



基于热力耦合有限元的大体积混凝土裂缝演化分析

仇安兵

Analysis of crack evolution in large-volume concrete based on thermal mechanical coupling finite element method

QIU Anbing

引用本文:

仇安兵. 基于热 - 力耦合有限元的大体积混凝土裂缝演化分析[J]. 北科大: 工程科学学报, 2025, 47(5): 995-1004. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2024.12.25.002

QIU Anbing. Analysis of crack evolution in large-volume concrete based on thermal mechanical coupling finite element method[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(5): 995-1004. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2024.12.25.002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2024.12.25.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

模拟冻结法施工环境对大体积混凝土的性能影响

Effects of a simulated freezing construction environment on the mass concrete performance

工程科学学报. 2022, 44(5): 857 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.07.01.002>

铁尾矿粉混凝土在荷载与硫酸盐干湿循环耦合作用下的性能劣化机理

Mechanism of performance deterioration of iron tailing powder concrete under the coupling effect of load and sulfate drywet cycle

工程科学学报. 2024, 46(8): 1358 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2023.09.13.006>

硫酸盐侵蚀作用下纤维锂渣混凝土裂缝的分形特征

Fractal characteristics of fiber lithium slag concrete cracks under sulfate attack

工程科学学报. 2022, 44(2): 208 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.09.10.001>

钢纤维混凝土动态力学特性及损伤规律研究

Experimental study on dynamic mechanical properties and damage law of steel fiber concrete

工程科学学报. 2024, 46(12): 2181 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2024.01.15.003>

纵筋锈蚀无腹筋混凝土梁抗剪性能细观数值研究

Corrosion effects of longitudinal reinforcement on shear behavior of concrete beams without web reinforcement

工程科学学报. 2023, 45(1): 117 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.06.29.008>

塑管混凝土界面密闭性能改善措施

Improvement of plastic pipeconcrete interface impermeability

工程科学学报. 2021, 43(5): 647 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.06.21.002>

基于热–力耦合有限元的大体积混凝土裂缝演化分析

仇安兵✉

北京科技大学雄安校区建设项目指挥部, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: qiu-anbing@163.com

摘 要 伴随大型工程项目持续增多, 大体积构筑物面临着混凝土浇筑过程中的质量控制问题. 本文以大体积浇筑混凝土结构为研究对象, 运用 Analysis 有限元软件建立热–力耦合三维数值模型, 模拟了 4 种混凝土入模温度下, 混凝土浇筑构筑物在特定施工时刻的温度场分布特征和结构裂缝的演化规律. 结果表明: 入模温度与构筑物温升呈正相关, 降低混凝土的入模温度可以有效地降低构筑物的峰值结构温度和缩小结构温度差, 有利于控制混凝土裂缝的生成和演化; 入模温度降低, 深层结构向表层的传热量降低, 表层边界与空气的热交换效率下降, 但其热交换效率仍高于表层非边界部分, 因而混凝土表层的边界与内部之间的温度过渡带变得不再明显; 中央深度的混凝土表现出最高的结构温度, 这有利于混凝土结构积累拉伸应力; 不同入模温度下, 峰值结构温度、最大水化升温曲线近似线性. 峰值裂缝长度与入模温度、峰值结构温度、最大水化升温呈正相关. 当入模温度由 10 °C 提升至 15 °C 时, 峰值裂缝长度产生了显著的增加; 混凝土入模温度降低, 表层大裂纹的数量减少, 在空间上的分布形态由大裂纹相互交叉转向细小裂纹均匀分散.

关键词 热–力耦合; 大体积混凝土; 混凝土裂缝; 塑性损伤模型; 数值模拟

分类号 TU7

Analysis of crack evolution in large-volume concrete based on thermal mechanical coupling finite element method

QIU Anbing✉

Xiong'an Campus Construction Project Command Center, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉Corresponding author, E-mail: qiu-anbing@163.com

ABSTRACT With the continuous increase in large-scale engineering projects, large-volume structures are encountering quality control issues during the concrete pouring process. To ensure the quality of construction, higher requirements are often placed on the design strength, setting time, and other related properties of concrete. In addition, concrete integration and one-time pouring are required. The coupled effects of cement material hydration heat, boundary constrained stress, and environmental humidity are often encountered during the pouring process of large-volume concrete. This is because cement-based cementitious materials release significant hydration heat in the early stages of pouring, while the concrete has poor heat transfer performance. This results in thermal expansion and contraction owing to internal and external temperature differences, storing large stresses and easily causing cracks in concrete structures, thereby affecting their durability and integrity. This study focuses on large-volume poured-concrete structures, utilizing finite element analysis software to establish a three-dimensional numerical model of thermal mechanical coupling. It simulates the temperature field distribution characteristics and evolution law of structural cracks of poured-concrete structures at specific construction times under four different concrete-pouring temperatures. The results show that there is a positive correlation between the molding temperature and the temperature rise of the structure. Lowering the molding temperature of concrete can reduce the peak structural temperature and narrow the temperature difference, which is beneficial for controlling the generation and evolution of concrete cracks. As the molding temperature

收稿日期: 2024–12–25

decreases, the temperature transition zone between the concrete boundary and the interior becomes less pronounced. This is because when the temperature decreases, the heat transfer from the deep structure to the surface layer decreases. Accordingly, the heat exchange efficiency between the surface boundary and air decreases. When the molding temperature is high, the deep structure transfers more heat to the surface layer, causing a significant increase in surface temperature. However, the surface boundary has a relatively high heat exchange efficiency owing to boundary effects and temperature differences, resulting in a rapid decrease in temperature. The heat exchange efficiency is affected by the temperature difference between the surface temperature and external air medium. When the mold temperature decreases, the heat transfer from the deep structure to the surface decreases, and the heat exchange efficiency between the surface boundary and the air decreases accordingly. However, its heat exchange efficiency is still higher than that of the non-boundary part of the surface, reflecting an unclear temperature transition zone. The concrete at the central depth exhibits the highest structural temperature, which facilitates the accumulation of tensile stress in the concrete structure. At different molding temperatures, the peak structural temperature and maximum hydration temperature rise curves are approximately linear. The peak crack length reflects a positive correlation with three parameters: molding temperature, peak structural temperature, and maximum hydration temperature rise. However, note that when the molding temperature increases from 10 °C to 15 °C, the peak crack length significantly increases. As the temperature of concrete entering the mold decreases, the number of large cracks on the surface continue to decrease and gradually shift from a distribution pattern of intersecting large cracks to that of uniformly dispersed small cracks in space.

