

花岗岩锯泥对混凝土耐久性影响的研究

胡亮, 徐智勇, 凌刚, 龚继武, 林希

武汉盛大长青建材有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年7月18日; 录用日期: 2023年8月8日; 发布日期: 2023年8月28日

摘要

花岗岩锯泥为花岗岩石材切割、抛光等加工过程中产生的废弃物, 含水率高, 难以大量应用。本试验研究了不同等级混凝土中掺入 100 kg/m^3 的湿花岗岩锯泥, 等量取代粉煤灰和细砂颗粒, 研究湿花岗岩锯泥对混凝土工作性能、力学性能以及耐久性的影响规律。研究表明湿锯泥的掺入对不同标号混凝土拌合物工作性能、力学性能均无不利影响, 但是会降低混凝土氯离子扩散系数并减少干燥收缩, 有利于提高混凝土的耐久性。这主要是因为锯泥粉体的活性低, 掺入后会增加混凝土小于 20 nm 的无害孔的含量, 同时锯泥比粉煤灰的粒径更小, 具有更好的填充效果, 从而明显降低大于 200 nm 有害孔的含量, 有助于耐久性的提升。同时锯泥对混凝土水化产物无明显影响。

关键词

花岗岩锯泥, 粉煤灰, 孔结构, 耐久性

Study on the Influence of Granite Sawdust for the Durability of Concrete

Liang Hu, Zhiyong Xu, Gang Ling, Jiwu Gong, Xi Lin

Wuhan Shengda Changqing Building Materials Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: Jul. 18th, 2023; accepted: Aug. 8th, 2023; published: Aug. 28th, 2023

Abstract

Granite saw mud is the waste generated in the processes of cutting and polishing granite stone. It is difficult to be widely used for its high water content. In this experiment, wet granite saw mud with a dosage of 100 kg/m^3 is added to concrete to replace fly ash and fine sand particles. The influence of wet granite saw mud on the workability, mechanical properties and durability of concrete is studied. The results show that the addition of wet sawdust has no adverse influence on the

workability and mechanical properties of concrete. In addition, it reduces the chloride ion diffusion coefficient and the drying shrinkage of concrete, which is conducive to improving the durability of concrete. This is mainly because of the low activity of the sawdust powder, which will increase the content of harmless pores to less than 20 nm in the concrete after mixing. And the particle size of sawdust is smaller than the fly ash, which has a better filling effect. Thus, significantly reducing the content of harmful pores greater than 200 nm, which is conducive to improving the durability of concrete. At the same time, granite saw mud has no obvious effect on the hydration products.

Keywords

Granite Saw Mud, Fly Ash, Pore Structure, Durability

Copyright © 2023 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

随着我国经济发展,天然石材的需求量、消耗量、出口量大幅度增加,同时产生了大量废弃物-锯泥。花岗岩锯泥为花岗岩石材切割、抛光等加工过程中产生的废浆。由于其含水率高,处理工艺繁杂,难以有效利用。大量锯泥的堆放,不仅严重污染环境,而且留下安全隐患。以麻城市为例,前期回填处理的锯泥约3000万吨,每年新增锯泥约900万吨,绝大部分处于集中堆放而未有效利用阶段,不仅占用大量的土地资源,同时对当地的环境和地下水资源造成严重的污染,寻求锯泥的综合化利用变得十分重要。

目前,国内对石材锯泥的应用也进行了不少探索,一方面将其作为原材料生产灰渣砖、加气混凝土砌块、陶瓷等[1][2],但其产品市场需求量较少,对锯泥的消耗量达不到处理的要求;另一方面采用干法制粉,将锯泥烘干、磨细,作为惰性掺合料[3]。由于锯泥中含水率最高可达40%以上,且含有细砂、石块、塑料薄膜等杂物,采用烘干磨细工艺时,能耗较高,经济效果不明显。为了更大限度地利用花岗岩锯泥,将锯泥直接应用于混凝土生产无疑是最有效的途径,因此,研究锯泥对混凝土性能的影响规律则具有十分重要的意义。

