

数字图像技术评价混凝土粗集料结构的有效性分析

马 翥¹, 李 宁¹, 王 科²

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘 要:粗集料骨架结构对水泥混凝土性能有明显影响,但目前缺乏相应的粗集料结构评价指标与方法。利用数字图像处理技术,采集粗集料的表面数字图像,实测试件表面粗集料数目,并与理论表面数目和理论体积数目对比,分析数字图像技术评价嵌锁骨架结构粗集料结构状态的有效性。研究表明:利用数字图像技术实测得到的表面粗集料数目、计算得到的理论表面粗集料数目和理论体积粗集料数目均与集料质量比有良好线性关系,并且表面粗集料数目实测值与理论值差别很小;实测的表面粗集料数目可以有效地表征集料质量比所反映的不同粒径集料颗粒的组成及其分布特征。

关键词:道路工程;数字图像技术;粗集料;有效性;集料质量比

中图分类号:U414

文献标志码:A

Effectiveness analysis of the evaluation of digital image technology on coarse aggregate structure of cement concrete

MA Biao¹, LI Ning¹, WANG Ke²

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CCCC First Highway Consultants Co. Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: The skeleton structure of coarse aggregate has a significant effect on performances of cement concrete. However, there is no corresponding index and method to evaluate the coarse aggregate structure at present. This study gathers the surface digital images of coarse aggregate, and measures the surface coarse aggregate number of specimen by using the digital image technology. Compared with the theoretical surface number and the volume number, the effectiveness of digital image technology in coarse aggregate structure evaluating is analyzed. The results show that the measured surface coarse aggregate number obtained from the digital image technology, the theoretical surface and volume coarse aggregate number are all linear to the aggregate mass ratio. The difference between the measured values and the theoretical values of the surface coarse aggregate number is very small. Moreover, the measured surface coarse aggregate number can effectively represent the composition and distribution characteristics of different particle size aggregate. 11 figs, 14 refs.

Key words: road engineering; digital image technology; coarse aggregate; effectiveness; aggre-

gate mass ratio

0 引言

随着水泥混凝土技术的不断发展,以及工程建设对水泥混凝土质量的要求越来越高,水泥混凝土向高性能、长寿命方向发展。为了达到高性能、长寿命的要求,目前水泥混凝土设计与施工中主要采用增加水泥用量、使用各种外掺料等方法,然而这些措施基本上都是基于水泥石理论,对占体积 50% 以上的粗集料的重视程度明显不足。粗集料作为决定混凝土强度和耐久性的关键性因素之一,却未能充分发挥粗集料在混凝土中的刚性骨架、阻挡裂缝的作用^[1-7]。因此,从充分发挥粗集料作用的角度出发,国内外学者对骨架型结构水泥混凝土开展研究,提出了不同水泥混凝土结构模型,如大中心质模型、晶体结构模型、垛密理论等,阐明了粗集料在混凝土中的重要作用,并根据这些模型提出了不同结构型式。王立久等提出架构混凝土设计理论框架^[8];陈忠达等提出了由集料主、次骨架结构形成的多级嵌挤密实级配(MDBG)设计体系^[4];马翥等提出了粗集料嵌锁骨架结构和嵌锁密实水泥混凝土组成模型^[5-8]。虽然相关研究已经提出了粗集料骨架结构模型和设计方法,但缺乏相应的粗集料结构评价指标与方法,无法有效表征粗集料在混凝土中的结构特征。

目前,数字图像技术在沥青混合料的粗集料指标评价中已得到广泛应用。彭勇等利用数字图像处理技术,对沥青混合料均匀性进行研究,从沥青混合料中集料的分布位置和分布数量两方面考虑,结合面积比 k ,表明沥青混合料的均匀性能够在数值上进行评价^[9];英红等应用数字图像技术,对沥青混合料的集料接触分布特征进行了研究,采用统计分析方法,找出了各档集料的接触分布规律^[10];汪海年等采用数字图像处理技术,利用自行研制的粗集料形态特征研究系统(MASCA),对粗集料的图像级配特征进行研究,提出将二维数字图像级配转换为三维机械筛分级配的修正方法^[11-12]。为此,本文借鉴沥青混合料粗集料评价方法,利用数字图像处理技术,采集嵌锁骨架结构中粗集料的表面数字图像,实测试件表面粗集料数目,并与理论表面数目和理论体积数目对比,分析数字图像在评价嵌锁骨架结构粗集料结构状态的有效性,以期为进一步粗集料骨架结构评价指标与方法研究提供依据和方法。

