

# 混凝土中骨料-浆体界面过渡区的力学性能研究综述

王 瑶,周继凯,沈德建,王 岩

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

**摘要** :列出了国内外交界面过渡区的试验和理论分析的主要成果。对数值混凝土有限元模型中有关交界面单元的力学性能(界面厚度、界面本构关系和随机力学特性等)输入进行了探讨。通过分析目前试验、理论以及数值分析的成果,指出界面力学性能研究还有待于进行更完整、更科学的试验。

**关键词** 混凝土;骨料-浆体界面过渡区;力学性能;试验方法;数值建模;综述

中图分类号:TU528 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2008)02-0089-06

**Review of study on mechanical property of aggregate-mortar interface transition zone of concrete**//WANG Yao, ZHOU Jikai, SHEN De-jian, WANG Yan( College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China )

**Abstract** :The main results of experimental and theoretical analysis of aggregate-mortar interface transition zone( ITZ) at home and abroad were presented. The mechanical property of interface elements in the FEM model, such as the thickness of the interface, constitutive relationship, random mechanical characteristics, etc., were discussed. By analysis of test, theoretical and numerical results, it is concluded that more complete scientific experimentation is needed for further study of the mechanical property of ITZ.

**Key words** :concrete; aggregate-mortar interface transition zone; mechanical behavior; test method; numerical simulation; review

混凝土的宏观力学性能在很大程度上取决于细观组成介质(骨料、水泥浆基体及两者交界面)的性能。Lyubimov 首先在细观层次上对混凝土进行了研究,提出界面过渡区( ITZ)的概念。通常认为,混凝土在加载以前,由于水泥浆硬化过程中干缩,在较粗骨料与砂浆的交界面上已有微裂缝形成。与基体相比,界面过渡区具有低强度、低弹性模量和高渗透性等特点,从而导致混凝土性能(如强度、弹性模量、断裂性能)在很大程度上与界面过渡区的几何和物理性能有关。因此,界面过渡区的力学性能研究对混凝土破坏机理的探索以及基于细观进行有限元数值分析都很有必要。

目前交界面的研究多集中在基于微观层面对界面结构特征及其影响因素的研究、劣化机理的研究等<sup>[1]</sup>,而直接涉及交界面本身的宏观受力性能研究很少。界面过渡区的力学性能试验目前还没有标准试验方法,而且还没有看到一种合理的方法直接测试界面力学性能<sup>[2]</sup>,采用的基本都是间接方法,即通过由骨料、砂浆基体和交界面三者组合而成的“含界面试件”的试验来判断界面的宏观力学特性。试验

一般都以测强度、变形或断裂韧度为目的,对于界面的本构关系少见有涉足,交界面动态特性研究则更罕见。

本文对目前交界面的相应力学性能的试验方法、主要研究成果及交界面材料性能的数值模拟分别进行概述,以期对混凝土破坏机理分析以及基于细观研究混凝土起到一定的参考作用。

## 1 骨料-浆体交界面的强度特性

### 1.1 界面强度试验研究方法

根据在混凝土中的作用,一般主要分析界面抗拉黏结强度和界面抗剪黏结强度。与混凝土试验方法类似,文献资料中拉伸强度试验通常可分为轴拉或劈拉两类,不同的主要是“含界面试件”制作较复杂。

轴心受拉(图 1)能够直接测量黏结抗拉强度,但试验难度较大。图 1(a)所示的为文献[3]中采用的试件形式,这种方法需要设有中心预埋拉杆的卧式棱柱模具,岩石切割较困难。图 1(b)为河海大学结构实验室目前正在进行的界面静、动态抗拉强度试验采用的形式,试件为圆柱形,仅在一端浇筑砂浆

(若两端同时浇筑,立式浇筑时会有空气进入而使一端砂浆与骨料接触不紧密)。骨料通过取芯得到,浇筑砂浆侧采用自然断面(更能真实反映界面特征),试件两端粘贴中心有螺孔的钢板。通过 MTS 伺服试验机加载,用位移控制加载还可以得到‘含界面试件’的静、动态轴拉应力变形全曲线。

