

西藏定日 6.8 级地震桥梁震害特征分析

孙得璋^{1,2}, 彭宇轩^{1,2}, 林旭川^{1,2}, 鲁懿虬³, 马新生^{1,2}, 黄勇^{1,2}, 雷红雨⁴

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 同济大学 土木工程学院结构防灾减灾工程系, 上海 200092; 4. 云南凤魏高速公路有限公司, 云南 临沧 677000)

摘要:2025年1月7日, 西藏自治区定日县发生6.8级地震, 导致桥梁结构出现一定的损伤。该文基于现场调查, 主要介绍了国曲线X222线1号桥、2号桥、G219噶定线杂村二号桥及萨迦县机脚桥的震害。结合主断裂与桥梁的位置关系、台站地震动记录等信息, 初步分析了各桥构件震害的失效原因。地震中受损的桥梁主要为空心板梁结构, 震害以轻微破坏为主, 主要体现在桥台的锥坡发生严重破坏, 主梁侧移但挡块未发生破坏, 支座垫石多处出现裂缝或压碎的情况。最后, 该文提炼了具有实践指导价值的经验教训及技术启示。

关键词:定日地震; 空心板梁; 支座垫石; 桥台锥坡; 挡块

中图分类号:U448.35; P315.9 **文献标志码:**A

Typical seismic damage characteristics of bridges in the M_s 6.8 Dingri earthquake in Xizang

SUN Dezhang^{1,2}, PENG Yuxuan^{1,2}, LIN Xuchuan^{1,2}, LU Yiqiu³, MA Xinsheng^{1,2}, HUANG Yong^{1,2}, LEI Hongyu⁴

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China; 3. Tongji University, Department of Structural Disaster Prevention and Reduction Engineering, School of Civil Engineering, Shanghai 200092, China; 4. Yunnan Fengwei Expressway Co., Ltd., Lincang 677000, China)

Abstract: On January 7, 2025, a magnitude 6.8 earthquake struck the Dingri region of Xizang Autonomous Region, resulting in certain damage to bridge structures. Based on field investigations, this paper primarily documents the seismic damage observed at the following bridges: Bridge No.1 and Bridge No.2 on County Road Guoqu X222, the Zacun No.2 Bridge on G219 Gading Line, and the Jijiao Bridge in Sakya County. Furthermore, the failure causes of the seismic damage to structural components in each bridge are preliminarily analyzed by integrating information such as the positional relationship between the main fault and the bridges, and ground motion records from seismic stations. The bridges damaged in this earthquake were predominantly of hollow slab girder structures, with the seismic damage primarily manifesting as minor destruction. Key observations include severe damage to the slope protection of abutments, lateral displacement of main girders without failure of the restraining block, and multiple instances of cracking or crushing in the bearing pedestals. Finally, this paper summarizes the lessons and technical insights that are of practical guiding value.

Key words: Dingri earthquake; hollow slab girder; bearing pedestal; slope protection of abutments; restraining block

收稿日期:2025-03-07; 修回日期:2025-07-25

基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2025C01);黑龙江省自然科学基金项目(LH2024E015);云南省科技厅重大科技专项计划项目(202402AC080003)

作者简介:孙得璋(1982—),男,副研究员,博士,主要从事桥梁抗震、减隔震、加固和评估等研究。E-mail:sundz@iem.ac.cn

通信作者:彭宇轩(2000—),女,硕士研究生,主要从事桥梁抗震、桥梁减隔震研究。E-mail:ppp112517219@163.com

0 引言

2025年1月7日9时5分,西藏自治区日喀则市定日县(28°30'N,87°27'E)发生6.8级地震,震源深度10 km,此次地震是2025年以来我国发生的最大、海拔位置最高的地震,也是全球同期6级以上地震中震级最高的一次^[1]。定日地震发生在特提斯喜马拉雅构造单元申扎—定结断裂带的丁木错断裂,是在青藏高原及邻区上地壳内发生的大型正断层型地震,地震破裂长度约为40 km,破裂持续时间约为27 s^[2-4]。

