

•水利与土木工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400111



本刊网刊

## 钢筋沙漠砂混凝土短柱轴压性能试验研究

李志强<sup>1</sup>, 甘丹<sup>1,2\*</sup>, 周阳<sup>1,3</sup>

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆维吾尔自治区石河子 832003; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045;  
3. 新疆兵团水科院(有限公司), 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐 830000)

**摘要:**为研究沙漠砂对钢筋混凝土短柱轴压性能的影响,对 18 根钢筋沙漠砂混凝土短柱进行轴压试验。以沙漠砂替代率、纵筋配筋率、体积配箍率为主要参数,对钢筋沙漠砂混凝土短柱的破坏模式、荷载-位移、荷载-混凝土应变、荷载-纵筋应变、延性性能等主要指标进行分析。结果表明:钢筋沙漠砂混凝土短柱主要形成竖向的贯通裂缝而破坏,其失效过程、破坏状态与钢筋普通混凝土短柱相似;当沙漠砂替代率由 0 增至 20%、40%、60%、80% 时,其峰值荷载分别增加-9.04%、4.62%、2.00%、-5.52%,延性系数分别增加-16.20%、5.40%、1.80%、-9.46%,其他各项性能均与沙漠砂混凝土的变化趋势相似,且当沙漠砂替代率为 40% 和 60% 时,试件表现出较好的受力性能;当纵筋配筋率由 0.89% 增加至 3.57% 时,其峰值荷载分别增加约 8.53% 和 15.80%,延性系数分别增加约 27.44% 和 39.98%;当体积配箍率由 1.22% 增加至 1.52% 时,其峰值荷载增加约 11.44%,延性系数增加约 21.58%;随着纵筋配筋率、体积配箍率的增加,钢筋沙漠砂混凝土短柱的其他各项性能均得到改善。最后,建立钢筋沙漠砂混凝土短柱轴压承载力计算公式,计算结果与试验结果吻合良好。研究结果可为钢筋沙漠砂混凝土短柱的工程应用提供理论依据。

**关键词:**沙漠砂混凝土;短柱;轴压性能;延性性能;承载力

**中图分类号:** TU375

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3246(2026)02-0155-13

沙漠砂混凝土作为一种新建筑材料,有助于充分利用中国广袤的沙漠资源,能缓解河砂等非再生资源的开采,且碳排放量更低<sup>[1]</sup>,具有广阔的发展场景。

目前,针对沙漠砂混凝土的研究已经取得一定成果。李志强等<sup>[2]</sup>揭示了沙漠砂替代率对混凝土基本力学性能的影响规律,并提出了适用于沙漠砂混凝土的应力-应变本构方程和损伤本构方程。Li 等<sup>[3]</sup>对 13 根沙漠砂钢筋混凝土柱进行低周往复加载试验,揭示了剪跨比和沙漠砂替代率等参数对其抗震性能的影响规律,并提出了适用于该类柱的弯曲及剪切强度计算方法。李志强等<sup>[4]</sup>对 9 个沙漠砂混凝土框架节点进行拟静力试验,揭示了沙漠砂替代率、轴压比和体积配箍率对节点抗震性能的影响规律,并建立了三折线恢复力模型。Sadat 等<sup>[5]</sup>通过回归分析建立了沙漠砂混凝土力学性能的统一预测模型,并提出了适用于该材料的应力-应变本构关系,经有限元验证有效,为结构设计提供了重要参考。Sadat 等<sup>[6]</sup>

对 18 根矩形沙漠砂混凝土钢管短柱进行轴压试验,揭示了沙漠砂替代率等参数对其力学性能的影响规律,并提出了可靠的承载力设计方法。秦拥军等<sup>[7]</sup>对 11 根试验梁进行受弯试验,揭示了钢纤维掺量、沙漠砂替代率和纵筋配筋率对梁受弯性能的影响规律,并验证了开裂荷载与极限弯矩理论计算值的准确性。秦拥军等<sup>[8]</sup>对 8 根无腹筋沙漠砂混凝土深梁进行受剪试验,揭示了剪跨比、纵筋配筋率和沙漠砂掺量对其抗剪性能的影响规律,并对国内外规范计算方法进行修正,提出了抗剪承载力计算式。董伟等<sup>[9]</sup>通过盐冻试验与核磁共振、灰熵分析,揭示了孔结构特征参数对风积沙混凝土抗压强度的影响规律,并建立了考虑孔结构和风积沙贡献率的抗压强度复合模型。Dong 等<sup>[10]</sup>通过冻融循环试验,利用超声波和共振频率测定损伤变量,结合 SEM 和 AFM 分析微观机理,揭示了风积沙的适宜替代率(20%~30%),并基于 Wei-bull 理论建立了可预测冻融

收稿日期:2024-02-16 修回日期:2024-03-22 网络出版日期:2024-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目(52268034;51668053);兵团科技计划项目(2024AA007);兵团重点研发项目(2024AB079)

作者简介:李志强(1980—),男,教授,博士。研究方向:钢筋混凝土结构。E-mail: zhiqiangli2023@163.com

\*通信作者:甘丹,教授, E-mail: gandan@cqu.edu.cn

损伤的本构模型。Wang 等<sup>[11]</sup>对 10 根风积沙混凝土柱进行拟静力试验,并结合灰色关联分析,揭示了轴压比、剪跨比及风积沙替代率对其损伤演化的影响规律,建立了基于变形和能量的双参数地震损伤模型。王尧鸿等<sup>[12]</sup>对 6 根橡胶集料风积沙混凝土柱进行低周往复加载试验,揭示了橡胶掺量和轴压比对其抗震性能的影响规律,发现橡胶掺量为 10% 时试件综合抗震性能最优。刘海峰等<sup>[13]</sup>通过冻融循环试验,揭示了沙漠砂替代率对混凝土冻融后轴心受压力学性能的影响规律,并采用本构模型拟合得到应力-应变全曲线方程。Liu 等<sup>[14]</sup>对沙漠砂替代率为 50% 的混凝土进行冻融循环试验,揭示了冻融作用下其力学性能的演化规律,发现其抗冻性优于普通混凝土,并建立了相应的本构模型。以上研究成果为深入研究沙漠砂混凝土构件的相关性能提供了理论依据。

经文献检索发现,有关钢筋沙漠砂短柱轴压性能的研究尚未报道。但针对钢筋混凝土短柱轴心受压性能的研究已经取得丰富成果,并可为相关研究提供借鉴。王静峰等<sup>[15]</sup>通过轴压试验与有限元分析,揭示了环向脱空率等参数对椭圆钢管混凝土短柱轴压性能的影响规律,阐明了脱空对其承载力、刚度及接触应力的影响机制。郑宇宙等<sup>[16]</sup>对 7 根大尺寸高强钢管约束自应力混凝土短柱进行轴压试验,揭示了自应力混凝土强度、截面类型和空心率对其轴压性能的影响规律与增强机理。王卫华等<sup>[17]</sup>对 7 根复式不锈钢管高强再生块体混凝土短柱进行轴压试验,揭示了再生块体取代率、含钢率等参数对其轴压性能的影响规律,并提出了承载力计算方法。唐红元等<sup>[18]</sup>通过对不同径厚比的圆不锈钢管混凝土短柱进行轴压试验,揭示了约束效应系数对其破坏模式、承载力和延性的影响规律,并提出了精度优于既有模型的轴压承载力计算方法。邓宗才等<sup>[19]</sup>对 9 根高强钢筋约束 UHPC 柱进行轴压试验,揭示了高强箍筋的约束机理,并基于 Ottosen 破坏准则建立了适用于该类柱的轴压本构模型。

本文以沙漠砂替代率、纵筋配筋率、体积配箍率为主要参数,设计 18 根钢筋沙漠砂混凝土短柱并对其进行轴压试验研究,以揭示其破坏机理及轴压力学性能,为钢筋沙漠砂混凝土短柱的工程应用提供参考。

## 1 试验

### 1.1 试件设计及制作

采用天业牌 P-O42.5 水泥、I 级粉煤灰、粒径为 5~20 mm 水洗石子、玛纳斯河水洗河砂、古尔班通古特沙漠砂、聚羧酸高性能减水剂、自来水等材料。沙漠砂混凝土的配合比、力学性能及施工性能等指标可参考文献[2-6]。

根据《混凝土结构设计规范》<sup>[20]</sup>,设计 6 组 18 根钢

筋沙漠砂混凝土短柱试件,其尺寸均为 150 mm×150 mm×550 mm,保护层厚度为 20 mm。试件详图如图 1 所示,试件设计参数如表 1 所示。表 1 中:沙漠砂替代率  $r$  的范围为 0~80%;纵筋配筋率分别为 0.89%(4 $\Phi$ 8)、2.04%(4 $\Phi$ 12)和 3.57%(4 $\Phi$ 16),采用 HRB400 级钢筋;体积配箍率分别为 1.52%( $\Phi$ 8@120)和 1.22%( $\Phi$ 8@150),采用 HRB400 级钢筋。各钢筋材性性能如表 2 所示。试件编号命名方式:如“R0-8-120”表示钢筋沙漠砂混凝土短柱的沙漠砂替代率为 0、纵筋直径为 8 mm、核心区箍筋间距为 120 mm。

