新型碾压式导电混凝土功能材料力学性能试验与精细仿真分析

李明超^{1*}, 闵巧玲¹, 张梦溪¹, 刘东海¹, 沈扬², 冯达¹

1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350

2. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038

* E-mail: lmc@tju.edu.cn

收稿日期: 2021-04-15; 接受日期: 2021-05-07; 网络版发表日期: 2021-07-30

国家自然科学基金(批准号: 51879185)和国家大坝安全工程技术研究中心开放基金(编号: CX2019B02)资助项目

摘要 碾压式导电混凝土(electrically conductive roller-compacted concrete, ERCC)是一种新型功能性材料,可通过自身电热性能解决高寒地区路面跑道人工除雪去冰效率低、大坝工程结构温控难等问题. 本文开展了ERCC材料设计、物理试验与数值仿真分析研究. 利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)测试分析了表面活性剂对ERCC浆体流动性、炭黑分散效果的改善机理; 针对碾压成型的大型ERCC钻芯取样试件, 开展了力学性能的宏观试验与X射线断层扫描(X-ray computed tomography, XCT)的细观试验; 进而在材料试验的基础上, 通过耦合连续介质、非连续介质计算方法进行ERCC精细化数值仿真分析, 建立了基于真实骨料的ERCC细观模型, 解决了传统混凝土细观模拟中XCT模型计算成本过高、非连续介质计算效率低、传统球体/多面体骨料模型的精细化程度差等问题. 结果表明: ERCC表面活性剂可明显改善炭黑分散效果, 采用碾压施工工艺成型质量较好, 抗压强度为22.85 MPa, 劈拉强度为1.72 MPa, 弹性模量为23.7 GPa, 孔隙体积比为1.05%; 在砂浆、界面强度一定时, 增大骨料体积比, 可不同程度提高ERCC的力学性能; 精细化仿真计算结果与多个实际工程混凝土材料特性统计规律相吻合, 相比传统混凝土细观模拟方法具有更好的适用性.

关键词 碾压式导电混凝土, 宏观试验, 真实骨料, 力学特性, 精细仿真

1 引言

冬季我国北方长期性的低温、冻融现象以及南方近年来时常出现的冬季雪灾危害严重威胁着建筑体系的正常运行, 例如低温环境和降雪会造成高速公路、桥梁和机场跑道的积雪凝冰, 高寒地区的寒潮侵袭则

会造成水利工程混凝土坝结构的开裂现象^[1-3], 直接影响我国基础设施运行、使用与维护的安全, 传统的融雪除冰、温控防裂方法需要消耗大量的人力、物力, 往往造成混凝土结构安全与耐久性问题^[4,5]. 近年来, 电热型混凝土由于其既具备混凝土材料良好的力学性能又具备优异的电热性能, 已经在融雪除冰与温控防

引用格式: 李明超, 闵巧玲, 张梦溪, 等. 新型碾压式导电混凝土功能材料力学性能试验与精细仿真分析. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1245–1258
Li M C, Min Q L, Zhang M X, et al. Mechanical experiments and precise simulation of a novel functional material: Electrically conductive roller-compacted concrete (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1245–1258, doi: 10.1360/SST-2021-0164

裂方面初露头角,能够在低温寒冷条件下通过外接电源提升混凝土建筑物的温度,从而防止积雪凝冰与温度裂缝等不利情况的发生^[6,7]。因此,针对电热型混凝土展开研究具有重要的科学实践意义与广阔的应用前景。

考虑到电热型混凝土在大体积混凝土结构中的应用成本,可将炭黑作为主要导电相材料^[8,9],但炭黑属于疏水材料,掺入后会使得混凝土浆体流动性降低,进而成为一种干硬的混凝土材料,而传统的浇筑施工方法难以实现高效、快速且高质量的铺装,可见干硬特性严重限制了该类材料的工程应用与推广。针对上述问题,考虑到碾压施工工艺在高速公路路面、混凝土坝工程中快速高效施工的优势^[10,11],Zhang等人^[6]采用碾压施工的方式浇筑了掺入炭黑的导电混凝土试件,证明了碾压成型比振捣浇筑更具有工程适用性,测试了大尺寸碾压试件的电热温升性能^[12],初步证明了该材料的自发热特性对结构热量损失补偿的可行性。Dehghanpour等人^[2,13-15]通过大量混凝土试验发现炭黑可有效降低混凝土电阻,炭黑的掺入可将常规混凝土电阻率由6540~11400 $\Omega \cdot \text{m}$ 降低至100 $\Omega \cdot \text{m}$ 以内,并可节约40%的成本。但现有研究主要通过宏观试验展开,未结合细观尺度的研究给出的该材料的设计与改进思路,有必要从细观尺度入手结合材料试验与数值仿真展开深入研究。

