

空间网状吊杆系杆拱桥 吊杆断裂对结构的力学性能分析

邹兰林, 胡言书

(武汉科技大学 汽车与交通工程学院, 湖北 武汉 430065)

摘要:以某宽幅空间网状吊杆钢箱系杆拱桥为研究背景,分析空间网状吊杆系杆拱桥吊杆断裂后的稳定状态下对结构的力学性能影响。通过模拟吊杆断裂后的状态,分析同侧吊杆断裂的数量以及断裂位置对剩余吊杆内力、主梁内力、主拱内力、主梁线形、主拱线形的静力学特性。结果表明,吊杆断裂后,相邻吊杆会发生内力重分布的现象,距离断裂位置越近,受到的影响越大;吊杆断裂后,会在其断裂位置附近出现位移减少的峰值,距离断裂位置越远,对主梁和主拱的线形影响逐渐减小;通过分析单根吊杆断裂和2根吊杆断裂可知,吊杆断裂后对主梁和主拱影响最大的位置为拱脚位置和跨中位置。

关键词:空间网状;钢箱系杆拱桥;结构稳定性;吊杆断裂;静力学

中图分类号:U441 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2023)04-0028-07

0 引言

近些年来,网状吊杆钢箱系杆拱桥逐渐在中国发展,因其结构简单、拱梁的弯矩小、振动性能好、竖向的刚度大,而且造价较低,外形优美,所以不论在城市还是郊区都得到广泛的应用。网状吊杆系杆拱桥的力学行为受关键结构的影响比较大,而吊杆是其中的主要受力构件,相比尼尔森拱^[1]来说,它增加了吊杆的数量,使得结构受力特性更加合理。

吊杆作为空间网状吊杆系杆拱桥^[2-3]的关键受力结构,建设和运营过程会受到各种荷载的反复作用,其使用寿命远低于其他拱桥构件。根据国内拱桥吊杆断裂情况统计,吊杆的破断寿命为3~16 a,极少能超过20 a,这只有桥梁设计寿命的1/10左右,因此在桥梁运营期间,吊杆需要多次维修替换^[4]。但是在维修替换之前,由于各种不确定因素的影响可能发生吊杆骤然断裂的情况。吊杆的断裂对于网状系杆拱桥的整体结构会产生非常不利的影响,一方面,吊杆的断裂会导致主梁与主拱的内力增大,直接影响到主梁和主拱的线形和稳定性;另一方面,吊杆的断裂会导致吊杆的内力出现重分布的状态,对拱桥的整体结构安全产生不好的影响,直接影响桥梁的正常使用,严重时甚至会发生桥梁坍塌的事故。近些年来,由于吊杆断裂引起的系杆拱桥坍塌事故屡见不鲜。例如,新疆的孔雀河大桥坍塌主要是因为主跨的第2根吊杆断裂,使得主跨第3、4、5道矮T梁掉入河中,导致路面坍塌,阻断了公路运输;四川攀枝花金沙江大桥由于一根吊杆突然掉落,导致桥面出现了塌陷,使得全桥出现严重的安全隐患。

导致吊杆断裂的原因^[5]有很多,如车辆对吊杆的撞击、爆炸、火灾、锈蚀等,拱桥吊杆遭受冲击时,可能在短时间内发生断裂,断裂吊杆的承载力可能会逐渐丧失,也可能在瞬间丧失。针对这些由吊杆断裂或失效引起的原因,国内外学者^[6-9]展开了不同程度的研究:分析了单根吊杆破断和不同位置的双根吊杆破断对大跨度钢管混凝土系杆拱桥使用阶段静力性能的影响,拱肋脱空对大跨度钢管混凝土系杆拱桥使用阶段静力性能的影响;分析了单根吊杆破断、不同位置的双根吊杆破断和拱肋脱空对大跨度钢管混凝土系杆拱桥稳定性的影响;进行了吊杆断裂过程的拱桥动力分析等。

收稿日期:2023-07-04 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20230174

作者简介:邹兰林(1974—),男,副教授,研究方向为桥梁结构健康监测与安全评估。E-mail:zll999-9@163.com

邹兰林,胡言书.空间网状吊杆系杆拱桥吊杆断裂对结构的力学性能分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(4):28-33,68.

