doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20259005

钢管再生混凝土柱-组合梁空间框架结构抗震性能

丁发兴[1,2]，黄 甲[1]，张泽宁[1]，单宏伟[3]
（1. 中南大学 土木工程学院，湖南 长沙 410075；2. 高速铁路建造技术国家工程研究中心，湖南 长沙 410075；
3. 中国建筑第五工程局有限公司，湖南 长沙 410004）

摘 要：为深入探讨再生骨料取代率对组合框架结构抗震性能的影响并采取有效措施弥补不利影响，建立了不同再生骨料取代率及是否施加柱端拉筋增强约束的5组足尺钢管混凝土柱-组合梁空间框架三维壳-实体有限元计算模型，开展动力响应分析. 研究结果表明：再生骨料取代率降低核心混凝土强度，增大钢管混凝土界面滑移与结构刚度损伤，导致结构抗震性能下降. 柱端拉筋增强约束措施通过直接约束核心混凝土而提升塑性能力，降低界面滑移与结构刚度损伤，使得结构抗震性能提升. 增加柱端拉筋的再生混凝土组合框架抗震性能强于无增强约束的普通组合框架，表明柱端拉筋增强约束可以有效抵消再生骨料取代对组合框架结构抗震性能的不利影响.

关 键 词：再生骨料；取代率；钢管混凝土柱；组合结构；柱端拉筋
中图分类号：TU 398 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3026(2026)04-0120-09

Seismic Performance of Recycled Concrete-Filled Steel Tubular Column-Composite Beam Space Frame Structure

DING Fa-xing[1,2], *HUANG Jia*[1], *ZHANG Ze-ning*[1], *SHAN Hong-wei*[3]
(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. National Engineering Laboratory for High-Speed Railway Construction, Changsha 410075, China; 3. China Construction Fifth Engineering Bureau Co., Ltd., Changsha 410004, China. Corresponding author: ZHANG Ze-ning, E-mail: 971135121@qq.com)

Abstract: To further explore the influence of recycled aggregate replacement ratio on the seismic performance of composite frame structure and take effective measures to make up for the adverse effects, five sets of full-scale three-dimensional shell-solid finite element calculation models of concrete-filled steel tubular column-composite beam space frame with different recycled aggregate replacement ratios were established by applying column end reinforcement constraints or not, so as to carry out dynamic response analysis. The results show that the recycled aggregate replacement ratio reduces the strength of core concrete, increases the interface slip and structural stiffness damage of concrete-filled steel tube, and leads to a decrease in seismic performance of the structure. The column end reinforcement constraint measure enhances the plastic capacity by directly restraining the core concrete, reduces the interface slip and structural stiffness damage, and improves the seismic performance of the structure. The seismic performance of a recycled concrete composite frame with column end reinforcement is stronger than that of an ordinary composite frame without reinforcement constraint, which shows that the column end reinforcement constraint can effectively offset the adverse effect of recycled aggregate replacement on the seismic performance of the composite frame structure.

Key words: recycled aggregate; replacement ratio; concrete-filled steel tubular column; composite structure; column end reinforcement

随着我国城市化进程的加速，每年产生的大量路面混凝土和建筑结构垃圾给环境带来了巨

收稿日期：2025-02-26
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52208220).
作者简介：丁发兴(1979—)，男，浙江瑞安人，中南大学教授，博士生导师.
通信作者：张泽宁，E-mail：971135121@qq.com.

大压力.再生混凝土是指将废弃的混凝土经过破碎、清洗并按一定级配混合后,部分替代混凝土中的天然骨料[1].再生混凝土应用于建筑结构中,有利于推动资源可持续利用,契合国家"双碳"战略要求[2].

近年来,关于再生混凝土力学性能的研究已取得显著进展.Topcu 等[3],Xiao 等[4]和 Liu 等[5]对不同再生骨料取代率的试件进行试验,发现随着再生骨料取代率提高,再生混凝土试件的密度、弹性模量、抗压强度和韧性等指标都有所降低.丁发兴等[6]通过对不同取代率下再生混凝土力学性能的实验资料整合,提出适用于不同强度等级的立方体抗压强度、弹性模量等力学性能指标的统一计算公式.在再生混凝土构件与结构抗震性能研究方面,Ma 等[7]、Tang 等[8]和 Xiao 等[9]开展钢筋再生混凝土柱、钢管再生混凝土柱、钢筋再生混凝土框架抗震性能试究,发现随着再生骨料取代率提高,柱子和框架的承载力、延性和耗能能力均有所下降.

钢管混凝土柱-组合梁框架结构结合混凝土和钢材两种材料的优势,抗震性能较好.在前期研究中,Lu 等[10]、丁发兴等[11]和 Xu 等[12]通过对钢管混凝土柱轴压、抗震以及框架抗震性能进行试验与有限元分析,发现拉筋具有降低界面滑移、直接约束混凝土、促进钢管抗弯和提高耗能能力的能效,使得钢管混凝土柱及结构抗弯刚度提升 10%,承载力提升 20%~50%,结构抗震耗能能力提升 1 倍、防倒塌能力提升 40%,以及柱端"压铰"和"拉铰"延后.结构采用再生混凝土时,可通过布置柱端拉筋增强以有效抵消再生骨料取代对结构造成的不利影响.本研究的主要工作如下:1)建立方钢管再生混凝土柱-组合梁框架结构有限元模型,以再生混凝土骨料的取代率为研究变量,获取结构的相关参数,探讨再生骨料取代率对结构抗震性能的影响机制;2)对比增加柱端拉筋增强约束措施的再生混凝土框架和普通框架的地震响应结果,探讨拉筋增强约束对再生混凝土框架抗震性能的影响规律.