劈裂拉伸试验是测量界面抗拉强度的间接试验方法,文献[4]采用了此法,如图1(c)所示。此法要求垫条与界面完全对中,若采用自然断面则很难准确计算轴拉强度,也无法直接得到拉应力与拉应变的关系。

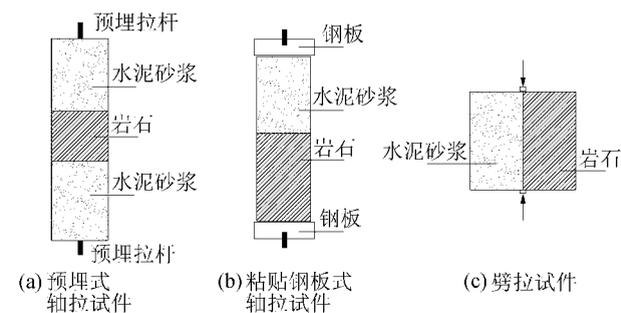


图1 界面拉伸强度试验试件

黏结抗剪强度试验一般采用“推出试验”。图2(a)所示的为 Caliskar<sup>[5]</sup>测试硅粉对界面黏结抗剪强度的影响所采用的试件和装置,圆柱形骨料放置在砂浆中心,加压使骨料-砂浆界面发生黏结破坏,从而推出骨料;类似的还有加工成棱柱体试件的,如图2(b)所示。这类试验同样也存在骨料芯样侧表面太光滑而不够真实的问题。文献[6-7]还提到了压剪试验方法,如图2(c)所示,可以得到压力对抗剪强度的影响。

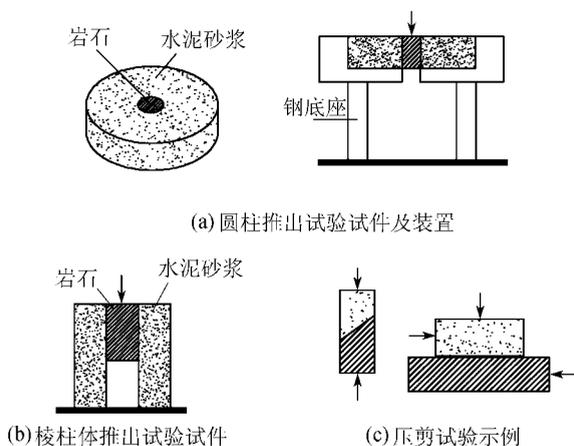


图2 界面剪切强度试验试件

## 1.2 主要研究成果

由于影响界面强度的因素很多,试验方法和试件加工条件也不统一,因此各学者的试验结果相差较大。但通常都认为界面黏结强度低于砂浆基体的黏结强度,这是由于初始的微裂隙、骨料与砂浆基体

的弹性模量和收缩不同引起的应力集中而造成的<sup>[8]</sup>。

文献[9]中提到界面的黏结强度与硬化水泥浆体的抗拉强度之比约为0.41~0.91。Rao等<sup>[10]</sup>则根据试验结果提出:砂浆和粗糙骨料界面的抗拉黏结强度约为砂浆抗拉强度的1/3,裂缝主要沿界面扩展,水泥与砂的比例越小,强度越低;界面抗剪黏结强度随骨料粗糙度增加而增加,而且界面倾斜角度越大则其抗剪强度越大。文献[11]通过劈裂试验研究了骨料的表面形状、刚度、尺寸和水灰比对界面黏结强度的影响,结果表明:对于低水灰比的混凝土,骨料特点(高弹性模量、光滑表面)对界面强度和破坏过程有显著的影响;采用低水灰比和大骨料的混凝土,其临界应力降低,即黏结特性降低。Caliskar<sup>[5]</sup>通过推出试验得出结论:界面强度与界面厚度和硅粉数量有关,由于硅粉的稠化,界面越薄黏结强度越高,黏结强度随骨料粒径的减小而增大,尺寸效应符合 Weibull 分布。宋春生<sup>[12]</sup>认为水泥石在骨料表面凹处的渗入增加了界面上骨料与水泥石之间的剪切强度。

