

# 预应力钢带加固裂损木柱轴心受压性能试验研究

杨 勇, 陈 展, 王香云, 薛建阳

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**在对现有裂损木柱加固技术分析研究的基础上,提出预应力钢带加固裂损木柱技术.对 6 个预应力钢带加固木柱和 1 个未加固木柱的轴心受压性能进行了试验研究,研究钢带间距和层数对试件受力性能的影响,对各试件的破坏形态、承载能力、刚度和延性等进行分析.试验结果表明:预应力钢带加固后,木柱的承载力有明显提高,提高幅度在 10 %~30 %之间,延性性能也得到提高.最后,对预应力钢带加固木柱与 FRP 加固木柱的试验结果进行了对比分析.

**关键词:**裂损木柱;预应力钢带加固;破坏形态;承载力

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)02-0184-06

## Experimental study on the axial compression performance of split wooden column reinforced with prestressed steel strips

YANG Yong, CHEN Zhan, WANG Xiangyun, XUE Jianyang

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** A new method of retrofitting the split wooden column with prestressed steel strips was proposed based on the analysis and navigation of the existing retrofitting methods. Experimental study on 6 wooden column retrofitted with prestressed steel strips and 1 wooden column without retrofit were performed. The influence of steel strips space and layers on the mechanical performance of strengthened wooden column were studied by observing the final failure mode of reinforced wooden column and analysing the change of the bearing capacity, ductility and stiffness. Results indicate that the bearing capacity of strengthened wooden columns is higher than that of the unreinforced columns with an amplitude of 10 %~30 %, and the ductility performance also has a betterment. The strengthen effect of prestressed steel strips reinforced wooden columns was probed and compared with the conventional way by FRP wrap.

**Key words:** split wooden columns; reinforced with prestressed steel strips; failure modes; bearing capacity

由于年代久远,目前大量的木结构古建筑均具有一定程度的破损和开裂,其中,裂损是古代木结构建筑的主要破损形态,而且,在我国还存有大量的木结构民居建筑,这些民居建筑的木梁和木柱也均存在着较为严重的开裂损伤,如何对这些裂损木结构构件进行维护和加固对于提高结构安全和保护传统民居文化具有重要意义.

20 世纪末,纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Plastic,简称 FRP)已经开始被广泛用于建筑结构的加固补强<sup>[1-3]</sup>.国内外较多学者开展了很多采用 FRP 加固木结构构件和裂损木结构构件的试验研究.Emerson<sup>[4]</sup>对采用玻璃纤维布加固的木桥墩进行了轴心受压试验研究.研究表明,玻璃纤维布可对加固木柱产生有效约束,加固木柱

的承载力提高了 17%.Chidiaq<sup>[5]</sup>对 CFRP 加固无损木柱进行了轴心受压试验研究,研究表明,加固后木柱的承载力提高了 15%~25%.朱雷等人<sup>[6]</sup>以开裂和 CFRP 层数为研究参数,研究加固木柱的受力性能.研究表明,开裂可使木柱的承载能力和极限位移发生明显降低,而粘贴 CFRP 能提高木柱的承载力和延性,且加固木柱的性能随着 CFRP 层数的增加而提高.曹海<sup>[7]</sup>分别采用 CFRP 和 GFRP 对木柱进行加固,并对两者的加固效果进行了对比分析.研究表明,CFRP 加固木柱的承载力高于 GFRP 加固木柱.

由此可知,FRP 加固木柱确实能改善木柱受力性能,但是也可以看出,采用 FRP 加固裂损木结构并不能有效改善木结构构件的受力性能,加

收稿日期: 2017-01-08

修改稿日期: 2018-04-03

基金项目: 国家重点研发计划基金项目(2016YFC0701400);国家自然科学基金项目(51108373)

第一作者: 杨 勇(1976—),男,教授,工学博士,博导,主要从事钢-混凝土组合结构、工程结构抗震与加固研究.

