

混凝土配合比优化及抗冻性能研究

黎俊杰¹, 张 晨², 仲小玲², 董世博²

- 新疆路桥桥梁工程建设有限责任公司, 乌鲁木齐 830021;
- 新疆农业大学 交通与物流工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为优化 C40 箱涵混凝土, 进行单因素试验, 研究水胶比、外掺剂含量、粉煤灰含量对混凝土试件抗压、抗折强度的影响程度, 基于 Box - Benhnken 响应曲面法建立响应曲面模型, 获得最优配合比, 并验证其在实际工程中的效用。结果表明: 水胶比、外掺剂含量、粉煤灰含量对混凝土性能影响较大, 基于模型得到最佳配合比为水胶比 0.38、粉煤灰掺量 24%、减水剂含量 1.46%, 实际试验选用水胶比 0.37、粉煤灰掺量 25%、减水剂含量 1.5%, 实际试验得到混凝土抗压、抗折强度与模型预测结果误差较小。基于混凝土配合比优化, 混凝土性能提升效果明显。采用 Weibull 模型对混凝土试件的冻融循环试验结果进行分析, 并预测其冻融寿命, 为高原大风地区实际工程中 C40 混凝土的应用提供参考意义。

关键词: C40 混凝土配合比; 响应曲面法; 冻融循环; Weibull 模型

中图分类号: U444 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 02-0001-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.001

Research on the Optimization of Concrete Mix Ratio and Frost Resistance of Prefabricated Box Culvert

LI Junjie¹, ZHANG Chen², ZHONG Xiaoling², DONG Shibo²

- Xinjiang Road and Bridge Engineering Construction Co., Ltd., Urumqi 830021, China;
- College of Transportation and Logistics Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to optimize the C40 box culvert concrete, the influence of water - glue ratio, external admixture content and fly ash content on the compressive strength and flexural strength of concrete was studied through single factor test, and then the response surface model was established based on the Box - Benhnken response surface method to obtain the optimal mix ratio and verify its utility in practical engineering. Based on the model, the optimal mix ratio is 0.38, 24% and 1.46% respectively, and the water - cement ratio is 0.37, 25% and 1.5% respectively. Based on the Maximization of concrete mix ratio, the concrete performance improvement effect is obvious. The Weibull model was used to analyze the results of freeze - thaw cycles on concrete samples and to estimate its freeze - thaw life, which is relevant in practical engineering for the use of C40 concrete in plateau and windy areas.

Key words: C40 concrete mix ratio; response surface method; freeze - thaw cycles; Weibull model

项目来源: 中央引导地方科技发展资金 (ZYYD2025QY18)。

作者简介: 黎俊杰 (1985—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 道路桥梁检测。

通信作者: 仲小玲 (1985—), 女, 硕士, 副教授, 高级工程师, 研究方向: 道路工程。

收稿日期: 2025-04-24

材料科学

0 引言

高寒、高海拔地区平均气温低,早晚温差大,影响水泥水化进程,导致混凝土强度发展缓慢,更容易产生内部缺陷^[1];进而对高原环境下混凝土的使用寿命和长期安全性产生不良影响^[2]。因此,高原地区由于风力强劲和温差显著,对混凝土的性能提出了更高的要求,而混凝土配合比是控制混凝土质量和耐久性最关键的环节。

田洪斌等^[3]采用正交试验设计探究了水胶比、粉煤灰掺量等因素对 C60 大体积混凝土力学性能的影响,表明水胶比对抗压强度的影响最为显著;程立年等^[4]研究了低温孔隙水结冰的演变规律,发现温度与水胶比和孔隙率均呈正相关;Zhang 等^[5]发现不同低温情况下,温度与水胶比的相关性具有明显差异;刘琳等^[6]、郝负洪等^[7]采用试验与机器学习相结合的方法,发现了粉煤灰掺量的阈值效应;罗舒睿^[8]、刘军等^[9]通过试验验证,发现粉煤灰掺量小于 25% 时,抗压强度随粉煤灰掺量的增加而增强,介于 50%~75%,二者呈负相关;郭磊等^[10]采用三种不同减水剂类型及掺量,研究抗压强度、劈拉强度的发展规律,表明二者的变化趋势随减水剂掺量的增加先增大后减小;李崇智等^[11]通过正交试验发现,在最佳水胶比下,混凝土可以形成黏状的浆体包裹骨料,从而提升骨料间的黏结强度,提升整体强度;陈立延等^[12]通过试验发现,粉煤灰掺量的增加会提高混凝土的需水量,并有效调整了浆体的和易性;杨鹰等^[13]试验结果表明,通过调整水胶比,达到良好浆体和易性,可减小其孔隙;钟楚珩等^[14]通过 Weibull 分布和响应面法,研究了严寒地区冻融损伤下再生混凝土的耐久性极限,分析了该过程混凝土内部的劣化规律,发现不锈钢纤维能有效延缓其相对动弹性模量的降低;Zhou 等^[15]基于 Weibull 概率分布建立了冻融损伤模型,将冻融损伤划分为 3

