

基于 CT 技术的喷射混凝土粗骨料与孔隙分布规律研究

潘 刚¹,李春岩¹,雅各布·拉日诺夫斯基²,托马斯·齐克蒙德²,
彼得·奥伯特³,约瑟夫·凯泽²,李鹏程¹,陈连军¹

(1. 山东科技大学 安全与环境工程学院,山东 青岛 266590; 2. 布尔诺理工大学 中欧理工学院,布尔诺 61200 捷克共和国;
3. 捷克科学院 物理研究所,布拉格 18200,捷克共和国)

摘要:混凝土粗骨料和孔隙是影响其力学强度的重要因素,本研究基于 CT 扫描技术,对浇筑和喷射两种工艺制作的混凝土试件的粗骨料、孔隙分布和力学强度进行研究,分析混凝土粗骨料和孔隙分布规律。结果表明:浇筑和喷射混凝土骨料存在分层现象,但呈现规律不同,浇筑混凝土粗骨料呈两层分布,分层临界点大约在试件 50 mm 处,靠近试件底部粗骨料体积增加 16%;喷射混凝土粗骨料呈三层分布,临界点位于试件 30、70 mm 处,在近壁面 30 mm 区域粗骨料回弹严重,体积减少 50.45%,试件中部 30~70 mm 区域,粗骨料分布均匀且密集,但仍少于浇筑混凝土,喷射试件末端 70~98 mm 区域骨料数量和体积有所下降,但高于近壁面区域;孔隙分布受骨料分布影响,大孔隙主要沿骨料边缘分布,总体上喷射混凝土孔隙率高于浇筑混凝土且形状不规则,0.1~0.4 mm 孔径孔隙数量较多。结合骨料分布和孔隙率的特点,分析了粗骨料分布、孔隙率对混凝土抗压强度的影响。

关键词:CT 扫描;粗骨料分布;孔隙率;抗压强度;喷射回弹

中图分类号:TU528

文献标志码:A

Research on coarse aggregate and pore distribution law of shotcrete based on CT technology

PAN Gang¹, LI Chunkui¹, JAKUB Laznovsky², TOMAS Zikmund², PETER Oberta³,
JOZEF Kaiser², LI Pengcheng¹, CHEN Lianjun¹

(1. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Brno University of Technology, Central European Institute of Technology, Brno 61200, Czech Republic;
3. Institute of Physics, Czech Academy of Sciences, Prague, 18200, Czech Republic)

Abstract: The coarse aggregate and porosity of concrete are important factors affecting its mechanical strength. Based on computed tomography(CT) technology, this paper studied the coarse aggregate, pore distribution and mechanical strength of concrete test blocks made by pouring and spraying technology, and analyzed the coarse aggregate and pore distribution law of concrete. The results show that layering phenomena exist in both the aggregate of concrete and shotcrete, but the rules are different. The coarse aggregate of poured concrete is distributed in two layers, with the critical point of layering at about 50 mm away from the test piece, and the volume of coarse aggregate near the bottom of the test piece increases by about 16%. The coarse aggregate of shotcrete is distributed in three layers with the critical point at 30 and 70 mm of the test piece. The coarse aggregate rebounds seriously in the area of 30 mm near the wall and its volume decreases by about 50.45%. In the area of 30~70 mm in the middle of the test piece, the coarse aggregate is evenly distributed and dense, but it is still less than in the concrete. The quantity

收稿日期:2022-12-12

基金项目:国家自然科学基金项目(52104199,51974177,52104206);省部共建矿山灾害预防控制国家重点实验室开放基金项目(MDPC2022ZR01);中国-捷克科技合作项目(43-4);MEYS CR (LM2018110);FSI-S-23-8389

作者简介:潘 刚(1986—),男,河北承德人,副教授,博士,主要从事井下喷浆机械设备以及减弹降尘体系研究。

陈连军(1981—),男,山东东营人,教授,博士,主要从事矿用混凝土喷射支护技术、装备、材料和工艺研究,本文通信作者。E-mail:skyskjxz@163.com

and volume of aggregate in the area of 70~98 mm at the end of the shotcrete has decreased, but higher than the area near the wall. The pore distribution is mainly affected by the aggregate distribution, and the macropores are mainly distributed along the edge of the aggregate. The porosity of shotcrete is higher than that of poured concrete and the pore shape is irregular, with the majority as pores of 0.1~0.4 mm in diameter. Combined with the characteristics of aggregate distribution and porosity, the influence of coarse aggregate distribution and porosity on concrete compressive strength was obtained.

