

临近地铁高架桥施工安全评估与风险控制研究

余 鑫

(湖南中大设计院有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘 要: 旨在评估与控制临近地铁高架桥施工作业中的安全性, 研究的对象为临近广州地铁 4 号线高架桥施工过程中的安全管理, 重点评估了施工过程中可能的风险, 并提出相应的风险控制措施。采用了工作分解结构-风险分解结构(WBS-RBS)耦合分析法, 对高架桥施工过程中的基础风险、基础设施风险、沉降风险等多种风险进行分类并分析, 使用 MIDAS GTS/NX 软件模拟施工过程中的动态变化。通过模型模拟, 预测并分析了施工过程中可能的结构变形和土体沉降情况。结果表明, 通过风险评估与控制措施的实施, 有效避免了高架桥施工中的安全隐患, 减少了施工过程中的风险。最后, 建议结合具体施工情况, 进一步加强对施工期的监测, 确保安全。

关键词: 近接地铁高架桥; 风险控制; 风险分析; 结构变形; 土体沉降

中图分类号: U445; U447; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)11-0253-04

Research on Safety Assessment and Risk Control of Elevated Bridge Construction Adjacent Metro

YU Xin

(Hunan Zhongda Design Institute Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: Aiming to assess and control the safety during the construction of elevated bridges adjacent subway lines, the research object is the safety management during the construction of the elevated bridge adjacent Guangzhou Metro Line 4. The focus is on the evaluation of the risks possibly in the construction process, and the corresponding risk control measures are put forward. The work breakdown structure - risk breakdown structure (WBS-RBS) coupling analysis method is used to categorize and analyze various risks, such as foundation risk, infrastructure risk and settlement risk during the construction of elevated bridges. The MIDAS GTS/NX software is used to simulate the dynamic changes during the construction. Through the model simulation, the potential structural deformations and soil settlement during construction are predicted and analyzed. The results indicate that through the implementation of risk assessments and control measures, the safety hazards during the construction of elevated bridges are effectively avoided, and the risks during construction are reduced. Finally, it is suggested that the monitoring during the construction should be further strengthened to ensure the safety in combination with the detailed construction situation.

Keywords: elevated bridge adjacent metro; risk control; risk analysis; structural deformation; soil settlement

0 引 言

近年来, 粤港澳大湾区一体化加速, 跨江通道与城市轨道交通的立体交叉日益频繁。狮子洋通道作为连接广州南沙与东莞滨海湾新区的重大工程, 其黄阁东互通主线桥与市南大道下沉隧道同时上跨、下穿运营中的广州地铁 4 号线高架桥, 施工风险极高。国内对临近运营地铁的结构安全控制值主要依据有《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T

202—2013)^[1]、《城市轨道交通既有结构保护技术规范》(DBJ/T 15-120—2017)^[2]及《公路与市政工程下穿高速铁路技术规程》(TB 10182—2017)^[3], 张美聪^[4]以某地铁区间明挖基坑下穿铁路高架桥为例, 结合周边环境和工程地质给出了基坑支护方案设计。王立勇、杨兆仁等^[5]研究了隧道下穿高架桥施工控制技术。任伟明^[6]研究了洞桩法施工的最优工序组合, 并分析不同加固措施的沉降控制效果。芮勇勤、安月、王振华、于晓莎等人^[7]通过研究大连地铁 5 号线地铁站基坑群施工, 给出了邻近桥梁影响的控制因素。何晟亚、刘一、李恒一、王志杰等人^[8]通过研究深圳地铁 12 号线基坑下穿城际桥梁, 给出

收稿日期: 2025-07-24

作者简介: 余鑫(1990—), 男, 学士, 工程师, 从事路桥设计工作。

基坑降水形式和钢支撑体系布置对桥墩变形的不同影响。刘海涛、姬海、邓科等^[9]研究结果表明不同基坑围护结构的刚度是桩基位移主要影响因素。李晓龙^[10]研究结果表明基坑施工引起的水平变形主要在桥梁顺桥向。宋欢艺^[11]研究结果表明随基坑开挖深度的增大,桩基侧向变形及内力也随之增大。但针对“桥—隧—地铁”三维空间耦合作用的研究尚属空白。本文依托狮子洋通道工程,开展了系统的设计、评估、监测与风险控制研究,以期填补该领域技术空白。

