

文章编号:1671-1637(2019)02-0025-11

焊钉锈蚀后钢-混组合梁抗弯承载力简化计算方法

许波^{1,2}, 刘永健¹, 朱伟庆¹, 姜磊¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064; 2. 鄂尔多斯应用技术学院土木工程系, 内蒙古鄂尔多斯 017000)

摘要:为预测界面焊钉锈蚀后钢-混组合梁抗弯承载力,考虑了焊钉锈蚀后其抗剪强度与混凝土黏结强度和有效面积降低对焊钉抗剪承载力的劣化影响,提出焊钉锈蚀后组合梁抗剪连接度和锈蚀焊钉抗剪承载力系数的概念及其计算公式;基于塑性简化计算假定,采用焊钉锈蚀后组合梁抗剪连接度对其抗弯承载力进行折减,建立了焊钉锈蚀后组合梁正负弯矩区抗弯承载力计算模型,分析了23根组合梁抗弯承载力试验结果,验证了计算模型的有效性。试验结果表明:在焊钉锈蚀率低于10%时,试验梁正负弯矩区抗弯承载力的试验值与提出公式的理论计算值非常接近,其中正弯矩区试验值与计算值的平均比值为1.00,变异系数为0.04,负弯矩区二者平均比值为1.01,变异系数为0,由此可见,计算结果与试验结果吻合较好。简化计算方法可用作界面焊钉锈蚀率较小情况下钢-混组合梁抗弯承载力定量和定性分析。

关键词:钢-混组合梁;抗弯承载力;焊钉锈蚀;抗剪连接度;抗剪承载力系数;简化计算方法

中图分类号:U448.216 **文献标志码:**A

Simplified method of calculating flexural capacity of steel-concrete composite beam after stud corrosion

XU Bo^{1,2}, LIU Yong-jian¹, ZHU Wei-qing¹, JIANG Lei¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Department of Civil Engineering, Ordos Institute of Technology, Ordos 017000, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to forecast the flexural capacity of steel-concrete composite beam after the interface stud corrosion, the deterioration effects of the reductions of stud shear strength, bonding strength with concrete and stud effective area on the stud shear capacity after corrosion were mainly considered, and the concept and calculation formula of shear connection degree of composite beam and the stud shear capacity coefficient after stud corrosion were proposed. Based on the plasticity simplified calculation assumption, the calculation models of flexural capacity of positive and negative moment regions for the composite beam after stud corrosion were established by adopting the shear connection degree of composite beam after stud corrosion to reduce the composite beam flexural capacity. The test results of 23 composite beams were analyzed, and the validity of the model was verified. Test result shows that when the corrosion rate of stud is less than 10%, the test values of flexural capacity of positive and negative moment regions of the test beam are very close to the theoretical value calculated by the proposed formula. The mean ratio between the test value and the calculated value in the positive moment

收稿日期:2018-10-19

基金项目:交通运输部建设科技项目(2014 318 363 230);内蒙古自治区自然科学基金项目(2018MS05063);内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZC17407);鄂尔多斯应用技术学院科研教研项目(KYYB2017019)

作者简介:许波(1985-),男,内蒙古准格尔旗人,长安大学工学博士研究生,从事钢-混组合结构耐久性研究。

导师简介:刘永健(1966-),男,江西玉山人,长安大学教授,工学博士。

region is 1.00, and the variation coefficient is 0.04. Their mean ratio in the negative moment region is 1.01, and the variation coefficient is 0. It can be seen that the formula calculation results are in good agreement with the test results, and the simplified calculation method can be used for the quantitative and qualitative analysis on the flexural capacity of steel-concrete composite beams when the corrosion rate of interface stud is small. 2 tabs, 10 figs, 28 refs.

Key words: steel-concrete composite beam; flexural capacity; stud corrosion; shear connection degree; shear capacity coefficient; simplified calculating method

Author resumes: XU Bo(1985-), male, doctoral student, xubo152723@126.com; LIU Yong-jian(1966-), male, professor, PhD, lyj.chd@gmail.com

0 引言

近年来钢-混组合梁由于其自重轻、承载力高、结构高效与施工便利等优势在中国东南沿海地区跨海跨江大桥建设中得到广泛应用^[1-3]。由于沿海地区腐蚀环境影响,钢-混组合梁耐久性问题逐渐成为学者们关注的焦点。一方面混凝土桥面板在正负弯矩、自身收缩徐变、环境腐蚀与外部疲劳荷载等多因素耦合作用下极易开裂;另一方面采用预制混凝土桥面板装配化施工容易在钢梁和混凝土板接触面产生缝隙,如图1所示。这两方面的原因导致环境中腐蚀介质很容易通过混凝土桥面板的裂缝和结合界面缝隙进入到钢-混结合界面腐蚀焊钉,使焊钉抗剪承载力降低,进而减弱组合梁组合效应,加速环境腐蚀对于结构承载力的劣化作用。图2为美国普渡大学使用30年后的钢-混组合梁^[4],可知,环境对于组合梁钢-混结合界面的腐蚀严重,使得结构的耐久性和安全性存在很大风险。



图1 钢-混结合界面缝隙

Fig. 1 Steel-concrete bonded interfacial cracks

目前,国内外学者对界面焊钉的腐蚀原因、影响因素、腐蚀模型以及腐蚀后的组合梁承载力进行了大量试验与理论研究。翁雅谷等采用盐酸喷雾和干湿循环的方法对带裂缝的钢-混组合梁在负弯矩作用下混凝土板裂缝发展规律和焊钉锈蚀情况进行了



图2 使用30年的钢-混组合梁

Fig. 2 30 years of steel-concrete composite beam

研究,结果表明横向裂缝、纵向裂缝以及梁两端加载引起的裂缝是引起焊钉锈蚀率增大的主要因素^[5];吴建高等对不同界面构造形式的钢-混组合梁氯离子侵入试验发现,钢-混结合界面、湿接缝新旧混凝土界面与混凝土板的裂缝是腐蚀介质侵入腐蚀焊钉的主要途径^[6-7];苏庆田等通过试验研究发现组合梁荷载试验中初始裂缝最先出现于预留剪力槽的角隅处,因此,剪力槽和湿接缝区域新旧混凝土接触界面较预制混凝土板更易开裂,是影响组合梁结构耐久性的薄弱部位^[8-10];苏庆田等研究了盐雾腐蚀环境下6种钢-混界面构造形式以及初始界面滑移对组合梁焊钉抗剪承载力的影响,结果表明当钢梁上翼缘板埋到混凝土中时,焊钉的抗剪强度受腐蚀影响非常小^[11];石卫华研究了组合梁界面焊钉的锈蚀状态以及锈蚀后焊钉的抗剪承载力^[12];Stewart通过试验证明,界面焊钉锈蚀同混凝土中钢筋锈蚀类型相似,以局部点状锈蚀为主,在焊钉锈蚀后,组合梁力学性能会出现不同程度的劣化^[13];龚匡晖等研究了焊钉锈蚀后抗剪承载力的影响因素,指出焊钉锈蚀后其有效截面面积、抗拉强度和抗剪承载力降低是导致组合梁抗剪连接度、刚度和抗弯承载力降低的主要原因^[14-15];荣学亮等研究结果证明,当焊钉头部锈蚀率达到20%以上时,焊钉极限抗剪承载力

