

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.063

影响道路水泥混凝土抗冻性能的细观损伤因子研究

侯海元^{1,2}, 周胜波^{1,2}, 闫强^{1,2}

(1. 广西交投科技有限公司, 广西南宁 530000; 2. 广西高速公路养护工程技术研究中心)

摘要:混凝土抗冻耐久性受到细观结构损伤的重要影响,为建立混凝土细观结构损伤与抗冻性能之间的量化关系,采用 Image-Pro Plus 进行图像处理,并通过灰度分析方法,确定了不同孔结构参数、裂缝结构参数和界面区结构参数对混凝土弹性模量的影响程度。结果表明,影响混凝土抗冻性的重要孔结构参数为无害孔、空隙率、总孔表面积、少害孔、最可几孔径以及孔间距系数,抗冻性与孔结构参数间符合多元线性模型,最可几孔径、总孔表面积和空隙率与相对动弹模量正相关,而少害孔和孔间距系数与其负相关。裂缝参数对混凝土抗冻性影响程度依次为裂纹宽度、裂缝分形维数、裂纹长度和裂纹密度,裂缝参数和抗冻性能间正常荷载时符合多元非线性模型、超载时符合多元线性模型。分形维数与相对动弹模量负相关,裂纹宽度和裂纹长度与相对动弹模量正相关。界面区参数与抗冻性间符合多元线性模型,密实度和裂纹长度与相对动弹模量间正相关,裂纹宽度与相对动弹模量间负相关。

关键词:混凝土抗冻性能; 细观尺度; 孔结构参数; 裂缝结构参数; 界面区结构参数

寒冷地区服役的水泥混凝土路面,其性能劣化受冻融循环影响严重,评价冻融循环作用下的混凝土抗冻性能一直受到学术界关注。混凝土内部含有骨料、砂浆和界面过渡区等结构,其中砂浆基体和界面过渡区含有大量裂缝和孔隙缺陷,既是冻融损伤因子成核区域,也是抗冻性能劣化源头。特别是混凝土内部细观孔结构状况是影响混凝土抗冻性的重要因素。T. C. Powers 提出气泡间距系数作为衡量混凝土抗冻性参数,目前这一参数对衡量抗冻性的孔间距系数临界值尚未形成统一的结论; Zbigniew Giergiczny 研究认为改善混凝土气孔结构空间因子可以提高其抗冻性能; 赵霄龙等认为混凝土经历冻融循环后,总比孔容增大,最可几孔径向大孔方向移动,大孔含量增多,临界孔径和平均孔径呈增长趋势,同时孔级配分布由小孔向大孔方向转移集中,从而造成了混凝土耐久性劣化; 张士萍指出引气剂可以细化混凝土内部的孔隙,使大孔减少、微小孔增多,使得抗冻耐久性得到提高。目前,针对混凝土内部细观孔结构对混凝土抗冻性的影响成果较多,而裂缝以及缺陷特征参数对抗冻性影响的主次程度报道很少。

该文针对冻融循环条件下的混凝土细观结构特征损伤进行定量化分析,并利用系统分析的方法评价不

同结构参数对抗冻性的影响程度,为混凝土抗冻性的系统设计和性能提升提供依据。

1 原材料及研究方法

1.1 原材料及混凝土强度

试验所用水泥为秦岭 P. O. 42.5R 普硅水泥, S95 级矿粉, 粉煤灰为 I 级, 粗集料最大公称粒径为 19 mm, 细集料河砂细度模数为 2.6, 高性能减水剂减水率为 26%, 水为自来水。试验设计 28 d 龄期混凝土强度等级为 C30、C40, 对应抗弯拉强度分别为 4.5 MPa 和 5.0 MPa。

1.2 冻融疲劳试验方案

不同应力状态的混凝土冻融疲劳试验方案如表 1 所示, 试验分 4 个阶段进行: ① 第 1 阶段: 对混凝土在不同荷载水平下分别加载 2 h, 然后按照表 1 设置的冻融循环次数, 在环境箱中进行冻融, 试验环境均按 4 h 进行温度循环, 结束时进行弯拉强度破坏试验; ② 第 2 阶段: 在第 1 阶段试验的基础上, 进行累计加载 4 h, 然后放回到环境箱中进行第 2 次冻融, 时间结束时进行弯拉强度破坏试验和细观表征试验; ③ 第 3 阶段: 在第 2 阶段累加的基础上, 按照试验程序进行试验; ④

