

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.03.024

# 基于 SMA-LRB 筒支梁桥动力响应及减震能力分析

肖长进

(福州左海控股集团有限公司,福建福州 350000)

**摘要:**针对筒支梁桥传统减震支座存在残余变形大和自恢复能力不足的缺陷问题,本文利用新型高性能形状记忆合金(Shape Memory Alloys, SMA)材料和铅芯橡胶支座(LRB)的强耗能和自恢复性能,构造 SMA-LRB 复合型减震支座来提高筒支梁桥的减震能力。采用双线性等效模型的方法对复合支座参数进行优化,建立 SMA-LRB 复合支座的五跨筒支梁桥有限元模型,依据设计反应谱从 PEER 中选择 10 条地震波作为有限元模型中的地震作用,进行非线性动力时程求解,并以盆式橡胶支座和 LRB 支座作为参照,对比分析 SMA-LRB 复合支座对筒支梁桥的减震效果。研究表明:新型复合支座可使墩底剪力降低 25.8%、墩顶位移减少 34.6%、支座位移缩减 87.8%、梁端位移下降 62%,同时墩底弯矩降幅达 3.9%,展现出显著的协同耗能与位移控制能力。该复合支座通过 SMA 的超弹性与 LRB 的滞回耗能耦合作用,有效兼顾了桥梁结构的内力削减与位移控制需求。

**关键词:**筒支梁桥;形状记忆合金(SMA);铅芯橡胶支座(LRB);复合减震支座;非线性动力时程分析

中图分类号:U44

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2025)03-0172-09

## Analysis of Dynamic Response and Shock Absorption Capacity of Simply Supported Girder Bridge Based on SMA-LRB

XIAO Changjin

(Fuzhou Zuohai Holding Group Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350000, China)

**Abstract:** Simply supported girder bridges are prone to excessive displacement and structural damage under earthquakes, and the traditional seismic bearings have the defects of large residual deformation and insufficient self-recovery ability. In order to improve the damping performance of simply supported girder bridges, the SMA-LRB composite damping bearings were constructed by using the strong energy dissipation and self-recovery performance of the new high-performance Shape Memory Alloys (SMA) materials and the lead core rubber bearings (LRB) to improve the damping capacity of simply supported girder bridges. Firstly, the parameters of the composite support were optimized by the method of bilinear equivalent model, and then the finite element model of the five-span simply supported girder bridge with SMA-LRB composite support was established based on the SAP2000 software, and then 10 seismic waves were selected from PEER as the seismic action in the finite element model according to the design response spectrum, and the nonlinear dynamic time history was solved, and finally the damping effect of the SMA-LRB composite bearing on the simply supported bridge was compared and analyzed by taking the basin rubber bearing and the LRB bearing as reference. The results show that the new composite bearing can reduce the shear force at the pier bottom by 25.8%, the displacement at the pier top by 34.6%, the displacement of the support by 87.8%, the displacement at the beam end by 62%, and the bending moment at the pier bottom by 3.9%, showing significant synergistic energy dissipation and displacement control capabilities. Through the coupling effect of the superelasticity of SMA and the hysteretic energy dissipation of LRB, the composite bearing effectively takes into account the internal force reduction and displacement control requirements of the bridge structure.

**Keywords:** simply supported beam bridge; shape memory alloy (SMA); lead core rubber bearing (LRB); composite shock-absorbing bearings; nonlinear dynamic time history analysis

收稿日期:2024-10-30

修稿日期:2025-02-27

基金项目:国家自然科学基金(52178169)

作者简介:肖长进(1983—),男,高级工程师,主要从事桥梁结构研究工作。E-mail: 80914565@qq.com

中国是世界上地震灾害频发且严重的国家之一<sup>[1]</sup>。近年来,西部地区由于复杂多样的地形地貌和活动断裂发育,中、强地震发生频率高,导致大量公路和铁路桥梁损伤严重,甚至破坏。如2008年汶川地震( $M = 8.0$ )导致庙子坪大桥受到严重破坏<sup>[2-5]</sup>;2010年青海玉树地震( $M = 7.0$ )中桥梁发生落梁、支承破坏、桥墩损伤等震害<sup>[6-9]</sup>;2014年四川芦山地震( $M = 7.1$ )中天泉思经桥塌方,桥梁各部位不同程度受损<sup>[10]</sup>;2021年青海玛多地震( $M = 7.4$ )使野马滩1、2号桥破坏,主要表现为落梁,桥墩不同程度损伤<sup>[11-14]</sup>;2022年青海门源地震( $M = 6.9$ )促使中国第一座高速铁路桥梁-硫磺沟大桥发生严重损伤和梁体扭转,导致兰新高铁运营中断<sup>[13-17]</sup>。地震中这些桥梁的支座都受到不同程度的破坏,四川泸定地震中铅芯橡胶支座破坏<sup>[18]</sup>,支座在桥梁上部 and 下部结构之间有着重要传力作用,减震支座对降低桥梁地震响应和控制桥梁结构破坏具有重要意义。