E-mail: yyhph2004@163.com

固后试件的承载力提高较小。同时, 采用 FRP 加固木柱对木柱刚度提高也比较有限, 并且加固费用较高。

为了优化加固方法并降低加固费用, 对一批预应力钢带加固裂损木柱进行了试验研究, 并对加固后裂损木柱的破坏形态、受力性能开展了部分研究。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

预应力钢带加固裂损木柱试验中共设置 7 个试件 B1—B7, 以钢带间距和钢带层数为研究参数。其中 B1 为未加固试件, B2—B7 为预应力钢带加固试件, 未加固试件 B1 和预应力钢带加固试件 B2—B7 的直径均为 190 mm, 7 根木柱柱高均为 800 mm, 所用木材均为东北白松, 放置时间超过一年。试件加固方式如表 1。

表 1 试件编号及加固方式

Tab. 1 The number of specimens and reinforce method

试件编号	加固方式	钢带间距/mm	钢带层数/mm
B1	未加固	—	—
B2	钢带加固	50	1
B3	钢带加固	50	2
B4	钢带加固	100	1
B5	钢带加固	100	2
B6	钢带加固	100	3
B7	钢带加固	150	3

试验前使用预应力钢带对试件两端进行局部加固, 以防止试件端部发生局部受压破坏。各试件的具体形式如图 1。

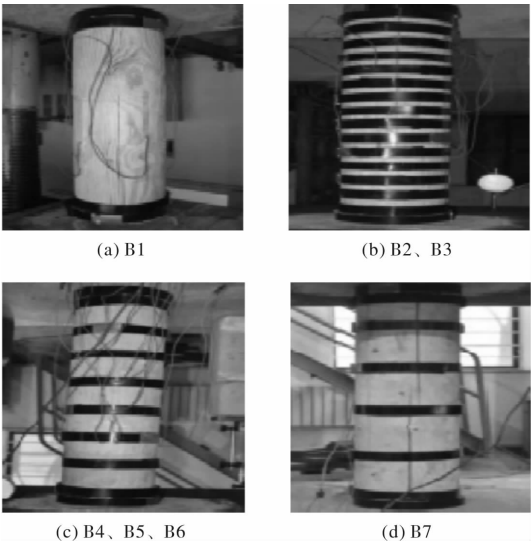


图 1 构件制作

Fig. 1 The fabrication of specimens

1.2 钢带材性

钢带是一种有效的结构构件加固材料, 具有以下特点: 强度高; 施工和操作方便; 质优价廉, 适用于实际工程的加固补强; 具有较高的耐腐蚀性和耐火性。

本试验中加固所用的预应力钢带的力学性能如下表 2。

表 2 钢带的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of steel strips

钢带宽度 /mm	钢带厚度 /mm	屈服强度 $f_y$ /MPa	抗拉强度 $f_u$ /MPa	弹性模量 $E_{ss}$ /MPa
32	1	770.7	877.4	$1.84 \times 10^5$

1.3 加载和量测方案

试验于西安建筑科技大学结构与抗震教育部重点实验室进行, 试验过程中使用 5 000 kN 四柱压力试验机对试件施加轴向荷载, 试验加载装置简图如图 2 所示。

试验过程中采用位移加载制度, 将试件放入四柱压力机并几何对中后, 开始对试件进行预加载, 检验加载和量测装置是否可以正常工作, 正常后卸载至零并重新开始加载。试验时在试件周围放置 2 个位移计来量测试件的轴向变形, 位移计布置位置见图 2。

