

基于可靠度理论的无机胶植筋设计方法

丁红岩¹, 梁玉国^{1, 2}, 高天宝³

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 河北省建筑科学研究院, 河北 石家庄 050021; 3. 天津城建大学能源与安全工程学院, 天津 300384)

摘要: 建立了无机胶植筋极限状态方程, 分别对植筋试件的粘接锚固强度、钢筋屈服强度、混凝土强度、几何尺寸、计算模式的准确性等大量试验数据进行了统计分析, 确定了可靠性指标。采用一次二阶矩法 (FOSM) 对无机胶植筋进行了可靠度分析, 分析结果表明: 钢筋直径越大、混凝土强度越低, 无机胶植筋所需的粘接锚固长度越长。基于以上的分析, 提出了基于可靠度理论的无机胶植筋的锚固长度计算方法, 计算结果与试验结果对比表明, 该锚固长度计算方法可以用于混凝土植筋的设计计算。

关键词: 混凝土; 植筋; 可靠度; 设计方法; 锚固长度

中图分类号: TU502

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)01-0006-03

The design method of inorganic glue bonded rebars based on reliability theory

DING Hongyan¹, LIANG Yuguo^{1,2}, GAO Tianbao³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. The Academy of Architectural Science of Hebei Province, Shi jiazhuang 050021, China;

3. School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: At first, this paper established the limit state equation of inorganic glue bonded rebars, and conducted respectively statistical analyses of a large number of experimental data of the anchoring strength, steel yield strength, concrete strength, geometry size and the accuracy of the calculation model, by which the reliability index is determined. Then the central point law in first order second moment method (FOSM) was adopted to analyze the reliability of bonded rebars with inorganic material. The analysis results showed that the greater reinforcement diameter was, the lower concrete strength was and the longer anchorage length was. Finally, the adhesive anchorage design method of bonded rebars with inorganic material was based on reliability theory. By means of comparing the calculation results with experimental results, it can be concluded that the calculation methods of anchorage length can be applied to the calculation and designing of concrete bonded rebars.

Key words: concrete; bonded rebars; reliability; design method; anchorage length

混凝土植筋锚固技术已成为现代建筑技术的重要组成部分, 主要应用于工程结构的维修、加固以及混凝土新增结构构件连接等方面, 可以有效地解决新老混凝土连接、钢筋漏埋、错埋等钢筋生根问题^[1]。目前, 国内外已开展了一些植筋技术的研究工作, 相关研究主要集中在不同埋深下化学植筋单筋受拉承载力、破坏形态、粘结滑移以及增层改造工程中常见的植筋梁柱试件抗震性能等方面, 并取得了一定的成果^[2-5]。关于植筋的可靠度研究方面, 主要集中在化学植筋的可靠度分析上^[6]。无机胶植筋与化学植筋相比具有如下优点: 成本低, 损耗小; 强度的热稳定性、抗惨性、护筋性能良好; 耐老化性与混凝土构筑物本体一致; 施工简便^[7]。因此, 无机胶植筋的应用范围将越来越广泛。目前, 实际工程中无机胶植筋锚固深度通常采用 15 d 或植筋胶生产商提供的建议值, 未充分考虑各种锚固

条件的影响, 植筋结构的安全性及可靠性有待通过理论分析予以保证。本文通过统计分析大量无机胶植筋拉拔试验数据, 利用一次二阶矩法 (FOSM) 对其进行可靠度分析, 提出了无机胶植筋锚固长度的设计方法, 对于无机胶植筋的工程应用具有现实意义。

