

温变间隙型摩擦摆支座响应行为分析

陶 海¹ 管仲国^{2,*}

(1.上海浦东建筑设计研究院有限公司,上海 200125; 2.同济大学,上海 200092)

摘 要 为了解决普通摩擦摆支座在正常运营阶段使结构产生附加内力的问题,工程界普遍采用温变间隙型摩擦摆支座,但理论计算时仍以普通摩擦摆支座的双线性本构模型来模拟,这与其实际力学行为不符。本文针对温变间隙型摩擦摆支座,分析其真实本构关系,提出了采用复合支座单元模拟其复杂地震行为的方法,得到了结构真实地震响应。基于一座典型三跨连续梁桥,对比分析了采用温变间隙型摩擦摆支座与采用常规摩擦摆支座的减隔震体系响应行为。结果显示:温变间隙型摩擦摆支座易导致更大的支座位移、偏低的支座剪力、显著增大的支座残余位移和轻微降低的墩底弯矩。在结构抗震理论计算时支座本构模型的选取应引起重视。

关键词 摩擦摆支座, 温变间隙, 本构关系, 复合支座单元, 减震行为

中图分类号: U448.28 文献标志码: A DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.202505.0002

Analysis of Response Behavior of Thermal Gap Type Friction Pendulum Bearing

TAO Hai¹ GUAN Zhongguo^{2,*}

(1.Shanghai Pudong Architectural Design&Research Institute CO.,Ltd, Shanghai 200125, China;

2.Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract To address the issue of additional internal forces induced in structures by conventional friction pendulum bearings during their service life, the engineering community has widely adopted thermal gap-type friction pendulum bearings. However, theoretical calculations still rely on the bilinear constitutive model of conventional bearings for simulation, which does not accurately reflect the actual mechanical behavior of the thermal gap type. This study analyzes the true constitutive relationship of thermal gap-type friction pendulum bearings and proposes a method to simulate their complex seismic response using composite bearing elements, thereby obtaining a more realistic structural seismic response. Based on a typical three-span continuous girder bridge, a comparative analysis is performed on the seismic isolation performance of systems equipped with thermal gap-type versus conventional friction pendulum bearings. Results indicate that the thermal gap-type bearings tend to induce larger displacements and lower shear forces in the bearing itself, along with significantly increased residual displacements and a slight reduction in pier bottom bending moments. Attention should therefore be paid to the selection of appropriate bearing constitutive models in the seismic theoretical analysis of structures.

Keywords friction pendulum bearing, thermal gap, constitutive relationship, combined bearing unit, shock absorption behavior

收稿日期: 2025-05-23

作者简介: 陶 海,男,高级工程师,主要研究方向为桥梁设计与研究。E-mail:45518132@qq.com

* 联系作者: 管仲国,男,教授,博士生导师,主要研究方向为桥梁抗震。E-mail:guanzhongguo@tongji.edu.cn

0 引言

摩擦摆支座是结构抗震上广泛应用的一种减隔震支座,它是一种球面稳定平衡体系与滑动摩擦支座相结合的减隔震装置,利用球面形成上部结构的摆式运动,实现结构自重势能和动能的相互转换,进而为结构提供柔性支承和回复力,同时利用滑动摩擦增加阻尼耗能能力^[1]。

然而,这种球面支承构造也会导致在温度等正常运营荷载作用下,主梁发生一定幅度的摆式运动,即在水平位移的同时也会产生一定的竖向变位^[2-4]。通常情况下这种竖向变位的幅值较小,对结构正常运营条件下的受力状况影响可忽略。但一些对竖向变位非常敏感的桥,如高速铁路桥梁,或运营状态下温变水平位移较大的多跨长联桥,这种附加竖向位移引起的结构附加内力影响不容忽视^[5-8]。为此,具有温变间隙的摩擦摆支座(图1)应运而生。这种支座是在球面摩擦摆支座的基础上,增加一个具有一定位移活动间隙的平面摩擦层,进而使温度等正常运营荷载作用下的水平位移由平面摩擦层承担,不再产生附加的竖向变位,从而改善了正常运营条件下的力学性能。当地震来临时,剪力销剪断,球面才进入减隔震工作状态。为降低运营荷载作用下的支座磨损,新增的平面摩擦层通常采用较小的摩擦系数^[9]。

