

公路混凝土护栏阻爬坎的仿真研究及应用

时文成¹, 马 晴², 赵浩泽², 龚 帅², 邓 宝²

(1.山东高速股份有限公司, 山东 济南 250014; 2.北京华路安交通科技有限公司, 北京市 100070)

摘 要:为研究阻爬坎对公路混凝土护栏安全性能的影响,采用了计算机仿真技术和实车足尺碰撞试验对护栏阻爬坎的功能进行分析论证,着重分析了设置阻爬坎和未设置阻爬坎对于新泽西型混凝土护栏及F型混凝土护栏防护功能的影响。结果表明:设置阻爬坎能有效改善新泽西型混凝土护栏的导向功能并防止车辆发生侧翻,同时可对车辆与护栏的直接接触部位(护栏顶部)的强度进行有效增强;而设置阻爬坎对F型混凝土护栏的安全防护性能的提升作用则并不明显。研究为阻爬坎的设置与否提供了重要依据,也为相关标准规范的规定提供了数据支撑。

关键词:混凝土护栏阻爬坎;有限元方法;实车碰撞试验;仿真模型

中图分类号:U417.1+2

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2024)12-0215-06

0 引言

混凝土护栏一般由钢筋和混凝土现浇或预制制作而成,护栏结构在碰撞后基本不发生严重的变形,通过坡面使车辆爬升(或倾斜)并利用刚度使车辆转向,以达到有效保护乘员的效果^[1-2]。阻爬坎是在混凝土护栏顶部常设置的突出迎撞面的坎状物,目的是期望降低车辆爬升的程度,以降低车辆由于过度爬升产生内翻的概率,达到改善护栏的导向功能、提高防护性能的作用。在我国实际使用的新泽西型混凝土护栏与F型混凝土护栏中,有些设置有阻爬坎,而有的护栏并未设置阻爬坎,因此对阻爬坎的功能进行研究,可以为改进护栏的防撞性和导向性以及合理设计护栏的形式提供建议,为新型安全护栏的开发提供参考依据。

通过计算机仿真方法,结合实车碰撞试验,对新泽西型及F型混凝土护栏增设阻爬坎的功能进行分析。

1 仿真模型的建立

车辆碰撞护栏是一种非线性的复杂物理过程,

采用仿真软件LS-DYNA进行车辆、护栏的建模及对碰撞过程的模拟,评估护栏安全性能^[3-5]。

1.1 建立车辆模型

在《公路护栏安全性能评价标准》(JTG B05-01-2013)^[6]中护栏安全性能评价指标包含阻挡功能、导向功能及缓冲功能,其中采用小型客车碰撞检验其缓冲功能和导向功能,采用中、大型客车碰撞检验其阻挡功能和导向功能。车辆模型的建立需按照我国车辆结构特点,结合规范中对车辆参数的要求建立车辆模型,结构参数如表1所示。车身结构主要是薄壁金属件,设置以壳单元进行模拟,构件间主要通过刚性或可变形单元模拟点焊进行固定,小型客车整车模型单元约为4.2万个,轮胎胎压经过试验测定为0.3 MPa;大客车整车模型单元约9.6万个,轮胎胎压为0.8 MPa。车辆与护栏间的接触采用基于惩罚函数法的Automatic_Single_Surface接触方式来定义。

1.2 建立护栏模型

混凝土护栏为刚性护栏,结合规范要求设计,护栏模型长为40 m。结合新泽西型混凝土护栏及F型混凝土护栏结构建立护栏有限元模型,护栏高度为1.1 m,其余结构尺寸依据规范确定,为系统研究混凝土护栏阻爬坎对车辆碰撞护栏防护性能的影响奠定基础。

护栏模型如图1所示。其中,图1(a)为建立的新泽西型混凝土护栏模型,图1(b)为建立的阻爬坎+

收稿日期:2024-01-16

作者简介:时文成(1990—),男,硕士,工程师,从事高速公路管理及研究工作。

通信作者:马晴(1994—),女,学士,工程师,从事交通安全设施科研工作。电子信箱:2227646153@qq.com

表 1 车辆模型结构参数

车辆参数	小客车	大客车
仿真模型		
车总质量 /t	1.5	18
车辆总长 /mm	4 338	11 910
车辆总宽 /mm	1 679	2 522
前轮轮距 /mm	1 440	2 100
轴距 /mm	2 642	6 010
车轮半径 /mm	303	540
距前轴距离 /mm	1 195	3 938
车辆重心位置	距对称轴距离 /mm 8(偏向行车方向左侧)	17(偏向行车方向右侧)
距地面距离 /mm	511	1 298

