

不同轴压比下墩柱-盖梁波纹管连接节点 抗震试验研究*

杜程¹, 杨靖宁², 邹俊志², 常正强¹, 徐腾飞², 王传琦^{2,3}

(1. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250101; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 3. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081)

[摘要] 为研究不同轴压比与剪跨比下装配式墩柱-盖梁节点的抗震性能, 基于某实桥三柱式排架墩, 设计并制作了 3 个不同轴压比试件及 1 个小剪跨比试件, 对比分析了试件的滞回特性、刚度退化、耗能能力、位移延性等抗震性能指标。研究表明: 不同轴压比下, 各试件呈现相似的损伤发展和破坏模式, 均表现出良好的承载力和变形能力。轴力变化会影响节点开裂范围, 但不会改变节点破坏模式。高轴压比情况下, 墩柱裂缝向盖梁发展的趋势得到有效控制。小剪跨比试件呈现出显著的剪切破坏特性, 其节点承载力与剪跨比近似成反比, 呈现出更高的等效刚度、屈服承载力和峰值承载力, 但其耗能能力及耗能效率显著降低, 强震作用下的延性较差。

[关键词] 桥梁; 拟静力试验; 抗震性能; 轴压比

[中图分类号] U445.4

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)22-0121-06

Seismic Test of Pier Column-cap Beam Corrugated Duct Connection Joints Under Different Axial Compression Ratios

DU Cheng¹, YANG Jingning², ZOU Junzhi², CHANG Zhengqiang¹,
XU Tengfei², WANG Chuanqi^{2,3}

(1. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250101, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: To investigate the seismic performance of prefabricated pier column-cap beam joints under different axial compression ratios and shear span ratios, three specimens with varying axial compression ratios and a small shear span ratio were designed and fabricated based on a real bridge's three-column bent cap. The seismic performance indicators, including hysteretic behavior, stiffness degradation, energy dissipation capacity, and displacement ductility, were analyzed and compared under low-cycle reversed loading. The results indicate that specimens under different axial compression ratios exhibited similar damage progression and failure modes, demonstrating good load-bearing and deformation capacities. Variations in axial force influenced the extent of joint cracking but did not alter the failure mode. Under high axial compression ratios, the propagation of pier column cracks toward the cover beam was effectively controlled. Specimens with a small shear span ratio displayed pronounced shear failure characteristics, with joint bearing capacity approximately inversely proportional to the shear span ratio. These specimens exhibited higher equivalent stiffness, yield strength, and peak load capacity, but their energy dissipation capacity and efficiency were significantly reduced, along with poorer ductility under strong seismic conditions.

Keywords: bridge; quasi-static test; seismic performance; axial compression ratio

* 国家自然科学基金(52311540016); 四川省科技计划(2023ZDZX0010); 中建股份科技研发计划资助(CSECE-2024-Z-36)

[作者简介] 杜程, 工程师, E-mail: duducheng66@qq.com

[通信作者] 徐腾飞, 博士, 教授, E-mail: tengfeixu@swjtu.edu.cn

[收稿日期] 2025-05-15

0 引言

装配式桥墩连接节点的震后安全性是决定桥墩整体抗震性能的关键。灌浆波纹管连接作为常用连接方式,在中高烈度地震区下的节点连接构造及抗震性能仍面临诸多挑战^[1-3]。既有研究表明,采用灌浆波纹管连接的装配式桥墩抗震性能与整体现浇墩接近^[4-7],但不同轴压比与剪跨比下的节点抗震性能差异尚未明晰。李航等^[8]研究了承插式连接预制桥墩的抗震性能,轴压比越高,桥墩承载能力越强,但延性和累积耗能能力均有降低。Zhang 等^[9]研究了采用灌浆套筒连接的双柱式桥墩抗震性能,结合超高性能混凝土增强了连接区域,残余位移显著降低。蓝亦辉等^[10]模拟了波纹管连接不同轴压比下的滞回特性,表明滞回曲线饱满度和峰值荷载与轴压比呈线性关系,极限荷载随轴压比增大而急速下降。许劲等^[11]开展了灌浆波纹管连接装配式桥墩双向拟静力试验,结果表明随着轴压比增加,桥墩承载能力和耗能能力提升,极限变形能力降低。胡志坚等^[12]分析了现浇、波纹管浆锚连接和榫头加波纹管连接的装配式桥墩地震动力响应,轴压比的提高会增大桥墩的位移响应及塑性损伤程度,剪力响应和地震耗能也随之增大。邵淑营^[13]分析了不同轴压比下波纹管连接的装配式桥墩特性。轴压比越大,墩柱破坏现象越显著,滞回曲线捏缩现象越明显。Shen 等^[14]提出了新型灌浆波纹管连接构造,通过扩大截面将塑性铰转移至过渡区,避免了纵筋断裂,其承载力较灌浆套筒和现浇桥墩提升约 16%。

