

引用本文:肖建庄,张航华,唐晨隽,等.低强再生混凝土及其应用[J].建筑科学与工程学报,2020,37(2):20-26.

XIAO Jian-zhuang, ZHANG Hang-hua, TANG Chen-jun, et al. Investigation on Low-strength Recycled Concrete and Its Application[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(2): 20-26.

DOI:10.19815/j.jace.2018.02009

低强再生混凝土及其应用

肖建庄,张航华,唐晨隽,陈宣宇,段珍华,张青天

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:通过梳理和分析国内外文献,结合试验论证,为建筑固废资源化提供一个新思路,即利用由废混凝土生产的再生原料(再生骨料和再生微粉)制备泡沫再生混凝土。阐述了再生骨料和再生微粉的加工工艺和复杂特性,分别介绍了再生混凝土和泡沫混凝土的力学性能及应用,并重点分析了影响泡沫混凝土性能的主要因素。充分利用再生混凝土与泡沫混凝土的自身特点,将两者进行有效结合,提出了一种低强功能化泡沫再生混凝土的制备方法,并确定了可行的配合比。最后,对这一研究方向进行了展望,提出了拦阻系统被破坏后现场实现二次、多次再生的可能性,使其具有更高的利用价值。研究结果表明:在同一种配合比下,泡沫混凝土的强度和密度远低于再生混凝土;用再生细骨料取代标准砂后,所得泡沫再生混凝土的强度和密度会进一步降低;所制备的泡沫再生混凝土符合规范《特性材料拦阻系统》(MH/T 5111—2015)中提出的耗能曲线要求,验证了将其用作机场跑道末端安全区特性材料拦阻系统的可行性。

关键词:废混凝土;再生骨料;再生微粉;泡沫再生混凝土;特性材料拦阻系统

中图分类号:TU528

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)02-0020-07

Investigation on Low-strength Recycled Concrete and Its Application

XIAO Jian-zhuang, ZHANG Hang-hua, TANG Chen-jun, CHEN Xuan-yu,
DUAN Zhen-hua, ZHANG Qing-tian

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A method of recycling construction and demolition waste was provided based on the analysis of previous investigations and experimental verifications. The recycled materials, including recycled aggregate (RA) and recycled powder (RP), could be used to produce a new kind of recycled foamed concrete. The processing technique and properties of RA and RP were introduced. Mechanical behaviors and application of recycled concrete (RC) and foamed concrete were assessed, especially the major influence factors on property of foamed concrete. Based on this, an effective combination of RC and foamed concrete was proposed. A kind of recycled foamed concrete with proposed mix proportion was produced and tested to confirm the mechanical behaviors. Finally, some further research was suggested. The possibility of recycling the engineered materials arresting system (EMAS) materials for second or even multiple times after destroyed was put forward, which made the applicability of this material more valuable. The

收稿日期:2019-06-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51661145023)

作者简介:肖建庄(1968-),男,山东沂南人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jzx@tongji.edu.cn.

results show that, with the same mixture, the strength and density of foamed concrete are much lower than those of RC. The strength and density of foamed concrete will be further reduced by totally replacing the sand with recycled fine aggregate. In addition, the recycled foamed concrete can meet the requirements of energy dissipation ability in the code *Engineered Materials Arresting System* (MH/T 5111—2015), which validates the feasibility to apply this kind of concrete in the EMAS at the runway end safety area (RESA).

Key words: waste concrete; recycled aggregate; recycled powder; recycled foamed concrete; engineered materials arresting system

0 引言

近年来,中国建筑固废排放量逐年增加,2016 年达 35.5 亿 t,约占城市垃圾的 40%,而目前中国的资源化率却不足 5%。将建筑固废加工成再生原料用于制备再生混凝土,是一种有效的资源化利用方式^[1]。然而,由于再生骨料成分与来源的复杂性,再生混凝土的力学、耐久、变形等性能差异性较大,且一般弱于天然骨料混凝土。

