

碱激发废旧混凝土道路基层材料在马桥河路 改建工程中的应用

郭一枝¹, 万晷², 吴超凡²

(1.湖南省高速公路集团有限公司, 湖南 长沙 410003; 2.湖南省建筑固废资源化利用工程技术研究中心)

摘要: 该文主要对碱激发废旧混凝土道路基层材料的应用进行了研究。试验首先对比了天然集料与混凝土再生集料性能;其次按规范和设计要求对混合料相应指标进行试验和控制。混合料测试指标有延时成型强度、劈裂强度、抗压回弹模量、干缩性、抗冲刷性能,从混合料路用性能测试结果得出,同等材料掺量条件下,碱激发废旧混凝土道路基层材料各项性能指标优于水泥稳定再生集料;最后将碱激发废旧混凝土道路基层材料应用于马桥河路改建工程中,实现原材料成本节约40%,同时,该项目对推进建筑固体废物资源化利用具有深远意义。

关键词: 废旧混凝土;再生集料;水泥稳定再生集料;路用性能

1 前言

建筑业作为中国国民经济的支柱产业之一,在中国现代化建设的进程中扮演了重要的角色,但建筑业的繁荣发展也产生了大量的建筑垃圾。据统计,中国所产生的建筑固体废弃物占全世界的30%,而在这些建筑固体废弃物中有40%是城市建筑垃圾。2017年中国产生的建筑垃圾超过了29亿t,其再生利用率仅10%左右,2020年时建筑垃圾的产量可能达到峰值。目前,中国政府已十分重视建筑垃圾危害问题,通过出台相关政策,极力号召社会各界力量寻找一条建筑垃圾资源化利用的可持续发展道路。另外,截止到2016年年底,中国高速公路建成通车总里程突破13万

km,为世界第一,并且2017年预计新增高速公路5000km,增速也位居全球第一。就湖南而言,2016年底,湖南省公路通车总路程238273km,其中高速公路通车里程达6080km,排名中国第六,预计到2020年达到7000km以上。中国公路建设的快速发展消耗了大量天然集料。近些年,由于矿石过渡开采造成一系列的环境问题,并且许多大城市周围矿石资源枯竭,用于道路建设的集料往往来源于数百公里以外的矿区,上述现象给中国环境和经济建设造成巨大困难。合理地把建筑固体废物替代天然集料用于道路工程建设中是解决上述问题的最佳途径。

由建筑固体废物破碎而成的再生集料具有吸水率大、强度低等特点,如将再生集料直接制备基层混合料,混合料工作性、路用性能波动较大,质量较难控制。

- *****
- [3] Cortizo M S, Larsen D O, Bianchetto H, et al. Effect of the Thermal Degradation of SBS Copolymers during the Aging of Modified Asphalts[J]. Polym Degrad Stab, 2004, 86: 275-282.
- [4] 李炜光, 周巧英, 李强, 等. SBS测试方法及机理研究[J]. 石油沥青, 2010(5).
- [5] 武建民, 张雪林, 陈忠达, 等. 改性沥青中SBS剂量检测方法[J]. 交通运输工程学报, 2012(3).
- [6] 马士让. SBS改性沥青质量控制技术研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2012.
- [7] 刘登武. 原材料参数对SBS改性沥青指标的影响及SBS剂量针入度法测试技术研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2011.
- [8] 杨朝辉. SBS改性沥青的流变性能及改性剂剂量研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2011.

收稿日期: 2019-06-12

基金项目: 湖南省交通运输厅重点科技项目(编号: 201806), 长沙市重大专项(编号: kq1804053), 湖南省交通运输厅2013年度科技进步与创新项目(编号: 201307)

作者简介: 郭一枝, 男, 大学本科, 高级工程师.

