

文章编号:1007-9629(2022)06-0635-08

钛石膏-矿渣对砖混再生粗集料 负压强化效果评价

赵之仲^{1,*}, 柳泓哲², 杨振宇³, 石祥玉⁴, 赵连地¹

(1. 山东交通学院 交通土建工程学院, 山东 济南 250357; 2. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 102616; 3. 山东高速股份有限公司, 山东 济南 250014; 4. 山东高速路桥国际工程有限公司, 山东 济南 250014)

摘要:为了解决建筑固废资源化利用的技术难题,研究了钛石膏-矿渣浆体(T-S浆体)强化砖混再生粗集料(BCRCA)的作用机理,比较了负压强化与传统搅拌裹附强化效果的优劣,分析了T-S浆体强化水泥稳定碎石混合料无侧限抗压强度和劈裂强度的变化.结果表明:T-S浆体可以产生C-S-H凝胶和钙矾石微膨胀体,填充粗集料的孔隙;负压强化BCRCA的压碎值达到27.5%,吸水率降低至6.6%,表观密度提高至2.678 g/cm³,灌入饱和度相较于传统搅拌裹附强化提高了63.7%;负压强化水泥稳定碎石混合料的无侧限抗压强度为3.8 MPa,劈裂强度为0.40 MPa,较未强化时分别提高38.5%、36.7%,抗疲劳性与抗冲刷性均提升了15%以上,强化效果明显.

关键词:砖混再生粗骨料;水泥稳定碎石;强化材料;负压强化;CT扫描

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.06.013

Effect Evaluation of Negative Pressure Strengthening of Titanium Gypsum Slag on Brick Concrete Recycled Coarse Aggregate

ZHAO Zhizhong^{1,*}, LIU Hongzhe², YANG Zhenyu³, SHI Xiangyu⁴, ZHAO Liandi¹

(1. School of Transportation Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China; 3. Shandong Hi-Speed Company Limited, Jinan 250014, China; 4. Shandong Hi-Speed Road & Bridge International Engineering Co., Ltd., Jinan 250014, China)

Abstract: To solve the technical difficulty in the utilization of construction waste resources, the mechanism of strengthening of the brick concrete recycled coarse aggregate (BCRCA) by titanium gypsum slag paste (T-S paste) was studied. Both of the advantages and disadvantages of negative pressure strengthening and traditional strengthening were discussed. At the same time, the variation rules of unconfined compressive strength and splitting strength used for the cement stabilized macadam mixture were analyzed. The results show that the T-S paste can produce C-S-H gel and ettringite micro expansion body to fill the coarse aggregate pores. After negative pressure strengthening, the crushed stone value of BCRCA reaches 27.5%, the water absorption ratio decreases to 6.6%, and the apparent density increases to 2.678 g/cm³. The water saturation after negative pressure strengthening is 63.7% higher than that after stirring. After negative pressure strengthening, the unconfined compressive strength and the splitting strength of cement stabilized macadam mixture are 3.8 MPa and 0.40 MPa respectively, increasing

收稿日期:2021-04-22; 修订日期:2021-07-12

基金项目:“十三五”国家重点研发计划资助项目(2018YFB1600100);山东省交通运输厅科技计划(2018B02-01,2019B63,2020B93);山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QE274);山东省重点研发计划(软科学项目)(2020RKB01602)

第一作者(通讯作者):赵之仲(1978—),男,山东德州人,山东交通学院副教授,硕士生导师,博士. E-mail: zhaozhizhong@sdjtu.edu.cn

by 38.5% and 36.7% compared with those unstrengthened. Both fatigue performance and anti-scouring performance increase by more than 15%. The strengthening effect of T-S paste is obvious in the negative pressure strengthening mode.

Key words: recycled brick-concrete coarse aggregate (BCRCA); cement stabilized macadam; strengthening material; negative pressure strengthening; CT scan

随着中国城市建设的发展,建筑固废总量已占到城市垃圾总量的30%~40%^[1-2].当前,中国道路工程建养每年需要消耗砂石等材料数十亿t,逐步成为了大宗建筑固废再利用的主战场^[3-5].由于砖混再生集料存在强度低、密度小和吸水率高的劣势^[6-9],在未经强化处理时不能满足相关使用要求,限制了其资源化利用,因此对砖混再生集料进行强化研究迫在眉睫.

采用化学浆液或溶液浸泡、渗透结晶改性、纳米技术改性和碳化处理等方法^[10-12]强化砖混再生集料时,需要的试剂较为昂贵,提高了强化成本,并且碳化过程需要收集CO₂并且封存,现阶段也没有合适的碳化设备^[13-14].钛石膏是硫酸法生产钛白粉的工业固体废弃物,目前仅少量用于水泥缓凝,制备复合胶凝材料等^[15-16].因此,使用钛石膏可以有效降低生产成本,具有很强的经济性,同时也会消耗大量废弃物,可以保护生态环境,达到以废治废的目的.

