

颗粒整形后粗骨料特征及其对混凝土性能的影响

赵明^{1,2}, 张雄^{1,2}, 张晓乐^{1,2}, 李仰根³

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804; 3. 厦门美益集团有限公司, 厦门 361027)

摘要: 以小型球磨机为模拟整形动力来源,研究了颗粒整形后粗骨料基本特征参数的变化规律,并与其应用性能进行关联分析。结果表明:整形过程根据粗骨料颗粒变化情况分为三个阶段:针片状颗粒转换阶段,棱角消除阶段以及颗粒破碎阶段;适当的颗粒整形使粗骨料配制混凝土的流动度有较大提升同时不降低强度,但是过度整形会对流动度和强度产生不利影响;在整形前期,针片状转换造成的堆积密度增加是影响混凝土流动性的关键参数,整形后期,粗骨料颗粒形貌的圆形化是影响混凝土流动性的主要因素;堆积休止角作为综合评价粗骨料颗粒间内摩擦力的参数对于整形后粗骨料与流动性的关联性最为紧密。

关键词: 粗骨料; 颗粒整形; 堆积密度; 圆度; 休止角

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Research on the Characteristic of Coarse Aggregate After Particle Shaping and the Influence on the Concrete Performance

ZHAO Ming^{1,2}, ZHANG Xiong^{1,2}, ZHANG Xiaole^{1,2}, LI Yanggen³

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Xiamen Meiyi Group co., Ltd., Xiamen 361027, China)

Abstract: By using small ball mill as the shaping source, the change of basic characteristics of coarse aggregate after particle shaping was studied and correlation analysis was conducted between the aggregate characteristics and its application performance. The results show that according to the change of the coarse aggregate particles, the shaping process is divided into three stages: transformation stage of elongated and flaky particles, roundness improve stage and

particle crushing stage. Appropriate particle shaping process can make the aggregate use in the concrete to increase significantly the flowability of concrete and not to reduce the strength, but excessive shaping will be harmful to the flowability and strength. In the early stage of the particle shaping, packing density increasing caused by needle flake transformation is the key parameters affecting the concrete flowability. In the latter particle shaping process, roundness of coarse aggregate is the main factors influencing the concrete flowability. As a comprehensive parameter to evaluate the friction between the coarse aggregate particles, angle of repose of aggregate particles has high correlation with the flowability of concrete.

Key words: coarse aggregate; particle shaping; packing density; roundness; angle of repose

粗骨料是混凝土中所占比例最大的组分,对混凝土的性能影响较大^[1]。随着自然资源的不断开采,品质良好的粗骨料资源正日益匮乏,应用品质较差粗骨料并生产出合格混凝土产品是相关产业面临的重要问题^[2]。品质较差的粗骨料通常针片状多、粒形差、级配差,导致配制出的混凝土各方面性能下降^[3-5],而通常采用增加胶凝材料总量以及采用特种添加剂的方法进行修复而又显著增加了生产成本,使得混凝土产品经济性下降。因此,针对品质差的粗骨料如何进行合理优化,最大程度上发挥粗骨料的利用率,对于建筑行业综合经济性、环保性具有重要价值。

对于品质较差粗骨料的应用,通常具有几种方法:其一,降级使用,配制低强度等级混凝土;其二,通过调整混凝土配合比,提高胶凝材料总量、降低水灰比、使用功能外加剂等方法来弥补性能下降问

收稿日期: 2015-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(51378391)

第一作者: 赵明(1989—),男,博士生,主要研究方向为混凝土性能基本理论。E-mail: zhaoming_tj07@163.com

通讯作者: 张雄(1956—),男,工学博士,教授,博士生导师,主要研究方向为建筑结构与功能材料。E-mail: zhangxiong@tongji.edu.cn

