

# 预制混凝土插入式预留孔灌浆钢筋搭接试验

姜洪斌<sup>1</sup>, 张海顺<sup>1,2</sup>, 刘文清<sup>3</sup>, 闫红缨<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨, 3260787@hit.edu.cn; 2. 天津大学 建筑工程学院, 300072 天津; 3. 黑龙江宇辉建设集团, 150090 哈尔滨)

**摘要:** 为了研究具有自主知识产权的预制混凝土结构钢筋连接方法, 在钢筋锚固试验结论的基础上, 设计制作了108个预制混凝土结构插入式预留孔灌浆钢筋搭接试件. 依据搭接接头率为100%的要求确定了钢筋搭接长度, 考虑钢筋直径、混凝土强度、搭接长度等不同影响因素, 完成了试件的单向拉伸试验, 得到了插入式预留孔灌浆钢筋搭接连接的破坏模式及各因素的影响规律, 计算分析并给出合理的搭接长度. 实验证明, 插入式预留孔灌浆钢筋搭接方法, 连接性能可靠且施工简便, 适合住宅产业化下的预制混凝土结构的钢筋连接.

**关键词:** 住宅产业化; 预制混凝土结构; 装配式结构; 钢筋搭接连接; 粘结滑移

**中图分类号:** TU375; TU398.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2011)10-0018-06

## Experimental study on plug-in filling hole for steel bar lapping of precast concrete structure

JIANG Hong-bin<sup>1</sup>, ZHANG Hai-shun<sup>1,2</sup>, LIU Wen-qing<sup>3</sup>, YAN Hong-ying<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, 3260787@hit.edu.cn; 2. School of Architecture, Tianjin University, 300072 Tianjin, China; 3. Heilongjiang YUHUI Construction Group, 150090 Harbin, China)

**Abstract:** In order to study the connection method between reinforced bars of the precast concrete structure, based on research results about reinforcement anchorage experiments, 108 lapping tests were completed. For the area percentage rate of the lap joints at 100%, the reinforcement lapping length was determined. According to the facts of bars diameter, concrete strength and different lapping length, some specimen simple tensile tests were completed. The failure mode and the impact law of factors about the reinforcement lapping were obtained, and the reasonable length was calculated. Through a series of tests and discussions, the plug-in filling hole for lap-joint of steel bar is a reliable connection, simply construct and suitable for precast concrete structure reinforced connection under the housing industrialization.

**Key words:** housing industrialization; precast concrete structure; assembly structure; reinforcement lapping; bond-slip behavior

“插入式预留孔灌浆钢筋搭接连接”是课题组研发的具有自主知识产权的预制装配整体式混凝土结构钢筋连接方法<sup>[1]</sup>, 该方法具有连接简便、质量易保障、成本低廉等优势<sup>[2-4]</sup>. 插入式预留孔灌浆钢筋搭接连接基本原理是: 搭接钢筋之间能够传力是由于钢筋与混凝土之间的粘结锚固<sup>[5-7]</sup>. 两根相向受力的钢筋分别锚固在搭接连

接区段的混凝土中而将力传递给混凝土, 从而实现钢筋之间应力的传递<sup>[8-9]</sup>. 钢筋的搭接长度是插入式预留孔灌浆钢筋连接的受力性能关键<sup>[10-12]</sup>.

### 1 试验概况

#### 1.1 插入式预留孔灌浆钢筋连接具体实施方式

如图1所示, 在预制混凝土构件预埋钢筋旁边的孔洞内, 插入被连接钢筋至设定搭接长度, 通过向孔洞内灌入灌浆料并经其凝结硬化后即可将

2 根钢筋连接成为一体. 在钢筋搭接长度范围内沿周边布置约束螺旋筋,用以加强钢筋的搭接连接性能.

