

# 后成型端部缺口梁抗剪加固试验研究

李曰辰<sup>a</sup>, 卢义焱<sup>b</sup>, 陈明祥<sup>b</sup>, 高作平<sup>a</sup>

(武汉大学 a. 水利水电学院; b. 土木建筑工程学院, 武汉 430072)

**摘要:**采用粘型钢法对钢筋混凝土简支梁进行抗弯加固时,由于底部型钢不能伸到支座中去,端部形成缺口,称为后成型缺口梁,缺口使梁端部的应力状态更加复杂。通过对21个梁试件的试验,研究了缺口梁粘钢板抗剪加固的变形过程、受力性能和破坏特征。结果表明,粘贴横向和45°斜向钢板2种方式加固效果均良好,明显推迟了梁上裂缝的出现,极限承载力最大分别提高了102%和93%。由于受缺口处应力集中的影响,破坏主要模式为混凝土拉坏或剪坏并导致钢板粘接失效,破坏具有一定的过渡过程。改变粘贴钢板的宽度,研究不同粘钢量时的加固效果,并在此基础上,运用桁架比拟理论建立缺口梁端部的力学模型,并根据试验数据回归出相应的抗剪加固承载力计算公式。

**关键词:**缺口梁;加固;抗剪强度;桁架比拟

中图分类号:TU375.1 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2012)04-0038-08

## Experimental Analysis on Shear Strengthening Capacity of Secondary Dapped-end Beams

LI Yuechen<sup>a</sup>, LU Yiyan<sup>b</sup>, CHEN Mingxiang<sup>b</sup>, GAO Zuoping<sup>a</sup>

(a. School of Water Resource and Hydropower; b. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

**Abstract:** Because section steel can only be extended to the edge of the support, when a simple-support RC beam is reinforced by bonded section steel, a notch comes into being at the end of the beam which is called a secondary dapped-end beam, making the stress state of the beam more complex. Through experimental analysis on 21 dapped-end beam specimens shear reinforced by steel plate bonded, the deformation process, performing characteristics and failure mechanism of the specimens were investigated. The result shows that two steel bonded forms, including horizontal steel plate and oblique steel plate with angle 45° bonded, delay the appearance of cracks significantly and improve the maximum bearing capacity by 102% and 93%. Due to the impact of stress concentration at the notch, the main modes of damage include concrete tensile or shear failure with the result of bonding failure of a steel plate. By changing the width of steel plates and analyzing different reinforcement effects, formula of bearing capacity of shear reinforcement was proposed based on the method of truss analogue, which provides a reference for engineering application.

**Key words:** dapped-end beam; reinforcement; shear strength; truss analogue

针对工程实践中常出现的需大幅度提高梁构件抗弯承载力的情况,文献[1]提出了粘接型钢加固的新方法,该方法在被加固梁底粘接焊接成型的钢梁

并采用化学锚栓以及竖向剪切键钢板加强上下联系,增大梁高度,加大梁截面惯性矩,从而大幅度甚至成倍提高被加固梁的抗弯承载力。当对简支梁使

收稿日期:2011-11-29

基金项目:湖北省重点科学技术发展计划项目(20001P2104)

作者简介:李曰辰(1972-),男,博士生,主要从事结构加固理论与应用研究,(E-mail)liyc@whu.edu.cn。

陈明祥(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)mxchen@whu.edu.cn。

用该方法加固时,由于梁底后加型钢最长只能延伸到支座的侧边缘,于是在梁端部就形成了阶梯形缺口,称为后成型缺口梁。当梁上荷载大幅度增加时,梁端部承受剪力也将大幅度提高,而且,受后成型缺口等因素的影响,梁端部的应力状态将会与常规等截面梁有很大不同,抗剪加固的问题也变得更加复杂。文献[2-4]研究了常规等截面梁斜截面抗剪粘钢加固和破坏的形态与机理。文献[5-10]研究了常规等截面梁的多种抗剪粘钢加固方式,其中粘贴横向和45°斜向钢板均有较好的效果。文献[11-14]研究了钢筋混凝土企口连接的端部缺口梁的抗剪受力特性以及配筋方式等,箍筋45°斜置、梁底纵筋在缺口边45°弯起等抗剪效果较好,横向配置的主筋对抗剪也起到了明显的作用。该研究不仅在梁端部存在变截面的缺口,而且梁是由混凝土和钢2种材料叠合而成,并通过结构胶的粘接和化学螺栓的锚固等连接成一个整体的构件。这与常规等截面梁以及一次性整体浇筑的端部缺口梁都有很大不同。文献[15]研究了这种粘型钢后形成的缺口梁抗剪加固方式,发现粘贴横向和45°斜向钢板加固效果均为良好。根据前述成果,笔者将对后成型缺口梁端部粘贴横向钢板和45°斜向钢板的抗剪加固方式进行进一步研究。

