

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.01.005

高性能铁尾矿细骨料再生混凝土碳化力学性能试验研究

黄钟晖,张世荣,王炳华,孟庆军

(南宁轨道交通集团有限公司,广西 南宁 530022)

摘要: 为了提高废弃物的利用程度,以交通工程所用混凝土为研究对象,对不同铁尾矿细骨料掺入比例下的再生混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度及其变形性能进行试验研究。结果表明:尾矿掺量的增加,使混凝土的立方体抗压强度在碳化前后均出现先增大后降低的趋势,峰值点时掺量为30%;使劈裂抗拉强度值与轴心抗压强度值出现不同的波动,但碳化前后的峰值点时掺量为20%~40%;使再生混凝土的峰值应变与弹性模量均出现不同程度的降低,碳化龄期越长,降低幅度近乎越大。整体上,当尾矿掺量为30%时,使再生混凝土的性能达到或超过普通混凝土,通过研究,为铁尾矿再生混凝土的普及应用提供了理论基础。

关键词: 铁尾矿;再生混凝土;碳化;力学性能;变形性能

中图分类号: X799.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)01-0028-06

Experimental Study on Carbonation Mechanical Properties of High Performance Iron Tailings Fine Aggregate Recycled Concrete

HUANG Zhonghui, ZHANG Shirong, WANG Binghua, MENG Qingjun

(Nanning Rail Transit Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530022, China)

Abstract: To promote the utilization of recycled concrete, this paper took the concrete used in road traffic engineering as the research object, the compressive strength, splitting tensile strength and deformation performance of high-performance recycled concrete with different tailings mixing proportion were tested. The results showed that the cube compressive strength of concrete increased first and then decreased with the addition of tailings with different contents before and after carbonation, and the content was 30% at the peak point. While the splitting tensile strength and axial compressive strength fluctuated differently, but the tailings content was 20%~40% at the peak point before and after carbonation, and the peak strain and elastic modulus of recycled concrete were different. The longer the carbonization age was, the greater the reduction. On the whole, when the tailings content was 30%, the performance of recycled concrete could reach or exceed that of ordinary concrete. Through the research, it provided a theoretical basis for the application of tailings recycled concrete.

Keywords: iron tailings; recycled concrete; carbonation; mechanical properties; deformation performance

伴随着现阶段交通工程的快速发展,高速公路、轨道交通、跨海隧道等都得到了质的发展,混凝土是其利用的主要材料。同时,伴随着中国城镇化建设

的加快,再加上现阶段再生技术的不成熟,导致了建筑垃圾与尾矿库的大量存在,给人们的生存环境带来了极大的威胁。利用尾矿与建筑废料制备高性能

收稿日期:2020-10-07

修稿日期:2020-10-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51178388)

作者简介:黄钟晖(1974—),男,广东横县人,博士,教授级高级工程师,主要从事隧道及地下工程研究工作。

E-mail:huangzhonghui@126.com

通讯作者:张世荣(1971—),男,山东临朐人,博士,教授级高级工程师,主要从事隧道及地下工程研究工作。E-mail:122822169@qq.com

尾矿再生混凝土并将应用于交通工程中去,是现阶段最有效的途径,也符合“发展绿色环保、循环再生高性能混凝土”的十三五发展战略。

张玉琢等^[1]对应用于道路工程的铁尾矿混凝土的力学性能、抗渗性、干缩性等进行了研究,表明其干缩应用值与磨损量增加。徐国强等^[2]以农村公路为研究对象,对尾矿混凝土的工作性能与力学性能进行了研究。杜艳^[3]利用铁尾矿取代天然砂,对其路用水泥混凝土的配合比进行了设计,并对其混凝土的坍落度、和易性与抗压强度进行了测试。张智^[4]利用碱激发剂对铁尾矿混凝土进行了固化处理,表明将其作为道路基层与底基层填料是可行的。但现阶段的研究多集中在普通尾矿混凝土,对环境与社会的增强效益较为有限。因此,有必要对高性能的尾矿再生混凝土进行研究。

