

# 装配式混凝土剪力墙上下层钢筋间接搭接单向拉伸试验及有限元模拟

周 剑<sup>a</sup>, 赵作周<sup>a</sup>, 侯建群<sup>b</sup>, 任宝双<sup>b</sup>

( 清华大学 a. 土木工程安全与耐久教育部重点实验室; b. 建筑设计研究院有限公司, 北京 100084)

摘 要: 进行了 6 个间接搭接试件的单向拉伸试验, 结果表明所选取的搭接长度能够满足承载力要求, 但搭接长度为 1.0 倍和 1.2 倍设计锚固长度的两个试件在连接筋屈服前就发生自由端滑移。根据应变分布变化及对比结果, 建议设计搭接长度取为设计锚固长度的 1.5 倍。采用 ABAQUS 中 Spring 2 非线性弹簧单元对锚固拉拔试验和本试验进行了有限元模拟, 结果表明采用 Spring 2 单元可以准确模拟锚固拉拔试验, 对于连接筋连接试验, 计算所得加载曲线和自由端滑移规律与试验相符, 但连接筋应力分布有较大差别。

关键词: 单向拉伸; 装配式; 剪力墙; 连接筋; 间接搭接

中图分类号: TU528.01 文献标志码: A 文章编号: 1002-3550(2015)11-0012-05

Uniaxial tension test and finite element simulation of indirect lap splice between the upper and lower floors of fabricated concrete shear walls

ZHOU Jian<sup>a</sup>, ZHAO Zuozhou<sup>a</sup>, HOU Jianqun<sup>b</sup>, REN Baoshuang<sup>b</sup>

( a. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry;

b. Architectural Design and Research Institute of Tsinghua University Co., Ltd., Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Uniaxial tension tests of six specimens with indirect lap splice have been completed. It has been concluded that the used splice length is enough to meet the demand of tension capacity, but the slippages of free ends were observed for the two specimens with splice length of 1.0 and 1.2 times design anchorage length before the yielding of splice rebar. A splice length which is equal to 1.5 times the design anchorage length of splice rebar is suggested according to strain distribution and its variation. Finite element simulation of anchorage pull-out test done by others and the tests in this paper has been conducted by using the Spring 2 element of ABAQUS software. The simulation results of pull-out test are accurate, the calculated loading curve and the law of free end slippage are in accord with the test results, but there are some differences between simulation and test for the stress distribution of splice rebar.

Key words: uniaxial tension; fabricated; shear wall; splice rebar; indirect lap splice

## 0 引言

对于现浇混凝土剪力墙结构, 上下层钢筋通常采用绑扎搭接的形式实现连接, 但对于装配式混凝土剪力墙结构而言, 比如叠合板式混凝土剪力墙<sup>[1]</sup>, 预制圆孔板剪力墙<sup>[2]</sup>, 装配整体式双向孔空心模板剪力墙<sup>[3]</sup>等, 在吊装上层预制墙板时, 下层预留的竖向连接钢筋通过插入上层预制墙板内的预留空腔或竖向孔内, 通过向空腔或孔内灌浆或浇筑混凝土连成整体, 下层连接筋与上层竖向钢筋之间存在一定间距, 形成一种“间接搭接”形式( 又称非接触搭接) ( 如图 1 ( a) 所示), 这与现浇混凝土结构中的接触绑扎搭接不同。对于采用套筒灌浆或浆锚搭接的预制剪力墙, 当竖向分布钢筋采用附加单排连接筋连接时<sup>[4]</sup> ( 如图 1 ( b) 所示), 连接筋与预制墙体内竖向分布筋之间也属于间接搭接。

针对间接搭接, ACI 318 - 11<sup>[5]</sup> 规定, 在受弯构件中, 钢筋横向间距不应大于 0.2 倍搭接长度和 6 英寸 ( 152 mm) 二者的较小值, 我国建筑标准设计图集 11G101 - 1<sup>[6]</sup> 采用同样的要求。

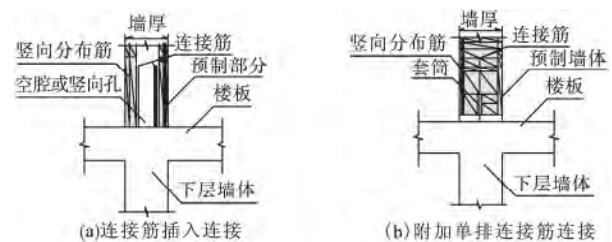


图 1 装配式混凝土剪力墙上下层连接筋连接

Sagan 等<sup>[7]</sup> 基于钢筋非接触搭接的拉伸试验, 建议单调荷载下当搭接钢筋间距小于 12 倍钢筋直径和 305 mm 及往复荷载下小于 8 倍钢筋直径和 203 mm 时, 可忽略间

