

doi: 10.3969/j.issn.1674-0696.2013.05.05

基于性能的混凝土桥梁全寿命养护策略方法研究

项贻强, 吴强强

(浙江大学 土木工程系 浙江 杭州 310058)

摘要: 分析了钢筋混凝土和预应力混凝土桥梁在规划设计、施工和运营养护中可能存在的问题,如桥墩不均匀沉降、水平位移、温度变化、裂缝超标、原桥设计荷载等级偏低、混凝土收缩徐变等引起的承载力不足,以及氯离子渗透、钢筋腐蚀、混凝土碳化及表层剥落、主梁下挠开裂、雨水锈蚀等造成的混凝土结构耐久性衰退和性能退化;从全寿命安全、适用、耐久、经济和环保等性能角度和结构可持续性方面,研究了基于性能的桥梁养护目标、性能水准及相应的维护策略和方法。

关键词: 混凝土桥; 基于性能; 全寿命; 桥梁维护; 策略

中图分类号: U448.29

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2013)05-0918-08

Maintenance Strategy of Performance-Based Concrete Bridges in Life Cycle

Xiang Yiqiang, Wu Qiangqiang

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: As far as the reinforced concrete and PC bridge was concerned, some existing problems in planning design, construction, operation and maintenance of concrete bridges were analyzed, such as insufficient load bearing capacity caused by uneven settlement of piers in bridges, horizontal displacement, temperature change, overload, the low design load level in original bridge design, shrinkage and creep of concrete and poor durability and performance degradation of concrete structures caused by chloride permeability, steel bar corrosion, carbonization and cover spalling of concrete, long-term deflection and cracking of main girder, the rain leakage and corrosion of concrete. From the aspects of safety, applicability, durability, economy, environmental protection and the sustainability of structure in the life cycle, the maintenance objectives, performance level, and corresponding strategies and methods of performance-based bridge were explored and discussed.

Key words: concrete bridges; performance-based; life cycle; bridge maintenance; strategy

0 引言

混凝土桥梁广泛应用于公路和城市桥梁中,主要的桥型有梁式桥、拱式桥及斜拉桥。梁式桥结构主要受弯,有钢筋混凝土和预应力混凝土,钢筋混凝土梁桥的跨径在20 m左右,预应力混凝土梁桥的跨径简支可达50 m左右,连续梁可达300 m左右。拱式桥的承重构件主要是主拱圈,以受压为主,可以充分用抗压性能较好的材料来修建,如早期的砖石及混凝土等圬工材料,随着桥梁跨越能力的要求逐渐提高及施工技术的不断进步,拱桥的建造型式呈多样化发展。按照修建拱桥的材料不同一般可分为混凝土拱桥、钢拱桥及钢管混凝土拱桥;按照结构的组合方式分有简单体系拱桥和梁拱组合体系拱桥,简

单体系拱桥又可以进一步分成三铰拱桥、两铰拱桥、无铰拱桥3种。组合体系拱桥是将梁和拱两种基本结构组合起来,共同承受桥面荷载和水平推力,充分发挥梁受弯、拱受压的结构特性及其组合作用,达到节省材料的目的,一般可划分为有推力的和无推力的两种类型。按照行车道的位置可分为上承式、中承式和下承式。这些拱桥中有相当一部分拱桥由钢筋混凝土材料所建,同时按照跨径、受力不同和经济性的要求,取不同的主拱圈截面型式。对小于30 m的中小跨径,拱的偏离弯矩较小,以轴压为主,可采用混凝土或钢筋混凝土板拱桥。随着跨径的进一步增加,拱的偏离弯矩逐渐加大,导致主拱在偏压荷载下,受拉侧的混凝土容易开裂,因而一般将截面设计为若干肋拱式。其间用横向联系加强的主拱肋拱截

收稿日期: 2013-02-12; 修订日期: 2013-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178416); 浙江省重点科技创新团队项目(2010R50034)

作者简介: 项贻强(1959—),男,浙江杭州人,教授,博士生导师,主要从事桥梁的全寿命设计理论、健康监测与养护管理、风险评估及古桥的保护研究。E-mail: xiangyiq@zju.edu.cn

面型式,一方面可以减轻结构自重,另一方面较高的拱肋高度及上下缘的配筋可以有效抵抗结构的偏心弯矩。当结构的跨径在80~300 m时,为进一步提升结构抵抗偏离弯矩的能力、增加桥梁的抗扭及横向联系,目前工程界对主拱圈的做法主要采用箱型截面、钢管劲性骨架箱拱结构及空间桁架的钢管混凝土拱桥。

混凝土斜拉桥有双塔、独塔及多塔。独塔混凝土斜拉桥的跨径一般在100~200 m,双塔混凝土斜拉桥的跨径一般200~500 m。

传统的桥梁的设计和施工,主要考虑结构早期的安全性及适用性,对混凝土及桥梁的施工只注重各个环节混凝土质量和品质控制,而不注重耐久性,致使早期建设的混凝土桥梁,在各种环境和荷载等因素的交互影响下,随时间推移出现混凝土开裂、剥落、钢筋锈蚀等病害,其性能将逐渐退化,抗力降低。当结构的抗力低于实际荷载产生的效应时,就会出现桥梁结构倒塌等事故,危及交通的安全和畅通。浙江、江苏、福建、广东等地区为经济发达地区,地处沿海,气候温湿,公路桥梁的交通量大,以前修建的很多桥梁结构为混凝土桥梁,长年处于复杂荷载及水气、氯离子等侵害的腐蚀性环境,混凝土桥梁的性能退化及病害十分突出。