基于此,文中考虑不同铁尾矿掺量,对尾矿再生混凝土碳化前后的主要力学性能与变形性能进行了

研究,以期寻找铁尾矿的最适掺入量,为铁尾矿再生混凝土在道路交通工程中的应用提供理论基础。

1 试验材料及配合比设置

采用陕西秦岭牌 42.5 级普通硅酸盐水泥;试验用天然粗骨料为人工碎石,连续级配,粒径范围为 5 mm ~ 20 mm;细骨料采用灞河天然河沙;再生骨料由西安某环保科技有限公司生产,为现行市场通用材料,基础混凝土强度等级为 C30,所选骨料已服役 30 年,连续级配,经筛分、清洗、晾晒、装袋等程序,供试验使用。试验用铁尾矿来自于陕西商洛宝明矿业有限公司窑沟尾矿库,试验前对再生粗骨料与尾矿的级配进行了测定,并与规范的规定值进行了对比,见图 1,可见其颗粒级配均满足规范^[5-6]的要求。试验前,对主要材料的物理性能指标进行了测定,见表 1 与表 2。

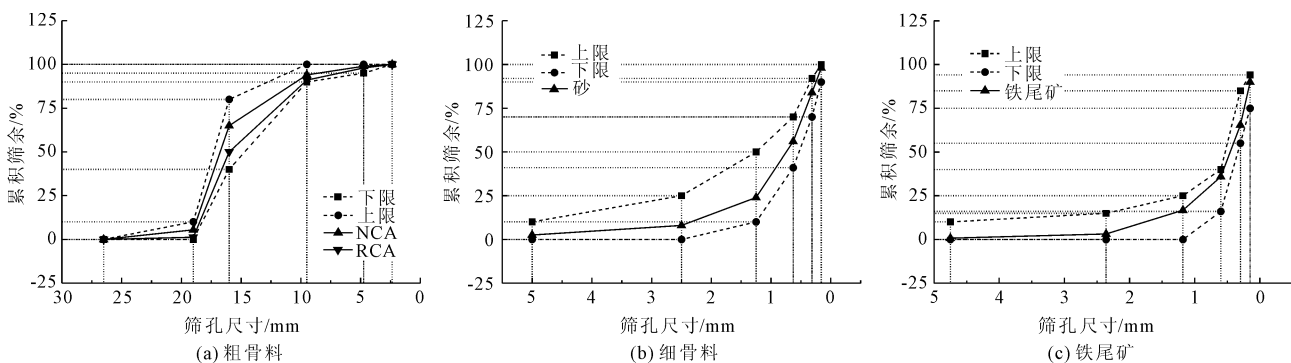


图 1 骨料的颗粒级配

表 1 水泥的主要性能指标

标准稠度 用水量/%	初凝时间 /min	终凝时间 /min	细度 (45 μm)	安定性 (雷氏法)	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
					3 d	28 d	3 d	28 d
28	160	280	2.8	合格	5.2	6.8	19.5	42.2

表 2 主要材料的性能指标

性能指标	表观密度 /(kg · m ⁻³)	堆积密度 /(kg · m ⁻³)	破碎值指标 /%	吸水率 /%	含泥量 /%	含水率 /%	有机物 含量	碱集料 反应
NCA	2941	1749	10.3	1.33	0.72	0.80	合格	合格
RCA	2536	1467	14.8	7.00	1.86	3.02	合格	合格
NCA 规范值 ^[7]	≥2500	≥1300	≤16.0	—	≤1.00	—	合格	合格
河砂	2764	1830	12.0	2.12	1.20	4.10	合格	合格
铁尾矿	2745	1824	19.5	8.70	2.90	1.45	合格	合格
河砂规范值 ^[7]	—	—	≤10.0	—	≤3.00	—	合格	合格

备注:天然粗骨料(Natural Coarse Aggregate),简称 NCA;再生粗骨料(Recycled Coarse Aggregate),简称 RCA。

