

文章编号 :1007 - 649X(2000)04 - 0016 - 07

混凝土断裂问题研究的层次方法

王宗敏¹, 朱明霞², 赵晓西¹

(1. 郑州工业大学水利与环境工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 郑州工业大学数理力学系, 河南 郑州 450002)

摘 要: 把对混凝土断裂问题的研究分为宏观、细观、微观和纳观 4 个层次, 综述了不同层次的研究方法及适用对象, 最后指出 混凝土细观层次的研究已成为 21 世纪混凝土断裂问题研究的热门课题, 并由此诞生了跨混凝土材料科学、计算力学和计算机图形学的新兴学科——混凝土计算材料科学。

关键词: 混凝土; 层次方法; 计算材料科学

中图分类号: TV 642 **文献标识码:** A

现代科学的一个重要的思维方式与研究方法就是层次方法, 在对客观世界的研究中, 当停留在某一层次, 许多问题无法解决时, 深入到下一个层次, 问题就迎刃而解, 同时也只有进入下一层次, 才能揭示更深层次的机理, 混凝土断裂问题的研究同样如此。本文在综述大量文献的基础上, 试图给出一个清晰的混凝土断裂问题研究的层次方法, 将目前混凝土断裂问题的研究归纳为如下 4 个研究层次。

(1) 宏观层次(Macroscopic Level)。混凝土这种非均质材料存在着—特征体积, 经验的特征体积相应于 3~4 倍的最大骨料体积, 当大于这种特征体积时, 材料假定为均质的, 当小于这种特征体积时, 材料的非均质性将会十分明显。有限元计算结果反映了一定体积内的平均效应, 这个特征体积的平均应力和平均应变称之为宏观应力和宏观应变。由于各种结构缺陷的存在, 宏观的应力—应变关系一般是非线性的, 宏观层次断裂按均质体断裂力学, 唯象地作缝端微裂隙区(断裂过程区) 假定进行分析。

(2) 细观层次(Mesoscopic Level)。在这个层次中, 混凝土被认为是一种由骨料、砂浆和它们间的过渡区(粘结带) 组成的三相非均质复合材料, 细观内部裂隙的发展直接影响混凝土的宏观力学性能。该层次的模型一般是毫米或厘米量级。

(3) 微观层次(Microscopic Level)。在这个层次

中, 认为砂浆的非均质性是由浆体中的孔隙所产生, 孔隙的尺寸大致为丝米量级。由于砂浆中孔隙很小而且量多、随机分布, 水泥砂浆力学性能可近似看作细观均质损伤体, 同配合比、同条件的砂浆试件, 通常其力学性能也比较稳定, 可由试验直接测定。

(4) 纳观层次(Nanoscopic Level)。混凝土的纳观层次认为水泥浆本身也是一种随机的复合材料, 其组分是未水化的熟料颗粒、水化硅酸钙 C-S-H、氢氧化钙晶体 CH(C = CaO, S = SiO₂, H = H₂O)、毛细孔和其他的化学成分, 该层次毛细孔的尺寸是微米或亚微米量级。

1 混凝土的宏观断裂模型

近代混凝土研究表明, 混凝土宏观力学性能和内部裂隙发展紧密关联, 但由于混凝土结构异常复杂, 内部裂隙观测困难, 很难定量地建立细观裂隙和混凝土宏观力学性能的关系。为实际分析简化起见, 人们首先在断裂力学基础上粗略地建立混凝土宏观断裂模型。混凝土的宏观断裂模型是确定混凝土内宏观裂缝的稳定发展, 实际上把混凝土看作均质体, 主要分为两大类, 一类是仍以线弹性断裂力学的基本概念为基础, 通过引入某些用于分析混凝土非线性断裂的假设, 如 R 阻力曲线的研究, 等效裂缝扩展长度的概念, 以及由 Shah 等人提出的两参数断裂模型^[1], 这类模型称

