

关宏洁,王群,田晶.再生混凝土的低温抗震性变化对比分析[J].地震工程学报,2019,41(2):326-331.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.326

GUAN Hongjie, WANG Qun, TIAN Jing. Comparative Analysis of the Seismic Behavior of Recycled Aggregate Concrete at Low Temperature[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2): 326-331. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.326

再生混凝土的低温抗震性变化对比分析

关宏洁¹, 王群¹, 田晶²

(1. 西安欧亚学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安市建筑设计研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 再生混凝土作为建筑材料在被使用前,需要对其低温抗震性能做出分析。但目前我国是全球新建建筑数量最多的国家,再生混凝土成本低、需求量大,建筑方根据对普通混凝土的印象,直接将再生混凝土应用到建筑工程建设中,其中存在低温抗震性能不明确的问题。针对这个问题,提出再生混凝土的低温抗震性变化对比分析,通过再生混凝土的材料配比及实验搭建设计再生混凝土低温抗震结构模型。根据其指标对其低温抗冻性能、加速度变化、损伤指标、刚度稳定性、层位移变化等几个方面进行变化对比分析。对比实验结果表明:再生混凝土当含气量在逐渐降低时,其保温效果降低,强度在降低,抗冻性也在降低,耐久性和稳定性较差,并且在地震后楼层间的位移和加速度变化较大,不能保证楼层的稳定性;位移角无法降低到最小;随着位移和负载地震力不断增加,再生混凝土逐渐产生开裂变化,刚度减小速度较快,刚度退化程度较大,低温抗震性能较差。

关键词: 再生混凝土; 位移; 刚度; 抗冻性; 抗震性

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)02-0326-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.326

Comparative Analysis of the Seismic Behavior of Recycled Aggregate Concrete at Low Temperature

GUAN Hongjie¹, WANG Qun¹, TIAN Jing²

(1. Xi'an Eurasia University, Xi'an 710065, Shaanxi, China;

2. Xi'an Institute of Architectural Design and Research Co. LTD, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: As a building material, the seismic performance of recycled aggregate concrete (RAC) at low temperature needs to be analyzed before use. At present, the cost of RAC is low, and the demand is large in China. However, seismic performance at low temperatures is uncertain if directly applying the RAC to construction engineering. In view of this problem, a comparative analysis of the seismic resistance of RAC at low temperatures was presented in this paper. The low temperature seismic structure model of RAC was designed through the material ratio of RAC and experimental construction. According to the indicators, low temperature frost resistance, acceleration change, damage index, stiffness stability, and layer displacement change were compared and analyzed. The results of the comparative experiments showed that: (1) with decreasing oxygen content, the heat conservation effect is reduced, and the strength and frost resistance of RAC

收稿日期: 2018-04-20

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(KL-SEER-ME-201203)

第一作者简介: 关宏洁(1980—),女(满族),黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,讲师,研究方向: 结构工程。

are also reduced; thus, the durability and stability of RAC are poor, and the seismic behavior is poor; (2) after an earthquake, the displacement and acceleration between the floors vary greatly, so the stability of the floor cannot be guaranteed; and (3), as the displacement and seismic load increase, the RAC gradually undergoes cracking changes. The stiffness decreases rapidly, and the degree of stiffness degradation is large, indicating the low temperature seismic performance of RAC is poor.

Keywords: recycled aggregate concrete; displacement; stiffness; frost resistance; earthquake resistance

0 引言

再生混凝土是建筑材料循环利用的产物,要在追求可持续发展的前提下,满足新建建筑工程对再生混凝土的需求。但建筑需求的不断发展对再生混凝土的耐久性和强度提出了更多要求,如要求使用生产材料很容易获得、制造成本低、使用范围广^[1-2]。再生混凝土的抗震性在土木工程中逐渐成为重点研究对象,再生混凝土的种类也逐渐增多,应用区域也越发广泛,研究再生混凝土建筑结构在一些特殊高寒区域的抗震性能测试已经迫在眉睫^[3-4],逐渐成为国内外学者们主要关注的课题之一。

