

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240409002

# 可更换预应力筋自复位双柱墩桥梁抗震设计及数值验证\*

庞伟<sup>1</sup>, 江昊<sup>2</sup>, 贾俊峰<sup>2</sup>, 朱安静<sup>1</sup>, 边嘉琛<sup>2</sup>

(1. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730099;  
2. 北京工业大学桥梁工程安全与韧性全国重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 为提升桥梁工程的震后功能可快速恢复性及结构可修复性, 提出一种配置可更换曲线预应力筋的摇摆自复位双柱墩桥梁及其结构与构造。以某市政桥梁工程为背景, 研究并确定了自复位双柱墩桥梁的抗震性能目标、设计方法和设计流程。基于OpenSees软件平台建立了摇摆自复位双柱式墩数值模型, 分析墩顶水平往复加载条件下墩柱的抗震能力, 验证了基于所提出的基于直接位移的抗震设计方法得到的预应力筋初始张拉应力、配筋率以及消能部件面积比等关键设计参数的合理性。研究表明: 双柱墩在墩顶加载偏移率达5%时, 其抗侧刚度和水平承载力基本不降低; 卸载后残余偏移率仅为0.17%, 具有优异的自复位能力。本文提出的摇摆自复位双柱墩桥梁结构及其抗震设计方法可以实现预期抗震性能目标, 可根据该方法得到结构合理设计参数。本文研究可为高烈度区市政和公路桥梁抗震设计提供参考。

**关键词:** 摇摆自复位桥梁; 可更换预应力筋; 抗震设计; 性能目标; 残余偏移率

**中图分类号:** TU378.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0819-10

## Seismic Design and Numerical Verification of Self-centering Double-column Pier Bridges with Replaceable Prestressing Tendons

PANG Wei<sup>1</sup>, JIANG Hao<sup>2</sup>, JIA Junfeng<sup>2</sup>, ZHU Anjing<sup>1</sup>, BIAN Jiachen<sup>2</sup>

(1. Northwest Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730099, China;  
2. National Key Laboratory of Bridge Engineering Safety and Resilience, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** To improve the rapid post-earthquake recovery of bridge functionality and structural repairability, a rocking self-centering double-column pier bridge with replaceable curved prestressing tendons, including its structure and construction, was proposed. Based on a municipal bridge project, the seismic performance objectives, design method, and design process for the self-centering double-column pier bridge were studied and established. A numerical model of the rocking self-centering double-column pier was established based on the OpenSees platform to analyze the seismic performance of the pier columns under horizontal cyclic loading at the top of the pier and to verify the appropriateness of key design parameters—such as the initial prestressing tendon stress, reinforcement ratio, and area ratio

\* 收稿日期: 2024-04-09; 修回日期: 2024-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178449)资助

作者简介: 庞伟(1982—), 男, 高级工程师, 硕士。主要从事桥梁抗震研究。E-mail: pangwei1228@126.com

通信作者: 贾俊峰(1982—), 男, 教授, 博士。主要从事桥梁抗震研究。E-mail: jiajunfeng@bjut.edu.cn

of energy dissipation devices-calculated using the proposed direct displacement-based seismic design method. The results showed that the lateral stiffness and horizontal bearing capacity of the double-column pier did not significantly decrease when the top drift ratio reached 5%. The residual drift ratio after unloading was only 0.17%, indicating excellent self-centering capability. The proposed rocking self-centering double-column pier structure and its seismic design method can achieve the intended seismic performance objectives, and rational structural design parameters can be obtained through this method. The research can provide reference for the seismic design of municipal and highway bridges in high seismic intensity regions.

**Keywords:** rocking self-centering bridge; replaceable prestressing tendons; seismic design; performance objectives; residual drift ratio

## 0 引言

我国为全球地震活跃度最高和地震灾害最严重的国家之一,Ⅶ度及以上的高烈度地震区覆盖半数国土面积,涵盖了23个省会城市和三分之二的百万人口以上大型城市<sup>[1-2]</sup>。桥梁的抗震性能直接关系到人民的生命财产安全和城市的应急响应能力,合理的抗震结构有助于减少地震后的修复成本和通行功能恢复时间。因此,桥梁抗震在提高城市韧性防灾中发挥着重要作用。当前国内外规范规程中桥梁抗震设计方法主要采用延性抗震设计<sup>[3-6]</sup>。然而,延性抗震设计中允许强震时桥墩塑性铰区域产生严重的混凝土剥落、钢筋屈服等破坏<sup>[7]</sup>,震后桥梁水平和竖向承载能力显著降低、墩柱残余偏移过大造成难以快速恢复功能且难以修复。

为进一步提升桥梁的抗震能力和震后功能保持能力,2009年美日地震工程协同研究联合规划会议提出了“建设韧性城市”理念,意在于减少震后城市功能损失,并迅速恢复城市运行。会议提出了新的桥梁设计框架<sup>[8]</sup>以确保桥梁在地震后能保持无损或微损状态,加快灾后恢复速度。2017年世界地震工程大会也将“可恢复功能:地震工程的新挑战”作为大会主题<sup>[9]</sup>。具有震后可恢复功能的桥梁结构逐渐成为各国学者重点关注的问题<sup>[10-11]</sup>。可恢复功能桥梁设计通过使用新型材料、创新的结构构造和系统设计,从而减少桥梁主体结构在震中的损伤,缩短震后结构修复时间,快速恢复桥梁的通行功能,并且震后结构易于修复。目前可恢复功能桥梁结构主要包括摇摆自复位结构<sup>[12-14]</sup>、可更换构件结构<sup>[15-16]</sup>和可快速修复结构<sup>[17]</sup>等几种结构类型。本文主要研究具有损伤控制的摇摆自复位桥梁结构,它

