

建筑垃圾再生骨料在海绵城市储水结构体中的应用

马学通¹, 高德彬¹, 严耿升², 王 宝³

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: [目的] 研究建筑垃圾骨料对环境的影响, 为建筑垃圾再生骨料用于“海绵城市”储水结构体等提供依据。[方法] 通过室内大型压缩固结试验, 对建筑垃圾再生骨料在不同配比、不同含水率的颗粒破碎、压缩变形及储水率变化进行了研究, 并通过浸出毒性试验对建筑垃圾骨料对环境的影响进行了研究。[结果] 再生骨料在压缩过程中具有破碎趋势, 且废砖骨料破碎程度大于废混凝土骨料; 随着废砖骨料比例的增加, 颗粒破碎程度越大, 压缩变形也愈大; 骨料含水率对颗粒破碎影响机制不尽相同, 当含水率从 3% 增加到 12% 时, 颗粒破碎率从 121.73% 上升至 132.64%, 而含水率从 12% 上升至 15% 时, 颗粒破碎率从 132.64% 下降至 127.6%, 在“最优含水率”(11.56%) 附近取得极大值, 且含水率通过影响颗粒破碎来影响再生骨料的压缩变形, 颗粒破碎变化趋势与重型击实试验曲线具有一致性。可通过“最优含水率”指导储水结构体含水率的控制, 减少颗粒破碎, 提高结构体储水能力和承载能力。不同地区的建筑垃圾骨料对环境的影响不同, 在应用中应避免已污染建筑垃圾的再利用。[结论] 建筑垃圾再生骨料可用于海绵城市储水结构体的建设, 但需对建筑垃圾的来源进行区分, 确保材料对环境无污染。

关键词: 建筑垃圾; 再生骨料; 压缩试验; 颗粒破碎; 海绵城市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)01-0206-06

中图分类号: TU528, TU992

文献参数: 马学通, 高德彬, 严耿升, 等. 建筑垃圾再生骨料在海绵城市储水结构体中的应用[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 206-211. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2021. 01. 029; Ma Xuotong, Gao Debin, Yan Gengsheng, et al. Application of recycled construction waste aggregate in sponge city water storage structure [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 206-211.

Application of Recycled Construction Waste Aggregate in Sponge City Water Storage Structure

Ma Xuotong¹, Gao Debin¹, Yan Gengsheng², Wang Bao³

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Northwest Survey Design and Research Institute Co., Ltd. of China Power Construction Corporation, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 3. Department of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055)

Abstract: [Objective] The impact of construction waste aggregate on the environment was studied to provide a basis for the application of reclaimed aggregate of construction waste in the water storage structure of sponge cities. [Methods] The particle fragmentation, compression deformation, and water storage rate change of the building waste recycled aggregate at different ratios and different moisture contents were studied through an indoor large-scale compression solidification test, and the environmental impact of the construction waste materials was studied using a leaching toxicity test. [Results] The recycled aggregate had a crushing trend in the compression process, and the degree of crushing of waste brick recycled aggregate was

收稿日期: 2020-08-06

修回日期: 2020-10-18

资助项目: 国家自然科学基金项目“非饱和黄土中水分迁移规律的研究”(41372329); 西北勘测设计研究院科技研发项目“建筑垃圾作为储水“海绵体”的体系结构及技术应用研究”(XBY2017-KJ-15); 中国铁路总公司科技研发项目“建筑垃圾填料分类及筑填技术研究”(J14-09B)

第一作者: 马学通(1997—), 男(汉族), 陕西省咸阳市人, 博士研究生, 研究方向为地质工程。Email: 2725587643@qq.com。

通讯作者: 高德彬(1974—), 男(汉族), 陕西省渭南人, 博士, 副教授, 主要从事地质工程与安全工程方面的教学科研工作。Email: dcdgx32@chd.edu.cn。

greater than that of waste concrete recycled aggregate. When the moisture content increased from 3% to 12%, the particle crushing rate increased from 121.73% to 132.64%. When the moisture content increased from 12% to 15%, the particle crushing rate decreased from 132.64% to 127.6%, reaching the maximum value near the optimal moisture content (11.56%). The water content affected the compression deformation of the recycled aggregate by affecting particle breakage. The change trend of particle breakage was consistent with the curve of the heavy compaction test. The optimal moisture content can be used to guide the water content control of the water storage structure, reduce particle breakage, and improve the water storage capacity and carrying capacity of the structure. The aggregate of construction waste in different areas had different impacts on the environment, so the reuse of the polluted construction waste should be avoided in the application. [Conclusion] The recycled aggregate of construction waste can be used for the construction of water storage structures in sponge cities. However, it is necessary to distinguish the sources of construction waste to ensure that the materials are free of pollution to the environment.

