

# 附加铅挤压阻尼器的自复位桥墩抗震性能分析

Seismic Performance Analysis of Self-resetting Pier with Lead Squeeze Damper

吴平川<sup>1,2</sup>, 段楠<sup>1</sup>, 齐虎<sup>3</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038; 2. 河北省装配式结构技术创新中心, 邯郸 056000;  
3. 河北省工程结构多灾害韧性与应急处置技术创新中心, 三河 065201)

**摘要:** 为了减轻自复位桥墩的抗震损伤, 提高其耗能能力, 在自复位桥墩的基础上附加一种铅挤压阻尼器, 得到外置铅挤压阻尼器自复位桥墩。基于 OpenSees 平台建立了附加铅挤压阻尼器自复位桥墩模型, 通过拟静力和动力时程分析对该模型进行抗震性能分析。结果表明: 在往复加载条件下, 附加铅挤压阻尼器的自复位桥墩的屈服刚度为 8.32 kN/mm; 在动力时程分析过程中, 附加铅挤压阻尼器的自复位桥墩可承受 0.6g PGA 地震影响。附加铅挤压阻尼器的自复位桥墩表现出更强的抗震能力, 并且可对桥墩内部预应力筋起到一定的保护作用。

**关键词:** 抗震性能; 桥梁抗震; 自复位耗能桥墩; 安全稳定; OpenSees

**中图分类号:** U443.22      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-8249 (2025) 06-0088-07

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.016

WU Pingchuan<sup>1,2</sup>, DUAN Nan<sup>1</sup>, QI Hu<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Handan 056038, China;  
2. Hebei Technology Innovation Center for Prefabricated Structure, Handan 056000, China;  
3. Hebei Technology Innovation Center for Multi-Hazard Resilience and Emergency  
Handling of Engineering Structures, Sanhe 065201, China)

**Abstract:** In order to reduce the seismic damage of the self-resetting pier and improve its energy dissipation capacity, a kind of lead squeeze damper is added to the self-resetting pier to obtain the external lead squeeze damper self-resetting pier. Based on OpenSees platform model, models of self-resetting pier and self-resetting pier with lead squeeze damper are established. The accuracy of the models is verified by pseudo-static test results of lead squeeze damper and self-resetting pier respectively. On this basis, the seismic performance of the two pier models is analyzed by pseudo-static and dynamic time-history analysis. The results show that the yield stiffness of self-resetting pier with lead squeeze damper is 8.32 kN/mm under the reciprocating loading condition; In the process of dynamic time history analysis, the self-resetting pier with lead squeeze damper can withstand 0.6g PGA earthquake; The self-resetting pier with lead squeeze damper has stronger seismic ability and can protect

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (E2020402079)。

作者简介: 吴平川 (1979—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 结构抗震与加固。

通信作者: 段楠 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 结构抗震。

收稿日期: 2024-08-12

the prestressed tendons inside the pier to some degree.

**Key words:** seismic behavior; aseismic of bridge; self-resetting energy-consuming pier; security and stability; OpenSees

## 0 引言

不同于钢筋混凝土桥墩的延性抗震设计理念, 自复位桥墩是基于性能设计的新型结构体系。自复位桥墩底部接缝处摇摆反应的发生将改变桥墩受力模式和变形机制, 降低桥墩承受的地震力。自复位桥墩因其良好的耗能能力和自复位能力成为可恢复功能结构的研究热点之一<sup>[1-2]</sup>。