由此可见,吊杆的完好状态对系杆拱桥的安全使用性能至关重要。以一实际系杆拱桥为背景,建立有限元模型,通过断裂不同位置单根、双根吊杆,分析典型吊杆断裂后对其余吊杆内力重分布规律以及对主梁和主拱的内力和线形的影响。

1 工程概况

以某宽幅空间网状吊杆钢箱系杆拱桥为工程实例,该桥的结构形式为拱梁组合体系,这种体系下将拱和梁的受力特点充分发挥,在降低成本的同时又能使得结构的承载力得到提高。其总体布置见图1。

宽幅空间网状吊杆钢箱系杆拱桥全长为190.3 m,计算跨径为188 m,矢跨比为1:6,桥面宽为47.5 m,双向6车道,设计荷载为公路I级,设计车速为120 km/h,主拱圈和主梁均采用钢结构;桥面板为钢筋混凝土板;具体的桥面布置为3.0 m(人行道)+5.0 m(非机动车道)+3.5 m(绿化带)+12.0 m(车行道)+0.5 m(中护栏)+12.0 m(车行道)+3.5 m(绿化带)+5.0 m(非机动车道)+3.0 m(人行道),其横断面如图2所示。

2 有限元模型

通过有限元软件 Midas 建立全桥模型,全桥共1 504个节点,2 320个单元,其中桁架单元56个,主拱单元212个,桥面板单元804个,该网状系杆拱桥的计算模型见图3。吊杆单元采用桁架单元模拟,其他结构采用梁单元模拟,主梁与吊杆之间的连接方式为刚性连接。此外,在模拟过程中的计算荷载取值如下:①恒载。恒载为主梁、主拱等结构的自重;二期的恒载为人行道板、护栏等。②活载。活载为公路-I级荷载。③风荷载。基准风速取30 m/s。④基础沉降。各支座考虑5 mm的沉降。⑤温度荷载。整体升温均为20 ℃;日照温度梯度按照公路桥涵设计通用规范(JTG D60—2015)作为标准来取值。

吊杆编号如图4所示(从桥梁左侧到桥梁右侧依次编号为N1、N2、…、N28)。

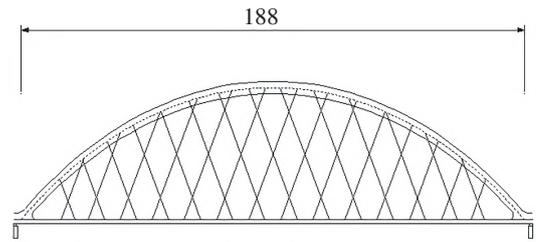


图1 桥梁总体布置图(单位:m)

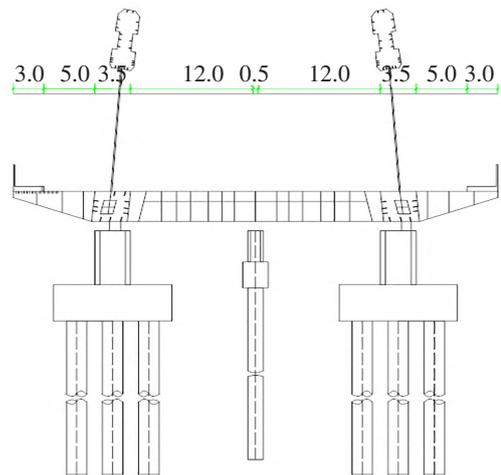


图2 桥梁横断面图(单位:m)

