

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.090



开放科学(资源服务)标识码OSID:



# 钢-混组合加固梁承载能力试验研究

林佳辉<sup>1</sup>, 张爱军<sup>2</sup>, 朱旦<sup>3</sup>, 杨康华<sup>1</sup>, 沈鑫涛<sup>3</sup>, 谢旭<sup>1</sup>

(1. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058; 2. 华汇集团, 浙江绍兴 312099;  
3. 绍兴市基础设施建设投资有限公司, 浙江绍兴 312099)

**摘要:**针对外包钢板钢-混组合结构加固方法中结合面传力机理及植筋、剪力钉数量对结构承载能力的影响问题,开展植筋、剪力钉布置不同的6组钢板-混凝土组合加固梁弯曲试验,比较植筋、剪力钉布置间距对构件的力学行为和承载能力的影响;根据试验数据以构件的破坏形态分析钢-混结合面的工作和破坏机理。结果表明:采用外包钢板加固法加固时,相对于原结构,加固的外包钢板刚度较大,对结合面的强度要求较高,通过灌浆料连接植筋、剪力钉的方式很难满足钢-混结构变形一致的要求,在一定范围内增、减剪力钉数量对加固结构的刚度和极限承载力基本没有影响,但可以防止钢板发生早期局部失稳,充分发挥外包钢板的刚度和承载能力。

**关键词:**桥梁加固;外包钢板法;剪力钉;梁静力试验;受力机理

**中图分类号:**U443.35 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)02-0141-09

## Experimental study on the load-bearing capacity of steel-concrete composite strengthening beam

LIN Jiahui<sup>1</sup>, ZHANG Aijun<sup>2</sup>, ZHU Dan<sup>3</sup>, YANG Kanghua<sup>1</sup>, SHEN Xintao<sup>3</sup>, XIE Xu<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China; 2. Huahui Group, Shaoxing 312099, Zhejiang, P. R. China; 3. Shaoxing Infrastructure Construction Investment Company Limited, Shaoxing 312099, Zhejiang, P. R. China)

**Abstract:** This paper presents an experimental investigation on the load transition mechanism of the joint surface, and the effects of shearing stud and bar-planted placements on structural capacity for the steel-concrete composite strengthening structure with coated steel plate. Six groups of steel-concrete composite specimens with various deployments of shearing stud and bar-planted are carried out. The influences of the arrangement interval of shearing stud and bar-planted on the mechanical behavior and load-bearing capacity are compared; the working and damage behavior of the steel-concrete composite joint surface is studied based on the experimental data and failure modes. Results showed that compared with the steel-enveloped approach with greater rigidity of the reinforced structure, the structure is reinforced by the enveloped steel plate with greater rigidity, and the

**收稿日期:**2021-01-23

**基金项目:**浙江省建设科研项目(2019K181)

**作者简介:**林佳辉(1996-),男,主要从事桥梁加固研究,E-mail:21912079@zju.edu.cn。

谢旭(通信作者),男,教授,博士,E-mail:xiexu@zju.edu.cn。

**Received:** 2021-01-23

**Foundation item:** Zhejiang Provincial Construction and Scientific Research Projects (No. 2019K181)

**Author brief:** LIN Jiahui (1996-), main research interest: bridge reinforcement, E-mail: 21912079@zju.edu.cn.

XIE Xu (corresponding author), professor, PhD, E-mail: xiexu@zju.edu.cn.

strength of the joint surface is higher. The grouting-connected pattern of bar-planted and shearing stud cannot satisfy the correspondence deflection requirement of enveloped steel plates and inner-concrete cores due to the stricter strength requirement of the joint surface. Although the changes in number of shearing stud nearly have no effect on the structural stiffness and the ultimate capacity of the enforced components for a certain range, the premature local instability of enveloped steel plates is prevented, by which the plasticity and ductility can be fully utilized.

**Keywords:** bridge reinforcement; steel-enveloped approach; shearing stud; beam static load test; force mechanism

混凝土桥梁上部结构加固主要有粘贴钢板<sup>[1-4]</sup>、碳纤维法<sup>[5-9]</sup>、增大截面法<sup>[10-11]</sup>、体外预应力加固法<sup>[12-13]</sup>、钢-混组合结构法<sup>[14-16]</sup>等几种形式。其中,钢-混组合结构法是聂建国等<sup>[16]</sup>提出的一种加固方法,首先在原有混凝土结构表面凿毛和植筋,然后在原混凝土与钢板之间后浇混凝土,将钢板的抗剪连接件与植筋结合成整体,让原混凝土结构与新设的钢结构组合成整体,共同承担荷载,提高结构的承载能力和刚度。钢-混组合结构法主要适用于承载能力提升要求较高的加固工程,与传统的粘结钢板法相比,加固钢板的截面积大,加固后的钢结构提供了较大比例刚度,可以分担更多荷载。因此,结合面的强度和刚度对钢-混凝土组合结构的工作性能具有重要影响。

