

# 掺 MgO 混凝土自身变形的温度效应试验及其应用

李承木

33-37 (国家电力公司成都勘测设计研究院科学研究所 成都 610071)

TV33/  
TV431.9  
F444

**摘要** 论述不同试验温度条件下 MgO 混凝土的自生体积变形,给出了温度与自生体积变形的关系式,并介绍了温度突变时对新老混凝土体积变形的影响。试验研究表明, MgO 混凝土自生体积变形的膨胀变形速率和膨胀量随温度的增高而增大;在气温骤降情况下,外掺 MgO 混凝土的自生体积膨胀变形是稳定的、不可逆的,也不会产生收缩现象。

**关键词** MgO 混凝土; 试验温度; 膨胀变形; 自生体积变形

由于水泥水化热作用,往往大体积混凝土结构内形成较高应力,当拉应力过大时就可能导致结构出现裂缝。据分析,这种拉应力及温裂缝的出现与混凝土的温降收缩变形受到阻抑有关。在大体积混凝土中,掺 MgO 膨胀剂或采用 MgO 膨胀水泥,使混凝土产生延迟性的自生体积膨胀变形,以补偿混凝土温度和干缩所引起的收缩变形,减小结构的收缩应力,防止裂缝发生,是温控防裂的有效途径。实践证明,利用掺 MgO 混凝土自身变形的上述特性,不但大大简化施工时的温度控制,而且在作温度应力计算时也必须考虑自身变形的温度效应,这样其计算结果才不会失真。

MgO 混凝土筑坝技术,经过 20 余年的研究,已形成了一套完整的理论体系,并在十几座大中型水利水电工程中成功应用。有关外掺 MgO 水泥混凝土的物理学、热学、变形、耐久性试验研究已有相当多的

成果,但是系统研究其自身变形的温度效应的成果却很少。本文通过不同试验温度对自生体积变形影响的研究,从而得到不同温度条件下 MgO 混凝土的自生体积变形,并建立了温度与自生体积变形的关系,以方便温控设计;并为分析计算 MgO 混凝土的温度徐变应力,提供具有参考价值的研究成果。另外还分析比较了温度对新老 MgO 混凝土自身变形的影响以及温度突变时对自生体积变形的影响结果。

## 1 试验方法和混凝土原材料

### 1.1 混凝土原材料和配合比

水泥品种及标号、粉煤灰生产厂家、氧化镁品种及性能以及它们的化学成分见表 1。采用二滩电站坝区正长岩加工的人工砂石骨料(Ⅰ)和白山电站工程料场的天然河沙和卵石(Ⅱ、Ⅲ)、各种混凝土的配合比组成见表 2。

表 1 水泥和粉煤灰及氧化镁的化学成分

| 类别  | 品种标号及性能             | SiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO   | SO <sub>3</sub> | fCaO | LOSS |
|-----|---------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-----------------|------|------|
| 水 泥 | 峨眉 525 号硅酸盐大坝水泥     | 21.82            | 5.99                           | 4.90                           | 61.08 | 1.22  | 2.00            | 0.66 | 1.80 |
|     | 抚顺 525 号硅酸盐大坝水泥     | 21.11            | 5.14                           | 5.31                           | 63.53 | 4.28  | —               | 0.40 | —    |
|     | 抚顺 425 号矿渣大坝水泥      | 21.03            | 5.18                           | 5.30                           | 63.35 | 4.38  | —               | 0.39 | —    |
| 粉煤灰 | 渡口河门口电厂粉煤灰          | 54.04            | 6.82                           | 23.01                          | 2.40  | 5.25  | 1.80            | —    | 1.91 |
| 氧化镁 | 海城回转窑 180 目,活性 120s | 0.56             | 0.70                           | 0.20                           | 1.22  | 93.18 | —               | —    | 4.14 |