现阶段缺少效果明显、成本不高和简单易控的强化材料,也没有较好的强化处理方式.传统搅拌和浸泡强化并不能满足使用要求,已经成为制约砖混再生集料广泛应用的瓶颈.从再生集料的强化方式与材料入手,选用一种成本低廉、效果优异的强化材料对砖混再生粗集料(BCRCA)进行强化,并提出一种新的负压强化方式,研究其强度的变化规律,可以解决建筑垃圾资源化利用的问题,在极大程度上促进BCRCA再生利用技术的推广.

1 原材料

水泥采用山水集团供应的P·O 42.5水泥,性能如表1所示.BCRCA由山东普绿祥环保科技有限公司提供,性能如表2所示.由表2可见,BCRCA的压碎值、吸水率和针片状含量都比较高,分析后发现是由于BCRCA破碎筛分装置还不够完善,在初期破碎分拣过程中所含杂物并不能完全去除,含有部分的砖瓦碎片、浮石和木屑等垃圾造成的.BCRCA的孔隙率较高,其中也存在部分浮石,因此导致该集料吸水率较高.

表1 水泥的性能

Table 1 Performance of cement

Performance	Requirement	Result
Normal consistency/%		28.5
Setting time/min	Initial	≥45
	Final	≤600
Soundness/mm	≤5	0
Flexural strength/MPa	1 d	≥3.5
	28 d	≥6.5
Compressive strength/MPa	1 d	≥17.0
	28 d	≥42.5

表2 BCRCA的性能

Table 2 Performance of BCRCA

Performance	Requirement	Result
Crushed stone value/%	≤35	32.9
Flat and elongated particle in coarse aggregate/%	20-30 mm	≤20
	10-20 mm	≤20
	5-10 mm	≤20
Apparent density/(g·cm ⁻³)	20-30 mm	2.550
	10-20 mm	2.567
	5-10 mm	2.573
Water absorption ratio (by mass)/%	20-30 mm	8.9
	10-20 mm	9.8
	5-10 mm	9.2

2 强化方式与材料

2.1 负压强化设备

采用课题组自主研发的小型负压强化设备^[17]对BCRCA中单颗粒或小部分粗集料进行强化.在负压的条件下,将强化材料灌入BCRCA孔隙中,从而达到填充孔隙、强化集料的目的.研究发现,采用二次搅拌的方法,在负压温度为54℃下,负压压力控制到75 kPa,稳压12 min时的强化效果最佳^[18].

2.2 强化材料

图1为钛石膏的XRD图谱.由图1可见,CaSO₄·2H₂O含量(质量分数,文中涉及的含量、剂量、水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比)为41.2%,在强化过程中提供CaSO₄.

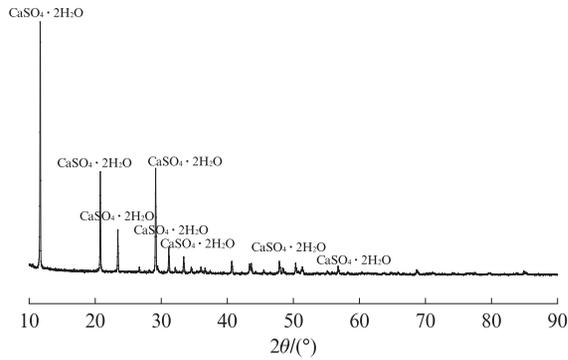


图1 钛石膏的XRD图谱

Fig. 1 XRD pattern of titanium gypsum

图2为矿渣的XRD图谱.由图2可见,矿渣含有大量的Al₂O₃和SiO₂,其中活性较高的Al³⁺和Si²⁺含

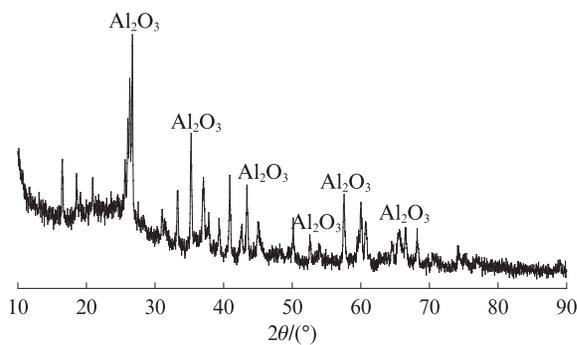
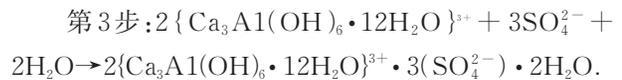
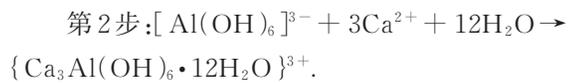


图2 矿渣的XRD图谱

Fig. 2 XRD pattern of slag

量丰富,在反应过程中可以提供足量的Al³⁺.但是,两者复合反应是很难进行的,所以要利用水泥来提供一定的碱性反应条件,作为复合反应的激发剂使用.因此,在P·O 42.5水泥中掺入钛石膏和矿渣,将产生大量C-S-H凝胶和钙矾石膨胀晶体,达到封闭、填充孔隙的效果.

