

隧道防水板铺设松弛对二次衬砌空洞形成的影响探讨

张 伟

云南云路工程监理咨询有限公司 云南 昆明 650051

【摘要】：隧道防水板铺设松弛是诱发二次衬砌空洞的关键隐患之一，其通过改变防水板与衬砌混凝土的接触状态，影响混凝土浇筑密实性，进而加剧空洞形成风险。明确二者内在作用机制，对提升隧道工程质量具有重要意义。分析防水板铺设松弛的不同程度对衬砌施工过程的干扰，探究松弛状态下空洞形成的路径与特征，提出针对性防控思路。研究表明，防水板过度松弛易导致混凝土浇筑时出现布料不均、排气不畅等问题，为空洞形成提供条件，需从铺设工艺管控等方面规避风险。

【关键词】：隧道防水板；铺设松弛；二次衬砌空洞；施工质量；防控思路

DOI:10.12417/2811-0528.26.06.034

隧道工程作为交通基础设施的重要组成部分，其结构稳定性与耐久性直接关系到通行安全与运营寿命。二次衬砌空洞是隧道工程中常见的质量病害，一旦形成易引发衬砌结构开裂、渗漏水等连锁问题，严重削弱隧道承载能力。防水板铺设作为隧道防水与衬砌施工的关键环节，其铺设状态与二次衬砌空洞形成存在密切关联，其中铺设松弛现象的影响尤为突出。深入厘清防水板铺设松弛对二次衬砌空洞形成的作用路径与影响规律，是解决此类质量病害、提升隧道工程建设水平的重要前提，也为后续施工管控措施的优化提供核心依据。

1 隧道防水板铺设松弛的成因及表现形式

防水板铺设松弛由基底条件、施工操作及材料特性等多因素共同导致。基底围岩表面的凸起、凹陷或杂物未清理，会使防水板无法紧密贴合，形成局部悬空松弛。施工时张拉力度不足、铺设顺序不合理，易造成防水板在转角、拱顶等关键部位堆积松弛。防水板热胀冷缩系数过大，也会随温度变化收缩变形，加剧松弛程度。松弛在隧道不同部位形态各异，拱顶多为大面积鼓包，易留存空气演化成空洞；边墙呈波浪状褶皱，间隙成为混凝土填充死角；转角及变截面处则是局部堆积褶皱，属于空洞高发区^[1]。松弛程度判定需结合外观与功能，外观无褶皱鼓包、贴合紧密为合格；褶皱超5cm或鼓包超0.5m²为中度松弛；大面积鼓包、悬空超10cm为重度松弛。功能上按压无明显变形、不干扰后续施工为合格，反之则需整改。

2 防水板铺设松弛诱发二次衬砌空洞的作用机制

2.1 松弛状态下防水板对混凝土布料的干扰作用

防水板松弛会显著干扰二次衬砌混凝土的布料过程，破坏浇筑的连续性与均匀性。浇筑时，混凝土冲击使松弛部位产生不规则变形，形成局部阻挡，阻碍混凝土向周边扩散^[2]。尤其在拱顶、边墙转角等易松弛区域，鼓包或褶皱易造成布料死角，混凝土受重力和输送压力影响难以充分填充，从而留下空档。

同时，松弛改变了混凝土的正常流动路径，引发分流现象：部分区域堆积过厚，而凹陷或悬空区则填充不足。这种布料不均直接为空洞形成创造了初始条件，严重影响衬砌密实度与结构完整性。