Keywords: construction waste; recycled aggregate; compression test; particle fragmentation; sponge city

城市雨洪问题是制约中国城市建设的核心问题之一,因地表不透水铺装,雨水下渗通道减少,导致地表径流增加,进而加重了城市排水系统的负荷^[1]。海绵城市遵循低影响开发(LID)原则,在城市建设中得到广泛应用,有效的缓解了城市雨洪问题^[2]。另一方面,中国建筑垃圾年产量达 2.00×10^9 t,再生利用率仅 8%,对环境造成了严重影响^[3]。传统海绵城市储水结构体采用天然碎石材料进行铺设,将建筑垃圾再生骨料用于“海绵城市”储水结构体的建设中,可以有效的减少天然材料的使用,同时为建筑垃圾再生利用提供新的途径,具有良好的社会经济价值。杨丽琼等^[4]通过化学成分分析指出建筑垃圾渗滤液对人体和环境无不良影响。郭士民^[5],乔明晨^[6]研究表明,红砖对重金属吸附效果良好,对有机物也有一定的吸附作用。乔明晨^[6]、李岩凌等^[7]研究表明再生骨料可更有效的降低环境温度,出水 pH 值与天然骨料相差不大。上述研究均表明建筑垃圾可有效的吸收雨水径流中的重金属及有机物,不会对环境造成二次影响,证明了建筑垃圾在海绵城市中应用的环境可行性。胡明玉等^[8]、谢若奇等^[9]研究表明,建筑垃圾再生骨料具有较好的透水性,可用于海绵城市上部透水结构砌块的生产。苏胜奇等^[10]、李岩凌等^[7]、李显等^[11]研究表明,建筑垃圾再生骨料蓄水能力可达到天然骨料的 2 倍以上。朱希等^[12]研究表明,建筑垃

圾渗井可有效提高场地渗透性能,提高土体的入渗效率。但对于建筑垃圾颗粒破碎研究较少。值得指出的是,建筑垃圾再生骨料的力学性能与天然骨料有一定的差距^[13],受压后容易产生破碎^[14],可能影响其结构稳定性及储水性能。

基于此,本文通过室内大型压缩试验,对建筑垃圾再生骨料在不同配比及含水率下颗粒破碎与沉降变形关系进行探讨分析,对比其压缩前后的储水性能,并通过浸出毒性试验研究了建筑垃圾骨料对环境的影响,以期建筑垃圾再生骨料用于“海绵城市”储水结构体等提供依据。

1 试验设计

1.1 试样配备

压缩试验建筑垃圾材料取自西安市某大型建筑垃圾消纳场,主要成分为废混凝土及废砖块,取样时间为 2019 年 3 月 15 日。选取粒径 4.75~37.5 mm 再生粗骨料,根据最大密实度原理,采用 Fuller-Talbol 公式^[15]〔式(1)〕设计再生骨料级配(见表 1)。

$$P_x = 100 \times \left(\frac{d_x}{D_{\max}} \right)^n \quad (1)$$

式中: P_x 为通过某一粒径的百分比(%); D_{\max} 为最大粒径(mm); d_x 为各粒级骨料粒径(mm); n 为指数,本次试验 n 取 0.5。

表 1 试验骨料连续开级配设计

粒径 d /mm	37.5	31.5	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75
过筛率/%	100	80.62	63.25	50.00	25.00	12.55	6.32	0

