

Design of layered pouring of large volume piers and foundation and verification of temperature crack control

Changmiao Wang

China Classification Society Quality Certification Co., Ltd. (Hubei Branch), Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

During the initial pouring phase of mass concrete, cement generates substantial hydration heat, causing rapid internal temperature rise and volume expansion. Subsequent cooling and shrinkage generate tensile stress within the structure. When this stress exceeds the concrete's ultimate tensile strength, cracks may develop internally, posing significant structural hazards. Temperature crack control remains a critical factor in mass concrete construction. This study utilizes a fixed mast pier foundation project at a port engineering site to investigate layered pouring design for mass concrete piers. The research establishes thickness relationships between different pouring layers and proposes an "internal cooling, external protection" thermal control strategy through controlled crack analysis. These measures effectively maintain both maximum internal temperatures and surface temperature differences within specified limits.

Keywords

large volume concrete; layered pouring design; crack control verification; surface insulation maintenance

大体积墩台分层浇筑设计及温度裂缝控制验算

王昌淼

中国船级社质量认证有限公司（湖北分公司），中国·湖北 武汉 430000

摘 要

大体积混凝土在浇筑初期水泥产生大量水化热，内部温度迅速升高，体积膨胀，后期冷却收缩产生拉应力，拉应力超过混凝土极限抗拉应力时就会在其内部产生裂缝，对结构产生较大的危害，温度裂缝的控制是大体积混凝土施工时控制的关键要素。本文结合项目码头工程固定桅杆吊墩台施工工程实例，探讨大体积墩台的分层浇筑设计，得出各分层厚度的关系，并通过温度裂缝的控制验算，提出相应的“内降外保”温控措施，使混凝土的内部最高温度和内表温差控制在要求以内。

关键词

大体积混凝土；分层浇筑设计；裂缝控制验算；表面保温养护

1 工程概况

项目码头结构为高桩梁板结构，码头平台设现浇桅杆吊墩台一座，结构尺寸为 $21.56\text{m} \times 30.00\text{m} \times 2.50\text{m}$ ，墩台前、后沿线与码头一致。墩台平面图如图 1-1 所示。

2 分层浇筑设计

2.1 层间关系

由于墩台的尺寸一般都较大，高度较大，一般采用分层分块浇筑的形式。若墩台面积较大，虽然分层，但一层一次仍然难以浇筑，可以考虑分层且分块浇筑。项目码头墩台面积为 646.8m^2 ，面积并不大，只需考虑分层浇筑而不必分块。

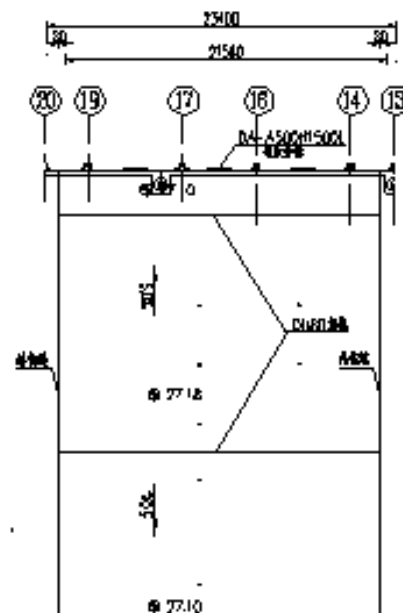


图 1-1 墩台平面图

【作者简介】王昌淼（1989-），男，中国湖北黄冈人，本科，工程师，从事技术管理研究。

上一层混凝土浇筑时,对下一层形成一个向下的荷载作用,假设该荷载为均布荷载,将在下一层形成拉应力和压应力。混凝土抗压应力远大于抗拉应力,具有抗压能力强而抗拉发力弱的特点,且在墩台底部有底板钢筋承担拉应力作用,故以控制第*i*层混凝土顶面上的拉应力不大于混凝土的抗拉强度作为混凝土分层的主要控制因素。