题^[6];其三,以粗骨料为处理对象,采用添加聚合物等方法^[7-9]改善粗骨料的界面特征,进而使得粗骨料在混凝土中的作用效果有所提升.对于方法1、2属于被动性接受粗骨料品质低下的技术方案,当粗骨料性能频繁发生变化时,对于配合比的调整往往不能及时进行调整;方法3具有显著效果,但是会增加混凝土产品成本,也使得推广受到一定限制.粗骨料的品质差主要还是集中在颗粒粒形方面,因此通过对粗骨料颗粒整形而实现提高其性能是一种可以尝试的手段,在研究再生骨料时,有研究^[10-12]引入骨料整形的技术,改善再生粗骨料的性能进而优化再生混凝土的相关性能,取得了一定的研究成果.然而在天然粗骨料的处理方面,少有文献研究利用整形技术处理改善骨料形貌进而提高混凝土性能的研究.

本文讨论整形作用对粗骨料的影响以及后续应用过程中对混凝土性能的影响规律.同时,粗骨料的整形技术为深入研究粗骨料的基本特征对混凝土性能的影响规律提供了可能,利用常规分析法、图像分析法、内摩擦力评价等方式评价粗骨料的基本性质,并将其与混凝土性能进行关联分析,从而获取粗骨料整形的技术指标及影响规律,初步建立整形粗骨料性能评价体系.

1 试验

1.1 原材料

水泥:江南小野田 P II 52.5 水泥,密度 $3.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;砂:中砂,细度模数 2.3;石:5~31.5 mm 碎石,针片状含量 13%;减水剂:市售萘系减水剂,推荐掺量 2%,减水率 18%.

1.2 试验方案

1.2.1 粗骨料的整形试验

利用小型球磨机作为整形动力来源,调整不同的整形时间,获取不同特征的粗骨料.试验过程中,首先取出球磨机中所有钢球和钢锻,取粗骨料 40 kg 放入球磨机,达到设定的整形时间后将整形后的骨料全部卸出,经自然干燥并筛除 5 mm 以下颗粒后,用于测量粗骨料的基本颗粒参数及混凝土试验.分别定制整形时间 5、10、12.5、15、25、35 min 的粗骨料为 CA05、CA10、CA12.5、CA15、CA25、CA35.

1.2.2 粗骨料颗粒参数的测定

(1) 粗骨料常规参数的测定

根据 GB/T 14685—2011《建设用卵石、碎石》测定粗骨料堆积密度、级配、针片状含量,作为整形粗

骨料的基本性能指标;

(2) 粗骨料形状特征测定

结合定量体视学原理,利用图像分析法^[6,13],经过图像获取—增强—图像二值化—图像分割—自动测量,实现对粗骨料参数的获取,本文主要研究粗骨料的颗粒形貌.图像获取方法见图 1,通过计算机辅助分析颗粒特征参数,采用圆度值计算公式(式(1))计算粗骨料圆度值,作为粗骨料形状特征参数.

$$R_{ou} = 4\pi \cdot A / P_{er}^2 \quad (1)$$

式中: R_{ou} 为计算获得的颗粒圆度; A 为利用图像分析方法获得的颗粒面积; P_{er} 为利用图像分析方法获得的颗粒边界周长.

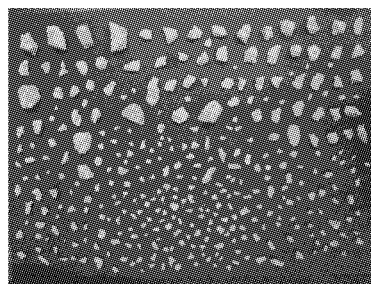


图1 粗骨料颗粒信息的数字获取

Fig.1 Characteristic of coarse aggregate analysis by digital image processing

(3) 休止角的测定

粗骨料的表面形貌对混凝土性能影响显著,当粗骨料之间摩擦力较大,混凝土流动性降低.利用颗粒的堆积休止角可以一定程度上反映颗粒间的内摩擦力^[14],本文选用如下的休止角测量方法,对粗骨料的内摩擦力进行评价.测量方法见图 2,在一个平台上固定一个半径 R 为 235 mm 的圆柱体,圆柱体上方 250 mm 处固定一个漏斗.将骨料从漏斗上方注入,则骨料会在圆柱体上表面形成一个底面半径为 R 的锥体.测量锥体骨料堆的高度 H ,则休止角为 θ

