具备有序牺牲机制的混合配筋铁路自复位桥墩力学行为分析

刘正楠，陈兴冲，张维科，马华军

（兰州交通大学 土木工程学院，兰州 730070）

摘　要：结合铁路自复位桥墩对抗侧刚度要求严格而需采用墩底加台构造的特点，开展了加台布设无粘结耗能钢筋、墩身内设无粘结预应力钢筋，具备有序牺牲机制的铁路自复位桥墩力学行为研究。通过讨论无粘结耗能钢筋在加台的配置形式对抗震性能的影响，提出了一种提升自复位桥墩抗震性能的耗能钢筋混合配置形式，开展了往复荷载作用下自复位桥墩的力学行为分析；研究了自复位桥墩的滞回特征影响因素与关键抗震性能指标之间的关系。结果表明：高强钢筋单排配置时，因钢筋断裂造成的承载力突降会使桥墩失效；依据不同等级耗能钢筋极限应变差异性，将低等级钢筋（HRB400）与高强钢筋（HTRB630）错排混合布置，可以实现不同等级耗能钢筋的有序牺牲及加台受压区域的不断调控，提升桥墩的变形能力和承载能力。预应力钢筋的配筋率会影响自复位桥墩的屈后刚度和抗侧强度，初始预应力值、配筋比、竖向轴力影响抗侧强度，耗能钢筋的距离比影响桥墩失效位移。自复位桥墩的三项主要抗震性能指标具有显著的正相关性，即承载能力减小、耗能能力及残余位移也随之减小；而最大位移与残余位移并未呈现出正相关性。

关键词：桥梁与隧道工程；自复位桥墩；滞回性能；抗震性能

中图分类号：U443.22　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1671-5497(2026)07-1926-11

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241381

Mechanical behavior of hybrid reinforced railway self-centering bridge piers based on ordered sacrificial mechanism

LIU Zheng-nan，CHEN Xing-chong，ZHANG Wei-ke，MA Hua-jun

（*School of Civil Engineering*，*Lanzhou Jiaotong University*，*Lanzhou* 730070，*China*）

Abstract：Combining the feature that railway self-centering bridge piers require a pedestal at the pier bottom due to the stringent lateral stiffness demand，a study on the mechanical behavior of railway self-centering bridge piers with an orderly sacrificial mechanism is conducted，in which unbonded energy-dissipating bars are arranged in the pedestal and unbonded prestressing tendons are arranged in the pier body. By discussing the influence of the configuration form of unbonded reinforcements on the seismic performance，a hybrid configuration form of reinforcements to enhance the seismic performance of self-

收稿日期：2024-12-31.

基金项目：国家自然科学基金项目（52178142）；甘肃省科技计划项目（23JRRA1807）；天佑博士后科学基金项目（TYBSH_KJ_202304）

作者简介：刘正楠（1993-），男，副教授，博士．研究方向：桥梁抗震．E-mail：zhengnan_liu@sina.com

centering piers is proposed. The analysis of the process of change in the mechanical behaviors of reinforcements under the action of lateral cyclic loads is carried out. The factors influencing the hysteresis characteristics of self-centering pier and relationship between the key seismic performance indicators were investigated. The results showed that the high-strength reinforcements are arranged in a single row, the sudden drop in loading capacity caused by reinforcements fracture can lead to the failure of bridge piers. Based on the limited strain variability of reinforcements with different grades, mixing low-grade steel bars (HRB400) with high-strength steel bars (HTRB630) in a staggered arrangement can achieve orderly sacrifice of different grades of reinforcements and the continuous regulation of the compression area of the pedestal, and improve the deformation and bearing capacity of the pier. The reinforcement ratio of prestressing reinforcements affects the post-yield stiffness and lateral strength of self-centering pier. Initial prestressing values, reinforcement ratios, and vertical axial forces affect lateral stiffness. The distance ratio of reinforcements affects the failure of displacement of piers. The three main seismic performance indicators of the self-centering piers have significant positive correlations, i.e., the load carrying capacity decreases, the energy dissipation capacity and the residual displacement also decrease, whereas the maximum displacement and the residual displacement do not show a positive correlation.

Key words: bridge and tunnel engineering; self-centering bridge pier; hysteresis behavior; seismic performance

0　引　言

重力式桥墩是铁路桥梁常见的下部结构形式,广泛应用于我国中小跨径铁路梁式桥中。为满足高速行车的需求,要求铁路桥梁具备较好的整体性和较大的刚度。重力式桥墩仅配置少量的护面钢筋,如标准跨径简支梁桥的配筋率一般在0.2%~0.5%之间[1]。历次地震中重力式桥墩出现墩底开裂、提离以及墩身环形裂缝等不同形式的震害现象,大量的室内试验也证明了重力式桥墩具有以上破坏特征[2,3]。2022年门源地震中,铁路重力式桥墩因发生侧倾而无法正常使用,导致拆除重建[4]。因此,重力式桥墩地震损伤控制难度大。摇摆自复位结构通过设置提离界面使其在地震作用下隔断能量的传播,震后能够恢复原来的位置,十分契合抗震韧性设计理念,是减少铁路桥梁地震损伤的重要途径之一。

新西兰的South Rangitikei铁路桥是摇摆结构在桥梁工程中的首次应用[5]。South Rangitikei桥巧妙地将耗能装置与摇摆结构结合,实现了高墩铁路桥的免损伤设计。我国铁路标准时速高,行车平稳性要求极其严格,正常使用时桥墩应具备较大抗侧向刚度。Xia等[6]研究铁路自复位桥墩时,在桥墩墩底设置扩大基础(称之为加台),并将加台底面作为摇摆提离面,以提高抗倾覆能力,这是铁路自复位桥墩在构造细节上的显著特点。预应力筋与耗能构件组合以提高桥墩的抗震能力是自复位结构常采用的方式,耗能钢筋[7]、角钢[8]、钢板[9]、SMA碟簧[10]、机械铰[11]、耗能支撑[12]及铅挤压阻尼器[13]等已被证实可以提高自复位桥墩的耗能能力。以上耗能构件中,耗能钢筋因设置方式简洁,无需特殊的节点连接装置,便于工程应用。Shen等[14]研究了耗能钢筋的数量、无粘结长度及初始预张力对自复位桥墩抗震性能的影响;Li等[15]研究了截面配筋率、耗能钢筋的面积及初始轴压对滞回特性的影响;Dicleli等[16]、Ou等[17]对有无耗能钢筋、耗能钢筋的配筋率及无粘结长度进行了探讨。以上研究均表明,增加耗能钢筋的用量,可以提高桥墩的耗能能力,但同时也会增加桥墩震后残余位移。在此基础上,文献[18,19]探讨了耗能钢筋合理配筋率的取值及基于位移的抗震设计方法。以上关于耗能钢筋的研究丰富了对摇摆自复位桥墩的认识,但在公路桥梁圆形或矩形截面墩柱中,无粘结耗能钢筋主要在桥墩截面的内边缘配置,无粘结钢筋与桥墩的中心距难以灵活调控,耗能钢筋的布置形式较为单一。高强钢筋替代普通钢筋可以减小钢筋用量,同时具有更为灵活的排布方式,在工程结构中具有广阔的应用前景。Tong等[20]研究已证实,采用高强钢筋替换普通钢筋可以减小自复位桥墩的残余位移。

