

超高性能混凝土在土木工程中的实际应用与性能评价

白泽宇

新疆农业大学水利与土木工程学院

摘要:超高性能混凝土(UHPC)是一种新型水泥基复合材料,具有超高强度、高韧性和出色的耐久性能。因此,超高性能混凝土在土木工程施工中应用越来越广泛,但由于制备UHPC的对材料要求且经济成本较高,从而限制了其在工程中的应用。为改善这一情况,文章通过对UHPC材料与结构性能特征、UHPC制备及其性能进行研究,旨在为设计出施工方便、强度满足要求的绿色超高性能混凝土提供参考和依据,进而推动UHPC实现可持续发展和广泛应用。

关键词:超高性能混凝土;制备;性能

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.17.022

引言

超高性能混凝土(UHPC)的制备灵感来自活性粉末混凝土(RPC),最早由法国的Richard等人在20世纪90年代成功开发。UHPC的制备过程中,采用了精细级配的石英砂,去除粗骨料,以提高其均质性和密实性。通过掺入硅灰、矿渣粉等活性矿物掺合料代替部分水泥,降低水化热峰值,提升其耐久性能。并且UHPC(超高性能混凝土)通过添加钢纤维,提高了其韧性和延性,从而表现出卓越的性能。这使得UHPC在工程结构加固、桥梁、建筑、防护和轨道交通等领域具有广泛的应用前景。因此,针对超高性能混凝土展开研究,对土木行业发展有着重要的现实意义。

一、UHPC材料与结构性能特征

为了增加超高性能混凝土(UHPC)的韧性,通常会采用大量的钢纤维或其他有机纤维进行增强。这样的做法可以使UHPC在受拉开裂时表现出应变硬化的特性,从而显著提高其抗拉强度和延性。这也导致UHPC结构与普通钢筋混凝土(RC)结构在性能特征上存在明显差异

在传统钢筋混凝土(RC)结构设计中,通常忽略混凝土的抗拉强度。这是因为混凝土的抗拉强度相对较低,同时具有受拉脆性,并且其极限拉伸应变与钢筋的屈服应变相差较大。因此,结构设计无法充分发挥混凝土的抗拉性能。混凝土发生受拉开裂时,由于受拉刚化作用,裂缝中的混凝土仍然能够发挥重要作用,对结构的刚度有一定贡献。在RC结构设计中通常会考虑受拉区混凝土对结构刚度的影响。对于超高性能混凝土(UHPC)结构,由于其具有相对较高的抗拉强度(约6~12MPa)和极限拉伸应变(微应变可达10000),它对结构的强度和刚度在受拉状态下具有重要贡献,因

此,在UHPC结构设计中,钢筋的配置是必要的,并且可以很好地实现钢筋和UHPC的协同受力效果。

另外,超高性能混凝土(UHPC)具有比普通混凝土显著更高的抗冲击能力和耗能能力。相比普通混凝土,UHPC的耗能能力高出50到100倍。因此,UHPC在防护工程、抗震结构等领域具有广泛的应用潜力。它可以用于设计和建造抵抗爆炸、撞击或其他冲击负荷的结构,以及提供更高的结构抗震能力。这些特性使得UHPC成为保护人员、设备和重要设施安全的理想选择。因此,UHPC在防护工程和抗震结构方面的应用前景非常大。

二、超高性能混凝土制备分析

(一)增强整体匀质性

在配制超高性能混凝土时,一般不使用粗骨料,而是选择最大粒径不超过1mm的细骨料。使用粒径较小的骨料可以减少混凝土内部的缺陷,提高混凝土的均质性,并降低产生内部裂缝的风险。通过选择细骨料,可以减少不一致变形对混凝土的影响,提高混凝土的整体性能和耐久性。因此,使用细骨料是制备超高性能混凝土的一种常见做法,它有助于提高混凝土的匀质性,并减少内部裂缝的形成。这有助于提升混凝土的力学性能和耐久性,使其成为更可靠和高性能的建筑材料。

