

木塑-混凝土组合柱轴心受压试验 及有限元分析

程东辉,王翔旭,杜园元

(东北林业大学土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要 为了实现建筑工程领域节能环保及可持续发展,提出木塑-配筋混凝土柱这一新的结构形式,为开展研究这类构件力学性能奠定基础。**方法** 设计制作了5根试验柱:木塑立柱、木塑素混凝土组合柱、钢筋混凝土柱、配箍率不同的两根木塑混凝土组合柱,完成了试验柱轴心加载试验,并与传统钢筋混凝土柱进行对比分析,获得相关试验数据。**结果** 在木塑型材中配置纵向受力钢筋并浇筑混凝土,能够明显提高木塑柱的抗压承载力,改善了木塑型材在压力作用下的破坏形态,与同尺寸钢筋混凝土柱相比,在保证承载力没有降低的情况下节约了混凝土用量。**结论** 柱中箍筋用量的改变对柱承载力及破坏形态没有影响,木塑型材有效约束了混凝土柱轴心受压时的侧向位移,并提高了柱的延性指标。利用有限元软件模拟结果与试验实测结果能够较好吻合,充分验证了试验结果的准确性。

关键词 木塑复合材料;木塑-配筋混凝土组合柱;轴心受压;承载力;ABAQUS 模拟分析

中图分类号 TU37 文献标志码 A

Axial Compression Test and Finite Element Analysis of Wood Plastic-Concrete Composite Columns

CHENG Donghui, WANG Xiangxu, DU Yuanyuan

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, China, 150040)

Abstract: To achieve the purpose of environmental protection and sustainable development in construction projects, we create the structural form of wood reinforced concrete column which we compare and analyze with the traditional reinforced concrete columns. To laid the groundwork for developing the analysis on such designs, we have designed five testing columns as follows: the wood column, wood-plastic concrete composite column, reinforced concrete column, wood-plastic concrete composite columns of two different respective hoop reinforcement ratios. And with them, we finished the experiment on the axial loading of the testing columns and acquired relevant testing

收稿日期:2016-08-31

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(90915003);哈尔滨市科技创新人才研究专项基金项目(2012RFXXS111);中央高校基本科研业务费创新团队与重大项目培育资金项目(2572016EBC1)

作者简介:程东辉(1971—),男,教授,博士,主要从事混凝土结构与预应力混凝土结构方面研究。

results. Adding longitudinal tensile bar and pouring concrete into the wood-plastic composite can significantly improve its crushing and bearing capability and failure deformation under pressure. In comparison with reinforced concrete of the same size, the former saves the concrete content but maintains the bearing capability. The amount of hoops has no effect on the bearing capability and failure deformation of the column because the wood-plastic composites effectively restrain lateral deviation and improves the ductility performance when the axis of the reinforced concrete is compressed. The simulation result by virtue of FEA software are in accordance with the experimental one, which best verifies the accuracy of the test.

Key words: materials of wood plastic composite; composite column of wood plastic-reinforced concrete; axial compression; the bearing capacity; ABAQUS simulation analysis

木塑复合材料 (Wood-Plastic Composites, WPC) 是以热塑性塑料为原料, 与超过 15% 以上木纤维或植物纤维混合而成的一种绿色、环保型复合材料。木塑复合材料具有良好的防水性能, 且阻燃性、防霉防潮性、耐腐蚀性、可加工性均较好^[1-6]。与木材和塑料材质相比, 木塑型材不会产生裂缝、无木材节疤、无翘曲、对环境温度不敏感。同时也存在一些不足: 密度大, 一般为木材的 2~4 倍; 生产耗能大, 塑料材质需要热处理加工; 对高温过于敏感, 源于内部的塑料材质。木塑复合材料被广泛应用于工程领域, 如室内外各种铺板、栅栏、建筑模板等。木塑型材应用于结构中, 一方面可以节约模板、节省混凝土用量^[7-11], 加快施工进度; 另一方面可以明显改善结构外观, 节约装修成本。但将木塑型材作为主要受力构件应用于结构中的相关研究尚属空白。现阶段国内学者对木塑混凝土组合构件研究并不成熟, 没有形成整套的研究体系, 仅对木塑混凝土组合梁及板进行了简

单研究, 深度与广度仍有待提高。

目前, 木塑混凝土组合柱的研究成果很少, 笔者以塑复合材料为受力基材, 在其中配置一定数量受力钢筋并浇筑混凝土, 形成木塑-配筋混凝土组合柱, 对构件施加轴心压力, 开展力学性能研究。陆续将会对木塑混凝土组合梁、板等构件进行力学加载试验研究, 为这类构件在工程领域的广泛应用奠定前期研究基础。

