

引用本文:易伟建,古攀.混凝土梁柱节点带锚固板钢筋锚固性能试验研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(1):83-92.

YI Weijian, GU Pan. Experimental research on anchorage performance of headed reinforcement in concrete beam-column joints[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(1): 83-92.

DOI:10.19815/j.jace.2022.03023

混凝土梁柱节点带锚固板钢筋锚固性能试验研究

易伟建^{1,2}, 古攀²

(1. 湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为研究混凝土梁柱节点带锚固板钢筋锚固性能,共设计33个满足现行规范构造要求的拟梁柱节点试件,通过静载试验分析混凝土强度、锚固长度、锚固板尺寸、箍筋间距等参数对带锚固板钢筋锚固承载力的影响;通过拟合试验数据得到带锚固板钢筋锚固力经验公式,提出带锚固板钢筋锚固长度设计建议,并基于试验数据库对建议公式以及中国规范公式进行了统计分析。结果表明:混凝土强度、钢筋锚固长度和锚固板面积对带锚固板钢筋锚固承载力有较大的影响,而承载力对箍筋间距不是很敏感;锚固板分担的锚固力占总锚固力的70%以上,中国规范对锚固板分担占比的规定偏小,对锚固长度的规定偏于不安全;建议现浇框架中间层梁柱角节点带锚固板钢筋的锚固长度调整为 $0.45l_{ab}$ (l_{ab} 为中国规范的基本锚固长度),中间层梁柱边节点的锚固长度可不作调整。

关键词:带锚固板钢筋;锚固长度;承载力;混凝土强度;梁柱节点

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)01-0083-10

Experimental research on anchorage performance of headed reinforcement in concrete beam-column joints

YI Weijian^{1,2}, GU Pan²

(1. Key Laboratory of Damage Diagnosis for Engineering Structures of Hunan Province, Hunan University,

Changsha 410082, Hunan, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University,

Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: In order to research the anchorage performance of headed reinforcement in concrete beam-column joints, a total of 33 quasi-beam-column joints were designed, which met the structural requirements of current codes. The influence of concrete strength, anchorage length, anchorage plate size, stirrup spacing, and other parameters on the bearing capacity of headed reinforcement was analyzed by the test data. An empirical formula of anchorage force of headed reinforcement was obtained by fitting the experimental data, and the design proposal of anchorage length of the headed reinforcement was put forward. Based on the test database, the proposed formula and the Chinese code formula were statistically analyzed. The results show that the concrete strength, anchorage length, and anchorage plate size have a marked impact on the bearing capacity of headed reinforcement. The bearing capacity is not very sensitive to stirrup

收稿日期: 2023-02-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878260)

作者简介: 易伟建(1956-),男,工学博士,教授,博士生导师, E-mail: wjy@hnu.cn。

spacing, and the anchorage force shared by the anchorage plate accounts for more than 70% of the total anchorage force. The regulation in China code on the proportion of anchorage plate sharing is relatively small. The code regulation on anchorage length may be unsafe. It is suggested that the anchorage length of headed reinforcement in the corner joint of the middle-story beam-column of a cast-in-place frame should be adjusted to $0.45l_{ab}$ (l_{ab} is the basic anchoring length in China code), and the anchorage length in the side joint of the middle-story beam-column should not be adjusted.

Key words: headed reinforcement; anchorage length; bearing capacity; concrete strength; beam-column joint

0 引言

带锚固板钢筋广泛应用于混凝土结构中,用来解决直钢筋锚固长度不足的问题。带锚固板钢筋的总锚固力由直锚段黏结力和锚固板承担的锚固力(表示锚固板处承压板所分担的锚固力,以下简称锚固板承载力)两部分组成,这两部分在总锚固力中所占比例是带锚固板钢筋锚固长度计算的基本问题。Devries^[1]通过 24 个梁端试件试验,发现直锚段和锚固板所承受的荷载比例并不恒定;郑文忠等^[2-3]采用试验和数值分析对锚固力的分配规律进行了探讨,并提出了稳定锚固长度的概念;陈朝霞等^[4]通过对 HRB500 级钢筋试验得到机械锚固黏结强度的计算公式,但能否将锚固板承载力表示为黏结强度尚不清楚。Choi 等^[5-6]分别进行了带锚固板钢筋浅埋和深埋试验研究,并将破坏时的强度与钢筋屈服强度 f_y 以及 $1.25f_y$ 进行比较。Alrasyid 等^[7]通过中心拉拔试验得出,锚固板承担的力随着埋入深度的减少而增加,试验中相对锚固面积 A_b/A_s 为 $1.8\sim 13.1$ (A_b 为锚固板净面积, A_s 为与锚固板连接的钢筋面积);建议可以在保证刚度的情况下研究相对锚固面积较小的试件。李智斌等^[8-9]通过大块混凝土拉拔试验得出,当相对锚固面积为 4.5 且钢筋埋入长度为直锚长度的 40% 时,可实现钢筋有效锚固的结论。Deveries 等^[10-11]在带锚固板钢筋深埋的试件试验中发现,较大埋置深度下带锚固板钢筋极限拉拔力随相对锚固面积的增加而递增,基本呈线性关系。

已有研究中,对带锚固板钢筋大多没有系统分析锚固板和直锚段两部分承担的锚固力以及相关参数的影响。现行《混凝土结构设计规范》^[12](以下简称中国规范)中有关规定的合理性还有进一步研究的必要。本文基于中国规范有关规定,对框架结构中间层拟梁柱节点进行试验研究,分析锚固板承载