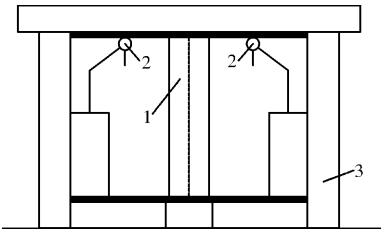


图 2 试验加载装置

Fig. 2 Test set-up

1.4 应变片布置

试件应变片布置如下: 在所有试件中部沿圆周间隔 90°纵向粘贴 4 个应变片, 测量试件的竖向应变; 在加固试件竖向中间位置处的预应力钢带上横向粘贴 3 个应变片, 测量预应力钢带的环向应变。

2 试验现象及破坏特征

2.1 试件 B1—B7 的破坏过程

2.1.1 未加固试件 B1

未加固试件 B1 在加载前柱身有较多干缩裂缝和木节, 其中木柱中部两个木节相对较大。在开始加载后, 柱身中部两个木节处逐渐出现纵向和横向裂缝; 随着荷载逐渐增大, 木节处纵向和横向

裂缝逐渐加宽;最终,两木节处横向裂缝贯通,纵向裂缝宽度接近 5 mm,木柱折断,发生脆性破坏.试件破坏过程如图 3.

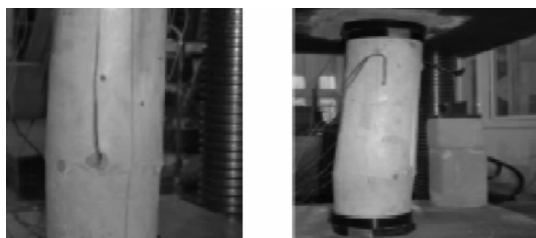


图 3 未加固木柱 B1 的破坏过程

Fig. 3 The failure pattern of unreinforced wooden B1

#### 2.1.2 加固试件 B2

试件本身纵向干缩裂缝和木节较多,预应力钢带加固完成后,只有部分木节裸露.试验加载过程中,由于预应力钢带的约束作用,试件本身裂缝发展受到明显限制,木节处纵向和横向裂缝的数量和宽度明显降低;最终,试件并未发生明显破坏.试件形式如图 4.

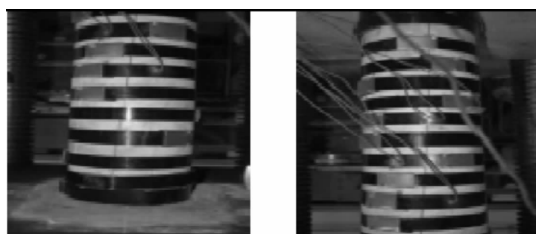


图 4 加固木柱 B2 的破坏过程

Fig. 4 The failure pattern of reinforced wooden B2

#### 2.1.3 加固试件 B3

试件本身纵向干缩裂缝和木节较多.加载过程中,由于钢带的约束作用,试件裂缝的产生和发展均受到限制,钢带间隔位置木节处产生微小的纵向和横向裂缝;随着荷载不断增大,试件本身裂缝逐渐增多;最终,试件顶部预应力钢带加固部位大木节处被压断,木柱外鼓,试件发生破坏.试件形式如图 5.

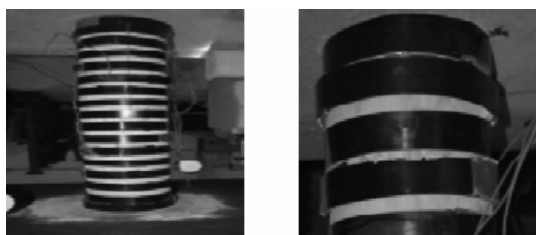


图 5 加固木柱 B3 的破坏过程

Fig. 5 The failure pattern of reinforced wooden B3

#### 2.1.4 加固试件 B4

试件本身纵向干缩裂缝和木节较多,试件中部有两个不在同一水平面内的木节.加载过程中,

当荷载较小时,试件中部木节处逐渐产生纵向和横向裂缝;随着荷载逐渐增大,木节处纵向和横向裂缝的数量和宽度逐渐增加,但明显少于未加固试件;最终,在极限状态时,试件因发生折断而破坏.试件形式如图 6.



