循环载荷作用下钢纤维混凝土 的损伤及演化行为的定量描述^{*}

鞠 杨

(中国矿业大学北京研究生部,北京 100083) (哈尔滨建筑大学,哈尔滨, 150001)

樊承谋

提 要 基于对轴向循环压缩载荷作用下钢纤维混凝土损伤行为的试验研究. 给出了 一种适宜工程应用的钢纤维混凝土损伤程度的定量计算方法,并导出了描述其损伤演化的 力学模型。与实验结果的对比表明,理论损伤演化模型较好地反映了实测钢纤维混凝土的 损伤演化行为。

关键词 损伤,演化,钢纤维混凝土,循环载荷

一、 引 言

钢纤维混凝土是一种抗裂性能好、抗疲劳、抗冲击、韧性好、耐磨损的工程复合材 料、用于土木、水利、近海结构、铁路及矿山等工程建设、可较大幅度提高结构物或构 筑物的耐久使用寿命,经济效益显著。反复循环荷载作用下材料因受损失效而导致结构 物或构筑物开裂及破坏是危害上述结构物或构筑物正常及安全使用的重要因素。因此, 研究并充分掌握循环载荷作用下钢纤维混凝土的损伤形成及演化行为,是合理控制材料 失效、提高整体结构设计水平、创造安全、经济的使用环境等重要工作的基础、具有实 际意义。本文针对此问题、以轴向循环压缩实验为例、研究了钢纤维混凝土损伤形成及 演化行为。给出了适宜工程应用的损伤定量计算方法,在此基础上利用连续介质损伤力

* 本文得到了中国博士后科学基金的资助 本文收稿日期: 1996年10月

学理论导出描述损伤演化的力学模型,并与实验结果进行对比。考虑到实验条件及其他 方面的限制,本文选取了一种工程上常用钢纤维配比的钢纤维混凝土进行了实验和理论 研究,意在为进一步研究实际工程中复杂外载条件下钢纤维混凝土的损伤及演化行为提 供实验和理论研究基础。

二、实验研究

实验采用图 1、2、3 的三种模式对钢纤维混凝土试件进行加载。等幅及变幅循环载 荷的最大应力水平 S_{max} , $s_{\text{max},i}$ 和第一级应力循环比 n_1/N_1 为变参数, S_{max} 为最大使用 应力 σ_{max} 与材料静极限轴心抗压强度 f_c 之比, $S_{\text{max}} = \sigma_{\text{max}}/f'_c$; n_1 为第一级应力的实际 循环次数, N_1 为该恒定应力水平下材料至破坏时的循环次数。等幅加载下的 S_{max} 分别 为 0. 65, 0. 75, 0. 85, 每种工况下测试 15~ 18 个试件。变幅加载下 $S_{\text{max},i}$ 分别为 0. 65 和 0. 75, 低一高和高一低加载中的 n_1/N_1 分别为 0. 08、0. 19、0. 24、0. 31、0. 46 和 0. 15、0. 21、0. 30、0. 45 等工况。每种工况下有 8 个相同的试件进行实验。为防止高 速加卸载过程中试件发生弹跳和错位, 每个试件上保持了 S_{min} 的最小压应力幅值。循环 加荷频率为 7. 5 赫兹,载荷波采用正弦波。试件为 Φ 100× 250mm 的圆柱体。材料配比 见表 1。



实验着重观测了卸荷至最小应力时钢纤维混凝土的残余塑性变形、变幅加载下历经 初始应力作用后的剩余强度和寿命随循环次数的变化规律,实验结果如下。

三、实验结果及分析

表 2 低 高变载第二级应力下的剩余寿命 表 3 高 低变载第二级应力下剩余疲劳寿命

初始循环次数	循环比	剩余寿命	循环比
n_1	n_{1}/N_{1}	n_2	n_2/N_2
7200	0.08	20100	1. 430
17600	0.19	15120	1. 080
21900	0.24	4410	0. 320
28400	0.31	3840	0. 274
425 50	0.46	3400	0. 242

初始循环次数	循环比	剩余寿命	循环比
n_1	n_{1}/N_{1}	n_2	n_{2}/N_{2}
2100	0. 15	100000	1.091
3000	0. 21	95400	1.040
4290	0. 30	17100	0.187
6300	0. 45	12280	0.134

