

文章编号: 1001-4888(2013)01-0094-07

钢纤维混凝土层裂强度的实验研究^{*}

郝龙^{1,2}, 张磊², 高伟亮², 吴建华²

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 河海大学安全与防災工程研究所, 江苏南京 210098;

2. 总参工程兵科研三所, 河南洛阳 471023)

摘要: 钢纤维能显著提高混凝土抵抗层裂破坏的能力, 但纤维含量、长细比和形状对高应变率下钢纤维混凝土层裂强度的影响仍缺少系统研究。本文利用大直径 Hopkinson 杆对混凝土细长杆件进行冲击加载, 通过放置在试件后方的空心铝合金杆上应变波形确定试件的层裂强度, 系统研究了钢纤维含量、长细比和形状对钢纤维混凝土层裂强度的影响。实验结果表明钢纤维混凝土层裂强度具有应变率效应, 即应变率越高层裂强度越高。钢纤维对混凝土层裂强度的增加与纤维影响系数 α 、纤维长细比和纤维含量三者之乘积具有线性关系。动态加载条件下的系数 α 高于静态, 其原因主要是动态加载时纤维快速从基体拔出时动态剪应力增加。波浪形纤维混凝土的系数 α 比扁头型纤维高。根据实验结果建立了钢纤维混凝土层裂强度经验公式, 公式预测结果能与实验结果较好吻合。

关键词: Hopkinson 杆; 钢纤维混凝土; 层裂; 层裂强度; 纤维影响系数

中图分类号: O347

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-12-004

0 引言

作为应用最广泛的工程材料, 混凝土由于其抗拉强度低, 在承受爆炸、冲击等强动载作用时, 易产生层裂破坏。为增强其抗层裂破坏能力, 在防护工程、国防工程和重要工业民用建筑等需要考虑强动载作用的工程结构中, 钢纤维混凝土得到广泛应用。目前对钢纤维混凝土层裂研究的实验手段主要是利用爆炸或射弹加载方式, 通过构件最终破坏形态对其抗层裂破坏能力给出定性的评价^[1-3]。而如何精确测量钢纤维混凝土的层裂强度, 以及钢纤维含量、长细比和形状对混凝土层裂强度的影响仍缺少系统研究。

近年来大直径 Hopkinson 杆正逐渐被广泛用于混凝土层裂研究^[4-8], 但在实验技术和数据分析等方面仍有待提高之处。J. R. Klepaczho 等^[4]提出一种相对简单可行的方法, 测量对试件的加载压缩波, 根据一维线弹性波理论得到不同时刻试件内反射拉伸波与加载压缩波的叠加状态, 层裂位置对应的拉伸应力最大值即被确定为层裂强度, 但该方法没考虑波形的弥散和衰减。胡时胜等^[5]和 Haijun Wu 等^[6]在 Klepaczho 的研究基础上进一步考虑到波形的弥散和衰减的影响。但以上方法数据处理过程复杂、对加载波形要求较高, 而且没考虑层裂过程中的损伤演化, 因此用此方法确定的层裂强度的精确性值得怀疑。H. Schuler 等^[8]提出利用加速度传感器测量试件自由面速度波形从而确定层裂强度的方法, 但此方法一方面需要高频响的高 G 值加速度传感器, 另外传感器本身惯性的影响也无法消除。虽然 VISAR(任意反射面速度干涉仪)技术被广泛用于爆炸、冲击实验中瞬态速度测量, 但用于混凝土类

^{*} 收稿日期: 2012-01-14; 修订日期: 2012-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10802098)

通讯作者: 张磊(1974—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事材料动力学性能研究。E-mail: ustczhanglei@163.com

极端非均匀材料仍存在很大困难^[9]。为解决上述问题,张磊等^[10,11]利用放置于混凝土试件后方的尼龙杆上应变波形来测量层裂强度的实验方法,但由于应力波在粘弹性材料中传播时存在弥散和衰减,给数据处理带来一定困难。为消除波的弥散和衰减影响,张磊等^[12]又提出利用空心铝合金杆代替尼龙杆为透射杆,一方面可以满足层裂发生的波阻抗要求,同时又避免了波的弥散和衰减问题。

