

• 复杂艰险山区重大工程与环境 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202400156



建筑敏感区隧道开挖破除抗滑桩扰动试验研究与数值分析

杨春山¹, 魏立新¹, 王雅甜², 李亚东³, 马辉¹

(1. 广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东广州 510060; 2. 广东工业大学土木与交通工程学院, 广东广州 510006;
3. 广州大学土木工程学院, 广东广州 510006)

摘要: 依托攀枝花阳光隧道工程, 构建 1:40 比例尺的模型试验装置, 开展隧道破除抗滑桩进洞模型试验, 探究隧道开挖扰动下围岩、结构的力学响应特征。以此为基础, 借助数值分析方法建立 3 维精细模型计算, 并与试验结果对比, 进一步分析转换结构受力特性、既有敏感建筑物的影响特性, 厘清围岩塑性变形规律及潜在破坏机制。结果表明: 在隧道开挖破除抗滑桩影响下, 围岩主要发生沉降及伴随沉降的侧移, 位移在到达掌子面前明显增加, 通过后逐渐趋于稳定; 隧道开挖诱发的坡面最大位移为 1.19 mm, 围岩受隧道建设影响可控。隧道开挖诱发应力扰动重分布, 局部围岩自重应力调整促使隧道-围岩接触压力与应变增大, 浅覆土区最大压力增加 28.3%, 最大应变增加 58.28×10^{-6} 。隧道开挖除受瞬时变形影响外, 还存在明显的时间效应, 表征出软岩变形的滞后性。隧道开挖扰动扩散、衰减且传递至转换结构, 使其发生挠曲变形, 最大应变为隧道结构最大应变值的 30%, 与掌子面距离呈反相关, 并在抗滑桩截断时出现应变突增, 具有瞬时变形特性, 对既有边坡支挡的影响主要在截断抗滑桩两侧相邻桩范围内。截断抗滑桩受隧道开挖影响很小, 既有边坡稳定系数均大于 1.35, 处于整体稳定状态, 结合围岩和隧道结构响应特性可判断, 转换结构可有效抑制隧道开挖截断抗滑桩时的力学扰动, 保证隧道安全实施。隧道开挖过程邻近既有建筑主要经历微小变形—变形显增—变形缓增—变形稳定 4 个阶段; 空间错层双线隧道薄弱处位于两者连线上部隧道拱腰位置, 施工中应重点防治斜上方隧道拱腰处的塑性破坏。

关键词: 山岭隧道; 破除抗滑桩; 转换体系; 开挖扰动; 受力变形; 模型试验; 数值模拟

中图分类号: U456

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)01-0192-12

中国基础建设中心正逐渐向地形环境复杂的西南山区转移, 在此过程中, 各类隧道修建面临诸多挑战, 如: 软岩大变形^[1-2]、偏压稳定性^[3-4]、大断面设计^[5-6]及复杂建设条件^[7-8]等。其中, 由建设条件衍生出的开挖扰动问题尤为突出, 如处理不当, 易对隧道与周边环境产生不利影响, 甚至诱发安全问题, 因此近些年备受工程界关注。

刘新荣^[9]、Jahromi^[10]等针对下穿隧道近接施工对上覆既有结构力学特性的影响, 依托工程实例开展隧道锚、管道与下穿隧道间相互影响的模型试验, 分析了围岩和既有结构的受力变形特征。Vlachopoulos^[11]、陶志刚^[12]等针对复杂围岩条件邻近边坡的隧道, 构建了 3 维弹塑性计算模型, 探索隧道开挖与边坡的相互作用特性、边坡变形规律、边坡稳定性及影响因素。张治国^[13]、吴红刚^[14]、Zhang^[15]等在现有成果的基础上,

系统梳理了隧道-边坡在不同相对位置条件下对应的变形特征、相互影响特征及加固技术。孙凡文^[16]、张建智^[17]等分别利用子域分解法和位移释放系数法, 构建了含非圆形空洞围岩、考虑空间效应围岩位移响应的解析法。Aygarr^[18]、李奥^[19]等探讨了隧道塌方的发生机理和演化规律, 以及与隧道开挖的内在联系, 建立了隧道塌方模型, 推导了隧道围岩塌方曲线方程。傅鹤林^[20]、邓祥辉^[21]等推导了爆破开挖邻近敏感建筑物的振速响应计算方法, 并通过数值计算、现场实测结果进行验证, 从而指导实际工程控制爆破。Gu^[22]、Houhou^[23]等利用数值法建立了 3 维模型, 并考虑岩土性质的空间差异分布, 计算分析了隧道开挖对邻近桩基的影响, 形成了桩体力学响应曲线。Aswathy^[24]和 Mirsepahi^[25]等利用有限元建立 3 维模型, 开展双线隧道施工对邻近桩基和建筑物变形的扰动机理、扰动特征及影响因素分析。上述

收稿日期: 2024-03-06 修回日期: 2024-09-30 网络出版日期: 2024-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878192); 广东省土木建筑学会青年科技人才托举工程(QT-2025-4)

作者简介: 杨春山(1986—), 男, 教授级高级工程师。研究方向: 隧道与地下结构设计。E-mail: soildocor@163.com

https://jsuese.scu.edu.cn

研究对隧道开挖诱发的力学扰动及控制做了探索,促进了相关技术的发展,为各类山岭隧道建设提供了技术支持。然而,既有成果对于隧道邻近敏感结构物开挖并截断上覆高边坡支护桩存在的环境效应却鲜有研究,此类隧道实施技术难题值得探索。

本文以攀枝花阳光隧道为背景,构建1:40比例尺的模型试验系统,开展隧道破除抗滑桩进洞模型试验,探讨开挖扰动作用下围岩、结构的力学响应特征。在此基础上,借助数值法进行3维精细分析,并与试验结果对比验证,进一步厘清既有敏感建筑物的影响特性;同时描述围岩塑性变形规律及潜在破坏形态,以期为类似山岭隧道破除既有结构开挖设计提供科学依据。

1 工程概况

四川省重点项目攀枝花花城区阳光隧道工程全长约3.6 km,为主干路、双向四车道。隧道设双洞,沿里程方向分别定义左右线。左线进洞处现状为20 m高的二级高边坡,支挡为抗滑桩+锚索及挡墙+锚杆。抗滑桩截面为3 m×2 m,长22 m,6根设在隧道开挖掌子面范围内,与隧道约以27°斜交,在隧道进洞开挖时被破除。现有高边坡上有3层(10.5 m高)框架结构建筑幼儿园,有独立基础,为敏感建筑,与隧道开挖面水平最小距离约9.32 m。新建隧道和现有边坡如图1所示。

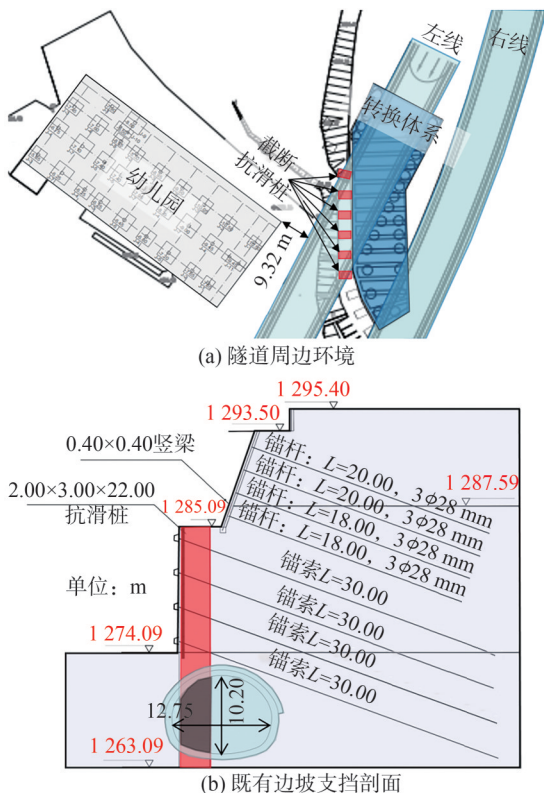


图1 新建隧道和现有边坡

Fig. 1 New tunnels and existing slope

隧道所在围岩等级为II级,隧道开挖断面如图1(b)所示。进洞用 $\phi 108$ 钢管,以及长30 m、环间距40 cm及外插角 $1^\circ\sim 2^\circ$ 的管棚超前支护;隧道内用直径42 mm、长4.5 m、环间距40 cm、外插角 12° 的超前小导管支护。初期支护为锚杆+钢筋网+喷射混凝土,其中,锚杆为直径25 mm、长3.5或4.5 m的中空注浆锚杆,纵向与环向间距为60 cm,布设 $\phi 6@20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 的钢筋网,喷射厚26 cm的C25混凝土;二次衬砌用厚50 cm的C30混凝土;临时支护用I20a钢拱架,纵向间距为60 cm。