个阶段,其劣化过程与典型的破坏模式一致。

通过调整 C40 混凝土水胶比、粉煤灰掺量、减水剂掺量,优化其配合比。运用 Design Expert 13 软件,采用响应面法中的 Box-Behnken 设计,进行混凝土配合比优化,提高混凝土的力学性能,大幅度提升混凝土工程的耐久性,延长其使用寿命并检验其抗冻性能,以期达到提高恶劣环境混凝土抗冻性能。使工程具有重要的经济意义和社会意义。

1 试验材料及原始配比

材料基本性能及规格见表 1~4,原始配合比见表 5。通过单因素试验,验证不同水胶比、粉煤灰掺量、减水剂含量对混凝土力学性能的影响,取混凝土 28 d 平均抗压强度和平均抗折强度为指标。

表 1 水泥的物理力学性能
Table 1 Physical and mechanical properties of cement

对比项	比表面积 /(m ² /kg)	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
		3 d	28 d	3 d	28 d
检测结果	345	5.0	8.2	20.8	50.6
技术要求	>300	>3.5	>6.5	>17.0	>42.5

表 2 粗集料主要指标
Table 2 Main indicators of coarse aggregate

不同粒径	性能指标		
	含泥量/%	压碎值/%	针片状颗粒含量/%
16~26.5	0.4	9.6	3.7
9.5~16	0.8	14.7	6.5
4.75~9.5	1.2	25.1	9.2

表 3 细集料主要指标
Table 3 Main indexes of fine aggregates

对比项	含泥量 /%	表观密度 /(kg/m ⁻³)	空隙率 /%	坚固性 /%
检测结果	1.6	2 650.0	28.9	6.2
技术要求	< 2.0	< 2 500	< 47	< 8

表 4 减水剂试验结果
Table 4 Test results of superplasticizer

对比项	减水率/%	泌水率/%	含气量/%	28 d 抗压强度比
检测结果	31.0	35.0	3.1	239.0
技术要求	>25	<60	<6.0	>140

表 5 C40 混凝土原始配合比用量表
Table 5 C40 concrete original mix ratio scale

水泥 /(kg/m ³)	粉煤灰掺量/%	水 /(kg/m ³)	砂 /(kg/m ³)	5~10 /(kg/m ³)	10~20 /(kg/m ³)	外加剂含量 /%	水胶比
344.0	21.0	175.0	728.0	216.0	863.0	1.0	0.4

通过添加不同水胶比、粉煤灰掺量、减水剂,进行混凝土拌合,确定不同含量下水胶比、粉煤灰掺

量、减水剂含量对混凝土平均抗压强度和平均抗折强度的影响规律。试验结果见表 6~8,如图 1~6 所示。

表 6 不同水胶比对指标的影响程度

Table 6 Effect of different water - glue ratios on indicators

编号	水胶比	粉煤灰掺量/%	减水剂含量/%	平均抗压强度/MPa	平均抗折强度/MPa
1	0.35	21.0	1.0	39.0	5.3
2	0.40	21.0	1.0	42.0	5.7
3	0.45	21.0	1.0	32.0	5.1

表 7 粉煤灰掺量对指标的影响程度

Table 7 Effect of amounts of fly ash on indicators

编号	水胶比	粉煤灰掺量/%	减水剂含量/%	平均抗压强度/MPa	平均抗折强度/MPa
1	0.4	0.0	1.0	36.0	4.6
2	0.4	10.0	1.0	43.0	4.9
3	0.4	15.0	1.0	46.0	5.5
4	0.4	20.0	1.0	47.0	5.7
5	0.4	25.0	1.0	49.0	5.3

