

文章编号: 1000-4750(2016)09-0109-07

# 考虑钢筋锈蚀的复合受扭混凝土箱梁 时变承载力研究

程 坤<sup>1,2</sup>, 项贻强<sup>1</sup>

(1. 浙江大学土木工程系, 浙江, 杭州 310058; 2. 河南省交通科学技术研究院有限公司, 河南, 郑州 450006)

**摘 要:** 对考虑钢筋锈蚀的复合受扭钢筋混凝土箱梁时变承载力进行研究。针对复合受扭混凝土箱梁中混凝土开裂面与钢筋斜交的情况, 推导了综合考虑钢筋混凝土粘结滑移效应及正交配筋效应的钢筋修正本构模型。引入钢筋和混凝土材料的时变劣化模型, 结合复合受扭钢筋混凝土箱梁的修正板-桁架模型, 编制了复合受扭钢筋混凝土箱梁时变承载力的计算程序。与纯扭锈蚀构件和复合受扭构件的试验对比, 验证了所提出钢筋修正本构模型的适用性较好。算例结果表明: 在假定的一般大气环境和受力条件下, 考虑钢筋锈蚀的复合受扭钢筋混凝土箱梁构件100年后抗扭强度降低约15%。

**关键词:** 混凝土箱梁; 复合受扭; 钢筋锈蚀; 时变; 承载力

中图分类号: TU375 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.01.0047

## STUDY ON TIME-DEPENDENT LOAD CARRYING CAPACITY OF CONCRETE BOX BEAMS SUBJECTED TO COMBINED TORSION CONSIDERING REINFORCEMENT CORROSION

CHENG Kun<sup>1,2</sup>, XIANG Yi-qiang<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

2. Henan Transportation Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450006, China)

**Abstract:** Time-dependent load carrying capacity of reinforced concrete (RC) box beams subjected to combined torsion by considering reinforcement corrosion is investigated in this paper. A modified constitutional relationship for reinforcement is derived by considering that the crack surface is not perpendicular to steel bar, as well as the bond slip effect between steel bar and concrete. Introducing the time-dependent degradation models of reinforcement and concrete, combined with a modified plate-truss model, the calculation for studying the time-dependent carrying capacity of RC box beams subjected to combined torsion is carried out. The test results of pure and combined torsional RC members verify the applicability of the modified constitutional relationship. The numerical results show that the torsional strength of the calculated corroded RC box beam model will decrease by approximately 15% after 100 years under the assumed environment and loading conditions.

**Key words:** concrete box beam; combined torsion; reinforcement corrosion; time dependent; load carrying capacity

钢筋混凝土结构的性能在全寿命期内具有时变性的特点。这其中钢筋锈蚀作为最为主要的影响

因素之一, 对于结构的使用寿命, 甚至于结构的安全性都会带来十分不利的影响。目前对于钢筋锈蚀

收稿日期: 2015-01-16; 修改日期: 2016-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178416); 浙江大学唐仲英基金资助项目

通讯作者: 项贻强(1959—), 男, 浙江杭州人, 教授, 博士, 中国土木工程学会桥梁与结构工程分会理事, 主要从事桥梁结构全寿命设计理论、健康监测与养护管理、风险评估、悬浮隧道及古桥的保护研究(E-mail: xiangyiq@zju.edu.cn).

作者简介: 程 坤(1987—), 男, 河南商丘人, 工程师, 工学博士, 从事桥梁全寿命理论研究(E-mail: chengkun812@163.com).

引起的混凝土结构耐久性 & 承载力问题, 更多关注于材料的微观层面和单一受力构件, 如钢筋混凝土结构中钢筋锈蚀机理及锈蚀程度的预测<sup>[1-5]</sup>, 混凝土保护层锈胀开裂预测<sup>[6-8]</sup>, 锈蚀钢筋的粘结滑移机理<sup>[9]</sup>, 单一受力构件的非线性行为及承载力分析<sup>[10-14]</sup>, 对于考虑钢筋锈蚀的弯剪扭共同作用下复合受扭混凝土构件的非线性分析鲜有报道。

本文在复合受扭钢筋混凝土箱梁修正板-桁模型<sup>[15]</sup>的基础上, 进一步考虑钢筋的锈蚀和钢筋混凝土间的粘结滑移效应, 同时受扭构件混凝土开裂面与钢筋斜交的情况, 对钢筋的本构模型进行修正。引入考虑时间特性的钢筋与混凝土材料劣化模型, 开展复合受扭钢筋混凝土箱梁时变承载力的研究工作。