## 1 模型试验

### 1.1 试件制作

首先制作矩形等截面钢筋混凝土试件梁,梁长2100 mm,截面尺寸100 mm×200 mm,混凝土设计强度C20。在梁两端1/3范围内各配4道双肢箍筋4φ6@200,梁底配主受拉筋2φ10,试件梁样式如图1所示。

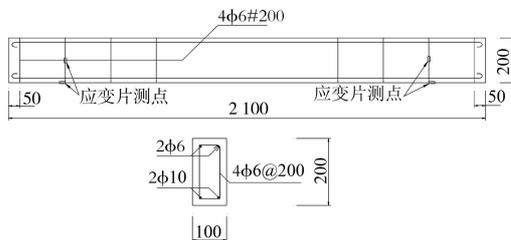


图1 试件尺寸及配筋示意图

混凝土养护期满后,先在梁底粘接型钢梁,型钢梁由2根[8槽钢配合钢板制作而成,长1600 mm,则两端形成各长250 mm的缺口,如图2所示。

缺口梁成型后,在端部侧面粘贴横向或45°斜向钢板条进行抗剪加固,并改变钢板条宽度,研究加固后外粘钢板对梁的承载能力、应力分布、破坏形式的

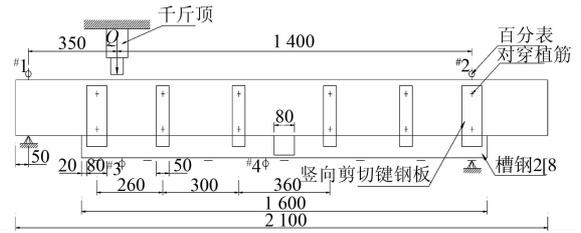


图2 缺口梁形式及试验加载示意图

影响以及粘钢量与加固后抗剪承载力的关系。共试验7组21个试件。A组为未加固对比试件;B、C、D组梁端每侧各粘一条450 mm长、2 mm厚横向钢板,宽度依次取50、100、150 mm;E、F组梁端每侧各粘一条2 mm厚45°斜向钢板,宽度依次取30、50 mm,斜板上部与粘贴于梁顶侧横向钢板焊接,下部与竖向剪切键钢板及梁底型钢梁交汇焊接以加强锚固;G组为最大粘钢面积对比试件,每侧满粘一整块钢板,长450 mm、宽200 mm、厚2 mm。对此类简支缺口梁,端部缺口下是支座,只有侧面才能粘钢,所以侧面满粘即为最大粘钢量。各试件粘贴钢板均使用植筋加强锚固。各组试件加固方式如图3所示。试件制作中所用各原材料性能见表1~4。

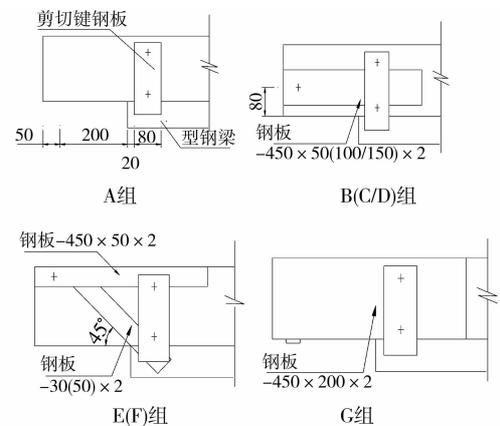


图3 加固方式示意图

表1 试验用钢筋性能指标

钢筋型号 (I级)	截面积/ mm <sup>2</sup>	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %
φ6	28.27	210	321.4	27.5
φ10	78.50	210	276.7	31.4

表2 试验用钢板性能指标

材质	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%
Q235	268	210	36.8

表3 试验用粘钢结构胶性能指标

抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	剪切强度/MPa	弹性模量/GPa
75~85	≥32	≥18	4.27

表 4 试验用混凝土性能指标

抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	强度等级
24	1.7	27.5	C24

## 1.2 加载方案和量测布置

加载在 500 kN 反力架上进行,将油压千斤顶固定在反力架上横梁底,顶面向下,在梁顶面施加一个集中荷载,集中荷载剪跨比  $\lambda$  取 2.0。将每根梁的每一个端部作为一个试件进行试验,一端结束,再加载另一端,如图 2 所示。加载从 0 开始,按每级增加 5 kN 逐级加载直至试件破坏。当施加某级荷载时,荷载值无法达到或能达到却无法保持稳定,试件出现持续不断的变形,视为试件破坏,则前一级荷载即为该试件的极限承载力。

