

积石山 6.2 级地震桥梁典型震害特征

孙得璋^{1,2}, 彭宇轩^{1,2}, 余世舟^{1,2}, 闫培雷^{1,2}, 张昊宇^{1,2}, 黄勇^{1,2}, 聂桂波^{1,2}

(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)

摘要: 调查了 306 省道、310 国道以及川亭公路上位于地震烈度 8 度和 7 度区的桥梁。GS.N0028 台站记录到的大河家镇加速度峰值超过 900 cm/s², 远超当地罕遇地震设防标准, 但从调查的结果看, 本次地震中, 8 度区的桥梁震害主要以轻微破坏为主, 包括挡块破坏、主梁侧移和支座滑移, 除了川亭公路上发现一桥梁的桥墩出现剪切裂缝外, 其他桥梁未发现主体结构发生破坏。7 度区的桥梁基本完好, 橡胶支座中橡胶有变形无法恢复以及主梁位移导致挡块间距发生变化, 但都不影响功能。混凝土挡块作为主梁防侧移装置, 震害虽然表明其有效性, 但缺乏快速恢复的特性, 同时设置缓冲橡胶垫的挡块仍然发生了较严重的破坏, 因此, 以后需要进一步加强挡块的缓冲装置和考虑可快速恢复性能的研究。

关键词: 积石山地震; 大河家黄河大桥; 挡块破坏; 支座滑移; 桥台震害

中图分类号: P315.9; U448.1

文献标识码: A

Typical seismic damage characteristics of bridges in the M_s 6.2 Jishishan earthquake

SUN Dezhang^{1,2}, PENG Yuxuan^{1,2}, YU Shizhou^{1,2}, YAN Peilei^{1,2},

ZHANG Haoyu^{1,2}, HUANG Yong^{1,2}, NIE Guibo^{1,2}

(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)

Abstract: This article mainly presents the investigation of bridges located in seismic intensity 8 degree and 7 degree zones on 306 Provincial Road, 310 National Road and Chuanting Highway. Peak acceleration of over 900 cm/s² was recorded at station GS.N0028 in the town of Dahejia, far exceeding the local rare earthquake fortification standard. However, the investigation results show that the bridges in the intensity 8 degree zone were mainly slightly damaged, including restrainer damage, lateral displacement of the main girder and bearing sliding, except for one bridge on Chuanting Highway where shear cracks were found in the pier, no other bridge in this area was found that suffered main structural damage. Bridges in the intensity 7 degree zone were basically intact, with some rubber deformations and unrecoverable displacements in the rubber bearings, as well as changes in the distance between restrainers. Fortunately, these issues did not affect their functionality. Concrete restrainer, as a measure to prevent lateral displacement of the main beam, has shown effectiveness in seismic damage, and is lack of rapid recovery characteristics. At the same time, the restrainer that installed cushion rubber pad also suffered severe damage, therefore, improving the cushioning device and considering the quick recovery of performance are needed in the future studies.

收稿日期: 2024-01-29; 修回日期: 2024-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51678544)

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

通讯作者: 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

Key words: Jishishan earthquake; Dahejia Yellow River Bridge; restrainer damage; bearing sliding; seismic damage of abutment

0 引言

2023 年 12 月 18 日北京时间 23 时 59 分,在甘肃省临夏回族自治州积石山县(35.70°N,102.79°E)发生 6.2 级地震,震源深度 10 km,发震区域属于甘南构造区^[1],截至 2023 年 12 月 31 日共造成 151 人死亡,千余人受伤^[2]。

