

文章编号: 1005-9865(2001)01-0045-06

高桩码头锈蚀破损面板残余承载力评估方法

刘富强¹, 张建国¹, 丁乃庆¹, 竺存宏², 朱崇诚², 田双珠²

(1. 天津港务局, 天津 塘沽 300456; 2. 交通部天津水运工程科学研究所, 天津 塘沽 300456)

摘 要: 高桩码头长期工作在具有腐蚀性介质的潮湿环境中, 因钢筋的锈蚀会使构件表面砼胀裂而破损, 目前我国大部分的高桩码头都进入了锈蚀破损的高峰期。通过研究指出: 以往国内外用构件锈蚀破损表面积大小或顺筋裂缝大小的标准来确定维修方案的方法是不正确的。根据一般构件为等截面, 而沿跨度分布的弯矩不均匀的事实, 指出构件在控制断面以外的部位强度有富裕, 允许钢筋适当的锈蚀仍能满足设计强度的新见解。提出了锈蚀破损面板的强度安全性评估准则、强度因子新概念及其具体计算式, 可以量化评估锈蚀破损面板的残余承载力, 为科学制定锈蚀破损面板的维修方案提供参考, 在保证码头结构安全的同时, 大大节省维修费用。

关键词: 桩基; 码头; 锈蚀破损; 板; 承载力; 评估

中图分类号: U656.1⁺13; TV528.01 **文献标识码:** A

Evaluation method of Remanent carrying capacity of rusty slab of open type pier on piles

LIU Fu-qing¹, ZHANG Jian-guo¹, DING Nai-qing¹, ZHU Cun-hong²,
ZHU Chong-cheng², TIAN Shuang-zhu²

(1. Tianjin Port Authority, Tanggu 300456, China; 2. Tianjin Institute of Water Transport Engineering, Tanggu 300456, China)

Abstract: The open type pier on piles is normally located in the wet environment with caustic mediums. On account of steel bar rust, the surface of the concrete member crazes and fails. At present, a majority of open type piers on piles come into the peak period of rust. Based on the research, the authors points out that the previous standard of the size of the exterior rust area and the length of the crack for maintenance, widely adopted by domestic and oversea scholars, is not correct. According to the reality that the member sections are mostly equal, but the bending moments distributed along the span are unequal, we put forward the new concept that the advisable rust on the steel bar can be allowed in the concrete member except the control section part and that it can also satisfy the design demand. The safety assessment rule about the rusty slab, the notion of intensity modulus and its material formula are presented. So we can evaluate the remanent carrying capacity of rusty slabs in a quantitative way. A reliable method to carry out the maintaining of the rusty slab is provided. A large sum of maintenance cost can thus be saved and at the same time the safety of the pier structure ensured.

Key words: pile foundation; pier; rust; slab; carrying capacity; evaluation

海港码头长期工作在具有腐蚀性介质的潮湿环境中, 由于砼为多孔材料, 所以腐蚀性介质会通过砼孔隙侵入到砼内部, 使其内部钢筋产生电化学反应而生锈, 钢筋的锈胀使构件表层砼开裂、剥落, 严重影响码头结

收稿日期: 1999-11-24

作者简介: 刘富强(1967-), 男, 工程师, 主要从事工程设计方面的研究。



构的耐久性和使用的安全性。钢筋锈蚀引起钢筋砼构件的破损是钢筋砼结构的一大通病，称之为钢筋砼结构的“癌症”。根据大量的现场调查资料，高桩码头一般使用 15 年左右就会出现不同程度的锈蚀破损^[1]，现我国很多码头的使用年限超过了 20 年，有的甚至达 40 多年，已普遍进入锈蚀破损维修的高峰期，全国每年要投入数以亿元计的巨款进行码头结构的维修。以往在进行码头的破损构件修复时，一般凭工程技术人员的经验来确定构件的破损等级，如将破损构件分成 A、B、C、D 四个等级标准^[2,3,4]，根据不同的破损等级确定不同的修复方案，因此对破损构件的等级划分是确定修复方案、控制维修费用的关键，但破损等级的划分没有定量的数据可以参照。技术人员在确定修复方案时一般偏向于安全，从而造成一些不需要更换的破损构件进行了更换，不但增加了维修费用，而且在更换新构件时，有时不得不局部停产，造成较大的直接和间接的经济损失。