本次地震最大地震烈度9度,面积约411 km²,建筑设施等所处平均海拔约4200 m,主要涉及定日县长所乡、曲洛乡、措果乡、尼辖乡和加错乡^[5-6]。地震后,中国地震局工程力学研究所定日西藏科考团队对震区的G219线、国曲线X222线上的桥梁进行了调查。通过对定结县至宏观震中线路中桥梁的宏观震害分析,揭示了此次地震造成桥梁,特别是高海拔公路桥梁在这次地震中破坏的形态和原因,总结了经验和教训。

1 桥梁震害调查概况

震区桥梁结构以梁桥为主,重点核查以下内容:①上部结构稳定性,包括主梁平面位移量值、落梁风险等级及伸缩缝区域碰撞痕迹;②承重构件完整性,着重检查主梁开裂特征(裂缝走向、宽度及分布密度)、支座工作状态(变形量、位移程度、脱空间隙及锚固螺栓效能);③下部结构损伤,涵盖桥面铺装层破损、盖梁与垫石裂纹形态、防撞挡块完整度,以及墩柱是否存在剪切裂缝、压溃破坏和倾斜等结构性损伤;④基础位移监测,需测量墩台基础的相对位移值并评估锥坡防护结构的有效性。

此次震后调查显示,区域内桥梁未遭受山体垮塌、滑坡掩埋、泥石流或堰塞湖等次生地质灾害的破坏。因此,后续桥梁的破坏等级主要依靠桥梁的直接损伤来判别^[7-9],根据中国地震台网中心给出的震中数据将桥梁调查情况以及震中距等列于表1中。

表1 调查的主要桥梁及震害简述

Table 1 Brief description of investigated bridges and damage

编号	名称	位置	震中距/km	主梁类型	跨度/m	桥墩形式	测量墩高/m	烈度	震害简述
1	国曲线 X222 线 1号桥	28°32'N, 87°27'E	4.1	空心板梁	6×20	双柱式墩	4~6	9度	锥坡破坏严重,部分梁轻微水平侧移,个别支座位石边缘开裂
2	国曲线 X222 线 2号桥	28°32'N, 87°26'E	3.1	空心板梁	5×20	双柱式墩	4~6	9度	锥坡破坏严重,个别支座位石变形压碎
3	G219 噶定线杂村二号桥	28°32'N, 87°32'E	9.0	空心板梁	1×10	无	—	9度	锥坡严重破坏;一侧矮侧墙出现多处裂缝,部分支座位石出现裂缝,支座发生变形无法恢复
4	萨迦县机脚桥	28°31'N, 87°45'E	29.6	空心板梁	3×15	双柱式墩	3	7度	桥墩发生不均匀沉降,支座有一定滑移,2个桥墩顶部钢筋裸露
5	协林藏布一号桥	28°29'N, 87°41'E	23.1	混凝土 T 梁	7×35	双柱式墩, 设置金属护套	—	7度	基本完好
6	协林藏布二号桥	28°29'N, 87°41'E	23.7	混凝土 T 梁	—	双柱式墩, 设置金属护套	—	7度	基本完好
7	帕泽朗大桥	28°58'N, 87°56'E	69.1	混凝土 T 梁	17×30	双柱式墩	5	6度	基本完好

2 典型桥梁震害特征介绍

2.1 国曲线 X222 线 1号桥震害特征

国曲线 X222 线 1号桥(图1)为6跨空心板简支梁桥,每跨20 m,下部结构采用双柱式桥墩,桥墩高度4~6 m,普通橡胶支座,主梁与挡块之间设置防撞橡胶垫见图1(b),总长度为130 m,桥梁于2013年9月1日通车。桥梁位于9度区,距离震中距约4.1 km,有多条地表裂缝穿越桥梁见图1(c),部分裂缝落差30 cm,在距离桥梁南侧6号桥台约400 m的南侧河滩位置,发现2处范围不大的液化点。主要震害表现为桥梁两端桥台的锥坡破坏严重,见图1(d);4号墩位置梁产生轻微水平侧移见图1(e),梁端发生碰撞挤压,

混凝土剥落见图 1(f); 2 号墩、3 号墩位置盖梁支座垫石边缘压碎, 垫石压碎处未发现配筋见图 1(g); 6 号桥台路基发生严重沉降, 与桥台脱离 21 cm 见图 1(h), 未发现挡块、桥墩破坏以及落梁风险。



