

文章编号:1673-2049(2018)03-0025-10

方钢管约束型钢再生混凝土柱-钢梁节点抗震性能分析

刘 坚¹, 毛 捷¹, 陈 原¹, 周观根², 于志伟¹, 任 达¹

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 浙江东南网架股份有限公司, 浙江 杭州 311209)

摘要:基于非线性和再生混凝土损伤因子的塑性损伤本构,建立了外加强环全焊接刚性连接、外套管式端板连接半刚性连接以及顶底角钢全螺栓连接半刚性连接 3 种形式的方钢管约束型钢再生混凝土柱-钢梁节点有限元模型,分析了各模型的抗震性能。结果表明:在低周循环加载下,柱内含有支撑骨架且没有穿柱构件时,有利于提高节点域核心再生混凝土的整体性,受力简单;采用外套管约束节点域,核心再生混凝土的应力、应变较小,有利于再生混凝土耐久性的提高;在相同轴压比、梁柱线刚度比的情况下,外加强环全焊接刚性节点承载能力和滞回耗能能力较高,但延性相对较差;顶底角钢全螺栓连接半刚性节点承载能力、滞回耗能能力相对较低,延性较好;外套管式端板连接半刚性节点的极限承载力、滞回耗能能力和延性性能都有良好的表现;在此基础上,对外套管式端板连接半刚性节点进行了荷载-位移影响参数分析。结果表明:轴压比在弹性阶段对节点的影响不大,在进入屈服和塑性强化阶段,随着轴压比的增高,节点的极限承载力和延性下降;在强柱弱梁的前提下,梁柱线刚度比的增加有利于节点弹性刚度和水平极限承载力的提高,屈服后梁柱线刚度比对节点刚度退化影响不大;钢材屈服强度影响主要体现在节点的极限水平承载力上;再生骨料取代率对节点的延性性能稍有影响;外套管和端板的厚度变化在一定范围时对节点的弹性刚度和极限承载力有一些影响,但增幅随着厚度的增加越来越小。

关键词:钢管约束型钢再生混凝土柱-钢梁节点;连接形式;抗震性能;影响因素分析

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A

Seismic Behavior of Steel Recycled Concrete Column and Steel Beam Joint of Square Steel Tube

LIU Jian¹, MAO Jie¹, CHEN Yuan¹, ZHOU Guan-gen², YU Zhi-wei¹, REN Da¹

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China;

2. Zhejiang Southeast Space Frame Co., Ltd, Hangzhou 311209, Zhejiang, China)

Abstract: Considering the nonlinear and plastic damage constitutive of recycled concrete and geometric, three steel recycled concrete column and steel beam joint finite element models including outer-shell stiffening ring all-welded rigid connection, the outer tube end plate connection semi-rigid connection, and bolt connection of top and seat angle, were established, and the seismic performance of models were analyzed. The results show that under the condition of low cycle load, the columns with supporting skeleton and without through member are beneficial to improve the integrity of core recycled concrete in joint area, and the force is simple.

收稿日期:2017-08-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51678168);广州市科技计划项目(201607010107);广东省自然科学基金项目(2017A030313267)

作者简介:刘 坚(1964-),男,湖南邵阳人,教授,工学博士,博士后,E-mail:787196372@qq.com。

The outer-shell restraint joint domain stress and strain of the core recycled concrete are small, which are beneficial to the improvement of the durability of recycled concrete. Under the same compression ratio, stiffness ratio of beam to column, the bearing capacity and hysteretic energy dissipation capacity of outer-shell stiffening ring all-welded rigid joints are higher, but the ductility is relatively poor. The semi-rigid bearing capacity and hysteretic energy of bolt connection of top and seat angle are relatively low, and the ductility is good. The ultimate bearing capacity, hysteretic energy dissipation capacity and ductility of the outer tube type of semi-rigid end plate connections all have good performance. On this basis, the impact parameter analyses on semi-rigid joints connected by casing pipe end plate were carried. The results show that the axial compression ratio has little effect on the node in the elastic phase, in the yield and plastic hardening stages, with the axial compression ratio increases, the ultimate bearing capacity of the joint and the ductility decrease. In the premise of strong column weak beam, the increasing of linear stiffness ratio of beam to column are benefit with the improving of joint elastic stiffness and ultimate bearing capacity, beam column stiffness ratio and after yielding have little effect on joint stiffness degradation. The impact of yielding strength is mainly reflected in the ultimate horizontal bearing capacity of joints, and the replacement rate of recycled aggregate has a little effect on the ductility performance of joints. The thicknesses of outer tube and end plate have some effects on elastic stiffness and ultimate bearing capacity of joints in a certain range, but the growth rate becomes smaller with increasing thickness.

Key words: steel tube confined steel recycled concrete column and steel beam joint; connection form; seismic performance; influence factor analysis

0 引言

再生混凝土作为一种新型环保建筑材料,既能解决废弃混凝土对环境造成的污染,又能大幅控制对天然山石的过量开采^[1],近年来一直受到国内外相关学者的广泛关注。相关研究表明,由于再生骨料所存在的天然缺陷,其强度发展、弹性模量、收缩、徐变等性能都与普通混凝土有一定的差异,尤其是在延性上,与普通混凝土相比较差^[2-12],目前在工程上的应用尤其是主体结构的应用较少。为改善再生混凝土的力学性能,将再生混凝土与钢材结合,外围增加钢管约束,内部增设骨架支撑形成钢管型钢再生混凝土,是一种良好的改性方法。一方面提高了核心再生混凝土的承载力,延性和耐久性能大幅度改善。另一方面,核心再生混凝土的包裹能够防止内部骨架的屈曲破坏,在外围钢管发生鼓曲破坏时,核心再生混凝土仍然具备良好的抗拉压性能。二者的组合有效地弥补了 2 种材料的不足,充分发挥了各自的优点,成为一种有效的结构形式。

