

## 道路路面砼单轴受压损伤过程数值模拟研究

唐飏

(长沙市规划设计院有限责任公司, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 水泥砼路面的砼宏观上表现出的破坏特征及力学特性取决于其内部细观结构, 为揭示其宏观特征的微观机理, 文中运用 Monte Carlo 生成随机分布骨料, 采用粘结单元模型模拟界面过渡区结构, 利用模型对砼单轴压缩过程进行数值模拟, 并与标准试验结果对比, 验证建模方法的可靠性。结果表明, 砼试件内部破坏单元都是界面过渡区的粘结单元, 界面过渡区是裂缝萌生和发展区域; 砼单轴受压数值模拟结果基本符合标准试验结果, 细观模型的建立及界面过渡区所采用的粘结单元模型合理、可靠。

**关键词:** 公路, 砼; 单轴受压损伤; 粘结单元; 骨料随机分布

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)06-0070-04

在砼受力破坏过程中, 涉及到细观各尺度和层次间的相互作用, 若想揭示砼宏观力学特性的微观机理, 关键在于细观模型的建立, 将有限元数值法与细观力学相结合实现细观力学的数值模拟。其中数值模型是模拟结果的关键影响因素, 主要包括骨料的随机分布模型及界面连接模型。在骨料随机分布模型建立方面, 肖建庄依据再生骨料特性建立了 5 种格构单元模型, 对不同格构单元赋予不同力学参数, 结果表明所建立的模型可用于再生砼单轴受压模拟计算; 唐欣薇采用连续介质力学法和弹性损伤力学本构关系建立了 Monte Carlo 随机骨料力学模型, 利用传统的三分点加载梁方法研究砼受力破坏机理, 结果表明该模型能模拟 I 型梁拉伸断裂破坏的全过程; 唐春安采用 weibull 随机分布方法建立砼损伤细观模型, 该模型虽然考虑了砼各材料力学特性的随机性, 但未考虑骨料性质在砼中的随机分布特性。在界面连接模型建立方面, 刘光廷等采用网格投影法, 将砼自身的几何模型投影到有限元既有网格中, 利用不同组分所区分的颜色由计算机自动区分骨料、砂浆及界面过渡区单元, 该方法必须明确适合的单元尺寸, 否则所生成的单元会呈齿状, 与实际情况差别较大; 王娟等采用弹簧单元作为粘结层建立力学模型, 将骨料和砂浆之间的界面过渡区设置为一个法向和两个切线方向的弹簧单元模型模拟界面的力学行为, 模型中弹簧失效所对应的界面破坏时能量释放瞬间完成, 而实际上砼破坏时界面能量释放具有一定的释放率。在以上背景下, 采用粘结单元法建立砼细观模型逐渐被提出, 该方法在

不具备任何骨料结构信息的情况下, 在所有骨料的公共边嵌入粘结单元, 定义粘结单元的本构模型参数, 进而进行数值模拟。它既能反映砼的各向异性, 又可降低损伤破坏路径对所划分网格的依赖性, 能与实际情况相吻合。综上, 以 Monte Carlo 骨料随机分布及骨料表面嵌入粘结单元的细观方法能模拟砼受力损伤破坏过程, 但该方法目前研究结果较少。该文采用 Monte Carlo 方法和粘结单元建立模型对砼单轴压缩过程进行数值模拟。

## 1 砼细观模型的建立

### 1.1 砼骨料的随机生成

采用 Monte Carlo 法模拟砼骨料颗粒的随机生成。首先确定符合某一概率分布的随机变量序列  $\{x_n\}$ 。最常见的随机变量  $x_n$  为位于  $[0, 1]$  的随机变量, 采用数学方法依次生成均匀分布的随机数。采用如下方法确定砼骨料中心点的坐标: 先明确所建模型的尺寸范围, 确定  $x_{\min}$  及  $x_{\max}$ , 该模型中  $x_{\min} = 0$ ,  $x_{\max} = 150$ ; 然后依据式(1)限定骨料中心的坐标范围, 采用式(2)生成骨料中心点的随机坐标。

