

文章编号:1673-2049(2018)05-0109-09

## 装配整体式双向密肋空心板疲劳性能分析

潘永祥<sup>1</sup>, 吴方伯<sup>2</sup>, 蒋文<sup>2</sup>, 李钧<sup>3</sup>

(1. 中交隧道工程局有限公司华南分公司, 广东 广州 510799; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;  
3. 中建五局第三建设有限公司, 湖南 长沙 410004)

**摘要:**在总结归纳已有结构板疲劳试验的基础上,对装配整体式双向密肋空心板的正截面疲劳性能进行了理论分析,提出了装配整体式双向密肋空心板正截面弯曲疲劳强度计算及验算公式,并通过肋梁下部钢筋疲劳应力幅计算值、实测值及规范限值来验证公式的可行性。计算了基于跨中挠度反算法的疲劳刚度,并与试验数据进行对比,分析了板件疲劳后刚度退化规律。通过对预制底板钢筋的疲劳应力幅值计算及验算结果分析,提出了多项设计加强措施。通过基于刚度退化的疲劳损伤定义,选取了符合刚度退化规律的函数形式,得到了可用于计算板件刚度退化程度的公式,给出了板件疲劳后刚度计算以及疲劳性能预测方法。结果表明:当板件疲劳后刚度退化到弹性刚度的20%时,板件即达到疲劳寿命,进入疲劳破坏阶段;当装配整体式双向密肋空心板用于需要考虑疲劳荷载作用结构时,可以保证该新型空心板结构整体疲劳性能;所得结论为该新型板在立体停车场、工业厂房楼板以及大跨组合桥面板等结构中的应用提供可靠依据。

**关键词:**装配整体式;空心板;疲劳性能;理论分析

**中图分类号:**TU375.2 **文献标志码:**A

## Analysis on Fatigue Performance of Assembled Monolithic Hollow-ribbed Slabs

PAN Yong-xiang<sup>1</sup>, WU Fang-bo<sup>2</sup>, JIANG Wen<sup>2</sup>, LI Jun<sup>3</sup>

(1. CCCC Tunnel Engineering Bureau South China Branch, Guangzhou 510799, Guangdong, China;  
2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;  
3. 3rd Construction Co., Ltd of China Construction 5th Engineering Bureau, Changsha 410004, Hunan, China )

**Abstract:** Based on the summarizing of existing structural slab fatigue test results, the theoretical research on normal section bending fatigue performance of traditional assembled monolithic hollow-ribbed slabs was carried out. The calculation and checking formulas for the bending fatigue strength of traditional assembled monolithic hollow-ribbed slabs were presented. The feasibility of the formulas was verified by the calculation of the fatigue stress amplitude, the measured values and the specification limits of the lower steel bars of the rib beam. The fatigue stiffness based on the inverse algorithm was calculated and compared with the test data, and the law of stiffness degradation after fatigue was analyzed. By analyzing the fatigue stress amplitude calculation of rebar in precast slab, improvement measures were proposed. Through the definition of fatigue damage based on stiffness degradation, a function form which conforms to the law of stiffness degradation was selected, and a formula could be used to calculate the degree

收稿日期:2018-06-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51278179);长沙市科技计划重点项目(K1205229-11)

作者简介:潘永祥(1967-),男,广东中山人,高级工程师,E-mail:pyongxiang@163.com。

of stiffness degradation of the plate. The calculation method of fatigue stiffness and the prediction method of the performance of fatigue based on the fatigue stiffness degradation were put forward. The results show that when the stiffness of the plate is reduced to 20% of the elastic stiffness after the fatigue of the plate, the fatigue life and the fatigue failure stage will be reached. When assembled monolithic hollow-ribbed slabs are used in structures under fatigue loading, the improvement measures can ensure the whole fatigue performances of structures. The study results provide a reliable basis for the application of the new floor in the construction of the multistory parking lot, industrial factory building and the composite bridge decks.

**Key words:** assembled monolithic; hollow floor; fatigue performance; theoretical analysis

0 引言

对于钢筋混凝土结构的疲劳问题,国内外做了大量的试验研究工作,部分科研成果已被有关设计规范采纳。Carvelli 等<sup>[1-3]</sup>研究了 GFRP 筋应用于混凝土桥面板加固中的疲劳性能,结果表明,用 GFRP 筋加固的板具有更好的疲劳性能。赵顺波<sup>[5]</sup>对 16 块钢筋混凝土板进行了疲劳试验研究,提出了疲劳荷载作用下钢筋混凝土板正截面疲劳强度和裂缝宽度验算方法。侯杰等<sup>[6]</sup>研究了 3 种钢纤维体积率的预应力钢纤维混凝土板的疲劳性能,提出了在不同应力水平下的弯曲挠度变化规律以及疲劳损失特性。对于钢筋混凝土受弯结构的疲劳性能,至今国内外研究较少,且大多为梁式受弯构件,中国现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[7]</sup>的疲劳验算建立在容许应力方法基础之上,不能对结构的疲劳寿命进行分析,中国现行《铁路桥涵混凝土结构设计规范》(TB 10092—2017)<sup>[8]</sup>仅用静载分析并考虑安全系数的方法来避免结构发生疲劳破坏。

本文所研究的新型装配整体式双向密肋空心板的疲劳问题是否可以按现行规范进行计算和验算,目前国内外尚未有相关研究成果可供参考。本文在疲劳试验研究的基础上,总结归纳已有相关疲劳研究成果,提出了装配整体式双向密肋空心板正截面弯曲疲劳强度计算及验算公式,分析了疲劳后刚度退化规律,给出了疲劳后刚度计算以及疲劳性能预测方法等,所得结论为该新型空心板结构中的应用提供可靠依据。

1 试验概况

新型装配整体式双向密肋空心板主要由现浇顶板、密肋和空心箱体组成,如图 1 所示。空心箱体由 1 块预制底板和 4 块预制侧壁拼装而成,预制侧壁由侧壁板、预埋支撑钢筋以及连接支撑的构件

