

基于影响矩阵法拱桥吊杆破断安全性评估*

胡志坚¹, 王登华^{1,2}, 周知¹, 夏雷雷¹

(1. 武汉理工大学交通与物流工程学院 武汉, 430063)

(2. 成都市建筑科学研究院有限公司 成都, 610051)

摘要 根据成桥索力确定拱桥关键吊杆位置,采用影响矩阵法分析关键吊杆断裂后剩余吊杆和主纵梁的内力变化,从剩余吊杆损伤和纵梁数量变化两方面对结构的安全性能进行研究,并以某中承式拱桥为背景工程验证了本研究方法的有效性和关键结构参数取值的合理性。结果表明:影响矩阵法能较为准确地分析出关键吊杆破断后剩余吊杆和主纵梁的内力变化情况;吊杆损伤主要影响剩余吊杆的安全性,当剩余吊杆截面损伤程度大于50%时,易出现连续断索事故;对于30多米宽的桥面系,布置2道主纵梁、3道次纵梁可以满足主纵梁在吊杆断裂后的安全性能储备。

关键词 拱桥;吊杆破断;影响矩阵法;安全性评估

中图分类号 U441+.4;U448.22+5

引言

在中、下承式拱桥中,吊杆既是主要的传力构件,也是易损构件,运营期间由于多种荷载反复作用,极易发生损伤和破断事故^[1]。一旦吊杆出现损坏,就会影响到桥梁的正常使用,严重时甚至会导致桥梁桥面系坍塌,造成重大的经济损失和人员伤亡^[2]。因此,吊杆的状态对于拱桥的正常使用起着重要作用。

许多学者针对吊杆的损伤及断裂进行了研究。殷学纲等^[3]采用一阶矩阵摄动理论,研究了吊索损伤对吊索系张力的影响,得到了吊索系张力矢量因损伤变化的表达式。于博等^[4]浇筑了系杆拱桥的缩尺模型,使经典位置的吊杆发生单根破断,对剩余吊杆的内力进行计算,得知拱脚短吊杆对剩余吊杆内力影响最大。吴文清等^[5]根据线性累积损伤理论,对非对称平行吊杆体系的吊杆疲劳寿命进行预测,并对端部吊杆骤断的受力变化规律进行分析,得出结构破坏安全设计理论应用于吊杆设计的可行性。陈淮等^[6]采用静力法分析计算了不同位置的吊杆破断对桥梁动力特性的影响。朱劲松等^[7]采用准静力法分析了短吊杆在运营期内破断对桥梁整体静动力性能的影响。曲兆乐等^[8]提出半动力方法来模拟斜拉桥的拉索破断,并与全动力法进行了比较。孙广

俊等^[9]对系杆拱桥吊杆完好状态和损伤状态进行分析对比,得出吊杆失效会使结构发生显著的内力重分布。柴文浩等^[10]以某钢管混凝土拱桥为研究对象,分析了吊杆断裂数量和吊杆断裂位置对主梁、剩余吊杆和拱肋内力的影响,并采用结构需求能力比(demand of capacity ratio,简称DCR)值去评估吊杆发生连续破断的风险。陈景星等^[11]依据刘江黄河大桥的结构类型和特点,建立了空间有限元模型,对桥梁不同位置处吊杆出现损伤进行动力特性的计算分析。目前有关于吊杆断裂的研究主要集中在关键吊杆位置确定和剩余构件的受力性能变化等方面,很少考虑关键吊杆断裂后剩余吊杆损伤和桥面系刚度对结构内力重分布的影响。

笔者根据成桥索力确定拱桥最不利吊杆位置,采用影响矩阵法分析关键吊杆断裂后剩余吊杆和主纵梁的内力变化,从剩余吊杆损伤和纵梁数量变化两方面对结构的安全性能进行研究,并以某中承式拱桥为背景工程验证了本研究方法的有效性和关键结构参数取值的合理性。

1 理论分析

一般来说,在拱桥成桥阶段索力最大的吊杆是整个吊杆系最容易发生损坏的,故可以根据索力值确定关键吊杆的位置。假定吊杆发生断裂的方式为

* 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0806000);湖北省重点研发计划资助项目(2023DJC001);江西省重点科技资助项目(2021Z0001)