Key words: CT scan; coarse aggregate distribution; porosity; compressive strength; aggregate rebound

喷射混凝土具有良好的耐久性和支护强度,但受工艺限制易发生回弹,导致混凝土粗骨料分布变化。粗骨料分布不仅影响混凝土的力学强度,对裂隙发展及损伤破坏行为也有显著影响^[1-2]。因此,研究混凝土粗骨料分布规律对提高混凝土使用性能具有重要意义。

常用的混凝土检测方法,如电子显微镜观察法(scanning electron microscope, SEM)、核磁共振法、压汞法等,都具有一定的局限性。与此相比,CT扫描作为一种无损检测技术,能准确、清晰展示被测物体内部结构、组成,逐渐应用于混凝土微观检测领域^[3-4]。宿辉等^[5]通过CT技术研究了温度变化对混凝土孔隙率的影响,发现温度越高孔隙面积越大;田威等^[6]将CT与冻融机结合,研究冻融循环下混凝土内部孔隙结构变化,发现冻融循环会导致混凝土孔隙扩展萌生速度加快,小孔隙连通形成大孔隙;杜向琴等^[7]通过CT扫描研究混凝土初始缺陷的空间形貌,结果表明孔隙缺陷处容易产生应力集中;Ren等^[8]基于CT技术开发了骨料-砂浆-孔隙的二维微观模型并模拟了应力作用下裂隙变化;Liu等^[9]通过分析骨料真实特征(即边缘数、面积、等效半径、延伸率和尺寸分布),提出一种多边形随机骨料建模方法。

关于骨料和孔隙分布结构及其对混凝土强度的影响,在实验和理论模拟上开展了很多研究。Yang等^[10-11]研究了混凝土骨料聚集分布规律,并结合骨料分布多重分形理论和裂隙盒维数方法,分析了混凝土骨料分布对力学损伤的影响关系;方健银等^[12]基于破损分区理论,将图像分为多个区域,发现骨料和砂浆粘界面厚度与真实混凝土极为接近,损伤裂纹绕着骨料发展;Chen等^[13]建立砂浆、骨料、粘性带、缺陷的四相随机骨料模型,提出相应拟合公式,分析了四种组分组合效应对混凝土抗拉强度的影响关系;Li等^[14]通过蒙特卡罗法建立随机骨料分布模型进行数值模拟,发现骨料分布会显著影响混凝土的宏观力学性能,骨料体积分数越高断裂峰值载荷越高;Ludovic等^[15]研究孔隙对混凝土三轴行为的影响,发现混凝土应力分布不仅取决于孔隙率,还受孔隙分布、结构影响;Shen等^[16]研究不同含冰量混凝土的孔隙结构变化,研究表明冰粒会导致混凝土水化周期加长,有利于减少有害孔隙,增加微孔。

综上所述,现有的混凝土骨料及孔隙分布的研究主要是利用蒙特卡罗法模拟随机骨料分布及细观孔隙损伤演化对混凝土强度影响,缺乏关于喷射回弹造成的粗骨料粒径、体积占比改变和孔隙结构变化规律研究。本研究基于CT扫描技术,研究制备工艺对混凝土粗骨料和孔隙分布规律影响,得到喷射混凝土粗骨料、孔隙分层现象,结合抗压实验,验证粗骨料及孔隙分布对混凝土力学性能的影响。

1 试验方法

1.1 试件材料

实验选用山水牌P.O 42.5普通硅酸盐水泥;细骨料选用细度模数2.8的天然河砂;粗骨料选用粒径5~15 mm的碎石。如图1所示,粗骨料级配符合《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ52—2019)。本研究对两种工艺混凝土进行试验研究,参考文献^[17]及前期试验确定合理的物料配合比为:水泥:细骨

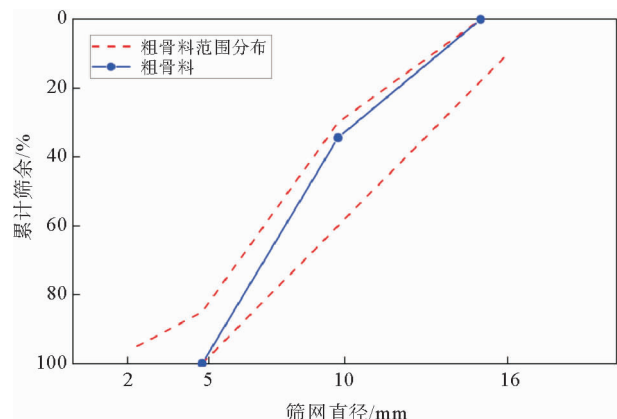


图1 粗骨料级配曲线

Fig. 1 Coarse aggregate grading curve

料：粗骨料：水=1：2.25：1.5：0.5。将配比好的水泥、砂、石子加入混凝土搅拌机中搅拌 3 min，使其均匀混合，随后加入称好的水，搅拌 15 min 后备用。

1.2 试件制备

1) 浇筑混凝土试件的制备。将搅拌好的混凝土浇筑到 100 mm×100 mm×100 mm 的浇筑模具中，置于混凝土振动台上，固定模具振动至表面出现浮浆，去除多余部分并抹平，置于室温下 1 d 后脱模。使用混凝土取芯机从试件中心取出 Φ50 mm×100mm 的圆柱体试件。

