

文章编号:1671-8879(2015)01-0076-08

# 加筋高性能砂浆加固 RC 梁抗剪性能及承载力计算

黄 华<sup>1,2</sup>, 杨 琪<sup>3</sup>, 郑益斌<sup>1</sup>, 刘伯权<sup>1</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;  
3. 科学出版社南京分社, 江苏 南京 210029)

**摘 要:**为统一中国对加筋高性能砂浆加固 RC 梁抗剪性能的认识,以中国所做 66 根加筋高性能砂浆加固的钢筋混凝土矩形梁抗剪性能试验研究为基础,分析抗剪加固梁的力学性能和破坏机理;借助桁架-拱模型,考虑一次受力、二次受力、持载程度、加固筋类型、加固筋数量、混凝土强度等级等因素影响,建立加固梁抗剪承载力计算公式。研究表明:该加固技术采用高强钢绞线、钢筋网、钢丝网作为受力材料,虽然三者受力性能存在显著差异,但构件力学性能和破坏机理相似,按统一计算公式进行承载力设计是可行的;所提公式计算值与试验值之比的平均值为 0.926,标准差为 0.178,二者符合良好,且计算结果偏于安全,公式可用于实际工程计算。

**关键词:**桥梁工程;加筋高性能砂浆;加固;钢筋混凝土梁;抗剪性能;桁架-拱模型;承载力计算  
**中图分类号:**U441;TU 375.1 **文献标志码:**A

## Shear behavior and bearing capacity calculation of RC beams strengthened with high performance ferrocement laminate

HUANG Hua<sup>1,2</sup>, YANG Qi<sup>3</sup>, ZHENG Yi-bin<sup>1</sup>, LIU Bo-quan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Science Press Nanjing Branch, Nanjing 210029, Jiangsu, China)

**Abstract:** For achieving a consensus on the shear performance of RC beams strengthened with high performance ferrocement laminate, this paper was based on the inland experimental study on 66 RC beams strengthened with high performance ferrocement laminate to analyze the shear behavior and failure mechanism of these strengthened beams. Based on truss-arch model and considering the influence of first load, secondary load, the magnitude of sustained load, quantity and style of the reinforcement, and concrete strength, this paper established the uniform formula of strengthened beam shearing capacity. The results show that the shear behavior and failure mechanism of these beams strengthened with the reinforcement are similar though they used different reinforcement materials including high strength stainless steel wire mesh, reinforcing steel bars, and steel wire mesh and their mechanical performance has significant difference. Building the uniform formula to calculate the shearing capacity of these strengthened beams is theoretically feasible. The average ratio between the calculating values of the uniform formula and test results of the shearing capacity is 0.926, and the standard error is 0.178.

收稿日期:2014-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51308065);高等学校博士学科点专项科研基金项目优先发展计划(20130205130001);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2012JQ7024);中国博士后科学基金项目(2012M511956,2014T70896);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014G2280014)

作者简介:黄 华(1979-),男,江苏常州人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:huanghua23247@163.com.

So the calculating values are more secure, and the calculation method can be used in the design of reconstruction engineering. 2 tabs, 10 figs, 16 refs.

**Key words:** bridge engineering; high performance ferrocement laminate; strengthening; reinforced concrete beam; shear behavior; truss-arch model; bearing capacity calculation

## 0 引言

2000 年以来,加筋高性能砂浆加固(HPFL 加固)技术在国内外逐步得到使用,该加固技术几经发展,受力材料有高强不锈钢绞线网、钢筋网和钢丝网等;而粘结剂则发展了渗透性聚合物砂浆、UHTCC 改性砂浆等,具有早强、高强、抗裂等特点。采用该加固技术的典型工程有中国沧乐公路东关大桥加固工程、厦门郑成功纪念馆加固改造工程,国外有韩国庄在桥加固改造工程等。国内外研究者对采用该技术加固的混凝土梁抗剪性能进行了大量研究:黄华等采用高强不锈钢绞线-聚合物砂浆加固了 6 根矩形钢筋混凝土梁,考虑膨胀螺栓影响完成了一次受力和二次受力 2 种情况下的抗剪试验<sup>[1-3]</sup>;清华大学聂建国等采用高强不锈钢绞线网-渗透性聚合物砂浆,完成了 4 根一次受力、二次受力 2 种情况下的加固梁抗剪试验研究<sup>[4]</sup>;湖南大学尚守平课题组的卜良桃等采用钢筋网、钢丝网复合砂浆,完成了 50 根 RC 梁的一次受力、二次受力梁抗剪加固试验,及对混凝土强度、钢筋网、钢丝网层数、配筋率、截面尺寸等的影响<sup>[5-10]</sup>;山东建筑大学王军辉等采用钢丝网加固的 6 根梁进行了抗剪加固试验,研究了混凝土强度、高强钢丝直径和间距等因素的影响<sup>[11]</sup>。以上研究者针对钢绞线网、钢筋网、钢丝网等不同受力材料进行的加固梁抗剪试验研究和理论分析具有各自的独立性,所提出的加固设计公式各不相同,给工程人员实际使用造成一定困难。且现行《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367-2006)仅针对高强不锈钢绞线网加固 RC 结构提出了斜截面承载力设计公式,而对钢筋网、钢丝网加固还缺乏具体规定。

