文章编号：1001-4888(2025)04-0515-13

腐蚀钢筋预应力混凝土梁抗弯性能试验研究*

许开成[1,2]，卢子健[2,3]，黄鸿睿[2]，邱日旭[2]，易彬[2]，张立卿[1,2]

（1. 华东交通大学 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室，江西南昌 330013；
2. 华东交通大学 土木建筑学院，江西南昌 330013；3. 中国铁路广州局集团有限公司肇庆工务段，广东肇庆 526000）

摘要： 预应力混凝土结构在服役期间由于受到环境腐蚀的作用，会造成钢筋腐蚀，从而使结构出现不同程度损伤，导致结构承载力下降。为了探究钢筋腐蚀对预应力混凝土梁抗弯性能的影响，对预应力混凝土梁进行了腐蚀后的四点弯曲试验，结果表明：当钢绞线腐蚀率相同时，试验梁的开裂荷载和极限荷载受钢筋腐蚀影响不大，但对屈服荷载影响比较明显；当普通钢筋腐蚀率为 3.8%时，试验梁屈服荷载下降 15.6%；钢筋腐蚀率对试验梁的屈服挠度影响较小，但对极限挠度影响较为明显；当钢筋腐蚀率为 11.5%时，极限挠度下降 8.6%；试验梁的开裂荷载和屈服荷载受钢绞线腐蚀影响较大，是影响预应力梁承载能力和变形能力的主要因素；当钢绞线腐蚀率为 7.6%时，试验梁的开裂荷载下降 32.9%。在试验的基础上，采用有限元软件 ABAQUS 对各腐蚀梁进行有限元模拟，并根据腐蚀后钢筋的性能劣化规律，提出了普通钢筋腐蚀和钢绞线腐蚀预应力混凝土梁承载力计算方法，计算值和模拟值均与试验值吻合程度较好。

关键词： 预应力混凝土梁；钢筋腐蚀；抗弯性能；有限元分析；承载力计算

中图分类号： TU378.2 **文献标志码：** A DOI：10.7520/1001-4888-24-074

0 引言

预应力混凝土结构具有跨越能力强、抗裂性好及强度高等特点[1-3]，是在高速铁路桥梁等基础设施中被广泛应用的结构之一。然而在实际工程中，预应力混凝土桥梁服役环境复杂，需要面临恶劣的自然环境造成的化学腐蚀，如江西地区受酸雨影响严重[4]，酸雨会通过桥梁薄弱点侵入结构内部，造成钢筋腐蚀，使结构受到不同程度损伤，从而对桥梁耐久性能产生不利影响。对后张预应力桥梁，由于施工工艺容易存在孔道灌浆缺陷和端头封锚不严等情况，因此预应力钢绞线易发生腐蚀，并且钢绞线通常处于高应力状态[5]。腐蚀不仅会导致钢绞线有效截面损失，还会使其力学性能退化，增加结构脆性破坏的风险[6]。

近年来，国内外学者开展了腐蚀环境下预应力混凝土梁力学性能的研究[7]。刘云雁等[8]对氯盐环境下锈蚀预应力混凝土梁进行试验和有限元模拟，结果表明，腐蚀时间小于 14 d 对预应力混凝土梁的抗弯性能影响有限，相比于未腐蚀的梁，经过 7 d 和 14 d 腐蚀后的梁极限承载力变化不大，分别下降 1.6%和 3.0%。周啟浩等[9]对 5 根锈蚀预应力混凝土梁进行了三分点静载试验，结果表明，当钢绞线腐蚀率大于 10.0%时，钢绞线腐蚀对试验梁抗弯性能影响显著；当钢绞线腐蚀率达到 13.5%时，试验梁

* **收稿日期：** 2024-04-26；**修回日期：** 2024-09-03
基金项目： 国家自然基金项目(52368031，51968021)；江西省自然科学基金重点项目(20242BAB26073)；江西省自然科学基金项目(20224BAB204067)；华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室自主课题(HJGZ2022201)
通信作者： 张立卿(1987—)，女，博士，副教授。研究方向：多功能/智能纳米混凝土与结构、绿色混凝土与结构。Email：zlq@ecjtu.edu.cn

开裂荷载与极限荷载分别降至未腐蚀梁的 78.4%和 69.3%，同时极限位移下降了 67.5%，梁脆性破坏特征明显。CAMPIONE 等[10]对试验数据和有限元软件(ABAQUS)的数值模拟结果进行比较，结果表明，预应力钢绞线的腐蚀会降低预应力梁的承载力，当预应力钢绞线的腐蚀率超过 10%时，会使梁的承载能力降低 30%；当腐蚀率达到 30%时，承载能力下降近 80%，并发生脆性破坏。此外，已有研究表明[6,11-12]，预应力梁中，先张拉后腐蚀的钢绞线的预应力损失与腐蚀损失几乎呈线性关系。随着钢绞线腐蚀程度的增加，开裂荷载、屈服荷载和极限荷载均显著降低，且梁的破坏方式会从混凝土破碎发展到钢绞线断裂，梁的延性大大降低[6,11-12]。LI 等[13]对预应力钢绞线进行了腐蚀试验和拉伸试验，结果表明，腐蚀预应力钢绞线退化过程可分为 3 个阶段：在第 1 阶段，钢绞线松弛，预应力迅速降低；在第 2 阶段，预应力随着腐蚀程度的增加而呈线性降低；在第 3 阶段，随着腐蚀程度的增加，钢绞线的横截面面积严重减小。由上述文献可知，目前对腐蚀预应力混凝土梁的研究主要集中在钢绞线的腐蚀对预应力梁抗弯性能的影响方面，而对预应力梁中钢筋腐蚀对抗弯性能的研究相对有限，对同时考虑钢绞线和钢筋发生腐蚀情况下的研究更为匮乏。

为了进一步了解酸雨腐蚀下预应力混凝土梁的性能退化规律，本文首先通过 5 根腐蚀预应力混凝土梁的抗弯性能试验，研究不同钢筋腐蚀率对预应力混凝土梁的抗弯性能的影响，以探究试验梁破坏形态、承载力变化、挠度变化及材料应变随钢筋腐蚀率的变化规律。然后，对各腐蚀试验梁进行有限元模拟并与试验结果进行对比分析。最后，基于混凝土结构设计规范，考虑腐蚀后普通钢筋和钢绞线力学性能退化与截面面积减少的情况，提出了酸雨腐蚀后预应力混凝土梁的受弯承载力计算公式。

1 试验概况

1.1 试件设计和制作

本研究共设计了 5 根 T 形截面后张法预应力混凝土试验梁，其中 1 根为未腐蚀梁，4 根为腐蚀梁。已有研究[9,14]表明，8%的腐蚀率对梁抗弯性能影响显著，因此本文钢绞线的腐蚀率定为 8%，试验的具体参数见表 1(J 表示静载试验)。梁长均为 2080 mm，梁内纵向钢筋和箍筋分别采用直径为 14 mm 的 HRB400 螺纹钢筋和直径为 6 mm 的 HPB300 光圆钢筋，梁跨中非加密区箍筋间距取 100 mm，梁端加密区箍筋间距取 80 mm，预应力筋采用直径为 15.2 mm、由 7 根钢丝捻制而成的 1×7 的 1860 级低松弛钢绞线，梁顶和梁底保护层厚度均为 20 mm。试验梁的截面尺寸和配筋布置如图 1 所示。