截断抗滑桩会产生不平衡下滑力,为了保障新建隧道的顺利施工与上覆高边坡的稳定,需设置转换结构以防断桩处地层失稳或大变形。转换体系的设置不能侵入隧道开挖范围,以保证其安全可靠。综合考虑,转换结构适合用“上部支挡+下部嵌固”的组合体系,如图2所示,为此提出“扶壁式挡墙+灌注桩”的方案承担因局部抗滑桩截断失效而产生的下滑力。

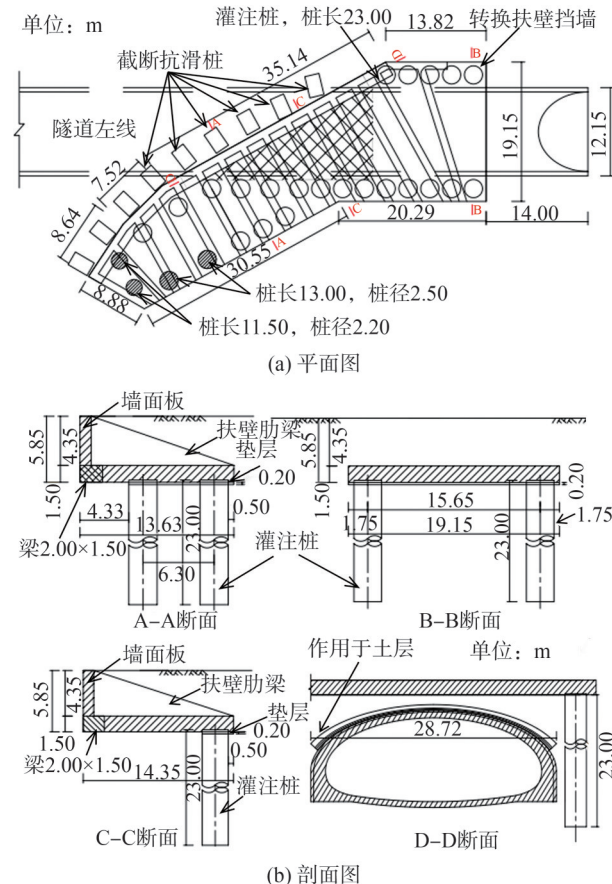


图2 转换体系方案

Fig. 2 Transfer system scheme

在抗滑桩处植入 $\phi 25@0.5\text{ m}$ 钢筋与转换结构有效连接,单根抗滑桩共植筋11排×4根。转换结构有26根灌注桩,其中:24根桩的直径为2.5 m,含2根长13.0 m的桩和22根长23.0 m的桩;另两根桩的直径为2.2 m、长为11.5 m。扶壁式结构含墙面板、肋梁及踵板,其中:

墙面板高 4.35 m、厚 1.00 m；变截面肋梁间隔 2.50 m、厚 1.00 m，最高处与墙面板顶齐平；踵板厚 1.00 m，板底设混凝土垫层。除垫层混凝土为 C20 外，其余所用混凝土均为 C35。

2 模型试验

2.1 试验材料及相似比

隧道开挖模型试验要兼顾开挖后续的地震动试验，需在振动台装置中完成。考虑到模型试验的合理性、必要性及操作性，选定原型与模型几何尺寸的相似比 $C_l=40$ ，重度、摩擦角、应变相似比 $C_\gamma=C_\phi=C_\epsilon=1$ ，根据相似原理推导得到位移、黏聚力及应力相似比 $C_\delta=C_c=C_\sigma=40$ 。

利用重晶石粉、河砂、石膏粉、甘油及水配置成围岩相似材料。将配比材料的重度、弹性模量、黏聚力与摩擦角作为主控指标，经过大量的配比试验，最终选定围岩的质量配比为重晶石粉：河砂：石膏粉：甘油：水=33.0：56.5：3.5：1.0：6.0。石膏具有类似于混凝土的特性，且更易与模拟钢筋的材料协同作用，故在隧道衬砌模型试验模拟时得到了良好应用^[26-27]。试验采用石膏和水 1.0：0.7 的质量比配置衬砌模型，衬砌结构厚 12.5 mm，通过双层 $\phi 0.45 \text{ mm}@1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的钢丝网模拟钢筋网。围岩、隧道衬砌、转换结构原型和模型材料参数见表 1。

表 1 围岩、结构原型与模型材料参数

Tab. 1 Surrounding rock and structural parameters of prototype and model material

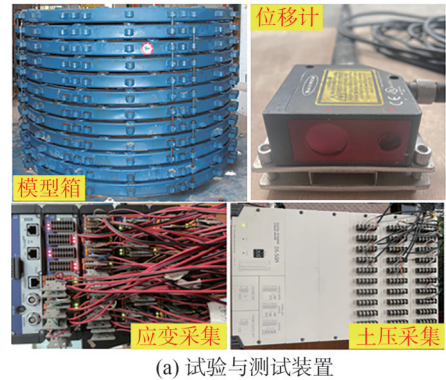
| 围岩材料 | 重度 γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$) | 弹性模量 E/MPa | 黏聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\phi(^{\circ})$ |
|----------|--|------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 泥岩与粉砂岩互层 | 原型 22.50 | 285.00 | 290.00 | 24.00 |
| | 模型 22.50 | 7.13 | 7.25 | 24.00 |
| 结构名称 | 重度 γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$) | 弹性模量 E/GPa | 隧道长度/ m | 抗压强度 $f_{cu,k}/\text{MPa}$ |
| 隧道衬砌 | 原型 24.00 | 30.00 | 48.00 | 30.00 |
| 结构 | 模型 24.00 | 0.75 | 1.20 | 0.75 |
| 转换结构 | 原型 24.50 | 31.50 | 48.00 | 35.00 |
| | 模型 24.50 | 0.79 | 1.20 | 0.88 |

考虑到既有抗滑桩和转换结构的复杂性，为了便于模型加工，使用聚乙烯塑料进行模拟，对应的弹性模量约为 0.75 GPa。由于二级边坡锚杆作用时间久，且与隧道开挖联系相对不紧密，故试验不作考虑。一级边坡锚索使用直径 2 mm、长 750 mm 的钢丝绳表征，锚固段长 300 mm、 $\phi 3 \text{ mm}$ 的扩大头由水、灰质量比为 0.45 的水泥砂浆制成，桩的末端通过螺母固定锚索。利用厚 0.3 mm@2.5 mm 的钢丝网模拟坡面钢筋网。

2.2 试验装置和方案

2.2.1 试验装置及模型构建

考虑开挖后期需开展震动台试验，模型箱用层状剪切箱，箱体内部高 1.5 m，内径为 2.0 m，设置隧道模型长 1.2 m。在试验模型中布设应变片、微型土压力盒及激光位移计测点。激光位移计用前需预热 10 min，测试距离设定为 40 cm，以取得最佳测试精度。试验模型箱、测试元件、采集仪及构建的模型如图 3 所示。



