

The Fifth International Bridge Seismic Workshop (5IBSW)

Hunan University, Changsha, China, June 5-7, 2026

与减隔震系统研究

Research on the damage mechanism and seismic isolation
system of high-speed railway simply supported bridge under
near-fault earthquake

汇报人：朱志辉 周高扬

中南大学 土木工程学院



中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

汇报提纲

一、研究背景及现状

Research background and current situation

二、近断层地震高速铁路桥梁损伤机理

Damage mechanism of high-speed railway bridge under near-fault earthquake

三、功能分离式双目标减隔震系统设计方法

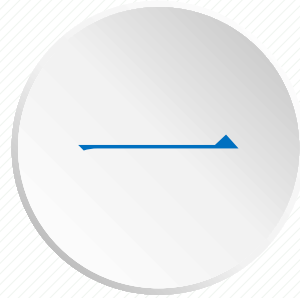
Design method of functional separation dual-objective seismic isolation system

四、近断层脉冲地震下系统抗震性能验证

Seismic performance verification of the system under near-fault pulse earthquake

五、结论

Conclusion



PART 01

研究背景及现状

Research background and current situation

1.1 研究背景

■ 我国铁路建设快速发展，截至 2025 年底，我国高铁里程超 5 万公里，铁路里程达 16.5 万公里

■ 我国地震活动频度高、分布广，高速铁路线不可避免的临近甚至跨越活动断层

■ 近断层地震强度大、破坏性强，蕴含速度脉冲、滑冲效应等，将对高铁



我国近五年地震发生位置分布

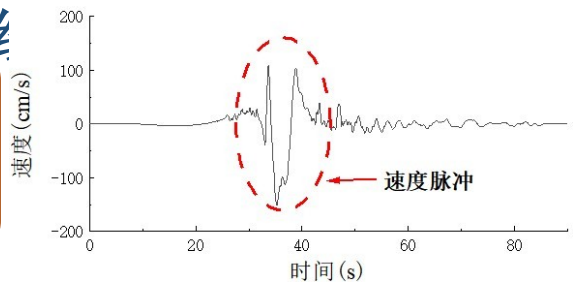
近断层地震
方向性效应
滑冲效应
上盘效应

跨断层地震
非一致激励
地表破裂
相对错动

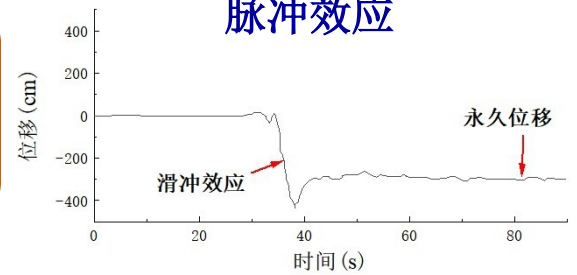
速度脉冲导致主梁由于惯性滑动
支座受损

非一致激励及永久地面变形导致
轨道结构受损

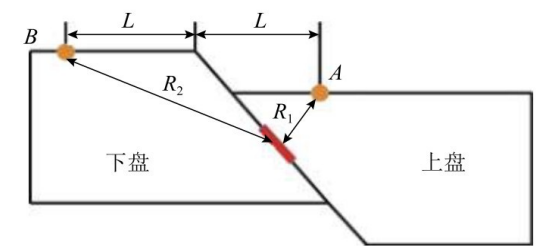
上盘效应引起的
竖向地震激励导致
支座脱空，诱发落梁



脉冲效应



滑冲效应



上盘效应

1.1 研究背景

- 2022 年 1 月 8 日 1 时 45 分，青海省海北藏族自治州门源回族自治县发生 **Ms6.9 地震**，震源深度 10 km，震中烈度达到 **IX（九）度**。兰州 - 乌鲁木齐高速铁路线浩门 - 军马场段硫磺沟大桥出现了严重的震害，是我国高速铁路桥梁**首次**遭受到如此严重的地震损伤。



门源 6.9 级地震地表变形
图



门源 6.9 级地震硫磺沟大桥破
坏



1.2 存在的问题

- 地震将会导致高速铁路桥梁**轨道结构**、**支座**和**桥墩**等多构件出现不同程度的损伤
- 高铁桥梁运营需求需要同时考虑**轨道结构**和**桥梁结构**安全，服务结构安全和震后行车安全



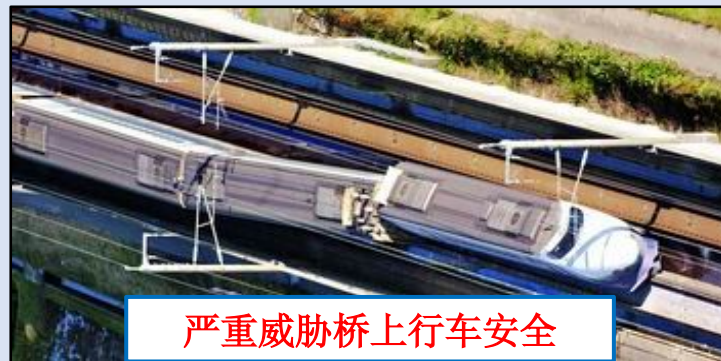
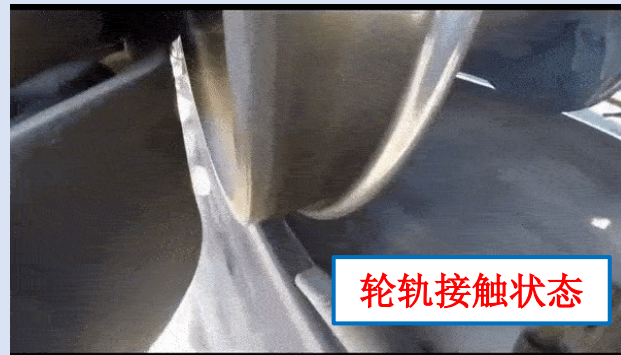
地震下桥梁 - 轨道系统损伤



影响

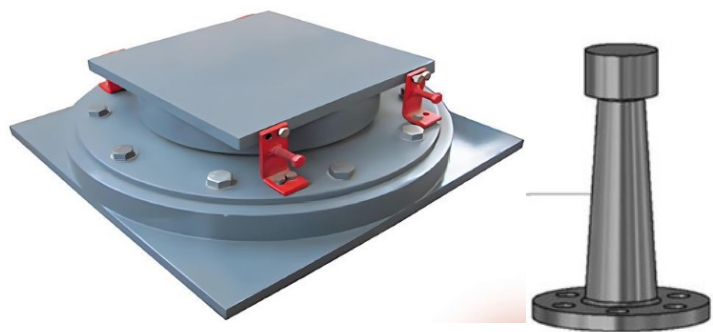


桥梁 - 轨道
系统损伤



1.2 存在的问题

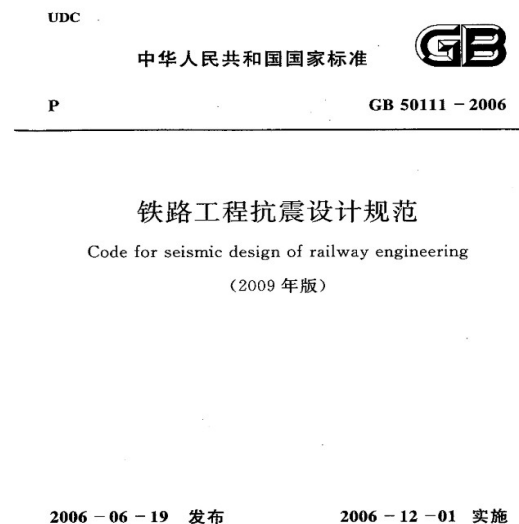
- 目前高速铁路桥梁常用的组合式减隔震系统包括“球型钢支座 + 防落梁挡块”和“摩擦摆支座 + 减震樺”等。这些系统在常规地震或一般设防场景下具有一定效果，但在近断层强脉冲地震下，其适用范围和对行车安全的保障仍需进一步研究
- 同时目前我国铁路工程抗震设计规范中对于桥梁减隔震设计主要关注结构损伤，而忽视了轨道结构和桥梁结构安全双目标的考虑