收稿日期:2022-04-17;修回日期:2022-05-27

1根横梁两侧的吊杆同时发生破坏,则吊杆发生破坏的瞬间,在吊杆锚固点的位置会对拱肋和桥面梁体产生一个突加集中力作用,记为 λT 。其中: λ 为动力放大系数; T 为吊杆索力值,方向与索力方向相反。拱桥吊杆破断示意图如图1所示。

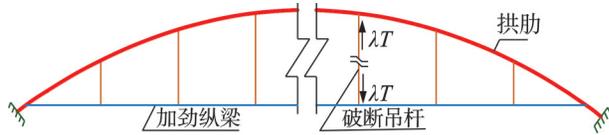


图1 拱桥吊杆破断示意图

Fig.1 Arch bridge suspender break diagram

拱桥的拱肋刚度与吊杆、主纵梁刚度相比大得多,故当吊杆发生破断时,拱肋可以视为刚体,内力变化可不考虑,剩余吊杆和主纵梁内力变化较为明显。近年来发生拱桥吊杆断裂的实例表明,事故最终结果都是导致桥面局部坍塌或连续断索,故吊杆破断后需要更加关注剩余吊杆及主纵梁的内力变化。

1.1 剩余吊杆分析

吊杆索力是相互影响的,当某一根吊杆索力发生变化时,其余吊杆也会随之发生改变,因此可以采用影响矩阵法去分析吊杆断裂后剩余吊杆内力的变化情况^[12]。在计算过程中,需要分别确定受调向量、施调向量和影响向量。

受调向量是由关键截面上 n 个独立的元素所组成的列向量,其在整个调值阶段需要接受调整,记为

$$D = (d_1 \ d_2 \ \cdots \ d_{i-1} \ d_i \ d_{i+1} \ \cdots \ d_n)^T \quad (1)$$

施调向量是结构中使受调向量发生改变的 m 个独立元素所组成的列向量,记为

$$x = (x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_{i-1} \ x_i \ x_{i+1} \ \cdots \ x_m)^T \quad (2)$$

影响向量是结构中由于某个施调向量 x_i ($i=1, 2, \dots, m$) 发生单位变化时,引起受调向量 D 发生相应的变化,记为

$$A_j = (a_{1j} \ a_{2j} \ \cdots \ a_{i-1,j} \ a_{ij} \ a_{i+1,j} \ \cdots \ a_{nj}) \quad (3)$$

当 m 个施调向量依次发生单位变化时,用矩阵表示相对应的影响向量,记为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1,i-1} & a_{1i} & a_{1,i+1} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{i-1,1} & \cdots & a_{i-1,i-1} & a_{i-1,i} & a_{i-1,i+1} & \cdots & a_{i-1,m} \\ a_{i1} & \cdots & a_{i,i-1} & a_{ii} & a_{i,i+1} & \cdots & a_{im} \\ a_{i+1,1} & \cdots & a_{i+1,i-1} & a_{i+1,i} & a_{i+1,i+1} & \cdots & a_{i+1,m} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n,i-1} & a_{ni} & a_{n,i+1} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

通常认为受调向量与施调向量呈线性关系,即满足线性叠加原理,可以得到如下方程

$$Ax = D \quad (5)$$

由上面分析可知,当 i 号吊杆发生断裂时,在其锚固点的位置会对拱肋和桥面梁体产生一个突加集中力 λT_i ,可以看作对吊杆 i 施加 $-\lambda T_i$ 的张力, T_i 为成桥阶段 i 号吊杆的索力,从而得到新的施调向量为

$$x' = (0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ -\lambda T_i \ 0 \ \cdots \ 0) \quad (6)$$

此时其余吊杆对于 i 号吊杆的影响为0,而 i 号吊杆对其余吊杆的影响依旧存在,且未发生改变,则影响矩阵为

$$A' = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1,i-1} & a_{1i} & a_{1,i+1} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{i-1,1} & \cdots & a_{i-1,i-1} & a_{i-1,i} & a_{i-1,i+1} & \cdots & a_{i-1,m} \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ a_{i+1,1} & \cdots & a_{i+1,i-1} & a_{i+1,i} & a_{i+1,i+1} & \cdots & a_{i+1,m} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n,i-1} & a_{ni} & a_{n,i+1} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

