

混凝土结构空间多尺度环境作用研究

徐宁, 张伟平, 顾祥林, 黄庆华

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要: 在分析混凝土结构所受主要环境作用的基础上, 借鉴国外环境作用在空间尺度上的划分方法, 针对中国的气候环境, 建立了混凝土结构的空間多尺度环境作用模型框架, 包括全局环境、地区环境、工程环境、构件表面环境和构件内部环境五个尺度, 并得到了空間多尺度环境作用数学模型. 以环境作用中的大气温度为例, 在考虑各尺度上不同环境条件影响的基础上, 由全局环境尺度上的环境作用值开始, 通过地区环境、工程环境以及构件表面环境尺度上的逐步调整, 最终计算得到混凝土内部的环境作用值, 为混凝土结构的耐久性评估和设计提供依据.

关键词: 混凝土结构; 空間多尺度; 环境作用; 温度

中图分类号: TU 37

文献标识码: A

Spatial Multi-scale Environmental Actions for Concrete Structures

XU Ning, ZHANG Weiping, GU Xianglin, HUANG Qinghua

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on an analysis of major environmental actions on concrete structures, a spatial multi-scale environmental action model framework for Chinese environment was established in reference with the spatial scale division method of environmental actions abroad. The framework considered the global, regional, engineering, surface and internal environments of concrete. Furthermore, a mathematic model was proposed correspondingly. Taking the air temperature, one of the environmental actions, as an example, the values of environmental actions in concrete was derived step by step from the values of the global environmental actions to those of the surface environment of concrete. The generated results can be used as references for durability assessment and design of concrete structures.

Key words: concrete structure; spatial multi-scale;

environmental action; temperature

混凝土结构性能的退化均由侵蚀介质通过扩散、迁移、渗透等各种作用到达混凝土内部, 并与构件内部材料相应位置处的组份发生反应引起的, 与退化直接相关的应该是构件的内部环境. 长期以来, 许多学者都把混凝土所处的周围环境条件作为混凝土内部的环境条件来考虑, 事实上, 混凝土周围环境条件和混凝土内部环境条件不尽相同^[1]. 只有获得混凝土内部不同位置处的各种环境作用值才能对混凝土结构耐久性能的退化过程进行准确描述.

建立外部环境作用与内部环境作用的相互关系属于环境作用空间特性研究范畴. 为了使问题趋于简单, 本文暂不考虑环境作用在空間和时间多尺度上的相关性, 根据文献[2]的研究成果, 在时间轴上选取混凝土内部各点处年平均环境作用值作为混凝土结构的环境作用代表值. 借鉴国外环境作用在空間尺度上的划分方法, 针对中国的气候环境, 建立混凝土结构的空間多尺度环境作用模型框架及其数学表达式. 并以环境作用中的大气温度为例, 考虑空間各尺度上环境作用的不同影响因素, 由全局环境尺度逐步调整, 计算出混凝土结构内部的环境作用温度值, 从而说明所提模型的合理性和实用性.

1 混凝土结构的环境作用

1.1 环境作用获取方式

我国气候复杂多变, 地处不同地域范围内的混凝土结构所处周围工作环境不同. 混凝土结构的环境作用值可通过所在地气象站点和环境监测站点获得.

收稿日期: 2011-02-24

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2009CB623200); 国家“八六三”高技术研究发展计划(2006AA04Z415)

第一作者: 徐宁(1980—), 男, 博士生, 主要从事混凝土结构的耐久性研究. E-mail: 123xn@tongji.edu.cn

通讯作者: 顾祥林(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构全寿命设计与维护、混凝土与砌体结构基本理论等. E-mail: gxl@tongji.edu.cn

中国国家气象台站包括:气候观测站、地面天气观测站、高空观测站、航空天气观测站、农业气象观测站、太阳辐射观测站、天气雷达观测站、卫星云图接收站、大气本底及污染观测站、降水酸碱度分析站等^[3]. 目前已建地面天气观测站点 2 500 个左右, 太阳辐射观测站 98 个, 高空观测站 120 个, 大气本底监测站 4 个, 酸雨观测点 82 个, 农业气象试验站 70 个, 农业气象基本站 672 个.

我国环境监测网络分级主要包括大气监测网络、水环境监测网络、近岸海域环境监测网等^[4]. 其中, 大气监测网络包括 113 个城市环境空气自动监控系统、酸雨监测网和沙尘暴监测网. 我国青海瓦里关大气本底监测站是全球 22 个大气本底站之一.

