

文章编号:1673-2049(2006)03-0061-05

锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力计算

王大宏¹, 范 猛²

(1. 西安外国语大学 后勤服务集团, 陕西 西安 710061;

2. 深圳市鹏城建筑集团有限公司 项目部, 广东 深圳 518040)

摘要:针对目前锈蚀钢筋混凝土构件的研究仅考虑钢筋锈蚀程度的影响,而忽略了在相同锈蚀程度下构件其他参数对承载力退化的影响,导致现有计算模型参数相差较大的问题,对现有锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力计算方法进行了对比分析。基于无粘结钢筋混凝土梁的研究成果,分析钢筋锈蚀程度、截面配筋率对锈蚀损伤构件的承载力退化产生的影响,综合考虑锈蚀构件截面配筋指标以反映不同构件参数对其产生的影响及无粘结梁钢筋强度利用系数的计算公式,建立了一般锈蚀钢筋混凝土梁受拉钢筋强度利用系数的计算公式。经试验验证,数据吻合很好,其结果有益于完善和发展锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力的计算方法。

关键词:锈蚀钢筋混凝土梁;锈蚀程度;抗弯承载力;退化机理;无粘结

中图分类号: TU378.2

文献标志码: A

Flexural Bearing Capacity Calculation of Corroded Reinforced Concrete Beams

WANG Da-hong¹, FAN Meng²

(1. Logistics Service Group, Xi'an International Studies University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. Department of Project, Shenzhen Pengcheng Construction Group Ltd, Shenzhen 518040, Guangdong, China)

Abstract: The present researches on corroded reinforced concrete members mainly focused on the corroded degree of steel bars, and other influences were systematically considered. These resulted in the differences among the existing parameters of calculation model. Therefore, the calculation methods of flexural bearing capacity strength of corroded reinforced concrete beams were comparatively analyzed. Based on the study results on the non-bond reinforced concrete beams, factors that influence the stress of steel bar in heavily corroded reinforced concrete members were investigated in detail. The results show that reinforcement index can reflect the influences of both concrete strength and reinforcement ratio on the steel stress. The degrading mechanism of bearing capacity for ordinary corroded reinforced concrete beams was analyzed, and a calculation formula of flexural capacity was proposed, which considers both corrosion degree and reinforcement index. The method was used to analyze large numbers of tested members, and there was excellent agreement between calculation results and experiment results. The results were useful to perfect the calculation method of the flexural bearing capacity of corroded reinforced concrete beams.

Key words: corroded reinforced concrete beam; corroded degree; flexural bearing capacity; deterioration mechanism; non-bond

0 引言

各国学者通过试验研究和有限元分析等手段,对锈蚀钢筋混凝土受弯构件的结构性能做了大量的研究,构件类型包括梁和板,有矩形截面也有 T 型截面,构件的获取途径有快速锈蚀试验,也有长期自然暴露,还有取自实际工程^[1]。关于锈蚀钢筋混凝土构件的承载力,现已提出了一些计算方法,其基本思路大体一致,但在系数取值上存在差异。

对现有的锈蚀钢筋混凝土梁承载力的计算方法做对比分析,对引起锈蚀钢筋混凝土梁承载力退化的因素及机理进行深入分析,提出了锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力的计算方法,由此方法得到的试验结果,为锈蚀损伤构件的承载力评估提供理论依据。

1 现有承载力计算方法

钢筋锈蚀对构件抗弯承载力的影响主要表现在 4 个方面:钢筋截面面积减小、构件截面尺寸相应变小、钢筋强度降低,以及钢筋与混凝土之间的粘结性能退化。对于锈蚀引起的前 3 个因素,在承载力计算中相对容易考虑,且概念上也较明确;对于粘结退化的影响,目前则主要是通过钢筋与混凝土的协同工作系数来考虑,并且在试验基础上给出了该系数的计算公式。