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (1)$$

$$y_{\min} \leq y \leq y_{\max}$$

$$x = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min})x_n \quad (2)$$

$$y = y_{\min} + (y_{\max} - y_{\min})y_n$$

建立骨料中心的坐标后, 将骨料随机投放至所建模型中。骨料投放前确定模型所采用的骨料级配, 依据 JGJ 55-2011《普通混凝土配合比设计规程》, 采用粒径为 5~25 mm 的连续级配且骨料占总

体积比 70% 进行模型配合比设计。骨料投放需满足以下限定条件:骨料中心点坐标值符合式(1)的限定条件;为保证骨料不相互重叠,两骨料坐标之间的距离小于两骨料半径之和,骨料中心点坐标到模型边界的距离小于骨料半径。如图 1 所示,将骨料进行随机投放,投放顺序为先大粒径后小粒径逐步投放,骨料随机生成模型见图 2。

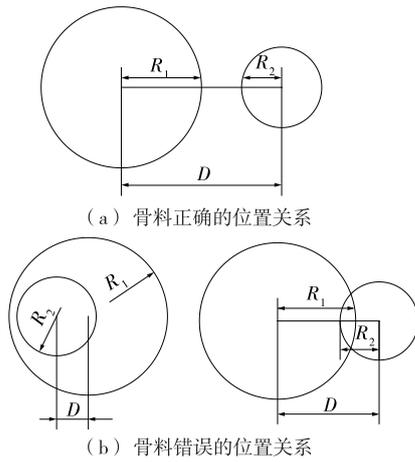


图 1 骨料位置关系示意图

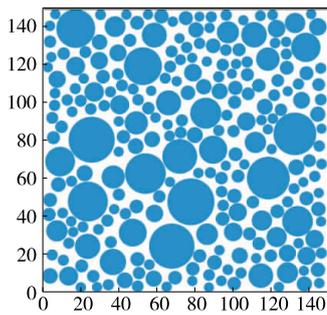


图 2 随机生成的骨料模型

### 1.2 界面粘结单元模型

骨料和砂浆之间的界面过渡区采用粘结单元模型,粘结单元的本构关系实质为力-分离模型。力-分离模型认为当界面过渡区上任意一点处的应力达到可承受的最大应力时,界面过渡区开始损伤,骨料和砂浆脱开。力-分离模型采用最大应力和最大应变控制界面变形,界面的粘结-脱开效应满足图 3 和图 4 所示关系,即:

$$\sigma_n = k_n [\mu_n] = k_n^0 (1 - D_n) [\mu_n] \quad (3)$$

$$\tau_n = k_t [\mu_t] = k_t^0 (1 - D_t) [\mu_t] \quad (4)$$

式中: $\sigma_n$ 、 $\tau_n$ 分别为粘结界面的法向应力和切向应力; $[\mu_n]$ 、 $[\mu_t]$ 分别为粘结界面的法向和切向位移; $k_n$ 、 $k_t$ 分别为粘结界面的法向和切向粘结刚度。

由式(3)、式(4)得到界面粘结损伤的表达式:

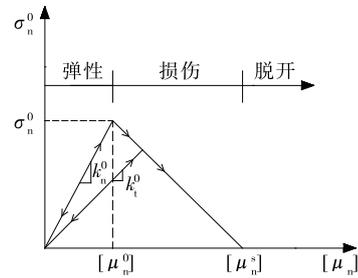


图 3 粘结单元法向本构关系

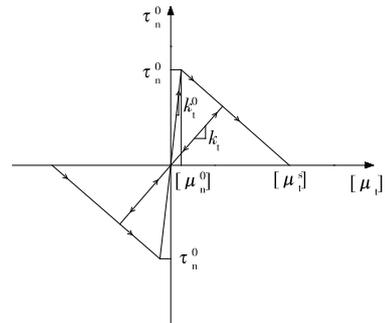


图 4 粘结单元切向本构关系

$$D_n = \frac{[\mu_n^s] ([\mu_n] - [\mu_n^0])}{[\mu_n] ([\mu_n^s] - [\mu_n^0])} \quad (5)$$

$$D_t = \frac{[\mu_t^s] ([\mu_t] - [\mu_t^0])}{[\mu_t] ([\mu_t^s] - [\mu_t^0])} \quad (6)$$