1 极限状态方程和统计分析

1.1 极限状态方程

混凝土植筋在拉拔力作用下的失效主要表现为: 钢筋屈服和粘接锚固破坏。当植筋的锚固长度处于临界锚固长度 (l_a^{cr}) 时, 粘接锚固破坏与钢筋屈服同时发生, 锚固力的大小决定于钢筋的屈服强度 (f_y) 及平均粘结锚固强度 (τ_u)。由此, 极限状态方程可表示如下:

$$4(l_a^{cr}/d)\tau_u = f_y \quad (1)$$

式中: l_a^{cr} 为临界锚固长度; d 为钢筋直径; τ_u 为平均极限粘结锚固强度; f_y 为钢筋的屈服强度。

根据大量试验数据的统计回归,无机胶植筋的极限粘结应力采用下式表示^[8]:

$$\tau_u = (0.5 + 8/d)(0.05f_{ck} + 11) \quad (2)$$

式中: d 为钢筋直径 (mm), f_{ck} 为混凝土立方体抗压强度 (MPa)。试验中实测的粘接锚固强度 $\tau_{u,e}$ 可与利用式 (2) 计算得到的计算值 $\tau_{u,c}$ 进行比较,经统计可得 $\tau_{u,e}/\tau_{u,c}$ 的平均值为 0.995 1, 方差 σ^2 为 0.017 7, 变异系数 δ 为 0.133 7。将 (1) 式采用通用形式表示:

$$R = S \quad (3)$$

式中: R 为锚固抗力,与锚固长度、钢筋直径和粘结强度有关; S 为作用效应,即植筋的拉拔力。

1.2 统计资料

1.2.1 钢筋的屈服强度

根据文献[8]的试验统计结果,钢筋的变异系数 $\delta_{fy}=0.069\ 9$, 钢筋的屈服强度按现行《混凝土结构设计规范》取其标准值 f_{yk} , 按 95% 保证率求得的 HRB335 级钢筋屈服强度的平均值为:

$$\mu_{fy} = f_{yk}/(1 - 1.645\delta_{fy}) = 380 \text{ MPa} \quad (4)$$

1.2.2 基体混凝土抗拉强度

根据文献[9]得混凝土抗拉强度 f_t 的统计参数如表 1 所示。

表 1 混凝土抗拉强度参数统计 (MPa)

Strength grade of concrete	C20	C30	C40	C50
Average value μ_{ft}	2.05	2.51	2.93	3.41
Variation coefficient δ_{ft}	0.227	0.189	0.151	0.113

1.2.3 几何尺寸

构件几何尺寸偏差统计参数见表 2。

表 2 构件几何尺寸偏差统计参数

Project	Anchorage length $l_{a,e}/l_{a,d}$	Reinforcement diameter d_e/d_d
Average value μ	1.057 9	1.00
Variation	0.001 3	0.018

注: 下标 e 表示实测值, 下标 d 表示设计值。

1.2.4 计算模式的准确性

计算模式的准确性为试验实测值 $\tau_{u,e}$ 与试验回归统计值 $\tau_{u,c}$ 的比值, 按以下公式计算:

$$\Omega_p = \tau_{u,e}/\tau_{u,c} \quad (5)$$

由文献[8]试验资料统计得: 平均值 $\mu_{\Omega_p}=0.995\ 1$, 变异系数 $\delta_{\Omega_p}=0.133\ 7$ 。

2 可靠度指标

为充分利用钢筋的极限承载能力,无机胶植筋

的失效应保证使锚固钢筋达到屈服强度,而不是发生粘接锚固破坏。因此,锚固失效概率 P_{fa} 应是钢筋应力超过屈服强度事件与锚固力小于屈服力事件同时发生的概率,即:

$$P_{fa} = P(\sigma_s = f_y, \tau = \tau_u) = P(\sigma_s = f_y) \cdot P(\tau = \tau_u / \sigma_s = f_y) = P_f \cdot P_{f0} \quad (6)$$