2) 喷射混凝土试件的制备。将预先搅拌好的混凝土加入自主研发的湿式混凝土喷射机组，调整风压为 0.5 MPa，喷射距离 1.5 m，喷射到 800 mm×800 mm×150 mm 的喷射模具中，模具和墙面呈 80°角。将喷射好的模具静置 1 d 后脱模，使用混凝土切割机切除喷射混凝土四周 200 mm 及上表面 50 mm 区域，并加工成 100 mm×100 mm×100 mm 的混凝土试件，使用混凝土取芯机从试件中心取出 Φ50 mm×100 mm 的圆柱体试件。

两种试件各制备 12 个，常温养护 1、3、7、28 d 试件各 3 个。

1.3 CT 扫描

本研究使用养护 28 d 的浇筑和喷射混凝土试样进行 CT 扫描，使用捷克布尔诺科技大学提供的 GE phoenix v|tome|x m 工业 CT 在 21 °C 的恒定温度下进行断层测量，X 射线管的加速电压设置为 230 kV，电流设置为 300 μA，X 射线束由 0.5 mm 厚的铜过滤器过滤。探测器曝光时间为 250 ms，共捕获 2 100 个投影。使用 GE phoenix datos|x 2.0 进行断层重建，并进行样本漂移校正、光束硬化校正和噪声过滤。重建体素大小为 32 μm。测量数据集的大小约为 2 000×2 000×1 400 体素。

1.4 图像处理

通过 Avizo 三维可视化软件处理二维图像，可以清晰观察到图像中粗骨料、孔隙、砂浆组分分布。为减少边缘对图像质量的影响，切除试件外表面 2 mm，使用阈值分割及三维重构技术，得到混凝土三维重构模型，实验流程如图 2 所示。

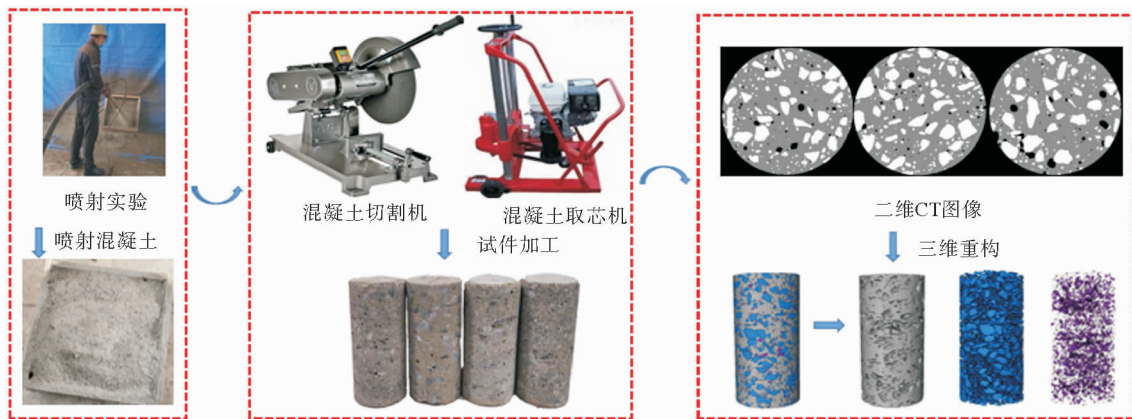


图 2 试件制备及 CT 三维重构

Fig. 2 Sample preparation and CT 3D reconstruction

2 结果与讨论

2.1 粗骨料分布分析

通过阈值分割混凝土骨料组分，将骨料以立体形式展示，选取颗粒粒径、位置、体积作为研究参数，可将骨料相关信息进行筛选和统计。不规则的骨料形状过筛情况不同，选取粒径大于 5 mm、体积大于 65 mm³ 的粗骨料作为研究对象，以浇筑混凝土上表面及喷射混凝土距壁面远端作为 Z 轴原点，以骨料中心在 Z 轴坐标代替骨料所处位置。对于切割、取芯及表面修整处理的试件，可能会将粗骨料切割，导致统计误差，尺寸

为 $\Phi 48 \text{ mm} \times 96 \text{ mm}$ 的圆柱混凝土试件粗骨料理论体积为 $47\,000 \sim 48\,000 \text{ mm}^3$, 而扫描的浇筑混凝土试件粗骨料体积为 $48\,612.55 \text{ mm}^3$, 在误差范围内。

图 3 为两种混凝土试件粗骨料沿 Z 轴分布位置情况。如图 3(a)、3(b) 所示, 浇筑混凝土越靠近底面粗骨料分布越密集, 喷射混凝土粗骨料集中于 $30 \sim 70 \text{ mm}$ 处。相较于浇筑混凝土, 喷射混凝土粗骨料减少了 30.53% , 尤其是粒径 9 mm 以上的粗骨料减少近 80% 。为研究不同工艺混凝土粗骨料分布情况, 不考虑试件上下修整的影响, 将试件沿 Z 轴方向等距分割成 10 个尺寸为 $\Phi 48 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的圆柱试件。

