

混凝土 I-型细观断裂模型及其在材料层次尺寸效应中的应用

李 冬^{1,2} 金 浏³ 杜修力³ 刘晶波¹ 段文会²

(1. 清华大学, 北京 100084; 2. 莫纳什大学, 澳大利亚维多利亚州墨尔本市 3800;
3. 北京工业大学城市减灾与防灾防护教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 混凝土材料的断裂破坏本质上是内部微细裂纹在荷载作用下不断萌生、扩展以及贯通的结果, 断裂裂缝在细观层次上则是由砂浆裂缝、界面裂缝以及骨料裂缝 3 部分组成。文章基于细观力学和断裂力学基本理论, 建立一类能够同时考虑细观裂缝在混凝土材料内部扩展过程中绕过骨料和穿透骨料发展的混凝土 I-型细观断裂模型。与已有试验数据对比表明, 文章模型能够有效预测混凝土断裂能等宏观力学参数随细观组分力学性能的变化规律。进而, 基于建立的细观断裂模型, 初步分析混凝土材料层次的强度尺寸效应, 结果表明: 当砂浆力学性能确定时, 混凝土材料的名义强度与骨料强度和界面强度正相关; 界面的力学性能能够显著影响混凝土材料名义强度等宏观力学参数随骨料尺寸的变化规律; 高性能混凝土强度随骨料尺寸增大而增大, 普通性能混凝土强度随骨料尺寸增大而减小。文章模型分析方法以期为基于性能设计的混凝土配合比研究奠定理论基础。

关键词: 混凝土; 细观裂缝; 扩展路径准则; 断裂力学; 细观力学; 尺寸效应

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2020)02-0048-14

Concrete mode-I mesoscale fracture model and its application in analysis of size effect at material level

Li Dong^{1,2} Jin Liu³ Du Xiuli³ Liu Jingbo¹ Duan Wenhui²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Monash University, Melbourne 3800, VIC, Australia;

3. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The fracture failure of concrete is essentially caused by the propagation and coalescence of micro-cracks inside the material under loading. At mesoscale, the fracture crack could be regarded as the combination of mortar crack, bond crack and aggregate crack. This paper establishes a mode-I mesoscale fracture model for concrete which could take both intergranular and transgranular crack pattern into consideration based on mesomechanics and fracture mechanics. The proposed model could efficiently predict the variation of concrete fracture energy with properties of meso components based on existed test data. In addition, the size effect at material level of nominal strength of concrete is preliminarily analyzed based on the proposed mesoscale fracture model. The results show that, for a determined mortar matrix, the nominal strength of concrete has positive correlation with that of aggregate and matrix-aggregate bond; mechanical properties of matrix-aggregate bond can significantly affect the nominal strength of concrete and other macroscopic mechanical parameters with aggregate size; for high-performance concrete, the nominal strength increases with increasing aggregate size, while for normal-performance concrete, the nominal strength decreases with increasing aggregate size. The model analysis method proposed in this paper can lay a theoretical foundation for the research of concrete mix proportion based on performance design.

Keywords: concrete; mesoscopic crack; crack path criterion; fracture mechanics; mesomechanics; size effect

E-mail: kinglew2007@163.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51708007, 51822801)、国家重点研发计划专项 (2018YFC1504302)

作者简介: 李冬, 博士, 助理研究员

通讯作者: 金浏, 博士, 教授

收稿日期: 2019-07-16

引 言

混凝土工程结构的裂缝问题是重要的科学问题。混凝土是由骨料颗粒、水泥砂浆以及界面过渡区等组成的多相复合材料,其断裂破坏本质上是内部微细裂纹在荷载作用下不断萌生、扩展以及贯通的结果。基于混凝土中宏观裂缝发生失稳扩展前,裂缝尖端存在微裂纹区这一认识,各国学者提出了众多混凝土宏观断裂模型,如虚拟裂缝模型^[1]、裂缝带模型^[2]、两参数模型^[3]、等效裂缝模型^[4]、尺寸效应模型^[5]、双 K 断裂模型^[6-8] 以及边界效应模型^[9-11] 等。在已知材料各项力学参数(名义强度 σ_{Nu} 、断裂能 G_f 等)情况下,这些断裂模型在宏观层面上均能够较好地预测混凝土材料的断裂破坏行为,但在分析混凝土断裂破坏行为过程中未能充分考虑骨料夹杂等因素导致的裂缝扩展路径的曲折效应,以及裂缝扩展路径的曲折效应对混凝土宏观力学性能的影响,如单轴拉伸加载条件下,混凝土裂缝常被简化为垂直于加载方向的直线(2D)或平面(3D),而实际上断裂裂缝(面)随着材料组成的不同亦展现出不同程度的曲折度(2D)或粗糙度(3D)。当混凝土材料配合比发生变化时,材料各项力学参数亦发生变化,因此在使用宏观断裂模型时需要重新测定。此外,混凝土裂缝扩展路径的曲折效应也会受到材料配合比的影响,进而影响其宏观力学参数的确定。

混凝土的多相复合材料组成特征,决定了其内部力学性能分布的随机性和不确定性,细观方法是解决混凝土裂缝萌生、扩展路径分析和断裂性能研究的有效手段。鉴于此,本文基于前期研究工作基础^[12-14],考虑从细观尺度入手,建立一类能够连接混凝土材料微观特性和宏观力学性能的断裂破坏分析模型。一方面,该细观断裂模型能够为诸如文献[1-11]建立的众多宏观断裂模型提供名义强度 σ_{Nu} 、断裂能 G_f 等力学参数,用于混凝土宏观断裂破坏行为的研究;另一方面,应用该模型研究混凝土材料层次的尺寸效应行为,如骨料级配、粒径、粗糙度等以及砂浆、界面的力学特性等对其宏观力学参数的影响,为基于性能设计的混凝土配合比研究奠定理论基础。

1 混凝土 I-型细观断裂模型

自 1985 年 Roelfstra 等^[15]首次将细观的概念引入混凝土力学性能的研究中以来,国际上一些学者已经开始从细观层次分析混凝土的断裂问题,研究混

凝土材料在外荷载作用下裂纹萌生、扩展以及贯通而导致的由细观层次到宏观层次的损伤和断裂过程,国内则只有少数学者开展了基于细观层次的混凝土断裂力学性能的研究^[16]。水泥基复合材料中骨料夹杂的存在能够显著影响其宏观力学性能:Özturan 等^[17]讨论了骨料种类对不同强度混凝土力学性能的影响;Wu 等^[18]研究了混凝土裂缝扩展过程中粗骨料的破裂概率;阮征等^[19]则从细观层次分析了骨料对混凝土强度的影响机理。此外,界面过渡区的力学性能也是影响混凝土宏观力学性能的重要因素:Buyukozturk 等^[20]分析了界面断裂参数对混凝土裂缝扩展行为的影响;Xiao^[21]和 Zhang^[22]等则分别探讨了界面过渡区对混凝土应力-应变关系和断裂破坏行为的影响。实际上,混凝土材料的宏观力学性能与裂缝扩展行为密切相关,当混凝土内逐渐发展的裂缝遇到骨料时,其扩展路径通常是沿界面绕过骨料发展或穿透骨料发展,不同的扩展路径所耗散的能量不同,从而导致混凝土宏观力学性能亦不同:张君等^[23]从宏观尺度出发给出了弯曲荷载作用下混凝土内裂纹沿骨料界面或穿透骨料发展的条件;国外学者则进行了一系列细观模型混凝土的断裂试验^[24-27],全面分析了骨料、砂浆和界面强度等细观组分对混凝土断裂破坏行为以及宏观力学性能的影响。这些研究工作均促进了从细观层次分析混凝土材料断裂破坏问题的研究,为后续建立更为精细的混凝土细观断裂模型奠定了基础。

在细观层次上,通常认为混凝土是由砂浆、界面以及骨料等具有不同力学性能的介质组成的多相复合材料,因此,在外荷载作用下混凝土的断裂裂缝主要由砂浆裂缝、界面裂缝以及骨料裂缝 3 部分组合而成。本文在前期研究工作中,基于单轴拉伸加载条件下强骨料夹杂混凝土中细观裂缝扩展路径的形态学特征(裂缝扩展过程中遇到骨料后选择绕过骨料继续扩展的情况),并结合细观力学和断裂力学基本理论,建立了一类混凝土 I-型细观断裂模型^[12-14]。本文将在既有模型基础上,扩展考虑弱骨料夹杂的情况,针对混凝土中细观裂缝遇到骨料后或选择绕过骨料扩展或选择穿透骨料扩展的断裂破坏模式,建立一套细观裂缝扩展路径准则,对裂缝在混凝土材料内部的扩展行为及其对混凝土宏观力学性能的影响规律进行研究。

1.1 细观模型及本构关系

图 1 给出了本文基于前期研究工作^[12-14]扩展建立的混凝土 I-型细观断裂模型及各细观组分本构关系。

图 1(a)为本文建立的混凝土 I-型细观断裂模型。单轴拉伸加载条件下,混凝土材料内部的砂浆裂缝

扩展至骨料边缘时,将根据各细观组分力学性能之间的相对关系,或形成界面裂缝绕过骨料发展(路径1)或形成骨料裂缝穿透骨料发展(路径2); l_{agg} 、 l_{ITZ} 和 l_{mo} 分别为骨料裂缝长度、界面裂缝长度和砂浆裂缝长度; r_i 为骨料的粒径(这里首先假定为圆形骨料,异形骨料的情况可在圆形骨料基础上进行演化); ϑ 为界面裂缝对应的圆心角; l_{ITZ}^* 为界面裂缝圆弧对应的弦长,并且在本文模型假定情况下,有 $l_{agg}=l_{ITZ}^*$ 。根据文献[12-14],有 $l_{ITZ}=2r_i\pi\eta$ 、 $l_{ITZ}^*=2r_i\sin(\vartheta/2)=2r_i\sin(\pi\eta)$,其中 η 为界面裂缝指数,且 $\eta\in[0,0.5]$ 。

