

混凝土配合比的优化设计

高云莉¹ 何 煦²

(1:吉林建筑工程学院管理系,长春 130021; 2:吉林省送变电工程公司,长春 130021)

摘要:混凝土配合比的传统设计方法需要根据经验进行配合比设计,其设计结果受到设计者的经验和判断力的影响。笔者旨在利用优化理论对混凝土的配合比设计方法进行探讨,建立了以经济效益为目标函数,将强度、稠度和耐久性作为约束条件的混凝土配合比优化设计数学模型,并在此基础上给出了混凝土优化设计的计算方法。

关键词:混凝土配合比;优化设计;数学模型

中图分类号:TU 528

文献标识码:A

混凝土配合比的传统设计方法需根据经验表格确定用水量和砂率,并在其确定后,才能进行配合比设计,其设计结果受设计者经验和判断力的影响。笔者旨在利用优化理论对混凝土配合比设计作一些探讨。

1 混凝土配合比优化设计的数学模型

1.1 目标函数

在评比设计方案的优劣时,必然有一个评比的标准。这就要求最优方案在满足所有的约束条件下,使约定的性能为最佳。这个约定的性能函数就是目标函数或评价函数。

英国学者 A·W·Neville 提出配合比设计定义为:为了配制某些性能,特别是稠度、强度和耐久性均能满足起码要求的最经济的混凝土,而进行选择其组成和确定各组成相对含量的方法。这一认识已经被接受。因此,评定混凝土配合比的好坏,应采用经济效益作为目标函数,将强度、稠度和耐久性作为约束条件,即要求出满足强度、稠度和耐久性要求的最经济的配合比。其目标函数为

$$f(X_1, X_2, X_3, X_4) = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4$$

式中, a_1, a_2, a_3, a_4 分别为水泥、砂子、石子、水的价格; X_1, X_2, X_3, X_4 分别为水泥、砂子、石子、水的用量。

1.2 设计变量和约束条件

设计变量是对目标函数有影响关系的变量,是在优化过程中所要选择的变量,优化的目的就是要寻找这些变量的最优组合。将混凝土的经济效益作为目标函数,很显然,水泥、砂子、石子和水的用量就是设计变量。

约束条件指优化设计中,为满足各方面的要求而对设计方案施加的种种限制。在该问题中,约束条件有3个。

(1) 强度条件。需满足试配强度的要求,即 $P \geq f_{cu,0}$

式中, P 为混凝土的强度(MPa)。

(2) 稠度条件。要求满足施工的要求,即 $T_{\min} \leq T \leq T_{\max}$

式中, T 为混凝土的坍落度(m); $T_{\max}, T_{\min}$ 分别为混凝土的最大坍落度和最小坍落度(m)。

(3) 耐久性条件。要求混凝土满足耐久性的要求。

2 约束条件的建立

2.1 强度约束条件的建立

对于普通混凝土,强度和水灰比基本保持线性关系,这是被普遍公认的。笔者仍然采用鲍罗比公式来建

立混凝土的强度约束条件,并利用试验资料,对鲍罗比公式进行了验证.

鲍罗比公式为 $\frac{w}{c} = \frac{Af_{ce}}{f_{cu,0} + ABf_{ce}}$, 经过变换, 变为 $f_{cu,0} = -ABf_{ce} + Af_{ce} \frac{c}{w}$

混凝土的强度要求不小于混凝土的试配强度, 即 $-ABf_{ce} + Af_{ce} \frac{c}{w} - f_{cu,0} \geq 0$

这就是混凝土配合比优化设计的强度约束条件, A, B, f_{ce} 的值根据实际工程情况确定.

2.2 稠度约束条件的建立

笔者研究的主要是塑性混凝土, 其坍落度用稠度表示. 对于普通混凝土, 影响坍落度的主要因素是用水量、粗骨料的最大粒径和砂率. 坍落度与它们的关系分析研究如下:

利用以往的试验资料, 经过多次试算, 将用水量、粗骨料的最大粒径、砂率、用水量与粗骨料的最大粒径的乘积、砂率与粗骨料的最大粒径的乘积、砂率与用水量的乘积作为影响坍落度的因素, 进行多元线性回归^[1], 得到的回归方程式为

$$T = -556.54 + 2615.93s_p - 10.13r_{\max} + 2.8m_{we} - 6.7r_{\max}s_p - 13.7s_pm_{ce} + 0.073r_{\max}m_{ce}$$

在工程中, 往往要求坍落度在一定的范围内, 即: $T_{\min} \leq T \leq T_{\max}$

所以, 稠度的约束条件为

$$-556.54 + 2615.93s_p - 10.13r_{\max} + 2.8m_{we} - 6.7r_{\max}s_p - 13.7s_pm_{ce} + 0.073r_{\max}m_{ce} - T_{\min} \geq 0$$

$$T_{\max} - (-556.54 + 2615.93s_p - 10.13r_{\max} + 2.8m_{we} - 6.7r_{\max}s_p - 13.7s_pm_{ce} + 0.073r_{\max}m_{ce}) \geq 0$$

式中, $r_{\max}, T_{\max}, T_{\min}$ 由实际工程确定.