多柱式排架墩在横向水平地震作用下,边墩柱轴力变化显著,受剪切破坏风险增加。剪跨比作为桥墩抗震性能的重要因素,直接影响桥墩破坏模式、承载能力及延性,剪跨比较小,桥墩易发生剪切破坏或弯剪破坏^[15-19]。此外,现有装配式桥墩抗震性能研究多集中墩柱-承台节点,对墩柱-盖梁节点关注较少。因此,为研究不同轴压比与剪跨比下墩柱-盖梁节点抗震性能,基于某实桥三柱式排架墩,通过拟静力试验,对比分析滞回特性、刚度退化、耗能能力、位移延性等指标。

1 试验方案

1.1 试验设计

某高速公路桥墩结构如图 1 所示,该桥位处基本地震动峰值加速度为 0.20g,抗震设防类别为 B 类,Ⅱ类场地,基本周期 T_g 为 0.40s。上部结构为装配式预应力混凝土 T 梁,下部结构为 M 型桥墩,墩柱采用灌浆波纹管与盖梁连接。根据 MIDAS 有

元软件进行全桥模型抗震计算,墩柱-盖梁边节点在设防地震动强度下的最大轴力为 856kN,最小轴力为 481kN 与恒载下轴力为 668kN,故设计了 3 个不同轴压比的试件。为研究小剪跨比桥墩的抗震性能,设计了试件 S4,减小墩柱高度,保证墩柱的剪切破坏先于弯曲破坏。各试件均采用灌浆波纹管连接,缩尺比设为 1 : 2.5。

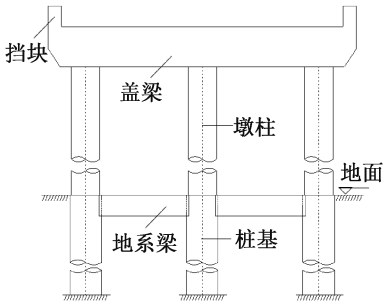


图 1 三柱式排架墩
Fig. 1 Three-column bent frame pier

试件由盖梁、墩柱及加载梁组成,具体构造如图 2 所示。其中盖梁截面尺寸为 880mm×640mm,长度 1 960mm;加载梁截面尺寸为 660mm×300mm,长度 660mm;墩柱直径为 560mm。试件 S1,S2,S3 轴压比设计为 0.18,0.10,0.14,加载点至盖梁底的有效高度 1.68m,对应剪跨比为 3.0。试件 S4 轴压比设置为 0.10,有效高度 0.84m,对应剪跨比为 1.5。盖梁截面纵筋配置 28 ϕ 14,箍筋配置 ϕ 6@60,预埋 12 根 ϕ 50 的金属波纹管,并配置了 8 ϕ 14 的 V 形弯折钢筋,以提升抗裂和抗冲切能力。墩柱截面配筋率为 1.24%,其中纵筋配置 12 ϕ 18,螺旋箍筋配置 ϕ 6@90。