目前国内外针对再生混凝土的研究大多集中在如何提升再生骨料或再生混凝土的性能,而极少会考虑功能化利用再生材料本身低强的特性。同时,对于常受破坏、需多次重建且对混凝土强度要求不高的工程,研究再生混凝土的低强化再利用有极大意义。因此,开发低强功能化的再生混凝土是建筑固废资源化的一种创新举措。

利用发泡剂等制备泡沫混凝土^[2]是混凝土低强化的方式之一。通过国内外文献分析,从材料特性入手,介绍了再生混凝土和泡沫混凝土的相关性能,提出了利用建筑固废再生原料(再生骨料、再生微粉等)制备低强泡沫再生混凝土,并分析了将其应用于机场跑道安全区(RESA)特性材料拦阻系统(EMAS)中的可行性。

1 再生原料

1.1 再生骨料

再生骨料是由建(构)筑固废中废混凝土加工而成,粒径介于 75 μm 和 4.75 mm 之间的颗粒称为再

生细骨料,而粒径大于 4.75 mm 的称为再生粗骨料。相对于天然骨料,再生骨料因表面包裹有大量老砂浆,一般具有强度低、密度低、表面孔隙多、吸水率大以及与新砂浆结合能力弱等劣势^[1]。研究发现^[3],受限于原始混凝土强度、破碎方式、破碎程度等因素,不同来源再生骨料的老砂浆在质量和含量上都存在较大差别,一般只有高品质的再生骨料(低附着砂浆含量和吸水率)才可以完全替代天然骨料。

1.2 再生微粉

再生微粉是指以废烧结黏土砖为主要成分加工分选出的粒径为 0~0.08 mm、主要成分为建筑废物中强度较低的烧结黏土砖粉,并含有少量水泥石粉,适用于取代部分混凝土掺合料^[4],主要化学成分与水泥成分的对比如表 1 所示^[5]。再生微粉具有一定的胶结作用,但较水泥差,因此在无激发剂时,用其替代部分水泥会导致混凝土强度下降^[6],如图 1 所示。另外,掺再生微粉的水泥浆体一般具有较高干缩变形。

2 再生混凝土性能及低强化

2.1 再生混凝土

采用再生骨料制备的混凝土称为再生骨料混凝土,简称为再生混凝土。再生混凝土的抗压强度随着再生粗骨料取代率的增加而降低。这是由于再生骨料与新旧砂浆之间存在的黏结较为薄弱;同时,再生混凝土本身的用水量也有所增加,再者由于再生骨料孔隙率高,在承受轴向应力时,容易形成应力集中,这些都可能

导致再生混凝土的强度降低^[1]。此

表 1 再生微粉化学成分

Tab. 1 Chemical Composition of Recycled Powder

化学成分	$\omega(\text{CaO})$	$\omega(\text{SiO}_2)$	$\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\omega(\text{MgO})$	$\omega(\text{SO}_3)$	$\omega(\text{Cl})$	$\omega(\text{i. e.})$
再生微粉	41.22	38.61	7.13	3.19	1.35	1.04	0.04	7.42
P.O52.5 水泥	66.20	21.40	4.50	0.20	0.90	4.10	0.01	2.69
P.O42.5 水泥	57.46	22.92	7.35	3.09	4.07	1.52	0.18	3.41