新泽西型混凝土护栏模型,图 1(c)为建立的 F 型混凝土护栏模型,图 1(d)为建立的阻爬坎 +F 型(以下简称加强型)混凝土护栏模型,由于混凝土护栏为刚性护栏,故采用实体单元建模,其材料模型采用 *MAT_RIGID 材料,在护栏内设置一定强度的钢筋,钢筋通过线单元进行模拟。

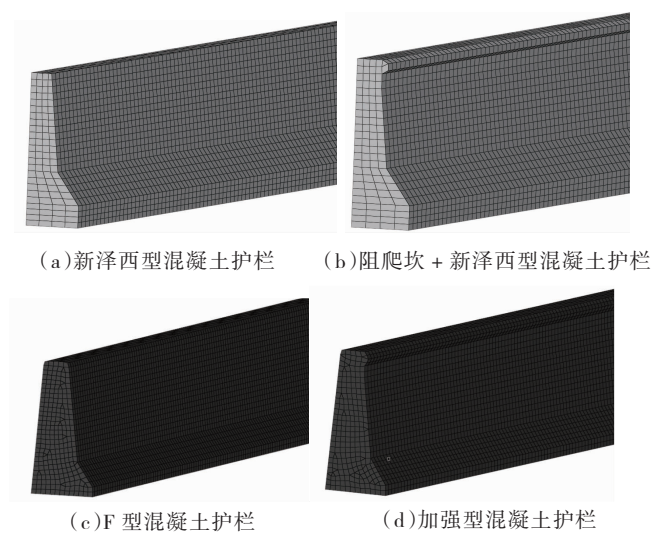


图 1 混凝土护栏模型

2 仿真模型的可靠性验证

根据《公路护栏安全性能仿真评价技术规程》(T/GDHS 001—2020)^[7]中的模型验证方法,对小型客车与大型客车的碰撞护栏模型进行验证。小型客车与大型客车碰撞混凝土护栏的过程仿真与试验对比如图 2 所示,可见车辆均顺利导出,仿真与试验的车辆碰撞过程基本吻合,且小型客车的缓冲功能、大

型客车的护栏最大横向动态位移外延值(W)和车辆最大动态外倾值(VI)等仿真结果与试验的对比指标均在误差允许范围,如表 2 所示,说明仿真模型具有准确性,能比较真实客观地表现试验车辆碰撞护栏的实际情况。

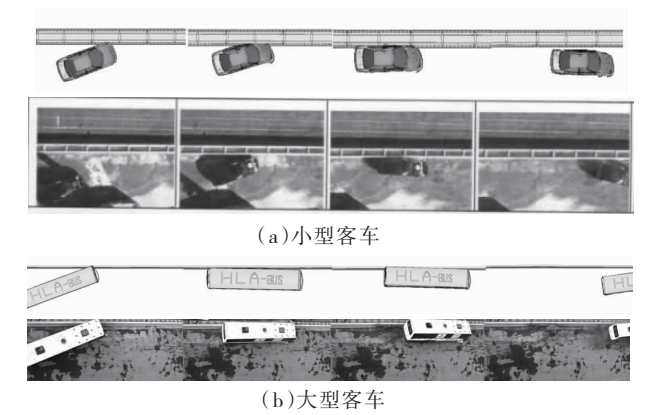


图 2 车辆碰撞混凝土护栏仿真与试验对比

3 阻爬坎对混凝土护栏影响的仿真分析

通过有限元仿真模拟,分别研究在新泽西型混凝土护栏及 F 型混凝土护栏上设置阻爬坎与未设置阻爬坎两种情况对于护栏防护性能的影响。

3.1 设置阻爬坎对新泽西型混凝土护栏的影响分析

小型客车与大型客车的碰撞条件如表 3 所列,小型客车和大型客车碰撞新泽西型混凝土护栏以及阻爬坎 + 新泽西型混凝土护栏的过程如表 4 所示。从车辆碰撞护栏的过程中可见,两种护栏均可有效阻挡车辆翻越及骑跨护栏,差异在于,小型客车碰撞设置阻爬坎的护栏时沿坡面爬升的程度明显降低,

