

## 混凝土化学植筋锚固强度的解析

马晓董,陈天虹,叶建

(浙江科技学院 建筑工程学院,杭州 310023)

**摘要:** 讨论了混凝土化学植筋的基本破坏形态,对常见的锥体-黏结复合破坏机理进行了分析;应用莫尔强度理论对混凝土锥体破坏面建立了混凝土抗拔力与锥体高度和混凝土强度的定量关系,基于黏结破坏的试验数据,通过数理统计得出极限平均黏结应力公式,最终建立了极限平衡状态下的承载力公式。进而通过实验数据证实了公式的可靠性,为混凝土植筋的设计计算提供了参考。

**关键词:** 化学植筋;锚固强度;解析

中图分类号: TU375

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2007)02-0113-04

## Anchorage Strength Analysis of Adhesively Bonded Rebar in Concrete

MA Xiao-dong, CHEN Tian-hong, YE Jian

(School of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Four basic failure modes for adhesively bonded rebar in concrete are discussed. Based on the Mohr theory, the relationship between the concrete strength and the height of the concrete cone and the resistance of the concrete is derived. Based on the test data for the bond failure, a formula is set up statistically. According to the force equilibrium a formula for the mixed-cone failure is obtained which is verified by the experiment date that the calculation results have good accordance with test results. The formula presented can be used in the practice design and construction.

**Key words:** adhesively bonded rebar; anchorage strength; analysis

植筋技术属于后锚固技术,它是在已有的混凝土基材上成孔,然后在孔中灌注化学结构胶并植入钢筋的一种钢筋锚固技术(图1)。作为一种新型简便、有效的后固定做法,近几年在建筑物加固改造以及新建工程、改扩建工程、设备件的固定等方面得到了较为广泛的应用。混凝土化学植筋受拉后通过植筋胶向混凝土传递内力以达到锚固抗拉力。在混凝土植筋研究方面,国内外已展开大量的理论、试验研

究工作<sup>[1-5]</sup>,探讨了化学植筋埋置深度、基材混凝土等级、钢筋直径及成孔直径、植筋间距和边距对锚固强度的影响。文献[4,6]通过试验也测得化学植筋黏结剪应力与滑移的关系。根据试验,混凝土化学植筋的基本破坏形态有4种(图2):1)钢筋屈服拉断 这种破坏发生在植筋长度较长,基材混凝土和化学黏结胶强度都较高时。2)混凝土锥形破坏 当植入深度较小,直径较大的钢筋受拔力后附带混凝土倒锥体拔

收稿日期: 2007-03-14

作者简介: 马晓董(1963—),男,浙江杭州人,副教授,主要从事结构工程的教学与研究。

出,出现混凝土锥形破坏,承载力较低,没有发挥钢筋能力,且呈脆性破坏。3)黏结滑移破坏 当孔壁没有清除干净或结构胶与基材混凝土没有充分黏结时,受力后混凝土与胶体层之间发生滑移,胶体层包围在钢筋周围随钢筋一起拔出;或者混凝土及钢筋本身强度很高,但胶黏层因配方问题分层较大导致在胶黏层中间黏结滑移拔出。4)锥体-黏结的复合破坏 这种破坏的特点是在基材混凝土表面植筋周围发生倒锥体破坏,锥体以下的锚固段发生黏结滑移破坏,锥体和其下段胶体层随钢筋一起从混凝土中拔出,或者是混凝土倒锥体破坏及拉伸端钢筋拉断。前 3 种破坏形式可以通过合理设计及严格的施工程序加以避免,第 4 种破坏形式实质上是化学植筋处于最小埋置深度的情况下,钢筋屈服而基材混凝土近拉伸端产生混凝土圆锥体破坏,并下段钢筋胶黏层与混凝土界面之间黏结滑移破坏的临界状态。考虑到既有混凝土构件尺寸常常有所限制,因此,研究混凝土锥体-黏结复合破坏机理,确定化学植筋极限抗拉承载力强度及植筋临界锚固深度具有重要的意义。