收稿日期 2000 - 05 - 10; 修订日期 2000 - 06 - 30

基金项目: 1997 年教育部“优秀年轻教师基金”资助项目; 1999 年河南省杰出青年基金资助项目

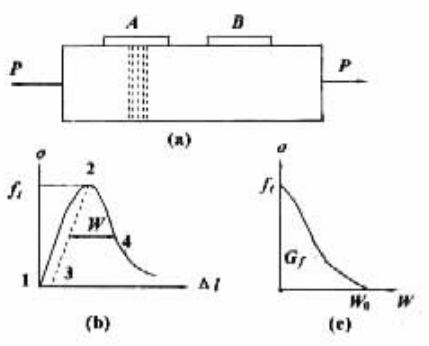
作者简介: 王宗敏(1964 -)男, 河南省荥阳市人, 郑州工业大学副教授, 博士, 主要从事水工结构工程分析方面的研究

为修正的线弹性断裂力学模型. 然而由于没有能考虑断裂过程区的影响, 致使用线弹性断裂力学的方法所测得的混凝土的断裂韧性存在明显的尺寸效应(Size Effect).

另一类是放弃经典线弹性断裂力学某些基本概念的非线性断裂力学^[2~19], 该模型认为: 在混凝土缝端附近存在一个较大的局部损伤区, 称为断裂过程区(Fracture Process Zone), 在这一区域内, 混凝土材料虽然含有大量的微观裂缝, 但仍能传递一部分应力, 只是应力将减小, 形成应变软化现象(Strain Softening). 混凝土材料的应变软化关系可由单轴拉伸实验获得^[2].

1.1 应变软化曲线的实验获得

在大刚性试验机上采用位移(或应变)控制, 测得混凝土材料的应力 - 位移全曲线(见图 1), 其中 A, B 为两标距相等的引伸仪.



1-2-4 为引伸仪 A 测得的应力 - 伸长曲线, 将 1-2-4 减去 1-2-3 表示了断裂区的软化特性; 1-2-3 为引伸仪 B 测得的应力 - 伸长曲线

图 1 拉伸实验曲线

当达到抗拉强度 f_t 时, 假设断裂区出现在引伸仪 A 测量的区段内, 由于微裂缝的生成, 使材料性能相对减弱, 断裂区随断裂位移增大, 承受应力水平减弱, 因而外荷载 P 将减小, 由于应变软

化的局部化效应(Strain Localization), 断裂区以外的各部分将处于卸载状态, 因此, 引伸仪 B 测量的是材料弹性加载和卸载过程. 引伸仪 A 测得的应力 - 变形曲线 1-2-4 扣除由 B 测量的弹性部分加、卸载应力 - 变形曲线 1-2-3, 剩余的将是断裂区内材料呈现的应变软化曲线, 软化曲线下的面积即为断裂能 G_f . 图 1(c) 为裂缝张开和其应力的关系.

1.2 虚拟裂缝模型(Fictitious Crack Model)

A. Hillerborg 于 1976 年提出了虚拟裂缝模型^[3], 该模型将带状微裂区简化为一条分离的虚拟裂缝, 其中虚拟裂缝面上作用的分布面力用实际在混凝土断裂过程区(FPZ)中传递的内力来表示, 虚拟裂缝面上传递的应力和其张开位移之间存在着服从软化曲线的反比关系(见图 2).

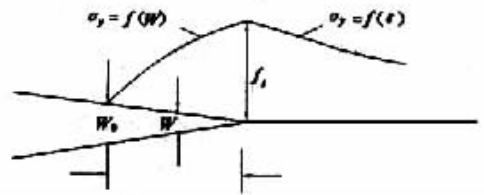


图 2 虚拟裂缝模型

该模型的裂缝扩展是通过节点的分离来实现的, 其缺点是随着裂缝的扩展, 需要不断地重新划分网格, 增加了有限元的工作量, 然而虚拟裂缝模型十分便于边界元实现.