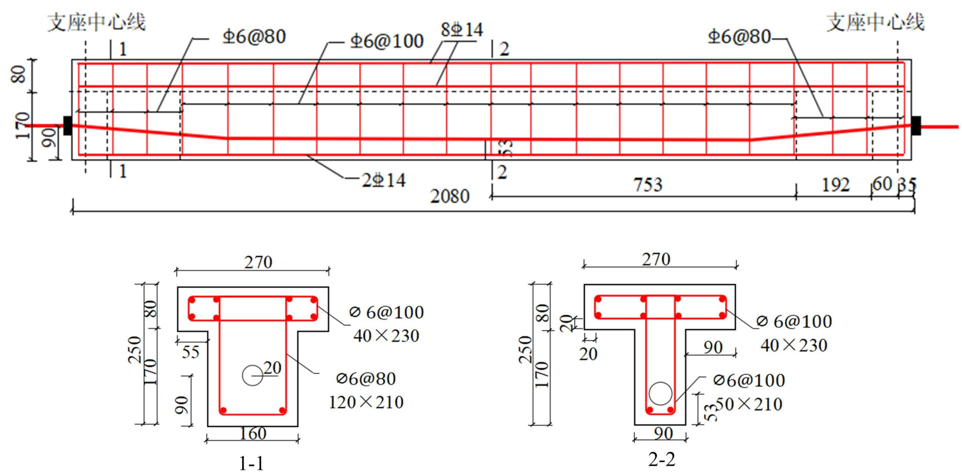


图 1 试验梁尺寸和配筋布置(单位：mm)

Fig. 1 Section size and reinforcement bar of testing beam(unit: mm)

试验中采用钢绞线控制张拉应力为 1302 MPa，即 0.7 倍钢绞线标准抗拉强度。试验前对钢筋进行性能测试，得到普通钢筋、箍筋和预应力钢绞线的材料性能参数见表 2。试验梁混凝土的强度为 C50，水泥型号为 P·O 42.5R，混凝土配合比见表 3。在试验梁浇筑过程中，所制备的试块在相同条件下养护 28 d 后，测得其棱柱体抗压强度为 44.9 MPa，立方体抗压强度为 54.9 MPa。

表 1　试验梁概况

Tab. 1　Overview of the test beam

试件编号	腐蚀部位	设计腐蚀率/%		实测腐蚀率/%	
		钢筋	钢绞线	钢筋	钢绞线
J-1	—	0	0	0	0
J-2	钢绞线	0	8	0	7.6
J-3	钢筋、钢绞线	4	8	3.8	7.7
J-4	钢筋、钢绞线	8	8	8.2	8.3
J-5	钢筋、钢绞线	12	8	11.5	7.9

表 2　钢材的力学性能

Tab. 2　Mechanical characteristics of steel

类型	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/MPa	伸长率/%
箍筋	6.0	370	565	2.10×10^5	30.0
纵筋	14.0	470	570	2.00×10^5	20.0
钢绞线	15.2	1860	1945	1.95×10^5	4.0

表 3　混凝土配合比(单位:kg/m³)

Tab. 3　Mix proportion design of concrete (unit: kg/m^3)

水泥	细骨料	粗骨料	矿粉	减水剂	水
380.0	710.0	1111.0	100.0	1.44	144.0

1.2　腐蚀方案

根据相关文献及近 10 年来江西的降雨报告[15−17]，可知酸雨中主要阳离子为 NH_4^+、Mg^{2+}、Na^+ 和 Ca^{2+}，主要阴离子为 SO_4^{2-}、NO_3^- 和 Cl^-，酸雨中离子的比例见表 4。基于这些数据，本文最终确定了实验室模拟酸雨溶液的成分，并将酸雨溶液 pH 值定为 3，酸雨溶液成分见表 5。

表 4　酸雨离子比例

Tab. 4　Proportion of acid rain ions

离子	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	NH_4^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+
占比/%	73.18	21.40	3.28	27.44	54.99	2.74	6.60

表 5　酸雨溶液成分

Tab. 5　Chemical composition of acid rain

酸雨成分	Na_2SO_4	$MgSO_4$	$Ca(NO_3)_2\cdot4H_2O$	$(NH_4)_2SO_4$	NaCl
含量/(g/L)	0.531	0.087	0.252	0.191	0.036

试验采用通电加速腐蚀方法对钢绞线和钢筋进行腐蚀，将养护 28 d 后的试验梁以半浸泡的方式放置在酸雨溶液腐蚀池中进行通电加速腐蚀。将直流稳压稳流电源的正负极分别与钢筋及钢板相连，通过酸雨溶液形成电流回路，加速钢筋和钢绞线腐蚀。为了防止箍筋腐蚀，在箍筋与纵向钢筋接触的位置使用电工胶带与环氧布绝缘。为了避免锚具腐蚀对试验产生干扰，通过喷涂金属漆和环氧树脂的方式对锚具进行防腐处理。通电电流密度为 400 $\mu A/cm^2$，根据法拉第定律[18]确定不同腐蚀率的试验梁通电时间。试验设计的预应力钢绞线腐蚀率为 8%，通过法拉第定律计算出腐蚀时间为 14 d，普通钢筋腐蚀率为 0%、4%、8%和 12%，腐蚀时间为 0 d、6.5 d、13 d 和 19.5 d。

1.3　腐蚀率测定方法

试验全部完成后，将试验梁破碎并取出腐蚀钢筋和钢绞线，截取中间段 100 mm 长度用除锈剂对其

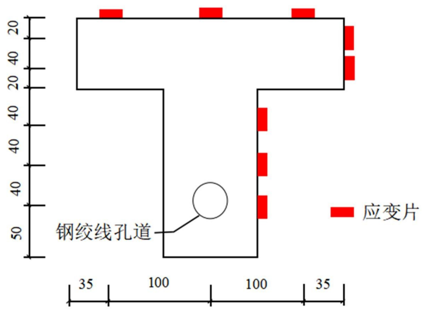
清洗；清洗掉表面的浮渣和铁锈后，用高温吹风机对钢筋和钢绞线进行烘干处理；先测得腐蚀后质量，再测量每一段实际长度，并按密度法计算原始质量，得到实际腐蚀率，实际腐蚀率见表 1。腐蚀率计算公式为

$$\eta=\frac{m_0-m_c}{m_0}\times 100\% \tag{1}$$

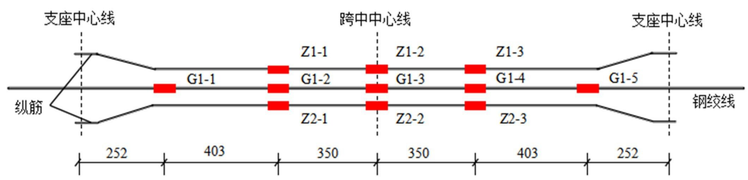
式中：η 为钢筋、钢绞线腐蚀率，%；m_0 为钢筋、钢绞线原始质量，g；m_c 为钢筋、钢绞线锈蚀后剩余质量，g。