注: $\omega(\cdot)$ 为各化学成分质量分数; $\omega(\text{i. e.})$ 为其他化学成分质量分数。

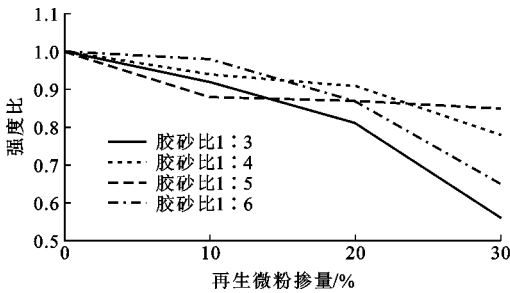


图 1 强度比与再生微粉掺量关系

Fig. 1 Relationship Between Strength Ratio and Amount of Recycled Powder

外,再生骨料的品质和制备方法对再生混凝土也有较大的影响,如果不控制再生骨料的品质,不采用专门的制备方法,再生混凝土的力学性能将会受到显著影响,而对简单破碎的再生骨料进行颗粒整形处理后,再生混凝土抗压强度能够得到提高^[7]。再生细骨料以及再生微粉在工程中始终未得到合适的利用。混凝土低强化、功能化可以利用再生细骨料混凝土、再生微粉混凝土强度较低的特点,拓宽其应用范围,使再生细骨料和再生微粉得到有效的利用。

2.2 泡沫混凝土

泡沫混凝土是指将发泡剂制备的泡沫加入到由胶凝材料、掺合料、外加剂和水等制成的料浆中,制备而成的轻质多孔混凝土^[8]具有轻质、防水能力强、隔音耐火、可泵性、冲击能量吸收性能好、成本低的优点,且可以大量利用工业废渣^[9-10]。

发泡剂为泡沫混凝土制备中起决定性作用的外加剂,它能够降低液体表面张力,在混凝土浆体中产生大量气泡。使用时需保证其质量。验证发泡剂质量的指标包括发泡倍数、沉降距以及泌水量等^[11]。从成分上,发泡剂主要分为松香树脂类、表面活性剂类、动植物蛋白类、复合类,综合考虑成本、发泡倍数以及泡沫质量,最适宜采用植物蛋白类发泡剂^[12]。不同种类发泡剂对应的发泡倍数不同,如图 2 所示。

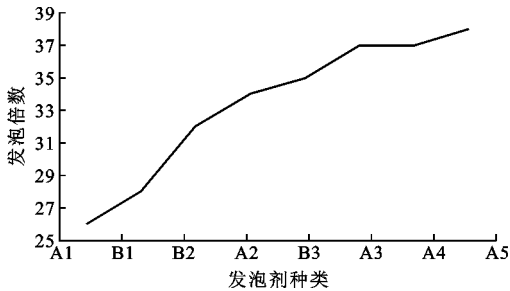


图 2 发泡剂种类与发泡倍数在不同文献中的数据比较

Fig. 2 Comparison of Foaming Agents and Expansion Ratio in Different Literatures

图 2 中,A1~A5 取自文献^[5],B1~B3 取自文献^[12],A1 表示稀释倍数为 20 的复合发泡剂,A2 表示稀释倍数为 40 的复合发泡剂,A3 表示稀释倍数为 20 的动物蛋白发泡剂,A4 表示稀释倍数为 40 的植物蛋白发泡剂,A5 表示稀释倍数为 20 的植物蛋白发泡剂,B1 表示稀释倍数为 10 的植物型发泡剂,B2 表示稀释倍数为 10 的动物型发泡剂,B3 表示稀释倍数为 10 的复合发泡剂。在成型过程中,发泡剂制得的泡沫最终成为泡沫混凝土的气孔一般要经过气-液界面、气-液-固界面、气-固界面 3 个阶段,且发泡剂的掺量越高,泡沫含量越高,泡沫混凝土的绝干密度、抗压强度随发泡剂掺量的提高而降低(图 3)^[13]。

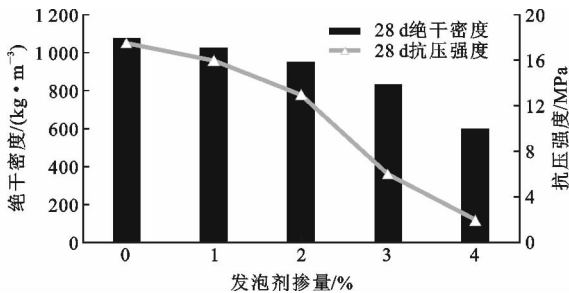


图 3 发泡剂掺量对泡沫混凝土绝干密度、抗压强度的影响
Fig. 3 Effects of Foaming Agent Content on Dry Density and Compressive Strength of Foamed Concrete