(a) 桥梁整体图



(b) 主梁与挡块之间设置的防撞橡胶垫



(c) 贯穿桥梁的地表裂缝



(d) 0号桥台锥坡严重开裂



(e) 4号墩上梁发生水平侧移



(f) 4号墩上梁发生碰撞, 混凝土剥落



(g) 4号墩支座垫石边缘压碎



(h) 6号桥台处路基发生21 cm沉降

图 1 国曲线 X222 线 1 号桥震害

Fig. 1 Seismic damage of Bridge No.1 on County Road Guoqu X222

2.2 国曲线 X222 线 2 号桥震害特征

国曲线 X222 线 2 号桥(图 2)为 5 跨空心板简支梁桥, 每跨 20 m, 下部结构采用双柱式桥墩, 桥墩高度为 4~6 m, 普通橡胶支座, 总长度为 110 m, 主梁与挡块之间设置防撞橡胶垫见图 2(b)。桥梁位于 9 度区, 距离震中距约 3.1 km, 有多条地表裂缝垂直穿越桥台, 长度几十至上百米不等见图 2(c)。桥梁的主要震害表现为桥台两侧锥坡破坏严重见图 2(d)、(e); 4 号墩一侧支座垫石变形压碎, 未发现垫石配筋见图 2(f)。除此之外, 在距离桥梁 A1 桥台 600 m 左右的河滩位置, 发现 2 处范围不大液化点见图 2(g), 桥台锥坡旁的挡土墙也出现裂缝。未发现桥墩和挡块破坏以及落梁风险。



(a) 桥梁整体图



(b) 主梁与挡块之间设置的防撞橡胶垫



图 2 国曲线 X222 线 2 号桥震害

Fig. 2 Seismic damage of Bridge No.2 on County Road Guoqu X222

2.3 G219 噶定线杂村二号桥震害特征

G219 噶定线杂村二号桥为单跨空心板斜交简支梁桥,长度为 10 m,无桥墩,采用普通橡胶支座,见图 3(a);主梁与挡块之间布置防撞橡胶垫,见图 3(b),2019 年 12 月通车。桥梁位于地震烈度 9 度区,距离震中距约 9.0 km,距离主断裂约 1 km,主要震害表现为承台锥坡发生了严重破坏;一侧桥台矮侧墙出现多处裂缝并且与梁碰撞导致梁端混凝土剥落见图 3(c)、(d)、(e);部分支座垫石出现裂缝见图 3(f),橡胶支座发生变形无法恢复见图 3(g);桥台与路面碰撞导致路面出现裂缝。除此之外,连接桥梁的道路路基发生大面积的沉降,最大达到 20 多厘米见图 3(h);桥梁和道路两侧场地出现大量场地裂缝以及大面积的液化现象,桥梁距离最近的液化点 10 m 左右,见图 3(i)。





(g) 部分支座发生变形无法恢复

(h) 局部路基坍塌

(i) 桥梁附近场地液化现象

图3 G219 噶定线杂村二号桥震害

Fig. 3 Seismic damage of Zacun No.2 Bridge on G219 Gading Line

2.4 萨迦县机脚桥震害特征

萨迦县机脚桥,3跨曲线空心板简支梁桥,双柱式桥墩,桥墩高度3 m,采用普通橡胶支座,桥墩底部设置防冲刷金属护套,每跨梁为直线空心板梁,见图4。桥梁位于地震烈度7度区,距离震中距约29.6 km。多条地表裂缝穿越桥梁见图4(b),2号桥墩发生不均匀沉降,导致空心板梁的相邻梁之间出现缝隙,部分支座有少量滑移,2号桥墩顶部混凝土脱落,钢筋裸露见图4(c)。