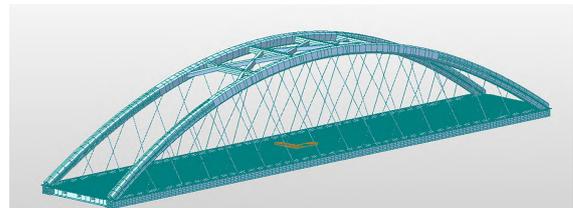


图3 有限元模型标准视图

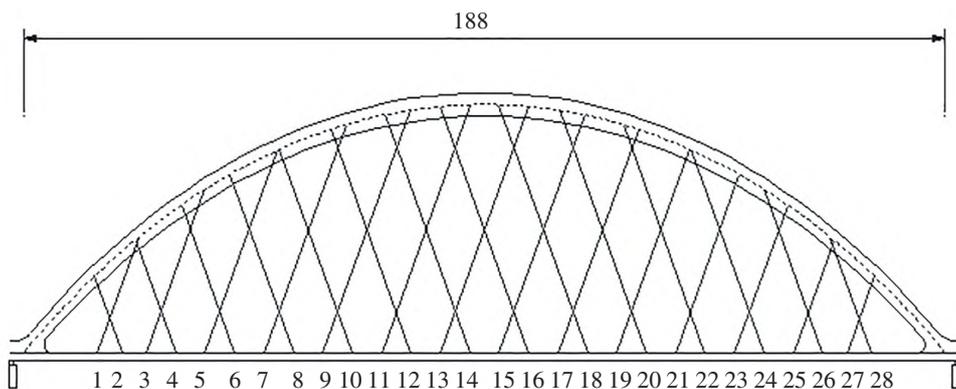


图4 吊杆编号示意图(单位:m)

3 吊杆断裂对结构的力学性能影响分析

3.1 吊杆断裂的分析方法

等效荷载卸载法^[8]即是移除模拟断裂的吊杆,然后在移除吊杆的两端加上一对与吊杆内力大小相等方向相反的拉力,等结构稳定时将施加的拉力减小为 0,如图 5 所示。为了更好地捕获该宽幅空间网状系杆拱桥吊杆断裂后的结构状态,采用了直接删除失效吊杆的方法,删除失效吊杆以后,吊杆的内力会进行重分布,直接影响到主梁、主拱等其他拱桥结构上。针对不同吊杆断裂情形采用等效荷载卸载的方法对宽幅空间网状系杆拱桥结构静力影响展开详细分析。

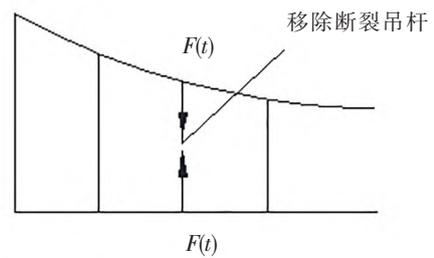


图 5 等效荷载卸载法

该宽幅空间网状系杆拱桥为对称分布,试验过程中选取一侧吊杆作为试验对象,以此拟定了 14 种工况,采用刚性吊杆法确定成桥状态下的柔性吊杆张拉力后,模拟边跨、1/4 跨和跨中单根或 2 根吊杆突然断裂的情况,分析桥梁的内力和变形情况。现选择 N1、N2、N7、N8(1/4 跨)、N14、N15(跨中)吊杆作单根吊杆断裂分析;选择 N1+N2、N1+N28、N2+N27(边跨)、N7+N22、N8+N21、N7+N8(1/4 跨和 3/4 跨)、N14+N15(跨中)吊杆作 2 根吊杆断裂分析。活载采用公路-I 级标准,恒载为自重、二期荷载和修正吊杆力之和,采用恒载+活载的荷载组合进行分析。

3.2 吊杆内力分析

单根吊杆断裂对同侧吊杆内力的影响见表 1,2 根吊杆断裂对同侧吊杆内力的影响见表 2。

表 1 单根吊杆断裂同侧吊杆内力变化

吊杆断裂位置	内力变化最大位置	原设计内力/kN	断裂后内力/kN	变化幅值/%	相邻 3 根外吊杆增幅/%
N1	N3	459.0	575.0	25.20	0.6~2.7
N2	N4	802.0	1 345.0	67.20	0.4~5.1
N7	N5	949.0	1 217.0	28.18	0.5~11.6
N8	N6	1 031.0	1 453.0	40.90	0.4~12.4
N14	N16	821.0	1 185.0	44.30	0.3~5.1
N15	N13	801.0	1 177.0	47.00	0.4~13.8