收稿日期: 2015-02-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划( 863 计划) 课题( 2013AA041307)

• 12 •

距影响,将非接触搭接按照接触搭接进行设计,当间距超出此范围时建议采用拉压杆模型进行设计。Hamad 等<sup>[8]</sup>研究发现,在相同的搭接长度下,搭接钢筋的间距约为 0.3 倍搭接长度时黏结强度最大,建议 ACI 规范中将搭接钢筋间距 0.2 倍搭接长度的限制修改为 0.3 倍搭接长度。McLean<sup>[9]</sup>等建议非接触搭接时要设置横向钢筋,当搭接长度取标准搭接长度加钢筋间距时,非接触搭接性能良好。Kilpatrick 等<sup>[10]</sup>对比了接触搭接和非接触搭接的性能,表明在搭接长度相同且钢筋净距较小时,非接触搭接和接触搭接无明显差异,当钢筋净距较大时非接触搭接时试件承载力降低。

宋绪传<sup>[11]</sup>对钢筋净距为 25 mm 的非接触搭接钢筋混凝土梁的试验研究表明,与钢筋接触搭接相比,非接触搭接时钢筋应力扩散较快,极限承载力有所提高,但刚度性能不如接触搭接。

事实上,钢筋间接搭接在现浇结构中也存在,比如变截面构件的纵筋搭接。在装配式剪力墙结构的上下层连接中,这种连接形式应用更广泛。间接搭接不同于绑扎搭接,搭接钢筋之间均在间距,搭接钢筋直径或数量不一定对等。针对这种搭接形式,我国规范并未给出明确的设计搭接长度及间距、横向钢筋等构造要求,是否可以将其按照普通绑扎搭接或搭接钢筋的各自锚固问题进行设计,都有待研究。

本研究以装配整体式双向孔空心模板剪力墙的上下层连接为原型,进行了 6 个试件的单向拉伸试验与有限元数值模拟,旨在从连接筋的角度出发,通过分析不同间接搭接长度下连接筋的受力、应变分布及变化规律等,验证所选用的搭接长度是否可靠,建议合理的设计搭接长度。

## 1 试验设计及结果分析

### 1.1 试验设计

试件参数见表 1,钢筋强度实测结果见表 2。混凝土立方体抗压强度实测值为 47.2 MPa。表 1 中  $l_a$  为连接筋设计锚固长度,按  $0.14f_y/f_t \cdot d$  计算,  $f_y$  取 360 MPa,  $f_t$  按 C45 考虑,取 1.8 MPa,  $d$  为连接筋直径,计算时考虑保护层厚度的有利修正和不少于 200 mm 的设计要求。设计时保证被连接筋不会发生劈裂和拔出破坏现象。连接筋包括 1C12 和 2C8 两种形式,被连接筋为 4C8,对应预制墙体中的竖向分布筋,试件设计图如图 2 所示。图 3 所示为加载装置。采用位移计量测连接筋加载端和自由端相对端部混凝土的位移,位移量测方法如图 4 所示,加载端量测值包括钢筋相对混凝土的滑移量和长度  $l$  范围内钢筋伸长量

表 1 试件参数

试件编号	连接筋形式	搭接长度/mm
DL1	1C12	240(1.0 $l_a$ )
DL2	1C12	300(1.3 $l_a$ )
DL3	1C12	360(1.5 $l_a$ )
DL4	2C8	240(1.2 $l_a$ )
DL5	2C8	300(1.5 $l_a$ )
DL6	2C8	360(1.8 $l_a$ )

表 2 材料强度实测值

钢筋规格	$f_y$ /MPa	$f_u$ /MPa
C8	497.6	697.4
C12	445.5	602.8

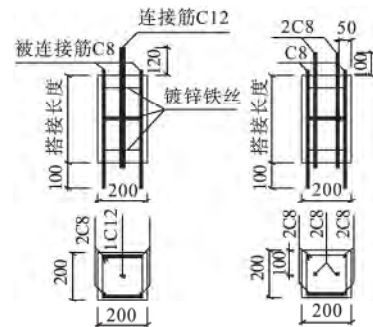


图 2 试件设计图(单位: mm)

