

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.019

考虑黏结性退化的锈蚀PC梁抗弯承载力计算方法*

马亚飞, 刘宇, 郭忠照, 王磊, 张建仁

(长沙理工大学土木工程学院, 湖南长沙 410114)

摘要: 钢绞线锈蚀降低了其与混凝土间的黏结性, 导致钢绞线与其周围混凝土间的变形不协调, 影响预应力混凝土梁的抗弯性能。采用快速锈蚀试验得到了不同锈蚀程度的16个有箍筋和无箍筋拉拔试件, 通过拉拔试验得到了试件开始滑移及破坏时的拉拔力; 回归了黏结折减系数与锈蚀率之间的关系式, 并将其融入到预应力混凝土梁的抗弯承载力分析模型中, 提出了考虑黏结性退化的锈蚀预应力混凝土梁抗弯承载力计算方法。试验结果表明: 有箍筋试件的黏结强度大于无箍筋试件; 随着钢绞线锈蚀水平的增大, 箍筋对黏结强度退化的约束作用逐渐减小; 黏结折减系数随锈蚀率的增加呈指数函数规律递减。将理论值与本文及已有文献中锈蚀预应力混凝土梁抗弯性能试验结果进行了比较, 计算结果表明本方法预测精度较高, 最大误差在6%以内, 验证了本抗弯承载力计算方法的适用性, 可为服役预应力混凝土桥梁抗弯承载力评估提供参考。

关键词: 桥梁工程; 预应力混凝土; 锈蚀; 黏结退化; 抗弯承载力

中图分类号: U446 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0639-08

Calculation Method for Flexural Capacity of Corroded PC Beams Considering Bond Degradation

MA Yafei, LIU Yu, GUO Zhongzhao, WANG Lei, ZHANG Jianren

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Strand corrosion degrades the bond behavior between the strand and concrete, resulting in deformation incompatibility between the strand and surrounding concrete and affecting the flexural performance of the prestressed concrete beams. Sixteen pull-out specimens with and without stirrups under different strand corrosion levels are obtained by accelerated corrosion test. The pull-out forces corresponding to the initial slip and failure are measured, respectively. The relationship between the bond degradation coefficient and strand corrosion loss is regressed. Following this, a modified calculation method for the flexural capacity of corroded prestressed concrete beams considering bond degradation is proposed by incorporating the bond degradation coefficient. The experimental results show that the bond strength of the pull-out specimens with stirrup is larger than that of without stirrup. The effect of the stirrup on the deterioration of bond strength decreases as corrosion loss increases. The bond degradation coefficient decreases exponentially with the increase of strand corrosion loss. The theoretical values are compared with the test results of corroded prestressed concrete in this paper and those avail-

* 收稿日期: 2018-07-28; 修回日期: 2018-09-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB057705)、国家自然科学基金项目(51508036, 51678069)、湖南省自然科学基金项目(2017JJ3325)、湖南省教育厅科学研究项目(17B012)资助

作者简介: 马亚飞(1984-), 男, 副教授, 博士。主要从事桥梁可靠性及耐久性评估研究。Email: yafei.ma@csust.edu.cn

able in the published literatures. The calculation results show that the method has a higher prediction accuracy, and the maximum error is less than 6%, which demonstrates the applicability of the present method. The proposed method may provide a reference for the evaluation of the bending bearing capacity of existing prestressed concrete bridges.

Keywords: bridge engineering; prestressed concrete; corrosion; bond degradation; flexural capacity

引 言

预应力混凝土(PC)桥梁因其在强度、刚度及抗裂性等方面具有显著优势,在桥梁结构中被广泛应用。长期以来,预应力混凝土结构被认为具有较强抵御环境侵蚀的能力。然而,在实际工程中,仍出现了一些预应力混凝土结构耐久性失效的事故,其中预应力筋锈蚀引起的破坏占绝大多数^[1]。因此,锈蚀预应力混凝土结构的承载能力评价一直是研究的热点。

锈蚀导致钢绞线截面积减小、屈服强度和延伸率降低,从而降低构件的承载力。M. K. Elbatanouny等^[2]采用声发射的无损检测方法,评估了快速锈蚀预应力混凝土试件的锈蚀程度;M. S. Darmawan等^[3]通过试验发现钢绞线具有明显的坑蚀特征;罗小勇等^[4]发现钢绞线的塑性变形随腐蚀率的增加迅速减小,当腐蚀率约为9.9%时,钢绞线完全失去塑性;李富民^[5]通过对断裂后的锈蚀钢绞线进行扫描电镜分析,指出锈蚀钢绞线的破坏特征由蚀坑底部珠光体团的位向决定。锈蚀导致的受力钢筋与混凝土间黏结性能退化是受弯构件承载力退化的另一重要原因^[6-7]。现有对锈蚀钢筋混凝土受弯构件的承载力研究中,多采用锈蚀钢筋与混凝土间的协同工作系数来反映黏结性退化的影响^[8];T. E. Maaddawy^[9]通过锈蚀钢筋混凝土梁的非线性弯曲性能来预测钢筋与混凝土间的黏结退化效应。