1 混凝土桥梁耐久性相关问题及在中国研究的进展

据统计,腐蚀损失一般约占国民生产总值的2%~4%。美国于2002年发布的该国第7次腐蚀损失调查结果表明,1999—2001年间,美国每年的直接腐蚀损失是2 760亿美元,约占其GDP的3.1%。我国2008年国内生产总值超过 3×10^6 亿元,如按腐蚀损失约占GDP的3.1%计算,2008年我国因腐蚀所造成的经济损失超过 9×10^3 亿元人民币。但如果腐蚀研究和防护工作做得好,其中25%~40%的腐蚀损失是完全可以避免的,可见大力开展结构材料的腐蚀与防护研究工作意义重大。

根据美国截至2011年底对其桥梁的结构缺陷和功能老化按材料分类统计的结果^[1-2],从材料形式,混凝土及预应力混凝土桥梁的结构缺陷占其总数为10.8%,功能老化占其总数为20.2%,即缺陷或功能老化数占其总数为31%左右,说明混凝土桥梁结构缺陷或功能老化的问题非常突出。

据有关统计,截至2010年,我国的桥梁数目为65.8万座,超过美国约62万座的数目,成为世界上拥有桥梁数目最多的国家。与此同时,我国约有10万座(占15%)的桥梁存在着不同程度的缺陷,危桥数目大于1万座,有些甚至出现了坍塌的危险。

对相关资料进行统计^[3-5],可得我国近10年来桥梁倒塌数的数据,如表1。

表1 2002—2011年底我国每年桥梁倒塌数
Table 1 Annually collapsed bridge number in China from 2002 to 2011

年份	2002	2003	2004	2005	2006
桥梁倒塌数/座	4	1	9	5	11
年份	2007	2008	2009	2010	2011
桥梁倒塌数/座	12	15	14	20	26

20世纪80年代以来我国开始进行大规模的经济建设,由于当时经济基础薄弱,标准低,加之有些技术上的认识不足,导致这些结构提前出现了耐久性及承载力不足,急需进行维修改造。

在20世纪90年代,牛荻涛、惠云玲等注意到钢筋混凝土结构的耐久性问题对结构的影响,开始对钢筋混凝土中的钢筋锈蚀、锈蚀对构件的影响、锈蚀的耐久性评估、损伤、混凝土碳化等机理进行理论分析和试验研究,并对混凝土结构的寿命预测等展开了系统的研究。2003年,牛荻涛对混凝土结构耐久性与寿命预测作了总结^[6];金伟良在耐久性方面展开了近10多年的研究^[7]。对混凝土耐久性 & 桥梁结构的影响和剩余使用寿命预测的研究则是在最近7~8年才开始在中国桥梁界得到重视和开展。

目前,对于钢筋混凝土在环境作用下的碳化、钢筋锈蚀、氯离子渗透、碱骨料反应等劣化规律和机理研究已相对成熟,并在结构耐久性设计方面得到了应用。但对于这些劣化规律对混凝土桥梁结构的极限承载力的影响研究则相对较少,而且很不成熟,尤其是环境和荷载的耦合作用机理更是复杂。为此,浙江大学在近几年连续展开了相关的研究,总结提出了混凝土桥梁剩余使用寿命的预测模型,包括基于混凝土耐久性失效的寿命预测模型、基于可靠度的寿命预测模型及基于全寿命周期成本的寿命预测模型^[8];对锈蚀钢筋混凝土构件开裂问题进行有限元模拟分析^[9],鉴于氯离子扩散控制方程与瞬态热传导控制方程的相似性,根据传统的Fick定律和已有的氯盐环境下钢筋非均匀锈胀模型以及热弹性力学理论,提出了钢筋混凝土锈胀开裂模拟的热力耦合方法。

2010年,综合考虑氯离子扩散系数的时随效应、混凝土自身缺陷对扩散过程的影响,对氯离子在混凝土中扩散的多因素模型进行了修正和应用,给出了基于概率性能和基于时变可靠度的混凝土结构寿命预测方法^[10]。

2012年,以浙江沿海地区的在役混凝土桥梁为背景,分析了现有3个预测混凝土碳化深度模型的异同点,并对其进行分析预测及实测数据对比,给出了该地区典型桥梁构件的碳化寿命预估值,同时通

过在模型3中引入水灰比影响系数,提出了修正模型3。结果表明,在沿海地区,修正模型3在碳化寿命预测上更符合实际情况^[11]。

2011年,通过引入锈蚀产物质量相等的条件假定,研究推导了钢筋均匀锈胀和非均匀锈胀两种钢筋锈胀模型下钢筋径向锈胀位移-时间曲线,将锈胀位移作为强制位移作用于钢筋表面的混凝土节点,利用有限元软件ANSYS进一步提出,并模拟分析了锈蚀钢筋混凝土的开裂过程^[12]。