表 8 减水剂含量对指标的影响程度

Table 8 Effect of admixture content on indicators

编号	水胶比	粉煤灰掺量/%	减水剂含量/%	平均抗压强度/MPa	平均抗折强度/MPa
1	0.4	20.0	1.0	46.0	5.3
2	0.4	20.0	1.1	47.0	5.4
3	0.4	20.0	1.2	49.0	5.6
4	0.4	20.0	1.3	45.0	5.5

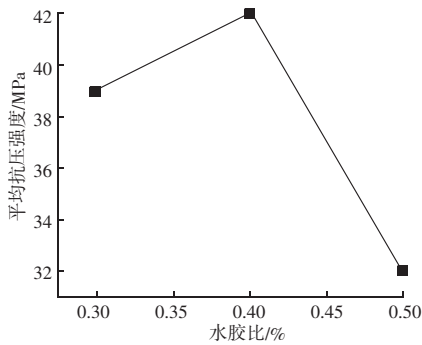


图 1 水胶比对平均抗压强度的影响程度

Fig. 1 Effect of water - glue ratios on the average compressive strength

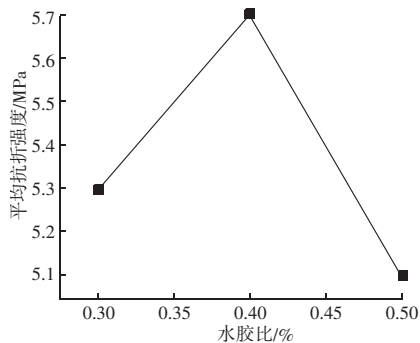


图 2 水胶比对平均抗折强度的影响程度

Fig. 2 Effect of water - glue ratios on the average flexural strength

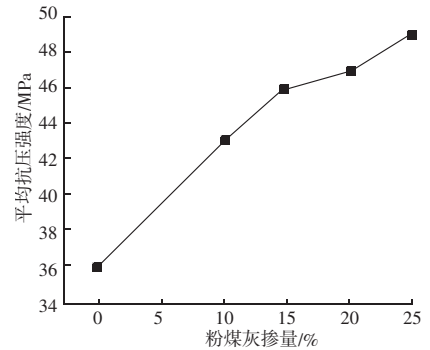


图 3 粉煤灰掺量对平均抗压强度的影响程度

Fig. 3 Effect of fly ash content on average compressive strength

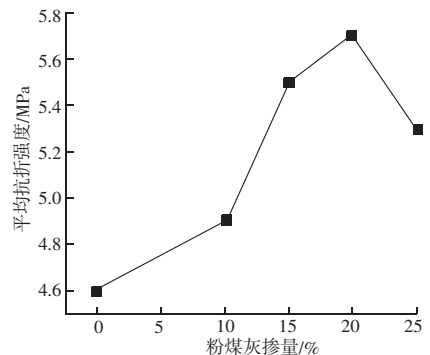


图 4 粉煤灰掺量对平均抗折强度的影响程度

Fig. 4 Effect of fly ash content on average flexural strength

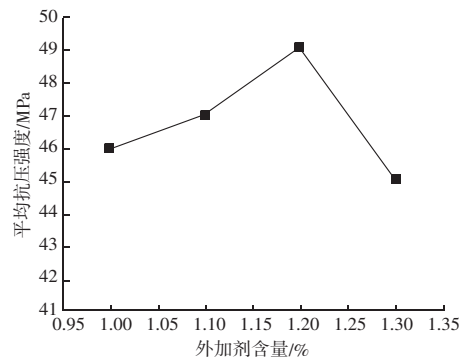


图 5 减水剂含量对平均抗压强度的影响程度

Fig. 5 The effect of admixture contents on the average compressive strength

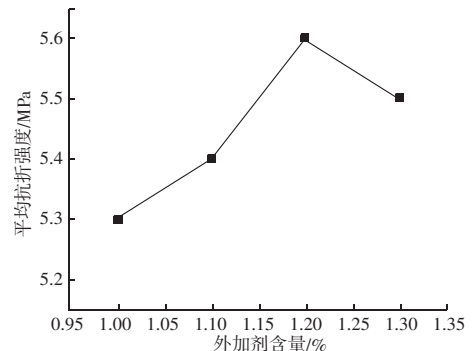


图 6 减水剂含量对平均抗折强度的影响程度

Fig. 6 Effect of admixture contents on honeycomb and hemp surface

材料科学

基于上述试验数据可知,水胶比为 0.35~0.4 时,水胶比越大,混凝土平均抗压、抗折强度随之增大,水胶比大于 0.4 时,随之减小;粉煤灰掺量与混凝土平均抗压强度呈现正相关关系,当粉煤灰掺量为 20% 时,其抗折强度在此时达到最佳;混凝土平均抗压、抗折强度随减水剂含量的变化情况同水胶比类似。