应变采用电测法,布置电阻应变片测点。浇筑混凝土前,预先在梁端部第 2 道箍筋两侧中部和缺口角点处纵筋上分别布置测点,如图 1 所示。为了较准确地获取加固钢板上的应变分布,综合考虑钢板的布置形式、端部缺口的受力规律以及裂缝出现的规律,大概确定出主要的应力变化区域范围,并在该范围内布置测点。如图 4 所示。

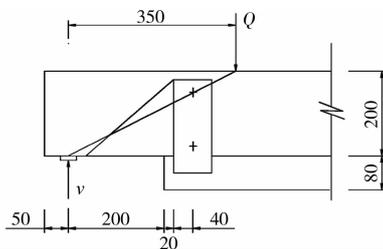


图 4 梁端部主要应力变化区域示意图

挠度采用百分表测量,在对应加载点位置和梁跨中的底部以及两端支座顶部分别布置百分表,测量挠度,如图 2 所示。

## 2 试验结果

### 2.1 应力状态与极限承载力

A 组未加固试件破坏时,端部抗剪箍筋的拉应力较低,约 60~70 MPa。缺口处纵筋拉应力很高,已经屈服。最端部的一对竖向剪切键钢板,由于其位置处于受剪区,可以起到部分抗剪作用,但作用不大,钢板上最大拉应力约 100~120 MPa。

B、C、D、E、F 5 组加固试件,加固钢板上的拉应力很高,且越靠近梁缺口角点,拉应力越大,出现了明显的屈服,钢板较充分地发挥了强度作用,角点处主纵筋的拉应力也很高,也达到了屈服。

G 组试件模拟的是最大粘钢面积的情况,为脆性破坏。加固钢板、箍筋和主纵筋上的应力均较低,钢板 70~110 MPa,箍筋 40 MPa 左右,主纵筋 120 MPa 左右。

各组试件加固钢板的应变变化如图 5 所示。

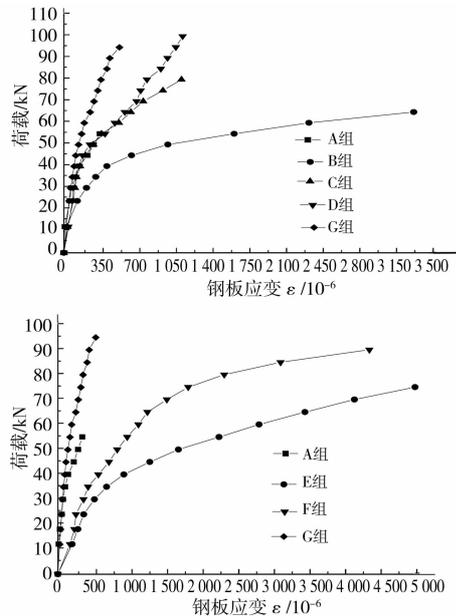


图 5 加固钢板荷载-应变曲线

各组试件初裂荷载与极限承载力见表 5。2 种粘钢方式的加固效果都很好,随着粘钢量的增加,试件的承载力在稳定地提高,而且,粘钢量的增加幅度与承载力的提高幅度基本一致。

D、F 组试件初裂荷载相对 A 组分别提高了 129% 和 119%,大大推迟了裂缝的出现,控制了裂缝的扩展。D、F 组试件极限承载力相对 A 组分别提高了 102% 和 93%,和满粘钢板的 G 组试件基本持平,加固效果是十分明显的。

### 2.2 裂缝分布及破坏状态

A 组未加固试件,随荷载增加,裂缝开始出现于缺口角点附近的底面,并由下斜向上扩展,随着荷载继续增加,又出现多条裂缝,均为 45° 斜裂缝。

B、C、D 3 组横钢板试件和 E、F 2 组 45° 斜钢板试件的破坏均有一定的过渡过程。初裂均发生在靠近缺口梁角点处,并逐步发展成为主裂缝,主裂缝表现为典型的 45° 斜裂缝,随着荷载增加,又出现多条斜裂缝。

G 组试件模拟的是最大粘钢面积的情况。试件临近破坏前没有观察到裂缝等征兆,破坏时试件沿侧面钢板内边缘由下而上突然断裂,并伴有巨响,为典型的脆性破坏。

表5 各组试件初裂荷载与极限承载力试验值

试件编号	初裂荷载/ kN	平均提高/ %	极限承载力/ kN	平均提高/ %
A-1	35		45	
A-2	35		45	
A-3	35		50	
B-1	40		60	
B-2	35	5	65	35
B-3	35		65	
C-1	75		80	
C-2	75	114	80	70
C-3	75		80	
D-1	85		100	
D-2	85	129	95	102
D-3	70		90	
E-1	65		70	
E-2	60	81	75	53
E-3	65		70	
F-1	75		90	
F-2	80	119	90	93
F-3	75		90	
G-1			90	
G-2			95	95
G-3			90	

