

文章编号:1673-2049(2011)01-0083-08

混凝土细观刚体弹簧元法在劈裂试验中的应用

邢立坤,王立成,侯宇星

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘要:系统总结了细观刚体弹簧元法的理论框架,即随机骨料的生成过程、细观刚体单元的划分原理、刚体弹簧元模型的确定方法、本构关系的建立过程等,并评述了各国细观刚体弹簧元法的最新研究进展及成果;在模拟混凝土劈裂试验时,考虑劈裂试验的加载特点,对劈裂试件刚体单元的划分方法进行了局部调整。结果表明:细观刚体弹簧元法能够应用于混凝土劈裂试验的数值模拟。

关键词:细观层次;刚体弹簧元模型;本构关系;劈裂试验;数值模拟

中图分类号:TU528

文献标志码:A

Application of Mesoscopic Rigid-body-spring Method of Concrete in Splitting Test

XING Li-kun, WANG Li-cheng, HOU Yu-xing

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: Authors systematically summarized the theoretical frame of the mesoscopic rigid-body-spring method, which included the generation process of random aggregates, the meshing technique of elements, the construction of the mesoscopic rigid-body-spring model and the development of constitutive law of the springs. In addition, the latest research advances and results on the application of mesoscopic rigid-body-spring method at home and abroad were reviewed. At the end, regarding of the loading characteristics of splitting test, the adjustment of meshing method of element was adopted for the sample in order to represent the test condition. The results indicate that the mesoscopic rigid-body-spring method can be applied to the numerical simulation process of splitting test of concrete.

Key words: mesoscale; rigid-body-spring model; constitutive law; splitting test; numerical simulation

0 引言

混凝土根据其内部结构组成和分析的需要,可分为宏观、细观和微观 3 个不同层次。宏观层次认为混凝土为各相同性材料,但由于温差作用、泌水等会引起混凝土内部骨料和砂浆基体之间产生裂纹,

直接影响了混凝土的各相同性和宏观性能。细观层次将混凝土视为粗骨料、硬化水泥砂浆及两者之间的界面粘结带组成的三相复合材料,其中,硬化水泥砂浆或骨料可分别视为各相同性材料。细观力学方法就是在此基础上提出来的。微观层次的研究尺度在分子、原子量级,但该层次下的结构模型以及数学

收稿日期:2010-11-03

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(90815026);国家自然科学基金重点项目(50838001)

教育部科学技术研究重点项目(109046)

作者简介:邢立坤(1988-),男,山东济宁人,工学硕士研究生,E-mail:shanjixing123@sina.com。

算法等尚不完善,仍需要进一步研究。为体现材料的非均匀性对混凝土性能的影响,准确反映混凝土的整体和局部破坏形态,需要在细观层次上对混凝土进行研究,这也成为目前混凝土的一个重要研究方向。

通过数值方法模拟混凝土的力学特性,首先要解决的问题是粗骨料的生成方法。目前,研究者提出了许多混凝土骨料生成的数值算法,如 Wittmann 等^[1]建立的多棱角无规则的骨料模型,高政国等^[2]提出的以面积为参数的骨料侵入判别算法,侯宇星等^[3]提出的以面积为参数的改进随机骨料生成算法;在力学性能分析时,学者们提出了各种力学模型,如格构模型^[4]、梁单元模型^[5]等。刚体弹簧元模型(Rigid-body-spring Model,简称 RBSM)是 20 世纪 70 年代末由 Kawai 等^[6]创立的一种适用于极限分析及处理裂纹行为的数值计算方法。刚体弹簧元法通常用来模拟均质材料的断裂过程^[7]。细观刚体弹簧元法是在细观层次上应用刚体弹簧元法对混凝土进行力学分析的方法。

本文中笔者对细观刚体弹簧元法进行了系统总结,包括随机骨料的生成过程、细观刚体单元的划分原理、刚体弹簧元模型的确定方法、本构关系的建立过程等,并对各国最新的研究进展和研究成果进行了评述。为保证劈裂试验数值模拟与试验时边界条件的一致性,对模型的刚体单元划分方法进行了局部调整,并通过实例进行了验证分析。

1 细观刚体弹簧元法

1.1 随机骨料模型的生成

组成混凝土的粗骨料一般可以分为卵石骨料和碎石骨料,在数值模拟中这 2 类骨料通常均假定为球状。文献[3]中对圆形骨料与多边形骨料进行了对比分析,发现骨料形状对混凝土力学性能的影响很小。