现有锈蚀钢筋混凝土梁的承载力计算方法是,先根据锈蚀程度确定钢筋与混凝土的协同工作系数,再考虑钢筋锈蚀损伤后的实际截面面积和屈服强度,最后按混凝土规范中完好构件承载力公式计算锈蚀梁的抗弯承载力。

从现有的计算方法来看,计算锈蚀钢筋混凝土梁承载力的关键是确定钢筋与混凝土的协同工作系数。本文中选择了不同的损伤指标,如裂缝宽度、钢筋截面损失率、锈蚀损伤范围^[2]等,建议了协同工作系数的取值方法。

(1)惠云玲等根据试验结果,以钢筋直径和锈胀裂缝宽度作为主要指标,提出的协同工作系数计算公式为^[3]

$$k_s = \begin{cases} 1.0 & w \leq 0.5 \text{ mm} \\ (1.1 - 0.09d/10)(1.12 - w/9.4) & 0.5 \text{ mm} < w \leq 2.0 \text{ mm} \\ 0.7 \sim 0.8 & w > 2.0 \text{ mm} \end{cases} \quad (1)$$

式中: d 为钢筋直径; w 为锈胀裂缝宽度。

(2)金伟良等以钢筋锈蚀截面损失率作为损伤指标,提出的协同工作系数的计算公式为^[4]

$$k_s = \begin{cases} 1.0 & \delta \leq 1.2 \% \\ 1.0168 - 1.4\delta & 1.2 \% < \delta \leq 6.0 \% \end{cases} \quad (2)$$

式中: δ 为钢筋锈蚀截面损失率。

(3)牛荻涛等根据钢筋种类、锈胀裂缝宽度、构件锈胀开裂长度等,提出的协同工作系数的计算公式为

$$k_s = \begin{cases} 1.0 & w \leq 0.25 \text{ mm} \\ 1.0 - \beta(w - 0.25) & 0.25 \text{ mm} < w \leq w_b \\ k_{s,\min} & w > w_b \end{cases} \quad (3)$$

式中: w_b 为粘结力基本丧失时的界限裂缝宽度,对于光圆钢筋取 $w_b = 0.25 \text{ mm}$,对于变形钢筋取 $w_b = 0.35 \text{ mm}$; β 为配筋指标。 β 和 $k_{s,\min}$ 的取值与构件锈胀开裂的长度 l_w 有关,见表 1。

表 1 β 和 $k_{s,\min}$ 的取值

Tab. 1 Values of β and $k_{s,\min}$

钢筋种类	$l_w \leq l/3$		$l/3 < l_w \leq 2l/3$		$2l/3 < l_w \leq l$	
	β	$k_{s,\min}$	β	$k_{s,\min}$	β	$k_{s,\min}$
光圆钢筋	0.022	0.95	0.067	0.85	0.111	0.75
变形钢筋	0.015		0.046		0.077	

式(1)~(3)的形式各不相同,但都是在锈蚀构件承载力试验研究的基础上,通过回归分析建立协同工作系数与钢筋锈蚀损伤程度的关系。无粘结梁的试验研究和有限元分析结果显示,除了锈蚀程度影响构件承载力退化外,构件的混凝土强度、配筋率、跨高比、荷载作用形式等也对锈蚀构件的承载力退化有较大影响。

2 抗弯承载力分析

由于构件截面几何参数的变化以及钢筋锈蚀后的截面面积在承载力计算中相对容易考虑,在此将重点讨论锈蚀对钢筋强度的影响以及粘结性能退化对钢筋应力的影响。

2.1 锈蚀钢筋的强度

描述锈蚀钢筋强度的指标有名义屈服强度和实际屈服强度。名义屈服强度为钢筋屈服时的屈服拉力与钢筋公称面积为(锈蚀前的面积)的比值;实际屈服强度为屈服拉力与锈蚀后实际截面面积的比值。锈蚀引起的截面尺寸相应变小势必要降低钢筋所能承受的拉力,从而导致钢筋的名义屈服强度降低。若是均匀锈蚀,钢筋的实际屈服强度则不会降低,但实际上钢筋锈蚀是不均匀的,往往坑蚀比较严重,钢筋受荷时坑蚀将引起应力集中,使锈坑处的应力提前达到钢材的屈服应力,从而降低了钢筋的实际屈服强度。另外,钢筋最后是在锈坑处被拉断,此

