

混凝土结构 节点连接及抗震构造 研究与应用 论文集

全国混凝土结构标准技术委员会
节点连接学组与结构抗震学组

中国建筑工业出版社

混凝土结构节点连接及抗震构造研究与应用 论文集

全国混凝土结构标准技术委员会
节点连接学组与结构抗震学组

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

为了总结近年来我国钢筋混凝土结构节点与连接和结构抗震方面的研究成果,全国混凝土结构标准技术委员会节点连接学组与结构抗震学组在全国范围内广泛征文,经认真筛选后,收集了 29 篇论文,作为 1996 年 4 月在青岛召开的“全国混凝土节点连接与结构抗震学术研讨会”论文集出版。这些论文所涉及的问题均属我国土木工程界正在探讨和亟需解决的课题,基本上反映了我国混凝土结构节点连接及抗震性能研究、设计的最新研究成果,具有较高的参考价值。

本书可供建筑工程设计、教学、科研单位的技术人员学习参考。

* * *

本论文集的组稿、审稿、编排及成书是由中国工程建设标准化协会混凝土结构标准技术委员会节点连接及结构抗震学组委托重庆建筑大学白绍良教授、傅剑平老师完成的。

混凝土结构节点连接及抗震构造研究与应用

论文集

全国混凝土结构标准技术委员会

节点连接学组与结构抗震学组

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

重庆建筑大学印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:16 1/2 字数:402 千字

1996 年 3 月第一版 1996 年 3 月第一次印刷

印数:1—500 册 定价:35 元

ISBN7—112—02837—X

TU • 2157(7947)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码:100037)

目 录

并筋粘结锚固性能的试验研究·····	(1)
钢筋混凝土并筋梁受力性能的试验研究·····	(7)
梁底纵筋在梁铰区搭接的框架节点抗震性能研究·····	(16)
抗震框架节点构造设计的探索和工程应用·····	(37)
抗震设防三水准刍议·····	(42)
约束钢筋混凝土短梁抗震性能试验研究·····	(50)
装配整体式剪力墙体系的连接构造和抗震性能	
——一种新型装配式大板结构·····	(64)
剪力墙——楼板后浇连接的抗震性能·····	(91)
连续梁负弯矩钢筋分批切断时延伸长度的受力分析	
——兼论延伸长度确定原则和方法的改进·····	(103)
缺口梁端部构造的研究·····	(115)
角钢骨架梁—梁节点及内含角钢骨架混凝土梁—梁节点的试验研究·····	(122)
钢筋混凝土梁、柱、节点粘钢加固抗震性能试验研究(之一)·····	(130)
钢筋混凝土梁、柱、节点粘钢加固抗震性能试验研究(之二)·····	(140)
水平加腋梁框架边节点的试验研究·····	(150)
钢管混凝土空间框架角柱节点连接件的试验研究·····	(159)
钢筋混凝土框架圆柱边节点抗剪性能的试验研究·····	(168)
恒定轴力作用下钢筋混凝土框架柱抗震性能的试验研究·····	(175)
水平地震作用下钢筋混凝土框架柱抗震性能研究·····	(184)
规则变轴力作用下钢筋混凝土框架柱抗震性能研究·····	(196)
钢筋混凝土框架——抗震墙结构1/10 模型振动台试验研究·····	(207)
钢筋混凝土框架——抗震墙结构修复后的抗震性能研究·····	(215)
混凝土框架中柱节点钢筋粘结锚固性能的试验研究·····	(222)
承受正弯矩时框架节点的配筋及强度·····	(229)
间接加载梁加载节点的配筋构造试验研究·····	(234)
梁上牛腿的腹筋构造研究·····	(239)
高层钢筋混凝土建筑结构节点与连接的抗震设计·····	(244)
钢筋混凝土抗震墙对框支砖房非弹性地震位移反应影响的研究·····	(256)
钢筋混凝土柱二阶效应、稳定问题和强度问题的关系研究·····	(263)
从变形过程研究柱二阶效应、强度问题和稳定问题·····	(271)

并筋粘结锚固性能的试验研究*

徐有邻

(中国建筑科学研究院结构所)

摘 要 本文通过双并筋、三并筋的拉拔试验探讨了并列钢筋在混凝土中的粘结锚固机理和影响粘结锚固性能的主要因素。通过试验分析和统计回归求得了双并筋和三并筋的粘结锚固强度,并在此基础上提出了并筋的锚固设计建议。

关键词 粘结锚固 锚固强度 锚固长度

一、前 言

按我国设计规范和施工习惯,受力钢筋之间必须保持一定的间距,使每根受力钢筋都能被混凝土握裹,以维持粘结锚固作用。但是,这在设计和施工中很难做到,在截面较小和配筋较多时不得不将受力钢筋分排布置。这样在受力较大配筋较密集的区域,受力钢筋的排数多达二排、三排,甚至四排。要准确维持这些钢筋的位置必须增加不少架立构造筋,成排钢筋还必须上下对齐以实现混凝土下落通畅及振捣密实。显然,这给设计,特别是施工带来了很大的麻烦,而且由于施工不便往往造成密集配筋区混凝土的蜂窝和空洞,反而影响了钢筋与混凝土的粘结锚固。

国外对此问题的解决办法是采用并筋,即将受力主筋二根、三根甚至四根为一组,并列捆扎在一起,以钢筋束的形式配筋。当然,在采用并筋(钢筋束)形式配筋以后,相应的配筋构造措施将有所调整。最明显的就是锚固长度修正。各国修正的方法和形式不一,但无一例外都是以增加实际长度来修正并筋的锚固长度。

