

文章编号:1007-9629(2024)04-0343-07

工业 CT 对混凝土中混杂钢渣颗粒的鉴别应用

陈春^{1,2}, 李之涵¹, 潘伟行³, 傅琦¹, 张亚梅^{1,2,*}

(1. 东南大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 211189; 2. 东南大学 江苏省土木工程材料重点实验室, 江苏 南京 211189; 3. 浙江新世纪工程检测有限公司, 浙江 杭州 310022)

摘要:采用工业 CT 对混凝土中的钢渣颗粒和普通石子进行三维扫描, 获得两者在形貌上的差异. 将钢渣颗粒按体积分数 3%、6% 和 9% 掺入混凝土中, 并使用工业 CT 扫描获得不同掺量钢渣颗粒混凝土试样的形貌学特征. 基于图像相似法得到钢渣颗粒的灰度范围, 并采用该灰度范围对图像进行二值化处理, 计算钢渣颗粒的掺量. 结果表明: 钢渣颗粒掺量的计算结果与实际掺入的钢渣颗粒体积分数较为接近, 误差范围小于 $\pm 10\%$, 具有较高精度. 结合实际工程案例, 采用工业 CT 和 X 射线荧光光谱分析仪 (XRF) 等测试手段, 对钢渣颗粒引发的混凝土外观质量事故成因进行科学分析.

关键词:混凝土; 工业 CT; 钢渣; 案例分析

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.04.008

Application of Industrial CT to Identify Mixed Steel Slag Particles in Concrete

CHEN Chun^{1,2}, LI Zhihan¹, PAN Weixing³, FU Qi¹, ZHANG Yamei^{1,2,*}

(1. School of Materials Science and Technology, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Construction Materials, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. Zhejiang New Century Engineering Detection Co., Ltd., Hangzhou 310022, China)

Abstract: Industrial computed tomography (CT) was used to perform 3D scanning of steel slag particles and natural gravel in concrete, and their morphological differences were obtained. Steel slag particles were mixed into concrete in volume fraction of 3%, 6% and 9% and industrial CT scanning was used to determine morphological characteristics of concrete specimens containing varying proportions of steel slag particles. Based on the image similarity method, the gray range of steel slag was obtained, and the image was binarized to calculate the content of steel slag particles. The results show that the calculated results are found to be relatively close to the actual steel slag particles volume fraction added, with an error range of less than $\pm 10\%$ of the actual value, indicating high accuracy. Finally, industrial CT, X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) and other testing methods were used to scientifically analyze the causes of concrete appearance quality accidents caused by steel slag particles in an actual project.

Key words: concrete; industrial computed tomography; steel slag; case analysis

混凝土材料是最大宗的建筑材料, 自然成为消纳钢渣等工业固废的主要方向. 大量研究^[1-3]表明, 钢渣应用于混凝土材料中具有一定可行性. 有研究^[4-7]

进一步指出钢渣能够取代混凝土的组成材料, 取代后混凝土性能并未降低或略有提升. 相关管理部门也颁布了一些技术规程和标准^[8-9]来推进钢渣粉在混

收稿日期: 2023-05-06; 修订日期: 2023-11-09

基金项目: 2022 年度南京市建设行业科技计划项目 (Ks2216)

第一作者: 陈春 (1975—), 男, 江苏扬州人, 东南大学副研究员, 硕士生导师, 博士. E-mail: 101005550@seu.edu.cn

通讯作者: 张亚梅 (1968—), 女, 江苏如皋人, 东南大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: ymzhang@seu.edu.cn

凝土中的应用.然而在混凝土材料中无序掺加钢渣颗粒所导致的工程事故案例屡见不鲜^[10-12],其主要原因是钢渣颗粒中游离的CaO和MgO缓慢水化,产生体积膨胀,从而导致混凝土材料出现爆裂等外观质量问题.