仅降低不到 4%,而同样腐蚀环境下,焊钉根部锈蚀率达到 20%左右时,其极限抗剪承载力降低 15%以上,是头部锈蚀后降低幅值的 3 倍多^[16-17];余志武等通过试验分析了焊钉锈蚀率与组合梁正弯矩区抗弯承载力的定量关系,并给出焊钉锈蚀后的本构关系^[18-19];Kuang 等通过锈蚀试验研究了焊钉锈蚀对钢-混组合梁正弯矩区抗弯承载力的影响^[20];李清元等通过组合梁锈蚀试验证明焊钉锈蚀后其有效截面面积、材料强度与抗剪承载力降低是导致组合梁刚度和抗弯承载力降低的主要原因,并给出焊钉锈蚀率与组合梁承载力的定量关系^[21-22];相比正弯矩区,组合梁负弯矩区同样也存在类似的问题,薛文等采用海绵包裹通电加速锈蚀的方法对 6 根钢-混组合梁负弯矩区的部分焊钉进行单独锈蚀试验,结果表明焊钉锈蚀率越大,组合梁抗弯承载力降低越明显,然而文献未给出相应的理论计算模型^[23]。对比正负弯矩区组合梁抗弯承载力随焊钉锈蚀率的劣化规律可以发现,焊钉锈蚀后导致的组合梁抗剪连接度减小是其承载力降低的本质原因。

鉴于此,本文在参考国内外相关规范中关于组合梁抗弯承载力塑性计算理论的基础上,考虑焊钉锈蚀对组合梁抗弯承载力的劣化作用,借鉴已有文献关于正弯矩区组合梁承载力的研究结论,研究了焊钉锈蚀后组合梁正负弯矩区抗弯承载力的统一简化计算方法,提出采用焊钉锈蚀后组合梁抗剪连接度作为折减参数来计算组合梁正负弯矩区截面抗弯承载力,并结合已有试验数据对其进行验证,为考虑界面焊钉锈蚀影响的正负弯矩区截面抗弯承载力简化计算提供参考,也为定量评估锈蚀环境下组合梁的安全性和耐久性提供依据。

1 计算方法

1.1 计算假定

组合梁达到承载能力极限状态之前,一般钢梁下翼缘和混凝土板内钢筋的应变均已超过材料屈服应变,截面塑性性能发展充分,可以采用塑性理论近似计算其极限抗弯承载力,日本《复合桥梁设计和施工指南》和欧洲规范中均采用这种方法。国内王庆利等采用简化塑性理论计算了组合梁负弯矩区极限抗弯承载力,精度满足工程规范要求^[24-25]。采用塑性理论计算组合梁截面抗弯承载力的前提是组合梁可以形成塑性铰,并且截面的大部分发生屈服。为此,本文计算基于以下几点假定。

(1)组合梁正负弯矩区达到极限状态之前形成

塑性铰,构件材料均可达到其屈服强度,即当正弯矩区达到极限状态时,混凝土板的压应力达到其抗压强度,而钢梁的拉压应力分别达到其屈服强度;当负弯矩区达到极限状态时,混凝土板内的纵向钢筋、焊钉和钢梁的应力分别达到其屈服强度。

(2)假定锈蚀环境对组合梁界面焊钉的锈蚀均匀,即忽略个别焊钉锈蚀的差异,相同环境下同一个组合梁的焊钉锈蚀率采用同一批焊钉的平均锈蚀率。

(3)通过焊钉锈蚀后组合梁抗剪连接度来表示焊钉锈蚀对组合梁抗弯承载力的影响,而在计算锈蚀后焊钉抗剪承载力时只考虑锈蚀后焊钉截面面积、焊钉抗拉强度和焊钉与混凝土协同工作性能 3 个因素的变化对其承载力的影响。

基于以上假定,在计算界面焊钉锈蚀后组合梁的抗弯承载力时,要考虑焊钉锈蚀对组合梁抗剪连接度的影响,为此需要计算界面焊钉锈蚀后组合梁的抗剪连接度。

1.2 钢-混组合梁抗剪连接度

《钢-混凝土组合桥梁设计规范》(GB 50917—2013)中规定:在计算组合梁正弯矩区塑性抗弯承载力时要考虑组合梁剪力连接程度对其承载力的影响,给出未锈蚀组合梁正弯矩区剪力连接程度 r_0 的计算公式为

$$r_0 = \frac{n_1 N}{\min\{A_1 f_1, A_2 f_2\}} \quad (1)$$

式中: n_1 为一个剪跨区的抗剪连接件的数量; N 为一个剪力连接件抗剪承载力设计值,根据《钢-混凝土组合桥梁设计规范》(GB 50917—2013)计算; A_1 、 A_2 分别为钢梁的截面面积和混凝土板受压区的截面面积; f_1 、 f_2 分别为钢梁与混凝土的抗压强度设计值。

界面焊钉一旦锈蚀,由于其单钉抗剪承载力发生变化,组合梁的剪力连接程度必然发生变化,因此,定义组合梁界面焊钉锈蚀后的剪力连接程度为锈蚀后组合梁的抗剪连接度。根据式(1)给出焊钉锈蚀后组合梁正弯矩区抗剪连接度的计算公式为

$$r_{pi} = \frac{K_i n_2 N + n_3 N}{\min\{A_1 f_1, A_2 f_2\}} \quad (2)$$

式中: r_{pi} 为当焊钉平均锈蚀率为 i 时组合梁正弯矩区的抗剪连接度; n_2 、 n_3 分别为锈蚀和未锈蚀焊钉的数量; K_i 为焊钉平均锈蚀率为 i 时焊钉抗剪承载力系数。

类比式(1)、(2)得到组合梁负弯矩区焊钉未锈蚀和锈蚀后抗剪连接度计算公式为

$$r'_0 = \frac{n_1 N}{\min\{A_3 f_3, A_4 f_4\}} \quad (3)$$

$$r_{ni} = \frac{K_i n_2 N + n_3 N}{\min\{A_3 f_3, A_4 f_4\}} \quad (4)$$

式中： r'_0 为未锈蚀组合梁负弯矩区的抗剪连接度； r_{ni} 为当焊钉平均锈蚀率为*i*时组合梁负弯矩区的抗剪连接度； A_3 、 A_4 分别为混凝土板纵向受力钢筋的面积和钢梁受压区的面积； f_3 为混凝土板纵向受力钢筋抗拉强度设计值； f_4 为钢梁抗压强度设计值。

