

# 桥梁支座脱空病害成因及整治方法分析

陈 晶

云南航天工程物探检测股份有限公司 云南 昆明 650217

**【摘要】**：桥梁工程施工中，最常见的病害为桥梁支座脱空现象，其对于桥梁结构安全与耐久性有着严重影响。文章主要对一些核心影响成因系统性分析，主要揭示桥梁支座脱空机理与演化规律，提出了基于高精度检测技术、同步顶升系统及新型修复材料的综合整治方案。通过实践表明，采取超声波透射法对脱空区域精准定位，以同步液压顶升调平技术、环氧砂浆填充工艺等，可让桥梁支座传力性能显著提升，还可让桥梁使用寿命延长，为同类工程提供理论依据及技术参考。

**【关键词】**：桥梁支座脱空；病害成因；整治方法；同步顶升；环氧砂浆

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.022

## 引言

桥梁支座是桥梁工程的核心构件，其起到了连接上部结构与下部结构的作用，这一构件的工作状态会对桥梁整体安全性造成直接影响。桥梁支座脱空会让梁体受力由四点支撑转变为三点或两点支撑，进而引发一些连锁反应，如应力集中、结构失稳等。现阶段，桥梁工程实践中，依然普遍存在支座脱空问题，其病害成因较为复杂，整治技术较为分散，缺乏系统性的解决方案。相关部门可从多个维度来对桥梁支座脱空机理深入分析，以探索及开发创新的整治方法，为桥梁养护提供科学化建议及指导。

## 1 桥梁支座脱空病害成因分析

### 1.1 施工误差与质量控制缺陷

#### 1.1.1 支座垫石施工偏差

桥梁支座脱空主因为支座垫石标高控制不严。特殊结构的桥梁，邻近的桥梁墩台盖梁往往存在坡度差，相关人员要对垫石标高合理调整，让梁体四点共面。在施工前，相关人员往往未实地测量盖梁坡度，或缺失了过程复核，让桥梁普遍出现了偏差，改变了梁体受力，引发了应力集中问题，让桥梁结构受到损伤。施工中，应对严格控制混凝土浇筑高度，可利用高精度设备来进行复测，确保误差 $\leq \pm 2\text{mm}$ ，让垫石与盖梁粘结强度达标。

#### 1.1.2 梁体预制与安装误差

梁体端部底模的平整度会对桥梁支座安装产生影响，温湿度变化又会让底模发生翘曲现象，让支座与梁底接触不理想。预应力施工中，若张拉力不均匀，则会导致梁体发现扭曲，支座受力出现偏移，长期发展下去，会让橡胶支座出现边缘开裂、钢板变形现象。预制时，应严格控制底模刚度，采取可调工底模系统，依照环境合理化调整。安装前，引入全站仪对梁体轴线复核，确保偏差 $\leq 5\text{mm}$ ，张拉时还要对变形同步监测，通过智能系统来实现双控。

### 1.1.3 支座安装粗糙

桥梁支座安装中，若细节疏漏则会减少接触。垫石上端钢板粘贴若不规范，则会出现空隙或倾斜，会引发支座受力偏移。支座位置偏移会对传力造成直接影响，超出上限会让梁体受力发生改变，会导致附加弯矩。安装时应利用粘结剂，让钢板与垫石没有空隙，粘贴后还要检测倾斜度，确保偏差 $\leq 0.5^\circ$ ，支座定位时，可引入全站仪进行放样，再结合限位装置来固定，安装后还要检查四角高差，确保 $\leq 1\text{mm}$ ，盆式支架要做好滑动面的清洁。

### 1.2 材料性能与耐久性不足

#### 1.2.1 垫石混凝土强度不足

垫石混凝土强度若不达标，则会出现支座脱空。设计要求应用C30混凝土，若误用了C25混凝土或配合比失控，则会导致抗压强度不足。车辆荷载反复作用下，低强度混凝土内部则会让微裂缝产生并不断扩展，其表面会发生剥落、掉角现象。强度缺陷会让支座受力状态发生改变，让锐角支座超载、钝角支座脱空。施工时，要对原材料质量严格管控，水胶比 $\leq 0.35$ ，分层振捣要更密实，养护不少于14天，安装前进行回弹检测，不合格区域可凿除重新浇筑。