钢渣作为冶金行业的副产品,质量水平受冶炼方式、排渣方式和造渣方法等诸多环节影响^[13-14],导致钢渣颗粒性能存在较大差异性和波动性,即使有大量的钢渣安定性评价方法和手段^[15-18],也很难从源头控制钢渣颗粒的质量.Dong等^[19]和Jiang等^[20]就发现不同产地、不同时期的钢渣颗粒中游离CaO含量差异巨大.由于钢渣颗粒产生的危害往往出现在混凝土爆裂之后,因此在爆点处钻取骨料颗粒、粉样或者芯样^[11-12],很难获得钢渣颗粒在混凝土材料中的掺量及分布情况.

工业CT是表征材料内部结构的常用手段^[21-22].鉴于此,本文在混凝土试样中掺加不同体积分数的钢渣颗粒,采用工业CT对混杂钢渣颗粒混凝土试样进行三维扫描,获得了其三维重构图像,基于图像相似法计算得到钢渣颗粒的掺量,并将该研究成果应用到实际工程案例分析中.

1 试验

1.1 原材料

钢渣来源于南京钢铁股份有限公司,表观密度

为 3.08 g/cm^3 ,钢渣颗粒为两级配,其中粒径为 $[4.75, 9.50]$ 、 $[9.50, 19.00]$ mm的颗粒含量(质量分数,文中涉及的含量、组成等除特别注明外均为质量分数)分别为55%、45%.对钢渣颗粒进行肉眼观察,发现颗粒呈现2种形貌,一种较为密实,另一种含有较多孔隙,如图1所示.



图1 钢渣颗粒的外观形貌

Fig. 1 Appearance morphologies of steel slag particles

石子为石灰岩,表观密度为 2.65 g/cm^3 ,5~25 mm连续级配,颗粒级配见表1.

将2种形貌的钢渣颗粒和石子研磨成粉末,采用X射线荧光光谱分析仪(XRF)测试其化学组成,结果见表2.由表2可知:钢渣的化学组成与石子存在较大差异;2种钢渣颗粒虽然在形貌上存在较大差异,但在化学组成上并未存在明显差异,只是铁含量有所不同——表面多孔的钢渣颗粒(钢渣A)铁含量低于表面密实的钢渣颗粒(钢渣B).

表1 石子的颗粒级配

Table 1 Particle gradation of stone

Sieve size/mm	26.5	19	16	9.5	4.75	2.36	0
Accumulated sieve residue(by mass)/%	0	20	55	64	91	98	100

表2 钢渣颗粒和石子的化学组成

Table 2 Chemical compositions (by mass) of steel slag particles and stone

Material type	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	SrO	Cl	Other
Steel slag A	12.82	41.43	26.55	4.50	1.86	0.28	0.13	0.02	1.01	2.80	3.53	0.36	0.33	0.04	0.04	4.31
Steel slag B	11.69	42.16	28.65	4.60	1.72	0.28	0.10	0.01	1.00	2.84	3.48	0.40	0.31	0.04	0.02	2.71
Stone	21.96	72.96	0.64	1.25	0.71	0.10	0.27	0.17	0.05	0.03	0.04	—	—	0.10	—	1.71

水泥采用安徽海螺水泥厂产P·O 42.5普通硅酸盐水泥,化学组成见表3;砂子为淮安河砂,细度模数为2.66,颗粒级配见表4,级配符合II区;外加剂采用苏博特PCA®-I(TS)聚羧酸高性能减水剂(减水率25%);拌和水采用自来水.

1.2 混凝土制备

设计混凝土强度等级为C30,按体积分数0%、3%、6%和9%,将钢渣颗粒掺入混凝土中.混杂钢渣

表3 水泥的化学组成

Table 3 Chemical composition (by mass) of cement

SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	IL
21.20	64.37	4.42	0.55	5.32	2.00	1.50

颗粒混凝土的配合比如表5所示.将所配制的混凝土采用强制式搅拌机机械拌和后,置于尺寸为 $\phi 100 \times 100$ mm的试模中先在室温下养护24 h,脱模后再放

表4 砂子的颗粒级配

Sieve size/mm	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0
Accumulated sieve residue(by mass)/%	4	15	30	57	82	92	100

入养护室((20±2)°C、相对湿度RH≥95%)养护28 d.

