

# 砼结构耐久性研究现状综述

李永重<sup>1,2</sup>, 田仲初<sup>1</sup>, 李智<sup>1,2</sup>

(1.长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410004; 2.中交路桥华南工程有限公司, 广东 中山 528400)

**摘要:** 分别对砼结构内钢筋的锈蚀机理、力学性能、粘结滑移和承载力退化等耐久性方面的研究现状进行了综述, 给出了部分研究结论。研究表明, 锈蚀电流密度是评估钢筋发生电化学反应时构件损伤程度的关键因素; 锈蚀会导致钢筋的弹性模量、强度与损伤程度等下降; 锈蚀钢筋与砼间的粘结性能会随着锈蚀程度的增加而降低; 锈蚀最终会造成结构整体抗弯性能下降。

**关键词:** 桥梁; 砼结构; 锈蚀; 力学性能; 粘结滑移; 承载力

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)01-0183-05

## 1 砼结构中钢筋锈蚀原理

电化学反应是造成构件出现损伤的原因之一, 一般为阳极附近的铁氧化而失去电子, 逐渐溶于溶液中而遭到锈蚀, 导致铁元素丧失。钢筋锈蚀后表面会生成大量锈蚀产物。针对钢筋砼(RC)结构中锈蚀原理和参数敏感性, 目前已开展了大量研究。

(1) 钢筋锈蚀时间和速率之间的关系。众所周知, 锈蚀速率对构件的性能损伤影响较大。力筋发生损伤后, 构件内的碱性变小, 完好的钝化膜发生破坏, 力筋进入锈蚀阶段。在实际应用中发现, 力筋发生锈蚀的开始时间并不一定是以氯离子的渗透深度达到力筋周围作为起点。锈蚀电流密度是评估钢筋发生电化学反应时损伤程度的关键因素。

(2) 钢筋锈蚀量预测研究。实际工程中的构件, 各种因素往往会对钢筋锈蚀产生影响。由于因素种类较多, 获得的数据差异性很大, 建立准确的计算公式预测评估钢筋的锈蚀量难度很大。一些学者根据经验方法, 采用质量锈蚀损失率和截面损失率作为描述力筋损伤程度的指标, 建立了相关评估理论。保护层出现裂缝后, 大气环境中的各种锈蚀性物质都更易到达构件内部, 相比于裂缝出现之前, 力筋的损伤效率会大大加快。

## 2 锈蚀后钢筋力学性能研究

锈蚀不仅会削弱力筋的截面尺寸, 也会造成力筋整体强度变化。试验室的快速研究由于操作简单、时间周期短, 是目前国内外学者的主要研究途径, 也取得了大量研究结论。

一些学者认为锈蚀前后力筋的弹性模量不会有

太大变化。文献[1]对受力钢筋的整体和局部锈蚀情况作了分析, 得到了力筋发生锈蚀后的弹性模量、屈服强度与损伤程度之间的关系。文献[2]对用 3 种不同方法得到的损伤构件进行测试, 获得了大量损伤试件样本, 分析了各构件的差异, 得到了锈蚀程度变化对损伤力筋弹性模量变化影响很小的结论。

部分学者针对锈蚀预应力筋的力学性能进行了研究。文献[3]对处于海洋气候中的锈蚀预应力钢绞线和暴露在海洋环境下的预应力砼(PC)梁的钢绞线进行了力学性能试验。文献[4]设计制作一批多种应力状态和多种水灰比的砼构件, 用来模拟不同应力状态下受氯盐锈蚀的 PC 构件。文献[5]对不同应力大小的锈蚀预应力筋进行了静力和疲劳性能试验, 通过试验结果对比, 得到了钢绞线整体力学性能的退化趋势。文献[6]对锈蚀后的无粘结预应力筋进行了试验, 同时与锈蚀普通钢筋的整体性能进行了对比, 得到了预应力筋比普通钢筋对锈蚀情况更敏感的结论。文献[7]对加速锈蚀情况下得到的锈蚀预应力筋进行试验, 得到了锈蚀对预应力钢丝的弹性模量无明显作用, 但对钢绞线的弹性模量有较大影响的结论。