为使骨料达到最优密实度,通常借助三维 Fuller 曲线确定骨料分布。Walravent 等^[8]基于 Fuller 公式将三维级配曲线转化为试件截面上任意点具有骨料直径 $D < D_0$ 的概率 $P_c(D < D_0)$,即

$$P_c(D < D_0) = P_k(1.065D_0^{0.5}D_{\max}^{-0.5} - 0.053D_0^4D_{\max}^{-4} - 0.012D_0^8D_{\max}^{-6} - 0.0045D_0^8D_{\max}^{-8} + 0.0025D_0^{10}D_{\max}^{-10}) \quad (1)$$

式中: D_0 为筛孔直径; D_{\max} 为最大骨料直径; P_k 为骨料占混凝土总体积的百分比,一般取 75%。

粗骨料中小石粒径为 5~20 mm,中石粒径为 20~40 mm,大石粒径为 40~80 mm,特大石粒径为

80~150 mm。常用的二级配骨料中,小石、中石质量比为 55:45;三级配骨料中,小石、中石、大石质量比为 3:3:4;四级配骨料中,小石、中石、大石、特大石质量比为 2:2:3:3。这 3 种常用的骨料级配与三维 Fuller 曲线都能较好吻合^[9]。

根据式(1)确定某一粒径骨料所占的面积,进而确定某一粒径的骨料颗粒数。这些骨料颗粒可由 Monte Carlo 法^[10]在试件截面内随机生成。生成方法为:按照骨料直径从大到小的顺序逐个随机生成骨料形心的位置,在已确定的骨料形心周围一定范围内不能再生成其他的骨料,直到所有骨料都随机生成。随机骨料的生成模型如图 1 所示,其中 r_i 、 r_j 分别为骨料 i 、 j 的半径, k 为放大倍数。

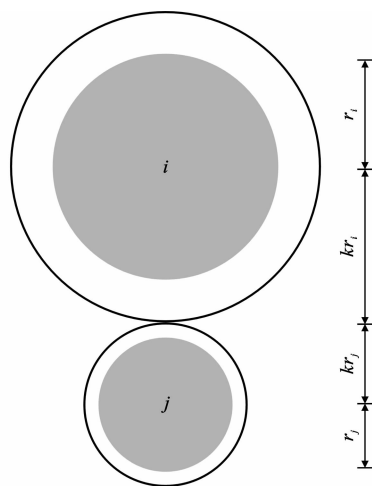
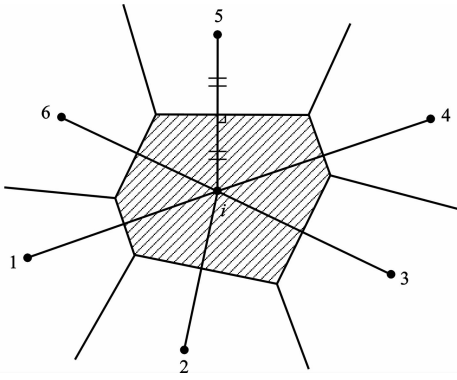


图 1 随机骨料的生成模型

Fig. 1 Generation Model of Random Aggregates

1.2 细观刚体的单元划分

细观刚体的单元划分就是将一个在细观层次上形成的混凝土构件分割为一些相互联系的刚体单元,也称作网格单元或刚体粒子。由于裂纹将沿刚体单元的边界产生和扩展,所以裂纹的产生受到细观刚体单元划分的影响。另外,为满足混凝土宏观性能的各相同性特征,网格单元有 2 个基本要求:①能够模拟一个均匀应变场;②裂纹的产生方向应具有各向相同概率性质。因此,刚体弹簧元中的单元划分方法采用 Voronoi 图形处理技术。平面问题中,构成刚体单元的多边形由随机生成的 Voronoi 点产生,其方法为:假定平面内的每个 Voronoi 点都有属于自己的区域,使得该区域内的任何一点到该点的距离都比到其他点的距离要近。如图 2 所示,阴影部分即为属于 Voronoi 点 i 的区域。Voronoi 点生成以后可以通过数学算法实现 Voronoi 单元的自动划分。

图 2 与点 i 相关的 Voronoi 单元Fig. 2 Voronoi Element Associated with Point i

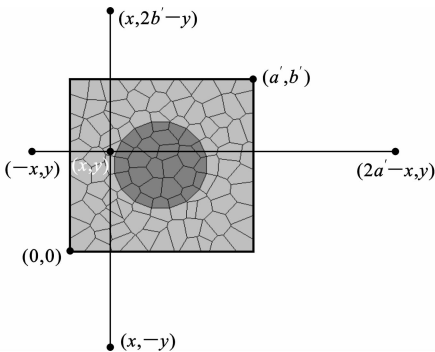
细观刚体单元划分的步骤如下:

