

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.05.009

桥梁旋转式伸缩装置的缝宽控制性能

辛荣亚, 张启伟

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对桥梁的运营过程中某些桥梁的伸缩装置出现的缝宽不均匀、单缝缝宽过大等缺陷给行车安全带来的隐患, 结合工程实例, 基于力学分析对旋转式伸缩装置的缝宽控制性能进行了研究, 讨论了影响缝宽均匀性的主要因素, 提出了改善缝宽控制性能的措施。研究表明: 在伸缩量较大时, 旋转式伸缩装置的缝宽可能存在不均匀, 且这种不均匀主要集中在靠近伸缩装置两端的单元上; 伸缩装置的材料特性、安装工艺和构造参数对缝宽不均匀性都有影响, 而构造参数的影响更为显著; 布置合理的限位装置可有效改善缝宽的不均匀性。

关键词: 桥梁工程; 缝宽控制; 力学分析; 旋转式伸缩装置; 缝宽均匀性

中图分类号: U443.31

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2013)05-0052-06

Width Control Performance of Swivel-type Expansion Joints on Bridges

XIN Rong-ya, ZHANG Qi-wei

(School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: For the danger brought to the traffic by the defects of expansion joints, such as unevenness of widths and overlarge widths, which are found during the service of some bridges, a research about the width control performance of swivel-type expansion joints is conducted based on mechanical analysis with an engineering example. Thus, the width control performance of swivel-type expansion joints is researched based on mechanical analysis, the main factors which have influence on the widths evenness are discussed and the measures to improve the width control performance are proposed. The result indicates that (1) the widths of the swivel joint, especially the elements at the ends, are uneven when the joint is suffering large displacement; (2) the influences of the material property, the installation, and the configuration parameters of the expansion joint on the unevenness are all significant, and the influence of the last one is greatest; the unevenness can be decreased effectively by suitably arranged stoppers.

Key words: bridge engineering; joint width control; mechanical analysis; swivel-type expansion joint; joint width evenness

0 引言

伸缩装置是桥梁的重要构件, 是为使车辆平稳通过桥梁并满足结构变形要求的需要, 在桥面伸缩接缝处设置的各种装置的总称。桥梁跨度较大时, 传统的伸缩装置无法满足梁端的伸缩量需求, 当伸缩量在 300 mm 以上时, 模数式伸缩装置是唯一的合理选择^[1]。模数式伸缩装置将总体伸缩量均摊到各

单元, 因而可以在保证行车平顺的前提下提供较大的伸缩量。根据构造和缝宽控制原理的不同, 模数式伸缩装置可分为格栅式、排梁式和旋转式等^[2], 其中, 旋转式伸缩装置通过支承梁的旋转将总体伸缩量分摊到各单元。相对于常规的模数式伸缩装置, 旋转式伸缩装置具有更好的适应桥梁横向变位的能力^[3], 在大跨度桥梁的应用中具有很强的竞争力, 国内的江阴大桥、西堠门大桥等均采用了此

收稿日期: 2012-11-29

作者简介: 辛荣亚(1989-), 男, 河南民权人, 博士研究生。(xinrongya2006@126.com)

类伸缩装置。由于设计、施工和车辆超载等多方面的原因,有些伸缩装置在投入运营后在较短时间内就发生了损坏或工作异常^[3]。国内外学者从伸缩装置的设计、施工安装、构件疲劳等方面进行了研究^[3-6],指出了管理维护方面的不足^[7],提出了伸缩缝破损状况及疲劳寿命的评估方法^[8-9]。

在伸缩装置的诸多缺陷中,单缝缝宽过大降低了道路的平顺性,由此导致的行车安全性下降显而易见。旋转式伸缩装置在运营中也出现了此类问题,而目前的研究尚未涉及针对旋转式伸缩装置缝宽控制性能的详细分析。本文介绍了一种计算单缝缝宽的方法,并以一座大跨度桥梁上的DS2240伸缩装置为实例进行计算,揭示了单缝缝宽的分布规律,分析了缝宽均匀性对各设计参数的敏感程度以及导梁和限位装置对伸缩装置性能的影响,可为大伸缩量模数式伸缩装置的设计、安装及管养维护提供参考。