力占比变化规律,得到带锚固板钢筋锚固力经验公式,并结合试验结果与中国规范对比,给出锚固长度和锚固板尺寸相关设计建议。

1 试验概述

1.1 试件设计

共设计 33 个框架结构中间层拟梁柱端节点试件,其中 30 个模拟中间层梁柱角节点,试件截面尺寸为 $350\text{ mm}\times[l_a(\text{锚固长度})+70\text{ mm}]$,柱高为 2 500 mm,其余 3 个模拟整体现浇钢筋混凝土框架中间层梁柱边节点,具体参数见图 1。试验锚筋采用直径 20 mm 的 HRB500 级钢筋,箍筋采用直径 8 mm 的 HRB400 级钢筋,箍筋间距分别为 50、100、150 mm,与锚筋平行,利用柱中 8 根直径 16 mm 的 HRB400 级纵筋进行固定。钢筋材性见表 1。混凝土选用 C35、C45、C65 级;依据《钢筋锚固板应用技术规程》^[13](以下简称技术规程)和工程实际,锚筋侧保护层厚度 c 为 50 mm。结合中国规范和技术规程,设计 3 种锚固长度: $8d$ 、 $11d$ 和 $14d$ (d 为钢筋直径)。按公式(1)计算得到锚固长度系数 β (表 2)。

$$\beta = \frac{l_a/d}{0.14 \times 1.5 f_{ym}/f_{tm}} \quad (1)$$

式中: f_{ym} 、 f_{tm} 分别为钢筋屈服强度和混凝土抗拉强度平均值; 1.5 为中国规范中锚固长度安全储备;如果 $\beta=1.0$,相当于钢筋锚固长度等于去除了安全储备后中国规范规定的锚固长度。

将钢筋一端镦粗后加工螺纹^[14],便于连接加载装置;另一端与锚固板螺纹连接,锚固板制作及螺纹连接满足《CABR 钢筋-锚固板》^[15]相关要求,试验选择 3 种锚固板尺寸,如图 2 所示(M 表示螺纹公称直径,本试验锚筋直径 20 mm, M 为 20.5 mm; D_1 和 D_2 为六角螺帽参数; A 和 E 分别表示承压板厚度和锚固板厚度)。3 种锚固板仅承压板外径 D 不同, D 分别为 48.5、43.4、37.6 mm 时,相对锚固面

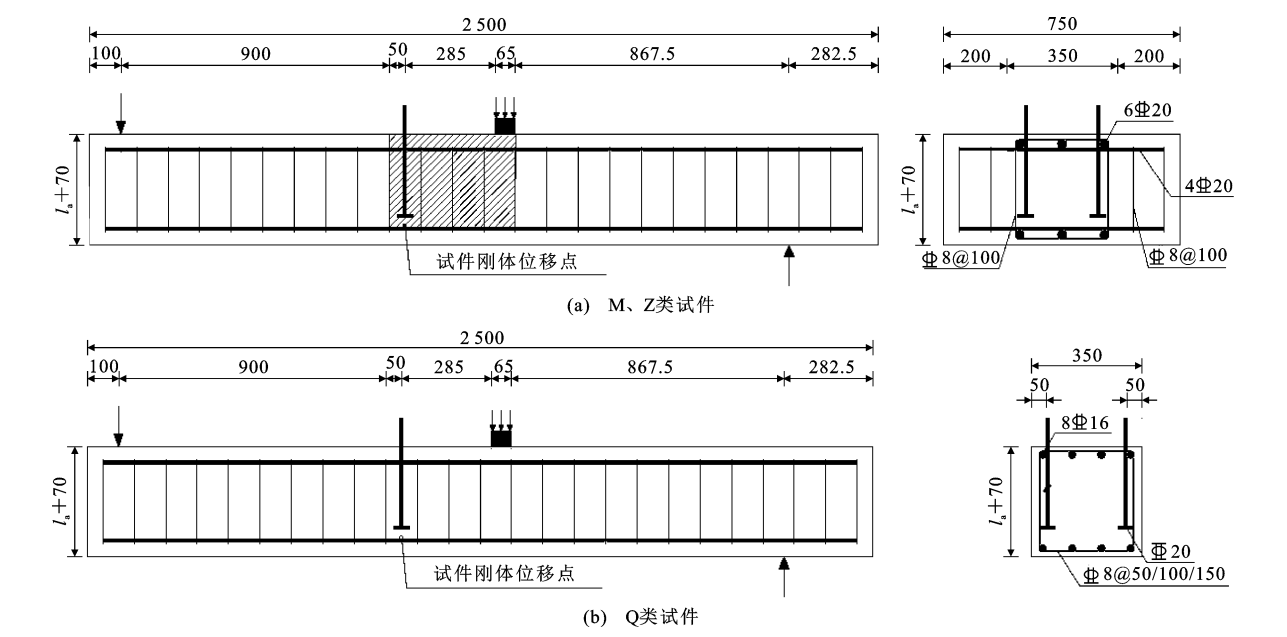


图 1 构件尺寸 (单位: mm)

Fig. 1 Component size (unit: mm)

表 1 钢筋材性试验结果

Table 1 Test results of reinforcement properties				
钢筋种类	钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	强屈比
HRB500	20	553	717	1.29
HRB400	16	476	608	1.28
HRB400	8	423	621	1.47

表 2 锚固长度系数 β

Table 2 Anchorage length coefficient β				
混凝土强度	不同锚固长度时的 β			中国规范 β 取值
	8d	11d	14d	
C35	0.17	0.23	0.30	0.4
C45	0.19	0.27	0.34	
C65	0.24			

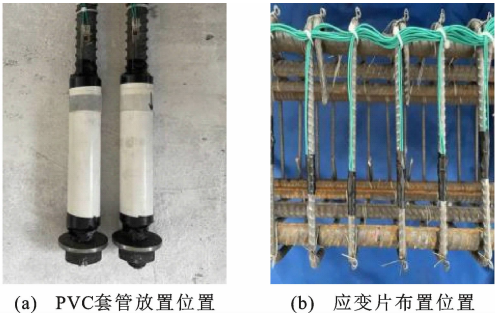


图 3 试验准备

Fig. 3 Experiment preparation

在该类试件箍筋上粘贴了应变片[图 3(b)];Q 类试件模拟框架结构中间层梁柱边节点,由于实际结构中两端有梁,保护层厚度超过 250 mm。

1.2 试验装置及加载制度

试验装置如图 4 所示,图中压梁下方放置一钢板(宽度为 65 mm)模拟梁柱节点中梁的受压区。试件两端放置铰支座模拟柱的反弯点,保证梁的受拉钢筋与支座的距离 l_2 等于压梁中心点到另一端支座的距离 l_1 (图 5, F 为锚固力)。

