

文章编号:1007-9629(2021)01-0071-06

轴压重复荷载作用后再生混凝土毛细吸水性能

鲍玖文^{1,2}, 李树国¹, 张 鹏¹, 刘兆麟¹, 赵铁军¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 研究了应力水平(0、0.3、0.5、0.7)和再生粗骨料取代率(0%、30%、50%、100%)对再生混凝土毛细吸水性能的影响规律;基于毛细吸水的非饱和流体理论和试验结果,引入 Boltzmann 变量并采用水力扩散系数的指数形式,建立了考虑应力水平和再生粗骨料取代率影响的再生混凝土内部相对含水量分布预测模型.结果表明:随着再生粗骨料取代率和应力水平的增加,再生混凝土的毛细吸水质量和吸水率呈增加趋势;当应力水平一定时,水分侵入深度随着再生粗骨料取代率的增加而变大.

关键词: 再生混凝土; 重复荷载; 取代率; 毛细吸水; 水分分布

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.010

Capillary Water Absorption of Recycled Aggregate Concrete after Repeated Axial Compressive Loading

BAO Jiuwen^{1,2}, LI Shuguo¹, ZHANG Peng¹, LIU Zhaolin¹, ZHAO Tiejun¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The influences of stress level(0, 0.3, 0.5, 0.7) and replacement ratio(0%, 30%, 50%, 100%) of recycled aggregate on capillary water absorption of recycled aggregate concrete was studied. Based on the unsaturated flow theory and the obtained experimental results, the predicted model of water distribution within concrete considering the influence of stress level and recycled aggregate replacement ratio is established using the Boltzmann variable and the exponential-law of hydraulic diffusivity. The results indicate that capillary water absorption mass and sorptivity for recycled aggregate concrete show an increasing trend with the increase of recycled aggregate replacement ratio and stress level. Under a given stress level, the depth of water penetration into concrete increases with increasing recycled aggregate replacement ratio of recycled aggregates.

Key words: recycled aggregate concrete; repeated loading; replacement ratio; capillary water absorption; water distribution

为解决建筑垃圾资源化问题及天然骨料资源紧张局面,利用废弃混凝土制备再生骨料是实现建筑、资源、环境可持续发展的必然选择,符合国家建筑垃

圾资源化与环保型绿色建筑材料可持续发展战略^[1].然而,与天然骨料相比,再生骨料棱角多,且外表面附着部分旧砂浆,造成其压碎指标高、吸水率

收稿日期:2019-08-18; 修订日期:2019-10-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51922052,51778309,51908307);山东省自然科学基金资助项目(ZR2018JL018);山东省“双一流”建设工程-土木;大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放课题基金资助项目(LP1902)

第一作者:鲍玖文(1989—),男,黑龙江佳木斯人,青岛理工大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:baojiuwen@qut.edu.cn

通讯作者:张 鹏(1981—),男,山东潍坊人,青岛理工大学教授,博士生导师,博士. E-mail:peng.zhang@qut.edu.cn

大、表观密度低等特点,凝结硬化后混凝土内部形成的多重界面结构复杂、疏松且孔隙率大^[2-3];由于自身缺陷及外部荷载与环境因素双重作用,容易引起微裂缝起裂、扩展或相互连通,加速了水分及有害介质的侵入,使得再生混凝土(RAC)的耐久性问题尤为突出^[4].因此,开展荷载与环境作用下再生混凝土耐久性研究,对深入理解和完善再生混凝土耐久性基础理论及工程应用具有重要意义.

关于再生混凝土介质传输性能的研究,目前主要集中于抗氯离子渗透性能方面,研究表明:再生混凝土抗氯离子侵蚀性能不及普通混凝土,且随再生粗骨料取代率的增加其抗氯离子侵蚀性能变差^[5-7].由于再生粗骨料自身初始缺陷及微裂缝的影响,许多学者也开展了荷载损伤及裂缝对再生混凝土抗氯离子侵蚀性能机理影响的试验和数值研究,例如:Qi等^[8]研究了干湿循环与弯曲荷载耦合作用下再生混凝土的抗氯离子侵蚀性能.欧阳璋等^[9]开展了轴压重复荷载作用后不同再生粗骨料取代率混凝土的抗氯离子侵蚀性能试验研究,结果表明:再生混凝土氯离子扩散系数随应力水平和再生粗骨料取代率的增加而增大.Wang等^[10]研究了持压荷载作用对再生混凝土氯离子扩散系数的影响规律,发现随着应力水平的增加,氯离子扩散系数呈现先降低后增加的趋势,且再生混凝土对荷载敏感程度要高于普通混凝土.Wu等^[11]基于蒙特卡洛数值模拟方法分析了微裂缝数量、长度、方向以及旧砂浆-原始骨料界面等因素对再生混凝土氯离子扩散系数的影响,建立了微裂缝随机分布与氯离子扩散系数之间的关系.