表5 混杂钢渣颗粒混凝土的配合比

Table 5 Mix proportions of concrete containing steel slag particles

Code	Cement	Water	Sand	Gravel	Steel slag	Admixture
1	390.0	165.0	735.0	1 110.0	0	3.9
2	390.0	165.0	735.0	1 028.0	92.4	4.2
3	390.0	165.0	735.0	949.0	184.8	4.5
4	390.0	165.0	735.0	869.0	277.2	4.9

Unit: kg/m³

需要说明的是,随着钢渣颗粒掺量的增加,混杂钢渣颗粒混凝土的工作性有所下降,本试验通过调整外加剂掺量的方式,将混凝土坍落度保持在120~150 mm,以减少混凝土工作性变化对其微观结构体系的影响.

1.3 试验方法

试验用工业CT采用依科视朗国际有限公司(YXLON)^[2]产高分辨率Y.CT Precision S断层扫描系统.试验前先对2种形貌的钢渣颗粒和石子进行三维扫描,重点获取二者在灰度值上的差异;再对混杂钢渣颗粒混凝土试样按照0.14 mm间隔由上至下进行三维扫描,每个试样获取700多张图像,以便较为完整地反映钢渣颗粒在混凝土中的分布情况.

2 结果与讨论

2.1 钢渣颗粒和石子的三维扫描结果

2种外观形貌的钢渣颗粒和石子的工业CT扫描结果如图2所示.图2显示,钢渣颗粒的整体灰度值高于石子.

在2种钢渣颗粒和石子的相应区域进行灰度取值计算,结果如表6所示.由表6可知:石子的灰度值在526.00~733.00之间,平均值为634.71;表面多孔的钢渣颗粒(钢渣A)灰度值在795.00~1 155.00之间,平均值为978.73;表面密实的钢渣颗粒(钢渣B)灰度值在713.00~1 046.00之间,平均值为899.93;2种钢渣颗粒的灰度值均比石子高300.00左右.

将灰度值设为0~5,对CT图像进行二值化处理,结果如图3所示.图3显示,表面密实的钢渣颗粒

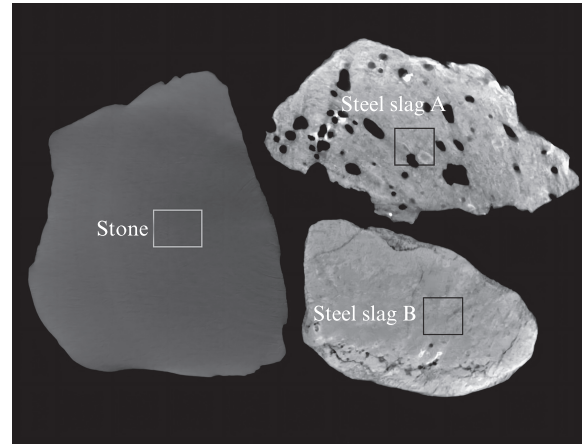


图2 钢渣颗粒和石子的工业CT扫描结果

Fig.2 Industrial CT scan results of steel slag particles and stone

表6 钢渣颗粒和石子的灰度值

Table 6 Grayscale values of steel slag particles and stone

Material type	Minimum	Maximum	Mean	Deviation
Stone	526.00	733.00	634.71	28.45
Steel slag A	795.00	1 155.00	978.73	53.43
Steel slag B	713.00	1 046.00	899.93	40.69

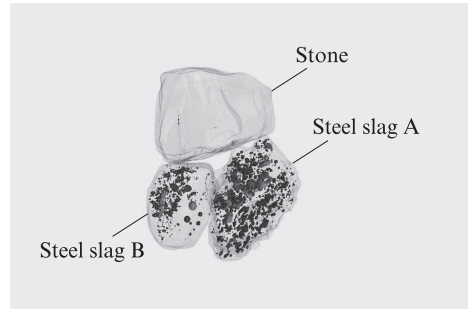


图3 二值化处理后钢渣颗粒和石子的工业CT扫描结果

Fig.3 Industrial CT scan results of steel slag particles and stone after binarization

(钢渣B)内部也存在一定的孔隙结构,只是其孔隙数量和孔径远小于表面多孔的钢渣颗粒(钢渣A).