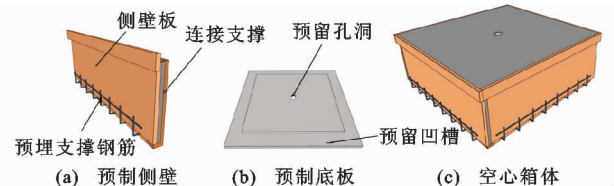


图 1 空心箱体拼装示意图

Fig. 1 Assembling Graphs of Hollow Body 组成<sup>[1-3]</sup>。

该新型空心板不仅具有传统密肋楼盖整体性好、承载力高、刚度大的优点,同时还有效降低了楼盖自重,节约了原材料,是在新型楼盖结构领域的一项创新。本文主要研究装配整体式双向密肋空心板的弯曲疲劳性能,为此进行了 9 块空心板板带试件的弯曲疲劳性能试验,试件组成部分如图 2 所示。

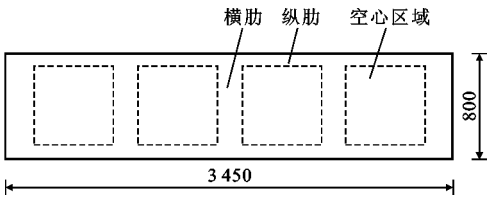


图 2 试件组成部分(单位:mm)

Fig. 2 Components of Specimen (Unit:mm)

板带试件全长 3 450 mm,试件支座距离 3 250 mm,板厚 250 mm,板宽 800 mm,加载点离支座的距离为 800 mm,加载名义剪跨比  $\lambda=4.9$ 。

试验板带试件及空心箱体预制构件(预制顶板、预制侧壁、预制底板)混凝土强度设计等级为 C35,预制顶板、底板内钢筋采用 HPB300 级钢筋,试件现浇板面钢筋、板底钢筋、架立筋、箍筋均采用 HPB300 级钢筋,板肋底部主要受力钢筋采用 HRB400 级钢筋。试件 AKXB-7, AKXB-8 底板配筋分别为  $\phi 8@120$  和  $\phi 10@120$ ,其余各试件底板配筋为  $\phi 6@120$ 。试件疲劳荷载加载参数如表 1 所示。试验加载装置如图 3 所示。

疲劳试验在湖南大学土木工程学院建筑结构实

表 1 疲劳荷载加载参数

Tab. 1 Loading Parameters of Fatigue Load

试件编号	$\frac{P_{\min}}{P_u}$	$\frac{P_{\max}}{P_u}$	$\frac{P_{\max}-P_{\min}}{P_u}$	$P_{\min}/P_{\max}$
XJB-2	0.10	0.30	0.20	0.333
MKXB-2	0.10	0.33	0.23	0.300
AKXB-2	0.10	0.33	0.23	0.300
AKXB-3	0.10	0.33	0.23	0.300
AKXB-4	0.10	0.40	0.30	0.250
AKXB-5	0.10	0.50	0.40	0.200
AKXB-6	0.10	0.60	0.50	0.167
AKXB-7	0.10	0.60	0.50	0.167
AKXB-8	0.10	0.60	0.50	0.167

注:试件编号中 XJB 表示现浇空心板带,MKXB 表示明箱空心板带,AKXB 表示暗箱空心板带; $P_u$  为试件的静力极限荷载; $P_{\min}$  为疲劳荷载下限; $P_{\max}$  为疲劳荷载上限。

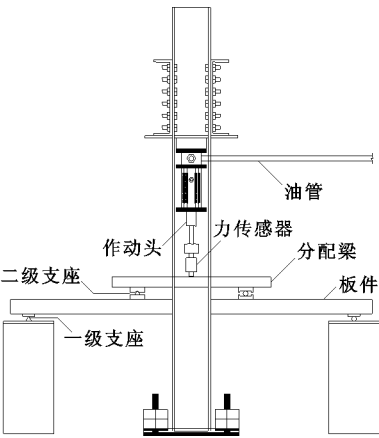


图 3 加载装置

Fig. 3 Loading Setup

验室进行,作动头以频率 5 Hz 的正弦波对试件进行疲劳加载。试验过程中对混凝土和钢筋的应变、板的挠度、裂缝宽度、动应变和动挠度等进行测试。

2 装配整体式双向密肋空心板正截面弯曲疲劳强度分析

实际工程中对装配整体式双向密肋空心板进行疲劳强度验算时,纵向受压钢筋一般不会屈服,所以主要应对受压混凝土和受拉区钢筋进行疲劳强度验算。在构件发生破坏时一般是受拉区钢筋发生屈服,只有超筋构件受压区混凝土才会出现被压碎的可能。

对于一般的构件,当纵向受拉钢筋的配筋率  $\rho^f$  不超过疲劳最大配筋率  $\rho_{\max}^f$  时,一般为钢筋先屈服<sup>[9-10]</sup>,并且根据国内外的试验<sup>[11]</sup> 总结得

$$\rho_{\max}^f=0.3\frac{f_c^f}{f_y^f}\tag{1}$$

式中: $f_c^f,f_y^f$  分别为混凝土的疲劳抗压设计强度和钢筋的疲劳抗拉设计强度。

为了保证受压区混凝土不先被压碎,也可以用  $x_0\leqslant0.55h$  来保证, $x_0$  为疲劳验算时受压区高度, $h_0$  为截面有效高度。当本文的空心板用于大荷载、大跨度、桥梁时,满足最大挠度与裂缝要求时板可能成为超筋构件,故仍需要对钢筋的疲劳强度与应力幅值、最大应力水平、钢筋外形、直径和强度进行验算,其中应力幅值是对疲劳强度影响的主要因素,应用应力幅法来计算钢筋。

2.1 正截面弯曲疲劳强度计算基本假定

根据试验结果与国外的研究成果<sup>[12-14]</sup>,对装配整体式双向密肋空心板进行疲劳强度验算时做出如下基本假定:

- (1)截面应变保持平面。

(2)受压区混凝土的压应力图形为三角形。

(3)不考虑受拉区混凝土的抗拉强度,拉应力全部由钢筋承担。

(4)采用换算截面计算。

装配整体式双向密肋空心板疲劳强度验算时截面应变和应力分布示意如图 4 所示,其中  $h$  为截面高度, $\epsilon_{s1},\epsilon_{s2}$  分别为第 1,2 次应力  $\sigma_{s1},\sigma_{s2}$  循环引起的残余变形, $b'_f$  为 T 形截面受压区有效翼缘宽度, $A'_{s2},A_{s1},A'_{s1},A_{s2}$  分别为肋梁上部钢筋、板顶钢筋、肋梁下部钢筋和预制底板钢筋面积, $n'_1,n'_2,n_1,n_2$  分别为肋梁上部钢筋、板顶钢筋、肋梁下部钢筋和预制底板钢筋弹性模量  $E'_{s1},E'_{s2},E_{s1},E_{s2}$  与混凝土疲劳变形模量  $E_c^f$  的比值,即  $n'_1=E'_{s1}/E_c^f,n'_2=E'_{s2}/E_c^f,n_1=E_{s1}/E_c^f,n_2=E_{s2}/E_c^f$ 。

2.2 正截面弯曲疲劳应力计算与验算

根据基本假定,构件开裂前原截面和开裂后换算截面如图 5 所示,其中  $h'_f$  为弯矩 T 形截面受压区翼缘高度, $b$  为 T 形截面腹板宽度。

首先应根据截面内力平衡条件对开裂后换算截面形式进行判断,当  $x_0\leqslant h'_f$  时,按宽度为  $b'_f$  的矩形截面计算,当  $x_0>h'_f$  时,换算后截面按 T 形截面计算。换算截面的受压区高度  $x_0$  和惯性矩  $I_0^f$  按照公式(2)~(5)计算。

当  $x_0\leqslant h'_f$  时

$$\frac{1}{2}b'_fx_0^2+(n'_1-1)A'_{s1}(x_0-a'_{s1})+(n'_2-1)A'_{s2}(x_0-a'_{s2})-n_1A_{s1}(h_{01}-x_0)-n_2A_{s2}(h_{02}-x_0)=0$$

$$I_0^f=\frac{b'_fx_0^3}{3}+(n'_1-1)A'_{s1}(x_0-a'_{s1})^2+$$

(2)

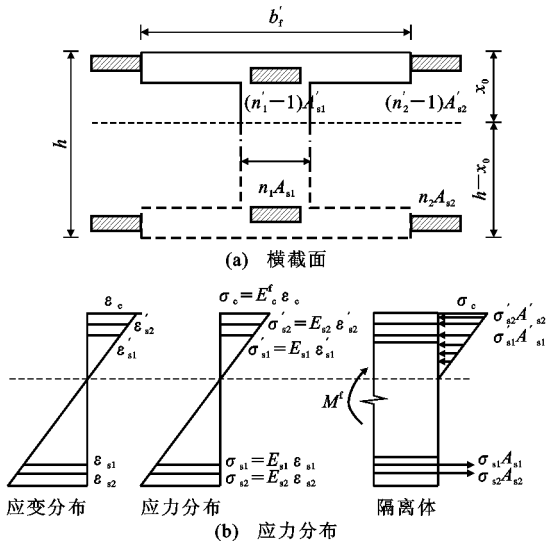


图4 疲劳强度验算时截面应变和应力分布

Fig. 4 Distribution of Section Strain and Stress at Fatigue Strength Checking

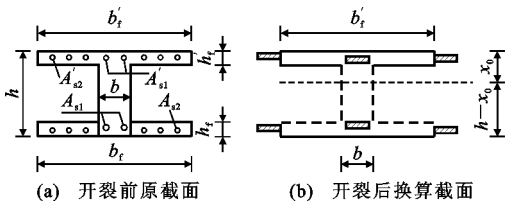


图5 开裂前原截面和开裂后换算截面示意

Fig. 5 Section Before Cracking and Transformed Section After Cracking

$$(n_2' - 1)A_{s2}'(x_0 - a_{s2}')^2 + n_1A_{s1}(h_{01} - x_0)^2 + n_2A_{s2}(h_{02} - x_0)^2 \quad (3)$$

当  $x_0 > h_f'$  时

$$\frac{1}{2}b_f x_0^2 - \frac{1}{2}(b_f' - b)(x_0 - h_f')^2 + (n_1' - 1)A_{s1}'(x_0 - a_{s1}') + (n_2' - 1)A_{s2}'(x_0 - a_{s2}') - n_1A_{s1}(h_{01} - x_0) - n_2A_{s2}(h_{02} - x_0) = 0 \quad (4)$$

$$I_0^f = \frac{b_f x_0^3}{3} - \frac{(b_f' - b)(x_0 - h_f')^3}{3} +$$

$$(n_1' - 1)A_{s1}'(x_0 - a_{s1}')^2 + (n_2' - 1)A_{s2}'(x_0 - a_{s2}')^2 + n_1A_{s1}(h_{01} - x_0)^2 + n_2A_{s2}(h_{02} - x_0)^2 \quad (5)$$

式中:  $a_{s1}'$ ,  $a_{s2}'$  分别为肋梁上部钢筋和板顶钢筋截面重心至受压区边缘距离;  $h_{01}$ ,  $h_{02}$  分别为受压区边缘至肋梁下部钢筋和预制底板钢筋截面重心距离。

大量文献研究表明<sup>[15-16]</sup>: 在疲劳荷载作用下, 混凝土的弹性模量将随应力循环次数的增加而降低, 因此在荷载效应计算中, 混凝土弹性模量应取疲劳变形模量; 钢材弹性模量随应力循环次数的增加变化很小, 因此钢材的弹性模量可取为初始弹性模量,