1.2 试验设计

1.2.1 大型压缩试验 根据表 1 骨料粒径级配,制备了 6 种不同配比及 5 种不同含水率试样,用以研究

不同含水率及配合比再生骨料压缩性能及压缩前后储水率变化情况(表 2)。试验时间为 2019 年 4 月 5 日至 2019 年 4 月 7 日。

表 2 再生骨料基本物理参数

方案	材料配比 (砖:混凝土)	干密度 ρ_d / ($g \cdot cm^{-3}$)	含水率 w / %	最优含水率/ %
A ₁	10:0	0.887	8	—
A ₂	8:2	0.941	8	—
A ₃	6:4	1.025	8	—
A ₄	4:6	1.091	8	—
A ₅	2:8	1.139	8	—
A ₆	0:10	1.220	8	—
B ₁	5:5	1.058	3	11.56*
B ₂	5:5	1.058	6	11.56*
B ₃	5:5	1.058	9	11.56*
B ₄	5:5	1.058	12	11.56*
B ₅	5:5	1.058	15	11.56*

注: * 最优含水率通过重型击实试验获取。

试验压力设备选用 WAW-1000 D 型微机控制电液伺服万能试验机,压缩设备选用自制的直径 500 mm,高度 250 mm 的大型压缩仪。沉降变形由试验机行程控制系统测量,精度 0.01 mm。

配制试验所需试样,分 5 层装入试验圆筒内,为防止骨料受力不均,在装入后,先施加一定的预压力,使试样表面尽可能平整。加载等级依次为 250,500, ..., 1 500 kPa,每级加载按照 5,10,15,30, ..., 30 min 的时间间隔记录百分表读数,当两次读数差值小于 0.05 mm,视作沉降稳定,进行下一级加载。试验结束后将试样烘干筛分,并称得各粒径质量。

1.2.2 颗粒破碎分析 颗粒破碎是指材料在荷载作用下破碎成更小的颗粒^[16],会引起颗粒级配重组,对材料力学性质等会产生一定影响^[17]。Bg 是试验前后用试样粒组百分含量差的绝对值之和描述颗粒破碎情况〔式(2)〕。

$$B_g = \sum_1^n |P_{i0} - P_{i1}| \quad (2)$$

式中: B_g 为破碎率(%); n 为总粒级数; i 为级数; P_{i0} 为压缩前该粒级比例(%); P_{i1} 为压缩后该粒级比例(%).

1.2.3 骨料储水率试验 依照压缩试验前后颗粒级配及含水率设计级配骨料,进行储水试验,试验采用模型长×宽×高=1 m×1 m×1 m,依照“海绵城市”结构进行构建,分为 4 层,最下层填充 60 cm 厚建筑垃圾再生骨料(粗骨料层),其上部为 15 cm 的砂层(细骨料层)及耕植土层,模型中部埋设一 $\Phi 100 \times 1200$ 的抽排水管,水管壁下部约 100 mm 内等距设置排水孔,使水通过管道直接流入建筑垃圾再生骨料层。试验时间为 2019 年 6 月 14 日至 2019 年 7 月 13 日。

1.2.4 潜在环境风险分析 建筑垃圾骨料用作海绵体时受水体作用可能存在一定的环境风险,基于此,本文对采自不同地区的建筑垃圾骨料进行浸出毒性研究,选用 1~2 mm 直径建筑垃圾骨料,按照《固体废物浸出毒性浸出方法硫酸硝酸法》(HJ/T299-2007)中相关要求,使用 pH 值为 3.0,5.0,7.0 的硫酸和硝酸混合液对建筑垃圾进行浸提,判断建筑垃圾是否属于危险废物;并将浸提剂的 pH 值恒定在 3.0,5.0,7.0,持续浸提,研究极端条件下建筑垃圾中污染物浸出情况。浸出毒性试验所选用试样取样时间为 2019 年 6 月 5 日,试验时间为 2019 年 6 月 8 日。