我国对并筋粘结锚固性能的研究始于 80 年代,当时中国建筑科学研究院曾进行过少量的探索性试验。并筋锚固性能的试验研究于 1992 年正式列入混凝土结构设计规范第五批科研课题,1993 年该项目受到国家自然科学基金的资助,本文为中国建筑科学研究院进行并筋锚固试验的结果。并筋的构件试验在郑州工学院进行,另文专述。

二、试验方案

(一)试验目的

- (1)探讨并筋受力时的粘结锚固机理和粘结锚固特性。
- (2)确定影响并筋粘结锚固强度的主要因素及其规律。
- (3)统计回归并筋粘结锚固强度的计算公式。
- (4)确定并筋锚固长度及配套的构造措施,提出相应的设计建议。

(二)试验试件

* 本文得到国家自然科学基金资助。

鉴于我国用拉拔试验探讨钢筋粘结锚固性能已积累了相当成熟的经验和资料。为减少试验的工作量,以单筋和并筋的对比试验来探讨上述各试验目的。

试件截面尺寸有 $100 \times 100 \text{mm}$ 及 $150 \times 150 \text{mm}$ 两种,长度 100, 200, 250mm 三种。混凝土强度 $f_{cu} = 21.6 \sim 39.0 \text{MPa}$ 。1 $\phi 12$, 2 $\phi 12$, 3 $\phi 12$ 月牙纹钢筋锚固于试件中心,配箍 $\phi^4 @ 50$ 。并筋端头以贴缝联焊成整体,以便在拉拔力作用下共同受力和滑移(图 1)。

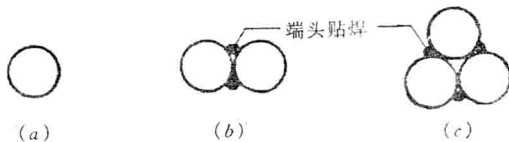


图 1 并筋试件的钢筋布置

(a) 单筋试件;

(b) 双并筋试件;

(c) 三并筋试件

试验试件分组如表 1 所示。

并筋试验试件总表

表 1

试件号	组 数	试件数	探讨目的	基 本 参 数		
				主 筋	混凝土强度 $f_{cu}(\text{MPa})$	锚固长度 $l_a(\text{mm})$
BA-1~3	3	8	并筋对比组	1 $\phi 12$	21.6~31.1	80~200
BB1~5	5	14	双并筋试件	2 $\phi 12$	23.0~39.0	80~200
BC1~3	3	9	三并筋试件	3 $\phi 12$	23.5~31.3	80~250

(三) 加载及量测方案

用拉拔试验探讨粘结锚固性能。试件下置穿心球铰以消除偏斜引起断裂对锚固性能的影响。量测加载端和自由端的滑移量(s_1 和 s_2),拉拔力用荷载传感器量测并以试验机的度盘读数校准。整个试验用 X-Y 函数记录仪以连续曲线的形式记录(图 2)。

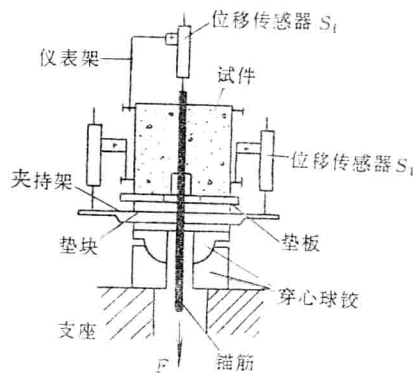


图 2 拉拔试验装置

三、试验观察与分析

(一) 典型的荷载—滑移曲线

单筋、双并筋和三并筋的典型的荷载—滑移曲线($F-s$)如图 3 所示。

由图 3 可以看出,并筋的 $F-s$ 曲线基本与单筋一致。拉拔力 F 增高,但并不成比例。受力也分初滑移、劈裂、极值、下降及残余几个阶段。曲线的临界转折点相应的特征强度有劈裂(c_r),极限(u)和残余(r)三个。详细分析同单筋锚固,不再赘述。

剖开试验试件可以看到并筋试件除在横肋前有挤压造成混凝土碎末的眉状堆积以外，在并筋间的切面内也填塞了混凝土碎末，形成以钢筋的部分弧面与钢筋间切面构成的卵形（双并筋）和三角形（三并筋）截面（图 4）。此“组合截面”上可以观察到破碎与摩擦的痕迹，在相对应的握裹层混凝土内侧面上也同样存在着擦痕。

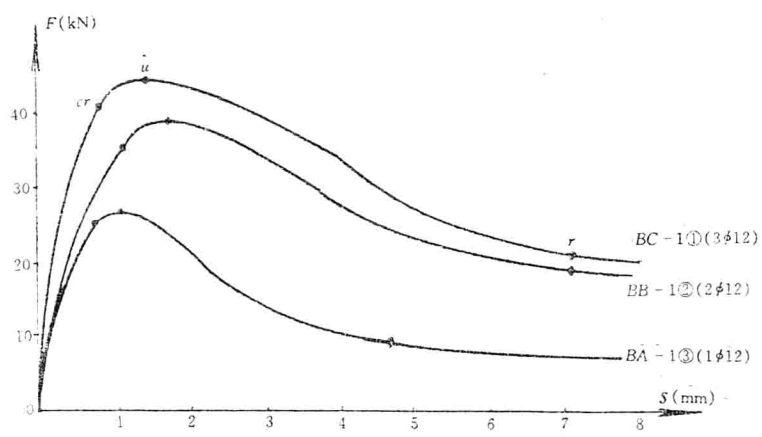


图 3 并筋的荷载—滑移曲线

（二）并筋粘结锚固机理的分析

从并筋的荷载—滑移（ $F-s$ ）曲线和滑移、劈裂、下降、拔出等宏观试验现象看，并筋与单筋的粘结锚固机理相同。即胶结力丧失后以摩阻力和咬合力承载，而锥楔作用引起的纵向劈裂是锚固承载的关键，最后当大滑移使混凝土咬合齿切断以后，由残余摩阻力承载，直至拔出破坏。