1 缝宽控制原理

模数式伸缩装置采用整体成型的异型钢材制成,由边梁、中梁、支承梁、连接件、密封橡胶等构件组成,其单缝的缝宽由总伸缩量和伸缩装置的构造决定。旋转式伸缩装置的缝宽控制系统由支承梁、中梁和滑动支座构成,支承梁大致平行布置,且与桥梁纵轴线有一定夹角(约20°)。旋转式伸缩装置的剖面图见图1。支承梁一端与主桥连接,只可在水平面内转动,可看作铰接(固定端);另一端与引桥连接,可沿纵桥向滑动以及在水面内转动(活动端)。中梁通过C形的构件箍在支承梁上,中梁与支承梁之间设置可滑移的支座,并施加预压力,以减弱构件的振动,避免构件之间发生碰撞。

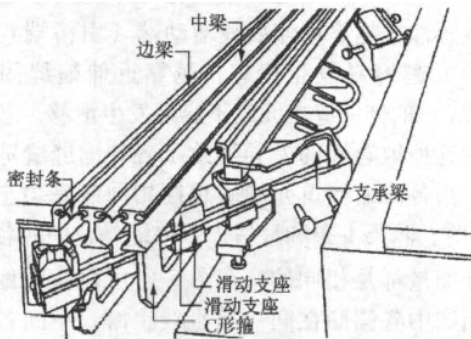


图1 旋转式伸缩装置剖面图^[2]

Fig. 1 Profile of swivel-type expansion joint^[2]

当主桥和引桥发生相对变位时,支承梁绕其铰接端发生水平面内的转动,中梁也随着支承梁的转

动产生变位。由于导梁的横向限制作用,中梁不能自由地进行横向运动,只能沿着支承梁发生滑移。在伸缩装置安装时,各中梁是等间距布置的。因此,按照几何上的等比例关系,伸缩装置伸长或缩短后各中梁应仍是等间距的,旋转式伸缩装置的设计正是基于此原理。

2 缝宽计算方法

当伸缩装置逐步伸长(或缩短)时,各中梁先是保持不动,随着伸缩量的增大,各中梁上的支撑体会先后发生滑移,带动中梁运动(见图2)。由于构造原因,各中梁并不同时发生滑移。为了得到伸缩装置伸缩后各中梁的位置,必须先计算使各中梁发生滑移的临界转角 α_i^* ,文献[10]中提出了一组量化分析方程如下,方程中的物理量参考图3。

$$\begin{cases} S = (c_L + c_F) \times 2 \times v \times (n - i) \times \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\cos\beta}, \\ S_p = S \times \frac{\cos\left(\frac{\alpha}{2} + \beta\right)}{\sin(\alpha + \beta)}, \\ \text{当 } S_p = R = 2 \times \mu \times V \text{ 时, } \alpha = \alpha_i^*, \end{cases} \quad (1)$$

式中, S 为滑移支撑体的应变产生的剪力; c_L 、 c_F 为上、下滑移支撑体的抗剪刚度; v 为同一根支承梁上,相邻支座在横桥向的间隔; n 为伸缩缝单元的个数; i 为支撑单元(中梁)的编号; α_i 为支承梁的转角位移; β 为支承梁的初始位置; S_p 为 S 在与支承梁平行方向的分量; α_i^* 为使 $S_p = R$ 的临界夹角; R 为每个支承单元的摩擦力; μ 为摩擦系数; V 为滑动支座的预压力。

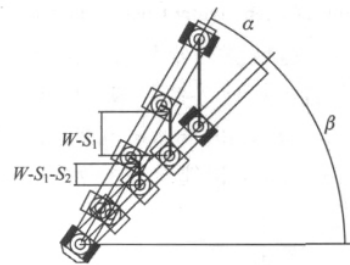


图2 滑动支座控制机理^[10]

Fig. 2 Control mechanism of sliding bearings^[10]

支承梁和中梁之间靠压紧的支座连接,支座的上下2个面分别和中梁及支承梁接触(见图3、图4)。在伸缩装置位移量很小时,这2个接触面都没有发生滑移且一个随支承梁发生变位,另一个随中

梁不动。支座上下2个面之间的变位差引起的剪切力为 S , S 可分解为与支承梁平行的分量 S_p 和横桥向分量 S_q 。由于横桥向分量 S_q 总是会被其他构件所平衡,在伸缩缝单元的缝宽分析中只需考虑 S_p 分量。随着伸缩量的增大, S_p 达到了支座与支承梁及中梁的最大摩擦力,支座将沿支承梁滑移。上述过程在图4中可清楚地看到,即在支承梁与横桥向水平线夹角从 α_0 增大到 α 的过程中,中梁和支承梁与支座的接触面最初都在 A ,之后一个在 A 一个在 B ,最后一个从 A 向 C 运动、一个从 B 向 D 运动。各中梁的位置由伸长前的 Y_i 变为 $Y_i + W_i$,利用几何关系计算出各 W_i (图4), $(Y_i + W_i) - (Y_{i-1} + W_{i-1})$ 就是各缝的缝宽。

