

主动约束混凝土圆柱的损伤演化规律

周长东¹, 厉春龙²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中国建筑设计研究院, 北京 100044)

摘 要:为了揭示主动约束混凝土圆柱的损伤演化规律,在细观层次上分析了环向预应力主动约束混凝土的破坏机理,在构件层次上基于试验研究了环向预应力纤维条带主动约束混凝土圆柱的损伤演化规律,探讨了主动约束作用对混凝土圆柱刚度的影响,研究表明:随着应力水平的提高,损伤应变曲线的斜率先减小后增大,体现了柱的损伤发展由缓慢到快速的渐变过程;直至试件应变达到峰值应变,损伤度达到 0.4~0.6 之间时试件破坏;并在试验研究和理论分析的基础上,提出了损伤演化方程,该方程反映了预应力大小和混凝土强度等级对轴压混凝土圆柱损伤演化的影响;给出了适用于环向预应力纤维条带主动约束混凝土圆柱的等效初始弹性模量的计算公式。

关键词:结构工程;损伤演化规律;混凝土圆柱;环向预应力 FRP;主动约束

中图分类号:TU375.3

文献标志码:A

Damage evolution of active confined concrete cylinder

ZHOU Chang-dong¹, LI Chun-long²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. China Architecture Design & Research Group, Beijing 100044, China)

Abstract: To reveal the damage evolution of actively confined circular concrete columns, the damage mechanism of actively confined concrete with lateral prestress was analyzed at mesoscopic level, the damage evolution law of actively confined circular concrete columns was studied at component level, and the impact of active confinement on the cylindrical stiffness was explored. The results show that the slope of damage strain curve decreased first and then increased along with increase of stress. It indicates the gradual process of damage evolution from slow growth to rapid development. As the damage degree reaches between 0.4 and 0.6, strain of specimens reaches the peak strain and then specimens damaged. Based on test results and theoretical analysis, the damage evolution equation of circular concrete columns under axial compression is derived which reflects the influence of lateral pre-stress level and concrete strength grade on the damage evolution of circular concrete column. The equivalent initial elastic modulus of circular concrete columns actively confined with lateral prestressed FRP was proposed. 5 tabs, 8 figs, 16 refs.

Key words: structural engineering; damage evolution law; circular concrete column; lateral pre-stressed FRP; active confinement

0 引言

传统的粘贴纤维复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)加固混凝土柱,因为粘结胶体和纤维本身并未张紧等因素的影响,造成 FRP 的受力滞后于被加固柱,从而影响加固效果。而采用环向预应力 FRP 加固混凝土圆柱时,核心混凝土受到 FRP 所提供的主动约束应力而处于三向受压状态,限制了内裂缝的发生和开展,从而显著提高了柱的强度和延性^[1]。从细观层次上来看,混凝土的破坏过程是各种尺度损伤(微孔洞、微裂缝)的演化、发展和累积造成的。考虑到这个劣化过程,经典的塑性理论并不能真实地反映材料的损伤变化特性;而连续介质损伤力学理论把连续介质的微缺陷理解为连续的损伤场变量^[2-9],并假定损伤的能量耗散过程满足不可逆热力学定律,利用连续介质力学的唯象学方法研究微缺陷(损伤)的发展及其对材料力学性质的影响。故连续介质损伤力学理论(CDM)比较适合描述混凝土材料的破坏过程及其损伤演化规律。

近年来,学者们对混凝土损伤的研究包括新型结构形式的损伤演化及本构、混凝土受海水腐蚀、冻融、火灾后的损失研究及数值分析等^[10-13]。本文将连续损伤理论用于环向预应力 FRP 主动约束混凝土圆柱的研究,从细观角度解释了主动约束混凝土的破坏机理;采用连续介质力学和不可逆热力学的唯象学方法,得到了构件层面的环向预应力 FRP 主动约束混凝土圆柱的损伤演化方程和等效初始弹性模量计算公式。

1 主动约束混凝土的破坏机理

1.1 普通受压混凝土损伤破坏机理

混凝土属于非匀质材料,由水泥、骨料、沙子、水和其他掺合料凝结而成的一种固体材料。由于材料性质具有较大的离散性,往往无法直接观察到混凝土构件内部的材料缺陷,而只能通过观察表面或通过试验数据对内部做出推断。

在细观层次上,引起混凝土破坏的因素主要有 2 个:拉伸断裂与剪切滑移^[10]。若不考虑长期荷载效应,单轴受压混凝土的破坏主要与拉伸断裂有关,而与剪切滑移关系不大,即破坏主要由拉应力引起。当混凝土承受压载荷后,沿其横向将产生拉应变及拉应力,当拉应变达到混凝土极限拉应变时材料破坏。具体而言,在这个轴向压缩、横向膨胀的过程中,由于混凝土中的骨料与水泥砂浆的泊松比不同,