常见的减震支座有摩擦摆支座、板式橡胶支座和铅芯橡胶支座等。研究人员对不同的减震支座进行了大量研究,如杨孟刚等<sup>[19]</sup>分析了不同摩擦系数的摩擦摆支座对墩底剪力的减震效果。李伟等<sup>[20]</sup>对三维摩擦摆支座的竖向隔震性能进行研究,研究发现3D-FPB可以降低网壳的竖向地震作用及悬挑端竖向加速度,减小对竖向荷载敏感的网壳构件的应力水平,并使相邻支座之间的竖向作用力分布更加均匀;当考虑支座不均匀抬升效应后,上部网壳的竖向地震作用及悬挑端竖向加速度增大;网壳构件在加载过程中始终保持弹性,在承载能力方面有充足安全储备。朱秀云等<sup>[21]</sup>利用组合式碟形弹簧支座(CDSB)具有可根据其承载力和刚度需求灵活调整的优点,与铅芯叠层橡胶支座串联组成4种不同竖向刚度的三维组合式隔震支座(3D-CIB),研究不同竖向刚度的3D-CIB对其三维隔震效果的影响。结果表明,与非隔震结构相比,3D-CIB能够有效地减小水平和竖向的楼层反应谱和加速度响应;3D-CIB的水平向隔震效果受竖向刚度的影响较小,3D-CIB的竖向刚度越小,其竖向隔震效果越好,但同时会相应增大反应堆厂房的水平向和竖向位移响应,其中包括摆动效应。李悦等<sup>[22]</sup>提出可用双线性弹塑性分析模型,模拟了板式橡胶支座在地震过程中的摩擦滑移,分析其减震性能。李超等<sup>[23]</sup>研究了铅芯橡胶支座对连续梁拱组合结构拱肋控制截面的减震效果,发现其能有效降低主拱肋内力响应和位

移响应。刘志华等<sup>[24]</sup>通过振动台试验研究发现,铅芯橡胶支座能够有效减小地震对桥梁的损害。李超等<sup>[25]</sup>对比分析了摩擦摆支座和铅芯橡胶支座的减震性能,发现铅芯橡胶支座位移限制能力和大震耗能更好,且屈服前刚度越大、屈服强度和屈服后刚度越小,耗能能力越强。石岩等<sup>[26-27]</sup>通过研究发现,铅芯虽然提高了支座的水平剪切刚度和耗能能力,但也减小了支座本身的稳定性和恢复能力,使其在实际应用中表现出变形能力不足、残余位移过大的缺点;发现在地震作用下,铅芯橡胶支座的往复变形会导致温度上升,支座的耗能能力、特征强度和刚度下降。铅芯橡胶支座是桥梁工程中的常用支座,虽然具有优越的减震能力,但存在恢复力不足,耗能能力会受温度影响等不足。为弥补这些不足,有学者提出将SMA与铅芯橡胶支座(LRB)结合,构造具有自恢复能力的复合支座(SMA-LRB),充分发挥两种构件的力学性能,增强支座的减震效果,提升桥梁结构的抗震性能。

SMA-LRB是一种新型复合减震支座,具有耗能能力强和自恢复能力强的优点,既能满足地震中结构的耗能,又能提高桥梁结构的自恢复能力。如李忠献等<sup>[28]</sup>对形状记忆合金复合橡胶支座隔震桥梁的抗震性能进行了深入研究,并分析了在地震作用下,复合支座的复位和耗能性能。Hedayati等<sup>[29]</sup>对记忆合金的天然橡胶减震支座(SMA-LNR)进行了力学性能研究,结果显示其性能稳定并具有良好的耗能能力。邱灿星等<sup>[30]</sup>提出了由预应力松弛的形状记忆合金棒和铅芯橡胶支座组成的一种新型装置,经研究发现该装置具有较好的自复位、限位和耗能能力。杨洁<sup>[31]</sup>通过研究发现SMA复合型支座能够减小桥墩、主梁等相对位移,提高支座在地震后的自复位能力,有效减少桥梁受震损伤。

本文基于SAP2000软件建立有SMA-LRB复合支座的五跨简支梁桥非线性有限元模型,并采用双线性等效模型对复合支座本构关系进行参数化;基于谱一致特性,从PEER选择10条地震动作为地震动输入;采用非线性动力时程分析方法,系统研究复合支座的减震性能,并以盆式橡胶支座和LRB支座作为参照,对比分析SMA-LRB复合支座对简支桥梁的减震效果。该研究可提高简支梁桥在地震作用下的安全性,为减震支座提供参考。

## 1 工程背景及三维有限元模型

本文以某五跨简支箱梁桥为研究对象,桥梁单

跨径为 32.6 m, 采用单箱单室钢筋混凝土等高箱梁为主梁, 宽度为 12.6 m, 高度为 3.035 m, C50 混凝土。伸缩缝间隙为 0.1 m。桥墩为圆端型实体钢筋混凝土墩, 墩高 14 m, 桥墩编号从左至右依次为 1#、2#、3#和 4#。两侧桥台编号为 0#和 5#。桥梁原设计支座为 PZ5500 型盆式橡胶支座。为了分析 SMA-LRB 复合支座的减震效果, 选用 LRB 和原设计 PZ5500 型盆式橡胶减震支座作为对照, 具体如图 1 所示。

有限元模型采用框架单元模拟主梁, 二期恒载采用质量单元施加到主梁上, 考虑其惯性效应。桥墩采用框架单元模拟, 约束混凝土本构采用 Mander 本构, 钢筋采用双折线本构。强震作用下桥墩进入塑性状态, 采用纤维铰模拟墩体塑性行为。桥台采用线性弹簧单元模拟, 其刚度参考规范取  $4 \text{ kN/m}^{[32]}$ 。桥梁原设计支座采用盆式支座, 型号为 PZ5500 型, 盆式橡胶支座分为纵向活动支座(ZX)、

