材料研究与应用 2022,16(2):205-213 Materials Research and Application http://mra.ijournals.cn Email:clyjyyy@gdinm.com

文章编号:1673-9981(2022)02-0205-09

粗骨料嵌锁型混凝土的细观断裂机理研究

张雨,李犇*,余盈,张琛

(佛山科学技术学院交通与土木建筑学院,佛山市智慧型陆地与海洋土木工程材料工程技术研究开发中心,广东佛山528225)

摘要:粗骨料形成的骨架对混凝土的宏观力学性能,特别是断裂性能有重要影响。基于细观力学和断裂 力学,对粗骨料嵌锁型混凝土的力学性能和断裂特性进行了理论模拟和实验研究。通过理论计算,建立了 粗骨料嵌锁型混凝土的断裂机理。同时,通过试验测试不同粗骨料增加率的嵌锁型混凝土的力学性能,并 且结合压汞法测孔试验,分析粗骨料体积对嵌锁型混凝土力学性能和断裂特性的影响。最后,通过对比分 析理论计算与实验结果之间的误差,建立了粗骨料嵌锁型混凝土的断裂机理。结果表明:混凝土的力学性 能和断裂特性随着粗骨料体积的增大均呈现先增加后减小的趋势,当粗骨料体积增加一定量时,混凝土的 抗压强度、抗折强度和断裂能得到显著提高。通过理论计算发现,当粗骨料增加率小于20%时,随着粗骨 料体积的增大,抗压强度和弹性模量模拟结果与试验结果的计算误差逐渐趋于稳定,断裂能的模拟结果和 试验结果具有相同的变化规律。故所提出的细观力学计算模型,对于预测粗骨料嵌锁型混凝土的断裂特 性具有较高的精度。

关键词: 粗骨料混凝土;孔隙结构;细观力学模型;断裂特性;力学性能 **中图分类号:**TU502 **文献标志码:** A

引文格式:张雨,李犇,余盈,等. 粗骨料嵌锁型混凝土的细观断裂机理研究[J]. 材料研究与应用,2022,16(2):205-213. ZHANG Yu, LI Ben, YU Ying, et al. Research on Mesoscopic Fracture Mechanism of Coarse Aggregate Interlocking Concrete[J]. Materials Research and Application,2022,16(2):205-213.

混凝土是含有砂浆和骨料的两相复合材料^[1-3], 混凝土的行为取决于每个相的性质及其相互作用。 常规混凝土的原材料由水泥、砂石和水组成,其中水 泥砂浆占比很大,而混凝土中粗料含量通常控制在 较低水平^[4]。粗骨料是混凝土强度的框架,通常是 混凝土材料中强度最高、耐久性最好以及体积稳定 性最好的结构单元^[5-6]。作为一种复合材料,只要骨 料能够与水泥砂浆很好地结合,其性能就会随着骨 料体积分数的增加而增加。随着混凝土掺量的增加 和混凝土强度等级的提高,混凝土中水泥和胶凝材 料的数量增加,导致大量混凝土在早期出现非常明 显的裂缝,这影响了混凝土的服役性能,并已成为混 凝土一种常见的"富贵病"^[78]。 混凝土的力学性能是建筑结构设计的基础和混 凝土结构的基本技术要求^[9-11]。然而,力学性能并不 是混凝土的绝对特征,它还受许多因素的影响。如 在早期阶段,混凝土中大量的水泥和凝胶材料会引 起显著的开裂现象,进而影响其后期的力学及耐久 性能;粗骨料的体积含量相对较低,不仅不能充分发 挥骨料强度对混凝土性能的提升作用,而且还会增 加混凝土成本,造成资源浪费和环境负担增加等问 题;混凝土的强度、优异的工作性能和耐久性能间的 矛盾。目前,一些学者通过研究混凝土的骨胶比、粗 骨料的最大粒径或体积掺量来构造高性能和高体积 稳定的骨料嵌锁型混凝土,以期优化混凝土材料的 综合性能及增大应用范围^[12-14]。其中,作为一种新

收稿日期:2021-11-24

基金项目:广东高校科研项目(青年创新人才项目)(2021KQNCX083)

作者简介:张雨(1998-),女,云南大理人,研究生,主要研究方向为固废资源化,E-mail:924155254@qq.com。

通信作者:李犇(1989-),男,博士,教授,主要研究方向为固废资源化及制备建材的关键技术、水泥基材料的多尺度损伤机理、水泥基材料的耐候性损伤机理,E-mail:sktm1@163.com。

