

# 轨道交通安全保护区人行天桥施工保护措施研究

张克清<sup>1</sup>, 邓会兵<sup>2</sup>, 王升堂<sup>2</sup>

<sup>1</sup>重庆轨道交通运营有限公司运营发展分公司, 重庆

<sup>2</sup>重庆路威土木工程设计有限公司, 重庆

收稿日期: 2026年5月26日; 录用日期: 2026年6月18日; 发布日期: 2026年6月30日

## 摘要

本文以重庆某轨道交通安全保护区内人行天桥工程为研究对象, 运用有限元软件模拟分析了施工及运营各阶段对轨道交通区间隧道的位移影响, 结果表明各阶段隧道变形均符合规范要求, 且运营阶段影响最大。并通过识别出桩基施工扰动、吊装作业加载、运营期加载三类风险, 从项目审批、施工过程控制、施工工艺管控、第三方监测等方面提出项目轨道安全保护措施。研究结果能够为轨道交通安全保护区管理工作提供借鉴。

## 关键词

轨道交通安全保护区, 人行天桥, 桩基施工, 有限元分析, 施工保护措施

# Research on Construction Protection Measures for Pedestrian Bridges in Rail Transit Safety Protection Zones

Keqing Zhang<sup>1</sup>, Huibing Deng<sup>2</sup>, Shengtang Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Operation Development Branch of Chongqing Rail Transit Operation Co., Ltd., Chongqing

<sup>2</sup>Chongqing Leway Civil Engineering Design Co., Ltd., Chongqing

Received: May 26, 2026; accepted: June 18, 2026; published: June 30, 2026

## Abstract

This paper takes a pedestrian bridge project within a rail safety protection zone in Chongqing as the

research object. Finite element software is used to simulate and analyze the displacement impact on the rail transit interval tunnel during various stages of construction and operation. The results show that the tunnel deformation at all stages meets the specification requirements, with the greatest impact occurring during the operation stage. By identifying three types of risks—pile foundation construction disturbance, hoisting operation loading, and operational loading—corresponding rail safety protection measures are proposed from the aspects of project approval, construction process control, construction technology management, and third-party monitoring. The research findings can serve as a reference for the management of rail transit safety protection zones.

## Keywords

Rail Transit Safety Protection Zone, Pedestrian Bridge, Pile Foundation Construction, Finite Element Analysis, Construction Protection Measures

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

轨道交通安全保护区是为保障轨道交通建设、运营安全以及建设条件,依法在轨道交通沿线划定的特定保护区域,该范围内的建设和作业等活动受到合理限制[1]。随着轨道交通覆盖范围越来越广,在既有轨道交通安全保护区内进行施工作业的项目越来越多,其施工作业时不可避免会对临近轨道交通结构带来影响,可能造成结构位移和变形,甚至发生破坏影响轨道交通的运营[2]。因此,为规避或降低外部施工作业项目对轨道交通结构的安全影响,确保轨道交通建设、运营安全,规范轨道交通控制保护区的工程建设和施工作业是十分必要且有意义的。

针对以上问题,闫静雅等人利用平面应变有限元方法分析了桩列荷载作用对邻近已有隧道的变形及受力影响,并研究了桩群参数变化如桩间距以及桩基础与隧道结构净距等对现存隧道的影响规律[3]。路平、邓刚通过三维有限元数值模型,模拟了立交桥桥墩桩基础的成孔施工、运营期桩基承担荷载在土中产生的应力扩散对既有隧道结构和轨道变形产生的影响机制和规律,提出了相应的变形控制措施[4]。

本文以重庆某人行天桥工程为实例,通过风险源识别分析、有限元软件模拟分析等方式分析了人行天桥桩基施工、上部结构施工、人行天桥运营等不同工况对既有轨道交通隧道的影响,并总结明确施工期间对轨道交通隧道的安全保护措施,以为类似工程问题提供轨道交通安全保护区管理经验。

## 2. 工程概况

### 2.1. 设计概况

该人行天桥主桥全宽 3.9 m,跨径为 5.8 m + 45.6 m + 17.1 m,主桥上部结构采用钢桁架,预制吊装施工。下部结构采用混凝土墩,桥墩基础采用桩基础,桩径 1.8 m,其中 P1 墩桩基与隧道衬砌结构外边线最小水平距离 7.46 m, P2 墩桩基与隧道衬砌结构外边线最小水平距离 11.34,位置关系见图 1。桩基础因均位于校园内,受场地限制采用人工挖孔施工,梯脚为扩大基础,明挖施工。根据地勘资料显示,本项目区域范围内隧道所处为中等风化基岩,采用桩基底 45°扩散范围在区间隧道结构外作为主要相对位置关系控制条件。