 $\dot{E}: N_1 = N_{S=0.65} = 91700, N_2 = N_{S=0.75} = \dot{E}: N_1 = N_{S=0.75} = 14060, N_2 = N_{S=0.65} = 14060, N_2 = 14060, N_2 = N_{S=0.65} = 14060, N_2 = 14060$ 14060^[1]; $N_{S=0.65}$ 和 $N_{S=0.75}$ 分别为 $S_{max} = 0.65$ 91700^[1]; $N_{S=0.65}$ 和 $N_{S=0.75}$ 分别为 $S_{max} = 0.65$ 和 $S_{max} = 0.75$ 等幅循环加载时的寿命。 和 $S_{max} = 0.75$ 等幅循环加载时的寿命。

表 4 历经不同循环次数的初始应力作用后的剩余强度变化

应力水平 S _{max}	循环次数 <i>n</i> 1	循环前的强度 f_{c}^{\prime} (M Pa)	平均值 <i>ī ̄ c (</i> M Pa)	循环后的强度 f_{c}^{\prime} (MPa)	平均值 <i>ī ̄ ː (</i> MPa)
	3000	38.6		38.5	
	3000	37.5	38.83	37.2	38.80
	3000	40.4		40.7	
0. 75	4290	39.4		35.4	
	4290	37.5	38.60	35.6	35.70
	4290	38.9		36.1	
	17600	37.6		38.0	
	17600	36.9	38.10	37.3	38.0
0. 65	17600	39.8		38.9	
	21900	38.7		35.6	
	21900	37.7	38.63	36.0	36.40
	21900	39.5		37.5	



图 6 高低变幅加荷时的残余塑性变形

图 4, 5, 6 分别为实测等幅及变幅循环载荷下钢纤维混凝土残余塑性变形的变化规 律。横坐标为循环比 *n/N* (任一时刻循环次数 *n* 与试件最终破坏时循环次数 *N* 之比), 纵坐标为试件的瞬时残余塑性变形 *e*_n。表 2, 3, 4 则给出了历经不同循环次数的初始 应力作用后钢纤维混凝土试件在第二级应力作用下剩余寿命和强度的变化情况。

由于钢纤维混凝土的损伤在细观上表现为微裂纹萌生和扩展, 宏观表现为卸荷后产 生不可恢复的残余塑性变形。随内部损伤加剧, 残余塑性变形累积增加。当残余塑性变 形累积增加至极限值时, 材料产生破坏。这就是说, 残余塑性变形规律实质上反映出材 料的损伤演化规律⁽²⁾。根据以上观测结果, 可将钢纤维混凝土的损伤演化在宏观上划 分为图 7 所示的三阶段演变模式, 即损伤潜伏阶段、损伤起始和稳定扩展阶段以及失稳 破坏阶段。所谓损伤潜伏是指在一定幅值的循环应力作用下, 在该阶段材料的宏观力学 性能 (包括寿命、强度等) 并未因早期循环荷载作用而产生衰减⁽²⁾。只有当循环作用 超过一定次数后, 对应于内部细观损伤累积超过临界值后, 材料的宏观力学性能方开始 衰退。表 2, 3, 4清楚地表明这一点。据此,本文定义宏观损伤潜伏阶段与损伤开始阶 段分界点所对应的循环次数为损伤起始循环次数 nr. 所对应的循环比 nr/N 为临界循

图 7 钢纤维混凝土损伤演化行为的宏观描述

环比。从图示结果可以看出, 比值 *n*_r/*N* 基本不随应力水平*S*_{max}而变化, 可视为材料常数, 本文钢纤维混凝土的 *n*_r/*N* 约等于 0.21。

以下表 5、6、7 分别列出了宏观损伤起始和最终破坏时的残余塑性变形值 (因实验 中试件数量较多,且规律相近,这里例举了足够多的试件测试结果以说明问题)。表中 6,为钢纤维混凝土宏观损伤起始时刻对应的残余塑性变形, 8 是宏观损伤破坏时刻的 残余塑性变形。结果表明:不同应力幅值下钢纤维混凝土损伤起始应变 8 和损伤破坏 时应变 8 的平均值变化不大。若将各试件破坏时寿命的差别,视作材料静抗压强度的 离散造成试件上实际作用应力大小不同的结果,那么该实验结果说明,对于任意荷载水 平,钢纤维混凝土损伤起始应变 6 和损伤破坏时的应变 8 接近于常数,实测的 6 和 8 分别近似为 636.7 4 和 942.7 4 。

