

文章编号:1673-2049(2018)05-0134-08

# 腐蚀预应力混凝土梁抗剪性能试验

羊日华<sup>1,2</sup>, 刘欢<sup>1</sup>, 张旭辉<sup>1,3</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 张建仁<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000;  
3. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:**为研究预应力筋腐蚀对预应力混凝土梁抗剪性能的影响,设计制作了4片预应力混凝土梁,采用外加恒电流法对单侧弯剪区局部预应力筋进行了快速腐蚀,并对不同锈蚀程度混凝土梁进行了抗剪试验,分析了预应力筋腐蚀对梁开裂、变形、钢筋受力、破坏形态以及抗剪承载力的影响,并在试验基础上对锈蚀PC梁抗剪承载力计算方法进行了探讨。结果表明:相同剪跨比下预应力筋腐蚀对混凝土梁的破坏形态影响很小,但对构件裂缝发展影响较大,引起开裂荷载显著降低;开裂前,预应力筋腐蚀对其刚度影响较小;开裂后,腐蚀引起刚度退化较为明显;预应力筋腐蚀导致相同荷载下箍筋、纵筋应变增大,构件抗剪承载力退化;预应力筋腐蚀率为3.2%,7.9%,13.2%的混凝土梁抗剪承载力分别下降5.8%,9.1%,15.5%;考虑腐蚀预应力筋截面减小,采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)公式对PC梁抗剪承载力计算具有较高的计算精度。

**关键词:**桥梁工程;预应力混凝土梁;腐蚀;抗剪性能;试验研究

**中图分类号:**U448 **文献标志码:**A

## Experiment on Shear Behavior of PC Beams After Prestressed Tendons Corrosion

YANG Ri-hua<sup>1,2</sup>, LIU Huan<sup>1</sup>, ZHANG Xu-hui<sup>1,3</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, ZHANG Jian-ren<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China;  
2. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, Hunan, China; 3. College of Civil  
Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China)

**Abstract:** In order to study the influence of prestressed tendon corrosion on shear behavior of prestressed concrete (PC) beams, four PC beams were designed and manufactured. The prestressed tendon in the area of one-sided bending and shearing local zone was rapidly corroded by galvanostatic method, and the shear test was performed on the concrete beams with different corrosion rates of steel strands. The influence of corrosion of prestressed tendons on the cracking, deformation of steel beams, stress of reinforced bars, failure modes and shear bearing capacity were analyzed, and the calculation method of shear bearing capacity of corroded PC beams was discussed on the basis of test. The study results shows that the corrosion of prestressed tendons under the same shear-span ratio has little effect on the failure modes of concrete beams, but it has a greater impact on the development of component cracks, causing a significant reduction in cracking loads. Before cracking, the corrosion of prestressed tendon has

收稿日期:2018-06-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51678069,51708477);湖南省研究生科研创新项目(CX2017B472);

中国博士后科学基金项目(2017M620350,2018T110837)

作者简介:羊日华(1979-),女,湖南新化人,湖南城市学院讲师,长沙理工大学工学博士研究生,E-mail:yrhzhj@163.com。

通信作者:王磊(1979-),男,吉林榆树人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:leiwang@csust.edu.cn。

little effect on its stiffness; after cracking, the stiffness degradation caused by corrosion is more obvious. Corrosion of prestressed tendon leads to the increased strains of stirrups and longitudinal reinforcement under the same load, it also leads to the degradation of shear capacity of components. The shear strength of concrete beam with corrosion rates of 3.2%, 7.9%, and 13.2%, respectively, decreases by 5.8%, 9.1%, and 15.5% compared to that of un-corroded beams. Considering reduction of cross-section of corroded prestressed tendons, the calculation formula for shear strength of PC beams in *Code for Design of Concrete Structures* (GB 50010—2010) has high accuracy.

**Key words:** bridge engineering; prestressed PC beam; corrosion; shear behavior; experimental research

## 0 引言

预应力混凝土桥梁由于其强度高、跨度大、抗裂性好等优势,在中国桥梁中占有重要比重。一直以来,该类桥梁被认为具有较好的耐久性能,但情况不容乐观。随着时间的推移,混凝土桥梁中预应力筋腐蚀的问题不断出现<sup>[1]</sup>,尤其是中国早期建设的预应力混凝土桥梁,由于施工条件以及工艺的限制,很多预应力结构中还存在孔道灌浆缺陷和封锚不严的问题<sup>[2]</sup>,会进一步诱发预应力筋的腐蚀。预应力筋腐蚀后,会引起截面损伤和力学性能退化,预应力筋与混凝土之间黏结退化,进而导致结构服役性能的退化<sup>[3-9]</sup>。