横向活动支座(HX)、多向活动支座(DX)和固定支座(D)。活动支座的力学模型可视为理想的弹塑性模型, 采用 Plastic(Wen)非线性单元模拟。铅芯橡胶支座的构造细节如下: 支座铅芯直径为 160 mm, 铅芯高度为 200 mm, 铅芯个数为 4 个, 单层橡胶厚度为 5 mm, 钢板厚度为 2 mm, 支座高度为 240 mm, 支座直径为 1 000 mm, 初始刚度为  $162.4 \text{ kN/mm}$ , 屈服刚度为  $25 \text{ kN/mm}$  和屈服荷载为  $612 \text{ kN}$ 。有限元模型如图 2 所示。

为简化模型, 本文参考 Hedayati 等<sup>[33]</sup> 建议的 SMA-LRB 双线性等效模型, 将模型的力学性能参数进行简化。简化结果如图 3 所示。以 OA 段的刚度为初始刚度, 初始刚度  $K_1 = 182.79 \text{ kN/mm}$ , AB 段的屈服后刚度  $K_2 = 28.12 \text{ kN/mm}$ , A 点的屈服力  $F_y = 611.96 \text{ kN}$ , AB 段的屈服后刚度与 OA 段的初始刚度的比值  $r = 0.154$ 。

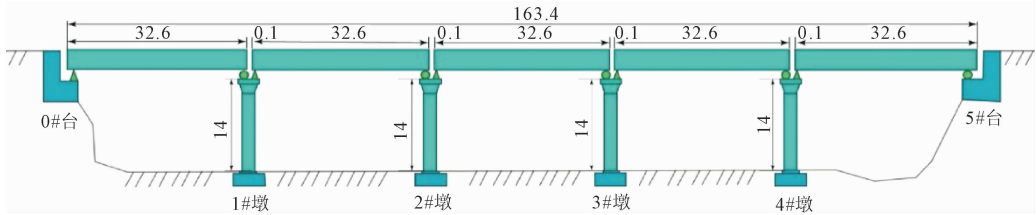


图 1 某五跨简支箱梁桥(单位:m)

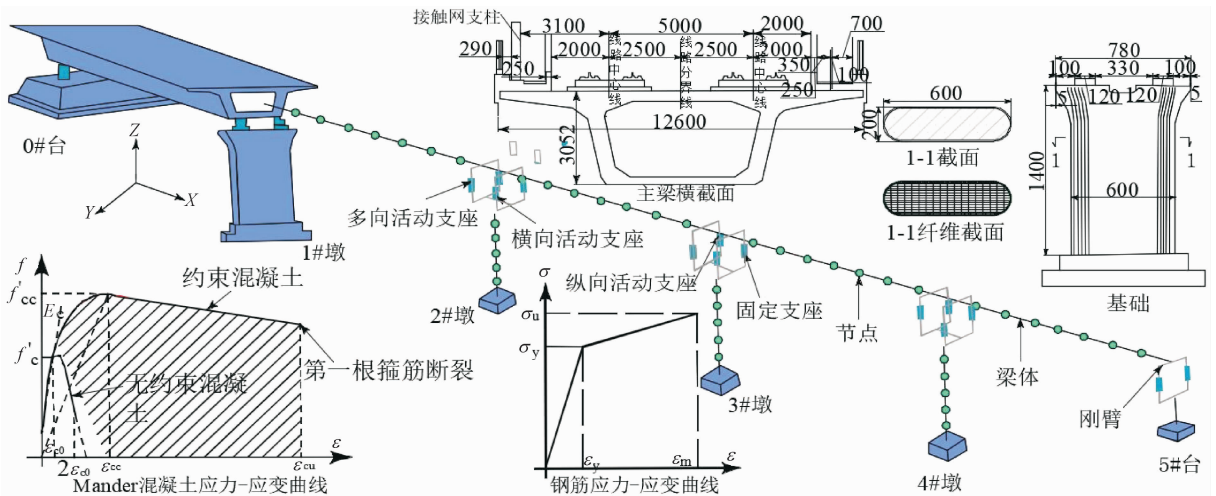


图 2 某五跨简支箱梁桥有限元模型(单位:mm)

## 2 地震动输入

基于设计加速度反应谱, 从美国太平洋地震工程研究中心 (PEER) 数据库选取 10 条地震波作为地震动输入。地震波满足我国规范规定的 II 类场地

条件(对应美国“NEHRP”报告中的 C 类场地), 剪切波速在  $260 \text{ m/s} \sim 510 \text{ m/s}$  之间, 震级为  $6.0 \sim 8.0$ , 断层距在  $20 \text{ km} \sim 100 \text{ km}$  之间, 峰值地震动强度在  $0.1g \sim 1.0g$  之间, 地震波频率在  $0.05 \text{ Hz} \sim 0.5 \text{ Hz}$  之间, 简支箱梁桥的基频在  $1.2 \text{ Hz}$  左右, 所选地

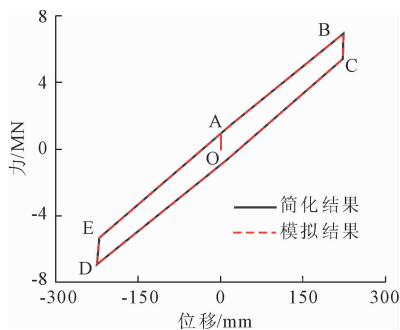


图3 SMA-LRB 等效参数模拟图

震波频率普遍低于结构基频,地震波具体信息见表1。相应地震动的加速度和速度时程曲线如图4所示,由图4可知,所选地震波速度时程中无明显高幅

值脉冲现象。将所选地震动进行傅里叶变换得到反应谱,并与设计反应谱进行对比,所选地震动谱特性与设计反应谱基本一致,如图5所示。

该桥属于小跨径桥梁,不考虑地震动空间效应,故本文采用一致激励地震输入法进行非线性动力时程求解,从而获得结构动力响应时程。桥梁所在场地为II类场地,抗震设防烈度为VIII度,根据规范<sup>[34]</sup>,在II类场地,烈度为VIII度时,水平地震设计加速度为 $0.2g$ ,罕遇水平地震加速度为 $0.38g$ ,因此,所选地震波均统一调幅至 $0.38g$ 。为便于对比分析,根据不同类型支座将模型分为三类,M1(盆式橡胶支座),M2(LRB 支座)和M3(SMA-LRB 复合支座),工况设置如表2所示。