应力水平	试 件	破坏时的循环次数	损伤起始应变	平均值	破坏时的应变	平 均 值
$S_{ m max}$	编号	N	$\mathbf{E}_{D}^{p}(\mathbf{\mu}\mathbf{E})$	$\mathbf{E}_{D}^{p}(\mathbf{\mu}\mathbf{E})$	$\mathbf{E}_{f}^{p}(\mathbf{\mu}\mathbf{E})$	$\mathbf{E}_{f}^{p}(\mathbf{\mu}\mathbf{E})$
0.65	1	54310	644. 6		950.0	934.9
	2	95020	650.5	632.0	951.6	
	3	100770	636.2		930.0	
0.05	4	116720	620. 5		943.4	
	5	130100	623. 4		919.8	
	6	135050	616.8		914.7	
1 2	1	10750	666.7		960.5	
	2	12740	670.8	642.5	970.5	950.4
0.75	3	15200	630. 7		948.3	
0.75	4	17550	627.4		947.7	
	5	19320	621.3		935.0	
	6	21720	638.0		940. 2	
0. 85	1	1680	642. 5		997.3	
	2	2380	670. 0		971.2	
	3	3160	636.2	641.2	944. 8	957.6
	4	3640	624. 3		943.5	
	5	3860	630. 2		950.0	
	6	4150	643. 5		939.0	

表 5 等幅循环加载时试件 🖏 和 🕏 的测算值

注: \mathcal{C}_D 取各应力等级 $S_{\max,i}$ 下试件的 $\mathcal{C}_D ~ n/N$ 关系曲线上 $n_1/N_i = 0.21$ 时的残余应变值, N_i 为等幅循环破坏时的寿命值

初始循环比	试 件	破坏时的循环次数	损伤起始应变	平均值	破坏时的应变	平 均 值
n_1 / N_1	编 号	N	$\mathbf{E}_{D}^{p}(\mathbf{\mu}\mathbf{E})$	$\mathcal{E}_{D}^{p}(\mu\epsilon)$	$\mathbf{E}_{f}^{p}(\mathbf{\mu}\mathbf{E})$	$\mathcal{B}_{f}^{p}(\mu\epsilon)$
	1	22170	/		966.8	
0.08	2	23200	/	/	950.3	954.2
	3	27300	/		945.5	
	1	32300	/		947.4	
0. 19	2	33730	/	/	944. 5	942.0
	3	33840	/		934.1	
	1	25940	637.3		949.5	
0.24	2	26010	622. 6	629.9	940. 1	940.1
	3	28480	630. 0		930.7	
	1	31250	628.3		937.3	
0.31	2	32040	635.5	636.6	941.7	933.1
	3	32750	646.1		920.4	
1	1	44720	630. 4		927.9	
0.46	2	46200	626.8	633.8	940.0	932.7
	3	46570	644. 3		930.1	

表6 低-高变载时试件 & 和 & 的测算值

注: 1. 低 - 高应力水平分别为 $S_{\text{max},1} = 0.65$, $S_{\text{max},2} = 0.75$; n_1 为低应力时的实际循环次数, N_1 为 $S_{\text{max},1}$ 作用下破坏时的循环次数, N_1 取 91700。 2. \mathfrak{G} 取 $\mathfrak{C}_n \sim n/N$ 关系曲线上与 $n_1/N_1 = 0.21$ 相对应的循环比 n_1/N 下的残余应变值, N 为实测的变幅载荷下至破坏时的循环次数。 3."/" 表示在 $S_{\text{max},1}$ 作用下,循环 次数未达到损伤起始值 $n_1/N_1 = 0.21$ 时变幅至 $S_{\text{max},2}$,故没有在 $S_{\text{max},1}$ 作用下的相对应的损伤起始应变。

据此,作者认为,钢纤维混凝土损伤起始应变 & 和损伤破坏时的应变 & 是与材料构成有关的常数,与外载幅值和加载历程无关。当外载引起的残余塑性变形累积达到临界值 &,材料即进入宏观损伤演变;而当残余塑性变形累积达到临界值 & 时,材料即产生破坏。