(二)提高堆积密实度

通过添加高效减水剂和超细粉末材料,可以改善混凝土的密实性。高效减水剂通过破坏凝胶结构释放内部包裹的水分,而超细粉末材料的添加则通过置换填充水分和增加颗粒之间的相对运动来增加混凝土的流动性。这些措施有助于提高混凝土的质量,使其更具可塑性和均匀性,从而达到更好的工作性能和力学性能。

(三)加强韧性

超高性能混凝土的强度相对于传统混凝土来说非常高,但也存在较高的脆性。为了弥补这一缺陷,通过掺入微细钢纤维,可以有效地提高混凝土的韧性和抗裂性能。这些钢纤维能够在混凝土中形成一个三维分散的网状结构,承担和分散应力,阻止裂缝的扩展,并增加混凝土的延性和能量吸收能力。这样,在受到外部应力时,微细钢纤维能够防止脆性断裂的发生,使混凝土表现出更好的韧性和抗冲击性能。另外,添加聚丙烯纤维也可以有效提高混凝土的韧性。聚丙烯纤维具有较高的拉伸强度和抗拉伸能力,能够有效吸收和分散应力,在混凝土中形成一个网状结构,使其具有更好的韧性和抗裂性能。聚丙烯纤维的添加可以减少混凝土内部的裂缝

数量和尺寸，提高其抗拉强度和抗折性能。

(四) 改善微观结构

在超高性能混凝土的生产中，常常采用热处理养护方法。热处理养护指的是在混凝土初凝后应用热源来提高混凝土的温度，通常通过蒸汽养护或加热养护等方式实现。通过热处理养护可以促进掺合料（如火山灰）的活性效应和水泥水化反应的速率。高温环境可以加速水泥中的水化反应，促使C-S-H凝胶形成的过程，并改变其形貌。同时，高温养护还可以减少氢氧化钙和钙矾石的产生量，从而减少混凝土中不稳定的化合物，细化孔隙结构。这样一来，混凝土内部的界面黏结力也会增强，提高混凝土的整体性能。通过使用热处理养护方法，可以有效促进混凝土中的水化反应和掺合料效应，改善混凝土的微观结构和孔隙结构。这有助于提高混凝土的强度、耐久性和抗裂性能。然而，需要注意在进行热处理养护时，要控制好温度和养护时间，以避免潜在的副作用和缺陷的产生。

三、UHPC基本力学性能

(一) 抗压性能

超高性能混凝土（UHPC）的抗压性能受多个因素的影响，包括原材料选择、配合比、纤维类型和掺量以及养护方式等。在非加压条件下，通过标准养护和自然养护，UHPC的抗压强度通常在不超过150MPa，而经过热养护可以达到300MPa。与普通混凝土不同，UHPC的轴压应力-应变曲线呈现较高的线性相关性。具体来说，经过蒸养处理的UHPC在压应力达到80%至90%的抗压强度之前，呈现出良好的线性行为。而自然养护的UHPC在压应力达到70%的抗压强度之前，也展现出较好的线性特性。

(二) 抗拉性能

超高性能混凝土（UHPC）的抗拉性能主要受到基体性能以及纤维种类、强度、掺量和纤维的长径比等因素的影响。相比于普通混凝土抗拉强度较低、破坏时呈宽裂缝的特点，UHPC在抗拉性能上具有明显优势。

在普通混凝土结构设计中，通常假设开裂后的受拉区混凝土不起作用，受拉区的力完全由钢筋承担。这种简化的假设在计算中简化了过程，而且与实际受力情况的差异不大。然而，在掺有纤维的UHPC中，由于其较高的抗拉强度和多裂缝的特性，纤维在裂缝间形成桥联作用，承担了混凝土基体的卸载。因此，受拉区的UHPC对结构的承载能力具有较高的贡献，不能忽略不计。

因此，研究UHPC的受拉应力-应变曲线对于进行UHPC的工程设计是非常重要的。这样的研究有助于了解UHPC在抗拉受力下的行为，为UHPC结构的设计和分析提供基础依据。通过合理考虑纤维的种类、强度、掺量以及纤维的长径比等因素，可以进一步优化UHPC的抗拉性能，实现更可靠和高性能的结构设计。

