# 冷弯薄壁型钢部分包裹轻骨料混凝土L形角柱受压性能研究

陈 明[1,2],崔 琦[1],吴若一[1*],胡方琪[1],贺国强[1],李补拴[1,3]

(1.内蒙古科技大学 土木工程学院,内蒙古 包头 014010; 2.内蒙古科技大学 内蒙古自治区土木工程安全与耐久重点实验室,内蒙古 包头 014010; 3.内蒙古科技大学 内蒙古自治区建筑结构防灾减灾工程技术研究中心,内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 本文针对冷弯薄壁型钢构件局部易屈曲和轻骨料混凝土易开裂等技术难题,创新性地提出一种可预制装配的冷弯薄壁型钢部分包裹轻骨料混凝土L形角柱(简称L形PEC柱)。设计了2根L型钢柱和4根L形PEC柱试件,系统探究了填充轻骨料混凝土与缀条间距对构件力学性能的影响机制。结果表明:填充轻骨料混凝土可显著抑制型钢屈曲变形,使屈曲承载力提升737.08%;缀条间距对轴压/偏压试件峰值荷载及初始刚度影响不明显,但能一定程度上延缓试件变形。结合试验结果验证了ABAQUS有限元模型的准确性与可靠性,之后进一步开展参数分析揭示了钢材强度、轻骨料混凝土强度、缀条间距及偏心距四个参数对L形PEC柱受力性能的影响。结果表明:材料强度、偏心距对试件极限承载力影响较大,采用Q355钢和LC40轻骨料混凝土对试件极限承载力的提升最明显,提升幅度分别可达14.60%、14.85%;随着偏心距的增加,试件极限承载力下降明显,沿$x$轴、$y$轴的极限承载力最大降幅分别为22.97%、15.07%;缀条间距主要防止试件过早屈曲,对极限承载力的影响有限,极限承载力的降幅在2.21%以内。

**关键词:** 冷弯薄壁型钢; 轻骨料混凝土; L形PEC柱; 受压试验; 数值模拟; 参数分析

**中图分类号:** TU398$^{+}$.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9379(2026)08-0065-09

DOI: 10.13969/j.jzgjgjz.20241220001

# Study on the Compressive Performance of Cold-Formed Thin-Walled Steel L-Shaped Corner Columns Partially Encased with Lightweight Aggregate Concrete

*CHEN Ming*[1,2], *CUI Qi*[1], *WU Ruoyi*[1*], *HU Fangqi*[1], *HE Guoqiang*[1], *LI Bushuan*[1,3]

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Safety and Durability for Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Engineering Technology Research Center for Disaster Prevention and Mitigation of Building Structures, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

*Corresponding author: 13669172546@163.com

收稿日期:2024-12-20

基金项目:国家自然科学基金(52168024),内蒙古自治区自然科学基金(2021MS05061)

作者简介:

陈 明(1978—),男,博士,教授,主要从事新型冷弯型钢房屋结构设计与性能分析方面的研究。E-mail: cmlx-1978@163.com。

通信作者:

吴若一(2000—),男,硕士研究生,主要从事薄壁钢结构设计与智能金属抗震设计方面的研究。E-mail: 13669172546@163.com。

**Abstract:** This study addresses the technical challenges of local buckling in cold-formed thin-walled steel members and cracking in lightweight aggregate concrete (LAC) by innovatively proposing a prefabricated L-shaped cold-formed thin-walled steel corner column partially encased with lightweight aggregate concrete (referred to as an L-shaped PEC column). Two L-shaped steel columns and four L-shaped PEC columns were designed to systematically investigate the effects of LAC filling and batten spacing on the mechanical properties of the members. The experimental results indicate that the LAC filling can significantly suppress the buckling deformation of the steel members, increasing the buckling load-carrying capacity by 737.08%. While the batten spacing has an insignificant effect on the peak load and initial stiffness of the axially or eccentrically compressed specimens, it can delay the deformation of the specimens to a certain extent. The accuracy and reliability of the Abaqus finite element model were validated based on the experimental results, and a parametric analysis was further conducted to reveal the effects of steel strength, LAC properties, batten spacing, and eccentricity on the load-bearing performance of the L-shaped PEC columns. The parametric analysis results indicate that the material parameters and eccentricity significantly influence the ultimate bearing capacity of the specimens. The use of Q355 steel and LC40 lightweight aggregate concrete yields the most pronounced enhancement, with increases in ultimate bearing capacity of up to 14.60% and 14.85%, respectively. As the eccentricity increases, the ultimate bearing capacity decreases notably, with maximum reductions of 22.97% along the x-axis and 15.07% along the y-axis. The Batten spacing primarily prevents premature buckling and has a limited impact on the ultimate bearing capacity, with a reduction within 2.21%.

**Keywords:** cold-formed thin-walled steel; lightweight aggregate concrete; L-shaped PEC column; compressive test; numerical simulation; parametric analysis

冷弯薄壁型钢在钢材领域通常被认为是一种高效经济型钢，相较于传统的热轧型钢构件，冷弯薄壁型钢构件承载能力更好，整体刚度和相关受力性能也更优越，可显著降低钢材用量、减轻结构自重，便于工业化生产[1]。然而，冷弯薄壁型钢结构存在受力易屈曲、抗侧力不足、防火性能差及风敏感性高等特点，导致其主要用于低矮房屋，大大限制了冷弯薄壁型钢结构的发展。