1997年Mander等<sup>[3]</sup>首次将自复位结构体系应用于桥墩中, 将桥墩与墩顶处的纵筋以及桥墩与下部结构处的纵筋截断, 并在桥墩中添加一条预应力筋, 得到了最初的自复位桥墩体系, 此桥墩体系的抗震性能较好, 但耗能能力较弱。Palermo等<sup>[4]</sup>提出了配置无粘结预应力筋和耗能钢筋的摇摆自复位桥墩体系, 其桥墩的抗震性能更佳, 并且具有一定的耗能能力。申彦利等<sup>[5]</sup>提出一种新型自复位节段拼装桥墩, 通过拟静力模拟分析显示该桥墩在低周往复荷载下具有良好的抗震性能。王大鹏等<sup>[6]</sup>提出一种在自复位桥墩基础上外置防屈曲支撑的结构, 通过拟静力分析得出外置防屈曲支撑可显著提高桥墩的耗能能力。王德斌等<sup>[7]</sup>提出了拥有自复位能力的斜拉桥附加黏滞阻尼器的结构体系, 附加黏滞阻尼器可有效提高斜拉桥体系的纵向抗震能力。李帆等<sup>[8]</sup>针对自复位桥墩内置耗能装置难以更换的问题, 提出一种外置分阶段耗能阻尼器, 该阻尼器可以显著增强桥墩的承载能力, 增强了结构的抗震能力。张恒等<sup>[9]</sup>提出一种铁路自复位桥墩外部附加黏滞阻尼器的结构, 采用动力时程分析方法得知外设黏滞阻尼器可以显著减小桥墩墩顶位移与墩底弯矩。高慧兴等<sup>[10]</sup>提出一种将新型粘弹性阻尼器外置于节段拼装桥墩底部的结构, 并通过滞回对比分析得知新型粘弹性阻尼器可以提高结构整体的刚度, 增强节段拼装桥墩的承载能力和耗能能力。高明等<sup>[11-12]</sup>提出了一种新型自复位预制节段桥墩, 该结构以外置角钢作为耗能装置, 通过三组拟静力试验得知该新型结构形式具有较好的自复位以及耗能能力。综上, 自复位桥墩可以有效减少震后残余位移, 减少桥墩所

受地震力, 并且具有良好的自复位能力, 但是耗能能力较弱并且震后不易修复。可在外部附加耗能装置提高其抗震能力与耗能能力, 减少震后修复成本。

Sadeghi等<sup>[13]</sup>提出一种将铅挤压阻尼附加于自复位桥墩外部的结构体系, 并将此体系用于全桥结构设计中。但是所研究的桥墩对象并没有添加自复位构件, 并且仅是一种猜想, 并没有对此结构体系进行抗震性能分析。因此, 选用铅挤压阻尼器附加于桥墩两侧形成一种外置铅挤压阻尼器的自复位桥墩结构, 建立该结构的数值分析模型, 通过拟静力和动力时程分析研究该结构的抗震性能。

## 1 附加铅挤压阻尼器自复位桥墩构造及机理

铅挤压阻尼器结构简单, 具有耗能能力强、经济耐用的优点<sup>[14]</sup>。铅挤压阻尼器的内部构造如图1所示。

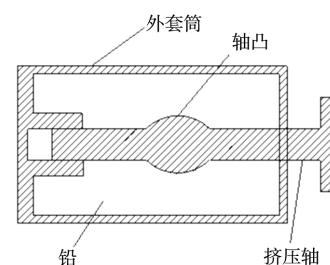


图1 铅挤压阻尼器构造

Fig. 1 Lead extrusion damper construction

铅挤压阻尼器在工作时, 挤压轴会进行往复运动, 推动轴凸对封闭空间内的铅进行挤压, 从而铅发生塑性变形, 产生阻尼力并且提供耗能。

铅挤压阻尼器附加在自复位桥墩外部如图2所示。在地震中, 墩身承重, 预应力筋起到复位作用, 铅挤压阻尼器起到耗能作用。

## 2 数值模型

### 2.1 模型建立

基于OpenSees有限元软件对桥墩进行建模。墩身采用纤维模型, 混凝土采用Concrete 01的本构模型, 其本构关系如图3所示。

## 道桥技术

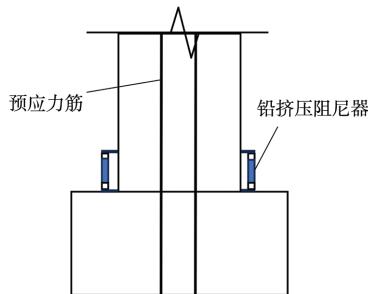


图 2 外置铅挤压阻尼器自复位桥墩构造  
Fig. 2 Self-resetting pier construction with external lead extrusion damper

