

基于退化机理的混凝土桥梁耐久性环境区划

陈艾荣, 冯师蓉, 马如进

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 系统研究了桥梁耐久性设计的环境作用和区划。首先, 从环境作用对混凝土桥梁的影响和导致的混凝土桥梁的耐久性病害出发找出不同区域混凝土桥梁耐久性退化的主要因素; 其次, 依托国家气象中心的气象资料对混凝土结构耐久性有显著影响的环境指标进行调查分析, 获取代表城市的环境数据, 对常规环境参数进行了调研; 再次, 借鉴现有的规范和标准, 选择适当的区划参数对混凝土桥梁的工作环境进行了分类; 最后, 运用桌面地理信息系统软件 ArcGIS 绘制了全国耐久性环境区划图, 得到了对应于不同环境参数的环境区划图表。

关键词: 混凝土桥梁; 耐久性; 环境作用; 环境区划

中图分类号: U448.34

文献标志码: A

Environmental Zoning for Durability Performance of Concrete Bridges Based on Deterioration Mechanism

CHEN Airong, FENG Shirong, MA Rujin

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The environmental effects and zoning for the durability performance of concrete bridges were systematically studied. First, the major influence factors for concrete bridges in different places were investigated according to the environmental effects and the durability diseases. Then, the environmental indicators which had significant impact on durability performance of concrete bridges were investigated and analyzed on the basis of meteorological information data from the National Meteorological Center (NMC). Subsequently, proper environmental parameters were chosen in order to classify the environmental conditions of concrete bridges by the current design codes and standards. Finally, the environmental zoning maps and tables for different environmental parameters were obtained by the ArcGIS software.

Key words: concrete bridge; durability; environmental effects; environmental zoning

我国地域广阔, 东西南北气候和地型差异明显, 河流分布广, 跨越河流的桥梁处于不同的自然环境中。如果不考虑桥梁所处的环境作用的差异, 采用通用的桥梁结构和构造形式将不可避免地产生耐久性问题。作为混凝土结构耐久性设计的基础, 环境区划的技术发展与混凝土结构设计理论及方法的发展息息相关, 相应的环境作用类别及等级的划分也受到规范、规程中采用的设计理论及方法的制约。

目前, 国外土建工程中对混凝土结构耐久性设计主要采取条文说明方法, 这导致在耐久性设计过程中对环境作用类别和等级划分的要求不高, 半定量甚至定性的描述即可满足方法的需求, 相应对环境作用类别及等级的划分也多基于此。条文说明法及其对应的设计理念虽然易于理解, 且设计过程易于实施, 但其无差别的处方式设计过程忽略了因环境和结构不同而导致的性能要求差异, 容易导致安全隐患, 急需改进^[1-7]。与国外规范类似, 目前国内主要规范和指南^[8-12]在耐久性设计过程中大多采用了条文说明法, 对应环境类别和作用等级的划分也大多采用定性表格规定的形式, 而未提供全国范围的环境区划图, 一定程度上影响了耐久性设计方法的可操作性。在对耐久性作用的形式和等级的表达中, 虽然部分规范引入了定量形式, 但离实际应用存在一定的距离。

对我国混凝土桥梁进行耐久性设计, 首要的是要我国各地区混凝土桥梁所处的环境及环境作用对桥梁的影响程度认识清楚, 才能据此从材料、构造、施工及后期养护维修等各个方面对混凝土桥梁进行耐久性设计。因此, 对环境作用和环境区划的研

收稿日期: 2013-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(50878145); 交通运输部西部交通科技项目(2011 318 494 160)

第一作者: 陈艾荣(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁结构设计理论。E-mail: a.chen@tongji.edu.cn

通讯作者: 马如进(1978—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为桥梁结构设计理论。E-mail: rjma@tongji.edu.cn

究至关重要。

1 环境对混凝土桥梁耐久性的作用

环境作用指结构处于某一特定环境(包括自然环境、使用环境)中受到的侵蚀作用。混凝土结构所处的工作环境变化多端,影响因素复杂,氯盐侵蚀、碳化物侵蚀、冰冻、水、工业废水和废气等都会引起结构耐久性劣化。不同地区的气候、地理等环境条件伴随着侵蚀介质的不同直接导致了结构的耐久性劣化的地区差异。

