

基于蒙特卡罗法的轨道交通建设用混凝土 受冻服役寿命分析*

陆晨浩¹ 农兴中² 范进¹ 丁建国¹ 缪建红¹ 黄宏坤¹

(1. 南京理工大学理学院, 210094, 南京; 2. 广州地铁设计研究院有限公司, 510010, 广州//第一作者, 硕士研究生)

摘要 为对不同地区轨道交通混凝土受冻服役寿命进行预测, 并揭示主要材料参数的影响规律, 以冻融试验模型为基础, 结合对气象数据的分析, 建立了室内冻融与自然冻融间的关系。考虑材料参数变化的随机性, 采用蒙特卡罗法, 分析了水胶比、含气量和粉煤灰掺量等主要参数对轨道交通混凝土受冻服役寿命的影响规律。结果表明: 水胶比越大, 受冻服役寿命越短, 且影响明显; 参数在合理范围内时, 含气量增大, 受冻服役寿命提高; 粉煤灰掺量的增大使受冻服役寿命有所提高。

关键词 轨道交通; 混凝土; 受冻服役寿命; 蒙特卡罗法; 冻融

中图分类号 TU528.45.062

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.03.010

Analysis of Concrete Freezing Service Life for Rail Transit Construction Based on Monte Carlo Method

LU Chenhao, NONG Xingzhong, FAN Jin, DING Jianguo, MIAO Jianhong, HUANG Hongkun

Abstract In order to predict the freezing service life of concrete for rail transit engineering in different regions and reveal the influence law of main material parameters, the relationship between indoor and natural freezing-thawing is established based on the freezing and thawing experimental model, and the analysis of meteorological data. Considering the randomness of material parameter changes, Monte Carlo method is used to analyze the influence of main parameters such as water-to-binder ratio, gas content and fly ash content on the freezing service life of rail transit concrete. The result shows that the larger the water-to-binder ratio in concrete is, the shorter the service life will be. When the parameters are in a reasonable range, the freezing service life of concrete increases significantly with the increase of the gas content. The increase of the fly ash amount can also improve the freezing service life of concrete.

Key words urban rail transit; concrete; freezing service life; Monte Carlo method; freezing and thawing

First-author's address School of Science, Nanjing University of Science and Technology, 210094, Nanjing, China

近年来,我国轨道交通建设发展迅速,已建成的线路分布很广,而其桥梁、隧道等构筑物以及站房等建设物的建筑材料大部分采用混凝土。由于地区环境差异较大,这些用于轨道交通建设的混凝土(以下简为“轨道交通混凝土”)产生的耐久性问题不尽相同。对于北方地区而言,由冻融循环造成的冻害是混凝土服役期间的主要耐久性问题之一。此外,华东、华中的长江以北地区及西南高原寒冷地区,冻融作用的影响也不容忽视^[1]。因此,根据我国不同地区的气温变化情况,考虑材料参数变化的随机性,研究轨道交通混凝土受冻服役寿命的变化规律,具有重要的理论意义和应用价值。

已有的相关研究主要以高强或水工混凝土为对象,而轨道交通混凝土所处环境和材料参数与上述两者有一定差别。同时,材料参数的变化具有随机性,已有研究大多采用确定性方法,虽有学者将概率论引入混凝土寿命分析研究中,如:文献[2]在进行现场暴露混凝土的寿命预测时,考虑质量损失与超声声速变化的随机性建立起了混凝土剩余寿命的联合分布函数;文献[3]在以往确定性的氯离子渗透模型基础上,引入失效概率,得到了基于概率的寿命预测模型。但目前尚未有考虑材料参数随机性的混凝土受冻服役寿命研究的报道。

本文以轨道交通混凝土为对象,考虑水胶比、含气量和粉煤灰掺量等主要材料参数变化的随机性,采用蒙特卡罗方法,开展其受冻服役寿命预测及其影响规律的研究。

* 国家重点研发计划项目(2017YFB1201204)

1 轨道交通混凝土受冻服役寿命预测

1.1 混凝土受冻服役寿命预测模型选择

混凝土受冻服役寿命的预测模型,主要分为理论模型和试验模型。理论模型^[4-5]物理意义明确,但相关参数须用不同的复杂方法测定,且学者们对理论模型背后的机理仍存在争议。试验模型的建立主要依据室内冻融试验的结果,表达形式简单、应用较为简便。本文以文献[6]提出的多元回归模型为基础,对轨道交通混凝土受冻服役寿命进行分析,其具体表达式如下:

$$N = (A + 1)^{1.5} e^{[-11.188(\varphi - 0.794) - 0.013\,07f]}$$

(1)

