

集料性状对高强混凝土断裂和声发射特性的影响

张立新¹, 吕伟民¹, 陈兵² 吴科如²

(1. 同济大学 道路与交通工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 混凝土材料研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 计算不同粗集料粒径、不同集料体积率和不同种类粗集料混凝土断裂能和断裂韧性; 测试混凝土断裂时的声发射事件数; 分析了集料性状对混凝土断裂性能的影响以及声发射事件数和断裂性能的关系。

关键词: 混凝土; 高强混凝土; 集料; 裂纹; 声发射

中图分类号: TU 528.31

文献标识码: A

文章编号: 0253-374X(2001)05-0546-05

Effects of Aggregates' Character on Concrete Fracture Performance and Acoustic Emission

ZHANG Li-xing¹, LU Wei-min¹, CHEN Bing², WU Ke-ru²

(1. Department of Road and Traffic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. The State Key Laboratory of Concrete Research, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The tests were carried out to study the effect of the size and type of and the volume rate of aggregates on fracture energy and toughness of high-strength concrete (HSC) and the hits of acoustic emission in three-point bending (AE) fracture toughness testing. The relationship between fracture properties of concrete and AE hits was analyzed.

Key words: concrete; high-strength concrete(HSC); aggregate; crack; acoustic emission(AE)

集料是混凝土的重要组成部分,通常占混凝土总体积的75%以上,构成了混凝土骨架,因此其在一定程度上决定了新拌混凝土流变性、硬化混凝土强度以及混凝土耐久性^[1]。

以前研究集料对混凝土力学性能影响时,研究对象为普通混凝土。普通混凝土由于界面强度低,混凝土破坏都是发生在界面,集料的特性影响不大。高强混凝土则由于界面得以加强,混凝土破坏可能切断集料,因而集料的特性对其影响较大;而且以前的研究手段较为单一,主要针对混凝土强度,本文利用混凝土的荷载-挠度曲线和混凝土声发射事件图研究混凝土断裂性能。近年来,工程使用的混凝土的强度越来越高,所以研究集料对高强混凝土断裂性能的影响对于提高混凝土的性能具有重要意义。

1 试验设计

1.1 原材料

水泥为上海吴淞水泥厂生产的#525普通硅酸盐水泥;超细矿渣为湖南韶峰水泥集团有限公司生产的超细矿渣;砂为中砂,细度模数为2.8;碎石1:粒径为5~20mm的硬质碎石,石子级配良好,含泥量<0.1,压碎指标8.3%,该碎石筛分为5~10mm,10~15mm,15~20mm间断级配;碎石2:粒径为5~20mm的硬质石灰石,石子级配良好;卵石:粒径为5~20mm的硬质石灰石,石子级配良好;碎砖:粒径为5~20mm,松散体积质量为811kg·cm⁻³,表现体积质量为1630kg·cm⁻³,吸水率为13.1%;陶粒:粒径

收稿日期:2000-03-09

作者简介:张立新(1973-),男,内蒙古赤峰人,博士生。

为 5~15 mm,松散体积质量为 833.5 kg·cm⁻³,表观体积质量为 1 400 kg·cm⁻³,吸水率为 14%,压碎值为 18.2%,筒压强度为 8.75 MPa;减水剂为花王高效减水剂。

1.2 混合料配合比

考虑到集料性状对混凝土断裂性能影响,本文试验分为三组,分别为不同粗集料粒径混凝土试验;不同集料体积率混凝土试验;不同粗集料混凝土试验.各混合料配合比见表 1~表 3。

表 1 不同粗集料粒径混合料配合比

Tab.1 Mixture proportions of concrete produced with different size of coarse aggregate

编号	粒径/mm	m(水)	m(水泥)	m(矿渣)	m(砂)	m(碎石 1)	w(减水剂)/%	抗压强度/MPa
D5	0~5	0.26	0.7	0.3	2.35		2.5	59.1
D10	5~10	0.26	0.7	0.3	0.94	1.41	2.0	81.7
D15	10~15	0.26	0.7	0.3	0.94	1.41	2.0	84.3
D20	15~20	0.26	0.7	0.3	0.94	1.41	2.0	75.7