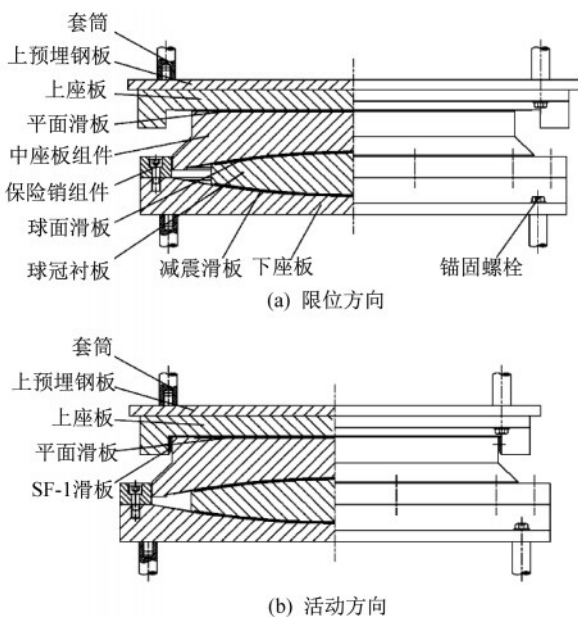


图1 温变间隙型摩擦摆支座构造图^[9]

Fig.1 Construction diagram of thermal gap type friction pendulum bearing^[9]

常规摩擦摆支座的力学行为可以采用双线性本构模型进行模拟^[10-14],而这种具有温变间隙的摩擦摆支座,其力学行为显然更加复杂,然而现行行业规范《桥梁减隔震装置通用技术条件》(JT/T 1062—2025)对这种支座的本构关系仍采用双线性模型^[9],这种理论计算与实际力学行为的不一致性可能导致结构抗震设计结果产生一定的偏差,进而使实际结构抗震处于偏不安全的状况。

本研究针对这种温变间隙型摩擦摆支座,设计了一种复合本构模型进行模拟,使理论分析更符合结构实际力学行为。

1 温变间隙型摩擦摆支座的力学行为与模拟方法

1.1 温变间隙型摩擦摆支座力学行为

如前所述,常规摩擦摆支座适用双线性本构模型,而温变间隙型摩擦摆支座增加的水平摩擦面实际上可由带双向限位间隙的库仑平面摩擦模型来模拟,因此整个支座的真实本构关系可以由这两个本构模型按串联关系来模拟,如图2所示。平面摩擦模拟平面摩擦层的行为,只拉不压和只压不拉单元模拟两个方向的限位装置,右边的双线性本构模拟球型摩擦摆部分。

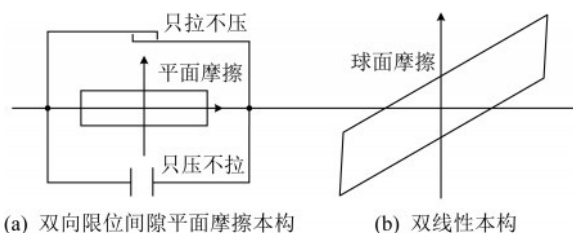


图2 温变间隙型摩擦摆支座力学模型

Fig.2 Mechanical model of thermal gap type friction pendulum bearing

图3为一个恒载压力为10 000 kN,等效回转半径为3 m,球面摩擦系数为0.05,平面摩擦系数为0.02,温变间隙为±0.06 m的温变间隙型摩擦摆支座的滞回本构,其中首圈的滞回环与第二圈及以后的滞回环略有不同,这主要是平面摩擦层和球面摩擦层初始位置均为零点的缘故,此后滞回中则不会同时达到位移零点的状态。对比起见,图中还绘制了不包含温变间隙平面摩擦构造的同参数常规摩擦摆支座滞回本构,可见两者存在显著差异,温变间隙型摩擦摆支座的滞回本构更

为复杂。

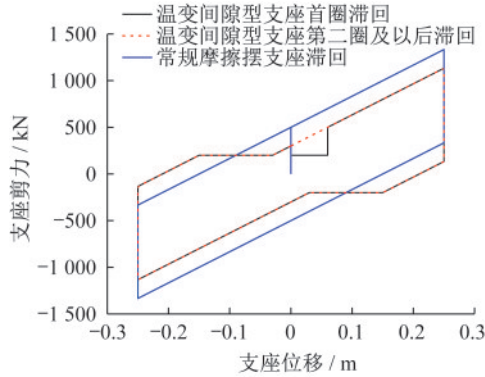


图3 温变间隙型摩擦摆支座滞回本构

Fig.3 Hysteresis constitutive model of thermal gap type friction pendulum bearing