(1)由一系列的线段描绘出试件的边界形状,如矩形、圆形、T形等。

(2)按第 1.1 节中的方法在试件截面内随机生成骨料颗粒。

(3)在试件区域内按一定规律生成一系列的 Voronoi 点,也可以通过控制点之间的最小距离来实现 Voronoi 点的随机生成。因为砂浆基体与骨料的力学性能不同,特别是两者之间的粘结带通常是薄弱部位,裂纹主要沿界面产生和扩展,所以在采用 Voronoi 点生成刚体单元时,要控制点的生成位置使骨料与砂浆的界面成为刚体单元的交界面。

(4)每个 Voronoi 点都需要生成一组辅助点来保证试件边界成为 Voronoi 多边形的一条或多条边,这要求辅助点与基本点关于边界对称,如图 3 所示。生成的辅助点在单元划分时只有一部分是有效的^[11],如图 3 中的 4 个辅助点只有点 $(-x, y)$ 为有效辅助点,其中, a' 、 b' 分别为矩形的长和宽。

图 3 Voronoi 点 (x, y) 的辅助点Fig. 3 Auxiliary Points of Voronoi Point (x, y)

(5)根据生成的 Voronoi 点,利用 Voronoi 多边形划分算法即可生成细观网格模型。

(6)记录每个 Voronoi 多边形所对应的 Voronoi 点,将其作为刚体单元受力变形的计算基

准点。采用 Voronoi 点计算比采用 Voronoi 多边形的质心计算更能产生均匀的应变场,并容易满足网格单元划分的基本要求。

1.3 刚体弹簧元模型的建立

刚体弹簧元的单元通过边界中间处的一组零尺寸的弹簧相互连接,而本身不产生变形。

如图 4 所示,刚体单元 i 和 j 通过边界中间位置处的 P 点相互联系,2 个刚体单元所对应的 Voronoi 点之间的距离为 h 。因每个刚体单元有 3 个自由度,所以在每个单元界面上设置一个垂直弹簧 k_1 、一个剪切弹簧 k_2 和一个旋转弹簧 k_3 来反映其变形。弹簧的刚度根据各种组成材料的性能来确定,而裂缝的产生和扩展可以通过弹簧的变形和刚度的退化来反映。

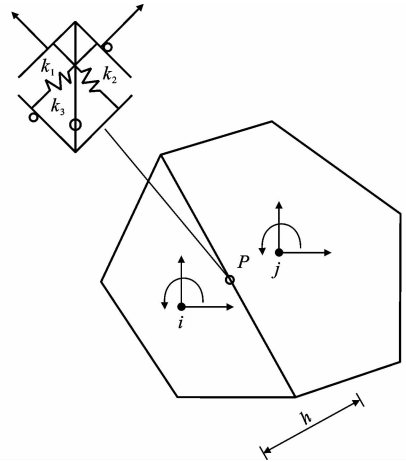


图 4 刚体弹簧元模型

Fig. 4 Rigid-body-spring Model

根据增量型的虚功原理,刚体单元中由局部相对小变形引起的荷载与位移关系推导出广义坐标系下的荷载与位移的关系式,即

$$\left. \begin{aligned} k_e \Delta u_e &= \Delta f_e \\ k_e &= B^T D B \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: B 为转换矩阵; D 为含垂直、剪切和旋转弹簧刚度的对角刚度矩阵; u_e 为位移矩阵; k_e 为广义刚度矩阵; f_e 为广义荷载向量。关于此部分,文献[7]、[12]中有详细的推导过程。

1.4 刚体单元间弹簧本构关系的确定

宏观层次上混凝土的力学性能与细观层次上的有所不同,式(3)、(4)给出了泊松比、弹性模量在 2 个层次上的对应关系^[13],即

$$\mu_{\text{elem}} = 20\mu^3 - 13.8\mu^2 + 3.8\mu \quad 0 \leq \mu \leq 0.3 \quad (3)$$

$$E_{\text{elem}} = (-8\mu_{\text{elem}}^3 + 1.2\mu_{\text{elem}}^2 - 0.2\mu_{\text{elem}} + 1)E \quad (4)$$

式中: E_{elem} 、 μ_{elem} 和 E 、 μ 分别为细观层次和宏观层次

上材料的弹性模量和泊松比。

由于混凝土各相组成材料的弹性模量不同,在细观刚体弹簧元中刚体单元间弹簧的刚度也应该不同。对于砂浆单元,垂直弹簧刚度 k_n 和剪切弹簧刚度 k_s 分别为

$$k_n = E_{\text{elem}} / (1 - \mu_{\text{elem}}^2) \quad (5)$$

$$k_s = E_{\text{elem}} / (1 + \mu_{\text{elem}}) \quad (6)$$

弹簧应力与变形之间的关系可表示为

$$\sigma = k_n \epsilon \quad (7)$$

$$\tau = k_s \gamma \quad (8)$$

$$\epsilon = \Delta n / (h_1 + h_2) \quad (9)$$

$$\gamma = \Delta s / (h_1 + h_2) \quad (10)$$

式中: σ 、 τ 分别为垂直弹簧和剪切弹簧的应力; Δn 、 Δs 和 ϵ 、 γ 分别为垂直弹簧和剪切弹簧的变形和应变; h_1 、 h_2 分别为相邻两单元计算点到边界的垂直距离。