在反应过程中钛石膏会分离出SO₄²⁻和Ca²⁺,矿渣提供足量的Al³⁺,水泥熟料矿物产生OH⁻和Al(OH)₄⁻,这些离子会通过浓度差扩散聚集在一起,从而发生化学反应,在反应中将会通过3个步骤形成钙矾石晶体:



前期研究表明^[19-20],水泥作为激发剂使用的剂量为5%时,可以提供充足的碱性环境,当m(钛石膏):m(矿渣)=2:3时,钙矾石的生成量较多而且反应效果最佳.因此,选取m(水泥):m(钛石膏):m(矿渣)=10:2:3的掺配比例制备强化浆体(T-S浆体),同时利用扫描电子显微镜(SEM)观察养护龄期为1、7、14、21 d时T-S浆体的微观形貌,结果如图3所示.

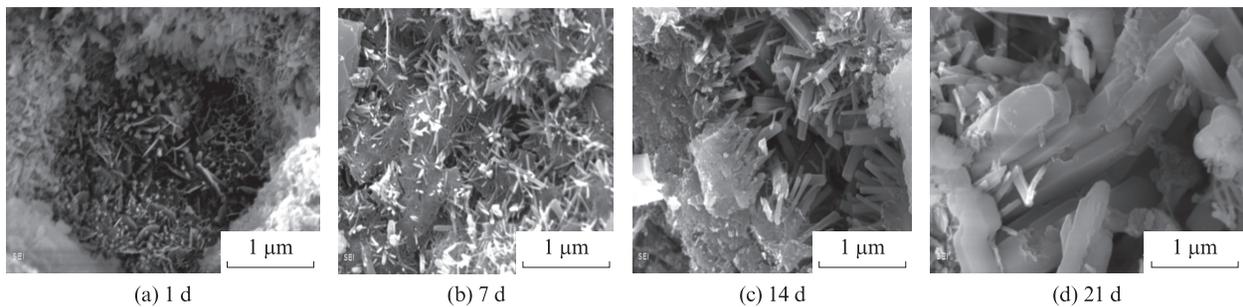


图3 不同养护龄期下T-S浆体的微观形貌

Fig. 3 Microstructure of T-S paste with different curing ages

2.3 试验方法确定

2.3.1 T-S浆体强化BCRCA

首先,以0.1为间隔,确定T-S浆体水胶比 m_w/m_b 为1.3~1.8,浆体裹附效果如图4所示.观察发现:当水胶比为1.3时,浆体较稠,无法有效裹附BCRCA;当水胶比为1.8时,浆体太稀,也无法裹附在集料表面.因此,选择1.4、1.5、1.6和1.7为试验水胶比.其次,确定2种强化方式:搅拌裹附强化方式是将BCRCA放入T-S浆体中,基于水泥初终凝时间的影响,利用净浆搅拌机分别搅拌20、40、60 min,并静置



图4 钛石膏-矿渣浆体的裹附效果

Fig. 4 Adhesion effect of titanium gypsum slag slurry

5 min,使 T-S 浆体均匀裹附在 BCRCA 表面;负压强化方式如 2.1 所述.最后,待 2 种强化方式处理完成后,为避免集料间的黏结,用筛子轻轻筛分,在室温下静置 24 h,得到强化 BCRCA.根据 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》,分别对强化 BCRCA 的吸水率、压碎值和表观密度进行测定,分析在不同强化方式下 BCRCA 3 种性能的变化规律,确定最佳水胶比.

2.3.2 灌入饱和度试验

将 T-S 浆体所能浸入深度与孔隙总深度的比值定义为灌入饱和度,以此来表征 T-S 浆体灌入孔隙的程度.利用 CT 扫描技术对 T-S 浆体强化 BCRCA 前后的孔隙充盈情况和孔隙特征进行观察,结果如图 5、6 所示.根据图 5、6,通过分析得到,强化 BCRCA 的闭口孔隙占 47%,开口孔隙占 36%,连通孔隙占 17%.