表7 高-低变载时试件 的和 幹 的测算值

初始循环比	试 件	破坏时的循环次数	损伤起始应变	平均值	破坏时的应变	平 均 值
n_1 / N_1	编号	N	$\mathcal{E}_D^p(\mu \mathcal{E})$	$\mathcal{E}_{D}^{p}(\mu\epsilon)$	$\mathcal{E}_{f}^{p}(\mu \varepsilon)$	$\mathcal{E}_{f}^{p}(\mu \mathbf{E})$
	1	98900	/		947.4	
0.15	2	101830	/	/	926.5	928.4
	3	104720	/		911.3	
1 0.21 2 3	1	96050	/		937.5	
	2	100200	/	/	940.0	934.7
	103080	/		926.7		
1 0.30 2 3	18460	632. 7		936.4		
	2	19930	644. 1	633.5	964.7	948.5
	3	23150	623.8		844.5	
	1	16270	638.1		970.5	
0.45	2	18680	624. 6	641.4	954.0	955.6
	3	21310	651.6		942.3	

注: 1. 高-低应力水平分别为 $S_{\text{max},1} = 0.75$, $S_{\text{max},2} = 0.65$; n_1 为高应力时的实际循环次数, N_1 为 $S_{\text{max},1}$ 作用下破坏时的循环次数, N_1 取 14060。2. \mathcal{E}_0 取 $\mathcal{E}_n^{\prime} \sim n/N$ 关系曲线上与 $n_1/N_1 = 0.21$ 相对应的循环比 n_1/N 下的残余应变值, N 为实测的变幅载荷下至破坏时的循环次数。3. "/"表示在 $S_{\text{max},1}$ 作用下,循环次数未达到损伤起始值 $n_1/N_1 = 0.21$ 时变幅至 $S_{\text{max},2}$,故没有在 $S_{\text{max},1}$ 作用下的相对应的损伤起始应变。

四、损伤大小的定量描述

损伤变量 D 是量度材料损伤大小的物理量,选取恰当的损伤变量对于正确地描述 损伤及其演化规律至关重要。根据以上分析, S 和 S 为材料常数,因而从损伤起始到 最终破坏的塑性变形能力 (S-S)为常量,这就是说,当钢纤维混凝土的固有塑性变 形能力 (S-S) 被耗尽时,材料发生损伤破坏。据此,本文将损伤变量 D 定义为:

$$D = \begin{pmatrix} \mathcal{E}_n - \mathcal{E}_D \\ \mathcal{E}_n^{\prime} - \mathcal{E}_D^{\prime} \\ \mathcal{E}_n^{\prime} - \mathcal{E}_D^{\prime} \end{pmatrix} (\mathcal{E}_D^{\prime} \leq \mathcal{E}_n^{\prime} \leq \mathcal{E}_n^{\prime})$$

该式表明损伤 D 与残余塑性变形 & 成线性关系,图 8 给出了实测的 D~ & 关系曲线。 由以上定义知,当 & < & 时,钢纤维混凝土尚处于损伤潜伏阶段,未产生宏观损 伤;当 & ≥ & 时,宏观损伤演化开始,D ≥0;当 & = & 时,D=1.0,材料发生损伤 破坏。图 9 为按式 (1) 计算的本文钢纤维混凝土的损伤演化规律。可见,按式 (1) 计 算损伤 D,物理意义明确,对材料宏观损伤演变各阶段的特征描述符合实验观测。



图 8 钢纤维混凝土的 D~ & 关系曲线

图 9 钢纤维混凝土的损伤演化规律

实际应用时,量取试样在实际循环载荷作用下残余塑性变形值 &,根据式 (1)及临界值 &, Y,即可判断钢纤维混凝土当前的损伤程度,进而对其构件或结构的损伤状况作出判断。应当指出的是,不同配比的钢纤维混凝土具有不同的 &, Y 值,因而,运用式 (1) 计算不同于本文配比的钢纤维混凝土的损伤程度时,应先通过简单实验测定其 &, Y 值。考虑到受多种因素影响,测试结果存在一定的离散性,故需要一定数量的实验方能获取可靠的临界参数值。另一方面,不难看出,由于钢纤维混凝土与普通混凝土具有相似的组成结构和损伤形成、演化机理,因而,式 (1) 的损伤计算方法可推广应用于普通混凝土,但其临界值 &, Y 与钢纤维混凝土的有较大差别。这可通过一些简单的实验证实,详细分析可参见文献 [2]。