均可按现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)的相关规定取值。

混凝土应力  $\sigma_{c, \max}^f$  用式(6)计算, 钢筋应力幅值  $\Delta\sigma_{si}^f$  用式(7)~(9)计算。

$$\sigma_{c, \max}^f = \frac{M_{\max}^f x_0}{I_0^f} \quad (6)$$

$$\Delta\sigma_{si}^f = \sigma_{si, \max}^f - \sigma_{si, \min}^f \quad (7)$$

$$\sigma_{si, \max}^f = \frac{n_i M_{\max}^f (h_{0i} - x_0)}{I_0^f} \quad (8)$$

$$\sigma_{si, \min}^f = \frac{n_i M_{\min}^f (h_{0i} - x_0)}{I_0^f} \quad (9)$$

式中:  $M_{\max}^f$  为各种荷载标准组合下在该截面产生的最大弯矩;  $\sigma_{si, \max}^f$ ,  $\sigma_{si, \min}^f$  分别为由弯矩  $M_{\max}^f$  和  $M_{\min}^f$  引起的相应截面第  $i$  层纵向受拉钢筋的应力。

当计算得到的应力和应力幅小于《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定的限值即未超限。

### 2.3 钢筋疲劳应力幅值计算与验算

本试验各试件均为适筋构件, 故试件的破坏为钢筋先屈服。尚未有文献对 HPB300 的钢筋疲劳应力幅限值进行专门研究, 本文使用 HPB235 与 HRB335 进行推断。使用第 2.2 节的计算方法得到的 200 万次未发生钢筋疲劳断裂板件的钢筋疲劳应力幅计算值均小于相应限值, 而 200 万次后均已超过。计算对比如表 2 所示。

根据表 2 与试验结果, 可以得到不考虑预制底板钢筋作用的肋梁下部钢筋应力幅计算值, 如表 3 所示。由表 3 可知, MKXB-2 和 AKXB-6 的计算值与试验值相差较大, 其余的板计算值与试验值基本吻合, 当剔除掉 2 个偏差较大的数据后, 可以得到  $\Delta\sigma_{s1}^f / \Delta\sigma_{s1}$  的平均值为 0.961 2, 变异系数为 0.143 1, 小于 0.15。

## 3 装配整体式双向密肋空心板疲劳刚度分析

目前有多种计算疲劳荷载作用下构件刚度的方法, 主要有利用受压区混凝土应变计算刚度法<sup>[17]</sup>、调整钢筋应变不均匀系数法<sup>[18]</sup>、解析刚度法<sup>[19-20]</sup>、平均曲率法<sup>[21-22]</sup>以及挠度反算法<sup>[23-24]</sup>等。

### 3.1 基于跨中挠度反算法的疲劳刚度计算

本文采用挠度反算法对试验构件的疲劳刚度进行分析计算, 刚度表达式为

$$B = \alpha \frac{ML^2}{f} \quad (10)$$

式中:  $f$  为受弯构件计算截面处的挠度;  $\alpha$  为与荷载形式、支承条件等相关的挠度系数;  $M$  为计算截面

表 2 预制底板钢筋疲劳应力幅计算值及相关限值对比

Tab. 2 Comparison of Calculated Results of Fatigue Stress Amplitude of Prefabricated Slab Steel Bar with Relevant Limits					
试件编号	$P_{\min}/P_{\max}$	$\Delta\sigma_{s2}^f$ (计算值)/MPa	$\Delta\sigma_{\text{HPB235}}^f$ (文献[11]限值)/MPa	$\Delta\sigma_{\text{HRB335}}^f$ (规范 <sup>[7]</sup> 限值)/MPa	破坏形式
XJB-2	0.333	112	120	135	疲劳后静载未断裂
MKXB-2	0.300	98	120	135	疲劳后静载拉出
AKXB-2	0.300	98	120	135	疲劳后静载拉出
AKXB-3	0.300	98	120	135	疲劳后静载拉断
AKXB-4	0.250	126	130	150	疲劳后静载拉断
AKXB-5	0.200	168	130	150	钢筋疲劳断裂
AKXB-6	0.167	210	140	155	钢筋疲劳断裂
AKXB-7	0.167	168	140	155	钢筋疲劳拉出破坏
AKXB-8	0.167	134	140	155	钢筋疲劳拉出破坏

注: $\Delta\sigma_{\text{HPB235}}^f$ 为 HPB235 钢的应力幅限值。

表 3 肋梁下部钢筋疲劳应力幅计算值、实测值及规范限值

Tab. 3    Calculated Results, Measured Data and Code Limits of Fatigue Stress Amplitude of Ribbed Beam Bottom Steel Bar								
试件编号	$P_{\min}/P_{\max}$	$\Delta\sigma_{s1}^f$ (计算值)/MPa	$\Delta\sigma_{s1}$ (实测值)/MPa	$\Delta f_{y1}^f$ (规范 <sup>[7]</sup> 限值)/MPa	$\frac{\Delta\sigma_{s1}}{\Delta\sigma_{s1}^f}$	$\frac{\Delta\sigma_{s1}^f}{\Delta f_{y1}^f}$	$\frac{\Delta\sigma_{s1}}{\Delta f_{y1}^f}$	破坏形式
XJB-2	0.333	99	114	145	1.145	0.683	0.786	疲劳后静载
MKXB-2	0.300	87	67	149	0.775	0.584	0.500	疲劳后静载
AKXB-2	0.300	87	98	149	1.125	0.584	0.658	疲劳后静载
AKXB-3	0.300	87	71	149	0.821	0.584	0.477	疲劳后静载
AKXB-4	0.250	112	111	153	0.989	0.732	0.725	疲劳后静载
AKXB-5	0.200	149(221)	154	156	1.034	0.955(1.417)	0.987	钢筋疲劳断裂
AKXB-6	0.167	186(276)	108	158	0.578	1.177(1.747)	0.684	钢筋疲劳断裂
AKXB-7	0.167	149(276)	127	158	0.856	0.943(1.747)	0.804	钢筋疲劳断裂
AKXB-8	0.167	118(276)	112	158	0.945	0.747(1.747)	0.709	钢筋疲劳断裂

