

文章编号: 1001-1455(2003)05-00466-00

FRP 约束混凝土快速荷载下应力应变关系初探*

张宝超, 潘景龙

(哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 在四种不同约束比下 FRP (fiber reinforces plastic) 约束混凝土柱静力性能试验的基础上, 选定一种约束比, 进行了 FRP 约束混凝土柱在三种应变速率下的快速加载试验, 研究其在快速荷载下的力学行为。结果表明, FRP 约束混凝土在快速荷载作用下, 其强度与极限应变随应变速率的增加而增大并与对数应变速率成较好的线性关系, 其应变速率敏感性远高于无约束混凝土, 且应力应变关系曲线大致呈一条平滑曲线。根据试验结果拟合了 FRP 约束混凝土在快速荷载下强度与极限应变的经验公式, 并对其应力应变关系进行了初步探索。

关键词: 固体力学; 应力应变关系; 快速荷载; FRP; 约束混凝土; 应变速率

中图分类号: O347.1; TU377.4

国标学科代码: 130°15

文献标志码: A

1 引 言

FRP 约束混凝土柱在承受轴向压力时, 内部混凝土处于三向受压状态, 与普通混凝土相比, 其强度和变形能力大大提高, 因此在加固工程实践中得到了广泛应用。目前国内外关于 FRP 约束混凝土柱的试验研究多为静载试验^[1~4], 快速荷载下的力学行为研究未见报道。为将 FRP 约束混凝土应用于在使用期内可能承受动力荷载作用的结构, 尤其是承受诸如爆炸、冲击等快速荷载作用下的结构(如地下防护工程结构)加固工程中, 必须对其动态本构关系进行描述。为此, 本文中在四种不同约束比静载试验的基础上, 选定一种约束比, 进行了三种应变速率下的玻璃纤维约束混凝土柱在快速荷载下的全过程受压试验来研究 FRP 约束混凝土快速荷载下的应力应变关系。

2 试件、试验装置及试验方法

根据电液伺服试验系统的加载能力, 选用了直径 84mm、高度 168mm 的圆柱体试件, 其高径比为 2。试件制作采用的质量配比为: 水泥 : 砂子 : 石子 : 水 = 1 : 2.171 : 4.064 : 0.61, 所用水泥为哈尔滨水泥厂生产的 425 号普通硅酸盐水泥, 砂子为江砂中砂, 石子为最大粒径 15mm 的碎石, 设计混凝土强度等级为 C25。用塑料管作模板, 振捣成型, 3 天后拆模进行养护。试件养护后在室温下放置了 50 天, 可认为其属于干燥状态, 实测混凝土轴压强度为 27MPa。纤维材料选用了哈尔滨玻璃钢研究所生产的中碱玻璃纤维及美国赫氏复材泛太公司生产的碳纤维。经过标准试件的拉伸试验, 玻璃纤维单层破断拉力为 71N/mm, 碳纤维单层破断拉力为 411N/mm。采用环氧树脂作为胶结剂, 试验前进行了试配, 在试验中未出现脱胶现象。为防止试件两端压坏, 在圆柱体试件两端头采用 3cm 宽的碳纤维进行了缠绕三层加固, 试验中未出现端头破坏。

静载试验共分为 5 组, 每组两个试件。试验中采用 600kN 压力机加载, 长标距电阻应变片量测应变, 加载共分十级。应变由对称的四片应变片分别测量, 静态电阻应变仪采集。在静力试验的基础上, 选定了一种约束比进行了三种应变速率的快速加载试验, 每种应变速率下采用 3~4 个试件。利用电液伺服试验系统加载, 该系统的作动器最大加载能力为 630kN, 频率响应为 0~15Hz (在 80% 极限荷载时的频响为 2Hz)。为使得试验系统的响应较好的符合命令信号, 试验前调节了 PID。作动器上端有球铰,

* 收稿日期: 2002-12-02; 修回日期: 2003-05-12

作者简介: 张宝超(1978—), 男, 博士研究生。

为避免加载过程中出现偏心,作动器用固定于试验系统机架的套箍来限制作动器可能产生的偏移。由于试件高度较小,试件下部采用了与混凝土地面有良好连接的钢结构支架作底座。动态应变采用应变片量测,数据由计算机自动采集。为减小采样间隔,应变改由对称的四片应变片先串联后并联合并成一个通道后采集。采用位移控制进行加载,通过达最大位移的时间不同,获得了三种不同的应变速率。

