

公路上跨桥施工与运营对高铁 U 型槽结构受力影响有限元分析

石磊¹ 宋锐锐²

1. 南通国盛城镇建设发展有限公司 江苏 南通 226000
2. 南通市交通建设咨询监理有限公司 江苏 南通 226000

摘要：软土地区临近高铁开展上跨桥梁施工，易对既有高铁 U 型槽结构产生土体扰动与形变影响。依托 MidasGTSNX 岩土有限元软件搭建全域耦合模型，探究不同桩基布设间距、成桩施工工艺下 U 型槽的形变与应力变化特征，分析软土蠕变及桥土耦合作用机制。结合仿真模拟成果，梳理适配软土地场的施工管控方式，为同类临近高铁交叉工程的施工管控提供技术参考。

关键词：高铁 U 型槽；公路上跨桥；土体扰动；结构变形；有限元分析

引言：高铁 U 型槽结构变形控制标准严苛，软土地场土体压缩性高、应力传导周期长。邻近公路上跨桥的施工扰动与长期行车荷载，会打破 U 型槽外侧土体压力平衡，引发结构内力重分布和微量变形，影响高铁运营稳定性。依托软土地区实际工程，通过有限元仿真模拟，量化不同施工参数下结构响应特征，梳理施工风险，适配现场工况总结变形防控技术体系。

1 相关结构基础力学特性

1.1 高铁 U 型槽构件构造与受力传递特征

本项目交叉区段高铁 U 槽整体宽度 16m，底板厚度 0.9m，底板、竖壁、顶部翼板一次性浇筑成型，基底正方形排布 60m 长 $\phi 800$ 桩基，如图 1 所示。场地深部流塑粉质黏土压缩模量仅 4.64MPa，侧向土体约束能力偏弱。列车竖向荷载沿底板向下传递，水土侧向压力作用于槽体竖壁，竖壁和底板交接位置断面突变，是整体结构应力集中薄弱区域^[1]。结合现场勘察资料，浅层粉土压缩模量 9.64MPa，深部密实粉砂可达 13.62MPa，软土层内应力传导衰减速度慢，桥梁基础产生的附加应力可完整穿过桥间土体传递至 U 槽外壁。按照《邻近铁路营业线施工安全监测技术规程》要求，高铁 U 槽竖向、水平位移统一执行 $\pm 2\text{mm}$ 累计控制值，预警阈值 1.2mm，报警阈值 1.6mm，严苛的变形约束决定上跨工程必须量化评估土体扰动带来的附加变形量。

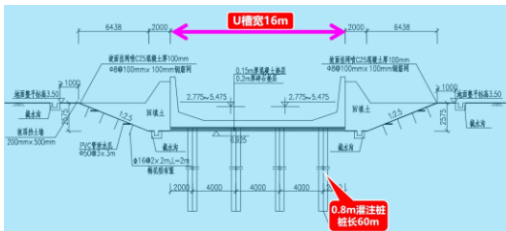


图 1 项目所在区域北沿江高铁 U 槽资料图

1.2 公路上跨桥梁主体受力传递路径

本项目上跨桥选用 27m+35m+27m 先简支后连续预制组合箱梁，桥梁总长 89m，全幅路面宽度 40.63m，箱梁统一梁高 1.8m，单跨 35m 梁自重 130t，27m 梁自重 106t。下部采用直径 1.5m 圆柱墩，配套 $\phi 1.6\text{m}$ 钻孔灌注桩，中墩桩长 72m，两侧边墩桩长 70m。荷载传递路径清晰，车辆活载与桥面恒载作用于 C50 箱梁，经 GQZ 系列球型支座传递至 C40 盖梁与墩柱，再通过桩基传导至下方分层地基土。工程实测 2 号墩桩基距离 U 槽外壁 7.41m，与高铁桩基中心间距 10.31m，满足 6 倍桩径 9.6m 规范底线。若缩短桩基与高铁基础的间距，土体附加应力会相互叠加，槽体变形数值会明显上升，有限元多方案对比可直观量化间距变化带来的位移差值。

1.3 桥槽土体耦合接触力学机理

本工程桥梁主体与高铁 U 槽无任何刚性连接，两类结构之间的力学作用全部依靠中间粉土、软黏土层完成传递。桥梁桩基施工、上部结构加载产生附加应力，以挤压、剪切两种形式在土层内扩散，改变 U 槽外侧原始土压力状态。场地软土液性指数偏高，压缩性能强，受荷载后塑性变形明显，应力传播范围远大于密实砂层。现有 10.31m 桩基中心距下，附加应力叠加效应有限，仿真模型可分别模拟六倍、五倍、四倍桩距三种布置形式，对比不同间距下 U 槽最大位移数值，确定符合规范要求的安全布设距离。