1　有限元模型

1.1　算例概况

本文以高 49.2 m,跨度为 9 m 的 3×3 跨钢管混凝土柱-组合梁框架结构为研究对象.采用混凝土柱截面尺寸为 490 mm×490 mm,钢管壁厚为 5 mm 的方钢管混凝土柱,且在底部 3 层的各节点 1 000 mm 范围内布置有间隔为 100 mm 的 HRB400 级拉筋;主梁采用尺寸为 HM400×200 mm×8 mm×13 mm 工字形钢梁,次梁采用尺寸为 HM300×200 mm×8 mm×12 mm 工字形钢梁,梁柱之间采用加强环连接;钢梁上翼缘布置两排 ϕ19@500 mm 的栓钉,作为抗剪连接件与混凝土楼板连接;混凝土楼板内则双向布置两层 ϕ10@200 mm 钢筋网,其钢筋保护层厚度为 25 mm.各算例概况及组合框架模型示意图如表 1 和图 1 所示,模型中主要截面示意图如图 2 所示.

表 1　算例与工况

Table 1　Examples and working conditions

算例	柱端拉筋	地震波方向	再生混凝土取代率/%
KJ-1	无	N-S;N-S,E-W,U-D	0
KJ-2	无	N-S;N-S,E-W,U-D	50
KJ-3	无	N-S;N-S,E-W,U-D	100
KJ-4	1~3F	N-S;N-S,E-W,U-D	50
KJ-5	1~3F	N-S;N-S,E-W,U-D	100

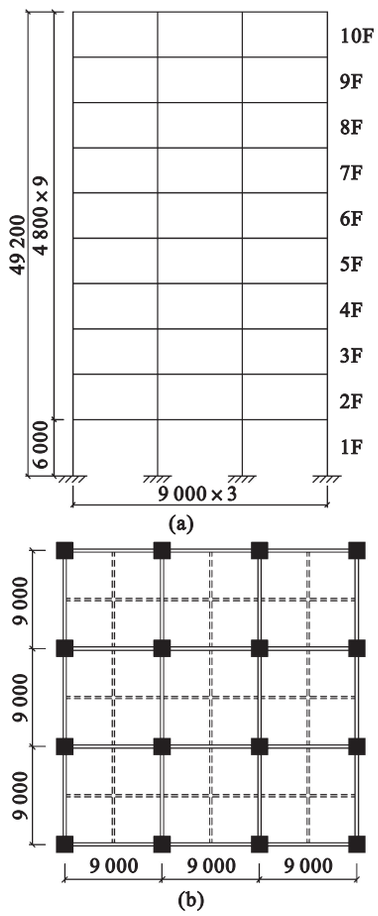


图 1　组合框架示意图(单位:mm)

Fig. 1　Schematic diagram of composite frame (unit:mm)

(a)—框架概况;(b)—柱网布置.

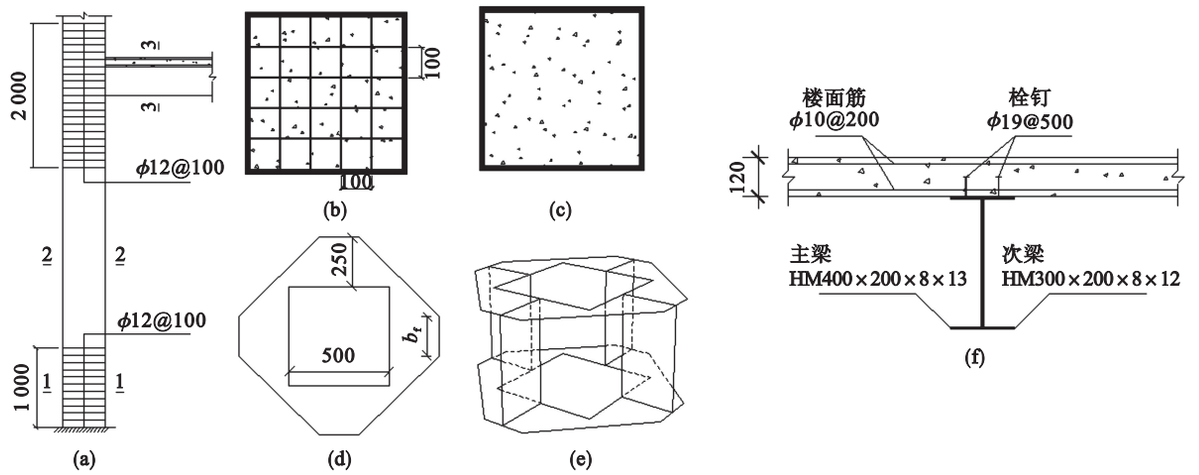


图2 各截面示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of each section (unit:mm)

(a)—柱端拉筋;(b)—1-1 截面;(c)—2-2 截面;
(d)—加强环平面图(b_f为翼缘宽度);(e)—加强环立体图;(f)—3-3 截面.

各算例中,普通混凝土或不同取代率的再生混凝土强度等级均为 C50,钢材强度等级为 Q235,内拉筋及楼板钢筋网采用 HRB400 钢筋,钢梁与楼板之间按规范采用 ML15 栓钉连接.各类混凝土、钢管柱、钢梁、钢筋网及栓钉的相关弹性参数如表 2 所示.

