

# 地聚合物稳定建筑固废再生集料力学特性研究

袁开新<sup>1</sup>,何永健<sup>1</sup>,张来君<sup>1</sup>,李海<sup>2\*</sup>,许戈韦<sup>2</sup>

(1.中国路桥工程有限责任公司,北京市 100001;2.长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室,湖南长沙 410114)

**摘要:**为解决建筑固废产量急剧增加且利用率不足的问题,该文以矿渣-粉煤灰基地聚物为无机结合料,用建筑固废再生集料代替天然碎石,将城市道路基层作为目标,研究不同掺量下地聚物稳定再生集料的力学性能。研究表明:随着地聚物掺量的增加,混合料的最大干密度增加,最佳含水率上升;混合料的无侧限抗压强度随着地聚物掺量、养护龄期的增加而提高,随着再生集料掺量的增加而下降;混合料劈裂强度与抗压回弹模量的变化规律与无侧限抗压强度相似,随着前体矿渣掺量、地聚物掺量、养护龄期的增加而上升,随着再生集料掺量的增加而下降。

**关键词:**建筑固废;强化改性;地聚物;道路基层;力学性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

## Mechanical Properties of Geopolymer-Stabilized Recycled Aggregates from Construction Solid Wastes

YUAN Kaixin<sup>1</sup>, HE Yongjian<sup>1</sup>, ZHANG Laijun<sup>1</sup>, LI Hai<sup>2\*</sup>, XU Gewei<sup>2</sup>

(1. China Road & Bridge Corporation, Beijing 100001, China; 2. National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of a sharp increase in construction solid wastes and insufficient utilization rate, this paper took slag-fly ash-based geopolymer as an inorganic binder, replaced natural gravels with recycled aggregates from construction solid wastes, and set urban road base layer as the target scene to study the mechanical properties of geopolymer-stabilized recycled aggregates at different contents. The results show that with the increase in geopolymer content, the maximum dry density of the mixture increases. The optimum moisture content increases. The unconfined compressive strength of the mixture increases with the increase in geopolymer content and curing age and decreases with the increase in recycled aggregate content. The variation law of splitting strength and compressive rebound modulus of the mixture is similar to that of unconfined compressive strength. It increases with the increase in precursor slag content, geopolymer content, and curing age and decreases with the increase in recycled aggregate content.

**Keywords:** construction solid waste; reinforcement and modification; geopolymer; road base layer; mechanical property

## 0 引言

改革开放历经40余年,中国常住人口城镇化率已超过65%<sup>[1]</sup>。随着中国城市化进程不断加快,每年大量的结构临近使用年限被拆除,造成建筑固废产

量的急剧增加<sup>[2]</sup>。据相关资料统计,中国目前的建筑固废存储量已经达到200多亿t,且仍以每年20亿~30亿t的增量持续产生(图1),中国已成为世界上建筑固废排放量最多的国家之一,同时与日、韩、欧美等发达国家90%以上的资源化利用率相比,中国建

收稿日期:2024-07-10(修改稿)

基金项目:中国交通建设集团基金资助项目(编号:P2200001)

作者简介:袁开新,男,高级工程师.E-mail:yuankx@crbc.com

\*通信作者:李海,男,硕士研究生.E-mail:13317485261@163.com

筑固废总体资源化率不到 20%<sup>[3]</sup>。目前中国处理建筑固废的方式主要是运往郊外露天堆放或填埋(图 2),处理方式粗放,绝大部分建筑固废未经任何有效处理,占用土地的同时破坏生态环境<sup>[4-5]</sup>。建筑固废的简单填埋造成城市环境污染,影响土壤与空气质量,同时由于建筑固废中重金属物质、有害物质的挥发和渗透,接触到地表水、地下水后,会给人们生活带来隐患<sup>[6-7]</sup>。目前,许多城市对建筑固废堆存地的选址缺乏科学规划,采取的安全防范措施不到位,并且处置能力已无法满足日益增长的需求,若无法妥善处理现存巨量建筑固废的问题,将严重制约城市化建设的推进。

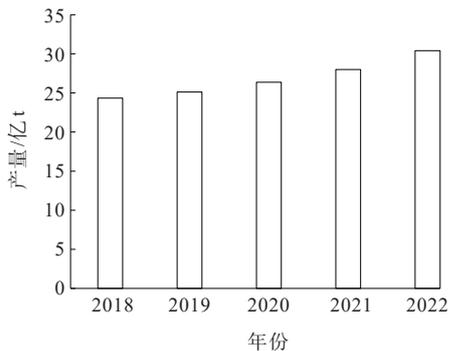


图 1 中国建筑固废产量

Figure 1 China's construction solid waste production



图 2 建筑固废露天堆放

Figure 2 Open stacking of construction solid wastes

建筑固废来源广、成分复杂、性能不均,国内外学者开展了大量研究通过各种手段提升建筑固废再生集料的性能,实现建筑固废再生集料的更高品质利用,提高产品的附加值<sup>[8]</sup>,主要方式包括物理强化、化学强化两种方式。

将再生骨料浸泡于水中进行超声波清洗,可去除其表面的灰尘、碎屑和松散砂浆,但对于黏附较紧密的砂浆去除效果有限,再生混凝土 28 d 强度仅提

高 7%。李秋义等<sup>[9]</sup>使用颗粒整形设备,通过颗粒间的高速运动互相冲击摩擦,从而去除表面黏附的砂浆和水泥石,改善粒形,经整形的再生骨料密度、吸水率、孔隙率和压碎值等指标均得到了改善。机械研磨<sup>[10]</sup>、加热研磨<sup>[11]</sup>的方式同样是通过去除表面软弱砂浆的方式改善再生骨料的品质,但物理强化的方式存在能源消耗过大的问题,且条件设置不当的话,容易损伤再生骨料内部,形成微裂纹。

化学强化通过常见的酸溶液包括盐酸(HCl)<sup>[12]</sup>、硫酸(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)<sup>[13]</sup>、磷酸(H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)<sup>[14]</sup>和醋酸(CH<sub>3</sub>COOH)<sup>[15]</sup>均可以用于溶解去除再生骨料表面的砂浆,在操作过程中使用强酸存在安全性隐患,处置后的废液若不恰当处理会造成环境问题。而醋酸属于弱酸,操作安全且不会引入有害物质,产生的废液可回收利用制取高附加值产物。水玻璃溶液法是一种常用的改善再生骨料性能的方法,硅酸钠与氢氧化钙发生水化反应,可填充再生骨料的孔隙、空隙和微裂纹。Zhang 等<sup>[16]</sup>得到水玻璃溶液的最佳强化条件为浓度 8%,浸泡时间 5 h,强化后的水泥稳定再生骨料在 50% 的掺量下可满足高速公路和一级公路底基层的要求,75% 的掺量下可满足二级及以下公路的要求。当再生骨料浸泡在聚合物溶液中时,聚合物分子扩散分布至再生骨料的孔洞、缝隙与裂纹中,聚合形成一层薄膜,赋予再生骨料表面憎水性。常用的聚合物包括聚乙烯醇<sup>[17]</sup>、硅烷<sup>[18]</sup>和硅氧烷<sup>[19]</sup>等,聚合物使再生骨料疏水的同时,可能也会影响水泥与骨料表面的接触,阻碍进一步的水化,从而降低再生混凝土的抗压强度<sup>[20]</sup>。将火山灰材料与碱性溶液混合配制具有火山灰活性的浆液浸泡再生骨料,通过活性微细颗粒可以填充砂浆与骨料表面的孔隙缺陷,同时还能与旧水泥砂浆发生水化反应,改善界面过渡区,提高强度。Shaban 等<sup>[21]</sup>配制了粉煤灰+硅灰、粉煤灰+水泥、粉煤灰+水泥+纳米硅灰 3 种浆液处置再生骨料,结果表明:40% 浓度的粉煤灰+水泥浸泡 4 h 效果最佳,再生骨料密度增大 6.75%,孔隙率、磨损值、冲击值、压碎值、吸水率分别下降 50%、35%、30%、44%、51.39%。与单独使用硅灰相比,水玻璃与硅灰组合的处置效果更佳,还能避免发生碱集料反应<sup>[22-23]</sup>。再生混凝土骨料具有较高的比表面积和旧水泥浆体,通过碳化使 CO<sub>2</sub> 与其表面浆体水化产物发生反应生成碳酸钙,捕捉封存 CO<sub>2</sub> 的同时提升了再