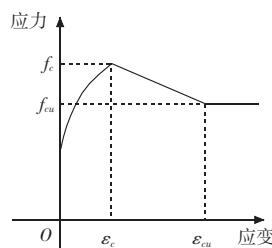


图 3 Concrete 01 模型本构关系  
Fig. 3 Concrete 01 model constitutive relation

图 3 中,  $f_c$  为混凝土抗压强度;  $f_{cu}$  为混凝土极限抗压强度, 建模时对于极限抗压强度  $f_{cu}$  可取  $f_c$  的 0.2 倍;  $\varepsilon_c$  为混凝土压应变;  $\varepsilon_{cu}$  为混凝土破坏时的极限压应变。

纵筋选用 Steel 02 单轴材料模拟, 其本构关系如图 4 所示。图中  $E$  为钢筋的弹性模量,  $E_p$  为钢筋的屈服刚度,  $f_y$  为钢筋的屈服强度,  $\varepsilon_y$  为钢筋屈服应变。

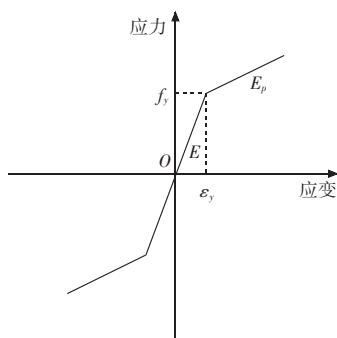


图 4 Steel 02 模型本构关系  
Fig. 4 Constitutive relation of Steel 02 model

对于无粘结预应力筋的模拟, 可选用 Elastic-PP 材料, 通过对此材料中施加初始应变的方式达到施加预应力的效果。在预应力筋工作时, 当最大应力达到其抗拉极限值 80% 时, 预应力筋会进入塑性, 会使桥墩的复位能力大大降低。因此在预应力筋建

模时, 其最大应力可设置为其极限抗拉值的 80%, 避免预应力筋遭受过大的应力而导致模拟计算不准确。

在对铅挤压阻尼器的建模模型选取时, 考虑到铅挤压阻尼器具有强大的耗能能力, 其滞回曲线近似于矩形, 对其恢复力模型可采用钢塑性模型<sup>[15]</sup>。因此, 对于铅挤压阻尼器亦可采用 Steel 02 材料模型建立, 且可调用 OpenSees 中的 two Node Link 命令将材料模型建立到整体模型中, 并通过钢臂单元使之与桥墩墩身并联, 从而在 OpenSees 中建立附加铅挤压阻尼器的自复位桥墩模型。

自复位桥墩接缝处摇摆反应的模拟是建模的核心所在, 采用纤维铰模型<sup>[16]</sup>来模拟接缝处的开合反应。因纤维铰单元长度远小于墩身纤维材料的长度, 需要将纤维铰中的钢筋材料、混凝土材料本构关系做相似变换, 变换细节参考文献 [16]。

附加铅挤压阻尼器的自复位桥墩模拟如图 5 所示。在用纤维铰模型模拟桥墩接缝时, 非接缝处的预应力筋直接在梁柱纤维单元内定义, 接缝处的预应力筋无需结合其他单元, 可以直接在纤维铰模型中建立, 减少了建模工作量。并且接缝处只能预应力筋穿过, 可调用 OpenSees 中的 Fiber 命令对预应力筋在局部坐标系中的坐标位置进行精准定位。

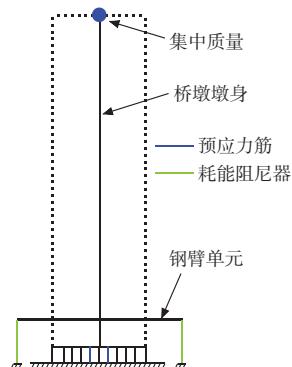


图 5 附加铅挤压阻尼器的自复位桥墩模型  
Fig. 5 Self-resetting pier model with lead squeeze damper

## 2.2 模型验证

Palermo 等<sup>[4]</sup>完成了 4 个自复位桥墩拟静力试验, 选取编号为 PT1 的试件来验证模型准确性。试件 PT1 的截面边长为 350 mm, 桥墩截面为正方形, 内置两根面积为 99 mm<sup>2</sup> 的预应力筋, 预应力筋的屈服强度为 1 600 MPa, 极限强度为 1 870 MPa, 初始预应力为 100 kN。