表2 各种材料弹性参数

Table 2 Elastic parameters of various materials

材料	再生骨料取代率/%	杨氏模量/MPa	泊松比	强度等级
混凝土	0	34 998	0.200	C50
混凝土	50	29 748	0.200	C50
混凝土	100	24 498	0.200	C50
钢筋		2.06×10^5	0.285	HRB400
栓钉		2.06×10^5	0.285	ML15
钢管柱		2.06×10^5	0.285	Q235
钢梁		2.06×10^5	0.285	Q235

1.2 有限元模型

基于课题组前期研究成果,本研究采用的建模方法已经过系统化验证:通过开展钢管混凝土柱、钢-混凝土组合梁、节点和两层框架的有限元模拟和试验研究,发现有限元模拟和试验研究结果高度吻合[12].这一验证过程充分证实了采用该模型进行钢管再生混凝土柱-组合梁空间框架结构抗震性能分析的合理性.

算例框架主要由钢管、混凝土柱、主梁、次梁、加强环、混凝土楼板、钢筋网等 13 个部件组成,其有限元模型如图 3 所示.为部件进行网格划分时,除梁柱节点处、楼板与栓钉连接处采用精细化网格,其他部分采用一般网格形式进行划分.在各部件单元类型方面,混凝土柱、楼板及屋面板采用的单元类型为 C3D8R;钢梁、加强环和钢管柱采用的单元类型为 S4R;栓钉采用的单元类型为 B31[13];钢筋网及拉筋采用的单元类型为 T3D2.

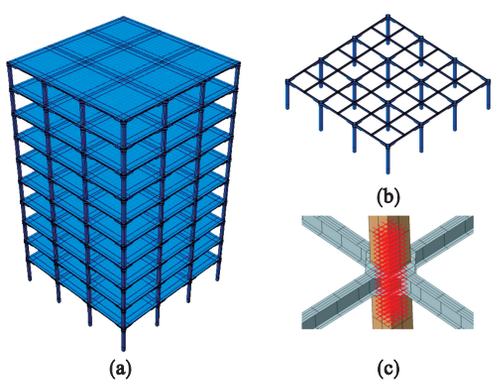


图3 空间框架有限元模型

Fig. 3 Finite element model of space frame

(a)—组合框架整体;(b)—单层钢管混凝土柱、加强环、钢梁、栓钉;(c)—加强环及内拉筋.

参考文献[12],在相互作用模块分别拾取混凝土柱表面和钢管柱内表面完成面-面约束,且将混凝土柱表面设置为主表面,钢管柱内表面为从表面;将钢筋网及栓钉分别内置于楼板内,内置区域选择钢筋网或栓钉,主机区域选择楼板;钢管柱与加强环之间采用“结点-表面”的绑定约束;对于带拉筋的算例,还需将拉筋内置于混凝土柱中.

1.3 材料本构

依据混凝土损伤比强度理论,普通混凝土及再生混凝土三轴塑性损伤本构参数取值如下[14]:膨胀角取 40°,偏心率取 0.1,双轴等压与单轴受压极限强度比取 1.331,拉压子午线强度比 K 取

0.64,黏性参数取0.000 5.

考虑钢管对混凝土的约束作用使应力-应变曲线下降段缓和,普通混凝土和再生混凝土本构关系采用丁发兴等[6]提出的塑性-损伤模型,其无量纲的应力(y)应变(x)曲线方程如下:

$$y=\begin{cases}\dfrac{A_i x+(B_i-1)x^2}{1+(A_i-2)x+B_i x^2}, & x\leqslant 1;\\ \dfrac{x}{\alpha_i(x-1)^2+x}, & x>1.\end{cases}\tag{1}$$

式中:A_i与B_i为上升段参数;α_i为下降段参数,当横向配箍率或含钢率为0时,取$\alpha_1=4.0\times10^{-3}f_{cu}^{1.5}$;当横向配箍率或含钢率大于2%时,取$\alpha_1=0.15$;当横向配箍率或含钢率在0~2%之间时,根据钢管混凝土柱含钢率进行线性内插取值.

当i=1时,$y=\sigma/f_c$,$x=\varepsilon/\varepsilon_c$,$\sigma$为应力,$\varepsilon$为应变,$f_c$为单轴抗压强度,$\varepsilon_c$为单轴抗压峰值应变;当$i$=2时,$y=\sigma/f_t$,$x=\varepsilon/\varepsilon_t$;$f_t$为单轴抗拉强度,$\varepsilon_t$为单轴抗拉峰值应变.具体参数表达式如表3所示.

表3　部分参数表达式

Table 3　Expressions of selected parameters

受力方式	压	拉
普通混凝土	$f_c=0.4f_{cu}^{7/6}$,$E_c=9\,500f_{cu}^{1/3}$,$\varepsilon_c=291f_{cu}^{7/15}\times10^{-6}$; $A_1=6.9f_{cu}^{-11/30}$,$B_1=1.67(A_1-1)^2$	$f_t=0.24f_{cu}^{2/3}$,$\varepsilon_t=33f_{cu}^{1/3}\times10^{-6}$, $A_2=1.3$,$B_2=0.15$,$\alpha_2=0.8$
再生混凝土	$f_c=0.4f_{cu}^{7/6}(1-0.1\eta)$,$E_c=9\,500f_{cu}^{1/3}(1-0.3\eta)$, $\varepsilon_c=(1+0.2\eta)291f_{cu}^{7/15}\times10^{-6}$, $A_1=6.9f_{cu}^{-11/30}(1-0.3\eta)(1+0.2\eta)/(1-0.1\eta)$, $B_1=1.67(A_1-1)^2$	$f_t=0.24f_{cu}^{2/3}(1-0.1\eta)$,$\varepsilon_t=$ $33f_{cu}^{1/3}\times10^{-6}(1+0.1\eta)$, $A_2=1.3(1-0.3\eta)(1+0.1\eta)/(1-0.1\eta)$, $B_2=1.67(A_2-1)^2$,$\alpha_2=0.8$

注:η为再生骨料取代率.