目前,国内外学者针对预应力筋腐蚀后构件的力学性能进行了大量研究。李富民等<sup>[10]</sup>对钢绞线腐蚀预应力混凝土梁进行抗弯试验发现,腐蚀引发的断丝破坏会导致梁的极限承载力和变形能力降低。Rinaldi 等<sup>[11]</sup>发现钢绞线腐蚀会显著减小预应力混凝土梁抗弯承载力,随着腐蚀程度增大,构件由延性破坏转变为脆性破坏。这些主要是针对腐蚀构件抗弯性能的研究。锈蚀必然也会引起预应力混凝土(PC)构件抗剪性能的退化,但相关方面的研究很少,尤其是混凝土构件受剪多表现为脆性破坏特征,破坏前无明显征兆,其后果也更为严重,因此有必要明确腐蚀 PC 构件抗剪性能退化规律。

一些学者对腐蚀普通钢筋混凝土梁抗剪性能进行了研究,发现轻微的箍筋腐蚀对抗剪性能具有一定的促进作用,但腐蚀严重时会引起抗剪性能的退化<sup>[12]</sup>,纵筋的腐蚀引起主斜裂缝向加载点移动,混凝土梁抗剪的“拱机制”增强而“桁架机制”削弱,构件抗剪承载力增大<sup>[13]</sup>。在布置形式和材料性能方面,预应力筋与箍筋、纵筋均存在较大差异,腐蚀普通混凝土构件抗剪性能方面的研究成果未必适用于

腐蚀预应力构件,腐蚀 PC 梁抗剪性能退化规律尚需明确。

为此,本文设计制作了 4 片预应力混凝土梁,采用电化学方法对其进行了加速腐蚀,随后对其进行了抗剪性能测试,研究分析了预应力筋腐蚀对于试验梁裂缝扩展、变形、钢筋受力、破坏形态以及抗剪承载力的影响,并在试验基础上探讨了腐蚀 PC 梁抗剪承载力计算预测方法。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

所有试验梁均采用相同的矩形截面,梁高 450 mm,梁宽 160 mm,梁长 3 000 mm。试验梁底部布置 2 根  $\phi 25$  的 HRB400 钢筋,顶部布置 2 根  $\phi 10$  的 HRB400 钢筋,箍筋为  $\phi 6$  的 HRB400 钢筋,间距为 200 mm。试验梁浇筑过程中通过预埋塑料管预留出直径为 33 mm 的预应力孔道,该孔道在梁两侧按二次抛物线弯起,为使梁端锚垫板与预应力孔道垂直,在梁端锚固区设置倒角,倒角尺寸为 150 mm $\times$ 100 mm。待混凝土达到强度后,采用直径为 15.2 mm 的七丝钢绞线穿过预应力孔道,并采用千斤顶进行预应力张拉,张拉控制应力为 1 395 MPa,张拉完成后对孔道进行了压浆。试验梁尺寸和预应力筋布置如图 1 所示。

试验前对钢筋进行了性能测试,得到普通钢筋和预应力筋的力学性能参数,如表 1 所示。试验梁混凝土采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥,细骨料采用湘江细砂,粗骨料采用碎石,最大粒径为 20 mm。混凝土中掺杂了一定量的粉煤灰,同时为了保证混凝土强度与和易性,采用了萘系高效减水剂。混凝土配合比如表 2 所示。试验梁浇筑过程中预留了边长为 150 mm 的立方体试块,养护 28 d 后测得的混凝土立方体抗压强度为 42.2 MPa。

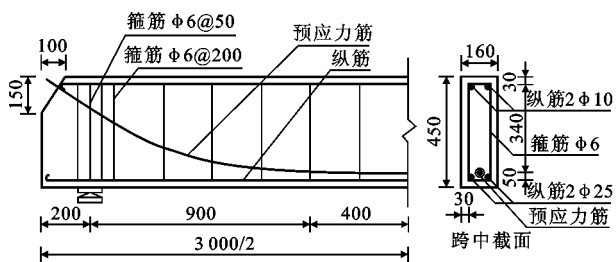


图 1 试验梁尺寸及配筋 (单位: mm)

Fig. 1 Dimensions and Reinforcement of Test Beams (Unit: mm)

表 1 钢筋力学性能

Tab. 1 Mechanical Properties of Reinforcement

钢筋型号	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
HRB400 $\phi$ 6	412.5	561.2	200
HRB400 $\phi$ 10	403.9	551.6	200
HRB400 $\phi$ 25	424.1	574.8	200
七丝钢绞线	1 412.4	1 876.3	195

表 2 混凝土配合比

Tab. 2 Mix Proportion of Concrete  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

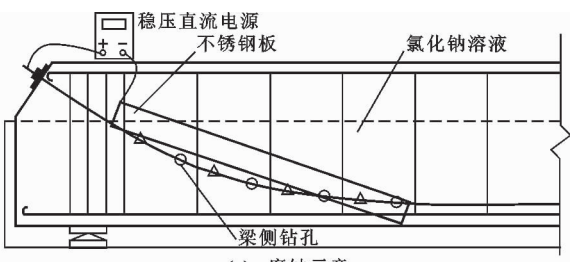
材料	水泥	水	砂	碎石	矿粉	减水剂
用量	311	164	780	994	121	9.9

