

基于蒙特卡洛法的组合梁桥支座生产误差影响分析

王立超¹, 任春颖², 李娜³, 曹宗勇¹, 何余良³

(1. 华汇工程设计集团股份有限公司, 浙江 绍兴 312000; 2. 绍兴市科技创新创业服务中心, 浙江 绍兴 312000; 3. 绍兴文理学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 运用蒙特卡洛法, 借助 MATLAB 编程生成随机误差数据进行计算, 选取可靠度为 95% 的总误差值, 通过 ABAQUS 平台建立不同跨径及不同连接形式钢-混组合梁有限元模型, 分析支座生产误差对钢-混组合梁力学性能的影响。结果表明, 支座生产误差对简支梁桥的影响较小, 使单跨固结形式桥梁局部混凝土板产生受拉倾斜现象; 对钢梁不同连接形式双跨组合梁桥支反力的影响不同, 固结连接形式跨中单个支座生产误差对横向相邻支座和纵向梁端支座反力的影响较大, 而 U 形钢铰连接形式仅对横向相邻支座产生影响, 对梁端支座几乎没有影响, 更有利于桥梁整体稳定性。

关键词: 桥梁; 钢-混组合梁; 板式橡胶支座; 生产误差; 蒙特卡洛法

中图分类号: U443.36

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)01-0129-08

支座是桥梁上部结构受力传递到下部结构的主要途径。其中板式橡胶支座具有较好的抗剪切变形性能和抗震减震效果, 且经济性好, 是中小跨径桥梁使用的主要支座形式之一。近些年来, 由于桥梁支座所引起的桥梁事故越来越多。文献[1-2]分析发现板式橡胶支座的生产质量对公路桥梁事故有较大影响。文献[3-7]研究发现板式橡胶支座生产质量会导致支座剪切变形过大、受力不均匀、脱空等, 进而产生支座病害, 影响桥梁耐久性。根据 JT/T 4—2019《公路桥梁板式橡胶支座》, 板式橡胶支座的形状系数与其抗剪模量成正比^[8], 说明支座的生产质量将直接影响其力学性能, 桥梁支座生产质量不容小觑^[9]。而支座在生产制作时由于多方面原因导致的误差累计往往被忽略。本文根据板式橡胶支座相关规范对影响其质量的主要因素进行筛选, 按规范规定误差范围采用蒙特卡洛法进行随机抽样, 运用 MATLAB 编程进行误差计算, 同时借助 ABAQUS 有限元平台对钢-混组合梁进行力学性能分析, 研究支座生产误差对钢-混组合梁的影响。

1 支座误差因素分析

1.1 影响因素选取

支座抗压弹性模量合格率的高低主要由支座形状系数决定, 剪切功能主要依靠橡胶自身变形和内部钢板刚度来实现, 橡胶支座中钢板厚度、钢板强度

及钢板与橡胶之间的黏结力是直接影响支座承压能力的主要因素。板式橡胶支座中钢板与橡胶的黏结、钢板厚度、胶层厚度及测量仪器的准确性等都是影响橡胶支座主要力学性能的因素^[10-13]。综上, 考虑影响板式橡胶支座力学性能的主要因素包括内部构件尺寸偏差、仪器测量误差及垫石误差。

1.2 支座误差范围

根据 JT/T 4—2019《公路桥梁板式橡胶支座》, 影响橡胶支座厚度的主要内部因素有胶层厚度、钢板与橡胶的黏结, 其中胶层厚度允许偏差为 ± 0.4 mm, 钢板与橡胶的黏结平面允许偏差为 ± 1 mm, 测量误差为游标卡尺仪器误差 ± 0.002 mm。根据 JT/T 4—2004《公路桥梁板式橡胶支座技术标准》^[14], 同一桥墩支撑垫石处于统一标高平面内, 相对高差不超过 ± 3 mm。

2 蒙特卡洛随机抽样

2.1 随机抽样

考虑产生支座误差的主要因素, 利用蒙特卡洛法模拟 4 种误差随机抽样下总生产误差的分布情况, 内容如下:

(1) 根据影响支座总厚度误差的因素, 选择主要因素作为随机变量, 同时确定每种随机变量的分布规律。

(2) 根据各随机变量所满足的概率分布, 选择

合适的抽样方法抽取随机变量。

(3) 计算模拟次数。将随机抽取的随机变量带入条件方程不断进行计算,达到模拟次数后将计算结果进行统计分析,得到误差估计值。

2.2 模拟次数确定

在对4种误差进行抽样模拟分析时,需在不同误差区间进行大量随机样本抽取。虽然抽取次数越多样本含量越大,模拟次数愈多精度愈高,但当模拟次数达到一定值后,其精度不再随模拟次数增多而增大。因此,需先确定所需模拟次数 n 。

假设某区间随机变量有 X_1, X_2, \dots, X_n ,该随机变量的样本均值 μ 和方差 σ^2 为:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

$$E(\bar{X}) = \mu \quad (2)$$

$$D(\bar{X}) = \frac{\sigma^2}{n} \quad (3)$$

采用蒙特卡洛法进行样本模拟时,随着样本容量的增大即 n 的增大,样本估计值近似服从标准正态分布,即:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\frac{\bar{X}_n - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \leq x\right) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{2\pi} e^{-t^2/2} dt \quad (4)$$

