

大跨斜拉输水管桥水锤冲击响应研究

张嘉瑞¹, 宋志强¹, 刘琛²

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 大跨斜拉输水管桥管道内水锤效应往往对桥梁结构安全产生重要影响。建立了某斜拉输水管桥有限元模型, 对比分析水-管-桥结构的动力特性, 进行了管-桥共振复核。通过特征线法求解水锤基本方程, 计算了输水工况转换过程中不同阀门关闭历时产生的水锤压力, 分析了水锤冲击作用下管桥主要构件的动力响应, 对比研究了水锤荷载不同加载方式及不同关阀历时对管桥构件响应的影响规律。结果表明: 管道空管及充水满管情况下的自振频率与桥梁结构的固有频率错开度较大, 二者没有发生共振的可能; 非均匀加载方式使得管桥各构件动力响应相对均匀加载显著增大, 位移和应力的增幅大都超过 50%, 但不会引起构件的失稳或破坏; 随着阀门关闭历时的增加, 水锤冲击作用减弱, 管桥主要构件的动力响应降低, 钢桁梁组件中 K 型支撑杆、横梁、腹杆的响应下降幅度相对较大, 桥塔响应下降幅度较小。

关键词: 输水管桥; 固有频率; 共振; 水锤效应; 动力响应

中图分类号: TU991.39

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)05-0160-09

Response of long-span water conveyance cable-stayed pipeline bridge to water hammer impact

ZHANG Jiarui¹, SONG Zhiqiang¹, LIU Chen²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: The water hammer effect in the pipeline of long span cable-stayed pipeline bridges often has an great adverse influence on the bridge structure safety. The finite element model of a cable-stayed pipeline bridge was established to comparatively analyze the dynamic characteristics of water-pipe-bridge structure, and the pipe-bridge resonance check was carried out. The basic equation of water hammer is solved by the characteristic line method, then the water hammer pressure generated by different valve closing time in the process of water conveyance condition conversion was calculated to analyze the dynamic response of the main components of the pipeline bridge under the impact of water hammer and the effects of different loading modes of water hammer load and different valve closing time on the response of the components of the pipeline bridge. The results show that the natural vibration frequencies of cable-stayed bridge and water conveyance pipeline are quite different from each other whether there is no water or full of water in the pipeline, so the pipe-bridge resonance will not occur. The non-uniform loading mode significantly increases the dynamic response of each component of the pipeline bridge, and both the increment of displacement and stress are more than 50%, but they will not cause the instability or failure of the components. With the increase of valve closing time, the impact of water hammer is weakened, and the dynamic response of the main components decreases, of which the response of the K-type support rod, beam and ventral rod in the steel truss beam assembly decreases significantly, while that of the bridge tower only decreases slightly.

收稿日期: 2021-11-24; 修回日期: 2022-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479165)

作者简介: 张嘉瑞(1999-), 男, 江西景德镇人, 硕士研究生, 研究方向为水工结构抗震。

通讯作者: 宋志强(1981-), 男, 辽宁开原人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构抗震研究。

Key words: water conveyance pipeline bridge; natural frequency; resonance; water hammer effect; dynamic response

1 研究背景

在长距离管道输送工程中,管道跨越河流、山谷等自然障碍物时,常采用管线过桥的穿越方式^[1-2],将管道作为桥面的附属部分,既经济合理,又方便管线的检修,有利于管道输送工程的安全保障。对于大跨度管道悬索桥及管道斜拉桥这类长周期柔性结构,挂桥管道自重及管内移动荷载对桥梁全桥结构受力性能的影响不可忽视^[3]。张志东等^[4]构建了一种斜拉索跨越管桥安全状况评定方法研究管桥的安全程度。王永振等^[5]通过悬索管桥缩尺模型试验与数值模拟相结合,研究了挂桥管道荷载变化及吊索破坏对全桥结构的影响。高行行^[6]针对斜拉管桥的受力特点,研究了管梁不同连接形式对全桥动力特性的影响。另外,桥面敷设长距离管段相比埋地穿越管段更易受到外界条件的影响,研究管道桥梁的结构健康状态有着重要意义^[7-8]。张平^[9]研究了大跨度悬索管桥结构在风、雪、地震及清管^[10-11]这些典型荷载作用下的全桥结构动力响应并进行了安全评价。

现有的管桥工程一般在行车桥梁的基础上铺设管道结构,管道内水荷载对桥梁整体的影响较小,而对于长距离专项输水管桥,大管径管道内的水锤效应对桥梁结构的影响较大,随着桥梁上敷设管道直径的增大,除输水管道自重和水重作用之外,输水工况变换过程中管道阀门处产生的水锤效应^[12]也会对管桥结构体系产生不可忽视的作用。而我国公路及城市桥梁相关规范^[13-14]中缺乏关于桥梁结构上敷设输水管道的动力计算条文,国内外针对水锤冲击作用下桥梁结构动力响应的研究成果尚不多见。

目前研究者大都基于简化的计算方法或试验手段来分析水锤效应对桥梁结构的影响。庄小将等^[15]、马芹钢等^[16]和 Li 等^[17]采用拟静力法将水锤效应转化为一定比例下作用在桥梁结构上的行车荷载,研究了水锤作用下桥梁结构的响应。孙建渊等^[18-19]分别建立斜拉桥与输水管道水锤有限元计算模型,研究得到了斜拉桥结构在水锤激励作用下的动力响应。张博等^[20]通过建立多塔斜拉管桥模型,得到了管桥各构件在水锤效应作用下的动力响应。伍平等^[21]、丁欢欢等^[22]基于流固耦合理论对比分析了管桥结构数值模拟与试验结果,判定过桥水管与桥梁结构不会发生共振,并研究了水流流速