花岗岩锯泥本质上是以花岗岩石粉为主,花岗岩石粉在混凝土中的应用已有相当部分的研究成果。赵国成[4]等研究表明,花岗岩石粉和粉煤灰的复掺量不超过10%和20%时,可以显著提高混凝土的工作性能,但是为保证混凝土的力学性能,需要控制其掺量范围。武汉理工大学李相国[5]教授研究发现,掺入花岗岩石粉可以显著提高砂浆的流动度,并降低砂浆的收缩率,但同时砂浆的抗压、抗折强度会随着花岗岩石粉掺量的增加而降低性花岗岩石粉对水泥性能的影响。研究结果显示,花岗岩的加入可以降低砂浆收缩率,提高流动性,砂浆抗折、抗压强度随掺量增加而降低。叶武平[6]等研究了花岗岩石粉取代水泥对混凝土工作性能和力学性能的影响规律,研究结果表明,掺入花岗岩石粉可以提高混凝土的工作性能,增加其坍落度;同时混凝土的力学性能会随着花岗岩石粉掺量的增加而逐渐降低,但是提高花岗岩石粉的细度可以很好的改善混凝土的力学性能。由于花岗岩锯泥是花岗岩石材切割、抛光等加工过程中产生的,其颗粒较细,在混凝土中具有很好的应用价值。但是花岗岩锯泥与烘干花岗岩石粉具有显著差异,因此有必要厘清原状含水锯泥应用于混凝土中对其性能的影响,从而确认原状锯泥的应用效果和价值。

对锯泥资源的再生利用研究有助于解决部分地区大量锯泥资源堆积的问题,有助于促进石材产业经济循环,同时对该地区的环境保护也是一大利好。本实验通过对原状花岗岩湿锯泥进行研究,将其应用到预拌混凝土生产中,对拌合物性能、力学性能进行了研究,同时,通过干燥收缩、氯离子渗透系数、孔结构分析、水化产物微观形貌分析测试实验,研究了锯泥对混凝土长期耐久性能的影响进行了研究。

2. 试验

2.1. 原材料

水泥选用阳新华水泥股份有限公司生产的P·O 42.5水泥,粉煤灰选用鄂州电厂的II级粉煤灰,D50为10.23 μm 。矿粉选用武汉武新型建材有限公司的S95级矿粉,花岗岩锯泥取自麻城嘉煜新型材料有限公司堆厂,各材料的化学成分如表1所示,锯泥是一种硅铝质材料。花岗岩锯泥试验前经过预处理,最大粒径不超过19 mm,其物理性能参数如表2所示,可以看出锯泥中以粉体为主,含有部分粗颗粒。将锯泥烘干过200目的筛子后测得D50为5.98 μm 。锯泥的SEM图片如图1所示,从图1中可以看出,锯泥颗粒表面较光滑,但是具有明显无规则棱角。细骨料选用大冶水洗机制砂和江砂,细度模数分别为4.2和0.7。粗骨料为咸宁碎石,粒径为5~25 mm。减水剂选用武汉信来道科技公司的聚羧酸高性能减水剂,型号610。

Table 1. Main chemical composition of raw materials (wt.%)

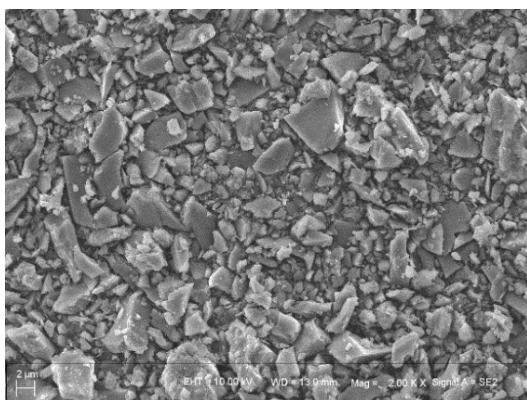
表 1. 原材料的主要化学成分(wt.%)

样品	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	LOI
锯泥	1.65	14.56	72.28	1.30	0.03	4.76	0.66	3.69	0.37
水泥	55.70	9.04	23.16	2.57	2.62	0.82	2.21	0.51	3.87
粉煤灰	3.76	11.08	51.34	4.23	1.06	0.88	0.65	0.42	2.87
矿粉	34.13	16.45	32.21	0.56	2.43	0.43	10.05	0.24	0.87