1.3 断裂带模型(Crack Band Model)

Z. P. Bazant 于 1983 年提出断裂带模型^[4], 该模型认为: 断裂过程区可用一条含密集、平行裂纹带来描述(图 3(a)), 裂缝带的宽度 W_c 表示了材料的属性, 约为最大骨料粒径 d_{max} 的几倍, 一般混凝土材料的 $W_c = 3d_{max}$. 裂缝带的混凝土达到抗拉强度后, 呈现应变软化, 满足应力 - 应变软化本构关系.

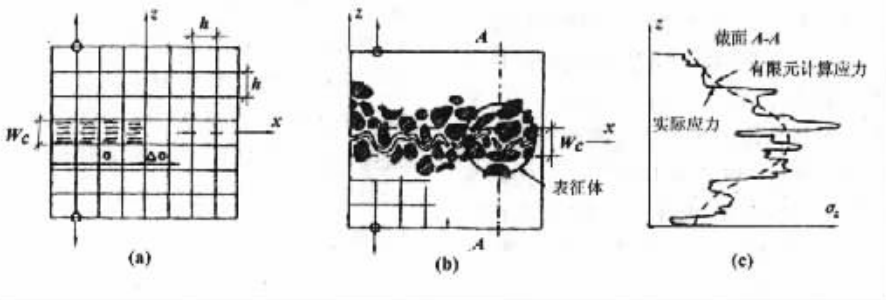


图 3 断裂带模型

当有限元计算时, 若网格划分 h 大于 W_c 时, 为保证计算结果不随网格划分大小而变化, 消除

网格敏感性(Mesh Sensitivity), 应调整应变软化段的本构关系, 以保证宽度为 h 的断裂带吸收的能

量和宽度为 W_c 断裂带吸收的能量相等,即裂缝扩展单位长度吸收的能量唯一。

断裂带模型只调整单元刚度矩阵,不需重新划分单元,因此方便有限元的计算实施,但网格的划分方式影响裂缝的开展方向。

Z. P. Bazant 于“分布式开裂力学”^[5]一文中,对混凝土的开裂进行了高度总结,从而混凝土宏观断裂模型得到了广泛的认可,许多学者^[6-11]对混凝土断裂问题进行了成功的研究和应用,在该方面的参考文献不胜枚举,由于篇幅所限,本文不介绍。

2 混凝土的细观断裂模型

混凝土的宏观断裂模型认为,裂缝尖端存在较大的应变软化区,以应变软化机理将非线性本构关系引入到混凝土断裂分析中,从宏观反应上对混凝土类材料进行了深入研究,但是宏观模型在本质上没有能力去捕捉混凝土这类脆性不均质材料的非弹性变形和断裂以及微观材料不均质的随机性产生的影响,宏观模型很好地模拟了宏观材料的均值,但不能模拟方差,即使采用随机有限元这类一般化的考虑,其假定的空间分布也仅仅在宏观意义下是正确的,它不能够捕捉在损伤和破坏的局部化上的随机的、材料非均质性的效果。

材料的各种宏观性质是由其内部结构决定的,换句话说,材料的宏观性质可以因适当地改变材料的结构而予以改性。虽然混凝土是应用最广泛的结构材料,但其内部结构是不均匀的,而且高度复杂,混凝土的结构与性质的关系至今尚未得到充分的研究,然而,我们在讨论影响混凝土重要工程性质诸因素如强度、弹性、收缩、徐变和开裂及耐久性之前,对混凝土结构基元的了解是必不可少的。

从混凝土试样的断面(见图4)可以很容易地鉴别的两个相是不同尺寸、形状的骨料颗粒以及分布紊乱的硬化水泥浆体物质所组成的胶凝性介质,因此,以宏观水平而论,混凝土可视为由骨料颗粒分散在水泥浆基体中所组成的两相材料。

