

再生混凝土断裂机理及其增强手段

姚梦园 仝勺珍 张海宁

郑州航空工业管理学院

DOI:10.12238/btr.v8i1.4588

[摘要] 再生混凝土的断裂性能较普通混凝土差,且随着再生骨料取代率的增加而降低,大大阻碍了再生混凝土的工程应用。因此,开展再生混凝土断裂性能的研究至关重要。结合国内外最新研究现状,分别从再生混凝土断裂模型方面对再生混凝土断裂机理进行归纳总结。以此为基础进一步从再生骨料的取代率、预处理方法、掺合料加入、纤维的添加等再生混凝土断裂性能的影响因素的研究现状进行梳理与分析。研究成果对加强废旧混凝土断裂机理及力学增强措施的研究具有引导作用,为进一步提高废旧混凝土的再生利用及推广提供参考。

[关键词] 再生混凝土; 再生骨料; 替代率; 增强手段; 断裂模型

中图分类号: TU528.59 **文献标识码:** A

Investigation of the Fracture Mechanism of Recycled Concrete and Its Enhancement Methods

Mengyuan Yao SaoZhen Tong Haining Zhang

Zhengzhou University of Aeronautics

[Abstract] The fracture properties of recycled aggregate concrete are worse than those of ordinary concrete, and decrease with the increase of recycled aggregate substitution rate, which greatly hinders the engineering application of recycled concrete. Therefore, it is crucial to carry out the research on the fracture properties of recycled aggregate concrete. Combined with the latest domestic and foreign research status, the fracture mechanism of recycled concrete is summarized from the fracture model of recycled concrete. On the basis of this, the current research status of the factors affecting the fracture performance of recycled concrete, such as the substitution rate of recycled aggregate, pretreatment method, addition of admixture and fiber, is sorted out and analyzed. The research results have a guiding role in strengthening the research on fracture mechanism and mechanical enhancement measures of waste concrete, and provide reference for further improving the recycling and promotion of waste concrete.

[Key words] Recycled concrete; recycled aggregate; substitution rate; means of reinforcement; fracture modeling

再生混凝土利用废弃混凝土作为骨料重新制备,有助于持续推进固体废物源头减量和资源化利用^[1],形成先进的城市管理理念与发展模式。断裂性能是混凝土力学性能关键指标,关乎结构耐久性与安全性。再生混凝土因界面过渡区(Interface Transition Zone, ITZ)弱化及骨料非均质性,断裂行为有别于普通混凝土,制约其推广应用。本文旨在总结再生混凝土的断裂模型、影响因素及增强手段进展,为相关设计施工提供依据,推动其可持续发展与建筑行业绿色转型。

1 断裂模型

再生混凝土(Recycled Aggregate Concrete, RAC)的断裂是一个多阶段且复杂的过程。在受力初始阶段,由于再生骨料与新

水泥砂浆界面过渡区的结合相对薄弱。随着外部荷载的持续增加,微裂缝开始沿着界面过渡区或者穿过再生骨料进行稳定扩展。当裂缝发展到一定程度,混凝土内部结构损伤不断累积,剩余承载能力无法承受荷载,裂缝便会迅速贯通,最终致使结构破坏。断裂模型能从理论层面系统阐释裂缝起裂、稳定扩展以及失稳破坏的全过程,为深入理解这一复杂过程提供有效手段,以下是三个常用的断裂模型。

1.1 虚拟裂缝模型

由Hillerborg等^[2]提出的虚拟裂缝模型(FCM)是准脆性材料断裂行为的经典描述模型,常用于混凝土等脆性材料断裂分析,其将裂纹扩展分为真实与虚拟裂缝区,可模拟混凝土裂纹扩

展后的非线性软化行为。在再生混凝土研究中,FCM常评估再生骨料取代率对断裂特性的影响。已有研究显示,传统混凝土断裂模型适用于再生混凝土,且随再生粗骨料(RCA)含量上升,再生混凝土(RAC)断裂韧性呈逐渐降低趋势。