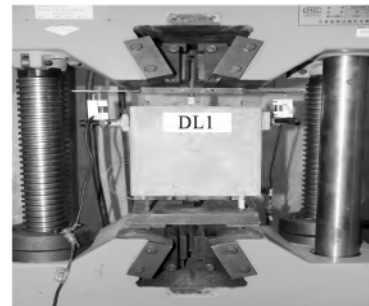


图 3 加载装置(单位: mm)

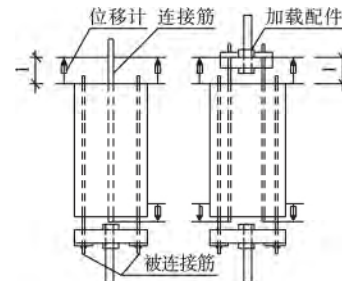


图 4 位移量测方法示意图(单位: mm)

两部分,试件 DL1~DL6 加载时  $l$  分别为 45、38、40、73、83、83 mm。自由端量测值为自由端钢筋滑移。在连接筋和处于对角位置的 2 根被连接筋上布置应变片以量测钢筋应力分布及变化,应变测点布置如图 5 所示。

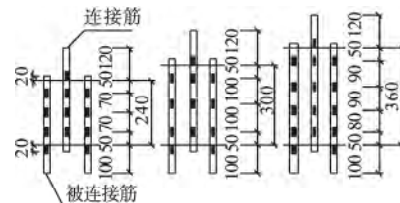


图 5 应变测点布置图(单位: mm)

### 1.2 结果分析

#### 1.2.1 破坏形态

所有试件均以拉力达到极限受拉承载力,连接筋达到极限强度后开始颈缩即将拉断为破坏标志。加载开始直至连接筋受拉屈服,连接筋的加载端位移很小,连接筋屈服后,受流幅影响,加载端位移迅速增长,进入强化段后位移仍保持较快增长,加载端靠近混凝土表面处,连接筋周围

混凝土被连同拔起,最终形成锥形破坏(如图6所示),各试件破坏时照片如图7所示。受加载装置的限制,DL4、DL5、DL6的两根连接筋受力不均匀,导致二者屈服时间及最终滑移量不一致,试件屈服及破坏的判断以首先屈服的连接筋为准。



图6 连接筋根部锥形破坏

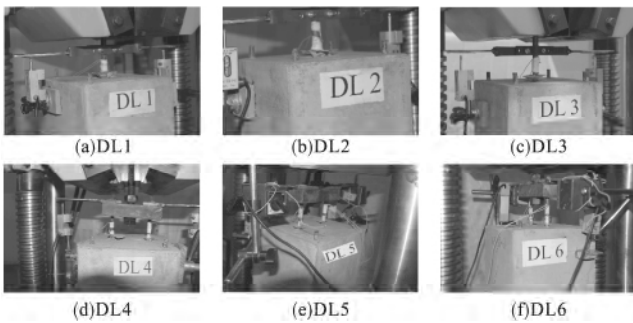


图7 试件破坏时照片

### 1.2.2 承载力

各试件连接筋达到屈服和极限时加载端所受拉力  $F_y$  和  $F_u$  汇总见表3。所有试件均满足当连接筋屈服直至颈缩而没有被拔出的标准,从承载力的角度来看,三种搭接长度均满足要求。

表3 连接筋加载端拉力

试件编号	$F_y$ /kN	$F_u$ /kN
DL1	48.21	64.05
DL2	48.57	67.22
DL3	48.58	66.89
DL4	46.74	63.28
DL5	40.08	65.04
DL6	36.93	65.42

### 1.2.3 位移

由位移计量测结果可知,DL1、DL2、DL3 连接筋屈服前加载端位移较小(屈服时分别为 0.64、0.63、0.88 mm),屈服后位移迅速增大,强化后仍保持较快增长。DL4、DL5、DL6 由于两根连接筋受力不均匀,表现为其中一根连接筋首先屈服,到达强化段及颈缩时,两根连接筋受力趋于一致。DL1 和 DL4 加载端位移随拉力的变化曲线如图8所示,其余试件变化曲线与其大致相同。

试件连接筋自由端滑移随拉力的变化曲线如图9所示。由于搭接长度不同,各试件连接筋自由端滑移出现的阶段及大小有较大差别。DL1 在屈服前就出现滑移,屈服时为 0.06 mm,屈服后滑移继续增大,最终达到 1.05 mm;

DL2 屈服前未发生滑移,屈服后出现滑移,最终达到 0.29 mm; DL3 直到拉力达到钢筋极限受拉承载力时才出现滑移,最终大小为 0.04 mm; DL4 连接筋屈服前,自由端发生滑移,屈服时大小为 0.09 mm,屈服后滑移不断增长,最终达到 0.48 mm; DL5 仪表发生故障; DL6 连接筋直至破坏时才发生滑移,最终大小为 0.04 mm。