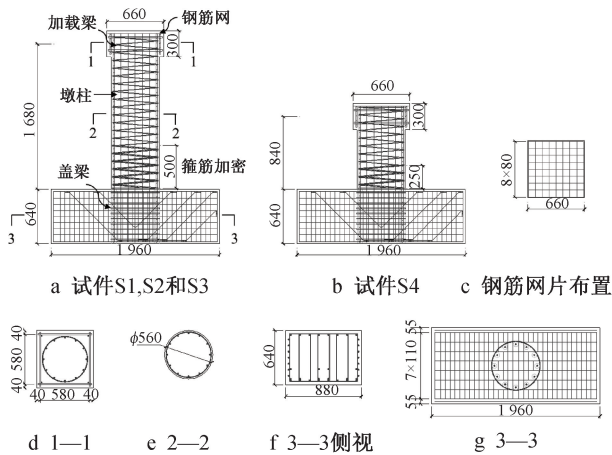


图 2 试件设计
Fig. 2 Specimen design

试件采用 C40 混凝土,实测混凝土立方体抗压强度为 43MPa。钢筋直径为 6, 14, 18mm,均采用

HRB400 钢筋。灌浆料棱柱体抗压强度有效值为 100MPa,圆柱体劈裂抗拉强度为 3.5MPa。

1.2 加载方案

试验加载制度由恒定的轴向压力及逐级增大的水平位移加载组成,通过竖向千斤顶对加载梁施加轴压力,MTS 水平作动器施加水平荷载与位移,如图 3 所示。试件 S1,S2,S3,S4 的轴压力分别设置为 856,481,668,481kN。水平位移加载采用墩顶漂移率^[17](以下简称“纵漂率”)控制,其值为试件两侧位移幅值之和与有效高度比值,从 0.125%逐级递增至 5%,共设置 9 个加载等级,每级正、反向循环加载 2 次,如图 4 所示。当试件顶部的水平荷载下降至峰值承载力的 85%时,视作试件破坏,试验停止。

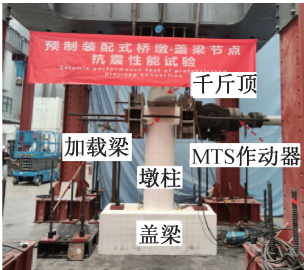


图 3 试验加载装置
Fig.3 Test loading setup

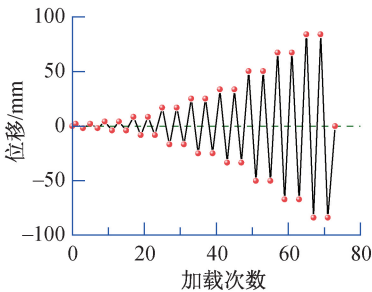


图 4 加载制度
Fig.4 Loading protocol

1.3 测量系统

试验测量系统由 14 个应变片和 5 个位移计组成,应变片沿盖梁长度方向两侧纵筋各设置 5 个,沿盖梁宽度方向墩底箍筋各 2 个;位移计分别架设在加载梁中部及墩柱-盖梁节点处上方 80,280mm 处,以监控塑性铰的发展,如图 5 所示。墩柱与盖梁面均涂刷白色乳胶漆,用墨斗绘出 150mm×100mm 的网格,记录加载过程中墩身与盖梁裂缝的发展。

2 试验结果分析

2.1 失效破坏模式

各试件开裂与破坏形式如图 6 所示。S1 纵漂率加载至 0.5%时,墩柱右侧距墩底约 350mm 处出

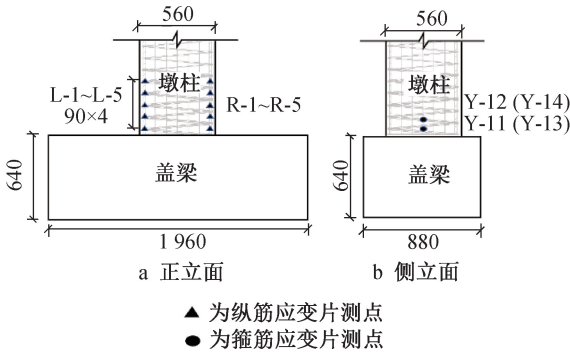


图 5 应变测点布置
Fig.5 Strain gauge layout

现水平微裂缝。纵漂率加载至 1%时,原有裂缝在接近墩柱中部以 20°~45°斜向下发展,左右两侧的裂缝接近贯穿柱面,墩柱盖梁节点接缝处开始出现裂缝。纵漂率加载至 2%时,墩柱中部裂缝基本贯通,继续沿 45°向下发展,最大裂缝宽度达 3.14mm。墩柱左右两端节点接缝处混凝土脱落,盖梁顶出现多条裂缝从接缝处延伸至盖梁正面。纵漂率加载至 3%时,斜向裂缝已发展成大量树枝状分支,最大裂缝宽度达 4.89mm。墩柱左右两端距墩底 200mm 范围内的混凝土完全破碎,脱落严重,露出主筋与箍筋,箍筋已发生明显变形。纵漂率加载至 4%时,两端最上方裂缝以近 70°向塑性铰区剧烈扩展,最大裂缝宽度达 5.8mm。墩柱左右两端距墩底 300mm,环向长度约 800mm 范围内的混凝土完全破碎且剥落。箍筋纵筋均屈服,两侧纵筋侧向产生隆起变形。