本文在作者所做 6 根高强钢绞线网加固矩形梁试验研究的基础上,收集中国研究者所做 60 根钢筋网、钢丝网加固 RC 梁的抗剪试验研究,对 HPFL 加固梁抗剪性能进行分析,全面考虑加固材料、加固方式、原梁承载力、二次受力等因素影响,提出适用不同加固受力筋的抗剪承载力计算公式。

## 1 RC 梁抗剪加固试验

HPFL 加固技术中作为加固受力筋的应力-应变

曲线如图 1 所示。钢绞线和钢丝作为硬钢材料,拉伸曲线没有明显的屈服台阶;钢筋作为软钢材料,拉伸曲线有明显的弹性段、屈服段和强化段,3 种加固材料的屈服强度见表 1,可见其材料性能差异显著。

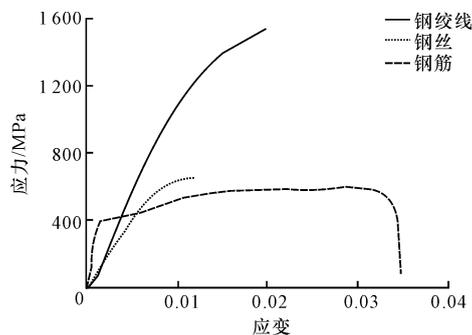


图 1 典型加固筋应力-应变曲线

Fig. 1 Strain-stress curves of typical reinforcing bars

表 1 加固材料屈服强度

Tab. 1 Yield strength of strengthening materials

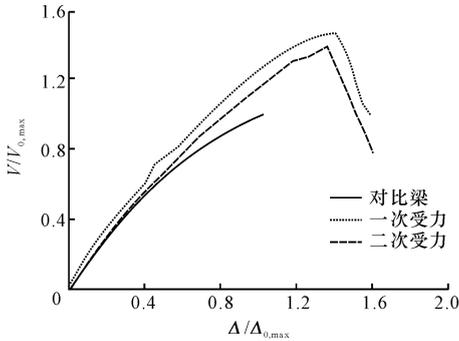
材料类别	屈服强度/MPa
钢绞线 <sup>[1]</sup>	1 535
钢丝网(机械编织型) <sup>[7]</sup>	605
钢筋网 <sup>[5]</sup>	413.91

下一页图 2 为抗剪加固构件典型的荷载-挠度曲线,图中横坐标为加固梁挠度  $\Delta$  与对比梁最大挠度  $\Delta_{0,max}$  的比值,纵坐标为加固梁荷载  $V$  与对比梁极限荷载  $V_{0,max}$  的比值;下一页图 3 为典型的加固构件破坏图。

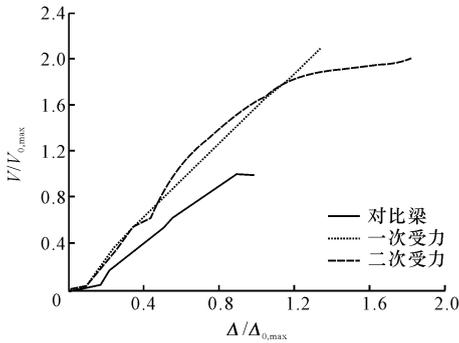
由图 2 和图 3 可见,虽然 3 种加固方式的加固材料不同,但是加固梁的荷载-挠度曲线却表现出很大的相似性。加固梁从加载到破坏大致可以分为 3 个受力阶段。

(1)弹性工作阶段:加载初期,加固层砂浆和混凝土的应力均小于各自的极限拉应力,构件没有发生开裂,荷载-挠度曲线在该阶段表现为线性关系,加固构件的截面刚度较对比梁大,相同荷载作用下的挠度较小,无论是原梁箍筋还是加固筋的应变均较小。

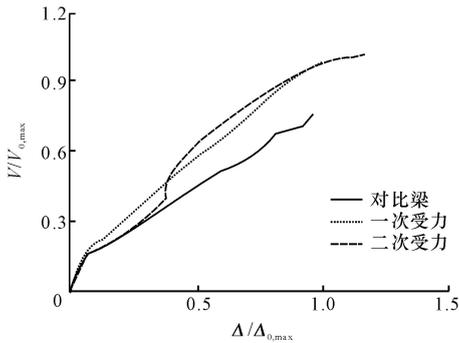
(2)带裂缝工作阶段:随着外荷载增加,首先在梁跨中纯弯段出现受拉裂缝,且自下向上延伸;荷载继续增加,剪弯段内弯矩增大,相继出现受弯(拉)裂缝,在底部与纵筋轴线垂直,向上延伸时倾斜角逐渐减小,约与主压应力轨迹线一致,形成弯剪裂缝,并随荷载继续增加而出现腹剪裂缝;梁的刚度降低,挠