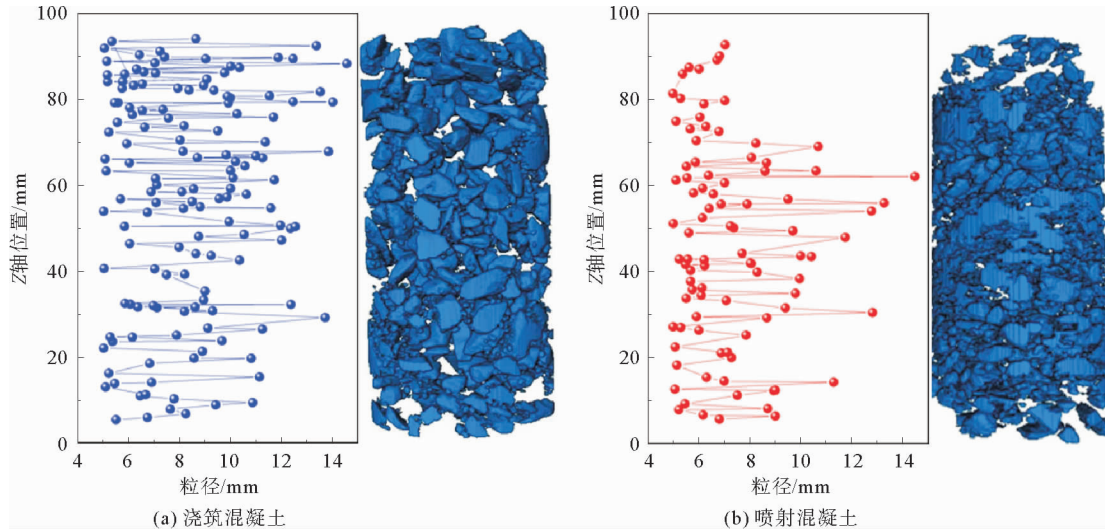


图 3 浇筑混凝土和喷射混凝土粗骨料沿 Z 轴分布位置

Fig. 3 Z-axis distribution position of coarse aggregate of poured concrete and shotcrete

图 4 为混凝土试件各层粗骨料数量及粗骨料总体积分布, 可以看出, 浇筑混凝土和喷射混凝土具有不同的骨料分布规律。如图 4(a) 所示, 浇筑混凝土在 $2 \sim 50 \text{ mm}$ 区域粗骨料数量少、体积小; 而 $50 \sim 98 \text{ mm}$ 区域粗骨料数量和总体积大幅提高, 粗骨料数量及总体积比 $2 \sim 50 \text{ mm}$ 区域分别提高了 19.44% 、 16.03% , 其中 9 mm 以上的粗骨料数量比 $2 \sim 50 \text{ mm}$ 区域增加了 29.62% , $80 \sim 90 \text{ mm}$ 区域的粗骨料数量及总体积达到最高。浇筑混凝土粗骨料在试件长度 50 mm 时有明显分布差异, 呈两层分布。这是由于浇筑混凝土在浇筑、振动过程中, 粗骨料受重力和振动力作用向下沉降, 砂浆对粗骨料的粘滞阻力无法抵抗粗骨料重力, 造成较大粒径粗骨料向下聚集。

如图 4(b) 所示, 喷射混凝土在 $70 \sim 98 \text{ mm}$ 区域无 9 mm 以上粒径的粗骨料, 随着远离受喷面, 粗骨料数量增加, 9 mm 以上骨料占比也增加; 在 $30 \sim 70 \text{ mm}$ 区域粗骨料数量最多, 粒径大于 9 mm 的粗骨料占比最高, 粗骨料总体积远远超过其他区域; 随喷层厚度增加, 在 $0 \sim 30 \text{ mm}$ 区域粗骨料数量略微减少, 总体积却大幅减少。据此可将喷射混凝土粗骨料分为三层, 临界点在试件的 30 、 70 mm 位置。在 $30 \sim 70 \text{ mm}$ 区域粗骨料数量及总体积占比最高分别为 53.63% 、 62.29% , $70 \sim 98 \text{ mm}$ 区域粗骨料数量及总体积受回弹影响严重, 比 $30 \sim 70 \text{ mm}$ 区域减少了 36.36% 、 50.45% , $2 \sim 30 \text{ mm}$ 区域比 $30 \sim 70 \text{ mm}$ 区域减少了 24.54% 、 36.43% 。造成这种现象的可能原因是, 混凝土喷射过程中, 粗骨料由于体积差异较大, 受重力及喷射推力影响运动轨迹不同, 粗骨料更易分散^[18]。受壁面回弹影响, 一定区域内粗骨料数量有所减少。在 $70 \sim 98 \text{ mm}$ 区域, 粗骨料与光滑壁面碰撞很难粘附, 随着粘附在壁面上的砂浆厚度增加, 粗骨料与砂浆接触面积增大, 砂浆粘结力增强, 粗骨料回弹力小于砂浆粘附阻力, 粗骨料开始增加。 9 mm 以上粗骨料由于本身粒径较大, 需要更厚的砂浆层才能粘附; 距壁面超过 30 mm 后, 粗骨料动力不足使其深入砂浆接触壁面, 因此受壁面回弹的影响大幅降低, 粗骨料受到砂浆粘附及回弹阻力作用, 无法逃离砂浆, 使粗骨料数量相对增加, 在 $60 \sim 70 \text{ mm}$ 区域由于砂浆占比大, 有利于骨料粘附^[19]; $2 \sim 30 \text{ mm}$ 区域粗骨料与粗骨料碰撞产生回弹, 造成粗骨料减少, 同时砂浆层受重力影响会发生垮落。

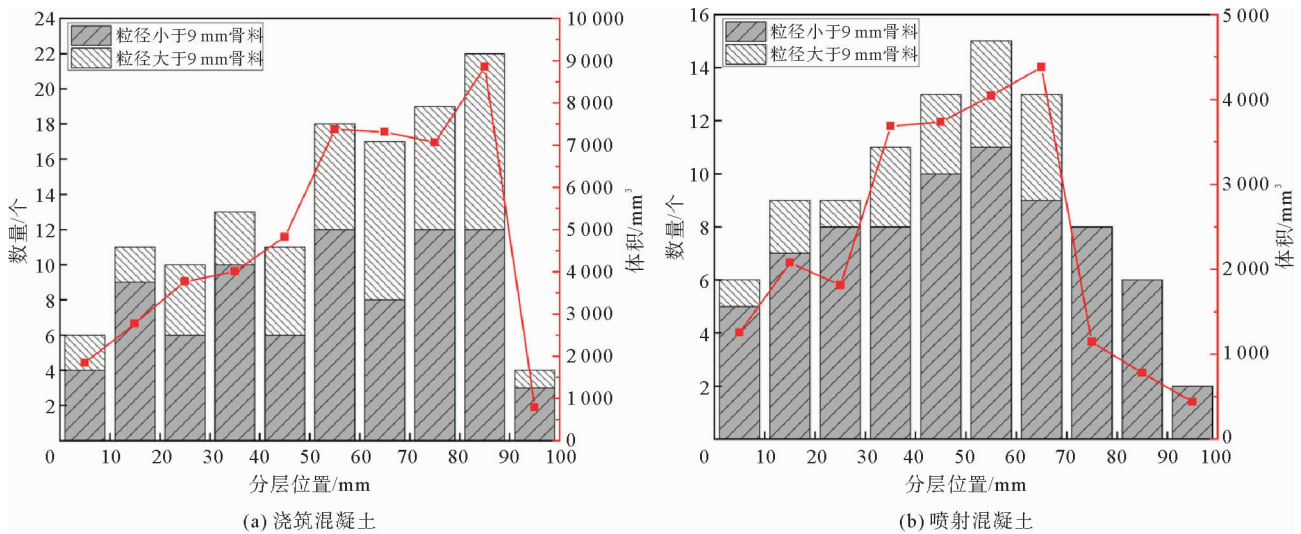


图4 浇筑混凝土和喷射混凝土粗骨料沿分层位置

Fig. 4 Layered position of coarse aggregate of poured concrete and shotcrete

2.2 孔隙分布分析

图5为两种混凝土在Z轴方向的孔隙率分布。如图5(a)所示,浇筑混凝土沿Z轴方向孔隙率在0.5%~4%波动,在2~40mm范围内,孔隙率呈波动上升趋势,30~40mm范围内波峰最高;在60~98mm范围内,孔隙率波动较稳定,总体上与粗骨料分布趋势类似。

如图5(b)所示,喷射混凝土沿Z轴方向孔隙率在3%~20%波动,在距壁面30mm内,孔隙率峰值明显低于其他区域;在20~70mm内,孔隙率波动幅度较大但波动幅度稳定;在20~30mm位置孔隙率峰值最高,孔隙分布与粗骨料分层现象有一定差别。