是当前桥梁抗震研究的热点之一。

摇摆自复位桥墩通过桥墩底部与承台不断地“开口”、“闭合”来实现桥墩的摇摆行为。J.B. Mander等<sup>[18]</sup>在1997年首次把摇摆结构应用到桥梁抗震设计中,进行相关试验,试验结果表明桥墩在地震中的摇摆作用可减小结构的地震响应,通过预应力筋提供的预张拉力与重力共同作用提供自复位能力。随后,一些学者对摇摆桥墩进行大量实验研究,摇摆桥墩也从纯刚体摇摆发展为具有一定耗能能力的摇摆自复位桥墩。摇摆自复位桥墩通过消能装置提供耗能能力。Y.C. Ou等<sup>[19-20]</sup>首次提出消能装置耗能贡献率的概念,魏博等<sup>[21]</sup>通过研究外置消能器对摇摆自复位桥墩抗震性能的影响,建议附加外置消能器对桥墩的抗侧贡献率不宜超过40%。贾俊峰等<sup>[22]</sup>建立自复位摇摆双柱式桥墩数值仿真模型,分析预应力筋初始张拉力、耗能部件截面积、预应力筋配筋率等设计参数对自复位摇摆双柱式桥墩抗震能力的影响规律,研究结果表明:预应力筋初始张拉力和配筋率增加,桥墩最大抗侧承载力增大,残余位移减小,耗能能力无明显变化;耗能部件截面积增加,桥墩最大承载力、残余位移以及耗能能力均有明显增大。

本文以我国典型强震区甘肃天水某城市桥梁为背景,首先根据原设计提出一种可更换曲线无粘结预应力筋的摇摆自复位桥梁结构,针对该自复位桥梁提出新的抗震性能目标,在此基础上建立该桥自复位双柱式桥墩的抗震设计方法和设计流程,最后基于OpenSees平台研究自复位双柱式桥墩的抗震能力。本文提出的结构体系将运用于甘肃天水该城市桥梁设计中,为高烈度区市政和公路桥梁抗震设计提供参考。

# 1 摇摆自复位桥梁工程背景

本文以甘肃天水某城市桥梁中三跨连续梁桥为原型,在桥梁结构设计中,上部结构采用 $3\times 30\text{ m}$ 预应力钢筋混凝土连续箱梁,横桥向宽度 $25.2\text{ m}$ ,道路设计双向6车道,道路等级为城市主干路,设计速度 $60\text{ km/h}$ ,桥跨布置如图1(a)所示;下部结构采用异形花瓶墩设计,墩中心线相距 $9\text{ m}$ ,墩高 $7.5\text{ m}$ ;承台尺寸为 $11.5\text{ m}\times 6.25\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ ,设6根直径 $1.5\text{ m}$ 的钻孔灌注桩。桥梁抗震设防烈度为VIII度,场地类别为II类场地,地震动峰值加速度 $0.3g$ ,场地特征周期为 $0.4\text{ s}$ 。在原有抗震设计中,计划在主梁和盖梁间设置超高阻尼隔震支座,而该支座价格较高,并且桥梁生命周期内要经常检修甚至更换,在强震作用下主梁水平位移可能过大。以墩顶无支座摇摆自复位桥梁体系替换原隔震设计方案,以实现桥梁震后主体结构免损或微损、结构损伤可控及损伤部件震后可更换、易更换等目标。摇摆自复位桥梁可采用无盖梁、无支座体系,避免了运营过程中支座检修和更换问题。

具有可更换后张无粘结曲线预应力筋的摇摆自复位双柱墩桥梁体系的结构设计方案如图1所示。墩柱顶部通过周围钢板约束的垫石直接支撑在盖梁或主梁底部而不设置支座,底部直接支承在和承台顶部连接的底座上。墩柱顶部和底部均无纵向钢筋穿过,其中的无粘结曲线预应力筋顶部锚固于墩柱侧边,底部锚固于台座侧边以便于震后进

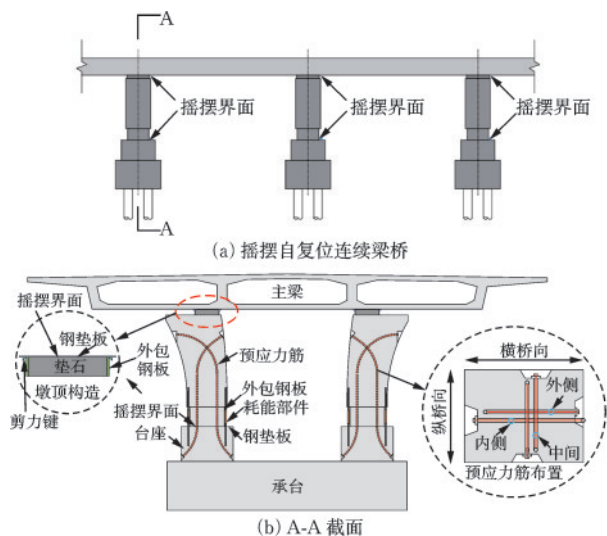


图1 摇摆自复位方案

Fig.1 Rocking self-centering scheme

行更换。在地震作用下,墩顶和墩底的干接缝处形成摇摆界面,允许墩柱在接缝界面发生可控的摇摆行为。在墩柱横向或纵向摇摆过程中,干接缝将发生开闭行为从而形成摇摆界面,由墩内预应力筋及墩顶竖向荷载提供恢复力。墩底外侧设置消能部件,可采用金属消能阻尼器,置于墩柱截面突变处与台座之间,为方便更换,采用螺栓连接<sup>[1]</sup>。结构体系通过墩柱摇摆和装置消能而避免桥墩出现塑性铰损伤并减小自复位摇摆墩柱顶部位移。震后桥梁无粘结曲线预应力筋可在不影响桥上通行的情况下从侧上方将锚具切断并从底部取出以实现预应力筋的快速更换,如图2所示。