根据文献[10],对于安全等级为二级的结构构件,取锚固承载力可靠度指标为 $\beta_a=3.95$,相应失效概率 $P_{fa}=4.0 \times 10^{-5}$ 。钢筋应力达到屈服强度时的可靠指标 $\beta=3.2$,相应允许概率 $P_f=6.87 \times 10^{-4}$ 。因此,粘结锚固应力达到极限 ($\tau=\tau_u$) 事件的允许概率 P_{f0} 为:

$$P_{f0} = P_{fa} / P_f = 5.82 \times 10^{-2} \quad (7)$$

相应的可靠度指标 $\beta_{01}=1.57$ 。

3 可靠度分析

本文采用一次二阶矩法 (FOSM) 中的中心点法对无机胶植筋进行可靠度分析。极限状态方程式

(1) 中各变量为相互独立的随机变量,式 (3) 中的 R 和 S 均为服从正态分布的综合变量,无机胶植筋的锚固长度 l_a^{cr} 可以通过一个方程式求解。结合前述分析可得:

效应 S 的特征参数: 由公式 (1)、(3) 得效应的平均值 $\mu_S=\mu_{fy}$, 变异系数 $\delta_S=\delta_{fy}$ 。

抗力的一般表达式为:

$$R = \Omega_p \cdot R_p = \Omega_p \cdot R(l_a, d, f_{ck}) \quad (8)$$

式中: Ω_p 为反映计算公式准确性的系数; R_p 为按给定公式计算所得的抗力; $R(\cdot)$ 为抗力函数。

根据粘结锚固强度公式(2), 极限状态方程(1)及抗力表达式 (8), 有:

$$R = 4\Omega_p l_a [(0.5/d) + (8/d^2)] (0.05f_{ck} + 11) \quad (9) \\ = 4\Omega_p L_1 D_1 T_1$$

式中: $L_1=l_a$; $D_1=0.5/d+8/d^2$; $T_1=0.05f_{ck}+11$ 。

计算可得抗力 R 的统计参数为:

平均值

$$\mu_R = 4.211 \times l_a \times [(0.5/d) + (8/d^2)] \times (0.377 \mu_{ft}^{1.5} + 11)$$

变异系数

$$\delta_R = \sqrt{0.133\ 7^2 + 0.001\ 3^2 + \left(\frac{0.018 \times (0.5d + 16)}{0.5d + 8}\right)^2 + 0.377^4 \delta_{ft}^2}$$

随机变量 S 、 R 均可认为服从对数正态分布,由可靠度指标表达式可得出计算锚固长度的方程式为:

$$\ln \mu_R - \ln \mu_S - \beta_{01} \sqrt{\delta_R^2 + \delta_S^2} = 0 \quad (10)$$

代入相应的统计参数为:

$$\ln 4.211 + \ln l_a + \ln \left(\frac{0.5}{d} + \frac{8}{d^2} \right) + \ln (0.377 \mu_n^{1.5} + 11) - \ln 380 - 1.57 \sqrt{0.1337^2 + 0.0013^2 + \left(\frac{0.018 \times (0.5d + 16)}{0.5d + 8} \right)^2 + 0.377^4 \delta_n^2 + 0.0641^2} = 0 \quad (11)$$

以不同的混凝土强度、不同的钢筋直径代入上式,即可得到在一定可靠度下各种直径钢筋在不同基体混凝土上的锚固长度的可靠度计算值如表3所示。

表3 无机胶植筋锚固长度的可靠度解 (l_a/d)

Reinforcement diameter/mm	Strength grade of concrete				
	C20	C30	C40	C50	
	14	8.9	8.6	8.3	8.0
18	10.1	9.7	9.4	9.1	
22	11.0	10.6	10.3	9.9	