相比常规混凝土材料,碾压成型的混凝土骨料体积更大^[16,17],且骨料体积的变化对材料的力学性能与电热性能均会产生一定影响。物理试验方法能够直接

获得混凝土材料的力学性能,采用碾压工艺则是开展干硬性混凝土材料的真实特性研究的重要手段,但大型碾压试件制备需耗费巨大人力物力,且通过宏观试验难以研究细观尺度各相组分对材料特性的影响机制。数值仿真方法成本低、可重复性强,可作为物理试验的一种有效辅助手段。目前混凝土细观模拟主要包含连续介质与非连续介质计算方法两大类。其中连续介质计算方法基于将混凝土等效为骨料、砂浆、界面过渡区所组成的三相复合材料^[18,19],通过以下两种方式建立模型:(1)基于X射线断层扫描(X-ray computed tomography, XCT)构建真实细观模型^[20-23],该类模型较为准确,但前期处理工作量大、成本高,难以广泛应用;(2)基于多种简化骨料投放算法构建混凝土细观模型^[24-28],该类模型效率高,但骨料多为圆球、椭球或多面体,无法反映骨料真实形状,精细化程度低,对投放算法依赖性高。非连续介质计算方法主要用于模拟新拌混凝土流动、压实、骨料破碎、不规则运动等过程,该方法将混凝土砂浆、骨料等效为多个不同粒径的刚性圆球颗粒或“颗粒簇”,通过颗粒之间的相互作用模拟混凝土的力学性能^[29,30],但非连续介质方法在进行混凝土细观模拟中需设置庞大的颗粒数量,计算效率低,参数率定困难,在混凝土强度细观模拟中仍有较大不足。

针对上述问题,本文配制了一种新型碾压式导电混凝土材料(electrically conductive roller-compacted concrete, ERCC),开展了如图1所示的多尺度物理试验与精细化数值仿真研究。利用扫描电子显微镜(scan-

图1 总体研究框架
Figure 1 Overall research framework.

ning electron microscope, SEM)测试分析了表面活性剂对导电混凝土浆体流动性、炭黑分散效果的改善机理. 通过多参数可调式碾压装置浇筑了大型ERCC试件, 针对钻芯取样试件, 开展ERCC力学性能的试验与XCT细观试验. 随后以试验与细观模型为基础, 用耦合连续介质、非连续介质计算方法进行不同骨料体积比的ERCC细观模拟, 将二级配真实骨料模型由非连续介质模型映射至连续介质数值模型中开展ERCC力学性能数值仿真, 以期从细观尺度解释ERCC力学破坏机理, 并对材料试验数据进行有效补充.

2 ERCC功能材料宏细观试验

2.1 炭黑分散效果与机理分析

普通混凝土无论是处于潮湿或干燥环境中, 均不具有良好的导电性能, 在ERCC设计时, 考虑在普通混凝土中掺加低成本的炭黑颗粒作为导电相材料使其成为电的良导体. 因此, ERCC材料的导电性主要受双逾渗行为控制, 即当导电颗粒达到某一浓度后, 在连续的水泥浆体和骨料中会同时出现逾渗现象, 使得混凝土电阻率发生突变. 开展预试验测试了28 d电阻率随炭黑掺量的变化, 得到炭黑体积掺量在8.2%~11.4%时处于逾渗区(电阻率突变区), 故选择炭黑掺量为11.4%.

炭黑颗粒为疏水性材料, 若拌和时炭黑无法均匀分散, 则会影响ERCC中导电网络的特性, 无法充分利用双逾渗行为. 考虑到上述问题, 本文采用阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)来改善导电相炭黑的分散效果, 通过扫描电子显微镜

拍摄了有无表面活性剂分散作用对ERCC净浆微结构的影响, 具体表现为: 如图2(a)所示, 无SDS的ERCC浆体团聚作用明显, 炭黑的存在影响了胶凝材料与水分的接触, 抑制了胶凝材料的水化, 导致水化产物较少, 不利于ERCC力学性能增长, 相比之下, 掺入SDS后团聚效果明显变弱, 见图2(b). 原因在于表面活性剂SDS由亲水头部和疏水尾部组成, 如图2(c)所示, 由于SDS尾部与炭黑颗粒表面均表现为强疏水性, 使得二者存在疏水吸引力, 同时SDS亲水头部变成液相, 形成氢键, 这样便使炭黑颗粒更均匀地分散在水中, 水分子也能与胶凝材料充分接触与水化. 因此, 掺入表面活性剂能够改善浆体流动性, 进而提升成型质量.

2.2 ERCC功能材料施工工艺

以实际工程中常态混凝土配合比为基础, 根据双逾渗原理与预实验结果, 设计了如表1所示的ERCC配合比, 通过自行研制的多参数可调式碾压装置进行ERCC碾压成型, 浇筑了尺寸为2200 mm×1100 mm×150 mm的碾压试件, 该碾压试件尺寸由碾轮行进距离、碾轮宽度及ERCC单层摊铺厚度确定, 力求真实反映施工现场压路机的压实过程^[31]. 该装置可多级调节振动频率、振幅、激振力、行进速度、静线载荷等参数, 试验选取参数如表2所示. 本文中的ERCC大型试件碾压成型施工工艺如图3所示, 第一步, 将按规定配合比所形成ERCC拌合料倒入钢模板中进行摊铺, 如图3(a); 第二步, 通过龙门吊将装有ERCC的钢模板移至碾压机滚动行进路径上, 如图3(b); 第三步, 校准压实监控装置, 设置适宜的碾压档位, 即可开始碾压施工, 如图3(c).

图2 (网络版彩图)ERCC净浆炭黑分散效果与机理. (a) 无SDS的净浆扫描电子显微镜图; (b) 掺入4%SDS的净浆扫描电子显微镜图; (c) SDS分散机理示意图

Figure 2 (Color online) Dispersion effect and mechanism of carbon black in ERCC slurry. (a) SEM for slurry without SDS; (b) SEM for slurry with 4% SDS; (c) schematic diagram of SDS dispersion mechanism.