## 1 锈蚀钢筋本构模型的修正

对于钢筋混凝土间出现粘结滑移的情况, 裂缝宽度内和裂缝间的钢筋应力会出现分布不均匀的情况, 会出现不同于裸钢筋的受力特性。文献[16]曾对考虑钢筋混凝土粘结滑移效应的单一受力构件中钢筋本构模型的修正工作展开过研究。对于复合受扭箱梁构件, 混凝土裂缝经常与钢筋斜交, 并且箱梁每一个箱壁可以看作是平面受力问题, 因此首先对平面受力钢筋混凝土模型中钢筋的本构进行修正。

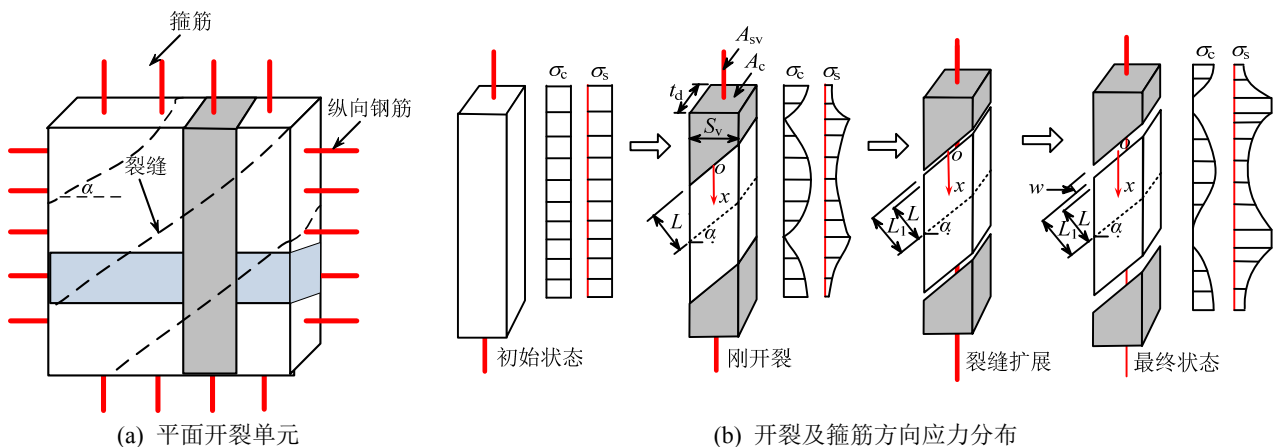


图 1 平面受力单元开裂过程及应力分布

Fig.1 Cracking process and stress distribution of plane-stress member

对于图 1 中箍筋方向的混凝土拉伸单元体, 取裂缝宽度的中点  $o$  作为分析坐标轴  $x$  轴的原点, 该点的钢筋和混凝土应力状态分别记为  $\sigma_s(0)$  和  $\sigma_c(0)$ , 且  $\sigma_c(0)=0$ 。根据  $x$  坐标轴方向受力平衡, 任一点  $x$  的钢筋及混凝土应力可表示为:

$$\sigma_s(x) = \sigma_s(0) - \frac{\pi d \tau_m x}{A_{sv}} \quad (1)$$

$$\sigma_c(x) = \frac{n \pi d \tau_m x}{A_c} \quad (2)$$

式中:  $d$  为箍筋直径;  $A_{sv}$  为单根箍筋截面积;  $A_c$

### 1.1 基本假定

1) 认为钢筋与混凝土间的粘结力在裂缝宽度范围内均匀分布。

2) 裂缝宽度采用钢筋与混凝土伸长量的差值表示。

3) 混凝土拉伸计算单元体的宽度取相邻钢筋(箍筋或纵筋)的中心间距, 厚度采用复合扭转分析中的剪力流有效厚度。

4) 忽略钢筋的销栓作用, 只考虑钢筋的纵向拉伸作用。

5) 考虑钢筋锈蚀作用时, 认为钢筋仅出现均匀锈蚀。

### 1.2 修正模型

对于平面受力钢筋混凝土开裂单元, 以箍筋受力方向为例, 斜裂缝的开展及应力分布如图 1 所示。图中  $L$  为刚出现开裂时裂缝间距的一半,  $L_1$  为裂缝出现后钢筋与混凝土共同长度的一半,  $w$  为裂缝的宽度,  $\alpha$  为裂缝面与纵向钢筋的夹角,  $\sigma_c$  和  $\sigma_s$  分别代表混凝土和箍筋应力。开裂前认为钢筋与混凝土共同受力, 应力沿着箍筋方向均匀分布; 出现开裂时, 开裂面的钢筋应力最大, 混凝土应力完全释放, 并且沿着钢筋方向往两端逐渐趋于均匀分布; 随着裂缝宽度的增大, 裂缝面钢筋应力逐渐增大, 且认为钢筋应力在裂缝宽度范围内均匀分布。

