

Comparative Study on Abrasion Method & Drilling Method to Estimate Actual Stress of Steel Bars Embedded in Reinforced Concrete Building Members

Li Pan

Institute of Building Structures, China Academy of Building Research, Beijing
Email: Panli535482@sohu.com, Panlicabr@163.com

Received: Feb. 6th, 2014; revised: Mar. 4th, 2014; accepted: Mar. 13th, 2014

Copyright © 2014 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In security assessment, quality assurance, retrofitting and accident analysis for reinforced concrete structures, it is often needed to estimate the actual stress of longitudinal steel bars embedded in members, then as the basis, to estimate the actual internal forces of those members, but detection and identification now about existent concrete structures can hardly provide these dates. Abrasion Method and Drilling Method are the two practical ways proposed in recent years by author, which are based on elastic analysis and routine testing (analytical calculation of supplementary measured variable), and the accuracy meets engineering needs by application test verifications in past. In this paper, the two methods are introduced and comparatively analyzed, the intrinsic link and consistency between these two are proved as the reference for detection, identification and similar studies of reinforced concrete structures. Based on the same principle and further improvement of the test process and the accuracy, Drilling Method can also be used to estimate the combined stress (including temperature stress) in super-long concrete structures and the prestress efficiency in prestressed concrete structures.

Keywords

Abrasion Method; Drilling Method; Actual Stress of Steel Bars Embedded in Concrete Members; Supplementary Measured Variable; Analytical Estimation in Elastic Range; Combined Stress; Prestress Efficiency

磨筋法与钻孔法推算混凝土构件配筋实际应力的比较研究

潘 立

中国建筑科学研究院建筑结构研究所, 北京

Email: Panli535482@sohu.com, Panlicabr@163.com

收稿日期: 2014年2月6日; 修回日期: 2014年3月4日; 录用日期: 2014年3月13日

摘 要

既有建筑结构的评估、质量鉴定、加固改造, 事故分析常需准确推算混凝土构件中纵筋的实际应力, 依此估算构件实际内力, 但目前混凝土结构检测鉴定极少能涉及或提供这些数据。磨筋法与钻孔法是作者近年首次提出的推算混凝土构件配筋实际应力的两种实用方法, 均基于弹性分析结合常规检测计算求解(补充实测变量的解析计算), 多项模拟试验表明其精度满足工程需要。介绍了两种方法并进行了比较与分析, 证明了两者的内在联系及其一致性, 结果可供混凝土结构检测鉴定与同类研究参考。分析表明, 基于相同原理, 经进一步改进测试工艺与精度, 钻孔法还可拓展用于推算超长混凝土结构实际组合应力(含温度应力), 及混凝土结构中实际预应力效应。

关键词

磨筋法; 钻孔法; 构件配筋实际应力; 补充实测变量; 弹性解析推算; 组合应力; 预应力效应

1. 引言

对于既有混凝土结构, 实际作用荷载的种类、数值、分布及传递路径与设计条件不完全相同, 混凝土弹性模量与应力水平有关且存在较大不确定性, 构件边界实际约束条件与计算假定存在差异, 构件裂缝、基础不均匀沉降、环境温度变化均可能影响结构内力分配结果, 使构件的实际内力与配筋实际应力与设计相应计算值存在明显差别, 且难以确定其变化规律。

在既有混凝土结构的评估、质量鉴定、加固改造、事故分析中, 常需准确推算构件中受力纵筋的实际应力, 并依此推算构件实际内力, 但目前国内混凝土结构检测鉴定[1]极少涉及或提供这些数据。磨筋法[2]与钻孔法[3]是国内近年提出的推算混凝土构件中配筋实际应力的两种实用方法, 均基于弹性分析与常规检测计算求解(补充实测变量的解析计算)。本文介绍了两种方法的基本推导与操作运用过程, 比较分析了两方法的内在联系, 在弹性范围内解析证明了两者的一致性, 给出了被测钢筋截面受损上限。