图 1 为进行 z-16 试验时的命令信号, d 为位移。图 2 为在该命令信号下产生的荷载曲线。

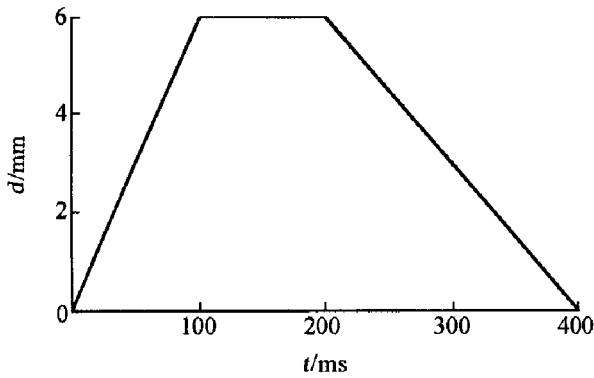


图 1 命令信号图
Fig. 1 Command signals

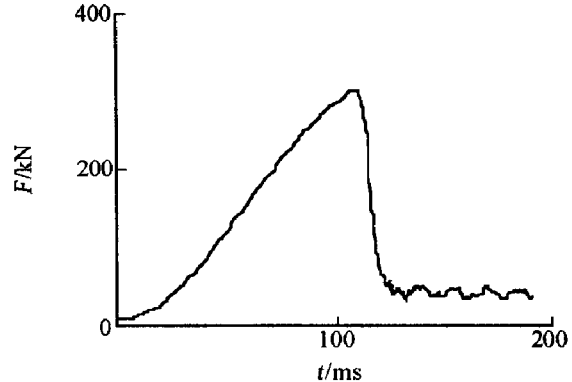


图 2 荷载曲线
Fig. 2 Load history

3 试验现象及主要试验结果

3.1 试验现象

试验现象表明,在静力加载和快速加载试验中试件的最终破坏均是由环向纤维被拉断造成的。试件在准静载下破坏时,距离近时才能听见纤维的逐步断裂声;当应变速率达 0.0038s^{-1} 时,在 5m 外就可以听见试件破坏时纤维的断裂声;当应变速率达到 0.219s^{-1} 时,试件破坏时甚至出现了爆炸声,在破坏面有碎混凝土块飞出,破坏更具有突然性。图 3 为典型的破坏照片。

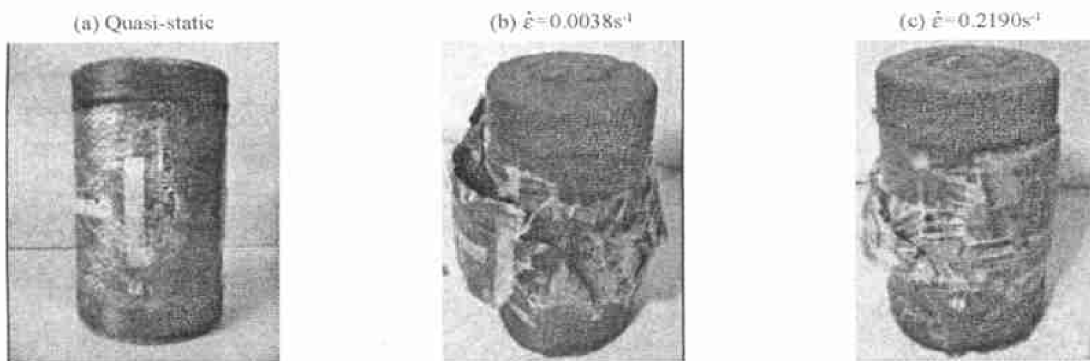


图 3 典型的破坏照片
Fig. 3 Typical models of failure

3.2 主要试验结果

静载试验结果见 1,表中, ξ 为约束比, F 为承载力, σ_{lim} 为极限压应力, ϵ_{lim} 极限压应变。其中,约束比 $\xi = \sigma_2 / f_c$, 侧向压应力 $\sigma_2 = NP / r$, N 为纤维层数, P 为单层纤维的破断拉力, r 为试件半径。