图 6 加固木柱 B4 的破坏过程

Fig. 6 The failure pattern of reinforced wooden B4

#### 2.1.5 加固试件 B5

试件本身同样存在较多纵向干缩裂缝和木节.在加载过程中,由于预应力钢带的约束作用,试件裂缝的产生和发展均受到限制,纵向和横向裂缝的数量和宽度明显降低;当荷载逐渐增大,试件节疤处逐渐出现纵向和横向裂缝;最终,试件因节疤所在处截面被压断而发生破坏.试件形式如图 7.

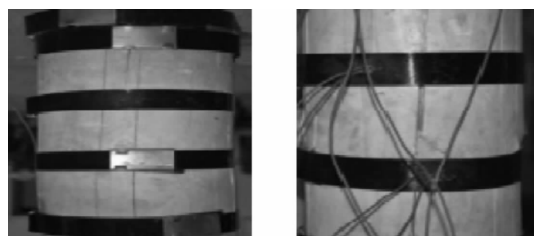


图 7 加固木柱 B5 的破坏过程

Fig. 7 The failure pattern of unreinforced wooden B5

#### 2.1.6 加固试件 B6

试件存在较多的纵向裂缝和木节,加固后试件顶部部分木节裸露在外.加载过程中,试件裂缝的产生和发展均受到限制,纵向和横向裂缝发展缓慢;当荷载逐渐增大,试件木节处开始产生微小的纵向和横向裂缝,并随着荷载的增大而变宽;在达到极限荷载时,柱身折断,并在木节处产生斜向滑移面,试件发生破坏,试件形式如图 8.

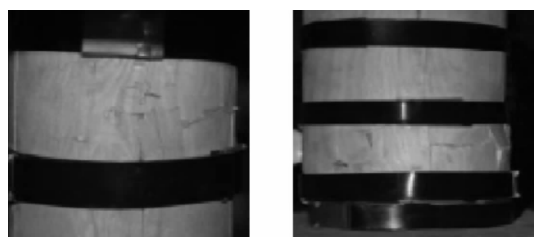


图 8 加固木柱 B6 的破坏过程

Fig. 8 The failure pattern of reinforced wooden B6

2.1.7 加固试件 B7

加固前试件存在较多的纵向裂缝和木节. 加载过程中, 由于预应力钢带的约束作用, 试件裂缝的产生和发展均受到限制, 纵向和横向裂缝发展较为缓慢; 随着荷载不断增加, 试件表面木节处开始出现横向和纵向裂缝, 且裂缝宽度随着荷载增大而增大, 并且试件逐渐被压褶皱, 直到发生断裂; 达到极限荷载时, 试件折断现象较为明显, B7 的破坏过程与 B6 相似, 试件形式如图 9.

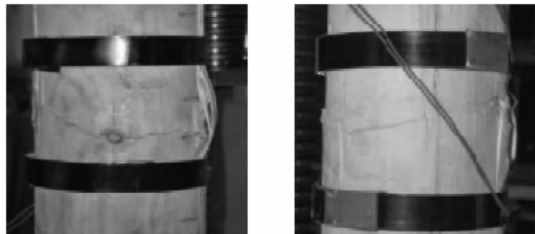


图 9 加固木柱 B7 的破坏过程

Fig. 9 The failure pattern of reinforced wooden B7

3 试验结果分析

通过对各试件的荷载—位移曲线进行分析, 对比预应力钢带加固试件与未加固试件的承载力、刚度和延性等力学性能的变化情况, 研究不同的钢带间距和层数对木柱受力性能的影响, 验证预应力钢带加固裂损木柱的有效性与可行性.

3.1 荷载—位移曲线

图 10 为试件 B1—B7 的荷载—位移曲线, 从图中可以看出, 未加固试件 B1 在破坏前也出现了塑性阶段; 但与未加固试件 B1 相比, 使用预应力钢带加固后的试件, 由于预应力钢带的主动约束, 加固试件的屈服荷载得到明显提高, 也表现出更好的延性性能.

