

文章编号:1007-9629(2021)03-0637-07

不合格新拌混凝土回收利用基本试验研究

易卓然¹, 肖建庄¹, 薛松涛¹, 韩 女¹, 张恒春²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中建商品混凝土(福建)有限公司, 福建 福州 350015)

摘要: 采用减水剂-缓凝剂体系对不合格新拌混凝土的工作性能进行调节, 并利用不合格新拌混凝土部分取代同配合比新拌混凝土来制备再生混凝土. 通过坍落度和抗压强度测试, 分析了不合格新拌混凝土放置时间(90、180、270 min)和取代率(10%、20%、30%)对再生混凝土工作性能和力学性能的影响. 结果表明: 不同放置时间下, 再生混凝土 30 min 内的坍落度经时损失均与新拌混凝土标准相近, 但 60 min 后的经时损失显著增大; 再生混凝土 7、28 d 抗压强度与放置时间和取代率总体呈负相关关系; 在不同放置和取代率下, 放置时间 180 min、取代率 30% 时的再生混凝土 7 d 抗压强度最低, 为 31.5 MPa; 放置时间 270 min、取代率 30% 时的再生混凝土 28 d 抗压强度最低, 为 50.1 MPa. 试验表明, 初凝前的不合格新拌混凝土可以作为再生混凝土的制备材料.

关键词: 不合格新拌混凝土; 再生混凝土; 流动性; 抗压强度; 减水剂

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.026

Experimental Study on Utilization of Disqualified Fresh Concrete

YI Zhuoran¹, XIAO Jianzhuang¹, XUE Songtao¹, HAN Nü¹, ZHANG Hengchun²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. China Construction Pre-mix Concrete(Fujian) Co., Ltd., Fuzhou 350015, China)

Abstract: The water reducer and retarder were adopted to modify the working performance of disqualified fresh concrete, and the modified concrete was mixed into the fresh concrete with a constant mix proportion for recycling. The effect of different placing time(90, 180, 270 min) and replacing rate(10%, 20%, 30%) were studied by the tests of slump loss through time and compressive strength. According to the results, the slump loss through time of the recycled concrete is similar to the result of fresh concrete within 30 minutes but increases rapidly after 60 min, the minimum compressive strength of the recycled concrete after 7 days was 31.5 MPa with the placing time equal to 180 min and replacing rate equal to 30%, and the minimum compressive strength after 28 days is 50.1 MPa with the placing time equal to 270 min and replacing rate equal to 30%. The experiment shows that the disqualified fresh concrete before the initial setting was suitable for the preparation of recycled concrete.

Key words: disqualified fresh concrete; recycled concrete; fluidity; compressive strength; water reducer

随着中国建筑行业的蓬勃发展和 2003 年“禁现”政策的颁布实施, 预拌混凝土使用率快速增长^[1-2]. 由于调度过程和施工现场存在诸多不可控因素, 在预拌混凝土使用过程中会不可避免地被部分

退回^[3-5]. 退回的混凝土, 即不合格新拌混凝土, 往往已经不能满足原来施工要求, 无法直接进行二次利用. 随着预拌混凝土产量的增多, 不合格新拌混凝土的总量日益增长. 上海某搅拌站近 3 a 的不合格新

收稿日期: 2020-01-23; 修订日期: 2020-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078358)

第一作者: 易卓然(1997—), 男, 江西上饶人, 同济大学硕士生. E-mail: yzr1997@tongji.edu.cn

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

拌混凝土总量如图 1 所示. 由图 1 可见, 随着搅拌站商品混凝土生产规模的扩大, 不合格新拌混凝土产量在 3 a 间增长了近 10 倍.