力筋的应力—应变曲线关系会随着锈蚀程度的加剧而发生变化。文献[8]对两座后张法预应力砼桥梁进行试验, 得到了力筋的锈蚀情况、弹性模量和极限强度等力学指标, 分析了钢筋锈蚀后力学性能的变化。

## 3 锈蚀后钢筋—砼间的粘结退化

大量学者对普通 RC 构件中锈蚀力筋与砼间的性能展开了研究与分析。受自然环境尤其是海洋气

候下有害离子的影响,RC构件中的力筋性能会下降。锈蚀必然会产生相应的锈蚀产物并造成交界面的体积膨胀,而周围存在的砵会对铁锈产生束缚作用,两者之间产生的相互作用力最终会造成砵锈裂,产生劈裂裂纹。以上一系列反应会使钢筋的抗拉及粘结性能随着钢筋锈蚀的扩散而降低。

不少学者开展了关于普通钢筋锈蚀与砵间粘结应力的试验研究。文献[1]通过实验室快速法对RC构件内的力筋实施侵蚀,根据拔出试验对两者之间的整体性能退化情况展开讨论,并利用有限元方法进行了预测。文献[10]通过对砵构件中各种尺寸和大小变形的光面钢筋进行拔出试验,得到了各种情况下构件性能下降的关系曲线,描述了各种情况下的失效原理,阐述了存在箍筋与否等情况对交界面粘结退化的影响。文献[11]通过直接荷载试验,得到了锈蚀拉拔梁的粘结退化行为,同时研究了箍筋存在与否对界面极限粘结强度的作用。

过去往往关注普通力筋的相关分析,而对预应力的存在对整体性能改变的研究相对较少。相对于普通RC构件,很多新型构件由于预应力的存在会使其更容易受到侵蚀破坏。预应力钢绞线与砵间的粘结行为如何,对于预应力构件尤其是先张法构件的抗弯性能及使用性能至关重要。因为先张法预应力构件中钢绞线的张拉力必须通过与砵的粘结才能以压力的形式传递给砵,才能最终发挥各自材料抗拉压的优势。另外,在先张法构件中,由于预应力的存在,力筋长期处于高应力状态,其与砵间的粘结力受到钢绞线数量、钢绞线束布置、表面状况及构成等影响,其工作性质与普通钢筋必然不尽相同。文献[12]通过较短的粘结拔出试验研究了3股钢绞线的粘结力规律,通过并筋(钢筋束)拉拔试验得到了相应的粘结、锚固原理。文献[13]通过拉拔试验实时测量先张法构件中预应力筋预应力及钢绞线端部滑移,研究了先张法结构中锚固失效后钢绞线的粘结滑移趋势,得到了各种砵等级条件下传递和锚固长度影响内的平均粘结应力大小。文献[14]对预应力钢绞线与砵间的粘结行为进行了研究。文献[15]以锈胀裂缝宽度为控制变量,对12个在室内加速锈蚀及室外自然环境下锈蚀的小型试件及4个未锈蚀对比试件进行拉拔试验,得到了锈蚀与否钢绞线与砵间的粘结-滑移关系,分析了拉拔过程的4个阶段,探讨了先张法结构中锈蚀预应力筋的退化规律。然而其试验研究只针对短试件、非预应力下的粘结

性能,对于模拟先张法预应力状态下预应力筋锈蚀的粘结性能存在明显不足。文献[16]通过制作先张法预应力砵梁,将各构件处于不同自然条件中进行不同程度的自然锈蚀,每隔一段时间对构件进行粘结-滑移监测,分析了砵构件长期粘结蠕变性能的变化规律,得到了各预应力构件的粘结-滑移曲线随时间的变化规律。

#### 4 锈蚀 RC 结构抗弯承载力分析

锈蚀会导致服役RC桥梁的抗弯性能下降。大气环境的锈蚀和砵性能的劣化等因素均会使RC受弯构件的承载能力提早退化,失效模式也会发生较大变化。目前,受时间、空间等多种客观条件的限制,自然环境下锈蚀砵构件暴露试验相对较少,锈蚀后RC梁的力学特性研究主要依据实验室快速锈蚀法得到的构件来展开。

