

UHPC 超高性能混凝土制备及工程应用研究

王小林

(赣州城投工程管理有限公司, 江西 赣州 341000)

摘要 超高性能混凝土 (Ultra-High Performance Concrete, UHPC) 是一种新型水泥基复合材料, 其主要是将超高强度混凝土 (UHPC) 的韧性和耐久性与普通混凝土相结合制成的一种新型水泥基复合材料。相比于传统的水泥基复合材料, UHPC 具有更高的强度、更强的韧性和耐久性。因此, 在桥梁工程、机场跑道、核电站等交通基础设施以及海洋平台等基础设施工程中得到广泛应用。基于此, 本文重点介绍了超高性能混凝土的制备原理和技术手段, 以及各组成原料的性能, 并对 UHPC 在建筑工程中的应用情况进行了整理, 目的是为 UHPC 的进一步研发和建设应用提供借鉴。

关键词 UHPC; 超高性能混凝土; 制备; 工程应用

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 2097-3365(2023)11-0007-03

1 UHPC 制备原理

1.1 提升均质性

对于大部分的固态材料而言, 其理论压缩强度通常为弹性模量的 0.1-0.2 倍, 而实际测量值只有 $(0.1-0.2) \times 10^{-3}$ 倍。二者的差异很大, 这是由于其内部组织不完整, 缺陷增多所致。要想使 UHPC 的强度和耐久性得以充分发挥, 首先就应确保 UHPC 内部的均质性。所谓均质性是指材料的结构和性质能够在宏观上保持高度均匀, 不会存在较大差异, 材料的整体力学性能可以得到充分发挥。普通混凝土是由水泥、粗骨料、细骨料和水按一定比例混合搅拌而成, 之后通过泵送进入模具中, 成型为立方体、棱柱体等形状。由于普通混凝土中的细骨料含量很高, 其表面粗糙, 其棱角也比较尖锐, 且表面吸附的水较多。这样, 在水泥浆中便存在较多的孔隙和微裂缝, 同时混凝土的密实性也会降低, 因此在浇筑成型后, 便会导致内部结构不均匀^[1]。要想使 UHPC 的均质性得以提高, 在原材料中加入适量的超细矿物骨料是很有必要的, 因为这种骨料的表面通常会粗糙, 且表面吸附较多水分, 同时其自身具有较高的弹性模量, 这些特点都有利于提高混凝土的力学性能。

1.2 提升堆积密度

在 UHPC 的制备中, 根据其堆积密度的要求, 通常都会选用高流动性的水泥和骨料。在体积率一定的情况下, 颗粒越大, 则堆积密度越高。如果在一个颗粒中加入了其他的材料, 其密度也会增加, 这就是堆积密度受到颗粒大小的影响。按照晶体学的理论, 当

两个原子在同一空间内排成一条直线时, 它的压缩系数是 0.68, 而最密的一条直线, 它的压缩系数也是 0.74。为了提高填充密度, 通常会在大颗粒和小颗粒之间添加合适的颗粒。这样就能确保填满合适的位置, 剩余的位置也会有相应的次序, 让整个空间变得最密集^[2]。

1.3 改善微观结构

在进行超高性能混凝土的制备过程中, 为确保其微观结构的稳定性, 在前期需要进行水化反应, 同时也会在水泥水化过程中产生一定量的硅酸钙水化物。经过长时间的水化反应后, 会在水泥石中形成一定量的活性成分。超高强度混凝土浇筑完毕后, 必须进行高温养护, 才能加快水化过程, 并将火山灰的效果发挥到最大。对于 200MPa 以上的超高性能混凝土, 在 20℃-90℃ 环境下, 仍需进行水化产物尚未定型的常温养护。随着温度的逐渐上升, 火山灰作用逐渐增强, 其微结构也随之发生显著改变, 尤其是有害孔体积逐渐减小, 孔隙逐渐变细。

2 UHPC 的制备

2.1 制备阶段配合比的设计

2.1.1 基本原则

制备阶段配合比的设计应遵循以下原则:

1. 要满足 UHPC 强度与耐久性的要求, 其强度要达到 $\geq 200\text{MPa}$, 且具有高韧性、高抗拉等性能。
2. UHPC 中材料组成要多样化, 其中包括水泥、活性掺合料以及纤维等。水泥选用高性能水泥, 同时加入一定量的粉煤灰和硅灰; 活性掺合料的选择要以硅

灰为主, 同时也可考虑加入一定量的粉煤灰; 纤维材料可以选用钢纤维、玻璃纤维、芳纶纤维等, 加入量一般控制在 0.3%-0.5%^[3]。

3. 要保障 UHPC 中各组分的均匀性, 确保各组分的含量都在最佳值, 不能出现过多或者过少的现象。

4. 组分的细度应适当提升。UHPC 中各组成材料的细度通常有两种: 一种是指材料颗粒的平均粒径, 即在纳米级范围内; 另一种是指材料颗粒之间的空隙率, 即在微米范围内。通常情况下, 由于组成材料颗粒间的空隙率较大, 使得材料内部的缺陷比较明显。