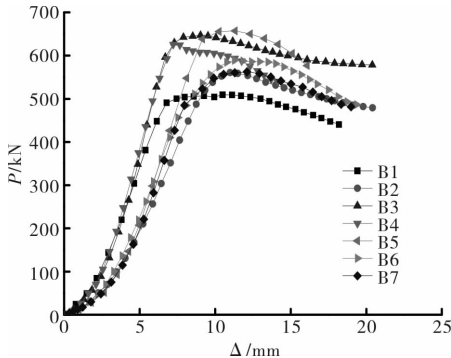


图 10 试件荷载—位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curve of specimens

对图 10 中各试件的荷载—位移曲线进行分析可以得到预应力钢带加固试件的承载力和刚度的改善情况.

3.2 承载力

对表 3 和图 11 进行分析可知, 使用预应力钢带对木柱进行加固能够显著提高木柱的承载能力, 提高幅度为 10%~30%. 钢带层数和间距对试件的承载能力均有较大影响, 表明钢带对裂损木柱的加固补强效果明显.

表 3 加固木柱极限承载力提高情况

Tab. 3 Ultimate bearing capacity of reinforced columns

试件 编号	钢带间 距/mm	钢带层 数/mm	极限承 载力/mm	提高幅 度/%
B1	—	—	51	—
B2	50	1	56	9.8
B3	50	2	64.6	26.7
B4	100	1	63	23.5
B5	100	2	66	29.4
B6	100	3	58.9	15.5
B7	150	3	56	9.8

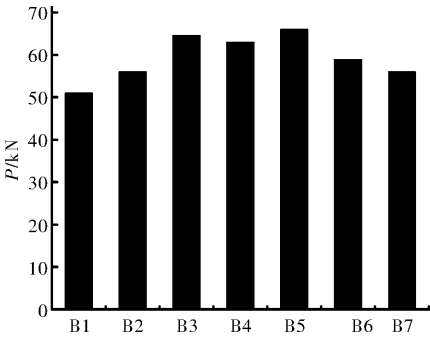


图 11 试件极限荷载对比图

Fig. 11 Ultimate capacity of specimens

3.3 刚度

对图 10 进行分析可以得到, 预应力钢带加固试件 B2—B7 的荷载—位移曲线斜率与未加固试件 B1 斜率较为接近, 主要原因是由于未加固木柱自身缺陷较多, 各试件自身刚度相差较大, 从而导致预应力钢带加固试件的刚度与未加固试件相比没有明显提高.

3.4 承载力影响因素

由于木材自身性能差异较大, 且各试件的缺陷也有较大差别, 故仅给出一些比较明显的结论.

(1)强度

木材固有强度对加固木柱的承载力影响较大, 木材固有强度越高, 加固木柱承载力提高幅度越大.

(2)裂损

通过对试件 B1—B7 的试验结果进行分析可知, 木柱自身裂损程度极大的限制了加固后木柱

的承载力提高幅度.自身裂损越多、越集中,木柱越容易在钢带间隙处发生破坏,预应力钢带的约束作用越不能得到充分发挥,从而导致试件承载力提高较低.

### (3) 预应力钢带的间距和层数

预应力钢带层数相同时,随着钢带间距减小,木柱的承载能力理应有提高,但试验结果并未有明显提高,主要原因是由于被加固木柱自身的承载能力相差较大而造成.随着钢带层数增加,钢带的约束作用增大,木柱的承载能力得到提高.

### 3.5 预应力钢带加固木柱与 FRP 加固木柱对比分析

以上研究结果表明,预应力钢带加固可对木柱产生有效约束,改善被加固木柱的受力性能.现将预应力钢带加固试验研究结果与邵劲松等学者<sup>[8-12]</sup>采用 FRP 加固木柱的试验结果进行对比,从以下几方面将预应力钢带加固木柱与 FRP 加固木柱的受力性能进行对比分析.