由于缺口梁特殊的结构形式,再加上试件梁原配箍筋较为稀疏,在受力时,缺口角点处存在着拉、剪应力集中,初裂缝便会在附近发生,且一般会发展为主裂缝,随荷载增加,混凝土在拉、剪应力作用下出现更多裂缝,逐渐被拉坏或剪坏,最终导致钢板粘接失效而完全破坏。对粘贴45°斜钢板试件,由于钢板正好通过角点,强化了该处,裂缝出现的位置会相对横钢板试件稍远些。各粘钢方式下,由于钢板的锚固措施比较充分,对混凝土的约束作用很强,并没有出现钢板先脱落的破坏形式,均表现为混凝土先脆性破坏。随着粘钢量增加,加固钢板最大应力逐渐减小,箍筋所起抗剪作用也慢慢减弱,破坏过程的脆性也越来越强。

各组试件破坏裂缝扩展图见图6。

### 2.3 挠度

各组试件的挠度变化规律基本一致。破坏前,荷载-挠度基本呈线性关系同时增长,随着荷载的增

大,挠度的增长速度有所增加。临近破坏时,挠度急剧增大,直至试件最终完全破坏,总体来说,各组试件均属于脆性破坏。但相对于A组未加固试件和G组满粘钢板对比试件,B、C、D和E、F各组加固试件变形过程较为明显,有一定的过渡过程。粘钢量越大,试件的抗变形能力越强,同级荷载下的挠度越小。且随着粘钢量增加,破坏过程的脆性也越来越明显。挠度变化如图7所示。

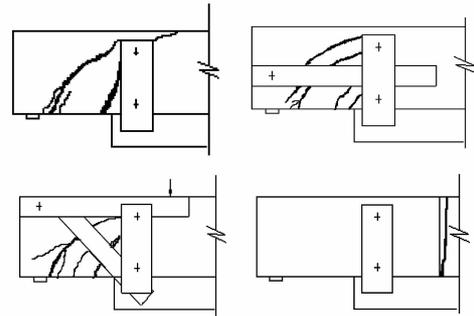


图6 各组试件破坏裂缝扩展图

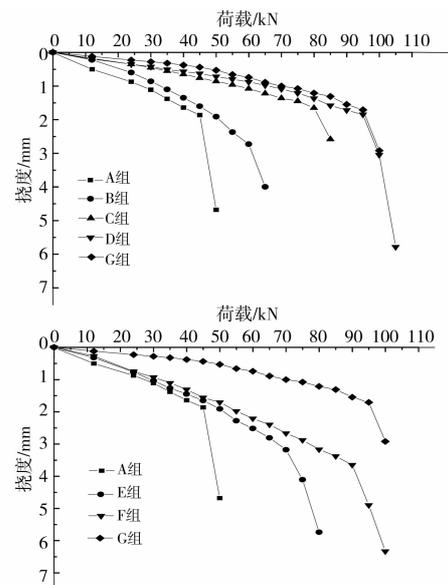


图7 荷载-挠度曲线

## 3 有限元计算分析

### 3.1 概述

运用有限元软件 ANSYS 对 A、C、E、G 组试件进行了仿真模拟计算。计算采用三维非线性模式,混凝土梁体采用 SOLID65 号混凝土单元,将梁中原配钢筋按照体积率的方式加在相应位置的混凝土单元中。外粘钢板和箱型钢梁采用塑性 SHELL PLASTIC43 号板单元,钢筋、钢板、型钢梁屈服均采用 Von. Mises 屈服准则,建立双线性等向强化模型。各材料物理性能指标与前述试验部分同。

### 3.2 主要计算结果

1) 计算初裂荷载均比试验偏小, 偏差约 70%。这是由于试验时检查裂缝是靠人眼观察, 而人的观察力有限, 只有当裂缝宽度扩展到人眼看到时才会认为有裂缝, 而事实上在此之前裂缝就已经存在了, 且由于粘结钢板和型钢的干扰, 某些部位出现的裂缝也无法及时观察到。两者极限承载力误差约 10%, 比较合理。

2) 各组试件端部的应力状态见图 8。各组试件的计算结果和试验结果的规律性基本一致。由于受粘结型钢形成缺口的影响, 试件在受力时, 靠近缺口处存在着应力集中。A 组未加固试件的应力集中点基本上正在缺口处; 各加固试件由于有横向和斜向加固钢板通过缺口处, 对缺口处进行了强化, 则应力集中的位置稍有变化, 但都距缺口处不远; 加固钢板上的应力状态与试验结果也非常一致, 横向和斜向钢板上的应力很大, 且越靠近角点处应力越大, 充分发挥了钢板的强度作用, 承载力显著提高。

