

文章编号:1007-6492(2001)03-0065-04

## 钢筋与砼间粘结锚固性能及粘结作用机理

管品武<sup>1</sup>, 孟会英<sup>1</sup>, 李 丽<sup>2</sup>

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 郑州市城建开发设计院, 河南 郑州 450000)

**摘 要:** 钢筋与砼间的粘结锚固性能依据钢筋外形大致可分为三种: 光圆钢筋、变形钢筋、扭转型钢筋的粘结锚固, 并分别总结了它们与砼间的粘结锚固性能及机理, 以及光圆钢筋及变形钢筋在重复荷载及反复荷载作用下的粘结退化及其机理, 最后也对粘结锚固设计进行了总结。

**关键词:** 钢筋砼; 粘结锚固; 粘结退化

**中图分类号:** TU 375 **文献标识码:** A

### 0 引言

钢筋与砼间的粘结锚固是钢筋与外围砼之间的一种复杂相互作用, 是钢筋与砼共同工作的基本前提。通常所谓粘结应力是指钢筋与砼接触面上的剪应力, 它使钢筋应力沿钢筋长度而变化; 反之, 没有钢筋应力变化, 就不存在粘结应力。

钢筋砼构件中的粘结应力按作用性质可分为锚固粘结应力与裂缝间的局部粘结应力, 前者主要指钢筋伸入支座或在跨间切断, 必须有足够的锚固长度(延伸长度), 以积累足够的粘结应力使钢筋中建立起所需的拉力; 后者是指开裂截面的钢筋拉力通过粘结应力向砼传递, 使未开裂截面砼受拉。裂缝截面间局部粘结应力的大小反映受拉区砼参与工作的程度。

影响粘结锚固的因素多, 破坏机理复杂, 再加之试验技术方面相对滞后, 使得目前粘结锚固的某些基本问题还未得到很好解决, 尚未提出一套较完整的、有充分依据的粘结锚固理论。

### 1 粘结锚固机理

#### 1.1 光圆钢筋与砼间的粘结机理<sup>[1-5]</sup>

光圆钢筋的粘结强度主要由三部分组成: 水泥凝胶体与钢筋表面的化学胶着力; 钢筋与砼接触面间的摩擦力; 钢筋表面粗糙不平的机械咬合作用。光圆钢筋的粘结强度在钢筋滑动前取决于化学胶着力, 滑动后则取决于摩擦力和与钢筋表

面状况有关的咬合力。

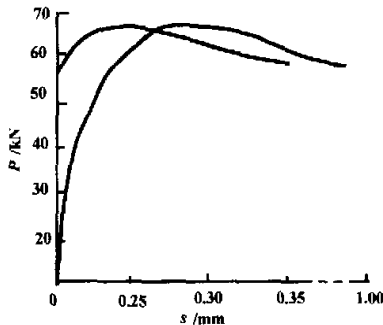


图1 拉拔状态下光圆钢筋  $P-s$  曲线

Fig.1  $P-s$  curve of plain steel bar

拉拔试验加载初期, 钢筋与砼即发生相对滑移, 但加载端滑移与粘结应力近似为直线关系。胶着强度很小, 不大的钢筋应力即足以产生使胶着力破坏的局部滑移。随荷载增大, 相对滑移逐渐向自由端发展, 胶着长度减小, 应力峰值内移。一旦出现滑动, 钢筋与砼脱离, 粘结力即由摩擦咬合作用承担。胶着力破坏的发展使  $P-s$  曲线愈来愈表现出非线性特征。当自由端滑动时, 钢筋埋长范围内的胶着力全部丧失, 荷载虽可进一步增加, 但粘结应力峰值已移至自由端, 增加荷载仅由应力峰值的增大来提供。  $P-s$  曲线下降段的出现是因为砼细颗粒被磨平, 摩阻力减小。