现有多项模拟试验已证实[3]-[4], 用磨筋法或钻孔法推算既有混凝土构件配筋的实际应力和实际内力, 其适用性与精度可满足工程需要。基于相同原理不难理解, 两方法还可用于推算超长混凝土结构的实际组合应力(含温度应力), 及混凝土结构中的实际预应力效应。希望借助这些技术方法能拓展混凝土结构常规检测鉴定的范围与深度, 满足目前结构工程相关需求, 并使这些方法通过更深入研究与应用得到不断完善。

2. 磨筋法

首先剔凿混凝土构件局部的保护层, 外露一小段截面为 $A_{s,0}$ 的被测单根纵筋(宜选截面角部钢筋), 然后在外露段的一侧粘贴电阻应变计, 在纵筋另一侧对应处用电动工具进行削磨, 迫使受力钢筋该部位因截面减小而产生应变增量 $\Delta\varepsilon_s$ 。设被测钢筋削磨前的实际应变为 $\varepsilon_{s,0}$, 截面减小量为 $A_{s,a}$ (限 $A_{s,a}$ 为圆缺形), 削磨后剩余截面为 $A_{s,s}$, 钢筋弹性模量为 E_s , 可列出:

$$A_{s,0} = A_{s,a} + A_{s,s} \quad (2-1)$$

被测钢筋削磨前, 有:

$$\sigma_{s,0} A_{s,0} = \varepsilon_{s,0} E_s (A_{s,a} + A_{s,s}) \quad (2-2)$$

被测钢筋削磨后 $A_{s,a} = 0$, $\varepsilon_{s,0}$ 有一增量 $\Delta\varepsilon_s$, 式(2-2)改记为:

$$\sigma_{s,0} A_{s,0} = (\varepsilon_{s,0} + \Delta\varepsilon_s) E_s A_{s,s} = \sigma_{s,0} A_{s,s} + \Delta\varepsilon_s E_s A_{s,s} \quad (2-3)$$

由式(2-3)可导出:

$$\sigma_{s,0} = \Delta\varepsilon_s E_s A_{s,s} / A_{s,a}, \text{ 且限 } \sigma_{s,0} \leq f_y \quad (2-4)$$

式中 f_y 为钢筋的屈服强度设计值。将实测 $\Delta\varepsilon_s$ 及对应的 $A_{s,a}$ 代入式(2-4), 可解出被测钢筋的实际应力 $\sigma_{s,0}$, 此过程未考虑构件混凝土截面剔凿缺损对 $\Delta\varepsilon_s$ 的影响, 也未考虑钢筋截面减小可能导致微小的构件截面应力重分布。对同根钢筋的削磨、量测、计算过程可重复多次, 理论上每次解出的 $\sigma_{s,0}$ 应有相同值。当相邻两次解出的 $\sigma_{s,0}$ 差别较小时, 为避免钢筋缺损截面 $A_{s,a}$ 过大应停止削磨, 此时可近似取数个 $\sigma_{s,0}$ 的平均值。式(2-4)可改记为:

$$\frac{\Delta\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,0}} = \frac{A_{s,a}}{A_{s,s}} \quad (2-5)$$

式(2-5)的含义为: 在弹性范围内, 被测钢筋截面削磨受损后的应变增量与削磨前实际应变的比值, 等于该筋缺损面积与剩余面积之比。可见当 $A_{s,a} = A_{s,s} = 0.5A_{s,0}$ 时, 有 $\Delta\varepsilon_s = \varepsilon_{s,0}$ 或 $\Delta\sigma_s = \sigma_{s,0}$ 。

实际操作中, 被测钢筋应力较高时, 测点部位较少削磨量可产生较大 $\Delta\varepsilon_s$ 值, 此时应控制钢筋测试截面最大应力不超过 f_y ; 被测钢筋应力较小时, 可能需削磨较大截面以提高 $\Delta\varepsilon_s$ 值、减小其相对误差, 此时应控制 $A_{s,a} < 0.5A_{s,0}$ 。可视被测钢筋的削磨缺损截面 $A_{s,a}$ 为圆缺形(弓形), 并按式(2-6)计算确定。

$$A_{s,a} = \frac{D_s^2}{4} \left[\frac{\theta}{2} - \sin \frac{\theta}{2} \sqrt{1 - \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)^2} \right] \quad (2-6)$$