式中:

- N ——混凝土能承受的最大冻融循环次数,次;

A ——混凝土含气量,%;

w ——混凝土的用水量,kg;

c ——混凝土的水泥用量,kg;

f ——粉煤灰掺量,%;

φ ——混凝土水胶比, $\varphi = w / (c + f)$ 。

1.2 室内冻融与自然冻融损伤比例关系的确定

通过对文献[7]的试验结果及其变化规律分析,假定自然冻融与室内冻融引起混凝土的损伤满足线性关系:

$$N_a = KN$$

(2)

式中:

- N, N_a ——分别表示室内和自然冻融环境下混凝土质量损失率不超过 5% 时的最大冻融循环次数;

K ——自然环境下与室内冻融间的冻融损伤比例系数。

自然冻融环境下的最大冻融循环次数与混凝土所处地区的最冷月平均气温直接相关。因此可以根据不同地区混凝土结构的实际冻害情况^[8],计算得到全国受冻区与微冻区的损伤比例系数。由于严重受冻区与偶冻区的实际冻害资料匮乏,确定 K 值时,分别以该地区最冷月平均气温与受冻区最冷月平均气温的差值,对 K 进行线性差值选取。全国典型地区的 K 见表 1。

我国东北、西北地区最冷月平均气温符合严重受冻区的范畴;华北属于受冻区;华中、华东属于微冻区,华南属于偶冻区,本文不计入考虑。

表 1 我国典型地区的冻融损伤比例系数表

气候区最冷月平均气温/℃	受冰等级	K
≤ -8	严重受冻	7
$-8 < \cdot \leq -4$	受冻	12
$-4 < \cdot \leq 0$	微冻	17
> 0	偶冻	23

1.3 模型参数及分布规律

水胶比、含气量、外加剂掺量等参数都是随机变量,假定各参数均服从正态分布。由《地铁设计规范》^[9]可知,水胶比一般不超过 0.40;文献[10]中要求冻融环境下含气量最大不超过 7%;单掺粉煤灰时最大掺量为 30%。根据此限值,以样本置信度为 95% 计算得到各参数的统计特征值,如表 2 所示。

表 2 模型中各参数及其统计特征值

参数	均值	方差
φ	0.36	0.024 4
$A/\%$	5.00	0.608 0
$f/\%$	25.00	3.050 0

1.4 典型地区年平均冻融循环次数

统计资料^[11]显示,我国不同区域可能出现的年平均冻融循环次数如表 3 所示。借助文中采用的多元回归模型以及室内冻融与自然冻融间的损伤关系,可以分析和预测不同地区轨道交通混凝土的受冻服役寿命。

表 3 我国典型地区气温及年冻融循环统计结果

地区	极端最低气温/℃	年平均温差/℃	年平均负温天数/d	年平均冻融循环次数/次
华北	-27.4	53.2	120	84
东北	-36.5	66.5	172	120
西北	-26.6	52.1	169	118
华中	-9.8	41.8	18	18

2 混凝土受冻服役寿命的蒙特卡罗法模拟结果与分析

本文对轨道交通混凝土进行受冻服役寿命预测及规律分析时,采用单参数分析方法。模拟时,采用蒙特卡罗法生成随机数,根据式(1)、式(2)得到自然冻融环境下混凝土质量损失率不超过 5% 时的最大冻融循环次数,其与典型地区的年平均冻融循环次数的比值即为轨道交通混凝土的受冻服役寿命。本文将对各种工况模拟计算 5 000 次。