光圆钢筋拉拔试验的破坏形态均为钢筋自砼中被拔出的剪切破坏。若相对埋长  $l_a/d$  较大, 砼强度等级较高, 则钢筋屈服可能先于粘结破坏。

收稿日期: 2001-04-10; 修订日期: 2001-06-02

基金项目: 河南省科技攻关项目(96119016)

作者简介: 管品武(1971-), 男, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事钢筋砼结构基本理论及建筑工程抗震方面的研究。

光圆钢筋的粘结锚固强度主要取决于摩擦阻力及机械咬合作用的组合,而这与钢筋表面状况(锈蚀与表面凹凸等)有关。

### 1.2 变形钢筋与砼的粘结机理<sup>[1-5]</sup>

变形钢筋粘结强度主要取决于钢筋表面突肋与砼的机械胶合力,故变形钢筋极大地改善了与砼间的粘结作用。加载初期与光圆钢筋类似,随荷载增大胶合力破坏后钢筋开始滑移,肋对砼的挤压作用及钢筋与周围砼的摩擦力构成了滑动阻力的主要部分。肋的斜向挤压力产生的楔作用,挤压力的径向分量使外围砼环向受拉。砼逐渐被挤压成粉末而密实地嵌固在肋的根部。在此过程中,斜向挤压力的作用方向不断调整。当嵌固在肋根部的砼粉末物与钢筋的纵向倾角为  $30^\circ \sim 40^\circ$  时,将形成新的滑移面。

钢筋肋对砼的斜向挤压力不仅使砼被压碎,同时使外围砼产生内部斜裂缝及径向裂缝。内裂缝的出现和发展使钢筋有可能沿新的滑移面产生较大的相对滑移,使  $P-s$  曲线的斜率发生改变。随着荷载的增大,内裂缝向纵深及试件表面发展,滑移增大,使肋与砼更为挤紧,挤压力及摩擦力增大,但  $P$  的增长较  $s$  缓慢,  $P-s$  曲线的斜率继续减小。随挤压力增大,砼横向拉应变增大。当径向裂缝到达试件表面时,砼达到极限拉应变,加载端出现纵向劈裂裂缝,并迅速发展到自由端,产生突然的脆性破坏而达到极限粘结应力。加载端劈裂裂缝的出现并不表明粘结强度的耗尽,而是表明加载端处遭到局部破坏。埋长越长,加载端劈裂裂缝出现相对越早,  $\tau$  应力峰值的内移就越多,劈裂部分的粘结应力就越小,试件的平均强度就越低。

当砼受到横向约束时,如砼保护层过大、有侧向压力或配有横向钢筋时,变形钢筋的粘结破坏也将是另一种形态。在内裂缝出现以前,横向钢筋的存在对  $P-s$  曲线并无明显影响,横向钢筋基本不起作用。但内裂缝出现以后,其发展则由于横向钢筋的约束而受到限制,  $P-s$  曲线的斜率增大。开裂粘结应力也较无横向钢筋试件有较大提高,极限粘结强度时的相对滑移也显著增大。横向钢筋应力的增大延缓了劈裂裂缝的发展,使外围砼不致很快崩裂。开裂粘结强度后,加载端和自由端的滑移急剧增大,而且自由端的发展更快,趋近于加载端滑移。极限荷载的出现是由于剪切强度的耗尽。此时钢筋徐徐拔出,产生刮犁式破坏,钢筋与砼发生沿肋外径柱面上的剪切滑移。在钢筋被徐徐拔出的过程中,虽然滑移不断增大,但粘结

强度并不降低,这是由于沿圆柱滑移面上砼颗粒间存在有很大的咬合力及摩擦力,反映在  $P-s$  曲线上有较长的水平段,表现了较好的粘结延性。

达到极限粘结强度后,  $P-s$  曲线缓慢下降。当钢筋的滑移达到一定数值后,试件保持稳定的残余粘结强度。若继续加载,荷载不再上升,钢筋被徐徐拔出变形钢筋的  $P-s$  曲线如图 2 所示。