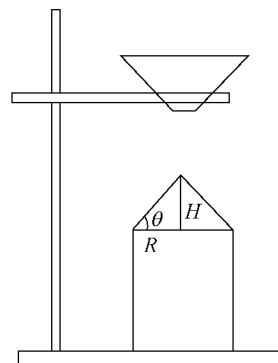


图2 堆积休止角测量装置

Fig.2 Measuring device of angle of repose

$$= \arctg(H/R).$$

该方法较之正常注入法的不同点为本方法使用一圆柱体来限制所形成的圆锥体的底面半径,而不是让骨料在平面上形成圆锥体.在圆柱体上可以形成规则底面的锥体,降低测量难度并提高精度.试验过程中为确保测量值的准确性,每组试样重复三次试验.

1.2.3 混凝土性能的测定

利用 7 种不同颗粒特征的粗骨料配制混凝土,混凝土配合比见表 1,分别测定混凝土工作性能和力学性能.混凝土坍落度参照 GB/T 50080—2002《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》,混凝土力学性能参照 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行.

表 1 混凝土配合比

Tab.1 Mix proportion of concrete

水/(kg·m ⁻³)	水泥/(kg·m ⁻³)	砂/(kg·m ⁻³)	石/(kg·m ⁻³)	外加剂/(kg·m ⁻³)
180	350	800	1 050	7

2 结果分析与讨论

2.1 粗骨料颗粒参数的变化规律

(1) 颗粒基本特征参数的变化

测定不同整形时间作用下粗骨料的基本特征参数变化情况见图 3.由图 3a 可知,随着整形时间增加,堆积密度变化显著,可以将堆积密度的变化规律分为三个阶段:整形时间 0~10 min,堆积密度呈现线性增加趋势,当整形时间为 10 min 时,堆积密度增加 7%;而后堆积密度呈现平稳趋势,没有显著增加,这一阶段持续到整形时间 25 min;当整形时间超过 25 min,堆积密度又出现快速增长,整形 35 min 时,堆积密度相比未整形增加 10%.第一个阶段为颗

粒变化最显著阶段,由图 3b 可知这一阶段大量的针片状的粗骨料,在相互碰撞挤压过程中破碎成为小颗粒,因此能够快速消除针片状的不利影响,使得堆积密度快速提高,这与再生骨料的整形效果相似^[11];当完成了针片状颗粒的整形后,堆积密度的变化进入平稳阶段,这一阶段主要是粗骨料颗粒相互碰撞降低颗粒棱角,提高颗粒的圆形度,本质上是颗粒的棱角转化成小于 5 mm 的石粉,因此并不能改变颗粒的颗粒分布,表现在级配曲线上(图 3c)即多级配曲线重叠在一起,没有显著区分度.因此,从颗粒堆积角度来讲并没有对堆积密度造成显著影响.而当颗粒整形进一步进行,一些强度低的颗粒发生裂解,因而造成了颗粒级配的改变,整体颗粒趋于变小,使得堆积密度呈现显著的增加趋势.