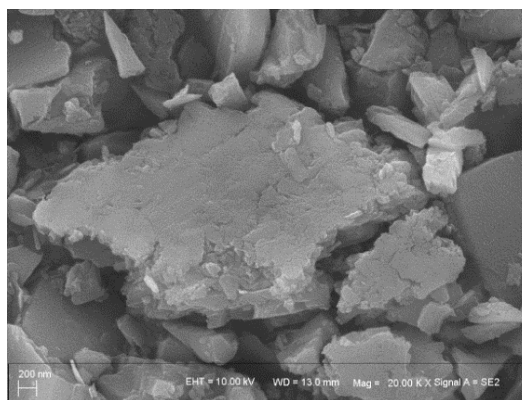
Table 2. Physical properties of granite sawdust

表 2. 花岗岩锯泥的物理性能

含水率	细砂含量	粉含量	亚甲蓝	最大粒径(mm)
15%	20%	65%	1.4	19



(a)



(b)

Figure 1. SEM image of granite sawdust

图 1. 花岗岩锯泥 SEM 图

2.2. 试验方法

混凝土拌合物工作性能参考标准 GB/T 50080-2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》进行测试；混凝土力学性能参考标准 GB/T 50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行测试；混凝土耐久性参考标准 GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行测试。采用 Auto Pore IV 9510 型压汞仪对混凝土的孔结构进行分析，采用 Quanta 450FEG 场发射扫描电镜对混凝土水化产物微观形貌进行分析。

2.3. 配合比设计

本次实验中将锯泥过 19 mm 筛，固定掺量为 100 kg/m^3 ，按照表 2 中锯泥各组分的含量，等质量取代基准配比中的粉煤灰、江砂和水，分别研究锯泥对 C30、C35、C40、C45、C50 混凝土性能的影响。具体配合比如表 3 所示。

Table 3. Mix ratio of different grades concrete with granite sawdust (kg/m^3)

表 3. 锯泥不同标号混凝土配比(kg/m^3)

	水泥	矿粉	粉煤灰	锯泥	机制砂	江沙	碎石	减水剂	水
C30	200	90	50	0	710	170	970	5.8	170
C30-锯泥	200	90	0	100	710	135	970	6.0	155
C35	220	100	50	0	670	170	980	6.3	170
C35-锯泥	220	100	0	100	670	135	980	6.5	155
C40	255	110	50	0	637	160	980	7.7	165
C40-锯泥	255	110	0	100	637	125	980	8.0	150
C45	285	120	50	0	620	160	1000	8.3	160
C45-锯泥	285	120	0	100	620	125	1000	8.5	145
C50	340	80	60	0	601	150	1000	8.6	160
C50-锯泥	340	80	0	100	601	125	1000	9.0	145

3. 试验结果与分析

3.1. 花岗岩湿锯泥对各等级混凝土工作性能的影响

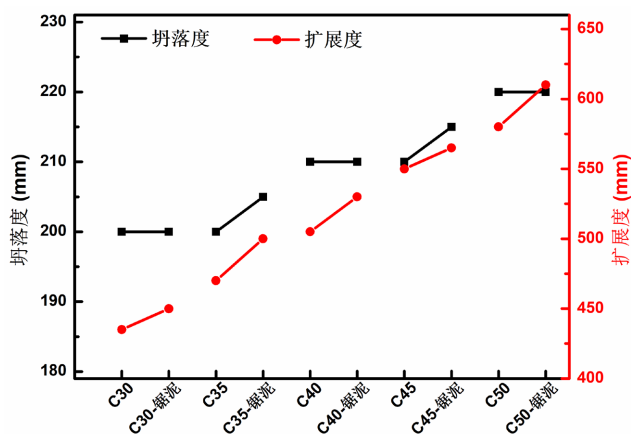


Figure 2. The influence of granite sawdust on the workability for various grades of concrete