为选取的拉伸单元体的截面积,  $A_c=S_v t_d$ ,  $S_v$ 为箍筋间距,  $t_d$ 为等效剪力流厚度;  $n$ 为混凝土拉伸计算单元体内的箍筋肢数;  $\tau_m$ 为钢筋与混凝土的粘结应力, 本文采用 Eligehausen 等<sup>[17]</sup>的试验结果。

### 1.3 钢筋等效弹性模量

按照加权平均的方法, 考虑粘结滑移后钢筋的等效弹性模量  $\bar{E}_s$  可表示为:

$$\bar{E}_s = \frac{\bar{\sigma}_s}{\bar{\varepsilon}_s} \quad (3)$$

其中,  $\bar{\sigma}_s$  为计算长度  $L_1/\cos\alpha+w/(2\cos\alpha)$  范围内的箍筋应力, 加权平均后可表示为:

$$\bar{\sigma}_s = \frac{\bar{\sigma}_{s1} \frac{L_1}{\cos\alpha} + \sigma_s(0) \frac{w}{2\cos\alpha}}{L_1/\cos\alpha + w/(2\cos\alpha)} \quad (4)$$

$\bar{\varepsilon}_s$  为该长度范围内的箍筋应变:

$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{\bar{\sigma}_{s1} \frac{L_1}{\cos\alpha} + \varepsilon_s(0) \frac{w}{2\cos\alpha}}{E_s \frac{L_1}{\cos\alpha} + \varepsilon_s(0) \frac{w}{2\cos\alpha}} \quad (5)$$

式中:  $E_s$  为钢筋弹性模量;  $\bar{\sigma}_{s1}$  为单个裂缝间距范围内的箍筋平均应力, 可采用积分形式表示:

$$\bar{\sigma}_{s1} = \frac{\int_0^{\frac{L_1}{\cos\alpha}} \left( \sigma_s(0) - \frac{\pi d \tau_m x}{A_s} \right) dx}{L_1/\cos\alpha} \quad (6)$$

裂缝宽度  $w$  可用钢筋与混凝土的变形差表示:

$$w = 2 \int_0^{\frac{L}{\cos\alpha}} [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] dx \cdot \cos\alpha \quad (7)$$

钢筋混凝土共同长度的一半  $L_1$  可表示为:

$$L_1 = L + \int_0^{\frac{L}{\cos\alpha}} \frac{n \pi d \tau_m x}{A_c E_c} dx \cdot \cos\alpha \quad (8)$$

对于纵向钢筋的等效弹性模量, 只需将上述各式中  $\cos\alpha$  换成  $\sin\alpha$  即可。

### 1.4 裂缝间距的确定

一般情况下, 在开裂达到稳定阶段, 即裂缝间距满足最小裂缝间距要求之前, 伴随着新的裂缝的出现, 其间距是不断变化的。

对于单向受力构件, 取混凝土的平均裂缝间距为<sup>[16]</sup>:

$$l_m = 1.5 \frac{f_t A_{c,eq}}{n \tau_m \pi d_{eq}} \quad (9)$$

式中:  $f_t$  为混凝土抗拉强度;  $d_{eq}$  为等效成垂直于裂缝面后的钢筋直径, 按照箍筋直径考虑;  $A_{c,eq}$  为等效的混凝土受拉面积,  $A_{c,eq}=0.25\pi d_{eq}^2/\rho_r$ ,  $\rho_r$  为等效的受拉钢筋的配筋率, 参考 Hutchinson 等<sup>[18]</sup>的研究

成果,  $\rho_r = \rho_l \cos^4(-\alpha) + \rho_t \sin^4(-\alpha) + (\rho_l + \rho_t) \cdot \cos^2(-\alpha) \sin^2(-\alpha) \varepsilon_d / \varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_d$  和  $\varepsilon_r$  分别为主压应变和主拉应变,  $\rho_l$  和  $\rho_t$  分别为纵向钢筋和箍筋的配筋率。