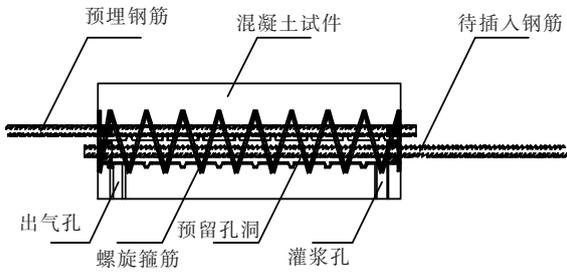


图 1 钢筋搭接示意

### 1.2 钢筋搭接试验试件设计

本次试验为住宅产业化下装配式施工模式的钢筋搭接,钢筋搭接接头面积百分率均为 100% ,

钢筋搭接长度  $l_l = 1.6 l_a$ ,  $l_a$  为规范要求的基本锚固长度. 考虑螺旋筋套箍作用的有利影响,搭接长度分别减少 20%、30%、40%,即搭接长度确定为  $0.8 l_l$ 、 $0.7 l_l$ 、 $0.6 l_l$ . 混凝土采用 C20、C30、C40, 钢筋为 HRB335,直径分别为 12、14、16 mm. 同时制备一些  $0.5 l_l$ 、 $0.4 l_l$ 、 $0.3 l_l$  的试件,以便确定搭接长度极限和可靠度分析.

钢筋搭接试验试件尺寸见图 2 和表 1. 试件截面为  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ ,长度为钢筋搭接左右各增加 20 mm 的非粘结段. 预埋钢筋的尺寸为混凝土内部的钢筋左右分别伸出 20 和 190 mm,后插钢筋的尺寸为混凝土内部的钢筋左右分别伸出 20 和 460 mm. 内部螺旋箍筋采用 4 钢筋,环内径 80 mm.

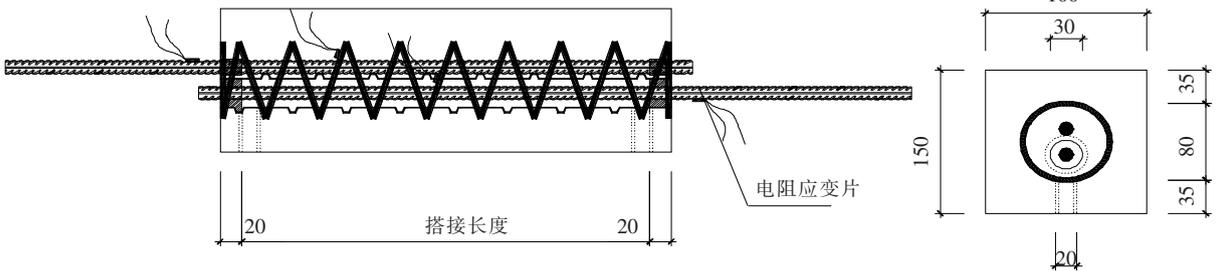


图 2 钢筋搭接试验试件尺寸 (mm)

表 1 钢筋搭接试验试件尺寸

纵筋直径/mm	混凝土强度	搭接长度/mm			螺旋箍筋	试件个数
		$0.8 l_l$	$0.7 l_l$	$0.6 l_l$		
12	C20	586	513	440	$\phi 4@40$	9
14		—	599	513		9
16		—	684	586		9
12	C30	451	395	338	$\phi 4@31$	9
14		526	461	395		9
16		602	526	451		9
12	C40	377	330	283	$\phi 4@26$	9
14		440	385	330		9
16		503	440	377		9

### 1.3 钢筋搭接试验试件制备

1) 将波纹管,预埋钢筋和螺旋筋放入特制钢模中,预埋钢筋的一端伸出钢模 20 mm,螺旋筋的 1/4 处应变片的位置靠近预埋筋伸出钢模较短的一侧,见图 3.



图 3 波纹管、预埋钢筋和螺旋筋放入钢模中

2) 浇筑混凝土,在混凝土初凝后抽出波纹管,形成预留孔,见图 4.

3) 插入后插钢筋,灌入灌浆料,养护 28 d,见图 5.

### 1.4 钢筋搭接试验方案

采用单向拉伸的方法进行钢筋搭接性能试验,用于加载的钢架为长度可调,加载设备采用 200 kN 穿心式液压千斤顶,见图 6. 就位后试件的加载端钢筋分别伸出加载钢架,其中一端采用夹片式锚具锚固于加载钢架底板,另一端穿过千斤顶并用夹片式锚具锚固. 试件的自由端钢筋架设千分表测量滑移量.