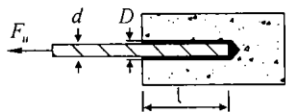


图 1 植筋示意图

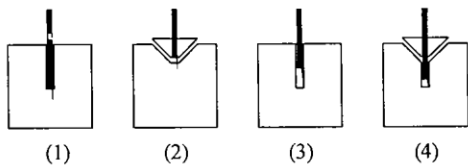


图 2 植筋的 4 种破坏形态

## 1 理论分析及计算模型的建立

根据化学植筋拉拔试验<sup>[4,6]</sup>结果,当植筋埋置深度达到一定值时,拉伸端钢筋达到屈服强度并部分开始进入颈缩阶段,化学植筋发生锥体-黏结复合破坏。因此,极限拉拔力标准值  $F_u$  为:

$$F_u = F_{uc} + F_{ub} \quad (1)$$

式(1)中: $F_{uc}$ 为混凝土锥体拉剪破坏时提供的极限承载力标准值,kN; $F_{ub}$ 为胶黏体与混凝土基材之间界面破坏时提供的极限黏结承载力标准值,kN。

图 3 表示化学植筋发生锥体黏结复合破坏时的力平衡分析图; $\sigma^*$ 、 $\tau^*$ 为锥体拉剪破坏时破坏锥面上的正应力与剪应力,它们是圆锥面上平均垂直拉应力  $\sigma_0$  的分量; $\theta$ 为钢筋与锥体的夹角; $D$ 为胶黏层

直径(即钻孔直径),一般取钢筋直径加 4~8 mm,  $x_0$ 为破坏时圆锥体的高度。

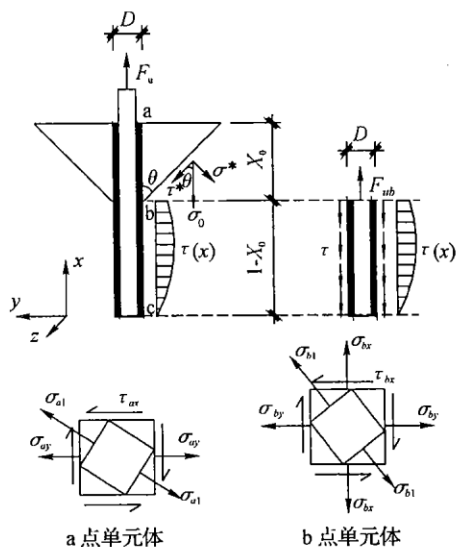


图 3 力平衡分析图

### 1.1 对混凝土圆锥体

在拉拔力加载初期,近拉伸端钢筋拉应力  $\sigma_s$  最大,底部钢筋拉应力为零,植筋全长胶黏体基本受剪切应力为主,植筋的  $\tau$ - $s$ (黏结-滑移)曲线成线性递增变化,剪切刚度为常数而测得的  $\tau$ - $s$  曲线中剪切应力一般指平均剪切黏结应力,这在文献[4,6,7]试验曲线中已经体现。随着荷载的增加,由胶黏体传递至四周基材混凝土沿  $\theta$  角成锥形面上的正应力、剪应力也相应加大,但破坏高度  $x_0$  尚未形成。当拉拔端纵向钢筋拉应变很大甚至接近屈服拉应变时,近混凝土基材端钢筋局部发生颈缩变形;当这种颈缩变形仍处于弹性临界状态时,附近的胶黏体单元体 a(图 3 所示)除受到很大的剪切应力外,同时因钢筋颈缩而产生的横向拉应力  $\sigma_{ay}$  也逐步加剧了胶黏体在主应力  $\sigma_{a1}$  方向的变形;当钢筋达到其屈服极限拉应力时,钢筋近基材混凝土拉伸端的周围胶黏体中,间或有微细裂缝产生并向下发展,此时 a 点的纵向剪切黏结应力减小,峰值剪切黏结应力下移,在锥体高度取值达到  $x_0$  的地方,锥体在  $\theta$  角的锥面上混凝土主应力强度  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  均首先达到并超过莫尔强度应力圆的包络线范围,锥体在图 3 中胶黏体的 b 点单元体右上角产生混凝土内裂缝,破坏开始。混凝土圆锥体抗拔力:

$$F_{uc} = \sigma_0 \times A_l \quad (2)$$

式(2)中:

$$A_l = \pi \times \frac{x_0}{\cos\theta} \times (D + x_0 \tan\theta) \quad (\text{圆锥体侧面积})$$