针对再生混凝土耐久性的研究已广泛开展,且研究表明再生混凝土的内部膨胀、开裂甚至表面剥落,均与水分在内部孔隙及微裂缝中的传输密不可分;水又是侵蚀性介质迁移、扩散进入混凝土内部的载体^[12].然而,对荷载-环境耦合作用下再生混凝土水分迁移的研究较少,关于其荷载损伤对水分传输性能的影响规律和作用机理的认识还不够全面.因此,本文开展轴压重复荷载作用后不同再生粗骨料取代率(0%、30%、50%、100%)的再生混凝土毛细吸水性能试验,分析应力水平和再生粗骨料取代率对水分传输的影响规律;基于毛细吸水的非饱和和流体理论,建立了再生混凝土水分传输模型,并结合试验结果对再生混凝土内部相对含水量分布进行了预测.

1 试验

1.1 原材料及试件制作

采用山水集团 P·O 42.5R 普通硅酸盐水泥(C)和矿粉(GBFS)作为胶凝材料;采用最大粒径为 5 mm 的标准河砂(S)为细骨料;选用 5~20 mm 连续级配的花岗岩碎石为天然粗骨料(NCA);利用原强度等级为 C40~C50 的实验室废弃混凝土试块,经颚式破碎机破碎 2~3 次制备再生粗骨料(RCA);采用普通自来水(W)和聚羧酸高效减水剂(SP).依据 GB/T 25177—2010《混凝土用再生粗骨料》以及 GB/T 14685—2011《建筑用卵石、碎石》规范中要求,天然粗骨料和破碎后的再生粗骨料颗粒级配均符合规范上下限值要求(见图 1).对天然粗骨料和再生粗骨料的物理指标进行测试,结果如表 1 所示.混凝土配合比如表 2 所示,其中附加用水量(AW)是再生粗骨料吸水至饱和面干状态所需水分,用以补偿再生粗骨料(RCA)高吸水性造成的水分损失^[13],有效水灰比¹⁾为 0.39.采用二次搅拌法(TSMA)^[14]制备 4 种再生粗骨料取代率(R)分别为 0%、30%、50%、100%的立方体试件,试件边长为 100 mm,编号分别为 R0、R30、R50、R100;室温养护 1 d 后拆模,并在(20±2)℃,相对湿度 RH≥95%的养护室中养护至 28 d,测试其 28 d 立方体抗压强度 f_c ,结果也列于表 2.

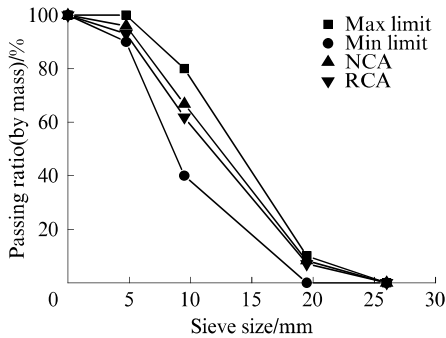


图 1 粗骨料颗粒级配
Fig. 1 Particle gradation of coarse aggregate

表 1 粗骨料物理指标
Table 1 Physical index of coarse aggregate

Coarse aggregate	Crushing index (by mass) / %	Water absorption ratio (by mass) / %	Apparent density / (g · cm ⁻³)	Moisture content (by mass) / %
NCA	11.2	1.7	2 650	0.4
RCA	15.0	6.1	2 642	3.2

1)文中涉及的水灰比、取代率等均为质量比或质量分数.