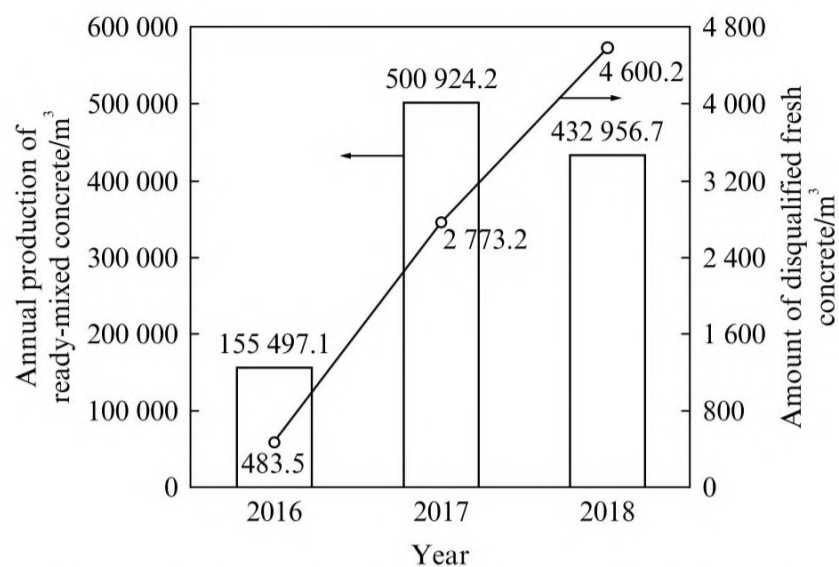


图 1 2016~2018 年某搅拌站混凝土产量与不合格新拌混凝土产量

Fig. 1 Annual production of ready-mixed concrete and disqualified fresh concrete in 2016 - 2018

处理不合格新拌混凝土的常规方法是直接废弃或骨料分离^[3-5]. 直接废弃的处理方法是对资源的极大浪费, 不符合节能减排的需要; 骨料分离的处理方法是通过筛分、冲洗将不合格新拌混凝土中的骨料分离出来, 用于新混凝土的制备. 骨料分离处理方法在一定程度上实现了建筑材料的二次利用, 但由于其中的水泥无法实现二次利用, 材料再利用效率较低; 同时, 分离粗细骨料过程耗时较长、用水量巨大, 增加了不合格新拌混凝土再利用的经济和环境成本.

本文通过将不合格新拌混凝土直接部分取代同配合比新拌混凝土制得再生混凝土的方式, 来实现

不合格新拌混凝土的回收利用. 研究中采用多种外加剂对不合格新拌混凝土的工作性能进行调节, 并研究了不合格新拌混凝土放置时间和取代率对再生混凝土抗压强度、坍落度和坍落度经时损失的影响, 以为不合格新拌混凝土的再生利用提供研究基础.

1 混凝土配合比和试验方法

1.1 试验原材料

水泥采用 P·O 42.5, 矿粉采用 S95, 粉煤灰采用 II 级高钙灰; 中砂细度模数为 2.2~2.5, 细砂细度模数为 1.9~2.2; 碎石粒径 5~16 mm; 减水剂采用含固量 (质量分数, 本文涉及的含固量、掺量、比值等均为质量分数或质量比) 20% 的高性能聚羧酸减水剂; 缓凝剂为二水合柠檬酸三钠 ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

1.2 不合格新拌水泥净浆与新拌混凝土准备

运输或放置时间过长是导致新拌混凝土的工作性能无法满足施工要求的主要因素. 因此, 研究运输或放置时间对新拌混凝土性能的影响, 并寻求其工作性能改善方法意义重大.

为确定放置时间的大小, 分别调研了沈阳市和上海市共计 26 个工地和 14 个搅拌站的相对位置, 作为中型城市 and 大型城市的代表. 其中, 不合格新拌混凝土放置时间 t_p 由如下公式定义:

$$t_p = \lambda t_d + t_c + t_m \quad (1)$$

式中: λ 为路况系数, 取 1.2; t_d 为往返一般耗时; t_c 为工地反应时间, 据调研取 30 min; t_m 为搅拌站反应时间, 据调研取 20 min. 沈阳市和上海市工地退回的不合格新拌混凝土放置时间分布如图 2 所示.