(a) 高强钢绞线加固



(b) 钢筋网加固



(c) 钢丝网加固

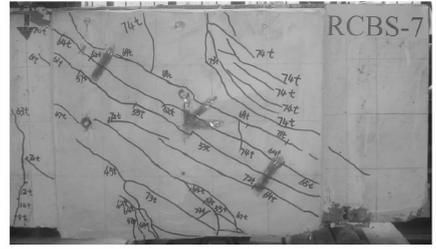
图 2 典型加固梁荷载-挠度曲线

Fig. 2 Load-deflection curves of typical strengthened beams

度比开裂前有较快的增长,由于加固层砂浆和混凝土的开裂,加固筋和原梁箍筋应力增大,与对比梁相比,相同荷载作用下的挠度、原梁箍筋应变均有不同程度减小。

(3)破坏阶段:随外荷载进一步增加,箍筋屈服、腹剪裂缝和弯剪裂缝迅速发展,内部混凝土裂缝开展加快,挠度随荷载增大迅速增加,试件很快达到极限荷载,呈明显的脆性破坏特征。

以上不同受力筋加固的梁均发生显著的剪压破坏,加固措施有效地限制了剪弯区裂缝的宽度,延迟了裂缝的开展速度,提高了斜截面的剪切刚度,加固梁斜截面受弯承载力提高幅度基本上在 10%~60%之间。根据加固筋的用量、原梁配箍率以及混凝土强度等级的差异,承载力提高幅度存在差异,但



(a) 钢绞线加固梁



(b) 钢筋网加固梁



(c) 钢丝网加固梁

图 3 典型加固梁破坏

Fig. 3 Failure mode of typical strengthened beams

由于加固筋材料的不同,故对承载力提高幅度的影响并不显著。采用这 3 种受力筋加固的 RC 梁抗剪性能基本相似,可建立统一的加固计算公式。

## 2 加固梁斜截面承载力分析

RC 梁斜截面承载力计算模型主要包括桁架模型、软化桁架模型、桁架-拱模型、桁架拱模型等。在桁架-拱模型中,构件的抗剪强度由“桁架作用”和“拱作用”叠加而成<sup>[12]</sup>,前者由抗剪钢筋和混凝土共同承担,后者由混凝土压杆承担,抗剪钢筋不参与其作用。此模型能够综合考虑混凝土和腹筋的抗剪作用,较好地模拟抗剪构件承载力的组成,因而本文采用该模型分析加筋高性能砂浆加固的 RC 梁斜截面承载力。

### 2.1 加固梁的桁架模型

加固梁桁架模型如下页图 4 所示,图中  $F_c$  为混凝土、加固层砂浆以及纵筋所受压力; $F_t$  为纵筋所受拉力; $V_c$  为桁架模型所受剪力; $\theta$  为斜向压杆与水平方向的夹角; $h_z$  为原梁箍筋和加固箍筋的综合高度。

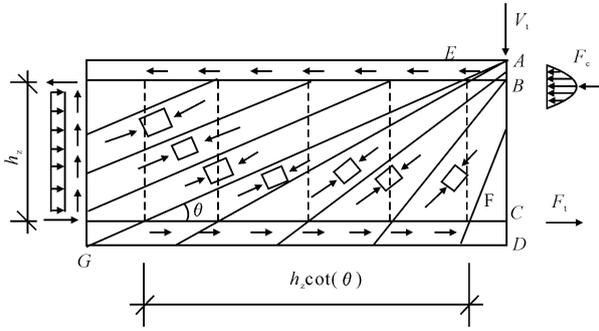


图 4 桁架模型

Fig. 4 Truss model

原梁及抗剪加固梁截面尺寸如图 5 所示,图中  $b$ 、 $h$  分别为原梁截面宽度和高度; $b_c$ 、 $h_c$  分别为原梁箍筋的宽度和高度; $b_m$ 、 $h_m$  分别为加固梁的截面高度和宽度; $b_d$ 、 $h_d$  分别为加固箍筋的宽度和高度; $t$  为加固层厚度。根据图中关系,忽略加工误差,则有  $h_d = h$ 、 $b_d = b$ 、 $h_m = h + 2t$ 、 $b_m = b + 2t$ ,当加固仅采用 U 型加固,而非图 5(b)中的环包加固时, $h_m = h + t$ 。

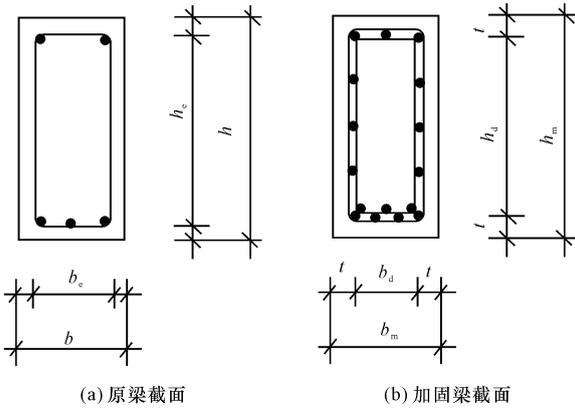


图 5 梁截面尺寸

Fig. 5 Size of beam section

取图 4 中直线 AEG 右侧的加固梁作为隔离体,如图 6 所示。图中, $A_{sv}$  为原箍筋截面积; $A_{smv}$  为加固筋截面积; $\sigma_{sv}$  为箍筋应力,考虑到剪压破坏时,箍筋屈服,根据试验测试,加固层与原梁共同工作性能较好,此处不再区分二者应力差异。令  $\sigma_{sv} = f_{yv}$ ,由加固梁桁架部分承担的剪力  $V_t$  与穿过直线 EG 的原梁箍筋和加固箍筋拉力的合力平衡,则得到“桁架模型”承担的剪力,即

$$V_t = \sum A_{sv} f_{yv} + \sum A_{smv} f_{yv} = \rho'_{sv} f_{yv} b_m h_m \cot(\theta) \quad (1)$$