### 1.5 钢筋本构关系的修正

本文计算采用图 2 所示的三折线钢筋应力-应变曲线, 图中  $f_y$  和  $f_u$  分别为钢筋的屈服强度和抗拉强度,  $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_{sh}$  和  $\varepsilon_u$  分别为钢筋的屈服应变、强化起始点应变和极限拉应变。修正时只需根据裂缝点钢筋的不同应力状态, 计算式(3)所示的平均等效弹性模量, 并且钢筋应力-应变关系按照修正的等效弹性模量满足线性相关。具体的修正方法可参考文献[16]。

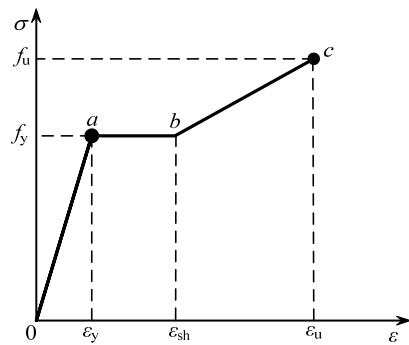


图 2 钢筋三折线应力-应变曲线  
Fig.2 Triple-line stress and strain relationship for reinforcement

## 2 材料劣化模型的选择

### 2.1 混凝土劣化模型

以处于一般大气环境的混凝土结构为例, 其抗压强度的衰减规律可以采用如下的表达式<sup>[19]</sup>:

$$f_c(t) = 1.4529 e^{-0.0246(\ln t - 1.7154)^2} f_c(0) \quad (10)$$

式中:  $f_c(t)$  为随时间  $t$  变化的混凝土抗压强度;  $f_c(0)$  为 28 d 混凝土强度。

### 2.2 钢筋劣化模型

选取服从衰减型的钢筋劣化模型, 钢筋锈蚀深度表示为<sup>[20]</sup>:

$$\delta(t) = 0.0166 \times 1.9718 i_0 t^{0.71} \quad (11)$$

式中:  $\delta(t)$  为钢筋锈蚀深度;  $i_0=37.8(1-\rho_0)^{-1.64}/c$  为初始锈蚀电流密度,  $\rho_0=27/(f_{cu}/1.25+13.5)$  为混凝土水灰比,  $f_{cu}$  为混凝土立方体抗压强度,  $c$  为保护层厚度。

则钢筋锈蚀率  $\eta_s(t)$  与时间的关系可表示为:

$$\eta_s(t) = \frac{4\delta(t)}{d} \quad (12)$$

式中,  $d$  为钢筋直径。

另外，钢筋起锈时刻的预测对于结构全寿命时变承载力的计算同样重要，对于一般大气环境下钢筋的起锈时间  $t_{cr}$ ，采用文献[21]提出的预测公式：

$$t_{cr} = \left( \frac{c - x_0}{k} \right)^2 \quad (13)$$

式中： $k$  为碳化系数，一般情况下应按照实测值采用，本文近似取 1.3； $x_0$  为碳化残量， $x_0 = (1.2 - 0.35 \times k^{0.5}) \cdot c - 6 \times (1.5 + 0.84 \times k) / (k_{ce} + 1.6)$ ， $k_{ce}$  为局部环境影响系数，一般环境下可取 1~1.5。

### 2.3 粘结强度劣化模型

为考虑钢筋锈蚀引起的钢筋与混凝土粘结强度的变化，采用文献[22]通过试验得到的锈蚀变形钢筋与混凝土的粘结影响系数  $\eta_b$ ，表达式为：

$$\eta_b = \begin{cases} 1 + 7.0\eta_s & , \eta_s \leq 5\% \\ 1.46 - 2.3\eta_s & , \eta_s > 5\% \end{cases} \quad (14)$$

则锈蚀后钢筋混凝土间的粘结强度  $\tau_{mc}$  可表示为：

$$\tau_{mc} = \eta_b \tau_m \quad (15)$$

## 3 计算流程

作者等曾推导了未考虑粘结滑移及钢筋锈蚀的复合受扭混凝土箱梁修正板-桁模型<sup>[15]</sup>，篇幅有限，不再赘述。对于考虑时变特性的构件承载力计算，计算过程中只需要在根据不同计算时刻对材料参数进行修正即可，其中最为主要的即为考虑钢筋锈蚀及粘结滑移效应的钢筋本构的修正。图 3 为计算程序中钢筋本构的修正流程。图 3 中  $i$  为箱梁截面第  $i$  个离散的单元体； $f_{si}(i)$  和  $f_{st}(i)$  分别为第  $i$  单元体中纵筋和箍筋的应力； $\tau_{ti}(i)$  和  $\gamma_{ti}(i)$  分别为第  $i$  单元体的剪切应力和剪切应变；其余参数同前。