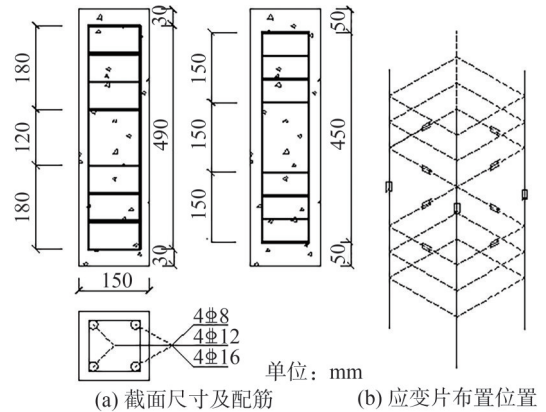


图 1 试件详图

Fig. 1 Detail of specimen

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of specimens

试件编号	$r/\%$	混凝土立方体抗压强度 $f_{cu}/\text{MPa}$	纵筋配筋率 $\rho_s/\%$	体积配箍率 $\rho_{sv}/\%$
R0-8-120			0.89	
R0-12-120	0	39.80	2.01	1.52
R0-16-120			3.57	
R20-8-120			0.89	
R20-12-120	20	37.80	2.01	1.52
R20-16-120			3.57	
R40-8-120			0.89	
R40-12-120	40	43.10	2.01	1.52
R40-16-120			3.57	
R60-8-120			0.89	
R60-12-120	60	41.20	2.01	1.52
R60-16-120			3.57	
R80-8-120			0.89	
R80-12-120	80	39.19	2.01	1.52
R80-16-120			3.57	
R60-8-150			0.89	
R60-12-150	60	41.20	2.01	1.22
R60-16-150			3.57	

表 2 钢筋材性性能

Tab. 2 Properties of steel bars

钢筋材性	直径/ mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ ( $10^5$ MPa)
HRB400	8	427	567	2
	12	436	608	2
	16	455	665	2 <sup>5</sup>

### 1.2 试验加载及量测

试验采用 500 T 微机控制电液伺服压力试验机进行加载,加载装置示意图如图 2 所示。

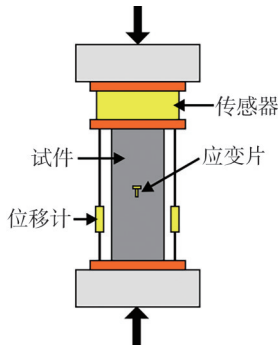


图 2 加载装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of loading device

加载前,估算试件的峰值荷载,取预估峰值荷载的 15% 进行预加载<sup>[21]</sup>,并调整试件几何对中,保证短柱试件轴心受压。加载方式采用位移控制单调加载,加载速率为 0.01 mm/min,当荷载降至约峰值荷载的 80% 时,停止加载。

试件沿 4 个面中轴线及对应端板分别布置 4 个量程为 100 mm 的位移传感器,在纵向钢筋、箍筋及混凝土纵向、横向分别粘贴了电阻应变片,并将其与静态数据采集仪 TDS-530 进行连接。

试验过程中主要观察内容:试件表面裂缝开展情况,加载端的竖向位移,混凝土纵、横向的变形,纵筋和箍筋的应变等。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验现象

各试件的破坏过程和形态比较相似,典型破坏过程如图 3 所示。图 3 中,  $N_u$  为峰值荷载。加载初期,试件外观无明显变化(图 3(a));加荷至峰值荷载的 65% 左右,产生大量竖向裂缝并不断向短柱中部延伸,直至形成贯通裂缝(图 3(b));加载至峰值荷载时,贯通裂缝的数量、宽度都显著增加,并伴随混凝土保护层脱落(图 3(c));继续加载直至构件破坏,竖向形成多条贯穿主裂缝,横向向外鼓出,并伴随大量混凝土剥落(图 3(d))。

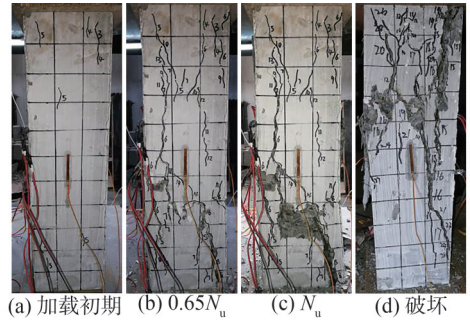


图 3 试件典型破坏过程

Fig. 3 Typical failure process of specimens

图 4 为所有试件破坏形态。造成该破坏形态的主要原因是沙漠砂属特细砂,微观状态呈圆形,内摩擦角较小<sup>[22]</sup>,降低了粗细骨料间的机械咬合力,且当沙漠砂掺量较少时无法充分填充内部孔隙<sup>[2]</sup>,因此,内部较早出现裂缝,混凝土的承载力降低且破坏形态更严重。

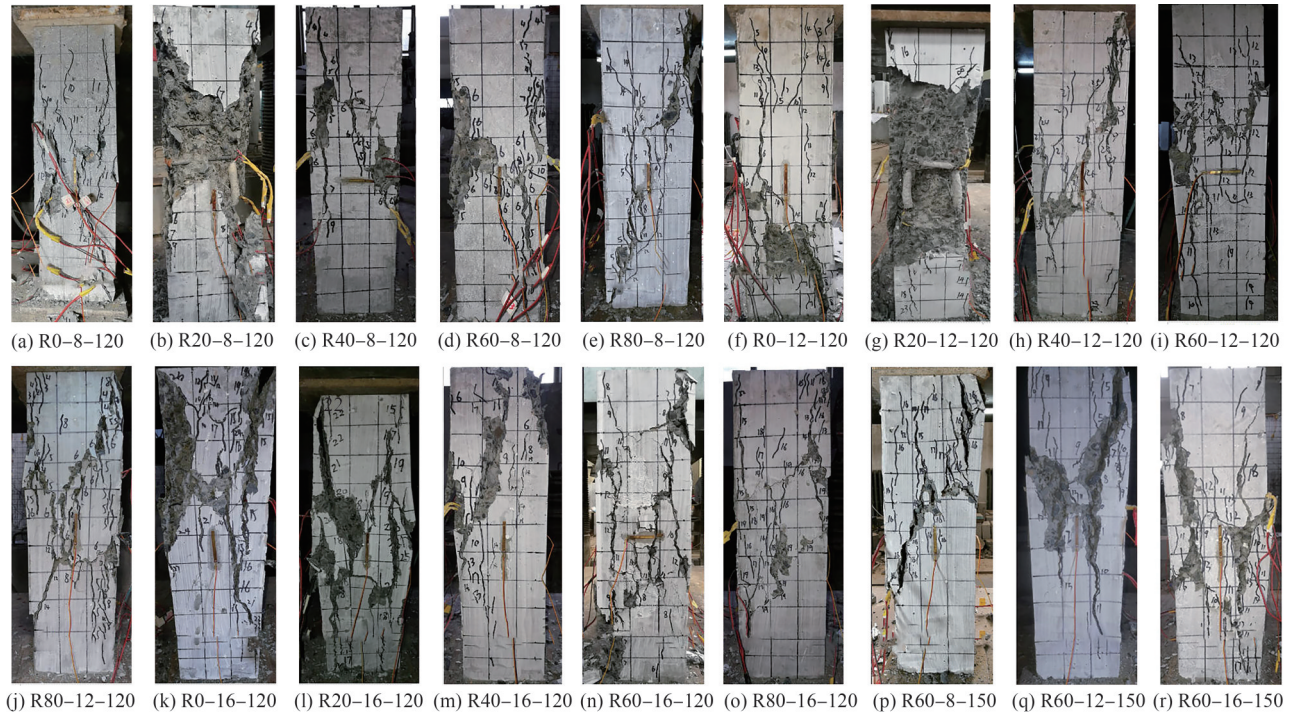


图 4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure pattern of specimens

由图 4(p)~(r)可知,随着纵筋配筋率的增加,各试件的破坏形态较相似,表明纵筋基本不影响试件破坏形态。

由图 4(d)、(i)、(m)、(n)、(o)和(p)可以看出,体积配箍率较小的试件其破坏更为严重,主要原因是箍筋间距增加,削弱了对核心区的约束作用,核心区混凝土强度降低。

总的来说,钢筋沙漠砂混凝土短柱与钢筋普通混凝土短柱的破坏形态较相似。各试件峰值状态时的荷载、位移如表 2 所示。

表 2 各试件峰值状态时的荷载、位移

Tab. 2 Load and displacement of each specimen at the peak state

试件编号	峰值位移 $\Delta_u/\text{mm}$	峰值荷载 $N_u/\text{kN}$
R0-8-120	1.563	798.663
R0-12-120	1.666	862.522
R0-16-120	1.711	926.675
R20-8-120	1.478	716.606
R20-12-120	1.607	803.554
R20-16-120	1.645	833.972
R40-8-120	1.521	846.424
R40-12-120	1.581	895.008
R40-16-120	1.633	973.265
R60-8-120	1.592	821.527
R60-12-120	1.739	876.703
R60-16-120	1.826	940.625
R80-8-120	1.495	747.431
R80-12-120	1.620	822.739
R80-16-120	1.664	875.395
R60-8-150	1.522	702.038
R60-12-150	1.702	793.195
R60-16-150	1.764	880.765