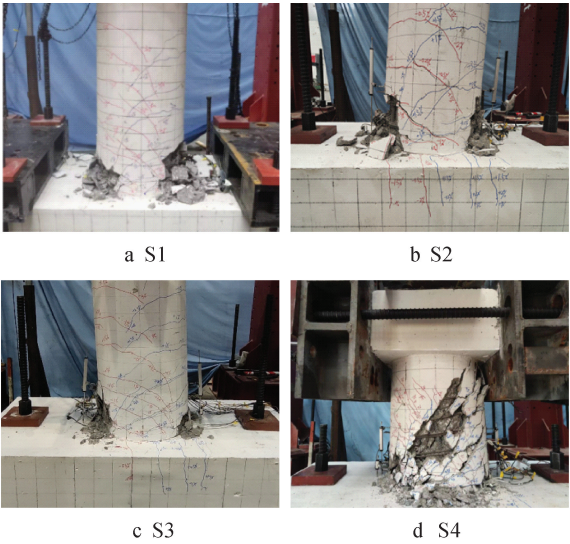


图 6 试件开裂与破坏形式
Fig.6 Specimen crack and failure mode

试件 S2,S3 与 S1 的损伤发展及破坏规律相似, S2 纵漂率加载至 0.5%时,节点接缝处出现裂缝。

纵漂率加载至 1% 时,墩柱左右两端节点接缝处混凝土脱落,节点接缝处全部开裂。纵漂率加载至 2% 时,墩柱左右两端距墩底 100mm 范围内的混凝土大块脱落。对比 S2 和 S3,纵漂率加载至 2% 时,墩柱左右两端墩底 50mm 范围内混凝土轻微压碎。经分析可知,轴压比的大小会影响连接节点的开裂范围,但不会改变节点破坏模式。高轴压比情况下,墩柱裂缝向盖梁延伸的情况得到更好控制。

S4 开裂及破坏形式与其余试件差异显著,呈现出剪切破坏特性。纵漂率加载至 0.25% 时,墩柱右侧距墩底约 225mm 处出现水平微裂缝并直接在墩柱中部以 45° 发展。节点接缝处开始出现裂缝。纵漂率加载至 0.5% 时,原有裂缝继续发展,在接近墩柱中部位置形成 X 形交叉,节点接缝处全部开裂。纵漂率加载至 3% 时,墩柱中部产生大量裂缝,墩柱左右两端距墩底 50mm 范围内混凝土整块碎裂脱落。纵漂率继续增大,斜裂缝贯穿试件,墩柱中部混凝土保护层沿右上至左下斜裂缝完全破碎脱落,主筋与箍筋外露,纵筋明显受剪切变形。

2.2 滞回特性分析

各试件滞回曲线及骨架曲线如图 7,8 所示。加载初期,各试件滞回环呈饱满的梭形,未出现明显捏拢现象。随加载级数的递增,试件 S1,S2,S3 的滞回曲线逐渐转为弓形;S4 的滞回曲线呈反 S 形,捏拢效应明显。

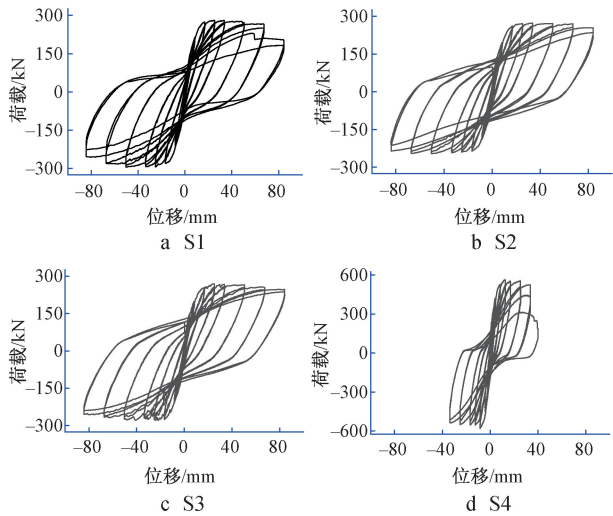


图 7 各试件滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curves of each specimen

随着轴压比增大,试件能承受的峰值荷载也越大,但整体变化范围有限,试件 S1 与 S3 的峰值承载力差仅为 11.12kN。在加载后期,试件 S1 的滞回曲线出现明显的捏拢现象,达到峰值承载力后,其失效速率更快,结构延性也更差。剪跨比会极大影响

试件内力分布并改变最终破坏形式,试件 S4 的峰值荷载显著提升至 564.22kN,对比之下 S2 为 272.97kN,峰值承载力与剪跨比几乎成反比,同时试件 S4 达峰值荷载后,承载力失效速率显著加快,结构延性也更差。

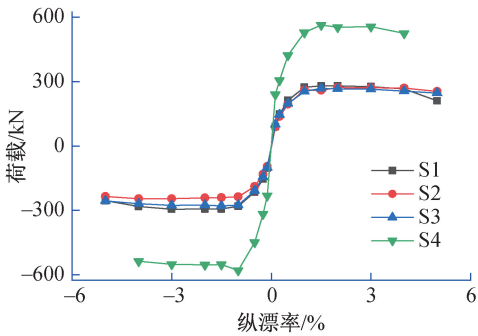


图 8 各试件骨架曲线

Fig. 8 Skeleton curve of each specimen

2.3 刚度退化分析

各试件等效刚度及刚度退化曲线如图 9 所示。由图 9 可知,加载前中期,等效刚度随轴压比的增加而增大,但整体变化范围有效,试件 S1 与 S2 等效刚度最大差值为 3.59kN/mm;加载过程后期,等效刚度逐渐趋于一致。小剪跨比试件 S4 的等效刚度显著大于其余试件,其原因是剪切变形比例更高,导致达到峰值承载力后的下降速度更快。不同轴压比与剪跨比试件呈现出相似的刚度退化趋势,刚度初期快速下降后渐趋于平缓。轴压比对刚度退化影响较小,不同轴压比试件的刚度退化速度几乎一致。

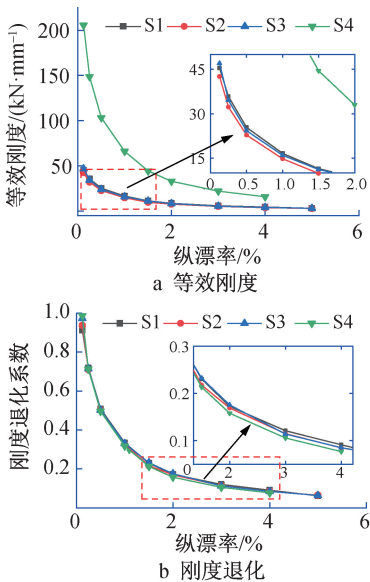


图 9 各试件刚度曲线对比

Fig. 9 Comparison of stiffness curves for each specimen

2.4 位移延性分析

位移延性系数是结构达到极限状态时的最大位移与屈服位移之比。基于 JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》,采用能量等效法计算骨架曲线的等效屈服点。试件承载力下降到其峰值承载力的 85%时,对应的位移视为极限位移。各试件位移延性相关指标如表 1 所示。不同轴压比试件的屈服承载力及峰值承载力变化范围有效,其等效屈服位移随轴压比的增大而减小,极限位移也基本符合该规律,均呈现出良好的承载力与变形能力。试件 S4 的峰值承载力显著大于其余试件,但其等效屈服位移仅 6.07mm,极限位移为 33.45mm,与剪跨比几乎成反比,强震作用下的结构延性较差。

表 1 各试件位移延性分析

试件编号	等效屈服承载力 F_y /kN	等效屈服位移/mm	峰值承载力 F_p /kN	极限位移/mm	位移延性系数
S1	236.97	11.98	280.01	64.32	5.37
S2	233.11	13.93	272.97	79.78	5.73
S3	223.97	12.25	268.89	80.35	6.56
S4	466.54	6.07	564.22	33.45	5.51

2.5 耗能能力分析

累计滞回耗能及等效黏滞阻尼系数是评估试件耗能能力的重要指标。各试件累计滞回耗能及等效黏滞阻尼曲线如图 10 所示。试件 S1,S2,S3 的累计滞回耗能曲线走势相近,试件 S3 的累计滞回耗能大于试件 S1,试件 S2 为 37.65kN·m。加载过程中期,不同轴压比下试件的等效黏滞阻尼系数差距较小;加载后期,轴压比越大,试件其等效黏滞阻尼系数越大,耗能效率也越高。

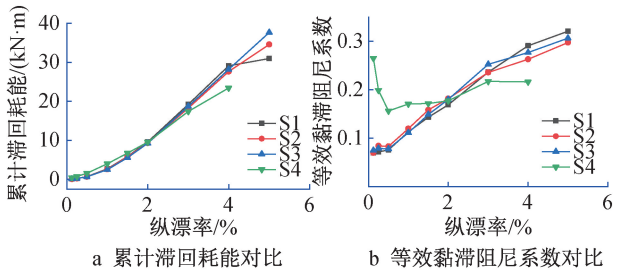


图 10 各试件耗能能力对比

Fig. 10 Comparison of energy dissipation of each specimen

对比试件 S2 与 S4,加载前期,S4 的累计滞回耗能略高于 S2,等效黏滞阻尼系数显著高于 S2;加载中后期,S2 累计滞回耗能及等效粘滞阻尼系数均高于 S4,呈现更强的变形能力与更高的耗能效率。

3 结语

- 1) 三柱式排架墩在横向地震下轴力变化范围有限,轴力变化不会改变节点破坏模式,不同轴压比下的灌浆波纹管节点均呈现出良好的承载能力和变形能力。
- 2) 轴压比会影响节点开裂范围,高轴压比情况下,节点区受到多项约束,墩柱裂缝向盖梁发展趋势得到更好控制。
- 3) 节点的承载力与剪跨比近似成反比,小剪跨比试件的耗能能力及效率显著降低,但其等效刚度更大,主要原因在于剪切变形比例更高,导致达到峰值后承载力下降更快。

参考文献:

[1] 陈彦江,丁梦佳,许维炳,等. 预制拼装桥墩体系及其抗震性能研究进展[J]. 中国公路学报,2022,35(12):56-76.
CHEN Y J, DING M J, XU W B, et al. Research process for seismic performance of the prefabricated concrete pier system [J]. China journal of highway and transport, 2022, 35(12): 56-76.

[2] 王志强,卫张震,魏红一,等. 预制拼装联接件形式对桥墩抗震性能的影响[J]. 中国公路学报,2017,30(5):74-80.
WANG Z Q, WEI Z Z, WEI H Y, et al. Influences of precast segmental connector forms on seismic performance of bridge pier [J]. China journal of highway and transport, 2017, 30(5): 74-80.

[3] 张凯迪,贾俊峰,程寿山,等. 等同现浇预制装配桥墩抗震性能研究综述 [J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(12): 1248-1259.
ZHANG K D, JIA J F, CHENG S S, et al. Seismic performance of emulative cast-in-place precast bridge columns-state of the art review[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(12): 1248-1259.

[4] 贾俊峰,郭扬,宋年华,等. 基于灌浆波纹管锚固连接的预制拼装 RC 墩柱抗震试验 [J]. 中国公路学报,2018, 31(12): 211-220.
JIA J F, GUO Y, SONG N H, et al. Seismic testing of precast RC bridge pier columns anchored by grouted corrugated ducts [J]. China journal of highway and transport, 2018, 31(12): 211-220.

[5] 姜海西,王志强,沈佳伟. 灌浆金属波纹管连接预制拼装立柱抗震性能试验研究[J]. 结构工程师,2016,32(5):132-138.
JIANG H X, WANG Z Q, SHEN J W. Anti-seismic performance testing of prefabricate assembly pillars connected with grouting metal corrugated pipe [J]. Structural engineers, 2016, 32(5): 132-138.

[6] TULLINI N, MINGHINI F. Grouted sleeve connections used in precast reinforced concrete construction-experimental investigation of a column-to-column joint [J]. Engineering structures, 2016, 127:784-803.

[7] BAO L S, ZHAO J K, TENG F, et al. Experimental study on the seismic performance of prefabricated frame piers [J]. Structures, 2023, 52:651-665.

[8]

李航,刘朵,王阳春,等. 承插式连接预制拼装桥墩抗震性能试验研究[J]. 桥梁建设,2024,54(1):95-102.

LI H,LIU D,WANG Y C,et al. Experimental study on seismic performance of precast piers with socket connection[J]. Bridge construction,2024,54(1):95-102.

[9]

ZHANG G D,SU S B,HAN Q,et al. Experimental and numerical investigation of seismic performance of prefabricated double-column piers used in accelerated bridge construction [J]. Engineering structures,2023,293:116688.