2.3 混凝土耐久性约束条件的建立

近年来, 人们对耐久性问题的认识日益提高, 国外各标准中均将混凝土的耐久性列为混凝土的一项重要性能指标. 认为不是对特殊要求的混凝土才要考虑耐久性, 而应对所有混凝土均应予以考虑. 因此, 对所有混凝土在配合比设计时, 都应按该混凝土使用时所处的环境条件, 考虑其满足耐久性要求所必要的水灰比及水泥用量值. 另外, 每立方米混凝土的水泥用量也不宜大于 500 kg.

建立的混凝土耐久性的约束条件为

$$\left(\frac{w}{c}\right)_{\max} - \frac{w}{c} \geq 0; m_{ce} - (m_{ce})_{\min} \geq 0; 500 - m_{ce} \geq 0.$$

式中, $(m_{ce})_{\min}, \left(\frac{w}{c}\right)_{\max}$ 由实际工程的环境条件确定.

3 优化计算方法

由于该问题的约束条件是非线性的, 在数学模型建立以后, 选择罚函数法进行计算. 罚函数法是将一个约束极值问题转变成一系列无约束极值问题, 方法可靠, 一般都能求出最优解. 它的缺点是, 与其他方法相比, 计算量要大一些, 可以利用计算机程序完成这部分计算^[2].

构造罚函数的目的是求 X , 使 $f(X) = \min$, 约束: $g_i(X) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$
 $h_j(X) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, p$

罚函数分为内点罚函数、外点罚函数和混合罚函数 3 类, 该问题采用内点法和外点法相结合的混合罚函数法. 罚函数的具体形式为

$$P(X, r_k) = f(X) + r_k Q(X) + 1/r_k [e(X) + l(X)]$$

其中包括对数障碍项

$$Q(X) = - \sum_{i \in I_1} \ln g_i(X) = \sum_{i \in I_1} \ln 1/g_i(X)$$

与二次损失项

$$l(X) = \sum_{i \in I_2} \{\min[0, g_i(X)]\}^2; \quad e(X) = \sum_{j=1}^p h_j^2(X)$$

式中,下标集合 I_1 和 I_2 定义为

$$I_1 = \{i \mid g_i(X^0) > 0, 1 \leq i \leq m\}; \quad I_2 = \{i \mid g_i(X^0) \leq 0, 1 \leq i \leq m\}$$

这里, X^0 是由使用者给出的原问题的计算初始点,罚系数 r_k 为一系列确定的正值. 序列 r_k 当 $k \rightarrow \infty$ 时,是一个单调递减无穷小序列. 每改变一次 r_k ,就构造一个新的罚函数 $P(X, r_k)$,选取适当的 r_k ,就有

$$\lim_{k \rightarrow \infty} [f(X(r_k))] = f(X^*) \quad \text{及} \quad \lim_{k \rightarrow \infty} [l(X(r_k)) + e(X(r_k))] = 0$$

式中, X^* 为原问题的极小解.

$$\text{罚系数 } r_k \text{ 的初值由下式给定} \quad r_0 = \max \left\{ 10^{-2}, \frac{|V^*|}{100} \right\}$$

式中, V^* 为原问题的目标函数的极小值估计,由使用者预先给出,笔者给定 $V^* = 0$,序列 $\{r_k\}$ 按规律 $r_k = r_{k-1} / \sqrt[3]{10}$ 递减. 该方法求无约束极小采用 DFP(变尺度)法. 其中,要用到问题函数的一阶导数,它由程序自带的差分求导的子程序求其一阶导数的近似值,该程序采用两点中心差分法. 求无约束极小值时,一维搜索使用二次插值法. 该程序根据实际情况,绝对精度和相对精度取为 1×10^{-3} ,最大迭代次数定为 500 次(程序框图略)^[3].

在进行混凝土配合比优化设计时,用户只要根据要求输入原始资料,包括配合比的初值和原材料的价格,程序就会自动计算出最优配合比.

4 结语

混凝土的优化设计方法同传统设计方法比较,数学概念清晰,不需要对设计人员的经验提出较高的要求,无需查表,避免人为的主观因素的影响,能够根据实际情况,给出比较客观、满足各项要求的配合比.

参 考 文 献

- [1] 孙荣恒,黄文莹,伊亨云. 数理统计[M]. 重庆:重庆大学出版社,1995.
- [2] 唐焕文. 实用最优化方法[M]. 大连:大连理工大学出版社,2002.
- [3] 蔡 新,郭兴文,张旭明. 工程结构优化设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.

The Optimizing Method of Concrete Mixture Proportion

GAO Yun-li¹, HE Xu²

(1: Department of Management, Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130021;

2: Jilin Province Power Transmission and Substation Project Company, Changchun 130021)

Abstract: The traditional concrete mixture proportion design method need more experiences. The design result will be affected by the designer's experiences. The article discusses the optimizing method of the concrete mixture proportion, and gives the mathematical model and computing method.

Keywords: concrete mixture proportion; optimizing method; mathematical model