对输水管道的影响。

本文以某长距离输水工程中斜拉输水管桥跨越结构为研究背景,建立了斜拉输水管桥有限元模型,分析了水-管-桥梁结构动力特性,进行了压力输水管道、斜拉桥结构共振复核;采用特征线法求解水锤基本方程计算了输水工况转换过程中的水锤效应,研究了水锤冲击作用下桥梁主要构件的动力响应特性,对比探讨了不同加载方式和阀门不同关闭历时对管桥动力响应的影响规律。

2 管桥有限元模型及其动力特性

2.1 工程简介

某输水管桥工程主桥为四塔五跨钢桁梁斜拉桥,主桥跨距分别为 65、120、120、120、65 m,总长 490 m,桥梁总宽度为 18.5 m;水滴形混凝土索塔顺桥向对称布置,主索塔总高为 73.5 m,塔柱横向宽度为 28 m;主梁采用由桥面系、主桁架等组成的钢桁架结构,主桁架内净宽为 16.5 m,高为 9.3 m;双索面布置,斜拉索直接锚固在上弦杆上,塔上索间距为 2.0 m,主梁上索间距为 8.0 m,单塔布置 12 对,全桥共布置 48 对。斜拉管桥主桥整体布置如图 1 所示。两根 Q345D 钢管顺水流向对称分布在钢主梁桥面上,输水管道内径为 3.4 m,管壁厚度为 22 mm,桥塔横梁处设置钢镇墩组与管道固定连接。输水管道与桥梁布置如图 2 所示,在桥梁上游桥头管道上设有阀门,给水泵房布设在桥梁下游。

2.2 斜拉管桥有限元模型建立

在有限元软件 ANSYS 中建立斜拉管桥空间三维计算模型,分析桥梁结构与输水管道动力特性,计算水锤作用下桥梁结构动力响应。主桥塔塔柱、桥塔横梁及桥墩采用 SOLID45 实体单元模拟。主梁、拉索采用空间杆系结构模拟,钢桁梁组各杆件采用 BEAM188 梁单元模拟,斜拉索采用只受拉不受压的 LINK10 单元模拟,斜拉索与钢桁架梁上平联固定连接。钢纤维混凝土桥面、两根 Q345D 压力钢管、钢镇墩采用 SHELL63 板壳单元模拟。两根 DN3400 压力输水管道顺桥向对称分布,管道在主塔横梁处与钢镇墩固定连接,约束管道三向平移、转动自由度。输水管道顺水流方向上按 4 m 间距约束管道横向、竖向自由度,来模拟支墩对管道的影响。斜拉输水管桥及输水管道(局部)有限元计算模型如图 3、4 所示。

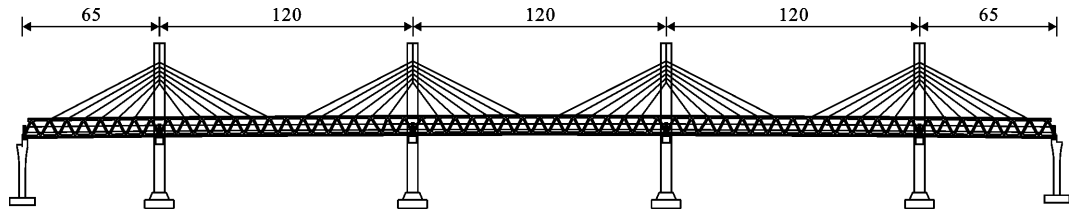


图 1 斜拉管桥主桥整体分布图 (单位:m)

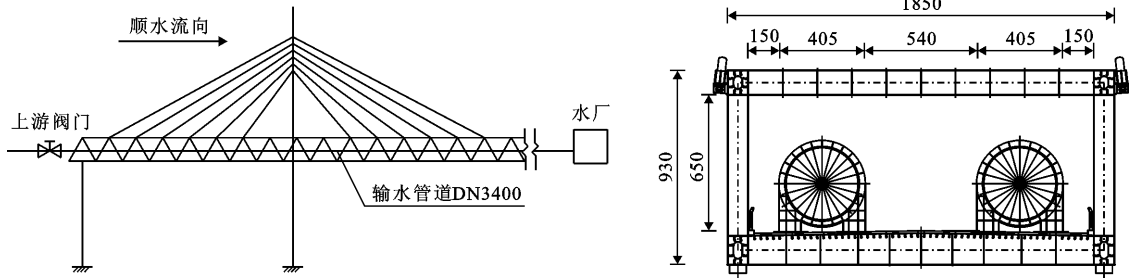


图 2 输水管道与斜拉桥分布图 (单位:cm)