(a) 试验与测试装置



(b) 围岩与结构模型构建

图 3 模型装置与模型构建

Fig. 3 Device and construction of the model

2.2.2 测点布置与试验方案

按图 4 布置位移、应变、土压力测点。

试验主要经历前期准备、模型构建、隧道开挖及数据采集。

1) 准备工作：清洁模型箱，在箱体内部铺设油布以减小箱体与材料间的摩擦力；配置围岩相似材料，打磨结构测试元件（应变片和土压力传感器）粘贴处至粗糙状态，利用胶水、橡皮泥粘贴牢固测试元件。

2) 模型构建：将围岩相似材料分层装入模型箱内，每次填入厚度为 20 cm，压实填至隧道底、转换结构、锚索及抗滑桩位置时放入相应的结构模型，随后

继续堆填直至模型顶部。隧道开挖利用气囊法模拟,单个气囊长 10 cm,充气软管接压力表,边填筑围岩边充气,至采集设备数据略有波动为止。在锚索安装前用细砂纸沿长度方向成 45°打磨以去除氧化层。

3) 隧道开挖及监控:将测试元件导线连接至数据

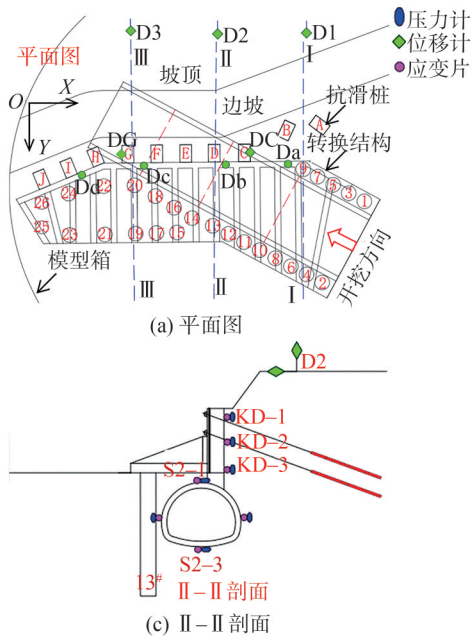


图 4 测点布置

Fig. 4 Arrangement of measuring points

2.3 试验结果与分析

2.3.1 地层位移

图 5 为隧道在开挖过程中既有边坡坡面位移计 D1~D3 测得的位移。由图 5 可知:在隧道开挖破除既有抗滑桩的影响下,围岩主要发生沉降和伴随沉降

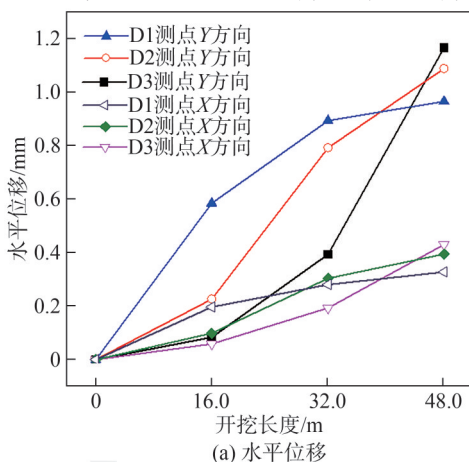


图 5 开挖过程中坡面测点 D1~D3 测得的位移

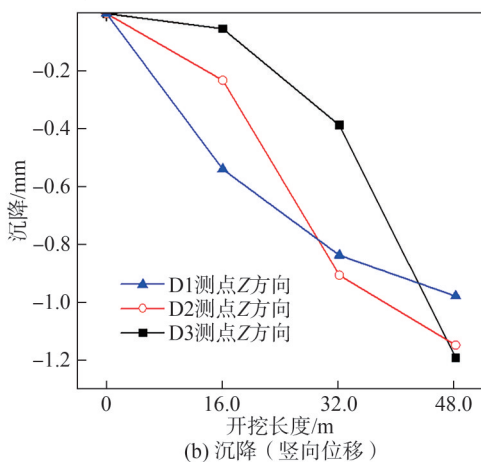
Fig. 5 Slope displacements of the monitoring points D1 to D3 during the excavation process

2.3.2 隧道结构受力变形

考虑到试验范围隧道两侧存在灌注桩,开挖对隧道侧向接触压力的影响相对小,故分析隧道顶、底围岩压力变化情况,如图 6 所示。由图 6 可知,不同测点处围岩压力变化规律相近,隧道开挖卸载诱发应力扰动重分

采集仪,安装调试数据采集系统。由于难以在开挖时放置衬砌结构,需提前放置在围岩中,通过气囊压力实现无附加变形,因此无法模拟分部开挖效应,气囊缓慢泄压放气后衬砌起作用。每个气囊泄压完成后,待其静置稳定后再进行下一步操作。

指向临空面的侧移;各测点位移在到达掌子面前明显增加,在通过后逐渐趋于稳定;隧道开挖诱发的坡面最大侧移、沉降分别为 1.17 mm 及 1.19 mm;围岩受抗滑桩截断和隧道开挖力学扰动较小,边坡稳定性可控。



布,部分围岩自重应力调整作用于隧道结构,使其压力增大。拱顶、底最大压力增量为 7.21 和 8.29 kPa,出现在 S3 处;最大压力变化率出现在 S2 处,为 28.3%,该断面覆土浅而初始应力小;S3 断面覆土更深,但 S3 断面隧道中心处接近抗滑桩正下方,局部抗滑桩截断后,在转换

结构作用下,与围岩的接触压力显著增大,对相邻局部围岩的侧向剪切约束增强,抑制了围岩向下滑移变形,竖向自重应力释放变小,故其隧道压力变化率较S2小。

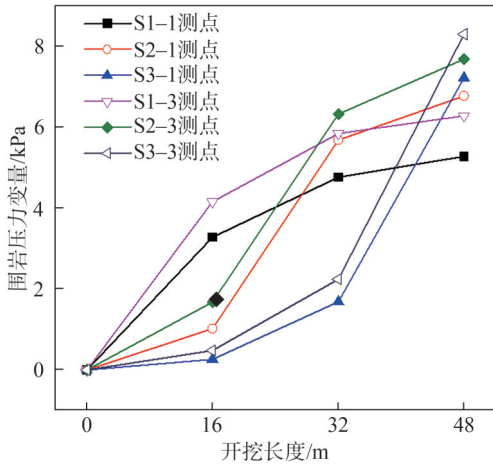


图 6 隧道顶、底围岩压力变化量

Fig. 6 Surrounding rock pressure variables at the top and bottom of tunnel

图 7 为隧道顶、底应变曲线。由图 7 可知,隧道开挖引起顶、底收敛变形,3 个截面变形发展规律相近,即距掌子面越近变形值越大,过掌子面后达到峰值并趋于稳定。与压力分布规律相对应,最大应变出现在 S3 断面,具有明显的非线性特性,对应的整体应变水平也较低,最大值为 58.28×10^{-6} 。

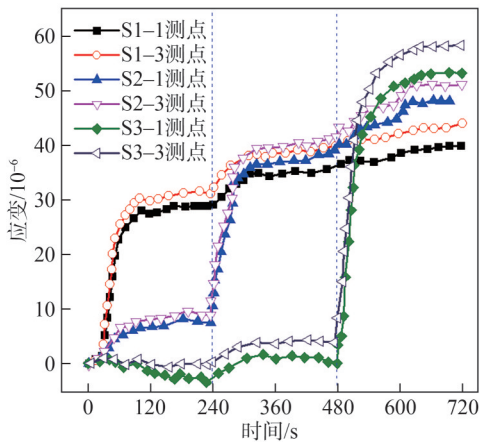


图 7 隧道顶、底应变曲线

Fig. 7 Strain curves at the top and bottom of the tunnel

软岩中隧道开挖不仅受到开挖初时瞬时变形的影响,还存在较明显的时间效应。试验开挖至 S2 与 S3 断面对应的的时间约为 180 s 和 420 s,隧道变形则在 260 s、480 s 时才显著增加,可见围岩扰动后变形需经过一定时间的发展,呈现出软岩变形的滞后性,且在发生变形突变后表征出一定的软岩蠕变特征。

