

GFRP管 - 钢管混凝土纯弯构件的滞回性能研究

王梓任, 张海霞, 王思晴

沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳

Email: 870151116@qq.com, iriszhx@163.com, 273113909@qq.com

收稿日期: 2020年11月8日; 录用日期: 2020年11月23日; 发布日期: 2020年11月30日

摘要

本文以9根GFRP管 - 钢管混凝土组合构件为研究对象, 考虑混凝土强度、GFRP管厚度、钢管型号和加载方向, 对GFRP管 - 钢管混凝土纯弯构件的滞回性能进行试验研究, 分析其破坏形态、滞回曲线和骨架曲线特征, 研究组合构件在低周往复荷载作用下的刚度退化、强度退化和耗能等抗震性能指标; 建立组合构件滞回模型, 在验证模型正确性的基础上, 对其滞回工作机理进行分析。试验结果表明, GFRP管、钢管、混凝土三者协同工作, 且GFRP管和混凝土表现出良好的粘结性能, 可以有效地传递应力; 构件的受力过程可分为弹性阶段、弹塑性阶段和强化阶段; 构件承载力随型钢型号的增加而增大, 型钢型号较小的构件其刚度退化较为明显; 强轴加载构件初始刚度较大, 刚度退化较快; 构件承载力随混凝土强度的增加而增大, 且混凝土强度较高的构件刚度退化较快; 构件承载力和刚度随GFRP管厚度的增加而增大, 且GFRP管厚度较大的构件其刚度退化较快。

关键词

GFRP管, 钢管混凝土, 纯弯构件, 滞回曲线, 骨架曲线

Study on Hysteretic Behavior of Steel-Encased Concrete Filled GFRP Tubes Pure Bending Members

Ziren Wang, Haixia Zhang, Siqing Wang

School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang Liaoning

Email: 870151116@qq.com, iriszhx@163.com, 273113909@qq.com

Received: Nov. 8th, 2020; accepted: Nov. 23rd, 2020; published: Nov. 30th, 2020

Abstract

In this paper, 9 steel-encased concrete filled GFRP tubes composite members are used as the re-

search object and the hysteretic performance of pure bending members is tested. The test variables are concrete strength, thickness of GFRP tubes, I-steel type and loading direction. The failure mode, hysteresis curve and skeleton curve of pure bending members are studied, and Seismic performance indexes such as stiffness degradation and strength degradation of the composite member under low-cycle load are analyzed. The simulated mode of pure bending member is established. The working mechanism of composite member is analyzed. The test results show that GFRP tubes, I-steel and concrete work together. It shows good bonding properties between GFRP tubes and concrete, which can effectively transfer stress. When strong axial of the pure bending member is loaded, the hysteresis curve of the member shows a relatively full spindle shape. When the weak axis of the pure bending member is loaded, the hysteresis curve of the component is not full and the pinch is obvious. The force process of the member can be divided into the elastic phase, the elastoplastic phase and the strengthening phase. The bearing capacity of the component increases with I-steel type. The stiffness degradation of the components is more obvious; the initial stiffness of the components loaded with strong axis is larger, and the stiffness degrades quickly; the bearing capacity of the components increases with the increase of the concrete strength, and the stiffness of the components with higher concrete strength degrades faster; the bearing capacity and the stiffness of the components increase with the thickness of the GFRP tubes, and the stiffness of the component with a larger GFRP pipe degrades faster.

Keywords

GFRP Tubes, Steel-Encased Concrete, Pure Bending Member, Hysteresis Curve, Skeleton Curve

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

GFRP 管 - 钢筋混凝土组合构件由 GFRP 管、钢筋以及核心混凝土三部分组成, 是将钢筋置于构件中部, 以 GFRP 管为模板在管内浇筑混凝土的一种组合构件。GFRP 管对混凝土产生约束作用使得混凝土处于三向受力状态, 有效地提高了构件整体的强度及塑性性能; 钢筋对于构件的延性性能有所提高; 由于 GFRP 管壁较薄, 存在局部稳定性不好的问题, GFRP 管中填充混凝土后, 提高了组合结构的局部稳定性并防止构件局部屈曲的发生; 以 GFRP 管为模板可以有效地节省模板费用, 提高施工速度; GFRP 管外包使构件具有良好的耐腐蚀性能; 同时由于 GFRP 管约束混凝土的横向膨胀以及钢筋的存在可以有效地提高构件的承载力和抗震性能。目前国内外学者对于 GFRP 管约束混凝土组合构件进行了轴心受压性能研究[1] [2] [3] [4]、偏心受压性能研究[5] [6] [7] [8] [9]和抗震性能研究[10] [11] [12] [13] [14]。但对于 GFRP 管 - 钢筋混凝土纯弯构件滞回性能的研究较少。本文以 GFRP 管 - 钢筋混凝土纯弯构件为研究对象, 进行了 9 根 GFRP 管 - 钢筋混凝土纯弯构件的滞回性能试验, 通过试验得出组合构件的破坏形态、滞回曲线以及骨架曲线, 进而对构件的刚度退化、强度退化等受力性能进行比较分析, 并进行 GFRP 管 - 钢筋混凝土纯弯构件的滞回性能数值模拟, 对构件的工作机理进行深入的研究。

2. 试验概况

2.1. 试件设计

本试验共设计了 9 个 GFRP 管 - 钢筋混凝土试件, 试件编号分别为 ZL1~ZL9。本次试验的主要参数

为：GFRP 管厚度、钢管型号、混凝土强度和加载方向，试件设计长度为 2000 mm，各试件工字钢具体参数见表 1 所列。试件混凝土设计强度为 C30 和 C50，试验共制作了 12 个标准混凝土试块，与试件在相同条件下进行养护，之后测得了混凝土立方体试块的抗压强度平均值分别为 44.1 MPa 和 56.2 MPa。钢管采用型号为 10#和 12#的工字钢，强度等级均为 Q235B，横截面积分别为 14.33 cm² 和 17.8 cm²，实测屈服强度分别为 290.2 MPa 和 344.6 MPa。GFRP 管的纤维缠绕角度为 80°，其力学参数由生产厂家提供，GFRP 管轴向和环向抗拉强度分别为 147 MPa 和 340 MPa，轴向弹性模量和环向弹性模量分别为 9.21 GPa 和 13.42 GPa。

Table 1. Experimental Parameters

表 1. 试件具体参数

试件编号	试件尺寸 $D \times L$ (mm)	GFRP 管壁厚 t (mm)	钢管型号	混凝土强度	加载方向
ZL1	210 × 2000	3	I10	C30	强轴
ZL2	210 × 2000	3	I10	C30	强轴
ZL3	210 × 2000	5	I10	C30	强轴
ZL4	210 × 2000	5	I10	C30	强轴
ZL5	210 × 2000	5	I10	C30	弱轴
ZL6	210 × 2000	5	I10	C50	强轴
ZL7	210 × 2000	5	I10	C50	弱轴
ZL8	210 × 2000	5	I12	C30	强轴
ZL9	210 × 2000	5	I12	C30	弱轴