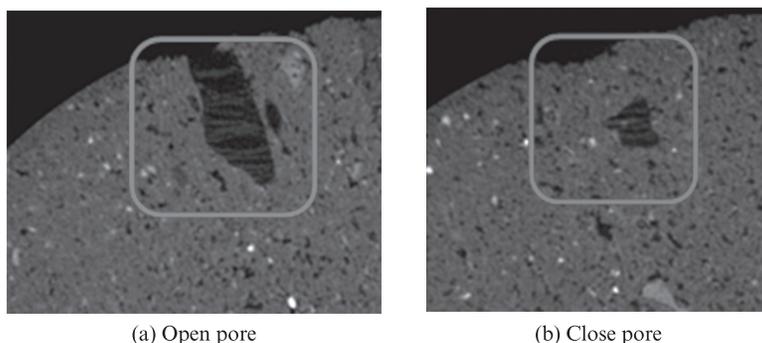


图 5 强化材料灌入程度示意图

Fig. 5 Schematic diagram of filling degree of strengthening materials

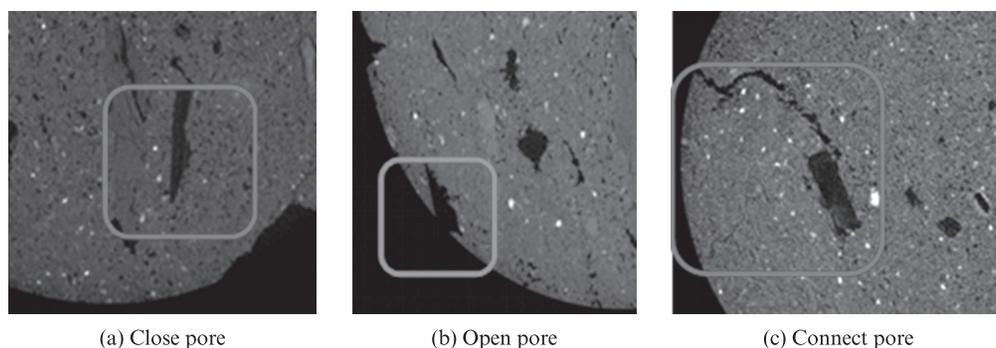


图 6 强化 BCRCA 的孔隙特征扫描图

Fig. 6 Scanning graph of pore characteristics of strengthening BCRCA

2.3.3 力学性能与耐久性能评价

水泥稳定碎石基层是路面结构中的主要承重层,不仅要承受由沥青面层上车辆传递下来的行车荷载,还要起到支撑沥青面层的作用,所以水泥稳定碎石基层应具有足够的强度和耐久性.因此,将强化前后的 BCRCA 用于水泥稳定碎石中,依据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》,分别测试其无侧限抗压强度、劈裂强度、抗疲劳性能以及抗冲刷性能,分析水泥稳定碎石的性能变化规律.

3 结果与分析

3.1 集料强化性能结果分析

图 7 为采用 2 种方式强化后,BCRCA 的吸水率、表观密度和压碎值的变化规律.由图 7 可见:

(1)强化 BCRCA 的吸水率随着水胶比的增大呈先减小后增大的趋势.分析可知,水胶比变化反映了强化浆体稠度的变化,过稠或过稀都会降低浆体的裹附效果.水胶比为 1.5 时,BCRCA 易于被 T-S 浆体包裹.当采用搅拌裹附强化方式时,随着搅拌时间的延长,吸水率不断降低,使更多的 T-S 浆体浸入孔隙中,从而获得了较好的强化效果.在搅拌 60 min 后强化效果最佳,吸水率降至 7.2%.当采用负压强化方式时,T-S 浆体能够更好地填充集料孔隙,并且反应生成钙矾石晶体和 C-S-H 凝胶,使集料更加密实,从而有效提高集料的性能,使吸水率降至 6.6%,较未强化时降低 32.6%.