表 2 2 根吊杆断裂同侧吊杆内力变化

吊杆断裂位置	内力变化最大位置	原设计内力/kN	断裂后内力/kN	变化幅值/%	相邻 3 根外吊杆增幅/%
N1+N2	N4	804.0	1 577.0	96.1	0.3~7.2
N7+N8	N6	1 106.0	1 532.0	48.6	0.5~19.7
N14+N15	N13	801.0	1 225.0	53.0	0.9~9.6
N1+N28	N26	582.0	756.0	29.9	0.7~10.0
N2+N27	N4	804.0	1 345.0	67.3	0.4~5.4
N7+N22	N24	976.0	1 274.0	30.6	0.8~12.1
N8+N21	N23	961.0	1 386.0	44.2	0.5~13.6

从表 1 可以看出,单根吊杆断裂时,断裂吊杆位置附近吊杆内力变化值最大,如当 N15 吊杆断裂后,同侧相邻的 N13 吊杆内力变化值最大,增幅为 47%;N2 吊杆断裂后,同侧相邻的 N4 吊杆变化值最大,增幅为 67%。可以看出,单根吊杆断裂后相邻吊杆的内力增幅在 25.2%~67.2%之间,相邻 3 根吊杆之外的吊杆内力变化幅值不超过 13.8%,且拱脚位置的 N2 吊杆发生断裂时,相邻的 N4 吊杆内力增大至 1 345 kN,为相邻吊杆断裂的最不利状态。

从表 2 可知,2 根吊杆断裂时,拱脚处的 N1 和 N2 吊杆同时断裂为相邻吊杆内力的最不利状态,相邻的吊杆 N4 的内力增大到 1 577 kN,增幅为 96.1%;其余位置 2 根吊杆断裂其相邻吊杆内力变化幅值为 29.9%~96.1%间,相邻 3 根吊杆之外的内力增幅不超过 20%。由此可知,单根吊杆或 2 根吊杆断裂不

会破坏网状系杆拱桥的整体结构,吊杆断裂后其余吊杆的内力值小于设计值,不会发生吊杆断裂的连锁反应,但 2 根吊杆断裂相较于单根吊杆断裂吊杆内力值变化明显,在更换吊杆的过程中应增设临时吊杆。

3.3 主拱与主梁内力分析

单根吊杆断裂对主梁内力值的影响见图 6;单根吊杆断裂对主拱内力值的影响见图 7,其中断裂后的内力值为负,取其绝对值。

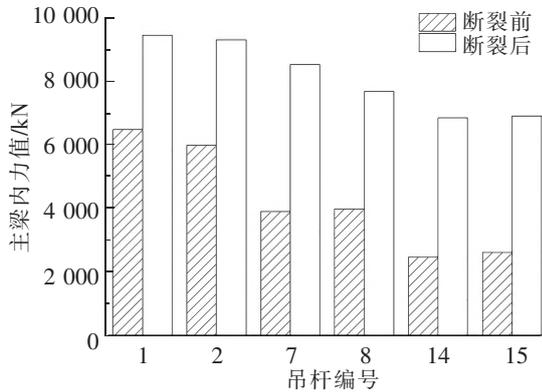


图 6 单根吊杆断裂时主梁内力值

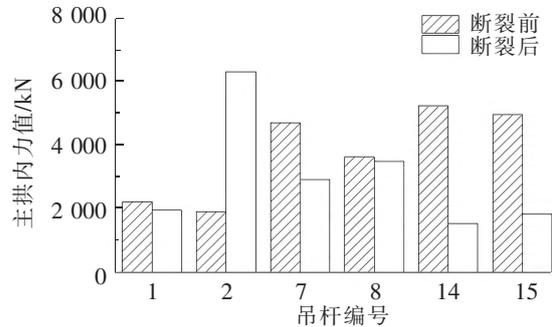


图 7 单根吊杆断裂时主拱内力值

从图 6 可以看出,单根吊杆断裂时,吊杆 N7 断裂导致主梁最大内力变化值最大,为 4 240.1 kN,比完好时增加了 109%;N1 吊杆或 N2 吊杆断裂后,主梁最大内力值增大 30%左右,其他吊杆断裂时,在其断裂吊杆附近的吊杆内力值均未达到完好状态下吊杆的最大内力值(9 467.9 kN)。

