

谈混凝土强度检验评定方法

王铁城

(小浪底工程咨询有限公司,河南济源 454681)

摘要:从概率理论出发,剖析某大型水利枢纽混凝土工程国际招标合同规定的连续5组小样本检验评定方法存在的问题,并与美国ACI214规范采用的连续3组小样本检验评定方法进行比较分析。结果表明,当水工大体积混凝土设计强度保证率在80%~90%时,合同规定的检验评定方法产生的拒收概率较高,有时甚至产生误判,不太适用于混凝土施工质量控制和验收。对此提出了改进建议。

关键词:混凝土强度;检验评定方法;正态分布;样本;错判概率

中图分类号: TU528.1

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2001)02-0053-03

某大型水利枢纽工程是国际招标项目,合同文件是委托某国际工程管理集团编写的,其主体工程,混凝土300多万 m^3 ,设计强度分C70, C40, C30, C25, C15等5个等级。该工程设计规定:属于大体积素混凝土结构强度保证率不低于80%;而大体积钢筋混凝土结构强度保证率不低于90%。合同文件规定的混凝土强度检验评定方法,既没有采用中国行业规范,也没有采用美国ACI214规范,而是参照美国规范自行制订的检验评定方法。其具体要求摘录如下:

每种级别混凝土在标准养护条件下,抗压强度试验结果应符合两个要求:①任何5组(每组3块,下同)连续抗压试验结果的平均值 $R_{(5)}$ 大于或等于设计强度;②5组连续抗压试验结果中低于设计强度的试件不得多于1组,而且该组试验结果小于设计抗压强度之值不得大于3.5MPa。

上述评定标准可简单用下式表示:

$$\begin{cases} \bar{R}_{(5)} \geq R_{\text{设}} & \text{(第1款规定)} \\ R_{\min} \geq R_{\text{设}} - 3.5\text{MPa} & \text{(第2款规定)} \end{cases} \quad (1)$$

而美国规范规定的评定标准与上述标准所不同的只是连续组数不同,前者是5组,后者是3组。其表达式如下:

$$\begin{cases} \bar{R}_{(3)} \geq R_{\text{设}} \\ R_{\min} \geq R_{\text{设}} - 3.5\text{MPa} \end{cases} \quad (3)$$

上述抽样检验评定方法是平均值与最小值联合使用,称为平均值-最小值方案。第1条款规定是使

用移动平均值,即连续5组(或3组,下同)试件移动平均值必须大于或等于该级混凝土的设计强度,若低于设计强度则该5组判为不合格,相应的这批施工的混凝土视为不满足合同要求;第2条款规定,是第1条款使用的同一批5组试件,假如其中有一组低于设计强度,但其差值不大于3.5MPa,该5组判为合格,若其差值大于3.5MPa,或者这5组当中若有2组或2组以上低于设计强度时,这5组判为不合格。在判断中两个条款必须同时满足,这5组才算合格,其中有一条不满足,这5组就都判为不合格。如此类推连续按抽样时间顺序移动5组为一批验收下去,以此为据,对现场混凝土施工进行质量控制和验收。

通过工程实际运用,感到合同所采用的混凝土强度验收方案,存在一些问题,有必要进行讨论,以便为今后编写合同文件选用质量验收标准提供借鉴。

为了便于说明问题,将美国DCI214规范采用的连续3组和合同文件规定连续5组的评定标准一起进行分析。

1 平均值规定

混凝土抗压强度总体为正态分布 $N(R_{\text{保}}, \sigma^2)$ 时,其样本平均值 $\bar{R}_n$ 也服从正态分布 $N(R_{\text{保}}, \sigma^2/n)$,如图1所示。

由图1可知:

$$\begin{cases} R_{\text{保}} = \bar{R}_n + t\sigma \\ R_{\text{保}} = \bar{R}_n + t'\sigma/\sqrt{n} \end{cases} \quad (5)$$

$$R_{\text{保}} = \bar{R}_n + t'\sigma/\sqrt{n} \quad (6)$$

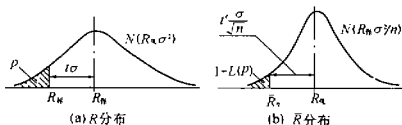


图1 R 和 $\bar{R}_n$ 的分布

因为离差系数 $C_v = \frac{\sigma}{R_{\text{标}}}$, 故上式经整理可得:

$$\bar{R}_n = \frac{1 - \frac{t'}{\sqrt{n}} C_v}{1 - t' C_v} \cdot R_{\text{标}} \quad (7)$$

