

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.02.053

# 再生集料在道路基层材料中的试验研究与应用

章力

(上海市青浦区道路运输管理事务中心, 上海市 201700)

**摘要:** 利用公路路面铣刨出的废旧水稳再生集料替代天然集料制备再生水稳基层材料, 并开展工程示范应用。结果表明: 对于来自同一路段的废旧水稳再生集料, 其烘干或不烘干处理对再生水稳混合料的最佳含水率影响较小, 最佳含水率一般比再生级配集料吸水率高约4%~5%; 对于不同路段的废旧水稳再生集料, 其压碎值越高, 再生水稳的无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度、抗压回弹模量越低; 综合考虑再生水稳的性能, 选择来自路段1的再生细集料与路段3的再生粗集料按比例混合制备再生水稳用于工程实践, 再生水稳具有较好的力学性能与路用性能, 满足工程设计要求, 应用效果良好。

**关键词:** 废旧水稳再生集料; 再生集料处理方法; 再生水稳; 力学性能; 工程应用

中图分类号: U414

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)02-0242-04

## 0 引言

自改革开放以来, 我国公路建设事业迅速发展。至2021年年末, 我国公路总里程已达528.07万km, 很多公路沥青路面都采用了半刚性基层材料<sup>[1]</sup>。根据公路设计寿命, 现阶段以及未来很长一段时间内, 越来越多的公路将进入大修、中修阶段, 由此将铣刨出大量的废旧水稳。这些废旧水稳因品质较低, 基本以露天堆放或填埋为主, 占用大量土地资源, 且有严重的环境污染隐患<sup>[2-3]</sup>。经实践证明, 废旧水稳经过预处理后可在道路基层材料中实现再生利用<sup>[4-5]</sup>。本项目研究了来自不同路段的废旧水稳再生集料制备的再生水稳性能, 并优选再生粗集料、再生细骨料按比例混合制备再生水稳, 在上海市青浦区华腾公路大中修工程中开展应用。

## 1 试验

### 1.1 原材料

(1) 水泥: 南方P·O 42.5水泥, 其力学性能见表1。

(2) 再生集料: 公路路面铣刨出的废旧水稳经破碎、筛分而成5~15 mm、15~31.5 mm两档再生粗集料和0~5 mm再生细集料, 来自不同路段废旧水稳制备的再生集料基本性能见表2, 再生集料颗粒级配见图1。

收稿日期: 2023-02-22

作者简介: 章力(1976—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事道路养护管理工作。

表1 水泥主要物理力学性能

标准稠度需水量/%	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
27.8	175	206	6.4	9.5	32.2	55.6

表2 再生集料基本性能

废旧水稳来源	再生集料编号及规格	压碎值/%	吸水率/%	含水率/%
路段1	RCA-1(15~31.5 mm)	-	8.5	7.9
	RCA-2(5~15 mm)	27.4	9.4	8.4
	RFA-1(0~5 mm)	24.2	15.0	14.4
路段2	RCA-3(15~31.5 mm)	-	8.2	6.6
	RCA-4(5~15 mm)	27.7	7.3	8.8
	RFA-2(0~5 mm)	39.4	14.4	12.0
路段3	RCA-5(15~31.5 mm)	-	6.5	5.2
	RCA-6(5~15 mm)	25.3	7.0	6.4
	RFA-3(0~5 mm)	31.7	13.8	11.0

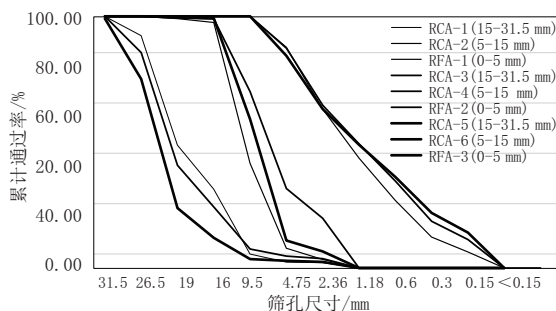


图1 再生集料级配曲线(单位:%)

### 1.2 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》, 对再生集料按以下两种方法处理后

再分别进行击实试验,方法1:对再生集料进行烘干,在进行击实试验的前一天,根据预定的含水量,将级配优化后的再生集料进行加水(加水量 $w_1$ 低于预定的含水量1%左右)预混浸润,浸润试件不低于12h;方法2:直接测试不同集料含水率,根据预定的含水量,将级配优化后的再生集料进行加水(加水量 $w_2$ 为 $w_1$ 扣除再生集料含水量),预混浸润时间不低于3h。进行击实试验前,按预定含水量补足水分并与水泥拌合均匀。