(a) 桥梁整体及桥墩

(b) 地表裂缝穿越桥梁



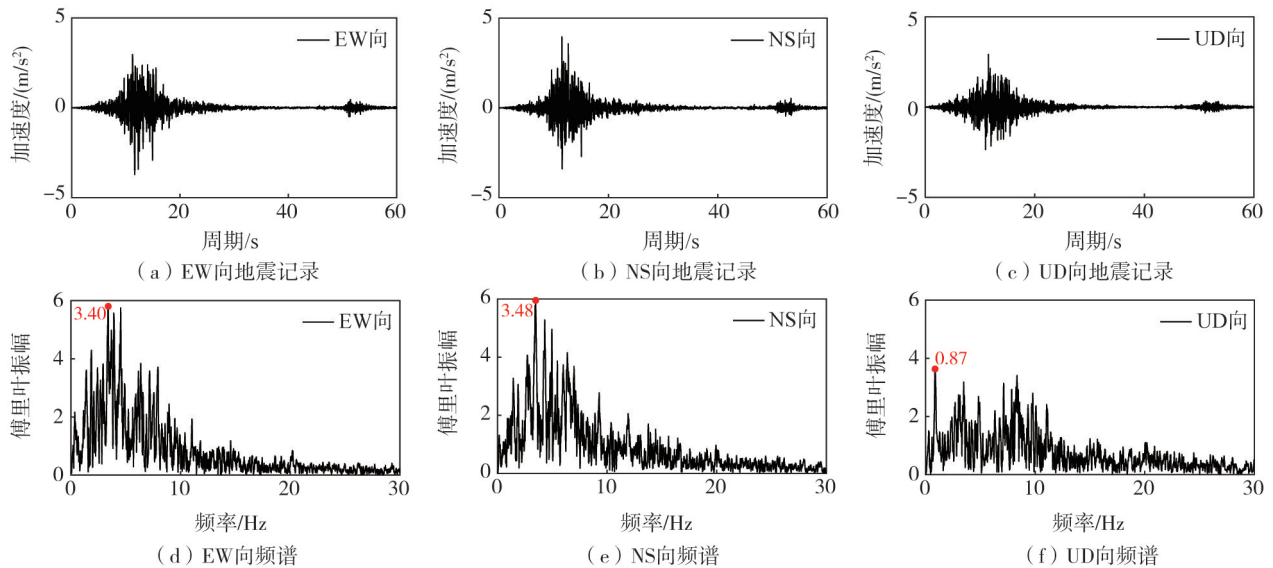
(c) 2号墩不均匀沉降倾斜导致墩顶钢筋裸露

图4 萨迦县机脚桥震害

Fig. 4 Seismic damage of the Jijiao Bridge in Sakya County

3 震害原因初步分析

1) 根据 GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》^[10],定日县的设防等级为Ⅶ度 0.15 g,定结县的设防等级为Ⅷ度 0.2 g。距离震中最近的台站震中距为 35.5 km,EW(东西)向、NS(南北)向、UD(垂直)向加速度峰值分别为-1.00、1.08、-63.3 cm/s²,速度峰值分别为 -0.13、0.09、0.05 cm/s。台站 XZ.D0007 距离震中为 67.5 km,记录到此次地震的最大峰值加速度。台站 XZ.D0007(坐标 29°5'N, 87°38'E)记录到的最大三向地震动时程及其对应傅里叶振幅谱,见图5。EW向、NS向、UD向加速度峰值分别为 3.81、4.19、3.18 cm/s²。时程记录对应的地震反应谱见图6(抗震设防烈度为Ⅶ度 0.15 g,设计地震分组为第3组,场地类别为Ⅱ类,场地特征周期为 0.45 s^[10])。



注:中国地震局工程力学研究所强震动观测中心提供数据支持。

图 5 XZ.D0007 台站三向时程记录及对应傅里叶频谱

Fig. 5 Three-dimensional time history records and corresponding Fourier spectrum of XZ.D0007 station

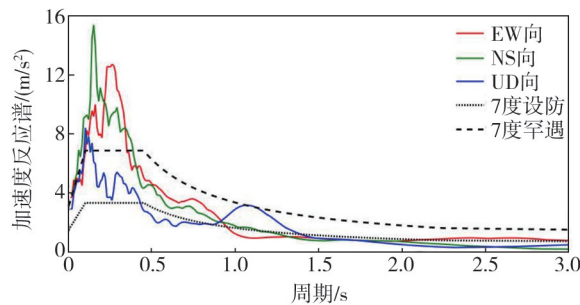


图 6 XZ.D0007 台站三向记录对地震反应谱(阻尼比 5%)

Fig. 6 Seismic response spectrum of three-dimensional records of XZ.D0007 station (damping ratio 5%)