五、描述损伤演化的力学模型 一损伤演化方程

1. 损伤演化方程的导出

建立与外载条件直接相关的描述损伤演化的力学模型一损伤演化方程,对于根据外 载条件,预估拟建或已建结构物的使用寿命或剩余使用寿命具有重要意义。在上述研究 的基础上,本文以下导出适用于钢纤维混凝土 (或混凝土)的损伤演化方程。

考虑到材料的损伤演化行为与其当前的循环应力状态和损伤状态有关,是一种非线性行为,可将损伤随应力循环作用次数的变化率表示为^[2-6]:

$$\delta D = (1 - D)^{a^* (S^*_{\max}, S^*_{m})} [\frac{S^*_{\max} - S^*_{\min}}{M^* (S^*_{m})}]^{\beta^*}$$
(3)

式中 $\frac{\delta D}{\delta n}$ 为损伤的周变化率。 S^*_{\max} 为最大使用应力水平, S^*_m 为平均应力水平, S^*_{\min} 为最 小应力水平; $S^*_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_u}$, $S^*_m = \frac{\sigma_m}{\sigma_u}$, $S^*_{\min} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_u}$, $S^*_m = \frac{1}{2}(S^*_{\max} + S^*_{\min})$, σ_{\max} , σ_{\min} , G_n 分别为绝对最大、最小和平均使用应力, 这里为反映材料极限静强度变化对损伤演 变的影响而引入了相对量。 α^* (S^*_{\max} , S^*_m) 为考虑 S^*_{\max} 、 S^*_m 与D 非线性相关效应的 函数。 M^* (S^*_m) 为考虑平均应力水平 S^*_m 对循环荷载下材料持久强度(或寿命) 影 响的线性化的与材料构成有关的函数。D 为材料当前的损伤大小。 β^* 为材料系数。

据此,考虑到只有当 *n* ≥*n*, 时, 宏观损伤演变开始。以变量 *T* 代替式 (3) 中的 变量 *D*,并对式 (3) 积分有:

$$\int_{0}^{D} (1 - T)^{-\alpha^{*}} dT = \int_{m_{r}}^{n} \left[\frac{S_{\max}^{*} - S_{\min}^{*}}{M^{*} (S_{m}^{*})} \right]^{\beta^{*}} dn$$
(4)

式中 $\alpha^* = \alpha^*$ (S_{max}^* , S_m^*)。求积分并化简后得:

$$1 - (1 - D)^{\mu \alpha^{*}} = (1 - \alpha^{*}) \left[\frac{S_{\max}^{*} - S_{\min}^{*}}{M^{*}(S_{m}^{*})} \right]^{\beta^{*}} (n - r)$$
(5)

代入条件: n=n_r时, D=0; n=N_f时, D=1.0, 有:

$$N_{\rm f} = \frac{1}{1 - \alpha^*} \left[\frac{S_{\rm max}^* - S_{\rm min}^*}{M^* (S_m^*)} \int_{-\beta^*}^{-\beta^*} + n_{\rm r} \right]$$
(6)

将式 (6) 代入式 (5), 化简得:

$$D = 1 - \left(1 - \frac{n_{\rm f}}{N_{\rm f}} - \frac{n_{\rm r}}{N_{\rm f}}\right) + \alpha^* (s_{\rm max}^*, s_{\rm m}^*)$$
(7)

式中 $n_{r}^{n_{r}}$ 即为前述的临界循环比 $n_{N}^{n_{r}}$,以材料系数 C_{r} 表示。 令应力水平函数 $K^{*}(S_{max}^{*}, S_{m}^{*}) = \frac{1}{1 - \alpha^{*}(S_{max}^{*}, S_{m}^{*})},$ 并以 N 代替 N_f,代入式(7)得:

$$D = 1 - (1 - \frac{N}{N} - C_{\rm r})^{K^* (S^*_{\rm max}, S^*_{\rm m})}$$

该式即为适用于描述本文钢纤维混凝土类材料损伤演化行为的损伤演化方程的一般形式。式(8)中的非线性应力函数形式 K^* (S^*_{max} , S^*_m)可进一步表达为⁽²⁾:

$$K^{*}(S_{\max}^{*}, S_{m}^{*}) = K_{0}(1 - \frac{S_{m}^{*}}{S_{\max}^{*}})S_{\max}^{*K_{1}}$$
(9)