水胶比、粉煤灰掺量、减水剂含量对混凝土强度具有显著影响;确定 C40 混凝土水胶比以 0.4 左右为宜,粉煤灰掺量以 25.0% 左右为宜,外加剂以 1.2% 左右为宜。

2 基于响应曲面法的 C40 配合比优化

2.1 试验设计

水胶比、粉煤灰掺量、减水剂含量对粉煤灰泡沫混凝土性能影响较大。选择水胶比 (W/B)、粉煤灰掺量、减水剂含量为关键影响因素,分别标记为 X_1 、 X_2 、 X_3 。影响因子的水胶比最佳范围为 0.34~0.4,粉煤灰的适宜掺入比例在 20%~30% 之间,而减水剂掺量则在 1.3%~1.7% 之间。利用 Design Expert 13 软件构建了 Box-Behnken 设计模型,共安排 17 组试验,以混凝土试件养护 28 d 抗压强度和抗折强度为响应值,分别标记为 Y_1 、 Y_2 ,各响应值的试验结果见表 9。

2.2 模型拟合

采用响应曲面法对混凝土的抗压强度和抗折强度与三个影响因素之间的关系进行多元回归拟合,

表 9 C40 混凝土配合比优化响应曲面试验设计

Table 9 Experimental design of C40 concrete mix optimization response surface

编号	水胶比	粉煤灰掺量/%	减水剂含量/%	抗压强度 /MPa	抗折强度 /MPa
1	0.37	25.0	1.5	47.0	5.6
2	0.40	30.0	1.5	38.0	4.3
3	0.37	25.0	1.5	51.0	6.1
4	0.40	25.0	1.7	41.0	4.9
5	0.40	25.0	1.3	40.0	4.5
6	0.37	20.0	1.3	42.0	4.9
7	0.34	25.0	1.3	38.0	4.4
8	0.34	30.0	1.5	36.0	4.2
9	0.37	25.0	1.5	49.0	5.8
10	0.34	25.0	1.7	40.0	4.6
11	0.37	25.0	1.5	46.0	5.5
12	0.34	20.0	1.5	33.0	3.8
13	0.37	20.0	1.7	44.0	5.2
14	0.37	30.0	1.7	45.0	5.3
15	0.37	30.0	1.3	43.0	5.1
16	0.37	25.0	1.5	49.0	5.6
17	0.40	20.0	1.5	35.0	4.1

得到抗压强度 Y_1 和抗折强度 Y_2 的回归模型,如式 (1)、(2) 所示,各响应值回归模型方差分析结果见表 10、11。

$$Y_1 = 48.4 + 0.875 \times A + B + 0.875C - 0.25 \times AC - 8.33 \times A^2 - 4.58 \times B^2 - 0.325 \times C^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 5.72 + 0.1 \times A + 0.1125 \times B + 0.1375 \times C - 0.05 \times AB + 0.05 \times AC - 0.025 \times BC - 1.07 \times A^2 - 0.5475 \times B^2 - 0.0475 \times C^2 \quad (2)$$

由表 10 可知,水胶比与粉煤灰掺量的交互作用的模型模拟 P 值 < 0.05 ,水胶比、粉煤灰掺量、减水剂含量的单因素的 P 值 > 0.05 ,说明水胶比与粉煤灰掺量的交互作用对混凝土抗压强度的影响显著,但水胶比、粉煤灰、减水剂的单因素作用对其影响较小。由表 11 可知,单因素及双因素交互作用对抗折强度影响,与其对混凝土抗压强度的影响类似,即:水

表 10 混凝土抗压强度的回归模型方差分析

Table 10 Analysis of variance of the regression model for the compressive strength of concrete