国内外学者对锈蚀构件的整体受力特性和失效模式进行了研究。文献[17]利用通过不同大小电流作用得到的损伤构件对锈蚀RC梁的性能退化给出了解释。文献[18]根据现行相关规范得到了锈蚀RC梁的计算方法,该方法对以往试验结论进行了总结。文献[19]通过对已锈蚀RC构件进行分析,研究了实际构件的力学退化原理。文献[20]首先考虑钢筋横断面损失所带来的RC梁抗弯承载力降低,然后研究梁一拱共同存在对抗剪承载力的作用,依次计算分析了无腹筋锈蚀RC梁的抗剪承载力、抗弯承载能力和相对应的失效情况。文献[21]对锈蚀一年多的8根加速锈蚀构件进行加载试验,试验过程中保持荷载恒定,研究发现弯曲裂缝会对纵向锈胀裂缝的发展起到非常显著的作用。文献[22]利用随机概率分析理论,提出了可变荷载情况下锈蚀RC构件的节点曲率随锈蚀程度的变化规律,并对构件的挠度变化进行了长期观测。

文献[23]对自然条件下的锈蚀和外加电流快速锈蚀两种情况下的锈蚀钢筋及锈蚀RC构件的试验情况进行了比较分析。易伟建等将固有频率分析方法应用到既有RC构件的检测中,基于裂缝宽度和高度,得出了锈损构件的平均截面刚度的退化情况,明确了挠度和频率两者的联系。针对目前大部分学者在进行锈蚀RC构件抗弯承载性能分析时仅考虑锈蚀因素的作用效应,而对构件自身参数条件造成的RC梁抗弯承载力变化基本没有考虑,在分析锈蚀钢筋与砵的整体协同工作性能变化时可能产生不

同结果的情况,文献[24]通过截面配筋,全面地反映了砼强度和截面配筋率对受拉钢筋应力强度的影响,进一步给出了锈蚀后无粘结 RC 构件的力筋强度使用情况,并对锈蚀 RC 构件的抗弯能力退化原因进行了深入讨论。

文献[25]通过大量 RC 构件承载力和相应的拉拔试验,得到了没有粘结力情况下锈蚀 RC 受弯构件承载能力的计算方法。文献[26]利用国外已发表的发生锈蚀的 111 根 RC 构件进行分析,结合试验结果并考虑钢筋直径和锈蚀电流密度等因素,得到了锈蚀 RC 梁弯矩理论公式。文献[27]对不同锈蚀情况下钢筋—砼界面间的粘结滑移关系进行研究,通过拔出试验和有限元模拟得到试验数据,并对试验数据进行了对比分析。文献[28]通过在砼浇筑过程中对试件的保护层不浇筑砼的方法来模拟构件发生整体剥落的现象,并对该构件的整体力学性能进行了研究。文献[29]在平截面假定的基础上,考虑受压区钢筋锈蚀,建立了弯矩计算公式。文献[30]对快速锈蚀情况下的构件进行拉拔破坏试验,结合试验结果并考虑多种因素对钢筋锈蚀率和两者间粘结性能的影响,得到了两者之间的关系表达式。文献[31]通过对 3 种不同快速锈蚀情况下获取的构件进行整体性能试验,分析了锈蚀程度、不同自然条件和铁锈体积膨胀等因素,结果表明当砼的裂缝宽度未超过 1 mm 时,铁锈的产生基本不会对钢筋与砼界面间的摩擦力造成太大影响。