本文以铁路自复位桥墩为研究对象,首先,探究了耗能钢筋在加台中的布置形式对抗震性能的影响,提出了基于有序牺牲机制的混合配筋自复位桥墩;其次,开展了往复荷载作用下的受力过程分析;最后,进行了滞回特征影响因素分析和性能指标关系研究。

1 耗能钢筋配置形式及建模

1.1 耗能钢筋配置形式

基于设置加台的自由摇摆铁路自复位桥墩试验模型[21],本文提出的铁路自复位桥墩如图1所示,其构造及形式适用于剪跨比大于2.5的中等高度桥墩。

无粘结耗能钢筋配置于自复位铁路桥墩的加台,考虑到不同等级钢筋的力学性能差异,共设置5种配置方式,分别为HRB400级钢筋及HTRB630级钢筋单独配置、HTRB630级钢筋多排布置、HRB400级钢筋及HTRB630级钢筋混合配置,具体布置如图2所示。

图2中,无粘结钢筋两端分别锚固在加台和承台中,沿着横桥向并列布置2φ12.7的预应力钢筋,初始张拉力设为185 kN。

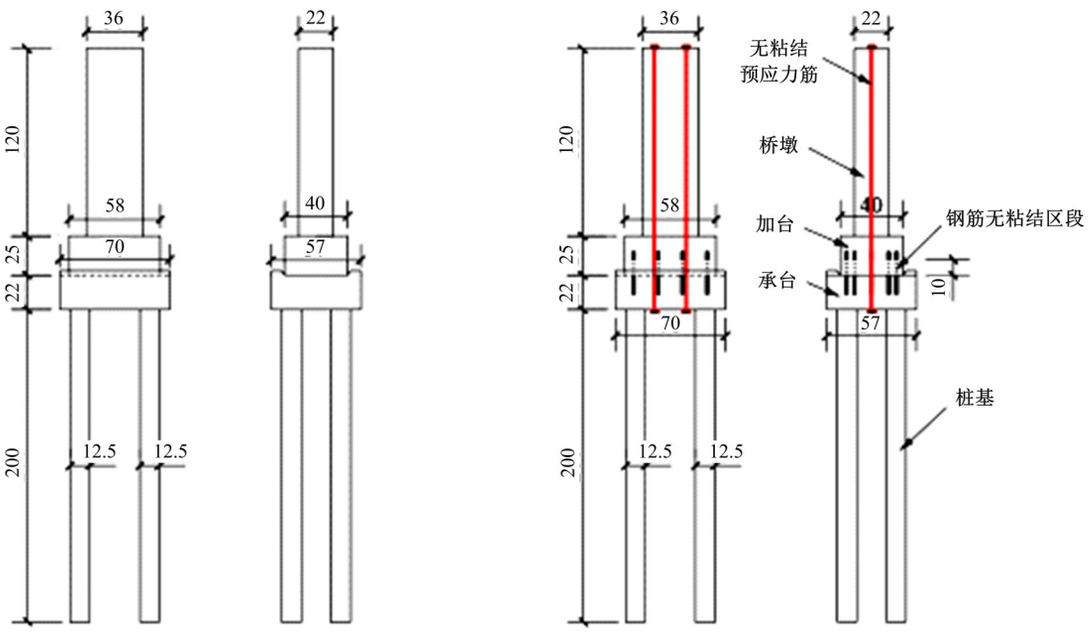


图1 铁路自复位桥墩模型构造(cm)

Fig. 1 Schematic of self-centering railway bridge pier model(cm)

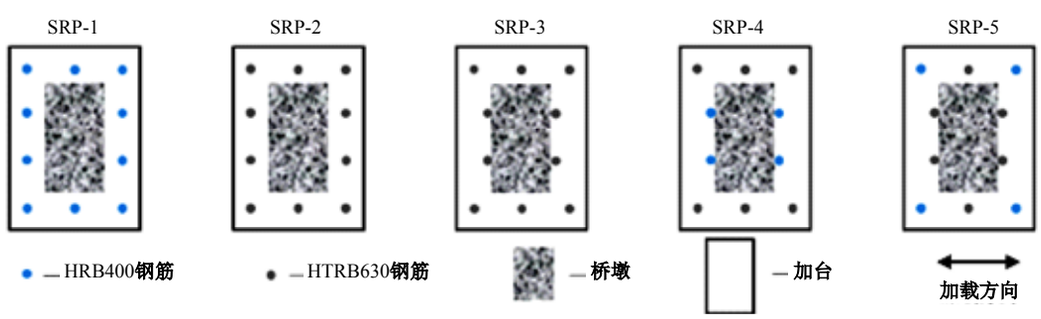


图2 耗能钢筋的配置形式

Fig. 2 Configuration of steel

1.2 数值建模方法

采用OpenSees平台建立如图3所示的混合配筋自复位铁路桥墩数值分析模型。

桥墩采用弹性梁柱单元模拟,承台及加台采用刚臂单元模拟,对于摇摆自复位桥墩,加台以下部分主要提供桥墩摇摆的支承面,因此,对桩基础没有进行模拟。无粘结预应力钢筋采用Truss单元配合Elastic-PP单轴材料模拟,其仅受拉特性及预加力通过设置压应变及初始应变实现。无粘结耗能钢筋采用Truss单元配合Reinforcing steel

