

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220298

# 基于 CT 技术的矿物掺合料改性蒸养混凝土冻融试验

高志涵<sup>a,b</sup>, 陈波<sup>a,b</sup>, 陈家林<sup>a,b</sup>

(河海大学 a. 水利水电学院; b. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为研究矿物掺合料在冻融环境下对蒸养混凝土的影响情况,采用 CT 技术对经历冻融循环后的蒸养混凝土进行扫描,获取了其断层的扫描图像,并利用 Fiji 和 Avizo 软件进行了蒸养混凝土的三维重构,得到了试样的孔隙结构特征。研究表明,蒸养混凝土试样的抗压强度随冻融次数的增加而降低,孔隙结构的劣化是造成抗压强度降低的主要原因;掺加了矿粉和粉煤灰的蒸养混凝土试样在相同冻融条件下的力学性能和孔隙结构特征均优于普通蒸养混凝土,矿粉和粉煤灰对于蒸养混凝土的孔结构具有一定的改善效果。

**关键词:** 蒸养混凝土; 冻融循环; 抗压强度; 孔隙结构; 盒维数

中图分类号: TV431<sup>+</sup>.9; TU528.31

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)01-0129-04

## 1 引言

蒸汽养护工艺因其具有成本低廉、生产效率高优点而广泛应用于预制构件的生产中<sup>[1]</sup>。然而蒸养制度会劣化混凝土内部的孔隙特征,从而影响预制构件的长期力学性能<sup>[2]</sup>。应用于高寒区的蒸养混凝土构件每年需经历多次冻融循环,因此了解其在冻融环境下的力学特征对保障工程安全具有重要意义。谢友均等<sup>[3]</sup>研究了冻融环境下蒸养混凝土的耐久性并对比了不同配合比之间的差异;田耀刚等<sup>[4]</sup>研究了升温速率、恒温时间等蒸养参数对高强混凝土抗冻性能的影响;RAMEZANIANPOUR A M 等<sup>[5]</sup>研究了不同掺合料对蒸养混凝土力学性能的影响,并对比了不同蒸养条件下各自的影响水平。大量研究表明,矿粉、粉煤灰等掺合料有助于降低胶凝材料的水化热,改善混凝土内部的孔结构,从而提高其抗压强度,然而现有的研究主要集中于蒸养混凝土早期的力学性能,少有从孔隙结构方面探究掺合料对蒸养混凝土的影响。X 射线 CT 技术是一种无损检测混凝土内部结构的新技术,可探测到混凝土各个层面的二维切片,并利用三维分析软件可实现混凝土微观结构的三维重构。为此,本文选取了两种不同配合比的蒸养混凝土试样,对其进

行了若干次冻融循环和 CT 扫描,得到各试样的孔隙率、孔径分布、孔隙盒维数等参数,探究了掺合料对于冻融环境下蒸养混凝土力学性能的影响。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

粗骨料选择粒径为 5~25 mm 的碎石;细骨料选择细度模数为 2.5 的天然河沙;水泥采用海螺牌 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,矿粉为 S95 级矿渣粉,粉煤灰为 II 级低钙粉煤灰,水泥、矿粉、粉煤灰的主要化学成分见表 1。减水剂采用聚羧酸高性能减水剂,减水率为 26%;水为普通自来水。混凝土试样的配合比见表 2。

表 1 水泥、矿粉、粉煤灰的主要化学成分

Tab. 1 Main chemical composition of cement, GGBS and FA

材料 类型	百分比/%						
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	其他
水泥	47.93	25.12	11.36	5.52	2.97	2.44	4.66
矿粉	41.87	34.01	9.85	8.11	2.67	1.02	2.47
粉煤灰	3.36	56.63	24.82	1.2	0.2	9.7	4.09

表 2 混凝土试样的配合比

Tab. 2 Mixture proportion of concrete specimen kg/m<sup>3</sup>

试样 编号	水泥	矿粉	粉煤灰	细骨料	粗骨料	水	减水剂	水胶比
Z1	483	0	0	815	957	145	3.42	0.5
Z2	241.5	144.9	96.6	815	957	145	3.42	0.5

收稿日期: 2022-02-21, 修回日期: 2022-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079049); 国家自然科学基金重点项目(51739003)