收稿日期: 2021-05-13(修改稿)

基金项目: 广西自然科学基金资助项目(编号: 2018GXNSFAA281339)

作者简介: 侯海元, 男, 硕士, 高级工程师。

第4阶段:在第3阶段基础上进行试验,待时间结束时未破坏样品将在疲劳试验机上进行加载直至疲劳断裂,对断裂破坏样品进行弯拉强度破坏试验、抗冻弹性模量指标测试和细观表征试验。

表1 不同应力状态下的混凝土冻融试验方案

试验方案	荷载时间/ h	不同抗弯强度水平下 冻融循环次数/次	
		50%	80%
第1阶段	2	75	50
第2阶段	4	150	100
第3阶段	6	225	150
第4阶段	8	300	200

1.3 细观结构分析方法

水泥混凝土是一类复杂的多相介质材料,内部含有大量不同尺度、不同形状的孔隙、裂隙和界面过渡区,单纯采用一种表征方法难以表征全面,因此,根据具体需求应采用不同方法进行分析表征。

(1) 压汞法表征孔结构:采用 AutoPore IV 9510 型水银压汞仪,基于二次压汞法进行孔比表面积、平均孔径、面积中间孔径、最可几孔径等结构参数表征。

(2) 光学显微法表征孔结构:依据 JTG F30—2014《公路水泥混凝土路面施工技术规范》,用奥特 SZ—DM200 型数码体视显微镜通过直线导线法对气孔结构参数的气孔弦长、气孔数量进行测试后通过公式计算得孔间距系数。

(3) 混凝土孔结构模型计算分形维数:采用 Menger 海绵体模型研究孔结构分形特征。Menger 海绵体孔构造模型分形维数 D 定义见式(1),计算过程如下:用式(2)计算经 k 次迭代后剩余立方体体积;将 $m^3 - n$ 以及 m 用 D 和 R/r 替换得剩余固体体积与孔径的关系式(3),对式(3)两边同时取对数得式(4),其斜率即为孔体积分形维数 D :

$$D = \log(m^3 - n) / \log m \quad (1)$$

$$V = (R/m^k)^3 \times (m^3 - n)^k \quad (2)$$

$$V = R^3 m^{(D-3)k} = R^3 (R/r)^{(D-3)k} = R^D r^{3-D} \quad (3)$$

$$\log V = D \log R + (3-D) \log r \quad (4)$$

(4) 裂缝表征:用日本 Hitachi S—4800 场发射扫描电子显微镜进行裂缝采集,并通过数字图像处理技术对混凝土 SEM 图像进行增强和分割,然后用 Image—Pro Plus 软件进行图像裂缝特征参数提取。

(5) 裂缝分形研究:混凝土内部的裂缝分布及扩展过程是随机杂乱无章的,除裂缝宽度、长度、密度等参数指标外,有必要选择分形维数从整体上描述这种

分布特点,Mandelbrot、Lange、谢和平、王铁成等关于裂缝的研究结果表明,混凝土内部裂缝的萌生、扩展过程具有自相似性,其分布具有明显分形特征。

研究采用计盒维数法给定盒子尺码(像素标度)用正方形格子去覆盖含裂缝的图像,通过不断改变尺码的大小形成一个递减序列,并记录每个尺码下所需的盒子数目 N ,得到盒子数目和尺码一一对应的数据序列,通过对盒子数目和尺码同时取对数,即可计算得到分形维数,该方法具有概念清晰、计算简单的特点,是一种较优异的计算图像分形维数的方法。

具体步骤如下:在混凝土数字图像构成的平面上以 δ 为尺度,通过编制特定程序采用 Matlab 软件自动实施正方形网格划分和计数, δ 取值为 $\delta = 2^i$,其中 $i = 1, 2, \dots, n$,改变 δ 的大小记录 C 与正方形网格相交的数目 N ,对 N 和 δ 同时取对数作图,并利用最小二乘法进行拟合回归,得到曲线斜率的负值即为微裂缝的盒维数。