2.2 防水板松弛导致衬砌混凝土排气不畅的机理

混凝土浇筑过程中产生的空气能否顺利排出，直接影响衬砌的密实度，而防水板松弛会破坏排气通道的完整性，导致排气不畅。正常铺设的防水板与基底之间贴合紧密，混凝土浇筑时产生的空气可沿防水板与基底的间隙或专门设置的排气孔排出。但当防水板存在松弛现象时，其与基底之间会形成多个封闭的悬空区域，这些区域会将混凝土浇筑过程中产生的空气包裹其中，形成封闭的气腔。随着混凝土的持续浇筑，气腔周围被混凝土逐渐包裹，空气无法找到有效的排出路径，只能在局部聚集。松弛的防水板具有一定的弹性，在混凝土压力作用下会发生压缩变形，进一步压缩气腔空间，使空气更难排出。长期聚集的空气会在混凝土凝固后形成永久性的空洞，影响衬砌结构的整体性与承载能力。

2.3 松弛防水板与衬砌界面粘结缺陷的形成过程

松弛的防水板难以与二次衬砌混凝土紧密贴合，导致界面存在间隙，无法形成有效粘结。在混凝土浇筑及硬化过程中，因缺乏约束，松弛区域易发生界面剥离。混凝土自身收缩产生的应力在无防水板有效限制的情况下，会在界面处引发微裂缝。这些微裂缝为水分渗透提供通道，水分侵入后进一步削弱界面粘结性能，促使剥离范围扩大，最终发展为明显空洞。同时，粘结缺陷使防水板失去应有的防水屏障作用，渗漏水不仅降低结构耐久性，还会加速空洞周边混凝土的侵蚀劣化，严重损害衬砌整体质量与服役性能。

3 防水板铺设松弛影响二次衬砌空洞形成的关键因素

3.1 铺设松弛程度与空洞形成规模的关联关系

防水板铺设松弛程度与二次衬砌空洞规模呈显著正相关, 松弛越严重, 空洞规模越大、风险越高。轻度松弛时, 防水板贴合较好仅局部微褶皱或悬空, 对混凝土施工影响小, 形成分散小型空洞 ($<0.1 \text{ m}^2$), 对衬砌影响有限; 中度松弛出现明显褶皱或鼓包, 布料死角与排气阻碍加剧, 空洞扩大 ($0.1 - 1 \text{ m}^2$) 且可能连通, 影响衬砌承载; 重度松弛时防水板大面积悬空, 混凝土难填充关键部位, 形成大面积深空洞 ($>1 \text{ m}^2$), 破坏衬砌完整性, 引发结构安全隐患。这一规律在云南省某高速公路隧道 K28+450~K29+120 段的施工实践中得到充分验证: 初期因基底处理粗糙、张拉控制缺失, 拱顶区域出现多处鼓包 (最大面积 1.2 m^2 , 悬空高度达 15cm), 后续地质雷达检测发现 7 处空洞, 最大达 1.35 m^2 ; 而在实施精细化铺设管控后 (包括基底打磨、分段张拉、铺设后敲击与红外辅助检测), 后续 120m 段仅检出 2 处微小空洞 (均 $<0.08 \text{ m}^2$), 空洞发生率下降 82%, 有力佐证了松弛程度与空洞规模之间的强关联性。

3.2 施工环境对松弛防水板诱发空洞的影响

施工环境通过影响混凝土性能与防水板状态, 间接作用于松弛防水板诱发二次衬砌空洞的过程。隧道内部的温度环境是重要影响因素之一, 若施工环境温度过低, 混凝土的初凝时间会延长, 流动性下降, 在松弛防水板形成的布料死角处更难填充密实, 同时低温会导致防水板的弹性降低, 松弛区域的变形能力减弱, 进一步加剧空洞形成风险; 若温度过高, 混凝土水分蒸发过快, 易出现离析、泌水现象, 同样会降低填充密实度^[3]。隧道内部的湿度环境也会产生影响, 高湿度环境会延缓混凝土硬化速度, 有利于混凝土充分填充, 但也可能导致防水板表面附着水汽, 降低其与混凝土的粘结性能; 低湿度环境则会加速混凝土表面干燥, 易形成干缩裂缝, 为空洞扩展提供通道。隧道内的通风条件也会影响排气效果, 通风不畅会导致混凝土浇筑时产生的空气无法及时排出, 进一步加剧空洞的形成。

