

文章编号: 1673-9469 (2018) 04-0011-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.04.003

装配式剪力墙预留弯钩钢筋低周反复荷载下搭接长度研究

丁晓唐, 柯溯源, 陈 阳

(河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究装配式剪力墙竖向接缝处新型预留弯钩钢筋在地震作用下的搭接性能, 基于本课题组已有单调一次加载下的研究成果, 利用 ANSYS 软件采用分离式建模方法, 确定低周反复荷载下的粘结滑移本构关系和加载制度, 进行不同钢筋直径和混凝土等级下低周反复加载数值计算分析。结果表明, 与单调一次加载相比, 低周反复荷载下的预留弯钩钢筋搭接长度增加超过 30%。不同钢筋直径和混凝土等级下, 考虑抗震要求的预留弯钩钢筋的可靠搭接长度都接近 $0.9l_{abE}$ 。

关键词: 装配式剪力墙; 预留弯钩钢筋; 粘结退化; 搭接长度; 低周反复

中图分类号: TU375

文献标识码: A

Research on the overlapping length of reserved hook rebar under low cyclic loading

DING Xiaotang, KE Suyuan, CHEN Yang

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the lap joint performance of the new reserved hook rebar at the vertical seam of the prefabricated shear wall under the influence of earthquake, the ANSYS discrete model was set up based on the research results of monotonous one-time loading. Under the bond-slip constitutive relationship and loading regime, numerical calculations of low cyclic loading under different steel bar diameter and concrete grades were conducted. The results show that compared with monotonous one-time loading, the overlap hook length of reserved hooks under low cyclic load increases by 30%. Under different steel bar diameters and concrete grades, the reliable overlap length of the reserved hooks is close to $0.9l_{abE}$ considering seismic requirements.

Key words: prefabricated shear wall; reserved hook rebar; bond-slip; overlap length; low cyclic load

装配式剪力墙具有绿色环保、施工快等优势, 是目前我国大力推广的结构形式, 而接缝连接处是其受力性能的薄弱环节。现有研究主要关注水平接缝连接, 对于竖向接缝连接研究相对较少。余志武等^[1]提出了一种 U 型套箍连接, 但 U 型套箍连接在施工中不利于纵筋的穿插, 为便于纵筋施工安装, 《装配式混凝土结构连接节点构造》(15G310-2)^[2]给出了预留弯钩钢筋搭接方式, 预留弯钩钢筋也因此被广泛使用。图集同时也给出了预留弯钩钢筋的搭接长度, 但这种搭接长度参考规范, 凭借工程经

验得出, 缺乏系统的理论研究。因此本文沿用文献[3]分离式的建模方法, 确定低周反复荷载下的加载制度, 研究考虑地震影响时预留弯钩钢筋的可靠搭接长度取值, 并与图集 15G310-2 给出的搭接长度值进行比较, 从而为实际工程抗震设计提供参考。

1 预留弯钩钢筋墙元拉拔试验

预留弯钩钢筋墙元拉拔试验模型为 $200\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ 长方体试件, 钢筋按图 1 布置,

收稿日期: 2018-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51578215)

作者简介: 丁晓唐 (1961-), 女, 江苏南京人, 博士, 副教授, 研究方向为混凝土结构基本理论及近代计算方法等。

竖向钢筋强度等级 HRB400，直径 10 mm，箍筋和预留弯钩钢筋强度等级为 HRB400，直径 8 mm，搭接长度取 200 mm。加载装置见图 2。

在伸出墙元试件两端钢筋上，以 2 kN 为一级，分级重复加载的方式加载，观测开裂情况、拔出位移和钢筋应变。试件在重复加载时，当重复荷载达到 13 kN，钢筋周围出现裂缝。随着荷载增加，裂缝逐渐扩大。钢筋屈服时，裂缝沿钢筋向四周放射发展，并且向侧面发展趋势更明显，但是并未贯通，试件侧面无明显裂缝产生。钢筋屈服时，钢筋与混凝土试件接触端拔出位移为 0.200 mm。

