

三向地震作用下系杆拱桥结构的响应分析

李 强

(中铁十八局集团第三工程有限公司 工程部, 河北 涿州 072750)

摘 要:为探究三向地震作用下系杆拱桥的结构响应规律,给系杆拱桥的抗震设计提供依据,依托某大型下承式系杆拱桥,采用 Midas 有限元分析系杆拱桥各部件位移和内力响应受三向地震作用的影响。结果表明:三向地震作用下,拱肋的横向位移响应最大,纵向位移响应最小;拱脚的轴力最大,剪力最小;系杆 0 m 端与跨中内力相比,轴力增加 13%,剪力增加 33.5%,弯矩减小 4 倍;系杆 66 m 端与跨中内力相比,轴力减小 19.6%,剪力增加 30%,弯矩减小 49%;系杆 66 m 端与 0 m 端内力相比,轴力减小 43.3%,剪力减小 5%,弯矩增加 72%;系杆拱桥端横梁与中横梁的内力相比,轴力增加 91%,剪力增加 25%,弯矩增加 62%;三向地震作用对系杆拱桥的拱肋横向位移、系杆端部及跨中和端横梁的内力响应有很大影响。

关键词:系杆拱桥;三向地震;内力;位移;拱肋

中图分类号:U448.22

文献标志码:A

文章编号:2097-0358(2023)2-0030-07

0 引言

随着交通行业的不断发展,大规模的公路建设使桥梁的建设规模也逐年增大。桥梁建设不仅要保证结构的安全性能,还要追求桥梁的美观外形,其中拱式桥梁的出现体现出桥梁优美的视觉效果,同时还保证了结构的安全使用功能^[1-3]。其中,系杆拱桥不仅具有拱桥的基本特征,还具有自身的显著特点,集拱和梁的优点于一身,将拱和梁有机结合起来,共同承受荷载,充分发挥了梁受弯、拱受压的结构性能优势,系杆承受拱脚的水平推力,使桥梁结构更加稳定^[4-5]。由于我国处于地震带,对于交通建设的抗震研究必不可少,尤其是对交通枢纽的桥梁结构,其抗震安全性能不仅关乎社会经济,还关系到人民的生命安全。近年来,对于桥梁结构的抗震研究已经较为成熟,众多学者对桥梁的抗震设计以及方法进行了研究,薛开坤研究了横撑对钢管混凝土拱桥抗震性能的影响^[6],陈阶亮依托钱江四桥,分析了系杆拱桥的抗震性能^[7],李福万采用有限元分析法,分析了下承式系杆拱桥的抗震性能,并针对系杆拱桥的抗震性能提出建议,相关成果可为同类型桥梁的抗震设计提供借鉴^[8],方圆、席进研究了大跨度系杆拱桥纵向、横向采用不同支承体系时的地震响应,并在地震响应的基础上提出了合理的抗震体系^[9],郭恩超采用 Midas 有限元分析了下承式异形系杆拱桥的抗震性能,主要研究了系杆拱桥横向和纵向在地震作用下的响应,结果表明桥梁的各项抗震性能满足要求^[10]。由上述研究可知,目前对于桥梁结构抗震影响的研究多集中于双向地震作用,而关于三向地震对桥梁结构响应的研究较少。同时,由于三向地震的破坏力度更大,对桥梁结构尤其是系杆拱桥的安全性能影响更大,因此,为保证桥梁结构在三向地震作用下的安全性能,确保系杆拱桥的抗震性能,开展三向地震作用下系杆拱桥结构的响应分析是很有必要的。本文基于有限元分析,依托某系杆拱桥,开展了三向地震作用下系杆拱桥的结构响应分析,主要对其结构在地震作用下的位移和地震响应变化规律进行了研究,为桥的抗震设计提供有力的数据支撑。

