



原型构件锈蚀钢筋混凝土梁承载力 计算方法*

刘梅梅, 应宗权, 李嘉民, 赵娟, 梁梓豪
(中交四航工程研究院有限公司, 中交集团建筑材料重点实验室,
水工构造物耐久性技术交通行业重点实验室, 广东广州 510230)

摘要: 为了准确评估锈蚀钢筋混凝土梁受弯承载力, 以3根原型构件锈蚀钢筋混凝土梁为研究对象, 进行承载力试验及仿真分析, 并提出可修正规范方法的锈蚀钢筋混凝土梁受弯承载力简化计算方法。采用该方法, 可以根据现场检测得到的锈蚀钢筋混凝土梁构件某一根或几根钢筋截面损失率换算得到同一截面处所有钢筋的平均截面损失率, 用于计算锈蚀钢筋强度利用系数, 并解决了钢筋截面损失率大于10%时承载力计算不准确的问题。

关键词: 原型构件; 锈蚀钢筋混凝土梁; 受弯承载力; 截面损失率; 损伤塑性模型; 广义极值分布

中图分类号: U654; TU528.571

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0045-06

Bearing capacity calculation method for corroded reinforced concrete beam of prototype member

LIU Meimei, YING Zongquan, LI Jiamin, ZHAO Juan, LIANG Zihao

(Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Durability Technology, Ministry of Transport,

Key Laboratory of Construction Material, CCCC, CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: To accurately evaluate the bending capacity of corroded reinforced concrete beam, we take three corroded reinforced concrete beams of prototype members as research objects, carry out the bearing capacity test and simulation analysis, and put forward a simplified calculation method for bearing capacity of corroded reinforced concrete beam with modified code. By using this method, the average cross-section corrosion ratio of all the steel bars in the same section can be converted from the corrosion ratio of one or several steel bars detected in the field, which can be used to calculate the strength utilization coefficient of the corroded steel bars, and solve the problem of inaccurate calculation of the bearing capacity when the cross-section corrosion ratio of the steel bar is greater than 10%.

Keywords: prototype member; corroded reinforced concrete beam; bending capacity; cross-section corrosion ratio; damaged plasticity model; generalized extreme value distribution

海工混凝土结构长期服役过程中, 受到环境及荷载等因素的作用, 会导致材料耐久性劣化, 比较常见的病害为钢筋锈蚀、混凝土开裂和脱落, 进而导致构件承载力降低, 严重时则威胁结构的服役安全性, 在海工结构中多以梁构件钢筋锈

蚀及破坏较为严重。影响锈蚀钢筋混凝土梁承载力降低的因素主要有3个方面, 即材料本身性能的退化、钢筋锈蚀截面减小和钢筋与混凝土黏结性能退化。实际工程中混凝土中钢筋锈蚀具有显著的不均匀性, 锈蚀钢筋的力学性能也具有显著

收稿日期: 2024-04-22

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2603000); 国家重点研发计划青年科学家项目(2023YFB3711800)

作者简介: 刘梅梅(1984—), 女, 博士, 正高级工程师, 从事水工构造物耐久性研究。

的随机性^[1]。锈蚀钢筋的名义屈服强度和名义极限强度随着截面损失率的增加而降低；钢筋锈蚀的不均匀性随截面损失率的增加而加剧，锈蚀钢筋名义强度和实际强度的波动范围随之增大，但大部分锈蚀钢筋的实际强度仍大于未锈蚀钢筋的强度标准值。随着锈蚀钢筋的截面损失率增大，其名义强度的离散性也随之增大。然而，剔除锈蚀不均匀性影响后，锈蚀钢筋的屈服强度、极限强度、弹性模量以及极限应变等材料参数没有随锈蚀发展而呈降低的趋势^[2]。