式中: $f_{yv}$  为箍筋屈服强度; $\rho'_{sv}$  为等效配箍率,即为原梁配箍率与加固箍筋配箍率的等效转化值,由式(2)计算。

$$\rho'_{sv} = \rho_{smv} + \rho'_{svo} \quad (2)$$

式中: $\rho_{smv}$  为加固箍筋配箍率, $\rho_{smv} = A_{smv} / (b_m s_m)$ ,  $s_m$

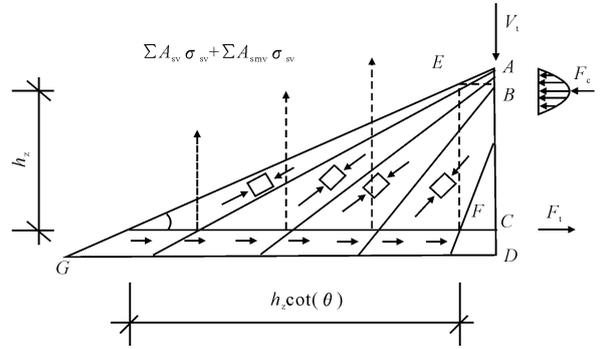


图 6 加固桁架机构隔离平衡体

Fig. 6 Isolated balance body of strengthened truss model

为加固筋的间距; $\rho'_{svo}$  为原梁转化配箍率, $\rho'_{svo} = \rho_{svo} (b/b_m)$ ,  $\rho_{svo}$  为原梁配箍率, $\rho_{svo} = A_{sv} / (bs)$ ,  $s$  为原箍筋的间距。

式(1)中未知系数为  $\theta$  角,若其已知,则可求出  $V_t$  值。下文根据加固前后桁架模型的受力,求解  $\theta$  角。

现取图 4 中直线 AEG 左侧原梁部分为隔离体,如图 7 所示。

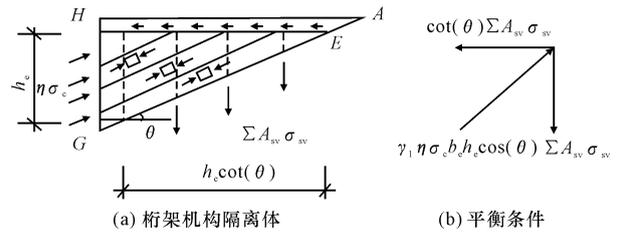


图 7 原桁架机构压应力的平衡

Fig. 7 Compressive stress equilibrium of origin truss model

设  $\sigma_c$  为桁架模型中混凝土的斜向压应力,引入系数  $\eta$ ,则未加固桁架中混凝土的斜向压应力为  $\eta \sigma_c$  ( $0 < \eta < 1$ ),  $\eta$  随  $\rho_{smv}$  的增大而减小。由于箍筋有效约束区域比梁实际面积小,根据文献[13],定义原桁架的有效系数  $\gamma_1 = (1 - s/2h)(1 - b/4h)$ 。由混凝土斜向压应力、原箍筋的拉力以及纵筋拉力的平衡,可得

$$\sum (A_{svo} f_{yv})^2 [1 + \cot^2(\theta)] = [\gamma_1 \eta \sigma_c b h_c \cos(\theta)]^2 \quad (3)$$

根据配箍率化简得

$$[\rho_{svo} f_{yv} b h_c \cot(\theta)]^2 [1 + \cot^2(\theta)] = [\gamma_1 \eta \sigma_c b h_c \cos(\theta)]^2 \quad (4)$$

同样取图 4 中直线 AEG 左侧加固梁部分为隔离体,如下页图 8 所示。加固后的桁架有效系数  $\gamma_2 = (1 - s_z/2h_m)(1 - b_m/4h_m)$ ,  $s_z$  为原梁箍筋和加固箍筋的综合间距。由混凝土斜向压应力、原梁箍筋拉力、加固箍筋拉力以及纵筋拉力的平衡,可得

$$\sum (A_{sv} f_{yv})^2 [1 + \cot^2(\theta)] = [\gamma_2 \sigma_c b_m h_m \cos(\theta)]^2 \quad (5)$$

