

文章编号:1007-9629(2021)03-0545-06

再生粗骨料含水状态对混凝土性能的影响

段珍华^{1,2}, 江山山¹, 肖建庄^{1,2}, 侯少丹¹, 陈祥磊¹

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092;

2. 同济大学 工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 研究了再生粗骨料含水状态(绝干、气干及饱和面干)对新拌混凝土流变性能的影响规律, 同时对其早期力学性能和耐久性能进行了测试. 结果表明: 再生粗骨料的含水状态对新拌混凝土流变性能影响较大, 拌和物中自由水的含量虽然对新拌混凝土的动态屈服应力影响不大, 但会显著影响其静态屈服应力和塑性黏度; 相对于其他 2 种含水状态, 气干状态下的再生粗骨料对混凝土抗压强度产生的不利影响最小.

关键词: 再生混凝土; 含水状态; 流变性能; 抗压强度; 抗氯离子渗透性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.014

Effect of Moisture Condition of Recycled Coarse Aggregate on the Properties of Concrete

DUAN Zhenhua^{1,2}, JIANG Shanshan¹, XIAO Jianzhuang^{1,2}, HOU Shaodan¹, CHEN Xianglei¹

(1. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The influence of moisture condition(oven dry, air-dry, saturated surface dry) of recycled coarse aggregate on the rheological properties of fresh concrete was studied, and the early mechanical and durability properties were also tested. The results show that the moisture condition of recycled coarse aggregate plays a significant part in the rheological properties of fresh concrete. Although the free water content of the fresh concrete has little effect on the dynamic yield stress of fresh concrete, it can significantly affect the corresponding static yield stress and plastic viscosity. Besides, the recycled coarse aggregate in air-dry condition has the least adverse effect on compressive strength among all the 3 conditions examined in this study.

Key words: recycled coarse aggregate concrete; moisture condition; rheological property; compressive strength; resistance to chloride ion penetration

目前,国内外研究人员已经针对再生混凝土开展了大量的研究^[1-2],主要集中在力学性能、变形性能和耐久性能等方面.考虑到再生粗骨料较高的孔隙率、吸水率和较低的表观密度^[3],由其制备的再生混凝土在施工时必会面临严峻挑战.

对再生粗骨料进行预处理,可以有效改善再生混凝土的各项性能.许多研究人员建议对再生

粗骨料进行预饱水处理以减少骨料和水泥浆之间的水分交换^[4],但饱和面干状态的再生粗骨料存在水分从骨料内部转移到水泥浆中的“渗出”风险,可能会改变再生粗骨料和水泥浆之间界面过渡区的水胶比,进而影响黏结强度^[5]. Ferreira 等^[6]调查了预吸水与附加水工艺下再生粗骨料对混凝土工作性能的影响,发现 2 种工艺都能改善再生

收稿日期:2019-12-23; 修订日期:2020-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51708419);中央高校基础研究经费专项资金资助项目

第一作者:段珍华(1985—),男,河南商丘人,同济大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:zhduan@tongji.edu.cn

通讯作者:肖建庄(1968—),男,山东临沂人,同济大学教授,博士生导师,博士. E-mail:jzx@tongji.edu.cn

混凝土的工作性能,且后者还有利于提高其强度. Brand 等^[7]发现在有效水胶比一致的情况下,相较于饱和面干状态再生粗骨料,干燥状态再生粗骨料制备的再生混凝土表现出较高的初始坍落度. 而 De Oliveira 等^[8]的试验结果表明,干燥状态和饱和面干状态再生粗骨料制备的再生混凝土,在强度和抗冻融性方面均差于普通混凝土,且后者的抗弯强度下降尤为显著.

工作性能作为新拌混凝土的重要性能之一,直接影响硬化后材料的抗压强度以及耐久性. 随着高性能混凝土的迅速发展,工作性能常规经验测试方法难以对其进行有效评估. 当前流变性能被认为是表征混凝土工作性能的最理想方法^[9]. 相较于传统的经验测试方法,流变性能测试能够从机理方面更加科学、全面地表征新拌混凝土材料的工作性能.

本文研究了再生粗骨料含水状态对混凝土常规工作性能、流变性能、力学性能和耐久性能的影响,并揭示了其作用机理.