钢纤维能显著增强混凝土材料抵抗层裂破坏的能力,但目前对钢纤维混凝土层裂现象研究较少。江水德等^[13]通过接触爆炸方式研究了钢纤维混凝土杆件的层裂,其假定爆炸载荷为三角形脉冲,根据第一次层裂的厚度与材料的层裂强度呈正比的关系,定性地比较了不同钢纤维含量混凝土和素混凝土层裂强度的差别,指出钢纤维可以提高混凝土的层裂强度,但没有给出其层裂强度具体结果。张磊等^[11]利用大直径 Hopkinson 杆测量了钢纤维混凝土层裂强度,并认为钢纤维混凝土层裂强度与纤维含量、混凝土强度及加载率有关,但对纤维形状和长细比对层裂强度的影响没有讨论。

本文利用文献[12]所提出的实验方法系统测量了不同种类钢纤维混凝土的层裂强度,分析了纤维长细比、形状和含量对钢纤维混凝土层裂强度的影响,结合实验结果给出无量纲钢纤维混凝土层裂强度的经验公式,并对层裂强度应变率效应和纤维增强原因进行了分析。

1 实验原理

实验装置示意图见图1,撞击杆撞击 Hopkinson 杆所产生的压缩波沿杆向右传播,传播到 Hopkinson 杆与试件接触面时部分透入试件中对试件进行冲击压缩加载。该加载波传播到试件—空心杆接触面时,由于空心杆波阻抗小于试件,反射成拉伸波对试件进行冲击拉伸加载,同时部分透射到空心杆中。当试件内拉伸波幅值大于混凝土层裂强度时,试件开始层裂损伤演化并产生层裂破坏。层裂过程中所产生的压缩波向右传播到透射杆,导致试件和透射杆接触面压力增加,根据接触面上压力波形可以得到试件层裂强度^[10]:

$$\sigma_F = \frac{1}{2} [n(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) - (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})] \frac{A_b}{A_c} \quad (1)$$

其中 $n = (A\rho c)_c / (A\rho c)_b$ 为试件与透射杆“广义”波阻抗比; A 为横截面积; ρ 为密度; c 为一维应力弹性波速; 下标 c 和 b 分别表示混凝土试件和透射杆; $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 分别为接触面压力波形的最大值和最小值(以压为正)。张磊等^[12]研究表明,在采用空心铝杆为透射杆并选用合适的波形整形器时,应力波在空心铝杆中传播时的弥散和衰减可以忽略不计,即可以用空心杆上的应力波形代替试件—空心杆接触面压力波形。所以,测量吸收杆上的应变波形,利用(1)即可得材料层裂强度。

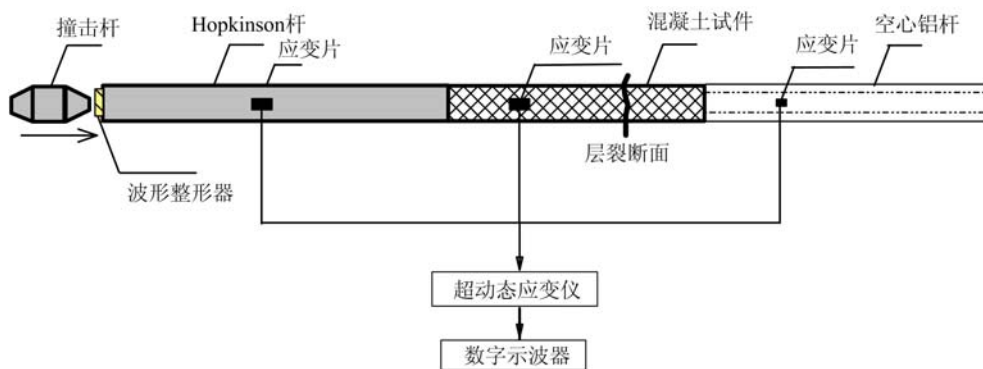


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Scheme of experimental facility