各试件在正式加载之前进行预加载,检查试验装置和设备仪器。试验采用分级加载制度,加载初期,每级荷载增量为 20 kN,节点区出现斜裂缝后,每级荷载增量改为 10 kN。每级加载持荷 5 min 后,记录裂缝和其他观测数据。

1.3 测量内容

荷载测量采用 500 kN 力传感器,位移采集使

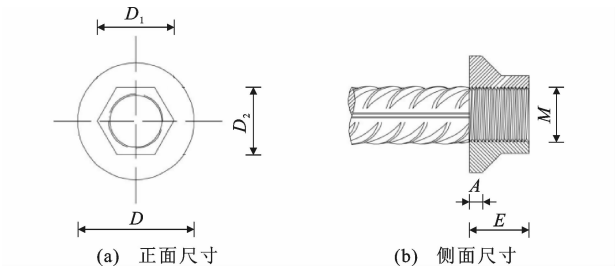


图 2 锚固板尺寸

Fig. 2 Anchorage plate dimension

积分别为 4.9、3.7、2.5。

试件分为 3 类:M 类试件使用外径为 32 mm 的 PVC 管消除钢筋与混凝土的黏结力,用胶带和热熔胶固定端部[图 3(a)];Z 类试件未套 PVC 管,参数设置与 M 类相同,形成对照,为预估锥状裂缝走向,

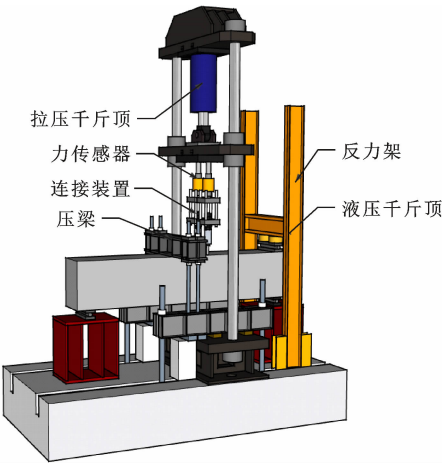


图 4 试验装置
Fig. 4 Experiment device

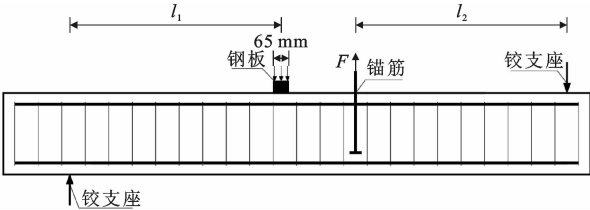


图 5 加载示意图
Fig. 5 Loading diagram

用应变式位移计,位移计架设在从试件底部伸出的短钢筋和由螺纹与锚筋连接的杆之间(图 6),这样测量锚筋位移时可消除试件刚体位移的影响。钢筋锚固板处的位移为

$$\left. \begin{aligned} S &= S_c - \Delta S_h \\ \Delta S_h &= \epsilon_s h \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: S 为实际钢筋自由端的滑移值; S_c 为测量得到的钢筋自由端滑移; ΔS_h 为测量点与锚固起点间钢筋伸长量; ϵ_s 为不同荷载等级下钢筋的应变; h 为滑移测量点到锚固起点的长度(对于 M 类试件, h 表示位移计架设点到锚固板的距离;对于 Z、Q 类试件, h 为位移计架设点到混凝土表面的距离)。