一般说确定锈蚀破损构件是否需要更换新构件，主要取决于破损构件还有多少残余承载力。由于构件锈蚀破损形态各异，锈蚀破损程度和部位的不同，对锈蚀破损构件残余承载力的估算十分复杂，理论上没有很好的解决办法，也无法用模型试验方法来模拟，国内外对锈蚀破损面板抗弯残余承载力的研究资料很少（以下抗弯残余承载力均称残余承载力）。在少量的研究成果中，大都用构件外表的破损范围或顺筋锈蚀裂缝的大小来估算锈蚀破损构件的残余承载力^[4,5,6]。实际工程中，为了施工的方便，绝大部分的构件均设计成等截面的，实际作用在构件跨度方向的弯矩分布一般是不等的，从而使控制断面以外的断面强度都有较大的富裕，在非控制断面的外表有局部破损，不一定会影响构件的承载力。在进行构件残余承载力评估时，以往国内外学者简单地将表面破损面积加起来或将与断面相垂直的顺筋锈蚀裂缝大小作为评估的依据，从力学角度看是十分不合适的，它不能从本质上反映锈蚀构件的残余承载力，往往会导致错误的结论。

本文从预应力钢筋与砼的相互作用机理入手，研究钢筋锈蚀对钢筋预应力损失的影响，当钢筋表层产生体积为钢的 2.5 倍左右的铁锈时，其膨胀力使保护层砼产生裂缝，甚至产生透空或脱落，降低砼对钢筋的粘结力，削弱钢筋与砼的整体作用；钢筋的锈蚀使钢筋的有效面积减小，从而削弱断面的强度。评估构件的残余承载力，探索锈蚀破损构件残余承载力评估的新途径。

1 试验概况

本研究的试验板取自于 1981 年建的 26 段码头及 1985 年建的 27 段码头的连接段面板。1995 年码头调查时，发现连接段面板的保护层砼由于钢筋锈蚀而产生大面积剥落，然后更换了 65 块面板，在拆换下来的锈蚀破损面板中选取了 12 块具有不同破损程度的面板作为研究的试件，各板的板型如表 1 所示。

表 1 试验板的板型特征

Tab. 1 Characteristics of tested slabs

板型	板号	几何尺寸			板的简图
		长(m)	宽(m)	厚(m)	
实心板	1 [#] 、6 [#] 、10 [#]	6.34	1.48	0.5	
两孔空心板	2 [#] 、3 [#] 、4 [#] 、8 [#] 、9 [#] 、12 [#]	6.85	1.48(1.46)	0.5	
三孔空心板	5 [#] 、7 [#] 、11 [#]	6.85	1.72	0.5	

注：表中()内的数为 9[#]板的宽度。

对 12 块试验板进行承载力试验。试验时将板搁置在支座上，然后在板顶加一对线荷载，测定板的开裂荷载及极限荷载。另外对板端进行钢筋的拔出试验，以求得钢筋预应力不损失的最短钢筋锚固长度。并对面板没有破损处截取钢筋试件进行钢筋力学性能试验及钻取砼芯样进行砼抗压强度试验，为计算面板的理论强度提供参数。以上试验做完后，凿去面板保护层砼，测量钢筋不同截面的锈蚀率。

2 试验结果及分析

2.1 钢筋与砼材料性能试验结果

各板残余承载力试验结束后，共截取了 5 根钢筋试样进行拉伸试验。根据钢筋的拉伸试验结果及残余承载力所达到的极限状态，计算时取 Φ^125 钢筋的极限应力为 680.0MPa， Φ^18 钢筋的极限应力为 700.0MPa。



在进行残余承载力试验后的面板上, 取 $\Phi 55\text{mm}$ 的砼芯样 62 个, 进行了抗压强度试验, 根据 62 个样本试验的统计分析, 得砼试件的抗压强度为 35MPa , 通过折算知砼的标准立方强度 $R=34.6637\text{MPa}^{[8]}$ 。