UHPC（超高性能混凝土）的典型轴拉应力-应变全曲线可以被划分为三个阶段，如图1所示。

阶段I是弹性阶段，即在应力作用下，UHPC表现出线性弹性行为。在此阶段，应变与应力成正比，没有明显的裂缝形成或损伤发生。阶段II是应变硬化阶段，此时密集的微细裂缝开始扩展，应力随着应变的增加而逐渐增长。随着裂缝的扩展，UHPC的抗拉强度逐渐增加，直到达到抗拉强度 σ_{pc} ，对应的应变为峰值应变 ϵ_{pc} 。阶段III是应变软化阶段，此阶段临界裂缝开始形成，裂缝之间的纤维开始不断地被拔出或断裂。此时UHPC的应变软化现象明显，抗拉强度逐渐下降。UHPC的应变硬化和应变软化程度与纤维的类型、掺量以及纤维的长径比等因素密切相关。选择合适类型、适量的纤维，并控制纤维与基体的比例和相互作用，可以调整UHPC的应力-应变特性。适当的纤维掺量和合理的长径比有助于增强UHPC的韧性和延伸性，提高其抗拉性能。

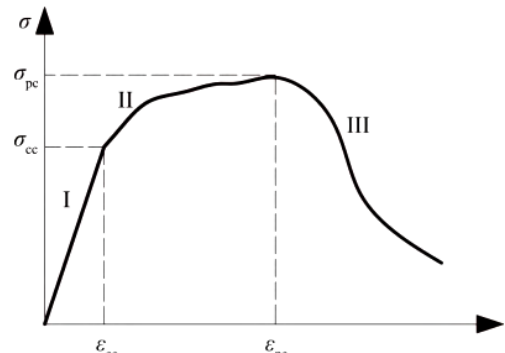


图1 UHPC轴拉应力-应变曲线

(三) 抗渗性能

通过氯离子渗透试验可以评估超高性能混凝土（UHPC）的抗渗性能。在这项试验中，测试了不含纤维的UHPC基体的氯离子扩散系数。结果显示，这些UHPC基体的氯离子扩散系数约为 $5.6 \times 10^{-16} \text{m}^2/\text{s}$ 左右。这个结果表明，这些UHPC基体能够满足T/CBMF37-2018《超高性能混凝土基本性能与试验方法》中对抗渗性能的D02级要求。这个结果进一步验证了UHPC基体具有极为致密的结构。这种致密结构是由于UHPC的原材料经过紧密堆积的设计原理所实现的。这种设计原理确保了混凝土内部的颗粒之间几乎没有空隙，使得水和氯离子等渗透物质无法轻易穿透。因此，UHPC基体表现出了优异的抗渗性能。

表1 UHPC氯离子扩散系数测试结果 (m^2/s)

编号	氯离子扩散系数
U1	5.6×10^{-16}
U4	5.0×10^{-16}
U5	5.5×10^{-16}
U8	4.9×10^{-16}

(四) UHPC的收缩性

超高性能混凝土(UHPC)具有极低的水胶比、较高的水泥用量和活性粉体掺合料,这使得其收缩变形明显大于普通混凝土,并且其变形发展与普通混凝土有较大差异。UHPC的收缩主要包括自收缩和干燥收缩两个方面。通过试验研究,UHPC在早期阶段(0~7天)收缩发展较快,占总收缩的61.3%~86.5%,在中期阶段(7~28天)收缩速度缓慢,占总收缩的13.5%~27.9%,而在后期阶段(28天后)趋于稳定。UHPC的收缩主要由自收缩所引起,自收缩占总收缩的78.6%~90.0%,是导致早期开裂的主要原因。蒸汽养护后,UHPC的残余收缩可以基本忽略不计。

影响UHPC收缩的因素包括其组分和配比。普遍认为,水泥含量越大,UHPC的收缩就会越大;而水胶比越小,UHPC的自收缩就会增大。

关于纤维对收缩的抑制效果的研究结果存在差异。经研究得出,钢纤维可以降低UHPC的自收缩,但对于干燥收缩的影响不大;同时,纤维可以有效地降低UHPC的干燥收缩,尤其是粉煤灰对UHPC的干燥收缩抑制作用大于矿粉。