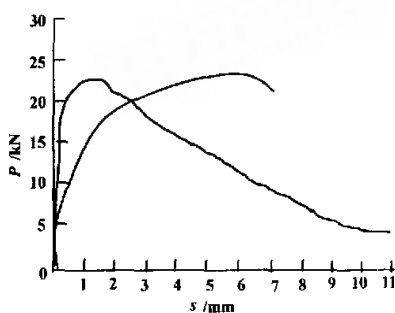


图 2 拉拔状态下变形钢筋  $P-s$  曲线

Fig.2  $P-s$  curve of deformed steel bar

### 1.3 扭转型钢筋与砼的粘结机理<sup>[6-8]</sup>

近年来,不同外形的新型钢筋不断出现,其中以螺旋肋及冷轧扭钢筋为代表的“扭转型”钢筋与砼间的粘结性能较光圆及变形钢筋独具特色。螺旋肋钢筋因具有连续螺旋状的突肋、冷轧扭钢筋则是具有一定截面形式和螺距的连续螺旋状冷强化钢筋,故通称为“扭转型”钢筋。

经试验发现,扭转型钢筋粘结受力过程(图 3)可分为胶结段( $OA$ 段)、摩阻段( $ABC$ 段)、挤压段( $CD$ 段)等三个阶段。因扭转型钢筋具有连续螺旋状外形(或突肋),钢筋在纵向拉拔力作用下,沿钢筋轮廓面挤压力径向分量对周围砼产生反对称的挤压扭矩,其纵向分量则为一般意义上的拉拔力。周围砼处于复杂的三向应力状态,使得扭转型钢筋的粘结锚固性能比较复杂。但就宏观来讲,加载前期类似光圆钢筋但粘结刚度好,与稳定滑移强度  $\tau_u$  对应的滑移仅为 0.3 mm 左右。但粘结强度较光圆钢筋高,这是因为扭转型钢筋体表面积大,而且表面粗糙,并伴有对砼连续楔体的机械咬合作用;加载后期类似于变形钢筋,但具有较好的粘结延性。这是因为钢筋大滑移和逆螺旋转角作用使钢筋在顺槽滑动时造成较大侧向挤压力矩和摩阻力,机械咬合作用表现明显。而且挤扭面连续变化、不断调整,使粘结强度维持于一较大值,因而粘结延性好,但与扭转型钢筋的极限强度  $\tau_u$  对应的钢筋滑移  $s_u \geq 30$  mm,如此大的滑移已不

具有工程意义,但比  $\tau_u$  高 30%~60% 的极限强度  $\tau_u$  可作为安全储备,可靠指标  $\beta$  可适当降低。也就是说,扭转型钢筋粘结锚固破坏是刚度问题而非强度问题,此为扭转型钢筋粘结锚固性能独特性的重要方面。

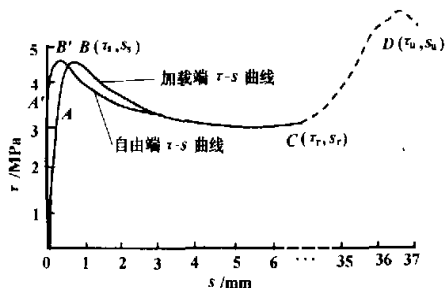


图3 拉拔状态下扭转型钢筋  $\tau-s$  曲线

Fig.3  $\tau-s$  curve of spiral steel bar

## 2 影响粘结锚固性能的主要因素<sup>[1-8]</sup>

### 2.1 砼强度及种类

随砼强度等级的提高,极限粘结强度  $\tau_u$  提高,且近似与砼抗拉强度成正比。而且普通砼比轻骨料砼的粘结强度要高。

### 2.2 保护层厚度及钢筋间距

增加保护层厚度可提高外围砼的劈裂抗力,故可提高开裂粘结强度及极限粘结强度。但保护层厚度超过一定范围( $C/d=5\sim6$ )时,变形钢筋的破坏形态将不再是劈裂破坏而是肋间砼被刮出的剪切破坏,因而影响不大。

