

沙漠砂混凝土框架节点抗震性能试验研究

李志强¹, 张华东¹, 甘丹^{1,2}

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:为研究古尔班通古特沙漠砂混凝土框架节点的抗震性能,对9个缩尺比为1/2的框架节点进行了拟静力试验研究,研究了沙漠砂替代率、轴压比和配箍率对节点破坏模式、耗能能力、延性、刚度和恢复力模型的影响。研究结果表明:沙漠砂替代率由0%逐渐增加到80%时,试件的破坏现象、骨架曲线、耗能、刚度退化主要受沙漠砂混凝土的强度和应力-应变关系影响,延性逐渐降低,且沙漠砂替代率为80%的构件其延性较首个试件降低了11.48%;轴压比由0.2逐渐增加到0.6时,峰值荷载提高约3%,延性降低约5%,等效黏滞阻尼系数增加约18%,刚度退化程度增加;配箍率由0.50%逐渐增加到2.52%时,峰值荷载提高近10%,延性提高约6%,等效黏滞阻尼系数增加约25%,刚度退化减缓。整体而言,沙漠砂混凝土框架节点的抗震性能与普通混凝土试件相似。建立了沙漠砂混凝土框架节点的三折线恢复力模型,且计算模型与试验结果吻合良好。

关键词:抗震性能;沙漠砂混凝土;拟静力试验;框架节点;恢复力模型

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)03-0757-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.03.018

引言

随着建筑业的飞速发展,河砂资源日益短缺。利用沙漠砂替代河砂的研究得到了国内外学者的关注。李志强等^[1-3]对古尔班通古特沙漠砂混凝土的力学性能和柱的抗震性能开展了相关研究。张明虎等^[4]对毛乌素沙漠砂混凝土的动态力学性能及本构模型开展了相关研究。张广泰等^[5]对托克逊沙漠砂混凝土的力学性能开展了相关研究。董伟等^[6]对库布齐风积沙混凝土的轴心受压力学性能开展了相关研究。Park等^[7]、Amel等^[8]、Jiang等^[9]和 Zaitri等^[10]对掺有非洲撒哈拉沙漠砂的混凝土的力学性能开展了相关研究。董存等^[11]对沙漠砂混凝土梁的受力性能的试验研究表明,沙漠砂混凝土梁有较好的受力性能。研究表明,可以用沙漠砂替代部分河砂,达到与普通混凝土相似的力学性能。

目前,国内外有关框架节点的研究成果比较丰富^[12-14],但是有关沙漠砂混凝土框架节点的研究还未见报道。据此,本文以9个缩尺比为1/2的沙漠砂混凝土框架节点为研究对象,通过分析沙漠砂替代率、轴压比和配箍率对节点抗震性能的影响,揭示其抗震机理,建立恢复力模型,为沙漠砂混凝土框架节点的工程应用提供依据。

1 试验概况

1.1 试件制作

试验所用材料为:天业牌PO42.5R(旋)普通硅酸盐水泥,Ⅰ级粉煤灰,玛纳斯河洗砂、古尔班通古特沙漠砂作为细骨料,经筛分的5~20 mm石子作为粗骨料,HSC牌减水剂和自来水。其中沙漠砂的平均粒径为0.183 mm,细度模数为0.334,其相关性能指标见文献[3]。此外,沙漠砂混凝土的力学性能、施工性能指标见文献[2-3]。

为了研究节点核心区的抗震性能及受力机理,参考钢筋混凝土框架节点抗震^[12,15]的设计原则,设计了9个框架节点试件,具体参数设置如表1所示。其中沙漠砂替代率 r 的范围为0%~80%(r =沙漠砂质量/(沙漠砂质量+河砂质量));混凝土立方体强度为150 mm³立方体标准试块强度;轴压比 n 的范围为0.20~0.40, $n=N/(f_c A)$,其中, N 为施加在柱顶的轴向荷载, f_c 为试件的混凝土抗压强度设计值, A 为试件的截面尺寸;箍筋的配箍率分别为0.50%($\Phi 8@250$),1.57%($\Phi 8@80$),2.52%($\Phi 8@50$,梁、柱的纵筋为 $\Phi 14$ 的HRB400级钢。)。梁、柱截面尺寸及配筋如图1所示,1-1截面为柱截面详图,2-2为梁截面详图;所有钢筋均为HRB400级钢,

收稿日期:2021-09-22; 修订日期:2021-12-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52268034,51668053);兵团科技创新人才计划项目(2021CB043)。

钢筋材料性能如表 2 所示。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Specimens design parameters

试件编号	沙漠砂 替代率 $r/\%$	混凝土 立方体强度 f_{cu}/MPa	轴压比 n	配箍率 $\rho_s/\%$
DSCJ-1	0	49.71	0.40	1.57
DSCJ-2	20	41.37	0.40	1.57
DSCJ-3	40	45.31	0.40	1.57
DSCJ-4	60	46.87	0.40	1.57
DSCJ-5	80	48.72	0.40	1.57
DSCJ-6	60	51.09	0.20	1.57
DSCJ-7	60	46.87	0.60	1.57
DSCJ-8	60	47.56	0.40	0.50
DSCJ-9	60	45.80	0.40	2.52

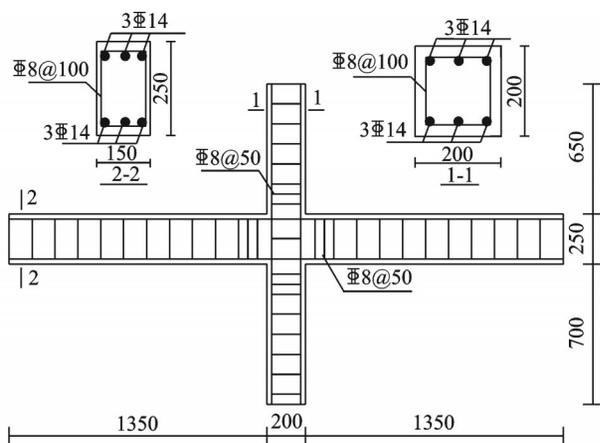


图 1 试件尺寸及配筋示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of specimen size and reinforcement (Unit:mm)

表 2 钢筋材料性能

Tab. 2 Material properties of reinforcement

钢筋型号	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	弹性模量 E_s/GPa
Φ8	427.6	567.1	2.00
Φ14	421.7	606.5	2.02

