

玄武岩纤维活性粉末混凝土力学性能试验研究

樊程坤, 黄庭耀, 张 任, 李海艳

石家庄铁道大学, 河北 石家庄

收稿日期: 2021年9月14日; 录用日期: 2021年9月28日; 发布日期: 2021年10月13日

摘 要

玄武岩纤维活性粉末混凝土(RPC)具有强度高、耐久性好、耐高温等优点,适用于复杂条件下建筑结构用材料。为研究玄武岩纤维RPC的静态力学性能,试验配制了5种纤维体积掺量分别为0.1%、0.15%、0.20%、0.25%、0.30%和两种不同纤维长度(6 mm、12 mm)的玄武岩纤维活性粉末混凝土(BFRPC),研究了玄武岩纤维对RPC抗压强度和抗折强度的影响,并与其它玄武岩纤维混凝土的试验结果进行了对比分析。试验结果表明,玄武岩纤维对提高混凝土的抗压强度作用不大,甚至出现负增长现象,但对抗折强度的影响较为明显,随着玄武岩纤维掺量增加,抗折强度先增加后减小,当体积含量为0.15%~0.20%时效果最佳;长度为6 mm的纤维比12 mm的纤维对抗压强度和抗折强度提高效果好;对比分析发现玄武岩纤维对抗压强度的影响不明显,但对抗折强度的提高效果较好。本文的研究成果可为玄武岩纤维RPC的推广应用提供一定理论依据。

关键词

玄武岩纤维RPC, 抗压强度, 抗折强度, 破坏形态

Experimental Study on Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete

Chengkun Fan, Tingyao Huang, Ren Zhang, Haiyan Li

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei

Received: Sep. 14th, 2021; accepted: Sep. 28th, 2021; published: Oct. 13th, 2021

Abstract

Basalt fiber reinforced reactive powder concrete (RPC) has the advantages of high strength, good

durability, and high temperature resistance, which is suitable for building structural materials under complex conditions. In order to study the static mechanical properties of basalt fiber reinforced RPC, 5 kinds of fiber volume content of 0.1%, 0.15%, 0.20%, 0.25%, 0.30% and two different fiber lengths of 6 mm and 12 mm of basalt fibers were considered. The influence of basalt fiber on the compressive strength and flexural strength of RPC was studied, and the test results of other basalt fiber reinforced concrete were compared and analyzed. The results show that basalt fiber has little effect on improving the compressive strength, and even shows a negative growth, but the effect on flexural strength is more obvious. As the content of basalt fiber increases, the flexural strength first increases and then decreases. The best volume content of basalt fiber is 0.15%~0.20%. The fiber with a length of 6 mm is better than the fiber with a length of 12 mm in improving the compressive strength and flexural strength. Through comparative analysis, it is found that the influence of basalt fiber on compressive strength is not obvious, but is better on improving the flexural strength. The research of this paper can provide a certain theoretical basis for the application of basalt fiber reinforced RPC.

Keywords

Basalt Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete, Compressive Strength, Flexural Strength, Destruction Form

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, 简称 RPC)作为一种极具创新性的超高强度混凝土, 凭借其极低的孔隙率、超高的强度以及超高的耐久性等优点, 在桥梁、隧道、道路工程领域得到了广泛的应用[1] [2]。玄武岩纤维作为一种新型高性能绿色无机纤维材料, 具有高抗拉强度、良好的化学稳定性、与混凝土良好的融合性、高性价比等特点, 成为了纤维增强混凝土领域的研究热点[3]。将短切玄武岩纤维掺入水泥基体可形成均匀三维牵拉“微骨架”体系, 承担基体收缩变形应力, 增加材料的韧性、延性, 抑制裂纹等。将玄武岩纤维掺入活性粉末混凝土, 可充分发挥 RPC 抗压强度高, 玄武岩纤维耐腐蚀强、抗渗性好及抗拉强度高优点, 配制成玄武岩纤维活性粉末混凝土(BFRPC), 设计出适用于复杂条件下的建筑结构用材料。