基于课题组前期有关研究,钢管柱、钢梁、加强环、拉筋及楼面筋采用Ding等[15]提出的弹塑性混合强化模型,具体参数取值:零塑性应变处的屈服应力为钢材屈服强度235 MPa,随动硬化参数$C1$为7 500,屈服面最大变化Q_∞为屈服强度的1/2,即117.5 MPa,背应力变化率γ为50,硬化参数b为0.1.

栓钉采用硬化类型为各向同性的弹塑性本构模型,其应力-应变关系如下[16]:

$$\sigma=\begin{cases}E_s\varepsilon, \varepsilon\leqslant\varepsilon_y;\\ f_y+0.01E_s(\varepsilon-\varepsilon_y), \varepsilon_y<\varepsilon\leqslant\varepsilon_u;\\ 1.2f_y, \varepsilon>\varepsilon_u.\end{cases}\tag{2}$$

式中:$E_s=2.06\times10^5$ MPa;f_y为屈服强度;ε_y为屈服应变;ε_u为极限应变,取$\varepsilon_u=21\varepsilon_y$.

1.4　边界条件与荷载输入

在ABAQUS有限元软件中,对空间框架模型柱底部施加完全固定约束,限制X,Y,Z 3个方向的位移与转动,即$U_1=U_2=U_3=U_{R_1}=U_{R_2}=U_{R_3}=0$.

对整个模型施加9.8 m/s^{2}重力加速度,完成结构自重输入.本文算例中活荷载取值严格按照建筑功能区分,屋面区域按照"上人屋面"类别采用2.0 kN/m^{2}标准值,楼面区域采用4.0 kN/m^{2}标准值,并施加在结构相应区域.

选取El Centro波前20 s的加速度数据进行结构动力响应分析,其在3个方向的原始加速度数据如图4所示.依据《建筑结构荷载规范》[17],加速度峰值的原始数据调幅至9度多遇(0.14 g)、8度罕遇(0.40 g)、9度罕遇(0.62 g)及以上.

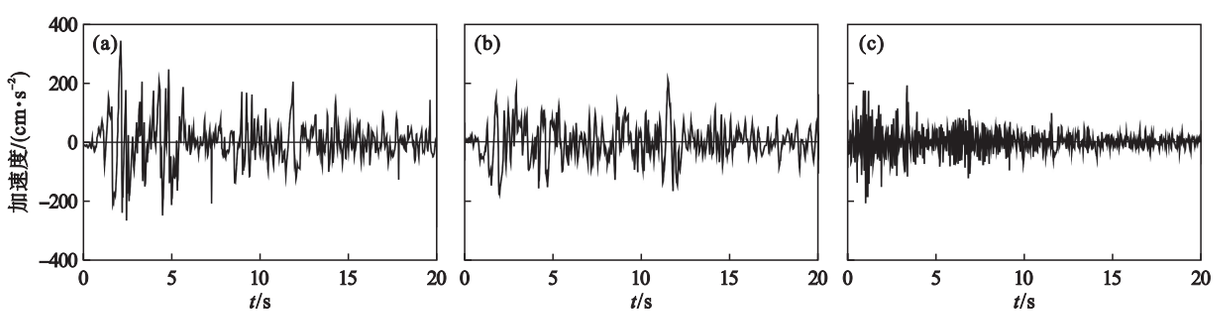


图4　地震波选取

Fig. 4　Selected seismic waves

(a)—N-S方向;(b)—E-W方向;(c)—U-D方向.

1.5 频率与振型分析

不同再生骨料取代率和柱端拉筋增强约束措施对结构自振频率的影响如表4,表5所示.主要参考结构一阶自振频率,由表可知:1) 再生骨料取代率会降低组合框架的自振频率,50%取代率和100%取代率使结构一阶自振频率降低2.15%和4.72%;2) 拉筋增强约束措施能够显著提升组合框架的一阶自振频率,相较于基准框架KJ-1,KJ-4(η=0.5)与KJ-5(η=1)的一阶自振频率提升6.87%和4.29%,说明柱端拉筋可以有效抵消再生骨料取代率对结构自振频率的影响;3) 再生骨料取代率及柱端拉筋增强约束对结构各阶振型均无明显影响.

表4 再生骨料取代率对结构自振频率的影响

Table 4 Influence of recycled aggregate replacement ratio on structural natural vibration frequency

阶数	自振频率/Hz		降低/%	自振频率/Hz	降低/%	振型
	基准框架KJ-1	普通框架KJ-2(η=0.5)		普通框架KJ-3(η=1)		
1	0.233	0.228	2.15	0.222	4.72	平动
2	0.258	0.252	2.33	0.244	5.43	平动
3	0.299	0.291	2.68	0.283	5.35	扭转
4	0.735	0.717	2.48	0.696	5.31	弯曲
5	0.807	0.785	2.73	0.760	5.82	弯曲
6	0.936	0.910	2.78	0.881	5.88	扭转

表5 增强约束措施对结构自振频率的影响

Table 5 Influence of reinforcement constraint measure on structural natural vibration frequency

阶数	自振频率/Hz		提升/%	自振频率/Hz	提升/%	振型
	基准框架KJ-1	拉筋框架KJ-4(η=0.5)		拉筋框架KJ-5(η=1)		
1	0.233	0.249	6.87	0.243	4.29	平动
2	0.258	0.256	−0.78	0.248	−3.88	平动
3	0.299	0.306	2.34	0.297	−0.67	扭转
4	0.735	0.780	6.12	0.757	2.99	弯曲
5	0.807	0.800	−0.87	0.773	−4.21	弯曲
6	0.936	0.955	2.03	0.925	−1.17	扭转

2 结构响应分析

2.1 极限强度地震波与层间位移角

在一维地震波作用下,KJ-1和KJ-2(η=0.5)可承受的最大水平地震波强度为1 500 cm/s^2,考虑KJ-3(η=1)在1 500 cm/s^{2}水平地震波作用下产生了过大的层间位移角,认为KJ-3能承受的极限地震波强度为1 250 cm/s^2;拉筋框架KJ-4(η=0.5)和KJ-5(η=1)能承受的最大水平地震波强度为1 750 cm/s^2.在三维空间地震波作用下,KJ-1,KJ-2,KJ-3和KJ-5能承受的极限地震波强度为620 cm/s^2,KJ-4能承受的极限地震波强度为850 cm/s^2.