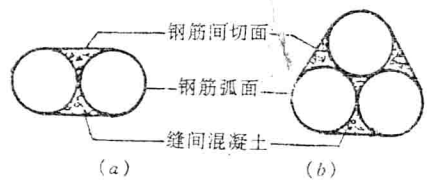


图 4 并筋的组合截面
(a)双并筋的卵形截面； (b)三并筋的三角形组合截面

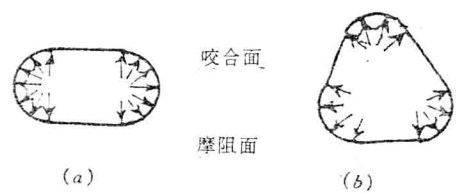


图 5 并列锚固钢筋的等效钢筋
(a)双并筋； (b)三并筋

并筋粘结锚固的特点是受力钢筋与握裹混凝土之间相互作用面不再是一个圆,而是呈卵形(双并筋)和三角形(三并筋),其由部分钢筋的弧面和钢筋间的切面构成。其中弧面主要以钢筋横肋锥楔作用的咬合力承载,而切面主要以混凝土界面上的摩阻力承载。从粘结锚固而言,并筋相当于一个轮廓为卵形或三角形的组合截面等效钢筋(图 5)。其承受拉拔力的面积为钢筋面积,而有效粘结锚固面积则为等效钢筋的外轮廓周长。

单筋的承载面积为 $(\pi/4)d^2$,锚固面积为 πdl (l 为横肋间距,故锚固面积比 $4(l/d)$)。双并筋承载面积为 $(\pi/2)d^2$,锚固面积为 $(\pi+2)dl$,锚固面积比为 $[2+4/\pi](l/d)=3.27l/d$ 。而三并筋的相应值为 $(3/4)\pi d^2$, $(\pi+3)dl$ 和 $(3/4+4/\pi)(l/d)=2.61l/d$ 。由于锚固面积比的减小,还由于部分粘结锚固面积只承受摩阻力而没有咬合力,故并筋的粘结锚固强度小于单筋相应值。试验量测证实了这一点。

四、粘结锚固强度

(一)粘结锚固的特征强度

由图 3 的荷载滑移曲线加以改造,将拉拔力折算成每根钢筋名义粘结面积所承担的粘结锚固应力,即可得并列钢筋的 τ/f_t-s 曲线如图 6 所示。与单筋一样,其特征粘结锚固强度有三个,劈裂强度 τ_{cr} 极限强度 τ_u 和残余强度 τ_r 。

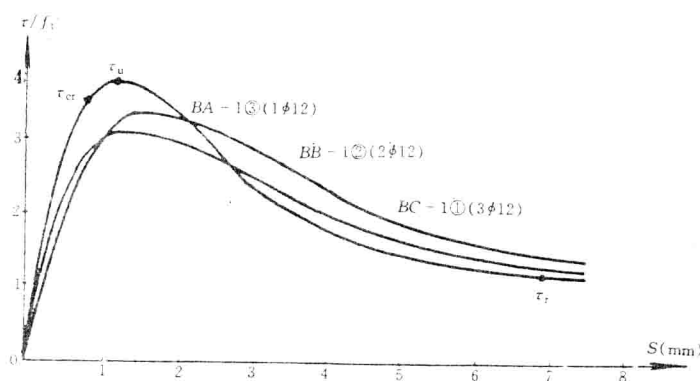


图 6 并筋的 $\tau-s$ 曲线

由图看出,并列钢筋的总锚固力虽有提高。但折算成每根钢筋计算粘结锚固强度,则比单筋有所降低,并且并筋数量越多,降低越多。

(二)影响粘结锚固强度的因素

(1)并筋数量

并筋的粘结锚固强度降低,且与并筋数量有关。并筋数量越多,降低越多。在各种锚固条件基本相同的条件下,对单筋,双并筋和三并筋的粘结锚固强度进行比较,结果比例为 $1:0.719:0.562$ 。这小于前述锚固面积比 $4:3.27:2.61=1:0.818:0.653$ 。原因是由于并筋有部分界面(混凝土切面)没有咬合力而只有摩阻力的缘故(图 5)。

(2)混凝土强度

随握裹层混凝土强度的提高,粘结锚固强度增加。但两者并非线性关系,而与混凝土的抗拉强度 $f_t=0.267f_c^{2/3}$ 呈正比。此规律与单筋锚固试验的结果相同。

(3)保护层厚度

随混凝土保护层厚度增加,并筋的粘结锚固强度加大,但两者并不是正比关系而是非线性关系。其规律与单筋锚固情况类似。此时保护层厚度 C 为由等效钢筋外缘起算的距离。

(4)箍筋的配置

箍筋的配置使试件在发生劈裂以后并不丧失承载能力,粘结锚固强度还能有少量增加而达到极限强度。增量与劈裂面上的配箍率有关,规律与单筋试验结果类似。

(5)锚固长度

短锚试件平均粘结锚固强度较高而长锚试件相应值较低,但锚长较大时这种变化趋于平缓,其规律与单筋试验结果基本相同。

(三)并筋的折算直径

前面已从机理分析和统计比较得出,并列钢筋的粘结锚固强度降低,其比例为 $1:0.719:0.562$,这个比例大体可以简化为 $1:1/\sqrt{2}:1/\sqrt{3}=1:0.707:0.577$ 。