当组合梁界面焊钉全部锈蚀时，式(2)、(4)中的 n_3 为0，可改写为

$$r_{pi} = \frac{K_i n_2 N}{\min\{A_1 f_1, A_2 f_2\}} = K_i r_0 \quad (5)$$

$$r_{ni} = \frac{K_i n_2 N}{\min\{A_3 f_3, A_4 f_4\}} = K_i r'_0 \quad (6)$$

式(5)、(6)建立了界面全部焊钉锈蚀前后组合梁的抗剪连接度的关系，其关键在于确定焊钉锈蚀后单钉的抗剪承载力系数 K_i ，而要确定 K_i 可以采用2种方法：第1种可以通过拟合焊钉锈蚀后的推出试验数据得到，但这种方法计算结果准确的前提是要通过不同焊钉锈蚀率下大量的焊钉推出试验数据来确定，否则结果可靠性较差；第2种可以通过分析焊钉锈蚀后抗剪承载力降低的原因，结合一些焊钉锈蚀强度试验数据和推出试验数据，考虑各种影响因素的降低规律，综合给出焊钉锈蚀后抗剪承载力系数随锈蚀率的变化规律，再结合不同试验结果进行验证。本文采用第2种方法。

大量研究结果表明^[12,14,21,26-27]：焊钉锈蚀后抗剪承载力降低原因与钢筋锈蚀后钢筋混凝土梁承载力降低原因类似，主要包括以下几点。

(1)焊钉锈蚀会引起焊钉截面面积减小、焊钉抗拉强度降低，从而导致焊钉抗剪承载力降低。

(2)焊钉锈蚀产物会产生体积膨胀(2~4倍)，导致焊钉周围混凝土开裂损伤，影响焊钉与混凝土的协同工作性能，进一步加剧锈蚀的劣化作用。

(3)焊钉表面由于不均匀锈蚀出现的锈坑，易引起应力集中，严重影响焊钉的疲劳性能，试验结果表明焊钉锈蚀后其疲劳寿命明显下降，当锈蚀率达到20%时，其疲劳寿命下降高达40%^[16]；在计算焊钉锈蚀后的抗剪承载力时，忽略锈蚀引起应力集中的影响，主要考虑锈蚀后焊钉面积减少、抗拉强度降低以及与混凝土协同工作性能劣化三方面因素对其抗剪承载力的影响，并考虑相互叠加影响，给出焊钉锈蚀后抗剪承载力系数 K_i 的计算公式

$$K_i = C_i S_i E_i \quad (7)$$

式中： C_i 为焊钉锈蚀率为*i*时焊钉与混凝土的协同工作系数； S_i 为焊钉锈蚀率为*i*时焊钉抗剪强度系数； E_i 为焊钉锈蚀率为*i*时焊钉有效面积系数。

本文对文献[12]中焊钉锈蚀试验数据(锈蚀率小于10%)进行指数拟合，如图3所示，得到 C_i 的拟合公式如式(8)所示，决定系数 $R^2=0.9297$ ；根据钢材力学性能可知钢材的抗剪强度和抗拉强度之间存在定量的比例关系，可根据焊钉锈蚀后抗拉强度材料试验数据拟合得到，本文直接选取文献[21]中对30组不同锈蚀率(锈蚀率为0~16.05%)下焊钉的名义屈服抗拉强度随锈蚀率变化的拟合公式作为 S_i 的计算公式，如式(9)所示； E_i 可用锈蚀后焊钉的有效面积率表示，记为式(10)

$$C_i = 0.970 1e^{-0.074 0i} \quad (8)$$

$$S_i = 1.009 1e^{-0.027 9i} \quad (9)$$

$$E_i = 1 - i \quad (10)$$

将式(8)~(10)代入式(7)可得焊钉锈蚀后抗剪承载力系数的表达式

$$K_i = 0.978 9e^{-0.101 9i} (1 - i) \quad (11)$$

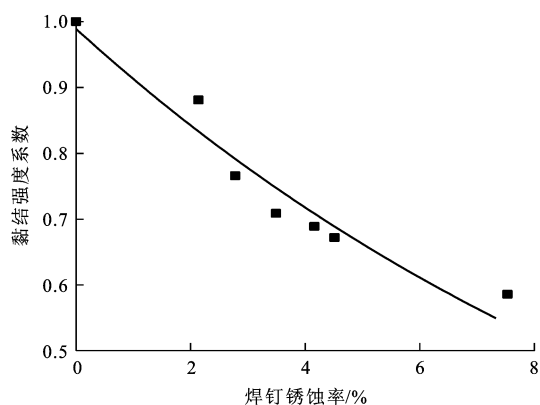


图3 焊钉与混凝土黏结强度系数随锈蚀率变化曲线

Fig. 3 Variation curve of bonding strength coefficient between stud and concrete with corrosion rate

1.3 焊钉锈蚀后正负弯矩区抗弯承载力计算方法

1.3.1 正弯矩区抗弯承载力计算方法

由前文分析可知，焊钉锈蚀会直接降低焊钉的抗剪承载力，从而弱化钢梁和混凝土桥面板的组合效应，最终导致钢-混组合梁承载力和刚度降低。为了研究焊钉锈蚀后组合梁的抗弯承载力变化规律，国内学者们对此进行了大量的试验研究，并基于试验数据拟合提出一些考虑焊钉锈蚀影响的正弯矩区抗弯承载力计算模型^[18-22]。计算模型在聂建国等提出的未锈蚀组合梁正弯矩区抗弯承载力塑性简化计算公式^[2]的基础上，考虑焊钉锈蚀对组合梁抗弯承载力的劣化影响，在组合梁抗

剪连接度的方根前引入有关焊钉锈蚀率的代数式来对其进行折减,但由于公式都是基于试验数据拟合得到的,所以代数式形式各异,本文在借鉴其研究结果的基础上,用焊钉锈蚀后的抗剪连接度来代替原抗剪连接度,得到焊钉锈蚀后组合梁正弯矩区抗弯承载力统一表达式为

$$M_{pi} = M_1 + \sqrt{r_{pi}}(M - M_1) \quad (12)$$

式中: M_{pi} 为焊钉锈蚀后组合梁正弯矩区抗弯承载力; M_1 为钢梁提供的抗弯承载力; M 为完全抗剪连

接钢-混组合梁的抗弯承载力。

图 4(a)为组合梁正弯矩区抗弯承载力计算横截面, M 和 M_1 的计算参考图 4(b)、(c),计算公式为

$$M_1 = f_5 W \quad (13)$$

$$M = xbf_2 d_1 = f_5 A_1 d_1 \quad (14)$$

式中: W 为钢梁的塑性抵抗弯矩; f_5 为钢梁的屈服强度; d_1 为受压区混凝土形心到钢梁受拉区形心的距离; x 为混凝土板受压区高度; b 为混凝土桥面板的有效宽度。