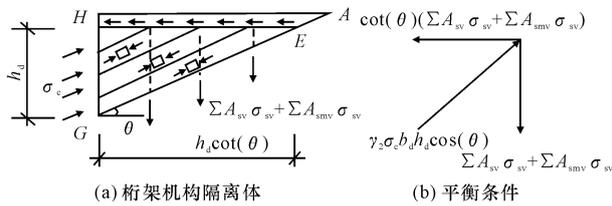


图8 加固后的桁架机构压应力的平衡

Fig. 8 Compressive stress equilibrium of strengthened truss model

根据配箍率化简

$$\left[ \rho'_{sv} f_{yv} b_m h_m \cot(\theta) \right]^2 [1 + \cot^2(\theta)] = \left[ \gamma_2 \sigma_c b_m h_m \cos(\theta) \right]^2 \quad (6)$$

将式(4)和式(6)联立,可得

$$\frac{\rho_{svo} f_{yv} b h}{\rho_{sv} f_{yv} b_m h_m} = \frac{\gamma_1 \eta \sigma_c b h}{\gamma_2 \sigma_c b_m h_m} \quad (7)$$

化简后得

$$\eta = \frac{\gamma_2 \rho_{svo}}{\gamma_1 \rho_{sv}} \quad (8)$$

将式(8)代入式(4)化简得

$$\cot(\theta) = \sqrt{\frac{\gamma_2 \sigma_c}{\rho_{sv} f_{yv}} - 1} \quad (9)$$

桁架模型中,角度 $\theta$ 越小,与斜裂缝正交的压力越大,当 $\theta$ 小到一定值时,斜裂缝区域横截面压力过大,压应力传递困难,故取 $\cot(\theta) = 2$ 作为上限值,此时 $\theta = 26.6^\circ$ 。又剪压破坏时, $\sigma_c = f_c$ 。

故

$$\cot(\theta) = \min\left(\sqrt{\frac{\gamma_2 \sigma_c}{\rho_{sv} f_{yv}} - 1}, 2\right)$$

## 2.2 加固梁的拱模型

加固梁的拱模型如图9所示。由于高性能砂浆强度等级一般比原梁混凝土的强度高一个等级,弹性模量比相应的混凝土略大,但是加固层厚度在15~25 mm之间,其面积占总面积不足1/4,高性能砂浆承受总压应力占总压应力的比例较小。为简化计算,可以认为高性能砂浆所承受的压应力和混凝土的斜压应力 $\sigma_a$ 相等。取加固梁的拱模型中拱的宽度为 $b_m$ ,高度为 $h_m$ ,拱水平投影长度为 $L$ ,拱与水平方向夹角为 $\varphi$ 。

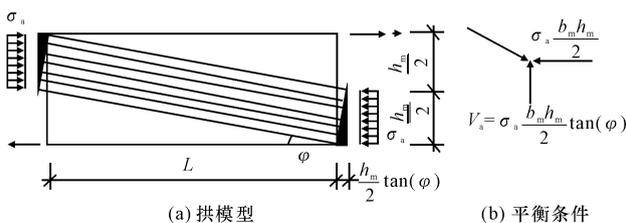


图9 拱模型

Fig. 9 Arch model

根据图9(a),加固梁拱模型混凝土和高性能砂浆所承受的总压力为

$$F_a = \sigma_a \frac{b_m h_m}{2} \quad (10)$$

根据图9(b)中所示平衡条件,拱模型承担剪力为

$$V_a = \sigma_a \frac{b_m h_m}{2} \tan(\varphi) \quad (11)$$

剪跨比 $\lambda$ 对拱和桁架的作用具有很大影响,前者随 $\lambda$ 的增大而减小,后者随 $\lambda$ 的增大而增大,根据文献[14],混凝土压杆“拱”的受力确定如下。

(1)当 $\lambda < 0.5$ 时,构件剪力主要由“拱”进行传递,由于加固梁剪切裂缝出现时,混凝土和加固砂浆的轴心抗压强度 $f_c$ 降低,“拱”中混凝土压应力达到极限强度破坏时,应取其有效强度 $v f_c$ ,此时

$$\sigma_a = v f_c \quad (12)$$

根据文献[15],有效强度系数 $v$ 计算如下

$$v = 0.7 - f_c / 200 \quad (13)$$

(2)当 $\lambda > 3$ 时,剪力主要由“桁架”进行传递,而“拱”作用近似为0,所以“拱”中混凝土和高性能砂浆压应力取为

$$\sigma_a = 0 \quad (14)$$

(3)当 $0.5 \leq \lambda \leq 3$ 时,“拱”与“桁架”同时参与工作,则混凝土和高性能砂浆的压应力取以上两式的线性插值,即

$$\sigma_a = (1.2 - 0.4\lambda) v f_c \quad (15)$$

将式(15)代入式(11)可得“拱”剪力为

$$V_a = \frac{b_m h_m}{2} (1.2 - 0.4\lambda) v f_c \tan(\varphi) \quad (16)$$

根据图9(a)的几何关系,有

$$\tan(\varphi) = \frac{h_m / 2}{L + (h_m / 2) \tan(\varphi)} \quad (17)$$

取截面有效高度 $h_0 = 0.9 h_m$ , $\lambda = L / h_0$ ,代入式(17),得

$$\tan(\varphi) = \sqrt{1 + (0.9\lambda)^2} - 0.9\lambda \quad (18)$$

即有

$$V_a = \frac{(1.2 - 0.4\lambda)}{2} (\sqrt{1 + (0.9\lambda)^2} - 0.9\lambda) v f_c b_m h_m \quad (19)$$

