

超长结构放坡地下室地坪裂缝协同控制与精益施工

关键技术研究

伍 鸽

中国建筑第五工程局有限公司 湖南 长沙 410000

【摘要】：当地下空间朝大尺度和大复杂高差推进时，超长放坡地坪因基层强约束与重力滑移叠加，易产生早期贯穿性裂缝。为处理多维力场耦合影响导致的开裂情况，本文以抗放结合的控制思路为基础，分析了依靠柔性滑移减少垫层约束和利用微膨胀剂梯度补偿收缩来进行力学干预的方式，在此基础上引入精益施工管控模式，提出借助三维数字模型的异形跳仓排版、能够抵抗塑性流变位移的阶梯式推进浇筑、利用物联网传感进行驱动的闭环动态养护关键技术。工程实际运用说明，使用该成套技术可以阻止收缩拉应力在超长跨度及变截面上连续累积的情况，在时间和空间上消除破坏性形变，达到复杂受力地坪高质量无缝成型的目的。

【关键词】：超长结构；放坡；地下室；地坪裂缝；控制措施；关键技术

DOI:10.12417/2811-0528.26.13.085

引言

随着城市立体空间向深层复合方向开发，附带复杂高差的超长地下工程日益增多。其结构耐久性与成型质量直接体现了建筑行业高质量发展的战略导向。然而，超大空间跨度突破了常规伸缩缝界限，再加上底板放坡引发重力滑移与变截面应力集中，导致地坪在早龄期温降与干缩阶段极易出现贯穿性裂缝^[1]。以往依靠单一材料进行补偿或者被动保留缝隙的做法，很难妥善处理多维力场耦合作用下产生的复杂受力畸变问题，从力学本质上寻找整体共同防裂的办法和精益建造模式，是解决该类地下空间建造瓶颈的迫切需要。

1 超长放坡地下室地坪裂缝成因机理分析

地下室地坪经常出现开裂的问题，严重地影响使用者的体验。地坪裂缝甚至让人们产生一种错觉：认为建造的房屋不安全，出现不愿意将车停放在地下车库，不愿意去商场购物的情况。地坪裂缝问题也造成施工方高昂的维修费用和经济损失。

1.1 超长跨度放大收缩应力

地下室地坪在浇筑完成后进行硬化过程中，会水化热温度降低和水分蒸发，产生体积收缩变化，若结构尺寸超出常规范围继而达到超长标准，微小的收缩变形量会对巨大的空间跨度产生不断累积的影响，此期间地坪底部的垫层会产生很大的摩擦阻力，并把上面试图收缩的混凝土固定住。该类底层约束方式切断了变形释放的渠道，使内部聚集了较大的拉应力，一旦拉应力超过混凝土当时的极限抗拉强度，地坪就会在应力最集中的地方出现撕裂，产生贯穿性裂缝^[2]。

1.2 倾斜地势诱发滑移拉伸

放坡结构改变了常规平整地坪的受力状态，把重力分解成一个平行于斜坡向下的下滑力。混凝土从初凝直至终凝这段时间内，呈半固态的拌合物受自重作用，一直会有向坡底发生滑移的趋势，顺着坡面向下发生的微观位移会使地坪在坡顶和标高发生变化的地方受到持续拉拽。因为早期混凝土抗拉能力非常薄弱，重力产生的单向拉伸很容易在坡道上端拉出横向裂缝，同时在坡底交接处产生应力挤压，引起局部的受力畸变和开裂

1.3 坡面落差加剧水分流失

混凝土塑性收缩形成的裂缝，由于混凝土在终凝前没有强度，表面失水快，造成毛细管中产生较大的负压而使混凝土体积急剧收缩，表层湿润度的维持直接决定了塑性收缩裂缝的发生率。在放坡地坪的实际施工和养护过程中，受重力水流向影响，表层泌水以及人工养护覆盖的水分会迅速顺着斜面流失并汇集到低洼处^[3]。这导致坡顶和斜坡中上段的混凝土表面极易脱水，失水速率远超平整区域。水分的过快散失使得毛细孔内产生巨大的负压，促使表面急剧干缩，在混凝土尚未来得及建立起表面强度的阶段，便密集爆发浅表性的网状龟裂。

2 地坪裂缝“抗放兼备”协同控制关键技术

2.1 铺设隔离介质消减底层约束

技术方案在垫层和地坪面层之间铺设双层高分子滑动膜，以解决超长结构早期收缩易受底板垫层强约束的力学特征，该隔离介质在物理力学上阻碍上下结构进行刚性固结，使层间界面的静摩擦系数有明显减少，在地坪混凝土处于水进行化热降

温 and 干燥收缩期、发生体积改变时，滑动膜允许板体进行顺向微幅滑移^[4]。该释能方式把底部的被动嵌固改成主动滑动，使混凝土内部积蓄的收缩拉应力提前进行耗散，在受力根源上对贯穿性裂缝的萌生进行阻止。