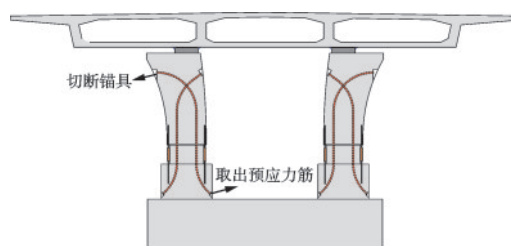


图2 预应力更换示意

Fig.2 Schematic diagram of prestress replacement

# 2 摇摆自复位双柱墩桥梁抗震设计

## 2.1 摇摆自复位桥梁抗震性能目标

摇摆自复位桥梁体系力学行为相较于传统现浇体系更为复杂。在摇摆过程中,桥墩抗侧承载力会随着预应力筋和消能部件受力状态而发生较大变化,在抗震设计时需重点考虑二者的受力变形情况。摇摆自复位双柱墩桥梁结构布置及侧向变形状态如图3所示,摇摆自复位桥梁体系主要部件包括主梁、墩柱、无粘结预应力筋以及耗能部件,相比于传统现浇体系,摇摆自复位桥梁体系将墩柱、主梁和承台之间的纵筋断开,通过干接缝以及贯穿其中的无粘结预应力筋连接。在地震作用下,墩顶和墩底的干接缝处形成摇摆界面,允许墩柱在接缝界面发生可控的摇摆行为,在墩柱横向或纵向摇摆过程中,干接缝将发生开闭行为从而形成摇摆自复位,墩内预应力筋及墩顶竖向荷载提供恢复力,墩底设置消能减震阻尼装置,可采用金属消能阻尼器。结构体系通过墩柱摇摆和装置消能从而避免桥墩出现塑性铰损伤并减小自复位摇摆墩柱的位

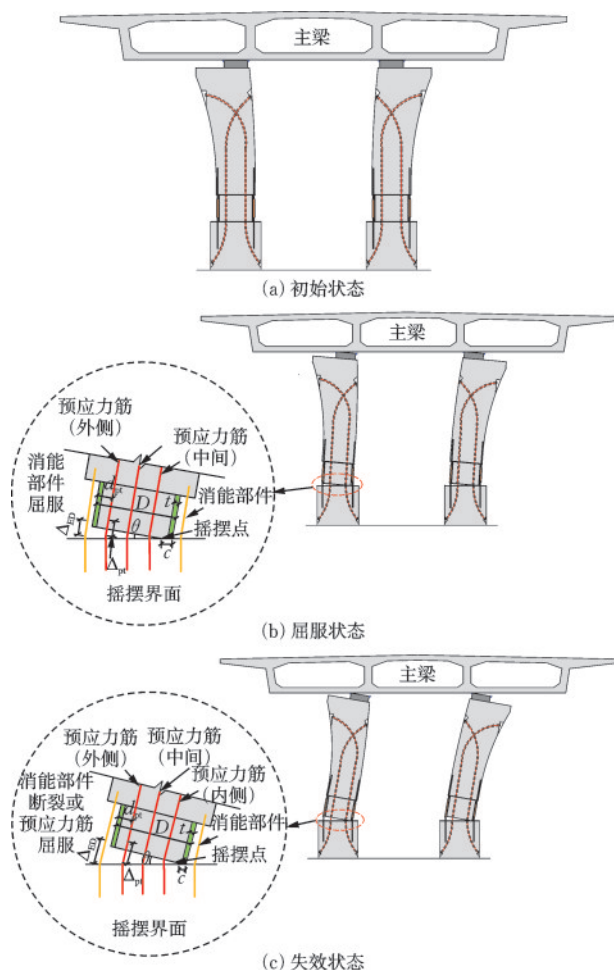


图3 摇摆自复位桥墩侧向变形状态

Fig.3 Lateral deformation state of rocking self-centering bridge columns

移。通过设置外置式耗能装置可实现震后进行快速更换,并且不影响桥上通行。

根据摇摆自复位体系设计极限位移的不同取值,桥墩在摇摆过程的力学行为略有不同。如图4所示,对于高径比较大的桥墩,一般以耗能部件断裂作为设计极限状态,桥墩在水平地震作用下开始摇摆直至破坏全过程的承载力与位移关系如图4(a)所示。当结构耗能部件和预应力筋功能完好时,结构水平承载能力和位移变形路径为①→①→②→③→④。其中,①为初始无地震状态,墩柱受上部结构自重和预应力作用,摇摆界面应力基本均匀分布。①→①为墩柱底摇摆界面由全截面受压转变为单侧消压状态,即顺加载方向,摇摆界面一侧压力逐渐增大,另一侧压力逐渐减小直至为零;①→②为墩柱底摇摆界面由单侧消压状态转变为屈服状态。此时墩柱上下摇摆界面处出现开口,体

系刚度减小,随着摇摆界面开口不断扩大,接缝部位设置的耗能部件发生屈服,此时定义为结构体系的屈服状态;③为结构体系无需修复的界限状态,在该状态下,墩柱卸载后残余偏移率为0.2%。根据美国建筑抗震性能评估方法<sup>[23]</sup>,在地震作用下,桥梁体系残余偏移率小于0.2%时,桥梁结构无需修复即可马上投入使用。当桥梁结构进入状态④时,耗能部件达到极限强度而发生断裂,墩柱侧向承载力将迅速减小,即路径④→⑤。由于缺少耗能部件,结构体系仅有自复位能力及预应力筋屈服产生的少量耗能能力,本文将这一状态定义为设计极限状态,这与日本桥梁抗震设计规范<sup>[24]</sup>中规定的桥墩结构可修复界限含义一致。随着墩柱顶部水平位移继续增大,结构抗侧承载力继续提高,预应力筋应力持续增加,当预应力筋中应变达到其屈服应变 $\epsilon_{py}$ 时,结构体系进入状态⑥,此后结构抗侧承载力随位移增加而逐渐降低,即路径⑥→⑦。当结构体系进入状态⑦时,墩内预应力筋达到极限拉伸应变而发生断裂,结构水平抗侧承载力迅速减小,即路径⑦→⑧,结构体系仅依靠上部结构自重提供自复位能力,基本无耗能能力。当墩柱顶部水平位移超过倾覆点即结构体系进入状态⑨时,桥墩将迅速发生倒塌。