通过比较分析国内外氯离子扩散模型及钢筋锈蚀模型,提出了考虑荷载和氯离子结合能力两种因素的混凝土氯离子扩散模型和钢筋锈蚀模型,并借助于国内外相关的试验数据及沿海地区的某钢筋混凝土桥梁为背景,对提出的模型进行了验证,与传统的仅考虑这些单一因素影响的模型相比,所提出的氯离子扩散修正模型及钢筋锈蚀模型更趋合理^[13-14]。

在箱梁桥施工中底板开裂机理及防护措施的研究方面,针对实际的箱梁桥施工步骤,采用非线性的分析方法模拟了随着预应力钢束的张拉箱梁底板裂缝的发展。通过数值与理论分析得到了开裂模式,得出底板裂缝产生的原因是预应力管道削弱了底板的抗剪强度。基于数值分析及现场调查,归纳得出4种类型的箱梁底板裂缝,并提出了控制裂缝的简化设计方法^[15]。

综上所述,钢筋混凝土结构在环境及荷载作用下,存在混凝土碳化、氯离子渗透、钢筋锈蚀、保护层锈胀裂缝、混凝土剥落等耐久性问题,并严重影响混凝土桥梁结构的剩余使用寿命。以往对桥梁的检查养护,主要靠现场工程师的直觉判断及简单的现场试验评估,缺乏对其材料劣化、基于各种性能的桥梁结构全寿命的剩余使用寿命的预测分析评估,更无法从全寿命的角度,分析提出基于性能的养护策略及方法。因此,如何对钢筋混凝土桥梁在全寿命的性能退化规律进行有效分析,预测其强度及剩余使用寿命,提出基于性能的技术维护策略,充分发挥在役桥梁的作用,提高混凝土桥梁工程的建养技术,是一个涉及经济环保及社会可持续发展的,具有重大的学术价值及经济效益的课题。

2 全寿命结构性能与性能水准要求

桥梁的全寿命指的是从规划、设计、施工、运营、管养、拆除或回收再利用的全过程,其目标是实现桥梁全寿命周期内总体性能(功能、成本、人文、环境等)最优的设计。它具有3个特点:①全局性。即从全面的、联系的和发展的观点,不再是从某一阶段或某一个部门的角度出发,更多地关注桥梁全寿命周

期内的各种影响因素,综合平衡桥梁各种性能需求,追求桥梁设计作品整体的最大效应。②创新性。体现了桥梁工程师从无到有、从定性到定量的创新过程。③多目标性。过程涵盖了总体概念、景观造型、生态环境、结构性能、养护管理、风险评估、全寿命成本等一系列设计活动。

2.1 桥梁的性能

2.1.1 桥梁的安全性能

安全性能是结构施工、运营承载、确保交通安全畅通的关键,主要涉及桥梁结构在施工及运营期间各种预期荷载作用下的强度、刚度和稳定性。

传统的设计方法主要将空间的桥梁结构简化为平面问题,采用平面杆系的线性分析方法,进行结构设计,这对于较窄的桥梁,其分析结果与实际较为符合。但随着桥梁宽度的增加,其空间效应非常明显,平面杆系的线性分析方法渐渐暴露其局限性,有必要采用更为合理的空间设计分析方法,如三维数值分析的有限元;对于某些大跨桥梁,在引入空间分析方法的同时,还应考虑结构的非线性效应的分析等,如结构的稳定、大位移及非线性问题。

2.1.2 桥梁的适用性能

即分析解决桥梁在设计使用寿命周期内要有足够的桥面宽度满足未来的交通流量、在通过设计荷载时不出现过大的变形和过宽的裂缝、同时要利于桥下的泄洪、通航(跨河桥)或车辆等,条件许可方便各种管线(水、电、气、通讯等)的搭载,为此首先要进行桥梁的用途和功能需求分析,并给出相应的设计方法。

混凝土桥梁的突出问题就是开裂问题,开裂有混凝土浇筑时产生的收缩裂缝,及使用过程中因荷载、温度作用、结构基础不均匀沉降等引起的裂缝,这就要求工程师们研究桥梁实际所承受的车辆的密度、荷载轴重的分布、结构可能的不均匀沉降、温度等对结构的影响,同时要对有关的施工工艺、混凝土配合比等进行优化和控制。在分析设计方法上,应采用更为精确的符合桥梁施工工况及考虑相关因素影响的计算图示及空间分析方法,以准确预测其受力状况及可能存在的应力和挠度过大的问题。

2.1.3 桥梁的耐久性能

混凝土桥梁耐久性的突出问题是前些年设计施工的混凝土保护层厚度偏薄、抗渗透能力差、钢筋锈蚀、结构不均匀沉降、混凝土碳化,对沿海浪溅区的混凝土桥梁,这些问题更为严重。一般影响混凝土桥梁耐久性的因素有混凝土材料的自身特性、桥梁的设计、细部构造与施工质量、桥梁所处的环境条件、桥梁的使用条件和防护措施等。

2.1.4 桥梁的可持续性(或经济和环保性)

