

疲劳荷载作用下铰接板桥挠度试验

唐先习¹,孙焕重²,朱彦鹏¹,徐 岳³

(1. 兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050; 2. 中铁十四局集团第二工程有限公司,
山东 泰安 271000; 3. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为了研究铰接板桥在疲劳荷载作用下的挠度变化规律,制作了 2 组钢筋混凝土板桥试件,一组进行疲劳试验,另一组对应地进行静载试验。在试验过程中,分别取疲劳循环达到一定次数后静载作用下的板桥跨中挠度值和挠度残余累加值进行研究,并将疲劳荷载作用后的板桥与只进行静载试验的板桥在静载作用下的跨中挠度变化规律进行对比分析。研究结果表明:当疲劳循环次数未超过 200×10^4 次时,由于疲劳幅值未超过特定值,故随着疲劳次数的增加,施加静载时挠度值随静载值的增加逐渐呈线性关系,同时对于不同疲劳次数,施加相同静载时挠度值的变化呈现一定的规律性;当疲劳循环次数达 $200 \times 10^4 \sim 250 \times 10^4$ 次,疲劳幅值增大时,挠度随施加静载值的变化规律仍近似呈线性,但在相同静载作用下,挠度值比未超过 200×10^4 次时的值增加较多,同时一定幅值下的疲劳循环次数及不同的疲劳幅值均会对板桥的疲劳残余产生影响;由静载试验梁的荷载-挠度曲线的对比可看出,经过疲劳荷载作用后,板桥挠度随施加荷载的变化更接近于线性变化。

关键词:桥梁工程;铰接板桥;疲劳荷载;挠度;疲劳次数

中图分类号:U446.1 **文献标志码:**A

Experiment on deflection of hinged slab bridge under fatigue loads

TANG Xian-xi¹, SUN Huan-zhong², ZHU Yan-peng¹, XU Yue³

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;

2. China Railway 14th Bureau Group 2nd Engineering Co Ltd, Taian 271000, Shandong, China;

3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: For the study on the deflection change regulation of hinged slab bridge under the fatigue loads, two groups of reinforced concrete slab bridge specimens were made. The fatigue test was carried out on one group of specimens, and the corresponding static load test was carried out on another group of specimens. The deflection and cumulative residual of mid-span under static load after certain fatigue circles were studied. The comparison between deflection changes of slab bridge under fatigue load and static load was conducted. The results show that as the fatigue cycle number is no more than 2 million times, for the fatigue amplitude is no more than the certain value, the deflection value has a linear relationship with static load applied gradually with the increase of the fatigue cycle number. At the same time, for different fatigue cycles, the deflection change presents certain regularity with the same static load. As the fatigue cycle number increases from 2 million to 2.5 million times, for the fatigue amplitude increases,

the change regulation of slab deflection with static load applied is approximately linear, but the deflection value increases more than the that when the fatigue cycles times is no more than 2 million times. At the same time, the number of fatigue cycles under certain amplitude and different fatigue amplitudes will affect the fatigue residual of slab bridge. It can be seen through the comparison of load-deflection curves of the static load specimen, after the effect of fatigue load, the deflection change with load applied is close to a linear change. 12 figs, 14 refs.

Key words: bridge engineering; hinged slab bridge; fatigue load; deflection; fatigue time

0 引言

疲劳破坏是桥梁结构破坏的基本形式之一。在疲劳荷载的作用下,桥梁结构的刚度和抗力将随疲劳损伤的累积而衰减,最终导致结构功能退化或失效,比如桥梁结构中的混凝土或钢筋达到其疲劳屈服强度、桥梁的挠度逐渐增大等。过大的挠度变形不仅会影响到桥梁结构的正常使用性能,甚至会影响到桥梁结构的安全性。而在现阶段的桥涵设计规范中,并未明确给出疲劳荷载作用下桥梁结构挠度的计算公式,这会导致在设计时对疲劳荷载作用下的桥梁结构变形没有安全保证。

