

大体积混凝土施工热工计算

赵鹏¹ 刘汉旺² 徐洋²

1 北京国顺昌建筑工程有限公司 2 北京志骏腾达建筑工程有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i5.16905

[摘要] 本论文介绍了国家某重点项目中的大体积混凝土一次浇筑成型的热工计算方法及实施效果,按设计要求,混凝土设计强度等级为C30S8,裂缝宽度 $\leq 0.3\text{mm}$,裂缝深度 $\leq 10\text{mm}$ 。从混凝土原材料的选择,含泥量、泥块含量、针片状颗粒含量、含水率、碱含量等进行了严格筛选和控制,经过几十次的试验最终确定混凝土C30S8的配合比,为热工计算提供了基础数据。通过混凝各龄期的收缩当量温差值,以及各龄期弹性模量、松弛系数的计算,从而计算出各龄期混凝土的应力以此判断是否处于规范约定值范围。同时,此混凝土的养护采用了蓄水15cm深的水养,为后期出现不利情况预留了解决方案,如温升或温降差过大,可采用冷水或热水以及水量来调节温差。通过本方案的实施,最终取得了良好的效果,除混凝土表面局部位置龟裂外,均未出现有害裂缝。

[关键词] 大体积混凝; 热工计算; 水养护

中图分类号: TV331 **文献标识码:** A

Thermal calculation for mass concrete construction

Peng Zhao¹ Hanwang Liu² Yang Xu²

1 Beijing Guoshunchang Construction Engineering Co., LTD

2 Beijing Zhijun Tengda Construction Engineering Co., LTD

[Abstract] This paper introduces the thermal calculation method and implementation effect of one-time pouring of large-volume concrete in a key national project. According to the design requirements, the design strength grade of the concrete is C30S8, the crack width is $\leq 0.3\text{mm}$, and the crack depth is $\leq 10\text{mm}$. From the selection of concrete raw materials, the content of mud, mud lumps, needle and flake particles, moisture content, alkali content, etc. were strictly screened and controlled. After dozens of tests, the mix proportion of concrete C30S8 was finally determined, providing basic data for thermal calculation. By calculating the shrinkage equivalent temperature difference values of concrete at each age, as well as the elastic modulus and relaxation coefficient at each age, the stress of concrete at each age is determined to determine whether it has been treated within the specified value range. Meanwhile, the curing of this concrete was carried out by water curing with a water depth of 15cm, reserving solutions for unfavorable situations in the later stage. For instance, if the temperature rise or drop difference is too large, cold or hot water and water volume can be used to adjust the temperature difference. Through the implementation of this plan, good results were ultimately achieved. Apart from local cracks on the concrete surface, no harmful cracks occurred.

[Key words] Mass coagulation; Thermal calculation; Water curing

某国家重点能源研究项目,E区底板采用满堂红筏板基础,其中一侧与C区基础相邻,二者间相距10cm,基础底板尺寸为 $18.6\text{m} \times 15.14\text{m} \times 1.88\text{m}$,设计采用C30S8防水混凝土,要求一次性浇筑成型,筏板混凝土浇筑按项目施工进度计划预计在2023年7月中下旬进行。

1 材料选择及混凝土配合比设计

1.1 材料选择

(1) 水泥采用P·II 42.5中热低碱硅酸盐水泥,3d水化热为 215KJ/Kg ,7天水化热为 262KJ/Kg ,碱含量 $\leq 0.6\%$ 。(2) 粗细骨料:石子为 $5 \sim 31.5\text{mm}$ 连续级配碎石,其含泥量 $\leq 1.0\%$,泥块含量 $\leq 0.5\%$,针片状颗粒含量 $\leq 10\%$,含水率 $\leq 1.5\%$,为非碱活性集料;砂子采用II区中砂,其含泥量 $\leq 3.0\%$,泥块含量 $\leq 1.0\%$,含水率 $\leq 6.0\%$,为非碱活性集料。(3) 掺合料选用II级粉煤灰,碱含量 $\leq 1.15\%$,将烧失量指标控制在 $\leq 5\%$ 。

