

doi: 10.11799/ce201501011

无机胶植筋的可靠度分析及设计方法

高天宝^{1,2}, 梁玉国^{3,4}, 曹红新⁵

(1. 建筑安全与环境国家重点实验室, 北京 100013; 2. 天津城建大学能源与安全工程学院, 天津 300384;
3. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 4. 河北省建筑科学研究院, 河北 石家庄 050021;
5. 河北华瀚建设有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘要: 建立了极限状态方程, 结合大量试验数据, 采用一次二阶矩法(FOSM)对无机胶植筋进行了可靠度分析, 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, 算例分析结果表明, 实际工程中常采用的植入深度为15d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。

关键词: 混凝土; 植筋; 可靠度; 锚固长度

中图分类号: TU502 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2015)01-0034-03

Reliability Analysis and Design Method of Inorganic Glue Bonded Rebar

GAO Tian - bao^{1,2}, LIANG Yu - guo^{3,4}, CAO Hong - xin⁵

(1. State Key Laboratory of Building Safety and Environment, Beijing 100013, China;
2. School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;
3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
4. Hebei Academy of Building Science, Shijiazhuang 050021, China;
5. Hebei Huahan Construction Company Limited, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Based on the limit state equation, combining with analysis on a large amount of statistic testing data, the reliability of inorganic bonded rebar was analyzed applying central point law in first order second moment method (FOSM), and the calculation method for anchorage length was proposed. Results of example analysis show that, the commonly used embedded depth of 15d, basically meets the design requirements, but is not reasonable, the influence of different anchorage conditions should be comprehensively considered to determine the anchorage length.

Keywords: concrete; bonded rebar; reliability; 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]。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^[6]。因此, 无机胶植筋的应用范围将越来越广泛。本文对无机胶植筋进行可靠度分析并提出设计建议。

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^c)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)。

收稿日期: 2014-07-30

基金项目: 建筑安全与环境国家重点实验室开放课题基金资助项目(BSBE2014-02)

作者简介: 高天宝(1978-), 男, 山东聊城人, 讲师, 博士, 研究方向: 既有结构性能评价与修复, E-mail: gaotb2008@sina.com。

引用格式: 高天宝, 梁玉国, 曹红新. 无机胶植筋的可靠度分析及设计方法 [J]. 煤炭工程, 2015, 47(1): 34-36.

由此, 极限状态方程如式(1)。

$$4 \frac{l_a^e}{d} \tau_u = f_y \quad (1)$$

式中, τ_u 为平均极限粘结锚固强度。

无机胶植筋的极限粘结应力方程如式(2)^[7]:

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

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 $\tau_{\text{实测}}$ 可与利用式(2)计算得到的计算值 $\tau_{\text{计算}}$ 进行比较, 经统计可得 $\tau_{\text{实测}}/\tau_{\text{计算}}$ 的平均值为 0.9951, 方差 σ^2 为 0.0177, 变异系数 δ 为 0.1337。

将式(1)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

根据试验统计结果, 钢筋的变异系数 $\delta_{fy} = 0.0699$, 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如式(4):

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

1.2.2 基体混凝土抗拉强度

根据文献 [8] 得混凝土抗拉强度 f_t 统计参数见表 1。

表 1 混凝土抗拉强度参数统计 MPa

混凝土强度等级	C20	C30	C40	C50
平均数 μ_{ft}	2.05	2.51	2.93	3.41
变异系数 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

项目	锚固长度 $l_{a,e}/l_{a,d}$	钢筋直径 d_e/d_d
平均值 μ	1.0579	1.00
变异系数 δ	0.0013	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, 按式(5)计算:

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

由试验资料统计得: 平均值 $\mu_{\Omega_p} = 0.9951$, 变异系数 $\delta_{\Omega_p} = 0.1337$ 。

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 [9], 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 $\beta_a = 3.95$, 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:

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

相应可靠度指标 $\beta_{01} = 1.57$ 。

3 可靠度分析

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^e 可以通过一个方程式求解。

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 R 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 为计算模式准确性系数; R_p 为按给定公式计算所得的抗力; $R(\cdot)$ 为抗力函数。

根据式(1)、(2)、(8), 可得抗力 R 的表达式:

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

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

计算可得抗力 R 的统计参数包括平均值和变异系数。平均值为:

$$\mu_R = 4.211 \times l_a \times \left(\frac{0.5}{d} + \frac{8}{d^2} \right) \times (0.377\mu_{ft}^{1.5} + 11)$$

变异系数为:

$$\delta_R = \sqrt{0.1337^2 + 0.0013^2 + \left(\frac{0.018 \times (0.5d + 16)}{0.5d + 8} \right)^2 + 0.377^4 \delta_{ft}^2}$$

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:

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

分别将混凝土强度为 C20、C30、C40、C50 及钢筋 (HRB335) 直径为 14mm、18mm、22mm 代入上式, 即可得到不同直径的钢筋在不同基体混凝土上的锚固长度的可靠度解, 见表 3。

表3 无机胶植筋锚固长度的可靠度解($l_{a/d}$) mm

钢筋直径	混凝土强度等级			
	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。

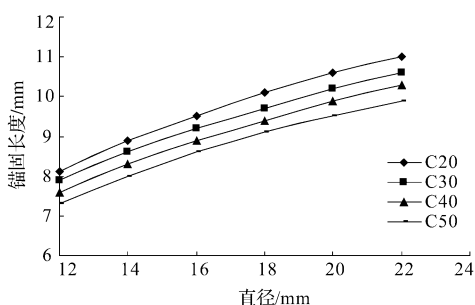


图1 钢筋直径及混凝土强度对锚固长度的影响

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:

$$[l_a]_0 = \eta_0 \frac{df_y}{4\tau_u} \quad (12)$$

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 为在不同基体混凝土强度时所测得的植筋胶的极限粘结强度,MPa,本文采用式(2),并将其中的混凝土强度标准值改为设计值,即 $\tau_u = \left(0.5 + \frac{8}{d}\right)(0.05f_c + 11)$ 。

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见表4。

表4 锚固长度的设计值($l_{a/d}$) mm

钢筋直径	混凝土强度等级			
	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,在实际工程中所采用的植入深度为15d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 结语

根据无机胶植筋的锚固极限状态方程及有关的统计资料,对无机胶植筋进行了可靠度分析。给出了锚固长度合理实用的设计公式,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。

参考文献:

- [1] 高天宝,杨树标,吴斌. 混凝土植筋设计的两种剪切模型[J]. 煤炭工程, 2006(5): 75-78.
- [2] 欧阳坚. 混凝土高层框架节点抗震及建筑结构胶植筋的试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2001.
- [3] 周新刚. 混凝土植筋锚固性能分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1169-1173.
- [4] 黄维民. 温度作用下植筋锚固试件拉拔试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [5] Ronald A Cook, Jacob Kunz, Werner Fuchs, et al. Behavior and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete [J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(1): 9-25.
- [6] 姜常玖. 无机胶植筋式后锚固连接的防火性能研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2013.
- [7] 高天宝. 混凝土结构无机料植筋拉拔试验研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2005.
- [8] 赵更歧. 植筋粘接锚固性能的试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2001.
- [9] 赵国藩, 曹居易, 张宽权. 工程结构可靠度[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

(责任编辑 杨蛟洋)