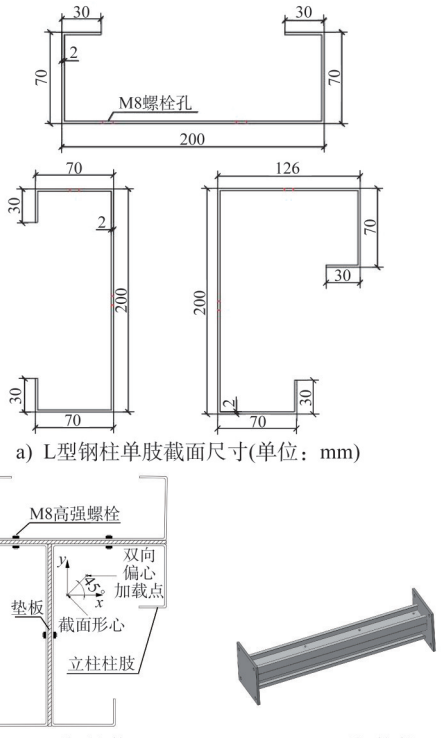
采用部分包裹混凝土(partially encased composite, PEC)可以很好地解决冷弯薄壁型钢出现的易受力屈曲问题。但普通混凝土自重较大，不利于预制构件运输与安装。为此，一些学者采用轻骨料混凝土替代普通混凝土制备预制构件，以解决该问题[2]。轻骨料混凝土(lightweight aggregate concrete, LAC)是一种干表观密度小于1 950 kg·m$^{-3}$的新型混凝土材料，具有质量轻且力学性能优良的特点。与普通混凝土相比，在混凝土抗压强度相同的情况下，轻骨料混凝土的重量比普通混凝土的重量轻20%～30%。然而，轻骨料混凝土是一种多孔的结构，其脆性破坏特性明显，导致其工程中的应用范围受到了很大限制。目前，PEC柱可分为标准柱(如矩形截面)和异形柱(如十字形截面)。赵根田等[3]、SONG等[4]和林德慧等[5]分别开展了PEC柱抗震性能、局部屈曲以及局部屈曲后行为的研究，研究结果表明矩形PEC柱具有优秀的抗震耗能能力，可应用于抗震设防区，并提出了轴压作用下型钢临界强度与屈曲后强度的预测公式以及型钢应力-应变关系的计算公式。PEREIRA等[6]和BEGUM等[7]分别开展了不同荷载组合下填充不同强度混凝土PEC柱的承载力试验，研究表明随着设计偏心距增大，构件可靠性持续下降，构件受力逐渐由轴压主导转为弯压结合，结构抗力储备减弱。对于异形柱的研究大多集中在八角形、十字形和T形PEC柱上，主要研究了PEC柱的轴压性能、偏压性能、抗震性能以及细长柱的整体稳定性等。EBADI JAMKHANEH等[8]对轴向和扭转荷载作用下的八角形PEC柱进行了试验，并建立了有限元分析模型，结果表明所有试件都出现混凝土被压碎与钢翼缘局部屈曲的现象，仅无钢筋试件出现连接件焊缝断裂的现象，局部屈曲均出现在峰值荷载附近，这说明混凝土约束有效延缓了局部失稳。王静峰等[9]主要研究了含钢率、钢材牌号、截面面积、混凝土强度、截面高宽比等参数对十字形PEC柱轴压性能的影响规律，并提出了十字形PEC柱轴心受压下承载力计算公式。李补拴等[10]分析了十字形和T形PEC柱的破坏形态和抗震性能指标，并建立有限元分析模型对加载角度和轴压比进行参数分析，研究表明十字形PEC柱比T形PEC柱更适用于抗震结构，高轴压比会削弱柱的抗震性能。相比八角形、十字形和T形截面，L形截面剪切中心与质心不重合。因此，L形PEC柱表现出的力学性能与传统异形柱存在差异。目前，对L形PEC柱的研究较少，特别是对部分包裹轻骨料混凝土-钢组合构件的研究较为缺乏。对该类型柱的工作机理、受力性能、破坏模式的研究还不够深入。

为此，本文提出了一种冷弯型钢部分包裹轻骨料混凝土L形柱，研究了填充轻骨料混凝土对L型钢柱受力性能的影响规律以及缀条间距对轴压、偏压试件破坏模式、承载力的影响规律。在此基础上，利用有限元模拟，拓展分析了钢材强度等级、轻骨料混凝土强度等级、缀条间距及偏心距四个参数对L形PEC柱受力性能的影响，为冷弯薄壁型钢异形柱的受压破坏研究提供参考。

# 1　试验概况

## 1.1　试件设计

共设计了2个L型钢柱试件、4个L形PEC柱试件，柱高均为1 600 mm。L型钢柱试件由两个C型钢和一个角钢通过垫板及螺栓连接而成。L形PEC柱试件由外部焊接缀条的L型钢柱试件和轻骨料混凝土组成。试件编号和试件参数如表1所示。其中，偏压试件的偏心角度均为45°，轻骨料混凝土等级设为LC35。试验采用的钢材厚度均为2.0 mm，螺栓纵向间距均为500 mm。L型钢柱及L形PEC柱各组成部件构造及截面尺寸如图1、图2所示。




a) L型钢柱单肢截面尺寸(单位：mm)

b) L型钢柱截面　　c) L型钢构件

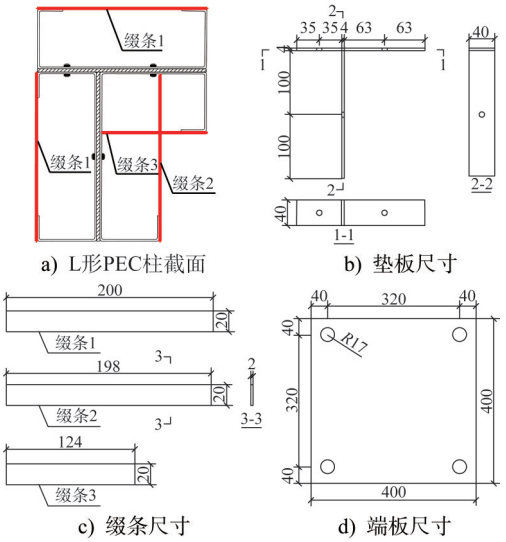
**图1　L型钢柱几何尺寸及构造**

**Fig. 1　Geometric dimensions and construction of L-shaped steel column**

参照规范《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)[11]进行混凝土抗压强度试验，立方体抗压强度平均值为34.47 MPa。参照《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)[12]进行材性试验，试件弹性模量$E$平均值为$2.06\times10^5$ MPa，屈服强度$f_y$平均值为403.11 MPa，抗拉强度$f_u$平均值为472.28 MPa，泊松比$\mu$为0.3。