[10]

蓝亦辉,夏樟华,陈浩冲,等. 灌浆波纹管装配式桥墩双向地震损伤评价方法[J]. 世界地震工程,2022,38(4):167-177.

LAN Y H,XIA Z H,CHEN H C,et al. Bidirectional seismic damage evaluation method for corrugated duct grouting prefabricated bridge piers [J]. World earthquake engineering,2022,38(4):167-177.

[11]

许劲,朱祖科,夏樟华. 轴压比对灌浆波纹管连接预制拼装桥墩抗震性能的影响[J]. 福州大学学报(自然科学版),2022,50(4):521-529.

XU J,ZHU Z K,XIA Z H. Influence of axial pressure ratio on the seismic performance of prefabricated assembled piers connected by grouted bellows [J]. Journal of Fuzhou University (natural science edition),2022,50(4):521-529.

[12]

胡志坚,闫明辉,周知,等. 不同连接构造的预制拼装桥墩地震响应分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2022,54(9):55-64.

HU Z J,YAN M H,ZHOU Z,et al. Seismic response analysis of precast pier with different connection structures [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2022,54(9):55-64.

[13]

邵淑莹. 灌浆波纹管连接装配式桥墩抗震性能研究[D]. 福州:福州大学,2018.

SHAO S Y. Anti-seismic performance study of precast bridge piers connected with grouting corrugated pipe [D]. Fuzhou: Fuzhou University,2018.

[14]

SHEN Y, WANG Y, FU C X, et al. Seismic performance of precast bridge columns with new grouted corrugated duct connections [J]. Engineering structures,2025,327:119608.

[15]

石岩,李军,秦洪果,等. 桥梁双柱式排架墩抗震性能研究进展述评[J]. 中国公路学报,2021,34(2):134-154.

SHI Y,LI J,QIN H G,et al. Review on seismic performance of bridge double-column bents [J]. China journal of highway and transport,2021,34(2):134-154.

[16]

孙熠. 桥梁双柱及三柱墩抗震性能分析[D]. 廊坊:防灾科技学院,2022.

SUN Y. Analysis on seismic performance of double-column and three-column bridge piers [D]. Langfang: Institute of Disaster Prevention,2022.

[17]

卓卫东,曾武华. 矩形 RC 桥墩变形能力概率模型[J]. 工程力学,2015,32(1):57-63,71.

ZHUO W D,ZENG W H. Probabilistic deformation capacity model for rectangular RC bridge columns [J]. Engineering mechanics,2015,32(1):57-63,71.

[18]

冉隆飞. 双柱式桥墩横向抗震加固易损性分析[J]. 施工技术(中英文),2025,54(11):118-123.

RAN L F. Fragility analysis of transverse seismic reinforcement of double-column piers bridge [J]. Construction technology,2025,54(11):118-123.

[19]

高博,杨建荣,李睿. 高烈度山区机场高架桥墩抗震性能试验研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(11):1-8.

GAO B,YANG J R,LI R. Experimental study on seismic performance of airport viaduct piers in high intensity mountain areas [J]. Construction technology,2024,53(11):1-8.

(上接第 78 页)

HU Y,DIAO L,DENG X,et al. The influence of cementitious capillary crystalline waterproofing admixtures on the self-healing performance of cementitious materials and its mechanism research [J]. China concrete and cement products,2018(10):1-4.

[12]

文高原,尹光福,蔡庆华,等. 自修复渗透结晶型防水材料对混凝土碱集料反应的影响研究[J]. 防护工程,2012,34(1):27-30.

WEN G Y,YIN G F,CAI Q H,et al. Research on the effects of self-healing capillary crystalline waterproofing materials on alkali-aggregate reaction [J]. Protective engineering,2012,34(1):27-30.

[13]

李冰,郭荣鑫,万夫雄,等. 不同条件下内掺水泥基渗透结晶型防水材料混凝土自愈合性能研究[J]. 硅酸盐通报,2019,38(7):2208-2212.

LI B, GUO R X, WAN F X, et al. Research on self-healing performance of concrete with cement-based permeable crystalline waterproof material under different conditions [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society,2019,38(7):2208-2212.

[14]

杜英欣,马再禹,任广毅,等. 水泥基渗透结晶型材料与纳米材料对混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品,2024(3):36-38.

DU Y X,MA Z Y,REN G Y,et al. Influence of cement based permeable crystalline materials and nano-materials on the properties of concrete [J]. China concrete and cement products,2024(3):36-38.