式中的 D_s 为被测钢筋的公称直径, $\theta = 4\text{arctg}(2h/b)$, θ 为弧度, h 、 b 分别为圆缺形截面的高度与宽度。

3. 钻孔法

为推算混凝土构件内纵筋的实际应力 $\sigma_{s,0}$, 先剔凿外露纵筋测点部位, 在选定钻孔位置的周边高应力区[3]-[4]粘贴一组电阻应变计。首次钻孔直径为 d_1 , 见图 1。钻孔使 $A_{s,0}$ 减小为 $A_{s,1}$, 由应变计可测出钢筋因截面减小而产生的应变增量 $\Delta\varepsilon_{s,1}$ 。

换用稍大直径钻头将钢筋上的小孔直径扩大为 d_2 , 使该部位截面减小为 $A_{s,2}$, 由同组应变计可再测出钢筋应变增量 $\Delta\varepsilon_{s,2}$ 。重复此过程, 钻孔孔径相继增大为 d_3, \dots, d_n , 钢筋截面相应减小为 $A_{s,3}, \dots, A_{s,n}$ 。根据孔边高应力区应变增量 $\Delta\varepsilon_{s,p}$ 与钻/扩孔截面应变增量 $\Delta\varepsilon_s$ 之间的目标函数[4], 可依次计算确定钢筋应变增量 $\Delta\varepsilon_{s,3}, \dots, \Delta\varepsilon_{s,n}$ 。限钢筋的钻孔中心与截面形心重合, 近似有:

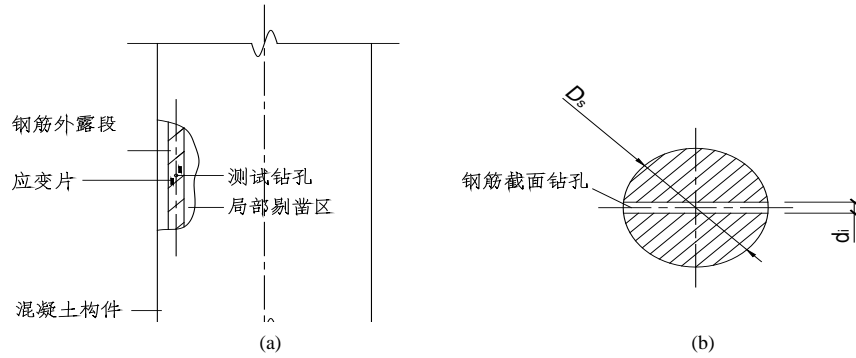


Figure 1. Schematic diagram of the measured bar in reinforced concrete members. (a) The exposed bar in a corner of the measured member; (b) The drilled hole on section of the measured bar

图 1. 混凝土构件内被测钢筋示意图。(a) 混凝土构件角部剔凿外露的被测钢筋；(b) 钢筋截面上的测孔

$$A_{s,0} = A_{s,1} + D_s d_1 = A_{s,2} + D_s d_2 = A_{s,3} + D_s d_3 = \cdots = A_{s,n} + D_s d_n \quad (3-1)$$

式中取 $A_{s,0} = \left(\frac{D_s}{2}\right)^2 \pi$ ，或被测带肋钢筋公称截面积，且有

$$0 < d_1 < d_2 < d_3 < \cdots < d_n, \quad A_{s,0} > A_{s,1} > A_{s,2} > A_{s,3} > \cdots > A_{s,n}。$$