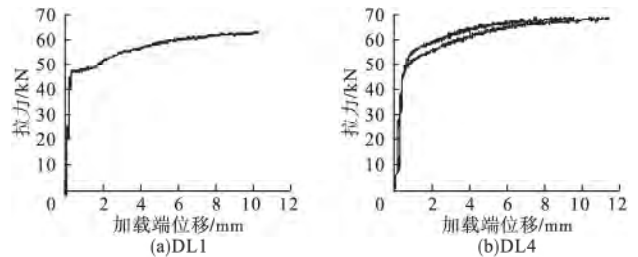


图8 连接筋加载端拉力-位移曲线

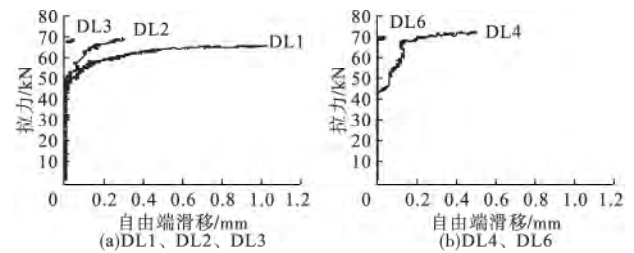


图9 连接筋自由端滑移曲线

钢筋相对混凝土的滑移作为钢筋锚固和搭接的重要变形指标,滑移发生的阶段及大小直接影响钢筋的锚固和搭接性能,进而影响构件和结构的力学性能。从连接筋本身来看,其与混凝土之间的黏结锚固作用由胶结力、摩阻力和咬合力构成,加载开始后其必先经过微滑移阶段和滑移阶段<sup>[12]</sup>。加载开始后,加载端即会发生微小滑移,此时自由端未发生滑移,随着胶结力由加载端向自由端逐渐丧失,钢筋应力和黏结应力逐渐向内渗透,若持续渗透至自由端,则自由端开始发生滑移。如果搭接长度大于临界搭接长度(钢筋屈服而恰好发生搭接破坏的最短长度<sup>[13]</sup>)但富裕不多,那么钢筋屈服或达到极限强度时则可能存在自由端滑移。我国现有锚固和搭接长度定义中没有规定钢筋滑移的限值,这里考虑此种搭接为间接搭接,且用于装配式混凝土剪力墙结构,因此提高搭接可靠的标准,要求搭接钢筋受拉可以屈服直至达到极限强度,且钢筋屈服前自由端不发生滑移,极限时自由端滑移不大于  $0.04d$  ( $d$  为钢筋直径,此值为文献[14]统计回归得到的黏结锚固极限强度对应的滑移值。若按照此标准,DL1 和 DL4 由于在连接筋屈服前自由端发生滑移且极限时自由端滑移值大于规定值,因而不满足间接搭接要求。

### 1.2.4 应变分布

搭接长度最短的 DL1 和 DL4 当连接筋屈服时各钢筋应变分布如图10所示。测点位置指测点距连接筋加载端的距离。由连接筋及被连接筋的应变分布可知,通过钢筋周围的混凝土,二者可实现应力传递且没有发生劈裂和拔出破坏,可见间接搭接有效可行。

在不同拉力水平下,DL1、DL2、DL3 连接筋应变分布随拉力变化如图11所示。通过应变分布的变化可以看出

连接筋沿搭接长度的应力渗透过程, DL1 在 15 kN 时应力渗透完全, 自由端发生滑移, DL2 直到屈服时才渗透完全, 而 DL3 屈服时仍未渗透完全, 这与前面滑移分析结论一致。DL4、DL5、DL6 的连接筋应变分布具有同样特点。

