

# 再生骨料混凝土在道路基层中的应用研究

陈新杰<sup>1</sup>, 甄飞<sup>2</sup>

(1.内蒙古赤峰市翁牛特旗公路管理段, 内蒙古 赤峰 024500; 2.内蒙古赤峰市高等级公路管理处)

**摘要:** 为寻找废弃混凝土再利用的新途径,探索了废弃混凝土用于道路基层的可能性。首先将再生骨料划分为两档,调配为连续级配,然后研究了废弃混凝土作为粗骨料完全代替粗集料对混凝土强度和收缩性能的影响。研究发现:不同水胶比再生骨料混凝土的强度均可满足道路基层的要求;再生骨料混凝土的收缩应变随着粉煤灰掺量的增加先增大后减小;30%掺量粉煤灰的再生骨料混凝土不仅具有较高的强度,而且具有优良的收缩性能,可应用于重交通等级高速公路的基层。

**关键词:** 废弃混凝土;再生混凝土;基层;强度;收缩应变

## 1 前言

水泥混凝土是道路、建筑、桥梁等基础设施中应用最广泛的材料之一。随着结构物逐渐到达使用期限,以及房屋建筑的拆迁、水泥混凝土路面的改造,产生了大量的废弃混凝土。据报道,美国每年产生废弃混凝土约1.36亿t,欧盟约产生2亿t。在中国,每年产生的废弃混凝土数量同样惊人,预计2020年将达到6.38亿t,若仅将废弃混凝土进行掩埋处理,每年约需占地3万亩(约2000万m<sup>2</sup>)。由此可以看出:对废弃混凝土进行回收利用具有巨大的社会效益,对减少废弃建筑垃圾的堆放、减少车辆的运输费用、节约土地资源具有重要的经济效益。水泥混凝土是由水泥和集料组成的混合物,对废弃混凝土进行再生,生产再生混凝土,可减少水泥的生产、山石的开挖、二氧化碳的排放,具有明显的环保效益。因此,研究废弃混凝土的再生利用具有重要的社会效益、经济效益和环保效益。

目前,对废弃混凝土的再生利用已成为各国学者竞相研究的热点。废弃混凝土的利用主要有4个方面:再生混凝土、再生水泥、新型墙体材料、地基基础加固。其中以再生混凝土利用价值最高,回收价值最大,研究最为广泛。国内外许多学者对再生混凝土的配合比设计、物理力学性能、耐久性进行了研究,针对再生混凝土吸水率高、强度低、耐久性差等特点,提出了配合比设计方法、拌和工艺、再生骨料表面改性、添加外

加剂等改进措施,取得了丰硕的成果。再生水泥指利用废弃混凝土中的石灰石作为水泥的钙质原料生产水泥熟料,也可作为混合材加入水泥中。新型墙体材料指将废弃混凝土制成空心混凝土砌块,或者研磨、分离出细粉料,取代部分胶凝材料,制成墙体砖。地基基础加固则将废弃混凝土作为填料加固地基,承载力高,但回收价值较低。

虽然废弃混凝土的再生利用已经研究多年,但应用于道路基层的研究还很少。中国的道路基层大多采用水泥稳定碎石基层,强度要求不高,但需消耗大量石料,而废弃混凝土作为一种强度较低的再生骨料,正好可以满足其要求,有潜力作为水泥稳定碎石骨料的替代料。秦春丽对废弃混凝土用于道路基层做了探索性研究,但对基层最关注的收缩问题还没有涉及。该文采用再生骨料完全替代水泥稳定碎石粗骨料,研究不同水胶比、粉煤灰掺量对再生骨料混凝土强度的影响,并且针对再生骨料混凝土收缩性大的缺点,研究添加粉煤灰对再生骨料混凝土收缩性能的影响,以期能为废弃混凝土应用于道路基层提供一些参考。

## 2 试验原材料和方案

### 2.1 原材料

(1) 再生粗骨料:再生粗骨料的原生混凝土强度为C30,经破碎机破碎、筛分出细集料和粉料而来。由于分离出的粗集料粒径偏粗且不满足连续级配的要

求,对粗集料进行了二次筛分,划分为 4.75~13.2 mm 和 13.2~26.5 mm 两档。两档粗集料的物理性能指标如表 1 所示,再生集料的压碎值满足道路基层对集料压碎值<30%的要求;通过对 4.75~13.2 mm 和 13.2~26.5 mm 两档集料进行调配,可满足道路基层连续级配的要求。

表 1 粗集料物理性能指标

粒径/mm	紧装密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	吸水率/%	压碎值/%
4.75~13.2	1.375	6.5	21.7
13.2~26.5	1.313	6.0	19.3