纵向钢筋间距对砼的劈裂也有较大影响。保护层较大而纵筋净距较小,外围砼将发生纵筋处贯穿整个构件宽度内的劈裂破坏;若保护层厚度不够而纵筋净距较大时,砼将首先出现纵筋处保护层的纵向裂缝,然后发展成构件侧面裂缝。

### 2.3 横向钢筋

横向钢筋的存在延缓了径向内裂缝向试件表面发展,使开裂粘结应力较无横向钢筋的试件提高。劈裂到达试件表面后,横向钢筋限制了劈裂裂缝的发展,因而极限粘结强度也有较大提高,避免了脆性的劈裂破坏。同时,横向钢筋改善了试件受力的非均匀性,使  $P-s$ 、 $\tau-s$  曲线各项特征值的离散率均有所下降,而且在粘结应力下降不多的情况下,容许有较大相对滑移出现,具有较好的粘结延性。

一般认为,具有横向钢筋试件的粘结强度随横向钢筋的增大而增大,且大致与横向钢筋的配

箍特征值呈直线关系。

### 2.4 垂直压应力

垂直压应力的存在,使锚固区钢筋与砼间抵抗相对滑动的摩擦阻力增大。此时试件一般发生剪切型破坏。在接近破坏时才在与压应力平行的平面内产生一条沿钢筋长度方向的竖向裂缝,试件被裂缝分割成两半,破坏面上可见肋间砼被剪断刮出的痕迹。而无垂直压应力试件的破坏则大多属劈裂破坏。

### 2.5 其他因素

影响钢筋与砼粘结锚固性能的其他因素大致有钢筋外形、砼的组成、砼的浇注方向等。

## 3 重复荷载下粘结性能与机理

钢筋与砼间的粘结退化及相对滑移的增大是重复荷载作用下钢筋砼构件的刚度下降、裂缝开展的重要原因,不仅影响构件正常使用阶段的刚度及裂缝,而且影响构件的强度,尤其是配光圆钢筋的试件,粘结退化将导致钢筋强度降低而提前破坏。因粘结疲劳所引起的粘结破坏较静载时更为复杂、破坏形态也更多样化,但均以粘结疲劳产生过大滑移为破坏前提。

光圆钢筋的粘结强度主要取决于摩擦力,重复荷载作用下钢筋与砼间的摩擦阻力减小,故光圆钢筋的粘结强度较变形钢筋有更多的降低。粘结退化一般随荷载重复次数的增多而加剧。当应力水平不变时,为数不多的重复荷载并不引起粘结应力的显著退化;但在加载历史中出现过应力峰值,即使当前应力水平不高,其粘结退化比未出现应力峰值的情况显著,而且加载过程中出现的应力峰值水平越高,对以后低应力下粘结破坏影响就越大。粘结退化使构件受拉区砼参与工作的程度减小,裂缝宽度增大,刚度下降。故承受多次重复荷载的构件即使出现为数不多的几次较大超载,也会对工作应力下的性能产生不利影响。

当钢筋拉力增大而且钢筋与砼之间的粘结作用受到破坏时,在肋条处的承压能力未得到充分发挥前会产生摩擦滑移。此时若卸载钢筋将产生反向摩擦阻力,并在钢筋中产生残余应力,同时在周围砼中引起相应的压力。而肋条附近的非弹性变形、砼中的微裂缝及收缩应变的释放在卸载后不能完全闭合,从而在重复加载时导致粘结退化。

从卸载后肋的变形及受力状态来看,在应力峰值作用下卸载后,肋与砼间的空隙在以后的低应力下将不会消失,故肋对砼不产生挤压作用(存

在空隙),而粘结应力由摩擦力及咬合作用来提供,重复加、卸载时,摩擦咬合阻力不断下降,从而造成粘结应力的退化.应力峰值越高,低应力下不受挤压的肋的范围越大,粘结应力退化也越严重.

