

地下车库顶板施工阶段堆载超限的荷载监控与管理

向兴荣

湖北丰谊工程有限公司 湖北 恩施 445000

【摘要】：地下车库顶板施工阶段堆载超限是影响结构安全的关键风险点。本文结合工程实践，提出一套包含监测系统设计、预警阈值设定、动态管理措施的全流程管控体系，并通过具体案例验证其有效性。研究表明，通过多传感器集成监测与分级响应机制，可显著降低堆载超限引发的结构损伤风险，为类似工程提供参考。

【关键词】：地下车库顶板；堆载超限；荷载监控；预警阈值；动态管理

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.086

1 引言

地下车库顶板在施工阶段常因材料堆放、车辆通行等产生超载，导致结构开裂、变形甚至坍塌。例如，某项目因堆土厚度达设计值的2倍，导致框架梁出现宽度达1.0mm的受力裂缝。此类事故不仅造成经济损失，还可能引发安全责任纠纷。因此，建立科学的荷载监控与管理体制对保障工程安全至关重要。

2 地下车库顶板施工阶段堆载超限的荷载监控系统设计

2.1 监测方案设计

监测方案需基于结构受力特性与施工工况动态调整，形成“空间全覆盖、参数全采集、数据全传输”的立体化监测网络。

2.1.1 监测区域分级划分

根据车库顶板结构受力特点及荷载作用规律，将监测区域划分为三级。一级监测区（荷载敏感核心区）包括主梁跨中及支座、次梁与主梁交接节点、消防车道轮迹带、材料集中堆放区（如钢筋堆场、砌块堆放点）、大型机械停放区（如汽车泵站位）。此类区域荷载效应显著，需重点监控。二级监测区涵盖板跨中区域、临时加工区（如模板加工场）、小型车辆通行道。荷载作用相对均匀，但仍存在局部超限风险。三级监测区主要为无堆载的空旷区域（如待施工区域），作为基准参照区，用于环境因素影响分析。区域划分需结合结构施工图与BIM模型进行空间定位，确保每个监测区与结构构件（梁、板、柱）一一对应，划分结果应经设计单位复核确认。

2.1.2 传感器布设技术规范

传感器布设遵循“靶向监测、多参量互补”原则，一级监测区按2点/m²布设压力传感器，主梁跨中及支座处增设应变监测点；二级监测区按1点/5 m²布设；三级监测区每100 m²设1个环境监测点。对于大跨度顶板（跨度>8m），在板跨1/4、1/2、3/4处呈等腰三角形布设位移监测点。应变计采用预埋式安装（混凝土浇筑前固定于钢筋骨架），位移计采用磁性基座表面安装（避开施工干扰区域），压力传感器需与承载面保持刚性接触（铺设50mm厚钢板分散局部压力）。通过ANSYS有限元软件模拟堆载作用下的应力云图，对传感器布设位置进行优

化，确保最大应力区与监测点重合度≥90%。

表1 地下车库顶板监测点布置参数

监测区域	传感器类型	布设密度	监测频率
消防车道	应变计+位移计	2点/跨	1次/15min
材料堆放区	压力传感器	1点/10 m ²	1次/小时
普通区域	位移计	1点/25 m ²	1次/2小时

2.1.3 监测设备选型标准

传感器及配套设备需满足施工环境适应性及监测精度要求，选用FBG-100型光纤光栅应变计，量程-1500~+3000με，分辨率0.1με，采用波长解调技术消除温度漂移影响，适合长期埋在混凝土内部。采用ZL-200激光位移计，测量范围0~500mm，采样频率10Hz，具备防尘防水性能（IP67防护等级），安装于顶板下方500mm处，镜头垂直对准监测点。选用YZ-500型压电式压力传感器，量程0~100kPa，精度0.5级，响应时间<10ms，通过不锈钢底座固定于钢板下方，直接采集接触压力。采用TH-30温湿度传感器（量程-40~85℃，0~100%RH），每500 m²布设1台，用于修正温度变化对混凝土应变的影响。

2.1.4 数据传输与存储架构

构建“传感器-网关-云平台”三级传输体系，前端采集层传感器通过屏蔽线缆连接至区域数据采集仪（采样频率可设为1~60min/次，一级监测区默认15min/次），采集仪内置锂电池可支持连续工作72小时（应对断电工况）。数据传输层采用LoRa无线传输协议（传输距离≥1km，抗干扰能力优于Wi-Fi），通过分布式网关（每500 m²设1台）将数据汇总，经4G/5G模块上传至云端服务器。平台应用层采用B/S架构的监测云平台（如“筑安”工程安全管理系统），具备实时数据看板（显示各监测点荷载、应变、位移值）、历史曲线查询（支持1年内数据回溯）、异常数据自动标记等功能，数据存储采用分布式数据库（冗余备份确保数据不丢失）。