## 4 试验验证

为验证上述考虑钢筋本构修正后复合受扭混凝土构件承载力计算程序的可靠性，分别采用纯扭构件和复合受扭箱梁构件的试验结果作为验证。

### 1) 锈蚀纯扭混凝土矩形构件

对文献[23]中不同钢筋锈蚀程度的矩形钢筋混凝土纯扭构件进行计算。试验梁混凝土设计强度 C30，保护层厚度为 30 mm。材料参数及模型尺寸参考文献[23]。表 1 给出了采用上述修正方法及程序得到的极限扭矩与试验值的对比情况，计算结果表明，对不同锈蚀构件计算误差基本控制在 10%以

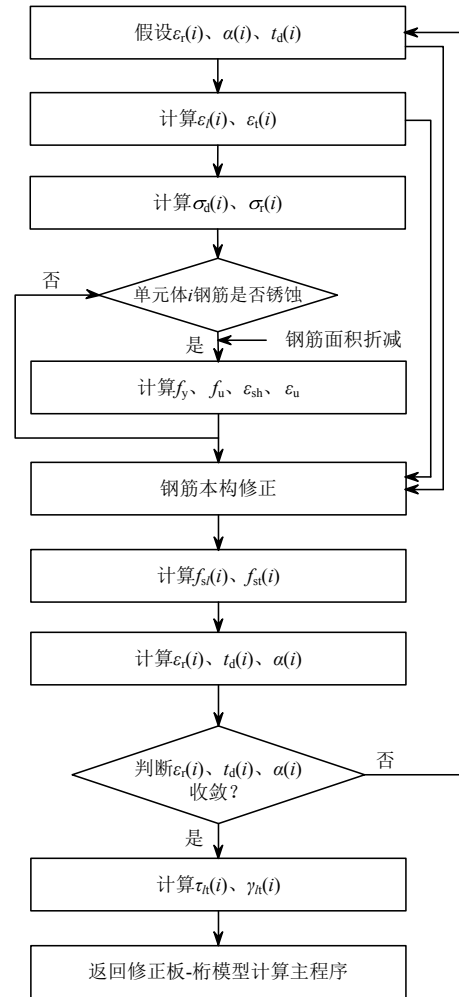


图 3 钢筋本构的修正流程

Fig.3 Flowchart for modifying constitutional relationship of reinforcement

表 1 极限扭矩计算值与试验值的对比

Table 1 Comparison of ultimate torque between predicted and test values

构件	锈蚀率/(%)	试验扭矩 $T_i/(kN \cdot m)$	计算扭矩 $T_c/(kN \cdot m)$	$T_i/T_c$
无锈蚀	0.0	7.10	6.92	1.03
箍筋 锈蚀	0.8	7.02	6.85	1.02
	2.2	7.00	6.72	1.04
	3.5	6.75	6.56	1.03
	4.8	6.50	6.42	1.01
	9.0	5.40	5.24	1.03
纵筋 锈蚀	3.0	7.00	6.78	1.03
	6.8	6.60	6.18	1.07
	8.0	6.30	5.83	1.08
纵筋、箍筋 均锈蚀	1.0	7.00	6.81	1.03
	1.5	6.75	6.74	1.00
	3.0	6.70	6.45	1.04
	3.5	6.50	6.38	1.02
	5.9	6.10	5.70	1.07

内,验证了上述钢筋修正本构在纯扭构件计算中的合理性。

### 2) 复合受扭连续箱梁构件

对文献[15]中作者完成的共 4 个复合受扭钢筋混凝土连续箱梁试验模型进行计算分析。其中 3 m+3 m 的两跨连续箱梁模型 2 个(L1 构件和 L2 构件),4 m+4 m 的两跨连续箱梁模型 2 个(L3 构件和 L4 构件),模型尺寸及材料可参考文献[15]。采用两跨跨中一侧腹板位置的偏心加载,加载示意图如图 4 所示。