各算例在各种工况下的层间位移角响应如图5和图6所示.由图可知:1) 随着再生骨料取代率提高,模型算例层间位移角增大,一维地震波作用下主要体现在强度为1 500 cm/s^{2}水平地震波之后,三维地震波主要体现在强度为620 cm/s^{2}地震波之后;2) 拉筋框架KJ-4和KJ-5层间位移角明显低于基准框架KJ-1,说明柱端拉筋增强约束可以有效抵消再生骨料取代率对结构层间位移角的不利影响.

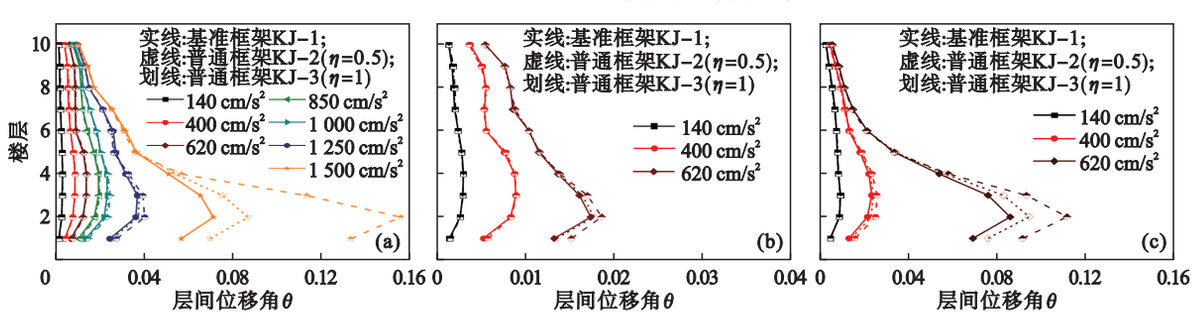


图5 再生骨料取代率对模型算例层间位移角的影响

Fig. 5 Influence of recycled aggregate replacement ratio on interlayer displacement angle for model calculation

(a)— 一维地震波;(b)—三维地震波X方向;(c)—三维地震波Z方向.

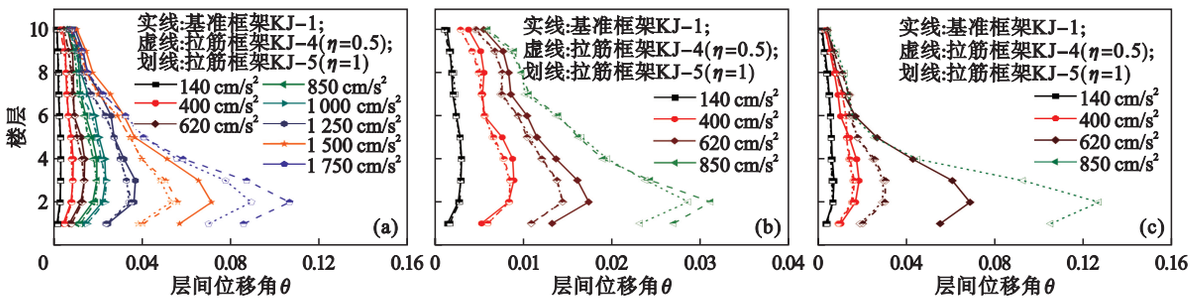


图 6　柱端拉筋对模型算例层间位移角的影响

Fig. 6　Influence of column end reinforcement on interlayer displacement angle for model calculation

(a)— 一维地震波;(b)—三维地震波 X 方向;(c)—三维地震波 Z 方向.

2.2　应力-应变曲线与界面滑移

图 7 绘制了各算例框架钢管混凝土柱底部的应力-应变曲线.由图可知:1) 再生骨料取代率使核心混凝土应变水平提高,应力水平降低,同时钢管的应变也有所增大.与基准框架 KJ-1 相比,KJ-2(η=0.5)和 KJ-3(η=1)核心混凝土最大应变分别提升 10.2% 和 23.7%,纵向钢管应变分别提升 31.7% 和 36.0%.表明再生骨料取代率通过直接降低核心混凝土的强度,降低钢管混凝土柱端应力-应变水平;2) 图 7c 和 7d 表明,柱端拉筋增强约束通过直接约束核心混凝土,提高其应力水平,使拉筋框架 KJ-4 和 KJ-5 柱端应力水平提高,增强钢管抗力水平.可见柱端拉筋增强约束可以有效抵消再生骨料取代率对钢管混凝土柱抗力造成的不利影响.

取边柱底部 2 000 mm 高处受力侧钢管和混凝土纵向位移,绘制出二者的位移差值曲线,如图 8 所示.由图可知:1) 相较于基准框架 KJ-1,2 种取代率下的普通框架界面滑移分别提升了 12.9% 和 35.5%,表明再生骨料取代率会增大结构柱端界面滑移;2) 与基准框架 KJ-1 相比,拉筋框架 KJ-4 和 KJ-5 界面滑移明显降低,表明柱端拉筋增强约束通过直接约束核心混凝土有效抵消了再生骨料取代率对结构界面滑移造成的不利影响.