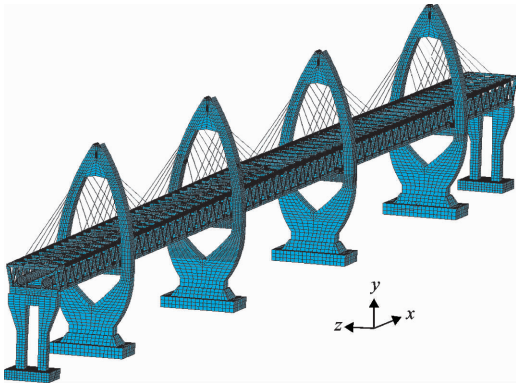


图 3 斜拉管桥有限元计算模型图

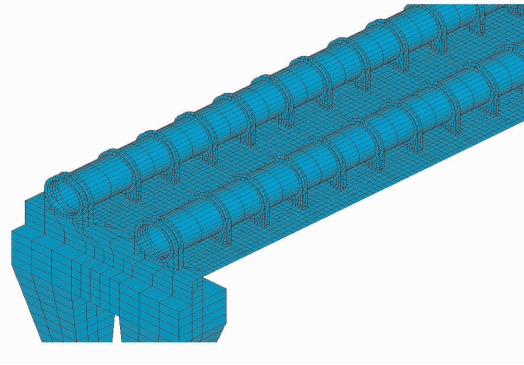


图 4 输水管道(局部)有限元计算模型图

2.3 水-管-桥结构动力特性分析

采用 MASS21 单元模拟管道中的水流,考虑管道施工完建期管道内无水及管道正常运行期管道内充满水时,全桥固有频率对比分析。表 1 给出了桥梁结构与压力钢管施工完建及正常运行期动力特性计算结果。

由表 1 可以看出,大跨度斜拉桥为长周期柔性结构,其自振频率较低,且低阶振型比较密集。输水管道施工完建管内无水及管道正常运行管内充满水时,管道的前 10 阶自振频率与斜拉管桥的前 10 阶自振频率相差较大,二者前 5 阶固有频率错开度达到或超过 90%。由输水管道施工完建期转变为正常运行期造成管道固有频率的改变,对斜拉桥结构的影响不大,即桥梁结构与输水管道发生共振的可能性不大。

设置桥面敷设输水管道边界约束条件,分析管道固有频率的变化,图 5 给出了管道支座间隔设置

约束长度变化对管道自振频率的影响情况;考虑斜拉桥结构参数变化对桥梁结构固有频率的影响。图 6

表 1 斜拉桥及输水管道(施工完建和正常运行期)前 10 阶动力特性计算结果

振型阶数	斜拉桥自振频率/Hz	输水管道(无水)		输水管道(有水)	
		自振频率/Hz	错开度/%	自振频率/Hz	错开度/%
1	0.11	2.07	95	1.97	94
2	0.13	2.08	94	1.98	93
3	0.15	2.09	93	1.99	92
4	0.16	2.10	92	2.02	92
5	0.21	2.11	90	2.03	90
6	0.24	2.12	89	2.04	88
7	0.25	2.13	88	2.05	88
8	0.26	2.14	88	2.07	87
9	0.30	2.15	86	2.08	86
10	0.34	2.16	84	2.09	84

给出了斜拉桥桥面厚度变化对桥梁结构自振频率的影响情况。

由图 5 可知,在输水管道处于施工完建期管道内无水及正常运行期充满水时,输水管道的自振频率随着管道支座间隔长度的增加呈非线性递减趋势;由图 6 可以看出,斜拉桥结构固有频率随桥面厚度增加近似呈线性递增趋势。管道处于正常运行期(充水满管),且管道支座约束间隔长度为 24 m 时

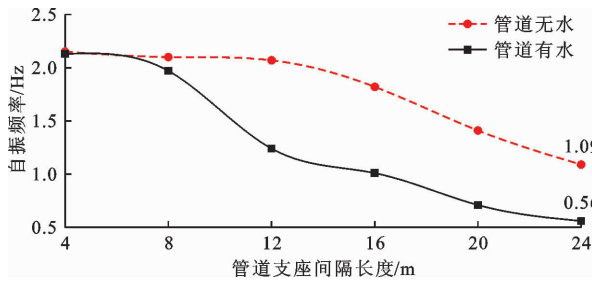


图 5 支座约束改变对管道自振频率的影响

的自振频率为 0.56 Hz(图 5),斜拉桥桥面厚度增加到 0.3 m 时,桥梁结构自振频率为 0.21 Hz(图 6),此时输水管道与斜拉桥的自振频率相差较大,不会发生共振。图 5、6 表明,在布置桥面管路系统时,合理增设输水管道支座的总数量,适当减小管道上边界约束的长度,同时合理控制斜拉桥的桥面厚度,通过多种措施能有效降低输水管道与斜拉桥发生共振的可能性。

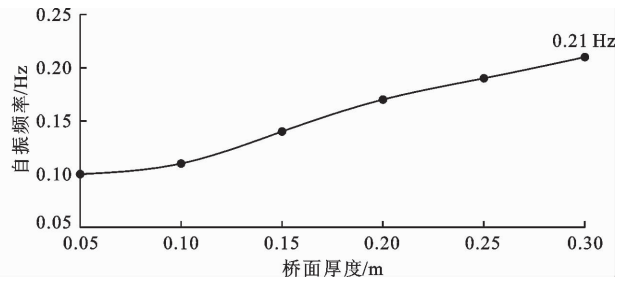


图 6 桥面厚度改变对斜拉桥自振频率的影响

3 水击作用下管桥结构动力响应分析

3.1 输水管道水锤冲击作用分析

由于有压管路内阀门突然关闭,引起管道内流量、压强突变的水力现象称为水锤效应。当管道内发生水锤时,水锤波在管路内传递,产生的沿管道纵向的冲击力对管路系统的破坏程度极大。在长距离引水输送工程中,管道内发生水锤现象对管路系统的破坏不容忽视。通过求解水锤基本方程中的运动方程、连续方程得到水锤波的时程曲线,运动方程与连续方程见方程式(1)和(2)。

运动方程:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f}{2d} |V| V = 0 \quad (1)$$