在我国东北和西北寒冷地带,提升建筑抗震能力的主要办法是提高再生混凝土的抗冻性、抗拉性和抗压性。在低温的情况下,再生混凝土建筑结构的抗震性能会发生较大变化。再生混凝土低温抗拉、抗压和抗冻性能是影响再生混凝土抗震性的三大主要因素。由于对抗冻性能的限制因素比多,抗拉、抗压性能就成为最重要的抗震因素之一。再生混凝土抗拉、抗压性能能够反映抵抗地震负荷荷载的量化能力,再生混凝土抗压强度越小,抗拉强度越大,

再生混凝土抗震性就越差,所以提高再生混凝土的抗压性,降低抗拉强度对再生混凝土抗震性的增强有着重要的作用^[5-6]。本文通过实验,研究再生混凝土低温抗震性能的变化,由于实验过程繁多,论文篇幅有限,本千篇一律只阐述了实验结果,供业内人士在使用时参考。

1 再生混凝土低温抗震性能实验研究

1.1 实验原材料和仪器

1.1.1 实验原材料

本文实验采用的再生骨料由南京富源资源利用有限公司提供。据实地考察的结果可知,其公司再生骨料的原材料来自于南京城市改造产生的建筑垃圾,主要为 20 世纪 70 年代与 80 年代废旧建材。将其成分和性能与普通混凝土作对比(表 1、表 2)。

配置混凝土和再生混凝土搅拌混合物的配比及抗压能力测试如表 3 所列。

Table 1 Composition of aggregate of RAC				
再生骨料 /%	水泥砂浆 /%	原态石子 /%	粉煤灰 /%	胶质材料 /%
50	16	20	10	4

Table 2 Comparison between densities and properties of aggregate of RAC and ordinary concrete							
骨料类型 /%	吸水率 /%	压碎指标 /%	紧密密度 /(kg·m ⁻²)	表观密度 /(kg·m ⁻²)	堆积密度 /(kg·m ⁻²)	含水率/%	
						最大	最小
再生骨料	4.70	18.1	1 458	2 588	1 299	5.90	2.60
天然石子	0.68	10.7	1 590	2 601	1 411	0.89	0.37

Table 3 Tests on aggregate proportion and frost resistance capacity of RAC			
样本	再生骨料 取代率/%	骨料配比 水泥:水:砂浆:天然骨料:再生骨料	温度设置 /℃
S1	0	480:160:530:1120:0	-5~-35
S2	50	480:181:530:520:580	-5~-35
S3	100	480:200:530:0:1200	-10~-45
S4	100	480:200:530:0:1200	-10~-45

1.1.2 实验仪器

(1) 养护箱: 献县天健仪器有限公司生产的 HBY-40B 水泥再生混凝土恒温箱。

(2) 试验箱: 正航仪器设备有限公司生产的可编程恒温恒湿试验箱。

(3) 低温条件恒温箱: 创造实验的低温条件。

1.2 实验相关参数的计算

在低温下, 假设 Q_i 表示在 i 龄期时再生混凝土水泥化散发的总热量; Q_{1i} 表示在 i 龄期时, 温度降低得到的冰水混合物所增加的热量; Q_{2i} 表示在 i 龄期出现相变时, 冰水混合物所增加的热量; R_q 表示加入水泥之后的恒温箱总热容量; l_i 表示龄期是 i 个时间水泥水融化的温度; l_0 表示水泥水化原始温度; α 表示水泥在再生混凝土恒温箱的散热常数, E_{0-i} 表示 $0 \sim i$ 个小时内周围温度和水泥浆温度曲线间的面积。再生混凝土水泥化计算公式如下:

$$Q_i = R_q(l_i - l_0) + \alpha \sum E_{0-i} + Q_{1i} + Q_{2i} \quad (1)$$

依据式(1), 可以获取到水泥化绝热放热实验数据。假设 $Q_{\max}$ 表示低温下水泥水化总放热量; Q_i 表示 i 时间内低温下水泥水化放热量, 低温水化程度 μ_i 的计算公式如下:

$$\mu_i = Q_i / Q_{\max} \quad (2)$$

1.3 实验条件搭建

选用 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 立方体测试件, 由表 3 可看出实验对再生混凝土以及普通混凝土的温度设置, 分别在 $-5 \sim -35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10 \sim -45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可以满足再生混凝土低温抗震性能对比变化实验的条件。