#### 1.2.2 支座老化与损伤

橡胶支座若出现老化损伤，会造成脱空现象。紫外线照射会让橡胶分子链出现断裂现象，导致表面出现龟裂硬化。若发生油污渗透，会对橡胶与钢板粘结层造成损坏，引发界面分离。老化支座弹性模量降低后，则不能实现有效补偿变形，会抬升梁体端部，板式支座老化还会出现横向变形，让接触面减少。

### 1.3 荷载作用与环境影响

#### 1.3.1 车辆荷载动态效应

重载车辆通过桥梁时会产生动态的冲击，极易引发支座瞬时脱空。轴重30t的货车，以60km/h的速度通过时，梁体瞬时挠度达到5mm，若支座与梁底存在0.3mm以上间隙，其动态荷载会让间隙效应瞬间放大，让边缘瞬时脱空2mm，引发应力

波动，会超设计值 1.5 倍，这就会让橡胶层产生疲劳现象。

### 1.3.2 温度与收缩徐变

混凝土收缩徐变及温度变化，会让梁体出现纵向位移，引发支座半脱空。温度升降 10℃，30m 跨梁桥伸缩量达到 3.6mm 时，若支座滑动面摩擦系数超过 0.05，其阻力会阻碍收缩，让边缘出现半脱空。收缩徐变在运营初期效果显著，前 3 年变形会达总量的 60%。要采取有效措施予以防治。

### 1.3.3 地基沉降与不均匀变形

桥墩基础性沉降现象会让支座标高发生变化，引发脱空。软土地基桥梁若桩基未穿透软弱层，或地下水位变化导致土体固结，也会产生不均匀沉降现象。不同危害要采取有效措施予以防治。

## 2 桥梁支座脱空病害整治方法

### 2.1.1 超声波透射法

可利用超声波透射法对声波在支座与梁底接触面的传播特性进行深入分析，以检测脱空。检测时可引入便携式仪器，可依据间距  $\leq 20\text{cm}$  的形式来实施网格布点，以全覆盖支座区域。仪器发射高频声波会穿透接触面，可实时记录透射时间与信号衰减。若接触面有间隙时，声波绕行会延长透射时间，会让信号发生衰减。如某区域信号衰减超出 30% 现象，或反射波频谱出现异常现象时，则可判定为脱空，可控制精度为  $\pm 0.5\text{mm}$ 。

### 2.1.2 应力应变监测

在监测应力应变时，可依据粘贴应变片来实时采集支座实际受力情况，以对接触面传力的有效性精准判定。在支座顶面及垫石表面可对称性布置应变片，让量程维持在  $\pm 5000 \mu \epsilon$ 、精度  $\pm 1 \mu \epsilon$ ，还可对车辆荷载下的应力时程曲线同步采集。如某区域应变值持续低于理论值 30% 时，若外观发生异常时，可判定为脱空。系统可开展温度补偿，连续桥梁还可对相邻支座同步监测，让数据采集频率  $\geq 100\text{Hz}$ ，监测周期可全覆盖昼夜温差。

### 2.1.3 分级评估标准

脱空程度分级依据脱空面积、最大间隙及应力偏差综合判定。I 级（轻微）脱空面积  $\leq 15\%$ ，最大间隙  $\leq 2\text{mm}$ ，应力偏差  $\leq 20\%$ ，需定期监测；II 级（中度）脱空面积 15%-30%，间隙 2-5mm，应力偏差 20%-40%，需灌浆或垫片调整修复；III 级（严重）脱空面积  $> 30\%$ ，间隙  $> 5\text{mm}$ ，或应力偏差  $> 40\%$  且伴异常，需立即换支座并加固基础。评估要结合位置和桥型调整阈值。