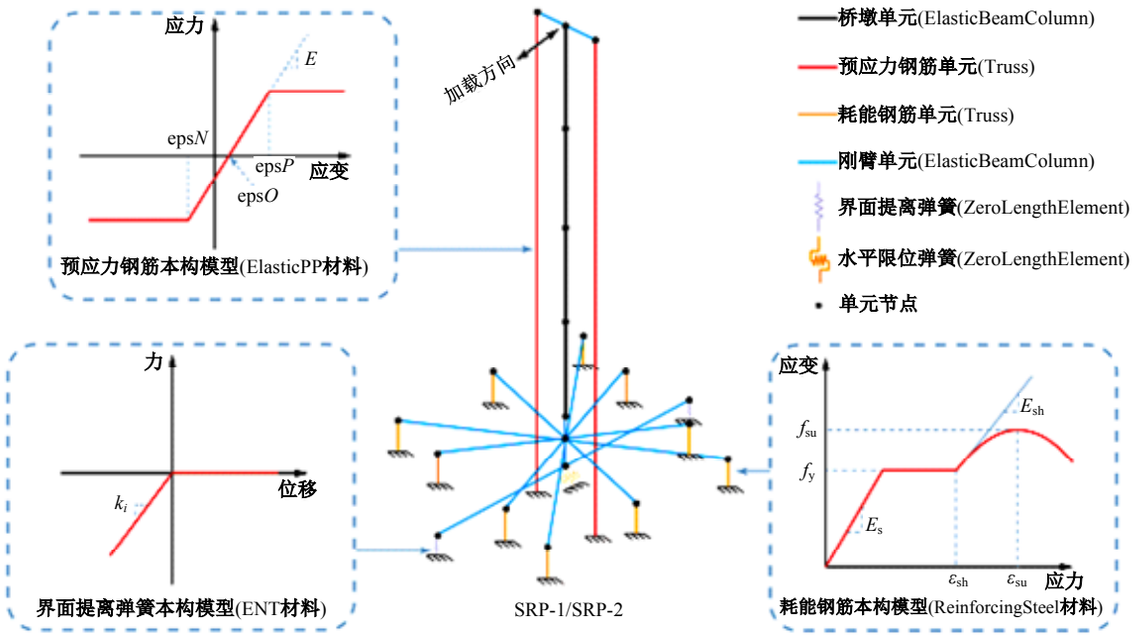


图 3　数值分析模型

Fig. 3　Numerical analysis model

表 1　耗能钢筋及预应力钢筋力学参数表

Table 1　Table of simulation parameters for energy-consuming and prestressing reinforcement

钢筋类型	材　料	参　数	数值
HRB400	Reinforcing Steel	直径/mm	8
		f_y/MPa	453.42
		f_{su}/MPa	614.7
		E_s/GPa	190.34
		E_{sh}/GPa	5.6
		ε_{sh}	0.025 26
		ε_{su}	0.144 45×0.7=0.1
HTRB630	Reinforcing Steel	直径/mm	8
		f_y/MPa	738.32
		f_{su}/MPa	928.51
		E_s/GPa	219.08
		E_{sh}/GPa	9.50
		ε_{sh}	0.012 38
		ε_{su}	0.089 65×0.7=0.062 7
预应力钢筋	ElasticPP	E/GPa	195
		epsP	0.009 538
		epsN	0
		eps0	−0.00 480 6

注:f_y为耗能钢筋屈服强度;f_{su}为耗能钢筋极限强度;E_s为耗能钢筋弹性模量;E_{sh}为耗能钢筋强化段的切线模量;ε_{sh}为耗能钢筋强化段的初始应变;ε_{su}为耗能钢筋的极限应变;E为预应力钢筋弹性模量;epsP为预应力钢筋拉伸时达到塑性状态对应的应变;epsN为压缩达到塑性状态对应的应变;eps0为预应力钢筋初始应变。

材料模拟。耗能钢筋顶部节点与承台采用刚臂单元连接,以实现变形协调。需要说明的是,耗能钢筋低周疲劳效应的影响因素较多,既有参考文献[22,23]给出的疲劳强度折减系数、损伤累积系数和疲劳延性系数参考值差异较大,本文结合文献[24]建议的方法,对钢筋的极限应变折减 30% 考虑低周疲劳及压屈等,采用 MinMax 材料控制其最大应变。墩顶竖向力为 36 kN。

表 1 为耗能钢筋及预应力钢筋力学参数表[25]。接缝处仅受压特性通过设置零长度接触单元配合 Elastic-No Tension 单轴材料模拟。其中,本课题组前期已对界面提离弹簧的刚度计算式进行了验证[26],其模拟铁路自复位桥墩的准确性也通过试验进行了校核[21],如图 4 所示,需要说明的是,自由摇摆桥墩本身无耗能能力,但试验模

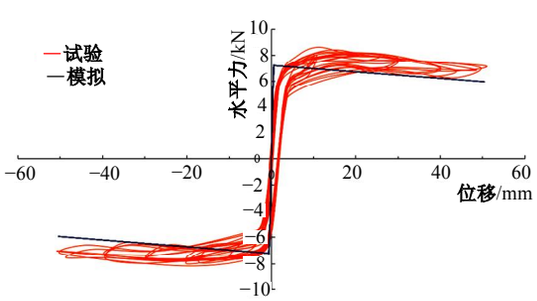


图 4　试验与模拟结果对比

Fig. 4　Comparison of experiment and simulation results

型加工及加载连接等误差影响导致滞回曲线出现非线性特征,即形成了较小的滞回闭环。

$$k=\frac{1}{2}K_{\mathrm{v}} \tag{1}$$

$$K_{\mathrm{v}}=\frac{4GR_0}{1-\nu} \tag{2}$$

$$R_0=\sqrt{A_0/\pi} \tag{3}$$

式中:K_{v}为竖向刚度;G为基础材料的剪切模量;R_0为等效半径;ν为基础材料的泊松比;A_0为扩大基础的截面积。

2 配置不同等级钢筋的自复位桥墩抗震性能分析

2.1 HRB400级钢筋及HTRB630级钢筋单独配置

图5为加台布置无粘结HRB400级钢筋(SRP-1)和HTRB630级钢筋(SRP-2)时自复位桥墩的滞回曲线对比图,从滞回曲线对比图可得,自复位桥墩的滞回曲线均具有"旗帜型"特征,滞回曲线整体形状相似,均因配置耗能钢筋而具备耗能能力,整个滞回曲线反映了加台与界面分离,耗能钢筋屈服至拉断的全过程。

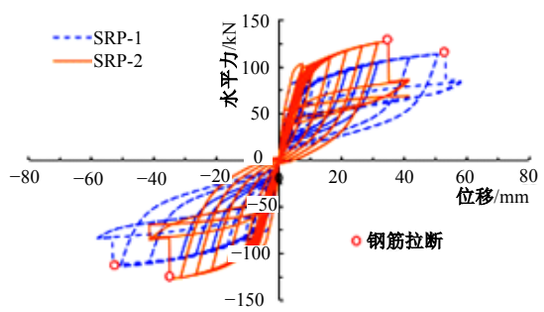


图5 滞回曲线对比图

Fig. 5 Comparison of hysteresis curves

图6为水平力-位移关系对比图,当耗能钢筋的配筋率及布置位置相同时,在同等加载位移下SRP-2的水平力高于SRP-1(提高约10.3%),但SRP-2的变形能力相对较差(降低约34.2%)。图7为累积能量耗散占比对比图,在同等加载位移下SRP-2的耗能能力高于SRP-1,但在最外排耗能钢筋拉断后,自复位桥墩的耗能能力明显减小。因此,仅在同排配置高强钢筋时自复位桥墩的变形能力较差,且因纵筋突然断裂会造成桥墩的承载力突降,SRP-1和SRP-2的承载力分别降低了23.2%和33.5%。