1 工程概况

该下承式系杆拱桥为某公路工程的桥梁工程,该桥全长 66 m,主桥采用 50 m 的系杆拱桥,拱轴线采用悬链线,拱肋横向间距为 20 m。全桥吊杆采用桁架单元,共 15 对,拱肋采用钢混组合形式,中横梁和端横梁

收稿日期:2022-12-22

作者简介:李强(1991—),男,吉林白山人,中铁十八局集团第三工程有限公司工程部助理工程师。

均采用 C50 混凝土材料。桥梁的立面图如图 1 所示。

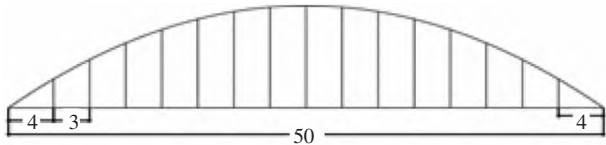


图 1 系杆拱桥立面图 单位 m

2 有限元模型及材料特性

2.1 有限元模型

本计算采用 Midas Ccicil 建立主桥有限元模型 ,如图 2 所示 ,拱肋、中横梁和端横梁均采用梁单元模拟 ,端横梁和拱肋交界点以及端横梁中部采用一般支撑 ,吊杆采用桁架单元。

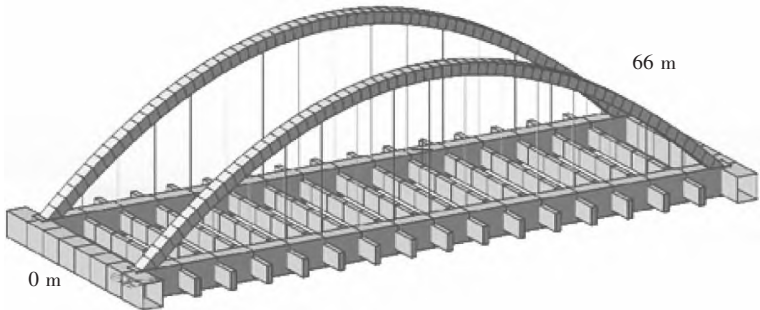


图 2 有限元模型

2.2 材料特性

拱圈采用 16Mn 钢和 C50 混凝土组合 ,中横梁、端横梁和系杆采用 C50 混凝土 ,吊杆采用高强钢绞线 ,具体参数如表 1 所示。

表 1 材料参数特性

名称	材料	弹性模量/Pa	泊松比	容重/(kN·m ⁻³)
拱圈	16Mn 钢	2.06×10^8	0.3	76.98
管内混凝土、中横梁、端横梁、系杆	C50	3.49×10^7	0.167	25
吊杆	Strand1860	1.95×10^8	0.3	78.5

3 动力特性分析

本计算采用 Midas 有限元分析系杆拱桥的主桥动力特性 ,分析结果如表 2 所示。限于篇幅 ,本文仅给出前 10 阶的自振频率和自振周期及分析结果。

表 2 系杆拱桥的动力特性分析结果

阶次	自振频率/Hz	自振周期/s	阵型特征
1	1.346 998	0.926 650	系杆一阶横弯
2	1.572 650	0.768 573	拱肋对称侧弯
3	1.592 396	0.668 993	拱肋反对称侧弯 + 系杆一阶横弯
4	2.532 568	0.433 568	系杆二阶竖弯
5	3.396 163	0.323 568	系杆二阶横弯
6	3.680 286	0.295 345	系杆二阶扭转
7	3.872 569	0.289 563	系杆一阶竖弯
8	4.356 986	0.226 538	拱肋二阶反对称扭转
9	4.493 326	0.225 638	拱肋二阶对称扭转
10	4.639 666	0.212 563	拱肋 + 系杆二阶扭转

4 地震波输入

为获取地震作用对系杆拱桥结构响应的影响规律,本计算根据桥梁场地工程条件,采用 Seismo Match 软件拟合三条人工地震波,编号分别为 B1、B2、B3,如图 3 所示。