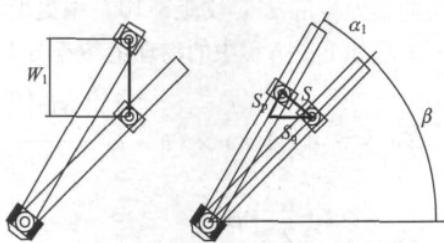
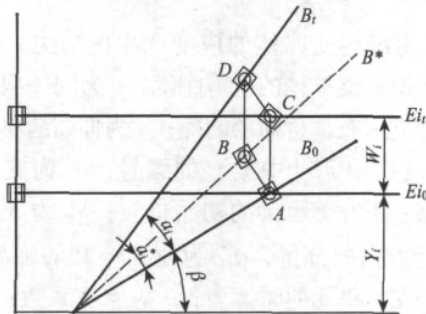
图3 支座受力简图^[10]Fig. 3 Forces on sliding bearings^[10]

图4 伸缩前后单元位置图

Fig. 4 Position of each element before and after expansion

为计算伸缩缝缝宽的分布情况,采用DS2240型旋转式伸缩装置的设计参数,即, $C_L = 1\,000\text{ kN/m}$, $C_F = 500\text{ kN/m}$, $v = 45\text{ mm}$, $n = 24$, $\mu = 0.1$, $V = 20\text{ kN}$, $s_0 = 137\text{ mm}$ (相邻单元初始纵向间隔)。假设伸缩装置逐步伸长(或缩短)600 mm,各缝的缝宽分布见图5、图6。

图5、图6中,横轴表示伸缩缝的总宽,纵轴表示各单元与梁端(24#单元)的距离。图中各折线分别代表了各单元的位移情况,当伸缩量较小时,各单元静止不动;当伸缩量达到某一临界值时,单元开始发生滑移(各单元对应的临界值不同,见图中圆圈标注);伸缩量进一步增大时,更多的单元发生

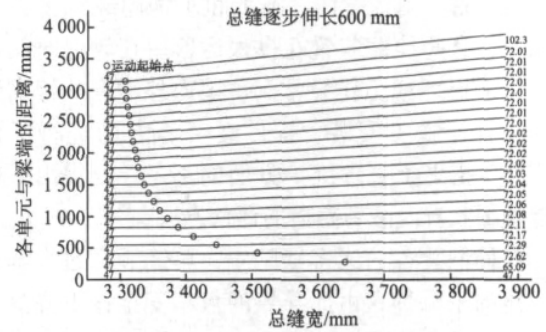


图5 伸缩缝逐步伸长600 mm时,各缝的缝宽分布

Fig. 5 Width distribution during the expansion joint expanding by 600 mm gradually

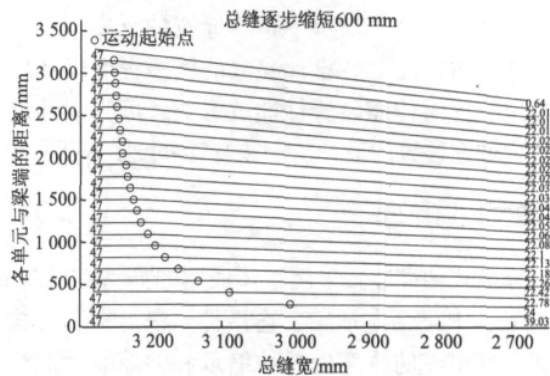


图6 伸缩缝逐步缩短600 mm时,各缝的缝宽分布

Fig. 6 Width distribution during expansion joint being compressed by 600 mm gradually

滑移。相邻折线间的竖向距离就是某单缝的宽度(图中标注的数字),左边的数字为伸缩缝各单缝的初始缝宽,右边的数字为各单缝在总伸长量=600 mm时的缝宽。在图上还可以直观地看出各单缝宽度随着伸缩缝的伸长的变化。