理论上，对于锈蚀钢筋混凝土梁，其正截面受弯承载力由最大纵筋损失率截面控制^[3]。然而，纵筋最大截面损失率位置通常无法预知，且实际加载过程中受拉区混凝土开裂位置具有随机性，并不都是位于纵筋最大损失率截面，因而试验测得的极限弯矩并不一定是最大纵筋损失率截面的受弯承载力。因此，有研究^[4-6]及 JTS 304—2019《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》^[7]（简称“规范”）采用平均损失率计算锈蚀钢筋梁受弯承载力，拟通过平均截面损失率的随机时变特征考察钢筋混凝土梁力学性能随机时变规律，从而实现钢筋混凝土结构构件的时变可靠度分析与评估。实际工程中同一构件钢筋平均截面损失率不一定相同，且同一截面处钢筋的损失率存在弱相关性，为此需要通过分析手段得到构件同一截面处所有钢筋的截面损失率，才能准确计算锈蚀钢筋混凝土梁的受弯承载力。

目前学者们对钢筋与混凝土黏结性能退化做了大量研究，提出可用于数值仿真分析钢筋混凝土承载力退化过程的黏结-滑移本构模型^[8]，以及可用于评估锈蚀钢筋混凝土梁承载力退化的简化公式，以孙彬等^[9]的研究为代表，并纳入规范中。

本文以锈蚀钢筋混凝土梁为研究对象，通过理论分析、数值模拟及试验研究相结合的方法，综合考虑材料性能、钢筋混凝土黏结退化及钢筋截面损失等指标，提出更加符合实际工程情况的锈蚀钢筋混凝土梁受弯承载力计算方法。

1 原型构件锈蚀钢筋混凝土梁承载力试验

1.1 试验概况

试验梁选取浙江台州地区某梁板式高桩码头引桥上拆除的钢筋混凝土空心板梁构件共 3 根。该码头建于 1985 年，受海水腐蚀以及各种荷载的作用，损伤较为严重。试验梁为空心板梁，其外观尺寸为长 12 m、宽 1 m、高 0.65 m，内空尺寸为宽 0.7 m、高 0.4 m。钢筋型号为 HRB335，其中底部的受拉筋为 9 根直径 25 mm 钢筋和 2 根直径 20 mm 钢筋，顶部为 4 根直径 8 mm 的构造钢筋和 2 根直径 25 mm 受压钢筋，试验梁尺寸见图 1。

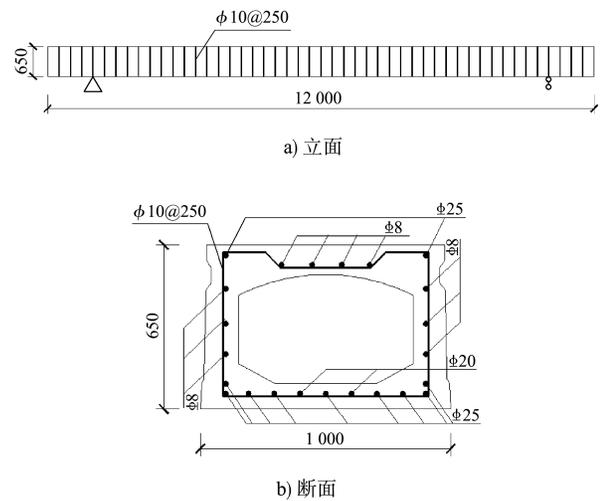


图 1 试验梁尺寸 (单位: mm)
Fig. 1 Size of test beam (unit: mm)

试验梁加载完成后，凿除混凝土取出受拉钢筋称质量，以钢筋公称质量为锈蚀钢筋质量，计算获得质量损失率表征各试验梁的锈蚀情况，统计出 1#~3# 试验梁的质量损失率分别为 18.33%、15.30% 和 20.57%。

1.2 加载及测试方案

根据试验梁能够承受的最大荷载情况，选取适宜加载的千斤顶(最大量程为 500 kN)，安装在反力架上，千斤顶产生的力通过反力架作用于试验梁上。试验采用四点弯曲加载方式，一端为固定支座，一端为铰支座，为防止试验梁局部被压碎，在支座处铺垫钢板。在混凝土梁的跨中截面处沿梁高 H 均匀布置混凝土应变片，布置位置及数量见图 2。