处的实际面积一般很难获得,而量测的面积往往比实际面积大,这也是造成钢筋实际屈服强度降低的另一个因素。总而言之,不均匀锈蚀是导致钢筋实际强度降低的直接原因。

文献[5]中通过大量试验数据分析,给出的锈蚀钢筋屈服拉力能够较好地考虑锈蚀后钢筋的实际强度变化,根据屈服拉力与锈蚀损伤后的截面面积,可以得出锈蚀后钢筋的实际屈服强度为

$$f_{sc} = (1 - 0.077\delta) f_y / (1 - \delta) \quad (4)$$

式中: f_y 为钢筋锈蚀前的实际屈服强度。

式(4)适用于截面损失率 $\delta \leq 15\%$ 的锈蚀钢筋,当截面损失率 $\delta > 15\%$ 时,由于钢筋的屈服点已不明显,伸长率一般小于规范的允许值,建议按无屈服点的热轧钢筋确定锈蚀钢筋强度。

2.2 粘结性能退化对钢筋应力的影响

锈蚀构件有限元分析结果表明,最大弯矩截面处锈蚀钢筋应变较混凝土应变滞后,钢筋应变与混凝土应变不再满足平截面要求。

从无粘结梁的研究可以看出,粘结性能退化使裂缝间受拉钢筋的应变趋于均匀。从无粘结梁的分析结果来看,尽管构件配筋率在适筋梁配筋率的范围内,但由于缺少粘结力,无粘结构件在破坏时,钢筋不一定屈服;另一方面,并不是所有构件的受拉钢筋都不能屈服,而是取决于构件的配筋指标,当构件配筋指标小于界限配筋指标时,只要钢筋端部锚固不失效,钢筋总能够屈服,因此,粘结性能退化后,只能说钢筋可能不屈服,具体情况还与截面配筋指标、钢筋的锈蚀程度等有关。无粘结梁是普通锈蚀钢筋混凝土梁在粘结力完全丧失时的极限情况,与无粘结梁类似,普通锈蚀钢筋混凝土梁的受拉钢筋也可能不屈服。在现有的锈蚀构件承载力计算模型中,协同工作系数实际上就是对钢筋强度的折减,但没有从概念上明确提出钢筋可能不屈服的实质。将以往的协同工作系数改称为钢筋强度利用系数能更好地反映钢筋强度不能充分发挥的实质,具有明确的物理意义。

现有的协同工作系数计算公式在某种程度上能够反映锈蚀损伤构件的协同工作情况,但都忽略了在同样锈蚀程度下,由于构件参数的不同,粘结力退化引起钢筋与混凝土协同工作性能的退化幅度是有区别的,这也是各国学者基于试验给出的协同工作系数存在差异的原因之一。当配筋指标小于 0.246 时,无论锈蚀程度如何,钢筋都能达到屈服,协同工作系数始终等于 1.0,以往的研究都不能得出这一

结论,而这对于建立锈蚀损伤构件承载力计算模型将非常重要。

2.3 受拉钢筋强度利用系数

2.3.1 截面配筋指标

根据无粘结钢筋混凝土梁截面配筋指标的概念,定义锈蚀钢筋混凝土梁的截面配筋指标为

$$\beta_{0c} = f_{sc} A_{sc} / (f_c b h_0) \quad (5)$$

式中: f_c 为混凝土轴心抗压强度; A_{sc} 为钢筋锈蚀后的截面面积, $A_{sc} = (1 - \delta) A_s$, A_s 为钢筋锈蚀前的截面面积; b 为截面宽度; h_0 为截面有效高度。