KEY WORDS thermal mechanical coupling; large volume concrete; concrete cracks; plastic damage model; numerical simulation

近年来,伴随着城市化、现代化建设的推进,以及新型建造与工程技术的提出,我国城市基础建设工程项目不断增多,建造难度随之升高.城市广场、港口、机场、高铁站等大体积构筑物面临着混凝土浇筑过程中的质量控制问题^[1-2].

相关研究已经证实,大体积混凝土在浇筑过程中面临水泥材料水化热、边界约束应力、环境湿度的耦合影响^[3-12].在大尺度工程项目中,为保证构筑质量,对混凝土的设计强度、凝结时间等相关性能要求往往更高,并且需要进行混凝土整体化、一次性浇筑^[13-14].这要求胶凝材料、减水剂等材料的粒度和掺量不断提升^[15],而在混凝土的固化过程中,以水泥为主的胶凝材料会在浇筑早期释放出大量水化热^[16].混凝土自身的传热性能较差,导致其因内外温差发生热胀冷缩,储存较大的应力,极易造成混凝土结构裂缝,影响结构的耐久性和完整性^[17-19].因此,研究大体积混凝土结构的温度场分布规律和裂缝演化规律,对确认工程项目的结构安全性具有重要意义.

相关学者已经开展了一些关于水化热对混凝土结构升温、强度形成和裂缝发育的影响.刘亚鹏等^[20]基于某大尺度筏板基础工程,通过 Midas Civil 分析了不同入模温度及保温措施下的混凝土温度场分布.结果表明,随着入模温度的提高,混凝土内部最高温度增大;增大保温板厚度可提高混凝土的表面温度,但会使混凝土内部温度消散较慢;王仲平^[21]通过建立混凝土有限元损伤计算模型,揭示了混凝土浇筑块在不同边界约束条件下的裂

缝发展规律.结果表明,混凝土裂缝的特征和发展与边界约束条件密切相关,当只存在底面约束时,混凝土裂缝的数量较多,但尺寸比较小;当三边约束时,裂缝数量较少,但会形成主裂缝,尺寸较大;当四边均约束时,裂缝较多,尺寸较大;傅金阳等^[22]研究了高寒地区隧道仰拱处大体积浇筑混凝土的变形特性与裂缝演化特征.通过 Abaqus 有限元模拟了结合混凝土早期水化热与多场耦合作用下的混凝土裂缝萌生与发展过程.结果表明,负温环境和温差应力是导致混凝土表面早期开裂的主要原因,出模温度越高,养护温度越低,混凝土的早期裂纹越多.并且混凝土裂纹与其厚度存在正相关,厚度越大,裂纹萌生和发展越严重;降低混凝土出模温度、提高混凝土养护温度可有效避免混凝土早龄期表面开裂;甘铭威等^[23]基于 Abaqus 有限元软件构建了一种单向耦合的混凝土多尺度热-力耦合模型,分析了混凝土保温时间、水灰比、底板厚度对其温度场和应力场的影响.结果表明,混凝土水化初期保温有利于降低上部开裂风险;水灰比越高,上部开裂风险越低;底板越厚,整体开裂风险越低.

因此,为了确立大体积混凝土一次性浇筑过程中的水化升温对其浇筑结构的影响,本文以大体积浇筑混凝土结构为研究对象,结合工程实际,运用有限元软件 Analysis 建立大尺度三维数值模型,对混凝土结构进行基于水化热温度场-应力场耦合,分析了 25、20、15、10 °C 四种不同入模温度下,浇筑混凝土构筑的水化升温特性、温度场空间

分布差异、混凝土构筑裂缝发育长度和分布情况, 探讨混凝土构筑随入模温度变化的裂缝演化规律, 为今后类似工程提供理论参考。

1 工程概况

本项目为某加热炉基础底板(图1), 整体为钢筋混凝土结构, 底板总长度为 79.100 m, 轴线处边长最宽处为 50.400 m, 总面积约为 3250 m²。底板大部分区域底标高为 -4.000 m, 顶标高为 -2.170 m, 板厚为 1.830 m; 底板采取一次浇筑成型, 混凝土总量约 5610 m³, 混凝土总浇筑时间约 63 h, 环境温度为 28 ℃。

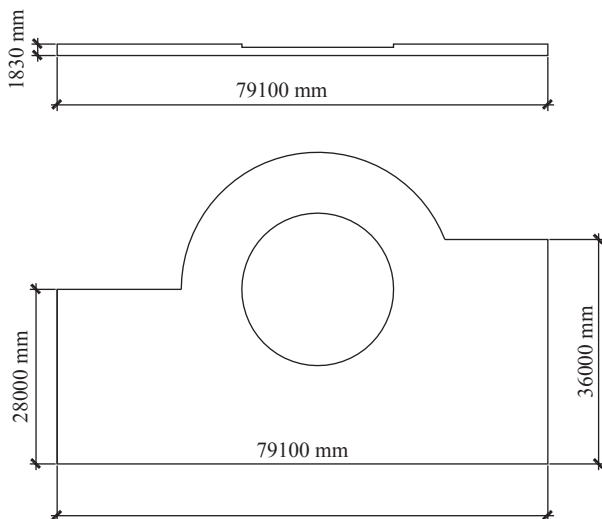


图1 加热炉基础底板平面图

Fig.1 Plan view of concrete structures

2 大体积混凝土裂纹产生机理

大体积混凝土裂纹的产生主要是由于温度变化引起应力差异, 从而导致收缩变形不协调引起的。在固化过程中, 混凝土结构会伴随着水化热的消散而逐渐收缩, 产生内部拉应力, 当拉应力超过混凝土的抗拉强度, 就会产生局部裂纹。

《大体积混凝土施工标准》(GB 50496—2018)^[24]中规定了大体积混凝土浇筑施工阶段的温度应力与收缩应力的计算公式, 其中水泥水化热可按式(1)计算:

$$Q_0 = \frac{4}{7/Q_7 - 3/Q_3} \quad (1)$$

式中: Q_3 为龄期 3 d 时的累积水化热, kJ·kg⁻¹; Q_7 为龄期 3d 时的累积水化热, kJ·kg⁻¹; Q_0 为水泥水化热总量, kJ·kg⁻¹。

混凝土绝热温升值根据《水工混凝土试验规

程》(DL/T 5150)^[25] 和 (SL 352—2006)^[26] 中相关规定通过试验得出, 也可按照式(2)计算:

$$T(t) = \frac{WQ}{C\rho} (1 - e^{-mt}) \quad (2)$$

式中: $T(t)$ 为龄期 t 时混凝土绝热温升, ℃; Q 为混凝土累积水化热, kJ·kg⁻¹; W 为每立方米的胶凝材料用量, kg·m⁻³; C 为混凝土比热容, 可取 0.9 ~ 1.0; ρ 为混凝土质量密度, kg·m⁻³; t 为混凝土龄期, d; m 为单方胶凝材料对应系数。