表2 车辆碰撞混凝土护栏仿真与试验对比指标

车辆	对比项	对比指标	结果		允许误差范围	是否一致 / 是否在允许误差范围	
			仿真	试验			
小型客 车和大型 客车	阻挡功能	车辆是否穿越、翻越和骑跨护栏	否	否	—	是	
		护栏构件及其脱离碎片是否侵入车辆乘员舱	是	是	—	是	
	导向功能	车辆碰撞后是否翻车	否	否	—	是	
		车辆碰撞后的轮迹是否满足导向驶出框要求	是	是	—	是	
	其它	碰撞过程中是否有车轮脱落	否	否	—	是	
		护栏纵向连接构件是否失效	否	否	—	是	
小型 客车	缓冲功能	乘员碰撞速度(OIV)	纵向 / (m·s ⁻¹)	4.20	4.3	± [0.83+0.1 × (试验值)]	是
			横向 / (m·s ⁻¹)	6.63	6.3	± [0.83+0.1 × (试验值)]	是
		乘员碰撞后加速度(ORA)	纵向 / (m·s ⁻¹)	65.74	61.7	± [10+0.1 × (试验值)]	是
			横向 / (m·s ⁻¹)	147.27	173.8	± [10+0.1 × (试验值)]	是
	护栏最大横向动态位移外延值(W)	外延值 /m	1.092	0.900	± [0.05+0.1 × (试验值)]	是	
	大型 客车	护栏最大横向动态位移外延值(W)	外延值 /m	0.463	0.50	± [0.05+0.1 × (试验值)]	是
车辆最大动态外倾值(VI)		外倾值 /m	0.537	0.45	± [0.05+0.1 × (试验值)]	是	

大型客车碰撞设置阻爬坎的护栏时侧倾明显减小,说明增加阻爬坎对新泽西型混凝土护栏的导向功能改善较为明显。

表3 碰撞条件

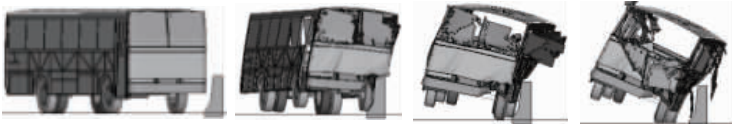
碰撞车型	车辆总质量/t	碰撞速度/(km·h ⁻¹)	碰撞角度/(°)
小型客车	1.5	100	20
大型客车	18	80	20

小客车重心位置碰撞方向的加速度曲线如图3所示,可见小型客车碰撞两种护栏的加速度指标相近,说明增设阻爬坎对于护栏缓冲功能的提升作用不大。

3.2 设置阻爬坎对F型混凝土护栏的影响分析

小型客车和大型客车分别碰撞F型混凝土护栏及加强型混凝土护栏的过程如表5所示,碰撞条件同表3。从车辆碰撞护栏的过程可见,两种护栏均可有效阻挡车辆翻越及骑跨护栏,小型客车碰撞两种

表4 车辆碰撞护栏过程图

护栏类型	车型	碰撞过程	碰撞结果
新泽西型混凝土护栏	小型客车		碰撞时车辆沿坡面爬升较高,碰撞后顺利导向驶出
	大型客车		碰撞时车辆侧倾较大,碰撞后顺利导向驶出
阻爬坎+新泽西型混凝土护栏	小型客车		碰撞时车辆沿坡面爬升较低,碰撞后顺利导向驶出
	大型客车		碰撞时车辆侧倾较小,碰撞后顺利导向驶出