在锈蚀预应力混凝土受弯构件的承载力研究中,一些学者选取不同的损伤指标,如裂缝宽度、钢筋截面损失率及锈蚀损伤范围等,通过试验和有限元等分析手段,建议了不同的协同工作分析模型。王磊等^[10]采用反推法量化了变形协调系数,得到了变形协调系数随各影响因素的变化规律。F. Li等^[11]通过拉拔试验研究了锈蚀对钢绞线与混凝土间黏结性的影响,结果表明黏结滑移曲线由上升和下降段两部分组成。钢绞线与混凝土间的黏结机理与普通钢筋混凝土构件存在差异,若直接将钢筋

与混凝土间的黏结退化模型用于锈蚀PC梁的抗弯承载力计算,可能会产生较大误差。在锈蚀PC梁抗弯性能评价方面,对于无黏结PC梁,通常采用钢绞线应力增量法来计算钢绞线的整体变形量,通过考虑钢绞线与混凝土间的变形不协调来预测抗弯承载力^[12-13]。然而,对于有黏结PC梁,鲜有研究在其抗弯承载力分析中考虑钢绞线与混凝土黏结性退化的影响。

本文在已有研究的基础上,开展了不同锈蚀程度锈蚀钢绞线拉拔试验,得到了锈蚀率与黏结折减系数的关系表达式;通过黏结折减系数来考虑锈蚀钢绞线与混凝土之间的变形不协调,进而提出了考虑黏结性退化的锈蚀后张预应力混凝土受弯构件承载力计算方法。

1 钢绞线与混凝土间的黏结性

1.1 试验设计

通过开展拉拔试验来研究锈蚀钢绞线与混凝土间的黏结性能。为防止锈蚀过程中钢绞线在低锈蚀率时导致的锈胀开裂,试件横截面尺寸为150 mm×150 mm,保护层厚度为40 mm,考虑到预应力传递长度较大但预应力损失不能过大,长度取1 200 mm。预应力钢绞线采用 $\Phi 15.2(1 \times 7)$ 1860级钢绞线。混凝土配合比为水泥:水:砂:碎石=1:0.45:1.65:2.65。通过多点控制钢绞线的位置,确保钢绞线处于试件中心,以降低拉拔过程中偏心受拉对试验结果的影响。试件张拉端采用PVC套管设置100 mm无黏结段,减小在拉拔过程中张拉端的应力集中。试件截面设计及配筋如图1所示。试验分为两组,共16个试件:8根无箍筋试件,编号为S0~S7;8根有箍筋试件,编号为R0~R7。S0和R0为基准试件,其余试件中钢绞线进行电化学加速锈蚀,通过控制电流密度和通电时间来获得不同锈蚀程度的试件。

在试件张拉端设置千斤顶用于加载,端部采用夹片锚将钢绞线锚住进行张拉,荷载通过反力装置

传递给钢绞线,反力装置尺寸与试件截面一致。在试件与张拉千斤顶间设置力传感器实时测量拉拔力,拉拔试验装置如图2所示。试验结束后,将钢绞线取出,经12%盐酸清洗→清水冲洗→石灰水中和→清水冲洗→烘干→长度及质量测量,得到钢绞线质量锈蚀率 η 。拉拔试验在30 t万能试验机上进行。加载过程中,观察试件裂缝发展情况,记录每个试件在拉拔端开始滑移时的拉拔力 F_p 和最大拉拔力 F_m ,实测结果见表1。对于非锈蚀试件S0和R0,在达到钢绞线极限拉力时自由端未出现滑移, F_p 用“—”表示,基于以往钢绞线拉拔试验,取 F_p 和 F_m 相等^[14]。