表 2 混凝土配合比及立方体抗压强度
Table 2 Mix proportion and cubic compressive strength of concrete

Specimen	Mix proportion/(kg · m ⁻³)								f_c /MPa
	C	GBFS	S	NCA	RCA	SP	W	AW	
R0	210	90	780	1 170	0	3.6	117	0	45.9
R30	210	90	780	819	351	3.6	117	11	38.2
R50	210	90	780	585	585	3.6	117	17	36.0
R100	210	90	780	0	1 170	3.6	117	34	35.2

1.2 加载制度

为了分析不同应力水平(λ_c)对再生混凝土水分传输性能的影响,考虑混凝土材料的应力破坏规律,本文设计了 0、0.3、0.5 和 0.7 这 4 种应力水平,对应的加载应力分别为 0、0.3 f_c 、0.5 f_c 、0.7 f_c ,其中 $\lambda_c=0$ 为未加载试件(对照组).采用万能试验机进行轴压重复加载,其加载制度如图 2 所示.为保证荷载作用下再生混凝土内部孔隙与微裂纹充分发展及相互连通,当施加荷载达到预期的应力水平时,持载 10 min 后再卸载,并重复加载 5 次,加卸载速率保持为 5 kN/s.

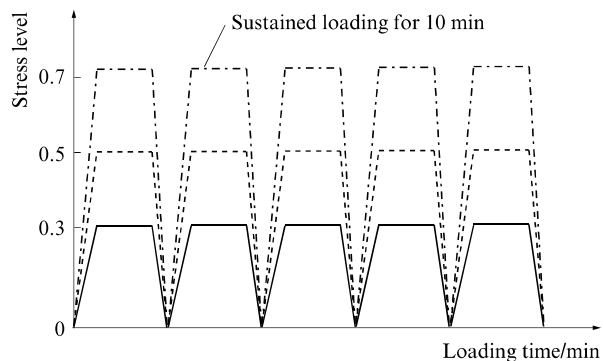


图 2 试验加载制度示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test loading mechanisms

1.3 毛细吸水测试

采用传统的测重法开展再生混凝土毛细吸水试验.根据 ASTM C1585-04《Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concrete》进行处理,保证试件吸水前处于完全干燥状态,在 105 °C 的环境下烘干至恒重,将试件 4 个侧面用环氧树脂密封以保证水分的一维传输,利用试件底面与水源接触.利用精度为 0.01 g 的电子天平记录试件吸水前的质量,吸水开始后每隔一定时间记录 1 次吸水质量,吸水时间为 8 d,最后可计算再生混凝土的毛细吸水质量 Δm .同时,利用真空饱水法测定再生混凝土的孔隙率 p ,结果如表 3 所示.

表 3 再生混凝土孔隙率
Table 3 Porosity of recycled aggregate concrete

Specimen	R0	R30	R50	R100
$p/\%$	11.3	13.3	14.1	15.2

2 结果与分析

2.1 毛细吸水质量

图 3 为再生混凝土毛细吸水质量(Δm)随时间(t)平方根的变化曲线.从图 3 可以看出,再生混凝土毛细吸水质量均随着应力水平的提高而逐渐增加,尤其是在经受 0.7 f_c 的轴压重复荷载作用后,毛细吸水质量增加较为明显.这是由于再生混凝土在轴压重复荷载作用后,会导致其界面过渡区出现更多的微裂缝,应力水平及重复荷载循环次数的增加会降低孔隙曲折度,使再生混凝土内部出现更多通道,加快了水分的侵入.由图 3 还可见,随着再生粗骨料取代率的增加,在相同的应力水平下再生混凝土的毛细吸水质量逐渐增加.当应力水平 $\lambda_c=0.7$ 时,试件 R0、R30、R50、R100 的 8 d 毛细吸水质量分别为 34.70、47.50、58.43、77.90 g,试件 R100 的 8 d 毛细吸水质量是试件 R0 的 2.24 倍.分析原因:一方面,再生粗骨料残余砂浆的存在造成再生混凝土内部界面结构复杂,出现更多的薄弱区域,在轴压重复荷载作用后,更易出现微裂缝与孔隙;另一方面,原始混凝土在服役过程及骨料破碎过程中所积累的微裂缝与缺陷导致再生粗骨料吸水率增加,随着再生粗骨料取代率的增加,其高吸水性能使得再生粗骨料与新水泥砂浆形成的界面较为薄弱,存在较多的孔隙与微裂缝,经轴压重复荷载作用后,这些孔隙与微裂缝形成连通的网络,加快了水分传输速率.