影响混凝土桥梁耐久性的因素有结构的内部因素和外部因素 2 个方面,如表 1 所示。其中内部因素主要为混凝土结构保护层厚度、水灰比和密实度、水泥品种、标号和用量、外加剂类型、结构或构件的构造、混凝土和钢筋的应力大小、裂缝等。外部因素主要为气候、潮湿程度、高温、氯离子侵蚀、化学介质(酸、酸盐、海水、碱类等)侵蚀,还有冻融、磨损破坏等。

表 1 桥梁结构病害和耐久性的影响因素

Tab.1 Influence factors of disease and durability of the bridge structure

类别	影响因素
内部因素	结构形式、体系 结构设计方法 结构构造措施 结构初始质量:原材料品质、施工质量等
外部因素	物理:荷载、温度、湿度等 化学:氯离子质量分数、CO ₂ 体积分数等 生物 其他:社会因素、人为因素等

2 混凝土桥梁耐久性环境作用调查

我国幅员辽阔,跨纬度较广,距海远近差距较大,地势高低不同,气候多种多样。我国气候主要有以下 3 个特征:①南北温差大,北部年较差(一年中最高月平均气温与最低月平均气温之差)和日较差(一天中气温最高值与最低值之差)较大,冬夏极端气温较差更大;②降水分布很不均匀,年降水量自东南向西北逐渐减少,比差为 40:1,冬季降水少,夏季降水多,且年际变化很大;③冬夏风向更替十分明显,冬季的冷空气来自高纬度大陆区,多为偏北风,寒冷干燥,夏季的风主要来自海洋,多为偏南风,湿润温暖。

2.1 大气温度

气温主要受太阳辐射影响,大地表面接收太阳辐射的过程是极其复杂的,包括辐射、反射、漫射、吸收、传导等过程。就北半球来说,纬度越高温度越低;近地面处海拔高度每增加 1 km,气温降低 6~7℃。白天地表受日光照射后,温度上升而放热,大气获得热量而增高,而夜间日照消失,地表冷却,因此大气温度随之下降。一日的最高气温一般出现在日照最强的 12:00 以后的 1~2 h,而天亮前的温度则为日最低气温。

根据中国气象科学数据共享服务网提供的数据整理出我国具有代表性的 210 个城镇 1976—2005 年共 30 年的气温特征值,基于这 210 个城镇气温特征值,采用反位移插值方法获得全国范围内的相应气温特征值,如图 1 所示。该过程利用 ArcGIS 地理信息系统软件实现。

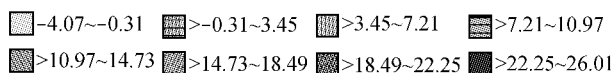
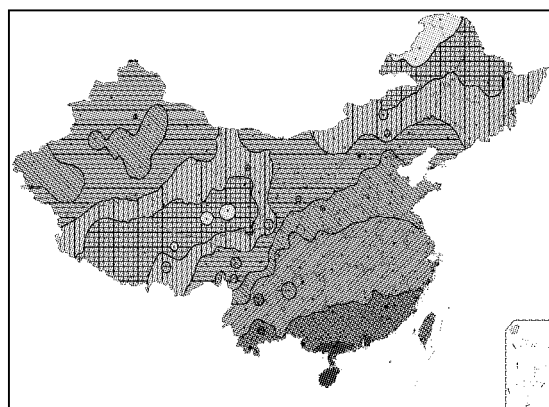


图 1 1976—2005 年年平均气温分布(单位:℃)

Fig.1 Distribution of annual average temperature during 1976—2005 (unit: °C)

2.2 大气湿度

湿度用于表示大气中所含水蒸气量,主要分为绝对湿度和相对湿度。绝对湿度指 1 m³ 大气中含有水蒸气的质量;相对湿度指 1 m³ 大气中所含水蒸气质量与同温度时大气所含饱和水蒸气质量之比。湿度和温度一样,在大气环境中也发生规律性变化,包括湿度的日变化和年变化。我国 1976—2005 年的年平均相对湿度分布如图 2 所示。