2.2 混杂钢渣颗粒混凝土试样的三维扫描结果

对混杂钢渣颗粒混凝土试样进行工业CT扫描,结果如图4所示.由图4可见:(1)钢渣颗粒的密度与石子、水泥浆体存在一定差异,在CT图像上能够明显区分出钢渣颗粒、石子及水泥浆体.(2)当钢渣颗粒掺量为0%时,CT图像纵横切面上均未发现亮色区域;当钢渣颗粒掺量为3%时,CT图像纵横切面上均开始出现亮色区域;当钢渣颗粒掺量为6%时,CT图像纵横切面上亮色区域逐渐增加;当钢渣颗粒掺量为9%时,CT图像纵横切面上亮色区域较低掺量(3%和6%)时显著增加.这表明,采用工业CT测试技术鉴别混凝土中是否混杂钢渣颗粒具有技术可行性.

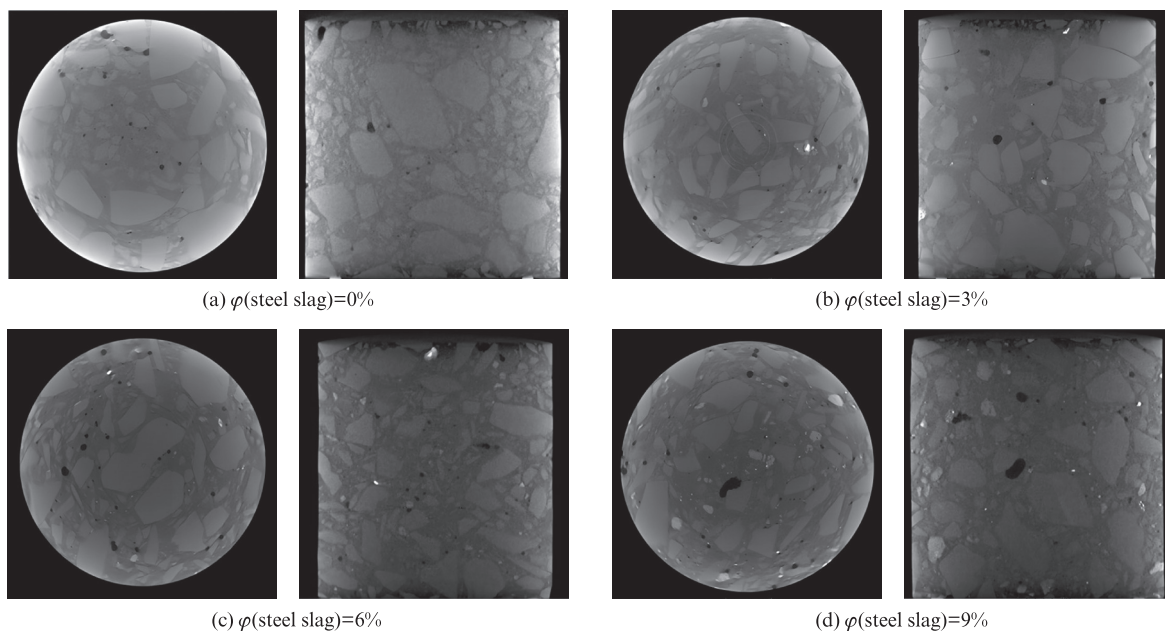


图4 混杂钢渣颗粒混凝土试样的工业CT三维扫描照片

Fig. 4 Industrial CT images of concrete samples containing steel slag particles

2.3 灰度赋值对测试结果精度的影响

赋予特定的灰度值后可以进行图像二值化处理,在此基础上借助工业CT设备自带的计算软件或其他商用图像处理软件能够计算出钢渣颗粒的体积分数.由此可见,如何确定合适的灰度值成为精确测量钢渣体积分数的关键因素.目前,一般有2种确定合适灰度值的方法——(1)图像相似法.选择CT图像中具有代表性的3~5个切面,先赋予1个灰度值范围,生成仿真图像;再比较实际图像与仿真图像之间的差异,调整灰度值范围,使仿真图像接近实际切面;最后通过迭代循环,确保选择的灰度值所生成的仿真图像均能与实际图像一致.其流程图如图5所示.(2)基于扫描得到的钢渣颗粒灰度值进行计算.