1 木塑材料物理与力学性能

木塑复合材料的物理性能与制造工艺、原材料及制造配方有紧密联系, 通常在生产加工时, 调整配方比例及原材料种类来改变木塑材料的物理性能, 以满足功能需求。其物理性能如表 1 所示, 其中表面耐磨参数为每 100 转时木塑型材的质量损失。木塑复合材料具有良好的抗压和抗剪性能, 在达到承载力极限状态时呈明显脆性破坏特征, 且木塑复合材料弹性模量较低^[12-21], 表 2 给出了当前具有代表性的木塑复合材料的力学性能指标。

表 1 木塑复合材料物理性能指标

Table 1 Physical performance indexes of wood-plastic composites

密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	吸水膨胀率/%	表面耐磨参数/g	低温落锤冲击破裂个数/个	加热后尺寸变化率/%	高低温反复尺寸变化率/%
1.18	≤ 2	≤ 0.28	≤ 0.08	≤ 1	± 2.5	± 20.2

表 2 木塑复合材料力学性能指标

Table 2 Mechanical property indexes of wood-plastic composites

拉伸强度/MPa	抗弯弹性模量/MPa	冲切韧性/(kJ·m ⁻²)	抗弯强度/MPa	抗压强度/MPa
5.8	1 480	10.1	26.5	25.88

2 试验设计与加载测试方案

2.1 试件设计

为充分考察木塑-配筋混凝土组合柱力学性能,设计制作了5根受压试件.试件截面尺寸均为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,试件高度 800 mm ,长细比 $l/b = 4.5$.根试件中包括1根其中未浇筑混凝土的纯木塑型材柱、3根在木塑型材内浇筑混凝土形成的木塑-混凝土组合柱以及1根同尺寸的钢筋混凝土柱.试件中混凝土强度等级为C30,纵向受力钢筋强度等级为HRB335,箍筋强度等级为

HPB300,木塑壁厚 8.5 mm .各试件参数如表3所示,试件截面尺寸如图1所示,试件配筋布置如图2所示.

表3 截面尺寸及配筋

Table 3 Section size and reinforcement

试件编号	截面尺寸/mm	纵筋配筋率/%	箍筋配筋率/%
MZ	200×200	—	—
GHZ	200×200	0.19	0.094
MHZ1	200×200	—	—
MHZ2	200×200	2.18	0.157
MHZ3	200×200	2.18	0.336