表 2 混凝土配合比

| 配合比<br>编号 | 混凝土<br>标号           | 水泥品种<br>及标号      | MgO 掺量<br>/% | 水灰<br>比 | 砂率<br>/% | 胶材<br>/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 粉煤灰<br>掺量/% | 混凝土配合<br>比例 | 外加剂<br>掺量/% | 坍落度<br>/cm | 级配 |
|-----------|---------------------|------------------|--------------|---------|----------|------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|----|
| I         | R <sub>28</sub> 250 | 峨眉 525 号<br>大坝水泥 | 4.0(外掺)      | 0.50    | 24       | 220                          | 渡口灰<br>30   | 1:2.32:7.36 | 0.20(木钙)    | 3~5        | 4  |
| II        | R <sub>28</sub> 250 | 抚顺 525 号<br>大坝水泥 | 4.28(内含)     | 0.47    | 20.5     | 206                          | —           | 1:2.20:8.71 | 0.20(塑化剂)   | 3~7        | 4  |
| III       | R <sub>28</sub> 200 | 抚顺 425 号<br>矿渣水泥 | 4.38(内含)     | 0.53    | 21.5     | 191                          | —           | 1:2.49:9.37 | 0.20(塑化剂)   | 3~7        | 4  |

作者简介:李承木,男,教授级高级工程师,从事水工建筑材料及 MgO 混凝土筑坝技术研究。

## 1.2 试验条件和试验方法

a. 根据温控设计需要和外掺 MgO 混凝土的膨胀变形特性, 自生体积变形的试验养护温度按 20℃、30℃、40℃、50℃ 四个温度进行试验。其中 20℃ 的混凝土试件, 均置于恒温恒湿的徐变室内进行养护和观测。

b. 试验养护温度为 30℃、40℃、50℃ 的各种混凝土试件, 分别置于 HYN-1-02 型、SWK-D-1 型、HYN-1-13 型混凝土标准自控恒温养护箱内进行养护和观测。

c. 测量自生体积变形的试件尺寸为  $\varnothing 20\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ , 用 1 mm 厚的镀锌白铁皮做成圆柱形桶, 并用塑料布、黄油和 1 mm 厚的橡皮, 粘贴于铁桶内壁, 然后浇筑混凝土。同时在试件正中垂直对称埋入 DI-25 型大应变计 1 支, 采用 SBQ-2 型水工比例电桥量测其变形。

d. 试件成型后, 用火漆、石蜡、橡皮、桐油膏灰等材料密封试件顶部和应变计电缆引出口, 最后将桶盖与其侧壁焊接成整体。

试验方法和试验结果处理均按照 SD105—82《水工混凝土试验规程》有关规定进行。

## 2 试验成果及其分析

### 2.1 不同试验温度 MgO 混凝土的自生体积变形

#### 2.1.1 试验结果

试验采用峨眉水泥厂生产的 525 号硅酸盐大坝水泥, 掺渡口粉煤灰 30%, 外掺 MgO 4%, 在试验温度为 20℃、30℃、40℃ 及 50℃ 条件下, 采用配比 I 进行外掺 MgO 混凝土的自生体积变形试验, 其试验结果见图 1。从图中可以看出:

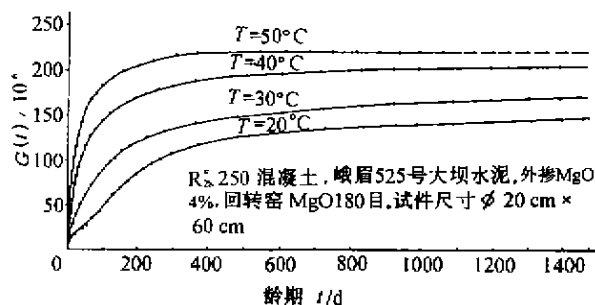


图 1 不同试验温度 MgO 混凝土的自生体积变形

a. 不同试验温度对 MgO 混凝土自生体积变形的影响较大。当 MgO 掺量相同时, 混凝土的自生体积变形是随着养护温度的增高和观测龄期的延长而增大的, 并且各种温度下的膨胀变形曲线的变化规律基本上是一致的。