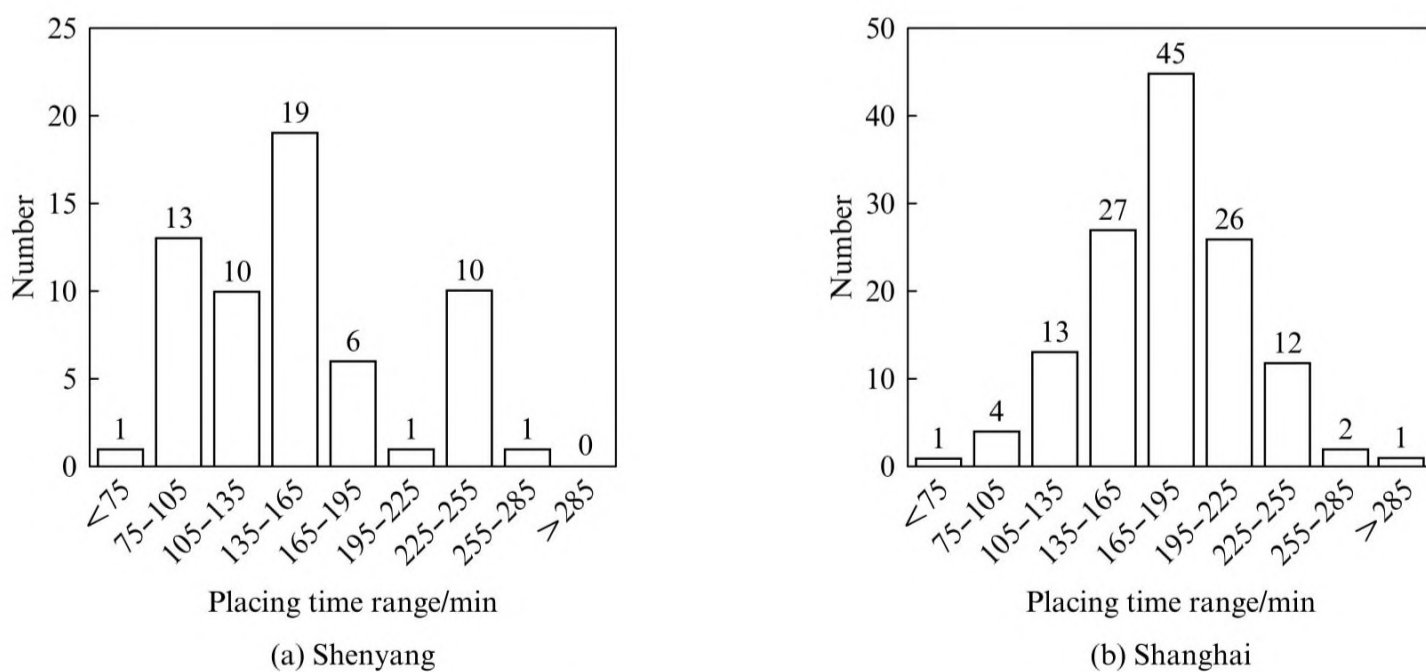


图 2 沈阳市和上海市部分搅拌站不合格新拌混凝土放置时间分布图

Fig. 2 Distribution diagrams for placing time of disqualified fresh concrete in Shenyang and Shanghai

由图 2 可知, 在中型城市 (沈阳市) 中, 不合格新拌混凝土放置时间呈现 2 至 3 峰的分布局势, 分别

集中于 90、150、240 min 左右, 这与搅拌站的分布有关. 一般而言, 工地会从邻近的搅拌站调配商品混凝土

土,此时退换较为方便,放置时间一般为75~135 min;兼顾价格和供应因素,或工地处于郊区,路程往返约需2 h,此时放置时间为135~195 min;考虑运送成本和工地需求,搅拌站一般不供应单程车程2 h以上的工地.在大型城市(上海市)中,由于搅拌站数目和工地数目相对密集,因此不合格新拌混凝土放置时间呈现中心集中趋势,但相应的,考虑交通堵塞因素,放置时间也相对较长.考虑上述情况,后续试验放置时间分别取90、180、270 min,分别对应就近区段混凝土供应情况、相邻区段调配混凝土和偏远地区混凝土供应情况,以及误工的极限状态,并进行后续研究.

研究中,将新拌水泥净浆和新拌混凝土分别静置90、180、270 min,获得相应材料,称为不合格新拌水泥净浆和不合格新拌混凝土.在各放置时间结束后,拌制同配合比混凝土,并以不同掺量掺入不合格新拌水泥净浆和不合格新拌混凝土.新拌水泥净浆基本配合比为: $m(\text{水泥}) : m(\text{矿粉}) : m(\text{粉煤灰}) : m(\text{水}) = 0.70 : 0.14 : 0.16 : 0.29$;新拌混凝土基本配合比为: $m(\text{水泥}) : m(\text{矿粉}) : m(\text{粉煤灰}) : m(\text{水}) : m(\text{中砂}) : m(\text{细砂}) : m(\text{碎石}) : m(\text{减水剂}) = 0.70 : 0.14 : 0.16 : 0.50 : 1.71 : 0.57 : 2.91 : 0.43$.

2 水泥净浆试验及其分析

2.1 水泥净浆试验参数

采用减水剂-缓凝剂外加剂体系调节不合格新拌水泥净浆工作性能.减水剂和缓凝剂的掺入能够改善不合格新拌水泥净浆的工作性能,延迟其初凝和终凝时间^[6-7].然而,减水剂和缓凝剂的过量使用可能对材料强度造成不利影响^[8].为了确定减水剂和缓凝剂的合理掺量,开展了不同外加剂掺量水泥净浆初凝、终凝时间和流动度经时损失试验:

(1)测试未掺加外加剂的对照组新拌水泥净浆的初凝时间、终凝时间、初始净浆流动度和15、30、45、60 min的流动度损失.

(2)将新拌水泥净浆静置至初凝前90 min、初凝时、初凝后90 min作为3类不合格新拌水泥净浆.按照测定的初凝时间,在后续配制步骤中这3类不合格新拌水泥净浆的放置时间 t_p 分别为90、180、270 min.