桥梁的可持续性要求桥梁在完成预定功能和设计使用寿命周期内,其工程建设及养护维修费用最低,同时还应对环境影响小,利于环保及社会的可持续发展。

以上4个性能分别对应4种极限状态:①承载能力极限状态。直接根据作用是否危及公路桥梁结构的安全来判断;②正常使用极限状态。根据使用功能如行车的影响来判断;③耐久性极限状态。根据结构材料的耐久性准则及对使用的影响来判断;④可修复极限状态。不但要考虑结构在偶然作用下的劣化和损坏程度,还要根据将降低的安全性和适用性恢复到要求的水平进行维修或修复的难易程度来判断,应分别针对不同的评价对象规定不同的容许状态。

与传统桥梁设计(或加固设计)相比,桥梁全寿命性能设计(或加固维护设计)在工作中将桥梁设计范围从建设期(或从加固维护开始)拓展到整个寿命周期,增加了以往未考虑的内容,具体包括耐久性设计、管养设计、拆除、回收再利用设计、风险评估和保险策略,以及全寿命周期成本分析。

2.2 不同水准的性能要求

综合上述桥梁的安全性、适用性、耐久性和环保(可修复性),以及桥梁不同环境和位置、重要性程度等,对应结构4种极限状态,文献[16]提出了中国现有桥梁设计、3个水准下的性能要求和描述。从桥梁维护的角度,也应根据桥梁的实际状况、重要性程度等,对照不同水准下的性能要求,提出基于性能的养护指标,进行桥梁结构的维护和加固。

3 混凝土桥梁性能问题的分析方法

由于结构的性能对应4种极限状态,4种极限状态的前3种的承载能力极限状态、正常使用极限状态、耐久性极限状态均可通过相应的分析方法、结合实际桥梁状况来判断。同时,可从桥梁的材料层次、构件层次和结构层次的角度进行分析。

3.1 材料层次分析

主要是混凝土材料的退化,包括混凝土碳化^[17-18]、氯离子侵蚀^[19-20]及钢筋锈蚀^[21-22]及开裂,材料劣化形式分类可参见图1^[23]。许多学者对现有的混凝土碳化、氯离子侵蚀和钢筋锈蚀等混凝土材料的退化和耐久性进行研究,并对相应的退化模型和耐久性剩余使用寿命进行归纳和总结,但研究的角度多以横向为主,即单独考虑每种退化形式对应有哪些数学模型,各模型之间的相关联系和区别等问题。

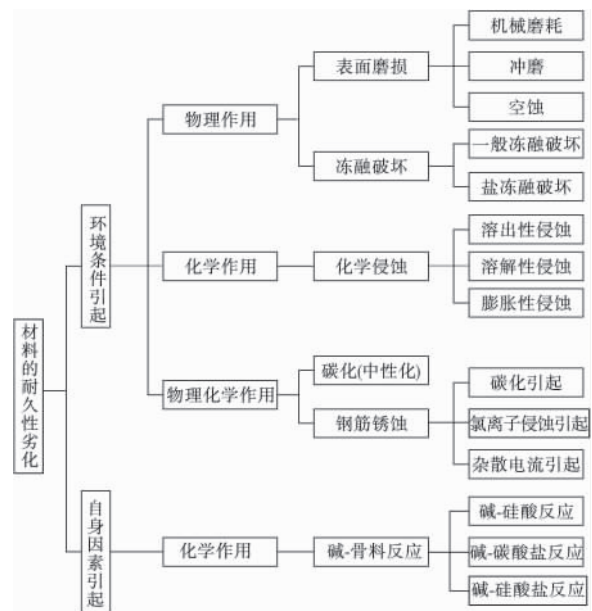


Fig.1 Degradation classification of concrete structure materials

3.2 构件层次分析

构件层次分析以往主要分析研究结构构件的抗力效应及设计方法,对其在环境荷载下的钢筋锈蚀等对钢筋混凝土构件(梁、板、柱、节点等)受力性能的变化(包括耐久性、抗力或剩余承载力)研究较少。随着桥梁垮塌失效事故的增多,目前已逐渐加强了构件时变性能的模拟试验研究,但受试验条件的限制,现行锈蚀构件主要通过外加电流加速锈蚀获得,且绝大多数的试验是在构件(试件)不受力的实验室加速锈蚀情况下进行的,不能正确反映桥梁运营期间的实际工作情况,尤其未考虑结构构件的使用环境与荷载的耦合作用效应,少数研究已经表明结构受力状态对构件的耐久性及抗力的退化影响是不可忽视的^[24]。

3.3 结构层次分析

结构层次以往的研究主要是综合各种作用及时变效应(如预应力、收缩徐变效应),分析研究给出结构各构件的作用效应及其组合,再借助构件层次分析设计,解决各构件的安全性能,同时确保结构的适用性能等。这种分析方法无法准确预知结构的安全性能,尤其是结构随时间的时变承载力及适用性能,因此,有必要从整个结构和全寿命的观点研究整个结构抗力与荷载的变化规律及其对结构安全性能及适用性能的影响(包括裂缝),了解结构任意的使用状况及安全度,为结构性能的维护提出有关的建议。而混凝土桥梁结构抗力退化是一个非常复杂的过程,一方面受很多因素影响,如环境因素、荷载因素、原始设计、施工质量的自身因素^[25];另一方面,混凝土结构承载力的分析方法涉及材料的时变性、