b. 温度对方镁石水化速率的影响较大, 温度越高水化膨胀速度越快, 因而高温下 MgO 混凝土的膨

胀变形速率比常温的大。如果以 20℃ 为基准, 各种温度即 50℃ 至 30℃ 在龄期 10 d 前的平均膨胀速率依次为 20℃ 的 5.6 倍、3.2 倍、1.5 倍。当观测龄期在 10~30 d 之间, 在同样温度下的平均膨胀速率分别为 20℃ 的 8.3 倍、7.5 倍、2.9 倍。此后的膨胀速率逐渐减慢。

c. 相同龄期, 不同试验温度的自生体积变形大小相差数倍。如 30 d 龄期, 从 50℃ 至 20℃ 的自生体积变形依次为  $143.7 \times 10^{-6}$ ,  $100 \times 10^{-6}$ ,  $42.5 \times 10^{-6}$  和  $22.5 \times 10^{-6}$ , 前三者分别为 20℃ 的 6.39 倍、4.44 倍、1.89 倍; 又如 90 d 龄期的自生体积变形分别为 20℃ 的 4.40 倍、3.50 倍、2.13 倍; 再看龄期 365 d 的自生体积变形却分别仅为 20℃ 的 1.87 倍、1.61 倍和 1.21 倍了。这说明高温下的自生体积变形在早期的膨胀速率较常温的大得多, 因此其变形量也随温度而迅速增大。从图 1 和表 3 可以看出, 自生体积变形的膨胀速率高温比常温衰减得快, 其变形也较常温逐渐稳定得早。

表 3 各龄期不同温度的自生体积变形  
为最大值的百分比

| 温度<br>$T/^\circ\text{C}$ | 14 d | 30 d            | 90 d            | 180 d           | 365 d | 730 d |
|--------------------------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|-------|
| 20                       | 12   | 14              | 27              | 52 <sup>①</sup> | 76    | 89    |
| 30                       | 16   | 23              | 49 <sup>②</sup> | 65              | 79    | 90    |
| 40                       | 30   | 47 <sup>③</sup> | 68              | 79              | 90    | 95    |
| 50                       | 50   | 64              | 82              | 91              | 98    | 100   |

注: ①170 d 为 50%; ②95 d 为 50%; ③35 d 为 50%。

d. 从试验结果可以得出相对于 20℃ 的变形增长率。由表 4 可知, 30℃ 至 50℃ 的自生体积变形较 20℃ 的平均分别增长 0.52 倍、1.61 倍和 2.75 倍; 在龄期 60 d, 30 d, 20 d 所出现的最大变形分别增长 1.19 倍、3.44 倍和 5.41 倍。从表 4 还可得到, 各试验温度之间的相对递增变形率, 即 50℃ 至 20℃ (即 50℃ 比 40℃, 40℃ 比 30℃, 30℃ 比 20℃) 分别平均增长 35%, 66%, 52%; 在龄期 7 d, 20 d, 60 d 出现的最大递增变形分别增长 0.83 倍、1.40 倍和 1.19 倍。

e. 通过上述分析不难得出: 当试验温度每增减 10℃ 时, MgO 混凝土自生体积变形的平均增减范围在 1.35~1.66 倍之间, 即总平均增减 1.51 倍。再从平均变形的增值范围看: 30℃ 的变形比 20℃ 的增加  $(25 \sim 30) \times 10^{-6}$ , 40℃ 的比 30℃ 的增加  $(40 \sim 45) \times 10^{-6}$ , 50℃ 的比 40℃ 的增加  $(30 \sim 35) \times 10^{-6}$ 。即温度每增减 10℃ 时, 其膨胀变形量大概平均增减  $(30 \sim 35) \times 10^{-6}$ ; 其最大增值的出现龄期分别为 90 d, 60 d 和 20 d。为了方便应用, 表 4 给出了不同试验温度及龄期与自生体积变形三者之间的关系, 如果在分析 MgO 混凝土的温度应力时, 只有 20℃ 的自生体积变形资料, 则可参