表 2 不同集料体积率混合料配合比

Tab.2 Mixture proportions of concrete produced with different aggregate volume rate

编号	集料体积率/%	m(水)	m(水泥)	m(矿渣)	m(砂)	m(碎石 2)	w(减水剂)/%	抗压强度/MPa
V40	40	0.26	0.7	0.3	0.41	0.62	0.75	82.7
V60	60	0.26	0.7	0.3	0.94	1.41	2.00	85.0
V80	80	0.26	0.7	0.3	2.48	3.72	2.70	66.5

表 3 不同粗集料混合料配合比

Tab.3 Mixture proportions of concrete produced with different types of coarse aggregate

编号	粗集料	m(水)	m(水泥)	m(矿渣)	m(砂)	m(粗集料)	w(减水剂)/%	抗压强度/MPa
P1	碎石 1	0.26	0.7	0.3	0.94	1.41	2.0	91.8
P2	卵石	0.26	0.7	0.3	0.94	1.41	2.0	65.7
P3	碎砖	0.26	0.7	0.3	0.94	1.00	1.5	57.3
P4	陶粒	0.26	0.7	0.3	0.94	0.74	1.5	47.0

1.3 测试方法

混凝土断裂能的计算公式采用 RILEM 建议的公式

$$G_F = \frac{(\omega_0 + mg\delta_0)}{A_{lig}} \tag{1}$$

式中: ω_0 为荷载-挠度曲线下的面积, N·m; m 为梁的跨间自重, kg; δ_0 为梁最终破坏时的变形, m; A_{lig} 为混凝土断裂韧带的面积, m²。

根据 ASTM 标准,按下式计算混凝土断裂韧性:

$$K_{IC} = \frac{3P_{max}sa^{1/2}}{2db^2} f(a/d) \tag{2}$$

$$f(a/d) = 1.93 - 3.07(a/d) + 14.53(a/d)^2 - 25.11(a/d)^3 + 25.8(a/d)^4$$

式中: P_{max} 为混凝土荷载-挠度曲线的峰值荷载, N; a, d, b, s 分别为混凝土试件切口深度、厚度、宽度和试验机支点间距。

测量混凝土断裂能和断裂韧性,采用 100 mm×100 mm×515 mm 的试件,其净跨距为 400 mm,切口深度为 50 mm.进行三点弯曲试验时,同步运用发射仪记录混凝土断裂时的声发射事件数 h . 试验装置图及声发射探头布点如图 1、图 2,其中混凝土试件上下面探头布点反向对称。

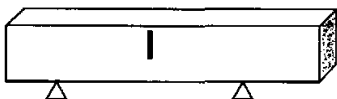


图 1 三点弯曲试验装置图

Fig.1 Three-point-bend beam specimen



图 2 声发射探头布点示意图

Fig.2 Sketch map of AE probes

2 试验结果

2.1 混凝土荷载-挠度曲线和声发射曲线(见图3)

混凝土材料受力过程中,材料发生塑性变形,从产生裂纹到裂纹扩展直至失稳断裂.在此期间,释放应变能,其中一部分以应力波的形式发射和传播,产生声发射.混凝土材料的声发射特征和强弱程度,携带着其组织结构变化的动态信息,通常以声发射的事件来表征声发射的特征^[2].本文将混凝土荷载-挠度曲线和声发射曲线绘在同一图中,这样便于比较混凝土声发射的特征与断裂性能的关系.