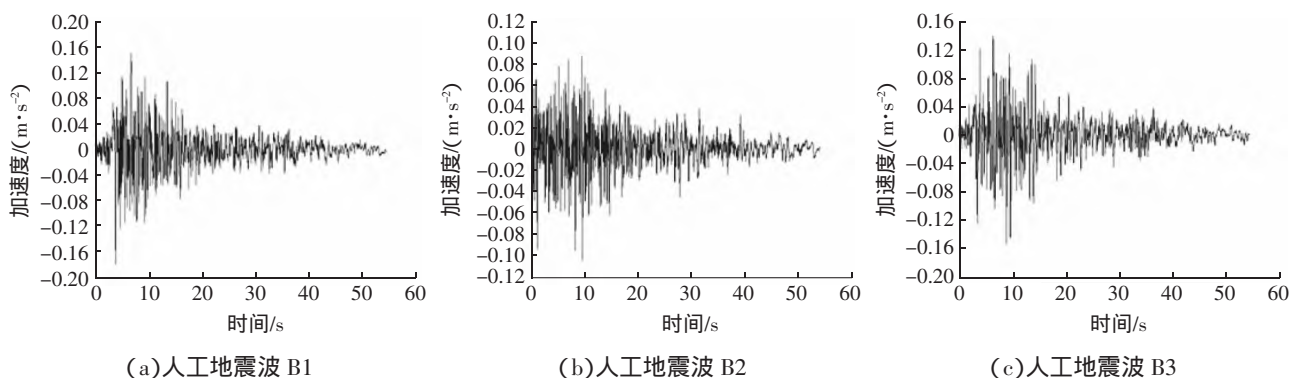


图 3 拟合人工地震波

5 三向地震作用下系杆拱桥结构的位移响应

本文主要考虑三向地震作用下系杆拱桥各部件的位移响应,即主要分析拱肋、系杆以及横梁的位移变化规律。

三向地震作用的加载主要考虑 X + Y + Z 三个方向的地震波,X 向采用地震波 B1,Y 向采用地震波 B2,Z 向采用地震波 B3,充分考虑三个方向地震波对桥梁结构的影响。系杆拱桥各部件的最大位移计算结果如表 3 所示,三向地震作用下,拱顶横向位移为 16.8 mm,是拱顶纵向位移的 7 倍,是拱顶竖向位移的 3 倍左右,说明三向地震作用对系杆拱桥拱顶横向的位移响应影响较大;三向地震作用对系杆拱桥拱脚的位移响应影响较小;系杆的跨中横向位移最大,为 22.2 mm,为系杆跨中纵向位移的 17 倍,是系杆跨中竖向位移的 4 倍左右。三向地震作用对系杆拱桥系杆跨中的横向位移响应影响较大。

表 3 三向地震作用下系杆拱桥各部件最大位移

单位:mm

拱顶位移			拱脚位移			系杆位移		
纵向	横向	竖向	纵向	横向	竖向	纵向	横向	竖向
2.38	16.8	4.82	0	0.057 7	0	1.29	22.2	5.73

拱肋的三向位移包络图如图 4 所示。三向地震作用对系杆拱桥拱肋的横向位移响应最大,且呈现出逐渐增大的趋势,而拱肋的纵向和竖向位移变化趋势基本一致,与横向位移变化趋势有所不同,呈现出波浪线式增大减小的规律。由图 4 还可以看出,拱肋的纵向位移响应最小。

在三向地震作用下,系杆的位移响应包络图如图 5 所示。系杆拱桥系杆的横向位移响应最大,纵向位移响应最小,横向位移和竖向位移变化趋势基本一致,呈现出沿纵向先增大后减小的趋势,系杆跨中位置处的横向位移达到最大,而纵向位移则呈现出逐渐增大的规律。