1.2 温变间隙型摩擦摆支座模拟方法

鉴于温变间隙型摩擦摆支座这种复杂的本构关系,并没有合适的支座连接可以直接进行模拟,为此采用多个非线性单元按照其串、并联关系组成复合支座单元进行模拟^[15-20]。如图4所示,四个非线性单元分别为具有初始间隙的只压不拉的GAP单元、具有初始间隙的只拉不压的HOOK单元、模拟平面摩擦特性的库仑摩擦单元和模拟常规摩擦摆式支座的双线性模型单元,其中前三者并联,再与第四个单元串联。四个单元在各自6自由度上的约束关系见表1。

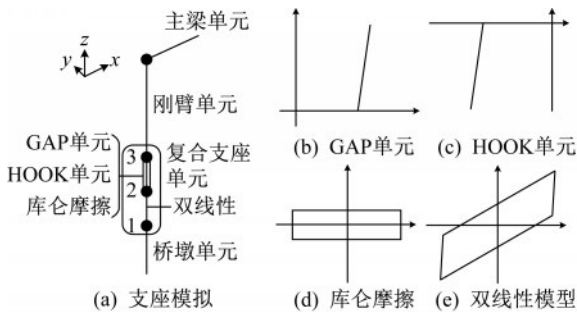


图4 温变间隙型摩擦摆支座模拟方法

Fig.4 Simulation method for thermal gap type friction pendulum bearing

2 温变间隙型摩擦摆支座响应行为

2.1 结构概况与建模

以某高速公路跨河段连续梁桥为研究对象,主跨跨径布置为45 m+80 m+45 m,主梁为箱形断面,中墩支点恒载反力为25 500 kN,边墩支点恒

表1 温变间隙型摩擦摆支座模拟方法

Table 1 Simulation method for thermal gap type friction pendulum bearing

单元	xx	yy	zz	Rx	Ry	Rz
GAP	GAP	GAP	自由	自由	自由	自由
HOOK	HOOK	HOOK	自由	自由	自由	自由
库仑摩擦	库仑摩擦	库仑摩擦	固定	固定*	自由	自由
双线性	双线性	双线性	固定	固定	固定	固定

注: x, y, z 分别表示纵桥向、横桥向、竖向。“*”是当墩顶横桥向进行支座合并时,采用的固定约束。

载反力为4 600 kN,桥墩为矩形截面空心墩,墩高19.5~26.6 m,钻孔灌注桩群桩基础,桩径为1.5 m,桩长48 m,主墩桩数为12根,边墩桩数为6根。主桥左、右侧分别接3×30 m和2×30 m简支变连续T梁桥。

基于SAP 2000平台建立结构有限元分析模型,其中上部结构和桥墩均按弹性梁柱单元模拟,主梁的二期恒载模拟为分布质量,承台模拟为质点^[21]。桩-土相互作用采用6×6弹簧矩阵进行模拟,弹簧系数采用m法进行计算^[22]。减隔震支座仅设置在中墩上,边墩处采用滑动钢支座,中墩温变间隙型减隔震支座采用2.2节中的模拟方法,其中温变间隙取±0.1 m,温变间隙内平面摩擦的摩擦系数取0.02,球面摩擦系数取0.05,等效支座半径取3 m。为便于对比,还分析了常规摩擦摆减隔震支座体系,其中常规摩擦摆支座采用双线性模型模拟,球面摩擦系数取0.05,等效支座半径取3 m。左右引桥作为主桥的边界联,全桥结构有限元模型如图5所示。

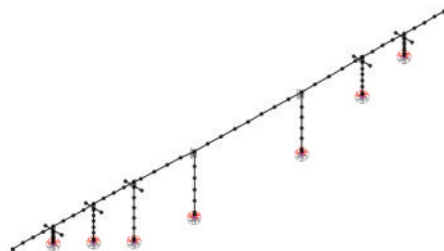


图5 桥梁结构有限元模型

Fig.5 Finite element model of bridge structure

2.2 地震动输入

桥址场地设防烈度为7度,设计地震峰值加速度为0.18g,罕遇地震峰值加速度为0.3g,III类场地,特征周期为0.65 s。依据目标反应谱,选取12条强震记录,各条波所对应的反应谱以及12条