基于此,对高性能尾矿再生混凝土进行了配合比设计^[8],参考相关文献,将再生骨料的取代率设

定为 30%^[9-10],然后考虑不同的尾矿掺量,依据规范^[7]的规定对配合比进行了设计。便于对比分析,

各配合比均选择水胶比为 0.4, 砂率为 0.35。经过试配与调整, 各工况下混凝土的配合比设计见表 3。

表 3 不同工况下资源化混凝土的配合比设计

序号	试块编号	胶凝材料 (水泥)	不同粗骨料量		不同细骨料量		水量 $/(kg \cdot m^{-3})$	尾矿取代率/%
			NCA	RCA	Sand	IOT		
1	NAC	538	1063	0	572	0	215	0
2	RAC-1	538	735	315	566	0	215	0
3	RAC-2	538	739	317	512	57	215	10
4	RAC-3	538	743	319	458	114	215	20
5	RAC-4	538	744	319	402	172	215	30
6	RAC-5	538	751	322	343	229	215	40
7	RAC-6	538	755	324	290	290	215	50
8	RAC-7	538	763	327	176	410	215	70
9	RAC-8	538	773	331	0	594	215	100

注: NAC 为天然混凝土, RAC 为再生混凝土。

2 试验设置

文中以 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ (立方体抗压强度、劈裂抗拉强度) 与 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ (轴心抗压强度、变形能力) 试块为基本研究对象, 来建立再生混凝土随时间的材料强度变化规律。试验中对碳化前后不同尾矿掺量的再生混凝土试块进行了测试, 碳化龄期分别为 7 d、14 d、28 d 与 90 d, 由于试验仪器容积有限, 因此不同的测试指标采用了不同的碳化龄期。

采用 TH-W 混凝土碳化试验箱进行碳化测定, 力学性能由 1 000 kN 微机控制电液伺服万能试验机测定。试验加载与碳化试验均按照规范^[11]的要求进行, 其中, 碳化试验的具体流程见图 2。

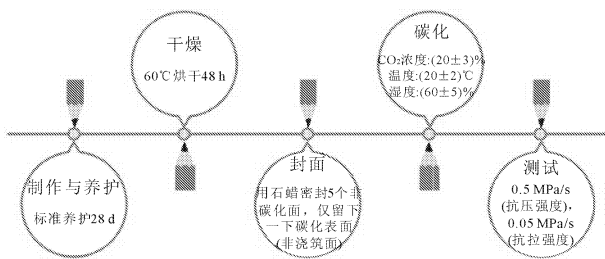


图 2 碳化试验流程图

3 试验结果分析

3.1 立方体抗压强度

图 3 为碳化前后不同龄期下资源化混凝土的立方体抗压强度随尾矿取代率的变化曲线。定义强度增长率为同一龄期的混凝土的强度增长值与自然养

护龄期强度的比值。由图 3(a)可以看出, 当尾矿掺量低于 30% 时, 抗压强度随尾矿掺量的增加而增大, 而高于 30% 时, 则出现了相反的趋势。碳化后的情况与未碳化的情况相似, 均在尾矿取代率为 30% 时, 抗压强度出现峰值, 使强度值接近 NAC 的对应强度值。同时, 由图 3(c)可以看出, 碳化提高了混凝土的抗压强度, 且碳化 7 d 的强度增加值在不同程度上均比碳化 14 d 的强度增加值高。究其原因, 铁尾矿颗粒较细, 填充效应明显, 少量的掺加能够改善混凝土的匀质性与致密性, 阻止了 CO_2 气体在混凝土中的扩散, 使抗压强度升高。当掺量为 30% 时, 尾矿的填充效应最好, 抗碳化能力也最强; 但当掺量较高时, 大量的铁尾矿取代了细骨料, 造成骨料级配不合理, 混凝土内的缺陷、孔隙增多, 从而降低了抗压强度值。此外, 铁尾矿具有“火山灰活性”, 促进了水泥的水化, 同等条件下, 消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的能力变强, 使混凝土的碱度降低, 抗碳化能力变强。同时, 在某种程度上提高了混凝土的密实度, 从而提高了碳化后的抗压强度, 且掺量越高, 这一效应就越明显, 由图 3(b)可以直观的看到碳化的曲线变得相对缓和也即是验证了这一点, 这与文献[12-13]得到的变化趋势相似。