式中: $[\mu_n^s]$ 、 $[\mu_t^s]$ 分别为粘结界面的法向和切向损伤位移; $[\mu_n^0]$ 、 $[\mu_t^0]$ 分别为粘结界面最大应力损伤失效时对应的法向和切向最大位移。

## 2 单轴压缩损伤过程数值模拟

### 2.1 有限元模型参数

选择砼立方体标准试样(150 mm × 150 mm × 150 mm)剖面进行二维细观模拟,采用 Monte Carlo 法生成的随机骨料为 240 个,在骨料与砂浆界面生成粘结单元。为使粘结单元能采用扫略方式进行网格划分,将骨料及界面过渡区采用四等分进行分割,生成节点 23 743 个、单元 154 387 个,其中粘结单元 25 427 个(见图 5)。

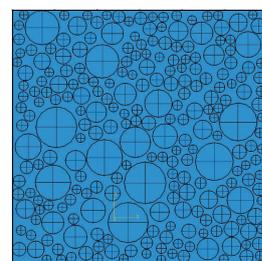


图 5 有限元模型

骨料采用花岗岩进行模拟,设置为不会发生损伤的线弹性体,弹性模量  $E=6 \times 10^4$  MPa,泊松比  $\mu=0.2$ ;砂浆采用砼损伤塑性模型,  $E=2.9 \times 10^4$  MPa,  $\mu=0.2$ ,单轴压缩采用图6所示本构关系,单轴拉伸采用图7所示本构关系;粘结单元采用力一分离本构关系模型,断裂能  $\omega=0.03$  N/mm,粘结刚度  $k=1.4 \times 10^4$  MPa/mm。

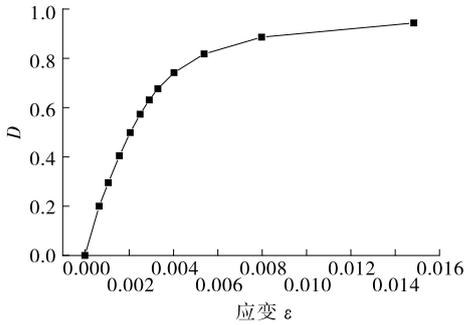


图6 砂浆压缩损伤演化

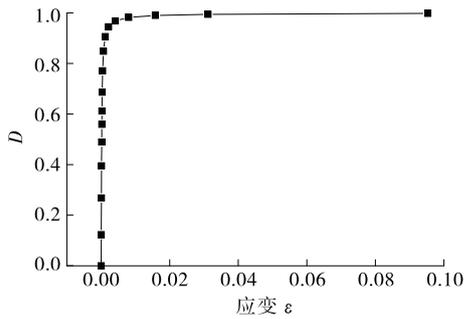


图7 砂浆拉伸损伤演化

### 2.2 单轴压缩数值模拟

图8为细观模拟砼单轴受压的破坏过程。从图8可看出砼局部应力增大直至破坏的情况。加载至极限应力的70%时,砼界面过渡区损伤发生,出现裂缝;加载至极限荷载的80%时,骨料边缘尤其是大骨料边缘的界面过渡区开始出现更多的应力集中区域,砼边缘受拉应力达到极限,开始发生破坏,但试件内部并未出现损伤区域;加载至极限荷载的90%时,试件内部开始出现损伤区域,且裂缝逐渐贯通;加载至极限荷载时,损伤单元相互贯通,形成宏观的破坏裂缝,砼最终破坏形态为立方体两侧形成八字形破坏,内部裂缝贯通,形成竖向破坏,与图9所示砼试验破坏形态相似。此时试件虽然失稳,但仍保留残余应力,直至失去承载力而完全断裂。另外,砼试件内部破坏单元都是界面过渡区的粘结单元,界面过渡区是裂缝的萌生和发展区域,随着荷载的增加,裂缝沿平行于加载方向开展。说明砼单轴压缩破坏裂纹是由内部结构主拉应变引起的。砼单轴受压破坏是由泊松比效应所引起的拉伸破坏,破坏分布于整个试件内。