该应力函数式 (9) 中的 K₀, K₁为材料系数,由具体材料实验确定。

该式表明,已知外载应力幅值和实际循环次数时,可利用式(8)确定材料当前的 损伤程度;若由式(1)测算出材料当前的损伤大小后,则可以利用式(8)确定出其剩 余使用寿命 N_{re}: N_{re}= N-n, n 由式(8) 解出。

2. 实验验证

代入本次实验条件下测得的材料系数 *C*_r= 0.21, *K*₀= 3.346, *K*₁= 5.464, 得到本 文条件下钢纤维混凝土的损伤演化方程为:

$$D = 1 - \left[1 - 1.265\left(\frac{n}{N} - 0.21\right)\right]^{3.346\left(1 - \frac{5}{s_{\text{max}}^*}\right)S_{\text{max}}^{*-5.454}}$$
(10)

式中 n 为使用应力下的实际循环 次数, N 为该等幅应力水平下钢纤维 混凝土破坏时的循环次数。 $S_{max}^* =$ $\sigma_{max}/f_c', S_m^* = \sigma_m/f_c', \sigma_{max}, \sigma_m$ 分 别为使用最大应力幅值和平均应力幅 值, f_c' , 为钢纤维混凝土的极限静抗 压强度。图 10 给出该理论模型与图 9 实测损伤演化规律的对比,可以看 出,理论计算与本文实验结果吻合较 好。



图 10. 理论模型与实验结果的对比

六、结 语

通过实验及理论分析,本文得到以下主要结论:

1、循环荷载作用下钢纤维混凝土损伤演化是分阶段进行的。在宏观上,并非受荷 初始就产生力学性能衰减等损伤现象,只有当循环作用超过一定次数 nr 后,即内部损 伤累积超过临界值,钢纤维混凝土方有宏观损伤现象发生。该临界循环次数 nr 与该循 环应力水平下钢纤维混凝土受损破坏时的寿命N 比值为常数,仅与材料构成有关。

2、钢纤维混凝土宏观损伤起始和最终损伤破坏时刻的残余塑性变形值也为材料常数,与外载幅值和加荷历史无关。

3、在此基础上给出了一种以残余塑性变形量表达的损伤程度计算方法,建立了与 外载条件相联系的适用于描述钢纤维混凝土损伤演化行为的损伤演化方程。与实验结果 对比表明,本文的损伤计算及演化模型较好地反映了钢纤维混凝土的损伤及其演化行 为。

参考文献

- 1 鞠杨, 樊承谋. 等幅循环载荷下钢纤维混凝土疲劳寿命分析. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1995, 28 (1): 64 71
- 2 鞠杨. 钢纤维 (增强) 混凝土疲劳损伤行为及其累积损伤理论和疲劳寿命估算方法研究 (博士学 位论文). 哈尔滨建筑大学, 1995
- 3 Krajcinovic, D. Continuum damage mechanics. J Appl Mech Rev, 1984, 37: 1-6
- 4 Kachanov, L M. Introduction to Continuum Damage Mechanics. Martinus Nijhoff Publisher, Dodrecht, 1986
- 5 Chaboche, J.L. Continuum damage mechanics: Part I and II. J Appl Mech, 1988, 55: 59-72
- 6 Lemaitre, J. A course on damage mechanics. Springs Verlag, Berlin, 1992

A QUANTITATIVE DESCRIPTION OF DAMAGE AND ITS EVOLUTION OF SFRC UNDER CYCLIC LOADS

Ju Yang (China University of Mining & Technology, Beijing,) (Harbin University of Civil Engineering & Architechture, Harbin)

Abstract Based on an experimental investigation of damage performance of SFRC under axial compressive cyclic loads, a quantitative description of damage and its evolution of steel fibre reinforced concrete (SFRC) is presented in this paper. An equation which characterizes the damage evolution of SFRC is proposed in the paper. It is found that the theoretical results are in good agreement with the experimental results.

Key words damage, evolution, steel fibre reinforced concrete, cyclic loads