

基于数值模拟和回弹验证的蒸养预制大体积混凝土方块开裂风险分析

李沛^{1,2}, 李杰^{1,2}, 王伟旭³, 李俊毅^{1,2}, 曹忠露^{1,2}, 徐建光³

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司; 2. 中交第一航务工程局有限公司; 3. 青岛中航工程试验检测有限公司)

摘 要: 在某重力式方块码头工程中, 为预判和分析蒸养预制大体积混凝土方块在不同环境条件和蒸养制度下的开裂风险, 采用回弹法检测该大体积混凝土同条件试件的强度, 并采用 Matlab 数值模拟该混凝土方块在不同工况下的温度场和应力场, 分析其开裂风险程度。结果表明环境温度和蒸养制度对大体积混凝土方块的影响较大, 适当提高环境温度、延长蒸养恒温时间并降低蒸养升温 and 降温速率, 有利于降低混凝土开裂风险; 当环境温度低于 10 ℃时, 混凝土开裂风险程度较大, 应停止大体积混凝土方块的工厂预制。

关键词: 预制大体积混凝土方块; 蒸养工艺; 回弹强度; 数值模拟; 开裂风险

0 引言

混凝土性能主要由混凝土组成材料、配合比、施工和养护工艺等因素决定。在原材料、配合比和施工工艺一定的情况下, 混凝土的早期养护方式、养护温度、养护湿度、养护时间等养护条件, 对混凝土的水化程度、力学性能、耐久性能等均具有重要影响。工程实践已经证明^[1]: 做好大体积混凝土结构的保温保湿及养护工作, 会有效提高混凝土的匀质性, 提高混凝土抗拉性能, 降低混凝土离散性和随机性, 减轻约束对大体积混凝土作用的影响, 有效控制裂缝的产生和发展。

国内某重力式方块码头工程抛石基床和主体结构由预制混凝土方块和现浇胸墙组成, 其中预制混凝土方块尺寸最大达 10 m×6 m×4.3 m (长×宽×高), 是目前资料可查的国内最大尺寸的预制混凝土方块, 该工程为提高预制质量和加快模板周转率, 拟对大体积混凝土方块采用蒸汽养护工艺预制。但若是蒸养制度不合理, 可能会导致预制的大体积混凝土方块开裂, 进而造成较大的经济损失, 因此有必要制备蒸养预制大体积混凝土方块的同条件小尺寸试件, 并对其进行实际检测分析是否存在开裂的风险; 同时, 依据 GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》^[2]的相关规定, 采用 Matlab 数值模拟原尺寸混凝土方块蒸汽养护期间的温度场和应力场, 分析该大体积混凝土预制方块因温差导致的开裂风险, 以期该项目混凝土

预制方块蒸养工艺的制定提供参考。

1 混凝土配合比

预制混凝土方块设计强度等级 C30, 其胶凝材料由 P·O 42.5 水泥、F 类 II 级粉煤灰和粒化高炉矿渣粉按一定比例混合而成, 外加剂选用缓凝型聚羧酸高性能减水剂。经反复试配、测试和调整, 确定混凝土配合比如表 1 所示。

表 1 重力式码头预制方块混凝土配合比

胶凝材料/ (kg·m ⁻³)	水/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	碎石/(kg·m ⁻³)			外加剂 掺量/%	坍落 度/ mm
			5~20 mm	20~40 mm	40~80 mm		
276	135	732	391	651	260	2.5	70

2 蒸养工艺

蒸汽养护工艺通常包括静停期、升温期、恒温期和降温期 4 个阶段^[3-6]:

1) 静停期是将混凝土预制构件在浇筑完成后放置在室温下进行养护的过程。在此期间, 骨料在重力作用下下沉, 内部气泡向外扩散, 水泥在蒸汽养护前开始水化并具有一定的初始强度;

2) 升温期是混凝土预制构件蒸汽养护温度逐步升温的过程。在此期间, 当蒸汽温度高于混凝土表面温度时, 蒸汽会在混凝土表面冷却和凝结, 冷却和凝结后的气体和水分会沿混凝土表面空隙逐渐渗入混凝土内部, 造成内部空隙增多, 因此升温速度不宜过快;

3) 恒温期是混凝土预制构件蒸汽养护温度保

持不变的过程。在此期间，高温使水泥水化剧烈，强度逐渐增长，混凝土内部水分、气体持续膨胀。因此蒸汽温度不宜过高；

4) 降温期是混凝土预制构件蒸汽养护温度逐步降低的过程。在此期间，养护蒸汽降低速度不宜过快，这是因为降温速度过快可能会导致混凝土内外温差过大，在混凝土内产生过大的收缩和拉应力，最终可能导致混凝土开裂。