为了研究钢-混组合结构结合面的力学行为及结构承载能力计算方法,聂建国等<sup>[17]</sup>、王春生等<sup>[18-20]</sup>以简支T形、矩形梁为对象,对截面局部外包钢板组合加固简支梁进行了试验研究。结果表明,合理配置植筋和剪力钉,钢板和混凝土共同工作性能良好,可以大幅提高钢筋混凝土梁的承载力和刚度。根据试验结果,聂建国等认为,这种加固结构的承载能力计算方法与普通钢筋混凝土双筋梁计算方法相同,可用弹性分析法估计组合加固梁的开裂荷载,用极限状态分析法计算组合加固梁的受弯承载能力。王春生等假定加固混凝土与原梁混凝土、钢板和加固混凝土梁无相对滑移,采用钢筋混凝土双筋梁的塑形计算方法计算加固结构的抗弯承载力。其他国家关于钢板-混凝土组合加固方法的研究报道比较少见, Nozomi等<sup>[21]</sup>对3面包裹钢板的混凝土组合T梁开展了弯曲试验研究,结果表明,3面包裹钢板的组合结构加固法能够提高结构的抗弯承载能力,但强度低于配置与钢板等面积钢筋的钢筋混凝土梁,很难确保钢板与混凝土之间同工作;当剪力钉数量不够充分时,随着钢板面积的增加,用普通钢筋混凝土结构强度计算公式得到的计算结果

可能偏大,不能正确计算结构的承载能力。

与新建钢-混组合结构相比,加固结构的剪力钉无法植入到原混凝土内,目前一般采用新浇注混凝土的方法将钢板的剪力钉与原混凝土的植筋相连接,过密的植筋会导致原混凝土截面损伤大,影响既有结构的安全性。相反,剪力钉数量少且加固钢板截面积大时,在荷载作用下,钢板和混凝土之间会发生明显的滑移,这种滑移对结构的力学行为有不可忽视的影响。为了研究剪力钉布置方式对钢板截面相对较大的外包钢板-混凝土组合梁结构力学性能的影响,设计制作了6根试验梁,通过弯曲试验研究组合加固结构的力学性能及破坏机理,根据试验结果分析结合方式对结构力学行为的影响。

## 1 模型试验研究

### 1.1 试件设计及其材料参数

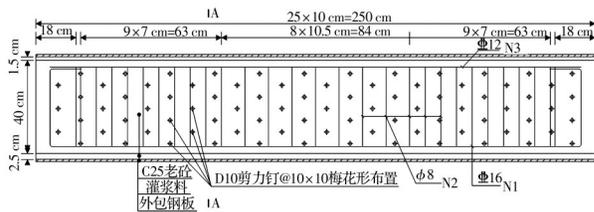
以钢板剪力钉和原有混凝土梁植筋的布置方式为参数,设计6根钢-混组合加固梁。按照弯曲破坏的模式确定梁的截面参数。试验梁的长度为2.5 m,计算跨径为2.3 m,内部完好混凝土梁的截面尺寸为175 mm(宽)×400 mm(高),表面四周凿毛,并按梅花形布置方式植筋;外包钢梁的截面尺寸为232 mm(宽)×460 mm(高),上下翼缘钢板厚度为9.75 mm,左右腹板厚度为5.75 mm;钢梁内侧焊接直径为10 mm、长度为25 mm的剪力钉,混凝土梁与钢梁之间灌注高强低收缩灌浆料。混凝土梁的强度为C25;截面下侧配3根直径为16 mm的HRB400受拉纵筋,上侧配两根直径为12 mm的HRB400受压纵筋;箍筋采用直径为8 mm的HRB400钢筋,跨中纯弯区的箍筋间距为105 mm,弯剪区的箍筋间距加密至70 mm。钢梁采用Q355B材料,分别选取截面尺寸为450 mm(宽)×30 mm(高)和350 mm(宽)×30 mm(高)的钢板各两块进行拉伸和弯曲试验,得出其屈服应力为474 MPa,拉伸强度为578 MPa,伸长率为26.5%。钢

板与混凝土之间的填充采用BY(S)-YJ100型水泥基灌浆料,通过对3个尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的立方体灌浆料28 d养护后,进行抗压试验,实测灌浆料立方体抗压强度为115 MPa。另外,根据试块抗压试验及钢筋拉伸试验结果,混凝土立方体抗压强度为29.4 MPa,钢筋屈服强度为460 MPa,抗拉强度为585 MPa。6根梁的编号依次为L1~L6,表1给出了试件的剪力钉布置方式。试件尺寸见图1。