用 F_0 表示成桥阶段各吊杆索力值, F' 表示吊杆破断后剩余吊杆索力变化值, F_1 表示吊杆破断后剩余吊杆最终索力值,则可以得到

$$F' = A'x' \quad (8)$$

$$F_1 = F_0 + F' \quad (9)$$

1.2 主纵梁分析

在影响矩阵中,元素可以对应于吊杆索力、结构弯矩及结构位移等力学量中的任意一个。当吊杆索力发生变化时,对应主纵梁的弯矩值也会发生相应改变,可以采用影响矩阵法去分析吊杆破断后主纵梁的内力变化,此时施调向量仍然为 x' ,吊杆位置处主纵梁弯矩值的影响矩阵为

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1,i-1} & b_{1i} & b_{1,i+1} & \cdots & b_{1m} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{i-1,1} & \cdots & b_{i-1,i-1} & b_{i-1,i} & b_{i-1,i+1} & \cdots & b_{i-1,m} \\ b_{i1} & \cdots & b_{i,i-1} & b_{ii} & b_{i,i+1} & \cdots & b_{im} \\ b_{i+1,1} & \cdots & b_{i+1,i-1} & b_{i+1,i} & b_{i+1,i+1} & \cdots & b_{i+1,m} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{n,i-1} & b_{n,i} & b_{n,i+1} & \cdots & b_{n,m} \end{bmatrix} \quad (10)$$

用 M_0 表示成桥阶段各吊杆位置处主纵梁的弯矩, M' 表示吊杆破断后各吊杆位置处主纵梁的弯矩

变化值, M_1 表示吊杆破断后各吊杆位置处主纵梁的最终弯矩值,可以得到

$$M' = Bx' \tag{11}$$

$$M_2 = M_1 + M' \tag{12}$$

1.3 安全性评价指标

引入需求能力比 DCR 指标来评估吊杆断裂后主纵梁和剩余吊杆的安全性能,其反映了剩余结构的承载能力储备情况。DCR 的表达式为

$$DCR = Q_{UD}/Q_{CE} \tag{13}$$

其中: Q_{UD} 为吊杆破断时剩余构件的最大荷载效应; Q_{CE} 为剩余构件的极限承载力。

材料强度采用规范规定的设计值。根据相关规定,钢绞线和钢丝的条件屈服点为其抗拉强度的 0.85 倍^[13],纵梁根据公路钢结构桥梁规范规定的钢材设计强度进行取值。通过 DCR 值的变化,判断结构的安全性能储备情况。

2 工程应用

2.1 工程概况

以建成的某中承式拱桥为计算实例,该桥为柔性系杆拱桥,主拱跨径为 168 m,两侧边拱跨径为

60 m,通过锚固于两侧边拱末端的系杆使结构形成自锚体系。主拱肋跨中 116 m 段为钢结构,两侧各 26 m 段为钢筋混凝土结构,钢拱肋与混凝土拱肋在结合段通过预应力精轧螺纹钢筋、普通钢筋、钢板及混凝土连接。主拱肋采用钢管混凝土桁式结构,拱轴线采用悬链线,主跨矢高 $f=38.333$ m,矢跨比 $f/L=1/4.3826$,拱轴系数 $m=1.6$ 。两侧拱肋各设置 19 根吊杆,相邻吊杆纵向间距为 6 m,弹性模量为 1.9×10^5 N/mm²,标准抗拉强度为 1 860 MPa,边吊杆与次边吊杆截面面积为 5 179.8 mm²,其余吊杆截面面积为 4 340.5 mm²。主梁为等截面钢-混凝土结合梁结构,全高为 3.27 m,全宽为 36.5 m。结合梁由钢主纵梁、钢横梁、钢中横梁、钢端横梁及钢次纵梁组成的梁格体系。主纵梁为工字形截面,梁高为 2.72 m,使用 Q345qD 钢材,截面面积为 59 232.0 mm²,截面惯性矩为 9.46×10^{10} mm⁴。拱桥立面布置如图 2 所示。1/2 桥面系钢梁布置如图 3 所示。

