

# 钢筋混凝土桥梁的钢筋锈蚀与疲劳耦合损伤

杨 良, 孙立军

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 钢筋混凝土桥梁在运营过程中同时承受环境侵蚀作用和荷载疲劳作用, 导致承载力衰变. 通过对钢筋混凝土梁的钢筋锈蚀损伤和疲劳损伤过程的相互影响分析, 建立了钢筋锈蚀与疲劳损伤耦合效应下的钢筋截面综合损伤计算模型. 对空心板梁的计算分析表明, 锈蚀作用造成钢筋疲劳寿命显著减小. 因此, 钢筋截面综合损伤计算模型可为钢筋混凝土桥梁结构时变承载力评价提供依据.

**关键词:** 钢筋锈蚀; 疲劳; 耦合效应; 结构损伤; 承载能力  
**中图分类号:** U445.7 **文献标志码:** A

## Damage of Steel Bar of Reinforced Concrete Bridge by the Coupling Effect of Corrosion and Fatigue

YANG Liang, SUN Lijun

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Reinforced concrete bridges withstand both environmental erosions and fatigue loads during operations, resulting in the bridge carrying capacity decay. Through the analysis of the process of steel bar corrosion and fatigue damage, a damage calculation model is set up for evaluation of the comprehensive damage of steel bar's cross-section. Calculation of the hollow plate beam shows that corrosion of steel bar caused a significant reduction in its fatigue life. Therefore, the damage calculation model can provide the basis for the evaluation of the bridge's time-variant load capacity by the coupling effect of both bar corrosion and fatigue damage.

**Key words:** steel bar corrosion; fatigue damage; coupling effect; structural damage; load capacity

土桥梁的疲劳损伤或者钢筋锈蚀损伤研究很多, 得到了大量的研究成果. 朱红兵<sup>[2]</sup>通过试验梁的疲劳荷载试验认为钢筋混凝土梁受弯疲劳破坏都是钢筋疲劳断裂引起, 应力幅值  $\Delta\sigma$  是影响疲劳强度的最主要因素. Vu 等<sup>[3]</sup>用锈蚀电流密度来度量钢筋的锈蚀速率, 并提出了锈蚀电流密度与混凝土保护层厚度、水灰比的时变计算模型. 张克波等<sup>[4]</sup>通过对比试验研究快速锈蚀和自然锈蚀 2 种条件下对钢筋屈服强度和极限强度的影响. 但是, 目前对于钢筋锈蚀与荷载疲劳综合影响方面的研究很少. 因此, 研究荷载疲劳与环境侵蚀综合作用下的钢筋截面损伤率对于钢筋混凝土桥梁承载力的定量评价具有基础性意义.

## 1 钢筋疲劳损伤

### 1.1 钢筋疲劳强度损伤

疲劳是指在循环应力作用下材料内部的损伤不断增加、剩余强度不断降低的过程. 通常采用 Miner 线性损伤准则来度量钢筋混凝土结构的疲劳损伤<sup>[5-6]</sup>. 每个常幅循环周期都会造成材料强度损伤, 当剩余强度降低到等于循环应力幅上限值时就会造成疲劳破坏. 假设材料的初始强度为  $\sigma_0$ , 单级常幅循环荷载作用下的应力幅上限值为  $\sigma_{\max}$ , 材料剩余强度  $\sigma_n$  随着疲劳次数  $n$  的增加逐渐减小, 当  $\sigma_n = \sigma_{\max}$  时材料疲劳破坏.

每次循环材料的强度损伤  $R'$  为

$$R' = \frac{1}{N}(\sigma_0 - \sigma_{\max}) \quad (1)$$

式中:  $N$  为单级常幅应力幅作用下的钢筋疲劳寿命.

由 Miner 线性累积损伤准则, 经过  $n$  次循环后材料的剩余强度为

$$\sigma_n = \sigma_0 - nR' = \sigma_0 - \frac{n}{N}(\sigma_0 - \sigma_{\max}) \quad (2)$$

材料的强度衰减系数  $K$  (或称疲劳剩余强度系数) 为

2013 年, 我国全国公路桥梁达 73.53 万座、累计长度为 3 9778 km<sup>[1]</sup>. 在众多的桥梁中, 钢筋混凝土桥梁占据了绝大多数. 随着交通荷载的日益重型化, 桥梁结构损伤也愈加严重. 目前, 国内外对钢筋混

$$K = \frac{\sigma_n}{\sigma_0} = 1 - \frac{n}{N} \left( 1 - \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \right) \quad (3)$$