(3)

提出的粗骨料嵌锁型混凝土,现浇骨料混凝土是通 过最大限度地提高材料性能和减少病害发生来改善 混凝土使用寿命的新方法^[15-17]。与传统混凝土相 比,粗骨料有效嵌锁对混凝土的基本力学性能、耐久 性能、经济性能及环保等方面都有积极的影响^[18]。 此外,一些学者通过对骨料嵌锁型混凝土的实验和 工程应用进行了一些研究,但其力学机理,特别是断 裂理论尚未得到系统的研究。断裂或开裂特性是混 凝土最重要的工程和材料特性,是确保混凝土稳定 性的必要标志。此外,骨料嵌锁型混凝土内部纳米 结构和水化产物会受到粗骨料的影响从而进行重新 分配。传统的力学模型在表征其断裂机理方面并不 全面,需要建立多尺度模型进行理论分析。

在此背景下,研究骨料嵌锁型混凝土的断裂机 理和理论计算模型。在细观力学与混凝土介观结构 变化相结合的基础上,通过理论计算与数值分析,为 骨料嵌锁型混凝土的力学机理提供理论补充和 支持。

1 理论分析

基于能量、裂缝发展规律等因素,考虑粗骨料的

1.1 粗骨料嵌锁型混凝土的 RVE 模型

假设细观尺度下混凝土基体中存在体积为V 的弹性体,弹性体中粗骨料引起的夹杂和扰动中存 在一个夹杂子域。基域和包含域具有不同的弹性张 量和柔度张量。粗骨料相互作用产生的孔隙结构包 裹体的不均匀性,会在均匀固体中产生应力场和应 变场扰动。因此,含有孔隙结构夹杂物的弹性固体 的应力应变方程可以表示为:

$$\sigma(X, x) = \sigma^{0}(X) + \sigma^{d}(x)$$
(1)

$$(X, x) = \varepsilon^{0}(X) + \varepsilon^{d}(x)$$
⁽²⁾

式(1)和式(2)中, $\sigma(X,x)$ 为含孔隙结构夹杂物水泥 基弹性体的应力, $\epsilon(X,x)$ 为含孔隙结构夹杂物水泥 基弹性体的应变, $\sigma^{0}(X)$ 为水泥基弹性体的应力, $\epsilon^{0}(X)$ 为水泥基弹性体的应变, $\sigma^{d}(x)$ 为非均质孔隙 结构的扰动应力, $\epsilon^{d}(x)$ 为非均质孔隙结构的扰动 应变。

通过特征应变场与实际应变场的叠加,得到等 效均匀固体应力场与原始非均匀应力场的关系。

子域。因此,可以得到硬化混凝土中粗骨料相互作

用而产生的孔结构特征应力场。

$$\sigma(X,x) = C: [\varepsilon(X) - \varepsilon^*(x)] = \begin{cases} C: [\varepsilon^0(X) + \varepsilon^d(x)], (x, X \subset M) \\ C: [\varepsilon^0(X) + \varepsilon^d(x) - \varepsilon^*(x)], (x, X \subset \Omega) \end{cases}$$

式(3)中*C*是非均匀固体的弹性张量,ε^{*}(*x*)是模拟 材料失配、缺陷、孔隙结构或不均匀性失配的特征应 变,*M*是固体细观尺度的特征域,Ω是固体中的夹杂

 $\sigma_{pore}^{*}(x) = C^{l} : [\varepsilon_{ij}^{*}(x)]_{pore} = C^{l} : [\varepsilon^{0}(X) + \varepsilon^{d}(x)] - \sigma(X, x)$ $\tag{4}$

式(4)中C¹为包含场的弹性张量。

在无限空间中,孔结构中的特征应变场引起的 诱导位移场可确定为:

$$\begin{bmatrix} u_i(x) \end{bmatrix}^{pore} = -\int_{R^3} C_{jlmn} \varepsilon_{mn}^*(y) G_{ij,l}^{\infty}(x-y) d\Omega_y$$

$$= -\varepsilon_{mn}^* \int_{\Omega} C_{jlmn} G_{ij,l}^{\infty}(x-y) d\Omega_y$$

$$= \frac{\varepsilon_{mn}^*}{8\pi(1-v)} \left\{ \frac{\partial^3 \psi}{\partial x_i \partial x_m \partial x_n} - 2(1-v) \left[\delta_{mi} \frac{\partial \phi}{\partial x_n} + \delta_{mi} \frac{\partial \phi}{\partial x_m} \right] - 2v \delta_{mn} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right\}$$
(5) $\text{tr} \left[u(x) \right]^{pore} = \frac{4}{5} \text{tr} \text{ tr} \text{ tr}$