可靠性、非线性本构方程及破坏准则等基础理论问题等。关于这方面的环境模拟、计算方法、计算模型、经济性等有待深入研究。

图2展示了影响桥梁性能的环境因素,表2列举了钢筋混凝土结构常见的影响因素^[25]。

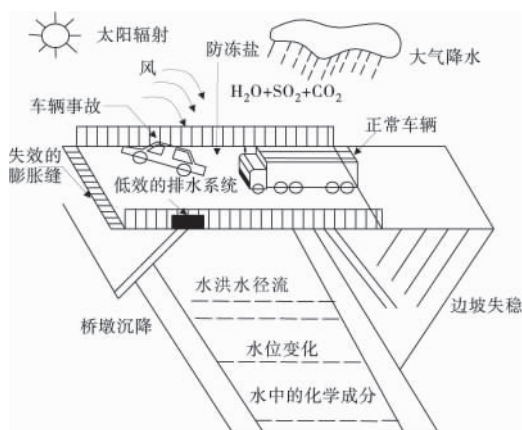


图2 环境因素引起桥梁性能退化

Fig. 2 Bridge performance degradation induced by environment factors

表2 钢筋混凝土结构抗力时变影响因素

Table 2 Time-varying influence factors of reinforced concrete structure resistance

环境因素	荷载因素	自身因素
混凝土碳化; 钢筋锈蚀; 侵蚀性液体、气体; 高温、低温	高周疲劳损伤; 低周疲劳损伤; 高应力效应	设计偏差、钢筋混凝土施工质量及强度的时变性; 碱-集料反应; 收缩、徐变

4 基于性能的混凝土桥梁养护指标

混凝土桥梁结构在自然环境、使用环境及材料内部因素的作用下,随着服役时间的增加,结构的性能会逐步退化,从而使得承载能力下降,影响结构的安全和正常使用性能,缩短结构的使用寿命。结构养护的目的就是针对桥梁结构存在的各类问题,基于性能(安全性、适用性、耐久性及可持续性)的要求和分析,提出相应的养护指标,确保混凝土桥结构及其构件能在规定期限内维持正常的工作状态。图3为在参照了中国相应的桥梁养护规范^[26]和桥梁承载能力检测评定规程^[27]的基础上,提出了基于性能的桥梁结构相应的养护指标,并要求通过养护,使桥梁结构的性能达到设计及养护规范的要求。



图3 基于性能的混凝土桥梁养护指标

Fig. 3 Maintenance index of performance-based concrete bridge structures

5 养护的对策及方法

5.1 养护的对策

针对桥梁的实际状况及前面提出的基于性能的桥梁结构养护指标,分别从安全性、适用性、耐久性、可持续性提出相应的养护策略。

5.1.1 安全性养护策略

安全性就是要确保桥梁在运营期间各种预期荷载作用下的强度、刚度和稳定性,且具有一定的安全储备。为此,在日常运营管理中,应建立养护管理日志、严格限制超载车辆的通行,定期检查,加强养护,分析潜在的安全隐患,加强风险管控措施。在校核检查结构时变承载力时,尤其应根据实际的运营荷载,考虑各种因素相互影响和耦合作用,分析给出基于材料退化的桥梁结构承载力,应加强非线性分析理论和寿命预测方法的基础研究及应用,尽可能少

用对交通影响比较大的桥梁现场荷载试验检测。

通常钢筋混凝土结构承载力的计算,是在大量试验研究的基础上采用半理论半经验的简化计算公式。对于常规的桥梁设计来说,这种方法可以满足工程需要。但对于处于复杂环境影响的特定混凝土桥梁,要客观而准确地预测和评定其承载力,不仅需要全面得考虑影响承载力的诸因素,如混凝土徐变、强度劣化、钢筋锈蚀、裂缝等,更需要选择合理的计算理论和方法,尤其要考虑桥梁结构在开裂后进入非线性的实际情况。目前结构极限承载力分析常采用的理论包括塑性极限分析理论和混凝土非线性有限元理论等。

1) 工程中应用较多的是塑性极限分析理论,它只考虑结构的塑性极限状态,通过对结构塑性极限状态分析求解结构的承载力。在结构极限分析中,通常假设结构的塑性变形集中在桥梁的特定部位而

成为塑性铰,常用的塑性铰模型包括简单塑性铰模型、精细塑性铰模型及弹塑性铰模型等。塑性铰模型意义明确,计算相对方便,但存在不足,其对于复杂截面形式、桁架结构在复合受力如弯、剪、扭、轴向力等力素共同作用下,截面的应力分布及塑化条件难以确定;塑性铰形成位置、次序及转动能力难以确定判断。因此,对较复杂的混凝土桥及多跨斜拉桥等采用这种理论计算结果效果并不理想。

2) 混凝土非线性和极限承载力有限元分析的理论研究可追溯到20世纪60年代,Ngo和Scordelis(1967)用二维矩形单元分析钢筋混凝土简支梁,经过40多年的发展,非线性有限元取得了长足的进展。在理论研究方面,主要集中于数学模型的建立和改进,尤其是考虑混凝土材料随时变化的本构关系研究,混凝土裂缝模型及开裂准则的研究,断裂力学的引入、钢筋与混凝土黏结滑移的影响及数值计算方法的研究等。除了进行理论的探索外,各国学者的注意力聚焦在各类模型的工程应用^[28]。