近年来,碱激发胶凝材料被看作是一种能替代传统水泥的环保型建筑材料,具有强度高、抗酸碱腐蚀能力强等优点。碱激发胶凝材料主要由具有一定急冷热历史的含铝硅酸盐煅烧天然矿物或工业废渣(矿渣、粉煤灰等)和碱激发剂(氢氧化钠、水玻璃、硫酸钠等)组成。将碱激发胶凝材料用于再生集料作基层材料有较多优点:① 碱激发胶凝材料能替代大部分水泥,减少水泥的用量;② 矿渣、粉煤灰等掺入能填充再生集料的孔隙,并且矿渣和粉煤灰具有火山灰活性,能与再生集料表面老的浆体发生二次水化作用,使集料强度增大;③ 再生集料中具有一定的火山灰活性物质,在碱激发剂的作用下能发生水化反应,生成更多的凝胶使混合料的整体强度变大。

基于上述问题,围绕碱激发废旧混凝土道路基层材料的研究进行了多项室内试验。试验表明:碱激发废旧混凝土道路基层材料具有强度高、路用性能优异等特点,且各项性能指标都能达到高等级公路路面基层材料要求,该文依托湖南长(沙)益(阳)(扩容)高速公路马桥河道路路面改建工程进行工程应用。

2 工程概况

马桥河路是湖南望城经开区规划“六纵四横”的主干道路网框架中的一纵,路线走向为南北向,等级为城市次干路,设计速度 50 km/h。由于马桥河路原路

面一段与长益(扩容)高速交叉,所以将此段路面降低标高,新路面从长益(扩容)高速下面穿过。破除原路面所产生的道路固废全部进行再生资源化利用。新路面结构层包括:4 cmSMA—13 上面层、6 cmAC—20 中面层、8 cmAC—25 下面层、1 cmSBS 改性沥青同步碎石封层+透层、18 cm5%水泥稳定碎石上基层、18 cm5%水泥稳定碎石下基层和 20 cm4%水泥稳定碎石底基层。其中,上、下基层水泥稳定碎石重型压实度不应小于 98%,7 d 无侧限抗压强度为 5 MPa;底基层水泥稳定碎石重型压实度不应小于 96%,7 d 无侧限抗压强度为 3 MPa。

3 原材料试验

胶凝材料:水泥采用湖南南方 P.C.32.5 级水泥,密度为 3 150 kg/m³,水泥性能指标如表 1 所示,各项性能指标满足规范要求;矿渣来自湖南娄底涟钢,为白色粉状,比表面积为 455 m²/g,密度为 2 950 kg/m³。水泥与矿渣化学组分如表 2 所示。

碱活性激发剂 Z-1:该研究中采用的碱活性激发剂 Z-1 为氢氧化钠、硅酸钠与碳酸钠按一定比例配置而成,碳酸钠和氢氧化钠都为工业级,纯度 99%±1%,硅酸钠的化学成分见表 3,3 种化学产品都由长沙某公司提供。

表 1 水泥技术指标

比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	标准稠度/ %	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度 MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
314	26.7	208	383	18.4	37.4	4.9	7.3

表 2 水泥与矿渣化学成分

胶凝材料	化学组分/%							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
水泥	22.51	5.32	3.78	63.12	2.56	0.71	0.19	2.02
矿渣	33.00	13.91	0.82	39.11	10.04	1.91	—	0.16

表 3 硅酸钠化学成分

Na ₂ O/%	SiO ₂ /%	模数	含水率/%
8.3	26.5	3.3	65.2

集料:再生集料主要为马桥河路原路面混凝土板和民用建筑拆除后的混凝土经加工处理后所得。天然

集料由江西某厂提供。两种集料都包括 0~4.75、4.75~9.5、9.5~19 和 19~31.5 mm 共 4 档。按照 JTG E42—2 005《公路工程集料试验规程》相关试验方法,测得集料性能指标如表 4 所示。从表 4 可知:再生集料压碎值大于天然集料,即强度低于天然集料,另外除细集料外,再生集料吸水率大于天然集料,但再生集料