3.2 立方体劈裂抗拉强度

图 4 为碳化前后不同龄期下资源化混凝土的立方体劈裂抗拉强度随尾矿取代率的变化曲线。由图 4(a)与图 4(b)可得, 随着养护与碳化龄期的增长, 立方体劈裂抗拉强度整体呈现小幅增长的趋势; 同一龄期自然养护条件下, 抗拉强度随着尾矿的掺入先增后降, 但不同的养护龄期, 峰值点出现的位置有所差异, 7 d、14 d、28 d 与 90 d, 最大劈裂抗拉强度对应的铁尾矿掺量分别为 30%、20%、40% 与 40%。碳化使混凝土的抗拉强度值变化更为复杂, 出现了不同程度的波动, 但可以确定第一个峰值点出现的位置处于 20%~40% 之间; 随着碳化龄期的增长, 碳化强度值也出现了较大的波动, 但整体较为平缓, 与 Chinnappa 等^[14]的研究结果的规律相似。由图 4(c)也可以看出, 碳化使不同工况下的大部分混凝土抗拉强度出现不同程度的增长, 但增幅较小(与立方体抗压强度相比), 部分还出现了负增长, 主要原因在于混凝土的抗拉强度仅为立方体抗压强度的 1/10, 且混凝土的密实度对其影响相对较小; 铁尾矿的掺入, 对低碳化周期的混凝土影响相对较大, 当碳化周期较长时, 影响相对较小, 例如掺量为 100% 时, 7 d、14 d、28 d 与 90 d 的碳化龄期下, 其强度增

加值分别为 10.79%、6.65%、5.97% 与 1.22%。追其原因,随着碳化时间的增长,碳化生成物逐渐填充了混凝土中的孔隙,使 CO₂ 进出混凝土的通道变