通过变形协调导致混凝土内部沿横向产生拉应力。假设粗骨料在基体内均匀分布,可将混凝土看作两相材料,即粗骨料和硬化的水泥砂浆体,如图 1 所示,其泊松比分别为 ν_a 、 ν_m ^[10]。

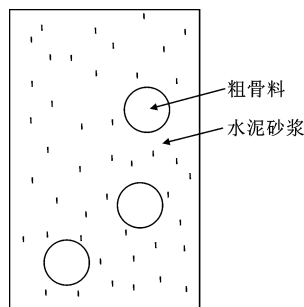


图 1 混凝土构成

Fig. 1 Composition of concrete

在轴向压应力的作用下,混凝土的纵向平均压应变 ϵ_0 与粗骨料、水泥砂浆基体的应变协调变形,即 $\epsilon_0 = \epsilon_a = \epsilon_m$ 。故在无侧向约束的条件下有

$$d\epsilon_a = -\nu_a \epsilon_0, d\epsilon_m = -\nu_m \epsilon_0 \quad (1)$$

式中: ϵ_a 、 ϵ_m 分别粗骨料、水泥砂浆基体横向应变。

对于一般碎石硬骨料混凝土,粗骨料与水泥砂浆基体的泊松比关系为 $\nu_a < \nu_m$ 。因此, $|d\epsilon_a| < |d\epsilon_m|$,即由于粗骨料与水泥砂浆泊松比不同导致二者横向变形不一致,由此二者在水平方向上会产生拉应力。

细观研究表明,骨料与水泥砂浆的界面过渡区是围绕在粗骨料周围的一层薄壳,厚度约为 10~15 μm ,强度不仅低于粗骨料,而且也低于水泥砂浆,因此,界面过渡区是混凝土中最薄弱的部分^[11]。当由于变形协调不一致导致的水平拉应力,大于混凝土内部砂浆基体或过渡区的极限抗拉强度时,混凝土产生损伤,同时拉应力得到释放。

此外,混凝土圆柱在纵向压应力作用下,端部受到摩擦约束,横向膨胀受到抑制,圆柱中部拉应变较大,先于端部出现裂缝。裂缝发展方向平行于受力方向,且裂缝的发展过程是由外表面中部向核心发展,即越靠近外边缘,拉应变产生的变形越大。

所以,在不同的加载状态下,普通受压混凝土的损伤破坏机理为:当未施加荷载时,混凝土只在部分粗骨料与水泥砂浆的界面处存在少许初始缺陷-微裂缝;当施加至一定荷载时,在粗骨料与水泥砂浆交界处出现新裂缝,且裂缝长度沿开裂界面随着荷载的增加而增大,直至极限荷载时刻,各条纵向裂缝开始贯通,形成平行于荷载的宏观劈裂裂纹,混凝土破坏;在极限荷载下,裂缝贯通形成平行于荷载的宏观劈裂裂纹,如下页图 2 所示混凝土破坏^[4],这就是混凝土细观损伤破坏的全过程。

因此,对核心混凝土采用有效的侧向约束,能够限制图 2 中竖向裂缝的延伸和开展,外粘 FRP 约束混凝土柱就是有效的被动约束加固方法之一;若对环向纤维布施加预应力,可以主动约束核心混凝土,进一步促使图 2 中的竖向裂缝宽度减小和弥合,以获得更优的加固效果。

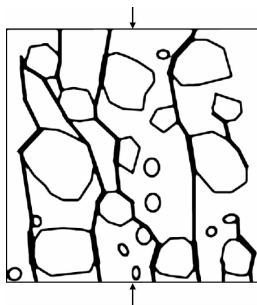


图 2 混凝土劈裂裂缝

Fig. 2 Splitting cracks of concrete

1.2 环向预应力主动约束混凝土破坏机理

20 世纪 20 年代,英国物理学家 Griffith 对断裂力学做出了开拓性的贡献,他认为在裂缝的扩展过程中,物体内部能量的释放所产生的裂纹驱动力导致了裂纹的增长,同时伴随着阻止形成新裂纹的阻力。即在裂纹的增长过程中,物体中驱动裂纹增长的动力与阻止裂纹增长的阻力是平衡的。