2.3.2 锈蚀钢筋强度利用系数

正常钢筋混凝土受弯构件的破坏过程一般是受拉区混凝土开裂,中和轴上移,受拉钢筋屈服,受压区混凝土达到极限压应变;锈蚀钢筋混凝土受弯构件的破坏过程往往是受拉区混凝土开裂,受拉钢筋与受拉区混凝土发生较大滑移,中和轴上移,受压区混凝土达到极限压应变,受拉钢筋可能屈服也可能不屈服,即锈蚀可能导致受拉钢筋的强度不能充分发挥。无粘结梁的分析结果可直接用来评估锈蚀严重构件的承载能力,但对于一般锈蚀钢筋混凝土构件,钢筋强度利用系数还受钢筋锈蚀程度的影响。

试验数据表明,当钢筋锈蚀深度 x_c 为 0.3 mm 左右时,钢筋与混凝土之间的粘结强度已降低到 10% 以下,此时可认为粘结力完全丧失,因此,将锈蚀深度 0.3 mm 作为锈蚀损伤构件有无粘结的界限锈蚀量。当然,也可以根据粘结强度分析方法,计算出粘结力退化系数为 0.1 时的钢筋锈蚀量作为界限锈蚀量,此时确定的锈蚀量将因构件参数不同而改变。

根据无粘结钢筋混凝土梁的研究成果,假定锈蚀损伤构件不发生钢筋端头锚固破坏,锈蚀钢筋的强度利用系数 α_{sc} 可分别按 3 种情况确定。

(1) 当锈蚀构件的配筋指标 β_{0c} 小于界限配筋指标 β_0 ($\beta_0 = 0.246$) 或混凝土表面未出现锈胀裂缝时,取 $\alpha_{sc} = 1.0$ 。

(2) 当混凝土构件锈蚀严重,即钢筋锈蚀深度 $x_c \geq 0.3$ mm 时,可按无粘结梁确定钢筋强度利用系数 α_{sc} ,即

$$\alpha_{sc} = \begin{cases} 1.449 - 1.822\beta_{0c} & \beta_{0c} \leq 0.444 \\ 0.922 - 0.634\beta_{0c} & \beta_{0c} > 0.444 \end{cases} \quad (6)$$

式中:当计算值 $\alpha_{sc} > 1.0$ 时,取 $\alpha_{sc} = 1.0$ 。

(3) 当锈蚀构件的配筋指标 β_{0c} 大于界限配筋指标 β_0 ,且钢筋锈蚀深度 $x_c < 0.3$ mm 时,可根据钢筋未锈蚀时的强度利用系数 $\alpha_{sc} = 1.0$ 和钢筋锈蚀深度 $x_c = 0.3$ mm 时的式(6),并结合式(1)~(3)所反映

的线性退化规律,通过线性内插法确定锈蚀钢筋强度利用系数为

$$\alpha_{sc} = \begin{cases} 1.0 + (1.449 - 1.822\beta_{0c})x_c/0.3 & \beta_{0c} \leq 0.444 \\ 1.0 + (-0.078 - 0.634\beta_{0c})x_c/0.3 & \beta_{0c} > 0.444 \end{cases} \quad (7)$$

实际中,并不是钢筋一旦锈蚀,粘结力就发生退化,而且即使粘结力退化了,在退化幅度较小的情况下,钢筋应变滞后后并不明显,还不足以使钢筋强度利用系数降低;但是,由于粘结力变化情况除了与钢筋锈蚀程度有关外,还与混凝土保护层厚度、混凝土强度、钢筋直径、铁锈产物的种类等密切相关,且影响机理极为复杂,若是要准确确定钢筋应变开始滞后时的锈蚀量,实际中处理起来非常复杂。式(7)实际