为直观显示混凝土强度及钢筋直径对无机胶植筋锚固长度的影响,将常用钢筋直径及混凝土强度等级的可靠度计算值绘于坐标图中,如图1所示。

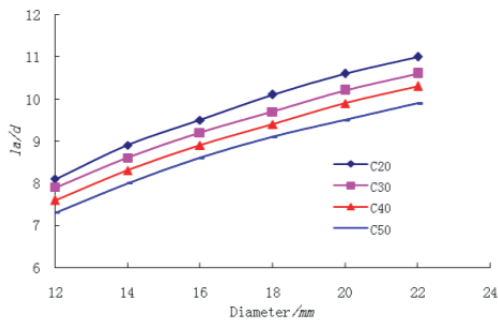


图1 钢筋直径及混凝土强度对锚固长度的影响
Fig.1 Effects of diameter of reinforcement and concrete strength on the anchorage length

从图1可以看出,钢筋直径越大、混凝土强度越低,无机胶植筋所需的粘接锚固长度越长。

4 无机胶植筋锚固的设计建议

文献[1]给出了弹性剪切模式下的极限拉拔力和锥体高度的计算公式,但是计算较为复杂,不利于实际应用。因此,为使植筋设计与我国现行的“混凝土结构设计规范”相协调,本文建议无机胶植筋锚固长度采用均匀剪切模式方法,通过考虑不同锚固条件的影响进行简化计算。

4.1 基本锚固长度

采用无机胶植筋的受拉钢筋的基本锚固长度按下式计算:

$$[l_a]_0 = \eta_0 (d f_y / 4 \tau_u) \quad (12)$$

式中: f_y 为钢筋的设计强度 (MPa); d 为钢筋直径 (mm); η_0 为考虑可靠度的安全系数,取 1.45; τ_u 为在不同基体砼强度时所测得的植筋胶的极限粘

结强度 (MPa),本文采用式 (2),并将其中的砼强度标准值改为设计值,即: $\tau_u = (0.5 + 8/d)(0.05 f_c + 11)$ 。

4.2 锚固长度的修正

不同锚固条件下的无机胶植筋的受拉钢筋的锚固长度按下式^[11]计算:

$$[l_a] = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 [l_a]_0 \quad (13)$$

式中: η_1 为结构重要性系数,安全等级为一级时, $\eta_1 = 1.1$; 安全等级为二级时, $\eta_1 = 1.0$; 安全等级为三级时, $\eta_1 = 0.9$; η_2 为钢筋类型影响系数,光圆钢筋 $\eta_2 = 2.25$,带肋钢筋 $\eta_2 = 1.0$; η_3 为钢筋锚固位置影响系数,一般取 $\eta_3 = 1.0$,不利时取 $\eta_3 = 1.3$; η_4 为加载方式影响系数,静载情况下取 $\eta_4 = 1.0$,动载情况下取 $\eta_4 = 1.2$ 。

5 算例

以安全等级为二级、采用Ⅱ级钢筋、锚固位置不利、且为动载情况时为例,无机胶植筋锚固长度的设计值如表4所示。

表4 锚固长度的设计值 (l_a/d)

Reinforcement diameter/mm	Strength grade of concrete				
	C20	C30	C40	C50	
	14	14.2	14.0	13.6	13.4
18	16.1	15.8	15.5	15.3	
22	17.7	17.2	16.9	16.7	

由算例可以看出,实际工程中所采用的植入深度为 15 d 基本满足设计要求,但并不合理,无机胶植筋的锚固长度应综合考虑不同锚固条件的影响。

6 结论

本文首先列出了无机胶植筋的锚固极限状态方程及有关的统计资料,进而对无机胶植筋进行了可靠度分析。在可靠度分析的基础上,本文采用均匀剪切模式方法进行简化,综合考虑不同锚固条件对无机胶植筋锚固长度的影响,给出了锚固长度合理实用的设计公式。主要结论如下:

(1) 钢筋直径越大、混凝土强度越低,无机胶植筋所需的粘接锚固长度越长。

(2) 实际工程中所采用的植入深度为 15 d 基本满足设计要求,但并不合理。

(3) 本文提出的设计公式综合考虑了不同锚固条件的影响,对混凝土结构无机胶植筋的设计和施工具有现实的指导意义。

(下转第45页)