针片状含量低于天然集料,表明再生集料之间的镶嵌作用要优于天然集料。表 5 为不同再生集料掺量压碎值。由表 5 可见,随再生集料掺量增加压碎值逐渐变大。

4 混合料配合比设计

4.1 集料级配合成

该研究将碱激发废旧混凝土应用于路面底基层及

基层中,马桥河路为城市主干道,中轻交通流量。因此集料级配主要参考 DBCJ 008—2017《建筑固体废弃物在城镇道路中应用技术指南》中表 8.3.3.1 推荐级配 A—1、A—3,如表 6 所示。另外,根据上述指南,对于城市主干道底基层,再生集料掺量为 100%,而对于基层,再生集料掺量为 80%。通过对两类集料进行筛分试验,得出各档集料粒径分布情况,进而按照各结构层再生集料掺量情况进行级配合成,级配合成情况如表 7、8 所示。

表 4 再生集料技术指标

集料种类		表观密度/ (g·cm ⁻³)	吸水率/ %	压碎值/ %	针片状 含量/%	含泥量/ %
再生 集料	19~31.5 mm	2.63	1.8	26.8	2.2	0.8
	9.5~19 mm	2.63	1.6		1.3	0.7
	4.75~9.5 mm	2.64	1.7		2.9	1.0
	0~4.75 mm	2.61	3.1		—	4.0
天然 集料	19~31.5 mm	2.71	0.3	18.2	3.9	0.1
	9.5~19 mm	2.72	0.3		4.4	2.9
	4.75~9.5 mm	2.74	0.2		4.6	2.3
	0~4.75 mm	2.69	3.3		—	9.2

表 5 不同再生集料掺配比压碎值

再生集料掺配 比例/%	压碎值/ %	再生集料掺配 比例/%	压碎值/ %
40	22.9	70	25.1
50	23.3	80	25.7
60	24.3		

4.2 混合料击实试验

将满足相应再生集料掺量的混合料进行重型击实试验,得出不同掺量再生料条件下混合料最大干密度和最佳含水率。底基层混合料胶凝材料掺量为 3%、

4%及 5%,基层混合料胶凝材料掺量为 4%、5%及 6%。具体试验方法参照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》。另外,碱活性激发剂添入方式为按比例掺入水中,但相对于水的掺量,碱活性激发剂掺量较少,因此碱活性激发剂掺入不会影响混合料最大干密度和最佳含水量数值。表 9、10 为击实试验结果。

4.3 无侧限抗压强度试验

将上述不同组分混合料在最大干密度和最佳含水率条件下进行 7 d 无侧限抗压强度试验,试验具体方法参照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》。表 11、12 为抗压强度结果。

表 6 级配粒径范围

层位	通过下列方孔筛(mm)的质量百分率/%														
	37.5	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
基层	100	100	100	82~	73~	65~	53~	35~	22~	13~	8~	5~	3~	2~	
				86	79	72	62	45	31	22	15	10	7	5	
底基层	100	90~	—	67~	—	—	45~	29~	18~	—	8~	—	—	0~	
		100		90			68	50	38		22			7	

表 7 底基层、基层各档集料使用比例

层位	再生集料/%				天然集料/%	
	0~4.75 mm	4.75~9.5 mm	9.5~19 mm	19~31.5 mm	9.5~19 mm	19~26.5 mm
底基层	34	28	22	16		
基层	38	23	19		7	13

表 8 底基层、基层各档集料合成级配

层位	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%												
	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
底基层	97.6		81.4			52.0	32.0	23.1		11.9			4.8
基层	100	97.1	84.9	78.0	67.3	54.4	35.3	25.4	19.0	12.6	8.7	6.7	5.0

表 9 底基层混合料击实试验结果

胶凝材料剂量/%	最佳含水量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)
3.0	7.2	2.03
4.0	8.5	2.06
5.0	9.6	2.05

表 10 基层混合料击实试验结果

胶凝材料剂量/%	最佳含水量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)
4.0	6.9	2.06
5.0	8.2	2.11
6.0	9.2	2.09