1.4 测点布置和加载方案

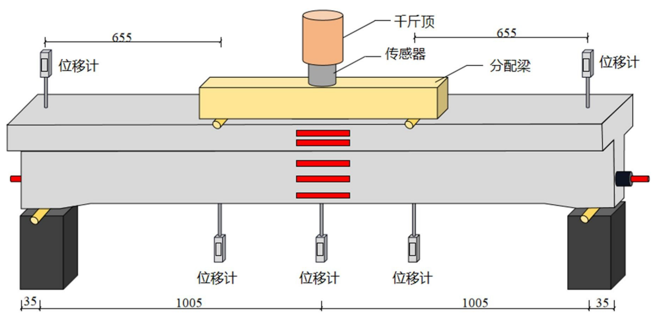
在试验梁底部普通受力钢筋和钢绞线上总共布置 11 片应变片，测点布置如图 2(a)(b)所示，图中 Z 代表纵向钢筋，G 代表预应力钢绞线。跨中区域的混凝土表面布置 8 个应变片，其中 5 个应变片分别布置在试验梁侧面，用以测量跨中不同截面高度处混凝土应变的变化，另外 3 个应变片分别布置在试验梁跨中截面顶部，用于监测受压区混凝土的应变。为便于观测试验梁裂缝开展情况，试验开始前，在试验梁观测面喷涂白色喷漆。



(a) 跨中截面混凝土应变片布置示意图



(b) 普通钢筋、钢绞线应变片布置示意图



(c) 试验加载图

图 2 试验测点布置及加载图（单位：mm）

Fig. 2 Layout and loading diagram of test measurement points(unit: mm)

试验采用四点弯曲加载，梁顶的加载点采用跨中中心对称布置，间距为 700 mm，支座距加载点处 655 mm；分别在跨中、加载点处和支座处布置 1 个位移计，如图 2(c)所示。试验加载过程分预加载和正式加载 2 个阶段。正式加载前，先进行 2～3 次的预加载，每次加载至 20 kN；正式加载时，以每级5 kN 增量匀速加载；当混凝土开裂后，加载幅度增加至 10 kN；加载到极限荷载的 80%后，加载幅度减小至 5 kN。每级加载后，需要待荷载数值及应变位移数值稳定，方可继续加载，期间观察并记录梁的挠度变形、钢筋应变及裂缝的发展，直至试验梁破坏为止。

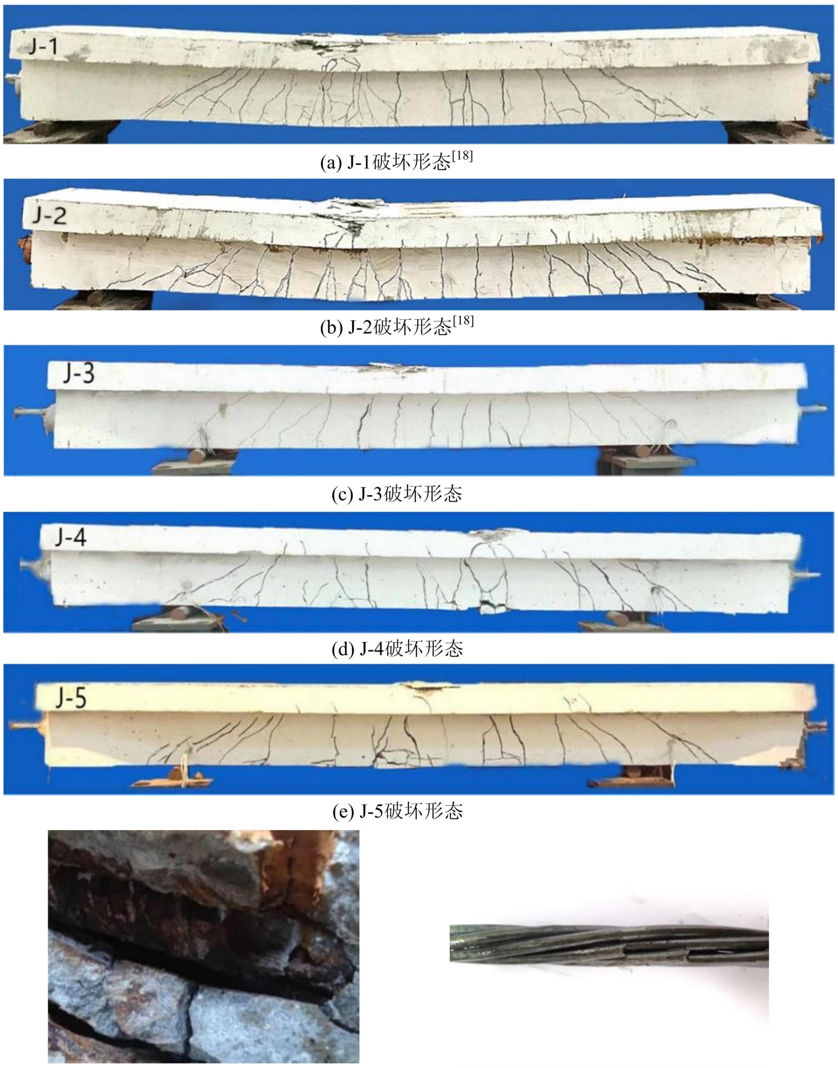
2 试验结果及分析

2.1 破坏形态

试验梁的破坏形态如图 3 所示，由图可知，梁的破坏形态均为适筋破坏。加载时，所有试验梁均在跨中纯弯段腹板底部边缘先出现垂直微裂缝，随后在剪弯段也相继出现部分微裂缝；随着荷载继续增大，裂缝逐渐由支座处向分配梁加载处延伸至翼缘底板，新裂缝不断产生，原有裂缝宽度不断增大且逐

渐向上延伸；钢筋屈服时，听到钢绞线断丝响声，此时裂缝宽度迅速增大；最终，梁受压区混凝土压溃破坏，试验结束。裂缝开展顺序依次为：跨中纯弯段腹板侧面→加载点下部腹板→支座至加载点位置→跨中裂缝延伸至翼缘底部边缘→纯弯段翼缘侧面。

钢筋腐蚀率越高，底部混凝土破坏越严重，腐蚀率超过 8.2％的梁底部混凝土出现剥落现象。从混凝土剥落处可以观察到钢筋锈蚀产生的蚀坑和钢筋断裂，如图 3(f)所示。试验梁破碎后，可观察到部分钢绞线出现断丝现象，如图 3(g)所示。



(a) J-1破坏形态[18]

(b) J-2破坏形态[18]

(c) J-3破坏形态

(d) J-4破坏形态

(e) J-5破坏形态

(f) 底部混凝土脱落形态　　(g) 钢绞线断丝

图 3　试验梁破坏形态

Fig. 3　Failure mode of the test beam

2.2　承载力

试验梁的承载力见表 6。由表 6 可知，与未腐蚀梁 J-1 相比，J-2、J-3、J-4 和 J-5 的开裂荷载分别下降了 32.9％、31.6％、26.6％和 38.0％，表明钢绞线腐蚀率对开裂荷载影响显著，当钢绞线腐蚀率为 7.6％时，荷载下降幅度为 32.9％。从表 6 还可知，试验梁的屈服荷载和极限荷载均随着钢筋腐蚀率的增加呈下降趋势；与 J-2 梁相比，J-3、J-4 和 J-5 的屈服荷载分别下降 15.6％、14.7％和 18.0％，极限荷载分别下降 5.2％、13.5％和 8.7％；当钢筋腐蚀率为 3.8％时，屈服荷载下降明显，下降了 15.6％；当钢筋腐蚀率大于 3.8％时，钢筋腐蚀对屈服荷载和极限荷载影响较小。由于通电加速腐蚀天数较短，且混凝土龄期为 28 d，腐蚀溶液可能还对混凝土起着养护的作用，且受压区混凝土未被腐蚀溶液浸泡，因此腐蚀对受压区混凝土无影响。腐蚀溶液对混凝土起养护作用及受压区未受腐蚀使混凝土强度有所增