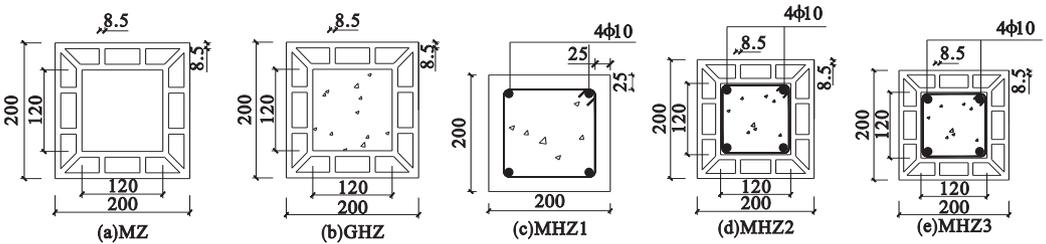


图1 试件截面尺寸图

Fig. 1 Section size drawing of specimens

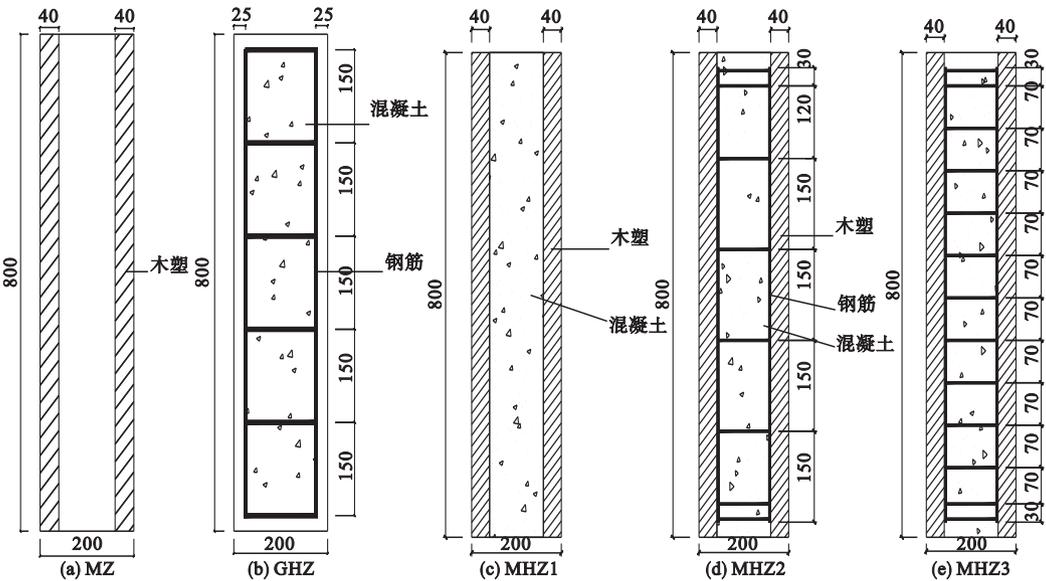


图2 试件配筋图

Fig. 2 Reinforcement drawing of specimens

2.2 加载与测量方案

轴心受力试验是在 $5\ 000\text{ kN}$ 液压伺服压力试验机上完成的.试验过程为获得纵向钢筋和木塑柱的应力值,在纵向受力钢筋表

面设置了钢筋应变片,以监测钢筋在加载过程中应力的变化;在木塑表面设置了应变片以监测试验过程中木塑型材的受力变化;为了监测试验过程中构件的轴向变形及横向变

形,在构件表面布置了6个位移计.应变片布置及加载测量装置如图3和图4所示.

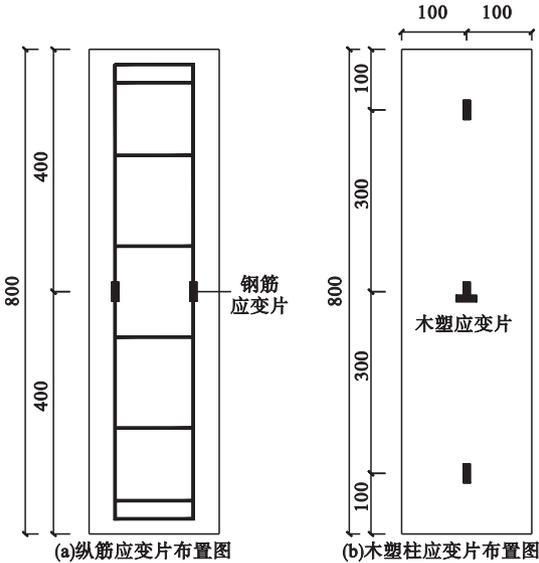


图3 应变片布置

Fig. 3 Strain gauge arrangements

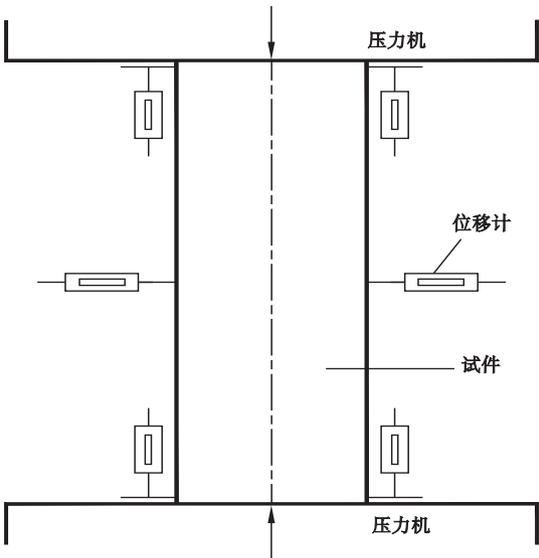


图4 加载及测量装置

Fig. 4 Equipment of loading and measuring

3 试验现象与试验结果

试件 MZ 在加载过程中外观没有显著变化,当竖向荷载加至 280 kN 时,加载板下木塑表面出现褶皱现象;当加至极限荷载时试件侧面突然沿纵向劈裂,并伴有脆裂响声,木塑柱端被压坏且有碎块飞出,导致柱承载力迅速消失,破坏是突然地、无明显征兆. 试件

