

工程质量的模糊综合评估初步探讨

王民寿

(成都科技大学)

在工程质量管理中,采用因果关系图(石川图),把影响工程质量的主、次因素加以分类,在同一图上用箭头将其因果关系表示出来,然后召开质安会议,采取对策,制订切实可行的措施,解决质量问题。但是,该图本身仍限于定性地分析工程质量的因果关系,缺乏定量的描述,难以做到对影响工程质量的各因素定量地评估。本文拟在工程质量管理因果关系图的基础上,采用模糊数学的综合评估方法,分析质量问题产生的主要原因和次要原因,从局部到整体定量评估工程质量。由于借助数学关系,逻辑地表示主次因果关系,因此有条件利用电子计算机来实现质量评估,使质量评估工作更加科学化,系统化,更有利于加强工程质量管理。

一、研究影响工程质量的各因素

为了阐明工程质量的模糊综合评估方法,我们以混凝土大坝的质量评估为例。把握住混凝土大坝质量的关键问题—坝体裂缝问题进行分析。首先从调查研究入手,找出影响混凝土坝体质量的各因素,按原因的主次和逻辑顺序,依次按层次用箭头标注在工程质量的因果关系图上(如图1所示)。这张图形象地反映了质量问题的因果关系,在施工过程中易于查找产生质量事故的各种因素。为了把工程质量评估朝定量方向推进,可进一步将因果关系图转换成分级质量影响因素表(如图2所示)。

由图表可见,影响混凝土大坝质量的主要因素有七个方面,即气象条件、混凝土原材料、混凝土生产制备、混凝土运输、仓面作业、混凝土养护及冷却。我们可将影响工程质量的主要因素的因素称为子因素。譬如影响混凝土原材料的有水泥,骨料、砂、水、掺和料和外加剂等。又可将影响子因素的因素叫孙因素。譬如影响子因素砂的孙因素有砂的成份、细度模数、有害物质含量、含泥量等。于是可以很自然地将主因素、子因素和孙因素相应地划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级因素。通过影响质量因素的分级,使影响质量的主、从、因、果关系一目了然。既便于在施工中查找质量事故的原因,防微杜渐;又便于按统一格式将赋有编号的各浇筑块,各坝段的各项质量影响因素如实地记载存入数据库。有利于对各注块的质量进行综合评定。最后将整个坝体所有注块的质量评估成果汇总,整理分析,自然可对整个混凝土坝体质量从微观到宏观作出科学的评价。这样,不仅对工程质量事故处理起到对症下药的作用,而且使工程质量评估和验收工作更加科学。

