚度减小, 从而导致混凝土拌合物的黏度系数增大, 最终导致坍落度值的减小。

由表 2 和图 1 可以看出, 掺入合成纤维的混凝土拌合物的流动性要高于掺入钢纤维的混凝土, 这是由于钢纤维的硬度要大于合成纤维, 在混凝土浆体体系中所产生的阻力也要大于合成纤维, 造成混凝土拌合物的黏度增大, 因此在相同碎石含量的情况下掺合成纤维混凝土的流动性要大于掺钢纤维的混凝土。

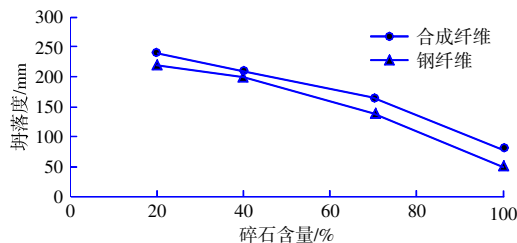


图 1 不同碎石含量-坍落度曲线

Fig. 1 Curve of slump with different crushed stone content

## 2.2 碎石含量和纤维种类对 UHPC 力学性能的影响

1) 图 2、图 3 分别为(合成纤维、钢纤维)不同碎石含量-抗压强度曲线。由表 2 和图 2、图 3 可以看出, 无论是掺合成纤维还是钢纤维 UHPC 随着碎石含量的增加其 7 d 和 28 d 抗压强度先增大后减小。同时由拟合曲线可以看出其 7 d 和 28 d 强度变化规律均符合二次曲线拟合方程, 其线性相关系数均大于 0.95 以上。根据拟合方程可以计算出对于合成纤维 7 d 抗压强度的最佳含量为 33.4%, 28 d 抗压强度的最佳含量为 43%; 钢纤维 7 d 抗压强度的最佳含量为 18.7%, 28 d 抗压强度的最佳含量为 38.6%。同时由表 2 可以看出, 掺钢纤维的 UHPC 的强度普遍高于掺合成纤维的 UHPC, 7 d 平均强度提高 13.8%, 28 d 平均强度提高 21.7%。

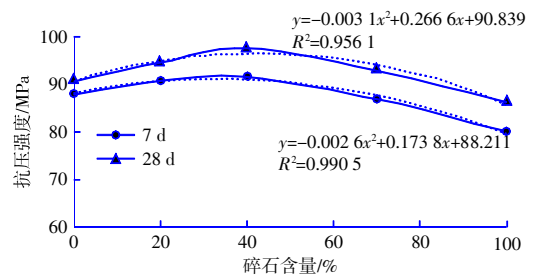


图 2 不同碎石含量-抗压强度曲线(合成纤维)

Fig. 2 Curve of compressive strength with different crushed stone content (Synthetic fiber)

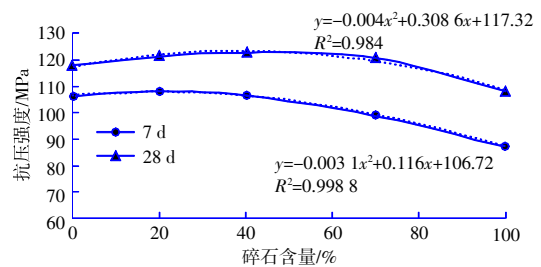


图 3 不同碎石含量-抗压强度曲线(钢纤维)

Fig. 3 Curve of compressive strength with different crushed stone content (Steel fiber)

2) 图 4 为不同碎石含量-7 d 与 28 d 抗压强度比曲线。由图 4 可知, 无论是掺合成纤维还是钢纤维其 7 d 与 28 d 抗压强度比均随着碎石含量的增大而逐渐降低。由图 4 还可以看出, 对于 UHPC 其早期强度增长较快, 尤其是掺合成纤维的混凝土, 当碎石含量为 0 时抗压强度比最高为 97.0%, 当碎石含量为 100% 时抗压强度比最低为 92.5%。并且掺合成纤维混凝土的 7 d 与 28 d 抗压强度比普遍高于掺钢纤维的混凝土, 高约 10%。