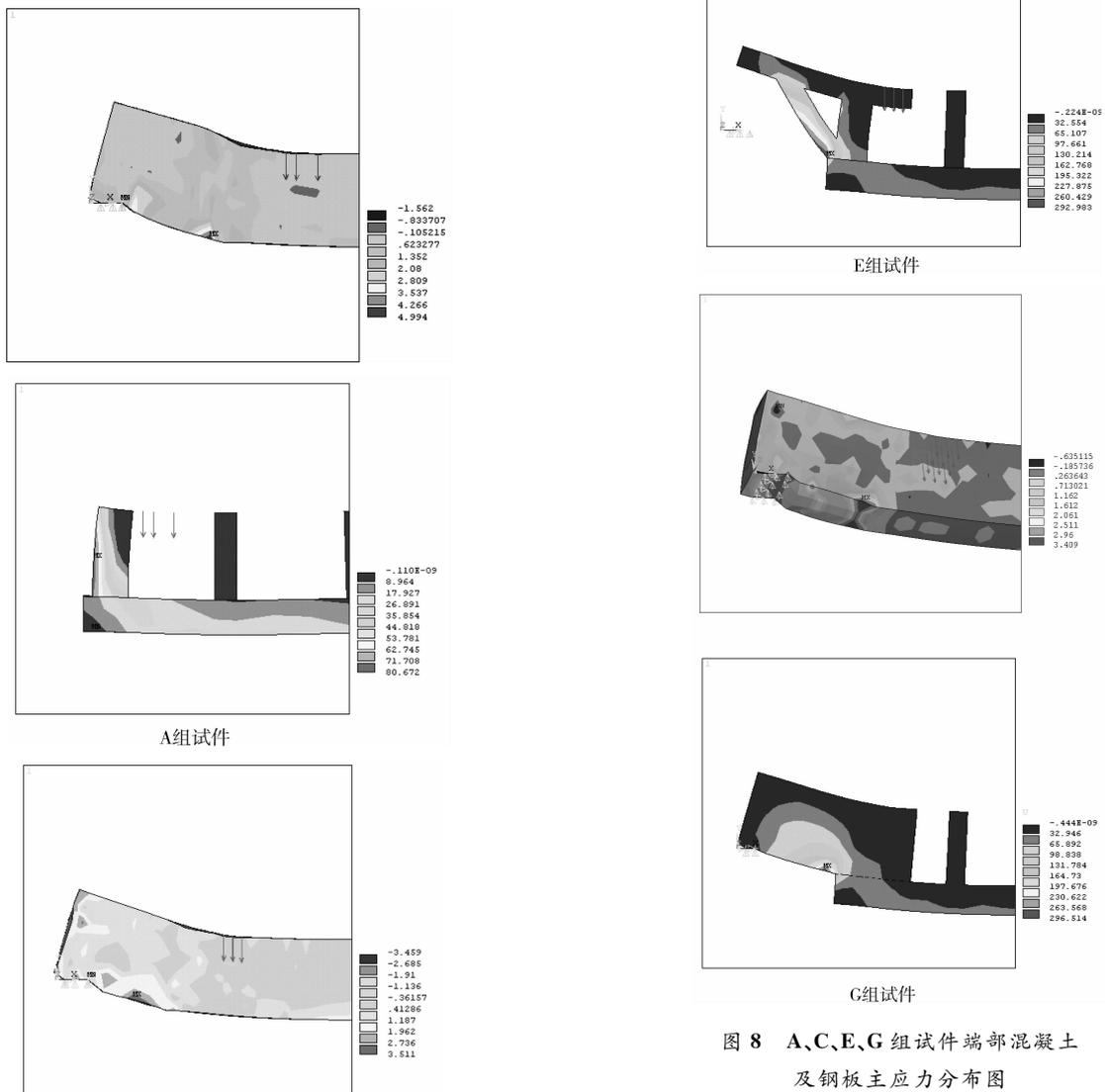


图 8 A、C、E、G 组试件端部混凝土及钢板主应力分布图

## 4 抗剪加固承载力计算式

### 4.1 端部桁架比拟受力模型

运用桁架比拟理论<sup>[16]</sup>,分别建立粘贴横向和 45°斜向钢板的端部受力模型,如图 9。梁顶部压区混凝土(C<sub>2</sub>)模拟上弦杆,受拉纵筋(T<sub>1</sub>、T'<sub>1</sub>)及型钢梁(T<sub>3</sub>)模拟下弦杆,腹杆由平行于斜裂缝的混凝土压杆(C<sub>1</sub>)及端部箍筋和竖向剪切键钢板合成的拉杆(V<sub>0</sub>)组成。横向钢板(T<sub>2</sub>、T'<sub>2</sub>)和 45°斜向钢板(T<sub>b</sub>)分别在各自结构中模拟下弦杆和腹杆。