压浆达到设计强度后,对混凝土梁进行电化快速腐蚀。试验中仅对试验梁一侧的弯剪段进行腐蚀,以通过梁两侧的响应对比分析腐蚀的影响。试验梁置于盐溶液池,直流电源正极接通钢绞线,负极接通盐溶液中的不锈钢板,同时在混凝土梁腐蚀端两侧沿预应力筋布置方向分别钻出数个直径为 6 mm 的小洞,以便盐溶液能够接触钢绞线形成电流回路,如图 2 所示。以通电时间控制混凝土梁的锈蚀程度,静载试验完成后取出预应力筋,经酸洗、中和和干燥后,对预应力筋质量腐蚀率进行了测定,钢绞线锈蚀时间和腐蚀率如表 3 所示。

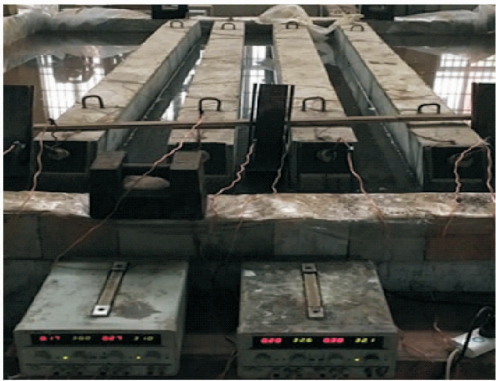
1.2 加载布置

试验梁简支,计算跨径为 2.6 m,采用千斤顶和分配梁对试验梁进行两点对称加载,加载点间距为 1.0 m,剪跨比为 2.1,如图 3 所示。采用分级单调方式进行加载,试验梁开裂前以 5 kN 为一级加载,速率为 5 kN  $\cdot$  min<sup>-1</sup>,试验梁开裂后,以 10 kN 为一级加载,速率为 5 kN  $\cdot$  min<sup>-1</sup>,每级荷载持荷 5 min。接近极限荷载时,以 5 kN 为一级加载,调整加载速率至 2 kN  $\cdot$  min<sup>-1</sup>。以混凝土压碎或出现不稳定变形作为构件的极限状态,停止加载。

加载过程中,对混凝土梁的挠度变形、钢筋应力和裂缝扩展等进行观测。测试元件布置如图 3 所示,在试验梁跨中、加载点和支点处分别布置了 5 个



(a) 腐蚀示意



(b) 腐蚀实物

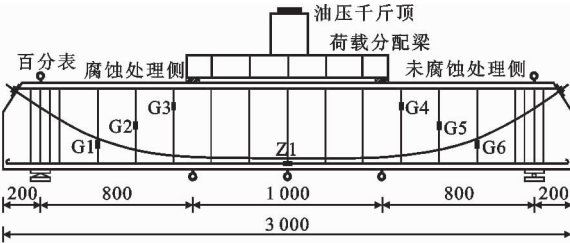
图 2 试验梁腐蚀处理

Fig. 2 Corrosion Treatment of Test Beams

表 3 腐蚀时间及质量腐蚀率

Tab. 3 Corrosion Time and Mass Corrosion Rate

梁编号	B0	B1	B2	B3
腐蚀时间/d	0	3	6	10
质量腐蚀率/%	0.0	3.2	7.9	13.2



(a) 加载示意及测点布置



(b) 加载现场

图 3 加载试验 (单位: mm)

Fig. 3 Loading Test (Unit: mm)

百分表对构件挠度变形进行测定;在试验梁腐蚀弯剪区和未腐蚀弯剪区箍筋上分别布置 3 个应变片测定钢筋应变,编号依次为 G1~G3 和 G4~G6。梁底纵向钢筋跨中处布置了应变片,记为 Z1,如图 3(a)所示。采用裂缝观测仪对混凝土梁的裂缝扩展进行测定。

## 2 结果及分析

试验测得各混凝土梁的开裂荷载、极限荷载、主斜裂缝倾角和极限挠度等数据,汇总于表 4。

表 4 主要试验结果  
Tab. 4 Main Test Results

梁编号	腐蚀率/%	$P_{cr1}$ /kN	$P_{cr2}$ /kN	$P_u$ /kN	$\theta/(^{\circ})$	$w$ /mm
B0	0.0	71	90	298	30	11.2
B1	3.2	63	81	281	36	11.7
B2	7.9	54	73	271	41	12.3
B3	13.2	42	56	252	35	12.9

注: $P_{cr1}$ 为弯曲裂缝初现荷载; $P_{cr2}$ 为斜裂缝初现荷载; $P_u$ 为极限荷载; $\theta$ 为主斜裂缝对水平方向的倾角; $w$ 为极限荷载下的跨中挠度。