进一步简化,将并列钢筋等效为直径 $\sqrt{2}d$ 和 $\sqrt{3}d$ 的单筋,则其承载面积完全不受影响,而粘结锚固强度也大体可按等效钢筋计算,且误差很小。因此并筋按等效直径的单筋考虑是一种既简单又比较准确的处理方式。并筋的等效直径 D 可由单筋的直径 d 按下列公式计算。

$$\text{双并筋} \quad D = \sqrt{2}d \quad (1)$$

$$\text{三并筋} \quad D = \sqrt{3}d \quad (2)$$

表 2 为并筋按折算直径考虑后基本参数的比较。

并筋折算直径有关参数的比较			表 2
形 式	单 筋	双 并 筋	三 并 筋
直径	d	$D = \sqrt{2}d$	$D = \sqrt{3}d$
面积	$(\pi/4)d^2 = A_s$	$(\pi/2)d^2 = 2A_s$	$(3/4)\pi d^2 = 3A_s$
锚固面积	$\pi d l$	$(2+\pi)d l$	$(3+\pi)d l$
锚固面积比	$4(l/d)$	$3.27(l/d)$	$2.61(l/d)$
相对值	1	0.818	0.653
试验锚固强度比	1	0.719	0.562
折算锚固面积	A_s	$\sqrt{2}A_s$	$\sqrt{3}A_s$
折算锚固强度比	1	$1/\sqrt{2}=0.707$	$1/\sqrt{3}=0.577$
相对值	1	1.017	0.973

由表 2 看出,采用折算直径 D 的概念,以等效钢筋计算的折算锚固强度与试验结果比

较的相对值均在 1 左右,即非常接近。

(四)并筋的粘结锚固强度

并筋的粘结锚固机理和强度规律与单筋完全相同,由试验结果分析采用折算直径 D 后,可按等效钢筋利用单筋的粘结锚固强度计算公式进行相应的计算。

$$\text{劈裂强度} \quad \tau_{cr} = (0.82 + 0.9D/l_a)(1.6 + 0.7C/D)f_t \quad (3)$$

$$\text{极限强度} \quad \tau_u = (0.82 + 0.9D/l_a)(1.6 + 0.7C/D + 20\rho_{av})f_t \quad (4)$$

$$\text{残余强度} \quad \tau_r = 0.98f_t \quad (5)$$

由公式(3)、(4)、(5)对试验结果进行校核计算,试验值与计算值的比较如表 3 所示。由表可看出,公式反映了试验的结果。

试验值 τ^o 与计算值 τ^c 的比较

表 3

形 式	双 并 筋			三 并 筋		
τ^o/τ^c	τ_{cr}^o/τ_{cr}^c	τ_u^o/τ_u^c	τ_r^o/τ_r^c	τ_{cr}^o/τ_{cr}^c	τ_u^o/τ_u^c	τ_r^o/τ_r^c
试件数 n	14	14	13	9	9	8
平均值 μ	0.940	1.007	1.231	0.934	0.976	1.155
标准差 σ	0.154	0.112	0.510	0.142	0.065	0.147
变异系数 δ	0.164	0.111	0.414	0.152	0.067	0.128

五、设计建议

1. 并筋可按折算直径等效为单筋考虑,双并筋的折算直径为 $\sqrt{2}d$,三并筋的折算直径为 $\sqrt{3}d$ 。

2. 并筋的锚固长度可由规范中的基本锚固长度 l_a 乘修正系数 $\sqrt{2}$ (双并筋)和 $\sqrt{3}$ (三并筋)而得。

3. 并筋的保护层厚度及钢筋间距应不小于其折算直径 $\sqrt{2}d$ (双并筋)和 $\sqrt{3}d$ (三并筋)。

钢筋混凝土并筋梁受力性能的试验研究

刘立新 徐有邻 徐泽品*
(郑州工学院) (中国建筑科学研究院建筑结构研究所)

摘要 本文通过 6 组双并筋梁、2 组三并筋梁和 2 组对照梁在弯矩和剪力作用下的锚固和受力性能试验,分析了在不同锚固长度下并筋梁和对照梁粘结滑移关系的特点以及采用并筋后对梁受力性能的影响。试验研究表明,采用并筋后钢筋和混凝土之间的粘结锚固作用有所下降,但粘结滑移的特性相近。在现行混凝土结构设计规范 GBJ10—89 规定的锚固长度下,并筋梁的粘结锚固强度不足,容易发生锚固破坏,使梁的承载力降低,但通过适当延长锚固长度即可保证锚固强度和梁的承载力,从而使并筋梁可在工程中应用,并给出了并筋梁设计的建议锚固长度。