1.2 试验加载及量测方案

采用拟静力加载方法,加载装置如图 2 所示。

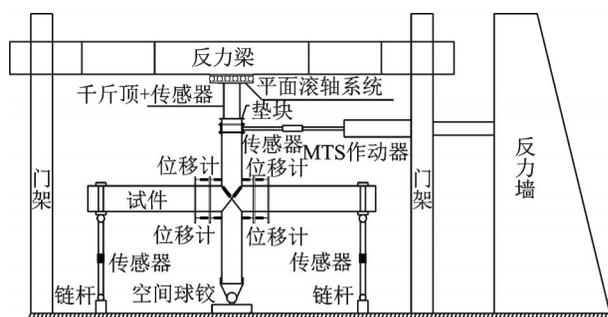


图 2 拟静力试验加载装置

Fig. 2 Loading device of pseudo static test

加载前,首先根据各试件的轴压比在柱顶施加预定轴压力,然后采用 MTS 在加载点施加水平低周反复荷载。水平荷载按照位移控制进行加载,前 10 级荷载每级以目标位移(即层间位移角为 0.03 所对应的位移)的 1% 增量进行加载,每级循环 1 次;此后每级以目标位移的 5% 增量进行加载,每级循环 2 次,当试件承载力下降至峰值荷载的 80% 后停止加载,加载制度如图 3 所示。

试验中主要观测内容:柱顶加载点处的水平荷载及位移,节点核心区的位移变化、裂缝开展情况、混凝土剥落情况、破坏形态等。

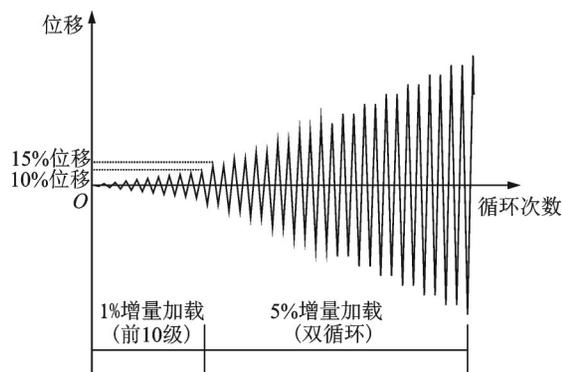


图 3 加载制度图

Fig. 3 Schematic diagram of loading protocol

2 试验结果与分析

2.1 试验现象与破坏模式

所有试件破坏模式与预期结果一样,节点核心区均发生了剪切破坏,如图 4 所示。加载初期,试件处于线弹性阶段,无裂缝出现,滞回曲线基本为一条斜线;随着水平荷载的增加,首先在梁端底部受拉区出现第一条垂直裂缝,宽度约为 0.08 mm;继续加载,当水平荷载达到 60%~69% 的峰值荷载 P_{max} 时,节点核心区出现 45° 的 X 形交叉裂缝,长度约为 100 mm,宽度约为 0.1 mm;当水平荷载达到 80%~84% 的 P_{max} 时,试件屈服,节点核心区产生了 2 条贯通的主斜裂缝,宽度约为 3 mm,节点核心区出现轻微混凝土剥落现象;当水平荷载达到 P_{max} 时,交叉裂缝迅速加宽到约为 6 mm,节点核心区小块混凝土剥落。此后,试件的水平荷载逐渐下降,核心区交叉裂缝宽度迅速加宽,并伴随大面积混凝土剥落。

由图 4(a)~(e)可以看出,试件 DSCJ-2 的混凝土剥落更为显著,而试件 DSCJ-1, DSCJ-3, DSCJ-4 和 DSCJ-5 的破坏较相似。

由表 1 可知,随着沙漠砂替代率的增加,各试件

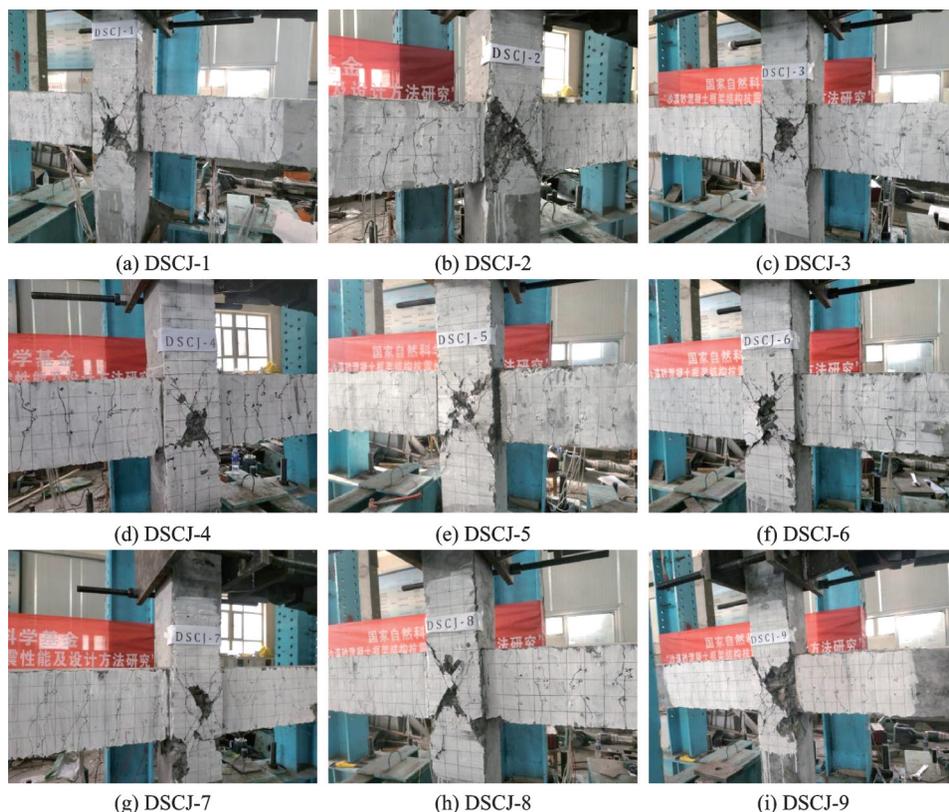


图 4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure patterns of specimens

较普通混凝土试件(试件 DSCJ-1)的混凝土立方体强度分别降低了 16.78%, 8.85%, 5.71% 和 1.99%, DSCJ-2 的混凝土强度降低较显著, 因此其核心区混凝土较早发生剪切破坏。

该现象表明, 沙漠砂替代率基本不影响试件破坏模式; 试件破坏模式主要由其混凝土强度决定。

由图 4(f), (d), (g) 可以看出, 试件 DSCJ-6 的混凝土剥落现象比 DSCJ-4 和 DSCJ-7 显著, 主要原因是轴压比的增大可减小节点的剪切变形^[16], 轴压

比较小的试件 DSCJ-6 抗剪切变形能力相对较低。

由图 4(h), (d), (i) 可以看出, 试件 DSCJ-9 的混凝土剥落现象比 DSCJ-4 和 DSCJ-8 显著, 主要原因是配箍率较高的试件可以避免核心区混凝土较早地发生剪切破坏, 混凝土充分受剪, 箍筋充分受拉, 耗能效果更显著。