表1 地震波选取信息

地震编号	地震名称	地震震级	台站分量	断层距	PGA /g	PGV /( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	PGV/PGA	PGD /cm	场地类型
1	ImperialValley-06	6.53	Delta	22.03	0.701	47.411	0.068	42.706	C
2	Northridge-01	6.69	LA-F	25.66	0.639	37.643	0.059	7.722	C
3	KernCounty	7.36	TLS	38.89	0.596	44.635	0.075	11.652	C
4	Chi-Chi	6.30	TCU141	45.72	0.691	33.439	0.048	11.411	C
5	Trinidad	7.20	RDOWG	76.26	0.657	30.227	0.046	5.176	C
6	Chi-Chi	7.62	TCU042	26.31	0.695	100.693	0.145	38.533	C
7	Chi-Chi	7.62	CHY087	28.79	0.624	35.746	0.057	9.904	C
8	Chi-Chi	6.30	CHY029	41.36	0.619	65.158	0.105	28.345	C
9	Chi-Chi	6.30	CHY036	46.19	0.677	64.350	0.095	26.772	C
10	Chi-Chi	7.62	TAP032	93.15	0.636	67.966	0.107	17.763	C

注:表中 TLS 为 Taft Lincoln School 台站名称的缩写, RDOWG 为 Rio Dell Overpass W Ground 台站名称的缩写。

表2 工况设置

工况编号	模型编号	支座类型	输入方向
C1	M1	盆式橡胶支座	纵桥向 BHDW
C2	M2	LRB 支座	纵桥向
C3	M3	SMA-LRB 复合支座	纵桥向

### 3 动力响应分析

为了排除其他方向地震激励影响,本文仅考虑纵向地震激励下支座性能。系统考察了不同支座下桥梁结构纵向内力和位移响应,如:桥墩顶部位移、梁端位移、支座位移和桥墩底内力。以盆式橡胶支座和 LRB 作为参照,分析 SMA-LRB 复合支座降低桥梁地震响应程度和减震能力提升效果。

#### 3.1 内力响应

墩底内力是判断桥梁破坏重要依据,表3和表4列出了地震动作用下 M1、M2 和 M3 中 1#桥墩—4#桥墩墩底纵向剪力和纵向弯矩的响应均值。从表

3可知,M1墩底纵向剪力比M2和M3的剪力大,而M3的剪力比M2的小。以1#墩为例,M1的墩底纵向剪力为4056.2kN,在相同情况下M2的墩底纵向剪力为3021.1kN,与M1相比减少量为1035.1kN,墩底纵向剪力响应减少25.5%,M3模型中1#墩墩底纵向剪力为3011.6kN,与M1相比缩减量为1044.6kN,墩底纵向剪力减少25.8%。由表4可知,M1的1#墩和4#墩墩底纵向弯矩比M2和M3的响应大,2#墩和3#墩的响应结果与1#墩和4#墩相反。以1#墩为例,M1的墩底纵向弯矩为36694.3kN,在相同情况下M2的1#墩墩底纵向弯矩为35270.2kN,与M1相比减少量为1424.1kN,墩底纵向弯矩响应减少3.9%,M3的1#墩墩底纵向弯矩为35931.4kN,与M1相比减少量为762.9kN,墩底纵向弯矩响应减少2.1%。其余墩也可得出类似结论。因此,从墩底内力响应角度判断,SMA-LRB具有较好减震效果。