采用植物蛋白发泡剂制备低密度泡沫混凝土时,水胶比取 0.50~0.65 即可制备成型,且随着水胶比的增加,其抗压强度整体呈下降趋势,而渗水系数随水胶比增加而增大,当水胶比达到 0.65 时,已经不宜使用^[14-16]。图 4 总结了相关学者用植物蛋白发泡剂制作的泡沫混凝土水胶比和 28 d 抗压强度之间的关系。

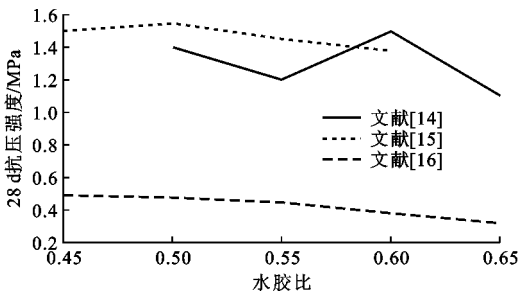


图 4 水胶比对泡沫混凝土抗压强度的影响

Fig. 4 Effect of Water-cement Ratio on Compressive Strength of Foamed Concrete

另外,为提高泡沫混凝土的稳定性和能量吸收效率,可加入稳泡剂和纤维等^[17-18],其掺量及生产工艺都会对泡沫混凝土的性能产生影响。稳泡剂是一

种能提高泡沫稳定性和延长泡沫半衰期的材料。常用的稳泡剂包括羟丙基甲基纤维素(HPMC)等,在泡沫混凝土中可改善孔隙结构的分布,同时有效提高泡沫混凝土浆体的和易性、成型体的体积安定性,对泡沫混凝土性能的稳定具有积极意义。表 2 为不同 HPMC 掺量对泡沫混凝土和易性的影响情况^[17]。纤维对泡沫混凝土的抗压强度影响不大,但可有效改善混凝土干燥收缩大、折压比低等问题,提高材料的耗能能力(图 5)^[18]。

目前泡沫的制备方式主要包括2种:一是高速搅拌发泡剂溶液制取泡沫;二是采用压缩空气发泡机制泡。相比压缩空气法,采用高速搅拌法可在节约成本的同时达到理想的效果。张巨松等^[19]采用高速搅拌法制备泡沫混凝土时,用转速 1 200 r·min⁻¹以上的高速搅拌机搅拌 3~5 min,即得到均匀、细小、稳定的泡沫。与压缩空气法相比,高速搅拌法的发泡倍数稍大,但其稳泡性能较差。李浩然等^[14]对拌合时间和速度对浆体和泡沫的混合效果以及浆体流动性的影响进行了研究,当拌合速度为 80 r·min⁻¹,拌合时间控制在 120 s 时,泡沫与浆体的包裹较为均匀。

2.3 泡沫再生混凝土

再生混凝土和泡沫混凝土都具有低强、孔隙率高等共同特点。如将二者结合,制成泡沫再生混凝土,可获得强度适宜且应用广泛的新型低强化再生混凝土。

目前,国内外对于泡沫再生混凝土的研究较少。国内制备泡沫再生混凝土的方法是将粉碎后的废料经过煅烧粉磨后脱水,作为可二次水化的再生微粉,然后用其代替水泥组分制备泡沫混凝土。丁庆军等^[20]研究表明,从废混凝土中分离出的水泥石有二次水化的能力,为废混凝土能够制备再生胶凝材料提供了依据。李元君^[5]发现当再生微粉的掺量小于 20%时,对泡沫再生混凝土的力学性能影响较小,而当掺量继续增加时,强度则会显著下降。国外仅有少量有关泡沫再生混凝土的研究,自 2004 年起, Jones 等^[21]开始对利用不同来源再生骨料制备的泡沫再生混凝土进行了一系列研究,包括干燥收缩、水渗透、硫酸盐侵蚀和热传导值等性能,进一步证明了优良的二次再生骨料可以有效地用于取代天然砂。