注:疲劳应力幅实测值是 200 万次疲劳后或疲劳破坏前一次静载测得的跨中纯弯段区域应力幅最大值;第 3 列括号内为不考虑预制底板钢筋作用时的肋梁下部钢筋疲劳应力幅计算值。

所受弯矩; $L$ 为梁的计算跨度; $B$ 为截面抗弯刚度。

根据本文集中加载的形式与支撑条件可得板件的疲劳刚度  $B_f=1.070\ 2M/f$ 。由试验数据计算空心板疲劳刚度时,截面弯矩取外加荷载为 0 至疲劳荷载上限作用下的弯矩增量,即疲劳荷载上限作用下的截面最大弯矩值,挠度取在该最大弯矩作用下的跨中挠度增量,由此可得空心板的计算刚度  $B_f=1.070\ 2M_{\max}^f/\Delta f$ 。

3.2 板件疲劳刚度退化幅度分析

使用公式(10)可计算得到板件经历 200 万次疲劳循环荷载作用后和疲劳破坏前刚度,并与初始刚度对比得到退化幅度,如表 4 所示。

对比可得经历 200 万次循环疲劳荷载作用后板件的刚度有明显的退化,疲劳荷载上限越大,板件的疲劳损伤越大。

试验板件疲劳后刚度相对弹性刚度退化幅度如

表 4 板件疲劳后刚度相对初始刚度退化幅度

Tab. 4 Degradation Amplitude of Fatigue Stiffness of Slab Relative to Initial Stiffness									
试件编号	XJB-2	MKXB-2	AKXB-2	AKXB-3	AKXB-4	AKXB-5	AKXB-6	AKXB-7	AKXB-8
破坏形式	疲劳后静载	疲劳后静载	疲劳后静载	疲劳后静载	疲劳后静载	疲劳破坏	疲劳破坏	疲劳破坏	疲劳破坏
疲劳荷载上限	0.3 $P_u$	0.33 $P_u$	0.33 $P_u$	0.33 $P_u$	0.4 $P_u$	0.5 $P_u$	0.6 $P_u$	0.6 $P_u$	0.6 $P_u$
疲劳循环加载次数/ $10^4$	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	74.02	26.86	21.46	52.40
疲劳后刚度 $K_f$ /(MN·m <sup>2</sup> )	16.122	15.163	17.461	8.361	5.674	5.348	5.062	5.617	7.232
初始刚度 $K_0$ /(MN·m <sup>2</sup> )	21.236	23.511	26.431	12.664	9.066	9.238	5.808	6.048	9.346
$K_f/K_0$	0.759 2	0.644 9	0.660 6	0.660 2	0.625 9	0.578 9	0.871 6	0.928 7	0.773 8
退化幅度/%	24.08	35.51	33.94	33.98	37.41	42.11	12.84	7.13	22.62

表 5 表示。当板件疲劳后刚度退化到弹性刚度的 20% 左右时,板件即将达到疲劳寿命,进入疲劳破坏阶段,AKXB-4 经历 200 万次疲劳循环荷载作用后,虽然没有发生疲劳破坏,但从动挠度、裂缝发展及分

布、裂缝宽度以及应变情况均可以推断,板件即将进入到疲劳破坏阶段。因此,对于本文所研究的装配整体式双向密肋空心板而言,可以将板件疲劳后刚度退化到弹性刚度的 20% 作为疲劳破坏的标志。

表 5 板件疲劳后刚度相对弹性刚度退化幅度

Tab. 5 Degradation Amplitude of Fatigue Stiffness of Slab Relative to Elastic Stiffness

试件编号	XJB-2	MKXB-2	AKXB-2	AKXB-3	AKXB-4	AKXB-5	AKXB-6	AKXB-7	AKXB-8
破坏形式	疲劳后静载	疲劳后静载	疲劳后静载	疲劳后静载	疲劳后静载	疲劳破坏	疲劳破坏	疲劳破坏	疲劳破坏
疲劳荷载上限	0.3P <sub>u</sub>	0.33P <sub>u</sub>	0.33P <sub>u</sub>	0.33P <sub>u</sub>	0.4P <sub>u</sub>	0.5P <sub>u</sub>	0.6P <sub>u</sub>	0.6P <sub>u</sub>	0.6P <sub>u</sub>
疲劳循环加载次数/10 <sup>4</sup>	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	74.02	26.86	21.46	52.40
疲劳后刚度 K <sub>f</sub> /(MN·m <sup>2</sup> )	16.122	15.163	17.461	8.361	5.674	5.348	5.062	5.617	7.232
弹性刚度 K <sub>e</sub> /(MN·m <sup>2</sup> )	28.811	28.811	28.811	28.811	28.811	28.811	28.811	29.086	29.432
K <sub>f</sub> /K <sub>e</sub>	0.559 6	0.526 3	0.606 1	0.290 2	0.196 9	0.185 6	0.175 7	0.193 1	0.245 7

3.3 板件疲劳刚度退化规律分析

通过试验将试件分为经过 200 万次疲劳荷载后未发生疲劳破坏的板与在 200 万次之前已经发生破坏的板,其刚度退化规律如图 6,7 所示。

下刚度退化较快,经过 20 万次相对稳定阶段后,直至破坏前刚度退化呈明显加快趋势。从上述图中可以看出情况 1 的板刚度退化规律主要表现为二阶段规律,即初始退化较快阶段和后面的平稳发展阶段。

3.4 低幅值疲劳板件剩余刚度计算

根据试验与本文的分析结果,板件经历 200 万次疲劳循环荷载作用后没有发生疲劳破坏,疲劳后刚度(即剩余刚度)相对于初始刚度退化 34%~37.5%,疲劳刚度退化与加载循环次数呈现明显的规律性。

