

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201710053

锚固力在钢筋黏结和端板承压间的分配规律

郑文忠, 苗天鸣, 王识宇, 王 英

(结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

摘要: 为获得锚固力在高压热轧钢筋直锚段黏结和端部锚固板承压间的分配规律, 以钢筋与混凝土间的黏结-滑移本构关系为基础, 利用 MATLAB 编写出带锚固板钢筋受力计算程序, 并通过 120 个带锚固板钢筋混凝土试件的拉拔试验结果对程序的准确性进行验证。依托程序, 分析相对保护层厚度 c/d 和钢筋屈服强度与混凝土抗拉强度之比 f_y/f_t , 对钢筋稳定锚固长度与钢筋公称直径之比 l_{as}/d 的影响以及钢筋屈服强度、混凝土强度等级、混凝土相对保护层厚度、钢筋相对埋置长度等参数对直锚段钢筋黏结应力 f_b 的影响, 并拟合得到以 f_y/f_t 和 c/d 为自变量的 l_{as}/d 计算公式。结果表明: l_{as}/d 随 f_y/f_t 的增大而线性增大, 随 c/d 的增大而非线性减小; f_b/f_y 随钢筋埋置长度与稳定锚固长度之比 l_{at}/l_{as} 的变化规律只与混凝土相对保护层厚度有关。继而通过拟合得到加载端钢筋受拉屈服强度时刻, 以 c/d 和 l_{at}/l_{as} 为自变量的 f_b/f_y 计算公式。

关键词: 直锚段黏结力; 稳定锚固长度; 锚固板承压力; 分配规律

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)06-0152-09

Distribution regulation of the reinforcement force between bond and headed bars

ZHENG Wenzhong, MIAO Tianming, WANG Shiyu, WANG Ying

(Key Laboratory of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China)

Abstract: Based on the bond stress-slip constitutive model between the reinforcement and concrete, a MATLAB program was coded to calculate the force of the headed bars, which was used to obtain the regulation of distribution between bond and headed bars of the high strength hot-roll reinforcement force, and it was validated by the pull-out tests of 120 reinforced concrete specimens. According to the simulation results, the combined effects of the relative concrete cover (the ratio of concrete cover c to bar diameter d) and an index f_y/f_t indicating the ratio of reinforcement yield strength to concrete tensile strength were investigated quantitatively. The results indicate that l_{as}/d (the ratio of the stable development length to bar diameter) increases linearly with f_y/f_t increase, but gradually decreases with the increasing c/d . The formula of l_{as}/d for f_y/f_t and c/d was established, and the potential influence factors of the bond stress f_b were evaluated, including reinforcement yield strength, concrete tensile strength, the relative concrete cover and the embedment length l_{at} . The results indicate that c/d is the only factor to constrain the parameter f_b/f_y to be varied with the index l_{at}/l_{as} . A reliable calculation formula of the f_b/f_y for c/d and l_{at}/l_{as} was proposed.

Keywords: bond stress; stable development length; pressure of headed bars; regulation of distribution

国家标准 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[1] 纳入了 HRB500 钢筋, 修订中的 GB1499.2《钢筋混凝土用钢 第二部分: 热轧带肋钢筋》已考虑新增 HRB600 钢筋。高强钢筋具有更高屈服强度的特点, 给工程带来诸多益处^[2], 但也使得其在混凝土中所需要的锚固长度进一步增大。当锚固长度不宜过长时, GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》中规定了可在钢筋末端采用弯钩或机械锚固的措施来减小锚固长度。在钢筋末端连接锚固板就是一种常

见的机械锚固形式。

文献[3]完成了 4 组共计 72 个拉拔试件的试验。试验分析了不同混凝土强度 (C20、C30 和 C40)、不同钢筋公称直径 d (8、12、18、25 mm)、不同保护层厚度 c (37.5、41、44、46 mm)、不同埋置长度 ($10d$ 、 $12d$ 和 $15d$) 和不同配箍率对直锚高强钢筋黏结力的影响, 验证了 HRB500 钢筋的极限黏结强度、黏结-滑移本构关系均符合中国黏结锚固专题研究组所提出的计算方法^[4], 这为带锚固板钢筋受力问题的程序计算提供了基础。

文献[5]通过完成 36 个带锚固板和 36 个带加焊筋的 HRB500 的拉拔件试验, 对中国黏结锚固专题研究组提出的黏结强度计算公式进行了修正。通过对不同钢筋公称直径 d (12、16、25 mm)、不同钢

收稿日期: 2017-10-13

基金项目: 国家自然科学基金 (51378146);

教育部博士点基金 (20132302110064);

黑龙江省自然科学基金重点项目 (ZD2015010)

作者简介: 郑文忠 (1965—), 男, 博士生导师, 长江学者特聘教授

通信作者: 郑文忠, hitwzhang@163.com

筋埋置长度 l_{at} (10d 和 15d)、不同配箍率 ρ_{sv} (0.43%、0.66% 和 0.88%)、不同混凝土强度 (C40、C50 和 C70)、不同保护层厚度 c (1d 和 2d)、不同锚固板净面积 (锚固钢筋公称面积的 4.5~5.0 倍) 和双侧焊筋不同长度 (30 mm 和 50 mm) 的分析,拟合得到了锚固板承压作用折算的锚固强度 τ_{ua} 和直锚段黏结作用折算的锚固强度 τ_{um} 两部分计算公式:

$$\tau_{ua} = 0.583(0.82 + 0.9 \frac{d}{l_{at}}) (1.6 + 0.7 \frac{c}{d} + 20\rho_{sv}) f_t,$$

$$\tau_{um} = 81.237 f_t d / (\pi l_{at}),$$

进而可以得到机械锚固黏结强度 $\tau_u = \tau_{ua} + \tau_{um}$ 。这两个公式均由两种机械锚固形式的结果共同回归得到,可以为计算钢筋机械锚固力问题提供一定的依据。但是,双侧焊筋锚固与端部焊锚板锚固的受力特点和破坏机理都有所差异,以一种统一的公式来计算锚固力,会造成一定的误差。

文献[6]完成了 70 个采用 HRC 公司钢筋锚固板产品 (钢筋直径约 25 mm, 锚固板尺寸约 75 mm × 75 mm) 的混凝土梁式拉拔试验,给出了该钢筋锚固板产品的锚固长度计算公式:

$$l_{at} = \frac{22df_y}{60\sqrt{f'_c}} \left(\frac{3d}{c+K_{tr}} \right) (\alpha\beta\gamma\psi), K_{tr} = \frac{A_{tr}f_{yt}}{1500sn}.$$