注：D 为试件截面直径，L 为试件有效计算长度。

2.2. 量测内容及应变片布置

试件共设置 5 个位移计，其中 3 个位移计用来测量试件的侧向位移，分别布设在试件 $L/3$ 、 $L/2$ 以及 $2L/3$ 处，另外 2 个布设在支座处，用来测量支座处位移。在 GFRP 管外粘贴应变片，以测得受力过程中 GFRP 管纵向和环向应变的变化情况。位移计与应变片的布置情况如图 1 所示，图 1(b) 中点 1、2、3、4 位置处为测点。

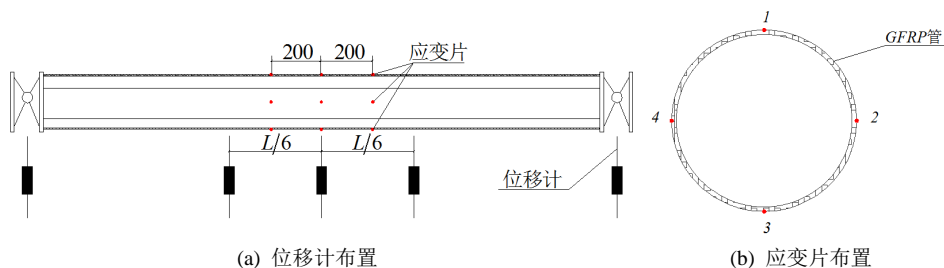


Figure 1. Strain gauges distribution of specimens

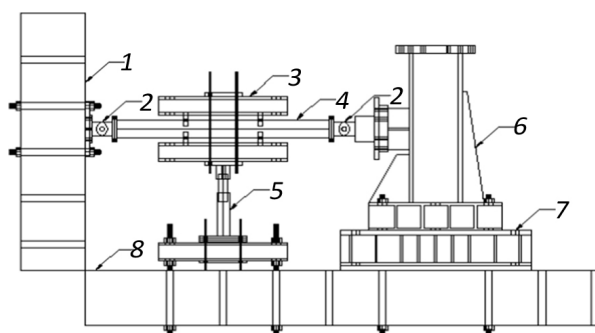
图 1. 试件测点布置情况

2.3. 加载方法

参照《建筑抗震试验方法规程》(JGJ/T101-2015)，本试验加载制度采用荷载 - 位移双控制。正式试验开始前，应先进行预加荷载试验。屈服前采用荷载控制，分级加载，每级加载 5 kN，接近屈服前减小

极差进行加载, 每级荷载循环 1 次。屈服后, 以屈服位移的整倍数($\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3 \dots$)为级差进行加载, 每级荷载循环 3 次, 直至 Δ_5 ; 之后每级荷载循环 2 次。当荷载下降到极限荷载的 80% 或接近千斤顶的最大允许位移时, 停止加载。

试件水平放置, 两端通过平板铰连接, 一端通过背板与反力墙使用锚杆连接, 另一端与反力墩通过高强螺栓相连。往复荷载由位于跨中位置的竖向 100 t 千斤顶施加, 千斤顶与夹具通过一单向铰连接, 夹具在左右等距处分别焊接分配套铰, 从而实现纯弯加载。由于本实验加载装置复杂、机构较多, 加载过程中为了避免试验过程中千斤顶与试件轴线不在同一平面上而失稳, 设计了一对侧向支撑装置, 该装置是由工字钢焊接组成的三角形支架。侧向支撑作用于刚性夹具上, 下部与地锚刚性连接, 以此保证加载过程中试件在平面内的移动, 并限制试件发生侧向位移, 本试验的试验装置如图 2 所示。