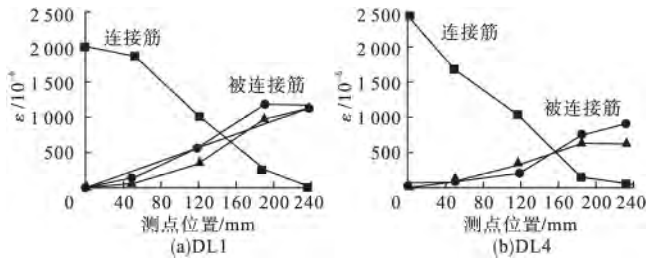


图 10 连接筋屈服时各钢筋应变分布

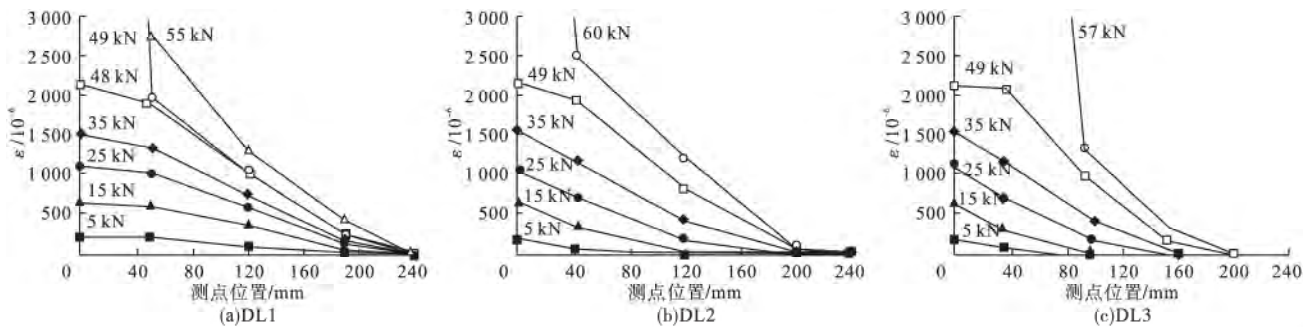


图 11 连接筋应变分布

连接筋屈服时应变分布对比如图 12 所示。对于 DL1、DL2、DL3 所采用的 1C12, 有效搭接长度  $l_{1,eff}$  取 300 mm, 对于 DL4、DL5、DL6 所采用的 2C8  $l_{1,eff}$  取 250 mm。 $l_{1,eff}$  与连接筋设计锚固长度  $l_a$  的对比见表 4。由表 4 可知  $l_{1,eff}$  约为  $l_a$  的 1.25 倍, 考虑到钢筋屈服后强化及搭接的可靠度, 对  $l_{1,eff}$  乘以安全系数 1.2, 建议设计搭接长度  $l_1$  取为  $1.5l_a$ 。

表 4 搭接长度分析

连接筋形式	$l_{1,eff}/mm$	$l_a/mm$	$l_{1,eff}/l_a$	$l_1/mm$
1C12	300	235	1.28	350
2C8	250	200	1.25	375

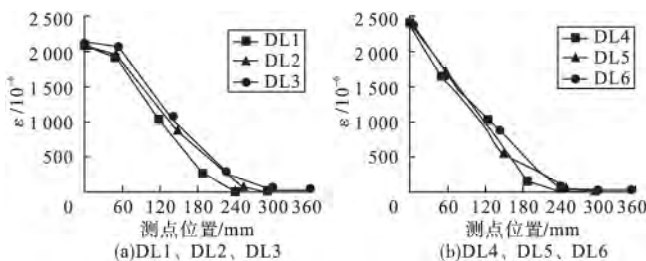


图 12 连接筋屈服时应力分布对比

## 2 有限元模拟

### 2.1 锚固拉拔试验验证

采用 ABAQUS 对文献 [12] 中的 I-1 试件的加载过程和钢筋应力分布进行有限元模拟, 混凝土采用连续体实体单元 C3D8R, 钢筋采用空间桁架单元 T3D2, 钢筋与混凝土之间黏结采用 Spring2 非线性弹簧单元 [15] 考虑, 混凝土本构及黏结滑移本构采用原文中建议的形式 (如图 13 所示) 其中  $\tau$  代表黏结应力,  $s$  代表滑移,  $f_c$  为混凝土轴心

### 1.2.5 搭接长度分析

与临界锚固长度类似, 临界搭接长度的准确确定方法为探索法, 即从较短的搭接长度开始, 如果在钢筋屈服前发生搭接破坏, 则增加搭接长度, 直至满足屈服和搭接破坏同时发生, 此时相应的搭接长度即为临界搭接长度。这种方法准确合理, 但需要做大量的试验。这里采用一种粗略但保守的方法确定合理的搭接长度, 即采用较长的搭接长度进行试验, 然后分析钢筋加载端屈服时沿搭接长度的应变分布, 将试验搭接长度扣除钢筋无滑移段后剩余的长度作为有效搭接长度。实际上采用此有效搭接长度时保证了钢筋受拉屈服前自由端不发生滑移, 此搭接长度即为钢筋受拉屈服时自由端不发生滑移的最小搭接长度。

抗拉强度  $\rho$  为钢筋的混凝土保护层厚度,  $d$  为钢筋直径,  $\rho_{sv}$  为配箍率。钢筋采用二折线弹性-强化本构, 不考虑位置函数对黏结滑移本构的影响。有限元计算结果如图 14 所示, 可见采用非线性弹簧单元能够比较准确地模拟钢筋与混凝土之间的黏结滑移性能。