(3)对3类不合格新拌水泥净浆的工作性能进行调节.将每类不合格新拌水泥净浆分为3组,以水泥净浆质量为基准,分别掺入0.025%、0.050%、0.100%的缓凝剂,再掺入减水剂,直至水泥净浆流动度合格.测定各组不合格新拌水泥净浆的初凝时间、终凝时间、初始净浆流动度和15、30、45、60 min

的流动度损失.其中,掺加缓凝剂后不合格新拌水泥净浆的凝结时间从掺入缓凝剂的时间点(即放置时间后)起算.

2.2 水泥净浆工作性能试验结果

针对不合格新拌混凝土再生利用的工作性能要求,减水剂-缓凝剂外加剂体系处理预期效果为:在已经预先掺加缓凝剂状态下,掺加减水剂后的不合格新拌水泥净浆流动度达到同配合比水泥净浆的标准、流动度经时损失最小;不合格新拌水泥净浆的初凝、终凝时间与同配合比水泥净浆的初凝、终凝时间接近.

按现有研究设置了缓凝剂掺量梯度^[9],进行工作性能对比试验,试验结果见图3.图3(a)、(c)中,缓凝剂掺加过量的水泥净浆终凝时间超过允许范围,故未记录.

由图3(a)、(b)可见,对于放置时间为90 min的不合格新拌水泥净浆,缓凝剂最优掺量为0.025%.在该掺量下,该类不合格新拌水泥净浆的初凝、终凝时间分别为360、465 min,与对照组相当;其流动度经时损失曲线同样与对照组高度吻合.

由图3(c)、(d)可见,对于放置时间为180 min的不合格新拌水泥净浆,缓凝剂最优掺量为0.050%.3组试验组中,掺量为0.025%和0.050%的试验组流动度经时损失相近,同时初凝、终凝时间也均与对照组接近,此处取相对较高值.

由图3(e)、(f)可见,对于放置时间为270 min的不合格新拌水泥净浆,缓凝剂最优掺量为0.100%.放置时间达到270 min时,水泥净浆已发生初凝,此时水泥净浆凝结过程对缓凝剂掺量的敏感度显著下降,掺量低于0.100%时的初凝、终凝时间变化与缓凝剂掺量关联性较低.缓凝剂掺量为0.100%时,该类不合格新拌水泥净浆的初凝、终凝时间分别为300 min和360 min,与对照组试验结果最为相似.

综上,放置时间不大于180 min的不合格新拌水泥净浆工作性能对缓凝剂掺量较为敏感,少量掺入(0.025%)即可获得超过300 min的初凝时间;放置时间达到270 min时,不合格新拌水泥净浆对缓凝剂掺量不再敏感,掺量达到0.100%时,其初凝时间可延长至300 min.

该现象符合柠檬酸钠缓凝剂的工作机理.单个柠檬酸钠大分子中含有3个羟基,作为活性基团,一方面,羟基可在水泥表面形成氢键,阻止水化进行;另一方面,羟基可与水泥表面钙离子吸附成膜,阻碍水泥粒子与游离水接触反应,从而抑制水泥水化过程^[9].硅酸盐水泥前期水化主要是硅酸三钙(C_3S)