(2) 天然粗骨料:石灰岩,粒径为 5~20 mm 的连

续级配,表观密度为 2.70 m/cm<sup>3</sup>,压碎值为 6.2%。

(3) 细集料:采用天然河砂,细度模数为 2.71,表观密度为 2.63 g/cm<sup>3</sup>。

(4) 水泥:采用 P.O.42.5 级普通硅酸盐水泥,密度为 3.12 g/cm<sup>3</sup>,细度为 351 m<sup>2</sup>/kg,其化学成分如表 2 所示。

(5) 粉煤灰:采用Ⅱ级粉煤灰,化学成分见表 2。

2.2 试验方案

再生粗骨料全部代替水泥稳定碎石中的粗集料,粗集料中两档集料的掺配质量比为(4.75~13.2 mm):(13.2~26.5 mm)=7:11。为减少再生混凝土的收缩量,细集料全部采用天然砂。粗细集料的合成级配曲线如图 1 所示。

表 2 水泥化学成分

原材料	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	烧失量
水泥	24.53	6.58	56.12	3.75	1.83	1.10	2.37	0.30	0.02	3.40
粉煤灰	48.98	32.16	8.75	6.31	1.34	—	0.26	—	—	2.20

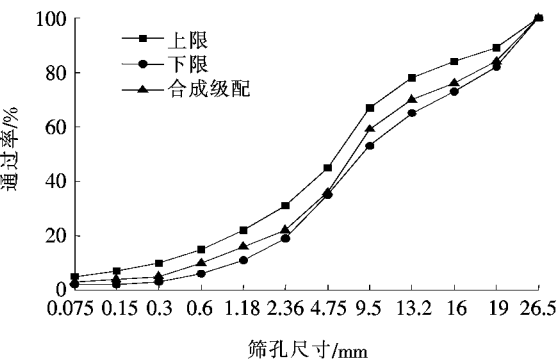


图 1 再生混凝土合成级配

由于再生骨料吸水率较高,在配合比设计时,增加

了附加用水量。附加用水量为满足粗集料在拌和过程中吸收水分、减少了用水量而增加。该研究假设了粗骨料处于饱和吸水状态,附加用水量为粗集料质量与吸水率之乘积。粗集料的吸水率为 6.3%,根据两档集料的质量比和各自的吸水率线性叠加而成。

共设计 4 组水胶比的再生混凝土进行 7、28 d 抗压强度和 28 d 抗折强度测试;为研究再生混凝土的干缩性能,选取其中一个水胶比测试其干缩应变,并采用内掺法分别添加 20%、30%、40%、50% 的粉煤灰测试干缩性能和强度,同时设计了一组不含再生粗骨料的混凝土进行对照。配合比设计时固定水泥用量,试验再生混凝土的配合比如表 3 所示。

表 3 再生混凝土配合比

编号	水胶比	单位水泥用量/kg	单位用水量/kg	再生粗集料/kg	天然粗集料/kg	天然砂/kg	附加用水量/kg	粉煤灰用量/kg
1 <sup>#</sup>	0.45	200	90	1 341	0	722	84.5	0
2 <sup>#</sup>	0.50	200	100	1 311	0	706	82.6	0
3 <sup>#</sup>	0.55	200	110	1 228	0	661	77.4	0
4 <sup>#</sup>	0.60	200	120	1 201	0	647	75.7	0
5 <sup>#</sup>	0.50	160	100	1 311	0	706	82.6	40
6 <sup>#</sup>	0.50	140	100	1 311	0	706	82.6	60
7 <sup>#</sup>	0.50	120	100	1 311	0	706	82.6	80
8 <sup>#</sup>	0.50	100	100	1 311	0	706	82.6	100
9 <sup>#</sup>	0.50	200	100	0	1 228	706	0	0

2.3 试验方法

再生粗骨料混凝土拌和时,先将水泥、粉煤灰、1/2 水搅拌,而后投入再生粗骨料搅拌,再投入天然砂和 1/2 水搅拌,通过改变投料顺序的方法实现对粗骨料预处理的目的。

天然粗骨料混凝土拌和时采用人工拌和,首先将砂与水泥拌和,然后加入粗骨料搅拌,最后加入水,至混凝土搅拌均匀。

混凝土拌和好后,将新拌混合料分别装于 150 mm×150 mm×150 mm、100 mm×100 mm×400 mm 和 100 mm×100 mm×515 mm 的试模中,然后放于标准养护室中 24 h 后脱模。其中 150 mm×150 mm×150 mm 试块用于抗压强度测试,100 mm×100 mm×400 mm 试块用于抗折强度测试,100 mm×100 mm×515 mm 试块用于干缩应变测试。