2 结果与分析

2.1 骨料力学性能分析

2.1.1 含水率对骨料力学性能的影响

(1) 含水率对颗粒破碎影响分析。图 1 为不同含水率下骨料颗粒破碎率变化曲线。从图 1 中可以看出,破碎率随着含水率的增大呈现先增大后减小的变化趋势,当含水率从 3% 增加到 12% 时,颗粒破碎率从 121.73% 上升至 132.64%,而含水率从 12% 上升至 15% 时,颗粒破碎率从 132.64% 下降至 127.6%,在“最优含水率”附近取得极大值。这是由于含水率较低时,水主要存在于颗粒内部,对颗粒起软化作用,导致颗粒破碎率随着含水率的上升而增大。当含水率超过最优含水率时,水主要起到润滑作用,此时颗粒破碎率随着含水率的上升而减小。

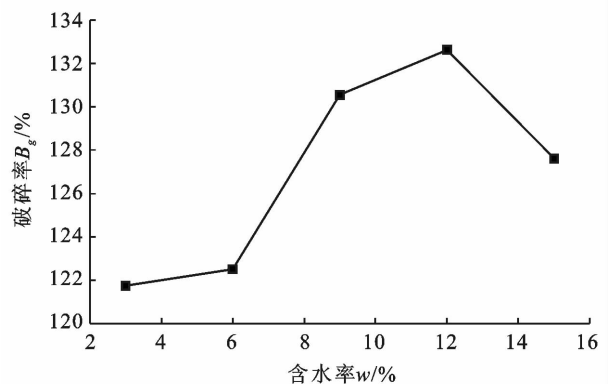


图 1 含水率与颗粒破碎指标变化特征

(2) 含水率对压缩沉降影响分析。图 2 为不同压力下含水率与沉降量关系曲线。由图 2 可以看出,在荷载一定的条件下,随着含水率的增大,骨料压缩沉降量也呈先增大后减小的趋势,且其同样在最优含水率处取得峰值。当荷载达到 1 500 kPa 时,最大沉降不足 40 mm,且单位荷载增量引起的压缩沉降量无

明显变化,说明建筑垃圾再生骨料结构体受压后虽然产生严重的破碎现象,但结构体依然稳定。对不同压力下含水率与沉降量进行拟合,得到如式(3)所示的公式,从公式(3)可以看出,在压力不变的情况下,含水率与沉降量呈抛物线关系,其拟合曲线随着压力的增加,各项系数也不断增加,沉降量取最大值时,含水率取值范围为 10.75%~11.24%,均值为 11.05%。接近于建筑垃圾的“最优含水率”(11.56%)。因此,可以认为含水率对压缩沉降的影响与对颗粒破碎的影响趋势相同,含水率通过影响颗粒破碎来影响材料的压缩沉降。

$$s = \begin{cases} -0.02883w^2 + 0.64337w + 6.40461 & (P=250 \text{ kPa}, R^2=0.987) \\ -0.05585w^2 + 1.25313w + 11.50134 & (P=500 \text{ kPa}, R^2=0.967) \\ -0.07312w^2 + 1.57242w + 16.44399 & (P=750 \text{ kPa}, R^2=0.980) \\ -0.07421w^2 + 1.63983w + 21.74533 & (P=1000 \text{ kPa}, R^2=0.986) \\ -0.08942w^2 + 1.94219w + 25.32466 & (P=1250 \text{ kPa}, R^2=0.964) \\ -0.08709w^2 + 1.95806w + 29.1 & (P=1500 \text{ kPa}, R^2=0.979) \end{cases} \quad (3)$$

2.1.2 配比对骨料力学性能的影响

(1) 配比对颗粒破碎影响分析。图 3 为相同荷载下不同配比与颗粒破碎指标关系曲线。由图 3 可知,随着废砖再生骨料比例的增大,颗粒破碎率逐渐增大,当废砖骨料由 0% 增加至 100% 时,其颗粒破碎率由 82.5% 增大至 157.2%。