根据施工进度要求，结合环境温度制定了 12 种蒸汽养护制度，对应 12 种工况，见表 2。

表 2 12 种工况蒸汽养护制度

工况序号	蒸养温度/℃	环境温度/℃	混凝土入模温度/℃	总模拟时长/h	浇筑时间/h	静置时间/h	升温时间/h	恒温时间/h	降温时间/h
1	45	0	5	120	6	6	5	77	5
2		10	10		6	6	4	50	4
3		15	15		6	6	4	45	4
4		20	20		6	6	3	26	3
5		25	25		6	6	3	20	3
6		30	30		6	6	3	12	3
7	50	0	5		6	6	5	77	5
8		10	10		6	6	4	50	4
9		15	15		6	6	4	45	4
10		20	20		6	6	3	26	3
11		25	25		6	6	3	20	3
12		30	30		6	6	3	12	3

3 回弹强度结果及分析

考虑到使用原尺寸的预制混凝土方块进行回弹检测可能导致不必要的经济损失，因此按表 2 中的 12 种蒸养制度分别成型了 1.00 m×0.60 m×0.43 m(长×宽×高)的同条件小型试件，并依据 JTS 239—2015《水运工程混凝土结构实体检测技术规范》^[7] 对上述同条件试件进行了回弹强度测试，结果见表 3。

表 3 预制方块混凝土回弹强度结果

工况序号	强度等级	试配强度/MPa	10 个测区的强度代表值/MPa										强度推定值/MPa
			测区 1	测区 2	测区 3	测区 4	测区 5	测区 6	测区 7	测区 8	测区 9	测区 10	
1	C30	38.2	39.9	38.0	39.9	40.3	40.3	38.0	40.5	39.9	40.5	38.3	37.9
2	C30	38.2	50.0	49.7	49.0	51.1	48.1	47.2	47.4	48.3	47.4	47.4	46.4
3	C30	38.2	53.3	49.0	47.9	49.0	50.7	47.9	48.8	48.6	48.3	50.4	46.7
4	C30	38.2	45.6	46.1	51.1	50.2	52.5	48.1	47.9	47.9	48.1	47.4	44.9
5	C30	38.2	48.3	48.8	47.0	50.4	48.3	47.7	47.9	47.4	47.4	48.3	46.6
6	C30	38.2	48.8	51.4	51.8	56.2	52.1	52.3	50.2	51.6	50.4	51.1	48.4
7	C30	38.2	39.0	40.3	39.0	38.8	37.4	38.6	38.2	39.2	38.6	38.6	37.6
8	C30	38.2	37.6	38.0	38.4	38.2	39.7	39.0	38.6	38.0	38.2	38.4	37.5
9	C30	38.2	48.8	55.9	52.8	49.5	51.8	48.1	48.6	50.2	50.0	51.6	46.8
10	C30	38.2	55.9	53.3	62.8	55.9	55.4	50.0	50.0	45.2	50.4	52.3	45.3
11	C30	38.2	56.4	50.4	51.8	56.4	51.6	52.1	54.0	51.8	50.2	53.5	49.2
12	C30	38.2	45.0	47.2	48.6	46.3	47.9	53.3	51.6	57.2	54.2	54.5	43.8

由表 3 可知，经蒸养后的混凝土强度均能满足设计强度等级，但工况 1、工况 7、工况 8 的强度均达不到 C30 的试配强度(38.2 MPa)，说明在上述工况下的混凝土内部存在薄弱，较其他工况下的混凝土具有更高的开裂风险，即工况 1、工况 7、工况 8 对应的环境温度和蒸养制度对大体积混凝土方块的负面影响较大。

4 Matlab 数值模拟方法

目前常用的数值模拟软件有 Matlab 和 Comsol，Matlab 提供了一个高级的矩阵/阵列语言环境，主要用于数值计算、符号计算和数据可视化，而 Comsol 则更侧重于物理场仿真的操作界面，主

要用于多物理场仿真。考虑到本文的数值模拟主要为温度应力的计算,因此选用了 Matlab 作为数值模拟软件。

4.1 混凝土绝热温升温度场

建立预制方块混凝土温度场的三维空间坐标(笛卡尔坐标系,图1),依据《大体积混凝土施工标准》规定,温度场采用三维中心有限差分法进行计算,差分公式如式(1)一式(4)所示。

$$T_y = \frac{T(x+1, y, z, i-1) - 2T(x, y, z, i-1) + T(x-1, y, z, i-1)}{dx^2} \quad (1)$$

$$T_x = \frac{T(x, y+1, z, i-1) - 2T(x, y, z, i-1) + T(x, y-1, z, i-1)}{dy^2} \quad (2)$$

$$T_z = \frac{T(x, y, z+1, i-1) - 2T(x, y, z, i-1) + T(x, y, z-1, i-1)}{dz^2} \quad (3)$$

$$T(x, y, z, i) = T(x, y, z, i-1) + a(T_y + T_x + T_z)dt + T(i) - T(i-1) \quad (4)$$