1.2 空间多尺度环境作用

传统的气候观测(环境监测)基本上是小范围的观测, 相当于以点形式对地球系统进行采样. 虽然我国建立了大量的气象站点, 但由于成本的限制, 观测采样点有限. 受地理条件、维护条件等因素的限制, 气象站点的布设也不均匀, 发达地区的站点较密集, 而在很多自然条件恶劣的地方, 站点十分稀少. 虽然我国设置有较完善的环境监测网络, 但某一具体工程所在地并不一定有监测站点. 若以周围邻近气象(监测)站点的环境作用值作为混凝土结构实际位置处的外部环境作用值, 由于没有考虑空间范围内各种环境条件(如地形、海拔、距海远近、热岛效应等)对环境作用的影响, 将会产生较大误差, 并直接影响混凝土内部环境作用值的计算精度.

中国幅员辽阔, 跨纬度较广, 距海远近差异较大, 气候多种多样, 复杂的气候环境导致了混凝土结构周围所处的环境作用复杂. 如何根据气象(监测)站点的空间分布情况以及不同地域范围内各种环境条件的影响, 得到混凝土结构所在地理位置处周围及内部的环境作用值成为研究混凝土结构耐久性问题的重要任务之一. 针对环境作用在空间上的复杂变化, 可选用多尺度的研究方法, 通过不同尺度上环境作用值之间的相互关系最终确定混凝土结构的内部环境作用代表值.

2 空间多尺度环境作用模型

2.1 现有空间环境作用模型

国外有关学者对混凝土结构所处环境作用在空间尺度上进行了划分. Haagenrud 根据地理区域大小, 将欧洲环境划分为宏观气候环境、中等气候环

境、局部气候环境和表面气候环境四个尺度等, 如图 1 所示^[5].

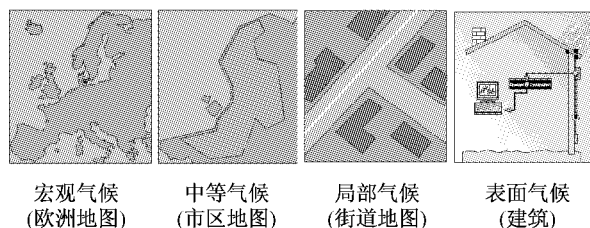


图 1 欧洲环境作用划分

Fig.1 Division of environmental actions in Europe

为了对混凝土结构的性能退化进行准确的预测, 仅仅分析到混凝土表面是不够的, 还需记录混凝土内部对环境的响应. BE95-1347 中的环境作用模型在地区环境、局部环境、表面环境的基础上增加了混凝土的响应部分, 如图 2 所示^[6].

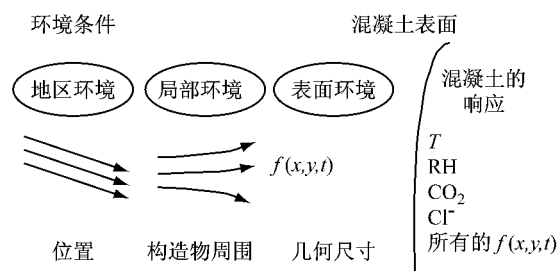


图 2 环境条件和混凝土的响应

Fig.2 Environmental conditions and concrete responses

在上面两个模型的基础上, Lindvall 将气候环境划分为全球气候、地区气候(中等气候)、局部气候、表面气候(微小条件)四个尺度, 并对相应的影响因素进行了讨论^[7], 但没有对全球气候条件进行过多考虑, 如图 3 所示.

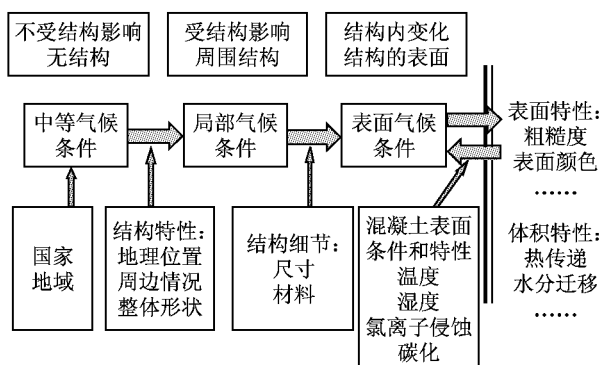


图 3 不同地理范围内暴露环境的划分

Fig.3 Division of exposure environment in different geographical zones

Cole 在分析侵蚀参数模型的局限性时指出, 只

有采用多尺度的方法才能获得大气侵蚀参数的合理模型,并给出了如图4所示的模型框架及不同尺度上的影响因素^[8].

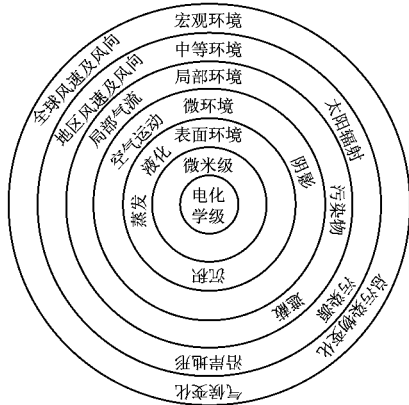


图4 侵蚀参数的模型框架

Fig.4 A model framework of erosion parameters

以上4个环境模型的尺度划分基本一致,均属于概念模型,各尺度之间的相关性尚缺乏研究.