护栏时沿坡面的爬升程度基本一致,大型客车碰撞两种护栏时的侧倾角度和驶出角度也基本一致,说明增设阻爬坎对F型混凝土护栏导向功能的提升并不明显。

小客车重心位置碰撞方向的加速度曲线如图4所示,可见两种护栏的加速度线形基本一致,印证了增加阻爬坎(加强型护栏)对F型混凝土护栏的缓冲功能提升并不明显的结论。

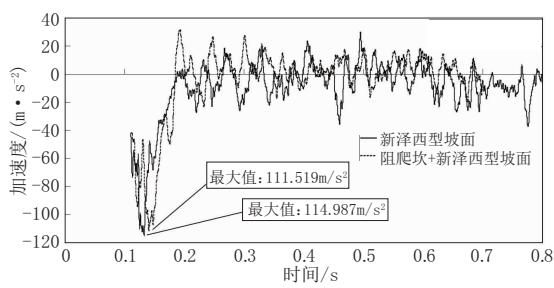


图3 小客车重心位置碰撞方向加速度曲线

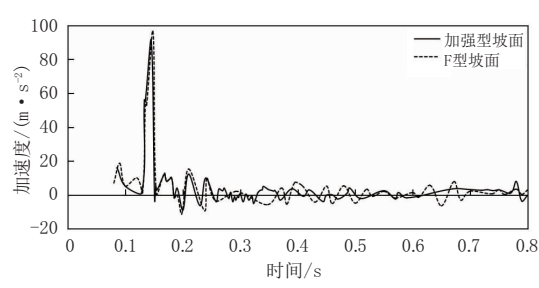


图4 小客车重心位置碰撞方向加速度曲线

表5 车辆碰撞护栏过程图

护栏类型	车型	碰撞过程	碰撞结果
F型混凝土护栏	小型客车		碰撞时车辆沿坡面爬升较低,碰撞后顺利导向驶出
	大型客车		碰撞时车辆侧倾较小,碰撞后顺利导向驶出
加强型混凝土护栏	小型客车		碰撞时车辆沿坡面爬升较低,碰撞后顺利导向驶出
	大型客车		碰撞时车辆侧倾较小,碰撞后顺利导向驶出

通过上述车辆碰撞护栏的行驶姿态对比,可见当车辆碰撞新泽西型及阻爬坎+新泽西型护栏时,在护栏顶部设置阻爬坎能有效改善护栏的导向功能并减小车辆的侧倾角度,同时设置爬阻坎可对车辆与护栏的直接接触部位(护栏顶部)的强度进行有效加强,使得护栏防护性能更好;而车辆碰撞F型或加强型混凝土护栏时,车辆碰撞过程的行驶姿态接近,说明在F型坡面的基础上增加阻爬坎对于护栏安全防护性能的提升作用不大。

4 阻爬坎对混凝土护栏影响的试验验证

为进一步验证阻爬坎对新泽西型混凝土护栏的影响,组织进行了大量的实车足尺碰撞试验。

4.1 新泽西型混凝土护栏试验验证

从其他研究者对车辆碰撞新泽西型混凝土护栏的实车试验中^[8-9],有一种车辆(10 t 福特 F800 卡车、碰撞速度为 90.9 km/h、碰撞角度为 16.2°)碰撞时因沿坡面过度爬升而翻越护栏,可见新泽西护栏不能对该车辆进行有效防护。试验护栏如图 5 所示,碰撞过程如图 6 所示。



图5 试验护栏



图6 车辆碰撞试验护栏过程

4.2 阻爬坎+新泽西型混凝土护栏试验验证

通过对阻爬坎+新泽西型混凝土护栏的安全性进行大量试验,共进行了 15 次车辆(小客车、小型货车、大客车和大货车)碰撞阻爬坎+新泽西型混凝土护栏的实车足尺碰撞试验。这些试验的碰撞条件及车辆的运行轨迹如表 6 所示,可见绝大多数车辆驶出角度较小,且多数车辆没有翻车,说明阻爬坎+新泽西型混凝土护栏具备较优的导向能力。

部分车型碰撞护栏的过程如图 7 所示,可见碰撞后护栏能够有效阻挡并导正车辆,说明阻爬坎+新泽西型混凝土护栏的阻挡功能及导向功能较好。

表 6 碰撞条件及车辆的运行轨迹表

试验序号	车型	总重 /t	碰撞角度 / (°)		碰撞速度 /(km·h ⁻¹)		驶出角度 / (°)	驶出角度与碰撞角度之比	翻车情况
			设计	实测	设计	实测			
1	小型货车	2	20	21.6	95	91.5	4.17	19.3%	右侧内翻
2	大客车	18	20	21.1	80	81	3.03	14.4%	右侧内翻
4	大客车	18	20	20.4	80	84	5.09	25.0%	右侧内翻
5	小客车	2	20	19.2	100	95	8.53	44.4%	未翻
6	大货车	20	20	20.5	60	64	0	0	未翻
7	大客车	18	20	19.9	80	79	6.84	34.4%	未翻
8	大货车	20	20	21.1	90	86	1.91	9.1%	右侧内翻
9	小客车	2	20	20.4	100	98	3.4	16.7%	未翻
10	小客车	2	20	20.4	100	99	4.0	19.6%	未翻
11	大客车	18	20	20.7	80	83	0	0	未翻
12	大客车	14	20	18.2	90	89	0	0	未翻
13	小客车	1.5	20	20.0	100	101.3	—	—	未翻
14	大客车	18	20	20.4	80	80.3	—	—	未翻
15	大货车	33	20	20.2	60	61.4	—	—	未翻