从图 3 还可发现,轴压重复荷载作用后再生混凝土毛细吸水质量曲线仍呈现双线性增长的趋势,即初期吸水速率较大,后期曲线逐渐趋于平缓.这是由于初期外部水分主要靠毛细吸力进入混凝土内部,初期混凝土内部含水率较低,导致毛细吸力较大,使吸水速率增长较快,随着吸水过程不断进行,混凝土含水率逐渐增大,其毛细吸力也逐渐降低;同时由于重力因素的影响,造成后期毛细吸水质量曲线较为平缓.

2.2 吸水率

通常采用吸水率 S 来表征多孔建筑材料的毛细吸水速率,考虑到与水接触瞬间表层孔隙瞬间被水填充^[12,15],混凝土在 t 时刻的一维累计吸水量 i (mm) 可用下式表示.

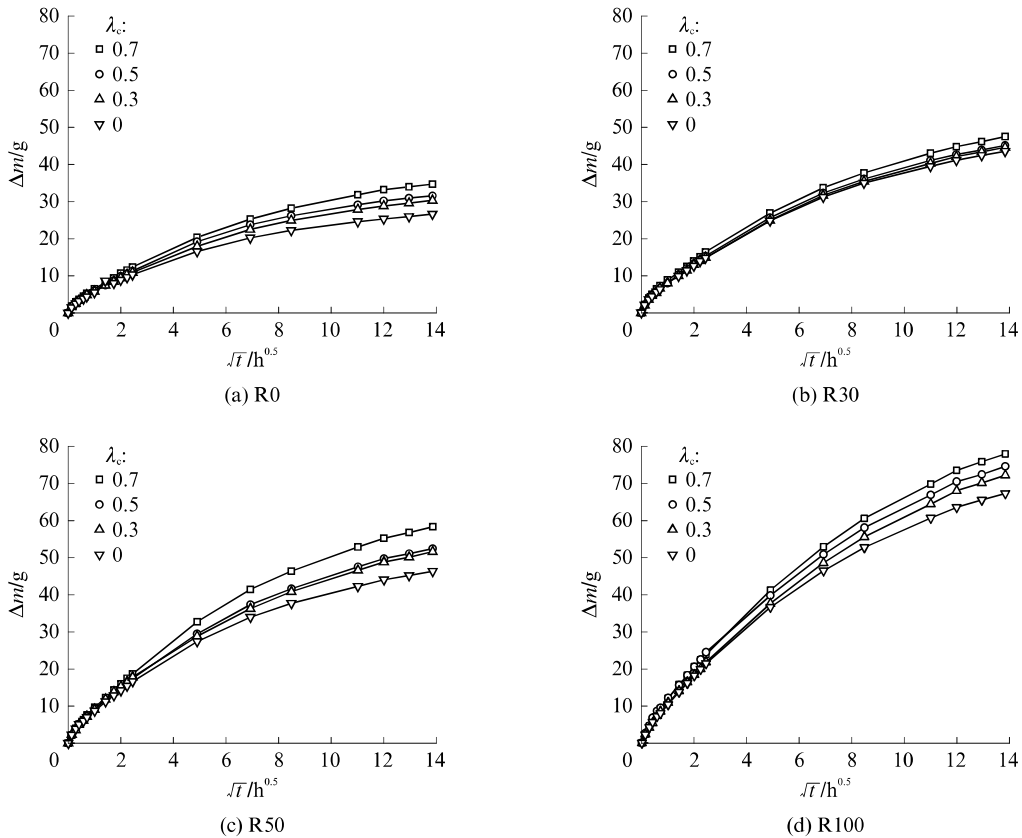


图 3 再生混凝土毛细吸水质量随时间平方根的变化曲线

Fig. 3 Mass variation curves of RAC capillary water absorption with square root of time

$$i = \frac{\Delta m}{\rho_w A_c} = S\sqrt{t} + b \quad (1)$$

式中： ρ_w 为水的密度， g/mm^3 ； A_c 为试块与水源接触的面积， mm^2 ； b 为拟合曲线的纵轴截距。

利用公式(1)对再生混凝土毛细吸水质量曲线进行拟合，以吸水时间 $t=24\text{ h}$ 为分界点，分别确定再生混凝土的初期吸水率 S_{ini} 与后期吸水率 S_{sec} 。表 4 为轴压重复荷载作用后再生混凝土初期和后期吸水率。由表 4 可见，初期吸水率明显大于后期吸水