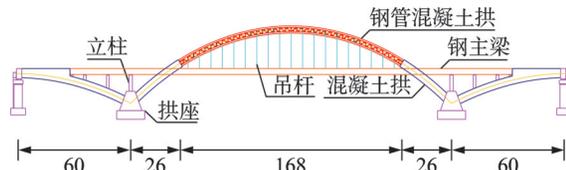


图 2 拱桥立面布置图(单位:m)

Fig.2 Vertical layout of the arch bridge (unit: m)

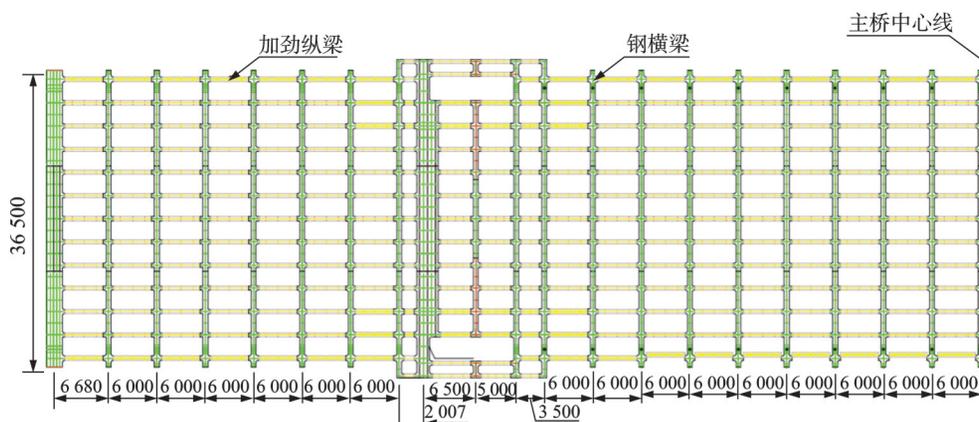


图 3 1/2 桥面系钢梁布置图(单位:mm)

Fig.3 1/2 steel beam layout of bridge deck system (unit: mm)

2.2 有限元模型

利用有限元软件对该拱桥进行施工过程模拟分析,有限元模型如图 4 所示。全桥模型共有 3 298 个节点,4 392 个单元,包括梁单元 4 288 个,桁架单元 104 个。混凝土拱肋、立柱及拱座采用梁单元模拟,系杆、吊杆则采用桁架单元模拟,钢混组合梁和钢管混凝土组合截面根据材料和截面参数的等效替换采

用联合截面模拟,主梁支架采用只受压的节点弹性支撑模拟。



图 4 有限元模型

Fig.4 Finite element model

3 关键吊杆断裂构件受力分析

3.1 关键吊杆的确定

该拱桥成桥阶段上游侧和下游侧吊杆实测索力值如图5所示。由图可知:上游侧吊杆索力值最大为2086.0 kN,出现在2#吊杆的位置;索力值最小为1462.3 kN,出现在10#吊杆的位置。下游侧吊杆索