连续方程:

$$V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + V \sin a + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ; H 为测压管水头, m ; V 为管内流速, m/s ; x 为顺水流方向; t 为时间, s ; d 为管径, m ; f 为管内阻力系数; a 为管道轴线与水平线的夹角; c 为水锤波速, m/s 。

采用以 $x-t$ 为坐标场的特征线法求解水锤基本方程。代入任意常数 λ 将方程式(1)和(2)进行线性组合,不计管道坡度,得到方程式(3)。

$$\lambda \left[\left(V + \frac{g}{\lambda} \right) \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} \right] + \left(V + \frac{c^2 \lambda}{g} \right) \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f}{2d} |V| V = 0 \quad (3)$$

取 $\lambda = \pm \frac{g}{c}$,求解方程式(3)中偏微分方程得到方程式(4)。

$$\frac{g}{c} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2d} |V| V = 0 \quad (4)$$

通过特征线法求解方程式(4)可得管内流速的变化,由公式(5)求出水锤压强的变化值与管道截面面积相乘可得随时间变化的水锤冲击力,再将所得水锤冲击力作为作用在桥梁结构上的荷载,计算桥梁动力响应^[19]。

$$\Delta P = \pm \rho c \Delta V \quad (5)$$

式中: ΔP 为水锤压强变化值, Pa ; ρ 为管内流体密度, kg/m^3 ; ΔV 为管内流速, m/s ; c 为水锤波速, m/s 。

本文根据管道输水工况转换时的水锤冲击作用计算结果,选取历时 300 ~ 600 s 阀门关闭所产生的水锤波作为动力分析的荷载进行计算,得到水锤冲击作用下管桥各主要构件的动力响应。300 ~ 600 s 阀门关闭产生的水锤冲击力如图 7 所示,由图 7 可以看出,水锤冲击力基本呈正弦变化,并迅速衰减,其中设计流量下 300 s 关闭历时产生的水锤冲击力幅值相对最大,为 1 804.43 kN。

为研究输水管道内产生的水锤冲击荷载在管桥结构上的不同加载方式对管桥系统动力响应的影响,将主桥塔及其镇墩按顺水流方向依次进行了编号,如图 8 所示。关闭引起管道内流速及压强突变,沿管道径向变化产生的作用力相互平衡,对桥梁结构影响不大;管道内产生的纵向冲击力作用在主梁上,对桥梁结构影响较大,主要考虑顺桥向施加水锤

冲击荷载对桥梁结构的影响。对水锤冲击荷载施加方式分为均匀施加和比例施加,均匀施加方式即1#~6#镇墩均匀承担水锤荷载;比例施加方式即各镇墩按距离阀门位置远近,承担不同比例的荷载,将总荷载按6:5:4:3:2:1对应施加在1#~6#钢镇墩组上。与均匀输入加载方式相比,比例施加方式可模拟桥梁的非一致输入,分析管桥构件的非一致变形

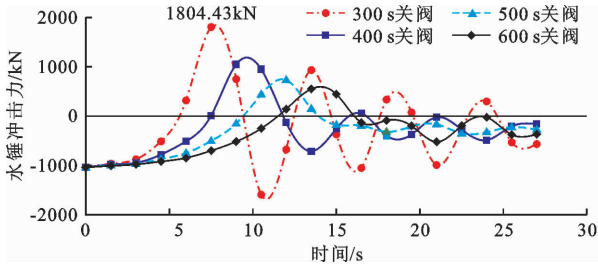


图7 不同阀门关闭历时产生的水锤冲击力

引起的附加位移、应力及内力等响应。

3.2 不同加载方式下管桥结构动力响应分析

3.2.1 位移响应分析 将300 s 关阀历时产生的水锤激励荷载按以上均匀和比例两种加载方式进行输入,开展全桥瞬态动力响应分析,得到主要构件钢桁梁中上弦杆、下弦杆、腹杆、横梁、K型支撑梁以及桥塔的顺桥向位移响应最大值,汇总于表2。

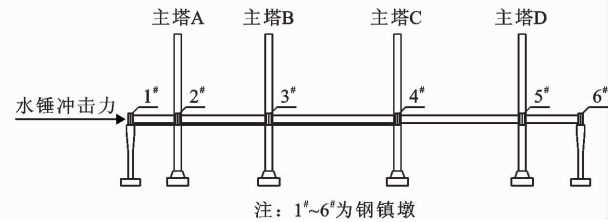


图8 水锤冲击力加载示意图

表2 水锤激励荷载两种加载方式管桥主要构件顺桥向的最大位移

关阀历时/s	加载方式	上弦杆	下弦杆	腹杆	横梁	K型支撑	桥塔塔顶
300	均分	0.81	0.98	0.81	0.97	0.82	2.38
	比例	1.26	1.60	1.34	1.58	1.35	3.42
	增幅/%	56	63	65	63	65	44

从表2可以看出,在水锤冲击的作用下管桥主要构件的顺桥向位移均在1 mm 量级,与均匀施加相比,比例施加方式使得钢桁梁各杆件及桥塔位移响应值显著增大,各杆件与桥塔结构之间的非均匀相互作用使管桥系统位移变化幅度加大,如下弦杆顺桥向位移增大了63%,达到了1.60 mm,横梁顺桥向位移增大了63%,达到了1.58 mm,塔顶顺桥向位移增大了44%,达到了3.42 mm。

图9给出了比例加载方式下钢桁梁下弦杆位移在不同节点位置处的分布情况。不同加载方式下,桥梁主要构件的位移随空间位置的变化规律趋于一致,只是幅值的差别,因此均匀加载方式下桥梁构件