考虑到混凝土材料的非均匀性,实验采用了国内最大直径的 $\Phi 100\text{mm}$ Hopkinson 杆。为减小波的弥散效应,撞击杆选用“纺锤型”变截面子弹^[10],并结合调试实验,采用双层 0.8mm 厚、直径 50mm 硬纸板为波形整形器^[14],纸板间用韧性较好的万能胶进行粘结。入射杆长 4500mm ,撞击杆和入射杆的材料均为高强弹簧钢。透射杆为空心 LC4 超硬铝合金杆,弹性模量 $E_b = 70\text{GPa}$,弹性波速 $c_b = 5090\text{m/s}$,屈服强度 $\sigma_b > 400\text{MPa}$,外径与试件相同 ($D = 100\text{mm}$),内径 $d = 80\text{mm}$,长度为 2000mm 。试件直径

100mm, 长度 1600mm。试件上距离入射杆—试件接触面 600mm 位置粘贴应变片, 以测量试件应变波形并用于计算应变率, 应变率为试件压缩加载阶段平均应变率。在空心杆上距离试件—空心杆接触面 400mm 位置粘贴应变片测量透射杆应变波形。

2 实验结果和分析

2.1 实验结果

实验所采用的混凝土强度等级为 C45。为研究钢纤维长度、含量和形状对层裂强度的影响, 选用了扁头型和波浪型两种形状的钢纤维, 纤维平均有效直径为 1mm。扁头型纤维长度分别为 30mm、20mm 和 15mm, 表示为 BSF-30、BSF-20 和 BSF-105; 波浪型纤维长度为 20mm, 表示为 LSF-20。钢纤维抗拉强度 1.06GPa, 延伸率 3.1%。共加工了如下几种试件: 纤维种类 BSF-20、纤维含量为 1%、2%、3% 和 4%; 纤维种类为 BSF-30、BSF-15 和 LSF-20, 纤维含量为 2%。试件材料的主要力学性能参数见表 1, 其中抗压强度为 28d 龄期 150mm×150mm×150mm 标准立方体试件实验结果, 静态劈裂拉伸强度 f_{ts} 为 $\Phi 50 \times 50$ mm 平台巴西圆盘实验结果^[15], 应变率为 10^{-5} s^{-1} 。根据 C. Rocco 等^[16]的研究结果, 通过(2)式得到静态拉伸强度 f_t :

$$f_t = 0.92 f_{ts} \quad (2)$$

表 1 试件材料主要参数

Tab. 1 The main parameters of specimen materials

材料种类	抗压强度 (MPa)	静态劈裂 强度(MPa)	静态拉伸 强度(MPa)	波速 (m/s)	密度 (kg/m ³)	动弹性 模量(GPa)	波阻抗 (MPa·m ⁻¹ s)	波阻抗比 n
C45-V0	43.8	6.32	5.81	4340	2410	45.4	10.46	2.114
BSF-20-V1	45.1	6.64	6.11	4420	2470	48.3	10.92	2.207
BSF-20-V2	46.2	7.08	6.51	4440	2520	49.7	11.19	2.262
BSF-20-V3	47.3	7.17	6.60	4480	2540	51.0	11.38	2.300
BSF-20-V4	48.4	7.54	6.94	4480	2590	52.0	11.60	2.345
BSF-15-V2	44.8	6.82	6.27	4440	2520	49.7	11.19	2.262
BSF-30-V2	47.6	7.38	6.79	4440	2520	49.7	11.19	2.262
LSF-20-V2	47.2	7.22	6.64	4440	2520	49.7	11.19	2.262