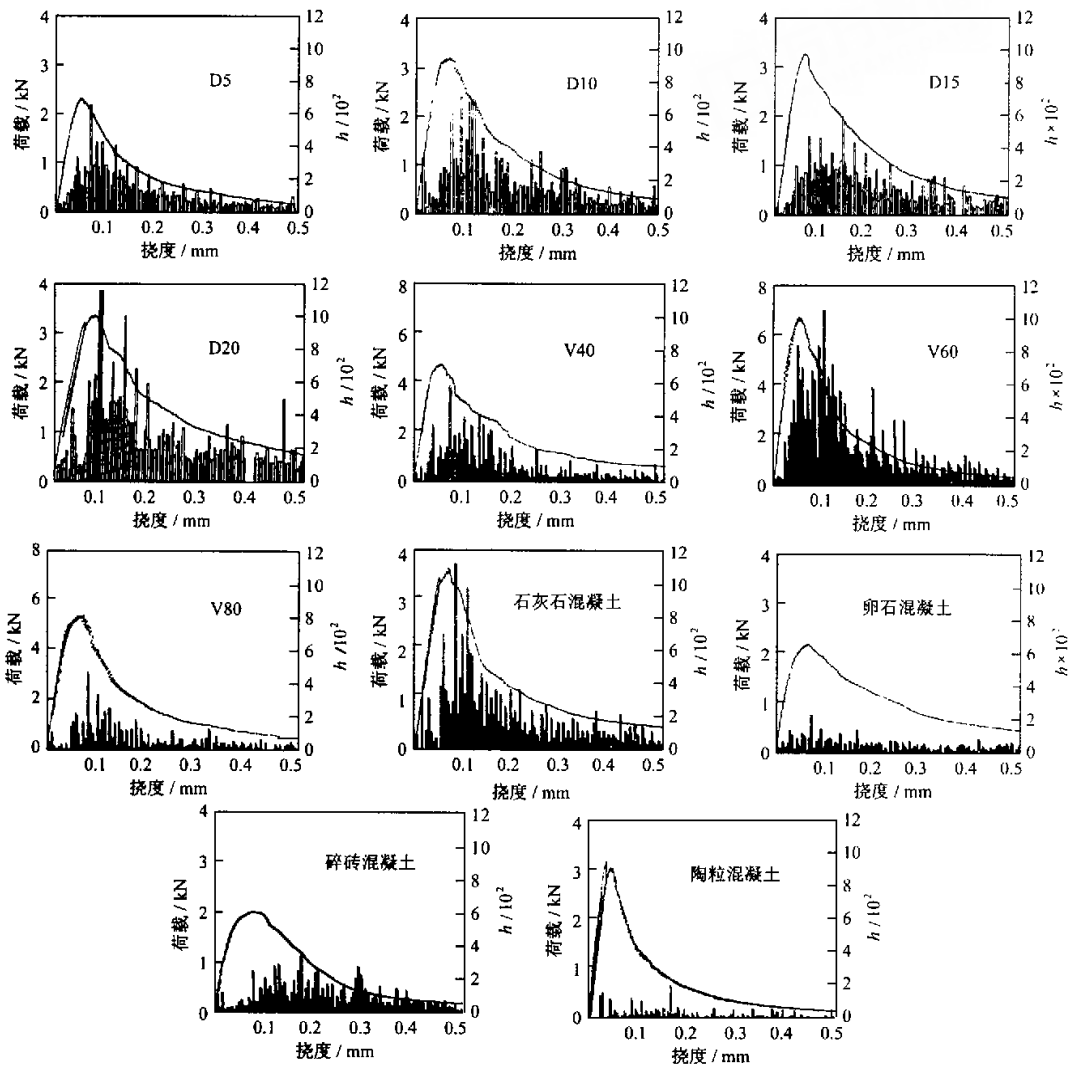


图3 混凝土荷载-挠度曲线与声发射事件数曲线

Fig.3 Curves of load-deflection and curves

2.2 试验结果

利用式(1)和式(2)可分别计算混凝土断裂能和断裂韧性,由混凝土声发射事件曲线可得混凝土断裂过程中声发射事件数,如表4.

