

# 城市轨道交通盾构近距离侧穿已施工完成区间隧道安全评估研究

孙俊峰

昆明地铁建设管理有限公司 云南昆明 650051

**摘要:** 昆明地铁5号线福保至滇池国际会展中心区间隧道已贯通,在建线路地铁2号线二期工程龚家村站~会展中心站~宝丰村站盾构区间将侧穿已建昆明地铁5号线工程,根据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/202-2013),地铁2号线侧穿地铁5号线左线区域(距离<1.0D),其影响风险等级已为特级,经对5号线隧道结构的现状评估和2号线盾构穿越作业影响评估、2号线盾构穿越作业施工过程评估和2号线盾构穿越作业影响后评估,该项目采取的设计方案基本可行。

**关键词:** 地铁盾构;侧穿;已贯通区间;特级风险

Study on safety assessment of completed interval tunnel of urban rail transit shield

Sun Junfeng

Kunming Metro Construction Management Co., LTD. Yunnan Kunming 650051

**Abstract:** The tunnel from Kunming Metro Line 5 to Dianchi International Convention and Exhibition Center has been completed, Gongjia Village Station ~ Exhibition Center Station ~ Baofeng Village Station shield section will cross the existing Kunming Metro Line 5 project, According to the Technical Specification for Safety Protection of Urban Rail Transit Structure (CJJ / 202-2013), The side of Metro Line 2 crosses the left line area of Metro Line 5 (distance <1.0D), Its impact risk level has been super grade, After the assessment of the current situation of the tunnel structure of Line 5, the impact assessment of the shield crossing operation of Line 2, the assessment of the construction process of the shield crossing operation of Line 2 and the post-assessment of the impact of the shield crossing operation of Line 2, The design scheme adopted for this project is basically feasible.

**Key words:** subway shield; side wear; through area; super risk

## 1 研究背景

随着地铁建设的不断推进,城市地铁线网逐渐形成,在建地铁线路与既有线路交叉施工过程中,要对既有线路进行保护,为了确保既有线路的安全,需要对编制第三方评估报告,安全评估后才能进行在建线路施工。地铁2号线龚~会区间右线隧道里程DK23+665.513(1934环)处与地铁5号线左线隧道相距6.2米(距离<1.0D),至接收里程DK23+7171.488(1979环)相距2.4米,穿越距离51.975米;会~宝区间右线隧道里程DK24+010.067~DK24+043.147处与地铁5号线隧道相距≤6.2(1.0D),穿越33.08米,在宝丰村站接收端右线隧道里程DK25+313.237~DK25+441.597处与地铁5号线隧道相距≤6.2(1.0D),穿越距离128.36米。其影响等级已为特级,需要编制第三方评估报告并出具论证后才能组织施工。

## 2 工程概述

### 2.1 2号线二期龚~会~宝丰村站区间简介

龚~会区间线路主要位于道路下方,区间隧道埋深较大,沿线控制性的建构筑物主要为民房、海河桥、地铁5号线等。区间右线长2407.771m,左线长2382.136m。区间穿越范围内主要为填土、粉质粘土、粉砂、泥炭土。

会~宝区间线路主要位于环湖东路一侧,区间隧道埋深为8.0m~22.1m,沿线控制性的建构筑物主要为待建地铁5号线、会展中心站2A风亭、下穿隧道、雨污水管、虾坝河、姚安河、老宝象河等。区间隧道穿越范围主要为人工填土、黏土、泥炭质土、粉土、粉砂。

正线区间均采用盾构法施工,通用型衬砌管片,错缝拼装。管片外径6.2m,内径5.5m,管片宽度1.2m,分块数6块,16根纵向连接螺栓,12根环向连接螺栓,楔形量37.2mm。

### 2.2 5号线福~会~宝区间简介

福~会区间设计里程为右DK23+362.801~右DK24+444.364,左DK23+360.675~左DK24+444.310,其中右线长1083.961m,左线长1076.979m。区间采用盾构法施工。