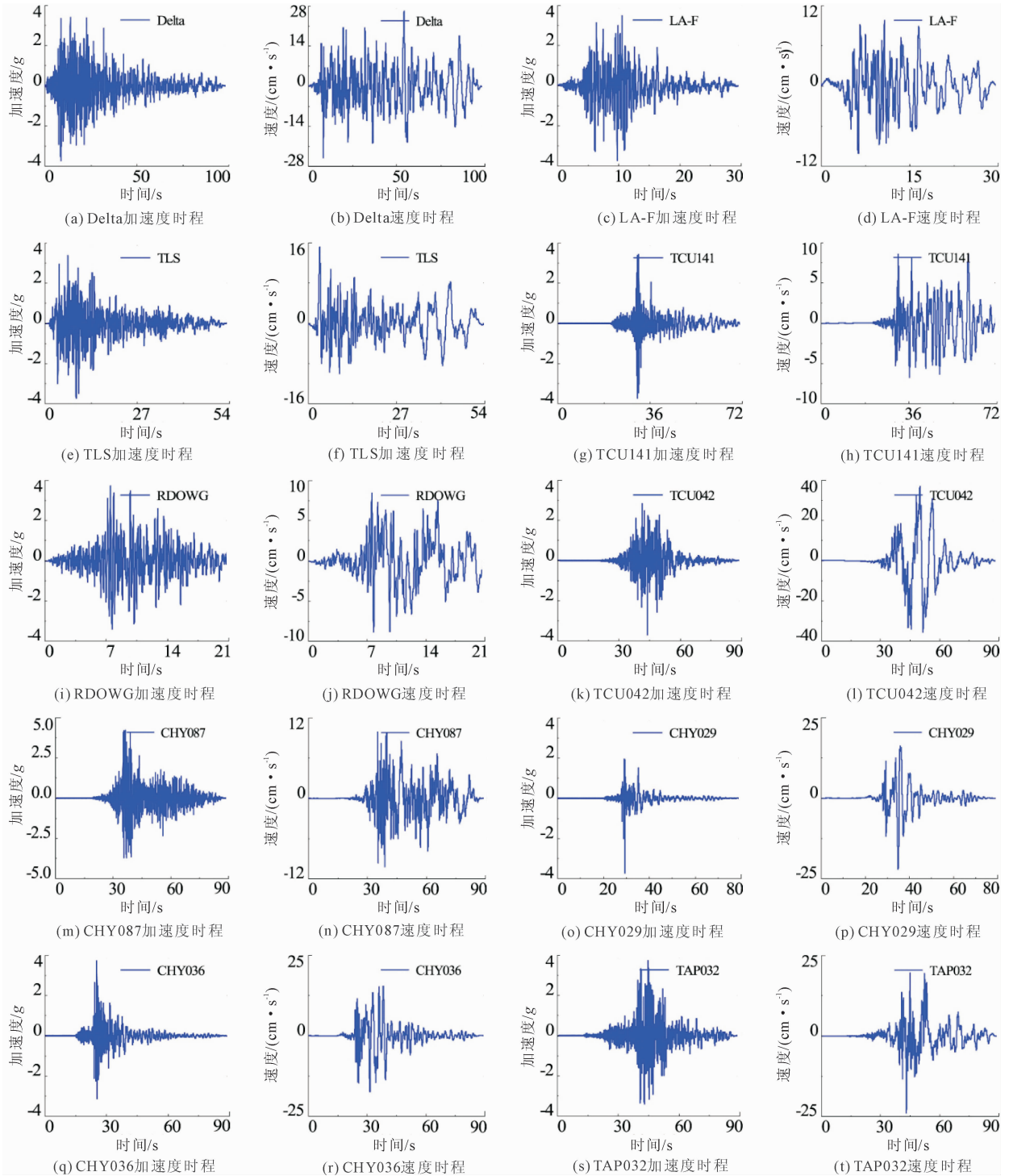


图 4 加速度及速度时程

表 3 墩底部纵向剪力

单位:kN

模型编号	桥墩编号			
	1#墩	2#墩	3#墩	4#墩
M1	4056.2	3863.6	3367.3	3408.7
M2	3021.1	3279.2	3299.5	2917.7
M3	3011.6	3265.5	3315.0	2895.5

表 4 墩底纵向弯矩

单位:kN·m

模型编号	桥墩编号			
	1#墩	2#墩	3#墩	4#墩
M1	36694.3	37510.2	36980.7	36471.3
M2	35270.2	41108.8	41413.8	36407.5
M3	35931.4	40666.9	41203.4	36423.7

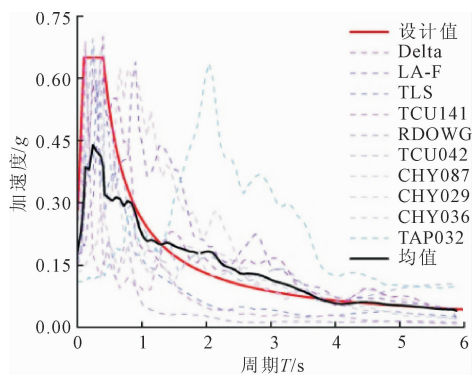


图 5 加速度反应谱

### 3.2 位移响应

由表 5 可知, M1 各墩顶纵向位移响应均值比 M2 和 M3 的墩顶纵向位移响应均值大, M2 与 M3 的墩顶纵向位移则较为接近。以 1#桥墩为例, M1 的墩顶纵向位移为 0.116 m, M2 的墩顶纵向位移为 0.077 m, 比 M1 的墩顶纵向位移减少 33.4%, M3 的墩顶纵向位移为 0.076 m, 比 M1 的墩顶纵向位移减少 34.6%。由此说明 M3 中的 SMA-LRB 能有效控制位移响应, 防止落梁。表 6 为 5#台端的梁端纵向位移响应。从表 6 可知, M1 模型中梁端纵向位移比 M2 和 M3 梁端纵向位移大, M2 与 M3 梁端纵向位移较为接近。由于地震动具有离散性, 故不同地震动作用下安装 LRB 支座和 SMA-LRB 复合支座桥梁的梁端位移有差异。

表 5 墩顶部位移均值 单位:m

模型编号	桥墩编号			
	1#墩	2#墩	3#墩	4#墩
M1	0.116	0.115	0.112	0.114
M2	0.077	0.110	0.111	0.077
M3	0.076	0.109	0.110	0.075

表 6 梁端位移响应 单位:m

地震编号	M1	M2	M3	M1 均值	M2 均值	M3 均值
1	0.068	0.045	0.044	0.099	0.071	0.069
2	0.057	0.031	0.031	0.099	0.071	0.069
3	0.059	0.048	0.048	0.099	0.071	0.069
4	0.014	0.005	0.005	0.099	0.071	0.069
5	0.109	0.072	0.068	0.099	0.071	0.069
6	0.163	0.095	0.091	0.099	0.071	0.069
7	0.057	0.102	0.101	0.099	0.071	0.069
8	0.098	0.062	0.060	0.099	0.071	0.069
9	0.117	0.089	0.089	0.099	0.071	0.069
10	0.243	0.162	0.149	0.099	0.071	0.069