波的平均谱和目标谱的对比如图6所示。可以看出,12条波与目标谱具有较好的匹配性。表2所示为12条强震记录的基本信息。

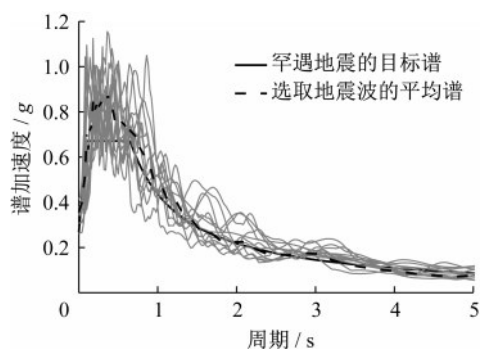


图6 地震波反应谱与目标谱对比

Fig.6 Comparison between seismic wave response spectrum and target spectrum

2.3 结构响应行为分析

图7所示为RSN1499地震波作用下的温变间隙型摩擦摆减隔震支座各部分位移响应时程曲线。可以看出,温变间隙层的位移全程均控制在 $[-0.1\text{ m}, 0.1\text{ m}]$ 区间内,当复合支座位移达到峰值位移时,温变间隙层和球面摩擦层均达到同相位移峰值响应。此外,温变间隙层与复合支座位移响应在波动形态上更加趋同,特别是当复合支座总位移较小、保持在 $[-0.1\text{ m}, 0.1\text{ m}]$ 区间内时,球面摩擦层的随动趋势很弱,甚至完全不动。这主要是由于温变间隙层的摩擦系数显著低于球面摩擦层摩擦系数,因此在地震响应较弱时主导支座

需求。同时这一现象也说明温变间隙型摩擦摆支座更多是通过温变间隙层的响应来适应地震下的支座变形需要,结果可能导致支座耗能效应的减弱。

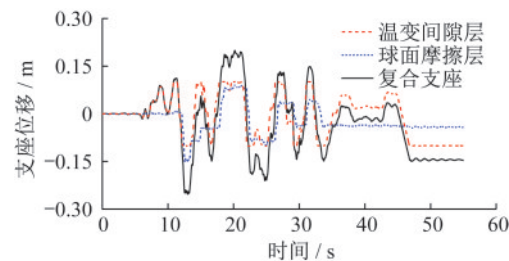


图7 温变间隙型摩擦摆减隔震支座位移响应(RSN1499)

Fig.7 Displacement response of thermal gap type friction pendulum seismic isolation bearings

图8所示为温变间隙型摩擦摆支座各组合单元的滞回曲线,可以看出各单元均可按预期方式进行工作。图9所示为采用温变间隙型摩擦摆支座和常规摩擦摆支座两种减隔震体系的支座滞回性能对比。首先,可以看出温变间隙型摩擦摆减隔震支座可以获得预期的支座滞回性能,这表明采用的复合支座单元模式可以较好地模拟温变间隙型摩擦摆减隔震支座的真实力学行为。其次,相比常规摩擦摆减隔震支座体系,温变间隙型摩擦摆支座的位移响应更大,但支座剪力响应基本相当或者略小,最大滞回环的面积也基本相当。

图10所示为全部12条地震波作用下采用温变间隙型摩擦摆支座与采用常规摩擦摆支座的减隔震体系支座最大位移响应对比。可以看出,大多数情况下,温变间隙型摩擦摆支座的位移响应

表2

地震波基本信息

Table 2

Basic information of seismic waves

RSN	地震	时间	台站	原峰值加速度 PGA/g
6	Imperial Valley-02	1940年	El Centro Array #9	0.215
169	Imperial Valley-06	1979年	Delta	0.238
316	Westmorland	1981年	Parachute Test Site	0.155
1177	Kocaeli, Turkey	1999年	Zeytinburnu	0.108
1214	Chi-Chi, Taiwan, China	1999年	CHY057	0.039
1214	Chi-Chi, Taiwan, China	1999年	CHY057	0.056
1245	Chi-Chi, Taiwan, China	1999年	CHY102	0.05
1493	Chi-Chi, Taiwan, China	1999年	TCU053	0.223
1499	Chi-Chi, Taiwan, China	1999年	TCU060	0.201
1518	Chi-Chi, Taiwan, China	1999年	TCU085	0.054
1546	Chi-Chi, Taiwan, China	1999年	TCU122	0.261
1597	Chi-Chi, Taiwan, China	1999年	WSF	0.073

