

化工钢筋混凝土结构的模糊荷载效应分析^{*}

郭院成 陈捷^{**} 蒋晓东

(郑州工业大学土建系)

摘 要 讨论了化工钢筋混凝土结构在腐蚀环境下,钢筋及砼材料力学性能指标的变化对结构构件和梁柱节点强度及刚度的影响,初步定义了节点模糊约束度概念。结合钢筋混凝土连续梁结构,定义了考虑弯矩内力重分布的模糊调幅系数,从而避免了主观调幅的盲目性。对钢筋混凝土结构的模糊耐久性分析及可靠性分析具有一定的参考意义。

关键词 在役结构;腐蚀度;模糊约束度;模糊荷载效应

中图分类号 TU312

1 模糊腐蚀度

由于外部腐蚀环境的复杂性,且钢筋混凝土结构构件的腐蚀属于应力腐蚀,使其实际发生的腐蚀程度是与结构构件所处的截面应力状态密切相关的^[1]。对同一受力结构的不同结构构件,在外荷载作用下,可能处于受弯状态、受压状态(包括大偏心受压或小偏心受压)、受拉状态或受剪、受扭状态,即使对同一构件,在不同工况下,也可能处于不同的应力状态,或几种受力状态的组合。对同一构件的同一截面,在不同的位置构件上,任一点所处的应力性质或应力值的大小实际上也是不同的。所以说结构构件在任一瞬间、任一不同位置上的腐蚀度是不同的,对任一瞬间的同一截面上的各处,考虑构件不同的腐蚀程度将导致结构内力分析的急剧复杂化,甚至使计算难以实现。故为简化计算,我们引入结构构件的模糊腐蚀度概念,将处于某种侵蚀介质中的钢筋混凝土结构,在结构服役的任意时刻,对同一构件的任一截面,认为其模糊腐蚀度是相同的^[2,3]。其隶属函数定义为

$$\mu_X(x) = \sin\left(\frac{x-X^-}{X^+-X^-}\right)\pi \tag{1}$$

2 模糊约束度

对钢筋混凝土杆系结构而言,结构构件截面尺寸、受力钢筋截面面积的减小以及钢筋屈服强

^{*} 河南省自然科学基金资助项目(964040500)

^{**} (河南财经学院,郑州,450002)

收稿日期:1997-11-11

第一作者 男 1965 年生 博士学位 副教授

度值的衰减, 均将降低构件的极限承载能力。对承受弯矩的构件截面, 结构节点抗弯承载能力的相对降低就意味着结构荷载效应计算模式的改变, 在外部作用不变或只作微小变动的情况下, 使整个结构构件的受力状态发生不可忽视的变化。

对受弯构件而言, 结构腐蚀度的加大将促使截面受压区高度减小, 钢筋应变增大, 从而导致该节点截面的转动能力增强, 促其发生由刚结向铰结的过渡, 导致结构强度、刚度发生衰减。我们以结构构件截面的约束度 γ 表征截面的刚性转动能力。对于刚节点(包括固定端和空间可动刚节点), 截面的约束度定义为 1; 对于铰节点, 约束度定义为 0, 则约束度越大, 其转动能力就越小; 反之, 转动能力就越大。可见, 化工结构在侵蚀介质作用下, 构件截面的相对刚度有所降低, 相应对结构节点的约束度也有所折减, 其约束度将在介于 0~1 之间变动。构件截面的转动能力介于刚节点和铰节点的转动能力之间。

对在役受腐蚀钢筋砼框架结构, 由于受到外部侵蚀介质的影响, 在结构使用 t_1 年后, 结构构件的几何尺寸和材料的力学性能都要发生一定程度的衰减。假设此时框架梁端部截面的模糊高度为 $(\tilde{h}^{(1)})_{\alpha}=[h^{-}, h^{+}]$; 模糊宽度为 $(\tilde{b}^{(1)})_{\alpha}=[b^{-}, b^{+}]$; 纵向受力钢筋的模糊截面面积为 $(\tilde{A}_s^{(1)})_{\alpha}=[A_s^{-}, A_s^{+}]$ 、 $(\tilde{A}_s'^{(1)})_{\alpha}=[A_s'^{-}, A_s'^{+}]$; 受力钢筋的模糊抗拉(压)强度分别为 $(\tilde{f}_y^{(1)})_{\alpha}=[f_y^{-}, f_y^{+}]$ 、 $(\tilde{f}_y'^{(1)})_{\alpha}=[f_y'^{-}, f_y'^{+}]$, 则可计算得其模糊极限抗弯承载能力 \tilde{M}_u 。对于大偏心受压构件来说, 在确定轴力 N_P 的情况下, 同理可计算得受压截面节点的模糊极限抗弯承载能力 \tilde{M}_u 。