表 2 弯矩计算值与试验值的对比

Tab. 2 Comparison of Moment Between Calculation Value and Experiment Value

试件来源	试件编号	$\delta/\%$	x_c/mm	b/mm	h_0/mm	f_{cu}/MPa	A_s/mm^2	f_y/MPa	β_{0c}	α_{sc}	计算值 $M_j/(\text{kN}\cdot\text{m})$	试验值 $M_s/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_j \cdot M_s^{-1}$
文献[5]	B ₁	0.0	0.000	120	168	32.5	307.9	325	0.201	1.00	15.28	16.2	0.943
	B ₂	5.0	0.177	120	168	32.5	307.9	325	0.190	1.00	14.53	14.1	1.031
	B ₃	10.0	0.359	120	168	32.5	307.9	325	0.179	1.00	13.78	12.0	1.148
	L ₁	3.7	0.187	990	360	34.9	3 770.0	257	0.098	1.00	319.92	332.5	0.962
	L ₂	10.2	0.524	990	360	44.6	3 770.0	263	0.073	1.00	307.18	294.9	1.042
	L ₃	14.1	0.732	990	360	40.4	3 770.0	272	0.079	1.00	301.79	271.5	1.112

3 抗弯承载力计算

3.1 计算方法

根据构件锈蚀后的截面配筋指标和钢筋锈蚀程度计算极限状态下受拉钢筋的强度利用系数,即可确定锈蚀钢筋的极限应力,再按规范中计算完好混凝土梁的方法计算锈蚀构件的承载力^[6-10]。

在极限状态下,构件破坏截面的计算如图 1 所示。根据截面平衡条件可得

$$\alpha_1 f_c b x = \alpha_{sc} f_{sc} A_{sc} \quad (8)$$

式中: α_1 为等效矩形的应力值与轴心抗压强度设计值的比值,当混凝土强度等级不超过 C50 时,取 $\alpha_1 = 1.0$; x 为等效矩形应力的混凝土受压区高度。由式(8)确定出混凝土受压区高度后,即可求得锈蚀

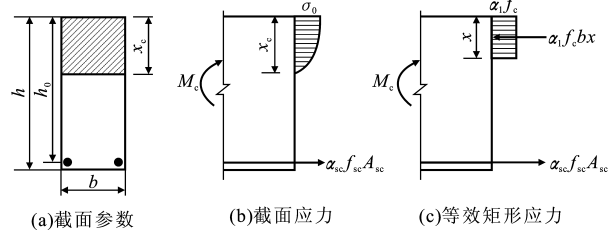


图 1 锈蚀受弯构件正截面承载力

Fig. 1 Cross-Section Bearing Capacity for Corroded Bending Member

上是一种偏于保守的方法,其出发点是便于工程应用。

为了验证上述计算方法的合理性和准确性,收集并整理了袁迎曙通过快速锈蚀制作的 3 根矩形梁和任宝双取自马家堡桥的 3 根简支板梁的试验数据。由于现行规范 GB 50010-2002 中提高了安全度水平,承载力计算中采用的是轴心抗压强度,为了尽量反映试验构件的实际承载力,在验证计算时,混凝土强度仍采用规范 GBJ 10-89 中的弯曲抗压强度,即式(8)、(9)中的 $\alpha_1 = 1.1$ 时,轴心抗压强度 f_c 与立方体抗压强度 f_{cu} 的转换关系为 $f_c = 0.76 f_{cu}$,计算结果见表 2。

钢筋混凝土梁的抗弯承载力为

$$M_c = \alpha_1 f_c b x (h_0 - x/2) = \alpha_{sc} f_{sc} A_{sc} (h_0 - x/2) \quad (9)$$

3.2 试验验证

文献[11]中综合统计了 93 根梁的试验资料,计算值与试验值的相关关系如图 2 所示,所有试件计算值与试验值比值的平均值为 1.004,标准方差为 0.077,可见该方法所得结果与试验结果吻合较好。

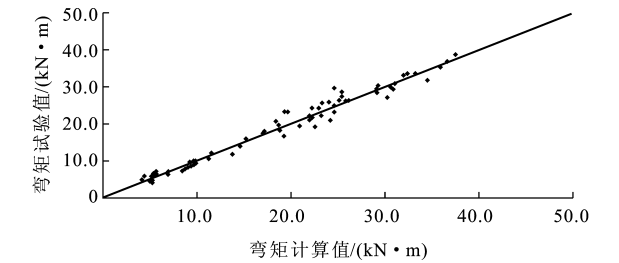


图 2 弯矩计算值与试验值的相关关系
Fig. 2 Related Relationship of Moment Between Calculation Value and Experiment Value