图 4 混凝土试件和孔洞



图 5 钢筋混凝土搭接试件完成

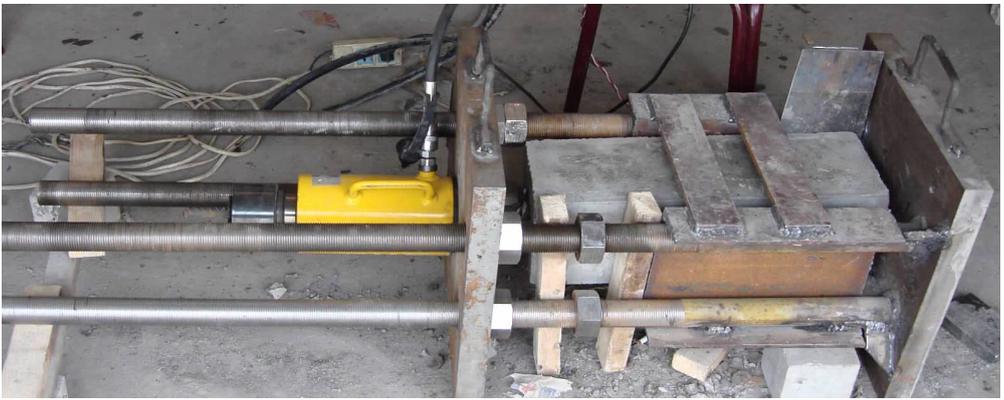


图 6 试验装置

拉伸试验加载为连续方式,直到钢筋屈服或破坏为止.露出试件外部的纵筋、及内部螺旋筋在试件长度  $1/4$  和  $1/2$  处贴有应变片,试验中记录了拉伸力、钢筋应变和钢筋自由端滑移.

搭接长度满足搭接要求.

## 2 钢筋搭接试验数据和处理

### 2.1 试验现象及结果

每组试件共 3 个,其中 1 个加载至钢筋拉断,2 个加载至钢筋屈服.试验时试件混凝土破坏现象有所不同,见图 7,当混凝土试件长度较长 ( $0.8 l_l$ ) 时,加载端和自由端的混凝土开裂较小;而长度中等 ( $0.7 l_l$ ) 时,开裂较大;当长度更短 ( $0.6 l_l$ ) 时,加载端和自由端混凝土压碎破坏.



(a)  $0.8 l_l$



(b)  $0.7 l_l$



(c)  $0.6 l_l$

图 7 搭接试件破坏图

将各个试件的试验结果汇总,见表 2. 在各个试验中,所有受拉钢筋均达到屈服或拉断,但钢筋均未被抽出,未发现钢筋混凝土粘结段出现粘结滑移.试验结果充分证明,试验设计的搭接形式和

表 2 钢筋搭接长度屈服强度值

砼强度	纵筋直径/mm	搭接长度/mm			屈服强度/MPa
		$0.8 l_l$	$0.7 l_l$	$0.6 l_l$	
C20	12	317.4	328.0	316.5	337.5
	14	—	300.8	309.3	345.7
	16	—	349.1	348.6	374.8
C30	12	314.8	318.3	331.6	337.5
	14	308.6	309.3	311.2	345.7
	16	347.6	331.7	348.6	374.8
C40	12	327.1	324.5	313.9	337.5
	14	302.1	293.0	309.3	345.7
	16	346.1	344.1	343.1	374.8

2.2 螺旋筋应力应变分析

图 8 为不同钢筋直径各试件内部螺旋筋应变. 试件 1/2 处应变增长较快,边界 1/4 处应变增

长较慢,原因为端部套箍作用强,约束较多,所以端部应变增长较慢. 但是总体应变值均很小,都在  $1 \times 10^{-4}$  以内.