## 2.3 加固梁总剪力

根据桁架-拱模型,加固梁所能承担的总剪力由桁架承担的剪力与拱承担的剪力叠加,故总剪力 $V_u$ 为

$$V_u = V_t + V_a = \rho'_{sv} f_{yv} b_m h_m \cot(\theta) + \frac{(1.2 - 0.4\lambda)}{2} (\sqrt{1 + (0.9\lambda)^2} - 0.9\lambda) v f_c b_m h_m \quad (20)$$

对上式进行整理,得

$$\frac{V_u}{v f_c b_m h_m} = \frac{\rho'_{sv} f_{yv} \cot(\theta)}{v f_c} + \frac{(0.6 - 0.02\lambda)}{\sqrt{1 + (0.9\lambda)^2} + 0.9\lambda} \quad (21)$$

### 3 试验验证

本文就式(21)对文献[1]、文献[4-11]中已完成的 9 组 66 根采用加筋高性能砂浆加固梁的试验结果进行验算,试验包括采用高强不锈钢绞线网、钢筋网和钢丝网等不同加固材料,加固方式包括直接加固和二次受力加固 2 种,加载方式包括一点加载和两点集中加载,公式的计算结果见表 2。限于篇幅,加固梁的混凝土强度、配箍率、截面尺寸等具体试验参数见相关文献。由表 2 中的计算结果表明,试验值与式(21)的计算值之比的平均值为 0.926,标准差为 0.178,离散系数为 0.192,本文建议公式与试验值吻合较好。

同时将试件承载力计算值与试验值列于图 10,图中各点为各加固梁的试验值,直线  $\lambda$  分别为 1.5 和 3.0 时的理论公式计算值。由图可见,计算公式基本取到了试验点的下包线,是偏于安全的,仅表中剪跨比 2.5 和 2.79 的 4 个点位于  $\lambda=3$  的曲线下方,且离曲线很近。因此本公式计算值可用于实际工程的加固设计。

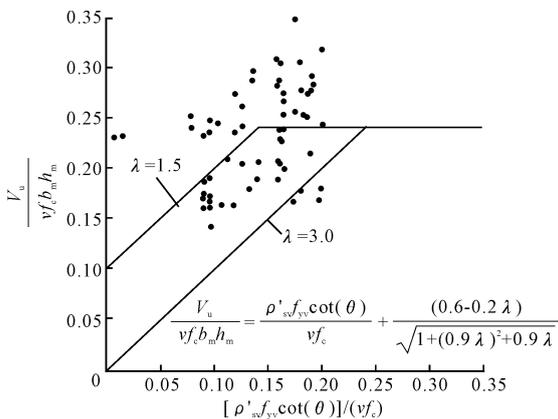


图 10 试件承载力计算值与试验值的比较

Fig. 10 Comparison of calculated and experimental values of specimen's bearing capacity

表中计算数据同时表明,二次受力对加筋高性能砂浆加固梁抗剪承载力计算的影响并不明显,其原因在于抗剪加固最终发生剪压破坏,混凝土达到极限强度,原梁箍筋屈服并未进入强化阶段,此时加固箍筋应力能够随变形增加而达到原箍筋应力大小,但达不到自身屈服强度或极限强度。

表 2 抗剪加固梁计算值与试验值对比

Tab. 2 Comparison between calculation values and experimental results of shear strengthened beams

文献	试件编号	加固筋类型	剪跨比	受力类型	剪力/kN		$V_c/V_u$
					$V_u$	$V_c$	
[1]	RCBS-2	钢绞线网	1.60	一次	315.0	409.9	1.301
	RCBS-3			一次	384.0	409.9	1.067
	RCBS-4			一次	359.0	409.9	1.142
	RCBS-5			一次	384.0	409.9	1.067
	RCBS-6			二次	425.0	409.9	0.964
	RCBS-7			二次	370.0	409.9	1.108
[4]	RCBS-2	钢绞线网	1.84	一次	256.6	227.3	0.886
	RCBS-3			一次	276.2	227.3	0.823
	RCBS-4			二次	236.6	227.3	0.961
	RCBS-5			二次	252.4	227.3	0.900
[5]	BV2	钢筋网	1.92	一次	302.1	290.0	0.960
	BV3			二次	279.5	292.9	1.048
	BV4			一次	317.8	289.7	0.912
	BV5			二次	280.0	295.5	1.055
	BV6			一次	310.5	285.4	0.919
	BV7			二次	296.2	286.4	0.967
[6]	AA2	钢筋网	1.67	一次	264.2	286.7	1.085
	AA3			二次	252.7	292.0	1.156
	AB2		0.83	一次	307.8	307.8	1.000
	AB3			二次	300.0	290.3	0.968
	AC2		2.50	一次	230.0	281.9	1.226
	AC3			二次	222.0	286.5	1.291
	BB1		1.92	一次	366.2	313.8	0.857
	BB2			二次	338.8	321.8	0.950
	BC1		1.92	一次	362.3	322.7	0.891
	BC2			二次	339.5	329.3	0.970
	BD1		1.80	一次	376.4	318.7	0.847
	BD2			二次	359.1	320.0	0.892
	CB2		1.80	一次	394.2	313.7	0.796
	CB3			二次	406.1	326.3	0.804
	CC2		1.60	一次	480.0	374.2	0.780
	CC3			一次	394.3	307.5	0.780
CC4	二次	567.0		354.9	0.626		
CC5	二次	416.6		307.5	0.738		
[7]	BM-1	钢筋网	2.20	一次	150.0	150.8	1.005
	BM-2			一次	205.0	150.8	0.736
	BM-3			一次	150.0	145.6	0.971
	BM-4			一次	240.0	151.9	0.633
	BM-5			一次	190.0	150.8	0.794
	BM-6			一次	200.0	150.8	0.754
	BM-7			一次	220.0	151.9	0.691
	BM-8			一次	245.0	149.0	0.608
	BM-10			一次	220.0	151.6	0.689
	BM-11			一次	195.0	145.6	0.747
	BM-12			一次	220.0	151.6	0.689