通过表 1 可以看出,随着约束比的增加,FRP 约束混凝土准静载下的极限压应力与极限压应变有较大增加。经拟合,FRP 约束混凝土强度与约束比的关系为

$$f'_c = f_c (1 + 3.84 \xi) \tag{1}$$

式中: f'_c 为 FRP 约束混凝土抗压强度, f_c 为混凝土抗压强度试验值。该拟合结果与文献[1~4]的结果较好吻合。

基于准静载下试验结果并考虑到试验机的加载条件,选定约束比最小的一类试件($\xi=0.063$ 时)进行了快速加载试验,表 2 为快速加载试验的主要试验结果。

由表可见,在一定约束比下,随着应变速率的增加,FRP 约束混凝土的强度与极限应变均有较大增加。图 4 与图 5 分别为典型的试验曲线。

由图 4 可见,静载下 FRP 约束混凝土的应力应变关系曲线表现为明显的弹性、弹塑性、线性强化三个阶段^[1~4];而由图 5 可见,FRP 约束混凝土在快速荷载下的应力应变关系却表现为明显的曲线。

表 1 静载试验结果

Table 1 Results for specimens subject to quasi-static load

柱号	纤维类型	ξ	F/kN	σ_{lim}/MPa	$\epsilon_{lim}/10^{-6}$
z-1	玻璃纤维	0.063	190.0	34.28	7920
z-2	玻璃纤维	0.063	180.0	32.48	6656
z-3	玻璃纤维	0.125	220.0	39.70	9244
z-4	玻璃纤维	0.125	230.0	41.50	8923
z-5	玻璃纤维	0.313	320.0	57.74	10658
z-6	玻璃纤维	0.313	330.0	59.55	11752
z-7	碳纤维	0.362	350.0	63.15	21494
z-8	碳纤维	0.362	360.0	64.96	17035

表 2 快速加载试验结果

Table 2 Results for specimens subject to fast load

柱号	ϵ/s^{-1}	F/kN	σ_{lim}/MPa	$\epsilon_{lim}/10^{-6}$
z-9	0.0038	232.0	41.86	10817
z-10	0.0038	225.4	40.67	9870
z-11	0.0038	257.8	46.52	11010
z-12	0.0182	264.1	47.64	10098
z-13	0.0182	278.7	50.29	11881
z-14	0.0182	275.0	49.62	11220
z-15	0.219	300.8	54.28	13007
z-16	0.219	290.5	52.42	12987
z-17	0.219	272.7	49.21	12244
z-18	0.219	285.0	51.43	11697

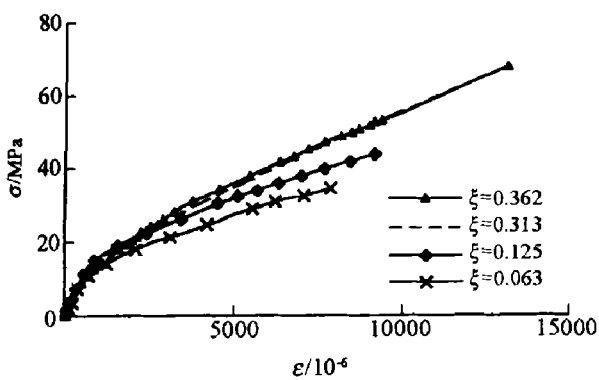


图 4 不同约束比时静载下的应力应变曲线
Fig.4 Stress-strain curves of specimens with different constraint ratio subject to static load

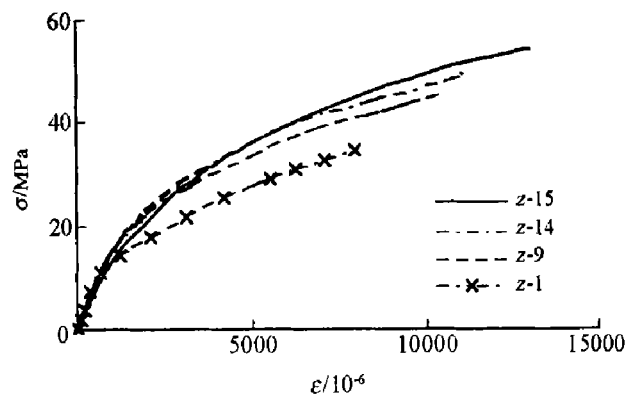


图 5 相同约束比不同应变速率下的应力应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves of specimens with the same constraint ratio at different strain rates