从图中可以清楚地看到各伸缩单元对于总伸缩量的敏感性,越靠近伸缩缝活动端(引桥端)的伸缩缝单元越容易发生滑移,越靠近伸缩缝固定端(主桥端)的伸缩缝单元越不容易发生滑移。各伸缩单元的这种敏感性的差异导致了各伸缩缝缝宽的不均匀,当各伸缩缝单元的敏感性相同或呈均步递增(减)时,除第1条和最后1条单缝外,中间各缝的单缝伸缩量都是相同的。在图5中可以直观地理解为,当图中各圆圈在同一条直线上时,中间各缝的单缝伸缩量就是相同的。最顶端1条线表示伸缩装置活动端的位置,也是伸缩装置的边梁,它的运动起始点在该线的最左端。当边梁的运动起始点与各中梁的运动起始点的连线在同一直线上时,所有的缝宽都是均匀的。

从图5和图6还可以看出,缝宽分布的不均匀主要集中在伸缩装置的两端,即1[#]缝和24[#]缝的缝宽与平均值差别最大(单元编号从伸缩装置活动端向固定端依次增大)。图5中,伸缩装置伸长600 mm时,1[#]缝宽102.3 mm,24[#]缝宽47 mm,平均缝宽72.00 mm;图6中,伸缩装置缩短600 mm时,1[#]缝宽0.64 mm,24[#]缝宽39.03 mm,平均缝宽22.00 mm。由此可以发现,无论伸缩装置是伸长还是缩短,最靠近伸缩装置活动端(可滑动端)的1[#]缝总是最先响应,该缝的缝宽也随之最大或最小;相应地,24[#]缝则总是最后响应,对于总缝缝宽的变化最为迟钝。对DS2240伸缩装置实际运营时的监测数据^[11]也证实了这种规律:当伸缩装置伸长时,1[#]缝、3[#]缝和12[#]缝的伸缩量依次递减。

3 参数分析

伸缩装置各单缝缝宽的不均匀主要体现在1[#]单缝和24[#]单缝上,其余各缝相对较均匀。因此,在总伸缩量不变的情况下,可以用1[#]缝宽和24[#]缝宽来衡量伸缩装置的缝宽均匀性控制性能。整理式(1)可得:

$$v \times (n - i) \times \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\cos \beta} \times \frac{\cos\left(\frac{\alpha}{2} + \beta\right)}{\sin(\alpha + \beta)} = \frac{\mu \times V}{C_L + C_F}, \quad (2)$$

式中, $\beta = \arctan(s_0/v)$, s_0 为同一根支承梁上,相邻支座在纵桥向的间隔,也是相邻中梁的初始中心距。

由于伸缩装置的缝宽取决于各单元发生滑移时支承梁的临界转角 α , 因此对缝宽均匀性有影响的参数都包含在式(2)中。独立的参数共6个: v 、 s_0 、 μ 、 V 、 C_L 、 C_F 。对于模数式伸缩装置,在特定温度下各单元间的初始缝宽一般相同。为方便分析,这里先把 v 和 s_0 看成一组独立参数,后文中会对此另作讨论。这样,前述的设计参数可以合并为2个相互独立的参数 $A = \frac{\mu V}{C_L + C_F}$ 和 $B = \frac{s_0}{v}$ 。代入DS2240的设计参数可得: $A = \frac{0.1 \times 20}{1.5} = \frac{4}{3} \text{ mm}$, $B = \frac{136.65}{45} = 3.037$ 。假设伸缩装置伸长600 mm,先固定 B 值不变,调整 A 值可以得到1[#]缝宽和24[#]缝宽随 A 值的变化,见图7;同样地,固定 A 值为设计值,调整 B 值可以得到1[#]缝宽和24[#]缝宽随 B 值的变化,见图8。

在图7中,1[#]缝宽随着 A 值的增加呈线性增大;

24[#]缝宽随着 A 值的增加先是呈线性减小,之后保持不变。24[#]缝宽没有随 A 值的增加继续变化是由于当 A 很大时,伸缩装置的缝宽均匀性控制较差,600 mm的伸长量已不足以触发第24[#]中梁发生变位,24[#]缝宽保持在初始值(47 mm)不变,既不伸长,也不压缩。