式中: f_y 为钢筋屈服强度, f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度, c 为混凝土保护层厚度, K_{tr} 为横向配筋指标, s 为锚固长度范围内的横向钢筋最大中心距离, n 为开裂面上的钢筋数, f_{yt} 为横向钢筋的屈服强度, A_{tr} 为锚固长度范围内开裂面上的横向钢筋面积。 α 、 β 、 γ 、 ψ 是建议考虑浇筑方式、轻质骨料、环氧树脂和锚固长度范围内超筋的影响。但是,在公式应用时,需要满足试件保护层厚度大于 3 倍钢筋公称直径、锚固板承压面积与锚固钢筋公称面积比值约 9、锚固长度最小值不小于 6 倍钢筋公称直径或 150 mm 等限制条件,因此在适用范围上存在着局限性。

文献[7-8]进行了 2 个中间层边节点和 3 个顶层边节点的试验。其中,中间层边节点中受力钢筋公称直径为 25 mm, 锚固板承压面积约为 4 倍锚固钢筋公称面积; 顶层边节点中受力钢筋公称直径为 16 mm 和 20 mm, 锚固板尺寸为边长 50 mm 的正方形。试验结果表明,带锚固板钢筋的节点受力性能可以满足美国规范对房屋节点的要求,并给出了受力钢筋公称直径为 16~25 mm 的锚固长度不小于 12 倍钢筋公称直径,锚固板承压面积不小于 4 倍锚固钢筋公称面积的建议。

美国混凝土建筑规范 ACI318-2014 中规定^[9],带锚固板变形钢筋锚固长度 l_{at} 为

$$l_{at} = (0.016\psi_e \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}}) d.$$

式中: f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; ψ_e 为环氧涂层的影响系数,采用环氧涂层时取为 1.2,其余取为 1.0; f_y 为钢筋屈服强度。另外, l_{at} 长度不得少于 8d 或 150 mm 中的较大值。另外,规范中也给出了变形钢筋屈服强度不超过 420 MPa、混凝土强度等级不超过 40 MPa、钢筋公称直径 d 不得超过 36 mm、锚固板净承压面积不少于 4 倍锚固钢筋公称面积、保护层厚度不小于 2d、相邻钢筋净距不小于 4d 的公式限制条件。

国家行业标准 JGJ 256—2011《钢筋锚固板应用技术规程》^[10] 中也对部分锚固板给出了类似规定:承压面积不应小于锚固钢筋公称面积的 4.5 倍; 钢筋公称直径不宜大于 40 mm; 钢筋屈服强度为 335、400、500 MPa 时,对应混凝土强度等级不低于 C30、C35、C40; 锚固长度不应低于 0.3 l_{ab} 。

以往的研究成果及各国规范,基本上都是通过限制锚固板承压面面积与锚固钢筋公称面积比值下限和钢筋直锚段长度下限来保障带锚固板钢筋的可靠锚固,这样可能会造成直锚段过长或者锚固板过大。因此,合理考虑钢筋公称直径、钢筋屈服强度、混凝土强度、钢筋埋置长度等因素的影响,给出锚固力在直锚段钢筋黏结和锚固板承压间分配规律的具体算法,能够更准确地给出钢筋锚固长度和锚固板尺寸,把带锚固板钢筋在锚固问题上的被动校核转变为主动选择,具有一定的工程使用价值与意义。

1 钢筋锚固数值分析

1.1 本构模型

变形钢筋黏结-滑移本构关系采用文献[11-13]的研究成果。该本构关系以黏结应力-滑移基本关系 $\Phi(s)$ 与位置函数 $\psi(x)$ 的乘积形式,表示出锚固长度范围内每一个点的局部黏结应力-滑移关系。

τ - s 基本关系曲线上 4 个黏结锚固特征强度表达式为:

滑移强度:

$$\tau_s = 0.99f_t,$$

劈裂强度:

$$\tau_{cr} = (1.6 + 0.7 \frac{c}{d}) f_t,$$

极限强度:

$$\tau_u = (1.6 + 0.7 \frac{c}{d} + 20\rho_{sv}) f_t,$$

残余强度:

$$\tau_r = 0.98f_t.$$

式中: f_t 为混凝土抗拉强度, MPa; c 为混凝土表面到纵向受力钢筋外边缘的距离, mm; d 为钢筋公称直径, mm; ρ_{sv} 为配箍率. 此外, 相应的特征滑移值分别为 $s_s = 0.0008d$, $s_{cr} = 0.0240d$, $s_u = 0.0368d$, $s_r = 0.5400d$.

位置函数表达式为

$$\psi(x) = \left[1 + \left(\frac{x}{l_{at}} \right)^4 \right] \sin \frac{x}{l_{at}} \pi,$$

式中: l_{at} 为钢筋直锚段长度, x 为钢筋直锚段上一点距自由端的长度.

1.2 数值分析方法

将埋置长度 l_{at} 平均划分为 n 个单元 (见图 1), 每个单元长度 $\Delta x = l_{at}/n$. 若在加载端施加滑移 s_1 , 则将引起锚固长度范围内各单元相关变量的变化. 利用下列递推关系式可进行递推计算:

$$\sigma_s(i+1) = \sigma_s(i) - \frac{4\tau(i)}{d} \Delta x,$$

$$\sigma_c(i+1) = \sigma_c(i) - [\sigma_s(i) - \sigma_s(i+1)] \frac{A_s}{A_c}.$$

式中: A_s 为受力纵筋横截面积, A_c 为混凝土受力影响区的横截面积. 由本构关系可计算钢筋应变 $\varepsilon_s(i)$ 和混凝土应变 $\varepsilon_c(i)$, 并由应变差递推下一单元的滑移 $s(i+1)$.

$$s(i+1) = s(i) - \left[\frac{\varepsilon_s(i) + \varepsilon_s(i+1)}{2} - \gamma_c \frac{\varepsilon_c(i) + \varepsilon_c(i+1)}{2} \right] \Delta x,$$

式中 γ_c 为混凝土应变不均匀系数, 本文按徐有邻教授建议取 2. 由 $s(i+1)$ 根据 $\tau-s$ 本构关系求得下一单元的黏结应力 $\tau(i+1)$. 依次递推, 直到算至最后一个单元或递推至某一单元时, 钢筋应力和滑移在误差允许范围内满足边界条件.

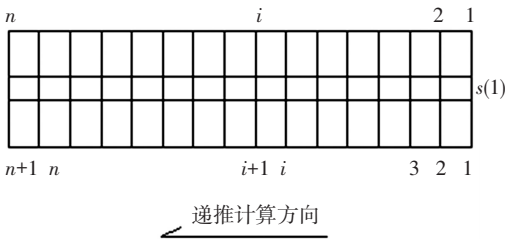


图 1 单元划分和递推计算

Fig.1 The method of division and calculation

在计算带锚固板钢筋直锚段的黏结作用时, 认为锚固板承压面处钢筋的滑移值为 0, 并且钢筋埋置长度 l_{at} 已知, 因此自由端的边界条件为 $s(l_{at}) = 0$, $\sigma_s(l_{at}) = F_p$ (F_p 为锚固板承压作用力). 在加载端钢筋应力给定的条件下, 通过调整加载端滑移 s_1 , 使递

推计算结果满足边界条件. 由此可以得到加载端钢筋任一应力下, 带锚固板钢筋直锚段黏结作用的分布情况.