混凝土收缩值根据《大体积混凝土施工标准》(GB 50496—2018)^[24]、《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2024)^[27] 中的相关要求计算, 见式(3):

$$\varepsilon_y(t) = \varepsilon_y^0 (1 - e^{-0.01t}) \cdot M_1 \cdot M_2 \cdots M_{11} \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_y(t)$ 为龄期 t 时混凝土相对收缩变形; ε_y^0 为标准状态下混凝土最终收缩变形; M 为影响修正系数。

混凝土的抗拉强度^[24] 计算见式(4), 防裂性能^[24] 辨别见式(5):

$$f_{tk}(t) = f_{tk} (1 - e^{-\gamma t}) \quad (4)$$

$$\sigma \leq f_{tk}(t) / K \quad (5)$$

式中: f_{tk} 为混凝土抗拉强度标准值; $f_{tk}(t)$ 为龄期 t 时混凝土抗拉强度, MPa; γ 为控制系数, 可取 0.3; σ 为安全拉伸应力, MPa; K 为防裂安全系数, 可取 1.15。

温度差异下大体积混凝土的自约束拉应力计算见式(6):

$$\sigma(t) = \frac{a}{2} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta T_i(t) \cdot F_i(t) \cdot H_i(t, \tau) \quad (6)$$

式中: $\sigma(t)$ 为龄期 t 时, 混凝土浇筑体内外温差产生的自约束拉应力累计值, MPa; $\Delta T_i(t)$ 为龄期 t 时, 第 i 区段混凝土内外温差的增量, ℃; $F_i(t)$ 为龄期 t 时, 第 i 区段混凝土的弹性模量, MPa; a 为混凝土的线膨胀系数; $H_i(t, \tau)$ 为龄期 τ 时, 第 i 区段产生的约束应力延续至 t 时的松弛系数, 可按经验取值。由式(6)可以看出, 为防止混凝土局部开裂, 可通过控制混凝土浇筑体内外的温度差来降低混凝土的自约束应力, 从而提高混凝土的抗裂能力。

3 大体积混凝土温度与裂缝演化数值模拟

3.1 模型建立

项目使用 D 型 C35 混凝土, 抗渗等级为 P8 级, 配合比编号 N1-D-001, 原材料品种和规格用量如

表 1 所示, 模拟混凝土的参数根据真实混凝土材料规格确定, 主要包括水胶比、粉煤灰容重、粉煤灰含量, 其数值会影响模拟水化热 1 的数值计算, 具体参数见表 2.

表 1 混凝土原材料规格与用量

Table 1 Specification and dosage of concrete raw materials

Material	Specification	Usage/ (kg·m ⁻³)
Cement	PI42.5	273
Fly Ash	Class I	91
Medium sand	0-4.75 mm	734
Crushed stone	4.75-19 mm	581
Crushed stone	19-37.5mm	475
Water		160
Water reducer (mass fraction: 0.8%)		2.912
Air-entraining agent (mass fraction: 0.003%)		0.0109

表 2 模拟混凝土材料参数

Table 2 Simulate concrete material parameters

Parameter	Value
Concrete properties	Hygrothermal
Porosity	Auto
Heat evolution	Hydration
Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.0
Specific heat capacity/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	900.0
Density/(kg·m ⁻³)	2.4×10 ⁴
Permeability/m ²	1×10 ⁻¹⁹
Air void ratio	0.023
Cement bulk density/(kg·m ⁻³)	273.0
Water-cement ratio	0.44
Fly ash bulk density/(kg·m ⁻³)	91.0
Calcium oxide content in fly ash	0.11

模拟的水化热升温基于水泥的矿物质成分及比表面积, 影响混凝土水化升温的参数主要有粉煤灰容重、粉煤灰含量等. 升温具体数值基于化学反应速率理论形成的等效龄期成熟度函数计算得出, 见式(7).

$$V_H(t) = Q_u \cdot W_c \cdot \left(\frac{\tau}{t_e}\right)^\beta \cdot \left(\frac{\beta}{t_e}\right) \cdot \alpha(t_e) \cdot \exp\left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{273 + T_r} - \frac{1}{273 + T_c}\right)\right] \quad (7)$$

式中: $V_H(t)$ 为水化热速率, $W \cdot m^{-3}$; Q_u 为胶凝材料 100% 水化时的总水化热, $J \cdot g^{-1}$; W_c 为胶凝材料含

量, $g \cdot m^{-3}$; τ 为水化时间参数, h ; $\alpha(t_e)$ 为等效龄期 t_e 的水化度; β 为水化形状参数; R 为气体常数, $8.3144 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$; E 为活化能, $J \cdot mol^{-1}$; T_r 为参考温度, $^{\circ}C$; T_c 为时间间隔 (Δt) 内混凝土的平均温度, $^{\circ}C$.

本模拟中的混凝土开裂行为使用塑性损伤接触模型, 其中损伤面根据主应力标准形成, 然后发展为嵌入的粗糙接触面. 拉伸破坏的软化曲线通常由单位面积断裂能量确定, 并与徐变和收缩行为相结合, 从而产生包括开裂和破碎在内的综合时间相关的开裂行为.

本研究采用 Analysis 有限元软件对目标工程构筑进行三维建模, 模型的环境温度为 $28^{\circ}C$, 相对湿度为 0.7. 模型的力学边界条件被设置在底部的 30 cm 垫层, 为三向约束, 有限元模型如图 2 所示. 同时, 混凝土的本构模型已有成熟的理论基础和广泛认可的物理规律支持, 本模型的建立参考了相关学者的试验验证和研究论文^[28-31], 以确保模型的合理性.

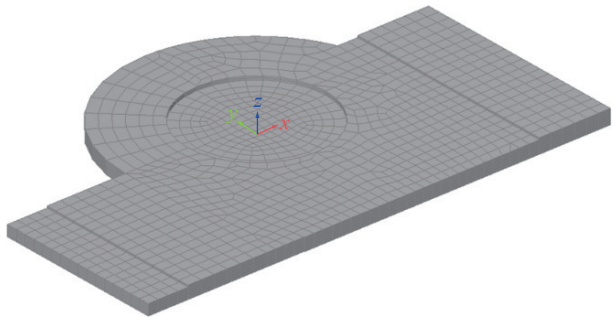


图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

3.2 不同入模温度下混凝土温度场变化趋势

为探究温度对混凝土开裂特性的影响, 本文设置了 4 种混凝土入模温度工况, 分别为 $25^{\circ}C$ 、 $20^{\circ}C$ 、 $15^{\circ}C$ 、 $10^{\circ}C$, 模拟得到了不同施工时间下混凝土构筑的温度场和裂缝分布情况.