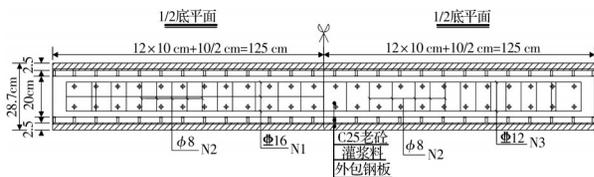
表 1 加固梁参数

Table 1 Parameters of reinforced beam specimen

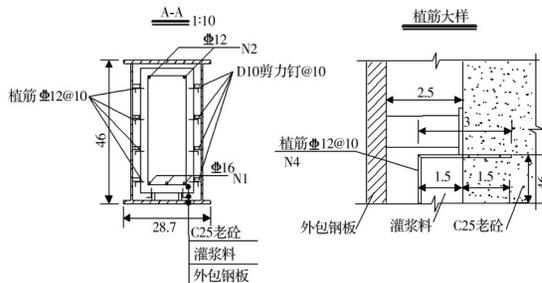
梁编号	剪力钉间距/mm	植筋间距/mm	布置方式
L1	100	100	剪力钉与植筋对应
L2	100	100	错开布置
L3	150	150	剪力钉与植筋对应
L4	150	150	错开布置
L5	200	200	剪力钉与植筋对应
L6	200	200	错开布置



(a) 加固梁立面图及植筋布置



(b) 加固梁顶底面图



(c) 加固梁横截面图(单位:cm)

图 1 加固梁设计

Fig. 1 Reinforced beam specimen

为了提高混凝土与灌浆料之间的结合强度,在混凝土表面凿毛并植入外露段长度为15 mm、埋入

段长度为15 mm的植筋。图2为外包钢板、混凝土梁及灌浆现场照片。灌浆时,钢梁上表面设排气孔,确保灌浆密实。



(a) 钢筋混凝土凿毛植筋



(b) 焊有剪力钉的外包钢板、灌浆

图 2 加固梁的制作

Fig. 2 Manufacture of reinforced beam

## 1.2 应变测点

应变测量采用120 Ω的电阻应变片,应变片布置如图3所示,编号为:构件编号(L1~L6)-材料(钢板S、混凝土C、钢筋R)-构件截面(1/4截面A、1/2截面B、3/4截面C)-处于截面的位置(顶部T、正侧面FS、反侧面RS、底部B)-每个位置的应变片从左到右、从上到下分别标1、2、3、4-应变片类型(单轴应变片U、应变花T)。如L1-R-C-T-2-U表示单轴应变片在构件-钢筋3/4截面顶部右侧钢筋上,其余类推。

## 2 试验及试验结果

### 2.1 组合结构结合面强度试验

为了检验钢板与灌浆料之间结合面的粘结强度,用相同工艺制作了8个钢板剪力钉连接试件进行推出试验(试件编号为G1~G8)。试件尺寸为287 mm(宽)×490 mm(高)×400 mm(长),内部混凝土尺寸为175 mm(宽)×440 mm(高)×400 mm(长)。在混凝土外侧套槽型钢板,两侧焊有剪力钉的钢板与混凝土侧面通过灌浆料粘结,混凝土表面进行凿毛植筋处理,顶板与混凝土上表面之间预留一定空隙。试验时,将混凝土表面外露一端放置在试验机上,在架空钢板一端施加压力,进行推出试验,测量结合面的抗剪强度。试件及其主要参数、加载方式如表2和图4所示。

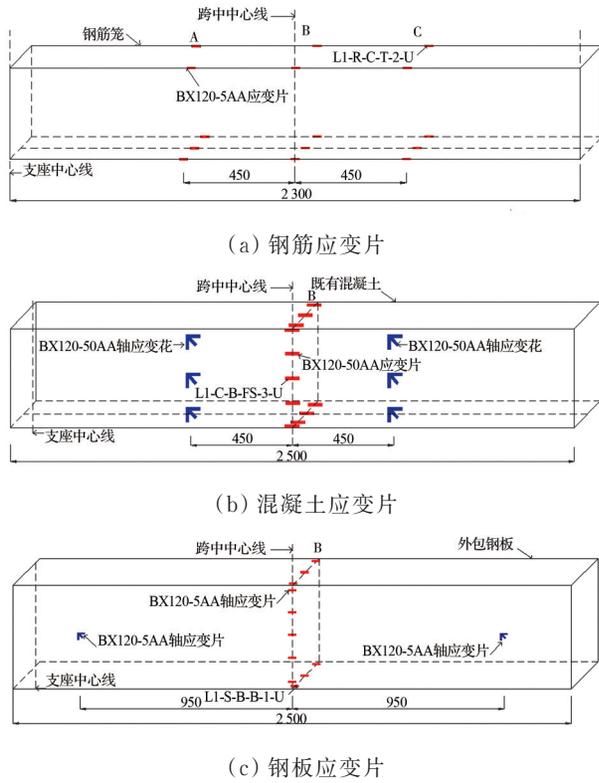


图 3 应变片布置(单位: mm)

Fig. 3 Distributions of strain gauges (Unit: mm)