图 4 典型箱梁构件加载照片

Fig.4 Loading picture for typical test member

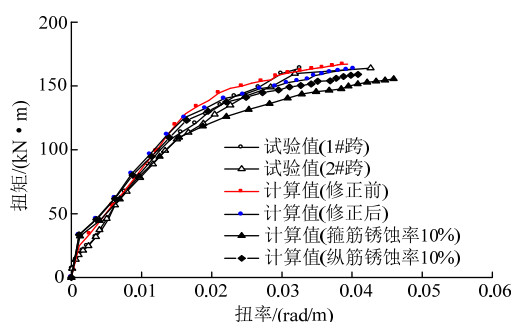
图 5 给出了钢筋本构模型修正前、后,跨中截面扭矩-扭率曲线与试验结果的对比情况。作为对比,图中也给出了纵筋锈蚀率和箍筋锈蚀率分别为 10%时对应的扭矩-扭率曲线。

由图 5 可知,在弹性阶段,钢筋本构修正与否对计算结果基本没有影响;随着混凝土裂缝的开展,相对于直接基于单向拉伸的钢筋材料模型,考虑粘结滑移效应后构件总体的抗扭刚度会降低,并且与试验结果吻合程度更好;同时,随着纵筋或箍筋锈蚀的出现,构件的裂后抗扭刚度和极限扭矩均会出现明显下降。图 5 中比较结果也验证了上述考虑钢筋锈蚀及粘结滑移效应的钢筋修正本构模型在混凝土构件复合受力分析中的适用性。

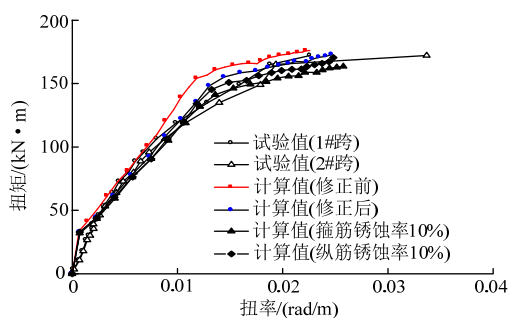
## 5 考虑钢筋锈蚀的复合受扭箱梁构件时变承载力分析

定义复合受力混凝土构件的抗扭承载力劣化系数  $\zeta(t)=T(t)/T(0)$ ,其中  $T(t)$  为  $t$  时刻的抗扭强度, $T(0)$  为初始抗扭强度。以文献[15]中 L1 构件为例,采用前文给出的一般大气环境下钢筋和混凝土材料的劣化模型,并且假定构件使用年限为 100 a,图 6 给出了 L1 构件的  $\zeta(t)$  变化曲线。由图可知:1) 初始阶段由于混凝土强度的增加,抗扭强度会有所增加,并在箍筋出现锈蚀之前( $t < 13$  a)基本处于稳定

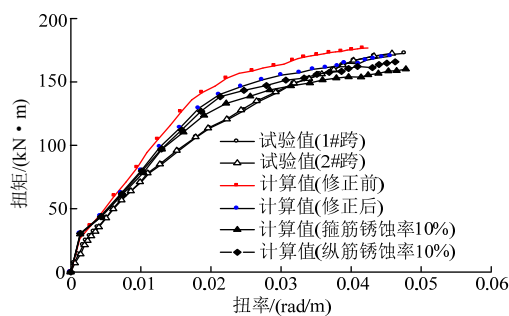
阶段;2) 超过箍筋起锈时刻后,抗扭强度出现明显下降,并在纵筋出现锈蚀前( $t < 23$  a)下降趋势基本为线性变化;3) 纵筋出现锈蚀以后,劣化系数整体的



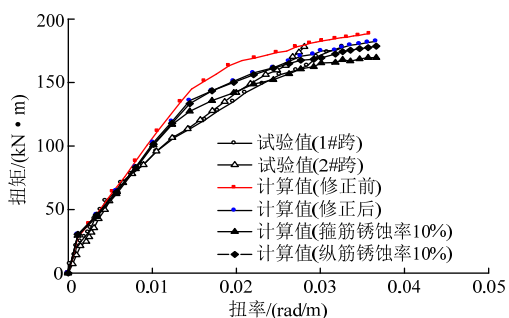
(a) L1 构件



(b) L2 构件



(c) L3 构件



(d) L4 构件

图 5 钢筋本构修正前后及考虑钢筋锈蚀时各试验构件跨中截面扭矩-扭率曲线的对比

Fig.5 Comparison of torque and twist relationship considering modification of constitutive relationship and corrosion for rebar