将加载端钢筋屈服而自由端钢筋不发生滑移时的最小锚固长度, 定义为受拉钢筋的稳定锚固长度 l_{as} . 由稳定锚固长度 l_{as} 的定义可以得到新的边界条件, $\sigma_s(0) = f_y$, $\sigma_s(l_{at}) = 0$, $s(l_{at}) = 0$. 由于钢筋埋置长度 l_{at} 和加载端滑移 s_1 均为迭代自变量, 所以先假设一个 l_{at} , 按计算带锚固板钢筋直锚段黏结作用的方法进行迭代计算, 对迭代结果进行判断来调整所假设的 l_{at} , 直至计算结果满足边界条件, 所得到的长度即为稳定锚固长度 l_{as} .

2 数值分析与试验结果对比

试验完成了共计 120 个中心埋置单根带锚固板高强钢筋混凝土试件的拉拔试验. 钢筋采用 HRB500 和 HRB600 两种, 公称直径分别为 20 mm、22 mm 和 25 mm 三种. 每种钢筋各截取 3 个试样, 试样长度为 600 mm, 并根据 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法》^[14] 的规定进行钢筋材性试验. 当钢筋采用 HRB500 时, 混凝土采用 C30~C60 四种强度等级; 而当钢筋采用 HRB600 时, 混凝土则采用 C40~C70 四种强度等级. 纵向钢筋埋置长度 l_{at} 是同等条件下钢筋临界锚固长度 l_{ac} 的 0.3~0.7 倍. 混凝土拉拔试件的横截面尺寸统一为 150 mm×150 mm. 钢筋与混凝土力学性能见表 1、2.

表 1 钢筋材料力学性能

Tab.1 Mechanical properties of reinforcement bars

钢筋品种	钢筋公称直径 d / mm	屈服强度 f_y / MPa	极限强度 f_u / MPa
HRB500	20	555	725
HRB500	22	555	716
HRB500	25	560	713
HRB600	20	633	825
HRB600	22	612	796
HRB600	25	684	901

表 2 混凝土材料力学性能

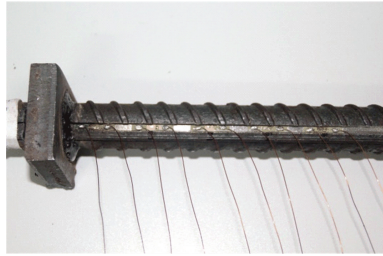
Tab.2 Mechanical properties of concrete MPa

混凝土设计强度等级	标准立方体抗压强度 $f_{cu,m}$	轴心抗压强度 $f_{c,m}$	轴心抗拉强度 $f_{t,m}$
C30	40.23	30.57	3.01
C40	51.49	39.13	3.45
C50	59.63	45.32	3.74
C60	66.96	50.99	3.99
C70	79.50	62.56	4.38

注: 1. C50 及以下混凝土标准立方体抗压强度由 100 mm×100 mm×100 mm 立方体抗压强度实测值乘以 0.95 得到; C60 和 C70 混凝土标准立方体抗压强度是 150 mm×150 mm×150 mm 立方体抗压强度实测值.

2. 混凝土轴心抗拉强度根据 $f_{t,m} = 0.395f_{cu,m}^{0.55}$ 计算得到.

为尽量不改变钢筋表面形状,沿钢筋纵肋一侧开 4 mm×4 mm 槽口,槽口紧贴钢筋纵肋边缘,钢筋埋置长度范围内每 30 mm 在槽底布置一个 1 mm×2 mm 应变片,先后涂抹氯丁胶、植筋胶封槽.应变片的布置及后处理见图 2.



(a) 钢筋开槽及槽底密布应变片



(b) 涂抹氯丁胶和植筋胶封槽后

图 2 应变片的布置及处理

Fig.2 Processing the strain gauges

混凝土拉拔件配置 4Φ8 纵筋 (HPB300),用于固定箍筋.箍筋选用 HPB300 钢筋,公称直径为 8 mm,间距为 100 mm.20、22、25 mm 三种公称直径的钢筋末端锚板尺寸分别为 40 mm×40 mm、45 mm×45 mm 和 50 mm×50 mm,钢板厚度均为 16 mm,末

端锚固板与钢筋通过穿孔塞焊.混凝土拉拔试件示意图见图 3,其中,1 为钢筋锚固板,2 为架立筋,3 为箍筋,4 为受拉纵筋.

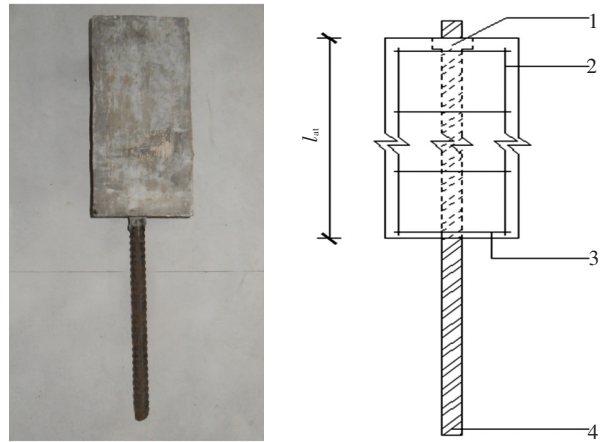


图 3 拉拔试件示意

Fig.3 The pull-out specimen

试件拉拔力由荷载采集系统采集,沿钢筋纵肋所开槽内的应变片读数随荷载的变化用 DH3816 静态应变采集仪采集.由于混凝土拉拔试件的锚固力 T 由直锚段钢筋黏结力 F_b 与锚固板承压力 F_p 共同承担,因此通过应变片的实测值,可以获得在各级荷载作用下真实的钢筋黏结力 F_b^t 与真实的锚固板承压力 F_p^t .借助 MATLAB 数值分析程序,可以得到各试件在各级荷载下的直锚段钢筋黏结力 F_b^c 与锚固板承压力 F_p^c .表 3 给出了钢筋屈服时刻,计算的锚固板承压力 F_p^c 与真实的锚固板承压力 F_p^t .