### 2.1 裂缝扩展

试验加载过程中各梁均表现出相似的裂缝扩展模式。荷载作用下,梁体首先在加载点间的纯弯段出现竖向弯曲裂缝,随荷载增加,腐蚀处理一侧的弯剪段陆续出现多条指向加载点的斜向裂缝,未做腐蚀处理一侧的斜裂缝出现稍晚。腐蚀处理一侧的某条斜裂缝逐渐延伸至加载点附近形成临界裂缝,极限荷载下,裂缝顶端的混凝土被压碎,混凝土梁破坏。极限荷载下各梁的裂缝分布如图 4 所示。腐蚀未引起裂缝数量、倾角等发生明显改变。

预应力筋腐蚀导致弯曲裂缝和斜裂缝出现时对应的荷载值降低。这是因为预应力筋腐蚀越严重,其有效截面面积损失越大,与混凝土黏结退化越严重,造成有效预应力的损失越大,试验梁在荷载作用下越早开裂。预应力筋的腐蚀率分别为 3.2%,7.9%,13.2%的试验梁弯曲裂缝、斜裂缝初现荷载对比未腐蚀梁分别下降 11.3%,23.9%,40.8%和 10%,19%,37.8%。腐蚀率较大时,开裂荷载对比未腐蚀梁出现更大程度的下降,可能是由于预应力筋的不均匀腐蚀造成的。已有研究<sup>[14]</sup>及本文试验结果都表明预应力筋的腐蚀程度越大,点蚀的情形越严重,甚至出现断丝的状况,预应力损失较大,构件开裂大幅提前。

加载过程中对多条斜裂缝的最大宽度进行了连续测量。定义破坏阶段的临界斜裂缝为主斜裂缝。

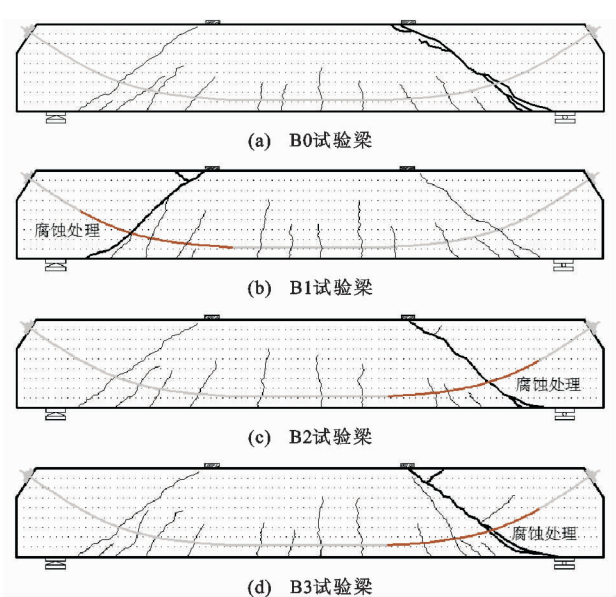


图 4 极限荷载下的裂缝形态

Fig. 4 Crack Modes Under Ultimate Load

各试验梁的荷载-主斜裂缝宽度关系如图 5 所示。观察发现,在斜裂缝出现的前期,宽度较小且发展较为缓慢,大致与荷载呈线性关系。当荷载达到约 85%的极限荷载后,斜裂缝的宽度发展加快,在极限荷载处达到峰值。总体上讲,腐蚀会增大同一级荷载下混凝土梁斜裂缝宽度。当腐蚀率较小时,腐蚀梁与未腐蚀梁在线性发展段的差异不显著,当腐蚀率较大时,腐蚀梁的裂缝宽度从开裂之初就明显大于未腐蚀梁。这主要是因为腐蚀率较小时,预应力筋截面面积损失较小,轻微腐蚀会增大预应力筋与混凝土之间的黏结作用,预应力筋限制构件裂缝开展的能力下降较小。在腐蚀率较大时,预应力筋截面面积损失大,黏结退化严重,预应力筋限制构件裂缝开展的能力严重下降。

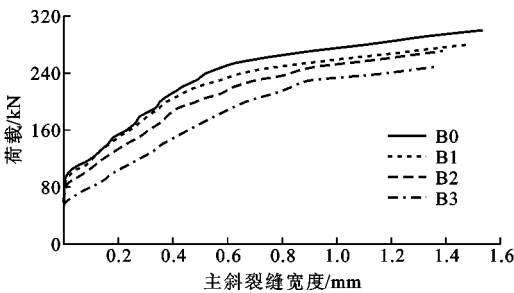


图 5 荷载-主斜裂缝宽度曲线

Fig. 5 Load-diagonal Crack Width Curves

考察斜裂缝的倾角(裂缝与梁纵轴线的夹角),预应力筋腐蚀率分别为 0%,3.2%,7.9%和 13.2%的试验梁斜裂缝倾角分别为 30°,36°,41°和 35°。斜裂缝倾角没有随预应力筋的腐蚀率表现出明显的变