1.反力墙; 2.平板铰; 3.夹具; 4.构件;
5.100t千斤顶; 6.支座; 7.钢梁; 8.地面

(a) 试验装置示意图



(b) 试验装置实图

Figure 2. Test setup

图 2. 试验加载装置

3. 试验结果与分析

3.1. 受力过程与破坏形态

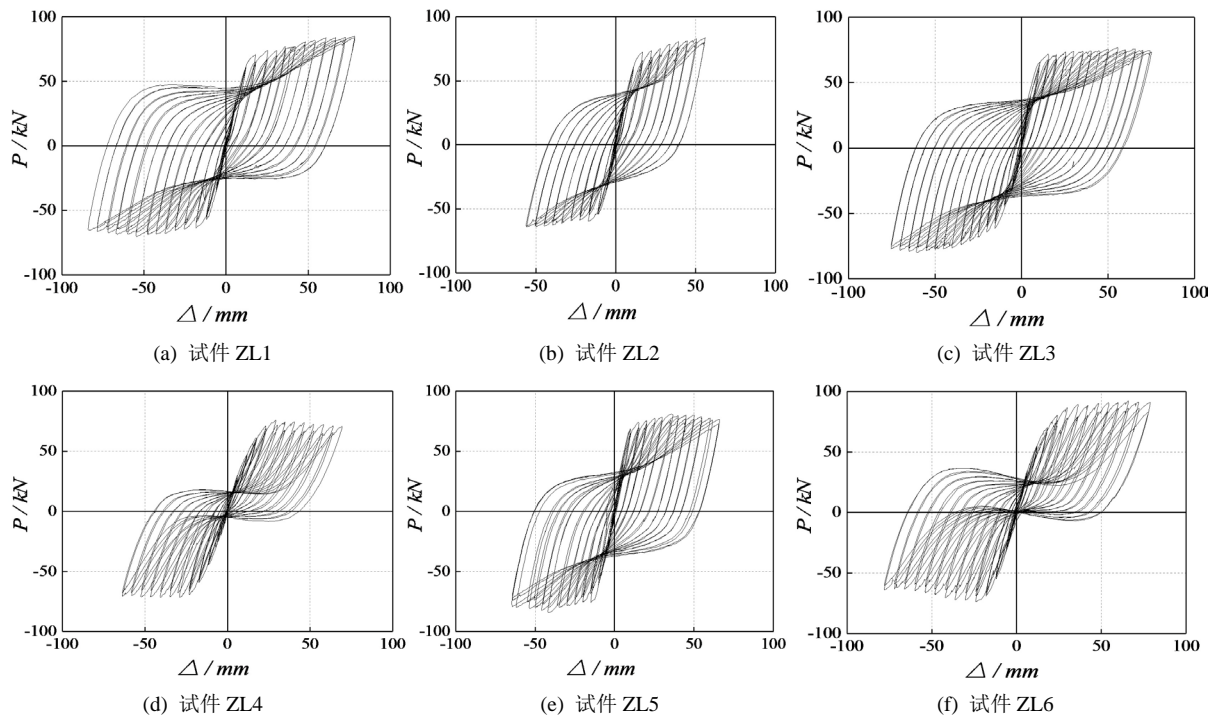
本文以试件 ZL2-2 为例阐述其受力过程和破坏模式。在试件达到屈服之前, 试件表面无明显变化。当荷载超过屈服荷载后, 位移加载在 $\Delta_1 \sim \Delta_2$ 阶段时, 有 GFRP 管纤维轻微的撕裂声, 但 GFRP 管外观无变化。随着位移的逐渐增大, 在位移为 Δ_3 时, 纯弯段 GFRP 管表面出现纤维拉断现象, 刚性夹具与试件连接处受拉一侧的 GFRP 管开始产生微小裂缝, 纤维拉断声逐渐增多、增大, 且声音间隔越来越短。在位移为 Δ_4 时, 纯弯段变形开始加大, 夹具处裂缝逐渐发展, 透过裂缝可见管内混凝土。在位移为 Δ_5 、 Δ_6 时, 伴随着纤维进一步地撕裂, 可听见内部混凝土开裂声音, 试件变形迅速增加, 接近此级的峰值时变形增加缓慢, 卸载时变形快速减小。在位移为 Δ_7 、 Δ_8 时, GFRP 管裂缝在环向方向贯通, 裂缝处有混凝土碎渣掉落, 千斤顶达到最大允许位移时, 停止加载。为了观察 GFRP 管内混凝土和钢骨的破坏形态, 将试件加载点之间的区段剖开, 将部分 GFRP 管移除, 混凝土和钢骨破坏形态如图 3 所示。从图中可以看出, 纯弯段混凝土出现多条沿环向开展的裂缝, 但并没有出现压碎现象, 这是因为 GFRP 管的环向约束作用使混凝土处于三向受力状态, 其强度和延性均有所提高。观察移除部分 GFRP 管的内部破坏形态, 发现其与混凝土裂缝对应的位置同样出现多条白色纤维裂缝, 可知二者表现出良好的粘结性能, 可以有有效的传递界面的法向力和切向力。纯弯段内的钢骨没有出现屈曲, 这说明混凝土的存在有效地防止了钢骨的屈曲。



Figure 3. Failure of specimen
图 3. 试件破坏情况

3.2. 荷载 - 位移滞回曲线

图 4 为试件的荷载 - 位移滞回曲线。从图 4 中可以看出，试件的滞回曲线形状主要分为两类。第一类为加载方向为钢筋强轴方向的试件，其滞回曲线都较为饱满，呈纺锤形，没有明显的捏缩现象，同级荷载下两次循环的卸载阶段滞回环基本重合，加载阶段的刚度与承载力有下降趋势。在加载初期，由于竖向荷载较小，试件基本上处在弹性阶段，滞回曲线接近于线性变化，说明 GFRP 管、混凝土和钢筋三者单独工作；试件屈服之后，GFRP 管、混凝土和钢筋共同工作，随着竖向位移的不断增加，试件残余变形越来越大，加载刚度逐渐降低。但是试件的承载力并没有明显的下降。加载后期，试件的强度、延性和耗能性能主要由钢筋提供。第二类为加载方向为钢筋弱轴方向的试件，其滞回曲线不饱满，存在明显的捏缩和滑移现象。试件屈服之后第 3 级加载循环开始，曲线的捏缩现象逐渐明显，受力方向的钢筋与混凝土之间存在较大滑移，且滑移量随着荷载的增加而增大，曲线最后发展成典型的反 S 型滞回曲线。该类试件的延性性能和耗能能力较差。



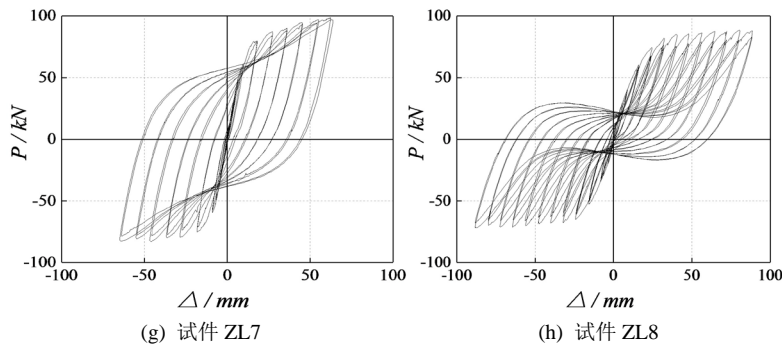


Figure 4. Load-deformation of specimens

图 4. 试件荷载 - 位移曲线

3.3. 荷载 - 位移骨架曲线

图 5 为各试件荷载 - 位移骨架曲线。从图中可以看出，各试件从加载初期至最终破坏均未出现明显的承载力下降现象。图 5(a) 为其他参数相同，钢骨型号不同时试件的荷载 - 位移骨架对比曲线。从图 5(a) 中可以看出，在弹性阶段，试件刚度相同；试件屈服之后，钢骨型号较大的试件 ZL4-1 的刚度更大；钢