2.2 建议的空间多尺度环境作用模型

针对中国的气候环境,可将环境作用在空间尺度上划分为全局环境、地区环境、工程环境、构件表面环境、内部环境,如图5所示.

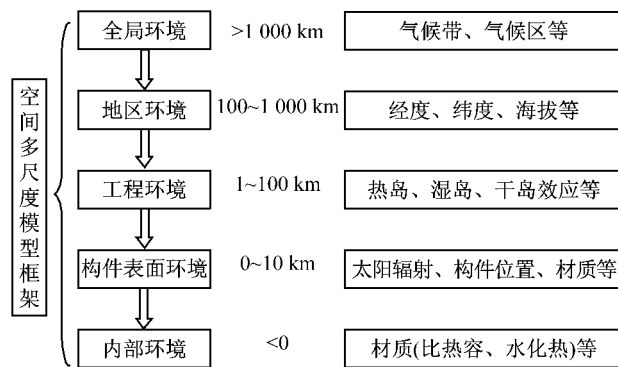


图5 混凝土结构空间多尺度环境作用模型框架

Fig.5 A spatial multi-scale model framework of environmental actions on concrete structures

全局环境尺度也叫宏观尺度,定义地理范围大于1000 km.在此尺度上,混凝土结构的环境作用主要受所在气候带、气候区等环境条件影响^[9],记为 G_1, G_2, \dots, G_n .

地区环境为一个相对较小的尺度,将其定义为100~1000 km的地域范围.该尺度上影响环境作用的环境条件主要有经度、纬度、海拔等,这些影响因素可记为 R_1, R_2, \dots, R_n .

工程环境定义为1~100 km的尺度,这个尺度一般大于结构的最大尺寸,具体可体现为城乡环境

作用的差别.该尺度上影响环境作用的环境条件主要有城市热岛、干岛、湿岛效应等,这些影响因素可记为 E_1, E_2, \dots, E_n .

构件表面环境指材料近表环境,定义为以m甚至mm计的尺度,一般小于结构的最大尺寸,该尺度上影响环境作用的环境条件主要有构件本身朝向、邻近构件的遮阳作用、构件本身距离地面高度等,这些影响因素可记为 S_1, S_2, \dots, S_n .

构件内部环境指构件内部的不同环境条件,如内部温度、湿度等,主要受混凝土材质等的影响,可记为 I_1, I_2, \dots, I_n .如果假定结构构件的内部由均质材料组成,则可用一个尺度来描述构件的内部环境.

根据以上环境作用模型框架,可建立如下混凝土结构的空多尺度环境作用数学模型.

$$E_{\text{INT}} = E_0 + \delta_{EG_1} + \delta_{EG_2} + \dots + \delta_{EG_n} + \delta_{ER_1} + \delta_{ER_2} + \dots + \delta_{ER_n} + \delta_{EE_1} + \delta_{EE_2} + \dots + \delta_{EE_n} + \delta_{ES_1} + \delta_{ES_2} + \dots + \delta_{ES_n} + \delta_{EI_1} + \delta_{EI_2} + \dots + \delta_{EI_n} \quad (1)$$

式中: E_{INT} 为混凝土结构内部某一环境作用值, E_0 为环境作用的初始计算值,可从各气象观测站点和环境监测站点获得; $\delta_{EG_n}, \delta_{ER_n}, \delta_{EE_n}, \delta_{ES_n}, \delta_{EI_n}$ 分别为全局环境尺度、地区环境尺度、工程环境尺度、构件表面环境尺度、混凝土内部环境尺度上影响环境作用因子的修正值($n=1, 2, \dots, n$).通过各种环境尺度上环境因子的逐步修正,最终可以较准确地获得混凝土内部任意点处的环境作用值.

3 空间多尺度环境作用实例分析

时间多尺度研究中计算用的气象资料年限为1976—2005年^[2],以初始年1976年的年均环境作用值(年均大气温度)为例,进行空间多尺度环境作用模型的实例分析.

3.1 全局环境及地区环境尺度上的环境作用

由于1976年年平均气温值可通过全国分布的各气象站点获得,而现有中国气象站点的观测距离均在1000 km之内,按照混凝土结构环境作用的空间多尺度模型框架,此范围属于地区环境范畴,所以可以直接从地区环境尺度开始逐步进行以下几个尺度的研究.此时,全局环境尺度系指中国版图范围内的环境作用.