表 1 ERCC配合比设计

Table 1 ERCC mix proportion design

单位用水量 (kg m ³)	粗骨料 (kg m ³)	水泥 (kg m ³)	粉煤灰 (kg m ³)	炭黑体积掺量 (%)	表面活性剂 (%)	减水剂 (%)	砂率 (%)
125	1146	210	90	11.4	4.0	1.0	42.0

表 2 试验装置主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of the experiment device

项目名称	参数	本文所选参数	备注说明
碾轮直径 (mm)	1200	1200	与实际碾压机相同
碾轮宽度 (mm)	1000	1000	约为实际碾压机的1/2
振动频率 (Hz)	40~70	45	无级可调
振幅 (mm)	0.3~1.1	0.33	9档可调
激振力 (kN/m)	22~118	31	无级可调
行进速度 (km/h)	0~6	1.5	无级可调

图 3 (网络版彩图)ERCC碾压成型施工工艺. (a) 第一步; (b) 第二步; (c) 第三步

Figure 3 (Color online) Construction technology of ERCC. (a) Step 1; (b) step 2; (c) step 3.

通常而言, 大型试件是由碾压机进行两遍静态碾压与多遍振动碾压后成型的。

2.3 ERCC宏观观试验

为进行ERCC的性能试验, 本文针对上述成型ERCC试件(养护28天)分别开展了芯样的力学试验与XCT扫描试验, 如图4所示。取芯试件为圆柱体, 圆柱体直径为150与100 mm, 高度为150 mm。直径为150 mm的取芯试件用于测试其弹性模量、抗压强度与劈拉强度, 并获得抗压与劈拉破坏应力应变关系, 测得ERCC弹性模量为23.7 GPa, 抗压强度为22.85 MPa, 劈拉强度为1.72 MPa。这里的强度值为3组芯样的平均值, 以避免随机性对强度测试结果的影响。根据规范与经验公式^[32,33], 相同抗压强度的常规混凝土试件对应的弹性模量为26.8 GPa, 劈拉强度为2.20 MPa, 相比ERCC分别大17.29%, 27.91%。直径为100 mm的取芯试件用

于进行XCT扫描以构建其真实结构的多相细观模型, 如图5(a)所示, 三维重构的ERCC模型如图5(b)所示, 统计得出骨料体积比为37.9%, 内部孔隙体积比仅为1.05%, 表明ERCC成型质量较好。

2.4 ERCC细观参数率定

ERCC芯样抗压/巴西劈裂试验可从宏观尺度反映其力学性能, 混凝土作为骨料、砂浆与界面过渡区组成的三相复合材料, 各细观组分材料参数可通过宏观力学性能进行率定。混凝土损伤模型(concrete damaged plasticity, CDP)在模拟混凝土单轴荷载、循环荷载与动态荷载作用下的受压破碎及受拉开裂具有较好的适用性^[20,27], 受压和受拉作用下混凝土的应力应变关系如下:

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^p) = (1 - d_c)E_0\varepsilon_c^e, \quad (1)$$

图 4 (网络版彩图)ERCC试件取芯示意图

Figure 4 (Color online) Schematic diagram of ERCC specimen coring.

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^p) = (1 - d_t)E_0\varepsilon_t^e, \quad (2)$$

式中, σ_c , σ_t 分别为混凝土单轴受压与受拉时的应力 (MPa); d_c , d_t 分别为混凝土受压损伤因子与受拉损伤因子; E_0 为混凝土初始弹性模量 (MPa); ε_c , ε_t 分别为受压与受拉时的应变; ε_c^p , ε_t^p 为卸载后的有效受压塑性应变与有效受拉塑性应变, ε_c^e , ε_t^e 为弹性受压应变与弹性受拉应变。

图 5 ERCC三维骨料重构模型. (a) CT切片; (b) 重构模型

Figure 5 3D aggregates reconstruction model of ERCC. (a) CT slice; (b) reconstruction model.

根据2.3节中ERCC三维重构模型建立包含砂浆、骨料、界面过渡区(厚度取1 mm^[34-37])的ERCC细观数值模型, 如图6所示. ERCC细观模型中砂浆与界面过渡区采用CDP混凝土损伤本构, 界面强度为砂浆强度的80%^[38], 由于骨料在试验荷载作用下不发生破坏,

图 6 (网络版彩图)ERCC细观数值计算模型. (a) 砂浆、骨料、界面细观模型; (b) 骨料、界面细观模型

Figure 6 (Color online) ERCC mesoscopic numerical model. (a) Mesoscopic model of mortar, aggregate and interface; (b) mesoscopic model of aggregate and interface.

故采用弹性本构. 考虑到炭黑对砂浆及界面过渡区的影响, 数值模拟选取的材料参数如表3所示. 为验证数值参数选取的合理性, 本文通过ERCC力学性能试验进行参数率定. 该数值计算模型包含326.944万个C3D8R微单元, 采用动力显式模块进行求解. ERCC单轴压缩及巴西劈裂模型验证结果如图7与8所示, 可以看出无论应力应变与破坏模式, 室内试验与数值模型结果比较吻合. 单轴压缩破坏时出现骨料外围砂浆及界面过渡区剥落, 劈拉破坏时破坏从试件中心沿界面过渡区劈裂, 对应的峰值抗压强度为23.24 MPa, 劈拉强度为1.71 MPa, 弹性模量为24.28 GPa, 与室内试验误差分别为1.71%, 0.58%, 2.45%, 误差较小, 验证了ERCC材料参数取值及数值模型设置是合理的.