表4 混凝土断裂能、断裂韧性和声发射事件数结果

Tab.4 Results of fracture energy, fracture toughness and AE hits

混凝土	断裂能/(N·m ⁻¹)	断裂韧性/(MPa·m ^{1/2})	事件数	混凝土	断裂能/(N·m ⁻¹)	断裂韧性/(MPa·m ^{1/2})	事件数
D5	111.9	0.840	20 667	V80	179.3	1.092	20 571
D10	172.2	1.087	25 000	P1	213.3	1.196	28 684
D15	193.9	1.165	33 333	P2	174.3	0.698	10 263
D20	237.4	1.224	43 500	P3	137.6	0.674	3 421
V40	174.1	0.889	13 714	P4	90.3	0.617	2 632
V60	192.9	1.279	43 429				

3 试验结果分析

3.1 集料性状与混凝土断裂性能关系

混凝土试件受力,一旦达到临界应力,裂纹将以不稳定方式扩展.裂缝在混凝土中扩展通过不同相扩展,其中各相又有不同的断裂性能,其扩展通常以以下三种方式进行¹⁾:

- (1) 裂纹全部切断集料继续扩展.
- (2) 裂纹全部绕集料与硬化水泥浆体界面扩展.
- (3) 裂纹切断集料和裂纹绕集料与硬化水泥浆体界面扩展同时存在.

本文就集料性状对裂纹在混凝土中扩展方式的影响进行讨论.

在**高强混凝土**中,砂浆和粗集料的界面强度得以加强.裂纹扩展遇到粗集料产生裂纹受阻现象.裂纹扩展总是沿着耗能最小的路径前进,裂纹穿过集料所耗的总能量要小于绕界面扩展所耗的总能量,因此在**高强混凝土**中,断裂途径在很多情况下是切断集料.在水灰比和集料体积率相同情况下,集料的粒径越大,切断集料所消耗的能量就越多,表现为断裂能和断裂韧性随着粗集料粒级增大而增大,而且从图3可以看出**混凝土**断裂过程中声发射事件随着集料粒径的增大而变得更加“猛烈”.

集料的体积率由40%增加到60%,从**混凝土**断裂面发现,其中集料被切断.一般来讲,集料的断裂表面能要大于硬化水泥浆体的断裂表面能,集料体积率增加,混凝土的断裂表面能增加.由表4可知体积率由40%增加到60%,**混凝土**断裂和断裂韧性增加,从图3看出声发射事件明显变强.然而,当集料体积率由60%增加到80%时,由于集料体积率过大,界面强度下降,由**混凝土**断裂面可以观察到,裂纹绝大多数沿集料的界面扩展.这种情况下,界面断裂表面能要远小于硬化水泥浆体断裂表面能,集料体积率增加,混凝土断裂表面能降低.由表4可知,混凝土断裂能、断裂韧性及声发射事件数也随之降低,同时从图3可看出随着体积率的增加声发射事件变得较“平缓”.

从碎石混凝土和碎砖混凝土的断裂面,可以看出裂纹切断集料扩展.碎石断裂表面能大于硬化水泥浆体断裂表面能,而碎砖断裂表面能远远小于硬化水泥浆体断裂表面能,从表4可以看出碎石混凝土的断裂能和声发射事件数都大于碎砖混凝土.由于卵石混凝土界面强度较低,从其断裂面可以看出裂纹切断集料与裂纹沿界面扩展同时存在,但是裂纹还是较多地沿集料扩展,所以卵石混凝土表面断裂能要小于碎石混凝土表面断裂能,碎石混凝土的断裂能、断裂韧性和声发射事件数均大于卵石混凝土.陶粒混凝土由于粗集料强度低且界面强度也低,故其断裂性能最差.比较声发射事件图,碎石混凝土断裂过程中声发射事件最为“猛烈”,陶粒混凝土发射事件最为“平缓”.