1 数字图像采集步骤

利用 CCD 数字图像采集设备^[8-12],采集振实成型的粗集料试件的表面数字图像。

1.1 粗集料染色

为了提高振实试件中骨料与填料的对比性,方便数字图像处理,对试验用粗集料进行染色处理,将一级填料染成红色,二级填料染成黄色。染色前后的粗集料见图 1、图 2。

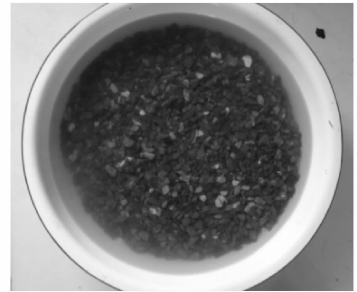


图 1 染色前的粗集料

Fig. 1 Pre-dyed coarse aggregate

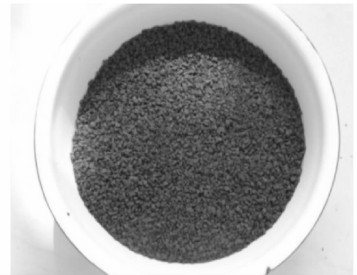


图 2 染色后的粗集料

Fig. 2 After-dyed coarse aggregate

1.2 粗集料试件制作

粗集料试件通过一级和二级振动填充成型,振动试验设备主要有振动台、外模具、配重、软木垫片、透明胶片、塑料纸等。每次试验用粗集料的总质量为 4 kg,上振配重块为 25 kg 的圆柱体铁块,在配重块与粗集料的接触部位放置软木垫片。重复试验得出,振动时间 90 s 即可使粗集料形成稳定的骨架结构。振动成型的粗集料试件脱模备用。

1.3 粗集料数字图像采集

将拆模后的试件置于光线均匀柔和处,调整好数字图像采集设备的位置,视角大小以刚好包括某一振实试件侧面所有粗集料为宜,采集每个振实试件的 4 个侧面(下页图 3)。



(a) 前侧



(b) 右侧



(c) 后侧



(d) 左侧

图 3 振实粗集料的侧面数字图像

Fig. 3 Profile digital image of vibrated coarse aggregate

2 粗集料数字图像处理

主要涉及到数字图像处理方法中的图像增强和复原、图像分割、图像填充方法^[13]。

(1)图像增强

利用数字图像增强技术提高图片的色差,增强不同颜色粗集料的对比度,以便后期处理。图像增强前后的图片如图 4、图 5 所示。



图 4 图像增强前

Fig. 4 Picture before enhancement



图 5 图像增强后

Fig. 5 Picture after enhancement

(2)图像分割

利用数字图像分割技术将每个粗集料从背景中分割出来,提取不同粒径粗集料,并用不同颜色、宽度的实线标记不同粒径粗集料的轮廓。图像分割前后的图片如图 6、下页图 7 所示。