2 低温抗震性能测试与分析

2.1 抗冻性的影响

将恒温低温箱的低温按照上述实验条件设置, 检验再生混凝土结构模型低温抗冻性和普通混凝土结构模型低温抗冻性(图 1 和图 2)。

分析图 1 和图 2 可知, 再生混凝土和普通混凝土在低温情况下, 其抗冻性与含气量和强度有关。观察图 1, 当温度处于 $-5 \sim -35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间时, 在龄期每个阶段的养护下, 当含气量在 30% 时, 再生混凝土的强度在增加, 抗冻性也在增强。随着含气量的逐渐降低, 保温效果也在降低, 再生混凝土的强度也跟着降低, 抗冻性也在降低, 耐久性和稳定性较差; 由图 2 可知, 当温度处于 $-5 \sim -35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间时, 在龄期每个阶段的养护下, 含气量一直保持在 10% ~

40% 之间的情况下, 普通混凝土随着含气量和龄期的逐渐增加, 普通混凝土强度也在逐渐增加, 抗冻性也在逐渐增强, 保温效果较好, 耐久性和稳定性较高。由此可以说明再生混凝土的抗冻性与普通混凝土相比, 其低温抗冻性较差、耐久性相对较低, 低温抗震性也不够稳定。

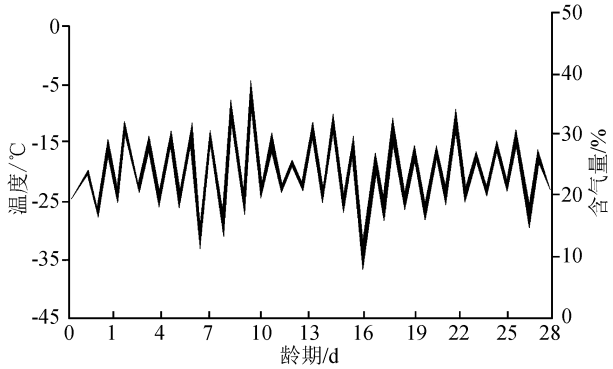


图 1 再生混凝土结构模型低温抗冻性
Fig.1 Frost resistance of the structure model of RAC in low temperature environment

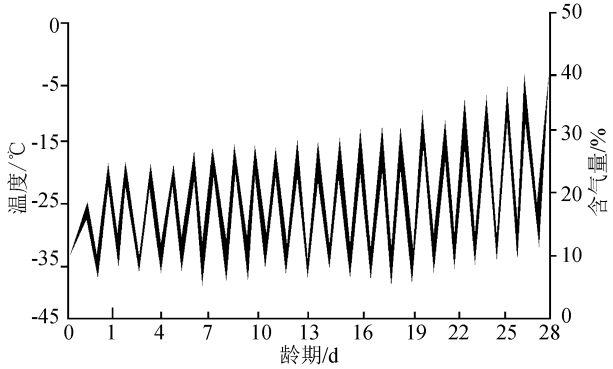


图 2 普通混凝土结构模型低温抗冻性
Fig.2 Frost resistance of the structure model of common concrete in low temperature environment

2.2 损伤指标分析

在低温条件下对立方体的抗压强度进行测试。按照表 3 中骨料的配比, 将普通混凝土和再生混凝土搅拌震动 24 小时成型后拆开模型, 分别放入 CA-BR-OABS 湿温度养护箱中养护 3 d、7 d、18 d 之后, 完全满足湿温度要求, 测定每个试件中 3 d、7 d、18 d 的抗压强度, 将获取的测试结果列于表 4。