率，并均随应力水平增大而单调递增。荷载作用会引起再生混凝土微裂缝的萌生与扩展，裂缝相互交错形成连通的网络使再生混凝土内部曲折度降低，从而提高水分传输速率。然而，应力水平对吸水率的影响不够显著，特别是后期吸水率，原因可能为：试验所选取的应力水平较小，重复加载次数较少，持载时间较短，对混凝土内部造成损伤不够明显，部分裂缝或孔隙在卸载后出现自我闭合现象，进一步减小了应力水平对吸水率的影响。

表 4 轴压重复荷载作用后再生混凝土初期和后期吸水率

Table 4 Initial and secondary sorptivity of RAC after repeated axial compressive loading

λ_c	$S_{\text{ini}}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-0.5})$				$S_{\text{sec}}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-0.5})$			
	R0	R30	R50	R100	R0	R30	R50	R100
0	0.328 5	0.489 2	0.544 3	0.738 2	0.108 2	0.204 0	0.206 0	0.338 1
0.3	0.355 1	0.491 9	0.581 0	0.754 6	0.133 0	0.214 0	0.250 4	0.381 6
0.5	0.376 1	0.504 3	0.585 8	0.802 6	0.133 5	0.212 4	0.251 6	0.383 7
0.7	0.402 3	0.528 0	0.651 7	0.829 5	0.157 6	0.225 1	0.279 9	0.405 3

从表 4 还可以发现，再生混凝土的吸水率随着再生粗骨料取代率的增加而变大，初期吸水率表现尤为明显。这可能是由于再生粗骨料吸水率较高，导致其周围的水泥水化不够充分，界面过渡区中出现

较多的气孔与裂缝。随着混凝土内部再生粗骨料取代率的增加，再生混凝土界面过渡区中孔隙和原始裂缝数量明显增多。此外，混凝土初期水分传输的通道主要为再生混凝土内部连通的微裂缝，后期主要

是扩散作用.在吸水后期,普通混凝土绝大部分孔隙及裂缝中的水分已趋于饱和,而再生混凝土内部封闭的微裂缝与孔隙较多,因此再生混凝土的后期吸水率高于普通混凝土.

根据表4试验结果,发现再生混凝土的吸水率 S 与再生粗骨料取代率 R 及应力水平 λ_c 整体符合线性关系.因此,考虑再生粗骨料取代率和应力水平的影响,再生混凝土吸水率 S 可用下式表示:

$$S(\lambda_c, R) = k(1 + \alpha\lambda_c)(1 + \beta R) \quad (2)$$

式中: k 、 α 、 β 为拟合系数,针对初期吸水率可分别取 $k=0.3843$ 、 $\alpha=0.2124$ 、 $\beta=0.5908$.

2.3 相对含水量分布预测

多孔建筑材料的吸水特性主要与材料内部湿度和外界环境条件密切相关,通常利用扩展的 Darcy 定律来描述非饱和流体的迁移过程.混凝土毛细吸水过程主要依靠毛细孔隙内部液体的表面张力作用^[12,15],其控制方程可表示为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla [D(\theta) \nabla \theta] \quad (3)$$

式中: θ 为混凝土内部相对含水量; $D(\theta)$ 为水力扩散系数, mm^2/s ,通常采用经验性的指数形式 $D(\theta) =$

$D_0 e^{n\theta}$ 来描述,其中 D_0 为饱和状态下的水力扩散系数; n 为试验数据回归参数,通常取6~9.

王立成^[12]以吸水率 S 作为变量,给出了试件任意时刻 t 与对应水分侵入深度 x 处的相对含水量 θ 关系:

$$x = \phi \sqrt{t} = \frac{-S + \sqrt{S^2 + 4A\lambda(\theta)p^2}}{Ap} \sqrt{t} \quad (4)$$

式中: ϕ 为 Boltzmann 变量; A 和 $\lambda(\theta)$ 为模型参数^[12].

当采用指数形式表达水力扩散系数 $D(\theta)$ 时, D_0 可由吸水率 S 来计算^[12]:

$$D_0 = \frac{n^2 S^2}{p^2 [e^n (2n-1) - n + 1]} \quad (5)$$

式中: n 为回归参数.