地震发生后中国地震局迅速组织专家进行现场地震现场应急调查,包括对灾区范围内台站、建筑物、生命线工程、地震地质灾害及次生灾害进行调查,并通过震害调查评定宏观烈度。经调查,宏观震中位于大河家镇,烈度评定为 8 度^[3]。而地震台网中的 GS.N0028 台站位于积石山县大河家镇康吊村(102.75°E,35.8°N),高程 1 854 m,距微观震中 13.6 km,距离大河家黄河大桥约 6 km,记录到最大峰值加速度为 928 cm/s²,最大峰值速度为 57.3 cm/s,该台站观测仪器为 MI3000 地震烈度仪,固定于铁塔站房距离地面约 30 cm 内墙上,站房位于坡度较缓的斜坡中部,坡度约为 5°。

桥梁作为重要的生命线工程,其震后的功能畅通性是地震应急救援、物资运输等的重要保障。而我国西部、西南部地区的山区及河谷较多,地震断裂带密布,导致我国西部、西南部山区桥梁的地质条件复杂,使桥梁的易损性较高^[4-5],其在地震中发生破坏,往往会给灾区救援工作带来极大的阻碍,严重影响救援的效率。本次地震位于甘肃和青海省,地质条件复杂,地震后大河家黄河大桥一度封闭,使甘肃—青海的线路需要绕行 10 km 以上,给救援带来了极大的困难。经中国地震局批准,中国地震局科技人员对灾区的生命线工程进行了考察,分析灾区桥梁结构的震害特征,以期对未来桥梁的地震安全和抗震能力分析提供一定的参考。

1 桥梁震害概况

本文主要涉及调查了 306 省道、310 国道以及川亭公路上位于地震烈度 8 度和 7 度区的桥梁,该地区设防等级属于 7 度 0.10 *g* 三组^[6]。地震烈度 8 度受损的桥梁具体桥梁包括大河家黄河大桥(新桥和旧桥)、306 省道 2 个桥梁、310 国道以及川亭公路上桥梁,同时也调查了沿途没有震害的桥梁,如表 1 所示。

表 1 调查的主要桥梁列表

Table 1 List of investigated bridges

名称	位置	桥梁类型	烈度	震害简述
大河家黄河大桥新桥	102.76°E,35.84°N	连续梁桥	8 度	桥台局部开裂、支座侧移
大河家黄河大桥旧桥	102.82°E,35.86°N	刚构桥	8 度	梁横移、挡块开裂严重、栏杆外闪
川亭公路通往官亭镇一公路桥梁(无具体名称)	102.79°E,35.87°N	简支梁桥	8 度	桥墩 140 cm 明显裂缝
306 省道 K8 段 2 个公路桥梁(无具体名称)	102.82°E,35.86°N	简支梁桥	8 度	挡块开裂严重、支座滑移
大河家镇广场一公路桥(无具体名称)	102.76°E,35.84°N	简支梁桥	8 度	桥头碰撞
国道 310 公路桥梁	102.71°E,35.82°N	连续刚构桥	8 度	桥头碰撞
临大高速黄河大桥(在建)	102.74°E,35.83°N	连续刚构桥	8 度	完好
黄河二号大桥	102.64°E,35.83°N	连续刚构桥	7 度	完好,梁侧移导致挡块间距变化
清大线一桥梁(无具体名称)	102.63°E,35.84°N	简支梁桥	7 度	完好,支座中橡胶变形无法恢复
阿么查大桥	102.60°E,35.84°N	简支梁桥	7 度	完好
黄河一号大桥	102.60°E,35.84°N	连续刚构桥	7 度	完好

2 桥梁震害特征

2.1 大河家黄河大桥新桥震害

大河家黄河大桥新桥为 3 跨 1 联(45 m+90 m+45 m)的预应力混凝土连续梁桥,桥梁全长 185.5 m,行车道净宽 9.0 m,如图 1 所示。大河家黄河大桥新桥位于 8 度区,主体桥墩、梁未见裂缝,主要的震害包括在桥