4 应变速率影响

4.1 极限抗压强度

图 6 为对数应变速率与 FRP 约束混凝土极限抗压强度提高的关系,可见呈较好的线性。利用试验结果拟合了 FRP 约束混凝土在快速荷载作用下极限抗压强度的经验公式

$$f'_c/f'_c = 1.645 + 0.129 \lg(\dot{\epsilon}/\epsilon_0) \quad (2)$$

式中: f'_c 为 FRP 约束混凝土快速荷载下的抗压强度, f'_c 为 FRP 约束混凝土静载抗压强度,准静载下的应变速率 $\epsilon_0=0.00001s^{-1}$ 。

董毓立等^[5]对无约束混凝土的动态力学行为进行了研究,得到强度公式

$$f_c/f_c = 1.327 + 0.068 \lg(\dot{\epsilon}/\epsilon_0) \quad (3)$$

尚仁杰^[6]给出了相似的关系。通过式(2)与(3)的对比可以看出,FRP 约束混凝土的应变速率敏感性比无约束混凝土更显著。

本文中认为 FRP 约束混凝土的纤维应变速率应与混凝土的应变速率处于一个量级,所以本次试验纤维的应变速率量级应处于 $0.0038 \sim 0.219s^{-1}$ 附近。夏源明等^[7]进行了玻璃纤维的动态拉伸试验,得到了应变速率在 $0.01s^{-1}$ 以下时,纤维的应变速率敏感性并不明显,即玻璃纤维强度可取静力试验值,但是并未进行应变速率为 $0.01 \sim 0.219s^{-1}$ 的试验。因此本文中在哈尔滨工业大学固体力学系材料强度试验室采用 Zwick 试验机进行了玻璃纤维在等应变速率($0.2s^{-1}$)下的动态拉伸试验,试件为单层、5cm 宽的玻璃纤维,共采用两个试件,平均试验结果与静载试验结果对比见表 3。表中 σ_{lim}^s 为单层极限拉应力, ϵ_{lim}^s 为极限拉应变, K^s 为单层抗拉刚度,应变速率为 $0.00001s^{-1}$ 时是准静载下的常用取法^[5-6]。由表可见,在应变速率为 $0.2s^{-1}$ 时,纤维的应变速率效应仍然很小。因此,混凝土受力状态的差别是导致 FRP 混凝土应变速率敏感性远高于未约束混凝土的原因。

表 3 玻璃纤维的拉伸试验结果

Table 3 Material properties of GFRP

$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	$\sigma_{lim}^s/(N/mm)$	$\epsilon_{lim}^s/10^{-6}$	$K^s/(N/mm)$
0.00001	71.0	13846	5128
0.2	71.3	13897	5129

4.2 极限压应变

图 7 为对数应变速率与 FRP 约束混凝土极限压应变提高的关系,可见亦呈较好的线性。拟合的 FRP 约束混凝土在快速荷载下极限压应变的经验公式为

$$\epsilon_c^d/\epsilon_c = 1.822 + 0.165 \lg(\dot{\epsilon}/\epsilon_0) \quad (4)$$