2.3.3 转换结构变形

图 8 为转换结构挡墙和灌注桩应变。由图 8 可知:

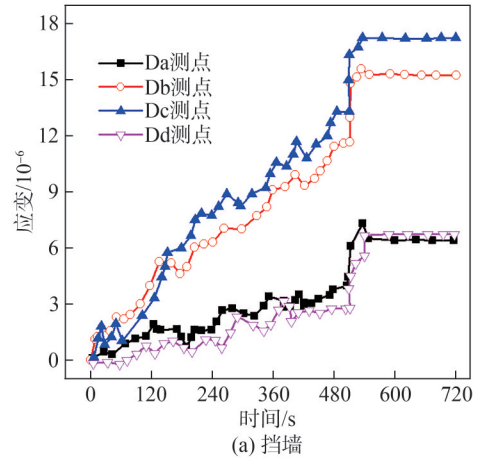
1)隧道开挖应力扰动扩散、衰减后传递至转换结

构,使该结构出现指向边坡和开挖临空面的挠曲变形,且应变较隧道明显更小,最大值仅为隧道最大应变的 30%;

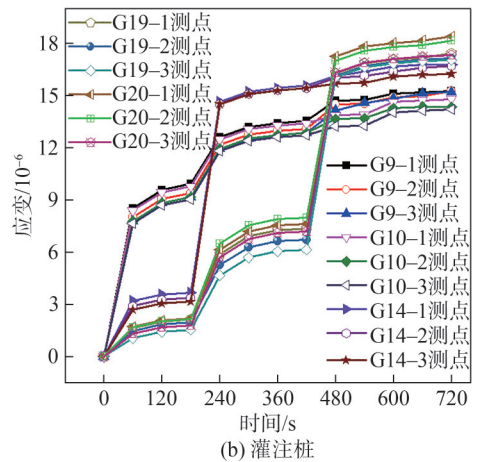
2)转换结构变形随开挖进度的推进而增大,转换结构墙体仅在抗滑桩截断时出现应变突增,桩基在到达掌子面后发生应变显增,且变形均体现出瞬时特性;

3)转换体系墙体最大应变出现在截断桩范围的 Db、Dc 位置,且越往两侧应变越小,相邻桩对应的 Da 和 Dd 位置应变减小约 71%,抗滑桩截断对既有边坡支挡影响范围为相邻桩基;

4)转换体系灌注桩应变响应排序是 $G20 > G19 > G14 > G9 > G10$,表现为越靠近截断桩响应越明显,且各桩基最大应变相差不大,体现出转换结构较好的整体性。



(a) 挡墙



(b) 灌注桩

图 8 转换结构应变

Fig. 8 Transfer structural strains

2.3.4 截断抗滑桩变形

隧道开挖引起的截断抗滑桩变形特性是评价结构转换后隧道施工安全性的重要指标。截断抗滑桩应变与水平位移分别如图 9、10 所示。转换结构与既有抗滑桩要保证可靠连接,通过大刚度的转换结构,可有效抑制隧道开挖截断抗滑桩引起的位移及应力扰动。

由图 9、10 可知:断面 S3 位于截断抗滑桩后,为最大应变断面,该位置抗滑桩最大应变为 13.6×10^{-6} ,受隧道

开挖影响很小;截断抗滑桩顶发生 1.22 mm 的最大侧移,与坡面位移相当。分析上述试验结果不难判断,依托工程转换体系可保证隧道安全实施,转换结构方案具备合理性。

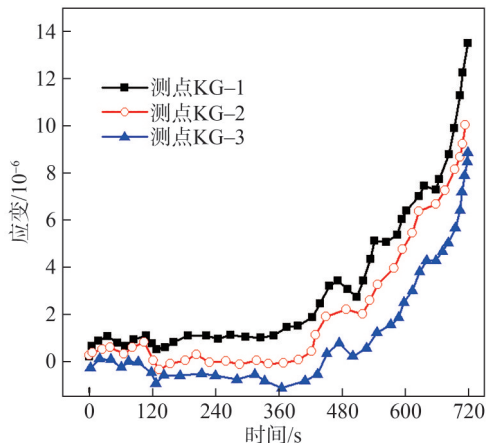


图 9 截断抗滑桩应变

Fig. 9 Truncated anti-slide pile strains

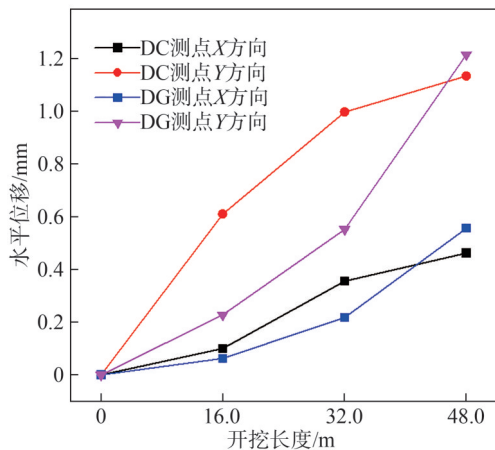


图 10 截断抗滑桩水平位移

Fig. 10 Truncated anti-slide pile displacements

3 3维数值分析

模型试验真实表征了隧道的开挖过程,但受限于试验模拟条件,试验成果并未得到完整的体现,如既有建筑力学响应规律、围岩塑性变形形态等。故本文充分发挥数值计算的优势,进行隧道开挖破除抗滑桩过程 3 维仿真计算,并与试验结果对比分析,进一步揭示隧道开挖扰动特性。

3.1 计算模型

模型计算需充分考虑边界效应,根据隧洞开挖扰动后围岩二次应力场的空间分布特征^[28],以及隧道开挖 5D(D 为隧道宽)范围外受影响甚微^[29],确定模型计算范围为 X、Y 及 Z 方向分别取 165、150、80 m,计算模型如图 11 所示。计算模型四周施加法向位移约束,底部施加竖向位移约束,顶部不加任何约束。

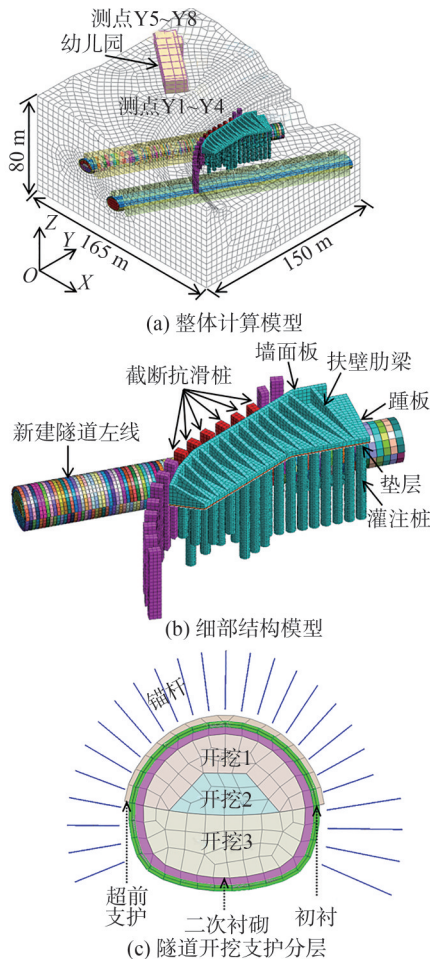


图 11 隧道开挖的 3 维计算模型

Fig. 11 3D calculation model of tunnel excavation

模型利用实体单元模拟围岩、转换结构、隧道超前支护、隧道二次衬砌及抗滑桩,利用梁单元模拟锚杆(索)和既有建筑梁、柱,采用壳单元模拟隧道初衬、既有建筑墙板及边坡挡土墙。模型所涉及到的结构采用弹性本构模型,岩层采用摩尔-库仑弹塑性本构模型,具体参数见表 2。