强,导致受压区混凝土在底部钢筋屈服后还能持续提供承载力,因此,钢筋腐蚀对试验梁受弯性能的影响明显低于钢绞线腐蚀率的影响。

表6 试验梁承载力

Tab.6 The bearing capacity of the test beam

试验梁编号	开裂荷载/kN	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	破坏形态	破坏方式
J-1	79	241	265	加载点裂缝显著,底部钢筋屈服后,受压区混凝土压溃。	延性破坏
J-2	53	211	252		
J-3	54	178	239		
J-4	58	180	218		
J-5	49	173	230		

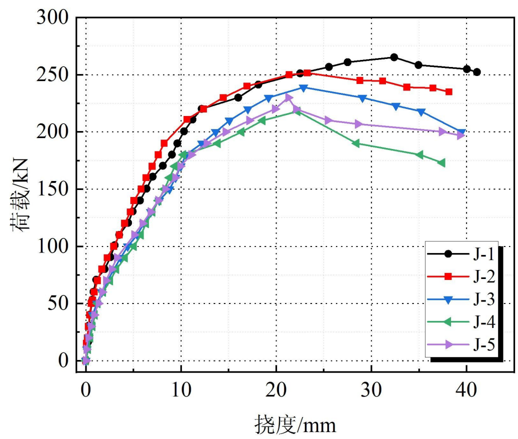


图4 试验梁荷载-挠度曲线

Fig.4 Force-displacement curve of tested beams

2.3 荷载-挠度曲线

试验梁的荷载-挠度曲线如图4所示,由图可知,试验梁跨中荷载-挠度曲线主要经历了3个阶段:1)试验梁达到开裂荷载前,试验梁跨中荷载-挠度曲线呈线性关系。2)试验梁开裂后,荷载-挠度曲线斜率明显下降,变形速率增大,受拉区混凝土逐渐退出受力,拉力主要由底部普通钢筋承担。3)加载至钢筋屈服阶段,曲线斜率急剧减小,挠度迅速增大直至极限荷载后,试验梁破坏。

试验梁延性系数结果见表7,由表可知,J-2、J-3、J-4和J-5的屈服挠度分别为J-1的58.6%、57.9%、56.5%和54.6%;极限挠度分别为J-1的71.8%、70.6%、68.7%和65.7%,表明当钢筋腐蚀率小于8.2%时,钢筋腐蚀对试验梁屈服挠度及极限挠度基本无影响;当腐蚀率大于8.2%时,对试验梁的屈服挠度及极限挠度有一定影响。J-2、J-3、J-4和J-5的延性系数分别为J-1的122.5%、121.8%、121.6%和120.2%,表明钢绞线腐蚀是影响结构变形能力的主要因素,当钢绞线腐蚀率相同时,钢筋腐蚀对结构的变形能力影响很小。

表7 试验梁延性系数结果

Tab.7 Results of ductility coefficient of test beams

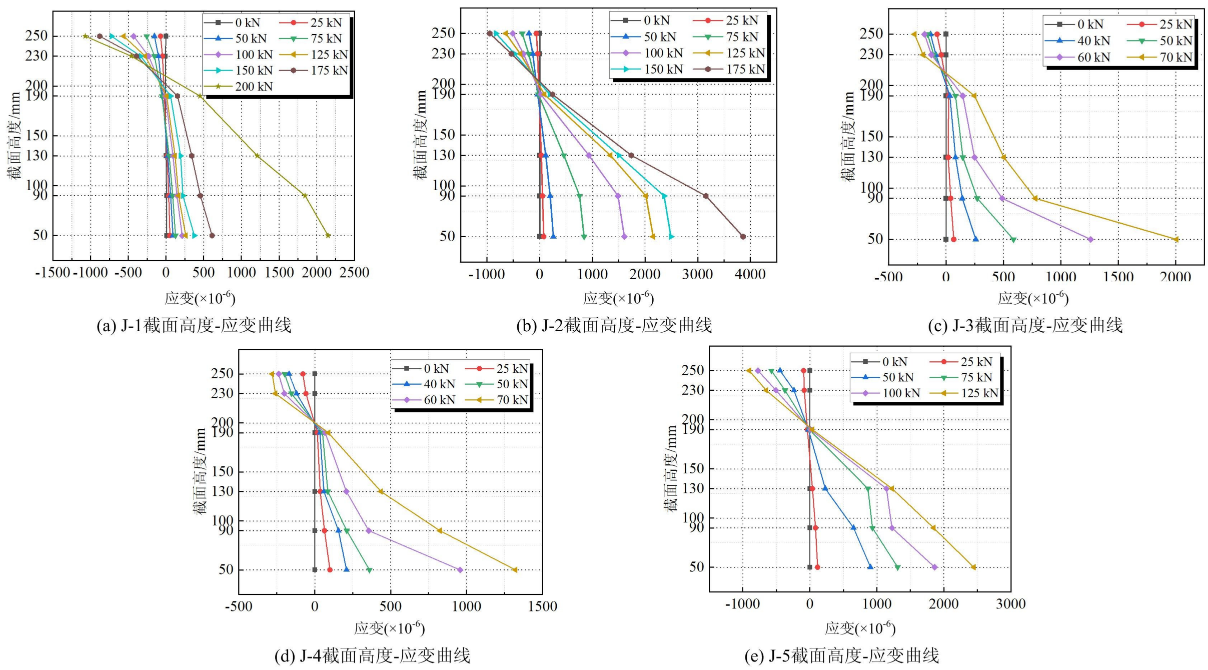
试验梁编号	极限挠度 f_u/mm	屈服挠度 f_y/mm	延性系数
J-1	32.391	18.134	1.786
J-2	23.267	10.633	2.188
J-3	22.867	10.510	2.176
J-4	22.245	10.248	2.171
J-5	21.271	9.907	2.147

注:延性系数指极限挠度与屈服挠度的比值。

2.4 混凝土应变曲线

试验梁跨中截面不同高度处混凝土的应变变化情况如图5所示。由图5可知,加载初期,混凝土应变沿高度呈线性分布,满足平截面假定。由图5(b)~(e)可知,随着钢筋腐蚀率的增大,受拉区混凝土开裂前应变呈下降趋势,受压区混凝土应变呈上升趋势,且随钢筋腐蚀率增大,会加速开裂后中性轴的上移。这是钢筋腐蚀导致其有效截面减小,同时降低了钢筋与混凝土之间的黏结强度,从而削弱了钢筋的承载能力所致。为了在荷载不变的情况下维持试验梁的性能,梁需增加截面曲率,以弥补钢筋拉力的