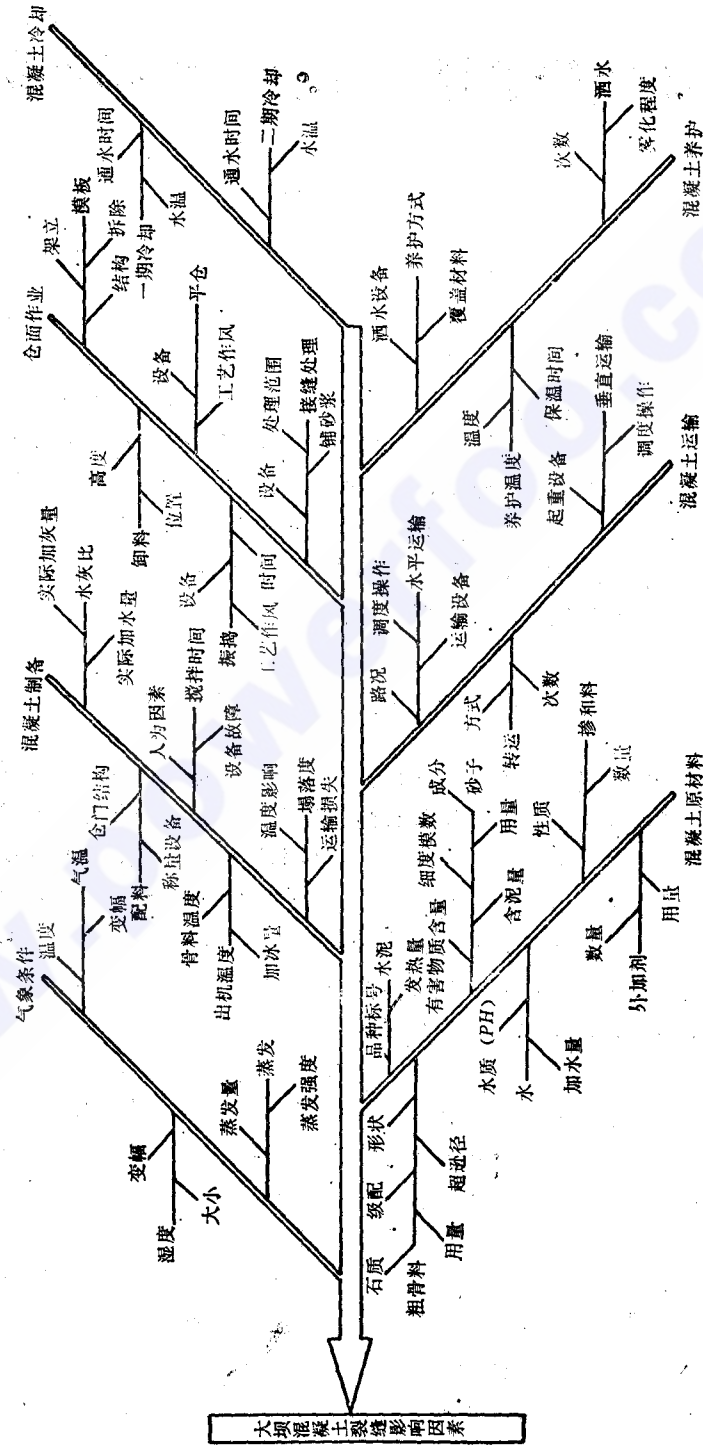


图 4 混凝土大坝质量控制因果关系图

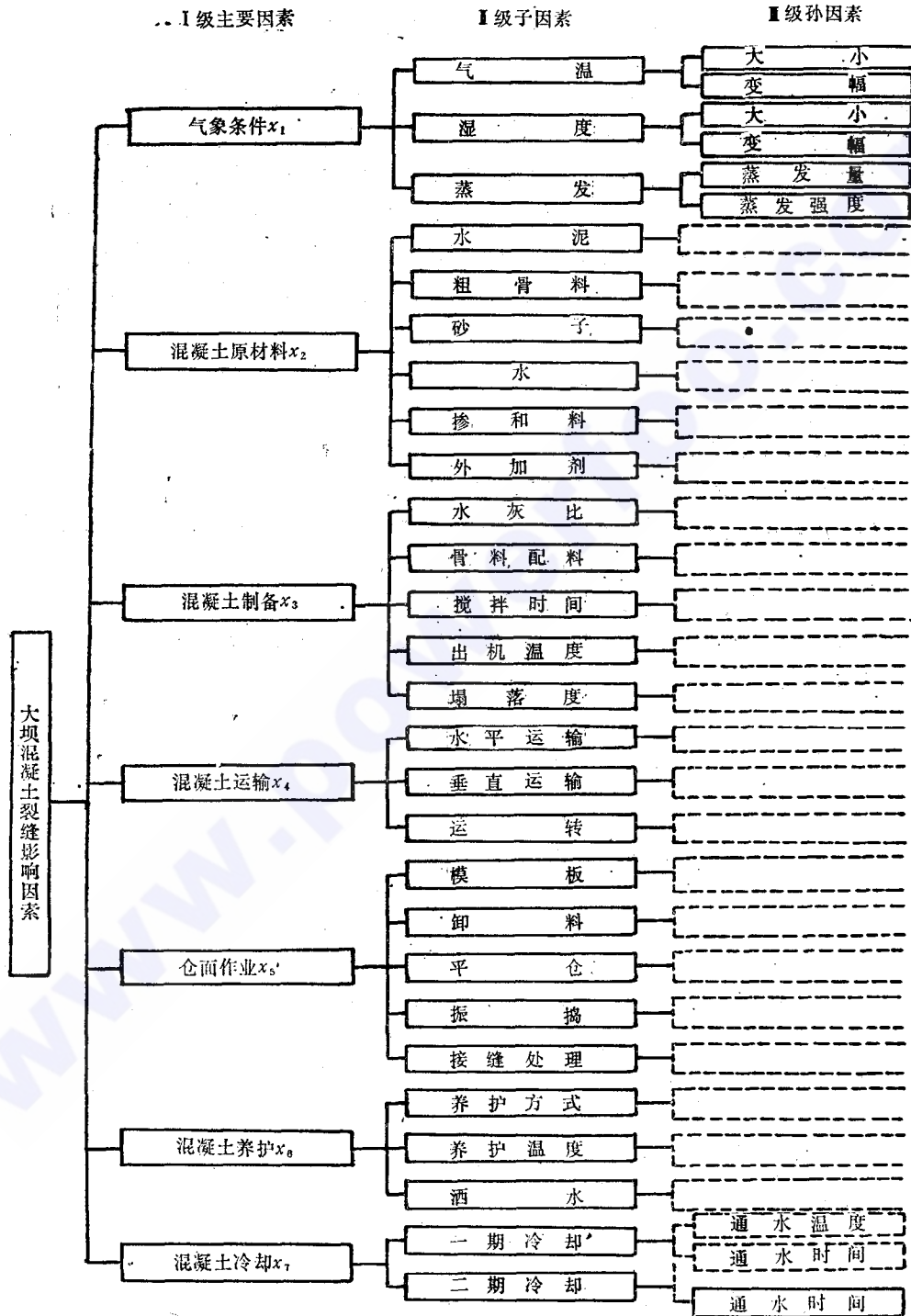


图 2 混凝土大坝质量分级影响因素

二、工程质量的模糊综合评估方法

通过对影响工程质量的主次因素的分析，可以对工程质量进行分级评估。影响因素有的可定量表示，如温度，加水量，标号等，有的则不易定量表示，如路况、石质、砂质等，有的处于不确定的模糊状态，只能定性描述。为了定量评估工程质量，还须采取措施使定性指标数量化、标量化。同时，即便是定量因素，比较尺度不统一。如温度是多少度，加水量是多少立升，标号是多少号也难以比较。因此，应使定量因素和定性因素一样，纳入统一的比较尺度“归一化”，赋予模糊性评分，对工程质量进行全面综合评估。

利用模糊数学进行工程质量的模糊综合评估必须构成两个论域

质量影响因素的子集 $X = \{x_1, x_2, x_3 \dots x_n\}$

工程质量评价的子集 $Y = \{y_1, y_2, y_3 \dots y_m\}$

式中 $x_1, x_2 \dots x_n$ 分别表示工程质量的影响因素；

$y_1, y_2 \dots y_m$ 分别表示对相应质量影响因素的评价；在质量评估中可将质量的好坏划分为五个等级 ($m=5$) 即

$Y = \{\text{优、良、中、合格、不合格}\}$ 。

可用质量评估子集 Y ，对论域 X 中各工程质量影响因素 x_1, x_2, \dots, x_n 进行评估，得质量评估模糊向量

$$\underline{R}_1 = (r_{11}, r_{12}, r_{13} \dots r_{1m})$$

以及由 $\underline{R}_2, \underline{R}_3 \dots \underline{R}_n$ 组成的模糊矩阵记作

$$\underline{R} = \begin{pmatrix} \underline{R}_1 \\ \underline{R}_2 \\ \vdots \\ \underline{R}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & \dots & r_{nm} \end{pmatrix}$$

在确定 $\underline{R}_1, \underline{R}_2 \dots \underline{R}_n$ 模糊向量集合时，必须先确定论域 X 中各影响因素 $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ 。对于质量评估子集 Y 的隶属度，称之为隶属函数。若将质量绝对好（即对工程质量毫无影响）和绝对坏（即工程质量影响无限大）分别定义其隶属函数为

$$\mu_{\underline{A}}(x_*) = 0 \text{ 和 } \mu_{\underline{A}}(x_0) = 1$$

实际情况工程质量不可能绝对好，也不可能绝对坏，因此实际工程质量的隶属函数 $\mu_{\underline{A}}(x_i)$ ，即隶属度应为 $0 \sim 1$ 之间，可表示为