续表

文献	试件 编号	加固筋 类型	剪跨比	受力 类型	剪力/kN		$V_c/V_u$
					$V_u$	$V_c$	
[8]	B2	钢筋 网	1.50	一次	264.0	289.1	1.095
	B3			一次	229.0	286.3	1.250
	B4			一次	289.0	291.1	1.007
	B11		1.60	一次	269.0	347.1	1.260
	B19			二次	283.0	279.2	1.226
[9]	B1	钢筋 网	1.95	一次	264.2	339.0	1.057
	B2			二次	252.7	286.8	1.135
	B3		1.11	一次	307.8	286.9	0.932
	B4			二次	299.9	292.3	0.975
	B5		2.79	一次	230.0	241.1	1.048
	B6			二次	222.0	240.3	1.083
[10]	XB2	钢筋 网	1.95	二次	496.0	431.9	0.871
	XB3			二次	560.0	427.8	0.764
	XB4			一次	400.0	455.0	1.138
	XB5			一次	494.0	474.5	0.961
[11]	L1-1	钢筋 网	1.76	一次	443.8	307.3	0.692
	L1-2			一次	499.2	374.2	0.750
	L1-3			一次	568.8	394.6	0.694
	L2-1			一次	336.2	239.1	0.711
	L2-2			一次	377.6	262.2	0.694
	L2-3			一次	420.1	319.3	0.760

注: $V_u$ 为抗剪加固梁的试验值; $V_c$ 为用式(21)计算出的加固梁抗剪承载力理论值。

文献[7]的试验研究,主要考虑界面剂及粗糙度对加固梁抗剪承载力的影响,试验值与式(21)的计算值之比随着粗糙度增加而减小,且计算值明显低于试验值。试验测试值随着粗糙度增大而增加,由于实际施工时,粗糙度均较试验时低,试验中抹砂法测得粗糙度为0.54~3.04,实际施工时,一般在0.6左右,且试验中1~3号构件与之类似,说明计算公式对实际施工是比较适用的<sup>[16]</sup>。

对文献[11]的计算表明,当钢丝强度高时(试验中钢丝极限强度达到1 850 MPa),公式计算值明显低于试验值,计算时会带来较大误差,应适当提高式(21)中 $f_{yv}$ 的取值。

## 4 结 语

(1)对中国66根采用加筋高性能砂浆加固技术加固的RC梁抗剪性能进行了分析,认为虽然3类加固受力筋(高强钢绞线、钢筋网、钢丝网)的力学性能存在显著差别,但各自所加固的RC梁均具有显著的剪压破坏特性,加固有效限制了剪弯区裂缝的宽度,延迟了开展速度,提高了截面的剪切刚度和斜

截面抗剪承载力,其抗剪力学性能基本相似。

(2)依据中国加筋高性能砂浆加固钢筋混凝土梁式构件抗剪性能试验研究,建立了加固梁斜截面抗剪承载力计算公式,该公式考虑了一次受力、二次受力、持载程度、加固筋类型、加固筋数量、混凝土强度等级等因素的影响,适用范围较为广泛,可用于加筋高性能砂浆的抗剪承载力设计。

(3)由于抗剪加固最终发生剪压破坏,混凝土达到极限强度,原梁箍筋屈服并未进入强化阶段,此时加固箍筋应力能够达到原箍筋应力,但达不到自身屈服强度或极限强度,计算时可不考虑二次受力对加固梁抗剪承载力的影响,由此造成的误差较小。