2.3 降水

降水包括液态降水和固态降水。液态降水一般指降雨,固态降水包括雪、雹、霰等,此外还有如雨夹雪等液态固态混合型降水。降水量指从天空降落到

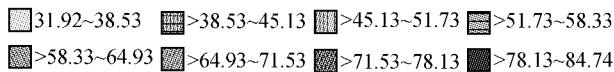
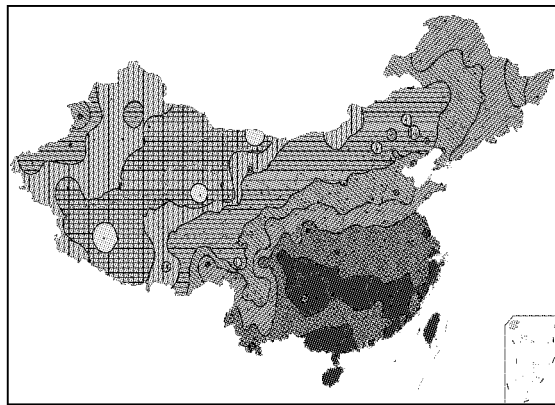


图2 1976—2005 年年平均相对湿度分布(单位:%)

Fig.2 Distribution of annual average relative humidity during 1976—2005 (unit: %)

地面上的所有液态和固态(经融化后)降水在不经蒸发、渗透和流失而在水平面上积聚的深度.降水量一般会影结构表面干湿循环状况.我国1976—2005年的年平均降水量分布如图3所示.

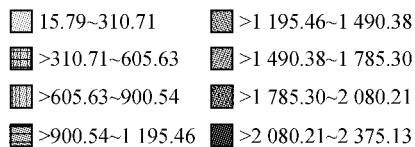
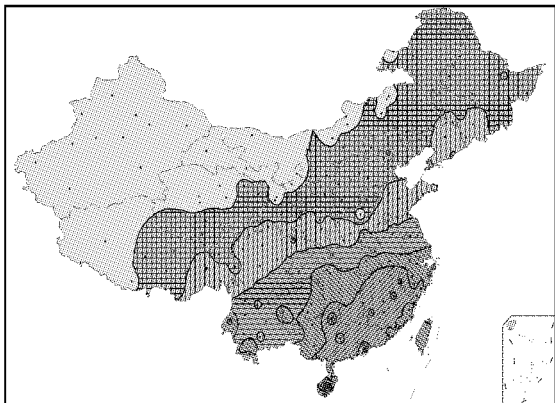


图3 1976—2005 年年平均降水量分布(单位:mm)

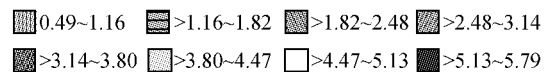
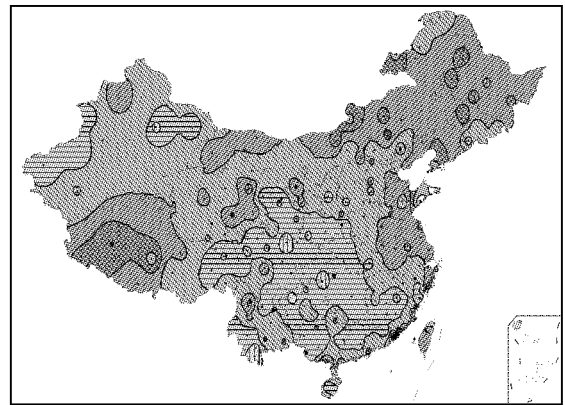
Fig.3 Distribution of annual average precipitation during 1976—2005 (unit: mm)

2.4 风速、风向

大气层的温度在各个区域不同,由此气压也不同.大气由高压区域流向低气压区域,即由于气压差而产生大气流动,成为风.风与地貌、高度等因素有关.我国1976—2005年的年平均风速分布如图4所示.

2.5 大气中CO₂

对混凝土结构而言,在一般大气环境下,CO₂引

图4 1976—2005 年年平均风速分布(单位:m·s⁻¹)Fig.4 Distribution of annual average wind velocity during 1976—2005 (unit:m·s⁻¹)

起的混凝土碳化是导致其中钢筋锈蚀的主要原因.