摩擦摆支座 + 减震樺



球型钢支座 + 防落梁挡块



铁路工程抗震设计规范

1.2 存在的问题

- 高速铁路桥梁近断层地震损伤案例少，损伤特征不明确



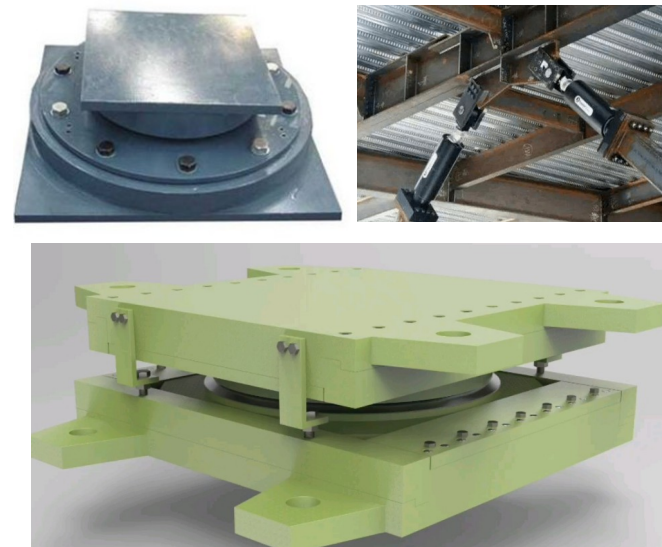
损伤机理**不清晰**

- 目前高速铁路抗震设计主要针对结构安全单目标



轨道 - 桥梁双目标**难保障**

- 目前减隔震系统设计往往采用多功能集成设计

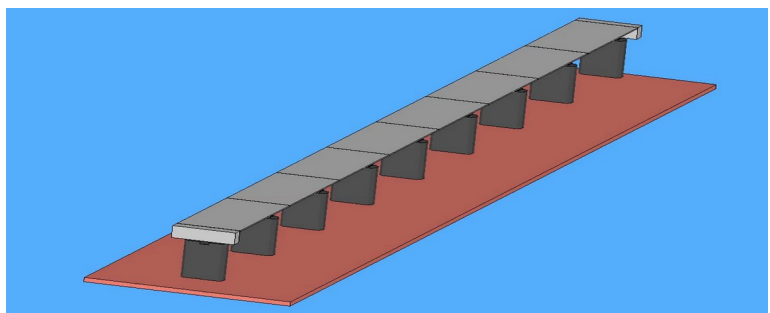


系统震后**难修复**

亟需针对近断层地震下高速铁路简支梁桥损伤机理及减隔震措施开展研究

1.3 主要工作

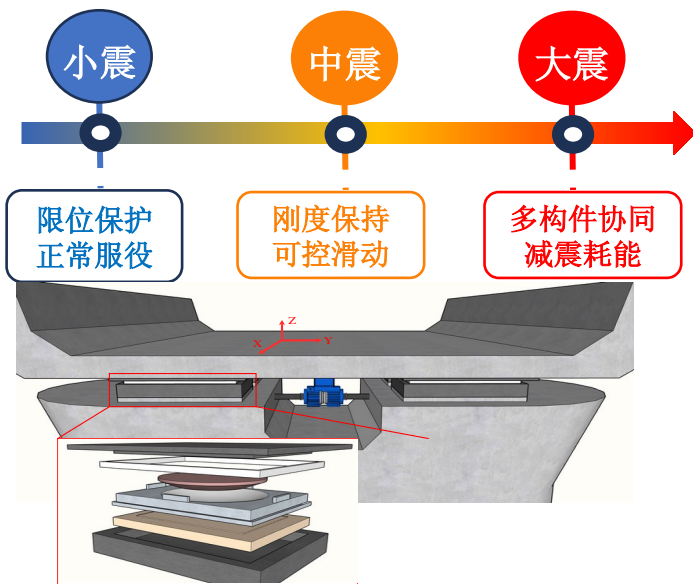
1 高速铁路桥梁近断层地震损伤机理及震害原因分析



采用多尺度建模方案，实现桥梁碰撞倒塌全过程分析，揭示桥梁震损机理及震害原因

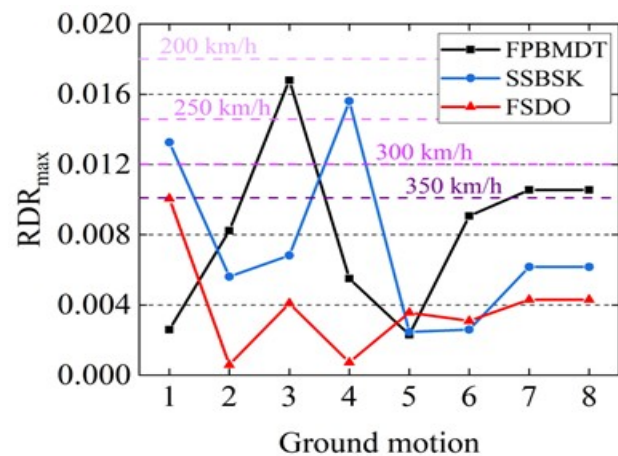
2 提出功能分离式双目标减隔震系统设计方法

分级 + 强度依赖的体系转换机制

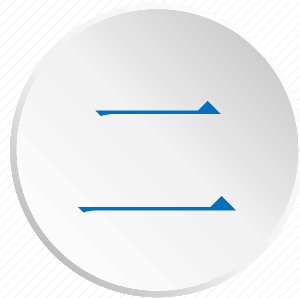


针对近断层地震特征，基于双目标设防理念，提出具有功能分离和功能转换的减隔震系统及其设计方法

3 近断层脉冲地震下系统抗震性能验证



通过典型近断层脉冲地震场景下高速铁路桥梁减隔震系统动力响应分析，验证系统的合理性及有效性



PART 02

近断层地震高速铁路桥梁 损伤机理

Damage mechanism of high-speed railway
bridge under near-fault earthquake

2.1 近断层地震高速铁路桥梁损伤特征

- 硫磺沟大桥为八跨简支梁桥，轨道结构形式为 CRTS I 型双块式无砟轨道，支座为球型钢支座并配置防落梁挡块，抗震设防烈度为七度



主梁落梁

地震损伤特征

- ◆ 支座销钉剪断、防落梁装置破坏
- ◆ 主梁大位移，整座桥面发生倾斜
- ◆ 上部轨道结构损伤变形严重



桥梁支座破坏



钢轨变形

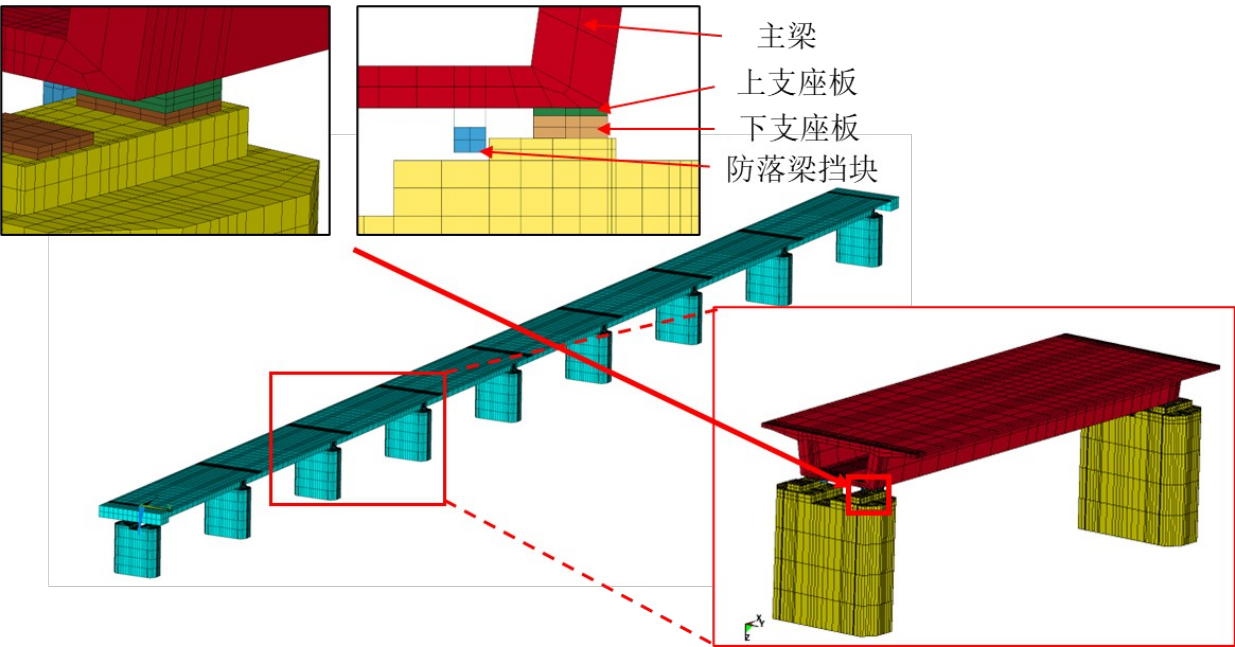