以微观水平而言,则显示出混凝土结构的复杂性。显然,结构的两个相,既不是彼此均匀分布,其本身又不是均匀的。同样,如果几个含有相同水泥但含水量不同的混凝土试块,在不同龄期进行测定,通常可以看到,硬化水泥浆体中毛细管孔隙的体积随水灰比降低或随水化龄期延长而减少。对于水化良好的水泥浆体,当模拟材料的行为时,

只有固体和孔隙分布的不均匀性可以忽略不计。但是,微观结构的研究已表明,对于混凝土中硬化水泥浆体,就不能如此模拟。当存在骨料时,在贴近大颗粒骨料表现的硬化水泥浆体的结构与系统中水泥石或砂浆的结构非常不同。事实上,在应力作用下,混凝土行为的许多方面只能将水泥浆-骨料界面视为混凝土结构的第三相才能作出解释,因此,混凝土结构的非均一特性可以综述如下。

第一,有第三相,即过渡区相,它代表着粗骨料颗粒与硬化水泥浆体之间的界面区。过渡区系围绕大骨料周围存在的一层薄壳,通常比混凝土的两个主要组成为弱。因此,界面区对混凝土力学行为的影响较其尺寸影响要大得多。第二,三相中任一相的本身,其本质上是多相的,例如,硬化水泥浆的本身和过渡区两者一般都含有不同类型和数量的固相、孔和微裂缝,呈不均匀分布。第三,混凝土不同于其他工程材料,其结构并不保持稳定(即其结构不是材料固有的特征),这是因为结构的两个组分,即硬化水泥浆体和过渡区,随时间、环境湿度和温度的变化而变化。

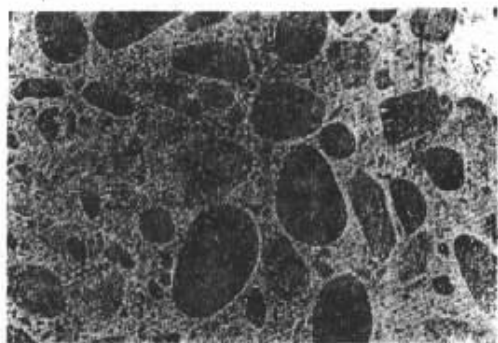


图4 取自混凝土试样的抛光断面

随着高速度大容量的计算机的出现,一个崭新的基于骨料随机分布的混凝土计算材料科学诞生了,材料科学的基本任务之一就是根据科学的原理去建立微观结构和材料宏观特性间的关系。混凝土的细观断裂模型就属于一种材料科学,混凝土的细观断裂模型一般分为两种,一种是根据线弹性断裂力学的理论来模拟裂纹开展的“理论混凝土”,另一种是利用数值方法(如有限元法)的“数值混凝土”。

2.1 理论混凝土

现在,考虑均质体中存在一个多边形夹杂物,代表无限体中一个骨料颗粒,长度为 $2L_1$ 的一个初始裂缝位于边 AB 上,如果临界荷载 q^{IF} 达到,

裂缝就将沿着界面扩展,属于 II 型不稳定扩展(图 5(a)):

$$q^{IF} = -\frac{K_{IIc}^{IF}}{B(\alpha, \rho)} \frac{1}{\sqrt{\pi l_1}}, \quad (1)$$

式中, ρ 为缝面摩擦系数.当裂缝碰到另一个骨料时(图 5(b)),裂缝的进一步扩展就依赖于这两个骨料界面的倾角, I 型和 II 型裂缝扩展条件为

$$q_I = -\frac{\sqrt{\pi l_2}}{l_1} \frac{2K_{IC}^{IF}}{\alpha(\alpha, \beta, \rho)}; \quad (2)$$

$$q_{II} = -\frac{\sqrt{dl_2}}{l_1} \frac{2K_{IIc}^{IF}}{D(\alpha, \beta, \rho)}. \quad (3)$$