根据计盒维数法分析不同尺码下覆盖混凝土微裂缝盒子数目,并对盒子尺码 δ 和与裂缝相交盒子数目 N 取双对数作图 1,得到的斜率绝对值即为分形维数,通过试验数据验证,基于计盒维数法混凝土细观裂缝数量与量度尺码之间具有非常强的线性对应关系。

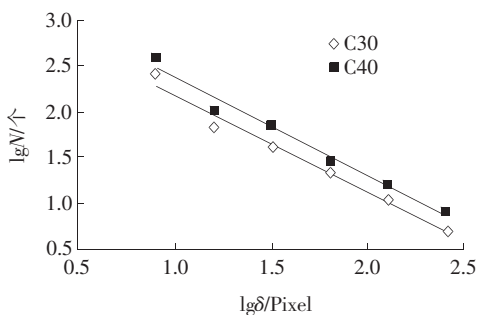


图1 盒子尺码对数与裂缝盒子数目对数的关系

(6) 界面区结构表征:采用光学显微硬度仪进行界面区显微硬度测试,通过显微硬度的变化突变点进行界面区宽度的判别。而界面区的裂缝特征和密实度特征采用 Image—Pro Plus 图像处理软件进行量化。

1.4 灰度分析方法

混凝土的细观结构特征参数有多个,这些参数对混凝土的性能影响重要性和程度上是有区别的,为确定关键参数,借助灰色系统理论的关联分析方法,处理步骤如下:① 确定相对动弹模量为参考数列,孔结构参数、裂纹参数和界面区结构参数为比较序列;② 对参考数列以及比较数列进行无量纲化处理;③ 计算求差序列和两极差,并计算参考数列与比较数列的灰色

关联系数,在此基础上求出关联度;④ 根据关联度的大小次序进行关联度排序,从而反映各因素对研究问题影响的主次程度。

2 结果和讨论

通过细观结构定量化表征,并结合灰色关联分析方法,以抗冻等级为参考数列,以孔结构参数、裂纹参数和界面区结构参数为比较序列,进行灰色相关度判别。研究混凝土的抗冻性能劣化选择了两个荷载条件,50%抗弯强度应力水平作为正常交通荷载水平,

80%抗弯强度应力水平作为超载交通荷载水平,同时进行冻融循环的作用。

2.1 细观尺度孔结构特征参数与抗冻指标

冻融环境下道路混凝土孔结构参数与抗冻性关联度如表 2 所示。由表 2 可得:关联性由大到小的顺序依次为:正常荷载下(50%应力水平):无害孔>空隙率>总孔表面积>少害孔>最可几孔径>孔分形维数>多害孔>孔间距系数>有害孔>面积中间孔径、平均孔径;超载下(80%应力水平):总孔表面积>无害孔>空隙率>少害孔>最可几孔径>孔分形维数>多害孔>有害孔、平均孔径>面积中间孔径>孔间距系数。

表 2 冻融环境下孔结构参数与抗冻性的灰相关度

荷载条件	混凝土 标号	空隙率 $P_g/\%$	总孔表面 积 $S_g/$ ($m^2 \cdot g^{-1}$)	面积中 间孔 径/nm	平均 孔径/ nm	最可几 孔径 R_p/nm	孔分形 维数	多害 孔/ nm	有害 孔/ nm	少害孔 $P_{lh}/$ nm	无害 孔/ nm	孔间距 系数 L_p
50%应 力水平	C30	0.905	0.838	0.533	0.585	0.782	0.733	0.692	0.600	0.835	0.931	0.655
	C40	0.930	0.885	0.587	0.569	0.787	0.785	0.710	0.699	0.807	0.957	0.704
80%应 力水平	C30	0.842	0.896	0.579	0.561	0.749	0.731	0.721	0.644	0.762	0.873	0.695
	C40	0.819	0.943	0.624	0.563	0.737	0.737	0.690	0.700	0.739	0.900	0.691

对于混凝土损伤特征与抗冻等级的关联性研究中,选择相关程度较大的结构参数建立孔结构参数与抗冻性关系,此外考虑孔间距系数的重要程度,两个荷载水平时均选择空隙率、总孔表面积、少害孔、最可几孔径以及孔间距系数 5 个参数。通过多元回归分析得到式(5)~(8),两个应力水平下抗冻性与孔结构参数之间用多元线性方程描述较准确,其相关系数为 0.999,其中最可几孔径、总孔表面积和空隙率与相对动弹模量呈正相关,而少害孔和孔间距系数与其呈负相关。