3.2 断裂性能与声发射关系

进一步研究断裂能、断裂韧性与声发射事件数的关系,可得图4.断裂韧性与事件数的线性相关性很好,断裂能与事件数的线性相关性次之.混凝土的断裂能是指断裂混凝土单位面积所需要的表面能,断裂韧性是用来表示混凝土阻止裂缝失稳扩展的能力,而事件数则表示混凝土断裂时所释放出的应力波的强弱.这三者均从不同角度来阐述裂纹在混凝土扩展的情况.本文将声发射事件数与混凝土断裂能、断裂韧性归为线性关系.

1) 同济大学建材教研室译.混凝土断裂力学译文集.同济大学科技情报站,1982

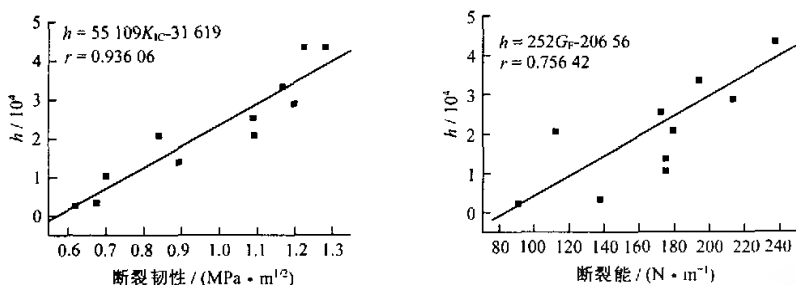


图4 断裂性能与事件数

Fig. 4 Fracture properties and hits

4 结论

(1) 粗集料粒径增大,混凝土断裂能和断裂韧性增大,声发射事件数增多,断裂过程中声发射事件变得“猛烈”。集料体积率由40%增加到60%,混凝土断裂能和断裂韧性增加,声发射事件数增加;但体积率增加到80%,混凝土断裂能和断裂韧性降低,声发射事件数减少,其中集料体积率为60%时,断裂时声发射事件最“猛烈”。不同种类粗集料混凝土断裂能、断裂韧性以及声发射事件数大小次序为碎石混凝土、卵石混凝土、碎砖混凝土和陶粒混凝土,碎石混凝土断裂过程中声发射事件最为“猛烈”,陶粒混凝土发射事件最为“平缓”。

(2) 裂纹在混凝土中扩展有三种方式:裂纹全部切断集料继续扩展;裂纹全部绕集料与硬化水泥浆体界面扩展;裂纹切断集料和裂纹绕集料与硬化水泥浆体界面扩展同时存在。整料体积率一定的条件下,裂纹在高强混凝土中切断集料扩展;集料粒径一定的条件下,集料体积率在40%和60%时,裂纹切断集料扩展,而集料体积率增加到80%,裂纹切断集料和裂纹绕集料与硬化水泥浆体界面扩展同时存在;集料粒径和集料体积率一定的条件下,碎石混凝土中,裂纹全部切断集料继续扩展;而卵石混凝土中,裂纹切断集料和裂纹绕集料与硬化水泥浆体界面扩展同时存在;碎砖和陶粒集料其本身强度很差,故裂纹继续扩展将切断集料。集料性状通过影响裂纹扩展方式,进而影响混凝土断裂能、断裂韧性以及声发射事件。

(3) 声发射事件数与混凝土断裂能、断裂韧性有一定的线性相关性。

参考文献:

- [1] 傅智. 高强混凝土及其集料的断裂特性与脆性[J]. 混凝土与水泥制品, 1993(3): 4-10.
- [2] 李为社. 混凝土无损检测[M]. 上海: 同济大学出版社, 1989. 163-171.