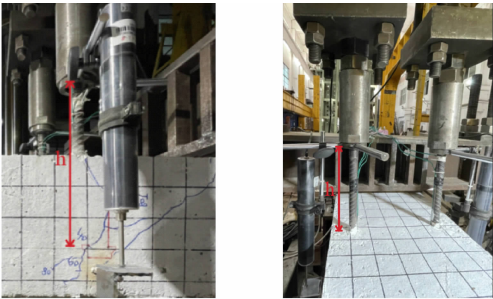


图 6 位移测量
Fig. 6 Displacement measurement

2 试验结果分析

2.1 裂缝发展与破坏形态

锚固破坏是一种脆性破坏,破坏时裂缝较多且杂乱,其破坏形态大致分为 3 类(表 3)。

第 1 类为混凝土锥状拔出[图 7(a)~(c)],最先出现的是试件顶面锚筋处的弯曲裂缝,随荷载增

表 3 主要试验结果

Table 3 Main test results

试件编号	F_u/kN	f_{cu}/MPa	β	破坏形式
M35-8-100-4.9	116.47	46.65	0.17	混凝土锥状拔出
M35-8-50-4.9	108.64	37.38	0.17	混凝土锥状拔出
M35-8-150-4.9	71.63	26.74	0.17	混凝土锥状拔出
M35-8-100-3.7	117.55	43.90	0.17	混凝土锥状拔出
M35-8-100-2.5	99.59	43.00	0.17	混凝土锥状拔出
M45-8-100-4.9	122.44	50.00	0.19	混凝土锥状拔出
M65-8-100-4.9	130.19	60.70	0.24	混凝土锥状拔出
M35-11-100-4.9	105.01	27.00	0.23	侧保护层剥落
M35-11-100-3.7	147.45	33.50	0.23	侧保护层剥落
M35-11-100-2.5	97.50	32.65	0.23	侧保护层剥落
M45-11-100-4.9	154.77	50.37	0.27	侧保护层剥落
M35-14-100-4.9	151.28	31.00	0.30	侧保护层剥落
M35-14-100-3.7	156.95	34.90	0.30	侧保护层剥落
M35-14-100-2.5	108.28	31.36	0.30	侧保护层剥落
M45-14-100-4.9	192.92	46.80	0.34	侧保护层剥落
Z35-8-100-4.9	96.10	33.10	0.17	混凝土锥状拔出
Z35-8-50-4.9	108.78	37.38	0.17	混凝土锥状拔出
Z35-8-150-4.9	76.95	31.69	0.17	混凝土锥状拔出
Z35-8-100-3.7	113.42	29.00	0.17	混凝土锥状拔出
Z35-8-100-2.5	106.80	33.73	0.17	混凝土锥状拔出
Z45-8-100-4.9	105.31	42.00	0.19	混凝土锥状拔出
Z65-8-100-4.9	128.82	65.00	0.24	混凝土锥状拔出
Z35-11-100-4.9	142.27	31.27	0.23	混凝土锥状拔出
Z35-11-100-3.7	148.44	30.80	0.23	混凝土锥状拔出
Z35-11-100-2.5	115.18	31.06	0.23	侧保护层剥落
Z45-11-100-4.9	144.74	40.77	0.27	侧保护层剥落
Z35-14-100-4.9	200.00	33.00	0.30	侧保护层剥落
Z35-14-100-3.7	173.31	34.90	0.30	侧保护层剥落
Z35-14-100-2.5	140.25	33.23	0.30	侧保护层剥落
Z45-14-100-4.9	221.88	45.15	0.34	钢筋拉断
Q35-8-100-4.9	117.84	33.80	0.17	混凝土锥状拔出
Q35-11-100-4.9	177.26	32.34	0.23	混凝土锥状拔出
Q35-14-100-4.9	216.33	32.19	0.30	钢筋拉断

注:试件编号中 M 表示仅锚固板受力(套 PVC 管),Z 表示锚固板和直锚段共同受力,Q 表示中间框架梁节点;第 1 个数字为混凝土强度等级,第 2 个数字为埋深(钢筋直径倍数),第 3 个数字为锚筋间距,第 4 个数字为锚固板相对面积; F_u 为破坏荷载; f_{cu} 为混凝土标准立方体轴心抗压强度。

加,裂缝发展至试件侧面;荷载继续增加时两根锚筋的弯曲裂缝贯通,随后由顶部延伸到侧面的裂缝沿锚筋位置向下发展,直至锚固板埋深处。此过程中,试件顶面节点区外侧相继出现弯曲裂缝。临近破坏时,节点区出现倾角较大的斜裂缝,随即节点区外侧同样出现锥状斜裂缝,锚固板上方的混凝土呈锥状拔出。这类破坏主要发生在埋深为 $8d$ 的试件中。

第 2 类为混凝土侧保护层剥落[图 7(d)~(f)],裂缝前期的发展与锥状拔出破坏大致相同。节点区出现斜裂缝,但裂缝宽度基本不发展。由于埋深较大,在形成锥状裂缝(拔出)之前,试件侧保护层剥落,导致锚固破坏。埋深为 $11d$ 、 $14d$ 且钢筋未拉断的试件发生此类破坏。

第 3 类破坏为钢筋拉断[图 7(g)~(i)],临近破坏前裂缝发展与锥状拔出破坏差别不大,节点区出现斜裂缝,但节点区外侧没有斜裂缝,且裂缝宽度没有明显发展和延伸,由于锚固板相对面积和埋深大,最终钢筋拉断。

2.2 荷载-滑移曲线

试验所得的荷载-滑移曲线反映了加载过程中钢筋和混凝土的相对变形随荷载的变化关系,也能直观看出钢筋的锚固刚度变化,图 8 为本次试验中典型破坏特征的荷载-滑移曲线。