根据两种方法的击实结果,参照JTG E51-2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行再生水稳试件成型、养生以及无侧限抗压强度、间接抗拉强度、抗压回弹模量等性能测试。

## 2 配合比设计

### 2.1 再生级配集料比例设计

按《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)中用于二级及二级以下公路基层材料的集料推荐级配(C-C-1),对来自不同路段废旧水稳再生粗集料与再生细集料分别复配形成再生级配集料,来自路段1、路段2、路段3的废旧水稳再生集料形成的级配集料配比分别为(15~31.5)mm:(5~15)mm:(0~5)mm=35:15:50、35:25:40、35:35:30,其吸水率分别为11.9%、10.5%、8.9%。

### 2.2 再生水稳配合比设计

来自不同路段、经不同处理的再生集料制备的再生水稳材料配合比设计见表3。

表3 再生水稳配比

编号	再生级配集料配比	水泥掺量/%	备注
ZS-1H	RCA-1;RCA-2;	5.5	来自路段1废旧水稳再生集料(烘干处理)
ZS-1W	RFA-1=35:15:50		来自路段1废旧水稳再生集料(未烘干)
ZS-2H	RCA-3;RCA-4;	5.5	来自路段2废旧水稳再生集料(烘干处理)
ZS-2W	RFA-2=35:25:40		来自路段2废旧水稳再生集料(未烘干)
ZS-3H	RCA-3;RCA-4;	5.5	来自路段3废旧水稳再生集料(烘干处理)
ZS-3W	RFA-2=35:35:30		来自路段3废旧水稳再生集料(未烘干)

注:再生级配集料配比中,再生集料质量均按干重计。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 击实试验结果分析

采用JTG E51-2009中丙类击实试验方法进行,

绘制含水率-干密度关系曲线,见图2。

图2表明,不论再生集料经过烘干处理还是不烘干,再生水稳混合料的最佳含水率差别较小,因此再生水稳生产时,可对再生集料不作烘干处理,通过击实试验确定最佳含水率用于指导生产;水泥掺量相同,再生水稳的最佳含水率与再生集料的吸水率相关,吸水率越高,最佳含水率越大,一般最佳含水率比再生级配集料吸水率高约4%~5%。

### 3.2 再生水稳力学性能与路用性能

不同配合比的再生水稳力学性能、路用性能结果见表4。

表4表明:

(1)当水泥掺量为5.5%时,第一批、第三批再生集料制备的再生水稳7d无侧限抗压强度3.0~5.0MPa,达到二级及二级以下公路重交通基层材料以及各级公路底基层材料要求;而第二批再生集料制备的再生水稳7d无侧限抗压强度约3MPa,仅满足二级及二级以下公路中、轻交通基层材料以及各级公路中、轻交通底基层材料要求。

(2)水泥掺量、龄期均相同时,再生水稳材料的性能与再生集料本身强度有关,再生集料原强度越小、压碎值越高,再生水稳的无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度、抗压回弹模量越低,主要是因为再生骨料棱角多、表面粗糙、内部含有微裂纹,使得再生水稳混合料存在薄弱界面,在外力作用下界面产生应力集中,从而降低混合料的整体性能<sup>[6]</sup>。

## 4 工程应用

### 4.1 工程概况

工程应用依托于上海市青浦区华腾公路,该公路为二级公路,双向四车道,交通荷载等级为中等交通。原路面经现场踏勘,机动车道、非机动车道路面存在纵横向裂缝、车辙、沉陷等不同程度的破损(见图3),经钻芯取样及弯沉测试,原沥青面层厚9~15cm,基层约30~34cm,弯沉平均值达145(0.01mm),路面服务质量下降。

经管理部门、设计、施工、监理等多方协商后,该公路北半幅(K0+275~K0+360)和南半幅(K0+330~K0+420)段设置为再生水稳的试验段,试验段折算成单车道计,施工总长度为350m。试验段再生水稳用集料来自翻挖废旧水稳的再生集料,再生水稳7d无侧限抗压强度设计不小于3.5MPa;试验段路面结构设计见表5。级配碎石施工前应根据弯沉值对土路基