1.2 混凝土配合设计

1.2.1 设计基本原则

混凝土强度等级为C30, 抗渗等级S8, 氯离子含量≤3Kg/m³, 碱含量≤3Kg/m³, 裂缝宽度≤0.3mm, 且为表层裂缝, 裂缝深度≤10mm。

1.2.2 混凝土配合比设计

经试验室对15组配合比反复试验, 最终C30S8混凝土配合比确定为: 水泥361Kg/m³, 石子1080Kg/m³, 砂782Kg/m³, 水135Kg/m³。

2 混凝土热工计算

2.1 环境温度

经查资料, 项目当地夏季的平均气温为26.1℃。

2.2 混凝土拌合物温度T_c

每立方米混凝土原材料重量、温度、比热及热量。

序号	材料名称	重量W(kg)	比热C(KJ/k×kg)	W×C	材料温度T _i (℃)	T _i ×W×C
1	水	135	4.2	567	19	10773
2	水泥(粉煤灰)	361	0.84	303	25	7581
3	砂子	782	0.84	657	28	18393
4	石子	1080	0.84	907	28	25402
5	砂石含水量	35	4.2	147	26.1	3837
6	合计			2581		65986

注: 水(未加冰)、砂子、石子温度由去年同期实际测得取值

$$T_c = \frac{\sum T_i wc}{\sum wc} = \frac{65986}{2581} = 25.57^\circ\text{C}$$

2.3 混凝土出罐温度T₁

由于搅拌棚为敞开式, 故T₁=T_c=25.57℃

2.4 混凝土入模温度T_i

由于混凝土由现场搅拌站搅拌, 混凝土直接倒入地泵内, 通过输送管到浇筑地点, 需用时间为10min, 混凝土浇筑完需要10min。

$$A_1 = 0.032$$

$$A_2 = 0.0042 \times 10 = 0.042$$

$$A_3 = 0.003 \times 10 = 0.03$$

$$\sum A = A_1 + A_2 + A_3 = 0.032 + 0.042 + 0.03 = 0.104$$

T₁=25.57-(25.57-30)×0.104=26.03℃(运输时的环境温度取30℃)

2.5 实际计算温度取值

考虑到实际情况和现场施工时段的温度变化, 实际计算时, 浇筑混凝土时入模温度取T₀=28℃, 大气温度t₀=26.1℃

2.6 混凝土水化热温升值

由GB50204-2015标准附表3.1可知, Q=400KJ/kg

$$T_{(t)} = \frac{WQ}{\rho C} (1 - e^{-mt})$$

Q—每kg水泥水化热(KJ/Kg) Q=400 KJ/Kg

W—每m³砼中的水泥用量(Kg/m³) W=289(Kg/m³) (扣减粉煤灰72Kg/m³)

c—砼比热, 计算时取0.96(KJ/kg.k)

p—砼密度, 取2400(Kg/m³)

e—常数, e=2.718

m—经验系数, 取m=0.4

t—混凝土浇筑后至计算时的天数(d)

2.6.1 混凝土的最大水化热温升

$$T_{max} = \frac{WQ}{\rho C} = \frac{289 \times 400}{0.96 \times 2400} = 50.174^\circ\text{C}$$