图 3、4 显示了施工第 96 h 时, 使用 4 种不同入模温度混凝土浇筑构筑物的温度场云图. 由图 3 可知, 在施工第 96 h, 入模温度为 $25^{\circ}C$ 的混凝土 (图 4(a)) 构筑物显示最高的峰值结构温度和最大温差, 结构温度达到 $49.49^{\circ}C$, 温度差达到 $24.08^{\circ}C$, 相比之下, 入模温度为 $20^{\circ}C$ 、 $15^{\circ}C$ 、 $10^{\circ}C$ 的混凝土构筑的峰值结构温度分别为 $44.48^{\circ}C$ 、 $40.31^{\circ}C$ 和 $37.19^{\circ}C$, 同比分别降低了 10.12%、18.54% 和 24.85%. 这说明混凝土入模温度与浇筑构筑物的温升值之间存在明显的正相关关系, 降低混凝土的入模温度可

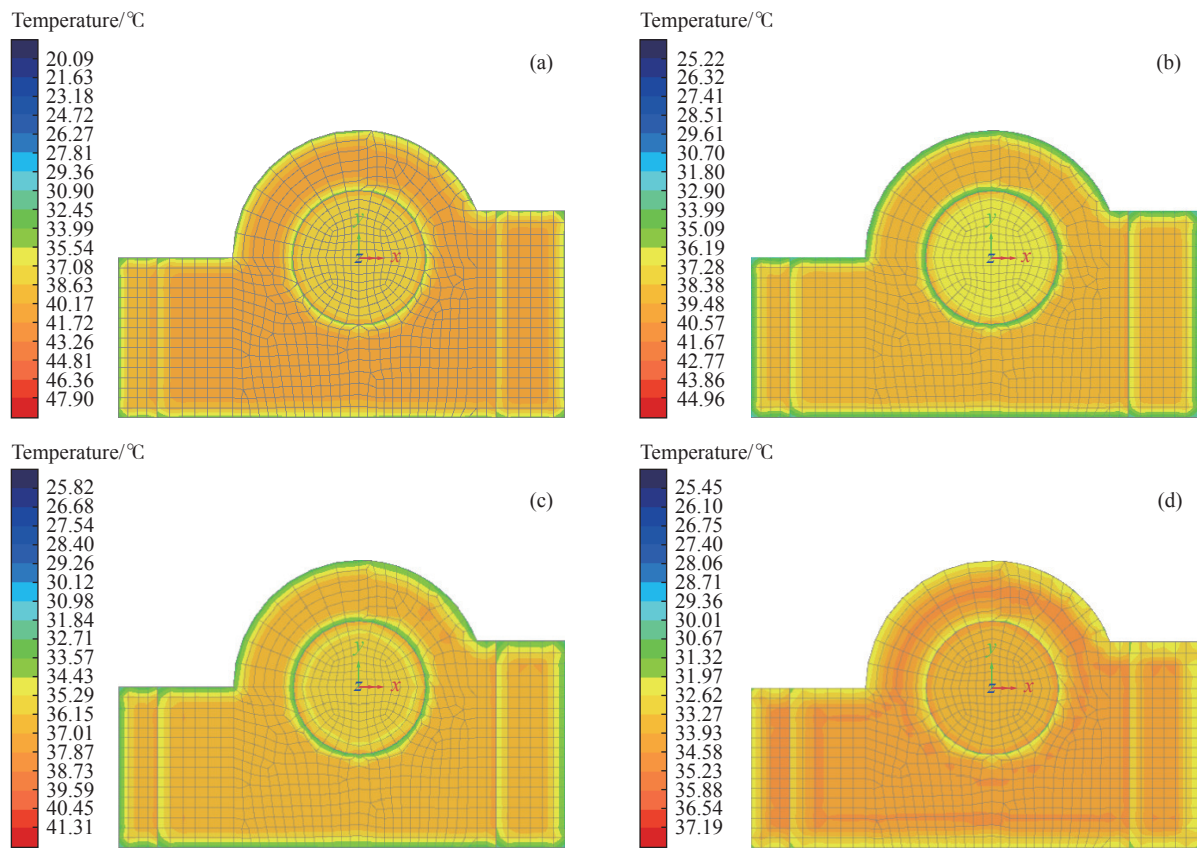


图 3 4 种入模温度下混凝土构筑水平温度场分布. (a) 25 °C; (b) 20 °C; (c) 15 °C; (d) 10 °C

Fig.3 Horizontal temperature distribution of concrete construction under four different molding temperatures: (a) 25 °C; (b) 20 °C; (c) 15 °C; (d) 10 °C