表 2 3 维模型计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of the 3D model

| 结构(材料)名称 | 重度 γ / (kN·m ⁻³) | 弹性模量 E / MPa | 泊松比 μ | 摩擦角 ϕ / (°) | 黏聚力 c / kPa |
|----------|-------------------------------------|----------------------|-----------|------------------|---------------|
| 岩层 | 22.50 | 285.00 | 0.35 | 24.00 | 290.00 |
| C30 | 24.50 | 3.00×10 ⁴ | 0.17 | | |
| C35 | 25.00 | 3.15×10 ⁴ | 0.17 | | |
| Q235 钢 | 78.50 | 2.06×10 ⁴ | 0.30 | | |

通过修改边界属性的形式赋予灌注桩、抗滑桩、超前支护及二次衬砌结构对应的属性。网格设定六面体自动划分,通过设置无厚度的界面单元^[30-32]模拟桩岩相互作用,界面遵循摩尔-库仑摩擦非线性特征,其力学指标由所用软件属性助手自动获取。

对隧道拱顶厚 0.6 m、180°范围的土层赋予超前注

浆属性。隧道初期支护包含了多种结构,模型复杂且没必要将其全部建出,所以利用刚度等效的思路,将初喷混、钢筋网、钢拱架及复喷混中钢拱架、钢筋网模量折算成混凝土,等效弹性模量由式(1)^[33]计算确定,初期支护和临时钢拱架采用0.35 m厚的壳。

$$E = E_0 + \frac{S_g E_g}{S_c} \quad (1)$$

式中: E 为等效弹性模量,MPa; E_0 为喷混弹性模量,MPa; S_g 为钢拱架/钢筋网截面积, m^2 ; E_g 为钢拱架/钢筋网弹性模量,MPa; S_c 为混凝土截面积, m^2 。

3.2 计算工况

模型计算区域包括139 m长的左线隧道和169 m长的右线隧道,根据坡上幼儿园结构受隧道开挖影响特性,结合必要性和运营成本,左线隧道掌子面在建筑物前后3D内开挖进尺取1 m,其余位置隧道开挖进

尺取2 m,在左线隧道实施开挖后对右线一次性开挖。

首先,计算初始应力;得到初始应力场后,进行隧道开挖支护计算分析,含120个计算步,包括转换结构实施、隧道分部开挖;每个进尺分3部分开挖支护,结合图11步序:超前支护→开挖1(同步初衬)→开挖2→开挖3(同步初衬)→二衬施作。

3.3 与试验结果对比分析

数值模型计算区域显著大于试验范围,对试验范围内隧道典型开挖工况坡顶D3测点的计算值与试验结果进行对比分析,如图12所示。由图12可知:模型试验与数值计算在关键点处的位移规律和量值吻合较好;数值计算结果总体略大于试验监测数据,最大相差约10%,这是因为试验未考虑分部开挖,初期衬砌结构发挥了作用。由此,可判断试验与数值模型均具备一定的合理性。

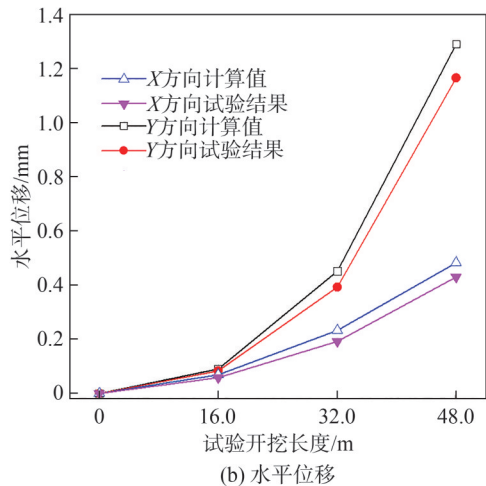
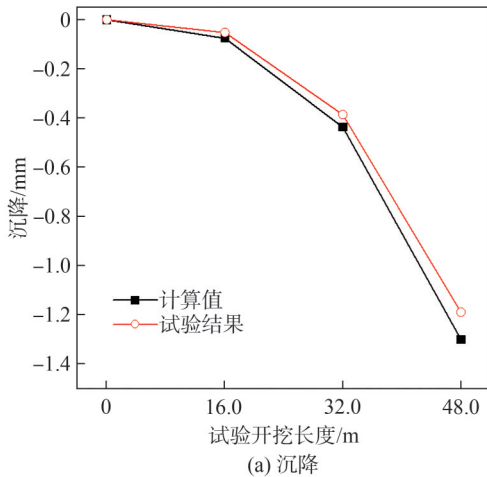


图12 坡顶D3测点变形计算与试验结果对比

Fig. 12 Comparison of calculation deformation for the D3 at the slope crest with experimental results

3.4 转换结构受力分析

图13为隧道开挖后转换结构位移云图。由图13可见,转换结构整体表现为水平向外侧倾斜及竖向沉

降,最大水平、竖向位移分别为2.11 mm和3.86 mm,出现在墙面板Db、Dc位置,与试验结果(图8)吻合,显著小于位移控制值15 mm。

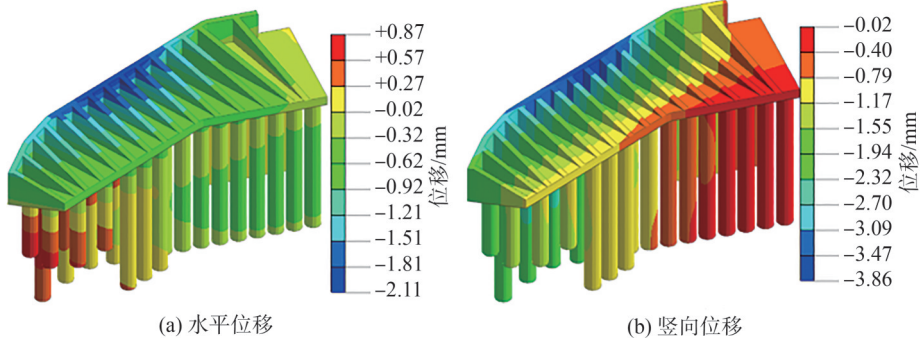


图13 隧道开挖后转换结构位移云图

Fig. 13 Displacement contour of the transfer structure after tunnel excavation

图14为转换结构应力云图。由图14可以看出,结构主要承受拉应力,与图13变形结果对应,在截桩位置墙面内侧出现较为明显的应力集中,最大值为

1.1 MPa,小于抗拉强度设计值而未开裂。结合应变和位移结果不难判断,隧道开挖后转换结构能满足可靠性要求,处于整体稳定状态。

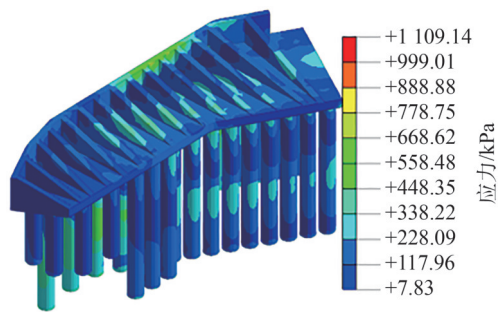
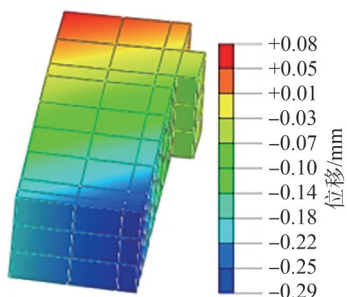


图 14 转换结构应力云图

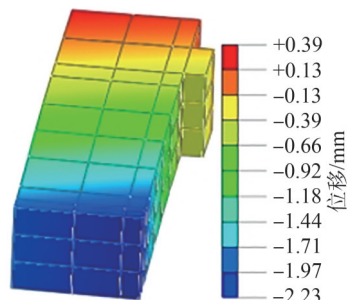
Fig. 14 Stress contour of transfer structure