会~宝区间设计里程为右DK24+740.195~右DK26+168.394,左DK24+740.243~左DK26+168.394,其中右线长1428.199m,左线长1430.726m。区间采用盾构法施工。

## 3 地质概况

### 3.1 场地稳定性、适宜性评价

本工程场地为复杂场地。工程影响深度范围内岩土层数多,表层多为素填土,下部为第四系全新统冲湖积相(Q4al+l)泥炭质土、黏土、粉土、砂土等,厚度大于50m,地层埋深及厚度变化不大,钻探深度内未揭示基岩。场地内地下水位较高,地下水类型主要为上层滞水、孔隙潜水和微承压水,特殊岩土为素填土和软土,场地范围内无滑坡、崩塌、塌陷等不良地质作用。地下水主要含水层为粉砂及粉土,具微承压性。场地土类型为中软场地土,场地类别为Ⅲ类,属对建筑抗震不利地段。综合分析认为场地工程地质条件较差,场地基本稳定,采取各种措施对各种工程地质问题处理后,场地基本适宜建筑拟建工程。

### 3.2 地基均匀性评价

工程场地岩土层主要为表层人工填土,第四系全新统冲湖积相(Q4al+l)泥炭质土、黏土、粉土、砂土、圆砾等,厚度大于50m,钻探深度内未揭示基岩,各岩土层的工程特性在纵横方向上具明显的差异,主要表现为水平分布不均、纵向厚度变化较大,物理力学性质相差较大,均匀性较差,综合评价场地为不均匀地基。

### 3.3 地基土分析与评价

根据钻孔揭露,本次勘察深度范围内自上而下可分为第四系素填土层(Q4ml)和第四系全新统冲湖积相(Q4al+l)两大类根据勘探孔揭示,隧道范围内主要土层自上而下分述如下:

(1) <2>人工填土: 稍压实, 由黏性土, 砂砾及碎石组成, 土质不均匀, 呈层状分布, 厚度变化较大, 工程性质差。

(2) <2-2>泥炭质土: 软塑, 具高压缩性, 呈层状分布, 开挖易产生变形, 工程性质差, 地基基本承载力低。

(2) <3-2>黏土: 软塑, 具高压缩性, 呈透镜状分布, 厚度变化大, 自温性差, 地基承载力较低。

(2) <3-3>黏土: 可塑, 具中压缩性, 呈层状分布, 厚度变化大, 工程性能差, 地基承载力交低。

(2) <4-2>粉土: 中密, 很湿, 呈层状分布, 厚度变化大, 工程性能差, 具液化性, 地基承载力较低。

(2) <5-3>粉砂: 中密, 饱和, 呈层状分布, 工程性能差, 具液化性, 地基承载力较低。

(2) <10-2>圆砾: 稍密, 饱和, 呈透镜状分布, 工程性能好, 地基承载力高。

(3) <1-2>泥炭质土: 可塑, 具高压缩性土, 呈层状分布, 开挖易产生变形, 工程性能差, 地基基本承载力低。在进行相关加固措施后可作为持力层。

(3) <2-2>黏土: 软塑, 具高压缩性, 呈透镜状分布, 工程性能差, 地基承载力低。

(3) <2-3>黏土: 可塑, 具中等压缩性, 呈层状分布, 工程性能差, 地基承载力较低, 可作为持力层。

(3) <3-3>粉土: 中密、湿, 呈层状分布, 厚度变化大, 工程性能差, 地基承载力较低, 可作为持力层。

(3) <4-3>粉砂: 中密, 呈透镜状分布, 工程性能一般, 地基承载力较低, 可作为持力层。

(4) <1-2>泥炭质土: 可塑, 具高压缩性, 呈层状分布, 易产生变形, 工程性质差, 地基承载力较低。

(4) <2-2>粉质粘土: 软塑, 具高压缩性, 呈透镜状分布, 工程性质差, 地基承载力较低。

(4) <2-3>黏土: 可塑, 具高~中压缩性, 呈层状分布, 工程性质差, 地基承载力较低。

(4) <3-3>粉土: 中密, 湿, 呈层状分布, 厚度变化大, 工程性质差, 地基承载力较低, 可作为持力层。

(4) <4-3>粉砂: 中密, 呈透镜状分布, 工程性质一般, 地基承载力较低, 可作为持力层。

(5) <1-2>泥炭质土: 可塑, 具高压缩性, 呈层状分布, 开挖易产生变形, 工程性质差, 地基承载力较低。

(5) <2-3>黏土: 可塑, 具高压缩性, 呈层状分布, 工程性质差, 地基承载力较低。

(5) <3-4>粉土: 中密, 湿, 呈透镜状分布, 厚度变化大, 工程性质差, 地基承载力较低, 可作为持力层。

(5) <4-3>粉砂: 中密, 呈层状分布, 工程性质一般, 地基承载力较低, 可作为持力层。

### 3.4 不良地质及特殊岩土评价

本工程场地中第四系粉砂和粉土的液化等级为中等~严重。液化土层对工程不利, 对影响工程范围的可液化土层应采取抗液化措施, 消除液化沉陷, 确保工程的安全、稳定。

场地内发育软土, 多呈透镜状分布, 厚度不均, 其工程性能差, 对工程不利; 工程影响范围的软土, 需采取洞内注浆加固等措施进行处理, 以满足沉降、稳定要求。根据剪切波速测试资料判别, 场地内软土不会出现软土震陷现象, 依据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)(2016年版)第4.3.9条中规定的各项措施来减

弱地震时软土沉降变形对上部结构的影响。场地表层分布一层0.80~9.00厚的素填土, 其成分较复杂, 均匀性差, 工程性能差, 对隧道盾构区影响较小, 对隧道始发井、端头井及联络通道开挖影响加大, 应加强支护。

### 3.5 水的腐蚀性评价

根据《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)(2009年版)附录G及其条文说明, 采用矿山法施工的联络通道、泵房和盾构隧道一边接触地下水, 一边暴露在大气中, 水可以通过渗透或毛细作用在暴露大气中的以便蒸发, 环境类型为I类。

按环境水类型判别, 地下水对混凝土结构有中腐蚀性、对钢筋混凝土结构中的钢筋有微腐蚀性; 按地层渗透性判别, 地下水对混凝土结构有微腐蚀性、对钢筋混凝土结构中的钢筋有微腐蚀性;

根据国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T50476-2008)第42.2条规定, 明挖隧道的矩形结构和盾构隧道以便接触地下水, 一边暴露在大气中, 水可以通过渗透或毛细作用在暴露大气中的一边蒸发, 环境作用等级应为I-C。

## 4 影响等级判定

2号线区间与5号线区间最小净距1.8m, 小于1倍开挖直径, 接近程度判断为非常接近。2号线采用盾构法施工, 区间会展中心站端埋深15.5m, 宝丰村站埋深10m, 5号线会展中心站端位于0.7h2范围内, 5号线宝丰村站端位于0.7h2范围内, 按照工程影响分区判定为强烈影响区(A)。按外部作业影响等级划分为特级。

## 5 数值计算

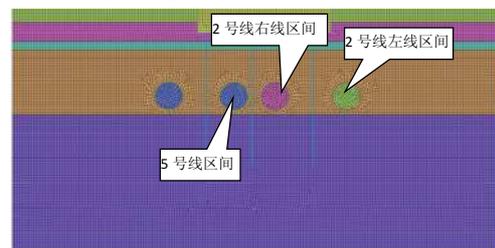
### 5.1 会展中心站大里程端区间

#### 5.1.1 计算模型

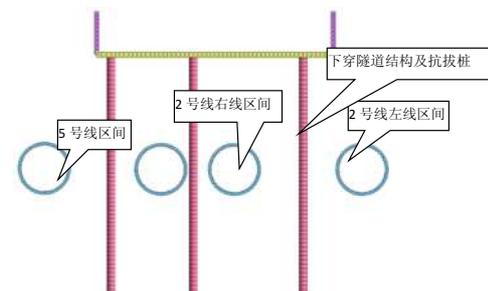
本次计算采用大型通用有限元分析软件MIDAS, 通过建立二维模型, 分析2号线二期区间施工对5号线区间的影响。