从表 7 可知, M3 模型的支座位移小于 M2 和 M1 的支座位移。以 2 号支座为例, M2 和 M3 支座位移相比 M1 的支座位移分别减少 31.7% 和 76.9%, M3 的减震效果优于 M2。M3 中的 SMA 材料具有耗能和自恢复作用, 能有效控制支座位移响应。

表 7 支座位移响应及比较

模型编号	各支座位移/m			
	1 号	2 号	3 号	4 号
M1	0.599	0.591	0.587	0.577
M2	0.367	0.403	0.393	0.328
M3	0.113	0.137	0.126	0.070
(M2 - M1) / M1	38.8%	31.7%	33.0%	43.1%
(M3 - M1) / M1	81.1%	76.9%	78.6%	87.8%

## 4 减震能力分析

### 4.1 内力减震能力

从图 6 可知, 针对墩底剪力减震能力, 多数情况下 M2 和 M3 模型没有显著差异。但是部分地震波作用下, M2 和 M3 模型中墩底剪力响应都可能增大, 如图 7 所示。这可能是因为地震波具有离散性, 不同的地震波虽然峰值相同, 但是频谱特性有一定差异, 从而造成结构响应结果的不同。由表 4 分析可知, 与 M1 相比, M2 和 M3 中 1#和 4#墩的墩底纵向弯矩响应有一定程度的减小, 而 2#和 3#墩底弯矩响应规律相反, 即减震支座稍微增加了部分桥墩弯矩响应, 这一现象在图 8 中也有所体现。虽然减震支座可能在某种情况下增加结构的弯矩响应, 但是其增加量相对较小。总之, M3 可能不会比 M2 能更有效地减少墩底剪力响应, 甚至可能会增加部分墩底弯矩响应。但从降低结构内力响应角度来看, SMA-LRB 复合支座 (M3) 仍然提供了更好的减震效果。SMA-LRB 复合支座没有引入过多额外弯矩增加量, 减震能力是三种支座中最优的。SMA-LRB 复合支座减震效果优于单纯的 LRB 支座 (M2), 能够提高桥梁在地震作用下的整体抗震性能。

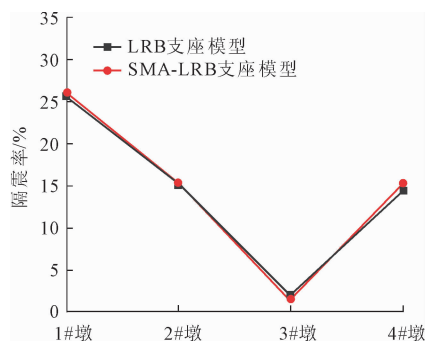


图 6 剪力隔震率

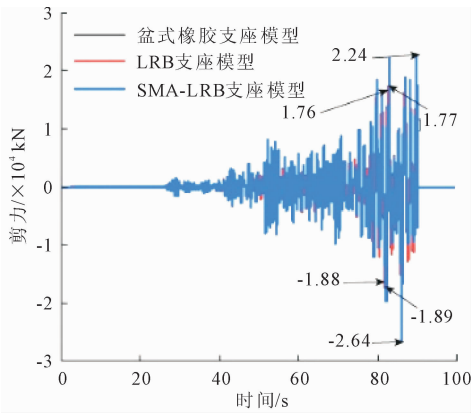


图 7 1#墩底剪力时程曲线

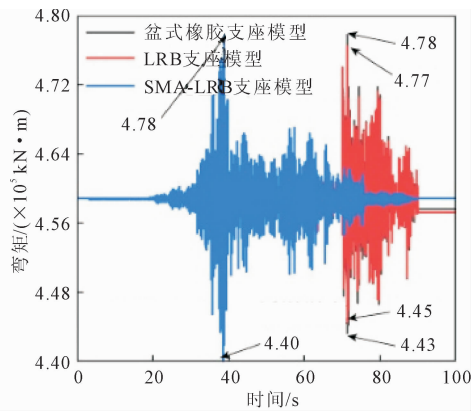


图 8 3#墩底弯矩时程曲线

### 4.2 位移减震能力

墩顶位移和梁端位移如图 9、图 10 所示,从图 9 可知,M3 控制墩顶位移响应有显著效果,位移值明显小于 M2,M1 模型控制位移能力最差。这一结果表明 SMA-LRB 复合支座能更有效地控制桥梁结构的位移响应。从图 10 中可得出类似结论,即:SMA-LRB 复合支座、LRB 和盆式支座控制墩顶位移能力依次为: M3 > M2 > M1。