由应力关系: $\tau^* = \sigma_0 \times \cos\theta$ ;  $\sigma^* = \sigma_0 \times \sin\theta$  并代入

圆锥面上混凝土微单元主应力公式:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{\sigma^*}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma^*}{2}\right)^2 + (\tau^*)^2}$$

$$\text{得: } \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{\sigma_0}{2} (\sin\theta \pm \sqrt{1 + 3\cos^2\theta}) \quad (3)$$

圆锥体-黏结复合破坏时,混凝土圆锥体面上的应力状态不是处于混凝土简单拉伸的应力状态而是处于复杂剪拉应力状态,斜锥面上的主拉应力须满足莫尔强度理论准则:

$$\sigma_1 - \frac{\sigma_{bt}}{\sigma_{ct}} \times \sigma_3 = \sigma_{bt} \quad (4)$$

由于  $\sigma_{bt} = f_{tk}$ ;  $\sigma_{ct} = f_{ck}$ ; 将上述关系及式(3)代入式(4)并化简后得:

$$\sigma_0 = \frac{2f_{tk}}{\left(1 - \frac{f_{tk}}{f_{ck}}\right) \times \sin\theta + \left(1 + \frac{f_{tk}}{f_{ck}}\right) \times \sqrt{1 + 3\cos^2\theta}} \quad (5)$$

式(5)中:  $f_{tk}$  为混凝土单向轴心拉伸时抗拉强度标准值,  $\text{N/mm}^2$ ;  $f_{ck}$  为混凝土单向轴心压缩时抗压强度标准值,  $\text{N/mm}^2$ 。

由试验知,对混凝土材料发生锥体破坏时  $\theta$  一般取  $45^\circ$ , 同时将式(5)代入式(2), 得混凝土圆锥体提供的抗拔承载力:

$$F_{uc} = \frac{x_0(D + x_0)}{\frac{0.2574}{f_{tk}} + \frac{0.0983}{f_{ck}}} \quad (6)$$

## 1.2 对圆锥体下段钢筋

由于混凝土锥体下段钢筋长度已减小到  $(l - x_0)$ , 大多数情况下, 植筋与胶黏体的黏结强度大于胶黏体与混凝土基材之间的黏结强度, 圆锥体下段钢筋的拉拔承载力强度将由胶黏体与混凝土基材之间的黏结强度决定。在 b 点处, 混凝土内裂缝产生时该点处的钢筋已达到较大的纵向拉应力值, 其横向也有一定的弹性颈缩变形, 因此在剪应力的作用下锥体下段钢筋的拉伸端也出现类似于前面叙述的钢筋拉伸端 a 点的应力变形状态(图 3), 不同之处只是在最终的极限状态时  $\sigma_{ay} > \sigma_{by}$ ,  $\tau_{ay} < \tau_{by}$ 。这是由于钢筋在不同位置颈缩变形程度不同所致, 并且由于内裂缝产生胶黏体拉应力  $\sigma_{bx} > 0$ , 达到极限状态时混凝土锥体剪拉破坏, 下段钢筋缓慢拔出。需要说明的是下段钢筋拔出时不会产生第二个混凝土锥体破坏, 因为植筋在  $(l - x_0)$  范围的拉拔抗力已经不足以克服第二个混凝土锥体斜面提供的抗拉力, 这在试验中也得到了证实。由试验数据可推知, 黏结应力沿锚

固长度是变化的, 它实际上是跟沿锚长变化的拉力值微分  $dF$  与锚长微分  $dx$  的比值有关; 随着外拔力增大, 峰值黏结应力不断下移。对埋置深度取临界长度的钢筋, 在混凝土构件中当拉伸端屈服后, 峰值应力比较靠近锚长中点附近, 在文献[2, 3] 对普通混凝土中埋置钢筋的拉拔应力屈服后黏结性能的研究测试报告中已体现这一现象。因此, 本文假定化学植筋在拉伸端处于屈服极限时峰值黏结应力处在锚长中点附近,  $\tau(x)$  分布比较均匀, 所以破坏时拉拔承载力  $F_{ub}$  用极限平均黏结应力来表示, 能满足计算精度的要求。即:

$$F_{ub} = \pi D \int_0^{l-x_0} \tau(x) dx = \pi D \bar{\tau} (l - x_0) \quad (7)$$