1 试验

1.1 试验材料

水泥为 42.5 级普通硅酸盐水泥,其化学组成¹⁾列于表 1. 细骨料为Ⅱ区河砂,级配良好,细度模数为 2.5,符合 GB/T 14684—2011《建设用砂》的要求. 再生粗骨料(RCA)来自上海某建筑固废资源化工厂,粒径分别为 4.75~10 mm 和 10~20 mm,按质量比 1:2 混合,混合后其级配符合 JGJ 52—2006《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》的要求. 天然粗骨料(NCA)来源于碎石,NCA 和 RCA 的物理性能按照 GB/T 14685—2011《建筑用卵石、碎石》进行测试,结果见表 2. 减水剂采用聚羧酸高效减水剂,固含量为 20%. 混凝土配合比见表 3.

表 1 水泥化学组成 Table 1 Chemical composition of cement											w/%
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Others	
21.1	4.3	2.5	65.9	0.1	1.5	2.3	0.1	0.5	0	1.7	

表 2 骨料的物理性能
Table 2 Physical properties of aggregates

Type	Size/mm	Apparent density/ (kg·m ⁻³)	Water absorption (by mass)/%	Moisture content (by mass)/%	Crushing value (by mass)/%
Sand	0.15—4.75	2 606	1.00	0.85	
NCA	4.75—20	2 646	0.60	0.60	12.43
RCA	4.75—10	2 297	9.57	4.42	13.60
	10—20	2 378	7.17	3.77	13.60

表 3 混凝土配合比 Table 3 Mix proportions of concretes							kg/m ³
Specimen	Cement	Free water	Additional water	Sand	NCA	RCA	
NC	440	160	0	700	1 060	0	
RC1	440	160	69.8	700	0	868.8	
RC2	440	160	34.9	700	0	903.7	
RC3	440	160	0	700	0	938.6	

1.2 配合比设计

笔者前期研究^[10]发现,高品质 RCA 对混凝土性能的不利影响较小. 为深入考察 RCA 对结构混凝土的性能影响,基准组设计强度为 C45,水胶比取 0.36,粗骨料使用天然碎石,作为对照组,标记为 NC. 在此基础上,共设计了 3 组再生混凝土(RC),其水胶比和胶凝材料用量与对照组一致,采用不同含水状态的 RCA 全部取代 NCA(以体积分数计),

所制备的混凝土分别标记为 RC1、RC2 和 RC3,其中 RCA 的含水状态分别设定在绝干(含水率为 0%)、气干(含水率约为饱和面干吸水率的 50%)和饱和面干(饱和面干吸水率)状态,附加水用量根据骨料的含水状态进行相应调整. 混凝土配合比详见表 3. 为了探究新拌混凝土常规工作性能和流变性能随时间的变化规律,通过调整减水剂用量将各组混凝土的初始坍落度均控制在(200±10)mm 范围内.

1.3 测试方法

参照 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》对新拌混凝土进行常规工作性能测试,包括坍落度和扩展度及其经时变化(0、15、30、45 min).

使用 ICAR 流变仪对新拌混凝土进行流变性能测试以获取流变参数(包括静态屈服应力、动态屈服

1)文中涉及的组成、水胶比等均为质量分数或质量比.

应力和塑性黏度)以及流变参数随时间(0、15、30、45 min)的变化规律。流变仪的叶片半径为 63.5 mm,高度为 127 mm,流变筒的容量为 20 L,静态屈服应力测试时,控制叶片的转速为 0.025 r/s,持续时间为 60 s;动态屈服应力和塑性黏度测试时叶片的转速由 0.5 r/s 逐渐降低到 0.05 r/s,共采集 7 个点的扭矩和转速。

参照 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,分别浇筑 3 组 100×100×100 mm 和 150×150×300 mm 的试件,试件成型 1 d 后脱模并进行标准养护,分别用于测试 7、28 d 抗压强度和 28 d 轴心抗压强度,测试中加载速率控制为 0.3 MPa/s;同时参照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》,浇筑 2 组试件用于再生混凝土抗氯离子渗透性能测试,养护龄期为 28 d,其中一组采用电通量测试方法,另外一组采用快速氯离子迁移测试方法。

2 结果与分析

2.1 再生粗骨料吸水时变规律

利用静水平可以获取绝干状态下的 RCA 吸水时变曲线,如图 1 所示。由图 1 可见:绝干状态下的 RCA 遇水后,吸水速率极快,15 s 后其含水率就已达到了其饱和面干吸水率的 46.7%;但其吸水速率随时间的推移迅速下降,5 min 时其含水率仅增加了约 17.1%。这表明 RCA 的含水率越低,其吸水速率就越快,且随含水率增加而迅速下降,当 RCA 的含水率达到其饱和面干吸水率的 70%左右时,其吸水速率趋于平缓。由此可见,绝干状态下的 RCA 在加入到拌和物中时,其吸水速率非常快。

