

乔文靖,朱浩云,张 岗,等.强腐作用下钢板组合梁的力学性能及失效机理[J].长安大学学报(自然科学版),2021,41(2):46-54.

QIAO Wen-jing,ZHU Hao-yun,ZHANG Gang, et al. Mechanical properties and failure mechanism of steel plate composite beams under strong corrosion[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2021, 41(2): 46-54.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2021.02.005

强腐作用下钢板组合梁的力学性能及失效机理

乔文靖¹,朱浩云¹,张 岗²,杨 帆¹,张 浩¹

(1. 西安工业大学 建筑工程学院,陕西 西安 710032; 2. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:针对钢板工业盐酸强腐导致钢板组合梁力学性能退化的过程,以三跨钢板组合梁为研究对象,基于腐蚀后钢材力学性能衰减过程,推导出强腐作用下双钢板组合梁的正弯矩抗弯承载力的计算公式。将荷载作用在腐蚀后的钢板组合梁上,参考已有受腐蚀钢材的力学性能试验数据和研究成果,建立有限元数值模型。分析 3 种腐蚀场景下钢板组合梁的破坏形态,获得不同腐蚀时间下钢板梁上所研究关键截面的荷载-位移曲线,揭示钢板在浓度 36% 工业盐酸强腐下引起三跨钢板梁的破坏过程,拟合出钢板组合梁在不同腐蚀场景下,极限荷载随腐蚀时间变化的计算公式。研究结果表明:正弯矩抗弯承载力公式计算值和有限元计算值的相对偏差在 4.31%~8.12%。当钢板腐蚀时间在 6 h 以内,钢板梁腐蚀区域中心截面的极限荷载和位移降低较明显;当钢板腐蚀时间从 6 h 增加到 30 h 时则降低较少;当钢板腐蚀时间增加至 30 h 之后,降低更为缓慢;钢板腐蚀时间达到 48 h,钢板梁腐蚀区域中心截面的极限承载力和位移相当于未腐蚀截面的 78.98%~87.11% 和 74.94%~76.54%。由于连续梁中跨边界约束较边跨约束强,中跨表现为混凝土桥面板的下挠和钢梁的鼓胀破坏,边跨表现为钢板组合梁的整体破坏。

关键词:桥梁工程;钢板组合梁;有限元;强腐;极限荷载;力学性能;失效机理

中图分类号:U448.216

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2021)02-0046-09

Mechanical properties and failure mechanism of steel plate composite beams under strong corrosion

QIAO Wen-jing¹, ZHU Hao-yun¹, ZHANG Gang², YANG Fan¹, ZHANG hao¹

(1. School of Civil & Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, Shaanxi, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Aimed at the degradation process of mechanical properties for steel plate composite beams under strong corrosion caused by industrial hydrochloric acid, a three-span steel plate composite beam was taken as the research object, based on the decay processes of mechanical properties of steel after corrosion, the bearing capacity calculation formula of positive bending moment of double steel plate composite beam under strong corrosion was deduced. The load was applied to the steel plate beam after corrosion, and the finite element model was established by

收稿日期:2020-10-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51778057,51878057);陕西省教育厅专项科研项目(17JK0384);

西安市未央区科技局项目(202019);西安工业大学校长基金项目(XAGDXJJ14019);陕西省交通运输厅科技项目(20-45K)

作者简介:乔文靖(1981-),女,河北衡水人,副教授,工学博士,E-mail:qiaowenjing@xatu.edu.cn.

referring to the existing mechanical performance test data and research results of corroded steel. The failure modes of steel plate composite beams under three corrosion scenarios were analyzed, and the load-displacement curves of the key sections were obtained on steel plate beams of different corrosion rates, the failure process of three-span steel plate beams caused by 36% industrial hydrochloric acid was revealed, and the calculation formula of ultimate load with corrosion time was derived on steel plate composite beams after corrosion. The results show that the relative deviation between formula values and finite element values of flexural capacity are 4.31% to 8.12%. When the corrosion time of steel is less than 6 hours, the ultimate load and displacement of the central section in the corrosion area of steel plate beams decrease obviously, when the corrosion time of steel increases from 6 hours to 30 hours, it decrease less, when the corrosion time of steel increases to 30 hours, it decrease more slowly. When the corrosion time of steel reaches 48 hours, the ultimate bearing capacity and displacement of the central section of the corrosion area of steel plate beams are equivalent to 78.82% to 87.11% and 74.94% to 76.54% of the uncorroded section. Because of the boundary constraint in the mid-span of continuous beam is stronger than that of the side span, the mid-span shows the down deflection of concrete bridge deck and the bulging failure of steel beam, while the side span shows the overall failure of steel plate composite beam. 1 tab, 8 figs, 28 refs.

Key words: bridge engineering; steel plate composite beam; finite element; strong corrosion; ultimate load; mechanical property; failure mechanism

0 引言

钢板组合梁桥作为中小跨径钢桥的优选结构^[1],由于其优越的力学性能、施工性能及良好的经济性^[2],在国内外得到了迅速发展^[3]。对传统的钢梁为箱形截面的钢混组合梁进行了大幅度简化,采用 2 根工字钢作为主梁的钢板组合梁已经成为中小跨径新建桥梁的主流,被认为是较经济的桥梁形式之一^[4]。然而,在运营中,由于交通事故频现,当载有腐蚀性液体的运输车发生倾覆侧翻,大量腐蚀性液体渗漏在桥梁上,导致结构承载力降低,特别是作为钢梁的钢材腐蚀后,截面减小,强度和延性有所下降^[5-6]。强腐会形成腐蚀坑,从而导致钢材应力集中,最终钢材力学性能下降,桥梁承载力和延性下降,破坏结构整体功能,造成不可逆的经济损失和不良社会影响^[7]。因此,钢板组合梁的强腐作用下力学性能及失效机理研究意义重大。