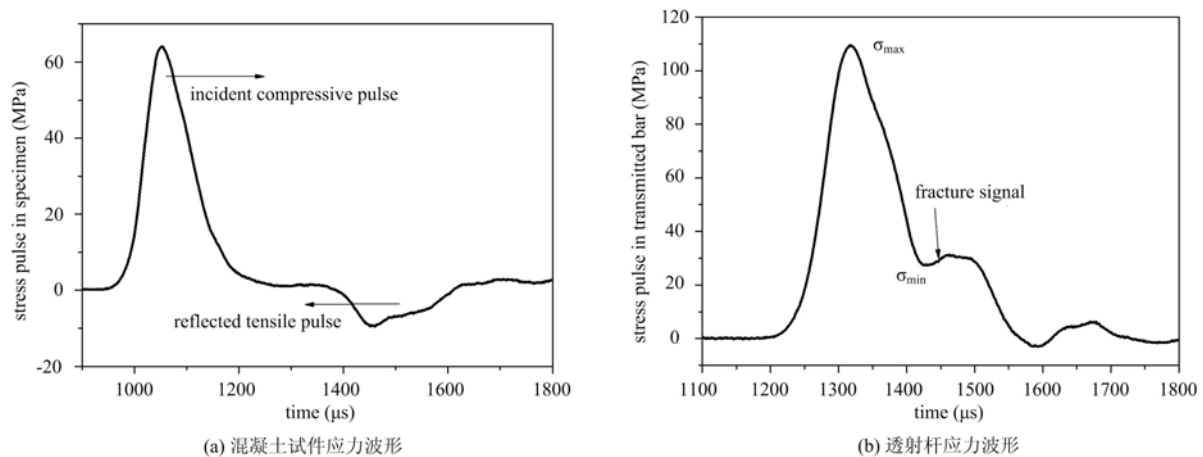


图 2 层裂破坏时试件与透射杆上的应力波形

Fig. 2 Stress pulse profiles with spall fracture (a) concrete specimen (b) transmitted bar

对每种材料分别进行了 4~16m/s 范围内不同速度的实验。素混凝土出现一次或者多次断裂, 而钢纤维混凝土仅仅出现宽度不同的一条或多条裂纹, 钢纤维从基体中拔出但试件没有完全断开。图 2 (a)为撞击速度 14m/s, 层裂发生时试件内应力波形, 这里假定混凝土为线弹性材料, 其应力波形为应变

波形乘以动弹性模量得到。由于采用变截面子弹和波形整形器,加载波接近半正弦状,弥散较小。加载波在试件—透射杆接触面反射成拉伸波向左传播到试件中对试件进行冲击拉伸加载,同时透射波向右传播到透射杆中。当试件内拉伸应力大于混凝土层裂强度时,试件产生层裂损伤演化直至破坏,层裂损伤演化过程中拉伸波卸载所产生的压缩波向右传播到透射杆,在透射杆中形成如图 2(b)所示的断裂信号^[17]。根据图 2(b)中透射波的最大值 $\sigma_{\max}$ 和最小值 $\sigma_{\min}$,利用(1)式即可得到混凝土层裂强度。

对表 1 中所列 8 种混凝土材料进行了不同撞击速度的层裂实验,每种加载条件下至少 5 个有效实验数据,取其层裂强度平均值作为实验结果,实验结果列于表 2。

表 2 层裂强度实验结果
Tab. 2 The experimental results of spall strength

撞击速度(m/s)	4	6	8	10	12	14	16
应变(s^{-1})	6.2	9.2	12.5	15.8	19.4	22.3	25.4
试件峰值应力(MPa)	20.5	31.2	39.6	51.2	59.3	66.4	82.8
C45-V0 层裂强度(MPa)	9.21	9.76	10.54	11.42	11.44	10.76	9.77
BSF-20-V1 层裂强度(MPa)	9.71	10.62	11.11	11.61	12.18	11.74	11.28
BSF-20-V2 层裂强度(MPa)	10.26	11.25	11.82	12.68	12.82	12.36	12.25
BSF-20-V3 层裂强度(MPa)	11.12	11.72	12.43	13.47	13.52	12.88	12.24
BSF-20-V4 层裂强度(MPa)	11.31	12.18	13.15	13.82	14.13	13.86	13.79
BSF-15-V2 层裂强度(MPa)	9.84	10.86	11.54	12.28	12.62	12.27	11.78
BSF-30-V2 层裂强度(MPa)	10.81	11.62	12.43	13.24	13.75	13.43	13.16
LSF-20-V2 层裂强度(MPa)	11.02	11.55	12.33	12.94	13.46	13.43	12.72