集料性状对高强混凝土断裂和声发射特性的影响

作者: [张立新](#), [吕伟民](#), [陈兵](#), [吴科如](#)
 作者单位: [张立新, 吕伟民 \(同济大学道路与交通工程系,\)](#), [陈兵, 吴科如 \(同济大学\)](#)
 刊名: [同济大学学报\(自然科学版\)](#) **ISTIC EI PKU**
 英文刊名: [JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY \(NATURAL SCIENCE\)](#)
 年, 卷(期): 2001, 29(5)
 引用次数: 1次

参考文献(2条)

1. [傅智](#) [高强混凝土及其集料的断裂特性与脆性](#) 1993(03)
2. [李为杜](#) [混凝土无损检测](#) 1989

相似文献(10条)

1. 期刊论文 [程瑶, 张美霞](#) [绿色高强混凝土——硅灰混凝土](#) - [安全与环境工程](#) 2002, 9(3)

硅灰是冶金厂生产硅铁和工业硅过程中产生的废灰, 硅灰混凝土为绿色混凝土, 它不仅节约了水泥熟料, 而且改善了环境, 大大促进了混凝土和建筑工程的健康发展. 混凝土中掺入硅灰可得到高强和超高强混凝土, 用此混凝土浇制的结构物其安全度大大提高, 经济效益显著. 硅灰混凝土还可以有效抑制碱骨料反应, 提高结构物的安全度和耐久性, 延长使用寿命.

2. 会议论文 [孙伟, 严捍东, 蒋立新, 秦鸿根, 姜佑民](#) [在疲劳荷载作用下碳纤维增强高强混凝土特种轨枕的阻裂效应](#)

2000

在预应力混凝土轨枕的基础上, 为适应高速重载列车的行驶及特殊部位复杂应力的要求, 本文采用纤维型与颗粒型复合增强技术, 分别在其中掺加1~1.2%的碳纤维与15%硅灰复合增强预应力高强混凝土轨枕. 系统测试了在不同荷载作用下, 当疲劳次数从0到200万次时各类轨枕在不同疲劳荷载和不同疲劳次数下裂缝的数量、宽度和高度的变化规律, 充分揭示了碳纤维对混凝土优异的阻裂效应, 硅灰对混凝土内部结构的细化及界面结构的改善, 共同减少与缩小了裂缝源的数量与尺度, 并进一步提高了碳纤维的阻裂效应, 使得该类轨枕可以带裂缝工作; 在抗疲劳性能不变的情况下, 当1~1.2%碳纤维和15%硅灰复合掺入时可节省50%的预应力钢筋.

3. 期刊论文 [许凌云, 朱敏, 丁大钧](#) [高强混凝土和密筋高强混凝土受拉应力-应变全曲线的试验研究](#) - [工程力学](#)

2001, 18(5)

本文简要介绍了高强混凝土和密筋高强混凝土受拉应力-应变全曲线的试验研究, 以及为此设计和制造的2套试验装置. 文中给出实测全曲线, 分散性小, 证明装置是可用的; 最后给出全曲线的理论方程, 并与实测曲线进行对比, 表明符合很好.

4. 学位论文 [王海阳](#) [高强混凝土早期收缩及塑性开裂影响因素研究](#) 2005

近年来, 高强混凝土在工程中得到越来越广泛的应用. 实践表明, 高强混凝土更易出现早期开裂现象, 这已成为国内外混凝土技术界的研究热点. 现有研究主要集中在对高强混凝土硬化后的体积稳定性及其开裂方面, 取得了较多的成果. 混凝土塑性收缩裂缝是早期裂缝的重要组成部分, 迄今为止, 对高强混凝土早期收缩及塑性开裂的系统研究却相对较少. 加强早期收缩及塑性开裂的研究对指导高强混凝土生产和施工具有一定的理论和现实意义.

本文通过集中约束平板法测试混凝土初裂时间、裂缝最大宽度和总面积等相关参数对塑性开裂趋势作定性评价; 采用非接触式激光位移传感器定量检测高强混凝土早期收缩, 从技术层面解决了流态混凝土早期塑性变形难以定量测定的问题. 以此对影响高强混凝土早期收缩及塑性开裂的主要因素进行系统试验研究. 结果表明:

1) 与普通混凝土相比, 高强混凝土表现出较大的早期收缩和塑性开裂趋势, 环境因素对混凝土塑性收缩大小和塑性开裂程度起决定性作用. 水分蒸发速率较高环境中, 塑性收缩在混凝土早期收缩中占据相当大比重.

