# 铅芯橡胶支座对非规则匝道桥抗震性能的影响

张 波1,杨思远2,张 芳2

<sup>1</sup>抚州赣东公路设计院有限公司, 江西 抚州 <sup>2</sup>广州大学土木工程学院, 广东 广州

收稿日期: 2023年4月30日; 录用日期: 2023年5月20日; 发布日期: 2023年5月31日

#### 摘要

为研究铅芯橡胶支座对非规则匝道桥抗震性能的影响,本文依托工程实例建立有限元模型,通过弹塑性时程分析方法,对比研究板式橡胶支座和铅芯橡胶支座在非规则匝道桥中的抗震作用,并对不同纵向坡度和曲率半径下铅芯橡胶支座的减震效果进行探讨。研究结果表明:桥墩采用铅芯橡胶支座后,其墩顶位移响应值基本不变,但内力响应值显著减小,各桥墩刚度比值的改变使得固结墩地震响应值小幅增大;铅芯橡胶支座的减震幅度随着纵向坡度的增大而增大,且对矮墩的减震效果明显大于高墩;随着曲率半径的增大,铅芯橡胶支座减震效果小幅减小。铅芯橡胶支座在曲率半径较小、桥墩较矮的非规则匝道桥中减震效果明显。

#### 关键词

匝道桥, 铅芯橡胶支座, 纵向坡度, 曲率半径, 抗震性能

# **Influence of Lead Rubber Bearing on Seismic Performance of Irregular Ramp Bridge**

Bo Zhang<sup>1</sup>, Siyuan Yang<sup>2</sup>, Fang Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fuzhou Gandong Hingway Design Institute Co., Ltd., Fuzhou Jiangxi

Received: Apr. 30<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 20<sup>th</sup>, 2023; published: May 31<sup>st</sup>, 2023

#### **Abstract**

In order to study the influence of lead rubber bearing on the seismic performance of irregular ramp bridge, a finite element model is established based on an engineering example. The seismic performance of plate rubber bearing and lead rubber bearing in irregular ramp bridge is analyzed,

文章引用: 张波, 杨思远, 张芳. 铅芯橡胶支座对非规则匝道桥抗震性能的影响[J]. 土木工程, 2023, 12(3): 668-675. DOI: 10.12677/hjce.2023.125075

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou Guangdong

and the damping effect of lead rubber bearing under different longitudinal slope and radius of curvature is discussed. The results show that the displacement response value at the top of the pier is basically unchanged but the internal force response value is significantly reduced. The change of stiffness ratio of each pier makes the seismic response of the consolidated piers increase slightly. The damping amplitude of lead rubber bearings to short piers is larger than that to high piers, and increases with the increase of longitudinal slope. With the increase of radius of curvature, the damping effect of lead rubber bearing decreases slightly. The lead rubber bearings have an obvious shock absorption effect in irregular ramp bridges with a small radius of curvature and short piers.

#### **Keywords**

Ramp Bridge, Lead Rubber Bearing, Longitudinal Slope, Radius of Curvature, Seismic Behavior

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <a href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>



Open Access

#### 1. 引言

随着交通运输行业的发展,桥梁的抗震性能要求不断提高。支座作为桥梁上、下部结构的连接构件, 对桥梁抗震能力有重大的影响。现有研究表明,相较于传统的延性抗震设计方法,采用性能更加优良的 支座形式可以有效减少桥梁结构在地震作用下的不利影响[1]。近年来,铅芯橡胶支座的发展为改善桥梁 结构的抗震性能提供了新思路,与板式橡胶支座相比,铅芯橡胶支座可以明显延长桥梁结构周期、减小 桥梁地震时的损伤[2] [3] [4],因此被广泛应用于桥梁支承体系中,成为现阶段桥梁抗震研究的热点。刘 智华等[5]通过振动台试验对采用板式橡胶支座和铅芯橡胶支座的连续梁模型进行对比研究,认为铅芯橡 胶支座能有效减小桥梁的震损,这表明铅芯橡胶支座可以在桥梁的减隔震设计中发挥积极作用。李雪红 等[6]对比分析了常规地震动和远场长周期地震动作用下铅芯橡胶支座桥梁的动力响应特性,认为铅芯橡 胶支座在远场长周期地震动作用下能发挥一定的减隔震性能。除此之外,也不断有学者尝试对基于铅芯 橡胶支座的桥梁减隔震设计方法进行完善。钟铁毅等[7]以能量平衡为依据,以地震输入能量达到铅芯橡 胶支座的极限耗能作为破坏准则,构建了基于铅芯橡胶支座的减隔震桥梁设计方法。针对工程中铅芯橡 胶支座等效线性分析模型动力参数选取不够合理的情况,吴彬等[8][9]系统地研究了铅芯橡胶支座的动态 力学性能与其自身构造、外加动载之间的关系。Jie Wang 等[10]对铅芯橡胶支座各参数取值的合理范围进 行了探讨,为铅芯橡胶支座设计参数的选取提供了参考依据。在高速铁路桥的减隔震研究中,Tang Huang 等[11]探索了铅芯橡胶支座对桥梁动力响应的影响, 认为铅芯橡胶支座可以减小桥墩弯矩、主梁弯矩和剪 力等动力响应值。