图 6 图像分割前

Fig. 6 Picture before segmentation

(3)图像填充

为了区分数字图像背景中的骨料与填料,利用数字图像填充技术将数字图像中的填料填充为红色。图像填充前后的图片如下页图 8、图 9 所示。

3 试验方案与分析指标

3.1 试验方案

本研究对 2 种单一粒径粗集料颗粒按不同质量比混合后振动成型试件,进行数字图像技术处理。粒径具有 2 倍关系的试验组合包括: 31.5 ~

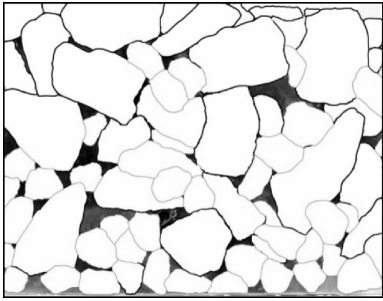


图7 图像分割后

Fig.7 Picture after segmentation

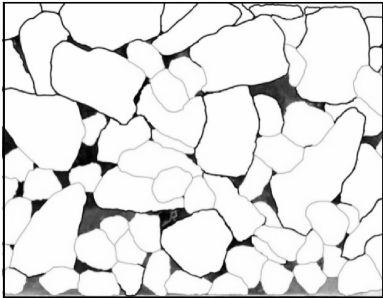


图8 图像填充前

Fig.8 Picture before filled

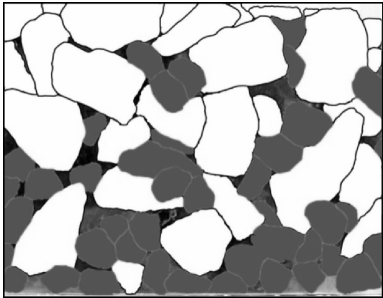


图9 图像填充后

Fig.9 Picture after filled

26.5 mm与16~13.2 mm, 26.5~19 mm与13.2~9.5 mm, 13.2~9.5 mm与9.5~4.75 mm, 9.5~4.75 mm与4.75~2.36 mm。粒径不具有2倍关系的试验组合包括: 19~16 mm与16~13.2 mm, 19~16 mm与13.2~9.5 mm, 16~13.2 mm与13.2~9.5 mm, 16~13.2 mm与9.5~4.75 mm。每次振动填充试验中, 较大粒径的粗集料为骨料, 较小粒径的粗集料为填料。每种组合的2种单一粒径粗集料取9个集料质量比(填料占混合料的质量百分比), 共72组, 每组平行试验5次。

3.2 分析指标

通过计算振动成型试件的理论表面粗集料数目、理论体积粗集料数目和实测表面粗集料数目, 分析3个参数随集料质量比的变化, 判断数字图像处理结果的有效性。

理论表面粗集料数目是指在理想状态下, 试件表面某一粒径的粗集料数目; 理论体积粗集料数目是指在理想状态下, 试件内填充的某一粒径粗集料的颗粒数目。为了方便计算, 假设粗集料分布同时满足以下3个条件为理想状态: ①各档粗集料为均质等粒径圆球体颗粒; ②粗集料以并排密实状态填充; ③粗集料之间的相互干涉引起的集料重叠与粗集料空隙率对粗集料数目计算的影响相互抵消。

根据定义, 理论表面粗集料数目中骨料数目 n_1 为

$$n_1 = \frac{4Am_1\rho_2 D_2}{\pi m_1 \rho_2 D_1^2 D_2 + \pi m_2 \rho_1 D_1^3} \quad (1)$$

理论表面粗集料数目中填料数目 n_2 为

$$n_2 = \frac{4Am_2\rho_1 D_1}{\pi m_2 \rho_1 D_2^2 D_1 + \pi m_1 \rho_2 D_2^3} \quad (2)$$

理论体积粗集料数目中骨料数目 N_1 为

$$N_1 = \frac{6\,000m_1}{\pi\rho_1 D_1^3} \quad (3)$$

理论体积粗集料数目中填料数目 N_2 为

$$N_2 = \frac{6\,000m_2}{\pi\rho_2 D_2^3} \quad (4)$$

式中: m_1 、 m_2 分别为骨料和填料的质量(g); ρ_1 、 ρ_2 分别为骨料和填料的表观密度(g/cm³); D_1 、 D_2 分别为骨料和填料的平均粒径(mm); A 为试件的总侧面积(mm²)。

实测表面粗集料数目是指振实试件表面经过数字图像处理技术处理后, 可以被观测到的某一粒径粗集料的颗粒数目, 取每组5次平行试验的平均值。

4 粗集料数字图像结果有效性分析

限于篇幅, 以粒径2倍关系(26.5~19 mm与13.2~9.5 mm)和不具有2倍关系(19~16 mm与16~13.2 mm)的粗集料振动试件数字图像处理结果为例进行分析, 其他试验结果类似。颗粒数目与集料质量比的关系分别见下页图10、图11。

由图10、图11可见, 不论粗集料粒径是否具有2倍关系, 随着集料质量比的增大, 骨料的理论表面数目、理论体积数目和实测表面数目均减小, 填料的颗粒数目则均增大, 理论表面数目与实测值有一定差别, 但差别不大, 而理论体积数目明显较大。这是由于, 理论表面粗集料数目的计算是在理想状态下, 将粗集料视为等粒径的球体, 而实际的粗集料是不规则的颗粒; 实际粗集料的空间分布会受粗集料干涉和空隙率的影响, 而理论表面粗集料数目计算认为这两种作用相互抵消, 不会对粗集料的空间分布

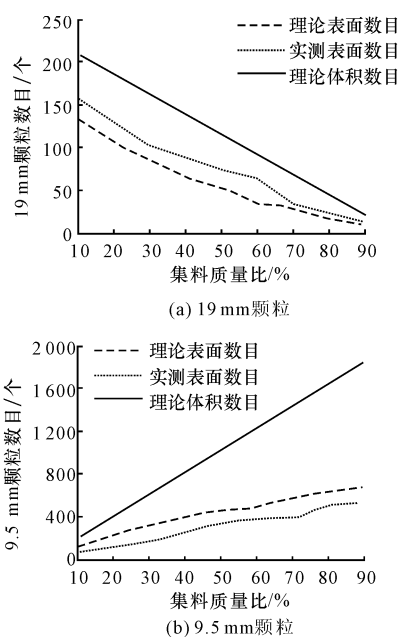


图 10 颗粒数目与集料质量比的关系(19 mm 与 9.5 mm)

Fig. 10 Relationship between particle number and aggregate mass ratio (19 mm and 9.5 mm)

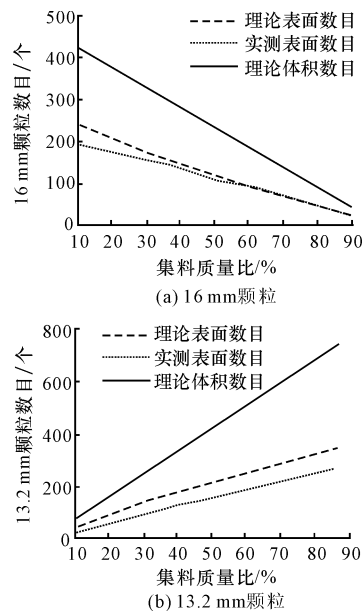


图 11 颗粒数目与集料质量比的关系(16 mm 与 13.2 mm)

Fig. 11 Relationship between particle number and aggregate mass ratio (16 mm and 13.2 mm)

产生影响。

理论体积数目明显大于理论表面数目和实测表面数目,这主要在于理论体积数目表征三维尺度内的颗粒数目,而表面数目仅是二维平面的颗粒数目。同时,理论计算公式未考虑空隙与填充不均匀性的影响。因此,理论体积粗集料数目随集料质量比的

变化速率较理论表面粗集料数目和实测表面粗集料数目大^[14]。

另外,从所有试验结果对比可以得出,随着骨料和填料粒径的减小,理论表面粗集料数目与实测值的差别越小,这可能与较小粒径集料颗粒振动混合时的颗粒干涉和空隙率的影响较小有关。

集料质量比反映不同粒径集料颗粒的质量组成,与粗集料在混凝土中空间分布状态相关。已有研究表明,水泥混凝土是一种多相复合材料,不同相的性质及其相互作用均影响混凝土的性质,粗集料作为混凝土的分散相,除了强度、表面特性、最大粒径等特性外,粗集料的级配组成,即不同粒径粗集料颗粒的组成比例,也明显影响混凝土的强度和耐久性。由于粗集料的强度和弹性模量均高于水泥砂浆,当足够数量的粗集料形成稳定骨架结构时,粗集料间的传递力可以提高混凝土的强度。但如果粗集料级配组成不好,如中间或较小粒径颗粒较少,反而会使粗集料空隙率增大,过多不易密实的砂浆导致混凝土内部均匀性差、拌和物流动性差、离析严重,混凝土强度和耐磨性均会变差。

数字图像技术处理结果分析表明,理论表面粗集料数目、理论体积粗集料数目、实测表面粗集料数目与集料质量比具有良好的线性关系,且理论表面粗集料数目与实测值相近。由此可见,利用数字图像技术获得的粗集料不同粒径颗粒的数目及其比例关系,可以与集料质量比一样有效表征不同粒径集料颗粒的组成及其分布特征;通过进一步获取不同粒径颗粒的配位数、接触颗粒数目等参数,可以分析粗集料的空间分布和接触状态,评价粗集料结构及其对混凝土性能的影响。