对式(4)进行变形,得:

$$P\left(\frac{\bar{X}_n - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \leq \mu_a\right) \leq 1 - \alpha \quad (5)$$

式中: μ_a 为临界值 x 值,其值查阅标准正态分布表获得; $1-\alpha$ 为置信区间。

μ 的取值范围为:

$$\bar{X} - \frac{\mu_a \sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + \frac{\mu_a \sigma}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

令抽样误差 $\epsilon = \mu_a \sigma / \sqrt{n}$,则 $|X - \mu| = \epsilon$ 。已知抽样误差和置信区间 $1-\alpha$ 时,模拟次数 n 为:

$$n = \left(\frac{\mu_a \sigma}{\epsilon}\right)^2 \quad (7)$$

α 一定时,置信区间长度越短越好,但 n 会不断增大,耗费代价增大,需适当把握。本文主要对支座生产误差因素取值范围进行抽样调查,为提升模拟效率和模拟精度,将样本的抽样误差和置信区间设为: $\epsilon=0.05, 1-\alpha=0.95$ 。查阅标准正态分布表,置信区间0.95对应的临界值 $\mu_a=1.96$ 。将该值带入式(7),得模拟次数 $n=1\,067$ 次,确定模拟次数为1100次。

2.3 支座总误差分布

支座生产过程中,4种主要因素所产生的误差是不确定的,每种误差的产生都具有一定的随机性。据统计,4种主要误差均近似符合均匀分布。采用MATLAB进行随机抽样,流程见图1,结果见图2、图3。

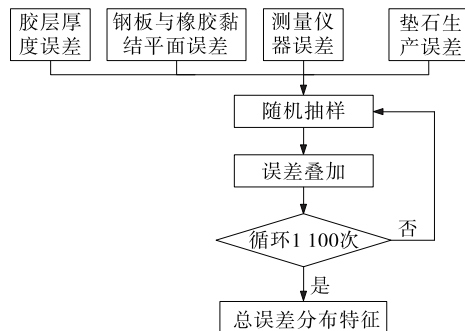
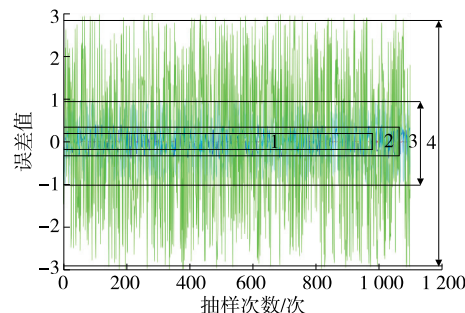


图1 蒙特卡洛随机抽样流程



1 游标卡尺测量随机抽样误差;2 钢板与橡胶黏结平面随机抽样误差;3 胶层厚度随机抽样误差;4 垫石厚度随机抽样误差

图2 4种误差的随机抽样结果

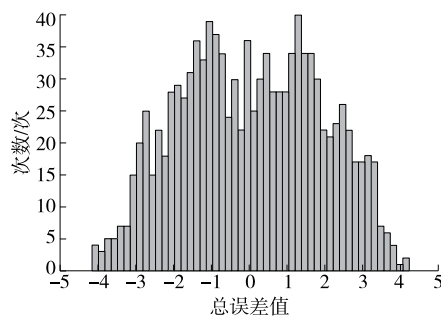


图3 总误差分布直方图

对支座厚度总误差进行正态分布拟合,均值 $\mu=0.009$,方差 $\sigma=1.044$ (见图4)。计算得4种支座误差对总误差在98%可靠度区间内的临界值为3.5 mm。

3 有限元分析

通过试验分析支座生产制造误差对钢—混组合

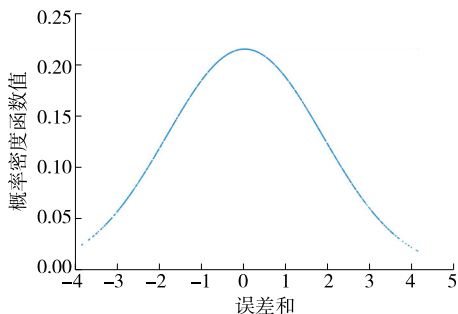


图4 总误差概率分布

梁的影响,费时费力,且成本高。有限元方法非常成熟,且节省费用。下面将随机可靠性理论与有限元方法结合,通过 ABAQUS 软件进行支座生产制造误差对钢—混组合梁力学性能影响分析。