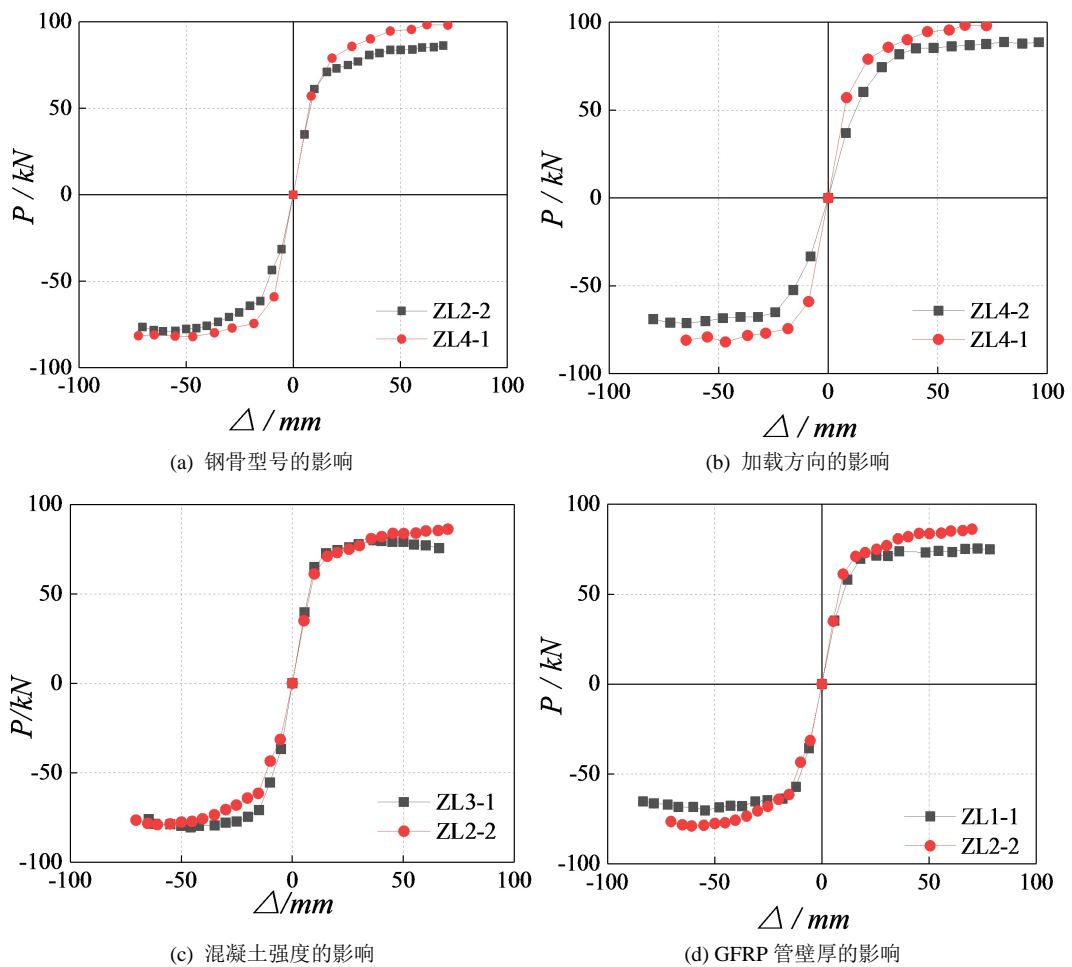


Figure 5. The skeleton curve of load-displacement

图 5. 试件荷载 - 位移骨架曲线

骨型号对试件的峰值荷载有较大影响，试件 ZL4-1 正方向承载力比试件 ZL2-2 提高了 14.1%，负方向承载力提高了 4.9%。图 5(b)为其他参数相同，加载方向不同时试件的荷载 - 位移骨架对比曲线。对比结果表明，加载方向为强轴的试件 ZL4-1 其刚度较试件 ZL4-2 大，试件 ZL4-1 的正方向屈服荷载和峰值荷载较试件 ZL4-2 分别提高了 54.7%和 77.2%，负方向分别提高了 10.7%和 17.4%。图 5(c)为其他参数相同，混凝土强度不同时试件的荷载 - 位移骨架对比曲线。由图 5(c)可见，混凝土强度的改变对试件后期刚度和峰值荷载有一定的影响；混凝土强度为 C50 的试件破坏阶段曲线无下降段，而混凝土为 C30 的试件达到峰值后，曲线下降。图 5(d)为其他参数相同，GFRP 管壁厚不同时试件的荷载 - 位移骨架对比曲线。由图 5(d)看出，GFRP 管壁厚对试件弹性刚度基本无影响；试件屈服后刚度随壁厚的增大而增大。管壁较厚的试件 ZL2-2 峰值荷载比管壁较薄的试件 ZL1-1，正方向和负方向峰值荷载分别提高了 14.3%和 11.4%，说明在一定范围内 GFRP 管壁厚越大，试件承载力越高。

3.4. 刚度退化曲线

本文采用每级加载过程中，第一次循环所对应的平均割线刚度来表示试件的刚度退化特性，平均割线刚度计算公式为

$$K_i = \frac{\sum_{j=1}^n F_{ij}}{\sum_{j=1}^n \Delta_{ij}} \tag{1}$$

式中： K_i ——第 i 级加载循环时试件的平均割线刚度； F_{ij} ——第 i 级加载循环时第 j 次循环所对应的峰值荷载； Δ_{ij} ——第 i 级加载循环时第 j 次循环所对应的峰点位移； n ——循环次数。

