

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.01.009

寒区海洋环境下高性能混凝土桥梁配合比研究

冯 博, 李松涛, 钱永久

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 随着区域经济社会的持续发展, 沿海地区长大跨度桥梁建设日益增多。为了解决目前海洋寒冷环境下高性能混凝土配合比设计存在的不足, 基于全计算法对高性能混凝土配合比设计方法进行了优化。首先理论分析了全计算法在计算高性能混凝土配合比时存在的问题, 并针对全计算法中水胶比公式提出了修正。然后通过设计多组对照试验, 指出了寒冷地区海洋环境下采用标准全计算法配制的高性能混凝土存在的缺点, 并通过配合比试验对改进全计算法的有效性进行了验证。结果表明: (1) 在对照试验下, 运用标准全计算法得出的高性能混凝土配合比能够满足抗冻、抗渗和碳化要求, 但存在砂率和水胶比偏大的问题, 因此针对水胶比公式提出了修正系数 γ ; (2) 在综合考虑混凝土抗压强度、胶凝材料总量和混凝土耐久性试验后, 验证了修正后的全计算法的有效性, 并指出修正系数的建议取值范围为0.85~0.925, 其中修正系数越小, 水胶比越小, 抗碳化能力和抗氯离子侵蚀能力越高; (3) 结合工程实例, 进一步验证了改进的全计算法得到的高性能混凝土配合比满足设计要求, 其强度值、抗渗等级、抗冻性能等参数均满足指标要求。研究成果拓展了全计算法理论在寒区海洋复杂环境中的应用, 为实现我国桥梁建设向迈入深海提供一定的技术支持。

关键词: 桥梁工程; 改进全计算法; 修正系数; 高性能混凝土配合比; 耐久性

中图分类号: U448.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 01-0085-07

Study on Mix Proportion of High Performance Concrete Bridge in Marine Environment at Cold Region

FENG Bo, LI Song-tao, QIAN Yong-jiu

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: With the continuous development of regional economy and society, the construction of long-span bridges in coastal areas is increasing. In order to solve the shortcomings of high performance concrete mix design in the cold marine environment at present, the high performance concrete mix design method is optimized based on the full calculation method. First, the problems of the full calculation method in calculating the high performance concrete mix proportion are theoretically analyzed, and the formula of water-binder ratio in the total calculation method is revised. Then, by designing multiple sets of control test, the shortcomings of the high performance concrete prepared by the standard full calculation method in the marine environment in cold region are pointed out, and the effectiveness of the improved full calculation method is verified through the ratio test. The result shows that (1) the high performance concrete mix proportion derived by applying the standard full calculation method in the control test can meet the requirements of frost resistance, seepage resistance and carbonation, but there are problems of large sand rate and water-binder ratio, so the correction factor γ is proposed for the water-binder ratio formula; (2) after comprehensively considering the compressive strength of concrete, the total amount of cementitious material and the durability

收稿日期: 2022-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51778532)

作者简介: 冯博 (1990-), 男, 四川达州人, 博士研究生. (409160232@qq.com)

test of concrete, the effectiveness of the modified full calculation method is verified, and it is pointed out that the recommended value range of the correction coefficient is 0.85–0.925, where the smaller the correction coefficient, the smaller the water-binder ratio and the higher the resistance to carbonation and chloride ion erosion; (3) combining with engineering examples, it is further verified that the high performance concrete mix proportion obtained by the improved full calculation method meets the design requirements, its strength value, impermeability grade, frost resistance and other parameters all meet the indicator requirements. The research result expands the application of the full calculation method theory in the cold marine complex environment, and provides some technical support for the bridge construction in China to step into the deep sea.