总的来说, 沙漠砂混凝土试件的破坏模式与普通混凝土试件相似。各试件的荷载位移特征值及破坏形态如表 3 所示。

表 3 试件荷载位移特征值及破坏形态

Tab. 3 Load displacement characteristic values and failure modes of specimens

试件编号	初裂状态		屈服状态		峰值状态		极限状态		延性系数 μ	极限位移角 $\theta/\%$	破坏形态
	Δ_{cr}/mm	P_{cr}/kN	Δ_y/mm	P_y/kN	Δ_{max}/mm	P_{max}/kN	Δ_u/mm	P_u/kN			
DSCJ-1	11.7	33.2	19.7	45.4	34.3	54.3	49.6	46.2	2.517	3.1	剪切破坏
DSCJ-2	11.2	32.5	19.6	39.5	34.6	45.8	49.2	38.9	2.510	3.0	剪切破坏
DSCJ-3	11.7	33.1	18.3	40.4	29.7	49.9	45.8	42.4	2.502	2.9	剪切破坏
DSCJ-4	11.7	31.8	18.6	43.7	29.7	51.7	44.8	43.9	2.409	2.8	剪切破坏
DSCJ-5	9.8	27.2	19.7	45.2	29.7	53.6	43.9	45.6	2.228	2.7	剪切破坏
DSCJ-6	9.7	25.5	21.6	42.1	39.6	50.5	53.5	42.9	2.477	3.3	剪切破坏
DSCJ-7	11.5	36.4	18.9	43.4	29.7	52.7	43.7	44.8	2.312	2.7	剪切破坏
DSCJ-8	8.7	24.7	18.8	40.0	34.7	49.2	43.6	41.8	2.319	2.7	剪切破坏
DSCJ-9	9.8	32.7	18.2	44.1	29.7	55.0	45.4	46.8	2.494	2.9	剪切破坏

注: Δ_{cr} 为开裂位移, P_{cr} 为开裂荷载; Δ_y 为屈服位移, P_y 为屈服荷载; Δ_{max} 为峰值位移, P_{max} 为峰值荷载; Δ_u 为极限位移, P_u 为极限荷载。

2.2 滞回曲线

图5为沙漠砂混凝土框架节点的实测侧向荷载-位移($P-\Delta$)滞回曲线。各试件的滞回性能相似,即加载初期, $P-\Delta$ 曲线大致呈线性变化,滞回环包围的面积很小,试件的耗能能力较小,试件处于弹性阶段;随着荷载增加,试件进入弹塑性阶段, $P-\Delta$ 曲线呈非线性变化,滞回线所围合的区域一般比较丰满,说明试件的耗能能力较好;峰值荷载作用后,试件进入刚度退化阶段,滞回曲线仍较丰满,但“捏缩”效应明显,滞回环呈Z形。