从地震动记录看,EW 向和 NS 向的加速度相差不大,NS 向略大。由图 6 可知,在 0.3~0.4 s 周期范围内 EW 向谱值比 NS 向大,但衰减的较快,在 0.4 s 以后 EW 向和 NS 向均小于 7 度罕遇的反应谱值。通过粗略估计(梁高 1.2 m,开孔率 50%,梁长 20 m,混凝土 C40,墩直径 1.2 m,高度 4~6 m,盖梁 1.3 m×1.4 m×6 m,橡胶支座直径 0.25 m)国曲线 X222 线 1 号桥和 2 号桥的基本周期在 0.5~0.7 s 附近,刚好对 EW 向地震动比较敏感。从国曲线 X222 线 1 号桥和 2 号桥的震害看,主体桥墩、梁体均未发生破坏,而仅仅部分梁发生横向侧移,以及在支座的垫石在 EW 向有压碎、裂缝等破坏,NS 向未发现大的破坏现象,比如落梁、梁与路面碰撞引起等,这一方面反映 EW 向的反应比 NS 向大。而超过 0.4 s 以后地震动加速度值均未超过 7 度罕遇的应谱值,从侧面说明桥梁满足了设计要求。另外,根据研究^[11],本次地震的地震动特征表现为非常明显的上/下盘效应,上盘的地震动峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)值较大,但持时较短,而下盘的 PGA 较小但是持时较长。这也可从侧面说明位于上盘的 9 度区 3 座桥梁仅仅发生了轻微破坏的原因。

2) 距离震中最近的主断为丁木错断裂^[12-14],属于拉张型断裂(图 7),丁木错段地表断裂位于丁木错东侧、东南侧的先存断层陡坎上,整体近 NNE 走向,由多条不连续分布、长度数百米的断裂组成^[14]。9 度区 3 座桥梁均处于正断层的上盘,国曲线 X222 线 1 号和 2 号桥距离丁木错断裂约 9 km,杂村二号桥距离丁木错断裂约 1 km;萨迦县机脚桥处于正断层的下盘,距离丁木错断裂约 19 km,但距离郭加断裂非常近。这几座桥梁所处位置均属于高原河流冲积平原,以沙土为主,在桥址位置均发现大量的地裂缝贯穿桥梁。现行的 JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》^[15]对于小于Ⅷ度的抗震设防烈度不考虑发震断裂引起的地表断裂的影响其他设计规范^[16-17],也未对正断层断裂区域设计予以说明。研究表明,地震导致的地形和地貌的显著变化,例如出现地裂现象,会增强结构的动力响应,放大地表加速度,且在基岩波地震作用下影响效果更为显著,从而使结构受到损害^[18-19],显然这次地震上盘的桥梁是Ⅶ度设防,而国曲线 X222 线 1 号和

2号桥桥台及道路路基附近沙土以细沙为主,含水量较少,在EW向地震中道路出现了沉陷和外闪,因此,桥梁的锥坡破坏与地裂缝破坏有直接的关系。另外,萨迦县机脚桥位于定结县,根据文献[14],多次余震发生在丁木错断裂和郭加断裂之间,与郭加断裂的活动的关系更大,而机脚桥处于郭加断裂的延伸线上,且距离很近;考虑到其处于主断裂下盘,地震动强度虽然不大,但是持时长,结合与郭加断裂位置,其破坏与断裂穿越桥梁的关系更大一些^[20-21],具体的量化还需要进一步后续研究。除机脚桥外,位于主断裂上盘的桥梁也明显比下盘的桥梁受灾严重,也具有显著的上盘效应^[22-23]。