匝道桥作为主干线桥梁的附属引道,在交通系统中发挥着重要作用,但曲线不规则性和侧向刚度分布不规则性导致其在地震中较易发生倒塌性破坏[12] [13] [14]。而铅芯橡胶支座可以减小曲线桥梁的内力耦合效应,且具有较好的经济性,是提高非规则匝道桥的抗震性能的重要途径[15] [16]。为研究铅芯橡胶支座对非规则匝道桥抗震性能的影响,本文依托工程实例,通过弹塑性时程方法对比分析非规则匝道桥使用铅芯橡胶支座和板式橡胶支座后的抗震性能,并探讨匝道桥几何参数对铅芯橡胶支座减震性能的影响。

## 2. 工程背景

本文以一座一联 3×25 m 的匝道桥为工程背景,工程实例所在地抗震设防烈度为 6度,设计地震加速度为 0.05 g。该桥曲率半径为 150 m,纵向坡度 4%,桥面宽 10.5 m,主梁采用单箱单室截面,混凝土强度为 C50;下部独柱墩采用 C30 混凝土浇筑,桥墩内部纵筋为 25 mm 直径的 HRB400 钢筋,箍筋为直径 12 mm 的 HRB300 钢筋。下部结构为直径 1.6 m 的圆形墩,最矮墩高 6 m,其中 1#墩和 4#墩采用支座连接,2#和 3#墩为墩梁固结。

#### 3. 有限元模型及地震动输入

本研究通过 ABAQUS 软件对该桥进行有限元模拟(如图 1 所示),并分析把板式橡胶支座改成铅芯橡胶支座的影响。其中混凝土本构模型选用塑性损伤模型,上部箱梁混凝土用 S4R 壳单元模拟,下部桥墩混凝土用 C3D81 非协调 8 节点线性六面体单元模拟;钢筋本构模型采用理想弹塑性模型,用 T3D2 单元模拟。



Figure 1. Finite element model 图 1. 有限元模型

板式橡胶支座的滞回曲线呈狭长形,其恢复力模型采用线性方程,即:

$$F = Kx \tag{1}$$

式中,F 为恢复力,x 为上部结构位移,K 为支座的等效剪切刚度,按式(2)进行计算:

$$K = \frac{GA}{\sum t} \tag{2}$$

其中G为支座动剪切模量,取为1.2 MPa,A为支座剪切面积, $\sum t$ 为支座橡胶总厚度。

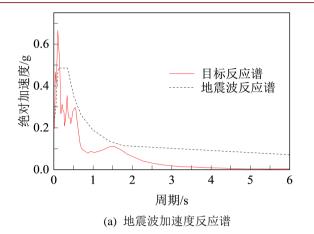
文本中板式橡胶支座水平刚度取为  $5.5\times10^6$  N/m,竖向刚度取为  $1\times10^9$  N/m,三个方向的转动惯量皆取为  $3.57\times10^6$  N/m,用 bushing 组合单元对其进行模拟。铅芯橡胶支座采用双线性恢复力模型,其力位移关系按公式(3)计算:

$$F = \begin{cases} K_1 D & D \le D_y \\ F_y + K_2 \left( D - D_y \right) & D > D_y \end{cases}$$
 (3)