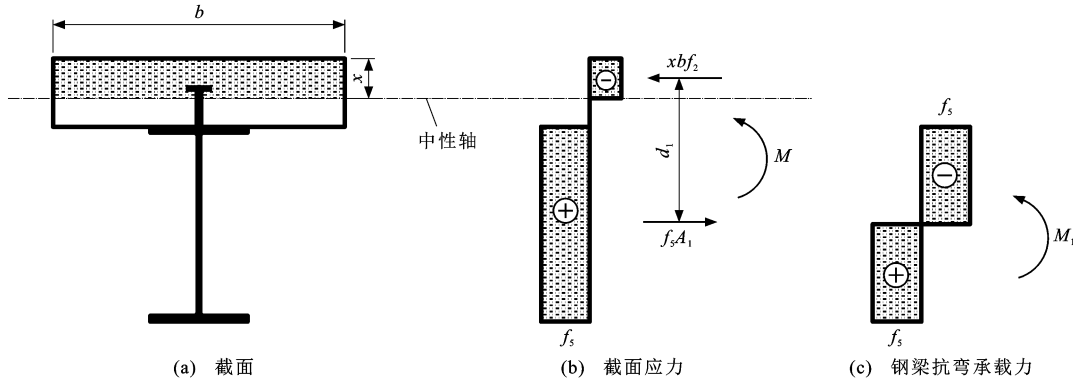


图 4 组合梁正弯矩区抗弯承载力计算(中性轴在混凝土板内)

Fig. 4 Flexural capacity calculation of positive moment region for composite beam (neutral axis in concrete slab)

式(12)适用于完全抗剪或部分抗剪连接的钢-混组合梁正弯矩区抗弯承载力计算,将焊钉锈蚀后组合梁的抗剪连接度计算结果直接代入公式计算即可,无需考虑其锈蚀后抗剪连接度是否小于 1。当组合梁界面焊钉全部锈蚀时,将式(5)、(11)代入式(12)可得到不同焊钉锈蚀率下钢-混组合梁正弯矩区抗弯承载力的计算公式为

$$M_{pi} = M_1 + \sqrt{0.978 9e^{-0.101 9r}(1-i)} \sqrt{r_0}(M - M_1) \quad (15)$$

1.3.2 负弯矩区抗弯承载力计算方法

参照日本和欧洲规范关于计算组合梁抗弯承载力的规定,计算组合梁负弯矩区抗弯承载力时,认为其抗弯承载力主要由钢梁和混凝土内的纵向受力钢筋提供。在计算公式中未考虑混凝土与焊钉的承载力贡献,然而混凝土、钢筋和焊钉的良好黏结是保证钢梁和纵向钢筋能否达到其屈服强度的关键,所以一般负弯矩区均要求完全抗剪连接,但是在焊钉锈蚀后,由于焊钉抗剪承载力的降低必然引起组合梁抗剪连接度减小,使得纵向钢筋的强度无法充分利用,进而导致组合梁抗弯承载力降低,因而类比正弯矩区抗弯承载力计算方法,可以采用相同的方法来考虑负弯矩区焊钉锈蚀对其抗弯承载力的影响。

当焊钉锈蚀后,组合梁负弯矩区抗剪连接度小于 1 时,计入焊钉锈蚀引起抗剪连接度降低产生的

负弯矩区抗弯承载力降低效应,通过对负弯矩区纵向钢筋的受力面积进行折减来计算其抗弯承载力,参照焊钉锈蚀后组合梁正弯矩区抗弯承载力计算公式,折减参数取焊钉锈蚀后组合梁抗剪连接度的平方根,得到焊钉锈蚀后组合梁负弯矩区抗弯承载力一般表达式为

$$M_{ni} = 1.1(M_1 + \sqrt{r_{ni}}M_2) \quad (16)$$

$$M_2 = M_3 + M_4 \quad (17)$$

$$M_3 = f_6 A_5 d_2 \quad (18)$$

$$M_4 = f_7 A_6 d_3 \quad (19)$$

$$d_2 = d_4 - a_1 - \frac{1}{4}h_1 + \frac{1}{2}h_2 \quad (20)$$

$$d_3 = d_4 - a_2 - \frac{1}{4}h_1 + \frac{1}{2}h_2 \quad (21)$$

$$d_5 = \frac{1}{2}h_1 - h_2 \quad (22)$$

$$h_2 = (f_5 A_1 - f_6 A_5 - f_7 A_6) / 2f_5 b' \quad (23)$$

式中: M_{ni} 为焊钉锈蚀后组合梁负弯矩区抗弯承载力; M_1 、 M_2 分别为钢梁和纵向钢筋所提供的抗弯承载力; M_3 、 M_4 分别为上、下层纵向钢筋提供的塑性抵抗弯矩; f_6 、 f_7 分别为上、下层纵向钢筋的屈服强度; A_5 、 A_6 分别为上、下层纵向钢筋的面积; d_2 、 d_3 分别为上、下层纵向钢筋截面形心到 d_5 中心的距离; d_5 为钢梁截面形心轴到组合梁截面

中性轴的距离; h_1 为钢梁的高度; h_2 为钢梁受拉区的高度; b' 为钢梁截面的换算宽度,对于工字形梁可近似认为是其腹板宽度; d_4 为组合梁混凝土板上翼缘到钢梁形心轴的距离; a_1 、 a_2 分别为负弯矩区混凝土板内顶、底层纵向钢筋截面中心到混凝土板上翼缘的距离。

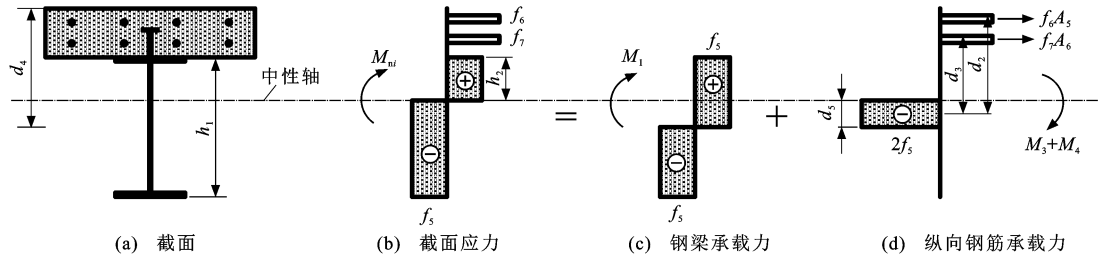


图 5 组合梁负弯矩区抗弯承载力计算(中性轴在钢梁腹板内)

Fig. 5 Flexural capacity calculation of negative moment region for composite beam (neutral axis in steel beam web)

当组合梁界面焊钉全部锈蚀时,将式(6)、(11)代入式(16)可得

$$M_{ni} = 1.1(M_1 + \sqrt{0.978 \cdot 9e^{-0.101 \cdot 9i} (1-i)}} \sqrt{r_0} M_2) \quad (24)$$

综上所述,采用焊钉锈蚀后组合梁的抗剪连接度计算组合梁正负弯矩区的抗弯承载力的流程见图 6,图中: B_0 为未锈蚀焊钉的截面面积; B_i 为焊钉锈蚀率为 i 时焊钉的有效截面面积。

2 文献数据验证

为了验证本文简化计算方法的合理性和准确性,

图 5(a)为组合梁负弯矩区横截面,图 5(b)为该横截面应力分布,图 5(c)为组合梁钢梁部分提供的抗弯承载力,图 5(d)为组合梁混凝土板中纵向钢筋提供的抗弯承载力。 M_1 和 M_2 的计算分别见图 5(c)、(d), M_2 的计算公式同式(13)。当中性轴在钢梁腹板内时,根据力的平衡方程可得 h_2 。