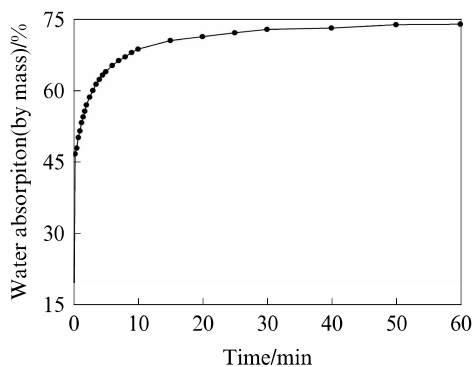


图1 绝干状态下的 RCA 吸水时变曲线
Fig. 1 Time varying curve of water absorption for oven dry RCA

2.2 常规工作性能

新拌混凝土坍落度经时变化和减水剂用量(w_{sp})

如图 2 所示。由图 2 可知,NC 组减水剂的用量最多,RC 组减水剂的用量相对较少。这是由于 RC1 和 RC2 组中附加水的存在导致其拌和物中游离态的水要明显多于 NC 组,从而降低了对减水剂的需求,尤其是 RC1 组,其减水剂的用量最少。RC3 组采用的 RCA 预先在水中浸泡了 24 h,达到饱和面干状态,表面润滑且附着的灰尘颗粒基本上被清洗掉,骨料间摩擦力同样得到降低,对减水剂的需求也相应减少。由此可知,再生粗骨料的初始含水状态对新拌混凝土的减水剂用量有较大的影响。

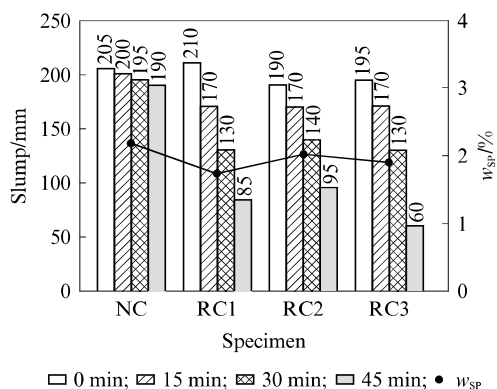


图2 新拌混凝土坍落度经时变化和减水剂用量
Fig. 2 Slump of fresh concrete over time and w_{sp}

图 3 展示了新拌混凝土扩展度随时间的变化。由图 2、3 可知:NC 组的坍落度和扩展度经时损失均明显小于再生混凝土组。静置 45 min 后再搅拌,NC 组的坍落度和扩展度分别为 190、385 mm,损失很小,能够保持较好的流动性。但再生混凝土组拌和物的坍落度经时损失较严重,其中 RC3 组 45 min 后的坍落度损失最大,达 69%,这是由于再生混凝土拌和物中的自由水和减水剂随时间推移不断被再生粗骨料上附着的老砂浆吸收,使得拌和物中自由水和有效减水剂浓度降低,导致其工作性能迅速损失。其中,由于 RC1 组中 RCA 的初始含水率为 0%,其吸水速率较快,从而导致该组的工作性能损失高于 RC2 组。对于 RC3 组,因为饱和面干状态下的 RCA 与拌和物之间可能存在水分传输的现象,导致有效减水剂浓度降低,进而加速了工作性能损失。通过不同 RC 组的坍落度经时损失对比可以发现,RC2 组坍落度的损失情况较 RC1 和 RC3 组要好,说明相较于绝干与饱和面干状态,气干状态下的 RCA 对新拌混凝土坍落度的保持可能会产生更加有利的影响。