图1(b)为各细观组分本构关系。 σ_{agg} 、 $\varepsilon_{u,agg}$ 和 $E_{0,agg}$ 分别为骨料的极限应力、极限应变和弹性模量; σ_{mo} 、 $\varepsilon_{p,mo}$ 、 $\varepsilon_{u,mo}$ 和 $E_{0,mo}$ 分别为砂浆的极限应力、峰值应变、极限应变和弹性模量; σ_{ITZ} 、 $\varepsilon_{u,ITZ}$ 、 $E_{0,ITZ}$ 分别为界面的极限应力、极限应变和弹性模量。一般情况下,混凝土中骨料的强度和弹性模量均大于砂浆和界面,而变形能力则小于砂浆和界面,骨料多为天然石材(卵石骨料等)或经过有限人工处理的天然石材(碎石骨料等),其破坏多属于脆性破坏,故假设其应力-应变关系曲线无软化段,如图1(b)中曲线OAC或OBC所示。这里需要说明的是,本文模型主要讨论天然岩石类骨料力学性能对混凝土宏观力学性能的影响,对于特殊情况下采用极弱骨料(轻质骨料)的情况,实际上骨料本身已成为混凝土材料中的薄弱环节,因此可根据其对混凝土宏观力学性能贡献的大小进行讨论,如文献[24-27]中制作的简单混凝土模型即采用了强度和弹性模量均大幅小于砂浆基质的弱骨料以方便获得显著的试验结果。砂浆和界面多属于准脆性破坏,其通过标准试件实测得到的宏观平均的应力-应变关系曲线存在软化段,如图1(b)中曲线OEI和ODH所示。这里,将界面看作含初始缺陷(裂隙、孔洞等)较多的砂浆或砂浆与骨料表面发生化学反应产生的黏结介质,其力学性能通常相对砂浆较弱^[28-32],根据文献[14]和本文模型的基本假定,有 $E_{0,ITZ}=E_{0,mo}$ 、 $\sigma_{ITZ}=\kappa\sigma_{mo}$ 、 $\varepsilon_{u,ITZ}=\kappa\varepsilon_{u,mo}$,其中 $\kappa\in[0,1]$ 为界面力学性能相对砂浆力学性能的折减系数,且 κ 与界面裂缝指数 η 有转换关系为 $\kappa=\sqrt{\cos(\pi\eta)}$ 。

1.2 基于能量守恒的裂缝尖端应力强度

如图1(a)所示,结构内部存在几何不连续时容易产生应力集中,当裂缝尖端应力强度达到或高于材料的理论强度时裂缝即扩展,最终使该结构的名义强度 σ_{Nu} 低于组成该结构材料的理论强度。实际上,由于测试材料力学性能的标准试件始终受到尺

寸效应(结构效应)的影响,因此不易准确获得材料的理论强度,仅能够得到该研究尺度下材料的平均强度及其应力-应变关系曲线(如图1(b)中宏观平均的本构关系所示),进而,可以根据能量守恒原理反演该研究尺度下材料的“理论强度”,并在该研究尺度下用于预测结构的宏观力学行为。

假设宏观尺度上混凝土最终破坏所耗散的总能量(外力所做的功)为 W ,在细观尺度上则是由各细观组分破坏所耗散的能量(即 W_{mo} 、 W_{ITZ} 、 W_{agg})以及使断裂后的混凝土产生动能 W_k 所需能量的组合,这里仅考虑外力加载前的初始状态和外力加载后的最终破坏状态,不考虑外力加载过程中产生的应变能,因此有

$$W=W_{mo}+W_{ITZ}+W_{agg}+W_k \quad (1a)$$

$$W=\omega_{mo}V_{mo}+\omega_{ITZ}V_{ITZ}+\omega_{agg}V_{agg}+W_k \quad (1b)$$

$$W=G_{f,mo}l_{mo}b+G_{f,ITZ}l_{ITZ}b+G_{f,agg}l_{agg}b+W_k \quad (1c)$$

式中: ω_{mo} 、 ω_{ITZ} 和 ω_{agg} 分别为砂浆、界面和骨料的应变能密度(通过标准试件实测得到的宏观平均的应力-应变曲线下面积 S_{OEI} 、 S_{ODH} 和 $S_{OAC或OBC}$); V_{mo} 、 V_{ITZ} 和 V_{agg} 分别为混凝土材料中砂浆、界面和骨料破坏的总体积; $G_{f,mo}$ 、 $G_{f,ITZ}$ 和 $G_{f,agg}$ 分别为砂浆、界面和骨料在相同参考尺寸(l_r)下的断裂能,即认为 $G_{f,i}=\omega_i l_r$ ($i=mo$ 、 ITZ 或 agg); l_{mo} 、 l_{ITZ} 和 l_{agg} 分别为砂浆、界面和骨料的实际断裂长度; b 为试件的厚度,二维模型情况取 $b=1$ 。此外,在准静力加载条件下,有 $W_k=0$ 。

从宏观平均的角度分析,裂缝尖端区域材料点的破坏与其他区域材料点的破坏所需耗散的能量相等。进而,考虑应力集中导致的裂缝尖端区域应力提高等物理现象,本文定义一类裂缝尖端材料的虚拟本构关系,这里以砂浆为例,如图1(b)中虚线OFG所示, σ_{mo}^{tip} 、 $\varepsilon_{u,mo}^{tip}$ 和 $E_{0,mo}^{tip}$ 分别为裂缝尖端砂浆材料的极限应力、极限应变和弹性模量,令宏观平均的砂浆材料本构曲线以及裂缝尖端的砂浆材料本构曲线初始斜率和应变能密度均相等,即 $E_{0,mo}^{tip}=E_{0,mo}$, $\omega_{mo}^{tip}=\omega_{mo}$,可以推导得到裂缝尖端砂浆材料的极限应力 σ_{mo}^{tip} 为

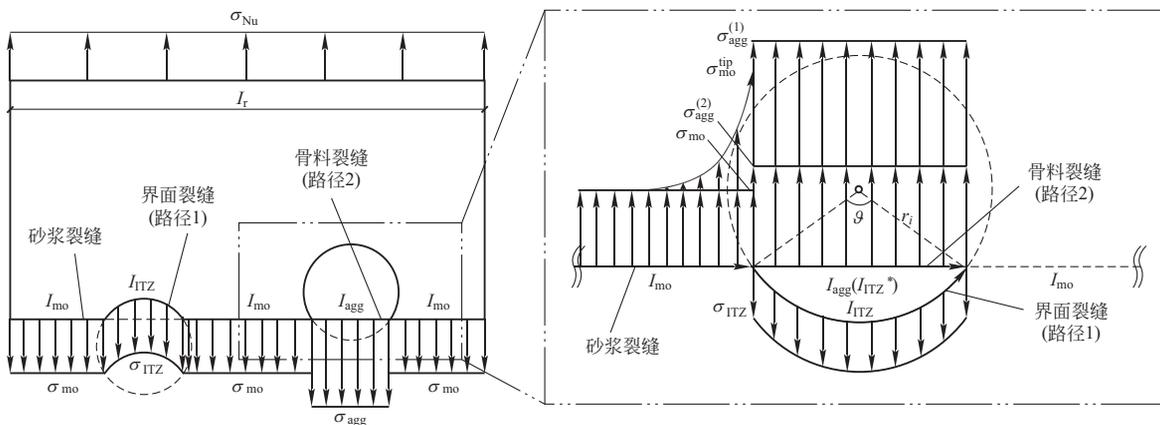
$$\sigma_{mo}^{tip}=\zeta\sigma_{mo} \quad (2a)$$

$$\zeta=\left(\frac{\varepsilon_{u,mo}^{tip}}{\varepsilon_{p,mo}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2b)$$

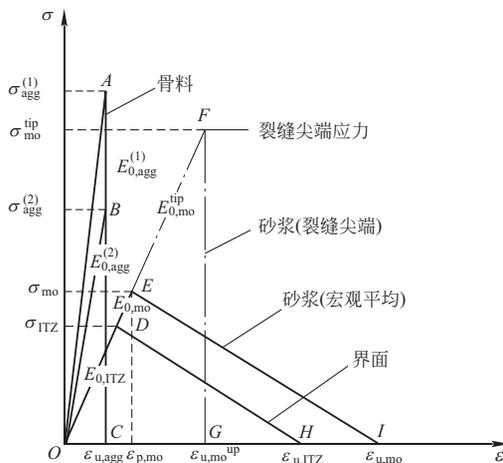
式中: ζ 定义为裂缝尖端材料的虚拟强度放大因子。本文以细观尺度为基本研究尺度,因此 σ_{mo}^{tip} 即为通过对标准试件实测宏观平均的应力-应变曲线进行反演得到的细观尺度下砂浆材料的“理论强度”。这里需

要说明的是，该虚拟本构关系仅影响裂缝尖端区域的断裂破坏行为，且始终保持结构体系的能量守恒，即式(1b)保持不变，因此对宏观平均意义上的断裂破坏行为无显著影响。进一步，如图 1(a)所示，当