2.1 水胶比对混凝土受冻服役寿命的影响

以 A 为 5%、 f 为 25%, φ 服从 $N(0.360\,0, 0.024\,4)$ 的配合比对混凝土的受冻服役寿命进行模

拟,得到 φ 对轨道交通混凝土受冻服役寿命的影响规律,如图1所示。

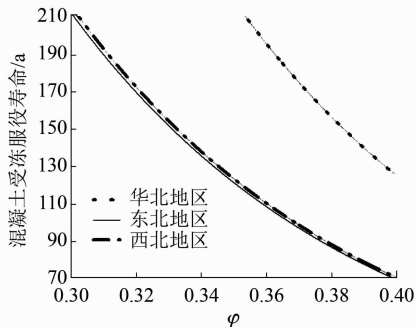


图1 轨道交通混凝土水胶比与受冻服役寿命间的关系

由图1可知,当 φ 从0.35增大到0.40时,东北、西北地区轨道交通混凝土的受冻服役寿命从120 a降低至75 a,降幅为37.5%;华北地区则从210 a降至120 a,降幅达42.9%。由此可见,当 A 和 f 不变时,各地区轨道交通混凝土的受冻服役寿命随 φ 的增大而明显减小。这主要是因为随着 φ 的增大,外加剂对混凝土的增密效应不明显,混凝土的孔隙比增大,造成受冻服役寿命的降低。

2.2 含气量对混凝土受冻服役寿命的影响

以 φ 为0.36、 f 为25%、 A 服从 $N(5.000\ 0, 0.608\ 0)$ 的配合比对混凝土进行模拟计算,得到 A 对轨道交通混凝土受冻服役寿命的影响规律,如图2所示。

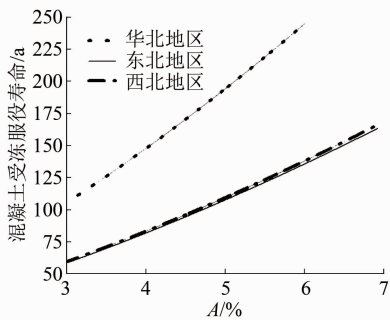


图2 轨道交通混凝土含气量与受冻服役寿命间的关系

由图2可知,当 A 从4%增大至6%时,东北、西北地区轨道交通混凝土的受冻服役寿命从80 a增大到125 a,增幅为36.0%;华北地区则从130 a增大至230 a,增幅达43.4%。由此可见,当 φ 和 f 不变时,各地区混凝土的受冻服役寿命随 A 的增大而增大。但该规律仅在 A 处于3.5%~6.5%的范围内时较为显著,因为 A 较小时,混凝土的和易性差、易开裂、抗冻性差; A 过大又会造成孔洞太多,导致混凝土不密实。

土不密实。

2.3 粉煤灰掺量对混凝土受冻服役寿命的影响

以 φ 为0.36、 A 为5%、 f 服从 $N(25.000\ 0, 3.050\ 0)$ 的配合比对混凝土进行模拟计算,得到 f 对轨道交通混凝土受冻服役寿命的影响规律,如图3所示。

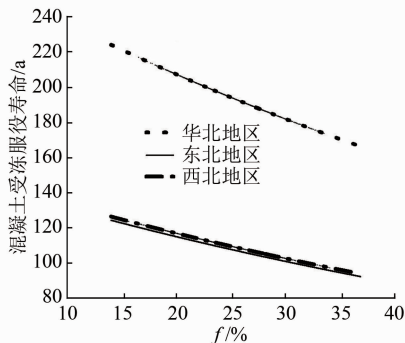


图3 轨道交通混凝土粉煤灰掺量与受冻服役寿命间的关系

由图3可知,当 f 处于20%~30%时,东北、西北地区轨道交通混凝土的受冻服役寿命在105~115 a范围内变化,变化幅度仅为8.6%;华北地区则在175~205 a范围内变化,变化幅度为14.6%。因此,当 φ 和 A 不变时,各地区混凝土的受冻服役寿命随 f 的增多呈下降趋势,但相较于 A 和 φ , f 对受冻服役寿命的影响不大。

3 结语

本文以混凝土冻融试验预测模型为基础,结合对全国气象资料的分析,建立了室内冻融与自然冻融间的关系。考虑了材料参数变化的随机性,采用Monte-carlo法,分析了3个主要参数对轨道交通混凝土受冻服役寿命的影响规律。主要结论如下:

1) 其它参数不变时, φ 越大,混凝土的抗冻性越差,服役寿命越短。当 φ 从0.35增大到0.40时,东北、西北地区混凝土受冻服役寿命降低37.5%,华北地区降低42.9%。 φ 对轨道交通混凝土受冻服役寿命影响明显。

2) 在其它参数不变的条件下, A 处于4%~6.5%的范围内时,增大 A 能提高混凝土的受冻服役寿命, A 对其影响较为显著;