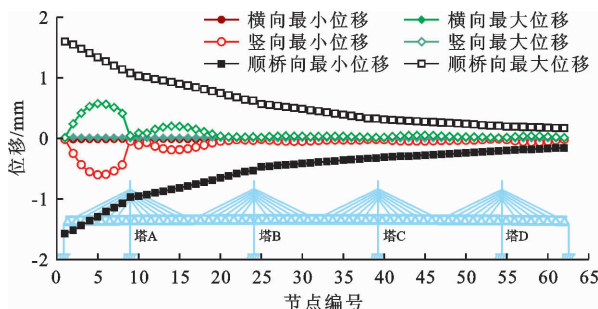


图9 比例加载方式下弦杆不同位置的位移

由表3可见,顺桥向的水锤冲击力主要使得钢

位移在不同空间位置处的分布情况不再给出。由图9可见,下弦杆在最左端1号节点处顺桥向位移最大,为1.60 mm,发生在靠近桥头水锤冲击力加载位置处,随着节点编号的增加,下弦杆顺桥向位移减小至约0.20 mm。图10给出了比例加载方式下各桥塔塔顶位移的时间历程曲线,由图10可以看出,各塔顶位移呈波动衰减,塔顶最大位移为3.42 mm,A塔塔顶由于全桥位移的累加效应,顺桥向位移较大。

3.2.2 应力响应分析 在均匀和比例两种加载方式下,桥梁主要构件钢桁梁中上弦杆、下弦杆、腹杆、横梁、K型支撑梁的截面应力、斜拉索应力最大值汇总于表3。

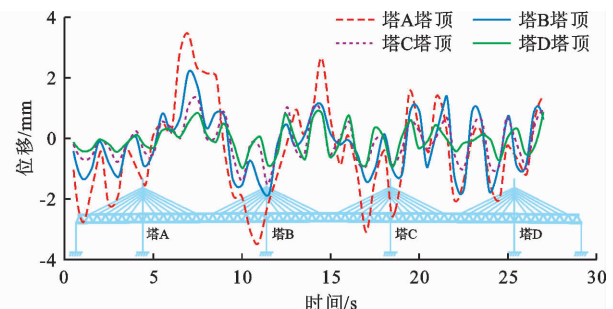


图10 比例加载方式各桥塔塔顶位移时间历程曲线

桁梁产生横向的弯曲作用,钢桁架梁组各杆件截面

应力以横向弯曲应力为主。钢桁梁各组件横向弯曲应力最大值在 1 MPa 量级,在比例加载方式下,各构件的应力响应值显著增大,其中,下弦杆截面应力值最大,为 1.02 MPa,相对于均匀加载方式增加了 89%;腹杆应力由 0.38 MPa 增加至 0.72 MPa,增加了 90%;斜拉索应力增大了 56%,达到 18.80 MPa。比例加载方式对钢桁梁组中下弦杆、腹杆及横梁的应力相比均匀加载方式的变幅影响较大,应力增幅均超过 70%;上弦杆和 K 型支撑的应力增幅不超过 60%,相对较小;斜拉索应力增幅为 56%;桥塔塔底处应力增幅最小为 49%,水锤激励不同施加方式对桥塔塔底的影响不大。

图 11 给出了比例加载方式钢桁梁中下弦杆在不同节点位置处的弯曲应力分布情况。不同加载方式下桥梁主要构件的应力随空间位置的变化规律趋于一致,只是幅值的差别,因此均匀加载方式下桥梁构件应力在不同空间位置处的分布情况不再给出。由图 11 可见,下弦杆横向弯曲应力最大值在靠近主桥塔塔 A 支座处取得,最大值约为 1 MPa,随着节点编号的增加,下弦杆截面横向弯曲应力迅速减小,在顺桥向其他位置截面,下弦杆横向弯曲应力变幅均

不超过 1 MPa 量级,表明水锤荷载对下弦杆的冲击影响不大。钢桁梁组各杆件的位移及截面弯曲应力分布情况基本一致。

斜拉索顺桥向双索面对称布置,以斜拉桥一侧 48 根拉索为研究对象,顺桥向 A、B、C、D 4 座主桥塔上锚固的斜拉索分别编号为 A ~ D 组拉索,各组斜拉索由上游至下游依次编号为 1 ~ 12 号。图 12 给出了管桥一侧主塔上锚固的 48 根拉索在水锤激励作用下的应力极值分布及变幅。由图 12 可以看出,由于斜拉索与钢桁梁、主桥塔锚固处不协调变形,A 塔上锚固的第 7 号斜拉索的应力值和应力变幅最大,分别为 9.50、19.00 MPa。锚固在主塔 B ~ 主塔 D 上的斜拉索应力分布类似,只是应力值略低。在水锤冲击作用下,斜拉索应力变幅较大,在主塔附近锚固位置处的斜拉索更需关注。

3.3 关阀历时对管桥系统结构动力响应分析

3.3.1 位移响应分析 将图 7 中 300、400、500 和 600 s 4 种关阀历时下产生的水锤冲击力时间历程,按均匀和比例两种分配方式施加在各镇墩上,得到斜拉管桥主要构件在不同关阀历时下的动力响应,如表 4 所示。

表 3 水锤激励荷载两种加载方式管桥主要构件的截面最大应力

关阀历时/s	加载方式	上弦杆	下弦杆	腹杆	横梁	K 型支撑	桥塔	斜拉索
300	均分	0.38	0.54	0.38	0.12	0.10	0.04	12.04
	比例	0.58	1.02	0.72	0.21	0.15	0.06	18.80
	增幅/%	53	89	90	75	50	49	56