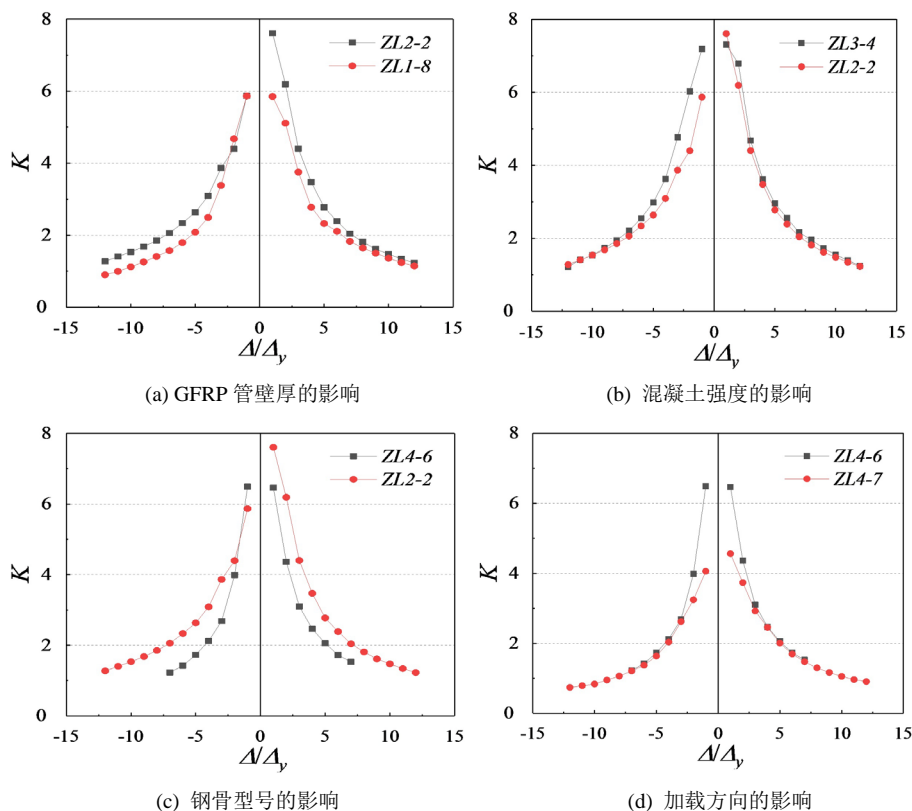


Figure 6. The contrast figure of stiffness degradation curve
图 6. 试件刚度退化曲线对比图

图 6 为试件的刚度退化曲线。从图中可以看出, 各试件的割线刚度随位移的增加而逐渐降低, 体现出刚度退化的现象。各试件在 Δ_3 、 Δ_4 加载阶段之前刚度急剧退化, 之后退化趋于平缓。图 6(a) 为其他参数相同, GFRP 管壁厚不同时试件刚度退化曲线对比, 由图 6(a) 可见, 试件刚度随 GFRP 管厚度的增加而增加, 管壁厚的试件其刚度退化更快。图 6(b) 为混凝土强度不同时试件刚度对比, 由图 6(b) 可以看出, 试件的刚度随混凝土强度的增加而增大, 混凝土强度较高的试件其刚度退化更快。图 6(c) 为不同型号钢骨的试件刚度对比, 钢骨型号较小的试件其刚度较大, 且刚度退化较快。图 6(d) 为加载方向不同的试件刚度对比, 加载方向为强轴方向的试件其初始刚度较大, 但初期刚度退化更快。在第 4 级加载之后不同加载条件的试件刚度退化曲线基本重合。

3.5. 强度退化曲线

为了反映每次循环时试件强度的变化, 本文采用同级荷载强度退化系数 λ_{ij} 表示, λ_{ij} 由公式(2)计算,

$$\lambda_{ij} = \frac{F_i^j}{F_i^1} \quad (2)$$

式中: λ_{ij} ——第 i 级加载循环时第 j 次循环的同级荷载退化系数; F_i^j ——第 i 级加载循环时第 j 次循环所对应的峰值点荷载值; F_i^1 ——第 i 级加载循环时第 1 次循环所对应的峰值点荷载值。

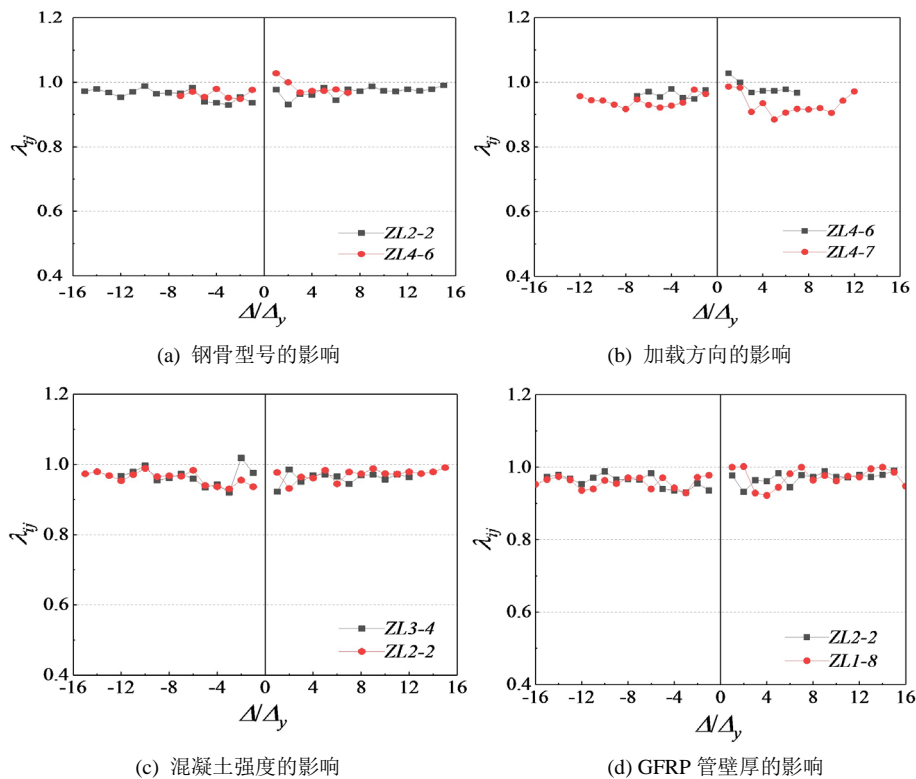


Figure 7. The contrast figure of strength degradation curve

图 7. 试件同级强度退化曲线对比图

图 7 所示为不同参数情况下试件的同级强度退化情况, 其中 $j = 2$ 。图 7(a) 为钢骨型号不同的情况, 图 7(b) 为加载方向不同的情况, 图 7(c) 为混凝土强度不同的情况, 图 7(d) 为 GFRP 管壁厚不同的情况。从图 7(b) 可知, 加载方向不同对试件同级强度退化的影响较大。采用弱轴方向加载的试件其同级强度退

化更加明显。从图 7(a)、图 7(c)和图 7(d)可以看出, 试件的同级强度退化均不明显, 原因是 GFRP 管对核心混凝土的保护作用防止了混凝土的压溃剥落, 且内部配置钢筋, 三者协同作用, 从而同级强度退化不明显; 钢筋型号、混凝土强度和 GFRP 管厚度的改变对同级强度退化的影响均不大。

4. 有限元模拟分析

4.1. 有限元模型的建立

本文利用 ABAQUS 有限元软件建立 GFRP 管 - 钢筋混凝土纯弯构件有限元模型。混凝土受压本构关系采用吴刚等[15]提出的 FRP 约束无软化段混凝土三折线模型。混凝土受拉本构采用 ABAQUS 中的断裂能 GFI 模型。钢材采用标准双折线模型。GFRP 管采用单层板理论进行模拟, 并采用 Hashin 损伤模型来模拟其断裂破坏。

钢筋和 GFRP 管均采用四节点减缩积分格式的各向同性壳单元(S4R), GFRP 管厚度方向采用 3 个积分点的 Simpson 积分。混凝土采用八节点六面体减缩积分单元(C3D8R)。GFRP 管与核心混凝土接触时, 法线方向采用硬接触, 切线方向采用库伦摩擦模型。采用 Embedded region 命令将钢筋嵌入到核心混凝土中。核心混凝土与两侧端板采用 tie 连接; GFRP 管与两侧端板之间采用 shell to solid coupling 接触。根据试验实际情况对 GFRP 管 - 钢筋混凝土纯弯构件设置边界条件。

4.2. 有限元模型的验证

为了验证有限元模拟结果的正确性, 将有限元计算结果与试验结果进行比较。图 8 为与试件 ZL3-1 的骨架曲线和滞回曲线对比情况。从图 8 中可以看出, 有限元模拟的结果与试验结果吻合良好。