2) 水胶比在0.28~0.34范围内变化对高强混凝土早期收缩及塑性开裂的影响与新拌混凝土塑性状态有关. 在减水剂掺量不变情况下, 随水胶比增大, 混凝土早期收缩和塑性开裂趋势减小; 若变化减水剂掺量, 使混凝土保持一定初始坍落度, 水胶比变化对混凝土塑性收缩及开裂的影响较小; 一定水胶比下, 随减水剂掺量变化, 干硬性和高流态混凝土表现出较小早期收缩, 塑性开裂率减小, 坍落度在100mm~200mm之间的混凝土早期收缩较大, 易出现塑性开裂. 高强混凝土塑性开裂程度在砂率值38%附近表现得最为严重, 高于或低于此砂率值, 塑性开裂有减小趋势. 混凝土早期收缩随砂率增大而明显增大. 混凝土塑性开裂与塑性收缩之间并不完全是正相关关系. 其它配制参数不变, 减小粗集料最大粒径, 高强混凝土早期收缩和塑性开裂趋势减小. 保持一定坍落度下, 随水泥用量增大, 高强混凝土早期收缩及其开裂程度呈增大趋势.

3) 粉煤灰和矿渣在较小掺量下, 均有抑制高强混凝土塑性开裂作用, 该掺量范围分别为0%~40%和0%~20%. 当掺量超过该范围, 混凝土塑性开裂呈增大趋势. 粉煤灰掺量在0%~20%范围内, 高强混凝土早期收缩随掺量增加而减小; 掺量大于20%时, 高强混凝土早期收缩随掺量增大而增大. 随矿渣掺量增大, 高强混凝土早期收缩减小. 粉煤灰和矿粉细度越大, 高强混凝土表现出较小的早期收缩和塑性开裂趋势. 硅粉存在一临界掺量值使高强混凝土塑性开裂程度最为严重, 该掺量值随水胶比不同在6.5%~8%之间波动. 低于此掺量值时, 高强混凝土塑性裂缝面积随硅粉掺量增大而增大; 高于此掺量值, 高强混凝土塑性裂缝面积随硅粉掺量增大而减小. 随硅粉掺量增大, 高强混凝土早期收缩增大, 且早期收缩的急剧发展时间段增长.

4) 环境湿度增大或风速减小, 高强混凝土早期收缩和塑性开裂趋势减小. 环境温度升高, 高强混凝土早期收缩增大, 但塑性开裂趋势减小.

5) 随聚丙烯纤维掺量增大, 高强混凝土塑性开裂程度减轻. 不同配比混凝土, 纤维的最佳掺量不同. 对高强混凝土采取保湿养护或二次抹面工艺措施对抑制塑性开裂有较好作用, 后者效果更佳.

5. 会议论文 [巫英凯, 刘有元, 黄永莱](#) [轻质高强混凝土的试验研究](#) 1988

6. 期刊论文 [朱海堂, 高丹盈, 张启明, ZHU Hai-tang, GAO Dan-ying, ZHANG Qi-ming](#) [碳纤维高强混凝土的劈拉及剪切](#)

[变形性能](#) - [水利水电科技进展](#) 2008, 28(6)

通过碳纤维高强混凝土的劈拉和剪切性能试验, 分析碳纤维对高强混凝土劈拉和剪切变形性能的影响. 结果表明, 碳纤维的加入有效地改善了高强混凝土的劈拉和剪切变形性能. 劈拉荷载作用下, 碳纤维高强混凝土的劈拉变形能力随碳纤维体积率的增大而提高; 剪切荷载作用下, 碳纤维高强混凝土的初裂和破坏变形均随着碳纤维体积率的增大而增大, 当碳纤维体积率为2.0%时, 碳纤维高强混凝土的初裂变形较相应的普通高强混凝土提高了42%~65%, 剪切韧性提高了4~5倍. 此外, 研究表明碳纤维类型对高强混凝土劈拉及剪切荷载作用下的变形性能具有不同程度的影响.