式(5)中 $\left[u_i(x)\right]^{pore}$ 是特征应变引起的位移场, $C_{imn}G_{ii,l}^{\infty}(x-y)$ 是格林变换公式, R^3 是无限空

对于粗集料锁混凝土,弹性应变场可表示为:

$$\varepsilon_{ij}(x) = \left\{ \frac{1}{2} \left[u_{i,j}(x) + u_{j,i}(x) \right] \right\} = \frac{\varepsilon^*(x)}{8\pi(1-v)} \left[\psi_{,mnij} - 2v\delta_{mn}\phi_{,ij} - (1-v)(\delta_{mi}\phi_{,nj} + \delta_{ni}\phi_{,mj} + \delta_{mj}\phi_{,ni} + \delta_{ni}\phi_{,mj} \right]$$

$$(6)$$

1.2 骨料嵌锁型混凝土的弹塑性本构关系

根据胡克定律,弹性应变与柯西应力的关系为:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}'(x) &= C_{ijkl}^{\text{concrete}} \varepsilon_{ij}^{* \text{ concrete}}(x) + C_{ijkl}(\varepsilon_{ij}^{* \text{ concrete}}(x) - [\varepsilon_{ij}(x)]_{\text{pore}} - [\varepsilon_{ij}(x)]^{\text{pore}}) \\ &= C_{ijkl}^{\text{concrete}} u_{i,j}^{\text{concrete}}(x) + C_{ijkl}(u_{i,j}^{\text{concrete}}(x) - [\varepsilon_{ij}^{*}(x)]_{\text{pore}} - [\varepsilon_{ij}(x)]^{\text{pore}}) \end{aligned}$$
(7)

粗集料联锁混凝土弹塑性本构关系的理论解确定为:

$$[\sigma_{FAC}]_{ij} = \sigma'_{ij}(x) = \underbrace{[\overline{C_{FAC}}]_{ijkl} \bigotimes [\varepsilon_{FAC}]^{kl}}_{\text{elestic}} + \underbrace{[\overline{C'_{FAC}}]_{ijkl} \bigotimes [\varepsilon'_{FAC}]^{kl}}_{\text{plestic}}$$
(8)

式(8)中[$\overline{C_{FAC}}$]_{ijkl}是弹性阶段混凝土的有效模量, [$\overline{C_{FAC}}$]_{ijkl}是塑性阶段混凝土的有效模量,[ε_{FAC}]^{ill}和 [ε_{FAC}]^{ill}是弹塑性阶段混凝土的应变,[σ_{FAC}]_{ij}是荷载 应力。

基于广义自治法理论,推导了弹性阶段混凝土

$$C^{pq}{}_{FAC} = \left[1 + \frac{16}{9} \frac{1 - \vartheta_{1}^{2}}{1 - 2\vartheta} f(V_{\text{Coarse aggregate interlocking}}) + \frac{4.35 - 2.06(1 + \vartheta_{1})}{1 - 2\vartheta} f^{2/5}(V_{\text{Coarse aggregate interlocking}})\right] \times C^{pq}{}_{f(V_{\text{Coarse aggregate interlocking}})} + \left[1 + \frac{16}{9} \frac{1 - \vartheta_{2}^{2}}{1 - 2\vartheta} f(\phi_{\text{pore}}) + \frac{4.35 - 2.06(1 + \vartheta_{2})}{1 - 2\vartheta} f^{2/5}(\phi_{\text{pore}})\right] C^{pq}{}_{\text{ITZ}}$$

$$(9)$$

式(9)中 C^{Pq}_{FAC} 为混凝土的有效模量, $C^{Pq}_{f(V_{Course sugregate interdexting})}$ 为嵌锁作用下粗骨料的模量, C^{Pq}_{ITZ} 为ITZ的模量, ∂_1 为嵌锁作用下粗骨料的泊松比, ∂_2 为ITZ的泊松比, $f(V_{Coarse aggregate interlocking})$ 是粗嵌锁的密度分布, $f(\phi_{pore})$ 是孔隙结构的分布表征函数。