大多数试件破坏时钢筋未屈服[图 8(a)]。加载初期,锚筋自由端滑移很小;当构件侧面劈裂裂缝沿锚筋延伸发展时,自由端滑移增加,荷载-滑移曲

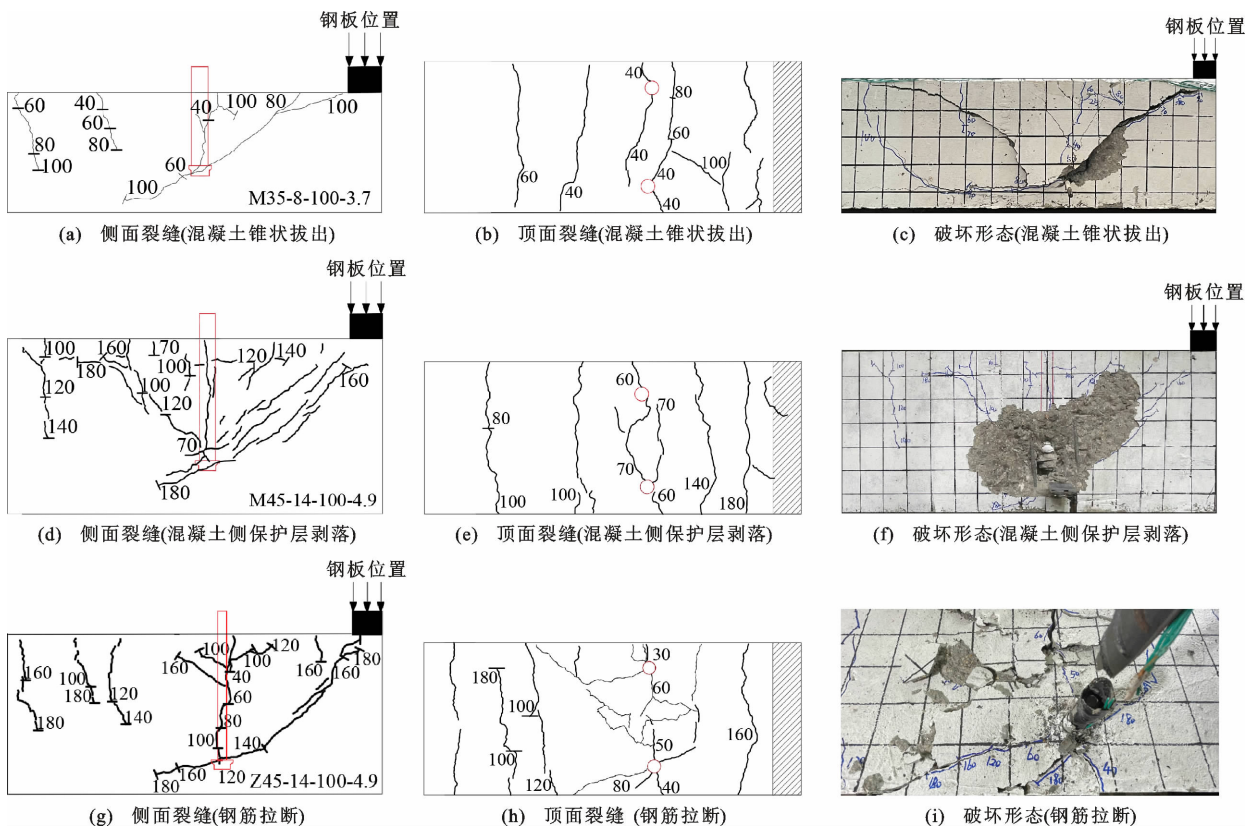


图 7 裂缝和破坏形态(单位:kN)

Fig. 7 Fracture and failure pattern (unit:kN)

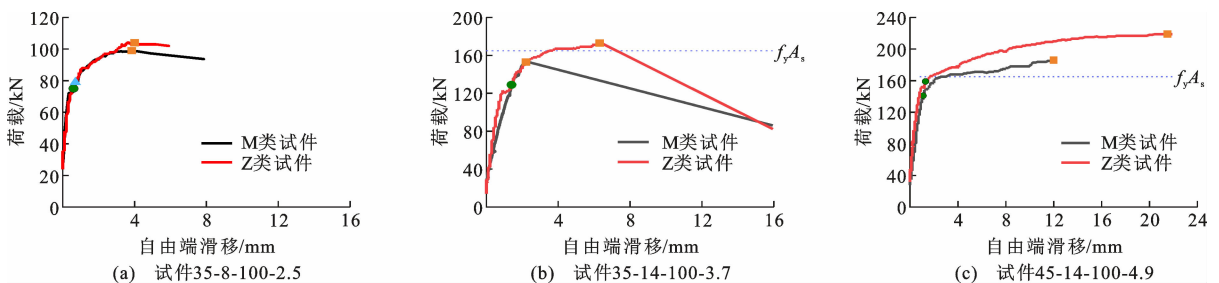


图 8 荷载-滑移曲线

Fig. 8 Load-slip curve

线呈线性关系,锚固刚度较大;继续加载,构件侧面混凝土剥落节点区出现锥状斜裂缝,滑移急剧增加,锚固刚度下降,试件发生锚固破坏。

部分试件锚固破坏时锚筋屈服[图 8(b)],屈服前锚固刚度变化趋势与图 8(a)一致,锚筋屈服时,曲线有一段水平段,滑移迅速增长,达到峰值后发生破坏。

钢筋拉断(图 8(c))的两个试件在节点区斜裂缝出现时钢筋即将达到屈服,此前自由端滑移与荷载呈线性关系,但变化较为缓慢,锚筋屈服后锚固刚度急剧下降,滑移迅速增加,直至最终破坏。

2.3 箍筋应力

距离锚筋最近的两侧箍筋应变变化几乎一致(图 9),当试件侧面劈裂裂缝发展至锚固板埋深处,节点区外侧箍筋应变由缓慢的线性增加变为快速的非线性变化。临近破坏时,靠近锚筋两侧的箍筋应力达到屈服,距离锚筋较远处的箍筋应变很小,发挥的作用不大。

3 参数分析

试验中 M 类试件套有 PVC 管,根据此类试件的试验结果得到锚固板承载力。用锚固板锚固强度 $\sigma_b = F_b / A_b$ (F_b 为锚固板承载力, A_b 为锚固板净面积)分析混凝土强度的影响,结果如图 10(a)所示。由图 10(a)可知, σ_b 与混凝土抗拉强度之间接近线性关系,说明混凝土抗拉强度是影响锚固强度的一个主要因素。

由于混凝土离散性较大,为排除其影响,用 σ_b / f_t (f_t 为混凝土抗拉强度设计值)研究其他参数对锚固板锚固强度的影响。锚固板的细部构造也是影响锚固强度的重要因素,中国规范规定相对锚固面积不小于 4; CABR 锚固板多采用相对锚固面积为 4.9 的锚固板。本试验为对比分析,设计了尺寸缩小了 20% 和 40% 的锚固板。试验发现,在同一埋深下,随着锚固板尺寸的增加,锚固强度线性减小[图 10(b)]。说明随锚固板面积加大,锚固板承担的锚固力没有成比例加大,控制锚固力的因素还有埋深和混凝土抗拉强度等因素。

在混凝土强度、锚固板尺寸、箍筋间距相同的条件下, σ_b / f_t 随相对锚固长度 l_a / d 增加而增大,基本呈线性关系[图 10(c)]。由于埋深增加,锚固板以上的混凝土受力面积加大,因此锚固强度提高。箍筋对混凝土破坏面的形成有一定影响,箍筋可以限制斜裂缝的发展。测试表明(图 9)靠近锚筋的箍筋