Key words: bridge engineering; improved full calculation method; correction factor; high performance concrete mix proportion; durability

0 引言

当前中国经济迅猛发展, 社会经济发展需要更多的有力支撑, 故海洋强国战略与“蓝色经济”理念应运而生。随着我国基础设施建设向深海迈入, 为实现“陆岛相联”、“岛岛相通”, 我国沿海地区桥梁建设需求迫切、方兴未艾。此外, 我国地域广阔、幅员辽阔, 部分区域处于寒冷气候与复杂海洋环境中, 给桥梁建设及运营带来了巨大的挑战。具体而言, 桥梁构件长期暴露在低温、腐蚀环境下, 不论是对其施工阶段还是运营阶段都是不利的, 结构的安全性能将面临巨大挑战, 为此需要具有更高性能的材料进行建设。高性能混凝土(HPC) 鉴于其卓越的材料性能, 在各类复杂环境工程建设中均被广泛应用。但是, 经受严寒气温与海水侵蚀的双重考验, 采用高性能混凝土材料建设的桥梁仍然面临着冻融破坏、侵蚀碳化、氯离子侵蚀、钢筋锈蚀等诸多严峻挑战^[1-3]。因此开展相应的高性能混凝土合理配合比研究, 具有重要的工程实践意义。

由于HPC的组成成分较普通混凝土更为复杂, 国内外尚未使用统一的方法来实现HPC配合比的设计。文献[4]中讨论了混凝土配合比的设计方法和应用, 但未能总结规律。在此方面, 法国国家路桥实验室首先提出了根据凝胶材料与砂浆模拟试验搜寻最佳配合比的方法^[5-6], 但试验材料得出的配合比与实际的高性能混凝土需求存在一定偏差。采用正交试验法^[7-8]设计HPC的配合比虽然可减少大部分试验工作, 但对于处于寒冷地区海洋环境的桥梁工程来说, 若要计算出合理的配合比, 就需要更完善地考虑各种因素的影响, 如此背景下设计的正交试验必定繁琐且难以计算。相比之下, 神经网络BP算法^[9-11]所需要的试验数据则更为庞大, 准确的分析

模拟必须设计众多试验组并建立符合要求的数据库, 其工作量令人望而止步。近年来, 全算法^[12-13]因其有效的模型与定量的计算方法而重新走进学者们的视野, 该方法可跳过复杂的试验设计过程, 通过计算得出基准配合比, 提高设计效率。因此, 本研究以唐山市曹妃甸区的纳潮河2#大桥为背景, 对全算法进行改进并进行试验分析验证, 进一步加强全算法理论在寒区海洋环境下HPC配合比设计的应用, 为实现我国桥梁建设向深海迈入提供一定的技术支持。

1 基本理论

1.1 全算法计算理论

陈建奎等^[13]通过理论推导及试验提出了一个全新的高性能混凝土配合比全算法。

全算法的空隙理论主要包括以下几点: (1) 混凝土的各组成成分具有加和性; (2) 干砂浆填充石子空隙; (3) 水填充干砂浆的空隙; (4) 干砂浆的4个组成成分分别为砂、水泥、掺合料和空气。根据美国Mehta教授等^[14]的研究表明, 其水泥砂浆体积和集料体积比应为35:65, 才能确保HPC保持在最优的工作状态, 从而可对原材料进行各种定量计算, 其计算步骤如下:

(1) 初始混凝土强度计算:

$$f_{cu,p} = f_{cu,o} + 1.645\sigma, \quad (1)$$

式中, $f_{cu,p}$ 为混凝土配制强度; $f_{cu,o}$ 为混凝土设计强度; σ 为标准差。

(2) 水胶比计算:

$$\frac{m(w)}{m(c+f)} = \frac{1}{\frac{f_{cu,p}}{Af_{ce}} + B}, \quad (2)$$

式中, $m(w)$ 为水的质量; $m(c+f)$ 为水泥和掺合料

的质量总量; A 、 B 为相关系数; f_{ce} 为水泥标号标准值。

(3) 用水量的确定:

$$Q_w = \frac{Q_e - Q_a}{1 + \frac{m(c+f)}{[\rho_c(1-\varphi) + \varphi\rho_f]m(w)}}, \quad (3)$$