式中: $T(x, y, z, i)$ 为预制混凝土构件内坐标编号 (x, y, z) 的坐标点在第 i 计算区段(龄期为 t_i, h) 的温度; a 为混凝土热扩散率,取 $0.0035 \text{ m}^2/\text{h}$; $T(i)$ 为第 i 计算区段的绝热温升温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

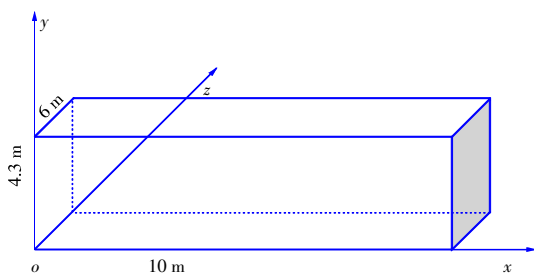


图1 预制方块混凝土温度场的三维空间坐标

4.2 混凝土收缩当量温度计算

混凝土收缩相对变形值的当量温度可按下式计算:

$$T_y(t) = \varepsilon_y(t) / \alpha \quad (5)$$

式中: $T_y(t)$ 为龄期 t 时混凝土收缩值当量温度; $\varepsilon_y(t)$ 为龄期为 t 时混凝土收缩引起的相对变形值; α 为混凝土的线膨胀系数,取 10^{-5} 。

$$\varepsilon_y(t) = \varepsilon_y^0(t) \times (1 - e^{-0.01t}) \times M_1 \times \dots \times M_{11} \quad (6)$$

式中: $\varepsilon_y^0(t)$ 为在标准试验状态下混凝土最终收缩的相对变形值,取 4.0×10^{-4} ; M_1, M_2, \dots, M_{11} 为混凝土收缩变形不同条件影响修正系数,参考《大体积混凝土施工标准》附录 B 中的表 B.2.1。

4.3 混凝土温度应力分析

混凝土自约束拉应力按下式计算:

$$\sigma(t) = \frac{\alpha}{2} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta T_{li}(t) \cdot E_i(t) \cdot H_i(t, \tau) \quad (7)$$

式中: $\sigma(t)$ 为龄期为 t 时因混凝土浇筑体里表温差产生自约束拉应力的累计值, MPa; $\Delta T_{li}(t)$ 为龄期为 t 时在第 i 计算区段混凝土浇筑体里表温差的增量, $^{\circ}\text{C}$; $E_i(t)$ 为第 i 计算区段龄期为 t 时,混凝土的弹性模量, MPa; α 为混凝土的线膨胀系数; $H_i(t, \tau)$ 为龄期为 τ 时,在第 i 计算区段产生的约束应力延续至 t 时的松弛系数,参考《大体积混凝土施工标准》附录 B 中表 B.6.1。

地基外约束应力按下式计算:

$$\sigma_x(t) = \frac{\alpha}{1-\mu} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta T_{2i}(t) \cdot E_i(t) \cdot H_i(t, \tau) \cdot R_i(t) \quad (8)$$

$$\Delta T_{2i}(t) = \Delta T_{2i}(t-j) - \Delta T_{2i}(t) \quad (9)$$

$$R_i(t) = 1 - \frac{1}{\cosh\left(\sqrt{\frac{C_x}{H \cdot E(t)}} \cdot \frac{L}{2}\right)} \quad (10)$$

式中: $\sigma_x(t)$ 为混凝土龄期为 t_i 时,因综合降温,在外约束条件下产生的拉应力, N/mm^2 ; $\Delta T_{2i}(t)$ 为混凝土龄期为 t_i 时,在第 i 计算区段内,混凝土浇筑体综合降温差的增量, $^{\circ}\text{C}$; μ 为混凝土泊松比,取 0.15; $R_i(t)$ 为混凝土龄期为 t_i 时,在第 i 计算区段,外约束的约束系数; L 为混凝土浇筑体的长度, mm; H 为混凝土浇筑体的厚度,该厚度为块体实际厚度与保温层厚度换算混凝土虚拟厚度之和, mm; 本文中混凝土养护采用蒸汽养护,不考虑保温层的影响; C_x 为外约束介质的水平变形刚度, N/mm^3 ,参考《大体积混凝土施工标准》附录 B 的表 B.6.4。