3.2 工程环境尺度上的环境作用

考虑地区环境尺度上的各种环境条件的影响,通过地区环境尺度上已有气象站点的环境作用值,可利用地理信息系统(Geographic Information System, 简称 GIS)技术,获得中国区域内工程环境尺度上(1×1 km)任意位置处的环境作用值(大气温度值)。

大气温度在地区环境尺度上的影响因素主要为空间分布的地理要素,如地理位置(包括经度、纬度和离海远近)、大的山脉走向和地势高低等。一个地区的年均气温与该地区的经度、纬度和海拔高度具有较好的线性相关关系,通常可采用如下的多元线性回归方程表示^[10]:

$$T_0 = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z \quad (2)$$

式中: T_0 为常规统计模型模拟的气温值; X 为经度; Y 为纬度; Z 为海拔高度; a_0 为常数; a_1 、 a_2 、 a_3 为回归系数。

采用“常规统计模型+空间残差”的方法可更加准确地建立由地区环境尺度到工程环境尺度上环境作用的定量描述。具体步骤如下:

(1) 基于中国气象科学数据共享服务网,统计我国间距为 100 km 以上的 200 个气象站点 1976 年年平均气温值。剔除塔中、米林、温州、桦甸 4 个不连续站点数据,选取 180 个气象站点环境作用值进行回归统计分析(其余 16 个站点用作模型验证),如图 6 所示,得到如下常规统计模型:

$$T_0 = 45.256 - 0.065X - 0.721Y - 0.003Z \quad (3)$$



图 6 计算和检验气象站点分布图

Fig. 6 Distribution map of meteorological stations for calculation and verification

(2) 基于美国太空总署和国防部国家测绘局联合测量的中国 SRTM 数据^[11],采用 ArcGIS 软件进行转化处理,得到中国数字高程模型(Digital

Elevation Model, 简称 DEM),并由此可提取全国范围内各采样点的地理信息(如经度、纬度和海拔信息等)。代入式(3)可得到全国任意 1×1 km 采样点范围内 1976 年年平均气温值。

(3) 将 180 个残差值(实测值与通过统计模型获得的计算值的差值)在中国区域内进行空间插值,得到全国任意 1×1 km 采样点上的残差值 ΔT 。将此空间残差值与式(2)中得到的计算值进行叠加,即获得工程环境尺度上全国范围内 1976 年年平均气温的分布图,如图 7 所示。从图 7 中可以提取全国任意经纬度处的 1976 年年平均气温值。

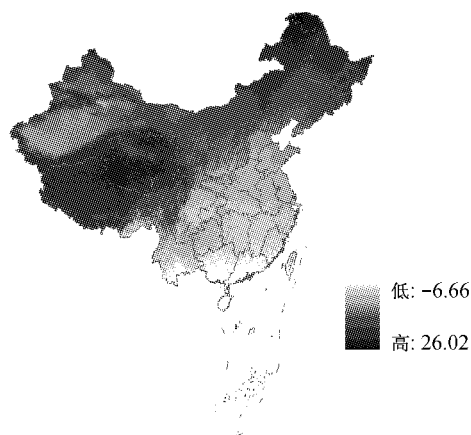


图 7 1976 年年均气温分布图(°C)

Fig. 7 Distribution map of the mean annual temperature of year 1976 (°C)

选取剩余 16 个检验站点,实测值与计算值见表 1,分别通过相关系数、平均绝对误差和均方根误差三个统计值进行检验,检验结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,采用“常规统计模型+空间残差”的方法计算得到的我国 1976 年年平均气温值的计算精度较直接统计计算值有明显提高。

3.3 工程环境尺度上环境作用的修正

通过地区环境尺度到工程环境尺度的研究所得到的全国每 1×1 km 范围内 1976 年年平均气温分布图,是从全国 180 个城市市区气象站点的环境作用值开始计算的,没有考虑工程环境尺度上其它环境条件(如热岛效应、湿岛和干岛效应等)的影响,城、郊环境作用差别没有体现。对于大气温度,需要考虑热岛效应造成的城、郊温差的影响。

为此,可统计 1976 年全国 31 个省会城市城区与郊区气象站点的大气温度值,并定义城区气象站点与郊区气象站点的温度差为当年的热岛强度值。剔除南宁、沈阳、天津由于站点迁移或区站号变动带来的热岛强度突变点,用剩余全国 28 个省会城市热

岛强度值作为初始值,采用 ArcGIS 地理信息处理软件,通过反距离权重插值方法,可计算得到 1976 年热岛强度分布图,如图 8 所示^[12]。

表 1 检验站点的大气温度值

Tab.1 Temperature values of verification stations

气象站点	实测值	常规统计值	常规统计值+空间残差
鸡西	3.50	3.45	3.16
临汾	11.60	9.44	10.85
高邮	14.20	13.85	14.30
金华	16.80	16.38	17.03
麻城	15.80	14.82	14.99
广州	21.30	21.18	21.27
达尔罕茂明安联合旗	3.50	3.82	3.98
中宁	8.50	7.50	7.54
广元	15.20	12.64	13.55
贵阳	14.50	15.79	14.88
格尔木	4.70	4.29	3.86
且末	9.70	8.39	10.46
额尔古纳右旗	-3.40	-0.59	-2.11
精河	6.80	6.29	8.37
德钦	4.50	6.20	6.81
拉萨	7.80	5.05	4.86