5. 在保证 UHPC 各项性能指标达标的情况下, 尽可能地降低水灰比。由于 UHPC 中的各组分在硬化时都会受到自身化学性质的影响, 导致水灰比过大, 进而使得水化产物的堆积密度增大, 由此使得材料内部的缺陷得到充分的释放。

2.1.2 制备方案

1. 精选原材料。经比对选择水泥, 宜采用硅酸盐或普通硅酸盐水泥。经比选外加剂, 可选用萘系、聚羧酸系、硫铝酸盐等。经比对选择骨料, 采用强度等级为 32.5 级的普通碎石。经比选掺合料, 选用硅灰、粉煤灰、矿渣粉和超细矿粉等。在实际应用中, 通常要对水泥和相关的减水剂等进行较为科学的调整, 确保两者之间能够互相适合。随着混凝土的逐渐增强, 其极限承载能力的降低, 其失效形式更加突兀, 是一种毫无预兆性的失效形式, 给结构带来了极大的损伤。为了让混凝土自身的抗折性能及韧性不断提升, 需适量加入一些微细高强钢纤维, 在增强混凝土自身的韧性的同时, 也能让其抗冲击能力不断增加, 确保整体破坏能够发生合适的变化, 转化为局部微裂缝, 从而对结构所受到的破坏产生一定的缓冲作用^[4]。

2. 配制流程。(1) 配合比设计: 选择的水胶比为 0.35, 砂率为 40%, 超细集料为 50%, 矿物掺合料为 10%, 外加剂为 0.3%; (2) 配制试块: 在温度为 25℃ 的条件下进行养护; (3) 配制超高性能混凝土试块: 在温度为 25℃ 的条件下进行养护, 养护龄期 7d; (4) 配制标准强度试块: 在温度为 25℃ 的条件下进行养护, 养护龄期 7d; (5) 制作试件: 采用标准的养护方式, 对其进行标准强度的测试。

3. 具体的生产工艺。(1) 原材料的检验: 在进行原材料的检验时, 应当严格按照标准的规定, 在原材料的验收过程中, 要对其质量进行严格的检验。对于混凝土而言, 其体积较为稳定, 对材料性能有较强的依赖性, 在进行检测时, 应当将混凝土的体积作为重

要的参考依据。在进行检测时, 应将水泥、粉煤灰、矿粉以及其他材料作为主要的检测对象, 确保其能够符合相关规定; (2) 生产工艺: 在生产过程中, 要根据实际情况进行合理的安排。通常情况下, 主要分为自然养护以及热养护两种方式。在自然养护当中, 应保证水泥能够充分地水化, 同时也要注意混凝土内部水分的蒸发速度。在实际生产中, 如果温度较低, 应采用电地暖或者是电加热等方式, 提高养护的效果。在热养护过程中, 应注意环境温度和湿度的变化。此外, 对于原材料的用量, 也要根据实际情况进行合理的调整。

2.2 制备阶段的配合比

2.2.1 配合比设计理念

UHPC 配合比设计应考虑现场结构或构件形式特点、施工工艺及环境作用等因素, 应根据混凝土工作性能、强度、耐久性及其他必要性能要求计算初始配合比。首先, UHPC 配合比设计应根据现场施工工艺及混凝土使用要求, 计算 UHPC 用水量、砂率及用水量, 并结合所用原材料的品种和质量, 计算单位用水量及单位胶凝材料用量, 并考虑 UHPC 的密实性要求, 采用合适的减水剂和掺合料, 确保其工作性能满足设计要求。其次, UHPC 配合比设计应采用先进的材料、技术和生产工艺。目前, 国内外研究较多的是基于经验的配合比设计方法, 但在实际工程应用中并不适用。为此, 需采用多因素正交试验方法研究 UHPC 配合比设计方法及其影响因素; 通过优化配合比降低用水量、提高胶凝材料用量、增大骨料粒径及调整施工工艺等, 提高 UHPC 强度。

2.2.2 试验过程

1. 称重。根据所需的配合比, 使用所收集的原材料, 如水泥、硅灰、微珠、石英砂、石英粉、镀铜钢纤维、高效外加剂等, 按对应的质量进行称重。然后把全部干燥的粉末原料都放到搅拌机里, 进行充分的混合。

2. 搅拌。应该使用的是强制式混凝土搅拌机, 将称量好的干混料先搅拌 2min, 加称量好的 3/4 水和全部外加剂后, 再搅拌 4min, 加剩余的 1/4 水, 搅拌约 9min; 在混合完毕后, 再对其工作特性进行测试, 确保检测结果能够符合设计的规定, 以达到确保 UHPC 自密实、自流平等工程应用的目的。如有需要, 可选择可调速的强力混合器, 并根据混凝土状况调节混合速率。

2.2.3 成型

根据配合比设计, 试验采用标准试件成型法进行。试件的高度为 80-120mm, 采用 20mm×20mm 的立方体, 在成型过程中, 在标准试件成型机振捣时, 为防止试件产生开裂现象, 应采用两个振捣棒同时振捣。在试