样品编号	平方和	均方	方差	P 值	注释
Model	423.020 0	47.000 0	18.850 0	0.000 4	显著
A - W/B	6.130 0	6.130 0	2.460 0	0.161 0	
B - coal ash	8.000 0	8.000 0	3.210 0	0.116 3	
C - admixture	6.130 0	6.130 0	2.460 0	0.161 0	
AB	0.030 0	0.030 0	0.261 0	0.033 2	
AC	0.250 0	0.250 0	0.100 3	0.760 7	
BC	0.005 0	0.005 0	0.062 90	0.845 3	
A2	291.810 0	291.810 0	117.060 0	$< 0.000 1$	
B2	88.130 0	88.130 0	35.350 0	0.000 6	
C2	0.444 7	0.444 7	0.178 4	0.685 4	
残差	17.450 0	2.490 0			
失拟值	2.250 0	0.750 0	0.197 4	0.893 2	不显著
总变异	440.470 0				

表 11 混凝土抗折强度的回归模型方差分析

Table 11 Analysis of variance of the regression model for the flexural strength of concrete

样品编号	平方和	均方	方差	P 值	注释
Model	6.820 0	0.757 6	22.050 0	0.000 2	显著
A - W/B	0.080 0	0.080 0	2.330 0	0.170 9	
B - coal ash	0.101 3	0.101 3	2.950 0	0.129 7	
C - admixture	0.151 3	0.151 3	4.400 0	0.074 1	
AB	0.010 0	0.010 0	0.291 1	0.046 3	
AC	0.010 0	0.010 0	0.291 1	0.606 3	
BC	0.002 5	0.002 5	0.072 8	0.795 1	
A2	4.840 0	4.840 0	140.970 0	$< 0.000 1$	
B2	1.260 0	1.260 0	36.740 0	0.000 5	
C2	0.009 5	0.009 5	0.276 5	0.615 2	
残差	0.240 5	0.034 4			
失拟值	0.012 5	0.004 2	0.073 1	0.971 3	不显著
总变异	7.060 0				

胶比与粉煤灰掺量的交互作用对混凝土抗折强度的影响最为突出，而单因素对抗折强度的影响相对较弱。

试验选用拟合优度检验 (R^2 检验) 对模型进行显著性评估，观其 P 值，判定各因子在响应曲面模型中的显著性，若 $P < 0.05$ 则显著，反之则不显著。对表 8、9 的方差分析进行整理汇总可知，模型中 P 值均小于 0.05，因此响应值 Y_1 、 Y_2 的回归模型具有良好的显著性和可依赖性，实测的抗压强度和抗折强度数据与模型预测结果呈现较高的契合度，表明

模型适用于对各响应指标进行有效的分析和预测。

2.3 优化结果分析

根据回归模型绘制抗压强度和抗折强度的三维响应曲面图和等高线图，该图像中直观体现两因素交互作用对混凝土力学性能的影响。由图 7、8 可知，当响应面等高线形状为椭圆形时，表明两因素交互作用对响应值影响显著；等高线与坐标轴交点越密集，表明该因素对响应值影响越大。

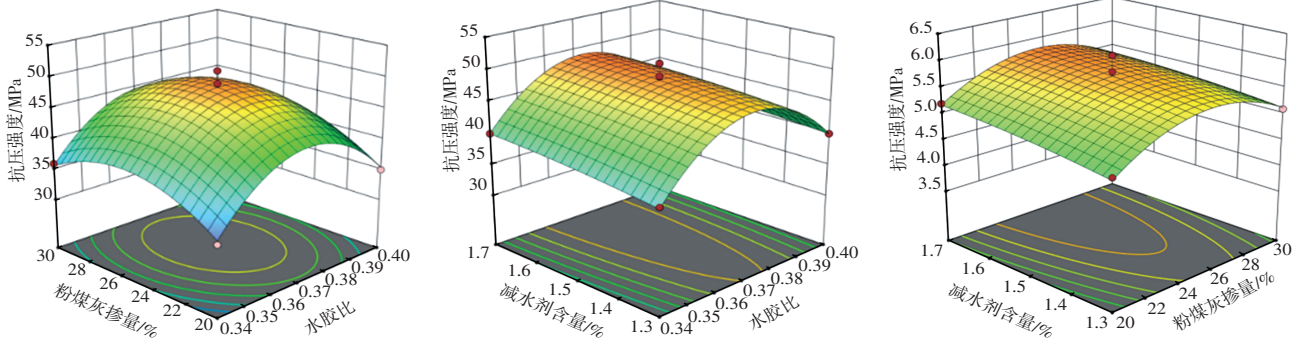


图 7 两个因素交互作用对抗压强度的影响

Fig. 7 The impact of the combined influence of the two factors on the compressive strength