2 预留弯钩钢筋墙元有限元模型及验证

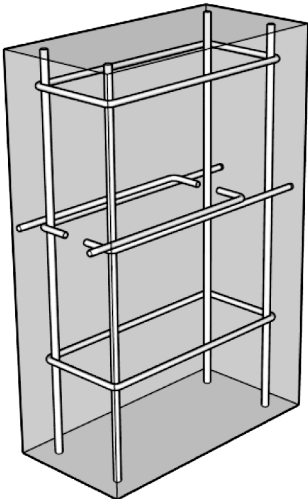


图 1 预留弯钩钢筋连接形式
Fig.1 Connection form of reserved hook rebar

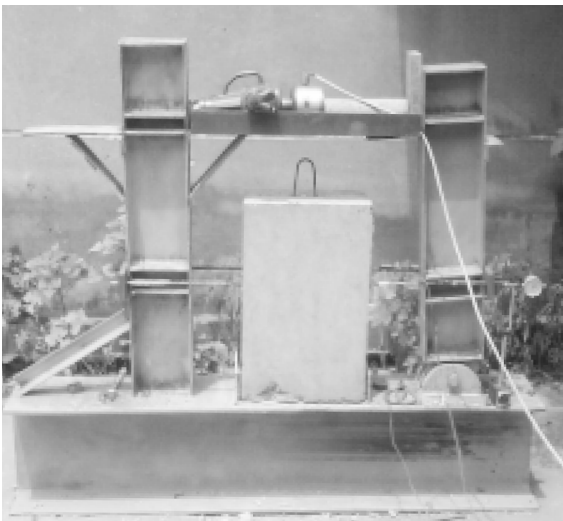


图 2 加载装置图
Fig.2 Loading device diagram

2.1 单元及本构关系选取

数值模拟选择大型有限元软件 ANSYS，建模方法采用分离式建模，利用弹簧单元 Combin39 模拟钢筋与混凝土间的粘结滑移(图 3)。国内外研究者^[4-7]通过各自相应的试验获得的低周反复荷载下的粘结滑移关系模型，参数较多，卸载再加载路径过于复杂，且不统一。故结合 ANSYS 已有技术条件采用弹簧单元 Combin39 中平行于原点处切线斜率的卸载再加载方式，单调包络线见图 4。数学表达式(第一象限，即受拉时)如下：

$$\tau = \begin{cases} \tau_u (s/s_u)^\alpha & 0 \leq s \leq s_u \\ \tau_u - (\tau_u - \tau_r)(s - s_u)/(s_r - s_u) & s_u < s \leq s_r \\ \tau_r & s > s_r \end{cases}$$

其中 $\tau_u=(1.6+0.7c/d)f_t$ ， $\tau_r=0.2\tau_u$ ； τ 粘结应力，N/mm²； τ_u 粘结应力峰值； τ_r 残余粘结应力值； s 相对滑移，mm； s_u 粘结应力峰值对应的滑移值，取为 0.032 mm； s_r 残余粘结应力值对应的滑移值，取为 0.1 mm； α 是系数，取为 0.4； c 锚筋外表面到混凝土构件边缘距离，mm； d 钢筋直径，mm； f_t 混凝土轴心抗拉强度，N/mm²。

混凝土单元采用实体单元 Solid65，模型采用多线性随动强化模型 (KINH)，服从 Mises 屈服准则，本构关系采用 Rüs ch 建议的数学模型：

上升段： $\epsilon \leq \epsilon_0, \sigma = f_c \left[2 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$

下降段： $\epsilon_0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{cu}, \sigma = f_c$

式中： f_c 为峰值应力 (N/mm²)； ϵ_0 为峰值应力时对应的应变，取 $\epsilon_0 = 0.002$ ； ϵ_{cu} 为极限压应变，取 $\epsilon_{cu} = 0.0038$ 。钢筋则视为理想的弹塑性材料，采用 Link8 杆单元和双线性等向强化模型 BISO，服从 Mises 屈服准则。本构关系为：