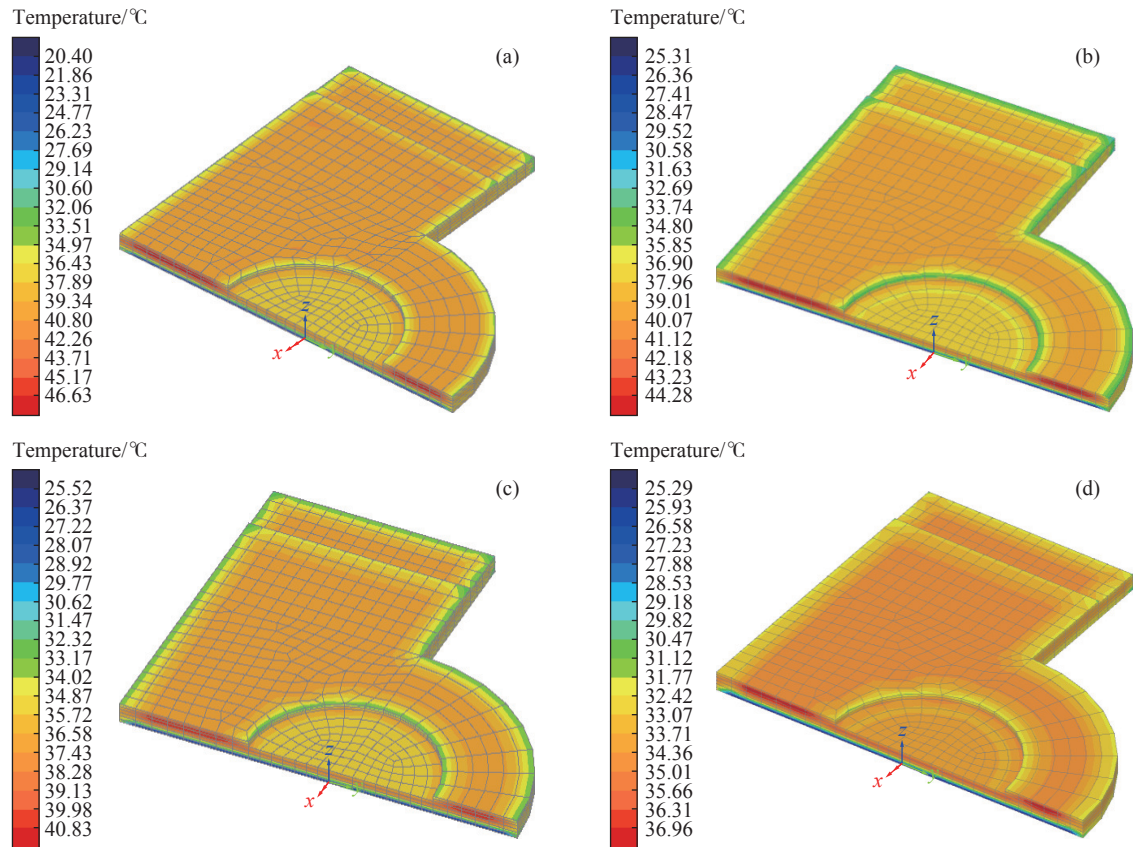


图 4 4 种入模温度下混凝土构筑垂直温度场分布. (a) 25 °C; (b) 20 °C; (c) 15 °C; (d) 10 °C

Fig.4 Vertical temperature distribution of concrete construction under four different molding temperatures: (a) 25 °C; (b) 20 °C; (c) 15 °C; (d) 10 °C

以有效地降低浇筑构筑物的峰值结构温度和缩小结构温度差,这显然有利于控制混凝土裂缝的生成和演化.

此外,通过图 3 可以发现,在相同水平高度下,所有工况下混凝土构筑的温度场分布都表现为由边界向内部,结构温度逐渐升高的特征.而值得注意的是,随着入模温度的降低,同一水平高度下,混凝土边界与内部之间的温度过渡带变得不再明显,这可能是由于深层结构的温度差异所导致的.当入模温度较高时,深层结构将向表层传递更多的热量,导致表层大幅升温.而表层边界受到边界效应影响,其热交换效率相对较高,因此表层边界温度迅速下降,形成明显的温度过渡带,如图 3(a)所示黄-绿色过渡边界.这种热交换效率受到表层与外界空气介质的温度差影响,因此当入模温度降低时,深层结构向表层的传热量降低,表层边界与空气的热交换效率随之下降,但其热交换效率仍高于表层非边界部分,从而体现出不明显的温度过渡带,如图 3(d)所示橙黄色过渡边界.

通过图 4 可以发现,所有工况下,不同深度混凝土构筑都呈现出明显的表里温差,位于中央深度的混凝土表现出最高的结构温度,这体现了混

凝土导热较差的特性,而这种表里温差造成的热胀冷缩,将有利于混凝土结构积累拉伸应力,最终导致结构裂缝的产生和发展,实际工程中应注意浇筑混凝土的厚度,防止混凝土在垂直方向上产生较大的温度差.

3.3 不同入模温度下混凝土裂缝随时间分布趋势

图 5、6 显示了施工第 720 h 时,使用 4 种不同入模温度混凝土浇筑构筑物的结构裂缝分布云图.其中图 5 展示了俯视平面下混凝土构筑物的裂缝分布情况.由图 5 可知,在施工第 720 h,入模温度为 25 ℃ 的混凝土(图 5(a))构筑物显示最多和最长的结构裂缝,结构裂缝最大长度达到了 1.144 mm,相比之下,入模温度为 20、15、10 ℃ 的混凝土构筑的最长结构裂纹分别为 0.904、0.724 和 0.153 mm,同比分别降低了 20.98%、36.71% 和 86.63%.图 6 给出了 4 种入模温度下混凝土结构裂缝长度与各温度参数之间的关系.由于结构裂缝的产生主要受温度差影响,不同入模温度下,峰值结构温度、最大水化升温曲线近似线性.峰值裂缝长度与入模温度、峰值结构温度、最大水化升温呈正相关.然而值得注意的是,当入模温度由 10 ℃ 提升至 15 ℃ 时,峰值裂缝长度产生了显著的增加.说明在实