表 4 不同温度条件下各龄期自生体积变形的相对倍数关系

| 不同温度<br>$G(t)$ 之比          | 3d   | 7d   | 20d  | 30d  | 60d  | 90d  | 180d | 365d | 730d | 1095d | 平均   |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| $G_{20}/G_{30}^{\text{①}}$ | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00  | 1.00 |
| $G_{30}/G_{20}$            | 1.56 | 1.50 | 1.68 | 1.89 | 2.19 | 2.13 | 1.45 | 1.21 | 1.17 | 1.16  | 1.52 |
| $G_{40}/G_{20}$            | 3.54 | 2.83 | 4.02 | 4.44 | 4.15 | 3.50 | 2.07 | 1.61 | 1.46 | 1.40  | 2.61 |
| $G_{50}/G_{20}$            | 5.94 | 5.17 | 6.41 | 6.39 | 5.42 | 4.40 | 2.50 | 1.87 | 1.62 | 1.51  | 3.75 |
| $G_{40}/G_{30}$            | 2.26 | 1.88 | 2.40 | 2.35 | 1.89 | 1.64 | 1.43 | 1.34 | 1.25 | 1.21  | 1.66 |
| $G_{50}/G_{40}$            | 1.68 | 1.83 | 1.60 | 1.44 | 1.30 | 1.26 | 1.21 | 1.16 | 1.11 | 1.08  | 1.35 |

注:①下标表示温度。

照表 4 所揭示的规律,估算各种温度条件下的自生体积变形,以此满足温控设计所需要的资料。

### 2.1.2 经验公式

a. 为了方便温度控制设计,以及在分析 MgO 混凝土的温度应力时计算使用,根据上述试验结果,整理出一个统一的任意温度的自生体积变形的经验表达式:

$$G(t, T) = G(T)(1 - \exp(-m(T)t^S)) \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中:  $G(t, T)$  为任意温度下混凝土的自生体积变形,  $T$  为试验温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t$  为试验观测龄期, d;  $G(T)$ ,  $m(T)$ ,  $S$  为系数(见表 5), 各系数计算公式为

$$G(T) = 100.000 + 2.810T - 0.0001\exp(0.001T^{2.401})$$

$$m(T) = 0.01676\exp(0.001T^2) + 0.097\exp(-0.022T^{1.66}) - 0.0002T - 2.528 \times 10^{-8}\exp(0.001T^{2.45}) - 0.069\exp(-0.007T^{2.88})$$

$$S = 0.750 - 0.003T^{1.06}$$

表 5 不同温度下公式(1)中各项系数的值

| 温度 $T/^{\circ}\text{C}$ | $G(T)$  | $m(T)$   | $S$      |
|-------------------------|---------|----------|----------|
| 10                      | 128.100 | 0.011435 | 0.715555 |
| 15                      | 142.150 | 0.018983 | 0.697061 |
| 20                      | 156.200 | 0.023662 | 0.678185 |
| 25                      | 170.249 | 0.027243 | 0.659022 |
| 30                      | 184.297 | 0.035412 | 0.640000 |
| 35                      | 198.334 | 0.050074 | 0.620033 |
| 40                      | 212.288 | 0.074903 | 0.600271 |
| 50                      | 224.204 | 0.142162 | 0.560317 |