对于疲劳荷载作用下混凝土桥梁及结构疲劳性能的研究,国内外学者进行了大量的研究工作。高丹盈等对疲劳荷载下钢纤维高强混凝土梁裂缝宽度的计算方法进行了研究,给出了计算公式^[1];宋玉普等研究了疲劳荷载作用下梁内不同类型钢筋破坏关系,提出了开裂截面处消压后预应力钢筋应力增量的计算公式^[2];王春生等建立了桥面板疲劳寿命预测模型,对钢筋混凝土桥面板疲劳寿命评估^[3];胡铁明等研究了不同加固情况时疲劳荷载作用下钢筋混凝土梁的疲劳性能^[4-5];商峰等研究了疲劳荷载作用下锈蚀钢筋混凝土梁的剪切及弯曲性能^[6-7];Tang等研究了疲劳荷载对铰接板桥极限承载能力的影响^[8];Singh等研究了混凝土梁内加入不同材料时的疲劳性能^[9-10];肖赓等研究了多级变幅疲劳荷载下预应力混凝土梁刚度退化问题^[11];李世安等研究了疲劳荷载作用下预应力混凝土梁的挠度问题^[12-14]。以上的研究内容,均未对一定疲劳循环次数后板桥的荷载-挠度变化规律进行系统的研究,同时也未对疲劳荷载作用前后桥梁结构在静载作用下的挠度变化规律进行对比,但这两方面的内容对于研究疲劳荷载作用下板桥挠度的变化规律,具有非常重要的意义。为此,本文主要针对这两方面问题展开研究。

1 试验概况

在试验中,将两片钢筋混凝土板通过铰缝进行连接,形成钢筋混凝土板桥结构。板桥结构共制作2组,其中一组进行疲劳试验,另一组则进行相应的静载对比试验。

对于疲劳荷载幅值及疲劳次数,通过采用工程力学和有限元法的反复推算,并参考其他钢筋混凝土结构疲劳试验时疲劳荷载的确定方法进行确定^[13-14]。将两片板及铰缝看作是一个整体结构,按结构极限承载力的40%确定疲劳上限,按疲劳上限的20%确定疲劳下限。经计算板桥结构的极限承载力为340 kN,因此确定疲劳幅值上限为136 kN,下限为27.2 kN,加载频率则参考疲劳机的使用性能和板桥结构的固有频率确定为3 Hz。在实际试验过程中,出于安全的考虑,先以疲劳上限100 kN,疲劳下限20 kN进行疲劳试验,加载到 5×10^4 次后再增加疲劳幅值为上限136 kN,疲劳下限27.2 kN。加载到 200×10^4 次后,根据板桥的疲劳情况,又加了 50×10^4 次疲劳,疲劳幅值定为了上限200 kN,下限20 kN。因此总的疲劳次数为 250×10^4 次。当疲劳次数分别达到 1×10^4 、 5×10^4 、 10×10^4 、 30×10^4 、 50×10^4 、 100×10^4 、 150×10^4 和 200×10^4 次时,对板桥进行静力加载,观测一定次数的疲劳荷载作用后板桥挠度的变化规律。当疲劳次数达到 250×10^4 次后,因结构尚未完全破坏,施加静载直至结构破坏。静载试验的铰接板桥采取逐步施加荷载直至板桥结构破坏的方法进行。试验加载装置如图1和下页图2所示。



图1 静载试验加载装置

Fig. 1 Loading device of static test



图 2 疲劳试验加载装置
Fig. 2 Loading device of fatigue test

2 试验结果与分析

2.1 一定疲劳次数后静载作用下板桥跨中挠度

挠度是铰接板桥刚度变化的主要表现形式,本研究取加载板内外侧和非加载板内外侧跨中部位挠度进行疲劳荷载作用下板桥挠度变化规律的研究。试验中挠度采用百分表来测量,百分表在板桥跨中断面的布置位置如图 3 所示。

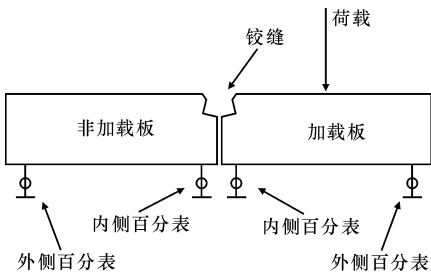


图 3 跨中截面百分表横向布置
Fig. 3 Transverse layout of dial indicators in mid-span of slab bridge