对粘贴横向钢板试件:

由力平衡  $\sum Y = 0$  和力矩平衡  $\sum M_A = 0$  得:

$$V_s = V_0 \quad (1)$$

$$V_0 e_0 = T_1 h_1 + T_2 h_2 \quad (2)$$

对粘贴 45°斜向钢板试件:

由力平衡  $\sum Y = 0$  得:

$$V_s = V_0 + T_b \sin 45^\circ \quad (3)$$

同理,当斜加固钢板与梁底面的夹角  $\alpha$  为任意角度时,混凝土压杆 C<sub>1</sub> 呈垂直状态,梁端受力模型如图 10。由力平衡  $\sum Y = 0$  得式(3)的一般形式:

$$V_s = V_0 + T_b \sin \alpha \quad (4)$$

由力矩平衡  $\sum M_A = 0$  得:

$$V_0 e_0 = T_1 h_1 \quad (5)$$

式中: V<sub>s</sub> 为原配筋和加固钢板提供的抗剪承载力; V<sub>0</sub> 为箍筋与竖向剪切键钢板中拉力的合力; e<sub>0</sub> 为支座中心至合力 V<sub>0</sub> 作用线的距离; h<sub>1</sub> 为梁顶混凝土

受压杆中线至梁底纵筋的距离,可取  $h_1 = 0.85h_0$ ; h<sub>2</sub> 为梁顶混凝土压杆中心线至 T<sub>2</sub> 的距离。

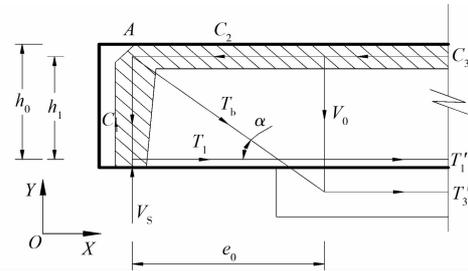


图 10  $\alpha$  为任意角度时端部受力模型

### 3.2 承载力计算式推导

试件梁端部抗剪承载力 V<sub>u</sub> 由混凝土与原配筋加外粘钢板 2 部分承载力组成,即:

$$V_u = V_c + V_s \quad (6)$$

式中 V<sub>c</sub> 为混凝土抗剪承载力,且  $V_c = \beta_0 f_t b h_0$ 。针对横钢板和斜钢板,分别代入式(1)、(2)和式(4)、(5),并设  $T_1 = \beta_1 A_{s1} f_{y1}$ ,  $T_2 = \beta_2 A_{s2} f_{y2}$ ,  $T_b = \beta_b A_{sb} f_{yb}$ , 分别得:

$$V_{u横} = \beta_0 f_t b h_0 + \beta_1 \frac{h_1}{e_0} A_{s1} f_{y1} + \beta_2 \frac{h_2}{e_0} A_{s2} f_{y2} \quad (7)$$

$$V_{u斜} = \beta_0 f_t b h_0 + \beta_1 \frac{h_1}{e_0} A_{s1} f_{y1} + \beta_b A_{sb} f_{yb} \sin \alpha \quad (8)$$

式中:  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_b$  分别为混凝土抗剪承载力、梁底纵筋受力、横向、斜向加固钢板受力影响系数; A<sub>s1</sub>, A<sub>s2</sub>, A<sub>sb</sub> 分别为梁底纵筋、横向、斜向加固钢板截面积; f<sub>y1</sub>, f<sub>y2</sub>, f<sub>yb</sub> 分别为梁底纵筋、横向、斜向加固钢板拉伸强度设计值。

根据参考文献[17],取  $\beta_0 = \frac{\alpha}{\lambda + 1}$ , 其中  $\alpha$  为待定参数。由试验与计算结果可知,梁底纵筋中的应力均很高,都能达到屈服强度设计值,因此可取  $\beta_1 = 1$ , 则式(7)、(8)分别为:

$$V_{u横} = \frac{\alpha}{\lambda + 1} f_t b h_0 + \frac{h_1}{e_0} A_{s1} f_{y1} + \beta_2 \frac{h_2}{e_0} A_{s2} f_{y2} \quad (9)$$

$$V_{u斜} = \frac{\alpha}{\lambda + 1} f_t b h_0 + \frac{h_1}{e_0} A_{s1} f_{y1} + \beta_b A_{sb} f_{yb} \sin \alpha \quad (10)$$