假设原结构材料处于完全弹性状态时, 框架梁端截面的计算弯矩为 \tilde{M}_P , 则当 $\tilde{M}_u^{(1)} \geq \tilde{M}_P$ 时, 结构构件截面的模糊约束度 $\tilde{\gamma}=1.0$; 而当 $\tilde{M}_u^{(1)} < \tilde{M}_P$ 时, 有 $\tilde{\gamma} < 1.0$ 。若以 $\tilde{M}_0^{(1)}$ 表示截面极限抗弯承载能力, 则截面模糊约束度可定义为^[2]

$$\tilde{\gamma} = \frac{\tilde{M}_u^{(1)} - \tilde{M}_0^{(1)}}{\tilde{M}_P - \tilde{M}_0^{(1)}} \tag{2}$$

3 模糊杆系结构的内力调幅

对受腐蚀建筑结构, 结构腐蚀度的加大, 将引起构件在该截面约束度的减少。对静定结构来说, 必然导致构件截面抗力的降低, 在外荷载保持不变情况下, 也可能进一步造成构件承载能力不足而破坏, 或使构件发生过大的变形失去正常使用功能而失效。对超静定结构, 结构节点约束度的减小, 相当于部分放松该节点的转动约束; 而构件自身抗弯刚度的减低, 必然导致与同一节点相连系的若干结构构件的相对线刚度发生变化, 最终导致结构发生内力重分布, 使结构的外部荷载效应发生变化。

处于化学侵蚀介质环境中的在役钢筋砼结构, 在不改变其使用功能的前提下, 其外部荷载可以认为是保持不变的。当结构构件控制截面的几何特征、刚度及承载能力不发生改变时, 结构荷载效应也将是不变的。随着结构服役时间的延长, 由于介质的侵蚀作用, 结构构件的几何特征、刚度及承载力发生不可逆的衰减, 构件节点截面的约束度减小, 使结构发生

内力重分布。当其刚度、承载力衰减到一定程度时,该截面就会由于钢筋屈服而出现塑性铰。当然,结构构件控制截面出现塑性铰之后,由于高应力及其它因素的影响,塑性铰处出现局部腐蚀加重,从而引起结构截面承载力进一步降低,可能会在下一个塑性铰出现之前,该截面受压区砼达到极限压应变,截面转角达极限转角,最终砼被压碎而破坏。由于外界环境因素的腐蚀,荷载效应及抗力等都有很强的随机性、未确知性,为了充分利用结构的塑性性能,这里假定暂不考虑局部腐蚀加重,而忽略截面应力的变化对钢筋腐蚀速度的影响。

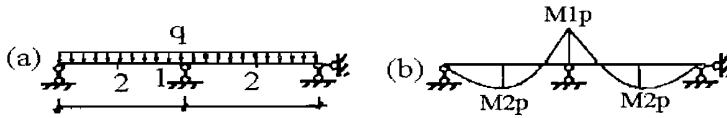


图 1 等截面两跨连续梁

对于如图 1(a)所示的承受均布线荷载的等跨等截面两跨连续梁,当结构的服役时间为 0 时,在外荷载作用下,该结构的弯矩图如图 1(b)所示。而在结构投入使用 t_1 年后,由于外部侵蚀介质的影响,中间支座截面的抗弯承载力衰减为 $\tilde{M}_{u1}^{(1)}$,跨中截面的抗弯承载力衰减为 $\tilde{M}_{u2}^{(1)}$ 。则若 $\tilde{M}_{u1}^{(1)} < \tilde{M}_{lp}$ 时,有中间支座截面的约束度 $(\tilde{\gamma}_1)_\alpha < 1.0$ 。此时支座弯矩可通过引入模糊随机结构的内力调幅系数 $\tilde{\zeta}$,对弹性结构的内力进行修正得到。定义