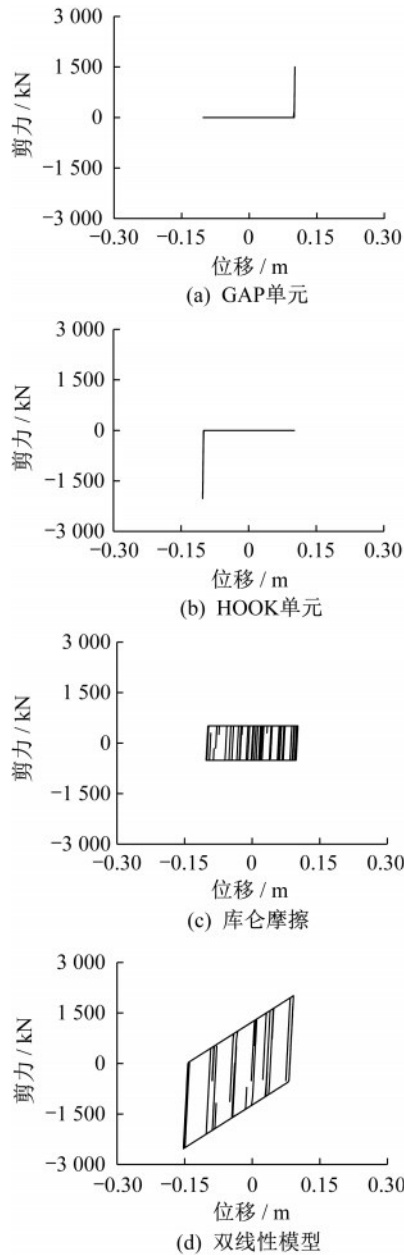


图8 复合支座各组成单元滞回曲线

Fig.8 Hysteresis performance of each component unit of composite bearing

要大于常规摩擦摆支座。12条地震波作用下采用温变间隙型摩擦摆支座的平均支座位移为0.248 m,而采用常规摩擦摆支座的平均支座位移为0.199 m,前者高出后者约25%。图11所示为全部12条地震波作用下采用温变间隙型摩擦摆支座与采用常规摩擦摆支座的减隔震体系支座最大剪力响应对比。可以看出,大多数情况下,温变间隙型摩擦摆支座的剪力响应要小于常规摩擦摆支座。12条地震波作用下采用温变间隙型摩擦摆支座的平均支座剪力为2 472 kN,而采用常规

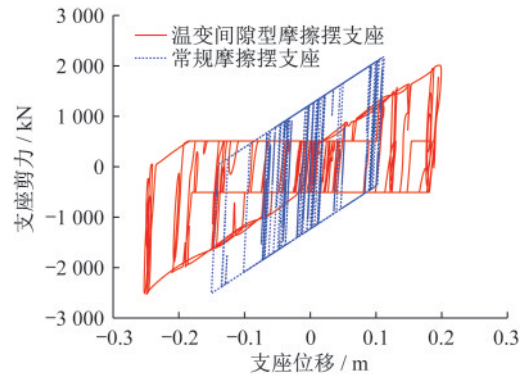


图9 温变间隙型与常规摩擦摆减隔震支座滞回性能对比

Fig.9 Comparison of hysteresis performance between thermal gap type and conventional friction pendulum seismic isolation bearings

摩擦摆支座的平均支座剪力为2 924 kN,前者低于后者约15%。由此可见,温变间隙型摩擦摆支座易导致更大的支座位移响应和偏低的支座剪力响应。究其原因,是由于温变间隙型摩擦摆支座特殊的滞回性能导致其需要更大的位移历程才能达到相近回复力和耗能。