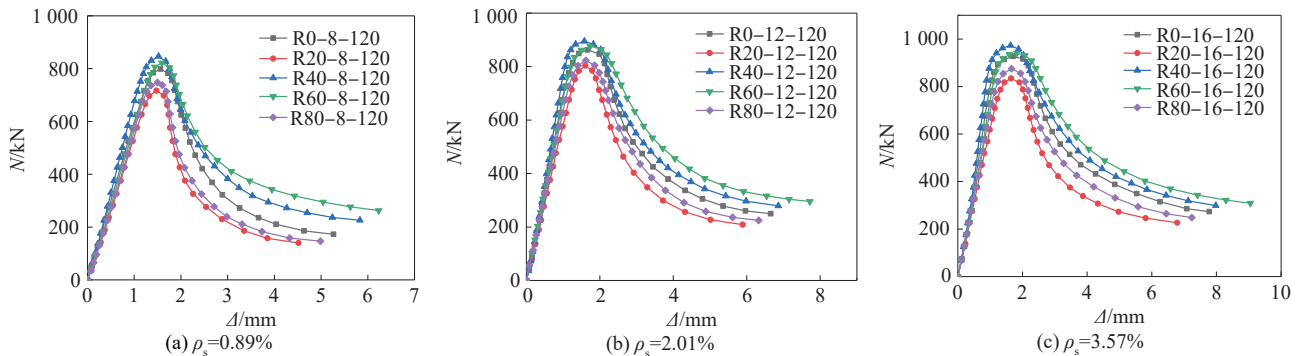


图 5 不同沙漠砂替代率时试件荷载-轴向位移曲线

Fig. 5 Load-axial displacement curves of specimens for different desert sand replacement ratios

2)随着纵筋配筋率的增加,纵筋直径为 12 和 16 mm 的试件较纵筋直径为 8 mm 的试件,峰值荷载分别增加约 8.53% 和 15.80%,且试件  $N-\Delta$  下降段曲线逐渐趋于平缓,表现出较好的延性。试验结果表明,增加构件的纵筋配筋率,不仅可以提高构件的极限承载力,而且可以改善构件的延性。因此,在工程实践中可通

## 2.2 荷载-轴向位移

图 5~7 分别为不同沙漠砂替代率、纵筋配筋率和体积配箍率时各试件的实测荷载  $N$ -轴向位移  $\Delta$  曲线,可以看出,各组试件的  $N-\Delta$  曲线变化规律基本相同:达到峰值荷载前,曲线总体呈线性变化;达到峰值荷载后,承载力曲线在下降段随位移增加明显下降,随后逐渐平缓。

由图 5~7 可知,各试验参数对  $N-\Delta$  曲线的影响如下:

1)随着沙漠砂替代率的增加,试件的峰值荷载呈先减小后增加再减小的趋势,其变化趋势与表 1 的沙漠砂混凝土立方体抗压强度变化趋势一致。与钢筋普通混凝土短柱相比(沙漠砂替代率为 0),当沙漠砂替代率增加至 20% 时,其承载力降低了约 9.04%;当沙漠砂替代率增加至 40% 时,其承载力增加了约 4.62%;当沙漠砂替代率增加至 60% 时,其承载力增加了约 2.00%;当沙漠砂替代率增加至 80% 时,其承载力降低了约 5.52%。

达到峰值荷载前,各组试件的  $N-\Delta$  曲线基本呈线性变化;达到峰值荷载后,R20 和 R80 系列试件较钢筋普通混凝土试件的下降段曲线陡峭,而 R40 和 R60 系列试件较钢筋普通混凝土试件的下降段曲线平缓。其主要原因:当沙漠砂替代率较低时(20%),内部空隙较多,使试件强度降低;当沙漠砂替代率达 40%~60% 时,内部孔隙被沙漠砂充分填充,试件的强度得到改善;当沙漠砂替代率达 80% 时,替代的河砂量较大,且沙漠砂颗粒的强度较低,造成试件强度降低<sup>[2]</sup>。

过适当增大纵筋配筋率的方式,提升钢筋沙漠砂混凝土短柱的轴压性能。

3)随着体积配箍率的增加,试件的峰值荷载增加约 11.44%,试件  $N-\Delta$  下降段曲线逐渐趋于平缓,该现象与钢筋普通混凝土轴压短柱的受力特性基本一致<sup>[23]</sup>。

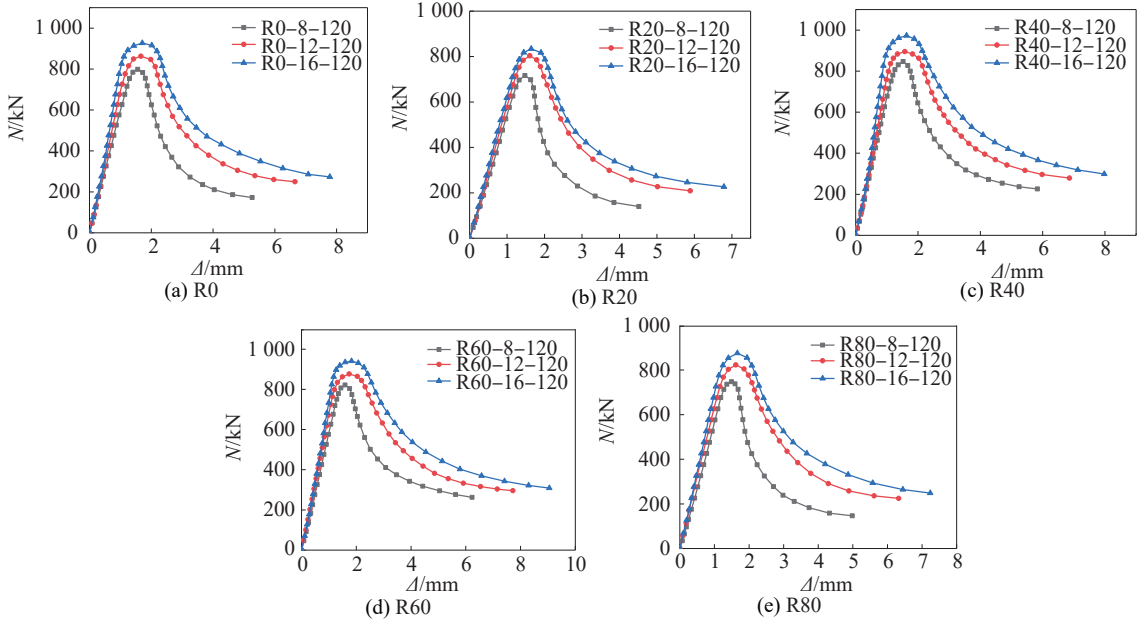


图 6 不同纵筋配筋率时试件荷载-轴向位移曲线

Fig. 6 Load-axial displacement curves of specimens for different reinforcement ratios

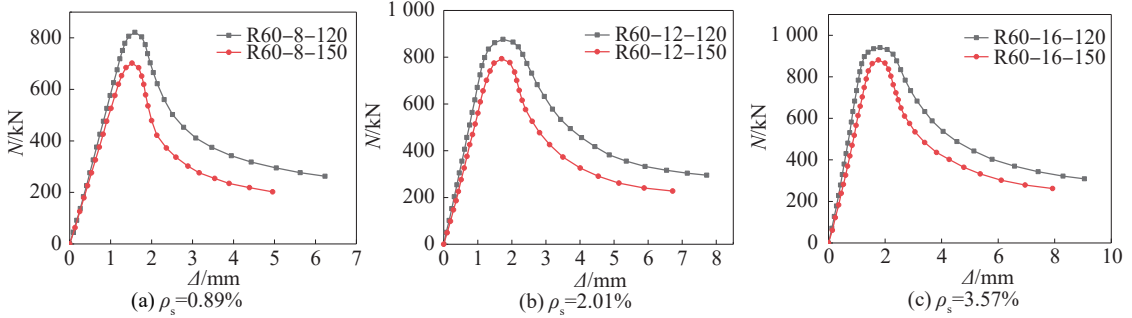


图 7 不同体积箍筋率时试件荷载-轴向位移曲线

Fig. 7 Load-axial displacement curves of specimens for different stirrup ratios

2.3 荷载-混凝土应变

图 8~10 分别为不同沙漠砂替代率、纵筋配筋率、体积配箍率试件的荷载-混凝土应变曲线。图 8~10

中,  $\epsilon_{cx}$ 、 $\epsilon_{cy}$  分别为混凝土的纵向压应变、横向拉应变。由图 8~10 可知:加荷初期,混凝土的应变与荷载大致呈线性关系;当增至约 0.7 倍峰值荷载时,曲线斜率发生

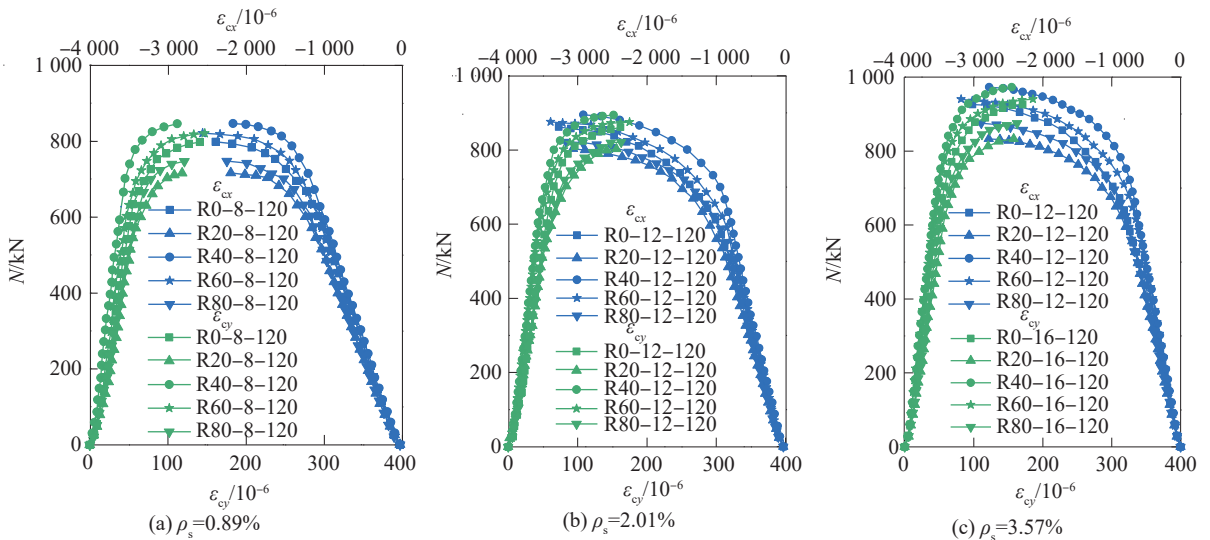


图 8 不同沙漠砂替代率时试件荷载-混凝土应变曲线

Fig. 8 Load-concrete strain curves of specimens for different desert sand replacement ratios