$$\tilde{\zeta}^{(1)} = \frac{\tilde{M}_u^{(1)}}{\tilde{M}_p} \tag{3}$$

显然,内力调幅系数 $\tilde{\zeta}$ 与构件截面节点约束度有关。当结构构件控制截面为刚结时,其约束度 $\gamma = 1.0$,此时结构处于完全弹性状态,按弹性理论计算所得的内力即为结构实际的内力分布,不需对其进行调幅,即内力调幅系数 $\tilde{\zeta} = 1.0$;当构件控制截面由于受腐蚀或其它原因使约束度下降时,结构进入弹塑性阶段,而使结构发生一定的内力重分布,重分布的程度与控制截面的约束度有关,约束度越大,构件控制截面的刚性就越大,结构就越接近弹性状态,内力调幅系数 $\tilde{\zeta}$ 就越大;约束度 γ 减小,控制截面的刚性也会减小,内力调幅系数 $\tilde{\zeta}$ 就越小,直至形成一个能发生有限转动的塑性铰,此时截面约束度 $\gamma = 0.0$,内力调幅系数最小 $\tilde{\zeta} = \zeta_0$ 。根据节点约束度概念可得

$$\tilde{\zeta} = \tilde{\gamma} + \zeta_0(1 - \tilde{\gamma}) \tag{4}$$

对 $\forall \alpha \in (0, 1)$, 则有

$$\begin{aligned} (\tilde{\zeta})_\alpha &= [\tilde{\gamma} + \zeta_0(1 - \tilde{\gamma})]_\alpha \\ &= [\gamma^- + \zeta_0(1 - \gamma^+), \gamma^+ + \zeta_0(1 - \gamma^-)] \end{aligned}$$

第一个塑性铰将出现在支座处(这里假定腐蚀对于钢筋砼结构构件中所有截面是均匀发生的)。之后,结构发生内力重分布,可能导致结构控制截面的转移。中间支座截面的极限抗弯承载能力将继续呈下降趋势,使外荷载作用下,中间支座处弯矩逐渐减小,而外荷载作用下梁结构跨中截面的弯矩将逐渐增大。在至 $\tilde{M}_{2p} > \tilde{M}_{u2}^{(1)}$ 使跨中截面的约束度 $\gamma_2^{(2)} <$

1.0, 在梁结构跨中出现塑性铰, 从而使整个连续梁结构成为机动体系, 丧失继续承载能力。

4 实例

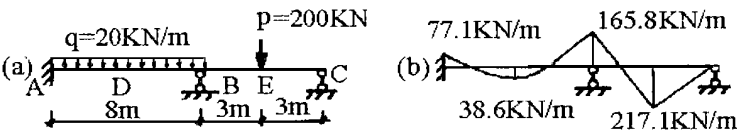


图 2 二跨连续梁结构

如图 2 所示为一等截面两跨连续梁结构, 砼设计强度为 C20 级, 受力钢筋为 II 级, 截面尺寸为 $b \times h = 250 \times 600 \text{mm}^2$, 保护层厚度 $a_s = a'_s = 35 \text{mm}$; 边支座截面上部受力钢筋为 $2\Phi 18$; $A_{s1}' = 509 \text{mm}^2$, 第 1 跨跨中截面底部受拉钢筋为 $2\Phi 18$; $A_{s1} = 509 \text{mm}^2$, 中支座截面上部受拉筋为 $2\Phi 18 + 2\Phi 20$; $A_s' = 1137 \text{mm}^2$, 第 2 跨跨中截面底部受拉筋为 $2\Phi 25$; $A_{s2} = 1964 \text{mm}^2$ 。由于外界使用环境中侵蚀介质的影响, 使结构在投入使用 $t_1 = 15$ 年后, 分别在中支座和跨中截面附近沿受力钢筋方向发现较大裂缝, 部分区域钢筋外露周长分别达 $\omega_A = 10 \text{mm}$, $\omega_B = 15 \text{mm}$, $\omega_E = 10 \text{mm}$ 。假定受力钢筋发生均匀锈蚀, 测得受力筋平均腐蚀深度分别为 $\overline{P_A} = 0.1 \text{mm}$, $\overline{P_B} = 0.3 \text{mm}$, $\overline{P_E} = 0.3 \text{mm}$, $\overline{P_D} = 0.05 \text{mm}$, 根据现场工作环境及经验类比推断, 构件在使用达 7 年左右时, 钢筋开始发生锈蚀, 试求此在役结构的弯矩图。

[解] (1)按弹性理论分析连续梁结构得 A、B、D、E 截面的荷载效应分别为

$$M_{As} = 77.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$$
$$M_{Bs} = 165.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$
$$M_{Ds} = 38.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$
$$M_{Es} = 217.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2)计算控制截面的极限抗弯承载能力