## 1.2 钢筋疲劳等效截面损伤

现有研究成果<sup>[7]</sup>表明,钢筋疲劳断裂时,断面有明显的金属疲劳断口特征,无缩颈现象.说明钢筋疲劳断裂面的截面积基本不变,该截面为钢筋最薄弱位置,断裂时强度为其承受应力幅的上限值.根据强度-截面积等效换算法,钢筋疲劳强度损伤率等效于强度不变条件下的截面积损失率.因此,可以用  $K$  来度量钢筋疲劳损伤.因此,荷载疲劳作用下的受拉钢筋疲劳时变有效截面积  $A_p(t)$  为

$$A_p(t) = A_0 K = A_0 \frac{\sigma_n}{\sigma_0} \quad (4)$$

式中:  $A_0$  为钢筋初始截面积.

## 2 钢筋锈蚀损伤

### 2.1 钢筋锈蚀类型

钢筋锈蚀分为全面锈蚀和局部锈蚀 2 类.全面锈蚀是指钢筋沿圆周各处锈蚀程度一致,即沿圆周锈蚀速度相同;局部锈蚀是指钢筋锈蚀不均匀分布形成“点蚀”,锈蚀点处的应力集中导致锈蚀加速形成“锈蚀坑”.在实际工程中,全面锈蚀与局部锈蚀往往同时存在,因而“锈蚀坑”最严重位置为最薄弱截面.锈蚀钢筋承载力的退化取决于最薄弱截面的钢筋锈蚀程度.

### 2.2 钢筋锈蚀的度量

#### 2.2.1 钢筋锈蚀率

钢筋锈蚀率分为质量锈蚀率和截面锈蚀率两类.质量锈蚀率是指锈蚀引起钢筋质量减小对应的损失率,反映锈蚀对钢筋质量的平均损耗.截面锈蚀率是指锈蚀引起钢筋截面减小对应的损失率,反映锈蚀对钢筋截面的削弱.对于锈蚀率较小的全面锈蚀,可用质量锈蚀率代替截面锈蚀率.随着锈蚀率的增大,钢筋锈蚀的变异性增大,出现局部锈蚀造成坑蚀,此时质量锈蚀率与截面锈蚀率不再相等.质量锈蚀率  $\eta_m$  计算式为

$$\eta_m = (m_0 - m_t) / m_0 \quad (5)$$

式中:  $m_0$  为钢筋锈蚀前的单位长度质量;  $m_t$  为钢筋锈蚀并除锈后的单位长度质量.

最薄弱截面锈蚀率  $\eta_{\max}$  计算式为

$$\eta_{\max} = (s_0 - s_{\min}) / s_0 \quad (6)$$

式中:  $s_0$  为锈蚀前截面积;  $s_{\min}$  为锈蚀后最小截面积.

#### 2.2.2 钢筋锈蚀等效截面损伤

锈蚀钢筋承载力取决于最薄弱截面的性状,即

强度和有效截面积.文献[4,8]认为锈蚀钢筋的屈服强度和极限抗拉强度有少量退化.文献[9]对锈蚀钢筋试件进行力学性能研究,认为锈蚀对钢筋的强度影响很小,锈蚀钢筋承载力下降的主要原因是截面积的减小,锈蚀钢筋的屈服强度和极限强度基本不变.综合分析上述成果,本文提出钢筋锈蚀剥壳效应,定义其为钢筋锈蚀仅对钢筋周边的表面造成侵蚀破坏,剔除钢筋锈蚀外壳后,内部剩余的钢筋力学性能不变.根据强度-有效截面积等效换算法,锈蚀钢筋时变有效截面积  $A_s(t)$  为

$$A_s(t) = A_0 (1 - \eta_{\max}) \quad (7)$$

## 3 钢筋锈蚀与疲劳综合损伤

### 3.1 钢筋锈蚀与疲劳的耦合机理

根据阳极溶解型应力腐蚀机理,钢筋在高碱性混凝土中会形成钝化膜.钝化膜在疲劳应力作用下破裂,露出的新鲜金属相对钝化膜而言属于阳极,并将产生瞬时溶解.溶解后的金属溶液会再次形成二次钝化膜.溶解区域的裂尖或蚀坑由于应力集中,造成二次钝化膜再次破裂,随后再次发生瞬时溶解.同时,环境侵蚀因素引起钢筋的裂尖或蚀坑位置金属的脆化与腐蚀,锈蚀损伤与疲劳循环应力的耦合作用加速钢筋截面裂缝的扩展.因此,钢筋锈蚀与疲劳的耦合效应不是二者的简单叠加,而是相互促进,从而加速钢筋截面的损伤.