从图 7 可以看出,单根吊杆断裂时,主拱内力变化最大的是 N2 吊杆断裂,由 1 911.8 kN 变化为 6 316.3 kN,变化值为 4 404.5 kN,比完好时增加了 230.4%,其余吊杆内力变化值相较于完好时变化幅值在 200%以内。总体来说,吊杆断裂后的内力值未超过完好时主拱最大内力值(8 191.4 kN)。

2 根吊杆断裂对主梁和主拱的内力影响见表 3 和表 4,其中工况 1~工况 7 分别表示 N1+N2 断裂、N7+N8 断裂、N14+N15 断裂、N1+N28 断裂、N2+N27 断裂、N7+N22 断裂、N8+N21 断裂,主梁完好状态下的最大内力值为 9 467.9 kN。

表 3 2 根吊杆断裂后主梁内力值

kN

工况	断裂位置	断裂前内力值	断裂后内力值	断裂位置	断裂前内力值	断裂后内力值
1	N1	6 466.2	11 427.1	N2	5 981.5	11 889.0
2	N7	3 891.1	9 648.0	N8	3 980.1	9 685.7
3	N14	2 469.1	10 246.5	N15	2 606.1	10 030.0
4	N1	6 466.2	9 438.2	N28	4 807.0	8 652.9
5	N2	5 981.5	9 291.6	N27	4 703.8	6 828.2
6	N7	3 891.1	8 542.1	N22	3 466.1	7 643.0
7	N8	3 980.1	4 705.1	N21	3 713.7	4 533.8

表 4 2 根吊杆断裂后主拱内力值

kN

工况	断裂位置	断裂前内力值	断裂后内力值	断裂位置	断裂前内力值	断裂后内力值
1	N1	2 218.7	-3 831.9	N2	1 911.8	-9 138.0
2	N7	4 713.9	3 412.0	N8	3 633.4	-2 523.9
3	N14	5 235.0	-803.4	N15	4 972.9	-980.5
4	N1	2 218.7	1 958.9	N28	3 016.9	-3 622.7
5	N2	1 911.8	-8 946.8	N27	3 101.9	-1 055.7
6	N7	4 713.9	2 798.7	N22	4 558.4	2 093.0
7	N8	3 633.4	-827.3	N21	2 899.2	-809.6

从表 3 可以看出,2 根吊杆断裂时,N14+N15 吊杆断裂,其断裂位置主梁弯矩值变化最大,比完好时分别增加了 315.0%和 284.9%,N15 吊杆附近主梁的最大内力值增加到 10 030.0 kN;N1+N2 吊杆断裂对主梁的内力影响最大,其中 N2 吊杆断裂后其附近主梁最大内力值达到了 11 889.0 kN,比完好时的最大值增加了 2 421.1 kN。其他位置 2 根吊杆断裂时,断裂位置附近主梁弯矩显著增加,但均不大于完好时的最大弯矩值(9 467.9 kN)。

从表 4 可以看出,2 根吊杆断裂时,主拱内力值变化最大的位置在两侧拱脚处吊杆断裂,其中 N2+N1 吊杆断裂时,N2 吊杆断裂位置附近主拱内力值最大,为-9 138.0 kN,比完好时增加了 11 049.8 kN。