2.2 实验结果分析

静态条件钢纤维对混凝土拉伸强度的影响已经得到比较广泛的研究,在国标^[18]中建议采用如下计算公式:

$$f_{ft} = f_t(1 + \alpha \frac{l_f}{d_f} \rho_f) \tag{3}$$

其中 f_{ft} 为钢纤维混凝土静态抗拉强度; f_t 为素混凝土抗拉强度; α 为静态钢纤维影响系数; l_f/d_f 和 ρ_f 分别为钢纤维长细比和体积率。根据静态实验结果拟合得 $\alpha=0.2532$ 。

表 2 的实验结果表明,混凝土层裂强度具有应变率效应,即应变率增加时层裂强度增大。素混凝土层裂实验研究结果^[4-7,10]表明,混凝土层裂强度率效应的主要原因是不同应变率下裂纹扩展方式不同:在低应变率时,裂纹主要沿基体和过渡区内裂纹曲折扩展;而在高应变率时,由于裂纹快速扩展的惯性效应,裂纹将直接穿透骨料扩展而导致骨料断裂。由于骨料拉伸强度高于过渡区,所以混凝土就具有较高的层裂强度。但当撞击速度大于 14m/s 时,层裂强度降低,在张磊等^[10,11]以及 D. L. Grote 等^[19]研究中也发现类似现象,分析认为是由于对试件的压缩加载波引起压缩损伤演化降低了材料层裂强度。

混凝土强度应变率效应一般采用相对应变率的幂函数形式表示^[20]。根据素混凝土(C45-V0)层裂强度实验结果,拟合得到层裂强度与应变率间关系:

$$\sigma_F = 0.096(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)^{0.209} f_t \tag{4}$$

其中 σ_F 为素混凝土层裂强度; f_t 为素混凝土静态拉伸强度; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; $\dot{\epsilon}_s=10^{-5} s^{-1}$ 为准静态应变率。公式(4)与素混凝土层裂强度实验值能较好吻合,但小于钢纤维混凝土的实验结果,说明钢纤维混凝土层裂破坏与素混凝土并不完全相同。素混凝土在拉伸应力大于层裂强度时,基体中大量微裂纹在拉伸应力作用下生成和扩展从而使得试件发生断裂,其层裂强度主要受不同应变率下不同裂纹扩展方式影响。对钢纤维混凝土,在钢纤维没有从基体中滑动和松脱时,两者紧密结合在一起,在纤维和基体的交接部分产生剪应力,此剪应力是引起钢纤维混凝土层裂强度增加的主要原因。Flávio de Andrade Silva

等^[20]利用高速液压伺服试验机进行了纤维混凝土在不同应变率下的拉伸实验,发现当应变率增加时,纤维与混凝土基体间动态剪应力也随之增加。因此,动态加载下纤维混凝土层裂强度增加的原因,除素混凝土的裂纹扩展因素外,还包括纤维与基体间动态剪应力的增加。同时在基体出现裂纹扩展后,由于混凝土基体中存在杂乱分布的钢纤维,在裂纹通过这些纤维时,将受到纤维的阻挡而延缓扩展者改变方向,这样在细观上会衍生出许多的细小裂纹,同时由于钢纤维桥联作用,使得基体中出现在主裂纹周围出现多级分支裂纹的现象,从而有效阻止拉伸损伤的进一步演化,所以在试件破坏形状上没有出现像素混凝土那样的整体断裂而仅仅是出现宽度不同的裂纹。而(3)式中钢纤维影响系数仅仅考虑了静态条件下钢纤维增强因素,所以需要引入动态钢纤维影响系数 α_d 反映动态加载条件下钢纤维的影响。假定动态钢纤维影响系数 α_d 具有公式(5)形式,其中 $b(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)^m$ 反映了纤维与基体材料间动态剪应力增加:

$$\alpha_d = 0.2532 + b(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)^m \quad (5)$$