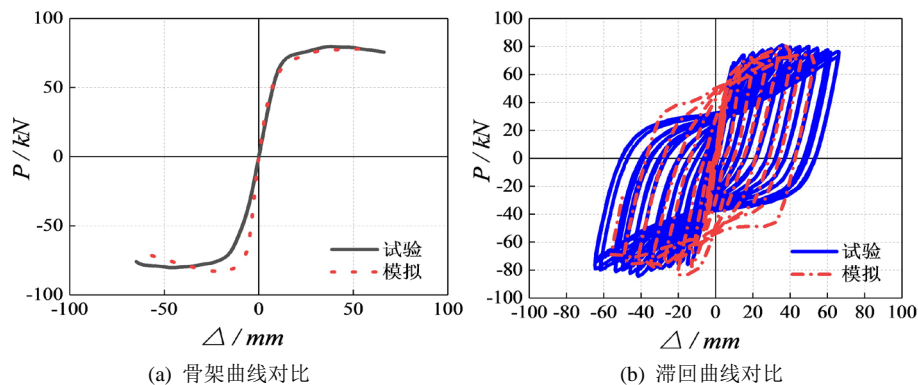


Figure 8. Comparison of experimental and simulated results

图 8. 试验结果与数值模拟结果对比

4.3. 工作机理分析

本文采用试件 ZL2-2 的相关参数建立典型模型进行有限元模拟分析, 并将模拟得到的骨架曲线第一象限定义为 GFRP 管 - 钢筋混凝土纯弯构件的典型荷载 - 位移曲线, 图 9 为纯弯构件的典型荷载 - 位移骨架曲线, 由图 9 可知, 构件的受力过程可以分为弹性、弹塑性和强化阶段。

OA 段为构件的弹性阶段, 在加载初期, 混凝土和钢筋均处于弹性阶段, 荷载 - 位移曲线基本呈线性关系。混凝土泊松比小于 GFRP 管, GFRP 管对混凝土约束作用较小; 随着往复荷载的增加, 混凝土泊松比逐渐增大, 当接近 A 点时, 混凝土泊松比超过 GFRP 管泊松比, GFRP 管开始对混凝土产生约束作用。AB 段为构件的弹塑性阶段, 与弹性阶段相比, 构件荷载 - 位移曲线的斜率开始减小, 并且构件刚度

降低。A 点以后，混凝土受拉侧损伤面积增大，受压侧混凝土应力进一步增大。由于 GFRP 管的约束作用，混凝土在受压区的应力值大于混凝土的单轴抗压强度。随着往复荷载的增加，GFRP 管对混凝土的环向约束作用增大，GFRP 管、核心混凝土以及钢筋三种材料均发生应力重分布，构件处于弹塑性阶段。BC 段为构件的强化阶段。峰值荷载 B 点之后，构件的荷载仍在增加，但增长速率明显慢于位移的增长速率。在此过程中，GFRP 管纤维从外部向内部逐渐断裂，约束效应开始降低，但由于钢筋的存在，构件表现出良好的延性性能。

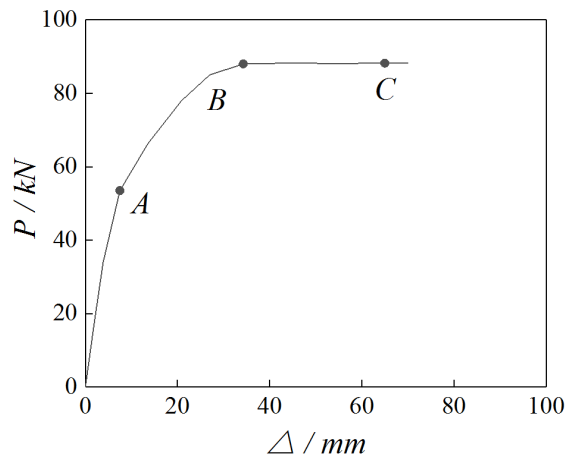


Figure 9. Typical load-midspan deflection curves
图 9. 典型荷载 - 位移骨架曲线

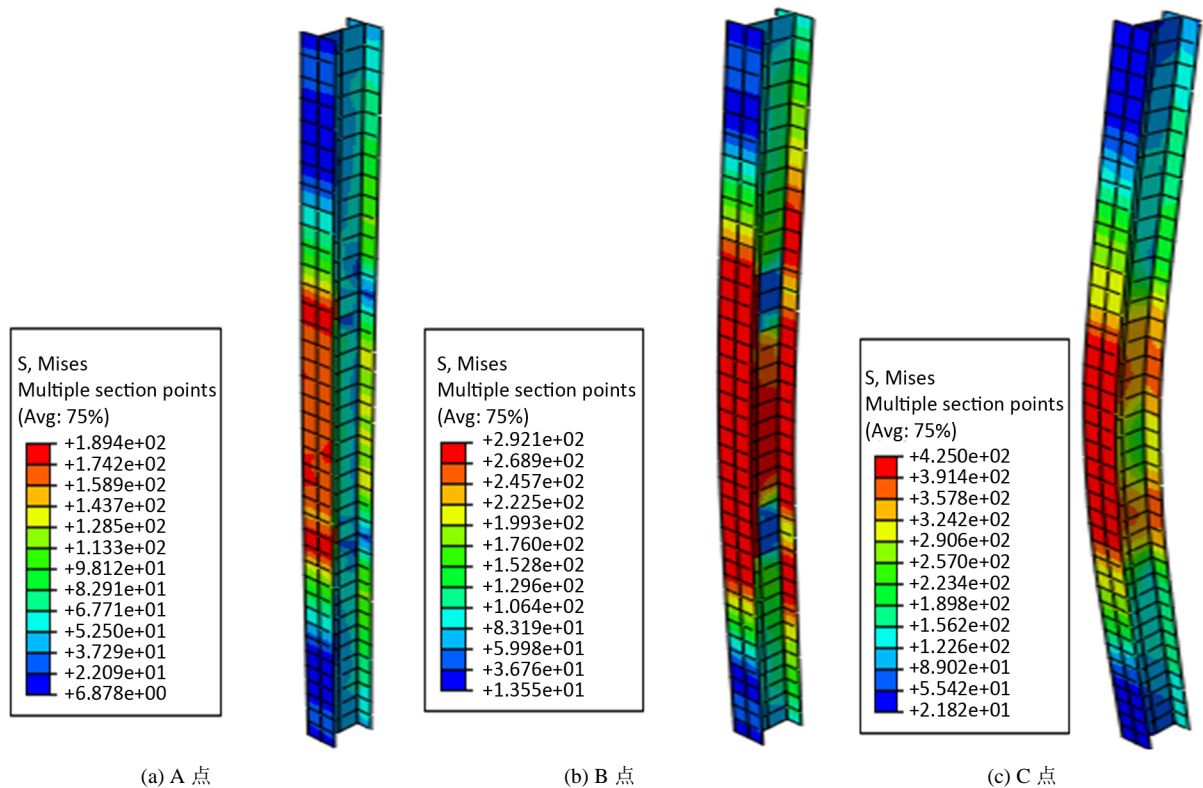


Figure 10. Steel Mises stress distribution
图 10. 工字钢钢筋 Mises 应力分布图

图 10 为典型构件的钢筋 Misses 应力分布，分别对应图 9 中的 A、B、C 三个特征点。从图 10 中可以看出，在循环加载过程中，钢筋受拉区的翼缘首先达到 Misses 屈服强度，然后屈服区逐渐延伸到腹板，最后纯弯段的钢筋全部屈服并进入强化阶段。在 A 点时，钢筋尚未屈服；B 点时，纯弯段处钢筋已经全部进入屈服阶段，证明在弹塑性阶段钢筋逐渐发挥作用。随着构件挠度的增大，钢筋的侧向变形和应力值均逐渐增大；C 点时，纯弯段的钢筋均发生屈服并进入强化阶段，但尚未达到极限强度。