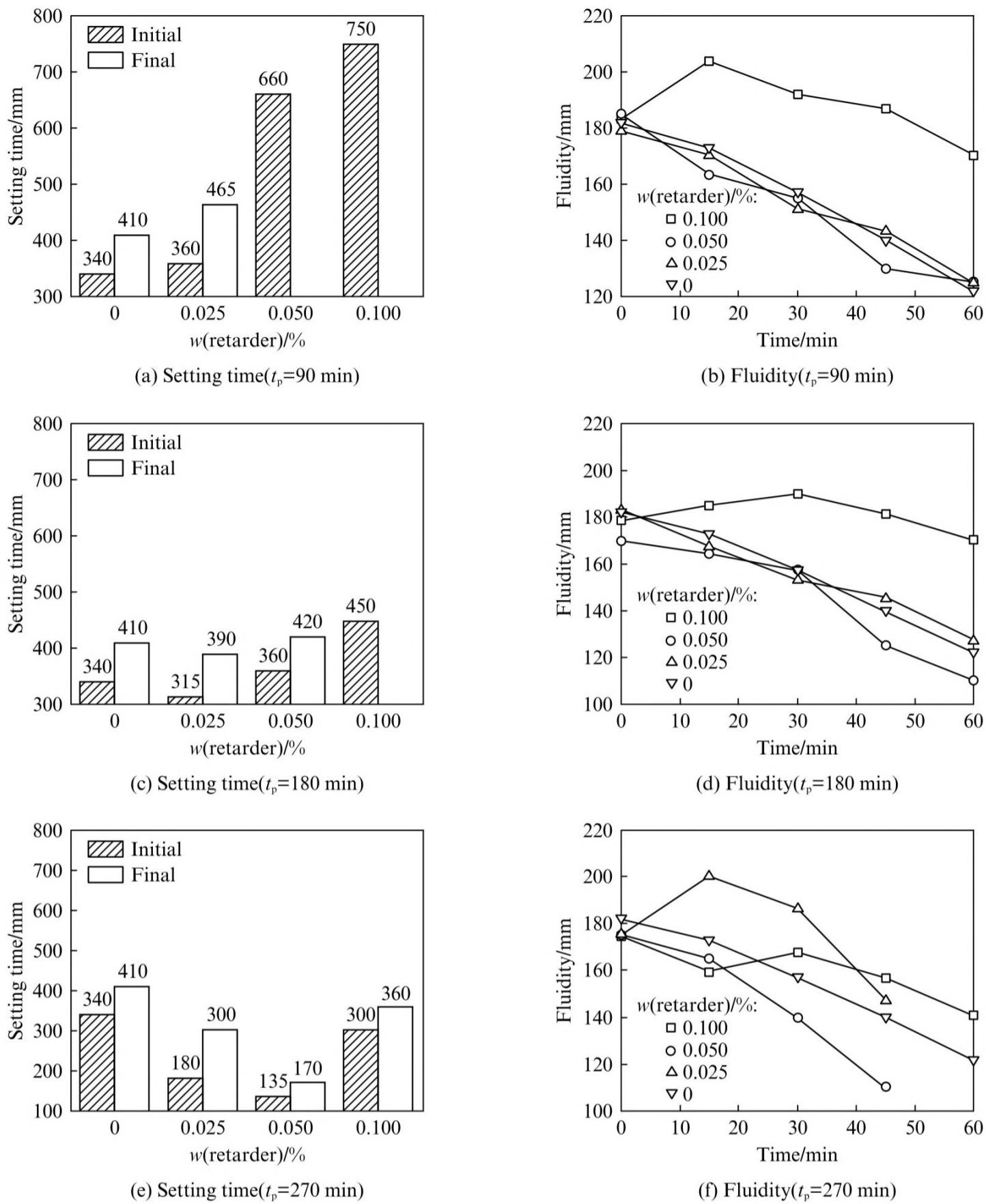


图3 3类不合格新拌水泥净浆的工作性能

Fig. 3 Working performance of three kinds of disqualified fresh cement paste

的水化. 在初凝前, C_3S 水化处于诱导期, 水化反应速率极慢, 水泥颗粒状态相对恒定^[10], 水泥水化产物数量较少, 水泥颗粒仍呈分散状态, 柠檬酸钠吸附作用显著, 此时, 随着柠檬酸钠掺量的提高, 其缓凝效果提升明显; 初凝后, C_3S 水化进入快速反应期, 水化反应剧烈进行并产生大量水化产物, 未水化的水泥颗粒相对减少, 柠檬酸钠的吸附效应产生的缓凝效果减弱; 另外, 水化产生的大量水化产物会对水泥颗粒间隙进行填充, 形成 C-S-H 凝胶结构^[11], 水泥内部变得致密, 在一定程度上阻碍了柠檬酸钠的吸附效应, 从而降低了柠檬酸钠的缓凝作用.

基于上述分析, 本研究建议的不合格新拌水泥净浆中缓凝剂、减水剂掺量(两者均分别以水泥净浆质量和胶凝材料质量为基准)如表 1、2 所示.

表1 不合格新拌水泥净浆的建议缓凝剂掺量

Table 1 Recommended contents of retarder in disqualified fresh cement paste

t_p / min	$w(\text{retarder})/\%$		Setting time/min	
	According to mass of cement paste	According to mass of cementitious material	Initial	Final
90	0.025	0.030	360	465
180	0.050	0.060	360	420
270	0.100	0.130	300	—

表2 不合格新拌水泥净浆的建议减水剂掺量
Table 2 Recommended contents of water reducer in disqualified fresh cement paste

t_p/min	$w(\text{water reducer})/\%$		Fluidity/mm	
	According to mass of cement paste	According to mass of cementitious material	Initial	After 60 min
90	0.035	0.045	181/174	130/120
180	0.125	0.161	165/173	110/110
270	0.240	0.310	172/182	147/135

3 混凝土试验及其分析

3.1 再生混凝土制备

基于不合格新拌水泥净浆试验结果,开展了不同放置时间、不同取代率(R)的再生混凝土工作性能和力学性能研究.