关键词 粘结 锚固 并筋梁 承载力

一、前言

在我国建筑工程混凝土结构设计和施工规范中,均规定受力钢筋应单根排列,钢筋之间必须保持一定的间距,以便使每根钢筋都能被混凝土握裹以维持钢筋和混凝土之间的粘结锚固作用。但在工程实践中,在截面较小配筋较多的构件中和梁柱节点处,完全单根排列受力钢筋又保持一定间距有时难以做到,不得不将受力钢筋二排甚至三排排列,这不仅给施工带来不便,也影响混凝土的振捣和施工质量。国外解决上述问题的方法之一是采用并筋,即将受力钢筋二根或三根并列捆扎在一起,以钢筋束的形式配筋,使钢筋束之间保持较大间距以利于施工。在采用并筋形式配筋后,钢筋和混凝土的接触面积有所减小,粘结锚固强度相应降低,钢筋的锚固长度应予修正。国外修正并列钢筋锚固长度的方法和形式尽管不同,但都是增加实际锚固长度以保证并筋后的锚固能力。

我国对并筋的粘结锚固性能研究始于 80 年代,当时中国建筑科学研究院曾进行过少量的探索性试验^[1]。并筋锚固性能的系统研究于 1992 年正式列入混凝土结构设计规范第五批课题。目前已完成并筋的拉拔试验和并筋梁的受力性能试验。并筋的拉拔试验结果表明,并筋的拉拔粘结锚固性能与单根排列的钢筋类似,只是劈裂粘结强度 τ_{cr} 、极限粘结强度 τ_u 和残余粘结强度 τ_r 均随并列钢筋根数的增加而降低,典型的 $\tau-s$ 关系曲线如图 1 所示^[3]。本文是在并筋拉拔试验的基础上,对月牙纹钢筋和带弯钩光面钢筋的双并筋梁、三并筋梁以及单根钢筋排列的对照梁进行试验,以探讨并筋梁的锚固及受力特点。

二、试验概况

* 本文得到国家自然科学基金资助。参加试验的有王仁仪、王菁、毕苏萍、王新玲

试验梁分月牙纹钢筋和带弯钩光面钢筋两类, $BL\text{ II }1\sim BL\text{ II }3$ 为 3 组月牙纹钢筋双并筋梁, $BL\text{ III }1$ 为 1 组月牙纹钢筋三并筋梁, $DL1$ 为 1 组月牙纹钢筋单根排列的对照梁; $BL\text{ II }4\sim BL\text{ II }5$ 为 3 组光面钢筋的双并筋梁, $BL\text{ III }2$ 为 1 组光面钢筋的三并筋梁, $DL2$ 为 1 组相应的对照梁。试验梁的配筋形式及加载方式如图 2 所示, 支座上方纵筋应力最大处留一缺口以量测钢筋的滑移和保护层厚度, 并用电阻应变仪量测该处钢筋的应变, 梁内配有足够的箍筋以防止提前发生剪切破坏, 主要变化参数为钢筋的锚固长度和混凝土强度。试验时在梁的一个伸臂端加载, 同时跨中施加相应的平衡荷载, 一个伸臂端试验完毕后, 再进行另一个伸臂端的试验。各组梁的参数及试验结果分别见表 1 和表 2。

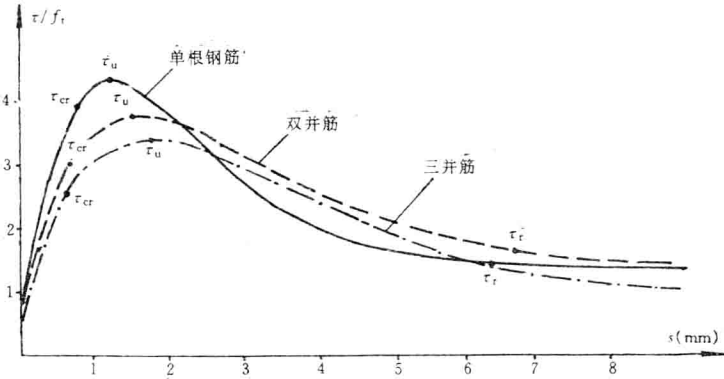


图 1 单根筋、双并筋、三并筋典型的 $\tau-s$ 关系曲线

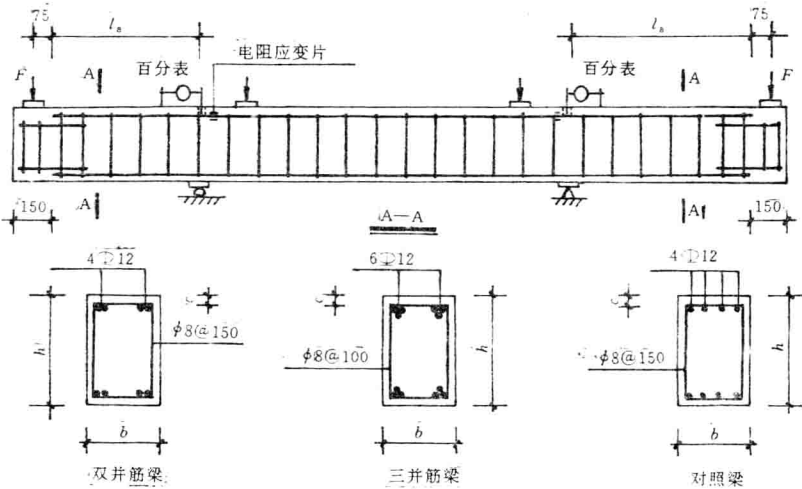


图 2 试验梁的配筋形式及加载方案

三、并筋梁的锚固性能

图 3a 是直径为 d 锚固长度为 l_a 的单根钢筋锚固受力图, 钢筋的拉力 $\sigma_s A_s$ 由锚固长度 l_a 范围的粘结应力 τ 的合力平衡, 在 l_a 内的平均粘结应力可由下式求得

$$\tau = \frac{1}{4} \sigma_s \frac{d}{l_a} \quad (1)$$

由拉拔试验的结果可知^[2], 并筋与混凝土握裹层之间的相互作用面不完全是钢筋表面, 而是由部分钢筋表面和并筋缝隙间混凝土共同组成的一个滑移面, 双并筋的滑移面大致呈卵形(图 3b)、三并筋的滑移面大致呈三角形(图 3c)。由滑移面的表面积和平衡关系可求得双并筋、三并筋在 l_a 内的平均粘结应力分别如(2)、(3)式:

$$\text{双并筋} \quad \tau = \frac{1}{4} \sigma_s \frac{d}{l_a} \cdot \frac{2\pi}{\pi + 2} \quad (2)$$

$$\text{三并筋} \quad \tau = \frac{1}{4} \sigma_s \frac{d}{l_a} \cdot \frac{3\pi}{\pi + 3} \quad (3)$$