根据 BSF-20 型不同钢纤维含量混凝土和素混凝土在不同应变率下层裂强度实验结果,采用最小二乘法拟合得到 $b=0.058, m=0.01$,拟合结果见图 3(a)。根据(3)、(4)和(5)式 BSF-20 钢纤维混凝土层裂强度可以表示成:

$$\sigma_F = 0.096(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)^{0.209} f_t [1 + (0.2532 + 0.058(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)^{0.01}) \frac{l_f \rho_f}{d_f}] \quad (6)$$

利用(6)式得到纤维含量 2%、长细比不同钢纤维混凝土的层裂强度,与实验值对比,两者能较好吻合(见图 3(b)),说明钢纤维混凝土层裂强度仅受 $l_f \rho_f / d_f$ 影响,在保持 $l_f \rho_f / d_f$ 不变时,纤维长细比或者含量的变化不会影响混凝土层裂强度。

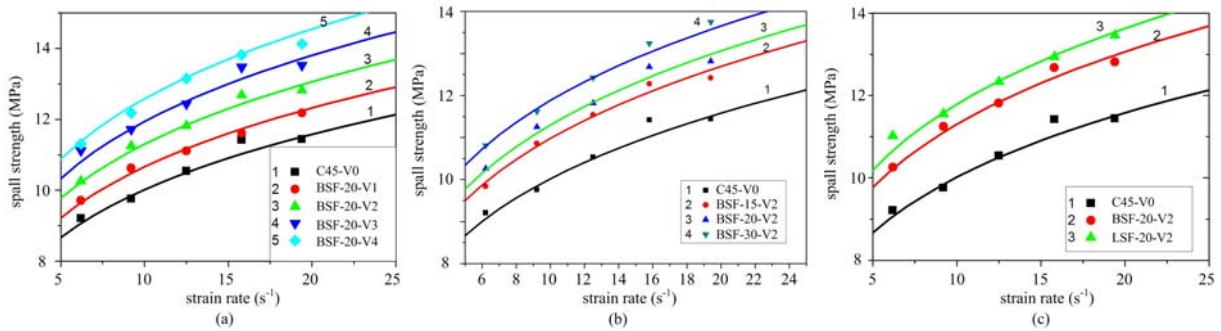


图 3 层裂强度经验公式与实验结果对比

Fig. 3 Comparison between the spall strength empirical formula and the experiment results

对 LSF 型纤维混凝土,仅进行了长细比 20、体积含量 2% 一种材料的实验,实验结果表明,在钢纤维长细比和含量相同时,波浪型钢纤维混凝土比扁头型钢纤维混凝土层裂强度更高。由于波浪型纤维表面形状的凸凹不平,除能增加其与混凝土基体间剪应力外,还能产生一定的机械啮合力,从而增加混凝土层裂强度。假定纤维形状对层裂强度影响可用纤维形状系数 β 进行表示,即 LSF 钢纤维混凝土层裂强度可以用式(7)表示:

$$\sigma_F = 0.096(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)^{0.209} f_t [1 + (0.2532 + \beta + 0.058(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)^{0.01}) \frac{l_f \rho_f}{d_f}] \quad (7)$$

根据 LSF-20-V2 与 BSF-20-V2 层裂强度实验结果得到 $\beta=0.122$ 。式(7)的计算结果和实验结果对比见图 3(c)。

拟合式(4)、(6)和(7)能较好地反映应变率、纤维长细比和形状对混凝土层裂强度的影响。其中 $0.096(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)^{0.209}$ 为应变率影响因子,素混凝土和钢纤维混凝土应变率效应可以采用相同形式表达; $(1 + \alpha_d l_f \rho_f / d_f)$ 为钢纤维影响项,钢纤维混凝土层裂强度和纤维长细比与含量乘积 $l_f \rho_f / d_f$ 具有线性关系,动态加载时影响系数比静态加载 α_d 高,且异型钢纤维(波浪型)的纤维影响系数比扁头直型钢纤维高。

3 结语

本文利用大直径 Hopkinson 杆进行了混凝土层裂实验研究,通过放置在试件后方的空心铝杆应变

波形测量了混凝土材料的层裂强度,系统研究了钢纤维长细比、含量和形状对钢纤维混凝土层裂强度的影响,取得如下结论:

(1) 混凝土层裂强度具有应变率效应,素混凝土与钢纤维混凝土层裂强度的应变率效应均可采用 $0.096(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)^{0.209}$ 进行表示。但当加载压缩波超过一定门槛值时,层裂强度会降低。

(2) 钢纤维对混凝土层裂强度的影响,可通过纤维影响系数 α 表示为 $(1 + \alpha l_f \rho_f / d_f)$ 的形式,层裂强度与纤维长细比与含量乘积成线性关系。

(3) 动态条件下钢纤维影响系数 α_d 高于准静态。对 BSF 型钢纤维混凝土而言, $\alpha_d = 0.2532 + 0.058(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)^{0.01}$ 能较好地符合实验结果。高速变形过程中纤维从基体中拔出时动态剪应力增加是导致动态条件下钢纤维影响系数 α_d 高于准静态的主要原因。

(4) 波浪型钢纤维混凝土层裂强度比扁头型高,其主要原因是纤维形状凸凹不平引起纤维与基体间啮合力增加。通过在纤维影响系数 α 中引入纤维形状系数 β 可以计及纤维形状的影响。

参考文献:

- [1] Lok T S, Xiao J R. Steel-fiber-reinforced concrete panels exposed to air blast loading[J]. Proceedings of the institution of civil engineers, structures and buildings, 1999, 134(9):319—331.
- [2] Sun W, Luo X, Yan H D, et al. Penetration and blast resistance of high performance steel fiber reinforced concrete[C]// in: Proceeding of 2nd Asia-Pacific specially conference on fiber reinforced concrete, Singapore, 1999:197—203.
- [3] 郑全平, 周早生, 钱七虎 等. 防护结构中的震塌问题[J]. 岩土力学与工程学报, 2003, 28(8):1393—1398 (Zheng Quanping, Zhou Zaosheng, Qian Qihu, et al. Spallation in Protective structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 28(8):1393—1398 (in Chinese))
- [4] Klepaczo J R, Brara A. An Experiment Method for Dynamic Tensile Testing of Concrete by Spalling [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(4):387—409.
- [5] 胡时胜, 张磊, 武海军 等. 混凝土材料层裂强度的实验研究[J]. 工程力学, 2004, 21(4):128—132 (HU Shi-sheng, ZHANG Lei, WU Hai-jun, et al. Experiment study on spalling strength of concrete [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(4):128—132(in Chinese))
- [6] Haijun Wu, Qingming Zhang, Fenglei Huang, et al. Experimental and numerical investigation on the dynamic tensile strength of concrete [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 32:605—617.
- [7] Brara A, Klepaczo J R. Experimental characterization of concrete in dynamic tension[J]. Mechanics of Materials, 2006, 38:253—267.
- [8] Schuler H, Mayrhofer C, Thoma K. Spall experiments for the measurement of the tensile strength and fracture energy of concrete at high strain rates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32:1635—1650.
- [9] 胡绍楼. 激光干涉测速技术[M]. 国防工业出版社, 2001 年第 1 版:13—17 (Hu Shao-lou. Laser interferometry for measuring velocities[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001:13—17 (in Chinese))
- [10] Zhang Lei, Hu Shisheng, Chen Dexing, et al. An Experimental Technique for Spalling of Concrete [J]. Experimental Mechanics, 2009, 49(4): 523—532.
- [11] 张磊, 胡时胜, 陈德兴 等. 钢纤维混凝土的层裂特征[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(2):119—124 (Zhang Lei, Hu Shisheng, Chen Dexing, et al. Spall Fracture Properties of Steel-Fiber-Reinforced Concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(2):119—124 (in Chinese))
- [12] 张磊, 高伟亮, 孙艳 等. 利用大直径 Hopkinson 杆测量混凝土层裂强度的新实验技术[J]. 防护工程, 2011, 32(5):1—4 (ZHANG Lei, GAO Weiliang, SUN Yan, et al. A Novel Experimental Technique to Determine the Spalling Strength of Concrete with Large Diameter Hopkinson Pressure Bar[J]. Protective Engineering, 2011, 32(5):1—4 (in Chinese))
- [13] 江水德, 任辉启, 赵大勇 等. 钢纤维高强混凝土杆抗爆炸剥落试验研究[J]. 防护工程, 2004, 26(2):103—108 (JIANG Shui-de, Ren Hui-qi, ZHAO Dar-rong, et al. Experimental study on spallation of steel fiber reinforced high strength concrete subjected to blasting load[J]. Protective Engineering, 2004, 26(2):103—108(in Chinese))
- [14] 张守保. 大直径分离式霍普金森压杆脉冲整形技术[J]. 防护工程, 2006, 28(5):1—8 (Zhang Shou-bao. The