下降斜率将会明显增大; 4) 由于采用的是随时间逐渐减小的钢筋锈蚀模型, 因此, 随时间增大, 整体的劣化趋势也趋于平缓, 而不是呈直线分布; 5) 由计算可知, 在假定的一般大气环境下和扭转比受力条件下, 100 a 以后 L1 构件抗扭强度会出现 15% 左右的损失, 但该计算并未考虑荷载效应的耦合影响。

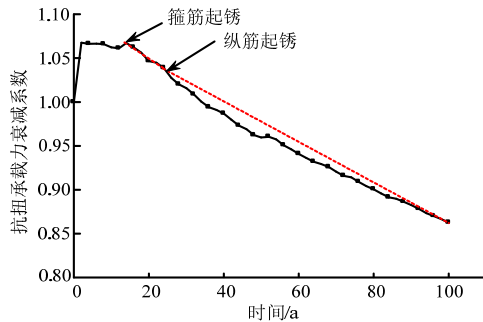


图 6 L1 构件抗扭强度的劣化曲线

Fig.6 Degradation prediction curve of torque strength for model L1

## 6 结论

本文在复合受扭钢筋混凝土箱梁修正板-桁模型的基础上, 进一步考虑钢筋的锈蚀和钢筋混凝土间的粘结滑移效应, 修正平面受力模型中锈蚀钢筋的本构模型, 引入考虑时间特性的钢筋与混凝土材料劣化模型, 进行复合受扭钢筋混凝土箱梁时变承载力的研究, 主要结论如下:

(1) 考虑复合受扭箱梁中混凝土开裂面与钢筋斜交(具有正交配筋)的情况, 推导了综合考虑粘结滑移效应及正交配筋效应的钢筋修正本构模型。

(2) 进一步引入一般大气环境下钢筋及混凝土材料的劣化模型, 研究给出了基于改进板-桁模型的复合受扭混凝土箱梁时变承载力计算方法及流程, 并编制了计算程序。

(3) 与纯扭锈蚀构件和复合受扭构件的试验对比, 验证了钢筋修正本构模型可以更好的模拟裂后构件抗扭刚度的退化情况。

(4) 算例结果表明: 在给定的一般大气环境和扭转比受力条件下, 计算试验模型构件在寿命期内抗扭强度将经历“提高-稳定-下降”的过程; 不考虑腐蚀气体、荷载及氯离子渗透等影响, 100 年后构件抗扭强度降低约 15%。

### 参考文献:

[1] 施锦杰, 孙伟. 混凝土中钢筋锈蚀研究现状与热点问题

分析[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(9): 1753—1764.

Shi Jinjie, Sun Wei. Recent research on steel corrosion in concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(9): 1753—1764. (in Chinese)

[2] 张伟平, 顾祥林, 金贤玉, 等. 混凝土中钢筋锈蚀机理及锈蚀钢筋力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2010(增刊 1): 327—332.

Zhang Weiping, Gu Xianglin, Jin Xianyu, et al. Study on corrosion mechanism of steel bars in concrete and mechanical performance of corroded steel bars [J]. Journal of Building Structures, 2010(Suppl 1): 327—332. (in Chinese)

[3] 赵羽习. 钢筋锈蚀引起混凝土结构锈裂综述[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(5): 1122—1134.

Zhao Yuxi. State-of-art of corrosion-induced cracking of reinforced concrete structures [J]. Journal of Southeast University (Nature Science Edition), 2013, 43(5): 1122—1134. (in Chinese)

[4] Khan I, François R, Castel A. Prediction of reinforcement corrosion using corrosion induced cracks width in corroded reinforced concrete beams [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 56: 84—96.

[5] Yu Bo, Yang Lufeng, Wu Ming, et al. Practical model for predicting corrosion rate of steel reinforcement in concrete structures [J]. Construction and Building Materials, 2014, 54(15): 385—401.

[6] 陆春华, 赵羽习, 金伟良. 锈蚀钢筋混凝土保护层锈胀开裂时间的预测模型[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 85—92.

Lu Chunhua, Zhao Yuxi, Jin Weiliang. Modeling of time to corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2): 85—92. (in Chinese)

[7] 项贻强, 程坤, 郭冬梅, 等. 基于热力耦合的钢筋混凝土锈胀开裂分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(8): 1444—1449.

Xiang Yiqiang, Cheng Kun, Guo Dongmei, et al. Analysis of RC bulge cracking by coupled thermal-mechanical method [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(8): 1444—1449. (in Chinese)

[8] 林刚, 向志海, 刘应华. 钢筋混凝土保护层锈胀开裂时间预测模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(7): 1125—1129.