式中: $\bar{R}_n$ 为连续 n 次抽样的混凝土平均强度, MPa; n 为连续抽样次数; t 为总体混凝土强度保证率系数; C_v 为混凝土强度离差系数; t' 为样本保证率系数, 由于样本容量小, 则对应的保证率系数应高于总体保证率, 由图1可知 $t' = t \sqrt{n}$; $R_{\text{标}}$ 为混凝土标准强度 (亦称设计强度)。

由数理统计原理可知, 任何抽检方案都不能做到将达到设计要求的混凝土批完全接收, 总有一定的概率拒收。把合格的混凝土批予以拒收的概率称为“第一种错判为概率”, 记作 α , 它反映把合格的混凝土批错判为不合格的可能性大小, 由于这种错判结果, 对生产方 (或承建方) 带来经济损失; 同样, 将不合格的混凝土批错判为合格而予以接收的概率, 称为“第二种错判概率”, 记作 β , 它反映把不合格的混凝土批错判为合格的可能性大小, 结果会使业主蒙受经济损失, 因此, 一种抽检方案的好坏, 就可以根据这两种错判概率的大小来分析比较。两者愈小, 愈对双方有利。但从统计分析可知, 当样本容量 n 一定时, α 的缩小会带来 β 的增大, 反之亦然。若同时要同时减小 α 和 β , 将会带来样本容量 n 增大的矛盾。因此, α 和 β 的选取, 一般需经双方协商确定。

由图1可以看出, 对一个具有不合格率为 p 的混凝土合格总体, 如果抽样要求 $\bar{R}_n \geq R_{\text{标}}$, 即规定当 $R_n < R_{\text{标}}$ 时判断它为不合格, 则将发生“第一种错判概率” $\alpha = 1 - L(p)$ ($L(p)$ 为接收概率), 如果不论样本容量 n 多少, 规定 $\alpha = 2\%$ (对第二错判概率 β 暂不讨论), 令混凝土强度均匀性 $C_v = 0.15$, 混凝土允许不合格率 p 分别为 5% , 10% , 20% 时, 按式(7)计算连续取样 n 组的最低平均强度 $\bar{R}_n$ 值, 计算结果列于表1。由表1可知, 当 $p = 10\%$ (即混凝土强度保证率 $q = 90\%$) 时, 连续抽样3组时, $\bar{R}_{(3)} = 1.02 R_{\text{标}}$, 这是美国 ACI214 规范规定连续抽样3组平均值要大于或等于设计强度的理论根据。当 $p = 20\%$ (即 $q = 80\%$) 时, 连续抽样5组时, $\bar{R}_{(5)} = 0.99 R_{\text{标}}$, 这也是前述合同文件规定的混凝土强度评定标准第1款任何

5组连续抗压试验结果的平均值要大于或等于设计强度的由来。我国 SL53-94《水工碾压混凝土施工规范》质量评定与验收中小样本 ($n \leq 10$ 组) 检验评定方法就采用了表1规定的验收标准, 但它没有最小值的规定。

表1 混凝土最低平均强度 $\bar{R}_n$ 值

连续取样 次数 n	连续取样最低平均强度 $\bar{R}_n$ 值		
	$p = 5\%$	$p = 10\%$	$p = 20\%$
1	0.92 $R_{\text{标}}$	0.86 $R_{\text{标}}$	0.79 $R_{\text{标}}$
2	1.04 $R_{\text{标}}$	0.97 $R_{\text{标}}$	0.90 $R_{\text{标}}$
3	1.09 $R_{\text{标}}$	1.02 $R_{\text{标}}$	0.94 $R_{\text{标}}$
4	1.12 $R_{\text{标}}$	1.05 $R_{\text{标}}$	0.97 $R_{\text{标}}$
5	1.14 $R_{\text{标}}$	1.08 $R_{\text{标}}$	0.99 $R_{\text{标}}$