作者简介: 高志涵(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水工结构安全监控, E-mail: hhgaozhihan@163.com

通讯作者: 陈波(1986-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为大坝安全监控, E-mail: chenbo@hhu.edu.cn

根据《水工混凝土试验规程》<sup>[6]</sup>中规定的方法,将各组样品按配合比制成若干个边长分别为100、50 mm 的混凝土立方体试样。Z1、Z2 均采用60℃蒸汽养护12 h,脱模后置于标准养护室中养护180 d。

### 2.2 试验器材和试验方法

蒸养混凝土冻融试验按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》<sup>[7]</sup>中规定的“快冻法”进行,采用CABR-HDK型快速冻融试验机进行试验。共冻融循环200次,每隔50次循环从各样品中取出1组边长100 mm 的立方体试样(每组3块)进行抗压强度试验,并取出1组边长50 mm 的立方体试样进行CT扫描。

蒸养混凝土立方体抗压强度试验仪器选用WAW微机控制电液伺服万能试验机,按照《水工混凝土试验规程》<sup>[6]</sup>进行抗压强度试验,试件尺寸为100 mm×100 mm×100 mm,以3 kN/S的加载速率沿轴向施加荷载,直至试样破坏,并记录各冻融循环后蒸养混凝土的抗压强度。

CT试验采用德国Y. CT Precision微焦点X射线CT系统,试样尺寸为50 mm×50 mm×50 mm。取各试样组中不同冻融次数的试样进行CT试验,沿试样的横断面以厚度0.5 mm进行逐层扫描,获取1 000张连续的二维断层扫描CT图像,图像的像素数为1 024×1 024。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 抗压强度结果

试验按照《水工混凝土试验规程》<sup>[6]</sup>测试了养护龄期为180 d的蒸养混凝土在经历不同次冻融循环后的抗压强度值,取每组试样抗压强度的平均值作为代表值,得到不同配合比的蒸养混凝土抗压强度随冻融循环次数的变化曲线,见图1。

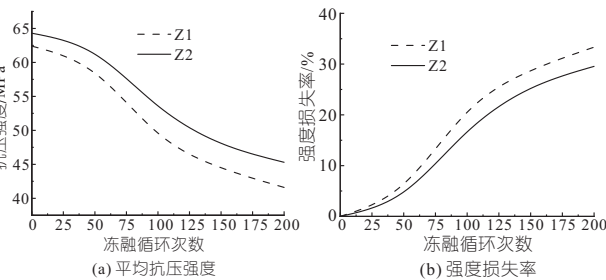


图1 冻融循环下蒸养混凝土的抗压强度变化曲线

Fig.1 Compressive strength curve of steam-cured concrete under freeze-thaw cycle

由图1可看出,蒸养混凝土试样的抗压强度随冻融循环次数的增大而逐渐减小,Z2组试样的

抗压强度在冻融循环的整个过程均大于Z1组试样,且在相同的冻融循环次数下,Z2组试样的强度损失情况也优于Z1组试样。这是由于矿粉和粉煤灰中的SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等成分与水泥水化生成的Ca(OH)<sub>2</sub>反应生成了较多的水化硅酸钙、钙矾石和C-S-H凝胶等,从而提高蒸养混凝土试样的强度<sup>[8]</sup>。另一方面,矿粉和粉煤灰颗粒比较小,能够填充混凝土中的部分细小孔隙,从而降低试样的孔隙率,使混凝土更加密实,一定程度上改善了蒸养混凝土的力学性能。由此可见,掺加适量的矿粉和粉煤灰有助于提高蒸养混凝土在冻融环境下的长期抗压强度。

冻融试验以50次循环为一个阶段,为探究蒸养混凝土在哪一阶段强度损失最严重,引入阶段损伤度 $\alpha$ 来描述各冻融循环阶段试样的抗压强度损失情况,其表达式为:

$$\alpha = 1 - P_{(n-50)} / P_n \quad (1)$$

式中, $\alpha$ 为阶段损伤度; $P$ 为经历不同冻融循环次数后蒸养混凝土的抗压强度值; $n$ 为冻融循环次数。

将试验数据代入式(1)得到蒸养混凝土试样在不同冻融循环阶段的强度损伤度,见表3。由表3可知,两组蒸养混凝土试样在冻融循环过程中,阶段损伤度呈先增大后减小的趋势,在50~100次冻融循环这一阶段的强度损伤值均为最大,在150次冻融循环后强度损伤值出现较大幅度的减小。其原因可能是在冻融循环初期,蒸养混凝土内部的孔隙因为水的冻胀压力而逐渐粗化,逐渐产生微裂缝,并在50~100次冻融循环过程中内部孔隙的劣化情况加快,该阶段蒸养混凝土的抗压强度损伤度较大;而在150次冻融循环后,试样内部的损伤到达了极值,孔隙结构变得疏松且出现了掉渣、塌落等现象,部分细颗粒脱落填充孔隙,混凝土的孔结构发生重分布。该阶段后,孔隙结构的劣化对蒸养混凝土试样抗压强度的影响程度在不断减小,引起试样强度降低的主要原因变为混凝土自身结构的缺陷如大量掉渣、裂缝开展、骨料脱落等,阶段损伤度指标可用来探究各

表3 试样各冻融循环阶段的损伤度情况

Tab.3 Damage degree of samples at each stage of freeze-thaw cycle

试样编号	冻融循环阶段	对应冻融循环次数/次	阶段损伤度/%	试样编号	冻融循环阶段	对应冻融循环次数/次	阶段损伤度/%
Z1	1	0~50	6.4	Z2	1	0~50	4.8
	2	50~100	15.1		2	50~100	12.4
	3	100~150	10.3		3	100~150	10.3
	4	150~200	6.5		4	150~200	5.8

冻融循环阶段造成蒸养混凝土抗压强度降低的主要因素。

### 3.2 孔隙率及孔径分布特征

混凝土的孔隙结构对其力学性能影响很大,混凝土冻融破坏的主要原因是孔隙中的水经固液态的变化而产生内部冻胀压力,引起孔隙尺寸增大,随着孔隙的逐步贯通,混凝土随之开裂,了解混凝土的微观孔隙结构有助于研究其力学性能的演化规律<sup>[9]</sup>。通过 CT 试验得到了一系列蒸养混

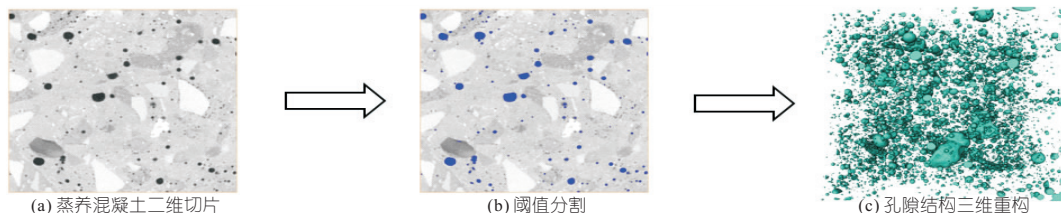


图 2 孔隙结构的处理流程

Fig. 2 Treatment process of pore structure

凝土的二维切片,为获得蒸养混凝土试样的内部结构,需先借助 Fiji 软件对图像进行预处理,以提高图像的质量和对比度。CT 图像中的 CT 数与材料的密度成正比,根据不同材料在 CT 图像中灰度值的差异,通过 Avizo 软件来进行阈值分割,从而提取出蒸养混凝土内部骨料、孔隙和胶结物等成分,实现蒸养混凝土的三维重构。以孔隙结构为例,其处理流程见图 2。

为进一步探究矿粉和粉煤灰对蒸养混凝土孔

隙结构的影响,以经历 100 次冻融循环后的 Z1、Z2 试样为例,分析了其竖直方向上的平面孔隙率,结果见图 3。由图 3 可看出,Z1、Z2 试样竖直方向的平面孔隙率随试样深度的变化趋势基本一致,试样上下表面的孔隙率较大,从试样表面到中部的过程中,孔隙率逐渐减小。这是由于在冻融循环中,混凝土受到的侵蚀破坏是由外到内发展的,靠近表面的混凝土受到的破坏更为严重,平面孔隙率的分布特征符合冻融侵蚀的发展规律。在切片深度为 5~45 mm 的范围内,Z1、Z2 试样的平面孔隙率大小较为接近,介于 1%~3% 之间,Z1 略大于 Z2;而在切片深度为 0~5、45~50 mm 的范围内,试样 Z1 的平面孔隙率显著大于试样 Z2。在主要受到冻融侵蚀的表面区域,Z2 试样整体的孔隙特征要明显优于 Z1 试样,两类掺合料的添加能够减缓蒸养混凝土在冻融循环过程中内部孔隙的发展。