式中: ϵ_c^d 为 FRP 约束混凝土快速荷载下的极限应变, ϵ_c 为 FRP 约束混凝土准静载下极限应变。

5 应力应变关系

通过图 4 与图 5 的对比可知,FRP 约束混凝土在快速

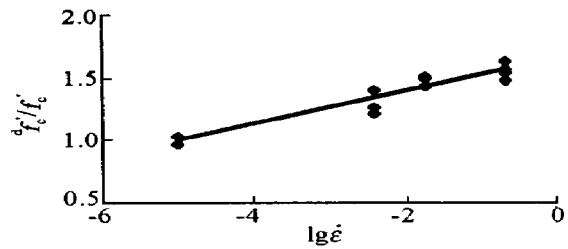


图 6 f'_c/f'_c 与 $\lg \dot{\epsilon}$ 的关系

Fig. 6 Relation between f'_c/f'_c and $\lg \dot{\epsilon}$

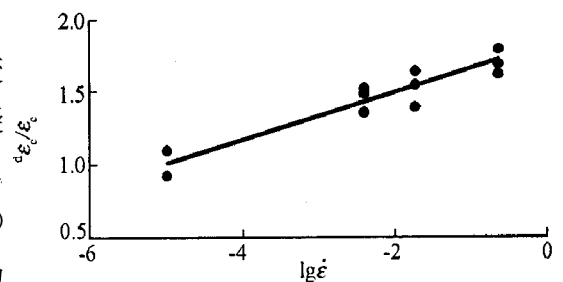


图 7 ϵ_c^d/ϵ_c 与 $\lg \dot{\epsilon}$ 的关系

Fig. 7 Relation between ϵ_c^d/ϵ_c and $\lg \dot{\epsilon}$

荷载下的应力应变关系曲线与其在静力条件下的关系曲线相比,存在一定的差异。在静力试验中,一般认为其应力应变曲线可以划分为弹性、弹塑性和强化三个阶段,弹塑性阶段所占比例不大,而强化段所占比例较大,且其随约束比的增加而增大,并较好的符合线性关系。虽然对于弹性、弹塑性阶段的描述方法不尽相同,但对于强化段的描述均采用线性化方法^[1~4]。而图 5 中可见,在快速荷载作用下,其全过程应力应变关系却接近于一条平滑曲线,因此用曲线来描述较合理。

采用下述应力应变关系

$$\sigma = \frac{E \epsilon}{1 + A_d \epsilon + B_d \epsilon^2 + C_d \epsilon^3} \quad (5)$$

此应力应变关系还应增加一个限制条件,即 $\epsilon = {}^d \epsilon_c$ 时,曲线结束。因此对于 FRP 约束混凝土快速荷载下的应力应变关系,必须先计算出^d ϵ_c 。

经拟合,适用于本文约束比下的三个系数分别为

$$\begin{cases} A_d = (7.76 + 3.09 \lg(\epsilon / \epsilon_0) + 0.65 \lg^2(\epsilon / \epsilon_0)) / {}^d \epsilon_c \\ B_d = (-8.05 - 5.72 \lg(\epsilon / \epsilon_0) - 0.94 \lg^2(\epsilon / \epsilon_0)) / {}^d \epsilon_c^2 \\ C_d = (4.71 + 2.98 \lg(\epsilon / \epsilon_0) + 0.39 \lg^2(\epsilon / \epsilon_0)) / {}^d \epsilon_c^3 \end{cases} \quad (6)$$