2 最小值规定

设有一批混凝土总体不合格率为 p , 合格率为 $q = 1 - p$ 。从此总体中随机抽取 n 组试件, 在这 n 组试件中, 含有 d 个不合格的试件可能情形共有 C_n^d 种, 设抽取 n 组试件中低于 $R_{\text{标}}$ 的不多于 C 组才算此批混凝土合格, 合格的可能性或者说接收概率 $L(p)$ 可用二项分布的累积概率给出:

$$L(p) = \sum_{d=0}^C C_n^d p^d q^{n-d} \quad (8)$$

按式(8), 根据验收标准规定连续取样 $n = 3$ (或 $n = 5$) 中, 低于 $R_{\text{标}}$ 不得多于1组 (界线值为 $R_{\text{min}} = 3.5$ MPa) 判断此批混凝土为合格, 取保证率 $q = 80\%$, 90% , 95% 三种情况, 计算出它们的 $L(p)$ 值和 α 值列于表2。从表2可以看出, 随着混凝土强度保证率的增大, $L(p)$ 值也在提高, 即 α 值在减小。随着连续抽样组数增加, $L(p)$ 值在降低, 即 α 值在增加。从减少 α 值来说, 连续3组验收方案优越于连续5组验收方案。

表2 接收概率和拒收概率

保证率/%	组数	$L(p)/\%$	$\alpha/\%$
80	3组	89.6	10.4
80	5组	73.7	26.3
90	3组	97.2	2.8
90	5组	91.9	8.1
95	3组	99.3	0.7
95	5组	97.7	2.3

关于上述验收标准最小值规定 $R_{\text{min}} \geq R_{\text{设}} - 3.5$ MPa, 是指连续抽样5组 (或3组) 混凝土试件中允许有1组低于设计强度的界线值, 即把抽样标准中相应于设计强度要求的 R_{min} 看作具有一定保证率的下限值。该式中 3.5 MPa 的选定, 是因为美国 ACI214 委员会制订规范时从调查的265个现场混凝土资料中发现, 当混凝土平均强度大于 20 MPa (指圆柱 $\varnothing 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 试件强度, 折算成 $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 试件强度为 25 MPa) 以后, 混凝土标准差 σ

大致接近 3.5MPa(折算成 $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 立方体为 4.2MPa)。美国规范混凝土质量控制是按 σ 值划分管理水平等级的,所以 3.5MPa 的规定是控制混凝土匀质性离散不要太大,以便保证设计的混凝土强度保证率达到预期效果的控制条件。

由表 2 可见,若与平均值抽样方案假设精度 $\alpha = 2\%$ 相匹配的话,采用式(2)和(3)连续抽样 3 组作一个验收单元,只有当混凝土强度保证率在 90% ($\alpha = 2.8\%$) 以上时才有可能实现;同理,采用连续抽样 5 组作一个验收单元,只有当混凝土强度保证率在 95% ($\alpha = 2.3\%$) 以上才行。

以上就是最小值确定的理论根据和统计分析结果,由此可以看出式(1)~(4)是有应用条件的,即要有保证率限制,不能随意应用,否则会使第一错判概率增大,接收概率降低,甚至产生验收工作中的误判。前述提及该工程混凝土强度保证率设计要求为 80%~90%,采用式(1)和(2)进行验收,由表 2 可知第一错判概率 α 竟达 8.1%~26.3%,显然合同文件采用的连续 5 组的验收方案是不合适的。

3 平均值-最小值联合使用的效果

上述是按合同规定的两条标准,每条标准单独分析出保证率的大小对 α 值的影响及两条标准的应用条件,那么两条标准联合作用情况怎样?我们再将现实抽样检查采用 SDJ 207《水工混凝土施工规范》大样本($n \geq 30$ 组,下同)和小样本同时评定进行比较和验证。现将某 1 年多的抽样资料,采用两种方法评定比较的结果列于表 3 和表 4。