目前,国内外学者对钢混组合结构开展了广泛研究,Dao 等通过对 4 种不同涂漆面积的钢板和混凝土块的复合模型试样进行加速循环腐蚀试验,统计分析了腐蚀特征,即腐蚀生长、腐蚀深度,以及腐蚀深度分布随测试时间变化,提出了在大气环境中的应用程序^[8]。Kainuma 等使用参考空间统计进行了钢混组合结构加速暴露试验和数值模拟,阐明

了腐蚀钢板在混凝土边界的疲劳行为,提出了腐蚀钢构件疲劳寿命的评估方法^[9]。因为上述研究对象是单梁模型,所以不能代表全桥结构在腐蚀下的破坏时间和破坏模式。王明年等采用快速电解的锈蚀试验,基于工字钢混凝土试件的不同锈蚀率,进行试件的黏结-滑移试验,分析不同锈蚀率对钢混组合结构滑移量和黏结破坏荷载的关系,建立喷射混凝土与锈蚀工字钢的黏结-滑移本构关系数学模型^[10]。Kenny 等研究了氯离子诱发腐蚀的钢-混凝土界面(SCI)之间的关系,结果表明,氯离子随着 SCI 厚度的增加而降低,最终导致结构劣化^[11]。Siamphukdee 等回顾了影响钢-混凝土黏结的参数,并建立了描述开裂混凝土的位移函数,推导出临界腐蚀穿透深度^[12]。彭晖等针对配有光圆钢筋混凝土梁,分析了不同钢筋锈蚀率对混凝土梁的承载能力和破坏形态的影响,讨论了锈蚀钢筋和混凝土间黏结退化对结构承载性能的影响^[13]。赵桂峰等考虑海蚀环境中氯离子对钢筋混凝土结构的腐蚀作用,建立钢筋坑蚀效应概率模型,结果表明,氯离子的腐蚀会导致桥梁墩柱的抗震性能降低^[14]。彭建新等考虑环境、材料参数的空间变异性,建立预应力混凝土梁桥开始腐蚀的空间可靠度模型,对 1 座服役 5 年的梁桥进行腐蚀概率预测^[15]。上述研究大多基于模拟大气腐蚀环境下,结构中钢筋受腐蚀后,钢-混凝土之

间的黏结-滑移对构件承载性能的影响,并未考虑钢混组合结构在强腐下的破坏模式。陆森强等结合实际工程,考虑钢板梁蚀坑深度和高度,钢板梁锈蚀率,采用有限元软件建立钢板梁模型,进行锈蚀后结构特征值屈曲及承载能力分析,得到试件的承载能力曲线,并分析其破坏模式,但在其有限元模拟中并未提出腐蚀后材料的本构关系对结构的影响^[16]。彭建新等为了深入研究腐蚀对高性能钢 Q550E 力学指标的影响,针对目标锈蚀率分别为 5%、10%、15%和 20%的试件,开展钢板拉伸试验,建立了不同锈蚀率影响下高性能钢 Q550E 的本构关系模型^[17]。徐善华等对不同腐蚀率下的腐蚀钢板进行拉伸试验,研究蚀坑的表征参数与腐蚀钢板力学性能之间关系,分析不同锈蚀率下钢材的破坏形态和应力-应变关系之间的差异,发现锈蚀率和局部蚀坑的尺寸是影响腐蚀钢材拉伸性能的主要因素,并建立与腐蚀钢板表面形貌相关的力学退化模型,揭示腐蚀钢板力学性能的退化规律^[18]。李琳等采用干湿交替腐蚀试验和全浸腐蚀试验结合锈层物相分析,研究了桥梁钢 Q345qENH、Q420qENH 和对比钢 Q345qE 在除冰盐环境下的腐蚀行为^[19]。但是上述对钢结构耐腐蚀的研究成果主要考虑钢材在内外界影响因素下,其腐蚀后的力学性能退化规律,主要侧重于材料基本性能,较少涉及构件和结构层面。

综上所述,钢混组合结构桥梁的截面形式多样,虽有学者对钢混组合箱梁开展了防腐研究,但是钢板梁是工字形截面,这种开口截面在接触酸性液体后,相较于闭口截面的钢箱梁腐蚀面积更大,对结构承载力更为不利。钢板梁桥跨形式复杂,因此,不能简单照搬建筑用钢混组合结构桥梁的防腐设计方法。腐蚀是外界环境导致结构材料的化学变化^[20-21]。目前,国内外学者针对钢-混凝土组合结构的研究主要涉及了腐蚀后材料力学特性和结构的承载能力,以及荷载和腐蚀耦合分析方法。其中试验研究方法多用于简支结构,连续结构多采用数值模拟方法分析腐蚀后的结构响应。为此,本文在已有受腐蚀的钢材力学性能试验数据的基础上,针对钢板梁在浓度 36%工业盐酸强腐下导致钢板梁的力学性能退化过程,选取跨径为 45 m 的三跨钢板梁作为研究对象,采用 ANSYS 有限元程序建立腐蚀后荷载作用的分析模型,开展钢板在强腐下对钢板梁结构性能的影响研究。