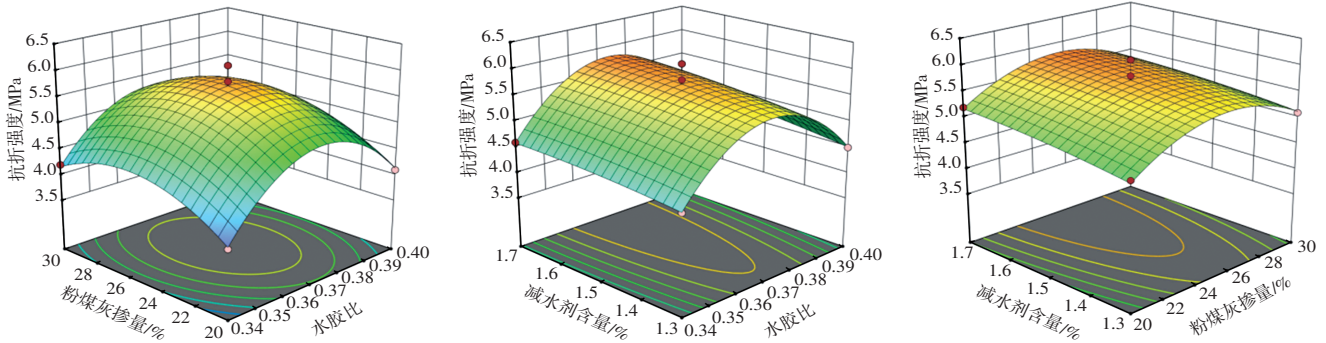


图 8 两个因素交互作用对抗折强度的影响

Fig. 8 The impact of the combined influence of the two factors on flexural strength

依据表 10、11，结合图 7 可知，粉煤灰掺量与水胶比交互作用对 C40 混凝土抗压强度影响显著，各因素及交互项对 C40 混凝土抗压强度影响约占 4%、减水剂含量约占 1.46%。考虑到响应曲面模型的有效性，横向对比模型的预测值和试验值，结果见表 12，可以看出混凝土抗压强度、抗折强度的试验与预测结果之

间的偏差均不超过 5%，表明模型预测精度较高。

3 抗冻性能研究

3.1 冻融循环损伤分析

C40 混凝土优化配合比见表 13。采用该配合比制备标准试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm。待试件成型，养护 28 d 后开始冻融试验。采用快速冻融法，冻融循环条件依据那巴项目气候环境设置，单个冻融循环历时 4 h，其中 -20 ℃ 下冻结 2.5 h，10 ℃ 下融化 1.5 h，冻融转换过程的时间间隔不超过 10 min。检测其冻融循环质量损失率、相对动弹性模量及抗压强度损失。结果如图 9~11 所示。

表 12 最优配合比设计的试验值与预测值对比

Table 12 Comparison of the experimental and predicted values of the optimal mix design

类型	水胶比	粉煤灰掺量/%	减水剂含量/%	抗压强度 /MPa	抗折强度 /MPa
预测	0.38	24.00	1.46	48.00	5.60
试验	0.37	25.00	1.50	50.00	5.70
误差	0.26	4.10	2.70	4.10	1.76

表 13 C40 混凝土优化配合比用量表
Table 13 C40 concrete optimized mix ratio scale

水泥 /(kg/m ³)	粉煤灰 掺量/%	水 /(kg/m ³)	砂 /(kg/m ³)	5~10 /(kg/m ³)	10~20 /(kg/m ³)	外加剂含量 /%	水胶比
344.0	25.0	170.0	728.0	216.0	863.0	1.45	0.37

混凝土在冻融循环过程中,随着冻融次数的增加,表面会出现剥落和冻胀导致的不同程度的开裂。由图 9 可知,在冻融达到 300 次时,质量损失率为 4.1%,损失较小。由图 10 可知,试件经 50 次冻融循环后,相对动弹性模量的变化幅度不大,当冻融循环次数达到 150 次,相对动弹性模量下降趋势明显加剧。由图 11 可知,冻融循环会导致混凝土强度降