目前,CO₂浓度观测点及已有观测数据均过少,难以推断其余广大地区的近地表大气中CO₂体积分数时空分布的准确状况.根据已有观测点及其观测值可将这些地区分为3级:第1级为全球基准站的瓦里关山,属于人口稀少、经济不发达地区的大气洁净区,其年平均体积分数最小,日变化和年变化幅度也最小;第2级为上甸子、临安和龙凤山三地,地处大型(特大型)城市或工业区50 km到数百千米距离内的农村或郊区,属人口密集发达地区的相对大气洁净区,观测所得年平均体积分数比第1级高0.4%~1.2%,日变化和年变化相对明显;第3级为年平均体积分数最高的北京和太湖区域,属大型城市城区或人口密集城市带包围区,北京年平均体积分数可高于第1级瓦里关的4.6%~10.3%.

3 混凝土桥梁耐久性环境区划

3.1 区划标准

环境区划是混凝土结构耐久性设计的基础,主要研究混凝土结构及构件所处的环境类别及其耐久性作用等级.在混凝土结构耐久性设计中,环境作用作为一种广义荷载,对结构性能的退化过程产生十分重要的影响,如表2所示.一般情况下,环境条件是十分复杂的,包括了很多参数如温度、相对湿度、CO₂体积分数、氯离子质量分数等.为了便于设计工作的进行,需在这些参数中选择对耐久性退化过程影响较大的参数,根据这些参数的取值进行环境作用等级的划分.例如,混凝土碳化过程受相对湿度影

响较大,因此选择相对湿度作为碳化作用的环境等级划分指标;氯离子侵蚀过程受构件表面氯离子质量分数影响较大,因此选择构件表面氯离子质量分数作为氯盐侵蚀作用的环境等级划分指标.

表 2 环境作用效应的主要影响因素

Tab.2 Major influence factors of environmental effects

因素	相对湿度	温度	CO ₂ 体积分数	降水量	风	氯离子质量分数	冻融循环次数
混凝土碳化	√	(√)	√	√	√		
氯离子侵蚀	√	√		√	(√)	√	
冻融、盐冻破坏	(√)	√		√	(√)	(√)	√

注:√表示影响较大,(√)表示影响较小.

在明确了不同耐久性退化过程的控制指标后,根据影响耐久性能的主要环境因素将结构的服役环境划分为 5 类,其类型特征如表 3 所示.下文的环境作用等级划分在表 2 和表 3 的基础上进行.

表 3 环境类别划分

Tab.3 Classification of environmental types

类别	名称	对材料的腐蚀作用
XT	碳化环境	碳化引起钢筋锈蚀
XL	氯盐侵蚀环境	氯盐引起钢筋锈蚀
XD	冻融环境	反复冻融导致混凝土损伤
XS	硫酸盐腐蚀环境	硫酸盐、酸等化学物质引起腐蚀
XM	磨蚀环境	磨耗与空蚀引起混凝土损伤

本文所提出的环境区划方法采用了图表结合的方式.这种环境区划不仅包括了现有规范常见的根据具体环境参数划分的环境等级,还包括了根据实测资料绘制的我国环境影响与作用的区划图,既体现了区划表对局部环境特点的考虑,又体现了区划图可操作性强的优点.

3.2 碳化作用

国内外学者开展的大量试验研究表明,影响混凝土碳化的环境因素包括 CO₂ 体积分数、温度和相对湿度 R_H ,其中,相对湿度的影响最为显著.对于暴露于大气环境中的混凝土桥梁结构而言,CO₂ 体积分数的差异较小,而温度的影响是以相对湿度为前提的.因此,将相对湿度作为碳化环境等级划分的依据,如表 4 所示.

表 4 碳化环境作用等级

Tab.4 Grades of carbonation effect

等级	相对湿度
XT1	$0 < R_H \leq 20\%$ 或 $80\% < R_H < 100\%$
XT2	$20\% < R_H \leq 40\%$ 或 $60\% < R_H \leq 80\%$
XT3	$40\% < R_H \leq 60\%$

注:(1) 污染严重的城市、工业区等级适当提高.

(2) 温度较高且干湿交替频繁区域等级适当提高.