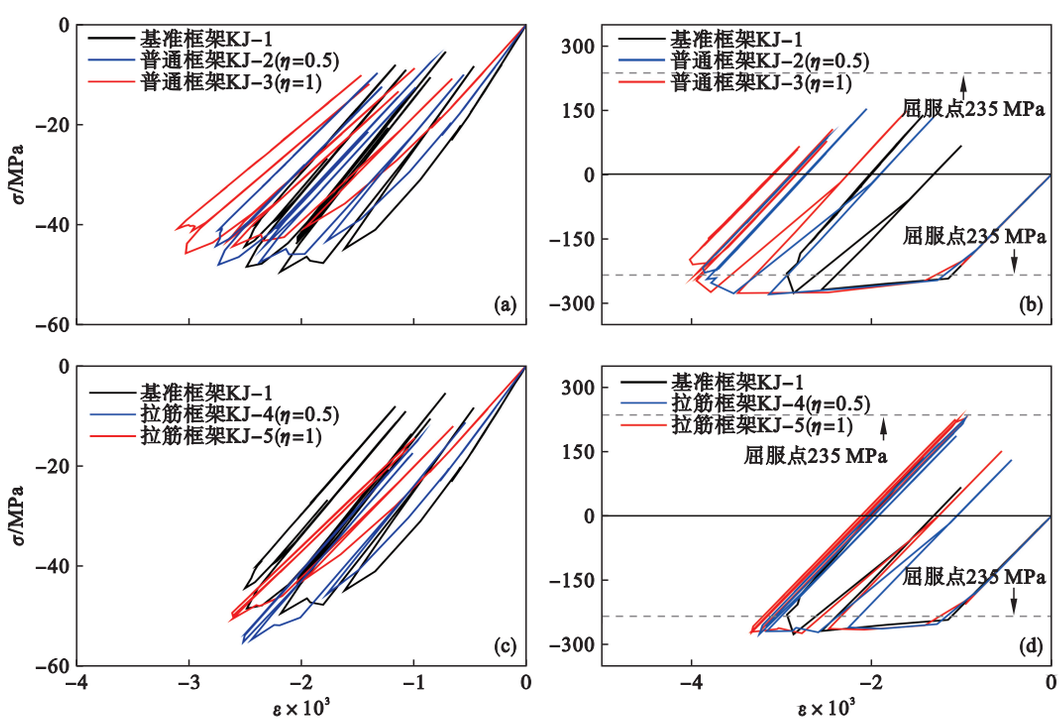


图 7　钢管混凝土柱应力-应变曲线

Fig. 7　Stress-strain curves of concrete-filled steel tubular column

(a),(c)—中柱底部混凝土应力-应变曲线;(b),(d)—中柱底部钢管应力-应变曲线.

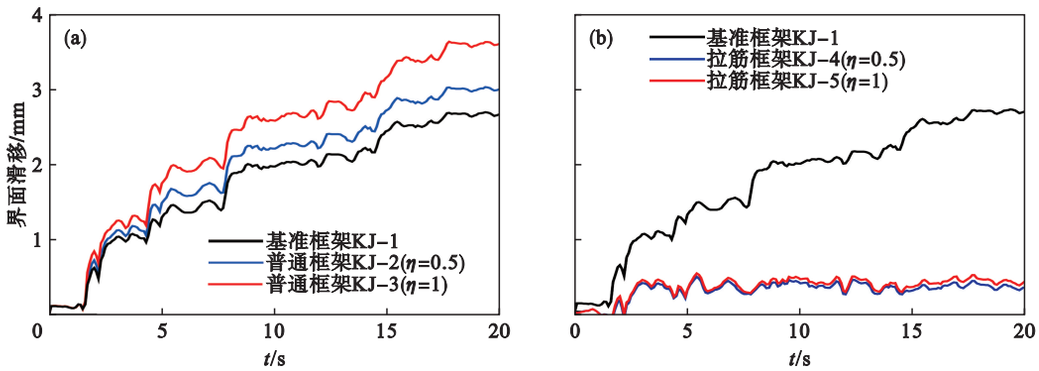


图 8 钢管混凝土柱纵向位移差值曲线

Fig. 8 Curves of longitudinal displacement difference of concrete-filled steel tubular column

(a)—再生骨料取代率对边柱界面滑移的影响;(b)—柱端拉筋增强约束对边柱界面滑移的影响.

3 结构塑性耗能与刚度损伤

3.1 结构塑性耗能分析

根据有限元计算结果,图 9 和图 10 绘制出再生骨料取代率和柱端拉筋对结构总塑性耗能及梁柱耗能占比的影响.由图可知:1) 由于结构在较小地震波作用下未进入弹塑性阶段,其总塑性耗能处于较低水平,此时再生骨料取代率对结构总塑性耗能影响不大;随着地震波强度增大,结构塑性耗能增大,再生骨料取代率提高使结构总塑性耗能增大;2) 再生骨料取代率对钢管混凝土柱抗震能力破坏明显,柱耗能占比显著提升;3) 与基准框架 KJ-1 相比,在相同地震波作用下,拉筋框架 KJ-4(η=0.5)和 KJ-5(η=1)结构总塑性耗能值更大,梁耗能占比更高.说明拉筋增强约束可以有效抵消再生骨料取代率对钢管混凝土柱抗力造成的削弱,使结构依然呈现强柱弱梁的耗能机制.