1.3 骨料嵌锁型混凝土的断裂韧度方程

利用塑性发展过程中的屈服函数预测材料的断裂过程。因此,基于Gurson模型建立混凝土的断裂 屈服方程为:

$$\Phi(\sigma_{ij}(x), \sigma_{e}, f^{*}(\phi_{\text{pore}})) = \left(\frac{\sum_{eq}}{\sigma_{e}}\right)^{2} + 2f^{*}(\phi_{\text{pore}}) \cosh \frac{\overline{C_{FAC}} \cdot \overline{\overline{C_{FAC}}}}{\overline{C_{FAC}} - \overline{C_{FAC}}} \left(\frac{3\sum_{m}}{2\sigma_{e}}\right) - 1 - f^{*}(\phi_{\text{pore}})^{2} = 0$$
(10)

$$f^{*}(\phi_{\text{pore}}) = f_{c}(\phi_{\text{pore}}) + \frac{0.53 - f_{c}(\phi_{\text{pore}})}{f_{fra}(\phi_{\text{pore}}) - f_{c}(\phi_{\text{pore}})} (f(\phi_{\text{pore}}) - f_{c}(\phi_{\text{pore}}))$$
(11)

$$\overline{C^{pq}}_{FAC} = \left[1 + \frac{16}{9} \frac{1 - \vartheta^{2}}{1 - 2\vartheta} f(V_{\text{Coarse aggregate interlocking}}) + \frac{4.35 - 2.06(1 + \vartheta)}{1 - 2\vartheta} f^{2/5}(V_{\text{Coarse aggregate interlocking}})\right] \times C^{pq}_{f(V_{\text{Coarse aggregate interlocking}})} + (1 - D') \left[1 + \frac{16}{9} \frac{1 - \vartheta^{2}}{1 - 2\vartheta} f^{*}(\phi_{\text{pore}}) + \frac{4.35 - 2.06(1 + \vartheta)}{1 - 2\vartheta} f^{*, 2/5}(\phi_{\text{pore}})\right] C^{pq}_{\text{TTZ}} \\ = \left[1 + \frac{16}{9} \frac{1 - \vartheta^{2}}{1 - 2\vartheta} f(V_{\text{Coarse aggregate interlocking}}) + \frac{4.35 - 2.06(1 + \vartheta)}{1 - 2\vartheta} f^{2/5}(V_{\text{Coarse aggregate interlocking}})\right] \times C^{pq}_{f(V_{\text{Coarse aggregate interlocking}})} + (1 - \frac{\Delta R}{R_{N}}) \left[1 + \frac{16}{9} \frac{1 - \vartheta^{2}}{1 - 2\vartheta} f^{*}(\phi_{\text{pore}}) + \frac{4.35 - 2.06(1 + \vartheta)}{1 - 2\vartheta} f^{*, 2/5}(\phi_{\text{pore}})\right] C^{pq}_{\text{TTZ}} \right]$$

$$(12)$$

式(10)至式(12)中 $\Phi(\sum_{ij}, \sigma_e, f^*(\phi_{pore}))$ 是混凝土的 屈服函数, $\sigma'_{ij}(x)$ 是宏观应力, σ_e 是等效屈服应力, \sum_{eq} 是Mises屈服应力, \sum_m 是静水应力, $f^*(\phi_{pore})$ 是屈服过程中ITZ的孔隙率分布函数, $f_c(\phi_{pore})$ 是孔 合流开始时的孔隙率分布函数, $f_{fra}(\phi_{pore})$ 是材料断 裂时的临界孔隙度分布函数,D'是载荷作用下的损 伤因子, ΔR 是ITZ的孔径变化值, R_N 是ITZ的孔径 特征值。

根据断裂准则,确定粗骨料嵌锁型混凝土的断 裂韧度方程为:

$$\tilde{G}_{FAC} = \frac{2\pi (\sigma_e)^2}{\overline{C^{p_q}}'_{FAC}}$$
(13)

式(13)中 \tilde{G}_{FAC} 为粗骨料混凝土的断裂韧度。

2 实验方案

2.1 原材料及配合比

实验所用原材料为当地普通硅酸盐水泥(P.O 42.5N)细度模量为2.3的当地河砂,及水等。当地 石灰石用作粗骨料,其尺寸为5~25 mm。普通硅酸 盐水泥的基本性能及化学组成分别列于表1和表2, 河砂和粗骨料的物理性质列于表3。

表1 水泥的基本性能

抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		細亩	凝结时间/min	
3天	28天	3天	28天	细皮	初凝时间	终凝时间
5.2	7.1	22.1	51.8	1.8	46	93