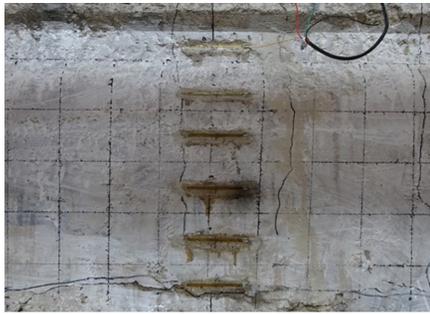
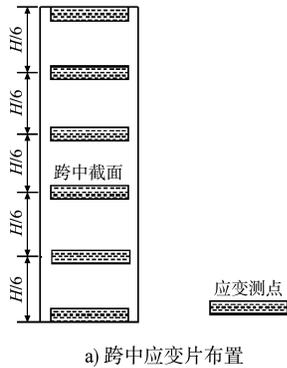


图 2 混凝土梁跨中应变片布置

Fig. 2 Strain gauge layout in span of concrete beam

在试验梁的两端支座处分别设置 2 个百分表测量支座处的沉降, 在梁的跨中截面处和加载点处设置 3 个位移传感器, 测量跨中和加载点的竖向位移值, 见图 3。

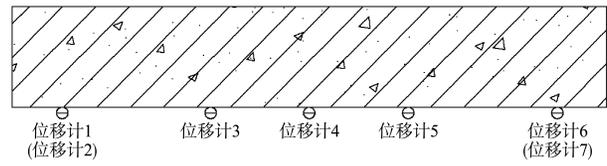


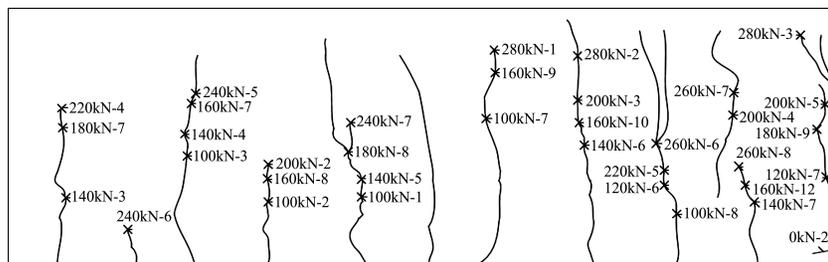
图 3 试验梁位移计布置

Fig. 3 Displacement meter layout of test beam

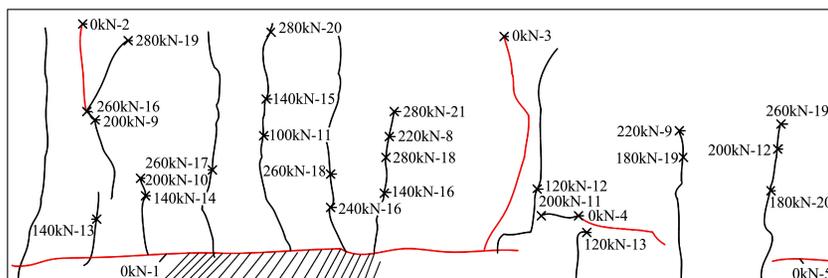
1.3 试验结果

由于各试验梁破坏时的特征基本相似, 现选取 3[#]试验梁的破坏特征进行简单分析。破坏时 3[#]梁的挠度发展较大, 卸载后不可恢复性大, 1[#]、2[#]梁破坏时挠度发展较小, 梁变形较小。观察钢筋拉断处现象, 发现没有明显的颈缩现象, 受压区混凝土未被压碎, 而钢筋拉断, 属于少筋破坏。