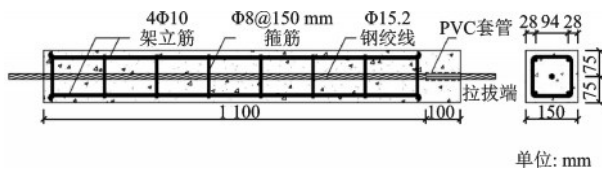


图1 截面及配筋设计

Fig.1 Dimension and reinforcement of specimen



图2 拉拔试验装置

Fig.2 Setup of pull-out test

表1 拉拔试验结果

Table 1 Results of pullout test

试件	$\eta/\%$	F_p/kN	F_m/kN	F_p/F_m	试件	$\eta/\%$	F_p/kN	F_m/kN	F_p/F_m
S0	0	—	265	1	R0	0	—	265	1
S1	1.19	81	198	0.409	R1	4.13	110	215	0.512
S2	2.02	57	183	0.311	R2	5.78	95	210	0.452
S3	4.59	35	175	0.200	R3	5.56	60	185	0.324
S4	6.07	9	129	0.070	R4	8.07	30	112	0.268
S5	5.82	8	130	0.062	R5	7.97	20	111	0.180
S6	5.54	7	103	0.068	R6	8.19	15	102	0.147
S7	6.49	5	110	0.045	R7	9.26	10	85	0.118

拉拔试验过程中,拉拔端首先出现沿钢绞线纵向方向的劈裂裂缝,且有逐渐加宽的趋势。当荷载接近最大拉拔力时,钢绞线沿拉拔方向发生旋转,这是由于钢绞线为螺纹形状,当钢绞线与混凝土间的化学胶着力破坏后,钢绞线沿着混凝土浇筑时形成的旋转路径旋转,到一定角度时旋转速度降低至

试件破坏时完全停止旋转,并且混凝土出现崩裂。随锈蚀率的增加,破坏模式由钢绞线的断裂转变为钢绞线的拔出破坏。

图3为锈蚀率与最大拉拔力的关系。由图3可知,随锈蚀率的增加,最大拉拔力近似呈线性下降。对于有箍筋试件,箍筋的存在增强了钢绞线与混凝土间的摩擦力和咬合力,对钢绞线与混凝土间的相对滑移有一定限制作用。因此,在相同锈蚀水平下,有箍筋试件的黏结强度高于无箍筋试件。随锈蚀率的继续增大,两组试件黏结强度的差值逐渐变小,这是由于锈蚀率增大时,锈蚀产物增多,钢绞线与混凝土间的摩擦力和机械咬合力明显减小,箍筋逐渐失去对混凝土的套箍作用,箍筋对最大拉拔力的影响逐渐减弱。

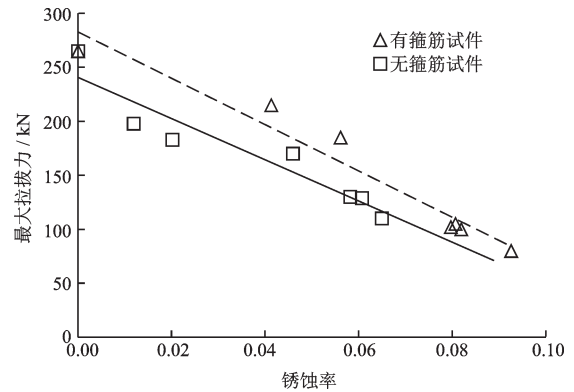


图3 最大拉拔力与锈蚀率的关系

Fig.3 Relationship between maximum pull-out force and corrosion rate

1.2 黏结折减系数

钢绞线锈蚀会降低其与混凝土间的黏结性,在拉力作用下,钢绞线与混凝土之间可能会脱黏,导致钢绞线应变与混凝土的应变不协调,平截面假定不再成立,在PC梁抗弯承载力计算模型中应予以考虑。将黏结折减系数定义为锈蚀钢绞线的应变增量与该位置处的混凝土应变增量之比,即:

$$\Omega = \frac{\Delta\epsilon_p}{\Delta\epsilon_{pc}} \quad (1)$$

式中, Ω 为黏结折减系数; $\Delta\epsilon_p$ 为锈蚀预应力钢绞线的应变增量; $\Delta\epsilon_{pc}$ 为锈蚀预应力钢绞线位置处的混凝土应变增量。

钢绞线与其周围混凝土间的应变难以直接精确测得,由于钢绞线锈蚀影响其与混凝土间的黏结

性,导致拉拔力发生变化,因此,本文结合试验,采用实测的拉拔力来反映黏结力的变化。钢绞线与混凝土间开始发生位移时,即黏结力开始退化,此时拉拔力大小为 F_p ;拉拔过程中最大拉拔力为 F_m 。本文采用开始出现滑移时的拉拔力和最大拉拔力的比值 F_p/F_m 表征黏结折减系数。根据前文试验结果,图4给出了有箍筋试件和无箍筋试件黏结折减系数与锈蚀率的关系。由图可知,随锈蚀率的增大,黏结折减系数逐渐减小。通过对试验数据进行拟合,得到如下关系式:

$$\Omega = 0.98e^{-26.447} \quad (2)$$

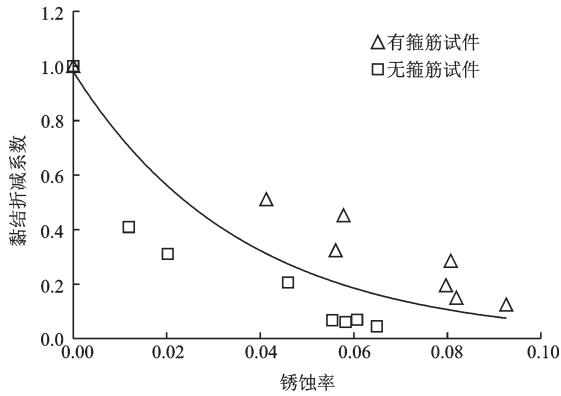


图4 黏结折减系数与锈蚀率的关系

Fig.4 Relationship between bond degradation coefficient and corrosion rate

2 承载力计算方法

图5为预加力和荷载作用下,预应力混凝土梁

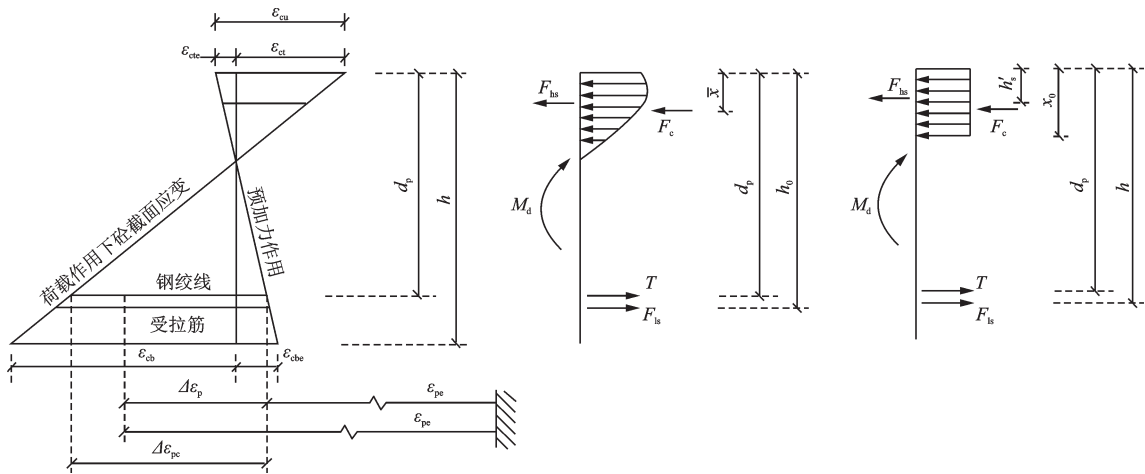


图5 抗弯承载力计算

Fig.5 Calculation diagram of bending bearing capacity

注: h 为截面高度; d_p 为钢绞线重心到混凝土上缘的距离; ϵ_{ct} 和 ϵ_{cb} 分别为混凝土上、下缘应变;混凝土极限压应变 $\epsilon_{cu}=0.0033$; ϵ_{cte} 和 ϵ_{cbe} 分别为预应力作用上、下缘混凝土的初始应变

抗弯承载力的计算图示。

由图5可知,受压区混凝土的合力为:

$$F_c = \int_0^x \sigma(\epsilon_c) b dy = \frac{\sigma_0 b \epsilon_c x_0}{\beta \epsilon_0} \left(1 - \frac{\epsilon_c}{3\epsilon_0}\right) \quad (3)$$

式中, x_0 为等效矩形压应力图的计算受压区高度; y 为计算点至截面顶面的距离; b 为梁宽; β 为矩形应力分布的高度系数, $\beta=0.8$ 。

预应力钢绞线拉力大小为:

$$T = A_p (1 - \eta) f_{ps} \quad (4)$$

$$f_{ps} = f_{se} + \Delta \epsilon_{pc} \Omega E_p \quad (5)$$

式中, A_p 为未锈蚀钢绞线截面积; f_{ps} 为钢绞线拉应力; f_{se} 为钢绞线的有效预应力; E_p 为钢绞线的弹性模量。

考虑黏结后,由平截面假定可得:

$$\frac{\epsilon_{cu}}{x_0} = \frac{\Delta \epsilon_{pc}}{d_p - x_0} \quad (6)$$

由水平方向内力平衡,有:

$$F_{hs} + F_c = T + F_{ls} \quad (7)$$

式中, F_{hs} 为受压钢筋受力; F_{ls} 为受拉钢筋受力; $F_{hs} = A_{hs} f_{hs}$, $F_{ls} = A_{ls} f_{ls}$, A_{hs} 为受压钢筋截面积, f_{hs} 为受压钢筋屈服强度, A_{ls} 为受拉钢筋截面积, f_{ls} 为受拉钢筋屈服强度。