Table 2	Chemical properties of Portland cement					
化学组成	烧失量/%	化学组成	烧失量/%			
SiO_2	21.50%	TiO ₂	0.23%			
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	4.50%	Na ₂ O	0.33%			
$\mathrm{Fe}_{2}\mathrm{O}_{3}$	3 %	K_2O	0.39%			
CaO	65.70%	SO_3	2%			
MgO	1.30%	$P_{2}O_{5}$	0.27%			
Mno	0.14%	Cl	0.01%			

夫9 水泥的化学组成

水灰比为0.45,粗骨料按基本骨料体积百分比

 表3 骨料的物理性能

 Table 3 Physical properties of aggregates

 物理性能
 细骨料(天然石)

 型素(研究)
 和骨料(碎石)

尺寸/mm	$0.16 \sim 2.5$	5~20.5
表观密度/(kg·m ⁻³)	2,540	2,590
24小时吸水率/%	3.06	2.17
细度模数	2.37	—

增加,分别为5%、10%、15%、20%和25%,混凝土 配合比列于表4。

		表 4	粗骨料混凝土的	り配合比			
	Table 4 Mixing proportions of coarse aggregate interlocking concrete					$/(kg \cdot m^{-3})$	
编号	水泥	水	砂	基础石	额外增加石	外加剂	
PT-0	493.3	222	736	1428.6	0	2.22	
PT-5	493.3	222	736	1428.6	509	2.22	
PT-10	493.3	222	736	1428.6	1018	2.22	
PT-15	493.3	222	736	1428.6	1527	2.22	
PT-20	493.3	222	736	1428.6	2036	2.22	
PT-25	493.3	222	736	1428.6	2545	2.22	

2.2 试件的制备与养护

混凝土试件的制备按照规范JTG 3420-2020^[19],混凝土试样尺寸分别为150 mm×150 mm×150 mm(144件)、100 mm×100 mm×300 mm(108件)和150 mm×150 mm×300 mm(108 件),试样在24h后脱模。然后将每个样品置于饱 和石灰水中,在室温(即20±2℃,RH≥95%)下按 GB/T50081-2002^[20]进行28天的养护。

2.3 实验方法

2.3.1 粗骨料嵌锁型混凝土的强度及弹性模量 试验

根据 GB/T50081-2002^[20],对 150 mm×150 mm×150 mm×150 mm(144 块)试件进行 28 天抗压、抗折和 轴压强度试验。

按 GB/T50081-2002^[20]的规定,30% 轴压抗压 强度应力下的割线模量作为弹性模量值。实验制作 的 试 样 尺 寸 为 100 mm×100 mm×300 mm (108件)。

2.3.2 粗骨料嵌锁型混凝土的断裂韧性试验

采用缺口三点弯曲梁法,测定粗骨料混凝土的 断裂韧度。通过在试样侧面切割,使试样产生裂纹。 宽度控制在3±1 mm,长度控制在80±2 mm,结合 面与试件成90±0.5°。具体实验根据GB/T500812002^[20]进行操作,实验制作的试样尺寸为150 mm×150 mm×300 mm(108件)。

2.3.3 压汞法(MIP)分析

压汞法是研究水泥基材料孔隙特性最常用的方法。该方法相对简单,通常产生可重复的孔径分布。 从这些孔径分布可以推断出总孔径、总孔隙率和理 论孔径等重要的特征参数。随着压力的增加,汞被 压入混凝土样品的孔隙结构中,汞填充样品后可以 得到侵入压力与孔隙半径的关系。对混凝土细颗粒 (5组,每组6个固体样品)进行压汞试验分析。

3 结果与讨论

3.1 粗骨料嵌锁型混凝土的力学性能

图1分别为粗骨料嵌锁型混凝土抗压和抗折强 度的试验结果。从图1可见:宏观力学强度,随粗骨 料体积率的增大呈现先增大后减少的趋势;当外部 粗骨料体积分数为0%~20%时,强度随集料取代 率的增加而增加;当粗骨料体积率为15%~20% 时,抗压强度和抗折强度达到最大值,分别提高 40%和36%;当粗骨料体积率为25%时,宏观力学 性能显著降低。这是因为混凝土中粗骨料过多时难 以压实,从而降低了机械强度。然而,由于骨料之间 的嵌锁效应,最终力学强度仍高于参考值。



⁽a) 抗压强度;(b)抗折强度。(a) compressive strengths; (b) flexural strengths.