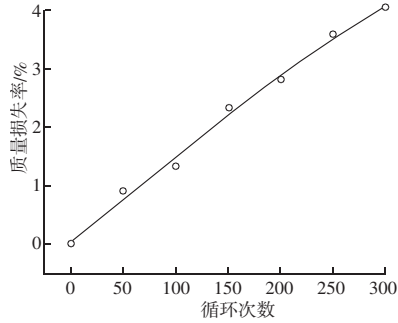


图 9 快速冻融试验检测结果 - 质量损失率

Fig. 9 Results of rapid freeze - thaw test - quality loss rate

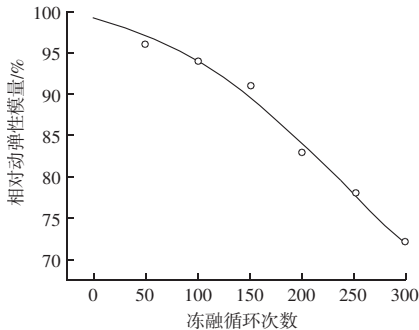


图 10 快速冻融试验检测结果 - 相对动弹性模量

Fig. 10 Results of rapid freeze - relative dynamic modulus of elasticity

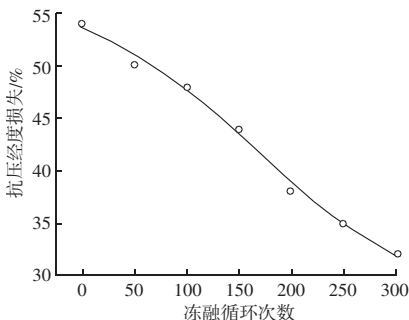


图 11 快速冻融试验检测结果 - 抗压强度损失

Fig. 11 Results of rapid freeze - loss of compressive strength

低,当冻融循环在 50~200 次之间时,抗压强度损失较少;当冻融循环次数达到 200 次时,抗压强度损失趋势较为明显。

3.2 Weibull 预测混凝土寿命模型的建立

以冻融循环 300 次的相对动弹性模量为基础信息进行分析,使用式 (3) 将相对动弹性模量的变化转变为损伤度,并对其进行 Weibull 分布函数的假设检验。

$$D_t = \frac{1 - E_t}{0.4} \quad (3)$$

式中: D_t 为损伤度,取值范围为 $[0, 1]$ 。

由图 12 可知,冻融损伤度 D_t 的实测数据均分布在 95% 置信区间范围内,因此该指标能够准确表征

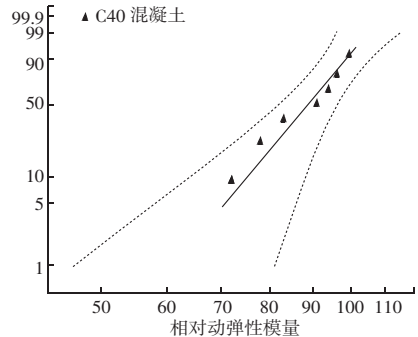


图 12 Weibull 分布 - 冻融损伤度概率图

Fig. 12 Weibull distribution - freeze - thaw damage probability plot

混凝土材料的耐久性退化规律。可用于进一步分析损伤数据服从两参数 Weibull 分布的统计特征,累积分布函数的表述如式 (4) 所示。基于该分布模型建立的可靠性函数,可为混凝土结构服役寿命预测提供理论依据。

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^m \right] \quad (4)$$

式中: m 为形状参数; η 为尺度参数,分别表征损伤发展速率和特征寿命值。

采用最小二乘法估计 Weibull 分布的形状参数和尺度参数,得到 $m = 115.52$, $\eta = 1.611$ ($R^2 = 95.7\%$)。将形状参数 m 与尺度参数 η 代入式 (4)

中可得寿命预测函数如式 (5) 所示。

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{1.611}\right)^{115.52}\right] \quad (5)$$

根据混凝土耐久性标准, C40 混凝土的动弹性模量减少至初始值的 60% 以下时, 则认为其抗冻性能不达标。由图 13 可知, 混凝土冻融循环损伤极限约为 350 次, 即 18.2 个月。在那巴项目中该 C40 混凝土在 7.5 年内失效风险为 63.2%。此数据表明, 该混凝土在长期使用过程失效风险较高, 在气候因素的影响下, 裂纹扩散、承重性能衰退系列问题发生概率大, 需提前规划加固或维护方案。