3.1 模型建立

某单跨跨径为 13 m 的钢—混组合梁,混凝土板采用 C50,尺寸为 1 240 mm×200 mm;工字钢规格为 NH650×320;剪力键为直径 22 mm 栓钉,间距为 150 mm。通过 ABAQUS 软件建立单跨及双跨钢—混组合梁有限元模型,考虑到采用双支座能更好地反映支座误差的最不利影响,根据 JT/T 4—2019《公路桥梁板式橡胶支座》计算其承载力后,选用 150 mm×300 mm×38 mm 支座并布置,选择在 95%可靠度下误差值为 3.5 mm,通过对板式橡胶支座施加竖向位移模拟误差变化(见图 5~7)。

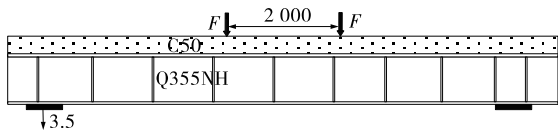


图5 单跨支座误差示意图(单位:mm)

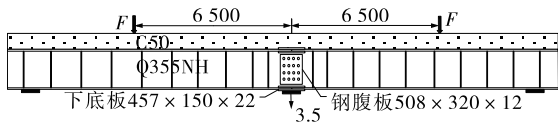
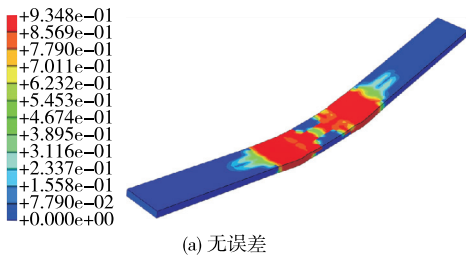


图6 双跨支座误差示意图(单位:mm)



(a) 无误差

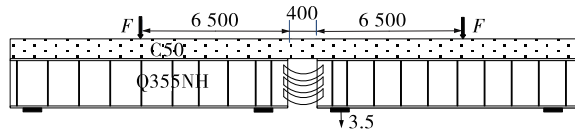


图7 双跨U形钢铰支座误差示意图(单位:mm)

3.2 材料本构

所有部件均采用六面体实体单元 C3D8R 模拟混凝土板采用塑性损伤模型,本构关系见图 8(a),其中偏心率为 0.1,膨胀角为 30° ^[15],黏性系数为 0.000 5^[16]。混凝土板与钢梁采用面面接触,摩擦因数为 0.3^[17]。栓钉和钢梁本构关系见图 8(b),采用双折线模型,强化阶段斜率取弹性阶段的 0.01 倍,栓钉与钢梁采用 Tie 接触。为防止应力集中造成收敛困难,在加载点设置刚性垫板。设置两个分析步,第一个分析步通过在板式橡胶支座下方施加 3.5 mm 竖向位移荷载模拟支座产生误差脱空,第二分析步采用位移加载方式进行加载。

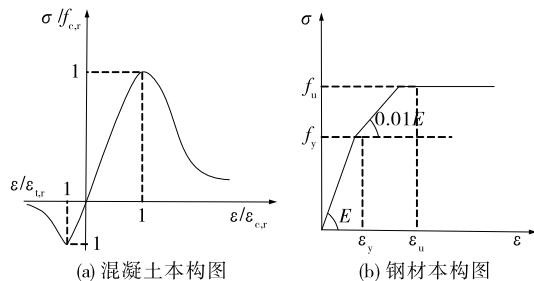


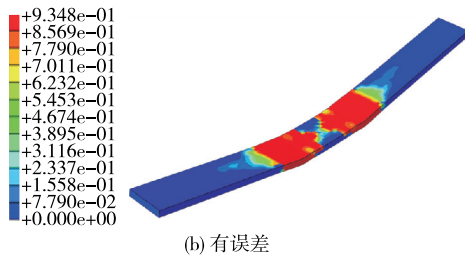
图8 本构模型示意图

3.3 有限元分析

3.3.1 单跨支座误差影响分析

3.3.1.1 单跨简支误差对比分析

图 9、图 10 为单跨简支混凝土板损伤云图。由图 9、图 10 可知:单跨钢—混组合简支梁在端部一个支座有误差的情况下,混凝土板受拉损伤变形比无支座误差时明显。支座误差对单跨简支梁桥混凝土板跨中受拉倾斜损伤变形的影响较大,对受压损伤变形的影响较小。



(b) 有误差

图9 单跨简支混凝土板损伤云图(受压)

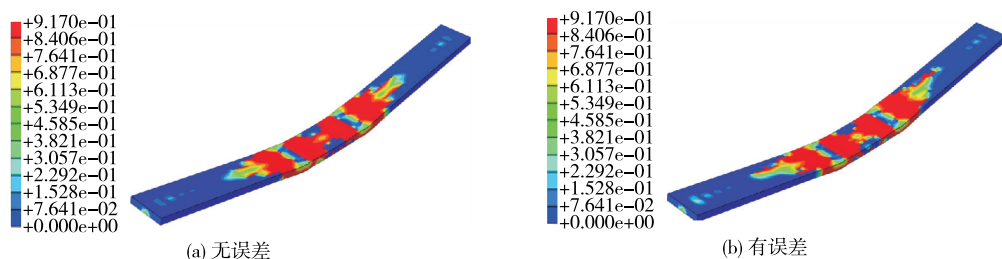


图 10 单跨简支混凝土板损伤云图(受拉)