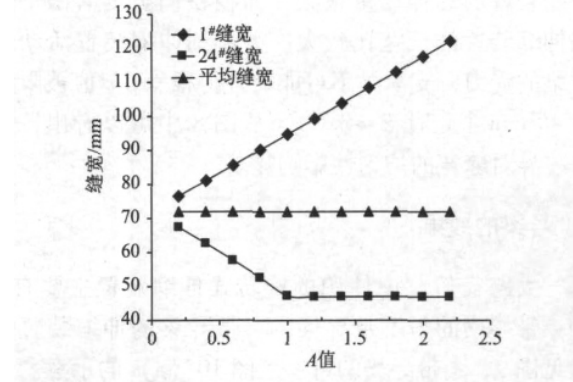


图7 单缝缝宽随 A 值的变化

Fig. 7 Single joint width varying with value of A

在图8中,1[#]缝宽和24[#]缝宽随 B 值变化的趋势与随 A 值变化的趋势相同,但是,随 B 值变化的速率更快。这表明,旋转式伸缩装置的缝宽均匀性对 B 值的变化更为敏感。 A 值由材料摩擦系数、支座预压力、支座抗剪切刚度计算得到,反映的是伸缩装置构件的材料特性和加工、安装工艺,其中的预压力 V 是为了保证构件之间的可靠连接、减弱构件的振动而施加的。 A 值越小,伸缩缝的缝宽分布将越均匀,同时构件之间的连接也更松散。在旋转式伸缩装置的设计中,综合考虑了2方面因素后, A 值通常为一个常量。 B 值反映的是伸缩装置的构造特点,其中的 s_0 是伸缩缝单元的初始间隔,在上述分析中被假定为一个常数。事实上,从式(2)中可以看

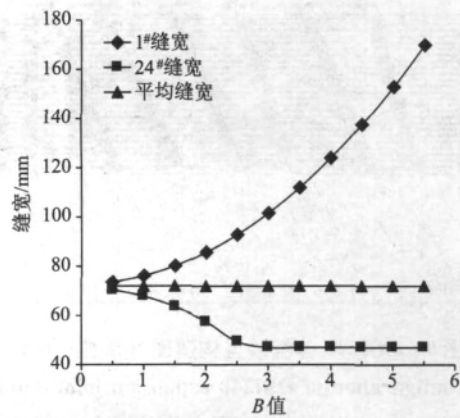


图8 单缝缝宽随 B 值的变化

Fig. 8 Single joint width varying with value of B

出,当 s_0 与 v 同时成比例地增大时, B 值不变,但等号左边 v 的增大可等效为 A 值的减小,此时伸缩装置的缝宽将更加均匀。因此, v 比 s_0 对伸缩装置的缝宽均匀性的影响更显著。

在构造条件允许的条件下 v 值一般为90 mm(此时 $B \approx 1.5$)。对于左右2幅分离的大跨度桥梁,伸缩装置的总伸缩量很大,而横桥向宽度有限,使得伸缩装置的长宽比较大。考虑到伸缩装置活动端中梁的受力,支承梁不可能设置得很斜, v 值被限制在45 mm(此时 $B \approx 3.0$)。从图8中可以看出,这一差异对缝宽的均匀性影响显著。

4 导梁的效果

大跨径桥梁中使用的旋转式伸缩装置主要有2种:带导梁的与不带导梁的。带导梁的伸缩装置构造见图9,不带导梁的可参考图10(a)的示意。中梁在支承梁上滑动时会受到横桥向的剪切力,双幅连成整体的伸缩装置可以通过设置对称支承梁的方式实现左右2幅的受力平衡。2幅分离的伸缩装置则有2种方法实现受力平衡:将单幅伸缩装置分成左右对称的2部分,再设置对称的支承梁;或者在伸缩装置的一侧设置导梁。为了保证中梁的强度和刚度满足使用要求,支承梁之间的横桥向距离不可过大。对于纵横向尺寸比值较大的伸缩装置,在单幅中采用支承梁左右对称的结构会将 v 值限制为一个较小的数值。前文已论证, v 值减小(即, B 值增大)将大大削弱伸缩装置的缝宽均匀性控制能力。因此,在2幅分离的大跨径桥梁中往往采用带导梁的伸缩装置。