3.5 既有建筑物受力分析

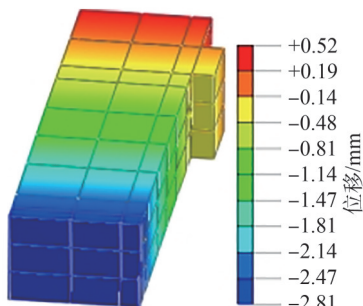
图 15 为既有建筑(幼儿园)在不同典型工况下的位移云图。



(a) 施作转换结构



(b) 左线隧道开挖完



(c) 右线隧道开挖完

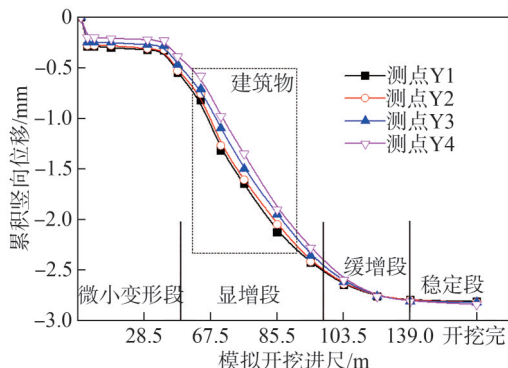
图 15 幼儿园在不同典型工况下的位移云图

Fig. 15 Displacement contour of the kindergarten under different typical work conditions

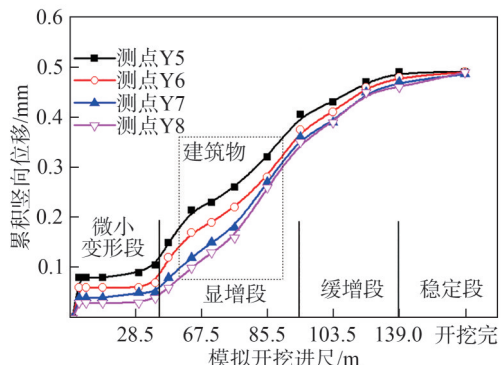
由图 15 可知:紧邻隧道侧的幼儿园结构受影响最大,沉降最大为 2.81 mm;远离隧道侧因外侧沉降,整体框架结构倾斜而出现细微上翘,最大值为 0.39 mm。因此,幼儿园结构产生的最大倾斜为 0.7%,小于控制

值 2.0‰。

为准确描述幼儿园位移特性,提取其靠近和远离隧道两侧 4 分点沉降值并绘制既有建筑(幼儿园)位移发展规律,如图 16 所示。由图 16 可知,在隧道开挖过程中,幼儿园位移变化主要经历 4 个阶段,包括:1)微小变形段,开挖掌子面前大于 3D 位置;2)变形显增段,掌子面前后 2D 范围内,此时受开挖应力扰动明显;3)变形缓增段,在掌子面后 2D~3D 范围,由于该区域的初期支护已经完工,二次衬砌也已成环,变形逐渐减小;4)变形稳定段,在掌子面通过幼儿园距离达到 3D 后,变形趋于稳定。



(a) 测点 Y1~4 位移



(b) 测点 Y5~8 位移

图 16 幼儿园位移发展规律

Fig. 16 Displacement development law of the kindergarten

图 17 为既有建筑(幼儿园)应力云图。由图 17 可知,在整体微倾作用下,既有结构发生挠曲变形,承受

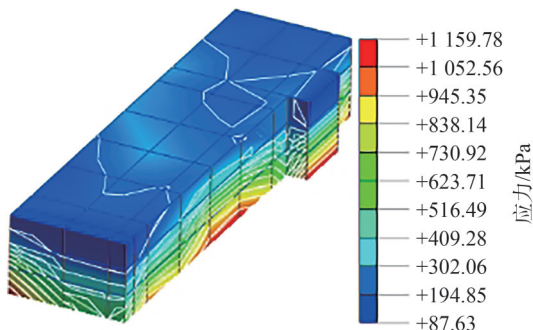


图 17 幼儿园结构应力云图

Fig. 17 Structural stress contour of kindergarten structure

拉应力,最大值为 1.16 MPa,出现在墙底,小于抗拉强度设计值 1.43 MPa。结合现场检测结果判断,结构未出现附加裂隙,综合图 16 认为可保证安全。

3.6 围岩塑性变形特征

为了探究隧道施工围岩潜在破坏特征,选取隧道开挖后围岩等效塑性区进行分析,结果如图 18 所示。由图 18 可知,隧道开挖围岩塑性应变主要出现在左线隧道右侧拱腰和截断抗滑桩边坡坡脚处,隧道侧整体塑性区沿左右隧道连线呈非对称分布,坡脚塑性区则近似呈对称分布。

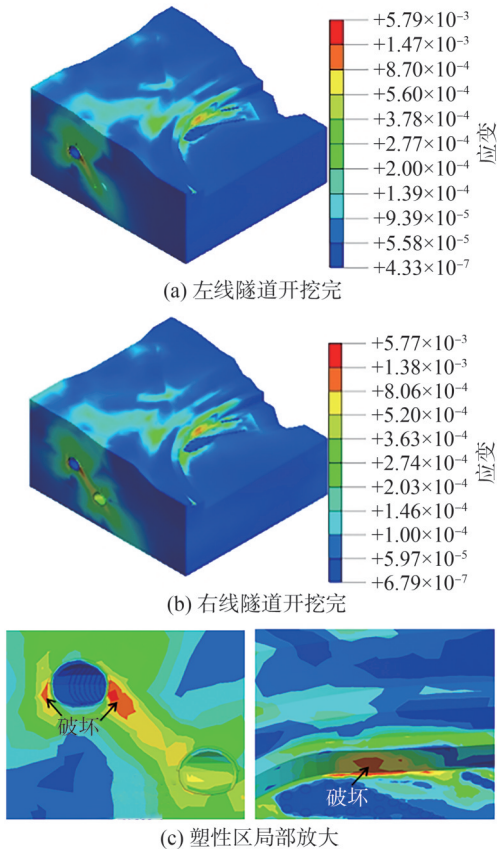


图 18 围岩塑性区云图

Fig. 18 Plastic zone contour of surrounding rock

围岩模拟使用理想弹塑性本构模型,该类本构模型给出了围岩从弹性变形到塑性变形的判据,缺乏由塑性变形到破坏的判据,因此肖明清等^[34]提出将围岩极限应变作为破坏判据。本文隧道围岩极限拉应变约为 1.2×10^{-3} ,图 18(c)显示,左线隧道拱腰外侧和坡脚局部应变超过了极限值,围岩发生了剪切破坏,塑性区未贯通,仍能保证整体围岩稳定。

基于上述分析,类似空间关系的双线隧道的薄弱处在两者连线上部隧道拱腰位置,在施工中应重点关注及防治该位置的塑性破坏,预留围岩变形空间,确保隧道结构的可靠性;相比之下,边坡坡脚前设置有转换结构,此处保证围岩整体稳定即可。

此外,由强度折减法(SRM)计算发现,既有边坡安全系数大于 1.35,处于稳定状态,从侧面表明本文坡面位移分析结果的合理性。

4 结论

1)在开挖破除抗滑桩的影响下,隧道围岩主要发生沉降及伴随沉降的侧移,位移在到达掌子面前明显增加,通过后逐渐趋于稳定;隧道开挖诱发的坡面最大位移为 1.19 mm,围岩受截断抗滑桩开挖影响可控。

2)隧道开挖诱发应力扰动重分布,局部围岩自重、构造应力调整促使隧道结构接触压力和应变增大,浅覆土区最大压力增加 28.3%,最大应变增加 58.28×10^{-6} 。隧道开挖围岩除受到瞬时变形影响外,还存在明显的时间效应,表征出了软岩变形的滞后性。