需要注意的是在测试界面黏结强度的时候采用的都是模型试件,因此得到的界面结构和性能与混凝土中的实际情况不同。对于界面强度对混凝土宏观特性的影响,很多学者进行了试验和数值研究,但结论不尽相同。有些认为界面强度对混凝土宏观受力性能影响不大,而有些则认为影响较显著<sup>[13]</sup>。Mohamed等<sup>[14]</sup>通过有限元数值模拟还得出界面强度与基质强度之比对混凝土材料特性有很大关系的结论,若比值大于0.6则裂缝不会出现在界面,而是在基质,若比值大于0.8则骨料强度对混凝土起重要的作用。

## 2 骨料-浆体交界面的弹性模量研究

直接测试界面的刚度一般采用显微硬度法<sup>[15]</sup>,即先将试件表面抛光,然后施加荷载,测试压痕的尺寸,再根据压头形状计算受压区的平均压力。通过显微硬度测试技术发现在靠近骨料表面处硬度最小,向基体发展则硬度逐渐增加,呈梯度变化,到距离骨料表面100 $\mu\text{m}$ 以后则硬度为常数。但该方法需达到微米量级,难以与宏观意义的力学概念相联系。

目前河海大学结构实验室正在进行界面轴拉试验,通过对等效应力应变关系的研究,表明‘含界面试件’的弹性模量约为砂浆弹性模量的1/2,由于试验影响因素较多,现仍在继续探索试验。这种方法虽未测出界面本身的弹性模量,但也充分说明界面过渡区性能与基体有较大差别。

除上述试验方法外,学者们大多结合理论采用模型试验研究 ITZ 弹性模量。最常用的是间接刚度法<sup>[16-17]</sup>,通常的思路是假设混凝土为三相串联或并联等模型,根据砂浆和骨料的弹性模量与泊松比,以及复合材料试件的弹性模量,并假定界面厚度,用反算的方法推算出界面的弹性模量。Hashir<sup>[18]</sup>假定砂浆基体中的骨料是球形的,外周是球壳形界面层,根据广义自一致性原理估计有效弹性模量,得出界面模量随骨料含量增加而增加的结论。唐国宝<sup>[19]</sup>采用普适有效介质方程,无需材料的泊松比,只要已知混凝土、粗集料、砂浆的弹性模量以及粗集料的体积率,在假定某一界面厚度的条件下就可以反算界面过渡区的弹性模量。Yang<sup>[20]</sup>采用 Double Inclusion 方法与 Moritanaka 理论,结合三相模型预测了 ITZ 的平均弹性模量,结果发现:当界面厚度为 20 μm 时,ITZ 的弹性模量为基体弹性模量的 20%~40%;当界面厚度为 40 μm 时,ITZ 平均弹性模量为基体弹性模量的 50%~70%。文献<sup>[21]</sup>根据 Teddy Hirsch 的实验资料输入组成材料的力学参数,用 Ansys 有限元软件进行界面弹性模量的粗略估算,结果约为砂浆弹性模量的 80%。

### 3 骨料-浆体交界面的断裂韧性研究

#### 3.1 试验研究方法

Tan<sup>[22]</sup>通过大量试验得出结论:对于同一个骨料-浆体界面,其 II 型断裂能通常比 I 型断裂能高一个数量级,因此 I 型断裂在混凝土破坏过程中是更为关键的。目前的试验研究主要针对 I 型断裂。

与混凝土破坏试验类似,骨料-浆体交界面的断裂试验通常采用三点弯曲梁,可带切口或无切口(因为界面一般最薄弱,无需切口一般也断在此处)进行界面 I 型断裂的断裂参数的研究。图 3 为对称型的试件<sup>[23]</sup>,骨料薄片放在中间,两端浇筑砂浆;图 4(a)为不对称型的试件<sup>[24-25]</sup>,一端骨料一端砂浆。改变荷载和支座的位置亦可进行复合型断裂参数的研究,如图 4(b)所示。不对称界面试验的试件制作虽