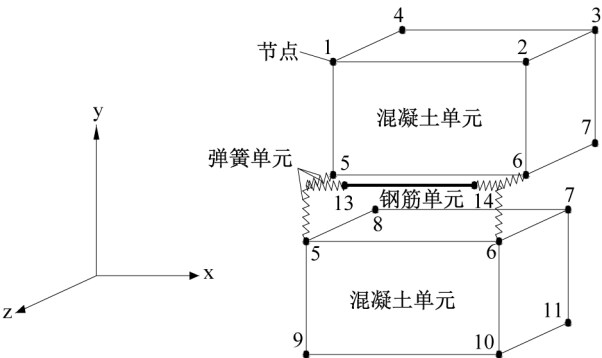


图 3 有限单元分离式模型图
Fig.3 Finite element model

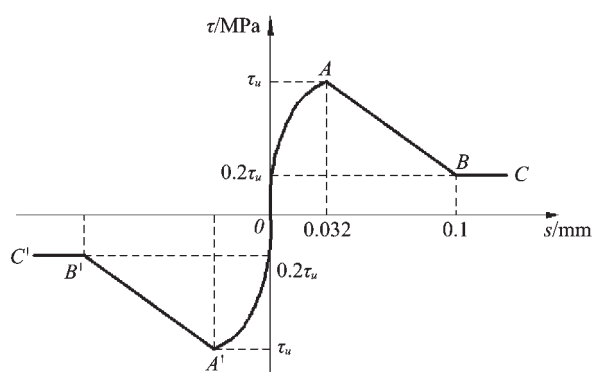


图4 弹簧单元粘结应力-滑移单调包络线

Fig.4 Bond stress-slip monotonic envelope of spring element

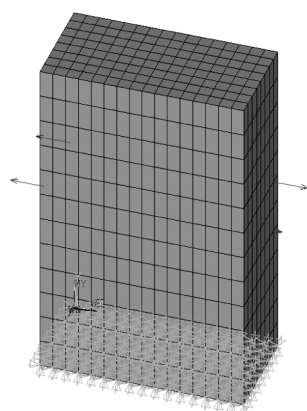
$$\sigma = \begin{cases} E_{\varepsilon} \varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon > \varepsilon_y \end{cases}$$

2.2 建模方法验证

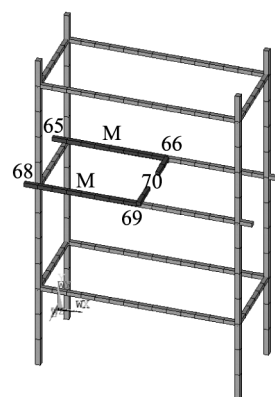
图5为预留弯钩钢筋墙元有限元模型与钢筋骨架图,水平筋节点与相邻混凝土节点添加弹簧单元以模拟粘结滑移,纵筋和箍筋不考虑粘结滑移。约束试件底部所有自由度,在试件两端水平筋同步施加与试验相同的分级荷载直至钢筋屈服荷载。ANSYS 计算结果表明,当荷载达到 13 kN 时,钢筋周围混凝土开始出现裂缝,其后裂缝随荷载增大而扩大。随着钢筋屈服,裂缝逐渐向四周放射发展,且以墙元加载面中轴线对称分布,此时两端拔出位移平均值为 0.204 mm。ANSYS 计算结果在裂缝发展规律和拔出位移上与试验结果相近,表明本文有限元分离式建模方法的可靠性。