图 4~图 7、下页图 8 为不同疲劳次数后板桥跨中挠度值图。其中图 4 为加载板外侧跨中挠度值图,代表板桥跨中挠度的最大值;图 7 为非加载板外侧跨中挠度值图,代表板桥跨中挠度的最小值;图 5、图 6 为两片板内侧跨中挠度值,即布置在跨中铰缝两侧的板底挠度值,主要用来观测试验过程中铰缝两侧板底的挠度变化。下页图 8 为不同疲劳次数后,施加荷载 136 kN 时的跨中挠度值。

由图 4~图 7 可以看出,初次加载时板桥挠度值变化较大,且随着荷载的增大,挠度值增大幅度呈增加趋势,总体变化呈非线性。这主要是由于初次静载时混凝土内存在一定的微裂缝和裂隙,而初次静载时施加荷载,会使板顶混凝土内的横向微裂缝闭合,板底混凝土内的横向微裂缝加大,同时混凝土与钢筋之间的粘结微裂缝都会发生变化,这些变化会导致混凝土产生一定的塑性应变,这些应变会导致铰接板桥挠度增大。

对于疲劳 1×10^4 次后的静载,跨中挠度随静载

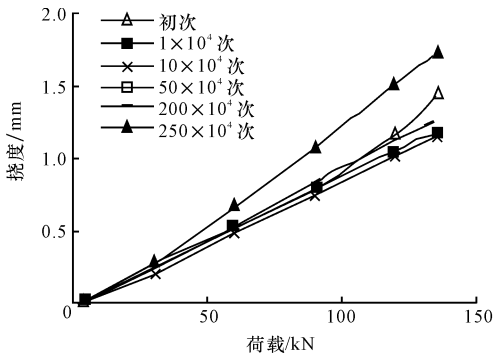


图 4 加载板外侧荷载-挠度曲线
Fig. 4 Load-deflection curves of loaded slab lateral

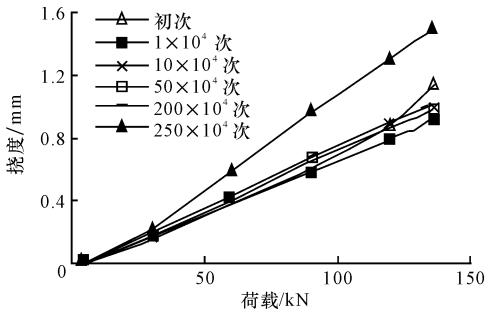


图 5 加载板内侧荷载-挠度曲线
Fig. 5 Load-deflection curves of loaded slab inside

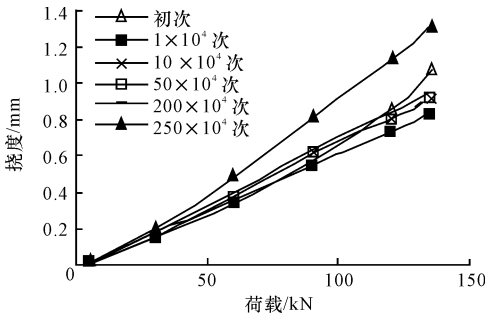


图 6 非加载板内侧荷载-挠度曲线
Fig. 6 Load-deflection curves of unloaded slab inside

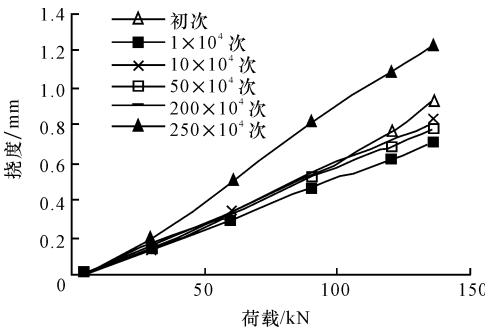


图 7 非加载板外侧荷载-挠度曲线
Fig. 7 Load-deflection curves of unloaded slab lateral

的增大近似呈线性变化。因为疲劳荷载会在一定程度上消除混凝土的静载塑性应变,同时对于钢筋而言,由于疲劳幅值较小,且疲劳次数较少,疲劳荷载

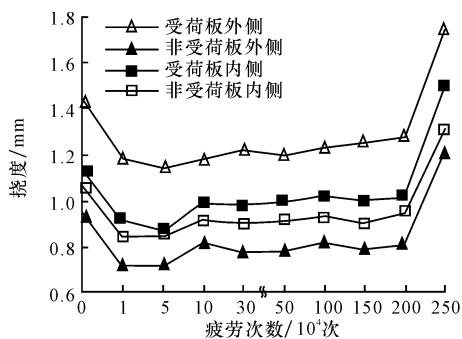


图8 铰接板桥疲劳次数-挠度曲线

Fig. 8 Fatigue number-deflection curves of hinged slab bridge