生骨料的物理性能<sup>[24]</sup>。Liu等<sup>[25]</sup>对液固加压碳化法与传统的气固加压碳化法进行了比较,10 min液固碳酸工艺处理的方式比24 h气固加压碳化工艺效率更高。在碳化前,使用富含Ca<sup>2+</sup>的溶液预处理再生骨料,可以起到增强作用<sup>[26]</sup>。微生物诱导碳酸沉淀可在微生物作用下形成方解石晶体,填充再生骨料孔隙,是一种环保的处理方法<sup>[27]</sup>。与天然骨料相比,再生骨料表面附着的旧水泥砂浆是导致其性能差异的主要原因,现有研究也主要是从去除黏附砂浆和强化黏附砂浆2个方面提升再生骨料性能,主要分类如表1所示,相较于去除黏附砂浆,采取强化黏附砂浆的方式更经济、更环保。

表1 建筑固废再生骨料性能提升方法分类

Table 1 Classification of performance improvement methods for recycled aggregates from construction solid wastes

强化原理	强化方式	方法	特点
		机械研磨法	效果一般
去除黏附砂浆	物理强化	加热研磨法	成本高,温度过高可能造成不良影响
		超声波处理	不能去除黏结力强的砂浆
	化学强化	酸液处理	安全性、环保性差
		聚合物乳液	形成憎水膜
强化黏附砂浆、封堵孔隙	化学强化	碳酸钙生物沉积	需严格控制条件保证菌的存活
		火山灰溶液	形态、填充、火山灰、成核效应
		硅酸钠溶液	增加碱集料反应风险
		碳化法	环境友好、条件严格

综上所述,目前建筑固废已在道路结构中广泛应用,对于建筑固废再生骨料的强化改性,现有成果大多选取2~3种材料进行简单比较,缺乏对不同改性方式间的系统比较后,再选取关键指标,使再生集料符合对应场景的技术要求。工业废弃物在建筑领域得到了广泛应用,用作混凝土骨料、辅助胶凝材料以及碱激发胶凝材料地聚物,地聚物更多被作为注浆材料处置病害或作为固化剂固化重金属污染物,而关于将工业废弃物地聚物稳定建筑固废再生集料用于道路基层的研究较为少见。针对以上问题,本文以矿渣-粉煤灰基地聚物为无机结合料,用建筑固废再生集料代替天然碎石,对不同掺量下地聚物稳定再生集料的力学性能进行了试验研究,并进行了相关经济效益分析。

## 1 再生集料基本性能

本研究采用石灰岩作为天然集料,再生集料取自湖南惟愿环保科技有限公司建筑固废再生基地的再生级配碎石,主要源自长沙市及其周边地区的房屋装修、拆除、工程建设产生的拆除垃圾、装修垃圾、施工垃圾等各类建筑固废,经破碎机破碎后分档堆放。测试天然集料、再生碎石、再生红砖的基本性能,比较它们之间的差异,并为下一步再生集料的强化材料的选取提供依据。

将取回的再生集料利用清水冲洗并晾晒,以去除集料表面黏附的大量浮尘与细粉,随后重新过筛,根据现有研究和规范将粗集料分为4.75~9.5 mm、9.5~19 mm、19~26.5 mm 3档,细集料≤4.75 mm,再通过人工分拣将再生粗集料中的碎石和砖渣与其他杂物分离,材料准备过程如图3所示。

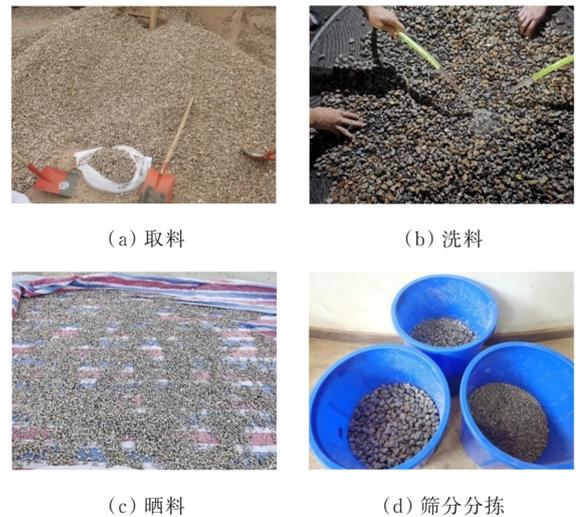


图3 材料准备

Figure 3 Material preparation

建筑固废成分复杂,不同来源的建筑固废组成特点不同,从3档再生粗集料中各取部分代表性样品进行成分分析,人工将样品中的不同组分分拣出来,然后称重计算各组分所占百分比,结果如表2和图4~7所示。

从图4~7可以看出:相较于天然集料的单一成分,成分混杂也是造成再生集料性能低下的原因之一。各组分中以碎石和红砖的占比最大,两者所占比例超过90%,剩下的则由瓷砖、纯砂浆以及玻璃、木块、塑料等杂物组成。

表2 建筑固废再生粗集料成分组成

Table 2 Composition of recycled coarse aggregates from construction solid wastes

组成成分	不同粒径(mm)粗集料成分/%			平均占比/ %
	4.75~9.5	9.5~19	19~26.5	
碎石	77.1	78.4	77.6	77.7
红砖	16.3	15.7	15.1	15.7
瓷砖	1.9	3.9	5.3	3.7
纯砂浆	3.3	1.2	1.5	2.0
杂物	1.4	0.8	0.5	0.9



图4 未分拣前的再生集料

Figure 4 Recycled aggregates before sorting



图5 分拣后的再生碎石

Figure 5 Recycled gravel after sorting



图6 砖、砂浆及杂物

Figure 6 Bricks, mortar and sundries

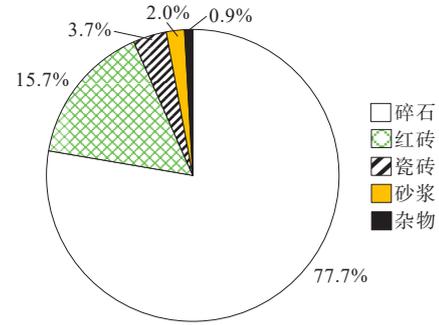


图7 各组分比例

Figure 7 Proportions of each component

### 1.1 粗集料表观相对密度与吸水率

按照《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)中的规定采用T0308—2005容量瓶法测定粗集料的表观相对密度与吸水率,测试结果如表3所示。

表3 粗集料表观相对密度与吸水率试验结果

Table 3 Test results of apparent relative density and water absorption of coarse aggregates

粒径/mm	表观相对密度			吸水率/%		
	天然 粗集料	再生 碎石	再生 红砖	天然 粗集料	再生 碎石	再生 红砖
4.75~9.5	2.783	2.532	2.462	0.67	7.4	18.5
9.5~19	2.772	2.537	2.458	0.30	5.7	15.9
19~26.5	2.794	2.545	2.455	0.37	5.2	13.9