式中, Q_e 为浆体体积, $Q_e = Q_w + Q_a + Q_f + Q_c$; Q_a 为空气的体积; Q_f 为掺合料的体积; Q_c 为水泥的体积; Q_w 为水的体积; φ 为质量分数; ρ 为密度; ρ_c , ρ_f 为水泥细粉密度。

(4) 胶凝材料使用量计算:

$$m(c+f) = \frac{m(w)}{m(w)/m(c+f)}, \quad (4)$$

$$m(c) = m(c+f) \times \varphi, \quad (5)$$

$$m(f) = m(c+f) \times (1-\varphi), \quad (6)$$

式中, $m(c)$, $m(f)$ 分别为水泥、掺合料的质量。

(5) 砂石及集料:

$$S_p = \frac{(Q_{es} - Q_e + Q_w) \times \rho_s}{(Q_{es} - Q_e + Q_w) \times \rho_s + (1000 - Q_{es} - Q_w) \times \rho_g}, \quad (7)$$

式中, S_p 为砂率; Q_{es} 为干砂浆体积; ρ_s , ρ_g 为砂子和石子的视密度。

最后基于上述各材料用量进行配合比适配及调整。

1.2 改进全计算法理论

原始全计算法的水胶比计算公式如式(2)与式(3)所示,从中不难看出,水胶比的控制因素主要是用水量和胶凝材料用量。如果增加水的用量,或降低胶凝材料用量均会得到偏大的比值。为了满足混凝土抗压强度需求,则需对用水量和胶凝材料用量进行修正。鉴于用水量的改变便于计算和经济,因此选择用水量为切入点,在用水量计算公式中乘以修正系数 γ_1 , 且满足 $\gamma_1 < 1$ 。修正后的用水量计算如式(8)所示:

$$Q_w = \frac{Q_e - Q_a}{1 + \frac{m(c+f)}{[\rho_c(1-\varphi) + \varphi\rho_f]m(w)}} \times \gamma_1, \quad (8)$$

同理,为确保混凝土处于较好的工作状态,在砂率的计算公式上乘以修正系数 γ_2 , 满足 $\gamma_2 < 1$, 则砂率的计算公式如下:

$$S_p = \gamma_2 \times \frac{(Q_{es} - Q_e + Q_w) \times \rho_s}{(Q_{es} - Q_e + Q_w) \times \rho_s + (1000 - Q_{es} - Q_w) \times \rho_g} \times 100\%, \quad (9)$$

式中, Q_s 为砂的体积; Q_{es} 为干砂浆体积, 且 $Q_{es} =$

$Q_c + Q_f + Q_a + Q_s$ 。

然而,上述方法虽然能解决水胶比和砂率的问题,却很难计算出骨料和砂浆体积的最优比例关系,且该比例关系是全算法设计配合比的核心,若简单的按照上述乘以修正系数的方式对全算法进行改进,会导致水泥浆与骨料用量比例不满足最优的理论体积比例。

为降低水胶比,可直接对水胶比的计算公式进行修正,其修正系数为 γ , 详情见式(10):

$$\frac{m(w)}{m(c+f)} = \frac{1}{\frac{f_{cu,p}}{Af_{ce}} + B} \times \gamma. \quad (10)$$

式(3)~式(7)计算公式不变。从式中可看出,用水量和砂率的变化呈相同趋势。因此,直接修正水胶比公式的方法更为科学合理。需要说明的是:该修正系数 γ 为小于1的无量纲参数,主要用于降低水胶比。

2 全算法试验

2.1 试验工况

为验证在寒冷地带海洋环境下全算法对于高性能混凝土配合比设计的适用性,试验以3个主要内容进行设计研究,即HPC的抗冻融能力、抗碳化能力以及抗侵蚀能力。

2.1.1 试验材料

本研究对水泥、集料、掺合料以及外加剂进行选取,见表1。采用标准的全算法,以背景工程所需的C45等级高性能混凝土为例,计算其合理配合比的基本范围,得到每立方米的材料用量为:水泥280.4 kg、砂668.3 kg、碎石1 075.1 kg、粉煤灰64.5 kg、矿渣粉86.1 kg、水171.9 kg。