从材料组成来看,砂浆又可视为由砂、水泥和孔隙组成的非均质材料,从而造成了砂浆单元性能的差异。为了实现数值模拟的准确性,需要考虑砂浆力学性能的变异性。在细观刚体弹簧元法中假定砂浆的抗拉强度符合一定的概率分布,如正态分布、Weibull 分布等。文献[13]中假定刚体单元之间的抗拉强度符合正态分布。

假定垂直弹簧在达到受拉峰值应力之前为弹性性能,而受压情况下垂直弹簧不会发生破坏,其本构模型如图 5 所示,其中 f_{telem} 为垂直弹簧的抗拉强度,最大裂缝宽度 w_{max} 取 0.03 mm。剪切弹簧假定为弹塑性性能,其本构模型如图 6 所示,剪切弹簧的最大剪应力 τ_{max} 显然受垂直弹簧应力 σ 的影响,可通过式(11)确定,即

$$\tau_{\text{max}} = \pm [0.11 f_{\text{telem}}^{3,0} (-\sigma + f_{\text{telem}})^{0.6} + f_{\text{telem}}] \quad \sigma \leq f_{\text{telem}} \quad (11)$$

对于骨料单元,单元间弹簧的本构关系与砂浆类似,上述关系亦适用。骨料与砂浆的界面处是混凝土内的薄弱部位。对于普通强度的混凝土,裂纹通常沿着界面产生和扩展,因此界面的抗拉强度在很大程度上决定着混凝土的宏观抗拉强度。文献[14]中对界面抗拉强度的试验方法、研究成果等进行了概述。

在混凝土细观数值模拟中,界面的连接方式通常有 2 种:一种认为界面是由一定厚度且具有自身性质的薄层相连,研究者对界面厚度进行了大量研究,发现界面层的厚度随着水化过程的进行而逐渐减小,从早期的 100 μm 减至约 15 μm ^[15];另一种不

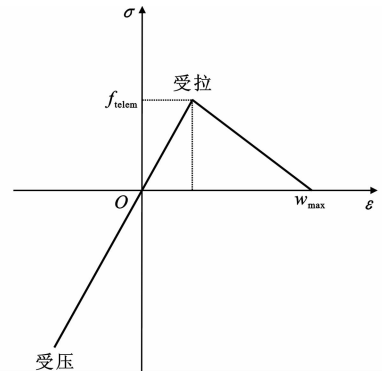


图 5 垂直弹簧的本构模型

Fig. 5 Constitutive Model of Vertical Springs

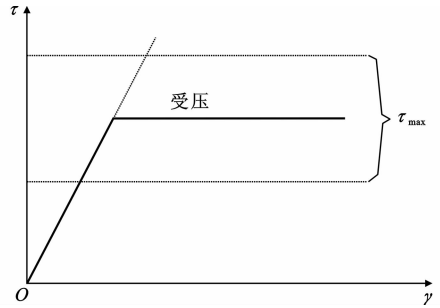


图 6 剪切弹簧的本构模型

Fig. 6 Constitutive Model of Shear Springs

考虑界面的厚度,直接用弹簧将骨料单元和砂浆单元相连接,赋予界面处弹簧一定的材料参数来模拟界面的性质。细观刚体弹簧元法采用第 2 种方法。界面处弹簧的垂直弹簧刚度 k'_n 和剪切弹簧刚度 k'_t 分别取骨料和砂浆单元刚度的加权平均值,即

$$k'_n = \frac{h_1 k_{n1} + h_2 k_{n2}}{h_1 + h_2} \quad (12)$$

$$k'_t = \frac{h_1 k_{t1} + h_2 k_{t2}}{h_1 + h_2} \quad (13)$$

式中: k_{n1} 、 k_{t1} 和 k_{n2} 、 k_{t2} 分别为骨料和砂浆单元的垂直弹簧刚度和剪切弹簧刚度。

界面处弹簧的本构关系与砂浆单元间弹簧的本构关系相类似,其垂直弹簧的本构关系如图 5 所示,其中最大裂缝宽度 w_{max} 取 0.01 mm。剪切弹簧采用弹塑性原则,其本构关系如图 6 所示,最大剪应力 τ_{max} 满足

$$\tau_{\text{max}} = \pm (-\sigma \tan \varphi + c) \quad \sigma \leq f_{\text{telem}} \quad (14)$$