表 2 剪力钉连接件参数

Table 2 Parameters of shearing stud connector

构件编号	单侧剪力钉个数	构件编号	单侧剪力钉个数
G1	0	G5	4
G2	0	G6	4
G3	1	G7	9
G4	1	G8	9

结合面推出试验在 1 000 kN 试验机上实施,如图 5 所示,通过位移计观察结合面有无滑动来判断粘结面是否失效,并确定对应的剪切强度。

对于没有剪力钉的试件 G1,仅在混凝土自重作用下发生滑动,表明钢板和灌浆料之间没有粘结力,结合强度需要依靠剪力钉和植筋的剪切强度来提供。如图 6 所示,单侧剪力钉个数为 0 和 1 的构件钢板和灌浆料的结合面发生破坏,单侧剪力钉个数为 4 和 9 的构件灌浆料和混凝土的结合面发生破坏。结果表明,随着剪力钉、植筋数量的增加,结合面的剪切破坏强度不断提高,在剪力钉数量较少时,剪切破坏主要由钢板和灌浆料之间的结合强度确定,在剪力钉数量较多时,剪切破坏主要由灌浆料与混凝土之间的结合强度确定。

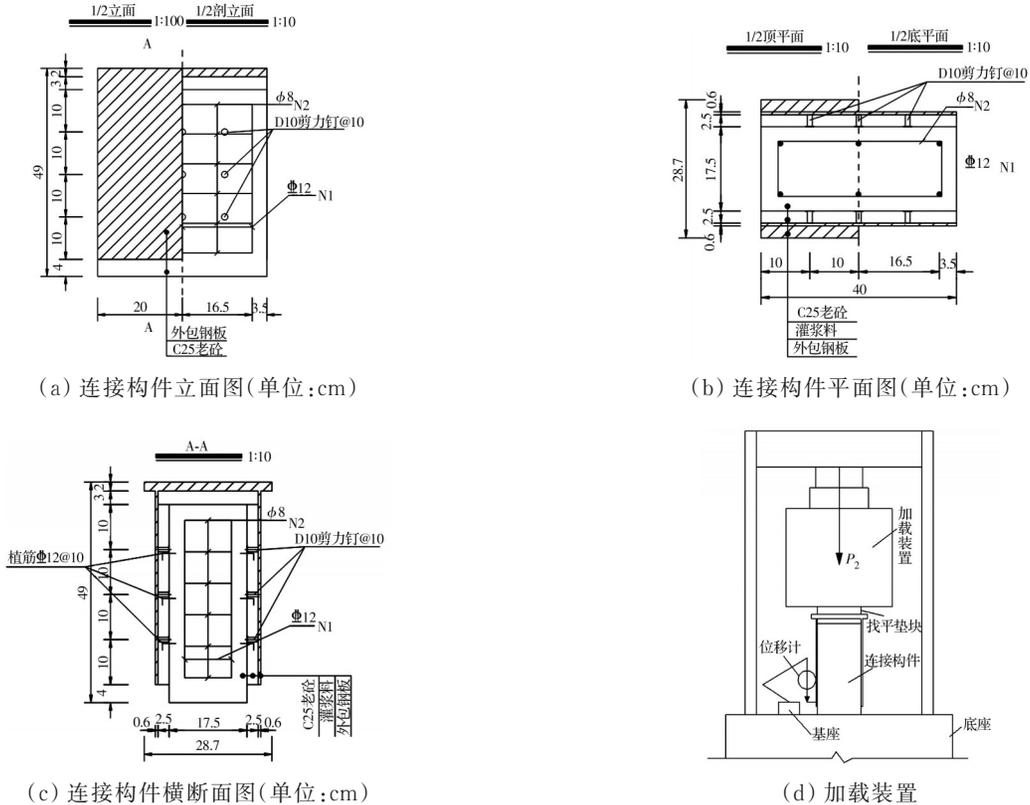


图 4 剪力钉连接件尺寸及加载装置

Fig. 4 Dimension of shearing stud connector and loading setup

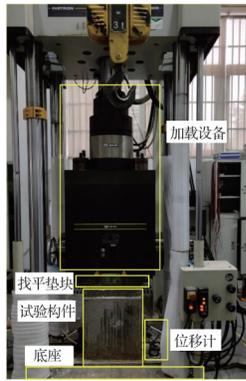


图 5 结合面抗剪试验

Fig. 5 Shear test of joint surface

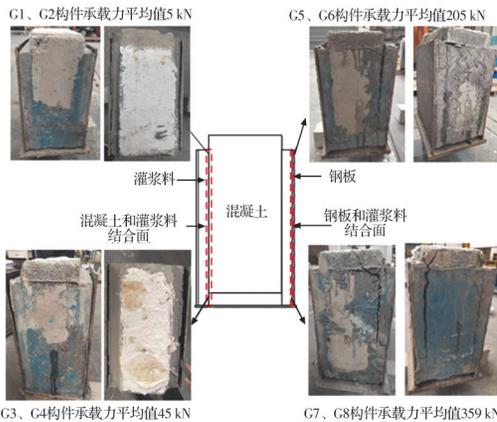


图 6 构件结合面的破坏形式

Fig. 6 Failure form of component joint surface

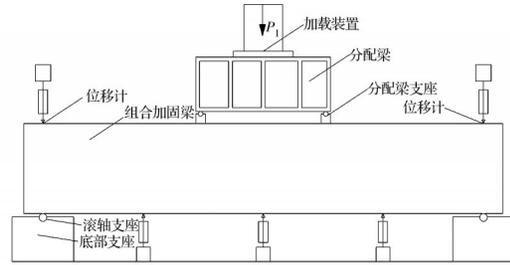
### 2.2 钢-混组合加固梁的弯曲试验

2.2.1 试验装置及加载程序 钢-混组合加固梁弯曲试验在 YAW-10000F 微机控制电液伺服多功能试验机上进行,利用分配梁对试件进行两点对称加载,梁的剪跨比为 2,中间段为纯弯曲变形。为保证组合梁在水平方向自由移动,在底部采用直径为 10 cm 的滚轴支座,分配梁支座采用直径为 2 cm 的滚轴支座,加载装置如图 7 所示。

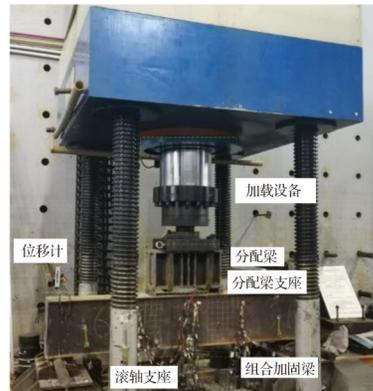
采用分级加载,每一级增量 100 kN,在施加压力至 1 000 kN 后,每一级增加 50 kN,并以位移增量作为加载的控制参数;当梁的承载能力下降到 90% 以后或发生过大位移、影响试验正常进行时,认为构件达到了极限状态,停止加载。