砂浆裂缝扩展至骨料边缘时，将 σ_{mo}^{tip} 作为对骨料施加的外荷载，用于判定骨料能否开裂，即根据 $\sigma_{agg}^{(2)} \leq \sigma_{mo}^{tip} \leq \sigma_{agg}^{(1)}$ 三者相对关系，作为混凝土细观裂缝选择路径 1 或路径 2 扩展的基本判据之一。



(a) 细观断裂模型



(b) 细观组分本构关系

图 1 混凝土 I-型细观断裂模型及各细观组分本构关系

Fig. 1 Concrete mode-I mesoscale fracture model and constitutive laws for meso components

1.3 细观裂缝扩展路径准则

在均质弹性体内，传统的裂缝扩展准则认为，当裂缝尖端的强度因子与材料的断裂韧性(临界强度因子)相等时裂缝即扩展。显然，这一裂纹扩展准则在考虑材料组成的非均匀特性时不再适用^[23]。在细观层次上，如图 1(a)所示，当砂浆裂缝扩展至骨料边缘时，或选择沿力学性能相对薄弱的界面扩展(路径 1)，或选择穿透骨料扩展(路径 2)。在外荷载作用下，任意材料的断裂均需首先满足使其开裂，进而外力所做的功能够使得该裂缝持续扩展。基于此，定义细观裂缝穿透力学性能相对较强的骨料进行扩展(即选择路径 2 产生骨料裂缝)的基本判据如下。

$$\begin{cases} \text{①骨料裂缝起裂条件: } \sigma_{agg} \leq \sigma_{mo}^{tip} \\ \text{②骨料裂缝扩展条件: } W_{agg} \leq W_{ITZ} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可以发现：当骨料的极限应力 σ_{agg} 小于等于裂缝尖端应力 σ_{mo}^{tip} 时，骨料即开裂；裂缝扩展路径方向上，令骨料断裂所需耗散的能量 W_{agg} 小于等于令界面断裂所需耗散的能量 W_{ITZ} 时，裂缝将选择穿透扩展路径较短的骨料，实际上，这一方面体现了裂缝扩展过程的最小能量原理，另一方面亦体现了裂缝扩展过程的最短路径原理。当且仅当同时满足①骨料裂缝起裂条件和②骨料裂缝扩展条件时，细观裂缝才选择穿透力学性能相对较强的骨料扩展(路径 2)，其他情况细观裂缝均绕过骨料选择力学性能相对薄弱的界面扩展(路径 1)。联立式(3)中条件①和条件②可以得到

$$\zeta \left(\frac{\epsilon_{u,agg}}{\epsilon_{u,mo}} \right) \leq \pi \eta \cot(\pi \eta) \quad (4)$$

即,当混凝土各细观组分性能满足式(4)时,裂缝将穿透骨料进行扩展。由式(2b)可以发现,裂缝尖端材料虚拟强度放大因子 ζ 由砂浆本身性能直接决定。因此,当砂浆的力学性能确定后,细观裂缝是否穿透骨料进行扩展将受到骨料极限应变 $\varepsilon_{u,agg}$ 、砂浆极限应变 $\varepsilon_{u,m0}$ 以及界面裂缝指数 η 3个参数的综合影响。定义一个临界细观断裂参数 MF_c 为

$$MF_c = \pi\eta\cot(\pi\eta) \quad (5)$$

可以得到 MF_c 随 $\eta \in [0, 0.5]$ 变化曲线如图2所示。进一步,定义一个骨料破裂指数 Π 为

$$\Pi = \zeta \left(\frac{\varepsilon_{u,agg}}{\varepsilon_{u,m0}} \right) \quad (6)$$

基于式(4)~(6),可以给出混凝土细观裂缝扩展路径准则为

$$\begin{cases} \Pi \leq MF_c & \text{裂缝穿透骨料发展} \\ \Pi > MF_c & \text{裂缝绕过骨料发展} \end{cases} \quad (7)$$

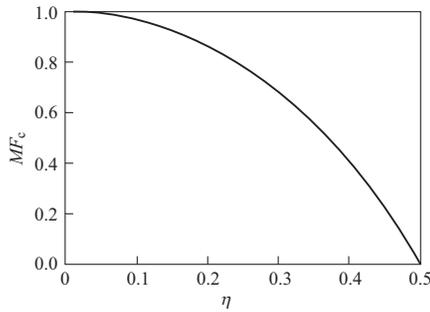


图2 临界细观断裂参数 MF_c 随界面裂缝指数 η 变化

Fig. 2 Variation of critical mesoscopic fracture index MF_c with bond crack index η

1.4 细观组分力学性能随机性

由于水泥基材料本身的复杂性,即使同一种介质(砂浆、界面或骨料),其力学性能在结构不同位置上也存在一定差异,因此断裂裂缝的扩展行为存在较大的随机性。基于建立的细观裂缝扩展路径准则可以发现,临界细观断裂参数 MF_c 仅取决于界面裂缝指数 η (图2),而骨料破裂指数 Π 则同时受到骨料和砂浆力学性能随机性的影响。实际上,由于界面是位于骨料和砂浆之间的过渡区,当骨料和砂浆的力学性能确定时,界面力学性能亦确定,因此仅须考虑骨料和砂浆力学性能随机性对骨料破裂指数 Π 的影响。

由式(6)可以看到,骨料破裂指数 Π 主要受到裂缝尖端材料虚拟强度放大因子 ζ 、骨料极限应变 $\varepsilon_{u,agg}$ 以及砂浆极限应变 $\varepsilon_{u,m0}$ 3个参数的影响,其中 ζ 和 $\varepsilon_{u,m0}$ 由砂浆性能控制, $\varepsilon_{u,agg}$ 由骨料性能控制。砂浆力学性能的随机性与混凝土材料相似,可基于 Weibull

分布理论进行探讨^[33-34]。本文主要针对骨料力学性能的随机性及其破裂概率进行探讨,即假设砂浆力学性能确定,骨料破裂指数 Π 仅受到骨料极限应变 $\varepsilon_{u,agg}$ 影响时骨料的破裂概率 $P_{f,agg}$ 确定方法。

假定骨料力学性能(强度、变形等)服从正态分布,则当不考虑砂浆力学性能的随机性时,骨料破裂指数亦服从正态分布,即 $\Pi \sim N(\mu, \sigma^2)$,其中 μ 和 σ^2 分别为骨料破裂指数 Π 的期望和方差,其概率密度函数表达式和累积概率密度表达式分别为

$$p(\Pi | \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\Pi-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

$$P(\Pi \leq MF_c | \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^{MF_c} e^{-\frac{(\Pi-\mu)^2}{2\sigma^2}} d(\Pi) \quad (9)$$

进而,将式(9)进行标准化变换,可以得到骨料破裂概率 $P_{f,agg}$ 的表达式为

$$\begin{aligned} P_{f,agg} &= P(0 \leq (\Pi) \leq MF_c | \mu, \sigma^2) \\ &= \Phi\left(\frac{MF_c - \mu}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{\mu}{\sigma}\right) - 1 \end{aligned} \quad (10)$$

如图3所示,给出了基于骨料破裂指数 Π 服从正态分布时确定骨料破裂概率 $P_{f,agg}$ 的图解法,即,当骨料破裂指数 Π 值落入阴影区域(包括曲线)内时,混凝土细观裂缝将穿透骨料(路径2)扩展;当骨料破裂指数 Π 值落入阴影区域外时,混凝土细观裂缝将绕过骨料(路径1)扩展。基于式(10)计算骨料破裂概率 $P_{f,agg}$,首先,根据界面裂缝指数 η 确定临界细观断裂参数 MF_c ,其次,针对使用骨料力学性能的均值及离散程度确定期望 μ 和方差 σ^2 ,继而,通过查标准正态分布表计算骨料破裂概率 $P_{f,agg}$ 。这里,考虑所有可作为混凝土材料中骨料使用的岩石为样本,根据 3σ 准则,认为约97%的样本落入区间 $[0, 2\mu]$,即令 $\mu = 3\sigma$,则式(10)转化为

$$\begin{aligned} P_{f,agg} &= P\left(0 \leq \Pi \leq MF_c | \mu, \left(\frac{\mu}{3}\right)^2\right) \\ &= \Phi\left(\frac{3(MF_c - \mu)}{\mu}\right) - 0.0013 \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可以看到,对于所有可用作骨料的岩石所组成的样本,根据不同临界细观断裂参数 MF_c 和期望 μ ,即可给出骨料破裂概率 $P_{f,agg}$ 。图4给出了骨料破裂概率 $P_{f,agg}$ 随临界细观断裂参数 MF_c 以及不同期望 μ 的变化趋势,可以看到,当骨料破裂指数 Π 均值为2时,骨料破裂概率 $P_{f,agg}$ 小于0.1,即仅有不超过10%的骨料可能被破坏。

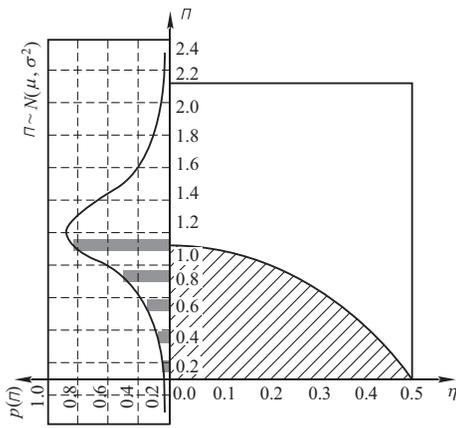


图 3 图解法确定骨料断裂指数 $P_{f,agg}$

Fig. 3 Determination of aggregate fracture probability $P_{f,agg}$ by graphical method