立方体砼单轴受压数值模拟与GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》的应力—应变曲线对比见图10。从图10可看出:砼受压破坏过程中的弹性变形上升段、塑性变形段和破坏阶段的数值模拟结果与标准结果较接近,数值模拟的平均强度为40.5MPa,极限强度对应的应变值为0.0016,与标

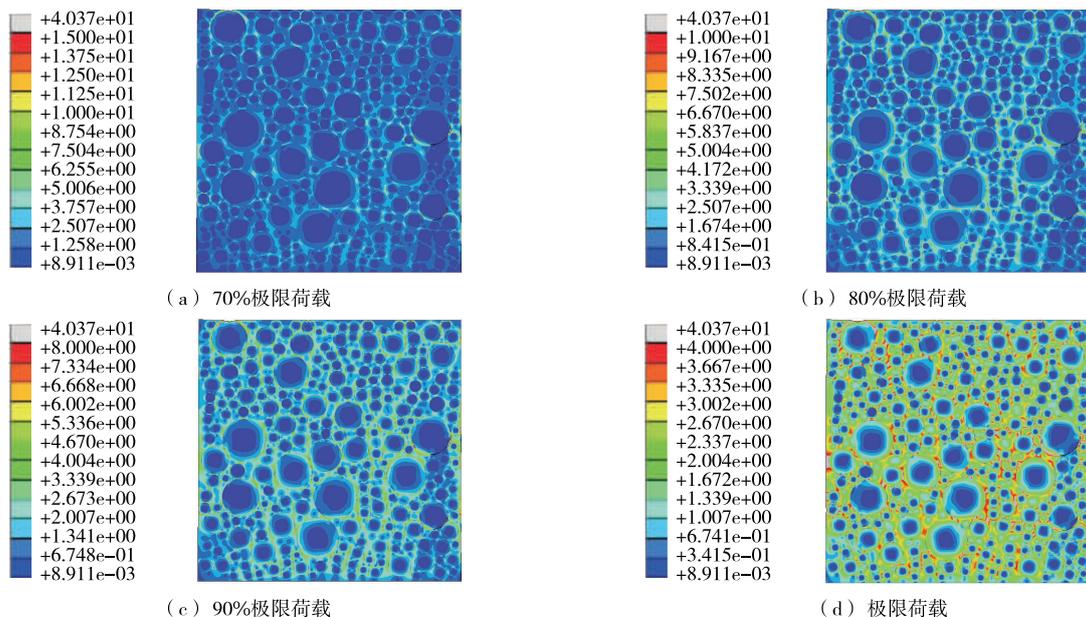


图8 细观模拟砼单轴受压破坏过程



图9 砼试验破坏形态

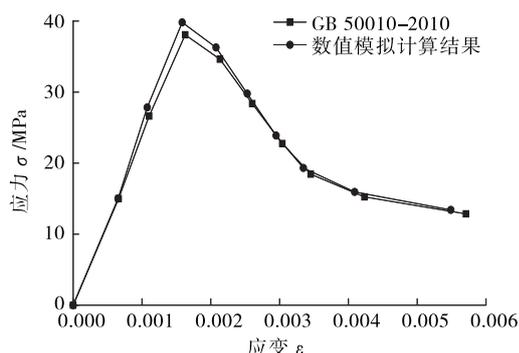


图10 数值模拟与标准砼应力—应变曲线对比

准试验结果的误差分别为3.4%和1.2%。单轴受压数值模拟结果基本符合标准试验结果,细观模型的建立及所采用的粘结单元模型合理。

### 3 结论

(1) 砼试件内部破坏单元都是界面过渡区的粘结单元,界面过渡区是裂缝的萌生和发展区域。

(2) 砼单轴受压破坏是由泊松比效应所引起的拉伸破坏,破坏分布于整个试件内。

(3) 砼单轴受压的数值模拟结果基本符合标准试验结果,细观模型的建立及界面过渡区所采用的粘结单元模型合理、可靠。

#### 参考文献:

- [1] 金浏,杜修力,黄景琦.多轴加载下混凝土细观破坏模拟的强度准则探讨[J].计算力学学报,2015,32(3).
- [2] 杜修力,金浏.非均质混凝土材料破坏的三维细观数值模拟[J].工程力学,2013,30(2).
- [3] 胡大琳,张立兴,陈定市.二维细观随机混凝土模型的建立和应用[J].长安大学学报,2017,37(3).
- [4] 李冬,金浏,杜修力,等.骨料级配对二维模型混凝土单轴抗拉强度影响的理论研究[J].工程力学,2017,34(6).
- [5] 雷斌,李召行,熊进刚,等.基于细观尺度的再生混凝土

性能研究综述[J].硅酸盐通报,2017,36(6).

- [6] 杜敏,金浏,李冬,等.模型尺寸和骨料级配对混凝土细观非均质影响[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(2).
- [7] 雷光宇,韩霖昌,党发宁,等.细观混凝土数值模型对比分析研究[J].应用力学学报,2017,34(2).
- [8] 周静海,王晓天,郭易奇,等.再生混凝土抗压强度的影响因素的有限元分析[J].混凝土,2017(6).
- [9] 秦拥军,田盼盼,于江,等.再生混凝土细观层次的数字图像模型分析[J].河南科技大学学报,2017,38(2).