由表3可知:不同粒径之间3种粗集料的表观相对密度相差不大,天然粗集料的表观相对密度明显高于再生碎石与再生红砖,接近2.8,满足用于城市快速路、主干路表面层的要求。再生碎石的表观相对密度随粒径的增加而增大,均超过了2.5,与天然粗集料相比约减小了9%,但也已经符合规范中对粗集料用于城市快速路、主干路表面层以下层次的要求。红砖的表观相对密度与粒径呈负相关,略低于再生碎石,约为天然集料的0.88,大于2.45,达到了其他等级道路对表观相对密度的要求。

表3展示了3种粗集料吸水率的显著差异,天然粗集料几乎不吸水,最大吸水率仅为0.67%。再生集料的吸水率随着粒径的增大而减小,再生碎石的吸水率是天然集料的十几倍,再生红砖的吸水率更是超出天然集料27倍。这是由于再生集料表面覆盖有黏附砂浆,疏松多孔,在自然环境中经长年累月的作用,以及破碎过程中产生的裂缝与细微开口孔隙所导致的。

## 1.2 粗集料针片状颗粒含量

集料颗粒通常有近球体或立方体的浑圆状、多棱角状颗粒,以及呈细长和扁平的针状、片状颗粒4种类型,其中针状、片状颗粒对混合料的和易性、强度和稳定性等性能有不良的影响。采用 T0312—2005 中游标卡尺法测定粗集料中针片状颗粒的含量,测试结果见表4。

表4 粗集料针片状颗粒含量试验结果

Table 4 Test results of needle-like and flake-like particle content of coarse aggregates

粒径/mm	不同粗集料中针片状颗粒含量/%		
	天然粗集料	再生碎石	再生红砖
4.75~9.5	10.5	8.4	12.7
9.5~19	7.2	6.3	11.6
19~26.5	6.9	7.9	11.4

天然集料、再生碎石、再生红砖的针片状颗粒含量均满足规范的要求,可以看出4.75~9.5 mm这一档粒径的集料含有更多的针片状颗粒,而规范中也对混合料中粒径小于9.5 mm的粗集料要求更为宽松。再生碎石的针片状颗粒含量最低,天然粗集料次之,再生红砖的针片状含量最高,其在破碎过程中产生了更多的不规则颗粒。

## 1.3 粗集料压碎值

压碎值是指集料在逐渐增加的荷载下抵抗压碎的能力,是反映集料强度的相对指标,在集料的抗压强度不便测定时,可通过压碎值间接评价集料的力学性能,从而反映其在道路工程中的适用性。根据 T0316—2005 的方法进行测试,结果见表5。

表5 粗集料压碎值试验结果

Table 5 Test results of crushing value of coarse aggregates

粒径/mm	不同粗集料压碎值/%		
	天然粗集料	再生碎石	再生红砖
4.75~9.5	26.3	37.3	50.5
9.5~19	22.7	29.2	44.3
19~26.5	19.0	26.1	41.1

与天然集料相比,再生集料内部的高孔隙率、微裂缝以及表面附着的软弱砂浆层,致使其压碎值偏高。再生碎石的压碎值仅达到规范中其他等级道路的要求,再生红砖的压碎值约为天然集料的2倍,远远超出了规范的限制值。

## 1.4 粗集料坚固性

坚固性又称耐候性,是指集料抵抗大气自然因素作用的性能,一般通过直接冻融法或硫酸盐浸泡法测定集料的坚固性。硫酸盐浸泡法实质上是一种快速评价集料抵抗低温冻胀破坏能力的试验,其原理是通过结晶膨胀产生晶胀作用,以替代低温水结冰产生的冻胀作用。根据 T0314—2000 的方法进行测试,结果见表6。

表6 粗集料坚固性试验结果

Table 6 Test results of coarse aggregate firmness

粒径/mm	不同粗集料坚固性/%		
	天然粗集料	再生碎石	再生红砖
4.75~9.5	1.1	5.5	11.9
9.5~19	0.7	4.6	11.2
19~26.5	0.6	5.3	9.9

规范要求粗集料坚固性不大于12%,3种集料的坚固性均满足规范的要求。天然粗集料的坚固性最好,随着粒径的增大集料的质量损失减少,粒径19~26.5 mm这一档集料的质量损失仅为0.6%。再生碎石的质量损失为天然集料的5~9倍,再生红砖的坚固性最差,质量损失是天然集料的十几倍。再生集料的压碎值和吸水率均高于天然集料,表明其强度较低且分布有大量孔隙,在溶液浸泡过程中吸入了更多的硫酸钠,从而在承受硫酸钠结晶和压碎作用后的破坏更为显著,这说明再生集料在实际使用时可能存在耐久性问题。

## 1.5 细集料性能

根据《公路工程集料试验规程》(JTGE42—2005)中的规定,对天然细集料与再生细集料的表现相对密度、吸水率、含泥量、液限、塑性指数等指标进行测试,测试结果如表7所示。

表7 细集料基本性能试验结果

Table 7 Test results of basic properties of fine aggregates

集料类型	表观相对密度	吸水率/%	含泥量/%	液限/%	塑性指数
天然细集料	2.717	4.1	0.6	21.9	4.7
再生细集料	2.311	13.5	15.7	32.4	6.5

再生细集料主要由纯砂砾、裹附有水泥砂浆的砂砾、石屑、砖渣以及各种渣土、木屑等杂物组成。

由表7可知:再生细集料各项性能指标均差于天然细集料。再生细集料的表观相对密度约为天然集料的85%,吸水率是天然集料的3倍多,含泥量更是远远高于天然细集料。考虑到再生细集料的吸水率较高、组分混杂、性质差异大、难以控制,本研究集料全部采用天然粗集料。

### 1.6 集料级配

由于不同粒径档次集料的组成比例不同,形成级配类型的不同,集料级配对混合料性能产生重要影响。混合料的典型组成结构类型有悬浮密实结构、骨架空隙结构、骨架密实结构3种。

骨架密实结构兼具悬浮密实结构与骨架空隙结构的优点,有足够数量的粗集料颗粒构成骨架,同时细集料颗粒充分填充粗集料颗粒间的空隙,压实混合料的嵌挤强度较高、抗裂性和抗冲刷性较好,《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169—2012)<sup>[28]</sup>对用作基层的半刚性材料推荐选用骨架密实型级配,本研究集料级配如表8所示。

表8 骨架密实型级配

Table 8 Dense skeleton gradation

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%						
	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
上限	100.0	86.0	58.0	32.0	28.0	15.0	3.0
下限	100.0	68.0	38.0	22.0	16.0	8.0	0.0
中值	100.0	72.0	48.0	27.0	22.0	11.5	1.5

### 1.7 矿渣、粉煤灰基本性能

#### (1) 矿渣

本研究所用矿渣为S95矿渣粉,比表面积422 m<sup>2</sup>/kg,密度2.86 g/cm<sup>3</sup>,其主要成分含量如表9所示。

表9 矿渣成分组成

Table 9 Slag composition

成分	含量/%	成分	含量/%
SiO <sub>2</sub>	34.78	MgO	8.55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.75	CaO	35.80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.62	K <sub>2</sub> O	0.48
Na <sub>2</sub> O	0.35	SO <sub>2</sub>	1.81

#### (2) 粉煤灰

本研究所用粉煤灰为I级粉煤灰,密度2.3 g/cm<sup>3</sup>,其主要成分含量见表10。

表10 粉煤灰成分组成

Table 10 Composition of fly ash

成分	含量/%	成分	含量/%
SiO <sub>2</sub>	46.60	MgO	1.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.20	CaO	4.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.20	K <sub>2</sub> O	0.52
TiO <sub>2</sub>	1.15	SO <sub>2</sub>	1.28

## 2 试验方法

### 2.1 击实试验

无机结合料稳定材料的最佳含水率与最大干密度通过击实试验确定,《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51—2009)<sup>[29]</sup>中规定了重型击实试验与振动压实试验两种方法。相比重型击实法,振动压实法能更好地模拟现场施工碾压工艺,因此本研究采用T0842—2009振动压实法,后续试件同样采取振动压实法成型,击实试验过程如图8所示。试验步骤如下:



图8 击实试验过程

Figure 8 Compaction test process

(1) 试验开始前检查设备运行情况,确认无误后调节设置好振动压实机参数,振实条件为面压力0.1 MPa,激振力6 800 N,振动频率28~30 Hz。

(2) 将筛分后的天然集料与再生集料根据集料级配以及再生集料掺量计算各档用量,配制5份,每份的集料干质量为5 500~6 000 g,根据工况预设5个含水率梯度,依次相差1.0%或0.5%。

(3) 将配制好的试料倒入盆中,将对应的加水量均匀喷洒在试料上,同时充分搅拌均匀,然后装入塑料袋中焖料2 h,焖料结束后加入对应质量的矿渣粉煤灰以及提前配制好的碱激发剂拌和均匀,随后需要在1 h内完成振实试验。

(4) 擦拭干净模具并安装好,在模具内壁与底部涂刷一层凡士林,并在底部放置一张圆形滤纸,将拌和好的试料装入模具内,装入过程中同时进行插捣,整平压紧表面后放置一张圆形滤纸,以免在压实过

程中使试料粘在压头上,随后将装有试料的模具放置在振动压实机的钢模底板上固定好。

(5) 降下压头,使其与模具内试料表面紧密接触,启动机器开始振动压实,当观察到振动压头回弹跳起时立即关闭机器,结束振动压实,取下模具检查试样高度,试样低于模具边缘或高出边缘 10 mm 均不符合要求,将符合要求的试样刮平修补,称取模具与试样的质量  $m_1$ 。

(6) 将试样脱模并打碎,取其中心部分的混合料约 2 000 g,放入烘箱中烘干 12 h 后测得其含水率,将模具擦拭干净后称取质量  $m_2$ 。

试样的湿密度和干密度计算公式如下:

$$\rho_w = \frac{m_1 - m_2}{V} \quad (1)$$

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 + 0.01w} \quad (2)$$

式中: $\rho_w$ 为试样的湿密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $\rho_d$ 为试样的干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $m_1$ 为模具与试样的质量( $\text{g}$ ); $m_2$ 为模具的质量( $\text{g}$ ); $V$ 为模具的容积( $\text{cm}^3$ ); $w$ 为试样的含水率(%)。

## 2.2 试件成型与养生

参照 T0843—2009 的方法,采用振动压实成型直径×高为 150 mm×150 mm 的圆柱形试件,用作后续力学性能测试所需,试件制作方法如下:

(1) 根据配合比以及击实试验得到的最佳含水率与最大干密度,计算各档集料用量、加水量和地聚合物用量。

(2) 配料,重复击实试验中的步骤(3)、(4),使用振动压实成型机成型试件,制件后放置 2~6 h,再使用液压电动脱模器脱模,如图 9 所示。



图9 试件脱模

Figure 9 Specimen demoulding

(3) 按照 T0845—2009 的方法将脱模后的试件装入塑料袋中包好,放入标准养护室中养护,养护条

件温度( $20 \pm 2$ ) $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 $\geq 95\%$ 。

## 2.3 无侧限抗压强度试验

无侧限抗压强度是用于无机结合料稳定材料配合比设计的强度指标,采用 T0805—1994 的方法,在试验龄期的前一天将试件浸水 24 h,取出后擦干表面水分,放置于压力机上,下降压头至与试件顶面接触后,开始抗压试验,保持加载速率为 1 mm/min。试件的无侧限抗压强度试验如图 10、11 所示,其计算公式如下:

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (3)$$

式中: $R_c$ 为试件的无侧限抗压强度(MPa); $P$ 为试件破坏时的最大压力(N); $A$ 为试件的截面面积( $\text{mm}^2$ )。



图10 无侧限抗压强度测试

Figure 10 Unconfined compressive strength test



图11 测试后的部分试件

Figure 11 Some specimens after test

## 2.4 劈裂强度试验

劈裂强度又称间接抗拉强度,采用 T0806—1994 的方法,在试验龄期的前一天将试件浸水 24 h,取出后擦干表面水分,放置一弧面压条于压力机升降台上,将试件侧面平顺面置于压条上,在试件顶面同样放置一块压条,两压条连接线为试件的直径,并且与升降台垂直,下降压头与上部压条顶面接触后,开始劈裂强度试验,加载速率保持为 1 mm/min。试件的劈裂强度试验如图 12 所示,计算公式如下:

$$R_i = 0.004 178 \frac{P}{h} \quad (4)$$

式中： $R_i$ 为试件的劈裂强度(MPa)； $P$ 为试件破坏时的最大压力(N)； $h$ 为浸水后试件的高度(mm)。



图 12 劈裂强度测试

Figure 12 Splitting strength test

## 2.5 抗压回弹模量试验

无机结合料稳定材料的抗压回弹模量是表征路面基层材料刚度的力学指标,反映材料受压状态下抵抗竖向变形能力,采用 T0808—1994 顶面法进行测试(图 13),步骤如下:



图 13 抗压回弹模量测试

Figure 13 Compressive rebound modulus test

(1) 通过早强高强水泥净浆和细砂对待测试件的 2 个端面进行整平,以免影响测试结果,每个端面整平后放置 4 h,将整平完的试件浸水 24 h 后取出擦干表面水分。

(2) 撒少许细砂于试件表面,用加载板在试件表面手动加压同时旋转使细砂填补表面不平整处,但有多余的细砂流出,从而增加顶板与试件表面的接触面积。

(3) 将测量变形装置与试件放到 MTS 万能试验机的升降台上,安装 2 个千分表使其脚分别支在加载顶板直径线两端,与试件中心等距离分布,调整升降台高度使压头与加载板中心接触。

(4) 以拟施加的最大荷载的一半进行 2 次加卸载预压,使加载顶板与试件表面充分接触,第 2 次卸载后等待 1 min,然后将千分表调零。

(5) 拟施加的最大荷载取对应试件无侧限抗压强度的 60%,划分为 5 个荷载级位,依次为最大荷载的 1/5、2/5、3/5、4/5 和 1。施加第 1 级荷载,加载时间为 1 min,记录此时千分表的读数,加卸载之间的间隔为 15 s,卸载时间为 30 s,卸载完成后再次记录千分表读数,逐级往复如此操作,直至记录完第 5 级荷载下的回弹变形。抗压回弹模量计算公式如下:

$$E_c = \frac{ph}{l} \quad (5)$$

式中： $E_c$ 为抗压回弹模量(MPa)； $p$ 为单位压力(MPa)； $h$ 为试件高度(mm)； $l$ 为回弹变形,为加载时千分表读数减卸载时的读数(mm)。

## 3 试验工况

地聚物配合比为碱激发剂模数 1.4,碱含量 8%,前体矿渣掺量为矿渣占由矿渣、粉煤灰组成的复合前体的质量比例,地聚物掺量为复合前体与碱激发剂的质量占混合料的比例,试验工况设计如表 11 所示。

表 11 地聚物稳定再生集料试验工况

Table 11 Experimental conditions of geopolymers-stabilized recycled aggregates

工况	前体矿渣 掺量/%	地聚物掺 量/%	再生集料 掺量/%	复合改性再生 集料掺量/%
S70G5R50	70	5	50	0
S70G6R50	70	6	50	0
S70G7R50	70	7	50	0
S70G7R75	70	7	75	0
S70G7R100	70	7	100	0
S70G8R50	70	8	50	0
S70G8R75	70	8	75	0
S70G8R100	70	8	100	0
S30G7R50	30	7	50	0
S30G7R75	30	7	75	0
S30G7R100	30	7	100	0
S30G8R50	30	8	50	0
S30G8R75	30	8	75	0
S30G8R100	30	8	100	0
S30G9R100	30	9	100	0
S30G7SR100	30	7	0	100