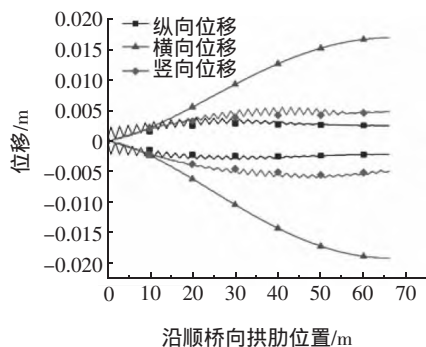


图 4 拱肋位移包络图

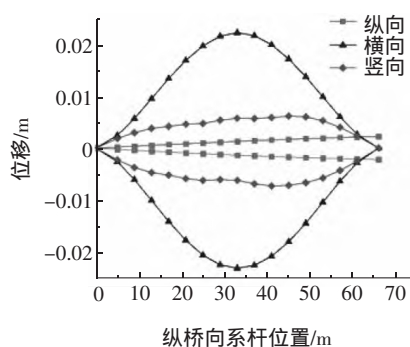


图 5 系杆位移包络图

由上述分析可知,三向地震作用对系杆拱桥横向位移响应影响最大,可能主要是由于该系杆拱桥没有设置横向联结系或者横向联结系的刚度较弱。因此,在进行系杆拱桥抗震设计时,应注意加强系杆拱桥两拱肋之间的横向刚度,同时由于系杆拱桥的系杆横向位移响应较大,需特别注意地震作用下系杆的横向位移响应。

6 三向地震作用下系杆拱桥结构的内力响应

6.1 拱肋内力响应

三向地震作用下系杆拱桥拱肋的内力响应如图6—图8所示,拱肋的内力最大值和最小值成轴对称分布,其变化规律也基本一致。拱肋的轴力变化均呈现出减小趋势,剪力呈现出近似正弦变化趋势,弯矩呈现出先减小再逐渐增大,后趋于平缓的趋势。由图还可以看出,三向地震作用对拱肋的轴力影响较大,对剪力和弯矩的影响较小。从整体上看,拱肋的抗震设计应多关注轴力变化,次要关注剪力和弯矩变化。

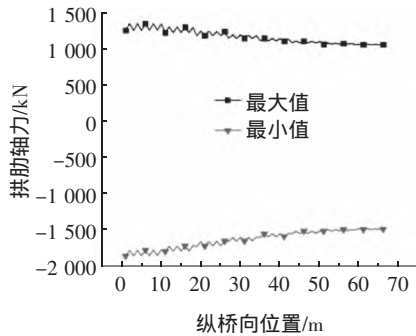


图6 拱肋轴力

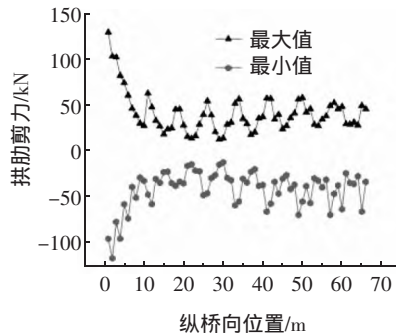


图7 拱肋剪力

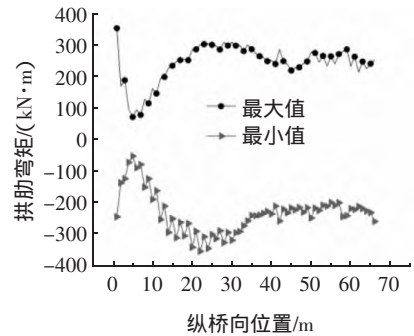


图8 拱肋弯矩

拱脚及拱顶的内力响应如表4所示,拱顶的轴力值最大,剪力较小,弯矩值较大。在系杆拱桥的抗震设计中,应关注拱顶的轴力和弯矩,拱脚的内力值较拱顶均有所增加,最大轴力增加了9.6%,最大剪力增加了148.5%,弯矩增加了26.3%,且拱脚的轴力值最大,剪力最小。相比较拱顶的内力,在三向地震作用下,应对拱脚进行抗震设计,防止地震作用下其内力过大引起破坏。