表 3 F_p^t 值与 F_p^c 值

Tab.3 Values of F_p^t and F_p^c

kN

试件编号	F_p^t	F_p^c	试件编号	F_p^t	F_p^c	试件编号	F_p^t	F_p^c
500-20-30-140	107.36	118.81	500-20-40-120	124.76	124.16	500-20-50-110	130.51	129.40
500-20-30-180	104.85	100.25	500-20-40-160	113.05	109.77	500-20-50-140	118.25	116.80
500-20-30-220	99.29	89.59	500-20-40-190	94.87	95.22	500-20-50-170	111.11	107.15
500-20-30-260	85.84	75.92	500-20-40-230	82.83	81.74	500-20-50-200	92.16	92.40
500-20-30-300	67.52	60.72	500-20-40-260	63.04	67.49	500-20-50-230	82.79	82.49
500-20-60-110	135.52	134.25	500-22-30-160	144.66	143.54	500-22-40-140	163.29	155.82
500-20-60-140	122.28	120.11	500-22-30-210	142.35	129.33	500-22-40-180	140.14	135.51
500-20-60-170	112.99	107.54	500-22-30-260	118.59	107.27	500-22-40-220	113.38	114.41
500-20-60-200	104.36	102.17	500-22-30-310	95.17	87.29	500-22-40-270	97.42	97.50
500-20-60-230	84.46	87.21	500-22-30-360	77.40	70.85	500-22-40-310	82.04	83.30
500-22-50-130	147.14	150.27	500-25-30-110	157.13	160.21	500-25-30-200	184.82	179.11
500-22-50-160	134.39	137.15	500-22-60-150	133.05	138.73	500-25-30-260	158.66	152.99
500-22-50-200	120.20	121.90	500-22-60-180	123.34	127.69	500-25-30-320	136.64	131.13
500-22-50-240	102.45	105.64	500-22-60-220	111.99	114.23	500-25-30-380	115.06	108.84
500-22-50-270	85.43	93.35	500-22-60-250	85.58	95.66	500-25-30-440	89.06	89.40
500-25-40-170	190.01	189.20	500-25-50-150	211.28	204.35	500-25-60-140	194.89	198.58
500-25-40-220	174.62	165.66	500-25-50-200	164.51	169.28	500-25-60-180	185.12	183.94
500-25-40-270	138.26	142.32	500-25-50-240	151.47	154.33	500-25-60-220	162.88	163.88
500-25-40-330	119.02	118.87	500-25-50-290	125.47	131.95	500-25-60-270	144.61	133.93
500-25-40-380	94.53	102.41	500-25-50-340	98.34	114.79	500-25-60-310	125.63	124.39
600-20-40-140	148.47	139.09	600-20-50-130	149.48	142.81	600-20-60-120	139.94	138.43
600-20-40-190	118.46	112.79	600-20-50-170	120.54	119.29	600-20-60-150	129.99	128.57
600-20-40-230	109.90	99.99	600-20-50-210	106.97	103.98	600-20-60-190	103.44	106.79

续表 3

试件编号	F_p^t	F_p^c	试件编号	F_p^t	F_p^c	试件编号	F_p^t	F_p^c
600-20-40-270	86.59	81.19	600-20-50-240	94.36	91.83	600-20-60-220	97.58	97.50
600-20-40-320	71.81	64.90	600-20-50-280	78.45	76.59	600-20-60-250	87.71	86.89
600-20-70-110	147.81	148.00	600-22-40-170	166.66	159.28	600-22-50-150	177.32	169.99
600-20-70-140	128.99	131.55	600-22-40-220	144.32	136.43	600-22-50-190	144.99	144.25
600-20-70-170	104.53	115.28	600-22-40-270	118.88	113.43	600-22-50-240	129.24	125.42
600-20-70-200	99.66	104.34	600-22-40-320	106.91	98.06	600-22-50-280	104.53	105.33
600-20-70-230	87.13	92.23	600-22-40-370	80.28	74.78	600-22-50-330	83.89	86.39
600-22-60-140	172.15	169.50	600-22-70-120	177.70	178.85	600-25-40-200	216.18	225.02
600-22-60-180	152.99	150.53	600-22-70-160	163.30	161.42	600-25-40-270	207.96	193.50
600-22-60-220	130.20	130.13	600-22-70-200	130.46	136.12	600-25-40-330	179.50	168.95
600-22-60-260	109.61	108.94	600-22-70-240	108.91	117.88	600-25-40-390	139.15	136.21
600-22-60-300	82.91	90.73	600-22-70-280	90.05	100.94	600-25-40-450	96.62	110.16
600-25-50-180	236.42	246.12	600-25-60-170	256.77	258.30	600-25-70-150	233.14	239.69
600-25-50-240	199.79	198.49	600-25-60-220	132.60	210.22	600-25-70-200	210.69	214.19
600-25-50-290	202.47	174.78	600-25-60-270	185.40	182.23	600-25-70-250	178.90	185.41
600-25-50-350	167.41	148.02	600-25-60-320	128.16	160.27	600-25-70-290	154.78	164.16
600-25-50-400	126.83	126.60	600-25-60-370	107.70	139.03	600-25-70-340	130.32	144.31

注:试件编号为“钢筋屈服强度-钢筋公称直径-混凝土强度-埋置长度”,例如“500-20-30-140”表示钢筋屈服强度为 500 MPa、公称直径为 20 mm 的钢筋在 C30 混凝土中埋置长度为 140 mm 的试件。

经计算,表 3 中各个试件计算的锚固板承压力 F_p^c 与真实的锚固板承压力 F_p^t 的比值平均值为 1.00, 标准差为 0.07, 变异系数为 0.07. 对比结果表明, 程序计算的结果具有较高精度, 可利用程序对锚固力在钢筋直锚段黏结力与锚固板承压力之间的分配问题进行分析。

3 影响因素分析

为方便分析, 将混凝土拉拔试件的锚固力 T 、直锚段钢筋黏结力 F_b 和锚固板承压力 F_p 都分别除以钢筋横截面积, 以应力形式表达:

$$f_T = f_b + f_p.$$

式中: f_T 为钢筋加载端应力, MPa; f_b 为直锚段钢筋黏结应力, MPa; f_p 为锚固板承压应力, MPa.

参考以往学者对直锚钢筋黏结力的分析成果^[15], 也同样将钢筋埋置长度 l_{at} 和混凝土保护层厚度 c 分别除以钢筋公称直径 d 进行无量纲化处理. 通过分别改变混凝土拉拔试件受力纵筋屈服强度 f_y 、混凝土强度等级、混凝土相对保护层厚度 c/d 、钢筋相对埋置长度 l_{at}/d 等参数, 分析各参数对直锚段钢筋黏结应力 f_b 的影响, 从而揭示锚固力在钢筋直锚段黏结力与锚固板承压力之间的分配关系. 在进行程序分析时, 钢筋屈服强度 f_y 统一取为钢筋屈服强度标准值的 1.1 倍, 即 HRB500 级钢筋屈服强度取为 550 MPa, HRB600 级钢筋屈服强度取为 660 MPa. 混凝土力学性能则按照表 2 进行选取.