防落梁挡块破坏

2.2 桥梁震害场景重现

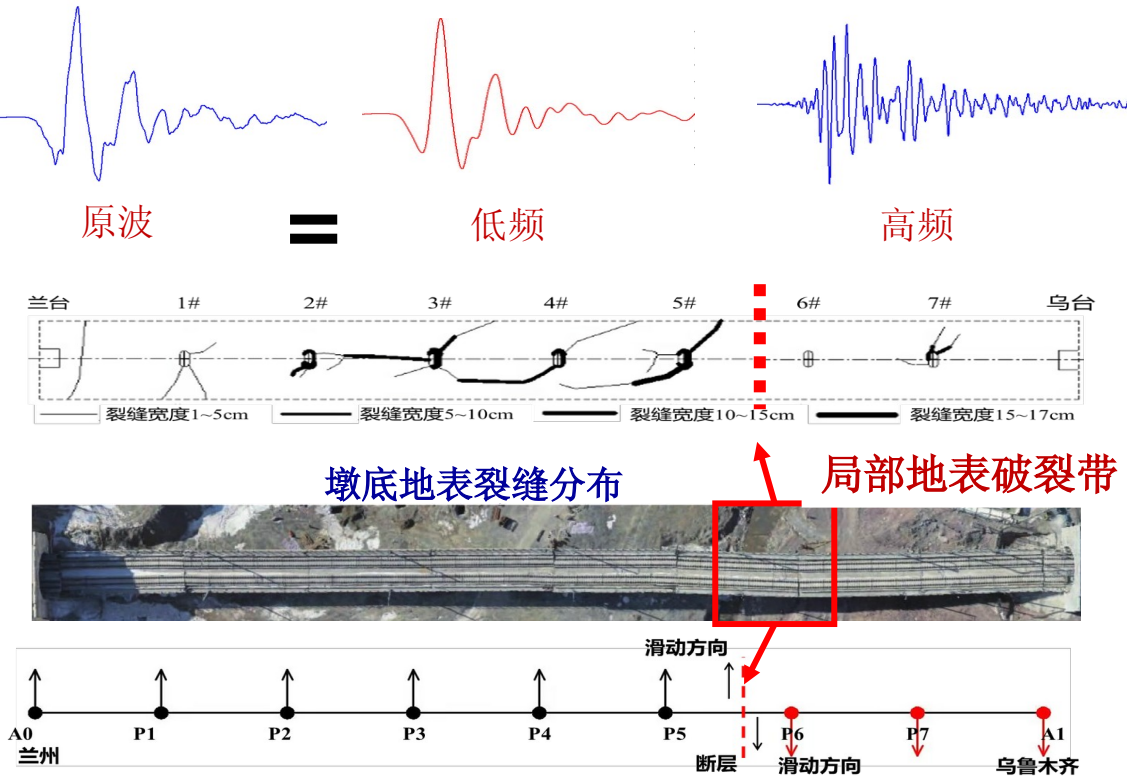
■ 基于以下两个重点核心工作实现桥梁震害全过程模拟

① 基于 ANSYS/LS-DYNA 显式有限元分析软件，采用多尺度建模方案实现桥梁碰撞倒塌全过程分析



桥梁数值模型

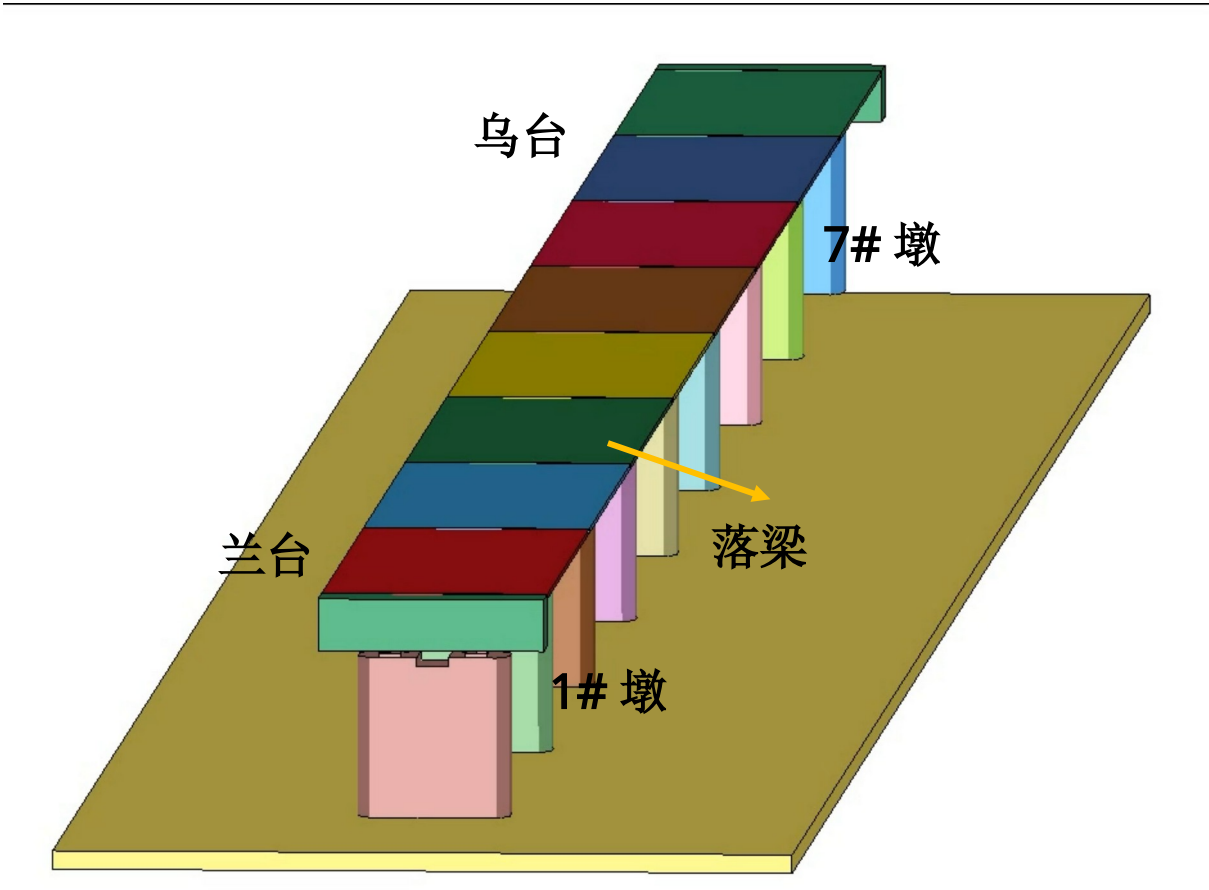
② 采用 RDI 方法结合墩底永久地面位移，准确拟合桥址处的实际地震情况



地震动输入

2.2 桥梁震害场景重现

■ 通过 126 条地震动模拟，最终得到符合硫磺沟桥震害情况的全过程模拟结果



全过程仿真动画

- 高频底波 -

Superstition Hills-02

脉冲类型 $\gamma = 3$ 多半波

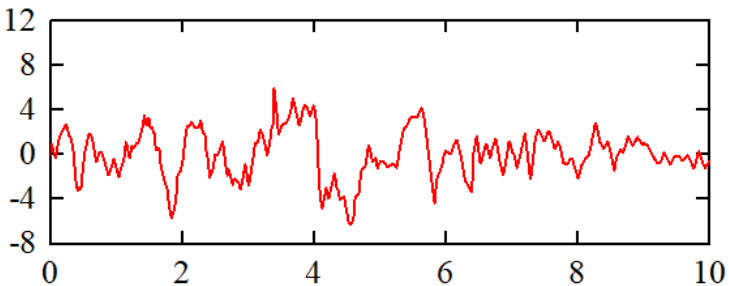
脉冲幅值 $A = 1 \text{ m/s}$

脉冲周期 $T = 2.547 \text{ s}$

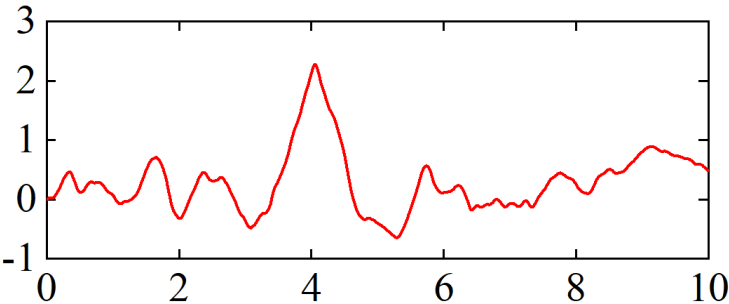
波形相位 $\nu = 0 \text{ rad/s}$

- 脉冲参数 -

- 加速度 -



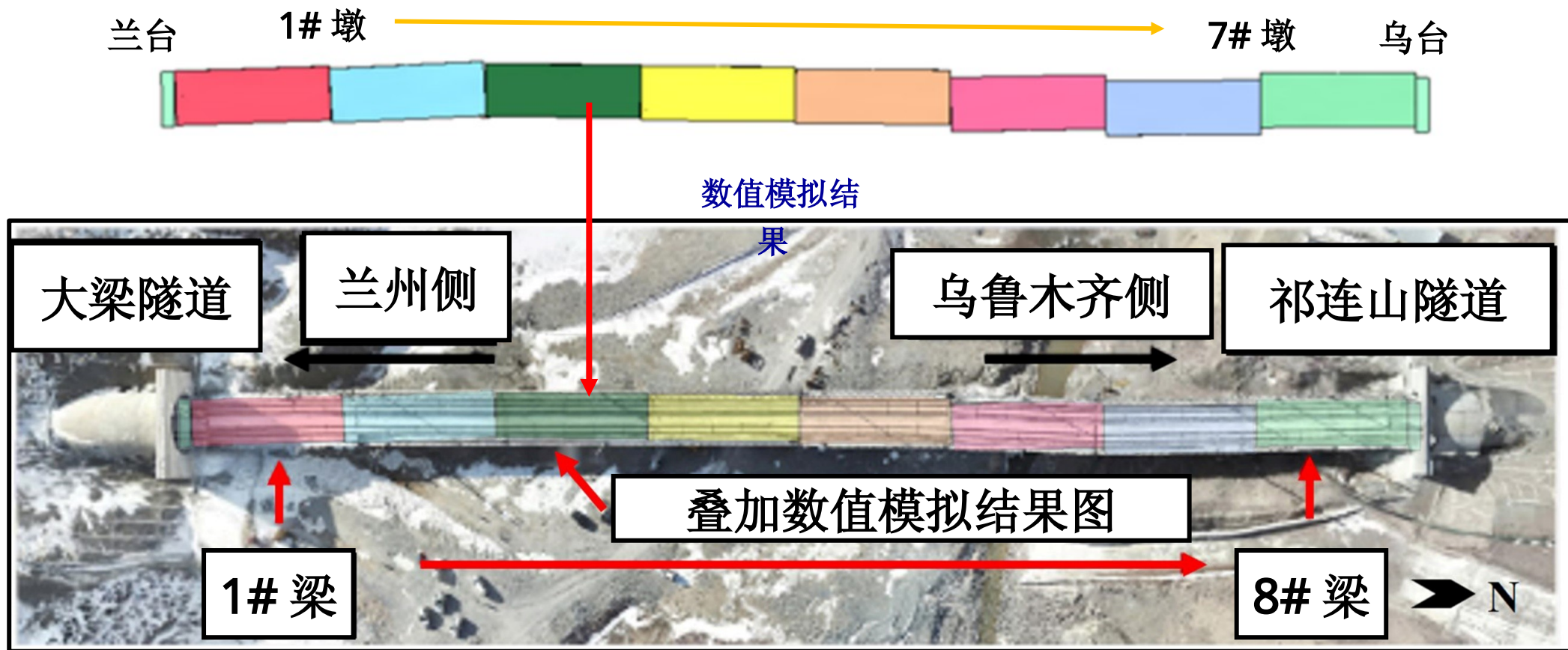
- 速度脉冲 -



目标地震动波形及参数

2.2 桥梁震害场景重现

- 模拟结果与现场震害结果对比发现，1#~5# 主梁向西侧出现偏移，而 6#~8# 主梁呈现朝东侧的偏移情况，模拟结果与实际结果基本吻合。



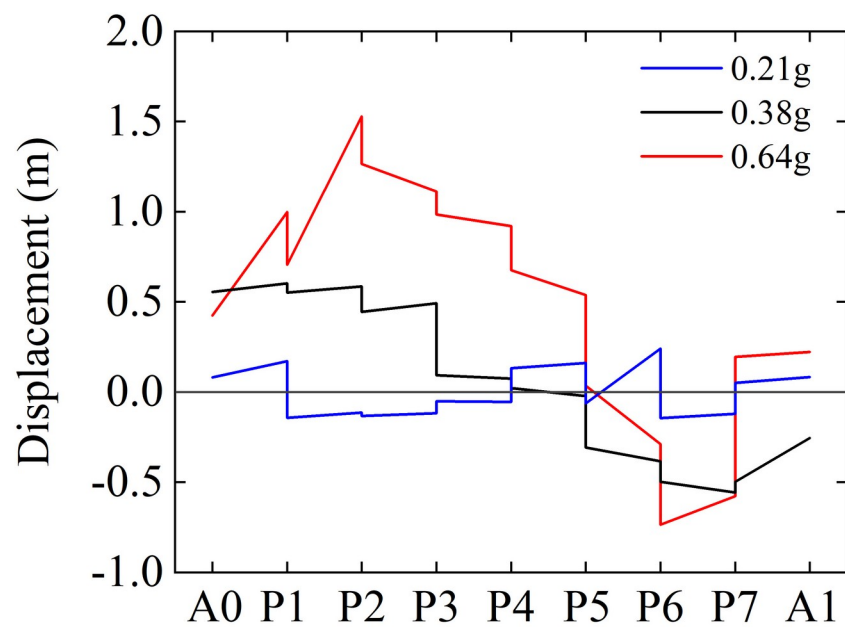
桥梁整体横向变形仿真结果对

通过桥梁地震损伤全过程模拟^比，基本再现了桥梁的震害场景

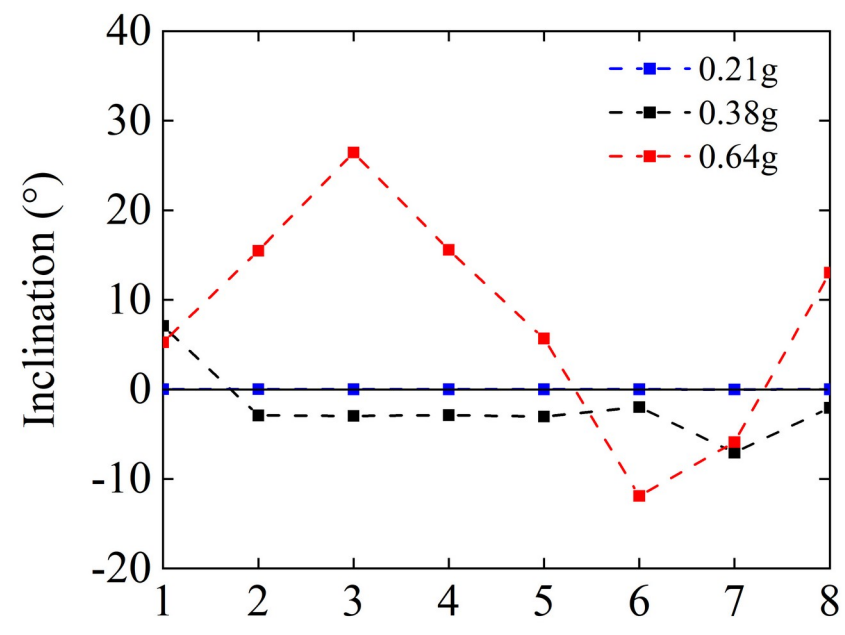
2.3 桥梁震害机理分析

(1) 地震强度的影响

根据规范中给出的 7 度、8 度和 9 度罕遇地震基本加速度，将 PGA 分别调整为 0.21 、 0.38 和 0.64 g ，同时按比例调整桥墩底部实测永久变形。



主梁横向位移



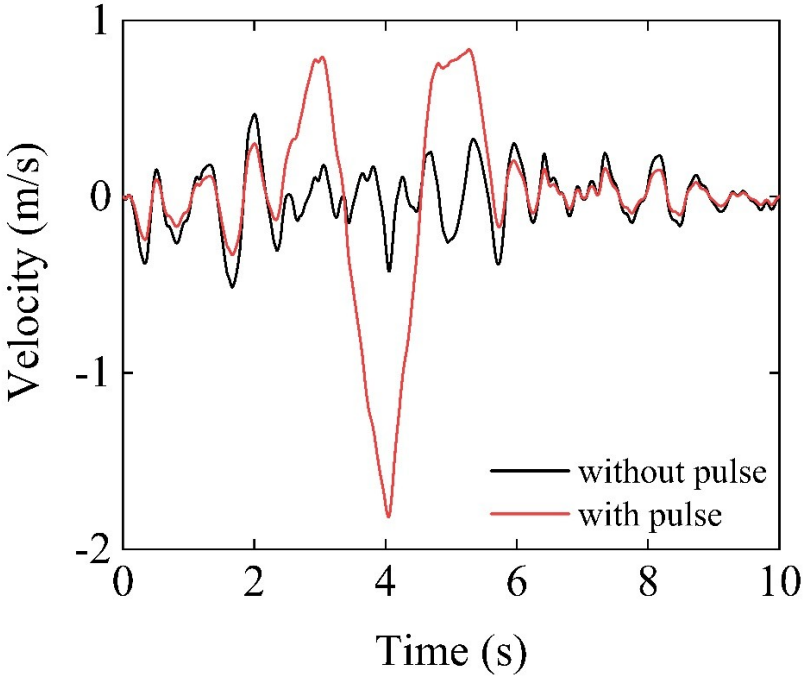
主梁倾

地震强度超出桥梁抗震设防烈度是导致桥梁损坏的直接原因

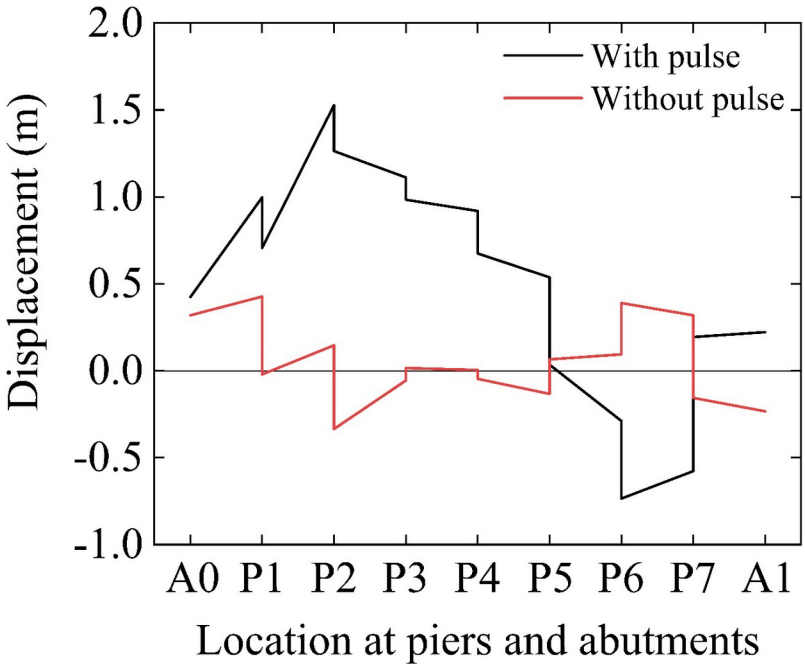
2.3 桥梁震害机理分析

(2) 地震速度脉冲的影响

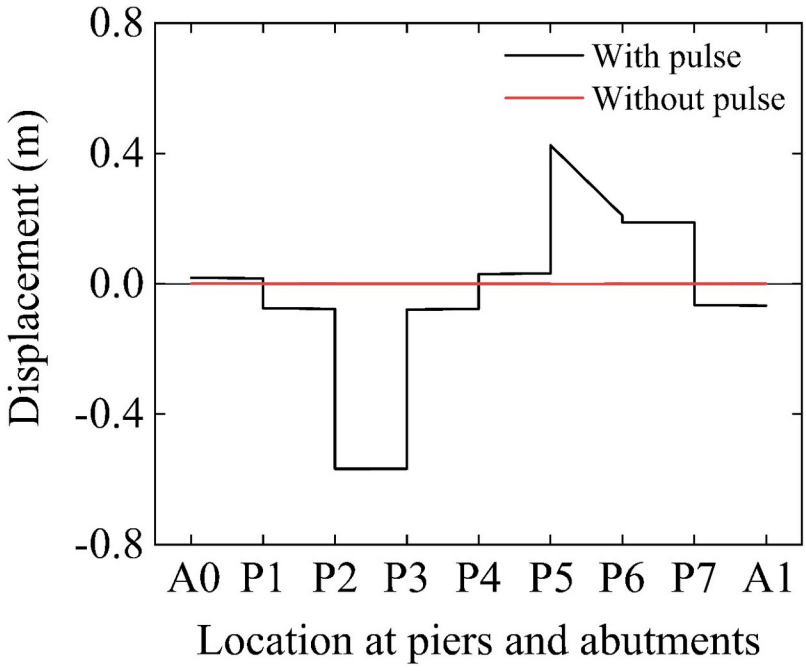
- 响➤ 以九度罕遇地震为例（0.64g），保留永久地面位移，对比 PGA 一致的情况下**脉冲效应对桥梁**的动力响应及损伤情况的影响
- 结果表明在速度脉冲的影响下，**主梁横移量激增，支座脱空，3# 主梁出现落梁**



地震动速度时程



梁墩横向相对位移



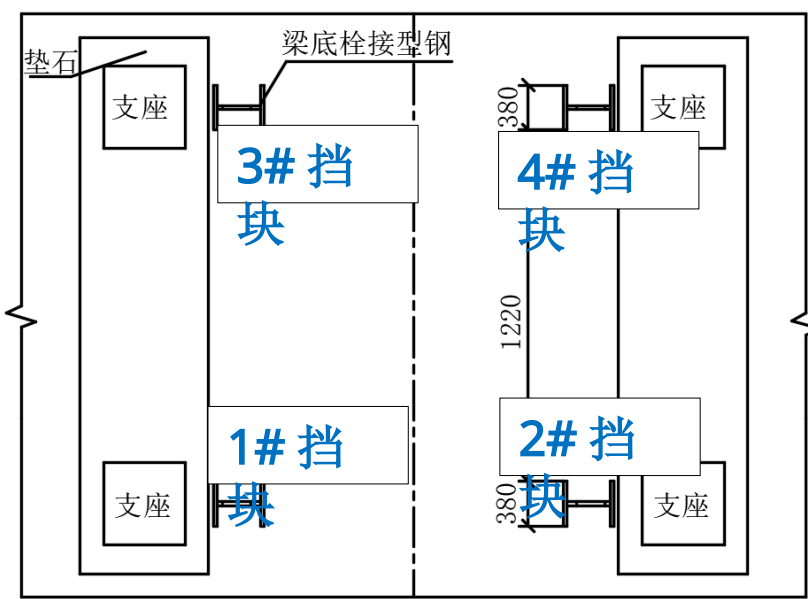
梁墩竖向相对位移

近断层地震的**速度脉冲**是造成硫磺沟桥震害的重要原因

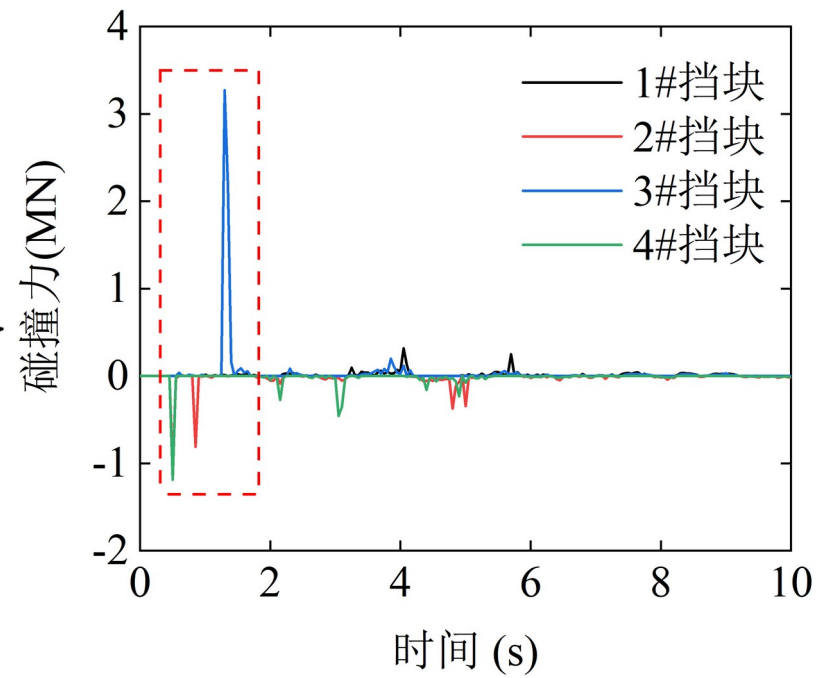
2.3 桥梁震害机理分析

(3) 防落梁挡块功能失效

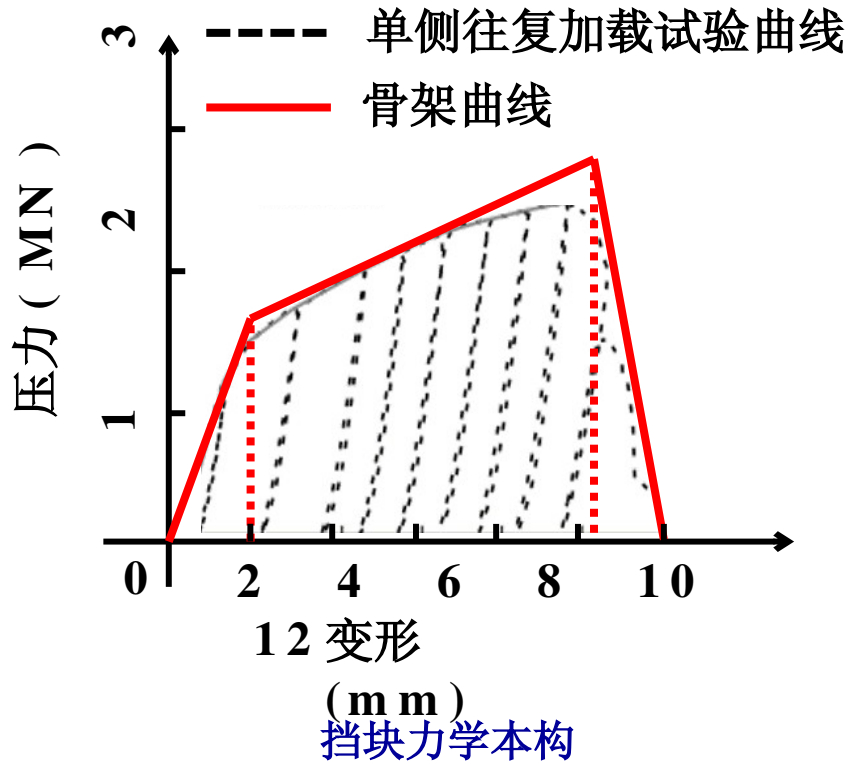
以九度罕遇地震为例（0.64g），铁路防落梁的抗震措施在罕遇地震下过早出现的碰撞损伤的情况，并造成了主梁的横移落梁。



落梁跨挡块编号



3# 主梁各挡块碰撞力时程



挡块力学本构

刚性挡块的防落梁措施在高烈度脉冲地震下难以有效约束梁体位移

2.3 桥梁震害机理分析

➤ 桥址处地震烈度区划不准确

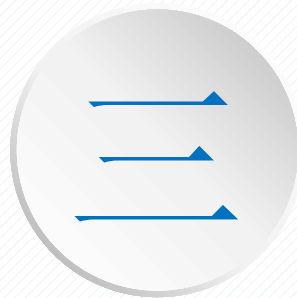
桥梁基于我国地震动区划图按照七度设防进行设计，但实际桥址处地震烈度达到了九度，导致桥梁支座、挡块等减隔震构件在极端地震作用下出现了破坏。

➤ 近断层地震蕴含高能速度脉冲及非一致激励

在横向速度脉冲作用下，结构离散、质量大的简支梁桥主梁会产生很大的横向位移，而传统的抗震措施无法对主梁提供有效的横向约束导致落梁。

➤ 桥梁支座和减隔震装置使用不当

传统的球型钢支座 + 铁路防落梁的铁路桥梁抗震措施属于通过自身“硬抗”地震作用，但其减震耗能能力弱，不适用与近断层脉冲型地震。



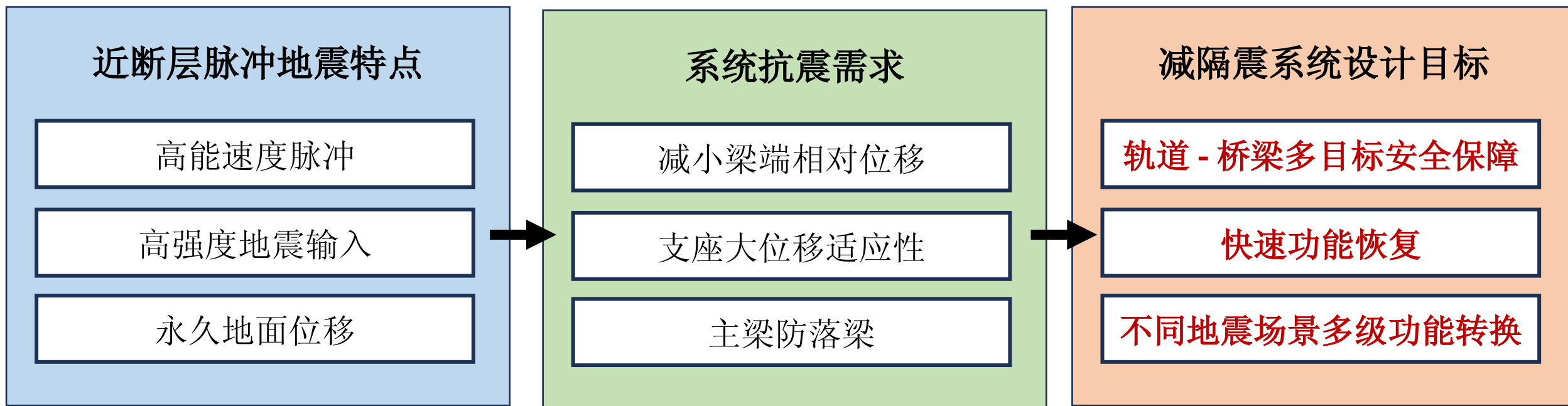
PART 03

功能分离式双目标减隔震 系统设计方法

Design method of functional separation
dual-objective seismic isolation system

3.1 基于近断层地震下桥梁抗震需求的减隔震系统设计目标

通过对真实近断层脉冲地震场景下高速铁路简支梁桥损伤特征分析及场景再现研究，
可以总结出近断层脉冲地震特点，**系统抗震需求**以及对应的**减隔震系统设计目标**



3.2 概念框架和系统协同机制

■ 单目标→双目标安全保障

高速铁路桥梁抗震设计需要在保障**结构安全**的基础上进一步考虑维持或快速恢复桥上**列车通行安全**，**因此需要**超越传统“单目标”的隔震思路，转向综合考虑**结构安全**和**通行安全双目标**的抗震设计。



列车通行安全



轨道结构损伤



支座损伤



桥墩损伤

- **轨道系统**：轨道系统主要保障桥梁列车的运行安全，支撑高速铁路桥梁运营需求。
- **支座 / 限位系统**：支座系统主要保障桥梁的结构承载能力，支撑高速铁路桥梁结构安全需求。
- **墩柱系统**：墩柱系统主要保障桥梁的整体抗倒塌能力，支撑高速铁路桥梁结构完整性需求。

基于**双目标**抗震思想，综合保障高速铁路桥梁**结构安全**和**通行安全**

3.2 概念框架和系统协同机制

■ 功能集成→功能分离式系统

通过**功能分离的概念**，将桥梁结构的**承载功能与耗能功能进行解耦**，降低不同功能构件在结构体系上的耦合程度，以提升震后损伤构件的**可更换性**与系统整体**可修复性**



墩顶空间的合理利用



从**多功能的集成设计**向**功能分离**设计理念转变

合理利用标准简支梁桥墩顶空间，实现减隔震系统功能分离

3.2 概念框架和系统协同机制

■ 单阶段性能→多阶段体系转换

传统单阶段性能



单一设防目标

- 小震、中震、大震下缺乏分级调控
- 难以满足不同阶段桥梁抗震需求
- 抗震性能协调性不足

分级 + 强度依赖的体系转换机制

小震

中震

大震

限位保护
正常服役

刚度保持
可控滑动

多构件协同
减震耗能



体系转换

强度依赖

分级触发

多阶段体系转换效果

阶段 I：正常服役

控制支座正常运营滑移，保持桥梁整体功能

阶段 II：隔震控制

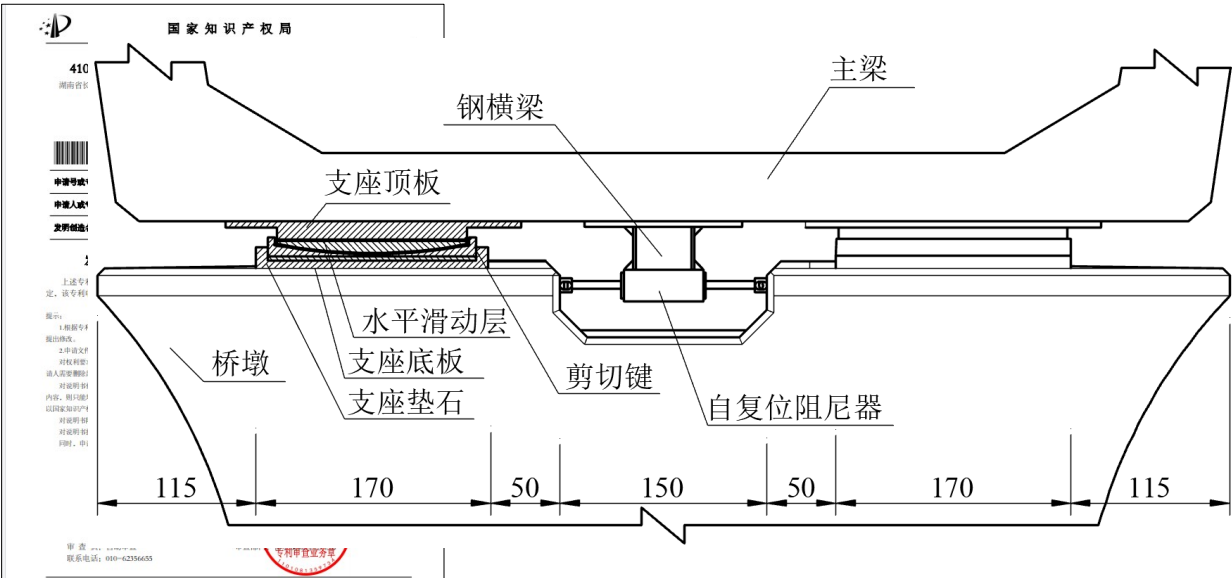
容许支座发生滑移，限制支座最大位移

阶段 III：协同抗震

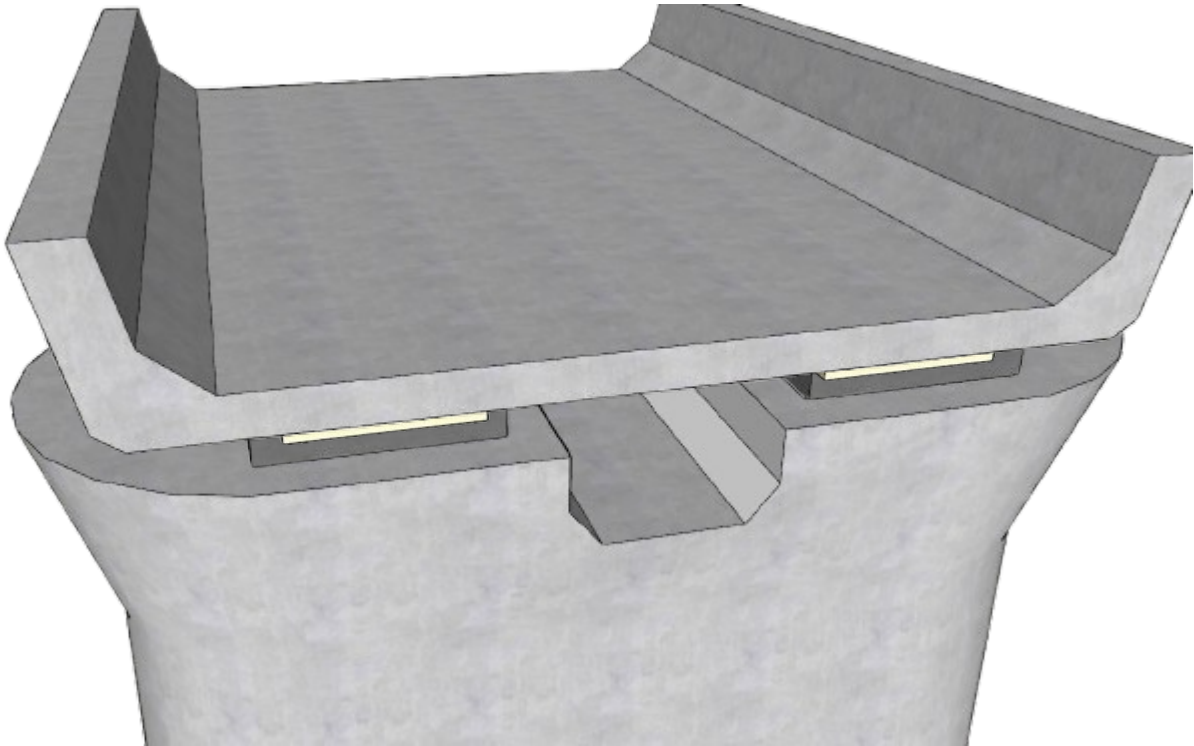
容许支座大位移，减隔震系统进入工作

3.3 功能分离式双目标减隔震系统设计方法

高速铁路桥梁减隔震系统的**承载功能**与**耗能功能**分离开，同时兼具正常使用情况和极端地震情况下的**体系转换**，提出了一种**功能分离式双目标减隔震系统**



