

酸雨环境混凝土受弯构件承载力计算模型研究*

Structural Seismic Design and Analysis of the Memorial Gateway

何叶¹, 马江萍¹, 刘清颖¹, 杨锦¹, 郝茸¹, 张奎²

(1. 西安培华学院 智能科学与工程学院, 陕西 西安 710100;
2. 机械工业勘察设计研究院, 陕西 西安 710043)

摘要: 通过总结酸雨侵蚀混凝土材料的相关试验研究成果, 考虑了混凝土损伤和钢筋的锈蚀, 提出混凝土受弯构件在受酸雨侵蚀下的承载力的计算公式, 并与试验对比。结果表明: 提出受酸雨侵蚀的混凝土受弯构件计算公式与试验结果吻合性较好, 可为西南酸雨地区腐蚀结构的防护提供指导。

关键词: 酸雨侵蚀; 中性化深度; 服役龄期; 受弯承载力计算模型

中图分类号: TU318 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 02-0107-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.020

HE Ye¹, MA Jiangping¹, LIU Qingying¹, YANG Jin¹, XI Rong¹, ZHANG Kui²

(1. College of Intelligent Science and Engineering, Xi'an Peihua University, Xi'an 710100, China;
2. China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710043, China)

Abstract: By summarizing up the relevant test results of concrete material corroded by acid rain, the bearing capacity calculation model of concrete flexural members under the acid rain erosion is derived, based on the concrete damage model and the reinforcement corrosion model. The calculated model value of bearing capacity is in good agreement with the test data. The results provide theoretical basis for the structural protection reliability by the acid rain in southwest.

Keywords: acid rain corrosion; neutralization depth; serving time; flexural strength model

0 引言

在我国, 酸雨污染已成为普遍性的环境问题。1995 年统计 SO₂ 的排放量达到 2369.6 万 t^[1], 已赶超美国成为世界第一位。从 2001 年开始, 我国的 SO₂ 排放量就一直在 2000 万 t 以上, 并且酸雨在我

国的分布呈现地区差异性^[2]。在秦岭淮河线以南及青藏高原以东的地区分布较为广泛; 东部区域, 如华中、华南、西南及华东地区酸雨污染较为严重, 北方地区只有局部地区出现酸雨。进入新世纪, 我国酸雨分布呈现扩大化、严重化的趋势。酸雨对建筑物的腐蚀使得建筑的使用性能下降, 不仅维修费用增加, 且带来严重的安全隐患。目前针对酸雨侵蚀下混凝土材料性能影响的研究较多, 但混凝土构件层次的研究较少。结合目前酸雨侵蚀下混凝土材料性能研究的科研成果^[2-4], 推导探究酸雨环境侵蚀下的混凝土受弯构件承载力计算公式。

* 基金项目: 陕西省社会科学基金项目 (2020J018)。

作者简介: 何叶 (1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 结构设计及工程抗震等。

收稿日期: 2024-01-04

建筑结构

1 钢筋和混凝土共同作用遭受酸雨侵蚀的机理

大气中的 S、N 氧化物遇水发生反应，形成酸性雨水渗入混凝土内，根据菲克定律受酸雨侵蚀的混凝土截面可分为侵蚀区、反应区和未侵蚀区三个区域，如图 1 所示。在酸雨侵蚀区内，酸雨与该区混凝土充分反应；在反应区内，存在一定浓度的酸雨溶液和未被完全酸化的混凝土；未侵蚀区内的混凝土完好。

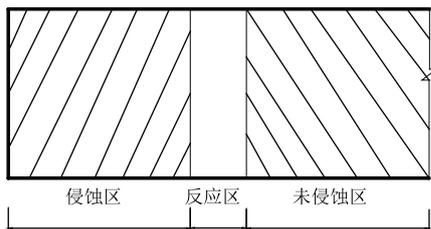


图 1 侵蚀混凝土截面区域划分

Fig. 1 Division of erosion concrete cross-section area

酸雨溶液与混凝土有机组分发生化学反应，引起混凝土的力学和物理性能变化，导致承载力下降。酸雨侵蚀由外向内发展，当侵蚀达到钢筋保护层厚度后，混凝土开裂钢筋暴露在空气中，与酸雨、空气中的氧气和水蒸气接触，钢筋锈蚀并产生内膨胀力，钢筋和混凝土变形不再协调，加剧混凝土保护层的开裂，导致钢筋锈蚀程度进一步加深，最终引起受压区钢筋局部失稳，结构遭受破坏，如图 2 所示。