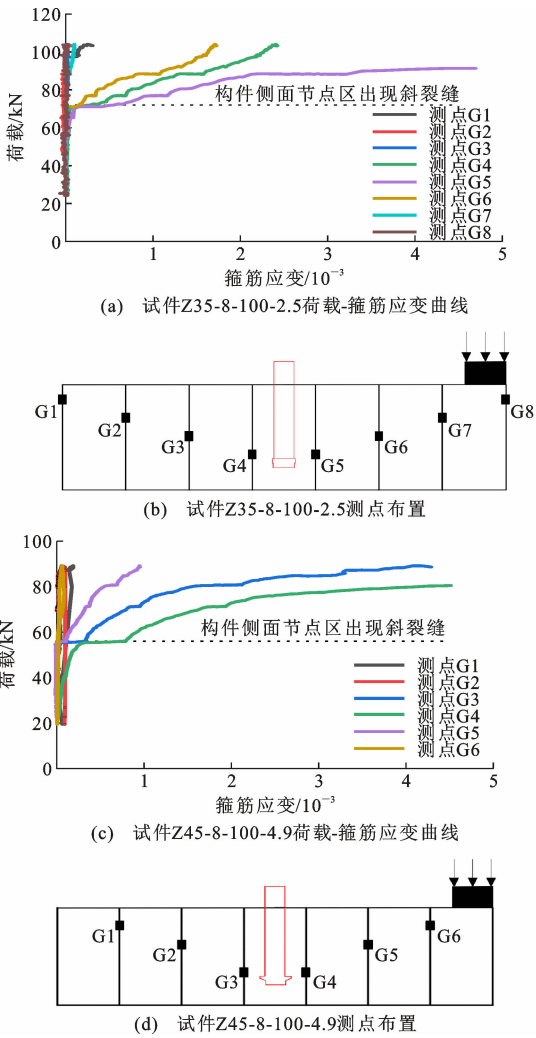


图 9 荷载-箍筋应变关系

Fig. 9 Relationship of load-stirrup strain

可以发挥作用,较远处的箍筋应力较小。图 10(d)表明本文试验结果对配箍率 ρ_{sv} 不是很敏感(配箍率采用锚筋两侧 $8d$ 范围内的箍筋数量计算^[16])。

4 锚固力计算与分析

4.1 破坏机理

试验中出现的锥状拔出与冲切破坏有相似之处。文献[17]、[18]提出冲切破坏一般为考虑弯曲变形的弯冲破坏,由板的受拉面沿着柱周围开始产生裂缝,发展为柱边向板边延伸的放射状裂缝,接着生成冲切环向裂缝,直到临界斜裂缝出现,发生冲切破坏。本试验中总锚固力分为直锚段与混凝土之间的机械咬合力以及锚固板的承载力。开始加载时,由直锚段主要承担锚固力,当混凝土受到的拉力大于其本身抗裂强度时,内裂缝出现;锚固力在加大的过程中转移到锚固板处,这会使锚固板处的锥状混凝土产生环向拉力从而加速裂缝的发展;接着在节

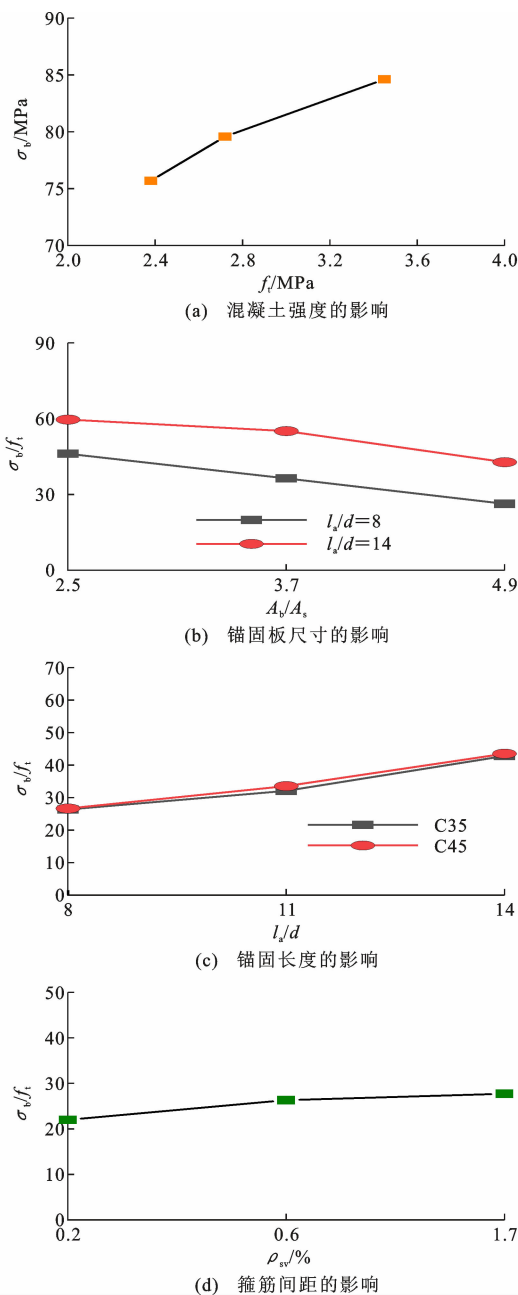


图 10 各参数对承载力的影响

Fig. 10 Influence of each parameter on bearing capacity

点区域会出现与冲切相似的斜裂缝,后续过程中部分试件斜裂缝持续加宽直至形成半锥体破坏。另一部分试件混凝土由于加载过程中局部被压碎形成侧面鼓胀,而发生侧保护层剥落的破坏,少数试件钢筋被拉断。

对比来看,两种破坏形态都是脆性破坏。首先在节点区域产生裂缝,本试验发生锥状拔出破坏的试件会出现与冲切破坏类似的由梁筋向柱边延伸的放射状裂缝;接着出现环向裂缝与放射状裂缝连接,形成破坏锥体,类似于文献[18]提到的临界斜裂缝。