件表面均匀涂上一层厚约 2-3mm 的减水剂溶液,厚度为 3-5mm;为使 UHPC 试件在成型过程中有一定的体积膨胀率,在成型过程中用钢模抹平后再用橡胶锤敲击压光。振捣时间以 5s 为宜。采用两个振捣棒同时振捣的方式,待试件表面初凝后,再用抹刀抹平表面;抹平后用小铁锤轻轻敲打试件表面,直至试件表面平整。

2.2.4 养护

UHPC 的养护是制样阶段的最后一步,也是最关键的一步。养护不当会影响混凝土的强度,导致其达不到设计要求,或达不到施工验收要求。因此,养护的好坏直接影响后续施工工序和质量。

对于已成形的试模,在其进行自然养护 48h 后(可根据实际情况调节脱模时间),然后进行拆模。可采取标准蒸汽养护,蒸汽养护,热水养护,标准常温养护等多种养护方式。标准养护:将脱模后的混凝土试件马上放到一个具有 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$,相对湿度超过 95% 的标准养护室中进行养护,将试件放置在一个养护架上,两个试件之间的距离为 10-20mm,并且要保证试件的表面是潮湿的,不能让水直接冲淋。标准蒸气养护:将脱模后的试件放在蒸汽养护箱中,以不超过 $15^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速度,将其加热到 $90^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,并维持一定的温度 72 小时,同时要留意降低试件的表面温度,然后以不超过 $15^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速度,将其冷却到 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。蒸养可以较快地反映出试验成果,对今后超高性能混凝土的试车使用具有一定的参考价值。

3 UHPC 超高性能混凝土在工程中的应用

在公路交通工程中,UHPC 超高性能混凝土常被用于一些特殊部位,如:桥梁的悬臂、桥面铺装层、桥墩底部等。

3.1 桥梁悬臂

我国桥梁悬臂结构的应用实例较多,其中部分桥梁由于处于交通要道,易受车辆冲击和碰撞,如:上海外滩跨黄浦江悬臂桥、深圳东门大桥、浙江泰顺千祥桥等,这些桥梁都属于超高性能混凝土结构。根据《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650-2020 规定,悬臂梁的最大设计弯矩不应大于 $500\text{kN}\cdot\text{m}$,故在进行悬臂梁设计时,应控制其弯矩及最大设计荷载^[5]。以上海黄浦江某悬臂梁为例,其最大弯矩为 $1676\text{kN}\cdot\text{m}$,最大荷载为 1468kN 。设计时,可将其作为一种新型的悬臂结构,并采用 UHPC 超高性能混凝土作为桥面铺装。

3.2 桥面铺装层

在城市中,车辆密度较大,会产生较大的噪声,

影响市民的生活和工作环境。在城市交通工程中,桥面铺装常采用沥青混凝土铺装,由于沥青混凝土材料具有较高的硬度和弹性模量,不能抵抗车辆撞击和振动等因素的影响,极易产生裂缝。而 UHPC 超高性能混凝土由于其良好的韧性、抗裂性及高强度等特点,可用于桥面铺装中。如:上海黄浦江某悬臂桥,其桥面铺装采用 UHPC 超高性能混凝土,以保证其耐久性和承载力。

3.3 桥墩底部

桥梁桥墩底部常采用钢筋混凝土结构。但钢筋混凝土材料在使用过程中,由于温度、收缩及徐变等因素的影响,极易产生裂缝,且随着时间的延长,裂缝会越宽。而 UHPC 超高性能混凝土由于具有良好的韧性及超高的强度,在高温、收缩及徐变等方面表现优异,因此可用于桥墩底部。

4 结语

总而言之,UHPC 超高性能混凝土在保证构件具有高强度的同时,还能有效提高其韧性,是一种具有巨大潜力的新型复合材料,具有广阔的应用前景。期间采用合理的配合比,配制出拌合物性能好、工作性和力学性能优异、耐久性良好的 UHPC 超高性能混凝土,是今后工作的重点。而在施工过程中,应严格控制水灰比、砂率及养护条件等因素,保证混凝土配合比设计合理、浇筑密实且养护到位,使 UHPC 超高性能混凝土达到预期目标。UHPC 超高性能混凝土具有良好的耐久性,在使用寿命内不会出现明显的裂缝,并能在一定程度上抵抗外部环境及荷载作用而发生的破坏,由此在未来将会得到更加广泛的应用。

参考文献:

- [1] 赵明宇,方兴旺,李志强,等. 机制砂高抗冲磨超高性能混凝土(UHPC)的组成设计与工程应用[J]. 混凝土,2023(01):159-164.
- [2] 北京市高强混凝土公司预拌超高性能混凝土 UHPC 首次工程应用[J]. 混凝土,2021(02):81.
- [3] 徐巍,张碧鸿,程利平. 超高性能混凝土(UHPC)在桥梁伸缩缝病害处治工程中的应用[J]. 中华建设,2020(06):142-143.
- [4] 李欢欢. 超高性能混凝土(UHPC)工作性能优化试验研究与工程应用[J]. 混凝土世界,2020(05):38-45.
- [5] 章烽锋. 超高性能混凝土(UHPC)在桥梁改建工程中的应用[J]. 广东公路交通,2019,45(05):31-34.