2.6.2 混凝土各龄期的水化热温升

$$T_{(1)} = 50.174 \times (1 - e^{-0.4 \times 1}) = 16.54^\circ\text{C}$$

$$T_{(3)} = 35.06^\circ\text{C}$$

$$T_{(18)} = 50.14^\circ\text{C}$$

$$T_{(6)} = 45.62^\circ\text{C}$$

$$T_{(21)} = 50.16^\circ\text{C}$$

$$T_{(9)} = 48.80^\circ\text{C}$$

$$T_{(24)} = 50.17^\circ\text{C}$$

$$T_{(12)} = 49.76^\circ\text{C}$$

$$T_{(27)} = 50.17^\circ\text{C}$$

$$T_{(15)} = 50.05^\circ\text{C}$$

$$T_{(30)} = 50.17^\circ\text{C}$$

2.7 混凝土各龄期的散热降温值

2.7.1 混凝土第i龄期至i-1龄期散热量

$$\Delta Q_i = \sum_{j=1}^i K_j (t_i - t_0) m_j \beta_j \Delta t_{(i)}$$

K_j—混凝土底板侧面和顶面养护覆盖材料散热系数

$$K_j = \frac{1}{0.043 + \sum_{i=1}^n d/N}$$

d、N—为每一种养护覆盖材料的厚度和传热系数

m_j—混凝土底板侧面和顶面的面积系数

$$m_j = \frac{F_j}{V}$$

F_j—为混凝土底板侧面和顶面的面积, V为混凝土底板的体积

β_j—混凝土底板侧面和顶面养护覆盖材料的透风系数

Δt_(i)—混凝土第i龄期至第i-1龄期的时间间隔(h)

t_i—混凝土第i龄期的相对温度, t_i=T₀+T_{绝(i)}-T_{散(i-1)}

t₀—大气温度

2.7.2 混凝土第i龄期到第i-1龄期的散热降温值

$$\Delta T_{散(i)} = \frac{\Delta Q_i}{\rho C}$$

ρ—混凝土密度, 取2400kg/m³

C—混凝土比热, 取0.96KJ/kg.k

2.7.3 混凝土到第i龄期的散热降温值

$$T_{散(i)} = \sum_{j=1}^i \Delta T_{散(j)}$$

2.8混凝土绝对升温值 $T_{(i)}$

混凝土第*i*龄期时的升温值 $T_{(i)}$ 等于混凝土第*i*龄期水化热升温值 $T_{绝(i)}$ 与混凝土第*i*龄期散热降温值 $T_{散(i)}$ 之差:

$$T_{(i)} = T_{绝(i)} - T_{散(i)}$$

3 混凝土底板验算

3.1侧面及顶面的K、β、m值

底板尺寸为18.6m×15.14m×1.88m,混凝土三面用钢模板外包两层草袋子保温,散热系数为:

$$K_1 = \frac{1}{0.043 + \sum_{i=1}^n d/N} = \frac{1}{0.043 + \frac{0.0025}{58} + \frac{0.02}{0.1}} = 4.11W/m^2 \cdot k$$

通风系数β=1.6,混凝土被钢模板覆盖的面积系数:

$$m_1 = \frac{F_1}{V} = \frac{(18.6 + 15.14 + 7.5) \times 1.88}{(18.6 \times 15.14 - 7.64 \times 1.3) \times 1.88} = 0.152m^{-1}$$

混凝土顶面蓄水150mm深,散热系数为:

$$K_2 = \frac{1}{0.043 + \sum_{i=1}^n d/N} = \frac{1}{0.043 + \frac{0.15}{0.58}} = 3.315W/m^2 \cdot k$$

通风系数β=1.3,混凝土被水覆盖的面积系数:

$$m_2 = \frac{F_2}{V} = \frac{18.6 \times 15.14 - 7.5 \times 1.3}{(18.6 \times 15.14 - 7.64 \times 1.3) \times 1.88} = 0.532m^{-1}$$