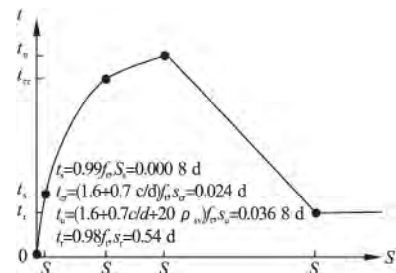


图 13 文献 [12]  $\tau-s$  本构

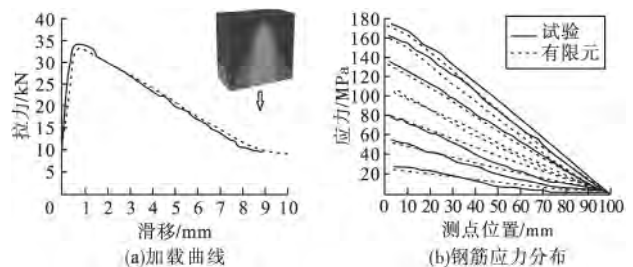


图 14 文献 [12] I-1 试件有限元模拟结果

### 2.2 间接搭接试验模拟

对本研究 DL1、DL2、DL3 按照 2.1 中的有限元模拟方法进行模拟, 加载端拉力-位移曲线、连接筋应力分布、自由端滑移计算结果如图 15~17 所示。

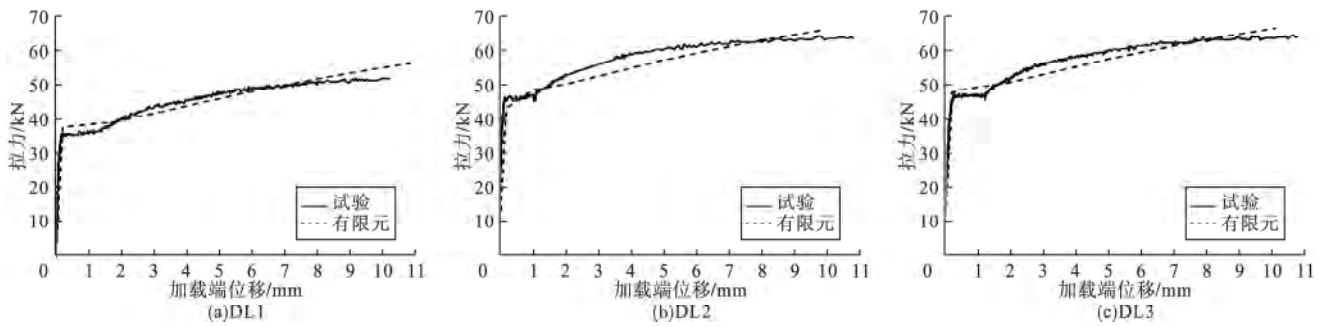


图 15 加载曲线

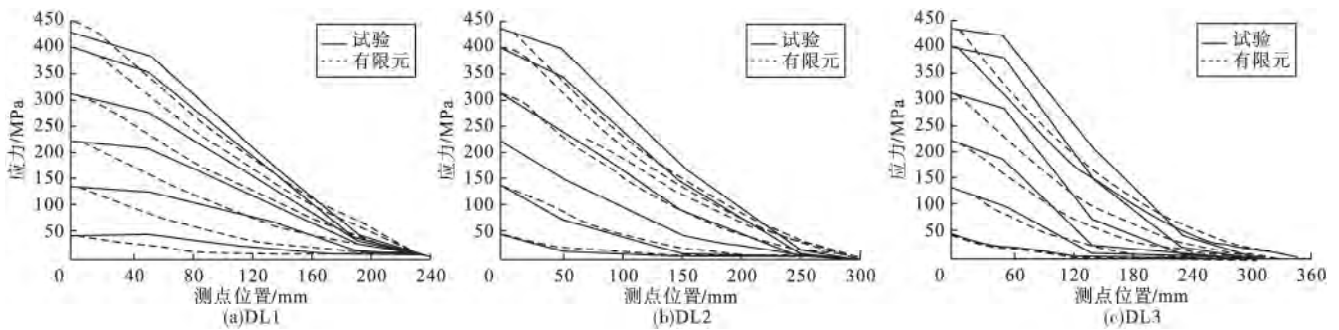


图 16 连接筋应力分布

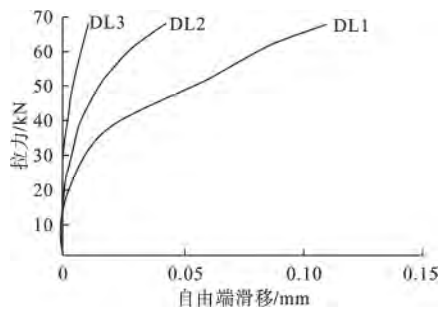


图 17 自由端滑移

由有限元模拟结果可知,采用 ABAQUS 中的 Spring2 单元对本试验进行模拟,所得加载曲线与试验结果吻合较好,自由端滑移随搭接长度的增加呈现滑移推迟出现和滑移值减小的规律与试验结果相符,但由于有限元计算中未能考虑黏结滑移关系沿搭接长度的变化及不能准确模拟钢筋周围混凝土的应力应变状态,因而连接筋的应力分布模拟结果与试验存在一定差异。

### 3 结论

(1) 现有锚固及搭接长度定义中没有规定钢筋滑移限值,考虑到本研究对象为间接搭接,规定搭接可靠的标准为钢筋能够受拉屈服直至达到极限强度,且屈服前自由端不发生滑移,极限时自由端滑移不超过 0.04 倍的钢筋直径,按照此标准判定搭接长度取  $1.0l_a$  和  $1.2l_a$  时不满足间接搭接要求。

(2) 根据不同搭接长度时连接钢筋的应变分布,针对文中的搭接形式,建议设计搭接长度取 1.5 倍的设计锚固长度。

(3) 采用 ABAQUS 中的 Spring2 单元可准确模拟锚固拉拔试验中钢筋与混凝土的黏结滑移,对本研究所进行

的间接搭接试验,有限元计算得到的加载曲线和自由端滑移规律与试验相符,但应力分布与试验结果存在一定差异。

研究仅从考察连接筋受力性能的角度出发,检验了所选取的搭接长度,建议了设计搭接长度,试验中被连接筋未屈服,连接筋与被连接筋均屈服时的搭接性能有待进一步试验。

#### 参考文献:

- [1] 连星,叶献国,王德才,等.叠合板式剪力墙的抗震性能试验分析[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2009,32(8):1219-1223.