3.1 混凝土强度的影响

混凝土的强度是影响钢筋与混凝土间黏结强度的重要因素, 不论是化学胶结力、摩擦力还是机械咬

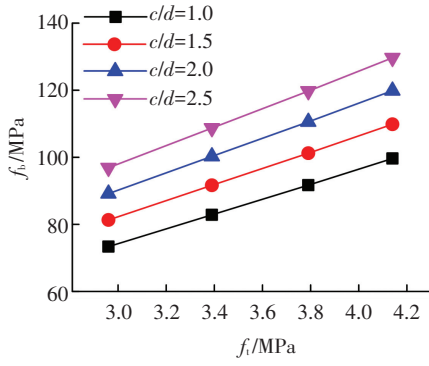
合力都与其相关^[16]. 在钢筋屈服强度 f_y 、钢筋相对埋置长度 l_{at}/d 和混凝土相对保护层厚度 c/d 相同的条件下, 分析混凝土强度对直锚段钢筋黏结应力 f_b 的影响. 通过对混凝土抗压强度 f_c 与抗拉强度 f_t 的分析, 发现拉拔试件加载端钢筋达到屈服时刻, f_b 随 f_t 的变化趋势更接近线性. 图 4 分别给出了 HRB500 或 HRB600 钢筋、钢筋公称直径 25 mm、埋置长度 $5d$ 或 $10d$ 、不同 c/d (范围在 1.0~2.5) 时, f_b 随 f_t 的变化规律.

3.2 相对保护层厚度 c/d 的影响

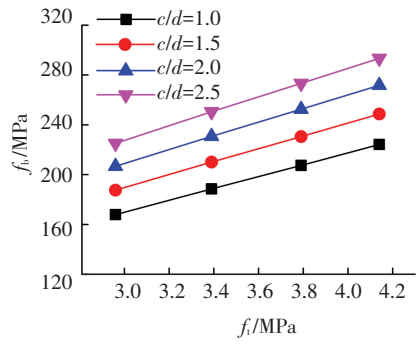
本文所指的保护层厚度为纵向受力钢筋外边缘到混凝土表面的距离, 而不是箍筋外边缘到混凝土表面的距离. 在钢筋屈服强度 f_y 、钢筋相对埋置长度 l_{at}/d 和混凝土抗拉强度 f_t 相同的条件下, 分析混凝土相对保护层厚度 c/d 对直锚段钢筋黏结应力 f_b 的影响. 图 5 分别给出了 HRB500 钢筋、不同钢筋公称直径 (20、22 和 25 mm)、不同混凝土强度 (C30、C40、C50 和 C60)、不同钢筋埋置长度 ($5d$ 和 $15d$) 情况下, f_b 随 c/d 的变化规律.

图 6 分别给出了 HRB600 钢筋、不同钢筋公称直径 (20、22 和 25 mm)、不同混凝土强度 (C40、C50、C60 和 C70)、不同钢筋埋置长度 ($5d$ 和 $15d$) 情况下, f_b 随 c/d 的变化规律.

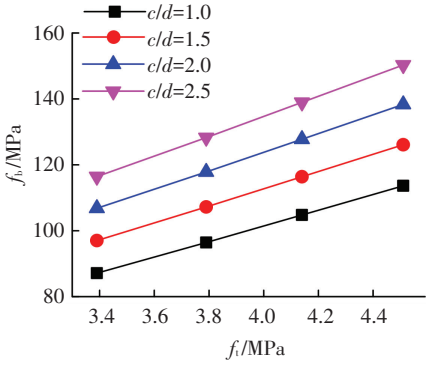
由图 5、6 可知, 当钢筋屈服强度 f_y 、钢筋相对埋置长度 l_{at}/d 和混凝土抗拉强度 f_t 一定时, 加载端钢筋达到屈服时刻, 直锚段钢筋的黏结应力 f_b 随相对保护层厚度 c/d 的增大而增大. 并且, 当埋置长度较短 (如埋置长度为 $5d$) 时, 增长趋势为线性; 当埋置长度较长 (如埋置长度为 $15d$) 时, 增长趋势表现出非线性的特征.