可以看出,单根吊杆断裂时,对主梁和主拱的影响不大,断裂位置的最大内力值小于全桥完好时的最大内力值,所以单根吊杆断裂不会影响桥梁的正常使用;2 根吊杆断裂时,主梁和主拱的内力值明显增大,可以认为是单根吊杆断裂的叠加作用,故在吊杆架设和后期更换吊杆时要采取架设临时吊杆的措施,预防吊杆断裂引起其他吊杆断裂的连锁反应。

3.4 主拱与主梁线形分析

单根吊杆断裂时主拱位移变化见图 8,2 根吊杆断裂时主拱位移变化见图 9。

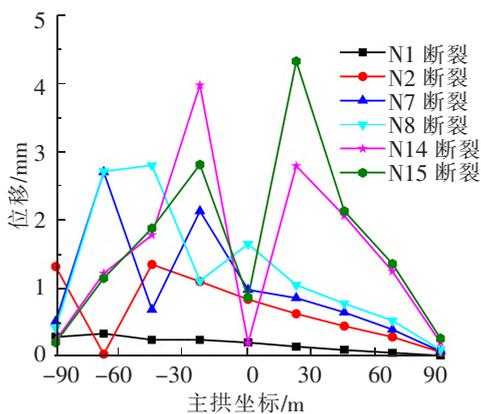


图 8 单根吊杆断裂时主拱位移变化

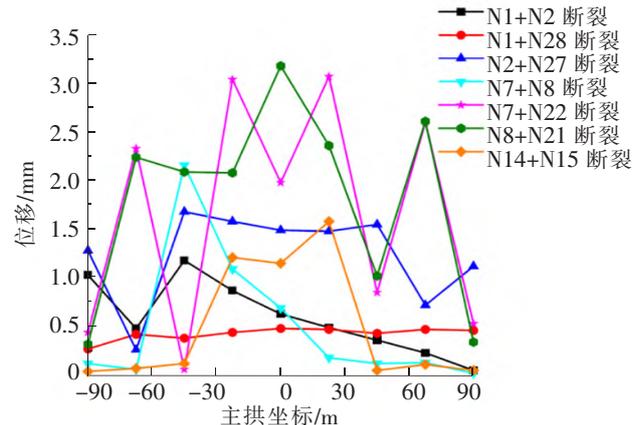


图 9 2 根吊杆断裂时主拱位移变化

从图 8 可知,单根吊杆断裂时,N1 吊杆断裂对于主拱的线形影响最小,其挠度变化值为+0.336 mm,比完好时减少了 0.7%;N15 吊杆断裂对于主拱的线形影响最大,挠度变化的峰值为 4.320 mm,比完好状态下减少了 4.02%。可以看出,各个工况下吊杆断裂后,在断裂位置出现了挠度变化的峰值,而且峰值随着吊杆断裂位置往跨中位置(横坐标为 0 m)的靠近不断增大,单根吊杆断裂对主拱的影响呈先增加再减小的态势。

靠近拱脚处的 N1 吊杆对于主拱的线形影响程度不大,总体挠度变化不超过 0.4 mm,距离 N1 吊杆位置越远,其断裂对于桥梁的影响程度越小。N15 吊杆对于主拱的影响范围最广,整个主拱圈的线形均有影响。

从图 9 可以看出,当同侧对称位置(N1+N28、N2+N27、N7+N22、N8+N21、N14+N15)2 根吊杆发生断裂时,桥梁主拱线形的影响整体呈对称的方式分布。在对称位置吊杆断裂中,靠近拱脚处的 N1+N28 吊杆断裂时,对主拱的线形影响最小,为 0.48 mm,比完好时减少了 0.4%。2 根吊杆发生断裂时,对主拱的线形影响最大的为 N7+N22 和 N8+N21 吊杆断裂,在主拱的跨中位置附近出现了位移变化的峰值,为 3.18 mm,比完好时减少了 2.65%。同侧相邻位置吊杆 N1+N2 断裂时,在其断裂位置都出现了位移减小的峰值,离吊杆断裂位置越远,其对主拱的影响越有限,对另一拱脚处的影响可忽略不计;当相邻 N7+N8 吊杆断裂时,在-40 m(1/4 跨)处达到位移变化的峰值,其值为 2.16 mm,且随着距离向两端偏移,影响逐渐减小。

