

生物炭对超高性能混凝土力学性能的影响

文洁

中南林业科技大学土木工程学院, 中国·湖南 长沙 410004

摘要: 生物炭作为一种新型内养护材料, 具有良好的保水性。本研究探讨对不同粒径不同掺量的生物炭颗粒进行预湿和干燥处理后, 对超高性能混凝土的力学性能的影响。使用生物炭替代 0.2%–0.6% 的水泥, 对生物炭进行 24h 浸泡处理以达到饱和状态, 对掺入生物炭的 UHPC 试件进行抗压试验和抗折试验。试验结果表明预湿生物炭的加入对 UHPC 的力学性能有显著提升, 抗压强度和抗折强度分别提升了 22.5% 和 26%, 有效的解决了传统内养护材料降低 UHPC 力学性能的问题。

关键词: 内养护; 力学性能; 生物炭; 超高性能混凝土

The Effect of Biochar on the Mechanical Properties of Ultra-high Performance Concrete

Wen Jie

College of Civil Engineer, Central South University of Forestry and Technology, China Hunan Changsha 410004

Abstract: Biochar as a novel internal curing material, possesses excellent water retention capacity. This study investigates the effects of pre-wetting and drying treatments of biochar particles with different partial sizes and dosages on the mechanical properties of ultra-high performance concrete. Biochar was used to replace 0.2%–0.6% of cement, and it was soaked for 24 hours to achieve saturation. Compression and flexural tests were conducted on UHPC specimenal results demonstrate that the addition of pre-wetted biochar significantly enhances the mechanical properties of UHPC, with increases of 22.5% in compressive strength and 26% in flexural strength. This effectively addresses the issue of traditional internal curing materials reducing the mechanical performance of UHPC.

Keywords: Internal curing; Mechanical properties; Biochar; UHPC

0 引言

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 凭借超高的力学强度和韧性, 适合现代社会建筑结构在极端情况下的应用。UHPC 一般具有较低的水灰比, 能产生更高的抗压强度和抗拉强度, 减少混凝土渗透性, 提高混凝土耐久性; 但较高的水胶比可能导致混凝土收缩过大, 影响混凝土的力学性能和耐久性^[1]。如何解决 UHPC 早期收缩开裂成为了热门研究课题。

内养护是解决低水胶比 UHPC 早期开裂的有效措施, 通过微小颗粒吸附水分, 并在湿度梯度作用下释放水分。目前常见的 UHPC 内养护是通过饱和轻骨料 (lightweight aggregate, LWA) 或高吸水树脂 (superabsorbent polymers, SAP) 来提供内部水源, 所释放的水分能够提供未水化的水泥继续水化, 降低水化过程中的自收缩^[2]。但轻骨料由于自身强度远低于天然砂石及 UHPC 基体, 是影响力学性能的不利因素^[3]。Zhang^[4] 等发现轻质粘土陶粒作为轻骨料掺量为 25% 时, UHPC 力学性能略有提升, 说明掺入的轻骨料正面效应高于负面效应; 而轻骨料掺量为 50%、75%

和 100% 时, UHPC 力学性能降低。Zhang^[5] 发现 SAP 吸水降低了有效水胶比, 增加了内部孔隙, 削弱了骨料与水泥浆体的黏结力, 尽管 SAP 释放水分促进了水泥水化反应, 但孔隙增多导致的强度下降无法得到完全弥补。

生物炭作为 UHPC 内养护载体, 粒径相对于 LWA 更为细小, 可以减小间距系数, 生物炭吸附的自由水在 UHPC 基体内传输的距离更短, 从而能提供更高效的养护^[6], 有助于 UHPC 的早期水化过程。除此之外, 生物炭丰富的微孔结构和极高的比表面积能够吸附储存大量水分, 为混凝土提供了良好的养护条件, 并有助于发展混凝土的微观结构和孔隙结构^[7]。本文研究生物炭对 UHPC 力学性能的作用机理并分析整理。