表1 试验材料

Tab. 1 Test materials

水泥	集料	掺合料	外加剂
	4.75~9.5 mm, 9.5~19 mm, 19~26.5 mm	I级粉煤灰、	YD-A1聚羧酸高
P.042.5	碎石, 细度模数2.8	S95级矿渣粉	性能减水剂
	中砂		

2.1.2 混凝土试块及试验方法

试验用混凝土试块的配合比采用全算法计算出的结果。试验分为碳化试验、冻融试验和氯离子渗透试验,每组试验制作3个试块。按照标准混凝土试块的浇注-拆模-养护完成后,方可进行试验。

(1) 抗冻融性能测试试验

本试验的试验过程按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[15]中的步骤进行,测试指标为动弹性模量或质量损失率。

(2) 抗碳化性能测试试验

本试验的试验过程也参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[15]中的步骤进行,测试指标为碳化深度。

(3) 抗氯离子渗透试验

本试验采用加速扩散法测定氯离子渗透性能,具体试验方法参考文献 [16],测试指标为渗透系数。

2.2 试验结果分析

按计算出的初步配合比配制混凝土,使用强制式 PVM500 搅拌机将各材料拌至均匀,测出混凝土和易性良好,试验结果如表 2 所示。

表 2 C45 试配试验结果
Tab.2 Trial mix test result of C45

水胶比	含砂率/%	坍落度/mm	碳化深度/mm	氯离子扩散系数
0.40	38.33	215.1	8.2	3.871
7 d 强度/ MPa	28 d 强度/ MPa	抗渗等级	抗冻性能	—
35.62	45.73	>P6	F300	—

表 3 C45 试验配合比
Tab.3 Test mix proportion of C45

组号	水胶比	γ	含砂率/%	水泥/kg	砂/kg	碎石/kg	矿渣/kg	粉煤灰/kg	水/kg
K1	0.31	0.775	34.81	315.3	608.2	1 135.2	97.4	72.5	151.6
K2	0.34	0.850	36.03	302.1	627.9	1 114.7	92.5	70.4	159.1
K3	0.37	0.925	37.04	288.7	645.8	1 097.3	88.6	66.9	166.4
K4	0.40	1.000	38.33	280.4	668.3	1 075.1	86.1	64.5	171.9
K5	0.43	1.075	38.88	266.9	677.1	1 064.6	82.3	62.3	178.2

本研究针对寒冷地区海洋环境下高性能混凝土的配合比设计,因此不仅需要考察混凝土的抗压强度,还需要对混凝土的抗冻融、抗碳化及抗侵蚀能力做进一步研究。按照设计标准试验步骤进行试验,混凝土的抗压强度试验结果见表 4。

从表 4 的试验结果可以看出,式(10)的修正方法是有效的。从抗压强度来看,随着修正系数 γ 取值的增大,配制的混凝土试件组在第 7 d 和第 28 d 所测得的抗压强度逐渐减小。其中 K3 和 K4 两组之间的抗压强度在两个时间节点上的减幅均大于其他试验组,第 7 d 的抗压强度减幅为 6.56 MPa,第 28 d 的抗压强度减幅为 5.54 MPa。混凝土抗压强度

砂率会影响混凝土的强度及工作性,尤其是对于高性能混凝土,其砂率一般不超过 40%^[17],而试验结果表明该混凝土的水胶比为 0.4,但砂率已达到 38.32%,试配砂率偏大,且 28 d 抗压强度不满足要求。

对于混凝土的抗冻性,可通过混凝土的质量损失率 5% 和相对动弹性模量 60% 进行评价。按当前的要求进行混凝土快速碳化试验,针对混凝土碳化性能进行评定。对于混凝土的抗氯离子侵蚀性能,参照混凝土抗渗等级的划分规定。通过结果分析,配制混凝土满足抗冻、碳化和抗渗要求。