3)隧道开挖扰动扩散传递至转换结构,使其发生挠曲变形,最大应变为隧道应变的 30%,与开挖进度呈正相关,并在抗滑桩截断时出现应变突增,具有变形瞬时性,开挖破除抗滑桩对既有边坡的影响范围为相邻桩。

4)截断抗滑桩受隧道开挖影响很小,既有边坡稳定系数大于 1.35,处于整体稳定状态;结合围岩和隧道结构响应认为,设计的转换结构可有效抑制隧道开挖截断抗滑桩时的力学扰动,能够保证隧道安全实施。

5)隧道开挖过程邻近既有建筑主要经历微小变形(掌子面前大于 3D 范围)→变形显增(掌子面前后 2D 范围内)→变形缓增(掌子面后 2D~3D 范围内)→变形稳定(掌子面后大于 3D 范围),共 4 个阶段。空间错层双线隧道薄弱处在两者连线上部隧道拱腰位置,在施工中应重点防治斜上方隧道拱腰处的塑性破坏。

参考文献:

- [1] Guo Xinxin, Wang Bo, Wang Zhenyu, et al. Methods and practices for deformation prediction in high-stress soft rock tunnels considering creep characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(3): 652-660. [郭新新,汪波,王振宇,等.考虑蠕变特性的高应力软岩隧道变形预测方法与实践[J].岩土工程学报, 2023, 45(3): 652-660.]
- [2] Zhao Liangliang, Yang Wenbo, Pan Wentao, et al. Study on model test and numerical simulation of layered soft rock tunnel construction with different large deformation grades[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(2): 454-467. [赵光亮,杨文波,潘文韬,等.不同大变形等级的层状软岩隧道施工模型试验与数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报, 2024, 43(2): 454-467.]
- [3] Wang Kezhong, Xiong Yu, Li Sheng, et al. Deformation

- characteristics analysis of temporary support in unsymmetrical loading tunnel excavation under composite support[J]. *Symmetry*,2023,15(4):830.
- [4] Wang Feifei, Ren Qingyang, Yang Xianyi, et al. Study on dynamic response characteristics of shallow-buried and unsymmetrical-loaded double-arch tunnel[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*,2023,41(1):257–269.
- [5] Chen Zongping, Liang Yan, Ye Peihuan, et al. Experimental and finite element analysis on mechanical performance of prefabricated assembly inverted arch to lining joints of large section highway tunnel under direct shear loading[J]. *Structures*,2024,59:105764.
- [6] Zhang Junru, Wu Jie, Yan Congwen, et al. Construction technology of super-large section of highway tunnels with four or more lanes in China[J]. *China Journal of Highway and Transport*,2020,33(1):14–31. [张俊儒, 吴洁, 严丛文, 等. 中国四车道及以上超大断面公路隧道修建技术的发展[J]. *中国公路学报*,2020,33(1):14–31.]
- [7] Yu Guo, Li Haitao, Zhang Dongming. Simulation study on electromagnetic response characteristics of unfavorable geological body under complex conditions[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*,2021,39(5):3371–3382.
- [8] Gokceoglu C, Aygar E B, Nefeslioglu H A, et al. A geotechnical perspective on a complex geological environment in a high-speed railway tunnel excavation (a case study from türkiye)[J]. *Infrastructures*,2022,7(11):155.
- [9] Liu Xinrong, Xiao Yu, Han Yafeng, et al. Model tests on interaction between tunnel-type anchorage and underpass tunnel[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,2022,44(11):1978–1987. [刘新荣, 肖宇, 韩亚峰, 等. 隧道锚与下穿隧道相互影响的模型试验研究[J]. *岩土工程学报*,2022,44(11):1978–1987.]
- [10] Jahromi H F, Jafarzadeh F, Zakaria M S. Experimental study of burial depth effect on embedded pipe deformations in sandy slopes under dynamic landsliding[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*,2018,114:281–297.
- [11] Vlachopoulos N, Vazaios I, Madjrabadi B M. Investigation into the influence of excavation of twin-bored tunnels within weak rock masses adjacent to slopes[J]. *Canadian Geotechnical Journal*,2018,55(11):1533–1551.
- [12] Tao Zhigang, Zhang Qingzhou, Yang Xiaojie, et al. Physical model test study on the influence of tunnel excavation on the stability of loose accumulation slope[J]. *Journal of China Coal Society*,2022,47(S1):61–76. [陶志刚, 张庆周, 杨晓杰, 等. 下穿隧道开挖对松散堆积边坡稳定性影响的物理模型试验研究[J]. *煤炭学报*,2022,47(S1):61–76.]
- [13] Zhang Zhiguo, Mao Mindong, Pany T, et al. Research status and prospect of tunnel–landslide interaction and control protection technology[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2021,42(11):3101–3125. [张治国, 毛敏东, Pany T, 等. 隧道–滑坡相互作用影响及控制防护技术研究现状与展望[J]. *岩土力学*,2021,42(11):3101–3125.]
- [14] Wu Honggang, Wu Daoyong, Ma Huimin, et al. Study on tunnel–landslide series and tunnel deformation mode[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2012,31(S2):3632–3642. [吴红刚, 吴道勇, 马惠民, 等. 隧道–滑坡体系类型和隧道变形模式研究[J]. *岩石力学与工程学报*,2012,31(S2):3632–3642.]
- [15] Zhang Yufang, Li Jian, Liu Hongyu, et al. Research on the interaction mechanism between landslide and tunnel engineering[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*,2021,2021:2265459.
- [16] Sun Fanwen, Zhang Dingli, Fang Huangcheng, et al. Analytical solution of ground displacement responses induced by shallowly tunneling in stratum with a cavity[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*,2023,54(3):1109–1120. [孙凡文, 张顶立, 方黄城, 等. 浅埋隧道开挖扰动下含空洞地层位移响应解析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*,2023,54(3):1109–1120.]
- [17] Zhang Jianzhi, Yu Jin, Zhang Xiaoyan, et al. Displacement release coefficient method for spatiotemporal deformations of rocky tunnels during construction[J]. *Advanced Engineering Sciences*,2019,51(2):98–107. [张建智, 俞缙, 张小燕, 等. 岩质隧道施工过程变形时空问题的位移释放系数法[J]. *工程科学与技术*,2019,51(2):98–107.]
- [18] Aygar E B. Evaluation of the relationship between the collapsed mechanism and excavation method in tunnels excavated in schists[J]. *Scientific Reports*,2022,12:21274.
- [19] Li Ao, Zhang Dingli, Huang Jun, et al. Progressive collapse mechanism and safety control of deep buried tunnel vault in soft and broken surrounding rock[J]. *Advanced Engineering Sciences*,2022,54(6):85–96. [李奥, 张顶立, 黄俊, 等. 软弱破碎围岩深埋隧道拱顶渐进性塌方机理及控制[J]. *工程科学与技术*,2022,54(6):85–96.]
- [20] Fu Helin, Jiang Zhibo, Qiu Qiong, et al. Influence and optimization of blasting of shallow-buried tunnel on sensitive buildings[J]. *Journal of Railway Engineering Society*,2023,40(3):71–78. [傅鹤林, 姜智博, 邱琼, 等. 浅埋暗挖隧道爆破对敏感建筑物的影响及优化[J]. *铁道工程学报*,2023,40(3):71–78.]
- [21] Deng Xianghui, Wang Jingyuan, Yang Jun, et al. Peak particle velocity of adjacent residential buildings influenced by blasting construction of subway tunnel[J]. *China Earthquake Engineering Journal*,2022,44(1):17–21. [邓祥辉, 王靖媛, 杨俊, 等. 地铁隧道爆破施工影响的邻近居民楼质点峰值振速研究[J]. *地震工程学报*,2022,44(1):17–21.]