表4 内力响应

最值	拱顶			拱脚		
	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
最大值	1 142.93	52.17	276.21	1 252.18	129.62	348.83
最小值	-1 652.32	-58.66	-278.31	-1 862.64	-95.02	-249.79

6.2 系杆内力响应

在三向地震作用下,系杆拱桥系杆的内力响应如图9—图11所示。由图9可知,系杆的整体轴力变化呈现出减小的趋势,且系杆的轴力最大值和最小值呈近似对称分布。最大值的减小幅度较最小值的减小幅度小。由图10可知,系杆的整体剪力变化呈现减小—增大—减小—增大的趋势,最大值和最小值也基本呈对称分布规律。由图11可知,系杆的整体弯矩变化呈现先增大,后近似平缓,再到增大后减小的趋势,其最大值和最小值也呈对称分布规律。系杆两端的弯矩值均较小,主要可能原因是系杆和端横梁以及拱肋共同连接,三者之间的协同受力作用使系杆的抗弯能力增强。

系杆的跨中和端部的内力响应如表5、表6所示。由表5可知,系杆跨中的剪力值较小,轴力值最大,弯矩值较大。系杆跨中最大轴力是其最大剪力的14倍左右,弯矩是剪力的11倍左右。因此,在系杆拱桥的系杆进行抗震设计时,应特别注意系杆跨中的轴力和弯矩响应对系杆的影响。由表6可知,0m端的系杆端部最大轴力为2 219.43 kN,比系杆跨中位置的最大轴力(1 925.77 kN)增大了13%左右;系杆端部的最大剪力为200.58 kN,比系杆跨中位置的最大剪力(133.3 kN)增大了33.5%;系杆端部的最大弯矩为268.61 kN·m,比系杆跨中位置的最大弯矩(1 440.76 kN·m)减小了4倍左右。66m侧的系杆端部最大轴力为1 547.93 kN,

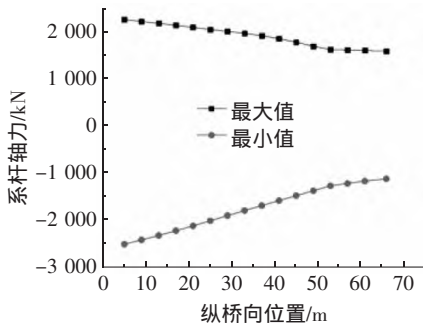


图9 系杆轴力

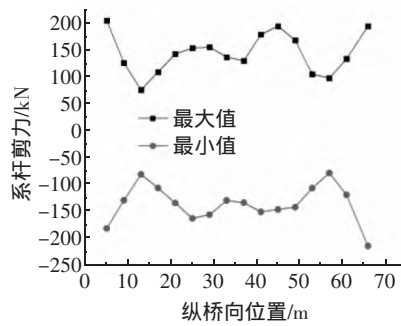


图10 系杆剪力

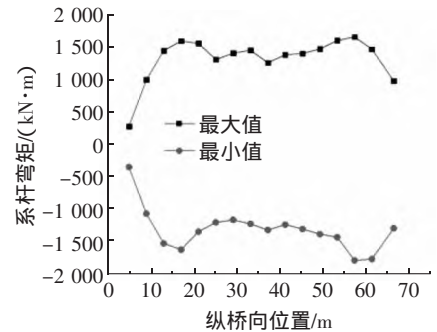


图11 系杆弯矩

较跨中位置的轴力减小了 19.6%, 较 0 m 侧端部的轴力减小了 43.3%。66 m 侧的最大剪力为 190.39 kN, 较跨中位置增大了 30%, 较 0 m 侧端部的剪力减小了 5%。系杆 66 m 侧的最大弯矩为 967.01 kN·m, 较跨中位置弯矩减小了 49%, 较 0 m 侧端部的弯矩增大了 72%。