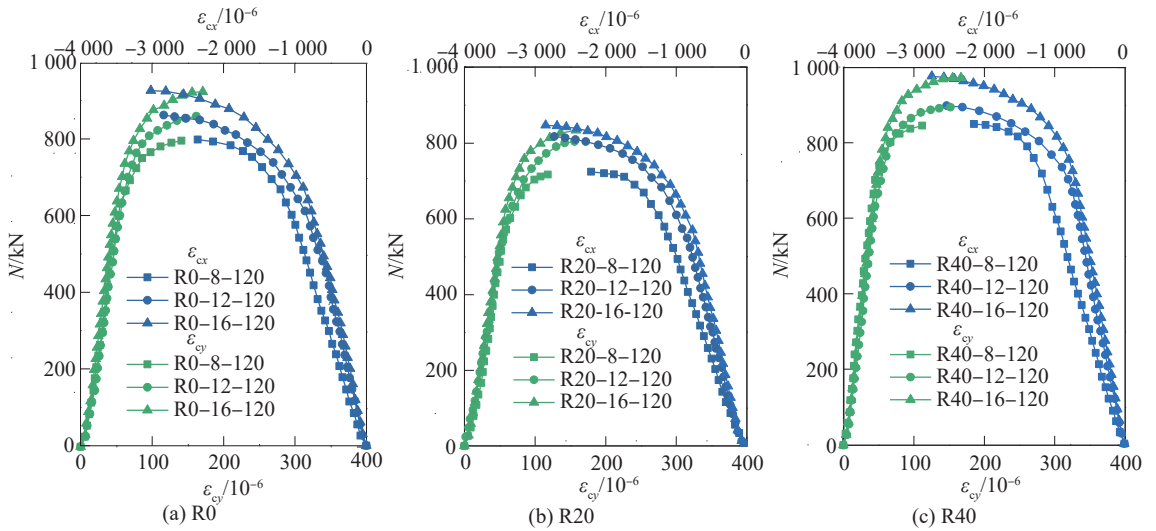


图9 不同纵筋配筋率时试件荷载-混凝土应变曲线

Fig. 9 Load-concrete strain curves of specimens for different reinforcement ratios

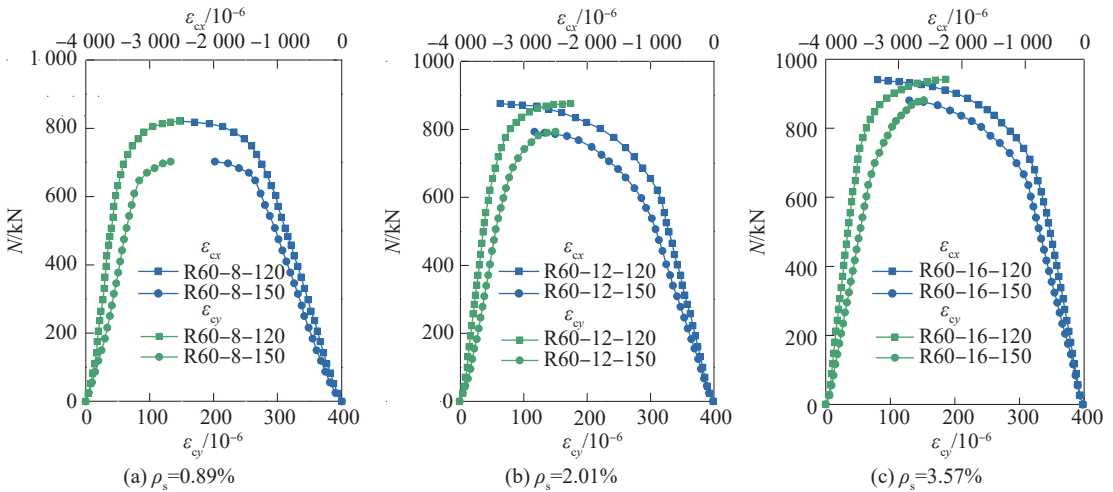
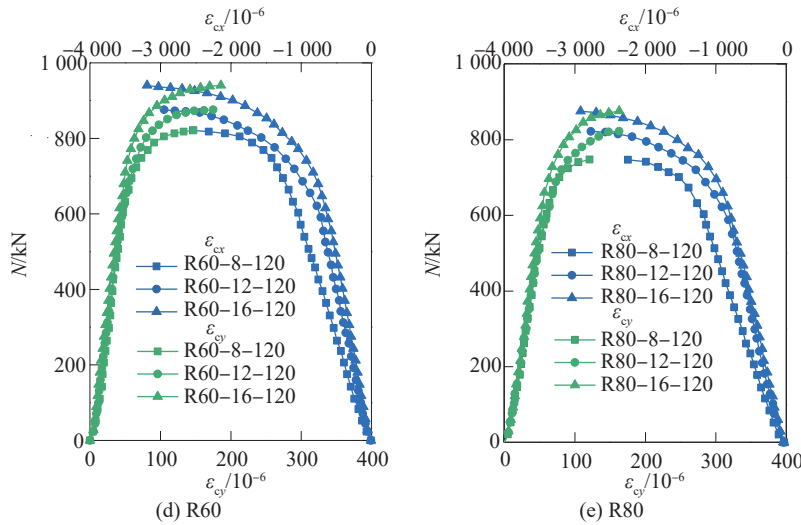


图10 不同体积配箍率时试件荷载-混凝土应变曲线

Fig. 10 Load-concrete strain curves of specimens for different stirrup ratios

变化,应变迅速增长而荷载增长较慢。各参数具体影响如下:

1)当荷载相同时,随着沙漠砂替代率的增大,试件

的纵、横向应变呈先增加后减小再增加的趋势。其主要原因为:当荷载值相同、沙漠砂替代率为20%和80%时,构件所承受的荷载值更接近其峰值荷载,混凝土应

变较大;当沙漠砂替代率为40%和60%时,构件所承受的荷载值比其峰值荷载小很多,混凝土应变较小。

2)当荷载相同时,随着纵筋配筋率/体积配箍率的增加,纵、横向应变均呈递减趋势。其主要原因为,当荷载值相同,纵筋配筋率较小时,构件所承受的荷载值更接近其峰值荷载,混凝土应变较大。试验表明,增加纵筋配筋率/体积配箍率可以提高试件的承载力,约束混凝土的变形。

### 2.4 荷载-纵筋应变

不同沙漠砂替代率、纵筋配筋率、体积配箍率试件的荷载-纵筋应变曲线分别如图11~13所示。图11~13中, $\epsilon_s$ 为纵筋应变。由图11~13可知,各组试件的荷载-纵筋应变曲线较相似:加载初期,荷载与纵筋应变呈线性关系;当轴向荷载增加至峰值荷载的80%时,曲线斜率减小,纵筋的应变增长速度加快而荷载增长减缓。

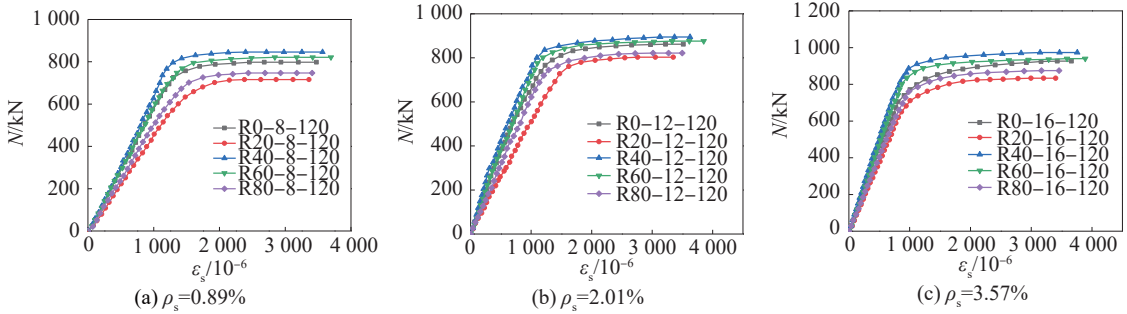


图 11 不同沙漠砂替代率时试件荷载-纵筋应变曲线

Fig.11 Load-longitudinal steel strain curves of specimens for different desert sand replacement ratios