(1) 预应力钢带加固木柱与 FRP 加固木柱在一定程度上都可以对木柱纵向裂缝的发展产生限制. FRP 加固木柱的破坏形式有两种:一种是木节处发生褶皱,木柱外鼓,导致木纤维被拉断而发生破坏;另一种是相邻两木节处的横向裂缝贯通,导致木柱产生斜向滑移面而发生破坏.这两种破坏形式都与木材的自身缺陷有明显联系.预应力钢带加固木柱的破坏形式也与木材自身的强度和缺陷有明显联系,钢带的间距和层数对其影响较小;

(2) FRP 加固木柱可以提高加固木柱的承载能力,并且随着 FRP 层数增多或间距减小提高幅度增大.预应力钢带加固木柱亦能提高被加固木柱的承载能力,提高幅度为 10%~30%.

(3) FRP 加固木柱能够提高木柱的刚度,但改变 FRP 的层数和间距对试件刚度无明显影响.而预应力钢带加固木柱对木柱的刚度也无明显影响.

综上所述,相比于 FRP 加固木柱,预应力钢带在提高木柱受力性能的同时更可以“主动”对木柱施加约束,避免了钢带应力滞后,使两者可以共同受力,可充分发挥出钢带的材料性能,是一种有效的木柱加固技术.

## 4 加固机理

用预应力钢带对木柱进行加固后,由于预应力的作用钢带会对木柱产生主动约束,使其在未受轴向压力作用时,就受到初始环向约束应力.在施加轴向荷载时,被加固木柱处于三向受压应力

状态,木柱的横向变形受到钢带的有效约束,两者成为一个整体共同参与受力,降低了钢带的应力滞后现象,可以使钢带的性能得到充分发挥,被加固木柱的承载能力和延性性能均得到较大提高.

## 5 结论

(1) 预应力钢带加固木柱能够提高木柱的承载能力,提高幅度为 10%~30%,其中钢带间距对承载力的影响较大;加固后木柱的延性和耗能能力得到改善,但刚度变化不明显.

(2) 预应力钢带加固木柱,试件的破坏形态与未加固试件基本相同,但预应力钢带加固避免了钢带的应力滞后现象,钢带对木柱产生主动约束,试件的屈服荷载得到明显提高,也表现出更好的延性性能.

(3) 木柱的自身强度、裂损和木节等缺陷对加固木柱的极限承载力均有较大影响,导致未能体现出不同钢带间距和层数的加固效果.

## 参考文献 References

- [1] 许清风,朱雷. FRP 加固木结构的研究进展[J]. 工业建筑, 2007, 37(9): 104-107.  
XU Qingfeng, ZHU Lei. State of the art of wood structure strengthened with FRP[J]. Industrial Construction, 2007, 37(9): 104-107.
- [2] 淳庆,张洋,潘建伍. 嵌入式 CFRP 筋加固圆木柱轴心抗压性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(3): 20-24.  
CHUN Qing, ZHANG Yang, PAN Jianwu. Experiment on axial compression properties of circular timber columns strengthened with near-surface mounted CFRP rods[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(3): 20-24.
- [3] 谢启芳. 中国木结构古建筑加固的试验研究及理论分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.  
XIE Qifang. Experimental study and theoretical analysis on strengthening for Chinese ancient timber building[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2007.
- [4] EMERSON R N. In situ repair technique for decayed timber piles[J]. Structures Congress, 2004(1): 1-9.
- [5] CHIDIAQ R. Axial compression of rounded wood poles reinforced with carbon fiber[D]. Piscataway: State University of New Jersey, 2003.
- [6] 朱雷,许清风. CFRP 加固开裂短木柱性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(11): 101-103.  
ZHU Lei, XU Qingfeng. Experimental research on