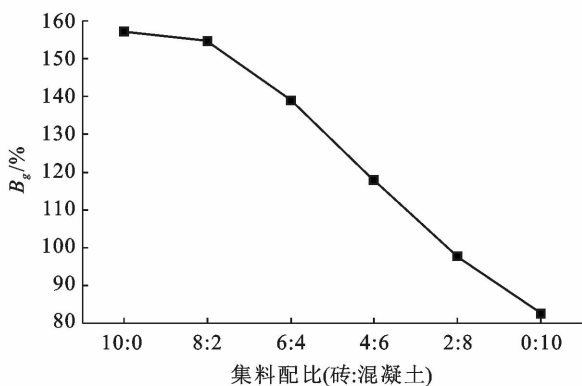


图 3 不同配比—颗粒破碎指标曲线

(2) 配比对压缩沉降影响分析。图 4 为不同压力下,砖骨料比例与压缩沉降量关系曲线。由图 4 可知,砖骨料比例与压缩沉降量近似呈线性关系,在荷载一定的条件下,随着砖骨料比例的增大,压缩沉降不断增大,当废砖骨料由 0% 增至 100% 时,其最大沉降量由 37.32 mm 增大至 47.13 mm。这是由于砖骨料强度较低,比混凝土骨料容易破碎导致的。

2.2 压缩前后骨料储水率试验分析

由图 5 可以看出压缩前后储水率随着砖骨料比

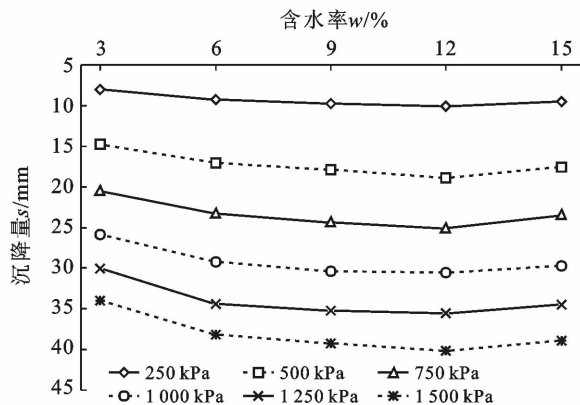


图 2 不同压力下含水率与沉降量(w-s)曲线

例的减少而减少,这是由于砖骨料吸水率大于混凝土骨料所导致的,骨料自身吸水亦被计入了储水率中,导致储水率随着砖骨料的减少而减少;同时,由于压缩导致骨料中细粒料含量增大,有效储水体积减少,进而导致了压缩后骨料的储水率有不同程度的下降。由图 6 可以看出,不同含水率的骨料在压缩前其储水率基本一致,但压缩后在“最优含水率”附近的骨料储水率下降较为明显,这与骨料的破碎率呈现出良好的相关关系,说明了储水率的下降主要是由于骨料破碎导致的,使骨料含水率远离最优含水率可以有效的降低储水率的变化率。