根据以上全算法配合比试验分析结果,表明在寒冷地区海洋环境下采用全算法配制的高性能混凝土存在以下不足:水胶比偏大;砂率偏大。

3 改进全算法试验及验证

3.1 修正系数 γ 的取值范围

从 1.2 节中改进全算法的基本理论可以看出,合理的修正系数 γ 可在保证最佳用量比的同时有效降低混凝土的水胶比与含砂率。为了探讨 γ 的取值范围,现进行试验,仍以相同的 HPC 作为考察目标,将水胶比依次增减,然后计算出新的配合比,并重新制作符合要求的混凝土试件开展相应试验,各试验组具体用料见表 3。

表 4 C45 抗压试验结果
Tab.4 Compression test result of C45

组号	水胶比	γ	含砂率/ %	7 d 强度/ MPa	强度 差值/ MPa	28 d 强度/ MPa	强度 差值
K1	0.31	0.775	34.81	50.33	4.18	58.91	3.77
K2	0.34	0.850	36.03	46.15	3.97	55.14	3.87
K3	0.37	0.925	37.04	42.18	6.56	51.27	5.54
K4	0.40	1.000	38.33	35.62	2.81	45.73	3.64
K5	0.43	1.075	38.88	32.81	—	42.09	—

变化规律如图 1 所示。

K3 试验组的 28 d 抗压强度为 51.27 MPa,略低

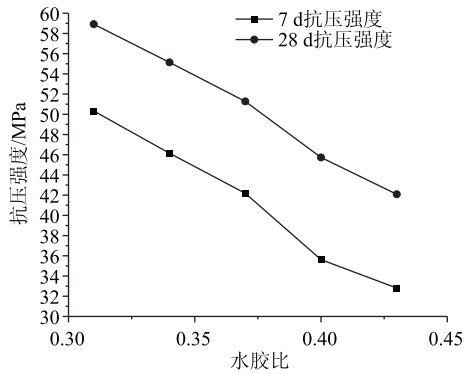


图 1 C45 抗压强度变化规律

Fig. 1 Compressive strength variation rule of C45

于规范要求; K1 与 K2 试验组的 28 d 抗压强度分别为 55.14 MPa 和 58.91 MPa, 均符合强度指标。由此, 得出修正系数 γ 的上限值为:

$$\gamma < \frac{0.37}{0.40} = 0.925. \quad (11)$$

根据目前的研究^[18-19], 强度等级在 C40~C50 之间的 HPC 胶凝材料用量宜低于 450 kg/m³, 而对于具有更高强度等级的高性能混凝土, 其用量应小于 500 kg/m³。而试验组 K2 组混凝土的胶凝材料已达到 465 kg/m³, 由此得出修正系数 γ 的下限值为:

$$\gamma > \frac{0.34}{0.40} = 0.85. \quad (12)$$

表 5 C45 碳化试验结果

Tab. 5 Carbonization test result of C45

组号	γ	水胶比	含砂率/ %	碳化深度/ mm	差值	抗渗等级
K1	0.775	0.31	34.81	4.3	-0.8	>P6
K2	0.850	0.34	36.03	5.1	-1.2	>P6
K3	0.925	0.37	37.04	6.3	-1.9	>P6
K4	1.000	0.40	38.33	8.2	-3.5	>P6
K5	1.075	0.43	38.88	11.7	—	>P6

表 6 C45 氯离子扩散试验结果

Tab. 6 Chloride ion diffusion test result of C45

组号	γ	水胶比	含砂率/ %	氯离子扩散系数/ ($\times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	差值
K1	0.775	0.31	34.81	2.809	-0.283
K2	0.850	0.34	36.03	3.092	-0.409
K3	0.925	0.37	37.04	3.501	-0.370
K4	1.000	0.40	38.33	3.871	-0.358
K5	1.075	0.43	38.88	4.229	—

表 5 进一步给出了标准试验设计下的碳化试验

结果。从表中可以看出, 5 组配合比高性能混凝土的抗渗等级均可满足要求。对于混凝土 28 d 时的碳化深度, 除 K5 组混凝土的碳化深度大于标准要求的 10 mm 外, K1~K4 各组混凝土的碳化深度均符合要求, 且随着 γ 值的增大, 碳化深度也相应增大。从抗碳化的角度出发, 修正系数 γ 的取值范围可为 0.775~1.0。