5.1.2 适用性养护策略

在设计时,应充分估计桥梁开通后在设计使用寿命周期内的桥梁总跨径、交通流量及通行荷载的标准,避免桥梁在投入使用时出现河道急剧涌水、河床冲刷加大和桥面交通拥堵,以及过大的变形和过宽的裂缝;加宽、加固桥梁时也应尽可能考虑一步到位,桥面系应避免积水和排水管堵塞,确保行车的畅通和安全。

5.1.3 耐久性养护策略

对出现的一般耐久性质量问题,如混凝土开裂、渗漏、剥蚀等,应及时进行养护和封闭修补;对沿海混凝土桥梁,应增大结构的保护层厚度,提高或改善混凝土的品质,也可通过在混凝土表层或钢筋表层涂刷钢筋阻锈剂等材料,有条件时,应采用耐久性更好的纤维材料或不锈钢材料等。有支座的桥梁,设计时就应考虑更换支座的方便。冬季有积雪的桥梁,尽可能采用人工除雪,少用盐类除雪剂。

5.1.4 可持续性养护策略

设计及维护桥梁时,应使其在使用寿命周期内的工程建设及养护维修费用最低,有利环保,方便维护和修复,避免大拆和随意倾倒建筑垃圾。

5.2 养护方法

不同环境和位置及桥梁型式的工程问题,其相应的养护维修和加固方法有所不同。

5.2.1 承载能力极限状态不足导致结构开裂

若裂缝的产生原因为墩台变位或温度应力,则一般可采取采用加固墩、台及基础。

若裂缝产生的原因为混凝土桥设计荷载等级过低或超载,则可采取加强薄弱构件、改变结构体系及

限制超载的方法来解决。加强薄弱构件及增加构件的刚度,主要措施如下:①采用以新材料(喷射混凝土、现浇混凝土、环氧胶浆黏贴钢板、钢筋、玻璃钢及碳纤维布)增大主拱圈截面;②用高标号水泥砂浆或环氧树脂水泥砂浆封填裂缝;③增设体外预应力筋,或用化学黏结剂黏贴附加构件的方法进行加固构件。

正常使用极限状态不足时,除了上面所提到的加强薄弱构件及增加结构刚度法以外,还可以采用改变结构体系的方法,主要是利用梁的连续作用或梁、板组合作用及拱梁组合作用,使原来简支或单一的拱式体系转化为连续梁或梁拱体系。对拱桥还可采用减轻恒载法,即:①实腹式拱桥改建为空腹式拱桥;②更换拱上填料,采用轻质的拱上填料;③改变拱上填料厚度来减轻拱上建筑自重;④改拱式为梁式拱上建筑,采用预制的钢筋混凝土T梁、微弯板或空心板等轻质桥面系代替笨重的腹拱体系。

当正常使用极限状态不足而使裂缝超限时,可采用加强薄弱构件法,即:①用高标号水泥砂浆或环氧树脂水泥砂浆封填裂缝;②增设体外预应力筋,或用化学黏结剂黏贴附加构件的方法进行加固构件,如可黏贴碳纤维布等。对于纵向裂纹可采用增设横向预应力,使裂缝闭合,加强结构整体性。

5.2.2 结构混凝土耐久性能不足

混凝土耐久性不足包括钢筋锈蚀、氯离子的侵蚀及混凝土碳化等。对结构混凝土因碳化、空蚀、冻融破坏、化学侵蚀及结构受力而引起的混凝土表层开裂、渗漏、剥蚀等大面积的破坏修补,可考虑采用表面修补法直接进行修补,修补的材料有水泥基修补材料,高分子有机修补材料,聚合物水泥砂浆等。而对钢筋锈蚀,应引起高度重视,因它是混凝土结构破坏的主要因素^[29]。防止或延缓钢筋锈蚀所采用的方法有4类:

1) 在混凝土中添加钢筋阻锈剂,其作用是为推迟钢筋开始生锈的时间以及减缓了钢筋腐蚀发展的速度。早期研究的阻锈剂主要有苯甲酸钠(Sodium benzoate)、各种亚硝酸盐(Sodium nitrite, potassium nitrite and barium nitrite)和铬酸盐(Chromates/dichromate)等,也有人研究了氯化亚锡(SnCl_2 , stannous chloride)。目前,研究最多的是迁移性阻锈剂(MCI)的发展^[30],这类阻锈剂具有在混凝土的孔隙中通过气相和液相扩散到钢筋表面形成吸附膜从而产生阻锈作用,如胺基羧酸盐^[31](Amino-carboxylate based)等。

2) 在钢筋表面涂抹保护层,其作用是阻止氧气、水分及氯离子等腐蚀性介质与钢筋直接接触。目前,使用的最为广泛还是环氧树脂涂层,优点是其喷涂厚度均匀,易于工业化生产;其缺点是在运输、布