从表 4 中可看出, 再生混凝土与普通混凝土的坍塌落度差距不是很大, 且能够达到流动性要求^[7-8]。即使普通混凝土在不同抗压强度下的抗压性能都要低于再生混凝土, 但也还是能够满足实验条件。

表 4 再生混凝土和普通混凝土抗压性能对比

种类	再生混凝土密度 /(kg·m ⁻³)	坍塌落度/ mm	抗压强度/MPa		
			3 d	7 d	28 d
普通混凝土	1 824	185	25.6	40.2	53.4
再生混凝土	2 346	198	35.0	56.2	64.4

依据上述实验可知,在低温条件下,每层间的位移距离会随着楼层的增高而增加,楼层的损伤程度也不断增加^[9-10],对再生混凝土的抗震性有一定的影响。

假设 x 表示再生混凝土结构层可满足质量参数和精度的有效模型阶数; y 表示层数; s_t 表示再生混凝土结构的第 t 个楼层在再生混凝土结构框架模型优化次数; b 地震中再生混凝土结构损伤指标的计算公式如下:

$$K_t = \frac{S_t}{b_x^y + b_x^{y+1} + \cdots + b_x^x} \tag{3}$$

通过式(3),构建混凝土框架和再生混凝土框架两种结构的建筑模型,在低温条件下进行模型损伤情况的对比,对比结果如图 3 所示。

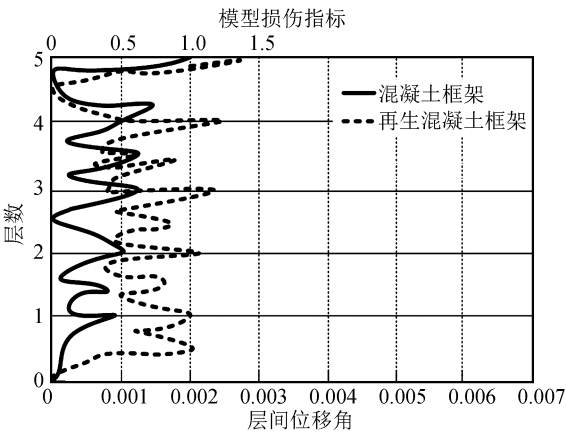


图 3 地震下两种混凝土结构层损伤指标
Fig.3 Damage indexes of structural layers of two kinds of concretes under earthquake

从图 3 中可看出,低温条件地震作用下,随着楼层的增高,层间位移角逐渐增加,再生混凝土结构建筑模型在一层时,层间位移角为 0.002,损伤程度是 1;在 3 层时,层间位移角为 0.002 4 左右,损伤程度是 1.2 左右;普通混凝土结构建筑模型在一层时,层间位移角为 0.9,损伤程度是 0.000 9;在 3 层时,层间位移角为 0.001 1 左右,损伤程度是 1.2 左右。由此可以说明当发生地震时,每层间的位移距离会随着楼层的增高而增加,楼层的损伤程度也不断增加。通过对损伤指标的计算,得到楼层的损伤程度。由于再生混凝土的位移角无法降低到最小,因此楼层

的损伤高于普通混凝土,抗震性能相对较差。

2.3 再生混凝土低温刚度退化

图 4 和图 5 分别分析了再生混凝土结构模型和普通混凝土结构模型。在低温震动前后的位移滞回曲线对比图。依据实验对比能够得到以下分析结果:

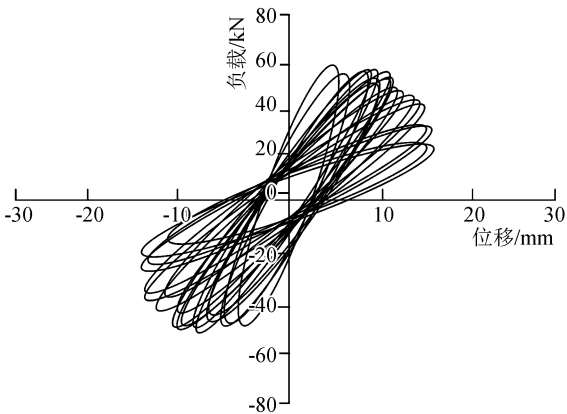


图 4 再生混凝土结构的荷载-位移滞回曲线变化
Fig.4 Load-displacement hysteretic curves of RAC structure

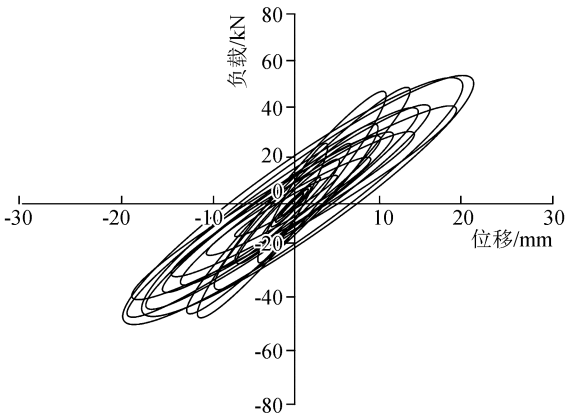


图 5 混凝土结构的荷载-位移滞回曲线变化
Fig.5 Load-displacement hysteretic curves of common concrete structure

(1) 从图 4 中位移滞回曲线变化结果看出,再生混凝土结构模型在低温条件下,加载初期处于属于弹性阶段,再生混凝土结构模型在抵抗地震力时,负载力和位移呈现出线性状态,负载形态逐渐变大,

刚度退化比较明显。随着位移和承载力不断增加,再生混凝土逐渐开裂,再生混凝土刚度减小较快,说明再生混凝土结构模型的刚度退化程度较大^[11-12]。

(2) 从图 5 中位移滞回曲线变化结果看出,普通混凝土结构模型在低温条件下,在加载初期也属于弹性阶段,当普通混凝土结构模型在抵抗地震力时,承载力和位移呈现出线性状态,负载形态逐渐变小,刚度退化不够明显,随着位移和承载力不断增加,普通混凝土逐渐有开裂迹象,但刚度减小速度较慢,说明普通混凝土结构模型的刚度退化程度较小。

(3) 再生混凝土和普通混凝土都有捏缩现象发生,这是由于剪切变形斜裂缝张引起的,导致滑移较大,从两图中可以看出,再生混凝土在地震时出现捏缩现象发生,是由于剪切变形斜裂缝张引起的,导致滑移较大,捏缩现象越突出,峰值负载之后,位移滞回曲线也相对不够稳定,刚度退化的程度相对较快^[13]。

2.4 层位移和加速度对再生混凝土低温抗震性的影响

为了探究再生混凝土低温抗震性,运用某地区地震记录 teu053 波,对上述配制比建筑结构的两种混凝土建筑的抗震性进行比较与分析,这两种结构建筑模型是在-35℃地震范围内的框架结构,分析其建筑模型的 2、4 和 6 层的层位移与加速度的抗震性能(表 5)。

表 5 低温下两种混凝土的位移和加速度对比

Table 5 Comparison of displacement and acceleration of two concretes at low temperature

种类	楼层	层位移/mm	加速度/gal
混凝土结构框架	2	7.2	201
	4	12.6	315
	6	14.6	386
再生混凝土结构框架	2	9.1	248
	4	13.8	354
	6	16.8	407

从表 5 中能够看出,在-35℃的温度下,由于地震记录 teu053 波的影响,普通混凝土结构框架模型在地震的加速度和层位移上与再生混凝土结构框架模型相比明显较低。鉴于楼层间位移越小,楼层建筑的抗震性越强,说明普通混凝土的低温抗震性很大程都上要好于再生混凝土的抗震性^[14-15]。