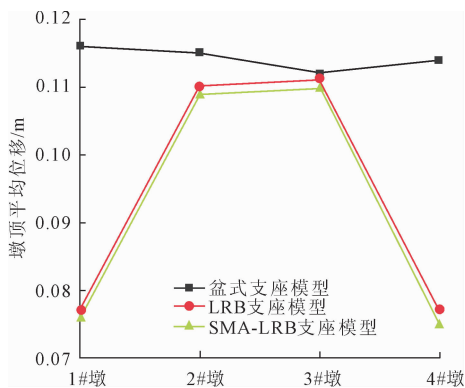


图 9 墩顶纵向位移响应

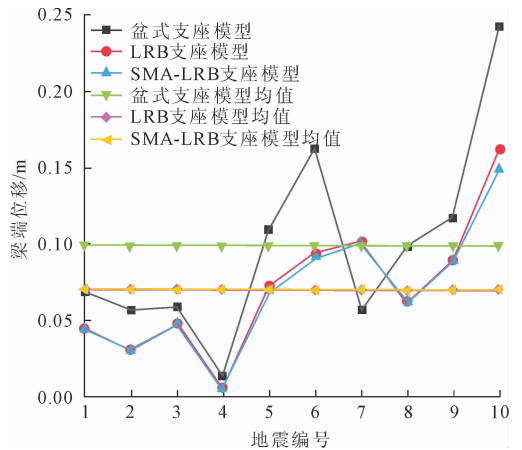
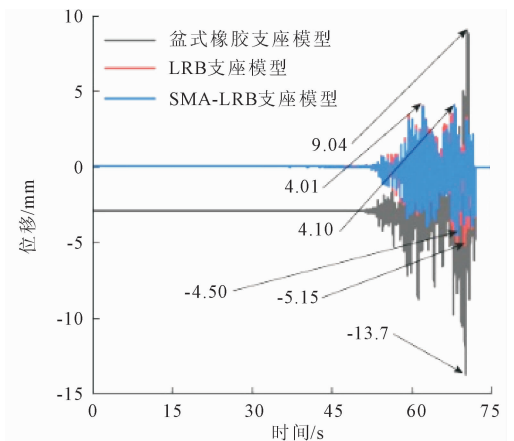
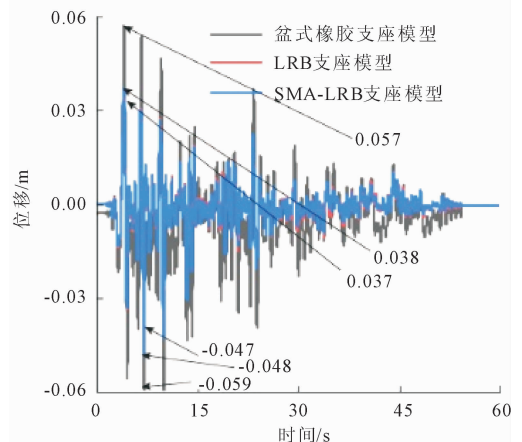


图 10 梁端位移响应

梁端位移时程线如图 11 所示,从图 11 可见,M3 模型的梁端位移显著减少,能有效减小梁体之间的碰撞。SMA-LRB 复合支座(M3)具备更优的耗能和自恢复能力,虽然 SMA-LRB 复合支座与 LRB 支座(M2)在控制桥梁结构位移上的效果差异不大,但



(a) 4号地震动下梁端位移时程



(b) 3号地震动下梁端位移时程

图 11 梁端位移时程曲线

考虑到支座位移控制(见表7),SMA-LRB 支座具有更好的耗能能力和自恢复能力。这意味着在地震作用下,SMA-LRB 支座能够更有效地吸收,从而减少桥梁结构的损害。因此,相较于单纯的 LRB 支座,SMA-LRB 支座在减震效果上更胜一筹,对于增强桥梁的抗震性能有着显著提升。

## 5 结 论

本文以某五跨简支梁桥为研究对象,基于 SAP2000 软件建立有 SMA-LRB 复合支座的简支梁桥三维有限元模型,研究了远场地震动作用下不同类型支座下桥梁结构非线性时程分析,最终对 SMA-LRB 复合支座的减隔震能力进行评估。主要结论如下:

(1) SMA-LRB 复合支座利用 SMA 材料优异的超弹性和恢复力特性,相比于单独使用 LRB 支座,SMA-LRB 复合支座能够有效降低桥梁的内力和位移响应,相关减震率为 25.8% (墩底剪力)、3.9% (墩底弯矩)、34.6% (墩顶位移)、87.8% (支座位移)和 62% (梁端位移)。

(2) SMA-LRB 复合支座具有较好的减震作用,简支梁桥安装 SMA-LRB 复合支座能够有效减少地震对桥梁的损害,提高桥梁结构的耐震性能。

(3) 地震动具有随机性,地震波幅值、频谱和结构自身动力特性共同影响结构地震响应,任意单条地震波作用下结构响应的差异为正常现象,但总体而言,SMA-LRB 复合支座、LRB 和盆式支座减震能力依次为:  $M_3 > M_2 > M_1$ 。