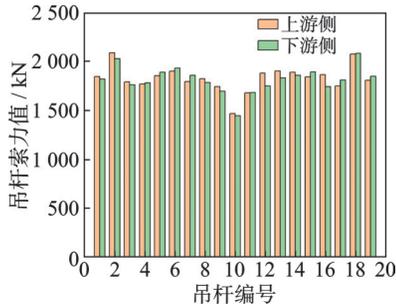


图5 成桥阶段吊杆实测索力值
Fig.5 Cable force value of suspender in bridge completion stage

1.000	-0.375	-0.225	-0.122	-0.054	-0.015	0.004	0.010	0.010	0.008
-0.295	1.000	-0.329	-0.203	-0.106	-0.042	-0.007	0.008	0.012	0.011
-0.133	-0.248	1.000	-0.269	-0.166	-0.086	-0.034	-0.006	0.007	0.010
-0.064	-0.135	-0.237	1.000	-0.265	-0.166	-0.087	-0.036	-0.007	0.006
-0.026	-0.064	-0.133	-0.241	1.000	-0.262	-0.165	-0.087	-0.036	-0.008
-0.006	-0.024	-0.064	-0.140	-0.244	1.000	-0.259	-0.163	-0.086	-0.036
0.002	-0.004	-0.024	-0.070	-0.146	-0.246	1.000	-0.256	-0.160	-0.085
0.004	0.006	-0.004	-0.028	-0.074	-0.149	-0.247	1.000	-0.252	-0.158
0.004	0.006	0.005	-0.005	-0.031	-0.078	-0.151	-0.247	1.000	-0.251
0.003	0.011	0.007	0.004	-0.007	-0.032	-0.080	-0.154	-0.249	1.000

根据文献[14]的研究,对于复杂桥梁,动力放大系数λ与结构类型及断索位置有关,其范围在1.3~2.7之间。为了安全起见,本研究按λ=2.0进行分析计算。根据影响矩阵法可以求得关键吊杆破断前后剩余吊杆应力值,如图6所示。

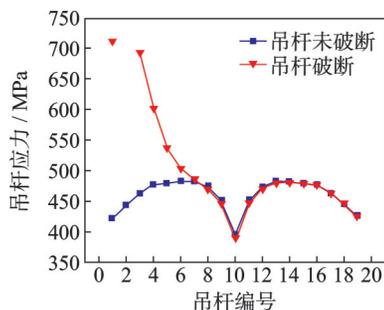


图6 关键吊杆破断前后剩余吊杆应力值
Fig.6 The stress values of residual suspender before and after the critical suspender breaking

力值最大为2078.4 kN,出现在18#吊杆的位置;索力最小值为1441.7 kN,出现在10#吊杆的位置。由此可见,在运营期间次边吊杆所承受的荷载最大,处于最不利状态,易发生断裂。

3.2 关键吊杆断裂前后剩余吊杆受力分析

将拱桥每一对吊杆的张拉分别设置为一个独立的施工阶段,张拉力都设置为1 kN,随后进行正装计算,可以获得1组成桥索力。在正装计算过程中,可得到每一对吊杆张拉单位力时对其余吊杆索力值的影响系数,求出所有的索力影响系数后,可以得到该拱桥吊杆索力的影响矩阵。由于该桥左右对称,且某根吊杆对于较远处吊杆的影响系数基本为0,故只展示1~10号吊杆的影响矩阵,其中每一行表示相应的吊杆编号,每一列表示该编号吊杆张拉单位力时其余吊杆索力的变化量。影响矩阵如下

由图6可知,当2#吊杆发生断裂后,1#吊杆应力增加69.1%,3#吊杆应力增加49.6%,4#吊杆应力增加26.1%,5#吊杆应力增加12.3%。这表明关键吊杆发生破断后,会使剩余吊杆发生明显的内力重分布现象,吊杆破断对同侧附近的其余吊杆内力影响较大,而对远离破断吊杆位置的吊杆内力影响较小,可以忽略不计。

3.3 关键吊杆断裂前后主纵梁受力分析

在正装计算过程中,可得到每一对吊杆张拉单位力时所有吊杆位置处主纵梁弯矩的影响系数,求出所有弯矩影响系数后,可以得到该拱桥张拉吊杆对主纵梁弯矩的影响矩阵。这里只展示1~10号吊杆位置处主纵梁弯矩影响矩阵,其中每一行表示相应的吊杆编号,每一列表示该编号吊杆张拉单位力时其余吊杆位置处主纵梁的弯矩变化量。影响矩阵如下

-1.336	-0.366	0.365	0.375	0.274	0.171	0.093	0.044	0.016	0.003
-0.493	-2.452	-0.205	0.638	0.756	0.612	0.414	0.245	0.127	0.054
0.015	-0.678	-2.610	-0.353	0.581	0.758	0.637	0.442	0.267	0.141
0.226	0.157	-0.636	-2.747	-0.511	0.459	0.679	0.594	0.423	0.262
0.229	0.364	0.211	-0.692	-2.852	-0.617	0.380	0.629	0.566	0.415
0.179	0.339	0.422	0.211	-0.744	-2.925	-0.688	0.326	0.591	0.552
0.123	0.246	0.385	0.451	0.205	-0.778	-2.970	-0.735	0.281	0.571
0.077	0.152	0.277	0.422	0.472	0.205	-0.794	-2.996	-0.774	0.261
0.044	0.079	0.168	0.308	0.451	0.490	0.211	-0.801	-3.011	-0.787
0.025	0.030	0.083	0.189	0.334	0.474	0.509	0.224	-0.792	-3.013