使用 ORIGIN 软件对 MKXB-2,AKXB-2 和 AKXB-3 的刚度退化曲线进行拟合得到函数式(11)

$$\theta=0.207(1-e^{-x/0.020\ 8})+0.198(1-e^{-x/0.783\ 4})$$

(11)

式中:θ 为疲劳刚度退化系数。

刚度退化曲线拟合结果如图 8 所示,其中,n 为疲劳荷载循环次数,N 为总疲劳循环次数。

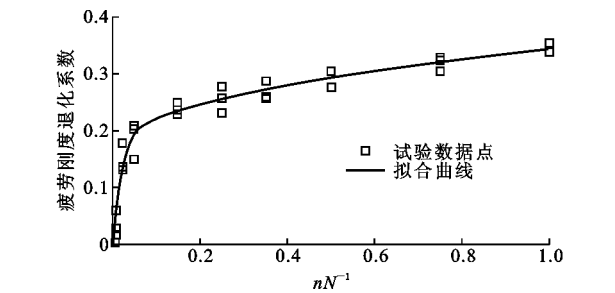


图 8 低幅值疲劳板件刚度退化曲线拟合结果  
Fig. 8 Stiffness Degradation Fitting Result of Slab with Low Amplitude Fatigue

由图 8 可知,拟合函数可以较好描述板件在 200 万次疲劳循环荷载作用内的刚度退化情况,板件经历 n 次疲劳循环荷载作用后的刚度计算公式如式(12)所示

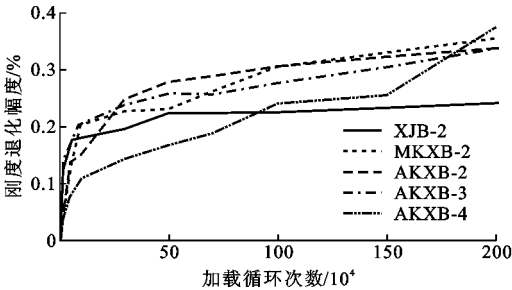


图 6 未发生疲劳破坏板件刚度退化规律  
Fig. 6 Stiffness Degradation Law of Slab with No Fatigue Failure Occurred

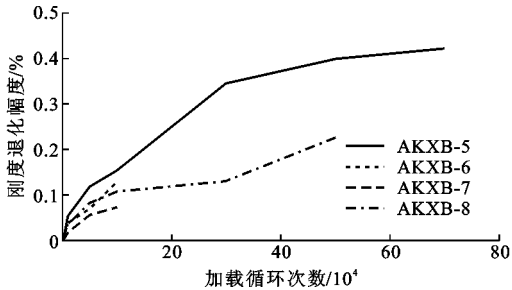


图 7 发生疲劳破坏板件刚度退化规律  
Fig. 7 Stiffness Degradation Law of Slab with Fatigue Failure Occurred

由图 6 可知:①未发生疲劳破坏板件在前 10 万次疲劳循环荷载作用下,刚度退化较快,随着疲劳应力幅值增大,疲劳刚度退化速度相应增大;②10 万次后,板件的刚度退化基本为线性退化趋势。

由图 7 可知:①疲劳荷载上限值相对较小的 AKXB-5 在前 30 万次疲劳循环荷载作用下刚度退化较快;②AKXB-8 在前 10 万次疲劳循环荷载作用

$$B_{n1} = (1 - \theta) B_1 \tag{12}$$

式中: $B_{n1}$ 为板件经历  $n$  次疲劳循环荷载作用后的剩余刚度; $B_1$  为板件第 1 次疲劳荷载上限静载时的初始刚度。

低幅值疲劳板件剩余刚度计算值与实测值对比结果如图 9 所示。

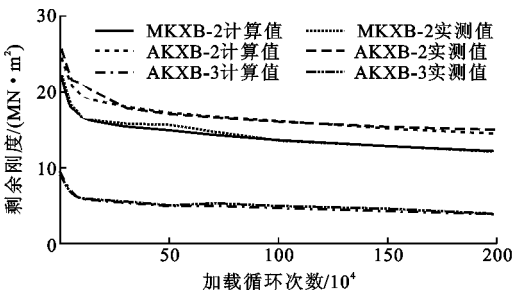


图 9 低幅值疲劳板件剩余刚度计算值与实测值对比  
Fig. 9 Comparison of Calculated Values with Measured Values of Slab with Low Amplitude Fatigue

4 基于疲劳刚度退化的疲劳性能预测

对于本文的板件,考虑到其受力不均匀等因素,采用剩余刚度模型对板件的疲劳损伤进行定义更直观简便且符合实际情况。

4.1 基于刚度退化的疲劳损伤定义

将基于刚度退化的疲劳损伤定义为

$$D = \frac{B_1 - B_{nr}}{B_1 - B_{Nr}} = f\left(\frac{n}{N}\right) \tag{13}$$

式中: $D$  为基于刚度退化定义的损伤变量,其取值范围为 $[0, 1]$ ; $B_{nr}$ 为试件经过  $n$  次疲劳循环荷载作用后的退化刚度; $B_{Nr}$ 为试件经过  $N$  次疲劳循环荷载作用后(即梁发生疲劳破坏时)的退化刚度。

表 6 板件 AKXB-4 刚度损伤变量发展  
Tab. 6 AKXB-4 Stiffness Damage Variable Development

AKXB-4	$n/N$	0.000	0.005	0.025	0.050	0.150	0.250	0.350	0.500	0.750	1.000
	$D$	0.000	0.096	0.210	0.287	0.387	0.448	0.505	0.643	0.681	1.000

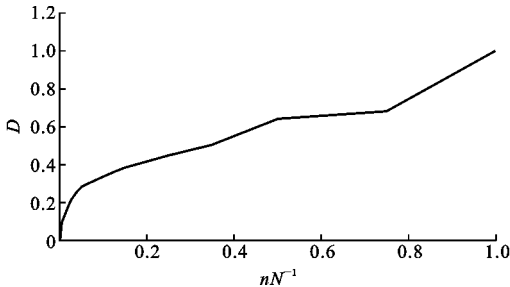


图 10 AKXB-4 刚度损伤变量  $D$  与疲劳荷载循环次数比  $n/N$  关系曲线

Fig. 10 AKXB-4 Relation Curve Between Stiffness Damage Variable  $D$  and Cycle Index Ratio  $n/N$