在再生混凝土工作性能研究中,选取不同放置时间(90、180、270 min)的不合格新拌混凝土,以20%取代率取代新拌混凝土,根据建议的缓凝剂掺量制备再生混凝土,并测试其初始坍落度和30、60、90 min的坍落度经时损失.坍落度试样编号见表3,试验结果见图4.

表3 再生混凝土坍落度试样编号
Table 3 Sample code of recycled concrete slump

Sample code	$w(\text{retarder})/\%$	$w(\text{water reducer})/\%$	t_p/min
T1.5	0.025	0.035	90
T3.0	0.050	0.125	180
T4.5	0.100	0.240	270

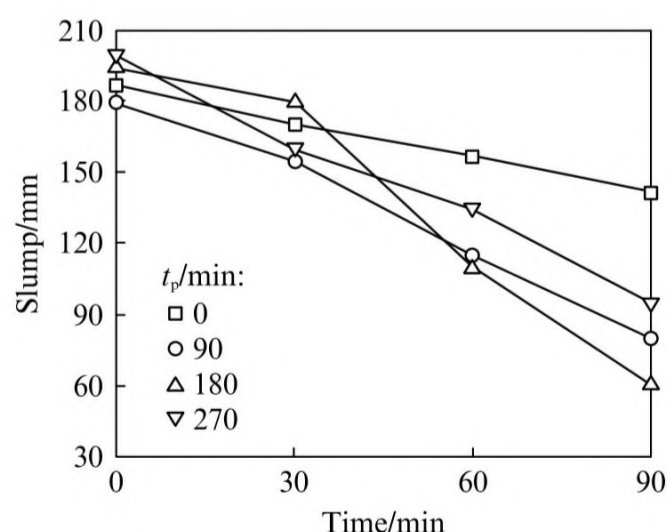


图4 再生混凝土坍落度

Fig. 4 Slump of recycled concrete

在再生混凝土力学性能研究中,选取不同放置时间(90、180、270 min)的不合格新拌混凝土,分别以10%、20%、30%取代率取代新拌混凝土,根据建议的减水剂和缓凝剂掺量制备再生混凝土,并测试其7、28 d抗压强度.抗压强度试样编号见表4;试验

结果见图5.每组抗压强度试验至少包含3个试件,结果取平均值;试件尺寸均为100 mm×100 mm×100 mm.

表4 再生混凝土抗压强度试样编号

Table 4 Sample code of recycled concrete compressive strength

Sample code	$R/\%$	t_p/min	$w(\text{retarder})/\%$	$w(\text{water reducer})/\%$
S101	10	90	0.025	0.035
S102	10	180	0.050	0.125
S103	10	270	0.100	0.240
S201	20	90	0.025	0.035
S202	20	180	0.050	0.125
S203	20	270	0.100	0.240
S301	30	90	0.025	0.035
S302	30	180	0.050	0.125
S303	30	270	0.100	0.240

3.2 再生混凝土坍落度经时损失分析

由图4可知:采用表3中的减水剂-缓凝剂用量后,不同放置时间下20%取代率的再生混凝土初始坍落度均可达到近似新拌混凝土水平,坍落度为(180±20)mm;拌和完成后的30 min内,再生混凝土仍能保持与新拌混凝土相似的坍落度水平.其中,采用放置时间为180 min的不合格新拌混凝土制备的再生混凝土30 min坍落度损失接近于新拌混凝土.

然而,由于水泥水化过程的不可逆性,再生混凝土水化程度总体高于新拌混凝土.经过60 min后,再生混凝土坍落度经时损失较大的特征逐渐显著,坍落度呈现加速下降趋势.此时,3类再生混凝土坍落度均低于新拌混凝土,但仍大于100 mm,满足JGJ/T10—95《混凝土泵送施工技术规程》要求泵送高度30 m以下时的泵送施工标准.随后,再生混凝土坍落度进一步下降,90 min时3类再生混凝土坍落度均低于100 mm,无法满足泵送施工要求.因此,建议再生混凝土生产后尽快在工程中使用;若生产后停滞时长超过60 min,则建议用作混凝土砌块、路沿石或其他水泥基制品的制备.

3.3 再生混凝土抗压强度分析

不同放置时间下,取代率不同的再生混凝土试件7、28 d抗压强度测试结果如图5所示.