$$\mu_{\underline{A}}(x_*) < \mu_{\underline{A}}(x_i) < \mu_{\underline{A}}(x_0)$$

$$\text{或 } 0 < \mu_{\underline{A}}(x_i) < 1$$

若将质量优等的不利影响因素及程度——隶属度定为 $\mu_{\underline{A}}(x_1) = 0.15$ ；质量不合格的不利影响因素的程度——隶属度定为 $\mu_{\underline{A}}(x_n) = 0.75$ ，则在质量优等和质量不合格间影响质量因素的隶属度，即隶属函数 $\mu_{\underline{A}}(x_i)$ 可按下式确定：

$$\mu_{\underline{A}}(x_i) = \frac{(i-1) [\mu_{\underline{A}}(x_n) - \mu_{\underline{A}}(x_1)]}{n-1} + \mu_{\underline{A}}(x_1)$$

例如：当 $n=5$ 时，求 x_4 的隶属度（即 $i=4$ 时）

$$\begin{aligned} \mu_{\underline{A}}(x_4) &= \frac{(4-1) [\mu_{\underline{A}}(x_5) - \mu_{\underline{A}}(x_1)]}{5-1} + \mu_{\underline{A}}(x_1) \\ &= \frac{3(0.75 - 0.15)}{4} + 0.15 \\ &= 0.6 \end{aligned}$$

同理可得 $\mu_{\underline{A}}(x_3) = 0.45$ ， $\mu_{\underline{A}}(x_2) = 0.3$

故有 $Y = \{\text{优、良、中、合格、不合格}\}$ 相应的隶属度

$$\mu_{n-5} = \{0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75\}$$

隶属度的高限与低限的取值，可由工程质检部门和有关专家商定，或通过实验，或按规范推理建立数学模型和图表确定，可以定义质量好隶属度大，质量差隶属度小；也可以定义对质量影响程度小（即质量好）隶属度小，对质量影响程度大（即质量差）隶属度大，本文采用后一种定义方式。

对于隶属度的确定可以分为三种情况：

1. 影响质量的因素可以定量表示

例如：砂中的云母含量，按规范规定不允许大于5%，若将砂中云母含量大于5%定义其隶属度 $\mu_{\underline{A}}(x_0) = 1$ ，砂中不含云母其隶属度 $\mu_{\underline{A}}(x_n) = 0$ 。故砂中实际云母含量在允许范围内必有 $0 < \mu_{\underline{A}}(x_i) < 1$ 。

2. 影响质量的因素是定性的但可通过间接关系定量表达

例如：路况，若将一级公路的路况视为优，隶属度取为0.15；将二级公路的路况视为良，隶属度取为0.3；将山区二级公路的路况视为中等，隶属度取为0.45；将三级公路的路况视为合格，隶属度取为0.6；则不到三级公路路况对运输混凝土的质量影响很大，视为不合格，其隶属度可取为0.75。

3. 影响质量的因素是定性的，只能用好坏程度相对表示

例如：工艺作风，若将施工工艺作风好的其隶属度定为0.15；施工工艺作风坏的其隶属度定为0.75，则工艺作风较好、一般、较差的隶属度可分别定为0.3、0.45、0.6。

再则，实际生产中对同一影响质量的因素有影响程度之分，用隶属度标量化加以反映。而对不同影响因素的影响大小又有区别。因此对不同影响因素的影响应赋予不同的“权”，区别其影响轻重程度的不同。可用模糊论域 X 上的一个模糊向量 \underline{A} 来表示“权”

的子集为

$$\underline{A} = (a_1, a_2, a_3 \cdots a_n)$$

且应满足归一条件

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1, \quad a_i \in [0, 1], \quad i=1, 2, 3 \cdots n;$$

要对工程质量进行模糊综合评估, 必须通过模糊变换, 合成, 得综合评估结果 \underline{B} 。它是 Y 集合的模糊向量子集, 可表示为:

$$\underline{B} = (b_1, b_2 \cdots b_m)$$

$$= \underline{A} \cdot \underline{R}$$

$$= (a_1, a_2 \cdots a_n) \times$$

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix}$$

$$= \sum_{i=1}^n a_i r_{ij} \quad (\text{其中 } j=1, 2 \cdots m; i=1, 2 \cdots n.)$$

$$= \sum_{j=1}^m b_j$$

并根据归一化原则, 使 $\sum_{j=1}^m b_j = 1$

三、大坝混凝土质量模糊综合评估示例

为了对整个大坝质量进行评估, 可先对任意时段同时浇筑的混凝土质量进行评估。为此, 就需要对影响注块质量的主要因素进行评估。为了对各主要影响因素进行评估, 还得逐级对影响主要因素的子因素和孙因素进行分析。鉴于分级影响质量因素的评估方法基本是一致的, 为了简化起见, 这里仅就影响混凝土质量图 2 所列七个主要因素进行评估。而所分析的影响因素是就单个注块的质量而言的。

首先根据实际情况, 对七个主要影响因素进行“权”分配。须知对不是同时浇筑的注块, 由于施工条件不同, 季节的变化, 对工程质量影响大小往往也会发生变化。因此, 对不是同时浇筑的注块的同一影响因素赋予的权重也应有差异。比如在夏季浇筑, 通常不会遇到寒潮的“冷击”影响; 但对混凝土骨料和拌和时的冷却要求却十分严格。若混凝土出机温度不能保证, 对大坝混凝土的质量影响极大。所以, 在夏季浇筑的注块权重

的取值,属于气象条件的权重 a_1 应取小值,属于混凝土制备的权重 a_3 应取大值;反之,在冬季 a_1 应取大值, a_3 应取小值。

对于同时浇筑的施工条件基本相同的注块,对影响大坝混凝土质量的七个方面的主要因素,夏季浇筑的注块可赋予如下权重:

$$\begin{aligned} A &= (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7) \\ &= (0.12, 0.2, 0.3, 0.08, 0.1, 0.08, 0.12) \end{aligned}$$

尚须指出:若采取分级质量评估时,关键在于确定分级分项的隶属度和权重,并注意各级间各项权重的隶属关系。例如表1,在夏季施工中的某注块,在七项主要影响因素中,气象条件所占的权重为0.12,相应的Ⅱ级影响子因素有气温,湿度和蒸发,它们在级内的权重分配为气温0.5,湿度0.3,蒸发0.2。但对于注块质量而言,Ⅱ级子因素的权重分配应为级内各项权重与隶属主因素权重的乘积。即对气温的权重 $a'_{11} = a_1 \times a'_1 = 0.12 \times 0.5 = 0.06$;同理 $a'_{21} = a'_2 \times a'_1 = 0.3 \times 0.12 = 0.036$; $a'_{31} = 0.024$ 对于Ⅲ级孙因素的权重、在级内的分配、温度为0.4,温度变幅影响为0.6。但对于注块质量而言应对权重进行合成 即 $a''_{11} = a'_{11} \times a''_1 = 0.06 \times 0.4 = 0.024$; $a''_{21} = a'_{11} \times a''_2 = 0.06 \times 0.6 = 0.036$,余类推。

在质量评估中,无论权重的分配和合成后的权重均应满足“归一化”的要求。即各

$$\text{级权重分别为 } \sum_{i=1}^n a_i = 1, \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a'_{ij} = 1, \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a''_{ij} = 1$$

表1 质量评估中影响因素各级权重间的隶属关系

Ⅰ级主要因素		Ⅱ级子因素			Ⅲ级孙因素		
评估项目	权重 a_i $\sum_{i=1}^n a_i = 1$	评估子项目	子权重 a'_i	合成权重 a'_{ij} $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a'_{ij} = 1$	评估孙项目	孙权重 a''_i	合成权重 a''_{ij} $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a''_{ij} = 1$
(1)	(2)	(3)	(4)	(2)×(4)=(5)	(6)	(7)	(5)×(7)=(8)
气象条件	0.12	气温	0.5	0.06	温度 温度变幅	0.4 0.6	0.024 0.036
		湿度	0.3	0.036	湿度 湿度变幅	0.6 0.4	0.0216 0.0144
		蒸发	0.2	0.024	蒸发量 蒸发强度	0.5 0.5	0.012 0.012
混凝土 原材料	0.2	水泥	0.3	0.06	⋮	⋮	⋮
		粗骨料	0.2	0.04	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

各项质量影响因素的隶属度按以上方式选取,在各项隶属度确定后,相应建立总的质量评估矩阵:

$$\underline{R} = \begin{pmatrix} 0.30 & 0.45 & 0.15 & 0.45 & 0.45 & 0.15 & 0.45 \\ 0.60 & 0.30 & 0.45 & 0.30 & 0.45 & 0.15 & 0.30 \\ 0.15 & 0.60 & 0.30 & 0.45 & 0.15 & 0.15 & 0.20 \\ 0.60 & 0.15 & 0.20 & 0.30 & 0.40 & 0.25 & 0.35 \\ 0.15 & 0.60 & 0.70 & 0.50 & 0.30 & 0.60 & 0.40 \\ 0.60 & 0.45 & 0.40 & 0.60 & 0.15 & 0.30 & 0.20 \\ 0.15 & 0.30 & 0.60 & 0.45 & 0.30 & 0.3 & 0.60 \end{pmatrix}$$

模糊向量合成有

$$\begin{aligned} \underline{B} &= \underline{A} \cdot \underline{R} \\ &= (0.33, 0.448, 0.388, 0.425, 0.299, 0.233, 0.34) \end{aligned}$$

如上面的子集不满足“归一化”要求，为了“归一化”，将子集内各项之和2.463分别去除各项得(0.134, 0.182, 0.157, 0.173, 0.121, 0.095, 0.138)，虽然其中1、5、6、7项隶属度均小于0.15；但2、3、4项的隶属度均大于0.15、小于0.3，故该注块的质量属于良。

同理，可按相同方法确定坝内任何浇注块的隶属度，即相应的质量等级，从而评估出整个坝体混凝土的质量。当工程完工后，在工程验收进行整个坝体混凝土工程质量评估时，可从数据库中将每个浇注块的质量评估资料调出，并将各个浇筑块按质量等级累计其数量，再分析各种质量等级的注块数量占全坝体注块总数的百分比是多少。而大坝混凝土工程的质量评估标准，可结合国家工程验收标准拟定根据注块质量等级确定坝体质量等级的验收标准，于是，不难确定坝体质量等级。

四、工程质量预测

在大坝混凝土浇筑完到通水冷却接缝灌浆，以致整个工程完工验收，还有相当长一段时间。假若在刚浇完混凝土，未进行冷却和接缝灌浆时就能预测坝体混凝土是否全面达到质量要求，是否在工程验收前还需要采取某些补救措施。这个决策有赖于我们根据已取得的某些质检资料，全面预测工程质量问题。比如上面述及的影响工程质量的七个方面，前六个方面已经知道，冷却灌浆尚未进行，这时我们需要预测验收时对整个坝体工程质量的评估究竟如何，这就要求我们对冷却灌浆效果作充分估计，这个估计正确与否，关键在于我们对冷却灌浆效果的隶属度有个正确的预测。假若隶属度预测正确了，将它纳入模糊综合评估计算，必将得到比较合乎实际的结果。这种估计和预测具有随机、不确定性质，故建议质检部门根据实际施工条件，区别不同情况按如下三种方式确定冷却灌浆质量的隶属度 $\mu_A(x_i)$ ，将随机型变成确定型进行处理。

1. 较有把握的隶属度

$$\mu_{\underline{A}}(x_i) = \frac{\mu_{\underline{A}}(x_1) + 4\mu_{\underline{A}}(x) + \mu_{\underline{A}}(x_n)}{6}$$

2. 具有一定力争精神, 偏乐观的隶属度

$$\mu'_{\underline{A}}(x_i) = \frac{2\mu_{\underline{A}}(x_1) + 3\mu_{\underline{A}}(x) + \mu_{\underline{A}}(x_n)}{6}$$

3. 把握不大, 偏保守的隶属度

$$\mu''_{\underline{A}}(x_i) = \frac{\mu_{\underline{A}}(x_1) + 3\mu_{\underline{A}}(x) + 2\mu_{\underline{A}}(x_n)}{6}$$

上式中: $\mu_{\underline{A}}(x_1)$ ——最乐观的质量隶属度;
 $\mu_{\underline{A}}(x_n)$ ——最保守的质量隶属度;
 $\mu_{\underline{A}}(x)$ ——较可靠的质量隶属度。

设 $\mu_{\underline{A}}(x_1) = 0$; $\mu_{\underline{A}}(x_n) = 1$; $\mu_{\underline{A}}(x) = 0.6$

则 $\mu_{\underline{A}}(x_i) = 0.566$; $\mu'_{\underline{A}}(x_i) = 0.466$; $\mu''_{\underline{A}}(x_i) = 0.633$ 。

即前两种估计, 冷却灌浆的隶属度合格, 后一种估计冷却灌浆的隶属度不合格, 提醒决策者应提前做好冷却灌浆的施工组织和施工技术的准备, 以防不测。

五、结 语

1. 工程质量的模糊综合评估, 将质量评估中的定量因素与定性因素统一纳入标量化的指标进行比较, 使质量评估考虑的因素更全面, 更科学。有利于实现工程质量的计算机管理。

2. 模糊综合评估法不仅可用于施工过程分级质量评估, 竣工时工程验收质量综合评估, 而且可借用施工前期已取得的资料对施工后期质量进行预测。

3. 文中所列质量影响因素的数量和名称可结合工程实际情况增删、变更。务求不漏掉主要因素及影响主要因素的子因素。

4. 工程质量的模糊综合评估作为一种评估方法有可取之处, 但评估质量隶属度上下限的选取, 各个质量影响因素权重分配的正确与否, 直接影响质量评估的正确性。这就要求质检部门做大量调查研究工作, 进行概率统计和回归分析, 召开专家协调会, 针对不同情况, 提出不同的评估隶属度和权重的匹配值, 力求反映变动着的客观实际情况。影响质量因素的隶属度的变化并非都是线性的, 鉴于非线性的影响因素的隶属度较复杂, 限于篇幅拟另文讨论。

5. 工程质量的模糊综合评估是一种质量评估的新方法, 具有无限生命力, 它必将使工程质量管理更加现代化。但它尚未在工程实践中取得应有的经验, 难免还存在一些有待改进的缺点, 但在关心它的人们的帮助下, 在今后的理论和实践的探索中, 定能日臻完善。

(下转50页)

水电站前池虹吸水箱抽气装置通过技术鉴定

1987年9月9日至11日, 在我省峨边县对峨边新林水电站前池虹吸取水口水箱抽气装置进行了技术鉴定。鉴定会由乐山市科委和乐山市水电局主持。省水电厅和省水利水电研究所等有关单位的三十余人参加了鉴定。

水电站虹吸取水采用水箱抽气装置, 这在国内还是首创。这种抽气装置是利用水箱的充气和排水抽走虹吸管喉部的空气, 造成真空而吸水。它与传统的真空泵抽气和射流泵抽气比较, 具有以下优点:

1. 结构简单, 运行可靠, 操作维护方便。

2. 不需要工作电源。在无电源的情况下, 照样抽气吸水, 启动机组, 这对于山区的孤立电站更具有其优越性。

3. 不需要高速工作水流, 因而采用这种抽气方式的虹吸取水电站不受电站水头的限制。抽气水箱也不受电站地形限制, 可以灵活布置。新林电站的抽气水箱布置在虹吸喉管下部, 这种巧妙的布置方式, 不仅节省了工程量, 而且使水箱的密封性得到充分的保证, 受到与会者的赞赏。

这项新技术是由乐山市水电设计院提出设想, 经成都科技大学的模型试验验证和优化后投入工程应用的。

该装置于1986年8月新林电站建成时投入运行, 并一次试验成功。运行至今, 水箱抽气吸水、充排水时间均达到了预期的效果。

与会者审查了水箱抽气虹吸取水的技术资料(电站设计资料、模型试验报告、原型测试报告及电厂运行鉴定等), 观察了现场操作表演, 经认真讨论, 一致认为该项技术是成熟先进的, 可在全国小型水电站中推广使用。

陈其秋 供稿



(上接49页)

主要参考文献

- [1] 贺仲雄编, 模糊数学及其应用, 天津科学技术出版社
- [2] 汪培庄, 模糊集合论及其应用, 上海科学技术出版社
- [3] 张宽权、曹居易编著, 建筑工程质量管理, 重庆大学出版社