图6为PT1试验与模拟滞回曲线对比图。PT1正方向滞回曲线屈服点试验值为17.6 kN, 模拟值为18.4 kN, 相差4.5%; PT1正方向滞回曲线峰值荷载试验值为27.6 kN, 模拟值为28.7 kN, 相差3.9%。均相差不大, 模拟效果较好。

对于铅挤压阻尼器建模方法的验证, 选用杨军等<sup>[10]</sup>所做的铅挤压阻尼器静力试验, 将其定义为L1。采用Steel 02材料模型结合two Node Link命令建模。将L1的屈服强度设为21 kN, 屈服后刚度设为0。

图7为铅挤压阻尼器模拟与试验滞回曲线对比结果。可见, 所建模型较为准确地模拟阻尼器的滞回反应。总体来说, 所采用的自复位桥墩以及铅挤压阻尼器的建模方法较为准确。

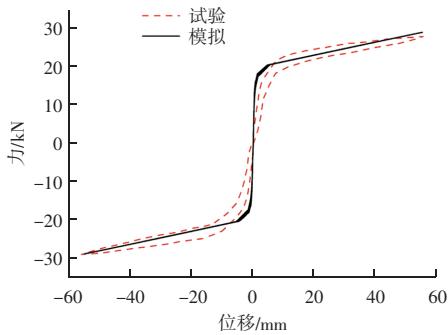


图6 PT1 模拟滞回曲线与试验曲线对比图

Fig. 6 Comparison of PT1 simulated hysteresis curve and test curve

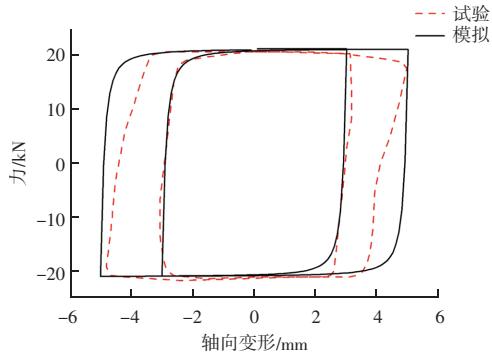


图7 铅挤压阻尼器滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curve of lead squeeze damper

### 3 桥墩拟静力分析

#### 3.1 滞回曲线对比

在建立模型时, 将模拟好的L1在PT1试件两侧各设置1个, 形成附加铅挤压阻尼器自复位桥墩模型PL, 其数值分析力-位移滞回曲线如图8所示。PL桥墩呈现的滞回形状为“旗帜形”, 说明其具有良好

的耗能能力和自复位能力, 并且相对于PT1桥墩, PL桥墩的结构承载能力和耗能能力都得到了提高。PT1在往复加载过程中并没有残余位移产生, 但PL桥墩滞回曲线出现了残余位移, 这是由于桥墩增设的铅挤压阻尼器本身的卸载刚度很大, 使得桥墩整体的卸载刚度增大, 造成结构残余位移有所增大。

图9为整个加载过程残余位移变化。桥墩的最大残余位移随着墩顶位移的增大而增大, 但增大的趋势逐渐减少。虽然增设铅挤压阻尼器使得桥墩的残余位移增加, 但在最大加载位移55 mm时的残余位移角为0.8%, 并没有超过残余位移角限值1%<sup>[17]</sup>。