设钢筋实际轴力为 $N_{s,0}$ ，随钻孔直径从 d_1 扩大为 d_i ， $i > 1$ ，钢筋截面减小为 $A_{s,i}$ ，钢筋应力增大为 $\sigma_{s,i}$ 。忽略被测钢筋应力变化可能导致构件截面发生应力重分配的微小影响，由平衡关系可列出：

$$N_{s,0} = \sigma_{s,0} A_{s,0} = \sigma_{s,1} A_{s,1} = \sigma_{s,2} A_{s,2} = \sigma_{s,3} A_{s,3} = \cdots = \sigma_{s,n} A_{s,n} \quad (3-2)$$

式中 $\sigma_{s,0} < \sigma_{s,1} < \sigma_{s,2} < \sigma_{s,3} < \cdots < \sigma_{s,n}$ 。将式(3-1)引入式(3-2)后有：

$$N_{s,0} = \sigma_{s,0} A_{s,0} = \sigma_{s,1} (A_{s,0} - D_s d_1) = \sigma_{s,2} (A_{s,0} - D_s d_2) = \sigma_{s,3} (A_{s,0} - D_s d_3) = \cdots = \sigma_{s,n} (A_{s,0} - D_s d_n) \quad (3-3)$$

在弹性范围内已知：

$$\sigma_{s,0} = \sigma_{s,1} - \Delta \varepsilon_{s,1} E_s \quad (3-4-1)$$

$$\sigma_{s,1} = \sigma_{s,2} - \Delta \varepsilon_{s,2} E_s \quad (3-4-2)$$

$$\sigma_{s,2} = \sigma_{s,3} - \Delta \varepsilon_{s,3} E_s \quad (3-4-3)$$

$$\sigma_{s,3} = \sigma_{s,4} - \Delta \varepsilon_{s,4} E_s \quad (3-4-4)$$

...

$$\sigma_{s,n-1} = \sigma_{s,n} - \Delta \varepsilon_{s,n} E_s \quad (3-4-n)$$

将式(3-4-n)代入式(3-4-n-1)、式(3-4-n-1)代入式(3-4-n-2)、...、式(3-4-2)代入式(3-4-1)后，经整理可解出：

$$\sigma_{s,0} = \sigma_{s,n} - E_s \sum_{j=1}^n \Delta \varepsilon_{s,j} \quad (3-5)$$

由(3-3)、(3-4-1)两式可解出：

$$\sigma_{s,1} = \frac{\sigma_{s,0} A_{s,0}}{A_{s,0} - D_s d_1} = \frac{(\sigma_{s,1} - \Delta \varepsilon_{s,1} E_s) A_{s,0}}{A_{s,0} - D_s d_1}$$

或重记为:

$$\sigma_{s,1} = \frac{\Delta \varepsilon_{s,1} E_s A_{s,0}}{D_s d_1} \quad (3-6-1)$$

同理可解出:

$$\sigma_{s,2} = \frac{\Delta \varepsilon_{s,2} E_s (A_{s,0} - D_s d_1)}{D_s (d_2 - d_1)} \quad (3-6-2)$$

$$\sigma_{s,3} = \frac{\Delta \varepsilon_{s,3} E_s (A_{s,0} - D_s d_2)}{D_s (d_3 - d_2)} \quad (3-6-3)$$

...

$$\sigma_{s,n} = \frac{\Delta \varepsilon_{s,n} E_s (A_{s,0} - D_s d_{n-1})}{D_s (d_n - d_{n-1})} \quad (3-6-n)$$

将式(3-5)、式(3-6-1)、式(3-6-2)、式(3-6-3)、…、式(3-6-n)计算结果和对应的钻孔直径 d_1 与扩孔直径 d_i 分别代入式(3-3), 可解出 n 个 $N_{s,0}$, 理论上这些 $N_{s,0}$ 有相同值。由于钢筋钻孔及每次扩孔获得的 $\Delta \varepsilon_{s,1}$ 、 $\Delta \varepsilon_{s,i}$ 存在测试误差, 依次解出的 $N_{s,0}$ 有所不同, 其差别随测试误差增大而增加, 实际操作时可近似取多个 $N_{s,0}$ 的均值。确定 $N_{s,0}$ 后, 由式(3-2)可求出被测钢筋实际应力 $\sigma_{s,0}$ 。