减弱，这种调整会加速中性轴的上移，从而降低开裂后的截面刚度。



(a) J-1截面高度-应变曲线　(b) J-2截面高度-应变曲线　(c) J-3截面高度-应变曲线

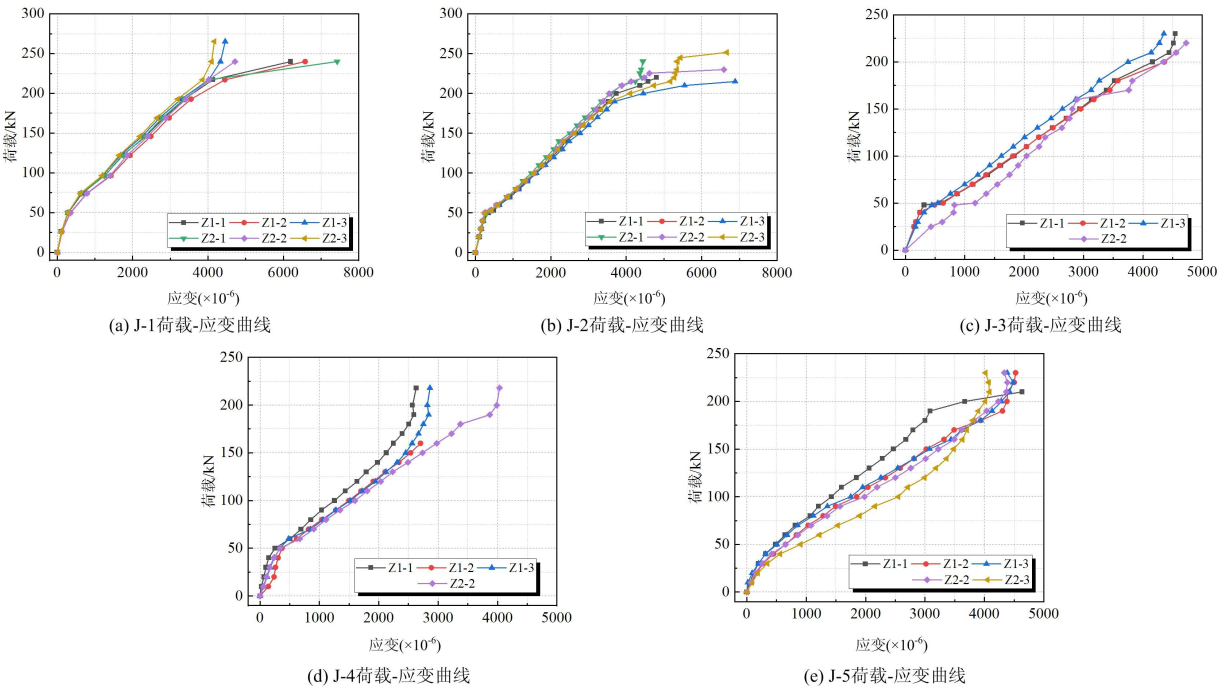
(d) J-4截面高度-应变曲线　(e) J-5截面高度-应变曲线

图 5　试验梁跨中截面高度-应变曲线

Fig. 5　Height-strain curve of the mid-span cross-section of the test beam

2.5　钢筋荷载-应变曲线

钢筋荷载-应变曲线如图 6 所示。由图 6 可知，钢筋应变的变化存在明显转折点，且转折点与开裂荷载和屈服荷载基本重合；在试验梁开裂后，拉力主要由底部钢筋承担，此时钢筋应变增长较快；随着荷载继续增加，底部钢筋屈服，此时应变基本保持不变。随钢筋腐蚀率的增加，钢筋荷载-应变曲线斜率呈下降趋势，这是由于钢筋腐蚀导致钢筋有效截面面积减小，加快了钢筋应变变化速率所致。



(a) J-1荷载-应变曲线　(b) J-2荷载-应变曲线　(c) J-3荷载-应变曲线

(d) J-4荷载-应变曲线　(e) J-5荷载-应变曲线

图 6　试验梁底部受拉钢筋荷载-应变曲线

Fig. 6　Load-strain curve of tensile reinforcement at the bottom of the test beam

2.6　预应力钢绞线荷载-应变曲线

预应力钢绞线荷载-应变曲线如图7所示(J-4梁预应力钢绞线应变片全部损坏)。由图7可知,预应力钢绞线荷载-应变曲线呈现2阶段变化(弹性阶段和塑性阶段),且钢筋屈服点与曲线转折点基本重合。随钢筋腐蚀率的增加,荷载应变曲线前期斜率逐渐减小,转折点逐渐提前;试验梁底部受拉钢筋达到屈服荷载前,钢绞线应变变化较小,钢筋屈服后钢绞线应变变化显著,曲线斜率较加载初期明显减小,并且呈线性关系。

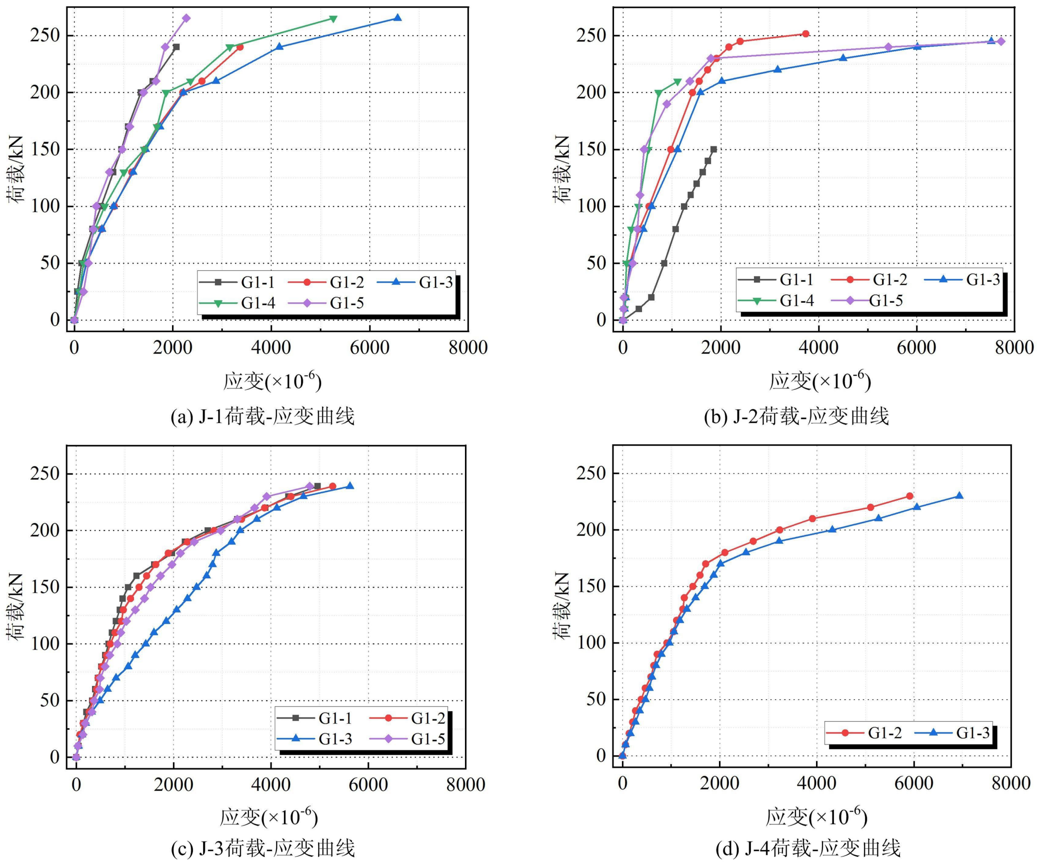


图7　钢绞线荷载-应变曲线

Fig. 7　Steel strand load-strain curve

3　有限元分析

3.1　材料的应力-应变关系

1)混凝土的本构采用塑性损伤(CDP)模型进行模拟,混凝土单轴受压下的应力-应变关系采用Hognestad模型[19],其数学表达式为

$$\begin{cases} \sigma = \left[2\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)\right]\sigma_0 & \varepsilon \leqslant \varepsilon_0 \\ \sigma = \left[1 - 0.15\left(\dfrac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_0}\right)\right]\sigma_0 & \varepsilon_0 < \varepsilon \leqslant \varepsilon_{cu} \end{cases} \tag{2}$$

