

首都机场 APM 下穿隧道病害成因分析及治理措施

李福辰¹ 班忠民¹ 郭向东²
1. 北京首都国际机场股份有限公司 北京 100621
2. 北京市建设工程质量第三检测所有限责任公司 北京 100037

摘 要：针对首都机场 APM 下穿隧道病害成因及治理技术开展研究。通过现状检测，明确隧道左右线各类病害的数量及分布特征，对裂缝及渗漏水病害成因进行了分析。根据下穿隧道结构特点及病害情况，提出了涵盖裂缝处理、渗漏水治理、结构修复等方面的针对性措施，以期为同类隧道工程的病害防治提供参考。
关键词：隧道；裂缝；渗漏水；结构治理

引言

APM 下穿隧道作为首都机场 T2 航站楼与 T3 航站楼之间的重要联络通道，承担着繁忙的交通疏导功能。该隧道全长 1265m，采用单向双车道设计，隧道全宽 10.1m，路面宽 9m，自建成投入使用至今已近 10 年。随着运营时间的增长，隧道结构受环境作用、荷载影响等多因素综合作用，部分区域逐渐出现墙体结构渗水等病害，尤其是西侧端表现更为明显。此类病害不仅影响隧道的正常使用，还可能对结构安全构成潜在威胁。因此，开展对该隧道病害的成因分析及治理措施研究具有重要的工程实际意义。通过对隧道现状的详细检测，深入剖析病害产生的根源，进而提出科学合理的治理方案，对于保障隧道的安全、稳定运营，延长其使用寿命，以及为类似隧道工程的病害防治提供技术借鉴均具有重要价值。

1 隧道现状检测

1.1 现状检测结果

通过现状检测，隧道左线共发现病害 428 处，其中表皮脱落开裂 5 处，渗水水渍 106 处，蜂窝麻面 3 处，剐蹭 1 处，露筋锈蚀 1 处，破损 7 处，墙皮鼓包脱落 4 处，涂层剥落 2 处，锈胀 3 处，竖向开裂 1 处，横向裂缝 20 条，竖向裂缝 260 条，纵向裂缝 8 条，网状裂缝 7 处；隧道右线共发现病害 570 处，其中表皮开裂脱落 12 处，修补脱落 2 处，剐蹭 1 处，露筋锈蚀 13 处，破损 15 处，渗水水渍 79 处，锈胀露筋 59 处，洇湿滴水 1 处，横向裂缝 17 条，竖向裂缝 349 条，纵向裂缝 8 条，网状裂缝 14 处。病害统计见下表。

表 1 病害汇总表

位置	裂缝		网状裂缝	露筋	锈胀	表皮开裂	破损	渗水水渍	剐蹭
隧道左线	≥ 0.3mm	< 0.3mm	7	1	3	11	10	106	1
	12 条	283 条							
隧道右线	≥ 0.3mm	< 0.3mm	14	13	59	14	15	80	1
	25 条	346 条							

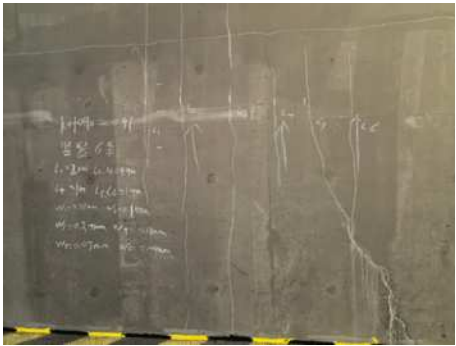


图 1 典型病害照片



图 2 典型病害照片

1.2 病害特征分析

APM 下穿隧道左线病害累计 434 条，其中裂缝病害占比 68.0%，渗漏水病害占比 24.4%，破损、开裂、网裂合计占比 6.5%，其中现有裂缝病害中裂缝宽度小于 0.3mm，占