1 工程概况与交叉关系

1.1 项目总体布置

狮子洋通道主线全长 34.915 km,上层为双向八车道高速公路,下层为桂阁大道城市主干路。黄阁东互通主线桥(K14+920~K16+790)采用 30 m+60 m+30 m 钢混组合梁上跨地铁 4 号线;市南大道下沉隧道采用明挖单层框架结构,基坑深 11.6 m。本项目拟建下沉隧道基坑围护结构冠梁外边线距离既有广州地铁 4 号线 DZ212 墩台结构外边线的最小水平净

距约为 0.96 m,距离既有广州地铁 4 号线 DZ213 墩台结构冠梁外边线的最小水平净距约为 0.63 m。下沉式隧道断面土层主要为素填土、淤泥、砂质黏性土等土层,工点存在的淤泥地层对下沉式隧道基坑开挖较为不利。

1.2 地铁高架桥现状

广州地铁 4 号线庆盛站~黄阁汽车城站区间高架桥上部结构采用单箱单室箱梁,桥梁建筑总宽为 9.3 m。墩台 DZ212~DZ213 桥梁跨度 41.9 m,梁高为 2.3 m。桥梁下部结构采用花瓶墩加承台桩基基础。DZ212~DZ213 桩基直径为 1.5 m,桩端嵌入中风化花岗岩。2022 年 8 月监测数据显示:DZ212 累计沉降 0.54 mm~-1.41 mm,DZ213 累计沉降-1.11 mm~-3.56 mm。

2 临近地铁施工风险识别与分级

2.1 风险源辨识

采用工作分解结构-风险分解结构(WBS-RBS)耦合分析法方法分解施工全过程,识别出 9 类一级风险:

风险事件	原因	后果	措施
旋挖钻机施工机械倾覆风险	场地不平、恶劣天气、操作不当	机械倾覆可能碰撞地铁设备或侵入地铁限界	选择小型机械、远离地铁侧布置、做好防倾覆措施
基坑施工风险	基坑开挖引起土体变形,影响地铁桥墩稳定性	围护结构变形、坍塌,影响地铁安全	设置隔离桩、MJS 微扰动桩止水、坑内满堂加固、设置多道钢筋混凝土支撑
墩柱、盖梁施工风险	脚手架失稳、模板坍塌、高空坠物	材料设备侵入地铁限界,影响运营	采用滑模施工、设置围护设施、严禁向地铁侧投掷物件
架桥机架梁施工风险	架桥机倾覆、梁体坠落	严重影响地铁运营安全	编制专项施工方案、专家评审、恶劣天气停止作业
防护棚安拆风险	安装或拆除过程中结构失稳、材料坠落	严重影响地铁运营安全	完善防护棚设计、编制专项方案、严格按序拆除
桥梁上部梁体倾覆风险	支座失效、结构失稳	严重影响地铁运营安全	采用多支座钢混组合梁,避免独柱墩单支点方案
车辆侧翻风险	交通事故导致车辆翻越护栏	严重影响地铁运营安全	设置 SS 级防撞护栏,优化平纵线形
高空抛物风险	桥上抛物落入地铁范围	严重影响地铁运营安全	设置临时防抛网和永久声屏障
排水不畅风险	桥面排水系统故障,水流冲刷铁路路基	严重影响地铁运营安全	完善排水系统,确保不流入地铁范围

2.2 风险矩阵

参照《铁路建设工程风险管理技术规范》^[12](Q/CR 9006—2014)及李仁强^[13]《市政道路下穿运营高速铁路桥梁影响分析及风险评估》,第一步定义概率(可能性)等级,第二步定义后果(严重性)等级,第三步绘制矩阵并确定风险等级,建立概率—后果矩阵,初始风险等级见表 1(节选)。

3 三维有限元模型建立

3.1 模型范围与网格

本项目采用迈达斯 GTS/NX 软件建立实体几何

表 1 主要风险源初始与残余风险等级

风险事件	初始概率	初始后果	初始等级	控制措施	残余等级
桩基塌孔	4	3	高度	钢护筒+旋挖	中度
基坑坍塌	5	4	极高	伺服支撑+注浆	中度
梁体倾覆	4	3	高度	双支座+防抛网	中度

模型。模型中,土体采用修正 Mohr-Coulomb 本构模型的三维实体单元模拟,桩体采用实体单元模拟。模型总计单元 349,848 个,节点 180,467 个。