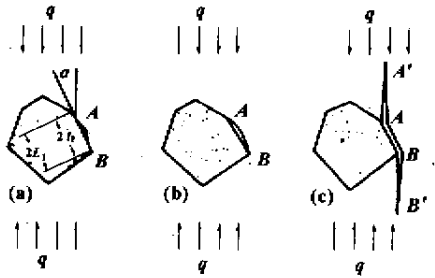


图 5 裂缝扩展模拟

2.2 数值混凝土

“理论混凝土”的缺点是引入了一定的假设,不能适应复杂的边界条件,有一定的应用局限性,从而产生了“数值混凝土”。

文献 12,13 采用微平面模型,假定混凝土由刚体颗粒骨料组成,在这些刚性颗粒之间存在大量的微平面,从微平面的应力应变关系组合来导出混凝土的宏观本构关系.文献 14 的刚颗粒接触模型随机产生了刚颗粒及其接触面,考虑颗粒之间的相互作用内力,以增量的方式确定了混凝土的宏观性能,类似于离散元的方式对混凝土进行了细观断裂模拟.这两种方法由于引入假设较多,不能真实地模拟混凝土的结构,缺乏生机,难以应用。

文献 15~18 采用了简单的网架模型对混凝土的断裂进行了数值模拟,借助于蒙特卡罗方法,在空间上随机确定骨料的位置、形状和尺寸,产生出混凝土随机骨料结构.将网架模型的有限元网格投影到随机骨料结构上,根据网格在随机骨料结构上的位置,分配不同的材料特性给相应的杆或梁单元,用以代表不同的相——水泥砂浆、骨料及二者间的粘结带.其主要缺点是该模型将混凝土离散为不连续介质的杆系结构,造成骨料和砂浆体的界面不能很好地模拟,无法模拟这种界面的厚度及各向异性,使得研究只能限制在定性研

究层次上。

文献 19~23 采用了连续介质的三角形有限单元,对混凝土的有关问题进行了初步研究,取得了一定的成果,并根据随机骨料结构生成了有限元网格,精确地模拟了骨料与砂浆体的界面。

文献 24,25 在混凝土材料科学、计算力学和计算机图形学的有机结合方面,做出了卓有成效的工作,对随机骨料结构的生成进行了较好的控制,发展了基于随机骨料结构的有限元网格生成方法,使用四节点的界面单元较好地模拟了骨料与砂浆体的界面,见图 6(粗线代表界面单元),并提出了特别适用于混凝土细观研究的非线性有限元分析方法。

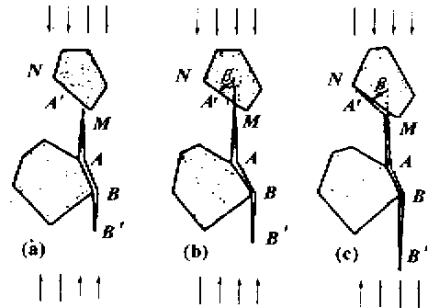


图 6 随机骨料结构与有限元网格

3 水泥砂浆的微观断裂模型

Y. B. Zaitsev 和 F. H. Wittmann 的微观模型^[16,17]认为:除了浆体中的孔隙外,水泥砂浆为均质连续材料,孔隙具有随机方向的预裂缝,且在整个体积内随机分布(见图 7),预裂缝的长度分布在 $0 \leq \lambda = \frac{1}{r} \leq 2$ 的范围内,角度 α_i 分布在 $0 \sim 2\pi$ 之间。

随着荷载 q 的增加,描述裂缝扩展的方程为

$$q = \frac{K_{IC}}{\sqrt{2\pi}} f(\lambda), \quad (4)$$

裂缝汇合后的相互作用,通过宏观反应产生突变予以考虑.实际上,确定配合比的水泥砂浆试件,通常能提供较稳定的材料参数,可由少量试件实验直接测出。

4 水泥浆的纳观模型

Bentz D. P 和 Garboczi E. J. 提出的水泥浆的结构模型^[26,27]认为:假定 C-S-H 为均质的连续材料,模型的核心是采用数字映象来表征水和水泥颗粒的初始混合物,水泥颗粒被认为是单一的相 C_3S ,由微粒 C_3S 构成的水泥颗粒具有随机的形

状,且在模拟水化过程微观结构的发展中,材料可以重新分布.