不会对钢筋的弹塑性产生较大的影响。因此在这一阶段,由于混凝土和钢筋的塑性应变导致跨中挠度增大的可能性较小,所以板桥的跨中挠度随荷载增大近似呈线性变化。

由图8可以看出,在疲劳 1×10^4 次和 5×10^4 次后,施加静载为136 kN时,跨中挠度变化规律不明显,其中加载板的挠度继续减小,非加载板挠度增大。当疲劳次数在 $5 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4$ 次之间时,增加趋势较明显,而后增加趋势较为缓慢,局部反而有下降的趋势。结合疲劳荷载的幅值可见,疲劳次数 5×10^4 次以后,施加的荷载幅值从上限100 kN、下限20 kN,改变为上限136 kN、下限27.2 kN。疲劳幅值加大,疲劳荷载的作用一方面会使板顶混凝土内的横向微裂缝和裂隙进一步密实,另一方面会使板底混凝土的横向微裂缝宽度增大,数量增加,而且使微裂缝发展为宏观裂缝。同时疲劳荷载也会对钢筋的疲劳性能产生一定的影响,使钢筋的损伤积累,在疲劳荷载作用过程中产生相应的残余应变,这种作用在 100×10^4 次前影响比较明显,超过 100×10^4 次后影响略有减小。因此疲劳循环在 $100 \times 10^4 \sim 200 \times 10^4$ 次之间时,局部跨中挠度有减小的趋势。在这一阶段,随着疲劳次数的增加,静载-挠度曲线呈线性关系。

当疲劳荷载在 $200 \times 10^4 \sim 250 \times 10^4$ 次时,由于疲劳荷载幅值提高较大,由上限136 kN、下限27.2 kN,提高到上限200 kN、下限20 kN,板桥挠度的变化规律发生了变化。由图4~图7可见,施加相同荷载的情况下,板桥的挠度值较 200×10^4 次疲劳荷载以前的挠度值变化大,图8也可以看到同样的变化规律,这主要是由于疲劳荷载对混凝土和钢筋的应变性能的影响。同时由图4~图7可见,当疲劳 250×10^4 次后,挠度随荷载增加的变化规律也发生了变化。对于施加荷载板,挠度随荷载增加大致呈线性的规律变

化;而对于非施加荷载板,随着荷载的增加,挠度的增加趋势反而减小,变化不再呈线性变化。这主要是经过较大幅值的疲劳荷载作用后,板桥铰缝发生了破坏,两块板在横向上挠度变化规律不再连续所致。

2.2 一定疲劳次数后板桥跨中挠度疲劳残余

图9为不同疲劳循环次数后铰接板挠度的疲劳残余累加值,其中,图9(a)为从疲劳 1×10^4 次到 200×10^4 次后的跨中挠度疲劳残余,图9(b)为从疲劳 1×10^4 次到 250×10^4 次后的跨中挠度疲劳残余。

