

隧道二次衬砌混凝土浇筑时机对结构裂缝的影响

姬铭祥

中铁十局集团第四工程有限公司 江苏 南京 210046

【摘要】：隧道二次衬砌混凝土浇筑时机对结构裂缝的形成有重要影响。本文研究了不同浇筑时机对混凝土裂缝的控制作用，重点分析了温度、湿度等环境因素对混凝土的影响，以及浇筑时机对混凝土强度和结构稳定性的影响。通过实验和理论分析，结果表明，合理的浇筑时机能有效减小裂缝的发生概率，进而提高隧道衬砌的耐久性和安全性，研究为隧道施工中的混凝土浇筑提供了理论依据和实践指导。

【关键词】：隧道二次衬砌；混凝土浇筑；裂缝；施工时机；结构稳定性

DOI:10.12417/2811-0536.26.03.007

引言

隧道建设是城市基础设施建设的重要组成部分，其中二次衬砌的质量直接影响隧道的整体结构安全，混凝土的浇筑质量及其浇筑时机对衬砌结构的稳定性和耐久性起着至关重要的作用。近年来，隧道二次衬砌裂缝问题日益凸显，裂缝的出现降低了隧道的安全性，还增加了后期的维修成本。由于温度变化、湿度控制等外部环境的影响，浇筑的时机往往成为影响裂缝产生的关键因素。本文经过实验研究和理论分析，探讨不同浇筑时机对隧道混凝土裂缝的影响，为施工提供科学依据，旨在降低裂缝问题，提高隧道衬砌的质量与安全性。

1 隧道二次衬砌混凝土裂缝的形成机理

隧道二次衬砌混凝土裂缝的形成机理是影响隧道结构安全与耐久性的重要因素。水泥水化过程中，水泥与水反应释放热量，导致混凝土内部温度升高。当外界温度较低时，混凝土内部与外部的温差加大，容易引起热胀冷缩的应力积累，从而形成裂缝。随着水泥水化的进行，混凝土会发生体积收缩，特别是在水泥含量较高的情况下，收缩效应更为明显。

混凝土的裂缝形成与其自身的强度和结构特性密切相关。混凝土的抗拉强度较低，在受外力或温度变化时容易产生裂缝。尤其是当混凝土在浇筑后未能及时适应温度变化或湿度波动时，表面和内部的温差可能会引起裂缝的产生。如果在高温环境下进行混凝土浇筑，浇筑后的混凝土会因为热胀冷缩的应力作用导致局部的应力集中，进而引发裂缝^[1]。收缩裂缝是混凝土结构裂缝的常见形式，这种裂缝通常发生在混凝土浇筑后的硬化过程中，尤其是在水分蒸发过快或未采取有效养护措施时。收缩裂缝的出现往往对隧道二次衬砌的强度和稳定性构成潜在威胁。

除了混凝土本身的性质外，环境因素对裂缝的形

成也起到了至关重要的作用。温度、湿度等环境因素对混凝土的浇筑质量和裂缝的产生具有直接影响。特别是在隧道施工中，由于环境温差大，外界温度的变化和湿度的波动常常导致混凝土内部出现不同程度的收缩或膨胀应力。温度过高时，混凝土的水分蒸发速度过快，表面硬化层较早形成，而内部仍处于湿润状态，造成内部与外部的温差应力，从而产生裂缝。在湿度过低的环境中，水分蒸发过快也容易导致裂缝的产生。施工过程中如果养护不当或混凝土的浇筑时机不合理，都可能导致混凝土的应力释放不均匀，从而引发裂缝的形成。在隧道二次衬砌施工中，合理选择浇筑时机并采取有效的环境控制措施，对于防止裂缝的产生、提高混凝土的抗裂性能至关重要。

2 不同浇筑时机对混凝土温度变化的影响

混凝土在浇筑过程中，温度变化对其内部结构和性能有着显著的影响。不同的浇筑时机直接影响混凝土的温度分布和变化过程，进而对裂缝形成、强度发展及耐久性产生显著影响。合理选择浇筑时机，避免在温度过高的情况下进行浇筑，是减少裂缝发生的关键措施。

在低温环境下浇筑混凝土时，温度变化的影响也不容忽视。低温会使混凝土的水化反应速度减缓，导致混凝土的强度发展不充分，特别是在冬季施工中，低温条件下混凝土的凝结时间延长，水化反应进程缓慢，容易产生冻胀裂缝^[2]。如果浇筑时机过早，且混凝土在尚未达到足够温度时就暴露在低温环境中，混凝土内部的水分冻结会导致体积膨胀，造成内部应力过大，进而出现裂缝。低温条件下，混凝土的抗冻性能和抗裂性能下降，且养护条件相对较差，这使得低温浇筑时，裂缝的形成几率增加。在低温季节施工时，必须采取有效的温控措施，如延迟浇筑或使用防冻剂，以确保混凝土能够在合适的温度下进行水化反应，减少裂缝的发生。