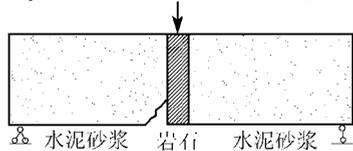


图 3 对称型三点弯曲断裂试验试件

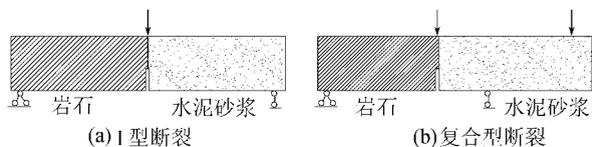


图 4 不对称型断裂试验试件

然较容易,但由于左右两部分质量、性能不同,所以受力不对称。也有文献采用带切口楔入劈裂的试件<sup>[22-26]</sup>,如图 5 所示。

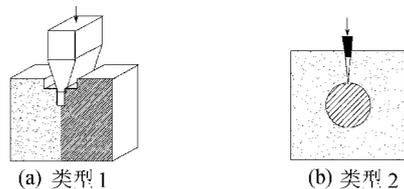


图 5 楔入劈裂试件

普遍存在的问题是:骨料的表面只用砂纸打磨表面,尽量模拟表面的粗糙程度,无法模拟自然断裂的表面,实际混凝土中浆体泌水会在集料下表面形成水囊,而试验的表面是垂直的,无法模拟真实的粗骨料-水泥砂浆的界面。断裂也有可能出现在骨料或砂浆内,Odler 等<sup>[27]</sup>通过不同骨料不同水泥的界面的断裂试验,认为界面区的断裂形式取决于界面与砂浆或骨料的强度(或刚度)相对比值,而不是绝对值。

#### 3.2 主要研究成果

多数研究者都得出了界面断裂能和断裂韧性低于砂浆基体的结论。Tschegg<sup>[28]</sup>采用劈裂破坏试验研究了砂岩和石灰石与砂浆界面的断裂能和断裂韧性,结果比纯砂浆低得多,并且得出界面性能在断裂面面积为 22.5~85 cm<sup>2</sup> 范围时的尺寸效应不明显的结论。Wong<sup>[29]</sup>采用对称型三弯点断裂试验得出界面的弯曲抗拉强度仅为砂浆的 1/3,而界面断裂能仅为砂浆的 1/10 的结论。Rao 等<sup>[10]</sup>根据双边切口轴拉断裂试验也得出界面的断裂韧性比砂浆和骨料显著低的结论。而 Alexander 等<sup>[30]</sup>的试验结果表明集料与浆体间界面断裂韧性及断裂能未必比净浆的低,指出:净浆与安山岩集料之间的界面断裂能要比净浆自身的断裂能高,而净浆与白云石集料之间的界面断裂能比净浆的低。较多的文献对水灰比、外加剂<sup>[23]</sup>、集料品种以及养护龄期等多种因素对断裂性能的影响进行了研究,这里不赘述。

除试验外,通常也采用理论模型研究界面断裂力学性能。李哲<sup>[25]</sup>用杂交元法计算双材料界面裂缝试件的应力强度因子,采用梁型试件研究岩石与砂浆界面裂缝的断裂准则,指出双材料界面裂缝的断裂问题与单材料不同之处是存在剪切断裂。此外,在单材料裂缝问题中通常  $K_{IC} > K_{IIc}$ ,而在双材料界面裂缝问题中  $K_{IIc} > K_{IC}$ ,这与 Tschegg<sup>[28]</sup>的试验结果相同。王兆忠等<sup>[24]</sup>对试验混凝土的断裂面进行处理,采集断裂面的数字图像并进行分析,重新构成断裂面,通过图像求得断裂面的分形维数和真实面积,用于分析断裂能。在分析混凝土断裂能时,

对水泥砂浆、骨料、水泥砂浆与骨料的黏结界面这3种不同性质的部分分别进行研究,汇总结果得到真实的断裂能,得出混凝土强度来源的3个方面中只要任意一个环节薄弱均会导致混凝土整体性能下降的结论。邢锋等<sup>[31]</sup>在已有试验数据和断裂准则的基础上,通过分析和计算表明,对数正态分布模型能够较好地反映粗骨料硬化水泥浆体界面裂缝韧性 $K_{IC}$ 的分布规律。