表 11 底基层混合料 7 d 无侧限抗压强度试验结果

水泥剂量/%	养生日期/d	强度平均值/MPa	强度标准差/MPa	强度偏差系数/%	强度代表值/MPa	强度标准值/MPa	是否合格
3.0	7	4.2	0.32	7.1	3.7	3.0	是
4.0	7	4.9	0.26	6.4	4.4	3.0	是
5.0	7	5.5	0.23	6.2	5.1	3.0	是

表 12 基层混合料 7 d 无侧限抗压强度试验结果

胶凝材料剂量/%	养生日期/d	强度平均值/MPa	强度标准差/MPa	强度偏差系数/%	强度代表值/MPa	强度标准值/MPa	是否合格
4.0	7	5.4	0.46	7.6	4.8	5.0	否
5.0	7	6.4	0.36	8.1	5.8	5.0	是
6.0	7	7.0	0.53	8.3	6.1	5.0	是

4.4 胶凝材料用量及相关参数的确定

马桥河路路面底基层设计要求为 4%水泥掺量,7 d 无侧限抗压强度为 3 MPa;基层设计要求为 5%水泥掺量,7 d 无侧限抗压强度为 5 MPa。因此,对于底基层混合料,根据试验结果,胶凝材料掺量选取试件强度代表值大于强度标准 3.0 MPa,且同时考虑工程经济性与现场施工条件综合确定,胶凝材料最小用量不低于 4%。对于基层混合料,根据试验结果,选取胶凝材料掺量试件强度代表值大于强度标准 5.0 MPa,且同时考虑工程经济性与现场施工条件综合确定,最小用量不低于 5%。

具体目标配合比为:底基层胶凝材料掺量为 4%,

再生集料掺量 100%,Z-1 碱活性激发剂为水掺量的 1.5%;基层胶凝材料掺量为 5%,再生集料掺量 80%,Z-1 碱活性激发剂为水掺量的 1.5%。对于各方案生产配合比确定,根据 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》的要求,视施工现场情况,对试验室确定的配合比进行调整,胶凝材料剂量可增加 0.5%,含水量要较最佳含水量增大 0.5%~1.0%。

5 混合料路用性能试验

为了验证上述配比条件下混合料的路用性能,下面将进行混合料路用性能指标试验。验证的混合料共

4 种,即底基层 4%碱激发废旧混凝土(Z4)以及对照组 4%水泥稳定再生集料(P4)、基层 5%碱激发废旧混凝土(Z5)以及对照组 5%水泥稳定再生集料(P5)。底基层混合料再生集料掺量为 100%,基层为 80%。混合料性能测试项目有延时性能试验、7 d 劈裂抗拉强度、90 d 抗压回弹模量、90 d 干缩应变、28 d 冲刷质量损失率,其中干缩试验既测量试件收缩变形,同时测量试件失水率,干缩性能试验开始的一周内,每天记录收缩组的千分表读数和失水率组的标准试件质量,在一周后每两天进行一次试验记录,1 个月后每隔 30 d 进行一次试验记录,直至第 90 d;冲刷试验采用全自动冲刷仪,冲刷频率为 10 Hz,冲刷时间为 30 min,取出冲刷后的试件,把筒中浑浊的水与冲刷物小心地倒入金属盆中沉淀,冲刷物沉淀 12 h 后,将上部清水倒掉,把金属盆放入烘箱中烘干,烘干后称量冲刷物质量。具体试验步骤参照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》的相关规定。