注: 目标函数[3]-[4]根据 18 种不同直径与孔径钢筋的 ANSYS 有限元模型计算分析确定, 见下式(3-7), 以沟通钢筋孔边实测应变增量 $\Delta \varepsilon_{s,p}$ 与过孔截面平均应变增量 $\Delta \varepsilon_s$ 的关系。式(3-7)为 459 组数据回归统计结果, 线性相关系数为 0.9776。

$$\frac{\Delta \varepsilon_{s,p}}{\Delta \varepsilon_s} = 0.6832 \sqrt{\frac{d_1 D_s}{S}} - 0.0946 \quad (3-7)$$

4. 减小修正 $\sigma_{s,0}$

实际操作中, 为外露被测钢筋的削磨或钻孔部位, 须先剔凿构件局部混凝土。构件截面剔凿缺损后, 根据受力平衡与变形协调原理, 截面应力自动调整使外露钢筋产生应力增量 $\Delta \sigma_s$, 因此需对 $\sigma_{s,0}$ 值进行减小修正。

根据 GB 50010-2010 规范第 6.2.1 条[5], 当混凝土压应变 $\varepsilon_c \leq \varepsilon_0$ 时, 受压混凝土的应力 σ_c 与应变 ε_c 关系曲线(本构关系)为:

$$\sigma_c = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^n \right] \quad (4-1)$$

式中 $\varepsilon_0 = 0.002 + 0.5(f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \geq 0.002$, ε_0 为 σ_c 刚达到 f_c 时的 ε_c ; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; $n = 2 - (f_{cu,k} - 50) / 60 \leq 2.0$; $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值。 $\varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$ 时, $\sigma_c = f_c$, ε_{cu} 为正截面的混凝土极限压应变。构件截面非均匀受压时, $\varepsilon_{cu} = 0.0033 - (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \leq 0.0033$; 轴心受压时 $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_0$ 。

构件完整截面为 $A_{c,0}$, 剔凿缺损截面为 $\alpha_c A_{c,0}$, α_c 为缺损系数, $A_{s,k}$ 为构件截面第 k 根纵筋面积, m

为纵筋总根数。测试截面剔凿减小后，被测纵筋及测点部位混凝土应力增量 $\Delta\sigma_s$ 、 $\Delta\sigma_c$ 可分别记为：

$$\Delta\sigma_c = \frac{\alpha_c A_{c0} \sigma_{c,0}}{A_{c0}(1-\alpha_c) + (\alpha_E - 1) \sum_{k=1}^m A_{s,k}} = \frac{\alpha_c \sigma_{c,0}}{1-\alpha_c + \frac{\alpha_E - 1}{A_{c0}} \sum_{k=1}^m A_{s,k}} \quad (4-2)$$

$$\Delta\sigma_s = \alpha_E \Delta\sigma_c = \frac{\alpha_E \alpha_c \sigma_{c,0}}{1-\alpha_c + \frac{\alpha_E - 1}{A_{c0}} \sum_{k=1}^m A_{s,k}} \quad (4-3)$$

式中 $\sigma_{c,0}$ 为剔凿前相邻被测钢筋处混凝土的应力， $\sigma_{s,0}$ 的修正值 $\sigma_{s,m}$ 可记为：

$$\sigma_{s,m} = \sigma_{s,0} - \Delta\sigma_s = \sigma_{s,0} - \xi_m \sigma_{c,0} \quad (4-4)$$

其中 $\xi_m = \frac{\alpha_E \alpha_c}{1-\alpha_c + \frac{\alpha_E - 1}{A_{c0}} \sum_{k=1}^m A_{s,k}}$ ，已知 $\varepsilon_{c,0} = \varepsilon_{s,0} = \sigma_{s,m} / E_s$ ，由式(4-4)和式(4-1)可整理出：

$$\sigma_{s,0} - \sigma_{s,m} = \xi_m f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\sigma_{s,m}}{E_s \varepsilon_0} \right)^n \right] \quad (4-5)$$