结合式(2)、(4)、(5),可建立考虑再生粗骨料取代率 R 和应力水平 λ_c 影响的混凝土内部相对含水量的预测模型.图4给出了吸水时间 $t=24\text{ h}$ 时再生混凝土内部相对含水量的分布曲线.由图4可见,不同应力水平下再生混凝土水分侵入深度均有所提高,这是由于荷载损伤对混凝土内部孔隙结构及分布造成影响,导致其吸水率增加所致.当应力水平一定时,水分侵入深度受再生粗骨料取代率的影响较

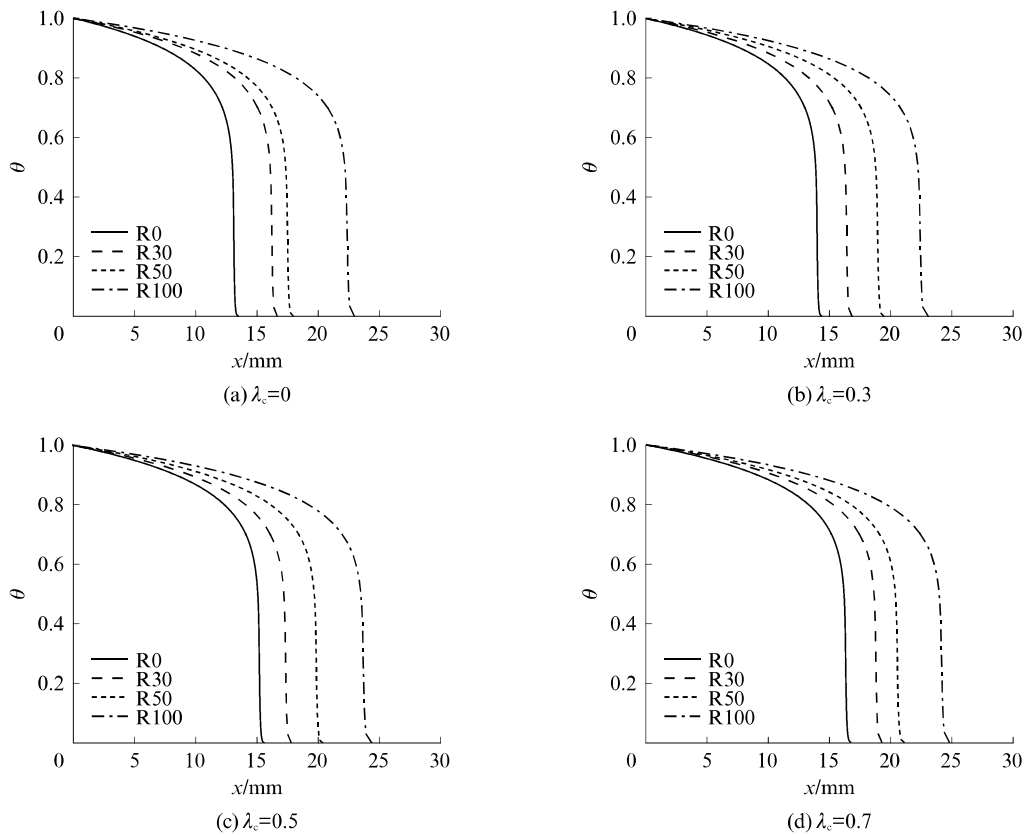


图4 再生混凝土内部相对含水量分布曲线

Fig. 4 Relative water content distribution curves inside recycled aggregate concretes

为明显,且随着再生粗骨料取代率的增加而增大,这是因为随着再生粗骨料取代率的增加,混凝土内部出现较多的旧砂浆-新砂浆界面薄弱区,在轴压重复荷载作用下该区域微裂缝萌生扩展,相互贯通,促进了水分的传输。

3 结论

(1)轴压重复荷载作用后,再生混凝土毛细吸水质量随着应力水平及再生粗骨料取代率的增加而增加,并且呈双线性增长趋势;当应力水平为0.7时,再生粗骨料取代率为100%的R100试件毛细吸水质量为普通混凝土的2.24倍。

(2)再生混凝土吸水率随着再生粗骨料取代率和应力水平的增加而增大,初期吸水率均高于后期吸水率。再生粗骨料取代率对水分侵入深度有显著影响,当应力水平一定时,二者呈正相关变化趋势。

(3)基于毛细吸水的非饱和流体理论和试验结果,考虑应力水平和再生粗骨料取代率的影响,引入Boltzmann变量并采用水力扩散系数的指数形式,建立了轴压重复荷载作用后再生混凝土内部相对含水量分布的预测模型,为再生混凝土耐久性评估及寿命预测提供了新方法。

