

文章编号:1671-6833(2008)03-0103-05

带扩大套头钢筋机械锚固性能的试验研究

刘立新, 赵 镇, 张 龔, 李大为

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 进行了36个采用扩大套头锚固形式的热轧带肋钢筋与混凝土粘结试件的拔出试验, 其主要参数为混凝土强度、钢筋直径、锚固长度、保护层厚度、横向配筋率及扩大套头尺寸等。对采用这种机械锚固方式的带肋钢筋与混凝土的粘结锚固强度、破坏形态以及影响粘结锚固性能的主要因素进行了较为系统的分析。试验研究结果表明, 采用此种锚固方式能使带肋钢筋与混凝土的极限粘结锚固强度显著提高, 减小粘结滑移量, 可有效地减小锚固长度。最后, 在统计回归的基础上给出带扩大套头钢筋的粘结强度的计算公式, 为我国混凝土结构设计规范进一步修订时列入机械锚固方式提供了参考依据。

关键词: 带扩大套头钢筋; 机械锚固; 锚固强度; 试验研究

中图分类号: TU 375.1

文献标识码: A

0 引言

钢筋和混凝土两种材料能组合在一起共同工作的原因是由于钢筋和混凝土之间存在粘结锚固作用。由于目前我国在工程中所应用的钢筋和混凝土强度比西方发达国家普遍要低1~2个等级, 因此在混凝土结构中应大力推广应用高强钢筋(如500 MPa级钢筋)和高强混凝土, 以节约钢材和混凝土的用量, 节约资源和能源。钢筋强度的提高将使锚固长度增大, 而过长的锚固长度将为钢筋混凝土结构节点构造的设计和施工带来一定困难, 因而有必要研究减小锚固长度的措施。国内外的研究和工程经验均表明^[1-6], 采用机械锚固的措施可以显著减小锚固长度, 但目前尚缺乏对钢筋机械锚固性能的系统研究。

目前常用的机械锚固方式有: 带肋钢筋端头加扩大套头、端头焊接短钢筋以及端头做机械弯钩等3种, 其中加扩大套头的方式可利用现有的钢筋机械连接套筒形成, 具有施工简便、占用空间较小的优点。为探讨这种机械锚固方式的性能, 笔者进行了加扩大套头这种机械锚固方式与混凝土粘结锚固性能的拔出试验, 对这种机械锚固方式带肋钢筋与混凝土的粘结锚固强度、破坏形态以及影响粘结锚固性能的主要因素进行了较为系统

的分析, 并提出了采用扩大套头锚固方式的粘结锚固强度计算公式, 以便为我国混凝土结构设计规范进一步修订时列入加扩大套头机械锚固方式提供参考依据。

1 试验方案和试验方法

带肋钢筋端头加扩大套头机械锚固试件分为12组, 每组3个, 共36个。试件截面100 mm × 100 mm, 长120~320 mm。拔出试件的混凝土立方体强度 $f_{cu} = 42.7 \sim 70.6 \text{ N/mm}^2$, 钢筋直径 d 分别为12 mm、16 mm和25 mm, 相对锚固长度 $l_a/d = 10 \sim 25$, 相对保护层厚度 $c/d = 1 \sim 3.7$, 部分试件配有横向箍筋, 配筋率 $\rho_{sv} = 0.43\% \sim 0.88\%$ 。拉出试件参数如表1所示。钢筋锚固端形状及尺寸如图1所示。

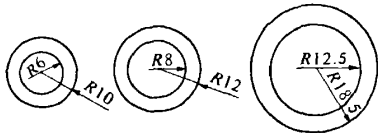
拉拔试验的试件及装置示意图分别见图2(a)和图2(b)。试件的加载端放置硬塑料管, 留有一段无粘结长度以避免局部挤压的影响, 硬塑料管在浇注混凝土前用胶与钢筋固定, 但对其粘结力几乎没有影响, 两端无粘结段的总长约50 mm。试验时分别在加载端和自端由端安装百分表量测相对滑移 s_l 和 s_r 。试件所受的拉拔力由油压表和荷载传感器同时记录。百分表和荷载传感器分别与CM-10测量应变仪连接, 用计算机记录每

收稿日期: 2008-04-26; 修订日期: 2008-07-01

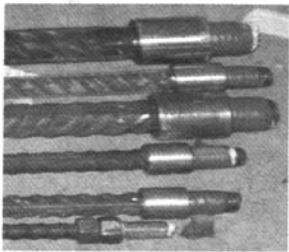
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578148)

作者简介: 刘立新(1947-), 男, 湖北汉川人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事混凝土结构、砌体结构基本理论及应用研究, E-mail: liuli_xin@126.com.