少,也就降低了碳化的影响程度。因此,碳化使立方体劈裂抗拉强度出现波动,首次出现峰值对应的尾矿的取代率为 20%~40%。

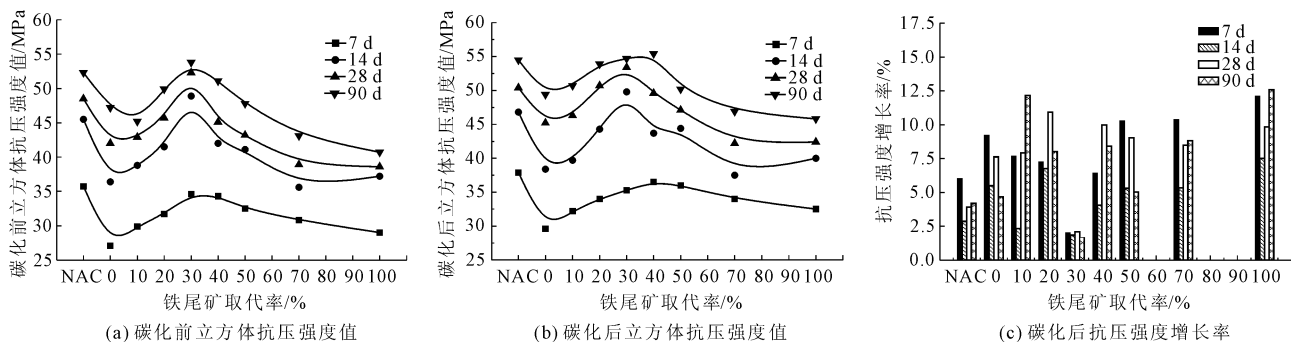


图 3 碳化前后资源化混凝土立方体抗压强度变化情况

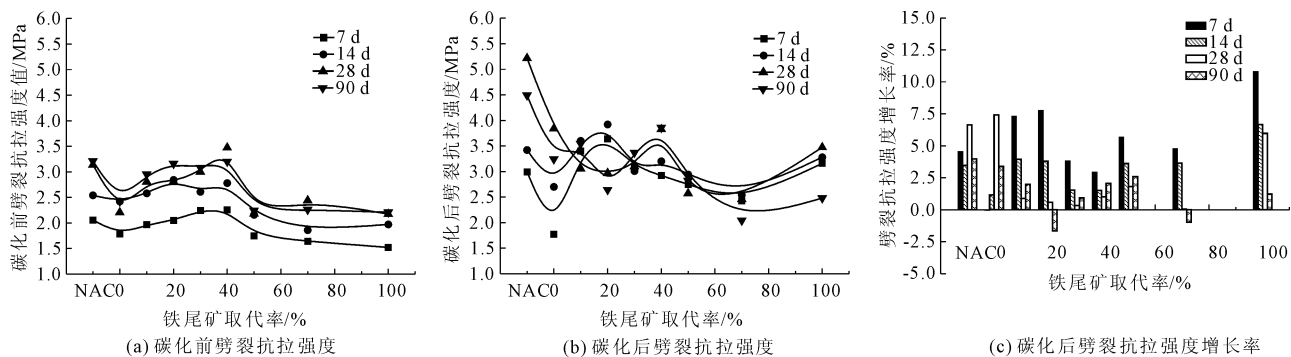


图 4 碳化前后资源化混凝土劈裂抗拉强度变化情况

3.3 轴心抗压强度

图 5 为轴心抗压强度变化图,图 5 中实线表示自然养护条件下,虚线代表碳化条件下。由图 5(a) 可得,自然养护与碳化条件下,铁尾矿的掺入对混凝土轴心抗压强度的影响趋势是一致的,均使其先增大后减小,峰值点依旧处于 20%~40% 范围内。通过图 5(a),我们还可以看出,自然养护 90 d 时,过了峰值点后,轴心抗压强度下降幅度不大,且之后有逐渐升高的趋势,而碳化 90 d 时,峰值点后也比较平缓,因此,可以预测随着时间的增长,水泥水化程度的逐步完善,尾矿掺量不同而使混凝土轴心抗压产生的强度差异在逐步变小,这与文献[14-15]的研究结论相似。由图 5(b) 也可看出,长龄期作用下,碳化产生的强度增长率在逐渐变小。但由于过量尾矿的掺入引起的级配不合理现象依旧存在,因此,使后期的强度值出现了变化(负值)。追其根源,主要由于尾矿的火山灰活性消耗了大量的 Ca(OH)₂,致使混凝土内部的碱含量降低,碳化反应变弱,相对差异变小。

3.4 变形性能

高性能尾矿再生混凝土的变形性能主要包括峰

值应变与弹性模量,其变化规律见图 6、图 7。由图 6、图 7 可知,不管是峰值应变还是弹性模量,不同的碳化周期与尾矿掺量,最终呈现出的整体趋势是相同的。整体看来,最初掺量较小时,尾矿使混凝土的变形性能发生无规律的变化。当掺量较大时,使混凝土的最优配合比发生了变化,同时,Ca(OH)₂ 的消耗降低了混凝土的碳化程度,使其变化趋于规律。

当尾矿掺量较小时(≤20%),每个相同的碳化周期,尾矿掺量使其变形性能发生不同程度的波动,近似上,28 d 的变形性能较大,例如,碳化 28 d 再生混凝土(RAC-1)的峰值应变比碳化 0 d 增大了 36.9%;NAC 与 RAC-3 的弹性模量,28 d 比 0 d 分别增加了 58.6% 与 34.9%。当掺量较大时(>20%),随着碳化龄期的增长,每个铁尾矿掺量下,其变形性能均呈现出:0 d > 28 d > 90 d 的相同趋势,也说明尾矿的掺入能够减小混凝土的峰值应变,但同时也使弹性模量发生了不同程度的降低,这也是与其抗压强度的降低相对应的。