联立式(5)~(7),可得 $\Delta \epsilon_{pc}$ 与 Ω 的关系式为:

$$\Delta \epsilon_{pc} = \frac{1}{\Omega E_p} \left[\frac{F_{hs} + F_c - F_{ls}}{A_p (1 - \eta)} - f_{se} \right] \quad (8)$$

由式(6)和式(8),可得 x_0 与 Ω 的关系式为:

$$x_0 = \frac{d_p}{\frac{\Delta \epsilon_{pc}}{\epsilon_{cu}} + 1} = \frac{\epsilon_{cu} d_p}{\frac{1}{\Omega E_p} \left[\frac{F_{hs} + F_c - F_{ls}}{A_p (1 - \eta)} - f_{se} \right] + \epsilon_{cu}} \quad (9)$$

对受压区混凝土合力 F_c 作用点取矩, 可得抗弯承载力计算公式为:

$$M_u = F_{ls} h_0 + T d_p - F_c \frac{x_0^2}{2} - F_{hs} h'_s \quad (10)$$

将式(7)、(9)代入式(10)中, 再由黏结折减系数与钢绞线锈蚀率的关系式(2), 可得:

$$M_u = F_{ls} h_0 + (F_{hs} + F_c - F_{ls}) d_p - \frac{F_c}{2} \left\{ \frac{\epsilon_{cu} d_p}{\frac{1}{\Omega E_p} \left[\frac{F_{hs} + F_c - F_{ls}}{A_p (1 - \eta)} - f_{se} \right] + \epsilon_{cu}} \right\}^2 - F_{hs} h'_s \quad (11)$$

3 模型验证

3.1 试验设计

设计制作了5片后张预应力混凝土矩形梁, 截面尺寸为 $(150 \times 220 \times 2\,000) \text{ mm}^3$, 计算跨径为 $1\,800 \text{ mm}$ 。预应力筋采用 $\Phi 15.2(1 \times 7)$ 1860级钢绞线, 其重心至梁下边缘距离为 60 mm , 预留孔洞采用拉拔钢管成型, 预留孔道直径为 32 mm 。控制

张拉应力为 $1\,395 \text{ MPa}$, 实测材料性能见表2。纵向受拉钢筋采用 $2\Phi 8$ HPB235钢筋, 架立钢筋采用 $2\Phi 12$ HRB335钢筋, 箍筋采用 $\Phi 8$ HPB235钢筋, 箍筋间距为 90 mm 。混凝土保护层厚度为 20 mm 。混凝土28天立方体抗压强度为 31.8 MPa 。采用电化学快速锈蚀方法对其进行锈蚀。锈蚀完成后, 采用三分点加载开展受弯性能试验, 梁的尺寸和加载装置如图6所示。实测锈蚀率及极限荷载时梁的裂缝数量、平均间距和抗弯承载力见表3。

表2 钢绞线和普通钢筋力学性能

类型	d/mm	f_y/MPa	E/GPa
钢绞线	15.2	1 830	193
HRB335	12	375	2.0
HPB235	8	290	2.1

表3 PC梁承载力试验结果

试验结果	锈蚀率/%	裂缝数量	裂缝平均间距/cm	抗弯承载力/(kN·m)
B0	0	7	125	37.8
B1	2.7	7	122	33.0
B2	6.2	7	120	31.5
B3	9.1	5	106	28.8
B4	10.6	4	87	21.0