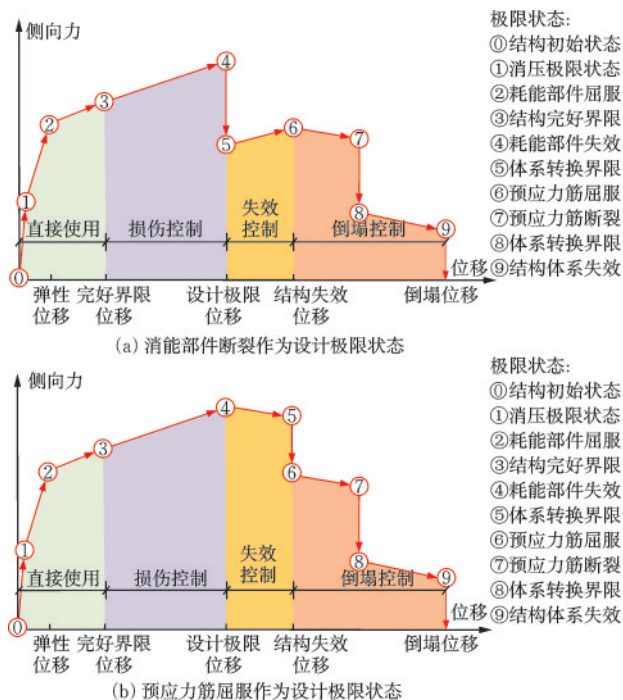


图4 摇摆自复位结构体系力学行为

Fig.4 Mechanical behavior of rocking self-centering structural systems

对于高径比较小的桥墩,一般以预应力筋屈服作为设计极限状态,桥墩在水平地震作用下开始摇摆直至破坏全过程的承载力与位移关系如图4(b)所示。当结构耗能部件和预应力筋功能完好时,结构水平承载能力和位移变形路径仍然为①→②→③→④。当桥梁结构进入状态④时,墩内外侧预应力筋达到屈服强度,此后结构抗侧承载力随位移增加而逐渐降低,即路径④→⑤。当桥梁结构进入状态⑤时,耗能部件达到极限强度而发生断裂,墩柱侧向承载力将迅速减小,即路径⑤→⑥。由于缺少耗能部件,结构体系仅有自复位能力及预应力筋屈服产生的少量耗能能力。随着墩顶位移持续增加,结构水平承载力进一步减小,当预应力筋中应力达到极限强度而发生断裂时,结构水平抗侧承载力迅速减小,即路径⑦→⑧,结构体系仅依靠上部结构自重提供自复位能力,基本无耗能能力。当墩柱顶部水平位移超过倾覆点即结构体系进入状态⑨时,桥墩将迅速发生倒塌。

根据摇摆自复位桥梁体系的极限状态和桥墩抗震设计规范共同确定其桥梁抗震设防目标,在正常使用极限状态和承载能力极限状态下,桥墩结构相关参数需满足桥梁抗震设计规范<sup>[25]</sup>,之后根据墩柱尺寸及耗能部件和预应力筋参数确定设计极限位移计算方法。摇摆自复位桥梁抗震设防目标如下:在E1地震作用下,摇摆自复位桥梁体系处于图4中非线性弹性范围内,即①→②路径状态,容许墩柱顶部和底部摇摆界面消压,接缝部位耗能部件最大应力小于其屈服强度,墩柱内预应力筋处于弹性工作状态,桥梁结构整体无明显损伤。在E2地震作用下,摇摆自复位桥梁体系处于图4中①→②→③→④范围内,即容许耗能部件达到屈服强度,但不发生拉伸断裂破坏,预应力筋处于弹性工作状态,且桥梁结构仅发生轻微损伤,不需修复或经简单修复可继续使用。

## 2.2 摇摆自复位双柱墩桥梁基于位移的抗震性能设计方法

如上节所述,当桥墩沿摇摆点发生转动时,外侧预应力筋和受拉侧耗能部件的变形相对于其余位置最大。基于安全考虑,桥墩的设计极限位移应根据预应力筋和耗能部件的变形情况计算。如图3中所示,受拉侧耗能部件的变形量为 $\Delta_{ED}$ ,长度为 $l_{ED}$ ,断裂应变为 $\epsilon_{EDU}$ ,外侧预应力筋变形量为 $\Delta_{pt}$ ,无粘结段长度为 $l_{pt}$ ,屈服应变为 $\epsilon_{pty}$ 。曲线预应力筋和

直线预应力筋作为自复位构件,两者在摇摆过程中伸长量相同,为计算简便,将曲线简化成直线计算。假设桥墩顶部位移为 $\Delta_d$ 时,受拉侧耗能部件达到断裂应变 $\epsilon_{EDU}$ ,此时,外侧预应力筋应变 $\epsilon_{pt}$ 可根据式(1)计算。若此时 $\epsilon_{pt} \geq \epsilon_{pty}$ ,则该体系设计极限位移为外侧预应力筋屈服时对应的墩顶水平位移;反之,则该体系设计极限位移为受拉侧耗能部件断裂时对应的墩顶水平位移。

$$\epsilon_{pt} = \frac{\Delta_{pt}}{l_{pt}} = \frac{(D - d_{pt} - c) \Delta_{pt}}{l_{pt} L} \quad (1)$$

式中, $L$ 为桥墩计算高度; $D$ 为墩柱在摇摆方向截面宽度; $c$ 为受压区高度。

在地震作用下,结构破坏程度与构件的变形能力有关,位移不仅可与以应变为基础的损伤极限状态联系到一起,也可在宏观上对结构的整体行为进行合理控制,因此,基于位移的抗震设计是实现基于性能抗震设计思想的一条有效途径,其设计流程如图5所示。首先,根据业主需求及设计经验,初步确定桥墩几何尺寸,进而基于2.1节提出的抗震性能设计目标计算桥墩目标位移。在E1地震作用下,桥墩结构目标位移 $\Delta_{d1}$ 为墩底耗能部件伸长量达到其屈服应变时,对应的墩顶水平位移,可根据式(2)、(3)计算;在E2地震作用下,结构目标位移 $\Delta_{d2}$ 为墩底耗能部件伸长量达到其极限应变或外侧预应力筋达到屈服应变 $\epsilon_{EDU}$ 时,对应的墩顶水平位移,可分别根据式(4)、(5)计算。

$$\Delta_{d1} = \frac{1}{3} \phi_y L^2 \quad (2)$$

$$\phi_y D = 1.957 \epsilon_{ED} \quad (3)$$

$$\Delta_{d2} = L \tan \theta_u = L \frac{\epsilon_{EDU} l_{ED}}{D} \quad (4)$$

$$\Delta_{d2} = \theta_u L = \frac{\Delta \epsilon_{pt} l_{pt} L}{D - X} = \frac{(f_{dpt} - f_{pt}) l_{pt} L}{E_{pt} (D - X)} \quad (5)$$