3.2混凝土第*i*龄期的散热降温值 $T_{散(i)}$

计算时,取入模温度 $T_0=28^\circ C$,大气温度 $t_0=26.1^\circ C$, $T_{散(0)}=0$,则:

$$t_1 = T_0 + T_{绝(1)} - T_{散(0)} = 28 + 16.54 - 0 = 44.54^\circ C$$

$$t_1 - t_0 = 44.54 - 26.1 = 18.44^\circ C$$

$$\Delta t_1 = 1d = 24h$$

$$\text{因 } T_{散(1)} = \Delta t_{散(1)}$$

故:

$$\Delta T_{散(1)} = \frac{\Delta Q_i}{cp}$$

$$\frac{18.44 \times 24 \times (4.114 \times 0.152 \times 1.6 + 3.315 \times 0.532 \times 1.3)}{0.96 \times 2400} = 0.63^\circ C$$

$$t_3 = T_0 + T_{绝(3)} - T_{散(1)} = 28 + 35.06 - 0.63 = 62.43^\circ C$$

$$t_3 - t_0 = 62.43 - 26.1 = 36.33^\circ C$$

$$\Delta t_3 = 2d = 48h$$

$$\Delta \Delta T_{散(3)} = \frac{\Delta Q_i}{cp} = \frac{36.33 \times 48 \times (4.114 \times 0.152 \times 1.6 + 3.315 \times 0.532 \times 1.3)}{0.96 \times 2400}$$

$$T_{散(3)} = \Delta T_{散(1)} + \Delta T_{散(3)} = 0.63 + 2.49 = 3.12^\circ C$$

$$t_6 = T_0 + T_{绝(6)} - T_{散(3)} = 28 + 45.62 - 3.12 = 70.5^\circ C$$

$$t_6 - t_0 = 70.5 - 26.1 = 44.4^\circ C$$

$$\Delta t_6 = 3d = 72h$$

$$T_{散(6)} = \Delta T_{散(3)} + \Delta T_{散(6)} = 3.12 + 4.57 = 7.69^\circ C$$

$$\Delta T_{散(6)} = \frac{72 \times 44.4 \times (4.114 \times 0.152 \times 1.6 + 3.315 \times 0.532 \times 1.3)}{0.96 \times 2400} = 4.57^\circ C$$

依次类推,计算得出:

$$\Delta T_{散(9)} = 4.43^\circ C \quad T_{散(9)} = 12.12^\circ C \quad \Delta T_{散(21)} = 2.97^\circ C \quad T_{散(21)} = 26.15^\circ C$$

$$\Delta T_{散(12)} = 4.07^\circ C \quad T_{散(12)} = 16.19^\circ C \quad \Delta T_{散(24)} = 2.67^\circ C \quad T_{散(24)} = 28.82^\circ C$$

$$\Delta T_{散(15)} = 3.68^\circ C \quad T_{散(15)} = 19.87^\circ C \quad \Delta T_{散(27)} = 2.39^\circ C \quad T_{散(27)} = 31.21^\circ C$$

$$\Delta T_{散(18)} = 3.31^\circ C \quad T_{散(18)} = 23.18^\circ C \quad \Delta T_{散(30)} = 2.15^\circ C \quad T_{散(30)} = 33.36^\circ C$$

$$\Delta T_{散(18)} = 3.31^\circ C \quad T_{散(18)} = 23.18^\circ C \quad \Delta T_{散(30)} = 2.15^\circ C \quad T_{散(30)} = 33.36^\circ C$$

$$\Delta T_{散(18)} = 3.31^\circ C \quad T_{散(18)} = 23.18^\circ C \quad \Delta T_{散(30)} = 2.15^\circ C \quad T_{散(30)} = 33.36^\circ C$$

$$\Delta T_{散(18)} = 3.31^\circ C \quad T_{散(18)} = 23.18^\circ C \quad \Delta T_{散(30)} = 2.15^\circ C \quad T_{散(30)} = 33.36^\circ C$$