1 双肋式钢板梁的选取

本文选取双肋式钢板组合连续梁为研究对象,

如图 1 所示,跨径布置为 3×45 m。其中钢板梁和横梁均采用 Q345,横截面采用双肋式工字形钢梁,梁高为 2.6 m,上翼缘厚度为 0.032 m,宽度为 0.9 m,腹板厚度为 0.024 m,下翼缘厚度为 0.046 m,宽度为 1.1 m。双主梁之间采用端横梁和小横梁的钢横梁,加强钢板梁横向联系。端横梁的高度与工字形钢梁高度相同,故设置在桥跨的跨中和端部;小横梁设置在端横梁中间,其高度为 1 m,间距为 5 m,端横梁和小横梁的其他构造参数与双主梁相同。工字形钢梁的腹板之间设置竖向一字形的加劲肋,平均间距为 5 m,沿桥跨纵向设置贯通的一字形加劲肋,平均间距为 2 m。桥面板混凝土强度等级采用 C50。桥面板宽度为 16 m,厚度为 0.4 m。桥面板内配有 HPB300 热轧光圆钢筋,钢筋直径为 16 mm。桥面板横向预应力束采用高强度低松弛钢绞线,直径为 15.20 mm。

2 桥梁腐蚀区域假定

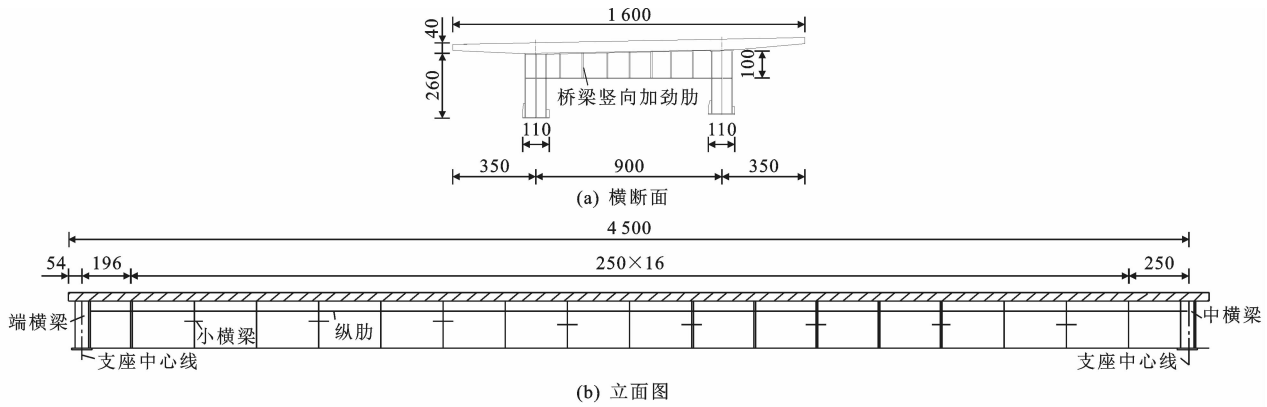
液体罐式运输车在通过桥梁上时,发生浓度 36%工业盐酸渗漏,导致钢主梁受到腐蚀性液体强腐。为了较真实地模拟桥梁腐蚀场景,参照《汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值》(GB 1589—2016)^[22],在外廓尺寸将车辆长度限制调整为 18.1 m 以内,车辆宽度限制调整为 2.55 m 以内,结合液体泄露范围,设定桥梁纵向腐蚀范围为 20 m 以内。

钢板梁纵向最不利位置应综合考虑其受力特点和截面特征,本文研究桥梁腐蚀工况 FS1~FS3,受腐蚀位置如图 2 所示。图 2(a)区域位于边支点附近,剪力较大;图 2(b)区域位于边跨 $0.4L$ 附近,边跨正弯矩最大;图 2(c)区域位于跨中,跨中正弯矩最大, L 为桥梁跨径。这几个截面均为桥梁腐蚀时最不利截面。

3 计算方法

3.1 腐蚀后钢梁的本构关系

目前,国内外学者基于已有腐蚀钢材的拉伸试验和数据,研究腐蚀后钢材的力学性能退化模型^[23],建立腐蚀后钢材的本构关系^[18]。该类力学性能退化模型大多针对锈蚀钢筋,极少考虑强腐下钢板的力学性能。本文所研究的钢板梁桥,其钢梁部分采用 Q345 钢板。浓度 36%工业盐酸腐蚀后的本构关系如下所示



(b) 立面图

单位: mm

图 1 钢板组合梁构造

Fig. 1 Structural of steel plate composite beam

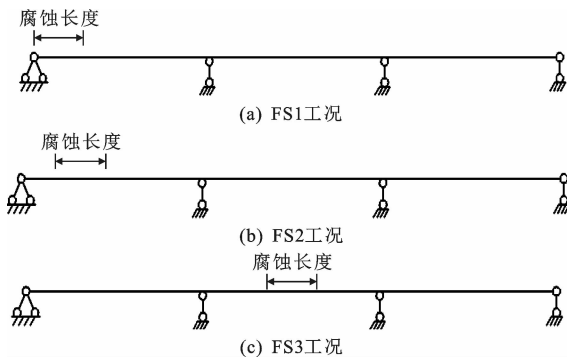


图 2 腐蚀工况

Fig. 2 Corrosion conditions

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & \varepsilon > \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y \leq \varepsilon \leq K_1 \varepsilon_y \\ f_y + (f_u - f_y) \cdot \frac{\sqrt{(K_2 - K_1)^2 \varepsilon_y^2 - (\varepsilon - K_2 \varepsilon_y)^2}}{(K_3 - K_1) \varepsilon_y} & K_1 \varepsilon_y < \varepsilon \leq K_3 \varepsilon_y \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_y 为钢材名义屈服强度; f_u 为钢材名义抗拉强度; E_s 为钢材名义弹性模量; K_1 为钢材强化阶段初始应变与屈服应变比值; K_2 为钢材峰值应变与屈服应变比值; K_3 为钢材断裂应变与屈服应变比值; ε_y 为钢材名义抗拉强度; ε 为钢材应变; σ 为钢材应力, 各参数取值见表 1。