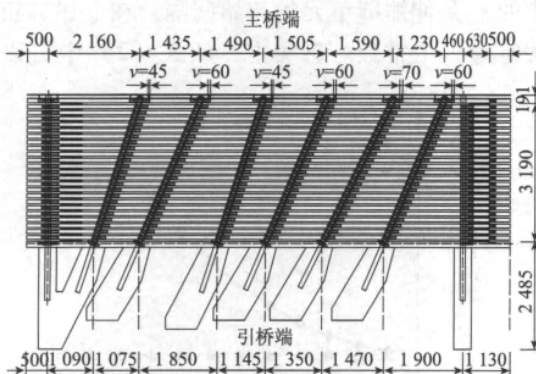


图9 DS2240伸缩装置构造图(单位:mm)

Fig.9 Configuration of DS2240 expansion joint (unit: mm)

导梁为中梁提供横向限位的同时也带来了纵桥向的力。在伸缩装置发生伸缩时,导梁并不运动,使得该处支撑体的变位总是滞后于同一中梁上其他

位置的支撑体,从而使中梁在各支撑体处受到纵桥向的力,见图10(b)。这一作用还会使得中梁产生水平面内的弧形弯曲,监测数据^[10]也证实了中梁弧形弯曲的存在。不过,导梁上的纵向摩擦力并不是使得中梁产生弯曲的唯一因素。在旋转式伸缩装置中,各支承梁不是完全互相平行的(可参考图9),这一差异也会导致同一中梁上各支撑体的纵向变位量不相等,进而引起中梁弧弯。

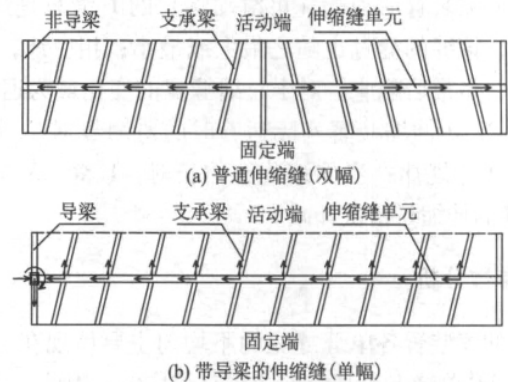


图10 伸缩缝伸长时单元受力示意图

Fig.10 Forces on expansion element during expansion joint expanding

为了保证导梁对中梁的横向限位并尽量减小纵向的摩阻力,需在导梁上设置活动滑块。中梁与导梁的连接和中梁与支承梁的连接相似,导梁可看作是一根平行于桥梁纵轴线的支承梁。值得注意的是,比起支承梁上的滑块,导梁上的活动滑块受力更复杂,不仅有纵向、横向和竖向的力,还有水平面内的扭矩,而且力的量值更大。因此,导梁上的活动滑块更容易损坏。实际中,国内多座桥梁上的活动滑块在投入使用后不久就发生了损坏。导梁处的活动滑块为中梁提供了竖向支承、横向限位和平面内的转动约束。假设1[#]、2[#]中梁在导梁处的活动滑块发生损坏,丧失了横向限位和平面内的转动约束功能,经计算得到伸缩装置逐步伸长600 mm时各单元的缝宽分布(见图11)。此时1[#]缝的缝宽已达到了246.31 mm,而图5中显示活动滑块未损坏时1[#]缝的缝宽为102.3 mm。可见,活动滑块的损坏会直接导致缝宽控制系统的失灵。

5 限位装置的效果

旋转式伸缩装置的缝宽不均匀主要体现在1[#]缝和24[#]缝中。缝宽的不均匀只会影响伸缩装置的外观,而不会对桥梁及行车安全造成直接影响。对行车的安全和舒适度产生影响的主要为单缝的最大宽

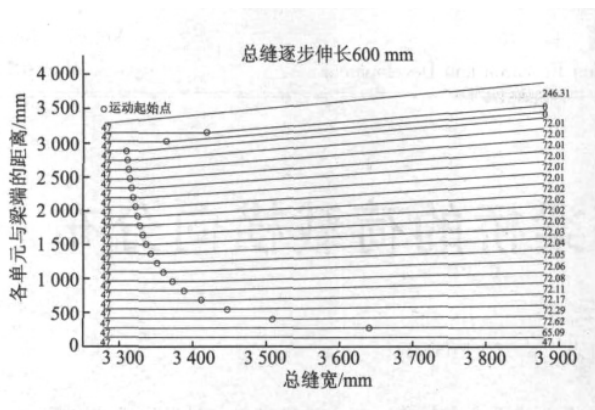


图 11 1[#]、2[#]中梁活动滑块发生损坏时的缝宽分布

Fig. 11 Width distribution of expansion joint when sliding bearings on the 1st and the 2nd center beams are damaged