总之,上述试验采用的都是“含界面试件”,而且试件中砂浆基体的材料配比很难与实际混凝土中的砂浆完全一致,因此目前精确地对混凝土进行细观分析并未达到。文献<sup>[32-33]</sup>提出:由于骨料的亲水性和水泥浆离析的水分积蓄在骨料的下表面,骨料表面砂浆的水灰比约为水泥浆的3倍,也就是说砂浆基体的水灰比比混凝土自身的水灰比低。文献<sup>[24]</sup>和文献<sup>[34]</sup>曾采用了混凝土的湿筛砂浆,但也不能完全反映真实基体。另外,界面试件的破坏模式还与很多因素有关,如砂浆基体外加剂的成分、骨料的品种和表面粗糙度、砂浆和骨料与界面的强度及刚度的相对比值、浇筑工艺、养护条件、加载速率、试件尺寸等。已有很多学者涉及了这些研究,但系统进行界面的力学特性研究还需做大量的工作。

## 4 交界面材料性能的数值模拟

材料细观力学通常将混凝土看作由粗骨料、硬化水泥胶体以及两者之间的界面黏结带组成的三相非均质复合材料。三维细观模型的建立也已成为热点。如何建立界面的数值模型才能真实反映3种材料之间的关系很关键。这里仅列举近期文献中常见的联结方式、界面厚度选取、界面的本构和破坏准则、界面力学随机特性。

### 4.1 交界面的联结方式

交界面的联结方式目前有两种:一种是水泥砂浆基体与粗骨料间通过一定厚度的且具有自身材料特性的薄层相连。当裂缝由基体发展到结合层后,材料的弹性模量、强度等参数均取结合层的材料特性;另一种是不考虑结合层的厚度,直接采用弹簧将粗骨料与水泥砂浆基体联结在一起,由弹簧的材料参数来模拟结合面的特性。由于交界面的强度参数较其变形参数容易取得,因而此法可在一定程度上简化细观数值模拟中交界面力学性能的输出。目前主要是采用前者。图(a)(b)分别为采用球形骨料有厚度界面<sup>[14]</sup>和不规则凸形骨料无厚度界面<sup>[35]</sup>随机分布时的模型。

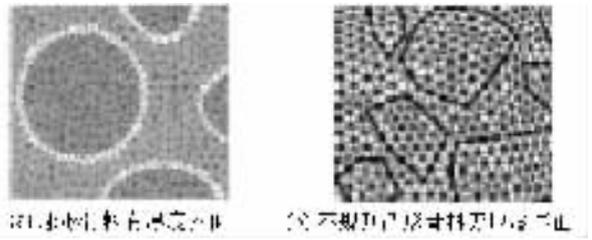


图6 数值混凝土模型

### 4.2 界面的厚度

影响界面厚度的因素很多,而且在其厚度范围内ITZ的性质是在渐变的。Lyubimove等用显微硬度测试技术发现,靠近骨料表面处砂浆硬度最小,向基体发展其硬度逐渐增加,呈梯度变化,到距离骨料表面 $100\mu\text{m}$ 以后则硬度为常数。此后,更多的学者开始利用现代测试技术如SEM(电子扫描显微镜)等对硬化浆体与集料界面的组成、结构及成因进行了进一步的研究,Bentur<sup>[36]</sup>的研究结果表明,在混凝土中的集料与浆体之间存在过渡区,区域内的孔隙、微裂缝和氢氧化钙晶体含量比在水泥石内多,且过渡区的厚度随着水化过程进行而逐渐减小,从早期的 $100\mu\text{m}$ 厚减至约 $15\mu\text{m}$ 厚。

在数值模型中界面通常被简化为均匀材料。研究表明:界面厚度增加导致ITZ体积分数增加,进而会导致混凝土有效弹性模量降低<sup>[37]</sup>。但目前基于细观研究混凝土时,为考虑计算量问题,模拟ITZ性能的界面单元的尺度取值一般比实际情况要大(通常取 $0.05\sim 0.5\text{mm}$ ),而且混凝土中集料的体积分数也可能比实际情况要小得多,这是在分析文献中采用有限元方法模拟ITZ性能对混凝土性能影响的结果时需要注意的问题。目前陈厚群等<sup>[38]</sup>正采用并行有限元计算来解决计算量的问题。