2 有限元计算模型构建

2.1 单元类型选取依据

本次仿真采用 Midas GTSNX 岩土专用有限元软件搭建全域耦合模型，模型长宽高尺寸 200m $\times$ 200m $\times$ 80m，完整覆盖桥梁、高铁 U 槽及周边全部扰动地层，避免边界截断造成应力失真。高铁 U 槽、箱梁、盖梁等大体积

混凝土构件采用三维实体单元,完整模拟受压、受弯、剪切复合受力状态;桥梁与高铁桩基选用一维梁单元模拟;桩土接触面、U槽侧壁填土接触面设置面面接触单元,精准还原土体与结构之间挤压、滑移、摩擦非线性作用,适配公路桥—多层软土—高铁U槽整体耦合计算工况。

2.2 材料本构与参数赋值

混凝土材料按构件类型区分取值,箱梁、调平层采用C50,弹性模量 $3.45 \times 10^4 \text{MPa}$;墩身、盖梁采用C40,弹性模量 $3.25 \times 10^4 \text{MPa}$;桩基、系梁采用C35,弹性模量 $3.15 \times 10^4 \text{MPa}$,全部采用塑性损伤本构匹配混凝土开裂刚度退化特性。钢筋统一选用HRB400,屈服强度400MPa。土体采用修正摩尔-库伦弹塑性本构,全部沿用现场土工试验实测数据,压缩模量、黏聚力、内摩擦角、天然重度分层赋值,最大程度贴合场地真实地层力学表现,保障仿真计算结果贴合现场实际受力变形特征。

2.3 模型边界与工况分组

模型底部全部施加固定约束,限制位移与转角;土体四周仅约束水平方向位移,土层竖向可自由变形,规避计算过程中刚体位移、应力畸变问题。为实现量化对比,本次模型设置三组差异化计算方案作为核心分析载体。基准方案采用工程实际设计,桩基中心距10.31m,桩基仅使用1.1比重常规泥浆;第二组缩小间距至8m,其余参数保持不变,模拟近距离施工风险;第三组维持原有间距,桩基改用1.3高比重泥浆搭配全程钢套管防塌工艺。三组完整复现施工、全周期运营全过程,提取U槽竖向、水平位移与结构应力横向对比,量化桩基间距、施工工艺两类措施的变形控制效果^[2]。

2.4 施工、荷载分步施加逻辑

建模按照项目指导性施工流程分七步依次加载,先完成地应力平衡清零,再依次模拟高铁U槽施工、公路桩基施工、墩盖梁浇筑、600t履带吊箱梁吊装、成桥恒载、长期往复车辆荷载。施工荷载包含吊机整机重量、构件临时堆放等临时集中荷载。运营荷载按照1.3倍公路-I级标准布置,同步计入多车道折减系数,完整还原现场各类受力条件,分阶段提取U槽变形数据用于横向对比分析。

3 公路上跨桥施工阶段U槽力学响应及工况对比

3.1 地系梁施工土体扰动特征分析

墩柱地系梁布设于浅层粉土地层,与高铁U型槽外壁距离较近。地系梁基坑开挖会产生土体卸荷效应,打破基坑周边原始应力平衡,促使土体产生向坑内滑移趋势。该部分扰动会与前期桩基施工带来的土体松弛效应相互叠加,进一步改变U槽外侧土体约束条件,诱发结构附加变形。对比不同方案仿真结果能够看出,桩基间

距缩减之后,开挖卸荷产生的扰动作用会进一步放大;采用高比重泥浆结合钢套管成桩工艺,能够维持孔周土体完整性,降低地系梁开挖工序叠加产生的二次扰动,削弱土体滑移对邻近高铁构筑物的不利影响。

3.2 桩基成孔、浇筑土体扰动量化对比

桥梁桩基孔径1.6m,中墩最大桩长72m,钻进过程即便配备泥浆护壁,仍会造成周边土体应力松弛,水下混凝土灌注时产生径向挤压力向四周扩散,软土层内应力衰减缓慢。钻孔松弛与注浆挤压交替作用,持续改变桥间土体原始应力场,间接传递至7.41m外侧U槽。基准方案桩基完工后槽体沉降-0.62mm;缩小至五倍桩距时土体应力叠加,沉降达到-0.91mm,距离1.2mm预警值很近;采用高比重泥浆加套管跟进后,孔壁土体坍塌松弛大幅减少,沉降控制在-0.40mm。从量化结果可以明确,公路桩基与高铁桩基中心距离不能小于9.6m也就是6倍高铁桩径,小于该距离软土区域应力叠加明显,极易逼近变形预警;配套套管桩基工艺,可降低三成以上土体扰动带来的附加变形。

3.3 箱梁吊装瞬时荷载影响规律

项目选用600t履带吊原位架设箱梁,吊装阶段瞬时集中荷载传递至下部土体,形成临时附加应力场并传导至邻近U槽。吊装工况是全施工周期水平位移最大值对应的阶段。基准方案吊装后最大水平位移0.53mm;缩小间距方案土体应力集中加剧,位移升至0.86mm;优化工艺搭配吊机场地砖渣换填加固后,瞬时扰动明显减弱,水平位移仅0.31mm。由此可见,吊机作业区域提前加固、严控最大作业半径等配套措施,能够大幅削减瞬时荷载带来的土体挤压效应。