3 预留弯钩钢筋搭接长度计算

3.1 搭接长度的计算原则



(a) 整体受力示意图



(b) 钢筋骨架示意图

图5 预留弯钩钢筋墙元有限元模型图

Fig.5 Finite element model of reserved hook rebar wall element

预留弯钩钢筋锚固破坏形态分为深埋破坏和浅埋破坏^[8]。浅埋破坏时表现为混凝土的拉裂破坏,但此时钢筋未能屈服,工程中禁止浅埋情况的出现。深埋破坏时,加载端钢筋达到屈服,粘结性能有一定程度的退化,但未完全丧失,混凝土也未发生拉裂破坏。文献[8]研究表明拉拔试验中,直钢筋段不够长,弯钩段承担的拔出力占比过大,直钢筋段承担的拔出力占比就小,结构很容易发生浅埋破坏。为保证深埋工况,偏于安全考虑,参考《混凝土结构设计规范》^[9],本文在进行预留弯钩钢筋搭接长度数值计算时,确定弯钩段承担的拔出力比例不超过 30%,此时的搭接长度为可靠搭接长度^[3]。

3.2 加载制度的选取

低周反复荷载试验方法采用的加载制度主要有位移控制加载、力控制加载、力-位移混合控制加载三种^[10],本次试验中荷载加至钢筋屈服即停止,对钢筋屈服后受力情况不做研究,故选用力控制加载。常见的力控制加载荷载由小渐大,根据幅值大小和循环次数的不同,可进一步划分。每次幅值循环次数越多,粘结退化现象越为明显,根据文献[11]研究,低周反复循环 3 次后,钢筋混凝土的粘结退化效应基本趋于稳定。故本文加载制度选择循环 3 次。

本文研究低周反复荷下钢筋的搭接性能,偏安全考虑,钢筋屈服即达到研究目的,因此最大荷载为钢筋屈服荷载值。力变幅加载制度选择从钢筋屈服荷载的 25% 开始逐级增加。同时遵循接近屈服荷载时减少级差加载的原则,并考虑 ANSYS 计算收敛性,将加载分为七级荷载,分别为钢筋屈服荷载

的 25%、45%、65%、80%、90%、95%、100%。如图 6 所示, 其中 F 表示屈服荷载值。

3.3 低周反复荷载下预留弯钩钢筋搭接长度

以图 6 所示加载制度, 进行常见的混凝土等级 (C30、C35、C40) 与钢筋直径 (8、10、12 mm) 组合时低周反复荷载下的搭接长度数值计算。由文献 [8] 结论可知, 搭接长度取 125 mm 时, 各试件均发生浅埋破坏。故搭接长度可从 150 mm 开始试算, 每 25 mm 为一等级增加, 计算弯钩段承担的拔出力占比最接近 30% 的搭接长度为可靠搭接长度, 混凝土等级为 C30 钢筋直径为 8 mm 搭接长度为 250 mm 的滞回曲线和骨架曲线见图 7 和图 8。

从滞回曲线来看, 随加载端荷载的增加, 曲线的斜率均减小; 随循环次数增加, 曲线的斜率减少程度加快; 表现出低周反复荷载下钢筋混凝土间粘结刚度的退化, 且粘结刚度退化越来越明显。相同的位移下, 随循环次数的增加, 所能承担的荷载减小, 存在粘结强度退化现象。