3.2 有限元模型的建立

采用通用有限元程序 ANSYS, 基于腐蚀后荷载作用场景下, 对钢板梁进行了有限元模拟, 混凝土板采用 Solid65 单元模拟, 钢板梁及加劲肋采用 Shell43 单元模拟, 预应力筋采用 Link8 单元模拟^[24-26]。针对桥跨结构最不利位置的钢梁腐蚀, 考虑材料的力学参数^[27], 将腐蚀后的钢梁本构关系加入模型中, 施加自重和外荷载进行结构分析。有限元模型如图 3 所示。

表 1 腐蚀钢材本构模型参数

Tab. 1 Constitutive model parameters of corroded steel

腐蚀时间/h	0	6	18	30	48
$E_s / (N \cdot mm^{-2})$	209 990	204 980	202 510	199 450	183 650
$f_y / (N \cdot mm^{-2})$	415.04	395.67	378.74	365.95	337.10
$f_u / (N \cdot mm^{-2})$	500.10	475.40	454.60	440.10	404.50
$\varepsilon_y / \%$	0.20	0.19	0.19	0.18	0.18
K_1	13.44	13.59	12.12	11.83	11.77
K_2	101.10	107.93	124.98	143.74	141.20
K_3	159.08	163.07	169.70	214.38	225.58

4 模型验证

根据《钢-混凝土组合桥梁设计规范》(GB 50917—2013)^[28], 计算出钢-混组合桥梁跨中、中间支座和边支点的混凝土桥面板有效分布宽度, 用塑性设计方法计算正弯矩区混凝土组合梁的抗弯承载力, 结合本文中钢板梁横断面细部尺寸, 计算得出未腐蚀截面的塑性中和轴在混凝土桥面板内, 随着腐蚀时间的增加, 钢梁力学性能退化, 这引起塑性中和轴在混凝土桥面板内不断上移, 使得桥面板受压区高度逐渐减小。结合规范^[28]中单工字钢组合梁承载力计算方法, 针对双肋钢板梁, 基于不同腐蚀时间钢材力学性能, 重新确定中性轴的位置, 推导出腐蚀下正弯矩抗弯承载力计算公式。

当钢板梁的塑性中和轴在混凝土桥面板内时, 如图 4 所示, 可按照塑性承载力计算方法求得腐蚀后钢板梁的抗弯承载力, 即

$$\gamma_0 M \leq A_{cc} f_{cdf} y_1 + A_r f'_{sd} y_2 \quad (2)$$

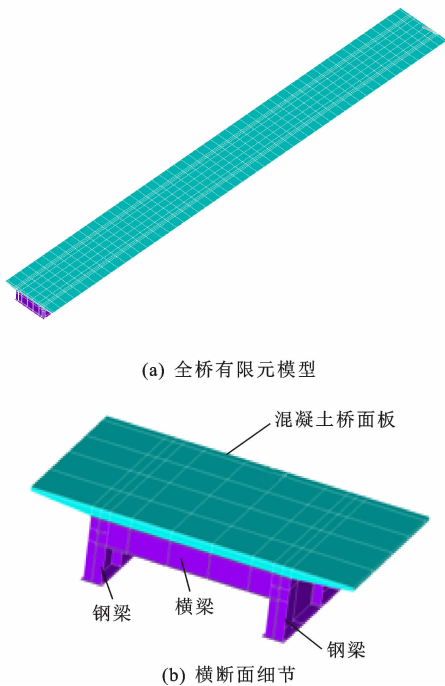


图3 钢板组合梁有限元模型

Fig. 3 Finite element model of steel plate composite beam

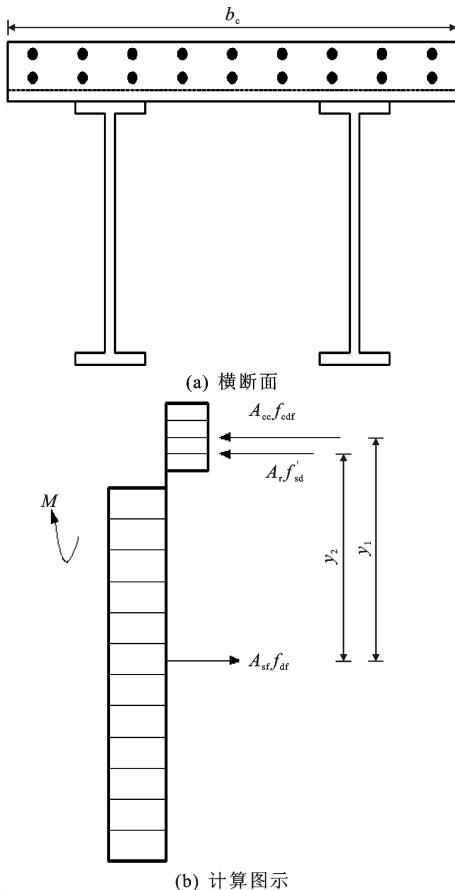


图4 双钢板组合梁抗弯承载力计算示意

Fig. 4 Calculate schematic for flexural capacity of composite beams with double steel plates

$$A_{cc} = b_c x' = \frac{A_{st} f_{df} - A_r f'_{sd}}{f_{cdf}} \quad (3)$$

式中: b_c 为混凝土桥面板有效宽度; x' 为混凝土桥面板受压区高度; γ_0 为桥梁结构的重要性系数,本文中取1.0; M 为正弯矩承载力; A_{cc} 为塑性中和轴上侧混凝土桥面板受压区面积; A_r 为塑性中和轴上侧混凝土桥面板内纵向钢筋的截面面积; A_{st} 为钢梁未腐蚀截面面积; f_{cdf} 为混凝土的抗压强度设计值; f'_{sd} 为混凝土桥面板内纵向钢筋的抗压强度设计值; f_{df} 为不同腐蚀时间钢材的抗拉强度设计值,具体取值参考表1; y_1 为混凝土桥面板受压区截面形心至腐蚀后钢梁受拉区截面形心的距离; y_2 为钢筋受压区截面形心至腐蚀后钢梁受拉区截面形心的距离^[28]。