2.3 流变性能

图 4 为新拌混凝土静态屈服应力随时间的变

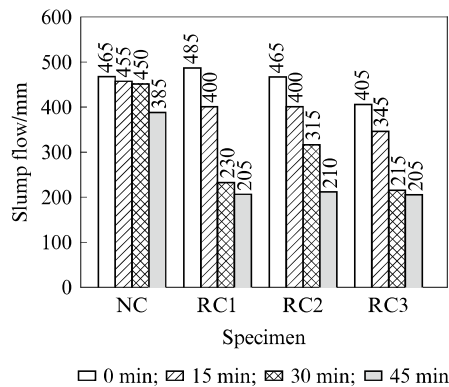


图3 新拌混凝土扩展度随时间的变化
Fig. 3 Slump flow of fresh concrete over time

化. 由图4可知: NC组静态屈服应力随时间匀速增长, RC3组静态屈服应力值增长最慢. 就静态屈服应力而言, RC3组的流变性能要比NC组好, 其原因有两点: 首先, RC3组RCA在水中浸泡了24 h后, 其表面的灰尘被除去并且表面得到润滑, 从而减小了骨料间的摩擦力, 使得其静态屈服应力减小; 其次, 饱和面干状态下的RCA在拌和物中可能存在水分从骨料内部渗出的现象, 此时RCA表面附着老砂浆的水胶比较大, 相当于再生粗骨料表面得到润滑, 减小了静态屈服应力. RC1组的静态屈服应力值比NC组小, 特别是在搅拌后的30 min内, RC1组静态屈服应力的增长低于NC组, 这是因为附加水的存在增大了拌和物中游离态水的含量, 但随着这些附加水被再生粗骨料所吸收, 其静态屈服应力值会迅速增大, 如RC1和RC2组静态屈服应力值在45 min时比30 min时分别增大了81%、70%. 虽然RC2组拌和物中游离态的水也比NC组多, 但是RCA表面较粗糙, 其摩擦力要比天然粗骨料大, 这会显著影响新拌混凝土的流变性能, 从而使得RC2组的静态屈服应力值比NC组大.

图5显示了新拌混凝土动态屈服应力随时间的变化. 由图5可知: NC组动态屈服应力值最小且增长缓慢, 说明其流变性能损失较少; 在3组再生混凝土中, RC2组的动态屈服应力增长最慢, RC1组的动态屈服应力增长最快, 结合坍落度测试结果(见图2), 较快的吸水速率导致RC1组动态屈服应力增长最快, 老砂浆对减水剂的吸附导致RC3组动态屈服应力增长高于RC2组. 这说明RCA的加入会增大新拌混凝土的动态屈服应力, 其含水状态对拌和物动态屈服应力的增长影响较大. 相对于气干状态, 绝干与饱和面干状态下的RCA对新拌混凝土动态屈

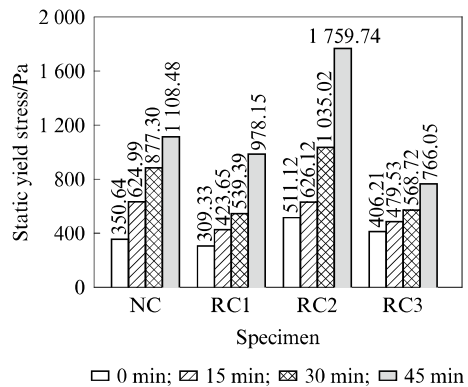


图4 新拌混凝土静态屈服应力随时间的变化
Fig. 4 Static yield stress of fresh concrete over time

服应力产生的影响更为显著. 值得注意的是, RC1组和RC3组在15 min内动态屈服应力的增长并不显著, 然而在15 min之后, 特别是30~45 min内, RC1组动态屈服应力的增长最明显, 这与RCA的吸水时变规律相反.

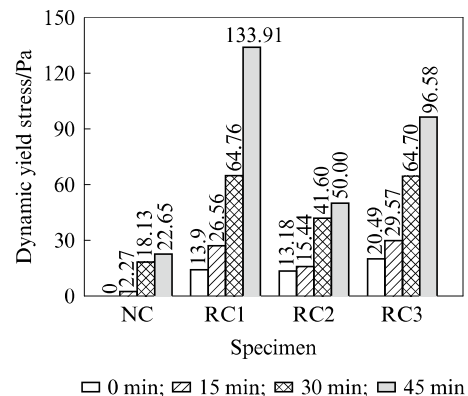


图5 新拌混凝土动态屈服应力随时间的变化
Fig. 5 Dynamic yield stress of fresh concrete over time

新拌混凝土塑性黏度随时间的变化如图6所示. 由图6可知, RC1和RC3组塑性黏度均小于NC组, 且增长缓慢. 说明尽管NC组和RC组具有相似的初始坍落度, 其塑性黏度仍存在较大的差异. 这是因为塑性黏度主要受浆体中水泥分子间引力影响, 由于RC1和RC2组附加水的存在以及RC3组骨料表面渗出水分的存在, 导致初始状态时RC组中水泥分子间的距离较大, 引力较小, 进而使得其塑性黏度低于NC组. 随着时间的推移, 水泥颗粒产生絮凝进而开始水化, 使得水泥分子间引力更大, 因而新拌混凝土塑性黏度随着时间的增长而增大. 值得注意的是, RC2组在15~45 min内的塑性黏度显著增长, 并且高于NC组, 根据前述分析, RC2组拌和物的减水剂用量在3组再生混凝土中最高, 因此RC2组水