3[#]梁中部长 2 m 部分裂缝开展情况见图 4, 其中阴影部分表示混凝土脱落, 加载前已存在的竖向裂缝的宽度基本小于 0.1 mm, 而顺筋裂缝由于锈胀力的原因, 裂缝宽度较大, 最大宽度达 7.0 mm 左右。正式加载时, 随着荷载的增加, 在加载点附近以及纯弯段之间首先出现新裂缝, 且此时原有的裂缝略变宽, 分级荷载继续增加, 支座附近也出现斜裂缝, 原有裂缝不断向上延伸, 当进入屈服阶段时, 裂缝宽度增加较快, 破坏时, 裂缝扩展最宽的出现在 1[#]梁, 最大裂缝宽度达 4.09 mm。



a) 正面



b) 背面

注: 240 kN-5 表示竖向力 240 kN 下出现的第 5 条裂缝, 以此类推。

图 4 3[#]梁中部长 2 m 部分裂缝开展情况

Fig. 4 Crack development of 2 m long section in middle of 3[#] beam

2 锈蚀钢筋混凝土梁承载力退化的数值计算

2.1 有限元模型建立

根据梁的截面尺寸及配筋进行实体建模，混凝土采用实体单元，钢筋采用桁架单元，混凝土采用损伤塑性模型。混凝土损伤塑性模型参数：剪胀角 $\psi = 30^\circ$ ，流动势偏移量 $\varepsilon = 0.1$ ，双轴受压与单轴受压极限强度比 $\sigma_{b0}/\sigma_{c0} = 1.16$ ，不变量应力比 $K_c = 0.667$ ，黏滞系数 $\mu = 0.0005$ 。钢筋参数为：密度 $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量 $E_s = 200$ ，泊松比 $\nu = 0.3$ 。

底部直径为 20 和 25 mm 的钢筋与混凝土之间通过非线性弹簧模拟黏结滑移，其黏结滑移本构关系采用 Zhao et al.^[10] 的研究成果，分段赋予底部钢筋截面损失率。混凝土及钢筋有限元模型见图 5。

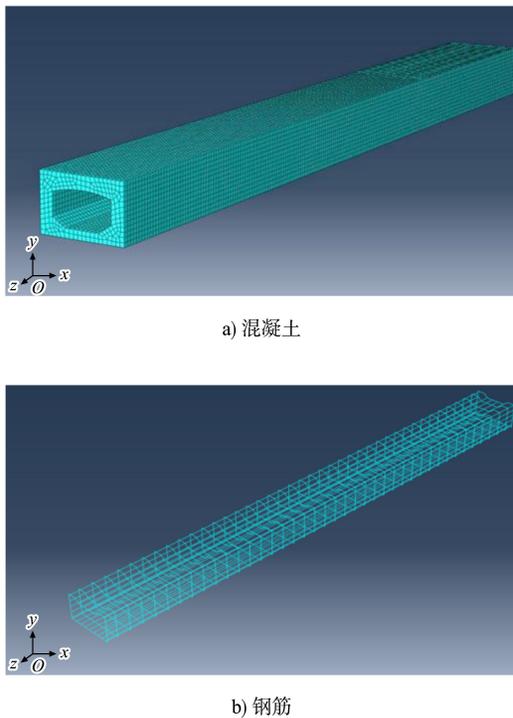


图 5 混凝土及钢筋有限元模型

Fig. 5 Finite element model of concrete and reinforcement

2.2 结果分析

1#、2#及3#梁受拉损伤因子云图见图6。可以看出，沿梁长度方向加载处梁底部最先出现受拉损伤，随着荷载的不断增大，损伤逐渐向加载处两侧扩展，其中向梁中间段扩展速度更快，最终沿梁长度方向均有损伤，从而导致混凝土开裂。