表 13 为混合料试件延时成型后 7 d 无侧限抗压强度,表 13 中试验与表 12 试验为不同批次试验,由于试验存在波动,部分数据不一致,但不影响同批试件性能对比结果。从表 13 可得:碱激发废旧混凝土试件在延时成型 2 h 时强度最大,主要原因是混凝土再生集料孔隙较多,前期会吸入部分碱溶液,在碱的作用下,混凝土再生集料内部活性物质发生水化反应使基体强度增加。成型过早时,试件静压成型过程中,再生集料吸入孔隙的碱有限,上述效果不明显。成型过晚时,胶凝材料已发生部分凝胶反应,降低混合料整体强度。另外还可得出碱激发废旧混凝土强度高于水泥稳定再生集料强度。在延时成型 6 h 内,水泥稳定再生集料试件 7 d 无侧限抗压强度随延时时间增加而大幅下降,碱激发废旧混凝土在 6 h 内延时成型强度下降较小。上述可以说明,碱激发废旧混凝土要比水泥稳定再生集料强度高,且混合料的施工工作性能更好。

表 13 延时性能测试结果

材料	不同延时成型时间(h)时的无侧限抗压强度/MPa			
	0	2	4	6
Z4	4.6	4.7	4.5	4.3
P4	4.1	4.0	3.5	2.9
Z5	6.2	6.4	6.4	6.2
P5	5.5	5.6	4.9	4.1

表 14 为混合料综合性能测试结果,应用碱激发技术相较于掺纯水泥的混合料试件劈裂抗拉强度和抗压

回弹模量都有明显的提高。从干缩试验测试结果可知,掺加纯水泥混合料试件干缩应变值较大,并且随胶凝材料掺量增加,混合料试件干缩应变值变大。从冲刷试验结果可得,碱激发废旧混凝土试件被水冲刷后质量损失相对较少,这说明使用碱发胶凝材料对再生集料的黏结作用要大于水泥对再生集料的黏结作用。

表 14 综合性能测试结果

材料	7 d 劈裂抗拉强度/MPa	抗压回弹模量/MPa	90 d 干缩应变/ $\mu\epsilon$	冲刷质量损失率/%
Z4	0.42	2547	276.4	0.092
P4	0.35	2337	284.3	0.151
Z5	0.55	2719	325.4	0.078
P5	0.47	2683	341.8	0.089

6 施工质量控制与效益分析

6.1 施工质量控制

由于水泥稳定碎石是碾压成型,其强度主要来源于集料之间的镶嵌力和混合料化学胶结力,而压实度是混合料强度关键参数。因此在施工过程中主要对混合料的含水率和压实度进行控制。表 15 为路面压实度检测数据,底基层压实度设计要求为不小于 96%,基层为 98%。从表 15 可得:混合料压实度控制较好,全部满足设计要求。从芯样图可知,芯样完整密实,且外表较光滑,说明混合料碾压成型后强度发展较好。

表 15 路面底基层与基层压实度检测

桩号	含水率/%		压实度/%	
	底基层	基层	底基层	基层
MK0+250~MK0+450	9.1	8.4	99	99
MK0+450~MK0+655	8.8	8.5	97	98
MK0+655~MK0+855	9.2	8.8	99	98
MK0+855~MK1+067	9.2	8.4	98	99
技术要求			≥96	≥98

6.2 效益分析

该项目在马桥河道路改建工程中开展试验研究与应用,其效益主要包括直接经济效益和间接社会效益。

(1) 经济效益。马桥河试验路段长 817 m,主线与辅道宽共 36 m,底基层与基层设计厚度共 0.5 m,共用混合料约 3.5 万 t。原材料成本价格为:废弃混凝土

板从工地运输到工厂,然后破碎加工成再生集料,所生产的再生集料成本为50元/t;碎石到场平均最低价格为100元/t;P.C.32.5级水泥的到场价格为500元/t;矿渣到厂价格为380元/t;活性碱激发剂3000元/t。该项目采用碱激发建筑固体废物原材料总成本约为250万元,而如果采用水泥稳定碎石,原材料成本为420万元。因此采用碱激发技术,原材料成本节约40%,具有可观的经济效益。