2.2 配置微膨胀剂补偿体积收缩

针对超长地坪原本存在的收缩开裂倾向，技术方案在混凝土配合比中加入了微膨胀补偿的方式，拌合物中按比例掺加硫铝酸钙类微膨胀剂，使其在早期水化阶段生成致密的钙矾石结晶，使基体产生微观体积膨胀，内部钢筋骨架和外部边界条件对物理变形进行限制，使该结构初始预压应力场得以形成。这部分预压力直接对冲混凝土硬化后期因温降与干缩叠加产生的极限拉应力。结合放坡地坪的局部应力集中特征，方案在坡道交汇与变截面敏感区实施差异化的梯度掺量设计。这种空间非等幅的补偿策略，定向抑制了自重滑移与变标高引起的附加拉伸，在材料力学层面实现了预压应力与收缩拉应力的动态平衡。

2.3 执行跳仓浇筑阻断应力累积

针对超长放坡地坪连续成型易引发应力叠加的风险，施工环节运用空间网格化跳仓技术实施时空分割管控。该工艺将超长坡面划分为尺度受控的独立作业仓格，现场严格执行相邻区块错时跳跃浇筑^[5]。先期成型的仓块在合理的间歇期内，能够不受周边固结约束地释放早期水化热与大部分干缩变形。待各独立单元的物理尺寸趋向收敛稳定后，再同步实施空仓的合拢浇筑。此种工序安排在成型初期以物理断口引导形变释放，在后期以结构闭合抵抗残余收缩，有效切断了拉伸应力沿变标高路径的连续传递与累积链条，从时空维度消解了地坪发生贯穿性开裂的力学前提。

3 面向防裂的精益施工与过程管控关键技术

3.1 深化三维模型指导网格排版

放坡地坪在混凝土浇筑初期处于塑性流变状态，受自重沿斜面分解的下滑力影响，极易产生宏观滑移与不均匀沉降，进而诱发坡顶受拉区的早期撕裂。为抑制这种由流变学特性引发的力学畸变，现场应采用自下而上的阶梯式布料工艺。该技术依托底端先期浇筑成型的混凝土条带作为实体抗滑挡墙，利用其初凝前逐渐增强的屈服剪应力，被动拦截上级流态拌合物的下探趋势。通过精准卡控各阶梯的推进时间与空间咬合尺度，将大面积顺坡流淌转化为局部受控的层间自锁，从工序源头阻断结构滑移引发的开裂风险。

在超长放坡地下室的现场施工管控中，阶梯浇筑的精益化体现在对材料流变状态与时间窗口的严密配合。以某带多级驻

车坡道的大型地下枢纽为例，面临长达数十米且局部坡度超10%的连续斜面，作业团队将入模混凝土坍落度严格限制在120至140毫米之间，以此获取最佳的抗流挂性能。浇筑作业自低标高起步，沿坡面横向均布首道宽约3米的水平底座。待该条带混凝土表面泌水微收、内部初具静切力支撑时，泵管即刻向高程平移，紧贴首道条带上沿布设第二级阶梯。两级阶梯的浇筑时间差被精准控制在混凝土初凝前45分钟以内。振捣手操作高频振动棒时，严格执行垂直快插慢拔，棒头需向下突破层间界面50毫米进行深度振捣，促使新旧阶梯在交接处实现骨料的咬合重组，彻底消除冷缝隐患。随阶梯逐级向上推演，面层修整工序紧密跟进，借助重型无缝钢管进行原浆碾压，并在初凝至终凝的关键期内辅以不少于三次的机械提浆与人工闭水抹压。此套流程凭借底层硬性顶托与表层高频挤压的力学协同，牢牢锁死了坡面半固态介质的位移空间，经后期实体量测，全段坡面厚度极差均控制在规范允许范围内，根治了斜坡顶端因沉降滑移诱发的贯穿性裂缝。

3.2 实施阶梯浇筑抑制重力滑移

放坡地坪在混凝土初凝前处于塑性阶段时，受自重平行于斜面分力的持续作用，拌合物很容易进行顺坡流变和宏观滑移，向下位移会使结构厚度失去控制，并且在坡顶和变标高转折处产生较大拉伸应力，直接把板体撕裂，为抑制该力学改变，施工应整体实行自下而上的阶梯式推进方法^[6]。此技术的核心在于利用下部先期成型混凝土不断增长的屈服切应力，将其转化为承托上级流态介质的物理挡墙。依靠各浇筑梯次间的空间咬合与自锁效应，将大面积的无序流淌强制转化为局部受控的层状堆叠，从源头阻断重力滑移引发的开裂前提。