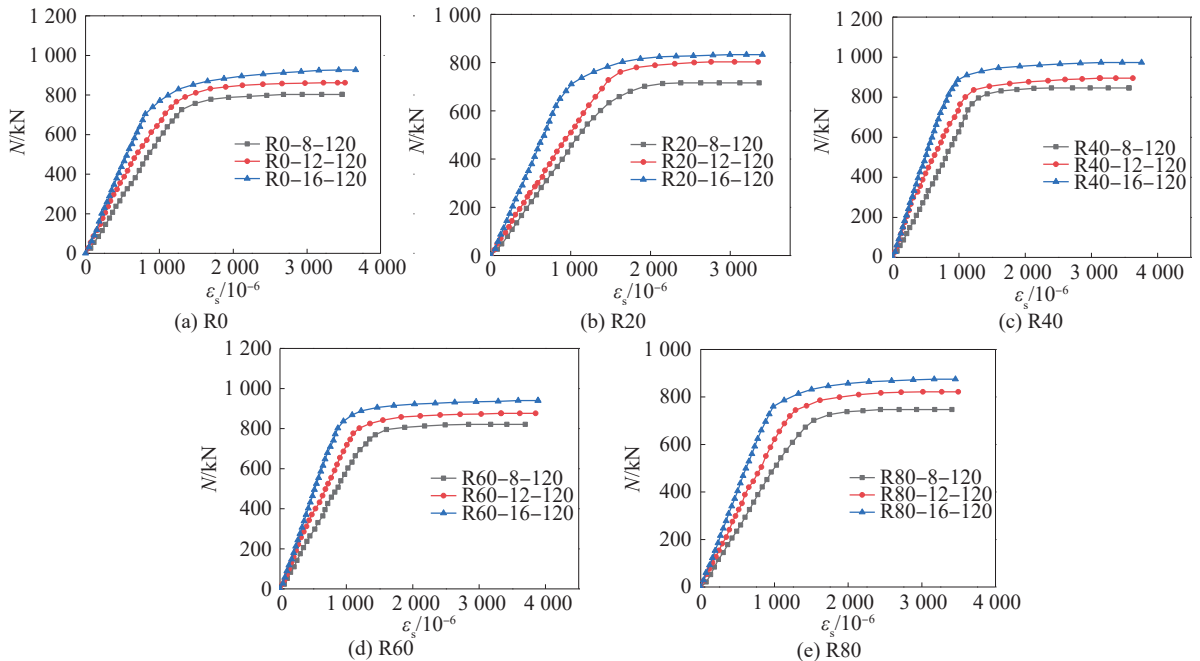


图 12 不同纵筋配筋率时试件荷载-纵筋应变曲线

Fig. 12 Load-longitudinal steel strain curves of specimens for different reinforcement ratios

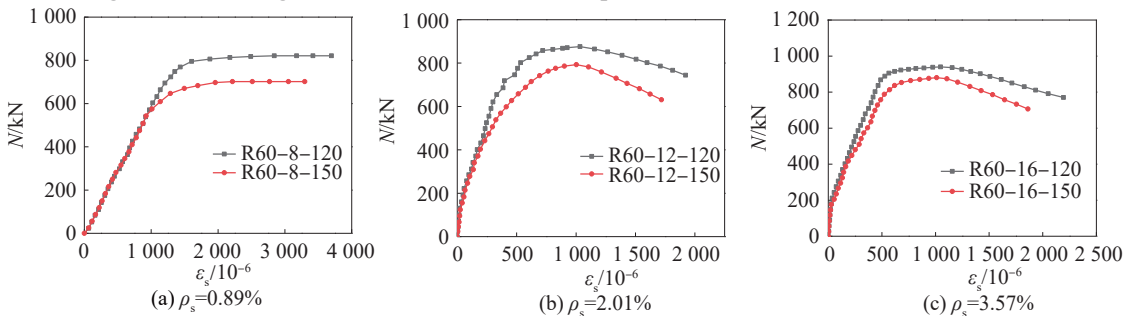


图 13 不同体积配箍率时试件荷载-纵筋应变曲线

Fig. 13 Load-longitudinal steel strain curves of specimens for different stirrup ratios

不同因素对荷载-纵筋应变曲线影响如下:

1)当荷载相同、沙漠砂替代率为 20%和 80%时,试件的纵筋应变较大;当沙漠砂替代率为 40%和 60%时,试件的纵筋应变较小。主要原因是轴压试件的荷载由混凝土和纵筋共同承担。沙漠砂替代率为 40%和 60%的试件较沙漠砂替代率为 20%和 80%的试件,混凝土强度更高(表 1);沙漠砂替代率为 40%和 60%的试件较沙漠砂替代率为 20%和 80%的试件纵筋应变小。其变化规律与试件的荷载-混凝土应变曲线一致。

2)当荷载相同时,随着纵筋配筋率/体积配箍率增

加,纵筋应变逐渐减小。其主要原因及变化规律与试件的荷载-混凝土应变曲线一致。

### 2.5 荷载-箍筋应变

图 14~16 分别为不同沙漠砂替代率、纵筋配筋率、体积配箍率试件的荷载-箍筋应变曲线。图 14~16 中,  $\epsilon'_s$  为箍筋应变。由图 14~16 可知,各组试件的荷载-箍筋应变曲线较相似:加载初期,荷载增加较快而箍筋应变增加缓慢;加载至约 70% 峰值荷载时,荷载增加变缓而应变增加迅速;峰值荷载后,荷载缓慢下降,应变持续增加。

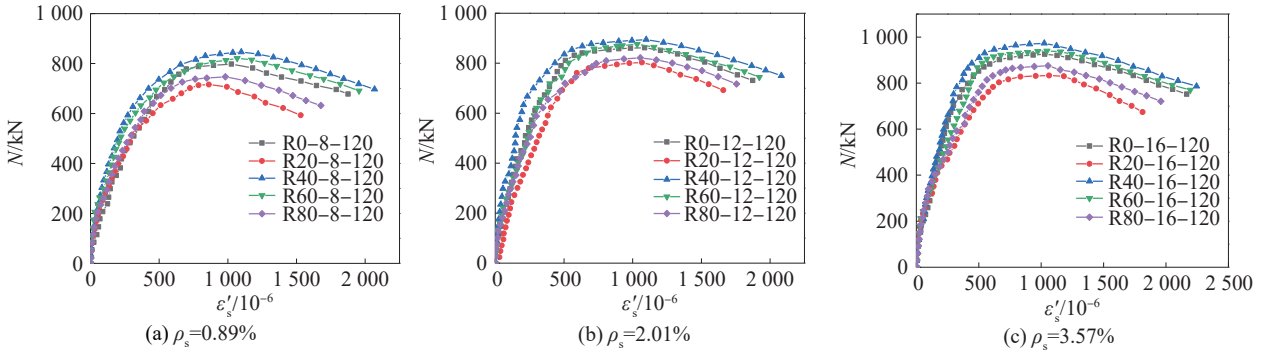


图 14 不同沙漠砂替代率时试件荷载-箍筋应变曲线

Fig. 14 Load-stirrup strain curves of specimens for different desert sand replacement ratios

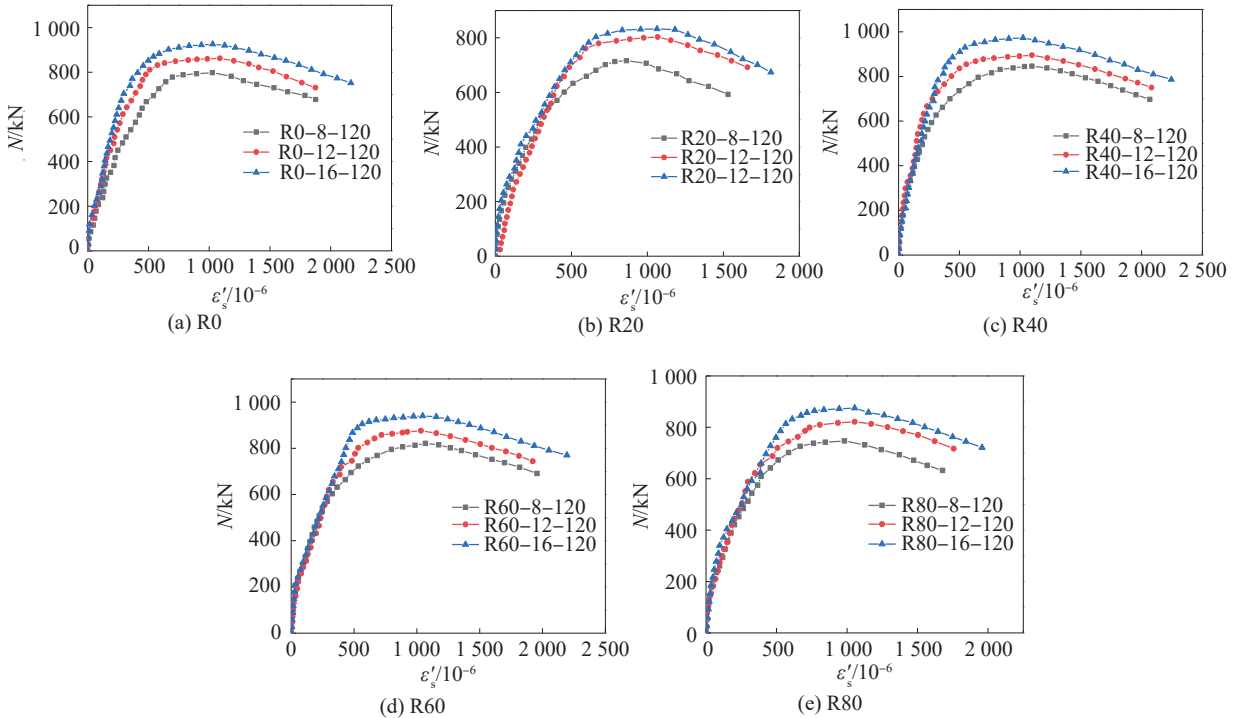


图 15 不同纵筋配筋率的荷载-箍筋应变曲线

Fig. 15 Load-stirrup strain curves for different reinforcement ratios

不同因素对荷载-箍筋应变曲线影响如下:

1)当荷载相同、沙漠砂替代率为 40%和 60%时,试件的箍筋应变较小;当沙漠砂替代率为 20%和 80%时,试件的箍筋应变较大。其主要原因及变化规律与

试件的荷载-纵筋应变曲线一致。

2)当荷载相同时,随着纵筋配筋率和体积配箍率的增加,箍筋应变逐渐减小。其主要原因及其变化规律与试件的荷载-纵筋应变曲线一致。

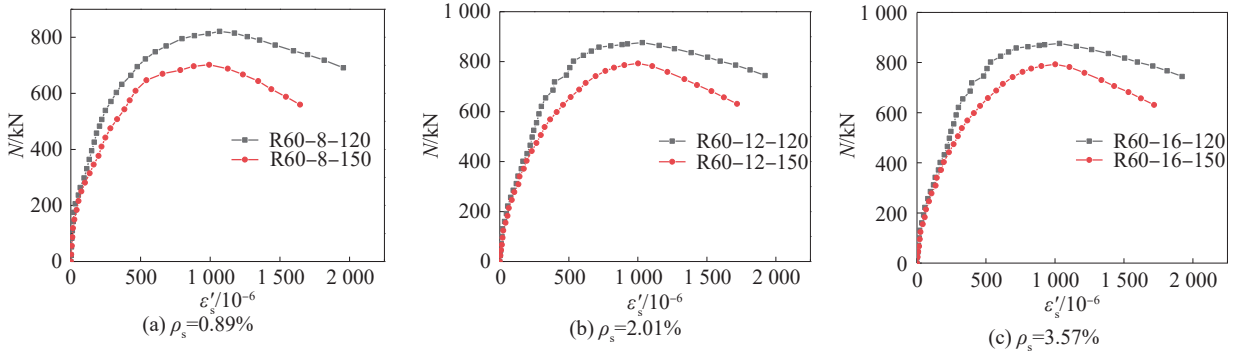


图 16 不同体积配箍率时试件荷载-箍筋应变曲线

Fig. 16 Load-stirrup strain curves of specimens for different stirrup ratios

2.6 轴压短柱试件的延性

为准确评价钢筋沙漠砂混凝土短柱的变形、耗能能力,采用 Pessiki 等<sup>[24]</sup>提出的位移延性 $\mu_{85}$ 及韧性系数 $T_1$ 的计算方法<sup>[25]</sup>,其示意图如图 17 所示。图 17 中: $P$ 为荷载值; $P_{max}$ 为构件的峰值荷载; $\Delta_{85}$ 为试件荷载-

轴向位移曲线下降段对应峰值荷载处 85% 的位移; $\varphi$ 为位移; $\varphi_{Au}$ 为 $\Delta_{85}$ 对应的位移; $\Delta_y$ 为 A 点的位移; $T_1$ 为 $A_u$ 与 $A_R$ 的比,其中, $A_u$ 、 $A_R$ 分别为图 17(b)中的阴影面积和矩形面积。延性系数及韧性系数计算结果如表 3 所示。

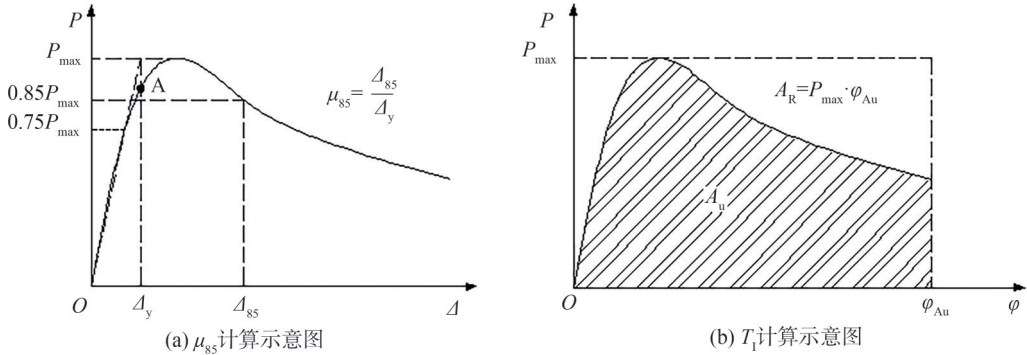


图 17 延性系数及韧性系数计算示意图

Fig. 17 Calculation diagram of ductility coefficients and toughness coefficients

表 3 延性系数及韧性系数计算结果

Tab. 3 Calculation results of ductility coefficients and toughness coefficients

试件编号	$\mu_{85}$	$T_1$
R0-8-120	1.44	0.47
R0-12-120	1.84	0.52
R0-16-120	2.08	0.53
R20-8-120	1.33	0.44
R20-12-120	1.49	0.49
R20-16-120	1.62	0.49
R40-8-120	1.49	0.48
R40-12-120	1.95	0.54
R40-16-120	2.22	0.54
R60-8-120	1.41	0.48
R60-12-120	1.96	0.55
R60-16-120	2.10	0.55
R80-8-120	1.34	0.43
R80-12-120	1.69	0.51
R80-16-120	1.80	0.52
R60-8-150	1.36	0.49
R60-12-150	1.56	0.51
R60-16-150	1.55	0.50

由表 3 可知:

1) 试件的沙漠砂替代率由 0 增加至 80% 时,其延性系数和韧性系数呈现先减小、后增加、再减小的趋势。

与沙漠砂替代率为 0 的试件相比,沙漠砂替代率增加至 20% 时,试件的延性系数降低约 16.20%,韧性系数降低约 6.50%;当沙漠砂替代率增加至 40% 时,试件的延性系数增加约 5.40%,韧性系数增加约 2.60%;当沙漠砂替代率增加至 60% 时,试件的延性系数增加约 1.80%,韧性系数增加约 4.10%;当沙漠砂替代率增加至 80% 时,试件的延性系数降低约 9.46%,韧性系数降低约 1.41%。其主要原因是:沙漠砂替代率为 20% 和 80% 的混凝土下降段应力-应变曲线较陡峭,峰值荷载后混凝土的承载力急剧下降<sup>[2]</sup>,延性和耗能能力较差;而沙漠砂替代率为 40% 和 60% 的混凝土下降段应力-应变曲线较平缓,峰值荷载后混凝土的承载力下降缓慢<sup>[2]</sup>,延性和耗能能力较好。

2) 当纵筋配筋率由 0.89% 增加至 2.01% 和 3.57% 时,试件的延性系数分别增加约 27.44% 和 39.98%,韧

性系数分别增加约 14.00% 和 14.68%，该现象与钢筋普通混凝土轴压短柱的受力特性相似<sup>[23]</sup>。

3) 当体积配箍率由 1.22% 增长至 1.52% 时，试件的延性系数增加约 21.58%，韧性系数增加 5.70%，该现象与钢筋普通混凝土轴压短柱的受力特性相似<sup>[23]</sup>。

### 3 轴压承载力计算

选取中、美两国规范分别对轴压短柱进行计算。

中国规范《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)<sup>[20]</sup>的计算式为：

$$N_{GB} \leq 0.9\lambda(f_c A + f_y' A_s') \quad (1)$$

式中， $N_{GB}$  为中国规范对应的试件轴压承载力， $\lambda$  为试件的稳定系数， $f_c$  和  $f_y'$  分别为混凝土轴心抗压强度和纵筋抗压强度设计值， $A$  和  $A_s'$  分别为混凝土截面面积和纵筋截面面积。

美国规范《结构混凝土建筑规范》(ACI318-19)<sup>[26]</sup>的计算式为：

$$N_{ACI} \leq 0.8\phi'(0.85f_c'(A - A_s') + f_y'A_s') \quad (2)$$

式中： $N_{ACI}$  为美国规范对应的试件轴压承载力； $\phi'$  为标准强度向设计强度转化时承载力的降低系数； $f_c'$  为混凝土圆柱体抗压强度设计值， $f_c' = 0.8f_{cu}$ ，其中， $f_{cu}$  为立方体抗压强度。

将本文试件承载力试验计算结果  $N_u$  与上述两种规范计算结果  $N_{GB}$ 、 $N_{ACI}$  进行对比，如表 4 所示。

表 4 试件承载力试验结果和规范计算结果

Tab. 4 Test results and standard calculation results of bearing capacity of specimens

试件编号	$N_u$	$N_{GB}$	$N_{ACI}$	$N_u \cdot N_{GB}^{-1}$	$N_u \cdot N_{ACI}^{-1}$
R0-8-120	798.66	605.11	538.27	1.320	1.484
R0-12-120	862.52	686.43	594.49	1.257	1.451
R0-16-120	926.68	800.48	673.34	1.158	1.376
R20-8-120	716.61	577.98	513.48	1.240	1.396
R20-12-120	803.55	659.30	569.70	1.219	1.410
R20-16-120	833.97	773.35	648.55	1.078	1.286
R40-8-120	846.42	649.88	579.16	1.302	1.461
R40-12-120	895.01	731.21	635.39	1.224	1.409
R40-16-120	973.27	672.38	714.23	1.447	1.363
R60-8-120	821.53	624.11	555.62	1.316	1.479
R60-12-120	876.70	705.43	611.84	1.243	1.433
R60-16-120	940.63	819.48	690.69	1.148	1.362
R80-8-120	747.43	596.83	530.71	1.252	1.408
R80-12-120	822.74	678.16	586.93	1.213	1.402
R80-16-120	875.39	792.21	665.78	1.105	1.315
R60-8-150	702.04	624.11	555.62	1.125	1.264
R60-12-150	793.19	705.43	611.84	1.124	1.296
R60-16-150	880.77	819.48	690.69	1.075	1.275