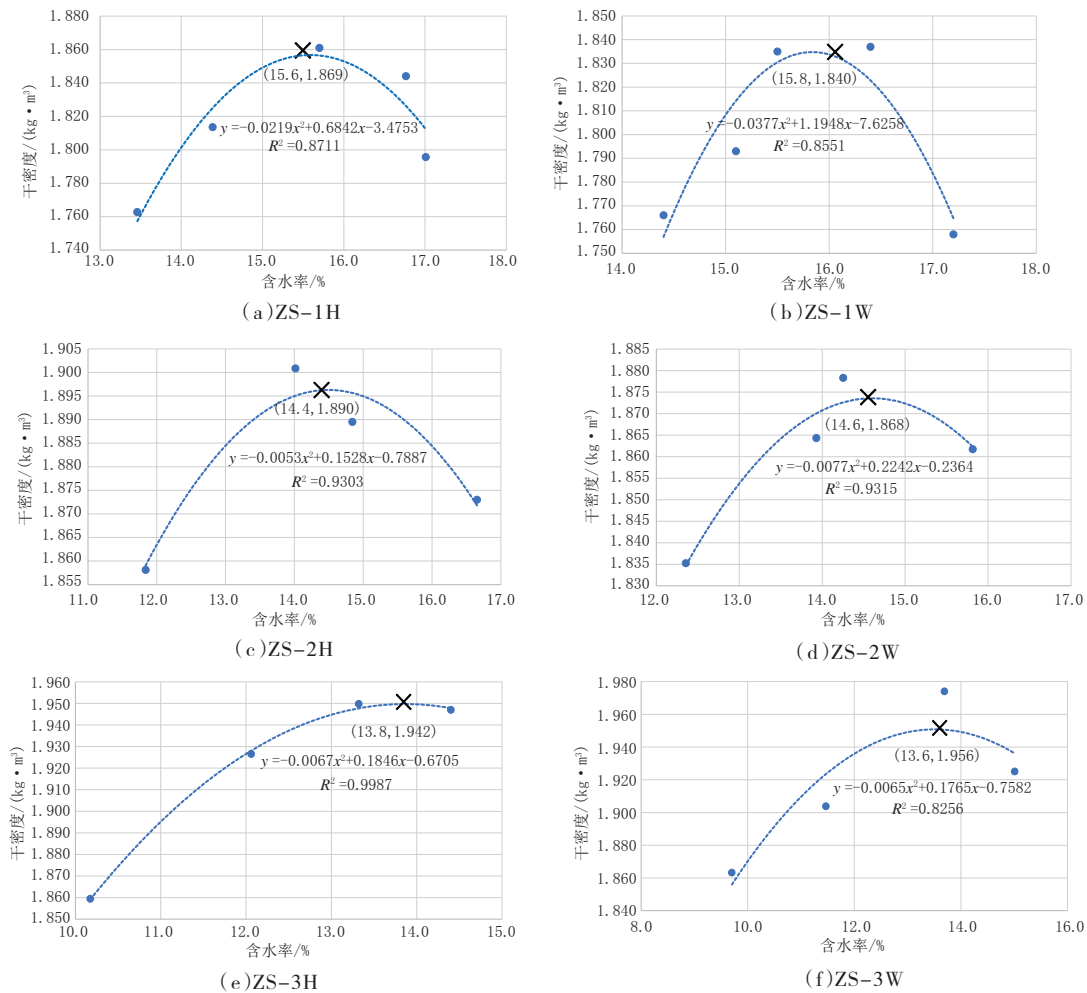


图2 再生水稳混合料击实试验结果(单位:kg/m³)

表4 再生水稳的力学性能与路用性能

编号	7 d 无侧限抗压强度 /MPa	7 d 抗压回弹模量 /MPa	7 d 间接抗拉强度 (劈裂试验)/MPa
ZS-1H	4.9	1 040	0.53
ZS-1W	4.5	963	0.43
ZS-2H	3.2	796	0.37
ZS-2W	2.8	530	0.33
ZS-3H	4.2	902	0.42
ZS-3W	3.9	878	0.40

表5 华腾公路路面结构方案设计

结构层	材料	厚度	交工验收弯沉值
路面面层	AC-13C 细粒式沥青混合料(SBS 改性沥青)	4 cm	$l=25.2$ (0.01 mm)
	洒粘层油	0.3~0.6 L/m <sup>2</sup>	-
	AC-25C 粗粒式沥青混合料(掺 0.35% 抗车辙剂)	8 cm	$l=27.8$ (0.01 mm)
	稀浆封层	0.8 cm	-
路面基层	厂拌再生水稳	40 cm	$l=33$ (0.01 mm)
垫层	级配碎石	15 cm	-