筋过程中易于破坏^[32]。

3) 牺牲阳极防护法,在钢筋表面涂抹一层金属介质,以代替钢筋作为电化学腐蚀的阳极,起到保护钢筋的作用。附在钢筋表面的活动金属覆层可以是锌、镉和铝等,目前,用的最多的还是热浸镀锌钢筋(HDG)。

4) 采用纤维增强复合材料(FRP)来代替钢筋。主要有碳纤维增强复合材料(CFRP)、玻璃纤维增强复合材料(GFRP)、芳纶纤维复合材料(AFRP)等。有研究表明解决钢筋锈蚀所引起的混凝土结构耐久性问题行之有效的方法是利用纤维增强塑料(Fiber Reinforced Plastics 简称 FRP)来代替钢筋或预应力钢筋^[33]。

桥梁结构在进行修复技术方案选择时,还需要综合考虑经济性因素、环境保护与社会效益。桥梁结构在寿命周期内要满足其性能要求,除需要对桥梁进行周期性的维护外,还应严格限制超载车辆的行驶。

6 结 语

1) 简述了混凝土桥梁安全性、耐久性等相关问题研究及在中国的进展,同时基于全寿命的特点及结构性能要求包括安全性、适用性、耐久性和可持续性,概略讨论了相对应的承载能力极限状态、正常使用极限状态、耐久性极限状态和可修复性极限状态及考虑的问题和解决的方法。针对结构在不同环境和位置、重要性程度等,提出应参照桥梁设计不同水准的性能要求,给出基于性能的养护指标,进行桥梁结构的维护和加固。

2) 针对混凝土桥梁结构存在的性能问题,从桥梁的材料层次、构件层次和结构层次的角度,讨论了现有的分析方法、存在的局限及要进一步研究解决的问题,提出有必要考虑各种因素相互影响和耦合作用,研究建立基于材料退化的桥梁结构承载力非线性分析理论及寿命预测方法。

3) 考虑到实际的混凝土桥梁可能因承载能力极限状态、正常使用极限状态及耐久性极限状态不足导致性能无法满足要求,提出了相应的维护策略和方法。

参考文献(References):

- [1] FHWA U S D O. Count of Bridges by Structure Type [DB/OL]. (2013-04-12) [2013-04-16] <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/struct.cfm>.
- [2] FHWA U S D O. Material Type of Structure by State [DB/OL]. (2013-04-12) [2013-04-16] <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/material.cfm>.
- [3] 刘效尧. 廿一世纪桥梁倒塌与事故综述 [EB/OL]. (2011-02-11) [2013-04-16] <http://liu-xiaoyao.blog.163.com/blog/static/137152320111193444328>.
- [4] 刘效尧. 2010 年桥梁倒塌和事故 [EB/OL]. (2011-01-27) [2013-04-16] <http://liu-xiaoyao.blog.163.com/blog/static/1371523201102793359300>.
- [5] 刘效尧. Bridge collapse accident in 2010 [EB/OL]. (2011-01-27) [2013-04-16] <http://liu-xiaoyao.blog.163.com/blog/static/1371523201102793359300>.
- [6] 刘效尧. 2011 年桥梁倒塌和事故 [EB/OL]. (2011-12-26) [2013-04-16] <http://liu-xiaoyao.blog.163.com/blog/static/1371523201112610632134>.
- [7] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [8] Niu Ditao. Durability and Life Prediction of Concrete Structures [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [9] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [10] Jin Weiliang, Zhao Yuxi. Durability of Concrete Structure [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [11] Xiang Yiqiang, Guo Dongmei, Cheng Kun. The model for predicting the remaining service life of reinforced concrete bridges in-service and applicability [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 90/91/92/93: 1162-1167.
- [12] 项贻强, 程坤, 郭冬梅, 等. 基于热力耦合的钢筋混凝土锈胀开裂分析 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(8): 1444-1449.
- [13] Xiang Yiqiang, Cheng Kun, Guo Dongmei, et al. Analysis of RC bulge cracking by the coupled thermal-mechanical method [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(8): 1444-1449.
- [14] 薛鹏飞, 项贻强. 修正的氯离子在混凝土中的扩散模型及其工程应用 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, 44(4): 831-836.
- [15] Xue Pengfei, Xiang Yiqiang. Corrected diffusion model of chloride in concrete and its engineering application [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(4): 831-836.
- [16] Xiang Yiqiang, Guo Dongmei, Wu Qiangqiang. Service Life Prediction of Concrete Bridges Based on Concrete Carbonation Depth near Coastal Areas [C]//3rd International Conference on the Durability of Concrete Structures. Belfast, UK: Queen's University, 2012.
- [17] Xiang Yiqiang, Cheng Kun, Guo Dongmei. Behavior of Rust Expansion Cracking of Concrete Deduced by Equivalent Corrosion Products of Steel Bar [C]//Xiamen: Proceedings of International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering. Nanjing: Southeast University Press 2011: 762-768.
- [18] 郭冬梅, 项贻强, 程坤. 沿海混凝土桥的氯离子扩散修正模型及应用 [J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 89-94.
- [19] Guo Dongmei, Xiang Yiqiang, Cheng Kun. Chloride diffusion correction model and application of coastal concrete bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 89-94.
- [20] 郭冬梅, 项贻强, 程坤. 沿海在役钢筋混凝土桥梁的钢筋锈蚀模型 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(12): 100-104.