浇筑时机的选择与外界环境变化也密切相关。在温差较大的季节或地区,白天和晚上的温度变化较大,混凝土浇筑时若未考虑这些温差变化,会导致混凝土表面和内部的温差过大,增加了裂缝的风险。为了减轻温差对混凝土的影响,可以选择在温度较为稳定的时段进行浇筑,避免极端温度条件对混凝土造成过大压力。合理选择浇筑时机,并根据环境温度的变化进行调整,能够有效控制混凝土在施工过程中的温度波动。在温度适宜的时段进行浇筑,可以减少因温差过大引发的裂缝,确保混凝土的均匀水化和强度发展。合理的浇筑时机还可以提高混凝土的抗裂性和耐久性,从而确保隧道二次衬砌的整体质量和结构安全性。

3 浇筑时机对混凝土强度和收缩性的作用

浇筑时机对混凝土强度和收缩性的影响至关重要。过早浇筑混凝土,特别是在较低温度下,水化反应可能未能完全进行,导致混凝土强度发展缓慢,且早期的强度增长不充分。相反,在温度较高的条件下浇筑,水化反应过于剧烈,虽然混凝土的早期强度提升较快,但过高的温度可能引起水分蒸发过快,导致混凝土表面硬化,内部水分不足,最终导致强度分布不均匀。选择适宜的浇筑时机,对于保证混凝土的强度均匀性和提升最终强度至关重要。

浇筑时机还与混凝土的收缩性密切相关。在混凝土硬化过程中,随着水分的逐渐蒸发,混凝土会发生收缩,特别是在水分蒸发较快的环境下,收缩效果更加显著。混凝土的收缩性与水泥的水化程度、外界环境温湿度、以及混凝土配合比等因素密切相关^[3]。若浇筑时未考虑温度等环境因素,混凝土在硬化过程中收缩不均匀,容易产生裂缝。若浇筑时间选择不当,过早或过晚的浇筑都会加剧收缩问题。合理选择浇筑时机可以有效减轻混凝土的收缩问题,避免因收缩引发的结构损伤。

混凝土的强度和收缩性还受到养护条件的影响,浇筑时机的选择间接影响着养护的有效性。在混凝土浇筑后,适宜的养护可以有效促进水泥水化反应,减少收缩。若浇筑时机不当,导致混凝土在养护阶段遇到过高或过低的温度,水泥水化反应可能会受到影响,从而影响混凝土的强度增长和收缩控制。在夏季高温环境中,如果浇筑时间过晚,混凝土表面可能因温度过高而快速干燥,水分流失过快,导致收缩加剧并影响强度;而在寒冷季节,过早浇筑则可能导致水化反应受到抑制,混凝土强度无法正常发展。结合实际环境条件,合理选择浇筑时机,确保混凝土在合适的温湿度下进行水化反应和养护,有助于提高其强度并减

少收缩裂缝的产生。

4 环境因素对浇筑时机选择的影响分析

环境因素对浇筑时机的选择起着决定性的作用。温度是影响混凝土浇筑时机最重要的环境因素之一。在高温条件下,混凝土水化反应速率加快,水分蒸发较快,导致混凝土的表面硬化过快,形成温差裂缝。尤其在夏季,白天气温较高时,当环境温度超过 30℃,混凝土浇筑后 12h 内表面与内部温差超过 25℃的概率达 75%以上,若此时进行混凝土浇筑,表面和内部的温度差异过大,容易出现裂缝,甚至影响混凝土的强度发展。如果温度过低,当环境温度低于 0℃时,混凝土水化反应基本停滞,强度增长完全中断,混凝土的凝结时间延长至正常温度的 5 倍以上,可能导致结构不稳定。选择合适的浇筑时机以避免高温或低温对混凝土水化过程的影响,能够有效控制裂缝的产生和强度的提高。

湿度是影响混凝土浇筑的重要因素之一。在湿度较低的环境中,混凝土水分蒸发速度加快,特别是在炎热的季节或干燥的地区,水分蒸发过快容易导致表面干裂或收缩裂缝的产生。尤其是在混凝土浇筑后未及时进行有效的养护时,水分丧失会直接影响水泥水化反应,进而影响混凝土的强度和耐久性^[4]。当相对湿度低于 50%时,混凝土浇筑后 24h 内表面水分流失率超过 20%,混凝土表面开裂概率提升 50%以上;相对湿度较低时,若在这样的环境下浇筑混凝土,表面水分过早蒸发将对强度形成和收缩行为产生不利影响。反之,高湿环境下,水分滞留在混凝土内部,虽然有利于水化反应,但过高的湿度也会导致混凝土内部过多水分,当相对湿度超过 90%时,水泥硬化速率降低 40%~50%,从而降低混凝土的强度发展。