- [2] 钱稼茹,张微敬,赵丰东,等.双片预制圆孔板剪力墙抗震性能试验[J].建筑结构,2010(6):71-75.
- [3] 初明进,刘继良,崔会趁,等.装配整体式双向孔空心模板剪力墙受剪性能试验研究[J].工程力学,2013,30(7):219-229.
- [4] 张微敬,钱稼茹,陈康,等.竖向分布钢筋单排连接的预制剪力墙抗震性能试验[J].建筑结构,2011,41(2):12-16.
- [5] ACI 318-11, Building code requirements for structural concrete and commentary [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2011.
- [6] 中国建筑标准设计研究院.混凝土结构施工图平面整体表示方法制图规则和构造详图(现浇混凝土框架、剪力墙、梁、板) 11G101-1 [M].北京:中国计划出版社,2011.
- [7] SAGAN V E, GERGELY P, WHITE R N. Behavior and design of non-contact lap splices subjected to repeated inelastic tensile loading [J]. ACI Structural Journal, 1991, 88(4): 420-431.
- [8] HAMAD B S, MANSOUR M Y. Bond strength of noncontact tension lap splices [J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(3): 316-326.
- [9] MCLEAN D I, SMITH A L. Noncontact lap splices in bridge column-shaft connections [R]. Report of Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, 1997.

• 下转第 20 页

快速增加 极大的增强腐蚀介质向混凝土内部传输速率。这种恶性循环作用使得混凝土损伤速率明显增加。因此,荷载作用促进了受拉区混凝土损伤,且荷载越大,作用越明显。

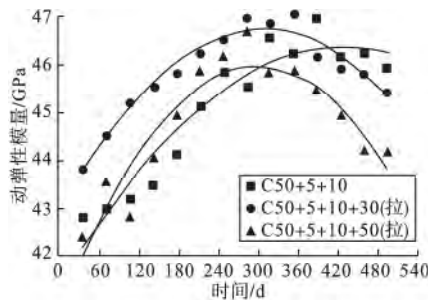


图8 C50 混凝土在  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{NaCl}$  溶液 + 荷载作用下 动弹性模量(受拉区)