基于此,本文在锚固力计算时以中国规范中冲切承载力的计算公式为基准,在考虑本试验所涉及的其他影响参数下多元拟合得到锚固板承载力和总锚固力经验公式。

4.2 锚固力计算公式

汪洪等^[19]在试验基础上提出带锚固板钢筋锚固强度的建议公式。本文根据 M 类试件和 Z 类试件的试验结果,分别拟合锚固板承载力 F_b 和总锚固力 F 的经验公式。统计分析中没有考虑箍筋项和保护层厚度的影响,以所有试验数据均满足中国规范对梁柱节点的箍筋和保护层厚度要求为基础。拟合公式简化后为

$$F_b = 12.6\alpha^{-0.66}f_tA_b(l_a/d)^{0.8} \quad (3)$$

$$F = 9.27\alpha^{-0.67}f_tA_b(l_a/d) \quad (4)$$

式中: $\alpha = A_b/A_s$ 。

对公式(3)、(4)进行运算,得到锚固板承载力占总锚固力的比值满足

$$F_b/F \gg 1.34(l_a/d)^{-0.2} \quad (5)$$

锚固长度为 $12d \sim 18d$ 时,锚固板承载力占比在 82%~75% 范围内变化,平均值为 78%。

假设带锚固板钢筋的锚固力 F^* 由锚固板承载力加上直锚段黏结力组成,则

$$F^* = 14.32\alpha^{-0.7}f_tA_b(l_a/d)^{0.82} + 4\tau_u A_s(l_a/d) \quad (6)$$

式中: τ_u 为平均黏结强度。

公式(6)中平均黏结强度如果按照规范(将规范公式转换为试验平均值)取值,可得 $\tau_u = 1.79f_t$ 。将 τ_u 代入式(6),取 $F^* = f_y A_s$,可求得带锚固板钢筋的相对锚固长度 l_a/d 和锚固板承载力与直锚段黏结力占比。中国规范规定带锚固板钢筋直锚段长度为基本锚固长度的 40%,锚固板承载力占比为 60%。按照这个结果,中国规范对锚固板分担占比的规定偏小,宜适当增加锚固板分担的锚固力。

利用总锚固力和锚固板承载力之差,可得到直锚段分担的锚固力,即

$$F - F_b = 4t_m A_s(l_a/d) \quad (7)$$

锚固长度在 $12d \sim 18d$ 间变化时,平均黏结强度 $\tau_m = 2.3$ MPa,这个值小于按照中国规范公式的推算值。取相对锚固面积 4.0 和 $\tau_m = 2.3$ MPa 代入公式(6),得到锚固长度为 $0.47l_{ab}$ (锚固板分担的锚固力占总锚固力 75%)。相对锚固面积取 4.9,代入公式(6)得到锚固长度为 $0.44l_{ab}$,与公式(4)计算出的锚固长度基本吻合。

3 个拟梁柱边节点试件(Q 类试件)的带锚固板钢筋的锚固板承载力大于同条件 M 类试件锚固板

承载力 12% 以上,因为节点区两侧的梁使保护层厚度明显加大。

根据上述结果,建议对于埋置在现浇框架中间层梁柱边节点中的带锚固板钢筋的锚固长度按中国现行规范确定,中间层梁柱角节点中的锚固长度应延长至 $0.45l_{ab}$ 。

4.3 基于数据库的统计分析

对带锚固板钢筋锚固性能的研究,国内外已有大量文献,由于本试验参数与数量有限,故搜集其他文献中共 212 个数据(表 4)对中国规范公式以及设计建议值对比分析。数据满足以下要求:

- (1)相对锚固面积大于 2.5。
- (2)若节点区配置箍筋,箍筋平行锚筋放置。
- (3)混凝土强度不低于 15 MPa。
- (4)钢筋屈服强度均大于 400 MPa。
- (5) β 值位于 0.23~0.38 之间。
- (6)破坏形态均为混凝土锥状拔出或侧保护层剥落的锚固破坏。

表 4 数据来源统计分析

数据来源	时间	引用数量
文献[2]、[3]	2020 年	35
文献[11]、[12]	2005 年	25
文献[20]、[21]	2010 年	30
文献[22]	2014 年	21
文献[23]	2016 年	23
文献[24]	2016 年	30
文献[25]	1996 年	11
文献[5]	2002 年	8
文献[4]	2006 年	14
文献[26]	2017 年	15
共计		212

通过图 11(其中 F_{test} 为试验得到的总锚固力, F_{cal} 为公式计算得到的总锚固力)和表 5 对比发现,中国规范公式虽然离散程度不是很大,但平均值小于 1.0,宜适当调整。

5 结 语

(1)试验中锚固长度为 $8d$ 的试件基本发生混凝土锥状拔出破坏,埋深为 $11d$ 、 $14d$ 且钢筋未拉断的试件出现混凝土侧保护层剥落,少数锚筋屈服或拉断。

(2)带锚固板钢筋的锚固板承载力与混凝土强度、钢筋锚固长度、锚固板尺寸等因素基本呈线性关系。保护层厚度和配箍量对锚固板承载力也有

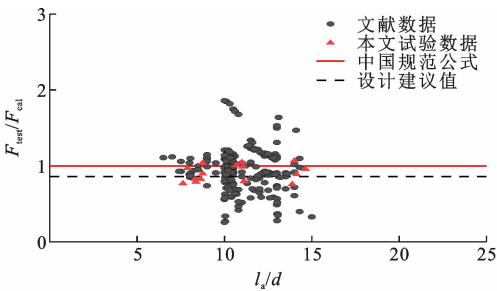


图 11 计算公式统计对比

Fig. 11 Calculation formula statistical comparison

表 5 计算公式误差分析

Table 5 Error analysis of calculation formula

公式来源	μ	σ	C_v
中国规范	0.94	0.28	0.29

注: μ 为平均值; σ 为标准差; C_v 为变异系数。

影响。

(3)基于本文试验数据得到锚固板承载力和总锚固力计算公式,计算表明中国规范对带锚固板钢筋的锚固板承载力预测值偏低。建议对于保护层厚度不大于 $2d$ 的现浇框架中间层梁柱角节点,相对锚固面积不小于 4 时,带锚固板钢筋的锚固长度取为 $0.45l_{ab}$ 。中间层梁柱边节点的锚固长度仍可取为 $0.4l_{ab}$ 。

(4)基于收集的 212 个带锚固板钢筋的锚固试验数据分析表明,中国规范公式偏于不安全。本文试验数据接近整体数据的平均值,说明本文试验数据可靠。本文试验为静载试验,未涉及反复荷载下带锚固板钢筋的锚固承载力,拟在下一阶段的试验中开展研究。

参考文献:

References:

[1] DEVRIES R A. Load distribution between bond and end-bearing for hooked and headed bars in concrete [C]//ASCE. Architectural Engineering Conference: Birth and Life of the Integrated Building. Reston: ASCE,2015:269-278.