对比(1)、(2)、(3)式可见, 在相同 l_a 和相同钢筋应力 σ_s 的情况下, 并筋滑移面的粘结应力要高于单根钢筋滑移面的粘结应力, 滑移值也应大一些。

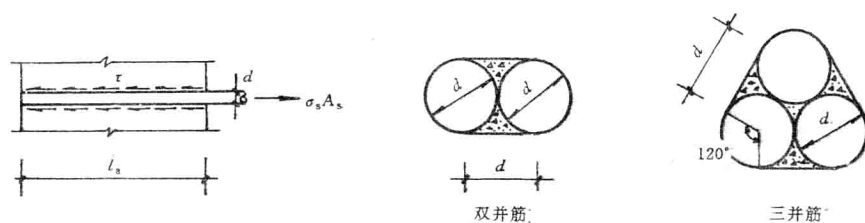


图 3 双并筋、三并筋形成的组合截面

图 4 和图 5 分别是月牙纹钢筋、带弯钩光面钢筋的对照梁、双并筋梁和三并筋梁的 τ - s 关系曲线对比。从图中可见, 无论是月牙纹钢筋还是光面钢筋, 随着并列钢筋根数的增加, 粘结滑移刚度均减小, 滑移量增长加快, 这与图 1 所示的拉拔试验结果是一致的。图 6 是月牙纹双并筋梁在不同锚固长度下纵筋应力 σ_s 和滑移 s 的对比, 从图中可见在垂直裂缝出现前三根试验梁滑移 s 均较小, 垂直裂缝出现后滑移 s 增长加快, σ_s - s 曲线出现第一个转折点, 在斜裂缝出现后滑移 s 增长迅速, σ_s - s 曲线出现第二个转折点。从图 6 中还可看出, 在 σ_s 相同条件下, 锚固长度长的梁滑移值较锚固长度短的梁滑移值要小; BL II 1-1 锚固长度最长 ($l_a = 680\text{mm}$), 垂直裂缝、斜裂缝出现时 σ_s - s 曲线转折不明显, 滑移值最小, 纵筋应力可达到屈服强度, 不发生锚固破坏, 最后由于纵筋屈服, 裂缝开展而发生弯曲破坏, 承载力不降低; BL II 1-3 锚固长度较短 ($l_a = 390\text{mm}$), 斜裂缝出现前滑移值不大, 但斜裂缝出现后滑移增长迅速, 纵筋应力达不到屈服强度, 最后由于纵筋被拔出, 滑移增大, 裂缝迅速开展而发生锚固破坏, 承载力降低; BL II 1-4 锚固长度最短 ($l_a = 280\text{mm}$), 在垂直裂缝出现后滑移值增长即很迅速, 当斜裂缝出现后, 纵筋立即被拔出而发生锚固破坏, 破坏时纵筋应力和梁的承载力均

很低。双并筋梁弯曲破坏和锚固破坏的形态如图 7 所示,其中锚固破坏是由于纵筋被拔出,或是由于垂直裂缝迅速开展而破坏,或是由于斜裂缝迅速开展而破坏,从外表看来很象弯曲破坏或剪切破坏,但其实质是由于纵筋被拔出而引起的,弯曲破坏和锚固破坏的区别在于破坏时纵筋是否屈服以及承载力是否降低。月牙纹三并筋梁和光面钢筋(带弯钩)并筋梁的 τ - s 曲线, σ_s - s 曲线以及破坏形态与月牙纹双并筋梁的特点类似,只是光面钢筋并筋梁由于弯钩的机械锚固作用,使量测结果偏于离散。