### 3.2 锈蚀钢筋疲劳损伤度量

#### 3.2.1 基本特征

综合现有研究成果,在荷载疲劳和环境侵蚀作用下,锈蚀疲劳过程的基本特征为:①锈蚀钢筋混凝土疲劳破坏是由于钢筋断裂而失效.②锈蚀钢筋疲劳断裂发生在最薄弱截面上,该截面通常位于主裂缝对应的位置附近.③最薄弱截面的锈蚀作用符合剥壳效应,即锈蚀作用对剩余钢筋的强度无影响.④钢筋最薄弱截面疲劳损伤均匀分布.⑤锈蚀钢筋疲劳断裂时,钢筋最薄弱截面的强度等于应力幅上限值.⑥无论锈蚀损伤还是疲劳损伤,剩余的钢筋有效截面积相同则承载力相同.

#### 3.2.2 锈蚀条件下的钢筋疲劳损伤

钢筋混凝土梁中钢筋锈蚀过程是连续的,为了便于研究分析其在环境侵蚀和交通荷载作用下的过程,将钢筋混凝土梁的服役期离散成各个时间段.由于钢筋锈蚀过程较慢,交通量统计一般以 1 年为单位,因此对于钢筋疲劳和锈蚀的耦合过程可离散为

时间段为  $\Delta t=1$  年. 对钢筋锈蚀与疲劳综合损伤的推理依据为: 本应由发生锈蚀钢筋截面承受的疲劳作用转由锈蚀后剩余钢筋截面承担, 加速了剩余钢筋截面的疲劳损伤, 如图 1 所示.

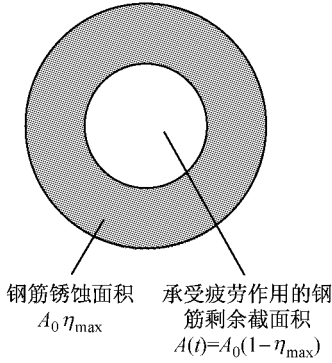


图 1 锈蚀钢筋截面承受的疲劳作用

Fig.1 Fatigue effects on the cross section of corroded bar

以常幅应力循环(应力幅上限为  $\sigma_{\max}$ )作用下的钢筋锈蚀疲劳过程为例, 进行锈蚀与疲劳耦合效应分析.

(1) 钢筋的初始承载力. 未锈蚀钢筋初始承载力  $P_0$  为

$$P_0 = A_0 \sigma_0 \quad (8)$$

(2) 钢筋锈蚀阶段的疲劳损伤过程. 锈蚀第 1 年, 钢筋疲劳强度损伤  $R_1$  为

$$R_1 = \frac{n_1}{N} \left( \frac{1}{1-\eta_1} \right) (\sigma_0 - \sigma_{\max}) \quad (9)$$

锈蚀第 2 年, 钢筋疲劳强度损伤  $R_2$  为

$$R_2 = \frac{n_2}{N} \left( \frac{1}{1-\eta_2} \right) (\sigma_0 - \sigma_{\max}) \quad (10)$$

锈蚀第  $i$  年, 钢筋疲劳强度损伤  $R_i$  为

$$R_i = \frac{n_i}{N} \left( \frac{1}{1-\eta_i} \right) (\sigma_0 - \sigma_{\max}) \quad (11)$$

锈蚀钢筋疲劳断裂年年初至断裂时的疲劳强度损伤  $R_{i'}$  为

$$R_{i'} = \frac{n_{i'}}{N} \left( \frac{1}{1-\eta_{i'}} \right) (\sigma_0 - \sigma_{\max}) \quad (12)$$

式中:  $n_i$  为钢筋锈蚀第  $i$  年内承受的应力幅循环次数;  $\eta_i$  为钢筋锈蚀第  $i$  年末钢筋最不利截面累积锈蚀率;  $n_{i'}$  为钢筋疲劳断裂年年初至断裂时承受的应力幅循环次数;  $\eta_{i'}$  为钢筋疲劳断裂时钢筋截面累积锈蚀率.