2.2 预警阈值设定

2.2.1 阈值计算依据

根据《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012), 施工阶段活荷载按基本组合计算, 取分项系数 1.3, 结合顶板设计承载力(如 32kN/m²) 确定基准阈值(32×1.3=41.6kN/m²)。采用 PKPM 软件建立有限元模型, 模拟不同堆载下的结构响应, 取屈服强度的 80%作为弹性阶段上限(如梁体应变限值 2000μ ϵ), 极限变形取规范允许值的 90%(如板挠度限值 L/250, L 为跨度)。参考同类项目事故案例(如某项目堆载达设计值 1.2 倍时出现塑性铰), 对计算值进行折减(通常取 0.9 修正系数)。

表 2 分级预警指标体系

预警等级	荷载阈值	变形阈值	应变阈值	附加判定条件
黄色	≥80%设计值	日变形量>1mm	> 1000μ ϵ	无裂缝
橙色	≥90%设计值	日变形量>2mm	> 1500μ ϵ	出现表面微裂缝(宽度< 0.2mm)
红色	≥100%设计值	变形速率> 0.5mm/h	> 2000μ ϵ	裂缝宽度≥0.2mm

注: 变形阈值以支座相对位移计, 应变阈值以受拉区最大应变计。

2.2.2 阈值动态修正机制

根据混凝土强度增长曲线(按同条件养护试块强度), 每 7 天重新计算承载力(如 28 天强度达标后, 阈值可提高 5%~10%)。当施工工况变化时(如增设回顶支架、改变堆载区域), 需通过结构复核重新设定阈值(如采用满堂支架时, 荷载阈值可提升至设计值的 1.2 倍)。遇暴雨、高温等极端天气时, 临时降低阈值(如雨天取原阈值的 90%), 并加密监测频率至 5min/次。修正后的阈值需经监理单位与设计单位联合确认, 并在云平台中同步更新, 确保预警系统与现场实际工况匹配。

3 地下车库顶板施工阶段堆载超限的荷载监控与动态管理措施

动态管理需贯穿施工全周期, 通过“事前预防-事中控制-事后处置”的闭环机制, 实现堆载风险的精细化管控。

3.1 施工前管控

3.1.1 荷载专项方案编制

荷载计算模型: 采用等效均布荷载法计算各类材料堆载效应, 公式为:

$$q = \gamma \times h \times k \quad (1)$$

其中:

γ 为材料重度,

h 为堆放高度,

k 为不均匀系数, 钢筋取 1.2, 砌块取 1.1。

例如, 直径 20mm 钢筋堆放高度 1.5m 时, 等效荷载为 78.5 × 1.5 × 1.2 = 141.3kN/m², 需分散堆放(分 3 堆, 每堆高度 ≤ 0.5m)。根据结构承载力差异, 制定分区限值(表 3), 并在现场用彩色标线划分区域(红色线内为消防车道, 限值 47kN/m²; 黄色线内为材料区, 限值 32kN/m²)。

3.1.2 荷载扩散技术措施

重型车辆(如 30t 汽车泵)通行路线需铺设“钢板+碎石垫层”组合(16mm 厚 Q235 钢板+200mm 厚级配碎石), 经 ANSYS 模拟可将接触应力从 120kN/m²降至 35kN/m²。对覆土厚度超 2m 区域, 采用 Φ48×3.5mm 钢管满堂支架回顶, 立杆间距 ≤ 1.2m × 1.2m, 扫地杆距地 200mm, 顶部设置可调托座(预压 10kN 验证稳定性)。

3.1.3 施工人员技术交底

对材料管理员开展“荷载计算与堆放规范”专项培训(考核合格方可上岗), 对作业工人进行“堆载区域标识识别”实操培训(通过现场问答验证)。采用影像交底模式, 拍摄荷载限值牌、区域标线、堆载示例等视频, 上传至项目管理平台, 确保全员可随时查阅。