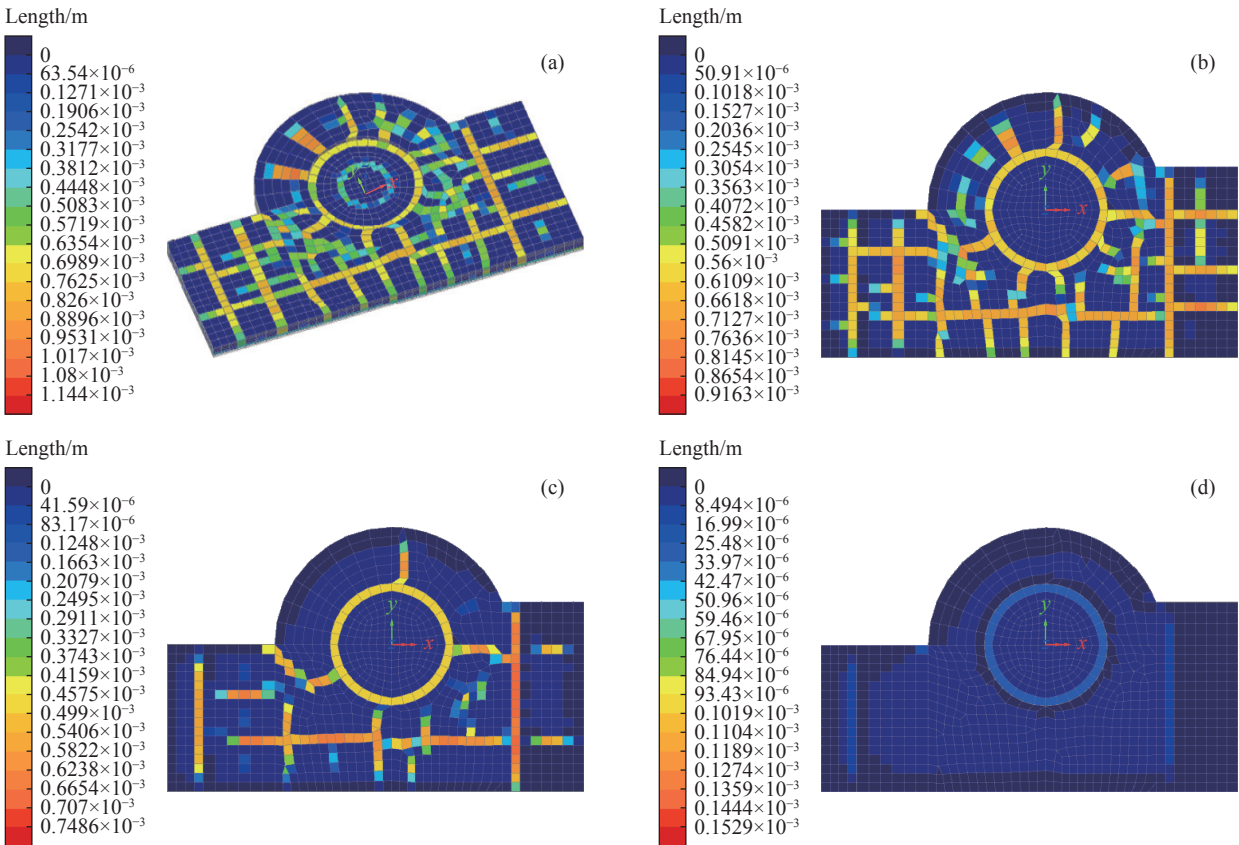


图 5 4 种入模温度下混凝土构筑裂缝长度及其分布. (a) 25 ℃; (b) 20 ℃; (c) 15 ℃; (d) 10 ℃

Fig.5 Length and distribution of cracks in concrete construction under four different molding temperatures: (a) 25 ℃; (b) 20 ℃; (c) 15 ℃; (d) 10 ℃

际工程中,应当密切关注此入模温度区间,以便有效控制浇筑结构的裂缝长度.

此外,相关研究证明在混凝土浇筑施工时,上翻梁位置的应力通常相对较高^[32],这与图5中表层裂纹基本出现在边界和上翻梁位置的结论向吻合,进一步说明了边界效应造成的温差是引起混凝土产生结构裂缝的主要因素之一.值得注意的是,随着混凝土入模温度的降低,表层大裂纹的数

量不断减少,并在空间上的分布形态由大裂纹相互交叉(图5(a)、(b))转向细小裂纹均匀分散(图5(d)).

图7展示了竖直截面下混凝土构筑物的裂缝分布情况.由图可知,所有入模温度下混凝土均在竖直方向上产生了结构裂缝.而与竖直方向温度场规律相符,由于受到内外温度差影响,竖直方向上的结构裂缝倾向于出现在中央深度,并且中央深度结构裂缝的存在位置和形态相对稳定.

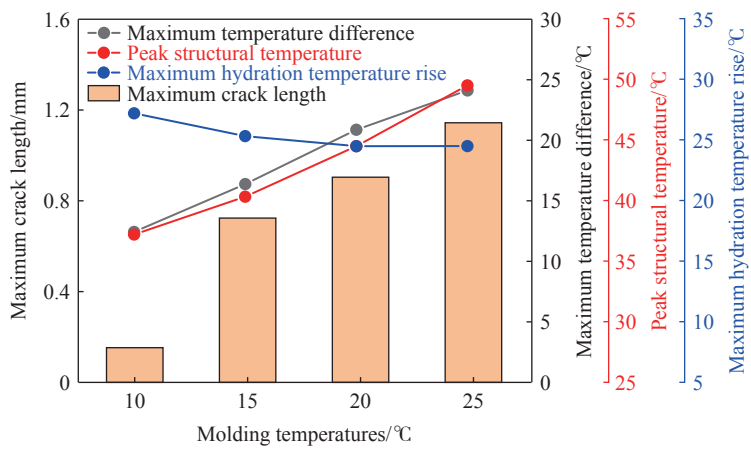


图6 4种入模温度下混凝土结构裂缝长度与各温度参数之间的关系

Fig.6 Relationship between the crack length and various temperature parameters at four molding temperatures

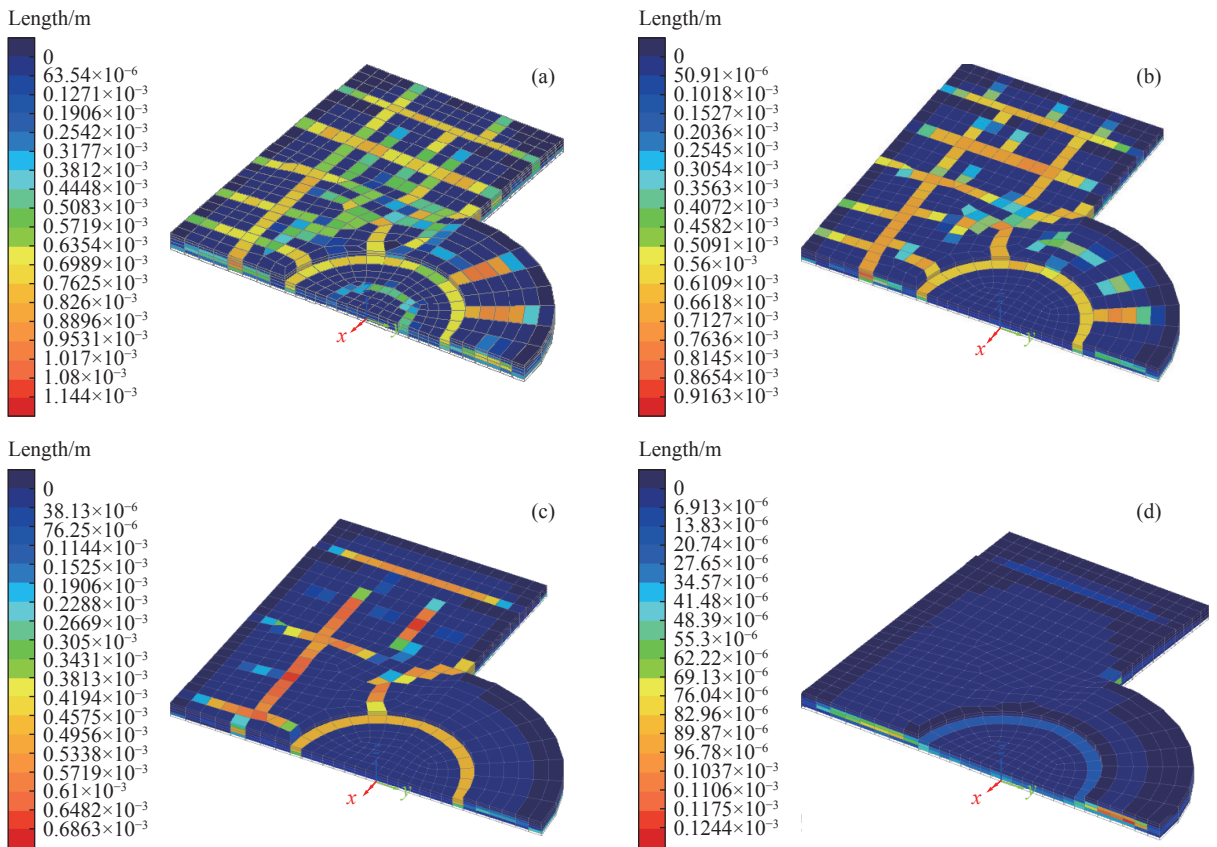


图7 4种入模温度下混凝土构筑物裂缝竖直分布. (a) 25 °C; (b) 20 °C; (c) 15 °C; (d) 10 °C

Fig.7 Vertical distribution of cracks in concrete construction under four different molding temperatures: (a) 25 °C; (b) 20 °C; (c) 15 °C; (d) 10 °C