图8为多排布置HTRB630级钢筋(SRP-3)时自复位桥墩的滞回曲线,钢筋未拉断之前,SRP-3的承载能力基本可以达到与SRP-2相同的水平,钢筋的错排布置使其依次发生断裂,最外排钢筋断裂后承载力降低了17.2%,次外排钢筋断裂后承载力降低了18.1%。在最外排钢筋断裂后,桥墩的承载力降幅约为SRP-2自复位桥墩钢筋断裂后的承载力降幅的一半。因此,HTRB630级钢筋单独分排配置对自复位桥墩抗震性能的提升有利。

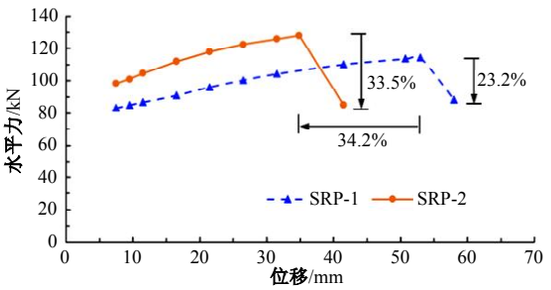


图6 水平力-位移对比图

Fig. 6 Comparison of horizontal force and displacement

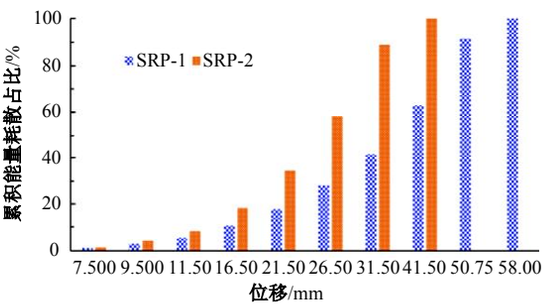


图7 累积能量耗散对比图

Fig. 7 Comparison of energy dissipation proportion

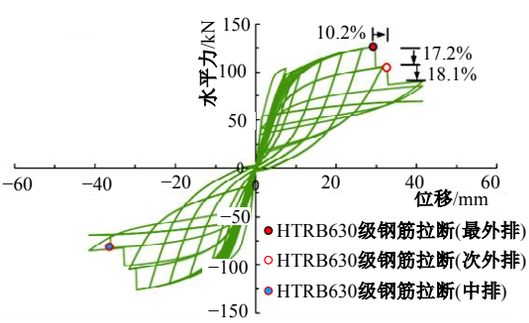


图8 SRP-3桥墩的滞回曲线

Fig. 8 Hysteresis curves of SRP-3

2.2 HRB400级钢筋及HTRB630级钢筋混合配置

图9和图10为HRB400级钢筋及HTRB630级钢筋混合配置时自复位桥墩的滞回曲线。

在加载后期,不同强度等级的钢筋被依次拉断,承载能力逐渐降低,且HRB400级钢筋因具有

较大的极限应变而最后拉断。SRP-4 桥墩在最外排 HTRB630 级钢筋拉断后,承载力降低约 20.2%,桥墩失效。SRP-5 与 SRP-4 桥墩的承载能力基本相当,但钢筋首次拉断时对应的变形更大,提高约 10%。SRP-5 桥墩在次外排 HTRB630 级钢筋拉断后承载力降低 14.8%,变形增加 34.7% 后最外排 HRB400 级钢筋被拉断。SRP-4 和 SRP-5 桥墩完全失去耗能能力对应的变形相同,但 SRP-5 桥墩在达到最大变形时承载力降低值小于 15% 且承载力未低于屈服力。

因此,HRB400 级钢筋和 HTRB630 级钢筋单独分排配置对于自复位桥墩抗震性能的提升有利,SRP-5 自复位桥墩实现了耗能钢筋的有序牺牲。

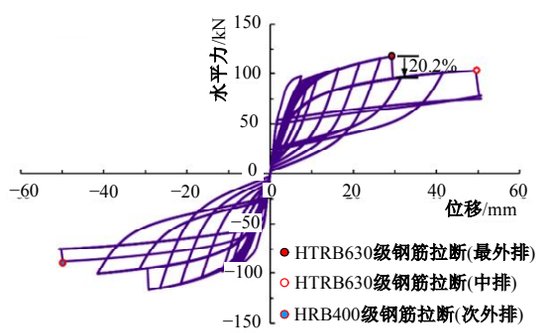


图 9　SRP-4 桥墩的滞回曲线

Fig. 9　Hysteresis curves of SRP-4

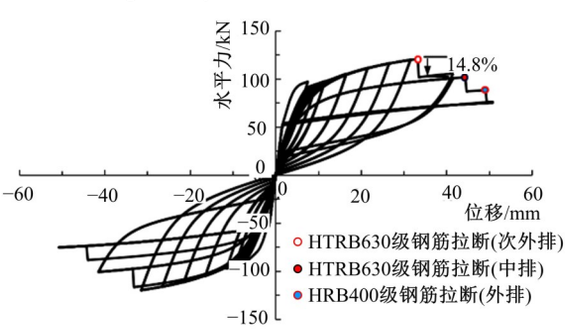


图 10　SRP-5 桥墩的滞回曲线

Fig. 10　Hysteresis curves of SRP-5

3　混合配筋自复位桥墩受力行为的全过程分析

3.1　受力阶段的全过程分解

为探究基于有序牺牲机制的自复位桥墩受力行为的全过程,以 SRP-5 桥墩为研究对象,并以不设耗能钢筋的自复位桥墩 SRP-6 桥墩为对比,如图 11 所示,按照骨架曲线的发展变化情况,将整个往复荷载作用下的滞回曲线按照滞回环的形状及刚度变化特征分为 4 个阶段。阶段①桥墩的刚度保持不变,滞回曲线未出现非线性特征,加载和卸载曲线保持一致;阶段②桥墩的刚度逐渐减小,滞回曲线出现非线性特征,同时加卸载曲线不再重合;阶段③滞回曲线的非线性特征显著,滞回曲线所围成的耗能环不断变大;阶段④滞回曲线加卸载刚度相近,整个滞回环的“旗帜型”特征更加明显。总体上,桥墩经历了摇摆界面消压、耗能钢筋消压、耗能钢筋屈服及断裂等阶段。