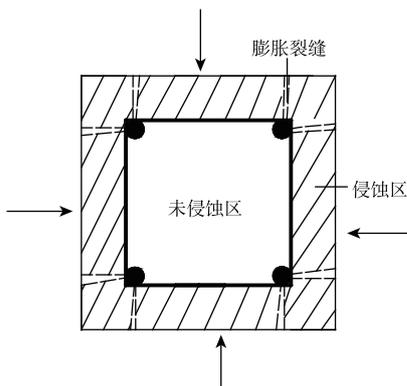


图 2 混凝土和钢筋协同工作破坏示意图

Fig. 2 Schematic diagram of collaborative failure of concrete and steel reinforcement

2 混凝土损伤模型

我国大多数地区燃煤使用较多，酸雨区域降水

属于硫酸型，阴离子主要为硝酸根和硝酸根离子。假设混凝土受弯构件在酸雨侵蚀的环境下，当混凝土被中和时，即失去对钢筋的保护作用。为更好地反映酸雨对结构侵蚀的影响，结合工程实际，通常采用干湿交替法对混凝土进行酸雨侵蚀试验，文献 [3] 通过大量实验拟合得到混凝土的中性化深度表达式：

$$h(t) = 0.0014965t \sqrt{\frac{50.83}{c_{(H^+)}}} + 0.78209 \left[\frac{c_{(SO_4^{2-})}}{c_{(H^+)}} \right]^{-0.062267} \quad (1)$$

式中： $h(t)$ 为混凝土的中性化深度，mm； t 为服役年限，y； $c_{(H^+)}$ 为 H^+ 浓度，mol/L； $c_{(SO_4^{2-})}$ 为 SO_4^{2-} 浓度，mol/L。

不同地区酸雨化学成分和 pH 不同，为更准确确定结构服役期间酸雨侵蚀后的中性化深度，需对当地酸雨的化学成分等进行分析，确定酸雨中 $c_{(H^+)}$ 、 $c_{(SO_4^{2-})}$ 的值。

当混凝土受酸雨侵蚀较严重，中性化深度 $h(t)$ 大于混凝土的保护层厚度 c 时，混凝土对钢筋保护作用消失。此时混凝土构件服役时间 t_1 由公式 (2) 计算得到：

$$t_1 = \frac{c - 0.78209 \left(\frac{c_{(SO_4^{2-})}}{c_{(H^+)}} \right)^{-0.062267}}{0.0014965 \sqrt{\frac{50.83}{c_{(H^+)}}}} \quad (2)$$

受酸雨侵蚀后，混凝土试块的抗压强度随着侵蚀时间的增加呈下降趋势。如果将公式中的酸雨浓度保持不变，则混凝土强度的降低率与侵蚀时间成正比。混凝土强度损失主要是因为受酸雨侵蚀后，混凝土因材料性能发生的物理化学变化，在侵蚀影响区域或深度内，材料强度不同程度的降低。用强度损失来评价混凝土受酸雨的侵蚀程度。文献 [3] 中通过试验，研究了酸雨侵蚀下的混凝土抗压强度，得到混凝土抗压强度损失率如下式：

$$\lambda(t) = 1.2311 \left(\frac{c_{(SO_4^{2-})}}{c_{(H^+)}} \right)^{0.0437} \left(\frac{t}{h(t) \sqrt{\frac{50.83}{c_{(H^+)}}}} \right)^{-0.0612} \quad (3)$$

3 钢筋锈蚀模型

钢筋在锈蚀条件下的力学性能，国内外学者已

经做了大量的试验研究工作和理论分析。采用文献[4]中锈蚀钢筋的应力—应变关系，公式符合胡克定律，如下：

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y(\eta) \quad (4)$$

式中： $f_y(\eta)$ 为未锈蚀钢筋的屈服强度。钢筋锈蚀对屈服强度的影响，按照锈蚀后的钢筋截面面积考虑，锈蚀钢筋的等效截面面积如下：

$$A_s(\eta) = A_s(1 - 1.077\eta) \quad (5)$$

式中： $A_s(\eta)$ 、 A_s 分别为锈蚀和未锈蚀钢筋的截面面积； η 为锈蚀钢筋的重量损失率。

4 酸雨侵蚀下混凝土受弯构件的正截面承载力计算

钢筋混凝土受酸雨侵蚀下的力学性能，根据钢筋是否锈蚀，可以分为两个阶段：第一个阶段，钢筋未锈蚀，主要考虑混凝土受酸雨侵蚀造成的截面减小和混凝土的强度降低；第二个阶段，钢筋开始锈蚀，此时除考虑混凝土受侵蚀损失还应对锈蚀钢筋的有效面积及力学性能进行考虑。