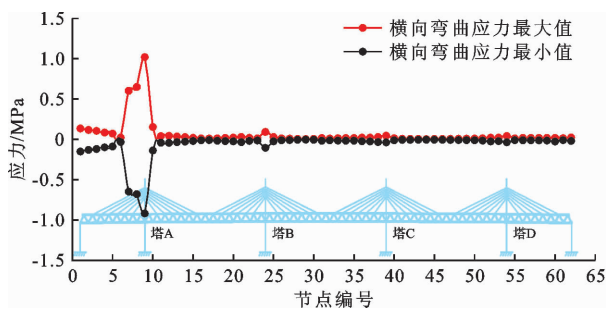


图 11 比例加载方式下弦杆截面弯曲应力分布

由表 4 可以看出,随着阀门关闭历时的延长,水锤压力的峰值逐渐降低,各构件的位移响应逐渐减小。以比例加载方式为例,钢桁梁组中 K 型支撑梁在 600 s 关阀历时产生的水锤压力作用下的最大位移为 0.49 mm,相对于 300 s 关阀历时减小了 64%;横梁在 600 s 关阀历时产生的水锤压力作用下的最

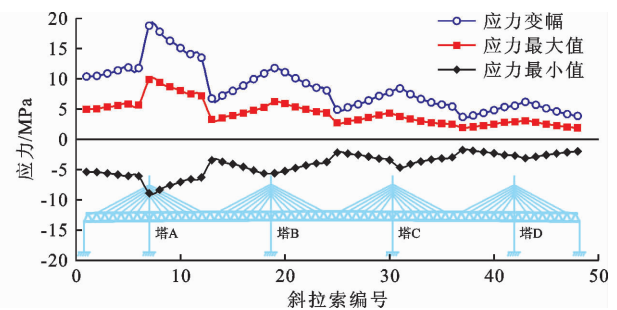


图 12 斜拉索在水锤作用下的应力极值及变幅

大位移为 0.64 mm,相对于 300 s 关阀历时减小了 60%;相应的塔顶最大位移由 3.42 mm 减小到 2.03 mm,减幅为 41%。

图 13 给出了不同加载方式下 K 型支撑梁和上弦杆顺桥向位移随关阀历时的变化规律。由图 13 (a) 可知,比例加载方式下的钢桁梁组中 K 型支撑

随着关阀历时的增加其位移减小呈先快后慢的非线性趋势,而均匀加载方式下位移随关阀历时的增加呈近似线性的减小趋势,最大减幅为64%。由图13(b)可知,在两种加载方式下,上弦杆随着关阀历时的增加其位移减小均呈先快后慢的非线性趋势,最大减幅为59%。管桥各构件中K型支撑梁、腹杆及横梁的位移减小趋势相似,最大降幅均在60%左右,上弦杆、下弦杆及桥塔塔顶的位移减小趋势相似,其中桥塔塔顶位移最大减幅为41%,相对较小。

3.3.2 应力响应分析 将4种不同关阀历时下产生的水锤冲击力按均匀和比例两种分配方式施加在

各镇墩上,所得管桥主要构件应力响应汇总于表5。

由表5可以看出,随着阀门关闭历时的增大,各构件的应力响应逐渐减小,以比例加载方式为例,钢桁梁组中腹杆在600s关阀历时产生的水锤压力作用下的应力最大值为0.24MPa,相对于300s关阀历时减小了67%;下弦杆在600s关阀历时产生的水锤压力作用下的应力最大值为0.50MPa,相对于300s关阀历时减小了51%,斜拉索应力最大值由18.80MPa减小至7.71MPa,减幅为59%。

图14给出了不同加载方式下钢桁梁组中腹杆和下弦杆弯曲应力随关阀历时的变化规律。

表4 不同关阀历时下两种加载方式管桥各构件的顺桥向位移

		mm					
关阀历时/s	加载方式	上弦杆	下弦杆	腹杆	横梁	K型支撑	桥塔塔顶
300	均分	0.81	0.98	0.81	0.97	0.82	2.38
	比例	1.26	1.60	1.34	1.58	1.35	3.42
400	均分	0.67	0.79	0.67	0.85	0.67	2.04
	比例	1.05	1.25	1.05	1.23	1.01	3.13
500	均分	0.52	0.71	0.50	0.69	0.52	1.83
	比例	0.59	1.14	0.60	1.12	0.62	2.88
600	均分	0.50	0.49	0.48	0.50	0.40	1.37
	比例	0.52	0.65	0.52	0.64	0.49	2.03