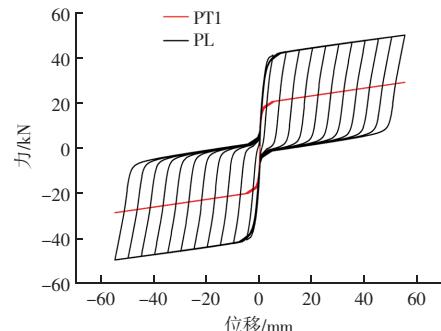


图8 滞回曲线对比图

Fig. 8 Hysteresis curve comparison diagram

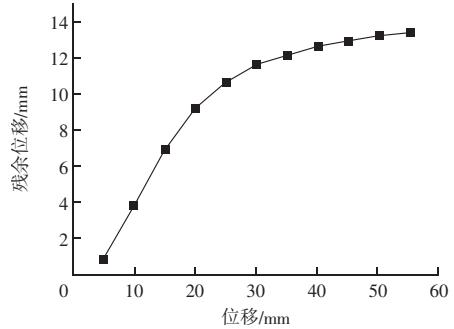


图9 PL 残余位移变化规律

Fig. 9 Variation of PL residual displacement

#### 3.2 骨架曲线分析

骨架曲线能够反映结构加载整个过程的受力与变形, 是判断结构屈服点和极限点的重要依据。图10为桥墩的骨架曲线对比图。

PL桥墩与PT1桥墩在消压阶段的骨架曲线斜率相近。在屈服阶段, 桥墩的屈服位移较为接近, 但所受承载力相差较大; 继续加载到屈服后阶段, PL桥墩的承载力稳定增加, 说明铅挤压阻尼器在工作时出力稳定。通过屈服弯矩法分析得到PL桥墩的屈服刚度为8.32 kN/mm, PT1桥墩的屈服刚度为4.38 kN/mm。

## 道桥技术

由此可知, 桥墩的屈服刚度显著增加。这是因为铅挤压阻尼器的初始刚度较大, 微小的变形下就会达到屈服强度, 从而使得桥墩整体的屈服强度增大。结构的屈服强度越大, 其抗震能力越强, 说明增设铅挤压阻尼器可以有效提高桥墩的抗震能力。

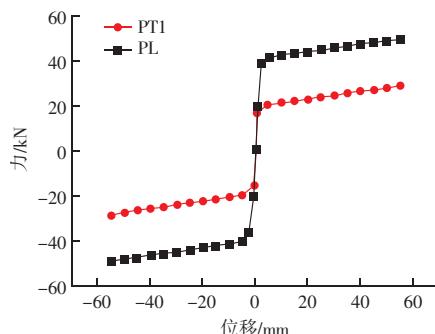


图 10 骨架曲线对比图

Fig. 10 Skeleton curve comparison diagram

### 3.3 耗能能力分析

图 11 为 PL 桥墩滞回单圈耗能量图。耗能能力的大小可通过滞回曲线面积计算得到, 通过计算每加载 0.1 mm 位移得到的滞回环面积, 并累加得到各个加载等级的耗能大小。PL 桥墩的累计耗能随着加载位移的增大而增大, 并且耗能曲线整体形状接近于“直线”形, 说明在加载过程中铅挤压阻尼器对结构可以提供稳定的耗能。在最大位移 55 mm 时, PL 桥墩的最大耗能为 5 546.4 kN·mm, 说明增设铅挤压阻尼器可以有效提高自复位桥墩的耗能能力。

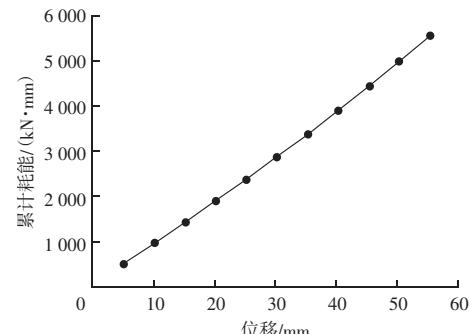


图 11 桥墩滞回单圈耗能量

Fig. 11 Energy consumption of piers in one cycle of stagnation

### 4 桥墩动力时程分析

采用动力时程分析方法对 PL 桥墩与 PT1 桥墩进行抗震分析, 讨论实际地震情况下铅挤压阻尼器对桥墩的加固效果。

#### 4.1 地震动的选取与分析方法

选取某桥梁, 其设防等级为 C 级, 所处 II 类场地, 根据 JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》得到设计加速度反应谱, 将其作为目标反应谱。采用谱匹配法从美国太平洋地震工程研究中心 (PEER) 建立的数据库中选取了 10 条地震动记录, 见表 1。图 12 为各个地震动在阻尼比为 0.05 经过调幅得到的地震动反应谱, 这 10 条地震动的平均加速度反应谱与设计目标反应谱吻合较高。