50%应力水平下多元线性回归:

$$\frac{E}{E_0} = -0.336 + 0.291 \times \frac{R_p}{R_{p_0}} + 0.336 \times \frac{S_g}{S_{g_0}} - 0.048 \times \frac{P_{lh}}{P_{lh_0}} + 0.296 \times \frac{P_g}{P_{g_0}} - 0.365 \frac{L_p}{L_{p_0}}, R=0.999 \quad (5)$$

50%应力水平下多元非线性回归:

$$\frac{E}{E_0} = 0.998 \times \left(\frac{R_p}{R_{p_0}}\right)^{0.146} \times \left(\frac{S_g}{S_{g_0}}\right)^{0.267} \times \left(\frac{P_{lh}}{P_{lh_0}}\right)^{-0.233} \times \left(\frac{P_g}{P_{g_0}}\right)^{0.329} \times \left(\frac{L_p}{L_{p_0}}\right)^{-0.891}, R=0.985 \quad (6)$$

80%应力水平下多元线性回归:

$$\frac{E}{E_0} = -0.184 + 1.170 \times \frac{R_p}{R_{p_0}} + 0.132 \times \frac{S_g}{S_{g_0}} -$$

$$0.203 \times \frac{P_{lh}}{P_{lh_0}} + 0.521 \times \frac{P_g}{P_{g_0}} - 0.461 \frac{L_p}{L_{p_0}}, R=0.999 \quad (7)$$

80%应力水平下多元非线性回归:

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{R_p}{R_{p_0}}\right)^{4.612} \times \left(\frac{S_g}{S_{g_0}}\right)^{0.058} \times \left(\frac{P_{lh}}{P_{lh_0}}\right)^{-1.633} \times \left(\frac{P_g}{P_{g_0}}\right)^{2.134} \times \left(\frac{L_p}{L_{p_0}}\right)^{-1.685}, R=0.998 \quad (8)$$

式中: P_{g_0} 、 S_{g_0} 、 R_{p_0} 、 P_{lh_0} 、 L_{p_0} 分别为初始状态的空隙率、总孔表面积、最可几孔径、少害孔、孔间距系数。

2.2 细观尺度裂缝特征参数与抗冻指标

根据灰度相关分析计算得出的冻融环境下混凝土裂缝结构的特征参数与抗冻性(用相对动弹弹性模量 E 表示, E_0 为初始状态的相对动弹弹性模量)的灰度相关度如表 3 所示。

表 3 冻融环境下裂缝结构参数与抗冻性的灰相关度

荷载条件	混凝土 标号	裂缝密 度/ $\%$	裂缝长度 $L_c/\mu m$	裂缝宽度 $W_c/\mu m$	裂缝分形 维数 F_c
50%荷 载水平	C30	0.562	0.832	0.946	0.929
	C40	0.563	0.812	0.929	0.913
80%荷 载水平	C30	0.623	0.774	0.853	0.819
	C40	0.623	0.805	0.864	0.839

由表3可得:不同应力水平下混凝土裂缝结构参数与抗冻性能相关程度由大到小顺序一致,灰度相关度由大到小顺序依次是:裂纹宽度>裂缝分形维数>裂纹长度>裂纹密度。

通过多元回归分析建立裂缝参数与抗冻性的关系结果如式(9)~(12)所示,50%应力水平时采用多元非线性方程具有较高准确度,其中分形维数和裂纹长度与相对动弹模量之间呈负相关,而裂纹宽度与其呈正相关;而80%应力水平时采用多元线性方程具有较高准确度,其中分形维数与相对动弹模量呈负相关,而裂纹宽度和裂纹长度与其呈正相关。

50%荷载水平下多元线性回归:

$$\frac{E}{E_0} = 8.723 - 0.110 \times \frac{L_c}{L_{c_0}} + 0.424 \times \frac{W_c}{W_{c_0}} - 8.050 \times \frac{F_c}{F_{c_0}}, R = 0.868 \quad (9)$$