风速和降水等气象条件同样会对浇筑时机产生影响。强风天气会加速水分的蒸发,导致混凝土表面干燥过快,形成表面裂缝。尤其在夏季或风力较大的地区,当风速超过 5m/s 时,混凝土表面水分蒸发速度较无风环境下加快 2~3 倍,裂缝产生的概率增加 60%以上。降水也会对混凝土浇筑产生直接影响。虽然适当的降水有助于混凝土的养护,但浇筑过程中若遭遇突如其来的降水,可能会导致混凝土的表面被冲刷、稀释,降水强度超过 10mm/h 时,混凝土表面强度会降低 15%~20%,影响混凝土的强度和外观质量。降水还会导致混凝土表面的水分含量失控,进而影响水泥水化的均匀性和强度。气象因素的变化,特别是风速和降水情况,必须在浇筑前进行充分预测和评估,以确保浇筑过程中不受到不利环境条件的干扰。合理的环

境因素控制能够显著改善混凝土的质量,提高其稳定性和耐久性。

5 优化混凝土浇筑时机的建议与实践

优化混凝土浇筑时机的关键在于合理控制环境条件,以确保混凝土的质量和结构安全。应结合施工现场的气候条件和混凝土的特性,选择合适的浇筑时机,避免极端温度对混凝土的水化过程产生负面影响。实验验证表明,在夏季高温期间,选择清晨6~8时或傍晚18~20时进行混凝土浇筑,可使浇筑环境温度降低10~15℃,水分蒸发速度降低60%~70%,温差裂缝风险降低80%以上。在寒冷的冬季,为了防止混凝土在低温环境下水化反应缓慢,可以采取延迟浇筑或使用防冻剂等措施,使用防冻剂后,混凝土在-5℃环境下仍可正常水化,7d强度可达设计强度的45%~50%,确保混凝土的强度和耐久性。选择合适的时段进行浇筑,能够有效控制混凝土温度和湿度的波动,从而提高其结构稳定性和抗裂性。

在实际施工中,除温度外,湿度和风速也是影响混凝土浇筑时机的重要因素。为了优化浇筑时机,必须对气候变化进行精准预测,并制定应急方案。在干燥季节,特别是风速较大的情况下,应采取临时遮盖或喷水雾等措施,喷水雾可使施工现场相对湿度提高20%~30%,降低混凝土表面水分的蒸发速度,避免由于水分流失过快导致的裂缝^[5]。高湿环境下,可以适当推迟浇筑时间,避免水分滞留在混凝土内部,影响水泥水化反应的正常进行。在选择浇筑时机时,还应根据具体的施工环境,配合采用先进的气象监测工具,实时掌握温度、湿度、风速等变化,确保施工过程中能应对环境变化带来的不利影响。

优化混凝土浇筑时机的一个重要方面是合理安排养护阶段。无论是高温还是低温环境,都需要采取有效的养护措施来保证混凝土的质量。在高温环境下,应延长养护时间,养护时间从常规的7d延长至14d,同时经过水膜覆盖或使用养护剂等方式,保持混凝土表面的湿润,可使混凝土28d强度提升10%~12%,裂

缝发生率降低50%以上。在寒冷季节,应加强混凝土的保温措施,避免因温度过低导致水化反应停滞。在此过程中,混凝土的水化温度变化要尽量平衡,避免出现过大的温差造成裂缝。科学合理的养护措施,能够促进混凝土的强度增长,还能有效减少裂缝的产生,提升混凝土的耐久性和稳定性,从而确保隧道等基础设施的长期安全运行。

表1 不同浇筑时机及环境条件下混凝土性能与裂缝情况对比

浇筑时机	环境参数 (温度/湿度/风速)	28d抗压强度 (MPa)	28d收缩量 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	裂缝发生率 (%)	裂缝平均宽度 (mm)
夏季白天 12~14时	35℃/45%/3m/s	38.2	385	68	0.32
夏季清晨 6~8时	22℃/65%/1.5m/s	44.5	230	12	0.08
冬季早晨 8~10时	-3℃/50%/2m/s	32.8	310	55	0.25
冬季午后 13~15时(保温措施)	8℃/55%/1.2m/s	42.1	215	15	0.09
春秋季节 10~16时	20℃/70%/2m/s	45.3	205	8	0.06

6 结语

本文探讨了隧道二次衬砌混凝土浇筑时机对裂缝、强度、收缩性以及环境因素的影响。分析温度、湿度、风速等外部环境条件对混凝土的水化反应和结构稳定性的作用,提出了优化浇筑时机的具体建议。在实际施工中,合理选择浇筑时机,并结合气象监测进行适时调整,是确保混凝土质量和耐久性的关键。有效控制环境因素和实施科学养护措施,可以显著提高混凝土的抗裂性、强度和长期稳定性,为隧道工程的安全性提供有力保障。

参考文献:

- [1] 段亚辉,樊启祥.水工隧洞衬砌混凝土温度裂缝控制理论与应用[M].中国水利水电出版社:202110:448.
- [2] 赵先强.膨胀性软岩隧道支护结构受力特性及缓释方法[D].三峡大学,2021.
- [3] 黄庆庆.高海拔地区隧道衬砌结构力学损伤与二衬混凝土优化设计[D].长安大学,2020.
- [4] 杨继清,丁红春,陆金才.隧洞工程施工新技术应用及线性工程管理[M].西南交通大学出版社:201706:186.
- [5] 左正.混凝土坝水管尺度级别温度场模拟研究[D].清华大学,2015.