目前,已有很多学者开展了钢管再生混凝土构件的抗震性能研究^[13-18],结果表明:由于外钢管对再生混凝土的约束作用,在一定程度上弥补了再生混

凝土力学性能上的不足。钢管再生混凝土柱的破坏过程和破坏形态与钢管普通混凝土柱相类似,钢管再生混凝土具有较好的工程应用前景。然而相对构件而言,节点的受力情况更加复杂,在地震的作用下,节点的抗震性能更加关键。国内外学者针对再生混凝土柱梁连接节点进行了卓有成效的研究,已经取得了一定的成果^[19-21]。对型钢再生混凝土框架中节点的动力力学性能有了一定研究^[22],而对钢管再生混凝土节点的抗震性能还少有报道,且局限于全焊接外加强环刚性连接形式^[23-25]。此类节点在施工过程中需要进行现场施焊,施工条件易受环境和场地的限制,节点刚度过大。国外震害调查表明,节点处的焊缝在地震作用时常发生脆性破坏,对结构整体造成重大的损害。辅以高强螺栓的半刚性连接能够提高节点更大的变形能力,同时焊接部分不需要现场施焊,可以让焊接质量得到更高的保障^[26]。然而穿柱高强螺栓螺杆交叉不便于多向梁柱和圆形钢管柱节点的设计和施工,另外高强螺栓施加的预紧力和受力时螺杆对核心混凝土的各向扰动使得核心再生混凝土的受力更为复杂,对本身存在一定缺陷的核心再生混凝土耐久性不利。外套管单边螺栓连接可以有效缓解这一问题,无需穿柱的单边螺栓

连接有利于节点的设计和施工,同时节点域核心再生混凝土受力相对简单,有助于提高再生混凝土的耐久性。外套管能够有效防止钢管柱壁被单边螺栓拉裂,并提高对节点域核心再生混凝土变形的约束能力。

本文对外加强环全焊接刚性节点、采用单边螺栓的外套管式端板连接半刚性节点以及顶底角钢全螺栓连接半刚性节点3种形式的方钢管约束型钢再生混凝土柱-钢梁节点进行了非线性有限元分析,研究其抗震性能,并在此基础上对影响外套管式端板半刚性连接节点进行了参数分析。

1 模型的建立

1.1 模型有效性验证

为验证材料模型、界面接触及单元类型对分析钢管再生混凝土柱抗震性能的适用性,采用ABAQUS有限元软件对文献[25]中方钢管再生混凝土柱-钢梁外加强环刚性节点的抗震性能试验试件JD2-10-50以及文献[27]中穿芯螺栓端板式钢管混凝土与钢梁连接节点JD-S23试件进行了同参数模拟分析。

1.2 材料本构

钢材的材料本构模型采用双折线随动强化模型,钢材强化阶段模量为 αE_s ,通常系数 α 取0.01。再生混凝土采用ABAQUS中考虑损伤因子的混凝土塑性损伤模型,再生混凝土本构关系采用文献[16]中对不同骨料取代率下的方钢管再生混凝土受压本构关系,见式(1),(2);由于外钢管的约束对再生混凝土的受拉性能影响很小,核心混凝土受拉本构关系按照现行规范采用。

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\beta(x-1)^\eta + x} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$f_{cu,R}/f_{cu,0} = 0.19R^2 - 0.249R + 0.789 \quad (2)$$

其中

$$x = \epsilon/\epsilon_{c0}, y = \sigma/\sigma_{c0}, \beta = \frac{(f'_{c,R})^{0.1}}{1.35\sqrt{1+\xi}},$$

$$\eta = 1.6 + 1.5/x, \xi = \frac{A_s/f_y}{A_c/f_{c,R}}$$

式中: ϵ 为应变; σ 为应力; $f'_{c,R}$ 为不同取代率下的圆柱体轴心抗压强度; $f_{cu,0}$ 为取代率为0%时的立方体标准抗压强度; $f_{c,R}$ 为棱柱体轴心抗压强度; $f_{cu,R}$ 为不同取代率下的立方体抗压强度; ϵ_{c0} 为峰值应力对应的峰值应变; σ_{c0} 为应力-应变关系的峰值应力; f_y

为核心区钢管屈服强度; R 为取代率; A_s 、 A_c 分别为核心区钢管和混凝土的横截面积。

1.3 单元选取和接触条件

钢管和再生混凝土均采用8节点减缩积分格式的三维实体单元(C3D8R)。混凝土和钢管柱壁的接触以及钢材与钢材之间的接触考虑黏结应力和界面切向力的传递,采用Coulomb摩擦模型,摩擦因数分别取0.6、0.45^[16],法向接触为硬接触。内部型钢构件被核心混凝土包裹,两者之间的接触采用Embedded模式。高强螺栓预紧力采用螺栓荷载沿轴线施加,螺栓帽接触面与钢板用Tie绑定;不考虑焊缝的脆性撕裂,焊缝连接部位采用Tie绑定。

1.4 边界条件和加载方式

考虑地震作用下的几何非线性重力二阶效应和更好地反映钢管再生混凝土柱的受力状况,加载方式为柱端加载,柱底部设定为铰接,顶部加载端为自由端,梁边界设定为只能水平移动。柱上端截面与参考点耦合在一起,先在柱顶施加轴向荷载,然后水平方向进行低周循环加载,为了保证模型的计算收敛性,水平加载制度为位移控制。

1.5 模型分析与已有试验对比

采用以上简述的建模方法对选取的文献试验研究进行了同参数模拟分析,计算结果与试验结果对比见图1,图1(a)为外加强环方钢管再生混凝土柱-钢梁节点试验与有限元分析滞回曲线对比,图1(b)为穿芯螺栓端板式钢管混凝土-钢梁节点试验与有限元分析滞回曲线对比。从两者对比结果可以看出,节点在循环荷载作用下,有限元计算出的滞回曲线在节点承载力下降阶段与试验有所偏差,但误差相差不大,两者曲线基本吻合,滞回环面积趋于一致,相对误差范围在5%以内。这说明有限元建模方法可以保证钢管再生混凝土柱与钢梁连接节点分析的准确度。