3.2 参数选取

地层参数根据地质勘察报告及现场注浆试验修

正,注浆后淤泥层弹性模量提高至 30 MPa,φ 提高至 25°。详见表 2。

表 2 主要岩土参数取值表

地层名称	重度 γ/(kN·m³)	直剪快剪		泊松比	弹性模量/MPa	本构关系
		φ/(°)	c/kPa			
① ₁ 层(Qml 4)素填土	17.5	12.2	20	0.30	15*	修正莫尔-库伦
② ₁ 淤泥(Qmal d)	15.6	2.6	6.1	0.35	9*	修正莫尔-库伦
③ ₁₃ 砂质黏性土(Q ^{cl})	19.2	14.7	29.1	0.25	20*	修正莫尔-库伦
⑥ ₂₁ 层(γ3 γ)强风化花岗岩(砂土状)	23.0	27	28	0.25	60*	修正莫尔-库伦
⑥ ₂₂ 层(γ3 γ)强风化花岗岩(碎块状)	24.0	28	40	0.20	60*	修正莫尔-库伦
⑥ ₃ 层(γ3 γ)中风化花岗岩	26.5	35	90	0.16	1 300*	修正莫尔-库伦
旋喷桩加固后土体	20*	25*	30*	0.27*	300*	修正莫尔-库伦

3.3 计算工况

采用大型三维有限元软件对施工全过程进行动态模拟,兼顾模拟的精细度与模型计算时长,地铁桥墩、承台、桩基按真实尺寸建模,网格尺寸控制在 0.2~0.5 m 以内,地层单元的网格尺寸在施工影响区以外适当加大。基坑支护结构用刚度等效原则采用板单元建立,对桥梁结构进行适当简化,仅模拟墩柱盖梁,将上部结构荷载及路面运行荷载以面荷载的形式加在桥墩上。按照施工工序划分 18 个工况,实现“激活—钝化”全过程模拟。

4 计算结果分析

4.1 支护结构变形

根据广东省地方标准《建筑基坑工程技术规程》^[14](DBJ/T15-20—2016)的相关规定,围护桩顶部水平位移控制值为 30 mm 和 0.2%H(H 为开挖深度)的较小值,基坑的最大开挖深度为 10.67 m,顶部位移控制值取 20 mm;深层水平位移控制值为 45 mm 与 0.4%H 的较大值,深层水平位移控制值取 45 mm。基坑最大顶部水平位移 1.915 mm,深层最大位移 16.46 mm,均小于《建筑基坑工程技术规程》^[14](DBJ/T15-20—2016)控制值 20 mm 及 45 mm。

4.2 地铁桥墩位移

4 号线区间高架桥 DZ212、DZ213 号墩台最大水平位移 TX 为 2.33 mm;最大水平位移 TY 为 4.48 mm;最大竖向隆起 TZ 为 0.02 mm;最大竖向沉降 TZ 为 -2.60 mm;相邻桥墩间最大差异沉降为 2.111 mm,出现在 DZ211 号墩与 DZ212 号墩之间。

4.3 临地铁桩基内力分析

根据竣工资料,DZ212、DZ213 号墩桩基直径 1.5 m,配筋为 36 根直径 25 mm 的二级钢。

(1)水平承载力验算

施工引起的桩基水平剪力最大增量为 59.28 kN。

考虑双线列车制动力,每根桩分配制动力 99.45 kN。桩身承受的最大水平剪力为:59.28 kN + 99.45 kN = 158.73 kN。依据《建筑桩基技术规范》^[15](JGJ 94—2008),当桩顶允许水平位移取 6 mm 时,考虑群桩效应的基桩水平承载力特征值为 583.339 kN>158.73 kN,满足要求。

(2)按偏压构件对桩基进行验算

桩身最大弯矩为 95.5 kN·m,相应最大轴力为 11 001 kN。验算正截面抗压承载力:当基桩承受弯矩 240.54 kN·m 时,其相应正截面抗压承载力为 26 797.2 kN>实际最大轴力 11 001 kN,满足要求。

4.4 参数敏感性分析

通过正交试验发现:注浆模量、支撑预应力及换撑时机对桥墩水平位移敏感度最高,贡献率分别为 42%、35%、18%。

5 地铁保护关键技术

5.1 分区对称开挖

深基坑施工严格遵循“分区、分块、分层、对称、限时”原则。邻近地铁高架桥侧,在开挖过程中监测数据开始预警的情况下采取坑内留土堆载反压预案,以降低土体开挖卸载对邻近结构的不利影响。