3.4 全施工阶段最终变形汇总

整套施工工序全部完成后提取数据,基准方案U槽最大竖向沉降-1.00mm,水平位移0.53mm,两项数值均远低于 $\pm 2 \text{mm}$ 控制限值;缩小间距方案竖向变形达到-1.43mm,突破1.2mm预警标准,施工阶段即存在铁路安全隐患;套管优化方案竖向变形仅-0.68mm。多组仿真数据直观验证两项核心施工防控手段,一是桩基与高铁基础中心距严格不小于6倍桩径,二是桩基采用高比重泥浆加钢套管跟进工艺,两项措施同步实施可降低四成以上施工期槽体附加变形,大幅压缩铁路结构安全风险^[3]。

4 公路上跨桥运营阶段力学响应与防控措施

4.1 长期车辆动荷载应力扩散与工况差异

桥梁通车后持续承受往复车辆动荷载,荷载经由主梁、支座、墩柱、桩基逐层向深部土体扩散,在地层形成周期性应力波动。浅层土体受荷载作用更直接,应力集中程度更高,深层土体应力随深度增加逐步衰减。结合长期蠕变耦合仿真结果,基准方案运营期末U槽总沉

降 - 1.12mm; 缩小五倍桩距方案沉降达到 - 1.65mm, 直接突破 1.6mm 报警值, 会干扰无砟轨道平顺性; 优化工艺方案长期沉降仅 - 0.79mm。充分说明六倍桩距是运营阶段变形控制的基础条件, 间距不足会造成长期荷载累积变形超标。

4.2 土体蠕变引发内力重分布控制方法

场地大范围分布淤泥质粉质黏土, 土体蠕变特性突出, 桥梁长期恒载持续施压下, 土颗粒缓慢滑移产生不可逆塑性变形, 持续改变 U 槽外侧土压力边界, 造成槽体各部位应力反复重分布。仿真模拟十年长期运营蠕变效果, 基准工况蠕变带来附加沉降 0.12mm; 间距不足工况蠕变变形放大至 0.41mm; 优化工艺后土体完整性更好, 蠕变附加沉降仅 0.07mm。现场可配套长效防护手段, 桩基施工完成后对桥间软弱土层注浆加固, 提升土体压缩模量, 从源头抑制长期蠕变引发的槽体内力偏移。

4.3 交变荷载接触应力管控路径

车辆通行带来周期性交变荷载, 使得桥间土体接触应力持续起伏波动, 长期循环易造成土体疲劳, 削弱土层传力稳定性。仿真结果显示桩基间距不足时, 应力波动幅度近乎翻倍。结合本项目附属设计, 可多重防护同步落地, 桥梁外侧设置 HA 加 HB 双层防撞护栏, 全桥架设 2.5m 高防抛网并配套异物侵限监测系统, 既能防范坠物风险, 也能减少车辆单侧偏载产生的峰值荷载, 间接降低土层应力波动幅度, 缓解 U 槽长期受力扰动。

4.4 基础不均匀沉降防控配套措施

长期恒活荷载叠加易引发桥梁基础不均匀沉降, 牵拉挤压周边土体, 改变 U 槽侧壁侧向土压力分布, 造成局部应力集中。结合有限元计算结论形成完整管控方案, 施工及运营全程执行三等精度监测标准, U 槽每 15m 设置一组监测断面, 每日四次采集位移数据, 达到预警值立即采取限速、停运处置; 桥梁选用先简支后连续结构均衡基底荷载, 减少不均匀沉降带来的侧向土体挤压; 日常同步开展人工巡检与桥下视频监控, 及时排查结构异常形变。

结束语

通过多组差异化有限元仿真工况, 梳理了桥梁施工、箱梁吊装及长期运营阶段, 公路上跨桥对高铁 U 型槽变形与内力状态的影响规律。软土场区高铁 U 型槽的结构稳定性, 主要受桩基布设间距与施工工艺影响。合理桩距搭配优化成孔工艺, 可有效缓解土体扰动、弱化软土蠕变形变, 结合实时监测、土层加固、结构防护等手段, 可保障桥轨交叉工程全周期运营安全。

参考文献

- [1] 杨伟超, 王蔚雯, 李国志, 等. 时速 400km 高铁隧道洞口 U 型槽对微气压波的影响 [J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(7): 2872-2885.
- [2] 郑建广. U 型槽式路基下穿既有高铁门式墩施工技术应用 [J]. 江西建材, 2025(7): 278-281.
- [3] 浦逸辉, 彭华, 肖骁骐, 等. 盾构下穿高速铁路隧道沉降变形控制标准研究 [J]. 北京交通大学学报, 2024, 48(1): 32-43.