分别取 9 个横钢板试件和 6 个斜钢板的试验结果进行线性回归,得回归公式:

$$V_{u横} = \frac{1.31}{\lambda + 1} f_t b h_0 + \frac{h_1}{e_0} A_{s1} f_{y1} + 1.071 \frac{h_2}{e_0} A_{s2} f_{y2} \quad (11)$$

$$V_{u斜} = \frac{2.49}{\lambda + 1} f_t b h_0 + \frac{h_1}{e_0} A_{s1} f_{y1} + 1.122 A_{sb} f_{yb} \sin \alpha \quad (12)$$

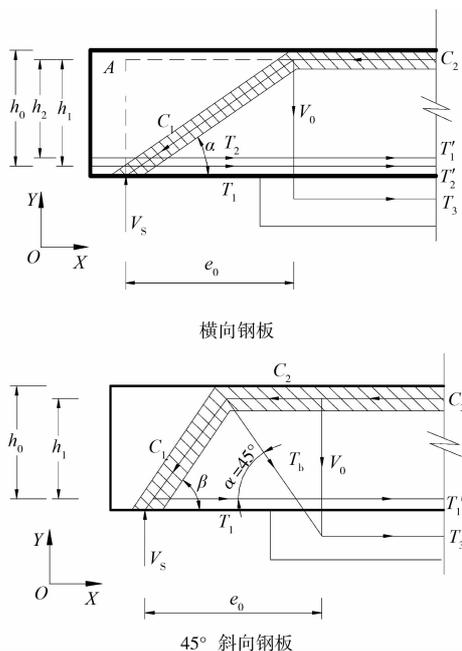


图 9 端部受力模型

再利用式(11)和(12)对 B、C、D 3 组试件和 E、F 2 组试件分别进行计算,结果见表 6。粘横钢板计算值  $V_u^c$  与试验值  $V_u^t$  之比的平均值  $\mu=1.0014$ , 标准差  $\sigma=0.0252$ , 粘斜钢板计算值  $V_u^c$  与试验值  $V_u^t$  之比的平均值  $\mu=1.0012$ , 标准差  $\sigma=0.0296$ , 说明公式计算结果与试验结果吻合良好。

表 6 试件参数及计算结果

试件	相关参数	$h_2$ /mm	$V_u^t$ /kN	$V_u^c$ /kN	$V_u^c/V_u^t$
B-1			48.0		1.058
B-2		124	52.0	50.776	0.976
B-3			52.0		0.976
C-1	$f_t=1.24$ MPa, $\lambda=2.0$ ,		64.0		0.998
C-2	$b=100$ mm, $h_0=175$ mm,	99	64.0	63.881	0.998
C-3	$e_0=254$ mm, $h_1=149$ mm		64.0		0.998
D-1			80.0		0.951
D-2		89	76.0	76.101	1.001
D-3			72.0		1.057
E-1			56.0		1.024
E-2	$f_t=1.24$ MPa, $\lambda=2.0$ ,		60.0	57.345	0.956
E-3	$b=100$ mm, $h_0=175$ mm,		56.0		1.024
F-1	$e_0=254$ mm,		68.0		1.039
F-2	$h_1=149$ mm, $\alpha=45^\circ$		72.0	70.673	0.982
F-3			72.0		0.982

### 3.3 计算式修正及说明

1) 考虑到实际工程中的各种不利影响因素,为安全起见,在式(11)和(12)中引入一个修正系数  $\beta$ ,

$$V_{u\text{横}} = \frac{1.31}{\lambda+1} f_t b h_0 + \frac{h_1}{e_0} A_{s1} f_{y1} + 1.071 \beta \frac{h_2}{e_0} A_{s2} f_{y2} \quad (13)$$

$$V_{u\text{斜}} = \frac{2.49}{\lambda+1} f_t b h_0 + \frac{h_1}{e_0} A_{s1} f_{y1} + 1.122 \beta A_{sb} f_{yb} \sin \alpha \quad (14)$$

式中  $\beta$  为加固效果影响系数,可取 0.75~0.85。

2) 试验研究由于受工作量限制,只取得了初步的成果,还远不完善。如:对分布荷载的工况未做试验;对集中荷载也只试验了  $\lambda=2$  一种工况,  $\lambda$  变化时,对计算式的影响尚不完全清楚;钢板厚度及宽度以及原配抗剪箍筋等再有不同变化,对计算式也会存在影响等等。因此,还需展开进一步的研究工作以深化这些成果。