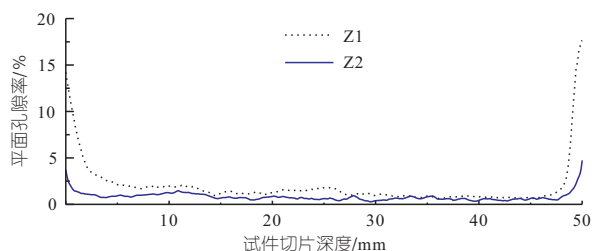


图 3 100 次冻融循环后试样竖直方向的平面孔隙率

Fig. 3 Plane porosity in vertical direction after 100 freeze-thaw cycles

孔径的大小及其分布特征对混凝土的力学性能有重要影响,本文提取并统计了两试样的孔径分布情况,结果见图 4。由图 4 可看出,Z1、Z2 试样的孔径主要分布在 0.1~0.7、0.1~0.4 mm 范

围内,分别占据总孔隙的 92.1%、82.2%。Z1 试样主要以孔径大于 0.4 mm 的孔隙为主,大孔隙占比较高;而 Z2 试样大部分孔径小于 0.4 mm,且以 0.1、0.2 mm 的孔隙为主。两试块在冻融循环过程中由于受到冻胀作用,内部原有的微孔隙逐渐发展为大尺寸孔隙,大量微孔隙的发展造成强度的损失。掺有矿粉和粉煤灰的 Z2 试样中的大孔隙的含量小于 Z1 试样,Z2 试样的强度损失情况亦优于 Z1 试样。一般认为矿粉和粉煤灰会与水泥的水化产物发生反应,生成较多的 C-S-H 凝胶,Jenning 模型<sup>[10]</sup>认为 C-S-H 凝胶的结构单元主要为直径小于 5 nm 的球体,堆积形态十分致密。掺了矿粉和粉煤灰的 Z2 试样内部含有大量的 C-S-H 凝胶,其孔隙结构得以进一步细化,从而具有更强的抵抗冻融侵蚀的能力,矿粉和粉煤灰对于冻融环境下的蒸养混凝土的孔隙结构有一定的改善作用。

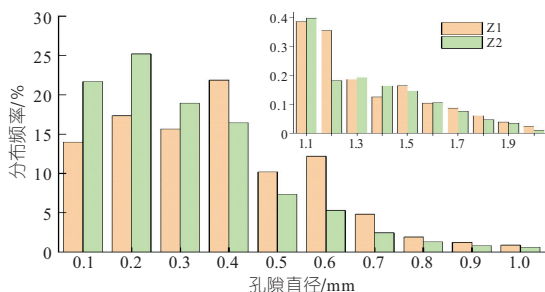


图 4 Z1、Z2 试样的孔径分布图

Fig. 4 Pore size distribution of Z1 and Z2 samples

3.3 冻融条件下蒸养混凝土孔隙结构的分形特征

分形理论作为描述物体分布的不规则性和复杂性的理论,可用来分析蒸养混凝土经冻融循环后内部结构的损伤情况。差分盒维数法作为一种

常用的计算图像分形维数的方法,其原理是用一系列尺寸为  $\delta$  的盒子来覆盖图像,并求出覆盖整个图像后的盒子数量  $N$ ,当不断调整盒子尺寸  $\delta$  时,盒子数  $N(\delta)$  亦随之变化,得到一系列的  $\delta-N(\delta)$  数据。使用最小二乘法对盒子数的对数  $\ln N(\delta)$  与尺寸倒数的对数  $\ln(1/\delta)$  进行线性拟合,当  $\delta$  趋于 0 时,拟合直线的斜率就是所求的盒维数,盒维数  $D$  的表达式为:

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln(1/\delta)} \quad (2)$$

针对 100 次冻融循环后的 Z1、Z2 试样,为了研究蒸养混凝土不同位置处的冻融损伤情况,等距选取两试样的若干水平截面,首先将各截面的 CT 图像进行二值化处理,转为 8-bit 的灰度图像,再计算其中分形盒子的尺寸和数量,从而得到截面的二维盒维数,并以各截面盒维数的平均值作为试样的整体盒维数,结果见表 4。

表 4 Z1、Z2 试样盒维数计算结果

Tab. 4 Box dimension calculation results of Z1 and Z2

试样编号	孔隙率/%	断面编号	断面盒维数 $D$	平均盒维数 $\bar{D}$	试样编号	孔隙率/%	断面编号	断面盒维数 $D$	平均盒维数 $\bar{D}$
Z1	3.81	1	1.819	1.903	Z2	1.42	1	1.841	1.862
		2	2.056				2	1.890	
		3	1.909				3	1.887	
		4	1.910				4	1.859	
		5	1.821				5	1.835	

Z1、Z2 的代表性截面 1~5 分别表示沿试样竖直方向深度为 0、12.5、25、37.5、50 mm 的水平截面。试样孔隙的盒维数可量化其内部孔隙的分布情况,一般情况下,试样的盒维数越大,其孔隙就越发育,分布也越复杂。由表 4 可看出,两试样上下表面的盒维数较小,而试样内部截面的盒维数较大。这是由于冻融侵蚀的发展是由表面到内部的过程,表面 5 mm 深度范围内的蒸养混凝土在冻胀力和渗透水压力的联合作用下,孔隙尺寸变大,孔隙之间的贯通和试样表面掉渣、脱落使得孔隙特征变得单一,孔隙分布的不均匀性随之下降。而受冻融影响较小的内部截面以微小孔隙为主,分布较为复杂,盒维数也较大。

对比两试样,发现 Z1 试样的平均盒维数大于 Z2 试样,这是由于未掺矿粉和粉煤灰的 Z1 试样经冻融循环后,其孔隙结构比 Z2 试样更加发育,从而 Z1 试样的孔隙空间分布形态更为复杂。但 Z1 试样上下表面处的盒维数却小于 Z2 试样,可见 Z1 试样表面受到的冻融侵蚀程度更加严重,表面区域孔隙的扩张和裂缝的发展使得 Z1 试样的表面孔隙的复杂程度有所减弱。

## 4 结论

a. 蒸养混凝土的抗压强度随冻融循环次数的增加而降低,100 次冻融循环时的阶段损伤度达到最大,矿粉和粉煤灰的添加可提高蒸养混凝土的抗压强度并改善其在冻融循环过程中的强度损失情况。

b. 通过 CT 技术实现了蒸养混凝土内部孔隙结构的三维重构,从微观角度对比了 100 次冻融循环后两试样的差异,矿粉和粉煤灰可细化蒸养混凝土的孔隙结构,减小大尺寸孔隙的占比并降低孔隙率,从而提高蒸养混凝土抵抗冻融侵蚀的能力。

c. 分析了试样代表性截面的二维盒维数,呈现出表面的盒维数较小而内部的盒维数较大的分布情况,符合材料冻融损伤的演化规律,两类矿物掺合料的添加能够减缓蒸养混凝土在冻融环境下孔隙的扩张情况。

### 参考文献:

- [1] 郭玉柱,陈徐东,宁英杰,等. 基于 X-CT 的蒸养大掺量矿物掺合料砂浆孔结构研究[J]. 建筑材料学报,2022,25(9):885-892.
- [2] 勾煜. 粉煤灰对蒸养混凝土抗压强度的影响[J]. 混凝土,2021(7): 86-89.
- [3] 谢友均,冯星,刘宝举,等. 蒸养混凝土抗压强度和抗冻性能试验研究[J]. 混凝土,2003(3): 32-34,51.
- [4] 田耀刚,李炜光,彭波,等. 蒸养参数对高强混凝土抗冻性能的影响[J]. 建筑材料学报,2010,13(4): 515-519.
- [5] RAMEZANIANPOUR A M, ESMAEILI K, GHAHARI S A, et al. Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete[J]. Construction and building materials, 2014, 73: 187-194.
- [6] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土试验规程:SL/T 352-2020[S]. 北京:中国水利水电出版社,2020.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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,2009.
- [8] 戴雄. 粉煤灰矿物掺合料的研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2017.
- [9] 申嘉荣,徐千军. 高温对混凝土孔隙结构改变和抗压强度降低作用的规律研究[J]. 材料导报,2020,34(2): 2046-2051.
- [10] 李凯. C-S-H 凝胶结构特性的分子模拟研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.