本文分别采用钢渣颗粒的灰度值上限($1\ 100.00 \pm 50.00$)、灰度平均值(900.00 ± 50.00)、钢渣灰度值下限(750.00 ± 50.00),以及图像相似法计算混凝土试样中混杂钢渣的体积分数,结果如表7所示.由表7可知:(1)选择不同灰度值范围进行三维重

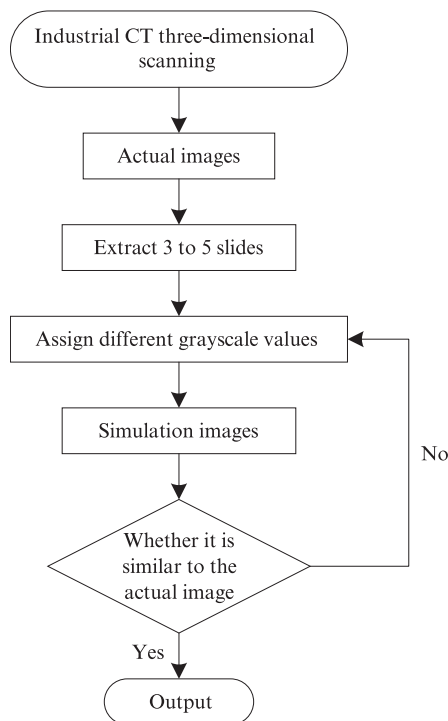


图5 图像相似法流程图

Fig. 5 Flow chart of image similarity method

表7 不同灰度值及图像相似法得到的混凝土混杂钢渣颗粒的体积分数

Table 7 Volume fraction of concrete mixed steel slag particles under different grayscale conditions and image similarity method

Unit: %

Method	$\varphi(\text{steel slag})/\%$			
	3	6	9	
Grayscale value	$1\ 100.00 \pm 50.00$	2.38	5.13	8.29
	900.00 ± 50.00	3.15	6.21	9.17
	750.00 ± 50.00	3.72	6.87	9.72
Image similarity method	3.10	6.19	8.97	

构和计算,对测试结果精度有一定影响。(2)以钢渣颗粒灰度平均值为基准所获得的测试结果更加接近实际结果;以钢渣颗粒灰度上限值为基准的测试结果小于实际结果;以钢渣颗粒灰度下限值为基准的测试结果大于实际结果。(3)图像相似法核心是对若干张切面图像进行相似性人工判断,最终灰度范围选择893.00~955.00,其测试结果精度与基于钢渣颗粒灰度平均值计算结果相当。

将基于图像相似法获得的测试结果进行三维重

构,结果如图6所示。由图6可见,随着钢渣颗粒体积分数的增加,基于图像相似法生成的三维重构图中钢渣颗粒所占空间明显增加,且能较好地表征钢渣颗粒在混凝土中的位置分布。图像相似法还具有一个独特的优势,它不需要预先知道所测物体的灰度范围,只要能在CT图像上区分出被测物体,就可以基于图像相似性进行二值化处理 and 计算,这给工业CT在实际工程案例中的应用带来了极大的便利条件。