2 抗震性能分析

2.1 有限元模型

对比分析不同类型钢管约束型钢再生混凝土柱-钢梁节点的抗震性能,分别建立了相同轴压比和梁柱线刚度比情况下的外加强环全焊接刚性连接节点JD1、外套管式端板连接半刚性连接节点JD2和顶底角钢全螺栓连接半刚性连接节点JD3。钢材屈服强度为345 MPa,再生混凝土强度等级为C40,钢管再生混凝土柱截面形式为方形截面,直径为300 mm,壁厚为8 mm,柱高为1 800 mm。工字钢梁长

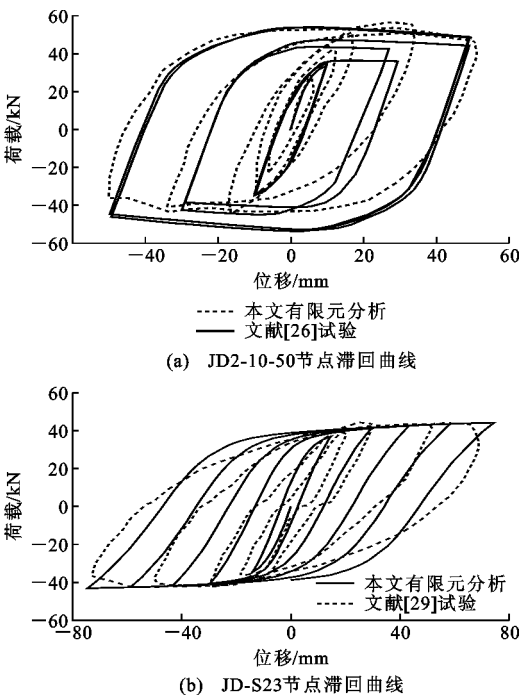


图1 非线性有限元分析结果与已有试验滞回曲线对比
Fig.1 Comparison of Nonlinear Finite Element Analysis Results and Experimental Hysteresis Curves

为 1 500 mm,截面尺寸为 250 mm×180 mm×6 mm×9 mm,轴压比 $n=0.2$,梁柱线刚度比 $k=0.48$ 。试件参数见表 1。

图 2 为 3 种节点形式的有限元模型及剖面示意图,其中 JD1 节点钢梁、外加强环分别与钢管柱壁焊接,钢梁翼缘与上下外加强环焊接;JD2 节点外套管与钢管柱壁焊接,端板与钢梁焊接,端板通过高强螺栓与钢管柱壁、外套管连接;JD3 节点钢梁上下翼

缘通过顶底角钢及钢梁腹板通过腹板角钢与外套管、钢管柱壁用高强螺栓连接。

2.2 计算结果与分析

2.2.1 模型破坏形态和应力云图分析

对比分析了 3 类节点在屈服阶段和破坏阶段节点模型破坏应力云图以及破坏阶段各节点模型核心再生混凝土的受力状态,见图 3,4。

由图 3,4 可知,外加强环全焊接节点 JD1 模型最大应力出现在外加强环与钢梁翼缘交接处以及加强环外的钢梁腹板、翼缘处,材料应力超过了屈服强度,材料的力学性能得到了充分利用。当模型节点处于屈服强化阶段时,在外加强环外端,梁翼缘开始出现塑性铰,随着位移的加大,梁端应力迅速发展,塑性铰逐渐变大,形成的时间要早于节点 JD2 和 JD3,钢管柱壁和外加强环无塑性铰的出现。

外套管式端板半刚性节点 JD2 和顶底角钢全螺栓节点 JD3 模型最大应力均在高强螺栓处,钢梁和端板的应力也进入了屈服强化阶段。在屈服阶段,外套管端板发生细微的弯曲变形,吸收了一定的能量,梁端翼缘未发现塑性铰的形成;当模型节点逐渐进入破坏阶段时,端板变形增大,和外套管之间产生缝隙,梁端塑性铰慢慢形成,出现的时间相较 JD1 节点模型要晚。钢管柱壁和外套管在屈服阶段无明显变形,破坏阶段在单边螺栓的拉力下,发生了细微的鼓曲变形。

JD3 节点模型由上下顶底角钢和腹板角钢通过全螺栓连接而成,由于钢梁与柱之间无直接刚性连接,地震能量很大部分由顶底角钢变形吸收,在模型

表 1 试件参数

Tab.1 Parameters of Specimens

试件编号	连接类型	连接构件尺寸	高强螺栓
JD1	全焊接刚性	D600×T12(外加强环)	无
JD2	焊接+螺栓半刚性	L300×300×H420×T18(外套管) L180×H420×T20	M24(端板)
JD3	全螺栓半刚性	L300×300×H420×T18(外套管) L85×172×H180×T20	M24(角钢)