#### 4 反复荷载下粘结锚固性能与机理

反复荷载下钢筋砼构件的粘结退化是影响结构非线性动力反应的一项重要因素.因为反复荷载下粘结-滑移的滞回性能对于梁、柱及节点的恢复力特性有着决定性影响.

与重复荷载类似,反复荷载下钢筋与砼的粘结退化与肋和挤压区砼间的空隙有关.随荷载循环次数的增加,由于砼的局部挤碎及内裂缝的发展,使接触面“边界层”砼的破坏范围由加载端向内扩散.而且正、反向加载产生的两组内裂缝反复开闭,使裂缝逐渐相交,结果将使钢筋周围“边界层”砼很快被压碎,导致粘结能力的显著退化.同时,正反两方向的反复滑移使钢筋表面与砼骨料间的摩擦咬合作用比单向重复荷载下有更大的降低.控制滑移(或荷载)越大,交叉裂缝引起加载端“边界层”的破坏越严重,沿钢筋长度上的摩擦咬合作用越小,粘结退化越显著.

锚固区的粘结退化是由支座逐渐向内发展的,随荷载循环次数的增多,钢筋屈服长度也由支座边向内发展.这是因为在大变形的反复荷载作用下,钢筋与砼的粘结作用很快失效.钢筋屈服应力进入支座的长度与钢筋直径、强度、控制荷载的变形有关.

#### 5 我国规范的锚固设计

锚固设计的目的是确定结构中配置的钢筋具

有一定可靠度,以符合《建设结构设计统一标准》的要求.我国锚固长度设计的传统习惯是以  $5d$  为间隔取值确定钢筋的基本锚固长度,用表格形式给出(表格法);同时考虑到各国锚固长度设计的发展趋势,并适应计算机设计的需要,建议以

$$[l_a/d]_0 = \alpha f_y / f_t \geq \kappa$$

的形式给出(计算法).式中:  $f_y, f_t$  均取设计值;  $[l_a/d]_0$  为钢筋基本锚固长度;  $\alpha$  钢筋外形系数.表格法和计算法相差不大.同时考虑到各种不同受力形式的构件和位置,受拉钢筋在砼中锚固长度按基本锚固长度取值,其他锚固形式的设计锚固长度采用不同锚固形式系数加以调整.

#### 参考文献:

- [1] 徐有邻.变形钢筋砼粘结锚固性能的试验研究[Z].北京:中国建筑科学研究,1990.
- [2] 王传志,滕智明.钢筋砼结构理论[M].北京:建筑工业出版社,1985.254-299.
- [3] 中国建筑科学研究院.钢筋砼结构研究报告选集(二)[R].北京:建筑工业出版社,1981.255-288.
- [4] 中国建筑科学研究院.钢筋砼结构研究报告选集(三)[R].北京:建筑工业出版社,1994.147-177,178-183,316-320.
- [5] PARK R, PAULY T. Reinforced concrete structures[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1982.236-296.
- [6] 管品武,刘立新,徐有邻.冷轧扭钢筋粘结性能的试验研究[J].郑州工业大学学报,1997,18(1):8-16.
- [7] 管品武,刘立新,张瑞新.冷轧扭钢筋与混凝土粘结锚固性能的可靠度分析及设计建议[J].建筑科学,1998,14(6):43-46.
- [8] 管品武,刘立新,王 菁,等.冷轧扭钢筋粘结锚固性能的试验研究[J].郑州工业大学学报,1999,14(1):1-7.

### The Bond Capability and Mechanism Between Reinforcement and Concrete

GUAN Pin-wu<sup>1</sup>, MENG Hui-ying<sup>1</sup>, LI Li<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Design Department of City Construction Development of Zhengzhou, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** According to the shape of steel bar, the bond performance should be divided into three groups. All kinds of bond performance and bond mechanism are analyzed. The bond capability decrease is also discussed under repeated load or cyclic load. Finally the bond and anchor design is summed up.

**Key words:** reinforced concrete; bond and anchor capability; bond capability decrease