以跨中正弯矩区段为例,结合推导的抗弯承载力计算公式,将公式计算值和有限元计算值进行对比,如图5所示。可见,二者相对偏差在4.31%~8.12%。因为有限元模型中增加了横梁,从而使受压区高度增加,导致有限元计算值偏大。

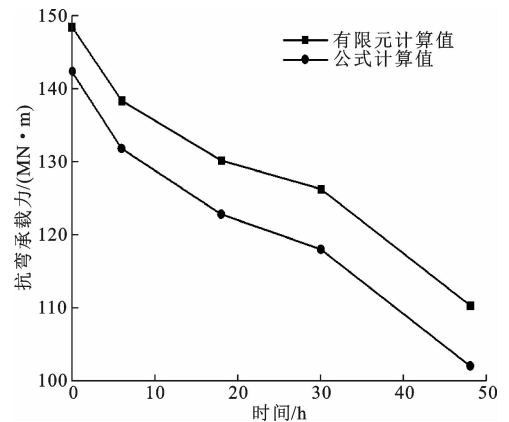


图5 不同腐蚀时间下公式和有限元计算值对比

Fig. 5 Comparisons of formula and finite element calculation values under different corrosion rates

5 失效行为

为研究液体运输车腐蚀性液体渗漏,导致钢板梁腐蚀后的失效过程,根据其内力影响线进行集中力加载。边支点截面,边跨正弯矩和跨中正弯矩均按照该位置弯矩影响线进行集中力加载。

5.1 钢板梁边支点受剪区失效

图6为FS1场景下,钢板梁的边支点腐蚀区域中心截面在荷载作用下的荷载-位移关系和极限承载力-腐蚀时间的变化。由图6(a)可以看出:当桥下边支点受腐蚀区域中心截面未腐蚀,截面达到极限承载力时,受腐蚀区域中心处竖向最大位移为469.9 mm;腐蚀时间分别为6、18、30、48 h,边支点

截面达到极限承载力时,受腐蚀区域中心处竖向最大位移分别为 435.97、410.98、382.89、352.16 mm,相当于未腐蚀截面最大位移的 92.77%、87.46%、81.48%、74.94%。随截面腐蚀时间的增加,边支点受腐蚀区域中心截面到达极限承载力时,最大竖向位移呈衰减趋势,但衰减速率呈增加趋势。由图 6(b)可以看出:桥下边支点局部受腐蚀场景下,受腐蚀区域中心截面未腐蚀时,其极限承载力为 37.2 MN;腐蚀时间分别为 6、18、30、48 h,中跨跨中截面的极限承载力分别为 36.17、34.93、32.65、31.33 MN,相当于未腐蚀截面极限承载力的 96.92%、93.59%、87.48%、83.95%。最终在边支点受腐蚀区域中心截面处发生弯曲破坏。将其极限承载力随腐蚀时间变化规律拟合如下

$$\begin{cases} y=37.3455-0.94955x+ \\ 0.12709x^2-0.00605x^3 \\ R^2=0.925 \end{cases} \quad (4)$$

式中: y 为极限承载力; x 为腐蚀时间; R^2 为判定系数。

5.2 钢板梁边跨正弯矩区失效

图 7 为 FS2 场景下,钢板梁的边跨腐蚀区域中心截面在荷载作用下的荷载-位移关系和极限承载力-腐蚀时间的变化。由图 7(a)可以看出:当桥下边跨受腐蚀区域中心截面未腐蚀时,边跨最大正弯矩截面达到极限承载力时,受腐蚀区域中心处竖向最大位移为 426.99 mm;腐蚀时间分别为 6、18、30、48 h,边跨截面达到极限承载力时,受腐蚀区域中心处竖向最大位移分别为 392.55、372.11、345.83、326.83 mm,相当于未腐蚀截面最大位移的 91.93%、87.15%、80.99%、76.54%。随着钢梁腐蚀时间增加,边跨受腐蚀区域中心截面到达极限承载力之前,位移的衰减趋势越来越大。由图 7(b)可看出:边跨钢梁局部受腐蚀场景下,受腐蚀区域中心截面未腐蚀时,边跨受腐蚀区域中心截面的极限承载力为 34.01 MN;腐蚀时间分别为 6、18、30、48 h,截面的极限承载力分别为 32.04、30.19、28.85、26.86 MN,相当于未腐蚀截面极限承载力的 94.21%、88.77%、84.83%、78.98%。最终在边跨受腐蚀区域中心截面处发生弯曲破坏。将其极限承载力随腐蚀时间变化规律拟合如下

$$\begin{cases} y=15.52855+0.13453x-0.14844x^2+ \\ 0.0128x^3+0.000338544x^4 \\ R^2=0.971 \end{cases} \quad (5)$$