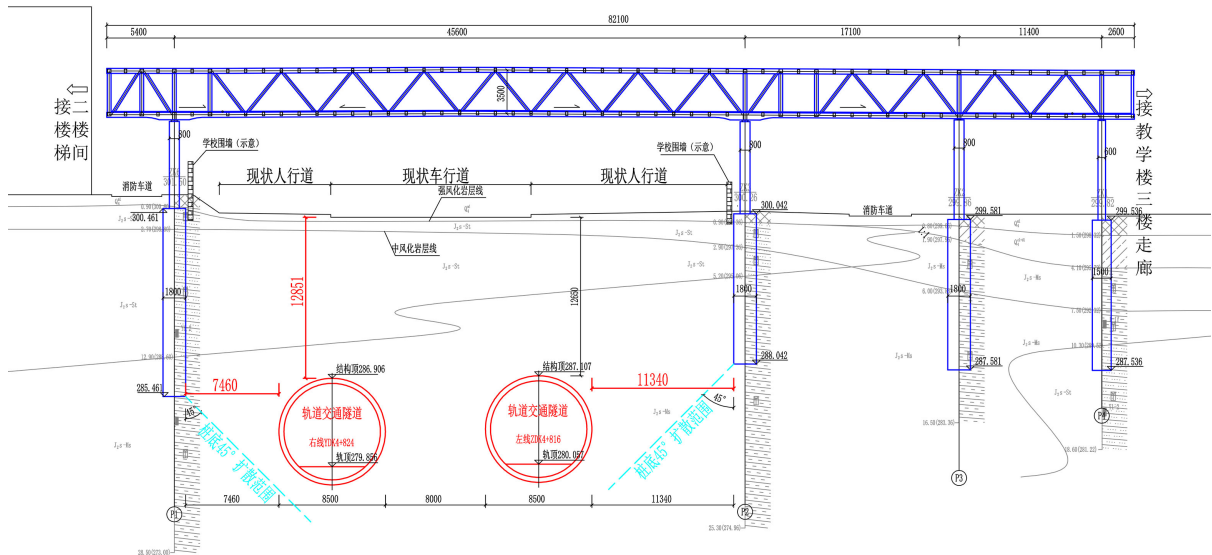


Figure 1. Location relationship diagram of the pedestrian bridge and the rail transit tunnel

图 1. 人行天桥与轨道交通隧道位置关系图

## 2.2. 工程地质及水文条件

据地面调查及钻探揭露,本工程范围内出露地层有第四系全新统人工填土,第四系全新统残坡积粉质粘土,下伏基岩为侏罗系中统上沙溪庙组的泥岩、粉砂岩。轨道交通隧道主要位于中等风化泥岩层,场区岩体较完整,场地及周边均已完成修建学校、道路等,地表采用铺装、沥青等为主,均设置有排水管网等设施,有利于地表水和地下水的排泄,不利于地下水的赋存,勘察期间钻孔揭露深度范围内无地下水。

## 3. 风险源识别

### 3.1. 下部结构桩基施工扰动风险

天桥下部结构桩基础临近轨道交通隧道,桩基础成孔施工过程中扰动轨道结构周围围岩,影响围岩完整性,可能引起轨道结构变形,使得隧道产生侧向和一定的竖向位移,甚至对轨道交通隧道造成一定的沉降,影响正常运营。在施工过程中桩基定位如出现较大偏差,会导致桩基距离轨道交通隧道净距变小,甚至侵入轨道结构范围,存在潜在的安全风险。此外,本项目轨道交通隧道主要位于泥岩层,天桥施工过程中基坑长时间积水导致渗漏水下渗至轨道周围围岩,影响围岩强度,可能影响轨道结构。

### 3.2. 地面施工吊装机械作业加载风险

天桥上部结构采用工厂预制现场拼装钢桁梁,需要在现场进行吊装施工作业并设置临时支墩,桥梁吊装施工机械荷载作用也是轨道交通隧道结构变形的主要风险。人行天桥大吨位吊装设备作业在轨道交通结构上方,运输超载、吊物坠落冲击,都可能导致轨道交通隧道结构承受过大的集中荷载,导致轨道交通隧道结构发生过大变形而造成结构开裂甚至破坏。