- [22] Gu Xin, Chen Fuyong, Zhang Wengang, et al. Numerical investigation of pile responses induced by adjacent tunnel excavation in spatially variable clays[J]. *Underground Space*, 2022, 7(5): 911–927.
- [23] Houhou M N, Amari T, Belouar A. Three-dimensional numerical analyses of pile responses to tunneling-induced ground movements in bilayer soil[J]. *World Journal of Engineering*, 2024, 21(1): 71–90.
- [24] Aswathy M S, Vinoth M. Twin tunnelling caused distortions and its effect on a hospital building on mixed ground conditions[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 17(1): 10–25.
- [25] Mirsepahi M, Nayeri A, Lajevardi S H, et al. Performance of side-by-side twin tunnel excavation under a single pile and pile group by the NATM[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2023, 59(6): 537–543.
- [26] Ding Zude, Wang Shunguo, Chen Yusheng, et al. Model test study on fault dislocation response of tunnel composite support structure across active faults[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(6): 2173–2187. [丁祖德, 王顺国, 陈誉升, 等. 跨活断层隧道组合支护结构断层错动响应模型试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(6): 2173–2187.]
- [27] Yang Changwei, Zhang Liang, Zhang Kaiwen, et al. Large scale shaking table model test on seismic response of mountain tunnel portal section passing through fault zone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(4): 993–1002. [杨长卫, 张良, 张凯文, 等. 山岭隧道跨断裂带段及洞口段地震响应大型振动台模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(4): 993–1002.]
- [28] Liu Shaofeng, Zhu Pinghua, Hu Kun, et al. Laboratory model test on maximum radial displacement of the rock tunnel excavation[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(4): 748–753. [刘少峰, 朱平华, 胡坤, 等. 岩质隧道开挖最大径向位移的室内模型试验[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(4): 748–753.]
- [29] Li Yayong, Jin Xiaoguang, Lv Zhitao, et al. Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 56: 22–33.
- [30] Ghalamzan Esfahani F, Gajo A. A zero-thickness interface element incorporating hydro-chemo-mechanical coupling and rate-dependency[J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(1): 197–220.
- [31] Yang Chunshan, Wei Lixin, Mo Haihong. Impact on and prediction of segment opening of shield tunnels under seismic action[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(1): 133–140. [杨春山, 魏立新, 莫海鸿. 地震作用对盾构隧道管片张开量的影响及预测[J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(1): 133–140.]
- [32] Kong Xianjing, Liu Jingmao, Zou Degao, et al. State-of-the-art: Computational model for soil–interface–structure system[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(3): 397–405. [孔宪京, 刘京茂, 邹德高, 等. 土–界面–结构体系计算模型研究进展[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(3): 397–405.]
- [33] Yang Chunshan, Yang Xueqiang, Wang Yatian, et al. Optimization of the design and construction scheme of tunnel entry and conversion system for removal of anti-slide pile in architecturally sensitive area[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2023, 60(6): 220–227. [杨春山, 杨雪强, 王雅甜, 等. 建筑敏感区隧道破除抗滑桩进洞转换体系设计与施工方案优选[J]. *现代隧道技术*, 2023, 60(6): 220–227.]
- [34] Xiao Mingqing, Xu Chen, Yang Jian, et al. Study on the identification method of tunnel surrounding rock failure zone based on continuous discontinuous analysis theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(11): 3099–3108. [肖明清, 徐晨, 杨剑, 等. 基于连续–非连续分析理论的隧道围岩破坏区判别方法研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(11): 3099–3108.]

Test and Numerical Analysis of Tunnel Excavation Disturbance Breaking Anti-slide Pile in Building Sensitive Area

YANG Chunshan¹, WEI Lixin¹, WANG Yatian², LI Yadong³, MA Hui¹

(1. Guangzhou Municipal Eng. Design & Research Inst. Co., Ltd., Guangzhou 510060, China;

2. School of Civil and Traffic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

3. College of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract:

Objective The current research on excavation disturbance in mountain tunnels is mostly confined to primarily focused on surrounding rock deformation and stability, tunnel structural load-bearing capacity and design, as well as aspects such as asymmetric loading, excavation impacts and control. However, there is no precedent or well-documented case study for the excavation of tunnels in sensitive construction areas that involves dismantling existing high slope retaining structures, and the key issues and challenges involved are rarely reported. Therefore, it is necessary to propose a reasonable and feasible transfer system scheme specifically for the excavation of breaking anti-slide pile in mountain tunnels. This

would involve clarifying the mechanical response characteristics of surrounding rocks, tunnels and sensitive structures under excavation disturbance, and elucidating the plastic deformation patterns and potential failure modes of the surrounding rocks.

Methods Depending on the Panzihua Sunshine tunnel project and the principle of similarity ratio, a 1:40 scale model test device was constructed to investigate the mechanical response characteristics of the surrounding rock and its structure under the disturbance of tunnel excavation by carrying out the model test of tunnel breaking anti-slide pile. Based on the model test, a 3D fine model considering the interaction of tunnel, slope, conversion system, sensitive building, and surrounding rock was developed using numerical methods and compared with the test results to verify the accuracy and reliability of the two research methods. Therefore, the force characteristics of the transfer structure, and the influence characteristics of the existing sensitive buildings could be further analyzed, and the plastic deformation regulation, as well as its potential damage mechanism of the surrounding rock, could be clarified. The model test and numerical calculation are in good agreement with the displacement law and value at the key points. The numerical calculation results are generally slightly larger than the test monitoring data, and the maximum difference is 10% indicating that the methods used are reasonable.

Results and Discussions The results show that under the influence of anti-slide piles breaking during tunnel excavation, the surrounding rock mainly underwent settlement with lateral displacement, which significantly increased before the arrival of the excavation face and gradually stabilized after passing through. Moreover, the maximum displacement of the slope caused by the tunnel excavation is 1.19 mm, and the influence on the surrounding rock from tunnel construction is well controlled. Stress disturbance redistribution is induced by tunnel excavation, and the tunnel-surrounding rock contact pressure and strain increase caused by local surrounding rock self-weight adjustment, with the maximum pressure in the shallow overburden area and the maximum strain increased by 28.3% and 58.28×10^{-6} , respectively. In addition to the transient deformation, tunnel excavation is obviously affected by the time effect, which shows the lagging of soft rock deformation. Tunnel excavation disturbance diffusely and attenuatively transferred to the conversion structure and caused its flexure deformation, with the maximum strain being 30% of the maximum value of the tunnel structure. The flexure deformation is inversely correlated with the distance from the excavation face, and a sudden increase in strain occurs during the anti-slide piles breaking process. With transient deformation characteristics, the impact of the existing slope is mainly in the range of the neighboring piles of the breaking anti-slide piles. The breaking of anti-slide piles is merely impacted by the tunnel excavation, with the existing slope stability factor being higher than 1.35 and in an overall stable state. Combining with the structural responses of the surrounding rock and tunnel, it was concluded that the conversion structure could effectively inhibit the mechanical turbulence and ensure the tunneling safety. The neighboring existing buildings mainly experienced the sections of a small deformation, significantly-increased deformation, slowly-increased deformation, and deformation stabilization during the tunnel excavation process. The weak area of the space staggered tunnel is in the hance position of the upper tunnel above the connecting line, and preventing the plastic damage on the hance position of the oblique upper tunnel should be focused on during the construction.

Conclusions The research results provide a scientific basis for the scheme design and field implementation of the background project, and have achieved perfect construction results. It has become a regional landmark building that provides a good reference for similar projects.

Key words: mountain tunnel; breaking anti-slide piles; transfer system; excavation disturbance; force deformation; model test; numerical simulation

(编辑 李轶楠)

引用格式: Yang Chunshan, Wei Lixin, Wang Yatian, et al. Test and numerical analysis of tunnel excavation disturbance breaking anti-slide pile in building sensitive area[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2026, 58(1): 192–203. [杨春山, 魏立新, 王雅甜, 等. 建筑敏感区隧道开挖破除抗滑桩扰动试验研究与数值分析[J]. *工程科学与技术*, 2026, 58(1): 192–203.]