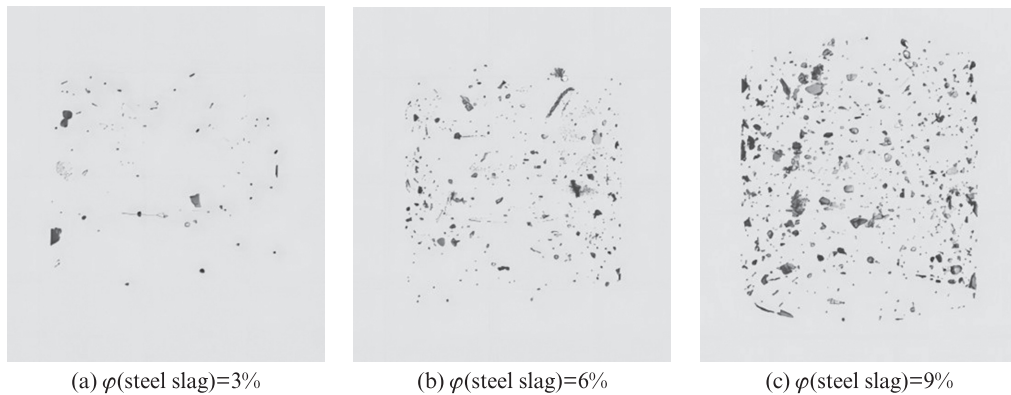


图6 基于图像相似法获得的混凝土混杂钢渣颗粒的三维重构图

Fig. 6 3D reconstruction of concrete mixed with steel slag particles based on image similarity method

2.4 工程案例及应用

某工程总建筑面积118 000 m²,包含4栋17层高层住宅、7栋16层高层住宅、配套用房及地下车库等。其中某栋高层建筑混凝土楼板从2021年3月起大量出现板面爆点现象,如图7所示。

按照爆点数量,将现场混凝土构件分为外观质

量较好区域(爆点数小于等于3个/m²)、外观质量一般区域(爆点数为3~10个/m²)及外观质量较差区域(爆点数大于10个/m²)。针对外观质量不同区域分别取芯,并对芯样进行CT扫描,结果如图8所示。由图8可见:(1)在表面出现爆点的混凝土构件内部均检出密度高于普通石子的异常物质。(2)异常物质数量与表面爆点数量呈现正相关规律,采用图像相似法进行计算时,外观质量较好、一般及较差区域的异常物质体积分数分别为1.25%、6.24%、10.22%。

为进一步明确异常物质的化学组成,分别在表面爆点处和外观完整处钻取粉样,采用X射线荧光光谱分析(XRF)进行测试其化学组成,结果如表8所示。由表8可知,爆点处粉样的铁含量远高于外观完整点位。按照YB/T 4328—2012《钢渣中游离氧化钙含量测定方法》,对爆点处和外观完整处2处粉样进行游离CaO含量测定,分别为4.45%和2.98%。参照GB/T 20491—2017《用于水泥和混凝土中的钢渣粉》的规定,测得爆点处游离CaO较高,表明混凝土出现爆点与游离CaO膨胀密切相关。综合工业CT、XRF及化学组成测试结果可知,该案例就是一起由钢渣颗粒导致混凝土外观质量问题的典型案例。