度,我国规范对此尚没有明确规定,德国规范^[12]中将伸缩装置的最大单缝宽度限制为 80 mm。因此,可以在中梁上设置限位装置以减小最大缝宽。由于 24[#]缝对伸缩装置总体的伸缩不敏感,其缝宽只会在初始值附近做小幅波动。在某个中梁处安装了限位装置后,一旦限位装置发挥作用,相邻的 2 个单缝缝宽都会受到影响。图 12 显示了设置 3 个限位装置后各缝的缝宽分布情况(总缝伸长 600 mm)。这 3 个限位装置分别设置在梁端与 1[#]中梁、1[#]与 2[#]中梁和 2[#]与 3[#]中梁之间,缝宽的上限设定为 80 mm。由于模数式伸缩装置各中梁之间相互独立,采用限位装置可以显著削减最大单缝伸缩量,而不会对非相邻各缝造成影响。所以,只需对靠近伸缩装置活动端的几个单缝缝宽进行限制,就可以满足缝宽的限制要求。

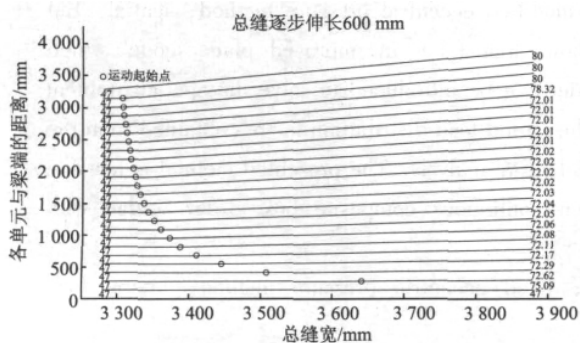


图 12 设置 3 个限位装置后各缝缝宽的分布

Fig. 12 Width distribution of the expansion joint with 3 stoppers

6 结论

(1) 旋转式伸缩装置的缝宽不均匀主要集中在靠近伸缩缝两端的几个单缝上。伸缩缝伸长时,靠

近活动端的缝宽偏大,靠近固定端的缝宽偏小;伸缩缝压缩时与此相反。

(2) 伸缩装置的缝宽的均匀性受材料特性和构造参数的影响。其中,橡胶支撑体的摩擦系数、预压力、以及纵向相邻支撑体间的纵向距离,这些参数的数值越大,缝宽的均匀性就越差;支撑体的抗剪切刚度和横向相邻支撑体间的横向距离,这些参数的数值越大,缝宽的均匀性越好;增大相邻支撑体间的横向距离比等比例地减小其纵向距离能更好地改善缝宽的均匀性。

(3) 有导梁时,导梁上的活动滑块是缝宽控制系统的构件,若损坏会导致缝宽控制系统失灵。在设计时最好对这些滑块的受力及疲劳性能进行特别考虑,若已发生损坏,更换时建议加大构件尺寸或采用高强材料。

(4) 伸缩装置的长宽比较小时,使用导梁可提高缝宽均匀性。但是,导梁的存在会引起中梁发生水平面内的弹性弯曲,且使得导梁上的活动滑块受力复杂而容易损坏。

(5) 设置限位器可显著改善缝宽过大(小)现象,若只限制最大缝宽,可只在靠近活动端的几个单元上设置限位器。

本文的成果可为大跨桥梁伸缩装置的设计、安装和管养提供参考,文中的量化分析假定了各支承梁互相平行、中梁不发生变形且恒垂直于导梁,更精确的分析需借助有限元程序模拟。

参考文献:

References:

- [1] JT/T327—2004, 公路桥梁伸缩装置 [S]. JT/T327—2004, Highway Bridge Expansion and Contraction Installation [S].
- [2] 赵衡平. 我国部分桥梁大位移量伸缩装置的初步调查 [J]. 公路交通技术, 2006 (5): 76–80. ZHAO Heng-ping. Primary Investigation to Large Displacement Expansion Joints for Partial Bridges in China [J]. Technology of Highway and Transport, 2006 (5): 76–80.
- [3] DEXTER R J, OSBERG C B, MUTZIGER M J. Design, Specification, Installation, and Maintenance of Modular Bridge Expansion Joint Systems [J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6 (6): 529–538.
- [4] 汪锋, 承宇. 江阴大桥伸缩缝损坏原因分析及设计改进 [J]. 现代交通技术, 2010, 7 (2): 64–66.