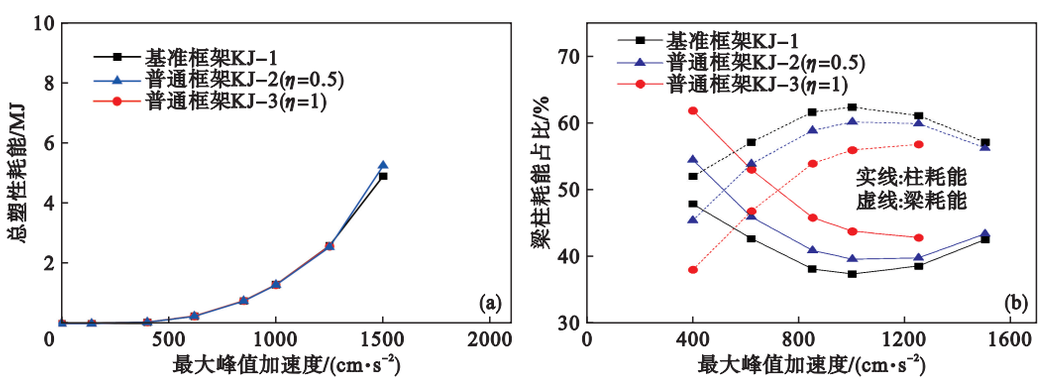


图 9 再生骨料取代率对结构总塑性耗能的影响

Fig. 9 Influence of recycled aggregate replacement ratio on total plastic energy dissipation of structure

(a)—结构总塑性耗能;(b)—梁柱耗能占比.

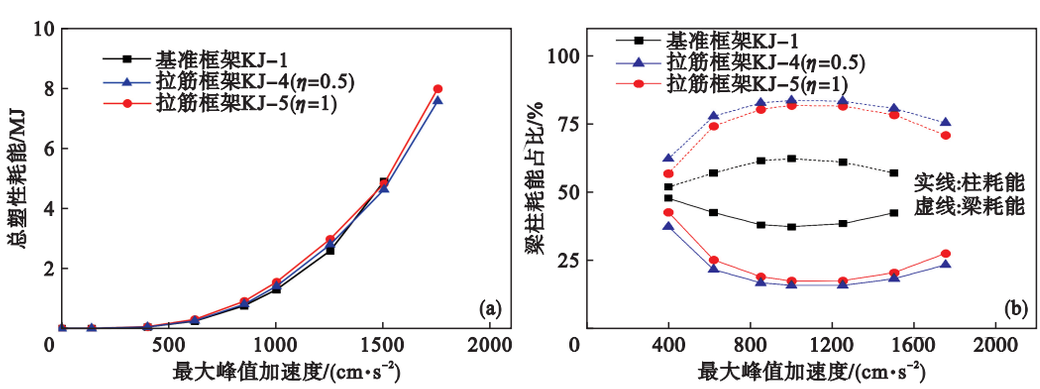


图 10 柱端拉筋对结构总塑性耗能的影响

Fig. 10 Influence of column end reinforcement on total plastic energy dissipation of structure

(a)—结构总塑性耗能;(b)—梁柱耗能占比.

3.2　结构塑性铰发展

基于课题组前期研究成果,对结构塑性铰判定依据如下[12]:梁端下翼缘受压屈服或受拉屈服达截面高度的1/3时为梁端压铰或拉铰;柱端钢管截面受压屈服或受拉屈服达截面高度1/3时为柱端压铰或拉铰.依据上述判定准则及有限元计算结果,图11绘制出模型算例在一维和三维地震波作用下的塑性铰分布图.由图可知:1) 再生骨料对结构柱端抗震不利;再生骨料取代率增加会使柱端塑性铰数量增多,梁端塑性铰数量减少;2) 与基准框架KJ-1对比,不同取代率下的拉筋框架KJ-4和KJ-5柱端塑性铰数量更少,梁端塑性铰数量更多,说明柱端拉筋增强约束可以增强结构柱端抗力,有效抵消再生骨料取代率对结构塑性铰发展带来的不利影响.

3.3　震后刚度损伤

根据有限元结果,绘制出各算例在不同地震波作用下刚度损伤变化图,如图12所示:1) 再生骨料取代率对结构破坏模式无明显影响,各算例均因"梁端拉铰"失效而破坏;2) 随着再生骨料取代率提高,结构抗倒塌能力减弱,结构刚度损伤增长幅度提高,刚度损伤变大;3) 对比基准框架KJ-1、拉筋框架KJ-4(η=0.5)和KJ-5(η=1)3个算例的刚度损伤计算结果,可知:KJ-4和KJ-5的刚度损伤低于KJ-1,说明施加拉筋增强约束后,结构柱端刚度更大,抗震性能更好,柱端拉筋增强约束可以有效抵消再生骨料取代对结构刚度损伤带来的不利影响.

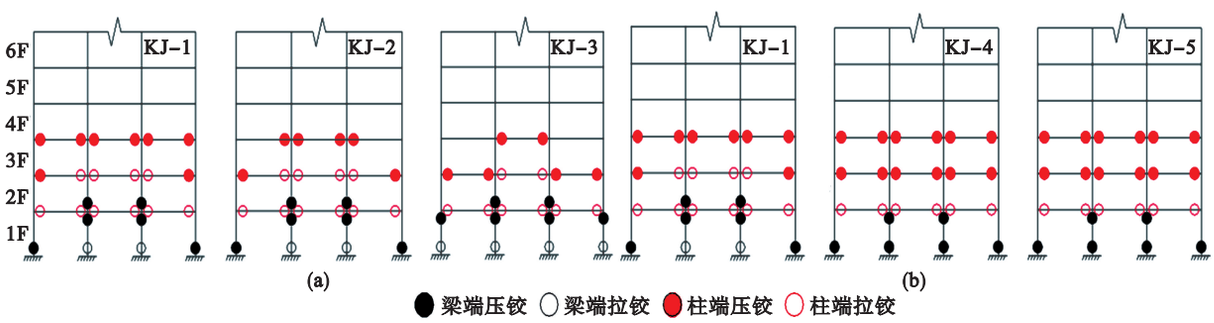


图11　结构塑性铰分布

Fig. 11　Distribution of plastic hinges of structure

(a)—再生骨料取代率影响;(b)—柱端拉筋影响.