对界面焊钉锈蚀后组合梁正负弯矩区抗弯承载力试验的大量数据进行分析^[12,14,19-21,23],并按照文献公式和本文计算公式进行了对比验证。其中,文献中试验所处环境均为加速锈蚀环境,与本文推导公式环境条件相同,并且试验数据及理论计算假定基本相同,文献公式具体推导过程可参见相关文献。

在验算过程中,根据本文公式计算所需的截面尺寸和材料强度均与数据来源文献相同,组合梁在正弯矩作用下的极限状态以混凝土板压碎或钢梁达到屈服强度为标准。文献[19]、[21]中试验梁加载

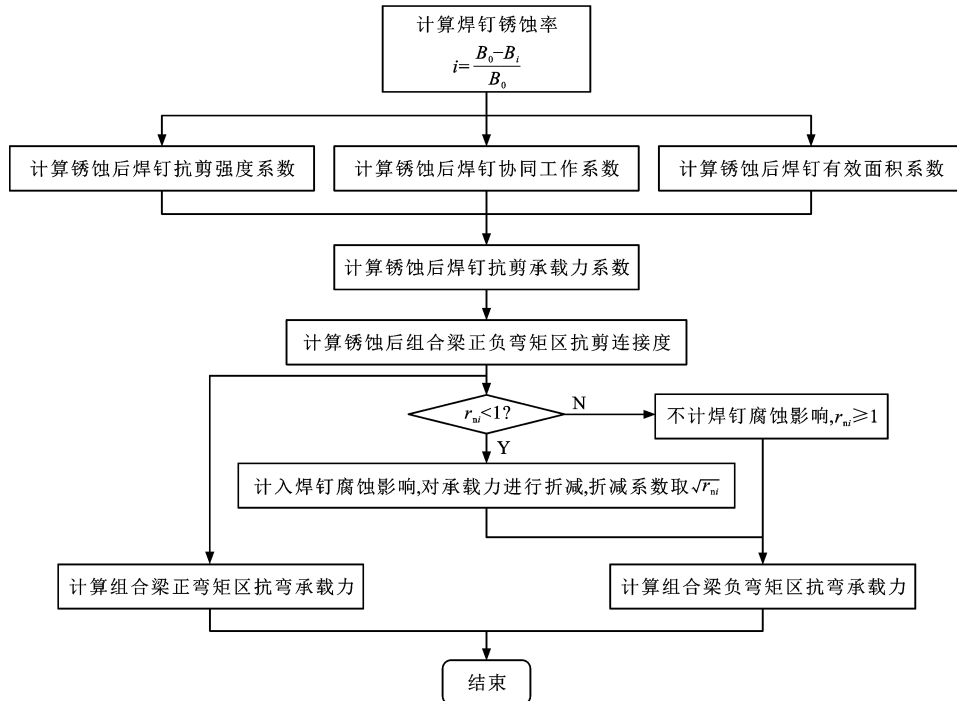


图 6 焊钉锈蚀后组合梁抗弯承载力计算流程

Fig. 6 Calculation flow of composite beam flexural capacity after stud corrosion

方式与截面尺寸见图 7,文献中组合梁的抗弯承载力试验值和理论计算值及其二者的比值见表 1 和图 8,可见:组合梁正弯矩区截面抗弯承载力试验值 M_E 与式(15)计算结果 M_{pr} 比值的平均值为 1.00,变异系数仅为 0.04,说明二者吻合度非常好,而试验值 M_E 与文献[19]理论计算结果 M_5 、文献[21]理论计算结果 M_6 和文献[12]理论计算结果 M_7 比值的平均值分别为 1.00、0.99、0.99,相应的变异系数分别为 0.02、0.04、0.03;对比结果可以发现式(15)计算结果与数据来源文献的拟合公式计算结果非常接近,然而,当焊钉锈蚀率大于 10%时,式(15)的预测值与试验值相差较大,例如表 1 中 L4 梁的式(15)理论计算值与试验抗弯承载力比值为 1.14,其原因主要是本文采用的焊钉锈蚀后与混凝土协同工作系数计算公式是基于文献[12]中的试验数据拟合得到的,该试验数据量较少,而且焊钉的锈蚀率均低于 10%,缺乏较大锈蚀率下的试验结果,所以拟合公式

计算结果在锈蚀率较大时不太准确,后期需要补充较大焊钉锈蚀率下的试验数据再进一步修正式(15);与数据来源文献的拟合公式计算结果相比,式(15)计算精度满足工程要求,并且理论性更强,在计算过程中用到的焊钉锈蚀后抗剪承载力参数是在理论分析焊钉锈蚀后抗剪承载力降低原因的基础上提出的,并且结合大量材料试验数据给出了每项影响系数的计算公式,并非直接根据试验结果拟合得到承载力计算公式,所以式(15)适应性更强,可用于焊钉锈蚀率低于 10%时组合梁正弯矩区抗弯承载力的定量评估。

而关于焊钉锈蚀后组合梁负弯矩区抗弯承载力试验研究较少,没有相关简化计算公式可以参考,本文采用文献[23]的试验数据,试验梁加载与截面见图 9,图 9(a)中黑色的焊钉为负弯矩区锈蚀焊钉,其他为未锈蚀焊钉,由于试验是对组合梁负弯矩区的部分焊钉进行锈蚀,所以在计算锈蚀后组合梁的抗