2.2 板端钢筋拔出试验结果

设钢筋的拔出长度为 l_0 , 钢筋的直径为 d , 受拉钢筋设计强度为 R_s , 拔出力为 P , 则钢筋与砼的平均粘结力 $\bar{\tau}$ 及钢筋受拉应力达到设计强度时所需在砼中的锚固长度 l_m 分别由下式得到:

$$\bar{\tau} = \frac{P}{\pi d l_0} \quad (1)$$

$$l_m = \frac{d R_s}{4 \tau} \quad (2)$$

本试验对 $\Phi 18$ 及 $\Phi 25$ 二种冷拉热轧 III 级筋进行拔出试验, 得锚固长度 l_m 必须满足下式:

$$l_m \geq 16 k d \quad (3)$$

式中, l_m 为钢筋的锚固长度; d 为钢筋的直径; k 为安全系数, 一般取 $k=1.2$, 则 $l_m \geq 20d$ 。

对于锈蚀破损面板, 当其板端完好砼长度满足式(3)时, 说明锈蚀破损面板中的预应力筋两端有足够的锚固, 钢筋锈蚀引起的预应力损失可以不计。

对于高桩码头面板, 其板端搁置在横梁上, 板端受海水中的氯离子影响少, 板端砼一般均没有破损, 能满足式(3)的条件, 大量的现场调查资料也说明了这一点, 所以说锈蚀破损面板一般预应力不受损失。

2.3 锈蚀破损面板钢筋锈蚀程度的测量

为了对钢筋锈蚀情况有一个全面、系统的了解, 对板进行了残余承载力试验、板端钢筋拔出试验, 钢筋及砼取样后, 将受拉区钢筋全部凿出, 清除铁锈, 测量钢筋在各锈蚀部位的锈蚀深度。钢筋的锈蚀情况如下:

- 1) 钢筋锈蚀分布不规则, 锈蚀深度不均匀, 对同一块板某些部位钢筋有锈蚀现象, 某些部位却无锈蚀。
- 2) 钢筋锈蚀形态以坑蚀为主, 从凿出的钢筋表面一般看不出锈坑, 但用铁锤敲掉锈皮, 用钢刷清除黑色锈粉后, 锈坑清晰可见, 而且某些锈坑的深度较深。
- 3) 钢筋锈蚀基本上是单面的, 在靠砼保护层一侧有锈蚀现象, 而其它部位与砼有较好的粘结, 则无锈蚀现象。

钢筋锈蚀表面一般占钢筋截面周长 $1/3$ 左右, 钢筋保护层砼胀裂剥落, $2/3$ 左右的钢筋表面与砼有良好的粘结。

根据实测得试验面板评估断面的钢筋锈蚀率如表 2 所示。

表 2 各板评估断面上钢筋锈蚀率
Tab. 2 Rate of rust of evaluated sections in slabs

板号	1"	2"	3"	4"	5"	6"	7"	8"	9"	10"	11"	12"
$\bar{r}(\%)$	20.0	9.48	1.78	10.05	7.03	11.45	1.57	2.00	2.24	0.9	3.44	1.12

2.4 面板残余承载力试验

对 12 块锈蚀破损面板进行承载力试验, 得各试验板的开裂荷载和极限荷载, 如表 3 所示, 并将钢筋未锈蚀前面板的开裂荷载和极限荷载的计算值也列于表 3 中。表 3 中 M_{crj} 及 M_{maxj} 为未锈蚀面板计算得的开裂弯矩及极限弯矩, P_{crs} 及 P_{maxs} 为锈蚀破损面板承载力试验时作用的开裂线荷载及极限线荷载, M_{crs} 及 M_{maxs} 为推算得锈蚀破损面板的开裂弯矩及极限弯矩。

由表 3 可知, 钢筋锈蚀面板的开裂弯矩除 5"、7"、11" 三孔板外, 试验值与没有破损面板的理论计算值比较接近(关于 5"、7"、11" 三孔板的开裂弯矩试验值比计算值低的主要原因是三孔板施工时预应力钢筋不是均匀张拉, 施工质量有问题), 对于极限弯矩来说, 试验值与理论计算值均相差甚远。从而可以得出如下初步结论: 对于码头锈蚀破损的面板, 由于其两端搁置在横梁上, 一般板端没有锈蚀破损现象, 因此对于钢筋的预应力损失影响不大, 对面板的抗裂度影响不大, 但钢筋锈蚀使砼与钢筋的粘结力减小, 钢筋断面变小, 所以钢筋锈蚀对面板的极限承载力有较大的影响。