式中, $\phi_y$ 为截面屈服曲率<sup>[25]</sup>; $\Delta \epsilon_{pt}$ 为预应力筋应变增量; $\theta_u$ 为设计极限状态下摇摆界面转动角度; $X$ 为外侧预应力筋与桥墩边缘距离; $f_{dpt}$ 为预应力; $f_{pt}$ 为初始预应力。

根据《中国地震动参数区划图》<sup>[25]</sup>查询工程所处位置的震动反应谱特征周期、峰值加速度、场地类型、抗震设防烈度等参数,计算E1地震作用和E2地震作用下的结构规范反应谱。在E1地震作用下,结构体系处于图4中非线性弹性范围内,即①→②路径状态,未发生塑性变形,根据中国《公路桥梁抗震设计规范》<sup>[3]</sup>确定结构弹性位移反应谱后,查找桥墩目标位移 $\Delta_{d1}$ 对应的结构等效周期 $T_{e1}$ 。

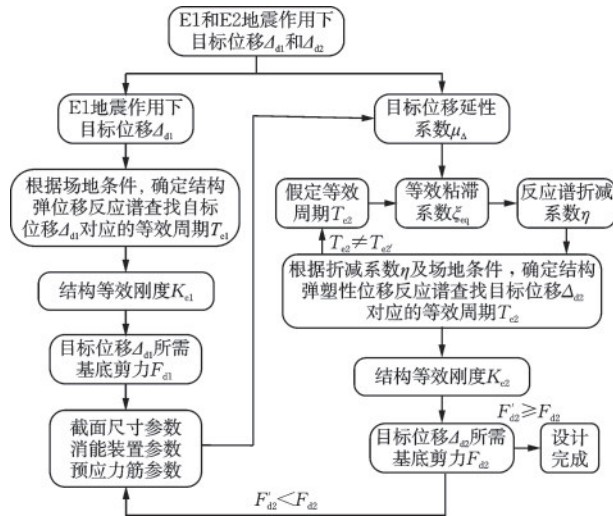


图5 基于位移的抗震性能设计方法流程

Fig.5 Flow chart of displacement-based seismic performance design for rocking self-centering bridge system

此时,结构等效刚度  $K_{e1}$  采用式(6)计算。

$$K_{e1} = 4\pi^2 \frac{m_e}{T_{e1}^2} \quad (6)$$

式中,  $m_e$  为结构等效质量。

当墩顶位移达到目标位移  $\Delta_{d1}$  时,墩底所需基底剪力  $F_{d1}$  采用式(7)计算。

$$F_{d1} = K_{e1} \Delta_{d1} \quad (7)$$

根据 2.3 节提出的桥墩侧向承载力计算公式初步确定摇摆自复位双柱式桥墩的预应力筋初始张拉应力、配筋率、消能部件面积比等参数,使桥墩的侧向承载力大于目标位移  $\Delta_{d1}$  下桥墩所需的基底剪力  $F_{d1}$ 。

在 E2 地震作用下,结构体系处于图 4 中 ①→①→②→③→④ 范围内,发生塑性变形,结构目标位移  $\Delta_{d2}$  对应的延性系数  $\mu_{\Delta}$  采用式(8)计算。

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_{d2}}{\Delta_y} \quad (8)$$

结构等效粘滞阻尼比  $\xi_{eq}$  采用式(9)计算。

$$\xi_{eq} = \xi_{hyst} + \xi_{elastic} \quad (9)$$

$$\xi_{hyst} = \frac{1}{1 + \lambda_{ED}} \left[ a \left( 1 - \frac{1}{\mu_{\Delta}^b} \right) \left( 1 + \frac{1}{(T_{e2} + c)^d} \right) \right] \quad (10)$$

式中,  $\xi_{hyst}$  为等效粘滞系数滞回分量,由式(10)计算,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  采用 D. Marriott<sup>[26]</sup> 针对摇摆自复位桥墩的建议取值,分别为 0.305、0.492、0.790、4.463。  $\lambda_{ED}$  为消能部件抗侧贡献率<sup>[27]</sup>,取 0.4;  $T_{e2}$  为假定的结构等效周期;  $\xi_{elastic}$  为钢筋混凝土结构弹性阻尼比<sup>[28]</sup>,

取 0.05。

结构等效单自由度弹性位移谱折减系数  $\eta$ <sup>[29]</sup> 采用式(11)计算:

$$\eta = \sqrt{\frac{0.07}{0.02 + \xi_{eq}}} \quad (11)$$

根据《公路桥梁抗震设计规范》<sup>[3]</sup> 确定结构设计加速度反应谱  $S_a$ , 结构弹塑性位移谱  $S_{dp}$  采用式(12)计算:

$$S_{dp} = \eta \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2 S_a \quad (12)$$

假定结构初始等效周期  $T_{e2}$  为 0.1 s, 在结构弹塑性位移谱  $S_{dp}$  中查找目标位移  $\Delta_{d2}$  对应的等效周期  $T'_{e2}$ , 若  $T'_{e2} \neq T_{e2}$ , 则以 0.01 s 为间隔依次迭代, 改变  $T_{e2}$  大小, 重复上述步骤, 直至  $T'_{e2} = T_{e2}$ 。