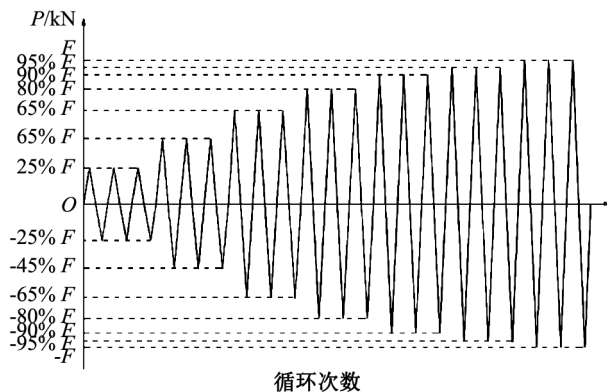


图 6 加载制度
Fig.6 Loading system

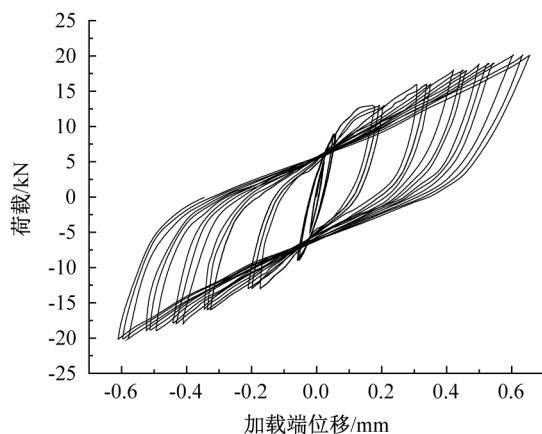


图 7 滞回曲线
Fig.7 Hysteretic curve

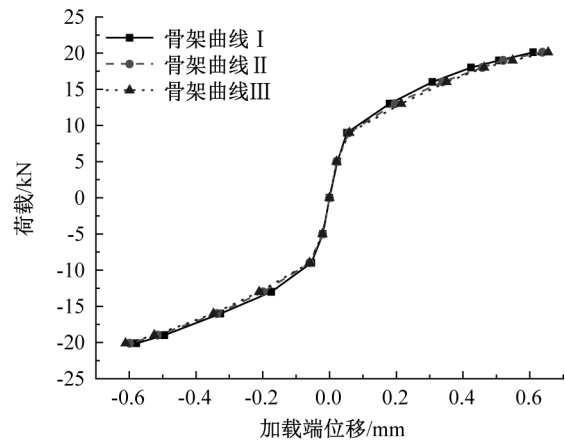


图 8 骨架曲线
Fig.8 Skeletal hysteretic curve

常见的混凝土等级 (C30、C35、C40) 与钢筋直径 (8、10、12 mm) 组合时低周反复荷载下的搭接长度数值计算值与图集 15G310-2 中考虑抗震要求的预留弯钩钢筋水平搭接长度值比较结果见表 1。

图集 15G310-2 中规定当采用弯钩角度是 90° 或 135° 的预留弯钩钢筋连接时, 考虑抗震要求, 预留弯钩钢筋可靠搭接长度为 l_{abE} , 而 $l_{aE} = \zeta_{aE} l_{ab}$, 其中 l_{abE} 是抗震锚固长度, l_{ab} 是受拉钢筋基本锚固长度, ζ_{aE} 是抗震锚固长度的修正系数。根据抗震设防要求, 抗震等级分别为一、二级时 ζ_{aE} 取 1.15, 抗震等级为三级时 ζ_{aE} 取 1.05, 抗震等级为四级时 ζ_{aE} 取 1.0。从表 1 可以看出, 不同钢筋直径和混凝土等级时低周反复荷载下的预留弯钩钢筋搭接长度计算结果略小于 $0.9l_{abE}$ 。同时通过本文试算结果可以发现, 低周反复荷载下的预留弯钩钢筋直钢筋锚固段已满足搭接要求, 其机械弯钩可作为安全储备。故建议工程设计和施工过程中, 在考虑一般抗震要求且处于剪力墙受力不大的部位处, 预留弯钩钢筋水平连接的搭接长度可取为 $0.9l_{abE}$, 不建议小于 $0.9l_{abE}$ 。

3.4 粘结退化引起的搭接长度变化

常见的混凝土等级 (C30、C35、C40) 与钢筋直径 (8、10、12 mm) 单调一次加载 [8] 和低周反复加载下的搭接长度数值计算结果对比见表 2。

相比于单调一次加载, 低周反复荷载下的搭接长度普遍高出了 30% 以上, 低周反复荷载引起的粘结退化效应十分明显。相同直径的钢筋, 因粘结退化而需增长的预留弯钩钢筋搭接长度相同, 都为 75 mm, 受混凝土强度影响很小。随着钢筋直径的增大, 钢筋与混凝土间的粘结退化越发明显, $l_b - l_a$

表 1 低周反复荷载下可靠搭接长度计算值与图集规定值对比
Tab.1 The comparison of calculated value and specified value of overlapping length for reserved hook rebar