图 3 表示在应力 σ 作用下,裂纹长度扩展至 a 时,在裂纹的两侧形成了自由表面,通过卸载释放了应变能。假定该板厚度为 1,计算该裂纹扩展前后的总应变差值得到能量释放率(energy release rate)或称为裂纹驱动力(crack driving force)为 V_ϵ 。

$$V_\epsilon = -\frac{\sigma^2}{2E}\pi a^2 \quad (2)$$

应变能是由裂纹扩展释放出来的,而在形成裂纹的过程中,材料内部的结合键将发生断裂,所引起的能量被材料吸收,产生了与裂纹扩展长度 a 相关的表面能 Q_ϵ 。

$$Q_\epsilon = 2\gamma a \quad (3)$$

式中: E 为混凝土弹性模量; γ 为单位面积表面能。

此时,令总能量 $V_\epsilon + Q_\epsilon$ 的导数为 0

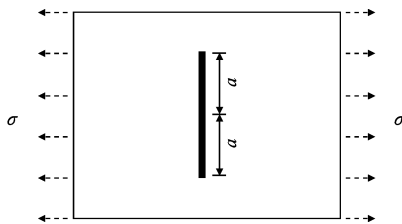


图 3 含中心裂纹的板

Fig. 3 Plate with a central crack

$$\frac{\partial (V_\epsilon + Q_\epsilon)}{\partial a} = 2\gamma - \frac{\sigma^2}{E}\pi a = 0 \quad (4)$$

求解得到

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (5)$$

式中: σ_i 为达到裂纹扩展的临界应力,即裂纹尖端区释放的应变能等于形成裂纹面积所需的表面能^[2];系数 2 是因为在开裂处有 2 个自由能面。

对于延性材料,断裂过程释放的能量主要耗散在裂纹尖端附近材料的塑形流动中,满足这些能量耗散的应变能释放率称为临界应变能释放率,用 G_c 表示,于是式(5)改写为

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{2EG_c}{\pi a}} \quad (6)$$

当约束混凝土圆柱在承受轴压载荷后,圆柱任意横截面均有胀大的趋势,最后形成图 2 所示的竖向裂缝而破坏。取出混凝土圆柱外表面开裂处的一个单元体,如图 4 所示。裂缝在垂直于裂缝面的拉应力 σ 作用下,沿圆截面径向 Z 方向由外向内呈张开状扩展。按照裂缝在外力作用下的扩张方式,该裂缝属于张开型(I 型)。

当垂直于裂缝面的拉应力达到裂纹扩展的临界应力 σ_i 时,裂缝开展扩展长度为 a 。根据广义胡克定律,圆柱环向应变随着轴压荷载的增大而增大。此时外包的纤维布环向受拉,核心混凝土受到纤维布产生的侧向约束力,侧向约束力的大小也随轴压荷载的增大而增大。

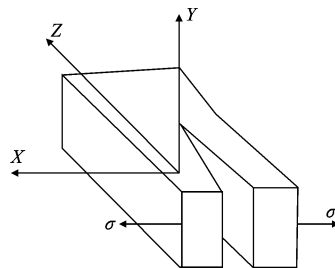


图 4 开裂处的单元体

Fig. 4 Unit body at the crack

通过采用高强度纤维材料自锁式锚具对圆柱表面 FRP 施加环向预应力,混凝土圆柱的横向应变受到抑制^[14]。根据力的平衡关系,图中的混凝土单元体在裂缝处受到纤维布主动约束产生抑制开裂的应力,可抵消部分裂纹扩展所必须的开裂应力,即假定

$$\sigma_i' = \sqrt{\frac{2EG_c}{\pi a}} + \sigma' \quad (7)$$

式中: σ' 为环向预应力 FRP 布对延迟裂纹扩展的有效约束应力; σ'_t 为在主动约束下满足裂纹扩展的临界应力条件,并且有主动约束作用的临界应力 σ'_t 大于无主动约束作用的临界应力 σ_t 。

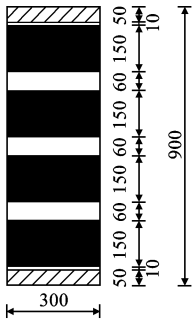
随着环向预应力的提高,混凝土柱的横向应变受抑制程度增大,柱体纵向裂缝的开展越缓慢,即主动约束作用下裂纹扩展的临界应力 σ'_t 随着环向预应力的增大而增大。

2 主动约束混凝土圆柱的损伤演化

本构关系是研究混凝土损伤模型和非线性分析中的核心部分,损伤演化方程起到联系材料内部结构损伤发展与外部宏观力学性能劣化的作用,因而损伤演化方程是研究结构或构件损伤行为的核心部分。

2.1 试验概述

对 11 根直径 300 mm、高 900 mm 的混凝土圆柱进行了轴心受压试验,试验在 5 000 kN 的液压伺服压力试验机上进行,采用单调位移加载控制。考虑了环向预应力大小和混凝土强度等级 2 个因素对试件静力性能的影响。试件加固试验方案与分组情况分别如图 5 和表 1 所示。表中 m 为纤维布施加的预应力与其极限强度之比。