比 95.9%。

APM 下穿隧道右线病害累计 567 条, 其中裂缝病害占比 65.4%, 渗漏水病害占比 14.1%, 锈胀、破损、开裂、网裂合计占比 18.0%。其中现有裂缝病害中裂缝宽度小于 0.3mm, 占比 93.3%。

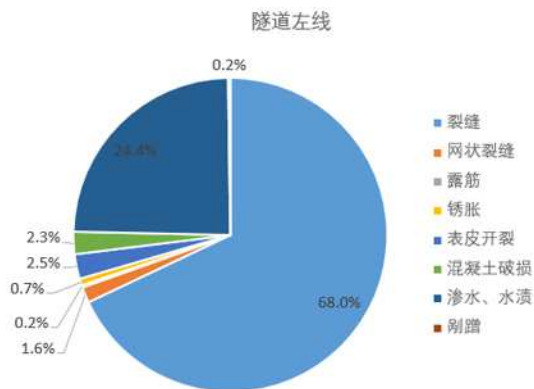


图 3 隧道左线病害占比图

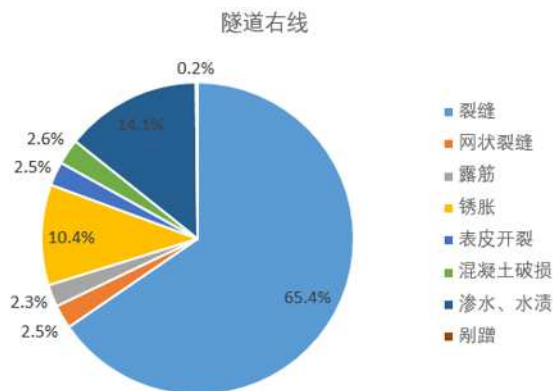


图 4 隧道右线病害占比图

依据《公路隧道养护技术规范》(JTG H12-2015)规定, 衬砌破损等级评定为 2 类: 出现变形、位移、沉降和裂缝, 发展缓慢, 边墙衬砌背后存在空隙, 有扩大的可能。衬砌衬砌渗漏水等级评定为 2 类: 衬砌拱部有滴漏, 侧墙有小股涌流, 路面有浸渗但无积水, 拱部、边墙因渗水少量挂冰, 边墙脚积冰不久可能会影响行车安全^[1]。

2 原因分析

2.1 裂缝形成原因分析

APM 隧道左线累计发现裂缝 295 条, 其中宽度大于等于 0.3mm 的为 12 条, 占比 4.1%。右线累计发现裂缝 371 条, 其中宽度大于等于 0.3mm 的为 25 条, 占比 6.7%。现有裂缝宽度绝大多数小于设计允许值 0.3mm, 考虑裂缝为非受力裂缝, 分析为: ①混凝土硬化过程中的化学收缩、塑性收缩、干燥

收缩产生。②飞机频繁通行产生的动荷载和振动, 长期作用可能引起结构既有干缩裂缝扩展。

2.2 渗漏水形成原因分析

分析推断渗漏水原因为隧道周围地下水逐渐聚集, 在结构周边形成富水环境; 且隧道结构由于各种原因, 逐步形成衬砌内外连通的渗漏水通道, 最终导致外部水源进入结构内部形成渗漏水病害。具体原因分析如下:

①裂缝、混凝土破损渗水, 墙体渗水:

结构的防水系统通常由混凝土材料本身的自防水性能和铺设的防水层构成, 防水层铺设的过程中存在大量的接缝, 接缝的施工质量影响着结构的防水效果, 防水措施失效后, 结构中出现裂缝、破损等病害, 形成渗水通道, 使外部水源从结构外侧流进结构内部, 形成渗漏病害^[2]; 另外, 现场检测部分墙体未见裂缝、破损等病害, 但墙体出现大面积渗水现象, 初步判定原因为混凝土自身防水性能较差, 渗漏水通过混凝土孔隙渗进结构内部形成渗水病害^[3]。

②变形缝渗水:

结构变形缝的处理一直是结构防水的薄弱环节, 随着时间的推移, 填缝材料日益老化并失去止水效果^[4]。防水措施失效后, 结构中出现水通道, 使水从结构外侧流进结构内部在变形缝、施工缝出现渗漏水。通过现场检测发现, 隧道施工缝或变形缝普遍存在渗漏现象, 且渗漏情况较为严重, 初步判定缝内止水材料已老化、失效。

3 隧道病害的治理措施

3.1 纵横向裂缝处理

(1) 缝宽 < 0.3mm 裂缝: 环氧树脂胶泥表面封闭处理
针对宽度小于 0.3mm 的裂缝, 采用环氧树脂胶泥进行表面封闭, 具体步骤如下:

①定位: 明确需要处理的裂缝具体位置, 做好标记。

②表面处理: 第一步, 借助钢丝刷等工具, 对裂缝走向两侧 30~50mm 范围内的混凝土表层进行清理, 把灰尘、浮渣以及松散的污物清除掉, 让基面呈现出牢固且平整的状态; 第二步, 用刷子蘸取甲苯、丙酮、酒精之类的有机溶剂, 对裂缝两侧 20~30mm 的区域进行擦拭, 以此确保该表面干净且干燥。

③封缝作业: 首先, 在裂缝两侧宽度为 20~30mm 的区域涂上环氧树脂基液; 接着, 再涂抹一层环氧树脂胶泥, 胶泥厚度大约 1mm, 宽度在 50~60mm, 涂抹过程中要防止出

现气孔和气泡, 将其刮抹平整, 以保障封闭效果。

④表层防护: 在已凝固的胶泥表面, 涂刷两层环氧树脂胶液。

(2) 缝宽 $\geq 0.3\text{mm}$ 裂缝: 低压灌浆处理 (环氧树脂胶泥封缝 + A 级环氧灌缝胶灌浆)

对于宽度不小于 0.3mm 的裂缝, 采用低压灌浆法修复, 封缝材料为环氧树脂胶泥, 灌浆材料选用 A 级环氧灌缝胶, 步骤如下:

①清缝处理: 使用角磨机将裂缝两侧 50mm 内的表面打磨至露出新鲜混凝土基面; 清除缝口的松散杂物后, 用气压超 0.2MPa 的压缩空气清理打磨区域的粉尘; 沿裂缝长度方向用丙酮洗刷表面, 确保清洁。

②灌胶底座位置标注: 依据裂缝宽度设定底座间距 (窄缝密集、宽缝稀疏), 裂缝交叉点、较宽处、端部、贯穿处及钻孔位置需安装灌浆嘴; 每条裂缝至少配备一个灌浆嘴、排气嘴和出浆嘴; 灌胶底座的粘贴间距为 $20\sim 40\text{cm}$ 。

③灌浆嘴埋设: 按 $1:1$ 的比例将主剂与固化剂调和成腻子状的粘结胶, 直至均匀; 把调好的粘结胶涂在灌胶底座下底面四周; 按标记位置将底座顺着缝隙贴上, 适当按压使粘结胶局部溢出并包裹底座边缘, 注意不要堵塞嘴孔和裂缝。

④封缝操作: 同步封闭压浆区域的所有裂缝 (防止贯通后出现跑气跑胶现象); 先沿缝涂一层环氧树脂基液, 待其初凝后抹一层环氧树脂胶泥 (需排除气泡并抹平); 胶泥初凝时, 在其表面刷两层环氧树脂基液。

⑤密封检查 (气检): 封缝材料凝固后, 用肥皂水沿缝隙刷洗; 从灌浆嘴通入 0.2MPa 的压缩空气, 若肥皂水中出现气泡则表明漏气, 需进行补封处理^[5]。