图 8 是三种应变速率下的试件应力按(5)式的计算值与平均试验值的对比,可见吻合较好。

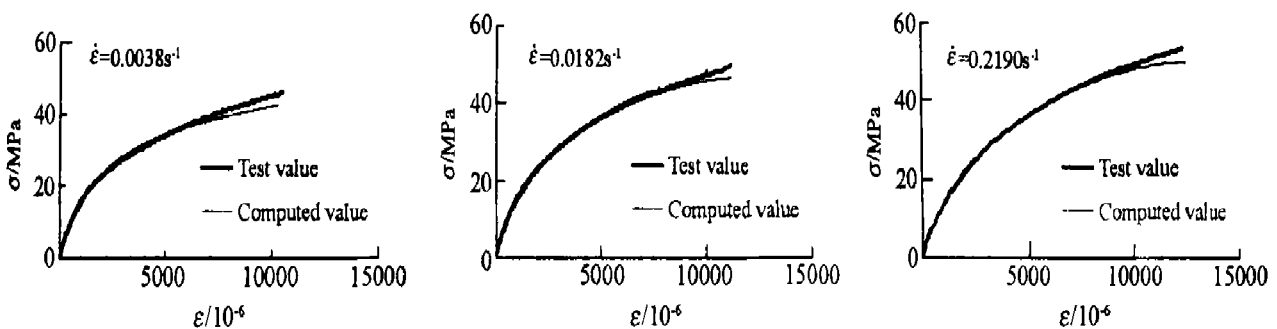


图 8 应力的计算值与试验值的对比

Fig. 8 Computed and measured stress

6 结 论

(1)约束混凝土在快速荷载下的强度与变形能力远远好于其在静力荷载下的相应性能,该原理可以应用于使用期内需承受快速荷载作用的混凝土结构加固。

(2)FRP 约束混凝土在快速荷载作用下的强度与极限应变随应变速率的增加而增加并与对数应变速率成较好的线性关系,混凝土受力状态的差别使 FRP 约束混凝土的应变速率敏感性远高于无约束混凝土。

(3)快速荷载作用下的 FRP 约束混凝土的应力应变关系曲线与静力试验结果有所不同,更接近于一条曲线,用曲线来描述较合理。

(4)研究了 FRP 约束混凝土应力应变关系特征,拟合了在文中约束比下 FRP 约束混凝土快速荷载下的应力应变关系,其计算值与试验值吻合较好。

参考文献:

- [1] 细谷学. 碳素纤维シートで横拘束したコンクリート柱の応力度-ひずみ関係の定式化[A]. 日本土木学会. 土木学会论文集[C]. 日本东京: 奥村印刷株式会社, 1998: 37-52.
- [2] Mirmiran A, Shahawy M. Behavior of concrete columns confined by fiber composites[J]. J of Structures Engin, 1997, 123(5): 583-590.
- [3] Shahawy M, Mirmiran A, Beitelman T. Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns[J]. Composites, 2000, 31B(6-7): 471-480.
- [4] 肖岩, 吴徽, 陈宝春. 碳纤维套箍约束混凝土的应力应变关系[J]. 工程力学, 2002, 19(2): 154-159.
XIAO Yan, WU Hui, CHEN Bao-chun. Compressive stress-strain behavior of concrete confined by carbon fiber jackets [J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(2): 154-159.
- [5] 董毓立, 谢和平, 赵鹏. 不同应变率下混凝土受压全过程实验研究及其本构模型[J]. 水利学报, 1997, (7): 72-77.
DONG Yu-li, XIE He-ping, ZHAO Peng. Experimental study and constitutive model on concrete under compression with different strain rate[J]. Shuili Xuebao, 1997, (7): 72-77.
- [6] 尚仁杰. 混凝土动态本构行为研究[D]. 大连: 大连理工大学, 1994.
- [7] 夏源明, 袁建明, 杨报昌. 纤维率相关的统计本构模型的理论及实验研究[J]. 复合材料学报, 1993, 10(2): 17-24.
XIA Yuan-ming, YUAN Jian-ming, YANG Bao-chang. Theory of the statistical constitutive model of strain rate dependence of the fiber and its experimental study[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1993, 10(2): 17-24.

Stress-strain relation of FRP confined concrete subjected to fast load

ZHANG Bao-chao^{*}, PAN Jing-long

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of technology,
Harbin 150090, Heilongjiang, China)

Abstract: Based on the quasi-static results of short concrete columns wrapped with fiber reinforced plastic (FRP) straps under the conditions of four different constraint ratios, test at three different strain rates and under selected constraint ratio $\xi(0.063)$ was conducted, aiming at studying the dynamic behavior of concrete confined by fiber reinforced plastic straps subjected to fast load. The experiments indicate that the strength and ultimate strain of FRP confined concrete increase with strain rate and with logarithmic strain rates linearly. The strain-rate sensitivity of the FRP confined concrete is far stronger than that of the corresponding unconfined concrete, and its stress-strain curves are of approximately a smooth curve rather than the bilinear characteristic under quasi-static condition. The experiential formula for dynamic strength and dynamic ultimate strain are derived from test data. Also, the computed values using constitutive formula similar to Seanz's agree well with the measured values.

Key words: solid mechanics; stress-strain relation; fast load; FRP; confined concrete; strain rate

* Corresponding author: ZHANG Bao-chao

E-mail address: zhangbaochao156@sohu.com; Telephone: 0451-6282081