## 2.2 同步顶升调平技术

### 2.2.1 设备选型与配置

同步液压顶升系统需满足单顶吨位  $\geq$  梁体自重的 1.2 倍，

确保顶升过程安全储备充足。系统配备位移传感器（精度  $\pm 0.01\text{mm}$ ）及压力传感器（精度  $\pm 0.5\% \text{FS}$ ），实时反馈顶升量与受力状态。多顶同步控制采用 PLC 闭环系统，通过总线通信协调各项动作，同步误差控制在  $\leq 0.2\text{mm}$ ，避免梁体倾斜或局部应力集中。液压泵站需配置双回路冗余设计，主回路故障时自动切换备用回路，保障顶升连续性。油管采用高压钢丝编织管，耐压值  $\geq 35\text{MPa}$ ，防止爆管风险。设备调试阶段需进行空载联动测试，验证同步精度与响应速度。

### 2.2.2 临时支撑设置

临时支撑引入钢支撑与楔形块组合相结合的形式，在脱空支座两侧对称布置。钢支撑选用 Q345B 级钢材，截面模量  $\geq 150\text{cm}^3$ ，以保障轴向刚度满足要求。楔形块坡度控制在 1:50 以内，便于微调支撑高度。支撑顶面与梁底预留 2-3mm 间隙，预留量需根据梁体弹性变形量计算确定。单组支撑承载力按  $\geq$  梁体自重的 20% 设计，并设置横向限位装置，防止顶升过程中水平位移。支撑间距  $\leq 2\text{m}$ ，确保梁体局部稳定性。安装前需对支撑基础进行平整处理，承载力不足时需浇筑混凝土垫层。支撑就位后采用激光水平仪校核垂直度，偏差  $\leq 0.5\%$ 。

### 2.2.3 分级顶升操作

顶升作业分为两阶段实施：首阶段顶升量控制在 5mm 以内，持压 3min 后检查结构稳定性，重点观测梁体裂缝扩展、支座脱空变化及临时支撑受力情况。二次顶升至设计标高，每级顶升量不超过 3mm，总顶升量达设计值后持压 5min，确认无异常后方可落梁。顶升过程中实时监测梁体位移（采样频率  $\geq 10\text{Hz}$ ）及关键截面应力变化，当位移速率  $> 0.5\text{mm}/\text{min}$  或应力增幅  $> 10\%$  时立即暂停作业。落梁阶段采用分级卸载，每级卸载量与顶升量对应，确保支座均匀受力。顶升全过程需记录环境温度，当昼夜温差  $> 10\text{℃}$  时，应选择低温时段作业，以减少温度效应干扰。

## 2.3 脱空区域修复工艺

### 2.3.1 界面处理

脱空区域修复前需对接触界面进行精细化处理。使用角磨机配备金刚石磨盘对混凝土表面进行打磨，重点去除浮浆层、油污及松散颗粒，打磨深度控制在 1-2mm 范围内，确保形成均匀粗糙的粘结面。打磨后采用高压吹风机（风压  $\geq 0.6\text{MPa}$ ）沿单一方向吹扫粉尘，避免交叉污染。对于顽固油污，需用棉纱蘸取丙酮或专用脱脂剂反复擦拭，直至棉纱无变色。界面干燥度检测采用湿度仪，当相对湿度  $> 5\%$  时，需延长通风时间或使用红外线灯烘烤。处理后的界面应呈现均匀的灰白色，无可见杂质，手指触摸有明显粗糙感。若遇钢筋外露，需用钢丝刷清除锈蚀层，并涂刷阻锈剂。界面处理范围应超出脱空区域边缘不小于 50mm，确保修复材料与基材充分粘结。

