

桥梁结构加固与箱涵工况适配调整

蒋 冬

际龙工程技术咨询有限公司 江苏 扬州 225003

摘 要: 城市地下空间开发中, 新建箱涵与既有桥梁形成毗邻或叠合关系后, 两类结构之间的荷载传递与变形约束显著改变原桥受力状态。箱涵顶部填土变动、侧向位移及基础沉降等工况变化, 会通过地基应力扩散与支座强迫变位途径, 在桥梁主梁与墩台中引发附加内力与局部损伤。针对这一耦合作用机制, 从结构加固技术选型与参数优化层面提出协同设计方法, 在调整加固构件布置的同时对箱涵荷载边界实施微调, 使桥涵体系在动态工况下维持受力均衡与变形协调。

关键词: 桥梁结构; 箱涵工况; 加固技术; 优化设计

引言: 箱涵施工与运营期间的荷载输出及变形释放, 对邻近既有桥梁构成不可忽略的附加作用。这类作用贯穿基坑开挖、填土压实及使用期荷载波动全过程, 其传递路径涉及地基应力扩散与结构接触面约束传递两个方面。桥梁在此类外部激励下表现出内力重分布、支座变位及局部应力集中等响应特征, 严重时引发结构损伤累积。现行加固设计通常将箱涵工况视为给定条件, 较少考虑工况参数与桥梁受力状态之间的动态关联, 导致加固方案在应对工况变动时存在适应性不足的问题。

1 桥梁与箱涵结构基础特性

1.1 桥梁主体结构力学特性

常规桥梁承重结构依赖主梁、拱肋或缆索体系将竖向荷载转化为内部应力, 经由支座与墩台传递至基础。附属构件如桥面铺装、栏杆、伸缩缝虽不直接参与主承载, 但其自身重量及温度变形约束会对主结构产生附加力。力在结构内部的流动遵循刚度分配原则, 刚度越大的构件吸引的荷载越多, 由此形成明确的传力路径。结构自身刚度决定了荷载作用下的变形量级, 承载力则受控于材料强度与截面形式。常规受力薄弱区域往往集中在跨中弯矩最大截面、支点附近剪力较大区段以及预应力锚固区。常态工况下, 车辆荷载与温度作用导致结构产生弹性变形, 其响应规律可由线弹性理论加以描述。结构性能的边界条件由材料屈服强度、疲劳寿命上限及容许挠度三者共同限定, 超出这一区间, 结构行为将进入非线性阶段。

1.2 箱涵结构构造与工况特性

箱涵为闭合框架结构, 顶板、底板与侧墙构成矩形或近似矩形截面, 形成封闭受力体系。其截面受力以弯

距与轴力组合为主, 顶板承受土压与活载, 侧墙受土侧压力作用, 底板则承担地基反力。整体稳定性依赖于基底摩擦与被动土抗力, 与埋深、土质条件及地下水位关系密切。运营阶段的核心参数包括顶部填土高度、车辆超载值及内水压力; 施工阶段则须重点关注基坑支护变形与混凝土浇筑顺序; 荷载变动工况涵盖周边堆载变化、地下水位升降及地震作用^[1]。不同工况条件下, 箱涵结构变形呈现显著差异: 均匀满布荷载下受力较为均衡, 偏载作用则引发扭转变形。应力分布基本规律表现为角隅部位应力集中、顶板跨中下缘受拉、底板下缘在基底反力作用下同样承担拉应力, 这些位置往往成为受力控制截面。

1.3 箱涵组合结构协同受力机理

当桥梁与箱涵呈毗邻或叠合布置时, 两类结构之间的相互作用不容忽视。毗邻状态下, 箱涵基坑开挖引起的土体应力重分布会向桥梁基础传递附加水平力与竖向位移。叠合状态下, 箱涵顶板可能直接承担桥梁墩台传递的集中荷载, 荷载传递路径由此发生根本改变。变形协调关系的核心在于两者刚度差异, 刚度较大的构件约束相邻构件的自由变形, 导致原本独立的受力体系被迫协同工作。相互作用的主要影响维度包括: 竖向位移差引发的附加弯矩、水平相对位移对支座剪切变形的作用、以及基础转动导致的墩顶水平变位。明确上述机理, 是后续分析箱涵工况对桥梁影响的理论前提。

2 箱涵工况对既有桥梁结构的影响机制

2.1 箱涵荷载工况变动对桥梁受力的影响

箱涵顶部填土荷载或地面超载增加时, 箱涵结构产生压缩变形并向下伏地基传递附加应力, 地基中的应力

扩散效应可能波及邻近桥梁基础范围。主梁作为上部承重构件,其内力分布因支座沉降差而重新分配:靠近箱涵一侧的支座反力上升,远端支座反力相应下降,跨中正弯矩与支点负弯矩的比例关系发生偏移。墩台顶部产生转角位移时,梁端约束条件改变,局部弯矩增大^[2]。荷载偏移情形下,箱涵受力中心偏离结构形心,引发扭矩输出至桥梁下部结构,墩身出现横向弯矩与扭转剪应力的叠加。荷载增量的作用则更为直接,桥梁构件应力水平整体抬升,部分构件逼近甚至超越设计允许值,形成局部受力异常。