- [10] 夏晓舟,章青,汤书军.混凝土细观损伤破坏过程的数值模拟[J].河海大学学报,2007,35(3).
- [11] 肖建庄,杜江涛,刘琼.基于格构模型再生混凝土单轴受压数值模拟[J].建筑材料学报,2009,12(5).
- [12] 唐欣薇,张楚汉.基于改进随机骨料模型的混凝土细观断裂模拟[J].清华大学学报:自然科学版,2008,48(3).
- [13] 唐春安,朱万成.混凝土损伤与断裂:数值模拟[M].北京:科学出版社,2003.
- [14] 刘光廷,王宗敏.用随机骨料模型数值模拟混凝土材料的断裂[J].清华大学学报:自然科学版,1996,36(1).
- [15] 方秦,张锦华,还毅,等.全级配混凝土三维细观模型的建模方法研究[J].工程力学,2013,30(1).
- [16] 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).
- [17] 王娟,李庆斌,卿龙邦,等.混凝土单轴抗压强度三维细观数值仿真[J].工程力学,2014,31(3).
- [18] Z J Yang, X T Su, J F Chen, et al. Monte Carlo simulation of complex cohesive fracture in random heterogeneous quasi-brittle materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46.
- [19] X T Su, Z J Yang, G H Liu. Monte Carlo simulation of complex cohesive fracture in random heterogeneous quasi-brittle materials: a 3D study[J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47.
- [20] 陈小佳,蔡宇清,崔太雷.砼受压试验全过程声发射特性研究[J].公路与汽运,2018(1).
- [21] 肖建庄,黄凯文,李龙.模型再生混凝土单轴受压静力与疲劳性能数值仿真[J].东南大学学报:自然科学版,2016,46(3).
- [22] 俞海英,武亮,糜凯华.全级配混凝土单轴疲劳特性细观数值模拟[J].水利水电技术,2017,48(3).
- [23] 宋立峰.混凝土单轴抗压强度的数值模拟[J].西部探矿工程,2008,20(6).

收稿日期:2018-09-21