单位: mm

图 5 试件加固试验方案

Fig. 5 Retrofitting test scheme of specimens

表 1 试件分组

Tab. 1 Grouping sheet of specimens

试件编号	混凝土强度等级	预应力度 m
Z1	C40	无纤维布
Z2	C40	无纤维布
Z3	C40	0
Z4	C40	0.10
Z5	C40	0.15
Z6	C40	0.20
Z7	C40	0.25
Z8	C20	无纤维布
Z9	C20	0.20
Z10	C30	无纤维布
Z11	C30	0.20

试验过程中主要的量测内容为:试件的荷载和竖向位移、试件中部混凝土的横向应变和纵向应变、纤维布条带的应变。

2.2 位移分析

表 2 给出了各主动约束试件相对于未加固构件的峰值位移的提高幅度,图 6 为纤维布的预应力度-峰值位移曲线。

表 2 峰值位移提高幅度

Tab. 2 Increase rate of peak displacement

试件编号	混凝土强度等级	预应力度 m	峰值位移/mm	提高幅度/%
Z1	C40	无纤维布	1.379 10	
Z2	C40	无纤维布	1.352 85	
Z3	C40	0	1.470 65	6.6
Z4	C40	0.10	1.591 75	15.4
Z5	C40	0.15	1.632 50	18.4
Z6	C40	0.20	1.751 85	27.0
Z7	C40	0.25	1.350 37	-2.2
Z8	C20	无纤维布	1.255 25	
Z9	C20	0.20	1.509 70	20.3
Z10	C30	无纤维布	1.080 15	
Z11	C30	0.20	1.525 70	41.2

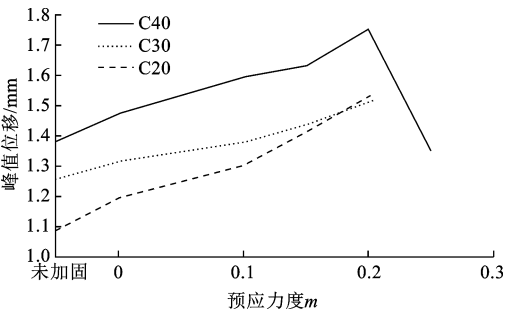


图 6 预应力度-峰值位移曲线

Fig. 6 Prestressing degree-peak displacement curve

由表 2 与图 6 可知,当纤维布的预应力度在 0~0.2 之间时,环向预应力 FRP 主动约束试件 Z4~Z7 的峰值位移大于被动约束试件 Z3 和未加固试件 Z1、Z2 的峰值位移;Z9、Z11 的峰值位移也大于相对应混凝土强度的未加固试件 Z8、Z10 的峰值位移。表明主动约束作用相对于被动约束作用可以显著提高试件的峰值位移。

当预应力度在 0~0.2 之间时,图 6 的 3 条曲线斜率为正,试件的预应力度与极限位移呈正相关,即预应力度越高,试件的极限位移越大,当预应力度达到 0.2 时,峰值位移提高了近 30%。

此外,结果显示预应力度为 0.25 的试件 Z7 的峰值位移小于其他试件,所以从极限位移的角度,纤

维布的最佳预应力度是 0.2。

2.2 损伤演化方程

以圆柱的混凝土弹性模量为基准度量损伤变量 D ,基于连续介质力学,结合未考虑预应力的混凝土损伤模型,通过经验理论与试验数据相结合的方法,分段建立考虑预应力影响因素下的损伤演化方程为

$$D=\begin{cases} 0 & \epsilon\leqslant\epsilon_0 \\ \sqrt[4]{\frac{\epsilon^2+(50\,000\,t+4\,000)\epsilon-8m-1.6}{1\,097}}+ & \epsilon_0\leqslant\epsilon\leqslant\epsilon_h \\ (2\,100\,t-300)c^2\epsilon+106.7m^3- & \\ 54.4m^2+7.613m-0.387 & \\ c(155\,000\epsilon^2+32.2\epsilon)+0.767m- & \\ 0.064\,97 & \epsilon_h\leqslant\epsilon\leqslant\epsilon_p \end{cases} \quad (8)$$

式中: ϵ 为圆柱纵向应变; ϵ_0 为在 30%峰值应力时对应的纵向应变值; ϵ_h 为在 65%峰值应力时对应的纵向应变值; ϵ_p 为峰值应变; c 为混凝土强度调整系数,与混凝土强度等级相关。