表5 系杆跨中内力响应

	最值	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
最大值		1 925.77	133.3	1 440.76
最小值		-1 829.79	-131	-1 234.48

表6 系杆端部内力响应

位置	最值	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
0 m 侧端部	最大值	2 219.43	200.58	268.61
	最小值	-2 542.77	-182.54	-359.47
66 m 侧端部	最大值	1 547.93	190.39	967.01
	最小值	-1 157.97	-214.77	-1 303.03

由上述分析可知,在三向地震作用下,系杆 0 m 侧端部的轴力和弯矩均比跨中位置有所增加,且增加幅度较大,而端部的弯矩较跨中位置大幅度减小。66 m 侧端部的轴力和弯矩较跨中位置大幅度减小,剪力较跨中位置大幅度增加。系杆 0 m 侧端部的轴力较 66 m 侧端部大幅度增加,剪力增幅较小,弯矩大幅度减小。因此,在做系杆拱桥的抗震设计时,需要特别注意系杆跨中位置的弯矩响应,以及系杆两端部的轴力和剪力响应。针对系杆跨中位置的轴力和剪力以及端部的弯矩也需要做相应的抗震设计。

6.3 横梁内力响应

在三向地震作用下,系杆拱桥横梁的内力响应如图 12—图 14 所示。横梁的跨中和端部的内力响应如表 7 所示。

由表 7 和图 12 可知,在三向地震作用下,端横梁的轴力值均大于中横梁的轴力值,且端横梁的轴力值呈现出先增大,然后趋于平缓,最后减小的趋势,中横梁的轴力呈现出增大—减小—增大—减小的趋势。端横梁的最大(最小)轴力为 347.9 kN(-352.39 kN),比中横梁的最大(最小)轴力 29.86 kN(-31.59 kN)增加了 91%(91%)。由上述分析可知,三向地震作用对系杆拱桥的端横梁轴力响应影响较大。

由表 7 和图 13 可知,在三向地震作用下,端横梁的剪力值均大于中横梁的剪力值,且端横梁的剪力值呈现出先逐渐增大,后逐渐减小的趋势,中横梁的剪力值呈现出增大—减小—增大—减小的趋势,且端横梁的跨中剪力达到最大,中横梁的跨中剪力最小。端横梁的最大(最小)剪力为 91.68 kN(-88.26 kN),比中横梁的最大(最小)剪力 68.95 kN(-65 kN)增加了 25%(26%)。由上述分析可知,三向地震作用对系杆拱桥的端横梁剪力响应影响较大。

由表 7 和图 14 可知,在三向地震作用下,端横梁的弯矩值均大于中横梁的弯矩值,且端横梁的弯矩值呈现出增大—减小—增大—减小的趋势,中横梁的弯矩值呈现出先逐渐增大后逐渐减小的趋势。中横梁跨中位置的弯矩值大于端横梁跨中位置的弯矩值。端横梁的最大(最小)弯矩为 651.86 kN·m(-716.69 kN·m),

比中横梁的最大(最小)弯矩 $286.29 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ($-251.77 \text{ kN}\cdot\text{m}$)增加了 56%(65%),中横梁跨中最大(最小)弯矩值 $286.29 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ($-251.77 \text{ kN}\cdot\text{m}$)比端横梁跨中弯矩 $109.32 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ($-117.75 \text{ kN}\cdot\text{m}$)增大了 62%(53%)。上述分析可知,三向地震作用对系杆拱桥的端横梁弯矩响应影响较大,但就横梁的跨中弯矩来说,地震作用对中横梁的影响较大。

表7 横梁内力响应

位置	最值	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)
端横梁	最大值	347.9	91.68	651.86
	最小值	-352.39	-88.26	-716.69
中横梁	最大值	29.86	68.95	286.29
	最小值	-31.59	-65	-251.77