表 1 选用的地震动信息  
Table 1 Selected ground motion information

编号	地震名称	年份	台站	震级	所选分量	PGA
1	Tabas Iran	1978/9/16	Dayhook	7.4	DAY - L1	0.324g
2	Upland	1990/2/28	Ocean Floor SEMS III	5.6	UP90S - H1	0.028g
3	Loma Prieta	1989/10/18	Gilroy Array #3	6.9	G03090	0.368g
4	Bolvard	2003/12/26	Bolvard	6.6	BOA - L	0.007g
5	Niigata Japan	2004/10/23	NIGH13	6.6	NIGH13NS	0.068g
6	Chuetsu - oki Japan	2007/7/16	Ojiya City	6.8	65321NS	0.266g
7	Iwate Japan	2008/6/13	AKT004	6.9	AKT004NS	0.011g
8	El Mayor - Cucapah Mexico	2010/4/4	El Centro Array #7	7.2	E07360	0.255g
9	Tottori Japan	2000/10/6	EHM006	6.6	EHM006EW	0.011g
10	Darfield New Zealand	2010/9/3	ODZ	7.0	ODZN	0.011g

采用增量动力分析 (IDA) 对 PL 模型与 PT1 模型进行非线性动力时程分析。将各地震动调幅, 从 0.1g 逐级增大, 得到 10 条地震动下每个桥墩的地震反应并取最大值, 研究桥墩从弹性到弹塑性直到结构失稳整个过程的抗震性能。在数值分析时, 模型采用 Rayleigh 阻尼, 阻尼比取 0.05%, 积分法采

用 Newmark- $\beta$  法, 其中  $\gamma=0.25$ ,  $\beta=0.5$ 。

判断结构失稳的方式: (1) 在桥墩墩顶位移角超过 5% 时认为桥墩倒塌; (2) 桥墩内预应力筋最大应力超过 1 490 MPa (预应力筋抗拉极限值的 80%) 认为预应力筋失效, 此时将不再增加 PGA。

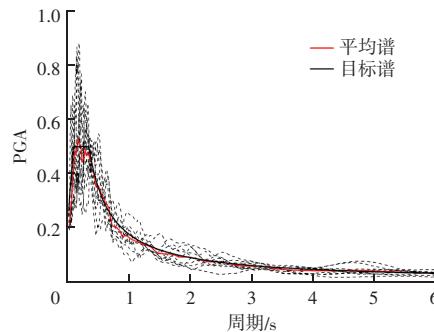


图 12 地震动平均谱及目标反应谱

Fig. 12 Ground motion mean spectrum and target response spectrum

#### 4.2 桥墩墩顶位移角对比

桥墩在地震作用下,其受损程度可由桥墩墩顶最大位移角  $R$  得出,由  $R$  可以判断动力时程分析时桥墩是否倒塌或者倾覆。图 13 为各桥墩墩顶位移增量动力分析结果。总体来看,桥墩 PT1 可承受 0.3g PGA 的地震波影响,桥墩 PL 则可承受 0.6g PGA,并且在 0.4g PGA 以前的增量分析中,桥墩 PL 的  $R$  值明显小于 PT1 的  $R$  值。说明铅挤压阻尼器增加了结构的整体刚度,使得地震导致的桥墩墩顶位移得以抑制,有效地减少地震作用对桥墩的损害。在计算过程中,PT1 桥墩在经受 0.4g PGA 地震波时,大部分地震波造成桥墩的预应力筋应力过大的问题,从而导致计算终止。PL 桥墩在将地震编号为 4、7、9、10 增量到 0.7g PGA 时,桥墩的墩顶位移超过限值 5%,同时桥墩内部预应力筋应力过大,致使计算终止。