模型的每个循环有 3 个步骤:溶解、扩散和反应.当所有溶解的微粒稳定后,重新寻找新的接触水的水泥表面,一个新的溶解、扩散和反应过程重新开始,直到预定的水化程度或者所有的水泥完全水化(一个缓慢的过程)或者没有更多的接触水的水泥表面.通过该模型,对于给定的水灰比,可

以达到 85% ~ 90% 的水化程度.但模型的缺点是没有模拟当水扩散进入覆盖未水化水泥的 C-S-H 层时的水化过程.

利用上述模型,文献[26,27]成功地描述了砂浆和混凝土界面区的微观结构,利用渗流理论进行了导电性和扩散性研究,并进行了 CH 浸析模拟.

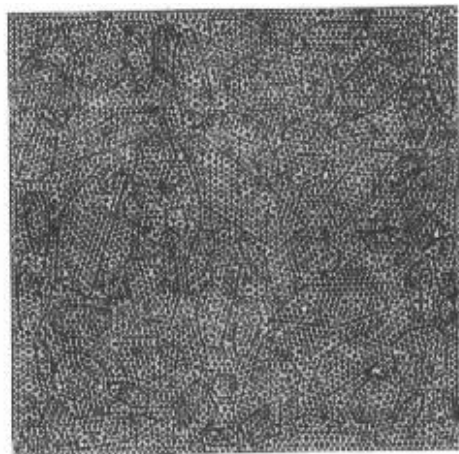
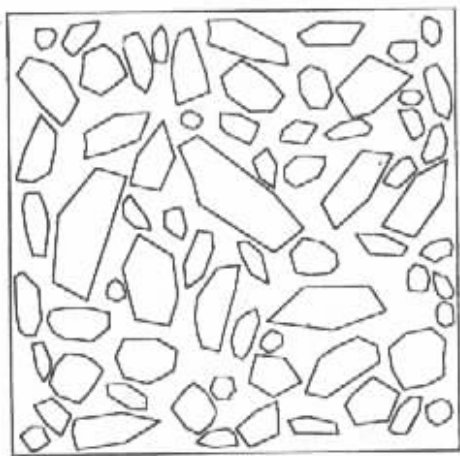


图 7 具有预裂纹的孔隙分布

5 结束语

根据以上对混凝土断裂研究 4 个层次的划分及其各层次研究方法的深入分析,可以看到:用宏观断裂模型分析混凝土是结构工程师的观点,在宏观层次上的研究仅能在一定精度下解决工程问题.按材料科学的观点,显然该层次的研究方法过于粗糙,无法揭示混凝土结构、组合与性能之间的关系.在宏观层次研究上不可能改变混凝土材料的本质性质.对混凝土宏观层次的研究尚存在许多难以解决的问题,如尺寸效应(Size Effect)、裂缝前端的断裂过程区是否存在.若存在,是否如宏观模型的假想.诸如此类问题,只有进入到细微观层次才能予以解决.高强混凝土的出现就是细微观层次研究的一个重大成果,它是通过掺入外加剂,改变混凝土细微观结构——粗骨料与水泥砂浆的界面的性质而诞生的.微观断裂模型虽然考虑了水泥砂浆基体中的孔隙随机分布,然而由于实际上很难得到不包含任何孔隙的“净”水泥砂浆的材料特性,况且对于确定配合比的水泥砂浆试件(尽管包含着孔隙),其材料特性也比较稳定,可由少量试件的实验直接测出,因此本文认为可不考虑微观层次的结构状况,而是将水泥砂浆以损伤唯象学的方式来描述.水泥浆的纳观模型,主要着眼

于水泥水化产物,是水泥化学家和材料学家的研究方向.