4 结论

本文针对大体积浇筑混凝土结构, 使用热-力耦合模型模拟了 4 种入模温度下, 特定施工时刻大体积混凝土浇筑构筑物的温度场分布和裂缝分布, 得到了入模温度对构筑物裂缝产生和演化的影响, 主要结论分为以下几点.

(1) 混凝土入模温度与浇筑构筑物的温升值之间存在明显的正相关关系, 降低混凝土的入模温度可以有效地降低浇筑构筑物的峰值结构温度和缩小结构温度差, 有利于控制混凝土裂缝的生成和演化.

(2) 随着入模温度的降低, 同一水平高度下, 混凝土边界与内部之间的温度过渡带变得不再明显, 这可能是由于深层结构的温度差异所导致的. 当入模温度较高时, 深层结构将向表层传递更多的热量, 导致表层大幅升温. 而表层边界受到边界效应影响, 其热交换效率相对较高, 因此表层边界温度迅速下降, 形成明显的温度过渡带. 而当入模温度降低时, 深层结构向表层的传热量降低, 表层边界与空气的热交换效率随之下降, 但其热交换效率仍高于表层非边界部分, 体现出不明显的温度过渡带.

(3) 中央深度的混凝土表现出最高的结构温度, 这种表里温差造成的热胀冷缩现象, 将有利于混凝土结构积累拉伸应力, 最终导致结构裂缝的产生和发展.

(4) 不同入模温度下, 峰值结构温度、最大水化升温曲线近似线性. 峰值裂缝长度与入模温度、峰值结构温度、最大水化升温呈正相关. 然而值得注意的是, 当入模温度由 10 °C 提升至 15 °C 时, 峰值裂缝长度产生了显著的增加. 随着混凝土入模温度的降低, 表层大裂纹的数量将不断减少, 并在空间上的分布形态由大裂纹相互交叉转向细小裂纹均匀分散.

参 考 文 献

- [1] Huang Z Q, Wang P X. Finite element simulation analysis and experiment on the temperature stress crack control of hydration heat of mass concrete. *Eng Constr*, 2017, 49(12): 24
(黄泽钦, 王培旭. 大体积混凝土水化热温度应力裂缝控制的试验及有限元仿真分析. 工程建设, 2017, 49(12): 24)
- [2] Bian C, Zhao C J, Huang W J, et al. Effect of coarse aggregates and hybrid fibers on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Chin J Eng*, 2024, 46(3): 536
(边晨, 赵长军, 黄卫军, 等. 粗骨料及混杂纤维对 UHPC 力学性能的影响. 工程科学学报, 2024, 46(3): 536)
- [3] Lu R L, Wu Y, Li H N, et al. Numerical simulation research on heat release temperature field of raft foundation mass concrete. *Concrete*, 2024(2): 188
(陆汝林, 吴炎, 李荟楠, 等. 筏板基础大体积混凝土放热温度场数值模拟研究. 混凝土, 2024(2): 188)
- [4] Zhou T. Temperature development law and crack prevention and control of mass concrete of raft foundation. *Constr Technol*, 2024, 53(16): 67
(周拓. 筏板基础大体积混凝土温度发展规律与裂缝防控. 施工技术(中英文), 2024, 53(16): 67)
- [5] Duan Y. *Macro-mesoscopic Numerical Simulation of Temperature Crack in Mass Concrete Based on the Heat-flow Coupling Method* [Dissertation]. Wuhan: Wuhan University, 2013
(段寅. 基于热流耦合算法的大体积混凝土温度裂缝宏观数值模拟[学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2013)
- [6] Wang Z H, Zhang Y T, Deng Y. Study on temperature influencing factors and control measures of mass concrete. *Build Constr*, 2023, 45(9): 1910
(王朝晖, 张艳涛, 邓洋. 大体积混凝土温度影响因素与控制措施研究. 建筑施工, 2023, 45(9): 1910)
- [7] Wang G J. *Study on Crack Mechanism and Control Method of Mass Concrete Raft Foundation* [Dissertation]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023
(王冠杰. 大体积混凝土筏板基础裂缝机理及控制方法研究[学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023)
- [8] Fu J Y, Xu G Y, Yang Z, et al. Early cracking mechanism and prevention measures for lining concrete in high geotemperature tunnel. *J China Railway Soc*, 2022, 44(3): 105
(傅金阳, 徐光阳, 杨曾, 等. 高地温隧道衬砌混凝土早期开裂机理及防控措施. 铁道学报, 2022, 44(3): 105)
- [9] Miao T, Tang J W. Finite element analysis of temperature crack control and temperature control effect of mass concrete. *Sichuan Cem*, 2024(1): 189
(苗田, 唐靖武. 大体积混凝土温度裂缝控制及温控效果有限元分析. 四川水泥, 2024(1): 189)
- [10] Fu Y F, Wang L F, Cheng P, et al. Study on thermal stress field and cracking control of cast-in-situ mass concrete in a box tunnel. *Mod Tunnelling Technol*, 2021, 58(6): 173
(傅奕帆, 王林峰, 程平, 等. 箱式隧道现浇大体积混凝土温度应力场及裂缝控制研究. 现代隧道技术, 2021, 58(6): 173)
- [11] Li Z P, Luo Q X, Han Q H, et al. Analytical solution for the temperature field of the hydration heat in a mass concrete wall. *J Tianjin Univ (Sci Technol)*, 2023, 56(8): 878
(李志鹏, 罗奇星, 韩庆华, 等. 大体积混凝土墙水化放热温度场分析. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56(8): 878)