在得到结构真实等效周期  $T_{e2}$  后, 桥墩结构等效刚度  $K_{e2}$  采用式(13)计算。

$$K_{e2} = 4\pi^2 \frac{m_e}{T_{e2}^2} \quad (13)$$

当墩顶位移达到目标位移  $\Delta_{d2}$  时, 墩底所需基底剪力  $F_{d2}$  采用式(14)计算。

$$F_{d2} = K_{e2} \Delta_{d2} \quad (14)$$

在有限元软件中建立相应数值仿真模型, 通过静力 pushover 分析可得到摇摆自复位双柱式桥墩结构的力-位移曲线, 对比目标位移  $\Delta_{d2}$  对应的承载力  $F'_{d2}$  是否满足上述方法计算得到的结构所需基底剪力  $F_{d2}$ , 若  $F'_{d2} > F_{d2}$ , 则完成摇摆自复位双柱式桥墩结构设计; 反之, 则改变消能部件及预应力筋相关设计参数, 重复上述步骤。

### 3 数值仿真模型分析验证

根据已有研究, 在摇摆自复位体系中预应力筋初始张拉应力  $f_{PT}$  常取为 0.35~0.55 倍的抗拉极限强度<sup>[30]</sup>, 预应力筋配筋率  $\rho_{pt}$  常取为 0.15%~0.5%<sup>[31]</sup>。基于上节提出的基于直接位移的抗震设计方法, 以 E1 地震作用下结构所需基底剪力为设计目标, 初步确定预应力筋初始张拉应力为 0.4 倍的极限强度, 即 744 MPa。预应力筋配筋率为 0.17%, 即配置 4 孔预应力筋, 单孔配置 10 根  $7 \times \Phi 15.2$  的高强钢绞线, 单根钢绞线面积为 140 mm<sup>2</sup>。单个桥墩所需的钢消钢材横截面积  $A_{ED}$  为 25 434 mm<sup>2</sup>, 对应截面钢材的面积比  $\rho_{ED}$  为 0.78%。

### 3.1 基于 OpenSees 平台的数值模型

基于 OpenSees 有限元软件平台建立自复位双柱式桥墩的数值模型。墩柱截面采用基于力的梁柱单元以提高模型精确性和计算收敛性<sup>[32]</sup>。墩底摇摆界面以上 1 m 范围采用钢管约束混凝土,如图 6 示。由于主梁在地震作用下处于弹性阶段,故采用弹性梁柱单元(elasticBeamColumn)模拟。预应力筋及耗能钢筋采用桁架(Truss)单元模拟。墩柱和主梁混凝土采用基于 Kent-Scott-Park 模型发展而来不考虑抗拉强度的 Concrete01 材料模型,截面纵筋、耗能钢筋、预应力筋均采用基于 Giuffre-Menegotto-Pinto 模型发展而来考虑包辛格效应的 Steel02 材料模型,曲线预应力筋和直线预应力筋作为自复位构件,两者在摇摆过程中伸长量相同,预应力筋提供的抵抗力也相同,为简化计算,曲线预应力筋按直筋模拟。通过在材料命令设置初始应力方法对预应力筋施加预应力。

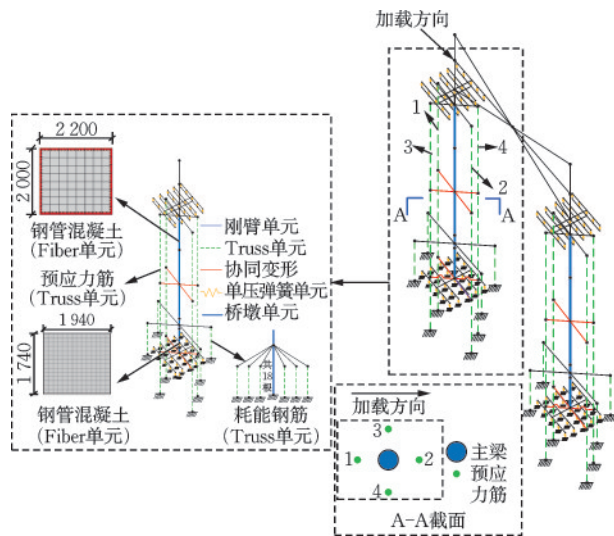


图 6 OpenSees 双柱墩模型

Fig.6 Double-column pier model in OpenSees

为模拟桥墩在摇摆过程中上、下摇摆界面的接触关系,在每个摇摆界面布置多个只受压不受拉的零长度弹簧单元来模拟摇摆面的接触行为<sup>[33-34]</sup>,通过零长度弹簧受压过程中产生的竖向位移差模拟桥墩的摇摆作用。在墩柱与基础间的摇摆界面处,零长度受压弹簧底部节点采用固结约束,顶部节点通过水平向的刚臂连接;在墩柱与主梁摇摆界面处,零长度受压弹簧的设置方式与底部界面类似。

同时,在墩底与墩顶摇摆界面边缘添加零长度弹簧模拟剪力键,防止界面发生水平相对滑动。当计算三维摇摆桥墩时,需要的弹簧单元数二维模型所需单元数的平方,在平面均匀设置 5 行 5 列零长度受压弹簧<sup>[33]</sup>,该弹簧的刚度  $E_s$  选用司炳君等<sup>[34]</sup>建议的公式计算,如式(15)所示。在主梁两个边墩处采用了 OpenSees 中针对滑动摩擦支座的 flatSliderBearing 单元模拟,摩擦系数取 0.02。

$$E_s = \frac{E_c A_c}{L \times n} \theta \quad (15)$$

式中,  $E_c$  为受压混凝土弹性模量;  $A_c$  为桥墩混凝土截面面积;  $n$  为竖向零长度单元个数;  $L$  为桥墩计算高度;  $\theta$  为经验系数,建议取值为 2.0<sup>[35]</sup>。

耗能钢筋底部节点采用固结约束,顶部节点通过刚臂与墩柱连接。为保证墩柱摇摆过程中,无粘结预应力筋与桥墩变形一致,通过 equalDOF 命令保证预应力筋节点与相应的墩柱节点在水平方向平动和平面转动两个自由度上保持一致。

### 3.2 摇摆自复位双柱式桥墩抗震能力

根据已建立的摇摆自复位双柱式桥墩数值模型,在墩顶施加恒定的竖向力 6 000 kN,轴压比为 0.12,采用位移加载模式在墩顶施加水平往复位移以了解自复位墩柱在水平地震作用下的抗震能力,得到摇摆自复位双柱式桥墩墩顶水平力-位移滞回曲线如图 7 所示。由图 7(a)可知,该滞回曲线呈现