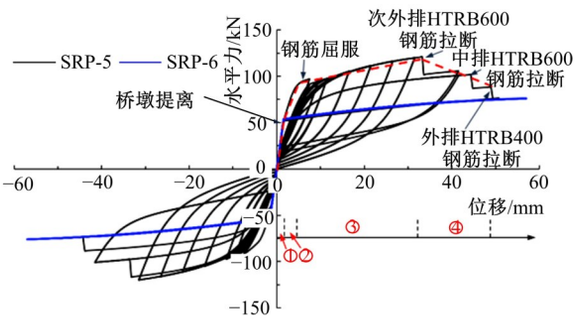


图 11　滞回曲线的阶段划分

Fig. 11　Stages of hysteresis curve

3.2　耗能钢筋的在不同阶段的受力特征分析

不同等级耗能钢筋的应力应变曲线如图 12 所示,为便于耗能钢筋的受力特征分析,按照相对位置关系对耗能钢筋进行了区分,即 HTRB630 左/右、HRB400 左/右、HTRB630 中。阶段①为摇摆界面消压,图 13 为加台耗能钢筋的在摇摆界面逐渐消压时,墩顶位移与钢筋应力的关系。随着墩顶位移的增大,对称布置的耗能钢筋应力分别呈现出线性增大及减小的趋势。尽管摇摆界面不断消压,但 HRB400 左和 HTRB630 左钢筋的

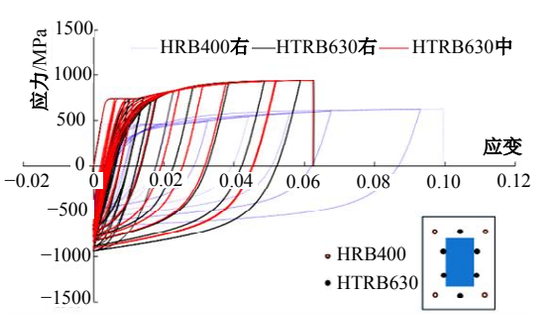


图 12　钢筋的应力-应变曲线

Fig. 12　Stress-strain curves of steel

压应力依旧逐渐增大,此阶段钢筋的受力特征与整体现浇桥墩截面钢筋的受力特征相似。

阶段②为加台的耗能钢筋消压至屈服,图 14 为加台的耗能钢筋的从首根消压至全部消压时,

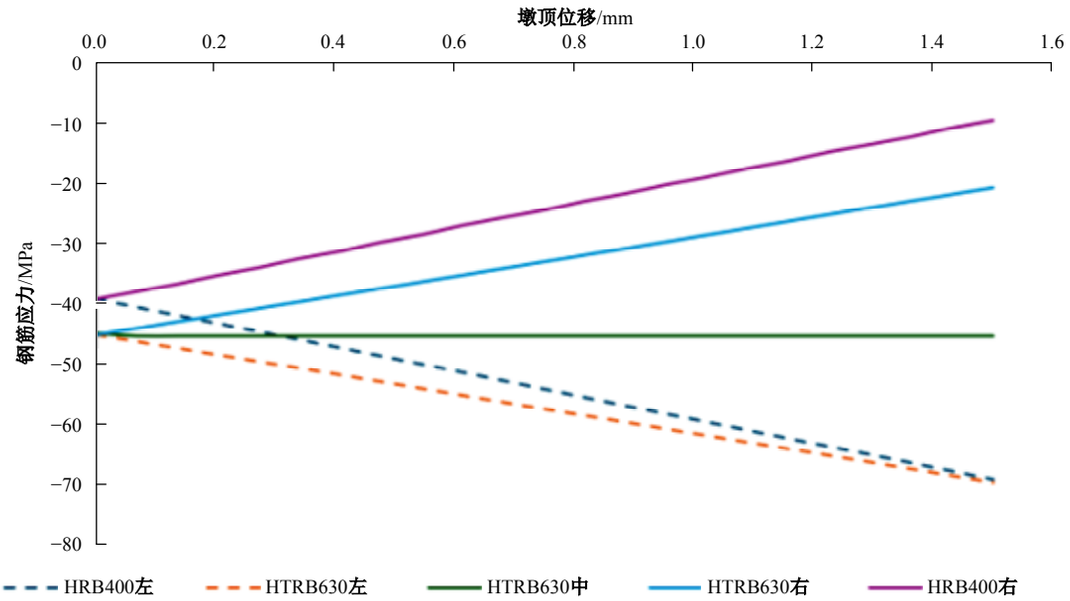


图13 摇摆界面消压阶段

Fig. 13 Decompression phase of rocking interface

墩顶位移与钢筋应力之间的关系。随着墩顶加载位移的增大,耗能钢筋的压应力逐渐变为拉应力,首根钢筋消压时,加台与承台截面发生分离,且提离侧的钢筋(HRB400右、HTRB600右)应力随墩顶水平位移增长较快,待全部钢筋消压时,提离侧的钢筋(HRB400右)应力接近其屈服强度。

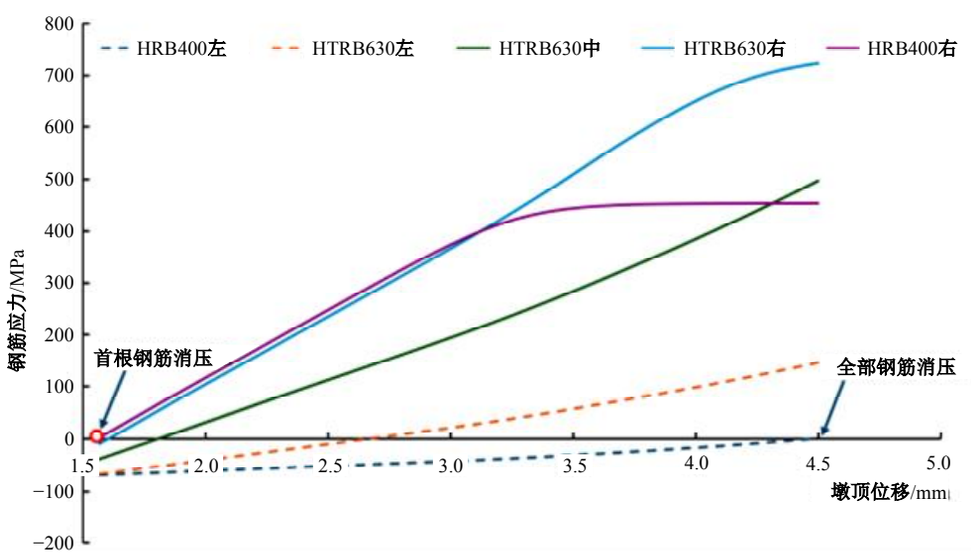


图14 耗能钢筋消压阶段

Fig. 14 Decompression phase of steel

图15为各排耗能钢筋首次屈服时刻,其余各排钢筋的应力。最外排HRB400钢筋首先发生屈服,次外排HTRB630钢筋其次发生屈服,中排HTRB630钢筋最后发生屈服。在HRB400钢筋屈服时,最外排HTRB630钢筋已接近于屈服状态,当HTRB630外排钢筋屈服时,HTRB630中排钢筋已接近于屈服。但是各排钢筋屈服时,钢筋拉压状态不同,由于最外排HRB400钢筋及次外排HTRB630钢筋首次屈服时,钢筋的初始压应力较小,因此,以上两排钢筋屈服时,其余各排钢筋均处于受拉状态。而中排HTRB630钢筋屈服前,各排钢筋已有较大的压应力,提离侧钢筋(HRB400右、HTRB630右)的压应力很快被抵消,而加台受压侧钢筋依旧处于受压状态。