为了研究沙漠砂混凝土框架节点的抗震性能,

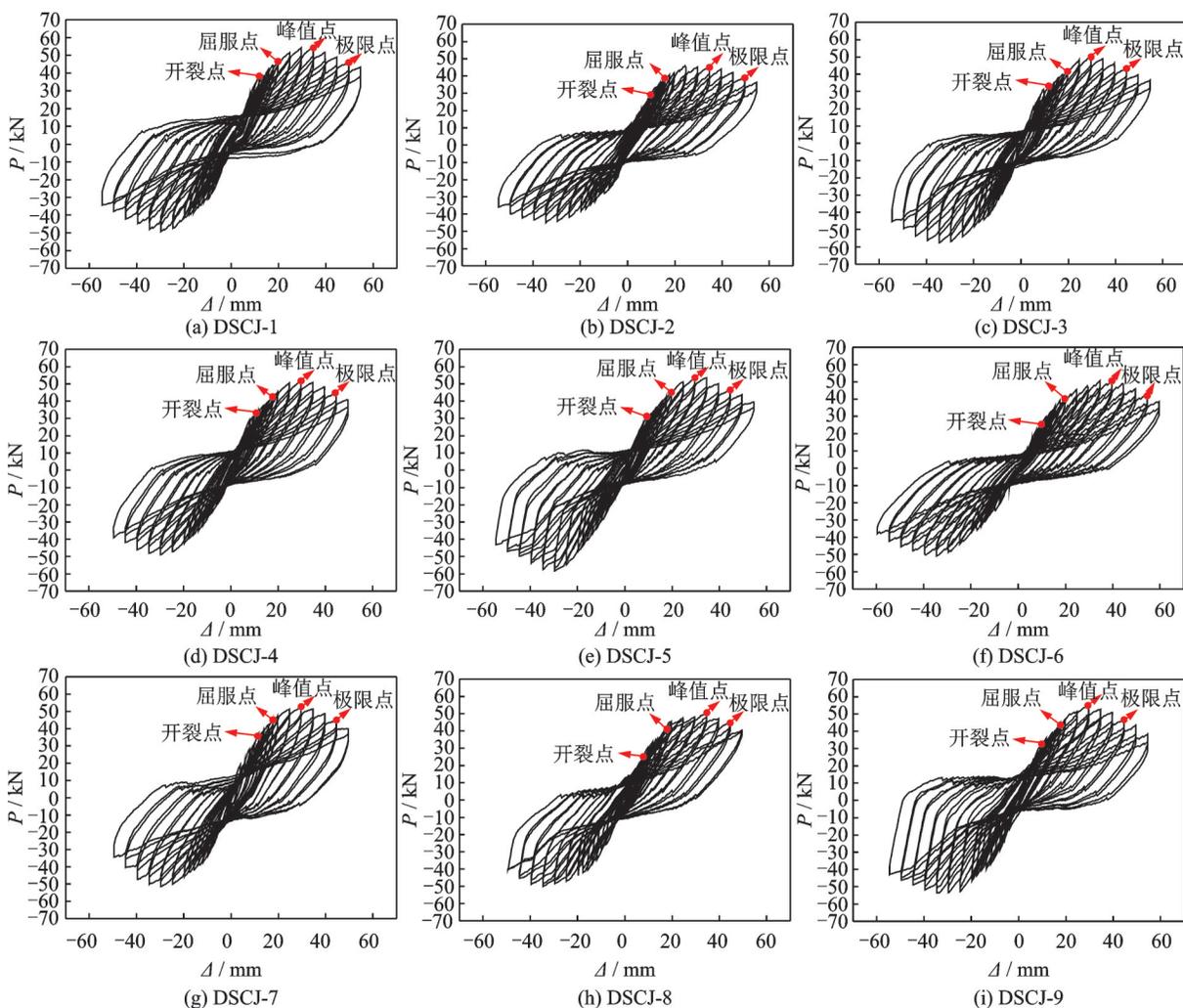


图5 试件 $P-\Delta$ 滞回曲线

Fig. 5 $P-\Delta$ hysteretic curves of specimens

(3) 由图5(h), (d), (i)可以看出,随配箍率的增加,滞回曲线的饱满度逐渐增加,极限位移角也逐渐增加(见表3),该结论与普通钢筋混凝土框架节点相似。

综上所述:沙漠砂混凝土框架节点的滞回性能与普通钢筋混凝土框架节点相似,都经历了弹性阶段、弹塑性阶段和刚度退化阶段,滞回曲线都很饱

满,表现出较好的抗震性能。

(1) 由图5(a)~(e)可看出,随沙漠砂替代率的增加,试件DSCJ-2,DSCJ-3,DSCJ-4和DSCJ-5滞回曲线的饱满度较DSCJ-1减小。主要原因是沙漠砂的掺入使得沙漠砂混凝土极限强度后的应力-应变曲线下降较普通混凝土更快^[2],造成滞回曲线的饱满度减小,以及极限层间位移角略微减小(见表3)。

(2) 由图5(f), (d), (g)可以看出,随轴压比的增加,滞回曲线的饱满度逐渐减小;极限位移角也逐渐减小(见表3),该结论与普通钢筋混凝土框架节点相似。

满,表现出较好的抗震性能。

2.3 骨架曲线

沙漠砂混凝土框架各节点的骨架曲线如图6所示。由图6可看出,加载初期, $P-\Delta$ 曲线大致呈线性关系,试件处于弹性工作阶段;随着荷载增加, $P-\Delta$ 曲线呈非线性关系,出现了明显的拐点,刚度及强度

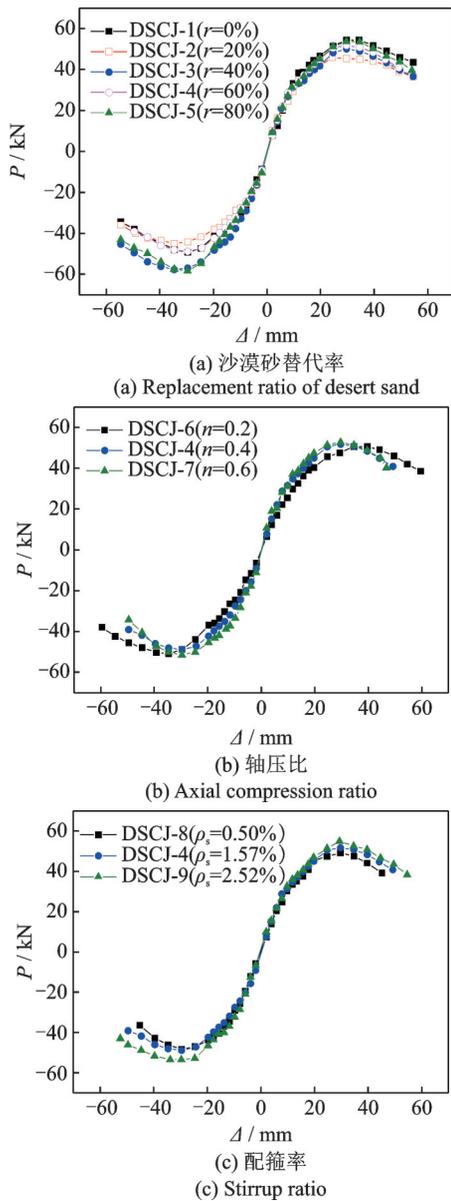


图 6 各设计参数对框架节点骨架曲线的影响

Fig. 6 Influences of design parameters on skeleton curves of frame joints

开始退化。随着位移的增加,强度衰减逐渐增长。

(1) 由图 6(a)及表 3 可看出,随沙漠砂替代率的增加,试件 DSCJ-2, DSCJ-3, DSCJ-4 和 DSCJ-5 比普通混凝土试件 DSCJ-1 的峰值荷载分别降低了 15.65%, 8.1%, 4.79% 和 1.29%, 其变化趋势与表 1 中沙漠砂混凝土抗压强度的变化趋势基本一致, 主要原因是极限承载力变化与混凝土的抗压强度有关。试件的极限位移呈逐渐减小趋势(见表 3), 造成该现象的原因是沙漠砂混凝土极限强度后的应力-应变曲线较普通混凝土的陡峭^[2], 变形能力有所降低。

(2) 由图 6(b)可看出,随轴压比的增加,试件 DSCJ-4 和 DSCJ-7 比 DSCJ-6 的峰值荷载分别提高了 2.38% 和 4.36%; 极限位移呈逐渐减小趋势(见表 3), 这与普通混凝土构件的变化规律相吻合。

(3) 由图 6(c)可看出,随配箍率的增加,试件

DSCJ-4 和 DSCJ-9 比 DSCJ-8 的峰值荷载分别提高了 5.08% 和 11.79%; 极限位移呈增加趋势(见表 3), 这与普通混凝土构件的变化规律基本一致。

2.4 延性性能

采用位移延性系数($\mu = \Delta_u / \Delta_y$)来评判试件的延性性能。其中, Δ_y 和 Δ_u 根据规范^[18-19]确定, 如图 7 所示。

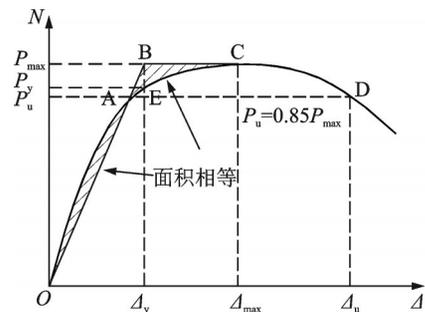


图 7 骨架曲线的特征点

Fig. 7 Characteristic points of the skeleton curve

各试件的位移延性系数如表 3 所示。由表 3 可看出:

(1) 随沙漠砂替代率的增加, 试件 DSCJ-2, DSCJ-3, DSCJ-4 和 DSCJ-5 比普通混凝土试件 DSCJ-1 的延性分别降低了 0.27%, 0.59%, 4.29% 和 11.48%。相关研究^[2]表明: 当荷载下降至峰值的 85% 时, 沙漠砂替代率为 20%, 40% 和 60% 的沙漠砂混凝土与普通混凝土的应力-应变曲线较接近; 而沙漠砂替代率为 80% 的沙漠砂混凝土其应力-应变曲线较陡峭, 造成构件的延性降低较显著。为此, 建议实际工程中沙漠砂的替代率不超过 60%。

(2) 随轴压比的增加, 试件 DSCJ-4 和 DSCJ-7 比 DSCJ-6 的延性分别降低 2.74% 和 6.66%。表明轴压比能够减少构件的延性, 其结论与普通混凝土构件一致。