式中:σ 和 ε 分别为应力和应变;σ_0 和 ε_0 分别为峰值应力和峰值应变;ε_{cu} 为混凝土极限压应变。

2)采用理想弹塑性模型来模拟钢筋本构,腐蚀后的钢筋采用袁迎曙等[20]提出的双折线模型的数学表达式。当 $0<\eta\leqslant 5\%$ 时

$$\begin{cases} f_{y,\eta} = (1.000 - 0.01608\eta) f_y \\ f_{u,\eta} = (1.000 - 0.02408\eta) f_u \\ \delta_\eta = (1.000 - 0.02480\eta)\delta \end{cases} \tag{3}$$

当 $\eta \geqslant 5\%$ 时

$$\begin{cases} f_{y,\eta} = (0.962 - 0.00848\eta) f_y \\ f_{u,\eta} = (1.088 - 0.03573\eta) f_u \\ \delta_\eta = (1.088 - 0.03573\eta)\delta \end{cases} \tag{4}$$

式中：f_y、f_u 和 δ 分别为钢筋的屈服强度、极限强度和伸长率；$f_{y,\eta}$ 为钢筋腐蚀后的屈服强度；$f_{u,\eta}$ 为钢筋腐蚀后的极限强度；δ_η 为钢筋腐蚀后的伸长率。

3）采用双折线模型来模拟预应力钢绞线本构，腐蚀后的预应力钢绞线采用吴雪峰[21]提出的双折线模型的数学表达式如式(5)：

$$\begin{cases} f_{ptk,\eta} = (1.000 - 0.0148\eta) f_{ptk} \\ f_{ptu,\eta} = (1.000 - 0.0279\eta) f_{ptu} \\ \delta_{p,\eta} = (1.000 - 0.018\eta)\delta_p \end{cases} \tag{5}$$

式中：f_{ptk}、f_{ptu} 和 δ_p 分别为钢绞线的屈服强度、极限强度和伸长率；$f_{ptk,\eta}$ 为钢绞线腐蚀后的屈服强度；$f_{ptu,\eta}$ 为钢绞线腐蚀后的极限强度；$\delta_{p,\eta}$ 为钢绞线腐蚀后的伸长率。

3.2　有限元计算模型

采用 ABAQUS 软件建立酸雨腐蚀后预应力混凝土梁构件数值模型，混凝土、垫块均采用六面体(C3D8R)单元，普通钢筋和预应力钢绞线采用桁架(T3D2)单元，假设钢筋与混凝土单元完全耦合(不考虑两者之间的黏结滑移)；模型中，混凝土、钢筋和钢绞线的材料性能均采用实测值。由于支座分别是球形支座和铰支座，因此球形支座约束了 5 个方向的自由度，铰支座约束了水平内 4 个方向的自由度。普通钢筋、预应力钢绞线与混凝土之间为内置约束，垫块与混凝土之间为绑定约束。通过降温法对模型施加预应力，加载方式采用位移加载，网格划分尺寸为 50 mm。

3.3　有限元计算结果

试验结果与有限元计算结果的对比见图 8 和表 8。由图 8 和表 8 可见，试验梁与模拟梁跨中荷载-挠度曲线吻合度较高。但由于模拟考虑的是理想状态，因此与试验存在一定误差；5 组试验梁的极限荷

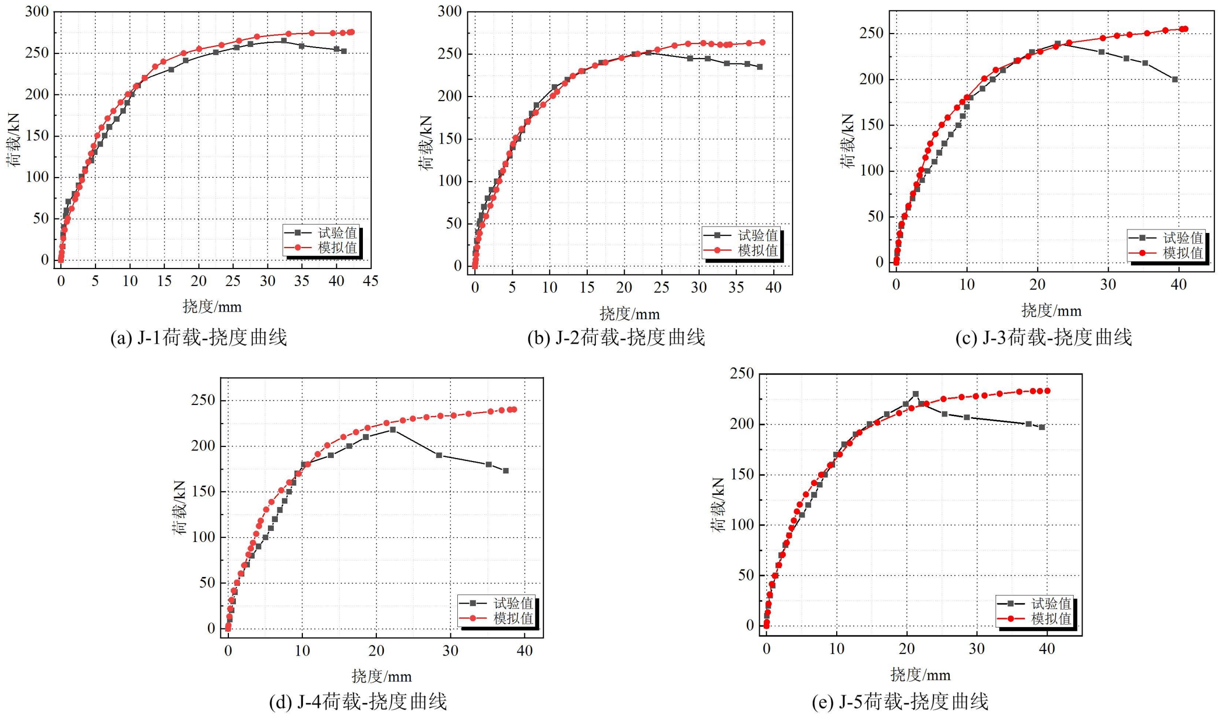


图 8　荷载-挠度曲线

Fig. 8　Load-deflection curve

载试验值与模拟值比值的平均值为 0.951,误差在 10%以内,表明该模型具有较高的精确度。

4 钢筋腐蚀后的预应力梁承载力计算

4.1 基本假定

本文建立的钢筋腐蚀预应力梁承载力计算模型基于以下 4 项基本假定:

1)钢筋腐蚀后的预应力梁混凝土截面应变分布符合平截面假定。

2)不考虑试验梁受拉区混凝土对承载力的贡献。

3)不考虑钢绞线与混凝土之间的黏结滑移。

4)考虑钢筋、钢绞线腐蚀对其截面面积减小和力学性能劣化的影响。

4.2 试验梁计算

腐蚀后预应力混凝土梁受力计算示意图如图 9 所示,图中 h_f'为翼缘的高度;b_f'为翼缘宽度;h 为梁截面高度;h_0 为底部钢筋至梁顶高度;x_0 为混凝土受压区高度;h_p 为钢绞线至梁顶高度;a_s 为底部钢筋至梁底距离;a_s'为顶部钢筋至梁顶距离。

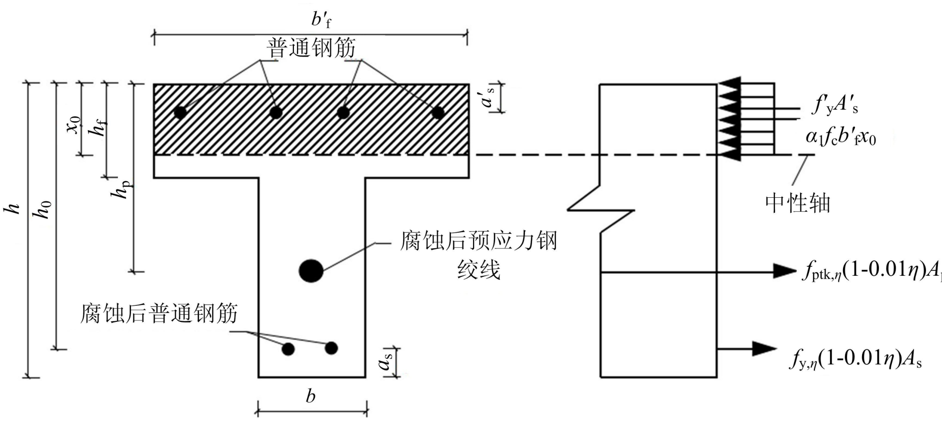


图 9 梁正截面承载力计算简图

Fig. 9 The calculation diagram of bearing capacity of beam normal sections

腐蚀直接导致了钢筋和钢绞线有效截面面积减小和屈服强度降低,并且改变了钢筋和钢绞线本构关系:弹性模量降低,屈服平台缩短甚至消失,极限应变减小,因此在计算酸雨腐蚀后预应力混凝土梁的极限承载力时,应考虑钢筋和钢绞线截面面积折减、屈服强度下降等因素的影响。腐蚀后的钢筋和钢绞线有效截面面积为平均锈蚀后的剩余截面面积,腐蚀后钢筋和钢绞线的屈服强度分别采用式(3)和式(4)进行计算。基于极限状态时跨中截面的静力平衡方程,试验梁的极限承载力计算如下:

$$f_{y,\eta}(1-0.01\eta)A_s + f_{ptk,\eta}(1-0.01\eta)A_p = \alpha_1 f_c b_f' x_0 + f_y' A_s' \tag{6}$$

式中:A_s 为受拉区纵向钢筋的截面面积;A_s'为受压区纵向钢筋的截面面积;A_p 为预应力筋的截面面积;α_1 为混凝土强度影响系数,通常取 1.0;f_c 为混凝土的轴心抗压强度设计值。

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010),将未腐蚀梁数据代入式(7)计算,计算结果满足式(7),因此可判断所有试验梁均属于第一类 T 型截面梁。通过式(8)计算相应的受压区高度,并代入式(9)得到其极限弯矩。

$$\alpha_1 f_c b_f' h_f' \geqslant f_{ptk,\eta} A_p (1-0.01\eta) + f_{y,\eta} A_s (1-0.01\eta) - f_y' A_s' \tag{7}$$

$$x_0 = \frac{f_{ptk,\eta} A_p (1-0.01\eta) + f_{y,\eta} A_s (1-0.01\eta) - f_y' A_s'}{\alpha_1 f_c b_f'} \tag{8}$$

$$M_u = \alpha_1 f_c b_f' x_0 \left(h_0 - \frac{x_0}{2}\right) + f_y' A_s' (h_0 - a_s') \tag{9}$$

式中:M_u 为试验梁的极限弯矩值。

根据计算得到的弯矩,求出试验梁的承载力,极限荷载计算结果见表 8。由表 8 可知,极限荷载试验值与计算值基本吻合,试验值与计算值比值的平均值为 1.035,计算值与试验值误差在 7%内,因此,

在计算腐蚀后预应力混凝土梁的极限荷载时可考虑钢筋、钢绞线面积折减的方法。

表 8　试验梁荷载试验值与计算值和模拟值比值结果汇总

Tab. 8　Summary of ratio results between load test values and calculated values and simulated values for test beams

试件编号	极限荷载试验值/kN	极限荷载模拟值/kN	极限荷载计算值/kN	试验值/模拟值	试验值/计算值
J-1	265	275	262.65	0.964	1.009
J-2	252	263	236.82	0.958	1.064
J-3	239	255	229.61	0.937	1.041
J-4	218	240	218.64	0.908	0.997
J-5	230	233	216.39	0.987	1.063

5　结论

本文通过通电加速腐蚀方法，对预应力混凝土梁中的钢筋和钢绞线进行腐蚀处理，研究了酸雨腐蚀环境下试验梁的抗弯性能退化规律。主要结论如下：

1）5 根 T 型试验梁在静力作用下均为适筋破坏，钢筋腐蚀率越高，底部混凝土破坏越严重，钢筋腐蚀率超过 8.2％的试验梁底部混凝土出现剥落现象。裂缝开展顺序依次为：跨中纯弯段腹板侧面→加载点下部腹板→支座至加载点位置→跨中裂缝延伸至翼缘底部边缘→纯弯段翼缘侧面。

2）钢绞线腐蚀对开裂荷载影响显著，钢筋腐蚀率对开裂荷载基本无影响。当钢绞线腐蚀率为7.6％时，开裂荷载下降 32.9％，试验梁屈服荷载、极限荷载均随着钢筋腐蚀率的增大出现一定程度下降。在钢筋腐蚀率在 3.8％时，屈服荷载下降 15.6％，当钢筋腐蚀率大于 3.8％对屈服荷载影响较小。

3）试验梁荷载-挠度曲线呈三阶段变化，斜率逐渐减小。当钢绞线腐蚀率为 7.6％时，对应 J-2 梁的屈服挠度、极限挠度和延性系数分别为未腐蚀梁的 58.6％、71.8％和 122.5％。当钢绞线腐蚀率相同时，钢筋腐蚀率对试验梁延性系数影响很小。

4）有限元模型模拟的荷载-挠度曲线与试验曲线吻合度较高，模拟结果显示模拟值与试验值的误差在 10％之内。

5）依据规范，考虑腐蚀对钢筋、钢绞线力学性能劣化及面积折减的影响，建立了腐蚀后预应力混凝土梁的极限荷载计算公式，计算结果与实测结果吻合较好，误差在 7％以内。

参考文献：

[1] 陈晨，赵羽习，徐丹丹，等. 不同环境下后张梁内预应力筋应力时变规律[J]. 建筑结构学报，2023，44(增刊 2)：457-464 (CHEN Chen，ZHAO Yuxi，XU Dandan，et al. Time variation of stress of prestressed reinforcement in post-tensioned beams under different environments[J]. Journal of Building Structures，2023，44(Suppl. 2)：457-464 (in Chinese))

[2] 李砚召，王肖钧，张新乐，等. 预应力混凝土结构抗爆性能试验研究[J]. 实验力学，2005，20(2)：179-185 (LI Yanzhao，WANG Xiaojun，ZHANG Xinle，et al. Test study on anti-detonation quality of prestressed concrete structure[J]. Journal of Experimental Mechanics，2005，20(2)：179-185 (in Chinese))

[3] LIU X G，ZHANG W P，GU X L，et al. Assessment of fatigue life for corroded prestressed concrete beams subjected to high-cycle fatigue loading[J]. Journal of Structural Engineering，2023，149(2)：04022242.