基于国内外研究,设计了如图 6 所示的泡沫再生混凝土制备流程,并制备出了稳定性良好的泡沫再生混凝土。

3 低强再生混凝土应用

3.1 EMAS 介绍

特性材料拦阻系统(EMAS)是一种铺设在机场跑道端安全区内的安全防范系统^[22]。系统中铺设 有吸能的拦阻材料,利用其在飞机轮胎碾压作用下的溃缩吸收飞机动能,使飞机逐渐减速并最终停止在安全区域内,避免飞机冲出跑道引发灾难性后果。

图 7 为 EMAS 工作原理示意图。图 8 为 EMAS 道

表 2 HPMC 掺量对泡沫混凝土和易性的影响
Tab.2 Effect of HPMC Content on Workability of Foamed Concrete

HPMC 掺量/%	0.00	0.02	0.05	0.08	0.10	0.15
泡沫质量	破灭严重	破灭较快	破灭减缓	破灭缓慢	破灭很慢	破灭很慢
浆体稠度	偏稀	稠度增加	稠度增加	黏稠流动	偏稠	很稠
气孔分布	很不均匀	不均匀	较均匀	均匀	较均匀	不均匀

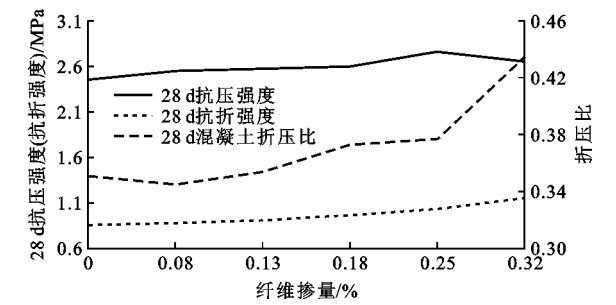


图 5 纤维掺量对泡沫混凝土 28 d 抗压、抗折强度及折压比影响
Fig.5 Effect of Fiber Content on 28 d Compressive Strength, Flexural Strength and Flexural Compression Ratio of Foamed Concrete

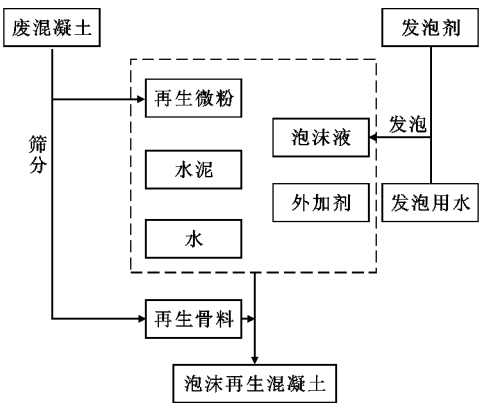


图 6 泡沫再生混凝土制备流程
Fig.6 Production Process of Foamed Recycled Concrete

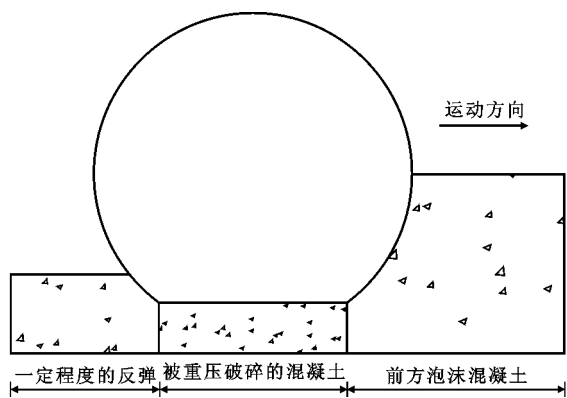


图 7 EMAS 工作原理

Fig. 7 Working Principle of EMAS



图 8 EMAS 使机轮制动

Fig. 8 EMAS Braking Wheels

面使机轮制动的现场图。

目前已经展开的 EMAS 相关研究工作包括：具

有特殊力学性能和一定耐久性的特性材料研究，以及能计算停止距离、评估安全性的仿真模型研究。根据国内相关标准^[23]和国外资料总结了 EMAS 中特性材料的性能要求，包括力学性能、抗冻融性、耐水性、耐久性、可修复性和阻燃性。