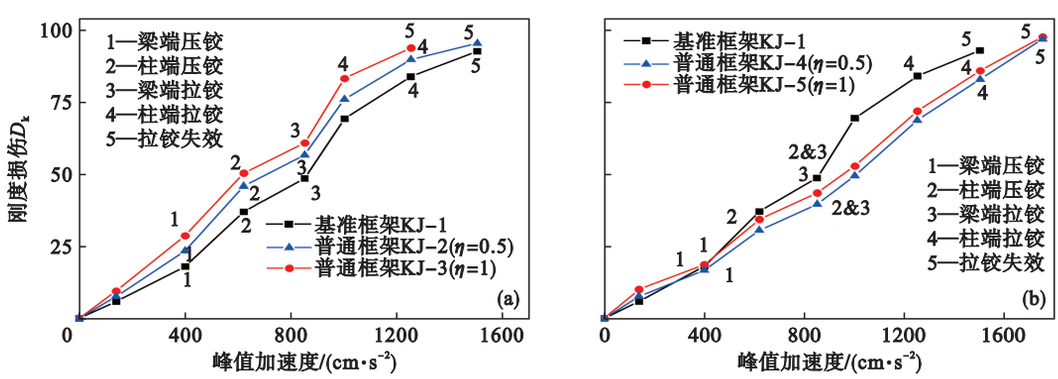


图12　结构刚度损伤

Fig. 12　Structural stiffness damage

(a)—再生骨料取代率对结构刚度损伤的影响;(b)—拉筋增强约束对结构刚度损伤的影响.

4　结　　论

1) 本文探讨了再生骨料取代率对框架抗震性能的影响规律,结果表明再生骨料取代率会直接降低钢管混凝土柱核心混凝土强度,导致结构自振频率减小、层间位移角增大、钢管混凝土柱界面滑移增大、结构塑性耗能降低、地震作用后的刚度损伤增大,且再生骨料取代率越大,其对结构抗震性能影响越明显.

2) 柱端拉筋增强约束措施能够显著提升结构抗震性能.相较于普通框架,施加拉筋增强约束再生混凝土框架自振频率更高、层间位移角更小、刚度损伤更低、结构抗震性能更好.柱端拉筋

可以抵消再生骨料取代率对结构抗震性能造成的不利影响.

参考文献:

[1] 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.)

[2] 丁发兴, 许云龙, 王莉萍, 等. 钢-混凝土组合结构抗震性能研究进展[J]. 钢结构(中英文), 2023, 38(12): 1-26.
(Ding Fa-xing, Xu Yun-long, Wang Li-ping, et al. State of art and future insights of the seismic performance of steel-concrete composite structures [J]. *Steel Construction* (*Chinese & English*), 2023, 38(12): 1-26.)

[3] Topçu I L B, Günçan N F. Using waste concrete as aggregate[J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(7): 1385-1390.

[4] Xiao J Z, Li J B, Zhang C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(6): 1187-1194.

[5] Liu B, Feng C, Deng Z H. Shear behavior of three types of recycled aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 217: 557-572.

[6] 丁发兴, 方常靖, 龚永智, 等. 再生混凝土单轴力学性能指标统一计算方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(4): 16-22.
(Ding Fa-xing, Fang Chang-jing, Gong Yong-zhi, et al. Unified calculation method of uniaxial mechanical performance index of recycled concrete[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2014, 31(4): 16-22.)

[7] Ma H, Xue J Y, Zhang X C, et al. Seismic performance of steel-reinforced recycled concrete columns under low cyclic loads[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 48: 229-237.

[8] Tang Y C, Li L J, Feng W X, et al. Seismic performance of recycled aggregate concrete-filled steel tube columns[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 133: 112-124.

[9] Xiao J Z, Sun Y D, Falkner H. Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete[J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(1): 1-8.

[10] Lu D R, Wang W J, Ding F X, et al. The impact of stirrups on the composite action of concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading[J]. *Structures*, 2021, 30: 786-802.

[11] 丁发兴, 许云龙, 王莉萍, 等. 拉筋对两层两跨钢-混凝土组合框架结构抗震性能的影响[J]. 工程力学, 2023, 40(4): 58-70.
(Ding Fa-xing, Xu Yun-long, Wang Li-ping, et al. Pseudo-static tests of stirrup-confined square CFST two-story two-span composite frame structure [J]. *Engineering Mechanics*, 2023, 40(4): 58-70.)

[12] Xu Y L, Ding F X, Lyu F, et al. Study on dynamic performance of CFST column-composite beam frame structural system under strong earthquake[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 94: 109970.

[13] Zhang J K, Liu P, He C, et al. Torsional behavior of I-steel-concrete composite beam considering the composite effects [J]. *Structural Concrete*, 2022, 23(2): 1151-1175.

[14] Xu Q Y, Sun H, Ding F X, et al. Analysis of ultimate seismic performance of thin-walled concrete-filled steel tube bridge piers under dynamic load [J]. *Engineering Structures*, 2023, 292: 116544.

[15] Ding F X, Yin G A, Wang L P, et al. Seismic performance of a non-through-core concrete between concrete-filled steel tubular columns and reinforced concrete beams[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 110: 14-26.

[16] Ding F X, Ying X Y, Zhou L C, et al. Unified calculation method and its application in determining the uniaxial mechanical properties of concrete [J]. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 2011, 5: 381-393.

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Lode code for the design of building structures: GB50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)