表 6 不同龄期混凝土自生体积变形  $G(t, T)$  计算值与试验值

| 温度 $T/^{\circ}\text{C}$ | 类 别         | 3d   | 7d   | 30d   | 90d   | 180d  | 365d  | 730d  | 1095d | 1460d |
|-------------------------|-------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20                      | 试验值         | 8.0  | 15.0 | 22.5  | 41.5  | 81.5  | 118.0 | 128.1 | 148.4 | 156.0 |
|                         | 式(1)-(2)计算值 | 8.0  | 13.0 | 22.9  | 42.5  | 86.0  | 113.3 | 136.4 | 145.9 | 150.5 |
| 30                      | 试验值         | 12.5 | 22.5 | 42.5  | 88.5  | 118.0 | 142.5 | 161.6 | 171.6 | 181.0 |
|                         | 式(1)计算值     | 12.6 | 21.1 | 48.1  | 85.5  | 114.5 | 144.3 | 167.2 | 175.9 | 179.8 |
| 40                      | 试验值         | 28.3 | 42.3 | 100.0 | 145.1 | 168.5 | 190.5 | 202.1 | 208.0 | 212.0 |
|                         | 式(1)计算值     | 28.7 | 45.5 | 93.1  | 143.0 | 173.2 | 196.3 | 208.1 | 210.9 | 211.7 |
| 50                      | 试验值         | 47.5 | 77.5 | 143.7 | 182.8 | 203.8 | 220.4 | 224.0 | 224.1 | —     |
|                         | 式(1)计算值     | 50.8 | 77.2 | 138.0 | 185.8 | 207.6 | 219.5 | 223.5 | 224.0 | 224.2 |

b. 温度为  $20^{\circ}\text{C}$  的自生体积变形曲线, 在龄期 180d 前的变化比较缓慢, 故其斜率较小。为了减小式(1)的计算误差, 并使其变形规律保持一致, 凡在  $20^{\circ}\text{C}$  及以下各温度的自生体积变形的计算值应为式(1)减式(2)之差。

$$G(t, T) = (4.444 - 5\exp(-0.01t^{1.41}))\ln(t+1) \cdot \exp(-0.001t^{0.01t^{0.99}}) \times 10^{-6} \quad (2)$$

c. 将式(1)及式(2)的计算结果列于表 6, 并与试验值比较, 除个别点外其相对误差都在 5% 以内, 表明计算值与试验曲线符合得比较好。

### 2.2 在温度急剧变化条件下 MgO 水泥混凝土的自生体积变形

采用白山大坝基础(Ⅱ)和内部(Ⅲ)混凝土试件, 在温度突变条件下进行 MgO 水泥混凝土的自生体积变形试验, 并将试验结果示于图 2。从图 2 中可以看出:

a. 膨胀变形曲线 1, 是在  $20^{\circ}\text{C}$  恒温室内观测了 5.7a 的基础老混凝土, 再将其放入  $40^{\circ}\text{C}$  高温养护观测 0.5a 后, 又从  $40^{\circ}\text{C}$  移置  $20^{\circ}\text{C}$  恒温室内并继续观测的自生体积变形过程线。从温度过程线可知, 当温度在 10h 内突降  $18^{\circ}\text{C}$  后, 所测其膨胀变形抵消温度应变后还增长了  $7.3 \times 10^{-6}$ 。然后在  $20^{\circ}\text{C}$  恒温室内继续观测近 4a 的自生体积变形, 如果不计头两天的迅速增长值( $7.7 \times 10^{-6}$ ), 在 4a 龄期内膨胀了  $13.4 \times 10^{-6}$ 。

变形曲线 2, 长期置于  $20^{\circ}\text{C}$  恒温室内, 未经受温度突变影响, MgO 混凝土的自生体积变形却是稳定的, 其膨胀变形过程线也很平稳, 无任何变化。这表