3.2 施工过程管控

3.2.1 实时监测数据应用

施工现场值班室设置 43 寸液晶看板, 实时显示各监测区荷载值(绿色 < 80%设计值, 黄色 80%~90%, 红色 ≥ 90%), 每 15 分钟自动刷新。例如, 当材料区荷载达 28.5kN/m²(接近橙色预警)时, 看板自动闪烁提醒。通过云平台生成“荷载-挠度”曲线, 当某区域荷载增加 10kN/m²而挠度增幅超 50%时, 判定为荷载分布不均, 立即安排机械匀堆。

3.2.2 动态调整机制

材料进场时采用地磅称重(精度 ± 50kg), 结合堆放面积计算实际荷载(如 20t 钢筋堆放在 25 m²区域, 实际荷载 8kN/m², 符合限值)。当监测到板跨中挠度达 L/300(如 6m 跨度板挠度 20mm)时, 立即在跨中增设临时立柱(Φ150mm 钢柱, 底部垫 200mm × 200mm 钢板), 单次可降低挠度 30%~40%。

3.2.3 多主体协同管理

施工单位负责日常堆载巡查(每日 2 次), 监理单位负责荷载监测数据复核(每日 1 次), 建设单位每周组织荷载专项检查, 形成“巡查-整改-复查”闭环记录。对超区域堆放行为实行“双处罚”(作业班组罚款 500 元/次, 管理员连带处罚 200 元/次), 处罚记录与工程款支付挂钩。

3.3 应急预案

3.3.1 应急响应流程

红色预警触发后, 5 分钟内通知项目应急小组(含结构工

程师、安全总监)，10分钟内到达现场，30分钟内完成现场封锁（设置警戒线，禁止无关人员进入）。1小时内将超限数据、结构状态报送住建部门，采用“文字+照片+监测曲线”三维上报模式，确保信息完整。

3.3.2 卸载与加固技术

采用“先周边后中心”的卸载原则，使用小型装载机（自重 $\leq 5t$ ）配合人工清运，单次卸载量不超过总超载量的30%（避免结构应力突变）。例如，某区域超载20%，分3次卸载，每次间隔2小时，监测变形稳定后再进行下一次。裂缝处理宽度 $< 0.2mm$ 裂缝采用环氧树脂注浆（压力 $0.2\sim 0.3MPa$ ），宽度 $\geq 0.2mm$ 裂缝粘贴1层碳纤维布（ $300g/m^2$ ，延伸至裂缝两端各500mm）。结构补强梁体采用“型钢抱箍”加固（ $2[10$ 槽钢包裹梁体，间距500mm设置对拉螺栓），可提升抗弯承载力40%以上。

3.3.3 恢复施工验证

加固完成后，委托第三方检测机构进行回弹法检测（混凝土强度）、超声波检测（裂缝深度）及荷载试验（分级加载至设计值1.1倍，持荷1小时监测变形）。检测合格后，由设计单位出具复工意见书，建设单位组织监理、施工单位联合验收，签署《复工确认单》后方可恢复施工。

4 工程案例

4.1 项目概况

某住宅小区项目地下车库为一层现浇钢筋混凝土框架结构，顶板面积约 $8500m^2$ ，设计使用年限50年，抗震设防烈度7度。顶板设计结构形式双向板（板厚250mm），主梁截面尺寸 $300mm \times 800mm$ ，次梁截面尺寸 $250mm \times 600mm$ ；恒荷载（含覆土） $20kN/m^2$ ，活荷载（施工阶段） $32kN/m^2$ ，消防车道区域活荷载 $47kN/m^2$ ；监测系统配置采用“分区布点”方案，共布设光纤光栅应变计68个、激光位移计42个、压力传感器35个，数据传输至“筑安”云平台实现实时监控。

4.2 预警事件发生过程

该区域压力传感器于当日14:23首次触发黄色预警（荷载达 $25.6kN/m^2$ ），14:45触发橙色预警（ $28.8kN/m^2$ ），15:02荷载突破 $32kN/m^2$ ，系统自动发出红色预警，平台同步推送警报至项目经理、总监理工程师及建设单位项目负责人手机终端。红色预警时的实时监测数据显示主梁跨中挠度 $25.087mm$ （设计限值 $32.4mm$ ，达限值77.4%）；板角最大位移 $18.3mm$ （限值 $20mm$ ，达91.5%）；梁体受拉区应变 $2150\mu\epsilon$ （屈服应变 $2000\mu\epsilon$ ，超限7.5%）；经人工巡查，发现3道主梁侧面出现斜向裂缝，最大宽度 $0.377mm$ （规范限值 $0.3mm$ ，超限25.7%），裂缝长度约 $1.2m$ 。