## 4 试验结果

### 4.1 击实试验结果

前体矿渣掺量为 70%、30% 时,地聚物稳定再生

集料最大干密度与最佳含水率的结果如表 12、13 和图 14、15 所示。

**表 12 地聚合物稳定再生集料击实试验结果**  
(前体矿渣掺量 70%)

**Table 12 Compaction test results of geopolymer-stabilized recycled aggregates** (precursor slag content of 70%)

工况	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最佳含水率/%
S70G5R50	2.128	7.71
S70G6R50	2.185	7.52
S70G7R50	2.239	7.50
S70G7R75	2.155	8.75
S70G7R100	2.123	8.97
S70G8R50	2.268	7.53
S70G8R75	2.166	8.52
S70G8R100	2.126	8.89

**表 13 地聚合物稳定再生集料击实试验结果**  
(前体矿渣掺量 30%)

**Table 13 Compaction test results of geopolymer-stabilized recycled aggregate** (precursor slag content of 30%)

工况	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最佳含水率/%
S30G7R50	2.204	7.36
S30G7R75	2.142	7.63
S30G7R100	2.105	8.25
S30G8R50	2.232	7.42
S30G8R75	2.186	7.78
S30G8R100	2.139	8.88
S30G9R100	2.168	8.99
S30G7SR100	2.135	5.39

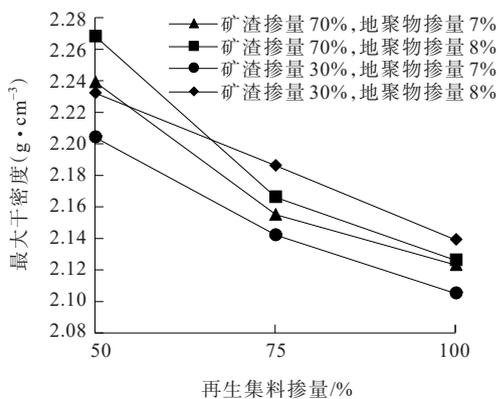


图 14 地聚合物稳定再生集料最大干密度

Figure 14 Maximum dry density of geopolymer-stabilized recycled aggregates

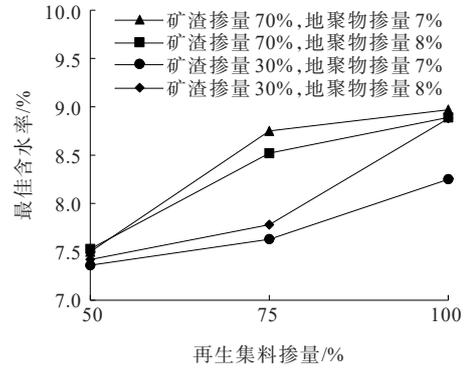


图 15 地聚合物稳定再生集料最佳含水率

Figure 15 Optimal moisture content of geopolymer-stabilized recycled aggregates

由表 12、13 和图 14、15 可知:

(1) 混合料的最大干密度随着地聚合物掺量的增加而增大,地聚合物浆体在试件成型过程中逐渐分布填充混合料间的空隙形成整体,增加了密实性,从而使混合料的最大干密度增加。当矿渣掺量为 30% 时,随着地聚合物掺量的增加,最佳含水率上升,这是由于地聚合物掺量增加,混合料整体细粒含量增加,从而吸附了更多的水分。

(2) 其他条件一定时,前体矿渣掺量由 70% 降至 30%,混合料最佳含水率大多下降,最大干密度相差不大。这是由于粉煤灰具有减水效应,增加粉煤灰用量可以减少用水量。当再生集料掺量为 75% 时,在 7%、8% 地聚合物掺量下,前体矿渣掺量由 70% 降到 30%,最佳含水率分别降低了 12.8%、8.7%。

(3) 再生集料掺量是影响混合料最大干密度与最佳含水率的主要因素,以前体矿渣掺量 70%、地聚合物掺量 8% 为例,当再生集料掺量由 50% 增加到 100% 时,混合料最大干密度由 2.268 g/cm<sup>3</sup> 降至 2.126 g/cm<sup>3</sup>,分别降低了 4.5%、6.3%,最佳含水率由 7.53% 升至 8.89%,分别增加了 13.1%、18.1%。再生集料孔隙分布多、密度较低、吸水率高,导致混合料的最佳含水率上升、最大干密度减小,使用复合改性再生集料的混合料的最佳含水率降至 5.39%,最大干密度同样有所增加。

#### 4.2 无侧限抗压强度

规范中以 7 d 龄期无侧限抗压强度作为半刚性材料施工质量控制的评价指标,不同交通等级的城镇道路基层的要求如表 14 所示,不同工况的地聚合物稳定再生集料各龄期的无侧限抗压强度结果如表

15、16 和图 16、17 所示。

表 14 城镇道路基层 7 d 无侧限抗压强度标准

Table 14 7 d unconfined compressive strength standard of urban road base layer

层位	无侧限抗压强度/MPa		
	特重交通	重、中交通	轻交通
基层	3.5~4.5	3.0~4.0	2.5~3.5
底基层	≥2.5	≥2.0	≥1.5

表 15 地聚物稳定再生集料无侧限抗压强度 (前体矿渣掺量 70%)

Table 15 Unconfined compressive strength of geopolymer-stabilized recycled aggregates (precursor slag content of 70%)

工况	无侧限抗压强度/MPa			适用层位
	7 d	14 d	28 d	
S70G5R50	1.4	—	—	—
S70G6R50	2.3	2.6	4.0	重、中交通底基层
S70G7R50	4.3	6.0	6.7	特重交通基层
S70G7R75	2.7	3.9	4.3	轻交通基层
S70G7R100	2.2	3.0	3.5	重、中交通底基层
S70G8R50	5.2	7.2	8.0	强度过高
S70G8R75	3.7	5.6	6.2	特重交通基层
S70G8R100	2.6	3.6	4.1	轻交通基层

表 16 地聚物稳定再生集料无侧限抗压强度 (前体矿渣掺量 30%)

Table 16 Unconfined compressive strength of geopolymer-stabilized recycled aggregates (precursor slag content of 30%)

工况	无侧限抗压强度/MPa			适用层位
	7 d	14 d	28 d	
S30G7R50	3.4	4.5	5.7	重、中交通基层
S30G7R75	2.4	3.2	4.0	重、中交通底基层
S30G7R100	1.9	2.5	3.1	轻交通底基层
S30G8R50	4.4	5.9	7.6	特重交通基层
S30G8R75	2.8	3.7	4.8	轻交通基层
S30G8R100	2.1	2.7	3.4	重、中交通底基层
S30G9R100	2.8	3.8	4.9	轻交通基层
S30G7SR100	2.2	3.0	3.4	重、中交通底基层

由表 15、16、图 16、17 可知：

(1) 当前体矿渣掺量为 70% 时，再生集料掺量 50%、地聚物掺量 5% 工况下的混合料 7 d 无侧限抗压强度仅为 1.4 MPa，不满足城镇道路基层最低强度要求；地聚物掺量由 6% 增至 7%、8% 时，7 d 无侧限抗压强度分别为 2.3 MPa、4.3 MPa、5.2 MPa，依次提

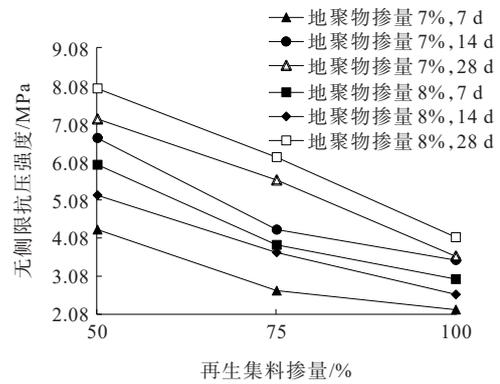


图 16 70% 前体矿渣掺量混合料无侧限抗压强度  
Figure 16 Unconfined compressive strength of 70% precursor slag mixture