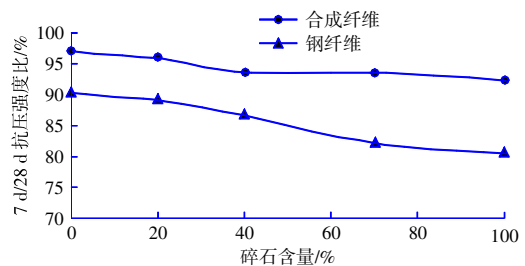


图 4 不同碎石含量-7 d 与 28 d 抗压强度比曲线

Fig. 4 Curve of compressive strength ratio of 7 d to 28 d with different crushed stone content

3) 图 5 为不同碎石含量-28 d 轴心抗压强度曲线。由图 5 中曲线可以看出, 无论是掺合成纤维还是钢纤维 UHPC, 其 28 d 轴心抗压强度均随着碎石含量的增大表现出先变大后减小的规律,

其强度增长规律符合二次拟合曲线方程。由方程可以计算出掺钢纤维 UHPC 碎石的最佳含量为 49.7%，掺合成纤维 UHPC 碎石的最佳含量为 49.2%。同时掺钢纤维 UHPC 比掺合成纤维 UHPC 的 28 d 轴心抗压强度普遍增加约 16.3%。

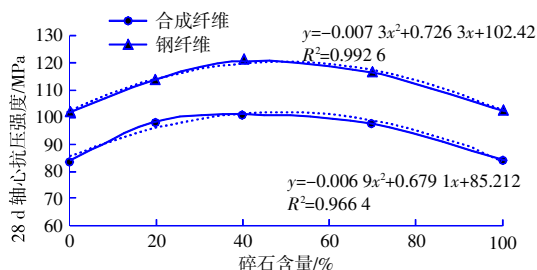


图5 不同碎石含量-28 d 轴心抗压强度曲线

Fig. 5 Curve of axial compressive strength at 28 d with different crushed stone content

4) 图6、图7分别为(合成纤维、钢纤维)不同碎石含量-弯拉强度曲线。由图6可知掺合成纤维 UHPC 的 7 d 和 28 d 弯拉强度均随着碎石含量的增加表现出先变大后减小的现象。当碎石含量为 20% 时，7 d 弯拉强度最高，当碎石含量为 40% 时，28 d 弯拉强度最高。由图7可知掺钢纤维 UHPC 的 7 d 和 28 d 弯拉强度在碎石含量为 0 时最大，随着碎石含量的增大其 7 d 和 28 d 的弯拉强度略微变小，但波动幅度不大。

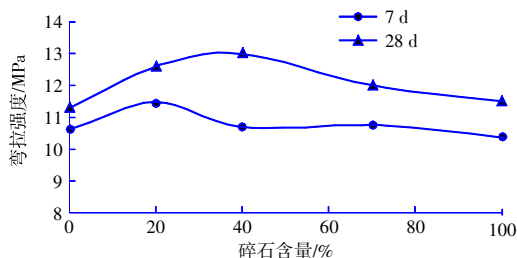


图6 不同碎石含量-弯拉强度曲线(合成纤维)

Fig. 6 Curve of flexural tensile strength with different crushed stone content (Synthetic fiber)

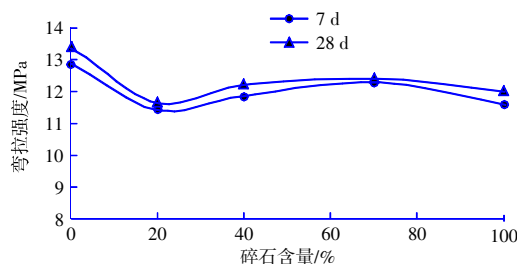


图7 不同碎石含量-弯拉强度曲线(钢纤维)

Fig. 7 Curve of flexural tensile strength with different crushed stone content (Steel fiber)