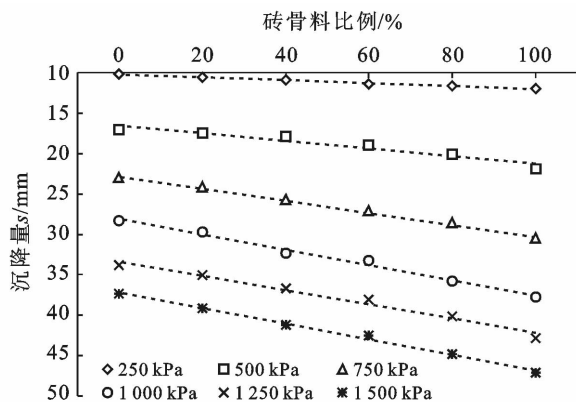


图 4 不同压力下砖骨料比例与沉降量关系曲线

因此,在工程建设过程中,需要考虑储水结构体上部荷载对结构体材料级配的影响,以消除后期由于结构体受荷作用骨料发生压缩破碎导致的储水率的下降。

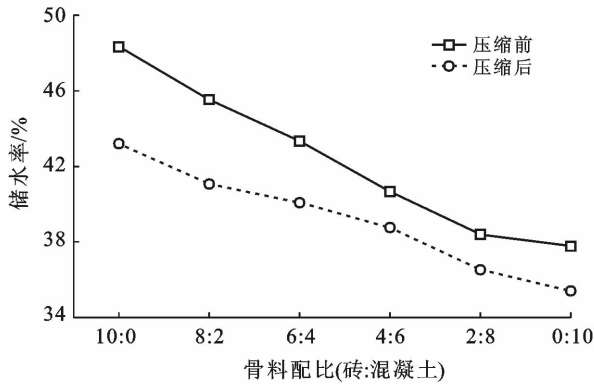


图 5 不同配比骨料压缩前后储水率

2.3 建筑垃圾骨料浸出毒性试验分析

由表 3 可以看出,在不同地区所取建筑垃圾骨料中 Cu, Pb, Cd 未检出, Cr 浓极低,且不同采样地点建筑垃圾骨料浸出毒性差别不大,根据浸出毒性判断,其不属于危险废物。由表 4 可以看出,强化浸提后星火路陇海铁路处的建筑垃圾骨料中 Cr 浸出浓度有所提高,根据《地下水环境质量标准》(GB/T 14 848-2017)

相关标准,其所在区域地下水可划分为Ⅳ类水体,其他采样点均为Ⅲ类水体,这是由于陇海铁路运送煤炭对铁路周边造成了一定的污染导致的。因此,采用建筑垃圾再生骨料作为“海绵城市”储水结构体应考虑建筑垃圾取样位置,避免采用受污染区域的建筑垃圾骨料,可以确保建筑垃圾骨料不会对环境造成负面影响,这与杨丽琼^[4]的研究结论相同。

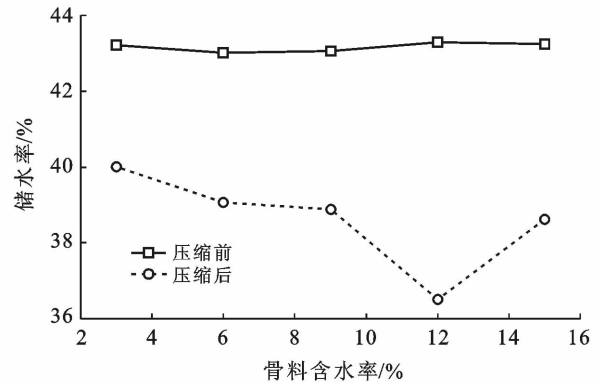


图 6 不同含水率骨料压缩前后储水率

表 3 不同地区建筑垃圾骨料标准浸提试验结果

取样位置	类型	温度/(°C)	Cu/(mg·L ⁻¹)			Pb/(mg·L ⁻¹)			Cd/(mg·L ⁻¹)			Cr/(mg·L ⁻¹)		
			3.0	5.0	7.0	3.0	5.0	7.0	3.0	5.0	7.0	3.0	5.0	7.0
西安市 自来水 小区	砖	25	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.04	0.02	0.04
		40	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.03	0.03	0.03
	混凝土	25	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.01	nd	0.01
		40	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.01	0.01	0.04
等驾坡	砖	25	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.05	0.04	0.04
		40	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.02	0.03	nd
	混凝土	25	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.02	0.01	0.04
		40	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.01	0.03	0.01
星火路 陇海铁路	砖	25	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.01	0.05	0.06
		40	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.04	0.06	0.04
	混凝土	25	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.01	0.01	0.02
		40	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.02	0.01	0.03

注:nd 为未检出。下同。

表 4 不同地区建筑垃圾骨料强化浸提试验结果

取样位置	类型	温度/(°C)	Cu/(mg·L ⁻¹)			Pb/(mg·L ⁻¹)			Cd/(mg·L ⁻¹)			Cr/(mg·L ⁻¹)		
			3.0	5.0	7.0	3.0	5.0	7.0	3.0	5.0	7.0	3.0	5.0	7.0
西安市 自来水 小区	砖	25	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.02	0.01	nd
		40	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.06	0.04	nd
	混凝土	25	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.03	nd	nd
		40	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.02	0.05	nd
等驾坡	砖	25	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.04	0.04	nd
		40	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.05	0.01	nd
	混凝土	25	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.02	nd	nd
		40	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.06	0.04	nd
星火路 陇海铁路	砖	25	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.07	nd	0.07
		40	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.16	0.14	0.11
	混凝土	25	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.34	nd	0.13
		40	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.24	0.22	nd

3 结论

(1) 建筑垃圾不同对比对骨料颗粒破碎影响较大,随着废砖骨料比例增加,颗粒破碎程度明显增加,同时其沉降变形也随之增大。即当废砖骨料由0%增加至100%时,其颗粒破碎率由82.5%增大至157.2%;最大沉降量由37.32 mm增大至47.13 mm。