混凝土受弯构件在酸雨侵蚀下服役 t 年后，根据混凝土保护层受酸雨侵蚀深度，有如下情况：

(1) 若 $t < t_1$ ，保护层未能完全受侵蚀

根据混凝土受弯构件的截面内力分布，由平衡关系可得到下列平衡方程：

$$f_c(t) b(t) x(t) = f_y A_s \quad (6)$$

对混凝土受压区中心取矩，可得到抗弯强度表达式：

$$M = f_y A_s \left[h_0(t) - \frac{1}{2} x(t) \right] \quad (7)$$

将式 (6) 代入式 (7) 得

$$\begin{aligned} M &= f_y A_s h_0(t) - \frac{1}{2} \frac{(f_y)^2 (A_s)^2}{f_c(t) b(t)} \\ &= f_y A_s h_0(t) - \frac{1}{2} \frac{(f_y)^2 (A_s)^2}{\lambda(t) f_c b(t)} \end{aligned} \quad (8)$$

式中： $\lambda(t)$ 为构件服役 t 年时混凝土抗压强度的损失率； $h_0(t)$ 为混凝土受弯构件服役 t 年时，钢筋合力点至受压边缘的距离； $b(t)$ 为构件服役 t 年时的截面宽度值。

(2) 若 $t > t_1$ ，保护层完全被侵蚀

混凝土结构服役时间增长，酸雨侵蚀程度越深，混凝土受弯构件进入第二个阶段。文献[5]利用有限元对钢筋锈蚀混凝土构件承载力的影响进行分析，

结果表明，钢筋锈蚀降低了钢筋和混凝土之间的黏接性能，增大了钢筋和混凝土的相对滑移，进而影响二者应变的协调关系，此时平截面假定不再适用。钢筋和混凝土间的不协调程度可以表示为：

$$m(\eta) = \varepsilon_{cs} / \varepsilon_s \quad (9)$$

式中： $m(\eta)$ 为其不协调程度； ε_{cs} 为混凝土的虚拟平均应变； ε_s 为钢筋应变。结合文献[4]，给出锈蚀钢筋和混凝土黏结强度折减系数 β 和锈蚀率 η 之间的关系，表达式如下：

$$m(\eta) = 1.16 \beta^{-0.96} \quad (10)$$

锈蚀钢筋黏结强度折减系数 β [4]，按下式计算：

$$\begin{cases} \beta = 1 + 0.5625\eta - 0.3375\eta^2 + 0.055625\eta^3 - 0.003\eta^4 & \eta \leq 7\% \\ \beta = 2.0786\eta^{-1.0369} & \eta > 7\% \end{cases} \quad (11)$$

截面变形后的曲率与钢筋应变和混凝土应变之间的关系如下所示：

$$\phi = \frac{\varepsilon}{y} = \frac{\varepsilon_c}{\xi_n h_0} = \frac{\varepsilon_{cs}}{h_0(1 - \xi_n)} \quad (12)$$

式中： ϕ 为截面变形后的曲率； ε 为距中和轴 y 处的应变； ε_c 为截面受压边缘的混凝土应变； ε_{cs} 为钢筋位置处的混凝土拉应变； $\xi_n = x/h_0$ ， x 为混凝土受压区高度， h_0 为截面有效高度。

在酸雨环境下服役 t 年后的混凝土，截面变形后的曲率 ϕ 表示为：

$$\phi = \frac{\varepsilon_{cs}}{h_0(t) \left(1 - \frac{x(t)}{h_0(t)} \right)} \quad (13)$$

将式 (9) 代入 (13) 则有：

$$\phi = \frac{m(\eta) \varepsilon_s}{h_0(t) \left[1 - \frac{x(t)}{h_0(t)} \right]} \quad (14)$$

假设锈蚀钢筋未达到屈服，根据图3中的平衡关系，可得到平衡方程 $T=C$ ， T 为钢筋拉力， C 为混凝土压力，展开为：

$$\begin{aligned} f_c(t) b(t) x(t) &= f_s(t - t_1) A_s(t - t_1) \\ &= A_s E_s \varepsilon_s (1 - 1.077\eta) \end{aligned} \quad (15)$$

式中： A_s 为钢筋截面面积； f_s 为钢筋应力； E_s 为锈蚀钢筋弹性模量。参照文献[7]取值。由公式 (15) 可得到锈蚀钢筋应变：

$$\varepsilon_s = \frac{f_c(t) b(t) x(t)}{A_s E_s (1 - 1.077\eta)} = \frac{\lambda(t) f_c b(t) x(t)}{A_s E_s (1 - 1.077\eta)} \quad (16)$$