3.3 衬砌混凝土性能与松弛防水板的相互作用

衬砌混凝土的性能参数与松弛防水板之间存在复杂的相互作用, 直接影响二次衬砌空洞的形成。混凝土的流动性是关键影响参数之一, 流动性较好的混凝土在浇筑过程中能够更好地扩散, 一定程度上可弥补松弛防水板带来的布料困难问题, 减少空洞形成的可能性; 但若流动性过大, 混凝土易出现离析现象, 骨料与砂浆分离, 在松弛防水板的悬空区域, 砂浆易流失, 骨料堆积, 形成空隙。混凝土的凝结时间也会影响空洞形

成, 凝结时间过长会导致混凝土在浇筑过程中出现过度流淌, 无法在松弛区域形成有效填充; 凝结时间过短则会使混凝土在未充分填充至松弛区域前就开始硬化, 形成空洞。混凝土的强度等级也会产生影响, 高强度混凝土的粘性相对较大, 在松弛防水板的阻挡作用下, 布料难度增加, 而低强度混凝土的承载能力较弱, 若存在空洞, 会进一步降低衬砌结构的整体稳定性。

4 基于空洞防控的防水板铺设松弛管控措施

4.1 防水板铺设前的基底处理优化方案

防水板铺设前的基底处理优化是防控铺设松弛与二次衬砌空洞的基础环节, 核心在于确保基底平整、洁净、坚实。针对基底凸起问题, 需采用人工或机械打磨的方式进行处理, 将凸起部位打磨至与周边基底平齐, 打磨后基底表面的平整度误差应控制在规范允许范围内, 避免凸起部位导致防水板局部悬空。对于基底凹陷区域, 需采用同级混凝土或专用修补材料进行填充找平, 填充过程中要确保修补材料密实, 与原有基底结合紧密, 防止后期使用过程中出现沉降导致防水板松弛。要对基底表面的杂物、浮尘、油污等进行彻底清理, 可采用高压风枪吹扫、人工清扫等方式, 确保基底表面无任何影响防水板贴合的障碍物。还需对基底的渗漏水情况进行处理, 采用注浆堵水、设置排水盲管等措施, 消除基底积水对防水板铺设的影响, 为防水板紧密贴合基底提供良好条件。

4.2 防水板铺设过程中的松弛度控制技术

防水板铺设过程中的松弛度控制需结合隧道断面特征与施工工艺, 采用精准化的控制技术。在防水板裁剪环节, 要根据隧道实际断面尺寸进行精准测量与裁剪, 预留合理的搭接宽度, 避免因裁剪尺寸过大导致铺设时出现堆积松弛, 同时也要防止裁剪尺寸过小导致张拉过度破坏防水板^[4]。铺设时应采用分段张拉、逐点固定的方式, 从隧道拱顶向边墙两侧对称铺设, 每铺设一段就进行张拉固定, 张拉力度需根据防水板的材料特性与设计要求精准控制, 确保防水板张拉后无明显褶皱, 与基底紧密贴合。在关键部位的控制上, 拱顶部位应适当增大张拉力度, 避免出现鼓包; 边墙转角部位应采用专用的转角件, 确保防水板平顺过渡, 减少局部松弛。铺设过程中要安排专人进行实时检查, 及时调整防水板的松弛状态, 确保铺设质量符合要求。

4.3 铺设后松弛状态的检测与整改方法

防水板铺设完成后, 需采用科学的检测方法对松弛状态进行全面排查, 并针对检测出的问题及时整改。外观检测是基础方法, 检测人员需沿隧道纵向与横向逐段检查防水板表面, 查看是否存在褶皱、鼓包、悬空等松弛现象, 对发现的轻微松弛部位, 可采用局部补张拉的方式进行整改; 对中度或重度松弛