式中, $K_1$ 为铅芯橡胶支座的初始刚度, $D_y$ 为支座的屈服位移, $F_y$ 为支座的屈服剪切力, $K_2$ 为支座屈服后刚度。

本文选用 Y4Q 圆形铅芯橡胶支座, 其铅芯屈服力为 61 kN, 屈服前刚度为 6.2 kN/mm, 屈服后刚度为 1 kN/mm, 采用 CARTESIAN 平移连接类型对其进行模拟。

依据匝道桥所在地的场地特性计算出目标反应谱(如图 2(a)所示),在 PEER 地震波数据库(Pacific Earthquake Engineering Research Center)选择与目标反应谱相似的 San Fernado 地震波,如图 2(b)所示。调整后将地震波桥梁的横、纵方向输入。



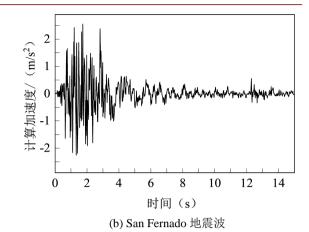
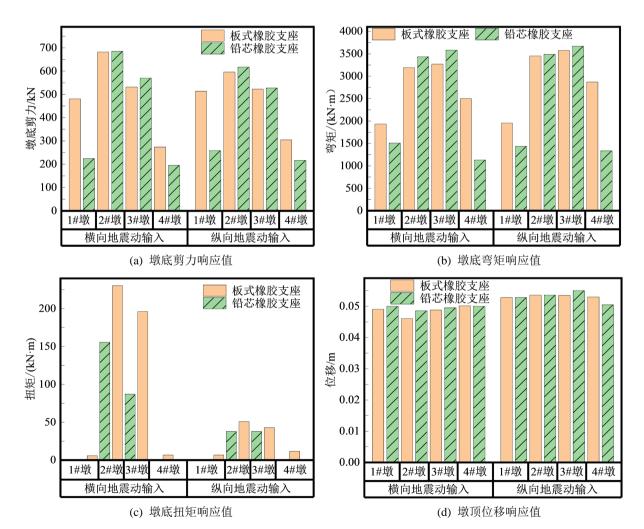


Figure 2. Seismic wave 图 2. 地震波

# 4. 桥梁动力特性比较



**Figure 3.** Analysis results of pier-top displacement and internal force 图 3. 内力分析和墩顶位移结果

分别计算出采用板式橡胶支座和铅芯橡胶支座后的非规则匝道桥最大地震动力响应值,结果如图 3 所示。从中看出,铅芯橡胶支座对匝道桥墩顶位移的影响不大,但可以充分减小各墩的墩底扭矩响应值。 且采用铅芯橡胶支座后,1#、4#墩的墩底剪力和弯矩响应值大幅下降:在地震动横向输入时,1#墩剪力与弯矩响应值分别下降了53%和54%,4#墩下降了28%和23%;纵向输入时,1#墩剪力与弯矩响应值分别下降了50%和54%,4#墩下降了29%和27%。

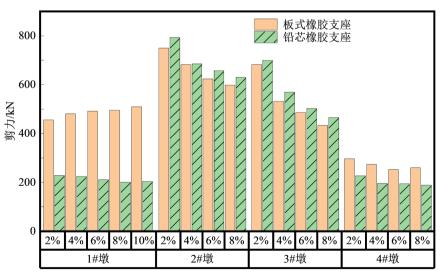
如果采用常规的板式橡胶支座,桥墩达到屈服状态后刚度会有显著下降,相应的结构抗力降低,内力响应增大幅度随位移增大而减小;而铅芯橡胶支座可以改善桥梁结构的相对刚度的分布情况,延缓结构进入屈服阶段,使桥墩的抗力可以在随着位移的增大而持续增大。这表明铅芯橡胶支座在非规则匝道桥中具有良好的减震效果。但采用铅芯橡胶支座后,由于固结墩的刚度相比于支座墩变大,2#墩和3#墩的墩底剪力与弯矩响应值有小幅增大,在选择铅芯橡胶支座对非规则匝道桥进行减隔震设计时,同联固结墩的抗震设计需考虑这一情况。