表 2 检验指标列表

Tab.2 List of verification indexes

检验指标取值	常规统计模型	常规模型+空间残差
相关系数	0.948	0.960
平均绝对误差	1.171	0.964
均方根误差	1.495	1.245

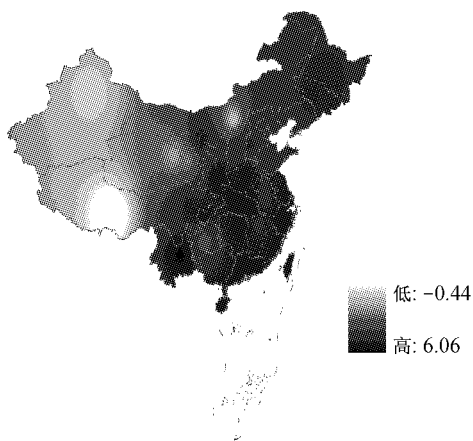


图 8 1976 年热岛强度分布图(°C)

Fig.8 Distribution map of the heat island intensity of year 1976 (°C)

从图 8 中可以提取全国任意经纬度处 1976 年的热岛强度值,此项对应于式(1)中的 δ_{EE_1} 项,当城区气温大于郊区气温时, $\delta_{EE_1} > 0$; 当城区气温小于郊区气温时, $\delta_{EE_1} < 0$ 。将图 7 中的环境作用值减去图 8

所对应点处的热岛强度值,即可准确获得郊区混凝土结构所处的环境作用值。

3.4 构件表面环境尺度上的环境作用

自然环境下混凝土结构表面各点处的环境作用不同,其影响因素主要有两种:混凝土构件的外部条件,包括:结构所在的地理位置、地形地貌、结构物所处的方位和朝向、所处的季节、气温变化、太阳辐射强度、云、雪、雾、雨等;混凝土构件的内部因素,包括构件表面材料、构件表面颜色、构件材料物理特性等。由于混凝土构件表面吸收和发出热辐射,并与周围空气发生对流热交换,所以处在一个三维稳态波动状态中。

选取上海市中山北二路上的一座公路桥(经度:121.5°E,纬度:31.3°N)进行计算。运用凯尔别克混凝土表面温度计算公式可得到此坐标处公路桥不同部位表面的温度值^[13]。

行车道表面:

$$q_B + q_K = q_J + q_H + q_{Ga} \quad (4)$$

翼板和底板底面:

$$q_B + q_K = q_R + q_{UR} \quad (5)$$

阴影腹板表面:

$$q_B + q_K = q_H + q_R + q_{Ga} + q_{UR} \quad (6)$$

受日照腹板表面:

$$q_B + q_K = q_J + q_H + q_R + q_{Ga} + q_{UR} \quad (7)$$

式中: q_B 为构件的辐射热量; q_K 为对流热交换热量; q_J 为太阳直接辐射热量; q_H 为天空辐射热量; q_{Ga} 为太阳逆辐射热量; q_R 为太阳和天空辐射的反射热量; q_{UR} 为地表环境辐射与逆辐射的反射热量。其中,

$$q_B = \epsilon_{BL} C_s \left(\frac{T'_s}{100} \right)^4 \quad (8)$$

$$q_K = \alpha_K (T'_s - T'_A) \quad (9)$$

$$q_J = A_{BK} J_0 q_2 \cos \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_h - \beta \right) \cos(\alpha_s - \alpha_w) \quad (10)$$

$$q_H = 0.5 A_{BK} J_0 \sin \alpha_h \cdot \sin^2 \frac{\beta}{2} (q_1 - q_2) \quad (11)$$

$$q_{Ga} = 0.82 \epsilon_a C_s \sin^2 \frac{\beta}{2} \left(\frac{T'_A}{100} \right)^4 \quad (12)$$

$$q_R = A_{BK} r_{uk} J_0 \sin \alpha_h \cos^2 \frac{\beta}{2} \left(\frac{q_1 + q_2}{2} \right) \quad (13)$$

$$q_{UR} = \epsilon_a C_s \cos^2 \frac{\beta}{2} \left(\frac{T'_A}{100} \right)^4 \quad (14)$$

式中: ϵ_{BL} 为构件辐射率(黑度); C_s 为黑体辐射常数; T'_s 为桥梁表面的绝对温度; α_K 为对流热交换系数; T'_A 为工程环境尺度上桥梁所在地点环境的绝对温度; A_{BK} 为短波吸收系数; J_0 为太阳常数; q_1 、 q_2 为透射系数; ϵ_a 为大气的辐射系数; α_h 为太阳高度角; β 为

壁面与水平面的夹角; α_s 为太阳方位角; α_w 为壁面的方位角; r_{uk} 为地表环境短波反射系数.