根据表 4 的区划结果可知,当相对湿度居中时,碳化过程较为严重,而当相对湿度较低或较高时,碳化过程均较轻微.这是因为,混凝土碳化速率主要考虑 2 个因素,一个是 CO₂ 的扩散速率,一个是化学反应速率.当相对湿度较低时,CO₂ 扩散速率较大,但化学反应速率较小;而当相对湿度较高时,正好相反.只有当相对湿度适中时,CO₂ 扩散速率和化学反应速率均较大,此时碳化情况最为严重.

图 5 中,XT3 等级主要包括新疆、西藏、青海、甘肃、宁夏及内蒙古大部分地区,XT1 等级主要包括海南及沿海边缘地带,其他大部分地区均属于 XT2 等级.

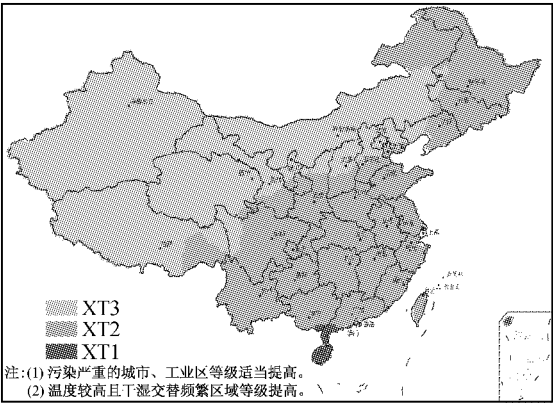


图 5 混凝土桥梁碳化环境等级划分

Fig.5 Classification of carbonation effect of concrete bridges

3.3 氯盐侵蚀作用

根据环境中的氯离子质量分数划分氯盐侵蚀作用等级,如表 5 所示.

表 5 氯盐侵蚀环境作用等级

Tab.5 Grades of chlorine effect

等级	氯离子质量分数	等级	氯离子质量分数
XL1	0%~1.0%	XL3	1.5%~2.0%
XL2	1.0%~1.5%	XL4	2.0%~3.0%

根据资料显示,需要考虑氯离子侵蚀作用的范围只在海岸线附近,影响范围不超过 1.5 km.其中,浪溅区氯盐侵蚀作用最为严重,随着距离海岸线距离加大,影响逐渐减少.内陆地区在有化学工业区域,或是冬季有除冰盐作用的地区需要考虑氯离子侵蚀的影响.

3.4 冻融循环作用

已有的大量文献研究均表明,冻融破坏是混凝土在负温和正温的交替循环作用下从表层开始发生剥落、结构疏松、强度降低、直到破坏的一种现象.冬季处于温度频繁变化的地区,依照最冷月平均气温

T 划分冻融环境等级能够反映环境作用的严酷程度,且便于设计和工程人员使用,如表 6 及图 6 所示。

表 6 冻融循环作用等级

Tab.6 Grades of freezing-thawing effect

等级	地区	最冷月平均气温
XD0	无冻地区	$T > 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
XD1	微冻地区	$-3.0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
XD2	寒冷地区	$-8.0\text{ }^{\circ}\text{C} < T < -3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$
XD3	严寒地区	$T \leq -8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$

注:温度升降频率较大区域等级适当提高。

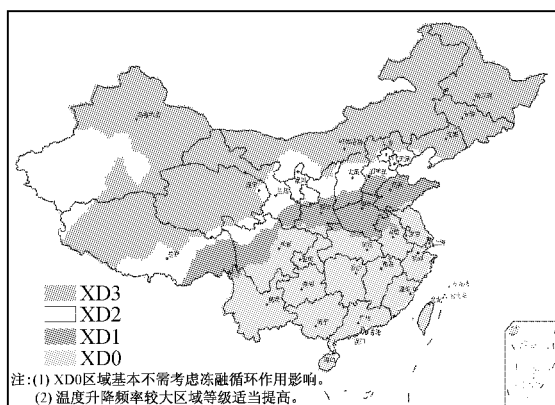


图 6 混凝土桥梁冻融循环环境等级划分

Fig.6 Classification of freezing-thawing effect of concrete bridges

图 6 中,XD3 包括东北三省、内蒙、甘肃、青海、西藏及新疆北部地区;XD2 包括河北、山西、陕西、宁夏、甘肃南部及新疆南部等地区;XD1 包括山东、河南、陕西南部及四川等地区;XD0 为南方大部分地区,基本不发生冻融破坏。