- short cracked timber columns strengthened with CFRP [J]. Building Structure, 2009, 39(11): 101-103.
- [7] 曹海. FRP加固木柱轴心受压性能试验研究[J]. 齐齐哈尔大学学报, 2013, 29(4): 74-76.
- CAO Hai. Experimental study on axial compressive behaviors for timber column strengthened with FRP [J]. Journal of Qiqihar University, 2013, 23(4): 74-76.
- [8] 邵劲松, 薛伟辰, 刘伟庆, 等. FRP横向加固木柱轴心受压性能计算[J]. 土木工程学报, 2012, 45(8): 48-54.
- SHAO Jingsong, XUE Weichen, LIU Weiqing, et al. Calculation of axial compressive behavior of timber column laterally strengthened with FRP [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(8): 48-54.
- [9] 邵劲松, 刘伟庆, 蒋桐. FRP加固轴心受压木柱应力-应变模型[J]. 工程力学, 2008(2): 183-187.
- SHAO Jingsong, LIU Weiqing, JIANG Tong. Stress-Strain model for FRP strengthened wood column under axial compression [J]. Engineering Mechanics, 2008 (2): 183-187.
- [10] 塞尔江·哈力克, 刘清, 等. BFRP加固新疆杨木柱的抗压试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(3): 108-112.
- SAIERJIANG Halike, LIU Qing. Experimental study of compression reinforcement Xinjiang Yang poplar columns of BFRP [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(3): 108-112.
- [11] 谢启芳, 赵鸿铁. 碳纤维布加固木柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2007, 37(10): 96-99.
- XIE Qifang, ZHAO Hongtie. Experimental study on axial compressive behaviors for timber column strengthened with CFRP sheets [J]. Building Structure, 2007, 37(10): 96-99.
- [12] 朱艳梅, 王清远, 董江峰. FRP加固圆木柱轴压性能的试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(S2): 52-56.
- ZHU Yanmei, WANG Qingyuan, DONG Jiangfeng. Experimental study on axial compression performance of FRP reinforcement round poles. [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(S2): 52-56.

(编辑 沈波)

(上接第168页)

- [15] 严宗达. 用双剪强度理论解混凝土板冲切的轴对称问题 [J]. 工程力学, 1996, 13(1): 1-7.
- YAN Zongda. Solution of the axisymmetrical punching problem of concrete slab by the twin shear strength theory [J]. Engineering Mechanics, 1996, 13(1): 1-7.
- [16] 魏雪英, 杨政, 于澍, 等. 用统一强度理论求解轴对称混凝土板的冲切强度 [J]. 工程力学, 2002, 15(9): 92-96.
- WEI Xueying, YAN Zheng, YU Shu. With the unified strength theory to solve the axisymmetric punching strength of the concrete slab [J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(05): 92-96.
- [17] 老大中. 变分法基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 163-167.
- LAO Dazhong. The basis of the variational method [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2007: 163-167.
- [18] 易伟建, 刘彪. 混凝土板柱节点冲切承载力的极限分析 [J]. 工程力学, 2017, 34(8): 125-132, 143.
- YI Weijian, LIU Biao. Ultimate strength analysis of punching shear capacity of concrete slab-column connection [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(8): 125-132, 143.
- [19] 舒兆发. 板柱结构的中柱节点传递剪力和不平衡弯矩的冲切承载力 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2003, 30(5): 55-60.
- SHU Zhaofa. Punching shear capacity of mid column joints of plate column structure under transfer shear and unbalanced bending moments [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2003, 30(5): 55-60.
- [20] 朱泽华. 偏载下板柱结构中柱节点受力性能试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015: 56-68.
- ZHU Zehua. Experimental investigations on eccentrically loaded RC interior slab-column connections [D]. Changsha: Hunan University, 2015: 56-68.

(编辑 沈波)