## 参考文献:

- [1] 贾宏宇,吴炜昌,游刚,等.强震下大跨度连续梁桥损伤分析[J].西南交通大学学报,2023,58(6):1423-1431.
- [2] 杨万理,李乔,赵灿晖,等.庙子坪大桥主桥破坏机理分析及抗震设计对策[C]//第六届全国防震减灾工程学术研讨会暨第二届海峡两岸地震工程青年学者研讨会.2012:14-15.
- [3] 夏志华.庙子坪岷江大桥地震反应分析[J].铁道建筑,2005,45(3):4-5.
- [4] 黄显彬,杨虹,恩文海,等.都汶高速公路庙子坪岷江特大桥震后5号主墩加固技术[J].建筑技术,2010,41(2):136-139.
- [5] 董磊,王东升,王荣霞.汶川地震庙子坪特大桥主桥箱梁开裂震害分析[J].世界地震工程,2020,36(3):161-171.
- [6] 陈凯,杨立峰,蔡玉亮.玉树地震桥梁震害维修及加固措施[J].青海大学学报(自然科学版),2012,30(3):85-89.
- [7] 丁子林,姚新强,李雅静,等.基于 EfficientNet 对地震受灾建筑物破坏评估[J].自然灾害学报,2023,32(2):26-31.
- [8] 刘明辉,李江,沙成宁,等.基于小波分析对形变扰动信号的触发检测方法[J].大地测量与地球动力学,2023,43(12):1229-1234.
- [9] 刘金龙,林均岐,刘如山,等.芦山“4·20”地震公路交通系统震害调查分析[J].自然灾害学报,2013,22(3):18-23.
- [10] 梅泽洪,李小军,陈红娟,等.青海玛多 M7.4 地震中桥梁地震破坏现象分析[J].地球与行星物理理论评,2022,53(1):107-111.
- [11] 王龙,李小军,杨理臣,等.青海玛多 7.4 级地震震发震断裂特性及工程震害成因分析研究[J].应用基础与工程科学学报,2023,31,(5):1219-1228.
- [12] 刘善军,纪美仪,宋丽美,等.基于改进两步差法的玛多  $M_s 7.4$  地震微波异常研究[J].地震学报,2023,45(2):328-340.
- [13] 刘也,任叶飞,王大任,等.2022 年青海门源地震引起的兰新高铁硫磺沟大桥地表同震位移研究[J].中国铁道科学,2022,43(5):42-50.
- [14] 黄勇,何静,尹明超,等.2022 年青海门源地震中香卡特大桥震害机理分析[J].自然灾害学报,2023,32(1):13-21.
- [15] 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.
- [16] 曾锐,蒋亚楠,燕翱翔,等.InSAR 约束的青海门源  $M_w 6.7$  级地震同震断层滑动反演与三维形变场模拟[J].地质科技通报,2024,43(6):212-225.
- [17] 胡朝忠,杨攀新,李智敏,等.2016 年 1 月 21 日青海门源 6.4 级地震的发震机制探讨[J].地球物理学报,2016,59(5):1637-1646.
- [18] 陶思宇,曲哲.2022 年泸定地震某隔震建筑铅芯橡胶支座位移反应分析[J].建筑钢结构进展,2023,25(1):29-37.
- [19] 王传坤,杨孟刚.基于摩擦摆支座的连续梁桥减隔震研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(3):564-572.
- [20] 李伟,甄伟,张奠华,等.设置三维摩擦摆支座的北京工人体育场单层网壳罩棚竖向隔震性能研究[J].建筑结构学报,2023,44(4):23-31.
- [21] 朱秀云,李建波,潘蓉,等.三维基底隔震反应堆厂房的隔震效果研究[J].原子能科学技术,2023,57(2):438-448.
- [22] 李悦,李冲,李茜,等.桥梁板式橡胶支座剪切

- 破坏及摩擦滑移性能试验研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(8):130-137.
- [23] 李超, 甘耀威, 秦世强. 铅芯橡胶支座对梁拱组合结构的减震效果研究[J]. 中山大学学报, 2021, 60(3):138-146.
- [24] 刘志华, 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.
- [25] 李超, 牟江亭, 张宇, 等. 高速公路多联连续梁桥隔震研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(4):682-690.
- [26] 石岩, 王东升, 韩建平, 等. 桥梁减隔震技术的应用现状与发展趋势[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(5):118-128.
- [27] 石岩, 王浩浩, 秦洪果, 等. 近断层地震动下公路桥梁铅芯橡胶支座变形发热及性能退化效应研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(23):96-106.
- [28] 陈海全, 李忠献, 刘东民. 基于 SMA 复合橡胶支座的桥梁隔震[J]. 天津大学学报, 2006(S1):198-202.
- [29] Dezfuli, Farshad Hedayati, Alam M. Shahria. seismic vulnerability assessment of a steel-girder highway bridge equipped with different SMA wire-based smart elastomeric isolators[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(7): .
- [30] 邱灿星, 吴诚静, 杜修力. 设置间隙式 SMA 隔震支座的钢筋混凝土框架结构抗震性能分析[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(12):1226-1237.
- [31] 杨洁. SMA 绞线复合支座的设计及其桥梁隔震效果分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012.
- [32] 新建时速 300 ~ 350 公里客运专线铁路暂行规定[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [33] Dezfuli, Farshad, Hedayati, et al. Smart lead rubber bearings equipped with ferrous shape memory alloy wires for seismically isolating highway bridges[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2018, 22(6-7):1042-1067.
- [34] 铁路工程抗震设计规范: GB 50111—2006[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.

(上接第 142 页)

- [15] Hassanpour N, Hosseinzadeh Dalir A, Farsadizadeh D, et al. An experimental study of hydraulic jump in a gradually expanding rectangular stilling basin with roughened bed[J]. Water, 2017, 9(12):945.
- [16] Torkamanzad N, Hosseinzadeh Dalir A, Salmasi F, et al. Hydraulic jump below abrupt asymmetric expanding stilling basin on rough bed[J]. Water, 2019, 11(9):1756.
- [17] Pagliara S, Lotti I, Palermo M. Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structures[J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2008, 2(1):29-38.
- [18] Eshkou Z, Dehghani A A, Ahmadi A. Forced hydraulic jump in a diverging stilling basin using angled baffle blocks[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2018, 144(8):06018004.
- [19] Omid M H, Esmaeeli Varaki M, Narayanan R. Gradually expanding hydraulic jump in atrapezoidal channel[J]. Journal of Hydraulic Research, 2007, 45(4):512-518.
- [20] 杜振康, 尹进步, 朱光明, 等. 不同扩散角下单侧渐扩消力池水力特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(2):144-151.
- [21] 罗永钦. 突跌渐扩消力池体型优化及水力特性分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(2):61-66.
- [22] 李民康, 等. 某水库除险加固工程新建泄洪闸 1:50 水工模型试验研究[R]. 武汉: 长江水利委员会长江科学院, 2024.
- [23] 程勇, 王文娥, 胡明宇, 等. 30°分水角明渠水流紊动特性试验研究[J]. 水科学进展, 2022, 33(4):638-647.