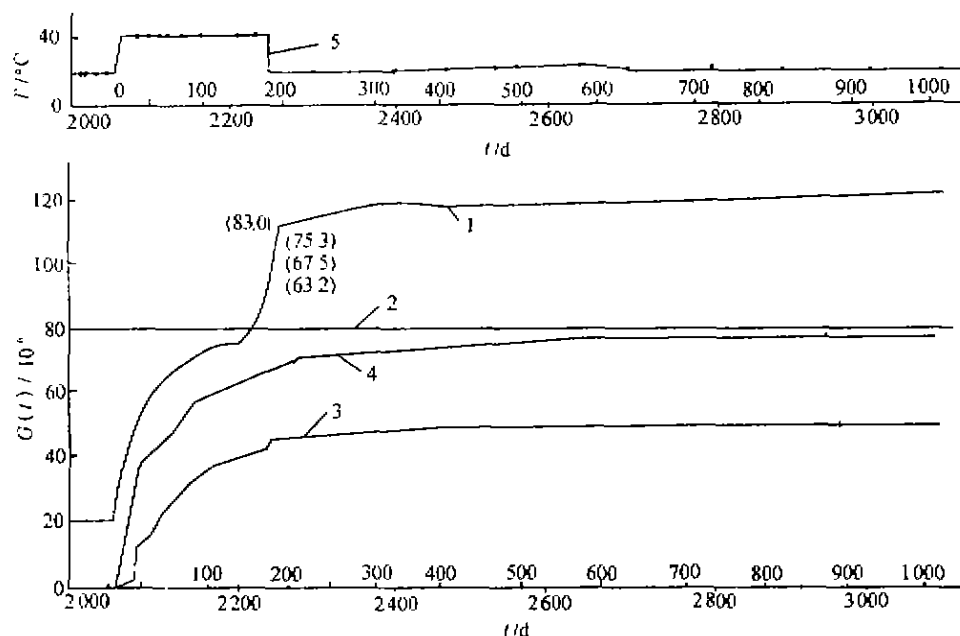


图2 养护温度突变条件下混凝土的体积变形

1.基础老混凝土于20℃养护观测2065d时,放入40℃养护箱观测180d后,又放回20℃养护观测的变形曲线;2.基础老混凝土长期置于20℃养护  $G(t)$  平均值( $53.5 \times 10^{-6}$ );3.基础混凝土温度从40℃降至20℃的变形曲线;4.内部混凝土温度由40℃降至20℃的变形曲线;5.试验温度(从20℃升至40℃再降至20℃)过程线

明常温膨胀变形量较小(曲线1)的MgO微膨胀混凝土,从常温升到高温,自生体积变形是增长的;再从高温突降至常温,其自生体积膨胀变形仍然是增长的,未出现收缩现象.同时也再次说明温度对方镁石水化速率及水化程度的影响确实很大(见图2).

b. 混凝土的自生体积试件成型后置于40℃高温养护,观测0.5a后,从40℃移出,放入20℃恒温室内继续观测,其膨胀变形过程线也示于图2中.由图可知,当温度在10h内急剧降低18℃后,所测基础(曲线3)和内部(曲线4)混凝土的膨胀变形仍然是增加的,即前者增加值为 $2.3 \times 10^{-6}$ ,后者增加值为 $4.0 \times 10^{-6}$ .尔后继续试验观测近4a的自生体积变形增长值分别为 $6.5 \times 10^{-6}$ 和 $7.8 \times 10^{-6}$ .以上试验结果再次说明MgO微膨胀混凝土的自生体积变形是不可逆的,即使在气温骤降情况下,其自生体积膨胀变形也是稳定增长的.由此表明,理想的膨胀变形过程线确实存在.

c. 上面研究了不同高温和温度突变时对自生体积膨胀变形的影响,但是MgO混凝土在低温环境会不会产生膨胀呢?这也是人们所担心的问题.根据1989年1月在铜街子工程作的现场试验观测结果(见表7),外掺4%的MgO混凝土在7℃的低温条件下也能够产生膨胀.但是在接近0℃的影响下,大大延缓了MgO的水化速度,使其膨胀变形速度发展得非常缓慢,在龄期3d前几乎没有膨胀,膨胀变形时间也往后延迟较多,一直到龄期22d之后才出现正值的自生体

积膨胀变形,结果使其膨胀变形量偏小.