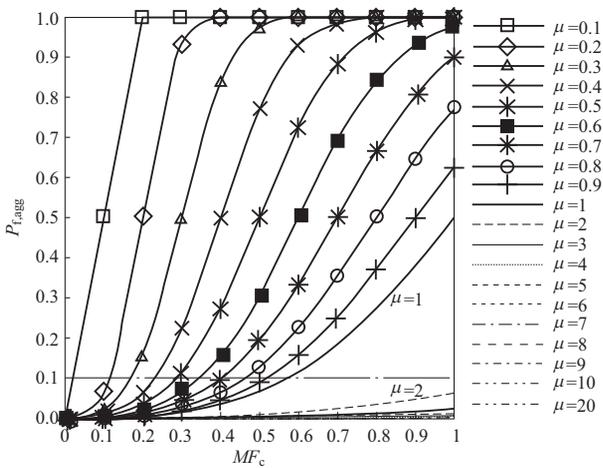


图 4 骨料断裂概率 $P_{f,agg}$ 随临界细观断裂参数 MF_c 和期望 μ 变化

Fig. 4 Variation of aggregate fracture probability $P_{f,agg}$ with critical mesoscopic fracture index MF_c and expectation μ

1.5 混凝土宏观力学参数

文献[14]给出了修正的考虑细观组分影响的强骨料夹杂混凝土在单轴拉伸加载条件下的应变能密度 ω^* 表达式为

$$\omega^* = (\alpha + X)\omega_{ITZ} + (1 - \beta - Y)\omega_{mo} \quad (12a)$$

$$\alpha = 2\eta \cdot \sum_1^n \sqrt{\pi\gamma a_n} \quad (12b)$$

$$\beta = 2\sin(\pi\eta) \cdot \sum_1^n \sqrt{\frac{\gamma \cdot a_n}{\pi}} \quad (12c)$$

$$\eta = \frac{1}{\pi} \arccos(\kappa^2) \quad (12d)$$

式中： α 和 β 分别为界面裂缝和砂浆裂缝的长度分配系数； X 和 Y 分别为基于试验数据统计的 α 和 β 的修

正系数； γ 、 n 和 a_n 为根据我国《水工混凝土配合比设计规程》(DLT5330—2015)^[35] 确定的粗骨料含量、级配和相应级配骨料含量的百分比； η 为界面裂缝指数； κ 为界面力学性能相对砂浆力学性能的折减系数。

由式(12a)可以看到，在强骨料夹杂混凝土中，因不考虑骨料破裂，细观裂缝均绕过骨料扩展，混凝土材料的宏观力学性能主要受到界面(ω_{ITZ})和砂浆(ω_{mo})两类细观组分的影响。本文扩展建立的混凝土 I-型细观断裂模型进一步考虑了弱骨料夹杂的情况，因此应对式(12a)考虑细观组分影响的混凝土应变能密度 ω^* 进行修正，基于本节分析可以给出其通用计算式为

$$\omega^* = (1 - \beta - Y)\omega_{mo} + (\alpha + X)(1 - P_{f,agg})\omega_{ITZ} + (\beta + Y)P_{f,agg}\omega_{agg} \quad (13)$$

由式(13)可以看到：当 $\Pi > MF_c$ 时，裂缝均绕过骨料发展，有 $P_{f,agg} = 0$ ，式(13)转化为强骨料夹杂混凝土应变能密度，即 $\omega^* = (1 - \beta - Y)\omega_{mo} + (\alpha + X)\omega_{ITZ}$ ^[4]；当 $\Pi \leq MF_c$ 时，裂缝均穿透骨料发展，有 $P_{f,agg} = 1$ ，式(13)转化为弱骨料夹杂混凝土应变能密度，即 $\omega^* = (1 - \beta - Y)\omega_{mo} + (\beta + Y)\omega_{agg}$ 。实际混凝土中，骨料破裂概率 $P_{f,agg}$ 应根据各细观组分力学性能的随机性在 $[0, 1]$ 浮动。根据式(13)，可以求解得到同时考虑砂浆、界面以及骨料影响的混凝土名义强度 σ_{Nu} 和断裂能 G_I 为

$$\sigma_{Nu} = \frac{2\omega^*}{\epsilon_u} \quad (14)$$

$$G_I = \omega^* l_r \quad (15)$$

式(14)和(15)中，基于建立的混凝土 I-型细观断裂模型的形态学特征^[12-14]，认为单轴拉伸加载条件下，混凝土极限应变等于砂浆极限应变，即 $\epsilon_u = \epsilon_{u,mo}$ ； l_r 为与计算各细观组分断裂能相同的参考尺寸，即标准试件在单轴拉伸加载方向上的边长。

2 参数分析和讨论

基于本文建立的 I-型细观断裂模型预测混凝土材料的宏观力学性能时，应首先根据式(13)求解考虑各细观组分影响的混凝土应变能密度 ω^* ，其中确定长度分配系数 α 和 β 过程中，粗骨料含量 γ 、级配 n 和相应级配骨料含量的百分比 a_n 均可根据实际配合比得到，界面裂缝指数 η 则取决于界面力学性能相对砂浆力学性能的折减系数 κ (式(12d))；文献[14]首先基于细观数值试验法初步给出了不同级配混凝

土中长度分配系数 α 和 β 的修正系数 X 和 Y , 后续将根据理论解析法和试验数据统计分析进一步确定其合理取值范围; 此外, 由式(10)可以看到, 骨料断裂概率 $P_{f,agg}$ 的确定需考虑骨料断裂指数 II 的随机性以及临界细观断裂参数 MF_c 的取值, 骨料断裂指数 II 的随机性主要由砂浆和骨料两类细观组分决定(1.4节已进行讨论), 而临界细观断裂参数 MF_c 则主要取决于界面裂缝指数 η , 亦即取决于界面力学性能相对砂浆力学性能的折减系数 κ (式(12d))。界面是位于骨料和砂浆之间的过渡区, 其力学性能受到诸多因素的影响, 因此如何确定折减系数 κ 成为计算界面裂缝指数 η 、临界细观断裂参数 MF_c , 确定长度分配系数 α 和 β 、骨料断裂概率 $P_{f,agg}$, 进而根据式(14)和(15)计算混凝土宏观力学参数的关键。

2.1 折减系数 κ 影响因素分析

一般来说, 界面的强度低于砂浆和骨料, 通常被作为混凝土材料中的薄弱环节^[28-32]。实际上, 界面不是一类在混凝土材料中占据特定区域的具体介质, 而是位于骨料和砂浆之间的一个过渡区, 根据研究问题尺度的不同, 定义的有效界面厚度亦不同。由于受到粗骨料“壁效应”的影响, 界面处孔隙率大于砂浆中的孔隙率, 在距离骨料 15~20 μm 区域的界面变化最为显著^[30], 即界面相对砂浆含初始缺陷(如裂隙、孔洞等)较多, 从而导致界面的力学性能弱于砂浆的力学性能。基于本节分析可知, 界面作为桥接砂浆和骨料之间应力的纽带, 其力学性能同时受到砂浆和骨料的影响, 根据界面传力机制^[28-32]的不同, 可以将界面主要分为2类。

(1) 物理界面。

当砂浆与骨料表面无化学反应或化学反应较弱时, 界面在骨料和砂浆之间传力主要取决于砂浆中的水泥水化产物与骨料表面形成的机械咬合作用, 因此骨料形状、骨料表面的粗糙度等将显著影响物理界面的力学性能, 例如, 同样条件下, 采用碎石骨料的混凝土强度高于采用卵石骨料的混凝土强度^[17]。这里认为物理界面主要基于骨料和砂浆之间的黏着力进行传力。

(2) 化学界面。

根据选用骨料类型的不同, 当砂浆与骨料表面发生不同程度化学反应时, 可以产生具有不同力学特性的黏结介质, 并作为骨料和砂浆之间的传力介质, 例如, 玄武岩骨料的强度高于石灰岩骨料的强度, 但在制备普通混凝土($\leq 30\text{MPa}$)时, 由于石灰岩骨料与砂浆基质发生化学反应产生的黏结介质使得骨料与砂浆结合更为紧密, 导致采用相对弱的石灰

岩骨料夹杂的混凝土强度反而高于相对强的玄武岩骨料夹杂的混凝土强度^[17]。化学界面的破坏实际上是骨料表面和砂浆发生化学反应后产生的黏结介质化学键的破坏, 即主要基于内聚力进行传力。

根据使用的砂浆的力学性能, 以及采用的骨料类型、形状和粗糙度等对形成的物理界面黏着力和化学界面内聚力的影响, 界面的力学性能相对砂浆应有不同程度的折减。基于本文模型的基本假定及本节分析, 可以给出界面力学性能相对砂浆力学性能的折减系数 κ 的广义表达式为

$$\kappa = \frac{\sigma_{ITZ} [f_{(mo)}] [f_{(agg, ad)} + f_{(agg, co)}]}{\sigma_{mo} [f_{(mo)}]} \quad (16)$$

式中: $f_{(mo)}$ 、 $f_{(agg, ad)}$ 和 $f_{(agg, co)}$ 分别为砂浆力学性能、物理界面黏着力和化学界面内聚力的影响因子, $f_{(mo)}$ 主要取决于水泥、水灰比、掺合料、细骨料等, $f_{(agg, ad)}$ 主要取决于骨料形状、骨料表面粗糙度等, $f_{(agg, co)}$ 主要取决于骨料类型等。本文研究工作主要基于细观尺度(以粗骨料、砂浆基质和界面过渡区的基本力学性能为基础), 这3类影响因子并不在本文研究尺度的范围内, 因此无法准确给出其对界面强度 σ_{ITZ} 和砂浆强度 σ_{mo} 的影响规律, 从而无法获得折减系数 κ 随界面力学性能和砂浆力学性能的演化规律, 须使用多尺度分析方法在更小研究尺度(如纳观或微观)范围进行探讨。本文将根据有限试验数据, 在细观尺度上基于给出的细观裂缝扩展路径准则反演折减系数 κ , 并分析其合理性。