4 结 语

对现有的锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力计算方法进行了对比研究,发现现有计算方法存在的问题。在无粘结钢筋混凝土梁的研究成果基础上,提出钢筋锈蚀程度、截面配筋率对锈蚀损伤构件的承载力

退化产生的影响,并定义了能够综合考虑截面配筋率和混凝土强度的锈蚀构件截面配筋指标以反映不同构件参数的影响。结合无粘结梁钢筋强度利用系数的计算公式,建立了一般锈蚀钢筋混凝土梁受拉钢筋强度利用系数的计算公式,较现有的计算方法有较大改进。

参考文献:

References:

- [1] AL-SULAIMAINI G J. Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behavior and Strength of Reinforced Concrete Members[J]. Structural Journal, 1990,87(2):220-231.
- [2] 任宝双,钱稼茹,聂建国.在用钢筋混凝土简支桥面梁受弯承载力估算[J].工业建筑,2000,30(11):29-33.
REN Bao-shuang, QIAN Jia-ru, NIE Jian-guo. Evaluation of Bearing Capacity in Bending for Existing Simply Supported RC Bridge Beams[J]. Industrial Construction, 2000,30(11):29-33.
- [3] 惠云玲,李荣,林志坤,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.
HUI Yun-ling, LI Rong, LIN Zhi-kun, 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.
- [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 Wei-liang, ZHAO Yu-xi. Test Study on Bending Strength of Corroded Reinforced Concrete Beams[J]. Industrial Construction, 2001,31(5):9-11.
- [5] 牛荻涛,卢梅,王庆霖.锈蚀钢筋混凝土梁正截面受弯承载力计算方法研究[J].建筑结构,2002,32(10):14-17.
NIU Di-tao, LU Mei, WANG Qing-lin. Study on Calculations of Bending Strength of Corroded Reinforced Concrete Beams[J]. Building Structure, 2002, 32(10):14-17.
- [6] 马玉平,马昕,崔建涛.高强度混凝土试验研究[J].建筑科学与工程学报,2005,22(3):67-69.
MA Yu-ping, MA Xin, CUI Jian-tao. Experimental Research on High-Strength Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005,22(3):67-69.
- [7] 宋晓勇,邹银生,涂文戈,等.受火钢筋混凝土柱截面极限承载力研究[J].建筑科学与工程学报,2005,22(4):61-64.
SONG Xiao-yong, ZOU Yin-sheng, TU Wen-ge, et al. Research on Ultimate Load Capacity of Cross Section of Reinforced Concrete Columns Exposing to Fire[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005,22(4):61-64.
- [8] 黄文金,陈宝春.钢管混凝土桁梁受弯试验研究[J].建筑科学与工程学报,2006,23(1):29-33.
HUANG Wen-jin, CHEN Bao-chun. Experimental Research on Concrete-Filled Steel Truss Girder Under Bending[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006,23(1):29-33.
- [9] 刘扬,张建仁.钢筋混凝土桥梁服役期间的可靠性评价[J].中国公路学报,2001,14(2):61-65.
LIU Yang, ZHANG Jian-ren. Reliability Assessment of RC Bridges Throughout Service Lives[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001,14(2):61-65.
- [10] 郑建岚.钢筋混凝土构件抗剪承载力的统一计算方法[J].中国公路学报,1999,12(1):50-55.
ZHENG Jian-lan. A General Shearing Calculation Method of Reinforced Concrete Member[J]. China Journal of Highway and Transport, 1999,12(1):50-55.
- [11] 孙彬.在役钢筋混凝土结构的性能退化与抗震性能评估[D].西安:西安建筑科技大学,2006.
SUN Bin. Structural Performance Degrading and Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Structures[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2006.