表 3 各面板的开裂弯矩与极限弯矩

Tab. 3 Craze bending moment and utmost bending moment of slabs

力及力矩	板 号												
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	
计算值	$M_{crj}(\text{kN} \cdot \text{m})$	504.7	743.7	743.7	743.7	898.9	504.7	898.9	743.7	743.7	504.7	898.9	743.7
	$M_{maxj}(\text{kN} \cdot \text{m})$	799.0	1 397.5	1 397.5	1 397.5	1 700.8	799.0	1 700.8	1 397.5	1 397.5	700	1 700.8	1 397.5
试验值	$P_{crs}(\text{kN})$	260.0	370.0	350.0	370.0	(250.0)	280.0	300.0	370.0	300.0	250.0	272.0	331.0
	$P_{maxs}(\text{kN})$	372.5	807.5	807.5	665.0	(672.5)	415.0	800.0	726.0	750.0	416.0	779.0	775.0
	$M_{crs}(\text{kN} \cdot \text{m})$	470.6	686.5	654.3	679.0	629.1	494.7	600.4	705.0	588.7	462.8	551.8	640.2
	$M_{maxs}(\text{kN} \cdot \text{m})$	639.3	1 392.0	1 392.0	1 154.6	1 520.6	695.2	1 431.6	1 296.9	1 336.8	717.6	1 394.7	1 378.3
评估值	n	10	9	2	10	3	10	3	10	6	10	10	2
	m_p	0.90	0.91	0.98	0.90	0.97	0.90	0.97	0.90	0.94	0.90	0.90	0.98
	m_r	0.8	0.805 2	0.982 2	0.899 5	0.929 7	0.885 5	0.984 3	0.98	0.977 6	0.991	0.965 6	0.988 8
	估算弯矩 M ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	575.28	1 156.2	1 345.2	1 131.4	1 533.8	636.76	1 623.9	1 232.6	1 284.2	712.6	1 478.1	1 354.2
	评估值/实测值	0.90	0.830 6	0.966	0.98	1.0097	0.915 9	1.134	0.950 4	0.960 7	0.9931	1.059 8	0.982 48

注：实测极限荷载中，() 中的数字为加荷点位置在离板端 1/3 板跨位置，其它数字的加荷点均为离板端 1/4 跨处。

3 钢筋锈蚀破损面板残余承载力估算方法

3.1 钢筋锈蚀破损面板残余承载力估算方法

从力学角度来说，面板的承载力是指控制断面的承载力，根据 $\epsilon = M/W$ (ϵ 为面板控制断面上产生的最大应变， M 为控制断面上作用的弯矩， W 为控制断面的抗弯模量)，控制断面上承载力与作用在该断面上的弯矩和抗弯模量有关，与其它断面上的抗弯模量没有关系。以往的研究中，将面板破损部位的面积累加起来进行残余承载力评估，从力学原理上分析是错误的，因为控制断面以外的破损是不会影响控制断面的承载力的，只是钢筋在某断面锈蚀特别严重时，使控制断面的位置转移（面板表面的破损程度对面板的总体刚度将产生影响）。

从力学角度出发，对钢筋与砼相互作用的机理进行评估，钢筋锈蚀破损面板残余承载力评估的主要参数为：

1) 面板残余承载力估算断面的受拉区钢筋的锈蚀率系数

根据预应力面板的抗弯强度计算可知，承载力同钢筋的极限强度及断面的含筋率有关。设 \bar{r} 为面板评估断面的钢筋锈蚀率，则面板钢筋锈蚀承载力下降系数 m_r 为：

$$m_r = 1 - \bar{r} \quad (4)$$

从而得钢筋锈蚀率与残余承载力之间的关系为：

$$M_r = m_r M_{max} \quad (5)$$

式中： M_r 为残余承载力； M_{max} 为设计弯矩； m_r 为钢筋锈蚀的承载力下降系数。

2) 锈蚀破损面板评估断面附近的钢筋与砼粘结的整体性

根据大量现场调查资料知，由于码头面板两端搁置在横梁上，工作条件较好，一般氯离子不太容易侵入保护层内，因此板端钢筋不易生锈，预应力钢筋砼板的两端锚固长度能满足式(3)要求，对于预应力钢筋砼板，因钢筋锈蚀而产生的钢筋预应力损失一般可以不予考虑。对于某些锈蚀破损极为严重的板，其两端完好砼长度小于 l ，如果板的评估断面两侧完好砼累计长度大于 $1.5l$ ，也可不考虑评估断面上的钢筋预应力损失。