阶段③和④为耗能钢筋从逐步屈服至拉断的全过程。图16为各排钢筋逐次拉断前后加台底

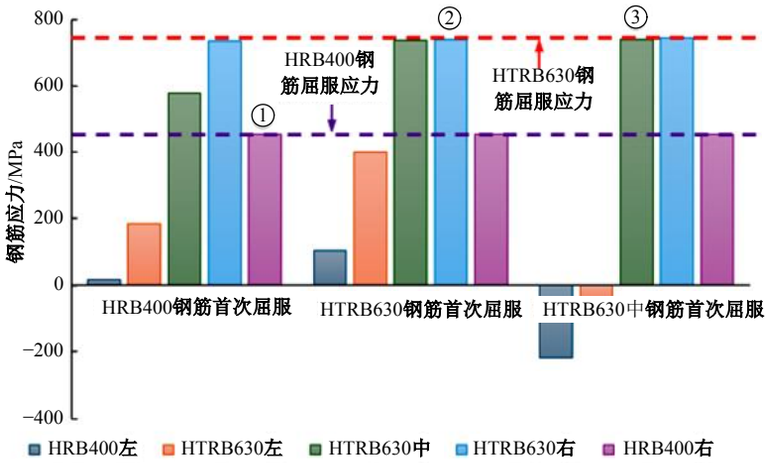


图 15　各排钢筋首次屈服时其余钢筋的应力

Fig. 15　Stress of remaining steels at the first yield of each row of steels

提离弹簧的压力,随着各排钢筋逐次拉断,提离弹簧的压力突然减小,不断改变等效受压区面积,有助于减轻加台局部损伤。

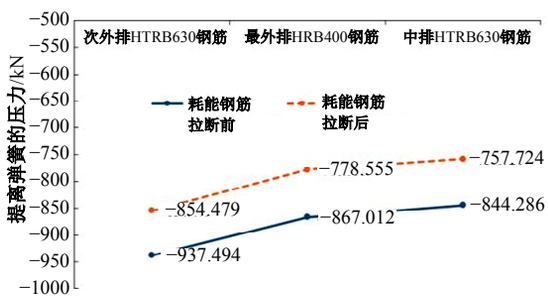
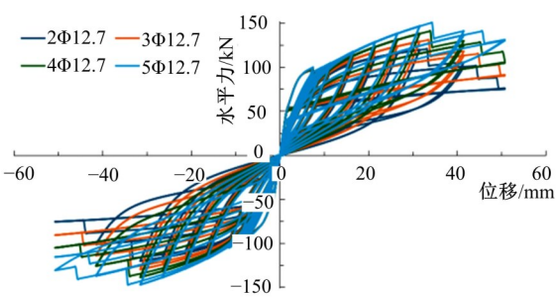


图 16　提离弹簧的压力

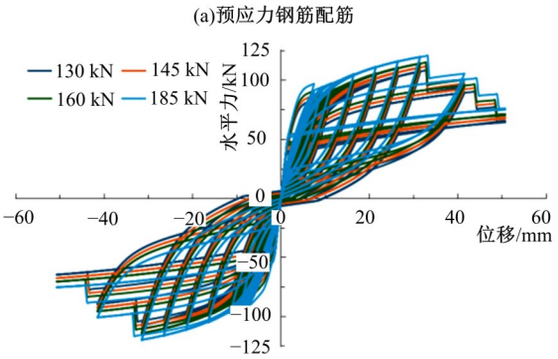
Fig. 16　Lift-off spring pressure

4　混合配筋自复位桥墩的抗震性能影响因素分析

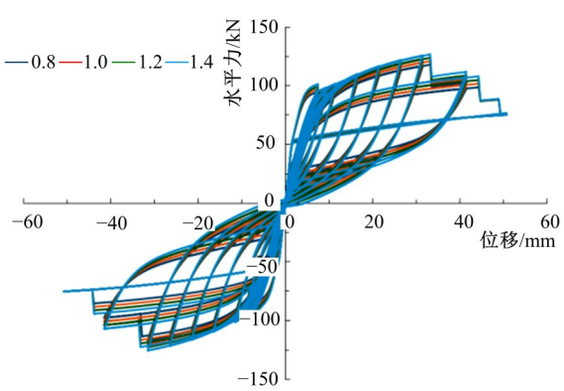
为探讨HRB400级钢筋及HTRB630级钢筋混合配置自复位桥墩的抗震性能影响因素,选取预应力钢筋的配筋率、初始张拉力、HRB400级钢筋和HTRB600级钢筋的配筋比、同侧最外排HRB400级钢筋和次外排HTRB600级钢筋与加载方向加台边缘的距离比及墩顶竖向力为研究参数,开展铁路自复位桥墩的滞回性能影响参数分析。图17(a)为预应力钢筋的配筋从2φ12.7增至5φ12.7时铁路自复位桥墩的滞回曲线,配置更多的预应力筋有助于提高屈服后刚度,且可延迟耗能钢筋的拉断失效,延迟效应较小。图17(b)为初始预应力由130 kN增加至185 kN时铁路自复位桥墩的滞回曲线,提高初始预应力值可提高桥墩的抗侧强度。图17(c)为不同耗能钢筋配筋比(最外排HRB400钢筋与次外排HTRB630钢筋的配筋面积比值)下自复位桥墩的滞回曲线,配筋比增大有助于提高桥墩的抗侧强度,且滞回曲线