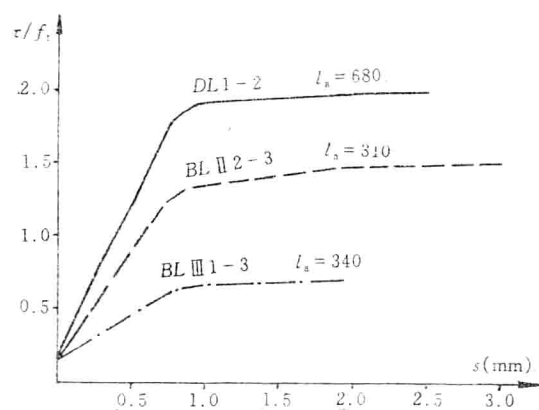


图 4 实测 τ/f_t - s 对比曲线

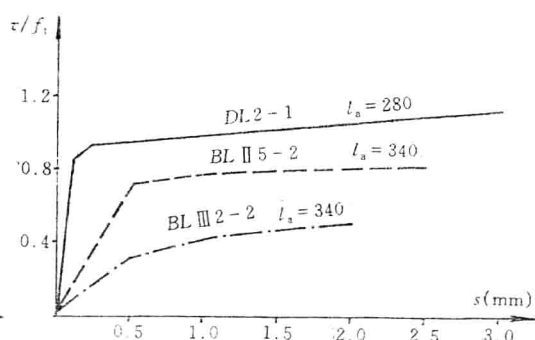


图 5 实测 τ/f_t - s 对比曲线

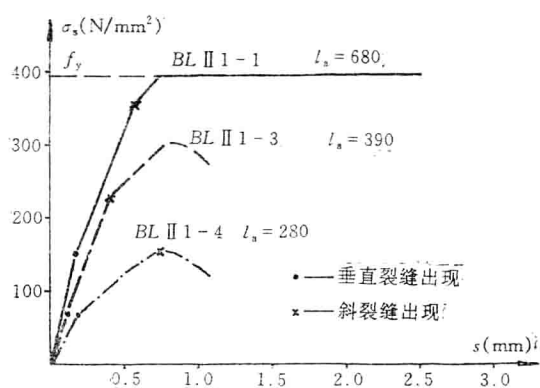


图 6 实测 σ_s - s 对比曲线

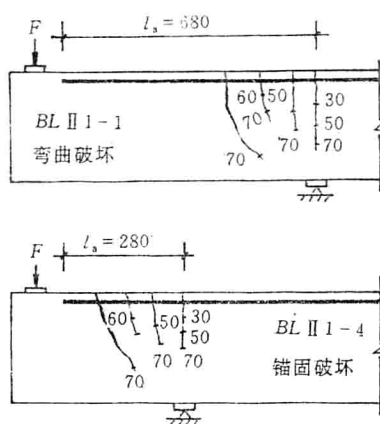


图 7 双并筋梁破坏形态

月牙纹钢筋并筋梁及对照梁试验结果

表 1

构件编号	f_{cu} (N/mm ²)	f_c (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	b (mm)	h (mm)	c (mm)	l_a (mm)	A_s (mm ²)	f_y (N/mm ²)	A_{sv}	f_{yv} (N/mm ²)	P_{α}	P'_{α} (kN)	P'_a (kN)	受坏特点
BL II 1-1	23.75	18.05	2.15	257	305	15	680	4 Φ 12	393.5	48@150	302	30	70	78	受变破坏
BL II 1-2	23.75	18.05	2.15	232	301	16	480	4 Φ 12	393.5	48@150	302	10	68	68	锚固破坏
BL II 1-3	23.75	18.05	2.15	240	305	15	390	4 Φ 12	393.5	48@150	302	35	70	100	锚固破坏
BL II 1-4	23.75	18.05	2.15	224	307	15	280	4 Φ 12	393.5	48@150	302	30	70	70	锚固破坏
BL II 2-1	36.73	27.91	2.87	230	303	14	480	4 Φ 12	393.5	48@150	302	30	90	110	受变破坏
BL II 2-2	36.73	27.91	2.87	210	303	25	390	4 Φ 12	393.5	48@150	302	30	80	85	锚固破坏
BL II 2-3	36.73	27.91	2.87	220	305	14	310	4 Φ 12	393.5	48@150	302	50	90	160	锚固破坏
BL II 2-4	36.73	27.91	2.87	187	305	19	210	4 Φ 12	393.5	48@150	302	40	80	80	锚固破坏
BL II 3-1	51.78	39.35	3.61	213	303	15	440	4 Φ 12	393.5	48@150	302	30	70	77	局部破坏
BL II 3-2	51.78	39.35	3.61	204	303	20	310	4 Φ 12	393.5	48@150	302	70	70	110	锚固破坏
BL II 3-3	51.78	39.35	3.61	220	303	15	240	4 Φ 12	393.5	48@150	302	80	200	280	受变破坏
BL II 3-4	51.78	39.35	3.61	205	303	21	180	4 Φ 12	393.5	48@150	302	70	110	150	锚固破坏
BL III 1-1	52.33	39.77	3.64	230	308	20	620	6 Φ 12	393.5	48@100	302	40	100	145	受变破坏
BL III 1-2	52.33	39.77	3.64	222	301	15	510	6 Φ 12	393.5	48@100	302	30	100	130	受变破坏
BL III 1-3	52.33	39.77	3.64	207	301	35	340	6 Φ 12	393.5	48@100	302	40	105	105	锚固破坏
BL III 1-4	52.33	39.77	3.64	212	308	36	210	6 Φ 12	393.5	48@100	302	40	110	114	锚固破坏
DL I 1-1	32.00	24.32	2.62	230	300	13	380	4 Φ 12	393.5	48@150	302	60	80	80	局部破坏
DL I 1-2	32.00	24.32	2.62	220	299	15	230	4 Φ 12	393.5	48@150	302	120	200	310	受变破坏