钢筋生锈使板跨产生保护层砼胀裂、剥落，减小了评估断面钢筋与砼之间的粘结力，此时预应力钢筋将处于不完全粘结的状态，它的承载力应介于预应力砼构件（完全粘结）与无粘结预应力构件之间的一种状态。设预应力砼的设计弯矩为 M_{max} ，据有关试验研究资料分析，在相同条件下，无粘结预应力梁比预应力砼梁的



承载力降低 30% 左右^[9]。对于锈蚀破损面板, 因钢筋与砼之间粘结力的损失, 其残余抗弯弯矩 M_p 为 $0.7M_{max} < M_p < M_{max}$ 。

由于钢筋锈蚀使保护层砼剥落, 从而影响钢筋和砼的整体性。设评估断面钢筋根数为 n_0 根, 砼因锈蚀剥落而暴露的钢筋根数为 n 根, 则砼因锈蚀而剥落所产生的承载力下降 $0.10n/n_0$, 从而得钢筋与砼粘结力削弱的残余抗弯弯矩 M_p 为:

$$M_p = m_p M_{max} \quad (6)$$

式中: m_p 为粘结力影响系数。

$$m_p = (1 - 0.10 \frac{n}{n_0}) \quad (7)$$

根据以上分析, 锈蚀破损面板残余承载力 M 的估算式为:

$$M = m_p m_r M_{max} \quad (8)$$

根据式(4)、(7)、(8)对试验的 12 块不同锈蚀程度板的残余承载力进行估算, 将锈蚀破损面板残余承载力的估算值列于表 3 中, 便于与试验结果进行比较。

由表 3 可知, 一般钢筋锈蚀面板残余承载力的评估值为实测值的 95% 左右, 评估值同实测值相当吻合, 所以用式(8)来评估钢筋锈蚀面板的残余承载力有足够精度, 可推广在工程实际中应用。

3.2 钢筋锈蚀面板强度安全性评估准则

为了说明方便, 以单向简支板为例推算锈蚀破损面板强度安全性评估准则。面板一般都设计成等截面, 设面板的长度为 l , 在它上面作用均布的堆货荷载 q 。如果在距板端 x 位置产生严重的钢筋锈蚀, 则此断面可能变成控制断面, 需对 x 断面进行强度安全性的评估。

根据材料力学知, 由堆货荷载 q 在 x 断面上产生的弯矩 M_x 为:

$$M_x = \frac{qx}{2}(l-x) \quad (9)$$

跨中控制弯矩(即为设计弯矩) $M_{l/2}$ 为:

$$M_{l/2} = M_{max} = \frac{ql^2}{8} \quad (10)$$

由式(9)、(10)可得 x 断面富裕弯矩 M_0 为:

$$M_0 = M_{max} - M_x = \frac{ql^2}{8} - \frac{qx}{2}(l-x) \quad (11)$$

从而可得评估断面承载力富裕度(或称评估断面的位置系数) m_x 为:

$$m_x = \frac{M_0}{M_{max}} = 1 - \frac{M_x}{M_{max}} \quad (12)$$

则富裕承载力 M_0 为:

$$M_0 = m_x M_{max} \quad (13)$$

另据式(8)知, 钢筋锈蚀在评估断面上损失的承载力 M_1 为:

$$M_1 = (1 - m_p m_r) M_{max} \quad (14)$$

综上所述, 锈蚀破损面板安全度评估准则为:

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } M_0 \geq M_1 \text{ 时} \\ M_0 < M_1 \text{ 时} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{安全} \\ \text{不安全} \end{array} \quad (15)$$

将式(13)、(14)代入式(15), 得锈蚀破损面板强度安全度评估准则为:

$$\left. \begin{array}{l} \beta = \frac{m_x}{m_p m_r} \geq 1 \\ \beta = \frac{m_x}{1 - m_p m_r} < 1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{安全} \\ \text{不安全} \end{array} \quad (16)$$