1 试验原材料

本次实验使用的胶凝材料包括普通硅酸盐水泥 P.O 42.5 (安徽海螺水泥有限公司), 偏高岭土 (平均粒径为 10 μ m), 硅灰 (表观密度为 2250 kg/m³), 粉煤灰 (中值粒径 26.82 μ m)。胶凝材料的化学成分见表 1。河砂选用湘江流域长沙段, 表观密度为 2.66 g/cm³, 粒径小于 1.18 mm。

表1 胶凝材料的主要化学成分

material	Mass fraction/%							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Others
Cement	19.18	4.98	3.08	62.96	2.78	0.68	0.31	0.75
Metakaolin	52.86	43.12	0.76	0.17	0.06	0.55	0.06	2.43
Silica Fume	95.51	0.76	0.39	0.91	0.21	0.61	0.42	1.19
Fly Ash	48.43	29.93	6.84	7.56	1.27	1.24	1.34	3.39

减水剂选用山东未来化工有限公司生产的聚羧酸高效减水剂，减水率为 30%。钢纤维选用磐金建材（衡水）生产的镀铜微丝钢纤维，长度为 13.23mm，等效直径为 0.22mm。实验用水为自来水。生物炭选用河南省炭尔诺活性炭有限公司的 B100 玉米秸秆炭（比表面积为 1120.0m²/g）和 B200 玉米秸秆炭（比表面积为 1346.5m²/g），见表 1。

2 配合比设计

UHPC 砂浆的总水胶比（w/c）控制在 0.18，砂与凝胶材料质量之比为 1.15，粉煤灰掺量为胶凝材料质量的 15%，偏高岭土与硅灰掺量占比相同，减水剂掺量为胶凝材料的 1.2%，钢纤维体积掺量为 2%。由于生物炭掺量设置为 0.8% 时，UHPC 砂浆的流动性低于标准 UHPC 流动性的 80%，将生物炭掺量调整为水泥质量的 0.2%，0.4%，0.6%。对生物炭分别进行预湿处理和干燥处理，共设计 13 组 UHPC，编号为 U0、D100-2、D100-4、D100-6、D200-2、D200-4、D200-6、P100-2、P100-4、P100-6、P200-2、P200-4、P200-6。表 2 为 UHPC 配合比设计。

3 试件制备及实验方法

3.1 生物炭的预湿处理

首先将生物炭置于 70℃ 的烘干箱内 10h 作为烘干处理，生物炭中水分烘干后，将生物炭放入自来水中浸泡 24h 达到完全饱和状态，再进行过滤^[8]。

3.2 试件制备

根据《超高性能混凝土基本性能与测试方法》（T/CBMTF 37-2018/T/CCPA 7-2018）进行抗压实验和抗折实验。抗压实验试件采用尺寸 100mm × 100mm × 100mm 的正方体试件，抗折实验试件采用尺寸 40mm × 40mm × 160mm 的棱柱体试件。试件成型后置于标准养护室（温度 20℃，相对湿度 95% 以上）养护 1d 后拆模，浸水养护至 3d、7d、28d 测定每组试件抗压强度值与抗折强度值，取平均值和标准差。

3.3 抗折实验方法

采用新三思 ANSCMT 5105 万能试验机，试验加载荷载控制在 0.08MPa，加载速率控制在 20mm/min。

3.4 抗压实验方法

采用 TYA-2000E 型号压力测试机，加载荷载控制在

0.8-1.2MPa 之间。

4 实验结果及分析

4.1 抗压实验

图 1、图 2 分别为不同掺量和干湿处理的 BC100 和 BC200 的 UHPC 抗压强度。由图中可以看出 UHPC 的抗压强度与生物炭的掺量与粒径有关，并且预湿生物炭组 UHPC 的平均抗压强度高于干燥组和标准组。与标准组 UHPC 3d 抗压强度对比，添加了 BC100 的 UHPC 抗压强度有小幅提升，干燥状态和预湿状态下分别增加了 3.7% - 9% 和 9.8% - 12.7%。预浸生物炭提前引入了 UHPC 砂浆中的自由水，砂浆内部有效水灰比相对较低，较低的自由水量导致孔隙结构更致密，孔隙网络连通性较低，从而减少了水分流失的途径^[9]。而添加了干燥 BC200 的 UHPC 随着掺量的增加，前期抗压强度出现明显下降，其中 D200-6 的抗压强度较标准组下降了 15%。UHPC 中的自由水含量不变（W/C=0.18），干燥生物炭加入 UHPC 砂浆中，吸附 UHPC 砂浆中自由水的能力不如提前预湿。