### 5. 几何参数影响分析

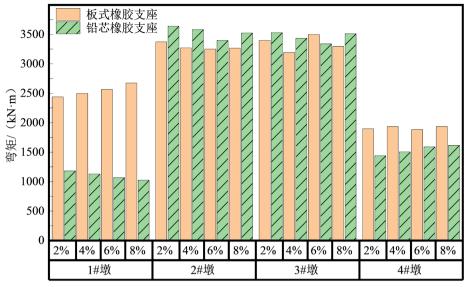
#### 5.1. 纵向坡度的影响

本文为研究匝道桥纵向坡度的改变对铅芯橡胶支座抗震性能的影响,通过按 1 至 4#墩由矮及高的顺序将原桥有限元模型的纵坡扩展为 2%、4%、6%和 8%。分别对采用板式橡胶支座和铅芯橡胶支座的匝道桥模型进行弹塑性时程分析,得到各桥墩的内力响应值。取横桥向各墩墩底剪力、弯矩响应值进行对比分析,具体如图 4 所示。从中可以看出采用铅芯橡胶支座的 1#墩和 4#墩在不同坡度下墩底内力响应值皆比板式橡胶支座低,体现了较好的减震性能。1#桥墩在 2%、4%、6%和 8%时剪力响应值减小幅度分别为 50%、53%、57%、59%,弯矩响应值减小幅度分别为 52%、55%、58%、62%。可明显看出:坡度越大,铅芯橡胶支座对 1#墩的减震幅度也越大。4#桥墩在 2%、4%、6%和 8%时剪力响应值减小幅度分别为 23%、28%、23%、27%,弯矩响应值减小幅度分别为 24%、22%、16%、17%,减震幅度明显低于高度相对较矮的 1#墩。

产生以上结果的主要原因是矮墩刚度较大,在地震作用下更容易发生脆性破坏,而铅芯橡胶支座的使用可以通过改善各桥墩的相对刚度分布情况,使矮墩的地震内力响应有明显的减小,这也导致固结墩(2#墩与3#墩)内力响应值要比采用板式橡胶支座的桥墩略高。



(a) 墩底剪力响应值



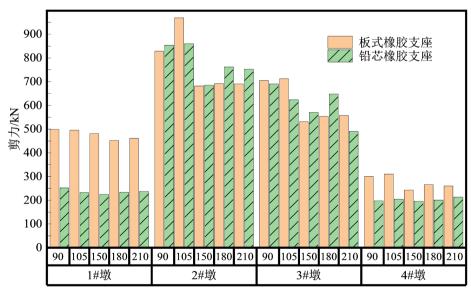
(b) 墩底弯矩响应值

Figure 4. Variation of maximum shear force and moment response at the pier bottom with longitudinal slope

图 4. 墩底最大剪力、弯矩响应值随纵向坡度变化情况

#### 5.2. 曲率半径的影响

将原桥有限元模型曲率半径扩展为 90 m、105 m、150 m、180 m、210 m,分别对采用板式橡胶支座和铅芯橡胶支座的匝道桥模型进行横桥向弹塑性时程分析,得到各桥墩的内力响应值,具体如图 5 所示。在曲率半径由 90 m增加至 150 m的过程中,采用铅芯橡胶支座后的 1#墩墩底剪力和弯矩响应值减小幅度皆约为 50%,几乎不随曲率半径的变化而变化;4#墩在曲率半径为 90 m、105 m、150 m、180 m、210 m 时墩底剪力响应值下降幅度分别为 34%、34%、19%、24%、18%,弯矩响应值下降幅度分别为 37%、38%、22%、23%、23%。



(a) 墩底剪力响应值

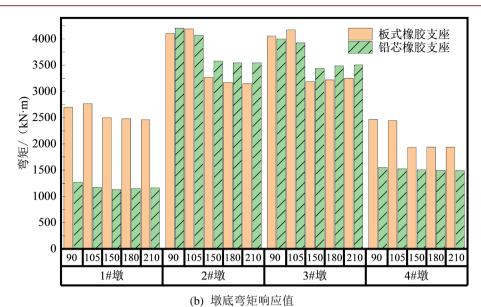


Figure 5. Variation of maximum shear force and moment response at the pier bottom with radius of curvature

图 5. 墩底最大剪力、弯矩响应值随曲率半径变化情况

曲率半径减小会导致匝道桥平面结构的不规则性的增强,使得桥梁结构抗震性能变差,但铅芯橡胶 支座的使用可以在一定程度上抵消匝道桥平面不规则性增加带来的不利影响。从以上分析中可以看出: 铅芯橡胶支座的减震效率总体上随着曲率半径的减小呈上升趋势,虽然变化幅度不大,但仍可认为对铅 芯橡胶支座的使用可以在一定程度上避免曲率半径减小对桥梁抗震性能产生的不良影响。对于采用固结 支承方式的2#、3#墩,随着曲率半径的增大,其减震效果越差,这表明铅芯橡胶支座在曲率半径较小的 非规则桥梁中效果更明显。