图 11 为单跨简支钢梁应力云图。由图 11 可知:钢-混组合简支梁在一侧单个支座产生误差的情况下,钢梁局部产生应力倾斜现象,且对称出现。

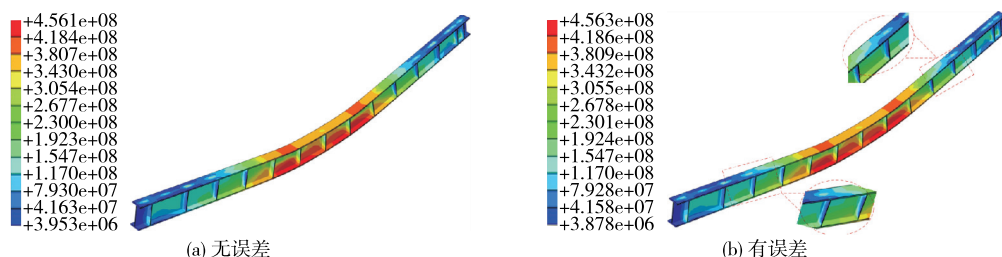


图 11 单跨简支钢梁应力云图(单位:Pa)

线。由图 12 可知:支座误差对单跨钢-混组合简支梁整体刚度及极限承载力几乎没有影响。支座误差仅对单跨钢-混组合简支梁混凝土板受拉损伤产生一定影响,对其他受力的影响较小。

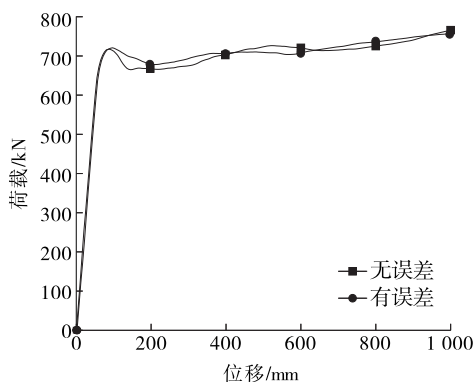


图 12 单跨钢-混组合简支梁荷载-位移曲线

单个支座误差对钢梁靠近支座附近产生局部应力影响,但对钢梁整体受力变形的影响较小。

图 12 为单跨钢-混组合简支梁荷载-一位移曲

3.3.1.2 单跨固结误差对比分析

图 13、图 14 为单跨固结混凝土板损伤云图。由图 13、图 14 可知:单跨固结形式下单支座误差对混凝土板受压损伤的影响较小,相较于简支梁桥钢梁,并未在跨中施加荷载处出现较明显的受压不均匀倾斜损伤,对混凝土板的受拉损伤也仅在误差支座附近产生局部倾斜受拉现象。说明单支座误差对单跨固结形式钢-混组合梁的影响较小,仅在局部产生不均匀受拉现象。

图 15 为单跨固结钢梁应力云图。由图 15 可知:与无误差支座钢梁相比,单跨固结形式组合梁的单支座误差仅在跨中施加荷载处产生局部应力倾斜,相较于简支梁桥钢梁,并未在钢梁两侧产生应力倾斜,且倾斜面积较小。单支座误差对单跨钢-混组合固结梁的影响较小。

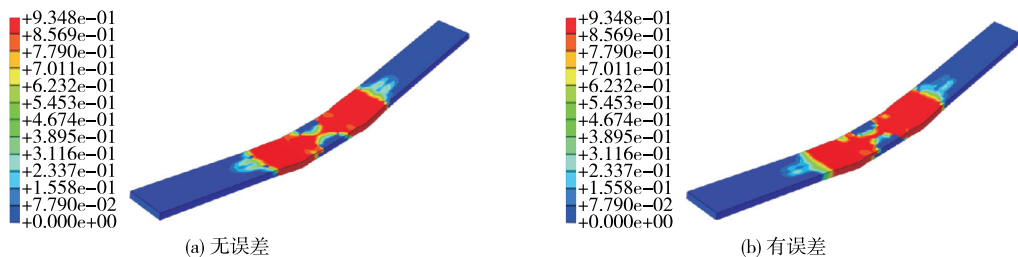


图 13 单跨固结混凝土板损伤云图(受压)

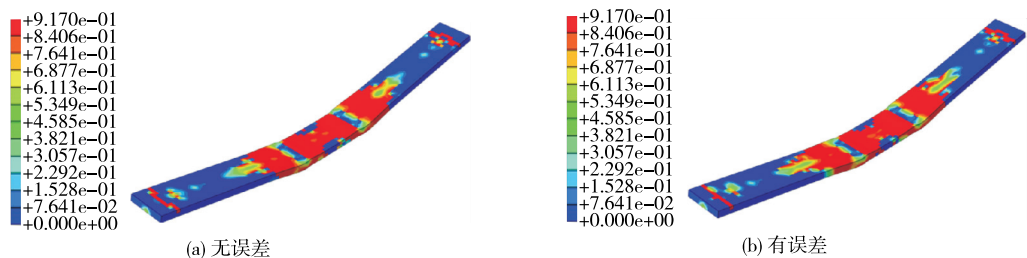


图 14 单跨固结混凝土板损伤云图(受拉)