- pulse shaper technique of large diameter split Hopkinson pressure bar[J]. Protective Engineering, 2006, 28(5): 1—8(in Chinese))
- [15] 王启智, 贾学明. 用平台巴西圆盘试件确定脆性岩石的弹性模量、拉伸强度和断裂韧度——第一部分: 解析和数值结果[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1285—1289 (WANG Qizhi, JIA Xueming. Determination of Elastic Modulus, Tensile Strength and Fracture Toughness of Brittle Rocks By Using Flattened Brazilian Disk Specimen—Part I: Analytical and Numerical Results[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1285—1289(in Chinese))
- [16] Rocco C, Guineab G V, Planasb J, Elices M. Review of the splitting-test standards from a fracture mechanics point of view [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31: 73—82.
- [17] Taraby Antoun, et al. Spall Fracture[M]. Springer-Verlag New York, Inc. 2003: 160—171.
- [18] CECS38:92, 钢纤维混凝土结构设计 with 施工规程[S] (Specification for Design and Construction of Steel Fiber Reinforced Concrete Structures[S] (in Chinese))
- [19] Grote D L, Park S W, Zhou M. Experimental characterization of the dynamic failure behavior of mortar under impact loading [J]. Journal of Applied Physics, 1989(4): 2115—2123.
- [20] Malvar L J, Crawford J E. Dynamic increase factors for concrete[C]. 28th DDESB Seminar, Orlando, FL, USA, 1998.
- [21] Flávio de Andrade Silva, Marko Butler, Viktor Mechtcherinea, et al. Strain rate effect on the tensile behavior of textile-reinforced concrete under static and dynamic loading [J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 1727—1734.

Experimental Study of Spall Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete

HAO Long^{1,2}, ZHANG Lei², GAO Wei-liang², WU Jian-hua²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Institute of Engineering Safety and Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 2. The Third Engineering Scientific Research Institute, The Headquarters of the General Staff, Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract: Steel fiber can improve evidently concrete ability to prevent spall fracture. But there is little detailed study about the effect of the fiber content, the fiber length and diameter ratio and the fiber shape on the spall strength of steel fiber reinforced concrete under high strain rate condition. A large diameter Hopkinson bar equipment was used to impact the slender concrete rod. The strain pulse in a hollow aluminum alloy bar mounted behind the specimen was used to examine the spall strength of concrete specimen. The effect of the fiber content, slenderness ratio and shaper on the spall strength was detected in detail, respectively. Experimental results indicate that the spall strength of steel fiber reinforced concrete (SFRC) has strain rate effect. In other words, the higher the strain rate is, the higher the spall strength. The improvement of spall strength due to steel fibers presents a linear relation with the product of the fiber influence coefficient α , the ratio of slenderness and the fiber content. The fiber influence coefficient α is higher under dynamic loading condition than that in the static loading due to the improvement of the dynamic shear stress between the fiber and the concrete bulk material when fiber is extracted quickly from bulk material. The undulated fiber concrete has higher influence coefficient α than that of dumbbell-shaper fiber concrete. An empirical formula to predict the spall strength of SFRC is presented based on the experimental results, which is well consistent with experimental results.

Keywords: Hopkinson bar; Steel fiber reinforced concrete (SFRC); spall; spall strength; fiber influence coefficient