压缩断裂界面形态的对比分析如图2所示。从 图2可见:粗骨料体积比的增大,促进了混凝土水化 过程中骨料相互嵌入和相互咬合的空间分布的形 成,也降低了荷载作用下贯穿裂缝的分布概率;当粗 骨料体积比为20%时,试件的芯部在压碎破坏时没 有明显的裂纹。



(a) PT-0;(b) PT-5;(c) PT-10;(d) PT-15;(d) PT-20;(e) PT-25.
 图2 不同掺量下粗骨料嵌锁型混凝土的破坏形貌

Fig. 2 Failure modes of coarse aggregates interlocking concrete subjected to different amount of coarse aggregates under compressive load

图 3 为粗骨料嵌锁型混凝土的弹性模量。从图 3 可见:当骨料体积增量为5%、10%、15%及20% 时,其弹性模量分别比基准组增加3.3%、6.6%, 13%和19.8%;当骨料体积为25%时弹性模量开 始下降,其变化及演变与上述强度特性的结果相似。

3.2 粗骨料嵌锁型混凝土的断裂特性

图4和图5分别为粗骨料嵌锁型混凝土断裂试 验中的初始断裂载荷、初始断裂韧度和极限断裂载 荷的结果。从图4和图5可见:与基准混凝土相比, 随着骨料掺量的增加,开裂荷载呈现先增大后减小 的趋势;当骨料体积增加20%时,初始裂纹荷载开 始呈现下降趋势;当粗骨料掺量增加0%~20%时,





图 1 不同掺量下粗骨料嵌锁型混凝土的抗压强度及抗折强度 Fig. 1 Compressive strengths and flexural strengths of coarse aggregates interlocking concrete subjected to different amount of coarse aggregates

产生初始裂缝和极限荷载增大,这是因为骨料的增 多使混凝土内部的材料填充密实,提高了材料的整 体密实度;当增量达到20%~25%时,过多的粗骨



⁽a)断裂载荷;(b)断裂韧性。(a) failure load;(b) fracture toughness.

图 4 粗骨料嵌锁型混凝土的初始断裂荷载和初始断裂韧度 Fig. 4 Initiation failure load and fracture toughness of coarse aggregates interlocking concrete



Fig. 5 Ultimate load of coarse aggregates interlocking concrete

根据断裂力学中的经典计算公式,可以得到粗 骨料嵌锁型混凝土在不同粗骨料体积增量下的试验 断裂能,其结果如图6所示。从图6可见:当粗骨料 体积为0%~15%时,断裂能呈增加趋势,体积每增 加5%,断裂能分别增加12.3%、17.6%和19.4%, 这是由于在断裂过程中粗骨料之间形成一定的摩擦 力,间接增加了粗骨料与粗骨料及粗骨料与胶凝材 料之间的咬合力,从而提高了断裂能;当粗骨料体积 分数达到20%时,断裂能呈下降趋势,与15%集料 体积分数相比,下降了15.3%;当粗骨料体积增加 到25%时,由于压实度的降低,材料间的咬合力开 始减小,导致断裂能呈现下降趋势。

料会影响混凝土的和易性,从而降低混凝土的粘结

力,产生更多的内部裂缝。这导致混凝土断裂过程

中产生了初始裂缝和极限荷载的减少的现象。



图 6 粗骨料嵌锁型混凝土的断裂能 Fig. 6 Fracture energy of coarse aggregates interlocking concrete

3.3 粗骨料嵌锁型混凝土的孔径分布

图 7 为粗骨料嵌锁型混凝土的孔径分布变化曲线,图 8 为孔隙率和临界孔径等特征孔隙参数。从图 7 和图 8 可见:孔径为 0~0.1 nm 时,累计进汞量下降速率较快,并且随着粗骨料体积的增加,曲线总体向左移动。同时,峰值(最大孔径)向左移动,且峰

值呈减小趋势;随着粗骨料体积的增加,混凝土的孔 隙率和临界孔隙率逐渐减小且略有降低,表明适当 增加粗骨料的掺量,不仅能起到原有强度骨架的作 用,而且能提高混凝土的内部密实度,降低内部孔隙 密度,从而提高混凝土的极限强度和抗折强度;但由 于和易性的影响和胶凝材料包裹不足,当粗骨料体 积增加20%~25%时,孔密度增大,极限强度和断裂能显著降低。综上所述,粗骨料与混凝土孔结构的施工有着重要的关系,孔隙率和临界孔径的变化对断裂韧度和极限强度有显著影响,为理论模拟计算提供了相关的计算参数。



⁽a)累积汞;(b)孔径分布。

(a) cumulative mercury; (b) pore size distribution.