(2)当水胶比为 1.5 时,强化 BCRCA 的表观密度达到最大值.这是由于水胶比的不同,导致浆体的稠

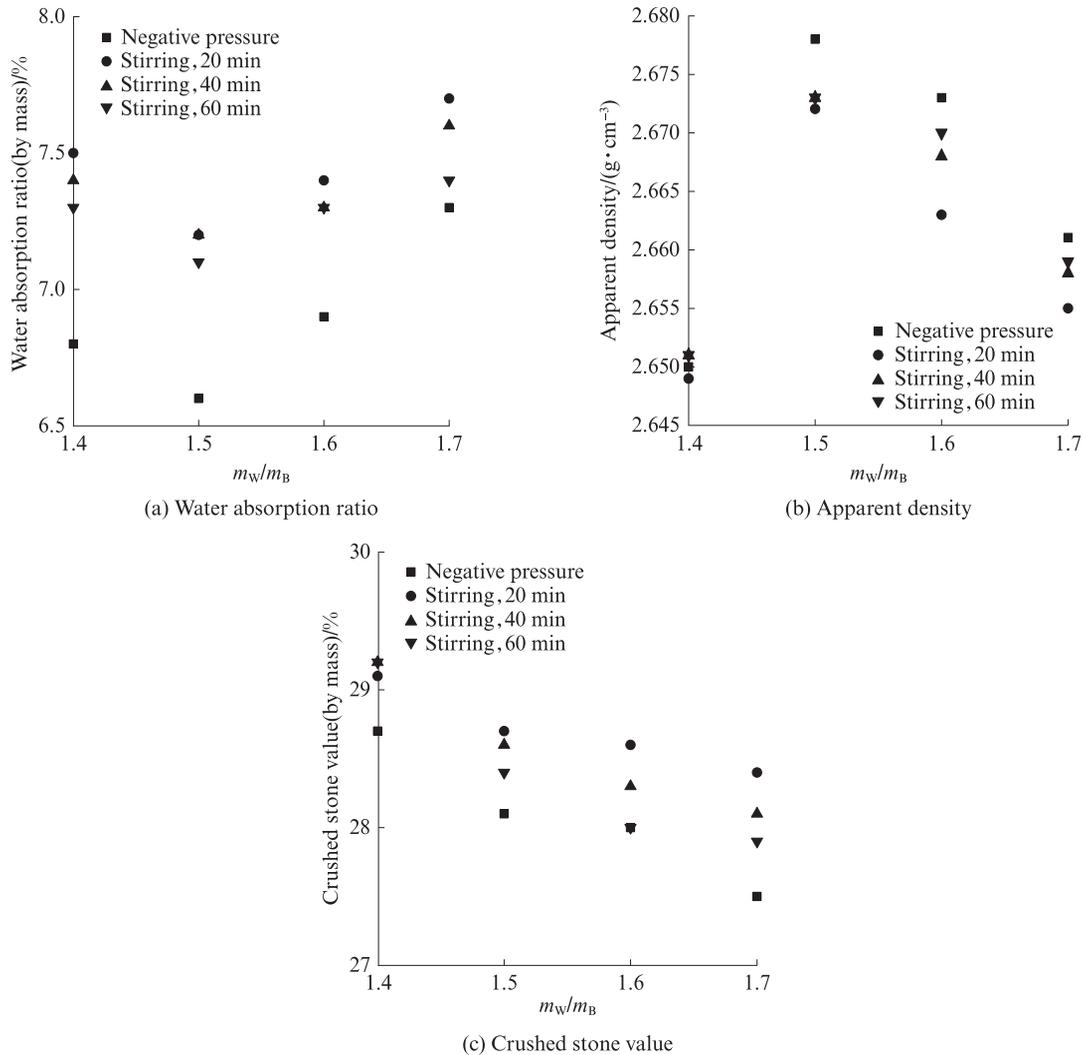


图7 BCRCA 各项性能指标的变化规律
Fig. 7 Variation law of each performance index of BCRCA

度和流动性不同,使填充程度出现差异.搅拌时间的影
响较弱,当搅拌 60 min 时,浆体已经开始趋向于初
凝状态;搅拌 40 min 后,BCRCA 的表观密度已达到
2.673 g/cm³.当采用负压强化方式时,BCRCA 的表
观密度较传统搅拌裹附强化方式有所提高,此时浆
体中不仅有更多反应生成的钙矾石晶体和 C-S-H 凝
胶填充到孔隙中,在集料表面也会裹附一部分浆体,
在其表面形成浆体强化壳,因此负压强化 BCRCA 的
表观密度可以达到 2.678 g/cm³.

(3) 强化 BCRCA 的压碎值随着水胶比的增大而
减小.当水胶比为 1.7 时,强化 BCRCA 的压碎值达
到最优状态,搅拌 40、60 min 时的压碎值约为
28.0%;经过负压强化后的压碎值降低至 27.5%,与
原始状态下的 32.9% 相比,降低了 16.4%.但是,与
搅拌裹附强化相比,负压强化 BCRCA 的吸水率有
所减小.当选择水胶比为 1.5 时,负压强化 BCRCA
的吸水率最小、表观密度最大,并且压碎值也变化
不大.因此,在负

压强化方式下,最优水胶比为 1.5.

3.2 灌入饱和度结果分析

从强化方式和孔隙特征 2 方面对灌入饱和度的
变化规律进行分析,结果如表 3 所示.由表 3 可见:

(1) 从强化方式上来看,当采取传统搅拌裹附强
化方式时,BCRCA 的灌入饱和度随着搅拌时间的延
长而增大,但是连通孔隙的灌入饱和度仅为 15.2%,
开口孔隙的灌入饱和度为 23.4%.经过负压强化后,
BCRCA 的灌入饱和度有明显提升,其开口孔隙和
连通孔隙的灌入饱和度分别提高至 38.3%、
27.5%.由此看出,负压强化方式可以有效提高强化

表 3 灌入饱和度的变化
Table 3 Variation change of filling saturation

Strengthening method	Open pore	Connect pore
Stirring	23.4	15.2
Negative pressure	38.3	27.5

材料浆体灌入集料孔隙的程度,从而提升了BCRCA的各项性能指标,使其达到使用条件.