式(7)中:  $\tau(x)$  为黏结滑移破坏时锥体下段钢筋沿  $(l - x_0)$  锚长的黏结应力分布函数;  $\bar{\tau}$  为黏结滑移破坏时锥体下段钢筋沿  $(l - x_0)$  锚长的平均黏结应力。

根据文献[6, 7] 的试验数据, 在黏结破坏时, 平均黏结应力  $\bar{\tau}$  主要与混凝土强度、钢筋直径、钻孔直径有关, 同时还与植筋相对锚固长度(锚固长度与钢筋直径之比)有关, 并且指出界面处的黏结应力只随混凝土轴心抗压强度标准值与孔径的乘积的平方根线性变化<sup>[7]</sup>。为此, 本文根据试验实测的数据进行定量的数理统计分析后, 提出如下公式:

$$\bar{\tau} = \frac{6\sqrt{f_{ck} \times D}}{d} \times \left(1 + 1.718 \frac{d}{l}\right) \quad (8)$$

式(8)中:  $f_{ck}$  为混凝土单向轴心压缩时的抗压强度标准值,  $\text{N/mm}^2$ ;  $D$  为钻孔直径,  $\text{mm}$ ;  $d$  为钢筋直径,  $\text{mm}$ ;  $l$  为钢筋埋置深度,  $\text{mm}$ 。

将式(8)代入式(7)并与式(6)相加得:

$$F_u = \frac{x_0(D + x_0)}{\frac{0.2574}{f_{tk}} + \frac{0.0983}{f_{ck}}} + \frac{6\sqrt{f_{ck} \times D}}{d} \left(1 + 1.718 \frac{d}{l}\right) (l - x_0) \pi D \quad (9)$$

令:  $\frac{\partial F_u}{\partial x_0} = 0$ , 则极限拉拔力取极小值时锥体高度为:

$$x_0 = \frac{D}{2} \left[ \pi \bar{\tau} \left( \frac{0.2574}{f_{tk}} + \frac{0.0983}{f_{ck}} \right) - 1 \right] \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 并取  $F_u = A_s f_y = 0.25\pi d^2 f_y$ , 可得化学植筋的临界埋置深度  $l_c$ 。根据《建筑结构可靠度设计统一标准》中提出的实用设计表达式, 引入抗力分项系数  $\gamma_R$  后便得到化学植筋混凝土锥体-黏结复合破坏的拉拔抗力设计值  $F_d =$

$F_u/\gamma_R$ , 考虑到混凝土锥体的脆性破坏,  $\gamma_R$  参考混凝土材料的分项系数取 1.4。

## 2 公式的验证与讨论

根据文献[4]的试验数据, 用本文推导的理论

公式进行计算, 计算结果统一列表(表 1)。公式中用到的  $f_{ck}$  及  $f_{tk}$  由表 1 中  $f_{cu,k}$  (混凝土强度实测值) 及混凝土结构设计规范(GB 50010—2002) 关于混凝土轴心抗压强度和轴心抗拉强度标准值用表线性插值得到, 其中  $f_{ck} = 0.88\alpha_{cl} \times \alpha_{c2} f_{cu,k}$ 。

表 1 试验结果与本文计算结果的对比

混凝土强度等级	混凝土强度实测值	钢筋直径 $d/\text{mm}$	孔径 $D/\text{mm}$	埋置深度 $l/d$	试验结果		按本文理论计算		$F_{uc}/F_u/\%$
					$F/\text{kN}$	$x_0/\text{mm}$	$F_u/\text{kN}$	$x_0/\text{mm}$	
C20	23.5	16	22	10	87.5	35	83.3	33.3	14.1
C20	23.5	16	22	15	111.2	20	123.5	20.1	4.4
C20	23.5	20	28	10	118.9	80	121.1	36.9	12.6
C30	32.3	12	16	10	58.7	13	60.0	26.86	15.1
C30	32.3	16	22	10	109.3	15	98.3	31.2	15.2
C30	32.3	16	22	15	133.5	10	144.5	29.1	8.1