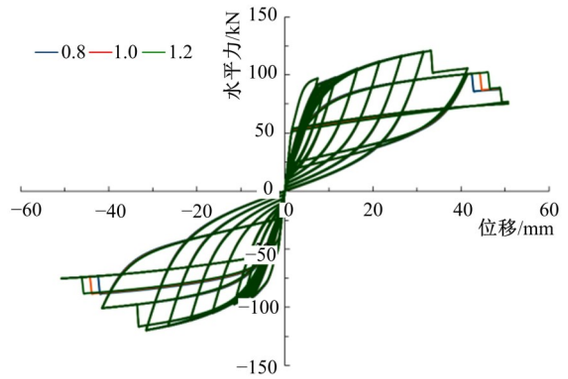
(a)预应力钢筋配筋



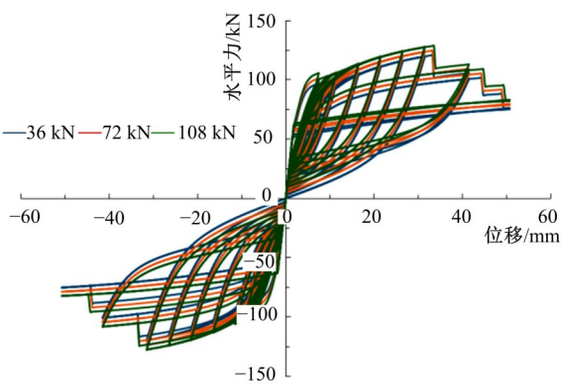
(b)初始预应力值



(c)配筋比



(d)距离比



(e)竖向轴力

图17 滞回性能参数分析结果对比

Fig. 17 Simulation results comparison of hysteresis performance parameter

所围成的面积更大。图17(d)为耗能钢筋不同距离比(加台同一侧最外排钢筋至加台边缘的距离与次外排钢筋至加台边缘的距离比值)下自复位桥墩的滞回曲线,随着耗能钢筋距离比增大,自复位桥墩的极限位移增大。图17(e)为不同轴向力下自复位桥墩的滞回曲线,轴向力的增大对自复位桥墩滞回曲线的影响规律与初始预应力一致。

综上所述,预应力钢筋配筋率的变化影响自复位桥墩的屈后刚度和抗侧强度,较高的预应力钢筋配筋率对桥墩的配筋要求也会变高。初始预应力值、配筋比及竖向轴力的增加影响自复位桥墩的抗侧强度。耗能钢筋距离比的变化影响自复位桥墩的失效位移,是控制桥墩变形能力的主要因素之一。

从图17可以得到,滞回曲线形状在钢筋失效前后出现了明显不同,在钢筋失效前后,滞回环的形状由明显的"捏缩型"变为"旗帜型"。滞回环形状的变化直接影响桥墩承载能力、残余位移和耗能能力三项主要的抗震性能指标。以下仅选择不同初始预应力值下桥墩抗震性能关键指标进行分析,如图18所示。

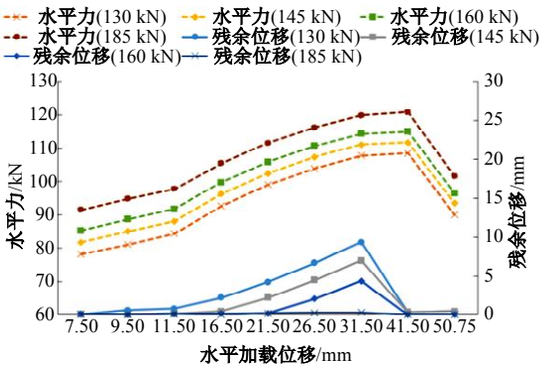


图18 抗震性能指标的变化规律

Fig. 18 Change pattern of seismic performance indicators

随着水平加载位移增大,承载能力呈现先增大后减小的趋势,残余位移与承载能力的变化趋势一致,即混合配筋自复位桥墩的残余位移与承载能力大小呈现正相关。然而,桥墩的残余位移与最大位移之间并没有呈现正相关。以上抗震性能指标间的关系与传统整体现浇混凝土桥墩的性能指标相关性存在差异。

不同加载位移下桥墩的耗能能力占比对比见图19。随加载位移的增大,桥墩的耗能能力先增大后减小,即在同排钢筋拉断后桥墩的耗能能力降低。桥墩的残余位移,承载能力及耗能能力的变化趋势具有明显的相关性,当混合配筋桥墩的耗能能力出现降低时,承载能力与残余位移也同步减小(承载能力降低幅度在15%之内),桥墩的自复位能力进一步得到提高,这是具备有序牺牲机制的铁路自复位桥墩抗震性能的突出优势。

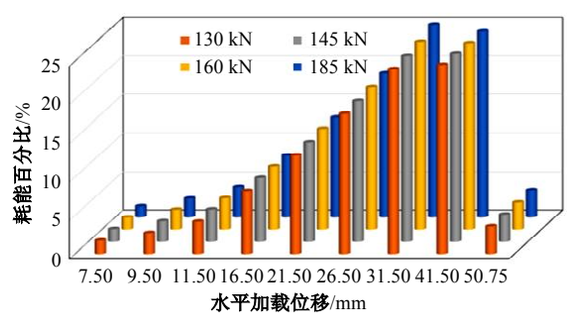


图19 耗能能力的占比图

Fig. 19 Percentage of energy-consuming capacity

5 结 论

(1)耗能钢筋在加台的配置方式对于铁路自复位桥墩的抗震性能有明显的影响,仅配置高强钢筋虽能提高自复位桥墩的承载能力,但钢筋的

断裂会导致桥墩承载力突降而失效。采用高低等级钢筋混合错排布置不但可以兼顾承载能力还可确保桥墩的变形能力。

(2)在往复循环荷载作用下,自复位桥墩首先发生提离界面消压,随后耗能钢筋逐渐消压至屈服,最后不同等级的耗能钢筋逐次拉断。耗能钢筋混合配置桥墩在摇摆界面消压时,受压侧钢筋压应力逐渐增大而受拉侧逐渐减小,但所有钢筋处于受压状态;随后进入耗能钢筋消压阶段,所有钢筋从受压状态逐渐向受拉状态转变;耗能钢筋进入屈服阶段时各排钢筋的应力有较大的差异,拉压应力大小与该状态下钢筋的初始压应力大小相关。各排钢筋拉断前后提离弹簧的压力表明,耗能钢筋有序牺牲会不断减小等效受压区的面积,实现损伤可控。

(3)预应力钢筋配筋率的变化影响自复位桥墩的屈后刚度和抗侧强度;初始预应力值、配筋比及竖向轴力的增加影响自复位桥墩的抗侧强度;耗能钢筋距离比的变化影响高强钢筋的失效位移,是控制桥墩变形能力的主要因素之一。本文提出的基于有序牺牲机制的自复位桥墩耗能能力、承载能力及残余位移的变化具有明显的正相关性,但最大位移与残余位移无直接相关性,耗能钢筋的有序牺牲提高了大变形下桥墩的可恢复性。

参考文献:

[1] 鲁锦华, 陈兴冲, 丁明波, 等. 少筋混凝土重力式桥墩抗震研究现状[J]. 世界地震工程, 2020, 36(1): 125-136.
Lu Jin-hua, Chen Xing-chong, Ding Ming-bo, et al. State-of-the-art review on research for the seismic behavior of concrete gravity piers with low longitudinal reinforcement ratios[J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(1): 125-136.

[2] 胡章亮, 魏标, 蒋丽忠, 等. 高速铁路桥墩损伤量化研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(5): 60-68.
Hu Zhang-liang, Wei Biao, Jiang Li-zhong, et al. Research on damage quantification of high-speed railway bridge piers[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(5): 60-68.