结合区间隧道的空间尺寸, 为避免尺寸效应对计算结果的不利影响, 拟定模型2方向(垂直2号线二期方向)取100m, y方向(深度方向)按实际地质情况取50m。由于模型空间关系复杂, 地层单元主要采用四边形, 过渡地段采用三角形单元, 能够得到较好的计算结果。模型中隧道衬砌、下穿隧道以梁单元模拟。

有限元数值计算分析模型如图5.1.1-1所示, 数值计算模型结构构件尺寸及物理力学参数如表5.1.1-1所示。



(a) 有限元整体数值分析模型



(b) 2号线与5号线空间关系图

图 5.1.1-1 数值计算分析模型

表 5.1.1-1 数值分析主要构件尺寸及力学参数

编号	构件	尺寸 (mm)	模拟单元	弹性模型参数		
				容重 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量 E (kN/m <sup>2</sup> )	泊松比
1	管片	350	板单元	25	2.1e7	0.2
2	下穿隧道抗拔桩	D1000@3000	梁单元	25	3e7	0.2
3	下穿隧道底板	600	梁单元	25	3e7	0.2

5.1.2 数值计算分析工况

5 号线为既有成型隧道结构, 分析 2 号线二期区间隧道开挖对 5 号线区间隧道的影响, 根据设计文件, 数值计算分析具体的施工阶段见表 6.1.2-1, 不同施工阶段有限元计算模型如图 6.1.2-1 所示。

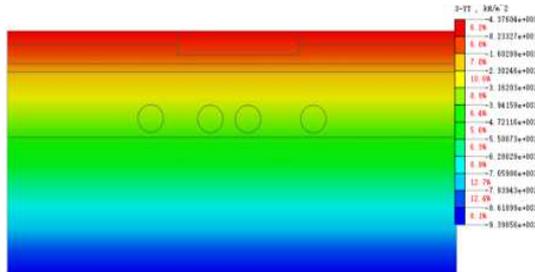
表 6.1.2-1 数值计算分析工况及施工阶段

施工阶段	数值模拟施工步骤	备注
初始平衡	数值计算模型初始应力平衡	位移清零, 获取隧道结构初始内力值
施工阶段 1	下穿隧道施工	
施工阶段 2	施做 5 号线区间	
施工阶段 3	位移清零	
施工阶段 4	2 号线右线隧道开挖	应力释放 20%
施工阶段 5	2 号线右线隧道管片	应力释放 80%
施工阶段 6	2 号线左线隧道开挖	应力释放 20%
施工阶段 7	2 号线左线隧道管片	应力释放 80%

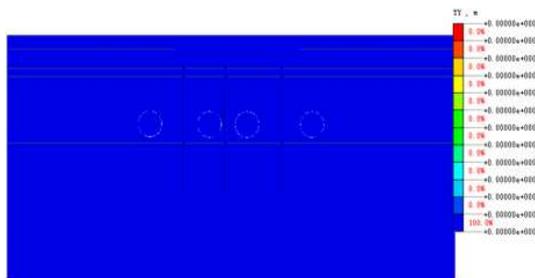
5.1.3 数值计算结果及分析

1、初始模型计算分析

首先对数值计算分析模型进行初始分析, 分析结果位移清零, 并获得既有地铁结构初始内力值。



a) 初始应力状态



b) 模型整体位移清零

图 6.1.3-1 初始应力平衡阶段隧道围岩及隧道结构竖向位移清零

2、2 号线二期区间开挖对 5 号线区间影响的计算结果及分析

在获得初始应力状态后, 后续的分步计算均建立在在上一步计算结果的基础上, 得到各施工阶段对应的增量。区间开挖有多个步骤, 本章节仅展示区间开挖终态与初始应力状态的对比。