3 精细化数值仿真计算与分析

“精细化”仿真逐渐成为混凝土性能分析趋势所

表3 ERCC材料属性

Table 3 ERCC material properties

材料类型	弹性模量 E (GPa)	泊松比	f_{cr} (MPa)	f_{tr} (MPa)
骨料	50.0	0.20	—	—
砂浆	22.0	0.22	22.0	3.79
界面	17.5	0.20	17.6	3.03

在, 为细观混凝土仿真提出了更高的要求^[39-42], 主要体现在: (1) 细观混凝土不再作为单一介质, 仿真时需考虑骨料、砂浆、界面等细观物质的分布; (2) 混凝土细观模型中需精细描述出真实骨料的几何特征; (3) 考虑混凝土细观模型中真实骨料后需同时保证网格划分质量及求解精度. 为满足该要求本节开展了进一步的深入研究.

3.1 真实骨料生成

目前混凝土细观模拟中骨料多简化为圆球、椭球

图7 (网络版彩图)ERCC单轴抗压模型的验证. (a) 应力应变曲线; (b) 破坏模式

Figure 7 (Color online) Verification of ERCC uniaxial compression model. (a) Stress-strain curve; (b) failure mode.

图8 (网络版彩图)ERCC巴西劈裂模型的验证. (a) 应力应变曲线; (b) 破坏模式

Figure 8 (Color online) Verification of ERCC Brazilian splitting model. (a) Stress-strain curve; (b) failure mode.

或多面体, 无法反映真实骨料形状, 且投放过程中对算法依赖性较高, 如何高效地开展混凝土精细化细观模拟仍面临较大的挑战, 针对该问题本文通过下述方法进行改进, 具体流程如图9所示。

第一步: 不规则骨料球形颗粒填充. 为真实反映骨料形状, 本文采用三维激光扫描技术建立碾压混凝土典型不规则骨料几何模型^[17,43], 骨料几何模型由多个三角面构成, 可反映不规则真实骨料外部轮廓. 对真实骨料几何模型进行球形颗粒填充形成“颗粒簇”, 适宜的颗粒数量及大小可较精确反映骨料的几何特征. 非连续介质中通过球体间的相互作用计算最终“颗粒簇”的位置。

第二步: 非连续介质中不规则骨料生成. 标准立方体(150 mm×150 mm×150 mm)内不规则骨料可通过以下方式生成. 首先基于非连续介质计算方法(discrete element method, DEM)在较大立方体空间内(尺寸可根据实际计算需求灵活调整, 本文采用尺寸为400 mm×150 mm×150 mm)生成不同体积比的不规则骨料“颗粒

簇”, 为保证骨料的填充效果, 骨料的“颗粒簇”几何参数放大1.05倍, 立方体长度方向边界处各设置一块挤压板. 其次通过边界处的挤压板向内匀速收缩, 直至骨料收缩至150 mm范围内。

第三步: 连续介质中精细化骨料生成. 提取上一步中骨料尺寸、位置、旋转信息, 通过批处理程序将骨料几何模型映射至连续介质(finite element method, FEM)中, 最终生成混凝土细观模拟的精细化真实骨料几何模型。

这里采用的不规则骨料投放方式适用于立方体、圆柱体及其他尺寸的混凝土试件, 具备通用性, 且不局限于本文中新型碾压式导电混凝土细观模拟. 通过该方法可实现精细化真实骨料在指定空间内的快速投放, 解决了目前混凝土细观模拟中骨料精细化程度低、投放算法依赖性高的问题。

3.2 微单元体积分数

混凝土材料可视为由三相复合材料组成(骨料、

图9 混凝土精细化仿真流程

Figure 9 Precise simulation process of concrete.

砂浆、界面过渡区), 采用传统方法建立不规则骨料细观模型存在网格质量差、难以收敛等问题, 且三维激光扫描的单个骨料几何模型三角面多, 采用自由网格建立细观模型时, 会在尖角区域形成网格宽度过小的四面体网格, 极大影响模型计算效率. 为解决上述问题, 本文通过将混凝土细观模型划分为多个规则正六面体微单元, 微单元边长为1 mm, 通过计算微单元体积分数判别骨料、砂浆、界面等区域, 避免对骨料进行网格划分. 微单元体积分数计算公式见式(3):

$$\rho = \frac{V_{A \cap B}}{V_B}, \quad (3)$$

式中, ρ 为微单元的体积分数; $V_{A \cap B}$ 为微单元与骨料相交区域体积 (mm^3); V_B 为微单元体积(这里取 1 mm^3). 考虑到计算成本与效率, 本文界面过渡区厚度为1 mm, 满足精度要求^[39].

通过上述计算规则化微单元体积分数的计算方法, 单元宽度可控, 可快速区分混凝土细观模型中单元属性并进行组合, 且无需对骨料几何模型进行剖分或网格划分, 具有较好的适用性, 图10为基于体积分数方法的混凝土细观模型, 可以清晰反映骨料区域、砂浆区域、界面区域等各部分单元, 并保证真实骨料的几何特征.