梁两端与桥台的碰撞产生裂缝,如图2所示。主梁南侧伸缩缝处碰撞导致东侧拉开3 cm左右位移,如图3所示。在大河家黄河大桥新桥的北侧有一条沿河走向的地裂缝贯穿桥台,如图4所示。裂缝最大尺寸接近20 cm,导致桥台侧墙和端墙发生严重裂缝,如图5和图6所示。支座的滑移导致连接锚栓折断和倾斜,如图7和图8所示。除此之外,桥梁的附属构件也发生不同程度的破坏,比如排水管拉脱,如图9所示。

本次地震中未发现河堤处发生液化。由于大河家黄河大桥北侧河堤落差和坡度都比较大,河堤处虽然用石头砌筑加固,但北侧河堤土层仍然出现了一定的滑动,而且拦河堤发生外闪,如图10所示,导致了河堤坡面产生了较大的地面裂缝且通过了北侧桥台,了解到北岸桥台在地震中土层沉陷或滑移,再加上主梁的碰撞导致桥台墙体处发生严重的水平裂缝。



图1 大河家黄河大桥(新桥)

Fig.1 Dahejia Yellow River Bridge (new bridge)



图2 南侧伸缩缝处护栏下部混凝土开裂

Fig.2 Concrete cracking at the lower part of the guardrails at the south expansion joint



图3 南侧伸缩缝被拉开3 cm 尚未恢复

Fig.3 Pulled apart by 3 cm without restored at the expansion joint on the south



图4 北侧桥台附近地裂缝(闫培雷摄)

Fig.4 Cracks in the ground near the north abutment (Photoed by YAN Peilei)



图5 北侧桥台侧墙发生严重水平裂缝

Fig.5 Severe horizontal cracks occurred in the north abutment side wall



图6 北侧桥台端墙斜裂缝

Fig.6 Diagonal cracks in the north abutment end wall



图 7 北侧支座处连接锚栓折断
Fig. 7 Broken of the anchor bolt of the north support



图 8 北侧单向支座连接锚栓被挤压倾斜
Fig. 8 Extruded and tilted of the anchor bolt of the one-way support on the north side



图 9 排水管拉脱
Fig. 9 Pulled of the drainpipes



图 10 北侧拦河堤外闪(闫培雷摄)
Fig. 10 Moved outside of the north side of the barrage (Photo by YAN Peilei)

2.2 大河家黄河大桥旧桥震害

大河家黄河大桥旧桥为刚构桥,加固之前桥长 161.12 m,桥面宽 9 m,主跨 1 孔、跨径 70 m,副跨 2 孔、跨径 45 m。桥型采用大跨径预应力混凝土 T 型结构,下部结构采用普通钢筋混凝土箱型桥墩,基础为沉井。后旧桥经过维修改造,在中部设置了 20 m“挂梁”,两端是用挂梁“搭接”在主梁上,改造后的大桥长度也达到了 180 m。

在本次地震中,大河家黄河大桥旧桥位于 8 度区,桥梁主体桥墩、梁未发现明显裂缝,如图 11 所示。主要震害包括跨中“挂梁”挡块发生破坏,如图 12 所示。跨中梁体横向侧移及纵向碰撞如图 13 和图 14 所示。从震害可以看到中部增加的简支梁在地震中易因碰撞发生破坏。

旧桥护栏底部开裂外闪如图 15 和图 16 所示。两端挡块均未设置缓冲装置,南北侧挡块碰撞斜(竖向)开裂如图 17 和图 18 所示。除此之外,南侧有一条沿河流的裂缝(横向)穿过护坡如图 19 所示。