式中, β 为强度因子。当面板锈蚀破损时, 可以用面板控制断面的强度因子 β 来判定面板在钢筋锈蚀后是否还有足够的强度, 从而确定此板的修复方案。

对于均布荷载作用下的单向简支板, $1 - m_p m_r, m_x$ 与评估断面 x 之间的关系如图 1 所示。

由图 1 可知, 对于 x 断面, 当承载力损失率 $1 - m_p m_r$ 的点 a 落在阴影处, 表示面板安全, 破损构件只要

进行适当的修补即可。当承载力损失率 $1-m_p, m_r$ 的点 b 落在空白处, 则表示面板不安全, 需要更换新板。

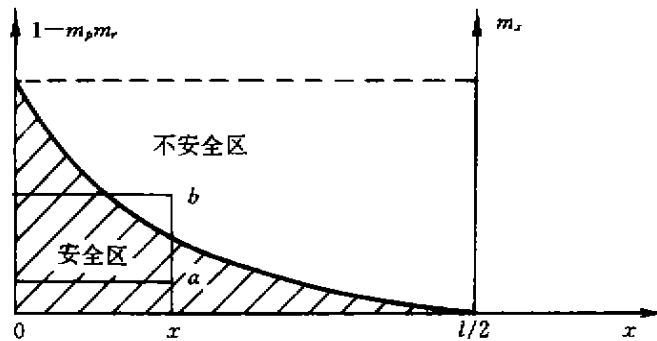


图 1 强度安全度评估准则图

Fig. 1 The safety assessment rule

4 结 语

高桩码头面板的钢筋锈蚀破损存在很强的随机性, 锈蚀破损的位置不定, 锈蚀破损的形态各异, 使钢筋锈蚀破损面板残余承载力的评估十分复杂, 理论上没有很好的解决办法, 试验资料也不多。通过对 12 块从码头上拆换下来的锈蚀破损面板的试验, 得到如下结论:

1) 以往国内外多数研究者均用板表面锈蚀破损范围的大小来对破损面板分等级, 由面板破损等级确定破损面板是否需要修补或更换, 这从力学观点来分析是不妥的。

2) 由于制作工艺的方便, 板一般均设计为等截面, 而在外荷载作用下板各截面上产生的弯矩却不等, 其最大为设计弯矩, 最小为 0, 从而可推知面板在控制断面以外的部位承载力有富裕, 所以可以允许面板在非控制断面上有适当的钢筋锈蚀, 并不影响面板的承载力。指出面板的某些部位可以允许钢筋锈蚀的事实, 它是本文建立锈蚀破损面板安全性评估准则的依据。

3) 从预应力钢筋砼面板中钢筋与砼的相互作用机理出发, 提出了评估锈蚀破损面板残余承载力的主要参数及其确定的方法。

4) 提出了影响残余承载力的主要参数与残余承载力的关系, 在此基础上建立了锈蚀破损面板残余承载力的估算公式。

5) 提出了锈蚀破损面板的强度安全性评估准则及强度因子, 为锈蚀破损面板修复方案的确定提供了科学依据。

6) 本研究提出的锈蚀破损面板残余承载力估算公式力学概念清晰, 表达式简单, 参数较容易确定, 可在工程中应用。

参考文献:

- [1] 刘卫民, 竺存宏, 等. 海港码头锈蚀破坏及其防治对策的研究总报告[R]. 交通部天津水运工程研究所, 1991.
- [2] [日]清水建设株式会社研究所. 已有建筑物可靠性鉴定方法和检测手册[Z]. 冶金工业部建筑研究总院技术情报研究室, 1981.
- [3] 李清富, 丁自强. 港工结构破损状态的预测和评估[J]. 水道港口, 1992, 2.
- [4] 顾绳仁, 陈玉梅. 港工码头面板破损等级评估方法及承载力折减系数的研究[J]. 海洋工程, 1993, 11(2): 67-72.
- [5] 曹易居. 对钢筋砼结构破损评估方法若干问题的看法[J]. 四川建筑科学研究, 1988, 3.
- [6] 惠云玲, 李荣, 等. 砼基本构件钢筋锈蚀前后性能试验研究[J]. 工业建筑, 1997, 6.
- [7] 全明研. 老化和损伤的钢筋砼构件的性能[J]. 工业建筑, 1990, 2.
- [8] J. H 邦奇. 结构砼的试验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.
- [9] F 莱昂哈特. 预应力砼[M]. 北京: 水利水电出版社, 1989.