根据试验结果回归得到混凝土强度调整系数 c 的取值范围,如表 3 所示。

表 3 混凝土强度调整系数 c 的取值

Tab. 3 Reduction coefficient values of concrete strength

混凝土强度等级	混凝土强度调整系数 c
C20	1.3~1.7
C30	1.2~1.5
C40	0.9~1.1

对于不同混凝土强度等级的试件,如 Z6、Z9、Z11,混凝土强度等级越高,混凝土强度调整系数 c 越小。

对于相同混凝土强度等级的试件,如 Z4、Z5、Z6,

混凝土纵向峰值应变较大的试件,混凝土强度调整系数 c 较小;混凝土纵向峰值应变较小的试件,混凝土强度调整系数 c 较大。

在该损伤演化方程中,当应力水平较低时,即环向预应力 FRP 主动约束混凝土圆柱轴向应力小于 30%的峰值应力时,假定忽略混凝土在浇筑时产生的孔隙和微裂缝形成的初损伤,损伤不发展,此时损伤值为 0。

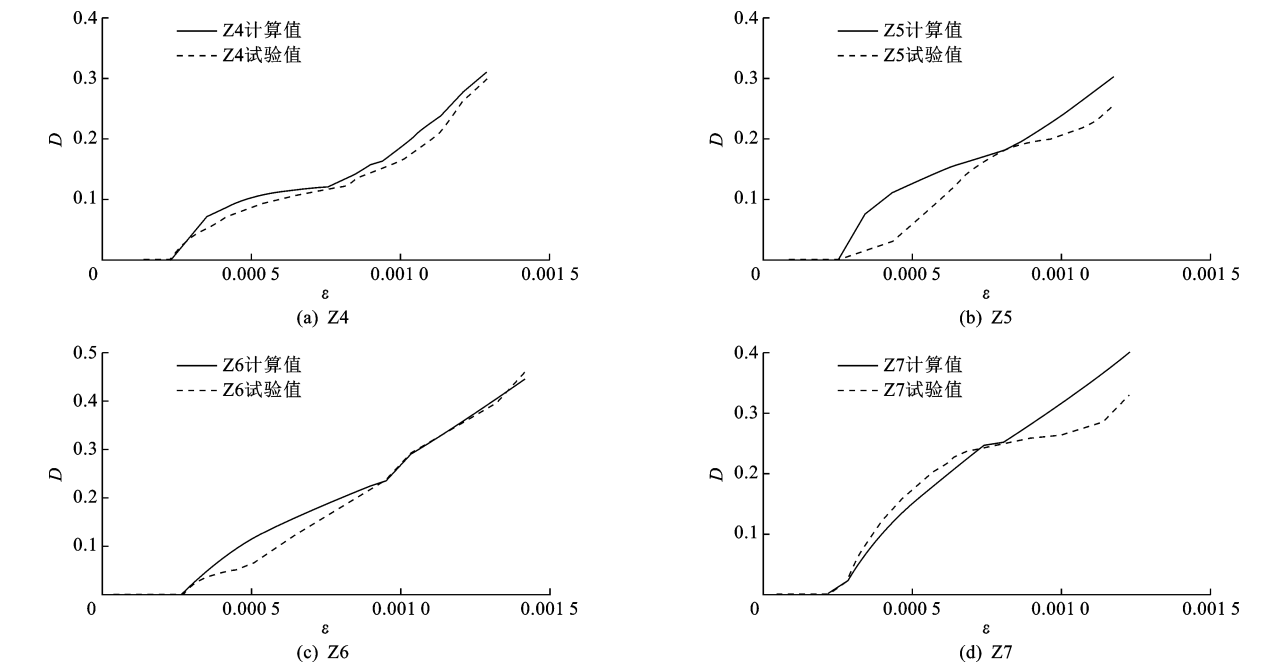
当环向预应力 FRP 主动约束混凝土圆柱轴向应力介于 30%~65%的峰值应力时,为损伤慢速发展阶段;当环向预应力 FRP 主动约束混凝土圆柱轴向应力介于 65%~100%的峰值应力时,为损伤快速发展阶段;当轴向应力超过峰值应力后,为破坏阶段。

分析试验结果可知,破坏阶段的损伤值快速增大,且离散性大,即主动约束混凝土圆柱的下降段离散性较大,规律不明显。试件的破坏往往以局部压碎或发生贯穿裂缝为标志,所以在破坏阶段不度量构件层面的损伤。

2.3 计算值与试验值比较

根据损伤演化方程式(8),可得损伤变量 D 的计算值, D 与试验值的对比如图 7 所示。

由计算值与试验值的对比可知,对于不同预应力度、不同混凝土强度的圆柱,损伤应变曲线的斜率先减小后增大,直至试件应变达到峰值应变,损伤度达到 0.4~0.6 之间时,试件破坏。计算值与试验结果的损伤发展趋势吻合良好,说明该损伤演化方程可以较好的解释主动约束作用下,混凝土圆柱在构件层次的损伤发展过程。