⑥灌浆操作: 气压试验合格后拆除堵头、配制灌浆液; 竖向及斜向裂缝需自下而上逐个灌浆, 同时注意排气; 根据浆液流动性选择灌浆压力 (通常 $0.1\sim 0.4\text{MPa}$); 当相邻排气嘴溢浆时, 在该位置安装灌浆器继续灌注; 最后一个排气嘴出浆后保持恒压, 待进胶速度小于 $0.1\text{L}/\text{min}$ 时, 继续灌注 5 分钟后停止; 灌注时若出现漏浆, 立即用快速凝结材料封堵; 灌浆结束后用堵头封闭灌浆嘴, 24h 内不得触碰^[6]。

⑦养护与修饰: 检查修补质量, 发现缺陷及时修补; 胶液完全固化后拆除灌浆嘴, 用角磨机将表面打磨平整。

3.2 沉降缝处渗漏水处理

(1) 前期准备

对裂缝进行普查, 找到明确的裂缝是成功的关键和前提, 因此需先对渗漏水部位进行全面清理, 明确裂缝的具体位置, 之后再开展后续操作。

(2) 钻孔

使用手持冲击钻钻孔, 钻孔深度需结合混凝土结构厚度来确定, 一般不少于 $10\sim 15\text{cm}$ 。钻孔间距为 $20\sim 30\text{cm}$, 沿裂缝两侧间隔分布, 具体间距可根据裂缝宽度调整——裂缝较宽时间距可大一些, 裂缝较小时则要缩小间距。孔位应在裂缝两侧约 $6\sim 10\text{cm}$ 处, 且钻孔时需倾斜一定角度。

钻孔如下图所示。

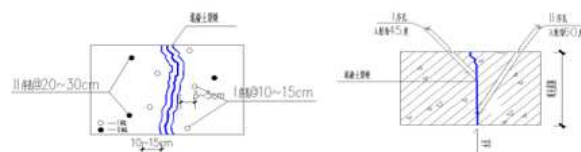


图 5 注浆孔布置图

(3) 埋设止水针头

选用封缝胶作为封缝材料, 同时用其埋设止水针头。

(4) 配置浆液

依据材料使用规范调配浆液, 且浆液需现配现用。一次调配量不宜过多, 具体要根据浆液凝固时间和进浆速度来定。若要停用浆液或清洗灌浆泵, 需使用厂家提供的专用清洗剂。浆液调配分两次进行, 一次在洞外, 另一次在洞内施工现场。因洞内湿度较高, 所以在洞内调配浆液时, 要遵循少量多次、随配随用的原则。

(5) 灌浆

每条裂缝在压水试验后, 需间隔一定时间再开展灌浆作业。正式灌浆时, 将灌浆压力一次性升至最高 0.30MPa , 可从裂缝一端开始灌浆, 也可从吸水量最大的灌浆嘴启动。每条裂缝的灌浆过程要连续无间断, 以确保浆液在裂缝内均匀扩散, 保障灌浆质量。进行压水或压气检查时, 压力需维持在 $0.3\sim 0.4\text{MPa}$ 。当某个灌浆孔的吃浆量 $\leq 0.02\text{L}/5\text{min}$ 时, 即可对该孔封孔, 随后转至下一个灌浆孔施工; 当某条裂缝的最后一个灌浆孔达到灌浆结束标准后, 需继续进浆 15min , 方可结束该裂缝的灌浆工作。

若某个灌浆孔吃浆量较大, 在未达到结束标准且无串浆现象时, 累计注浆量达到 3L 即可停止该孔灌浆。对于吃浆量较少的裂缝, 应适当增加钻孔进行复灌, 确保裂缝内浆液充足。对于已灌浆的裂缝, 若发现某处仍有渗水, 需在渗

水位位置附近重新钻孔复灌,直至彻底封堵渗水处。

(6) 效果检查

灌浆结束后,发现灌浆嘴无浆液时需进行补灌浆。并检查灌浆补强质量和效果,发现缺陷及时补救。

(7) 表面复原

注入的材料通常在 10~24 小时内会自行硬化,完成固化养护。材料硬化后,敲掉灌浆嘴,用磨光机对表面进行打磨,之后对施工后的表面进行装修处理,使处理后的表面颜色与原表面颜色基本一致。