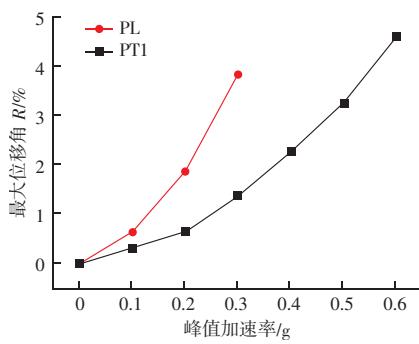


图 13 墩顶最大位移角增量分析

Fig. 13 Incremental analysis of maximum displacement angle at pier top

#### 4.3 桥墩残余位移角对比

图 14 为桥墩墩顶残余位移角  $R_r$  增量分析计算结果,  $R_r$  为桥墩震后残余位移与墩高比值。桥墩 PT1 的  $R_r$  随 PGA 的增大而增大,桥墩 PL 的  $R_r$  变化规律不明显,但整体呈增大趋势。整体来说桥墩 PL 与桥

墩 PT1 的残余位移角  $R_r$  远小于结构允许的限值 1%<sup>[14]</sup>。图中桥墩 PT1 在计算 0.1g PGA 与 0.2g PGA 时的残余位移角明显小于桥墩 PL,说明增设铅挤压阻尼器导致桥墩整体卸载刚度增大,使得残余位移增大,但增值较小在可控范围内。

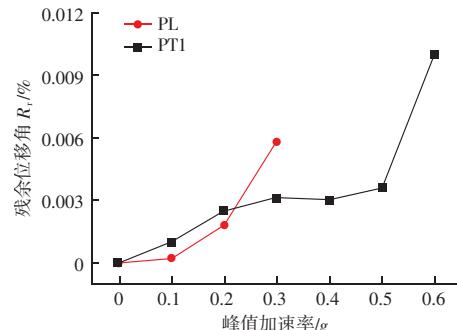


图 14 墩顶残余位移角增量分析

Fig. 14 Incremental analysis of residual displacement angle of pier top

#### 4.4 桥墩预应力筋最大应力对比

由预应力筋最大应力可判断桥墩在地震过程中的受损程度。可通过计算两桥墩的预应力筋在 IDA 分析过程中所能达到的最大应力来研究桥墩外置铅挤压阻尼器与内部预应力筋的协同工作规律。图 15 为预应力筋最大应力  $\sigma_{max}$  增量分析计算结果。

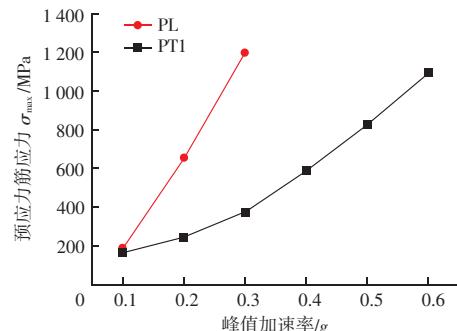


图 15 预应力筋最大应力增量分析

Fig. 15 Analysis of maximum stress increment of prestressed reinforcement

桥墩 PL 与桥墩 PT1 的  $\sigma_{max}$  都随 PGA 的增大而增大,这是由于随着 PGA 的增大桥墩对地震波的响应也越来越强烈,致使墩顶位移角  $R$  增加,从而导致  $\sigma_{max}$  增大。而图中 0.1g PGA 到 0.3g PGA 的计算过程中,桥墩 PL 的  $\sigma_{max}$  小于 PT1 的  $\sigma_{max}$ ,并且在整个计算过程中桥墩 PL 的  $\sigma_{max}$  增大幅度明显小于桥墩 PT1 的  $\sigma_{max}$  增大幅度,这是由于桥墩 PL 增设铅挤压阻尼器使得结构整体刚度增加,对桥墩墩顶位移响应起到了限制作用,  $R$  值减小使其对应的预应力筋应力减