注:1.由于当时的实车足尺碰撞试验尚不成熟,第3次实车碰撞试验组织失败,未记录于表5中。
2.第13~15次试验为按照《公路护栏安全性能评价标准》(JTGB05-01—2013)^[6]中规定的碰撞条件组织的,现行评价标准中未要求测量驶出角度,因此本表中无此试验值。

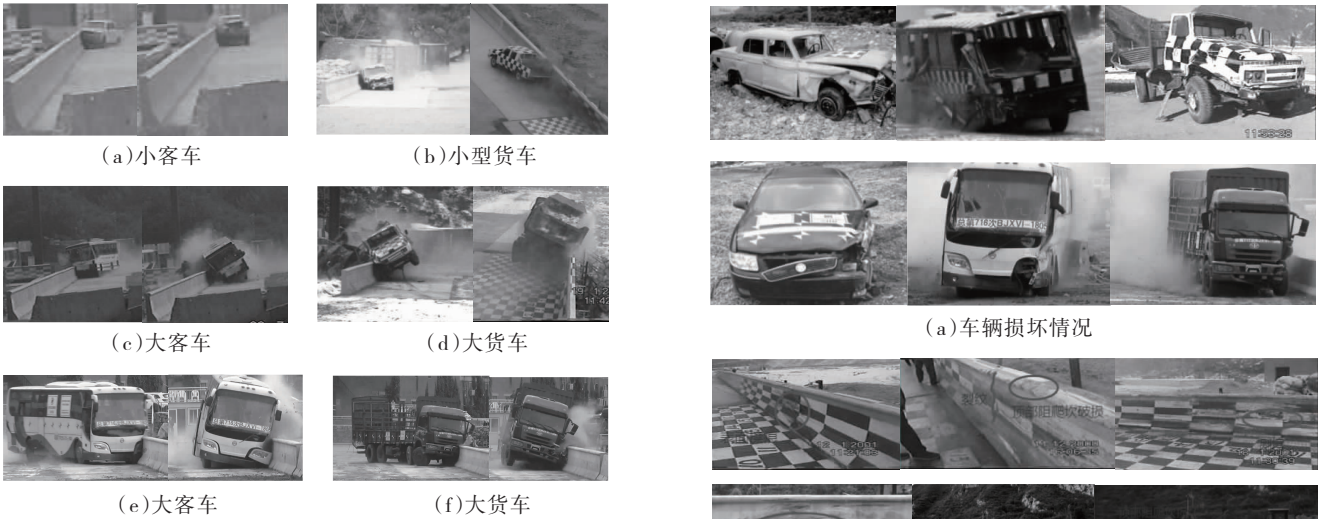


图 7 碰撞过程

碰撞后部分车辆和护栏的损坏情况如图 8 所示,可见车辆碰撞后侧车体会出现变形及刮擦损坏。在小型车碰撞护栏后,护栏的破坏一般仅为表面擦痕,未对顶部阻爬坎造成损坏;在大型车碰撞护栏后,护栏整体结构未发生严重破坏,反而是顶部阻爬坎处出现破损,墙体表面出现较深刮擦及裂纹现象。

测量试验中小型车乘员所受冲击的加速度指标,结果如表 7 所列,其中 x 、 y 、 z 三个方向分别对应乘员的前后、左右和上下三个方向,可见乘员所受冲击的加速度指标均小于标准限值 $20g$,说明阻爬坎 + 新泽西型混凝土护栏对车内的乘员有较好的保护,该种护栏缓冲功能较好。