图 2. 锯泥对各等级混凝土工作性能的影响

图 2 所示为锯泥对各等级混凝土坍落度和扩展度的影响结果,从图中可以看出,掺入原状锯泥后,各标号混凝土的扩展度均有一定的提升,而 C35 和 C45 等级混凝土的扩展度也有一定的增大。同时,测试过程中发现锯泥取代粉煤灰后,混凝土的和易性、包裹性、黏聚性均有改善。这一结果表明,锯泥的掺入可以改善混凝土的工作性能,这主要是由于锯泥本质上是优质石粉,其吸水率更低,填充性能优于二级粉煤灰。

3.2. 花岗岩湿锯泥对各等级混凝土力学性能的影响

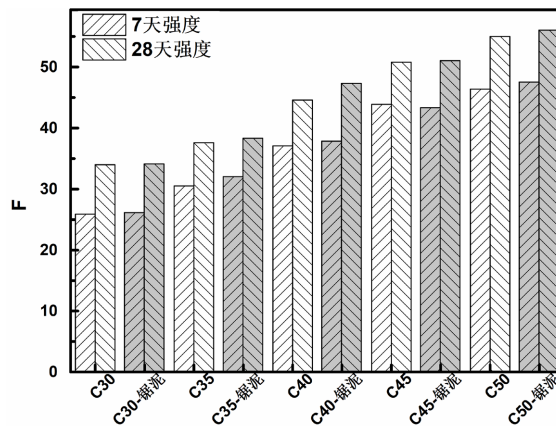


Figure 3. The influence of granite sawdust on the mechanical properties for various grades of concrete
图 3. 锯泥对各等级混凝土强度的影响

图 3 所示为掺入锯泥后各等级混凝土的 7 d 和 28 d 抗压强度变化。从图中可以看出,掺入锯泥后,各标号混凝土强度均有一定的提升,但是提升幅度不明显。强度提升最大的为 C40 混凝土,28 d 强度增加了 3.0 MPa,增幅为 6.5%。一方面,锯泥属于惰性掺合料,其活性低于粉煤灰,对于强度发展不利;另一方面,锯泥的填充效应更好,掺入锯泥后混凝土结构更为密实,同时锯泥颗粒具有棱角性,其与水泥浆体的结合更加坚固[7]。这两方面的综合影响下,掺入锯泥后混凝土的抗压强度仍然有一定的增加,表明锯泥在混凝土中的应用效果良好。

3.3. 花岗岩湿锯泥对各等级混凝土抗渗性能的影响

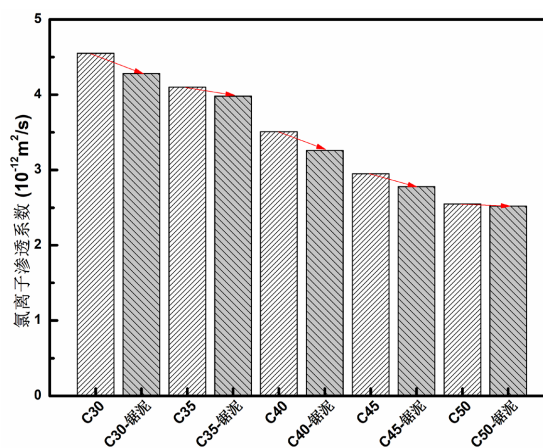


Figure 4. The influence of granite sawdust on the anti-chloride ion permeability for various grades of concrete
图 4. 锯泥对各等级混凝土氯离子渗透性能的影响

图4所示为锯泥取代粉煤灰后各等级混凝土28d的抗渗性变化。从图中可以看出,掺入锯泥取代粉煤灰后,各标号混凝土的氯离子渗透系数均有所降低。其中C30~C45混凝土的氯离子渗透系数降低幅度在3.0%~7.2%,其中C40混凝土的抗渗性提升最大,为7.2%,而C50混凝土的氯离子渗透系数仅降低了1.2%。这一结果表明锯泥对提高C45以下混凝土抗渗性的效果更加显著,而C50混凝土由于其自身抗渗性较好,掺入锯泥后对其抗渗性的影响也较小。混凝土的抗渗性是其自身结构密实性的一种体现,这一结果进一步证明了锯泥取代粉煤灰后,可以进一步填充混凝土内部孔隙,减少混凝土内部孔隙之间的连通性,提高混凝土的密实性[8]。