- Guo Dongmei, Xiang Yiqiang, Cheng Kun. Steel corrosion model of coastal existing reinforced concrete bridges [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(12): 100-104.
- [15] Xiang Yiqiang, Tang Guobin, Liu Chenxi. Cracking mechanism and simplified design method for bottom flange in prestressed concrete box girder bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(2): 267-274.
- [16] 赵君黎,李文杰,冯蓂. 基于性能的公路桥梁结构设计规范研究[C]//第二十届全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社, 2012: 25-31.
- Zhao Junli, Li Wenjie, Feng Min. Performance-Based Highway Bridge Structure Design Specification Research [C]//Proceedings of the 20th China Conference on Bridge. Beijing: China Communications Press, 2012: 25-31.
- [17] Parrott L J. A study of carbonation-induced corrosion [J]. Magazine of Concrete Research, 1994, 46(166): 23-28.
- [18] Papadakis V G, Vayenas C G, Fardis M N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation [J]. ACI Materials Journal, 1991, 88(4): 363-373.
- [19] Kong J S, Ababneh A N, Frangopol D M, et al. Reliability analysis of chloride penetration in saturated concrete [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2002, 17(3): 305-315.
- [20] Liu Y P, Weyers R E. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures [J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(6): 675-681.
- [21] Lee H S, Noguchi T, Tomosawa F. FEM analysis for structural performance of deteriorated RC structures due to rebar corrosion [C]. Tromsø, Norway: Proceedings of the Second International Conference on Concrete under Severe Conditions, 1998.
- [22] Maslehuddin M, Allam I M, Alsulaimani G J, et al. Effect of rusting of reinforcing steel in its mechanical-properties and bond with concrete [J]. ACI Materials Journal, 1990, 87(5): 496-502.
- [23] 张誉. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2003.
- Zhang Yu. Introduction of Concrete Structure Durability [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2003.
- [24] 涂永明,吕志涛. 应力状态下混凝土的碳化试验研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2003, 33(5): 573-576.
- Tu Yongming, Lv Zhitao. Experiment and research of prestressed concrete structure in carbonation corrosive environments [J]. Journal of Southeast University: Natural Science, 2003, 33(5): 573-576.
- [25] 叶文亚. 预应力混凝土桥梁寿命期结构整体性能退化分析[D]. 上海:同济大学, 2007.
- Ye Wenya. Life Cycle Prestressed Concrete Bridge Structure Performance Degradation Analysis [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [26] JTG H 11—2004 公路桥涵养护规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.
- JTG H 11—2004 Code for Maintenance of Highway Bridges and Culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [27] JTGT J 21—2011 公路桥梁承载能力检测评定规程[S]. 北京:人民交通出版社, 2011.
- JTGT J 21—2011 Specification for Inspection and Evaluation of Load-Bearing Capacity of Highway Bridge [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [28] 唐国斌. 基于全寿命设计的混凝土箱梁桥若干理论问题研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.
- Tang Guobin. Study on Some Theoretical Problems of Concrete Box Girder Bridge Based on Life-Cycle Design [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [29] Mehta P K. Durability of Concrete-Fifty Years of Progress: I [C]//ACI: Durability of Concrete. Montreal, Canada: Second International Conference, 1991: 1-31.
- [30] Bjegovic D, Miksic B. Migrating corrosion inhibitor protection of concrete [J]. Materials Performance, 1999, 38(11): 52-56.
- [31] Eydelnant A, Miksic B, Gelner L. Migrating corrosion inhibitors for reinforced concrete [EB/OL]. (1993-06-10) [2013-03-12]. <http://www.cortecmci.com/Files/CTP16MCI.pdf>.
- [32] 张晏清. 钢筋表面防腐蚀涂层的性能[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(5): 577-579.
- Zhang Yanqing. Study of corrosion resistance coatings for steel bar [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(5): 577-579.
- [33] 胡永晓. 预应力FRP筋受弯构件非线性有限元分析[D]. 武汉:武汉理工大学, 2007.
- Hu Yongxiao. Nonlinear Finite Element Analysis of Prestressed FRP Bars Bending Members [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.

(上接第917页)

- Suo Xiaoping. Environment of Suspension Bridge, Influence of the Construction Error to Bridge Condition and Procedure Development [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.
- [5] 徐君兰. 大跨径桥梁施工控制理论[M]. 北京:人民交通出版社, 2000.
- Xu Junlan. Construction Control Theory of Long Span Bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [6] 叶志龙. 悬索桥主缆架设误差影响分析及参数控制[D]. 成都:西南交通大学, 2008.
- Ye Zhilong. The Effect Analysis of Errors and Parameters Control for Main Cable Erection of Suspension Bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [7] 周孟波. 悬索桥手册[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.
- Zhou Mengbo. Suspension Bridge Handbook [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [8] 姜军,孙胜江. 悬索桥索夹安装位置及吊索下料长度计算[J]. 公路, 2007(8): 64-66.
- Jiang Jun, Sun Shengjiang. Calculation of cable clamp mounting position and suspender length of suspension bridges [J]. Highway, 2007(8): 64-66.