(2)从孔隙特征上来看,BCRCA的开口孔隙灌入饱和度比连通孔隙提升了约25.1%.因为连通孔隙中外部孔隙与内部孔隙的连接通道较为狭窄,T-S浆体不易进入孔隙内部,从而导致灌入饱和度较差.开口孔隙具有较宽的流通通道,T-S浆体可以更好地灌

入粗集料孔隙中,从而达到密实孔隙的目的.因此,负压强化方式能够更好地强化BCRCA.

3.3 水泥稳定碎石混合料强化性能结果分析

级配设计采用4档集料,分别为G1(20~30 mm)、G2(10~20 mm)、G3(5~10 mm)和G4(0~5 mm),筛分试验后调整确定4档集料比例为 $m(G1):m(G2):m(G3):m(G4)=17:23:23:37$,级配如表4所示.

表4 水泥稳定碎石混合料的集料级配
Table 4 Grading of aggregate of cement stabilized stone mixture

Sieve size/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Passing ratio(by mass)/%	100.0	82.6	77.4	69.5	55.7	35.4	22.6	16.0	12.0	7.4	4.8	2.6

采用水泥剂量为5%,含水量按8%、9%、10%、11%和12%添加,分别进行击实试验,得到水泥稳定

碎石混合料含水量与干密度的关系,结果如图8所示.

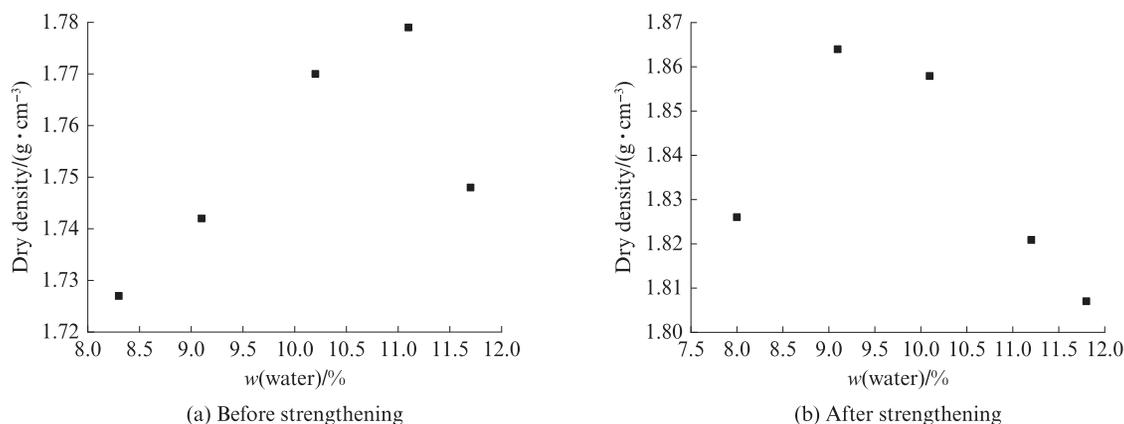


图8 水泥稳定碎石混合料含水量与干密度的关系

Fig. 8 Relationship between dry density and water content of cement stabilized stone mixture

3.3.1 无侧限抗压强度分析

表5为不同龄期下的水泥稳定碎石混合料无侧限抗压强度.由表5可见:(1)未强化集料在95%的保证率下,水泥稳定碎石混合料的7 d无侧限抗压强度代表值仅为2.1 MPa,适合二级及二级以下中等交通基层或重交通下底基层使用;水泥稳定碎石混合料的90 d无侧限抗压强度代表值可达到3.9 MPa.(2)对BCRCA进行负压强化后,在95%的保证率下,水泥稳定碎石混合料的7 d无侧限抗压强度代表值为3.8 MPa,相较于未强化时提高约80.9%,可在一级公路和高速公路中用于中等交通基层或集中交通下底基层;水泥稳定碎石混合料的90 d无侧限抗压强度代表值达到5.6 MPa,比未强化时增长了38.5%.