### 3.3. 天桥运营期间加载风险

天桥桩基分别设置于轨道交通隧道左右两侧,距离小于隧道的1倍洞跨,人行天桥建成后桩基浇筑后桩身摩擦力可能对区间隧道结构产生一定影响,且桩底附加荷载可能传递至轨道结构,导致轨道结构

荷载增加，产生结构变形。

## 4. 安全影响分析

### 4.1. 有限元数值分析

#### 4.1.1. 模型建立

根据新建天桥与轨道交通隧道结构的相对位置关系，结合工程资料，本文采用 MIDAS/GTS NX 有限元软件选取人行天桥最不利剖面按照实际情况建立模型，见图 2。网格采用 2D 德劳内网格，以四边形网格为主，过渡区域部分采用三角形网格，重点分析部位网格尺寸加密至 0.5 m，其余网格尺寸为 0.5~1.5 m。根据工程勘察报告及规范要求，各土层的主要物理力学参数见表 1。岩、土体材料的屈服条件采用摩尔库伦屈服准则，为模拟桩体与土体之间的相互作用，在桩 - 土交界面设置接触单位。计算模型的底面约束竖直方向 Y 方向的自由度、侧面约束侧向 X 方向的自由度，地表为自由面。

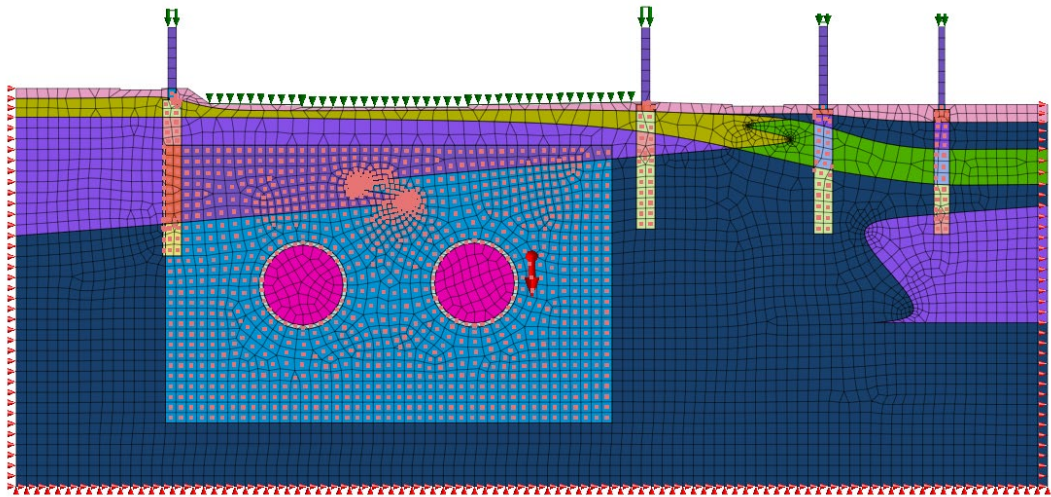


Figure 2. Finite element model diagram  
图 2. 有限元模型图

Table 1. Main physical and mechanical parameters of each soil layer  
表 1. 各土层的主要物理力学参数表

参数	容重(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量 MPa	泊松比	内聚力 $c$ (kPa)	内摩擦角(°)
回填土	21.5	5	0.37	4	25
强风化砂岩	23.9	300	0.34	120	26
强风化粉砂岩	24.9	100	0.38	40	24
中风化砂岩	24.3	1850	0.21	820	31.7
中风化粉砂岩	25.5	400	0.25	405	27.3
强风化泥岩	25.2	200	0.36	40	24
中风化泥岩	25.8	870	0.27	372	24.56

注：考虑轨道交通隧道施工时候对围岩的扰动，对轨道交通隧道结构 1 倍洞径范围岩层参数进行折减，弹性模量折减系数取 0.8，内聚力折减系数取 0.2。

### 4.1.2. 有限元模型施工过程

有限元模型施工顺序依照轨道、人行天桥的建设时序分 4 个关键阶段对整个实施过程进行模拟。阶段 1 为轨道施工完成及上部道路运营，阶段 2 为基础及下部结构施工，阶段 3 为上部结构吊装施工，阶段 4 为上部结构施工完成后运营阶段。

## 4.2. 有限元分析结果

根据有限元分析结果，不同施工阶段最大位移统计如表 2 所示。分析结果表明本项目施工将会导致轨道交通隧道结构产生一定变形，其中阶段 2 基础及下部结构施工阶段产生最大位移为 0.123 mm，对左线隧道影响最大；阶段 3 上部结构吊装及施工阶段及阶段产生最大位移为-0.794 mm，阶段 4 运营阶段产生最大位移为-2.012 m，均对右线隧道影响最大。计算结果显示其变形值均满足《城市轨道交通安全结构保护技术规范》(CJJ/T 202-2013)中对轨道交通隧道位移预警控制值 10 mm 的要求。