7. 会议论文 [蒋元海](#) [人工砂代替天然砂生产预应力高强混凝土管桩](#) 2006

本文介绍了用人工砂(或称石屑)试配高强混凝土及在预应力高强混凝土管桩的情况. 试验研究表明, 利用人工砂替代洁净的天然砂, 可以提高混

凝土强度,改善混凝土的和易性,生产的预应力高强混凝土管桩可以达到国标GB13476的要求.

8. 学位论文 何东明 钢纤维橡胶高强混凝土高温前后性能研究 2009

钢纤维高强混凝土是近年来在国内外快速发展的新的复合材料。凭借其良好的拉伸、剪切、抗裂、抗冲击性、抗疲劳以及高韧性性能,钢纤维高强混凝土被广泛应用于建筑、公路、桥梁、隧道、机场、水利工程、港口等各种建筑工程以及军事工程等。近年来,由于高强混凝土的应用日益广泛,国内高等院校及科研机构 and 工程单位在钢纤维高强混凝土机理研究和工程应用方面做了大量研究工作。随着社会的进步发展,建筑火灾的发生也日益频繁,在**高强混凝土**中加入钢纤维,在火灾条件下,它可以改善常温下混凝土的力学性能,抑制爆裂的产生,但也有一些研究表明其抗爆裂性能反而更差。因此,随着钢纤维**高强混凝土**应用的日益广泛,专家学者进行了一系列研究,并提出了许多有效措施。研究表明,掺加低掺量的橡胶粉可明显改善**高强混凝土**在高温下的抗爆裂性能,减小脆性破裂的发生,并增强韧性。

本研究以钢纤维**高强混凝土**为基准混凝土,钢纤维的掺量保持为0.5%。从改善**高强混凝土**脆性和在高温抗爆裂性能的角度出发,同时兼顾绿色环保材料的应用,探索研究以可再生橡胶粉为主要改性材料,掺入钢纤维**高强混凝土**中。本文探讨了一种新的绿色建材,并且提出一种以可再生橡胶粉为改性材料,改善钢纤维**高强混凝土**抗爆裂性能的方法。本研究工作如下:制作了两批试件,其中一批用于常温下的抗压试验,研究橡胶粉对基准混凝土的应力和变形能力的影响。另外一批则进行高温试验,研究钢纤维橡胶**高强混凝土**的高温抗爆裂性能,并对其进行轴心抗压强度试验,通过分析试件的轴压强度、峰值强度、峰值应变等的变化,探索在保持橡胶粉掺量和粒径的条件下,其对基准混凝土力学性能和抗爆裂性能的影响。最后通过总结和对比,提出了橡胶粉的最佳掺量和粒径。

9. 期刊论文 常江.蒋元海.柳刚.胡玉柱.张铂.祁建华.董猛.康勇 人工砂是配制优质混凝土和砂浆的理想材料 -混凝土与水泥制品2005, "" (3)

介绍了人工砂混凝土的研究和工程应用情况,说明采用人工砂替代天然砂,可以提高混凝土强度和耐久性,从而可用于各种强度级别的混凝土工程,并认为人工砂是混凝土配制中一种理想的细骨料。

10. 期刊论文 侯贯泽.刘树堂.HOU Guan-ze.LIU Shu-tang 高强混凝土的研究与应用综述 -山西建筑2009, 35 (18)

指出推广**高强混凝土**的必要性,综合介绍了国内外对**高强混凝土**研究的主要进展以及**高强混凝土**在国内外的应用现状,并归纳了目前**高强混凝土**研究存在的关键问题及其发展对策,以全面推广**高强混凝土**的应用。

引证文献(1条)

1. 梁天宇 粗集料对混凝土抗压强度影响的研究[学位论文]硕士 2004

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_tjdxxb200105009.aspx

下载时间: 2010年5月31日