钢筋直径		混凝土强度等级								
		C30			C35			C40		
8 mm	图集 /mm	$1.15l_a$	$1.05l_a$	$1.0l_a$	$1.15l_a$	$1.05l_a$	$1.0l_a$	$1.15l_a$	$1.05l_a$	$1.0l_a$
	l_{aE}	322	294	280	295	269	256	267	244	232
	本文 /mm	250			225			225		
10 mm	图集 /mm	$1.15l_a$	$1.05l_a$	$1.0l_a$	$1.15l_a$	$1.05l_a$	$1.0l_a$	$1.15l_a$	$1.05l_a$	$1.0l_a$
	l_{aE}	403	368	350	368	336	320	334	305	290
	本文 /mm	300			275			250		
12 mm	图集 /mm	$1.15l_a$	$1.05l_a$	$1.0l_a$	$1.15l_a$	$1.05l_a$	$1.0l_a$	$1.15l_a$	$1.05l_a$	$1.0l_a$
	l_{aE}	483	441	420	442	403	384	400	366	348
	本文 /mm	375			350			325		

表 2 单调一次加载和低周反复加载下的搭接长度数值计算结果对比
Tab.2 The comparison of lap length between monotone loading and low cyclic loading(mm)

混凝土强度等级	C30		C35		C40	
钢筋直径 /mm	l_a	l_b	l_a	l_b	l_a	l_b
8	175	250	150	225	150	225
10	225	300	200	275	175	250
12	250	375	225	325	200	325

注： l_a 和 l_b 分别表示单调一次和低周反复加载下的搭接长度。

明显增大。

4 结论

1) 通过计算常见混凝土等级和钢筋直径组合下的预留弯钩钢筋搭接长度可知，低周反复荷载下的搭接长度要高出单调一次加载下的搭接长度超过30%，粘结刚度退化和强度退化十分明显。

2) 通过与 15G310-2 图集中要求的预留弯钩钢筋抗震搭接长度对比，发现不同钢筋直径和混凝土等级组合下安全的搭接长度为 $0.9l_{abE}$ 。设计受力较小的剪力墙水平连接部位时，预留弯钩钢筋的搭接长度值可适当减少，但不得少于 $0.9l_{abE}$ 。

参考文献：

[1] 余志武, 彭晓丹, 国巍, 等. 装配式剪力墙结构新型连接节点的构造与抗震性能研究 [J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2015, 47(2): 160-164.
[2] 15G310-2, 装配式混凝土结构连接节点构造 [S].
[3] 丁晓唐, 陈阳, 彭继莹. 装配式剪力墙新型预留弯钩钢筋搭接长度分析 [J]. 水电能源科学, 2018, 36(1): 112-115.

[4] MORITA S, KAKU T. Local bond stress-slip relationship under repeated loading[C]. Lisbon: International Association for Bridge and Structural Engineers, 1973: 221-227.
[5] TASSIONS T P. Properties of bond between concrete and steel under load cycles idealizing seismic actions[J]. Comite Euro-International du Beton, 1979, 131: 1161-1174.
[6] ELIGEHAUSEN R, POPOV E P, RENTERO V V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations[R]. EERC Report 83/23. Berkeley: University of California, 1983.
[7] 滕智明, 邹离湘. 反复荷载下钢筋混凝土构件的非线性有限元分析 [J]. 土木工程学报, 1996(2): 19-26.
[8] 彭继莹. 装配式剪力墙竖向接缝水平连接性能数值分析 [D]. 南京: 河海大学, 2017.
[9] GB50010-2010, 混凝土结构设计规范 [S].
[10] 王墩, 赵海琼, 吕西林. 建筑结构拟静力试验方法的加载制度研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(3): 54-59.
[11] 傅恒菁. 低周反复荷载作用下月牙钢筋粘结性能试验研究 [J]. 西安冶金建筑学院学报, 1986, 45(1): 9-19.
(责任编辑 王利君)