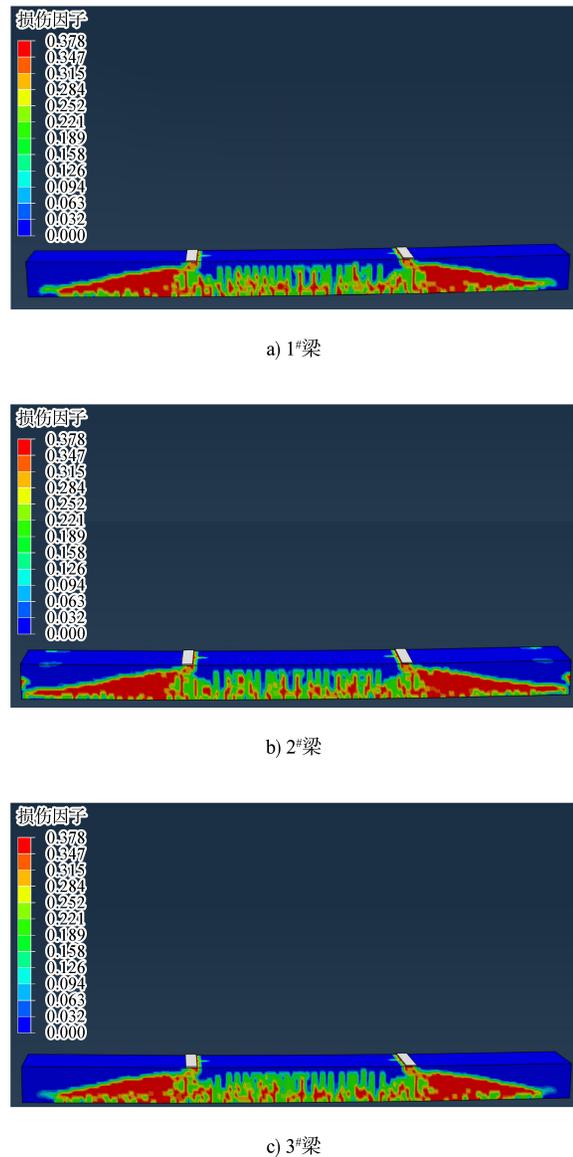


图 6 1#、2#及3#梁受拉损伤因子云图

Fig. 6 Tensile damage factor nephogram of 1#, 2# and 3# beam

通过计算得到梁的荷载位移曲线见图7，梁开裂荷载和极限荷载试验结果和数值结果对比见表1。通过与试验结果进行对比发现，极限荷载试验结果与计算结果较接近，误差在10%以内，但开裂荷载计算结果误差个别偏大。分析原因：实际梁构件钢筋长度方向锈蚀不均匀，理论上，对于钢筋混凝土梁，其正截面受弯承载力由最大纵筋损失率截面控制。然而，最大纵筋损失率截面位置通常无法预知，且实际加载过程中受拉区混凝土开裂位置具有随机性，导致开裂荷载也有一定的离散性。本文采用钢筋平均截面损失率，因此，开

裂荷载和极限荷载随损失率的增大荷载有所减小, 但 试验数据得到的开裂荷载则没有明显的规律。

表 1 梁的开裂荷载与极限荷载试验结果与数值结果对比

Tab. 1 Comparison of test results and numerical results of cracking load and ultimate load of beams

梁编号	损失率/%	开裂荷载试验结果/kN	开裂荷载数值结果/kN	误差/%	极限荷载试验结果/kN	极限荷载数值结果/kN	误差/%
1#	18.33	120	179.0	49.0	562	596.6	6.2
2#	15.30	200	179.9	10.1	624	600.4	3.8
3#	20.57	200	178.3	10.9	552	593.1	7.4