(下转第 62 页)

- 49 (12): 1930-1938.
- NIE Xin, FAN Jian-sheng, FU Yu. Transverse Load Distribution on Box Section Continuous Composite Steel-concrete Bridges [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition, 2009, 49 (12): 1930-1938.
- [7] 聂建国, 张晓光, 樊健生. 钢-混凝土组合梁加宽混凝土旧桥试验 [J]. 中国公路学报, 2010, 23 (5): 35-43.
- NIE Jian-guo, ZHANG Xiao-guang, FAN Jian-sheng. Experiment on Old Concrete Bridge Widened with Steel-concrete Composite Beams [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23 (5): 35-43.
- [8] 聂建国, 张晓光, 樊健生, 等. 钢-混凝土组合梁加宽混凝土梁桥的横向分布系数 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50 (6): 805-809.
- NIE Jian-guo, ZHANG Xiao-guang, FAN Jian-sheng, et al. Transverse Distribution Coefficient of Concrete Bridges Widened with Steel-concrete Composite Beams [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition, 2010, 50 (6): 805-809.
- [9] 邵旭东, 顾安邦. 桥梁工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- SHAO Xu-dong, GU An-bang. Bridge Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [10] ELGAALY M, SESHADRI A, HAMILTON R W. Bending Strength of Steel Beams with Corrugated Webs [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123 (6): 772-782.
- [11] 李宏江, 万水, 叶见曙. 波形钢腹板 PC 组合箱梁的结构特点 [J]. 公路交通科技, 2002, 19 (3): 53-57.
- LI Hong-jiang, WAN Shui, YE Jian-shu. Structural Features of Prestressed Concrete Box Girder with Corrugated Steel Webs [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19 (3): 53-57.
- [12] AASHTO, LRFD Bridge Design Specifications [S]. 1998.
- [13] 马磊, 靳九贵, 万水. 单箱三室波形钢腹板 PC 组合箱梁桥试验 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (3): 74-79.
- MA Lei, JIN Jiu-gui, WAN Shui. Experiment of 3-cell Single Box PC Composite Box-girder Bridge with Corrugated Steel Webs [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (3): 74-79.

(上接第57页)

- WANG Feng, CHENG Yu. Reasons Analysis on the Expansion Joint Damage and Design Improvement [J]. Modern Transportation Technology, 2010, 7 (2): 64-66.
- [5] CROCETTI R, EDLUND B. Fatigue Performance of Modular Bridge Expansion Joints [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2003, 17 (4): 167-176.
- [6] 吴殿月. 毛勒伸缩缝工作原理及安装工艺 [J]. 交通科技与经济, 2006 (6): 34-36.
- WU Dian-yue. The Operational Principle and Assembly Technology of Maole Expansion Joint [J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2006 (6): 34-36.
- [7] 庞俊杰. 高速公路 D160 型模数式伸缩缝病害成因分析 [J]. 交通标准化, 2011 (16): 67-69.
- PANG Jun-jie. Causes of Diseases of D160 Modular Pattern Expansion Joint on Expressway [J]. Transportation Standardization, 2011 (16): 67-69.
- [8] 铁明亮. 桥梁伸缩装置与支座全寿命研究 [D]. 长安大学, 2010.
- TIE Ming-liang. Study on Circle Life of Bridge Expansion Joint and Bearing [D]. Chang'an University, 2010.
- [9] 赵煜, 蒲广宁, 贺拴海. 基于外观调查的桥梁伸缩装置破损评价方法 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (11): 60-65.
- ZHAO Yu, PU Guang-ning, HE Shuan-hai. Evaluation Methodology for Failure of Expansion Joint Based on Visual Inspection [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (11): 60-65.
- [10] FOBO W. The Control Mechanism of Modular Joints, No. 21 [R]. Munich: Maurer Soehne, 1997.
- [11] 陈卫国, 辛荣亚, 张启伟, 等. 大位移模数式伸缩装置技术性能监测与分析 [J]. 上海公路, 2012 (2): 19-22, 11.
- CHEN Wei-guo, XIN Rong-ya, ZHANG Qi-wei, et al. Monitoring and Analysis of the Performance of Large-displacement Modular Expansion Joints [J]. Shanghai Highways, 2012 (2): 19-22, 11.
- [12] TL/TP-FÜ 92, Technical Delivery and Inspection Specifications for Watertight Expansion Joints of Road and Foot Bridges [S].