在钢筋搭接拉拔试验中,螺旋筋主要作用是侧向约束混凝土开裂,而拉拔力在钢筋混凝土交界面形成的剪切力很大部分由混凝土内部粘结力消耗传递,所以螺旋筋受力较小,其应变值也就很小. 同时发现从 12、14、16 mm 的钢筋直径逐渐增加,其螺旋筋的应变值也逐渐变得不稳定,原因为随着钢筋直径的增加,屈服拉力也变大,同时钢筋表面积也逐渐增加,粘结应力分布也越来越不规则,导致混凝土对钢筋的握裹力不稳定,最终导致螺旋箍筋的应变变化不规则.

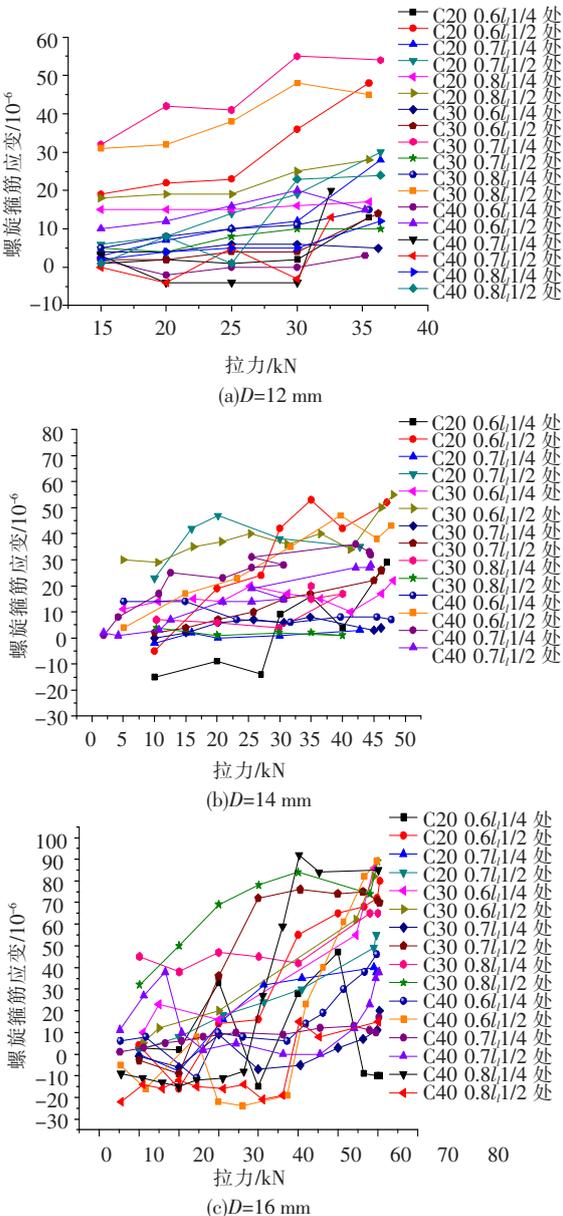


图 8 各个试件螺旋筋拉力-应变折线

3 钢筋极限搭接长度分析

3.1 极限搭接长度试验

为了深入研究极限钢筋搭接长度,试验进行了钢筋搭接长度继续减小到  $0.5 l_l$ 、 $0.4 l_l$ 、 $0.3 l_l$  的拉拔试验. 如表 3 所示,混凝土采用 C30,钢筋 HRB335,直径分别为 12、14、16 mm. 混凝土试件截面尺寸为  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ ,试件分别每组为 3 个、共 9 组,计 27 个试件.

纵筋直径	mm		
	$0.5 l_l$	$0.4 l_l$	$0.3 l_l$
12	282	226	169
14	329	263	197
16	376	301	226

3.2 极限搭接长度试验数据处理及结果

表 4 列出了钢筋搭接长度的试验数据,各个拉力值均为屈服拉应力,在试验中, $0.5 l_l$  的所有试件在钢筋屈服时未发现千分表有读数,即认为钢筋混凝土之间未发生粘结滑移. 而  $0.4 l_l$  和  $0.3 l_l$  的试件在钢筋未达到屈服时就已经有很大

的滑移量,即认为  $0.4 l_l$  和  $0.3 l_l$  搭接长度失败且不可取.可初步认定极限搭接长度为  $0.5 l_l$ .