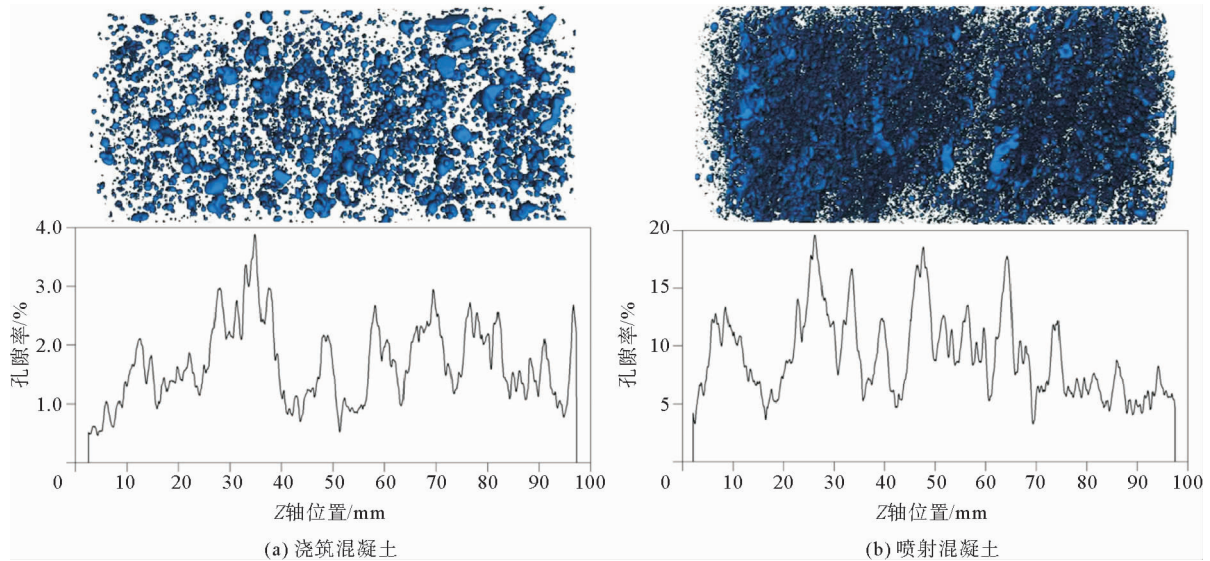


图5 浇筑混凝土和喷射混凝土孔隙率分布

Fig. 5 Porosity distribution of poured concrete and shotcrete

如图6所示,浇筑混凝土孔隙数量随孔径增加先增加后减少,孔径0.3~0.4mm的孔隙最多,总孔隙率为1.84%。其中,2~50mm区域孔隙率为1.96%,50~98mm孔隙率为1.72%。2~50mm孔隙数量比50~98mm区域多30.61%,主要是0.3~0.5mm孔径的孔隙数量差异。

喷射混凝土孔隙数量随孔径的减小而减少,孔径为 0.1~0.2 mm 的孔隙数量最高,孔径 0.1~0.4 mm 的孔隙占比均超过了 90%,总孔隙率为 10.91%。其中,在 2~30 mm 区域孔隙率为 5.07%,30~70 mm 区域孔隙率为 15.62%,70~98 mm 区域孔隙率为 9.97%;30~70 mm 区域孔隙数量比 2~30 mm 区域多 64.75%,比 70~98 mm 区域多 39.31%。各层 0.1~0.2 mm 孔隙数量差异较大。

浇筑混凝土由于内部水化反应及水分蒸发,留下空隙,造成总孔隙增加。浇筑混凝土表面砂浆较多,水化过程中消耗大量水,导致 2~50 mm 区域孔隙率较高,在 30~40 mm 区域孔隙率变化较大,可能是由于混凝土表面砂浆层堵塞了气泡的形成和排出,导致较高的孔隙率^[18]。喷射混凝土受工艺影响,存在大量微小气孔,粗骨料会阻挡后续砂浆填充这些孔隙,因此喷射混凝土孔隙结构受粗骨料分布影响,70~98 mm 区域孔隙率较低,30~70 mm 区域孔隙率高。

虽然喷射混凝土孔隙率高,但平均孔径小于浇筑混凝土。如图 7 所示,浇筑混凝土中存在较多的大孔隙,形状近似球形,这可能是在浇筑混凝土拌合、浇筑过程中混入空气,振动导致气隙向上移动,表面张力使气泡几乎呈球形。喷射混凝土孔隙数量远远大于浇筑混凝土,存在大量密集分布的小孔隙,大孔隙形状不规则,多呈带状沿粗骨料边缘分布,这是因为喷射混凝土在喷射过程中,受冲击风压影响,在砂浆中留下大量微小气孔,大量孔隙具有较高的连通性,形成大孔隙^[6,20]。而且粗骨料表面与砂浆结合程度不同,在砂浆中位移留下运动痕迹,产生沿粗骨料发展的孔隙。

2.3 抗压强度分析

根据 GB/T 50081—2019《普通混凝土力学性能试验方法标准》,使用混凝土压力试验机测量 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 混凝土试件的抗压强度,受压面为半径 25 mm 的圆面,控制加载速度在 0.4~0.6 MPa/s,直至试件破坏,记录破坏载荷,抗压强度为破坏载荷和面积的比值。

图 8 为浇筑混凝土和喷射混凝土分别养护 1、3、7、28 d 的抗压强度变化。可以看出,随养护时间增加,两种试件抗压强度均呈现升高趋势。喷射混凝土在 1~7 d 的抗压强度高于浇筑混凝土,而在 28 d 时低于浇筑混

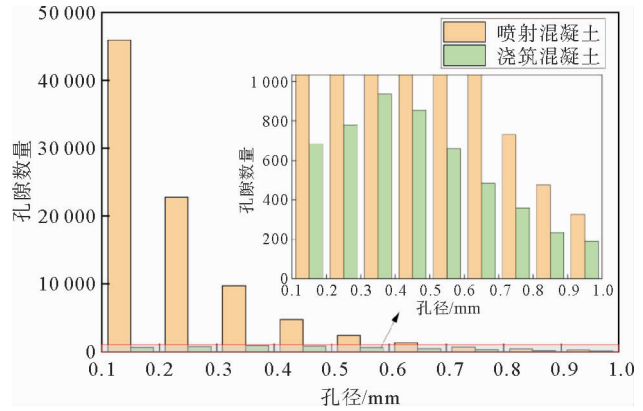


图 6 浇筑混凝土、喷射混凝土不同孔隙数量变化

Fig. 6 Variation of pore numbers in different apertures of poured concrete and shotcrete