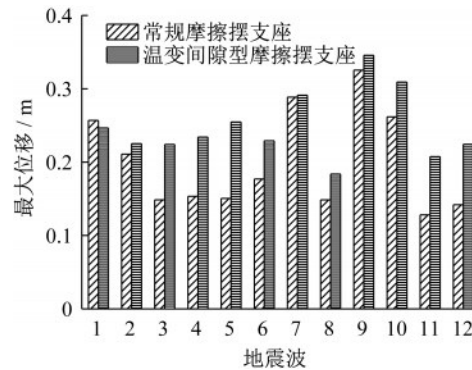


图10 支座最大位移响应对比

Fig.10 Comparison of maximum displacement responses of bearings

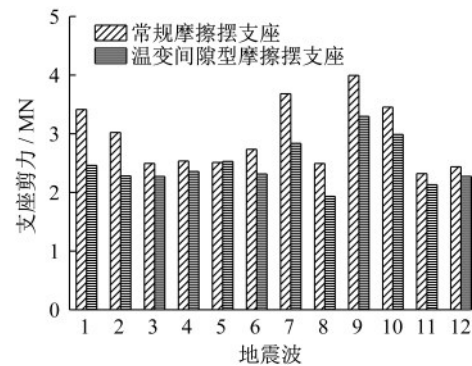


图11 支座最大剪力响应对比

Fig.11 Comparison of maximum shear responses of bearings

图12所示为全部12条地震波作用下采用温变间隙型摩擦摆支座与采用常规摩擦摆支座的减隔震体系支座残余位移对比。可以看出,绝大多数情况下,温变间隙型摩擦摆支座的残余位移大于常规摩擦摆支座。12条地震波作用下采用温变间隙型摩擦摆支座的平均支座残余位移为0.057 m,而采用常规摩擦摆支座的平均支座位移为0.021 m,前者高出后者约171%。由此可见,温变间隙型摩擦摆支座易导致更大的支座残余位移响应,这将对结构的韧性性能产生不利影响^[23-24]。

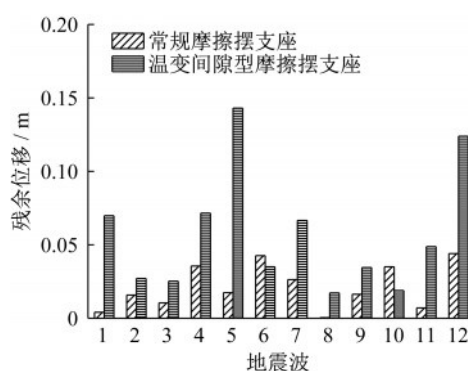


图12 支座残余位移对比

Fig.12 Comparison of residual displacement of bearings

图13所示为全部12条地震波作用下采用温变间隙型摩擦摆支座与采用常规摩擦摆支座的减隔震体系墩底弯矩对比。可以看出,两种体系的墩底弯矩响应基本相当,12条地震波作用下采用温变间隙型摩擦摆支座的平均墩底弯矩为78.5 MN·m,而采用常规摩擦摆支座的平均墩底弯矩为86.1 MN·m,前者比后者低约10%。由此可见,温变间隙型摩擦摆支座在一定程度上有利于降低墩底弯矩,但降幅并不显著^[25]。

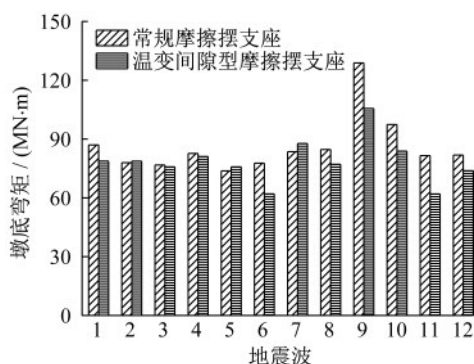


图13 支座最大墩底弯矩响应对比

Fig.13 Comparison of maximum pier bottom bending moment response of bearings

3 结 语

(1) 指出了温变间隙型摩擦摆支座目前采用的双线性本构模型进行抗震分析计算时,未考虑平面摩擦层的构造的受力行为,与支座实际力学行为不符。

(2) 针对温变间隙型摩擦摆支座,根据其实际构造特点分析其真实本构关系,提出采用复合支座单元的方法模拟其复杂的行为关系。

(3) 基于一座典型三跨连续梁桥,采用上述本构模型进行计算,对比分析了采用温变间隙型摩擦摆支座与采用常规摩擦摆支座的减隔震体系响应行为,指出温变间隙型摩擦摆支座易导致更大的支座最大位移、偏低的支座剪力、显著增大的支座残余位移和轻微降低的墩底弯矩。