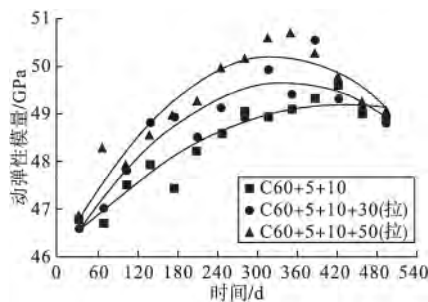


图9 C60 混凝土在  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{NaCl}$  溶液 + 荷载作用下 动弹性模量(受拉区)

#### 4 结论

(1) 硫酸盐侵蚀作用下,混凝土动弹性模量呈先增大后减小的趋势。初期,硫酸盐作用密实了混凝土,后期对混凝土造成损伤且硫酸盐浓度越高,损伤速率越大。

(2) 硫酸盐和氯盐作用下,混凝土动弹性模量呈先增大后减小的趋势。氯盐的存在延缓了混凝土损伤进程,且氯盐浓度越大,延缓混凝土损伤作用越明显。

(3) 荷载作用延缓了混凝土损伤进程,但作用不明显;相同的腐蚀介质及荷载作用下,受拉区混凝土动弹性模量呈先增大后减小的趋势。荷载增大了受拉区混凝土损伤速率,且荷载越大损伤速率增加越明显。

[10] KILPATRICK A E, GILBERT R I A preliminary investigation of the strength and ductility of lapped splices of reinforcing bars in tension [C]//22nd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM 2012), Leiden, Netherlands: Taylor and Francis - Balkema, 2013, 305 - 311.

[11] 宋绪传. 钢筋混凝土梁钢筋非接触搭接性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.

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

[13] 徐有邻, 汪洪, 沈文都. 钢筋搭接传力性能的试验研究[J]. 建筑

参考文献:

- [1] 马惠珠, 李宗奇. 混凝土外部硫酸盐侵蚀破坏的研究[J]. 工业建筑, 2007, 37: 1017 - 1019.
- [2] EDITORIAL G. Thaumassite formation and other forms of sulfate attack [J]. Cement and Concrete Composites, 2002, 24: 301 - 303.
- [3] 张光辉. 混凝土结构硫酸盐腐蚀研究综述[J]. 2012, 267(1): 49 - 61.
- [4] ROZIERE E, LOUKILI A, EL HACHEM R, et al. Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(12): 1188 - 1198.
- [5] 黄战, 邢锋, 董必钦. 荷载作用下的混凝土硫酸盐腐蚀研究[J]. 混凝土, 2008(2): 66 - 69.
- [6] THIDAR A, CHIAKI O T. Resistance of plain and blended cement mortars exposed to severe sulfate attacks [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(6): 2988 - 2996.
- [7] 余振新, 孙伟. 荷载 - 干湿交替 - 硫酸盐耦合作用下混凝土损伤过程[J]. 2012, 42(3): 487 - 491.
- [8] 左晓宝, 孙伟. 硫酸盐侵蚀下的混凝土损伤破坏全过程[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(7): 1063 - 1067.
- [9] 黄战, 邢锋, 董必钦. 荷载作用下的混凝土硫酸盐腐蚀研究[J]. 混凝土, 2008(2): 66 - 69.
- [10] 韩建德, 孙伟. 荷载与碳化耦合因素作用下混凝土的耐久性研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(17): 467 - 473.
- [11] 宿晓萍, 王清. 复合盐浸 - 冻融 - 干湿多因素作用下的混凝土腐蚀破坏[J]. 吉林大学学报, 2015, 45(4): 112 - 120.
- [12] 刘金龙, 韩建德. 硫酸盐侵蚀与环境多因素耦合作用下混凝土耐久性研究进展[J]. 混凝土, 2014, 9(33): 33 - 40.
- [13] 余振新, 高建明, 宋鲁光. 荷载 - 干湿交替 - 硫酸盐耦合作用下混凝土损伤过程[J]. 东南大学学报, 2012, 42(3): 487 - 491.
- [14] 滕海文, 黄颖. 荷载与环境因素耦合作用下结构耐久性研究进展[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(1): 12 - 18.

第一作者: 俞君宝(1986 - ) 男, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 混凝土材料及基本构件基础理论研究。

联系地址: 江苏省扬州市邗江区华扬西路 199 号 扬州工业职业技术学院(225009)

联系电话: 18762321781

• 上接第 16 页

结构, 1993, (4): 20 - 24.

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

[15] Dassault Systèmes Simulia Corp.. ABAQUS Analysis User's Manual [M]. 2011.

第一作者: 周剑(1989 - ) 男, 硕士研究生, 研究方向: 预制装配式混凝土剪力墙结构研究。

联系地址: 北京市清华大学土木工程系基地 107(100084)

联系电话: 15652919156