图7 楼板现场照片

Fig. 7 Site photo of floor slab

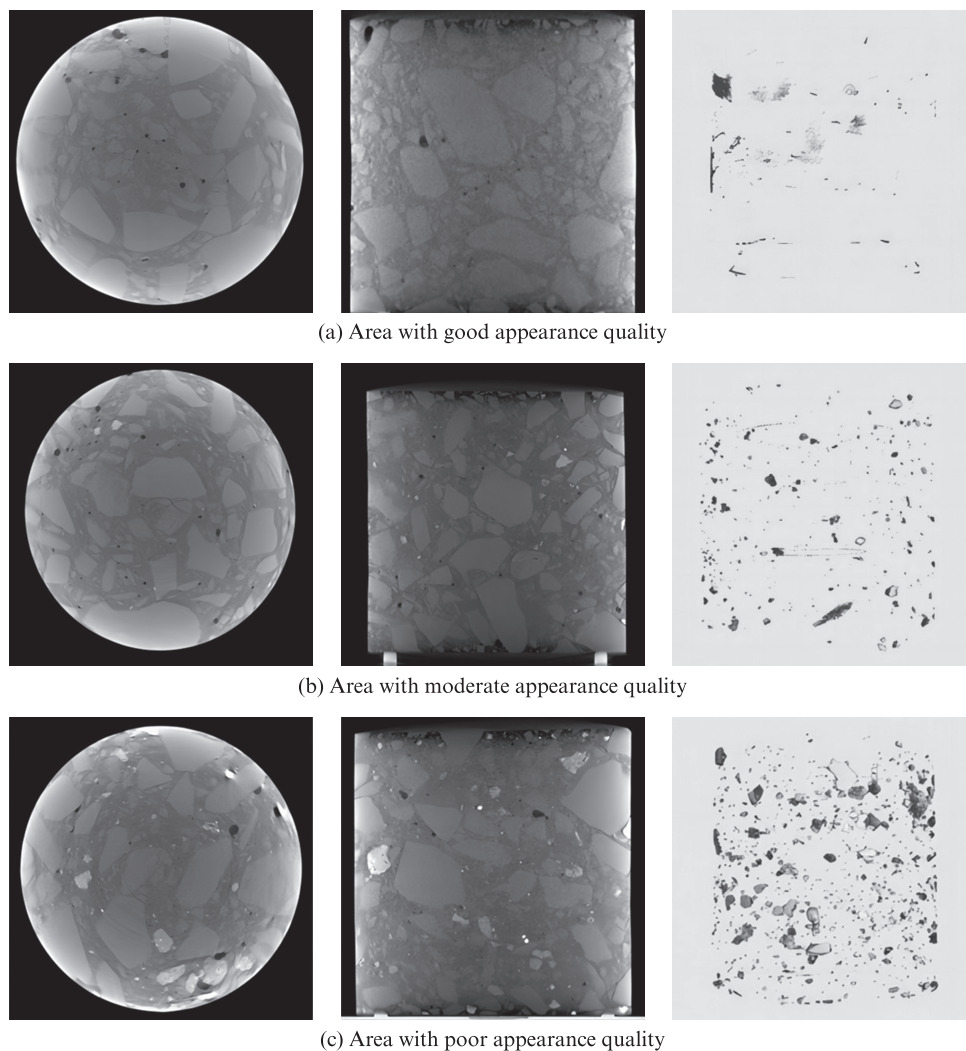


图8 不同区域芯样的三维扫描及重构结果

Fig. 8 3D scanning and reconstruction results of core samples in different areas

表8 爆点处及外观完整处粉样的化学组成

Table 8 Chemical composition (by mass) of powder samples at the explosion point and intact appearance area

Location	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	SrO	Cl	Other
Explosion point area	28.24	42.62	10.61	2.08	8.36	1.25	0.70	1.02	0.47	0.56	0.37	0.13	0.22	0.06	0.01	3.30
Intact appearance area	32.18	43.43	5.55	1.98	7.68	1.38	0.80	1.00	0.53	0.65	0.41	0.15	0.23	0.06	0.01	3.96

Unit: %

3 结论

(1)工业CT能够分辨出混杂在混凝土中的钢渣颗粒.钢渣颗粒较普通石子具有更高的密度,其CT扫描结果所呈现的灰度值比普通石子高300.00左右,钢渣颗粒呈现明显的亮色.

(2)分别采用给定灰度范围和基于图像相似法来定量计算混凝土中钢渣颗粒的体积分数.合适的灰度取值范围对精确计算钢渣颗粒的体积分数十分重要.基于图像相似法获得的钢渣颗粒体积分数灰度范围具有较高的精度,且能在无法预先获得钢渣颗粒灰度的情况下用于工程事故诊断分析.

(3)采用工业CT、X射线荧光光谱分析仪(XRF)及化学组成测试结果,明确了案例中的混凝土外观质量问题是由钢渣颗粒所导致的,该测试结果获得工程案例各参与方的认可.

(4)工业CT能够对混杂在混凝土中的钢渣进行精准定量分析,不仅有助于鉴别混凝土中是否混杂钢渣颗粒,而且为钢渣颗粒危害性评估提供了技术支撑.

参考文献:

[1] SHAKR PIRO N, MOHAMMED A, HAMAD S M, et al.