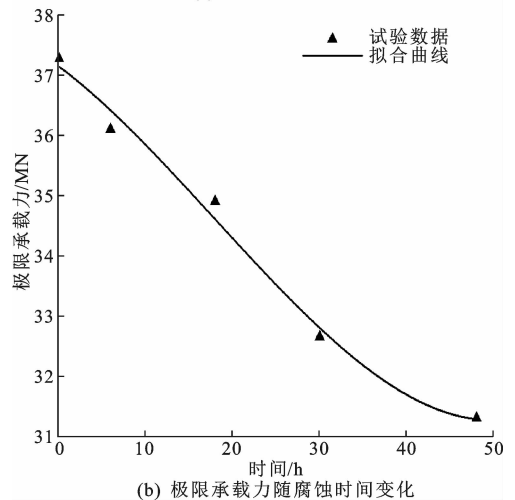
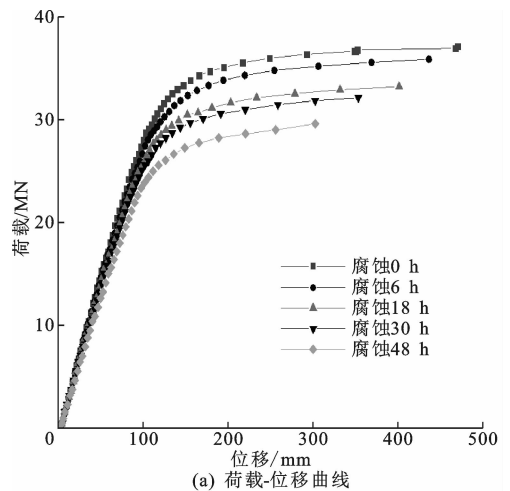


图 6 边支点截面荷载-位移和极限承载力-腐蚀时间变化曲线 (FS1)
Fig. 6 Curves of load-displacement and ultimate bearing capacity-corrosion time of side fulcrum (FS1)

5.3 钢板梁中跨正弯矩区失效

图 8 为 FS3 场景下,钢板梁的中跨腐蚀区域中心截面在荷载作用下荷载-位移关系和极限承载力-腐蚀时间的变化。由图 8(a)可以看出:桥下中跨跨中局部受腐蚀场景下,截面未腐蚀时,中跨跨中截面达到极限承载力时,受腐蚀区域中心处竖向最大位移为 510 mm;腐蚀时间分别为 6、18、30、48 h,中跨受腐蚀区域中心截面达到极限承载力时,受腐蚀区域中心处竖向最大位移分别为 476.3、435.44、410.49、387.65 mm,相当于未腐蚀截面最大位移的 93.39%、85.38%、80.49%、76.01%。随着钢梁腐蚀时间的增加,中跨跨中截面达到极限承载力之前,位移的衰减趋势越来越大。由图 8(b)看出:中跨钢梁跨中截面局部受腐蚀场景下,截面未腐蚀时,中跨跨中截面处的极限承载力为 52.5 MN;腐蚀时间分别为 6、18、30、48 h,截面的极限承载力分别为 50.79、49.14、47.16、45.73 MN,相当于未腐蚀截面

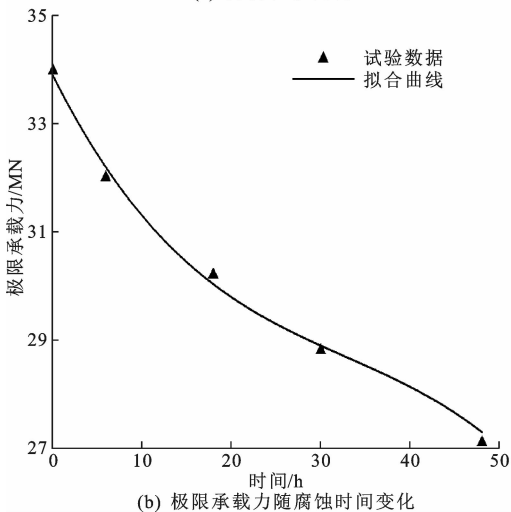
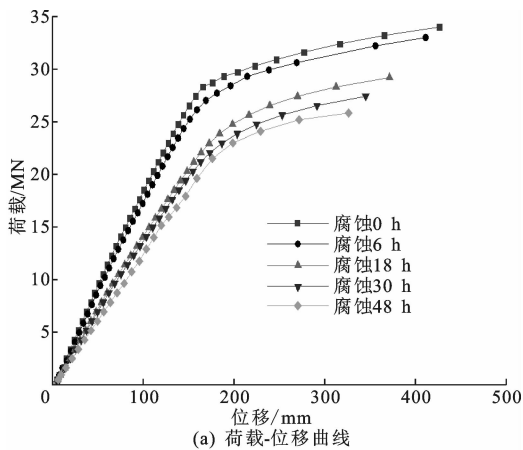


图7 边跨跨中截面荷载-位移和极限承载力-腐蚀时间变化曲线(FS2)

Fig. 7 Curves of load-displacement and ultimate bearing capacity-corrosion time of side fulcrum (FS2)

极限承载力的 96.74%、93.60%、89.83%、87.11%。最终在中跨跨中局部受腐蚀处发生弯曲破坏。将其极限承载力随腐蚀时间变化规律拟合如下

$$\begin{cases} y = 19.34273 - 0.35131x - 0.03414x^2 + \\ 0.00491x^3 - 0.0001789x^4 \\ R^2 = 0.949 \end{cases} \quad (6)$$

5.4 破坏特征分析

通过对钢板梁腐蚀工况 FS1~FS3 进行分析发现,随着截面腐蚀时间的增加,腐蚀钢梁表面的蚀坑深度和数量均增大,钢材受腐蚀的强度退化,腐蚀后钢板梁的塑性中和轴在混凝土桥面板内不断上移,导致受压区高度减小,极限承载力也在降低,梁体的变形减小、延性下降,逐渐表现为脆性破坏。腐蚀时间在 6 h 以内时,钢材腐蚀后的力学性能退化较明显,其对截面抵抗能力削弱也较明显,表现为截面承载力和变形减少较明显;当腐蚀时间从 6 h 增长至