表7 外掺MgO混凝土的自生体积变形

| 龄期 $t/d$       | 2    | 3     | 14   | 22   | 28   | 31   | 49   |
|----------------|------|-------|------|------|------|------|------|
| $G(t)/10^{-6}$ | -9.1 | -10.4 | -1.6 | -1.0 | 6.7  | 6.6  | 12.1 |
| 龄期 $t/d$       | 100  | 121   | 163  | 360  | 736  | 919  | 1441 |
| $G(t)/10^{-6}$ | 17.7 | 19.4  | 23.4 | 25.5 | 27.4 | 30.0 | 30.0 |

注:未掺MgO混凝土块的自身变形过程全是收缩的,最大收缩值 $18 \times 10^{-6}$ .

### 2.3 MgO混凝土的自生体积变形对温度应力的影响

a. 根据文献[1]的研究结果(见表8),外掺MgO混凝土的自生体积膨胀变形可以有效地补偿降温所产生的拉应力,大大改善结构的应力状态.因此,在MgO混凝土温度应力分析中必须考虑自生体积变形的影响,同时考虑自身变形的温度效应,这种情况下计算的温度应力才是真实的也是最小的.即温度越高膨胀量越大,抵消掉的拉应力就越多,MgO混凝土膨胀补偿作用就更充分.

表8 MgO混凝土自生体积变形对应力的影响

| 计算层 | 浇筑高程<br>/m | 应力/MPa             |                                       |                                                                |
|-----|------------|--------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|     |            | 自生体积变形<br>$G(t)=0$ | $G(t)_{90d}$<br>$=110 \times 10^{-6}$ | 温度 $T=30^{\circ}\text{C}$ ,<br>$G(t)_{90d}=140 \times 10^{-6}$ |
| 5   | 821        | 0.14               | -0.20                                 | -0.40                                                          |
| 4   | 818        | 0.65               | 0.32                                  | 0.10                                                           |
| 3   | 815        | 1.00               | 0.58                                  | 0.33                                                           |
| 2   | 813.5      | 0.75               | 0.24                                  | 0.16                                                           |
| 1   | 812        | 0.46               | -0.12                                 | -0.05                                                          |

b. 文献[1]对寒潮的研究结果也表明,当气温

骤降时,考虑 MgO 混凝土的自生体积变形所计算的最大温度拉应力为最小,不考虑自生体积变形的普通混凝土的拉应力最大.也就是说,外掺 MgO 混凝土抵御寒潮袭击的能力强于不掺 MgO 混凝土.

### 3 结 论

a. 试验研究结果表明,温度对 MgO 混凝土自生体积变形的膨胀速率和膨胀量的影响较大,其膨胀规律是随着温度的增高而增大.高温的自生体积膨胀变形比常温的要大几倍,但其比值是随龄期的延长而减小的.高温膨胀快,故变形稳定时间较常温提前较多.常温下水化愈慢的方镁石,温度对其水化速度的影响就愈大.

b. 试验温度每增减 10℃时,MgO 混凝土的自生体积变形可增减 1.5 倍,其膨胀变形量可增减  $(30 \sim 35) \times 10^{-6}$ .自生体积变形的经验公式(1)可在 MgO 混凝土的温度应力分析中使用.如果有 20℃的自生体积变形资料,也可根据表 4 中的参数,估算不同温

(上接第 29 页)

c. 弧形闸门的动力稳定性是关系到闸门安全运行的重要问题,除从结构设计及构造上采取措施外,还应注意保养维护和按章操作,并对弧形闸门的动力稳定性开展深入的研究分析.