2.2 箱涵变形工况对桥梁结构的扰动效应

箱涵沉降与侧向位移对桥梁结构构成持续的扰动输入。差异沉降导致桥梁墩台间产生相对高差,上部结构因此承受强迫位移引发的附加内力,连续梁中支点负弯矩增大,简支梁则表现为梁端转角变化与支座剪切变形加剧。侧向位移发生时,箱涵侧墙向外推移,通过土体剪切带将水平力传递至桥梁桩基,桩身产生附加弯矩,桩侧土抗力分布曲线发生偏移。转角变形的影响更为复杂,箱涵围绕某一轴线的转动迫使邻近桥梁基础产生跟随性变位,墩柱产生倾斜,梁体与支座接触状态改变。这些扰动并非孤立存在,沉降、位移、转角往往相伴生,对桥梁整体稳定性构成累积性威胁,对支座、伸缩缝等易损构件的耐久性亦产生持续负面影响。

2.3 桥涵工况适配失衡引发的结构损伤机理

桥涵工况参数不匹配时,结构损伤沿特定路径逐步发展。裂缝是最为直观的损伤表征,桥墩或主梁受拉区出现弯矩裂缝,裂缝宽度与深度随工况偏离程度增大而扩展。构件老化表现为预应力损失加速、混凝土碳化深度增加及钢筋锈蚀产物膨胀引起的保护层剥落。刚度衰减体现在荷载作用下结构挠度较初始状态显著增大,振动频率降低,结构抵抗变形的能力被持续削弱。受力过载则直接导致局部压溃或钢筋屈服,这一损伤形式往往发生在截面突变处或应力集中区域。上述损伤类型之间存在内在关联:裂缝开展加速了环境介质侵入,进而催生钢筋锈蚀与刚度退化;刚度衰减又使得结构在相同荷载下产生更大变形,进一步加剧受力过载风险。核心结构风险点集中在桥涵交界部位、支座安装区域及基础连接构造处,这些位置承担着两套结构体系之间的力流转换任务,工况适配一旦失衡,损伤将从这些节点启动并向外蔓延。

3 适配箱涵工况的桥梁结构加固技术选型

3.1 主流桥梁结构加固技术特性分析

体外预应力加固通过在梁体外部布置预应力筋并施加张拉力,对原结构引入反向弯矩,消减外部荷载引起的内力峰值。粘贴复合材料加固利用高性能纤维增强复合材料与结构表面的粘结力实现协同受力,补强效率高且几乎不增加结构自重。增大截面加固通过增设混凝土层与新增钢筋提高构件截面面积与刚度,效果可靠但施工周期较长。钢结构补强采用型钢或钢板与原结构连接,借助钢材优良的受拉性能分担荷载,适用于承受较大活载的构件。每项技术各有其受力补强原理上的侧重点:体外预应力主动施加内力,属于主动加固范畴;粘贴复合材料与增大截面属于被动加固,仅在外荷载作用下才发挥作用;钢结构补强则兼有主动与被动特征,视连接方式而定。

3.2 基于箱涵工况的加固技术适配性筛选

面对箱涵工况的动态特征,加固技术的筛选需考量其应变能力与结构相容性。体外预应力技术能够主动调整桥梁内力分布,适应箱涵荷载变动引起的支座反力重分布现象,但对变形协调问题的改善效果有限。粘贴复合材料技术轻质高效,适用于处理局部应力集中与裂缝控制,然而其在承受反复变形时存在界面剥离风险^[3]。增大截面技术大幅提升结构刚度与承载力,但刚度增长过大反而可能加剧桥涵之间的变形不协调。钢结构补强技术施工灵活、见效快,特别适用于箱涵侧向位移引发的墩柱附加弯矩问题。针对工况适配失衡的具体表现形式,无论是荷载增量、变形扰动还是刚度失配,需要选取最能切中要害的技术手段,而非笼统套用某一种方法。

3.3 多技术组合加固的协同作用机制

单一加固技术在应对复杂箱涵工况带来的多重结构缺陷时往往力不从心。体外预应力擅长调整内力分布却无法修复已出现的局部损伤,粘贴复合材料能够封闭裂缝但对整体刚度贡献有限,增大截面有效提升刚度却难以解决应力集中问题。组合加固的出发点在于取各技术之长、补各技术之短。体外预应力筋与粘贴碳纤维布的搭配较为典型:预应力筋承担主要卸载任务,碳纤维布则对应力集中区域实施局部补强,两者受力时序虽有先后,但最终共同参与承载。增大截面与钢结构补强的组合适用于刚度与承载力同步提升的需求,新增混凝土层提供刚度支撑,钢构件则承担额外活载。组合加固的技术搭配需遵循受力传递的连贯性原则,各加固单元之间的连接构造必须可靠,避免出现应力传递断点。补强重点应放在桥涵相互作用最为剧烈的区域,即交界部位的墩柱、基础顶面及主梁端部。