## 道桥技术

小。说明增设铅挤压阻尼器对自复位桥墩内部的预应力筋起到了一定的保护作用，延长了结构使用寿命。

### 5 结论

基于 OpenSees 有限元软件建立桥墩的数值分析模型，通过对桥墩进行低周往复加载分析和动力时程分析，研究外置铅挤压阻尼器对自复位桥墩的加固效果，得到以下主要结论：

(1) 基于 OpenSees 有限元软件，采用纤维铰模型建立自复位桥墩数值分析模型，能够比较准确地模拟自复位桥墩接缝处开合反应。

(2) 相比于传统自复位桥墩，外置铅挤压阻尼器的自复位桥墩具有更好的承载能力和耗能能力，在遭遇地震后，展现出更加优秀的抵抗变形的能力，提高了传统自复位桥墩的抗震性能。

(3) 增设铅挤压阻尼器会使自复位桥墩的残余位移有所增加，未超出允许的限值。

(4) 采用外置铅挤压阻尼器对自复位桥墩进行加固，可以保护桥墩内部预应力筋，使其不会过早地屈服，延长了结构使用寿命。

### 参 考 文 献

- [1] 王景全, 王震, 高玉峰, 等. 预制桥墩体系抗震性能研究进展: 新材料、新理念、新应用 [J]. 工程力学, 2019, 36 (3): 23.
- [2] 邓小伟, 钟海强, 龚子松, 等. 摆摆 - 自复位桥墩的研究和应用现状及展望 [J]. 公路, 2024, 69 (8): 168–175.
- [3] MANDER J B, CHENG C T. Seismic resistance of bridge piers based on damage avoidance design [J]. Technical Report NCEER, 1997, 97-0014.
- [4] 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 (11): 133.
- [5] 申彦利, 王修立. 新型自复位节段拼装桥墩的抗震性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38 (2): 111–118.
- [6] 王大鹏, 梁银丰. 外置耗能器与复位器的自复位桥墩抗震性能研究 [J]. 重庆交通大学学报, 2023, 42 (8): 9–17.
- [7] 王德斌, 郭宇晨, 孙治国. 设置摇摆 - 自复位桥墩和黏滞阻尼器的斜拉桥纵向减震性能 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44 (8): 1336–1344.
- [8] 李帆, 蒋玉玮, 黄海新. 外置分阶段耗能阻尼器自复位桥墩的抗震性能 [J]. 铁道建筑, 2022, 62 (5): 87–93.
- [9] 张恒, 夏修身, 张旭东, 等. 黏滞阻尼器对铁路自复位桥墩地震响应的影响 [J]. 铁道建筑, 2023, 63 (9): 65–68.
- [10] 高慧兴, 谷硕, 刘国清, 等. 外置新型粘弹性阻尼器节段拼装桥墩抗震性能研究 [J]. 吉林建筑大学学报, 2024, 41 (3): 63–68.
- [11] 高明, 崔恩文, 温永昕, 等. 自复位预制节段桥墩抗震性能试验研究 [J]. 世界地震工程, 2024, 40 (3): 200–207.
- [12] 高明, 崔恩文, 温永昕, 等. 基于角钢为耗能构件的自复位桥墩抗震性能数值分析 [J]. 震灾防御技术, 2025, 20 (1): 163–173.
- [13] SADEGHI M A, YANG T Y, BAGATINI-CACHUCO F, et al. Seismic design and performance evaluation of controlled rocking dual-fused bridge system [J]. Engineering Structures, 2020, 212: 110467.
- [14] 杨军, 李黎, 唐家祥, 等. 铅挤压阻尼器的试验研究 [J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27 (5): 3.
- [15] 周云, 周福霖. 铅阻尼器的研究与应用 [J]. 世界地震工程, 1999, 15 (1): 53–61.
- [16] QI H, GUO H S, LI Y G, et al. The fiber hinge model for unbonded post tensioned beam column connections [C] // 2018 Academic Conference on Basic Theory of Prefabricated-Concrete Industrial Construction Technology. Nanjing China: Southeast University, 2018: E19.
- [17] Japan Road Association (JRA). Design specifications of highway bridges: seismic design: JRA-2012 [S]. Tokyo: Japan Road Association, 2012.