通过以上实验对再生混凝土的低温抗震性能变化进行对比分析后得出:

(1) 再生混凝土与含气量和强度具有相关性。当温度处于-5~-35℃之间时,在龄期每个阶段

的养护下,当含气量在 30%时,再生混凝土的强度增加,抗冻性也在增强。当含气量在逐渐降低时,保温效果降低,再生混凝土的强度在降低,抗冻性也在降低,耐久性和稳定性较差,抗震效果相对较差。

(2) 再生混凝土在低温情况下由于地震的影响,楼层间的位移和加速度会发生变化。通过实验对比,再生混凝土的层间位移和加速度大于普通混凝土,楼层的稳定性相对较低,再生混凝土抗震性相对较差。

(3) 当发生地震时,每层间的位移距离会随着楼层的增高而增加,楼层的损伤程度也不断增加。通过对损伤指标的计算,得到楼层的损伤程度。由于再生混凝土的位移角无法降低到最小,因此楼层的损伤高于普通混凝土,抗震性能相对较差。

(4) 再生混凝土在地震时会有捏缩现象发生,这是由于剪切变形斜裂缝张引起的,导致滑移较大,捏缩现象突出,峰值负载之后,位移滞回曲线也相对不够稳定,刚度退化的程度相对较快。

(5) 在再生混凝土属于弹性阶段时,承载力和位移呈现出非线性状态。虽然负载形态逐渐变小,但刚度退化明显。随着位移和承载力不断增加,再生混凝土逐渐有开裂迹象,相对于普通混凝土来说刚度减小速度快,说明再生混凝土的刚度退化程度相对较大。

3 结论

随着自然条件的不断变化,地震逐渐成为最严重的自然灾害之一,人们对再生混凝土建筑结构的要 求也越来越高。而且我国地震多发地区较多,抗震防护的地区分布较广,研究再生混凝土结构的抗震性能是否适于抗震建筑的建造上已经迫在眉睫。通过分析层位移和加速度对再生混凝土低温抗震性的影响、损伤指标对再生混凝土低温抗震性的影响、刚度退化对再生混凝土低温抗震性的影响、抗冻性对再生混凝土低温抗震性的影响,可知再生混凝土的低温抗震性能与普通混凝土相比较来说相对较差,不适于将其代替普通混凝土用于抗震要求较高的建筑建设中。

参考文献(References)

[1] 陈吉光,刘玲.再生混凝土框架结构抗震性能研究进展[J].山西建筑,2017,43(20):36-37.
CHEN Jiguang, LIU Ling. On Research Progress of Seismic Performance of Recycled Concrete Framework[J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(20): 36-37.