级加载后的读数. 整个试验在 WE-30 型液压式万能材料试验机上进行, 并参考《混凝土结构试验方法标准》(GB50152-92) 的要求分级加载.



(a) 扩大套头的尺寸



(b) 扩大端形状

图 1 机械锚固措施

Fig. 1 Mechanical anchorage measure

表 1 粘结锚固试件参数

Tab. 1 Parameters of pull-out test specimens

试件 编号	$f_{cu}/$ ($N \cdot mm^{-2}$)	d /mm	c /mm	l_a /mm	配箍率 $\rho_v/\%$	试件 个数
LA-1	42.7	16	42	160	0	3
LA-2	55.1	16	42	160	0	3
LA-3	70.6	16	42	160	0	3
LB-1	42.7	16	42	240	0	3
LB-2	42.7	16	42	320	0	3
LC-1	42.7	12	44	120	0	3
LC-2	42.7	25	37	250	0	3
LD-1	42.7	16	16	160	0	3
LD-2	42.7	16	32	160	0	3
LE-1	42.7	16	42	160	0.43	3
LE-2	42.7	16	42	160	0.66	3
LE-3	42.7	16	42	160	0.88	3

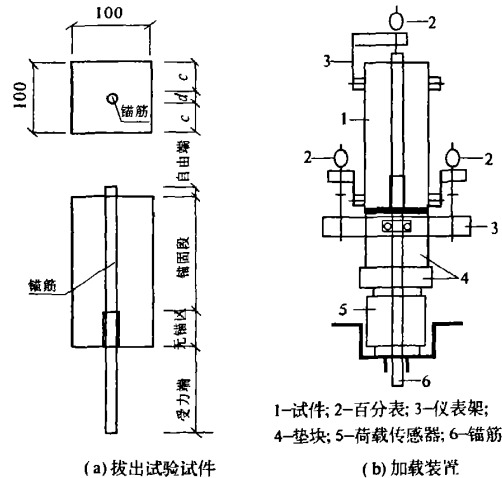


图 2 试件和试验装置示意图
Fig. 2 Test specimen sketch

2 试验现象的初步分析

2.1 荷载滑移曲线及受力阶段

带扩大套头钢筋的典型应力-滑移($\tau-s$)曲线如图 3 所示, 其受力阶段如下图所示. 钢筋的平均粘结应力按式(1)计算. 式中: F_u 为拉拔力, l_a 为锚固长度, d 为钢筋的公称直径.

$$\tau = \frac{F_u}{\pi d l_a} \tag{1}$$

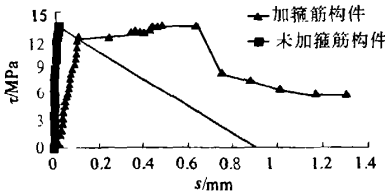


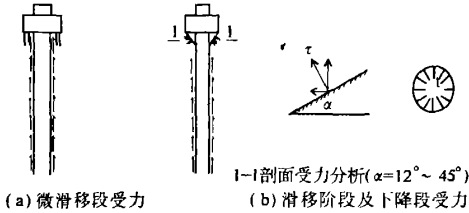
图 3 粘结滑移曲线

Fig. 3 bond-slip curve

(1) 微滑移段: 受力之初至自由端开始出现滑移. 此时拉拔力由扩大套头对混凝土顺筋方向的压力和钢筋与混凝土的胶结力承担, 荷载和滑移很小, $\tau-s$ 曲线呈线性增长, 见图 4(a).

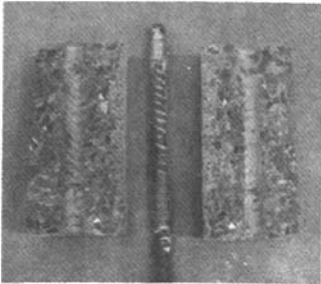
(2) 滑移段: 胶结力丧失, 拉力由扩大套头对混凝土顺筋方向的压力和钢筋肋对混凝土的摩阻力承担. 扩大套头处混凝土因斜向挤压锥楔作用造成握裹层混凝土的环向拉力, 并最终导致保护层纵向开裂, 见图 4(b).

(3) 下降段: 未加箍筋构件顺筋方向劈裂发生脆性破坏, 见图 4(c). 加箍筋的构件中部鼓裂, 见图 4(d), 钢筋出现大滑移发生延性破坏.