UHPC 抗压强度和轴心抗压强度随碎石含量的增加表现出先增大后减小的主要原因是：碎石最大粒径只有 10 mm，比表面积大，表面粗糙，增加了浆体与骨料界面过渡区的黏结能力；同时掺入一定量的碎石可以在 UHPC 体系内部形成骨架，使得 UHPC 内部颗粒之间的嵌挤作用增强，提高了 UHPC 整体的抗压性能。但是碎石含量过大，UHPC 流动性大大降低，结果表明当碎石含量从 0 增大到 70% 时，UHPC 的扩展度由 820 mm 降低到 394 mm，这就会导致硬化 UHPC 内部缺陷增多，抗压性能下降。掺钢纤维的 UHPC 抗压性能高于掺合成纤维 UHPC，是由于钢纤维自身抗拉强度要远大于合成纤维，对于 UHPC 抗压性能有一定的增幅作用，同时钢纤维与 UHPC 内部浆体的锚固作用要大于合成纤维，由于上述两方面因素的叠加作用导致掺钢纤维的 UHPC 的抗压性能高于掺合成纤维的 UHPC。

掺合成纤维 UHPC 的弯拉强度随碎石含量的增大先升高后降低是由于：当碎石含量在 0~40% 时，由于碎石相对较少，UHPC 浆体较多，合成纤维能够较为均匀地分散于浆体内部，纤维的抗拉强度能够充分得到利用。碎石的掺入能够在 UHPC 内部形成骨架结构，试块在弯拉破坏过程中，骨料的存在阻碍了混凝土内部裂缝的发展，使混凝土的弯拉强度得到提高。而当碎石含量大于 40% 时，UHPC 的流动性急剧下降，同时浆体体积减少导致纤维不能在 UHPC 内部均匀的分散，在试验试拌过程中发现纤维存在结团现象也验证了这一点，这样会使纤维对弯拉强度的增强作用大大降低。正是由于上述 2 个因素的相互作用和影响，使得掺合成纤维 UHPC 弯拉强度表现出先增大后减小的现象。钢纤维与合成纤维相比不宜分散，碎石的加入使得钢纤维分散变得更加困难，碎石加入对弯拉强度增强作用小于钢纤维分散不均匀使自身弯拉强度不能得到充分利用所带来的影响，因此掺钢纤维 UHPC 的弯拉强度从一开始就表现出随骨料加入而降低的现象。

## 2.3 碎石含量对 UHPC 弹性模量的影响

表 3 为 UHPC 弹性模量试验结果。图 8 为不同碎石含量-弹性模量曲线。由表 3 和图 8 可知随着碎石含量的增大，混凝土的弹性模量逐渐降低。掺合成纤维 UHPC 当碎石含量为 20%、40%、70%、100% 时，弹性模量较无碎石 UHPC 弹性模

量分别降低了 4.0%、7.4%、22.5%、29.7%；掺钢纤维 UHPC 当碎石含量为 20%、40%、70%、100% 时，弹性模量较无碎石 UHPC 弹性模量分别降低了 34.9%、45.4%、53.6%、54.9%，掺钢纤维 UHPC 弹性模量的降低幅度远大于掺合成纤维 UHPC。这个结果与文献[6]所得随碎石含量的增加 UHPC 弹性模量逐渐增大结论正好相反。主要原因是本试验所用碎石母岩的弹性模量小于活性粉料和石英砂所组成的砂浆的弹性模量。

表 3 UHPC 弹性模量试验结果

Table 3 UHPC elastic modulus test results

试验内容	合成纤维					钢纤维				
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
碎石含量/%	0	20	40	70	100	0	20	40	70	100
28 d 弹性模量/GPa	47.5	45.6	44.0	36.8	33.4	67.0	43.6	36.6	31.1	30.2

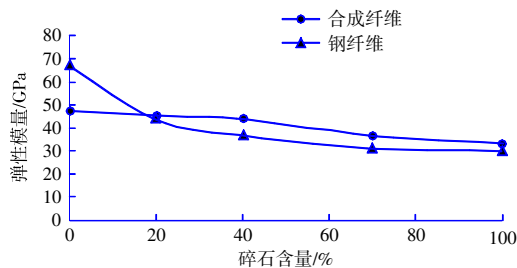


图 8 不同碎石含量-弹性模量曲线

Fig. 8 Curve of elastic modulus with different crushed stone content

根据文献[7]，混凝土的弹性模量可用式(1)表示：

$$E_c = E_m \frac{V_m E_m + (1 + V_p) E_p}{(1 + V_p) E_m + V_m E_p} \quad (1)$$

式中： $E_c$  为复合材料弹性模量，即混凝土弹性模量； $E_m$  为基体相弹性模量，即砂浆弹性模量； $E_p$  为粒子相弹性模量，即碎石弹性模量； $V_p$  为粒子相体积率，即碎石体积率； $V_m$  为基体相体积率，即砂浆体积率。