式中: φ 、 c 为常数。

2 基于细观刚体弹簧元法的研究成果

文献[12]中分析了试件尺寸及骨料粒径对混凝土抗拉强度和抗压强度以及弹性模量的影响,得出的结论为:单轴抗压、抗拉强度随试件尺寸的增大而

减小;混凝土的弹性模量随试件尺寸和骨料粒径的增大而增大。文献[12]中虽然没有给出定量关系,但对试件的尺寸效应进行了定性分析:在混凝土试件内部,骨料和砂浆之间的界面粘结带的抗拉强度最低,最易产生开裂;而试件尺寸越大,骨料越多,粘结带也就越多,越容易开裂,因此大试件的宏观强度常低于小试件的宏观强度。另外,文献[12]中还对比骨料级配对双轴抗压强度的影响进行了分析,得出以下结论:对于常用的几种级配的混凝土,双轴受压均可较大程度地提高其抗压强度;三级配、四级配大骨料混凝土的双轴抗压强度相比单轴抗压强度可分别提高 40%和 60%;二级配混凝土双轴受压比单轴受压可提高 25%左右。

文献[13]中对砂浆以及混凝土的一些基本性能进行了数值模拟。将模拟结果与试验结果对比得出以下结论:数值模拟得到的砂浆抗压强度与试验的基本相同,应力-应变曲线很相似;细观刚体弹簧元法能够模拟砂浆和混凝土的拉压强度之间的关系、单轴拉伸试验时裂纹的产生和扩展过程;二维模型模拟双轴受压试验得出的应力-应变曲线与实际试验中的三轴受压情况相似,原因是第 3 个方向受到约束不会产生变形。

王宝庭等[16]对混凝土的弹性模量进行了数值模拟,采用 3 种不同的骨料,用轴向平均应力除以轴向平均应变计算弹性模量,模拟得出了混凝土的弹性模量与骨料含量、骨料弹性模量的关系。此外,对混凝土单轴抗压泊松比进行了模拟,模拟结果与试验结果在定性上有良好的对应。

文献[17]中模拟了微裂纹密度与弹性模量的关系,定性上与 Budiansky 等[18]给出的裂纹密度和弹性模量的关系式一致。

3 混凝土劈裂试验的细观数值模拟

3.1 局部刚体单元的调整

采用刚体弹簧元进行混凝土数值分析时,单元的平均尺寸对模拟结果有一定的影响[19],对于带缺口的试件,需要特别注意缺口处的单元划分。文献[11]在模拟带缺口的三点弯曲梁试验时,对缺口上部单元采用对称方式划分,模拟得出的结果与试验结果更接近。文献[20]中也提到与边界相邻的细观单元,其单元之间的交界面与边界形成的夹角对裂纹的产生和扩展都有一定影响。

劈裂试验如图 7 所示,其中试件宽度为 a ,垫条宽度为 b ,居中放置,试件在上下两面对称受力。为

了保证数值模拟与试验边界条件的一致性,提高数值模拟的精度,需要对垫条下的刚体单元进行局部调整。由于刚体弹簧元中刚体单元本身不发生变形,在进行数值模拟时每个单元相当于一个整体,不存在半个单元受力或单元内部发生破坏的情况,因此垫条下的刚体单元数目应为整数。实现方法为分别使刚体单元 i 和 j 、 m 和 n 的交界面与试件边界的相交点为垫条最外边缘的 2 个点,如图 8 所示。

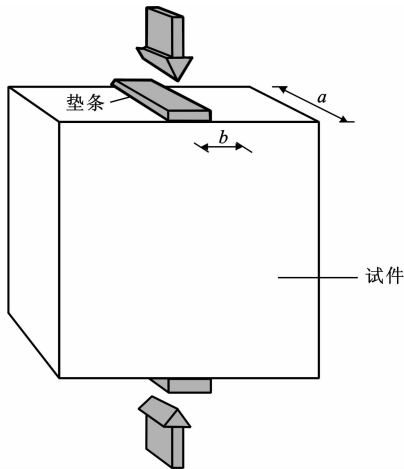


图 7 劈裂试验
Fig. 7 Splitting Test

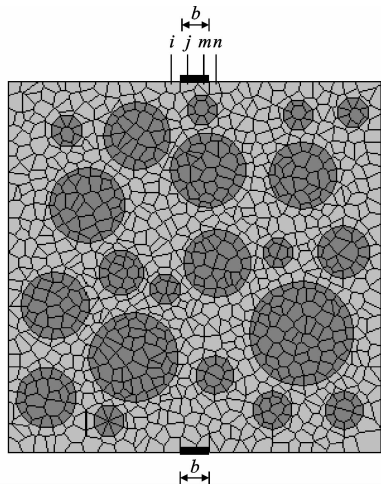


图 8 劈裂试验的数值模拟
Fig. 8 Numerical Simulation of Splitting Test

如图 9 所示,建立用于劈裂试验的细观刚体弹簧元模型的具体步骤为:

- (1)按第 1.2 节中的第 1、2 步描绘试件形状及生成随机颗粒分布。
- (2)基于垫条的左边缘点 A 生成 Voronoi 点 1 和点 2,要求这 2 个点到点 A 的水平垂直距离均相等,即 Voronoi 点 1 和点 2 关于直线 AC 对称。
- (3)按第 2 步的方法生成垫条其他边缘点 B、C、

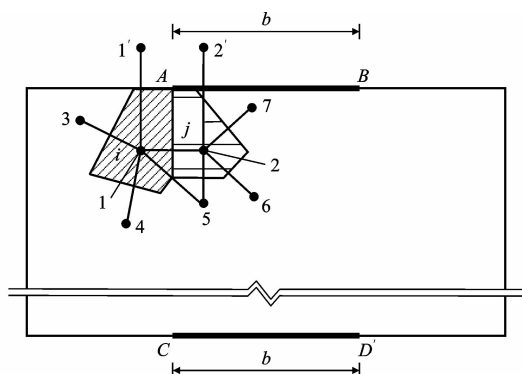


图9 垫条处单元的生成方式

Fig. 9 Generation Method of Elements Under Load-bearing Strips

D' 附近的 Voronoi 点。

(4)在保证第 2、3 步生成的 Voronoi 点的一定范围内无其他 Voronoi 点的前提下,在试件的其他区域内生成全部要求的 Voronoi 点。

(5)按第 1.2 节中的第 4~6 步进行细观刚体单元的划分。

3.2 劈裂试验模型的生成

根据以上步骤生成的劈裂试验的试件细观划分如图 10 所示。试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,垫条宽度为 8 mm ,粗骨料 21 个,粗骨料在整个试件内的面积比为 37.7% 。全部刚体单元数量为 1 963 个,其中砂浆单元 1 161 个,骨料单元 802 个。

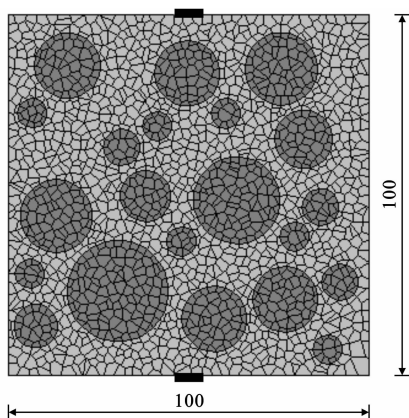


图10 试件细观刚体的单元划分(单位:mm)

Fig. 10 Element Divisions of Specimen on Mesoscopic Rigid Body (Unit:mm)

3.3 数值模拟结果与分析

试件的劈裂破坏形态如图 11 所示(为便于观察,横向和竖向变形均扩大 10 倍)。由图 11 可以看出:加载时,首先在试件的中部产生平行于受力方向的裂缝,并且裂缝出现在骨料与砂浆的交界面上;随着荷载的增大,沿着受力方向产生上下贯通的裂缝;

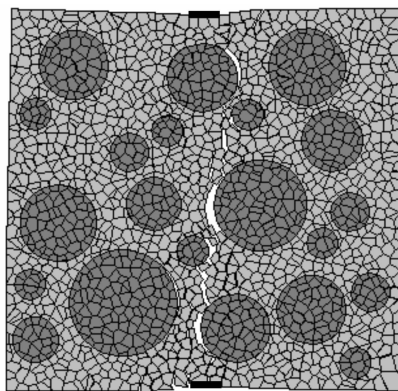


图11 试件的最终破坏形态

Fig. 11 Final Failure Mode of Specimen

垫条对上下边缘处的混凝土起到一定的约束作用,延缓了裂缝的扩展。这与劈裂试验中所观察到的破坏现象是一致的。

在劈裂试验时,试件内部受到拉、压 2 个方向的应力,断裂面上的应力分布如图 12 所示。在距试件中心上下 $0.7a$ 的范围内水平应力 σ_x 基本相同, $\sigma_x = 2F/(\pi a)$, F 为荷载;而垫条上下两点垂直应力 σ_y 最大, $\sigma_y = 12.083\sigma_x$ [21]。因混凝土的抗压强度是抗拉强度的十几倍,垫条附近的混凝土处于双向受压应力状态,所以裂缝是由主拉应力产生的,最先形成于试件中间部位并平行于受力方向 [22-26]。