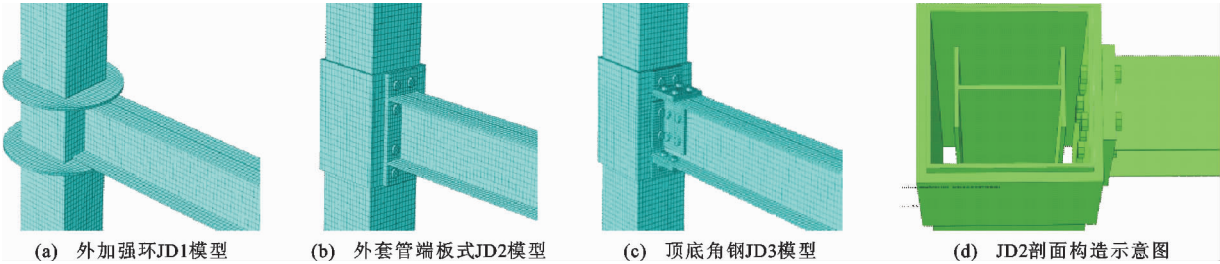


图2 各节点有限元模型
Fig.2 Finite Element Models of Joints

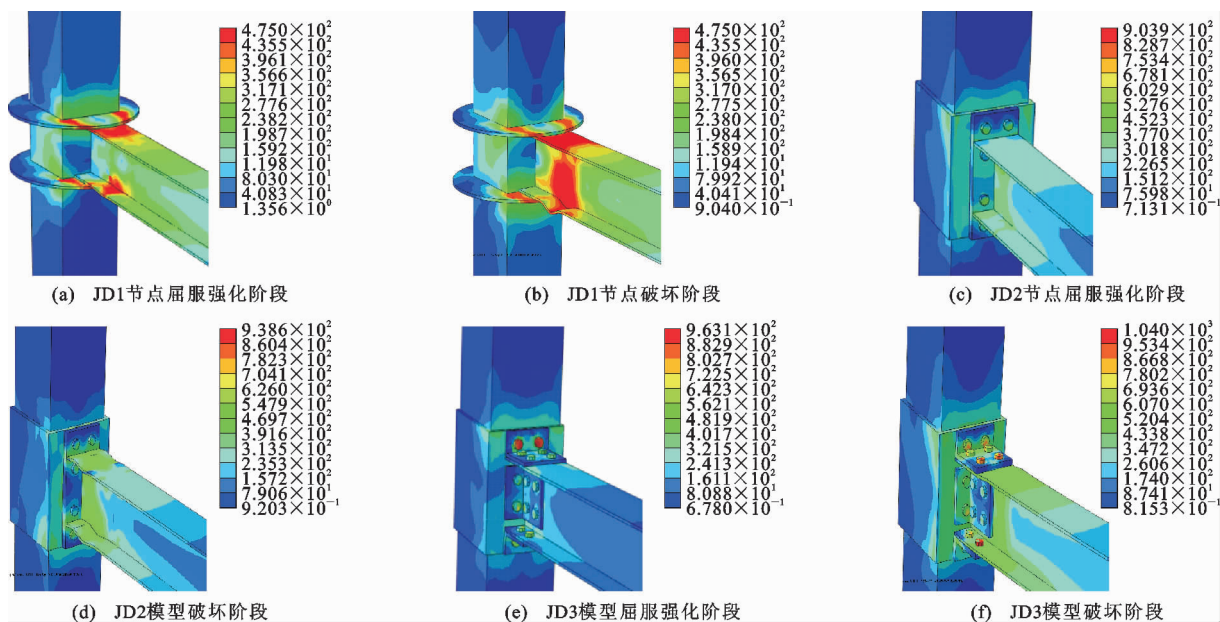


图 3 节点模型应力云图(单位:MPa)

Fig. 3 Stress Nephograms of Joint Models (Unit:MPa)

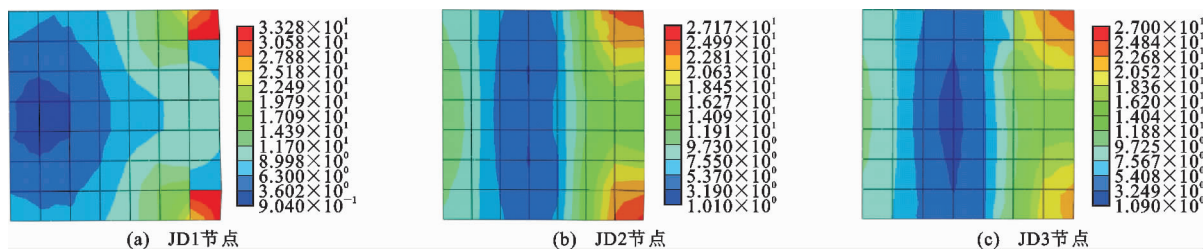


图 4 核心再生混凝土应力云图(单位:MPa)

Fig. 4 Stress Nephograms of Core Recycled Concrete (Unit:MPa)

加载的整个过程当中,钢梁发生了一定的屈曲变形,但是梁端的塑性铰并不明显,在顶底角钢与外套管壁的连接处出现了明显的间隙。当模型节点进入屈服阶段后,高强螺栓的最大应力逐渐由钢管柱壁处转移到梁翼缘处,表明了节点受力逐步由顶底角钢受弯逐渐向钢梁翼缘受弯剪变化。

在外套管的约束保护作用下,外套管式端板连接节点模型 JD2 和顶底角钢连接节点模型 JD3 内的核心再生混凝土最大应力明显小于外加强环节点模型 JD1,非穿芯的单边螺栓连接使得节点域受力主要集中在钢管壁和外套管处,而核心再生混凝土的受力相对简单。在外围钢管和外套管约束作用下,极大地削弱了节点域核心再生混凝土的横向变形,有利于再生混凝土在结构中的应用。

2.2.2 滞回曲线和骨架曲线

图 5 为模型滞回曲线和骨架曲线对比。从图 5(a)可以看出,在不考虑焊缝脆性断裂的情况下,外加强环 JD1 节点的滞回环面积最大,承载力最高,

吸收能量大,但是破坏位移值较低,伴随梁端塑性较出现较快,模型承载力迅速下降。从图 5(b)可知,外套管式端板 JD2 节点滞回环面积和承载力较大,由于外套管和端板的变形吸收了部分能量,梁端出现塑性铰的时间较晚,破坏位移值和延性相对较高。从图 5(c)可知,全螺栓角钢连接 JD3 节点模型的承载力和滞回环面积明显小于 JD1,JD2 模型,但破坏位移值最大,刚度退化较慢,展现了良好的延性。