3.3 泛碱处理

对于可溶于水的盐碱类物质,采用 1:10(盐酸:水)稀盐酸进行清洗,10~20s 后用大量清水清洗。对于不易溶于水的盐霜物质,采用钢刷或砂纸等进行擦除。

3.4 沉降缝钢盖板缺失及排水沟盖板损坏处理

对于沉降缝钢盖板缺失部分按原设计补充更换沉降缝钢盖板;对于排水沟盖板损坏部分亦及时更换。

3.5 通道路面铺装层裂缝处理

下穿通道路面铺装层裂缝需及时进行灌填处治。其中,隙 2~5mm,刷扫缝隙去尘,灌入热沥青或乳化沥青材料加以封闭处理,缝宽大于 5mm 的,清缝,改性沥青灌缝,灌缝后,表面撒上粗砂或 3mm~5mm 石屑^[7]。

3.6 通道路面铺装层破损处理

对下穿通道路面铺装层破损区域采取局部破除并就破除后的路面按原设计路面形式进行恢复处理。

3.7 通道路面面层局部裂缝处理

就通道路面面层局部裂缝位置在清理表面干净后,采用热沥青或乳化沥青材料加以封闭处理。

3.8 通道积水区域处理

对于通道积水区域,建议在破除破损的路面结构按原设计恢复路面结构,若发现路面结构下通道底板存在裂缝,需按裂缝处理的方式对底板进行灌胶封闭处理。

同时建议在通道变形缝上游局部设置直径 50mm 的渗水花管,通过引流方式入现况排水沟中,主要用于排除路面结构的层间水,定期采用手工泵进行抽水维护。

4 结论

(1) 首都机场 APM 下穿隧道服役近 10 年后,左右线

均出现较严重病害,主要表现为裂缝和渗漏水,其中裂缝病害占比超 65%,渗漏水病害占比约 14%~24%,且裂缝宽度多小于 0.3mm,符合非受力裂缝特征。

(2) 裂缝形成主要归因于混凝土硬化过程中的化学收缩、塑性收缩、干燥收缩,以及飞机频繁通行产生的动荷载和振动导致的既有干缩裂缝扩展;渗漏水则是由于隧道周围形成富水环境,且结构防水系统失效、变形缝止水材料老化,形成渗漏水通道所致。

(3) 针对不同类型病害提出了系统治理措施:对于纵横向裂缝,根据宽度采用表面封闭或低压灌浆处理;沉降缝渗漏水通过钻孔、埋针、灌浆等工艺治理;同时对泛碱、盖板缺失、路面铺装层裂缝及破损、积水等问题分别制定了相应修复方案。

(4) 本次病害分析及治理措施为该隧道的修复提供了技术依据,相关方法和经验可推广至同类交通隧道的病害防治,对保障隧道工程的长期安全运营具有参考意义。未来需持续关注隧道运营状况,定期开展检测维护,以确保治理效果的长效性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部.公路隧道养护技术规范: JTG H12-2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
- [2] 刘科麟,田志宇,张兆杰.某隧道渗漏水病害治理方案设计[J].北方交通,2023,(01): 88-90+94
- [3] 罗剑.公路隧道衬砌裂损病害检测与治理措施[J].工程技术研究,2020,5(02): 157-158.
- [4] 杨春君.地铁隧道施工缝及变形缝防水处理技术研究[J].中国建筑防水,2023,(05): 42-46.
- [5] 刘秀昌.隧道病害及其防治措施分析[J].建筑技术开,2020,47(16): 128-129.
- [6] 陈邦国.高速公路隧道工程防水施工研究[J].科技创新与应用,2022,12(07): 44-46.
- [7] 田奎.隧道结构裂缝病害治理方法研究[J].工程建设与设计,2022,(06): 62-64.

作者简介:李福辰(1990—),男,汉族,研究生,从事机场工程方向;郭向东(1997—),男,汉族,研究生,从事桥梁与隧道工程方向。