图3 华腾公路原沥青混凝土路面状况

进行局部加固,施工后对试验路段进行现场检测与性能跟踪监测。

## 4.2 再生水稳生产和施工

### 4.2.1 生产

用于生产的再生水稳配比为:水泥 5.5%,再生集

料为来自路段 1 废旧水稳再生细集料、路段 3 废旧水稳再生粗集料(5~15 mm)、路段 3 废旧水稳再生粗集料(15~31.5 mm),比例为 30 : 30 : 40,再生集料级配曲线见图 4;生产加水量 7.5%,采用拌和厂集中拌和。再生水稳生产见图 5,再生水稳力学性能与路用性能见表 6。

### 4.2.2 施工

(1)路基加固(见图 6)

为降低路基对基层材料应用后性能的影响,对弯

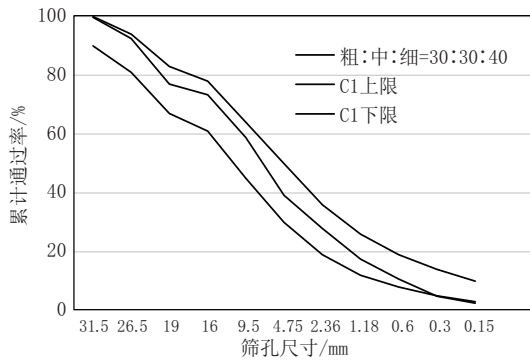


图4 再生级配集料的级配曲线(单位:%)

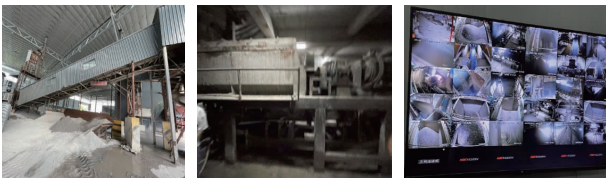


图5 再生水稳生产

表6 再生水稳力学性能与路用性能

测试项目	无侧限抗压强度 /MPa		抗压回弹模量 /MPa		间接抗拉(劈裂)强度 /MPa	
	7 d	90 d	7 d	90 d	7 d	90 d
性能	4.9	6.4	860	1 100	0.48	0.67



图6 土路基局部加固

沉值较大、渗水的土路基进行局部开挖、就地翻拌水泥固化土加固,加固前路基的平均弯沉 124(0.01 mm)、最大弯沉 282 (0.01 mm), 加固后路基的平均弯沉 105(0.01 mm)、最大弯沉 176(0.01 mm)。

### (2)再生水稳施工

再生水稳层设计厚度 40 cm,分两层摊铺、碾压,施工过程见图 7。

### 4.3 现场检测

待基层铺筑完成后,参照《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80-1—2017)和《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019),对该路段基层厚度、压实度和弯沉进行检测:实测厚度为 381 mm,符合设计要求(平均值不小于 0.9 H,H=40 cm);再生水稳基层压实度 97%,满足设计要求(不小于 97%);平均弯沉 11.8(0.01 mm),满足设计要求(不大于 33 (0.01 mm)),表明再生水稳作为基层材料,其抵抗垂直变形的能力较好。



图7 再生水稳施工

### 4.4 性能跟踪监测

该试验段建成通车后,对其进行性能跟踪监测, 钻芯检测再生水稳层半年的无侧限抗压强度、间接抗拉(劈裂)强度、抗压回弹模量等(结果见图 8),芯样完整,力学性能、路用性能有所提高,主要是因为水泥的进一步水化以及通车后荷载使路面结构层更为密实。再生水稳性能见表 7。



图8 性能跟踪监测

表7 再生水稳性能

测试项目	抗压强度 /MPa	间接抗拉(劈裂)强度 /MPa	抗压回弹模量 /MPa
性能	7.6	1.64	1 156

## 5 结论

(1)对于来自同路段的再生集料,其烘干或不烘干处理对再生水稳混合料的最佳含水率影响较小;水泥掺量相同,再生水稳的最佳含水率一般比再生级配集料吸水率高约 4%~5%。