玄武岩纤维在建筑领域的应用尚处于起步阶段, 针对玄武岩纤维增强普通混凝土领域开展了很多研究。Kirthika [4]对玄武岩纤维增强混凝土进行了系统的研究, 发现玄武岩纤维体积用量为 0.50%时, 抗压强度、劈裂抗拉强度和抗弯强度明显优于不加纤维的混凝土。Kabay [5]以玄武岩纤维的掺量及尺寸作为变量, 研究玄武岩纤维对混凝土物理力学性能的影响, 发现加入玄武岩纤维会降低抗压强度和抗弯强度, 但混凝土的断裂能显著提高, 玄武岩纤维的掺入使混凝土的抗磨性显著提高。李为民等[6]试验发现, 玄武岩纤维的掺入对混凝土的强度、韧性有明显改善, 当体积含量为 0.1%时效果最佳。Jiang 等[7]试验研究了玄武岩纤维体积率和长度对混凝土力学性能的影响, 发现加入玄武岩纤维可以显著提高混凝土抗拉强度、抗弯强度和韧性指标, 而抗压强度没有明显提高。王德宏等[8]研究了不同掺量的玄武岩纤维、聚丙烯纤维和混杂纤维对高性能混凝土抗压强度、抗弯强度、劈裂抗拉强度和应力-应变曲线的影响, 试验结果表明, 单掺玄武岩纤维或聚丙烯纤维增强的高性能混凝土抗压强度略有增加, 而抗弯强度和劈裂

抗拉强度则得到显著改善。

通过上述分析可知,针对玄武岩纤维 RPC 力学性能方面的研究工作还有待深入。本文针对两种不同纤维长度(6 mm、12 mm)分别成型了五种体积掺量(0.1%、0.15%、0.20%、0.25%、0.30%)的玄武岩纤维活性粉末混凝土试件,系统研究玄武岩纤维活性粉末混凝土的抗压、抗折等力学性能,并与相关文献的试验结果进行对比分析。

2. 试验概况

2.1. 原材料与配合比

选用石家庄企鹅牌 P.O42.5 硅酸盐水泥;四川朗天硅灰, SiO₂ 质量分数 90%,比表面积 20000 m²/kg;河北灵寿鑫鼎 S95 型矿渣粉,比表面积 55,000 m²/kg;山东莱芜纹河化工有限公司生产的 FDN 浓缩型高效减水剂;长度分别为 6 mm 和 12 mm 短切玄武岩纤维。本试验开展两种纤维长度、5 种体积掺量,共 10 组试件的试验,试验基准配合比为:水泥:硅灰:矿渣粉:石英砂:减水剂:水 = 1:0.3:0.15:1.2:0.015:0.29,试验配合比如表 1 所示。

Table 1. Mix ratio for experiment

表 1. 实验用配合比

编号	水胶比	硅灰/水泥	矿水渣/水泥	石英砂/水泥	减水剂/水泥	玄武岩纤维体积掺量/%
A1	0.2	0.3	0.15	1.2	0.058	0.10
A2	0.2	0.3	0.15	1.2	0.058	0.15
A3	0.2	0.3	0.15	1.2	0.058	0.20
A4	0.2	0.3	0.15	1.2	0.058	0.25
A5	0.2	0.3	0.15	1.2	0.058	0.30

2.2. 试件制备

首先将搅拌机内壁润湿,并将称量好的水泥、石英砂、硅灰、矿渣粉、减水剂分别倒入 JJ-5 型行星式水泥胶砂搅拌机中,干拌 3 min;然后在搅拌过程中缓慢加入称量好的水,湿拌 4 min;最后在搅拌过程中均匀撒入玄武岩纤维,搅拌 6 min 出料。

搅拌完成后,及时将拌合物注入到 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 和 40 mm × 40 mm × 160 mm 的试模中,分层捣实。然后在 50 HZ 高频混凝土振动台上经高频振动成型,待试块表面泛浆,停止振动,接着将表面抹平,放在常温室内静置 24 h 后拆模并标号。然后将试件放入 90℃ 的 HJ-84 型混凝土加速养护箱养护 3 d,再放入 YH-40B 型标准恒温恒湿养护箱养护 28d 拿出晾干后进行相应试验。

2.3. 试验方法

立方体抗压试验按照《建筑砂浆基本性能试验方法》(JGJ70-2009)的要求在 200 t 电子万能试验机上进行(图 1),试验加载速率取为 1~1.5 kN/s。