对混凝土强度等级不大于 C50 的构件， $n=2$ ， $\sigma_{s,m}$ 可由二次方程式(4-6)解出，

$$\frac{\xi_m f_c}{E_s^2 \varepsilon_0^2} \sigma_{s,m}^2 - \left(1 + \frac{2\xi_m f_c}{E_s \varepsilon_0} \right) \sigma_{s,m} + \sigma_{s,0} = 0 \quad (4-6)$$

对混凝土强度等级大于 C50 的构件， $n < 2$ ， $\sigma_{s,m}$ 可由式(4-5)用数值迭代方法解出。(4-5)与(4-6)两式中的 $\sigma_{s,0}$ 由式(2-4)或式(3-2)计算确定， α_c 根据实测确定。当剔凿截面 $\alpha_c A_{c0} \rightarrow 0$ 时，有 $\Delta\sigma_c \rightarrow 0$ ， $\Delta\sigma_s \rightarrow 0$ ， $\sigma_{s,m} \rightarrow \sigma_{s,0}$ 。

5. 推算构件实际内力

确定构件中纵筋实际应力 $\sigma_{s,m}$ 的主要目的，是为了推算被测钢筋周围混凝土的实际应力 $\sigma_{c,0}$ ，并依据 $\sigma_{c,0}$ 推算构件的实际轴力 N_{c0} 和弯矩 M_{c0} 。

设构件截面高度两侧的被测纵筋面积分别为 A_s 、 A'_s ，在 N_{c0} 与 M_{c0} 作用下， A_s 与 A'_s 的应力分别为 $\sigma_{s,m}$ 、 $\sigma'_{s,m}$ 。取 A_s 、 A'_s 处混凝土应变分别为 $\varepsilon_{c,0} = \sigma_{s,m} / E_s$ ， $\varepsilon'_{c,0} = \sigma'_{s,m} / E_s$ ，将 $\varepsilon_{c,0}$ 、 $\varepsilon'_{c,0}$ 分别代入式(4-1)可求出 A_s 、 A'_s 处混凝土的应力 $\sigma_{c,0}$ 、 $\sigma'_{c,0}$ ， A_s 与 A'_s 邻近处混凝土的弹性模量 E_c 、 E'_c 可分别由(5-1)、(5-2)两式确定。当构件截面上同侧同排被测钢筋的数量大于 1 时，可近似取同类数据的平均值进行计算。

$$E_c = \frac{\sigma_{c,0}}{\varepsilon_{c,0}} = \frac{E_s \sigma_{c,0}}{\sigma_{s,m}} \quad (5-1)$$

$$E'_c = \frac{\sigma'_{c,0}}{\varepsilon'_{c,0}} = \frac{E_s \sigma'_{c,0}}{\sigma'_{s,m}} \quad (5-2)$$

当 $M_{c0} = 0$ 时，有 $E_c = E'_c$ 。设 A_s 与 A'_s 分别为同排被测钢筋，且 $A_s + A'_s$ 等于全部纵筋面积，取 $\alpha_E = E_s / E_c$ ， $\alpha'_E = E_s / E'_c$ ，构件矩形截面的宽度与高度分别为 b_c 、 h_c ，构件的换算混凝土截面 A_c 可由式(5-3)确定，

$$A_c = b_c h_c + (\alpha_E - 1) \cdot A_s + (\alpha'_E - 1) \cdot A'_s \quad (5-3)$$

当 A_s 或 A'_s 由非同排筋构成时，可根据平截面假定确定与各排筋对应的 α_E 或 α'_E 。当 $M_{c0} = 0$ 时，式

(5-3)可改写为:

$$A_c = b_c h_c + (\alpha'_E - 1) A'_s \quad (5-4)$$

式中 A'_s 为构件纵筋总面积, 各纵筋有统一的截面换算系数 α'_E 。

设 a_s 、 a'_s 分别为 A_s 、 A'_s 距构件较近边缘的距离, 构件换算截面的惯性矩 I_c 由式(5-5)确定,

$$I_c = \frac{b_c h_c^3}{12} + (\alpha_E - 1)(0.5h_c - a_s)^2 A_s + (\alpha'_E - 1)(0.5h_c - a'_s)^2 A'_s \quad (5-5)$$