3.5 硫酸盐腐蚀作用

硫酸盐腐蚀作用的实质是环境中的 SO_4^{2-} 渗入到混凝土中和水泥的水化产物发生反应,生成具有膨胀性的侵蚀产物,从而在混凝土内部产生应力并形成微裂缝。一般而言,环境中的 SO_4^{2-} 来源较广,但总体上可划分为两类:一类是桥址处土壤自身含有的 SO_4^{2-} ,另一类是酸雨等水体中含有的 SO_4^{2-} 。为此,分别针对上述 2 种类型,以 SO_4^{2-} 质量分数为标准,对硫酸盐腐蚀作用进行环境作用等级的划分,如表 7 所示。

由于酸雨的监测点有限,根据中国气象科学数据共享服务网提供的数据,整理出我国 85 个监测点 1993—2004 年共 12 年的 pH 值,基于这些数值,采用反位移插值方法获得全国范围内的相应的 pH 值。该过程利用 ArcGIS 地理信息系统软件实现。图 7 中根据 pH 值大小划分为 4 个等级,并采用等高线

和不同颜色区块表示,以反映各特征值在我国的分布情况。

表 7 硫酸盐腐蚀环境作用等级

Tab.7 Grades of sulfate attack

等级	SO_4^{2-} 质量分数	
	土壤中水溶性 $\text{SO}_4^{2-}/10^{-2}$	水中的 $\text{SO}_4^{2-}/10^{-6}$
XS1	<0.10	<150
XS2	$0.10 \sim 0.20$	$150 \sim 1\,500$
XS3	$0.20 \sim 2.00$	$1\,500 \sim 10\,000$
XS4	>2.00	$>10\,000$

注:化学工业区域或污染严重区域等级适当提高。

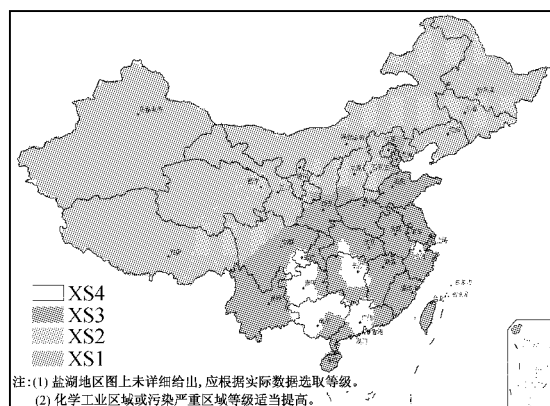


图 7 混凝土桥梁硫酸盐腐蚀环境等级划分

Fig.7 Classification of sulfate attack of concrete bridges

3.6 磨蚀作用

混凝土结构的磨蚀是环境因素造成的物理破坏现象,磨蚀作用主要分为风蚀和流水冲刷,表 8 中根据风力等级和时间进行了分级。

根据资料,风蚀主要发生的西北部分地区,而流水冲刷则是根据水流速率等数据来判断,因此区划图(图 8)只给出了大概区域,具体等级划分需要进一步的实测数据。

表 8 磨蚀环境作用等级

Tab.8 Grades of abrasion effect

等级	磨蚀类型	特征
XM1	风蚀 (有砂情况)	风力等级不小于 7 级,且年累计刮风时间大于 90 d
XM2	流冰冲刷	被强烈流冰撞击,磨损、冲刷(冰层水位下 0.5 m 至冰层水位上 1.0 m)
XM3	风蚀(有砂情况) 泥沙冲刷	风力等级不小于 11 级,且年累计刮风时间大于 90 d 被大量夹杂的泥沙或物体磨损、冲刷