简支梁梁体



大位移水平滑动层

支座大位移适应性

支座限位销钉

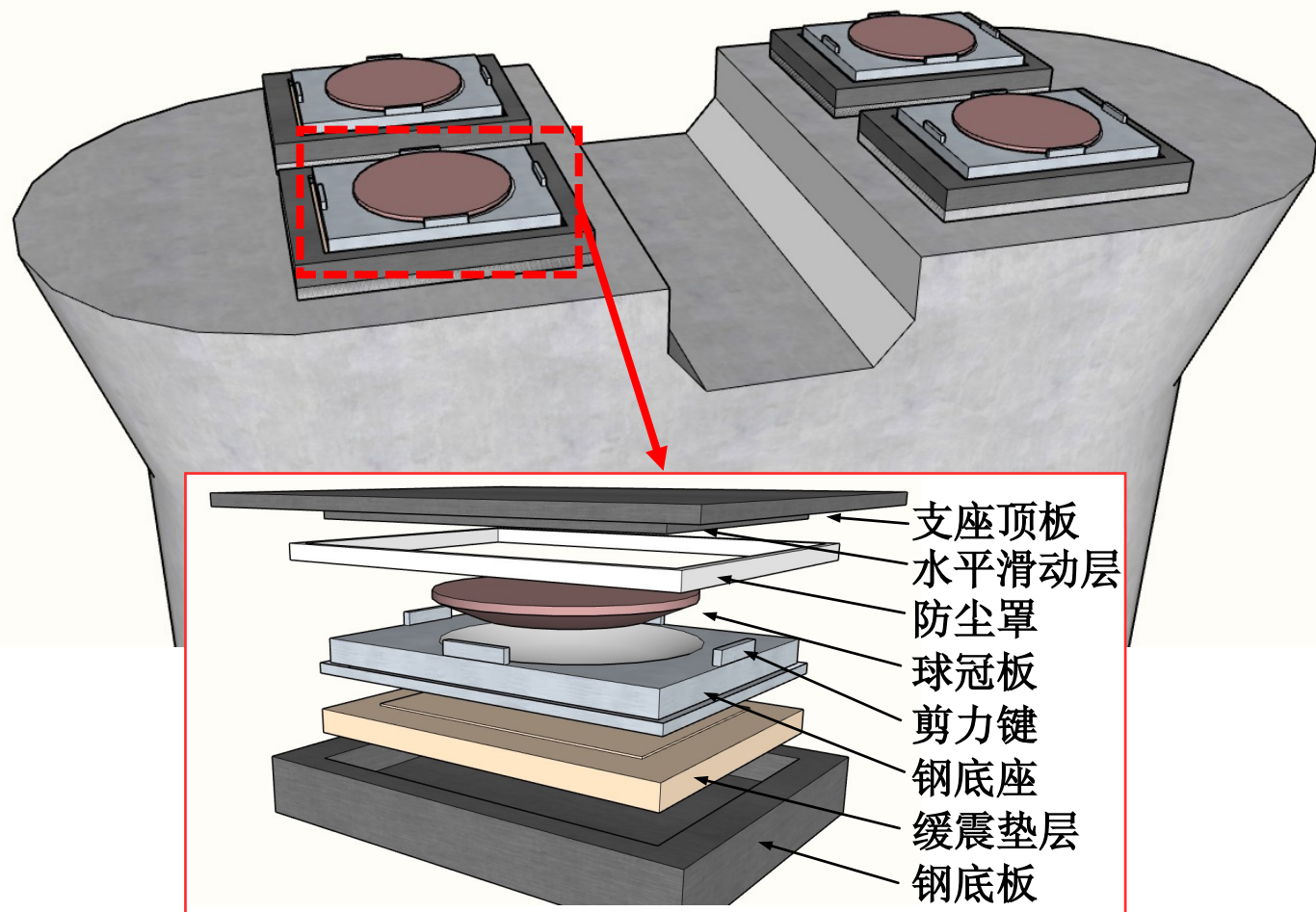
满足正常运营需求

自复位阻尼耗能装置

减震耗能并保障轨道结构连续性

3.3 功能分离式双目标减隔震系统设计方法

➤ 大位移滑动支座

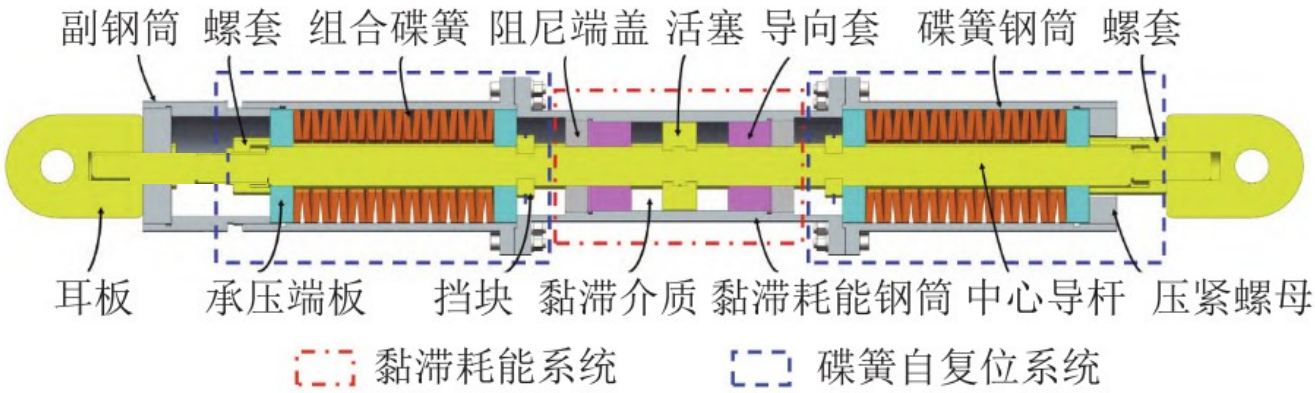
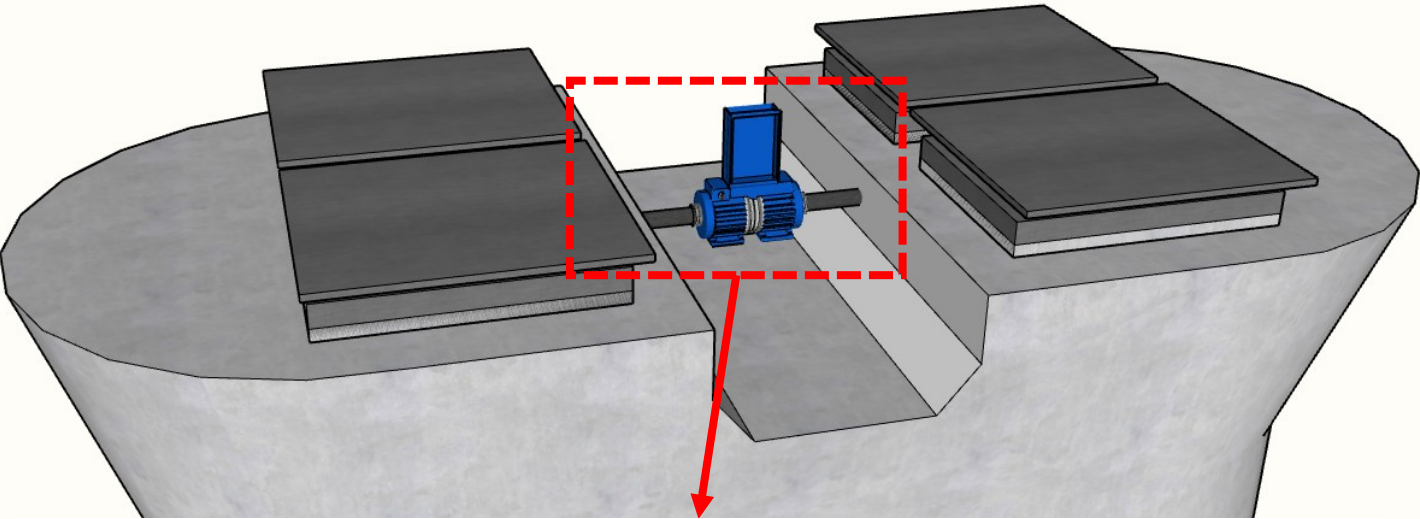


- 水平大位移滑动层：仅提供竖向支承功能，地震作用下**不出现结构性损伤**；通过设置**大尺寸**的低摩擦系数平面滑移层，**滑动范围广**，提供极端地震下支座**大位移适应性**
- 限位剪切销钉：支座**约束方向**设置限位剪切销钉，保障正常运营场景下**支座位移受控**，并根据抗震设防烈度计算需要设置的销钉尺寸及数量，满足销钉在设计地震下剪断，实现**受控体系转换**。
- 球冠板：提供正常使用场景下的**支座转动**

水平大位移滑动层提供极端地震下支座**大位移适应性**
剪切销钉的合理设计实现正常运营场景的**支座限位和体系转换**

3.3 功能分离式双目标减隔震系统设计方法

➤ 自复位阻尼耗能装置



双向自复位阻尼器

- 布置形式：双向自复位阻尼器通过型钢与主梁预埋构件之间焊接，阻尼器端部与墩顶凹槽内侧采用万向铰连接；结构布置不需要对桥墩进行二次改造，震后可便捷地对受损自复位阻尼耗能装置进行更换。
- 主要功能：粘滞阻尼系统实现地震过程中耗能能力；针对轨道结构平顺性要求进行复位碟簧刚度设计，满足震后主梁自复位
- 工作状态：水平滑动支座约束方向限位剪切销钉剪断，系统完成体系转换后，梁墩之间可自由滑动，此时系统开始工作