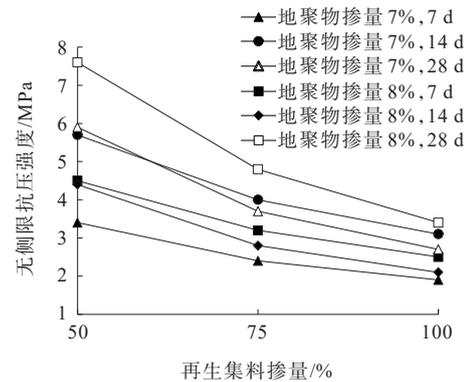


图 17 30% 前体矿渣掺量混合料无侧限抗压强度  
Figure 17 Unconfined compressive strength of 30% precursor slag mixture

高了 64.3%、207.1%、271.4%，7% 的地聚物掺量可满足城镇道路特重交通基层的要求。

(2) 随着再生集料掺量的增加，混合料的无侧限抗压强度降低，再生集料掺量由 50% 增加至 75% 时，下降更为显著。以地聚物掺量 7% 为例，7 d 无侧限抗压强度由 4.3 MPa 降至 2.2 MPa，分别下降了 37.2%、48.8%。粗集料在结构中起骨架支撑作用，而再生集料的压碎值较低，尤其是再生红砖，导致整体强度下降。

(3) 随着龄期的增长，地聚物稳定再生集料的无侧限抗压强度迅速增长，28 d 无侧限抗压强度较 7 d 无侧限抗压强度增长超过 50%，14 d 无侧限抗压强度最高接近 28 d 无侧限抗压强度的 90% 左右。

(4) 在 50% 的再生集料掺量下，前体矿渣掺量为 70% 时，地聚物稳定再生集料随着地聚物掺量的增加出现强度溢出情况，同时出于经济性的考虑，将前体矿渣掺量降至 30%。矿渣掺量的下降并没有造

成太大的强度损失,以7 d无侧限抗压强度为例,下降幅度为15.4%~20.9%。

(5) 随着再生集料掺量的增加,地聚物掺量的增加给混合料无侧限抗压强度带来的增幅减小,这是由于再生集料孔隙多、吸水率高,随着其掺量的增加,最大干密度减小,最佳含水率上升,增大了水胶比,使得地聚物强度降低,强度发展缓慢。而地聚物掺量的提升使得混合料无侧限抗压强度提升。以7 d无侧限抗压强度为例,再生集料掺量50%、75%、100%下,地聚物掺量由7%增加至8%,混合料无侧限抗压强度分别提升了29.4%、16.7%、10.5%。

(6) 混合料无侧限抗压强度随再生集料掺量以及龄期变化的发展规律与前体矿渣掺量为70%时相似,再生集料掺量由50%增加至75%时混合料无侧限抗压强度大幅下降,随着龄期的增长,混合料28 d无侧限抗压强度较7 d无侧限抗压强度最高增长超过70%。

(7) 前体矿渣掺量30%、再生集料掺量为100%时,地聚物掺量7%下混合料7 d无侧限抗压强度为1.9 MPa,只达到城镇道路轻交通底基层的要求,将再生集料进行超细水泥+含氢硅油复合改性后再使用,7 d无侧限抗压强度达到2.2 MPa,较未改性前提升了15.8%,可用于城镇道路重、中交通底基层。若不采取改性的方式,继续将地聚物掺量增加至9%,7 d无侧限抗压强度达到2.8 MPa,提升了47.4%,符合城镇道路轻交通基层的要求。从经济性和操作性出发,相较于对再生集料进行强化改性的方法,适当提高地聚物掺量为更有效的方法。

基于7 d无侧限抗压强度值,以最大化利用再生集料为原则,给出不同交通等级下城镇道路基层半刚性材料的推荐方案,如表17所示。

表17 城镇道路基层地聚合物稳定再生集料推荐方案

Table 17 Recommended scheme for geopolymer-stabilized recycled aggregates from urban road base layers

层位	交通等级	前体矿渣掺量/%	地聚物掺量/%	再生集料掺量/%
基层	特重交通	70	8	75
	重、中交通	70	8	75
	轻交通	30	9	100
底基层	特重交通	30	9	100
	重、中交通	30	8	100
	轻交通	30	7	100

### 4.3 劈裂强度

各工况不同龄期的劈裂强度结果如表18、19和图18、19所示。

表18 地聚合物稳定再生集料劈裂强度(70%前体矿渣掺量)

Table 18 Splitting strength of geopolymer-stabilized recycled aggregates (precursor slag content of 70%)

工况	劈裂强度/MPa		
	7 d	14 d	28 d
S70G6R50	0.16	0.21	0.27
S70G7R50	0.24	0.30	0.37
S70G7R75	0.20	0.28	0.31
S70G7R100	0.18	0.23	0.28
S70G8R50	0.31	0.40	0.45
S70G8R75	0.27	0.34	0.39
S70G8R100	0.24	0.29	0.35

表19 地聚合物稳定再生集料劈裂强度(30%前体矿渣掺量)

Table 19 Splitting strength of geopolymer-stabilized recycled aggregate (precursor slag content of 30%)

工况	劈裂强度/MPa		
	7 d	14 d	28 d
S30G7R50	0.21	0.28	0.34
S30G7R75	0.19	0.24	0.27
S30G7R100	0.16	0.19	0.23
S30G8R50	0.23	0.32	0.37
S30G8R75	0.20	0.25	0.31
S30G8R100	0.18	0.21	0.26
S30G9R100	0.22	0.31	0.36
S30G7SR100	0.19	0.24	0.29

由表18、19和图18、19可知:前体矿渣掺量为70%降为30%,混合料的劈裂强度下降,以7%地聚物掺量、50%再生集料掺量为例,7 d、14 d、28 d劈裂强度分别下降了12.5%、8.7%、20.0%。同样,随着再生集料掺量的增加,混合料劈裂强度降低,30%前体矿渣掺量、7%地聚物掺量下,7 d劈裂强度由0.21 MPa降至0.19 MPa、0.16 MPa,下降了9.5%、23.8%。与无侧限抗压强度发展规律一样,混合料劈裂强度随着龄期的增长而快速增长,28 d劈裂强度较7 d劈裂强度最高增长超过60%,14 d劈裂强度已经达到28 d劈裂强度的80%以上。增加地聚物掺量可提高混合料的劈裂强度,以前体矿渣掺量30%、再生集料掺量100%为例,地聚物掺量由7%增加至9%,混合料7 d劈裂强度由0.16 MPa增加至0.22 MPa,上升了

12.5%、37.5%。而采用复合改性后的再生集料,7 d劈裂强度为0.19 MPa,较未改性前提高了18.8%。

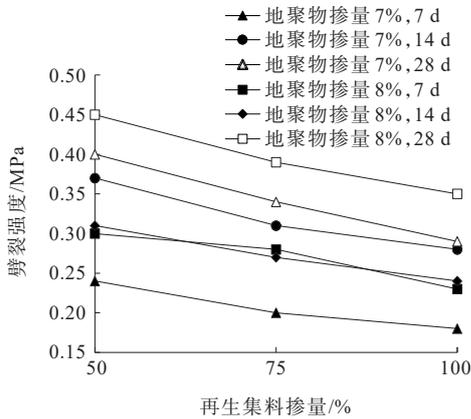


图 18 70%前体矿渣掺量混合料劈裂强度

Figure 18 Splitting strength of 70% precursor slag mixture

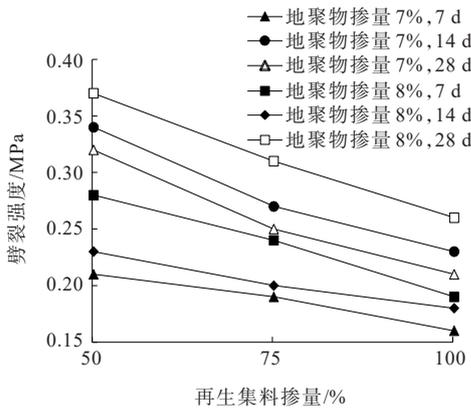


图 19 30%前体矿渣掺量混合料劈裂强度

Figure 19 Splitting strength of 30% precursor slag mixture

#### 4.4 抗压回弹模量

各工况不同龄期的抗压回弹模量结果如表 20、21 和图 20、21 所示。

表 20 地聚物稳定再生集料抗压回弹模量 (70%前体矿渣掺量)