2.2.2 荷载-位移曲线 图 8 所示为 6 根加固梁荷载-挠度试验结果。图中纵坐标  $P_1$  为试验机施加的竖向荷载,横坐标  $w$  为跨中挠度。6 根试验梁虽然剪力钉、植筋数据不同,但是跨中荷载-挠度曲线相似,基本重合。

以 L5 为例说明梁的破坏过程。如图 9 所示,加



(a) 加固梁与加载装置立面示意图



(b) 试验加载装置现场

图 7 加载装置

Fig. 7 Loading setup

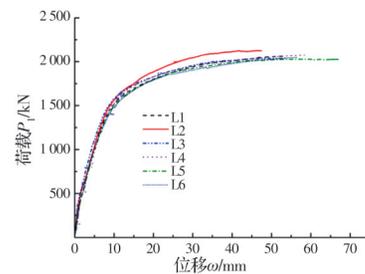


图 8 跨中荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves at mid-span

载初期,加载至 200 kN 时(A 点),在材料弹性阶段构件就出现刚度下降现象,随着加载的增加,刚度下降趋于明显。出现刚度下降的原因可能是钢板与灌浆或者灌浆料与混凝土之间发生了滑动。加载至 1 300 kN 时(B 点),梁体明显下挠,肉眼尚未发现钢板局部变形。加载至 1 900 kN 时(C 点),可以发现梁在纯弯区侧面及顶面钢板鼓包等明显局部变形。继续加载至 2 050 kN 时(D 点),结构承载能力达到最大,此后梁的承载能力开始下降,结构变形明显,承载能力下降到最大值的 90% 时,为防止仪器损坏,终止加载。

根据规范公式<sup>[22]</sup>可以算出内部钢筋混凝土梁及加固梁的极限承载能力分别为 90、2 448 kN,通过与

上述试验结果对比可以发现,加固后梁的承载力有较大提升,同时,加固梁的实际承载能力小于基于平截面假定的极限承载能力,表明滑动对加固梁的承载能力有明显影响。

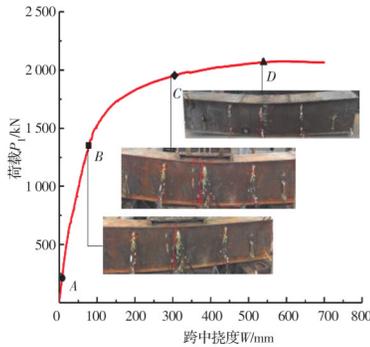


图 9 加固梁 L5 的破坏过程

Fig. 9 Failure process of reinforced beam L5

2.2.3 试件破坏形态 为观察梁体内部的破坏形态,试验结束后对位于纯弯段和弯剪段的加固钢板和灌浆料进行切割。如图 10 所示,在纯弯段,梁顶部的灌浆料及内部混凝土已经压碎,腹部两侧的灌浆料与钢板之间明显脱空;梁侧面和梁底的灌浆料和混凝土均有明显横向裂缝。在靠近加载截面附近,弯剪段梁侧面和梁底的灌浆料、混凝土也有明显横向裂缝,但开裂程度不如纯弯段。根据剖面分析结果可以发现,不同材料的界面存在脱空和滑移,内部材料在脱空处破坏最为严重。这表明,钢板与内部混凝土结构共同变形很难保证,存在相对变形;剪力钉除了传递剪力以外,还能起到阻止钢板发生局部变形、约束内部混凝土的作用;植筋起到传递剪力、增加灌浆料与混凝土结合面剪切强度的作用。由于灌浆料是传递荷载的中间环节,提高灌浆料与植筋的粘结力对改善结构强度和延性十分重要。