大河家黄河大桥旧桥中间增加的挂梁^[7],由于无墩柱支撑,其极易在地震中造成碰撞、落梁等破坏,需要增加可靠措施进行加固^[8-11]。



图 11 大河家黄河大桥旧桥

Fig. 11 The old bridge of Dahejia Yellow River Bridge

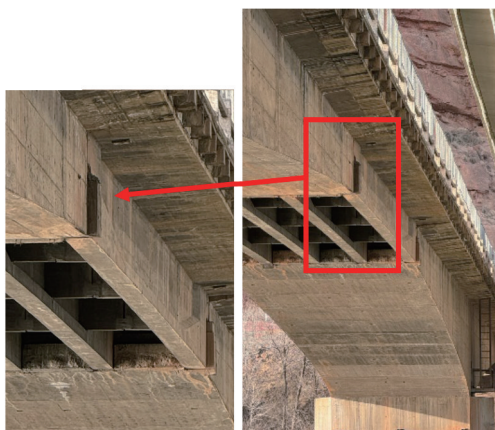


图 12 跨中挂梁挡块发生破坏

Fig. 12 Restrainer damage of the mid-span hanging girder



图 13 跨中挂梁横向侧移

Fig. 13 Transverse displacement of the hanging girder



图 14 旧桥北侧梁体碰撞

Fig. 14 Girder collision on the north side of the old bridge



图 15 旧桥南侧护栏底部开裂外闪

Fig. 15 Cracked and moved at the bottom of the guardrail on the south side of the old bridge



图 16 旧桥北侧护栏外闪

Fig. 16 Moved outside the guardrail on the north side of the old bridge



图 17 旧桥南侧挡块斜裂缝

Fig. 17 Oblique crack in the retainer on south side of the old bridge



图 18 旧桥北侧挡块斜向下裂缝

Fig. 18 Slanting downward cracks in the north retainer of the the old bridge



图 19 南侧场地东西向裂缝(桥横向)

Fig. 19 East-west cracks on south site (transverse direction of the bridge)

2.3 川亭公路简支梁桥震害

川亭公路通往官亭镇的公路桥梁为一个 3 跨 T 梁简支梁桥如图 20 所示, 桥墩为重力式桥墩, 未发现支座, 中间墩底部有冲刷痕迹。该桥梁位于川亭公路通往官亭镇公路上, 8 度区, 中间跨一桥墩发生严重剪切裂缝, 最长缝长 140 cm 左右, 如图 21 和图 22 所示, 图 21 和 22 中的横向裂缝判断应该是施工缝^[12-14]。该公路桥梁被鉴定为危桥, 整体属于中等破坏^[15]。



图 20 川亭公路通往官亭镇的公路桥梁

Fig. 20 A highway bridge on Chuanting Highway leading to Guanting Town



图 21 桥墩东侧剪切斜裂缝

Fig. 21 Shear diagonal crack on the east side of the bridge pier



图 22 桥墩西侧 140 cm 长剪切裂缝

Fig. 22 140 cm in length shear crack on the west side of the pier

2.4 306 省道 K8 段公路简支梁桥震害

306 省道 K8 段的公路桥梁为双向上下行线的 2 座桥, 均为 3 跨简支梁桥如图 23 所示, 支座为板式橡胶支座。桥梁的桥墩、梁未发现破坏。在桥梁的两端、中间的挡块均由于主梁横向位移导致碰撞而破坏, 其中两端较重, 而中间较轻如图 24 和图 25 所示。两端和中间支座均发生了不同程度的滑移, 最大达到约 10 cm, 如图 26 所示。梁端与桥台发生碰撞及错动如图 27 所示。此桥梁端部挡块设置了缓冲橡胶, 仍然发生了严重的破坏, 中部未设缓存橡胶, 挡块的破坏说明了挡块在抵抗主梁横向移动的有效性^[16-18], 但无法做到快速恢复。设计足够有效且能快速恢复的挡块是一个值得考虑的问题^[19-20], 而且需要对挡块的缓冲装置性能进行进一步的研究。



图 23 306 省道 K8 段公路桥梁

Fig. 23 Highway bridge on section K8 of 306 Provincial Highway



图 24 公路桥梁端部挡块严重破坏
(设置了缓冲橡胶垫)

Fig. 24 Serious damage of the retainer at the end of the highway bridge (cushion rubber pad installed)