表 2

光面钢筋(带弯钩)并筋梁及对照梁试验结果

构件编号	f_{cu} (N/mm ²)	f_c (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	b (mm)	h (mm)	c (mm)	l_n (mm)	A_s	f_y (N/mm ²)	A_{sv}	f_{yv} (N/mm ²)	P_{α}	P'_{α} (kN)	P_u (kN)	受坏特点
BL I 4-1	20.93	15.91	1.98	220	300	15	510	4 Φ 12	296.2	48@150	302	40	55	59	受弯破坏
BL I 4-2	20.93	15.91	1.98	230	300	15	470	4 Φ 12	296.2	48@150	302	30	60	83	受弯破坏
BL I 4-3	20.93	15.91	1.98	201	300	20	360	4 Φ 12	296.2	48@150	302	20	70	98	受弯破坏
BL I 4-4	20.93	15.91	1.98	203	300	15	360	4 Φ 12	296.2	48@150	302	25	70	110	受弯破坏
BL I 5-1	37.84	28.76	2.93	222	306	15	340	4 Φ 12	296.2	48@150	302	45	90	130	受弯破坏
BL I 5-2	37.84	28.76	2.93	232	300	15	340	4 Φ 12	296.2	48@150	302	50	100	130	受弯破坏
BL I 5-3	37.84	28.76	2.93	198	300	23	240	4 Φ 12	296.2	48@150	302	40	70	150	受弯破坏
BL I 5-4	37.84	28.76	2.93	202	306	20	240	4 Φ 12	296.2	48@150	302	50	75	105	锚固破坏
BL I 6-1	45.76	34.78	3.33	206	300	15	340	4 Φ 12	296.2	48@150	302	40	100	120	受弯破坏
BL I 6-2	45.76	34.78	3.33	210	302	20	340	4 Φ 12	296.2	48@150	302	40	85	85	锚固破坏
BL I 6-3	45.76	34.78	3.33	200	300	15	240	4 Φ 12	296.2	48@150	302	60	70	125	受弯破坏
BL I 6-4	45.76	34.78	3.33	199	302	28	240	4 Φ 12	296.2	48@150	302	20	45	70	锚固破坏
BL II 2-1	42.59	32.37	3.17	222	302	15	420	6 Φ 12	296.2	48@100	302	30	70	90	锚固破坏
BL II 2-2	42.59	32.37	3.17	222	304	15	340	6 Φ 12	296.2	48@100	302	50	150	200	受弯破坏
BL II 2-3	42.59	32.37	3.17	213	304	40	340	6 Φ 12	296.2	48@100	302	30	150	158	受弯破坏
BL II 2-4	42.59	32.37	3.17	210	302	40	240	6 Φ 12	296.2	48@100	302	40	90	160	锚固破坏
D L2-1	31.41	23.87	2.59	220	303	15	280	4 Φ 12	296.2	48@150	302	60	95	100	受弯破坏
D L2-2	31.41	23.87	2.59	227	300	14	240	4 Φ 12	296.2	48@150	302	80	110	135	锚固破坏

四、并筋梁承载力分析

由并筋梁的锚固性能和破坏形态可知,当并列钢筋的锚固长度足够时,纵筋的滑移较小,纵筋屈服前,裂缝开展不大,可保证受弯及受剪承载力。由于本次试验在梁中已配有足够的箍筋,未发生因箍筋不足而引起的典型剪切破坏,而由斜裂缝发展引起的外表看来象剪切破坏的形态也主要是由于纵筋被拔出而引起的,故本文重点讨论并筋锚固长度对受弯承载力的影响。

纵向受力钢筋达到屈服强度 f_y , 而未被拔出的最小锚固长度称为临界锚固长度,此时钢筋和混凝土之间的粘结强度达到极限粘结强度 τ_u , 根据参考文献^{[3][4]}的研究结果,单根钢筋拉拔试验的极限粘结强度为

$$\text{月牙纹钢筋} \quad \tau_u = (0.82 + 0.9) \frac{d}{l_a} (1.6 + 0.7 \frac{c}{d} + 20\rho_{sv}) f_t \quad (4)$$

$$\text{光面钢筋(带弯钩)} \quad \tau_u = (0.79 + 7.05 \frac{d}{l_a}) f_t \quad (5)$$

式中 d 为纵筋直径, l_a 为锚固长度, c 为保护层厚度, f_t 为混凝土抗拉强度, ρ_{sv} 为配筋率, $\rho_{sv} = \frac{A_{sv}}{cs}$, 其中 s 为纵筋间距, A_{sv} 为同一截面的箍筋截面面积。将(4)或(5)代入(1)式可得到月牙纹钢筋或光面钢筋的临界锚固长度表达式为

$$l_{cr} = \frac{f_y}{4\tau_u} d \quad (6)$$

按照(6)式计算并考虑拉拔试验钢筋和梁中纵向钢筋受力状态的差异,可得到月牙纹钢筋(Ⅱ级)和光面钢筋(Ⅰ级)的临界锚固长度如表3所示。纵向受力钢筋锚固的可靠性对结构正常发挥其功能具有重要意义,通过可靠性分析得到的月牙纹和光面钢筋的设计锚固长度 l_d 也列于表3中。其中月牙纹钢筋的 l_d 约为 l_{cr} 的1.8倍,光面钢筋由于端头带弯钩其 l_d 与 l_{cr} 大致相同。表3中还同时列出现行混凝土规范 GBJ10-89 规定的设计锚固长度。

单根排列的临界锚固长度和设计锚固长度

表3

钢筋类型	锚固长度类别	混凝土强度等级					
		C15	C20	C25	C30	C40	C50
月牙纹钢筋 (Ⅱ级)	临界锚固长度 l_{cr}	28d	23d	19.5d	17.5d	14.5d	13d
	设计锚固长度 l_d	51.7d	42.3d	35.8d	31d	25.8d	23d
	规范规定 l_d	50d	40d	35d	30d	30d	30d
带弯钩光面 钢筋(Ⅰ级)	临界锚固长度 l_{cr}	37.8d	29.6d	24.3d	20.5d	15.4d	12d
	设计锚固长度 l_d	39d	29d	25d	21d	15d	13.5d
	规范规定 l_d	40d	30d	25d	20d	20d	20d

并列钢筋的临界锚固长度可由(4)式或(5)式代入(2)式或(3)式求得: