

# 混凝土人工骨料生产的过程优化\*

王民寿

涂兴怀

(四川联合大学,成都,610065)

(四川省水利电力学校,四川都江堰,611830)

**摘要** 混凝土人工骨料系统生产的过程优化具有明显的经济效益和社会效益。本文重点论述了混凝土人工骨料系统生产过程优化的数学模型的建立。介绍了相应的程序设计,并应用四川宝珠寺水电站人工骨料生产数据进行了优化计算和经济分析。

**关键词** 混凝土 人工骨料 生产系统 过程优化

大型水利水电工程混凝土浇筑量很大,对骨料需求量也十分巨大。在有条件的地方可利用天然砂砾骨料。若当地缺乏天然骨料,天然骨料质量不符合要求,或运距太远、运费太高,通常采用人工骨料补充,或全部利用人工骨料。人工骨料生产的突出优点在于不受季节影响,宜于机械化生产,级配易于调控,产品质量稳定。加之,它能就地取材,还可利用开挖料,运距短,管理集中,更有利于降低生产成本。因此,国内外不少水利水电工程采用人工砂石骨料。

有别于在设计阶段研究人工骨料场的优选及其加工系统的优化设计,我们重点研究了人工骨料生产过程的优化,这对保证骨料加工质量,降低生产成本具有更大的现实意义。在此基础上开发的软件,不仅可从众多备选的料场中优选出应开采的料场,而且可以确定出使生产成本最低的各工艺环节应加工的各种级配的骨料及不可利用料的数量。

## 1 人工骨料系统生产过程优化的数学模型

影响骨料生产成本的因素繁多,概括起来大体有两类:一类可用连续变量表示,如开采量、运输量、破碎量和筛分量等。另一类则需用整变量表示,如料场和骨料加工厂的基建费这类变量或有、或无,或是某一费用,或是另一更大的费用。它是一非连续、跳跃式的某一定值。针对这两类不同变量的特点,要建立人工骨料生产的优化数学模型,既应包含连续变量,又应包含不连续的整变量,也即是混合整数规划的数学模型。

### 1.1 影响人工骨料生产成本的主要因素

假设有  $m$  个可供选择开采的人工骨料料场。不同料场的岩性、矿物组份不同、运输距离不等、骨料

加工设备与工艺也不尽相同。据此,似乎可建立多个骨料加工厂。然而,建立一座完好的骨料加工厂,常需要增加三四仟万元人民币的投资,花费一年以上的建设时间。除非工程规模特大,通常只设一个骨料加工厂。对于一个在建工程,工程规模、施工工期以及混凝土浇筑强度已定,混凝土骨料需求量随之确定,对骨料加工厂的生产规模亦可相应计算确定。因此在施工过程中料场和骨料加工厂的基建投资可视为一常量。故骨料生产优化的数学模型应以混凝土骨料料场和加工厂的基建费以及骨料生产台班运转总费用最少为目标函数相应考虑的因素如下:

#### 1.1.1 料场开采费用和相应的基建投资

尽管混凝土骨料价格中不反映料场的基建费,但在料场开采方案决策中应该考虑这个费用。它包括采料所需的交通道路、风、水、电以及通讯线路、料场生产服务的临时房屋及生产、生活福利设施的建筑物与安装费用等。

#### 1.1.2 毛料开采运输费用

料场开采条件决定了料场的开采方法,占地赔偿及其它附加费用。为了确定合理的采运价格,可用动态规划方法将采运加工过程划分为剥离、采料、装料、运料、卸料及附加作业等各个环节,对每个生产环节划分为若干道工序,每个料场可编制一个采运施工工艺优选网络图,通过图上作业优选出合理的采运方案和相应的采运价格。

#### 1.1.3 骨料破碎筛洗转运费用

骨料的破碎、筛洗加工费用与加工骨料颗粒级配有关,也与选用的破碎、筛洗机械的型号、加工石质和排矿特性密切相关。在方案优选决策时,可参照以往生产累计资料和加工设备的台班分析,确定不同类型机械的破碎、筛分、冲洗各环节的生产成本,最后再加入加工过程的转运费用。

\* 本文系“八·五”科技攻关《质量管理深化研究》中的一个小题

### 1.1.4 碎石加工设备及其排矿粒度特性

根据不同粒径骨料的产量要求,选择碎石机械型号并相应确定其排矿特性曲线,从而满足生产不同级配骨料的规格和各自的数量要求。排矿特性曲线是确定碎石产品级配的依据,国内常用碎石机的排矿特性曲线如图1所示。

### 1.1.5 开采运输加工的损耗系数

所谓损耗系数是指损耗前后人工骨料的重量

比,即是考虑因损耗而应增加的生产数量。各生产环节取用的损耗系数如表1。

表1 各个生产环节骨料的损耗系数值

生产环节	损耗系数	生产环节	损耗系数
爆破及场内装运	1.08~1.1	成品转运损耗	1.03~1.06
粗碎加工	1.05~1.08	中碎加工	1.06~1.08
细碎加工	1.02~1.05	小石制砂加工	1.20~1.25

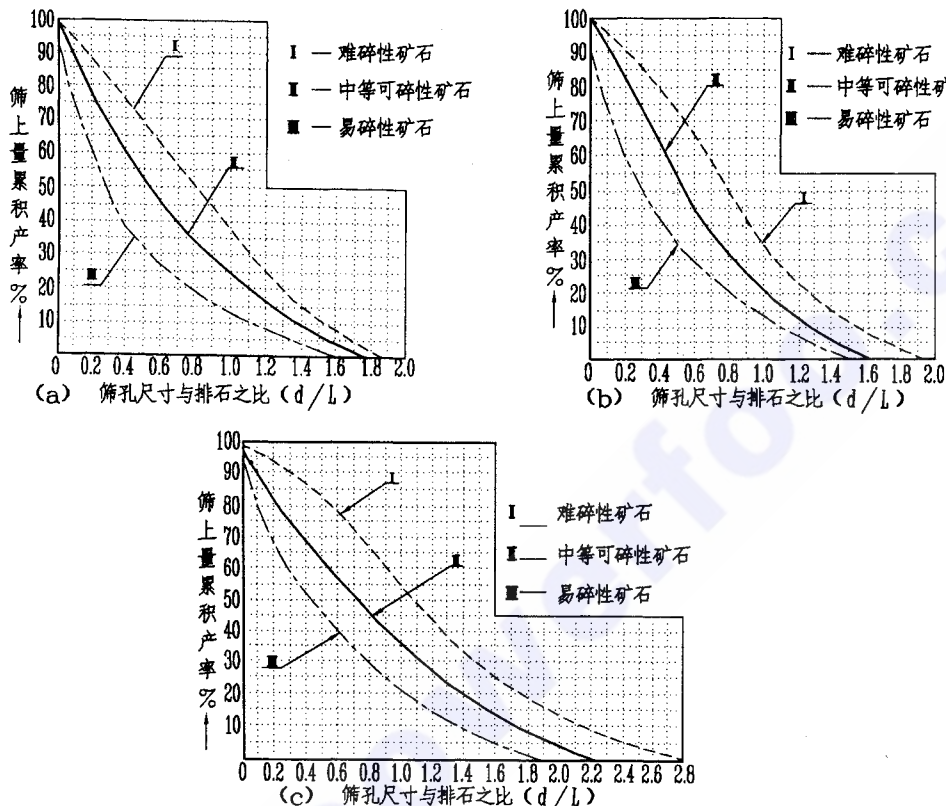


图1 国内常用的三种破碎机械的排矿特性曲线图

## 1.2 人工骨料生产优化的数学模型

### 1.2.1 已知参量和变量

- $m$ ——待开采的料场数目;
- $n$ ——骨料加工系统的工艺环节数目;
- $S_i$ ——第  $i$  个料场的基建费用;
- $P_i$ ——第  $i$  个料场至加工厂的运输单价;
- $e_j$ ——骨料加工厂第  $j$  个工艺环节的加工单价;
- $x_i$ ——第  $i$  个料场的开采量,  $i=1, 2, \dots, m$ ;
- $y_j$ ——第  $j$  个工艺环节的加工量,  $j=1, 2, \dots, n$ ;

$u_i$ ——为 0-1 型整变量,  $u_i=1$  表示第  $i$  个料场要开采。  $u_i=0$  表示第  $i$  个料场不开采;

### 1.2.2 目标函数

以骨料生产总成本最低为目标

$$\text{opt } F = \sum_{i=1}^m S_i u_i + \sum_{i=1}^m P_i x_i + \sum_{j=1}^n e_j y_j \rightarrow \min$$

### 1.2.3 约束条件

(1)第  $i$  个料场的开采量  $x(i)$ ,应小于等于开采料场最大可能开采量  $V_c(i)$

$$x(i) \leq V_c(i) \cdot n(i), i=1, 2, \dots, m;$$

(2)在所有料场中至少有一个需要开采,即

$$\sum_{i=1}^m u_i \geq 1$$

(3)骨料生产量大于等于需求量,即

$$\sum_{j=1}^n f_{kj} \geq (A_k + B_k) L_k, K=1, 2, \dots, 5,$$

其中,  $f_k$  为加工厂第  $j$  个工艺环节加工所得的第  $K$  种骨料量,  $K=1, 2, \dots, 5$ , 分别表示砂、小石、中石、大石、特大石的编号;

$A_k, B_k$  分别表示第  $K$  种级配骨料的需要量和销售量;

$L_k$  表示第  $k$  种级配骨料的加工损失系数。

(4) 骨料开采和加工量的非负约束

$$x(i) \geq 0$$

$$y(j) \geq 0$$

(5) 骨料加工厂某时段第  $K$  种级配骨料的生产量为  $V_o(K)$ , 其需求量为  $V_n(K)$ 。

骨料生产系统上一时段第  $K$  种级配骨料的剩

余量为  $V_r(K)$ 。在相应时段, 骨料供求第  $K$  种级配骨料含销售量的需求量及料仓容积  $V_a(K)$  之间存在如下关系:

$$V_o(K) + V_r(K) - V_n(K) \leq V_a(K)$$

其中  $K=1, 2, \dots, 5$  分别表示砂、小石、中石、大石、特大石各级骨料。

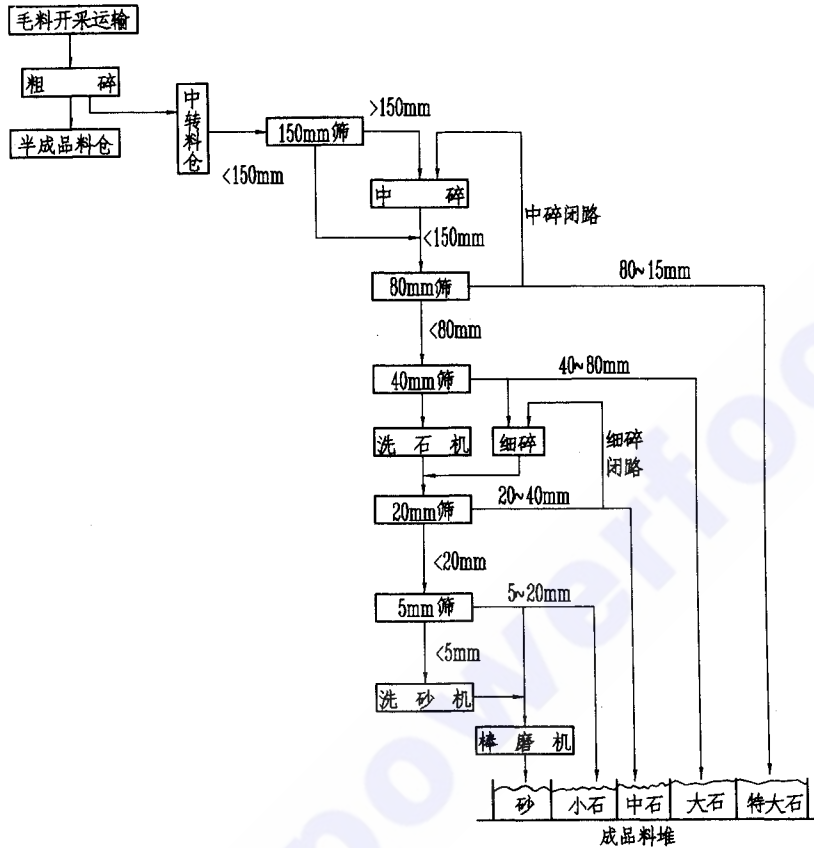


图2 宝珠寺水电站人工砂石系统工艺流程图

现用宝珠寺水电站人工骨料系统的工艺流程, 如图2, 具体分析说明人工骨料系统优化的数学模型。

设第  $i$  个采料场毛料开采量为  $x_i$  (万  $m^3$ ), 中  $i=1, 2, \dots, m$ ; 中碎特大石量为  $x_{m+1}$  (万  $m^3$ ); 细碎大石量为  $x_{m+2}$  (万  $m^3$ ); 细碎中石量为  $x_{m+3}$  (万  $m^3$ ); 制砂耗用小石量为  $x_{m+4}$  (万  $m^3$ )。粗、中、细碎加工单价分别为  $d_1, d_2, d_3$ , 制砂单价为  $d_4$ ; 对  $x_L$  (当  $L=m+5$  到  $m+4$  时) 分别为 0, 1 整变量,  $b(r, s)$  ( $r=1, 2, 3$  分别表示粗、中、细碎,  $s=1, 2, 3, 4, 5, 6$  分别表示破碎机对砂、小石、中石、大石、特大石及超径石各级排矿)。譬如  $b_{11}$  表示粗碎中石对砂的排矿量;  $b_{32}$  表示细碎对小石的排矿量。

再设加工及开采的损失系数。其中  $C_1$  为毛料开采和运输的损失系数,  $C_2, C_3, C_4, C_5$  和  $C_6$  分别为粗碎筛分、中碎(含筛分)、细碎(含筛分)、制砂和成品

料堆存转运的损失系数。

显然, 对  $m$  个料场必然有  $2m+4$  个变量, 其中前  $m+4$  个为连续变量, 后  $m$  个为 0, 1 整变量。

于是相应的优化目标函数应为:

$$\begin{aligned} \text{opt } F = & \sum_{i=1}^m P_i x_i + \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{C_1} d_1 + \sum_{i=1}^m \frac{x_i b(1, 6)}{C_1 C_2} \cdot d_2 + \\ & x_{m+1} \cdot d_2 + x_{m+2} \cdot d_3 + x_{m+3} \cdot d_3 + x_{m+4} \cdot d_4 + \\ & \frac{\sum_{i=1}^m x_i b(1, 1)}{C_1 C_2} d_4 + \frac{\sum_{i=1}^m x_i b(1, 6) b(2, 1)}{C_1 C_2 C_3} d_4 + \\ & \frac{x_{m+1} \cdot b(2, 1)}{C_3} d_4 + \frac{x_{m+2} \cdot b(3, 1)}{C_4} d_4 + \\ & \frac{x_{m+3} b(3, 1)}{C_4} d_4 + \sum_{L=m+5}^{2m+4} S_L X_L \rightarrow \min \end{aligned}$$

整理后可表达为:

$$\text{opt } F = \sum_{i=1}^m P_i x_i + \left( \frac{d_1}{C_1} + \frac{b(1,6)d_2}{C_1 C_2} + \frac{b(1,1)d_4}{C_1 C_2} + \frac{b(1,6)b(2,1)}{C_1 C_2 C_3} d_4 \right) \cdot \sum_{i=1}^m x_i + \left( \frac{d_2 + b(2,1)d_4}{C_3} x_{m+1} + \left( d_3 + \frac{b(3,1)d_4}{C_4} \right) x_{m+2} + \left( d_3 + \frac{b(3,1)d_4}{C_4} \right) x_{m+3} + d_4 x_{m+4} + \sum_{L=m+5}^{2m+4} S_L x_L \right) \rightarrow \min$$

其中  $x_L$  (当  $L=m+5$  至  $2m+4$ ) 为反应有无基建费的 0,1 整变量。

系统内共有如下约束条件:

(1) 骨料需求量的约束 ( $V_n(K)$  为对  $K$  种料的需求量)

$$\text{砂} \quad \frac{\sum_{i=1}^m x_i b(1,1)}{C_1 C_2 C_5} + \frac{\sum_{i=1}^m x_i b(1,6) b(2,1)}{C_1 C_2 C_3 C_5} + \frac{x_{m+1} b(2,1)}{C_3 C_5} + \frac{x_{m+2} b(3,1)}{C_4 C_5} + \frac{x_{m+3} b(3,1)}{C_4 C_5} + \frac{x_{m+4}}{C_5} \geq V_n(1) C_6$$

$$\text{小石} \quad \frac{\sum_{i=1}^m x_i b(1,2)}{C_1 C_2} + \frac{\sum_{i=1}^m x_i b(1,6)}{C_1 C_2 C_3} b(2,2) - x_{m+4} + \frac{x_{m+1} b(2,2)}{C_3} + (x_{m+2} + x_{m+3}) \frac{b(3,2)}{C_4} \geq V_n(2) C_6$$

$$\text{中石} \quad \frac{\sum_{i=1}^m x_i b(1,3)}{C_1 C_2} + \frac{\sum_{i=1}^m x_i b(1,6) b(2,3)}{C_1 C_2 C_3} - x_{m+3} + \frac{x_{m+1} b(2,3)}{C_3} + (x_{m+2} + x_{m+3}) \frac{b(3,3)}{C_4} \geq V_n(3) C_6$$

$$\text{大石} \quad \frac{\sum_{i=1}^m x_i b(1,4)}{C_1 C_2} + \frac{\sum_{i=1}^m d_i b(1,6)}{C_1 C_2 C_3} b(2,4) - x_{m+1} + \frac{x_{m+1} b(2,4)}{C_3} \geq V_n(4) C_6$$

$$\text{特大石} \quad \frac{\sum_{i=1}^m x_i b(1,5)}{C_1 C_2} + \frac{\sum_{i=1}^m x_i b(1,6)}{C_1 C_2 C_3} - x_{m+1} \geq V_n(5) C_6$$

(2) 反映有无基建费整变量的约束方程

$$\sum_{L=m+1}^{2m+4} x_L \geq 1$$

其中  $x_{m+5} \cdots x_{2m+4}$  或者为 0, 或者为 1。

(3) 骨料开采量小于等于料场可能最大采量

$$x_i \leq V_n(i) x_{m+4+i} \quad (i=1, 2, \cdots, m)$$

(4) 开采量和加工量的非负约束

$$x_i \geq 0, y_j \geq 0, i=1, 2, \cdots, m+4$$

(5) 料仓贮料容积约束

$$V_o(K) + V_r(K) - V_n(K) \leq V_o(K)$$

其中  $V_o(K)$  同约束条件(1)左端各项。

## 2 人工骨料优化生产的程序设计

如上根据四川宝珠寺水电站人工骨料生产系统建立的数学优化模型是一个具有多个约束方程的 0—1 混合整数规划的数学模型。它可利用分枝定界法求解。

### 2.1 系统求解程序

(1) 首先不考虑变量的整数约束条件, 将原问题作为一般线性规划求解。

(2) 取 1 作为解的上界;

(3) 对变量进行分枝;

(4) 采用带上界变量的对偶单纯形法逐次进行线性规划运算;

(5) 不断进行分枝定界、缩小寻优范围, 直至得到最优解。

由于在求解过程中采用了带上界变量的对偶单纯形法, 随着分枝的增加, 仅需要改变变量的上、下界来实现对变量进行分枝的限制, 勿须增加新的约束条件, 故在整个求解过程中, 运算规模并不随之扩大, 也不会因不断分枝而增加计算机的内存。在进行新的分枝时, 也并不需要从头开始求解一个新的线性规划问题。仅需要在上一次得到的最优解的基础上, 改变相应分枝的上、下界, 便可逐步得到不同分枝, 不同上下界所对应的最优解, 从而使求解的时间大为缩短。

### 2.2 系统程序结构

人工骨料的优化生产程序结构反映了如上 0—1 混合规划求解过程, 其优化求解框图见图 3。

## 3 应用实例

如上程序用于宝珠寺水电站 1994 年 1~2 月份实际浇筑的混凝土方量所需的人工骨料进行优化计算, 并对优化与不优化的价格进行了分析对比。

### 3.1 计算应用的初始数据

3.1.1 宝珠寺水电站 1994 年 1~2 月浇筑各种级配混凝土及其方量如表 2

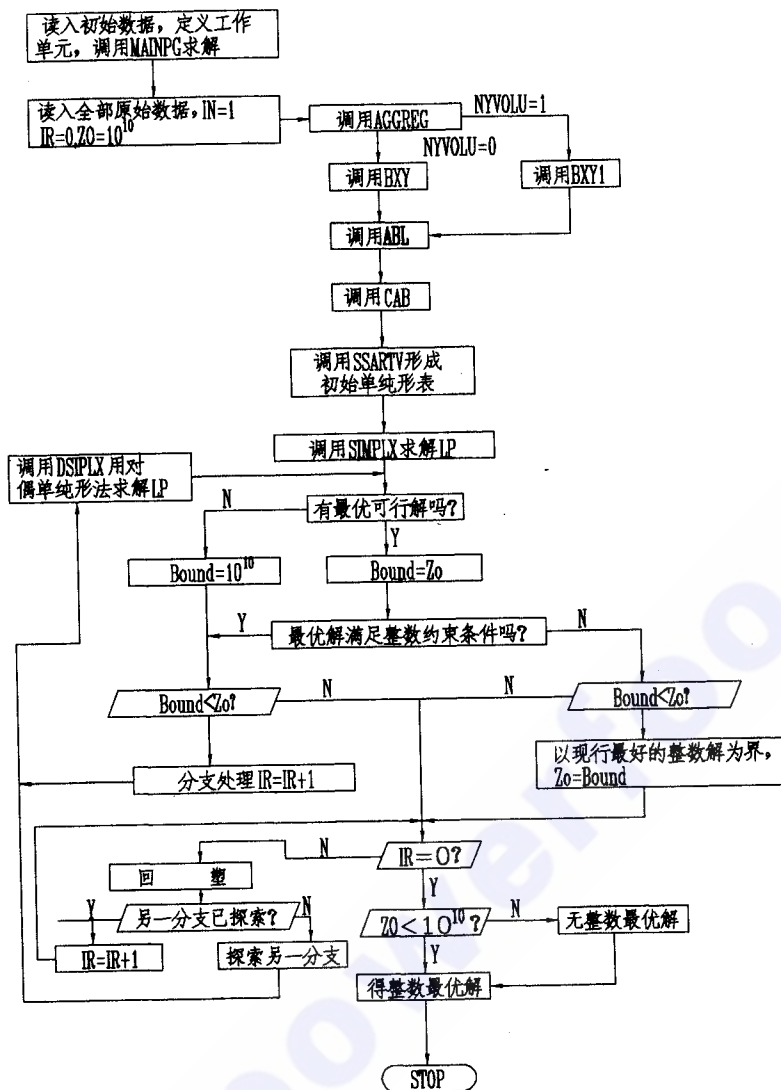


图3 宝珠寺水电站人工骨料生产优化程序框图

表2 1994年1~2月浇筑各种级配混凝土方量表

混凝土种类	一级配	二级配	三级配	四级配	合计
方量/万 m <sup>3</sup>	0	0.6483	1.6110	5.3168	7.5761

3.1.2 宝珠寺水电站采用混凝土的配合比(以每 m<sup>3</sup> 所需骨料的重量 kg 计)如表3。

表3 混凝土配合比表

混凝土级配	粗 细 骨 料 重 量 / kg				
	砂	小石	中石	大石	特大石
一级配	522	1267	0	0	0
二级配	561	552	826	0	0
三级配	503	341	511	852	0
四级配	431	358	411	447	572

3.1.3 人工骨料各工艺环节的损失系数

当计入损失,人工骨料生产各工艺环节的损失系数取用值如表1(《施工组织计手册》推荐值)。

3.1.4 人工骨料破碎的排矿特性

宝珠寺水电站人工骨料破碎中各级碎石机械的

排矿特性如表4。

表4 各级碎石机械的排矿特性表

破碎级	骨 料 级 配					
	≤5	5~20	20~40	40~80	80~150	>150
粗碎/%	0	10	10	28	30	22
中碎/%	8	21.5	24.5	33.5	12.5	
细碎/%	16	60	24			
计算容重 /kN·m <sup>-3</sup>	1.61	1.56	1.57	1.60	1.62	

3.1.5 人工骨料开采、运输及加工单价,如表5

表5 人工骨料开采、运输及加工单价表

采运单价 /元·m <sup>-3</sup>	1号料场		2号料场		
	粗碎	中碎	粗碎	中碎	制砂
	10.89		11.21		
加工单价 /元·m <sup>-3</sup>	3.13	6.42	6.13		12.53

3.1.6 各级人工骨料堆存的料仓容积,如表6

表6 料仓容积表

各级人工骨料	砂	小石	中石	大石	特大石
料仓容积/万 m <sup>3</sup>	4.0	2.5	2.5	2.5	2.5

3.1.7 采石料场基建费取值

1号料场基建费45万元;2号料场基建费38万元。

3.2 人工骨料优化生产计算成果及决策意见

宝珠寺水电站工程1994年1~2月份人工骨料生产总成本为317.3947万元(含基建费),决策意见应开采2号料场,不应开采1号料场。在2号料场总共应开采14.0016万m<sup>3</sup>。在加工中应将1.9283万m<sup>3</sup>特大石中碎;2.3340万m<sup>3</sup>大石和0.5797万m<sup>3</sup>中石细碎,应用1.9532万m<sup>3</sup>小石制砂。这样控制生产可使骨料生产总成本最低。

生产优化计算结果,宝珠寺水电站工程人工骨料1994年1~2月生产量、剩余量及实际需求量表如表7。

表7 1994年1~2月生产量、剩余量及实际需求量表

阶段情况	骨 料 分 级					总计
	砂	小石	中石	大石	特大石	
实际需用量/万 m <sup>3</sup>	2.153	1.802	2.257	2.343	1.877	10.432
控制加工量/万 m <sup>3</sup>	2.2386	1.8738	2.3476	2.4370	1.9524	10.8404
阶段剩余量/万 m <sup>3</sup>	0.0856	0.0718	0.0908	0.0940	0.0754	0.4174

计算结果表明宝珠寺水电站人工骨料系统若按优化生产管理,其人工骨料的综合平均单价为:25.1071元/m<sup>3</sup>,若以下式计算实际单价应为:

$$\frac{\text{砂石控制加工总量}}{\text{骨料控制加工总量}} \times \text{砂的单价} + \frac{\text{骨料控制加工总量} - \text{砂石控制加工总量}}{\text{骨料控制加工总量}} \times \text{粗骨料}$$

$$\text{单价} = \frac{2.2386}{10.8494} \times 41.76 + \frac{10.8494 - 2.2386}{10.8494} \times 26.3 = 29.49 \text{ 元/m}^3$$

由此可见,生产过程采用优化控制人工骨料的综合平均单价比不用优化生产每m<sup>3</sup>降低4.38元。

若该工程按年生产人工骨料70万m<sup>3</sup>计算,可节约投资306.8万元,整个工程则可节约上千万元。其经济效益十分可观。

4 结 语

(1)采用0—1混合整数规划建立的人工骨料系统优化生产的数学模型,能较客观全面反映人工骨料生产系统的内在联系和规律。

(2)根据本文提出的数学模型开发的软件应用来指导大规模人工骨料生产,可避免生产的盲目性,克服传统生产中仅根据料仓储量变化来调节骨料的产量,不够重视施工过程由于混凝土浇筑强度及其品种需求的变化,从而引起对各级骨料需求量的变化。这种变化对生产计划的影响若不实时调整,势必造成损失。

(3)人工骨料的优化生产不仅有利于降低成本单价,而且还可实时检查骨料生产中各环节引起成本变化的原因,以利对症下药,使生产中的问题得到及时解决。

鸣谢:中国水利水电第五工程局砂石生产部门为我们提供了系统的实际生产数据,为我们的研究工作提出了宝贵建议,特此表示感谢!

参 考 文 献

- 汪大彬等.人工砂石系统最优设计方案的选择.水力发电,1986
- 翁定伯.鲁绍栋.水利水电建设混凝土砂石系统设计中几个问题的商榷.水利水电技术,1963
- 雷培先.高岭头水电站人工砂石系统的工艺设计.水利电力施工机械,1993
- 俞水福.系统工程在二滩水电站施工组织设计中的应用简介.水利水电技术,1993
- Donald, L. Neumann. Mathematical Method for Blending Aggregate. Journal of The Construction Division ASCE Vol. No2 September 1964

作者简介

王民寿 男 四川联合大学水利系 教授  
涂兴怀 男 四川省水利电力学校 讲师 硕士

(收稿日期:1997-06-18)

Optimization of Process in Concrete Crushed Aggregate Production

Wang Mingshou

Tu Xinghai

(Sichuan Union University, Chengdu, 610065)

(Sichuan Water Conservancy and Electric Power School, Dujiangyan, 611830)

**Abstract** Optimization of process in concrete crushed aggregate production will bring great economic and social benefits. The mathematical model is described for optimization. The corresponding program design presented. The optimized computation and economical analysis are conducted based on data of crushed aggregate production at the Baozhusi hydropower station.

**Key Words** concrete, crushed aggregate, production plant, process optimization