化规律。现有研究表明,斜裂缝倾角的主要影响因素是剪跨比<sup>[15]</sup>。本文试验采用相同的剪跨比,可剔除该因素的影响。分析认为可能是预应力筋蚀坑分布的偶然性造成的。预应力筋蚀坑的存在对其所在竖向截面的应力分布存在影响,从而影响初始斜裂缝的发生位置,进而影响主斜裂缝的倾角。

2.2 挠度变形

混凝土梁在各级荷载下的跨中挠度可以较好地反映其总体刚度。试验梁的荷载-跨中挠度关系如图 6 所示。由图 6 可知,在加载初期,跨中挠度同荷载之间有着较好的线性关系,此时试验梁处于弹性变形阶段。达到开裂荷载后,跨中挠度随荷载变化略微加快,但依然大致保持线性关系,在接近极限荷载时,跨中挠度非线性增长,在极限荷载下达到峰值。腐蚀率越大,混凝土梁的初始刚度越小,极限荷载下的挠度越大。

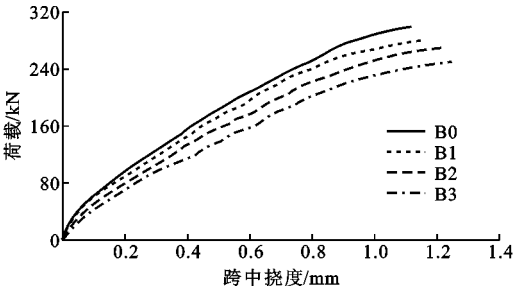


图 6 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 6 Load-midspan Deflection Curves

裂缝的出现破坏了试验梁的整体性,降低了试验梁的刚度<sup>[16]</sup>。裂缝出现使部分混凝土退出工作,混凝土应力发生重分布,裂缝的出现也表明预应力筋与混凝土之间出现滑移<sup>[17]</sup>,两者共同工作的能力削弱,也降低了试验梁的刚度。到达极限荷载时,预应力筋腐蚀率分别为 3.2%,7.9%,13.2%的试验梁跨中挠度值比未腐蚀梁分别增加了 2.7%,8%,11.6%。

2.3 应变发展

2.3.1 箍筋应变

箍筋应变可以作为试验梁破坏的一个参考依据。G2 及 G5 点位处的荷载-箍筋应变关系如图 7 所示。观察发现,G2 及 G5 点位处的荷载-箍筋应变曲线有相似变化规律:在斜裂缝出现之前,箍筋应变很小,腐蚀对于箍筋应变影响较小;斜裂缝出现后,箍筋应变随着荷载增加而增大,同一级荷载下,预应力筋腐蚀率越大箍筋应变也越大;在极限荷载下,G2 处箍筋应变平均值比 G5 处增大 5%。

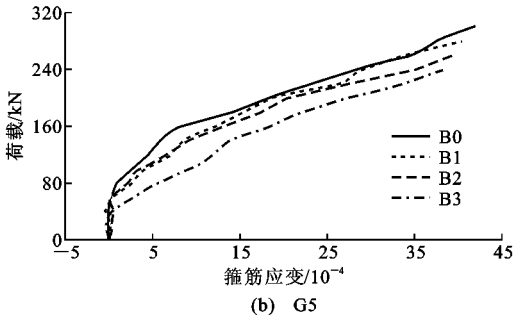
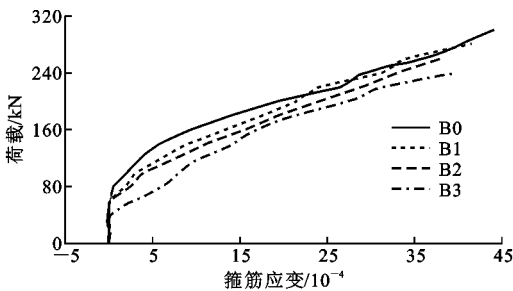


图 7 荷载-箍筋应变曲线

Fig. 7 Load-stirrup Strain Curves

混凝土梁斜裂缝出现之前,主要由混凝土承担剪力,箍筋尚未发挥抗剪作用,箍筋应变较小,这与已有抗剪研究结果<sup>[12,18]</sup>一致。斜裂缝出现之后,箍筋开始协同混凝土发挥抗剪作用,箍筋的应变值随着荷载的增大而迅速增大。腐蚀导致预应力筋的抗剪贡献减小,箍筋及混凝土部分承担的剪力增大,故在同一级荷载下,预应力筋腐蚀程度越大,箍筋应变越大。最终箍筋的应变几乎都达到甚至超过了其屈服应变。腐蚀造成预应力筋截面损失,主裂缝开展于 G2 所在一侧,是 G2 处箍筋应变略大于 G5 处的原因。