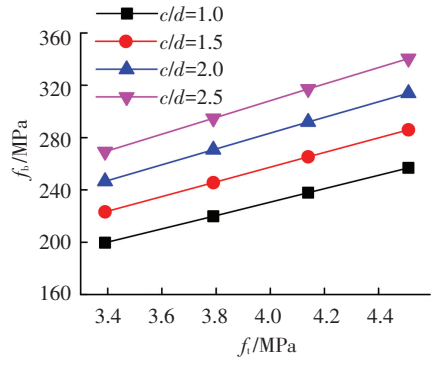
(a) HRB500-25 mm-5d



(b) HRB500-25 mm-10d



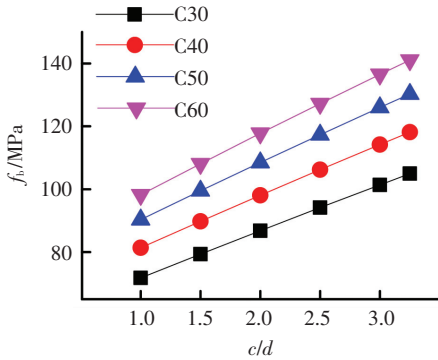
(c) HRB600-25 mm-5d



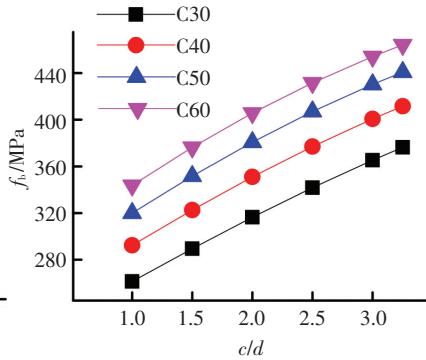
(d) HRB600-25 mm-10d

图 4 f_t 对 f_b 的影响

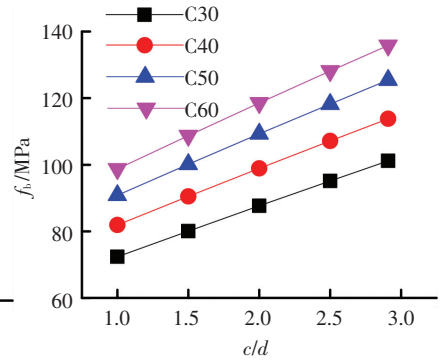
Fig.4 The effect of f_t on f_b



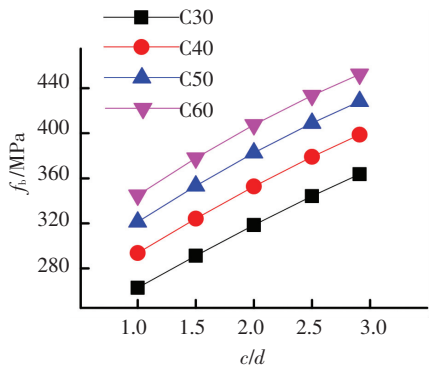
(a) HRB500-20 mm-5d



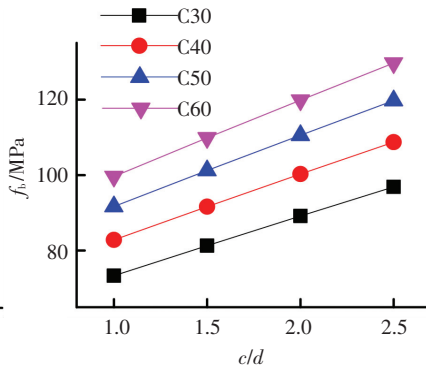
(b) HRB500-20 mm-15d



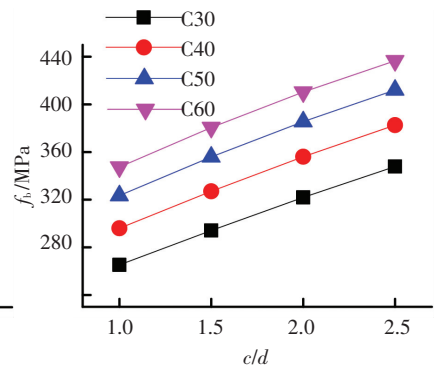
(c) HRB500-22 mm-5d



(d) HRB500-22 mm-15d



(e) HRB500-25 mm-5d



(f) HRB500-25 mm-15d

图 5 HRB500 时 c/d 对 f_b 的影响

Fig.5 The effect of c/d on f_b with HRB500

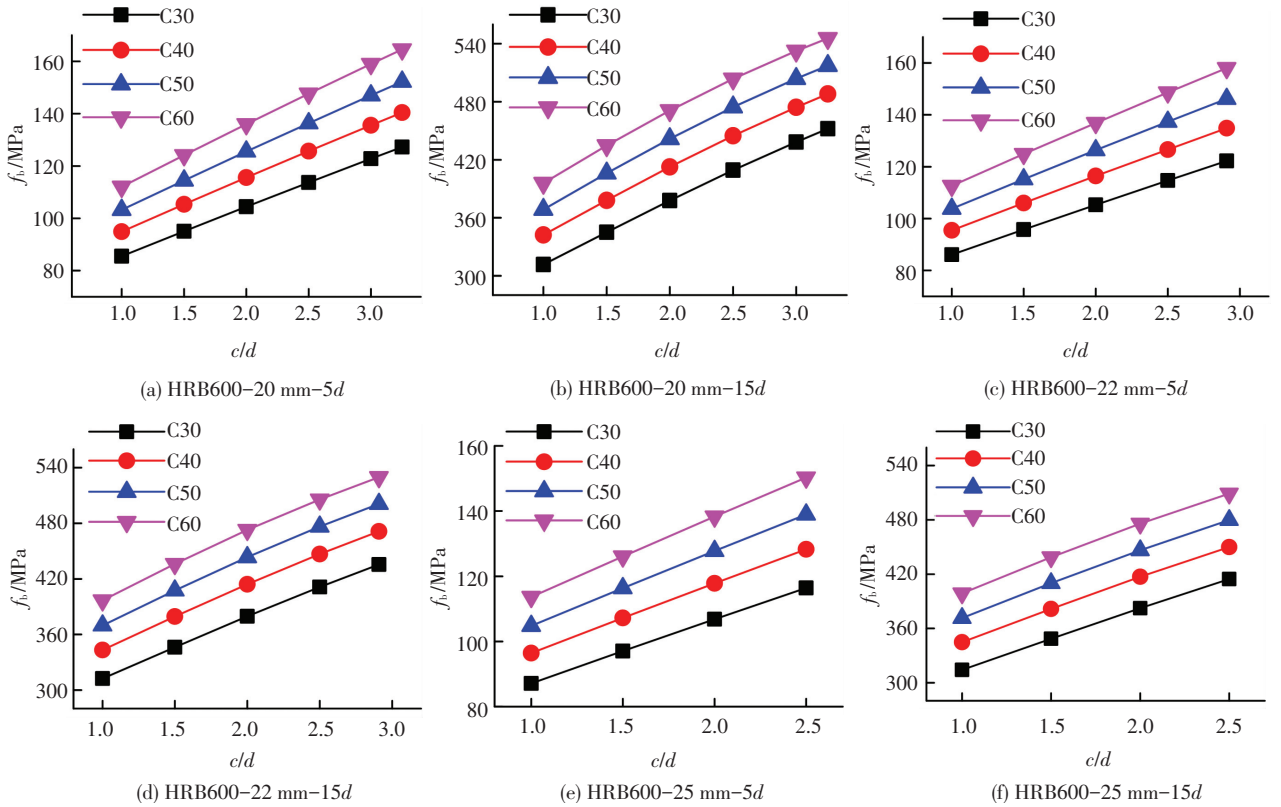


图 6 HRB600 时 c/d 对 f_b 的影响

Fig.6 The effect of c/d on f_b with HRB600

3.3 相对埋置长度 l_{at}/d 的影响

在钢筋屈服强度 f_y 、混凝土抗拉强度 f_t 和混凝土相对保护层厚度 c/d 相同的条件下,分析埋置长度 l_{at}/d 对直锚段钢筋黏结应力 f_b 的影响.因为稳定锚固长度 l_{as} 是加载端钢筋屈服时刻,锚固板进入工

作状态的一个临界锚固长度.所以,本文研究的埋置长度范围最大值为相同条件下的稳定锚固长度 l_{as} .图 7 分别给出了公称直径 20 mm 的 HRB500 钢筋在 C40 或 C60、不同相对保护层厚度时, f_b 随 l_{at}/d 的变化规律.