假设第一层浇筑高度为*h*₁,第二层浇筑高度为*h*₂,以此类推为*h*₃...*h*_{*n*}。第*i-1*层浇筑后,沿桩头取宽度为*B*,高度为*h*_{*i-1*}的板带。按面层不配筋的素混凝土,板带之截面抵抗距为:

$$W=Bh_{i-1}^2/6$$

第*i*层*h*_{*i*}混凝土对第(*i-1*)层混凝土施加的线荷载:

$$q=h_iB=2.5\times10^4h_iB(N/m)$$

墩台混凝土简化模型为多跨连续梁,混凝土在桩头位置的负弯矩为:

$$M=\alpha ql^2=2.5\times10^3h_iBl^2(N\cdot m)$$

弯矩越大时,产生的拉应力越大,跨度最大*l*=6.7时为最不利,此时产生在混凝土面上产生的拉应力为:

$$\sigma=\frac{M}{W}$$

混凝土强度等级为 C30,取安全系数 *K*=1.3,则:

$$K=f_t/\sigma$$

代入计算可得: *h*_{*i*}≤1.63*h*_{*i-1*}。

2.2 底层高度的选择

选择第一层的浇筑高度时,考虑的大原则如下:

- (1) 底模的支撑性能;
- (2) 混凝土的供应能力、温度裂缝的控制情况;
- (3) 墩台的整体性及抗渗性;
- (4) 施工进度及现场组织。

这几大原则相互制约,对立统一。分层越多,对底模支撑有利,散热快,但施工周期长,墩台整体性和抗渗性也较差。项目码头墩台底模支撑采用 Q235 钢板 400×400×14 的双牛腿,主梁采用 H588 型钢,次梁采用工 36a 型钢,综合施工进度及底模支撑、温度控制、层间关系等多方面因素,最终确定分两层浇筑,第一层浇筑 1.0m,第二层浇筑 1.5m。

3 混凝土温度裂缝控制计算

大体积混凝土在施工过程中控制中心最高温度,中心最高温度与表面温度温差,表面温度与大气温度温差在允许范围内,则可控制混凝土裂缝的出现。

3.1 中心最高温度控制 (内部最高温度 ≤ 75℃)

依据《简明施工计算手册》中混凝土内部实际最高温度的计算,混凝土内部的中心最高温度按下式计算:

$$T_{max}=T_0+T_{(t)}\times\xi$$

式中, *T*_{max}--- 混凝土内部中心最高温度 (℃);

*T*₀--- 混凝土的浇筑入模温度 (℃);

*T*₀--- 混凝土在 *t* 龄期时的绝热温升 (℃);

ξ --- 不同浇筑块厚度的温降系数;

依据《简明施工计算手册》中混凝土裂缝控制施工计算,混凝土的水化热绝对温升值一般可按下式计算:

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

式中, *T*₀--- 浇完一段时间 *t*,混凝土的绝热温升值 (℃);

*m*_{*c*}--- 每立方米混凝土水泥用量 (kg/m³),对于 C30,取为 340;

Q--- 每千克水泥水化热量 (J/kg),对于 42.5 号矿渣水泥,取为 335;

C--- 混凝土的比热容,一般取 0.96KJ/(kg·K);

P--- 混凝土的质量密度,取 2400 kg/m³;

t --- 龄期;

m --- 与水泥品种比表面、浇筑时有关的经验系数,一般取 0.2 ~ 0.4,计算时取为 0.3。

代入计算可得,3 天龄期时, *T*₀=29.3 (℃),依次代入,可得不同龄期的绝热温升,如下表。

表 1 混凝土绝热温升计算表

<i>t</i> (d)	3	6	9	12	15	18	21	24
<i>T_r</i> (℃)	29.3	41.2	46.1	48.0	48.8	49.1	49.3	49.4