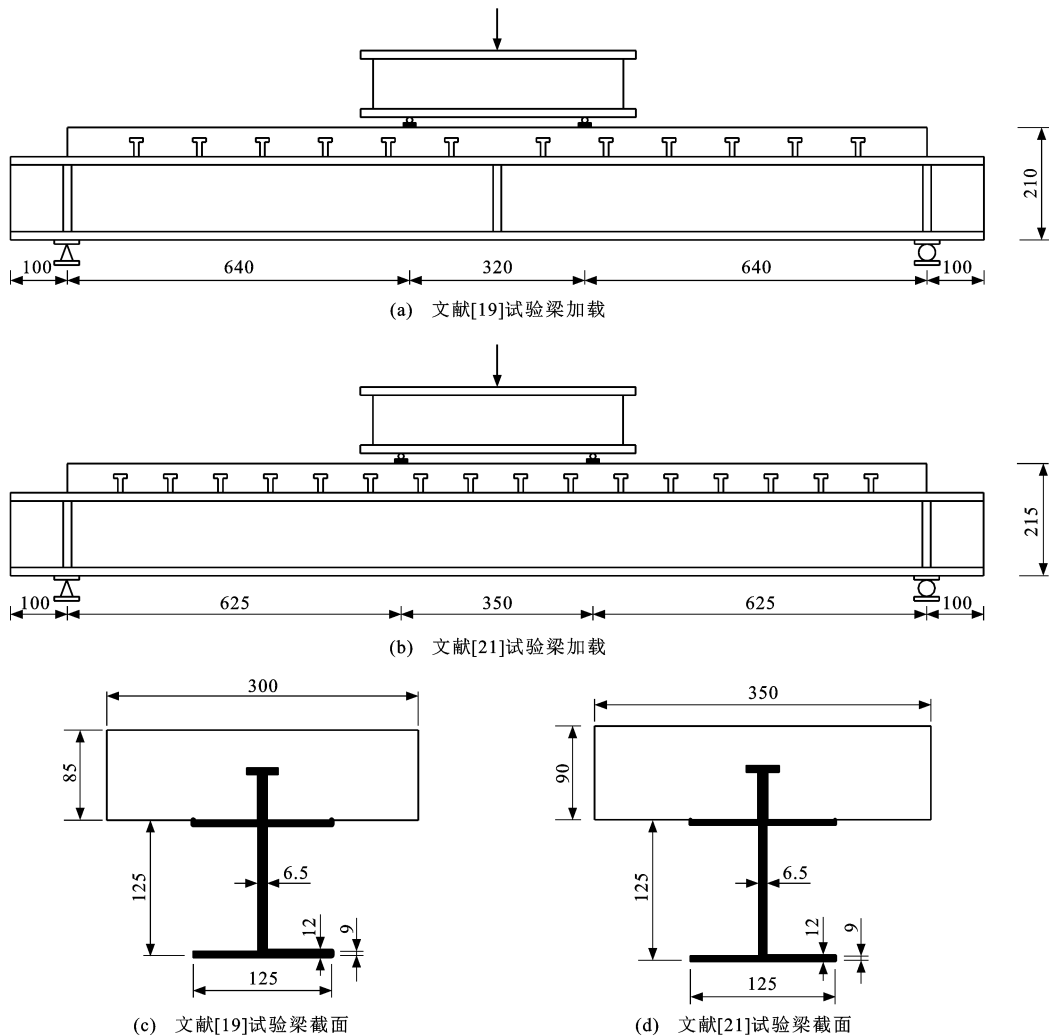


图 7 试验梁正弯矩区加载与截面(单位:mm)

Fig. 7 Loadings and sections of test beams in positive moment region (unit: mm)

表 1 正弯矩区抗弯承载力计算值与试验值比较

Tab. 1 Comparison of calculated and test values of positive moment region flexural capacity

试件来源	试件编号	焊钉锈蚀率/%	$M_E / (kN \cdot m)$	$M_{pi} / (kN \cdot m)$	$\frac{M_E}{M_{pi}}$	$M_5 / (kN \cdot m)$	$\frac{M_E}{M_5}$	$M_6 / (kN \cdot m)$	$\frac{M_E}{M_6}$	$M_7 / (kN \cdot m)$	$\frac{M_E}{M_7}$
文献[19]	L0	0.00	89.60	89.27	1.00	87.07	1.03	89.27	1.00	88.80	1.01
	L1	2.28	80.00	83.67	0.96	84.34	0.95	84.57	0.95	85.45	0.94
	L2	5.11	80.00	78.03	1.03	81.21	0.99	79.43	1.01	81.30	0.98
	L3	8.11	75.20	72.94	1.03	78.16	0.96	74.72	1.01	76.89	0.98
	L4	12.2	76.80	67.24	1.14	74.41	1.03	69.32	1.11	70.89	1.08
文献[21]	SCA0	0.00	95.90	97.16	0.99	94.64	1.01	97.16	0.99	96.63	0.99
	SCA7	0.15	94.75	96.21	0.98	94.43	1.00	96.79	0.98	96.37	0.98
	SCB7	0.41	93.82	95.50	0.98	94.07	1.00	96.15	0.98	95.94	0.98
	SCA2	0.63	93.80	94.90	0.99	93.76	1.00	95.62	0.98	95.57	0.98
	SCB2	0.66	93.30	94.82	0.98	93.72	1.00	95.54	0.98	95.52	0.98
	SCB6	0.72	92.30	94.67	0.97	93.64	0.99	95.40	0.97	95.42	0.97
	SCA6	0.76	91.90	94.56	0.97	93.58	0.98	95.30	0.96	95.35	0.96
	SCA3	1.40	92.59	92.88	1.00	92.70	1.00	93.79	0.99	94.28	0.98
	SCB3	1.74	92.10	92.01	1.00	92.25	1.00	93.01	0.99	93.71	0.98
	SCB4	2.08	92.06	91.16	1.01	91.79	1.00	92.24	1.00	93.14	0.99
SCA4	2.15	91.50	90.96	1.01	91.69	1.00	92.06	0.99	93.00	0.98	

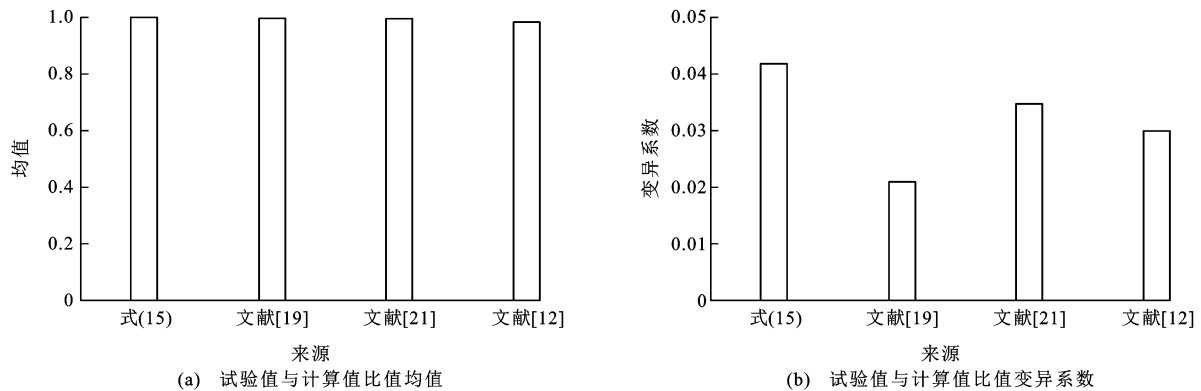


图 8 试验值与计算值比值数值分析

Fig. 8 Numerical analysis of ratio between test value and calculated value

剪连接度时采用式(4),将其计算结果和文献[23]中组合梁负弯矩区抗弯承载力试验值 M'_E 列于表 2,可知:部分焊钉锈蚀后组合梁的抗剪连接度小于 1,因此,要计入焊钉锈蚀对组合梁抗弯承载力的折减作用,可以采用式(16)简化计算;计算结果与试验结果非常接近,二者比值的平均值为 1.01,而且分布非常均匀,变异系数为 0;之所以在式(16)的右边引入系数 1.1,是因为在未锈蚀情况下,该公式计算值一般均比试验值偏小近 10%,其原因主要是忽略负弯矩区锈蚀焊钉对组合梁抗弯承载力的贡献^[28];另外,理论计算采用的是钢梁和钢筋的屈服强度,而达到极限状态时钢梁和钢筋的实际应力已经超过其