3.3混凝土各龄期的升温值 $T_{(i)}$

$$T_{(1)} = 16.54 - 0.63 = 15.91^\circ C \quad T_{(3)} = 35.06 - 3.12 = 31.94^\circ C$$

$$T_{(6)} = 45.62 - 7.69 = 37.93^\circ C \quad T_{(9)} = 36.68^\circ C$$

$$T_{(12)} = 33.57^\circ C \quad T_{(15)} = 30.18^\circ C$$

$$T_{(18)} = 26.96^\circ C \quad T_{(21)} = 24.01^\circ C$$

$$T_{(24)} = 21.35^\circ C \quad T_{(27)} = 18.96^\circ C$$

$$T_{(30)} = 16.81^\circ C$$

3.4各龄期混凝土收缩当量温差

$$T_{y(i)} = \epsilon_{y(i)} / a$$

$T_{y(i)}$ —为混凝土第*i*龄期的收缩当量温差($^\circ C$)

$\epsilon_{y(i)}$ —为混凝土第*i*龄期的收缩变形值

$$\epsilon_{y(i)} = \epsilon y^0 (1 - e^{-0.01t}) M_1 \dots M_{10}$$

$\epsilon y^0 = 3.24 \times 10^{-4}$,标准状态下的最终收缩值

$M_1 \dots M_{10}$ 考虑各种非标准条件下的修正系数

$M_1 = 1.0, M_2 = 1.13, M_3 = 1.0, M_4 = 1.21, M_5 = 1.2, M_6 = 1.0, M_7 = 0.77, M_8 = 1.02, M_9 = 1.0, M_{10} = 0.85$

a —为混凝土的线膨胀系数,取 1×10^{-5}

则:

$$T_{y(i)} = \epsilon y^0 (1 - e^{-0.01t}) M_1 \dots M_{10} = 3.24 \times 10^{-4} \times 1 \times 1.13 \times 1.21 \times 1.2 \times 1$$

$$\times 0.77 \times 1.02 \times 1 \times 0.85 / 10^{-5} \times (1 - \frac{1}{2.718^{0.01t}}) = 35.5 \times (1 - \frac{1}{2.718^{0.01t}})$$

$$T_{y(1)} = 0.35^\circ C \quad T_{y(3)} = 1.05^\circ C \quad T_{y(6)} = 2.07^\circ C \quad T_{y(9)} = 3.06^\circ C$$

$$T_{y(12)} = 4.01^\circ C \quad T_{y(15)} = 4.94^\circ C \quad T_{y(18)} = 5.85^\circ C \quad T_{y(21)} = 6.72^\circ C$$

$$T_{y(24)} = 7.57^\circ C \quad T_{y(27)} = 8.40^\circ C \quad T_{y(30)} = 9.20^\circ C$$

3.5各阶段阶梯式降温的综合温差

$$\Delta T_{(i)} = \frac{2}{3} [T_{(i-1)} - T_{(i)}] + [T_{y(i)} - T_{y(i-1)}]$$

$$\Delta T_{(1-3)} = \frac{2}{3} [18.91 - 31.94] + [1.05 - 0.35] = -9.99^\circ C$$

$$\Delta T_{(3-6)} = -2.97^\circ C \quad \Delta T_{(6-9)} = 1.82^\circ C \quad T_{(9-12)} = 3.02^\circ C$$

$$\Delta T_{(12-15)} = 3.19^\circ C \quad \Delta T_{(15-18)} = 3.06^\circ C \quad \Delta T_{(18-21)} = 2.84^\circ C$$

$$\Delta T_{(21-24)} = 2.62^\circ C \quad \Delta T_{(24-27)} = 2.42^\circ C \quad \Delta T_{(27-30)} = 2.23^\circ C$$