2.2.3 延性系数和耗能能力

采用各模型的位移延性系数 μ 来反映屈服后的变形能力,表达式为 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$,其中 Δ_u 为试件承载力下降至峰值荷载的 85%(破坏荷载)后对应的破坏位移, Δ_y 为试件在到达屈服荷载时相应的屈服位移(由能量等效法确定)。耗能能力也是反映构件抗震性能的一个重要指标,如能量耗散系数(滞回环的总能量与弹性能的比值)、等效黏滞力阻尼系数、滞回累积总耗能等。表 2,3 分别给出了节点 JD1~JD3 模型在正、负 2 个加载方向上的平均位移延性

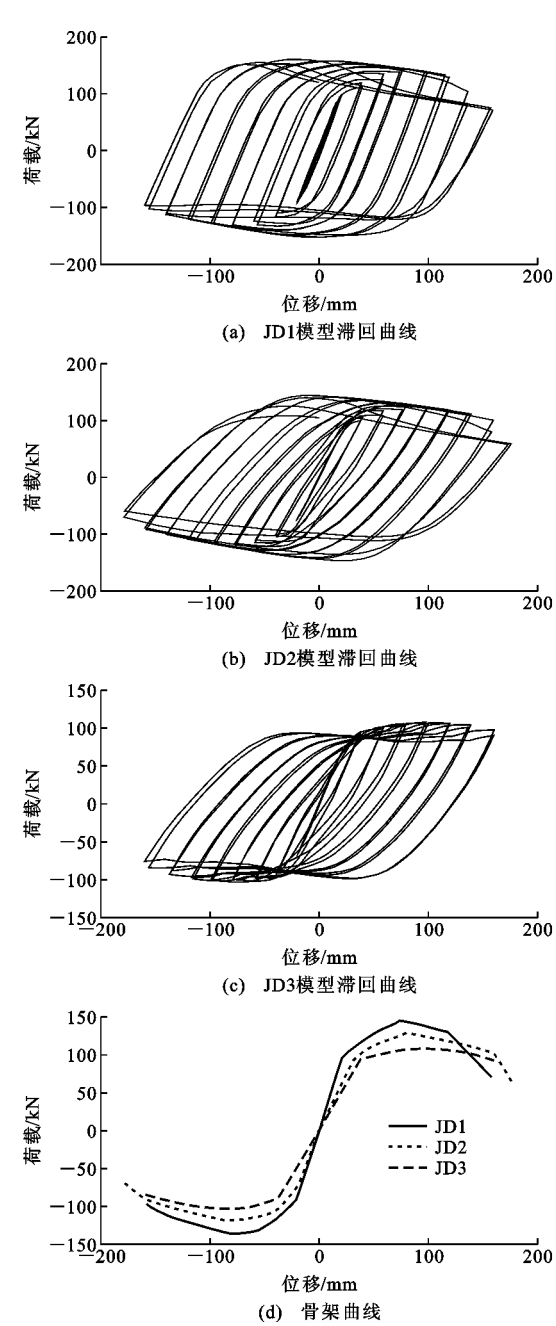


图5 模型滞回曲线和骨架曲线对比

Fig. 5 Comparison of Hysteresis Curves and Skeleton Curves of Models

表2 各节点模型荷载、位移及延性系数

Tab. 2 Load, Displacement and Ductility Factor of Joint Models

试件编号	加载方向	屈服荷载 P_y /kN	屈服位移 Δ_y /mm	峰值荷载 P/kN	破坏荷载 P_u/kN	破坏位移 Δ_u /mm	平均位移延性系数 μ
JD1	正向	118.02	41.21	149.53	127.10	119.51	3.08
	负向	-115.68	-39.42	-135.46	-115.14	-129.05	
JD2	正向	107.56	44.27	128.49	109.22	147.62	3.35
	负向	-107.56	-43.06	-118.02	-96.77	-145.26	
JD3	正向	98.26	47.91	109.88	93.40	157.17	3.43
	负向	-90.17	-41.84	-102.91	-87.47	-149.86	

系数和滞回耗能系数。

综上所述,对不同方钢管约束型钢再生混凝土柱-钢梁节点连接形式的滞回抗震性能分析表明:

(1)在不考虑焊缝脆性断裂的前提下,外加强环 JD1 和外套管式端板连接 JD2 节点域的刚度较大,应力云图显示破坏变形主要出现在梁端,塑性较明显,JD2 端板和外套管略微发生鼓曲变形。全螺栓顶底角钢 JD3 节点变形主要出现在顶底角钢,梁端塑性较不显著,承载力相对较小。

(2)由于柱内型钢提高了钢管再生混凝土的抗侧能力和整体刚度,外围约束降低了柱的横向变形,节点域无穿芯构件使得核心再生混凝土受力相对简单,在轴压比不高的情形下,各模型的核心再生混凝土应力较小,没有拉应力的出现。节点破坏时,核心再生混凝土仍然具有较高的承载能力。

(3)通过低周循环加载得出的 3 个模型滞回曲线均呈现饱满的弓形,其中 JD1 滞回环面积和承载力最大,JD2 略有减小,JD3 相对较小。随着位移的增加,JD1 梁端塑性铰出现较早,承载力迅速下降;JD2 也具有较高的承载力和滞回耗能能力,由于端板提供了一定的变形能力,梁端塑性铰出现较晚,承载力下降较 JD1 节点要缓;JD3 的滞回环面积和极限水平承载力相对较小,节点域连接构件变形较大,梁端无明显塑性铰出现,承载力下降较慢。

(4)从表 2 看出,JD2,JD3 节点的平均延性系数比 JD1 分别提高了 9%和 11%,正向破坏位移值分别提高了 24%和 31%,负向破坏位移值分别提高了 13%和 16%,半刚性连接相对刚性连接位移延性提升较大。由表 3 可知,JD1,JD2 节点的滞回环面积较大,滞回耗能能力明显强于 JD3,分别提高了 41%和 30%。通过对比分析可知,外套管式端板连接 JD2 的极限抗侧承载力、抗震延性以及滞回耗能能力都表现良好,是一种较为有效的钢管型钢再生混凝土柱-钢梁连接节点形式。