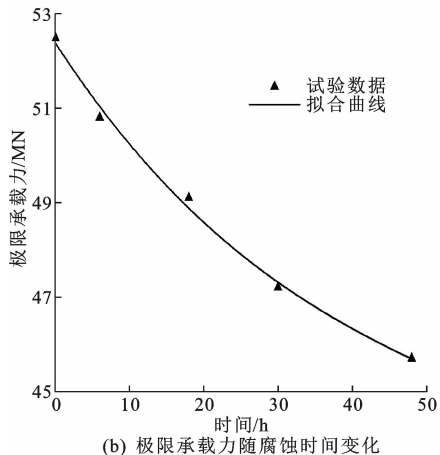
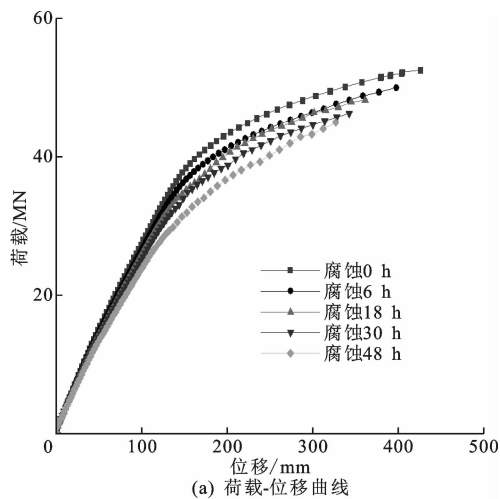


图8 中跨跨中截面荷载-位移和极限承载力-腐蚀时间变化曲线(FS3)

Fig. 8 Curves of load-displacement and ultimate bearing capacity-corrosion time of side fulcrum (FS3)

18 h,截面承载力和变形有所降低;当腐蚀时间从 18 h 增长至 30 h,锈层开始阻止腐蚀介质过多地接触钢材基体,截面承载力和变形降低缓慢;当腐蚀时间从 30 h 增长至 48 h,截面承载力和变形降低更为缓慢。由于连续梁边跨约束较中跨约束较小,对结构整体约束较弱,结构在变形过程中不断下挠,最终演变为整体垮塌。而中跨具有较强的约束,腐蚀下内力的释放表现为结构内的屈曲,主要表现为桥面板的挠曲破坏和钢梁的鼓胀破坏。

6 结语

(1)推导出双钢板组合梁腐蚀后正弯矩状态的抗弯承载力计算公式,将公式计算值和有限元计算值进行对比,二者相对偏差在 4.31%~8.12%,且有限元计算值略大于公式计算值。

(2)各腐蚀工况 FS1~FS3 下的研究表明,钢板组合梁极限承载力和变形随着腐蚀时间增加有所下

降。当钢梁腐蚀时间在6 h以内,极限承载力和变形下降较明显;当腐蚀时间从6 h增长至18 h,极限承载力和变形有所降低;当腐蚀时间从18 h增长至30 h,极限承载力和变形降低缓慢;当腐蚀时间从30 h增长至48 h,极限承载力和变形降低更为缓慢。

(3)钢板组合梁桥下腐蚀场景FS1~FS3中,中跨表现为混凝土板的下挠和钢梁的鼓胀破坏,连续梁边跨约束较中跨约束较小,表现为钢板组合梁的整体破坏。

(4)本文有限元建模中未考虑混凝土及其内部钢筋在接触浓度36%工业盐酸腐蚀时,其力学性能退化对钢板梁极限承载力和挠度的影响。

参考文献:

References:

- [1] 周绪红, 逯文茹, 狄 谨, 等. 钢锚箱栓钉剪力连接件群钉效应及抗剪承载力计算方法[J]. 中国公路学报, 2014, 27(12): 33-45.
ZHOU Xu-hong, LU Wen-ru, DI Jin, et al. Group studs effect and shear strength calculation method for group studs shear connector of steel anchor box[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(12): 33-45.
- [2] DE ANGELIS A, PECCE M R, LOGORANO G. Evaluation of the plastic hinge length of steel-concrete composite beams under hogging moment[J]. Engineering Structures, 2019, 191: 674-685.
- [3] 肖 林, 卫 星, 温宗意, 等. 钢-混组合结构桥梁2019年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 168-182.
XIAO Lin, WEI Xing, WEN Zong-yi, et al. State-of-the-art review of steel-concrete composite bridge in 2019[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 168-182.
- [4] 贺耀北, 方博夫, 刘 榕, 等. 中小跨整体预制II形钢板组合梁力学与经济研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(12): 62-68.
HE Yao-bei, FANG Bo-fu, LIU Rong, et al. Study on mechanics and economy of small and medium-span overall prefabricated II-shaped steel plate composite beams[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(12): 62-68.
- [5] ANGST U M. Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete[J]. Materials and Structures, 2018, 51(1): 1-20.
- [6] ZHANG X G, LI M H, TANG L P, et al. Corrosion

induced stress field and cracking time of reinforced concrete with initial defects: Analytical modeling and experimental investigation [J]. Corrosion Science, 2017, 120: 158-170.