抗压强度为试块在标准养护中分别养护 7、28 d 进行测试;抗折强度为试块在标准养护室中养护 28 d 后进行测试;干缩应变按照 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,养护温度(20±2)℃,养护相对湿度(60±5)%,分别在养护 1、3、7、14、28、60 d 后测试。

3 结果及分析

3.1 强度分析

当再生混凝土的龄期达到 7、28 d 时,分别测试其抗压、抗折强度。不同水胶比再生混凝土和普通混凝土的抗压强度和抗折强度如表 4 所示。

表 4 混凝土的抗压、抗折强度

混凝土类别	水胶比	不同龄期(d)抗压强度/MPa		28 d 抗折强度/MPa
		7	28	
普通混凝土	0.50	—	13.41	2.24
	0.45	5.93	8.25	1.53
再生混凝土	0.50	5.11	8.00	1.44
	0.55	4.66	6.37	1.25
	0.60	4.22	5.31	0.77

从表 4 可以看出:

(1) 随着水胶比的增加,再生骨料混凝土的 7、28 d 强度均逐渐减小。再生骨料混凝土的强度随水胶比的变化规律与原生普通混凝土的强度变化规律类似,

原因是增大水胶比增加了游离水的含量,致使水泥石的孔隙增多,空隙率增大,强度降低。同时,该研究为减小再生骨料空隙率大、吸水率高的影响,添加了额外用水量,保证了再生骨料混凝土的和易性,从而保证较低水胶比的再生骨料混凝土的强度。

(2) 再生混凝土抗折强度同样随着水胶比的增大而降低,水胶比为 0.50、0.55、0.60 的再生混凝土抗折强度比水胶比为 0.45 的再生混凝土强度分别降低了 5.9%、18.3%、49.6%,当水胶比较大时抗折强度下降较快。抗折强度与水胶比的变化规律同样与原生普通混凝土类似。

从强度角度考虑,再生粗骨料混凝土的强度均比普通混凝土强度低,即再生骨料的加入降低了混凝土的强度,但所有水胶比的再生骨料混凝土均达到了重交通等级高速公路水泥稳定材料基层的强度要求,可以作为公路基层使用。但再生骨料混凝土收缩性大的特点可能会是制约其用于道路基层的主要缺陷,因此从四组再生混凝土中选择一组强度较高、水泥含量相对较少的配合比添加粉煤灰,研究其强度和干缩性能。该文选择水胶比为 0.50 的配合比进行研究。

不同粉煤灰掺量的再生骨料混凝土的强度如表 5 所示。

表 5 不同粉煤灰掺量的再生混凝土抗压强度

粉煤灰掺量/%	抗压强度/MPa	
	7 d	28 d
20	4.27	8.12
30	4.02	7.54
40	3.75	6.83
50	3.06	6.34

由表 5 可以看出:随着粉煤灰掺量的增大,再生混凝土的抗压强度逐渐降低。其中 20% 和 30% 粉煤灰掺量再生混凝土 7 d 强度可满足重交通等级高速公路基层材料强度要求。

3.2 收缩性能

半刚性基层的收缩裂缝易在路面产生反射裂缝,增加路面病害。采用内掺法在再生混凝土中用粉煤灰代替部分水泥,希望以此减少混凝土的收缩应变,且此方法可降低水泥用量,节约成本。不同粉煤灰掺量的再生混凝土和普通混凝土在不同龄期的收缩应变如图 2 所示。