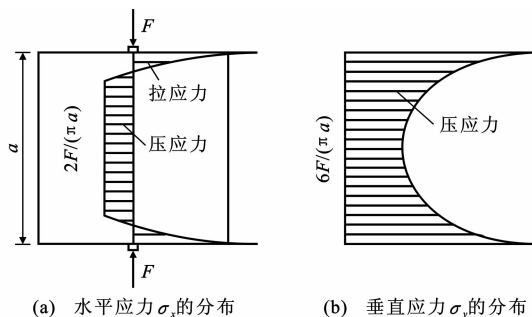


图12 断裂面上的应力分布

Fig. 12 Stress Distributions on Fracture Surface

4 结 语

(1)本文中对细观刚体弹簧元中骨料的生成过程(方法)、细观单元的划分方法、刚体弹簧元模型的确定方法、本构关系的建立过程进行了系统总结,评述了各国细观刚体弹簧元法的最新研究进展及成果。

(2)根据 Voronoi 图形的生成原理,可以通过控制局部 Voronoi 点的生成位置来实现局部细观单元的调整,使数值模拟与试验的边界保持一致。劈裂试验的数值模拟结果表明:细观刚体弹簧元法能有

效模拟混凝土劈裂试验的破坏过程和形态。

参考文献:

References:

- [1] WITTMANN F H, ROELFSTRA P E, SADOUKI H. Simulation and Analysis of Composite Structures [J]. Material Science and Engineering, 1984, 68(2): 239-248.
- [2] 高政国, 刘光廷. 二维混凝土随机骨料模型研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(5): 710-714.
GAO Zheng-guo, LIU Guang-ting. Two-dimensional Random Aggregate Structure for Concrete [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2003, 43(5): 710-714.
- [3] 侯宇星, 王立成. 混凝土细观分析中的随机多边形骨料生成方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(4): 59-65.
HOU Yu-xing, WANG Li-cheng. Generating Method of Random Polygon Aggregate in Mesoscopic Simulation of Concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(4): 59-65.
- [4] LEITE J P B, SLOWIK V, MIHASHI H. Computer Simulation of Fracture Processes of Concrete Using Mesolevel Models of Lattice Structures [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(6): 1025-1033.
- [5] SCHLANGEN E, GARBOCZI E J. New Method for Simulating Fracture Using an Elastically Uniform Random Geometry Lattice [J]. International Journal of Engineering Science, 1996, 34(10): 1131-1144.
- [6] KAWAI T, TOI Y. New Element Models in Discrete Structural Analysis [J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1977, 141: 187-193.
- [7] BOLANDER J E, SAITO S. Fracture Analyses Using Spring Networks with Random Geometry [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1998, 61(5/6): 569-591.
- [8] WALRAVENT J C, REINHARD H W. Concrete Mechanic. Part A: Theory and Experiments on the Mechanical Behavior of Cracks in Plain and Reinforced Concrete Subject to Shear Loading [J]. Heron, 1981, 26(1A): 1-68.
- [9] 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 Huai-fa, CHEN Hou-qun, LI Bao-kun. Mesos-structure Numerical Simulation of Concrete Specimens [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004 (10): 27-35.
- [10] 姜璐, 郑建军. 混凝土界面百分比计算的 Monte Carlo 法 [J]. 吉首大学学报: 自然科学版, 2003, 24(3): 27-29, 36.
JIANG Lu, ZHENG Jian-jun. Monte Carlo's Approach for the Calculation of Interfacial Transition Zone Fraction in Concrete [J]. Journal of Jishou University: Natural Science Edition, 2003, 24(3): 27-29, 36.
- [11] BERTON S, BOLANDER J E. Crack Band Model of Fracture in Irregular Lattices [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195(52): 7172-7181.
- [12] 王怀亮, 宋玉普, 王宝庭. 用刚体弹簧元法研究全级配混凝土力学性能 [J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(增1): 105-117.
WANG Huai-liang, SONG Yu-pu, WANG Bao-ting. Numerical Simulation of Mechanical Behavior of Fully-graded Concrete Based on Rigid Body Spring Model [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(S1): 105-117.
- [13] NAGAI K, SATO Y, UEDA T. Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar and Concrete by 2D RBMS [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2004, 2(3): 359-374.
- [14] 王瑶, 周继凯, 沈德建, 等. 混凝土中骨料-浆体界面过渡区的力学性能研究综述 [J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(2): 89-94.
WANG Yao, ZHOU Ji-kai, SHEN De-jian, et al. Review of Study on Mechanical Property of Aggregate-mortar Interface Transitionzone of Concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(2): 89-94.
- [15] BENTUR A. Microstructure Interfacial Effects and Micromechanics of Cementitious Composites [C]// MINDESS S. Advances in Cementitious Material. New York: American Ceramic Society, 1990: 523-550.
- [16] 王宝庭, 徐道远. 基于刚体-弹簧元法的全级配混凝土本构特性模拟 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2000, 28(1): 22-25.
WANG Bao-ting, XU Dao-yuan. Simulation of Fully-graded Aggregate Concrete Constitutive Behavior Based on Rigid Body Spring Model [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2000, 28(1): 22-25.
- [17] 王宝庭, 宋玉普, 张燕坤. 基于刚体-弹簧模型的混凝土微裂纹行为模拟 [J]. 工程力学, 1999, 16(2): 140-144.