Lin Gang, Xiang Zhihai, Liu Yinghua. Modeling of time to corrosion cracking in reinforced concrete structures [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2010, 50(7): 1125—1129. (in Chinese)

[9] Almusallam A A, Al-Gahtani A S, Aziz A R. Effect of reinforcement corrosion on bond strength [J]. Construction and Building Materials, 1996, 10(2): 123—129.

[10] Saad-Eldeen S, Garbatov Y, Soares C G. Corrosion-dependent ultimate strength assessment of aged box

- girders based on experimental results [J]. *Journal of Ship Research*, 2011, 55(4): 289—300.
- [11] 彭建新, 张建仁, 张克波, 等. 锈蚀 RC 桥梁弯曲抗力时变概率模型与试验研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(6): 125—132.
- Peng Jianxin, Zhang Jianren, Zhang Kebo, et al. Probabilistic resistance model and experimental investigation on corroded RC bridges [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(6): 125—132. (in Chinese)
- [12] 金伟良, 夏晋, 蒋遨宇, 等. 锈蚀钢筋混凝土梁受弯承载力计算模型[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(11): 64—70.
- Jin Weiliang, Xia Jin, Jiang Aoyu, et al. Flexural capacity of corrosion-damaged RC beams [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(11): 64—70. (in Chinese)
- [13] 孙彬, 牛荻涛, 王庆霖. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力计算方法[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(11): 1—6.
- Sun Bin, Niu Ditao, Wang Qinglin. Calculation method for flexural capacity of corroded RC beams [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(11): 1—6. (in Chinese)
- [14] 卢朝辉, 李海, 赵衍刚, 等. 锈蚀钢筋混凝土梁抗剪承载力预测经验模型[J]. *工程力学*, 2015, 32(增刊 1): 261—270.
- Lu Zhaohui, Li Hai, Zhao Yan'gang, et al. An empirical model for shear strength prediction of corroded RC beams [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(Suppl 1): 261—270. (in Chinese)
- [15] 程坤. 钢筋混凝土箱梁复合受力特性的试验与理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Cheng Kun. Experimental and theoretical study on mechanical behavior of RC box girder subjected to combined actions [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [16] 柏洁, 王志军, 高巧玲, 等. 考虑黏结滑移的 RC 非锚固区段平均本构关系[J]. *土木建筑与环境工程*, 2009, 31(2): 38—44.
- Bai Jie, Wang Zhijun, Gao Qiaoling, et al. Average constitutive relationship of unanchored zone of RC structure with considering bond and slip [J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2009, 31(2): 38—44. (in Chinese)
- [17] Eligehausen R, Popov E P, Bertero V V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations [R]. EERC Report 83/23. Berkeley: University of California, 1983.
- [18] Hutchinson T C, Wang T. Evaluation of crack spacing in reinforced concrete shear walls [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009, 135(5): 499—508.
- [19] 牛荻涛, 王庆霖. 一般大气环境下混凝土强度经时变化模型[J]. *工业建筑*, 1995, 25(6): 36—38.
- Niu Ditao, Wang Qinglin. Models of concrete strength changing with time in general air environment [J]. *Industrial Buildings*, 1995, 25(6): 36—38. (in Chinese)
- [20] Vu K A T, Stewart M G. Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models [J]. *Structural Safety*, 2000, 22(4): 313—333.
- [21] 董振平, 牛荻涛, 刘西芳, 等. 一般大气环境下钢筋开始锈蚀时间的计算方法[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 38(2): 204—209.
- Dong Zhenping, Niu Ditao, Liu Xifang, et al. Calculation of the initial time of steel-bar corrosion under atmospheric environment [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 38(2): 204—209. (in Chinese)
- [22] 赵羽习, 金伟良. 钢筋与混凝土粘结本构关系的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2002, 23(1): 32—37.
- Zhao Yuxi, Jin Weiliang. Test study on bond stress-strain relationship of concrete and steel bar [J]. *Journal of Building Structures*, 2002, 23(1): 32—37. (in Chinese)
- [23] 王凤池, 张霓, 刘统广, 等. 锈蚀钢筋混凝土梁的抗扭承载力[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2009, 25(6): 1074—1076.
- Wang Fengchi, Zhang Ni, Liu Tongguang, et al. Torsional bearing capacity of corroded RC beams [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science*, 2009, 25(6): 1074—1076. (in Chinese)