图 11 所示为打开构件其中一个侧面的破坏情况。绕剪力钉四周切开钢板,取出剪切钉,发现剪力钉与灌浆料已经分离。另一侧面的钢板不经开孔处理直接用撬棍撬开,钢板和灌浆料整体与混凝土分离。表明灌浆料开裂导致剪力钉与灌浆料或者植筋与灌浆料之间连接失效。

2.2.4 应变结果 图 12 所示为梁跨中截面钢腹板沿截面高度方向的纵向应变分布。其中,纵坐标为从梁底开始的截面高度  $h$ ,横坐标为应变  $\epsilon$ 。结果表明,加载初期截面变形基本符合平截面假定,荷载

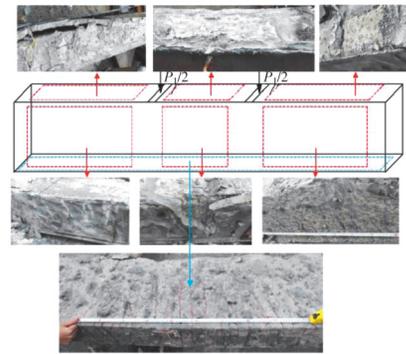


图 10 加固梁纯弯段的整体破坏

Fig. 10 The overall failure of the pure bending section off reinforced beam

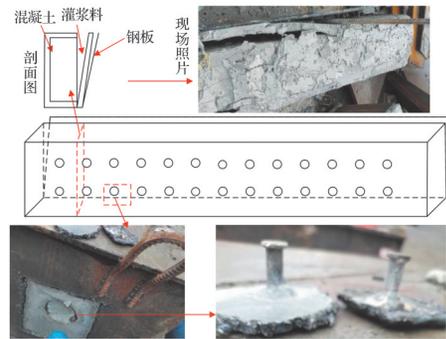


图 11 钢板与构件分离后的破坏状态

Fig. 11 Separation diagram of steel plate and component

增加至 400 kN 前后时,受压区变形开始不符合平截面假定,随着荷载继续增加至 1 000 kN 前后,由于中和轴明显上移,受拉区钢板的变形也开始不符合平截面假定。这是因为早期受压区钢板由于压应力发生了肉眼不可见的屈曲变形,在加载后期,内部混凝土和灌浆料开裂,钢板与灌浆料之间错动,导致受拉区钢板的变形不满足平截面假定。

应变实测结果表明,在弹性阶段或弹塑性初期,可用平截面假定理论计算截面的应变,但加载至后期时,平截面假定不成立,因此,基于平截面假

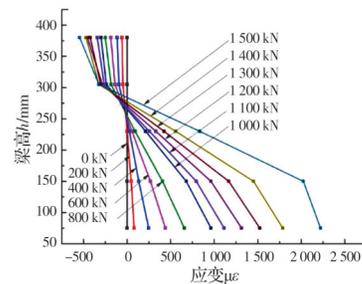


图 12 L5 跨中截面应变沿梁高的分布

Fig. 12 Distributions of L5 mid-span section strain along beam depths

定的极限承载能力和刚度计算结果会有较大误差。

图 13 所示试件 L3 钢筋、混凝土、钢板的荷载-应变曲线。为了对比参考,图中同时给出了梁跨中截面对应荷载-位移曲线的变化趋势。如图 1 所示,加载至 1 600 kN 左右时,受拉区混凝土开裂退出工作,引起钢筋、钢板应变的增加,继续加载至 1 700 kN 前后时,跨中截面底钢板和钢筋应力达到屈服。混凝土开裂应变达到  $4\ 000\ \mu\epsilon$ ,远超过素混凝土的抗拉应变  $150\ \mu\epsilon$ 。这表明,用灌浆料和钢板包裹后,套箍效应增大了混凝土的变形能力。

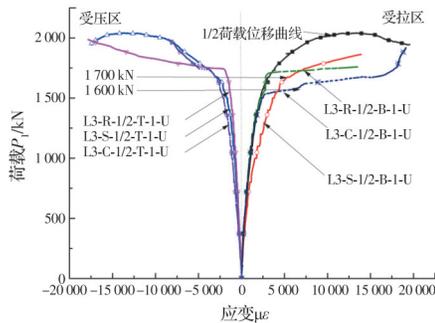


图 13 L3 各材料的荷载-应变曲线

Fig. 13 L3 Load-strain curve of each materials

另外,对比钢板的荷载-应变曲线和构件的荷载-位移曲线可以发现,两者的变化趋势一致,表明外包钢板的刚度对于构件的整体刚度影响较大。通过各种材料的应变变化过程可知,从 500 kN 开始,变化规律逐渐出现差异,到加载后期(1 300~1 600 kN 阶段)混凝土和钢板之间发生了相对滑移,差异进一步显著。因此,后期钢板与混凝土不能同步变形。