[2] 郑文忠,苗天明,王识宇,等. 锚固力在钢筋黏结和端板承压间的分配规律[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018,50(6):152-160.

ZHENG Wenzhong, MIAO Tianming, WANG Shiyu, et al. Distribution regulation of the reinforcement force between bond and headed bars[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2018,50(6):152-160.

[3] 苗天明. 带端板钢筋锚固力及端板下局压承载力研

- 究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- MIAO Tianming. Research on anchorage force of reinforcement with headed bars and local bearing capacity of concrete under the headed bars[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2020.
- [4] 陈朝霞,李雪,戎贤. HRB500 钢筋机械锚固性能的试验研究[J]. 河北工业大学学报,2011,40(2):97-100.
- CHEN Zhaoxia, LI Xue, RONG Xian. Experimental study on machinery anchorage performance of HRB500 steel bar[J]. Journal of Hebei University of Technology,2011,40(2):97-100.
- [5] CHOI D U, PARK D U, HONG S G, et al. Test of headed reinforcement in pullout[J]. KCI Concrete Journal,2002,14(3):102-110.
- [6] CHOI D U. Test of headed reinforcement in pullout II: deep embedment[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials,2006,18(3E):151-159.
- [7] ALRASYID H, YOGANATA Y S, SULUCH M, et al. Headed reinforcement in concrete structure: state of the art[C]//AIP Publishing LLC. AIP Conference Proceedings. Palembang: AIP Publishing LLC,2017:020015.
- [8] 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,2007.
- LI Zhibin. Experiment study in anchorage behavior of headed reinforcement[D]. Tianjin: Tianjin University,2007.
- [9] 吴广彬,李智斌,王依群,等. 带锚固板钢筋机械锚固强度的拉拔试验研究[J]. 建筑科学,2010,26(5):1-5.
- WU Guangbin, LI Zhibin, WANG Yiqun, et al. Experiment study on mechanical anchorage strength of headed reinforcement by pull-out[J]. Building Science,2010,26(5):1-5.
- [10] DEVRIES R A. Anchorage of headed reinforcement in concrete[M]. Austin: The University of Texas at Austin,1996.
- [11] BASHANDY T R. Application of headed bars in concrete members[M]. Austin: The University of Texas at Austin,1996.
- [12] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- Code for design of concrete structures:GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011.
- [13] 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,2012.
- Technical specification for application of headed bars: JGJ 256—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2012.
- [14] 镦粗直螺纹钢筋接头:JG 171—2005[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- Parallel thread rebar splice with upsetting end: JG 171—2005[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2005.
- [15] CABR 钢筋-锚固板:Q/JKJS 02—2006[S]. 北京:中国建筑科学研究院结构所,2016.
- CABR anchorage plate for rebars: Q/JKJS 02—2006[S]. Beijing: Institute of Structure, China Academy of Building Research,2016.
- [16] SPERRY J, AL-YASSO S, SEARLE N, et al. Anchorage of high-strength reinforcing bars with standard hooks[R]. Lawrence: The University of Kansas Center for Research, Inc.,2015.
- [17] 彭检. 钢筋混凝土板柱节点抗冲切试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2013.
- PENG Jian. Experimental study on punching shear failure of reinforced concrete slabs-column connections[D]. Changsha: Hunan University,2013.
- [18] 易伟建,刘彪. 基于塑性理论的钢筋混凝土板冲切开裂滑移模型[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2017,49(1):42-47.
- YI Weijian, LIU Biao. Crack slip model for punching capacity of reinforced concrete slab based on the plastic theory[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition),2017,49(1):42-47.
- [19] 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,1991,21(11):36-40.
- WANG Hong, XU Youlin, SHI Zhihua. Experimental research of mechanical anchorage properties of bars in concrete[J]. Industrial Construction,1991,21(11):36-40.
- [20] 王莉荔. 500 MPa 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.
- [21] 刘立新,王莉荔. 热轧带肋钢筋机械锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构,2009,39(增1):895-898.
- LIU Lixin, WANG Lili. Experimental study on bond-anchorage behavior of hot-rolled ribbed bars in concrete with mechanical anchorage measure[J]. Building Structure,2009,39(S1):895-898.

[22] 唐翠丽. 一种新型钢筋锚固装置的性能研究[D]. 西安:西安工业大学,2014.
TANG Cuili. Study on properties of a novel reinforcement anchorage device[D]. Xi'an;Xi'an Technological University,2014.

[23] 李晓清. 600 MPa 热轧带肋钢筋机械锚固性能试验研究[D]. 天津:河北工业大学,2016.
LI Xiaoqing. Experimental research on mechanical anchorage property of 600 MPa hot-ribbed steel bar [D]. Tianjin;Hebei University of Technology,2016.

[24] 程 莉. 椭圆型钢筋锚固装置的设计与性能研究 [D]. 西安:西安工业大学,2016.
CHENG Li. Study on design and performance of the elliptic steel anchorage devices[D]. Xi'an;Xi'an Technological University,2016.

[25] DEVRIES R A,JIRSA J O,BASHANDY T. Anchorage capacity in concrete of headed reinforcement with shallow embedments [J]. ACI Structural Journal, 1999,96(5):728-737.

[26] CHUN S C,CHOI C S,JUNG H S. Side-face blow-out failure of large-diameter high-strength headed bars in beam-column joints[J]. ACI Structural Journal,2017,114(1):161-172.