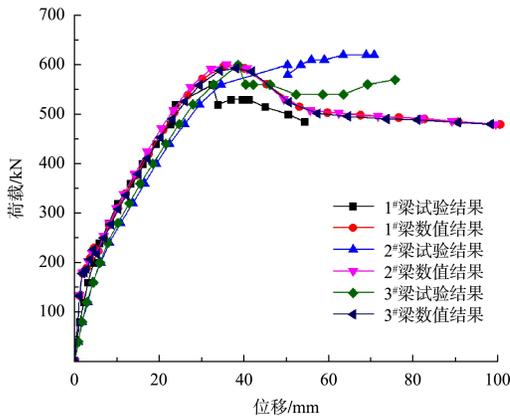


图 7 荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curve

3 锈蚀钢筋混凝土梁受弯承载力计算方法

本文在规范附录 A 锈蚀后钢筋混凝土构件承载力验算的基础上进行改进, 规范中规定了截面损失率大于 5% 且不大于 10% 的钢筋, 腐蚀后钢筋强度设计值计算方法, 根据此公式截面损失率为 10% 时, 锈蚀后钢筋强度设计值为未锈蚀钢筋强度设计值的 0.99, 减小幅度几乎可以忽略。因此在计算锈蚀钢筋混凝土梁受弯承载力时可不考虑钢筋强度的折减。

受拉钢筋腐蚀后强度利用系数涉及锈蚀后钢筋截面积, 现场检测评估得到的往往是在役构件内多根受力钢筋的整体平均截面损失率。实际某一构件同一截面处受拉钢筋的锈蚀率并不相同, 且存在较大的随机性, 若采用单根钢筋的平均截面损失率可能高估或低估了构件的剩余承载能力。因此本文根据锈蚀钢筋的剩余截面面积分布概率, 采用 Monte-Carlo 方法, 对某一构件最危险截面处的所有钢筋锈蚀率进行抽样计算。

假设构件内所有受拉钢筋的锈蚀特征相近, 即同一构件内受拉钢筋的平均截面损失率和残余截面面积概率分布模型相同, 因此受拉钢筋的平

均截面损失率 η_{av} 可视作为构件整体钢筋损失率 η_{AV} 。考虑构件整体钢筋损失率 η_{AV} 为 4% ~ 30%, 构件内受拉钢筋数量 N_{rebar} 为 4 ~ 12 根, 采用 Monte-Carlo 算法分别模拟生成构件内同一截面处各受力钢筋的截面面积, 取其平均值作为构件的截面损失率样本。重复抽取并计算得到 10 万个样本数据后将抽样所得的样本数据从小到大排列, 可根据评估需求, 取 50%、75% 或 95% 分位数的值作为构件截面钢筋损失率 η_{SC} 。考虑最不利的情况, 取 95% 分位数作为本文的计算截面损失率。将广义极值分布的构件截面损失率 η_{SC} 与构件整体损失率 η_{AV} 之比定义为锈损系数 $\alpha = \eta_{SC} / \eta_{AV}$ 。本文提出的广义极值分布模型计算所得的值见表 2。

表 2 不同构件整体钢筋锈蚀率和构件受拉钢筋数量下构件锈损系数的计算结果

Tab. 2 Calculation results of corrosion ratio of whole steel bar of different members and rust coefficient of member in different number of steel bars under tension

$\eta_{av}/\%$	α				
	$N_{rebar} = 4$ 根	$N_{rebar} = 6$ 根	$N_{rebar} = 8$ 根	$N_{rebar} = 10$ 根	$N_{rebar} = 12$ 根
4	2.216	2.069	1.981	1.916	1.870
6	1.867	1.738	1.664	1.614	1.574
8	1.675	1.567	1.495	1.452	1.420
10	1.568	1.468	1.408	1.368	1.335
12	1.494	1.400	1.346	1.306	1.279
14	1.452	1.366	1.313	1.277	1.253
16	1.427	1.344	1.292	1.259	1.234
18	1.396	1.318	1.271	1.238	1.215
20	1.373	1.297	1.253	1.221	1.200
22	1.348	1.275	1.230	1.203	1.182
24	1.327	1.263	1.220	1.190	1.171
26	1.317	1.246	1.207	1.182	1.161
28	1.306	1.242	1.203	1.176	1.158
30	1.293	1.229	1.192	1.167	1.149