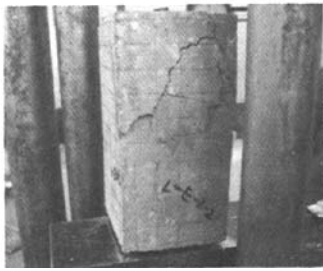


(a) 微滑移段受力

1-1剖面受力分析($\alpha=12^\circ \sim 45^\circ$)
(b) 滑移阶段及下降段受力



(c) 构件脆性破坏形态



(d) 构件延性破坏形态

图 4 锚固原理分析

Fig.4 The principium of bond - anchorage behavior

表 2 试验结果

Tab.2 The results of the test

试件 编号	$f_{cu}/$ ($N \cdot mm^{-2}$)	$\tau_{平均}/$ MPa	$\tau_{平均}/$ f_t	配箍率 $\rho_{sv}/\%$	破坏 形式
LA-1	42.7	10.13	3.70	0	脆性破坏
LA-2	55.1	10.42	3.41	0	脆性破坏
LA-3	70.6	9.74	2.99	0	脆性破坏
LB-1	42.7	6.58	2.40	0	脆性破坏
LB-2	42.7	6.51	2.37	0	脆性破坏
LC-1	42.7	14.35	5.23	0	钢筋拉断
LC-2	42.7	4.78	1.75	0	脆性破坏
LD-1	42.7	6.83	2.49	0	脆性破坏
LD-2	42.7	6.95	2.54	0	脆性破坏
LE-1	42.7	12.75	4.65	0.43	延性破坏
LE-2	42.7	13.73	5.01	0.66	延性破坏
LE-3	42.7	12.56	4.58	0.88	延性破坏

2.2 粘结锚固机理及特性

由拉拔荷载 F_u 计算平均锚固应力 τ , 由实测加载端及自由端滑移计算平均滑移 s , 做出锚固应力 - 滑移 ($\tau-s$) 曲线 (图 5). 图中同时列出了直锚形式的带肋钢筋的 $\tau-s$ 回归曲线以便比较. 在初期, 以摩阻力和扩大套头对混凝土压力共同承载时带扩大套头钢筋承载力稍优于直锚钢筋. 随着滑移增大, 扩大套头对混凝土的压力起主导作用, 此时, 带扩大套头钢筋的受力性能显著优于直锚钢筋, 极限粘结锚固强度显著提高, 粘结滑移量减小.

试验后观察试件内部, 扩大套头和钢筋肋处混凝土被刮犁拉出, 扩大套头下楔形体侧面有挤压破碎痕迹, 界面混凝土碾碎磨细.

带扩大套头钢筋锚固性能的特点是: 主要靠扩大套头机械咬合力承担荷载. 带扩大套头处的机械咬合力远远大于钢筋肋处的咬合力, 因此采用此种锚固形态的构件承载力大大提高. 但是扩大套头处混凝土因挤压锥楔作用造成外围混凝土

万方数据

的环向拉力, 当环向拉力大于混凝土抗拉强度时引起保护层纵向开裂.

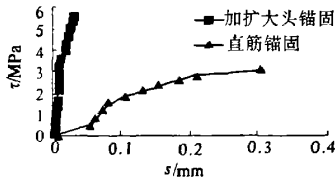


图 5 钢筋 ($\tau-s$) 曲线及比较

Fig.5 The comparison of bond - slip curves between knotted steel bar and common steel bar

3 影响锚固因素的讨论

3.1 混凝土强度

A 类试件 3 组共 9 个, $f_{cu} = 42.7 \sim 70.6 N/mm^2$, 探讨混凝土强度的影响. 试验表明, 粘结锚固强度随混凝土的强度的提高而提高, 并与抗拉强度 f_t 成正比, 这是由于破坏时无论内裂、劈裂、挤压、摩阻都与混凝土的抗裂性能有关. 由试验值 τ 和抗拉强度 f_t 经统计回归得到如下关系式:

$$\tau = 2.94f_t + 1.98 \quad (2)$$

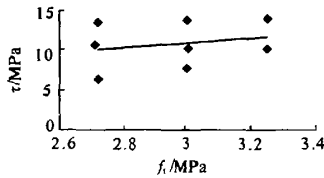


图 6 混凝土强度对粘结强度的影响

Fig.6 Relationship between bond strength and the strength of concrete

3.2 锚固长度

B 类构件 2 组共 6 个, $l_a = 120 \sim 250 mm$, $l_a/d = 10 \sim 20$, 并利用条件相似的 A 类构件, 探讨锚固长度的影响. 试验表明, 随锚固长度的增加, 拉拔力 F 增加, 但平均粘结锚固强度减小. 经统计回归后, 锚固长度的影响关系如下:

$$\tau/f_t = 28.45(d/l_a) + 0.79 \quad (3)$$

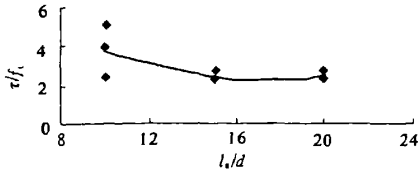


图 7 锚固长度对粘结强度的影响

Fig.7 Relationship between bond strength and anchorage length

3.3 钢筋直径

C 类构件 2 组共 6 个, $d = 12 \sim 25 mm$, 并利用条件相似的 A 类构件, 探讨钢筋直径的影响. 试

验表明,随着钢筋直径增加平均粘结滑移强度减小,统计回归公式如下:

$$\tau/f_t = -0.26d + 8.22 \quad (4)$$

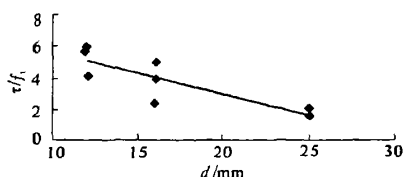


图8 钢筋直径对粘结强度的影响

Fig. 8 Relationship between bond strength and the diameter of bars

3.4 保护层厚度

D类试件2组共6个, $d = 12 \sim 25$ mm, $c/d = 1 \sim 3.7$, 并利用条件相似的A类构件, 探讨保护层厚度的影响. 采用 c/d 来消除D类试件中钢筋直径变化的影响, 并用 τ/f_t 来消除混凝土强度的影响. 试验表明, 随着保护层厚度的增加, 平均粘结应力增大. 经统计回归后, 保护层厚度的影响关系如下:

$$\tau/f_t = 1.93(c/d)^2 - 5.75(c/d) + 6.33 \quad (5)$$

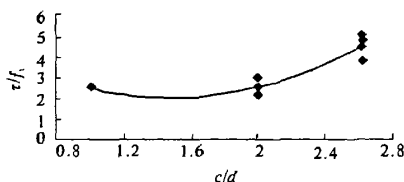


图9 保护层厚度对粘结强度的影响

Fig. 9 Relationship between bond strength and the cover thickness

3.5 横向配箍率

E类构件3组共9个, 配箍率 $\rho_{sv} = 0.43 \sim 0.88\%$, 并利用条件相似的A类构件, 探讨锚固长度的影响. 横向配箍率 ρ_{sv} 按式 $A_{sv}/(cs)$ 计算, 式中: A_{sv} 为单根箍筋的截面面积, c 为保护层厚度, s 为箍筋间距. 实验表明, 随着箍筋数量的增加平均粘结滑移强度增加不大, 但是此类构件粘结锚固强度离散性小, 试件开裂后承载力还略有增长, 为延性破坏. 统计回归公式如下:

$$\tau/f_t = 0.24\rho_{sv} + 4.61 \quad (6)$$

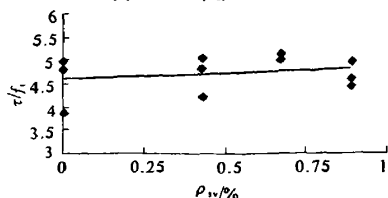


图10 横向配箍率对粘结强度的影响

Fig. 10 Relationship between bond strength and transverse steel ratio

3.6 扩大套头尺寸

A类构件和C类构件采用了尺寸不同的扩大套头进行锚固, 扩大套头横截面积 $A_{s1} = 200.96 \sim 584.04$ mm², 探讨扩大套头截面尺寸的影响. 通过A-I与C类共9个构件的比较, 并采用 A_{s1}/d^2 来消除钢筋直径变化带来的影响. 实验结果表明, 扩大套头横截面积越大, 平均粘结强度越高. 统计回归公式如下:

$$\tau/f_t = 6.10A_{s1}/d^2 - 3.15 \quad (7)$$

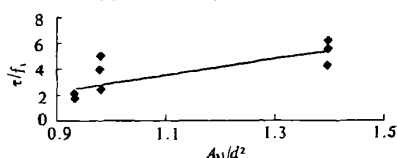


图11 扩大套头面积对粘结强度的影响

Fig. 11 Relationship between bond strength and the proportion of knot

4 锚固强度的计算公式

综合以上各因素, 在大量试验资料分析的基础上, 考虑影响粘结强度的主要因素并加以简化, 经统计回归后得带扩大套头钢筋的粘结锚固强度计算公式为

$$\tau = (1.11 \frac{c}{d} + 1.76\rho_{sv} + 25.84 \frac{d}{l_a} + 0.63 \frac{A_{s1}}{d^2} - 2.59)f_t \quad (8)$$

用此公式得出的计算值与试验值的复相关系数为0.84, 吻合性较好. 因此, 此公式可以作为计算带扩大套头钢筋锚固强度的计算依据.