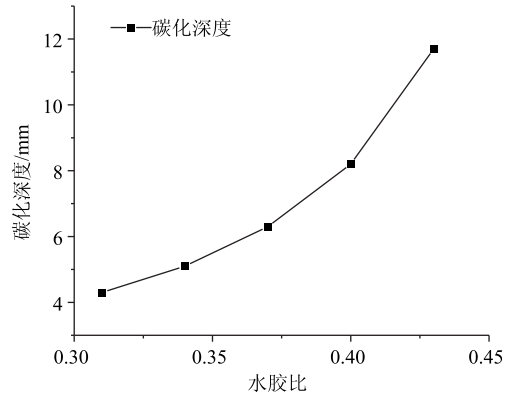


图 2 C45 碳化深度趋势

Fig. 2 Carbonization depth trend of C45

表 6 给出了标准试验设计下的氯离子扩散系数试验结果。从表中可以看出, 前 4 组试件的氯离子扩散系数均较小, 只有 K5 组混凝土的数据超过要求。将各试验组的氯离子扩散系数上下做差, 可发现其差值均为负数, K2 与 K3 组之间系数差的绝对值最大 (0.409)。结果表明: 修正系数 γ 的取值变化会使氯离子扩散系数呈规律变化, 如图 3 所示。从抗氯离子渗透的角度出发, 修正系数 γ 的取值范围也可可为 0.775~1.0。

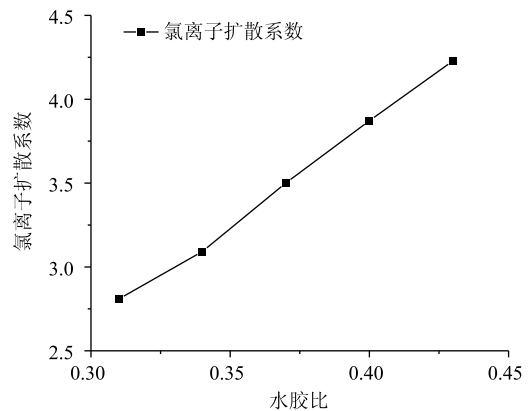


图 3 C45 氯离子扩散系数趋势

Fig. 3 Chloride ion diffusion coefficient trend of C45

表 7 给出了标准试验设计下 C45 质量损失率与冻融循环次数的关系。从表中可以看出, 除了 K5 组

混凝土具有较高的质量损失率（近 5%），其余 4 组均具有一定的抗冻融能力，各组混凝土的质量损失率都有效控制在 5% 以内。从 300 次冻融循环后混凝土的质量损失率来看，水胶比越小的混凝土，其质量损失率也越小。这说明随着修正系数 γ 取值的增大，水胶比增大，混凝土的抗冻性能逐渐减弱。

表 7 C45 质量损失率与冻融循环次数的关系

Tab. 7 Relationship between C45 quality loss rate and freeze-thaw cycles

组号	水胶比	冻融循环次数												
		0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
		质量损失率/%												
K1	0.31	0	0.03	0.06	0.09	0.14	0.20	0.31	0.55	0.77	0.90	0.97	1.13	1.26
K2	0.34	0	0.01	0.05	0.16	0.19	0.27	0.38	0.61	0.82	1.01	1.36	1.52	1.66
K3	0.37	0	0.02	0.11	0.25	0.46	0.65	1.05	1.33	1.49	1.62	1.91	2.25	2.64
K4	0.40	0	0.14	1.51	2.41	2.76	2.84	3.01	3.24	3.43	3.58	3.73	3.91	4.02
K5	0.43	0	0.39	0.94	2.38	3.11	3.53	3.65	3.68	3.74	3.76	3.94	4.48	4.99

综合考虑混凝土抗压强度、胶凝材料总量和混凝土耐久性对修正系数 γ 取值的要求，所有的 γ 取值范围取交集，所以最终 γ 的取值范围应为 $0.85 < \gamma < 0.925$ 。