(3) 锈蚀条件下钢筋疲劳强度累积损伤. 钢筋锈蚀时间  $t$  从第 1 年初至第  $i$  年末的常幅应力循环对剩余钢筋截面的疲劳强度累积损伤  $R_{fe}(t)$  为

$$R_{fe}(t) = \sum_{i=1}^t \frac{n_i}{N} \left( \frac{1}{1-\eta_i} \right) (\sigma_0 - \sigma_{\max}) \quad (13)$$

### 3. 2. 3 锈蚀与疲劳耦合下的钢筋损伤模型

(1) 钢筋有效截面积耦合损伤模型为

$$\lambda_i = \eta_i + R_{fe}(t) / \sigma_0 \quad (14)$$

即

$$\lambda_i = \eta_i + \sum_{i=1}^t \frac{n_i}{N} \left( \frac{1}{1-\eta_i} \right) \left( 1 - \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \right) \quad (15)$$

式中:  $\lambda_i$  为钢筋有效截面累积损失率;  $\eta_i$  为钢筋截面累积锈蚀率.

(2) 第  $t$  年末的锈蚀疲劳耦合作用下的钢筋剩余极限承载力为

$$P_t = A_0 \sigma_0 (1 - \lambda_t) \quad (16)$$

锈蚀作用下的钢筋常幅应力疲劳损伤及锈蚀钢筋疲劳损伤后的剩余强度计算过程如表 1 所示. 以上是以常幅应力疲劳为例进行分析, 对于锈蚀钢筋的变幅应力疲劳损伤亦可按照 Miner 线性损伤准则进行计算.

表 1 锈蚀与疲劳耦合作用下的钢筋截面损伤

Tab.1 The damage of steel bar section by the coupling effects of fatigue and corrosion

钢筋锈蚀疲劳过程	钢筋截面累积锈蚀率	锈蚀后剩余钢筋截面强度的累积疲劳损伤率	锈蚀与疲劳耦合下钢筋截面综合损失率	耦合作用后剩余钢筋极限承载力
初始值	0	0	0	$A_0 \sigma_0$
钢筋锈蚀第 1 年	$\eta_1$	$k_{fe}(1) = \sum_{i=1}^1 \frac{n_i}{N} \left( \frac{1}{1-\eta_i} \right) \left( 1 - \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \right)$	$\lambda_1 = \eta_1 + k_{fe}(1)$	$A_0 \sigma_0 (1 - \lambda_1)$
钢筋锈蚀第 2 年	$\eta_2$	$k_{fe}(2) = \sum_{i=1}^2 \frac{n_i}{N} \left( \frac{1}{1-\eta_i} \right) \left( 1 - \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \right)$	$\lambda_2 = \eta_2 + k_{fe}(2)$	$A_0 \sigma_0 (1 - \lambda_2)$
钢筋锈蚀第 $i$ 年	$\eta_i$	$k_{fe}(i) = \sum_{i=1}^i \frac{n_i}{N} \left( \frac{1}{1-\eta_i} \right) \left( 1 - \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \right)$	$\lambda_i = \eta_i + k_{fe}(i)$	$A_0 \sigma_0 (1 - \lambda_i)$
钢筋锈蚀疲劳断裂年	$\eta_{i'}$	$k_{fe}(i) = \sum_{i=1}^{i'} \frac{n_{i'}}{N} \left( \frac{1}{1-\eta_{i'}} \right) \left( 1 - \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \right)$	$\lambda_{i'} = \eta_{i'} + k_{fe}(i')$	$A_0 \sigma_0 (1 - \lambda_{i'})$

表 1 说明, 随着锈蚀率增加, 钢筋截面减小造成剩余钢筋截面承受的疲劳损伤加剧, 从而导致剩余截面的强度加速下降. 从钢筋锈蚀和疲劳过程中可以看到锈蚀疲劳后剩余钢筋极限承载力计算式同时

包含了锈蚀作用造成的截面积减小、疲劳作用造成钢筋截面强度下降以及二者耦合作用造成的疲劳损伤加速的综合效应. 至此, 推导出钢筋锈蚀和疲劳耦合作用效应下的钢筋截面损伤的理论计算模型(式

(15)、式(16))。

### 4 计算示例

以文献[2]的室内疲劳试验为基础,加入钢筋锈蚀因素,从理论上对锈蚀与疲劳耦合效应进行计算分析.为对比疲劳、锈蚀与耦合效应的差异性,分为4种工况(疲劳损伤、锈蚀损伤、锈蚀与疲劳简单叠加损伤和锈蚀与疲劳耦合损伤)进行计算分析.试验梁为空心板梁长4 m(净跨径为3.8 m),截面长、宽分别为600 mm、500 mm,纵筋和斜筋采用直径 $D=20$  mm的HRB335级螺纹钢筋,钢筋屈服强度429