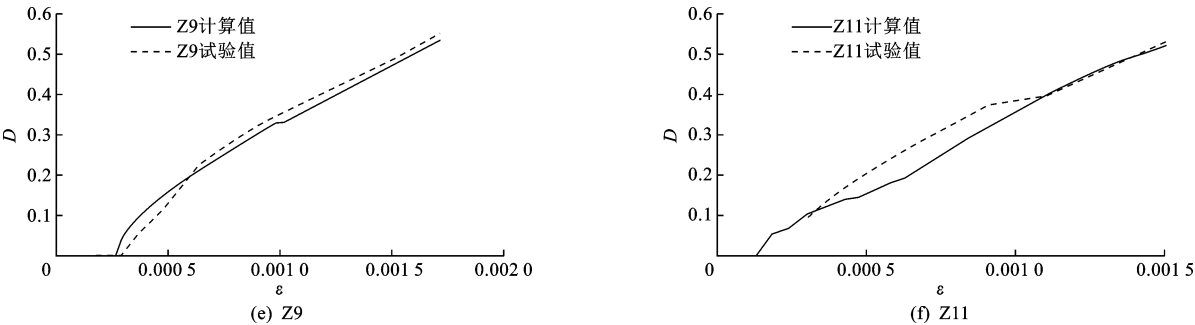


图 7 计算值与试验值的损伤演化曲线对比

Fig. 7 Comparison of damage evolution curve between calculated and experimental values

3 主动约束作用对圆柱刚度的影响

混凝土的弹性模量 E 是混凝土结构设计中一个重要参数, E 的数值随材料而异, 是通过试验测定的, 其值表征材料抵抗弹性变形的能力, 是衡量结构或构件刚度大小的基础指标^[15]。通过未加固对照试件和不同大小的环向预应力约束混凝土圆柱试件的初始弹性模量之间的比较, 可以看出环向预应力大小对圆柱抵抗变形能力的影响。

本文试验测得的使用同一批次混凝土浇筑的混凝土圆柱, 在采用不同环向预应力大小 FRP 条带加固后各试件的混凝土初始弹性模量结果见表 4 和图 8。可以看出, 采用环向预应力 FRP 施加主动约束后混凝土的初始弹性模量大于施加被动约束和无约束的混凝土的初始弹性模量, 而且混凝土初始弹性模量随着环向预应力的增大而增大, 说明环向预应力越强, 混凝土柱抵抗弹性变形的能力越强。

表 4 初始弹性模量的试验结果

Tab. 4 Experimental results of initial elastic modulus			
试件编号	混凝土强度等级	预应力度 m	初始弹性模量/ ($10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$)
Z1	C40	无纤维布	3.28
Z2	C40	无纤维布	3.24
Z3	C40	0	4.29
Z4	C40	0.10	4.58
Z5	C40	0.15	4.75
Z6	C40	0.20	4.07
Z7	C40	0.25	4.92

文献[16]对 FRP/RC 预应力杂交柱提出了等效初始弹性模量的计算公式

$$E_c=5\,000\sqrt{f_{co}(2.254\sqrt{1+\frac{7.94E_f\epsilon_{if}t}{f_{co}r}}-2\frac{E_f\epsilon_{if}t}{f_{co}r}-1.254)}$$

(9)

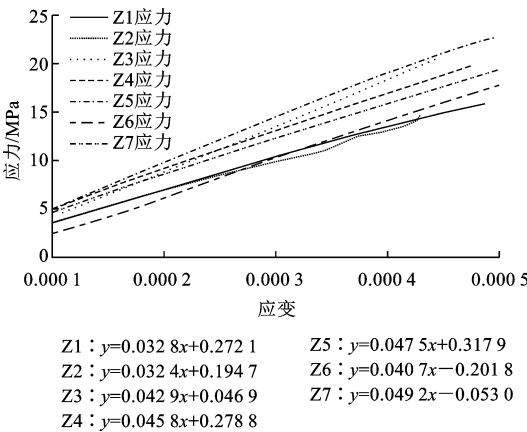


图 8 初始弹性模量的试验结果

Fig. 8 Experimental results of initial elastic modulus

式中: E_c 为约束混凝土的等效初始弹性模量; f_{co} 为未约束混凝土的极限强度; E_f 为 FRP 的弹性模量; ϵ_{if} 为环向预应力 FRP 的初始平均应变; t 为 FRP 的厚度; r 为混凝土圆柱的半径。