4.4 控制温度裂缝的条件

混凝土抗拉强度按下式计算:

$$f_{tk}(t) = f_{tk}(1 - e^{-\gamma t}) \quad (11)$$

式中: $f_{tk}(t)$ 为混凝土龄期为 t 时的抗拉强度标准值, MPa; f_{tk} 为混凝土抗拉强度标准值, MPa,参考《大体积混凝土施工标准》附录 B 中表 B.7.1; γ 为系数,应根据所用混凝土试验确定,当无试验数据时,取 0.3。

混凝土防裂性能按下式进行判断：

$$\sigma(t) \leq f_{tk}(t)/K \tag{12}$$

式中： K 为防裂安全系数，取 1.15。

5 数值模拟结果及开裂分析

依据该工程大体混凝土预制方块尺寸、原材料、前期配合比和蒸汽养护制度，参照《大体积混凝土施工标准》附录 B 中规定，采用上述 Matlab 数值模拟方法可得到各工况下预制混凝土方块的最大中心温度、最大中心温度自约束力、蒸汽养护结束后可能开裂时刻、最大外约束力的数值模拟结果，具体见表4。

表 4 预制方块混凝土温度应力和开裂风险模拟结果

工况 序号	最大中心 温度/℃	最大温度自约束力/(N·mm ⁻²)			自约束 力开裂	蒸汽养护结 束后可能 开裂时刻/h
		x	y	z		
1	48.85	2.57	2.57	0.87	是	3
2	50.88	1.72	1.72	0.80	否	—
3	58.24	1.40	1.40	0.68	否	—
4	63.81	0.93	0.93	0.56	否	—
5	69.10	0.70	0.70	0.47	否	—
6	74.28	0.51	0.51	0.40	否	—
7	52.43	2.82	2.82	0.93	是	2
8	52.30	1.88	1.88	0.82	是	14
9	58.37	1.53	1.53	0.68	否	—
10	63.90	1.01	1.01	0.56	否	—
11	69.14	0.77	0.77	0.47	否	—
12	74.30	0.56	0.56	0.40	否	—

由表 2 与表 4 可知：开裂时间以混凝土开始浇筑时刻算起，工况 1 中环境温度 0℃，混凝土入模温度为 5℃，混凝土经历恒温 45℃蒸汽养护，在蒸汽养护结束后 3 h 有可能开裂；工况 7 中环境温度 0℃，混凝土入模温度为 5℃，混凝土经历恒温 50℃蒸汽养护，在蒸汽养护结束后 2 h

有可能开裂；工况 8 中环境温度 10℃，混凝土入模温度为 10℃，混凝土经历恒温 50℃蒸汽养护，在蒸汽养护结束后 14 h 有可能开裂；其余工况大体积混凝土施工、养护工艺，120 h 内开裂可能性较小。

综合考虑回弹强度检测结果可知：混凝土入模温度越高，其达到的中心温度越高；环境温度越高，蒸养升温 and 降温速率越慢，恒温时间越长，越有利于降低大体积混凝土开裂风险。因此可适当提高环境温度，延长蒸养恒温时间并降低蒸养升温 and 降温速率，有利于降低大体积混凝土开裂风险。

6 结语

1) 适当提高环境温度，延长蒸养恒温时间并降低蒸养升温 and 降温速率，有利于降低大体积混凝土开裂风险。

2) 通过综合分析回弹测试和数值模拟的结果，对该码头工程而言，建议环境温度低于 10℃时停止大体积混凝土方块预制，否则混凝土强度增长不足，开裂风险程度较大。

参考文献：

[1] 江昔平. 大体积混凝土温度裂缝控制机理与应用方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.

[2] GB 50496—2018,大体积混凝土施工标准[S].

[3] 李杰,李沛,张鹏,等. 蒸养混凝土抗冻性及栅栏板预制工艺研究[J]. 中国港湾建设,2022,42(10):11-15.

[4] 郭月明. 粉煤灰加气混凝土蒸压养护工艺研究[J]. 粉煤灰, 2016(1):3-5.

[5] 马保国,白建飞,王凯,等. 隧道管片混凝土蒸养工艺参数的研究[J]. 现代隧道技术,2008,45(1):71-76.

[6] 徐桂平. 预制混凝土节段梁蒸养养护工艺的研究[J]. 中国市政工程,2004(4):32-33.

[7] JTS 239—2015,水运工程混凝土结构实体检测技术规程[S].