3.7 区划图的使用说明

由于在区划图表的制作过程中,一些地区(尤其是中西部偏远而气象站点又比较少的区域)缺少实测数据,只能由周边区域的数据插值得到。这就容易

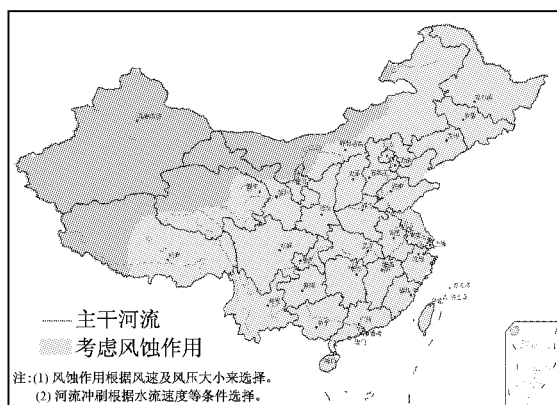


图 8 混凝土桥梁磨蚀环境等级划分

Fig. 8 Classification of abrasion effect of concrete bridges

导致一些不合理的结果,在这种情况下需要在区划图的基础上根据我国地域的实际特点对某些特殊区域进行标注,强调这些区域的取值应按照实际情况选择,对区划所获得的环境作用等级进行补充和调整,以考虑区划图中未能体现的其他环境作用影响。

区划图的使用步骤如下:①桥址处的环境调查;②若能获取当地环境的实测数据,则根据区划表获取作用等级,若无法开展环境参数调查,可根据区划图找到桥址处的环境作用等级;③查询区划表,确定环境作用等级;④根据得到的环境作用等级进行耐久性验算。

4 结语

耐久性环境区划是以环境对混凝土结构耐久性的影响程度为主要标准,并综合考虑结构形式、重要性、结构使用条件等因素,把全国划分为不同危险程度的区域,并以图表结合的形式表示出来,从而便于设计中的考虑与应用。其核心功能就是体现影响混凝土结构耐久性失效的环境因素在地域上的差异性,为混凝土结构耐久性设计提供指导。

(1) 依托国家气象中心的有关数据,对混凝土结构耐久性有显著影响的环境指标进行了调查分析。

(2) 系统地研究了混凝土桥梁耐久性环境区划参数,针对 5 种常见混凝土耐久性退化过程分别确定了各自的区划参数。

(3) 基于区划研究的原则和方法,根据调研所得的环境参数,借鉴现有的规范或标准对构筑物工作环境的分类,合理地选择区划标准,对我国混凝土桥梁耐久性的环境作用进行了区划,得到了对应于

不同环境参数的环境区划图表,并对各等级区域的耐久性要求给出具体的说明和设计要求。

进行耐久性设计时需要参考较为详细的环境参数,当没有实测数据时,虽然可参考环境区划图,但现有的环境区划相对较粗糙,对于耐久性环境因素差异性较大的省份和自治区并不能完整反映其耐久性失效在空间上的差异,还应根据其更加具体的环境气象数据、局部特殊侵蚀环境(如盐湖区、盐碱区、重污染区等)开展各省份和自治区的耐久性二级环境区划。

参考文献:

- [1] British Standards Institute. BS7543 Guide to durability of buildings and building elements, products and components[S]. London: BSI Group, 2003.
- [2] Duracrete. Guidelines for durability design and redesign[R]. Brussels: European Union-Brite EuRam Project, 2000.
- [3] Duracrete. Probabilistic performance based durability design of concrete structures [R]. Brussels: European Union-Brite EuRam III, 1999.
- [4] Duracrete. Working report: environmental actions and response survey, inspection and measurements[R]. Brussels: European Union-Brite EuRam, 1999.
- [5] JSCE Concrete Committee. Proposed recommendation on durability design for concrete structure[S]. Tokyo: Concrete Library of Japan Society of Civil Engineers, 1990.
- [6] Kunishima M, Okamura H. Durability design for concrete structure[C]//Proceedings of IABSE Symposium on Durability of Structures. Lisbon: International Association for Bridge and Structural Engineering, 1989:505-510.
- [7] Sarja A, Vesikari E. Durability design of concrete structures [R]. London: Spon Press, 1996.
- [8] 中国工程建设标准化协会. CECS 220: 2007 混凝土结构耐久性评定标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. China Association for Engineering Construction Standardization. CECS 220: 2007 standard for durability assessment of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [9] 中国土木工程学会. CCES 01—2004 混凝土结构耐久性设计与施工指南[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. China Civil Engineering Society. CCES 01—2004 Guide to durability design and construction of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [10] 中华人民共和国建设部. GB50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50010—2002 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [11] 中华人民共和国交通部. JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D64-2004 Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.

- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50476—2008 混凝土结构耐久性设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,

2008.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50010-2002 Code for durability design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

(上接第330页)

据理论能够成功处理各类不确定问题,收敛性和稳定性好。

参考文献:

- [1] Oberkampf W L, Helton J C, Sentz K. Mathematical representation of uncertainty [C] // Non-deterministic Approaches Forum. Seattle: AIAA, 2001; Chapter DOI: 10.2514/6.2001-1645.
- [2] Helton J C. Uncertainty and sensitivity analysis in the presence of stochastic and subjective uncertainty [J]. Journal of Statistical Computation and Simulation, 1997, 57: 3.
- [3] Dempster A P. Upper and lower probabilities induced by a multiplicand mapping [J]. Annals of Mathematical Statistics, 1967, 38:325.
- [4] Shafer G A. Mathematical theory of evidence [M]. Princeton: Princeton University Press, 1976.
- [5] Curcuro G, Galante G M, Fata C M. Epistemic uncertainty in fault tree analysis approached by the evidence theory [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25(4):667.
- [6] Francois J, Grandvalet Y, Denoeux T, et al. Addendum to resample and combine: an approach to improving uncertainty representation in evidential pattern classification [J]. Information Fusion, 2003, (4): 75.
- [7] BAO Yuequan, LI Hui, AN Yonghui, et al. Dempster-shafer evidence theory approach to structural damage detection [J]. Structural Health Monitoring, 2012(11):13.
- [8] FENG Tao, ZHANG Ahaopu, MI Jusheng. The reduction and fusion of fuzzy covering systems based on the evidence theory [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2012, 53(1):87.
- [9] Agarwal H, Renaud J E, Preston E L, et al. Uncertainty quantification using evidence theory in multidisciplinary design optimization [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004, 85: 281.
- [10] Bae H R, Grandhi R V, Canfield R A. An approximation approach for uncertainty quantification using evidence theory [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004, 86: 215.
- [11] Helton J C, Johnson J D, Oberkampf W L, et al. A sampling-based computational strategy for the representation of epistemic uncertainty in model predictions with evidence theory [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2007, 196:3980.
- [12] Salehghaffari S, Rais-Rohani M, Marin B E, et al. A new approach for determination of material constants of internal state variable based plasticity models and their uncertainty quantification [J]. Computational Materials Science, 2012, 55:237.
- [13] Mourelatos P Z, Zhou Jun. A design optimization method using evidence theory [J]. Journal of Mechanical Design, 2006, 128: 901.
- [14] 张清华,李乔,唐亮. 基于证据理论的结构损伤识别研究 [J]. 振动工程学报, 2007, 20(2): 200.
ZHANG Qinghua, LI Qiao, TANG Liang. Study of structural damage identification based on evidence theory [J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(2): 200.
- [15] 郭惠昕,夏力农,戴娟. 基于证据理论的结构失效概率计算方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(3): 457.
GUO Huixin, XIA Linong, DAI Juan. Method for calculating the failure probability of engineering structure using evidence theory[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2008, 16(3): 457.
- [16] 刘沐宇,徐长佑. 基于证据理论的岩体力学参数信度评估方法[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(4): 609.
LIU Muyu, XU Changyou. Belief estimation of rockmass mechanical parameters based on evidence theory [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(4): 609.
- [17] 杨风暴,王肖霞. D-S证据理论的冲突证据合成方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2010.
YANG Fengbao, WANG Xiaoxia. Combination method of conflictive evidences in D-S evidence theory [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [18] Eldred S M, Swiler P L, Tang G. Mixed aleatory- epistemic uncertainty quantification with stochastic expansions and optimization-based interval estimation [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2011, 96:1092.
- [19] 唐和生,王兆亮,薛松涛. 微分演化算法在桁架形状优化中的应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(1): 42.
TANG Hesheng, WANG Zhaoliang, XUE Songtao. Truss structure shape optimization with differential evolution algorithm [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(1): 42.
- [20] Storn R, Price K. Differential evolution—a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341.