若将泡沫再生混凝土应用于 EMAS 的特性材料中，可充分发挥其低强、溃缩耗能等特性，将再生混凝土的劣势转化为优势。此外，EMAS 需具备可修复性，在破坏后，必须尽快完成维修检查工作，而泡沫再生混凝土的特点能够很好地满足这一需求，且当 EMAS 道面破坏后，理论上可利用被破坏的废混凝土为原料进行快速修复，实现重复利用，降低了 EMAS 的建造成本，有利于 EMAS 的推广和使用。

3.2 试验验证

试验原材料的选用包括：水泥为 PO42.5 水泥，再生细骨料是将废弃混凝土破碎、筛分后得到的粒径为 0.075~4.75 mm 的骨料。再生细骨料的取样及试验方法均按《混凝土和砂浆用再生细骨料》(GB/T 25176—2010)进行，再生细骨料为中砂，细度模数为 3.05，吸水率为 23.7%，表观密度为 2 390 kg·m⁻³，堆积密度为 1 352 kg·m⁻³，孔隙率为 43%，压碎指标为 24.3%；发泡剂为植物蛋白类发泡剂。试验首先对比了再生混凝土、普通泡沫混凝土和泡沫再生混凝土的性质差异，试验配合比和结果如表 3 所示。

表 3 混凝土配合比及强度

Tab. 3 Mix Proportion and Strength of Concrete

混凝土类型	各材料用量/g					水灰比	抗压强度/MPa
	水泥	再生砂	标准砂	水	发泡剂		
再生混凝土	275.0	165.0	0.0	154.0	0.0	0.6	14.35
泡沫混凝土	275.0	0.0	165.0	154.0	2.0	0.6	1.14
泡沫再生混凝土	275.0	165.0	0.0	154.0	2.0	0.6	0.76

由表 6 可知，泡沫混凝土的强度和密度远低于再生混凝土，是再生混凝土低强化的一种有效方式。用再生细骨料取代标准砂后泡沫混凝土的强度和密度都会明显降低。

通过上述分析，依照《特性材料拦阻系统》(MH/T 5111—2015)，完成了低强功能化泡沫再生混凝土的性能测试。

根据规范 MH/T 5111—2015 要求进行力学性能测试，做出泡沫再生混凝土的应力-压溃度曲线和能量吸收效率曲线，其中能量吸收效率最高时的压溃度为最大压溃度。压溃度 ϵ 和能量吸收效率 η 计算公式为

$$\epsilon = \frac{h}{H} \tag{1}$$

$$\eta(\epsilon) = \frac{1}{\sigma(\epsilon)} \int_0^\epsilon \sigma(\epsilon) d\epsilon \tag{2}$$

式中： h 为试样的压溃深度； H 为试样高度； σ 为试样的压应力。

将规范中的应力-压溃度($\sigma\epsilon$)曲线(图 9)与试验测得的应力-应变曲线(图 10)对比可以看出，曲线呈三段式，最大压溃度为 62%，大于规范要求的 60%。

依照《特性材料拦阻系统》(MH/T 5111—2015)要求进行浸水软化测试和抗冻融性能测试。经测定，在浸水软化测试中，试件半溃缩能软化系数

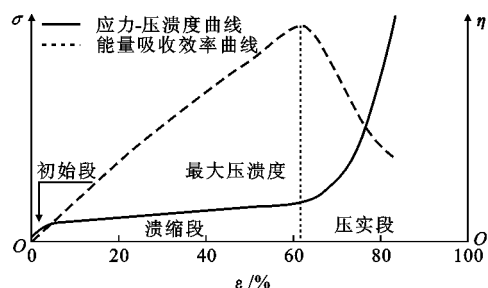


图9 理论应力-压溃度曲线及能量吸收效率曲线

Fig. 9 Theoretical Stress-rupture Ratio Curve and Energy Absorption Efficiency Curve