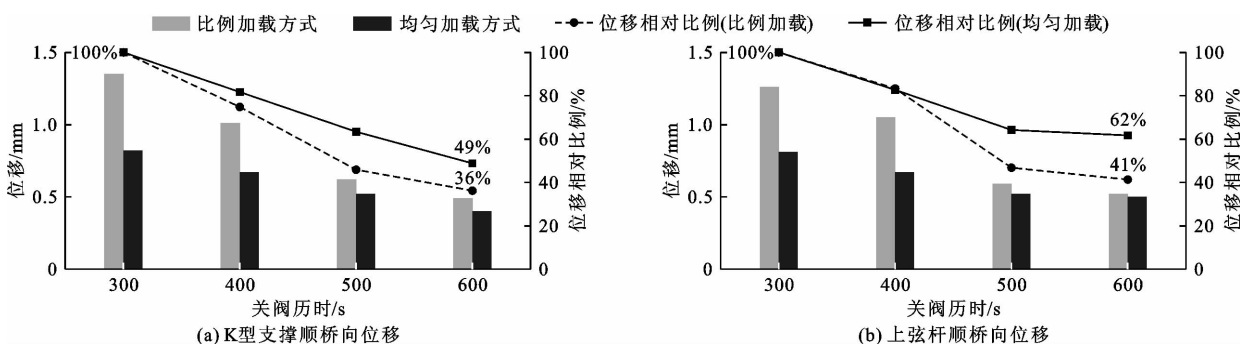


图13 两种加载方式下管桥主要构件顺桥向位移随关阀历时的变化规律

表5 不同关阀历时下两种加载方式管桥各构件的断面应力

		MPa						
关阀历时/s	加荷方式	上弦杆	下弦杆	腹杆	横梁	K型支撑	桥塔塔底	斜拉索
300	均分	0.38	0.54	0.38	0.12	0.10	0.043	12.04
	比例	0.58	1.02	0.72	0.21	0.15	0.064	18.80
400	均分	0.28	0.36	0.22	0.07	0.07	0.015	9.02
	比例	0.35	0.56	0.35	0.12	0.11	0.022	14.00
500	均分	0.21	0.32	0.20	0.06	0.05	0.014	8.12
	比例	0.26	0.52	0.25	0.10	0.07	0.009	12.90
600	均分	0.19	0.29	0.18	0.04	0.03	0.010	5.01
	比例	0.25	0.50	0.24	0.06	0.05	0.006	7.71

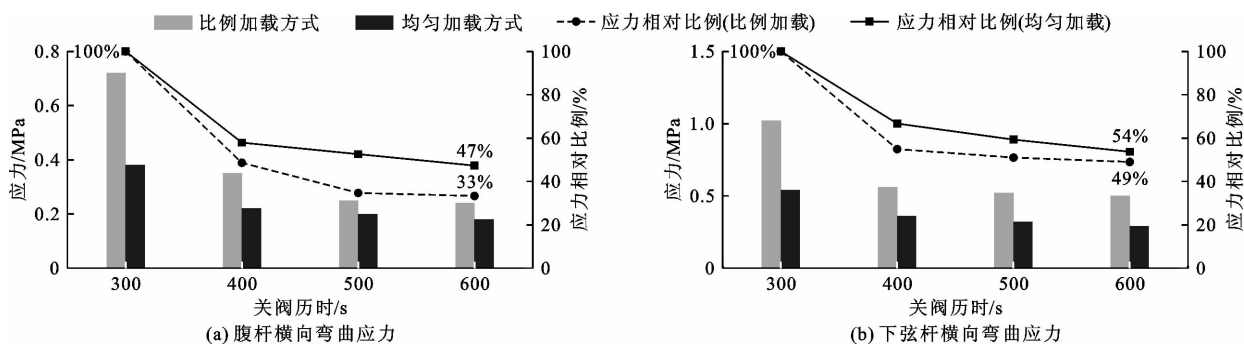


图 14 两种加载方式下管桥主要构件弯曲应力随关阀历时的变化规律

由图 14 可知,600 与 300 s 关阀历时相比,腹杆的应力最大降幅为 67%,下弦杆的应力最大降幅达 51%,在均匀和比例两种加载方式下,随着关阀历时的增加,腹杆和下弦杆应力减小均呈先快后慢的非线性趋势。管桥各构件的应力减小趋势与腹杆、下弦杆一致,其中腹杆、K 型支撑梁的应力降幅最大值为 67%,横梁的应力降幅最大值为 71%,相对较大,斜拉索、上弦杆、下弦杆及塔底的应力降幅最大值均不超过 60%,相对较小。

4 结 论

本文以某长距离输水工程中斜拉输水管桥跨越结构为研究背景,建立了斜拉输水管桥有限元计算模型,分析了水-管-斜拉桥结构动力特性,进行了压力输水管道、斜拉桥结构共振复核;基于特征线法求解水锤基本方程,计算了输水工况转换过程中的阀门快速关闭产生的水锤激励效应,分析了水锤激励荷载作用下管桥主要构件的动力响应特性,深入研究了不同加载方式和阀门不同关闭历时对构件位移和应力的影响规律,具体结论如下:

(1) 压力管道在无水及有水情况下,输水管道与斜拉桥均无发生共振的可能性,随着支墩间隔的增加,管道自振频率略有降低,随着桥面厚度的增加,桥梁自振频率略有升高,但二者仍然存在较大的错开度,水力振源引起的管道振动不会引发管-桥耦合共振。

(2) 水锤冲击作用下管桥主要构件主要发生顺桥向位移,各工况位移幅值均在 1 mm 量级。钢桁梁各组件主要发生横向弯曲应力,最大值在 1 MPa 量级,斜拉索最大应力不超过 20 MPa,计算中采用的水锤冲击荷载作用不会对桥梁主要构件的安全造成威胁或影响。

(3) 水锤冲击作用的非均匀加载方式使得管桥主要构件动力响应相对于均匀施加结果显著增大,

但仍不会引起构件的失稳或破坏。钢桁梁组件中下弦杆、腹杆、横梁及 K 型支撑的位移增幅超过 60%,桥塔塔顶位移增幅为 44%,相对较小。各构件之间的不均匀变形使得构件应力幅值显著增大,如钢桁梁组中下弦杆、腹杆及横梁的应力增幅均超过 70%;上弦杆和 K 型支撑的应力增幅约为 50%;斜拉索的应力增幅达到 56%;桥塔塔底处的应力增幅相对较小。