已知某一构件钢筋的平均截面损失率, 可根据受拉钢筋数量通过表 2 内插得到构件最危险截

面处所有钢筋的平均截面损失率,再通过规范方法计算锈蚀后钢筋强度利用系数,得到锈蚀后构件的承载力。

通过考虑钢筋剩余锈蚀面积和锈蚀钢筋强度

利用系数,计算锈蚀钢筋混凝土构件承载力,计算得出梁的极限承载力值的结果见表3。本文计算结果与试验值相比,误差在10%左右,且弥补了规范钢筋截面损失率大于10%计算方法不明确的问题。

表3 承载力模型计算值与试验值比较

Tab. 3 Comparison of calculation value of bearing capacity model and test value

梁编号	$\eta_{AV}/\%$	$\eta_{SC}/\%$	配筋指标 q_0	强度利用系数 α_{sci}	承载力计算值 F_j/kN	承载力试验值 F_s/kN	F_j/F_s	误差/ $\%$
1#	18.33	22.56	0.142	1.0	523.07	562	0.93	6.9
2#	15.30	19.11	0.148	1.0	541.70	624	0.87	13.2
3#	20.57	24.89	0.138	1.0	510.50	552	0.92	7.5

4 结论

1) 实际工程中,锈蚀钢筋混凝土梁由于每根钢筋最大截面损失率、平均截面损失率存在较大的随机性,导致梁构件极限承载力和开裂荷载与钢筋损失率之间并没有明显的相关性,主要原因是测得的钢筋损失率为某一根代表性钢筋的截面损失率,同一构件中所有钢筋的截面损失率也存在随机性。

2) 有限元分析方法采用每根钢筋的平均截面损失率,采用弹簧形式模拟钢筋与混凝土间的黏结滑移,极限荷载与开裂荷载与试验结果接近,误差在10%以内,说明采用平均截面损失率评估锈蚀钢筋混凝土梁承载力是可行的。

3) 规范对于钢筋锈蚀截面大于10%的钢筋强度设计值并未给出,需要通过试验或经验值确定,计算不方便。实际上锈蚀钢筋本身材料属性并未发生较大变化,尤其是钢筋实际强度并未随钢筋截面损失率增加而降低,影响承载力降低的主要原因是锈蚀钢筋截面减小和黏结强度退化。本文在规范计算方法基础上未考虑钢筋强度退化,并给出了构件同一截面处所有钢筋的截面损失率与某一代表性钢筋截面损失率的关系,可较准确地评估锈蚀钢筋混凝土梁的承载力,误差在10%左右。

参考文献:

[1] 张伟平,李崇凯,顾祥林,等. 锈蚀钢筋的随机本构关系[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 920-926.

ZHANG W P, LI C K, GU X L, et al. Stochastic model of constitutive relationship for corroded steel bars [J]. Journal of building materials, 2014, 17(5): 920-926.

[2] 王晓刚,王宇,秦麟,等. 混凝土结构中钢筋锈蚀不均匀性对其力学性能退化的影响[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2021, 34(1): 69-77.

WANG X G, WANG Y, QIN L, et al. Effects of non-uniform corrosion on mechanical degradation of corroded rebars in concrete structure [J]. Journal of Yantai University (Natural science and engineering edition), 2021, 34(1): 69-77.

[3] GU X L, GUO H Y, ZHOU B B, et al. Probability distribution model for cross-sectional area of corroded reinforcing steel bars [J]. Journal of materials in civil engineering, 2014, 26(5): 822-832.

[4] 金伟良,赵羽习. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯强度的试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(5): 9-11.

JIN W L, ZHAO Y X. Test study on bending strength of corroded reinforced concrete beams [J]. Industrial construction, 2001, 31(5): 9-11.

[5] 惠云玲,李荣,林志伸,等. 混凝土基本构件钢筋锈蚀前后性能试验研究[J]. 工业建筑, 1997, 27(6): 14-18, 57.

HUI Y L, LI R, LIN Z S, et al. Experimental studies on the property before and after corrosion of rebars in basic concrete members [J]. Industrial construction, 1997, 27(6): 14-18, 57.

[6] MANGAT P S, ELGARF M S. Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement [J]. ACI structural journal, 1999, 96(1): 149-158.

(下转第88页)