文献[32]从锈蚀构件的粘结性能退化的变化规律出发,考虑锈蚀箍筋对试件整体性能的作用,讨论了构件表面的可观测损伤对构件整体锈蚀程度的影响,并根据试验数据对该方法进行了验证,结果显示该方法只在锈蚀程度较小的情况下成立。文献[33]针对目前锈蚀钢筋砼构件的研究仅考虑钢筋锈蚀程度的影响,而忽略在相同锈蚀程度下试件其他参数影响的情况,在既有无粘结 RC 构件研究的基础上,进一步讨论了力筋锈蚀程度、截面配置钢筋情况对锈蚀损伤构件承载性能退化的作用。文献[34]假定锈蚀损伤构件不会发生力筋端头锚固失效,以锈蚀构件截面配置钢筋情况 and 无粘结锈蚀梁钢筋强度利用情况为指标,得到了锈蚀 RC 构件抗弯承载能力的理论公式。文献[35]通过试验研究,认为单独分析荷载对构件失效情况的影响会造成与实际自然情况存在很大差异,会导致试验设计失败,因而需综合考虑各因素的综合作用。范颖芳分析了多种参数作

用下,锈蚀 RC 梁的曲率随锈蚀程度的变化趋势,进而给出了两种材料间的粘结性能退化下锈蚀 RC 构件的截面曲率延性系数计算理论。文献[36]通过大量试验研究,提出了预测 RC 构件抗弯和抗剪强度变化的计算方法。文献[37]对现有 RC 构件规范中的刚度计算方法提出质疑,并对规范公式进行了修正和完善。文献[38]通过对锈蚀 RC 构件进行静力破坏试验,分析了锈蚀程度与试件的短期刚度退化之间的关系。文献[39]通过损伤 RC 板的整体力学试验,分析了截面刚度随时间的变化规律。

针对锈蚀导致预应力砼梁抗弯性能退化的问题,文献[40]通过电化学法对 9 根试验梁进行快速锈蚀,并进行静载试验,结果表明在锈蚀率较低的情况下,锈蚀能提高构件的粘结性能;当锈蚀率达到 20% 时,构件的抗弯承载力最大下降 66%,PC 梁的受力特性与 RC 梁相近,其抗弯承载力可按 RC 梁的公式进行计算。文献[41]对掺盐加速锈蚀的 PC 梁进行静载试验,得到了锈蚀梁正截面受弯破坏的两种方式,即传统的适筋破坏、断丝破坏。由于其锈蚀程度低,最大锈蚀率不超过 3%,结构性能的退化不明显。文献[42]对发生预应力钢丝锈断的某铁路桥梁进行整体荷载试验,结果表明锈蚀导致梁体整体刚度降低、挠度增大、截面内力分布改变及下缘出现拉应力,并利用有限元方法,通过调整材料弹性模量模拟了梁体的锈蚀。

目前,对于受弯构件承载力的研究各学者考虑的因素稍有不同,但多是在实验室快速锈蚀试验基础上提出的半理论、半经验公式,还难以达成共识,形成统一的计算理论,这使现有研究成果和实际应用还有一定差距。

## 5 结论与展望

该文对砼结构内钢筋的锈蚀机理、力学性能、粘结滑移和承载力退化等耐久性方面的研究现状进行了总结,得到了钢筋发生锈蚀的机理,明确了锈蚀会导致钢筋力学性能和粘结滑移退化、抗弯承载力下降;锈蚀电流密度是评估钢筋发生电化学反应时损伤程度的关键因素;锈蚀会导致钢筋的弹性模量、强度与损伤程度等下降;锈蚀钢筋与砼间的粘结性能会随着锈蚀程度的增加而降低;锈蚀最终会造成结构整体抗弯性能下降。

基于现有研究成果,对砼结构性能退化问题提出以下研究方向:1) 自然条件下 RC 梁的锈蚀程度

是一个十分缓慢的过程,而现有研究中,为加快力筋的损伤,采用实验室电化学法对力筋进行锈蚀,这与自然环境下的锈蚀是不同的,需寻求更符合实际的研究方法。2) 现有研究一般通过缩小尺寸对锈蚀 RC 梁进行研究,与真实结构的尺寸和跨径都不同,真实结构与试验梁的锈蚀过程是否完全一致还有待进一步研究。3) 如何考虑多种因素耦合作用对结构耐久性的影响有待深入研究。