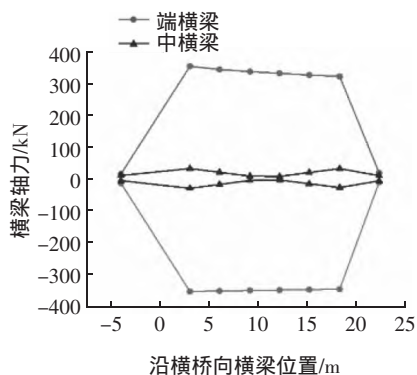


图12 横梁轴力包络图

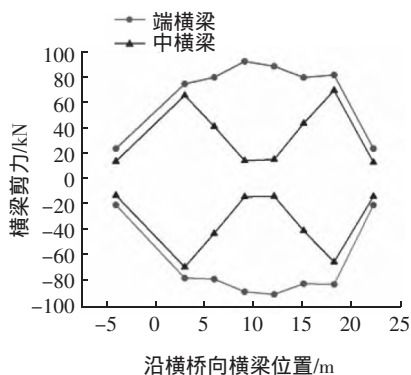


图13 横梁剪力包络图

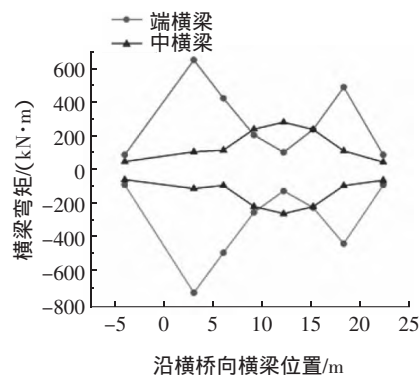


图14 横梁弯矩包络图

6.4 吊杆内力响应

在三向地震作用下,系杆拱桥吊杆的内力响应如图15所示,吊杆的内力呈现出先增大后逐渐趋于平缓的变化趋势,且最大值和最小值近似呈现对称分布。最长吊杆B8的最大内力为 116.7 kN ,最小内力为 -92.1 kN ,最短吊杆B1(B15)的最大内力为 91.7 kN (123.7 kN),最小内力为 -62.4 kN (-88.1 kN)。最大吊杆内力出现在B5 (127.98 kN)和B7 (127.99 kN)位置。吊杆受力不均可能主要是由三向地震作用对于桥梁结构的影响分布不均引起的。

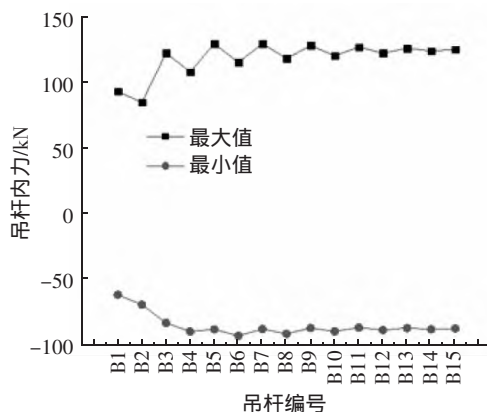


图15 吊杆内力

7 结论

为探究三向地震作用对系杆拱桥结构响应的影响规律,笔者依托实际工程,基于有限元分析,开展了地震作用下系杆拱桥各部结构的位移和内力响应研究。本研究主要得出以下结论:(1)三向地震作用对系杆拱桥拱顶以及系杆跨中的横向位移响应影响较大;(2)三向地震作用对系杆拱桥的拱顶轴力、弯矩以及拱脚的轴力和剪力响应影响较大,对拱肋的内力影响较小;(3)系杆的跨中内力响应受三向地震作用的影响较端部