构件截面中部的纵筋数量相对较少, 且距中和轴较近, 可近似不考虑其对 I_c 的影响。

由压弯构件截面应力的一般表达式, 可解出构件截面的实际弯矩 $M_{c,0}$,

$$M_{c,0} = \left(-\frac{N_{c,0}}{A_c} + \sigma_{c,0} \right) \cdot \frac{I_c}{0.5h - a_s} = \left(\frac{N_{c,0}}{A_c} - \sigma'_{c,0} \right) \cdot \frac{I_c}{0.5h - a'_s} \quad (5-6)$$

由式(5-6)可知 $\sigma_{c,0}$ 与 $\sigma'_{c,0}$ 满足以下关系:

$$\sigma_{c,0} + \sigma'_{c,0} = \frac{2N_{c,0}}{A_c} \quad (5-7)$$

由式(5-7)可解出构件截面的实际轴力 $N_{c,0}$,

$$N_{c,0} = 0.5 \cdot (\sigma_{c,0} + \sigma'_{c,0}) \cdot A_c \quad (5-8)$$

将解出的 $N_{c,0}$ 代入式(5-6)后可求出 $M_{c,0}$ 。当构件截面仅承受轴力时, $M_{c,0} = 0$, $\sigma_{c,0} = \sigma'_{c,0}$, 有 $N_{c,0} = \sigma_{c,0} A_c = \sigma'_{c,0} A_c$ 。

根据文[5]第 4.1.5 条可知, 受压与受拉混凝土弹性模量可取相同值, 即受压混凝土与开裂前受拉混凝土的 $\sigma_c - \varepsilon_c$ 曲线几何相似。如取式(4-1)中的 ε_0 为混凝土极限拉应变, ε_c 为与 σ_c 对应的混凝土拉应变, 用混凝土轴心抗拉强度设计值 f_t 替换式中的 f_c , 可近似确定受拉钢筋周围混凝土拉应力 $\sigma_{c,0}$, 及按上述方法确定混凝土轴拉、大偏压构件的实际轴力 $N_{c,0}$ 与实际弯矩 $M_{c,0}$ 。

6. 磨筋法与钻孔法内在联系

由磨筋法可知: 在弹性范围内, 如忽略混凝土构件截面剔凿缺损出现的微小应力重分布, 被测受力钢筋消磨缺损后的应变增量与初始实际应变的比值, 等于钢筋的缺损面积与剩余面积之比。按此描述用钻孔法中已知变量可列出:

$$\frac{\sum_{j=1}^n \Delta \varepsilon_{s,j}}{\varepsilon_{s,0}} = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta \sigma_{s,j}}{\sigma_{s,0}} = \frac{D_s d_n}{A_{s,0} - D_s d_n} \geq 0 \quad (6-1)$$

且 $D_s d_n = 0.5A_{s,0}$ 时, 有

$$\sum_{j=1}^n \Delta \varepsilon_{s,j} = \varepsilon_{s,0} \quad \text{或} \quad \sum_{j=1}^n \Delta \sigma_{s,j} = \sigma_{s,0} \circ$$

如令式(6-1)中 $n=1$, 即首次钻孔后无扩孔, 则有:

$$\sigma_{s,0} = \frac{A_{s,0} - D_s d_1}{D_s d_1} E_s \Delta \varepsilon_{s,1} \quad (6-2)$$