Table 20 Compressive rebound modulus of geopolymer-stabilized recycled aggregates (precursor slag content of 70%)

工况	抗压回弹模量/MPa		
	7 d	14 d	28 d
S70G6R50	585	759	869
S70G7R50	1 241	1 519	1 590
S70G7R75	774	1 045	1 251
S70G7R100	630	784	878
S70G8R50	1 323	1 584	1 683
S70G8R75	927	1 234	1 341
S70G8R100	739	908	1 026

表 21 地聚物稳定再生集料抗压回弹模量 (30%前体矿渣掺量)

Table 21 Compressive rebound modulus of geopolymer-stabilized recycled aggregates (precursor slag content of 30%)

工况	抗压回弹模量/MPa		
	7 d	14 d	28 d
S30G7R50	966	1 162	1 513
S30G7R75	693	821	976
S30G7R100	549	621	749
S30G8R50	1 261	1 528	2 047
S30G8R75	749	903	1 112
S30G8R100	606	691	841
S30G9R100	617	766	1 074
S30G7SR100	558	654	788

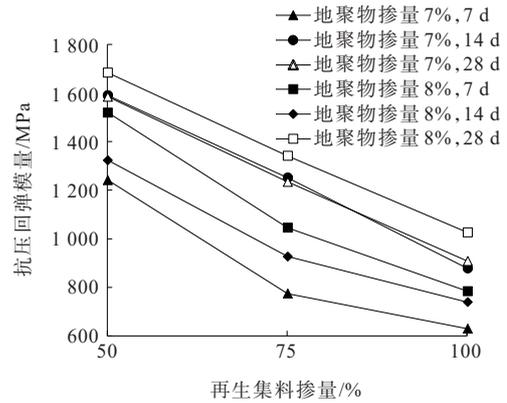


图 20 70%前体矿渣掺量混合料抗压回弹模量

Figure 20 Compressive rebound modulus of 70% slag mixture

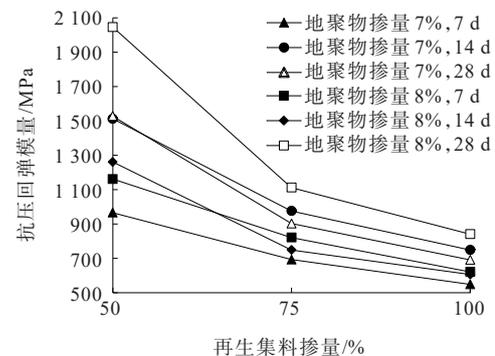


图 21 30%前体矿渣掺量混合料抗压回弹模量

Figure 21 Compressive rebound modulus of 30% slag mixture

由表 20、21、图 20、21 可知:

(1) 前体矿渣掺量由 70% 降为 30%, 以 7% 地聚物掺量、50% 再生集料掺量为例, 7 d、14 d、28 d 抗压回弹模量分别下降 22.2%、23.5%、4.8%。混合料抗压回弹模量随着龄期的增长而增长, 前体矿渣掺量

较高时,混合料的抗压回弹模量早期发展迅猛,14 d 抗压回弹模量最高可达28 d 抗压回弹模量的95.5%,而更高的粉煤灰掺量致使混合料抗压回弹模量初期增长较慢,但随着粉煤灰进一步水化参与反应,混合料抗压回弹模量后期的增长更为充足,因而14 d 龄期时30%矿渣掺量混合料的抗压回弹模量与70%矿渣掺量混合料的差距最大,而到28 d 时两者差距缩小。

(2) 混合料抗压回弹模量同样随着再生集料掺量的增加而降低、地聚物掺量的增加而增加,前体矿渣掺量30%、7%地聚物掺量下,再生集料掺量由50%增加到100%,混合料7 d 抗压回弹模量下降28.3%、43.2%,前体矿渣掺量30%、再生集料掺量100%时,地聚物掺量由7%增加至9%,混合料7 d 抗压回弹模量上升10.4%、12.4%。使用复合改性再生集料的混合料,7 d、14 d、28 d 抗压回弹模量分别上升1.6%、5.3%、5.2%。

## 5 经济效益分析

通过网上查询、电话咨询等方式调研得到各种材料的价格如表22所示。

表22 原材料价格

碎石	水泥	矿渣	粉煤灰	水玻璃	氢氧化钠	再生集料
94	470	270	220	550	2 200	40

根据规范和工程实际,将水泥稳定碎石水泥用量分为3%、4%、5%、6%4档,在不考虑运费等其他因素的情况下,每吨水泥稳定碎石的材料成本分别为: $0.03 \times 470 + 0.97 \times 94 = 105.28$ 元、 $0.04 \times 470 + 0.96 \times 94 = 109.04$ 元、 $0.05 \times 470 + 0.95 \times 94 = 112.8$ 元、 $0.06 \times 470 + 0.94 \times 94 = 116.56$ 元。

每1 t模数为3.3的水玻璃加入0.152 t 98.5%有效含量的氢氧化钠可配成模数1.4的碱激发剂,1 t模数为1.4碱激发剂的价格为 $(550 + 2\ 200 \times 0.152) / 1.152 \approx 767.71$ 元。在8%的碱含量下,每1 t矿渣-粉煤灰前体需加入0.457 t碱激发剂。前体矿渣掺量为30%、再生集料掺量为100%时,7%~9%地聚物掺量下每吨混合料成本分别为: $0.07 \times (235 + 0.457 \times 767.71) + 0.93 \times 40 \approx 78.21$ 元、 $0.08 \times (235 + 0.457 \times 767.71) + 0.92 \times 40 \approx 83.67$ 元、 $0.09 \times (235 + 0.457 \times$

$767.71) + 0.91 \times 40 \approx 89.13$ 元。70%前体矿渣掺量、75%再生集料掺量、8%地聚物掺量下每吨混合料的成本为 $0.08 \times (255 + 0.457 \times 767.71) + 0.92 \times 53.5 \approx 97.69$ 元。

相较于水泥稳定天然碎石,地聚物稳定再生集料可节约成本16.2%~25.7%。

## 6 结论与展望

本文设计了不同前体矿渣掺量、地聚物掺量、再生集料掺量的地聚物稳定再生集料配比方案,选用骨架密实型级配进行击实试验、无侧限抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量试验,分析各因素对其最大干密度、最佳含水率以及强度和刚度性能的影响,并给出了不同交通等级下城镇道路基层的适配方案,得出以下结论:

(1) 随着地聚物掺量的增加,混合料的最大干密度增加,前体矿渣掺量由70%降至30%,混合料的最大干密度、最佳含水率下降。再生集料掺量是混合料最大干密度与最佳含水率的主要影响因素,再生集料掺量由50%增加到100%,混合料的最大干密度减小、最佳含水率上升。