- [12] Chen S J, Zheng W, Li M Y, et al. Temperature crack control technology of super thick mass concrete in linear accelerator room. *Build Constr*, 2024, 46(2): 180
(陈少军, 郑巍, 李明月, 等. 直线加速器机房超厚大体积混凝土温度裂缝控制技术. 建筑施工, 2024, 46(2): 180)
- [13] Ai X Y, Yu D H, Ye J, et al. Research and application of temperature integrated control technology of C50P8 ultra-mass raft concrete of Tianjin Goldin 117 Building. *Concrete*, 2022(12): 121
(艾心炎, 余地华, 叶建, 等. 天津高银 117 大厦 C50P8 超大体积筏板混凝土温度综合控制技术研究与应用. 混凝土, 2022(12): 121)
- [14] Dou Z F. Construction technology of mass concrete integrating reinforcement support and cooling pipe. *Constr Mechanization*, 2024, 45(7): 91
(窦正富. 钢筋支撑与降温管一体化大体积混凝土施工技术. 建筑机械化, 2024, 45(7): 91)
- [15] Xi Y Y, Liu J H, Cheng L N. Mechanism of performance deterioration of iron tailing powder concrete under the coupling effect of load and sulfate dry-wet cycle. *Chin J Eng*, 2024, 46(8): 1358
(席雅允, 刘娟红, 程立年. 铁尾矿粉混凝土在荷载与硫酸盐干湿循环耦合作用下的性能劣化机理. 工程科学学报, 2024, 46(8): 1358)
- [16] Wu R D, Liu J H, Ji H G, et al. Effects of a simulated freezing construction environment on the mass concrete performance. *Chin J Eng*, 2022, 44(5): 857
(吴瑞东, 刘娟红, 纪洪广, 等. 模拟冻结法施工环境对大体积混凝土的性能影响. 工程科学学报, 2022, 44(5): 857)
- [17] Zhang C. *Thermodynamic Evolution of Concrete with Chemo-thermo-mechanical Couplings and Temperature Control and Cracking Prevention Method* [Dissertation]. Wuhan: Wuhan University, 2015
(张超. 混凝土热力学性能演变的化学—热—力耦合效应及温控防裂研究[学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2015)
- [18] Liu J, Xia Z C, Zhang Y R, et al. Active temperature control of mass concrete during the whole construction phase in hot season. *J Zhejiang Univ Technol*, 2024, 52(4): 437
(刘军, 夏子川, 章玉容, 等. 炎热气候下大体积混凝土施工全过程控温技术. 浙江工业大学学报, 2024, 52(4): 437)
- [19] Dong H L, Li H J, Shi H N, et al. Cracking mechanism of bridge piers concrete under large temperature variation in plateau region. *J Chin Ceram Soc*, 2024, 52(11): 3394
(董昊良, 李化建, 石贺男, 等. 高原大温差环境桥墩混凝土开裂机理. 硅酸盐学报, 2024, 52(11): 3394)
- [20] Liu Y P, Li S, Wang Q C, et al. Analysis of temperature crack control measures for mass concrete of raft foundation. *Bull Chin Ceram Soc*, 2018, 37(8): 2562
(刘亚朋, 李盛, 王起才, 等. 筏板基础大体积混凝土温度裂缝控制措施分析. 硅酸盐通报, 2018, 37(8): 2562)
- [21] Wang Z P. Analysis of concrete crack development characteristics under temperature-constraint interaction. *Build Constr*, 2020, 42(12): 2362
(王仲平. 温度-约束共同作用下的混凝土裂缝发展特性分析. 建筑施工, 2020, 42(12): 2362)
- [22] Fu J Y, Zhao N N, Xiao O H, et al. Cracking mechanism of fill concrete at entrance section in cold region. *Chin J Underground Space Eng*, 2021, 17(4): 1298
(傅金阳, 赵宁宁, 肖欧辉, 等. 寒区隧道洞口仰拱混凝土早期开裂机理研究. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1298)
- [23] Gan M W, Li G, Zhan Y J, et al. The cracking risk of mass concrete based on a unidirectional coupled multi-field and multi-scale model. *J Shandong Univ (Eng Sci)*, 2021, 51(6): 103
(甘铭威, 李刚, 占羿箭, 等. 基于单向耦合多尺度多场模型的大体积混凝土开裂风险分析. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(6): 103)
- [24] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50496—2018 *Standard for Construction of Mass Concrete*. Beijing: China Planning Press, 2018
(中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50496—2018 大体积混凝土施工标准. 北京: 中国计划出版社, 2018)
- [25] National Energy Bureau of the People's Republic of China. DL/T5150—2017 *Test Code for Hydraulic Concrete*. Beijing: China Water & Power Press, 2006
(中华人民共和国国家能源局. DL/T5150—2017 水工混凝土试验规程. 北京: 中国水利水电出版社, 2006)
- [26] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL352—2020 *Test Code for Hydraulic Concrete*. Beijing: China Water & Power Press, 2006
(中华人民共和国水利部. SL352—2020 水工混凝土试验规程. 北京: 中国水利水电出版社, 2020)
- [27] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T50082—2024 *Standard for Test Methods of Long-term Performance*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2024
(中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T50082—2024 混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024)
- [28] Yang Z H, Li H F, Hu Y L. Research on the Temperature Stress Constraint Coefficient of Hydraulic Concrete Structures. *J China Inst Water Resour Hydropower Res*, <https://doi.org/10.13244/j.cnki.jiwhr.20240125>
(杨志华, 李海枫, 胡永林. 水工混凝土结构温度应力约束系数研究. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), <https://doi.org/10.13244/j.cnki.jiwhr.20240125>)
- [29] Cao Y X, Kou S, Huo M L, et al. Study on the influencing factors of mass concrete temperature in subway station based on

- ABAQUS software. *China Concr Cem Prod*, 2024(12): 98
(曹玉新, 寇帅, 霍曼琳, 等. 基于 ABAQUS 的地铁车站大体积混凝土温度影响因素研究. *混凝土与水泥制品*, 2024(12): 98)
- [30] Guo Q, Yao M X, Qian Z X, et al. Study on mechanical characteristics of full-section fiber reinforced concrete seal structure under temperature load. *J Beijing Jiaotong Univ*, 2024, 48(6): 81
(郭强, 姚明昕, 钱忠霞, 等. 温度荷载下全断面纤维混凝土封闭结构力学特性研究. *北京交通大学学报*, 2024, 48(6): 81)
- [31] Li B L, Wang W Z, Guo H J, et al. Research on temperature field simulation and monitoring of concrete frame structure in construction stage of integrated transportation hub project of Beijing city sub-central station. *Eng Mech*, <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2024.04.0297>
(李保罗, 汪唯瞻, 郭洪军, 等. 北京城市副中心站综合交通枢纽工程混凝土框架结构施工阶段温度场模拟与监测研究. *工程力学*, <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2024.04.0297>)
- [32] Li W. *Thermal-mechanical Coupling Analysis of Concrete Structure Construction in Subway Station* [Dissertation]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023
(李维. 地铁车站混凝土结构施工的热-力耦合分析[学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2023)