3.3.2 劈裂强度分析

表6为不同龄期下的水泥稳定碎石混合料劈裂强度.由表6可见:(1)BCRCA未强化时,水泥稳定碎石混合料的7 d劈裂强度代表值仅为0.30 MPa;在养护90 d后,水化作用逐渐减缓,其劈裂强度的变化趋

表5 不同龄期下的水泥稳定碎石混合料无侧限抗压强度

Table 5 Compressive strength of cement stabilized stone mixtures at different ages

Curing age/d	MPa	
	Before strengthening	After strengthening
7	2.1	3.8
28	3.2	4.9
90	3.9	5.6

表6 不同龄期下的水泥稳定碎石混合料劈裂强度

Table 6 Splitting strength of cement stabilized stone mixtures at different ages

Curing age/d	MPa	
	Before strengthening	After strengthening
7	0.30	0.41
28	0.37	0.49
90	0.45	0.60

于稳定,达到0.45 MPa.(2)BCRCA强化后,水泥稳定碎石混合料的7 d劈裂强度可达到0.41 MPa,较未强化时强度增长约36.7%;养生90 d后,水化作用完成,

强度形成,此时的劈裂强度可达到0.60 MPa,比未强化时增长了33.3%。

3.3.3 疲劳性能分析

在疲劳性能试验中,首先测定梁式试件的弯拉强度,以便确定疲劳试验的荷载水平,再取4~6个应力比(K)进行疲劳试验.表7为水泥稳定碎石混

合料的疲劳性能.由表7可见,当BCRCA未强化时,水泥稳定碎石混合料的疲劳寿命(N)仅有约47万次,当BCRCA强化后,水泥稳定碎石混合料的疲劳寿命可超过62万次,强化后的平均疲劳寿命提高了30.8%,说明经过强化后的BCRCA具有良好的抗疲劳性能.

表7 水泥稳定碎石混合料的疲劳性能

Table 7 Fatigue properties of cement stabilized stone mixtures

Specimen type	Flexural tensile strength/MPa	K	N /time	Regression equation
Before strengthening	0.63	0.4	476 800	$y=9.45-11.32x$ $R^2=0.9902$
		0.5	17 240	
		0.6	310	
		0.7	30	
After strengthening	0.84	0.4	623 600	$y=11.28-13.88x$ $R^2=0.9337$
		0.5	22 670	
		0.6	560	
		0.7	50	

3.3.4 抗冲刷性能分析

在对BCRCA强化后的情况下,水泥稳定碎石混合料试件的冲刷质量损失为0.206%,与原始状态下的冲刷质量损失0.242%相比,降低了大约17.5%。主要有4种因素会影响试件冲刷质量的损失,分别是粗集料性质、养生龄期、水泥剂量以及混合料中细集料的含量.试验中水泥剂量与养生龄期均未改变,因此集料性质和细集料含量为主要影响因素.BCRCA的表面孔隙较多,会吸附一部分粉尘,增大了混合料中细集料的含量,在动水压力的作用下抗冲刷性能较弱.再生粗集料经过强化后,性质得到改善,孔隙得到填充,所以采用强化BCRCA制备的水泥稳定碎石混合料具有更好的抗冲刷性能.

4 结论

(1)在负压强化方式下,当水胶比为1.7时,砖混再生粗集料(BCRCA)的压碎值可降低至27.5%,较未强化时降低16.4%.为了兼顾吸水率与表观密度的影响,选择1.5作为最佳水胶比,此时BCRCA压碎值所受的影响不大,且吸水率、表观密度达到6.6%、2.678 g/cm³,吸水率较未强化时降低了32.6%。

(2)与传统搅拌裹附强化方式相比,经过负压强化方式强化后,BCRCA开口孔隙和连通孔隙的灌入饱和度分别提高至38.3%、27.5%,并且T-S浆体能够更好地灌入开口孔隙,其灌入饱和度比连通孔隙提升了25.1%。

(3)强化后的BCRCA用于水泥稳定碎石基层

时,其7 d无侧限抗压强度和劈裂强度分别为3.8、0.41 MPa,较未强化时提升了38.5%、36.7%,可以达到较好的强化效果。

(4)BCRCA强化后,水泥稳定碎石混合料的平均疲劳寿命提高了30.8%,抗冲刷性能提升了17.5%,具有较好的耐久性能。

参考文献:

- [1] 于华洋,马涛,王大为,等.中国路面工程学术研究综述·2020[J].中国公路学报,2020,33(10):1-66.
YU Huayang, MA Tao, WANG Dawei, et al. Review on China's pavement engineering research·2020[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10):1-66. (in Chinese)
- [2] 马昆林,黄新宇,胡明文,等.砖混再生粗骨料混凝土力学性能及工程应用研究[J].硅酸盐通报,2020,39(8):2600-2607.
MA Kunlin, HUANG Xinyu, HU Mingwen, et al. Mechanical properties and engineering application of brick-concrete recycled coarse aggregate concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(8):2600-2607. (in Chinese)
- [3] WANG X F, YANG X S, REN J, et al. A novel treatment method for recycled aggregate and the mechanical properties of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 10:1389-1401.
- [4] LI L, POON C S, XIAO J Z, et al. Effect of carbonated recycled coarse aggregate on the dynamic compressive behavior of recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 151:52-62.
- [5] 肖杰,马海峰,吴超凡,等.建筑固体废物再生粒料基层混合料的性能研究[J].建筑材料学报,2018,21(3):511-515,522.
XIAO Jie, MA Haifeng, WU Chaofan, et al. Study on