- [2] 李伯维,张耀庭.基于 Pushover 的多层钢筋混凝土框架结构设计 with 抗震性能分析[J].建筑技术,2016,47(5):392-395.
LI Bowei, ZHANG Yaoting. Design and Seismic Performance Analysis of Multi Story Reinforced Concrete Frame Structure Based on Pushover Analysis [J]. Architecture Technology, 2016, 47(5): 392-395.
- [3] 李兵,孟爽,嵇凤颖.不同取代率方钢管再生混凝土柱抗震性能的研究[J].广西大学学报(自然科学版),2017,42(1):78-85.
LI Bing, MENG Shuang, JI Fengying. Finite Element Analysis of Seismic Performance of Recycled Concrete Filled Square Steel Tubular Columns [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition) 2017, 42(1): 78-85.
- [4] 郑山锁,张艺欣,黄鹰歌,等.酸雨钢筋混凝土框架梁抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(9):20-27.
ZHENG Shansuo, ZHANG Yixin, Huang Yingge, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Reinforced Concrete Frame Beams in Acid Rain Environment [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(9): 20-27.
- [5] 龚玉云,李文芳.T 形钢管再生混凝土柱抗震性能的有限元非线性分析[J].长江大学学报自然科学版(理工(上旬)),2016(6):62-67.
GONG Yuyun, LI Wenfang. Nonlinear Finite Element Analysis on Seismic Performance of T-Shaped Recycled Aggregate Concrete Filled Steel Tube Columns [J]. Journal of Yangtze University, 2016(6): 62-67.
- [6] 郑睿,于虹, ZHENG Rui, 等.钢筋混凝土建筑结构的抗震性能分析与实验[J].华侨大学学报(自然科学版),2017,38(1):45-48.
ZHENG Rui, YU Hong, ZHENG Rui, et al. Seismic Performance Analysis and Experimental Study of Reinforced Concrete Building Structure [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2017, 38(1): 45-48.
- [7] 郭靳时,钱小龙.低温状态下混凝土短柱抗震性能试验研究[J].低温建筑技术,2016,38(1):45-47.
GUO Jinshi, Qian Xiaolong. Experimental Study on Seismic Behavior of Concrete Short Columns at Low Temperature [J]. Cryogenic Architecture Technology, 2016, 38(1): 45-47.
- [8] 董岚.再生混凝土节能住宅结构墙体抗震性能研究[J].建筑技术开发,2017,44(11):3-5.
DONG Lan. Study on Seismic Performance of Recycled Concrete Energy Saving Residential Structures [J]. Building Technique Development, 2017, 44(11): 3-5.
- [9] 余细东,任志刚,付应兵,等.钢框架-混凝土核心筒结构的抗震性能分析[J].武汉理工大学学报,2016,38(9):77-84.
YU Xidong, REN Zhigang, FU Yingbing, et al. Seismic Performance Analysis of Steel Frame-concrete Core Tube Structure [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(9): 77-84.
- [10] 蒋友宝,吴林华,陈治茂.配有 RPC 预制管混凝土组合柱的 RC 框架抗震性能分析[J].材料导报,2017,31(23):90-95.
JIANG Youbao, WU Linhua, CHEN Zhimao. Seismic Performance Analysis of RC Frames with RPC Precast Concrete Columns [J]. 材料研究, 2017, 31(23): 90-95.
- [11] 郭宏超,孙立建,刘云贺,等.内填再生混凝土墙的柔性钢框架结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(7):103-112.
GUO Hongchao, SUN Lijian, LIU Yunhe, et al. Experimental Research on Seismic Behavior of Flexible Steel Frame with Infilling Recycled Concrete Wall [J]. Journal of Building Structures 2017, 38(7): 103-112.
- [12] 李科,马霄航.采用泡沫混凝土填充墙的钢框架结构抗震性能分析[J].工程与建设,2016,30(2):196-197.
LI Ke, MA Xiaohang. Seismic Performance Analysis of Steel Frame Structure with Foamed Concrete Filled Wall [J]. Engineering and Construction, 2016, 30(2): 196-197.
- [13] 贺烽,李小卫,俞岳灿,等.水泥和混凝土在超低温的性能变化及其应用要求[J].水泥工程,2017,30(4):26-28.
He Feng, LI Xiaowei, YU Yuecan, et al. Performance Changes of Cement and concrete in Ultra-low Temperature Environment and Its Application Requirements [J]. Cement Engineering, 2017, 30(4): 26-28.
- [14] 杨涛,王社良,刘伟.性能增强再生混凝土框架中节点抗震性能试验[J].湖南大学学报(自科版),2016,43(11):68-77.
YANG Tao, WANG Sheliang, LIU Wei. Experimental Study on Seismic Behavior of Interior Joints in Enhancements Recycled Aggregate Concrete Frame [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(11): 68-77.
- [15] 邵建力,曹新明,常亚,等.钢筋区域约束混凝土与角钢区域约束混凝土的抗震性能分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2016,33(2):112-116,128.
SHAO Jianli, CAO Xinming, CHANG Ya, et al. Research on the Seismic Performance of Angle-Steel Regional Confined Concrete and Bar Regional Confined Concrete [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2016, 33(2): 112-116, 128.