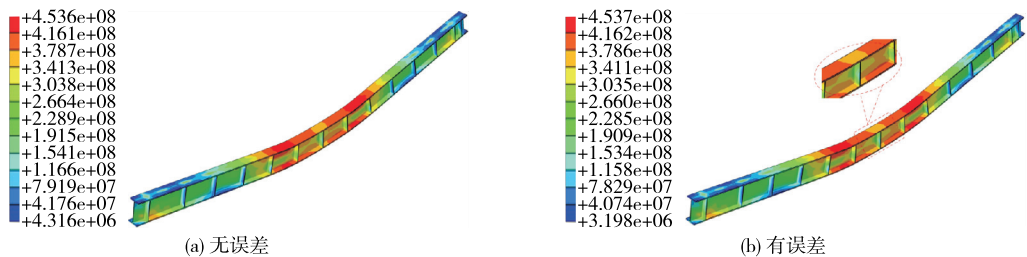


图 15 单跨固结钢梁应力云图(单位:Pa)

图 16 为单跨固结形式组合梁荷载一位移曲线。由图 16 可知:支座误差对钢—混组合梁整体刚度的影响较小,但无支座误差时单跨固结极限荷载值(847.9 kN)比有误差时极限荷载值(803.3 kN)小 44.6 kN,总体小约 5%。

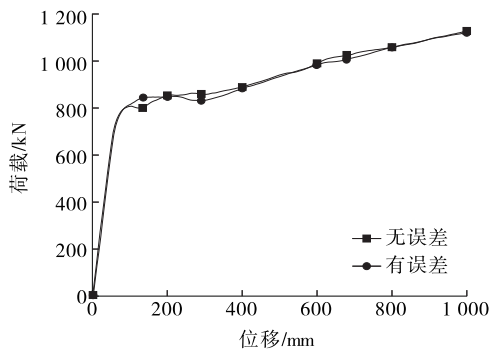


图 16 单跨固结形式组合梁荷载一位移曲线

3.3.1.3 单跨不同形式支座反力对比分析

单跨组合梁支座反力分析结果见表 1。由表 1 可知:简支形式下有误差支座反力比无误差支座下降 74.4 kN,降幅约 19%,而误差相邻支座反力增大 80 kN,增幅约 20%。单跨固结形式下误差支座反力比无误差支座下降 179.3 kN,降幅约 31.2%,较简支梁桥增加约 12.2%;误差相邻支座反力比无误差支座增大 179 kN,增幅约 31%,较简支梁桥增加 10%。可见,支座误差对单跨固结形式支座反力的影响比对简支梁桥钢—混组合梁的大,对相邻支座的影响也较大,不利于桥梁整体受力,会使结构传力不稳定,容易造成混凝土板受拉产生斜裂缝,降

低支座及混凝土板的耐久性。

表 1 单跨组合梁支座反力分析 单位:kN

支座编号	无误差时支座反力		有误差时支座反力	
	单跨简支	单跨固结	单跨简支	单跨固结
支座 1(误差)	387.6	573.1	313.2	393.8
支座 2(相邻)	388.6	574.8	461.7	754.2
支座 3(另一端)	395.5	589.0	392.0	473.6
支座 4(另一端)	395.3	590.8	399.6	478.9

3.3.2 双跨支座误差影响分析

3.3.2.1 双跨钢板连接形式误差对比

图 17、图 18 为双跨固结混凝土板损伤云图。由图 17、图 18 可知:支座有误差时钢—混组合梁的混凝土板受压时出现由跨中施加荷载处向负弯矩区连续处两侧扭转的现象,同时混凝土板负弯矩区产生多条斜裂缝并向两侧跨中扩散。其原因可能是固结连接形式的刚度较大,虽然其连接整体性较好,但当跨中支座产生误差时,混凝土板损伤较明显,且不利于混凝土板整体性。

图 19 为双跨固结钢梁应力云图。由图 19 可知:跨中单支座误差对固结连接形式钢—混组合梁的钢梁跨中及负弯矩区正截面受力基本没有影响,由于该连接形式仅在跨中采用双支座连接且连接刚度较大、误差较小,仅在负弯矩区连接处钢梁上翼缘负弯矩区连接处向跨中方向出现受力不均匀且倾斜的现象。

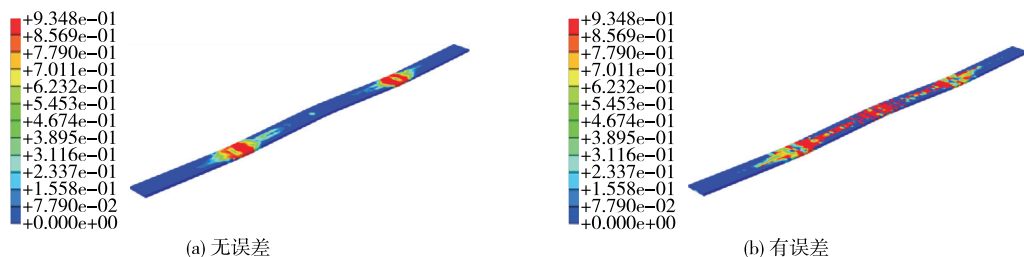


图 17 双跨固结混凝土板损伤云图(受压)