图 14 所示为构件 L1、L3、L5 的荷载-混凝土应变曲线。由图可知,在混凝土受拉开裂时,3 个构件荷载分别为 1 450(a 点)、1 550(b 点)、1 600 kN(c 点),剪力钉数量越多,混凝土的开裂应变越大。表明增加剪力钉数量能更好地确保混凝土与结构之间共同工作。

图 15 所示为构件 L1、L3、L5 的钢板荷载-应变曲线。由图可知,前期 3 个构件的钢板应变变化规律基本相同,但当荷载达到 1 500 kN 后,在相同荷载作用下,构件的剪力钉数目越多,钢板应变越小,说明钢板分担的荷载减少。这说明在一定程度上剪力钉数量影响钢板和混凝土的荷载分布,但在本文讨论范围内,这种影响比较有限。

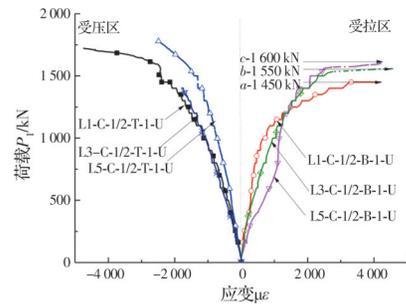


图 14 L1、L3、L5 混凝土荷载-应变曲线

Fig. 14 L1、L3、L5 concrete load-strain curve

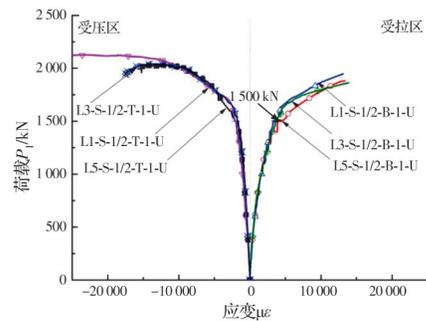


图 15 L1、L3、L5 钢板荷载-应变曲线

Fig. 15 Load strain curve of L1、L3、L5 steel plate

### 3 结论

通过钢板-混凝土组合梁的弯曲试验,研究外包钢板的加固结构力学特性,得到以下结论:

1) 外包钢板的组合加固法可以提高结构的承载力和延性,灌浆料和外包钢板的套箍作用能提高内部混凝土的变形能力。

2) 组合结构的破坏主要是由于混凝土及灌浆料开裂降低了剪力钉或者植筋的约束能力,导致钢板发生明显局部变形、混凝土被压碎。因此,剪力钉和植筋起到抑制钢板局部失稳的同时,提高灌浆料的强度也十分必要,否则难以发挥加固钢板的承载能力。

3) 在本文研究范围内,剪力钉数量对结构荷载-位移曲线的影响很小,钢板与灌浆料结合面在早期已开始发生了滑移,基于平截面假定的计算方法会过大评估组合结构的刚度和承载能力。

由试验可知,在加载前期,结构的刚度已经发生变化,粘结造成的滑移对该种加固方式的刚度影响不可忽略,提出考虑滑移影响的组合梁计算方法是建立外包钢板的组合结构加固法设计理论需要解决的一个重要问题。