表 3 大样本和连续 5 组小样本评定结果比较

混凝土类别	统计组数 n	大样本评定方法 $R_{\text{平均值}}/\text{MPa}$	σ	保证率/%	合格组数	小样本评定方法 保证率/%	误差 %
C70	795	82.9	6.9	97.0	751	94.5	2.6
C40	148	54.7	5.7	99.5	148	-100	0.4
C30	860	47.2	6.3	99.7	854	99.3	0.4
C25	1364	34.8	6.2	94.4	1226	89.9	4.8
C25	1737	32.0	5.3	90.5	1471	84.7	6.4
C15	1239	22.2	5.1	91.9	1070	86.4	6.0

表 4 大样本和连续 3 组小样本评定结果比较

混凝土类别	统计组数 n	大样本评定方法 $R_{\text{平均值}}/\text{MPa}$	σ	保证率/%	合格组数	小样本评定方法 保证率/%	误差 %
C70	795	82.9	6.9	97.0	768	96.6	0.4
C40	148	54.7	5.7	99.5	148	-100	0.4
C30	860	47.2	6.3	99.7	853	99.2	0.5
C25	1364	34.8	6.2	94.4	1250	91.6	3.0
C25	1737	32.0	5.3	90.5	1585	91.2	0.8
C15	1239	22.2	5.1	91.9	1142	92.2	0.3

由表 3 可见,连续 5 组小样本评定结果,当保证率在 95% 以上时,大样本评定结果误差较小,不到 3%,保证了验收精度;当保证率在 95% 以下时,误差增大,特别是按大样本评定当保证率为 90% 或略超过一些,满足设计要求时,小样本评定结果保证率

达不到 90%,不满足设计要求。

由表 4 可见,相同的试件采用连续 3 组小样本评定结果,当保证率在 90% 以上时,与大样本评定结果基本一致,误差不超过 3%,满足验收精度。以上统计分析结果与前面理论分析结果基本一致,即混凝土强度保证率按 95% 设计的水工建筑物,才能采用连续 5 组检验评定方法,否则会产生误判。同理只有按 90% 设计的保证率,才能采用连续 3 组的检验评定方法。

另外,通过理论分析可知,连续 3 组的评定公式(3)和(4)两个限定条件组合比较合理,即两个检验评定条件都是按 90% 保证率设计的,当施工质量管理控制较好,标准差 σ 较小时,式(3)平均值起主要控制作用;当施工质量管理控制水平下降 σ 值增大时,式(4)中最小值(3.5MPa)起主要控制作用,两式联合控制作用是显著的。美国混凝土工程一般都是按 90% 保证率设计的,所以将连续 3 组的检验评定方法写进了规范,并提出了相应混凝土配制强度的计算公式,这里不再赘述。

连续 5 组的评定公式(1)和(2)两个限定条件设计组合不合理,当验收精度确定后(一般 $\alpha = 2\%$),式(1)保证率按 80% 取值即可,式(2)只有保证率按 95% 才行,两者相差较大,评定时起不到联合控制作用,实际只是式(2)判定条件在起控制作用。

4 结 语

a. 因为我国水工大体积混凝土设计强度保证率要求一般为 80%~90%,混凝土方量大,施工强度高,每月抽样组数较多,所以质量控制和验收都采用部颁行业标准进行。通过以上分析可以看出,合同规定的连续 5 组小样本的检验评定方法不太适用于该工程的施工质量控制。因此在国家组织的工程阶段验收时,改用 SDJ 207《水工混凝土施工规范》大样本的检验评定方法进行。

b. 考虑今后商品混凝土的发展和外商习惯使用小样本的检验评定方法,小样本检验评定方法本身也具有简便、及时的特点,因此在招标工程中,若混凝土水工建筑物设计强度保证率大于或等于 90% 时,也可以考虑采用连续 3 组小样本检验评定方法作为工程阶段性结算质量评定的依据。

参考文献:

- [1] 卢瑞珍. 混凝土试验设计与质量管理[M]. 上海: 交通大学出版社, 1986.
- [2] 李秀英. 混凝土评定标准及混凝土强度标准差、离差系数与总体均值关系的综述[J]. 混凝土及加筋混凝土, 1983(4): 13~19. (收稿日期: 1998-05-28 编辑: 张志琴)