3.6各龄期砼弹性模量 $E(t)$

$$E_{(t)} = E_{(0)} (1 - e^{-0.09t})$$

$E_{(t)}$ —任意龄期的弹性模量

$E_{(0)}$ —最终的弹性模量,一般取28天的弹性模量 $3 \times 10^4 N / mm^2$

mm^2

t —混凝土浇灌后到计算时的天数

$$E_{(3)} = 0.71 \times 10^4 N / mm^2 \quad E_{(6)} = 1.25 \times 10^4 N / mm^2$$

$$E_{(9)} = 1.67 \times 10^4 \text{ N/mm}^2 \quad E_{(12)} = 1.98 \times 10^4 \text{ N/mm}^2,$$

$$E_{(15)} = 2.22 \times 10^4 \text{ N/mm}^2 \quad E_{(18)} = 2.41 \times 10^4 \text{ N/mm}^2,$$

$$E_{(21)} = 2.55 \times 10^4 \text{ N/mm}^2 \quad E_{(24)} = 2.65 \times 10^4 \text{ N/mm}^2,$$

$$E_{(27)} = 2.74 \times 10^4 \text{ N/mm}^2 \quad E_{(30)} = 2.80 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$$

3.7各时间段平均弹性模量

$$E_{(3-6)} = 0.98 \times 10^4 \text{ MPa} \quad E_{(6-9)} = 1.46 \times 10^4 \text{ MPa}$$

$$E_{(9-12)} = 1.825 \times 10^4 \text{ MPa} \quad E_{(12-15)} = 2.10 \times 10^4 \text{ MPa}$$

$$E_{(15-18)} = 2.315 \times 10^4 \text{ MPa} \quad E_{(18-21)} = 2.48 \times 10^4 \text{ MPa}$$

$$E_{(21-24)} = 2.60 \times 10^4 \text{ MPa} \quad E_{(24-27)} = 2.695 \times 10^4 \text{ MPa}$$

$$E_{(27-30)} = 2.77 \times 10^4 \text{ MPa}$$

3.8各龄期混凝土松弛系数

查第三版施工手册(四),考虑龄期及荷载持续时间影响松弛系数:

$$S_{(3)} = 0.186, S_{(6)} = 0.208, S_{(9)} = 0.212, S_{(12)} = 0.215, S_{(15)} = 0.230,$$

$$S_{(18)} = 0.252, S_{(21)} = 0.301, S_{(24)} = 0.367, S_{(27)} = 0.473, S_{(30)} =$$

1.00

3.9各时间段平均松弛系数

$$S_{(3-6)} = 1/2(S_{(3)} + S_{(6)}) = 1/2(0.186 + 0.208) = 0.197$$

$$S_{(6-9)} = 0.21 \quad S_{(9-12)} = 0.2135 \quad S_{(12-15)} = 0.2225 \quad S_{(15-18)} = 0.241$$

$$S_{(18-21)} = 0.2765 \quad S_{(21-24)} = 0.334 \quad S_{(24-27)} = 0.42 \quad S_{(27-30)} = 0.7365$$

3.10最大拉应力计算

$$\delta_{(t)} = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha \cdot E_{i(t)} \cdot \Delta T_{i(t)} \cdot S_{i(t)}}{1 - \mu} \cdot \left(1 - \frac{1}{\cosh \cdot \beta \cdot \frac{L}{2}}\right)$$

$\sigma_{(t)}$ —各龄期混凝土结构所承受的温度的应力(MPa)

$E_{i(t)}$ —某时间段混凝土平均弹性模量(MPa)

$\Delta T_{i(t)}$ —某时间段混凝土的综合温差

μ —混凝土泊松比,取0.15

L —混凝土结构长度(mm),取18600mm

$S_{i(t)}$ —某时间段混凝土平均松弛系数

CoSh—双曲线余弦函数

α —混凝土膨胀系数,取 1×10^{-5} 。

β —约束状态影响系数,按下式计算:

$$\beta_{(t)} = \sqrt{\frac{CX}{dE_{i(t)}}}$$

d —结构厚度(mm),取1880mm

Cx —地基水平阻力系数(N/mm³),取 $Cx = 0.1 \text{ N/mm}^3$

第一时段(3-6d)

$$\beta_{(1)} = \sqrt{\frac{0.1}{1880 \times 0.98 \times 10^4}} = 7.3673 \times 10^{-5}$$

$$\cosh \cdot \beta \cdot \frac{L}{2} = 1.24$$

则:

$$\sigma_{(1)} = \frac{10^{-5} \times 0.98 \times 10^4 \times (-2.97) \times 0.197}{1 - 0.15} \cdot \left(1 - \frac{1}{1.24}\right)$$

$$= -0.013 \text{ MPa (压应力)}$$

第二时段(6-9d)

$$\beta_2 = 6.04 \times 10^{-5}; \quad \text{Cosh} \beta_2 L/2 = 1.16$$

$$\sigma_2 = 0.009 \text{ MPa}$$

依据GB50204-92标准附录二中42.5#普通水泥(中热低碱硅酸盐水泥)拌制的混凝土温度、龄期对强度的影响曲线可知:9天强度达到75%,强度值为22.5MPa,相当于C15混凝土,即 f_{tk} 取1.2MPa

$$\sum_{i=1}^2 \delta_i = -0.013 + 0.009 = -0.004 \text{ (受压状态)}$$

第三段(9-12d)

$$\beta_3 = 5.4 \times 10^{-5}; \quad \text{Cosh} \beta_3 L/2 = 1.13$$

$$\sigma_3 = 0.016 \text{ MPa}$$

同理: f_{tk} 取1.5MPa

$$k = \frac{f_{tk}}{\sum_{i=1}^3 \delta_i} = \frac{1.5}{-0.013 + 0.009 + 0.0016} = 125 \gg 1.15 \quad \text{满足要求}$$

第四段(12-15d)

$$\beta_4 = 5.03 \times 10^{-5}; \quad \text{Cosh} \beta_4 L/2 = 1.11$$

$$\sigma_4 = 0.017 \text{ MPa}$$

同理: f_{tk} 取1.5MPa。

$$k = \frac{f_{tk}}{\sum_{i=4}^4 \delta_i} = 51.7 \gg 1.15 \quad \text{满足要求}$$

第五段(15-18d)

$$\beta_5 = 4.8 \times 10^{-5}; \quad \text{Cosh} \beta_5 L/2 = 1.10$$

$$\sigma_5 = 0.018 \text{ MPa}$$

同理: f_{tk} 取1.75 MPa。

$$K = 37.2 > 1.15 \quad \text{满足要求}$$

第六段(18-21d)

$$\beta_6 = 4.6 \times 10^{-5}; \quad \text{Cosh} \beta_6 L/2 = 1.09$$

$$\sigma_6 = 0.019 \text{ MPa}$$

同理: f_{tk} 取1.75MPa

$$K = 26.5 > 1.15 \quad \text{满足要求}$$

第七段(21-24d)

$$\beta_7 = 4.5 \times 10^{-5}; \quad \text{Cosh} \beta_7 L/2 = 1.09$$

$$\sigma_7 = 0.022 \text{ MPa}$$

同理: f_{tk} 取2.0MPa

$$K = 22.7 > 1.15 \quad \text{满足要求}$$

第八段(24-27d)

$$\beta_8 = 4.44 \times 10^{-5}; \quad \text{Cosh} \beta_8 L/2 = 1.09$$

$$K = 17.4 > 1.15 \quad \text{满足要求}$$

$$\sigma_8 = 0.027 \text{ MPa}$$

第九段(27-30d)

$$\beta_9 = 4.38 \times 10^{-5}; \quad \text{Cosh} \beta_9 L/2 = 1.08$$

$$\sigma_9 = 0.04 \text{ MPa}$$

$$K = 12.9 > 1.15 \quad \text{满足要求}$$

3.11计算混凝土核心温度(最高温度)

$$T_{\max} = T_0 + T_{(i)\max} = 28 + 37.93 = 65.93^\circ\text{C},$$

蓄水15cm, 计算混凝土的表面温度。

3.11.1 混凝土表面的保温介质放热系数 β (不考虑保温层的热容量)

$$\beta = \frac{1}{\sum \frac{d_i}{N_i} + 0.043} = \frac{1}{0.043 + \frac{0.15}{0.58}} = 3.31 \text{ w/m}^2\text{k}$$

d_i 为第*i*层保温材料厚度(m)