由图5可见,相对新拌混凝土对照组,再生混凝土试验组的抗压强度均得到了一定程度的提升.混凝土早期抗压强度主要与水灰比和水化程度有关.水化程度越高、水灰比越低,混凝土早期抗压强度相对越高^[12].在试验中,一方面,由于不合格新拌混凝土放置时间较长,其内部水分经蒸发散失和水化反

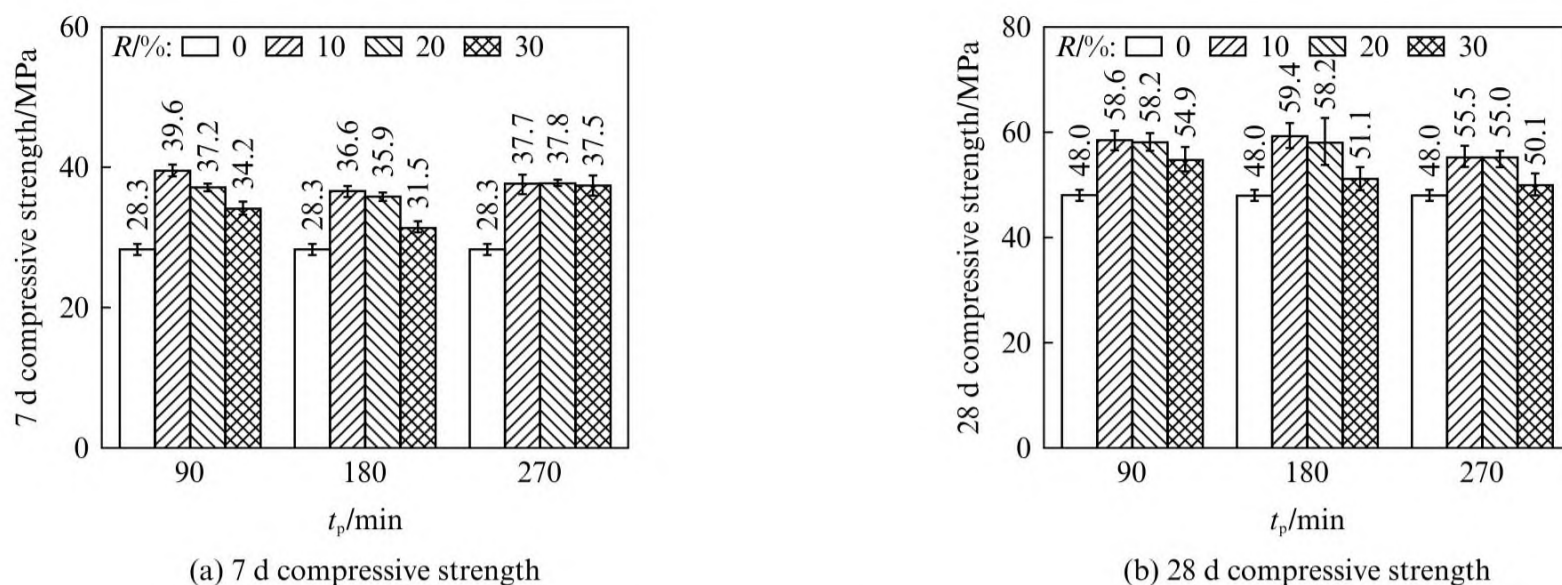


图5 不同取代率下的再生混凝土抗压强度与放置时间的关系

Fig. 5 Relationship between compressive strength and placing time of concrete with different replacing rates

应后减少,降低了再生混凝土的水灰比,使得再生混凝土抗压强度有所提升;另一方面,已经水化的部分不合格新拌混凝土的掺入,间接提高了再生混凝土的水化程度,又促使再生混凝土的抗压强度得到进一步的提升。

当不合格新拌混凝土放置时间相同时,随着不合格新拌混凝土取代率的增大,再生混凝土的7、28 d抗压强度整体呈现下降趋势.产生这种现象的主要原因是外加剂的掺入.安格尔^[8]的研究表明,同时掺加柠檬酸钠缓凝剂和聚羧酸减水剂时,羧基、酮基等活性基团对混凝土内水泥粒子的吸附作用较大,能较大地降低水泥的早期水化程度,从而使得混凝土7、28 d抗压强度均有下降.随着放置时间的延长,混凝土水化逐渐完全,强度下降趋势逐渐减缓.随着不合格新拌混凝土取代率的增加,柠檬酸钠缓凝剂和聚羧酸减水剂掺量相应增大,对再生混凝土水化反应产生的阻碍作用增大,使得再生混凝土抗压强度降低.其中,由于减水剂-缓凝剂用量在水泥水化早期影响更为显著,因此再生混凝土7 d抗压强度对不合格新拌混凝土取代率更为敏感。

当不合格新拌混凝土取代率相同时,再生混凝土7 d抗压强度与放置时间的相关性较弱,放置时间为180 min的试验组抗压强度整体低于放置时间为90、270 min的试验组.此时,外加剂掺量与所掺入不合格新拌混凝土水化程度作为2个主要影响因素,共同影响了再生混凝土的7 d抗压强度.再生混凝土28 d抗压强度随放置时间延长而不断降低,此时外加剂掺量成为主要影响因素,导致了外加剂掺量较多的270 min试验组抗压强度最低。