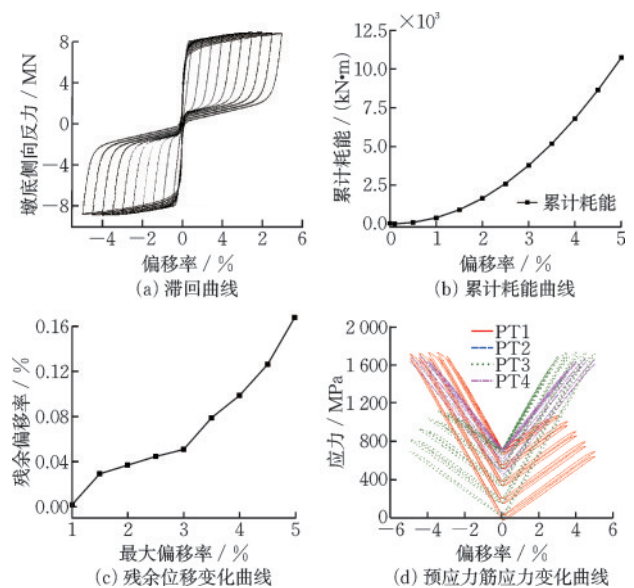


图 7 数值仿真分析结果

Fig.7 Analysis results of numerical simulation

饱满的“旗帜型”形态,说明该体系具有良好自复位及耗能能力。当墩顶位移达到最大偏移率5%时,卸载后残余偏移率仅有0.17%,根据美国建筑抗震性能评估方法<sup>[21]</sup>,在地震作用下结构的残余偏移率小于0.2%时,无需修复即可马上投入使用。因此,本文提出的摇摆自复位双柱式桥墩在墩顶最大位移达到5%偏移率时表现出良好的自复位能力,有利于震后的功能可恢复。如图7(b)和(c)所示,在墩柱偏移率达到0.1%之前,由于耗能钢筋未发生屈服,摇摆自复位结构无明显耗能。墩柱内预应力筋的应力变化曲线如图7(d)所示,处于墩柱外侧的预应力筋(图6编号1、编号2)在3%偏移率左右屈服,而处于墩柱中间的预应力筋在4%偏移率左右屈服。根据2.2节提出的基于直接位移的抗震性能设计方法计算得到的摇摆自复位结构关键设计参数基本满足设计要求,结构具有良好的自复位及耗能能力。

## 4 结 论

针对摇摆自复位桥梁结构提出了抗震性能目标,在此基础上建立了基于直接位移的摇摆桥梁抗震设计方法和设计流程。以某城市桥梁为工程背景,提出具有可更换后张无粘结曲线型预应力筋的摇摆自复位桥梁结构并确定其设计参数,基于OpenSees有限元软件平台建立了摇摆自复位双柱式桥墩数值模型,分析了水平往复作用下桥墩的抗震能力。得到以下结论:

(1) 提出的新型摇摆自复位双柱墩桥梁结构采用的后张无粘结曲线型预应力筋可从侧上方将锚具切断并从底部取出以实现快速更换,可减少桥梁结构的震后修复时间和成本。

(2) 摇摆自复位桥梁体系在水平地震作用下经历消压、屈服及设计极限等多个受力状态,提出了该体系的抗震性能目标和性能水平,发展了基于直接位移的抗震性能设计方法。

(3) 数值分析结果表明:双柱墩在墩顶加载偏移率达5%时,其抗侧刚度和水平承载力基本不降低;卸载后残余偏移率仅为0.17%,具有优异的自复位能力;滞回曲线饱满,累计耗能约12 000 kN·m,具有良好的耗能能力。根据本文提出的基于直接位移的抗震性能设计方法计算得到的摇摆自复位结构关键设计参数基本满足设计要求,可实现预期的

抗震性能目标。

(4) 本文提出的预应力筋可更换性及设计方法,模拟将曲线预应力筋简化为直线进行计算的精确性需要进一步验证。

## 参考文献:

- [1] 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 Q, Jia Z L, Zhou Y L, et al. Review of seismic resilient swinging bridge structures after earthquake[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 118-133. (in Chinese)
- [2] 金如意,申彦利.桩-土相互作用下的桥梁高墩地震易损性复合参数分析[J].防灾减灾工程学报,2023,43(5):1016-1023,1056.  
Jin R Y, Shen Y L. Composite parameter analysis of seismic vulnerability of high bridge piers under pile-soil interaction [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(5): 1016-1023, 1056. (in Chinese)
- [3] 公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231-01—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.
- [4] 城市桥梁抗震设计规范:CJJ 166—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [5] CALTRANS. CALTRANS seismic design criteria [S]. Sacramento: California Department of Transportation, 2013.
- [6] AASHTO. LRFD bridge design specifications [S]. Washington DC.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017.
- [7] Kawashima K, Macrae G A, Hoshikuma J, et al. Residual displacement response spectrum [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(5): 523-530.
- [8] PEER, Report of the first joint planning meeting for the second phase of NEES/E-Defense collaborative research on earthquake engineering [R]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2009.
- [9] 贾俊峰,魏博,杜修力,等.从WCEE看国内外韧性抗震梁桥研究进展[J].交通运输工程学报,2022,22(6):25-45.  
Jia J F, Wei B, Du X L, et al. Research progress on resilient seismic beam bridges at home and abroad from WCEE[J]. Journal of Transportation Engineering, 2022, 22(6): 25-45. (in Chinese)
- [10] 吕西林,全柳萌,蒋欢军.从16届世界地震工程大会看