从图 2 可以看出:不论是否添加粉煤灰以及是否添加再生骨料,混凝土的收缩应变都随龄期的增长而

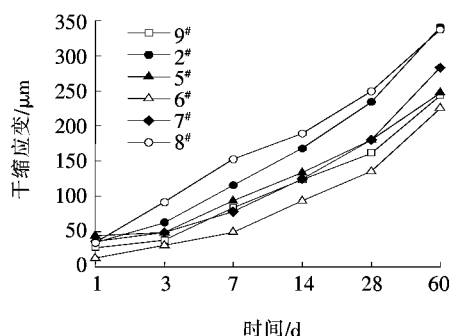


图 2 再生骨料混凝土的干缩应变

不断变大。因为随着水泥水化的不断进行和水分的不断蒸发,混凝土内部的游离水逐渐减少,从而引起收缩逐渐增大。

对比不同粉煤灰掺量的再生混凝土收缩应变可以发现,再生混凝土的收缩应变随粉煤灰掺量的增加先减小后增大。当粉煤灰掺量为 30% 时,再生混凝土的收缩应变最小;当粉煤灰掺量为 50% 时,再生混凝土的收缩应变最大,甚至比不掺粉煤灰的再生混凝土收缩应变大。分析其原因是:粉煤灰的细度很大,当掺量较小时,可填充于水泥水化产物的空隙中,减少水泥石的空隙率,降低收缩性能;同时,粉煤灰可发生火山灰效应,生成的产物可填充于水泥水化产物的孔隙中,提高密实度,降低收缩应变。但当粉煤灰掺量过大时,水与水泥之比增大,意味着可发生水化反应的水泥减少,生产的水化产物也减少,粉煤灰发生火山灰效应减弱,填充作用减弱;而游离水过多,又造成孔隙过多,所以收缩应变又增大。

对比 30% 粉煤灰掺量再生混凝土和原生混凝土的收缩应变可以发现,30% 粉煤灰掺量再生混凝土的收缩应变在 1、3、7、14、28、60 d 龄期内均更小,分别小 55.4%、20.8%、40.7%、24.6%、16.3%、7.4%。说明 30% 粉煤灰掺量的再生混凝土的收缩性能比原生混凝土更优异,完全可满足道路基层对收缩性能的要求。

## 4 结论

废弃混凝土是建筑垃圾的主要成分,对废弃混凝土进行再生利用可大量减少废弃垃圾,节约资源。该文对废弃混凝土用于道路基层进行了探讨,重点对再生骨料混凝土基层的力学性能和干缩性能进行了研究,得出以下结论:

(1) 与原生混凝土强度发展规律相似,再生骨料

混凝土强度随水胶比增大而减小,水胶比为 0.45、0.50、0.55、0.60 的再生混凝土均可满足高速公路重交通等级对基层的强度要求。

(2) 再生骨料混凝土的强度随粉煤灰掺量的增加而减小,收缩应变随粉煤灰掺量的增加先增大后减小,30% 粉煤灰掺量的再生混凝土收缩应变最小,甚至优于原生混凝土。

(3) 30% 粉煤灰掺量的再生骨料混凝土不仅具有较好的力学性能,收缩性能也优良,可作为高速公路重交通等级的基层。

## 参考文献:

- [1] Sandler, Ken. Analyzing What's Recyclable in C&D Debris[J]. BioCycle, 2003, 44(11): 51—59.
- [2] 张学兵. 再生混凝土改性及配合比设计研究[D]. 湖南大学博士学位论文, 2015.
- [3] 纪锋, 何兵. 废弃混凝土的再生利用及其研究进展[J]. 绿色环保建材, 2018(1).
- [4] 王程, 施惠生. 废弃混凝土再生利用技术的研究进展[J]. 材料导报, 2010(1).
- [5] 姚宇峰. 再生粗骨料对再生混凝土基本力学及抗冻性能的影响研究[D]. 宁夏大学硕士学位论文, 2017.
- [6] Rakshvir, M., Barai, S. V. Studies on Recycled Aggregate-Based Concrete[J]. Waste Management and Research, 2006, 24: 225—233.
- [7] 陈欣, 郑建岚, 王国杰. 矿物掺合料对再生混凝土干燥收缩性能的影响[J]. 混凝土, 2016(10).
- [8] Poon C S, Shui Z H, Lam L, et al. Influence of Moisture States of Natural and Recycled Aggregates on the Slump and Compressive Strength of Concrete[J]. Cement & Concrete Research, 2004, 34(1): 31—36.
- [9] 艾红梅, 常钧, 卢洪正, 等. 全组分废弃混凝土再生水泥熟料烧成及水化性能研究[J]. 大连理工大学学报, 2013(3).
- [10] 田芳, 叶青, 章天刚. 废弃混凝土磨细粉作水泥混合材的实验研究[J]. 河北工程大学学报, 2010(4).
- [11] 唐晓翠. 利用再生骨料生产混凝土空心节能砌块试验研究[J]. 新型建筑材料, 2006(8).
- [12] 马保国, 守卫, 郝先成. 利用建筑垃圾制备新型高利废墙体砖[J]. 新型墙体材料, 2006(1).
- [13] 石发恩, 朱萌萌, 柯瑞华, 等. 废弃混凝土资源化研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2014(6).
- [14] 秦春丽. 高掺量再生骨料混凝土基层试验研究[D]. 长沙理工大学硕士学位论文, 2013.
- [15] JTG/T F20—2015 公路路面基层施工技术细则[S].