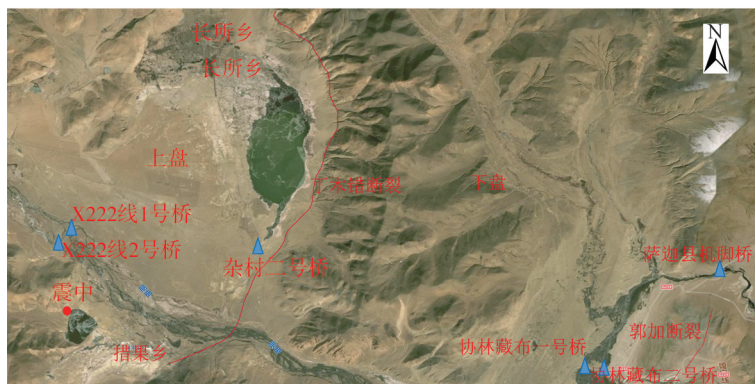


图7 桥梁及主断裂空间位置

Fig. 7 Spatial positions of the bridge and the main fault zone

3) 根据规范^[15,24-25]规定,橡胶支座的垫石按局部承压计算,垫石长度、宽度比支座相应的尺寸增加50 mm,高度在100 mm以上;垫石内应布置钢筋网,采用 $\phi 8$ 钢筋(间距 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$)且混凝土强度大于等于C30。本次地震中,垫石的尺寸满足规范的规定,但仍多处垫石发生了破坏,从垫石压碎处混凝土可以看到,垫石内没有设置钢筋网,因此,不满足规范的要求。地震中垫石的边缘很容易发生破坏,因此建议在高烈度地区,混凝土外边缘设置钢套箍、环形钢筋或纤维增强复合材料等约束措施以减少混凝土的开裂。9度区的几座桥梁中,主梁与挡块之间设置了橡胶垫^[15],从震害看,本次地震中未发现挡块的震害,说明增加的橡胶垫可有效缓冲地震惯性力引起的梁体和挡块的碰撞作用。对于采用桥台矮端墙替代挡块的设计,应将其按照耗能挡块的功能设计。

4) 本文介绍的受损的桥梁均为空心板梁结构,其横向约束一般为湿接缝,属于铰接,本质上是混凝土填补缝隙,横向约束较弱。现场中未发现增强横向预应力等加强横向约束的措施。本次地震中,机脚桥的结构形式为外观“曲线”的斜交梁,梁-梁之间不等高,因此,本次地震中其板梁之间的缝隙变大,是2号墩的不均匀沉降、板梁之间横向约束薄弱、斜交桥形式等多种因素综合的结果。

4 结论

根据对定日6.8级地震桥梁震害的形态和原因的初步分析,得到如下结论:

1) 从本次震害看,桥梁的设防等级满足当地的地震烈度和抗震设类别的要求。
2) 强化抗震概念设计,结构体系优选准则。应尽量采用几何线形简单、刚度均匀的直桥形式,避免弯、坡、斜桥,以减小地震作用下的扭转效应,应避免类似机脚桥的弯形斜交桥形式。同时,应避免开软弱土、液化土等不利场地,优先选择基岩或密实土层。

3) 现行的JTG/T 2231-01-2020《公路桥梁抗震设计规范》中对于发震断裂的要求是设防烈度小于VIII度时,不予考虑,其他设计规范也未对正断层断裂区域设计予以说明,很显然本次地震发生的地区就是位于设防烈度VII度的区域,正断层导致地面大面积的地表破裂。因此,建议将规范中此条文内容进行修改,并对于正断层地震的情况进行研究。

4) 相邻空心板梁间横向联系较弱,传统连接构造及施工方法难以保证其在地震中横向连接的可靠性,需要改进连接构造,确保强震下空心板梁横向连接的可靠性。从破坏的支座垫石来看,未发现垫石配置钢筋,不符合JTG/T 5532-2023《公路桥梁支座和伸缩装置养护与更换技术规范》的规定,该规范定义支座垫石为现浇钢筋混凝土垫块。从震害看,支座垫石应配置钢筋,对于高烈度区,应在垫石边缘设置钢套箍、环形

钢筋或纤维增强复合材料等抗拉约束装置防止边缘混凝土在地震中开裂、压碎等破坏。

5) 调查的部分桥梁中挡块与主梁之间均设置了橡胶垫,这符合JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》设置橡胶或其他弹性衬垫的要求。从本次震害看,挡块的震害基本保持完好状态,说明橡胶等弹性衬垫可有效缓冲地震惯性力引起的梁体和挡块的碰撞作用。对于采用桥台矮端墙替代挡块的设计,应将其按照耗能挡块的功能设计。

参考文献:

- [1] 赵伟华,许强,吉锋,等. 2025年1月7日西藏定日 M_s 6.8级地震形变场特征及场地效应分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2025, 52(2): 173-184.
ZHAO Weihua, XU Qiang, JI Feng, et al. Deformation field characteristics and site effect analysis of the M_s 6.8 Dingri earthquake in Xizang on January 7, 2025[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2025, 52(2): 173-184. (in Chinese)
- [2] 白玲,陈治文,王绍俊. 2025年西藏定日6.8级地震:构造背景分析与震源特征探讨[J]. 地球与行星物理评论(中英文), 2025, 56(3): 258-263.
BAI Ling, CHEN Zhiwen, WANG Shaojun. The 2025 Dingri M_s 6.8 earthquake in Xizang: Analysis of tectonic background and discussion of source characteristics[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 2025, 56(3): 258-263. (in Chinese)
- [3] 李雨森,李为乐,许强,等. 2025年1月7日西藏定日 M_s 6.8级地震InSAR同震形变探测与断层滑动分布反演[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2025, 52(2): 199-211.
LI Yusen, LI Weile, XU Qiang, et al. InSAR coseismic deformation detection and fault slip distribution inversion of the M_s 6.8 earthquake in Dingri, Xizang on January 7, 2025[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2025, 52(2): 199-211. (in Chinese)
- [4] 铁永波,高云建,张宪政,等. 西藏定日县 M_s 6.8级地震区地质灾害发育规律与减灾对策研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2025, 45(1): 212-224.
TIE Yongbo, GAO Yunjian, ZHANG Xianzheng, et al. Study on the development laws and mitigation of geological hazards in Dingri M_s 6.8 earthquake region, Xizang Autonomous Region[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2025, 45(1): 212-224. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部中国地震局发布西藏定日6.8级地震烈度图[EB/OL]. (2025-01-10) [2025-01-10]. <https://mp.weixin.qq.com/s/ge5eacI Gyq1diaa I2AKdj>.
Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China The Seismological Bureau of China, Ministry of Emergency Management, released the intensity map of Xizang Dingri earthquake with magnitude 6.8[EB/OL]. (2025-01-10) [2025-01-10]. <https://mp.weixin.qq.com/s/ge5eacI Gyq1diaa I2AKdj>. (in Chinese)
- [6] 王言侨,李祥秀,王宁,等. 西藏定日6.8级地震民居震害原因分析[J]. 地震工程学报, 2025, 47(3): 700-708.
WANG Yanqiao, LI Xiangxiu, WANG Ning, et al. Causes of damage to residential buildings during the Dingri M_s 6.8 earthquake in Xizang[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2025, 47(3): 700-708. (in Chinese)
- [7] 陈乐生. 汶川地震公路震害调查-桥梁[M]. 北京:人民交通出版社, 2012.
CHEN Lesheng. Report on highways' damage in the Wenchuan earthquake[M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese)
- [8] 林庆利,林均岐,刘金龙,等. 基于公路桥梁震害的烈度评定研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(4): 97-103.
LIN Qingli, LIN Junqi, LIU Jinlong, et al. Research on intensity assessment based on seismic damage of highway bridges[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(4): 97-103. (in Chinese)
- [9] 王再荣,郭恩栋,赵钊,等. 桥梁地震破坏等级划分标准浅析[J]. 世界地震工程, 2010, 26(1): 90-93.
WANG Zairong, GUO Endong, ZHAO Zhao, et al. Analysis of gradation criterion of earthquake damage to bridges[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(1): 90-93. (in Chinese)
- [10] GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》宣贯教材[M]. 北京:中国标准出版社, 2015.
GB 18306—2015 Teaching materials of Seismic Ground Motion Parameter Zoning Map of China [M]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [11] 王晓磊,李佳具,刘佳慧,等. 西藏定日6.8级地震地面运动特征空间分布分析[J/OL]. 地震工程学报, 2025; 1-14. (2025-06-04). <https://link.cnki.net/doi/10.20000/j.1000-0844.20250221001>.
WANG Xiaolei, LI Jiaju, LIU Jiahui, et al. Spatial distribution analysis of ground motion characteristics of M_s 6.8 earthquake in Dingri, Xizang [J/OL]. China Earthquake Engineering Journal, 2025; 1-14. (2025-06-04). <https://link.cnki.net/doi/10.20000/j.1000-0844.20250221001>. (in Chinese)
- [12] 赵小艳,贺素歌,孔令嵩,等. 西藏定日6.8级地震破裂特征及序列强余震预测[J]. 地球科学, 2025, 50(5): 1733-1743.
ZHAO Xiaoyan, HE Suge, KONG Lingsong, et al. Rupture characteristics of the Dingri M_s 6.8 earthquake in Xizang and prediction of strong aftershocks in the sequence[J]. Earth Science, 2025, 50(5): 1733-1743. (in Chinese)
- [13] 王秀英,旦增,赵国存,等. 基于地震动数据的西藏定日6.8级地震震害初步分析[J]. 安全与环境工程, 2025, 32(2): 41-49.
WANG Xiuying, DANZENG, ZHAO Guocun, et al. Preliminary damage analysis of Dingri 6.8-magnitude earthquake in Xizang using ground