## 1.2　测点布置

L型钢柱试件在柱1/4、1/2、3/4高度截面处布置3组应变片，每组各11个，布置位置如图3a)所示。另外，L形PEC柱试件还需在柱1/4、1/2、3/4高度混凝土截面处布置3组应变片，每组各3个，布置位置如图3b)所示。在上、下




a) L形PEC柱截面　　b) 垫板尺寸

c) 缀条尺寸　　d) 端板尺寸

**图2　L形PEC柱几何尺寸及构造(单位：mm)**

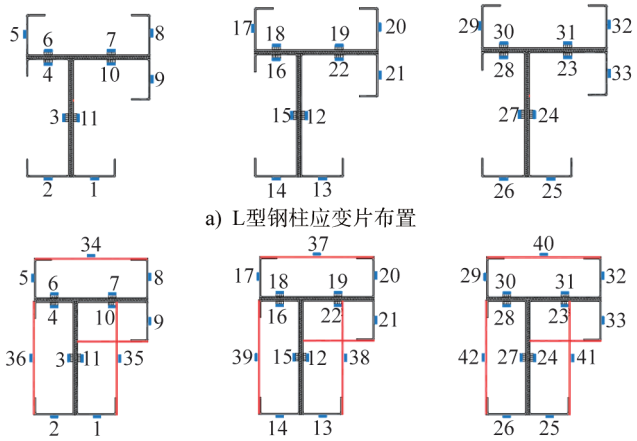
**Fig. 2　Geometric dimensions and construction of L-shaped PEC column (unit: mm)**

**表1　试件编号及参数**

**Table 1　Numbers and parameters of specimens**

| 试件名称 | 受压类型 | 偏心距/mm | 缀条间距/mm | 长细比 $\lambda_x$、$\lambda_y$ |
|---|---|---|---|---|
| C1 | 轴压 | — | — | 22.10、31.64 |
| C2 | 偏压 | 30 | — | 22.10、31.64 |
| PEC-1 | 轴压 | — | 250 | 17.20、18.60 |
| PEC-2 | 轴压 | — | 150 | 17.20、18.60 |
| PEC-3 | 偏压 | 30 | 250 | 17.20、18.60 |
| PEC-4 | 偏压 | 30 | 150 | 17.20、18.60 |

端板处布置1号、2号位移计用于测量试件的竖向位移。




a) L型钢柱应变片布置

b) L形PEC柱应变片布置

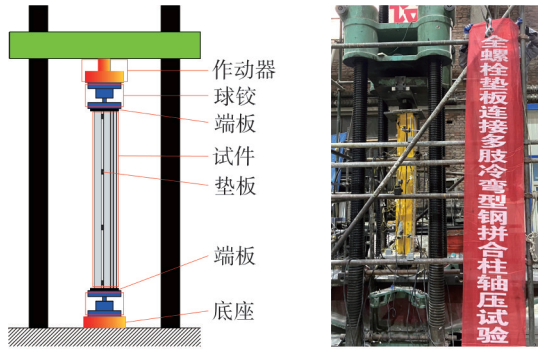
**图3　应变片布置**

**Fig. 3　Arrangement of strain gauges**

## 1.3　加载设备与制度

加载装置采用500 t电液伺服试验机，最大量程为5 000 kN。试件两端与加载板间采用球铰连接，如图4所

示。加载采用位移加载的方式，以1 mm·min$^{-1}$的恒定速率对试件进行加载。当荷载增加到接近试件极限承载力的80%时，表明试件可能即将进入破坏阶段。此时开始降低加载速率，以便更好地观察和记录试件的破坏过程和现象。直至荷载降低到峰值荷载的75%后，试验结束。




a) 试验装置 b) 加载测试装置

**图4 试验装置**

**Fig. 4 Test setup**

### 1.4 有限元模拟

本文采用ABAQUS有限元软件建立有限元模型，如图5所示。模型中钢材采用ABDEL-RAHMAN等[13]提出的应力-应变关系模型，轻骨料混凝土采用LIM等[14]建立的高拟合度本构关系曲线，钢材与轻骨料混凝土的材料性能值均取材性试验实测值。模型包含轻骨料混凝土、缀条、型钢及上下端板4个部分，各部件均采用C3D8R六面体缩减积分单元模拟。采用20 mm×20 mm的网格划分可兼顾计算精度和收敛性。接触类型均为面面接触，切向采用“罚”函数，摩擦系数为0.35，法向采用“硬”接触。分析步采用静力通用分析步并激活几何非线性选项，引入自动稳定机制控制求解收敛性，指定耗散能系数为0.000 2。边界条件设置方面，在试件端板上、下设置参考点，通过耦合约束关联端板与参考点自由度，对下端板施加$U_x=U_y=U_z=U_{Rz}=0$的约束，在上部参考点施加一个沿$z$轴方向的位移以模拟准静态加载工况。

有限元与试验破坏模式以及荷载-位移曲线对比结果如图6、7、8所示，有限元结果与试验结果的极限荷载值对比见表2。对比结果表明，模拟值与试验值的比值较小，均值为1.02，标准差为0.016，模拟结果精确度较高。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 破坏特征

各试件屈曲荷载、极限荷载及初始刚度如表3所示，与普通未包裹轻骨料混凝土C1和C2相比，PEC系列试件的整体承载能力和初始刚度均得到明显提升。其中，试件PEC-1和PEC-2的极限荷载分别达到1 962.50 kN和2 082.03 kN，初始刚度分别为1 145.46 kN·m$^{-1}$和