图 25 公路桥梁中部挡块开裂破坏
(未设置缓冲橡胶垫)

Fig. 25 Cracking damage of the middle retainer of highway bridge (without cushion rubber pad)



图 26 桥梁中部支座滑移 10 cm 左右

Fig. 26 Slipping about 10 cm of the middle bearing of the bridge

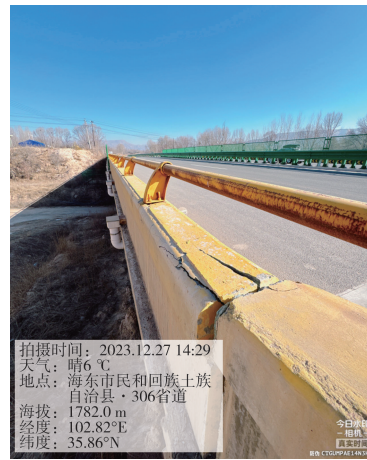


图 27 桥梁端部与桥台错位

Fig. 27 Misalignment between the end of the bridge and the abutment

2.5 其他梁桥震害

黄河二号大桥主桥为连续刚构桥,引桥为 T 梁简支梁,位于 7 度区。西侧引桥由于地震导致主梁侧移,从而两侧挡块间距产生差异如图 28 所示,主桥与引桥的接缝处也因地震留有碰撞痕迹;310 国道清大线一公路桥梁支座橡胶变形,无法恢复,7 度区,如图 29 所示。两座桥梁均属于完好,震后功能正常。

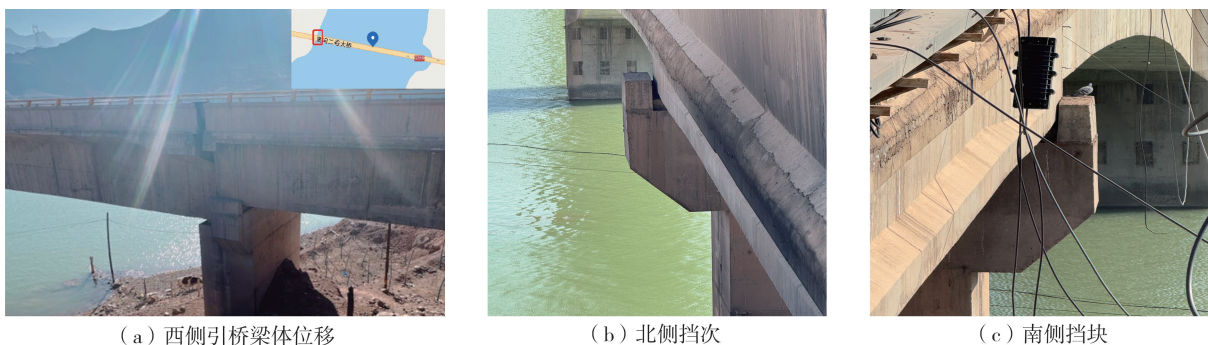


图 28 黄河二号大桥西侧引桥挡块由于地震导致间距差异

Fig. 28 Difference in the retainer spacing of the western approach span of the No.2 Yellow River Bridge due to the earthquake



图29 310国道清大线一公路桥梁支座地震后橡胶变形

Fig. 29 Bearing rubber deformation of a highway bridge in 310 National Highway Qingda line

3 结语

本次调查的损坏桥梁范围主要在8度区,本地设防烈度为7度 $0.1g$,总体上桥梁震害以轻微破坏为主,7度桥梁基本完好。通过本次调查表明:

1)大河家镇为宏观震中,根据现场调查最终烈度评定为8度,而GS.N0028台站位于大河家镇,记录到的地震动峰值最大值为 928 cm/s^2 。大河家黄河大桥距离GS.N0028台站约6 km,其主体并未发生严重破坏,仅在桥台墙体发生轻微的损伤;周围的临大高速黄河大桥(在建)主体结构完好。考虑GS.N0028台站观测仪器布置方式以及台站山坡位置影响,大河家黄河大桥场地的实际地震动大小需要综合考虑以上因素进行反演。