根据影响矩阵法计算出关键吊杆破断前后主纵梁弯矩值,如图7所示,主纵梁截面编号为相应位置处吊杆编号。

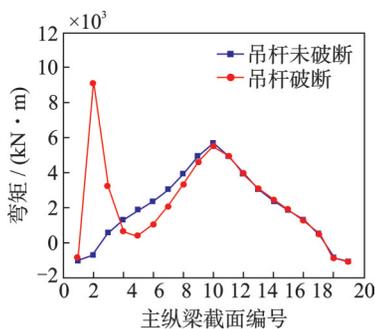


图7 关键吊杆破断前后主纵梁弯矩值

Fig.7 The bending moment value of the main longitudinal beam before and after the key suspender breaking

由图7可知:当2#吊杆发生破断时该位置处主纵梁弯矩由负弯矩变成正弯矩,大小为9 128.4 kN·m,比未破断时增加13.5倍;3#吊杆位置处主纵梁弯矩增加5.1倍;在远离吊杆破断位置的主纵梁弯矩没有变化。这说明当吊杆失效时,主纵梁的内力会发生明显的重分布现象,破断吊杆处主纵梁内力变化最明显,随着距离增加主纵梁内力改变量越来越小。

4 参数分析

4.1 剩余吊杆损伤

在实际工程中,吊杆易发生锈蚀、疲劳等损伤,因此当关键吊杆发生断裂时,剩余吊杆的状态并不是完好的,承载力低于设计值。为了探究吊杆损伤对结构安全性能的影响,通过改变吊杆的截面尺寸来改变吊杆的刚度。设置吊杆未损伤和吊杆损伤20%,40%,50%,60%这5个工况进行分析,DCR随吊杆损伤程度变化曲线如图8所示。

由图8可知:吊杆从未损伤到损伤60%时,剩余吊杆的应力DCR值增加90.5%,其安全性能大幅降

低;主纵梁的弯矩DCR增加7.4%,说明吊杆损伤对主纵梁的受力影响不大。当吊杆截面损伤程度大于20%时,剩余吊杆安全性能储备低于主纵梁安全性能储备,剩余吊杆断裂风险大于主纵梁断裂风险。

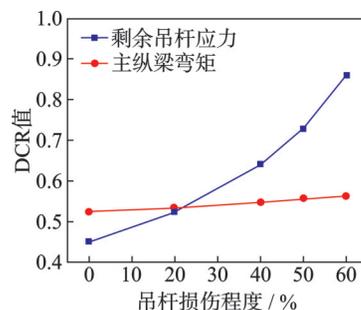


图8 DCR随吊杆损伤程度变化曲线

Fig.8 Curve of DCR with damage degree of suspender

上述结果表明,在正常情况下吊杆不会出现连续断索的情况,当剩余吊杆截面损伤程度大于50%时,吊杆DCR值上升幅度较快,连续断索的风险较大。因此,在运营期间需要对吊杆进行定期的养护和检修,确保吊杆截面损伤不超过50%。

4.2 纵梁数量变化

对于有纵梁的桥面系,纵梁的布置一定要合理。纵梁数量过少,会导致主梁纵向刚度不足,一旦在运营期间吊杆发生断裂,桥面系容易发生局部坍塌;纵梁数量过多,则会导致主梁纵向刚度过大,增加施工成本和工期。该中承式拱桥纵梁布置示意图如图9所示,纵梁现场施工图如图10所示。