GHZ 呈现典型的钢筋混凝土轴心受压破坏,达到承载力极限状态时,混凝土保护层脱落,混凝土被压碎,纵向受力钢筋屈服并向外鼓出. 试件 MHZ1 加载过程中无明显变化,加至极限荷载时发出脆裂声,木塑下端角部处碎裂,表面呈现纵向裂缝并迅速延中部扩展;木塑瞬间劈裂,有大面积木塑被撑开,内部混凝土压碎试件呈脆性劈裂破坏无明显预兆. 对于在木塑型材中配置了纵向钢筋并浇筑混凝土的试件 MHZ2、MHZ3,加载过程中外观没有明显变化,当竖向荷载加至 728 kN 时,在木塑某一侧面出现纵向裂缝,随着荷载增加,纵向裂缝不断延伸直至木塑柱劈裂,同时木塑表面伴随出现横向裂缝. 加至极限荷载时,试件表面大片木塑被撑开同时被压碎的木塑向外飞出,木塑型材内部混凝土被压碎,纵向钢筋受压屈服,呈灯笼状压屈外鼓,试件破坏前有明显预兆,呈典型轴心受压破坏. 试件破坏形态如图 5 所示. 表 4 给出了试件达到承载力极限状态时的荷载实测值及轴向位移实测值.

4 试验分析

4.1 承载力分析

由表 4 给出的试验柱承载力实测值可以看出以下几个特点:首先,木塑柱中浇筑混凝土可显著提高木塑组合柱的承载力. 与试件 MZ 相比,试件 MHZ1、MHZ2、MHZ3 极限承载力分别提高了 43%、157%、163%,提高幅度非常明显. 究其原因:一方面是由于木塑柱内的混凝土本身抗压强度高,承担了大部分荷载;另一方面混凝土对木塑柱起到了侧向支撑作用,从而避免了木塑柱端部出现褶皱,提高了木塑极限压应变. 其次,与试件 GHZ 相比,在混凝土有效受压面积减小的情况下,木塑-配筋混凝土组合柱 MHZ2、MHZ3 承载力并未降低. 主要原因在于木塑在一定程度上约束了混凝土侧向变形,限制并延缓了加载过程中混凝土内部裂缝的出现和发展,

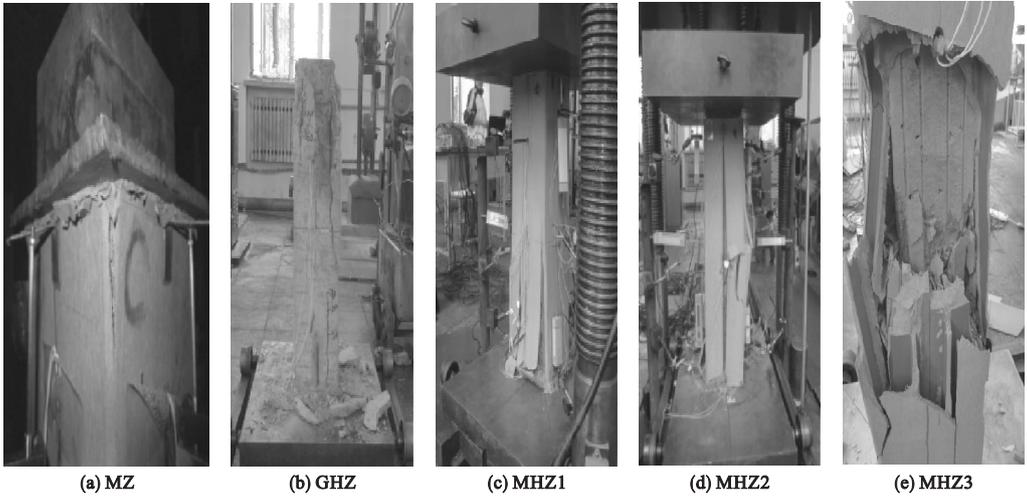


图5 柱的破坏形态

Fig. 5 Failure patterns of columns

表4 实验柱轴心受压试验结果实测值

Table 4 Measured values of column axial compression experiment

试件编号	极限荷载/kN	极限位移/mm
MZ	350	8.88
GHZ	920	0.61
MHZ1	500	1.26
MHZ2	900	3.19
MHZ3	920	3.93

提高了混凝土的极限压应变. 再次,在木塑混凝土中配置一定数量的钢筋也可改善木塑受压破坏性能. 与试件 MHZ1 的破坏形态相比,试件 MHZ2 和 MHZ3 破坏时木塑并未因裂缝的迅速开展而突然被压碎,而是在出现纵向裂缝后,随着荷载的增加纵向裂缝不断开展,最后导致木塑劈裂,即木塑-配筋混凝土柱在试验过程中首先纵向受力钢筋屈服,然后木塑型材劈裂,最后混凝土被压碎,柱的受力层次分明.

4.2 木塑-钢筋混凝土组合柱延性分析

构件的极限位移与其屈服位移之比称为构件延性系数,延性系数较好地反映了构件耗能能力的大小. 由设置于构件表面的位移传感器可以获知试验过程中试件轴向位移变化情况,如图6所示. 表5给出了各试件在纵

向受力钢筋屈服时轴向位移与达到承载力极限状态时轴向位移的实测值.

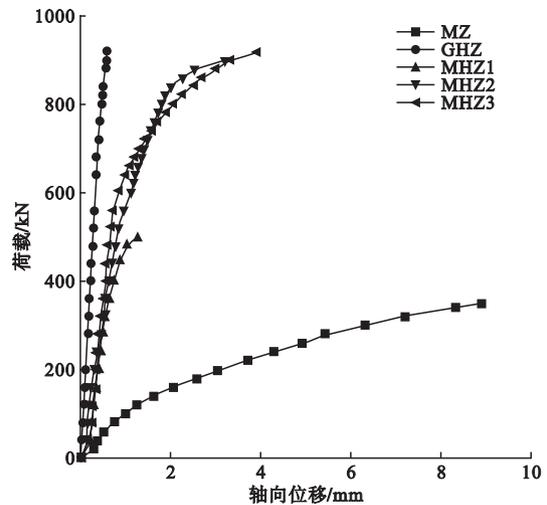


图6 荷载-轴向位移关系曲线

Fig. 6 Load-axial displacement curves

表5 试件位移延性系数

Table 5 Displacement ductility coefficients of specimens

试件编号	屈服位移 $\Delta y/\text{mm}$	极限位移 $\Delta u/\text{mm}$	延性系数 $\Delta u/\Delta y$
GHZ	0.535	0.61	1.14
MHZ2	1.61	3.19	1.98
MHZ3	1.31	3.93	3

由表5可以看出:与钢筋混凝土柱 GHZ 相比,木塑-配筋混凝土组合柱 MHZ2、

MHZ3 的延性系数显著提高,说明木塑 - 配筋混凝土柱的耗能能力较好,轴心受压下组合柱力学性能得到显著改善。

4.3 木塑与钢筋协同受力分析

图 7 给出了荷载作用下纵向受力钢筋及木塑型材应力变化曲线图。由图可以看出:加载初期木塑与纵向钢筋受力趋势基本相同,

表明在这一阶段木塑与纵向钢筋协同受力性能较好,共同承担外部荷载作用。考虑到二者弹性模量不同,纵向受力钢筋应力增量明显大于木塑柱应力增量;当加载至纵向受力钢筋屈服后,木塑应力增长明显加快,表明其后增加的荷载是由木塑与混凝土共同承担,最终木塑破裂、混凝土压碎。

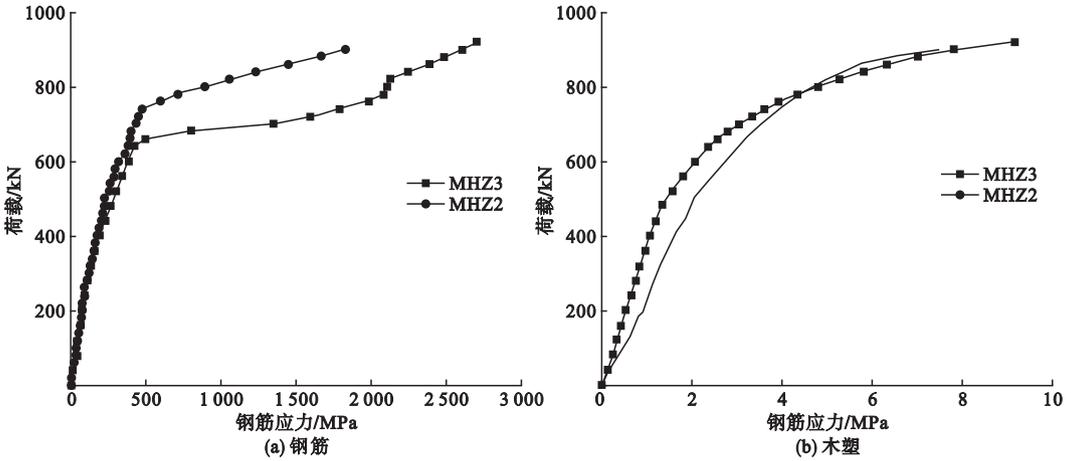


图 7 荷载 - 应力关系曲线

Fig. 7 Load-stress curves

5 有限元分析

5.1 有限单元建立

利用 ABAQUS 有限元分析软件,采用实体单元建立模型,其中混凝土采取 C3D8R 单元:三维八节点缩减积分单元;纵向受力钢筋与箍筋采取 T3D2 单元:两节点三维桁架单元。在模型中创建幅值来模拟试验中逐级加载现象,在柱顶几何中心位置创建节点并将柱顶纵向(坐标系中 Y 方向)位移耦合到此节点上,对节点施加纵向位移荷载。钢筋与混凝土相互作用关系采用嵌入式(EMBEDDED)方法来实现,忽略钢筋与混凝土间的粘结滑移,使钢筋与混凝土变形相协调,符合

平截面假定条件。木塑与混凝土相互作用关系采取 Tie(绑定)约束来实现;采用固定端方式对柱底施加边界条件。

在分析步中利用 ABAQUS/Standard(隐式计算)方法对模型进行运算,因为隐式计算相对于显示计算更为精准细致。有限元网络划分同样对准确率起着重要作用,网格太大计算不精确,网格太密集容易引起应力集中,太大造成结果不精确误差较大。因此应采取多次调试网格大小选取与试验结果吻合较好的,以减小误差。ABAQUS 模拟分析中混凝土与钢筋材料参数如表 6 所示。实体模型与网格划分模型如图 8 所示。

表 6 混凝土与筋材料参数

Table 6 The material parameters of concrete and steel

混凝土			钢筋		
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
2 400	2.97×10^4	0.2	7 800	2×10^5	0.3

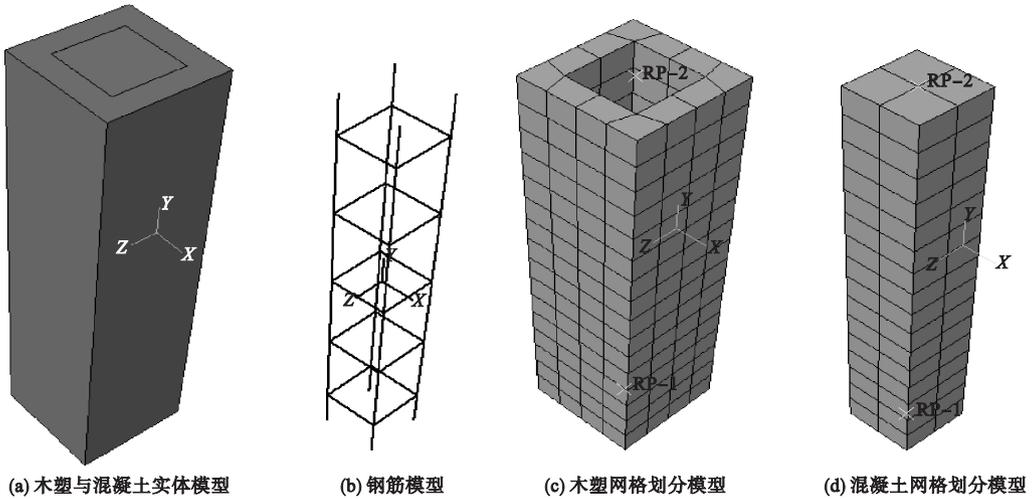


图8 有限元模型

Fig. 8 The finite element model

5.2 承载力对比分析

将试验实测值与有限元模型计算值进行对比分析,如表7所示.可以看出模拟值与实测值,二者能够较好吻合,并且最大误差控制在15%以内,因此有限元模型建立及单元选取、边界条件选定、相互约束建立是合理的.通过有限元模拟分析可以发现,木塑-配筋混凝土组合柱的极限承载力明显大于普通钢筋混凝土柱,木塑与混凝土的相互作用提高了试件极限承载力.在轴向压力作用下,内部混凝土侧向变形受到木塑的反向支撑作用,从而提高了混凝土的极限抗压强度,充分验证了试验结论.

表7 承载力试验值与有限元模拟值

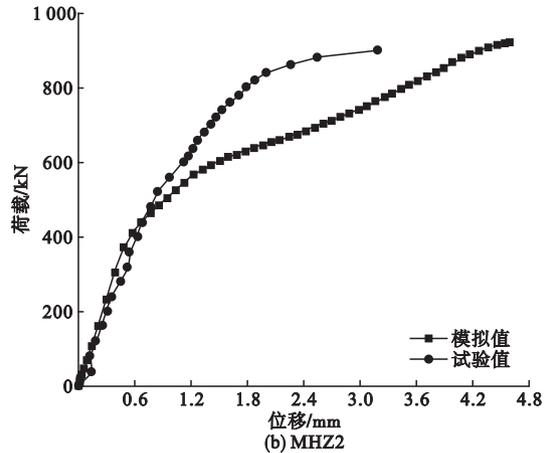
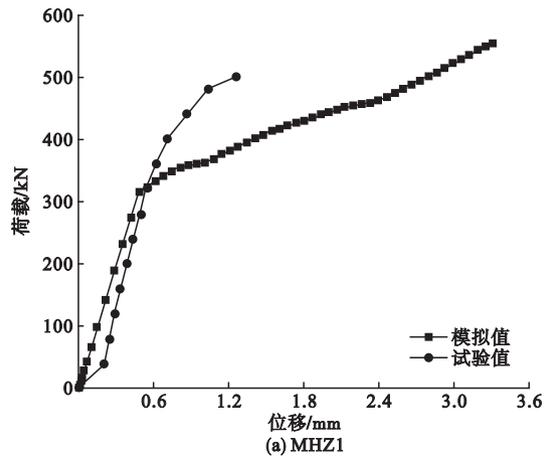
Table 7 Bearing capacity test value and finite element simulation value

试件编号	试验值/kN	模拟值/kN	模拟值/实验值
MZ	350	373	1.07
GHZ	920	856	0.93
MHZ1	500	554	1.11
MHZ2	900	919	1.02
MHZ3	920	954	1.04

5.3 荷载-位移关系曲线对比分析

有限元模拟分析与试验测得的荷载-位移曲线对比如图9所示.

在加载初期,木塑-配筋混凝土组合柱的有限元计算结果与试验实测结果吻合较好;在加载后期,随着荷载的不断增大,有限元分析结果与试验实测结果出现一定程度的



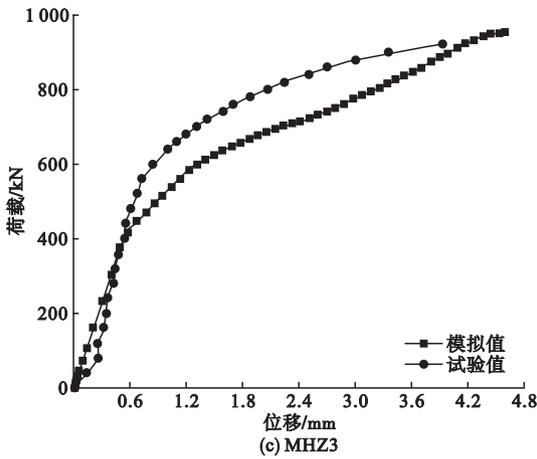


图9 荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves

偏差。产生偏差的原因:试验柱在轴向压力作用下,受力钢筋与混凝土之间存在相对滑移,但在有限元建模时两者相互作用关系是嵌固在一起,具有良好的粘结性,忽略了两者之间相对滑移;试验中仪器布置及操作误差;ABAQUS有限元建模时,材料本构关系中的损伤因子与实际试验材料存在误差;试验材料的不均匀性,混凝土的离散型。

上述原因都会对有限元模拟分析产生不可避免的误差,但从荷载-位移关系曲线的总体趋势看两者相似性较好。因此利用ABAQUS有限元软件,对试验柱进行模拟分析的方法是可行的,同时验证了试验成功与否。

6 结论

(1) 与同尺寸钢筋混凝土柱相比,木塑-配筋混凝土组合柱在减小混凝土用量的基础上,承载力并未降低。

(2) 木塑-配筋混凝土组合柱能够改善木塑型材受力性能,其破坏顺序首先是纵向钢筋受压屈服,然后木塑型材劈裂,最后混凝土被压碎,破坏层次分明,呈现塑性破坏特征。

(3) 木塑-配筋混凝土组合柱在保证承载力的前提下,具有良好的耗能能力,将其应用于工程中,不但降低混凝土用量、节能环保,

而且节约模板、提高施工进度,具有一定的工程应用前景。

参考文献

- [1] 张纪刚,付瑛琪,李秋义. 新型木塑自保温墙板力学性能试验研究[J]. 低温建筑技术, 2010(2):4-6.
(ZHANG Jigang, FU Yingqi, LI Qiuyi. Test study of new wood plastic insulation wallboard mechanical performance[J]. Low temperature architecture technology, 2010(2):4-6.)
- [2] 刘涛,何慧,洪浩群,等. 木塑复合材料研究进展[J]. 绝缘材料, 2008(2):38-41.
(LIU Tao, HE Hui, HONG Haoqun, et al. Research progress of wood-plastic composites [J]. Insulating materials, 2008(2):38-41.)
- [3] 窦立岩,汪丽梅,陈晨. 国内木塑复合材料研究进展及应用现状[J]. 科技视界, 2015(14):103-104.
(DOU Liyan, WANG Limei, CHEN Chen. Research progress and application of wood-plastic composites in China[J]. Science and technology vision, 2015(14):103-104.)
- [4] 王燕. 浅论木塑复合材料的组成及其性能提高[J]. 化学工程与装备, 2009(9):130-132.
(WANG Yan. Discussion on the composition and performance improvement of wood plastic composites [J]. Chemical engineering and equipment, 2009(9):130-132.)
- [5] AFRIFAH K A, HICKOK R A, MATUANA L M. Polybutene as a matrix for wood plastic composites [J]. Composites science and technology, 2010, 70:167-72.
- [6] AYRILMIS N, BENTHIE N J T, THOEMEN H. Effects of formulation variables on surface properties of wood plastic composites [J]. Composites part b: engineering, 2012, 43: 325-331.
- [7] FELIX J S, DOMENO C, NERIN C. Characterization of wood plastic composites made from landfill-derived plastic and sawdust: volatile compounds and olfactometric analysis [J]. Waste management, 2013, 33:645-655.
- [8] KAYMAKCI A, AYRILMIS N. Investigation of correlation between Brinell hardness and tensile strength of wood plastic composites [J]. Composites part b: engineering, 2014, 58: 582-585.
- [9] KAZEMI N S. Use of recycled plastics in wood plastic composites-a review [J]. Waste man-

- agement, 2013, 33: 1898 - 1905.
- [10] LOMELI-RAMIREZ M G, OCHOA-RUIZ H G, FUENTES-TALAVERA F J, et al. Evaluation of accelerated decay of wood plastic composites by *Xylophagus* fungi [J]. *International biodeterioration & biodegradation*, 2009, 63: 1030 - 1034.
- [11] 沈凡成, 贾润礼. 木塑复合材料的研究进展与发展前景 [J]. *塑料助剂*, 2010(1): 5 - 9. (SHEN Fancheng, JIA Runli. Study progress and development prospect of wood plastic composite [J]. *Plastics additives*, 2010(1): 5 - 9.)
- [12] 付瑛琪, 张纪刚, 陈洪昌, 等. 木塑板力学性能试验研究与分析 [J]. *青岛理工大学学报*, 2009(1): 31 - 34. (FU Yingqi, ZHANG Jigang, CHEN Hongchang, et al. Test research and analysis of wood plastic plate mechanics performance [J]. *Journal of Qingdao technological university*, 2009(1): 31 - 34.)
- [13] 陈焯, 贾欣欣, 张星宇, 等. PE 基木塑复合材料力学性能试验分析 [J]. *山西建筑*, 2016(6): 105 - 107. (CHEN Ye, JIA Xinxin, ZHANG Xingyu, et al. Test analysis of PE wood plastic composite material mechanics performance [J]. *Shanxi architecture*, 2016(6): 105 - 107.)
- [14] PALM A, SMITH J, DRISCOLL M, et al. Chemical constituent influence on ionizing radiation treatment of a wood-plastic composite [J]. *Radiation physics and chemistry*, 2016, 124: 164 - 171.
- [15] YEH S K, GUPTA R K. Improved wood-plastic composites through better processing [J]. *Composites part a: applied science and manufacturing*, 2008, 39: 1694 - 1702.
- [16] 张涛, 杨双燕, 高晓菊. 木塑复合材料力学性能的影响因素探讨 [J]. *科技创新导报*, 2015(25): 64 - 65. (ZHANG Tao, YANG Shuangyan, GAO Xiaojun. The influence factors of the wood plastic composite material mechanics performance [J]. *Science and technology innovation herald*, 2015(25): 64 - 65.)
- [17] 杨玲玲, 李慧, 钟志有. 聚丙烯基木塑复合材料力学性能的研究 [J]. *塑料科技*, 2010(2): 36 - 39. (YANG Lingling, LI Hui, ZHONG Zhiyou. Study of polypropylene wood plastic composite material mechanics performance [J]. *Plastic science and technology*, 2010(2): 36 - 39.)
- [18] 沈凡成, 贾润礼, 魏伟. PVC 基木塑复合材料力学性能的研究 [J]. *塑料科技*, 2011(2): 48 - 51. (SHEN Fancheng, JIA Ruili, WEI Wei. Study of PVC wood plastic composite mechanical properties [J]. *Plastic science and technology*, 2011(2): 48 - 51.)
- [19] 黄永清. 复合材料永久模板研究及其在桥梁上的应用 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010. (HUANG Yongqing. Study on composite permanent template and its application in bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.)
- [20] 付瑛琪. 新型木塑保温墙板力学性能分析与试验研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2009. (FU Yingqi. Experimental study and analysis on the mechanical properties of the new typed wood-plastic thermal insulation wall [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2009.)
- [21] 秦楠. 木塑复合材料力学性能影响因素的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013. (QIN Nan. Study on the impacting factors of wood-plastic composite mechanical properties [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.)