5 结 语

(1)利用粗集料振动成型试件采集数字图像,借助数字图像增强和复原、分割、填充技术对数字图像处理,并进行特征统计分析,可得到粗集料数目。

(2)利用数字图像技术实测得到的表面粗集料数目、计算得到的理论表面粗集料数目和理论体积粗集料数目均与集料质量比有良好的线性关系,且表面粗集料数目实测值与理论值差别很小。

(3)利用数字图像技术得到的实测表面粗集料数目,可以有效表征集料质量比所反映的不同粒径集料颗粒的组成及其分布特征,表明数字图像技术可以用于粗集料结构评价指标与方法研究。

参考文献:

References:

- [1] Meddah J, Mohammed S, Zitouni D, et al. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(5): 505-512.
- [2] Muñoz S, Jose F G, Karl J, et al. Effects of coarse aggregate coatings on concrete performance[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(1): 96-103.
- [3] 王立久, 曹明莉. 混凝土架构模型研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(7): 48-54.
WANG Li-jiu, CAO Ming-li. Research on concrete frame and structure model[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(7): 48-54. (in Chinese)
- [4] 陈忠达, 袁万杰, 高春海. 多级嵌挤密实级配设计方法研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 32-36.
CHEN Zhong-da, YUAN Wan-jie, GAO Chun-hai. Research on design method of multilevel dense built-in gradation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 32-36. (in Chinese)
- [5] 马 磊, 师延强, 田尔布, 等. 嵌锁密实水泥混凝土的强度特性试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(6): 6-10.
MA Biao, SHI Yan-qiang, TIAN Er-bu, et al. Test on strength characteristics of interlocking-dense cement concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(6): 6-10. (in Chinese)
- [6] 王 磊, 马 磊, 寇军平. 嵌锁密实水泥混凝土粗集料级配组成设计方法[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(5): 12-17.
WANG Lei, MA Biao, KOU Jun-ping. Gradation design method of coarse aggregate for interlocking-dense cement concrete [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(5): 12-17. (in Chinese)
- [7] Hirato T, Murayamma M, Sasaki H. Development of high stability hot mix asphalt concrete with hybrid binder[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(6): 424-431.
- [8] 韩 森, 王 旭. 基于数字图像技术的露石水泥混凝土路面露石分布[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(6): 1-5.
HAN Sen, WANG Xu. Particle distribution of exposed-aggregates-cement cement pavement (EACCP) based on digital image processing [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(6): 1-5. (in Chinese)
- [9] 彭 勇, 孙立军, 杨宇亮, 等. 一种基于数字图像处理技术的沥青混合料均匀性研究新方法[J]. 公路交通科技, 2004, 21(11): 10-12.
PENG Yong, SUN Li-jun, YANG Yu-liang, et al. A new way to study homogeneity of HAM based on digital image disposal technology [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(11): 10-12. (in Chinese)
- [10] 英 红, 张 宏. 基于图像的 AC-20 混合料集料接触分布特征研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(1): 88-94.
YING Hong, ZHANG Hong. Study of distribution characteristics of aggregate contacts in AC-20 HMA based on digital image processing [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(1): 88-94. (in Chinese)
- [11] 汪海年, 郝培文. 粗集料棱角性的图像评价方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(4): 637-641.
WANG Hai-nian, HAO Pei-wen. Digital image evaluation method for angularity of coarse aggregates [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(4): 637-641. (in Chinese)
- [12] Wang H N, Huang Z H, Li L, et al. Three-dimensional modeling and simulation of asphalt concrete mixtures based on X-ray CT [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 55-61.
- [13] 李 嘉, 林 辉. 基于数字图像处理的粗集料棱角性量化研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(7): 27-31.
LL Jia, LIN Hui. Quantification research of coarse aggregate angularity based on digital image processing [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(7): 27-31. (in Chinese)
- [14] 吴文亮, 李 智, 张肖宁. 用数字图像处理技术评价沥青混合料均匀性[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(4): 921-925.
WU Wen-liang, LI Zhi, ZHANG Xiao-ning. Evaluation of asphalt mixture homogeneity with digital image processing technique [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(4): 921-925. (in Chinese)