由表 4 可知： $N_u/N_{GB}$  的平均值为 1.214，标准差为 0.147，变异系数为 0.095； $N_u/N_{ACI}$  的平均值为 1.382，标准差为 0.070，变异系数为 0.051。结果表明，现有规范计算结果与本文试验结果偏差较大，规范的计算方法较保守、不经济。

因此，本文基于 GB50010—2010 的承载力计算公式<sup>[20]</sup>，通过引入沙漠砂对混凝土强度的影响系数  $\xi$ 、沙漠砂混凝土与钢筋的匹配效应系数  $K$  ( $K = \varepsilon_s / \text{混凝土应变} \varepsilon_c$ ) 来考虑沙漠砂对钢筋混凝土短柱承载力的影响，如式(3)所示：

$$N_F \leq 0.9\phi(\xi f_c' A + K f_y' A_s') \quad (3)$$

式中， $N_F$  为修正后的轴压承载力。

利用 origin 软件进行数据拟合， $\xi$  与  $r$ 、 $K$  与  $\varepsilon_s / \varepsilon_c$  的拟合曲线分别如图 18 和 19 所示。图 18 和 19 中， $R^2$  为平方残差系数， $R^2$  值越大，表示模型能更好地解释数据间的关联性，可分别得到  $\xi$  与  $K$  的表达式为：

$$\xi = 1.036 + 23.213r - 92.922r^2 + 89.073r^3 \quad (4)$$

$$K = \frac{-0.033}{1 - 0.906 \left( \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_c} \right)} \quad (5)$$

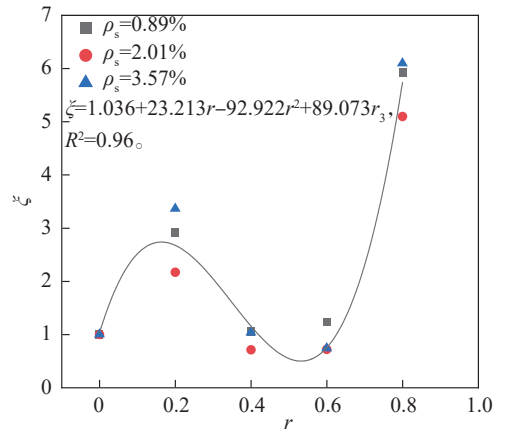


图 18  $\xi$  与  $r$  的拟合曲线

Fig. 18 Fitting curve of  $\xi$  and  $r$

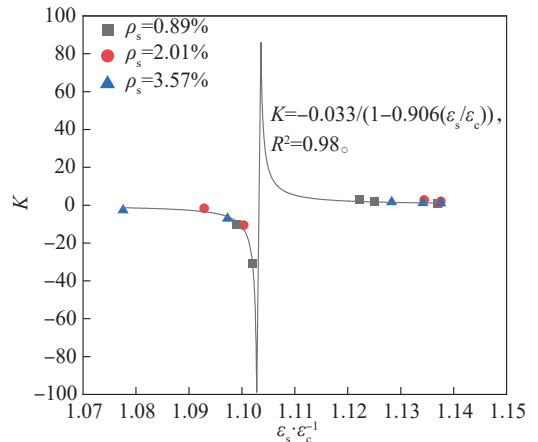


图 19  $K$  与  $\varepsilon_s / \varepsilon_c$  的拟合曲线

Fig. 19 Fitting curve of  $K$  and  $\varepsilon_s / \varepsilon_c$

按式(3)对钢筋沙漠砂混凝土短柱试件进行承载力计算,计算与试验结果对比如表5所示。

表5 试件计算结果与试验结果

Tab. 5 Calculation results and test results of specimens

试件编号	$r/\%$	$N_u/\text{kN}$	$N_F/\text{kN}$	$N_u/N_F^{-1}$
R0-8-120		798.66	640.48	1.247
R0-12-120	0	862.52	744.86	1.158
R0-16-120		926.68	902.15	1.027
R20-8-120		716.61	694.04	1.033
R20-12-120	20	803.55	748.30	1.074
R20-16-120		833.97	905.10	0.921
R40-8-120		846.42	820.04	1.032
R40-12-120	40	895.01	859.54	1.041
R40-16-120		973.26	1 055.02	0.923
R60-8-120		821.53	545.84	1.505
R60-12-120	60	876.70	623.29	1.407
R60-16-120		940.63	889.72	1.057
R80-8-120		747.43	656.50	1.139
R80-12-120	80	822.74	788.61	1.043
R80-16-120		875.40	1 036.33	0.845
R60-8-150		702.04	656.24	1.070
R60-12-150	60	793.20	761.35	1.042
R60-16-150		880.77	873.47	1.008

由表5可知, $N_u/N_F$ 的平均值为1.087,标准偏差为0.124,变异系数0.112,表明计算结果与试验结果吻合较好,说明修正后的计算公式可为钢筋沙漠砂混凝土短柱的轴压承载力计算提供理论依据。

## 4 结论

对18根钢筋沙漠砂混凝土短柱进行轴压试验研究,得到以下结论:

1)随着沙漠砂替代率的增加(0~80%),虽然各试件与钢筋普通混凝土短柱的破坏状态较相似,但沙漠砂替代率为20%和80%的短柱其各项性能指标较差,而沙漠砂替代率为40%和60%的短柱其各项性能指标较好。因此,建议采用沙漠砂替代率为40%~60%的沙漠砂混凝土试件。

2)当纵筋配筋率介于0.89%~3.57%、体积配箍率介于1.22%~1.52%时,钢筋沙漠砂混凝土短柱的各项性能指标均随着纵筋配筋率和体积配箍率的增加而得到改善,其特性与钢筋普通混凝土短柱相似。

3)通过引入沙漠砂强度影响系数 $\zeta$ 和沙漠砂混凝土与钢筋的匹配效应系数 $K$ ,建立了钢筋沙漠砂混

凝土短柱轴压承载力计算公式,其计算结果与试验结果吻合良好,可为钢筋沙漠砂混凝土短柱的工程应用提供理论参考。

参考文献:

- [1] Wang Xueyan, Liu Minghui, Liu Xuan, et al. Study on mechanical properties and carbon emissions of desert sand and machine-made sand concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(2): 23-30. [王雪艳, 刘明辉, 刘萱, 等. 沙漠砂+机制砂混凝土力学性能及碳排放研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(2): 23-30.]
- [2] 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. [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.]
- [3] Li Zhiqiang, Gan Dan. Cyclic behavior and strength evaluation of RC columns with dune sand [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 47, 103801.
- [4] Li Zhiqiang, Zhang Huadong, Gan Dan. Experimental research on the seismic behaviour of desert sand concrete frame joints [J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(3): 544-549. [李志强, 张华东, 甘丹. 沙漠砂混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 振动工程学报, 2023, 36(3): 544-549.]
- [5] Sadat S I, Ding F X, Lyu F, et al. Unified prediction models for mechanical properties and stress-strain relationship of dune sand concrete[J]. Computers and Concrete, 2023, (6): 595-606.
- [6] Sadat S I, Ding F X, Lyu F, et al. Axial compression behavior and reliable design approach of rectangular dune sand concrete-filled steel tube stub columns[J]. Developments in the Built Environment, 2024, 18: 100437.
- [7] Qin Yongjun, Zhang Liangliang, Qu Changwei, et al. Flexural mechanical properties of steel fiber desert sand concrete beams[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5599-5610. [秦拥军, 张亮亮, 渠长伟, 等. 钢纤维沙漠砂混凝土梁受弯力学性能试验[J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5599-5610.]
- [8] Qin Yongjun, Li Xiangyang, Cui Zhuang, et al. Research on shear performances of concrete deep beams mixed with desert sand without web reinforcement[J]. Industrial Construction, 2021, 51(9): 98-105. [秦拥军, 李向阳, 崔壮, 等. 无腹筋沙漠砂混凝土深梁抗剪性能研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(9): 98-105.]
- [9] Dong Wei, Fu Qianwang, Shen Xiangdong, et al. Grey entropy analysis on effect of pore structure on compressive strength of aeolian sand concrete after salt-freezing[J]. Materials Reports, 2023, 37(2): 65-70. [董伟, 付前旺, 申向东, 等. 盐冻作用后风积砂混凝土孔结构对抗压强度影响的灰熵分析[J]. 材料导报, 2023, 37(2): 65-70.]
- [10] Dong Wei, Shen Xiangdong, Xue Huijun, et al. Research on the freeze-thaw cyclic test and damage model of Aeolian