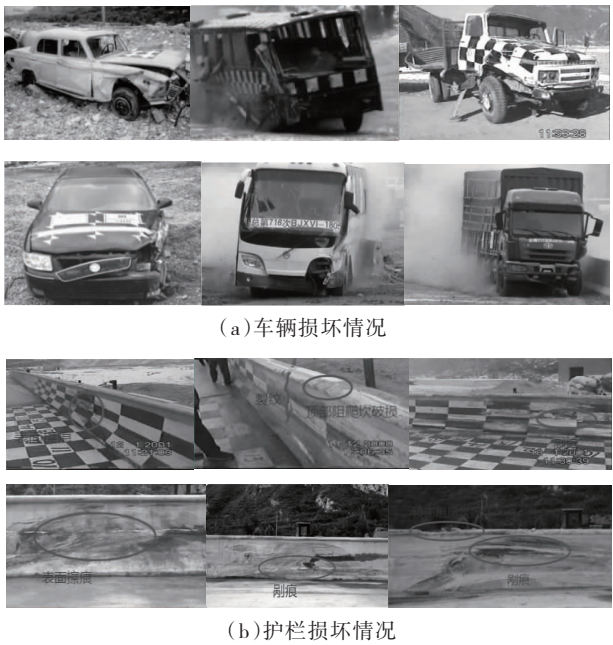


图 8 碰撞后车辆和护栏损坏情况

表 7 碰撞阻爬坎 + 新泽西型混凝土护栏的乘员加速度表

试验次数	车型	司机		乘客	
		最大值 / (m·s ⁻²)	方向	最大值 / (m·s ⁻²)	方向
1	小货车	9.5	y	19.2	y
5	小客车	19.3	x	4.9	z
9	小客车	13.3	x		

5 工程应用

阻爬坎+新泽西型混凝土护栏解决了车辆易沿坡面过度爬升而导致侧翻的问题,已在实际工程中应用,可改善护栏的导向功能,提高护栏的安全防护性能,现场应用照片如图9所示。



图9 阻爬坎+新泽西型混凝土护栏

对于其它坡面形式的混凝土护栏,为改善护栏景观效果,提高诱导功能,在护栏顶部增设阻爬坎结构的形式也在实际工程中得到推广应用,现场应用照片如图10所示。



(a)加强型混凝土护栏



(b)阻爬坎+单坡面型混凝土护栏

图10 其它坡面混凝土护栏

6 结 语

在对护栏顶部设置阻爬坎的功能分析中,通过仿真和试验分析得到如下结论:

(1)顶部增设有阻爬坎的新泽西型混凝土护栏既保留了新泽西型坡面较优的缓冲性能,又降低了车辆爬升程度,避免翻车状况发生,改善了护栏的导向功能,减少了车辆的侧倾角度,能够提高护栏的防护性能;

(2)在F型混凝土护栏顶部设置阻爬坎对护栏的导向功能、缓冲功能的改善作用不大,同时也对护栏防护性能的提升不明显。

研究为阻爬坎的设置与否提供了依据,也为相关标准的制定提供了数据支撑。

参考文献:

- [1] JTG/T D81—2017,公路交通安全设施设计细则[S].
- [2] JTG D81—2017,公路交通安全设施设计规范[S].
- [3] 闫书明.有限元仿真方法评价护栏安全性能的可行性[J].振动与冲击,2011,30(1):152-156.
- [4] 刘晓波,王新,刘思源,等.基于仿真模拟技术的SB级波形梁护栏梁板中心设置高度研究[J].中外公路,2021,41(2):352-356.
- [5] 刘明虎,张门哲,亢寒晶,等.桥梁嵌固式基础中央分隔带钢护栏安全性分析[J].中外公路,2019,39(3):291-296.
- [6] JTG B05-01—2013,公路护栏安全性能评价标准[S].
- [7] T/GDHS 001—2020,公路护栏安全性能仿真评价技术规程[S].
- [8] Polivka K A, Faller R K, Sicking D L, et al. Performance evaluation of the permanent new Jersey safety shape barrier—update to NCHRP 350 TestNo.4-12 (2214NJ-2), TRP-03-178-06[R].Midwest Roadside Safety Facility (MwRSF), 2006.
- [9] 陈林,彭婷,刘涛,等.低等级混凝土护栏对厢式卡车撞击桥墩作用的影响规律[J].自然灾害学报,2020,29(5):131-139.

(上接第214页)

- [1] 究综述[J].世界地震工程,2022,38(2):205-219.
- [3] 郑杰,张凯迪,贾俊峰,等.预制装配式桥墩连接关键技术及工程应用[J].市政技术,2022,40(4):6-15.
- [4] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2021[J].中国公路学报,2021,34(2):1-97.
- [5] 戚圣强,樊泽,郭强.装配式套筒连接墩柱受力性能分析研究[J].特种结构,2023(3):22-25,82.

- [6] 樊泽,戚圣强,封伟,等.装配式桥墩抗震性能分析[J].城市道桥与防洪,2023(9):158-161.
- [7] 李运生,王泽涵,杨斌,等.高速铁路桥梁装配式桥墩足尺寸拟静力试验研究[J].铁道学报,2022,44(9):135-145.
- [8] PARK R.Evaluation of Ductility of Structures and Structural Assemblages from Laboratory Testing[J].Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 1989,22(3):155-166.