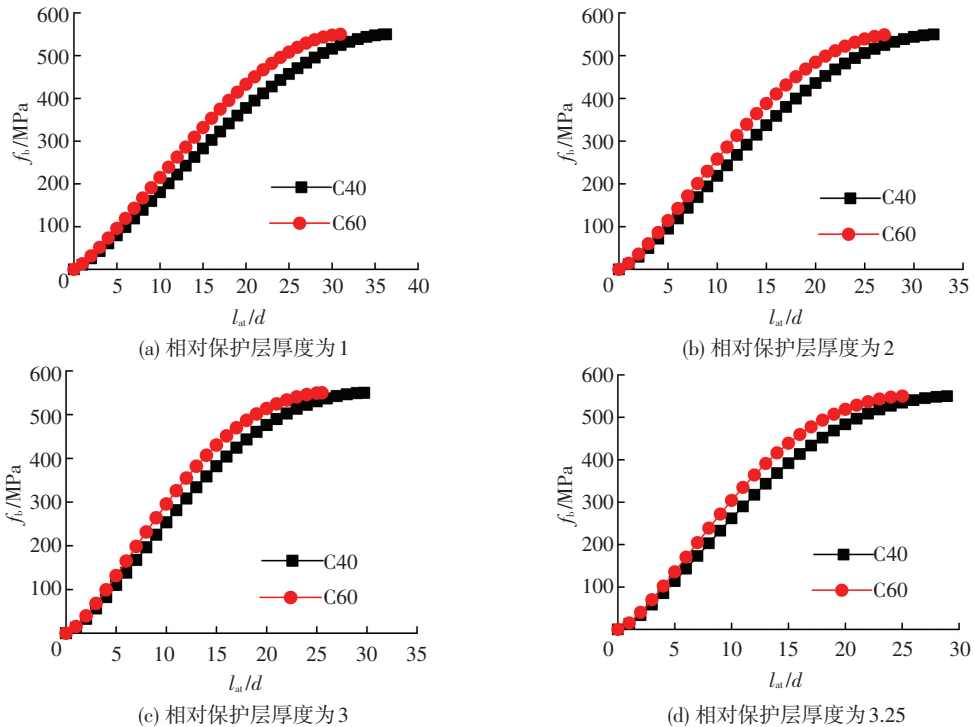


图 7 l_{at}/d 对 f_b 的影响

Fig.7 The effect of l_{at}/d on f_b

由图 7 可知,当钢筋屈服强度 f_y 、混凝土相对保护层厚度 c/d 和混凝土轴心抗拉强度 f_t 一定时,直锚段钢筋的黏结应力 f_b 随钢筋相对埋置长度 l_{at}/d 的增大而增大,但呈现出明显的非线性趋势。

4 稳定锚固长度的计算

由前文可知,钢筋的稳定锚固长度 l_{as} 是一个重要的指标。稳定锚固长度是加载端钢筋达到屈服时刻,锚固板承压作用是否分担锚固力的一个界限锚固长度。当 $l_{at} < l_{as}$ 时,受拉钢筋的锚固力才由直锚段钢筋黏结作用和锚固板承压作用共同承担。通过数值分析发现,相对保护层厚度 c/d 和钢筋屈服强度与混凝土抗拉强度之比 f_y/f_t ,都对钢筋稳定锚固长度与钢筋公称直径之比 l_{as}/d 有一定影响。

4.1 f_y/f_t 对 l_{as}/d 的影响

当选取 HRB500 钢筋,公称直径为 20 mm,混凝土相对保护层厚度 c/d 为 3.25 时,分析了不同混凝土强度(C30、C40、C50 和 C60)条件下 f_y/f_t 对 l_{as}/d 的影响。图 8 给出了 l_{as}/d 随 f_y/f_t 的变化图,由图 8 可知, l_{as}/d 随 f_y/f_t 的增大而增大,且近似呈现线性关系。

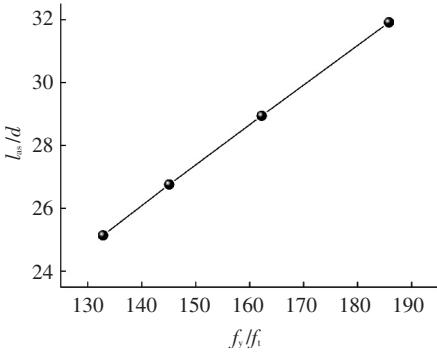


图 8 f_y/f_t 对 l_{as}/d 的影响

Fig.8 The effect of f_y/f_t on l_{as}/d

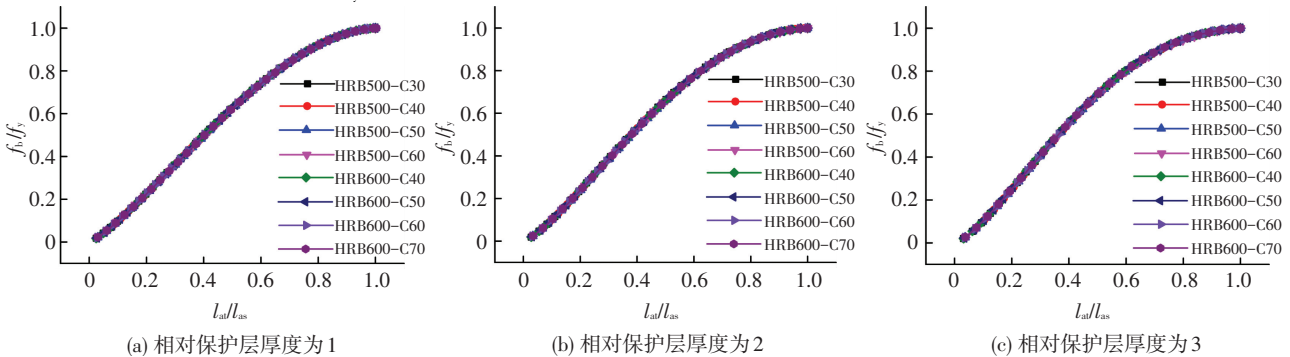


图 10 c/d 相同时 f_b/f_y 随 l_{at}/l_{as} 的变化规律

Fig.10 The effect of f_b/f_y on l_{at}/l_{as} with same c/d

而当相对保护层厚度不同时, f_b/f_y 随 l_{at}/l_{as} 的变化规律有所不同,见图 11。通过对图 11 中数据点的拟合,给出了 f_b/f_y 随 l_{at}/l_{as} 变化规律的公式:

$$\frac{f_b}{f_y} = a_0 + a_1 \cos\left(w \frac{l_{at}}{l_{as}}\right) + b_1 \sin\left(w \frac{l_{at}}{l_{as}}\right), 0 \leq \frac{l_{at}}{l_{as}} \leq 1.$$

4.2 c/d 对 l_{as}/d 的影响

当选取 HRB600 钢筋,公称直径为 20 mm,混凝土强度为 C40 时,分析了不同混凝土相对保护层厚度(1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 和 3.25)条件下, c/d 对 l_{as}/d 的影响。图 9 给出了 l_{as}/d 随 c/d 的变化图,由图 9 可知, l_{as}/d 随 c/d 的增大而减小,且呈现非线性关系。

由上述分析可得到, l_{as}/d 随 f_y/f_t 的增大而线性增大,随 c/d 的增大而非线性减小。因此,通过以 f_y/f_t 与 c/d 为自变量,拟合得到 l_{as}/d 值的公式:

$$l_{as}/d = -0.22 \frac{f_y}{f_t} \cdot \frac{c}{d} + 0.16 \frac{f_y}{f_t} + 0.31 \frac{c}{d} + 12.34.$$