由已知条件知 $t_1 = t_0 = 7$ 年时, 钢筋腐蚀速率 $P_{t0} = 0$; 以及 $t_1 = 15$ 年时, 受力筋平均腐蚀深度分别为 $\overline{P_A} = 0.1 \text{mm}$, $\overline{P_B} = 0.3 \text{mm}$, $\overline{P_E} = 0.3 \text{mm}$, $\overline{P_D} = 0.05 \text{mm}$ 。可近似认为构件的腐蚀过程遵循下列模型

$$\overline{P_A} = 322.6 \{ e^{0.0031(t_1-7)} - 1 \} - (t_1 - 7)$$
$$\overline{P_B} = \overline{P_E} = 109.9 \{ e^{0.0091(t_1-7)} - 1 \} - (t_1 - 7)$$
$$\overline{P_D} = 625 \{ e^{0.0016(t_1-7)} - 1 \} - (t_1 - 7)$$

不考虑截面受力钢筋裸露长度继续变化对结构截面抗力计算模式的影响, 则 A、B、D、E 各截面的抗弯极限承载能力及受力钢筋根限锈蚀率分别为

$$M_A(t^*) = 73.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$
$$M_B(t^*) = 134.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$
$$M_D(t^*) = 79.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$$
$$M_E(t^*) = 232.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$$
$$\gamma_{A0\text{截}} = 0.059$$
$$\gamma_{B0\text{截}} = 0.162$$
$$\gamma_{D0\text{截}} = 0.030$$
$$\gamma_{E0\text{截}} = 0.128$$

(3)计算 A、B 控制截面的约束度及调幅系数

$$\zeta_0^{(A)} = 73.3 / 77.1 = 0.95$$
$$\zeta_0^{(B)} = 134.8 / 165.8 = 0.813$$

据已知条件, $t_1 = 15$ 年时, 结构各控制截面的受力钢筋的截面损失率为

$$\gamma_{A\text{截}}=0.0221<\gamma_{A^0\text{截}}\qquad\gamma_{B\text{截}}=0.062<\gamma_{B^0\text{截}}$$
$$\gamma_{D\text{截}}=0.0111<\gamma_{D^0\text{截}}\qquad\gamma_{E\text{截}}=0.0474<\gamma_{E^0\text{截}}$$

由此可计算得到 A、B 两截面的约束度系数和弯矩调幅系数分别为

$$\gamma_A^{(1)}=0.7895\qquad\gamma_B^{(1)}=0.5226$$
$$\zeta^{(A)}=0.7895+0.95\times(1-0.7895)=0.9896$$
$$\zeta^{(B)}=0.5226+0.813\times(1-0.5226)=0.911$$

各控制截面的极限抗弯承载能力为

$$M_A(t_1)=77.1\times0.9896=76.3\textit{kN}\cdot\textit{m}$$
$$M_B(t_1)=165.8\times0.911=151\textit{kN}\cdot\textit{m}$$
$$M_D(t_1)=81.1\textit{kN}\cdot\textit{m}\qquad M_E(t_1)=249\textit{kN}\cdot\textit{m}$$

参考文献

1

B. M. 莫斯科文·C. H. 克谢耶夫等著·黄炯秋等译·砼和钢筋砼的腐蚀及其防护方法·化学工业出版社·1988

2

郭院成·化工钢筋砼结构可靠性评估与维修决策·哈尔滨建筑大学博士学位论文·1997

3

赵卓,王东炜,郭院成·在役钢筋砼结构的腐蚀可靠度分析·华北水利水电学院学报·第 16 卷·第 2 期·1995

Fuzzy Loading Effect Analysis of Chemical R·C·Structure

Guo Yuancheng

Chen Jie^{∗ ∗}

Jiang Xiaodong

(Zhengzhou University of Technology)

^{∗ ∗}(Financial and Economical Institute of Henan)

Abstract Under the corroded environment, the mechanics performance index of reinforcement and concrete of chemical R·C·structure. This will attack the strength and stiffness of beam column nodes. So new concepts of node fuzzy constraint degree are defined initially in this paper. And connected with R·C·continuous beam structures, we also define fuzzy amplitude adjustment coefficient of considering moment internal force redistribution which avoid the error aroused from amplitude adjustment. These have certain reference to R·C·structures' fuzzy durability analysis and reliability analysis.

Keywords structure in service; corrosive degree; fuzzy constraint degree; fuzzy loading effect