2)本次地震中挡块部分设置了缓冲橡胶,多数未设缓存橡胶,挡块的破坏说明了挡块在抵抗主梁横向移动的有效性;但是这种混凝土的挡块无法快速恢复。从调查现场看到,挡块破坏后基本上要等到几个月甚至更久之后才能得到维修,对于在一些高烈度可能造成强余震风险的桥梁而言,这种挡块设计并非良策,因此,设计出既有效又具有快速恢复的挡块具有非常重要的意义。本次地震中有端部挡块设置了缓冲橡胶,却仍然发生了严重的破坏,因此,以后需要对挡块的缓冲装置性能进行进一步研究。

3)本次地震中大河家黄河大桥虽然在地震中梁体和桥墩未发生可见破坏,震后仍然保持了功能正常。但北侧桥台墙体发生破坏必须采用适当的工程措施,例如桩基加固等,以提高桥台及其邻近河堤的整体稳定性,确保地震发生时桥梁的安全和功能性。

4)大河家黄河大桥旧桥中间的挂梁,由于无墩柱支撑,其极易在地震中造成碰撞、落梁等破坏,需要增加可靠措施进行加固。

参考文献:

- [1] 王润妍,万永革,宋泽尧,等. 2023年12月18日甘肃积石山6.2级地震震源机制及其对周围区域的应力影响[J/OL]. 地震, 2024; 1-10.[2024-02-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1893.P.20240119.1721.002.html>.
WANG Runyan, WAN Yongge, SONG Zeyao, et al. Focal mechanism and stress implication on the surrounding region of the Jishishan, Gansu $M_s 6.2$ earthquake on December 18, 2023[J]. Earthquake, 2024; 1-10.[2024-02-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1893.P.20240119.1721.002.html>. (in Chinese)
- [2] 陈龙伟,汪云龙,袁晓铭,等. 2023年甘肃积石山6.2级地震中川乡液化流滑灾害调查及诱因初析[J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(1): 187-193.
CHEN Longwei, WANG Yunlong, YUAN Xiaoming, et al. Preliminary analysis for the triggering of soil flowslide that occurred in Zhongchuan Town following the 2023 Jishishan $M_s 6.2$ earthquake in Gansu Province[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2024, 44(1): 187-193. (in Chinese)
- [3] GB/T 17742—2008 中国地震烈度表[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
GB/T 17742—2008 The Chinese seismic intensity scale[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [4] 刘金龙,林均岐,武雪宁. 四川泸定6.8级地震交通系统震害调查及分析[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(6): 25-34.
LIU Jinlong, LIN Junqi, WU Xuening. Investigation and analysis of seismic damage of transportation system caused by the Luding $M_s 6.8$ earthquake in Sichuan Province[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(6): 25-34. (in Chinese)
- [5] 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.