4 桥梁加固与箱涵工况协同优化设计

4.1 工况适配优化设计基本原则

协同优化设计需先行确立明确的基本原则,以此统领后续技术路径。将结构受力均衡置于首位,要求加固后桥梁各主要构件的应力水平趋于接近,避免因局部强度过高或过低引起内力重分布异常。变形协调原则强调桥梁与箱涵在承载过程中的位移响应保持一致,尤其在不均匀沉降和温度变形作用下,两者的相对位移应控制在可接受范围内,防止因变形差过大导致连接部位产生次生应力。性能稳定原则着眼于加固体系在长期服役中的力学行为保持恒定,不因外部条件波动而出现性能退化加速^[4]。除上述三项核心原则外,还需兼顾加固后桥梁结构的耐久性能,确保加固材料与原有结构协同工作年限满足预期要求,同时箱涵工况的动态适应性亦不可忽视,即加固方案应能适应箱涵在不同水位、土压及交通荷载组合下的受力状态变化,明确将承载能力提升幅度、刚度匹配指数及变形协调系数作为优化设计的核心控制目标。

4.2 桥梁加固结构参数优化

在箱涵常规工况与极限工况参数全面测定的基础上,对桥梁加固结构的关键参数实施系统优化。加固构件尺寸的确定需综合考虑截面惯性矩需求、锚固长度要求及施工可操作性,不同位置的主梁、横隔板及节点区域应采用差异化的截面设计策略,使材料效能得到充分发挥。加固构件的布设位置需依据原有结构损伤分布状态和应力场特征进行精准定位,重点强化弯矩峰值区和剪力较大截面的抗力水平,同时兼顾疲劳敏感区域的局部补强需求。加固强度参数的选取应与箱涵实际荷载水平建立定量对应关系,通过调整加固材料的强度等级和配筋比率,实现桥梁承载能力的分级提升。上述参数调整的直接效果是改变桥梁原有的受力传递路径和内力分配格局,使结构体系在恒载、活载及附加荷载组合作用下的响应特征发生有利改变,最终达成桥梁结构承载力储备、整体抗弯刚度与箱涵工况荷载需求之间的精准匹配,确保加固后桥梁在各种使用条件下均具备足够的安全裕度。

4.3 箱涵工况参数适配性微调设计

在保障箱涵核心使用功能不受影响的前提下,对箱涵相关工况参数进行有针对性的适配性微调,是桥涵体系协同优化的关键补充环节。箱涵荷载分布参数的微调主要涉及顶板覆土荷载的分布模式调整和侧向土压力系数的合理修正,使荷载传递路径与加固后桥梁的支承条件变化相协调。变形约束参数的调整需关注箱涵进出口部位的位移边界条件,通过适当改变约束刚度或设置变形缝,释放部分温度应力和收缩应力,减小箱涵对桥梁端部的约束效应^[5]。受力边界参数的微调则体现在箱涵底板与地基接触条件的合理处理上,通过调整基底反力分布形态,改善箱涵整体受力状态。上述微调措施的执行需严格评估每项调整对箱涵原有使用性能的影响程度,确保排水能力、通行净空及结构安全等核心指标不降低,最终实现加固后桥梁结构性能与箱涵工况条件的双向适配,使桥涵组合体系在静力及动力荷载作用下均呈现良好的整体协同工作状态。

结束语

桥涵组合结构在邻近布置条件下的受力行为,本质上由两类结构之间的刚度差异与变形传递路径所决定。箱涵荷载变动与位移输出对桥梁的影响具有明确的空间分布规律,加固方案需据此选取针对性技术手段。将结构参数优化与箱涵工况微调纳入同一设计框架,可在不大幅增加工程量的前提下实现桥涵体系受力状态的系统改善。加固与微调的互补策略使结构能够在工况波动中维持性能稳定,该设计思路为同类工程提供了具有操作性的技术路径。

参考文献

- [1] 仝文杰,张立同.市政道路桥梁结构加固设计方法[J].运输经理世界,2024(22):101-103.
- [2] 司马圆.市政桥梁结构加固设计方法分析[J].运输经理世界,2024(35):108-110.
- [3] 吴威.公路桥梁结构加固设计方法探析[J].工程建设与设计,2024(22):58-60.
- [4] 田嘉麟,邓坚.新建桥梁跨越既有供水箱涵安全影响分析[J].陕西水利,2024(1):168-170.
- [5] 朱光楠,郇鹤.框架箱涵下穿高速铁路桥梁施工影响分析[J].工程技术研究,2026,11(6):12-14+114.