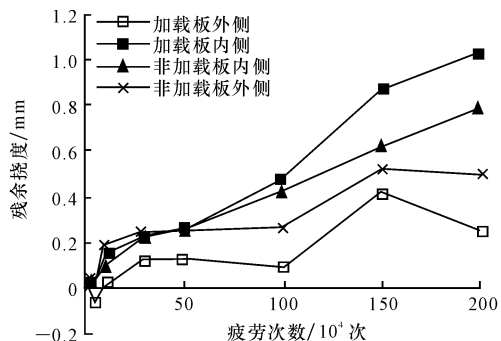
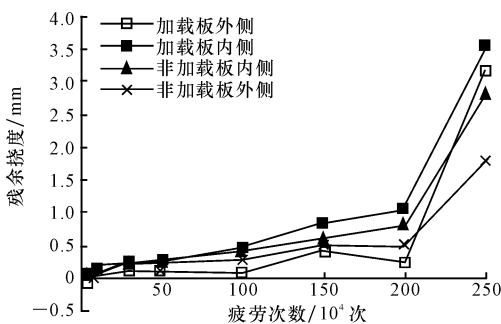
(a) $(1 \sim 200) \times 10^4$ 次疲劳的跨中挠度疲劳残余(b) $(1 \sim 250) \times 10^4$ 次疲劳的跨中挠度疲劳残余

图9 不同循环次数后铰接板挠度的疲劳残余累加值

Fig. 9 Fatigue cumulative residual of hinged slab deflection after different cycle numbers

从图9可以看出,在整个疲劳试验过程中,疲劳残余的累加值随着疲劳次数的增加而增大。但对于加载板和非加载板外侧的疲劳残余值而言,当疲劳次数在 $150 \times 10^4 \sim 200 \times 10^4$ 次之间时,疲劳残余累加值有减小的趋势,这主要是由于在疲劳过程中铰缝底部产生纵向开裂,从而使铰接板的两片板横向斜率变化不一致而造成的。其中加载板的横向斜率变大,外侧有上升的趋势,导致外侧挠度值变小;非加载板横向斜率变小,外侧同样有上升的趋势,因此也会导致外侧挠度值变小。

从图9还可以看出,在疲劳试验过程中,疲劳残余的增大有2个突变阶段,第一阶段是从疲劳 5×10^4 次到 10×10^4 次;第二阶段是从疲劳 200×10^4 次到 250×10^4 次。结合疲劳幅值的变化可以看出,这2个

阶段都是疲劳幅值增大的阶段,第一阶段是疲劳幅值由 80 kN 增加到 108.8 kN,第二阶段是疲劳幅值由 108.8 kN 增加到 180 kN,由此可见疲劳幅值的增大对疲劳残余的影响是比较大的。

2.3 疲劳荷载作用与静载作用对板桥跨中挠度影响对比

图 10 为相应的静载试验荷载-跨中挠度曲线,图 11 为疲劳 250×10^4 次后施加静载时不考虑疲劳残余的荷载-跨中挠度曲线,图 12 为疲劳 250×10^4 次后施加静载时考虑疲劳残余的荷载-跨中挠度曲线。

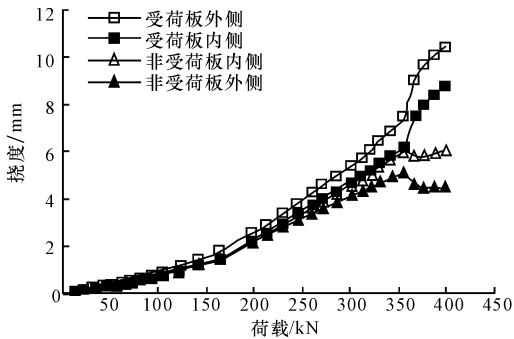


图 10 静载试验时荷载-挠度曲线

Fig. 10 Load-deflection curves in static test

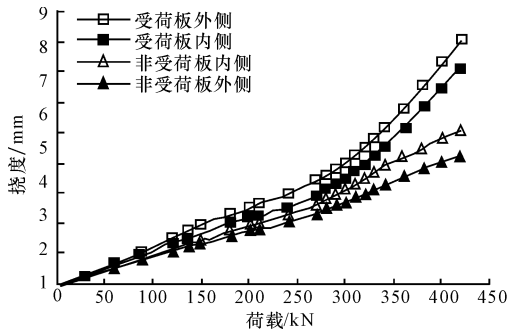


图 11 未考虑疲劳残余时破坏荷载作用下荷载-挠度曲线

Fig. 11 Load-deflection curves under failure load without fatigue residual considered