## 4 结论

1) 由于缺口梁端部特殊的应力状态,缺口角点

处存在应力集中,在梁侧粘贴横向和斜向钢板并确保足够锚固可以起到较好的抗剪加固效果。

2) 缺口梁加固后的抗剪承载力由混凝土、原配抗剪钢筋和后加固钢板 3 部分组成,将原配抗剪钢筋和后加固钢板提供的抗剪承载力合在一起分析比较方便。

3) 横向钢板由梁端向跨中方向要伸过缺口角点处一定的长度来确保发挥其强度作用,根据试验经验,建议该长度不小于 60 倍钢板厚度且不小于 200 mm,再配合植筋等适当措施加强锚固。

4) 根据试验数据,采用桁架比拟法分别推导出粘贴横向和斜向钢板加固的抗剪承载力计算式,和试验结果吻合较好。

### 参考文献:

- [1] 高作平,周剑波,陈明祥,等.采用粘结型钢扩大混凝土梁截面进行抗弯加固[M]//高作平,陈明祥.混凝土结构粘结加固技术新进展.北京:中国水利水电出版社,1999:97-104.
- [2] Arslan G, Sevuk F, Ekiz I. Steel plate contribution to load-carrying capacity of retrofitted RC beams [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(3):143-153.
- [3] Barnes R A, Mays G C. Strengthening of reinforced concrete beams in shear by the use of externally bonded steel plates: Part 1-experimental programme [J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(6):396-402.
- [4] Barnes R A, Mays G C. Strengthening of reinforced concrete beams in shear by the use of externally bonded steel plates: Part 2-design guidelines [J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(6):403-411.
- [5] Sharif A, Al-Sulaimani G J, Basunbul I A, et al. Strengthening of shear-damaged RC Beams by external bonding of steel plates [J]. Magazine of Concrete Research, 1995, 47(173):329-334.
- [6] Adhikary B B, Mutsuyoshi H. Shear strengthening of reinforced concrete beams using various techniques [J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(6):366-373.
- [7] Altin S, Anil O, Kara M E. Improving shear capacity of existing RC beams using external bonding of steel plates [J]. Engineering Structures, 2005, 27(5):781-791.
- [8] Adhikary B B, Mutsuyoshi H. Shear strengthening of RC beams with web-bonded continuous steel plates [J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(5):296-307.
- [9] 刘兴远,陈伟,林文修.钢筋混凝土梁斜截面粘钢加固实

- 验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(1): 25-27.  
LIU Xingyuan, CHEN Wei, LIN Wenxiu. Testing study on inclined steel-bonded RC beams [J]. Building Science Research of Sichuan, 2003, 29(1): 25-27.
- [10] 肖建庄, 秦灿灿, 刘祖华, 等. 钢筋混凝土梁抗剪加固试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1999, 27(4): 407-411.  
XIAO Jianzhuang, QIN Cancan, LIU Zuhua, et al. Experimental study on shear strengthening of RC beams [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1999, 27(4): 407-411.
- [11] 冯健, 吕志涛, 于长海. 预应力及钢筋混凝土企口接头受剪性能试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2000, 30(4): 27-32.  
FENG Jian, LYU Zhitao, YU Changhai. Experimental research of the shear behavior of PC and RC beams with flat or slanting scarf connections [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2000, 30(4): 27-32.
- [12] 黄祥海, 梁书亭, 朱筱俊. 预制装配式框架干式企口连接中缺口梁的受力性能分析[J]. 工业建筑, 2007, 37(10): 46-49.  
HUANG Xianghai, LIANG Shuting, ZHU Xiaojun. Research on dapped-end beams of dry dapped-end connections in precast concrete frame structure [J]. Industrial Construction, 2007, 37(10): 46-49.
- [13] 卢志红, 王全凤, 郭子雄. 配箍筋缺口梁的抗剪承载力[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 1994, 15(3): 289-292.  
LU Zhihong, WANG Quanfeng, GUO Zixiong. Shear bearing capacity of notched concrete beams with stirrup [J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science, 1994, 15(3): 289-292.
- [14] 郭子雄, 王全凤, 林雨生. 钢筋混凝土缺口梁抗剪强度试验研究[J]. 建筑结构, 1998(3): 41-44.  
GUO Zixiong, WANG Quanfeng, LIN Yusheng. Experimental research on shear capacity of RC notched beams [J]. Building Structure, 1998(3): 41-44.
- [15] 李曰辰, 陈明祥, 卢亦焱. 粘接型钢形成的缺口梁抗剪粘钢加固方式试验[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(24): 28-33.  
LI Yuechen, CHEN Mingxiang, LU Yiyan. Experimental research on forms of steel bonded to strengthen shear capacity of notched beams foremed by adhering section-steel [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(24): 28-33.
- [16] 莱昂哈特 F, 门希 E. 钢筋混凝土结构设计原理[M]. 程积高, 程鹏. 译. 北京: 人民交通出版社, 1991: 281-286.
- [17] 中国建筑科学研究院. GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 65-68.

(编辑 胡英奎)