- WANG Bao-ting, SONG Yu-pu, ZHANG Yan-kun. Simulation of Concrete Microcrack Behavior on RB-SM[J]. Engineering Mechanics, 1999, 16(2): 140-144.
- [18] BUDIANSKY B, OCONNELL R J. Elastic Moduli of a Cracked Solid[J]. International Journal of Solids and Structures, 1976, 12(2): 81-97.
- [19] BOLANDER J E, HONG G S, YOSHITAKE K. Structural Concrete Analysis Using Rigid-body-spring Networks[J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2000, 15(2): 120-133.
- [20] BOLANDER J E, LE B D. Modeling Crack Development in Reinforced Concrete Structures Under Service Loading[J]. Construction and Building Materials, 1999, 13(1/2): 23-31.
- [21] 姜福田. 混凝土抗拉强度测定中的几个问题[J]. 水利发电, 1986(9): 25-30.
- JIANG Fu-tian. Serval Problems of Tensile Strength Testing of Concrete[J]. Water Power, 1986(9): 25-30.
- [22] 叶见曙, 张 峰. 预应力混凝土连续箱梁开裂后的刚度退化模型[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 67-72.
- YE Jian-shu, ZHANG Feng. Stiffness Degeneration Model of Prestressed Concrete Continuous Box Girder After Cracking[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(6): 67-72.
- [23] 任更锋, 徐 岳, 石利强, 等. 基于层次分析法的在役 RC 桥梁耐久性评估[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(6): 41-45.
- REN Geng-feng, XU Yue, SHI Li-qiang, et al. Durability Evaluation of Existing Reinforced Concrete Bridges Based on AHP[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(6): 41-45.
- [24] 周志军, 朱宏祥, 张 熠. 土石混合料结构强度的微观分析[J]. 中国公路学报, 2008, 21(3): 30-34.
- ZHOU Zhi-jun, ZHU Hong-xiang, ZHANG Yi. Micro-analysis of Structural Strength of Earth-rock Mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(3): 30-34.
- [25] 范 文, 闫芙蓉, 俞茂宏. 考虑各向异性损伤的统一弹塑性损伤模型[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(3): 304-311, 318.
- FAN Wen, YAN Fu-rong, YU Mao-hong. Unified Elastic-plastic Damage Model Considering Anisotropic Damage[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2009, 41(3): 304-311, 318.
- [26] 赵忠伟, 骆 英. 混凝土结构损伤检测中的射线追踪正演方法[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(1): 53-56.
- ZHAO Zhong-wei, LUO Ying. Study on Ray Tracing Forward Method in the Blemished Concrete Structure Detection[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2009, 41(1): 53-56.

(上接第 52 页)

参考文献:

References:

- [1] KAMAL H K. Effects of Anti-washout Admixtures on Fresh Concrete Properties[J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(2): 164-171.
- [2] HIRONAKA H, TAKIZAWA M. The Development of Special Underwater Concrete (Skcrete) [M]. Tokyo: Sato Kogyo, 1987.
- [3] KOTANI I, OTOMO T, MOTOHASHI K, et al. Development of a New Type of Concrete: Part Two [M]. Tokyo: Kashima Construction Technology Institute, 1982.
- [4] NAKAHARA Y, KOTANI I, OTOMO T, et al. Development and Research of New Type Concrete [M]. Tokyo: Kashima Construction Technology Institute, 1981.
- [5] TAKAHASHI H, MATSUI K, MAEKAWA I, et al. Admixtures on the Application of Special Shape of a New Type of Concrete Research: Part Two [M]. Tokyo: Nishimatsu, 1986.
- [6] OYO K, KEWARE S, OKAMOTO H, et al. Research and Development of New Underwater Concrete [M]. Tokyo: Asuka, 1986.
- [7] 刘红飞. 水下不分散混凝土的性能及应用[J]. 建筑技术, 1996, 23(1): 20-21.
- LIU Hong-fei. Non-dispersible Underwater Concrete Properties and Applications[J]. Architecture Technology, 1996, 23(1): 20-21.
- [8] 刘 军, 方惠琦, 贺鸿珠. 水下不分散混凝土的应用研究[J]. 建筑材料学报, 2000, 3(4): 360-365.
- LIU Jun, FANG Hui-qi, HE Hong-zhu. Applied Study on Nondispersible Underwater Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2000, 3(4): 360-365.