1) 模型整体

2) 5 号线结构位移

3) 5 号线结构内力

4) 计数值计算结果统计

通过上述数值计算分析, 2 号线二期施工引起 5 号线的位移和内力见表 6.1.3-1~6.1.3-2。

表 6.1.3-1 5 号线竖向、水平向位移 (累计值)

工况	竖向位移 (最大跨度处) /mm	水平向位移 (最大跨度处) /mm
2 号线右线开挖	2.2 (向下)	2.3 (靠近 2 号线)
2 号线右线管片施工	5.7 (向下)	2.5 (背离 2 号线)
2 号线左线开挖	5.6 (向下)	2.6 (背离 2 号线)
2 号线左线管片施工	6.6 (向下)	4.3 (背离 2 号线)

表 6.1.3-2 5 号线内力计算结果

工况	正弯矩/kN.m/m	负弯矩/kN.m/m
开挖前	108	105
2 号线右线开挖	110	107
2 号线右线管片施工	109	106
2 号线左线开挖	109	106
2 号线左线管片施工	109	106

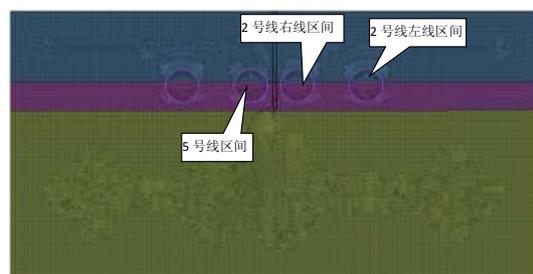
5.2 宝丰村站小里程端区间

5.2.1 计算模型

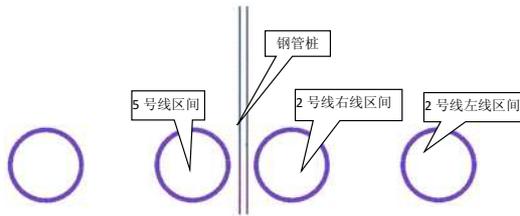
本次计算采用大型通用有限元分析软件 MIDAS, 通过建立二维模型, 分析 2 号线二期区间施工对 5 号线区间的影响。

结合区间隧道的空间尺寸, 为避免尺寸效应对计算结果的不利影响, 拟定模型 2 方向 (垂直 2 号线二期方向) 取 90m, y 方向 (深度方向) 按实际地质情况取 50m。由于模型空间关系复杂, 地层单元主要采用四边形形体, 过渡地段采用三角形单元, 能够得到较好的计算结果。模型中隧道衬砌梁单元模拟。

有限元数值计算分析模型如图 6.2.1-1 所示, 数值计算模型结构构件尺寸及物理力学参数如表 6.2.1-1 所示。



(a) 有限元整体数值分析模型



(b) 2号线与5号线空间关系图

图 6.2.1-1 数值计算分析模型

表 6.2.1-1 数值分析主要构件尺寸及力学参数

编号	构件	尺寸 (mm)	模拟单元	弹性模型参数		
				容重 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量 E (kN/m <sup>2</sup> )	泊松比
1	管片	350	板单元	25	2.1e7	0.2

### 5.2.2 数值计算分析工况

5号线为既有成型隧道结构,分析2号线二期区间隧道开挖对5号线区间隧道的影响,根据业主提供的设计文件,数值计算分析具体的施工阶段见表 6.2.2-1,不同施工阶段有限元计算模型如图 6.2.2-1 所示。

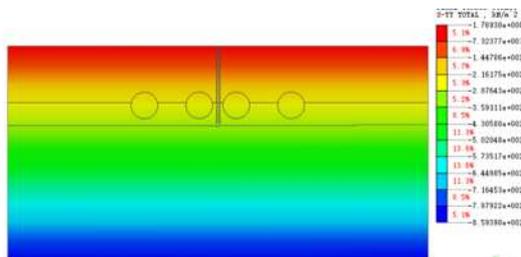
表 6.2.2-1 数值计算分析工况及施工阶段

施工阶段	数值模拟施工步骤	备注
初始平衡	数值计算模型初始应力平衡	位移清零,获取隧道结构初始内力值
施工阶段 1	施做5号线区间	
施工阶段 2	隧道间钢管桩	将钢管范围内的材料修改为钢管属性
施工阶段 3	位移清零	
施工阶段 4	2号线右线隧道开挖	应力释放 20%
施工阶段 5	2号线右线隧道管片	应力释放 80%
施工阶段 6	2号线左线隧道开挖	应力释放 20%
施工阶段 7	2号线左线隧道管片	应力释放 80%

