

混凝土初始损伤细观结构特性数值试验研究

肖诗云*, 朱 梁

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 细观结构特性是混凝土材料最重要的特性之一, 细观结构参数的改变直接影响混凝土弹性模量、抗拉抗压强度等宏观力学性能变化. 首先采用混凝土随机骨料模型进行混凝土细观数值试验, 将混凝土看成由骨料、水泥砂浆以及两者之间的界面过渡区(ITZ)组成的三相复合材料, 并在水泥砂浆中引入不同孔径、孔隙率的孔隙, 使用有限元分析软件 MSC. Marc, 通过数值试验研究了孔径、孔隙率对混凝土抗拉抗压强度和弹性模量的影响规律. 试验结果表明: 混凝土弹性模量在同一孔径下随着孔隙率的增长呈线性下降, 在同一孔隙率下随着孔径增大呈对数下降; 混凝土抗拉抗压强度随着孔隙率和孔径增大呈对数下降. 其次, 将数值试验结果与经验公式进行了对比, 验证数值试验结果的正确性. 最后, 根据数值试验结果, 建立了混凝土初始损伤与孔隙率和孔径之间的关系, 描绘了细观尺寸下混凝土的初始损伤面, 为建立混凝土细观结构参数和宏观力学特性之间的联系, 改善混凝土的力学性质打下了基础.

关键词: 混凝土; 孔隙率; 孔径; 弹性模量; 强度; 初始损伤

中图分类号: TU528

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201701011

0 引言

混凝土是当今应用最广泛的建筑材料, 以往对混凝土的研究往往基于对其宏观层次的认识, 并由此发展了众多理论模型, 如弹性理论、非线性弹性理论、弹塑性理论、黏弹性理论、断裂力学理论和损伤力学理论模型等^[1]. 材料的细观结构是其宏观性能的重要基础, 只有对混凝土细观结构进行深入的研究, 建立宏细观之间联系的桥梁, 才能充分揭示混凝土破坏的根本原因, 并为提高混凝土性能打下基础.

细观层次上混凝土是由粗骨料、水泥砂浆以及两者之间的界面过渡区组成的三相复合材料, 同时混凝土又是一种典型的多孔材料, 内部结构复杂, 对混凝土的材料性能产生显著的影响. 众多研究表明, 混凝土在总孔隙率相同时, 性质也可能会有很大差异, 即混凝土性质不仅同孔隙率相关, 而且和孔的形态、孔径分布范围等都有密切的联系. 马怀发等^[2]总结了混凝土细观力学的研究方

法, 详细介绍了细观层次上混凝土试验和数值模拟的研究成果. 尹红宇^[3]通过压汞试验研究了混凝土中孔结构分形特征. 金南国等^[4]结合断裂力学的相关研究理论, 分析了混凝土孔隙对弹性模量和断裂表面能的影响, 提出了混凝土孔结构复合体模型, 该模型一定程度上考虑了混凝土孔径对混凝土强度的影响. 高辉、张德思等^[5-6]采用试验的方法研究了硬化混凝土的气孔参数, 探讨了孔隙率、孔径等因素对混凝土宏观特性的影响. 杜修力和金浏^[7-8]通过采用三相球模型推导了含孔混凝土材料的有效弹性模量, 抗拉、抗压强度与孔隙率之间的关系.

由于理论模型研究大多无法考虑混凝土中孔径的影响, 近年来通过试验来研究混凝土的孔结构、孔隙率对其抗压强度和弹性模量的影响时, 往往采用在混凝土中添加引气剂的方式^[5,9], 然而此种方式只能在一定程度上控制混凝土中孔隙率、孔径级配, 难以揭示孔径对混凝土强度和弹性模量的影响及其相互关系.

收稿日期: 2016-06-11; 修回日期: 2016-11-25.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT13LK41); 国家自然科学基金创新研究群体项目(51421064).

作者简介: 肖诗云*(1973-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: shyxiao@dlut.edu.cn; 朱 梁(1989-), 男, 硕士生, E-mail: zlfengshiwuhen@qq.com.

混凝土弹性模量与抗拉抗压强度是混凝土重要的宏观力学参数,为揭示混凝土初始缺陷与混凝土宏观初始力学性能之间的关系,本文采用混凝土随机骨料模型对混凝土试件进行细观数值试验,研究混凝土孔隙率和孔径对混凝土抗拉及抗压力学性能的影响,进一步研究其对混凝土初始损伤特性的影响。

1 混凝土细观特性数值试验分析原理和步骤

混凝土的细观力学数值试验分析是在细观层次上将混凝土看作骨料、砂浆以及两者之间的过渡区组成的三相复合材料^[10],并在这个基础上通过有限元分析研究混凝土的结构、力学特性和裂缝扩展过程。近年来,许多学者发展了一系列的混凝土细观模型,包括格构模型、随机力学模型、随机骨料模型、刚体弹簧元模型等^[11]。随机骨料模型能够较好地模拟混凝土骨料、砂浆以及两者之间的界面形态与组成,因此引起了许多研究者的兴趣。

本文基于有限元分析软件 MSC. Marc,采用二维随机骨料模型,在细观尺度上对混凝土的力学特性进行分析。为减小计算规模,混凝土试件计算模型尺寸为 100 mm × 100 mm,采用与文献^[12]相同的建模方法,骨料采用圆形骨料,骨料填充率取为 40%,骨料粒径为 5~20 mm,并将粒径小于 5 mm 的骨料计入砂浆。骨料和砂浆的过渡区是建模的重点和难点,过渡区的尺寸直接影响到计算结果的精确程度。研究表明^[13]:一般来说,严格意义上混凝土界面过渡区厚度小于 100 μm。然而,厚度如此之薄的界面过渡区必然会导致计算单元尺寸变小,单元数目增加,计算工作量急剧增加。在不至于大幅影响计算精确程度的情况下,为减少计算工作量,本文将与界面过渡区紧密相连的部分砂浆也当成界面过渡区进行计算,使界面过渡区的厚度达到 0.2 mm。苏捷^[14]对试验与采用不同本构模型的计算结果进行了对比分析。为了使计算过程较为简便,本文采用其匀质弹脆性模型,计算中各项组分材料的力学参数如表 1 所示。

混凝土在浇注过程中会发生十分复杂的物理化学反应,水泥在硬结过程中不可避免地要产生

孔隙和孔洞,同时,由于振捣不实、养护不好等原因也会在混凝土中留下孔隙,这些孔隙是引起混凝土初始损伤的主要原因,也是混凝土卸载后产生裂纹的薄弱部位。因此,在对混凝土进行细观数值分析的过程中,混凝土的孔隙是一个不可忽视的重要影响因素。

表 1 混凝土各组成成分力学参数

Tab.1 Mechanic parameters of ingredients on concrete

材料	弹性模量/GPa	软化模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
骨料	60	12.0	0.2	10.0	100
基质	23	5.0	0.2	4.9	49
界面	17	4.4	0.2	4.4	44

影响混凝土孔隙最重要的两个因素是孔隙率和孔径。为了深入研究混凝土中孔径、孔隙率与混凝土宏观力学特性之间的关系,本文分别在数值模型中研究了 5 种不同孔径(0.4、0.8、1.2、1.6 和 2.0 mm)、6 种不同孔隙率(从 0 递增至 6%,每次递增 1%)的孔隙对混凝土试件初始单轴抗拉、抗压弹性模量和强度的影响。

一般情况下,普通混凝土骨料破坏的数量相对较少,因此为了在不影响计算精度的前提下,尽量减少骨料单元数目以降低计算规模,而砂浆基质和界面过渡区相对变形大,破坏数目多,因而单元尺寸相对更小。最终模型中产生骨料单元数 3 万左右,界面单元数 7 000 左右,基质单元数 8 万左右,总计 12 余万单元数。整体计算模型和局部细节图如图 1 所示。

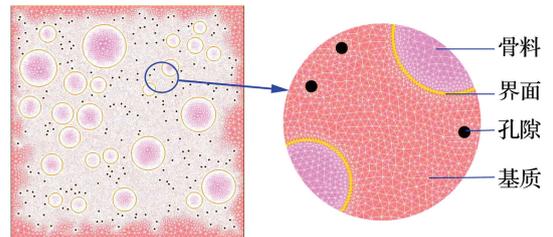


图 1 混凝土随机骨料计算模型示意图

Fig.1 Schematic of calculation model of concrete random aggregate

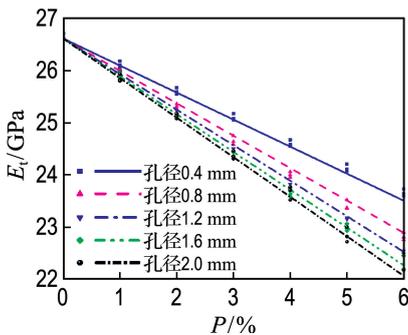
本文按照随机骨料模型的方法生成 3 组平行试件,为排除骨料分布的影响,每组中骨料分布不变,仅使孔隙率和孔径发生变化,则每组试件中包

含不同孔径和不同孔隙率的混凝土试件共 30 个, 模型采用位移加载方式, 对计算模型进行单轴竖向拉伸和压缩的数值分析, 得到混凝土试件的初始弹性模量和单轴抗拉抗压强度. 对于单轴受拉试件, 每步加载位移 0.000 2 mm, 对于单轴受压试件, 每步加载位移 0.002 mm, 分别计算每个试件的抗拉抗压强度与其对应的弹性模量, 最后研究孔隙率和孔径对混凝土试件初始弹性模量和抗拉抗压强度的影响.

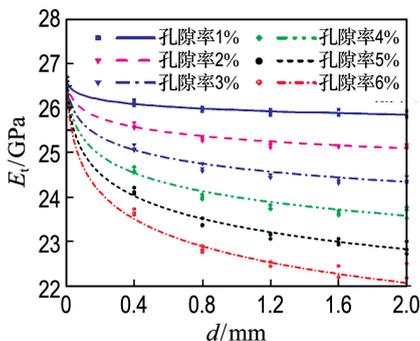
2 混凝土细观特性对抗拉力学特性的影响

2.1 孔隙率、孔径对混凝土抗拉弹性模量的影响

为得到孔隙率和孔径对混凝土抗拉弹性模量的影响变化规律, 本文首先分别研究了不同孔隙率和不同孔径情况下混凝土的抗拉弹性模量, 寻求单参量变化时弹性模量的变化规律. 按照前述试验方法对其进行数值模拟试验, 研究混凝土试件的抗拉弹性模量. 相同孔径情况下, 不同孔隙率对混凝土抗拉弹性模量的影响如图 2(a) 所示; 相



(a) 孔隙率对抗拉弹性模量的影响



(b) 孔径对抗拉弹性模量的影响

图 2 混凝土细观参数对抗拉弹性模量的影响

Fig. 2 Effects of microstructure parameters on tensile elastic modulus of concrete

同孔隙率情况下, 不同孔径对混凝土抗拉弹性模量的影响如图 2(b) 所示.

从图 2(a) 中可以看出, 在孔径相同的条件下, 混凝土的抗拉弹性模量随着孔隙率的增加而减小, 且孔隙率对混凝土抗拉弹性模量的影响近似呈直线关系, 同时也可以发现孔隙率相同时, 小孔径孔隙混凝土比大孔径孔隙混凝土具有更高的抗拉弹性模量, 这也与常识“密实的混凝土弹性模量高”相一致; 从图 2(b) 中可以看出, 在相同的孔隙率情况下, 随着孔径的增加, 混凝土抗拉弹性模量也降低了, 但不再是线性降低, 呈现出明显的非线性.

为定量研究混凝土细观结构对混凝土抗拉弹性模量的影响, 本文对数值结果进行了拟合分析. 考虑到孔隙率对混凝土抗拉弹性模量的影响近似呈线性关系, 而孔径对混凝土抗拉弹性模量的影响呈近似对数关系, 本文采用了如下所示的公式进行拟合:

$$E_t = E_{t0} (1 - \alpha P \ln(\beta d + \gamma)) \quad (1)$$

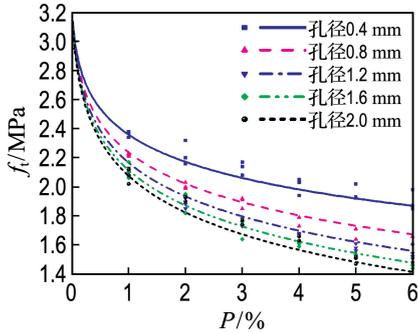
式中: E_t 为混凝土抗拉弹性模量, E_{t0} 为理想混凝土抗拉弹性模量, P 为孔隙率(%), d 为孔径, α 、 β 、 γ 为参数. 经过对数值结果进行拟合, 得到拟合参数值 $\alpha = 0.005\ 695$, $\beta = 73.46$, $\gamma = 1$, 其中 $E_{t0} = 26.61$ GPa. 拟合结果表明拟合曲面与数值结果之间相关系数达到 0.995 1.

2.2 孔隙率、孔径对混凝土抗拉强度的影响

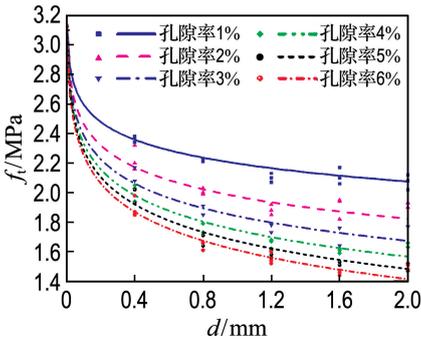
与研究混凝土的弹性模量方法相同, 本文对不同孔隙率(0~6%)和不同孔径(0~2.0 mm)的混凝土试件进行数值模拟试验, 研究混凝土试件抗拉强度的变化规律. 相同孔径情况下, 不同孔隙率对混凝土抗拉强度的影响如图 3(a) 所示; 相同孔隙率情况下, 不同孔径对混凝土抗拉强度的影响如图 3(b) 所示.

从图 3 中可以看出, 当混凝土孔径相同时, 随着孔隙率的增大, 混凝土的抗拉强度明显降低; 混凝土孔隙率相同时, 随着孔径增大, 混凝土抗拉强度也发生了明显的下降. 从下降的趋势来看, 随着孔隙率的增加, 与混凝土弹性模量呈线性下降不同, 混凝土抗拉强度的下降呈现出明显的非线性; 随着孔径的增加, 与混凝土弹性模量下降趋势相同, 混凝土抗拉强度的下降也呈现出明显的非线性, 但与混凝土抗拉弹性模量下降相比, 当孔隙率

相同时,随着孔径的增长,混凝土抗拉强度下降趋势趋于平缓,也就是说,当孔隙率相同时,孔径对混凝土抗拉强度的影响比对弹性模量的影响要小.造成这种结果的原因是混凝土的抗拉弹性模量与砂浆、界面和骨料三相材料的弹性模量和配比息息相关,孔径大小直接影响到三相复合材料的分布,而混凝土的抗拉强度主要只是由界面的抗拉强度决定,因而孔径大小的影响要相对小些.



(a) 孔隙率对抗拉强度的影响



(b) 孔径对抗拉强度的影响

图3 混凝土细观参数对抗拉强度的影响

Fig. 3 Effects of microstructure parameters on tensile strengths of concrete

与研究混凝土弹性模量类似,为定量研究混凝土细观结构对混凝土抗拉强度的影响,本文对数值结果进行了拟合分析.考虑到孔隙率和孔径对混凝土抗拉强度的影响均呈现出明显的非线性关系,本文采用了如下所示的双曲线公式进行拟合:

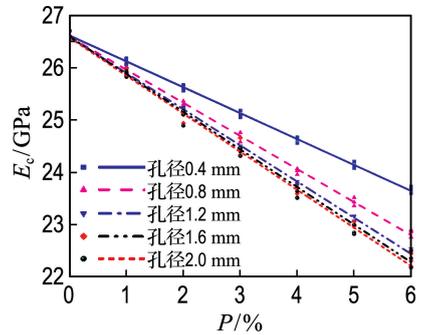
$$f_t = f_{t0} (1 - \lambda \ln(\mu_1 P + \eta_1)) \ln(\mu_2 d + \eta_2) \quad (2)$$

式中: f_t 为混凝土抗拉强度, f_{t0} 为理想混凝土抗拉强度, λ 、 μ_1 、 η_1 、 μ_2 、 η_2 为参数.经过对数值结果进行拟合,得到拟合参数值 $\lambda = 0.01954$, $\mu_1 = 16.49$, $\eta_1 = 1$, $\mu_2 = 231.5$, $\eta_2 = 1$,其中 $f_{t0} = 3.163$ MPa.拟合的三维曲面与数值结果相关度较高,相关系数达到0.9919,拟合效果较好.

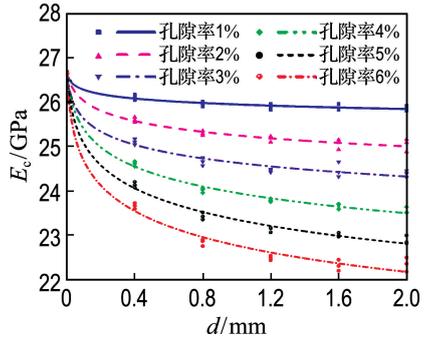
3 混凝土细观特性对抗压力学特性的影响

3.1 孔隙率、孔径对混凝土抗压弹性模量的影响

与研究孔隙率和孔径对混凝土抗拉弹性模量的影响相同,本文对不同孔隙率(0~6%)和不同孔径(0~2.0 mm)的混凝土试件进行抗压弹性模量数值试验.相同孔径情况下,不同孔隙率对混凝土抗压弹性模量的影响如图4(a)所示;相同孔隙率情况下,不同孔径对混凝土抗压弹性模量的影响如图4(b)所示.



(a) 孔隙率对抗压弹性模量的影响



(b) 孔径对抗压弹性模量的影响

图4 混凝土细观参数对抗压弹性模量的影响

Fig. 4 Effects of microstructure parameters on compressive elastic modulus of concrete

从图4可以看出,孔径和孔隙率对混凝土抗压弹性模量的影响规律与其对混凝土抗拉弹性模量的影响规律相似.在孔径相同的条件下,混凝土的抗压弹性模量随着孔隙率的增加而减小,且孔隙率对混凝土抗压弹性模量的影响近似呈直线关系,同时也可以发现孔隙率相同时,小孔径孔隙混凝土比大孔径孔隙混凝土具有更高的抗压弹性模量;在相同的孔隙率情况下,随着孔径的增加,混凝土抗压弹性模量也降低了,但不再是线性降低,

呈现出明显的非线性。

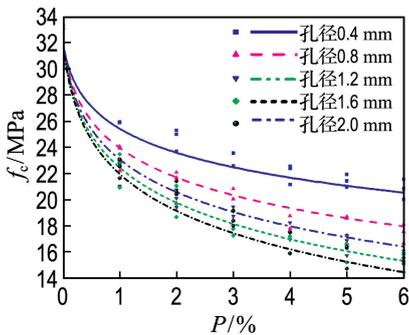
为定量研究混凝土细观结构对混凝土抗压弹性模量的影响,本文对数值结果进行了拟合分析。考虑到孔隙率对混凝土抗压弹性模量的影响近似呈线性关系,而孔径对混凝土抗压弹性模量的影响呈近似对数关系,本文采用了与抗拉弹性模量相类似的拟合公式,如下所示:

$$E_c = E_{c0}(1 - \alpha' P \ln(\beta' d + \gamma')) \quad (3)$$

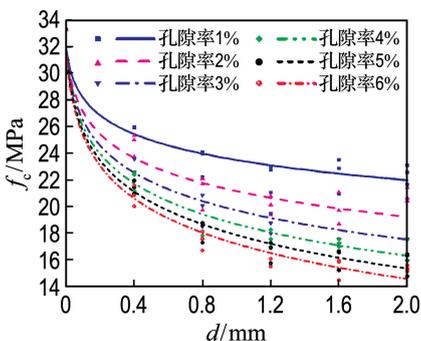
式中: E_c 为混凝土抗压弹性模量, E_{c0} 为理想混凝土抗压弹性模量, α' 、 β' 、 γ' 为参数,经过对数值结果进行拟合,得到拟合参数值 $\alpha' = 0.005798$, $\beta' = 69.14$, $\gamma' = 1$,其中 $E_{c0} = 26.64$ GPa,拟合曲面对数值结果具有较好的拟合效果。

3.2 孔隙率、孔径对混凝土抗压强度的影响

与研究孔隙率和孔径对混凝土抗拉强度影响的方法相同,混凝土试件的抗压强度计算的数值结果如图 5 所示。相同孔径情况下,不同孔隙率对混凝土抗压强度的影响如图 5(a)所示;相同孔隙率情况下,不同孔径对混凝土抗压强度的影响如图 5(b)所示。



(a) 孔隙率对抗压强度的影响



(b) 孔径对抗压强度的影响

图 5 混凝土细观参数对抗压强度的影响

Fig. 5 Effects of microstructure parameters on compressive strengths of concrete

从图 5 中可以看出,与孔隙率和孔径对混凝土抗拉强度影响类似,当混凝土孔径相同时,随着孔隙率的增大,混凝土的抗压强度明显降低;混凝土孔隙率相同时,随着孔径增大,混凝土抗压强度也发生了明显的下降。从下降的趋势来看,随着孔隙率的增加,与混凝土弹性模量呈线性下降不同,混凝土抗压强度的下降呈现出明显的非线性;随着孔径的增加,与混凝土弹性模量下降趋势相同,混凝土抗压强度的下降也呈现出明显的非线性。

因与孔隙率和孔径对混凝土抗拉强度的影响相似,本文采用与抗拉强度影响研究相同的方法进行数据拟合分析,考虑到孔隙率和孔径对混凝土抗压强度的影响均呈近似对数关系,采用了如下所示的公式进行拟合:

$$f_c = f_{c0}(1 - \lambda \ln(\mu'_1 P + \eta'_1) \ln(\mu'_2 d + \eta'_2)) \quad (4)$$

式中: f_c 为混凝土抗压强度, f_{c0} 为理想混凝土抗压强度, λ' 、 μ'_1 、 η'_1 、 μ'_2 、 η'_2 为参数,经过对数值结果进行拟合,得到拟合参数值 $\lambda' = 0.03101$, $\mu'_1 = 8.354$, $\eta'_1 = 1$, $\mu'_2 = 43.35$, $\eta'_2 = 1$,其中 $f_{c0} = 31.85$ MPa。拟合的三维曲面与数值结果相关度达到 0.9777。

4 混凝土细观数值分析结果与理论、经验公式的对比

4.1 混凝土弹性模量分析结果与理论对比

对于混凝土类多孔复合材料的弹性模量,已经有不少研究者进行了相关研究,提出了不同的计算分析模型:从最简单的 Voigt 并联模型,到 Zimmerman 提出的含球形孔隙差分法^[15],即 $E = E_0(1 - c)^2$,其中 c 为孔隙率。此后, Huang 等^[16]提出了含孔复合材料弹性模量的数学方法;卢子兴等^[17]采用三相球模型确定了泡沫塑料的有效模量;肖诗云等^[18]根据 Mori-Tanaka 细观力学理论方法,将混凝土看作二级二相复合材料,推导考虑初始缺陷的混凝土等效弹性模量等理论公式,但这些模型理论均无法考虑孔径大小与孔隙率共同作用对混凝土弹性模量的影响。为验证本文结果的合理性,本文将孔径一定而孔隙率变化时的弹性模量与文献^[18]的二级二相复合模型和差分法^[15]计算结果进行对比,结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出:数值模拟结果与文献^[15, 18]理论结果在小孔隙率时比较接近,随着孔隙率

的增加,误差逐步增加,但理论结果始终与最小孔径的数值试验结果相近,误差较小.主要原因是:一方面因为理论并没有考虑混凝土中孔隙的相互作用,当孔隙率较小时,这种相互作用并不明显,但随着孔隙率增大,孔隙之间的相互作用变得越来越明显,与文献[18]M-T方法中稀疏夹杂的假设条件差距加大;另一方面,M-T方法假设的前提条件是无限大基体材料,孔隙影响相对较小,但本文数值试验模型尺寸有限,随着孔径增加,孔隙的影响越来越突出,因而造成了随着孔隙率的增加,数值试验与理论结果误差越来越大.从图中可以看出数值计算结果与理论计算结果偏差在一定合理范围内,计算结果较为合理.

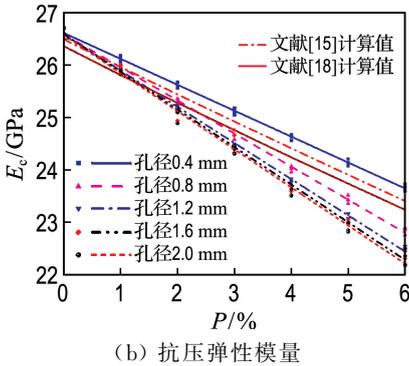
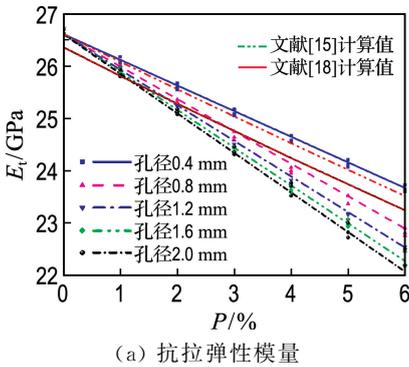


图6 孔隙率对混凝土弹性模量影响比较

Fig. 6 Comparison of the effect of porosity ratio on the elastic modulus of concrete

4.2 混凝土强度分析结果与经验公式对比

孔隙率与强度之间的关系,同样存在着许多经验公式^[19],包括 Balshin 幂函数关系模型 $\sigma = \sigma_0(1 - P)^A$, Ryshkewitch 指数关系模型 $\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-BP)^A$, Schiller 对数关系模型 $\sigma = D \ln(\sigma_0/P)$, Hasselmann 线性关系模型 $\sigma = \sigma_0(1 - AP)$, 其中 σ_0 为孔隙率为 0 时应力, A, B, D 均为经验参数.

若取 Balshin 幂函数关系模型 $\sigma = \sigma_0(1 - P)^A$, 和 Hasselmann 线性关系模型 $\sigma = \sigma_0(1 - AP)$ 同孔隙率作用下的混凝土抗拉抗压强度作对比, 并取 $A = 5.0$, 则抗拉抗压强度对比结果如图 7 所示.

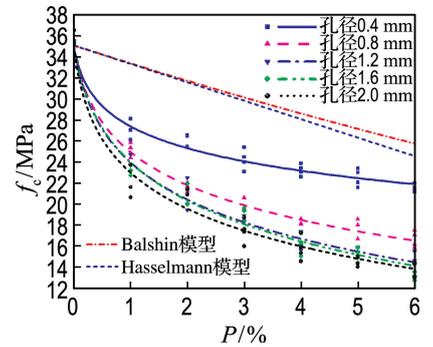
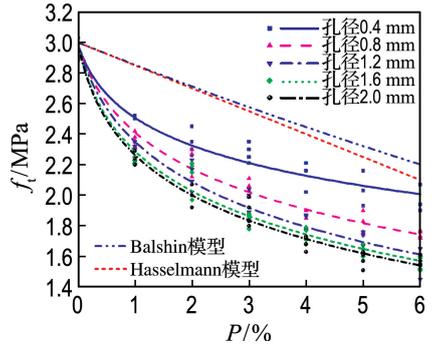


图7 孔隙率对混凝土强度影响比较

Fig. 7 Comparison of the effect of porosity ratio on strengths of concrete

从图7可以看出,经验公式中孔隙率的影响计算结果比数值试验结果偏保守,原因一方面是数值试验中试件相对理想化,易于通过调整孔隙率来研究孔隙率的影响,而真实混凝土更加复杂,孔隙率的测量也比较困难,多种因素相互作用弱化孔隙率的影响;另一方面是数值试验中每个试件的孔径是相同的,而混凝土中真实孔径大小不一,难以测量,因而经验公式中并没有考虑孔径的影响,更主要的是实际混凝土试件中总是小孔径孔隙比较多,因此孔径对混凝土试验结果的影响较小,造成了经验公式比数值结果偏于保守,且经验公式结果与数值试验中小孔径的结果更接近.

5 基于细观特性的混凝土初始损伤分析

混凝土材料在浇注、养护等过程中,因不可避

免的原因造成了材料内部的微缺陷,相对于理想材料来说,这种微缺陷必然会对混凝土的初始宏观力学特性造成影响,譬如混凝土强度的退化、刚度的劣化等;反过来说,混凝土初始宏观力学特性的退化或劣化必定与材料中的微缺陷存在某种关系^[20],因此,要建立混凝土宏观力学参数和细观结构参数之间的联系是非常有意义的,但又是相当困难的。

宏观连续介质损伤力学以连续介质力学和不可逆热力学为基础,把物体内存在的微缺陷理解为连续的变量场(即损伤场)。1958年 Kachanov 提出用连续度的概念来描述材料的衰变,使得材料中复杂的、离散的劣化过程可以用一个连续变量来描述。此后 Robotnov 引入了损伤因子的概念,定义损伤因子为材料的缺陷面积比。基于缺陷面积定义的损伤物理意义很明确,然而其却隐含着一些假设:(1)所有缺陷对拉伸和压缩的影响是相同的;(2)不同大小孔隙,单位面积损伤影响是相同的。根据损伤力学的概念,为更好研究混凝土孔隙率和孔径对混凝土材料初始宏观力学特性的影响,定义由不可避免原因引起的混凝土初始微缺陷造成的混凝土初始宏观力学特性的退化或劣化为混凝土的初始损伤。

根据初始损伤定义,混凝土初始损伤变量 D 可定义为

$$D = 1 - \tilde{A}/A \quad (5)$$

式中: A 为材料截面名义面积, \tilde{A} 为材料有效面积。

单轴拉伸和单轴压缩情况下,材料所能承受的强度不变,混凝土初始损伤变量可进一步写成

$$D_t = 1 - \tilde{A}_t/A = 1 - f_t/f_{t0} \quad (6)$$

$$D_c = 1 - \tilde{A}_c/A = 1 - f_c/f_{c0} \quad (7)$$

式中: D_t 和 D_c 分别为混凝土的初始受拉和受压损伤; f_t 和 f_c 分别为试件所能承受的最大抗拉和抗压强度。

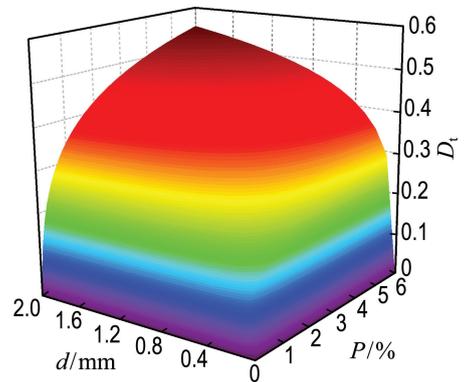
联立式(6)和混凝土抗拉强度拟合公式(2),混凝土初始受拉损伤曲面方程可写成

$$D_t = 1 - \frac{f_t}{f_{t0}} = 0.01954 \cdot \ln(16.49P + 1) \cdot \ln(231.5d + 1) \quad (8)$$

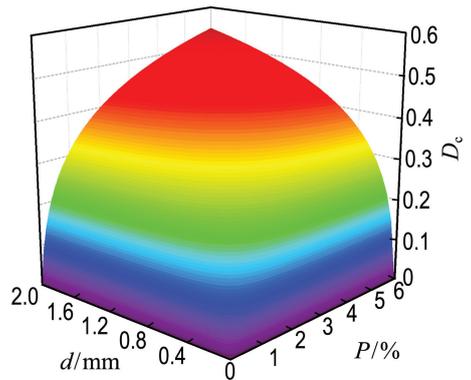
同理,联立式(7)和混凝土抗压强度拟合公式(4),混凝土受压损伤曲面方程可写成

$$D_c = 1 - \frac{f_c}{f_{c0}} = 0.03101 \cdot \ln(8.354P + 1) \cdot \ln(43.35d + 1) \quad (9)$$

混凝土初始受拉受压损伤曲面与混凝土初始缺陷细观结构参数(孔隙率和孔径)之间的关系如图8所示。由图可以看出:细观尺度下,混凝土初始受拉和受压损伤面表现出明显的非线性,初始损伤值随着孔隙率和孔径的增加而增加。



(a) 混凝土初始受拉损伤曲面图



(b) 混凝土初始受压损伤曲面图

图8 混凝土初始损伤曲面

Fig. 8 Initial damage surfaces of concrete

6 结 论

(1)混凝土弹性模量随着孔隙率的增加而减小,且孔隙率对混凝土弹性模量的影响近似呈直线关系;随着孔径的增加,混凝土弹性模量也降低了,但不再是线性降低,呈现出明显的非线性。

(2)随着孔隙率的增大,混凝土的强度明显降低,随着孔径增大,混凝土强度也发生了明显的下降。从下降的趋势来看,随着孔隙率和孔径的增加,混凝土强度的下降都呈现出明显的非线性。

(3)细观尺度下,混凝土初始受拉和受压损伤面表现出明显的非线性,初始损伤值随着孔隙率

和孔径的增加而增加。

参考文献:

- [1] 江见鲸,陆新征. 混凝土结构有限元分析[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2013:79-128.
JIANG Jianjing, LU Xinzhen. **Finite Element Analysis of Concrete Structures** [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013:79-128. (in Chinese)
- [2] 马怀发,陈厚群,黎保琨. 混凝土细观力学研究进展及评述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(2):124-130.
MA Huaifa, CHEN Houqun, LI Baokun. Review on micro-mechanics studies of concrete [J]. **Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research**, 2004, 2(2):124-130. (in Chinese)
- [3] 尹红宇. 混凝土孔结构的分形特征研究[D]. 南宁:广西大学, 2006.
YIN Hongyu. Study the fractal characteristic of concrete's pore structure [D]. Nanning: Guangxi University, 2006. (in Chinese)
- [4] 金南国,金贤玉,郭剑飞. 混凝土孔结构与强度关系模型研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(11):1680-1684.
JIN Nanguo, JIN Xianyu, GUO Jianfei. Relationship modeling of pore structure and strength of concrete [J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2005, 39(11):1680-1684. (in Chinese)
- [5] 高辉,张雄,张永娟. 混凝土气孔结构对其强度及界面过渡区的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(5):751-756.
GAO Hui, ZHANG Xiong, ZHANG Yongjuan. Effect of air void structure on strength and interfacial transition zone of concrete [J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2014, 42(5):751-756. (in Chinese)
- [6] 张德思,成秀珍. 硬化混凝土气孔参数的研究[J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(1):10-13.
ZHANG Desi, CHENG Xiuzhen. On better understanding of effect of air void parameters on freeze-thaw durability of concrete [J]. **Journal of Northwestern Polytechnical University**, 2002, 20(1):10-13. (in Chinese)
- [7] 杜修力,金浏. 考虑孔隙及微裂纹影响的混凝土宏观力学特性研究[J]. 工程力学, 2012, 29(8):101-107.
DU Xiuli, JIN Liu. Research on the influence of pores and micro-cracks on the macro-mechanical properties of concrete [J]. **Engineering Mechanics**, 2012, 29(8):101-107. (in Chinese)
- [8] 金浏,杜修力. 孔隙率变化规律及其对混凝土变形过程的影响[J]. 工程力学, 2013, 30(6):183-190.
JIN Liu, DU Xiuli. Variation of porosity and its effect on the deformation process of concrete [J]. **Engineering Mechanics**, 2013, 30(6):183-190. (in Chinese)
- [9] 刘建敏. 含气量对自密实混凝土性能的影响[D]. 青岛:青岛理工大学, 2011.
LIU Jianmin. The influence of air content on the performance of self-compacting concrete [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [10] 马怀发,陈厚群,黎保琨. 混凝土试件细观结构的数值模拟[J]. 水利学报, 2004(10):27-35.
MA Huaifa, CHEN Houqun, LI Baokun. Meso-structure numerical simulation of concrete specimens [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2004(10):27-35. (in Chinese)
- [11] 陈静. 混凝土骨料随机分布有限元建模与受压破坏分析[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2013.
CHEN Jing. Finite element modeling of aggregate randomly distributed concrete and compression failure analysis [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013. (in Chinese)
- [12] WANG Xiaofeng, YANG Zhenjun, JIVKOV A P. Monte Carlo simulations of mesoscale fracture of concrete with random aggregates and pores: a size effect study [J]. **Construction and Building Materials**, 2015, 80:262-272.
- [13] AKÇAOĞLU T, TOKYAY M, ÇELİK T. Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression [J]. **Cement and Concrete Composites**, 2004, 26(6):633-638.
- [14] 苏捷. 混凝土受压与受拉性能的尺寸效应研究[D]. 长沙:湖南大学, 2012.
SU Jie. The research on the size effect of concrete behavior in compression and tension [D]. Changsha: Hunan University, 2012. (in Chinese)
- [15] ZIMMERMAN R W. Elastic moduli of a solid

- containing spherical inclusions [J]. **Mechanics and Materials**, 1991, **12**(1):17-24.
- [16] HUANG J S, GIBSON L J. Elastic moduli of a composite of hollow spheres in a matrix [J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 1993, **41**(1):55-75.
- [17] 卢子兴, 黄筑平, 王仁. 基于三相球模型确定泡沫塑料有效模量[J]. 固体力学学报, 1996, **17**(2): 95-102.
- LU Zixing, HUANG Zhuping, WANG Ren. Determination of effective moduli for foam plastics based on three phase spheroidal model [J]. **Acta Mechanica Solida Sinica**, 1996, **17**(2):95-102. (in Chinese)
- [18] 肖诗云, 乔倩倩. 混凝土等效弹性模量细观影响因素[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, **31**(4):636-643.
- XIAO Shiyun, QIAO Qianqian. Mesoscopic influence factor analysis on the equivalent elastic modulus of concrete [J]. **Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)**, 2015, **31**(4): 636-643. (in Chinese)
- [19] 郭剑飞. 混凝土孔结构与强度关系理论研究[D]. 杭州:浙江大学, 2004.
- GUO Jianfei. The theoretical research of the pore structure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [20] 白卫峰. 混凝土损伤机理及饱和混凝土力学性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
- BAI Weifeng. Study on damage mechanism of concrete and mechanical property of saturated concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)

Numerical experiment study of initial damage microstructural behaviors of concrete

XIAO Shiyun*, ZHU Liang

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Microscopic structure characteristic is one of the most important behaviors of concrete. The change of microscopic structure parameters affects the macroscopic mechanical behaviors of concrete, such as the elastic modulus, the tensile and compressive strengths. Firstly, the numerical experiment of concrete is carried out with the random aggregate model. The concrete material is discretized as the three-phase composite material with aggregate, cement mortar and the interfacial transition zone (ITZ) and the void element with different porosity ratio and pore diameter is introduced to simulate the porosity of concrete. Using the finite element analysis software MSC. Marc, the specimens are simulated numerically to study the effects of porosity ratio and pore diameter on the elastic modulus, the tensile and compressive strengths of concrete. Experimental results show that the concrete elastic modulus decreases linearly with the increasing porosity ratio at the same pore diameter and decrease logarithmically with the increasing pore diameter at the same porosity ratio. The tensile and compressive strengths of concrete decrease logarithmically with the increasing porosity ratio and pore diameter. Secondly, the numerical results and the empirical formula are compared to verify the correctness of the numerical experiment results. Finally, according to the numerical experiment results, the relationship between the initial damage and the porosity ratio and the pore diameter of concrete is established and the initial damage surface of concrete is depicted on the micro-scale, which lays a foundation for establishing the relationship between the microstructure parameters and the macroscopic mechanical properties of concrete, and improving the mechanical properties of concrete in the future.

Key words: concrete; porosity ratio; pore diameter; elastic modulus; strength; initial damage