表 2 负弯矩区抗弯承载力计算值与试验值比较

Tab. 2 Comparison of calculated and test values of negative moment region flexural capacity

试件编号	焊钉锈蚀率/%	$\sqrt{r_{ni}}$	$M_{ni} / (kN \cdot m)$	$M'_E / (kN \cdot m)$	$\frac{M'_E}{M_{ni}}$
0	0.00	1.023 0	501.60	504	1.00
1	3.81	0.948 4	493.49	499	1.01
2	8.07	0.903 6	486.46	491	1.01
3	11.49	0.879 4	482.65	479	0.99
4	16.49	0.856 5	479.06	487	1.02
5	23.20	0.840 1	476.49	482	1.01
6	25.86	0.836 3	475.89	478	1.00

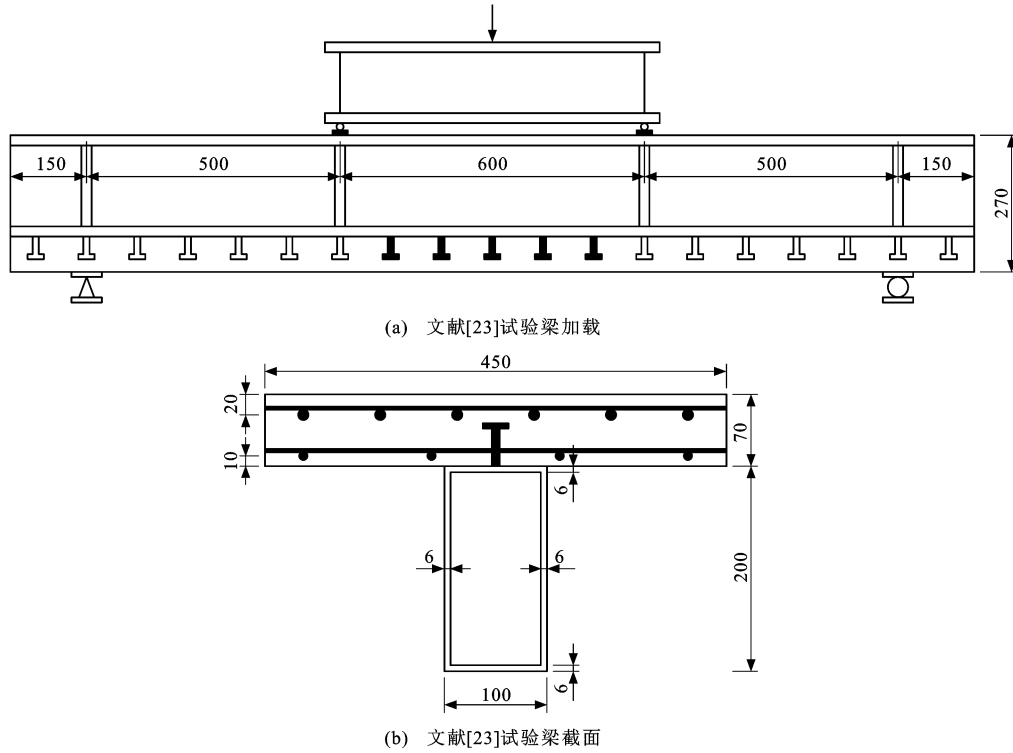


图 9 试验梁负弯矩区加载与截面(单位:mm)

Fig. 9 Loading and section of negative moment region for test beam (unit: mm)

屈服强度;综合考虑以上 2 个方面的原因,采用 1.1 的承载力修正系数。

将表 1、2 中式(15)、(16)计算值与文献试验值用图 10 对比分析可知:采用本文计算方法计算焊钉锈蚀后组合梁的正负弯矩区抗弯承载力与实际试验值吻合很好,说明采用焊钉锈蚀后组合梁抗剪连接度进行折减的简化计算方法来计算界面焊钉锈蚀后组合梁的抗弯承载力是可行的。然而,基于目前文献验证试验数据较少,并且多数为焊钉锈蚀率较小的试验数据,缺乏焊钉锈蚀率较大情况下的组合梁抗弯承载力

试验数据,所以公式用于预测分析焊钉锈蚀率低于 10%情况下的组合梁承载力较为准确,对于锈蚀率大于 10%的情况,有待于进一步试验验证。

3 结 语

(1)本文在分析焊钉锈蚀后抗剪承载力降低原因的基础上,提出焊钉锈蚀后抗剪承载力系数和组合梁抗剪连接度计算公式。

(2)鉴于焊钉锈蚀后组合梁承载力降低主要是由其抗剪连接度减小引起,本文提出采用焊钉锈蚀后组合梁的抗剪连接度对正负弯矩区抗弯承载力进行折减的简化计算方法来分析焊钉锈蚀对其抗弯承载力的影响,并经 20 多根试验梁的数据验证其计算结果的准确性。

(3)文献试验验证结果表明,在焊钉锈蚀率小于 10%时,该公式计算结果准确,可用于焊钉锈蚀后组合梁承载力评估;对于锈蚀率大于 10%的情况,仍需补充大量焊钉锈蚀后抗剪承载力和组合梁承载力试验数据以修正焊钉抗剪承载力系数公式。

参考文献:

References:

[1] 刘永健,高诣民,周绪红,等. 中小跨径钢-混凝土组合梁桥技术经济性分析[J]. 中国公路学报,2017,30(3):1-13.