表 4 钢筋搭接长度屈服强度及滑移

纵筋直径/mm	$0.5 l_l$		$0.4 l_l$		$0.3 l_l$	
	屈服强度/kN	有无滑移	屈服强度/kN	有无滑移	屈服强度/kN	有无滑移
12	299.7	无	308.6	有	287.4	有
	305.0	无	314.8	有	295.3	有
	313.0	无	305.0	有	302.4	有
14	308.6	无	304.7	有	311.2	有
	311.2	无	309.9	有	315.8	有
	315.8	无	314.5	有	309.9	有
16	346.6	无	339.6	有	344.6	有
	342.6	无	346.6	有	349.1	有
	354.1	无	354.5	有	345.6	有

建议搭接长度  $l_l = 1.25 \times 0.5 \times 1.6 l_a = l_a$ , 其中 1.25 为可靠度安全系数;  $l_a$  为规范要求的基本锚固长度. 由于螺旋筋的套箍作用, 搭接长度可以减短为基本锚固长度, 即插入式预留孔灌浆钢筋搭接长度计算公式为

$$l_l = l_a. \quad (1)$$

### 3.3 极限搭接长度机理分析

如图 9 所示, 将螺旋箍筋约束的搭接纵筋作为力学分析模型, 在纵筋受拉时产生沿钢筋表面的切向粘结应力  $\tau$ , 由于钢筋表面变形凸起而产生法向应力  $\sigma$ , 该法向应力  $\sigma$  是引起搭接范围内混凝土受拉开裂并导致纵筋搭接破坏的原因, 因此以混凝土达到抗拉强度为标志, 建立力的平衡方程为

$$2\sigma_s A_{sv} + f_{tk} (D_{cor} - 2d) S_v = 2\sigma d S_v. \quad (2)$$

式中:  $\sigma_s$  为混凝土即将开裂时约束螺旋箍筋应力值,  $\sigma_s = \alpha_E f_{tk}$ ;  $A_{sv}$  为约束螺旋加强箍筋截面面积,  $\text{mm}^2$ ;  $f_{tk}$  为混凝土抗拉强度标准值,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;  $D_{cor}$  为螺旋筋约束核心混凝土直径,  $\text{mm}$ ;  $d$  为纵筋直径,  $\text{mm}$ ;  $S_v$  为约束螺旋加强箍筋间距,  $\text{mm}$ ;  $\sigma$  为纵筋表面法向应力,  $\text{N}/\text{mm}^2$ .

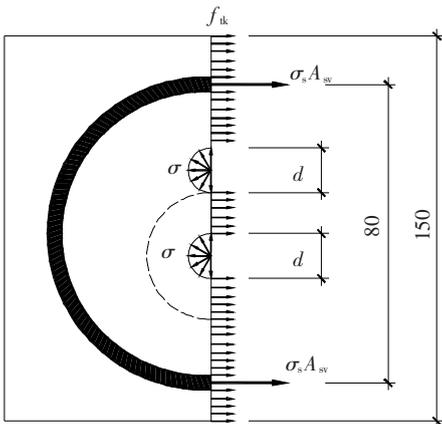


图 9 螺旋筋约束力学模型

如图 10 所示, 宏观上在钢筋搭接长度  $l_l$  范围内, 当纵筋受拉达到抗拉强度标准值  $f_{yk}$  时, 可建立力平衡方程为

$$f_{yk} A_s = \tau \pi d l_l. \quad (3)$$

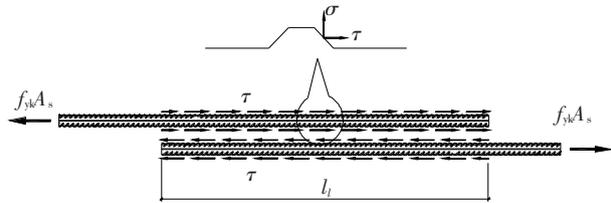


图 10 螺旋筋约束力学模型

另外假设, 纵筋表面的切向粘结应力  $\tau$  等于法向应力  $\sigma$ , 则有

$$\tau = \sigma \quad (4)$$

由式(3)和式(4)联立得法向应力为

$$\sigma = \frac{f_{yk} A_s}{\pi d l_l}. \quad (5)$$

式(5)代入式(2)有

$$2\sigma_s A_{sv} + f_{tk} (D_{cor} - 2d) S_v = 2 \frac{f_{yk} A_s}{\pi d l_l} d S_v. \quad (6)$$