泥颗粒更为分散,水泥在早期的水化更充分,水化产物之间的相互作用增大了塑性黏度。

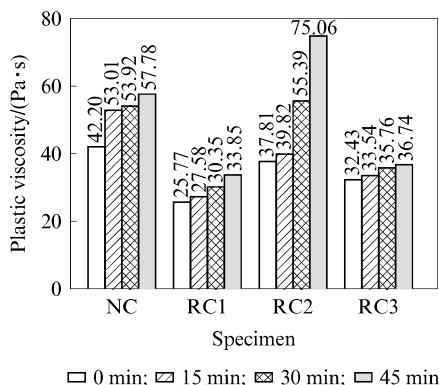


图6 新拌混凝土塑性黏度随时间的变化

Fig. 6 Plastic viscosity of fresh concrete over time

2.4 抗压强度

混凝土各龄期抗压强度如图7所示。由图7可见:由于RCA较低的表现密度和老砂浆的存在,导致再生混凝土的抗压强度均低于普通混凝土;RC1和RC3组混凝土各龄期的抗压强度均小于RC2组,反映了绝干与饱和面干状态下的RCA对再生混凝土抗压强度的不利影响要大于气干状态下的RCA。RC1组中的附加水用量显著高于RC2组,混凝土硬化时,RC1组的有效水胶比较高,从而导致其抗压强度低于RC2组;对于RC3组,如前所述,吸水饱和的RCA会存在老砂浆中的水分渗出现象,引起界面过渡区砂浆的水胶比增大,从而导致混凝土强度较低。RC2组更高的早期强度也验证了前述分析中其早期水化更充分的结论。由图7还可知:RC2组混凝土28d抗压强度较7d时增长了12.0 MPa,与NC组混凝土抗压强度的增长幅度(11.3 MPa)大致相同;RC1组混凝土7d抗压强度最低,但其增长速率最快,远超过其他各组,说明在7d时,RC1组混凝土中仍存在大量附加水未被RCA吸收,使得其有效水胶比较高,但在其强度增长过程中,这些附加水不断被再生粗骨料吸收,从而增大了有效水胶比,最终使得RC1组混凝土的抗压强度增长较快;而RC3组混凝土抗压强度的增长速率最慢,因为在其强度增长过程中,一部分水从RCA的孔隙中渗出,从而增大了界面过渡区砂浆的水胶比,影响了其强度的增长。

2.5 电通量与氯离子扩散系数

图8给出了混凝土28d电通量与氯离子扩散系数 D 。由图8可知,RC组的电通量和氯离子扩散系数均高出NC组很多,这说明了RCA会对混凝土

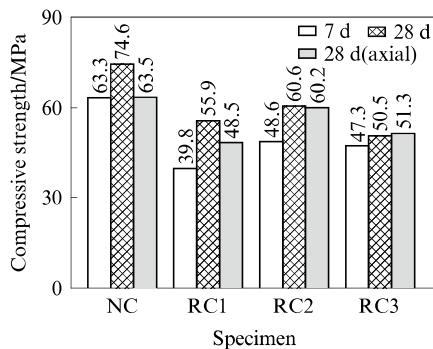


图7 各龄期混凝土抗压强度

Fig. 7 Compressive strength of concrete at different ages

抗氯离子渗透性能产生不利影响。其原因有两点:其一,由于附着老砂浆的存在,RCA具有比天然粗骨料更高的孔隙率;其二,在养护过程中,RC1和RC2组混凝土中的附加水会被未饱和的再生粗骨料吸收,而RC3组混凝土中一部分水会从已饱和的RCA中渗出,这种水分的传输过程会在混凝土结构中形成更多的孔隙,从而使其抗氯离子渗透性能下降。此外,RC3组的电通量和氯离子扩散系数远高于其他各组,这是因为水胶比较高的新老砂浆界面过渡区结构不够密实,会形成离子的传输通道。这也表明饱和面干状态下的RCA会对混凝土抗氯离子渗透性能产生非常不利的影响。

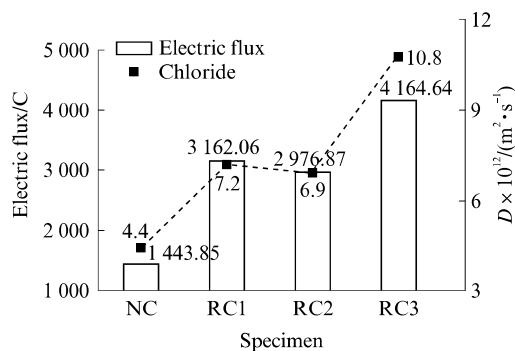


图8 混凝土28d电通量与氯离子扩散系数

Fig. 8 Experimental results of electric flux and chloride ion diffusion coefficient of concrete at 28 d

3 结论

(1)再生粗骨料的含水率越低,其吸水速率就越快,且吸水速率随着含水状态的增加而迅速下降,再生粗骨料的吸水时变规律与混凝土的工作性能时变规律具有紧密联系。

(2)再生粗骨料的含水状态对新拌混凝土的流变性能及其经时损失具有很大的影响,气干状态下的再生粗骨料对新拌混凝土工作性能的不利影响比

绝干和饱和面干状态下的再生粗骨料要小。

(3)用绝干与饱和面干状态下的再生粗骨料制备再生混凝土时,其抗压强度低于用气干状态下再生粗骨料制备的再生混凝土。当用绝干状态下的再生粗骨料制备再生混凝土时,其早期抗压强度偏低,但其抗压强度增长较快;当用饱和面干状态下的再生粗骨料制备再生混凝土时,其抗压强度增长缓慢。

(4)与天然粗骨料混凝土相比,3种含水状态下的再生粗骨料均会对再生混凝土抗氯离子渗透性能产生不利影响,尤其是饱和面干状态下的再生粗骨料。

参考文献:

- [1] KOU S C, POON C S. Effect of quality of parent concrete on the mechanical properties of high performance recycled aggregate concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(1): 7-11.
- [2] THOMAS C, SETIÉN J, POLANCO J A, et al. Durability of recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 1054-1065.
- [3] RAHAL K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate [J]. Building and Environment, 2007, 42(1): 407-415.
- [4] POON C S, SHUI Z H, LAM L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(6): 461-468.
- [5] POON C S, SHUI Z H, LAM L, et al. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(1): 31-36.
- [6] FERREIRA L, DE BRITO J, BARRA M. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties [J]. Magazine of Concrete Research, 2011, 63(8): 617-627.
- [7] BRAND A S, ROESLER J R, SALAS A. Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 79: 83-89.
- [8] DE OLIVEIRA M B, VAZQUEZ E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete [J]. Waste Management, 1996, 16(1-3): 113-117.
- [9] HU C, DE LARRARD F. The rheology of fresh high-performance concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(2): 283-294.
- [10] 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: 19-29.
- (上接第 537 页)
- WANG Chuanxing, XIE Jian, LI Huijie. Experimental research on the properties of concrete under low-temperature [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(Suppl 2): 182-186. (in Chinese)
- [15] MIURA T. The properties of concrete at very low temperatures [J]. Materials and Structures, 1989, 22(4): 243-254.
- [16] 刘麟玮. 混凝土低温特性引起的预应力损失试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2016.
- LIU Linwei. Experimental study on loss of prestress caused by characteristics of concrete under low temperatures [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- (上接第 515 页)
- [20] MALIOU O, KATSOTI M, GEORGIADIS A, et al. Properties of stabilized/solidified admixtures of cement and sewage sludge [J]. Cement and Concrete Composites, 2007, 29(1): 55-61.
- [21] AL-AMOUDI O S B, MASLEHUDDIN M, ABDUL-AL Y A B. Role of chloride ions on expansion and strength reduction in plain and blended cements in sulfate environments [J]. Construction and Building Materials, 1995, 9(1): 25-33.
- [22] 勾密峰, 管学茂, 张海波. 钙矾石结合氯离子能力的研究 [J]. 材料导报, 2013, 27(10): 136-139.
- GOU Mifeng, GUAN Xuemao, ZHANG Haibo. Study on chloride binding ability of ettringite [J]. Materials Review, 2013, 27(10): 136-139. (in Chinese)