细观结构层次把混凝土看作是由粗骨料、水泥砂浆基体和二者间的界面所组成的三相非均质复合材料,研究混凝土内裂缝的形成、扩展,追溯从损伤至断裂的全过程,预测材料的破坏抗力等力学指标,建立混凝土的细观结构与宏观性能之间的关系.根据目前的计算机分析能力及当前的技术水平,细观结构层次似乎是评价混凝土复合性能更可行与更实用的方法.

宏观断裂模型属于宏观唯象学,它的研究方法是将混凝土不均质材料均质化,这给予细观研究以启示.细观研究需要借助于宏观研究的一些研究方法,而水泥砂浆的微观结构借助于唯象学的方法,以损伤力学来描述材料的细观力学性能,从而可以使我们忽略水泥砂浆的微观结构,将其看作细观均质损伤体进行模拟.细观的数值模拟借助于宏观数值方法的优点,类似于宏观断裂带模型来模拟细观的断裂过程.同时,细观的研究目的在于研究细观结构与宏观性能之间的关系,最终的着眼点是为宏观研究服务,为工程服务.可以说宏观研究与细观研究相辅相成,细观研究中包含着宏观研究的一些方法,宏观研究中应用了细观研究的破坏机理与结论,建立宏观唯象的假设,

这就是细观层次研究的思维方式与研究方法。

混凝土结构的研究从宏观到细观,虽然在科学探索的道路上迈出可贵的步伐,但混凝土细观结构的一些复杂现象,如水灰比对界面性质的影响、水泥砂浆中气泡的形成和水泥结石的形成机理等一些现象,在细观层次上还不能解释清楚,要揭示更深层次的机理,也只有进入到下一层次的研究中去,人类对混凝土物质结构及其规律的深入了解,必将对改变混凝土上一层次的性能,特别是工程宏观性能,向着按预定性能设计新材料,起到深远的影响和巨大的作用。可以预言,对于混凝土细微观、纳观层次的研究,必将会迎来一个更加灿烂的时代。

混凝土细观层次的研究已成为 21 世纪混凝土问题研究的热门课题,并由此诞生了跨混凝土材料科学、计算力学和计算机图形学的新兴学科——混凝土计算材料科学。

参考文献:

- [1] JENG Y S, SHAH S P. Two parameter fracture model for concret[J]. J Eng Mech, 1985, 111 :1227 - 1241.
- [2] HILLERBORG A. The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_f of cements[J]. Mat & Const, 1985, 18 :327 - 335.
- [3] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elemen[J]. J Cement Concrete Research, 1976, 6 :773 - 782.
- [4] BAZANT Z P, OH B H. Crack band theory for fracture of concret[J]. Mater & Const, 1983, 16 :155 - 177.
- [5] BAZANT Z P. Mechanics of distributed cracking[J]. Applied Mechanics Review, 1986, 39 :675 - 705.
- [6] CHARALAMBIDES P G, MCMEEKING R M. Finite element method simulation of crack propagation in a brittle microcracking solid[J]. Mechanics of Mater, 1987, 6 :71 - 87.
- [7] WIDMANN R. Fracture mechanics and its limits of application in the field of dam construction[J]. Eng Frac Mech, 1990, 35 :531 - 539.
- [8] LINSBAUER H N. Application of the methods of fracture mechanics for the analysis of cracking in concrete dams [J]. Eng Frac Mech, 1990, 35 :541 - 551.
- [9] WANG C, CHEN Z D. Microrotation effects in material fracture and damage[J]. Eng Frac Mech, 1991, 38 :147 - 155.
- [10] HU X Z, WITTMANN F H. An analytical method to determine the bridging stress transferred within the fracture process zone a : Application to mortar[J]. Cement and Conc Res, 1992, 12 :559 - 570.
- [11] COTTERELL B, PARAMASIVAM P, LAM K Y. Modeling the fracture of cementitious materials[J]. Mater & Stru, 1992, 35 :14 - 20.
- [12] BAZANT Z P, GAMBAROVA R G. Crack shear in concrete : crack band microplane mode[J]. J of Struct Eng, ASCE, 1984, 110 :2015 - 2035.
- [13] BAZANT Z P, OH B H. Microplane model for progressive fracture of concrete and rock[J]. J of Eng Mech, ASCE, 1985, 111 :559 - 582.
- [14] ZUBELEWICZ A, BAZANT Z P. Interface element modeling of fracture in aggregate composites[J]. J of Eng Mech, ASCE, 1986, 113 :1619 - 1630.
- [15] BAZANT Z P, TABBARA M R, KAZEMI M T, et al. Random particle model for fracture of aggregate of fiber composite[J]. J of Eng Mech, ASCE, 1990, 116 :1686 - 1705.
- [16] SCHOM H, RODE U. Numerical simulation of crack propagation from microcracking to fracture[J]. Cement & Conc Comp, 1991, 13 :87 - 94.
- [17] SCHLANGEN E, VANMIER J G M. Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concrete materials and structure[J]. Mater and Stru, 1992, 25 :534 - 542.
- [18] SCHLANGEN E, VANMIER J G M. Experimental and numerical analysis of micromechanisms of fracture of cement - based composites[J]. Cement & Conc Comp, 1992, 14 :105 - 118.
- [19] SCHLANGEN E, VANMIER J G M, ROELFSTRA P E, et al. Simulation and analysis of composite structure[J]. Mater Sci and Eng, 1984, 68 :239 - 248.
- [20] ROELFSTRA P E, VANMIER J G M. Le beton numerique[J]. Mater Const, 1985, 18 :327 - 335.
- [21] SADOUKI H, WITTMANN F H. On the analysis of the failure process in composite materials by numerical simulation[J]. Mater Sci and Eng, 1988, 104 :9 - 20.
- [22] NILSON A, MONTEIRO J M. Concrete :a three phase materia[J]. Cement & Conc Res, 1993, 23 :147 - 151.
- [23] 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, 1996, 36(1) :84 - 89.
- [24] WANG Z M, KWAN A K H, CHAN H C. Mesoscopic study of concrete I : generation of random aggregate structure and finite element mesh[J]. Computers & Structures, 1999, 70 :533 - 544.
- [25] KWAN A K H, WANG Z M, CHAN H C. Mesoscopic study of concrete II : nonlinear finite element analysis, Computers & Structures, 1999, 70 :545 - 556.
- [26] BENTZ D P, GARBOCZI, E J. Percolation of phases in a three - dimensional cement paste microstructure model

[J]. Cem Concr Res ,1991 ,21 :325 – 344.

ment – based materials[J]. Mater and Stru ,1993 ,26 :191

[27] GARBOCZI E J. Computational materials science of ce-

– 195.

Hierarchical Approaches in the Study of Concrete

WANG Zong – min¹ , ZHU Ming – xia² , ZHAO Xiao – xi¹

(1. Department of Hydraulic & Environmental Engineering ,Zhengzhou University of Technology ,Zhengzhou 450002 ,China ; 2. Department of Mathematics ,Physics & Mechanics ,Zhengzhou University of Technology ,Zhengzhou 450002 ,China)

Abstract :In this paper , the study of concrete is hierarchically classified into four levels , viz macroscopic , mesoscopic , microscopic and nanoscopic level. The research approach and applied fields of four levels are apprehensively reviewed. It is concluded that the study of mesoscopic level for concrete materials will become major topics in the 21st century. Thus , a new branch , computational material science of concrete , is born , which involves concrete material science , computational mechanics and computer graphics , etc.

Key words 立方数据 ; hierarchical approach ; computational material science