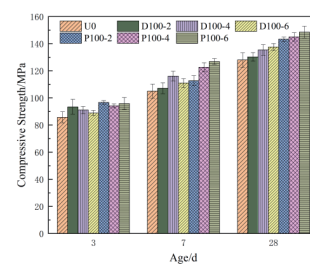


图 1 BC100组UHPC抗压强度

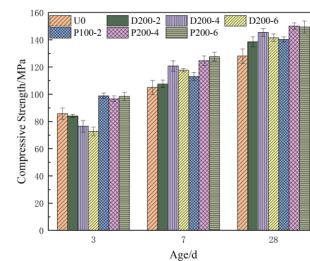


图 2 BC200组UHPC抗压强度

养护龄期至 7d 和 28d 时，所有掺入生物炭的内养护 UHPC 的抗压强度均高于标准组。养护 7d 时，干生物炭内养护 UHPC 都呈现抗压强度先增大后减小的趋势，D100-4 和 D200-4 分别为掺入干燥 BC100 和 BC200 内养护 UHPC 抗压强度的最高值，较标准组抗压强度分别增

加了 10.6% 和 15.1%。干生物炭的粒径对 UHPC 抗压强度影响较大, BC200 的粒径更小, 能够有效填充 UHPC 在水化过程中形成的孔隙, 并且小粒径能够避免生物炭颗粒本身的脆性结构。养护至 28d 时, UHPC 整体抗压强度随着掺量的提升而增强。加入预湿生物炭的 UHPC 提升明显, P100-6 和 P200-6 为预湿组 UHPC 抗压强度的最高值, 较干燥组提升了 9.2% 和 5.5%, 较标准组提升了 20.7% 和 22.5%。干生物炭在拌合 UHPC 砂浆过程中会争夺基体内部的自由水, 吸水效率低于提前预湿饱和, 生物炭内部与外部孔隙湿度差距相对较小, 驱动水份从内部向水泥凝胶区域释放的动力减弱, 从而导致内养护效率更低。

4.2 抗折实验

图 3、图 4 分别为添加干燥处理和预湿处理的不同掺量的 BC100 和 BC200 的 UHPC 抗折强度。由图中可以看出生物炭对 UHPC 的抗折强度有增强作用。

对比标准组养护龄期 3d 的抗折强度, 干生物炭组 UHPC 略有提高, BC100 组 UHPC 抗折强度最高提升了 4.8%, BC200 组 UHPC 抗折强度最高提升了 7.7%。预湿生物炭组的 UHPC 抗折强度提升效果较为明显, BC100 组与 BC200 组分别提升了 16% 和 20% 生物炭为具有多孔结构的脆性材料, 这些孔洞在荷载作用下会生成应力集中点, 不利于抗折强度的发展, 但生物炭的微填充作用和内养护效果能够有效提升抗折强度。

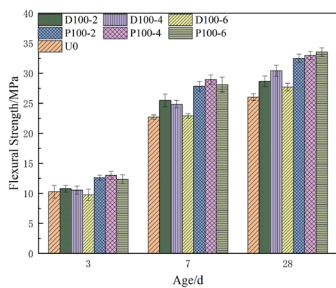


图 3 BC100组UHPC抗压强度

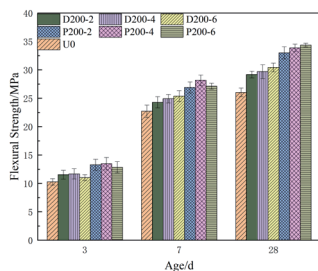


图 4 BC200组UHPC抗压强度

养护龄期至 7d 和 28d 时, 两组生物炭内养护 UHPC 的抗折强度随着掺量的增加显示出了不同的趋势。BC100 组 UHPC 出现了先增大后减小的强度趋势, BC200 组