3.3 ERCC力学性能分析

由于碾压混凝土相比常规混凝土骨料含量更大, 骨料体积比对新型碾压式导电混凝土力学性能的影响暂未明确. 基于上述材料参数开展不同体积比真实骨料的ERCC抗压及劈拉性能分析, 本文ERCC骨料采用二级配, 骨料体积比分别为0.36, 0.44, 0.52, 对应骨料颗粒数量分别为1702, 2271, 2711, 不同体积比的骨料颗粒级配曲线如图11所示. 通过上述方法在连续介质中建立出基于真实骨料投放的ERCC细观数值模型, 对应的ERCC砂浆、骨料、界面细观模型如图12所示.

(1) ERCC抗压力学特性

图13为不同骨料体积比ERCC在单轴受压荷载作用下的应力应变曲线与破坏模式, 可以看出ERCC受压时的破坏模式呈现出一致性, 加载初始阶段, 受压损伤由较大骨料的界面处开始产生, 加载后期受压损伤由界面处延伸至临近砂浆处, 最终导致ERCC出现大面积受压损伤, 损伤区域集中在试件中间区域, 大多呈交叉型, ERCC达到峰值强度时, 骨料体积比大的

图10 (网络版彩图)基于体积分数法的混凝土细观模型

Figure 10 (Color online) Meso-model of concrete based on volume fraction method.

图11 (网络版彩图)骨料颗粒级配曲线

Figure 11 (Color online) Aggregate particle gradation curve.

内部损伤较体积比小的区域大, 损伤由内部扩散至表面, 表现为多条斜向损伤. 由应力应变曲线可以看出, ERCC峰值抗压强度随骨料体积比增大而逐渐增大, 峰值强度处对应的应变也逐渐增大, 出现大面积损伤后, 强度迅速降低.

(2) ERCC劈裂拉伸力学特性

图14为不同骨料体积比ERCC劈裂拉伸作用下应力应变关系及破坏模式. 可以看出, 立方体试件在劈拉作用下沿试件中心砂浆及界面处劈裂破坏, 劈裂拉伸路径贯穿整个试件, 体积比小时, 劈裂过程中损伤沿骨料绕行路径较短, 破坏所需的能量较小, 峰值强度较小, 劈裂拉伸断面相对平整; 而骨料体积比增大时, 由于骨料对裂缝的阻碍, 损伤沿骨料绕行路径增长, 裂缝发展所需的破坏能量增大, 因此峰值强度增大, 劈裂拉伸断面相对粗糙. 由应力应变曲线可以看出, ERCC

图 12 (网络版彩图)不同体积比ERCC微观模型

Figure 12 (Color online) Meso-model of ERCC with different volume ratios.

图 13 (网络版彩图)ERCC抗压应力应变关系. (a) 应力应变曲线; (b) 破坏模式

Figure 13 (Color online) Compressive stress-strain relationship of ERCC. (a) Stress-strain curve; (b) failure mode.

峰值劈拉强度随骨料体积比增大而逐渐增大, 峰值强度处对应的应变也随骨料体积比增大逐渐增大, 受拉损伤贯穿试件中心后, 强度迅速降低。

由表4可以看出, 随着骨料体积比的增加, ERCC抗压强度、劈拉强度与弹性模量逐渐增大, 骨料体积比为0.44时的抗压强度较骨料体积比为0.36时增大

5.11%, 劈拉强度增大11.49%, 弹性模量增大2.48%; 骨料体积比为0.52时的抗压强度较骨料体积比为0.36时增大13.62%, 劈拉强度增大21.62%, 弹性模量增大5.37%。因此在砂浆与界面强度一定时, 增加骨料体积比可一定程度上提高混凝土的抗压强度、劈拉强度与弹性模量。实际工程中在保证骨料砂浆结合质量后, 选

图 14 (网络版彩图)ERCC劈裂拉伸应力应变关系. (a) 应力应变曲线; (b) 破坏模式
Figure 14 (Color online) Splitting tension stress-strain relationship of ERCC. (a) Stress-strain curve; (b) failure mode.

表 4 不同体积比ERCC力学特性
Table 4 Mechanical properties of ERCC with different volume ratios

体积比	抗压强度 (MPa)	劈拉强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)
0.36	23.5	1.48	24.2
0.44	24.7	1.65	24.8
0.52	26.7	1.80	25.5

取适宜的骨料含量可同时保证ERCC电热性能与力学性能。

(3) 对比验证

统计我国西南地区三个大型混凝土坝主体工程459组混凝土材料特性试验数据, 如图15所示, 可以看

出混凝土弹性模量随抗压强度/劈拉强度增大逐渐增大, 抗压强度随劈拉强度增大逐渐增大, 通过对比发现本文精细仿真计算结果与现场统计数据整体规律相吻合, 该统计结果验证了精细化仿真分析的正确性。

4 结论

本文设计配制了一种新型ERCC功能材料, 开展了ERCC浆体扫描电子显微镜测试、大型ERCC试件宏观力学试验与XCT细观试验, 分析了ERCC的成型效果及力学性能; 基于试验结果与细观模型, 通过耦合连续介质、非连续介质计算方法开展ERCC精细仿真分析, 建立了基于真实骨料的ERCC细观模型, 解决

图 15 (网络版彩图)混凝土材料特性试验统计数据. (a) 抗压强度与弹性模量间的关系; (b) 抗压强度与劈拉强度间的关系; (c) 弹性模量与劈拉强度间的关系
Figure 15 (Color online) Experimental statistical data of concrete material characteristics. (a) Relationship between compressive strength and elastic modulus; (b) the relationship between compressive strength and splitting tensile strength; (c) the relationship between elastic modulus and splitting tensile strength.