表 3 模型滞回耗能系数

Tab. 3 Hysteretic Energy Dissipation Coefficients

试件编号	能量耗散系数	等效黏滞阻尼系数	累积耗能/(kN·mm)
JD1	3.5	0.58	590.43
JD2	3.3	0.53	502.73
JD3	2.8	0.45	351.87

3 外套管式端板连接节点荷载-位移影响参数分析

以上非线性仿真分析表明,外套管式端板连接钢管约束型钢再生混凝土柱-钢梁节点在抗侧刚度、极限水平承载力和抗震延性、滞回环耗能上都较强。为了更深一步地研究影响其抗震性能的参数变化,以下分别从轴压比、梁柱线刚度比、钢材屈服强度、再生骨料取代率、端板厚度及外套管厚度 6 个方面进行了参数分析。

3.1 轴压比

图 6(a)为外套管式端板连接钢管约束型钢再生混凝土柱-钢梁节点在不同轴压比情况下的荷载-位移曲线。由图 6(a)可以看出,随着轴压比 n 的增加,节点的弹性刚度有下降趋势,极限抗侧承载力明显下降。在进入塑性强化阶段后,考虑二阶效应的影响,随着轴压比的增大,刚度退化加快。轴压比对节点的极限承载力和刚度退化影响较大,在弹性阶段影响不明显。

3.2 梁柱线刚度比

图 6(b)为外套管式端板连接钢管约束型钢再生混凝土柱-钢梁节点在不同线刚度比情况下的荷载-位移曲线。线刚度比 k 为梁的线刚度和柱的线刚度比值。从图 6(b)可知,随着梁柱线刚度比的增加,节点的弹性阶段刚度下降,极限水平承载力降低。荷载-位移曲线在强化阶段几乎平行,梁柱线刚度比对节点模型的刚度退化规律没有影响。

3.3 钢材屈服强度

图 7(a)为外套管式端板连接钢管约束型钢再生混凝土柱-钢梁节点在不同屈服强度 Q 下的荷载-位移曲线。由图 7(a)可知,随着钢材屈服强度 Q 的增加,模型分析的弹性刚度基本一致,屈服位移和极限水平承载力显著提升,而在塑性强化阶段的延性、刚度退化规律上的影响不明显。参数变化影响的规律与纯钢柱-钢梁节点类似,说明通过单边螺栓和外套管的形式,节点域的受力主要集中于外围套管、高强螺栓、端板等钢材上。

3.4 再生骨料取代率

图 7(b)为外套管式端板连接钢管约束型钢再

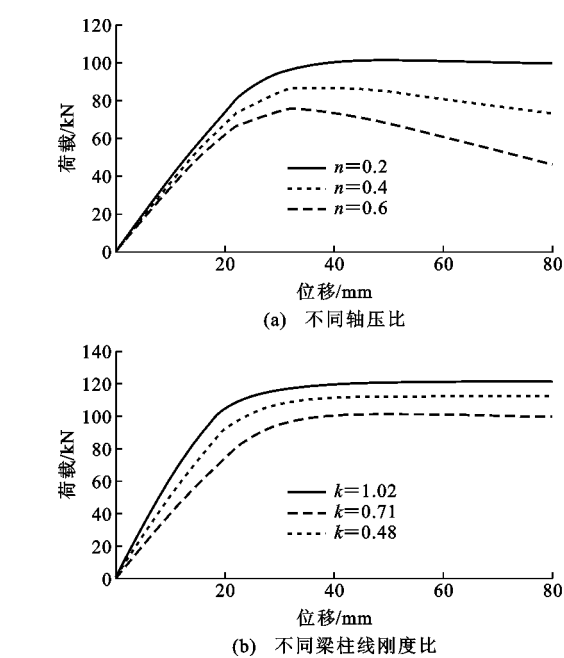


图 6 荷载-位移曲线 1

Fig. 6 Load-displacement Curves 1

生混凝土柱-钢梁节点在不同取代率 R 下的荷载-位移曲线。如图 7(b)可知,在外围约束降低了柱的横向变形,柱内型钢增加核心再生混凝土整体刚度,节点域无穿芯构件的情况下,再生骨料取代率 R 对外套管式端板连接半刚性节点的抗震性能影响不大。弹性刚度和屈服位移无明显变化,但刚度退化有减小的趋势。总体上再生混凝土在此类节点的抗震性能与普通混凝土基本类似。

3.5 端板厚度

图 8(a)为外套管式端板连接钢管约束型钢再生混凝土柱-钢梁节点在不同端板厚度 t_{ep} 下的荷载-位移曲线。从图 8(a)可以看出:不同端板厚度的节点在塑性强化阶段的曲线基本平行,端板厚度对节点的位移延性影响不大;随着端板厚度 t_{ep} 的增大,端板抵抗变形的能力增强,节点的抗弯刚度有所增大,根据对应的荷载-位移曲线可知,端板厚度的增加能够提升节点的弹性刚度和极限水平承载力,但提升的幅度随着端板厚度的继续增大而越变越小。对比 18 mm 和 24 mm 端板厚度的节点荷载-位移曲线可以发现,两者趋于一致,继续增大端板厚度对节点的性能影响甚微。

3.6 外套管厚度

图 8(b)为外套管式端板连接钢管约束型钢再生混凝土柱-钢梁节点在不同外套管厚度 t_{os} 下的荷载-位移曲线。从图 8(b)可以看出,外套管厚度影响变化规律和端板厚度影响变化规律相似,增加外