5 结论

(1) 试验研究结果表明, 带扩大套头钢筋机械锚固的强度随着混凝土抗拉强度、相对保护层厚度 c/d 、横向箍筋配箍率 ρ_{sv} 以及扩大套头相对面积的增大而增大, 随钢筋直径的增大而减小.

(2) 带扩大套头钢筋机械锚固的强度随着相对锚固长度 l_a/d 的增大而减小, 大致成线性关系; 但随着锚固长度 l_a 的增大, 粘结锚固破坏时总的拉拔力 F_u 仍随锚固长度的增大而增大.

(3) 带扩大套头钢筋其粘结锚固强度可按(8)式计算, 计算值与试验值符合良好.

(4) 未配横向箍筋的试件锚固破坏的形态均为脆性的劈裂破坏, 开裂荷载与破坏荷载基本相同, 粘结锚固强度的离散性较大; 配横向箍筋的机械锚固试件的锚固破坏表现出一定延性, 试件开

裂后锚固力还可有缓慢增长,粘结锚固强度的离散性减小;建议采用机械锚固措施时,应配一定数量的横向箍筋。

参考文献:

- [1] 毛达岭,刘立新,范丽. HRB500级钢筋粘结锚固性能的试验研究[J]. 工业建筑,2004,34(12):67-69.
- [2] MAO D L, LIU L X, XIE L L. Experimental study on bond - anchorage property of HRB500 steel bar in concrete [C]//International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering, South-east University, China, 2005:969-976.
- [3] 刘立新,毛达岭,李千. 超细晶粒带肋钢筋粘结锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构学报,2006,27(增刊):8-11.
- [4] 徐有邻,刘立新,管品武,等. 冷轧扭钢筋粘结锚固性能的试验研究[J]. 建筑技术,1998,29(8):538-540.
- [5] 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.
- [6] 管品武,刘立新,王菁,等. 冷轧扭钢筋的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.

Experimental Study on Bond - anchorage Behavior of Knotted Steel Bars in Concrete with Mechanical Anchorage Measure

LIU Li - xin, ZHAO Zhen, ZHANG Yan, LI Da - wei

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on 36 knotted steel bar specimens pull - out test, the main factors affecting the bond - anchorage behavior such as the strength of concrete, the diameter of bars, the development length, the cover thickness of concrete, the transverse steel ratio and the proportion of knot are analyzed. The results show that the development length of knotted steel bars with the mechanical anchorage measure can be decreased in engineering. Then the calculating formula of bond strength has been established based on the test and it can be a reference for future revision of the Chinese Design Code.

Key words: knotted steel bar; mechanical anchorage; bond strength; experimental study

(上接第94页)

- [8] 王安之,周裕之,赵蓓. 化学反应工程学[M]. 北京:化学工业出版社,2005:78-98.
- [9] 李绍芬. 反应工程[M]. 第二版. 北京:化学工业出版社,2000:127-154.
- [10] GROBICKI A, STUCKEY D C. Hydrodynamic characteristics of the anaerobic reactor[J]. Wat Res, 1992, 26(3):371-378.

Study of Hydrodynamic Characteristics of ABR at Different HRT

GENG Ya - ge, ZHANG Hao - qin, CHEN Hao, LIU Jin - dun

(School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Anaerobic baffled reactor is a new type of highly efficient, highly promising anaerobic reactor. Its hydraulic characteristics are important factors that affect its treatment efficiency. With the residence time distribution (RTD) method, NaCl was used as tracer to research the flow pattern and hydrodynamic characteristics of the ABR reactor. The impact of HRT to flow pattern was analyzed. The results in different HRT, showed that when the HRT changed from 1 h to 9 h, the dead zone fraction was under 0.30, among 0.068 to 0.299. With the increase of HRT, the dead zone decreased, N increased, and the extent of mixing decreased.

Key words: anaerobic baffled reactor (ABR); hydrodynamic characteristics; residence time distribution (RTD); pulse-response method