- sand lightweight aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*,2016,123:792–799.
- [11] Wang Yaohong,Chu Qi,Han Qing,et al.Experimental study on the seismic damage behavior of aeolian sand concrete columns[J].*Journal of Asian Architecture and Building Engineering*,2020,19(2):138–150.
- [12] Wang Yaohong,Chao Lei,Yang Xiaoming,et al.Experimental study on seismic behavior of crumb rubber aeolian sand concrete columns[J].*World Earthquake Engineering*,2022,38(4):113–119.[王尧鸿,晁磊,杨晓明,等.橡胶集料风积沙混凝土柱抗震性能试验研究[J].*世界地震工程*,2022,38(4):113–119.]
- [13] Liu Haifeng,Ma Yingchang,Zhang Runqi,et al.Influence of desert sand on axial compression behavior of concrete under freezing and thawing environment[J].*Journal of Harbin Institute of Technology*,2021,53(3):101–109.[刘海峰,马映昌,张润奇,等.冻融环境下沙漠砂对混凝土轴心受压力学性能的影响[J].*哈尔滨工业大学学报*,2021,53(3):101–109.]
- [14] Liu Haifeng,Ma Yingchang,Ma Jurong,et al.Frost resistance of desert sand concrete[J].*Advances in Civil Engineering*,2021,2021:6620058.
- [15] Wang Jingfeng,Liu Wei,Shen Qihan,et al.Investigation of axially-loaded concrete-filled elliptical steel tubular short columns considering the effect of circumferential gap[J].*Journal of Building Structures*,2023,44(2):50–63.[王静峰,刘伟,沈奇罕,等.考虑环向脱空影响的椭圆钢管混凝土短柱轴压性能研究[J].*建筑结构学报*,2023,44(2):50–63.]
- [16] Zheng Yuzhou,Chen Li,Zhu Xiaolong,et al.Test on axial compression performance of high-strength steel tube confined self-stress concrete short column[J].*Advanced Engineering Sciences*,2022,54(4):56–63.[郑宇宙,陈力,祝小龙,等.高强钢管约束自应力混凝土短柱轴压性能试验[J].*工程科学与技术*,2022,54(4):56–63.]
- [17] Wang Weihua,Chen Zijian,Cai Minwei,et al.Experimental investigation on composite-sectioned stainless CFST stub columns filled with high strength demolished concrete lumps under axial compression[J].*Advanced Engineering Sciences*,2022,54(3):180–191.[王卫华,陈子健,蔡敏伟,等.复式不锈钢管高强再生块体混凝土短柱轴压试验研究[J].*工程科学与技术*,2022,54(3):180–191.]
- [18] Tang Hongyuan,Fan Luyao,Zhao Xin,et al.Bearing capacity model of circular concrete-filled stainless steel stub columns under uniaxial compression[J].*Advanced Engineering Sciences*,2020,52(3):10–20.[唐红元,范璐瑶,赵鑫,等.圆不锈钢管混凝土短柱轴压承载力模型研究[J].*工程科学与技术*,2020,52(3):10–20.]
- [19] Deng Zongcai,Yao Junsuo.The axial compression stress-strain model for ultra-high performance concrete columns confined by high-strength stirrups[J].*Engineering Mechanics*,2020,37(5):120–128.[邓宗才,姚军锁.高强钢筋约束超高性能混凝土柱轴心受压本构模型研究[J].*工程力学*,2020,37(5):120–128.]
- [20] 中华人民共和国建设部.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构试验方法标准:GB/T 50152—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [22] Wang Haitao,Peng Liang,Wang Zhaoyun.An introduction to the engineering geological characteristics of the sand in guerbantonggute desert, Xinjiang[J].*Xinjiang Geology*,2007,25(2):225–228.[汪海涛,彭亮,王兆云.新疆古尔班通古特沙漠砂的工程地质特性浅析[J].*新疆地质*,2007,25(2):225–228.]
- [23] Gu Yangming,Wang Jingfeng,Shen Qihan,et al.Experimental study on axial compressive performance of HRB635 grade hot-rolled ribbed high-strength reinforced concrete short column[J].*Journal of Hefei University of Technology(Natural Science)*,2021,44(10):1370–1378.[顾杨明,王静峰,沈奇罕,等.HRB635级热轧带肋高强钢筋混凝土短柱轴压性能试验[J].*合肥工业大学学报(自然科学版)*,2021,44(10):1370–1378.]
- [24] Pessiki S,Pieroni A.Axial load behavior of large scale spirally reinforced high strength concrete columns[J].*ACI Structural Journal*,1997,94(3):304–14.
- [25] Domínguez–Cartes V,Ramos–Cabeza D,de la Torre M L,et al.Complete generalization of the equations for the stress-strain curves of concrete under uniaxial compression[J].*Materials*,2023,16(9):3387.
- [26] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete and commentary:ACI 318R–19[S]. Farmington Hills:American Concrete Institute,2019.

## Experimental Study on the Axial Compression Properties of Reinforced Desert Sand Concrete Short Column

LI Zhiqiang<sup>1</sup>, GAN Dan<sup>1,2\*</sup>, ZHOU Yang<sup>1,3</sup>

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

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

3.Xinjiang Corps Hydraulic Research Institute (Co., LTD.), Urumqi 830000, China)

### Abstract:

**Objective** Due to the rapid development of infrastructure construction, the consumption of concrete has increased significantly. However, natural

aggregate remains in shortage in many regions because of environmental constraints. Therefore, the use of locally available desert sand in concrete production in structural engineering receives increasing attention in northwest China's Xinjiang Province. The Xinjiang region is characterized by limited fine natural aggregate resources, and nearly a quarter of the area is covered with desert sand. Therefore, using desert sand as a fine aggregate resource addresses the imbalance between the supply and demand of river sand, and it reduces the cost of concrete production and transport. The column is one of the essential components of a structure, so numerous studies appear in previous literature. However, relatively limited research examines the axial compression behavior of reinforced desert sand concrete short columns. Therefore, the primary objective of this study is to investigate the influence of desert sand on the axial compression behavior of reinforced concrete short columns. The failure mode, load axial displacement curve, load concrete strain curve, load longitudinal steel strain curve, load stirrup strain curve, and ductility behavior of reinforced desert sand concrete short columns are analyzed.

**Methods** Taking the desert sand replacement ratio, longitudinal steel ratio, and stirrup ratio as the main parameters, the study designed eighteen reinforced concrete short columns made with desert sand in accordance with "Code for design of concrete structures" (GB 50010—2010). All columns were constructed with dimensions of 550 mm in length, 150 mm in width, and 150 mm in height. The test was conducted on an electrohydraulic servo pressure testing machine with an axial loading capacity of 5 000 kN, and the loading velocity was set to 0.01 mm/min. Four displacement sensors with a measuring range of 100 mm were arranged along the central axis of the four surfaces of each specimen to record the axial displacement. Strain gauges were attached to the longitudinal steel bar, stirrup, and concrete surface to measure their respective strains.

**Results and Discussion** The test results showed that 1) the reinforced desert sand concrete short columns failed by forming vertical through cracks, and the failure process and pattern of reinforced desert sand concrete short columns were similar to those of reinforced ordinary concrete short columns. 2) When the desert sand replacement ratio increased from 0 to 80%, the peak load changed by  $-9.04\%$ ,  $4.62\%$ ,  $2.00\%$ , and  $-5.52\%$ , and the ductility coefficient changed by  $-16.20\%$ ,  $5.40\%$ ,  $1.80\%$ , and  $-9.46\%$ , respectively; the concrete's longitudinal and transverse strains of the specimens increased at first, then decreased, and then increased again; the longitudinal steel strain and stirrup strain of specimens with a desert sand replacement ratio of 20% and 80% were larger, while the longitudinal steel strain and stirrup strain of specimens with a desert sand replacement ratio of 40% and 60% were smaller. The main reason for this behavior was that the concrete contained more pores than ordinary concrete when the desert sand replacement ratio was low (20%), while the internal pores were filled by desert sand when the replacement ratio ranged from 40% to 60%. The axial compression properties decreased again because the strength of desert sand particles was lower than that of river sand when the replacement ratio reached 80%. 3) When the longitudinal steel ratio increased from 0.89% to 3.57%, the peak load increased by about 8.53% and 15.80%, and the ductility coefficient increased by about 27.44% and 39.98%, respectively; the concrete's longitudinal and transverse strains decreased gradually; the longitudinal steel strain and stirrup strain of the specimens also decreased gradually; the results were consistent with those of ordinary reinforced concrete columns. 4) When the stirrup ratio increased from 1.22% to 1.52%, the peak load increased by about 11.44% and the ductility coefficient increased by about 21.58%; the concrete's longitudinal and transverse strains decreased gradually; the longitudinal steel strain and stirrup strain of the specimens decreased gradually; the results were also consistent with those of ordinary reinforced concrete columns. 5) The predicted axial compression strength using "Code for the Design of Concrete Structures" of China Code GB 50010—2010 and "Structural Concrete Building Code" of US Code ACI318 was higher than the experimental values by 21% and 38%, respectively; after introducing the influence of desert sand on the strength of concrete and the matching effect coefficient of desert sand concrete and steel bar, the study established a formula for the axial compression strength of reinforced desert sand concrete short columns. The calculated results agreed well with the experimental results.

**Conclusions** 1) The reinforced desert sand concrete short columns with desert sand replacement ratios of 20% and 80% demonstrated poor performance, while those with replacement ratios of 40% and 60% exhibited good performance. Therefore, it was appropriate to use desert sand concrete specimens with replacement ratios of 40% to 60%, and a 60% replacement ratio was recommended to make full use of desert sand resources. 2) When the longitudinal steel ratio increased from 0.89% to 3.57% and the stirrup ratio increased from 1.22% to 1.52%, the axial compression properties of the reinforced desert sand concrete short column improved gradually, and the behavioral characteristics were comparable to those of the ordinary reinforced concrete short column. 3) The formula for calculating the axial bearing capacity of reinforced desert sand concrete short columns was proposed by incorporating the influence of desert sand on concrete strength and the matching effect coefficient of desert sand concrete and steel bars. It can provide a theoretical basis for the engineering application of the reinforced desert sand concrete short column.

**Key words:** desert sand concrete; short column; axial compressive property; ductility property; carrying capacity

(编辑 周璇)

引用格式: Li Zhiqiang, Gan Dan, Zhou Yang. Experimental study on the axial compression properties of reinforced desert sand concrete short column[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(2): 155–167. [李志强, 甘丹, 周阳. 钢筋沙漠砂混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(2): 155–167.]