抗折试验按照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T17671-1999)的要求,通过自制夹具在 100 t 电子万能试验机上进行(图 2),试验加载速率为 0.5 kN/s。



Figure 1. 200 t electronic universal testing machine (compression test)

图 1. 200 t 电子万能试验机(抗压试验)



Figure 2. 100 t electronic universal testing machine (flexural test)

图 2. 100 t 电子万能试验机(抗折试验)

3. 试验结果与分析

3.1. 试验现象

3.1.1. 抗压试验现象

试块在加载前期无明显变化,随着荷载的增加,试块侧面部分轻微向外鼓胀并沿加载方向出现竖向裂纹,伴随着阵阵嘈杂和撕裂的声响试样外表皮脱落,但试样并没有突然破坏,而裂缝宽度在碎片掉落后逐渐增加。当达到极限荷载后,试件发出阵阵沉闷声,压力机显示屏力读数出现峰值,之后迅速变小,最后完全破坏时试块坏而不碎,整个试件呈塌落之状,抗压试件破坏形态如图 3 所示。



Figure 3. The shape of the compressive specimen after failure

图 3. 抗压试件破坏后形态

3.1.2. 抗折试验现象

图 4 为抗折试件破坏后形态。抗折试验过程中，随着载荷的增加，试件底部中间部位首先出现一条细微裂纹，随着荷载的持续增大，裂纹不断增大。试件破坏从裂缝出现到断裂有一定的缓冲时间，虽然时间很短，但说明混凝土的韧性确实有所提高。试件丧失承载力前可以观察到明显的扩展裂缝。



Figure 4. Form after failure of flexural specimen

图 4. 抗折试件破坏后形态

3.2. 抗压强度

立方体抗压强度与纤维掺量的关系如图 5 所示，由图 5(a)可以看出，抗压强度随玄武岩纤维掺量的增加逐渐减小。当玄武岩纤维掺量为 0.1% 时，混凝土抗压强度最大。且掺入纤维长度 6 mm 的纤维比 12 mm 的抗压效果好。原因是纤维的掺入会增加混凝土的孔隙率，从而降低了混凝土的抗压强度；12 mm 的纤维比 6 mm 的纤维使得基体产生更大的孔隙率，因此掺入 6 mm 纤维比 12 mm 的纤维效果好。

对分别掺入 6 mm 和 12 mm 的玄武岩纤维 RPC 立方体抗压强度进行回归分析，拟合公式如下式所示，理论曲线与试验数据绘于图 5(b)。

掺入 6 mm 玄武岩纤维的 RPC 抗压强度拟合公式：

$$f_{cu}^6 = 112.84 - 159.18V_f^6 \quad 0.1\% \leq V_f^6 \leq 0.3\% \quad R^2 = 0.9656 \quad (1)$$

掺入 12 mm 玄武岩纤维的 RPC 抗压强度拟合公式:

$$f_{cu}^{12} = 88.41 - 78.66V_f^{12} \quad 0.1\% \leq V_f^{12} \leq 0.3\% \quad R^2 = 0.9467 \quad (2)$$

式中: f_{cu}^6 和 f_{cu}^{12} 分别为掺入玄武岩纤维长度为 6 mm 和 12 mm 的 RPC 立方体抗压强度(MPa); V_f^6 和 V_f^{12} 为 6 mm 和 12 mm 玄武岩纤维掺量(%); R^2 为反应拟合精度的相关系数。