图 7 粗骨料嵌锁型混凝土的孔径分布 Fig. 7 Pore size distribution of coarse aggregates interlocking concrete



图 8 租骨料嵌锁型混凝土的孔隙参数 Fig. 8 Pore parameters of coarse aggregates interlocking concrete

3.4 基于细观断裂模型计算的粗骨料嵌锁型混凝 土断裂特征

基于建立的粗骨料嵌锁型混凝土的断裂理论模型,对其断裂特性进行理论计算并与实验结果进行 了比较,比较结果及误差分析如图9和图10所示。 综合分析计算与实验对比结果发现:对于抗压强度 和弹性模量的模拟,模拟结果均高于试验结果;对于 断裂能的模拟,其模拟结果与实验结果具有相同的 规律;抗压强度和弹性模量的模拟,随着粗骨料体积 的增大计算误差逐渐趋于稳定(3%~4%),粗骨料 体积增长较大(大于20%)时计算结果精度不理想, 表明计算结果受粗骨料影响且产生较大的波动和误 差。对于断裂能的模拟结果,当粗骨料的增加量小 于20%时计算误差较小(误差为2%),能较好地反 映混凝土断裂过程中断裂能的发展特征,当粗骨料 体积增加较大(大于20%)时计算误差很大。如何 提高相关计算结果的准确性,是该模型仍需改进和 完善的研究内容。综上所述,所建立的细观尺度力 学模型具有一定的理论基础和计算精度。



(a) 抗压强度;(b) 弹性模量;(c) 断裂能。

(a) compressive strength; (b) elastic modulus; (c) fracture energy.

图 9 粗骨料嵌锁型混凝土试验与模拟计算结果比较 Fig. 9 Comparison of experimental and numerical results of coarse aggregates interlocking concrete



图 10 粗骨料嵌锁型混凝土的抗压强度、弹性模量和断裂能的计算误差值

Fig. 10 Calculated errors of compressive strength, elastic modulus and fracture energy between experimental and numerical results

4 结论

基于细观力学RVE模型和断裂力学机理,建立 了新型细观断裂模型,并将其应用于计算粗骨料嵌 锁型混凝土的断裂特性,并得出以下结论。

(1)对混凝土的极限强度和断裂特性进行了试验和理论研究。在一定范围内,粗骨料掺量的增加可以显著提高混凝土的宏观强度和抗折强度。但随着掺量的增加,由于粗骨料过多导致胶凝材料的工作性能降低、凝结硬化降低和孔隙结构分布不均等,使得宏观力学性能下降,但仍高于参考值。

(2)混凝土的力学性能和断裂特性均随着粗骨 料体积的增加呈先增加后减小的趋势,当粗骨料体 积增量为20%时,抗压强度和弹性模量最高,断裂 荷载最大,断裂韧度最强;当粗骨料体积增量为 15%时,抗折强度和断裂能最高。

(3)当粗骨料体积增加率小于 20% 时,抗压强 度和弹性模量的模拟结果均高于试验结果,但随着 骨料增多,计算误差降低;断裂能的模拟结果规律与 试验结果一致,基于建立的细观断裂模型,可以较好 地评估和预测粗骨料嵌锁型混凝土的力学响应和发 展,其理论计算的结果具有较高的精度。

参考文献:

- [1] SUN G, ZHANG Y, SUN W. Multi-scale prediction of the effective chloride diffusion coefficient of concrete [J]. Constr Build Mater, 2012,25(10): 3820-3831
- [2] TANG L P. Engineering expression of the Clinconc model for prediction of free and total chloride ingress in submerged marine concrete [J]. Cem Concr Res, 2008, 28 (3): 1092-1097.
- [3] ZHANG M Z, YE G, BREUGEL K V. Multiscale lattice Boltzmann-finite element modelling of chloride diffusivity in cementitious materials Part I: Algorithms and implementation[J]. Mech Res Com, 2014, 58 (2): 53-63.
- [4] 崔啸宇. 粗骨料嵌锁型路面混凝土工程应用研究[D]. 湖北:武汉理工大学,2011.
- [5] ZHANG Mingzhong, YE G, BREUGEL K V. Multiscale lattice Boltzmann-finite element modelling of chloride diffusivity in cementitious materials Part II: Simulation results and validation [J]. Mech Res Com, 2014, 28: 64-72.
- [6] TRUC O, OLLIVIER J P, NILSSON L O. Numerical simulation of multi-species diffusion [J]. Mater Struct, 2010,33:566-573.
- [7] BODDY A, BENTZ E, THOMAS M D A, et al. The university of Toronto chloride transport model: An overview and sensitivity study [J]. Cem Concr Res, 2001,12: 827-837.
- [8] GLASSER F P, MARCHAND J, SAMSON E. Durability of concrete-degradation phenomena involving detrimental chemical reactions [J]. Cem Concr Res, 2008,38 (11): 226-246.
- [9] COOK R A, HOVER K C. Mercury intrusion porosimetry of cement-based materials and associated

correction factors [J]. Constr Build Mater, 2007, 7 (4) : 231-240.