(4)下一步研究应针对不同受力材料进行同批次对比试验,进一步验证公式计算的准确性。

## 参考文献:

### References:

- [1] 黄 华,刘伯权,吴 涛.高强钢绞线网加固 RC 梁抗剪性能及计算方法[J].中南大学学报:自然科学版,2011,42(8):2485-2492.  
HUANG Hua, LIU Bo-quan, WU Tao. Shear performance and design methods of strengthened RC beams with high strength steel wire mesh [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(8): 2485-2492. (in Chinese)
- [2] 黄 华,刘伯权,贺拴海,等.高强钢绞线网加固 RC 梁抗剪剥离承载力计算[J].中国公路学报,2013,26(2):102-109.  
HUANG Hua, LIU Bo-quan, HE Shuan-hai, et al. Calculation of shear debonding capacity of RC beams strengthened with high strength steel wire mesh [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2): 102-109. (in Chinese)
- [3] 黄 华,曾志成,刘伯权,等.高强钢绞线网加固 RC 梁界限用量[J].长安大学学报:自然科学版,2014,34(1):42-48.  
HUANG Hua, ZENG Zhi-cheng, LIU Bo-quan, et al. Critical dosage of high strength steel wire mesh for strengthened RC beams [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(1): 42-48.
- [4] 聂建国,蔡 奇,张天申,等.高强不锈钢绞线网一渗透性聚合砂浆抗剪加固的试验研究[J].建筑结构学报,2005,26(2):10-17.  
NIE Jian-Guo, Cai Qi, Zhang Tian-Shen, et al. Experimental study on shear behavior of RC beams strengthened with stainless steel wire mesh and permeability polymer mortar [J]. Journal of Building

- Structures, 2005, 26(2): 1-9. (in Chinese)
- [5] 卜良桃. 高性能复合砂浆钢筋网(HPF)加固混凝土结构新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 112-133.  
BO Liang-tao. New technology of using high capability ferrocement mortar to strengthen RC structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 112-133. (in Chinese)
- [6] 曾令宏. 高性能复合砂浆钢筋(丝)网加固混凝土梁试验研究与理论分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.  
ZENG Ling-hong. Experimental study and theoretical analysis on strengthening reinforced concrete beams with high-performance ferrocement [D]. Changsha: Hunan University, 2006. (in Chinese)
- [7] 张瑞文. 界面材料和粗糙度对 HPFL 加固 RC 梁抗剪性能影响的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.  
ZHANG Rui-wen. Experimental research on the influence of interface materials and roughness on shear behavior of RC beams strengthened with high performance ferrocement laminate [D]. Changsha: Hunan University, 2008. (in Chinese)
- [8] 罗利波. 水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土梁抗剪性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.  
LUO li-bo. Experimental research on shear strengthening of RC beams with CMMR [D]. Changsha: Hunan University, 2006. (in Chinese)
- [9] 叶 蓁. 高性能复合砂浆钢筋网加固伸臂梁受剪性能的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.  
YE Zhen. The experimental research on shear strengthening of the cantilever beam with the high performance ferrocement [D]. Changsha: Hunan University, 2007. (in Chinese)
- [10] 张雪宁. 水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土伸臂梁抗剪性能试验研究与理论分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006.  
ZHANG Xue-ning. Experimental study and theoretical analysis on shear performance of overhanging reinforced concrete beams strengthened with CMMR [D]. Changsha: Hunan University, 2006. (in Chinese)
- [11] 王军辉, 徐向东, 贾留东. 高强钢丝-聚合物砂浆加固梁抗剪性能的研究[J]. 山东建筑大学学报, 2008, 23(4): 293-297.  
WANG Jun-hui, XU Xiang-dong, JIA Liu-dong. Study on shear behavior of beams strengthened with the high strength steel wire and polymer mortar [J]. Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering, 2008, 23(4): 293-297. (in Chinese)
- [12] ICHINOSE T. A shear design equation for ductile R/C members [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1992, 21(3): 197-214.
- [13] 贾平一, 李延涛, 王立军. 基于桁架拱模型的抗剪承载力计算方法 [J]. 河北建筑工程学院学报, 2001, 19(1): 7-9.  
JIA Ping-yi, LI Yan-tao, WANG Li-jun. Calculation methods of shear strength on truss-arch model [J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Engineering, 2001, 19(1): 7-9. (in Chinese)
- [14] 赵树红, 叶列平. 基于桁架-拱模型理论对碳纤维布加固混凝土柱受剪承载力的分析 [J]. 工程力学, 2001, 18(6): 134-140.  
ZHAO Shu-hong, YE Lie-ping. Shear strength analysis of concrete column retrofitted with CFRP sheet based on strut-arch model [J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(6): 134-140. (in Chinese)
- [15] 刘立新. 钢筋混凝土深梁、短梁和浅梁受剪承载力的统一计算方法 [J]. 建筑结构学报, 1995, 16(4): 13-21.  
LIU Li-xin. An unified calculation method for shear capacity of RC deep beams, short beams and shallow beams [J]. Journal of Building Structures, 1995, 16(4): 13-21. (in Chinese)
- [16] 黄 华, 刘伯权, 刘卫铎. 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固层与 RC 结构粘结面性能试验 [J]. 中国公路学报, 2009, 22(3): 70-75.  
HUANG Hua, LIU Bo-quan, LIU Wei-duo. Experiments on bond performance between reinforced layer with steel wire mesh and polymer mortar and RC structures [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(3): 70-75. (in Chinese)