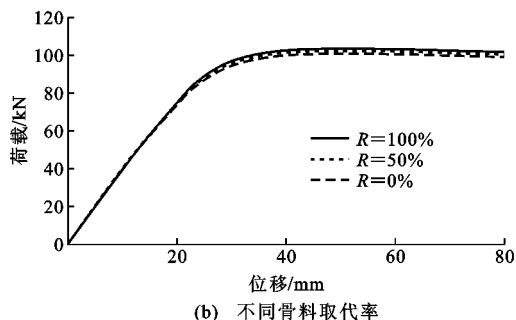
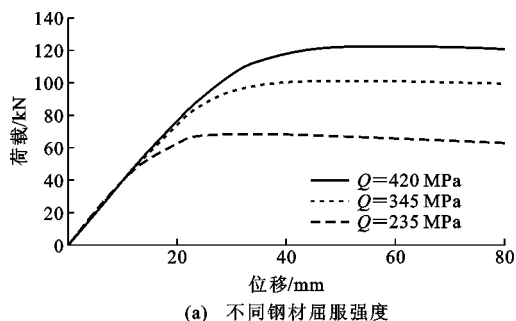


图 7 荷载-位移曲线 2

Fig. 7 Load-displacement Curves 2

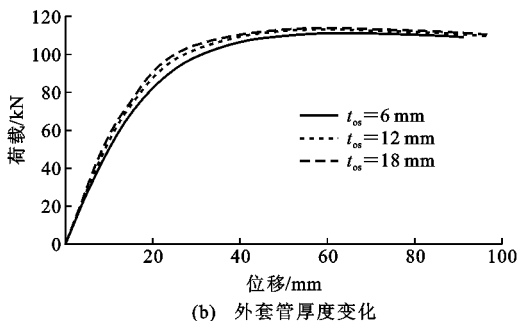
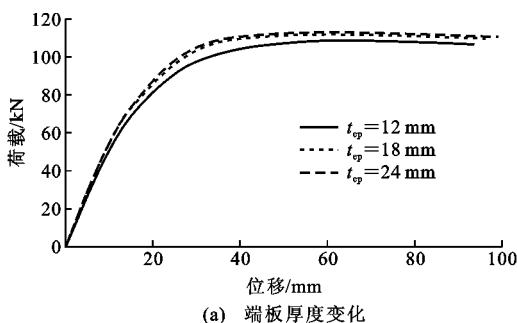


图 8 荷载-位移曲线 3

Fig. 8 Load-displacement Curves 3

套管厚度 t_{os} 有助于提高节点的弹性刚度和极限水平承载力,但增幅相对端板厚度变化而言较低,同样,变化影响的幅度随着厚度的继续变大而越来越小。

4 结 语

(1)从基于提高核心再生混凝土整体刚度和耐

久性角度出发,在加强外围约束,增加内部型钢支撑且无穿柱构件的情况下。核心再生混凝土在循环荷载作用下变形和扰动较小,受力简单,基本没有拉应力的出现,且 3 种类型的连接节点破坏变形均发生在梁端及端板等连接构件上,有利于再生混凝土在工程中的应用。

(2)外加强环全焊接刚性节点抗侧承载力较高,滞回耗能能力良好,但破坏位移值较低。顶底角钢全螺栓半刚性节点抗侧承载力和耗能能力相对较低,而破坏位移值较高。相对而言,外套管式端板连接节点在抗侧承载力、滞回耗能能力和延性性能上均良好,同时焊接部位可以在构件加工厂内完成,无需现场焊接,施工环境良好,焊缝质量便于检测,能够有效保证焊缝的质量,减少地震作用中焊缝脆性破坏的风险,是一种有效的节点连接形式。

(3)对外套管式端板连接节点而言,轴压比主要影响节点的极限抗侧承载力和刚度退化能力,在弹性阶段影响不大,柱截面设计时在满足承载力的情况下,尚应考虑轴压比产生的地震二阶效应带来的影响;梁柱线刚度比对节点的极限抗侧承载力影响较大,对刚度退化影响甚微,在符合强柱弱梁的前提下,可以适当提高梁柱线刚度比;钢材屈服强度的增加使得节点的极限抗侧能力增加,但对弹性阶段的刚度和强化阶段的刚度退化影响较小;再生骨料取代率对节点的荷载-位移曲线无明显影响,但延性有略微下降的趋势;外套管和端板的厚度增加可以提高节点的弹性刚度和极限承载力,但是增幅随着厚度增大而越来越小。

参考文献:

References:

- [1] 刘数华,冷发光.再生混凝土技术[M].北京:中国建材工业出版社,2007.
LIU Shu-hua, LENG Fa-guang. Technology of Recycled Aggregate Concrete[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2007.
- [2] EVANGELISTA L, DE BRITO J. Durability Performance of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates[J]. Cement & Concrete Composites, 2010, 32: 9-14.
- [3] TABSH S W, ABDEL FATAH A S. Influence of Recycled Concrete Aggregates on Strength Properties of Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2): 1163-1167.
- [4] PADMINI A K, RAMAMURTHY K, MATHEWS M S. Influence of Parent Concrete on the Properties of