(4) 工程实际应用中做地震理论分析计算时,对于温变间隙型摩擦摆支座本构关系的模拟,简单采用双线性模型会导致减隔震位移结果比实际偏小,使结构抗震处于不安全状态,应引起重视。

参 考 文 献

- [1] PRIESTLEY M J N, SEIBLE F, CALVI G M. Seismic design and retrofit of bridges [M]. New York: Wiley-Interscience, 1996.
- [2] 刘淦彬. 基于摩擦摆式减隔震支座的矮墩连续梁桥抗震设计[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(22): 72-74. LIU Ganbin. Seismic design of low pier continuous beam bridge based on friction pendulum seismic isolation bearings [J]. Transportation Technology and Management, 2024, 5(22): 72-74. (in Chinese)
- [3] 吴建翔, 刘海澄. 摩擦摆支座在大跨度预应力混凝土梁桥中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2025(3): 293-297. WU Jianxiang, LIU Haicheng. Application of friction pendulum bearings in large span prestressed concrete beam bridges [J]. Urban Road and Bridge and Flood Control, 2025(3): 293-297. (in Chinese)
- [4] 黄华. 高烈度震区桥梁减隔震设计分析[J]. 城市道桥与防洪, 2023(9): 153-157, 19-20. HUANG Hua. Analysis of seismic isolation design for bridges in high-intensity earthquake zones [J]. Urban Road and Bridge and Flood Control, 2023(9): 153-157, 19-20. (in Chinese)
- [5] 李侠. 近断层高烈度地震区铁路简支梁桥减隔震方

- 案研究[J].铁道标准设计,2023,67(6):93-98.
- LI Xia. Research on seismic reduction and isolation schemes for railway simply supported beam bridges in high intensity earthquake zones near the fault zone[J]. Railway Standard Design, 2023, 67 (6) : 93-98. (in Chinese)
- [6] 魏标,刘义伟,蒋丽忠,等.地震作用下双曲面球型减隔震支座在铁路简支梁桥中的动力行为[J].土木工程学报,2019,52(6):110-118.
- WEI Biao, LIU Yiwei, JIANG Lizhong, et al. Dynamic behavior of hyperbolic spherical seismic isolation bearings in railway simply supported beam bridges under earthquake action [J]. Journal of Civil Engineering, 2019, 52(6) : 110-118. (in Chinese)
- [7] HE W K, JIANG L Z, WEI B, et al. Influence of pier height on the effectiveness of seismic isolation of friction pendulum bearing for single-track railway bridges [J]. Smart Structures and Systems, 2021, 28 (2) : 213-228.
- [8] LI H Y, YU Z W, MAO J F, et al. Effect of seismic isolation on random seismic response of High-Speed railway bridge based on probability density evolution method[J]. Structures, 2021, 29: 1032-1046.
- [9] 中华人民共和国交通运输部.桥梁减隔震装置通用技术条件:JT/T 1062—2025[S].北京:人民交通出版社,2013.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. General technical specifications for bridge seismic isolation JT/T 2231-01—2025 [S]. Beijing: China Communications Press, 2013. (in Chinese)
- [10] GUO W, DU Q D, HUANG Z, et al. An improved equivalent energy-based design procedure for seismic isolation system of simply supported bridge in China's high-speed railway [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 134: 106161.
- [11] JIANG L Z, ZHONG B F, ZHOU W B, et al. Simplified linear analysis model of longitudinal constraint effect of high-speed railway simply-supported bridge under frequent earthquake [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2024, 22(4): 1827-1853.
- [12] 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁抗震设计规范:JT/T 2231-01—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for seismic design of highway bridges: JT/T 2231-01—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)
- [13] WEI B, TAN H, JIANG L Z, et al. Shaking table test of the seismic performance for railway simply-supported girder bridge isolated by self-centering bearing [J]. Engineering Structures, 2024, 300: 117249.
- [14] 刘太全,孙振华.基于摩擦摆支座的连续梁桥抗震性能提升研究[J].国防交通工程与技术,2024,22(4):51-56.
- LIU Taiquan, SUN Zhenhua. Research on seismic performance improvement of continuous beam bridges based on friction pendulum bearings [J]. National Defense Transportation Engineering and Technology, 2024, 22(4) : 51-56. (in Chinese)
- [15] 尚继英,娄东旭,韩建平,等.铁基形状记忆合金-变摩擦复摆隔震连续梁桥地震反应分析[J].振动与冲击,2025,44(1):262-271.
- SHANG Jiyong, LOU Dongxu, HAN Jianping, et al. Seismic response analysis of iron-based shape memory alloy variable friction pendulum isolation continuous beam bridge [J]. Vibration and Impact, 2025, 44 (1) : 262-271. (in Chinese)
- [16] 刘彦辉,姚嘉栋,郑文智,等.形状记忆合金摩擦摆隔震连续梁桥性能提升分析[J].东南大学学报(自然科学版),2024,54(6):1365-1376.
- LIU Yanhui, YAO Jiadong, ZHENG Wenzhi, et al. Performance improvement analysis of shape memory alloy friction pendulum isolation continuous beam bridge [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2024, 54 (6) : 1365-1376. (in Chinese)
- [17] 刘海亮,王昭儒,徐源庆,等.分级减震球形支座设计及其减隔震性能研究[J].公路,2025,70(2):191-198.
- LIU Hailiang, WANG Zhaoru, XU Yuanqing, et al. Design of graded seismic spherical bearings and study on their seismic isolation performance [J]. Highway, 2025, 70(2) : 191-198. (in Chinese)
- [18] 郭德鑫,张纪刚,宋罕宇,等.带双U型阻尼器摩擦摆支座力学性能研究[J].青岛理工大学学报,2025,46(1):16-25.
- GUO Dexin, ZHANG Jigang, SONG Hanyu, et al. Research on the mechanical properties of friction pendulum bearings with dual U-shaped dampers [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2025, 46 (1) : 16-25. (in Chinese)
- [19] 项敬辉,王媛媛,李海冬.变曲率摩擦支座摆隔震技术的理论研究与试验分析[J].天津建设科技,2024,34(5):23-25,42.
- XIANG Jinghui, WANG Yuanyuan, LI Haidong. Theoretical research and experimental analysis of