(2) 不同含水率条件下,建筑垃圾再生骨料的破碎机制不同,在一定范围内,颗粒破碎随着含水率的增加而增大;当超过一定范围后,颗粒破碎随含水率的增加而减弱,再生骨料的含水率对骨料压缩变形及颗粒破碎的影响具有一致性,即颗粒破碎是造成再生骨料压缩沉降的主要原因。

(3) 再生骨料储水率的变化主要是由于骨料破碎导致的,通过减少上部荷载或避开其最优含水率可以有效的减少骨料破碎,进而降低骨料储水率的变化率。

(4) 重型击实试验虽不适合用于建筑垃圾骨料最优含水率的确定,但可通过重型击实试验所确定的“最优含水率”来指导储水结构体含水率的控制,使结构体含水率远离“最优含水率”,从而减少骨料破碎,增强结构体的储水能力。

(5) 建筑垃圾浸出毒性试验表明,不同地区的建筑垃圾可能对环境产生不同的影响,在工程应用中应避免污染地区建筑垃圾骨料的再利用,选择无污染的建筑垃圾骨料则可以确保其对环境无不良影响。

[参 考 文 献]

[1] 张镇玺,徐国策,黄绵松,等. 固原市低影响开发措施下土壤水分时空变化[J]. 水土保持通报,2020,40(2):162-169.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部组织编制. 海绵城市建设技术指南:低影响开发雨水系统构建(试行)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2015:4-7.

[3] 王宁. 建筑垃圾全过程精准管控模式及实际工程应用示

范研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.

[4] Yang Liqiong, Wang Jianlong, Zhang Xiaoran, et al. Adsorption characteristics of Pb from urban stormwater runoff by construction wastes [J]. Journal of Southeast University, 2014,30(2):212-219.

[5] 郭士民. 建筑垃圾用于雨水渗透设施的控污效能与机制研究[D]. 北京:北京建筑大学,2019.

[6] 乔明晨. 建筑废砖对径流雨水中污染物的控污效能研究[D]. 北京:北京建筑大学,2018.

[7] 李岩凌,李烁,周少剑,等. 建筑垃圾再生骨料在海绵城市建设中的应用研究[J]. 新型建筑材料,2019,46(10):170-173.

[8] 胡明玉,陈露璐,徐旺敏,等. 废弃烧结砖制备植被型渗蓄生态材料[J]. 科学技术与工程,2019,19(9):193-199.

[9] 谢若奇,吴旷怀,蔡旭,等. 建筑废弃物透水混凝土基层材料透水及力学性能研究[J]. 混凝土,2017(12):173-175.

[10] 苏胜奇,卢家成,李嘉鹏,等. 再生细骨料对蓄水层渗蓄性能的影响[J]. 材料导报,2019,33(S2):226-228.

[11] 李显,张悦,陈家珑,等. 海绵城市建设中再生骨料蓄水层蓄水能力的研究[J]. 中国给水排水,2016,32(3):86-88.

[12] 朱希,李顺群,冯彦芳,等. 建筑垃圾雨水渗井在海绵城市中的应用[J]. 广西大学学报(自然科学版),2017,42(4):1415-1421.

[13] 范炜,陈峰. 再生骨料的基本物理力学性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(2):121-123.

[14] 李哲,韩保刚. 路用建筑垃圾击实特征试验分析[J]. 交通节能与环保,2014,10(6):65-71.

[15] 刘建伟. 城市主干道级配碎石材料组成分析与应用研究[D]. 湖南长沙:长沙理工大学,2010.

[16] 秦月,孟庆山,汪稔,等. 土体颗粒破碎度量方法及其进展[C]//中国地质学会工程地质专业委员会. 第九届全国工程地质大会论文集. 北京:中国地质学会工程地质专业委员会:工程地质学报编辑部,2012:146-151.

[17] 毛炎炎,雷学文,孟庆山,等. 考虑颗粒破碎的钙质砂压缩特性试验研究[J]. 人民长江,2017,48(9):75-78,102.