以计算混凝土桥梁行车道上表面温度为例,式(10)~(12)可分别简化为

$$q_j = A_{BK} J_0 q_2 \sin \alpha_h \quad (15)$$

$$q_H = 0.5 A_{BK} J_0 \sin \alpha_h \cdot (q_1 - q_2) \quad (16)$$

$$q_{Ga} = 0.82 \epsilon_a C_s \sin^2 \frac{\beta}{2} \left(\frac{T'_A}{100} \right)^4 \quad (17)$$

将式(8)~(9), (15)~(17)代入式(4),则行车道上表面温度可简化为^[13]

$$\begin{aligned} \left(\frac{T'_s}{100} \right)^4 + \frac{\alpha_K}{\epsilon_{BL} \cdot C_s} \cdot T'_s = \frac{A_{BK}}{\epsilon_{BL} \cdot C_s} \cdot \\ J_0 \cdot \sin \alpha_h \cdot \left(\frac{q_1 + q_2}{2} \right) \\ + \frac{\alpha_K}{\epsilon_{BL} \cdot C_s} \cdot T'_A + 0.82 \left(\frac{T'_A}{100} \right)^4 \end{aligned} \quad (18)$$

式中:太阳高度角 α_h 指太阳光的入射方向和地平面之间的夹角,它是一个重要的地理参量.在分析混凝土桥梁所在位置(经纬度)处的年均太阳高度角数值后,即可由式(18)获得此经纬度处混凝土桥梁结构行车道上表面温度年均值.

同一地点一天内太阳高度角是不断变化的,日出日落时角度都为0,正午时太阳高度角达最大.在年尺度上,由于太阳在南北回归线之间来回变动,所以,每一天太阳高度角所能达到的最大值由混凝土桥梁所在位置处的地理纬度以及太阳直射的纬度数

$$\bar{\alpha}_h = \frac{\frac{1}{2} \times (18-6) \cdot \alpha_{h1} + \frac{1}{2} \times (18-6) \cdot \alpha_{h2} + \dots + \frac{1}{2} \times (18-6) \cdot \alpha_{hn}}{182 \times 24} = \frac{(\alpha_{h1} + \alpha_{h2} + \dots + \alpha_{hn})}{728} \quad (20)$$

对于上海中山北二路上的公路桥(经度:121.5°E,纬度:31.3°N),当太阳到达北回归线时,太阳高度角最大,为

$$\begin{aligned} \alpha_{h1} &= 90 - (\phi - \nu) = \\ &90 - (31.3 - 23.45) = 82.15^\circ \end{aligned}$$

当太阳到达南回归线时,太阳高度角最小,为

$$\begin{aligned} \alpha_{h182} &= 90 - (\phi + \nu) = \\ &90 - (31.3 + 23.45) = 35.25^\circ \end{aligned}$$

所以,此经纬度处的太阳高度角年平均值为

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_h &= \frac{(\alpha_{h1} + \alpha_{h2} + \dots + \alpha_{hn})}{728} = \\ &\frac{(82.15 + \dots + 35.25)}{728} = 14.68^\circ \end{aligned}$$

从图7中提取该公路桥所在经纬度(经度:121.5°E,纬度:31.3°N)下1976年的环境温度值为

确定,可表示为

$$\alpha_h = 90 - (\phi \pm \nu) \quad (19)$$

式中: ϕ 为地理纬度; ν 为太阳直射的纬度数,当且仅当太阳直射的半球与混凝土桥梁所处的半球相同时取负号.

根据以上分析,以桥梁所在地位于北回归线以北为例,可详细绘制出半年内(太阳在南北回归线之间移动一次)每一天太阳高度角的变化情况,如图9所示.

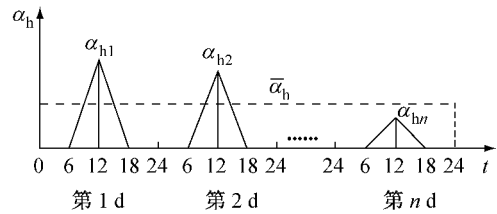


图9 一年中太阳高度角的变化

Fig. 9 Variation of solar elevation angle in a year

图9中,横坐标表示每天时刻值.每天6h,太阳升起,太阳高度角到中午12h达一天中的最大值.太阳高度角 α_h 在太阳到达北回归线时达最大照射高度对应于 α_{h1} ,在太阳到达南回归线时达最小照射高度 α_{hm} ,历经半年共182d.设太阳高度角年均值为 $\bar{\alpha}_h$,根据图中每天太阳高度角与时间轴所围成的图形面积和与年均太阳高度角年均值 $\bar{\alpha}_h$ 与时间轴所围成面积相等原则,可计算出太阳高度年均值 $\bar{\alpha}_h$ 为