3.4. 花岗岩湿锯泥对各等级混凝土干燥收缩性能的影响

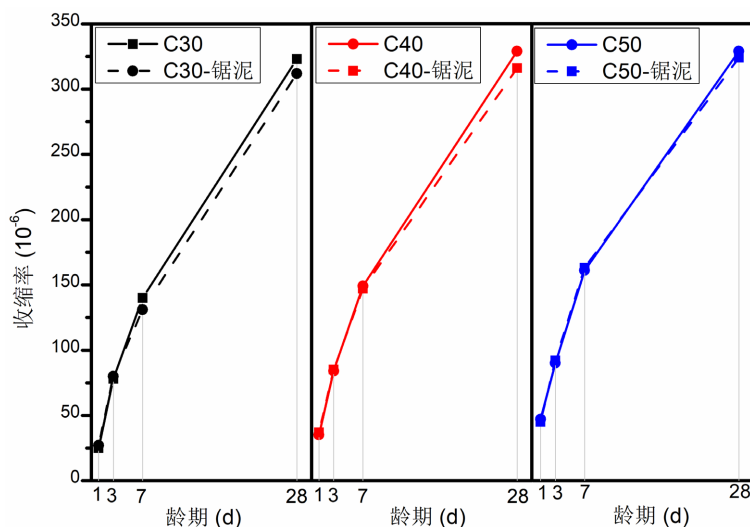


Figure 5. The influence of granite sawdust on the drying shrinkage performance for various grades of concrete
图5. 锯泥对各等级混凝土干燥收缩性能的影响

图5所示为锯泥对C30、C40、C50混凝土干燥收缩性能的影响。从图5中可以看出,混凝土的干燥收缩随着龄期的延长,逐渐增加,但是干燥收缩增长率逐渐变缓。掺入锯泥取代粉煤灰后,混凝土的28d干缩率呈下降趋势,掺入锯泥后C30、C40、C50混凝土28d的干燥收缩分别降低了3.4%、4.0%和1.5%。混凝土干燥收缩的与其内部毛细孔的含量有关,而锯泥的粒径比粉煤灰更细,其微集料效应可以有效的填补混凝土内部的毛细孔,降低毛细孔的含量,从而降低混凝土的干缩[9]。超细石粉在水泥水化早期有促进熟料矿物水化的性能,这种水化的加速会导致混凝土的干缩增加,但由于其对孔结构的细化作用抵消了这部分的干缩值[10]。因此,从整体来看,锯泥替代粉煤灰后有利于混凝土干缩性能的改善。

3.5. 花岗岩湿锯泥对混凝土孔结构的影响

对水泥基材料进行切割、破碎处理后,从中选取质量约为2g的块体用于孔结构分析测试。采用Auto Pore IV9510型压汞仪测试基准混凝土(C40)和掺锯泥混凝土(C40-锯泥)的孔结构分布。在测试过程中,设置测试最大压力为228 MPa,平衡时间和排空时间分别为10s和5min,测量的孔径范围为3.2nm~360nm。检测结果见图6。

根据吴中伟院士的观点[11],可以将水泥基材料内部孔按照孔径划分为:小于20nm的无害孔,20~100nm的少害孔、100~200nm的有害孔和大于200nm的多害孔,且指出减少100nm的以上的有害孔,增加50nm以下的少害孔和无害孔,可以提高水泥基材料的结构性能和耐久性。