材料流变状态和时间窗口的控制是实施具体方式的要求，浇筑作业要从地坪最低标高处开始，沿着等高线横向均匀布置首道宽度大约为2.5至3米的水平底座带，入模混凝土的坍落度应该被严格控制在120毫米到140毫米之间，从而可以获取最佳的抗流挂性能。待首条带混凝土表面泌水微收、内部初步建立静切力支撑时，泵管即刻向高程平移，紧贴该条带上沿布设第二级阶梯。两级阶梯的浇筑时间差需精准控制在底狭混凝土初凝界限前45分钟以内。操作高频振动棒时，需执行垂直快插慢拔的规范动作，棒头必须向下突破新旧阶梯交界面约50毫米进行深度振捣，强行促使两层骨料交错重组，彻底消除内部冷缝隐患。随阶梯逐级向上推演，面层修整工序需紧密跟进。作业班组使用重型无缝钢管继续碾压原浆，在初凝到终凝的重要时间内，进行不少于三次的机械提浆和人工闭水抹压。该闭环操作依靠底层硬性支撑和表层及高频挤压直接限制半固态介质的位移空间，使坡面整体受力均匀及结构密实得到保证。

3.3 布设传感网络驱动动态养护

放坡地坪受重力落差和斜面径流效应影响,表层水分很容易流失,人工洒水养护很难在超长变标高区域维持均匀的温湿度场,把物联网传感技术引入进来,用来形成动态监测网络,这是突破早期养护瓶颈的主要方式,该技术在混凝土内部、表层按照矩阵方式事先预埋微型传感器,可以全天候对结构中心区、表层的温度梯度变化和表面湿度流失速率进行监测。感知数据经无线基站实时透传至中央控制终端,一旦监测指标突破规范设定的温差阈值或湿度下限,系统即刻触发相应的物理干预装置。这种数据驱动的闭环管控彻底替代了经验盲目养护,从根本上遏制了早期干缩与温差应力裂缝的萌生。

在具体工程实施时,传感网络的布设要与地坪的三维形态和受力薄弱区高度契合。技术人员应在坡道转折处、变截面交接带以及大面积迎风坡面等水分散失严重的区域,高密度植入温湿度一体化探头。测点布置沿地坪厚度方向分为三层,即表层、中心层和底层,以此建立立体的温差监控矩阵。在参数设定环节,要将混凝土内外温差报警线严格控制在 25 摄氏度以内,同时将表层相对湿度下限设定为 85%。执行端依托沿坡面阶梯式架设的智能微喷淋管网进行联动。当控制中枢接收到某段坡面湿度逼近临界值的信号时,系统自动开启该局部区域的电磁阀进行高压雾化喷淋。这种定向微喷既规避了大水漫灌

导致的水流顺坡冲刷带走表层浮浆,又能迅速在混凝土表面形成一层稳定的水汽保湿膜。针对大体积超长区段的高水化热期,若系统监测到核心体与表层温差急剧拉大,中枢会联动增加局部喷雾频次,利用微小水滴蒸发吸热的物理特性强行压降表层温度,削峰填谷般地抹平结构内部的温度梯度。等待最危险的早期收缩变形期平稳度过,系统依靠实时回传的降温曲线自动进行干预强度的递减处理,整个动态干预过程彻底排除了人工操作存在的滞后性和空间死角,为超长结构硬化提供了非常精密的环境保障。

4 结语

处理超长放坡地坪的裂缝问题时,必须考虑到多个变量之间存在的相互影响,这属于一项需要整体进行考虑的工程任务。本文研究打破常规单一抗裂手段的局限,确立“抗放兼备”的力学协同方式,把材料微观应力补偿、空间物理约束解除和全过程动态感知进行深度融合,该模式在时间和空间两方面彻底消除超大跨度和高差突变叠加造成的复杂破坏应力,让结构受力状态由被动防御变为主动释能免疫,发生质的改变。展望未来,随着数字孪生与边缘计算技术的加速渗透,复杂地下空间的防裂管控将向全生命周期智慧运维演进。基于多源物联数据的结构演化模型,有望精准自适应调控混凝土流变特性与外部环境边界。

参考文献:

- [1] 易国良,陈馈,卢高明,等.我国城市地下空间盾构法隧道工程技术新进展[J].隧道建设(中英文),2024,44(1):1-20.
- [2] 罗开泰,李志刚.宜宾某地下道路基坑支护案例分析[J].城市道桥与防洪,2025(8):274-277.
- [3] 黄华昌.浅谈高水位地下室底板碎石疏水层施工技术[J].中国住宅设施,2021,(4):97-98.
- [4] 冯加兵.地下空间底板地坪堵疏降结合防返潮创新技术[J/OL].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2019(8)[2019-08-23].
- [5] 马维强,袁海波,路露.地下室地坪裂缝控制技术的应用[J/OL].中国科技期刊数据库工业 A,2024(11)[2024-11-01].
- [6] 李礼强.结构性地下室地坪在高水位地下室中的应用[J].建材与装饰,2020,16(28):45-46.