1.2 双K断裂模型

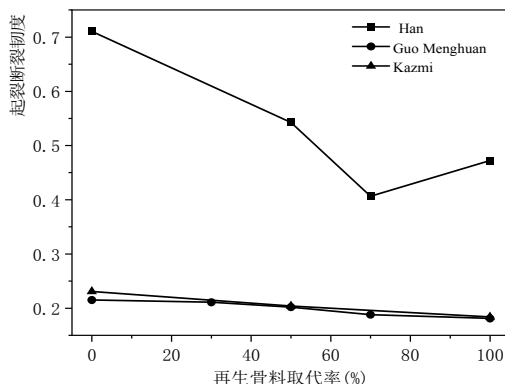
双K断裂模型(DKFM)是基于准脆性材料断裂行为特性提出的一种理论模型^[3],用于描述混凝土裂纹扩展的全过程。该模型在传统线弹性断裂力学基础上引入起裂韧度和失稳韧度两个瞬态来控制混凝土断裂过程中所经历三个阶段(即起裂、稳定扩展和失稳扩展)。在再生混凝土的断裂性能研究中,DKFM得到了广泛应用。通过DKFM,可以分析再生混凝土裂纹起裂阶段和失稳扩展阶段的韧性变化规律。

1.3 边界效应模型

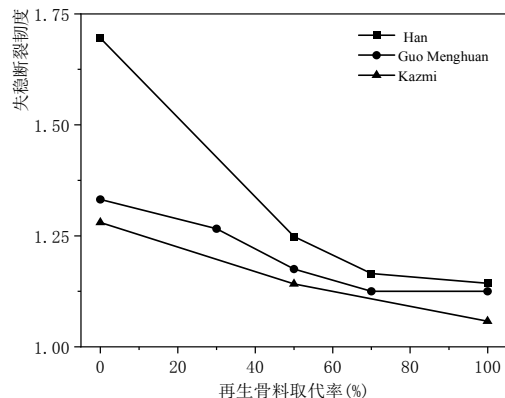
边界效应模型考虑了断裂过程区与结构边界之间的相互作用对结构强度的影响,认为产生尺寸效应的原因不是单一的试件尺寸,而是断裂过程区与试件前后边界的相互影响。Han等^[4]基于边界效应模型,研究了初始裂缝长度对海水海砂再生混凝土断裂参数的影响,并提出了未缺口试件的断裂分析方法,建立了海水海砂再生混凝土的断裂行为预测模型。

2 断裂性能影响因素

2.1 再生骨料取代率



(a) 再生骨料取代率与起裂断裂韧度的关系



(b) 再生骨料取代率与失稳断裂韧度的关系

图1 再生骨料取代率与双K断裂参数的关系

再生混凝土的断裂性能主要受再生粗骨料取代率的影响:断裂参数随再生粗骨料取代率的增加而下降(如图1所示)。这是因为再生骨料中大量微裂纹加速了裂纹扩展,最终导致断裂性能下降。此外,RAC的断裂参数随骨料粒径的增大而增大,随水灰比的增大而减小。原因在于,较大粒径的再生骨料使得裂纹扩展路径更加曲折复杂,裂缝在穿越骨料时需要消耗更多的能量。同时,较低的水灰比有助于改善水泥与骨料之间界面过渡区的结合,提升混凝土的密实度,进而提高RAC的强度与抗裂性能。

2.2 试件特征尺寸

混凝土作为准脆性材料具有明显的尺寸效应,表现为其断裂参数随着试件特征尺寸(如初始裂缝长度、高度、宽度、跨度等)的变化而发生变化。随着试件高度增加,裂缝路径变得更加曲折且延长,微裂纹数量增多,断裂参数随之增大。当试件高度达到一定程度后,裂缝已充分扩展,断裂参数趋于稳定。此外,缝高比对断裂性能的影响主要体现在裂缝在稳定扩展阶段的行为上。

2.3 环境因素

再生混凝土作为弯曲构件的潜在结构材料,目前针对其在高温环境下的断裂性能研究较多。研究表明,暴露于高温时,再生混凝土的断裂能显著低于普通混凝土,且随着目标温度升高,断裂能越低,起裂韧度和失稳韧度的变化趋势与之相同。然而,当前该领域研究仍不充分,且多聚焦于高温后的残余性能。