### 参考文献:

- [1] Lee H-S, Noguchi T, Tomosawa F. Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(8).
- [2] 张伟平, 李士彬, 顾祥林, 等. 自然锈蚀钢筋的轴向拉伸疲劳试验[J]. 中国公路学报, 2009, 22(2).
- [3] 刘文华, 李文春, 马金声. 高强钢丝钢绞线在海洋环境中的腐蚀试验[A]. 第九届全国混凝土及预应力混凝土学术交流会论文集[C]. 1996.
- [4] 黄素辉. 预应力混凝土结构抗氯离子侵蚀的耐久性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [5] 吴振, 龙跃, 章陈瀑. 持荷状态下钢绞线锈蚀及性能退化研究[J]. 广西工学院学报, 2011, 22(1).
- [6] 刘荣桂, 陆春华. 海工预应力混凝土氯离子侵蚀模型及耐久性[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2005, 26(6).
- [7] 曾严红, 顾祥林, 张伟平, 等. 锈蚀钢筋力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(2).
- [8] 刘其伟, 张鹏飞, 赵佳军. RC 连续梁桥孔道压浆调查及钢绞线力学性能研究[J]. 施工技术, 2007, 36(2).
- [9] 周峰, 王银辉, 李应根. 钢筋砼耐久性下降原因及提升方法[J]. 公路与汽运, 2016(4).
- [10] 吴庆. 锈蚀钢筋混凝土构件的结构性能退化预测模型研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2007.
- [11] Zhao Y X, Lin H W, Wu K, et al. Bond behaviour of normal/recycled concrete and corroded steel bars[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48(11).
- [12] 徐有邻. 并筋粘结锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构, 1996, 25(5).
- [13] Martí-Vargas J R, Serna P, Hale W M J. Strand bond performance in prestressed concrete accounting for bond slip[J]. Engineering Structures, 2013, 51(2).
- [14] Logan Donald R. Acceptance criteria for bond quality of strand for pretensioned prestressed concrete applications[J]. RCI Journal, 1997, 42(2).
- [15] Li F, Yuan Y. Effects of corrosion on bond behavior between steel strand and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38(2).
- [16] 李富民, 袁迎曙. 锈蚀钢绞线与混凝土的长期粘结蠕变性能试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(2).
- [17] 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).
- [18] 牛荻涛, 翟彬, 王林科. 锈蚀钢筋混凝土梁的承载力分析[J]. 建筑结构, 1999(8).
- [19] 袁迎曙, 贾福萍. 锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化模型[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3).
- [20] Wang X-H, Gao X-H, Li B, et al. Effect of bond and corrosion within partial length on shear behaviour and load capacity of RC beam[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(4).
- [21] El Maaddawy T, Soudki K, Topper T. Analytical model to predict nonlinear flexural behavior of corroded reinforced concrete beams[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(4).
- [22] Choi Y S, Yi S-T, Kim M Y, et al. Effect of corrosion method of the reinforcing bar on bond characteristics in reinforced concrete specimens[J]. Construction and Building Materials, 2014, 54(3).
- [23] 张伟平. 混凝土结构的钢筋锈蚀损伤预测及其耐久性评估[D]. 上海: 同济大学, 1999.
- [24] 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).
- [25] Bhargava K, Ghosh A, Mori Y, et al. Corrosion-induced bond strength degradation in reinforced concrete: analytical and empirical models[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(11).
- [26] Mangat P, Elgarf M. Bond characteristics of corroding reinforcement in concrete beams[J]. Materials and Structures, 1999, 32(2).
- [27] Fang C, Lundgren K, Chen L, et al. Corrosion influence on bond in reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(11).
- [28] Kheder G F, Al Kafaji J M, Dhiab R M. Flexural strength and cracking behavior of hybrid strength concrete beams[J]. Materials and Structures, 2010, 43(8).
- [29] Val D V, Chernin L. Serviceability reliability of reinforced concrete beams with corroded reinforcement[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(8).
- [30] Du Y, Clark L A, Chan A H. Impact of reinforcement corrosion on ductile behavior of reinforced concrete beams[J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(3).
- [31] Dang V H, François R. Influence of long-term corrosion in chloride environment on mechanical behaviour