(3) 随配箍率的增加, 试件 DSCJ-4 和 DSCJ-9 比 DSCJ-8 的延性分别提高 3.88% 和 7.55%。由于箍筋的环箍作用, 使核心区混凝土的受力性能得到提高, 表现为延性系数增大。

2.5 耗能能力

试件的能量耗散能力用等效黏滞阻尼系数 h_e 度量^[18]:

$$h_e = \frac{S_{ABCD}}{2\pi(S_{OAE} + S_{OCF})} \quad (1)$$

式中 $S_{ABCD}, S_{OAE}, S_{OCF}$ 如图 8 所示。

各试件的等效黏滞阻尼系数如表 4 所示。

由表 4 可看出:

(1) 随沙漠砂替代率的增加, 试件 DSCJ-2,

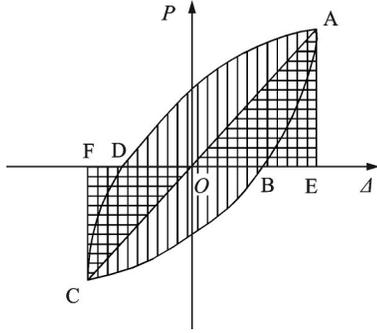


图8 等效黏滞阻尼系数计算示意图

Fig.8 Schematic diagram of equivalent viscous damping coefficient calculation

表4 试件等效黏滞阻尼系数

Tab.4 Equivalent viscous damping coefficients of specimens

试件编号	屈服点 h_{ey}	峰值点 h_{em}	极限点 h_{eu}
DSCJ-1	0.091	0.122	0.161
DSCJ-2	0.088	0.109	0.175
DSCJ-3	0.094	0.123	0.168
DSCJ-4	0.101	0.127	0.175
DSCJ-5	0.095	0.104	0.171
DSCJ-6	0.097	0.103	0.151
DSCJ-7	0.107	0.139	0.181
DSCJ-8	0.099	0.134	0.148
DSCJ-9	0.104	0.141	0.195

DSCJ-3, DSCJ-4 和 DSCJ-5 比 DSCJ-1 的等效黏滞阻尼系数分别增加 8.69%, 4.35%, 8.69% 和 6.21%。但是整体而言, 沙漠砂混凝土构件与普通混凝土构件的等效黏滞阻尼系数较接近。

(2) 随轴压比的增加, 试件 DSCJ-4 和 DSCJ-7 比 DSCJ-6 的等效黏滞阻尼系数分别增加 15.89% 和 19.87%, 耗能能力逐渐增加。

(3) 随配箍率的增加, 试件 DSCJ-4 和 DSCJ-9 比 DSCJ-8 的等效黏滞阻尼系数分别增加 18.24% 和 31.76%, 耗能能力逐渐增加。

相关研究表明, 构件的等效黏滞阻尼系数大致在 0.1~0.2 之间。本试验的等效黏滞阻尼系数平均值为 $h_{eu} = 0.17$, 表明沙漠砂混凝土框架节点具有较好的耗能能力。

2.6 刚度退化

采用割线刚度 $K_i = \pm |P_i| / |\Delta_i|$ 来衡量构件的刚度退化程度, 其中 P_i 和 Δ_i 如图 9 所示。

各试件的刚度退化如图 10 所示。由图 10 可看出:

(1) 随沙漠砂替代率的增加, 除了试件 DSCJ-2, 其他试件的刚度退化趋势较接近, 主要因试件 DSCJ-

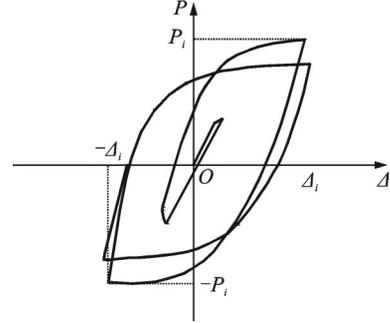
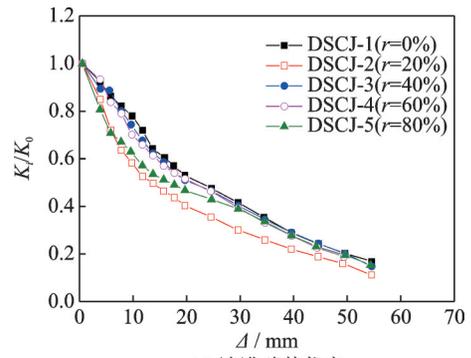
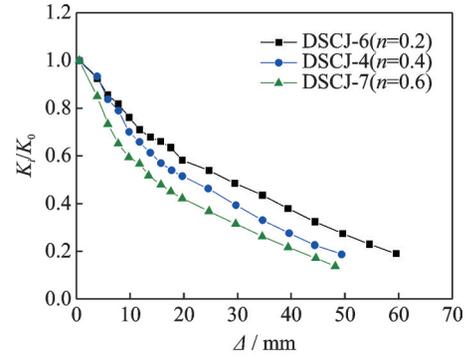


图9 割线刚度计算示意图

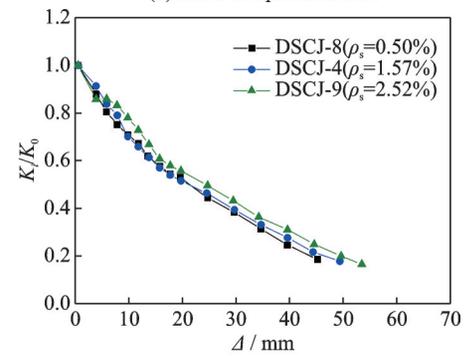
Fig.9 Schematic diagram of secant stiffness calculation



(a) 沙漠砂替代率
(a) Replacement ratio of desert sand



(b) 轴压比
(b) Axial compression ratio



(c) 配箍率
(c) Stirrup ratio

图10 各设计参数对框架节点刚度退化的影响

Fig.10 Influences of design parameters on stiffness degradation of frame joints

2 的混凝土立方体强度低, 核心区混凝土较早发生剪切破坏, 该现象与试件 DSCJ-2 的破坏形式一致 (见图 4(b)), 造成试件 DSCJ-2 比其他试件的刚度退化更显著 (见图 10(a), 图中 K_0 表示初始刚度)。结果