单根吊杆断裂时主梁位移变化见图 10,2 根吊杆断裂时主梁位移变化见图 11。

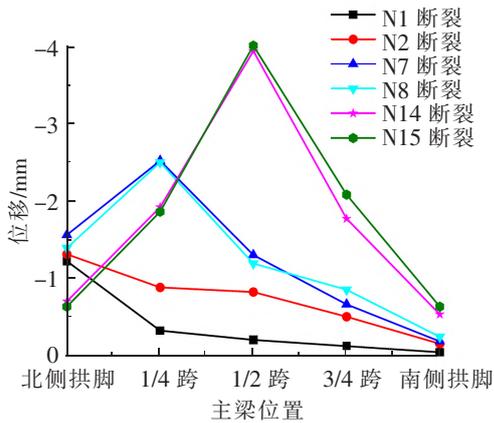


图10 单根吊杆断裂时主梁位移变化

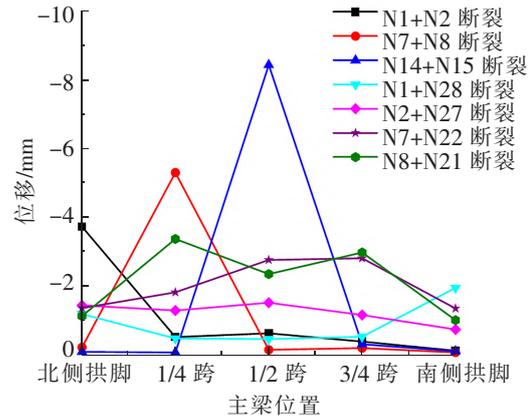


图11 2根吊杆断裂时主梁位移变化

从图10可知,单根吊杆断裂时,拱脚处的N1吊杆断裂对于主梁的线形影响程度最小,挠度的最大变化值为 -1.22 mm ,比完好状态下增加了 1.2% ;跨中位置吊杆(N15)断裂对主梁的线形影响最大,挠度的变化值为 -4.01 mm ,比完好状态下增加了 4.3% 。可以看出,单根吊杆断裂时,主梁的挠度变化值受断裂吊杆位置的影响,距离断裂吊杆位置越近,挠度的变化值越大,并且每根吊杆断裂位置附近都出现挠度变化的峰值,随着断裂位置往跨中位置的偏移,主梁的挠度变化值逐渐增大,在跨中位置达到了最大。

从图11可知,2根吊杆断裂时,跨中位置的N14+N15吊杆断裂时,主梁的位移变化值最大,其挠度峰值为 -8.42 mm ,比完好时增加了 8.2% ;对称位置的N1+N28吊杆断裂时的挠度变化值最小,其最大挠度为 -1.96 mm ,相较于完好时增加了 1.94% 。故2根吊杆断裂时,各吊杆断裂工况与吊杆完好状态下相比,挠度变化值不超过 10% ,且从图11中可以看出,相邻2根吊杆断裂比对称位置2根吊杆断裂对主梁的影响大。

总的来说,不论是单根吊杆断裂还是2根吊杆断裂,随着吊杆断裂位置往跨中位置的偏移,主梁的挠度峰值在不断增大,其对桥梁线形的影响越来越广。

4 结论

通过对宽幅空间网状系杆拱桥吊杆断裂后对结构的力学性能分析,可以得到以下结论:

(1)吊杆断裂会导致同侧相邻的吊杆内力重分布,断裂吊杆位置附近受到的影响最大,距离断裂位置越远,受到的影响越小,因此,在更换吊杆时要注意架设临时吊杆,防止吊杆发生连锁断裂。

(2)2根吊杆断裂相较于单根吊杆断裂来说,拱脚位置和跨中位置的主梁位移最大从 -1.22 mm 增加到 8.42 mm ,主梁内力增大到 $10\ 030.0\text{ kN}$,故在后期养护的过程中要注重对这些位置吊杆进行检查。