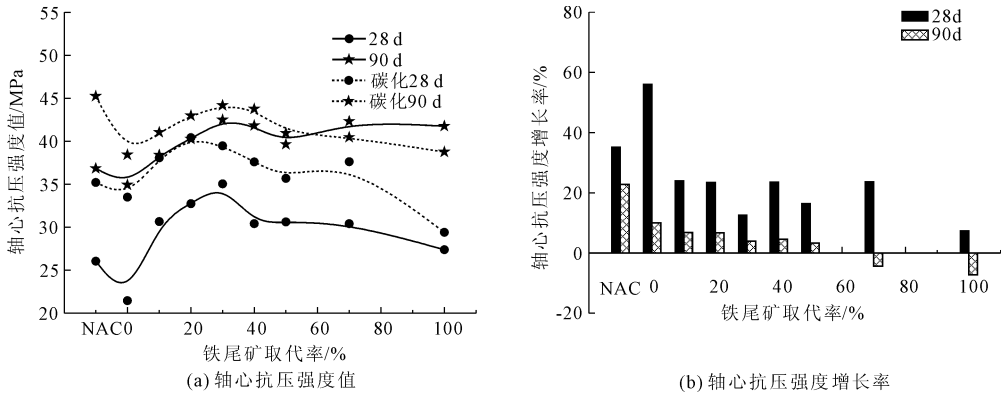


图 5 碳化前后轴心抗压强度变化情况

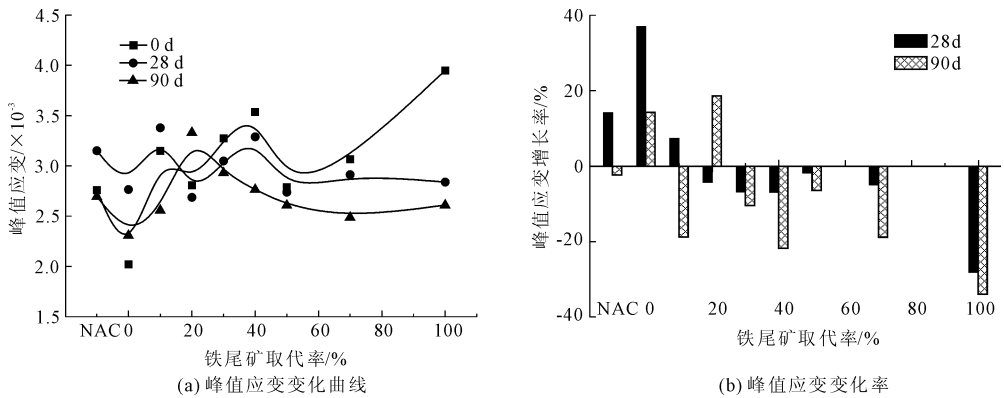


图 6 碳化对掺加铁尾矿混凝土峰值应变的影响

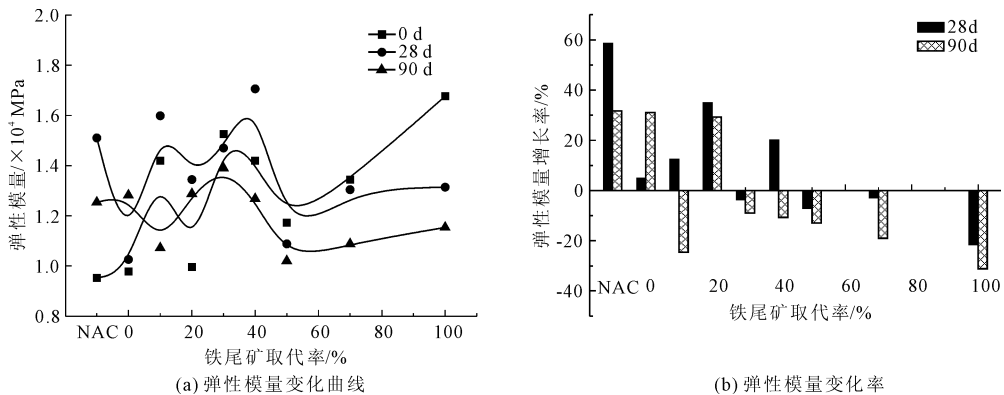


图 7 碳化对掺加铁尾矿混凝土弹性模量的影响

4 结 论

利用尾矿材料的微细粉及火山灰活化特性,对不同尾矿掺量的再生混凝土进行了快速碳化试验,对其主要力学和变形性能进行了试验研究。主要结论有:

(1) 少量尾矿掺加,使立方体抗压性能变强,但过量掺入时,使其强度值又出现了下降,峰值点处掺量为 30%;碳化提高了混凝土密实性,使抗压强度出现了不同程度的提高,部分提高接近 10%。

(2) 尾矿对裂劈抗拉强度的影响相对较小,未碳化时,当尾矿掺量为 30%,使其出现峰值;碳化后使各龄期的强度值出现了波动,且使各龄期的强度值出现了不同程度的增长,此时峰值强度出现在 20%~40%。

(3) 尾矿使轴心抗压强度先增后减,峰值点处于 20%~40%。碳化缓和了不同尾矿掺量对轴心抗压强度的影响,碳化龄期越长,碳化后的强度增长率越小。

(4) 尾矿使碳化前后混凝土的峰值应变与弹性

模量呈现出相似的趋势:掺量较小时,出现波动,掺量较大时,逐渐趋于直线变化,但总体来说,随着尾矿掺量的增加,其峰值应变与弹性模量值均出现了不同程度的降低,且掺量越高,降低幅度越大。

结果表明,当尾矿掺量近似为30%时,高性能尾矿再生混凝土的力学性能与变形性能能够达到或略超普通混凝土。因此,铁尾矿与再生骨料的掺量均为30%时,能够将其应用于道路交通工程中去。

参考文献:

- [1] 张玉琢,马洁,刘海卿. 铁尾矿砂混凝土路用性能试验研究[J]. 混凝土,2018,12:157-160.
- [2] 徐国强,于庆坤,杨小杰. 尾矿砂掺量对C30路用混凝土性能的影响[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2016,38(3):120-123.
- [3] 杜艳. 铁尾矿砂路用水泥混凝土性能分析[J]. 黑龙江交通科技,2019,42(9):5-6,9.
- [4] 张智. 碱激发材料固化细铁种尾矿砂路面基层强度特性与耐久性研究[J]. 阜新:辽宁工程技术大学,2019.
- [5] 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准:JGJ52[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [6] 普通混凝土配合比设计规程:JGJ 55—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [7] 再生混凝土结构技术标准:JGJ/T 443—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [8] 尹志刚,范巍,董思健,等. 基于正交试验设计的再生骨料透水混凝土力学性能研究[J]. 水利与建筑工

程学报,2019,17(4):21-25,44.

- [9] 肖倍,安旭文,杨瑞,等. 再生混凝土基本力学性能试验及其影响因素研究[J]. 混凝土,2018,11:32-36,40.
- [10] Fan Xu, Sheliang Wang, Tao Li, et al. The mechanical properties of tailing recycled aggregate concrete and its resistance to the coupled deterioration of sulfate attack and wetting - drying cycles [J]. Structures, 2020, 27: 2208-2216.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准(GB/T 50082—2009)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [12] Shettima A U, Hussin M W, Ahmad Y, et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete [J]. Construct. Build. Materials, 2016, 120:72-79.
- [13] 彭成,肖苗良,叶恒达,等. 再生混凝土耐久性研究进展[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(6):126-130.
- [14] Chinnappa G B, Karra R C. Experimental and statistical evaluations of strength properties of concrete with iron ore tailings as fine aggregate [J]. Journal of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste, 2020,24(1):04019038.
- [15] Sharma R, Khan R. Durability assessment of self-compacting concrete incorporating copper slag as fine aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2017, 155:617-629.