3.2 实例应用

针对以上研究，本研究利用工程背景纳潮河 2# 大桥预应力箱梁所需的 C50 高性能混凝土进行研究。大桥修建位置为河北省唐山市曹妃甸区，全桥总长 2.5 km，是连接岛屿和陆地的重要通道。由于该区冬季气候寒冷，海面结冰，此地区的结构物会经受各种耐久性能问题。表 8 为计算配合比结果，表 9 为试配试验结果，其计算步骤如下：计算混凝土配合强度→确定水胶比→计算用水量→计算胶凝材料→计算砂率→计算配合比。

表 8 纳潮河 2# 大桥 C50 高性能混凝土试配结果

Tab. 8 Trial mix result of C50 high performance concrete for Nachao River Second Bridge								
等级	含砂率/%	水泥/kg	砂/kg	碎石/kg	矿渣/kg	粉煤灰/kg	水/kg	
计算配合比 C50	41	315	722	1 039	97	73	155	

表 9 试配试验结果

Tab. 9 Trial mix test result								
水胶比	等级	坍落度/mm	7 d 强度/MPa	28 d 强度/MPa	抗渗等级	抗冻性能	碳化深度/mm	氯离子扩散系数/($\times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
0.32	C50	185	45.93	67.73	>P6	F300	7.2	4.62

从表 8 中可以看出高性能混凝土配合比满足设计要求。表 9 中高性能混凝土强度值、抗渗等级、抗冻性能、碳化深度和氯离子扩散系数均满足指标要求。修正后的全算法在计算寒冷地区海洋环境下高性能混凝土配合比设计方面具有较高的适用性。

4 结论

本研究采用全算法设计了 C45 高性能混凝土的配合比并开展了试验研究，发现寒区沿海环境下 HPC 配合比在现有的理论设计中存在需改进的地方，然后结合理论分析，提出了修正的全算法，并通过试验研究给出了修正系数的取值范围，得出的主要结论如下：

(1) 配合比试验分析结果表明，在寒冷地区海洋环境下采用标准全算法配制的高性能混凝土存在以下不足：水胶比偏大；砂率偏大。这些结果会导致混凝土的和易性、强度和耐久性能减弱。

(2) 对于改进的全算法，随着修正系数取值的增大，混凝土的抗碳化能力逐渐减弱，且减弱趋势逐渐加剧；氯离子扩散系数也随修正系数的增加呈线性增大。综合考虑混凝土抗压强度、胶凝材料总量和混凝土耐久性对修正系数 γ 取值的要求，所有的 γ 取值范围取交集，所以最终 γ 的取值范围应为 $0.85 < \gamma < 0.925$ 。

(3) 工程实例试验结果分析表明，采用改进的全算法得到的高性能混凝土配合比满足设计要求，其强度值、抗渗等级、抗冻性能、碳化深度和氯离子扩散系数均满足指标要求。

参考文献：

References:

[1] 李金玉, 曹建国. 水工混凝土耐久性的研究和应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
LI Jin-yu, CAO Jian-guo. Research and Application of Durability in Hydraulic Engineering Concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
[2] LÜ L S, WANG J Y, XIAO R C, et al. Chloride Ion