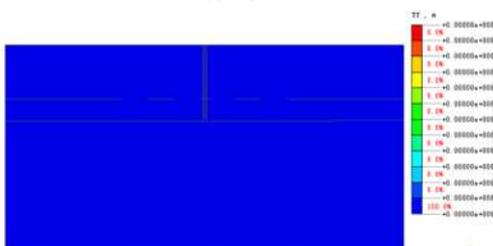
### 5.2.3 数值计算结果及分析

#### 1、初始模型计算分析

首先对数值计算分析模型进行初始分析,分析结果位移清零,并获得既有地铁结构初始内力值。



a) 初始应力状态



b) 模型整体位移清零

图 6.2.3-1 初始应力平衡阶段隧道围岩及隧道结构竖向位移清零

2、2号线二期区间开挖对5号线区间影响的计算结果及分析  
在获得初始应力状态后,后续的分步计算均建立在在上一步计算结果的基础上,得到各施工阶段对应的状态。区间开挖有多个步骤,本章节仅展示区间开挖终态与初始应力状态的对比。

- 1) 模型整体
- 2) 5号线结构位移
- 3) 既有结构内力

表 6.2.3-1 5号线竖向、水平向位移 (累计值)

工况	竖向位移 (最大跨度处) /mm	水平向位移 (最大跨度处) /mm
2号线右线开挖	5.6 (向下)	0.8 (背离2号线)
2号线右线管片施工	7 (向下)	2.2 (背离2号线)
2号线左线开挖	7.6 (向下)	4.2 (背离2号线)
2号线左线管片施工	7 (向下)	4.3 (背离2号线)

表 6.2.3-2 5号线内力计算结果

工况	正弯矩/kN.m/m	负弯矩/kN.m/m
开挖前	96	75
2号线右线开挖	112	101
2号线右线管片施工	106	92
2号线左线开挖	96	81
2号线左线管片施工	94	79

根据以上数值计算结果,2号线二期区间隧道开挖对既有5号线区间隧道的影响如下:

- 1) 5号线区间隧道有下沉的趋势。5号线区间隧道管片拱顶的沉降最大数值约 7.6mm。
- 2) 5号线区间隧道有远离2号线二期区间隧道的趋势。5号线区间隧道管片中心出的水平位移约 4.3mm。
- 3) 5号线区间隧道管片在2号线施工过程中内力有增大趋势,施工完成后略微减小。右线管片起承载作用之前,5号线管片内力增量较大,增大约 16%。

## 6 结论及要求

### 6.1 结论

根据昆明市轨道交通2号线涉5号线区间设计文件、详勘报告等相关资料,采用有限元软件计算并结合类似工程经验判断,目前设计方案下该项目影响范围内5号线区间隧道安全性评估结论如下:

- 1) 该项目采取的设计方案基本可行。需继续稳定边界条件并细化设计方案,听取地铁业主及相关权属部门意见后认真落实处理。
- 2) 对该项目的数值模拟计算结果分析表明:
  - ①5号线区间隧道有下沉的趋势。5号线区间隧道管片拱顶的沉降最大数值约 3.2mm。
  - ②5号线区间隧道有靠近2号线二期区间隧道的趋势。5号线区间隧道管片中心出的水平位移约 1.7mm。
  - ③5号线区间隧道管片在2号线施工过程中内力有增大趋势,施工完成后略微减小。右线管片起承载作用之前,5号线管片内力增量较大,增大 9%;施工完成后,5号线管片内力略微减小,减小 3.5%。