硬化混凝土结构有砂浆、碎石和内部孔隙组成，在不考虑内部孔隙的情况下，碎石体积率和砂浆体积率满足式(2)：

$$V_m + V_p = 1 \quad (2)$$

将式(2)带入式(1)得：

$$E_c = E_m \frac{E_m + E_p + V_p(E_p - E_m)}{E_m + E_p - V_p(E_p - E_m)} \quad (3)$$

由式(3)可以得到，当碎石母岩的弹性模量小

于 UHPC 中砂浆的弹性模量时，即  $E_p - E_m < 0$ ，随着碎石含量的增加，碎石在 UHPC 中占有的体积率  $V_p$  增大，UHPC 弹性模量  $E_c$  减小。

式(3)并没有考虑硬化混凝土内部孔隙对弹性模量的影响，如考虑孔隙的影响，因为孔隙的弹性模量为 0，因此孔隙率越高混凝土的弹性模量越小。由于掺钢纤维的 UHPC 的流动性小于掺合成纤维的 UHPC 的流动性，会造成成型试块后掺钢纤维 UHPC 的内部孔隙要大于掺合成纤维 UHPC，这也是掺钢纤维 UHPC 弹性模量下降幅度要大于掺合成纤维 UHPC 的原因。

#### 2.4 碎石含量对 UHPC 电通量的影响

由于钢纤维为导电介质，因此本文仅对掺合成纤维的 UHPC 进行电通量试验，试验结果如图 9 所示。

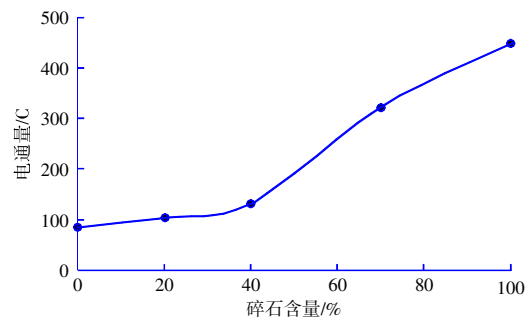


图 9 不同碎石含量-电通量曲线

Fig. 9 Curve of electric flux with different crushed stone content

由图 9 可知，随着碎石含量的增大掺合成纤维 UHPC 电通量逐渐增大。当碎石含量为 0~40% 时，电通量增长曲线比较平缓增长幅度不大；当碎石含量大于 40% 时，电通量曲线急剧升高。当碎石含量为 20%、40%、70%、100% 时，UHPC 的电通量分别增长了 21.2%、55.3%、278.9%、427.1%。但是与普通混凝土相比 UHPC 的电通量大大地降低了，也就是说 UHPC 的抗氯离子渗透性能也远远优于普通混凝土。

UHPC 与普通混凝土相比胶凝材料用量更多，水胶比更低，且掺入纤维。因此，UHPC 的微观结构更为复杂。在低水胶比的情况下，UHPC 中存在着相当比例的未水化水泥颗粒，未水化颗粒强度高而致密填充内部孔隙，使 UHPC 更加密实。龙广成等<sup>[9]</sup>认为 UHPC 孔隙率低，总孔隙率约 2%，孔径主要集中于 2~3 nm。UHPC 优异的抗氯离子渗透性能与其低孔隙率密切相关，孔隙率越低抗