(4) 随着阀门关闭历时的增加,水锤压力幅值逐渐降低,管桥主要构件的动力响应值也逐渐减小。钢桁梁各组件在 600 s 关阀历时下的最大位移相对于 300 s 关阀历时减小 60% 左右;塔顶位移最大减幅为 41%,相对较小。600 s 关阀历时下的最大应力相对于 300 s 关阀历时减小 70%,主要发生在横梁、腹杆、K 型支撑梁等构件上;斜拉索、塔底的应力最大值减幅相对较小。

参考文献:

- [1] 陈霞,苏凡.综合管线过桥方案探讨[J].公路,2013(6):123-125.
- [2] 赵永全.大跨度输水管道钢管桁架管桥设计选型与优化[J].特种结构,2019,36(3):79-83.
- [3] 范自盛,潘瑜.过桥管道的斜拉桥全桥受力性能数值模拟分析[J].华北科技学院学报,2021,18(1):58-65+124.
- [4] 张志东,骆吉庆,何莎,等.斜拉索跨越管桥安全状况评定方法研究[J].安全,2019,40(5):49-53.
- [5] 王永振,霍思彤,曾维国,等.基于缩比模型的悬索跨越管桥结构安全性分析研究[J].油气田地面工程,2021,40(1):13-17+24.
- [6] 高行行.大跨度管道斜拉桥受力特性分析[D].成都:西南交通大学,2016.
- [7] 陶思宇.管道悬索跨越系统在多因素耦合作用下的动力学行为研究[D].成都:西南石油大学,2016.
- [8] 赵小潘.大跨度管道悬索跨越结构受力行为研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [9] 张平.典型荷载作用下悬索管桥结构健康状态研究[D].北京:北京交通大学,2015.

- [10] 钱东辉,邱忠华. 清管过程中悬索管桥的动态载荷分析[J]. 石油工程建设,2013,39(4): 14-16+29+22-23.
- [11] PENG Yang, AN Jianchuan, LUO Min, et al. Stress and displacement in pigging process of suspension cable spanning natural gas pipeline[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2021, 12(4): 05021006.
- [12] 杨志强. 水锤激励下输水管道流固耦合响应特性研究[D]. 福州: 福州大学,2017.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社,2015.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市桥梁设计规范: CJJ 11—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [15] 庄小将,马芹刚,王丰平,等. 大门大桥引桥过桥管线作用效应研究[J]. 桥梁建设,2011(6): 50-53.
- [16] 马芹纲,陈方东,庄小将,等. 大跨度斜拉桥过桥水管振动关键问题研究[J]. 世界桥梁,2009(4): 50-53.
- [17] LI Ranran, WANG Xiaoshan, ZHANG Yajun, et al. Study on the mechanical characteristics of steel truss cable-stayed bridge with water pipeline [C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021.
- [18] 孙建渊,王灏. 大型输水管道水锤效应对桥梁结构的动力作用研究[J]. 中外公路,2016,36(3): 148-151.
- [19] 孙建渊,王灏. 输水管道水锤效应作用下斜拉桥结构动力响应研究[J]. 土木工程学报,2017,50(2): 82-87.
- [20] 张博,张嘉瑞,曹双利,等. 大型输水管桥动力特性及水锤效应作用下动力响应研究[J]. 西北水电,2021(6): 82-86.
- [21] 伍平,张挺,张帮稳. 基于流固耦合的过桥水管动力特性研究[J]. 福州大学学报(自然科学版),2014,42(6): 905-909.
- [22] 丁欢欢,张挺,苏燕,等. 基于双向流固耦合的多跨过桥水管模态分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2013,41(2): 242-246.

(上接第159页)

- [16] LIU Junzhe, YAO Senyuan, BA Mingfang, et al. Effects of carbonation on micro structures of hardened cement paste[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2016, 31(1): 146-150.
- [17] 刘继鹏. 湿热养护钢渣-粉煤灰复合材料的耐久性能及微观结构[J]. 新型建筑材料,2021,48(8): 70-73+79.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2010.
- [19] 崔正龙,张雪虹,唐博. 不同养护环境对粉煤灰混凝土强度及碳化性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2019,38(1): 65-69+76.
- [20] 明静,张亚梅,孙伟. Permit法研究氯离子渗透性及其与混凝土孔隙率的关系(英文)[J]. 硅酸盐学报, 2010,38(9): 1707-1712.
- [21] 刘保东,李鹏飞,李林,等. 混凝土含水率对强度影响的试验[J]. 北京交通大学学报,2011,35(1): 9-12.
- [22] 邓朝莉,李宗利. 孔隙率对混凝土力学性能影响的试验研究[J]. 混凝土,2016(7): 41-44.
- [23] 邵珠山,张鹏举,魏玮,等. 微波辐射下含水率对混凝土力学性能影响[J]. 工程科学与技术,2021,53(6): 93-102.
- [24] 谭聪,李宗利,韩进生,等. 不同强度等级和尺寸混凝土自由吸水规律研究[J]. 混凝土,2019(11): 34-38.
- [25] 嵇鹰,张军,武艳文,等. 粉煤灰对泡沫混凝土气孔结构及抗压强度的影响[J]. 硅酸盐通报,2018,37(11): 3657-3662.
- [26] 吴中伟,廉惠珍. 高性能混凝土 [M]. 北京: 中国铁道出版社,1999.