了传统混凝土细观模拟中XCT模型计算成本过高、非连续介质计算效率低、传统球体/多面体骨料模型的精细化程度差等问题, 计算结果与多个实际工程混凝土材料特性统计规律相吻合, 相比传统混凝土细观模拟方法具有更好的适用性, 可得出以下结论。

(1) 加入表面活性剂能够有效改善ERCC浆体微结构, 提高力学性能, 采用碾压工艺成型的ERCC的抗压强度为22.85 MPa, 劈拉强度为1.72 MPa, 弹性模量为23.7 GPa, 孔隙体积比为1.05%, 成型质量较好。

(2) 通过对比XCT扫描的ERCC试件数值计算结果与室内抗压/劈拉试验结果, 验证了本文选用的CDP混凝土损伤材料参数及数值仿真模型设置的合理性, 为后续ERCC细观模拟提供新的思路。

(3) 所提出的精细化真实骨料生成方式解决了目前混凝土细观模拟中骨料精细化程度低、投放算法依赖性高的问题, 所建立的数值模型收敛性较好, 无需对不规则真实骨料进行剖分或自由网格划分, 具有更好的通用性。

(4) ERCC砂浆与界面强度一定时, 增加骨料体积比可一定程度提高混凝土的力学性能, 工程中选取适宜的骨料含量可同时保证ERCC电热性能与力学性能。

值得一提的是, 本文是基于现场多种真实骨料开展的ERCC精细化细观力学特性模拟, 后续可进行RCC/ERCC复合结构多性能宏细观试验与模拟, 另外文中所介绍的细观建模技术并不局限于ERCC的设计研发, 适用于混凝土等多相复合材料的仿真计算。

参考文献

- 1 Yu H Y, Ma T, Wang D W, et al. Review on China's pavement engineering research-2020 (in Chinese). *China J Highway Transport*, 2020, 33: 1-66 [于华洋, 马涛, 王大为, 等. 中国路面工程学术研究综述-2020. *中国公路学报*, 2020, 33: 1-66]
- 2 Dehghanpour H, Yilmaz K, Afshari F, et al. Electrically conductive concrete: A laboratory-based investigation and numerical analysis approach. *Construction Building Mater*, 2020, 260: 119948
- 3 Zeng W, Ding Y N, Zhang Y L, et al. Effect of steel fiber on the crack permeability evolution and crack surface topography of concrete subjected to freeze-thaw damage. *Cement Concrete Res*, 2020, 138: 106230
- 4 Liu X H, Zhang C, Chang X L, et al. Precise simulation analysis of the thermal field in mass concrete with a pipe water cooling system. *Appl Thermal Eng*, 2015, 78: 449-459
- 5 Zhang G X, Liu Y Z, Liu Y, et al. Analysis on the causes of crack formation and the methods of temperature control and crack prevention during construction of super-high arch dams (in Chinese). *J Hydroelectric Eng*, 2010, 29: 45-51 [张国新, 刘有志, 刘毅, 等. 特高拱坝施工期裂缝成因分析与温控防裂措施讨论. *水力发电学报*, 2010, 29: 45-51]
- 6 Zhang M X, Li M C, Zhang J R, et al. Experimental study on electro-thermal and compaction properties of electrically conductive roller-compacted concrete overwintering layer in high RCC dams. *Construction Building Mater*, 2020, 263: 120248
- 7 Rao R, Fu J Y, Chan Y J, et al. Steel fiber confined graphite concrete for pavement deicing. *Compos Part B-Eng*, 2018, 155: 187-196
- 8 Wen S, Chung D D L. Effects of carbon black on the thermal, mechanical and electrical properties of pitch-matrix composites. *Carbon*, 2004, 42: 2393-2397
- 9 Çınar E, Uygunoğlu T, Şimşek B, et al. Effect of carbon black on electrical curing of fresh concrete for cold regions. *Construction Building Mater*, 2020, 247: 118572
- 10 Chhorn C, Hong S J, Lee S W. A study on performance of roller-compacted concrete for pavement. *Construction Building Mater*, 2017, 153: 535-543
- 11 Tu H J, Huang W. Overview of RCC dam construction technologies (in Chinese). *J Hydraulic Eng*, 2007, 38(S1): 36-42 [涂怀健, 黄巍. 碾压混凝土筑坝施工技术综述. *水利学报*, 2007, 38(S1): 36-42]
- 12 Zhang M X, Li M C, Zhang J R, et al. Experimental study on the electro-thermal performance of ERCC and its power supply mode analysis (in Chinese). *J Hydraulic Eng*, 2021, 52: 103-110, 119 [张梦溪, 李明超, 张津瑞, 等. 碾压式导电混凝土电热试验与供电模式分析. *水利学报*, 2021, 52: 103-110, 119]
- 13 Dehghanpour H, Yilmaz K, Ipek M. Evaluation of recycled nano carbon black and waste erosion wires in electrically conductive concretes. *Construction Building Mater*, 2019, 221: 109-121
- 14 Sassani A, Ceylan H, Kim S, et al. Influence of mix design variables on engineering properties of carbon fiber-modified electrically conductive