2.2 反演法确定折减系数 κ

文献[20]研究了界面断裂参数对混凝土裂缝扩展行为的影响, 但并未实际给出界面的相关力学参数, 鉴于此, 本文利用试验结果及相关分析数据反演界面裂缝指数 η 的合理取值范围, 进而通过转换关系 $\kappa = \sqrt{\cos(\pi\eta)}$ 获得折减系数 κ 。

文献[20]采用两相介质(砂浆基质和圆柱形骨料)复合材料代表混凝土, 对该复合材料制作的混凝土梁进行3点弯曲加载, 因此可以简化为二维模型进行探讨, 与本文建立的I型细观断裂模型相符。试验采用同种水泥配置了2种强度的砂浆基质, 采用了2种类型的圆形截面骨料, 分别为花岗岩骨料和石灰岩骨料, 因此有 $f_{(mo)} =$ 水灰比、 $f_{(agg, ad)} = 0$ 以及 $f_{(agg, co)} =$ 骨料类型。通过2.1节关于折减系数 κ 的影响因素分析及式(16)可知, 由于界面和砂浆的主要成分相同, 将同时受到水灰比的影响, 而骨料类型则仅对化学界面内聚力的大小产生影响, 因此该试验采用的混凝土中界面力学性能相对砂浆力学性能的折减系数 κ 应主要受到骨料类型的影响。文献[20]中与本文研究内容相关的

试验实测得到的细观组分力学参数如表 1 所示。基于本文模型的基本假定有

$$\varepsilon_{p,i} = \frac{\sigma_i}{E_{0,i}} \quad i = \text{agg1、agg2、mo1 或 mo2} \quad (17a)$$

$$\varepsilon_{u,i} = \frac{2G_{f,i}}{\sigma_i l_r} \quad i = \text{agg1、agg2、mo1 或 mo2} \quad (17b)$$

以强度较高的花岗岩骨料力学性能为基准, 令 $\varepsilon_{p,\text{agg1}} = \varepsilon_{u,\text{agg1}}$, 求解得到各细观组分的参考尺寸 $l_r = 0.13\text{m}$, 根据式(17b)计算得到其他细观组分的极限应变, 进而根据式(2b)给出 2 种砂浆裂缝尖端材料的虚拟强度放大因子 ζ , 如表 1 所示。

表 1 文献[20]中试验实测及基于本文模型假定计算得到的细观组分力学参数

Table 1 Mechanical parameters of meso components obtained from test results in ref. [20] and calculated based on present model

细观组分 ($i = \text{agg1、agg2、mo1 或 mo2}$)	文献[20]试验实测细观组分力学参数			基于本文模型假定计算得到的细观组分力学参数		
	σ_i (MPa)	$E_{0,i}$ (GPa)	$G_{f,i}$ (J/m ²)	$\varepsilon_{p,i} \times 10^{-6}$	$\varepsilon_{u,i} \times 10^{-6}$	ζ_i
花岗岩骨料 (agg1)	6.20	42.20	59.70	146.92	146.92	-
石灰岩骨料 (agg2)	3.10	34.50	29.20	89.86	143.72	-
低强度砂浆基质 (mo1)	2.80	27.80	39.00	100.72	212.52	1.45
高强度砂浆基质 (mo2)	5.00	33.30	57.00	150.15	173.94	1.08

表 2 基于文献[20]试验结果的界面强度折减系数 κ 取值

Table 2 Determination of reduction factor κ based on test results in ref. [20]

序号	不同细观组分组合的混凝土材料	文献[20]试验结果	假设本文方法预测结果	Π	MF_c	η	κ
①	花岗岩骨料、低强度砂浆基质	绕过骨料	绕过骨料	1.00	0.91	0.16	<0.94
②	花岗岩骨料、高强度砂浆基质	绕过骨料	绕过骨料	0.91	0.91	0.16	<0.94
③	石灰岩骨料、低强度砂浆基质	穿透骨料	穿透骨料	0.98	0.98	0.08	≥ 0.98
④	石灰岩骨料、高强度砂浆基质	穿透骨料	穿透骨料	0.89	0.98	0.08	≥ 0.98

2.3 讨论

文献[32]测试了水灰比为 0.5 的石灰岩骨料混凝土中界面的力学性能, 试验结果显示界面的抗拉强度较砂浆的抗拉强度减小约 30%, 基于本文模型的基本假定, 即界面强度折减系数 $\kappa = 0.7$ 。可以看到, 基于本文模型及文献[20]试验结果反演得到的石灰岩骨料混凝土中界面强度折减系数偏大。造成这一误差的原因可能在于, 为简化推导过程, 本文采用了计算较为简便的双线性本构模型来描述各细观组分的力学行为, 在计算断裂能等力学参数时可能与实际存在误差。后续将采用更为符合实际的本构模型来描述各细观组分的力学行为。

实际上, 由于界面的研究尺度较骨料和砂浆差数个量级, 因此, 仅从细观尺度探讨同时受到砂浆

对不同细观组分进行组合制成的混凝土试件进行断裂破坏试验, 文献[20]给出了混凝土裂缝在细观层次上的不同扩展行为, 如表 2 所示。假设本文方法的预测结果与文献[20]试验结果相同, 则根据式(6)可以计算得到基于本文模型的骨料破裂指数 Π , 继而根据式(7), 令序号② $\Pi = MF_c = 0.91$ 、序号③ $\Pi = MF_c = 0.98$, 根据式(5)推算得到花岗岩骨料混凝土的界面裂缝指数 η 约为 0.16, 石灰岩骨料混凝土的界面裂缝指数 η 约为 0.08, 进而根据 η 和 κ 转换关系得到: 对于花岗岩骨料混凝土, 其界面力学性能相对砂浆力学性能的折减系数 κ 应小于 0.94; 对于石灰岩骨料混凝土, 其界面力学性能相对砂浆力学性能的折减系数 κ 应不低于 0.98。

性能和骨料类型、形状以及粗糙度等因素影响的界面性能较难获得准确的力学参数, 进而, 令界面力学性能相对砂浆力学性能的折减系数 κ 难以确定。采用多尺度分析方法, 在更小的研究尺度范围内(如在纳观或微观水平采用分子动力学方法^[36])探讨与界面过渡区力学性能密切相关的折减系数 κ 的变化规律, 或能够给出相对合理的折减系数 κ 的取值范围, 进而应用于本文建立的混凝土 I-型细观断裂模型并预测混凝土宏观力学性能, 这亦是后续研究工作的重点。

3 模型验证及应用

3.1 模型验证

本文扩展建立的混凝土 I-型细观断裂模型同时考

虑强骨料、弱骨料夹杂的情况，基于不同裂缝扩展路径给出了混凝土宏观力学参数的表达式。在前期研究工作^[12-14]中，已对强骨料夹杂的情况进行了验证，本文将主要基于弱骨料夹杂的情况，验证模型的合理性。

文献[24-25]使用制作的简单混凝土断裂模型系统研究了细观裂缝的扩展行为及混凝土宏观力学性能随细观组分力学性能的变化规律。模型使用 Type-III 波特兰水泥和粒径 0.2~0.4mm 的硅质砂制成的砂浆基质作为胶凝材料，水灰比约为 0.32，采用平均粒径为 7.4mm 的球状莫来石作为粗骨料，体积分数约为 25.8%，通过对粗骨料表面涂抹脱模剂（石蜡）或环氧树脂等措施得到不同力学性能的界面过渡区，表 3 列出了该模型试验实测以及基于本文模型假定计算得到的各细观组分的力学参数。前期研究工

作^[12-14]中，已采用表 3 中强骨料、砂浆基质和不同性能界面过渡区组合的混凝土试验结果验证了模型的合理性，这里不再赘述。本文将采用弱骨料、砂浆基质和不同性能界面过渡区组合的混凝土试验结果验证扩展建立的混凝土 I-型细观断裂模型的合理性：令 $l_f = 40\text{mm}$ 、 $\gamma = 0.258$ 、 $n = 1$ 、 $X = 0.229$ ^[14]、 $Y = 0.027$ ^[14]，将各项参数代入式(15)可以计算得到基于本文模型的混凝土断裂能 G_f ，其中骨料断裂概率 $P_{f,agg}$ 采用文献[24-25]中实际测定的断裂骨料占比参数 PBA ，如表 4 所示。图 5 给出了本文方法预测结果与试验结果^[24-25]对比，基于扩展建立的混凝土 I-型细观断裂模型计算得到的混凝土断裂能 G_f 随骨料断裂概率 $P_{f,agg}$ 的变化趋势与试验结果基本相同，验证了模型的合理性。

表 3 文献[24-25]中试验实测及基于本文模型假定计算得到的细观组分力学参数

Table 3 Mechanical parameters of meso components obtained from test results in ref. [24-25] and calculated based on present model