- Recycled Aggregate Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2): 829-836.
- [5] KOU S C, POON C S, ETXEBERRIA M. Influence of Recycled Aggregates on Long Term Mechanical Properties and Pore Size Distribution of Concrete[J]. Cement & Concrete Composites, 2011, 33: 286-291.
- [6] MOHANRAJ E K, KANDASAMY S, MALATHY R. Behaviour of Steel Tubular Stub and Slender Columns Filled with Concrete Using Recycled Aggregates[J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2011, 53(2): 31-38.
- [7] 肖建庄, 雷 斌, 袁 颢. 不同来源再生混凝土抗压强度分布特征研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(5): 94-100.
- XIAO Jian-zhuang, LEI Bin, YUAN Biao. Compressive Strength Distribution of Recycled Aggregate Concrete Derived from Different Origins[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(5): 94-100.
- [8] 杨有福. 钢管再生混凝土构件受力机理研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(12): 7-12.
- YANG You-fu. Study on Bearing Mechanisms of Recycled Aggregate Concrete-filled Steel Tubular Members[J]. Industrial Construction, 2007, 37(12): 7-12.
- [9] 陈宗平, 占东辉, 徐金俊. 再生粗骨料含量对再生混凝土力学性能的影响分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(1): 130-135.
- CHEN Zong-ping, ZHAN Dong-hui, XU Jin-jun. Research on Mechanical Properties of Recycled Concrete Using Different Recycled Coarse Aggregate Replacement[J]. Industrial Construction, 2015, 45(1): 130-135.
- [10] 应敬伟, 肖建庄. 再生骨料取代率对再生混凝土耐久性的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(1): 56-62.
- YING Jing-wei, XIAO Jian-zhuang. Influence of Recycled Aggregate Replacement Ratio on Durability of Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(1): 56-62.
- [11] 陈宗平, 徐金俊, 郑华海, 等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力-应变本构关系[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 24-32.
- CHEN Zong-ping, XU Jin-jun, ZHENG Hua-hai, et al. Basic Mechanical Properties Test and Stress-strain Constitutive Relations of Recycled Coarse Aggregate Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1): 24-32.
- [12] XIAO J Z, HUANG Y J, YANG J, et al. Mechanical Properties of Confined Recycled Aggregate Concrete Under Axial Compression[J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1): 591-603.
- [13] 黄一杰, 肖建庄. 钢管再生混凝土柱抗震性能与损伤评价[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(3): 330-335, 354.
- HUANG Yi-jie, XIAO Jian-zhuang. Seismic Behavior and Damage Assessment of Recycled Aggregate Concrete-filled Steel Tube Columns[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(3): 330-335, 354.
- [14] 刘 锋, 余银银, 李丽娟. 钢管再生骨料混凝土柱抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2013, 40(增 2): 178-184.
- LIU Feng, YU Yin-yin, LI Li-juan. Aseismic Performance Analysis of Recycled Concrete Filled Circular Steel Tube Columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 40(S2): 178-184.
- [15] 张向冈, 陈宗平, 薛建阳, 等. 钢管再生混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(9): 45-56.
- ZHANG Xiang-gang, CHEN Zong-ping, XUE Jian-yang, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Recycled Aggregate Concrete Filled Steel Tube Columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(9): 45-56.
- [16] 陈宗平, 张向冈, 薛建阳, 等. 圆钢管再生混凝土柱抗震性能与影响因素分析[J]. 工程力学, 2016, 33(6): 129-137.
- CHEN Zong-ping, ZHANG Xiang-gang, XUE Jian-yang, et al. Analysis on Aseismic Performance and Influence Factors of Recycled Concrete Filled Circular Steel-tube Columns[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(6): 129-137.
- [17] 张向冈, 陈宗平, 薛建阳, 等. 圆钢管再生混凝土柱抗震性能试验与有限元分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(3): 582-594.
- ZHANG Xiang-gang, CHEN Zong-ping, XUE Jian-yang, et al. Test and Finite Element Analysis of Seismic Performance for Recycled Aggregate Concrete Filled Circular Steel Tube Column[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(3): 582-594.
- [18] 刘 坚, 毛 捷. 钢管再生混凝土力学性能的研究进展和展望[J]. 工业建筑, 2016, 46(增): 1057-1067.
- LIU Jian, MAO Jie. Seismic Performance Research on Frame and Node of New Type Recycled Concrete Filled Steel Tubular Column with Steel Beam[J]. Industrial Construction, 2016, 46(S): 1057-1067.
- [19] VALERIA C, GIACOMO M. Behavior of Beam-col-

- umn Joints Made of Sustainable Concrete Under Cyclic Loading[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18(5): 650-658.
- [20] CORINALDESI V, LETELIER V, MORICONI G. Behaviour of Beam-column Joints Made of Recycled-aggregate Concrete Under Cyclic Loading[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25: 1877-1882.
- [21] 柳炳康, 陈丽华, 周 安, 等. 再生混凝土框架梁柱中节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 109-115.
- LIU Bing-kang, CHEN Li-hua, ZHOU An, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Recycled Aggregate Concrete Beam-column Interior-joints [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 109-115.
- [22] 薛建阳, 鲍雨泽, 任 瑞, 等. 低周反复荷载下型钢再生混凝土框架中节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(10): 1-8.
- XUE Jian-yang, BAO Yu-ze, REN Rui, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Steel Reinforced Recycled Concrete Inner-frame Joints Under Low-cyclic Reversed Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(10): 1-8.
- [23] 吴 波, 赵新宇, 杨 勇, 等. 薄壁圆钢管再生混合柱-钢筋混凝土梁节点的抗震试验与数值模拟[J]. 土木工程学报, 2013, 46(3): 59-69.
- WU Bo, ZHAO Xin-yu, YANG Yong, et al. Seismic Tests and Numerical Simulations on Beam-to-column Joints with Demolished Concrete Blocks Filled in Thin-walled Circular Steel Tubular Columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(3): 59-69.
- [24] 陆 鹏. 方钢管再生混凝土柱-再生混凝土梁节点抗震性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
- LU Peng. Study on the Semismic Performance of RCFST Column and RAC Beam Joint[D]. Nanning: Guangxi University, 2015.
- [25] 曾文祥. 方钢管再生混凝土柱-钢梁节点抗震性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
- ZENG Wen-xiang. Experimental Study on the Seismic Performance of Recycled Concrete-filled Steel Tubular Column and Steel Beam Node[D]. Nanning: Guangxi University, 2015.
- [26] 刘 坚, 高 奎, 周观根, 等. 带外套管钢管混凝土柱与钢梁节点力学性能研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2015, 36(5): 58-62.
- LIU Jian, GAO Kui, ZHOU Guan-gen, et al. Study on Mechanical Performance of Outer-shell Connections for Concrete Filled Steel Tubular Column and Steel Beam[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2015, 36(5): 58-62.
- [27] 韩林海, 陶 忠, 王文达. 现代组合结构和混合结构: 试验、理论和方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- HAN Lin-hai, TAO Zhong, WANG Wen-da. Advanced Composite and Mixed Structures: Testing, Theory and Design Approach [M]. Beijing: Science Press, 2009.