氯离子渗透性能越好。对于未掺碎石的 UHPC, 彭艳周<sup>[9]</sup>依据吴忠伟院士提出的“中心质假说”认为石英砂粒和纤维以及未水化水泥、粉煤灰、矿渣粉、硅灰颗粒等与水泥浆体紧密黏结。水化产物中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  量很少而 C-S-H 等凝胶产物较多, 它们混合在一起使得未掺碎石的 UHPC 结构均衡密实, 界面效应相互叠加, 从而使得 UHPC 具有优异的抗氯离子渗透性能。由于碎石的吸水作用使得碎石表面形成一层水膜, 从而在硬化的混凝土中留下细小的缝隙, 这些细小的缝隙使得 UHPC 的抗氯离子渗透性减弱。碎石的含量越多, 碎石的比表面积越大, 在硬化混凝土中产生的细小缝隙就会越多, 这就导致了 UHPC 抗氯离子渗透性能随着碎石含量的增多而逐渐减小。当碎石含量大于 40%, UHPC 的流动性急剧下降, 使得此情况下的 UHPC 不易振捣密实, 内部产生较多的孔隙, 此孔隙尺寸的量级要大于水泥水化和集料表面的缝隙, 因此使得 UHPC 的抗氯离子渗透性能急剧降低。

### 3 结语

1) UHPC 的流动性随碎石含量的增加而降低, 当碎石含量大于 70% 时, UHPC 流动性急剧降低。

2) 随碎石含量的增加 UHPC 的抗压强度和轴心抗压强度先增大后减小, 其变化规律符合二次曲线拟合方程。掺合成纤维最佳碎石含量为 43.0%, 掺钢纤维碎石最佳含量为 38.6%, 掺钢纤维 UHPC 其抗压性能均优于掺合成纤维。

3) 掺合成纤维 UHPC 弯拉强度随碎石含量的增大先升高后降低, 含量为 40% 时弯拉强度最高; 掺钢纤维 UHPC 碎石含量为 0 时弯拉强度最大。

4) UHPC 弹性模量随碎石含量的增加而逐渐降低, 可能原因是由于所用碎石母岩的弹性模量小于活性粉料和石英砂所组成的砂浆的弹性模量。掺钢纤维 UHPC 弹性模量的降低幅度远大于合成纤维。

5) 随着碎石含量的增加 UHPC 电通量逐渐增大, 碎石含量为 20%、40%、70%、100% 时 UHPC 电通量分别增长了 21.2%、55.3%、278.9%、427.1%。虽然碎石的掺入降低了 UHPC 的抗氯离子渗透性

能, 但其结果仍远优于普通混凝土。

6) 活性粉料和石英砂的成本远高于碎石的成本, 因此在 UHPC 中掺入碎石可大幅降低 UHPC 的成本, 当碎石掺量为 40% 左右时, 虽然 UHPC 的流动性和耐久性能会有一定程度的降低, 但其试验结果仍能满足施工和结构耐久性的要求, 并且其力学性能较之未掺碎石的 UHPC 还有一定程度的提高, 综合以上分析, UHPC 在实际应用过程中建议掺入 40% 左右的优质碎石。

### 参考文献:

- [1] GB/T 31387—2015, 活性粉末混凝土[S].  
GB/T 31387—2015, Reactive powder concrete[S].
- [2] GB/T 50080—2016, 普通混凝土拌合物性能试验方法标准[S].  
GB/T 50080—2016, Standard for test method of performance on ordinary fresh concrete[S].
- [3] GB/T 50081—2019, 混凝土物理力学性能试验方法标准[S].  
GB/T 50081—2019, Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties[S].
- [4] GB/T 50082—2009, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].  
GB/T 50082—2009, Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete[S].
- [5] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999: 186.  
WU Zhong-wei, LIAN Hui-zhen. High performance concrete[M]. Beijing: China Railway Press, 1999: 186.
- [6] 李仕根. 含粗骨料超高性能混凝土力学性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.  
LI Shi-gen. Studies on mechanical properties of ultra high performance concrete with coarse aggregate[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [7] 南京工学院. 混凝土学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981: 86.  
Nanjing Institute of Technology. Concrete Science[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1981: 86.
- [8] 龙广成, 谢友均, 王新友. 矿物掺合料对新拌水泥浆体密实性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2002, 5(1): 21-25.  
LONG Guang-cheng, XIE You-jun, WANG Xin-you. Study on the effects of mineral admixtures on denseness of fresh cement paste[J]. Journal of Building Materials, 2002, 5(1): 21-25.
- [9] 彭艳周. 钢渣粉活性粉末混凝土组成、结构与性能的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.  
PENG Yan-zhou. Study on composition, structure and properties of reactive powder concrete containing steel slag powder[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.