- variable curvature friction bearing swing isolation technology [J]. *Tianjin Construction Science and Technology*, 2024, 34(5): 23-25, 42. (in Chinese)
- [20] 易磊, 王冰, 易成, 等. 高烈度地震区铁路连续梁桥摩擦摆支座和黏滞阻尼器减隔震方案研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2021, 45(6): 1173-1178.
- YI Lei, WANG Bing, YI Cheng, et al. Research on Friction Swing Bearings and Viscous Dampers for Seismic Reduction and Isolation of Railway Continuous Beam Bridges in High Intensity Earthquake Zones [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition)*, 2021, 45(6): 1173-1178. (in Chinese)
- [21] XIA X S, WU S W, WEI X H, 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.
- [22] GUO W, WANG Y, ZHAI Z P, et al. Seismic control of high-speed railway bridge using S-shaped steel damping friction bearing [J]. *Smart Structures and Systems*, 2022, 30(5): 479-500.
- [23] 寇峥, 李宁. 基于NSGA-II的城市桥梁系统震后可恢复性分析与优化[J]. *工程力学*, 2021, 38(3): 148-158, 180.
- KOU Zheng, LI Ning. Post earthquake recoverability analysis and optimization of urban bridge systems based on NSGA-II [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(3): 148-158, 180. (in Chinese)
- [24] 周颖, 吴浩, 顾安琪. 地震工程: 从抗震、减隔震到可恢复性[J]. *工程力学*, 2019, 36(6): 1-12.
- ZHOU Ying, WU Hao, GU Anqi. Earthquake Engineering: From Seismic Resistance, Seismic Isolation to Resilience [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(6): 1-12. (in Chinese)
- [25] 聂利英, 潘子坚, 邵云澜, 等. 悬臂施工连续梁桥摩擦摆支座减隔震特征研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2025, 49(1): 95-101.
- NIE Liying, PAN Zijian, SHAO Yunlan, et al. Research on the seismic isolation characteristics of friction pendulum bearings for cantilever construction continuous beam bridges [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition)*, 2025, 49(1): 95-101. (in Chinese)