由表可以得到结论:混凝土最高绝热温升 *T*₀max=49.4℃ 不同龄期不同浇筑厚度的降温系数如表 2 所示。

表 2 不同龄期不同浇筑厚度的混凝土 ξ 值

厚度 <i>h</i> (m)	不同龄期时的 ξ 值							
	3	6	9	12	15	18	21	24
1.0	0.36	0.29	0.17	0.09	0.05	0.03	0.01	
1.5	0.49	0.46	0.38	0.29	0.21	0.15	0.12	0.08

混凝土的浇筑入模温度控制为 25℃,此时混凝土内部最高温度在浇筑厚度为 1m 时, *T*_{max}=25+0.36×49.4=42.8(℃) < 75;浇筑厚度为 1.5m 时, *T*_{max}=25+0.49×49.4=49.2(℃) < 75,依据《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T3650-2020)中对大体积混凝土施工的规定:“对大体积混凝土进行温度控制时,应使其内部最高温度不大于 75℃”,实际内部最高温度均在规范允许范围内,符合要求。

3.2 温差控制 (中心最高温度 - 表面温度 ≤ 25, 表面温度 - 大气温度 ≤ 20)

1) 浇筑第一层混凝土时,此时由于墩台钢筋的影响,在表面覆盖保温材料操作不便,采用蓄水养护进行温度控制,根据热交换原理,每 1m³ 混凝土在规定时间内,内部中心温度降到表面温度时放出的热量,等于混凝土结构物在此养护期间散失到大气中的热量,依据《简明施工计算手册》混凝土蓄水养护温度控制计算,混凝土表面所需的热阻系数可按下式进行计算:

$$R = \frac{XM(T_{\max} - T_b)K}{700T_0 + 0.28m_c Q_{(t)}}$$

在式中：

R--- 混凝土表面的热阻系数 (K/W)；
X--- 混凝土维持到预定温度的延续时间 (h)；
M--- 混凝土结构物的表面系数 (1/m)；
 $T_{\max}$ --- 混凝土的中心温度；
 T_b --- 混凝土的表面温度；
K--- 传热系数修正值，可取为 1.3；
700--- 混凝土的热容量，即比热与密度的乘积 (kJ/(m³ · K))；

T_0 --- 混凝土浇筑振捣完毕开始养护时的温度；

m_c --- 每 m³ 混凝土的水泥用量 (kg/m³)；

$Q_{(t)}$ --- 混凝土在规定龄期内水泥的水化热。

混凝土的表面蓄水深度计算式为：

$$h_w = R \cdot \lambda_w$$

h_w --- 混凝土表面的蓄水深度；

λ_w --- 水的热导率，取 0.58W/m · K；

式中是令 $T_{\max} - T_b = 20$ 进行计算得到的蓄水深度，通过测温，中心温度与表面温度之差大于 20 时，可采取提高水温或调整水深进行处理，蓄水深度计算调整式为：

$$h'_w = h_w \cdot \frac{T'_b}{T_a}$$

h'_w --- 调整后的蓄水深度；

h_w --- 按 =20 时计算的蓄水深度；

T'_b --- 需要蓄水养护温度，即 =-20；

T_a --- 大气平均温度。

设温度控制时间为 14 天，则：

$$X = 14 \times 24 = 336 \text{ (h)}$$

$$M = (21.56 \times 30 + 21.56 \times 1 \times 2 + 30 \times 1 \times 2) / (21.56 \times 30) = 1.16 \text{ (1/m)}$$

$T_{\max} - T_b = 20$ ，又设 $K = 1.3, T_0 = 25, m_c = 340 \text{ (kg)}$ ， $Q_{(t)} = 335 \text{ kJ/(m}^3 \cdot \text{K)}$

代入计算： $R = 336 \times 1.16 \times 20 \times 1.3 / (700 \times 25 + 0.28 \times 340 \times 335) = 0.205 \text{ K/W}$ ，