经整理, 得纵筋搭接长度为

$$l_l = \frac{2 f_{yk} A_s S_v}{\pi [2\sigma_s A_{sv} + f_{tk} (D_{cor} - 2d) S_v]}. \quad (7)$$

式(7)的意义为, 建立起了纵筋搭接连接时, 搭接长度  $l_l$  与约束螺旋箍筋配筋量之间的关系.

由式(7)计算的本试验试件的理论搭接长度见表 5. 表中计算值较为接近式(1)的试验结论值, 且有一定的安全储备, 式(7)可作为螺旋箍筋约束情况下的纵筋搭接长度设计计算公式.

表 5 理论搭接长度计算

纵筋直径 $d/\text{mm}$	混凝土强度	螺旋箍筋	式(7)/mm	式(1)/mm	式(7)/式(1)
12	C20	$\phi 4@40$	257	397	1.54
14			365	463	1.27
16			501	529	1.06
12	C30	$\phi 4@31$	199	352	1.77
14			285	411	1.45
16			392	470	1.20
12	C40	$\phi 4@26$	169	295	1.75
14			241	344	1.43
16			333	393	1.18

## 4 结 语

根据不同钢筋直径、混凝土强度、不同搭接长度等因素完成了 108 个试件的搭接试验,对规范要求搭接长度进行折减 20% ~ 70% 设计并试验,得到了插入式预留孔灌浆钢筋搭接连接的破坏模式及各因素的影响规律,分析了螺旋箍筋约束情况下纵筋搭接连接机理,给出了考虑螺旋箍筋配筋量的纵筋搭接长度设计计算方法. 经理论分析和试验验证,在配置螺旋箍筋情况下,纵筋的搭接长度可以减短为基本锚固长度,即  $l_l = l_a$ .

本文仅在单根钢筋搭接并配置螺旋筋的情况下,进行了单向拉伸试验的探索性初步研究,下一步试验研究拟补充不设螺旋筋套箍的对比试验、及多种受力工况试验,并将这种钢筋连接方式应用到构件试验中,以检验多根钢筋搭接下的受力情况.

## 参考文献:

- [1] 张海顺. 预制混凝土结构插入式预留孔灌浆钢筋锚固搭接试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
- [2] PCa 技术研究会. プレキャストコンクリート技術マニュアル[M]. 东京:株式会社彰国社, 2000:38-47.
- [3] 渡辺邦夫, 中野清司. 知られざる PC 建築[M]. 东京:株式会社建筑技术, 2004:152-171.
- [4] 鯉田和夫. 最新建筑施工[M]. 东京:技报堂出版株式会社, 2008:82-83.
- [5] 徐有邻. 钢筋混凝土粘结锚固性能试验研究[D]. 北京:清华大学, 1990.
- [6] 王艺霖. 钢筋与混凝土粘结性能的若干问题研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2005.
- [7] PARK R, PAULY T. Reinforced concrete structures [M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1982:236-296.
- [8] 王国杰. 高强度自密实混凝土及其与钢筋粘结锚固性能的试验研究[D]. 福州:福州大学, 2002.
- [9] MAGNUSSON J. Bond and anchorage of ribbed bars in high-strength concrete [D]. Goteborg, Sweden: Division of Concrete Structures, Dept of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, 2000.
- [10] 宋玉普, 赵国藩. 钢筋与混凝土之间的粘结滑移性能研究[J]. 大连工学院学报, 1987, 26(2):93-100.
- [11] NAMMUR G, Jr, NAAMAN A E. Bond stress model for fiber reinforced concrete based on bond stress-slip relationship[J]. ACI Materials, 1989, 86(1):45-57.
- [12] LUTZ L A. Analysis of stresses in concrete near a reinforcing bar due to bond and transverse cracking[J]. ACI Journal, 1970, 67(10):778-787.

(编辑 赵丽莹)