- motion data[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2025, 32(2): 41-49. (in Chinese)
- [14] 刘富财, 潘家伟, 李海兵, 等. 2025年 M_w 7.1西藏定日地震地表破裂与同震位移分布特征[J]. *地质学报*, 2025, 99(3): 685-703.
LIU Fucai, PAN Jiawei, LI Haibing, et al. Co-seismic surface rupture of the 2025 M_w 7.1 Dingri earthquake and potential seismic risk in southern Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2025, 99(3): 685-703. (in Chinese)
- [15] JTG/T 2231-01—2020 公路桥梁抗震设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
JTG/T 2231-01—2020 Specifications for seismic design of highway bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)
- [16] TB 10093—2017 铁路桥涵地基和基础设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
TB 10093—2017 Railway bridge and culvert technical conditions[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. (in Chinese)
- [17] CJJ 166—2011 城市桥梁抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
CJJ 166—2011 Code for seismic design of urban bridges[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [18] 郭宏超, 郭品彰, 张博明, 等. 考虑地裂缝影响的连体结构地震动力响应分析[J]. *西安理工大学学报*, 2023, 39(1): 141-150.
GUO Hongchao, GUO Pinzhang, ZHANG Boming, et al. Seismic dynamic response analysis of conjoined structures considering the influence of ground fissures[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2023, 39(1): 141-150. (in Chinese)
- [19] 熊仲明, 王永玮, 陈轩, 等. 在上下盘差异沉降作用下跨越地裂缝框架结构地震响应研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(10): 112-118.
XIONG Zhongming, WANG Yongwei, CHEN Xuan, et al. Seismic responses of structures across ground fissure with different settlements between hanging wall and foot wall[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(10): 112-118. (in Chinese)
- [20] 惠迎新, 毛明杰, 刘海峰, 等. 跨断层桥梁结构地震响应影响[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2018, 48(6): 1725-1734.
HUI Yingxin, MAO Mingjie, LIU Haifeng, et al. Influence of structural seismic response of bridges crossing active fault[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2018, 48(6): 1725-1734. (in Chinese)
- [21] 石岩, 王文仙, 赵昊森, 等. 跨走滑断层多跨筒支梁桥地震反应特征与参数分析[J]. *地震研究*, 2024, 47(3): 461-473.
SHI Yan, WANG Wenxian, ZHAO Haomiao, et al. Seismic response characteristics and parameter analysis of the multi-span simply supported girder bridge across strike-slip faults[J]. *Journal of Seismological Research*, 2024, 47(3): 461-473. (in Chinese)
- [22] 杜建军, 马寅生, 黎敦朋. 渭河盆地东南缘主要断裂晚更新世以来的活动性及灾害效应[J]. *地球学报*, 2017, 38(增刊1): 55-58.
DU Jianjun, MA Yinsheng, LI Duncheng. Activity of main faults since the late Pleistocene and related geohazard effects in southeast of Weihe basin[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2017, 38(Sup. 1): 55-58. (in Chinese)
- [23] WEI T, FAN X, XIA M, et al. Hanging wall effects on cross-fault slope failures: Shaking table experiment insights[J]. *Engineering Geology*, 2025, 350: 107985.
- [24] JTT 4—2019 公路桥梁板式橡胶支座[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
JTT 4—2019 Plate rubber bearings for highway bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 2019. (in Chinese)
- [25] JTG/T 5532—2023 公路桥梁支座和伸缩装置养护与更换技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2023.
JTG/T 5532—2023 Technical specification for maintenance and replacement of highway bridge bearings and expansion devices[S]. Beijing: China Communications Press, 2023. (in Chinese)