UHPC 抗折强度随着掺量的增加而增加。这可能是因为 BC100 的粒度、孔径、孔体积更大, 从而形成大量的薄弱界面, 在荷载作用下容易形成裂纹或者扩展裂纹。预湿 BC100 组 UHPC 和预湿 BC200 组 UHPC 在 28d 的抗折强度, 较干燥 BC100 和 BC200 分别提升了 8.3%–10.2% 和 11.3% 和 13.1%, 较标准组 UHPC 提升了 22.9% 和 26.0%。湿度养护能够维持 UHPC 浆体内部的持续水化和内部湿度, 缓解内部裂纹的产生。在水化后期持续地提供水分, 促进胶凝材料的二次水化, 新生的水化产物能够有效地填充 UHPC 基体内部的孔隙, 降低总孔隙率从而减少内部容易诱发裂纹的应力集中区。

5 结语

本文选用了生物炭颗粒作为内养护 UHPC 的材料, 并设置了三组掺量及干湿处理对 UHPC 进行力学性能测试, 探讨生物炭的粒径、掺量、预湿处理对 UHPC 的力学性能影响, 得出以下结论。

(1) 养护龄期 28d 时, 生物炭对于 UHPC 的力学性能有显著提升。预湿生物炭组在抗压强度方面相较干燥生物炭提升了 5.5%–9.2%, 较基准组提升了 22.5%, 在抗折强度方面相较基准组提升了 26%。预湿生物炭的内养护效果明显优于干燥生物炭。

(2) 生物炭的细小粒径能够有效填充 UHPC 基体中的孔隙, 提升基体密实度。另一方面, 生物炭作为内养护材料, 能够持续释放水份促进胶凝材料的二次水化, 生成的水化产物能够填充 UHPC 内部空隙, 增强 UHPC 基体的力学性能。

(3) 生物炭的内部养护作用能够减少 UHPC 中裂缝的生成, 但随着生物炭掺量的增加, 生物炭本身引入的孔隙在荷载作用下会成为应力集中点, 不利于 UHPC 的力学性能。

(4) 预湿生物炭避免了在拌合初期争夺 UHPC 砂浆内部自由水, 能在浆体硬化初期快速及时的释放水份, 有助于 UHPC 早期的强度发展。同时, 预湿生物炭的强度更加稳定, 受生物炭粒径和掺量影响较小。

参考文献:

[1] 成鑫磊, 穆锐, 刘晓英等. 超高性能混凝土的制备及力学性能研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2024,43(12): 4295–4312.

[2] <http://www.concrete.org/technical/CCT/ACI-Terminology.aspx>.

[3] 张高展, 郭凯正, 程华强等. 轻集料用于超高性能

混凝土的研究进展[J].建筑材料学报, 2023, 26(8):886-896.
DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.08.009.

[4] 张高展, 王宇譞, 葛竞成等. 轻集料对超高性能混凝土工作和力学性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2021, 24 (03): 499-507.

[5] 张文龙, 冯滔滔, 王凤娟等. 基于高吸水性树脂内养护改善机制砂混凝土收缩开裂性能 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (07): 2447-2457+2473.

[6] G. Espinoza-Hijazin, M. Lopez, Extending internal curing to concrete mixtures with W/C higher than 0.42,

Constr. Build. Mater. 25 (3) (2011) 1236-1242.

[7] J. Castro, L. Keiser, M. Golias, J. Weiss, Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures, Cem. Concr. Compos. 33 (10) (2011) 1001-1008.

[8] Effect of water entrainment by pre-soaked biochar particles on strength and permeability of cement mortar.

[9] W.C. Choi, H.D. Yun, J.Y. Lee, Mechanical properties of mortar containing biochar from pyrolysis, J. Korea Inst. Struct. Maint. Inspection 16 (3) (2012) 67-74.