3) 其它参数不变时, f 在18%~32%范围内变化时,混凝土受冻服役寿命随 f 增加而减小,但相较于 φ 及 A ,其对受冻服役寿命的影响不显著。

(下转第44页)

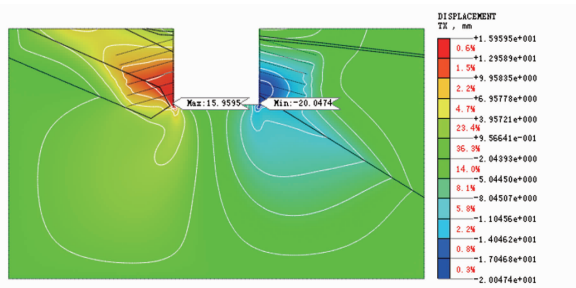


图6 二维有限元计算位移值

5 结语

本文以重庆某地铁站既有项目为依托,对岩质地层条件下的深基坑支护结构进行了创新设计,综合分析得出以下结论:

1) 在岩质地层下,对于地铁临时深基坑的支护,在采用型钢肋板挡墙的支护措施时,具有支护体系简单、受力明确的特点,可为后续类似的工程建设提供优化设计和施工参考。

2) 目前,该站已竣工并且开通运营,从现场反馈的监控数据显示,相关数据在允许范围以内,施工过程中整体是安全的,采取的型钢挡墙结构是满足规范、规程及现场施工要求的。

3) 型钢挡墙在实际施工过程中,具备施工方便、快速的优势。相较于混凝土肋板挡墙结构及桩+锚索/内支撑结构,在同等条件下,可节约工期约 20%、33%,可为车站主体结构施工及整个地铁工

程节约不可忽视的工期。

4) 在同等条件下,型钢挡墙综合经济指标最低,相较于混凝土肋板挡墙结构及桩+锚索/内支撑结构,在同等条件下,可节约工程投资约 3%、45%。在城市轨道交通车站多个深基坑工程情况下,若采用型钢挡墙结构支护结构,可以节省相当可观的工程投资。

在实际设计和施工过程中,型钢挡墙结构还可根据周边环境及地质情况调整支护参数,做到安全、经济、合理,使其具备更加广泛的应用价值。

参考文献

- [1] 郭楠,陈正汉,杨校辉.兰州地铁深基坑围护结构选型分析[J].水利与建筑工程学报,2015(6):65.
- [2] 王宗余,张荣,邹光炯.重庆地铁深基坑设计研究[J].现代城市轨道交通,2010(3):45.
- [3] 张亚楠,周雪峰,吕丹丹.谈型钢混凝土结构的研究现状[J].山西建筑,2016(2):31.
- [4] 岳清瑞,侯兆新.对我国钢结构发展的思考[J].工程建设标准化,2017(5):48.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑边坡工程技术规范:GB 50330—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计规范:GB 50017—2003[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

(收稿日期:2019-01-04)

(上接第 40 页)

参考文献

- [1] 杨海成.架构混凝土抗冻耐久性的研究[D].大连:大连理工大学,2009.
- [2] 乔宏霞,朱彬荣,路承功.基于 Copula 函数的现场暴露混凝土寿命预测方法[J].建筑材料学报,2017(2):191.
- [3] 刘志勇,孙伟,周新刚.基于 Monte Carlo 随机计算的海工混凝土使用寿命预测[J].东南大学学报(自然科学版),2006(增刊2):221.
- [4] FAGERLUND G. A service life model for internal frost damage in concrete[R].Lund:Lund University,2004.
- [5] BAZANT Z P. Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete[M]. Wiley:Wiley Interscience Publication,1988.
- [6] 李金玉.冻融环境下混凝土结构的耐久性设计与施工[C]//混凝土结构耐久性设计与施工论文集.北京:中国土木工程学

会,2004:10.

- [7] 彭涛,李金玉,曹建国.十三陵蓄能电站上水库面板质量检测 and 抗冻性评估[J].水力发电,2003(1):65.
- [8] 李金玉,彭小平.混凝土抗冻性的量化设计[J].混凝土,2000(12):61.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [11] 林宝玉,蔡锐华.海港工程混凝土和钢筋混凝土耐久性技术指标的确定[J].水运工程,1982(2):50.

(收稿日期:2019-06-05)