N_i 为第*i*层保温材料的导热系数(W/m·k)

3.11.2 混凝土虚厚度

$$h' = \frac{N}{\beta} = \frac{1.5}{3.31} = 0.453 \text{ m}$$

N 为混凝土的导热系数取1.5W/m·k

3.11.3 混凝土计算厚度

$$H = h + 2h' = 1.88 + 0.453 \times 2 = 2.786 \text{ m}$$

3.11.4 混凝土表面温度

$$\Delta T_{(t)} = T_{\max} - t_0 = 65.93 - 26.1 = 39.83^\circ\text{C}$$

$$T_{b(t)} = t_0 + (4/H^2)h'(H-h')\Delta T(t)$$

$$= 26.1 + (4/2.786^2) \times 0.453 \times (2.786 - 0.453) \times 39.83$$

$$= 47.80^\circ\text{C}$$

3.11.5 混凝土中心最高温度与表面温度之差 ΔT :

$$\Delta T = T_{\max} - T_{b(t)} = 65.93 - 47.80 = 18.13^\circ\text{C} < 25^\circ\text{C}$$

混凝土中心最高温度与表面温度之差小于 25°C , 满足要求。

3.12 结论

经过上述计算验证, 在混凝土顶面蓄水15cm、三侧面用钢模板外包两层草袋子, 采用C30S8粉煤灰防水混凝土一次性浇筑施工区筏板, 理论上能满足大体积混凝土施工的各项技术要求。

4 实施效果

为了更好地降低混凝土的绝对温升值, 以及升温梯度及降温梯度, 混凝土浇筑时间选择在晚上22点开始, 由两站双卧轴搅拌机同时搅拌混凝土, 混凝土搅拌时间为90S, 分别从两个相对短边端开始沿长度方向浇筑, 于第二天早晨7:30浇筑结束。当天最高温度 33.8°C , 夜晚潮湿闷热, 为了更好地控制混凝土入模温度过

高, 在搅拌用水中适量加入了一些冰块, 最终将入模温度控制在 25°C 左右, 低于计算值 26.03°C 。

混凝土浇筑完毕后, 为了预防表面龟裂, 对混凝土表面进行了二次抹压, 4小时后周边砌块蓄水养护, 同时对侧面模板扭松螺杆, 使钢模板与混凝土脱离, 但不拆除模板。

5 结束语

经对本大体积混凝土中心点到对角点的4个测温(沿厚度埋设上中下3个点)点12天的实际测温, 温差比计算值略低, 且混凝土表面除局部位置龟裂外, 均未出现宽度大于0.3mm的有害裂缝。取得了良好的经济效益和社会效益。

【参考文献】

- [1]《大体积混凝土施工规范》(GB 50496-2018) [S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部主编, 中国建筑工业出版社, 2018.
- [2]《混凝土结构工程施工规范》(GB 50666-2011) [S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部主编, 中国建筑工业出版社, 2011.
- [3]《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB 50204-2002) (2011版) [S]. 中国建筑科学研究院主编, 中国建筑工业出版社, 2011.
- [4]《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)(2015版)[S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部主编, 中国建筑工业出版社, 2015.
- [5]《混凝土工程结构验收规范》(GB50204-2015)[S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部主编, 中国建筑工业出版社, 2015.
- [6]朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 中国水利水电出版社, 2012.08:725.
- [7]《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55-2011) [S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部主编, 中国建筑工业出版社, 2011.
- [8]《建筑施工手册》(第四版)[G]. 中国建筑工业出版社, 2003.

作者简介:

赵鹏(1975—), 男, 汉族, 四川南充人, 清华大学硕士研究生, 就职于北京国顺昌建筑工程有限公司, 国家注册一级建造师, 高级工程师, 研究方向混凝土结构。