4.2 疲劳刚度退化函数构造

参考拟合需要的条件,文献[25]提出了如公式(14)所示的函数形式,在拟合复合材料层压板的疲劳刚度退化时取得了较好的效果。

$$f\left(\frac{n}{N}\right) = 1 - \frac{1 - (n/N)^a}{1 - (n/N)^b} \tag{14}$$

式中: $a, b$  为待拟合参数。

4.3 疲劳刚度退化函数构造

本文使用试验典型板件 AKXB-4 进行退化函数的分析。刚度损伤变量随疲劳荷载循环次数比的发展情况如表 6 所示,关系曲线如图 10 所示。

使用 ORIGIN 软件对试件 AKXB-4 在疲劳加载过程中的刚度退化数据进行拟合,拟合结果如式(15)所示,拟合曲线与实测曲线对比如图 11 所示。

$$f\left(\frac{n}{N}\right) = 1 - \frac{1 - (n/N)^{0.409\ 3}}{1 - (n/N)^{0.720\ 2}} \tag{15}$$

将式(15)代入式(13)可得

$$\frac{B_{nr}}{B_1} = 1 - \left(1 - \frac{B_{Nr}}{B_1}\right) \left[1 - \frac{1 - (n/N)^{0.409\ 3}}{1 - (n/N)^{0.720\ 2}}\right] \tag{16}$$

式中:当  $B_{Nr} = 0.2B_0$  ( $B_0$  为初始剩余刚度)时,认为板件发生疲劳破坏。

5 结 语

(1)根据推导的装配整体式双向密肋空心板正截面弯曲疲劳应力计算及验算公式,对本文试验试件肋梁下部钢筋应力幅进行验算,当预制底板钢筋应力幅值小于规范限值时,验算肋梁下部钢筋应力幅可以考虑预制底板钢筋作用;当预制底板钢筋应力幅值大于规范限值时,验算肋梁下部钢筋应力幅不应考虑预制底板钢筋作用。

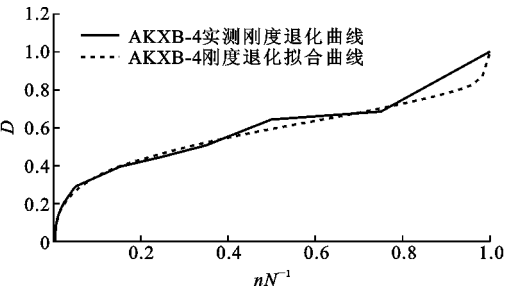


图 11 AKXB-4 板件疲劳刚度退化曲线拟合结果  
Fig. 11 Stiffness Degradation Curve-fitting Result of Slab Strip AKXB-4

(2)采用跨中挠度反算法求得试件疲劳后刚度,并对刚度退化幅度及退化规律进行了分析,得出当板件疲劳后刚度退化到弹性刚度的 20%时,板件即将达到疲劳寿命,进入疲劳破坏阶段。

(3)通过对预制底板钢筋的疲劳应力幅值进行计算及验算结果分析可知,当装配整体式双向密肋空心板用于需要考虑疲劳荷载作用的结构时,可以通过加密预制底板钢筋布置间距,增加预制底板钢筋锚固长度,预制底板钢筋疲劳强度采用不低于肋梁下部钢筋疲劳强度以及严格控制空心箱体安装质量及现场施工质量等方法来确保该新型空心板结构整体疲劳性能。

(4)利用典型试验试件 AKXB-4 的试验数据对刚度退化函数进行了优选和参数拟合,并取得了良好的拟合效果,可以用于装配整体式双向密肋空心板结构变形、疲劳性能退化以及剩余疲劳寿命预测。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 吴方伯,李 钧,周绪红,等. 新型后装式密肋空心楼盖弹性阶段变形对比试验研究与分析[J]. 建筑结构, 2014,44(13):9-14.  
WU Fang-bo, LI Jun, ZHOU Xu-hong, et al. Comparative Experimental Study and Analysis on Elastic Deformation of a New Type of Post-constructed Hollow-ribbed Floor[J]. Building Structure, 2014, 44(13): 9-14.
- [2] 吴方伯,李 钧,周绪红,等. 后装式双向密肋空心楼盖静力性能试验研究与挠度计算方法[J]. 建筑结构学报, 2014,35(12):1-9.  
WU Fang-bo, LI Jun, ZHOU Xu-hong, et al. Experimental Study on Static Behavior and Calculating Methods for Deflection of After-loading Two-way Hollow-ribbed Floor[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(12): 1-9.
- [3] 吴方伯,李 钧,邓利斌,等. 大尺寸钢筋混凝土密肋薄腹梁抗剪性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2014,31(14):1-6.  
WU Fang-bo, LI Jun, DENG Li-bin, et al. Experiment on Shear Behavior of Large-size Reinforced Concrete Multi-ribbed Thin Web Beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(14): 1-6.
- [4] CARVELLI V, PISANI M A, POGGI C. Fatigue Behaviour of Concrete Bridge Deck Slabs Reinforced with GFRP Bars[J]. Composites Part B: Engineering, 2010,41(7),560-567.
- [5] 赵顺波. 钢筋混凝土板正截面疲劳性能试验研究[J].

应用基础与工程科学学报,1999,7(3):289-297.