由分析结果可知，本项目施工期间采取有效保护措施后对轨道交通隧道结构的影响较小，天桥运营期间引发的轨道交通隧道变形范围最大，主要原因为运营期桩基引起的附加荷载，因此本项目桩基开挖期间应严格确保桩基与轨道隧道结构的相对位置关系，确保桩基底 45°扩散范围在区间隧道结构外，严禁欠挖导致桩基引起的轨道交通隧道附加荷载增加。

**Table 2.** Maximum displacement statistics for different construction stages (mm)

**表 2.** 不同施工阶段最大位移统计表(mm)

隧道位置	施工阶段	初始状态	基础及下部结构施工	上部结构吊装施工	运营阶段
左线隧道	最大位移	0	-0.123	-0.579	-1.508
右线隧道		0	-0.083	-0.794	-2.012

## 5. 安全保护措施

严格审批管理，项目方案设计、施工图设计阶段须取得主管单位审批意见以及施工图审查专项意见并开展第三方单位安全评估。在设计阶段结合有限元分析得出天桥运营期间引发的轨道交通隧道变形范围最大的情况，建议优化桩基布置，调整桩基底 45°扩散范围位于轨道结构范围外，尽量减少桩基在运营期对轨道结构的加载。项目施工阶段要求施工单位根据项目设计阶段意见及行业主管批复意见对轨道保护范围线内的项目工程编制详细施工组织计划及轨道交通专项安全保护方案，经轨道主管部门审批同意后再进行实施。

加强施工过程控制，在项目施工前、后组织开展轨道交通隧道结构现状调查，调查隧道结构的渗漏水、修补情况、裂缝及管片错台位置，形成施工前后现状调查对比表，以界定本工程施工对隧道结构的影响程度。对施工单位进行轨道交通保护区施工前交底，对项目关键工序开展专项巡查和日常巡查，确保施工单位按照审批通过后的安全保护方案施工。

施工工艺管控，桩基成孔采用对围岩扰动较小的人工挖孔施工，做好测量复核，确保桩位准确，确保桩基孔深满足设计要求，严禁欠挖。成孔后及时浇筑，避免长时间暴露导致雨水下渗影响围岩强度。吊装施工阶段机械不得摆放在结构正上方，吊装机械设备作业位置做好荷载扩散措施，吊装过程中避免出现跌落、超限及其他超出设计荷载的情况，并制定桥梁吊装作业专项施工方案及应急预案。

开展第三方监测，聘请第三方监测单位采用仪器测量、现场巡查等手段和方法，在施工期间长期、连续地采集和搜集本工程施工期间对轨道交通隧道结构的影响情况，及时监测隧道结构位移变形情况。根据项目风险等级并结合有限元分析结果，在第三方监测方案中要求对桩基位置加密监测断面布置，加

强该区域监测巡查及预警机制。并开展 2 年期运营期监测，长期关注运营期轨道交通结构变形情况。

## 6. 总结

轨道交通安全是城市安全的重要组成部分，轨道安全保护区的施工安全管理必须引起外部项目参建单位、轨道运营单位和行政主管部门的高度重视。本项目通过有限元软件分析，对不同阶段潜在的安全保护区施工风险源进行识别，从建设及运营两个阶段提出相对应轨道安全保护措施，确保了轨道安全保护区人行天桥的施工及运营安全，也验证了在地质情况良好的情况下，采用桩基底部 45°扩散角度作为对轨道隧道结构控制加载范围线是可控的项目经验。

## 参考文献

- [1] 重庆市人民代表大会常务委员会. 重庆市轨道交通条例[Z]. [https://www.cqrd.gov.cn/web/article/1395430277474123776/web/content\\_1395430277474123776.html](https://www.cqrd.gov.cn/web/article/1395430277474123776/web/content_1395430277474123776.html), 2025-03-26.
- [2] 成亮, 成燕, 万晶, 等. 城市轨道交通控制保护区管理研究[J]. 山西建筑, 2021, 47(15): 195-196.
- [3] 闫静雅, 张子新, 黄宏伟, 等. 桩基础荷载对邻近已有隧道影响的有限元分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2508-2514.
- [4] 路平, 邓刚. 立交桥桩基础施工及运营期对既有隧道影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(s2): 923-927.