(2) 社会效益。该项目的研究为丰富中国高速公路建设用大宗材料提供了理论支持与借鉴意义,充分实现就地取材、降低工程造价的原则,同时为沥青路面设计与施工提供基础数据与技术基础。利用工程建设过程中产生的固体废物物代替优质的碎石修建高速公路路面结构层,可以大量减少碎石的开采量,从而减少矿山开采过程中带来的山体破坏、森林与植被毁坏、水土流失。大量固体废物的堆放与储存,不仅占据大量的土地,而且产生的环境污染十分严重,这些固废物是城市近郊大宗固体环境污染源之一,其对社会构成的危害主要表现为固废物内的有害物质在雨水作用下对江河地表水系与地下水系的污染。把固废物用于高速公路路面结构层,可最大限度地消耗与掩埋这种大宗固体废弃物,一方面节约土地资源;另一方面保护环境,改善人类赖以生存的自然环境,完全符合中国实现可持续发展、清洁发展的重大战略。

7 结语

该文主要对碱激发废旧混凝土道路基层材料的应用进行了研究,根据碱激发胶凝材料强度、耐久性好等特点,成功地将其与再生集料结合应用于道路基层材料中。试验首先对比了天然集料与再生集料性能,再生集料强度弱于天然集料,吸水率大于天然集料。其次根据相应的规范和设计要求对混合料相应指标进行试验和控制。混合料测试指标有延时成型强度、劈裂强度、抗压回弹模量、干缩性、抗冲刷性能,从混合料路用性能测试结果得出,同等材料掺量条件下,碱激发废旧混凝土道路基层材料各项性能指标优于水泥稳定再生集料。将碱激发废旧混凝土道路基层材料应用于马桥河路改建工程中,实现原材料成本节约40%,并且相关性能指标都达到设计要求,为日后该技术进一步应用于长益(扩容)高速公路打下坚实基础。同时,该

项目对推进建筑固体废物资源化利用具有深远意义。

参考文献:

- [1] Yang H, Xia J Q, Julian R, et al. Urban Construction and Demolition Waste and Landfill Failure in Shenzhen, China [J]. Waste Management, 2017, 4: 393—396.
- [2] 李行,吴超凡,万暑,等.建筑垃圾在路基回填材料中的使用性能研究[J].中外公路,2019(1).
- [3] 邹桂莲,刘新海,周浩浩.水泥粉煤灰稳定再生集料的路用性能研究[J].中外公路,2018(3).
- [4] Poulikakos L D, Papadaskalopoulou C, Hofko B, et al. Harvesting the Unexplored Potential of European Waste Materials for Road Construction[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 116: 32—44.
- [5] Hansen T C. Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete Second State—of—the—Art Report Developments 1945—1985[J]. Materials and Structures, 1986, 19(3): 201—246.
- [6] Molenaar A, Van N A. Effects of Gradation, Composition, and Degree of Compaction on the Mechanical Characteristics of Recycled Unbound Materials[J]. Transportation Research Record, 2002, 1787(1): 73—82.
- [7] Mohammadinia A, Arulrajah A, Sanjayan J, et al. Stabilization of Demolition Materials for Pavement Base/Sub-base Applications Using Fly Ash and Slag Geopolymers: Laboratory Investigation[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28: 75—83.
- [8] Vieira T, Alves J, Brito J, et al. Durability—Related Performance of Concrete Containing Fine Recycled Aggregates from Crushed Bricks and Sanitary Ware[J]. Materials and Design, 2016, 90: 767—776.
- [9] Puertas F, Barba M, Gazulla F, et al. Ceramic Wastes as Raw Materials in Portland Cement Clinker Fabrication: Characterization and Alkaline Activation[J]. Materiales De Construcción, 2006, 56: 73—84.
- [10] JTG E42—2005 公路工程集料试验规程[S].
- [11] DBC J008—2017 建筑固体废弃物在城镇道路中应用技术指南[S].
- [12] JTG E51—2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [13] JTG/T F20—2015 公路路面基层施工技术细则[S].
- [14] 胡力群,沙爱民.水泥稳定废黏土砖再生集料基层材料性能试验[J].中国公路学报,2012(3).
- [15] 沙爱民,胡力群.半刚性基层材料的结构特征[J].中国公路学报,2008(4).