- of RC beam[J]. Engineering Structures, 2013, 48(3).
- [32] Zhu W, François R. Corrosion of the reinforcement and its influence on the residual structural performance of a 26-year-old corroded RC beam[J]. Construction and Building Materials, 2014, 51(2).
- [33] Azad A K, Ahmad S, Azher S A. Residual strength of corrosion-damaged reinforced concrete beams[J]. ACI Materials Journal, 2007, 104(1).
- [34] Yang S-Y, Liu X-L, Leng Y-B. Prediction of flexural deformation of a corroded RC beam with a polynomial tension-stiffening model[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 139(6).
- [35] Zhong J, Gardoni P, Rosowsky D. Stiffness degradation and time to cracking of cover concrete in reinforced concrete structures subject to corrosion [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 136(2).
- [36] 吴庆, 袁迎曙. 基于钢筋锈蚀的混凝土梁承载能力退化预计模型[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(4).
- [37] Ballim Y, Reid J. Reinforcement corrosion and the deflection of RC beams: an experimental critique of current test methods[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(6).
- [38] Almusallam A A, Al-Gahtani A S, Aziz A R, et al. Effect of reinforcement corrosion on flexural behavior of concrete slabs[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1996, 8(3).
- [39] Yoon S, Wang K, Weiss W J, et al. Interaction between loading, corrosion, and serviceability of reinforced concrete [J]. ACI Materials Journal, 2000, 97(6).
- [40] Zila Rinaldi, Stefania Imperatore, Claudio Valente. Experimental evaluation of the flexural behavior of corroded P/C beams[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(11).
- [41] 李富民, 袁迎曙, 王波, 等. 锈蚀钢绞线预应力混凝土梁受弯承载力评估[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2).
- [42] 朱尔玉, 刘椿, 何立. 预应力混凝土桥梁锈蚀后的受力性能分析[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(2).

收稿日期: 2016-04-25

\*\*\*\*\*  
(上接第 151 页)

势非常明显, 其钢束用量少, 且拆除简单, 若采用环氧涂层成品索, 还可解决钢绞线的防腐问题, 更便于后期拆除。

## 6 结语

中国于 2005 年建成国内第一座波形钢腹板箱梁桥浈河大桥, 经过 10 余年的研究, 已逐步向大跨径组合结构发展。但在波形钢腹板组合结构体系的理论研究、试验论证和创新优化等方面仍有待研究, 还需通过大量工程实践不断丰富和完善这种新型结构理论体系, 从而推动钢-砼组合结构实现跨越式发展, 为化解国内钢铁产能过剩、环保形势严峻等重大问题探索新的出路。

## 参考文献:

- [1] 李淑琴, 万水, 陈建兵. 一种新型抗剪连接件试验研究[J]. 桥梁建设, 2009(4).
- [2] 苏立超. 波形钢腹板箱梁桥剪力键形式的优化设计[J]. 交通标准化, 2012(1).
- [3] 钟豪, 徐君兰, 顾安邦, 等. 波纹钢腹板 PC 组合箱梁的抗剪连接键分析[J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25(3).
- [4] 杜斌, 包太, 黄春晖, 等. 大跨径悬臂浇筑连续箱梁墩顶临时固结结构设计研究[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2013, 30(4).
- [5] 苏立超. 大跨度波形钢腹板组合箱梁桥关键技术研究[J]. 公路与汽运, 2014(2).

收稿日期: 2016-05-09

\*\*\*\*\*  
(上接第 174 页)

- [5] JTG D62-2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [6] 王磊, 张旭辉, 张建仁. 局部无压浆 PC 构件抗弯性能试验及计算方法[J]. 中国公路学报, 2014, 27(10).
- [7] 王兴奎. MIDAS 与 ANSYS 在桥梁检测中的应用实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [8] 白杨. 灌浆与张拉力对预应力砼梁的性能影响分析

- [D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
- [9] 徐向锋, 叶见曙, 钱培舒. 后张法预应力混凝土梁的孔道压浆研究[A]. 中国公路学会桥梁和结构工程分会 2004 年全国桥梁学术会议论文集[C]. 2004.
- [10] 周明伟. 预应力混凝土箱梁后张法施工孔道压浆质量控制[J]. 山西建筑, 2012, 38(17).

收稿日期: 2016-08-04