#### 6. 结论

本文通过弹塑性时程分析方法,研究了铅芯橡胶支座在非规则匝道桥中的抗震性能,并探讨了纵向 坡度和曲率半径对铅芯橡胶支座减震效果的影响,得出以下结论:

- 1) 在非规则匝道桥中,使用铅芯橡胶支座可以显著减小桥墩的地震动内力响应值,但对墩顶位移响 应值的影响较小。同一联中的固结墩相对刚度会因铅芯橡胶支座的使用而增加,使其内力地震响应值小 幅增大。
- 2) 采用铅芯橡胶支座后,匝道桥中矮墩的减震幅度随着纵向坡度的增大而增大,而高墩的减震幅度 随坡度的变化基本保持稳定。矮墩采用铅芯橡胶支座后的减震幅度明显大于高墩。
- 3) 曲率半径对非规则匝道桥中铅芯橡胶支座减震性能的影响较小,其减震幅度总体上随着曲率半径 的增大而小幅减小。铅芯橡胶支座在曲率半径较小的曲线桥梁中减震效果更明显。

#### 基金项目

国家自然科学基金(51978183)。

# 参考文献

[1] 殷建强, 周跃, 洪亮, 等. 基于能力需求比法的矮墩大跨度 PC 连续梁桥延性和减隔震设计评价[J]. 中外公路,

- 2021, 41(5): 181-186.
- [2] 姜焱培, 周晓敏. 不同人工地震波作用下铅芯橡胶支座桥梁减震性能分析[J]. 公路, 2019, 64(4): 155-159.
- [3] 刘新华, 李加武, 周琴, 等. 简支梁桥铅芯橡胶支座减震特性研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2014(3): 124-131.
- [4] 赵宇翔. 支座形式对简支梁桥地震反应的影响[J]. 震灾防御技术, 2018, 13(4): 903-910.
- [5] 刘智华, 韩之江, 王磊, 铅芯橡胶支座 PC 连续梁桥隔震性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(5): 18-23.
- [6] 李雪红,周鹤鸣,李晔暄,等.远场长周期地震动作用下减隔震连续梁桥的动力响应特性研究[J].自然灾害学报,2016,25(3):137-142.
- [7] 钟铁毅,杨风利,夏禾.基于能量法的铅芯橡胶支座隔震桥梁设计方法[J].中国铁道科学,2009,30(2):43-48.
- [8] 吴彬, 庄军生, 臧晓秋. 铅芯橡胶支座的非线性动态分析力学参数试验研究[J]. 工程力学, 2004, 21(5): 144-149.
- [9] 吴彬, 庄军生, 臧晓秋. 铅芯橡胶支座等效线性分析模型参数的研究[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(8): 65-68.
- [10] Wang, J. and Liu, J.X. (2012) The Study of the Design Parameter of Lead Rubber Bearing. Applied Mechanics and Materials, 184-185, 591-594. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.184-185.591
- [11] Tang, H., Wang, H., Zhou, B. and Chen, L.K. (2011) Study on Seismic Isolation of High-Speed Railway Bridge Fabricated Lead Rubber Bearings. *Applied Mechanics and Materials*, 80-81, 409-413. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.80-81.409
- [12] Peng, W., Tang, Z., Wang, D., et al. (2020) A Forensic Investigation of the Xiaoshan Ramp Bridge Collapse. Engineering Structures, 224, Article ID: 111203. <a href="https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111203">https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111203</a>
- [13] Hurff, J.B. and Kahn, L.F. (2012) Rollover Stability of Precast, Prestressed Concrete Bridge Girders with Flexible Bearings. *PCI Journal*, **57**, 96-107. <a href="https://doi.org/10.15554/pcij.09012012.96.107">https://doi.org/10.15554/pcij.09012012.96.107</a>
- [14] 魏金校. 曲线梁桥倾覆计算理论与现场事故调查研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- [15] 管仲国, 李建中. 城市高架桥合理抗震体系选择与经济性对比[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(3): 91-98.
- [16] 腾格, 张于晔. 强震下支座形式对曲线梁桥地震响应的影响[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(2): 101-107.