- [10] KAUFMANN J, WINNEFELD F, ZURBRIGGEN R. Polymer dispersions and their interaction with mortar constituents and ceramic tile surfaces studied by zetapotential measurements and atomic force microscopy [J]. Cem Concr Com, 2012,34(5): 604-611.
- [11] TRAN M V, STITMANNAITHUM B. Chloride penetration into concrete using various cement types under flexural cyclical load and tidal environment [J]. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 2015, 13: 201-214.
- [12] 潘慧敏,左建航,宋嵘杰.粗骨料最大粒径对混凝土受早期扰动 后力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2020,39(10):3131-3136.
- [13] 沈楚琦,李北星. 粗骨料对超高性能混凝土力学性能的影响及 拟合分析[J]. 材料科学与工程学报,2021,39(1):35-40.
- [14] 程俊,刘加平,刘建忠,等.含粗骨料超高性能混凝土力学性能

研究及机理分析[J].材料导报,2017,31(23):115-119.

- [15] PYO S, ABATE S Y, KIM H K. Abrasion resistance of Ultra high performance concrete incorporating coarser aggregate[J]. Constr Build Mater, 2018, 165:11-16.
- [16] SHAFIEIFAR M, FARZAD M, AZIZINAMINI A. Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra high performance concrete (UHPC) [J]. Constr Build Mater, 2017, 156:402-411.
- [17] LEE M K, BARR B I G_o An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete [J]. Cem Concr Com,2004, 26(4):299-305.
- [18] 栾兰,贾金青. 粗骨料嵌锁型混凝土研究进展综述[J]. 混凝土, 2014(1):35-37。
- [19] 中国建筑科学研究院JTG 3420-2020 公路工程水泥及水泥混 凝土试验规程[S].北京:人民交通出版社,2020。
- [20] 中国建筑科学研究院GB/T50081-2002 普通混凝土力学性 能试验方法标准[S].北京:人民交通出版.2007。

Research on Mesoscopic Fracture Mechanism of Coarse Aggregate Interlocking Concrete

ZHANG Yu,LIBen*,YU Ying,ZHANG Chen

(Foshan University, College of Transportation and Civil Architecture, Foshan Intelligent Research and Development Center of Materials Engineering Technology for Land and Marine Civil Engineering, Foshan 528225, China)

Abstract: The skeleton formed by coarse aggregate has an important influence on the macroscopic mechanical properties of concrete, especially the fracture properties. Based on meso-mechanics and fracture mechanics, this study conducted numerical simulation and experimental analysis on the mechanical and fracture characteristics of coarse aggregate interlocking concrete. Through theoretical and numerical analysis, the fracture mechanism of coarse aggregate interlocking concrete was established. Meanwhile, through testing the mechanical and fracture properties of the interlocking concretes with different increase rates of coarse aggregate, the influence of coarse aggregate volume on the mechanical and fracture properties of interlocking concrete was analyzed. Finally, the theoretical and experimental results were comprehensively discussed and analyzed. This study is beneficial for understanding the fracture mechanism of coarse aggregate interlocking concrete. The results showed that the trend of the fracture strengths of the coarse aggregate was increased and then decreased when the volume of the coarse aggregate was gradually increased. The fracture energy and ultimate strength of concrete were significantly improved by increasing the volume of the coarse aggregate. Through analyzing the simulation results of the compressive strength, elastic modulus and fracture energy, it was found that when the increase rate of coarse aggregate was less than 20%, the of compressive strength and elastic modulus between simulation and experiment were similar. The numerical and experimental results on the fracture energy were also similar. The proposed meso-mechanics calculation model has a high accuracy in predicting the fracture characteristics of coarse aggregates interlocking concrete.

Key words: coarse aggregates interlocking concrete; pore structure; meso-mechanical model; fracture characteristics;mechanical properties

(学术编辑:孙文)