将式(3-6-1)代入式(3-4-1)后, 将推导出与式(6-2)完全相同的结果, 由此可证明磨筋法与钻孔法在理论上无

本质区别, 仅表达形式不同。

7. 被测钢筋受损截面上限

应用磨筋法和钻孔法推算混凝土构件配筋实际应力 $\sigma_{s,0}$ 时, 为确保被测钢筋受损截面不因 $A_{s,0}$ 过度减小而屈服, 应分别控制削磨截面 $A_{s,a}$ 及钻/扩孔直径 d_n ($n \geq 1$) 不超过相应上限值 $[A_{s,a}]$ 与 $[d_n]$ 。限 $\sigma_{s,0} < f_y$, 基于式(2-5)可导出不等式(7-1)

$$[A_{s,a}] \leq \left(\frac{f_y}{\sigma_{s,0}} - 1 \right) A_{s,s} \quad (7-1)$$

基于式(6-2)可导出不等式(7-2)

$$[d_n] \leq \left(1 - \frac{\sigma_{s,0}}{f_y} \right) \frac{A_{s,0}}{D_s} \quad (7-2)$$

如取 $A_{s,0} = \left(\frac{D_s}{2} \right)^2 \pi$, 代入式(7-2)后有

$$[d_n] \leq 0.25\pi \left(1 - \frac{\sigma_{s,0}}{f_y} \right) D_s \quad (7-3)$$

可见 $[A_{s,a}]$ 与 $[d_n]$ 均随 $\sigma_{s,0}$ 增大而减小, 随 f_y 增大而增加。

8. 分析与结论

分析表明: 磨筋法与钻孔法均通过微损构件配筋截面, 迫使钢筋受损部位产生应变增量, 依据该实测值与钢筋初始实际应力之间的对应关系, 计算确定构件配筋实际应力 $\sigma_{s,m}$, 继而用 $\sigma_{s,m}$ 推算构件实际轴力 N_{c0} 和弯矩 M_{c0} , 这是两种方法的共同点。

为提高推算精度, 两种方法实测钢筋应变增量的过程可同位重复多次, 但需控制被测钢筋应力位于弹性范围。由于 E_s 为稳定值, $\sigma_{s,m}$ 的精度相对较高。根据 $\sigma_{s,m}$ 推算 σ_c 及 N_{c0} 和 M_{c0} 时, 推算精度与 E_c 值的误差正相关。

磨筋法虽较早提出, 但钻孔法与之相比可操作性更强, 被测钢筋受损截面更小。如将钻孔法的机械钻/扩孔改为激光打孔, 并配合开发、使用精确测量孔径、孔位的工具, 则可降低重复检测次数, 减小被测钢筋受损截面, 进一步提高推算精度。

基本结论如下:

- 1) 磨筋法与钻孔法理论上无本质区别, 仅推导过程、表达形式与具体操作不同, 且均限在弹性范围内应用。
- 2) 检测数据的误差较小时, 现有试验表明, 两种方法推算 $\sigma_{s,m}$ 的精度均能满足工程需要, 但钻孔法的可操作性更强。依据 $\sigma_{s,m}$ 推算 N_{c0} 和 M_{c0} 的精度与 E_c 值误差正相关。
- 3) 增加构件配筋的同位削磨/扩孔检测与计算次数有助于改善推算精度, 但将增大被测钢筋截面受损程度, 实际操作时应控制其受损截面不屈服。

参考文献 (References)

- [1] GB/T 50344-2004 (2004) 建筑结构检测技术标准. 中国建筑工业出版社, 北京.
- [2] 潘立 (1991) 建筑结构中钢筋实际应力测定的新方法. 工业建筑, 9, 28-29.

- [3] 潘立, 李志文, 曾银枝 (2011) 确定混凝土构件实际应力技术方法的研究, 国家住房和城乡建设部研究开发项目 (No.20091902420730006). *建筑科学研究报告*, 中国建筑科学研究院建筑结构研究所, 北京.
- [4] 李志文, 潘立 (2010) 确定混凝土构件钢筋实际应力新方法的试验研究. *工程抗震与加固改造*, **1**, 79-84.
- [5] GB 50010-2010 (2010) 混凝土结构设计规范. 中国建筑工业出版社, 北京.