表 4 2017 年水资源承载力评价结果对比  
Tab. 4 Comparison of prediction results of water resources carrying capacity in 2017

地市	PSO-SVM 模型预测值	等级	地市	PSO-SVM 模型预测值	等级
哈尔滨	0.566 9	II	佳木斯	0.472 2	II
齐齐哈尔	0.474 4	II	七台河	0.512 9	II
鸡西	0.507 3	II	牡丹江	0.629 1	III
鹤岗	0.541 9	II	黑河	0.668 5	III
双鸭山	0.583 1	II	绥化	0.485 1	II
大庆	0.423 4	II	大兴安岭	0.709 2	III
伊春	0.641 2	III			

## 4 结论

a. 本文通过粒子群算法对核函数  $\sigma$ 、惩罚因子  $C$  这两个参数进行寻优处理,建立了基于 PSO-SVM 的水资源承载力预测模型,并将其应用于黑龙江省 2017 年水资源承载力评价。

b. 黑龙江省 2017 年水资源承载力指数位于 0.423 4~0.709 2 之间,部分地区水资源承载力

处于 II 级,承载能力较弱,有较大的提升空间。

## 参考文献:

- [1] 沈娜. 区域合作视角下“一带一路”倡议在东北亚区域的推进研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021: 15-16.
- [2] 席赫阳. 黑龙江省水稻产区耕地土壤肥力变化及培肥措施[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021: 6-12.
- [3] 施雅风, 曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [4] 袁艳梅, 沙晓军, 刘煜晴, 等. 改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 52-56.
- [5] 黄垒, 张礼中, 朱吉祥, 等. 河南省水资源承载力时空特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 54-60.
- [6] SHI Y, EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1998: 69-73.

## Application of PSO-SVM in Water Resources Carrying Capacity Evaluation of Heilongjiang Province

WANG Tao<sup>a,b</sup>, LI Zhi-jun<sup>a,b</sup>

(a. College of Water Resources and Electric Engineering;

b. Cold Groundwater Research Institute, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the evaluation and prediction of water resources carrying capacity involves multi-factor comprehensive indicators, particle swarm optimization algorithm was used to optimize the training parameter penalty factor  $C$  and kernel parameter  $\sigma$  in the support vector machine model, and a water resources carrying capacity prediction model was established based on PSO-SVM. According to the index grade standard, the training set data was constructed to evaluate the water resources carrying capacity of Heilongjiang Province in 2017. The results show that the water resources carrying capacity index of Heilongjiang Province in 2017 is between 0.423 4 and 0.709 2. The water resources carrying capacity in some areas is at level II, the carrying capacity is weak, and there is still much room for improvement.

**Key words:** water resources carrying capacity; support vector machine; particle swarm optimization algorithm; Heilongjiang Province

\*\*\*\*\*  
(上接第 132 页)

## Freeze-thaw Test of Steam-cured Concrete Modified by Mineral Admixtures Based on CT Technology

GAO Zhi-han<sup>a,b</sup>, CHEN Bo<sup>a,b</sup>, CHEN jia-lin<sup>a,b</sup>

(a. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering; b. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to study the influence of mineral admixture on steam-cured concrete under freeze-thaw environment, CT technology was used to scan the steam-cured concrete after freeze-thaw cycle, and the sectional images were obtained. The three-dimensional reconstruction of steam-cured concrete was carried out by Fiji and Avizo software, and the pore structure characteristics of the samples were obtained. The results show that the compressive strength of steam-cured concrete decreases with the increase of freeze-thaw times, and the deterioration of pore structure is the main reason for the decrease of compressive strength; The mechanical properties and pore structure characteristics of steam-cured concrete mixed with mineral powder and fly ash are better than those of ordinary steam-cured concrete under the same freeze-thaw conditions. The mineral powder and fly ash have a certain effect on improving the pore structure of steam-cured concrete.

**Key words:** steam-cured concrete; freeze-thaw cycle; compressive strength; pore structure; box dimension