参考文献:

- [1] 李秋义,全洪珠,秦原.再生混凝土性能与应用技术[M].北京:中国建材工业出版社,2010:4-10.
LI Qiuyi, QUAN Hongzhu, QIN Yuan. Performance of application technology of recycled concrete [M]. Beijing: China Building Materials Press, 2010:4-10. (in Chinese)
- [2] 应敬伟,蒙秋江,肖建庄.再生骨料CO₂强化及其对混凝土抗压强度的影响[J].建筑材料学报,2017,20(2):277-282.
YING Jingwei, MENG Qiujiang, XIAO Jianzhuang. Effect of CO₂-modified recycled aggregate on compressive strength of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(2):277-282. (in Chinese)
- [3] 朋改非,黄艳竹,张九峰.骨料缺陷对再生混凝土力学性能的影响[J].建筑材料学报,2012,15(1):80-84.
PENG Gaifei, HUANG Yanzhu, ZHANG Jiufeng. Influence of defects in recycled aggregate on mechanical properties of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(1):80-84. (in Chinese)
- [4] 潘艺倩,梁超峰,何智海,等.再生骨料混凝土抗氯离子渗透性能研究进展[J].硅酸盐通报,2018,37(2):501-507.
PAN Yiqian, LIANG Chaofeng, HE Zhihai, et al. Research progress on the chloride permeability of recycled aggregate concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(2):501-507. (in Chinese)
- [5] 吴相豪,岳鹏君.再生混凝土中氯离子渗透性能试验研究[J].建筑材料学报,2011,14(3):381-384,417.
WU Xianghao, YUE Pengjun. Experimental study on chloride ion penetration into recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(3):381-384, 417. (in Chinese)
- [6] 韩帅,李秋义,岳公冰,等.再生粗骨料品质和取代率对再生混凝土抗氯离子渗透性能影响[J].混凝土,2015(12):80-83.
HAN Shuai, LI Qiuyi, YUE Gongbing, et al. Influence of quality and substitution rate of recycled coarse aggregate on coefficient of the chloride migration of recycled concrete[J]. Concrete, 2015(12):80-83. (in Chinese)
- [7] PEDRO D, DE BRITO J, EVANGELISTA L. Durability performance of high-performance concrete made with recycled aggregates, fly ash and densified silica fume[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 93:63-74.
- [8] QI B, GAO J M, CHEN F, et al. Chloride penetration into recycled aggregate concrete subjected to wetting-drying cycles and flexural loading[J]. Construction and Building Materials, 2018, 174:130-137.
- [9] 欧阳璋,陈幼佳.重复压应力作用后再生混凝土中氯离子渗透性研究[J].混凝土,2017(1):31-33.
OUYANG Zhang, CHEN Youjia. Study on chloride permeability of recycled concrete after repeated compressive stress [J]. Concrete, 2017(1):31-33. (in Chinese)
- [10] WANG W J, WU J, WANG Z, et al. Chloride diffusion coefficient of recycled aggregate concrete under compressive loading [J]. Materials and Structures, 2016, 49(11):4729-4736.
- [11] WU Y Q, XIAO J Z. The effect of microscopic cracks on chloride diffusivity of recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 170:326-346.
- [12] 王立成.建筑材料吸水过程中毛细管系数与吸水率关系的理论分析[J].水利学报,2009,40(9):1085-1090.
WANG Licheng. Analytical relationship between capillarity coefficient and sorptivity of building material [J]. Shuli Xuebao, 2009, 40(9):1085-1090. (in Chinese)
- [13] 郭远新,李秋义,单体庆,等.再生粗骨料混凝土配合比简易设计方法[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(6):1029-1038.
GUO Yuanxin, LI Qiuyi, SHAN Tiqing, et al. Simplified design method for mix proportion of recycled coarse aggregate concrete [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2017, 33(6):1029-1038. (in Chinese)
- [14] TAM V W Y, GAO X F, TAM C M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(6):1195-1203.
- [15] 鲍玖文,王立成,程宝娟.短期持压荷载与混凝土内水分传输的耦合过程[J].硅酸盐学报,2016,44(8):1154-1160.
BAO Jiuwen, WANG Licheng, CHENG Baojuan. Water transport in concrete coupled with short-term sustained compressive loading [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(8):1154-1160. (in Chinese)