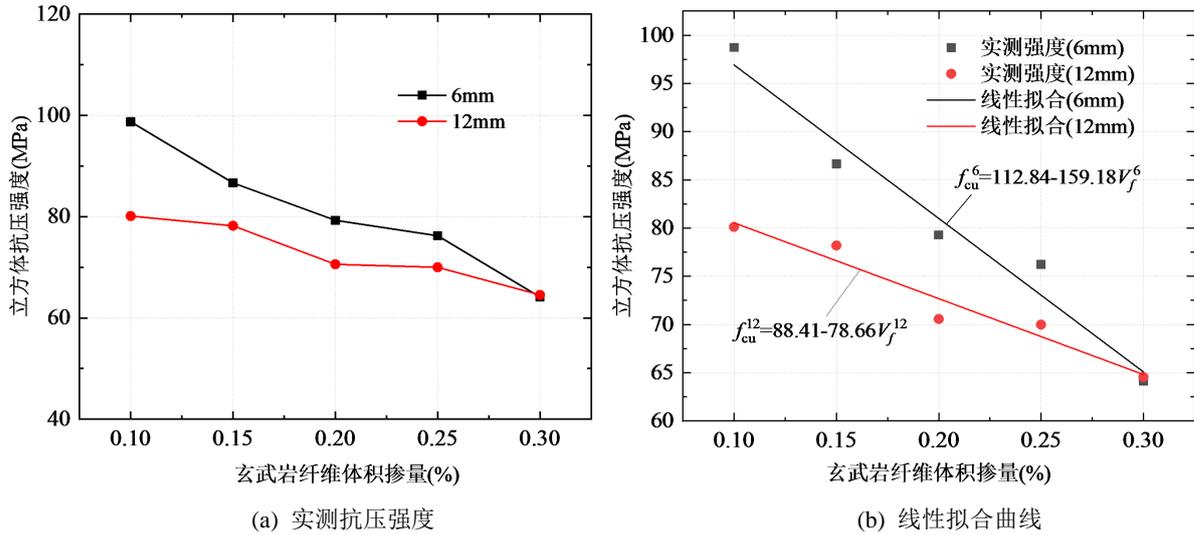


Figure 5. Cube compressive strength changes with fiber content

图 5. 立方体抗压强度随纤维掺量的变化

3.3. 抗折强度

抗折强度与纤维掺量的关系如图 6 所示, 由图 6(a)可以看出, 随着玄武岩纤维掺量的增加 RPC 的抗折强度先增加后减小, 当掺量为 0.15%~0.2% 时抗折强度最大。且掺入 6 mm 纤维长度比 12 mm 纤维长度的抗折强度效果好。因为纤维的掺入虽然可以起到桥接和传递混凝土间应力的功效, 但掺入过量的纤维会使得纤维相互团聚缠结, 并增加了孔隙率, 从而降低了抗折强度。且 6 mm 比 12 mm 的纤维和泥浆结合更好孔隙率更低, 因此 6 mm 较 12 mm 的纤维对 RPC 的抗折效果更佳。

对分别掺入 6 mm 和 12 mm 的玄武岩纤维 RPC 抗折强度进行回归分析, 拟合公式如下式所示, 理论曲线与试验数据绘于图 6(b)。

掺入 6 mm 玄武岩纤维的 RPC 抗折强度拟合公式:

$$f_f^6 = \begin{cases} 11.4 + 20V_f^6 & 0.1\% \leq V_f^6 \leq 0.2\% & R^2 = 0.971 \\ 20.31 - 24.5V_f^6 & 0.2\% \leq V_f^6 \leq 0.3\% & R^2 = 0.983 \end{cases} \quad (3)$$

掺入 12 mm 玄武岩纤维的 RPC 抗折强度拟合公式:

$$f_f^{12} = \begin{cases} 8.82 + 30V_f^{12} & 0.1\% \leq V_f^{12} \leq 0.2\% & R^2 = 0.957 \\ 18.88 - 20.5V_f^{12} & 0.2\% \leq V_f^{12} \leq 0.3\% & R^2 = 0.874 \end{cases} \quad (4)$$

式中: f_f^6 和 f_f^{12} 分别为掺入玄武岩纤维长度为 6 mm 和 12 mm 的 RPC 立方体抗折强度(MPa); V_f^6 和 V_f^{12} 为 6 mm 和 12 mm 玄武岩纤维掺量(%); R^2 为反应拟合精度的相关系数。