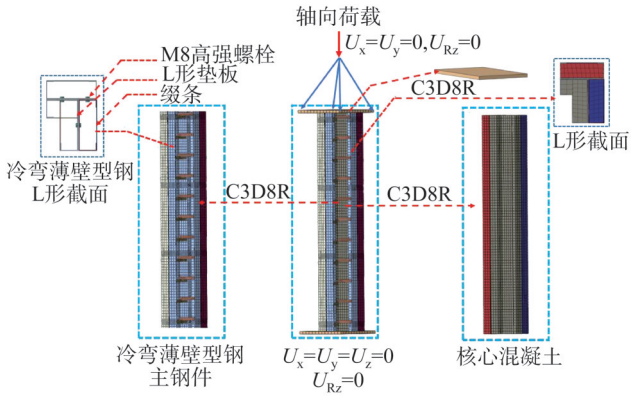
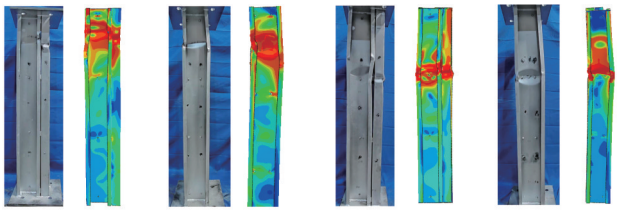



**图5 L形PEC柱有限元模型**

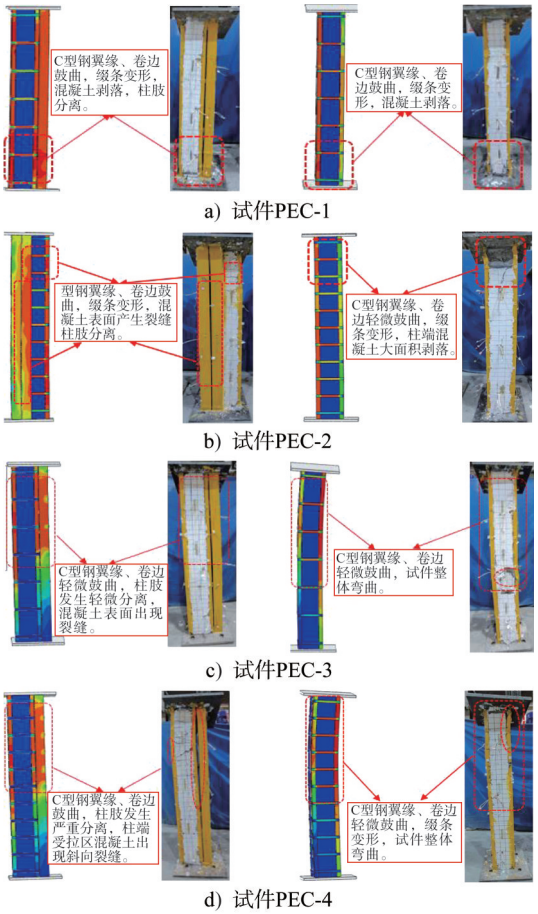
**Fig. 5 Finite element model of L-shaped PEC column**



a) 试件C1 b) 试件C2

**图6 L型钢柱破坏模式对比**

**Fig. 6 Comparison of failure modes of L-shaped steel columns**




a) 试件PEC-1

b) 试件PEC-2

c) 试件PEC-3

d) 试件PEC-4

**图7 L形PEC柱破坏模式对比**

**Fig. 7 Comparison of failure modes of L-shaped PEC columns**

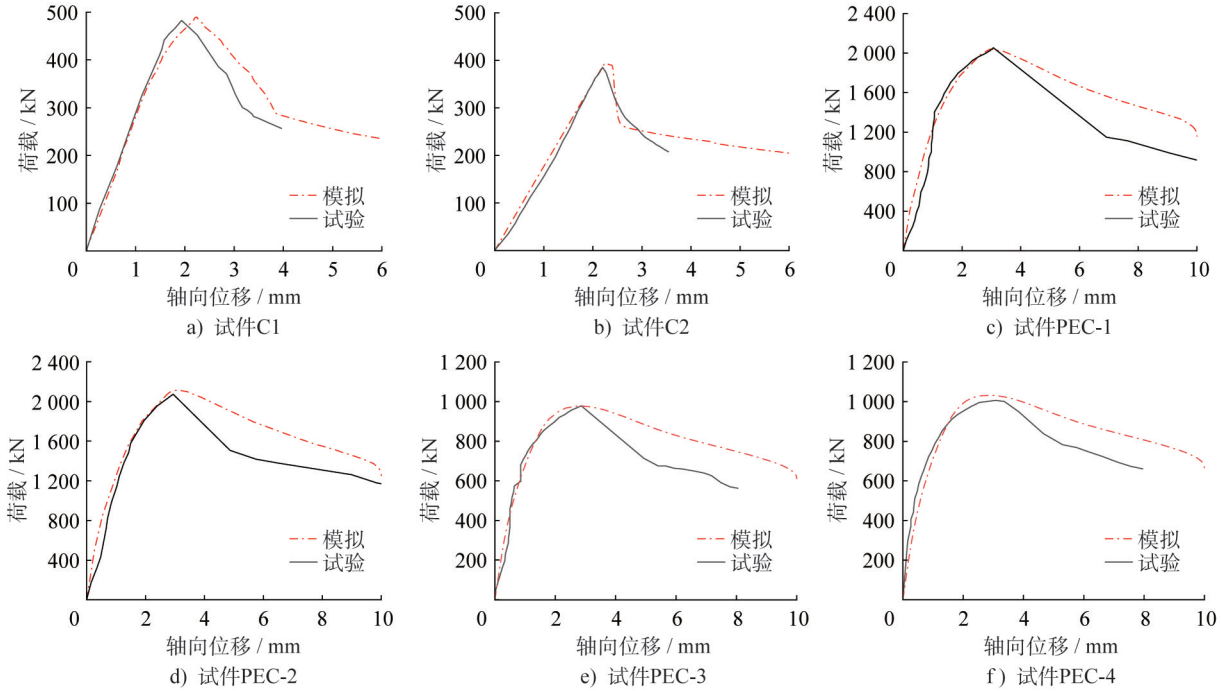



**图8　各试件荷载–轴向位移曲线**

**Fig. 8　Load-axial displacement curves of specimens**

**表2　试验结果与模拟结果对比**

**Table 2　Comparison between test results and simulated results**

| 试件编号 | 试验值 $N_u$/kN | 模拟值 $N_{FE}$/kN | $N_{FE}/N_u$ |
|---|---|---|---|
| C1 | 482.88 | 489.95 | 1.01 |
| C2 | 385.23 | 393.99 | 1.02 |
| PEC-1 | 1 962.50 | 2 053.13 | 1.05 |
| PEC-2 | 2 082.03 | 2 115.19 | 1.01 |
| PEC-3 | 978.13 | 980.37 | 1.00 |
| PEC-4 | 1 006.67 | 1 031.34 | 1.02 |
| 均值 | | | 1.02 |
| 标准差 | | | 0.016 |

**表3　试验结果**

**Table 3　Test results**

| 试件编号 | 屈曲荷载/kN | 极限荷载/kN | 初始刚度 $K$/(kN·m$^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| C1 | 209.06 | 482.88 | 140.07 |
| C2 | 102.20 | 385.23 | 120.23 |
| PEC-1 | 1 750.00 | 1 962.50 | 1 145.46 |
| PEC-2 | 1 592.19 | 2 082.03 | 1 174.50 |
| PEC-3 | 768.75 | 978.13 | 1 135.17 |
| PEC-4 | 812.01 | 1 006.67 | 1 173.25 |

1 174.50 kN·m$^{-1}$，以试件C1为基准，试件PEC-1的屈曲荷载由209.06 kN提高至1 750.00 kN，提升了737.08%；试件PEC-3和PEC-4虽然极限承载力低于试件PEC-1和PEC-2，但仍保持较高的初始刚度，表明不同构造形式对试件的受力性能具有显著影响。结合图6与图7可以发现，有限元模拟结果与试验结果吻合较好。试件C1和C2均表现为局部屈曲与畸变屈曲共同作用导致的整体失效；试件PEC-1和PEC-2以材料强度破坏为主，破坏集中于柱端区域；试件PEC-3和PEC-4则主要发生整体弯曲失稳。

## 2.2　荷载–轴向位移曲线

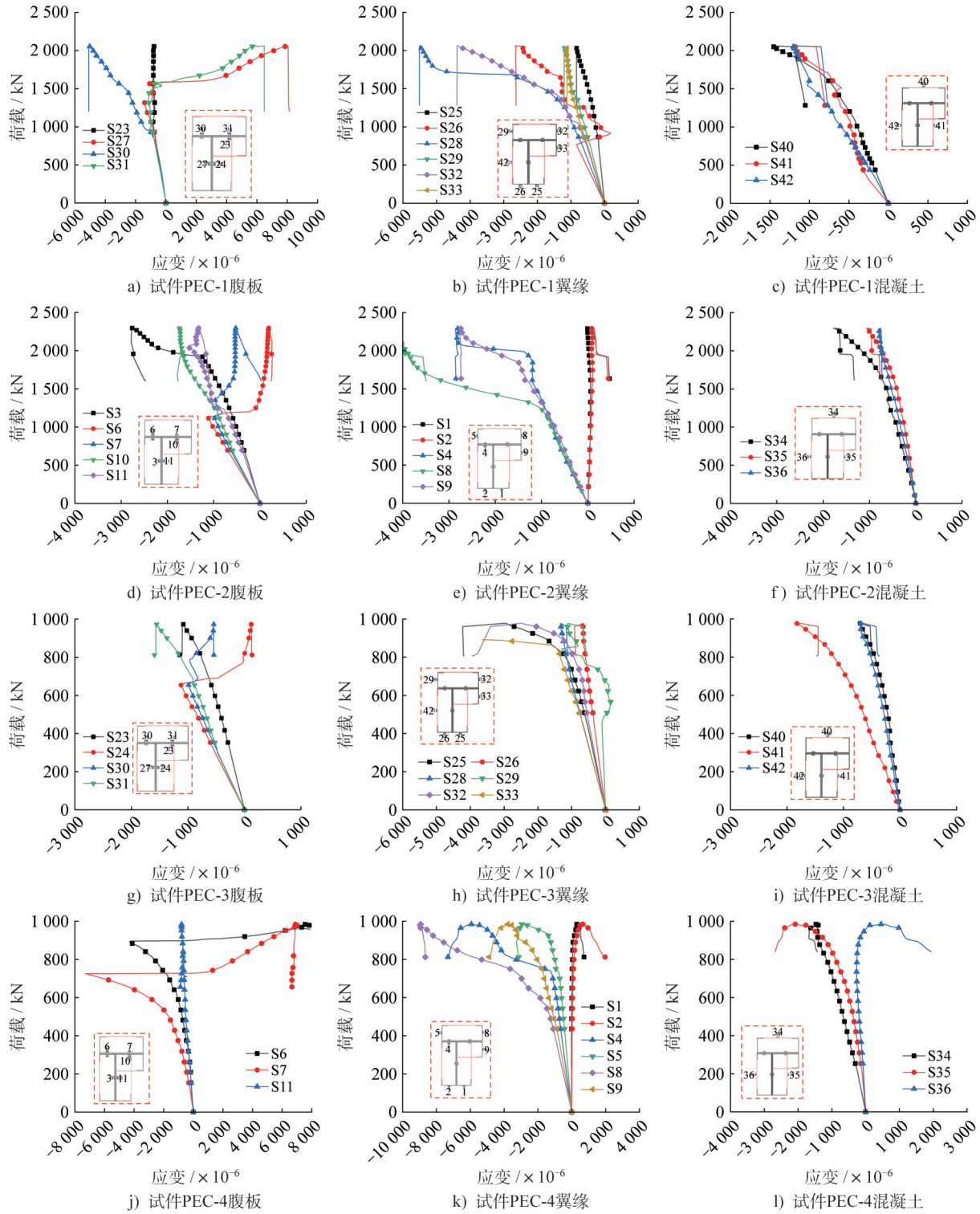
如图8所示，有限元模拟结果和试验结果的吻合度较高且所有试件的荷载-轴向位移曲线均可大致分为两个阶段：第一阶段为荷载上升阶段，在该阶段初期，试件处于弹性状态，荷载与位移近似呈线性关系。随着荷载增加，曲线上升速度变缓，斜率变小，表明试件开始出现变形，刚度下降。第二阶段为荷载达到峰值后下降阶段。此时曲线出现较大幅度下降，随后下降幅度变缓。

试件C2相较于试件C1，由于偏心距的存在，其极限承载力有明显下降，下降幅度高达20.22%。对比试件PEC-1和PEC-2，在曲线出现拐点后，试件PEC-2曲线的斜率更大，说明此阶段试件PEC-2的刚度大，抵抗变形的能力更强。在荷载下降阶段，试件PEC-2的承载力下降速率明显高于试件PEC-1的承载力下降速率，说明缀条间距的减小，能有效延缓试件的变形。对于偏压试件，改变缀条间距表现出同样的效果，说明缀条间距对L形PEC轴压试件和偏压试件极限承载力的提升均不明显，对轴压试件和偏压试件极限承载力的提升幅度分别为6.12%、2.93%。在相同缀条间距下，轴压和偏压L形PEC柱的荷载-轴向位移曲线在加载初期的弹性工作阶段基本重合，轴压试件的极限承载力远大于偏压试件的

极限承载力，试件PEC-3较PEC-1，试件PEC-4较PEC-2，极限承载力下降幅度分别为50.16%、51.65%，偏压试件的承载力下降速率更慢，说明偏心距能够延缓试件的变形。通过上述分析，填充轻骨料混凝土能明显提升L型钢柱的极限承载力和初始刚度，改变缀条间距和偏心距在一定程度上能够延缓试件变形。

## 2.3 荷载–应变曲线

L形PEC柱试件部分截面腹板、翼缘、混凝土荷载–应变曲线如图9所示。在加载初期，试件均处于弹性阶段，腹板的竖向应变相较翼缘处的竖向应变小、增长速率慢，说明此阶段腹板对试件承载力的贡献小于翼缘对试件承载力的贡献。




a) 试件PEC-1腹板　b) 试件PEC-1翼缘　c) 试件PEC-1混凝土

d) 试件PEC-2腹板　e) 试件PEC-2翼缘　f) 试件PEC-2混凝土

g) 试件PEC-3腹板　h) 试件PEC-3翼缘　i) 试件PEC-3混凝土

j) 试件PEC-4腹板　k) 试件PEC-4翼缘　l) 试件PEC-4混凝土

**图9　各试件荷载–应变曲线**

**Fig. 9　Load-strain curves of specimens**

对于试件PEC-1，当荷载达到912 kN左右时，腹板应变出现非线性变化，腹板开始出现屈曲变形；当荷载达到1 560 kN左右时，27号、31号测点的腹板应变开始朝正应变方向发展，说明该位置腹板出现受拉区，变形加剧，此时试件拼合处分离较严重，腹板对混凝土的约束作用减弱。由图9c)可知，到达峰值荷载以后，混凝土应变开始减小，型钢翼缘应变发展加快，说明型钢和缀条形成的轻钢骨架对混凝土具有一定约束作用。对于试件PEC-2，当荷载达到1 200 kN左右时，腹板、翼缘应变出现非线性增长，6号测点应变由压应变变为拉应变，说明此刻腹板位置出现明显屈曲变形，腹板对混凝土的约束开始减弱。由图9f)可知，混凝土应变在达到峰值荷载前均接近于线性增长，当达到峰值荷载附近时，腹板处混凝土最大压应变达到$1\,777\times10^{-6}$，此处混凝土严重脱落，之后腹板应变继续增加，由图9d)、e)可知，腹板、翼缘所产生的应变抑制了混凝土的膨胀、开裂，此时翼缘、卷边发生较为严重的鼓曲，轻骨料混凝土严重脱落。对于试件PEC-3，由图9i)可知，受拉区41号测点应变增长速度较快，说明混凝土对试件承载力的贡献在增加，当达到峰值荷载时，受拉侧混凝土最大压应变达到$1\,830\times10^{-6}$，说明此时混凝土已经退出工作，受压侧翼缘也全部达到屈服应变。对于试件PEC-4，当荷载达到550 kN左右时，各荷载-应变曲线开始非线性增长，当荷载达到720 kN左右时，7号测点应变出现拐点，由压应变变为拉应变，说明此处发生大变形，此时该处相邻柱肢开始分离。受拉侧混凝土提前达到屈服应变，腹板应变值较大，说明该处腹板向外鼓曲严重，相邻柱肢分离间隙增大。

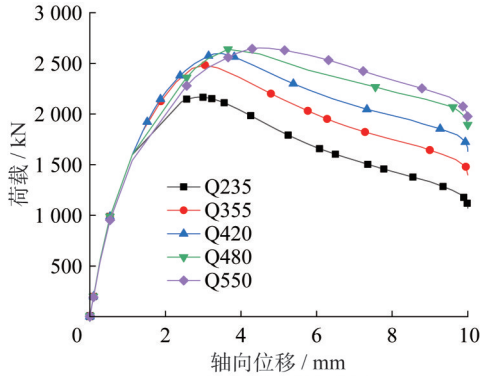
综上所述，填充轻骨料混凝土对抑制L型钢柱腹板的局部屈曲有明显效果，缀条间距对L形PEC柱翼缘的局部屈曲影响较大。

## 3　参数分析

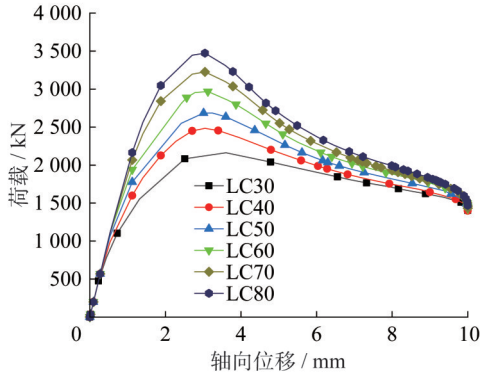
### 3.1　材料强度

为探究材料强度对L形PEC柱轴心受压性能的影响，建立了不同屈服强度的钢材和填充不同立方体抗压强度的轻骨料混凝土的L形PEC柱的有限元模型。

在轻骨料混凝土抗压强度相同和缀条间距相同的条件下，钢材强度等级分别取为Q235、Q355、Q420、Q480、Q550，不同钢材强度等级下模拟的荷载-轴向位移曲线如图10a)所示，随着钢材强度等级的提高，虽然构件承载力在不断提高，但提高幅度越来越小，钢材强度等级为Q355时承载力提升幅度最大，最大幅度可达到14.60%；在钢材强度相同和缀条间距相同的条件下，选取轻骨料混凝土强度等级为LC30、LC40、LC50、LC60、LC70、LC80，不同轻骨料混凝土强度等级下模拟的荷载-轴向位移曲线如图10b)所示，随着轻骨料混凝土强度的提高，构件初始刚度增加、极限承载力得到显著提升，轻骨料混凝土强度等级每提高一级，构件极限承载力与上一轻骨料混凝土强度等级下构件极限承载力相比分别增长了14.85%、8.18%、10.52%、8.7%、7.64%；在峰值荷载后，轻骨料混凝土强度越高，构件承载力下降得越快。



a)　钢材强度等级影响



b)　轻骨料混凝土强度等级影响

**图10　不同材料强度等级下构件荷载–位移曲线**

**Fig. 10　Load-displacement curves of members under different material strength levels**

### 3.2　缀条间距

为了分析缀条间距对L形PEC柱轴心受压性能的影响，建立了立方体抗压强度为40 MPa的轻骨料混凝土和Q355钢材的不同缀条间距的L形PEC轴压柱的有限元模型。缀条间距分别取为100 mm、150 mm、200 mm、250 mm、300 mm，不同缀条间距下模拟的荷载-位移曲线如图11所示，由图可知荷载-位移曲线变化趋势基本相同，在加载初期各曲线基本重合呈直线状，构件刚度较大，进入塑性以后曲线斜率变小，承载力变化趋势为上升到峰值后下降，短暂下降后曲线发展平缓，各构件峰值承载力无明显提升。随着缀条间距的增加，构件极限承载力总体呈下降趋势，但是降幅不明显，缀条间距每增加50 mm，构件极限承载力下降了0.31%、0.98%、0.18%、2.21%。这说明缀条的包裹对构件极限承载力影响有限，主要作用还是防止型钢过早出现屈曲失稳现象，对承载力的影响可以忽略不计。

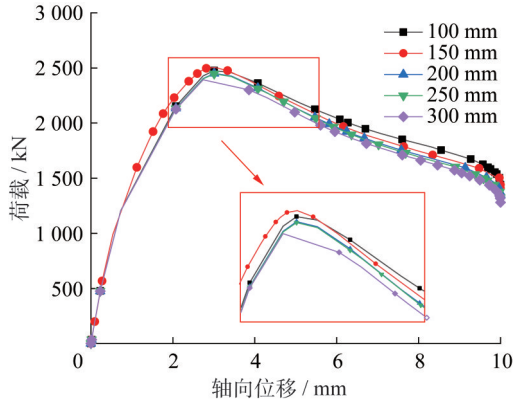



**图11 不同缀条间距下构件荷载–位移曲线**

**Fig. 11 Load-displacement curves of members under different stiffener spacings**

### 3.3 沿 $x$、$y$ 轴偏心距

为了分析沿 $x$、$y$ 轴不同偏心距对L形PEC柱偏心受压性能的影响，建立了立方体抗压强度为40 MPa的轻骨料混凝土和Q355钢材的不同偏心距的L形PEC偏压柱的有限元模型。沿 $x$、$y$ 轴偏心距分别取为−60 mm、−45 mm、−30 mm、−15 mm、15 mm、30 mm、45 mm、60 mm，沿 $x$、$y$ 轴不同偏心距下模拟的荷载-轴向位移曲线如图12a)、b)所示，在材料强度参数和缀条间距相同的情况下，随着偏心距的增大，构件的峰值荷载不断减小，但构件峰值荷载对应的位移不断增大。结合图12c)可知，沿 $x$ 轴正方向偏心距按15 mm的幅度增加时承载力降低幅度分别为22.97%、20.55%、18.15%；沿 $x$ 轴负方向偏心距按15 mm的幅度增加时承载力降低幅度分别为21.11%、21.29%、18.16%；沿 $y$ 轴正方向偏心距按15 mm的幅度增加时承载力降低幅度分别为14.83%、10.95%、13.11%；沿 $y$ 轴负方向偏心距按15 mm的幅度增加时承载力降低幅度分别为15.07%、14.33%、13.65%，沿强轴偏心加载的构件承载力降低幅度要大于沿弱轴偏心加载的构件承载力降低幅度，这是由于构件抗弯刚度不同造成的。