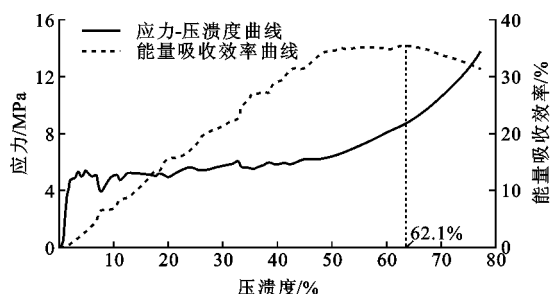


图10 试验应力-压溃度曲线及能量吸收效率曲线

Fig. 10 Experimental Stress-rupture Ratio Curve and Energy Absorption Efficiency Curve

为0.89,在0.8~1.2范围内;在抗冻融性能测试中,试件质量损失率为3.2%,不大于5%;抗冻系数为1.14,在0.8~1.2范围内,均符合规范要求。这证明了用再生微粉和再生细骨料制备泡沫再生混凝土应用于EMAS系统的特性材料中是可靠的。

4 结 语

(1)较相同配合比的普通混凝土,如果再生骨料的品质不加以控制,所制备的再生混凝土具有强度低、孔隙率高、抗腐蚀性能差等缺点。

(2)将再生原料与泡沫混凝土结合,可以得到泡沫再生混凝土。将再生混凝土低强化后用于有特殊功能需求的领域,是再生建材应用的新方向。

(3)通过试验分析得到,利用再生微粉和再生细骨料制备的泡沫再生混凝土具备强度低、易破碎、高能量吸收的特点;若将泡沫再生混凝土应用于EMAS系统中,其强度、耗能性能和其他性能(耐水、抗冻融等)均可满足相关标准要求。

(4)泡沫再生混凝土破碎后二次再生、多次再生的可行性还需要进一步研究。

参考文献:

References:

[1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京:中国建筑工程工业出版

社,2008.

XIAO Jian-zhuang. Recycled Concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2008.

[2] 张磊,杨鼎宜. 轻质泡沫混凝土的研究及应用现状[J]. 混凝土,2005(8):44-48.

ZHANG Lei, YANG Ding-yi. State of Study and Application of Lightweight Foam Concrete [J]. Concrete,2005(8):44-48.

[3] DUAN Z H, POON C S. Properties of Recycled Aggregate Concrete Made with Recycled Aggregates with Different Amounts of Old Adhered Mortars[J]. Materials and Design,2014,58(6):19-29.

[4] DB31/T 894.1-2015,再生砂粉应用技术规程[S]. DB31/T 894.1-2015, The Standard of Recycled Sand and Powder[S].

[5] 李元君. 再生微粉制备泡沫混凝土的试验研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2015.

LI Yuan-jun. Experimental Study on Preparation of Foam Concrete Making Use of Regenerated Powder [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology,2015.

[6] 陈雪,李秋义,杨向宁,等. 再生微粉的性能及应用[J]. 青岛理工大学学报,2013,34(3):17-21.

CHEN Xue, LI Qiu-yi, YANG Xiang-ning, et al. Properties and Application of Recycled Fine Powder [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2013,34(3):17-21.

[7] 李秋义,李艳美,毛高峰,等. 再生细骨料种类和取代量对混凝土强度的影响[J]. 青岛理工大学学报,2008(3):10-15.

LI Qiu-yi, LI Yan-mei, MAO Gao-feng, et al. Influence on Concrete Compressive Strength by Type and Replaced Amount of Recycled Fine Aggregate [J]. Journal of Qingdao University of Technology,2008(3):10-15.

[8] JC/T 1062—2007,泡沫混凝土砌块行业标准[S].

JC/T 1062—2007, Foamed Concrete Block[S].

[9] 蒋冬青. 泡沫混凝土应用新进展[J]. 中国水泥,2003(3):45-47.