Mpa,极限抗拉强度598 Mpa.静载破坏试验测得空心板梁极限承载力 $P_0=520$  kN,疲劳加载上下限为 $0.2P_0\sim 0.5P_0$ .钢筋锈蚀速率参照文献[10]取 $0.15$  mm·年<sup>-1</sup>.锈蚀与疲劳简单叠加不考虑二者的相互影响,其钢筋剩余有效截面积按 $A_p(t)+A_s(t)$ 计算;锈蚀和疲劳耦合损伤率参照表1进行计算;为模拟桥梁结构的钢筋锈蚀状况,将疲劳试验加载次数(疲劳寿命328.06万次)分别按20年、39年完成加载.4种工况的计算结果如表2和图2所示,图中,A为锈蚀损伤失效点,B为疲劳损伤失效点,C为锈蚀和疲劳简单叠加失效点,D为锈蚀和疲劳耦合失效点.

表 2 锈蚀与疲劳作用下的空心板梁使用性能

Tab.2 Service performance of hollow slab girder by the Effects of bar corrosion and fatigue

工况	钢筋损伤类型	疲劳加载上下限/kN	加载时间/年	锈蚀速率/(mm·年 <sup>-1</sup> )	疲劳断裂时钢筋有效截面损失率/%	疲劳寿命/万次	使用寿命/年
1	疲劳损伤	$0.2P_0\sim 0.5P_0$	20	0	50	328.06	20.0
		$0.2P_0\sim 0.5P_0$	39	0	50	328.06	39.0
2	锈蚀损伤	0		0.15	50		39.0
3	锈蚀与疲劳叠加损伤	$0.2P_0\sim 0.5P_0$	20	0.15	50	208.32	12.7
		$0.2P_0\sim 0.5P_0$	39	0.15	50	157.30	18.7
4	锈蚀与疲劳耦合损伤	$0.2P_0\sim 0.5P_0$	20	0.15	50	195.20	11.9
		$0.2P_0\sim 0.5P_0$	39	0.15	50	145.52	17.3

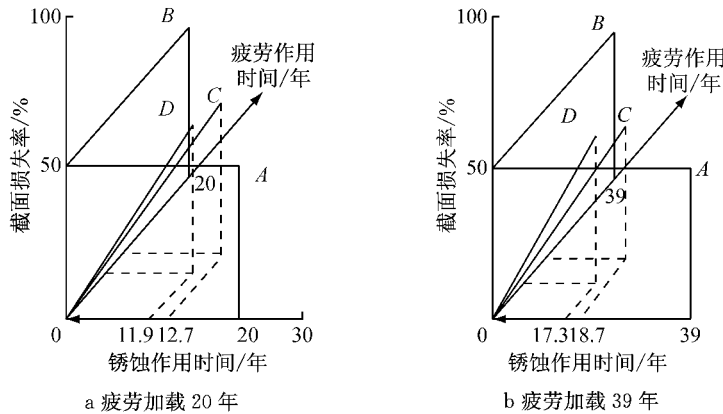


图 2 钢筋锈蚀和疲劳作用效应

Fig.2 Damage effects of bar corrosion and fatigue (fatigue load for 39 years)

表2和图2说明,锈蚀作用明显造成钢筋疲劳寿命减小.相对于工况1,工况3的锈蚀疲劳寿命降低了36.5%和40.5%,工况4的锈蚀疲劳寿命降低了52.1%和55.6%;工况4比工况3的锈蚀疲劳寿命更小.加载时间越长(相当于交通量越小),钢筋使用年限越长,但是疲劳寿命因锈蚀时间增加而更小.

### 5 结论

(1)推导出钢筋锈蚀和疲劳耦合作用效应下的

钢筋综合损伤度的理论计算模型,可为钢筋混凝土结构承载力的定量评价提供基础性依据.

(2)对空心板梁的钢筋疲劳损伤、锈蚀损伤、锈蚀和疲劳损伤以及锈蚀与疲劳耦合损伤共4种工况进行了计算,对钢筋锈蚀和疲劳的不同组合效应进行了量化分析.

(3)锈蚀作用造成钢筋疲劳寿命显著减小;与锈蚀和疲劳简单叠加效应相比,锈蚀和疲劳的耦合效应造成钢筋疲劳寿命更短;加载时间越长(相当于交