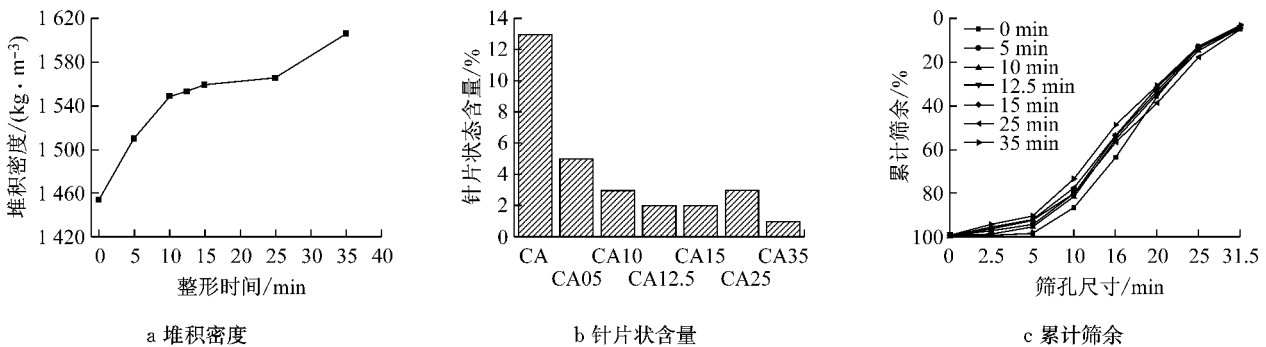


图 3 整形时间对粗骨料基本特征参数的影响

Fig.3 Effect of shaping time on the basic parameters of coarse aggregate

(2) 整形过程对颗粒圆度的影响

通过调整不同的整形时间,获得不同圆度特征的粗骨料.利用图像分析法分析整形后骨料的圆度值,结果如图 4 所示.根据圆度值的定义,圆度值越接近于 1,颗粒越接近圆形.整形后粗骨料,圆度值呈现显著增加趋势,逐步接近 1,说明颗粒整形对于粗骨料颗粒存在圆形化作用.整形时间在 25 min 以内,圆度值快速增加;当整形时间超过 25 min,整形

后粗骨料圆度值相对平稳,当整形时间为 35 min 时,其圆度值略低于 25 min 的圆度值.在骨料整形过程中,颗粒解体与颗粒表面圆整化是影响圆度值的两个主要因素,其中颗粒解体是指整形早期针片状颗粒的破碎,转化成小颗粒而使圆度值接近 1,以及整形后期一些骨料由于大量冲击而破碎成小颗粒,这一转化过程多产生垂直断面而使圆度值偏离 1;在整形过程中一直持续的圆整化作用则自始至终

提高颗粒圆形程度. 总体来讲在整形时间 25 min 以前, 颗粒圆度值发生的变化是由于针片状破碎与颗粒棱角消失所造成的, 而后期圆度值变化并不显著是因为针片状消失殆尽并且骨料形貌变化速度趋缓. 当整形时间过长达到 35 min 时, 一些强度较低的颗粒产生破碎, 反而降低了整体圆度.

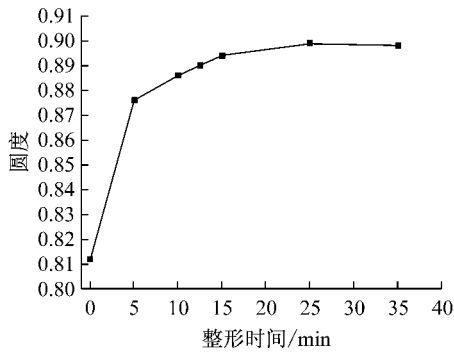


图 4 整形时间对圆度的影响

Fig. 4 Change of roundness of aggregate along with the shaping time

(3) 颗粒堆积休止角的变化

利用自行研制的休止角测定方法, 研究粗骨料的整形效果, 结果见图 5. 随着整形时间的增加, 粗骨料堆积休止角整体呈现下降趋势, 当整形时间超过 25 min 呈现最低值, 而后堆积休止角增加. 休止角可以从一定角度反映粗骨料颗粒群的内摩擦力, 堆积休止角越大, 说明内摩擦力较大. 整形后颗粒的堆积休止角下降, 说明颗粒内摩擦力降低. 内摩擦力主要受颗粒间的相互作用影响, 与两方面特征关联性较强: 颗粒形状特征与颗粒表面特征. 颗粒形貌差, 棱角间的相互搭接是阻碍颗粒相对运动的重要影响因素, 颗粒表面光滑在相互碰撞的过程中, 能够降低内摩擦力. 当整形时间过长而造成颗粒破损后产生的颗粒由于棱角性而增加了颗粒间的内摩擦力, 因此在整形时间达到 35 min 时, 休止角出现增大情形.