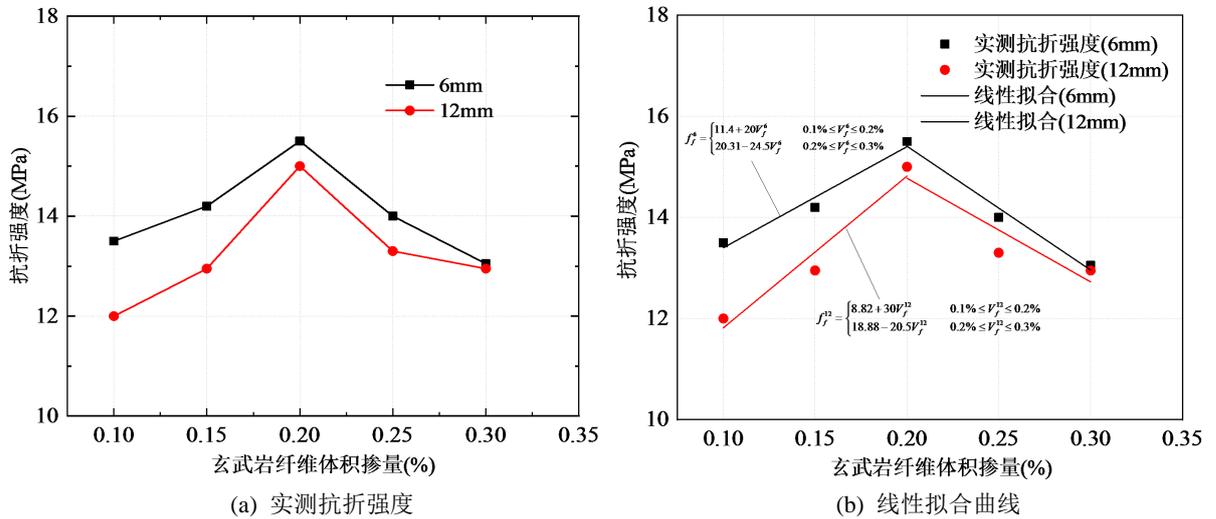


Figure 6. Flexural strength changes with fiber content
图 6. 抗折强度随纤维掺量的变化

4. 试验结果对比分析

将本文抗压与抗折强度试验结果与他人试验结果分别对比于图7和图8。从图中可以看出, Kirthika [4]对掺 0.5%~1%的玄武岩纤维普通混凝土进行了系统的研究, 发现玄武岩纤维体积用量大于 0.50%时, 抗压强度和抗弯强度明显下降; Jiang [7]等研究发现玄武岩纤维加固混凝土的抗压和抗折强度在早期略有提高, 后期有所下降; 李为民等[6]对玄武岩纤维普通混凝土的准静力学性能进行了试验研究, 结果显示玄武岩纤维体积掺量为 0.1%、0.2%的混凝土较素混凝土的准静态力学性能无明显变化, 纤维体积掺量为 0.3%时的抗压强度降低了 16.2%。王德宏等[8]研究了 0~0.2%掺量的玄武岩纤维、聚丙烯纤维和混杂纤维对高性能混凝土抗压强度、抗弯强度, 研究发现单掺玄武岩纤维增强的高性能混凝土抗压强度变化不大, 而抗弯强度和劈裂抗拉强度则得到显著改善。

综合以上分析可知, 玄武岩纤维对普通混凝土抗压强度和抗折强度的增强效果不明显, 当掺入玄武岩纤维体积分数小于 0.2%时可以略微提高混凝土的抗压强度, 当掺入玄武岩纤维体积分数大于 0.2%时,