- performance of construction and demolition waste recycled aggregate base mixture[J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(3):511-515,522. (in Chinese)
- [6] LIU S H, SHEN P L, XUAN D X, et al. A comparison of liquid-solid and gas-solid accelerated carbonation for enhancement of recycled concrete aggregate [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021:103988.
- [7] 张学兵,王干强,方志,等.RPC强化骨料掺量对再生混凝土强度的影响[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(3):400-408.
ZHANG Xuebing, WANG Ganqiang, FANG Zhi, et al. Effect of Mixing amount of aggregate intensified by RPC on the strength of recycled concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(3):400-408. (in Chinese)
- [8] HUANG Q, ZHU X H, XIONG G Q, et al. Recycling of crushed waste clay brick as aggregates in cement mortars: An approach from macro- and micro-scale investigation[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 274(8):122068.
- [9] 李文贵,龙初,罗智予,等.纳米改性再生骨料混凝土破坏机理研究[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(5):685-691,786.
LI Wengui, LONG Chu, LUO Zhiyu, et al. Investigation on failure mechanism of nanomodified recycled aggregate concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(5):685-691,786. (in Chinese)
- [10] 梁超锋,杜孝敏,裘锦瑜,等.再生混凝土骨料强化方法研究进展[J]. *混凝土与水泥制品*, 2020(12):87-91.
LIANG Chaofeng, DU Xiaomin, QIU Jinyu, et al. Research progress on modification methods of recycled concrete aggregate [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2020(12):87-91. (in Chinese)
- [11] 杨军彩.废弃黏土砖再生骨料对灌浆料性能的影响[J]. *混凝土*, 2020(4):138-140.
YANG Juncai. Effect of recycled aggregate of waste clay bricks on the properties of grouting material[J]. *Concrete*, 2020(4):138-140. (in Chinese)
- [12] 应敬伟,蒙秋江,肖建庄.再生骨料CO₂强化及其对混凝土抗压强度的影响[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(2):277-282.
YING Jingwei, MENG Qiujiang, XIAO Jianzhuang. Effect of CO₂ modified recycled aggregate on compressive strength of concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(2):277-282. (in Chinese)
- [13] TAM V W Y, BUTERA A, LE K N. Carbon-conditioned recycled aggregate in concrete production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 133:672-680.
- [14] KUMAR G S, SAINI P K, KARADE S R, et al. Chemico-thermal treatment for quality enhancement of recycled concrete fine aggregates[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2019, 21(1):1197-1210.
- [15] RAHMAN M S, AHMAD S I. Strength properties of concrete made from recycled brick concrete and EAF slag blended as coarse aggregate [J]. *Materials Science Forum*, 2020, 984:207-212.
- [16] 杨贺,陈伟,梁贺之,等.钛工业固废钛石膏胶凝性与强度机理分析[J]. *非金属矿*, 2021, 44(1):100-103.
YANG He, CHEN Wei, LIANG Hezhi, et al. Analysis on the cementation and strength mechanism of titanium industry solid waste titanium gypsum[J]. *Non-Metallic Mines*, 2021, 44(1):100-103. (in Chinese)
- [17] 赵之仲,杨振宇,柳泓哲,等.再生混凝土强化方法:CN109333828A [P]. 2019-02-15.
ZHAO Zhizhong, YANG Zhenyu, LIU Hongzhe, et al. Strengthening method of recycled concrete:CN109333828A [P]. 2019-02-15. (in Chinese)
- [18] 杨振宇.砖混类再生集料负压强化技术及工艺参数研究[D]. 济南:山东交通学院,2020.
YANG Zhenyu. Study on negative pressure strengthening technology and process parameters of recycled aggregate of brick and concrete[D]. Jinan:Shandong Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [19] 刘桂强.工业废石膏阻抗半刚性基层开裂的技术研究[D]. 济南:山东交通学院,2018.
LIU Guiqiang. Research on technical of industrial waste gypsum impedance semi-rigid base cracking[D]. Jinan:Shandong Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [20] KIM Y, HANIF A, KAZMI S M S, et al. Properties enhancement of recycled aggregate concrete through pretreatment of coarse aggregates-comparative assessment of assorted techniques [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 189:339-349.