3 断裂性能增强手段

3.1 骨料预处理

目前大多数再生骨料的预处理方法主要包括去除或强化附着砂浆(Adhered Mortar, AM)。一方面是去除AM,去除外表面砂浆之后可以得到天然骨料;另一方面,通过化学反应或改善填充能力来弥补再生骨料的薄弱区域。

目前,机械研磨法、酸溶液浸泡法和热处理法等是去除再生骨料表面附着旧砂浆的常用方法。Pandurangan等^[5]研究对比了这三种方法,发现它们都能降低再生骨料的吸水率。但在提高再生混凝土的粘结性能方面,酸处理法相较于机械处理和热处理显示出更大的优势。

增强旧砂浆的常用方法有碳化处理、化学溶液浸泡和改性处理等方法。碳化处理通过生成CaCO₃晶体填充再生骨料的孔隙和微裂纹。化学溶液浸泡和微生物改性通过生成沉淀物填充骨料孔隙,减少吸水率和孔隙率,实现增强效果。

3.2 纤维增强措施

纤维可以桥接水泥基质中形成的裂缝,可分为高弹模纤维和低弹模纤维(见表1),它们在提高混凝土断裂性能方面各有特点和优势。高弹模纤维能够延缓裂缝扩展,提高混凝土的抗裂效果和断裂韧性。低弹性模量纤维能够形成有效的微观裂缝桥接网络,提高混凝土的断裂韧性。丁冬^[6]等发现聚丙烯纤维的加入有效提高了RAC的抗弯韧性和断裂性能。此外,混杂钢纤维和其他纤维,能更好提升RAC力学性能,相比于单掺钢纤维,两种纤维混杂显著改善了RAC的起裂韧度和失稳韧度。

表1 常用纤维材料总结

纤维种类		弹性模量	改善机理	最佳掺量
高弹性模量纤维	钢纤维	210	有效防止裂缝的扩散, 提高材料的延性和韧性	1.5%左右
	玄武岩纤维	89	在ITZ之间形成一个网络结构, 有效提高RAC韧性	0.05%-1%
	玻璃纤维	72	减少混凝土的裂缝和提高抗裂性能	0.2%-0.5%
低弹性模量纤维	聚丙烯纤维	7	改变混凝土的FPZ发育过程并增强粘结性	1.50%
	聚乙烯醇纤维	40	提高劈裂抗拉强度、抗弯性能	0.20%

3.3 矿物掺合料

矿物掺合料包括粉煤灰、硅灰、矿渣和偏高岭土等, 通过发挥火山灰反应和微集料效应, 生成的水化产物可以填充再生混凝土内部孔隙, 改善浆体和RCA的界面过渡区, 从而提高其断裂性能。粉煤灰通过微集料效应, 可以有效改善再生混凝土界面过渡区的孔结构。

4 结束语

再生混凝土断裂机理复杂, 受多种因素交互影响。通过再生混凝土断裂机理理解其断裂过程, 针对性采取再生骨料预处理、配合比优化、纤维及复合增强等手段, 可有效改善断裂性能。未来研究应聚焦于进一步量化各因素影响程度, 推动再生混凝土在各类建筑工程中广泛应用, 助力建筑行业可持续发展迈向新高度。

[参考文献]

[1]肖建庄,张航华,唐宇翔,等.废弃混凝土再生原理与再生混凝土基本问题[J].科学通报,2023,68(05):510-523.

[2]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.

[3]徐世烺著.混凝土断裂力学[M].科学出版社,2011.

[4]Han X, Jia B, Zeng Y, et al. Fracture analysis of seawater sea-sand recycled aggregate concrete beams: Experimental study and analytical mode[J].Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2024,134:104698.

[5]Pandurangan K ,Dayanithy A ,Prakash O S .Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete[J].Construction and Building Materials,2016,120:212-221.

[6]丁东,张丽娟,赵军,等.聚丙烯纤维再生混凝土断裂性能研究[J].混凝土,2022,(06):74-79+84.

作者简介:

姚梦园(2000--),女,汉族,河南荥阳人,在读研究生,研究方向为新型建筑材料。

仝勺珍(2001--),女,汉族,河南新乡人,在读研究生,研究方向为新型建筑材料。

张海宁(1999--),男,汉族,安徽蚌埠人,在读研究生,研究方向为新型建筑材料。