实现极端地震场景下的减震耗能及自复位功能，同时便于受损后更换

3.3 功能分离式双目标减隔震系统设计方法

通过不同地震强度下的多阶段体系转换，实现分级抗震需求

小震

支座不滑动

开始滑动

中震

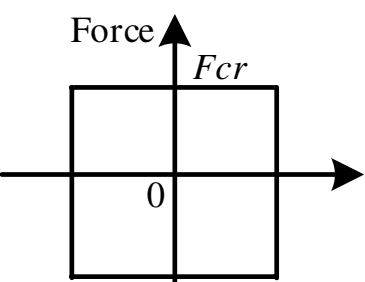
支座限位销钉不损坏

销钉剪断，体系转换

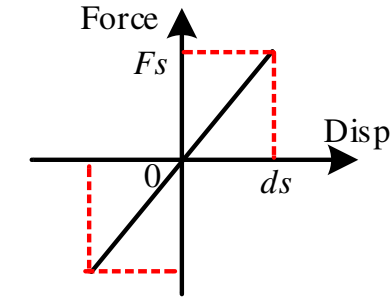
大震

主梁不落梁，桥墩始终处于弹性工作状态

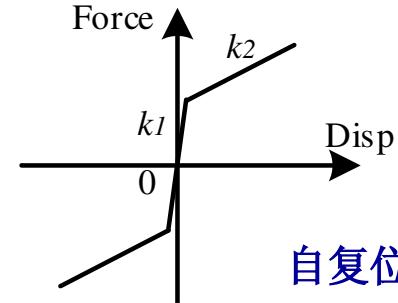
自复位耗能装置工作



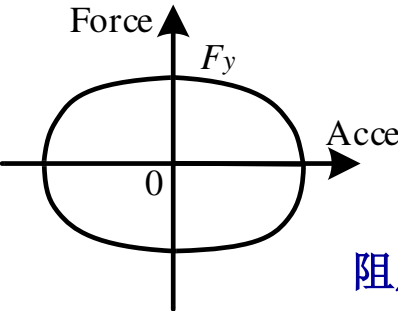
水平摩擦支座



支座剪切销钉



自复位系统



阻尼系统

小震

$$\mu F_N \geq m A_{gL}$$

$$\mu F_N \cdot h_p \leq M_u$$

正常运营和多遇地震下，通过滑动层摩擦系数设计，控制支座不出现滑移，桥墩处于弹性工作范围

中震

$$\mu F_N + F_s = m A_{gD} \quad (\mu F_N + F_s) \cdot h_p \leq M_u$$

设计地震下，通过限位剪切销钉破断力设计，支座受控滑动，减小结构损伤，同时保证桥墩弹性工作

大震

$$F_k \geq \mu F_N \quad (F_s + F_c + \mu F_N) \cdot h_p \leq M_u$$

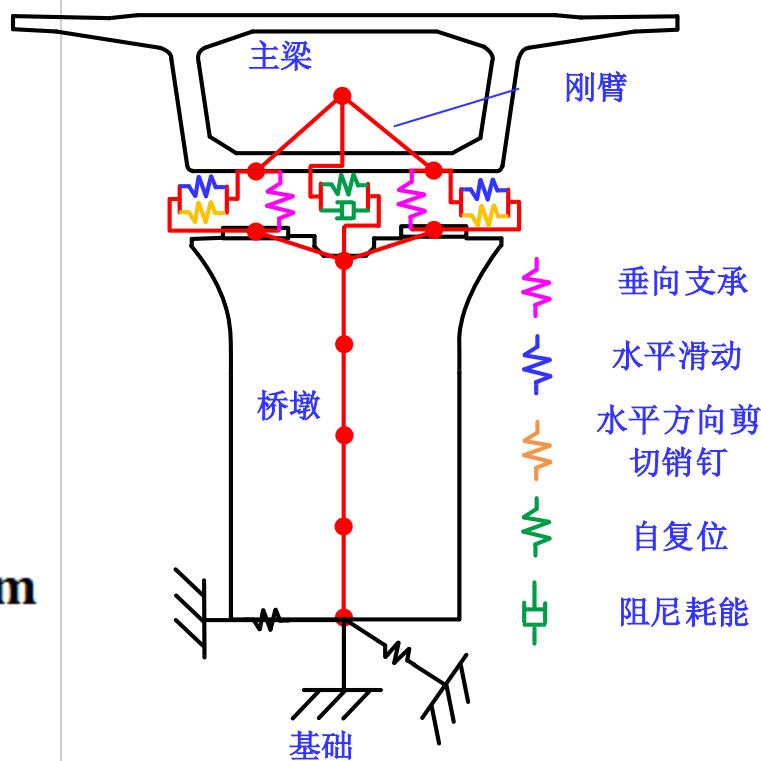
罕遇地震下，销钉剪断实现体系转换，保障桥墩始终处于弹性工作状态，结合自复位功能维持轨道结构平顺性

保障桥墩在地震过程中不出现屈服损伤的同时，充分发挥其抗震能力

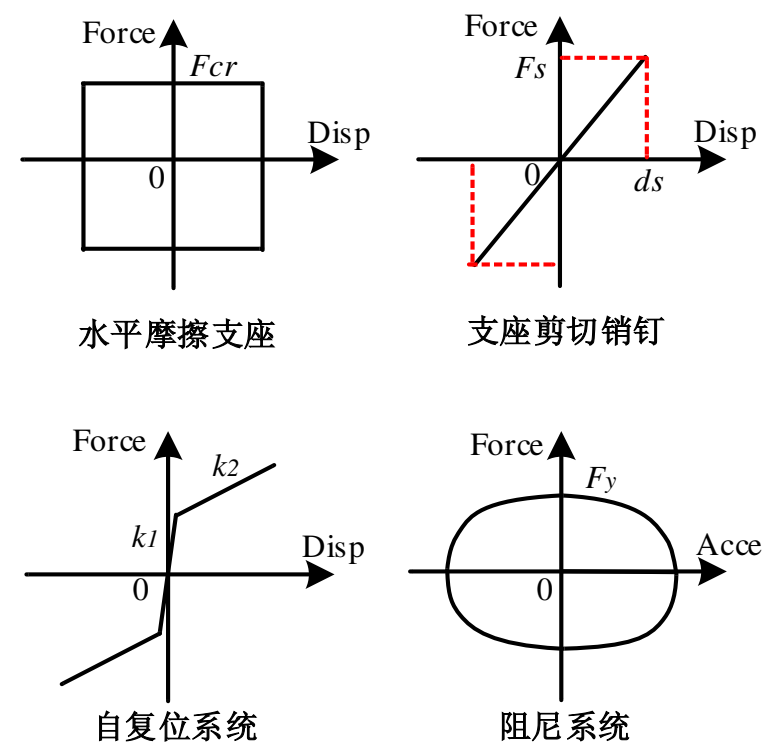
3.3 功能分离式双目标减隔震系统设计方法

■ 以八度抗震设防（ $0.3g$ ）等级为例，以硫磺沟桥为原型，基于提出的功能分离式双目标减隔震系统设计方法，实现减隔震系统参数设计

- 水平滑动支座摩擦系数 $\mu = 0.1$
- 支座剪切销钉破断力 1000kN
- 临界位移 2mm 刚度 $k = 5 \times 10^5 \text{ kN/m}$
- 自复位装置初始刚度 $k_1 = 2.20 \times 10^4 \text{ kN/m}$
- 最大位移状态下 $k_2 = 721.19\text{kN/m}$
- 双向自复位阻尼器阻尼系数为 $500 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$



(a)



(b)

功能分离式双目标减隔震系统力学模型

四

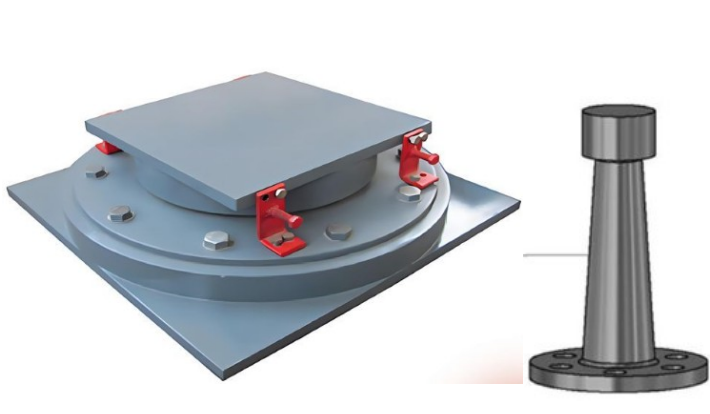
PART 04

近断层脉冲地震下系统抗震性能验证

Seismic performance verification of the system under near-fault pulse earthquake

4.1 抗震性能对比指标

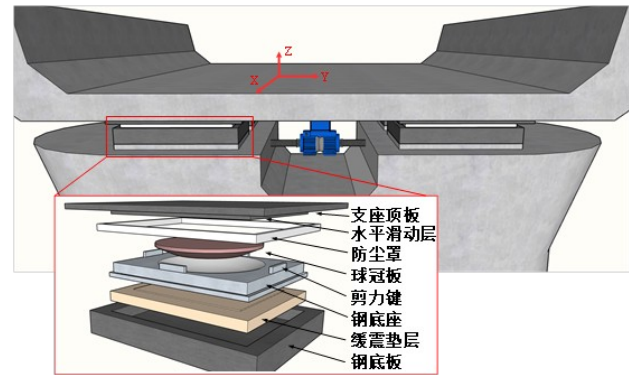
■ 将该系统与目前常用的两类高速铁路简支梁桥组合式减隔震装置抗震性能进行对比:



摩擦摆支座 + 减震棒（FPBMDT）



球型钢支座 + 防落梁挡块（SSBSK）



功能分离式轨道 - 桥梁系统双目标减隔震系统（FSDO）

□ 基于典型近断层脉冲地震记录开展不同减隔震装置的动力响应计算，分别对以下四类核心指标进行对比分析，并进一步分析了不同构件的滞回曲线

钢轨最大残余变形率

轨道结构平顺性

支座最大 / 残余位移

支座损伤程度

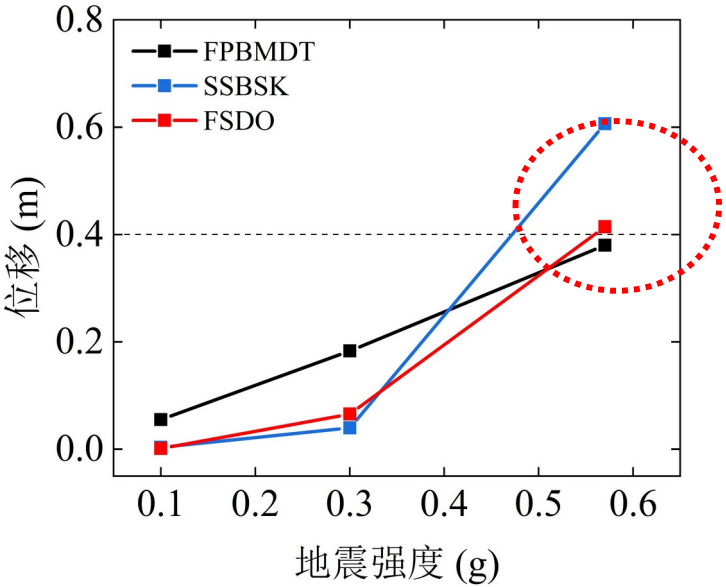
墩墩最大弯矩

桥墩损伤程度

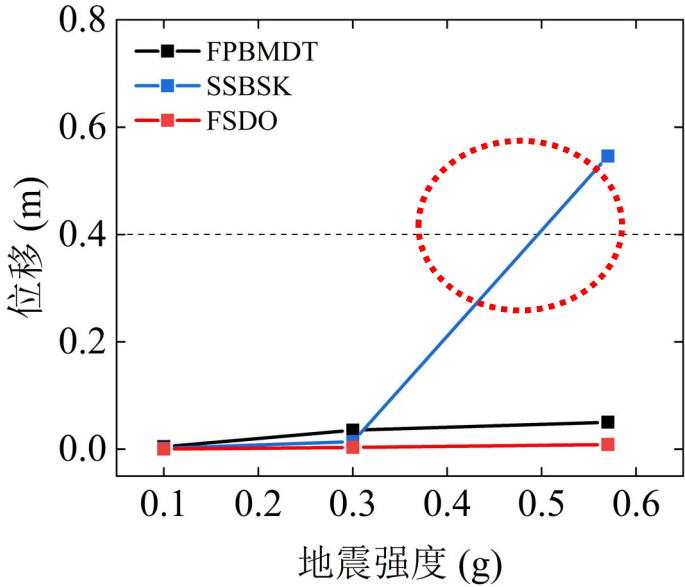
综合评估所提出的分离式双目标减隔震系统抗震性能

4.2 不同地震强度下系统抗震性能对比

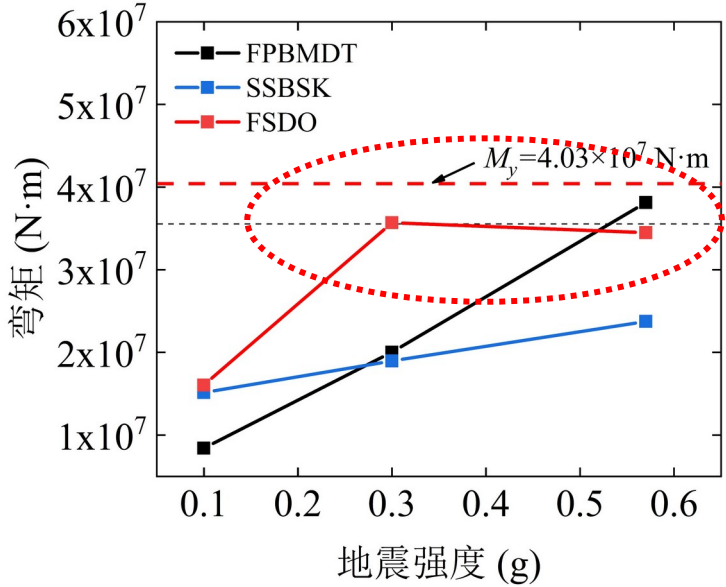
- FSDO 系统可以保障地震下支座位移处于相对较小值
- FSDO 系统的体系转换功能，使桥墩始终处于弹性工作状态，罕遇地震下桥墩抗震性能利用率分别提高了 43.9% 和 46.8%