[4] XU K C，HUANG L J，ZHANG L Q，et al. Experimental study on the seismic performance of prestressed concrete beams under low-cycle reciprocating load and simulated acid rain corrosion environment[J]. Construction and Building Materials，2023，408：133629.

[5] ANANIA L，BADALÀ A，D'AGATA G. Damage and collapse mode of existing post tensioned precast concrete

bridge: The case of Petrulla viaduct[J]. Engineering Structures, 2018, 162:226-244.

[6] YU Q Q, GU X L, ZENG Y H, et al. Flexural behavior of Corrosion-Damaged prestressed concrete beams[J]. Engineering Structures, 2022, 272:114985.

[7] TORRES-ACOSTA A A, NAVARRO-GUTIERREZ S, TERÁN-GUILLÉN J. Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams[J]. Engineering Structures, 2007, 29(6):1145-1152.

[8] 刘云雁，范颖芳，喻建，等. 氯盐环境下锈蚀预应力混凝土梁抗弯性能试验[J]. 复合材料学报，2020，37(3)：707-715 (LIU Yunyan, FAN Yingfang, YU Jian, et al. Flexural behavior test of corroded prestressed concrete beams under chloride environment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(3):707-715 (in Chinese))

[9] 周啟浩，卢朝辉，李海. 锈蚀高铁简支箱梁抗弯性能试验研究[J]. 建筑结构，2021，51(增刊 1)：1514-1521 (ZHOU Qihao, LU Zhaohui, LI Hai. Experimental study on flexural behavior of corroded high-speed railway box girder[J]. Building Structure, 2021, 51(Suppl. 1):1514-1521 (in Chinese))

[10] CAMPIONE G, ZIZZO M. Influence of strands corrosion on the flexural behavior of prestressed concrete beams [J]. Structures, 2022, 45:1366-1375.

[11] ZHANG X H, WANG L, ZHANG J R, et al. Corrosion-induced flexural behavior degradation of locally ungrouted post-tensioned concrete beams[J]. Construction and Building Materials, 2017, 134:7-17.

[12] 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.

[13] LI J Y, MIKI T, YANG Q N, et al. Experimental study on prestressing force of corroded prestressed concrete steel strands[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2022, 20(9):550-563.

[14] 许开成，曹艳明，陈子超，等. 模拟酸雨腐蚀下预应力混凝土梁的抗弯性能研究[J]. 计算力学学报，2019，36(1)：124-131 (XU Kaicheng, CAO Yanming, CHEN Zichao, et al. Study on flexural behavior of prestressed concrete beams under simulated acid rain corrosion[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2019, 36(1):124-131 (in Chinese))

[15] ZHANG L Q, PAN Y N, XU K C, et al. Corrosion behavior of concrete fabricated with lithium slag as corrosion inhibitor under simulated acid rain corrosion action[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 377:134300.

[16] 许开成，陈博群，陈梦成，等. 模拟酸雨腐蚀环境下掺锂渣钢筋混凝土偏心受压柱试验研究[J]. 实验力学，2018，33(4)：641-648 (XU Kaicheng, CHEN Boqun, CHEN Mengcheng, et al. Experimental investigation on lithium slag doped eccentrically loaded reinforced concrete column in a simulated acid rain corrosion environment [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(4):641-648 (in Chinese))

[17] 姜磊. 2016—2020 年江西省酸雨特征分析[J]. 江西科学，2021，39(3)：490-494 (JIANG Lei. Characteristics of acid rain in Jiangxi Province from 2016 to 2020[J]. Jiangxi Science, 2021, 39(3):490-494 (in Chinese))

[18] 许开成，黄凌娟，杨宏宇，等. 模拟酸雨腐蚀预应力混凝土 T 梁重载交通疲劳性能研究[J]. 实验力学，2024，39(2)：248-260 (XU Kaicheng, HUANG Lingjuan, YANG Hongyu, et al. Experimental study on fatigue performance of prestressed concrete T-beams under heavy load traffic and simulated acid rain corrosion environment[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2024, 39(2):248-260 (in Chinese))

[19] HOGNESTAD E. A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members[M]. Illinois: University of Illinois at Urbana Champaign, 1951:44-45.

[20] 袁迎曙，贾福萍，蔡跃. 锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化模型[J]. 土木工程学报，2001，34(3)：47-52，96 (YUAN Yingshu, JIA Fuping, CAI Yue. The structural behavior deterioration model for corroded reinforced concrete beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3):47-52, 96 (in Chinese))

[21] 吴雪峰. 锈蚀钢绞线力学性能和粘结性能研究[D]. 长沙：中南大学，2014 (WU Xuefeng. Research on mechanical properties and bonding performance of corroded prestressing steel strand[D]. Changsha: Central South University, 2014 (in Chinese))

Experimental study on the effect of reinforcement corrosion on the bending performance of prestressed concrete beams

XU Kaicheng[1,2], LU Zijian[2,3], HUANG Hongrui[2], QIU Rixu[2], YI Bin[2], ZHANG Liqing[1,2]

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 3. Zhaoqing Engineering Section of China Railway Guangzhou Group Co., Ltd., Zhaoqing 526000, Guangdong, China)

Abstract: Prestressed concrete structures are subject to environmental corrosion during service, resulting in corrosion of the reinforcement and varying degrees of damage to the structure. This leads to a reduction in the structural load carrying capacity. To investigate the effect of the reinforcement corrosion on the flexural performance of prestressed concrete beams, corroded prestressed concrete beams were tested by a four-point bending test. It is shown that the corrosion of the ordinary reinforcement has a small effect on the cracking strength and ultimate strength of test beams. However, the effect of corrosion on the yield load is more obvious. When the corrosion rate of ordinary steel reinforcement is 3.8%, the yield load of the test beams decreases by 15.6%. Additionally, the corrosion rate of steel reinforcement has a smaller effect on the yield deflection of the test beams, but the effect on the ultimate deflection is more obvious. When the corrosion rate of steel reinforcement is 11.5%, the ultimate deflection decreases by 8.6%. The corrosion of the prestressed steel strand has a significant effect on the cracking load and yield load of the test beams, which is the main factor affecting the load carrying capacity and deformation capacity of the prestressed beams. The cracking load of the test specimen decreases by 32.9% when the strand corrosion rate is 7.6%. Based on experimental data, finite element software ABAQUS is used to simulate the finite element calculation of each corroded beam. Meanwhile, a calculation method for the bearing capacity of prestressed concrete beams with corroded ordinary steel bars and corroded steel strands was proposed, based on the performance degradation patterns of corroded reinforcement. Both calculated and simulated results show good agreement with experimental data.

Keywords: prestressed concrete beam; steel corrosion; flexural behavior; finite element analysis; bearing capacity calculation