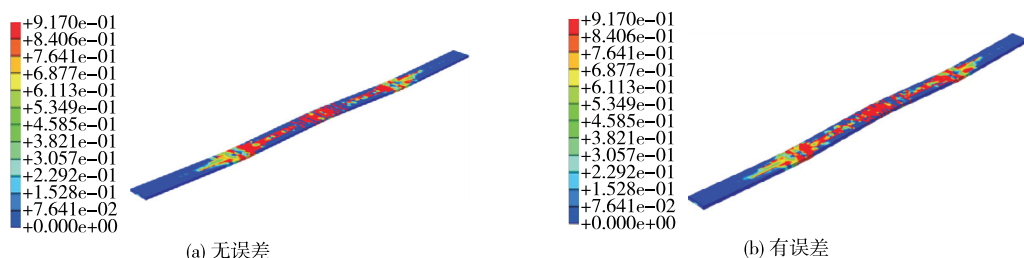


图 18 双跨固结混凝土板损伤云图(受拉)

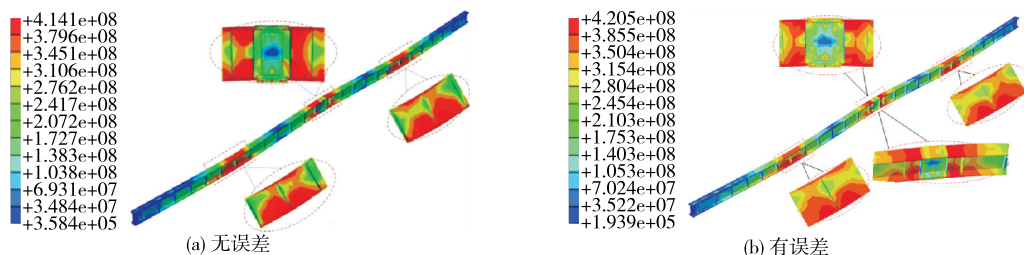


图 19 双跨固结钢梁应力云图(单位:Pa)

图 20 为双跨固结时钢—混组合梁荷载—位移曲线。由图 20 可知:跨中单支座生产误差对整体钢—混组合梁刚度基本没有影响,对其承载力有一定影响。支座有误差时钢—混组合梁承载力(1 659.67 kN)比无误差时承载力(1 684.40 kN)下降 24.73 kN,降幅约为 1.4%。支座生产误差对双跨固结连接形式钢—混组合梁整体刚度和承载力有一定影响,但影响较小。

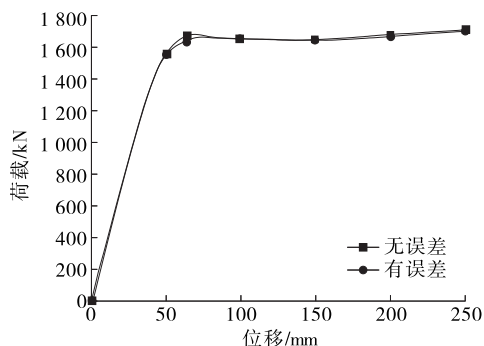


图 20 双跨固结时钢—混组合梁荷载—位移曲线

双跨组合梁固结形式支座反力对比见表 2。由

表 2 可知:有误差支座的支反力比无误差支座下降 804.7 kN,降幅 72.6%;相邻支座的支反力比无误差时增大 741.7 kN,增幅为 66.9%。反力增大的原因是该连接形式采用跨中横向双支座形式,一侧支座产生误差则另一侧支座支反力增大较多。同时对梁端同侧支座产生一定影响,其中支座 1 的支反力比无误差支座增加 14.5 kN,支座 5 支反力增加 31.9 kN,可能是由两端支座与跨中支座距离不同所致。钢板连接形式钢—混组合梁支座生产误差对横向相邻支座的影响较大,对纵向相邻支座的影响也较大。

表 2 双跨组合梁固结形式支座反力分析 单位:kN

支座编号	支座反力	
	无误差	有误差
支座 1(端点)	305.2	319.7
支座 2(端点)	304.6	305.1
支座 3(误差)	1 108.3	303.6
支座 4(相邻)	1 108.7	1 850.4
支座 5(终点)	301.3	333.2
支座 6(终点)	300.9	317.1