15.15℃,从图8中提取该经纬度处1976年的热岛强度为 $\delta_{EEI} = 0.01^\circ\text{C}$.考虑城市热岛效应后,此经纬度处的环境温度为 $15.15 - 0.01 = 15.14^\circ\text{C}$,即1976年平均绝对温度为 $T'_A = 15.14 + 273.15 = 288.29$ (K).假定此经纬度下的各种位置参量为经度 φ :121.5°E;纬度 ϕ :31.3°N; $\alpha_w = 0^\circ$ (图10),环境参量如表3所示^[13],将以上参量以及此位置处太阳高度角年均值 $\bar{\alpha}_h$ 代入式(18)求解关于 T'_s 的4维超越方程,即可得此经纬度处混凝土桥梁行车道上表面年平均温度 $T_s = T'_s - 273.15 = 21.14^\circ\text{C}$.

同理,可求得此经纬度处混凝土桥梁结构翼板和底板底面、阴影腹板表面、受日照腹板表表面位置处1976年年平均温度分别为18.42℃、15.37℃和18.93℃.

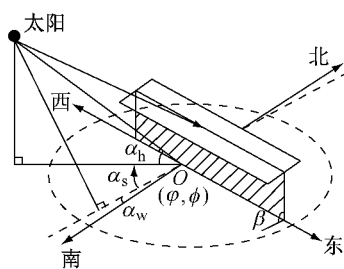


图10 结构位置示意图

Fig.10 Location sketch for structures

表3 1976年年平均计算参数表

Tab.3 Annual mean calculation parameters in 1976

ϵ_{BL}	C_s	α_K	A_{BK}	J_0	ϵ_a	q_1	q_2
0.8	5.775×10^{-4}	12.33	0.6	1 350	0.8	0.85	0.7

3.5 构件内部环境尺度上的环境作用

对于大气温度而言,进行构件表面环境尺度到内部环境尺度的研究即为温度由混凝土表面向混凝土内部传导的研究.基于热传导方程,将得到的混凝土构件的表面温度值作为其计算的边界条件,建立特定环境下混凝土构件内部的环境温度模型.

为简化计算,暂按一维热传导方程进行计算,可得混凝土内部任意深度处的温度值.

假设无限大混凝土板,厚度为 2δ ,混凝土内部初始温度(均匀一致)为 T_{c0} ,构件表面温度为 T_s ,环境与混凝土间的表面传热系数 h 为常数,混凝土导热系数为 λ ,导温系数 a ,时间 τ ,距离为 x ,则根据傅立叶导热基本定律和能量守恒原理建立的导热微分方程为

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (21)$$

定解条件: $T(x, \tau)|_{\tau=0} = T_{c0}$; $\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0$

$$h[T(x, \tau)|_{x=\delta} - T_s] = -\lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta}$$

引入过余温度变量 $\theta(x, \tau) = T(x, \tau) - T_s$,可以获得其解析解为^[15]

$$\theta(x, \tau) = \theta_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \beta_n}{\beta_n + \sin \beta_n \cos \beta_n} \cos\left(\beta_n \frac{x}{\delta}\right) e^{-\beta_n^2 \frac{a\tau}{\delta^2}} \quad (22)$$

式中: $\theta(x, \tau)$ 为任意位置任意时刻的过余温度; θ_0 为初始过余温度, $\theta_0 = T_{c0} - T_s$; 令 $F_0 = a\tau/\delta^2$, 为无因次数,称为傅立叶准则数; β_n 为超越方程(23)的根,超越方程如式(23)所示.

$$\frac{\beta}{B_i} = \cot \beta \quad (23)$$

式中: $B_i = h\delta/\lambda$ 量纲为一,称为毕渥准则.文献[14]给出了不同的 B_i 对应的超越方程的前6个根.

假定混凝土 $\delta = 0.25$ m,混凝土表面传热系数 $h = 8.15$ W · m⁻² · K,导热系数 $\lambda = 0.815$ W · m⁻¹ · K,导温系数 $a = 0.00146$ m² · h⁻¹,混凝土表面初始边界条件 $T_s = 21.14$ °C,混凝土内部初始温度为 $T_{c0} = 10$ °C.此时毕渥准则 $B_i = h\delta/\lambda = 2.5$,从文献[14]中查得其对应的超越方程的6个根后,代入式(22)进行计算,得到任意位置任意时刻的过余温度,从而获得任意位置任意时刻的混凝土内部温度值.整个过程通过 VC++ 程序实现,最终计算结果如表4所示.