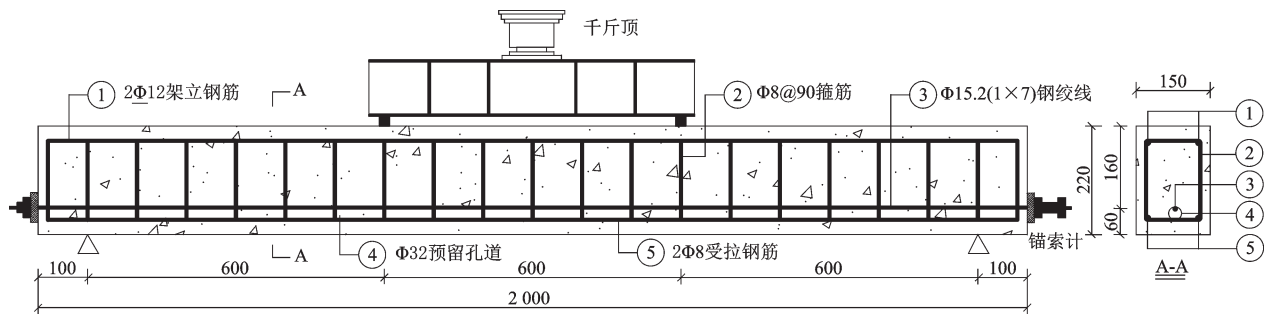


图6 构件尺寸及测点布置

Fig.6 Dimension and measurement point of specimens

3.2 试验结果

钢绞线锈蚀后, 锈蚀产物体积增大产生锈胀力, 进而产生锈胀裂缝。在每一级加载后, 观测裂缝的高度、走向及宽度, 并用记号笔绘出裂缝的形状。梁的裂缝分布如图7所示, 裂缝间距和数量

见表3。

由表3和图7可知, 对于锈蚀率较小的梁, 裂缝数量较多且间距较大。随着锈蚀率的增大, 裂缝数量和平均裂缝间距均减小。混凝土开裂将引起受拉应变能损失, 钢绞线与混凝土间的良好黏结性有助于二者协调变形, 从而减小混凝土开裂

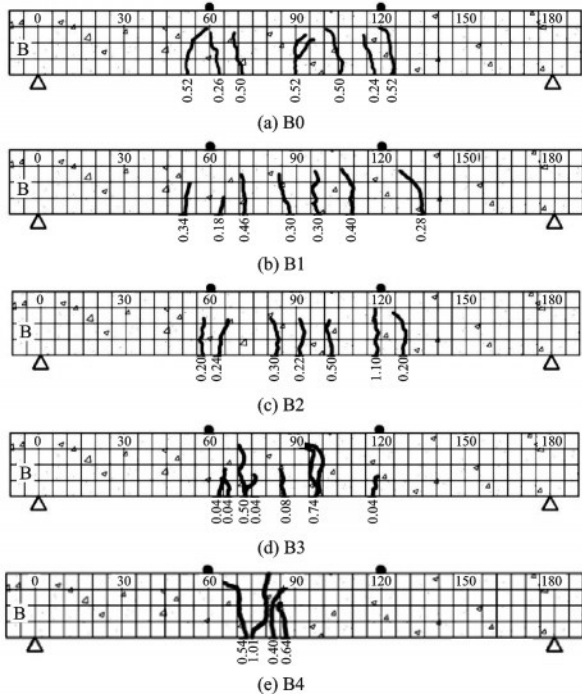


图7 试验梁的裂缝分布

Fig.7 Crack distribution of beam

引起的混凝土拉应变损失,使得裂缝周边混凝土剩余拉应变仍较大,裂缝周边混凝土在后续加载过程中易产生新裂缝,因此,混凝土裂缝数量多且裂缝间距大。当黏结力退化甚至失效时,开裂能量损失较大,裂缝周边混凝土剩余拉应变较小且不易出现新裂缝,导致混凝土裂缝数量少且裂缝间距小。这也进一步证明了钢绞线与混凝土间黏结性的重要性。

表3给出了各试验梁抗弯承载力大小。5片试验梁均为正截面受弯破坏,随钢绞线锈蚀率的增加,试验梁抗弯承载力逐渐减小。其中,梁B0、B1和B2由于钢绞线锈蚀率较小,在破坏前梁截面产生较大的塑性变形,而梁B3和B4由于钢绞线锈蚀率较大,梁截面开裂后混凝土退出工作,钢筋很快达到屈服应力,并迅速达到极限强度,试验梁呈脆性破坏。

3.3 理论值与实测值的比较

采用本文提出的后张PC梁抗弯承载力计算方法,给出了抗弯承载力的理论值和计算值,如图8所示。由图可知,对于锈蚀率不同的5片梁,计算误差分别为0.6%、3.4%、3.6%、3.0%和4.0%,平均误差为2.9%,计算值和理论值较为接近,说明采用本文