2.3.2 纵筋应变

试验梁的荷载-纵筋应变曲线如图 8 所示。观察发现,加载初期,纵筋应变大致随荷载呈线性变化,各试验梁纵筋应变水平较低且差异较小,腐蚀对于纵筋应变的影响不显著。当达到 60% 极限荷载后,纵筋应变随荷载增长明显加快,且纵筋应变发展开始呈现出一定的非线性特征,腐蚀对于试验梁纵筋应变的影响开始凸显,预应力筋腐蚀程度越大,同一级荷载下纵筋应变越大。在达到极限荷载时,B1,B2,B3 梁的纵筋应变比未腐蚀梁分别增加了 5.3%,2.6%,8.3%。在加载全过程中,纵筋均没有超过其屈服应变,表明试验梁具备足够的抗弯能力。

2.4 破坏形态

各试验梁破坏过程相似。在加载前期,首先在加载点之间的纯弯段出现竖向裂缝。随荷载增加,



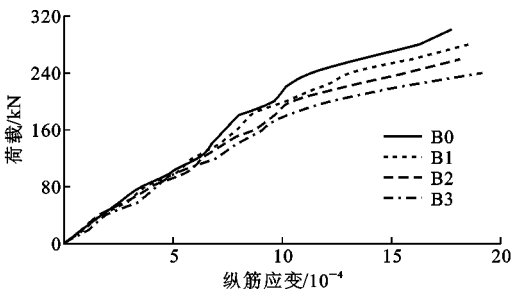


图 8 荷载-纵筋应变曲线

Fig. 8 Load-longitudinal Reinforcement Strain Curves

腐蚀一侧的弯剪段首先出现一条指向加载点的斜裂缝,未腐蚀一侧斜裂缝出现稍晚。梁两侧的弯剪段均陆续出现 3~5 条斜裂缝。腐蚀一侧某条斜裂缝延伸至梁顶加载点附近,成为临界斜裂缝,在到达极限荷载时,斜裂缝顶端的混凝土被压碎,试验梁破坏。

试验梁发生斜截面破坏时的裂缝形态如图 9 所示。试验梁均发生剪压破坏,破坏形态未因腐蚀产生明显改变。

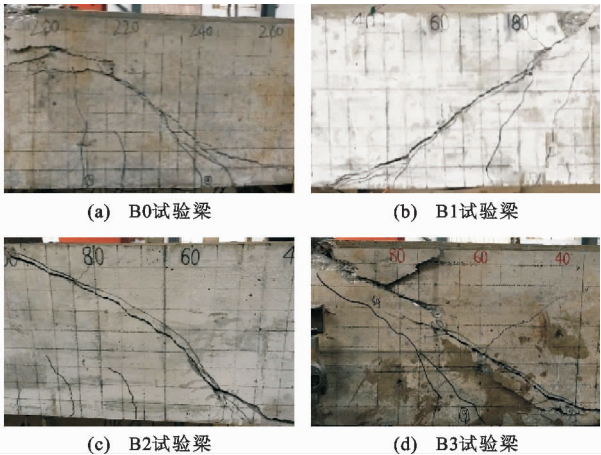


图 9 试验梁破坏形态

Fig. 9 Failure Modes of Test Beams

2.5 抗剪承载力

试验梁均发生脆性剪切破坏。定义相对极限抗剪强度  $\omega$  为腐蚀梁极限荷载与未腐蚀梁极限荷载之比。表 5 列出了试验梁的腐蚀率  $\eta$  和相对极限抗剪强度  $\omega$ 。

表 5 试验梁腐蚀率  $\eta$  及相对极限抗剪强度  $\omega$

Tab. 5 Corrosion Rate  $\eta$  and Relative Ultimate Shear Strength  $\omega$  of Test Beams

梁编号	B0	B1	B2	B3
腐蚀率 $\eta/\%$	0.0	3.2	7.9	13.2
相对极限抗剪强度 $\omega$	1.000	0.942	0.909	0.845

将表 5 数据线性拟合,并与文献[12],[13]试验

结果对比,得到  $\omega-\eta$  关系如图 10 所示。文献[12]试验结果来源于剪跨比为 1.75 配斜筋的箍筋腐蚀 RC 梁抗剪试验,文献[13]试验结果来源于剪跨比为 2.6 配腹筋的纵筋腐蚀 RC 梁抗剪试验。文献[12]研究表明,箍筋轻微腐蚀会提高构件抗剪承载力,但腐蚀率较大时,抗剪承载力下降。文献[13]研究表明,纵筋腐蚀引起承载机制转变会提高构件抗剪承载力。本文试验结果表明,预应力筋腐蚀导致构件抗剪承载力下降,且腐蚀率  $\eta$  与相对极限抗剪强度  $\omega$  之间有着较好的线性关系。