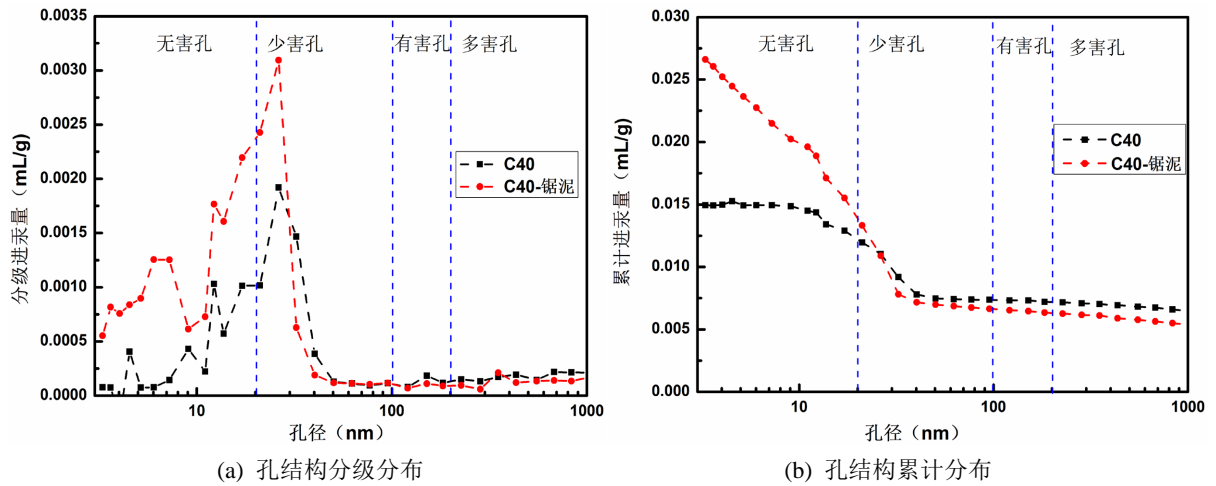


Figure 6. The influence of granite sawdust on the pore structure of concrete
图 6. 锯泥对混凝土孔结构的影响

图 6 所示为 C40 组混凝土和 C40-锯泥组混凝土的孔结构测试结果，可以看出，两组混凝土中孔均主要为小于 50 nm 的少害孔和无害孔。掺入锯泥后会导致混凝土内部无害孔和少害孔的含量显著增加，但是这对于混凝土的力学性能无明显不利影响，反而会降低混凝土的收缩，提高混凝土的抗冻性能，从而提高混凝土的长期耐久性。C40 组混凝土的累计进水量为 0.01573 mL/g，而 C40-锯泥实验组为 0.02661 mL/g，这一结果表明掺入锯泥后，混凝土的孔隙率有所增加。进一步对孔结构进行分析，如表 4 所示。从中可以看出，掺入锯泥后，混凝土内部小于 20 nm 的无害孔的相对从 23.9% 增加到 48.2%，但是大于 200 nm 的多害孔的比例从 49.9% 降低到 19.9%，这表明掺入锯泥后对混凝土的孔结构有一定的优化。这主要是因为锯泥的粒径更细，具有更好的填充效果，使混凝土的结构更加密实，有害孔的含量降低；但是由于锯泥的活性较低，掺入锯泥混凝土内部生成的水化产物减少，导致内部凝胶孔(无害孔)含量的增加 [12]。但是从整体孔结构上来说，锯泥的掺入可以优化混凝土孔结构，从而提高混凝土的耐久性能。

Table 4. Analysis of MIP test results
表 4. MIP 测试结果分析

编号	孔隙率(%)	孔结构分布(%)			
		<20 nm	20~100 nm	100~200 nm	>200 nm
C40	3.04	23.9	25.1	1.1	49.9
C40-锯泥	5.42	48.2	30.8	1.1	19.9

3.6. 花岗岩湿锯泥对混凝土微观形貌的影响

图 7 所示为 C40 组混凝土和 C40-锯泥组混凝土 28 d 的水化产物的微观形貌图。如图 7 所示，混凝土 C40 组和混凝土 C40-锯泥组的 SEM 图像中均可以看出一定量的片状氢氧化钙(CH)晶体和大量的致密无定型水化硅酸钙(C-S-H)，未发现明显的针棒状钙矾石(Aft)晶体。这主要是由于粉煤灰和锯泥的活性都较低，不能完全消耗水泥水化产生的 CH 晶体，而体系中硫酸根离子含量较低，水化后期未形成大量的 Aft 晶体。C40 组和 C40-锯泥实验组的水化产物形貌无明显差别，表明锯泥的掺入对水化产物的影响不明显。