方法可以得到较好的预测结果。

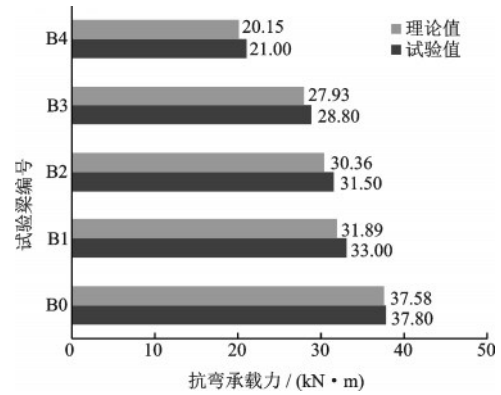


图8 抗弯承载力理论值与试验值

Fig.8 Theoretical and measured values of bearing capacity

为进一步验证本文方法的适用性,选取文献[5]中的5片梁、文献[15]中的4片梁以及文献[16]中3片试验梁进行分析。文献[5]获得5片锈蚀预应力混凝土矩形梁,计算跨径为1800 mm,梁号为POB2~POB6,锈蚀率分别为2%、1.51%、1.98%、1.6%和0%。文献[15]中试验梁截面为T形截面,计算跨径为4600 mm,梁号为S1~S4,锈蚀率分别为0%、4.23%、7.38%和10.14%。文献[16]中试验梁截面为矩形截面,计算跨径为2700 mm,梁号为Beam1~Beam3,锈蚀率分别为0%、14%和20%。各试验梁的抗弯承载力理论值与试验值如图9~11所示。

由图9~11可知,文献[5]中梁POB2~POB6的计算误差分别为1.5%、1.7%、3.3%、0.4%和3.0%,平均误差为2.0%。文献[15]中梁S1~S4的计算误差分别为1.3%、1.5%、0.9%和1.9%,平均误差为1.4%。文献[16]中梁Beam1~Beam3的计算误差分别为5.6%、1.8%和4.1%,平均误差为3.9%。结

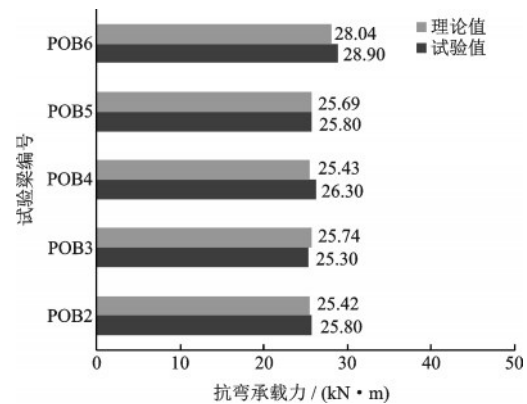


图9 文献[5]理论值与试验值

Fig.9 Theoretical and experimental results in reference [5]

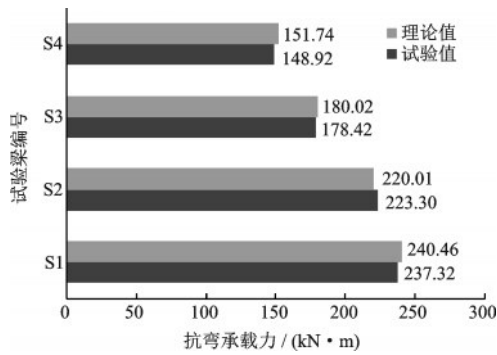


图 10 文献[15]理论值与试验值

Fig.10 Theoretical and experimental results in reference [15]

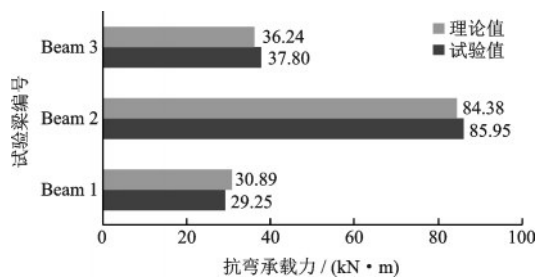


图 11 文献[16]理论值与试验值

Fig.11 Theoretical and experimental results in reference [16]

合本文和上述文献的计算结果可知,计算最大误差均在6%以内,17片梁的平均计算误差为2.5%,进一步验证了本文方法的适用性。

4 结 语

本文开展了不同锈蚀情况下钢绞线的拉拔试验,测得了试件开始滑移拉拔力和最终拉拔力,发现在锈蚀率较低时,箍筋的存在有助于提高钢绞线与混凝土的黏结;锈蚀率较大时,箍筋的套箍作用减弱,其对黏结性的贡献逐渐减小。在试验的基础上,给出了钢绞线与锈蚀水平的关系表达式,并将其融入到锈蚀PC梁的承载力计算中,提出了考虑黏结性退化的锈蚀PC梁抗弯承载力计算方法,采用本方法得到的计算值与本文试验和现有文献中的试验结果进行了比较,计算误差均在6%以内,验证了本文方法的适用性。本文由锈蚀钢绞线拉拔试验得到的黏结折减系数是通过有限样本得到的,日后仍需进一步验证。

参考文献:

[1] Wang L, Zhang X, Zhang J, et al. Effect of insufficient

grouting and strand corrosion on flexural behavior of PC beams[J]. Construction and Building Materials, 2014, 53: 213-224.

- [2] Elbatouny M K, Ziehl P H, Larosche A, et al. Acoustic emission monitoring for assessment of prestressed concrete beams[J]. Construction and Building Materials, 2014, 58: 46-53.
- [3] Darmawan M S, Stewart M G. Spatial time-dependent reliability analysis of corroding pretensioned prestressed concrete bridge girders[J]. Structural Safety, 2007, 29: 16-31.
- [4] 罗小勇, 李 政. 无粘结预应力钢绞线锈蚀后力学性能研究[J]. 铁道学报, 2008, 30(2): 108-112.
Luo X Y, Li Zh. Mechanical performance of corroded unbonded prestressed steel stranded wires[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(2): 108-112. (in Chinese)
- [5] 李富民. 氯盐环境钢绞线预应力混凝土结构的腐蚀效应[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
Li F M. Effect of steel strands corrosion on prestressed concrete structures under chloride environment[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008. (in Chinese)
- [6] Wang L, Zhang X, Zhang J, et al. Simplified model for corrosion-induced bond degradation between steel strand and concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 29(4): 04016257.
- [7] Ma Y, Guo Z, Wang L, et al. Experimental investigation of corrosion effect on bond behavior between reinforcing bar and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 240-249.
- [8] Ma Y, Zhang J, Wang L, et al. Probabilistic prediction with Bayesian updating for strength degradation of RC bridge beams[J]. Structural Safety, 2013, 44: 102-109.
- [9] Maaddawy T E. Analytical model to predict nonlinear flexural behavior of corroded reinforced concrete beams[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(4): 550-559.
- [10] 王 磊, 戴理朝, 张旭辉, 等. 腐蚀对预应力筋与混凝土间变形协调性的影响[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(4): 5-10.
Wang L, Dai L Zh, Zhang X H, et al. Impact of corrosion on the compatibility between the prestressed strand and the concrete [J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(4): 5-10. (in Chinese)
- [11] Li F, Yuan Y. Effects of corrosion on bond behavior between steel strand and concrete [J]. Construction & Building Materials, 2013, 38(2): 413-422.
- [12] Naaman A E, Burns N, French C, et al. Stresses in un-

bonded prestressing tendons at ultimate: recommendation[J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(4):518-529.

[13] 王磊, 张旭辉, 张建仁. 局部无压浆PC构件抗弯性能试验及计算方法[J]. 中国公路学报, 2014, 27(10): 64-75.

Wang L, Zhang X H, Zhang J R. Experimental study and calculation for flexural behavior of locally ungrouted PC beams [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(10): 64-75. (in Chinese)

[14] Dang C N, Murray C D, Floyd R W, et al. Analysis of bond stress distribution for prestressing strand by standard test for strand bond [J]. Engineering Structures,

2014, 72: 152-159.

[15] 余芳. 钢绞线腐蚀后的部分预应力混凝土梁受力性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.

Yu F. Study on mechanical performance of partial prestressed concrete beams with corroded strand [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)

[16] Rinaldi Z, Imperatore S, Valente C. Experimental evaluation of the flexural behavior of corroded P/C beams [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(11): 2267-2278.

(本文责编:池营营)



“多灾作用下工程结构全寿命可靠性研究”专辑征稿函

我国具有自然灾害种类多、强度大、区域广、易灾区高度重叠等特点。传统设计方法在进行结构设计时仅考虑单一灾害作用,忽略了多次、多种灾害间的耦合效应,这势必对基础设施安全性、区域城市韧性等带来极大隐患。因此,开展多种灾害间联合概率分布研究及结构抗多种灾害联合作用下的全寿命风险评估和设计方法研究,对提升我国工程结构的整体防灾减灾能力具有重要意义。

《防灾减灾工程学报》现针对工程结构在多灾害作用下存在的研究问题和难点,拟于2021年第1期出版“多灾作用下工程结构全寿命可靠性研究”专辑,欢迎从事相关科研工作的专家、学者踊跃投稿。本次征文拟在以下3个领域进行:(1)多灾害耦合机理与荷载模型;(2)全寿命工程结构抗多灾分析及设计理论;(3)工程结构抗多灾性能提升关键技术研究。

本专辑稿件征集截止日期为2020年11月15日,投稿邮箱:fzjzgcxb@vip.163.com,投稿时请注明“多灾作用下结构可靠性”专辑,编辑部联系电话:025-84285560,84285517。

《防灾减灾工程学报》编辑部