整形后粗骨料颗粒参数变化较为显著, 随着整形时间增加, 堆积密度先增加后平稳, 而后进入下一个增加趋势; 圆度值随整形进程而显著增加, 当整形时间超过 25 min, 趋于平缓; 堆积休止角呈现线性下降趋势, 当整形时间过长又会出现增长.

2.2 整形后粗骨料对混凝土性能的影响

利用整形后粗骨料配制混凝土, 坍落度变化情况见图 6. 随着整形时间的增加, 混凝土坍落度呈现抛物线形状, 即先增加到最高点而后下降, 说明整形后的骨料对于坍落度的影响是多方面的. 颗粒整形主要作用时将针片状等粒形较差的颗粒转化成小颗

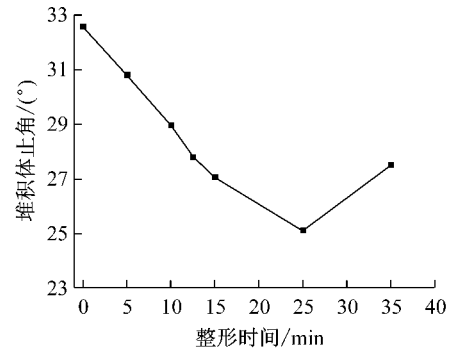


图 5 整形时间对粗骨料堆积休止角的影响

Fig. 5 Effect of shaping time on the angle of repose

粒, 另一方面是消除颗粒棱角提高圆形度, 进一步能够实现将颗粒表面修正光滑的作用. 从整形效果上来讲, 提高颗粒堆积密实度、增加圆度值、降低休止角对于混凝土的流动性均是有利因素, 提高颗粒密实度, 能够降低填充颗粒堆积空隙, 也就提高了润滑作用的浆体量, 提高圆度的关键在于消除了颗粒的棱角, 在颗粒相互运动的过程中, 相对阻力降低, 因此提高流动性, 在对再生粗骨料整形后能够得到相似的结论^[10]. 而休止角更是反映颗粒内摩擦力的综合参数, 内摩擦力降低, 在流动过程中的阻力进一步降低, 因此混凝土的坍落度在逐步增加. 然而当整形时间过长, 尽管整形作用对于流动性具有多重优势, 但是过度的整形会使部分强度低的颗粒产生破损, 而造成对流动性的不利因素, 导致混凝土坍落度在后期出现下降.

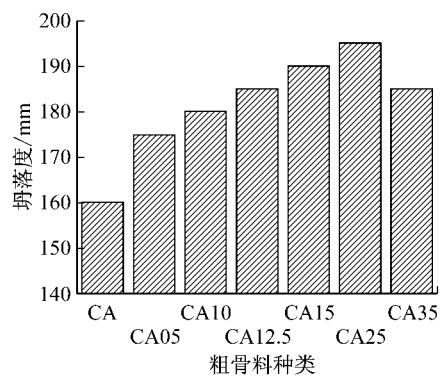


图 6 不同整形效果粗骨料对混凝土坍落度的影响

Fig. 6 Influence of different shaping aggregate on the slump of concrete

图 7 为不同颗粒特征的粗骨料配制混凝土的强度变化情况. 由图可知, 随整形时间的增加, 整形粗骨料配制混凝土的强度首先是较为平稳没有显著变化, 当整形时间超过 25 min, 混凝土的强度开始呈现下降趋势. 粗骨料在针片状、表面粗糙度、粗骨料的