建筑结构

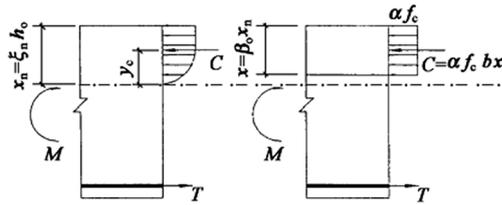


图3 计算简图
Fig.3 Calculation diagram

在酸雨侵蚀钢筋发生锈蚀，构件达到极限受弯强度时，取混凝土受压边缘应变 $\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 0.0033$ 。由截面应变几何关系（见图4），结合截面曲率计算，得到关系式：

$$\frac{\epsilon_{cu} \left(1 - \frac{x(t)}{h_0(t)}\right)}{\frac{x(t)}{h_0(t)} m(\eta)} = \frac{\lambda(t) f_c b(t) x(t)}{A_s E_s (1 - 1.077\eta)} \quad (17)$$

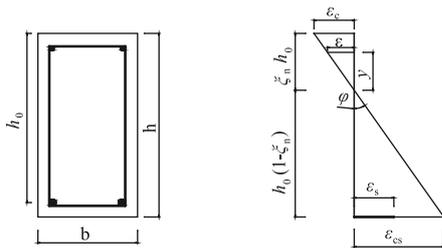


图4 截面几何关系
Fig.4 Cross section geometric relationship

由公式（16）求得 $x(t)$ ，将 $x(t)$ 的值代入公式（15）可求得 ϵ_s 。若 $\epsilon_s \leq f_y/E_s$ ，公式（16）求得的 ϵ_s 成立，说明锈蚀钢筋未达到屈服，则酸雨侵蚀下混凝土受弯构件的受弯极限承载力 M_u 为：

$$M_u = A_s E_s \epsilon_s (1 - 1.077\eta) \left[(h_0 - h(x)) - \frac{A_s E_s \epsilon_s (1 - 1.077\eta)}{2\lambda(t) f_c b(t)} \right] \quad (18)$$

若 $\epsilon_s > (f_y/E_s)$ ，说明锈蚀钢筋已经达到屈服，此时 $x(t)$ 需要重新计算：

$$x(t) = \frac{A_s f_y (1 - 1.077\eta)}{\lambda(t) f_c b(t)} \quad (19)$$

此时酸雨侵蚀下混凝土受弯极限承载力 M_u ：

$$M_u = A_s f_y (1 - 1.077\eta) \left[h_0(x) - \frac{A_s f_y (1 - 1.077\eta)}{2\lambda(t) f_c b(t)} \right] \quad (20)$$

5 模型验证

为验证文中提出的酸雨侵蚀作用下钢筋混凝土

受弯构件承载力计算公式的合理性，结合文献[8]中给出的8根试验构件的试验结果与文中所提混凝土构件受弯承载力公式进行对比，试验参数详见表1结果，文中提出的酸雨侵蚀下混凝土构件承载力与试验较为接近，在钢筋锈蚀程度较低的情况下，公式计算结果与试验数据吻合程度较高。试验值与文中公式计算的对比结果详见表2。

表1 文献[8]中试验参数
Table 1 Experimental parameters in reference [8]

编号	$\eta/\%$	b/mm	h/mm	f_{cu}/MPa	A_s/mm^2	f_y/MPa
1	0	100	160	26.40	153.5	400
2	1.0	180	240	21.10	307.9	387
3	2.2	156	215	28.00	402.1	410
4	3.3	156	215	27.52	508.9	376
5	4.2	158	216	25.12	402.1	393
6	5.4	166	217	25.12	402.1	396
7	16.0	180	240	21.10	307.9	387
8	29.0	180	240	21.10	307.9	387

表2 试验值与论文公式计算的对比结果
Table 2 Comparison results between experimental values and paper formula calculations

构件编号	$M_s/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_j/(\text{kN}\cdot\text{m})$	M_s/M_j
1	7.03	7.51	0.936
2	26.46	26.79	0.988
3	30.90	33.70	0.917
4	31.95	32.38	0.987
5	29.50	29.60	0.997
6	30.55	31.44	0.972
7	20.95	25.01	0.838
8	19.85	23.49	0.845