### 参考文献

- 1 黄廷璞,危盼.我国低水头弧形闸门失事调查和初步分析.金属结构,1986(5):23~41
- 2 阎诗武.皎口水库底孔闸门振动的原型观测研究.水利水运科学,1985(1):33~48
- 3 阎诗武.应用实验模态分析技术识别弧形闸门的模态参数.水利学报,1987(5):46~51
- 4 阎诗武.水工弧形闸门的振动.金属结构,1985(5):21~33
- 5 章继光.我国闸门振动研究情况综述.水力发电,1985(1):36~42
- 6 谢省宗.闸门振动的流体弹性理论.水利学报,1962,4(8):35~49
- 7 吴一红,谢省宗.水工闸门流固耦合动力特性分析.金属结构.1993,(2):1~12
- 8 汪德耀.闸门水下自振频率的分析与计算.河海大学学报,1987,15(3):60~69
- 9 符华,鲍洛金.弹性体系的动力稳定性.北京:高等教育出版社.1960
- 10 殷学纲,李宾.刚架结构的动力稳定分析.工程力学,1994(增刊):970~974
- 11 Brown J E, Hutt J M, Salama A E. Finite element solution to dynamic stability of bars. AIAA J, 1986, 6(7):1423~1425
- 12 Shastri B P, Rao G V. Dynamic stability of bars considering

度条件下的自生体积变形.

c. 试验研究结果表明,在气温骤降情况下,外掺 MgO 混凝土的自生体积膨胀变形是稳定的不可逆的,也不会产生收缩现象.另外,外掺 MgO 混凝土在较低温度条件下也能够产生膨胀,但其膨胀变形速度确实是非常缓慢的.

d. 实践证明,MgO 混凝土在不同温度的自生体积变形对温度应力的影响是巨大的.因此,在 MgO 混凝土的温度应力分析中,既要考虑自生体积变形的重大作用,又必须考虑温度对自生体积变形的影响,才能求得真实的温度应力.最终达到既避免温控措施的目的,又有可能获得显著的技术经济效益.

### 参考文献

- 1 丁宝瑛,岳耀真,朱绛.掺 MgO 膨胀混凝土的温度徐变应力分析.见:丁宝瑛主编.大体积混凝土结构的温度应力与温度控制论文集.北京:兵器工业出版社,1991.382~390
- 2 李承木.氧化镁微膨胀混凝土的变形特性研究.水电站设计,1990(2):1~8 (收稿日期:1999-03-17 编辑:熊水斌)

shear deformation and rotatory inertia. Computers & Structures, 1984, 19(5):823~827

- 13 Shigematsu T, Hara T, Ohga M. Dynamic stability analysis by matrix fuction. J of Engineering Mechanics, 1987, 113(7):1085~1100 (收稿日期:1998-04-15 编辑:熊水斌)

(上接第 32 页)

### 4 结 语

长江中下游具有许多大支流和大湖,也有众多挟带沙卵石的小支流,支流洪水组合,泥沙砾卵石淤积,情况极为复杂多变,与一般大中河流有很大区别,需要更广泛深入的探讨.

1998 年洪水是本世纪以来,水位最高,高水位历时最长的一次洪水,但洪峰流量并不很高;是洪量大体与 1931,1954 年相当的一次特大洪水.推测只是由于河床淤积,特别是河床粗化和砾卵石淤积才使水位异常壅高,达到百年来最高水位.

中下游设防水,宜考虑有一定可能的水情不利组合,同时适当考虑可能的不利沙情.据此确定设防水流量和水位,相应设置堤防.

从可持续发展战略出发,堤防不能愈筑愈高,出路只能是适当地疏浚河道.以现代技术水平,每年开采 300~400 万 t 砾卵石和 1000~2000 万 t 粗沙,既供城乡建设需要,又使粉细沙和其余沙砾卵石能随水流入海,为防汛安全提供一个长治久安之策.

(收稿日期:1999-04-27 编辑:熊水斌)