- concrete. *Construction Building Mater*, 2017, 152: 168–181
- 15 Ding Y, Chen Z, Han Z, et al. Nano-carbon black and carbon fiber as conductive materials for the diagnosing of the damage of concrete beam. *Construction Building Mater*, 2013, 43: 233–241
- 16 Liu D H, Sun L F, Xia X T. Compaction energy-based determination method for control standards of RCC compaction parameters under different vibrating-compacted values (in Chinese). *J Hydraulic Eng*, 2019, 50: 1063–1071 [刘东海, 孙龙飞, 夏谢天. 不同VC值下基于压实功的RCC碾压参数控制标准确定方法. *水利学报*, 2019, 50: 1063–1071]
- 17 Li Z L. Study on meso-simulation of vibration rolling process and real-time compaction quality control of roller-compacted concrete dam (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Tianjin: Tianjin University, 2017 [李子龙. 碾压混凝土坝振动碾压过程细观模拟及压实质量实时控制研究. 博士学位论文. 天津: 天津大学, 2017]
- 18 Li D, Jin L, Du X L, et al. Mesoscopic numerical investigations on the slenderness effect of reinforced concrete column under axial compression (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2016, 46: 961–969 [李冬, 金浏, 杜修力, 等. 钢筋混凝土轴压柱长细比效应的细观数值研究. *中国科学: 技术科学*, 2016, 46: 961–969]
- 19 Du M, Jin L, Du X L, et al. Mesoscopic simulation of size effect on stirrup-confined concrete columns under axial compression (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2017, 47: 1057–1066 [杜敏, 金浏, 杜修力, 等. 箍筋约束混凝土方柱轴压破坏尺寸效应细观数值研究. *中国科学: 技术科学*, 2017, 47: 1057–1066]
- 20 Huang Y J. Meso-scale fraction modelling of concrete based on XCT images and scaled boundary finite element method (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Hangzhou: Zhejiang University, 2017 [黄宇劼. 基于XCT图像和比例边界有限元法的混凝土细观断裂模拟. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2017]
- 21 Huang Y, Yan D, Yang Z, et al. 2D and 3D homogenization and fracture analysis of concrete based on in-situ X-ray computed tomography images and Monte Carlo simulations. *Eng Fract Mech*, 2016, 163: 37–54
- 22 Huang Y, Yang Z, Ren W, et al. 3D meso-scale fracture modelling and validation of concrete based on in-situ X-ray computed tomography images using damage plasticity model. *Int J Solids Struct*, 2015, 67–68: 340–352
- 23 Yang S Q, Yang Z, Jing H W, et al. Fracture evolution mechanism of hollow sandstone under conventional triaxial compression by X-ray micro-CT observations and three-dimensional numerical simulations. *Int J Solids Struct*, 2020, 190: 156–180
- 24 Thilakarathna P S M, Kristombu Baduge K S, Mendis P, et al. Mesoscale modelling of concrete – A review of geometry generation, placing algorithms, constitutive relations and applications. *Eng Fract Mech*, 2020, 231: 106974
- 25 Peng R, Qiu W, Teng F. Three-dimensional meso-numerical simulation of heterogeneous concrete under freeze-thaw. *Construction Building Mater*, 2020, 250: 118573
- 26 Jin L, Lan Y C, Zhang R B, et al. Impact resistances of RC beams at/after high temperature: Meso-scale analysis (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 024613 [金浏, 兰钰昌, 张仁波, 等. 高温下/后钢筋混凝土梁抗冲击性能: 细观分析. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50: 024613]
- 27 Ren Q W, Yin Y J, Shen L. Fractal study of random distribution of concrete aggregate and its effect on damage characteristics (in Chinese). *J Hydraulic Eng*, 2020, 51: 1267–1277, 1288 [任青文, 殷亚娟, 沈雷. 混凝土骨料随机分布的分形研究及其对破坏特性的影响. *水利学报*, 2020, 51: 1267–1277, 1288]
- 28 Yang Z J, Huang Y J, Yao F, et al. Three-dimensional meso-scale cohesive fracture modeling of concrete using a python script in Abaqus (in Chinese). *Eng Mech*, 2020, 37: 158–166 [杨贞军, 黄宇劼, 尧锋, 等. 基于粘结单元的三维随机细观混凝土离散断裂模拟. *工程力学*, 2020, 37: 158–166]
- 29 Yu Y, Zheng Y, Zhao X Y. Mesoscale modeling of recycled aggregate concrete under uniaxial compression and tension using discrete element method. *Construction Building Mater*, 2021, 268: 121116
- 30 Wang P, Gao N, Ji K, et al. DEM analysis on the role of aggregates on concrete strength. *Comput Geotechnics*, 2020, 119: 103290
- 31 Liu D H, Sun L F, Xia X T. Development and application of multi-parameter adjustable laboratory device for simulating roller-compacted concrete compaction (in Chinese). *J Hydroelectric Eng*, 2019, 38: 112–120 [刘东海, 孙龙飞, 夏谢天. 多参数可调式RCC碾压模拟试验装置研制与应用. *水力发电学报*, 2019, 38: 112–120]
- 32 Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China (MOHURD). Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 2015 [中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015]