支座最大位移



支座残余位移



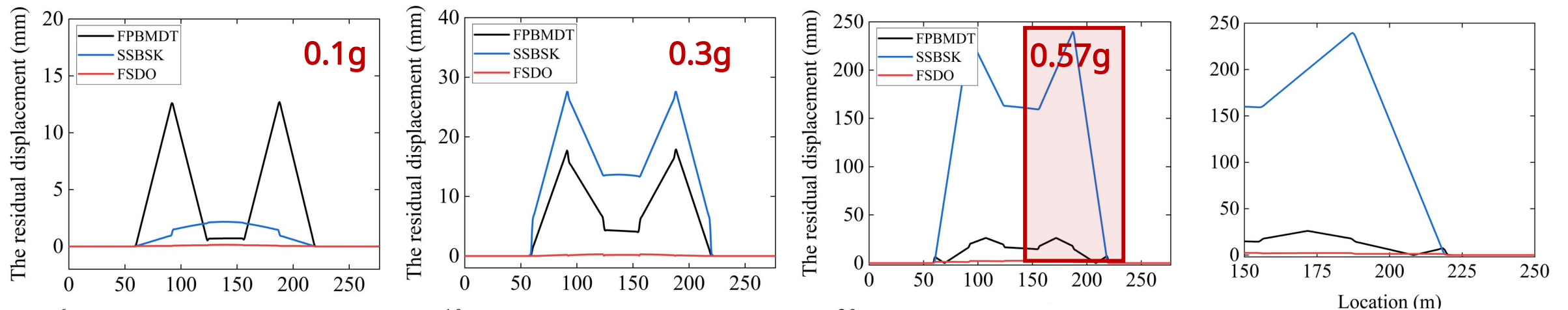
桥墩最大弯矩

FSDO 系统有效控制支座位移和轨道结构变形，并充分发挥了桥墩的抗震性能

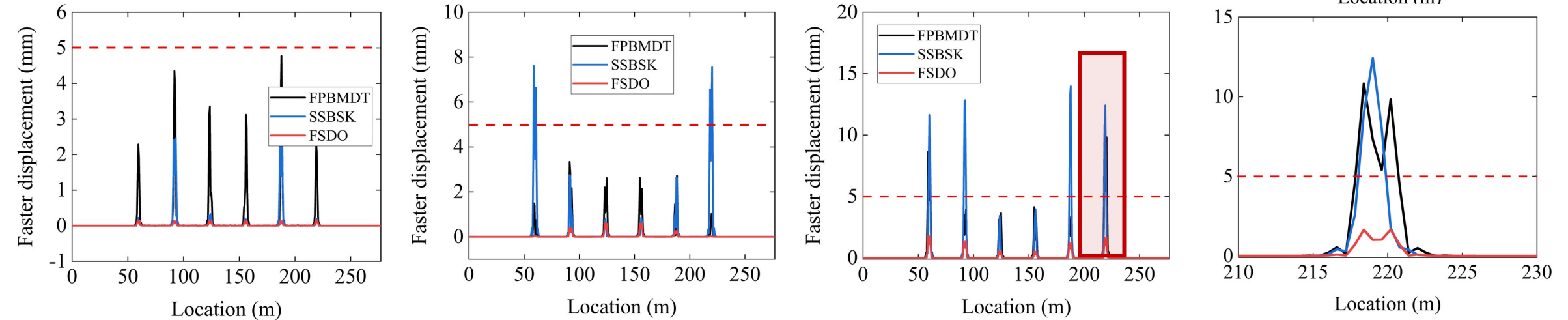
4.2 不同地震强度下系统抗震性能对比

- 罕遇地震下 FSDO 系统的自复位性能更显著降低了震后钢轨最大残余变形率
- FSDO 系统可有效保障地震过程中扣件基本完好

钢轨残余位移



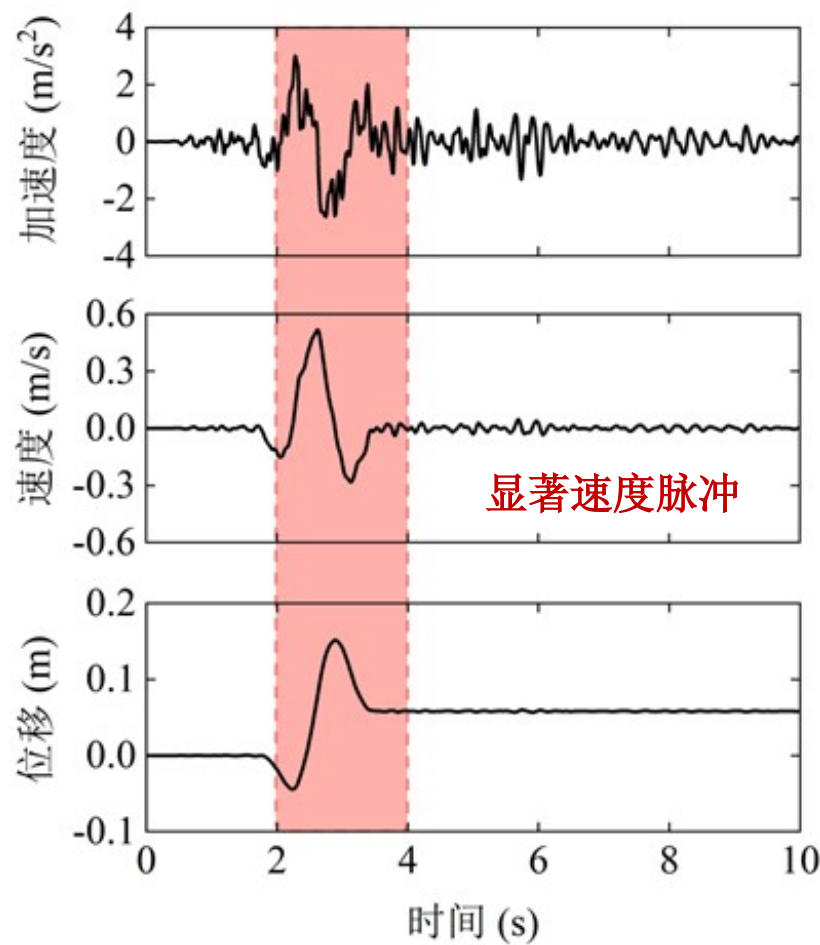
扣件变形



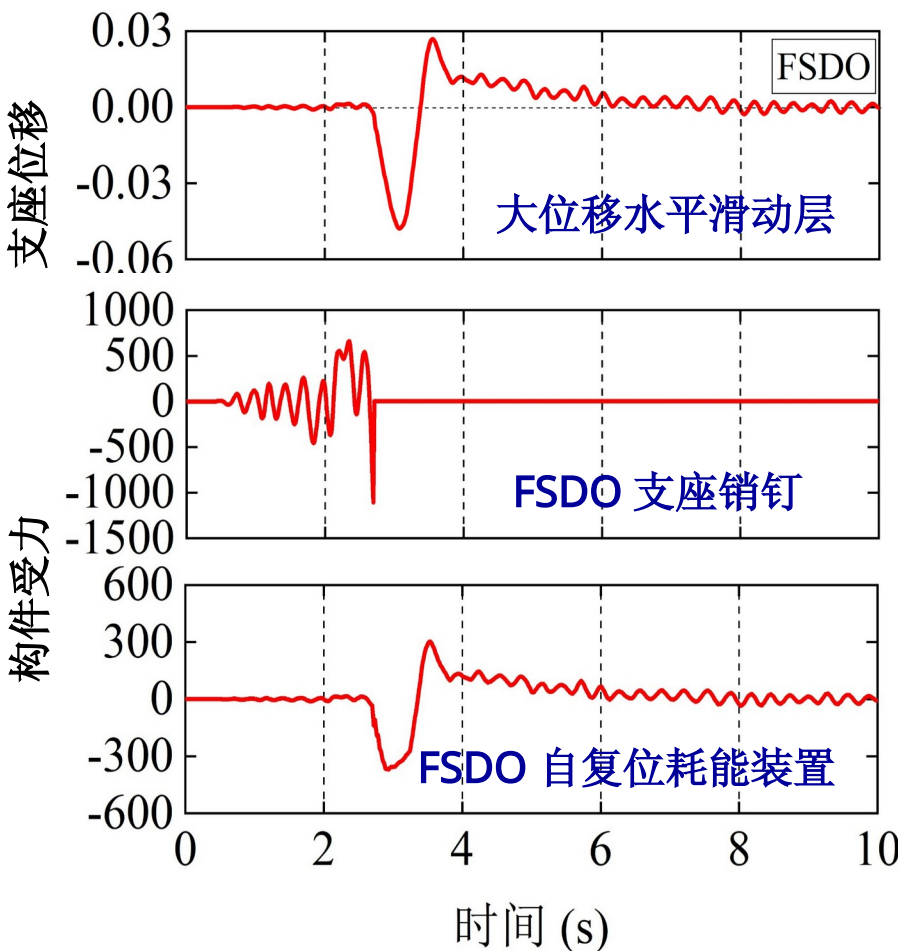
FSDO 系统有效降低了震后钢轨残余变形和轨道结构损伤，保障了震后行车需求

4.2 不同地震强度下系统抗震性能对比

■ 以近断层脉冲地震（0.3g）记录为例，分析不同减隔震系统各构件的动力响应时程



设计地震时程



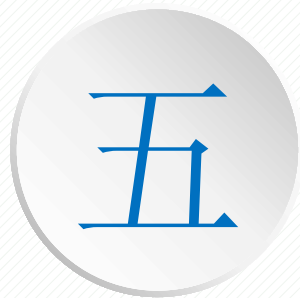
FSDO 系统动力响应及受力情况

FSDO 系统支座位移得到控制，并且震后有效复位

强震下支座限位剪切键破坏实现地震下体系转换

体系转换后自复位耗能装置开始工作，消耗地震能量，实现轨道结构复位

FSDO 系统通过受控体系转换设计，实现强震下销钉剪断，多构件协同减震耗能



PART 05

结论

Conclusion

- 实现了硫磺沟桥近断层地震下的**震害场景重现**，揭示了近断层脉冲地震下高速铁路简支梁桥的**损伤规律及震害原因**
- 提出了**功能分离式双目标减隔震系统设计方法**：
 - **可满足**高速铁路桥梁对桥梁结构安全和行车安全**双目标**的抗震需求
 - **可提升**震后损伤构件的可更换性与系统整体**可修复性**（功能分离式系统设计理念）
 - **可实现**不同地震强度下的**体系转换功能**，保障桥墩在地震过程中不出现屈服损伤的同时，充分发挥了其抗震能力。

THANKS

The Fifth International Bridge Seismic Workshop (5IBSW)
Hunan University, Changsha, China, June 5-7, 2026