由图 10、图 11 可知,在静载试验中,当铰缝发生破坏,板桥结构的极限承载力为 342.9 kN;在疲劳试验中,当疲劳 250×10^4 次后,施加静载时板桥结构的极限承载力为 340 kN。对于铰缝破坏后,图 10、图 11 中荷载-挠度曲线变化规律差别较大,主要是由于在静载试验过程中,当施加的荷载值超过极限承载力后,两铰接板突然沿铰缝出现了较大的相对错位,因此出现了受荷板挠度突然增大的现象,再接着施加荷载时,铰缝间错位增加缓慢。而对于疲劳荷载作用后施加破坏荷载,当施加荷载达到结构极限承载力后,两铰接板沿铰缝出现相对错位,随着施加荷载增大,

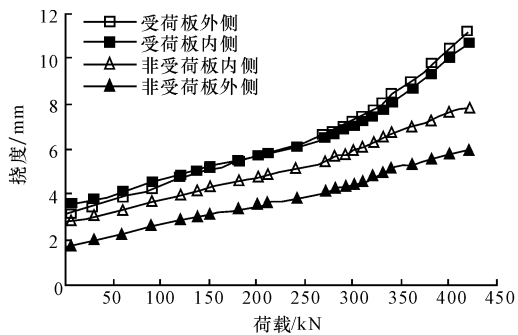


图 12 考虑疲劳残余时破坏荷载作用下荷载-挠度曲线

Fig. 12 Load-deflection curves under failure load with fatigue residual considered

铰缝间错位不断加大。因此造成了铰缝破坏后 2 种荷载-挠度曲线变化规律差别较大的现象。

为了便于研究疲劳荷载对板桥跨中挠度的影响,取施加荷载为 340 kN 时板跨中挠度进行对比分析。由图 10、图 12 可知,对于静载试验中的板桥结构,施加荷载为 340 kN 时,两片板内外侧板底挠度对应的值分别为 6.86、5.77、5.59、4.87 mm,最大挠度值即加载板外侧挠度值为 6.86 mm,挠度平均值为 5.77 mm。对于疲劳试验的板桥结构,施加荷载为 340 kN 时,两片板内外侧板底挠度对应的值分别为 8.37、8.08、6.72 和 5.05 mm,最大挠度值即加载板外侧挠度值为 8.37 mm,挠度平均值为 7.06 mm,分别比静载试验时的最大挠度值和平均挠度值增加 1.51 mm 和 1.29 mm。

3 结 语

(1)当疲劳循环次数未超过 200×10^4 次时,疲劳幅值未超过特定值,随着疲劳次数的增加,施加静载时板桥跨中挠度随荷载的增加逐渐呈线性变化;不同的疲劳次数后,施加相同静载时挠度值的变化呈现出一定的规律性。

(2)当疲劳循环次数由 200×10^4 到 250×10^4 次时,疲劳幅值增大,虽然挠度随静载的增加仍近似呈线性变化,但在相同的静载作用下,挠度较疲劳次数未超过 200×10^4 次时的值增加较多。这说明当疲劳幅值超过一定值后,疲劳荷载的作用对施加静载时挠度值的影响较大。

(3)通过对不同疲劳次数后挠度的疲劳残余累加值的分析可知,疲劳循环次数及疲劳幅值均会对疲劳残余挠度产生影响,疲劳循环次数增加或疲劳幅值增大,疲劳残余挠度都会加大。

(4)通过对静载试验和疲劳试验的挠度对比分析可知,经过疲劳荷载作用后,施加静载时板桥挠度

随施加荷载的变化更接近于线性变化。同时,在相同的荷载作用下,经过疲劳荷载作用的板桥的挠度要大于仅在静载作用下的板桥挠度。

参考文献:

References:

- [1] 高丹盈,张明,赵军.疲劳荷载下钢纤维高强混凝土梁裂缝宽度的计算方法[J].土木工程学报,2013,46(3):40-48.
GAO Dan-ying, ZHANG Ming, ZHAO Jun. Calculating method for crack width of steel fiber reinforced high-strength concrete beams under fatigue loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(3): 40-48. (in Chinese)
- [2] 宋玉普,韩基刚.疲劳荷载作用下梁内不同类型钢筋破坏关系[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(8):96-100.
SONG Yu-pu, HAN Ji-gang. The failure relationship between different types of steel in beams under fatigue loading[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(8): 96-100. (in Chinese)
- [3] 王春生,吴全友,缪文辉.钢筋混凝土桥面板疲劳寿命评估[J].长安大学学报:自然科学版,2013,33(2):50-55,62.
WANG Chun-sheng, WU Quan-you, MIAO Wen-hui. Fatigue life estimation for reinforced concrete bridge deck[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(2): 50-55, 62. (in Chinese)
- [4] 胡铁明,黄承逵,陈小锋,等.简支变连续法加固混凝土梁桥疲劳试验[J].中国公路学报,2010,23(5):76-83.
HU Tie-ming, HUANG Cheng-kui, CHEN Xiao-feng, et al. Fatigue experiment of concrete bridges strengthened by simple supporting to continuous construction method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5): 76-83. (in Chinese)
- [5] Oudah F, El-Hacha R. Performance of RC beams strengthened using prestressed NSM-CFRP strips subjected to fatigue loading[J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16(3): 300-307.
- [6] 商峰,何世钦,安雪晖.锈蚀后钢筋混凝土梁的剪切疲劳试验[J].清华大学学报:自然科学版,2010,50(9):1361-1364.
SHANG Feng, HE Shi-qin, AN Xue-hui. Shear fatigue of corroded reinforced concrete beams[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(9): 1361-1364. (in Chinese)
- [7] 吴瑾,王晨霞,徐贾,等.疲劳荷载下锈蚀钢筋混凝土梁弯曲性能试验研究[J].土木工程学报,2012,45(10):118-124.
WU Jin, WANG Chen-xia, XU Jia, et al. Study on flexural behavior of corroded reinforced concrete beams under fatigue loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10): 118-124. (in Chinese)
- [8] Tang X X, Xu Y, Xu Z, et al. Experimental study of ultimate bearing capacity of hinged plates with different configuration hinge joints[J]. Advanced Materials Research, 2011, 163-167(12): 1186-1191.
- [9] Singh S P, Singh A P, Bajaj V. Flexural fatigue strength of hybrid fibrous concrete beams[J]. Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials, 2012, 165(2): 99-110.
- [10] Li Q Q, Liu L X, He S D. Experimental study on fatigue behavior of prestressed concrete beams with manufactured sand[J]. Key Engineering Materials, 2012, 517(6): 595-600.
- [11] 肖赞,雷俊卿,张坤,等.多级变幅疲劳荷载下预应力混凝土梁刚度退化[J].吉林大学学报:工学版,2013,43(3):665-670.
XIAO Yun, LEI Jun-qing, ZHANG Kun, et al. Fatigue stiffness degradation of prestressed concrete beam under multilevel amplitude cycle loading[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2013, 43(3): 665-670. (in Chinese)
- [12] 李世安,贺桂海,赵煜.反复荷载作用下部分PC梁桥时频挠度计算分析[J].武汉理工大学学报,2011,33(9):55-60,96.
LI Shi-an, HE Shuan-hai, ZHAO Yu. Time-frequency deflection calculation research of partially PC girder bridge with the effect of cyclic loading[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(9): 55-60, 96. (in Chinese)
- [13] 左雷彬.双预应力混凝土梁的疲劳性能研究[D].天津:天津大学,2008.
ZUO Lei-bin. Research on fatigue behavior of bi-prestressed concrete beam[M]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- [14] 刘立新,汪小林,于秋波,等.疲劳荷载作用下部分预应力混凝土梁的挠度研究[J].郑州大学学报:工学版,2007,28(4):4-7.
LIU Li-xin, WANG Xiao-lin, YU Qiu-bo, et al. Study on deflection of partially prestressed concrete beams under fatigue loading[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2007, 28(4): 4-7. (in Chinese)