- Transport Properties in Microcracked Ultra-high Performance Concrete in the Marine Environment [J]. Construction and Building Materials, 2021, 291: 123310.
- [3] NEVILLE A. Consideration of Durability of Concrete Structures: Past, Present, and Future [J]. Materials and Structures, 2001, 34: 114-118.
- [4] 彭波, 尹志全, 李龙刚, 等. 基于早期抗压强度的乳化沥青冷再生混合料配合比设计方法 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (1): 1-9.
- PENG Bo, YIN Zhi-quan, LI Long-gang, et al. Study on Mix Design of Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture Based on Early Compression Strength [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (1): 1-9.
- [5] PERSSON B. Poisson's Ratio of High-performance Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29 (10): 1647-1653.
- [6] WANG D H, SHI C J, WU Z M, et al. A Review on Ultra High Performance Concrete: Part II. Hydration, Microstructure and Properties [J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 368-377.
- [7] 马永炯, 杨安, 洪芬, 等. 基于正交试验的泡沫混凝土配合比设计 [J]. 混凝土, 2021 (7): 147-150.
- MA Yong-jiong, YANG An, HONG Fen, et al. Design of Mix Ratio of Foam Concrete Based on Orthogonal Test [J]. Concrete, 2021 (7): 147-150.
- [8] 张淑云, 周杰, 张政, 等. 基于正交试验的机制砂自密实轻骨料混凝土配合比设计 [J]. 混凝土与水泥制品, 2021 (12): 84-88, 93.
- ZHANG Shu-yun, ZHOU Jie, ZHANG Zheng, et al. Mix Proportion Design of Machine-made Sand Self-compacting Lightweight Aggregate Concrete Based on Orthogonal Test [J]. China Concrete and Cement Products, 2021 (12): 84-88, 93.
- [9] 韩斌, 吉坤, 胡亚飞, 等. ANN-PSO-GA 模型在湿喷混凝土强度预测及配合比优化中的应用 [J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38 (3): 584-591.
- HAN Bin, JI Kun, HU Ya-fei, et al. Application of ANN-PSO-GA Model in UCS Prediction and Mix Proportion Optimization of Wet Shotcrete [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38 (3): 584-591.
- [10] 赵明亮, 水中和, 周华新, 等. 中低强度等级混凝土抗压强度的 BP 神经网络模型预测研究 [J]. 混凝土, 2021 (3): 35-38.
- ZHAO Ming-liang, SHUI Zhong-he, ZHOU Hua-xin, et al. Prediction of Compressive Strength of Medium and Low Strength Grade Concrete by BP Neural Network Model [J]. Concrete, 2021 (3): 35-38.
- [11] 闫康. 人工神经网络技术在现代混凝土配合比设计中的应用 [J]. 中国建材科技, 2008, 17 (6): 21-23.
- YAN Kang. Artificial Neural Network Technology in the Modern Concrete Mix Design [J]. China Building Materials Science & Technology, 2008, 17 (6): 21-23.
- [12] 李松涛. 寒冷地区海洋环境下高性能混凝土合理配合比研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- LI Song-tao. Study on Reasonable Mixture Ratio of High Performance Concrete in Cold Area and Marine Environment [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [13] 陈建奎, 王栋民. 高性能混凝土 (HPC) 配合比设计新法: 全计算法 [J]. 硅酸盐学报, 2000, 28 (2): 194-198.
- CHEN Jian-kui, WANG Dong-min. New Mix Design Method for HPC: Overall Calculation Method [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2000, 28 (2): 194-198.
- [14] MEHTA A, ASHISH D K. Silica Fume and Waste Glass in Cement Concrete Production: A Review [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 29: 100888.
- [15] GB/T 50082—2009, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准 [S].
- GB/T 50082—2009, Standard for Test Methods of Long Term Performance and Durability of Ordinary Concrete [S].
- [16] 曾丽娟. 干拌自密实混凝土耐久性的试验研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- ZENG Li-juan. Experimental Study on Durability of Dry-mixing Self-compacting Concrete [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009.
- [17] 陈庭龙. 刍议混凝土外加剂应用的发展 [J]. 建材与装饰, 2013 (22): 148-149.
- CHEN Ting-long. On Development of Concrete Admixture Application [J]. Construction Materials & Decoration, 2013 (22): 148-149.
- [18] 刘静. 复合型掺合料高性能混凝土配合比优化设计 [D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- LIU Jing. Mix Proportion Optimization Design of Composite Admixture High Performance Concrete [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.
- [19] 何锦云, 王陆陆. C40 特细砂混凝土和易性和抗压强度研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2012, 29 (3): 1-4, 10.
- HE Jin-yun, WANG Lu-lu. Study on the Workability and Compressive Strength of C40 Superfine Sand Concrete [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2012, 29 (3): 1-4, 10.