[3] 沈林白, 洪彧, 周志达, 等. 基于性能的铁路桥墩地震损伤量化指标研究[J]. 铁道学报, 2024, 46(11): 155-162.
Shen Lin-bai, Hong Yu, Zhou Zhi-da, et al. Research on quantification index for seismic damage of railway bridge piers based on performance[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(11): 155-162.

[4] 蔡丽雯, 黄勇, 何静, 等. 2022年青海门源6.9级地震交通系统震害与启示[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(4): 8-16.
Cai Li-wen, Huang Yong, He Jing, et al. Earthquake damage and enlightenment from traffic system in 2022 Qinghai Menyuan Ms6.9 earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(4): 8-16.

[5] 韩强, 贾振雷, 周雨龙, 等. 震后可恢复功能桥梁结构之摇摆桥梁研究综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 118-133.
Han Qiang, Jia Zhen-lei, Zhou Yu-long, et al. Review of seismic resilient bridge structures: rocking bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 118-133.

[6] Xia X, Wu S, Wei X, et al. Experimental and numerical study on seismic behavior of a self-centering railway bridge pier[J]. Earthquakes and Structures, 2021, 21(2): 173-183.

[7] Roh H, Ou Y C, Kim J, et al. Effect of yielding level and post-yielding stiffness ratio of ED bars on seismic performance of PT rocking bridge piers[J]. Engineering Structures, 2014, 81: 454-463.

[8] 孙治国, 赵泰儀, 王东升, 等. 基于RSC体系的双层桥梁排架墩地震损伤控制设计[J]. 中国公路学报, 2020, 33(3): 97-106.
Sun Zhi-guo, Zhao Tai-yi, Wang Dong-sheng, et al. Seismic damage control design for double-deck bridge bents based on rocking self-centering system [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(3): 97-106.

[9] 贾俊峰, 边嘉琛, 白玉磊, 等. 自复位摇摆双柱式桥墩抗震能力数值仿真分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(1): 89-97,122.
Jia Jun-feng, Bian Jia-chen, Bai Yu-lei, et al. Numerical simulation and parametric analysis for aseismic capacity of self-resetting swing double-column pier[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(1): 89-97,122.

[10] Fang C, Liang D, Zheng Y, et al. Rocking bridge piers equipped with shape memory alloy(SMA) washer springs[J]. Engineering Structures, 2020, 214: No. 110651.

[11] 钟学琦, 李建中, 高浩原, 等. 基于摇摆机械铰连接的自复位桥墩抗震性能研究[J]. 桥梁建设, 2023,

53(2): 52-59.
Zhong Xue-qi, Li Jian-zhong, Gao Hao-yuan, et al. Research on seismic performance of self-centering bridge pier based on rocking mechanical hinge connection[J]. Bridge Construction, 2023, 53(2): 52-59.

[12] 董慧慧, 胡潇, 韩强, 等. 新型自复位变摩擦耗能支撑及其在桥墩抗震中的应用[J]. 中国公路学报, 2024, 37(1): 66-80.
Dong Hui-hui, Hu Xiao, Han Qiang, et al. Novel self-centering variable friction energy dissipation brace and its application in seismic resistance of bridge piers[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(1): 66-80.

[13] 石岩, 钟正午, 秦洪果, 等. 装配铅挤压阻尼器的摇摆-自复位双柱墩抗震性能及设计方法[J]. 工程力学, 2021, 38(8): 166-177,203.
Shi Yan, Zhong Zheng-wu, Qin Hong-guo, et al. Seismic performance and corresponding design method of rocking self-centering bridge bents equipped with lead-extrusion dampers[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(8): 166-177,203.

[14] Shen Y, Freddi F, Li Y, et al. Parametric experimental investigation of unbonded post-tensioned reinforced concrete bridge piers under cyclic loading[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2022, 51(15): 3479-3504.

[15] Li Y, Li J, Shen Y. Quasi-static and nonlinear time-history analyses of post-tensioned bridge rocking piers with internal ED bars[J]. Structures, 2021, 32: 1455-1468.

[16] Dicleli M, Mansour M Y, Constantinou M C. Efficiency of seismic isolation for seismic retrofitting of heavy substructured bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(4): 429-441.

[17] Ou Y C, Chiewanichakorn M, Aref A J, et al. Seismic performance of segmental precast unbonded post-tensioned concrete bridge columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(11): 1636-1647.

[18] 鲍泽华, 李建中, 李永兴, 等. 自复位桥墩耗能钢筋合理配筋率的设计方法研究[J]. 工程力学, 2022, 39(10): 88-98,119.
Bao Ze-hua, Li Jian-zhong, Li Yong-xing, et al. Research on the design method of reasonable reinforcement ratio of energy-dissipation bars in self-centering columns[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(10): 88-98,119.

[19] 王军文, 张伟光, 李建中. 摇摆式预应力混凝土桥墩基于位移的抗震设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(24): 106-111.
Wang Jun-wen, Zhang Wei-guang, Li Jian-zhong. Displacement-based aseismic design method for rocking bridge piers with posttensioned tendons[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(24): 106-111.

[20] Tong T, Zhuo W, Jiang X, et al. Research on seismic resilience of prestressed precast segmental bridge piers reinforced with high-strength bars through experimental testing and numerical modelling[J]. Engineering Structures, 2019, 197: No. 109335.

[21] 马华军. 铁路桩基础桥墩墩底摇摆隔震机理及抗震设计方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学土木工程学院, 2019.
Ma Hua-jun. Research on rocking isolated mechanism of the railway bridge pier with pile foundation and its seismic design method[D]. Lanzhou: School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, 2019.

[22] 张耀庭, 赵璧归, 李瑞鸽, 等. HRB400钢筋单调拉伸及低周疲劳性能试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(4): 121-129.
Zhang Yao-ting, Zhao Bi-gui, Li Rui-ge, et al. Monotonic and low cycle fatigue testing and research for HRB400 steel[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4): 121-129.

[23] 高立, 左工. 基于Reinforcing Steel本构的高强钢筋混凝土柱纤维模型研究[J]. 世界地震工程, 2021, 37(3): 129-137.
Gao Li, Zuo Gong. Research on fiber model of high strength reinforced concrete column based on the constitutive model of reinforcing steel[J]. World Earthquake Engineering, 2021, 37(3): 129-137.

[24] Fu P, Li X, Xu L, et al. Life-cycle seismic damage identification and components damage sequences prediction for cable-stayed bridge based on fragility analyses[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2021, 19(15): 6669-6692.

[25] Zhuang M L, Sun C, Dong B. Experimental and numerical investigations on seismic performance of HTRB630 high-strength steel bars reinforced concrete columns[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: No. e01185.

[26] 夏修身, 陈兴冲. 桩基础高墩摇摆隔震分析模型研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(11): 86-91.
Xia Xiu-shen, Chen Xing-chong. Study on analytical model for rocking isolation of tall piers with pile foundations[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(11): 86-91.