该拱桥的主跨纵梁由外侧2道主纵梁和中间11道次纵梁组成,纵梁横向间距为2.85 m,设计不合理,纵梁刚度过大。为了优化纵梁的布置,改变次纵梁的数量来改变纵梁的刚度,并研究数量的变化对于主纵梁和剩余吊杆安全性能的影响。次纵梁数量分别设置为11道、5道、3道、1道和不设置,DCR随次纵梁数量变化曲线如图11所示。

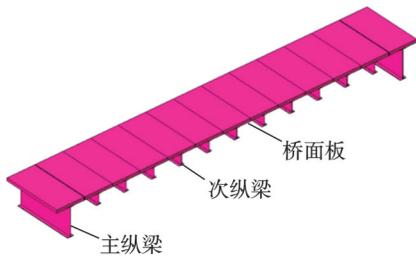


图9 纵梁布置示意图

Fig.9 Layout diagram of longitudinal beam



图10 纵梁现场施工图

Fig.10 Site construction drawing of longitudinal beam

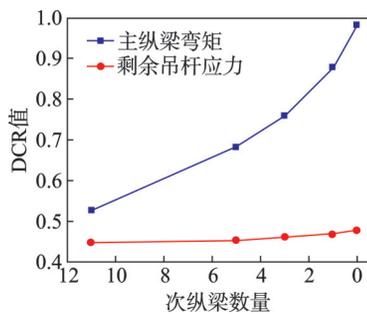


图11 DCR随次纵梁数量变化曲线

Fig.11 Curve of DCR with number of secondary longitudinal beams

由图11可知:钢横梁之间布置的次纵梁数量由11道减少到0时,剩余吊杆应力的DCR值从0.450增加到0.477,增加了6.0%,变化较小,说明纵梁数量变化对于剩余吊杆的安全性基本没有影响;主纵梁弯矩DCR值从0.528增加到0.982,增加了85.9%,变化较大,说明纵梁数量变化对于主纵梁的安全性影响较大。随着纵梁布置数量的减少,主纵梁的安全性能明显降低。

上述结果表明:当桥面系只设置2道主纵梁而不设置次纵梁时,纵梁横向间距为36.5 m,一旦吊杆发生断裂,主纵梁弯矩DCR接近1,极易发生破坏;当桥面系设置2道主纵梁和3道次纵梁时,纵梁横向间距为9.125 m,吊杆断裂时纵梁的安全性能储备可以得到保证。

5 结论

1) 本研究提出了基于影响矩阵法的吊杆破损结构安全性评估方法,并以中承式拱桥为算例,验证了该方法的有效性。

2) 剩余吊杆损伤主要影响剩余吊杆的安全性,当剩余吊杆截面损伤程度大于50%时,易出现连续断索事故。因此,在运营期间需要对吊杆进行定期的养护和检修,确保吊杆截面损伤程度不超过50%。

3) 一般来说,对于30多米宽的桥面系布置2道主纵梁、3道次纵梁就可以满足纵梁在吊杆断裂后的安全性能储备,继续增加纵梁数量虽然对桥面系刚度有所提升,但会大幅增加造价并延长工期,所以不建议采用。

参 考 文 献

- [1] 陈宝春, 韦建刚, 周俊, 等. 我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 50-61. CHEN Baochun, WEI Jianguang, ZHOU Jun, et al. Application of concrete-filled steel tube arch bridges in China: current status and prospects[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(6): 50-61. (in Chinese)
- [2] 邵元, 孙宗光, 陈一飞, 等. 车辆荷载对中承式拱桥吊杆体系的冲击效应分析[J]. 公路交通科技, 2016, 33(1): 82-88. SHAO Yuan, SUN Zongguang, CHEN Yifei, et al. Analysis of impact effect of vehicle load on hanger system of half-through arch bridge[J]. Journal of Highway and Transportation and Development, 2016, 33(1): 82-88. (in Chinese)
- [3] 殷学纲, 姚建军. 中承式拱桥吊索损伤对吊索系静张力的影响[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 45-48. YIN Xuegang, YAO Jianjun. Effect on sling system tension from sling damage in mid-supported arch bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 45-48. (in Chinese)
- [4] 于博, 张戎令, 毕来运, 等. 单根吊杆断裂对系杆拱桥吊杆内力重分布的影响研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 2020, 52(6): 889-894, 904. YU Bo, ZHANG Rongling, BI Laiyun, et al. Study on the influence of single hanger fracture on the internal force redistribution of the tied arch bridge[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2020, 52(6): 889-894, 904. (in Chinese)
- [5] 吴文清, 余江昱. 系杆拱桥吊杆的破损安全设计方法