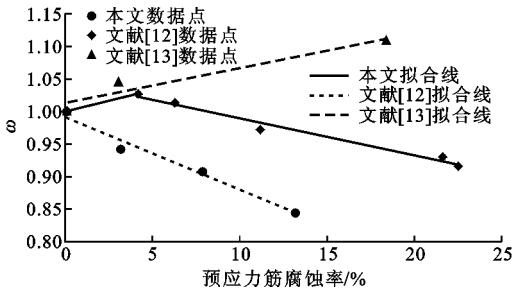


图 10  $\omega-\eta$  曲线

Fig. 10  $\omega-\eta$  Curves

3 抗剪承载力计算探讨

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[19],配置箍筋及弯起钢筋的预应力混凝土受弯构件的斜截面抗剪承载力可按下式计算

$$V_u = V_{cs} + V_p + 0.8f_y A_{sb} \sin(\alpha_s) + 0.8f_{py} A_{pb} \sin(\alpha_p) \quad (1)$$

$$V_{cs} = 1.75f_t b h_0 / (\lambda + 1) + f_{yv} A_{sv} h_0 / s \quad (2)$$

式中:  $V_u$  为构件的抗剪承载力;  $V_{cs}$  为箍筋及混凝土提供的抗剪承载力;  $V_p$  为预应力提供的抗剪承载力,规范规定预应力抗剪贡献项不考虑弯起预应力筋的作用,故  $V_p = 0$ ;  $f_y, f_{py}$  分别为弯起钢筋、预应力筋的抗拉强度设计值;  $A_{sb}, A_{pb}$  分别为弯起钢筋、预应力筋的截面面积;  $\alpha_s, \alpha_p$  分别为斜截面上弯起钢筋、弯起预应力钢筋与构件纵轴线的夹角;  $\lambda$  为试验梁的剪跨比;  $f_t$  为混凝土轴心抗拉强度设计值,参考文献[20],可以按照  $f_t = 0.35f_c^{0.5}$  来计算,其中  $f_c$  为混凝土棱柱体抗压强度,其与混凝土立方体抗压强度  $f_{cu}$  的换算关系为  $f_c = 0.88f_{cu}$ ;  $f_{yv}$  为箍筋的抗拉强度设计值;  $A_{sv}$  为箍筋截面面积;  $s$  为箍筋间距;  $b, h_0$  分别为矩形截面宽度和有效高度。

计算时,钢材抗拉强度设计值以实测的屈服强度替代。  $\alpha_p$  取主裂缝与预应力筋交点处切线与水平方向夹角。由于预应力筋在腐蚀率较大时出现较

严重的不均匀腐蚀现象,以质量腐蚀率来考虑截面面积均匀折减显然不合适,为此以实测的最大截面损失来考虑腐蚀的影响。弯起预应力筋抗剪贡献项记为  $V_{pb}$ 。计算得到试验梁的抗剪承载力如表 6 所示。

表 6 试验梁抗剪承载力计算结果

Tab. 6 Calculation Results of Shear Capacity of Test Beams							
梁编号	$A_{pb}/mm^2$	$\sin(\alpha_p)$	$V_{pb}/kN$	$V_{cs}/kN$	$V_u/kN$	$V_{ue}/kN$	$V_u/V_{ue}$
B0	139	0.271	85	235	320	298	1.07
B1	128	0.221	64	235	299	281	1.06
B2	112	0.210	53	235	288	271	1.06
B3	95	0.223	48	235	283	252	1.12

注: $V_{cs}$ 为箍筋和混凝土提供的抗剪承载力; $V_{ue}$ 为试验梁的实测抗剪承载力。

考虑预应力筋截面损失,依据规范计算得到的抗剪承载力计算值均略大于试验值。这是因为在利用规范公式计算抗剪承载力时,仅考虑了预应力筋截面损失,未考虑预应力筋腐蚀导致的预应力筋与混凝土之间黏结性能退化以及预应力筋力学性能退化对构件抗剪性能的影响。抗剪承载力规范计算值与试验实测值比值的均值为 1.083,标准差为 0.03。规范公式用于预测腐蚀 PC 梁的抗剪承载力具有较高的精度。

4 结 语

- (1)剪跨比相等的情况下,预应力筋腐蚀对于试验梁的破坏形态影响甚微,试验梁均发生剪压破坏。
- (2)预应力筋腐蚀显著影响试验梁的开裂行为,腐蚀率越大,开裂荷载下降越多。腐蚀率分别为 3.2%,7.9%,13.2%的试验梁弯曲裂缝、斜裂缝初现荷载比未腐蚀梁分别下降 11.3%,23.9%,40.8%和 10%,19%,37.8%。
- (3)开裂之前预应力筋腐蚀对其刚度影响不大;开裂之后,预应力腐蚀会较明显地降低构件的刚度。
- (4)预应力筋腐蚀导致相同荷载下箍筋、纵筋应变增大,引起结构抗剪承载力的退化。本文试验中,3.2%,7.9%,13.2%的预应力筋腐蚀率引起试验梁的抗剪承载力分别下降了 5.8%,9.1%,15.5%。
- (5)考虑腐蚀引起预应力筋截面损失,采用规范公式计算得到的试验梁抗剪承载力具有较高的精度。

参考文献:

References:

[ 1 ] LI F M, YUAN Y S, LI C Q. Corrosion Propagation

of Prestressing Steel Strands in Concrete Subject to Chloride Attack[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(10): 3878-3885.