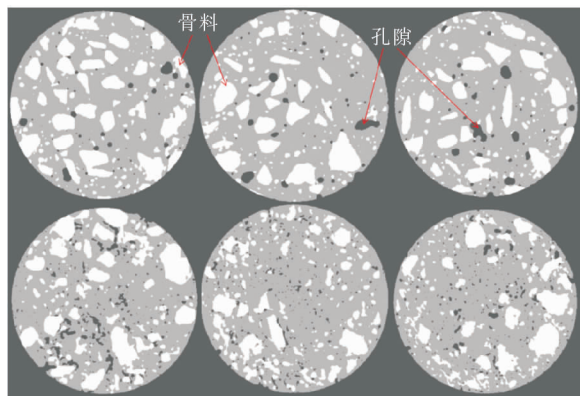


图 7 浇筑混凝土(上)和喷射混凝土(下)二维孔隙分布 CT 图像

Fig. 7 CT image of two-dimensional pore distribution of poured concrete (upper) and shotcrete (lower)

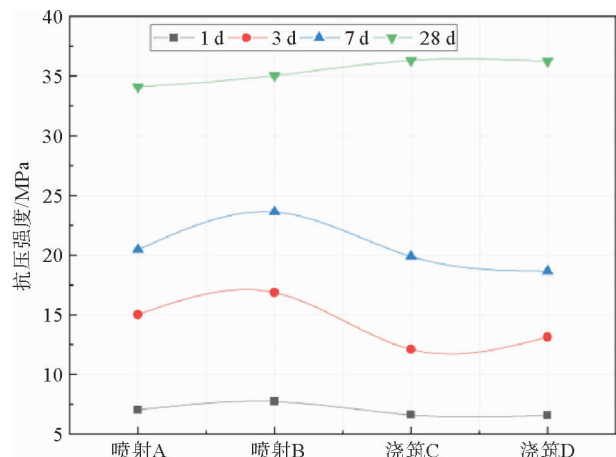


图 8 浇筑混凝土和喷射混凝土在 1、3、7、28 d 的抗压强度

Fig. 8 Compressive strength of poured concrete and sprayed concrete at 1, 3, 7, 28 d

凝土。相对于浇筑混凝土,喷射混凝土在1、3、7、28 d的平均增长率分别为11.81%、26.22%、14.33%、13.58%。这表明喷射混凝土早期抗压强度增长迅速,而后期相较于浇筑混凝土出现劣化。

喷射混凝土早期强度高是因为受喷射风压影响,具有较好的致密性,凝结速度比浇筑混凝土快,具有较多的水化产物,使混凝土在短期内表现出较高的抗压强度。而在养护28 d时,混凝土水化反应稳定,此时混凝土抗压强度变化主要受骨料属性及孔隙率影响^[12,16,21-22]。当混凝土受到外界压力时,会通过基体将压力传递到粗骨料,粗骨料会起到骨架和抵抗变形的作用,而粗骨料与砂浆的接触面为过渡区域,起到传递压力的作用。在一定范围内,粗骨料数量增加有利于增加粗骨料与砂浆的接触面面积,增强传递效果,提高混凝土强度。而孔隙沿骨料分布会影响接触面传递压力,当受到压力时,混凝土更容易发生形变,导致混凝土抗压强度降低。结合本研究,浇筑混凝土具有更高的骨料体积和更低的孔隙率,表现为较高的抗压强度。

3 结论

试验研究了两种混凝土粗骨料数量、孔隙率与力学性能的关系,对比浇筑和喷射两种工艺,以粗骨料数量、孔隙率反映两种混凝土的微观差异,分析了混凝土粗骨料、孔隙对抗压强度的影响,主要结论如下。

1) 浇筑和喷射混凝土具有不同的分层现象。浇筑混凝土粗骨料越靠近底面数量越多,呈两层分布,分层临界点在试件50 mm处;50~98 mm区域有更多的粗骨料,骨料体积比2~50 mm区域高16.03%。喷射混凝土骨料分布受骨料属性及回弹影响,呈三层分布,分层临界点位于试件30、70 mm处,近壁面30 mm区域粗骨料体积减少50.45%,在30~70 mm区域粗骨料分布均匀且密集,但仍小于浇筑混凝土,喷射末端70~98 mm区域骨料数量和体积有所下降,但高于近壁面区域。

2) 浇筑混凝土孔隙分布较均匀,孔径较大,近似呈球形。喷射混凝土孔隙孔径在0.1~0.4 mm的数量占比超90%,孔隙位置分布受粗骨料分布影响,小孔隙数量多、形状不规则,大孔隙主要沿骨料边缘分布。

3) 喷射混凝土早期强度较高,养护1~7 d的喷射混凝土抗压强度高于浇筑混凝土,而在28 d时由于粗骨料减少和孔隙率较高,抗压强度低于浇筑混凝土。

参考文献:

- [1] ZHANG L F, XIE H, FENG J L. Mesoscale modeling and failure mechanism of concrete considering pore structures and actual aggregate shapes[J/OL]. Construction and Building Materials, 2022, 353. DOI: 10. 1016/J. CONBUILDMAT. 2022. 129133.
- [2] JIANG Z, CAI G J, TIAN G L, et al. Effect of aggregate particle size on mortar pore structure[J/OL]. Construction and Building Materials, 2022, 352. DOI: 10. 1016/J. CONBUILDMAT. 2022. 128988.
- [3] MORGAN I L, ELLINGER H, K R, et al. Examination of concrete by computerized tomography[J]. ACI Journal proceedings, 1980, 77(1): 23-27.
- [4] WANG X F, CHEN Z P, REN J, et al. Object status identification of X-ray CT images of microcapsule-based self-healing mortar[J/OL]. Cement and Concrete Composites, 2022, 125. DOI: 10. 1016/J. CEMCONCOMP. 2021. 104294.
- [5] 宿辉, 黄顺, 屈春来. 高温对喷射混凝土孔隙结构分布特征的影响分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(10): 225-229. SU Hui, HUANG Shun, QU Chunlai. Analysis the distribution characteristics of pore structure in shotcrete affected by high temperature[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(10): 225-229.
- [6] 田威, 韩女, 张鹏坤. 基于CT技术的混凝土孔隙结构冻融损伤试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(11): 3069-3075. TIAN Wei, HAN Nü, ZHANG Pengkun. Experiments on the freeze-thaw damage of concrete porous structure based on CT technique[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(11): 3069-3075.
- [7] 杜向琴, 张臻, 姜宗科, 等. 基于CT图像的细观混凝土孔隙缺陷研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3): 603-610. DU Xiangqin, ZHANG Zhen, LOU Zongke, et al. Research of pore defects in mesoscopic concrete based on CT images[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3): 603-610.
- [8] REN W, YANG Z, SHARMA R, et al. Two-dimensional X-ray CT image based meso-scale fracture modelling of concrete[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 133: 24-39.

- [9] LIU T J, QIN S S, ZOU D J, et al. Mesoscopic modeling method of concrete based on statistical analysis of CT images[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 192: 429-441.
- [10] YANG Y, ZHAO W G, LI R Z. Automatic determination of the coarse aggregate distribution in concrete based on the statistical characteristics of ground-penetrating radar [J/OL]. *Structural Concrete*, 2020, 21 (2). DOI: 10.1002/suco.201900168.
- [11] YIN Y J, REN Q W, SHEN L. Study on the effect of aggregate distribution on mechanical properties and damage cracks of concrete based on multifractal theory[J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2020, 262. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120086.
- [12] 方建银, 李娜, 党发宁, 等. 基于破损分区理论和CT数重建混凝土数值模型[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(2): 66-73.
FANG Jianyin, LI Na, DANG Fanning, et al. Reconstruction of concrete numerical model based on damage zoning theory and CT number[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2020, 40(2): 66-73.
- [13] CHEN CH, ZHANG Q, LEON M K, et al. The multi-factor effect of tensile strength of concrete in numerical simulation based on the Monte Carlo random aggregate distribution[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 165: 585-595.
- [14] LI G D, YU J J, CAO P, et al. Experimental and numerical investigation on I-II mixed-mode fracture of concrete based on the Monte Carlo random aggregate distribution[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 523-534.
- [15] LUDOVIC Z, MATTHIEU B, JULIEN B, et al. Influence of cement matrix porosity on the triaxial behaviour of concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2016, 80: 52-59.
- [16] SHEN Y J, LV Y, YANG H W, et al. Pore development and mechanical properties of iced concrete during hydration[J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2022, 353. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129077.
- [17] ZHAO J, MENG X, CHEN L, et al. Correlation between the mechanical properties and the fiber breaking morphology of fiber reinforced shotcrete (FRS)[J/OL]. *Composite Structures*, 2021, 277. DOI: 10.1016/J.compstruct.2021.114641.
- [18] GINOUSE N, JOLIN M. Experimental and numerical investigation of particle kinematics in shotcrete[J/OL]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(11). DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001092.
- [19] JULIE A, GERALDINE C, MARTIN C, et al. Characterization of fresh dry-mix shotcrete and correlation to rebound[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 135: 225-232.
- [20] LIU C, ZHANG R F, LIU H W, et al. Analysis of the mechanical performance and damage mechanism for 3D printed concrete based on pore structure[J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2022, 314. DOI: 10.1016/J.conbuildmat.2021.125572.
- [21] CHEN Y W, FENG J L. Experimental study on effect of coarse aggregate volume fraction on Mode I and Mode II fracture behavior of concrete[J/OL]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2022, 20(2). DOI: 10.3151/JACT.20.57.
- [22] 朱春琪, 田稳苓, 姜磊, 等. 玄武岩纤维增强水泥长期力学性能试验研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(4): 49-55.
ZHU Chunqi, TIAN Wenling, JIANG Lei, et al. Experimental study on long-term mechanical properties of basalt fiber reinforced cement[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2021, 40(4): 49-55.

(责任编辑: 齐敏华)