- 33 Huang Y, Shi C J, Ouyang X, et al. Research progress on splitting tensile test methods and mechanical properties of concrete (in Chinese). *Materials Reports*, 2021, 35: 1131–1140 [黄勇, 史才军, 欧阳雪, 等. 混凝土劈裂拉伸测试方法及性能研究进展. *材料导报*, 2021, 35: 1131–1140]
- 34 Yu W X, Jin L, Zhang R B, et al. Mesoscale finite element analysis for uniaxial compressive failure and size effect of concrete at cryogenic temperature (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 305–314 [余文轩, 金浏, 张仁波, 等. 低温下混凝土单轴压缩破坏及尺寸效应细观有限元分析. *中国科学: 技术科学*, 2021, 51: 305–314]
- 35 Chen H, Xu B, Wang J, et al. Parametric analysis on compressive strain rate effect of concrete using mesoscale modeling approach. *Construction Building Mater*, 2020, 246: 118375
- 36 Jin L, Yu W, Du X. Effect of initial static load and dynamic load on concrete dynamic compressive failure. *J Mater Civ Eng*, 2020, 32: 04020351
- 37 Jin L, Yu W, Du X, et al. Mesoscopic numerical simulation of dynamic size effect on the splitting-tensile strength of concrete. *Eng Fract Mech*, 2019, 209: 317–332
- 38 Xiao J, Li W, Sun Z, et al. Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation. *Cement Concrete Compos*, 2013, 37: 276–292
- 39 Chen H Q. Challenge confronted in seismic design of high concrete dams (in Chinese). *Hydropower Pumped Storage*, 2017, 3: 1–13, 49 [陈厚群. 高混凝土坝抗震设计面临的挑战. *水电与抽水蓄能*, 2017, 3: 1–13, 49]
- 40 Chen H Q. Research on concrete hydraulic structures in the past 6 decades (in Chinese). *J China Institute Water Resources Hydropower Res*, 2018, 16: 322–330 [陈厚群. 水工混凝土结构抗震研究60年. *中国水利水电科学研究院学报*, 2018, 16: 322–330]
- 41 Li M C, Zhang M X. Primary investigation of isogeometric analysis for hydraulic structures numerical simulation (in Chinese). *J Hydraulic Eng*, 2018, 49: 291–302, 312 [李明超, 张梦溪. 水工结构数值仿真等几何分析方法初探. *水利学报*, 2018, 49: 291–302, 312]
- 42 Zhang M, Li M, Shen Y, et al. Isogeometric shape optimization of high RCC gravity dams with functionally graded partition structure considering hydraulic fracturing. *Eng Struct*, 2019, 179: 341–352
- 43 Liu D H, Ma H Y, Li Z L. PFC modelling of fresh RCC uniaxial compression tests and inversion of meso-structural parameters (in Chinese). *J Hydroelectric Eng*, 2017, 36: 10–20 [刘东海, 马鸿雁, 李子龙. 新拌RCC单轴压缩试验的PFC模拟及细观参数反演. *水力发电学报*, 2017, 36: 10–20]

Mechanical experiments and precise simulation of a novel functional material: Electrically conductive roller-compacted concrete

LI MingChao¹, MIN QiaoLing¹, ZHANG MengXi¹, LIU DongHai¹, SHEN Yang² & FENG Da¹

¹ State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

² China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China

Electrically conductive roller-compacted concrete (ERCC) is a novel functional material, which can solve the problems of low efficiency of artificial snow removal and deicing on expressway and airport runway and the difficulty in temperature control of dam engineering structures. In this study, we designed ERCC and conducted an experimental study and numerical simulations on the designed ERCC. The improvement mechanism of surfactants on the fluidity of ERCC slurry and the effects of carbon-black dispersion were analyzed by scanning electron microscopy. Aiming at the large ERCC core-sampling specimen formed by rolling, macroscopic tests for mechanical properties and mesoscopic tests by X-ray computed tomography (XCT) were conducted. Based on the experiment, precise simulation of ERCC was performed by coupling the calculation methods of continuous and discontinuous mediums. We developed a mesoscopic model of ERCC based on real aggregate. The model overcomes the challenges of high cost of XCT models, low efficiency of discontinuous-medium calculation methods, and poor refinement of traditional sphere/polyhedral aggregate models in traditional continuous-medium calculation methods for concrete. The result shows that surfactants can significantly improve the effect of carbon-black dispersion on ERCC, and the forming quality of rolling construction technology is positive with compressive strength of 22.85 MPa, splitting strength of 1.72 MPa, elastic modulus of 23.7 GPa, and pore volume ratio of 1.05%. The mortar and interface strengths of ERCC were constant, whereas with an increase in the volume ratio of aggregates, the mechanical properties of ERCC could be improved. The precise simulation results are consistent with the statistical laws of concrete material characteristics in many practical projects, and they have better applicability than traditional meso-simulations of concrete.

ERCC, macro & micro experiments, real aggregate, mechanical properties, precise simulation

doi: [10.1360/SST-2021-0164](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0164)