细观组分 ($i = \text{agg1}, \text{agg2}, \text{mo}, \text{ITZ1}, \text{ITZ2}$ 或 ITZ3)	文献[24-25]试验实测细观组分力学参数			基于本文模型假定计算得到的细观组分力学参数	
	σ_i (MPa)	$E_{0,i}$ (GPa)	$G_{f,i}$ (J/m ²)	η	κ
强骨料 (agg1)	16±2	19±2	>60	-	-
弱骨料 (agg2)	1.7±0.3	2.1±0.5	<40	-	-
砂浆基质 (mo)	4.7±2	31±2	52±6	-	-
强界面 (ITZ1)	-	-	50±10	0.088	0.98
中强界面 (ITZ2)	-	-	30±10	0.304	0.76
弱界面 (ITZ3)	-	-	10±10	0.439	0.44

表 4 本文方法预测结果与文献[24-25]试验结果对比

Table 4 Comparison of prediction results of present method with test results in ref. [24-25]

不同细观组分组合的混凝土材料	文献[24-25]试验结果		本文方法预测结果	
	PBA (%)	G_f (J/m ²)	$P_{f,agg}$	G_f (J/m ²)
弱骨料、砂浆基质、强界面	98.4	50.5-64.4	0.984	58.0
弱骨料、砂浆基质、中强界面	41.0	32.2-49.8	0.41	52.7
弱骨料、砂浆基质、弱界面	6.5	28.9-50.2	0.065	33.5

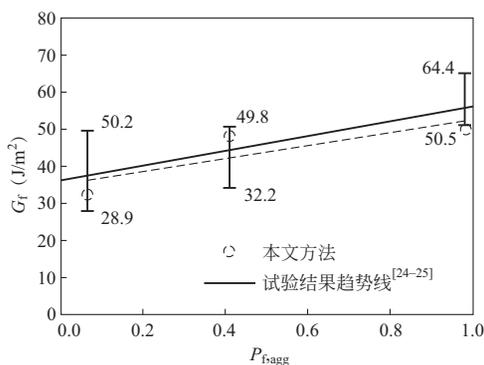


图 5 本文方法预测结果与试验结果^[24-25]对比

Fig. 5 Comparison of prediction results of present method with test results^[24-25]

3.2 混凝土名义强度材料层次尺寸效应分析

混凝土材料是一类多相多尺度多缺陷的水泥基材料，其非均质特性导致其宏观力学性能受到诸多因素影响。目前对混凝土尺寸效应问题的研究主要归结于两个重要层面^[37-38]：混凝土材料层次尺寸效应与(钢筋)混凝土构件层次尺寸效应。混凝土材料层次的尺寸效应实际上是一个复杂的材料科学问题，构件层次尺寸效应亦须建立在材料层次尺寸效应基础之上。因此，深入分析混凝土材料层次尺寸效应行为，可为后续建立更为完善的材料-构件统一的尺寸效应律奠定基础。

混凝土材料层次尺寸效应是指名义强度等宏观力学参数，一方面，随细观组分的力学性能发生变化，另一方面，随细观组分的尺寸或尺度发生变化。如何充分考虑骨料级配、粒径、粗糙度等以及砂浆、界面的力学特性等对混凝土宏观力学参数的影响，基于性能设计混凝土材料配合比，是目前混凝土材料科学领域研究的热点。

基于本文建立的 I-型细观断裂模型推导得到的混凝土应变能密度计算式(13)能够有效表征混凝土材料层次的尺寸效应行为：细观组分力学性能影响由相应应变能密度 ω_{mo} 、 ω_{ITZ} 和 ω_{agg} 控制，细观组分尺寸或尺度影响则体现在各细观组分应变能密度的分项系数中。本文方法亦可为基于性能设计的混凝土配合比研究奠定理论基础。

考虑细观裂缝穿透骨料颗粒发展的临界状态，即令 $\Pi = MF_c$ ，进而根据式(13)和(14)可以推导得到

$$\frac{\sigma_{Nu}}{\sigma_{mo}} = (1 - \beta - Y) + (\alpha + X)(1 - P_{f,agg}) \cos(\pi\eta) + (\beta + Y)P_{f,agg} \pi\eta \cot(\pi\eta) \quad (18)$$

由式(18)可以看出，公式左侧基于 2.4 节关于

砂浆力学性能确定的基本假设，将混凝土名义强度 σ_{Nu} 表示为与砂浆强度 σ_{mo} 的比值，可以进行无量纲化分析；公式右侧各参数分别代表不同细观组分力学性能以及尺寸或尺度的变化，如骨料破裂概率 $P_{f,agg}$ 受到骨料强度随机性的影响并与其均值强度相关，长度分配系数 α 和 β 受到粗骨料含量 γ 、级配 n 、相应级配骨料含量的百分比 a_n 以及界面裂缝指数 η 的影响，界面裂缝指数 η 则直接取决于界面的力学性能。

图 6 给出了不同级配混凝土无量纲名义强度 (σ_{Nu}/σ_{mo}) 随界面裂缝指数 η 及骨料破裂概率 $P_{f,agg}$ 的变化规律，这里采用的粗骨料含量 $\gamma = 0.45$ 以及相应级配骨料含量的百分比 a_n 与文献[12]相同。从图中可以看到，当砂浆力学性能确定时，混凝土无量纲名义强度 (σ_{Nu}/σ_{mo}) 随界面裂缝指数 η 以及骨料破裂概率 $P_{f,agg}$ 的增大而减小。由式(12d)可以发现，界面裂缝指数 η 与界面强度成反比。根据 1.4 节分析可知，骨料破裂概率 $P_{f,agg}$ 与骨料的均值强度亦成反比。由此，混凝土材料的名义强度与界面强度和骨料强度均成正相关关系。

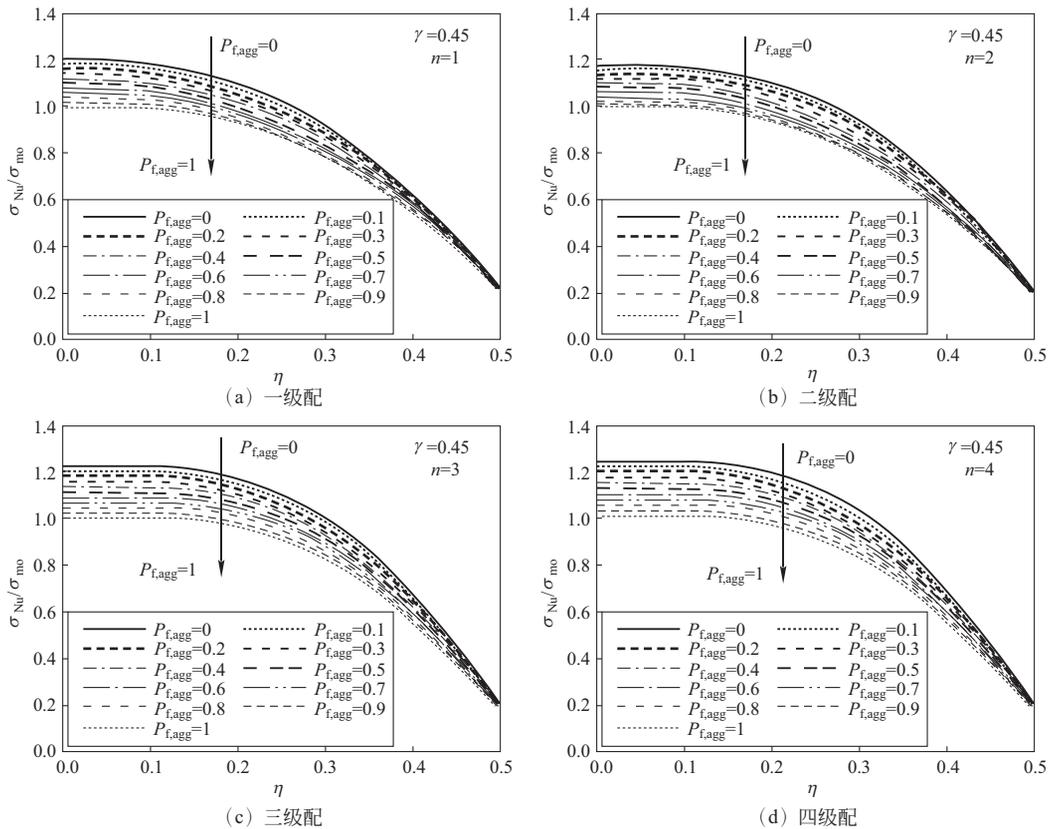


图 6 不同级配混凝土名义强度 (σ_{Nu}/σ_{mo}) 随界面裂缝指数 η 及骨料破裂概率 $P_{f,agg}$ 变化

Fig. 6 Variation of nominal strength (σ_{Nu}/σ_{mo}) of different graded concrete with bond crack index η and aggregate fracture probability $P_{f,agg}$ change

近年来，大型钢筋混凝土工程结构迅猛发展，结构尺寸、跨度及高度的不断增大，使得工程造价亦不断攀升。在工程材料层面，采用大骨料混凝土有益于减少工程造价，但在改善混凝土材料宏观力学性能方面，骨料尺寸则存在不同效果，例如：一方面，在一般混凝土拌合物中，若保持水泥用量不变，随粗骨料粒径增大，其比表面积减小，用水量则减少，可有效降低水灰比，使得存在于界面过渡区中的初始缺陷减少，界面强度提高，进而提高混凝土强度；但另一方面，大骨料内在缺陷发生概率相对小骨料高，又可能降低了比表面积减小对提高混凝土强度的贡献；此外，虽然小骨料需使用较高的水灰比，但相对较大的比表面积又增加了骨料与水泥黏结的面积，亦有益于改善混凝土材料的宏观力学性能。因此，确定骨料尺寸对混凝土宏观力学参数的影响规律，是分析混凝土材料层次尺寸效应行为的重点，亦是基于性能设计大骨料混凝土材料的关键。