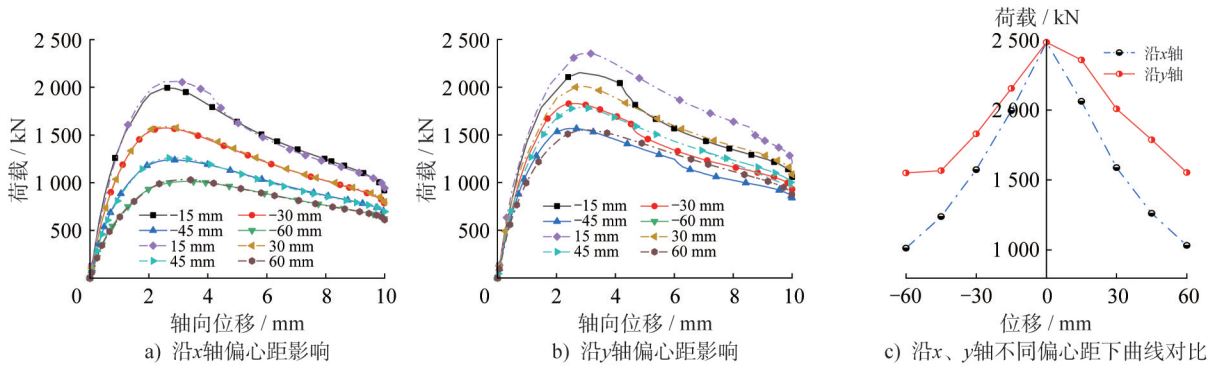



**图12 不同偏心距下构件荷载–位移曲线**

**Fig. 12 Load-displacement curves of members under different eccentricities**

## 4 结论

本文研究了冷弯薄壁型钢L形柱及冷弯薄壁型钢部分包裹轻骨料混凝土L形柱的受压性能，并开展了数值模拟研究，对影响L形PEC柱承载力的因素进行参数分析。得到如下结论：

(1) 在L型钢柱内部填充轻骨料混凝土，型钢与轻骨料混凝土相互作用，提高了构件承载力，抑制了型钢的屈曲变形。L形PEC轴压柱的承载力、初始刚度比L型钢柱的承载力、初始刚度分别提高了331.17%、738.47%。

(2) 缀条间距对L形PEC柱在轴心、偏心荷载下的初始刚度和极限承载力影响不明显，但能一定程度上延缓试件的变形，偏心距的存在使试件由强度破坏变为弯曲破坏。

(3) 建立合理的有限元计算模型，模拟的破坏形式及荷载-位移曲线与试验结果吻合较好，验证了数值模拟的可靠性。

(4) 有限元分析结果表明：L形PEC柱的极限承载力随钢材强度和轻骨料混凝土强度的提高而提高；缀条间距主要防止型钢过早出现局部屈曲变形，对极限承载力的影响有限；偏心距对L形PEC柱的承载力影响较大，随着偏心距增加，极限承载力下降明显。

## 参考文献：

[1] 李元齐，徐厚军. 我国冷弯型钢结构发展现状及展望[J]. 建筑结构，2019，49(19)：91-101. DOI:10.19701/j.jzjg.2019.19.011.
LI Yuanqi, XU Houjun. Research and development of cold-formed steel structures in China [J]. Building Structure, 2019, 49(19): 91-101. DOI: 10.19701/j.jzjg.2019.19.011. (in Chinese)

[2] 吕晶，姚少楠，赵欢，等. 新型内填材料在钢管混凝土结构

中的应用研究综述[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(2): 54-68. DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.02.006.
LYU Jing, YAO Shaonan, ZHAO Huan, et al. Research progress on application of new filling materials in concrete-filled steel tube structures [J]. Journal of Chang' an University (Natural Science Edition), 2023, 43(2): 54-68. DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.02.006.(in Chinese)

[3] 赵根田, 张宇鸣, 曹芙波, 等. 焊接H形钢部分包裹高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(4): 116-122. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.04.012.
ZHAO Gentian, ZHANG Yuming, CAO Fubo, et al. Experimental study on seismic performance of welded H-section steel partially encased columns with high strength concrete[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(4): 116-122. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.04.012.(in Chinese)

[4] SONG Y C, WANG R P, LI J. Local and post-local buckling behavior of welded steel shapes in partially encased composite columns[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 108: 93-108. DOI:10.1016/j.tws.2016.08.003.

[5] 林德慧, 陈以一. 部分填充钢-混凝土组合柱整体稳定分析[J]. 工程力学, 2019, 36(增刊1): 71-77, 85. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2018.05.S010.
LIN Dehui, CHEN Yiyi. Overall stability analysis of partially encased composite columns [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(Suppl.1): 71-77, 85. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2018.05.S010.(in Chinese)

[6] PEREIRA M F, BECK A T, EL DEBS A L H C. Reliability of partially encased steel-concrete composite columns under eccentric loading[J]. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2017, 10(2): 298-316. DOI: 10.1590/s1983-41952017000200003.

[7] BEGUM M, DRIVER R G, ELWI A E. Behaviour of partially encased composite columns with high strength concrete[J]. Engineering Structures, 2013, 56: 1718-1727. DOI:10.1016/j.engstruct.2013.07.040.

[8] EBADI JAMKHANEH M, ALI KAFI M. Experimental and numerical investigation of octagonal partially encased composite columns subject to axial and torsion moment loading[J]. Civil Engineering Journal, 2017, 3(10): 939-955. DOI:10.28991/cej-030927.

[9] 王静峰, 陶书庆, 刘用, 等. 十字形部分包覆钢-混凝土组合柱轴压性能数值分析与承载力计算方法[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(3): 65-74. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.03.007.
WANG Jingfeng, TAO Shuqing, LIU Yong, et al. Numerical analysis and calculation methods on the axial compression behavior of cross-shaped partially encased concrete composite columns[J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(3): 65-74. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.03.007.(in Chinese)

[10] 李补拴, 周伟, 赵根田, 等. 部分包覆钢-混凝土十字形和T形截面组合柱抗震性能及轴压比限值分析[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(8): 99-109. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2022.0321.
LI Bushuan, ZHOU Wei, ZHAO Gentian, et al. Seismic performance and limit values of axial ratio for partially encased composite steel-concrete cross-shaped and T-shaped section columns[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(8): 99-109. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2022.0321. (in Chinese)

[11] GB/T 50152—2012 混凝土结构试验方法标准[S].
GB/T 50152—2012 Standard for test method of concrete structures[S].(in Chinese)

[12] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S].
GB/T 228.1—2021 Metallic materials—Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature[S].(in Chinese)

[13] ABDEL-RAHMAN N, SIVAKUMARAN K S. Material properties models for analysis of cold-formed steel members [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(9): 1135-1143. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9445(1997)123: 9(1135).

[14] LIM J C, OZBAKKALOGLU T. Stress-strain model for normal and light-weight concretes under uniaxial and triaxial compression[J]. Construction and Building Materials, 2014, 71: 492-509. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.08.050.