4 结论

(1)初凝前的不合格新拌混凝土可作为再生混

凝土的制备原料.通过将不合格新拌混凝土按比例部分取代新拌混凝土,并采用减水剂-缓凝剂外加剂体系对不合格新拌混凝土的工作性能进行调节,可以制备出性能合格的再生混凝土。

(2)减水剂-缓凝剂外加剂体系可有效调节不合格新拌水泥净浆的工作性能.采用减水剂-缓凝剂建议掺量时,不合格新拌水泥净浆初始流动度和60 min内流动度经时损失与同配合比新拌水泥净浆相似。

(3)不合格新拌水泥净浆中减水剂-缓凝剂建议掺量适用于不合格新拌混凝土工作性能的调节.再生混凝土初始坍落度和30 min内坍落度经时损失与同配合比新拌混凝土相似;60 min后再生混凝土坍落度经时损失显著增大,60~90 min内再生混凝土坍落度损失约为新拌混凝土坍落度损失的2.5倍。

(4)在本试验中,再生混凝土抗压强度整体优于同配合比新拌混凝土。

(5)当不合格新拌混凝土放置时间相同时,随着不合格新拌混凝土取代率的增大,其中的减水剂-缓凝剂掺量相应增加,再生混凝土7、28 d抗压强度整体呈现下降趋势;7 d抗压强度对不合格新拌混凝土取代率更为敏感。

(6)当不合格新拌混凝土取代率相同时,放置时间较长的不合格新拌混凝土水化程度更高,减水剂-缓凝剂用量更大.外加剂掺量与所掺入不合格新拌混凝土的水化程度共同影响了再生混凝土的抗压强度。

(7)本文采用不合格新拌混凝土制备出再生混凝土,对其制备工艺流程的有效性进行了验证.由于本文得到的最适宜外加剂类型和掺量会随混凝土类型及其配合比等发生变化,因此应根据具体情况进行具体分析。

参考文献:

- [1] 易莉,李玉云,彭波,等.预拌混凝土能源消耗现状及节能潜力分析[J].混凝土,2012(11):87-90,93.
YI Li, LI Yuyun, PENG Bo, et al. Analysis of energy consumption present situation and energy saving potential of the commercial concrete[J]. Concrete, 2012(11): 87-90, 93. (in Chinese)
- [2] 纪宪坤,杨欣华,韦庆东.预拌混凝土搅拌站绿色生产技术探讨[J].施工技术,2014,43(24):24-27.
JI Xiankun, YANG Xinhua, WEI Qingdong. Green production technology of ready-mixed concrete mixing station [J]. Construction Technology, 2014, 43(24): 24-27. (in Chinese)
- [3] 肖建庄.再生混凝土[M].上海:中国建筑工业出版社,2008.
XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Shanghai: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [4] 贾宗明.再生混凝土基于含浆量配合比设计及其力学性能试验研究[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2014.
JIA Zongming. Recycled aggregate concrete mixture proportion method design and experimental study of mechanical property based on pulp content [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [5] 曲睿祚.废弃浆料对预拌混凝土性能影响的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
QU Ruizuo. Research on the influence of mixing station waste on premixed concrete waste on premixed concrete properties [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [6] KUMAR M, SINGH N P, SINGH S K. Effect of polycarboxylate type of super plasticizer on the hydration properties of composite cements[J]. Frontiers of Chemistry in China, 2011, 6(1): 38-43.
- [7] 王振军,何廷树.缓凝剂作用机理及对水泥混凝土性能影响[J].公路,2006(7):149-154.
WANG Zhenjun, HE Tingshu. Function mechanism of retarding agent and its influences on properties of cement concrete [J]. Highway, 2006(7): 149-154. (in Chinese)
- [8] 安格尔.复配聚羧酸系减水剂对混凝土性能的影响[D].南昌:南昌航空大学,2014.
AN Ge'er. Effect of complex polycarboxylic acid reducing agent on properties of concrete [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2014. (in Chinese)
- [9] RAMACHANDRAN V S, LOWERY M S. Conduction calorimetric investigation of the effect of retarders on the hydration of Portland cement [J]. Thermochimica Acta, 1992, 195: 373-387.
- [10] ODLER I, DÖRR H. Early hydration of tricalcium silicate II. The induction period [J]. Cement and Concrete Research, 1979, 9(3): 277-284.
- [11] JUILLAND P, GALLUCCI E, FLATT R, et al. Dissolution theory applied to the induction period in alite hydration [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(6): 831-844.
- [12] AITCIN P C, NEVILLE A. How the water-cement ratio affects concrete strength [J]. Concrete International, 2003, 25(8): 51-58.