坚实度这几个角度影响着混凝土的强度性能,针片状在受力过程中由于强度较弱会首先出现断裂,会降低混凝土强度;表面粗糙度越高,粗骨料-砂浆界面粘结力越强,混凝土强度越高;骨料的坚实度对于混凝土强度是积极因素,若坚实度很低则会降低混凝土整体强度.从这三个方面来研究粗骨料整形后对混凝土强度的影响,首先针片状的减少会提高混凝土的强度;而经过整形后混凝土表面会相对光滑,降低了粗骨料-砂浆界面的粘结,因此降低混凝土强度;再次,整形过程中粗骨料相互之间剧烈碰撞会在粗骨料内部产生一定量的微裂纹,当整形达到一定强度后,大量的微裂纹会造成粗骨料强度大大下降,会对混凝土强度起到负面影响.而在实际的试验中,在初期混凝土的强度变化不明显,主要是因为前期是粗骨料针片状转化和表面光滑度提高的过程,两方面因素对强度的影响趋势相反,综合表现出对混凝土强度的影响并不大,混凝土强度保持相对稳定的趋势,但是当使用整形时间超过 25 min 的粗骨料,混凝土的强度下降幅度较大,这一过程一方面粗骨料表面光滑度进一步提高,并且整形时的粗骨料的强度降低,因此对于混凝土强度影响较大,强度大幅度下降.说明品质较差的粗骨料,在整形前期对于混凝土宏观强度的影响不大,但是如果过度整形,会造成粗骨料强度的弱化,配制混凝土的性能大幅度下降.

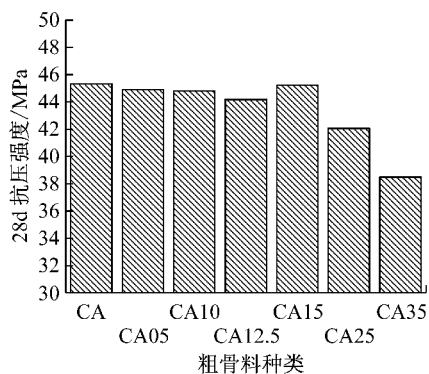


图7 混凝土强度随颗粒整形时间的变化规律

Fig.7 Influence of different shaping aggregate on the strength of concrete

2.3 粗骨料整形过程分析及整形关键参数的获取

从粗骨料颗粒基本特征上分析,可以将整形过程分为三个阶段:针片状的整形转换,粗骨料棱角的消除,整形效果进一步加强.在第一阶段,针片状被破碎成小颗粒,因此圆度值变化显著,颗粒堆积密度

也变化显著,颗粒间内摩擦力下降而堆积休止角表现为减小;第二阶段粗骨料的棱角被逐步消除但颗粒分布未显著变化,圆度值进一步增加,但堆积密实度没有明显变化,堆积休止角由于颗粒表面的进一步圆形化而减小;在第三阶段,当圆度值增加到一定程度,表明整形作用已经能够达到改变骨料颗粒尺寸的程度,一些骨料颗粒发生尺度上的转化,整体颗粒尺寸降低,堆积密实度进一步提高,但是却增加了整体的内摩擦力.

就整形后粗骨料配制混凝土的强度而言,除非达到整形过度,混凝土的强度没有十分显著的变化,因此作为次要考虑因素.然而混凝土工作性的变化更为显著,结合骨料整形过程中的几个阶段,本实验中以 15 min 为分界线,分布讨论整形后粗骨料的特征参数与流动性的关联性,结果见图 8a.当整形时间小于 15 min 时,粗骨料整形处于破损针片状的阶段,堆积密度的增加趋势与混凝土流动性的变化趋势十分接近,说明在此阶段堆积密度的变化是引起混凝土性能变化的主要因素,颗粒整形对于混凝土性能的优化效果在于对针片状颗粒的转化;当整形时间超过 15 min 后,针片状大多已经转化完成,粗骨料整体品质有所提高,这时颗粒圆度值的变化趋势与混凝土坍落度变化呈现相关趋势,这说明在整形后期,混凝土流动性的变化主要是由于颗粒形貌的圆形化造成的.

堆积密度与圆度值,两者交互影响混凝土流动性,在不同阶段分别作为影响混凝土流动性的关键特征参数.这也对未来配合比设计中有关粗骨料信息识别提供方向:品质差的骨料以其堆积密度作为主要调控参数,而品质较好骨料以其圆度值作为调控参数.同时,在本研究中提出的堆积休止角,作为综合评价骨料间内摩擦力的参数,与混凝土流动性具有更为直接的关联性,见图 8b.堆积密度与圆度值是从理论上解释整形后粗骨料对混凝土流动性的影响规律,而堆积休止角是从更为粗犷的角度,从混凝土流动的整体角度出发,提出了一种新的评价粗骨料的方式.