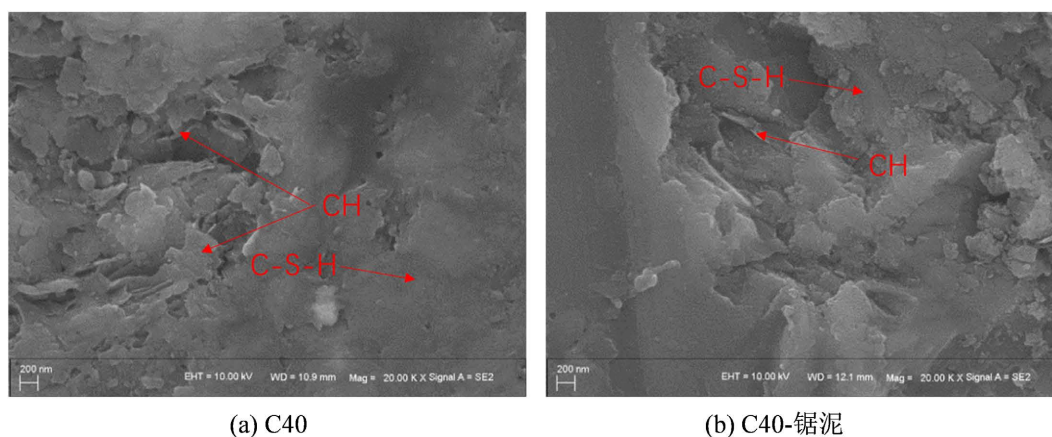


Figure 7. Microscopic morphology analysis of hydration products
图 7. 水化产物微观形貌分析

4. 结论

本实验通过掺入 100 kg 原状湿锯泥全部取代各等级混凝土中的粉煤灰和部分细砂，研究了锯泥对各等级混凝土工作性能、力学性能和耐久性能的影响规律，探究原状锯泥在混凝土生产中的应用价值，得到的结论如下：

(1) 掺入原状湿锯泥可以改善各等级混凝土拌合物的工作性能，并且能够提高混凝土的 7 d 和 28 d 强度，其中 C40 混凝土的强度提升最显著，28 d 强度增幅达到 6.5%。

(2) 掺入原状湿锯泥可以降低混凝土的收缩，提高混凝土的抗渗性，且 C45 等级混凝土以下的效果更佳显著。这主要是因为锯泥的颗粒更细，具有更好的填充效果，从而明显降低 200 nm 有害孔含量；同时由于其活性低，会增加小于 20 nm 的无害孔，这均有利于提高混凝土的耐久性。

(3) 从微观结构测试结果中看出，锯泥的掺入对混凝土水化产物的微观结构无明显影响。

参考文献

- [1] 彭鸿寿. 石材废浆在水泥砂浆中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2019.
- [2] 蒋慧媛. 花岗石废浆在泡沫混凝土中的应用研究[J]. 固废利用, 2014(2): 26-28.
- [3] 周洁, 杨正刚. 磨细石粉在混凝土中的应用[J]. 商品混凝土, 2014(6): 54-55.
- [4] 赵国成, 牛亚林, 李永亮. 花岗石粉和粉煤灰同时使用对混凝土抗压强度的影响[J]. 四川建材, 2014(3): 37-38.
- [5] 李相国, 李孟蕾, 马保国, 朱艳超, 徐斌. 改性花岗石粉对水泥的性能影响[J]. 混凝土, 2013(8): 87-90.
- [6] 叶武平, 朱明. 石粉在混凝土中应用的研究现状和展望[J]. 江西建材, 2015(5): 5.
- [7] 郭育霞, 贡金鑫, 李晶. 石粉掺量对混凝土力学性能及耐久性的影响[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3): 266-271.
- [8] 董刚刚. 花岗石粉混凝土力学、耐久性能和微观结构研究[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
- [9] 冯志龙. 混凝土的干缩机理研究[J]. 应用能源技术, 2008(11): 12-14.
- [10] 李保亮, 柏立贵, 徐洪伟, 丁百湛. 石粉对水泥及混凝土性能的影响[J]. 商品混凝土, 2013(2): 40-42+34.
- [11] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999: 22-25.
- [12] 刘数华, 阎培渝. 石灰石粉对水泥浆体填充效应和砂浆孔结构的影响[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(1): 69-72.