表明沙漠砂混凝土框架节点与普通混凝土框架节点的刚度退化规律基本一致。

(2) 刚度退化随轴压比的增加而逐渐增加(见图 10(b)),随配箍率的增加逐渐减缓(见图 10(c)),其刚度退化规律与普通混凝土试件的变化规律相吻合。

3 恢复力模型

3.1 骨架曲线建议模型

根据试验结果,将 9 个节点的荷载-位移曲线以峰值点为基准点进行无量纲化处理,可得无量纲骨架曲线,如图 11 所示。

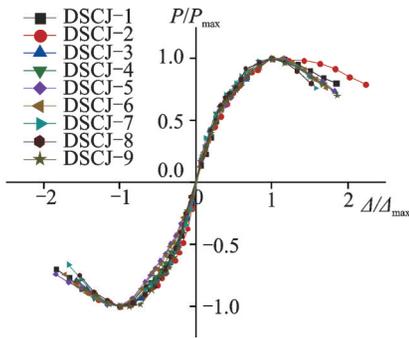


图 11 无量纲骨架曲线

Fig. 11 The dimensionless skeleton curve

由图 11 可看出,本试验得到的骨架曲线可划分为 3 个阶段(弹性段、弹塑性段及下降段),因此,可将无量纲骨架曲线简化为三折线计算模型^[20],如图 12 所示。

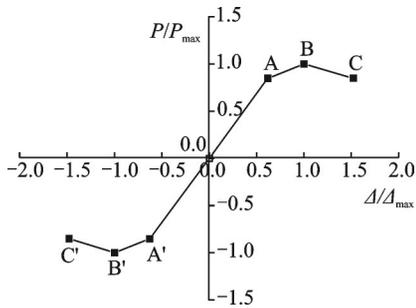


图 12 骨架曲线计算模型

Fig. 12 Calculation model of skeleton curve

建立骨架曲线三折线计算模型所需的 9 个关键参数如表 5 所示。

通过对三折线模型进行拟合,可得其各段回归方程及斜率,如表 6 所示。

表 5 骨架曲线关键参数

Tab. 5 Key parameters of skeleton curve

名称	符号	名称	符号	名称	符号
弹性阶段刚度	K_e	峰值荷载	P_{max}	极限荷载	P_u
屈服荷载	P_y	峰值位移	Δ_{max}	极限位移	Δ_u
屈服位移	Δ_y	屈服后刚度	K_y	下降段刚度	K_u

表 6 骨架曲线模型各线段回归方程

Tab. 6 Regression equation of each line segment of skeleton curve model

线段	回归方程	斜率
OA'	$P/P_{max}^- = 1.35796\Delta/\Delta_{max}^-$	1.35796
A'B'	$P/P_{max}^- = 0.3972\Delta/\Delta_{max}^- - 0.6028$	0.3972
B'C'	$P/P_{max}^- = -0.31193\Delta/\Delta_{max}^- - 1.31193$	-0.31193
OA	$P/P_{max}^+ = 1.37176\Delta/\Delta_{max}^+$	1.37176
AB	$P/P_{max}^+ = 0.39789\Delta/\Delta_{max}^+ + 0.60211$	0.39789
BC	$P/P_{max}^+ = -0.28925\Delta/\Delta_{max}^+ + 1.28925$	-0.28925

3.2 刚度退化规律

对试验数据进行回归分析,可得沙漠砂混凝土框架节点的刚度退化规律,如图 13 所示。其中 K_1, K_2, K_3 及 K_4 分别表示滞回环的正向卸载刚度、负向加载刚度、负向卸载刚度及正向加载刚度。

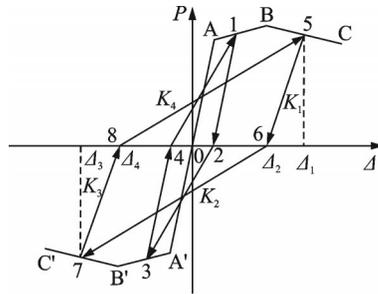


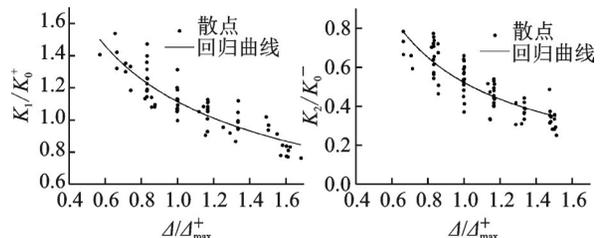
图 13 刚度退化及滞回规则

Fig. 13 Stiffness degradation and hysteresis rule

通过回归分析可得 K_1/K_0^+ 与 Δ_1/Δ_{max}^+ 的函数曲线^[19],如图 14(a)所示。具体表达式为:

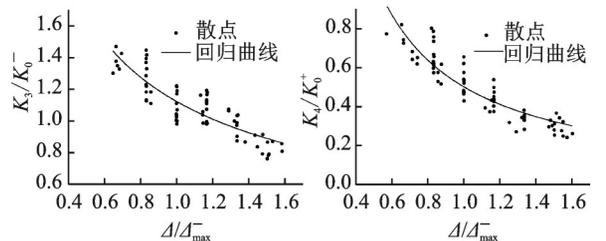
$$K_1/K_0^+ = 1.1405(\Delta_1/\Delta_{max}^+)^{-0.5306} \quad (2)$$

同理,可得 K_2/K_0^- 与 Δ_2/Δ_{max}^+ 的函数曲线(如图



(a) K_1 拟合曲线
(a) Fitting curve of K_1

(b) K_2 拟合曲线
(b) Fitting curve of K_2



(c) K_3 拟合曲线
(c) Fitting curve of K_3

(d) K_4 拟合曲线
(d) Fitting curve of K_4

图 14 刚度退化拟合曲线

Fig. 14 Stiffness degradation fitting curve

14(b)所示), K_3/K_0^- 与 Δ_3/Δ_{\max}^- 的函数曲线(如图 14(c)所示), K_4/K_0^+ 与 Δ_4/Δ_{\max}^+ 的函数曲线(如图 14(d)所示)。其表达式分别为:

$$K_2/K_0^- = 0.52206(\Delta_2/\Delta_{\max}^+)^{-0.98309} \quad (3)$$

$$K_3/K_0^- = 1.12277(\Delta_3/\Delta_{\max}^-)^{-0.57381} \quad (4)$$

$$K_4/K_0^+ = 0.50161(\Delta_4/\Delta_{\max}^-)^{-1.08062} \quad (5)$$

式中 K_0^+ 和 K_0^- 分别为加载初期拟合得到的正向和负向初始加载刚度; Δ_{\max}^+ 和 Δ_{\max}^- 分别为正向和负向加载时的峰值位移。