目前,降低UHPC收缩的主要措施包括采用内部养护方法、添加膨胀剂和减缩剂等。

研究中通过在UHPC中加入HCSA(高效节能复合膨胀剂),可以显著减小UHPC的自收缩和干燥收缩,同时略微增加了UHPC的抗压强度和抗折强度,但可能会降低其流动性和早期强度。这些措施有助于改善UHPC的收缩性能并提高其工程应用的可靠性。

(五) UHPC的徐变性

超高性能混凝土(UHPC)因其极低的水胶比和高胶凝材料用量等特点,使其在徐变性能上与普通混凝土存在显著差异。研究表明,UHPC的徐变受养护条件、纤维掺量和水胶比的显著影响。普通混凝土的名义徐变系数通常在1.5~3.0之间,而UHPC的名义徐变系数则更小。比如,在90℃蒸养(或90℃延迟蒸养)条件下的UHPC,在受压状态下的名义徐变系数约为0.3,60℃蒸养条件下约为0.66,而23℃标准养护条件下的试件名义徐变系数达到0.79。可见,高温养护可以有效减小UHPC受压状态下的徐变,其原因在于高温蒸养增强了纤维与基体之间的界面性能。同时,高温养护条件可以有效减小UHPC的受拉徐变,其中2%纤维掺量时受拉徐变最小,纤维对UHPC的徐变变形起到显著限制作用。此外,减小水胶比可以有效减小UHPC的徐变。这是因为水胶比对UHPC内部水分迁移、水化产物和孔隙结构产生显著影响,从而影响了其徐变性能。

(六) UHPC耐久性

UHPC在耐久性方面表现出色,具有出色的抗渗性、抗氯离子扩散性、抗冻融性和抗碳化性能。通过快速氯离子渗透试验和氯离子渗透试验发现,UHPC中几乎没有

氯离子的渗透。在进行215次氯化物冻融试验后,试件表面的钢纤维出现了锈蚀,但内部没有锈蚀现象,并且未观察到混凝土剥落或疏松现象。经过700次冻融试验后,试件的相对动弹模量不低于97%,质量变化小于3%。

此外,在UHPC中几乎没有发生碳化现象。比如,通过使用多年的UHPC构件进行钻芯取样研究,发现内部的钢纤维没有锈蚀现象。综合目前的研究和工程检测结果来看,UHPC展现出极高的耐久性能,这一点是不容置疑的。

四、总结

综上所述,超高性能混凝土(UHPC)已经经历了近30年的发展过程,在制备技术、性能研究和工程应用等方面取得了显著进展。这种材料的前景得到了国内外学者和工程界的一致认可。然而,要实现UHPC的大规模工程应用仍然存在一些待解决的问题。比如,配合比设计、经济性、养护方法等,需要相关学者及技术人员继续加深研究,有效提高超高性能混凝土的技术水平,使其可以在土木工程建设中真正发挥出其价值及作用,为我国工程事业发展注入强大推力。

参考文献

- [1] 陈宝春,李聪,黄伟,等.超高性能混凝土收缩综述[J].交通运输工程学报,2018,18(1):13-28.
- [2] 李聪,陈宝春,黄卿维.超高性能混凝土圆环约束收缩试验研究[J].工程力学,2019,36(8):49-58.
- [3] 吴林妹,史才军,张祖华,等.钢纤维对超高性能混凝土干燥收缩的影响[J].材料导报,2017,31(12):58-65.
- [4] 黄政宇,刘永强,李操旺.掺HCSA膨胀剂超高性能混凝土性能的研究[J].材料导报,2015,29(4):116-121.
- [5] GARAS V Y. Multi-scale investigation of tensile creep of ultra-high performance concrete for bridge applications [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2009.
- [6] XU Y, LIU J, LIU J, et al. Experimental studies and modeling of creep of UHPC [J]. Construction & Building Materials, 2018, 175: 643-652.
- [7] GRAYBEAL B. Characterization of the behavior of ultrahigh performance concrete [D]. Washington DC: University of Maryland, 2005.
- [8] LONG G, XIE Y, WANG P, et al. Properties and micro/macrostructure of reactive powder concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2005, 33(4): 456-461.