### 4.3 界面的本构关系和破坏准则

细观组成材料的本构关系和破坏准则一般都选用了较简单的形式。主要有两类:一类认为组成材料是弹脆性的,另一类则考虑了细观组成材料的非线性。

前者通常认为混凝土是一种准脆性材料,承载后在宏观上呈现应力-应变关系曲线的非线性通常被认为是因微裂纹萌生和扩展,而不是由于其塑性变形引起的。唐春安等<sup>[39]</sup>根据混凝土的声发射特性,认为将各组成介质包括界面单元的破裂性质假定为弹脆性行为是合理的。提出按照弹性损伤本构关系描述细观单元的损伤演化,按最大拉应力(或者拉应变准则)和摩尔库仑准则分别作为细观单元发生拉伸损伤和剪切损伤的阈值条件,同时以最大拉伸应变准则优先。文献<sup>[34]</sup>对混凝土进行三维细观模拟,假定各组成介质均可视为力学性质不同的弹脆性材料,采用最

大主应力准则。文献 40 则以简单的拉破坏准则,基于弹性损伤本构关系采用双折线损伤演化模型描述混凝土细观各相弹性损伤退化。

后者在计算模型中考虑了材料的非线性。任朝军等<sup>[41]</sup>模拟三级配混凝土单轴拉压下的开裂过程时,界面在单轴受拉时采用非线性本构模型,根据最大拉应力准则,并用软化模量考虑了材料的软化段;单轴受压时采用线性摩尔库伦准则。得出结论:随着界面强度的提高,混凝土的极限承载能力逐渐提高,随着界面软化模量的增大,混凝土应力-应变关系曲线下降段逐渐变陡,但下降段对软化模量的变化不是太敏感;界面的黏聚力对混凝土应力-应变关系曲线的塑性段有一定的影响,黏聚力越大,屈服段的长度越长。杜成斌等<sup>[42]</sup>数值模拟三级配混凝土弯拉梁在静、动载下的开裂过程时,骨料、砂浆及其黏结带采用的是非线性本构模型,特点是低拉伸开裂,受压时会产生塑性应变;当压缩应变达到极限压应变时,单元被压碎。

不同的模型所计算的结果自然有一定差异,各因素影响程度还需继续探讨,更重要的是不仅要将混凝土宏观计算结果与试验结果对比,还要有充足的组成材料力学性能的试验依据,才能找出结果差异的源头。目前对界面性能的试验研究还很不充分,这也阻碍了数值研究的发展。

#### 4.4 界面力学参数的随机分布特性

实际混凝土中的各相材料特性是随机分布的,因此在数值模拟时也应尽可能符合实际情况,很多文献已考虑了随机力学模型。经对比得出结论:若考虑各相力学参数在计算域内的随机特性,试件可能在更低的荷载时就有单元破坏。

唐春安等<sup>[39]</sup>指出混凝土的宏观非线性特征与细观非均匀性有直接联系,该模型数值实验分析中最常见的各组分材料性质是按照给定的 Weibull 分布赋值的<sup>[43-44]</sup>,黏结带的参数(包括弹性模量和强度)的均值与骨料的比值用  $r$  来表示,结果表明不同参数引起的裂缝扩展形态是不同的。文献 45 则认为混凝土细观各相单元的抗拉强度和弹性模量是遵循对数正态分布的随机参数。通过对三分点梁跨中界面单元材料参数的变异性进行数值模拟,结果表明,混凝土细观结构的不均匀性对动弯拉强度产生重要影响,即混凝土材料离散性越大,动强度增长系数越高。因此,组成材料各参量的统计特性对混凝土宏观特性的影响也是不可忽略的。