图 11 为典型构件核心混凝土纵向应力分布图。从图中可以看出，随着往复荷载的增大，核心混凝土的受拉区面积不断增大，中和轴不断向受压区移动，C 点时接近全截面受拉。

图 12 为典型构件的 GFRP 管纵向(S22)及环向(S11)应力分布。从图中可以看出，GFRP 管环向应力在加载初期较小，对混凝土约束作用较小。在 OA 段，GFRP 管的纵向应力首先从夹具处产生，继而向纯弯段发展。每级循环中，GFRP 管均产生拉应力和压应力。A 点时，整个纯弯段处受拉区和受压区的 GFRP 管均产生应力，A 点以后环向及纵向应力增长较快，环向应力大于纵向应力；B 点时，构件的纯弯段在夹具附近处产生的环向应力相较于跨中位置的环向应力要大，因为夹具刚度过大，导致 GFRP 管在夹具处产生应力集中。BC 段，随着往复荷载的增加，GFRP 管的环向拉应力增大，但纵向拉应力增大到某一值后开始减小，同时环向和纵向的压应力也逐渐增大，C 点时，环向应力还未达到 GFRP 管环向极限抗拉强度，仍能发挥约束作用。

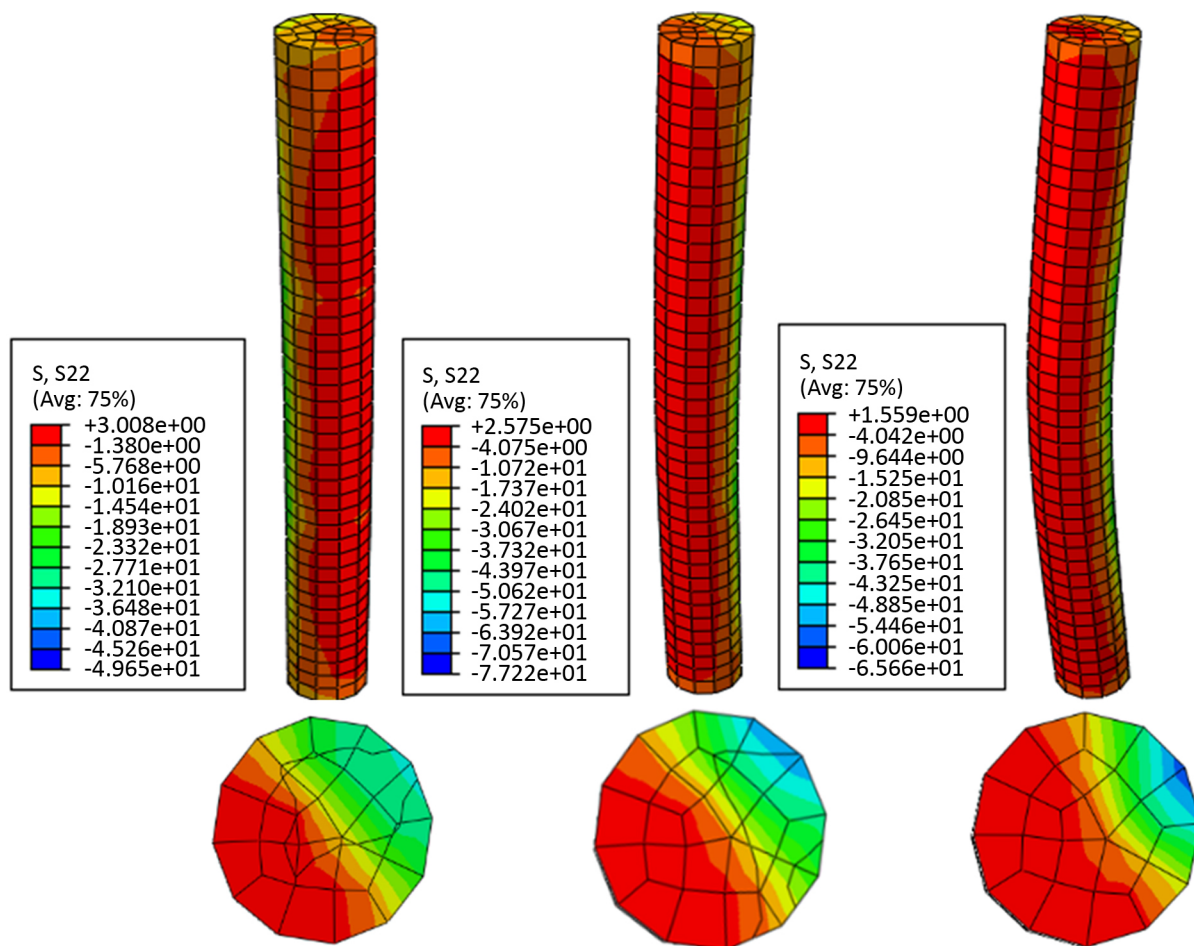


Figure 11. Core concrete vertical stress
图 11. 核心混凝土纵向应力分布图

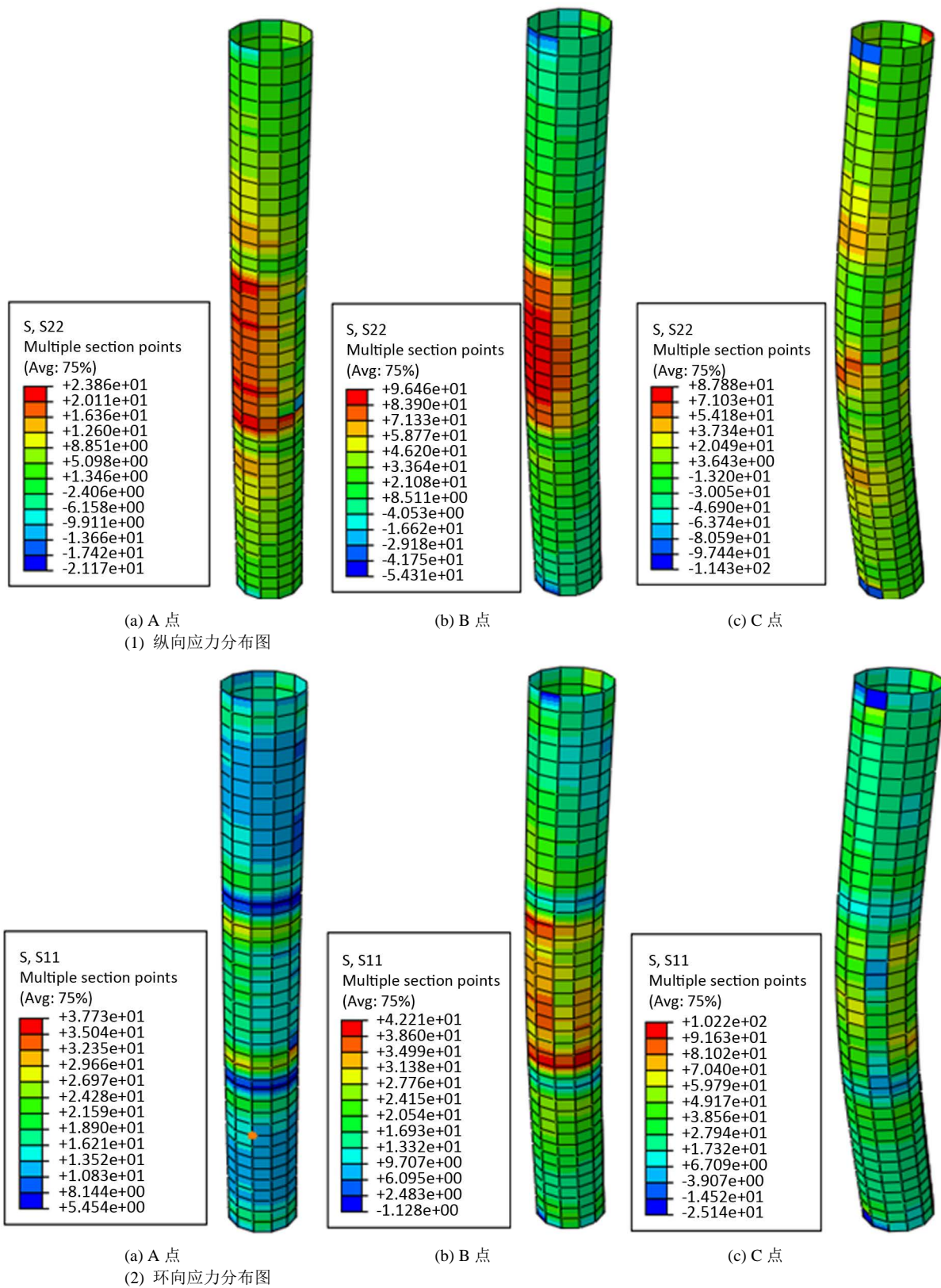


Figure 12. GFRP tube stress distribution
图 12. GFRP 管应力分布图

5. 结论

1) 试件采取强轴方向加载时, 其荷载 - 位移滞回曲线呈梭型。弱轴方向加载时, 其荷载 - 位移滞回曲线呈反 S 型, 滞回曲线不饱满, 存在明显的捏缩现象。

2) GFRP 管 - 钢骨混凝土纯弯构件滞回受力过程可分为弹性阶段、弹塑性阶段和强化阶段, 构件破坏属于延性破坏, GFRP 管、混凝土、型钢三者协同工作性能良好。

3) 构件的极限承载力随混凝土强度、型钢型号和 GFRP 管厚度的增大而增大; 不同加载方式下构件的荷载 - 位移骨架曲线在弹性阶段有所差别, 构件屈服后强轴加载的构件其极限承载力较大。加载方向为强轴方向的构件其初始刚度较大, 初始刚度退化较快。

基金项目

国家留学基金委 - 辽宁省地方合作项目(201808210435); 辽宁省自然科学基金计划项目(20170540750)。

参考文献

- [1] 刘杰, 刘庆洋, 安琳. GFRP 混凝土圆形管柱试验研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2007, 8(1): 11-13.
- [2] 王清湘, 关宏波, 等. GFRP 套管混凝土长柱轴压力学性能试验[J]. 建筑结构, 2010, 40(11): 80-83.
- [3] 王娟, 赵均海, 朱倩. GFRP 套管钢筋-钢骨混凝土短柱轴压承载力研究[J]. 建筑结构, 2012, 10(10): 102-105.
- [4] 章雪峰, 单鲁阳, 杨城. GFRP 管混凝土组合长柱的轴心受压特性研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(9): 72-77.