- 可恢复功能抗震结构研究趋势[J].地震工程与工程振动, 2017, 37(3): 1-9.
- Lyu X L, Quan L M, Jiang H J. Research trends in resilient seismic structures from the 16th World Conference on Earthquake Engineering[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2017, 37(3): 1-9. (in Chinese)
- [11] 李建中,管仲国.桥梁抗震设计理论发展:从结构抗震减震到震后可恢复设计[J].中国公路学报, 2017, 30(12): 1-9.
- Li J Z, Guan Z G. Development of seismic design theory for bridges: from structural seismic reduction to post-earthquake resilient design[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12): 1-9. (in Chinese)
- [12] 杜修力,周雨龙,韩强,等.摇摆桥墩的研究综述[J].地震工程与工程振动, 2018, 38(5): 1-11.
- Du X L, Zhou Y L, Han Q, et al. A review of research on rocking bridge piers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 38(5): 1-11. (in Chinese)
- [13] 苏醒,阎石,付江监,等.一种自复位摇摆墙的改进Bouc-Wen滞回模型[J].防灾减灾工程学报, 2024, 44(1): 39-49, 201.
- Su X, Yan S, Fu J J, et al. An improved Bouc-Wen hysteresis model for self-centering rocking walls [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(1): 39-49, 201. (in Chinese)
- [14] 倪永军,宋园,江辉.基于韧性的摇摆桥墩桥梁抗震研究综述[J].北京交通大学学报, 2023, 47(3): 1-9.
- Ni Y J, Song Y, Jiang H. A review of seismic research on rocking bridge piers based on resilience[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(3): 1-9. (in Chinese)
- [15] 王龙梅,蒋姝,田砾.可更换构件结构抗震性能研究进展[J].工程抗震与加固改造, 2022, 44(6): 119-126, 147.
- Wang L M, Jiang S, Tian L. Research progress on seismic performance of structures with replaceable components[J]. Engineering Seismic and Retrofitting, 2022, 44(6): 119-126, 147. (in Chinese)
- [16] 韩强,董慧慧,王利辉,等.基于可更换构件的可恢复功能桥梁防震结构研究综述[J].中国公路学报, 2021, 34(9): 215-230.
- Han Q, Dong H H, Wang L H, et al. A review of research on seismic-resistant bridge structures based on replaceable components for resilience[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(9): 215-230. (in Chinese)
- [17] 吕西林,武大洋,周颖.可恢复功能防震结构研究进展[J].建筑结构学报, 2019, 40(2): 1-15.
- Lyu X L, Wu D Y, Zhou Y. Research progress on resilient seismic structural systems [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2): 1-15. (in Chinese)
- [18] Mander J B, Cheng C T. Seismic resistance of bridge piers based on damage avoidance design[R]. Technical Report NCEER. [S.l.]: US National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER), 1997.
- [19] Ou Y C, Chiewanichakorn M, Aref A J, et al. Seismic performance of segmental precast unbonded posttensioned concrete bridge columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(11): 1636-1647.
- [20] Bu Z Y, Ou Y C. Simplified analytical pushover method for precast segmental concrete bridge columns [J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(5): 805-822.
- [21] 魏博,贾俊峰,欧进萍,等.外置耗能器对自复位预制RC桥墩抗震性能的影响研究[J].中国公路学报, 2021, 34(2): 220-229.
- Wei B, Jia J F, Ou J P, et al. Influence of external energy dissipation devices on seismic performance of self-centering precast RC bridge piers [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 220-229. (in Chinese)
- [22] 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.
- Jia J F, Bian J C, Bai Y L, et al. Numerical simulation analysis of seismic resistance of self-centering dual-pillar bridge piers with rocking mechanism [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(1): 89-97. (in Chinese)
- [23] Federal Emergency Management Agency (FEMA). Seismic performance assessment of buildings, volume I: methodology, FEMA P-58 [R]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [24] Japanese Road Association. Design specifications of highway bridges, Part V: Seismic design [S]. Tokyo: Japanese Road Association, 1996
- [25] 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [26] Marriott D. The development of high-performance post-tensioned rocking systems for the seismic design of structures [D]. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury, 2009.
- [27] Ou Y C, Tsai M, Chang K, et al. Cyclic behavior of precast segmental concrete bridge columns with high performance or conventional steel reinforcing bars as en-

- ergy dissipation bars [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 39(11): 1181-1198.
- [28] Paulay T, Priestley M. *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1992.
- [29] Borzi B, Calvi G M, Elnashai A S, et al. Inelastic spectra for displacement-based seismic design[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, 21(1): 47-61.
- [30] 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 Z G, Zhao T Y, Wang D S, et al. Seismic damage control design of double-deck bridge pier bracing system based on RSC system[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(3): 97-106. (in Chinese)
- [31] Palermo A, Pampanin S, Marriott D. Design, modeling, and experimental response of seismic resistant bridge piers with posttensioned dissipating connections [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2007, 133(11): 1648-1661.
- [32] 杜轲, 孙景江, 许卫晓. 纤维模型中单元、截面及纤维划分问题研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2012, 32(5): 39-46.  
Du K, Sun J J, Xu W X. Study on issues of element, section, and fiber division in fiber models[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2012, 32(5): 39-46. (in Chinese)
- [33] 葛超洋, 孙治国, 付建宇, 等. 近断层地震动下摇摆-自复位桥墩连续梁地震反应[J]. *世界地震工程*, 2023, 39(2): 113-124.  
Ge C Y, Sun Z G, Fu J Y, et al. Seismic response of rocking-self-centering bridge piers continuous beams under near-fault ground motions[J]. *World Earthquake Engineering*, 2023, 39(2): 113-124. (in Chinese)
- [34] 司炳君, 谷明洋, 孙治国, 等. 近断层地震动下摇摆-自复位桥墩地震反应分析[J]. *工程力学*, 2017, 34(10): 87-97.  
Si B J, Gu M Y, Sun Z G, et al. Seismic response analysis of rocking-self-centering bridge piers under near-fault ground motions [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(10): 87-97. (in Chinese)
- [35] 孙治国, 赵泰儀, 石岩, 等. 摇摆-自复位桥墩抗震性能数值建模方法研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019, 27(6): 1357-1369.  
Sun Z G, Zhao T Y, Shi Y, et al. Research on numerical modeling methods for seismic performance of rocking-self-centering bridge piers[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2019, 27(6): 1357-1369. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)