- Electrical resistivity-compressive strength predictions for normal strength concrete with waste steel slag as a coarse aggregate replacement using various analytical models [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 327:127008.
- [2] XUE G, FU Q, XU S, et al. Macroscopic mechanical properties and microstructure characteristics of steel slag fine aggregate concrete [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 56:104742.
- [3] MO L W, YANG S, HUANG B, et al. Preparation, microstructure and property of carbonated artificial steel slag aggregate used in concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 113:103715.
- [4] COSTA L C B, NOGUEIRA M A, ANDRADE H D, et al. Mechanical and durability performance of concretes produced with steel slag aggregate and mineral admixtures [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 318:126152.
- [5] SAI KEERTAN T, PAVAN KUMAR V, BOMMISSETTY J, et al. High strength fiber reinforced concrete with steel slag as partial replacement of coarse aggregate: Overview on mechanical and microstructure analysis [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023:1-6.
- [6] SUN K, PENG X, CHU S H, et al. Utilization of BOF steel slag aggregate in metakaolin-based geopolymers [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 300:124024.
- [7] ANDRADE H D, DE CARVALHO J M F, COSTA L C B, et al. Mechanical performance and resistance to carbonation of steel slag reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 298:123910.
- [8] 全国钢标准化技术委员会. 用于水泥和混凝土中的钢渣粉:GB/T 20491—2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017. Technical Committee 183 on Steel of Standardization Administration of China. Steel slag powder used for cement and concrete: GB/T 20491—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [9] 全国钢标准化技术委员会. 钢渣应用技术要求:GB/T 32546—2016[S]. 北京:中国标准出版社, 2016. Technical Committee 183 on Steel of Standardization Administration of China. Technical requirements for application of steel slag: GB/T 32546—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)
- [10] 张力, 李招, 尹立鹤, 等. 某混凝土结构爆裂的检测与加固 [J]. *建筑结构*, 2021, 51(增刊1):1639-1642. ZHANG Li, LI Zhao, YIN Lihe, et al. Detection and renovation for heave and burst of a slag concrete structure [J]. *Building Structure*, 2021, 51(Suppl 1):1639-1642. (in Chinese)
- [11] 张亚梅, 李保亮. 用钢渣作骨料引起的混凝土工程开裂问题案例分析 [J]. *混凝土世界*, 2016(6):22-25. ZHANG Yamei, LI Baoliang. Case study of cracking problems in concrete engineering caused by using steel slag as aggregate [J]. *China Concrete*, 2016(6):22-25. (in Chinese)
- [12] 王枫, 高波. 某学校混凝土爆裂事故原因分析 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2011(12):53-55. WANG Feng, GAO Bo. Analysis on reasons for concrete blowout accident in a school [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2011(12):53-55. (in Chinese)
- [13] GENCEL O, KARADAG O, OREN O H, et al. Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 283:122783.
- [14] MO L W, YANG S, HUANG B, et al. Preparation, microstructure and property of carbonated artificial steel slag aggregate used in concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 113:103715.
- [15] DAI S, ZHU H J, ZHAI M N, et al. Stability of steel slag as fine aggregate and its application in 3D printing materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 299:123938.
- [16] KUO W T, SHU C Y. Application of high-temperature rapid catalytic technology to forecast the volumetric stability behavior of containing steel slag mixtures [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50:463-470.
- [17] 韩檬, 张亮亮, 卢忠飞, 等. 钢渣安定性评价方法的比较 [J]. *环境工程*, 2022, 40(2):235-239. HAN Meng, ZHANG Liangliang, LU Zhongfei, et al. Comparative analysis of evaluation methods for steel slag soundness [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(2):235-239. (in Chinese)
- [18] WANG Q, WANG D Q, ZHUANG S Y. The soundness of steel slag with different free CaO and MgO contents [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 151:138-146.
- [19] DONG Q, WANG G T, CHEN X Q, et al. Recycling of steel slag aggregate in portland cement concrete: An overview [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 282:124447.
- [20] JIANG Y, LING T C, SHI C J, et al. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 136:187-197.
- [21] SKARŻYŃSKI Ł, SUCHORZEWSKI J. Mechanical and fracture properties of concrete reinforced with recycled and industrial steel fibers using digital image correlation technique and X-ray micro computed tomography [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 183:283-99.
- [22] SIETINS J M, GREEN W H, JONES J S. *Materials evaluation using X-ray computed tomography* [M]. Oxford: Elsevier, 2023: 159-199.