图 7 给出了 4 种典型骨料破裂概率情况下，混凝土无量纲名义强度(σ_{Nu}/σ_{mo})随骨料级配 n 及界面裂

缝指数 η 的变化规律。从图中可以看到，当砂浆力学性能确定时，对于相同粗骨料含量($\gamma=0.45$)的混凝土材料，当界面裂缝指数 η 较小(界面强度较大)时，混凝土无量纲名义强度(σ_{Nu}/σ_{mo})随骨料级配 n 增大有增大的趋势；当界面裂缝指数 η 较大(界面强度较小)时，混凝土无量纲名义强度(σ_{Nu}/σ_{mo})随骨料级配 n 增大有减小的趋势。此外，对于骨料破裂概率分别为 $P_{f,agg}=0$ 、 $P_{f,agg}=0.3$ 、 $P_{f,agg}=0.7$ 和 $P_{f,agg}=1.0$ 的混凝土材料，当界面裂缝指数分别为 $\eta \approx 0.47$ 、 $\eta \approx 0.46$ 、 $\eta \approx 0.44$ 和 $\eta \approx 0.40$ 时，混凝土无量纲名义强度(σ_{Nu}/σ_{mo})与骨料级配 n 不相关，并且随骨料破裂概率 $P_{f,agg}$ 增大，混凝土无量纲名义强度(σ_{Nu}/σ_{mo})与骨料级配 n 不相关的界面裂缝指数 η 呈减小趋势。这里，随骨料级配 n 增大，混凝土材料中采用的最大骨料粒径亦增大。综上分析可知，根据制备混凝土材料的各细观组分配比，当砂浆和骨料的力学性能确定时，界面的力学性能将显著影响混凝土材料的名义强度等宏观力学参数随骨料尺寸的变化规律。

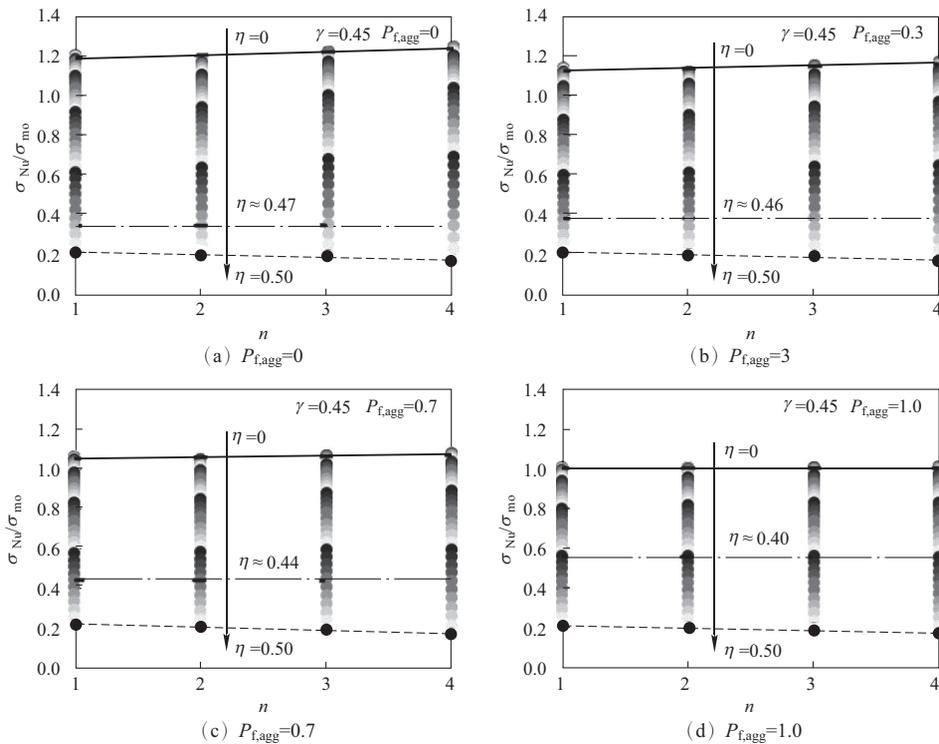


图 7 混凝土名义强度(σ_{Nu}/σ_{mo})随骨料级配 n 及界面裂缝指数 η 变化

Fig. 7 Variation of nominal strength (σ_{Nu}/σ_{mo}) of concrete with gradation n and bond crack index η

以图 7(a)中粗骨料含量 $\gamma=0.45$ 和骨料破裂概率 $P_{f,agg}=0$ 的强骨料夹杂混凝土材料为例，基于本文模型分析界面强度对混凝土名义强度随骨料尺寸变

化规律的影响机理：对于强骨料夹杂混凝土，由于骨料均不破裂($P_{f,agg}=0$)，细观裂缝只能选择绕过随机排列的骨料颗粒形成界面裂缝进行扩展，当界面

裂缝指数 $\eta=0$ 时, 即认为界面强度与砂浆强度相等^[12-14], 随着骨料尺寸的增大, 细观裂缝扩展路径更加曲折, 需耗散更多能量, 从而导致混凝土名义强度提高; 当界面裂缝指数 $\eta=0.5$ 时, 即认为骨料与砂浆之间的界面层在混凝土试件受力前已完全分离^[12-14], 界面强度为 0, 随着骨料尺寸的增大, 细观裂缝扩展路径上混凝土受力前已分离的界面裂缝占比逐渐增大, 砂浆裂缝占比逐渐减小, 耗散能量减少, 从而导致混凝土名义强度降低。

进而, 可以根据不同界面强度, 将一定配合比下制备的混凝土材料划分为高性能及普通性能两类: 首先, 确定混凝土名义强度与骨料尺寸不相关的界面裂缝指数 $\eta \approx 0.47$, 根据式 (12d) 可以推导得到界面力学性能相对砂浆力学性能的折减系数 $\kappa \approx 0.31$; 进而, 定义当 $\kappa > 0.31$ 时为高性能, 即混凝土名义强度随骨料尺寸增大而增大, 定义当 $\kappa < 0.31$ 时为普通性能, 即混凝土名义强度随骨料尺寸增大而减小。由此可以定量给出, 对于强骨料夹杂混凝土材料, 当骨料含量一定时, 可以采用控制水灰比、使用外加剂等方法保证界面相对砂浆力学性能折减不超过 69%, 使得混凝土名义强度随骨料尺寸增大而增大。

对于弱骨料夹杂混凝土材料, 随着骨料破裂概率 $P_{f,agg}$ 逐渐增大, 即骨料强度降低, 则骨料对混凝土名义强度的贡献减小, 因此令混凝土名义强度与骨料尺寸不相关的界面裂缝指数亦须减小, 即需提高界面对混凝土名义强度的贡献, 以保证混凝土名义强度不随骨料尺寸增大而减小。例如, 根据图 7 (b)~图 7 (d) 可以得到, 令骨料破裂概率 $P_{f,agg}$ 分别为 0.3、0.7 和 1.0 的混凝土名义强度与骨料尺寸不相关的折减系数 κ 应分别约为 0.36、0.43 和 0.56, 进而可确定配制高性能混凝土材料中界面力学性能的最小值, 并通过控制水灰比、使用外加剂等措施使配置的大骨料混凝土材料达到合理或最优配合比。

4 结 论

本文基于细观力学和断裂力学基本理论, 认为混凝土断裂裂缝在细观层次上由砂浆裂缝、界面裂缝以及骨料裂缝 3 部分组合而成, 建立了一类能够同时考虑细观裂缝在混凝土材料内部扩展过程中绕过骨料和穿透骨料发展的混凝土 I-型细观断裂模型。与已有试验数据对比表明, 本文建立的细观断裂模型能够有效预测混凝土断裂能等力学参数随细观组分力学性能的变化规律。进而, 基于建立的细观断裂模型, 初步分析了混凝土材料层次的强度尺寸效应,

结果表明:

(1) 当砂浆力学性能确定时, 混凝土材料的名义强度与骨料强度和界面强度正相关;

(2) 界面的力学性能能够显著影响混凝土名义强度等宏观力学参数随骨料尺寸的变化规律;

(3) 根据界面强度不同, 可将一定配合比制备的混凝土材料划分为高性能及普通性能 2 类: 高性能混凝土强度随骨料尺寸增大而增大, 普通性能混凝土强度随骨料尺寸增大而减小。

本文模型分析方法可为基于性能设计的混凝土配合比研究奠定理论基础。

参 考 文 献

- [1] Hillerborg A, Modéer M, Petersson P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773-781
- [2] Bažant Z P, Oh B H. Crack band theory for fracture of concrete [J]. Matériaux Et Construction, 1983, 16(3): 155-177
- [3] Jenq Y, Shah S P. Two parameter fracture model for concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111(10): 1227-1241
- [4] Karihaloo B L, Nallathambi P. Effective crack model for the determination of fracture toughness (K_{IC}^e) of concrete [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 35(4/5): 637-645
- [5] Bažant Z P, Kazemi M T. Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete [J]. International Journal of Fracture, 1990, 44(2): 111-131
- [6] Xu S, Reinhardt H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part I: Experimental investigation of crack propagation [J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2): 111-149
- [7] Xu S, Reinhardt H W. Determination of double-K, criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams [J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2): 151-177
- [8] Xu S, Reinhardt H W. Determination of double-K, criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part III: compact tension specimens and wedge splitting specimens [J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2): 179-193
- [9] 管俊峰, 胡晓智, 王玉锁, 等. 用边界效应理论考虑断裂韧性和拉伸强度对破坏的影响 [J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1298-1306 (Guan Junfeng, Hu Xiaozhi, Wang Yusuo, et al. Effect of fracture toughness and tensile strength on fracture based on boundary effect theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10): 1298-1306 (in Chinese))
- [10] 管俊峰, 王强, 胡晓智, 等. 考虑骨料尺寸的混凝土岩石边界效应断裂模型 [J]. 工程力学, 2017, 34(12):