50%荷载水平下多元非线性回归:

$$\frac{E}{E_0} = 0.991 \times \left(\frac{L_c}{L_{c_0}}\right)^{-0.218} \times \left(\frac{W_c}{W_{c_0}}\right)^{0.239} \times \left(\frac{F_c}{F_{c_0}}\right)^{-10.318}, R = 0.979 \quad (10)$$

80%荷载水平下多元线性回归:

$$\frac{E}{E_0} = 0.831 \times \frac{L_c}{L_{c_0}} + 3.366 \times \frac{W_c}{W_{c_0}} - 2.509 \times \frac{F_c}{F_{c_0}} - 0.694, R = 0.999 \quad (11)$$

80%荷载水平下多元非线性回归:

$$\frac{E}{E_0} = 0.962 \times \left(\frac{L_c}{L_{c_0}}\right)^{0.109} \times \left(\frac{W_c}{W_{c_0}}\right)^{0.497} \times \left(\frac{F_c}{F_{c_0}}\right)^{-20.072}, R = 0.955 \quad (12)$$

式中: L_{c_0} 、 W_{c_0} 、 F_{c_0} 分别为初始状态的裂纹长度、裂纹宽度和裂纹分形维数; L_c 、 W_c 、 F_c 分别为经历荷载损伤后的裂纹长度、裂纹宽度和裂纹分形维数。

2.3 界面过渡区结构参数与抗冻指标

根据多元回归分析建立了界面区参数与抗冻性之间的关系方程,其结果见式(13)~(16),两个应力水平下,界面区参数与抗冻性关系均具有较高的准确度;其中密实度和裂纹长度与相对动弹模量之间呈正相关,而裂纹宽度与其呈负相关。

50%荷载水平下多元线性回归:

$$\frac{E}{E_0} = 0.350 + 0.511 \times \frac{C}{C_0} + 0.072 \times \frac{L_c}{L_{c_0}} - 0.068 \times \frac{W_c}{W_{c_0}}, R = 0.997 \quad (13)$$

50%荷载水平下多元非线性回归:

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{C}{C_0}\right)^{0.455} \times \left(\frac{L_c}{L_{c_0}}\right)^{0.059} \times \left(\frac{W_c}{W_{c_0}}\right)^{-0.057}, R = 0.995 \quad (14)$$

80%荷载水平下多元线性回归:

$$\frac{E}{E_0} = 0.090 + 0.694 \times \frac{C}{C_0} + 0.154 \times \frac{L_c}{L_{c_0}} - 0.066 \times \frac{W_c}{W_{c_0}}, R = 0.994 \quad (15)$$

80%荷载水平下多元非线性回归:

$$\frac{E}{E_0} = 0.977 \times \left(\frac{C}{C_0}\right)^{0.288} \times \left(\frac{L_c}{L_{c_0}}\right)^{0.206} \times \left(\frac{W_c}{W_{c_0}}\right)^{-0.094}, R = 0.949 \quad (16)$$

式中: C_0 为初始状态密实度; C 为经历荷载损伤的密实度。

3 结论

(1) 影响混凝土抗冻性的重要参数有无害孔、空隙率、总孔表面积、少害孔、最可几孔径以及孔间距系数5个参数,抗冻性与孔结构参数之间用多元线性模型可以较准确地描述其相关性。最可几孔径、总孔表面积和空隙率与相对动弹模量是正相关,而少害孔和孔间距系数与其是负相关。

(2) 裂缝参数对混凝土抗冻性的影响程度依次为裂纹宽度、裂缝分形维数、裂纹长度和裂纹密度,裂缝参数和抗冻性能之间的关系在正常荷载时符合多元非线性理论模型、超载时符合多元线性理论模型。分形维数与相对动弹模量是负相关,裂纹宽度和裂纹长度与相对动弹模量是正相关。

(3) 界面区参数与抗冻性关系采用多元线性模型可以准确描述,密实度和裂纹长度与相对动弹模量之间是正相关关系,裂纹宽度与相对动弹模量之间是负相关关系。

参考文献:

- [1] Powers T. C. A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistant Concrete[J]. ACI, 1945, 41: 245-272.
- [2] Zbigniew Giergiczny, Michal A. Glinicki, Marcin Sokolowski, et al. Air Void System and Frost-Salt Scaling of Concrete Containing Slag-Blended Cement[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23: 2 451-2 456.