[ 2 ] 周先雁, 王智丰, 晏班夫. 预应力管道压浆质量无损检测方法[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 64-71.

ZHOU Xian-yan, WANG Zhi-feng, YAN Ban-fu. Nondestructive Testing Method of Grouting Quality for Prestressed Pipe[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(6): 64-71.

[ 3 ] 曾严红, 顾祥林, 张伟平, 等. 锈蚀预应力筋力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(2): 169-174, 209.

ZENG Yan-hong, GU Xiang-lin, ZHANG Wei-ping, et al. Study on Mechanical Properties of Corroded Prestressed Tendons[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(2): 169-174, 209.

[ 4 ] 王磊, 余强, 张旭辉, 等. 人工气候下腐蚀预应力钢绞线的力学性能研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(1): 97-102, 111.

WANG Lei, SHE Qiang, ZHANG Xu-hui, et al. Study of Mechanical Property of Prestressed Strands Corroded in Artificial Climate[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(1): 97-102, 111.

[ 5 ] VU N A, CASTEL A, FRANCOIS R. Effect of Stress Corrosion Cracking on Stress-strain Response of Steel Wires Used in Prestressed Concrete Beams[J]. Corrosion Science, 2009, 51(6): 1453-1459.

[ 6 ] WANG L, YI J, ZHANG J R, et al. Effect of Corrosion-induced Crack on the Bond Between Strand and Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 153: 598-606.

[ 7 ] LI F M, YUAN Y S. Effects of Corrosion on Bond Behavior Between Steel Strand and Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 413-422.

[ 8 ] ZHANG X H, Wang L, ZHANG J R, et al. Flexural Behavior of Bonded Post-tensioned Concrete Beams Under Strand Corrosion[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 313: 414-424.

[ 9 ] CORONELLI D, CASTEL A, VU N A, et al. Corroded Post-tensioned Beams with Bonded Tendons and Wire Failure[J]. Engineering Structures, 2009, 31(8): 1687-1697.

[ 10 ] 李富民, 袁迎曙. 腐蚀钢绞线预应力混凝土梁的受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 78-84.

LI Fu-min, YUAN Ying-shu. Experimental Study on Bending Property of Prestressed Concrete Beams with Corroded Steel Strands[J]. Journal of Building Struc-

- tures,2010,31(2):78-84.
- [11] 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.
- [12] 张建仁,刘 彬,王 磊,等. 箍筋锈蚀的配斜筋混凝土梁抗剪试验[J]. 中国公路学报,2013,26(6):73-79.
- ZHANG Jian-ren,LIU Bin,WANG Lei,et al. Test on Shear Behavior of Diagonal Reinforcement RC Beams with Corroded Stirrup[J]. China Journal of Highway and Transport,2013,26(6):73-79.
- [13] 薛 昕,杨 成. 纵向受拉钢筋锈蚀钢筋混凝土梁的抗剪性能[J]. 上海交通大学学报,2016,50(11):1767-1772.
- XUE Xin,YANG Cheng. Shear Performance of Reinforced Concrete Beams Containing Corroded Longitudinal Bars[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2016,50(11):1767-1772.
- [14] 李富民,袁迎曙. 氯盐腐蚀钢绞线蚀坑几何尺寸的分布特征[J]. 煤炭学报,2011,36(11):1826-1831.
- LI Fu-min,YUAN Ying-shu. Distributing Character of Size of Pits on Steel Strands Corroded by Chloride[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(11):1826-1831.
- [15] 周英武,王苏岩,李宏男. 钢筋混凝土梁斜裂缝倾角理论分析与试验分析[J]. 大连理工大学学报,2008,48(2):235-239.
- ZHOU Ying-wu,WANG Su-yan,LI Hong-nan. Theoretical and Experimental Analyses of Critical Shear Angle of RC Beam[J]. Journal of Dalian University of Technology,2008,48(2):235-239.
- [16] CASTEL A,VIDAL T,FRANCOIS R. Finite-element Modeling to Calculate the Overall Stiffness of Cracked Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of Structural Engineering,2012,138(7):889-898.
- [17] 柏 洁,王志军,高巧玲,等. 考虑粘结滑移的 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 Zhi-jun,GAO Qiao-ling,et al. Average Constitutional Relationship of Unanchored Zone of RC Structure with Considering Bond and Slip[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering,2009,31(2):38-44.
- [18] 郑 辉,方 志,刘 明. 预应力活性粉末混凝土箱梁抗剪性能试验研究[J]. 土木工程学报,2015,48(6):51-63.
- ZHENG Hui,FANG Zhi,LIU Ming. Experimental Study on Shear Behavior of Prestressed Reactive Powder Concrete Box Girders[J]. China Civil Engineering Journal,2015,48(6):51-63.
- [19] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2010,Code for Design of Concrete Structures[S].
- [20] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- GUO Zhen-hai,SHI Xu-dong. Reinforced Concrete Theory and Analysis[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2003.