5.2 隔离桩及注浆加固

在地铁 4 号线高架桥承台周边设置一圈隔离桩:采用 φ800@1000 钻孔灌注桩(局部受限处用 φ600@800),并设置穿透淤泥层的锁扣钢套筒。

围护桩:采用 φ1000@1200 钻孔灌注桩,设置穿透淤泥层的锁扣钢套筒。

止水帷幕:采用 φ1500 微扰动 MJS 桩(160° 摆喷)。

坑内加固:地铁影响范围采用 φ800@600 mm 双管法旋喷桩满堂加固,加固深度由第二道支撑顶至基坑底下 3 m。

支撑体系:第1~3道支撑采用钢筋混凝土支撑,换撑采用钢支撑,第1道支撑不予拆除。

承台周边加固:施作5排 $\phi 48 \times 3.5$ 钢花管注浆,注浆量30 L/m,水灰比0.8,注浆压力0.3 MPa。

6 施工监测与信息化

6.1 监测体系

建立“自动化+人工巡查”双轨监测:桥墩顶部布设徕卡TM30全站仪,频率1次/天;深层水平位移采用测斜管,间距10 m;水位观测井间距25 m。

6.2 预警标准

按照《城市轨道交通既有结构保护技术规范》^[2](DBJ/T 15-120—2017)划分四级预警:

黄色预警(0.6 δ):加强监测;

橙色预警(0.8 δ):暂停施工,启动专家会商;

红色预警(1.0 δ):立即回填反压,启动应急抢险。

7 结论与展望

(1)通过三维有限元全过程模拟及现场验证,证明了狮子洋通道近接施工方案安全可行,对国内类似工程具有示范意义。

(2)下一步将开展施工期及长期运营期健康监测,研究交通荷载一耦合作用对高架桥附加变形的

影响规律。

参考文献:

- [1] CJJ/T 202—2013,城市轨道交通结构安全保护技术规范[S].
- [2] DBJ/T 15-120—2017,城市轨道交通既有结构保护技术规范[S].
- [3] TB 10182-2017,公路与市政工程下穿高速铁路技术规程[S].
- [4] 张美聪.铁路高架桥下明挖基坑方案设计[J].居舍,2019,(18):113.
- [5] 王立勇,杨兆仁.地铁隧道下穿高架桥施工控制技术[J].市政技术,2010,28(4):101-103;135.
- [6] 任伟明.PBA工法地铁车站下穿桥梁影响分析[J].工程建设,2022,54(12):48-55.
- [7] 芮勇勤,安月,王振华,于晓莎.下穿桥梁紧邻高铁地铁联络线基坑群施工力学特性数值模拟[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(5):851-860.
- [8] 何晟亚,刘一,李恒一,王志杰.地铁车站基坑下穿对既有桥梁变形的影响及其控制措施研究[J].城市轨道交通研究,2022,25(6):105-111.
- [9] 刘海涛,姬海,邓科.深基坑工程对现有桥梁桩基变形的影响分析[J].广东公路交通,2024,50(2):56-61.
- [10] 李晓龙.新建航道基坑下穿高铁桥梁对邻近桥墩的影响分析[J].城市轨道交通研究,2024,27(3):188-192.
- [11] 宋欢艺.某城市地道深基坑开挖对桥桩影响有限元分析[J].福建建筑,2016,(5):89-91.
- [12] Q/CR 9006—2014,铁路建设工程风险管理技术规范[S].
- [13] 李仁强.市政道路下穿运营高速铁路桥梁影响分析及风险评估[J].铁道建筑,2021,61(11):57-60.
- [14] DBJ/T15-20—2016,建筑基坑工程技术规程[S].
- [15] JGJ 94—2008,建筑桩基技术规范[S].

(上接第224页)

- [9] 赵成贵.商合杭铁路芜湖长江公铁大桥斜拉索安装控制技术[J].桥梁建设,2020,50(4):107-111.
- [10] 夏焕文,常建增.鳊鱼洲长江大桥南汊航道桥塔梁同步施工测量技术[J].世界桥梁,2023,51(增刊1):91-96.
- [11] 杨天伟,肖广生.斜拉桥塔梁同步施工过程中主塔线形控制影响

- 因素分析[J].公路,2023,68(4):213-216.
- [12] 中交公路规划设计院有限公司,广州市市政工程设计研究总院有限公司.南沙至中山高速公路工程SJ01标段TJ05合同段施工图设计[Z].北京:中交公路规划设计院有限公司,广州市市政工程设计研究总院有限公司,2021.