表4 混凝土内部环境温度计算值

Tab.4 Environmental temperature values in concrete

时间/d	温度/°C				
	0.02 m	0.05 m	0.10 m	0.15 m	0.20 m
1	17.88	17.15	16.11	15.32	14.83
2	20.19	19.71	18.87	18.10	17.57
3	20.86	20.63	20.11	19.55	19.12
5	21.11	21.07	20.93	20.71	20.49
10	21.14	21.14	21.14	21.12	21.10

从表4可以看出,10 d以后混凝土内、外温度基本一致.因此,就大气温度而言,从年平均意义上讲,在混凝土结构构件处于外部恒定温度下,可不考虑混凝土内、外部环境的不同,直接以混凝土结构表面年平均温度值作为混凝土内部的温度值进行研究.实际工程中(非恒定温度下),尽管混凝土结构构件内部温度与构件表面温度之间存在滞后效应,但是其滞后效应基本不随环境参数的变化而变化,故可将混凝土构件表面温度的时变规律近似代替为混凝土内部温度的时变规律进行研究.

4 结 论

混凝土结构内部环境作用值的获取是耐久性研究的一个重要内容.采用多尺度的研究方法可以有效分析混凝土结构所受的复杂环境作用问题.以大气温度为例,通过对多尺度环境作用模型进行应用分析,可得出以下主要结论

(1) 采用“常规统计模型+空间残差”的方法,可有效建立地区环境尺度到工程环境尺度环境作用的定量关系.

(2) 从工程环境尺度过渡到构件表面环境尺度,不但要考虑环境作用本身影响因素(如混凝土结构所处经度、纬度等),而且还要考虑混凝土本身的

材料特性(如构件辐射率等)。

(3) 对于恒温下的混凝土结构构件,环境温度计算到构件表面尺度即可。

(4) 本文仅以温度为例研究了空间多尺度的环境作用,对其他环境作用的空间特性尚待进一步研究。

参考文献:

- [1] 马文彬,李果. 自然气候条件下混凝土内部温湿度响应规律研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2007(2): 18.
MA Wenbin, LI Guo. Study on responding rules for interior temperature and relative humidity in physioclimate[J]. China Concrete and Cement Products, 2007(2): 18.
- [2] 顾祥林,徐宁,黄庆华,等. 混凝土结构时间多尺度环境作用研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2012,40(1): 1.
GU Xianglin, XU Ning, HUANG Qinghua, et al. Study on temporal multi-scale environmental action for concrete structures[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012,40(1): 1.
- [3] 秦川. 气象台管理百科全书[M]. 北京:北京北大方正电子出版社, 2005.
QIN Chuan. Encyclopedia for observatory management[M]. Beijing: Beijing Founder Electronics Press, 2005.
- [4] 韩庆之,毛绪美,梁合诚. 环境监测[M]. 北京:中国地质大学出版社, 2005.
HAN Qingzhi, MAO Xumei, LIANG Hecheng. Environmental monitoring [M]. Beijing: Press of China University of Geosciences, 2005.
- [5] Haagenrud S E. Environmental characterisation including equipment for monitoring[R]. Norway: NILU, 1997.
- [6] BE95-1347. Working report: environmental actions and response survey, inspection and measurements [R]. Netherland: EU Project-Brite Euram, 1999.
- [7] Lindvall A. Environmental actions and response-reinforced concrete structures exposed in road and marine environments [D]. Göteborg: Department of Building Materials of Chalmers University of Technology, 2001.
- [8] Cole I S, Paterson D A, Ganther W D. A holistic model for atmospheric corrosion: part 1—theoretical framework for production, transport and deposition of marine salts [J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2003,38(2): 153.
- [9] Huang Q H, Xu N, Gu X L, et al. Environmental zonation for durability assessment and design of reinforced concrete structures in China[C]//Proceedings of the First International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, Nanjing: RILEM Publications SARL, 2008: 735–744.
- [10] 方精云. 地理要素对我国温度分布影响的数量评价[J]. 生态学报, 1992,12(2): 92.
FANG Jingyun. Study on the geographic elements affecting temperature distribution in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 1992,12(2): 92.
- [11] 曾雪兰,余志,邓院昌,等. SRTM 数字高程模型在 MM5 风场模拟中的应用[J]. 资源科学, 2008,30(5): 662.
ZENG Xuelan, YU Zhi, DENG Yuanchang, et al. Application of SRTM DEM in the numerical simulation of wind fields using MM5[J]. Resources Science, 2008,30(5): 662.
- [12] 徐宁,顾祥林,黄庆华,等. 工程环境尺度上混凝土结构环境作用研究[J]. 北京工业大学学报, 2011,37(增刊1): 34.
XU Ning, GU Xianglin, HUANG Qinghua, et al. Study on environmental action for concrete structures on engineering environment scale [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011,37(suppl.1): 34.
- [13] 凯尔别克. 太阳辐射对桥梁结构的影响[M]. 刘兴法译. 北京:中国铁道出版社, 1981.
Kehibeck. The influence of solar radiation on bridge structures [M]. Translated by LIU Xingfa. Beijing: China Railway Press, 1981.
- [14] 章熙民,任泽霏,梅飞鸣. 传热学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1992.
ZHANG Ximin, REN Zepei, MEI Feiming. Heat transfer theory [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1992.