(2) 混合料的无侧限抗压强度随着地聚物掺量、养护龄期的增加而提高,随着再生集料掺量的增加而下降,再生集料掺量由50%增加到75%时下降明显。70%前体矿渣掺量、75%再生集料掺量、8%地聚物掺量下可满足特重、重、中交通城镇道路基层的要求,降低前体矿渣掺量至30%对强度影响不会太大,100%再生集料掺量下,地聚物掺量7%~9%的范围可满足轻交通基层以及各交通等级底基层的要求。使用复合改性再生集料的混合料7 d无侧限抗压强度提升15.8%,但受到成本制约,适当提高地聚物掺量的方式在实际中或许更为可行。

(3) 混合料劈裂强度与抗压回弹模量的变化规律与无侧限抗压强度相似,随着前体矿渣掺量、地聚物掺量、养护龄期的增加而上升,随着再生集料掺量的增加而下降。与矿渣-粉煤灰基地聚物的早强特性相对应,混合料的强度、刚度性能在28 d龄期内迅速发展,前体矿渣掺量高时早期发展更快,使用复合改性再生集料的混合料7 d劈裂强度与7 d抗压回弹模量分别上升了18.8%、1.6%。使用地聚物稳定再生集料相较于水泥稳定天然碎石可节约材料成本

16.2%~25.7%。

本文以矿渣-粉煤灰基地聚物为无机结合料,用建筑固废再生集料代替天然碎石,将城市道路基层作为目标场景,研究了不同掺量下的地聚物稳定再生集料的力学性能。研究证明地聚物稳定建筑固废再生集料有广泛的利用价值,但研究中仍存在许多不足之处需要进一步完善。因此,将未来研究工作做出如下展望:① 本文所用的矿渣和粉煤灰为传统前体材料,未来可考虑选用钢渣、赤泥、建筑固废再生微粉等其他废弃物作为前体,废碱液为碱激发剂制备地聚物研究其基本特性,扩大应用范围;② 本文进行了击实试验、无侧限抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量试验,分析各因素对其最大干密度、最佳含水率、强度和刚度性能的影响,后续可以专门针对地聚物稳定建筑固废再生集料抗冲刷性能和水稳定性进行研究。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计, 2023(3):12-29.  
National Bureau of Statistics. Statistical communique of the People's Republic of China on national economic and social development in 2022[J]. China Statistics Beijing, 2023,(3):12-29.
- [2] 张军辉,丁乐,张安顺. 建筑垃圾再生料在路基工程中的应用综述[J]. 中国公路学报, 2021,34(10):135-154.  
ZHANG Junhui, DING Le, ZHANG Anshun. Application of recycled aggregates from construction and demolition waste in subgrade engineering: A review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021,34(10):135-154.
- [3] 吴水辉,蒋晨煜,许慧,等. 级配碎石横观各向同性动态回弹模量预估研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023,20(1):16-23.  
WU Shuihui, JIANG Chenyu, XU Hui, et al. Prediction of cross-anisotropic resilient modulus for unbound aggregates [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023,20(1):16-23.
- [4] HUANG B J, WANG X Y, KUA H, et al. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 129:36-44.
- [5] KARTAM N, AL-MUTAIRI N, AL-GHUSAIN I, et al. Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait[J]. Waste Management, 2004, 24(10):1049-1059.
- [6] 杜倩卉,付伟,张军辉,等. 固体废弃物路基填筑材料的重金属污染特性研究进展[J]. 中外公路, 2024,44(3):1-18.  
DU Qianhui, FU Wei, ZHANG Junhui, et al. Pollution characteristics of heavy metals in solid waste subgrade filling materials[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(3):1-18.
- [7] SCHAFFER M L, CLAVIER K A, TOWNSEND T G, et al. Assessment of the total content and leaching behavior of blends of incinerator bottom ash and natural aggregates in view of their utilization as road base construction material [J]. Waste Management, 2019,98:92-101.
- [8] 郑甲佳,张来君,王曦辉,等. 水泥稳定建筑固废再生集料抗冻性能研究[J]. 中外公路, 2024,44(3):95-103.  
ZHENG Jiajia, ZHANG Laijun, WANG Xihui, et al. Anti-Freezing performance of cement-stabilized mixture for recycled aggregate from solid construction waste[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(3):95-103.
- [9] 李秋义,李云霞,朱崇绩. 颗粒整形对再生粗骨料性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2005,13(6):579-581,585.  
LI Qiuyi, LI Yunxia, ZHU Chongji. The influence of a particle shape correcting technique in properties of recycled coarse aggregate[J]. Materials Science and Technology, 2005,13(6):579-581,585.
- [10] DIMITRIOU G, SAVVA P, PETROU M F. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 228-235.
- [11] BRU K, TOUZÉ S, BOURGEOIS F, et al. Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste[J]. International Journal of Mineral Processing, 2014, 126: 90-98.
- [12] ISMAIL S, RAMLI M. Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications[J]. Construction and Building Materials, 2013, 44:464-476.
- [13] SARAVANAKUMAR P, ABHIRAM K, MANOJ B. Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111:611-617.
- [14] TAM V W Y, TAM C M, LE K N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking

- approaches[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007,50(1):82-101.
- [15] WANG L, WANG J L, QIAN X, et al. An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2017, 144: 432-441.
- [16] ZHANG J H, LI C, DING L, et al. Performance evaluation of strengthening recycled coarse aggregate in cement stabilized mixture base layer of pavement[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 8821048.
- [17] 孙呈凯, 金宝宏, 曹鑫铖, 等. 不同改性再生粗骨料对PVA纤维混凝土抗压及劈拉强度的影响[J]. 建筑科学, 2019, 35(9): 66-71.
- SUN Chengkai, JIN Baohong, CAO Xincheng, et al. Effect of different modified recycled coarse aggregate on compressive strength and splitting tensile strength of PVA fiber reinforced concrete[J]. Building Science, 2019, 35(9): 66-71.
- [18] ZHU Y G, KOU S C, POON C S, et al. Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 35(1): 32-38.
- [19] SPAETH V, DJERBI TEGGUER A. Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments[J]. International Journal of Sustainable Built Environment, 2013, 2(2): 143-152.
- [20] 朱亚光, 徐培蓁. 硅烷与PVA对再生混凝土粗骨料改性试验研究[J]. 混凝土, 2015(3): 93-95, 101.
- ZHU Yaguang, XU Peizhen. Experimental research on modified of recycled aggregate concrete by silane and PVA[J]. Concrete, 2015(3): 93-95, 101.
- [21] SHABAN W M, YANG J, SU H L, et al. Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry[J]. Construction and Building Materials, 2019, 216: 632-647.
- [22] BUI N K, SATOMI T, TAKAHASHI H. Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 496-507.
- [23] BUI N K, SATOMI T, TAKAHASHI H. Enhancement of recycled aggregate concrete properties by a new treatment method[J]. International Journal of GEOMATE, 2018, 14(41): 68-76.
- [24] 唐薇. 再生混凝土骨料固碳关键技术的研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2019.
- TANG Wei. Research on key technology of utilization of recycled concrete aggregate to sequester CO<sub>2</sub>[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019.
- [25] 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, 118: 103988.
- [26] FANG X L, ZHAN B J, POON C S. Enhancement of recycled aggregates and concrete by combined treatment of spraying Ca<sup>2+</sup> rich wastewater and flow-through carbonation[J]. Construction and Building Materials, 2021, 277: 122202.
- [27] TANG Q, TIAN A R, LING C, et al. Physical and mechanical properties of recycled aggregates modified by microbially induced calcium carbonate precipitation[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 382: 135409.
- [28] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司. 城镇道路路面设计规范: CJJ 169—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Shanghai Municipal Engineering Design & Research Institute (Group) Co., Ltd.. Code for design of urban pavement: CJJ 169—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [29] 交通部公路科学研究院. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- Research Institute of Highway, Ministry of Communications. Test procedure for stabilized materials for inorganic binders in highway engineering: JTG E51—2009[S]. Beijing: China Communications Press, 2009.