- [7] CHEN J, ZHANG H, YU Q Q. Static and fatigue behavior of steel-concrete composite beams with corroded studs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 156: 18-27.
- [8] DAO D K, NGUYEN D K, KIM H S, et al. A time-dependent corrosion characteristic of a steel member in contact with concrete [J]. International Journal of Steel Structures, 2018, 18: 976-992.
- [9] KAINUMA S, HOSOMI N, KIM I T. Fatigue life evaluation of corroded structural steel members in boundary with concrete [J]. International Journal of Fracture, 2009, 157(1/2): 149-158.
- [10] 王明年, 童建军, 周国军. 海底隧道锈蚀工字钢与喷射混凝土的粘结滑移试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 310-315.
WANG Ming-nian, TONG Jian-jun, ZHOU Guo-jun. Test research on the bond-slip between I-beam and shotcrete in under sea tunnel [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 310-315.
- [11] KENNY A, KATZ A. Steel-concrete interface influence on chloride threshold for corrosion-empirical reinforcement to theory [J]. Construction and Building Materials, 2020, 244: 154-162.
- [12] SIAMPHUKDEE K, ZOU R, COLLINS F, et al. Modeling steel-concrete bond strength depletion during corrosion [J]. ACI Materials Journal, 2018, 115(2): 267-277.
- [13] 彭 晖, 张建仁, 郝海霞, 等. 锈蚀光圆钢筋混凝土受弯构件受力性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(1): 83-89.
PENG Hui, ZHANG Jian-ren, HAO Hai-xia, et al. Experimental research on mechanical behavior of RC flexural members with corroded plain steel bars [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(1): 83-89.
- [14] 赵桂峰, 何 双, 马玉宏, 等. 基于钢筋坑蚀效应的近海隔震桥梁易损性分析[J]. 中国公路学报, 2016, 29(4): 67-76.
ZHAO Gui-feng, HE Shuang, MA Yu-hong, et al. Fragility analysis of offshore isolated bridge based on steel pitting corrosion effect [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(4): 67-76.
- [15] 彭建新, 吴婷婷, 胡守旺, 等. 氯盐环境下预应力混凝土梁桥氯离子扩散效应及其空间概率分析[J]. 中国公路学报, 2016, 29(4): 50-58.

- PENG Jian-xin, WU Ting-ting, HU Shou-wang, et al. Effect of chlorides diffusion and its spatial probability analysis of prestressed concrete bridge under chloride environment [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(4): 50-58.
- [16] 陆森强, 赵伟, 蒋锦毅. 腹板局部锈蚀对钢桥中钢板梁受力性能的影响分析[J]. *中外公路*, 2018, 38(2): 103-108.
- LU Sen-qiang, ZHAO Wei, JIANG Jin-yi. The effect of web local corrosion on mechanical performance of steel plate girder used in bridge[J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2018, 38(2): 103-108.
- [17] 彭建新, 张伟, 阳逸鸣. 腐蚀对高性能钢 Q550E 力学指标影响的试验研究[J]. *公路交通科技*, 2018, 32(10): 56-62.
- PENG Jian-xin, ZHANG Wei, YANG Yi-ming. Experimental study on influence of corrosion on mechanical index of high performance steel Q550E[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018, 32(10): 56-62.
- [18] 徐善华, 张宗星, 何羽玲, 等. 考虑蚀坑影响的腐蚀钢板力学性能退化试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 49(2): 164-171.
- XU Shan-hua, ZHANG Zong-xing, HE Yu-ling, et al. Experimental study on monotonic tensile behavior of corroded steel in neutral salts pray environment[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 49(2): 164-171.
- [19] 李琳, 陈义庆, 高鹏, 等. 除冰盐环境下桥梁钢的耐腐蚀性能研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2020, 40(5): 448-454.
- LI Lin, CHEN Yi-qing, GAO Peng, et al. Corrosion resistance of various bridge steels in deicing salt environments [J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2020, 40(5): 448-454.
- [20] ROBERT E M, AHAMMED M, JEFFREY R, et al. Statistical characterization of surfaces of corroded steel plates [J]. *Marine Structures*, 2010, 23: 274-287.
- [21] SAAD E, CARLOS G S. Experimental assessment of the ultimate strength of a box girder subjected to severe corrosion [J]. *Marine Structures*, 2011, 24: 338-357.
- [22] GB 1589—2016, 汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值[S].
- GB 1589—2016, Limits of dimensions, axle load and masses of motor vehicles, trailers and combination vehicles[S].
- [23] 邹向农, 龙俊贤, 陈宇翔, 等. 腐蚀预应力混凝土桥梁抗力退化预测方法[J]. *中外公路*, 2019, 39(3): 84-88.
- ZOU Xiang-nong, LONG Jun-xian, CHEN Yu-xiang, et al. Prediction method of resistance degradation for corroded prestressed concrete bridges[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2019, 39(3): 84-88.
- [24] 宋超杰, 张岗, 秦智源, 等. 钢板组合梁的耐火极限[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(6): 89-98.
- SONG Chao-jie, ZHANG Gang, QIN Zhi-yuan, et al. Fire resistance of steel-concrete composite bridge girder [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2019, 39(6): 89-98.
- [25] RUMAN J M, APPUHAMY S, OHGA M, et al. Reduction of ultimate strength due to corrosion — A finite element computational method[J]. *International Journal of Engineering*, 2011, 5(2): 194-199.
- [26] 范亮, 李笑, 何骏. 考虑界面效应的钢-混凝土组合结构有限元模拟方法[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2017, 36(7): 7-14.
- FAN Liang, LI Xiao, HE Jun. Finite element simulation method of steel-concrete composite structure considering the interface effect[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2017, 36(7): 7-14.
- [27] 黄城均. 双钢板混凝土组合结构平面内破坏准则[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- HUANG Cheng-jun. The in-plane failure criterion of steel-concrete-steel composite structures[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2017.
- [28] GB 50917—2013, 钢-混凝土组合桥梁设计规范[S].
- GB 50917—2013, Code for design of steel-concrete composite bridges[S].