值得注意的是,本研究所采用的模拟整形设备为小型球磨机,与大型机械设备存在一定的差异性,因此本文的整形时间在工业生产阶段不具备参考意义;在实际生产中,宜通过本研究的骨料特征为调控指标,优化大型机械设施的生产过程参数,获得所需要性能特征的骨料.

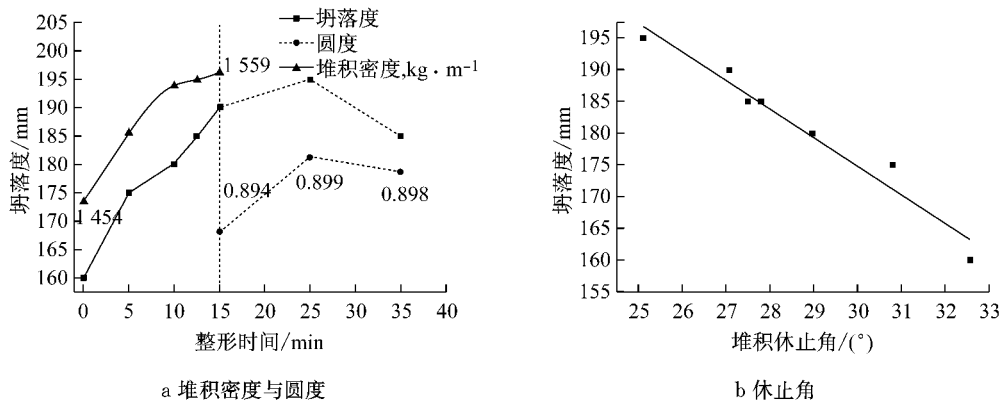


图8 粗骨料特征参数与混凝土坍落度的关联性

Fig.8 Relation between key parameter of coarse aggregate and slump of concrete

3 结论

本文利用小型球磨机对粗骨料进行颗粒整形,研究整形过程中粗骨料基本特征的变化以及对所生产混凝土性能的影响规律,得出以下结论:

(1) 随着整形时间增加,粗骨料堆积密度先增加后平稳,而后进入下一个增加趋势;圆度值随整形进程而显著增加,后期趋于平缓;堆积休止角呈现线性下降趋势,当整形时间过长又会出现增长.从粗骨料颗粒基本特征变化角度分析,可以将整形过程分为三个阶段:针片状颗粒转换阶段,粗骨料棱角的消除阶段和颗粒破碎阶段.

(2) 整形后粗骨料流动度有较大提升,但是过度整形会降低流动度;初步整形粗骨料对混凝土强度无显著影响,在本实验条件下整形时间超过 25 min,对强度产生副作用;

(3) 在整形前期,堆积密度是影响混凝土流动性的关键参数,整形后期,粗骨料颗粒形貌的圆形化是影响混凝土流动性的主要因素;堆积休止角作为综合评价粗骨料颗粒间内摩擦力的参数对于整形后粗骨料与流动性的关联性最为紧密.

参考文献:

- [1] Meddah M S, Zitouni S, Belaabes S. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(4): 505.
- [2] Beshr H, Almusallam A A, Maslehuddin M. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17(2): 97.
- [3] Liu L, Shen D J, Chen H S, *et al.* Aggregate shape effect on

the diffusivity of mortar: A 3D numerical investigation by random packing models of ellipsoidal particles and of convex polyhedral particles [J]. *Computers and Structures*, 2014, 144: 40.