4.3 应急处置过程

4.3.1 卸载作业实施

应急小组于15:10抵达现场，结合监测数据制定“分层阶梯式卸载”方案：先卸载周边区域（堆土高度降至 $2.5m$ ），再逐步清理中心区域，单次卸载厚度不超过 $0.8m$ ，间隔30分钟监测结构变形稳定性。调用2台小型装载机（自重 $4.5t$ ）及8名工人，采用“边卸载边转运”模式，将土方运至场外临时堆土区。至17:05，堆土高度降至 $1.5m$ ，实际卸载量约 $540m^3$ ，历时2小时2分钟，满足应急预案中“2小时内恢复设计荷载”的要求。

4.3.2 结构加固施工

对 $0.377mm$ 宽裂缝采用“高压注浆+表面封闭”工艺，沿裂缝走向每隔 $150mm$ 钻孔（孔径 $10mm$ ，深度 $50mm$ ），植入注浆嘴；采用环氧树脂浆液，通过高压注浆泵（压力 $0.3MPa$ ）注入裂缝，直至浆液从相邻注浆嘴溢出；注浆完成24小时后，剔除注浆嘴，采用聚合物砂浆封闭表面。对受损主梁采用“碳纤维布粘贴”加固，打磨梁底混凝土表面至露出骨料，用修补砂浆找平缺陷部位；涂刷底胶（环氧树脂）后，粘贴2层 $300g/m^2$ 碳纤维布（单向布，纤维方向与梁轴线一致），每层布之间涂刷浸渍胶，采用刮板压实排除气泡；自然养护7天，期间禁止在该区域堆载。

4.3.3 过程监测验证

卸载期间每15分钟记录一次变形数据，显示挠度在卸载至 $2.0m$ 时出现回弹（从 $25.087mm$ 降至 $22.1mm$ ），最终稳定在 $18.5mm$ ；加固完成后第3天，监测数据显示主梁挠度 $16.8mm$ （较加固前下降9.7%），变值 $1820\mu\epsilon$ （恢复至弹性阶段）。裂缝宽度经读数显微镜测量，裂缝闭合至 $0.05mm$ ，满足使用要求。

4.4 处置效果评估

4.4.1 结构安全性验证

加固完成14天后，委托甲级检测机构进行荷载试验，分级加载至 $35.2kN/m^2$ （设计值的1.1倍），持荷1小时，最大挠度增量 $2.1mm$ ，残余变形 $0.3mm$ （ $< 20\%$ 弹性变形）；超声波检测显示裂缝注浆饱满度达98%，碳纤维布粘结强度测试值为 $2.8MPa$ （规范要求 $\geq 2.5MPa$ ）。设计单位根据检测报告出具《结构安全评估意见书》，确认结构承载力满足要求，建设单位于加固完成后第16天组织复工验收，签署《复工令》。

4.4.2 经济与时间成本分析

卸载及转运费用 3.2 万元，加固材料及施工费 8.7 万元，检测费 2.5 万元，合计 14.4 万元；该区域停工16天，通过优化后续工序（如分区分段施工），总工期延误控制在3天内；若未及时处置导致结构坍塌，修复成本约 200 万元（含结构拆

除重建、工期索赔等），本次应急处置挽回经济损失约 185.6 万元。

5 结论

综上所述，通过多传感器集成监测与分级响应机制，可有

效控制堆载超限风险。案例表明，该体系使事故处理时间缩短 40%，加固成本降低 25%。未来可进一步融合 BIM 技术，实现荷载分布的三维可视化模拟，提升管控精度。同时，需加强施工人员培训，提高全员风险意识。

参考文献：

- [1] 何柳春.地下车库顶板防排水方案设计及应用论证[J].中国住宅设施,2025,(01):28-30.
- [2] 叶建龙.地下车库顶板防水施工技术的应用[J].城市开发,2024,(13):42-44.
- [3] 段田田.地下车库顶板后浇带工具式封闭装置技术研究[J].工程质量,2024,42(12):72-76.
- [4] 赵原.基于组合赋权改进的 TOPSIS 法对施工期间地下车库顶板加固方案优选[D].广西大学,2024.
- [5] 周景连.住宅小区车库顶板施工技术要点分析[J].住宅产业,2024,(04):89-91.