- 研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(1): 35-39.
- WU Wenqing, YU Jiangyu. Study of failure safety design method for hangers of tied arch bridge [J]. Bridge Construction, 2016, 46(1): 35-39. (in Chinese)
- [6] 陈淮, 胡锋, 李静斌. 吊杆损伤对湛江斜靠式拱桥动力特性的影响[J]. 世界地震工程, 2010, 26(4): 1-5.
- CHEN Huai, HU Feng, LI Jingbin. Influences of damaged suspenders on dynamic properties of the Zhanhe double X-arch bridge [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(4): 1-5. (in Chinese)
- [7] 朱劲松, 邑强. 拱桥新型吊杆安全性及其静动力影响研究[J]. 桥梁建设, 2011(1): 39-42, 51.
- ZHU Jinsong, YI Qiang. Study the safety of new type suspenders and their static and dynamic performance influence on the arch bridge [J]. Bridge Construction, 2011(1): 39-42, 51. (in Chinese)
- [8] 曲兆乐, 石雪飞, 李小祥, 等. 斜拉桥拉索断裂损伤的动力过程模拟方法研究[J]. 结构工程师, 2009, 25(6): 89-92.
- QU Zhaole, SHI Xuefei, LI Xiaoxiang, et al. Research on dynamic simulation methodology for cable loss of cable-stayed bridges [J]. Structural Engineers, 2009, 25(6): 89-92. (in Chinese)
- [9] 孙广俊, 李正嘉, 章世祥, 等. 结构损伤对系杆拱桥结构性能的影响研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(2): 61-66.
- SUN Guangjun, LI Zhengjia, ZHANG Shixiang, et al. Study of influences of structural damage on structural performance of tied arch bridge [J]. Bridge Construction, 2018, 48(2): 61-66. (in Chinese)
- [10] 柴文浩, 杨雅勋, 张宇航, 等. 吊杆断裂对系杆拱桥力学性能的影响[J]. 公路, 2021, 66(9): 174-179.
- CHAI Wenhao, YANG Yaxun, ZHANG Yuhang, et al. Influence of suspender fracture on the mechanical properties of tied-arch bridges [J]. Highway, 2021, 66(9): 174-179. (in Chinese)
- [11] 陈景星, 冯忠居, 胡锋. 吊杆损伤对钢管混凝土拱桥动力特性的影响[J]. 公路交通科技, 2013, 30(3): 100-104.
- CHEN Jingxing, FENG Zhongju, Hu Feng. Influence of suspender damage on the dynamic property of CFST arch bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(3): 100-104. (in Chinese)
- [12] 方鸿, 高琼. 影响矩阵法在系杆拱桥施工调索中的应用[J]. 中外公路, 2014, 34(6): 146-148.
- FANG Hong, GAO Qiong. Application of influence matrix method to cable adjustment for construction control of ties arch bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(6): 146-148. (in Chinese)
- [13] 夏欢, 金晓勤, 晏班夫. 拱桥在役损伤吊杆破断安全性研究[J]. 中外公路, 2017, 37(1): 89-93.
- XIA Huan, JIN Xiaoqin, YAN Banfu. Study of breaking safety of damaged suspenders of arch bridge in service [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(1): 89-93. (in Chinese)
- [14] PARK S Y, STAROSSEK U, et al. Effect of cable loss in cable stayed bridges-focus on dynamic amplification [C]//IABSE Symposium Report. Weimar, Germany: IABSE, 2007: 9-16.



第一作者简介:胡志坚,男,1974年10月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为在役桥梁检测评估及加固、桥梁结构安全技术、装配式桥梁快速建造技术等。

E-mail:hzj@whut.edu.cn

通信作者简介:王登华,男,1995年10月生,硕士、助理工程师。主要研究方向为桥梁工程。

E-mail:2972251594@qq.com