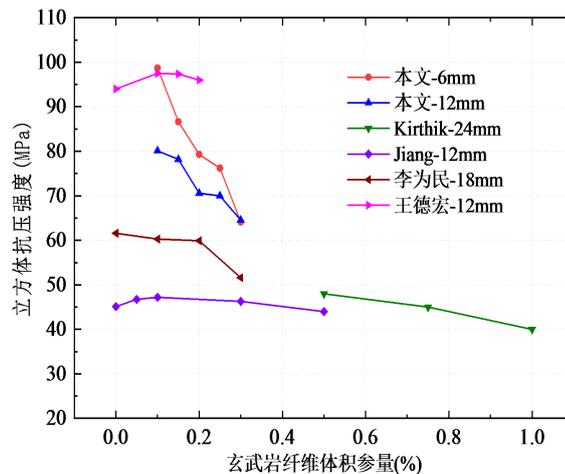


Figure 7. Comparison of compressive strength test results
图 7. 抗压强度试验结果对比

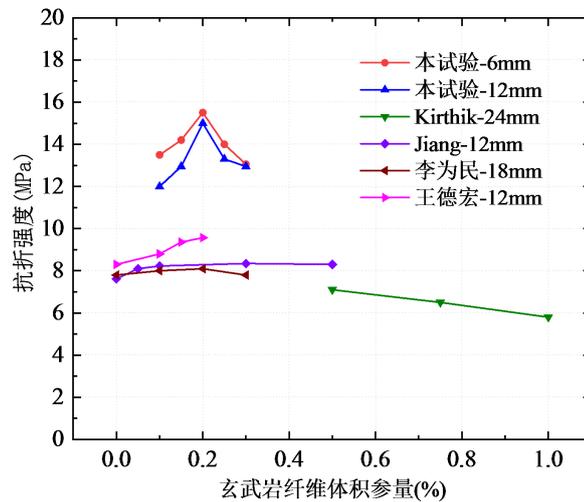


Figure 8. Comparison of flexural strength test results

图 8. 抗折强度试验结果对比

随着玄武岩纤维掺量的增加，抗压强度大致都呈下降趋势；玄武岩纤维的掺入对高性能混凝土抗折强度的提高较为明显，从图中可以看出，当掺入玄武岩纤维体积分数大约为 0.2% 时抗折强度达到最大为 15.8 MPa。

5. 结论

本文主要针对两种不同纤维长度、不同纤维体积参量的玄武岩纤维活性粉末混凝土立方体抗压强度和抗折强度开展了系统研究，得到以下主要结论：

玄武岩纤维 RPC 抗压试件表现为突然性的脆性破坏，由于纤维的存在试块坏而不碎；抗折试件也表现为脆性破坏，且试件破坏时有一条明显的主裂纹。

玄武岩纤维对提高 RPC 的抗压强度作用不大，甚至出现负增长现象；但对 RPC 抗折强度的影响较为明显，随着玄武岩纤维掺量增加，RPC 的抗折强度先增加后减小，当体积含量为 0.15%~0.20% 时效果最佳。

由于 6 mm 的玄武岩纤维比 12 mm 的纤维边壁效应小，且 6 mm 比 12 mm 的纤维与基体结合更好，因此，掺入长度 6 mm 玄武岩纤维比 12 mm 的纤维对 RPC 抗压强度和抗折强度的提高效果好。

对比分析发现，玄武岩纤维对普通混凝土抗压强度和抗折强度的增强效果不明显，当掺入玄武岩纤维体积分数大于 0.2% 时，随着玄武岩纤维掺量的增加，抗压强度大致都呈下降趋势；玄武岩纤维的掺入对高性能混凝土抗折强度的提高较为明显，当掺入玄武岩纤维体积分数大约为 0.2% 时抗折强度达到最大。

参考文献

- [1] 郑文忠, 吕雪源. 活性粉末混凝土研究进展[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 44-58.
- [2] Li, H.Y. and Liu, G. (2016) Tensile Properties of Hybrid Fiber-Reinforced Reactive Powder Concrete after Exposure to Elevated Temperatures. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10, 29-37. <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0125-z>
- [3] 侯敏, 陶燕, 陶忠, 柴栋. 关于玄武岩纤维混凝土的增强机理研究[J]. 混凝土, 2020(2): 67-71+75.
- [4] Kirthika, S.K. and Singh, S.K. (2018) Experimental Investigations on Basalt Fibre-Reinforced Concrete. *Journal of the*

Institution of Engineers (India): Series A, **99**, 661-670. <https://doi.org/10.1007/s40030-018-0325-4>

- [5] Kabay, N. (2014) Abrasion Resistance and Fracture Energy of Concretes with Basalt Fiber. *Construction and Building Materials*, **50**, 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.040>
- [6] 李为民, 许金余, 沈刘军, 等. 玄武岩纤维混凝土的动态力学性能[J]. 复合材料学报, 2008, 25(2): 135-142.
- [7] Jiang, C.H., Fan, K., Wu, F. and Chen, D. (2014) Experimental Study on the Mechanical Properties and Microstructure of Chopped Basalt Fibre Reinforced Concrete. *Materials and Design*, **58**, 187-193. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.056>
- [8] Wang, D.H., Ju, Y.Z., Shen, H. and Xu, L.B. (2019) Mechanical Properties of High Performance Concrete Reinforced with Basalt Fiber and Polypropylene Fiber. *Construction and Building Materials*, **197**, 464-473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.181>