(2)水泥掺量、龄期均相同时,再生水稳材料的性能与再生集料本身强度有关,再生集料原强度越小、压碎值越高,再生水稳的无侧限抗压强度、劈裂

(下转第 259 页)

以指导新片区道路交通、综合管廊和综合杆等基础设施的设计。该规划在基于长沙高铁西站片区规划及建设现状的基础上,分析了片区新基建建设现状与建设需求,通过深入论证明确了片区新基建规划内容。规划形成以下主要结论:

(1)规划明确了长沙高铁西城片区融合基础设施规划内容包括:土建基础设施载体(综合杆、综合箱、综合管廊系统);智慧交通基础设施以及能源基础设施等内容。

(2)规划明确了各类新型基础设施如综合杆、综合箱、综合管廊需要建设或预留的土建空间、布设原则、技术要求等。

(3)规划给出了以道路基础设施、管廊基础设施为载体的建设内容清单,明确道路及管廊建设新基建详细内容,并与道路工程同步给出建设时序。

片区新基建规划内容还需要在未来的建设实施和应用中逐步验证和完善。本文对长沙高铁西城片区新基建专项规划内容,可为国内同类片区的新基建规划建设提供借鉴意义。

参考文献:

- [1] 郭贺铨.新一代信息基础设施引领“新基建”[J].中国科技奖励,2020(4):6-7.
- [2] 韩建飞,孟凡达,张凯,等.我国各省市“新基建”发展潜力白皮书[J].机器人产业,2020(3):33-42.
- [3] 广州市工业和信息化局,广州市发展和改革委员会.广州市加快推进数字新基建发展三年行动计划(2020~2022年)[EB/OL].(2020-08-11)[2023-01-23].[https://gz.gov.cn/xw/tzgg/content/post\\_6492909.html](https://gz.gov.cn/xw/tzgg/content/post_6492909.html).
- [4] 上海市人民政府.上海市推进新型基础设施建设行动方案.(2020—2022年)[EB/OL].(2020-05-12)[2023-01-23].[https://www.shanghai.gov.cn/nw48504/20200825/0001-48504\\_64893.html](https://www.shanghai.gov.cn/nw48504/20200825/0001-48504_64893.html).
- [5] 韩忍冬.新基建激发新人才需求[J].中国新时代,2020(7):68-71.
- [6] 《中国勘察设计》编辑部.全国25省市“新基建”政策方案汇总[J].中国勘察设计,2020(7):10-17.
- [7] 《中国总会计师》编辑部.何为“新基建”[J].中国总会计师,2020(3):20-24.
- [8] 夏旭田,李振,梁宇芳,等.“新基建”的三大方面,七大领域[J].企业观察家,2020(5):40-43.
- [9] 刘艳红,黄雪涛,石博涵.中国“新基建”:概念,现状与问题[J].北京工业大学学报:社会科学版,2020,20(6):1-12.

\*\*\*\*\*  
(上接第245页)

抗拉强度、抗压回弹模量越低;当水泥掺量为5.5%时,来自路段1、路段3废旧水稳再生集料制备的再生水稳7d无侧限抗压强度3.0~5.0MPa,达到二级及二级以下公路重交通基层材料以及各级公路底基层材料要求。

(3)工程应用表明:废旧水稳再生集料制备的再生水稳用于上海青浦华腾公路(二级公路),其压实度、弯沉、施工厚度均满足设计要求,应用效果良好;半年后对路面结构层进行钻芯取样,其再生水稳层无侧限抗压强度与路用性能随时间的延长而提高。

参考文献:

- [1] 汪京.废旧基层材料水泥稳定再生利用技术研究[D].北京:北京建筑大学,2016.
- [2] 余春艳.水泥稳定再生骨料在道路基层中的应用研究[D].杭州:浙江工业大学,2020.
- [3] 王婷灏.废旧道路材料混合再生基层材料力学性能研究[J].甘肃科学学报,2019,31(2):92-96.
- [4] 杨尽,窦常青,刘晓娜.旧水泥稳定碎石再生利用研究[J].山西建筑,2009,27:168-170.
- [5] 李丽慧,马金柱,王运中.再生水泥稳定碎石试验研究与工程应用[J].福建交通科技,2016(5):1-2.
- [6] 陈峰,董生豪.水泥稳定再生骨料路面基层抗拉性能试验研究[J].长江科学院院报,2020,37(2):159-163.