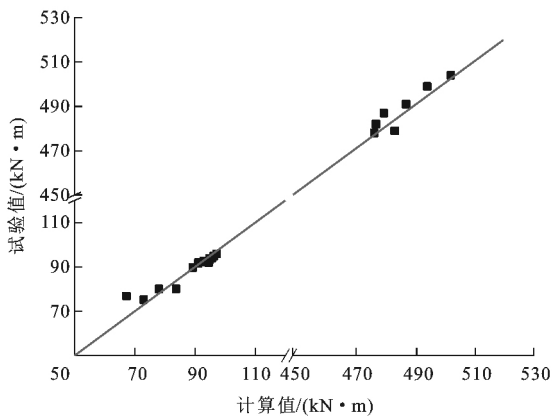


图 10 抗弯承载力计算值和试验值对比

Fig. 10 Comparison of calculated and test values of flexural capacity

- LIU Yong-jian, GAO Yi-min, ZHOU Xu-hong, et al. Technical and economic analysis in steel-concrete composite girder bridges with small and medium span[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 1-13. (in Chinese)
- [2] 聂建国,王宇航. 钢-混凝土组合梁疲劳性能研究综述[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 1-11.
NIE Jian-guo, WANG Yu-hang. Research status on fatigue behavior of steel-concrete composite beams[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(6): 1-11. (in Chinese)
- [3] 郝江华,周现伟,郝丽,等. 钢-混凝土组合梁的综述[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(2): 160-164.
HAO Jiang-hua, ZHOU Xian-wei, HAO Li, et al. Summary of steel-concrete composite beams [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(2): 160-164. (in Chinese)
- [4] CHEN Ju, ZHAO Yu-xi, WU Lin, et al. Experimental investigation and design of corroded stud shear connectors[J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 19(2): 218-226.
- [5] 翁雅谷,秦肖,赵长军,等. 钢-混凝土组合梁负弯矩区锈蚀规律试验研究[J]. 钢结构, 2016, 31(11): 108-113.
WENG Ya-gu, QIN Xiao, ZHAO Chang-jun, et al. Experimental investigation of corrosion rules in hogging moment zone of steel-concrete composite beam [J]. Steel Construction, 2016, 31(11): 108-113. (in Chinese)
- [6] 吴建高. 复合溶液干湿循环作用下钢-混凝土组合梁的耐久性研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.
WU Jian-gao. Study on durability of steel-concrete composite beams under dry and wet cycle in composite solution [D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese)
- [7] 陈丽芝. 干湿循环作用下氯离子对钢-混凝土组合梁的侵蚀及损伤演变[D]. 长沙:中南大学, 2011.
CHEN Li-zhi. Erosion and damage evolution of steel-concrete composite beams under the action of wet and dry cycle [D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese)
- [8] 苏庆田,杨国涛,吴冲. 预制预应力混凝土板组合梁受力性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(7): 996-1002.
SU Qing-tian, YANG Guo-tao, WU Chong. Experimental studies on mechanical behavior of continuous composite girder with prefabricate prestressed concrete slab [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(7): 996-1002. (in Chinese)
- [9] RYU H K, CHANG S P, KIM Y J, et al. Crack control of a steel and concrete composite plate girder with prefabricated slabs under hogging moments[J]. Engineering Structures, 2005, 27(11): 1613-1624.
- [10] 向红. 装配式钢箱-预应力混凝土组合梁性能试验与设计理论研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2012.
XIANG Hong. Performance experiment and design theory research of fabricated steel box-prestressed concrete composite beams [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [11] 苏庆田,陈思敏,李雨,等. 不同构造界面锈蚀对焊钉连接件承载力的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 671-676.
SU Qing-tian, CHEN Si-min, LI Yu, et al. Influence of corrosion with different connecting configuration on shear bearing capacity of stud [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(5): 671-676. (in Chinese)
- [12] 石卫华. 考虑耐久性的钢-混凝土组合梁结构力学性能研究及可靠性分析[D]. 长沙:中南大学, 2013.
SHI Wei-hua. Mechanical behavior and reliability of steel-concrete composite beams considering durability [D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [13] STEWART M G. Mechanical behaviour of pitting corrosion of flexural and shear reinforcement and its effect on structural reliability of corroding RC beams [J]. Structural Safety, 2009, 31: 19-30.
- [14] 龚匡晖. 氯离子作用下钢-混凝土组合梁的耐久性研究[D]. 长沙:中南大学, 2009.
GONG Kuang-hui. Study on durability of steel-concrete composite beams under chloride ion [D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)
- [15] 匡亚川,余志武,龚匡晖,等. 栓钉锈蚀与抗剪承载力试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(2): 381-384.
KUANG Ya-chuan, YU Zhi-wu, GONG Kuang-hui, et al. Experiment research on stud corrosion and structural function deterioration of push-out specimens [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), 2013, 37(2): 381-384. (in Chinese)
- [16] 荣学亮,黄侨,任远. 栓钉连接件锈蚀后静力性能和抗疲劳性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(2): 10-18.
RONG Xue-liang, HUANG Qiao, REN Yuan. Experimental study on static and fatigue behaviors of stud connectors for composite beams after corrosion [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(2): 10-18. (in Chinese)
- [17] 荣学亮,黄侨. 锈蚀栓钉连接件力学性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(2): 15-20.
RONG Xue-liang, HUANG Qiao. Experimental study on mechanical properties of corroded stud shear connectors [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2012, 34(2): 15-20. (in Chinese)
- [18] 余志武,石卫华,匡亚川. 锈蚀栓钉力学性能试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(1): 249-255.
YU Zhi-wu, SHI Wei-hua, KUANG Ya-chuan. Experimental study on mechanical properties of corroded stud [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(1): 249-255. (in Chinese)
- [19] 余志武,匡亚川,龚匡晖,等. 加速锈蚀钢-混凝土组合梁的性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 17(3): 1-5.
YU Zhi-wu, KUANG Ya-chuan, GONG Kuang-hui, et al. Structural behavior of steel-concrete composite beam with accelerated deterioration using a galvanstatic method [J].

- Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 17(3): 1-5. (in Chinese)
- [20] KUANG Ya-chuan, FENG Jin-ren, YU Zhi-wu, et al. Experimental study and analysis of the structural behavior of steel-concrete composite beam after shear connector corrosion[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 578/579: 1522-1530.
- [21] 李清元. 钢-混凝土组合梁耐久性试验研究及时变可靠性分析[D]. 长沙:中南大学,2014.
LI Qing-yuan. Durability test research and time-dependent reliability analysis of steel-concrete composite beams[D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese)
- [22] 邢 颖. 受硫酸盐侵蚀作用的钢-混凝土组合梁受力性能试验研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
XING Ying. Experimental study on mechanical behavior of steel-concrete composite beams with sulfate corrosion[D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)
- [23] 薛 文,陈 驹,吴 麟,等. 栓钉锈蚀钢-混凝土组合梁试验研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(增):222-226.
XUE Wen, CHEN Ju, WU Lin, et al. Experimental investigation of composite steel-concrete beams with corroded studs[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(S): 222-226. (in Chinese)
- [24] 王庆利,曹平周,康清梁. 钢-火山渣混凝土连续组合梁负弯矩区极限抗弯承载力计算[J]. 钢结构,2000,15(1):47-49.
WANG Qing-li, CAO Ping-zhou, KANG Qing-liang. Calculation of ultimate flexural strength for negative bending of continuous composite steel-concrete beams[J]. Steel Construction, 2000, 15(1): 47-49. (in Chinese)
- [25] 余志武,张大付,焦 姣. 钢-混凝土连续组合箱梁负弯矩区极限抗弯承载力研究[J]. 铁道科学与工程学报,2014,11(2):1-6.
YU Zhi-wu, ZHANG Da-fu, JIAO Jiao. Research on ultimate flexural bearing capacity of negative moment area for steel-concrete composite continuous box girder[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(2): 1-6. (in Chinese)
- [26] 孙 彬,牛荻涛,王庆霖. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力计算方法[J]. 土木工程学报,2008,41(11):1-6.
SUN Bin, NIU Di-tao, WANG Qing-lin. Calculation method for flexural capacity of corroded RC beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(11): 1-6. (in Chinese)
- [27] 金伟良,夏 晋,蒋邀宇,等. 锈蚀钢筋混凝土梁受弯承载力计算模型[J]. 土木工程学报,2009,42(11):64-70.
JIN Wei-liang, XIA Pu, JIANG Ao-yu, et al. Flexural capacity of corrosion-damaged RC beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(11): 64-70. (in Chinese)
- [28] MANFREDI G, FABBROCINO G, COSENZA E. Modeling of composite beams under negative bending[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(6): 654-662.