- ZHAO Shun-bo. Experimental Study on Fatigue Behaviors of Reinforced Concrete Plates[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1999, 7(3): 289-297.
- [6] 侯 杰,程赫明,王时越,等. 预应力钢纤维混凝土板弯曲疲劳挠度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(增):219-223.  
HOU Jie, CHENG He-ming, WANG Shi-yue, et al. Experimental Investigation of Fatigue Deflection of Steel Fiber Reinforced Prestressed Concrete Slab[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(S): 219-223.
- [7] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [8] TB 10092—2017, 铁路桥涵混凝土结构设计规范[S].  
TB 10092—2017, Code for Design of Concrete Structures of Railway Bridge and Culvert[S].
- [9] 田 芳. 预应力钢纤维混凝土板的弯曲疲劳性能及正截面承载力计算[D]. 昆明:昆明理工大学, 2005.  
TIAN Fang. Probability of Flexural Fatigue and Straight-resistance of Steel Fiber Reinforced Prestressed Concrete Slab [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005.
- [10] 黄海林. 预制带肋底板混凝土叠合楼板受力性能及设计方法[D]. 长沙:湖南大学, 2013.  
HUANG Hai-lin. Structural Behavior and Design Method of Concrete Composite Slab with Precast Prestressed Concrete Ribbed Panel[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [11] 宋玉普. 混凝土结构的疲劳性能及设计原理[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.  
SONG Yu-pu. Fatigue Behavior and Design Principle of Concrete Structures [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [12] 李秀芬,吴佩刚,赵光仪. 高强混凝土梁抗弯疲劳性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 1997, 30(5):37-42.  
LI Xiu-fen, WU Pei-gang, ZHAO Guang-yi. Experimental Research on Bending Fatigue Behavior of High-strength Concrete Beams[J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(5): 37-42.
- [13] 钟 铭,王海龙,刘仲波,等. 高强钢筋高强混凝土梁静力和疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2):94-100.  
ZHONG Ming, WANG Hai-long, LIU Zhong-bo, et al. Experimental Research of High-strength Concrete Beams Reinforced by High-strength Bars Under Static Loading and Fatigue Loading [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 94-100.

- [14] 潘 华. 混凝土受弯构件疲劳性能的试验研究[D]. 南京:东南大学,2006.  
PAN Hua. Experimental Study on Fatigue Behaviors of Concrete Flexural Components [D]. Nanjing: Southeast University,2006.
- [15] 太原工学院土木系. 钢筋混凝土受弯构件正截面疲劳验算方法的研究[C]//中国建筑科学研究院. 钢筋混凝土结构研究报告选集. 北京:中国建筑工业出版社,1981:235-254.  
Department of Civil Engineering, Taiyuan College of Technology. Study on Checking Calculation About Cross-section Fatigue of Reinforced Concrete Flexural Member[C]//China Academy of Building Research. Selection of Reinforced Concrete Research Report. Beijing:China Building Industry Press,1981,235-254.
- [16] HOLMEN J O. Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading[J]. ACI Special Publication,1982,75:71-110.
- [17] 王瑞敏,赵国藩,宋玉普. 混凝土的受压疲劳性能研究[J]. 土木工程学报,1991,24(4):38-47.  
WANG Rui-min, ZHAO Guo-fan, SONG Yu-pu. Fatigue of Plain Concrete Under Compression[J]. China Civil Engineering Journal,1991,24(4):38-47.
- [18] LOVEGROVE J B, SALAH E L, DIN A S. Deflection and Cracking of Reinforced Concrete Under Repeated Loading and Fatigue [J]. ACI Special Publication, 1982,75:133-152.
- [19] 孟建伟,王海龙,钟 铭. 用解析刚度法求解高强钢筋混凝土梁的疲劳刚度[J]. 石家庄铁道学院学报,2004,17(3):67-70.  
MENG Jian-wei, WANG Hai-long, ZHONG Ming. Testing Research for Fatigue Rigidity of High Strength Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute,2004,17(3):67-70.
- [20] 曾令宏,尚守平,万剑平,等. 复合砂浆钢筋网加固钢筋混凝土梁静力和疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2008,29(1):83-89,111.  
ZENG Ling-hong, SHANG Shou-ping, WAN Jian-ping, et al. Static and Fatigue Experimental Study on Reinforced Concrete Beams Strengthened with High-performance Ferrocement [J]. Journal of Building Structures,2008,29(1):83-89,111.
- [21] 沈忠斌,蓝宗建,丁大钧. 重复荷载作用下钢筋砼受弯构件变形的试验研究[J]. 沈阳建筑工程学院学报,1991,7(3):273-279.  
SHEN Zhong-bin, LAN Zong-jian, DING Da-jun. Experimental Research for Deflection of Reinforced Concrete Members Under Repeated Loading[J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute,1991,7(3):273-279.
- [22] 庞林飞,邱洪兴,陆 烜. 基于剩余刚度模型的构件疲劳寿命预测[J]. 工业建筑,2005,35(增):126-130.  
PANG Lin-fei, QIU Hong-xing, LU Xuan. Fatigue Life Prediction of Reinforced Concrete Members based on Residual Stiffness[J]. Industrial Construction,2005,35(S):126-130.
- [23] 朱红兵. 公路钢筋混凝土简支梁桥疲劳试验与剩余寿命预测方法研究[D]. 长沙:中南大学,2011.  
ZHU Hong-bing. Method and Experiment Research on Highway Reinforced Concrete Simply-supported Girder Bridge's Fatigue Residual Service Life Forecast [D]. Changsha:Central South University,2011.
- [24] 汤卫红,李士彬,朱慈勉. 基于刚度下降的混凝土梁疲劳累积损伤模型的研究[J]. 铁道学报,2007,29(3):84-88.  
TANG Hong-wei, LI Shi-bin, ZHU Ci-mian. A Fatigue Cumulative Damage Model of RC Beam Based on Stiffness Degradation[J]. Journal of the China Railway Society,2007,29(3):84-88.
- [25] 廉 伟,姚卫星. 复合材料层压板剩余刚度-剩余强度关联模型[J]. 复合材料学报,2008,25(5):151-156.  
LIAN Wei, YAO Wei-xing. Residual Stiffness-residual Strength Coupled Model of Composite Laminates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2008,25(5):151-156.