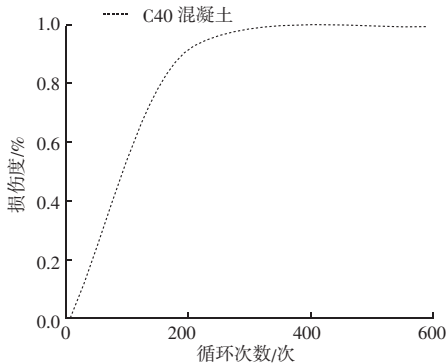


图 13 寿命预测
Fig. 13 Life expectancy

综上所述, 混凝土在低温环境下耐久性能的评估尤为重要。通过检测冻融循环下混凝土质量损失率、相对动弹性模量及抗压强度损失率, 可为低温地区的箱涵混凝土的施工提供科学依据, 从而确保工程质量及结构的安全性和稳定性。

4 结论

通过单因素试验和响应曲面法, 进行 C40 配合比的优化, 基于冻融循环试验, 结合 Weibull 模型预测高原高海拔地区混凝土的使用寿命, 得到如下结论:

(1) 通过响应曲面法构建影响因素与响应指标之间的二次回归方程模型, 模型拟合精度较高, 可作为工程实践中的参考依据。

(2) 响应面分析法确定混凝土水胶比、粉煤灰掺量、减水剂含量, 进行混凝土的抗压强度和抗折强度的试验, 结果表明实测值与预测值相比, 误差较小。

(3) 采用 Weibull 函数模拟冻融循环 300 次的质量损失率、相对动弹性模量、抗压强度损失, 并以相对动弹性模量为基础预测其冻融寿命。冻融循环下, C40 混凝土保守寿命预测值为 350 次循环。在其它环境因素及车辆荷载的影响下, 混凝土失效发生更快, 寿命时限更短。

参 考 文 献

- [1] 周州. 用粉煤灰制备轻质高强混凝土的试验研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- [2] MUGAHED AMRAN Y H, FARZADNIA N, ABANG ALI A A. Properties and applications of foamed concrete: a review [J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 990-1005.
- [3] 田洪斌, 贾殊, 陆斌, 等. 基于正交试验的超高层高强混凝土配合比设计 [J]. 混凝土, 2025, (1): 173-177.
- [4] 程立年, 刘娟红, 周大卫, 等. 混凝土孔隙结构特征对超低温力学性能影响研究 [J/OL]. 材料导报, 2025, (4): 1-13.
- [5] ZHANG D S, DING S, MA Y, et al. Preparation and properties of foam concrete incorporating fly ash [J]. Materials, 2022, 15 (18): 6287.
- [6] 刘琳, 邵鑫, 庞昆, 等. 基于机器学习的碱激发矿渣-粉煤灰混凝土抗压强度与弹性模量影响因素分析 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (4): 1398-1407.
- [7] 郝贞洪, 孙浩, 秦立达, 等. 外掺剂增强混凝土配合比试验 [J]. 功能材料, 2022, 53 (10): 10229-10236.
- [8] 罗舒睿. 粉煤灰掺量对混凝土力学性能的影响研究 [J]. 广东建材, 2025, 41 (9): 37-39, 75.
- [9] 刘军, 齐玮, 刘润清, 等. 粉煤灰对混凝土物理力学性能的影响 [J]. 材料导报, 2015, 29 (16): 111-114.
- [10] 郭磊, 陈平平, 郭利霞, 等. 减水剂掺量对再生透水混凝土性能的影响 [J]. 人民黄河, 2021, 43 (2): 112-115, 121.
- [11] 李崇智, 任强伟, 孙箫然, 等. C40 透水混凝土配合比设计及性能研究 [J]. 材料导报, 2022, 36 (2): 209-213.
- [12] 陈立延, 杨安, 洪芬, 等. 不同粉煤灰掺量对泡沫混凝土性能及其孔径的影响 [J]. 混凝土, 2021 (8): 137-140.
- [13] 杨鹰, 盛兴旺, 马昆林. C50 大体积混凝土温度应力测试及抗裂性能研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15 (4): 887-892.
- [14] 钟楚珩, 范祖伟, 周金枝, 等. 基于响应面法和 Weibull 分布的不锈钢纤维再生混凝土抗冻性能研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2024, 55 (2): 50-61.
- [15] ZHOU D, CHEN D, YANG F, et al. Freeze-thaw damage analysis and life prediction of modified pervious concrete based on weibull distribution [J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20:e03305.