(3)2根吊杆断裂相较于单根吊杆断裂对于桥梁结构的影响大,主梁和主拱在跨中位置受吊杆断裂影响比较严重,随着吊杆断裂位置往桥梁两侧的偏移,其对主梁与主拱的线形变化在逐渐减小,直至两侧拱脚处受吊杆断裂影响最小。

(4)在施工过程中,要尽量避免在桥面堆积过重的重物,防止因为架设过程中吊杆受力过大发生坍塌事故。

参 考 文 献

- [1]左家强.铁路槽形梁尼尔森体系刚性吊杆拱桥设计研究[J].铁道工程学报,2021,38(2):63-67.
- [2]汤虎,王伟,路辉,等.济南齐鲁黄河大桥420 m网状吊杆系杆拱桥主拱设计[J].桥梁建设,2022,52(4):117-124.
- [3]何波.高速铁路网状吊杆系杆拱桥结构分析[D].成都:西南交通大学,2016.
- [4]余江昱.系杆拱桥吊杆的破损-安全设计研究[D].南京:东南大学,2015.
- [5]郭卓明.中下承式拱桥吊杆断裂工况时的设计研究[J].中国市政工程,2022(2):17-20.

(下转第68页)

2. College of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: The support structure of deep foundation pits in soft soil area is prone to deformation and failure during excavation, leading to potential safety accidents. Taking the deep foundation pit project in the soft soil area of Zhenjiang city as the research target, the deformation law of the stepped support structure was investigated. Through on-site measurement and numerical simulation, a comprehensive analysis was conducted on the stepped support structure, with a particular focus on comparing the displacement results of the support piles. The results shows that the computed results closely align with the actual field data, accurately reflecting the deformation patterns of the support structure. During the excavation process, the highest horizontal displacement of support piles can be observed in the middle of the foundation pit, with a maximum of 33.4 mm at the top of the pile. Moreover, the horizontal displacement presents a “bow-shaped” deformation pattern along the pile body. By comparing the deformation results from the north and south sides of the foundation pit, it can be observed that the implementation of the stepped support structure effectively regulates the horizontal displacement of the support piles.

Key words: deep foundation pit; stepped support structure; foundation pit monitoring; numerical simulation; displacement

~~~~~  
(上接第 33 页)

[6]位庆江. 缺陷和局部失效对钢管混凝土系杆拱桥的影响研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.

[7]TED Z, RYAN W. Design of long span bridges for cable loss[M]. Lisbon: IABSE, 2005.

[8]吴庆雄, 罗健平, 魏小康, 等. 考虑吊杆断裂过程的下承式钢管混凝土拱桥动力分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 409-416.

[9]蔡建国, 冯健. 大跨空间结构连续倒塌分析若干问题探讨[J]. 工程力学, 2012, 29(3): 143-149.

## Analysis of Mechanical Properties of the Structure Caused by the Fracture of the Suspension Rod of Spatial Mesh Suspension Rod Tied Arch Bridges

Zou Lanlin, Hu Yanshu

(School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

**Abstract:** Based on the research background of a steel box tied arch bridge with a wide spatial mesh boom, the effects of the broken boom on the mechanical properties of the structure were analyzed. By simulating the state of the broken boom, the static characteristics of the number and position of the broken boom on the internal force of the remaining boom, the internal force of the main beam, the internal force of the main arch, the line shape of the main beam and the line shape of the main arch were analyzed. The results show that the internal force redistribution of the adjacent boom will occur after the boom breaks, and the closer the distance to the fracture, the greater the impact. After the boom was broken, the peak of displacement reduction would appear near the fracture position, and the farther away from the fracture position, the influence on the linear shape of the main beam and main arch would gradually decrease. Through the analysis of single boom fracture and two booms fracture, it can be seen that the arch foot position and mid-span position have the greatest influence on the main beam and main arch after the boom fracture.

**Key words:** spatial mesh; steel box tie arch bridge; structural stability; broken boom; statics