利用试验数据对上述计算公式进行修正, 得到适用于环向预应力 FRP 主动约束混凝土圆柱的混凝土等效初始弹性模量的计算公式

$$E_c=6\,800\sqrt{f_{co}(2.254\sqrt{1+14.3\frac{E_f\epsilon_{if}t}{f_{co}r}}-2\frac{E_f\epsilon_{if}t}{f_{co}r}-1.254)}$$

(10)

根据式(10)计算得到的初始弹性模量计算结果列于下页表 5 中, 可以看出初始弹性模量计算值与试验值对比吻合良好。

高强纤维布在加载前对混凝土圆柱主动施加环向预应力, 限制了混凝土横向膨胀的趋势, 提高了抵抗变形的能力, 提高了约束混凝土的初始弹性模量。圆柱混凝土的初始弹性模量大小与环向纤维布的预应力度正相关, 说明主动约束作用对混凝土圆柱加固效果的有益影响。

表 5 初始弹性模量计算值与试验值对比

Tab. 5 Comparison of initial elastic modulus between calculated and experimental values

试件 编号	预应 力 m	E_c 计算值/ ($10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	E_c 试验值/ ($10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	计算值 试验值
Z1	无纤维布		3.28	
Z2	无纤维布		3.24	
Z3	0	4.301	4.29	1.003
Z4	0.10	4.582	4.58	1.001
Z5	0.15	4.709	4.75	0.991
Z6	0.20	4.828	4.07	1.186
Z7	0.25	4.942	4.92	1.004

4 结 语

(1)通过对普通受压混凝土的损伤破坏机理和环向预应力主动约束作用的阻裂分析,阐述了环向预应力主动约束混凝土圆柱的损伤破坏机理,证明了对环向 FRP 施加预应力加固混凝土圆柱的有效性。

(2)基于试验对环向预应力 FRP 加固混凝土圆柱的损伤演化规律进行了分析,结果表明:当应力水平较低时,试件变形较小,损伤忽略不计;当应力水平中等时,损伤应变曲线的斜率减小,说明损伤发展缓慢;当应力水平较大时,损伤应变曲线的斜率增大,说明此阶段混凝土的损伤随着应变的增大快速发展,直至试件应变达到峰值应变,损伤度达到 0.4~0.6 之间时,试件破坏。

(3)提出了适用于预应力 FRP 主动约束混凝土圆柱的损伤演化方程,计算值与试验值吻合较好。

(4)分析了主动约束作用对圆柱刚度的影响,提出了适用于环向预应力 FRP 主动约束混凝土圆柱的等效初始弹性模量计算公式,证明了施加主动约束作用的混凝土的初始弹性模量大于施加被动约束作用和无约束作用的混凝土的初始弹性模量,而且混凝土初始弹性模量随着环向预应力的增大而增大。环向预应力越强,混凝土柱抵抗弹性变形的能力越强。

(5)本文只对预应力 FRP 主动约束混凝土圆柱的损伤演化规律进行了初步研究,还需对预应力钢板箍、形状记忆合金等主动约束混凝土圆柱、方柱等的损伤演化作进一步研究。

参考文献:

References:

[1] 周长东,白晓彬,赵 锋,等. 预应力纤维布加固混凝土

土圆形截面短柱轴压性能试验[J]. 建筑结构学报, 2013,34(2):131-140.

ZHOU Chang-dong, BAI Xiao-bin, ZHAO Feng, et al. Experimental study on circular concrete short columns strengthened with pre-stressed FRP under axial compression[J]. Journal of Building Structures,2013, 34(2):131-140. (in Chinese)

[2] 庄 苗,蒋持平. 工程断裂与损伤[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

ZHUANG Zhuo, JIANG Chi-ping. Engineering fracture and damage[M]. Beijing:China Machine Press, 2004. (in Chinese)

[3] 余寿文,冯西桥. 损伤力学[M]. 北京:清华大学出版社,1997.

YU Shou-wen, FENG Xi-qiao. Damage mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)

[4] 谢和平. 岩石与混凝土损伤力学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1990.

XIE He-ping. Damage mechanics of rock and concrete [M]. Xuzhou:China University of Mining and Technology Press,1990. (in Chinese)

[5] 尹双增. 断裂·损伤理论及应用[M]. 北京:清华大学出版社,1992.

YIN Shuang-zeng. Fracture and damage theories and their application [M]. Beijing: Tsinghua University Press,1992. (in Chinese)

[6] 蔡四维,蔡 敏. 混凝土的损伤断裂[M]. 北京:人民交通出版社,1999.

CAI Si-wei, CAI Min. Damage and fracture of concrete [M]. Beijing: China Communications Press, 1999. (in Chinese)

[7] Janson J, Hult J. Damage mechanics: fracture mechanics and a combined approach[J]. Journal of Applied Mechanics,1997,1(1):59-64.