- CAI Liwen, HUANG Yong, HE Jing, et al. Earthquake damage and enlightenment from traffic system in 2022 Qinghai Menyuan M_s 6.9 earthquake[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2022, 42(4): 8-16. (in Chinese)
- [6] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 2016 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. 2016 th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [7] 刘晓晨, 刘文勃, 曹跃. 基于荷载试验方法的 T 型刚构带挂梁桥加固改造研究[J]. *交通建设与管理*, 2023(1): 76-78.
LIU Xiaochen, LIU Wenbo, CAO Yue. Research on reinforcement and renovation of T-shaped rigid-frame bridge with cantilever beam based on load test method[J]. *Transport Construction & Management*, 2023(1): 76-78. (in Chinese)
- [8] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
JTG 3362—2018 Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2018. (in Chinese)
- [9] 陶吉访, 谭洪河. 六律邕江连续刚构桥维修加固方案研究[J]. *西部交通科技*, 2023(2): 80-84.
TAO Jifang, TAN Honghe. Research on maintenance and reinforcement scheme of continuous rigid frame bridge over Yong River[J]. *Western China Communications Science & Technology*, 2023(2): 80-84. (in Chinese)
- [10] 何滨池. 基于后评价的大跨度连续刚构桥加固方法分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2024.
HE Binchi. Research on treatment of downward deflection of long span continuous rigid frame bridge with additional middle pier[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2024. (in Chinese)
- [11] 王正, 管乐, 胡光晓. 大跨度连续刚构桥体外预应力加固技术研究[J]. *黑龙江交通科技*, 2023, 46(5): 123-125.
WANG Zheng, GUAN Yue, HU Guangxiao. Analysis of external prestressing method in strengthening continuous rigid frame bridge[J]. *Communications Science and Technology Heilongjiang*, 2023, 46(5): 123-125. (in Chinese)
- [12] 朱文喜. 市政桥梁施工混凝土裂缝分析及其防治措施浅谈[J]. *城市道桥与防洪*, 2016(1): 127-129, 14.
ZHU Wenxi. Analysis of municipal bridge construction crack and elementary discussion of its preventive measures[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2016(1): 127-129, 14. (in Chinese)
- [13] 宋勋, 刘振国. 浅谈桥梁施工中钢筋混凝土质量通病防治[J]. *黑龙江科技信息*, 2010(11): 213.
SONG Xun, LIU Zhenguo. Brief discussion on prevention and treatment of common quality problems of reinforced concrete in bridge construction[J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2010(11): 213. (in Chinese)
- [14] 赵忠英. 浅谈桥梁施工裂缝成因及防治措施[J]. *黑龙江科技信息*, 2013(25): 229.
ZHAO Zhongying. Brief discussion on the causes and prevention measures of cracks in bridge construction[J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2013(25): 229. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 朱文正, 徐忠根. 隔震桥梁横桥向挡块设计研究[J]. *土木工程与管理学报*, 2011, 28(3): 407-411.
ZHU Wenzheng, XU Zhonggen. Design method for seismic blocks of an isolation bridge[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2011, 28(3): 407-411. (in Chinese)
- [17] 杨孟刚, 王传坤, 乔建东. 高速铁路连续梁桥横向地震碰撞效应及挡块间隙研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(9): 2252-2263.
YANG Menggang, WANG Chuankun, QIAO Jiandong. Research on transverse seismic pounding effect and shear-key gaps of high-speed railway continuous beam bridges[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(9): 2252-2263. (in Chinese)
- [18] 田钦, 霍振坤, 刘康, 等. 钢挡块内置橡胶缓冲装置的厚度对曲线梁桥抗震性能影响[J]. *南昌大学学报(工科版)*, 2023, 45(2): 154-161, 204.
TIAN Qin, HUO Zhenkun, LIU Kang, et al. Influence of thickness of shock absorber device equipped in steel block on seismic performance of curved bridge[J]. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)*, 2023, 45(2): 154-161, 204. (in Chinese)
- [19] 项乃亮, 李建中. 不同挡块形式对中小跨径梁桥横向抗震性能的影响[J]. *工程力学*, 2016, 33(3): 188-195.
XIANG Nailiang, LI Jianzhong. Effect of different types of retainers on transverse seismic performance of small and mid-span girder bridges[J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(3): 188-195. (in Chinese)
- [20] 陈欧文, 董国华, 王海江, 等. 简支梁桥中高延性混凝土挡块的研究与探索[J]. *四川建材*, 2023, 49(9): 165-167.
CHEN Ouwen, DONG Guohua, WANG Haijiang, et al. Research and exploration on high ductility concrete abutment blocks in simply supported beam bridges[J]. *Sichuan Building Materials*, 2023, 49(9): 165-167. (in Chinese)