3.3.2.2 双跨 U 形钢铰连接形式误差对比

图 21、图 22 为双跨 U 形钢铰连接形式混凝土板损伤云图。由图 21、图 22 可知:支座生产误差对

混凝土板受压及受拉损伤几乎没有影响,相较于双跨固结连接形式,钢—混组合梁并未产生桥面板扭转倾斜现象,混凝土板总体受力较好。

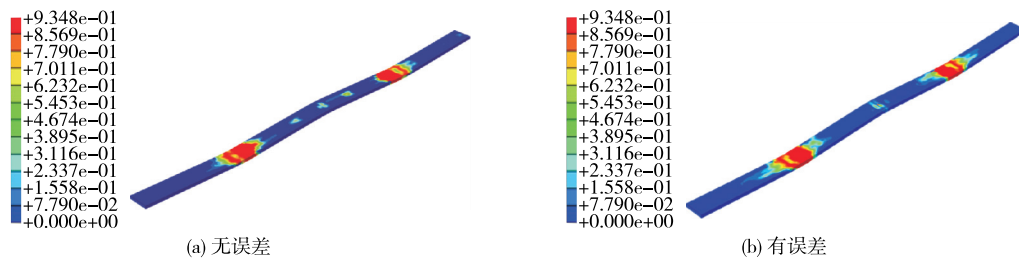


图 21 双跨 U 形钢铰连接形式混凝土板损伤云图(受压)

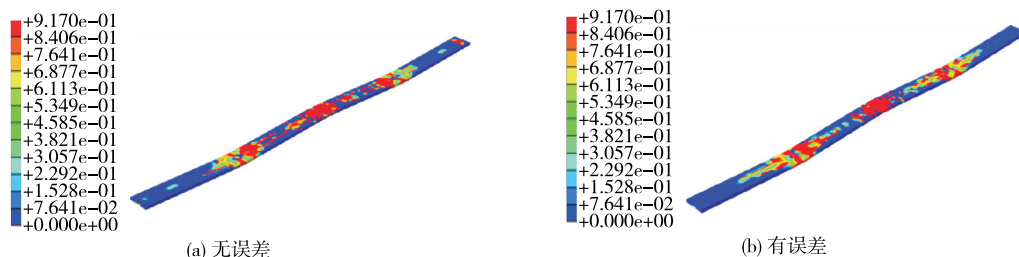


图 22 双跨 U 形钢铰连接形式混凝土板损伤云图(受拉)

图 23 为双跨 U 形钢铰连接形式钢梁应力云图。由图 23 可知:支座生产误差对钢梁整体影响较小,仅在 U 形钢铰靠近钢梁下翼缘处产生较小的不均匀受力现象,上部 U 形钢铰整体受力均匀且对

称,能较好地控制钢梁变形,相较于双跨固结连接形式,并未产生负弯矩区钢梁受力倾斜现象。主要原因是 U 形钢铰跨中采用四支座进行受力,相较于固结连接形式负弯矩区受力较稳定。

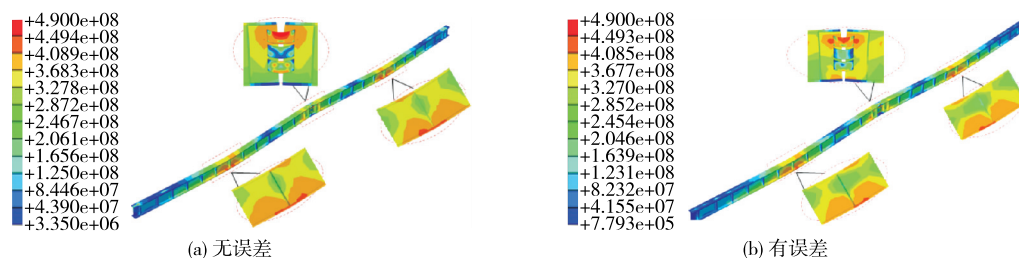


图 23 双跨 U 形钢铰连接形式钢梁应力云图(单位:Pa)

图 24 为双跨 U 形钢铰连接形式钢—混组合梁荷载—位移曲线。由图 24 可知:支座有生产误差时钢—混组合梁整体承载力(1 523.65 kN)比支座无生产误差时承载力(1 573.11 kN)下降 49.46 kN,降幅约 3.1%,相较于固结连接形式下降较大。其原因可能是采用半刚性连接形式。

双跨组合梁 U 形钢铰连接形式支座反力对比见表 3。由表 3 可知:有误差支座的支座反力比无误差支座下降 285.2 kN,降幅约 51%,其中横向相邻支座的支座反力增加 763.1 kN,增大约 57%,而纵向相邻支座的支座反力比无误差状态时下降约 230 kN,降幅约 42.6%,可能是由误差对超静定结

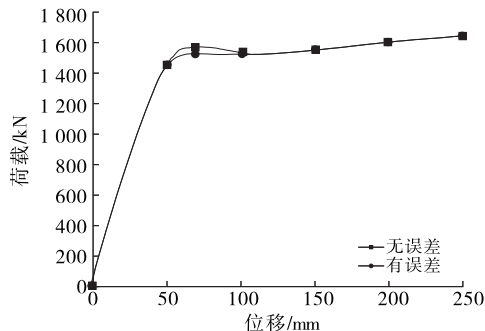


图 24 双跨 U 形钢铰连接形式钢—混组合梁荷载—位移曲线

构产生附加应力所致。跨中支座误差对 U 形钢铰连接形式钢—混组合梁支座受力的影响较大,尤其

是跨中横向相邻支座,其次是纵向跨中相邻支座,与文献[18]的结论基本一致。

表3 双跨组合梁U形钢铰连接形式支座

反力分析			单位:kN		
支座编号	支座反力		支座编号	支座反力	
	无误差	有误差		无误差	有误差
支座1(误差)	555.9	1 319.0	支座5	555.9	270.7
支座2	532.5	743.0	支座6	538.7	381.5
支座3	308.4	302.3	支座7	304.1	304.5
支座4	308.0	305.1	支座8	306.4	304.4