3.3 恢复力模型验证

根据骨架曲线建议模型和刚度退化规律,可建立沙漠砂混凝土框架节点的恢复力模型。通过计算分析可得计算曲线与试验曲线的对比结果,如图 15 所示。

由图 15 可看出,本文建立的三折线恢复力模型与试验结果吻合良好,表明该恢复力模型能够较好地反映沙漠砂混凝土框架节点的滞回性能,为其弹塑性反应分析提供理论参考。

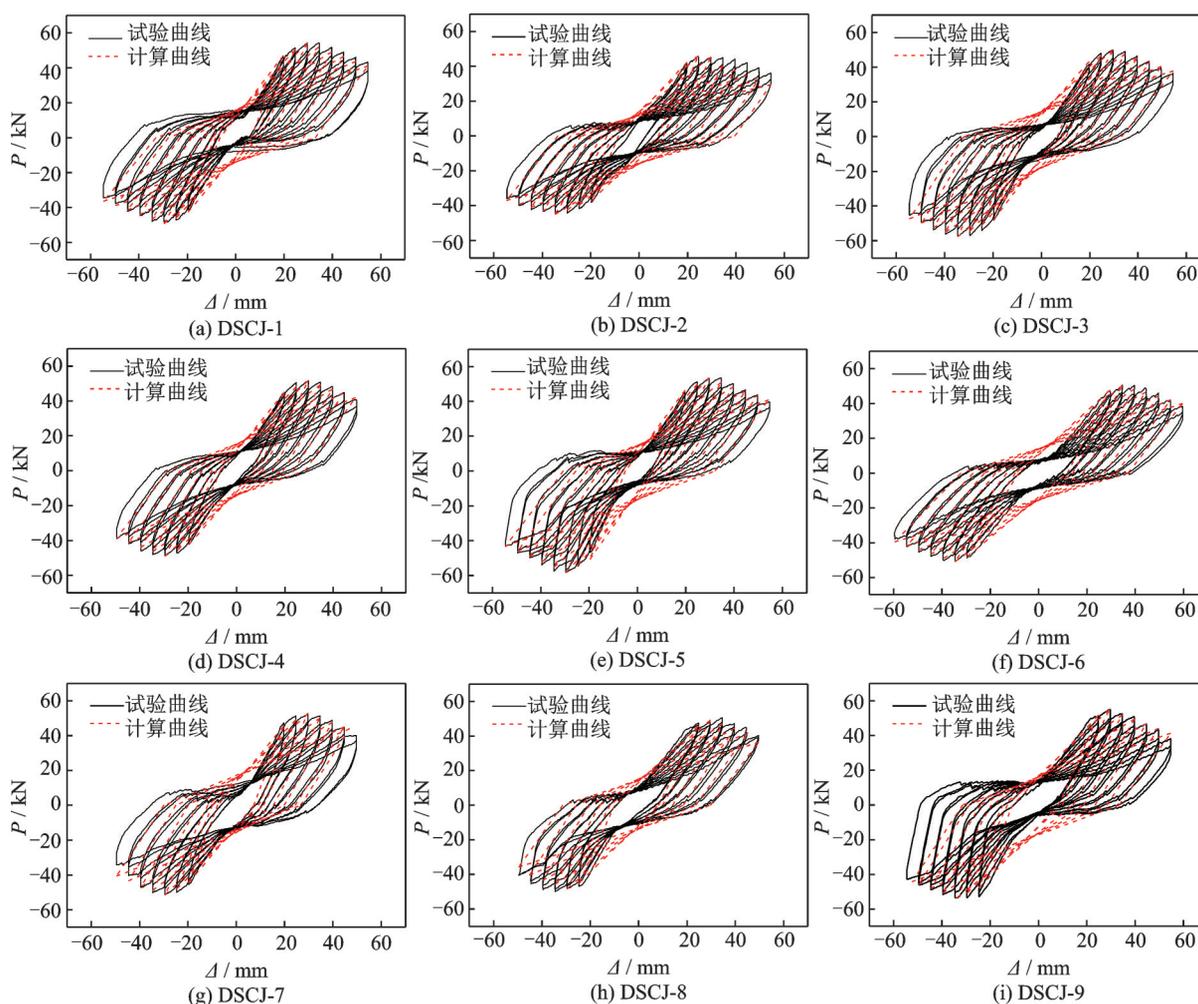


图 15 计算曲线与试验曲线对比

Fig. 15 Comparison of calculation curve and experimental curve

4 结论

(1) 随沙漠砂替代率的增加,试件 DSCJ-2, DSCJ-3, DSCJ-4 和 DSCJ-5 与普通混凝土试件 DSCJ-1 对比,混凝土立方体强度分别降低 16.78%, 8.85%, 5.71% 和 1.99%; 峰值荷载分别降低 15.65%, 8.1%, 4.79% 和 1.29%; 延性分别降低 0.27%, 0.59%, 4.29% 和 11.48%; 等效黏滞阻尼系数分别增加 8.69%, 4.35%, 8.69% 和 6.21%。各试

件的破坏现象、骨架曲线、耗能、刚度退化主要与沙漠砂混凝土的强度和应力-应变本构关系相关,但沙漠砂替代率为 80% 的构件其延性急剧降低 11.48%, 因此建议实际工程中沙漠砂的替代率不超过 60%。

(2) 随轴压比的增加,试件 DSCJ-4 和 DSCJ-7 与 DSCJ-6 对比,混凝土剥落现象逐渐减小; 峰值荷载分别提高 2.38% 和 4.36%; 延性分别降低 2.74% 和 6.66%; 等效黏滞阻尼系数分别增加 15.89% 和 19.87%; 刚度退化逐渐增加。其整体变化规律与普

通混凝土试件的变化规律相似。

(3) 随配箍率的增加,试件 DSCJ-4 和 DSCJ-9 与 DSCJ-8 对比,配箍率较高的试件 DSCJ-9 混凝土剥落较明显;峰值荷载分别提高 5.08% 和 11.79%;延性分别提高 3.88% 和 7.55%;等效黏滞阻尼系数分别增加 18.24% 和 31.76%;刚度退化逐渐减缓。其整体变化规律与普通混凝土试件的变化规律相似。

(4) 建立的沙漠砂混凝土框架节点的三折线恢复力模型,其计算值与试验结果吻合良好,可为沙漠砂混凝土框架节点的弹塑性反应分析提供理论参考。

参考文献:

- [1] 李志强,马瑞,甘丹.沙漠砂混凝土框架柱抗震性能试验研究[J].振动与冲击,2021,40(24):221-229.
LI Zhiqiang, MA Rui, GAN Dan. An experimental study on seismic behaviour of the desert sand concrete frame columns[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(24): 221-229.
- [2] 李志强,王国庆,杨森,等.沙漠砂混凝土力学性能及应力-应变本构关系试验研究[J].应用力学学报,2019,36(5):1131-1137.
LI Zhiqiang, WANG Guoqing, YANG Sen, et al. Experimental study on mechanical properties and stress-strain constitutive relations of desert sand concrete [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(5): 1131-1137.
- [3] 李志强,杨森,王国庆,等.古尔班通古特沙漠砂混凝土配合比试验研究[J].混凝土,2016(9):92-96.
Li Zhiqiang, Yang Sen, Wang Guoqing, et al. Mixture ratio test of Gurbantunggut desert sand concrete [J]. Concrete, 2016(9): 92-96.
- [4] 张明虎,刘海峰,马映昌,等.低应变率下沙漠砂混凝土动态力学性能及本构模型[J].应用力学学报,2020,37(5):2160-2166.
ZHANG Minghu, LIU Haifeng, MA Yingchang, et al. The dynamic constitutive model and mechanical behaviors of desert sand concrete at low strain rate [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(5): 2160-2166.
- [5] 张广泰,黄伟敏,郭锐.沙漠砂锂渣聚丙烯纤维混凝土基本力学性能试验研究[J].科学技术与工程,2016,16(24):273-278.
ZHANG Guangtai, HUANG Weimin, GUO Rui. Experimental study on basic mechanical properties of the desert sand concrete with lithium slag and polypropylene fiber[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(24): 273-278.
- [6] 董伟,肖阳,苏英,等.风积沙混凝土轴心受压力学性能研究[J].工程科学与技术,2020,52(3):86-92.
DONG Wei, XIAO Yang, SU Ying, et al. Study on axial compression performance of aeolian sand concrete [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(3): 86-92.
- [7] Park S, Lee E, Ko J, et al. Rheological properties of concrete using dune sand [J]. Construction and Building Materials, 2018, 172: 685-695.
- [8] Amel C L, Kadri E H, Sebaibi Y, et al. Dune sand and pumice impact on mechanical and thermal lightweight concrete properties[J]. Construction and Building Materials, 2017, 133: 209-218.
- [9] Jiang C H, Zhou X B, Tao G L, et al. Experimental study on the performance and microstructure of cementitious materials made with dune sand[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016,2016: 2158706.
- [10] Zaitri R, Bederina M, Bouziani T, et al. Development of high performances concrete based on the addition of grinded dune sand and limestone rock using the mixture design modelling approach[J]. Construction and Building Materials, 2014, 60: 8-16.
- [11] 董存,沙吾列提·拜开依,伊力亚尔·阿不都热西提,等.天然沙漠砂钢筋混凝土梁受弯性能的试验研究[J].建筑结构,2017,47(24):98-104.
Dong Cun, Sawulet·Bekey, Yaliyar·Abdurixiti, et al. Experimental study on bending behavior of reinforced concrete beam using natural desert sand[J]. Building Structure, 2017, 47(24): 98-104.
- [12] 王德弘,鞠彦忠,郑文忠.钢筋活性粉末混凝土框架节点抗震性能试验研究[J].振动与冲击,2018,37(6):149-156.
WANG Dehong, JU Yanzhong, ZHENG Wenzhong. Experimental research on the seismic performance of reinforced reactive powder concrete frame joints[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(6): 149-156.
- [13] 薛建阳,马林林,隋龔,等.动力荷载下传统风格建筑双梁-柱节点抗震性能试验研究[J].振动工程学报,2021,34(1):38-47.
XUE Jianyang, MA Linlin, SUI Yan, et al. Experimental research on the seismic performance of dual-lintel column joints in traditional style buildings under dynamic loading[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(1): 38-47.
- [14] 陈云,陈超,徐子凡,等.装配式梁柱转动摩擦耗能节点抗震性能试验研究[J].振动工程学报,2022,35(1):45-54.
CHEN Yun, CHEN Chao, XU Zifan, et al. Experimental study on seismic performance of prefabricated beam to column rotation friction energy dissipation connection[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022,35(1): 45-54.
- [15] 唐九如.钢筋混凝土框架节点抗震[M].南京:东南大

- 学出版社, 1989.
- Tang Jiuru. Seismic Resistance of Joints in Reinforced Concrete Frame[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989.
- [16] 傅剑平, 张川, 陈滔, 等. 钢筋混凝土抗震框架节点受力机理及轴压比影响的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(3): 67-77.
- FU Jianping, ZHANG Chuan, CHEN Tao, et al. Experimental investigation of shear mechanism and effect of axial-compression ratio on joints in earthquake-resistant reinforced concrete frames[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(3): 67-77.
- [17] Fadwa I, Ali T A, Nazih E, et al. Reinforced concrete wide and conventional beam-column connections subjected to lateral load[J]. Engineering Structures, 2014, 76: 34-48.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development, PRC. Specification for seismic test of building: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development, PRC. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [20] 薛建阳, 戚亮杰. 传统风格建筑钢框架结构恢复力模型试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(20): 148-153.
- XUE Jianyang, QI Liangjie. An experimental study on the restoring force model of steel frame structures of traditional style buildings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(20): 148-153.

Experimental research on the seismic behaviour of desert sand concrete frame joints

LI Zhi-qiang¹, ZHANG Hua-dong¹, GAN Dan^{1,2}

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: To reveal the seismic behavior of Gurbantonggut desert sand concrete frame joints (DSCJ), quasi-static tests are carried out on nine 1/2-scale DSCJs. The failure phenomenon and mode, hysteresis performance, energy dissipation capacity, ductility, stiffness and restoring force models of DSCJ are investigated considering the desert sand replacement ratio, axial compression ratio, and stirrup ratio. Test results show that when the desert sand replacement ratio increases from 0%, 20%, 40%, 60% and 80%, the failure phenomenon, skeleton curve, energy consumption and stiffness degradation of the specimens are mainly determined by the strength and stress-strain constitutive relationship of desert sand concrete, and the ductility decreases gradually, which decreases by 11.48% with the of 80%. When the axial compression ratio increases from 0.2, 0.4 and 0.6, the peak load increases by about 3%, the ductility decreases by about 5%, the equivalent viscous damping coefficient increases by about 18%, and the stiffness degradation increases gradually. When the stirrup ratio increases from 0.50%, 1.57% and 2.52%, the peak load increases by about 10%, the ductility increases by about 6%, the equivalent viscous damping coefficient increases by about 25%, and the stiffness degradation decreases gradually. In summary, the seismic performance of DSCJ is similar to that of ordinary concrete specimens, showing better energy dissipation capacity. The three-fold line restoring force model of DSCJ is established, and the calculated model agrees well with the experimental results. This study could provide a basis for the engineering application of DSCJ.

Key words: seismic performance; desert sand concrete; quasi-static test; frame joints; restoring force model

作者简介: 李志强(1980—),男,博士,教授。电话:(0993)2058082;E-mail:zhiqiangli2023@163.com。

通讯作者: 甘丹(1985—),男,博士,教授。电话:(023)65120720;E-mail:gandan@cqu.edu.cn。