

高烈度区高墩连续梁桥隔震技术的有效性分析

刘青兰¹, 唐文乐², 魏旭奇², 韦伟¹

(1. 广东省铁路规划设计研究院有限公司, 广东 广州 510699; 2. 广州大学 工程抗震研究中心, 广东 广州 510006)

摘要: 针对高烈度地区高墩连续梁抗震设计存在的难题, 以两座典型的高墩桥梁为例, 采用数值模拟的方式对比分析了抗震设计与隔震设计在 E2 地震作用下的响应结果, 阐明了隔震技术在高墩连续梁上的有效性, 针对隔震高墩连续梁梁端位移较大的问题, 提出了有效的解决方法。

关键词: 高墩连续梁; 隔震体系; 摩擦摆支座; 防落梁

中图分类号: U442.55

文献标识码: A

Analysis on the Effectiveness of Seismic Isolation Technology of Continuous Bridges with High Pier in High Intensity Area

LIU Qinglan¹, TANG Wenle², WEI Xuqi², WEI Wei¹

(1. Guangdong Provincial Railway Planning and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510699, Guangdong, China;

2. Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: Aiming at the problems of seismic design of high pier continuous bridges in high intensity areas, this paper takes two typical high piers as an example, and uses numerical simulation to compare and analyze the response results of seismic design and seismic isolation design under E2 earthquake, which elucidates the effectiveness of the seismic isolation technology on high pier continuous bridges, and puts forward effective solutions to the problem of large displacement of the beam end of the seismic isolation high pier continuous bridges.

Key words: continuous bridges with high pier; seismic isolation system; friction pendulum support; fall proof beam

连续梁桥由于其施工方便、行车平顺以及经济性高在我国得到广泛应用, 多适用于地质情况良好的桥位处。但受地形条件的限制, 有些连续梁的桥墩较高, 不同桥墩高度差异较大, 导致其地震响应变得复杂, 与常规连续梁桥的抗震设计存在很大差异^[1]。

对于高墩连续梁桥, 若采用抗震设计, 不得不增大桥墩截面尺寸以抵抗墩底过大的弯矩, 会显著增加材料用量, 既不经济也不美观。若采用隔震设计则会遇到三个问题。一是隔震多适用于墩高 10~15 m 的情况, 墩高增大后隔震效果如何尚存在疑问; 二是隔震多用于墩高相差不大、各墩刚度相近的情况, 但高墩连续梁的各桥墩刚

度往往差异较大; 三是采用隔震设计时, 连续梁桥的梁端位移会进一步放大, 存在梁体碰撞、落梁等风险, 如何防范碰撞风险成为隔震设计必不可少的内容。因此, 隔震技术在高烈度区高墩连续梁中的应用较少, 有关高墩连续梁桥采用隔震技术的研究也不多见。

基于此, 本文针对隔震技术应用于高墩连续梁桥的有效性进行了分析, 得出了一些具有代表性的结论, 并提出了防止梁体碰撞的构造方式, 为高墩连续梁桥的隔震设计提供参考。

1 某双层高架桥隔震分析

某大桥为双层钢桁梁高架桥, 跨度布置为

收稿日期: 2024-02-26

作者简介: 刘青兰, 高级工程师, 硕士, 主要从事桥梁工程设计与研究

2×80 m, 结构形式为正交异性板全焊钢桁梁, 结构采用连续梁支承体系。主桁结构采用三角桁式, 桁高 10 m, 节间长度 10 m, 两片主桁中心距 18 m, 上下层桥面均采用密布横梁体系的正交异性钢桥面板, 桥面间高度 10 m。最高墩为中墩, 桥墩高度为 22 m。该桥立面图见图 1, 桥梁横断面图见图 2。

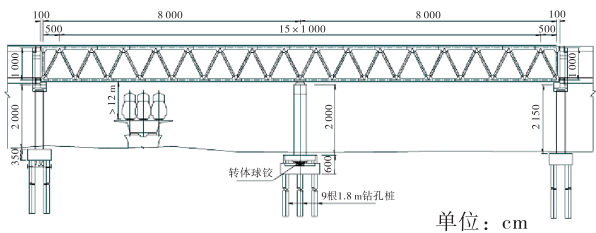
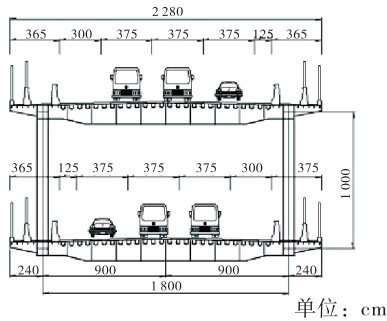
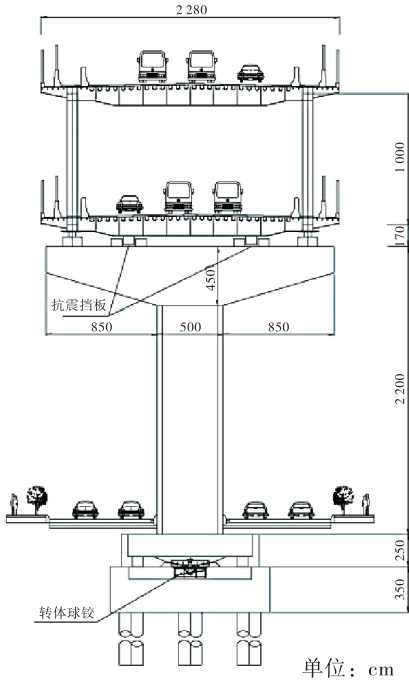


图 1 主桥立面布置图



(a) 主桥跨中处



(b) 主桥桥墩处

图 2 桥梁横断面图

该桥地处潮汕平原, 属于华南中、新生代大陆活化造山带的组成部分, 场地类别为Ⅳ类, 地

震烈度为Ⅷ度, 基本地震动峰值加速度为 0.2 g, 属于高烈度区, 根据相关规范^[2-3], 抗震措施按Ⅸ度设防。

由于双层梁体质量占比很大, 采用传统抗震设计会导致墩柱截面过大、配筋量大, 难以满足抗震强度要求和延性指标。为此, 采用隔震设计方案以削减地震响应。结合本桥结构特点, 在中墩设置摩擦摆隔震支座, 拟将桥梁的自振周期从 1.5 s 延长至 3.5 s 左右。经反复比选, 最终确定的摩擦摆隔震支座半径为 3 m, 固定螺栓剪断力限值 4 000 kN, 单个支座恒载下支反力约为 30 000 kN, 最大摆动距离为 300 mm。在 Midas Civil 2020 中, 摩擦摆隔震支座通过一般连接的滞后系统来模拟, 非线性特性值取值见表 1。

表 1 摩擦摆支座相关参数

型号	摩擦系数	初始刚度/(kN/m)	屈服刚度/(kN/m)	等效刚度/(kN/m)
FPQZ-50000-GD-e300	0.03	360 000	10 000	13 000

采用多重 Ritz 法进行动力特性分析, 对该桥取前 120 阶振型时, 纵桥向、横桥向及竖向振型贡献率均能达 90% 以上, 隔震前后前 8 阶自振周期如表 2 所示。由表可知, 中墩采用摩擦摆支座后, 结构纵横向的自振周期均得以大幅提高。

表 2 隔震前后自振周期

振型阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
隔震前周期/s	1.54	1.23	1.12	1.04	0.63	0.46	0.40	0.39
隔震后周期/s	3.41	3.36	1.05	0.95	0.77	0.68	0.57	0.57

根据地震安评报告所给出的 3 条安评波 (见图 3), 采用 Midas Civil 2020 进行 E2 地震作用下的非线性时程分析, 定义隔震率 = (抗震方案内力 - 隔震方案内力) / 抗震方案内力, 得出墩底内力值如表 3 第 2 列和第 3 列所示。由表可知, 采用摩擦摆支座进行隔震后, 隔震方案中墩的隔震率为 56% ~ 72%, 中墩弯矩和剪力显著减少, 隔震效果比较明显。相较于抗震方案, 隔震方案的纵、横桥向梁端位移均增大, 表明隔震设计方案使结构整体刚度变柔, 梁体和桥墩之间的约束得到释放, 从而减少桥墩的内力。其中隔震方案的纵、横向最大梁端位移为 0.268 m 和 0.164 m, 未超过摩擦摆 FPQZ-50000-GD-e300 的隔震允许位移量 ±300 mm, 表明隔震支座选取合理。

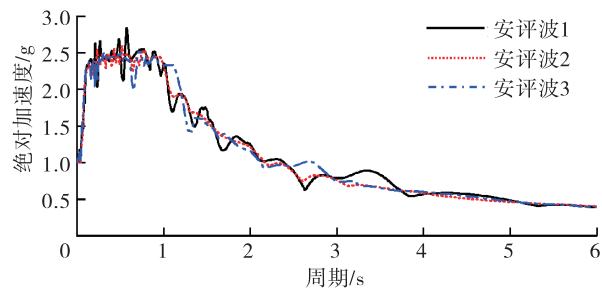


图 3 加速度反应谱

为了更好地对比分析隔震方案在高墩连续梁的有效性，在其他条件不变的情况下改变桥墩高度，将中墩高度由 22 m 增加至 32 m 和 42 m，边墩亦随之增高，计算得到地震响应结果见表 3。相较于抗震方案，随着中墩高度由 22 m 增加至 32 m 和 42 m，中墩墩底弯矩的隔震率由 72% 下降为 64% 和 56%，说明在高墩的情况下隔震仍然有效，但隔震效率有所降低。对于墩底剪力，抗

震方案的中墩墩底最大剪力为 38 331 kN。隔震方案中，当中墩高度为 22 m 时，墩底剪力为 10 936 kN，隔震率为 71%；当中墩高度为 32 m，墩底剪力为 10 702 kN，隔震率为 72%；墩高 42 m 时，墩底剪力为 9 820 kN，隔震率为 74%，说明随着桥墩高度增加，隔震后剪力变化幅度不明显。对于梁端位移，当桥墩高度增大至 32 m 和 42 m 时，梁端位移进一步放大，纵桥向分别达到了 0.313 m 和 0.335 m，存在落梁的风险，因此当桥墩较高时，采用隔震设计应考虑相应的措施减小位移。

总的来看，墩高较小时，隔震方案中墩和边墩的内力更为接近，中墩墩底弯矩的隔震率也最高，说明采用隔震设计可以使各桥墩均匀地分担地震响应，隔震效果较好，且有利于桥墩结构设计。当墩高增大时，尽管隔震效果有所降低，但仍然能有效削减地震产生的桥墩内力。

表 3 各方案地震响应结果

防震方案	抗震方案		隔震方案（墩高 22 m）		隔震方案（墩高 32 m）		隔震方案（墩高 42 m）	
	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向
中墩墩底弯矩/（kN·m）	831 416	662 302	229 453	208 615	300 493	281 512	362 868	343 253
隔震率	—	—	72%	69%	64%	57%	56%	48%
左边墩底弯矩/（kN·m）	305 168	434 572	233 041	166 605	122 573	103 829	122 508	103 843
隔震率	—	—	24%	62%	60%	76%	60%	76%
右边墩底弯矩/（kN·m）	276 644	492 030	207 885	192 046	147 619	94 510	146 858	111 154
隔震率	—	—	25%	61%	47%	81%	47%	77%
中墩墩底剪力/kN	38 331	25 075	10 936	11 041	10 702	11 979	9 820	11321
隔震率	—	—	71%	56%	72%	52%	74%	55%
左边墩底剪力/kN	16 083	17 750	11 770	8 301	7 012	4 806	7 053	4 917
隔震率	—	—	27%	53%	56%	73%	56%	72%
右边墩底剪力/kN	13 562	20 166	10 956	9 457	7 403	4 898	7 428	4799
隔震率	—	—	19%	53%	45%	76%	45%	76%
最大梁端位移/m	0.183	0.008	0.269	0.164	0.313	0.213	0.335	0.238

2 某大桥引桥连续梁隔震分析

某大桥引桥为 4 联混凝土连续梁桥，跨径布置为 6 × 45 m + 6 × 45 m + (74 m + 125 m + 74 m) + 4 × 78 m，共 1 125 m，如图 4 所示。桥址处为Ⅲ类场地，地震动峰值加速度 0.3 g。

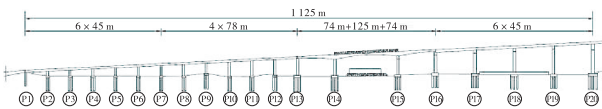


图 4 某大桥引桥结构布置图

在该桥中，最高墩墩高为 55.7 m，最低墩墩高为 0.3 m，差异非常大。为反映墩高对隔震效

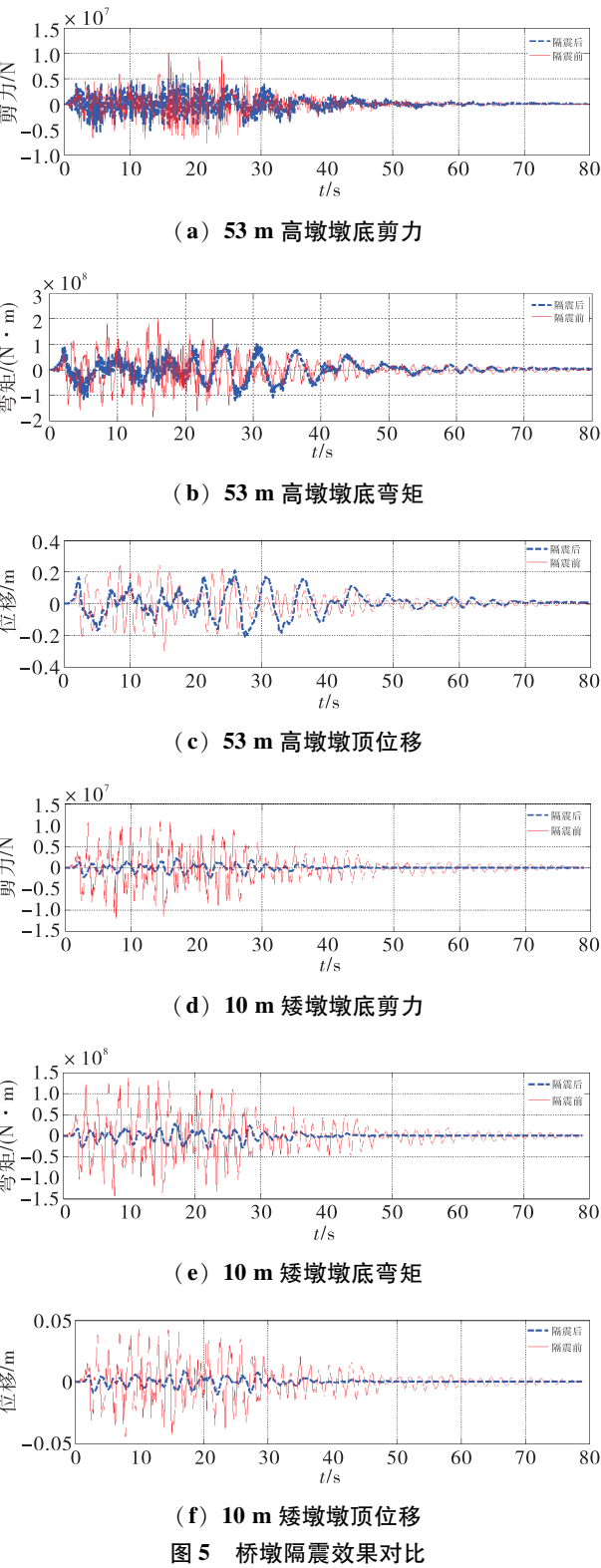
果的影响，本文选取了墩高变化较大的第 2 联连续梁，其最高桥墩为 53 m、最矮为 10 m。该桥隔震前桥梁基本周期为 2.3 s，采用摩擦摆将其周期延长至 4.9 s 左右。摩擦摆隔震支座的摩擦系数为 0.03，半径为 1.552 m。表 4 为东引桥隔震前后的自振特性对比。

表 4 隔震前后的自振周期

振型阶数	1	2	3	4	5
隔振前周期/s	2.29	1.94	1.58	1.54	1.23
隔振后周期/s	4.85	4.60	4.28	4.17	4.13

由表 4 可以看出，采用隔震支座后，引桥的自振周期可延长到未隔震前周期的 2 倍以上，从

而避开了地震输入的能量集中频带。以下进一步给出 53 m 高墩、10 m 矮墩的墩底弯矩、剪力以及对应的墩顶位移时程曲线, 如图 5 所示。



由图 5 可知, 对于本桥中的高墩段, 桥墩高度达 53 m, 刚度较小, 隔震前的自振周期已有 2.5 s 左右, 隔震效果不如 10 m 低墩明显, 但仍

能减小 40% ~ 50% 的弯矩和剪力; 而对于自身刚度较大, 正好处于地震输入能量集中段的低墩区, 采用隔震设计后, 弯矩和剪力减小了 80% ~ 90%, 很好地保护了桥梁的下部构造, 使其始终处于弹性振动范围内。

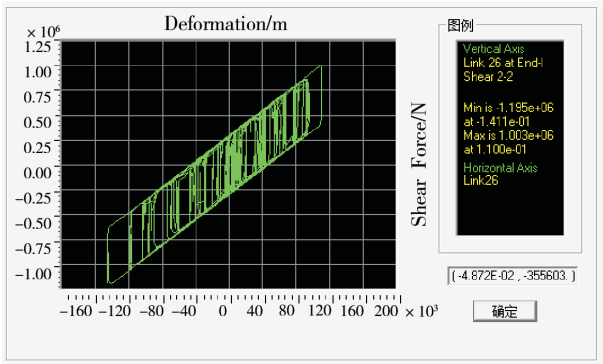


图 6 53 m 高墩摩擦摆支座的滞回曲线

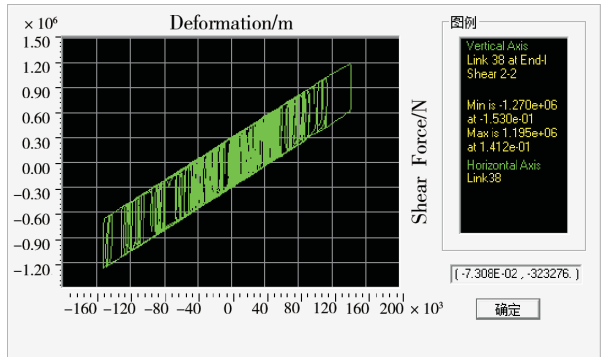


图 7 10 m 矮墩摩擦摆支座的滞回曲线

图 6 和图 7 分别给出了 53 m 高墩和 10 m 矮墩摩擦摆支座在 E2 地震作用下的滞回曲线。从图中可以看出, 摩擦摆支座具有稳定的滑移刚度和饱满的滞回面积, 在延长结构周期隔离地震动作用的同时, 耗散了大量的地震动输入能量, 起到保护桥梁下部结构的作用。对于 10 m 桥墩而言, 采用摩擦摆隔震支座可以有效控制内力和变形, 效果较好; 但当桥墩高达 53 m 时, 隔震支座虽可以达到削减内力的效果, 对墩顶位移则无明显作用, 如图 5 (a) 所示。在高墩连续梁中, 若各桥墩变形差距较大, 上部梁体容易错位摆动, 严重情况下会导致梁体碰撞、滑落等。

3 高墩连续梁防落梁措施

由上述分析可知, 高墩连续梁采用隔震设计后, 墩底弯矩大幅削减, 隔震效果明显。但也显现出一些问题, 即上部结构在地震作用下会产生较大的位移, 有可能发生碰撞, 导致连接件和支座的破坏, 甚至引起落梁现象。为避免这一极端

情况发生,需要采取相应的防落梁措施,如设置阻尼器、延性减震挡块^[4-6]、防震锚栓^[7]和减震卡榫^[8]等,这些装置均能有效提高上部结构梁体的安全,但构造略显复杂。

以上述双层高架桥为例,在隔震方案中,当中墩高度为 42 m,最大纵向梁端位移为 0.335 m,超过摩擦摆支座的极限允许位移,一旦支座在地震中发生破坏,上部结构有可能发生落梁事故。为此,本文提出了采用撑架将墩梁固结的构造措施,撑架结构如图 8~9 所示。其中,撑架采用低屈服强度 100~200 MPa 的软钢组成,此种钢材具有较低的屈服强度,且屈服点误差范围小,具有较好的延伸性和抗低周次疲劳特性。

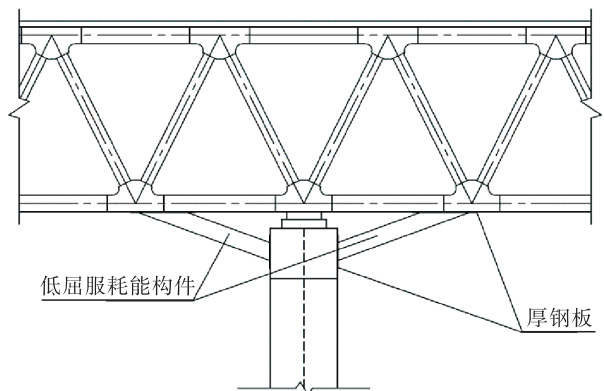


图 8 撑架结构立面图

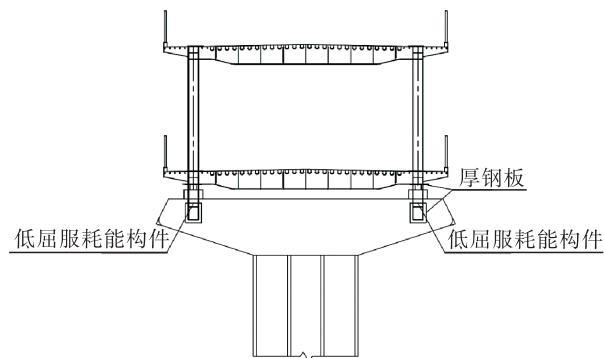


图 9 撑架结构横断面图

为反映撑架对梁端位移限制的有效性,对前述两跨钢桁梁的地震响应进行对比分析,主要模拟结果如表 5 所示。数值模拟结果表明,撑架可以大幅削减梁端的纵横向位移,在最不利情况下可以减小梁端位移 23%~39%,墩底剪力、弯矩亦可降低 10%~27%,是一种非常有效的耗能策略。

在中墩设置撑架后,中墩墩底弯矩和剪力进一步降低,而且梁体的变形也得到控制。这是因为在地震作用下软钢先进入屈服阶段,转变为减震耗能构件,配合隔震支座共同改善连续梁的受

表 5 无撑架隔震方案和有撑架隔震方案的对比

方案	无撑架隔震方案		有撑架隔震方案	
	纵向	横向	纵向	横向
中墩墩底弯矩/(kN·m)	362 868	343 253	337 995	309 074
中墩墩底剪力/kN	9 820	11 321	9 930	8 208
最大梁端位移/m	0.335	0.238	0.257	0.146

力性能、削减地震作用下控制截面内力和梁端变形。此外,撑架两端分别焊接在梁体和桥墩预埋钢板上,可作为牺牲性构件,如在地震作用下破坏,震后修复比较容易。由此可见,软钢撑架可作为高墩连续梁的防落梁措施可选择方案。

4 结论

本文采用墩底弯矩、墩底剪力和梁端位移作为评价指标,对比分析墩高差异对隔震连续梁桥隔震技术有效性的影响,通过两个典型案例的参数分析,可得出如下主要结论:①隔震技术在墩高 40~50 m 的高墩连续梁桥中是可行有效的,尽管隔震效果不如低墩连续梁桥显著,但降幅仍能达到 50% 以上,起到保护桥梁结构的作用。②高墩连续梁桥或墩高差异较大的连续梁桥采用隔震技术后,梁端位移显著增大,存在梁体碰撞、落梁等风险,对此,设置软钢撑架是可选择的方案。

参考文献:

[1]周志浩,陈实,宁晓骏,等. 梁桥高墩的减震设计方法[J]. 云南交通科技,2001(4):32-36.

[2]中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01—2020[S]. 北京:人民交通出版社,2020.

[3]中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[4]王翼,莫金生,李建中. 桥台混凝土挡块对连续梁桥地震响应的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017,45(7):948-953,1043.

[5]赵亮,项长生,周宇,等. 楔形挡块对中小跨径梁桥横向抗震性能的影响[J]. 地震工程学报,2020,42(1):22-31.

[6]董俊,文娟娟,杨转运. 高烈度区典型连续梁桥限位挡块设计参数研究[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(12):3678-3692.

[7]袁方. 锚栓抗震设计及应用[J]. 建筑结构,2017,47(01):55-59.

[8]董俊,曾永平,陈克坚,等. 减震榫对近场高烈度区大跨铁路连续梁桥抗震性能影响分析[J]. 铁道标准设计,2020,64(8):49-54.