- [4] Piotrowska E, Malecot Y, Ke Y. Experimental investigation of the effect of coarse aggregate shape and composition on concrete triaxial behavior[J]. *Mechanics of Materials*, 2014, 79: 45.
- [5] Basheer L, Basheer P, Long A E. Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 19(9): 682.
- [6] Kwan A, Mora C F, Chan H C. Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(9): 1403.
- [7] Tam V, 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.
- [8] Ryu J S. Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2002, 21(20): 1565.
- [9] Katz A. Treatments for the improvement of recycled aggregate [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2004, 16(6): 597.
- [10] 毛高峰,李艳美,万盈盈,等. 颗粒整形对再生粗骨料混凝土工作性的影响[J]. *混凝土*, 2008(7): 66.
MAO Gaofeng, LI Yanmei, WANG Yingying, *et al.* Influence of particle shaping on the workability of recycled coarse aggregate concrete[J]. *Chinese Concrete*, 2008(7): 66.
- [11] 李秋义,李云霞,朱崇绩. 颗粒整形对再生粗骨料性能的影响 [J]. *材料科学与工艺*, 2005(6): 579.
LI Qiuyi, LI Yunxia, ZHU Chongji. The influence of a Particle shaping technique in properties of recycled coarse aggregate [J]. *Materials Science and Technology*, 2005(6): 579.
- [12] 秦原,李秋义,孟文燕,等. 再生粗骨料颗粒整形的必要性[J]. *青岛理工大学学报*, 2009, 30(6): 25.
QIN Yuan, LI Qiuyi, MENG Wenyan, *et al.* The necessity for shaping recycled coarse aggregate particles [J]. *Journal of Qingdao Technological University*, 2009, 30(6): 25.

- [13] Mora C F, Kwan A K H, Chan H C. Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing[J]. *Cement and Concrete Research*, 1998, 28(6): 921.
- [14] 胡小芳,马静,胡大为,等. 粉体粒度分布分维与流动性及滑石对流动性影响[J]. *材料工程*, 2007(2): 42.
- HU Xiaofang, MA Jing, HU Dawei, *et al.* Correlation of powders particle size distribution fractal with flowability and the effect of talc on flowability[J]. *Materials Engineering*, 2007(2): 42.

~~~~~

(上接第 361 页)

- China Ministry of Construction. GB/T(50080)—2002 Standard for test method of performance on ordinary fresh concrete [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [11] 李飞. 混凝土早期约束应力发展与松弛过程研究[D]. 北京:清华大学, 2009.
- LI Fei. Research on the development of restraint stress and relaxation of concrete at early age [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [12] 安明哲,覃维祖,朱金铨. 高强混凝土的自收缩试验研究[J]. *山东建材学院学报*, 1998(增 1): 139.
- AN Mingzhe, TAN Weizu, ZHU Jinquan. Experimental study on autogenous shrinkage of high-strength concrete [J]. *Journal of Shandong Institute of Building Materials*, 1998(Supplement 1): 139.
- [13] Ilc A, Turk G, Kavcic F, *et al.* New numerical procedure for the prediction of temperature development in early age concrete structures [J]. *Automation in Construction*, 2009, 18(6): 849.
- [14] Atrushi D. Tensile and compressive creep of early age concrete: testing and modeling [D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2003.
- [15] Bjontegaard O, Sellevold E. Interaction between thermal dilation and autogenous deformation in high performance concrete [J]. *Materials and Structures*, 2001, 34(5): 266.
- [16] 张涛. 混凝土早期开裂敏感性的影响因素研究[D]. 北京:清华大学, 2006.
- ZHANG Tao. Studies on influencing factors of cracking sensitivity of concrete at early ages [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.
- [17] Jeong J H, Dan G Z, Lim J S, *et al.* Age and moisture effects on thermal expansion of concrete pavement slabs [J]. *Journal of Materials In Civil Engineering*, 2012, 24(1): 8.
- [18] 崔激,陈王,王宁. 早期混凝土热学参数优化及温度场精确模拟[J]. *四川大学学报:工程科学版*, 2014, 46(3): 161.
- CUI Wei, CHEN Wang, WANG Ning. Early concrete thermal parameters optimization and accurate thermal field simulation [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2014, 46(3): 161.
- [19] 朱伯芳. 大体积混凝土的温度应力与温度控制[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.
- ZHU Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: China Water & Power Press, 1999.
- [20] Azenha M, Rui F, Ferreira D. Identification of early-age concrete temperature and strains: Monitoring and numerical simulation[J]. *Cement & concrete composites*, 2009, 31(6): 369.