## 5 结 语

界面过渡区的研究对分析混凝土的破坏机理至

关重要。如果界面最薄弱,那么是因为它本身材料特性方面的问题,还是由于存在初始微裂缝、两种材料的不同收缩或是由于两种不同弹性模量材料引起的高应力集中的问题,以及界面性能对混凝土宏观特性影响程度大小等,都值得探讨。只有清楚界面自身的力学性能,才有助于了解界面性能对混凝土宏观力学特性的影响方式和程度,以至于更有效地改善混凝土的性能。

细观材料的本构模型及模型参数的选取都基于有关试验结果,而界面的强度、弹性模量、泊松比还没有完整的资料,并且不同砂浆、不同骨料的界面性质也不相同<sup>[40]</sup>,因此还有待于进行更完整、更科学的试验。

由于材料交界面尺寸较小,对交界面性能的试验设备和量测方法的要求较高,要得到交界面的完整而准确的力学特性资料是比较困难的。目前还没有标准的试验方法,试验条件和试件加工情况都不统一,因此结果也不完全一致,所以有必要继续探求这种交界面的力学性能试验研究方法,并同时考虑加载速度(或应变率)、尺寸效应、配合比、龄期等影响因素。通过合理的试验和理论分析得到交界面的基本强度、变形参数以及合理精确的本构关系,以用于细观力学的分析。

#### 参考文献:

- [1] 陈惠苏,孙伟,STROEVEN P. 水泥基复合材料集料与浆体界面研究综述-界面微观结构的形成、劣化机理及其影响因素[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(1):71-81.
- [2] 陈惠苏. 水泥基复合材料集料-浆体界面过渡区微观结构的计算机模拟及相关问题研究[D]. 南京:东南大学, 2004.
- [3] TASONG W A. Aggregate-cement paste interface Part I: Influence of aggregate geochemistry[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(7):1019-1025.
- [4] 喻乐华. 混凝土集料界面与强度关系的界面理论分析[J]. 华东交通大学学报, 1999, 16(4):14-19.
- [5] CALISKAN S. Aggregate/mortar interface: influence of silica fume at the micro-and macro-level[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 33(4):557-564.
- [6] Van MIER J G M, VERVUURT A. Test methods and modelling for determining the mechanical properties of the ITZ in concrete [C]//ALEXANDER M G, ARLIGUIE G, BALLIVY G. Engineering and Transport Properties of the Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites. Cedex, ENS-Cachan: RILEM Publications SARL, 1999:19-52.
- [7] 田砾. 钢纤维混凝土细观结构及力学性能的数值模拟[D]. 山东:青岛建筑工程学院, 2000.
- [8] Van MIER J G M. Fracture processes of concrete[J]. FL, USA: CRC Press, 1997:52.