## 参考文献

- [1] 王晓刚, 闫田田, 王宇, 等. 带肋钢板加固腹板开大洞口 RC 梁的受剪承载力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(3): 114-123.  
WANG X G, YAN T T, WANG Y, et al. Experimental research on shear capacity of RC beams with large web openings strengthened by ribbed steel plate [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(3): 114-123. (in Chinese)
- [2] ALAM M A, ONIK S A, MUSTAPHA K N B. Crack based bond strength model of externally bonded steel plate and CFRP laminate to predict debonding failure of shear strengthened RC beams [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 27: 100943.
- [3] 苏庆田, 王思哲, 薛智波, 等. 既有铆接钢桁梁桥拓宽改建时的主桁构件加固设计[J]. 桥梁建设, 2019, 49(4): 75-80.  
SU Q T, WANG S Z, XUE Z B, et al. Reinforcement design of main truss members of existing riveted steel truss bridge in a widening and reconstruction project [J]. Bridge Construction, 2019, 49(4): 75-80. (in Chinese)
- [4] 唐皇, 彭建新, 王晗. 不同钢板加固方式对锈蚀钢筋混凝土梁承载性能的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(6): 103-111.  
TANG H, PENG J X, WANG H. Influences of different steel plate strengthening methods on the bearing capacity of corroded reinforced concrete beams [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(6): 103-111. (in Chinese)
- [5] RAMACHANDRA MURTHY A, KARIHALOO B L, PRIYA D S. Flexural behavior of RC beams retrofitted with ultra-high strength concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 175: 815-824.
- [6] GUO X Y, HUANG P Y, WANG Y L, et al. Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) under hygrothermal environment considering the influence of CFRP: Concrete interface [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2021
- [7] AL-ROUSAN R, AL-SARAIREH S. Impact of anchored holes technique on behavior of reinforced concrete beams strengthened with different CFRP sheet lengths and widths [J]. Case Studies in Construction Materials, 2020, 13: e00405.
- [8] HUANG J, SHI J, XIAO H H, et al. Stressing state analysis of reinforcement concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced plastic [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2020, 14: 38.
- [9] TENG J G, CHEN J F, SMITH S T, et al. FRP strengthened RC structures [M]. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 2002.
- [10] 黄建锋, 朱春明, 龚治国, 等. 增大截面法加固震损钢筋混凝土框架的抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12): 9-17.  
HUANG J F, ZHU C M, GONG Z G, et al. Experimental study on seismic behavior of earthquake-damaged RC frame strengthened by enlarging cross-section [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(12): 9-17. (in Chinese)
- [11] 张森, 钱永久, 张方, 等. 基于增大截面法的混凝土加固石拱桥空间受力性能试验分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(1): 210-215.  
ZHANG M, QIAN Y J, ZHANG F, et al. Experimental analysis of spatial force performance of concrete-reinforced stone arch bridge based on enlarged section method [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(1): 210-215. (in Chinese)
- [12] 李双, 吴熠哲, 朱慈祥. 预应力混凝土连续梁桥二次加固及效果分析[J]. 桥梁建设, 2019, 49(5): 113-118.  
LI S, WU Y Z, ZHU C X. The second-time strengthening of a prestressed concrete continuous beam bridge and strengthening effect [J]. Bridge Construction, 2019, 49(5): 113-118. (in Chinese)
- [13] 吕宏奎. 某重载铁路连续刚构桥底板崩裂加固设计[J]. 桥梁建设, 2019, 49(1): 71-76.  
LYU H K. Reinforcement design for bursting cracks in bottom slab of a heavy-duty railway continuous rigid frame bridge [J]. Bridge Construction, 2019, 49(1): 71-76. (in Chinese)
- [14] 聂建国, 赵洁, 唐亮. 钢板-混凝土组合在钢筋混凝土梁加固中的应用[J]. 桥梁建设, 2007, 37(3): 76-79.  
NIE J G, ZHAO J, TANG L. Application of steel plate and concrete composite to strengthening of reinforced concrete girder [J]. Bridge Construction, 2007, 37(3): 76-79. (in Chinese)
- [15] 聂建国, 赵洁. 钢板-混凝土组合抗弯加固中滑移分布分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(12): 2085-2088, 2094.  
NIE J G, ZHAO J. Slip distribution analysis of steel plate-concrete composite flexural members [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(12): 2085-2088, 2094. (in Chinese)
- [16] 聂建国, 陶慕轩, 樊键生, 等. 钢-混凝土组合结构在桥梁加固改造中的应用研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(Sup1): 335-344.  
NIE J G, TAO M X, FAN J S, et al. Research on the Application of steel-concrete composite structure in

- bridge reinforcement [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(Sup1): 335-344. (in Chinese)
- [17] 聂建国, 赵洁. 钢板-混凝土组合加固钢筋混凝土简支梁试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(5): 50-56.  
NIE J G, ZHAO J. Experimental study on simply supported RC beams strengthened by steel plate-concrete composite technique [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(5): 50-56. (in Chinese)
- [18] 王春生, 袁卓亚, 郭晓宇, 等. 钢板-混凝土组合加固混凝土 T 梁的抗弯性能试验[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(6): 32-40.  
WANG C S, YUAN Z Y, GUO X Y, et al. Flexural behavior experiment of reinforced concrete T-beams with steel plate-Concrete composite strengthening [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(6): 32-40. (in Chinese)
- [19] 王春生, 高珊, 任腾先, 等. 钢板-混凝土组合加固带损伤钢筋混凝土 T 梁的抗弯性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(3): 94-101.  
WANG C S, GAO S, REN T X, et al. Bending behavior experiment of damage RC T-beams with steel plate and concrete composite strengthening [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(3): 94-101. (in Chinese)
- [20] 王春生, 袁卓亚, 高珊, 等. 钢板-混凝土组合加固矩形梁的抗弯性能试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(5): 65-73.  
WANG C S, YUAN Z Y, GAO S, et al. Flexural behavior test of rectangular reinforced concrete beams of steel plate-concrete composite strengthening [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 65-73. (in Chinese)
- [21] NOZOMI T, MASAMITSU S, HISASHI U, et al. Research on renewal method of existing RC viaduct beam utilizing composite structure [C]//10th Symposium on Utilization of Composite/Composite Structure, 2014 (in Japanese)
- [22] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2015.  
Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)