6 结论

以混凝土受弯构件钢筋和混凝土协同工作的特点，以混凝土保护层为侵蚀边界，分析了酸雨侵蚀对混凝土构件承载力的影响。考虑了混凝土和钢筋在酸雨侵蚀下的力学变化，利用平衡方程理论推导出受弯构件承载力计算公式。结果表明，在构件服役龄期 $t < t_1$ 时，主要为混凝土侵蚀破坏，此时钢筋未发生锈蚀，文中公式与实际试验拟合度高达94%；当服役龄期 $t > t_1$ 时，钢筋开始锈蚀，钢筋和混凝土黏接性能受影响，文中公式与实际试验在钢筋锈蚀程度较低时 ($\eta \leq 10\%$)，拟合程度较高，约为95%；当钢筋锈蚀程度较高，文中公式与实际试验拟合程度降低。文中提出的混凝土受弯构件承载力计算公

(下转第131页)

5 结论

以连锁客专一大跨桥梁为例, 研究了连续梁桥无缝线路地震响应, 并对相关设计参数对地震相应的影响进行了分析。主要得出以下结论:

(1) 轨道约束会提升结构低阶纵向自振频率, 对结构竖向及横向频率影响较小。

(2) 地震激励下轨道约束对主梁及墩台影响较大, 固定墩墩底内力和墩顶位移分别最大减小 27.56% 和 17.43%。

(3) 地震作用下梁缝位置处钢轨纵向力最大, 远大于按现行规范计算得到的对应位置处的钢轨伸缩力。

(4) 小阻力扣件可以明显改善桥上无缝线路受力状态。

(5) 采用摩擦摆减隔震支座可明显减小连续梁固定墩墩底弯矩, 从经济角度出发可选择仅在主墩布置摩擦摆减隔震支座。

(6) 轨道系统对行波效应较为敏感, 考虑行波效应的梁轨系统地震响应, 应重点关注轨道系统; 行波效应通过改变各支承处地震波相位, 进而墩底弯矩产生影响。

参 考 文 献

[1] 刘尊稳. 基于线桥一体化模型的高速铁路桥梁抗震性能及

设计方法研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.

- [2] MARAGAKIS E, DOUGLAS B, HAQUE S. Full-scale response test of a railway bridge. In: structures congress-proceeding. ASCE, 1996: 183-190.
- [3] PETRANGELI M, TAMAGNO C, TORTOLINI P. Numerical analysis of track: structure interaction and time domain resonance [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2008, 222 (4): 345-353.
- [4] 黄艳, 阎贵平, 刘林. 轨道约束对铁路桥梁纵向地震反应特性的影响 [J]. 铁道学报, 2002 (5): 124-128.
- [5] 严猛, 魏贤奎, 王平, 等. 大跨桥上无缝线路纵向地震响应研究 [J]. 铁道学报, 2014, 36 (5): 96-102.
- [6] 谢旭, 王炎, 陈列. 轨道约束对铁路减隔震桥梁地震响应的影响 [J]. 铁道学报, 2012, 34 (6): 75-82.
- [7] 黄宇辰, 王军文, 王少君. 无砟轨道约束对高铁 FPS 隔震筒支梁桥纵向地震反应的影响 [J]. 铁道建筑, 2015 (9): 24-28.
- [8] 石岩, 赵翔宇, 焦应乾, 等. 考虑轨道约束的连续梁拱桥地震反应及减震控制研究 [J]. 世界地震工程, 2022, 38 (1): 148-157.
- [9] 中华人民共和国铁道部. TB10015-2012 铁路无缝线路设计规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
- [10] 戴公连, 汪禹. 考虑轨道约束的大跨梁拱组合桥地震响应研究 [J]. 铁道工程学报, 2016, 33 (1): 70-74, 86.
- [11] 刘旭政, 王鹏. 行波效应对长跨连续刚构桥地震响应的影

响 [J]. 华东交通大学学报, 2018, 35 (1): 20-26.

(上接第 110 页)

式可作为西南酸雨地区腐蚀结构的防护提供指导。

参 考 文 献

- [1] 段颖, 李欣. 论二氧化硫排放状况及污染控制基本对策 [J]. 北方环境, 2002 (4): 13-14.
- [2] 蔡朋程. 浅析中国的酸雨分布现状及其成因 [J]. 科技资讯, 2018, (15): 127-128.
- [3] 石晋涛. 模拟酸雨环境下后张预应力体系耐久性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [4] 周勇. 既有钢筋混凝土受弯构件正截面抗弯承载力研究 [D].

长沙: 长沙理工大学, 2016.

- [5] 高向玲, 李志勇. 锈蚀钢筋混凝土受弯构件抗弯承载力评估 [J]. 结构工程师, 2016, 32 (3), 37-44.
- [6] 徐善华. 混凝土结构退化模型与耐久性评估 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
- [7] 混凝土结构设计规范 GB50010-2010 (2015 年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [8] 陈晓. 不同腐蚀条件下钢筋混凝土梁力学性能试验分析 [D]. 天津: 河北工业大学, 2012.