- [5] Fam, A., Schnersch, D. and Rizkalla, S. (2005) Rectangular Filament-Wound Glass Fiber Reinforced Polymer Tubes Filled with Concrete under Flexural and Axial Loading: Experimental Investigation. *Journal of Composite for Construction*, **9**, 25-33. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2005\)9:1\(25\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:1(25))
- [6] 阮元峰, 王清湘. GFRP 套管钢筋混凝土短柱偏压力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [7] 关宏波, 王清湘. 玻璃纤维增强套管钢筋混凝土组合柱偏压承载力计算[J]. 工业建筑, 2012, 42(10): 42-46.
- [8] 王宝立, 辛庚华, 王清湘. GFRP 管钢筋混凝土偏压长柱的试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(2): 21-27.
- [9] 吴紫阳. GFRP 管-混凝土-钢管组合柱偏压下力学性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
- [10] Shao, Y. and Mirmiran, A. (2004) Nonlinear Cyclic Response of Laminated Glass FRP Tubes Filled with Concrete. *Composite Structures*, **65**, 91-101. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2003.10.009>
- [11] 杨刻亚, 杨春梅, 吴庆文. GFRP 管混凝土圆形管柱抗震性能试验研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2008, 9(2): 18-20.
- [12] 肖建庄, 黄一杰. GFRP 管约束再生混凝土柱抗震性能与损伤评价[J]. 土木工程学报, 2012(11): 112-120.
- [13] 章雪峰, 单鲁阳, 郑曙光. GFRP 管混凝土组合长柱的抗震性能研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(9): 78-82.
- [14] 方劲松. GFRP-钢复合管约束再生混凝土柱的抗震性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 广东: 广东工业大学, 2018.
- [15] 吴刚, 吕志涛. FRP 约束混凝土圆柱无软化段时的应力-应变关系研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 1-9.