- [9] 吴科如. 混凝土破坏机理概论(下)[J]. 混凝土与水泥制品, 1983(2): 2-13.
- [10] RAO G A, PRASAD B K R. Influence of the roughness of aggregate surface on the interface bond strength[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(2): 253-257.
- [11] AKCAOGLU T, TOKYAY M. Effect of coarse aggregate size on interfacial cracking under uniaxial compression[J]. Materials Letters, 2002, 57: 828-833.
- [12] 宋春生. 混凝土强度机理浅析[J]. 山西建筑, 2005, 31(22): 143-144.
- [13] 陈惠芬, 孙伟. 水泥基复合材料界面对材料宏观性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2005, 18(1): 51-62.
- [14] MOHAMED A R, HANSEN W. Micromechanical modeling of crack-aggregate interaction in concrete material[J]. Cement & Concrete Composites, 1999, 21: 349-359.
- [15] IGARASHI S, BENTURE A, MINDESS S. Microhardness testing of cementitious materials[J]. Advn Cem Bas Mat, 1996, 4: 48-57.
- [16] ALEXANDER M G. Two experimental techques for studying the effects of the interfacial zone between cement paste and rock[J]. Cement and Concrete Research, 1993, 23(3): 567-575.
- [17] LUTZ M P, MONTEIRO P J M, ZIMMERMAN R W. Inhomogeneous interfacial transition zone model for the bulk modulus of mortar[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(7): 1117-1122.
- [18] HASHIN Z. An inverse method to determine the elastic properties of the interphase between the aggregate and the cement paste[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(8): 1291-1300.
- [19] 唐国宝. 水泥浆体-集料界面过渡区渗流结构及其对砂浆和混凝土性能的影响[D]. 上海: 同济大学材料学院, 2000.
- [20] YANG Cheng-chen. Effect of the transition zone on the elastic moduli of mortar[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(5): 727-736.
- [21] 展辰辉. 混凝土组成材料动力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [22] TAN D M. Cracks at mortar-stone interfaces[J]. Acta Metall, Mater, 1995, 43(10): 3701-3707.
- [23] LEE W K W. The interface between natural siliceous aggregates and geopolymers[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(2): 195-206.
- [24] 王兆忠, 周迎新, 陈凤山. 混凝土断裂能的研究[J]. 水运工程, 2003(9): 34-40.
- [25] 李哲. 岩石与砂浆界面裂缝断裂准则的研究[J]. 大连理工大学学报, 1997, 37(S1): 57-60.
- [26] BUYUKOZTURK O, HEARING B. Crack propagation in concrete composites influenced by interface fracture parameters[J]. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35(31/32): 4055-4066.
- [27] ODLER I, ZURZ A. Structure and bond strength of cement aggregate interfaces[C]//Bonding in Cementitious Composites (MRS Vol 114). Pittsburgh: Materials Research Society, 1988: 21-27.
- [28] TSCHEGG E K. fracture mechanical behavior of aggregate-cement matrix interfaces[J]. Materials in Civil Engineering, 1995, 7(4): 199-203.
- [29] WONG Yu-long. Properties of fly ash-modified cement mortar-aggregate interfaces[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(12): 1905-1913.
- [30] ALEXANDER M G, MINDESS S. Properties of paste rock interfaces and their influence on composite behavior[J]. Material Structure, 1995, 28(9): 497-506.
- [31] 邢锋, 郭向勇, 冷发光, 等. 混凝土中骨-浆界面断裂韧度的分布特性[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(7): 43-45.
- [32] NADEAU J C. Water-cement ratio gradients in mortars and corresponding effective elastic properties[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(3): 481-490.
- [33] LIAO Kuo-Yu. A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(6): 977-989.
- [34] 党发宁, 韩文涛, 陈厚群. 混凝土单轴压缩破坏过程的三维细观数值模拟[J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(2): 113-118.
- [35] WANG Zhi-ming, KWAN A K H, CHAN H C. Mesoscopic study of concrete I: generation of random aggregate structure and finite element mesh[J]. Computers and Structures, 1999, 70: 533-544.
- [36] BENTUR A. Microstructure interfacial effects and micromechanics of cementitious composites[J]. Adv Cementitious Mater Ceram Trans, 1990, 16: 523-549.
- [37] NADEAU J C. A multiscale model for effective moduli of concrete incorporating IIZ water-cement ratio gradients, aggregate size distributions, and entrapped voids[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(1): 103-113.
- [38] 陈厚群, 吴胜兴, 马怀发, 等. 全级配大坝混凝土动态性能研究[C]//火箭软件有限公司. 火箭用户大会论文集. 北京: 火箭软件有限公司, 2006: 24-42.
- [39] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂: 数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 29.
- [40] 马怀发, 陈厚群. 混凝土试件细观结构的数值模拟[J]. 水利学报, 2004(10): 27-35.
- [41] 任朝军, 杜成斌. 三级配混凝土单轴破坏的细观数值模拟[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(2): 177-180.
- [42] 杜成斌, 尚岩. 三级配混凝土静、动载下力学细观破坏机制研究[J]. 工程力学, 2006, 23(3): 141-146.
- [43] 朱万成, 唐春安. 混凝土细观力学性质对宏观断裂过程影响的数值试验[J]. 三峡大学学报, 2004, 26(1): 22-26.
- [44] 张子明, 赵吉坤. 混凝土单轴荷载下细观损伤破坏的数值模拟[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 422-425.
- [45] 马怀发, 陈厚群. 预静载作用下混凝土梁的动弯拉强度[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(3): 168-178.

(收稿日期 2007-04-12 编辑: 高建群)