4 总论

(1) 支座生产误差对单跨简支钢—混组合梁整体受力影响较小,对单跨固结形式钢—混组合梁局部混凝土板产生受拉不均匀现象,造成钢—混组合梁总体承载力下降约5%,对其相邻支座反力影响较大,支座反力增大31%,对距离误差支座较远(端头)支座的影响较小。

(2) 支座生产误差使双跨固结连接形式混凝土板从跨中到负弯矩区连续处对称两侧出现相反方向受压损伤,同时混凝土板负弯矩区向两侧产生受拉斜裂缝,钢梁负弯矩区上翼缘出现倾斜应力现象,造成相邻支座反力增大约66.9%。该连接形式下支座误差不仅对横向相邻支座的影响较大,对纵向梁端支座的影响也较大,有较大的侧向倾斜可能,严重时会影响桥梁整体稳定性。

(3) 由于采用半刚性连接形式,钢铰受力自身产生变形使负弯矩达到重分配效果,支座生产误差对混凝土板及钢梁整体影响较小,整体承载力下降约3.1%。对横向相邻支座反力的影响较大,增大约57%,对较远支座的影响较小。

综上,支座生产误差对单跨钢—混组合梁整体影响较小,对双跨不同形式组合梁混凝土板和支座反力(横向和纵向)的影响较大。相比固结连接形式,采用U形钢铰连接形式在支座有误差时混凝土板的受拉和受压整体性较好,仅对横向相邻支座有一定影响且较双跨固结连接形式其影响较小,并未产生较多斜裂缝。钢—混组合梁桥施工中,应加强对支座生产质量的把控,从根本上减少支座病害的产生,减少负弯矩区混凝土板裂缝的发生,进而提高桥梁整体耐久性。

参考文献:

- [1] 周明华.橡胶支座的应用前景与质量忧患[J].桥梁建设,2003,33(4):63—66.
- [2] 周明华.公路桥梁橡胶支座的使用寿命与应用对策[J].世界桥梁,2004,32(2):71—74.
- [3] 奚勇.桥梁橡胶支座应用中的质量问题分析及对策[J].世界桥梁,2006,34(4):68—70+75.
- [4] 刘锋.公路桥梁板式橡胶支座使用寿命的影响因素研究[J].居业,2020,12(7):66—67.
- [5] 王希慧,李金红.桥梁板式橡胶支座位力学性能研究[J].公路,2019,64(2):133—136.
- [6] 李晓翔,张勇.公路桥梁板式橡胶支座典型病害及原因分析[J].铁道建筑,2013,53(6):27—30.
- [7] 黄跃平,胥明,周明华.板式橡胶支座胶层厚度不均匀对力学性能的影响[J].世界橡胶工业,2006,33(2):37—42.
- [8] 中国公路规划设计院有限公司,中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限公司,成都市新筑路桥机械股份有限公司,等.公路桥梁板式橡胶支座:JT/T 4—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [9] 宫小能,谢建平,陈丙瑞.公路桥梁板式橡胶支座抗剪弹性模量测量不确定度的分析[J].公路,2015,60(6):131—132.
- [10] 张勇,高岩,庄军生.橡胶质量对板式橡胶支座性能的影响分析[J].铁道建筑,2016,56(8):43—45.
- [11] 张雷,丁楚志,汪小鹏,等.均压垫板橡胶支座在桥梁中的应用研究[J].公路与汽运,2019(4):125—127.
- [12] 于清新,刘君云.超载车辆对砼梁桥病害的影响及对策分析[J].公路与汽运,2021(6):137—140+144.
- [13] 李林珊,白羽,周立超,等.刚性滑板—复位橡胶隔震支座位性能研究[J].交通科学与工程,2021,37(2):61—67.
- [14] 中华人民共和国交通部科技教育司.公路桥梁板式橡胶支座技术标准:JT/T 4—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [15] 雷拓,钱江,刘成清.混凝土损伤塑性模型应用研究[J].结构工程师,2008,24(2):22—27.
- [16] 彭小婕,于安林,方有珍.混凝土损伤塑性模型的参数分析[J].苏州科技学院学报(工程技术版),2010,23(3):40—43.
- [17] BALTAI P, GJELSVIK A. Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1990, 2(1): 46—49.
- [18] 翟振树.支座不均匀高差对连续梁桥落梁后的应力影响分析[J].交通世界,2020(26):99—101.

收稿日期:2022-02-16