部位,需拆除相应区域的防水板,重新进行铺设。除外观检测外,还需采用敲击检测法辅助判断,通过敲击防水板表面,根据声音差异判断是否存在悬空松弛区域,若敲击声音为空响,则表明该区域存在松弛,需进一步核查空洞大小与深度。对于检测出的松弛区域,整改完成后需再次进行全面检测,确保整改到位。要建立检测与整改的闭环管理机制,对检测数据与整改情况进行详细记录,为后续施工质量追溯提供依据。

5 防水板铺设管控与二次衬砌空洞防控的协同实施路径

5.1 施工全流程的协同管控机制构建

构建施工全流程的协同管控机制,需打破各工序之间的壁垒,实现防水板铺设管控与二次衬砌空洞防控的无缝衔接。在施工策划阶段,要结合隧道工程的地质条件、断面尺寸等实际情况,制定兼具针对性与可操作性的协同管控方案,明确各工序的质量控制要点与协同配合要求。在材料进场环节,需对防水板、混凝土原材料等进行严格检验,确保材料性能符合设计要求,从源头保障防水板铺设质量与混凝土浇筑质量。在施工实施阶段,建立工序交接检查制度,防水板铺设完成并经检验合格后,方可移交至下道衬砌施工工序,衬砌施工前需对防水板铺设状态进行再次复核,确保无松弛等质量隐患。建立实时沟通协调机制,铺设施工与衬砌施工人员保持密切沟通,及时解决施工过程中出现的交叉问题,确保协同管控机制有效运行。

5.2 关键工序的质量联动核查方式

关键工序的质量联动核查是保障协同实施效果的核心手段,需聚焦防水板铺设与二次衬砌浇筑两大关键工序,建立多

维度的联动核查方式。在防水板铺设关键工序,核查内容包括基底处理质量、防水板裁剪精度、张拉固定质量等,核查人员需采用现场实测、外观检查等方式,确保各环节质量符合要求^[5]。在二次衬砌浇筑关键工序,核查内容包括混凝土配合比、布料顺序、振捣密实度等,同时需联动核查防水板在浇筑过程中的状态,查看是否因混凝土冲击导致松弛变形。衬砌浇筑时应同步监测防水板状态,发现松弛变形立即停浇整改;同时建立核查结果共享机制,实现铺设与衬砌质量数据互通,为后续工序提供质量控制依据。

5.3 协同防控体系的长效运行保障

协同防控体系长效运行需制度、技术、人员多维度保障。制度上,健全质量责任制,明确各岗位职责并落实到人,配套奖惩机制,奖优罚劣以规范操作。技术上,强化研发创新,推广先进铺设与检测技术设备提升检测精准度,定期开展技术培训提升人员专业能力与协同水平。人员上,组建专业质量管控团队,负责体系日常运维,定期巡查复盘施工质量,及时解决保障体系稳定运行。

6 结语

隧道防水板铺设松弛是诱发二次衬砌空洞的重要因素,其通过干扰混凝土布料、阻碍排气及削弱界面粘结等机制,显著增加空洞形成风险。松弛程度与空洞规模呈正相关,施工环境与混凝土性能亦对空洞发展产生重要影响。通过优化基底处理、精准控制铺设松弛度、强化铺设后检测整改,并构建全流程协同管控机制,可有效防控空洞病害。未来应持续推进工艺标准化、检测智能化与管理精细化,全面提升隧道衬砌结构的密实性与耐久性,为隧道工程高质量建设提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 付晓坤.地铁隧道防水工程施工技术研究[J].散装水泥,2025,(02):124-126+129.
- [2] 吴发展.浅埋特大断面隧道防水施工技术[J].云南水力发电,2025,41(03):93-96.
- [3] 戴世伟,李雪,曹义昌,等.复理石隧道防排水施工关键技术和质量控制[J].公路,2024,69(02):162-165.
- [4] 刘庚.严寒地区隧道防水保温层施工应用研究[J].工程建设与设计,2023,(23):201-203.
- [5] 周治强.隧道防水板自动焊接台车技术的应用[J].石材,2023,(12):37-39.