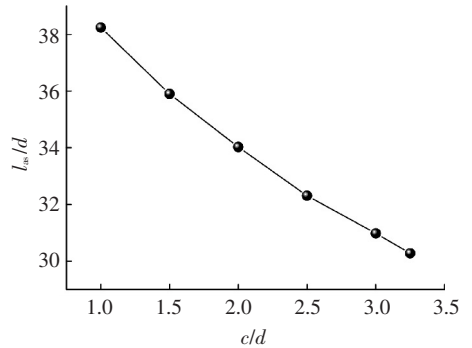


图 9 c/d 对 l_{as}/d 的影响

Fig.9 The effect of c/d on l_{as}/d

5 直锚段钢筋黏结应力的拟合

通过进一步的分析发现,钢筋屈服时刻,直锚段钢筋的黏结应力 f_b 与钢筋屈服强度(总锚固力) f_y 之比 f_b/f_y 随钢筋埋置长度 l_{at} 与稳定锚固长度 l_{as} 之比 l_{at}/l_{as} 的变化趋势只与混凝土相对保护层厚度 c/d 有关。即当相对保护层厚度一定时, f_b/f_y 随 l_{at}/l_{as} 的变化规律是固定不变的。图 10 分别给出了混凝土相对保护层厚度 c/d 取为 1、2 和 3 时 f_b/f_y 随 l_{at}/l_{as} 的变化规律。

式中的 a_0 、 a_1 、 b_1 、 w 是与相对保护层厚度 c/d 有关的系数,其计算公式为:

$$a_0 = -0.0556 \frac{c}{d} + 0.432,$$

$$a_1 = 0.0438 \frac{c}{d} - 0.434,$$

$$b_1 = 0.0861 \frac{c}{d} + 0.405,$$

$$w = -0.0115 \left(\frac{c}{d}\right)^2 + 0.0065 \frac{c}{d} + 2.163.$$

在给定钢筋屈服强度 f_y 、混凝土抗拉强度 f_t 、钢筋公称直径 d 、混凝土保护层厚度 c 、钢筋埋置长度 l_{at} 等参数的条件下,根据以上公式就可以计算出加载端钢筋应力达到屈服强度时,直锚段钢筋的黏结应力 f_b 与锚固板承压应力 f_p ,从而确定钢筋锚固力在黏结作用和承压作用间的分配。

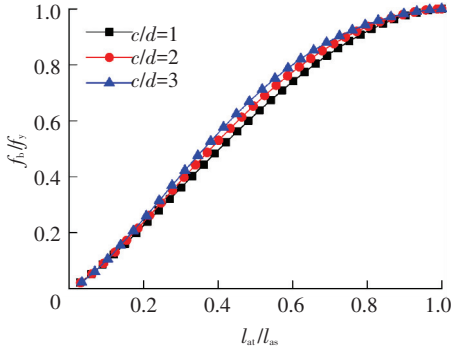


图 11 c/d 不同时 f_b/f_y 随 l_{at}/l_{as} 的变化规律

Fig.11 The effect of f_b/f_y on l_{at}/l_{as} with different c/d

6 结 论

1) 通过对 C30 ~ C70 混凝土、HRB500 和 HRB600 钢筋和埋置长度 0.3~0.7 倍临界锚固长度的 120 个混凝土试件的拉拔试验,验证了基于受拉钢筋与混凝土间的黏结-滑移本构关系编写的程序计算结果的准确性,证明了利用程序进行带锚固板钢筋锚固力分配规律研究的可行性。

2) 提出了钢筋稳定锚固长度的概念,稳定锚固长度是指加载端钢筋应力达到屈服强度时,自由端钢筋与混凝土间不发生相对滑移的最小锚固长度,是锚固板是否进入工作的临界状态.分析表明 l_{as}/d 随 f_y/f_t 的增大而线性增大,随 c/d 的增大而非线性减小,建立了以 f_y/f_t 和 c/d 为自变量的 l_{as}/d 计算公式。

3) 通过分析加载端钢筋屈服时刻,各个参量对直锚段钢筋黏结应力 f_b 的影响,发现带锚固板钢筋直锚段的黏结应力与钢筋屈服强度(总锚固力) f_y 之比 f_b/f_y 随带锚固板钢筋直锚段埋置长度与稳定锚固长度之比 l_{at}/l_{as} 变化的规律只与相对保护层厚度 c/d 有关.并在此基础上结合稳定锚固长度的算法,建立了计算加载端钢筋应力达到屈服强度时刻直锚段钢筋黏结力公式。

参 考 文 献

[1] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

[2] 李智斌. 带锚固板钢筋机械锚固性能的试验研究[D].天津:天津大学,2005.

LI Zhibin. Experiment study in anchorage behavior of headed reinforcement[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.

[3] 毛达岭. HRB500 钢筋粘结锚固性能试验研究[D].天津:天津大学,2004.

[4] 汪洪,徐有邻,史志华. 钢筋机械锚固性能的试验研究[J].工业建筑,1991(11):36-40.DOI:10.13204/j.gyjz1991.11.007.

WANG Hong, XU Youlin, SHI Zhihua. Experiment research of mechanical anchorage properties of bars in concrete[J]. Industrial Construction, 1991(11):36-40.DOI:10.13204/j.gyjz1991.11.007.

[5] 王莉荔. 500MPa 级热轧带肋钢筋机械锚固性能试验研究[D].郑州:郑州大学,2010.

WANG Lili. Experimental research on mechanical anchorage capability of HRB500 steel bar [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.

[6] THOMPSON M K, JIRSA J O, BREEN J E, et al. Anchorage behavior of headed reinforcement; literature review [R]. Austin, Texas: Center for Transportation Research Report 1855-1, 2002.

[7] WALLACE J W, MCCONNELL S W, GUPTA P, et al. Use of headed reinforcement in beam-column joints subjected to earthquake loads [J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(5):590-606.

[8] WALLACE J W. Headed reinforcement a viable option [J]. Concrete International, 1997, 19(12):47-53.

[9] American Concrete Institute. ACI committee 318 building code requirements for structural concrete: ACI 318-14 [S]. Farmington Hill, MI: American Concrete Institute, 2014.

[10] 钢筋锚固板应用技术规程: JGJ 256—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

Technical specification for application of headed bars: JGJ 256—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

[11] 徐有邻. 钢筋与混凝土粘结锚固的分析研究[J]. 建筑科学, 1992(4):18-24. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.1992.04.003.

XU Youlin. Analytical study on bond-anchorage between bar and concrete[J]. Building Science, 1992(4):18-24. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.1992.04.003.

[12] 徐有邻. 变形钢筋-混凝土粘结锚固性能的试验研究[D].北京:清华大学,1990.

[13] 徐有邻. 钢筋混凝土粘结滑移本构关系的简化模型[J].工程力学,1997(增刊):34-38.

[14] 金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S].北京:中国标准出版社,2011.

Metallic materials-tensile testing-part 1: method of test at room temperature; GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.

[15] 徐有邻,汪洪,史志华. 钢筋粘结锚固机理的试验研究[C]//混凝土结构基本理论及应用第二届学术讨论会论文集(第一卷).北京:[s.n.],1990:211-218.

[16] 徐有邻,邵卓民,沈文都. 钢筋与混凝土的粘结锚固强度[J].建筑科学,1988(4):8-14.

XU Youlin, SHAO Zhuomin, SHEN Wendu. Bond strength between reinforcement bars and concrete[J]. Building Science, 1988(4):8-14.