### 2.3.2 材料填充

环氧砂浆填充需严格把控材料配比与施工环境。主剂与固化剂按 4:1 体积比混合,使用电动搅拌器(转速 $\geq 300\text{r/min}$ )搅拌不少于 5min,直至颜色均匀无条纹。施工环境温度控制在 10-30 $^{\circ}\text{C}$ ,当温度低于 5 $^{\circ}\text{C}$ 时需采用碘钨灯加热,高于 35 $^{\circ}\text{C}$ 时需搭设遮阳棚并预冷材料。填充时用带齿抹刀沿脱空边缘向中心压入砂浆,每次压入厚度不超过 10mm,采用分层填充法确保密实度。对于深度 $>20\text{mm}$ 的脱空,需埋设镀锌钢丝网增强抗裂性能。填充后表面用铝合金刮板刮平,误差控制在 $\pm 1\text{mm}$ 以内。立即覆盖塑料薄膜进行湿养护,薄膜边缘用胶带密封,养护环境湿度 $\geq 60\%$ ,养护时间不少于 24h。养护期间禁止人员踩踏或振动。

### 2.3.3 效果验证

修复效果验证采用超声波检测与应力监测双重控制。超声波检测仪沿修复区域布置测线,间距 $\leq 100\text{mm}$ ,当声波透射率 $\geq 95\%$ 且无异常反射波时,判定界面闭合。应力监测通过预埋应变片(量程 $\pm 2000\mu\epsilon$ ,精度 $\pm 1\mu\epsilon$ )采集修复区域应力分布,要求与理论计算值偏差 $\leq 10\%$ 。若超声波检测发现局部透射率 $<90\%$ ,或应力偏差 $>15\%$ ,需标记缺陷位置并局部凿除重新修复。修复区域边缘与基材交界处应进行渗透检测,确保无微裂缝存在。验收文件需包含超声波检测图谱、应力监测曲线及现场照片,由第三方检测机构签字确认。对于重要桥梁,

修复后需进行 3 个月动态监测,每月检测一次应力变化。

### 2.4 新型修复材料应用

高强环氧砂浆以双酚 A 型环氧树脂为基体,掺纳米二氧化硅、碳纤维及高效减水剂,形成快硬、高强、耐久的复合材料。其抗压强度 $\geq 60\text{MPa}$ ,粘结强度 $\geq 3\text{MPa}$ ,与 C40 混凝土界面相容性好,剪切粘结强度达 2.8MPa,在-20 $^{\circ}\text{C}$ 至 60 $^{\circ}\text{C}$ 无开裂或剥离。材料双组分包装,主剂与固化剂配比 4:1,适用期 30min 内,初凝 $\leq 2\text{h}$ ,终凝 $\leq 6\text{h}$ ,适用于紧急抢修。抗渗等级 P8,可阻止水分侵入,延长结构寿命。自修复聚合物材料基于微胶囊技术,将环氧修复剂封装于脲醛树脂微胶囊中,粒径 50-200 $\mu\text{m}$ 。微裂缝产生时,微胶囊破裂释放修复剂,实现自主愈合。该材料断裂韧性提升 40%,修复后粘结强度恢复率超 85%,长期稳定性好,适用于支座微小脱空动态修复,可减少检修频次,延长支座寿命至设计值的 1.2 倍。

### 3 结语

总之,桥梁支座脱空病害成因复杂,需从施工控制、材料性能、荷载作用及环境影响等多维度综合分析。同步顶升调平技术与新型修复材料的结合,可实现支座脱空的高效、精准整治。工程实践表明,该方法能显著提升支座传力性能,延长桥梁使用寿命,具有推广价值。未来需进一步研究智能监测技术与自修复材料的应用,推动桥梁养护向智能化、长效化方向发展。

### 参考文献:

- [1] 马世纪.公路梁桥支座脱空度预测模型及优化算法应用研究[J].振动与冲击,2023,43(15):218-227.
- [2] 吴宜峰.桥梁板式橡胶支座运营病害及影响研究综述[J].工程抗震与加固改造,2022,43(05):104-113+95.
- [3] 姜玉印.梁桥支座群的脱空病害监测与诊断方法研究[D].哈尔滨工业大学,2021.
- [4] 王如寒.中小跨径桥梁的支座病害分析及改善措施研究[J].工程建设与设计,2021,(19):181-183.