[8] Loland K E. Continuous damage model for load response estimation of concrete[J]. Cement and Concrete Research,1980(5):395-402.

[9] Grassl P, Jir M. Damage-plastic model for concrete failure[J]. International Journal of Solids and Structures,2006,43(22-23):7166-7196.

[10] 李 杰,卢朝辉,张其云. 混凝土随机损伤本构关系-单轴受压分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2003, 31(5):505-509.

LI Jie, LU Zhao-hui, ZHANG Qi-yun. Study on stochastic damage constitutive law for concrete material subjected to uniaxial compressive stress[J]. Journal of Tongji University:Natural Science,2003,31(5):505-

509. (in Chinese)
- [11] 田 威. 混凝土损伤演化的 CT 研究及其在细观数值模拟中的应用[D]. 西安:西安理工大学, 2009.
TIAN Wei. CT study on the concrete-damage evolution and its application in numerical stimulation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [12] 许金泉, 郭凤明. 疲劳损伤演化的机理及损伤演化律[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 40-46.
XU Jin-quan, GUO Feng-ming. Mechanism of fatigue damage evolution and the evolution law[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(2): 40-46. (in Chinese)
- [13] 刘海卿, 陈小波, 王学庆, 等. 基于损伤指数的框架结构损伤演化规律[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(3): 29-35.
LIU Hai-qing, CHEN Xiao-bo, WANG Xue-qing, et al. Study on damage evolution of frame structure based on damage index[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(3): 29-35. (in Chinese)
- [14] 周长东, 厉春龙, 李 季, 等. 预张拉高强度纤维布加固圆形结构的施工方法: 中国, CN102121316A[P]. 2011-07.
ZHOU Chang-dong, LI Chun-long, LI Ji, et al. Construction method of actively confined mechanism of circular concrete columns strengthened with lateral pre-tensioned FRP: China, CN102121316A[P]. 2011-07. (in Chinese)
- [15] 孙训方. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
SUN Xun-fang. Material mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese)
- [16] 秦 岭, 刘彦青, 杨庆生. FRP/RC 预应力杂交柱在轴向荷载作用下的应力-应变关系分析[J]. 工业建筑, 2002, 32(11): 16-18.
QIN Ling, LIU Yan-qing, YANG Qing-sheng. Stress-strain analysis of axially loaded prestressed FRP-jacketed concrete columns [J]. Industrial Construction, 2002, 32(11): 16-18. (in Chinese)
- (上接第 42 页)
- [14] Yu W B, Lai Y M, Zhang X F. Laboratory investigation on cooling effect of coarse rock layer and fine rock layer in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(2): 31-42.
- [15] 何 平, 程国栋, 马 巍, 等. 块石通风性能实验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 789-792.
HE Ping, CHENG Guo-dong, MA Wei, et al. Researches on ventilation properties of block stones layer [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 789-792. (in Chinese)
- [16] 李靖波, 赵爱国, 杨玉贵, 等. 通风块石层非达西效应的试验研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 335-340.
LI Jing-bo, ZHAO Ai-guo, YANG Yu-gui, et al. Experimental study of non-Darcy effects of ventilative crushed-rock layer[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 335-340. (in Chinese)
- [17] 俞祁浩, 钱 进, 游艳辉, 等. 块石路基对流特性实验[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 411-417.
YU Qi-hao, QIAN Jin, YOU Yan-hui, et al. Experimental study of convective characteristics of block-stone embankment[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2): 411-417. (in Chinese)
- [18] 牛富俊, 马 巍, 吴青柏. 青藏铁路主要冻土路基工程热稳定性及主要冻融灾害[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 196-206.
NIU Fu-jun, MA Wei, WU Qing-bai. Thermal stability of roadbeds of the Qinghai-Tibet railway in permafrost regions and the main freezing-thawing hazards [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(2): 196-206. (in Chinese)
- [19] 孙斌祥, 徐学祖, 赖远明, 等. 基于对流效应的寒区路堤块石层临界高度研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(4): 1-6.
SUN Bin-xiang, XU Xue-zu, LAI Yuan-ming, et al. Research on critical heights of ballast layer in embankment based on convection effect in cold regions [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(4): 1-6. (in Chinese)
- [20] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Physics of frozen soils[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [21] 朱林楠. 高原冻土区不同下垫面的附面层研究[J]. 冰川冻土, 1988, 10(1): 8-14.
ZHU Lin-nan. Study of the adherent layer on different types of ground in permafrost regions on the Qinghai-Xizang plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 10(1): 8-14. (in Chinese)
- [22] 秦大河. 中国西部环境演变评估综合报告[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
QIN Da-he. Environment in western China to the evolution of TNA synthesis report[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)