内力小 (4)系杆拱桥的端横梁内力响应受三向地震作用的影响较大,对中横梁的跨中弯矩响应影响较大;(5)从整体上看,吊杆的内力响应受三向地震作用的影响较小。

8 结束语

本文主要对系杆拱桥的地震响应进行研究,分析了各部件在三向地震作用下的位移及内力变化规律,但仅考虑了三向地震作用对系杆拱桥的影响,没有考虑系杆拱桥的地震破坏性能、易损性和破坏受力状态等方面的研究。有鉴于此,接下来可进一步研究拱桥的地震破坏响应,并延伸至其他类型的拱桥结构以及大型桥梁结构,总结分析桥梁结构在地震作用下的破坏规律,为桥梁的抗震设计和抗震建设提供有益的帮助,从整体上把握桥梁结构在地震作用下的安全性能。

参考文献:

- [1]丁文胜.下承式刚架系杆拱桥的抗震设计方法及试验研究[D].南京:东南大学,2006.
- [2]杨灿,张铭,张家元.大跨度中承式钢箱桁架系杆拱桥抗震体系研究[J].世界桥梁,2022(1):86-92.
- [3]梁斌,雷啸,贾宏宇,等.地震断裂带高铁钢管混凝土系杆大跨拱桥抗震时程分析[J].信阳师范学院学报(自然科版),2020(4):681-688.
- [4]倪晓博,许笛.大跨度简支系杆拱桥抗震设计[J].中国市政工程,2020(2):23-25,28,126-127.
- [5]王连华,赵跃宇,易壮鹏.系杆对钢管混凝土拱桥抗震性能的影响[J].地震工程与工程振动,2007(1):59-65.
- [6]薛开坤.横撑对钢管混凝土系杆拱桥抗震性能的影响[J].山西建筑,2019(18):115-117.
- [7]陈阶亮.钱江四桥抗震性能分析[J].公路交通科技,2005(9):82-86,126.
- [8]李福万.下承式系杆拱桥抗震性能分析[J].山西建筑,2008(21):296-297.
- [9]方圆,席进.大跨度系杆拱桥合理抗震体系研究[J].结构工程师,2015(5):65-70.
- [10]郭恩超.下承式异形系杆钢拱桥抗震性能分析[J].建筑技术开发,2016(7):4-5.

(责任编辑 张 利)

Response Analysis of the Tied Arch Bridge Structures Under Three-directional Seismic Action

LI Qiang

(Engineering Department, the Third Engineering Co., Ltd., of the Eighteenth Bureau Group of China Railway,
Zhuzhou 072750, China)

Abstract: In order to investigate the structural response law of the tied arch bridge under three-directional seismic action, and to provide basis for the design of seismic prevention of the tied arch bridge, Midas finite element is applied to analyze the tied arch bridge displacement and internal force response of the various components by the three-dimensional seismic action, relying on a large-scale bottom-bearing tied arch bridge. The results show that: under the three-directional seismic action, the transverse displacement response of the arch ribs is maximum, and the longitudinal displacement response is minimum; the foot of the arch is maximum in axial force and minimum in shear force; the axial force at the 0 m end of the tied rod is increased by 13%, the shear force is increased by 33.5%, and the bending moment is decreased by 4 times compared with the internal force at the middle of the span; the axial force at the 66 m end of tied rod is decreased by 19.6%, the shear force is increased by 30%, and the bending moment is decreased by 49% compared with the internal force at the middle of the span; the 66 m end of the tied rod is decreased by 43.3%, the shear force is decreased by 5%, and the bending moment is increased by 72% compared with the internal force compared with the 0 m end of the tied rod; the internal force in the end crossbeams of the tied arch bridge is increased by 91% in axial forces, 25% in shear forces, and 62% in bending moments compared to the internal forces in the center crossbeams. The three-directional seismic action has a significant effect on the transverse displacement of the arch ribs, the end of the tied rod, and the internal force response of the mid-span and end crossbeam of the tied arch bridge.

Key words: tied arch bridge; three-directional seism; internal force; displacement; arch rib