$h_w = 0.205 \times 0.58 = 0.085 \text{ m} = 11.9 \text{ cm}$ ，取为 12cm。

此时， $T_b = T_{\max} - 20 = 42.8 - 20 = 22.8$ ，大气温度取为 22， $T_b - T_a = 22.8 - 22 = 0.8 < 20$ ，依据《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T3650-2020) 中对大体积混凝土施工温控指标的规定：“混凝土浇筑体的里表温差不宜大于 25℃，混凝土浇筑体表面与大气温差不宜大于 20℃”，实际表面与大气温差为 0.8℃，满足规范的要求。在安装侧模板时，侧模板高度为 1.2m，蓄水养护时蓄水深度 12cm。

2) 浇筑第二层混凝土时，表面采用覆盖土工布和塑料薄膜进行保水保温。依据《简明施工计算手册》混凝土表面温度控制裂缝计算，混凝土的表面温度可按下式计算：

$$T_{b(t)} = T_a + \frac{4h'(H-h')\Delta T_{(t)}}{H^2}$$

式中， $T_{b(t)}$ --- 龄期 t 时，混凝土的表面温度 (℃)；

T_a --- 龄期 t 时，大气的平均温度 (℃)；

H--- 混凝土的计算厚度，

h--- 混凝土的实际厚度 (m)；

h' --- 混凝土的虚厚度 (m)， $h' = K \frac{\lambda}{\beta}$ ；

λ --- 混凝土的热导系数，取 2.33W/(m · K)；

K--- 计算折减系数，可取 0.666；

β --- 模板及保温层的传热系数 (W/(m² · K))，

$$\beta = 1 / \left(\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\beta_a} \right)$$

δ_i --- 各种保温层的厚度 (m)；

λ_i --- 各种保温层的热导系数 (W/(m · K))；

β_a --- 空气层传热系数，可取 23 W/(m² · K)；

$\Delta T_{(t)}$ --- 龄期 t 时，混凝土内部最高温度与外界气温之差 (℃)， $\Delta T_{(t)} = T_{\max} - T_a$

当浇筑厚度为 1.5 时， $T_{\max} = 49.2$ ，大气温度根据长年气象统计取为 22℃，此时， $\Delta T_{(t)} = 27.2^\circ\text{C}$ 。

采用一层塑料薄膜与 1.5cm 厚的草袋保温养护时：

$$\beta = 1 / (0.001/0.04 + 0.15/0.14 + 1/23) = 5.7$$

$$h' = 0.666 \times 2.33/5.7 = 0.27 \text{ (m)}$$

$$H = h + 2 = 1.5 + 2 \times 0.27 = 2.04 \text{ (m)}$$

$$T_{b(t)} = T_a + \frac{4h'(H-h')\Delta T_{(t)}}{H^2} = 22 + 4 \times 0.27 \times 1.77 \times 27.2/2.04/2.04 = 34.5 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$T_{\max} - T_{b(t)} = 49.2 - 34.5 = 14.7 < 25$ ， $T_{b(t)} - T_a = 34.5 - 22 = 12.5 < 20$ ，依据《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T3650-2020) 中对大体积混凝土施工温控指标的规定：“混凝土浇筑体的里表温差不宜大于 25℃，混凝土浇筑体表面与大气温差不宜大于 20℃”实际里表温差为 14.7℃，表面与大气温差为 12.5℃，在规范允许范围内，满足要求。

4 结语

大体积混凝土在施工过程中，采用分层浇筑，并通过温度裂缝验算采取措施，可有效的控制温度裂缝，本工程的成功实例希望能为其它类似工程提供借鉴。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部.《水运工程混凝土施工规范》(JTS202-2011). 北京市朝阳区：人民交通出版社.2011年6月
- [2] 汪正荣 朱国梁编著.《简明施工计算手册》(第三版)北京西郊：中国建筑工业出版社，2005年7月
- [3] 刘剑锋 罗丁.《高桩码头墩台结构施工技术》. 湖北宜昌：葛洲坝集团科学与技术.2011年9月
- [4] 中华人民共和国交通运输部.《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T3650-2020). 北京市朝阳区：人民交通出版社.2011年7月