JIANG Dong-qing. Application of New Progress of Lightweight Foam Concrete [J]. China Cement,2003(3):45-47.

[10] 陈忠平. 气泡混合轻质填土新技术[M]. 北京:人民交通出版社,2004.

CHEN Zhong-ping. New Technology of Bubble Mixed Lightweight Fill [M]. Beijing: People's Communications Press,2004.

[11] JB/T 266—2011,泡沫混凝土[S].

- JB/T 266—2011, Foamed Concrete[S].
- [12] 李文博. 泡沫混凝土发泡剂性能及其泡沫稳定改性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
LI Wen-bo. The Comparison of Foaming Agent and the Research of Foam Stability Modification [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [13] 马保国, 赵志广, 蹇守卫, 等. 泡沫混凝土干密度试验研究[J]. 混凝土, 2012(6): 1-3, 6.
MA Bao-guo, ZHAO Zhi-guang, JIAN Shou-wei, et al. Experimental Study on Dry Density of Foamed Concrete[J]. Concrete, 2012(6): 1-3, 6.
- [14] 李浩然, 耿 飞, 卓跃武, 等. 泡沫混凝土制备及泡沫稳定性研究[J]. 低温建筑技术, 2013(10): 1-3.
LI Hao-ran, GENG Fei, ZHUO Yue-wu, et al. Study of Foam Concrete Preparation and Foam Stability[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2013(10): 1-3.
- [15] 郑秀梅, 付丽艳, 刘晓丹, 等. 水胶比对泡沫混凝土性能影响试验[J]. 低温建筑技术, 2014, 36(10): 12-13, 30.
ZHENG Xiu-mei, FU Li-yan, LIU Xiao-dan, et al. Experiment on the Influence of Water-binder Ratio on the Performance of Foam Concrete[J]. Low Temperature Building Technology, 2014, 36(10): 12-13, 30.
- [16] 王 鑫. 泡沫混凝土的制备及其性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
WANG Xin. Research on Preparation and Performance of Foam Concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [17] 李 青, 李玉平, 杨 斌, 等. 掺加稳泡剂 HPMC 对泡沫混凝土性能的影响[J]. 墙材革新与建筑节能, 2008(9): 33-35, 3.
LI Qing, LI Yu-ping, YANG Bin, et al. Capability Investigation on Foam Concrete with Foam Stabilizer HPMC[J]. Wall Materials Innovation & Energy Saving In Buildings, 2008(9): 33-35, 3.
- [18] 陈 兵, 刘 隰. 纤维增强泡沫混凝土性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(3): 286-290, 340.
CHEN Bing, LIU Jie. Experimental Research on Properties of Foamed Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(3): 286-290, 340.
- [19] 张巨松, 扬 合, 曾 尤. 国内外混凝土发泡剂及发泡技术分析[J]. 低温建筑技术, 2001(4): 66-67.
ZHANG Ju-song, YANG He, ZENG You. Analysis on Domestic and Oversea Concrete Foaming Agent and Foaming Technology [J]. Low Temperature Building Technology, 2001(4): 66-67.
- [20] 丁庆军, 丁晓敬, 黄少龙, 等. 废弃泡沫混凝土制备再生泡沫板材的研究[J]. 混凝土, 2015(6): 139-143.
DING Qing-jun, DING Xiao-xin, HUANG Shao-long, et al. Research of Using Waste Foam Concrete to Produce Regenerated Foam Sheet[J]. Concrete, 2015(6): 139-143.
- [21] JONES M R, ZHENG L, YERRAMALA A, et al. Use of Recycled and Secondary Aggregates in Foamed Concretes [J]. Magazine of Concrete Research, 2012, 64(6): 513-525.
- [22] 常 虹. 新型飞机道面拦阻系统应用研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2009.
CHANG Hong. Application and Research on Engineering Material Runway Arresting System [D]. Tianjing: Civil Aviation University of China, 2009.
- [23] MH/T 5111—2015, 特性材料拦阻系统[S].
MH/T 5111—2015, Engineered Materials Arresting System[S].