注:  $F_{uc}/F_u$  为混凝土锥体计算拉拔抗力标准值与总的计算拉拔抗力标准值的比值。

通过对比试验结果和理论计算结果可以发现: 用本文得出的理论公式来计算混凝土化学植筋锚固拉拔承载力计算值和试验值非常吻合, 平均误差在 6.3%。混凝土锥体高度也比较接近试验值, 趋势一致; 在其他条件相同的情况下, 破坏时混凝土锥体所分担的抗拔力随混凝土级别的提高而提高, 随着相对埋置深度的增大而减小; 从计算值及试验值来看锥体的高度也随着相对埋置深度的增大而减小, 说明随着相对埋置深度的增大化学植筋的破坏形式逐步从锥体-黏结复合破坏模式(见图 2(4))向钢筋屈服拉断的模式(见图 2(1))过渡。考虑到在既有建筑混凝土构件中钻孔直径的最小化原则, 所取的胶黏层厚度一般都较薄, 在拉拔端钢筋屈服前, 胶黏层厚度对拉拔滑移量的实际贡献是很小的, 文献[8]中测出此滑移量(剪切变形量) 仅在 0.06 ~ 0.42 mm 范围, 它对植筋拉拔锚固极限承载力的影响很小, 故在本文的分析推导中胶黏层厚度影响未给予考虑。

## 3 结 论

基于以上对混凝土化学植筋拉拔锚固强度的力学性能及破坏机理进行的详细分析, 以及基于理论分析和试验数据所建立的化学植筋锚固承载力强度公式, 根据理论计算和试验数据的对比, 得出以下结论:

1) 对发生锥体-黏结复合型破坏模式, 其混凝土化学植筋锚固拉拔承载力与混凝土强度( $f_{tk}$ 、 $f_{ck}$ )、钢筋直径、钻孔直径及相对埋置深度有关; 混凝土锥

形破坏的抵抗力与混凝土拉压强度标准值、钻孔直径及锥体高度有关; 相对锚长会影响锥体高度大小。

2) 引入莫尔强度破坏准则分析混凝土锥体破坏能反映锥体拉剪破坏时的实际受力极限状态。当相对埋置深度为 10 时, 混凝土锥体破坏的拉拔抗力占总拉拔抗力的平均值为 14.25%; 当相对埋置深度为 15 时, 混凝土锥体破坏的拉拔抗力占总拉拔抗力的平均值为 6.25%。

## 参考文献:

- [1] RONALD A. Behavior of chemically bonded anchor[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(9): 2744-2761.
- [2] SHIMA Hiroshi, CHOU Lie-liung, OKAMURA Ha-jime. Bond characteristics in post-yield range of deformed bar[J]. Concrete Library of JSCE, 1987(10): 113-124.
- [3] SHIMA Hiroshi, CHOU Lie-liung, OKAMURA Ha-jime. Bond-slip strain relationship of deformed bars embedded in massive concrete[J]. Concrete Library of JSCE, 1987(10): 79-94.
- [4] 高天宝, 杨树标, 吴斌. 混凝土植筋破坏形态分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(S0): 872-874.
- [5] 周新刚, 王允选, 曲淑英. 混凝土植筋锚固极限承载力分析[J]. 工程力学, 2002, 119(6): 82-85.
- [6] 熊学玉, 许立新, 胡家智. 化学植筋的拉拔试验研究[J]. 建筑技术, 2000, 31(6): 383-384.
- [7] 刘广明. 化学植筋技术及其应用实验研究[J]. 郑州工程学院学报, 2003, 24(1): 71-74.
- [8] 郑昊, 朱雷, 郭思浩. 聚胺酯钢筋锚固胶的研制与试验研究[J]. 结构工程师, 2006, 122(1): 67-68.