- 22-30 (Guan Junfeng, Wang Qiang, Hu Xiaozhi, et al. Boundary effect fracture model for concrete and granite considering aggregate size [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(12): 22-30 (in Chinese))
- [11] 管俊峰, 姚贤华, 白卫峰, 等. 由小尺寸试件确定混凝土的断裂韧度与拉伸强度[J]. 工程力学, 2019, 36(1): 70-79, 87 (Guan Junfeng, Yao Xianhua, Bai Weifeng, et al. Determination of fracture toughness and tensile strength of concrete using small specimens [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(1): 70-79, 87 (in Chinese))
- [12] 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): 64-72 (Li Dong, Jin Liu, Du Xiuli, et al. A theoretical study on the influence of aggregate gradation on the tensile strength of 2-dimensional model concrete [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(6): 64-72 (in Chinese))
- [13] 李冬, 金浏, 杜修力, 等. 考虑材料层次尺寸效应影响的混凝土力学性能理论预测方法[J]. 水利学报, 2018, 49(4): 464-473 (Li Dong, Jin Liu, Du Xiuli, et al. A theoretical method to predict the mechanical properties of concrete considering of the size effect in materia [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(4): 464-473 (in Chinese))
- [14] 李冬, 金浏, 杜修力, 等. 考虑细观组分影响的混凝土宏观力学性能理论预测模型[J]. 工程力学, 2019, 36(5): 67-75 (Li Dong, Jin Liu, Du Xiuli, et al. A theoretical prediction model of concrete macroscopic mechanical properties considering the influence of mesoscopic composition [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(5): 67-75 (in Chinese))
- [15] Roelfstra P E, Sadouki H, Wittmann F H. Le béton numérique [J]. Materials and Structures, 1985, 18(5): 327-335
- [16] 徐世焯, 董丽欣, 王冰伟, 等. 我国混凝土断裂力学发展三十年[J]. 水利学报, 2014, 45(增1): 1-9 (Xu Shilang, Dong Lixin, Wang Bingwei, et al. Development of concrete fracture mechanics in China during the past three decades [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(S1): 1-9 (in Chinese))
- [17] Özturan T, Çeçen C. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(2): 165-170
- [18] Wu K R, Liu J Y, Zhang D, et al. Rupture probability of coarse aggregate on fracture surface of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(12): 1983-1987
- [19] 阮征, 陈力, 洪建, 等. 骨料和砂浆等影响混凝土强度的细观层次机理分析[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(6): 952-958 (Ruan Zheng, Chen Li, Hong Jian, et al. Mesoscopic analysis on the mechanism of effects of aggregate and mortar on concrete strength [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(6): 952-958 (in Chinese))
- [20] 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
- [21] Xiao J, Li W, Corr D J, et al. Effects of interfacial transition zones on the stress - strain behavior of modeled recycled aggregate concrete [J]. Cement & Concrete Research, 2013, 52: 82-99
- [22] Zhang C, Yang X, Gao H. Effect of randomness of interfacial properties on fracture behavior of concrete under uniaxial tension[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2018, 31(2): 174-186
- [23] 张君, 刘骞, 王林. 混凝土内裂纹沿水泥石/骨料界面或穿透骨料发展的条件[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(3): 387-390 (Zhang Jun, Liu Qian, Wang Lin. Conditions promoting crack growth in concrete along the aggregate/matrix interface or into the aggregate [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(3): 387-390 (in Chinese))
- [24] Rosselló C, Elices M. Fracture of model concrete: 1. Types of fracture and crack path [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(8): 1441-1450
- [25] Rosselló C, Elices M, Guinea G V. Fracture of model concrete: 2. Fracture energy and characteristic length [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(7): 1345-1353
- [26] Elices M, Rocco C G. Effect of aggregate size on the fracture and mechanical properties of a simple concrete [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(13): 3839-3851
- [27] Rocco C G, Elices M. Effect of aggregate shape on the mechanical properties of a simple concrete [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76: 286-298
- [28] Struble L, Skalny J, Mindess S. A review of the cement-aggregate bond[J]. Cement and Concrete Research, 1980, 10(2): 277-286
- [29] Ollivier J P, Maso J C, Bourdette B. Interfacial transition zone in concrete[J]. Advanced Cement Based Materials, 1995, 2: 30-38
- [30] Scrivener K L, Crumbie A K, Laugesen P. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete[J]. Interface Science, 2004, 12(4): 411-421
- [31] 朱亚超, 宋玉普, 王立成. 砂浆-骨料界面拉伸软化性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(1): 91-95 (Zhu Yachao, Song Yupu, Wang Licheng. Experiment on tension softening behavior of mortar-aggregate interface [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(1): 91-95 (in Chinese))
- [32] Jebli M, Jamin F, Malachanne E, et al. Experimental characterization of mechanical properties of the cement-aggregate interface in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 161: 16-25
- [33] 何渐渐, 郑学成, 林社勇. 粉煤灰混凝土强度统计特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增1): 59-65 (He Xixi, Zheng Xuecheng, Lin Sheyong. The experimental studies on the statistical characteristics of fly ash concrete strength [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(S1): 59-65 (in Chinese))
- [34] 金浏, 韩亚强, 杜修力. 混凝土单轴动态拉伸强度随机性的统计特性分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(24): 6-13, 26 (Jin liu, Han Yaqiang, Du Xiuli. Statistical investigation the randomness of uniaxial dynamic tensile

- strengths of concrete [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(24): 6-13, 26 (in Chinese))
- [35] DL/T 5330—2015 水工混凝土配合比设计规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015 (DL/T 5330—2015 Code for mix design of hydraulic concrete [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015 (in Chinese))
- [36] Xu G, Wang H. Molecular dynamics study of interfacial mechanical behavior between asphalt binder and mineral aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2016, 121: 246-254
- [37] 杜修力, 金浏, 李冬. 混凝土与混凝土结构尺寸效应述评(I): 材料层次[J]. 土木工程学报, 2017, 50(9): 28-45 (Du Xiuli, Jin Liu, Li Dong. A state-of-the-art review on the size effect of concretes and concrete structures (I): concrete materials [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(9): 28-45 (in Chinese))
- [38] 杜修力, 金浏, 李冬. 混凝土与混凝土结构尺寸效应述评(II): 构件层次[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 24-44 (Du Xiuli, Jin Liu, Li Dong. A state-of-the-art review on the size effect of concretes and concrete structures (II): RC members [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11): 24-44 (in Chinese))

李 冬(1988—), 男, 博士, 助理研究员。主要从事混凝土材料多尺度分析理论研究。

金 浏(1985—), 男, 博士, 教授。主要从事混凝土及混凝土结构领域研究。

杜修力(1962—), 男, 博士, 教授。主要从事结构工程及地震工程领域研究。

刘晶波(1956—), 男, 博士, 教授。主要从事结构工程及防灾减灾工程领域研究。

段文会(1973—), 男, 博士, 教授。主要从事纳米科学和纳米材料在土木工程中的应用研究。

(上接第 22 页)

2009, 31(8): 1648-1660

- [14] Design specifications for highway bridges: Part V seismic design[S]. Tokyo: Japan Road Association, 2002
- [15] JTG/T B02-01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008 (JTG/TB02-01—2008 Guidelines for seismic design of highway bridges [S]. Beijing: China Communications Press, 2008 (in Chinese))
- [16] 殷芝霖, 李玉温. 钢筋混凝土结构中预埋件的设计方法(七)——拉剪和拉弯剪预埋件[J]. 工业建筑, 1988, 25(10): 39-50
- [17] 潘毅, 时胜杰, 常志旺, 等. 近断层脉冲地震动对基础隔震结构放大效应的量化分析[J]. 土木工程学报, 2018, 51(11): 8-16 (Pan Yi, Shi Shengjie, Chang Zhiwang, et al. Quantitative study on amplification effect of base-isolated structures subjected to near-fault pulse-like ground motions [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(11): 8-16 (in Chinese))
- [18] 潘毅, 季晨龙, 卢立恒, 等. 地震动频谱特性对基础隔震结构双向地震响应的影响[J]. 土木工程学报, 2013, 46(5): 50-55 (Pan Yi, Ji Chenlong, Lu Liheng, et al. Effects of ground motion characteristics on bilateral seismic response of base-isolated structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(5): 50-55 (in Chinese))
- [19] ATC Quantification of building seismic performance factors [R]. Washington: Federal Emergency Management Agency, 2009
- [20] Shome N. Probabilistic seismic demand analysis of non-linear structures[D]. Palo Alto: Stanford University, 1999
- [21] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010 (GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010 (in Chinese))
- [22] 潘毅, 赵崇锦, 常志旺, 等. 大跨异形钢连廊连体结构振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(2): 66-77 (Pan Yi, Zhao Chongjin, Chang Zhiwang, et al. Shaking table test of connected structure with large-span special-shaped steel corridor [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(2): 66-77 (in Chinese))

潘 毅(1977—), 男, 博士, 教授。主要从事建筑结构抗震设计、鉴定与加固研究。

胡思远(1994—), 男, 硕士研究生。主要从事建筑结构抗震与隔震设计的研究。

赵崇锦(1993—), 男, 硕士研究生。主要从事建筑结构抗震与减震设计的研究。

李 晰(1984—), 男, 博士, 讲师。主要从事桥梁结构的抗震与减震研究。