

DOI: 10.7672/sgjs2026130145

浅埋山岭隧道修建对生态植被影响的综合分析*

曹东福¹, 李栋栋², 黄景琦², 刘 洋²

(1. 云南省水利水电勘测设计院有限公司, 云南 昆明 650032; 2. 北京科技大学土木工程系, 北京 100083)

[摘要] 浅埋山岭隧道施工建设对生态植被造成的影响主要体现在 2 个方面, 地下水位下降引起根系的水分胁迫响应及地层沉降造成的根系力学损伤效应。对齐家庄隧道邻近古树区水文地质进行分析, 利用 FLAC3D 数值模拟软件建立了渗流-应力耦合数值模型, 将古柏树根系简化成根-土复合锚固单元。研究了施工期隧址区域渗流场时空动态变化规律; 分析了隧道开挖扰动诱发的古树根系变形破坏特征; 基于隧道开挖涌水量的预测定量评估了注浆圈的止水效果。结果表明: 排水条件下隧道建设引起的地下水位下降对地表古树具有一定的影响; 开挖扰动诱发的根系损伤程度较小, 拉应力是根系单元受损的控制因素; 注浆圈对于抑制施工期间的涌水量有明显作用, 但其防渗性能受注浆工艺影响。

[关键词] 隧道; 生态植被; 地下水位; 数值模拟; 渗流-应力耦合

[中图分类号] TU443

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0145-08

Comprehensive Analysis on Impact of Shallow-buried Tunnel Construction on Ecological Vegetation

CAO Dongfu¹, LI Dongdong², HUANG Jingqi², LIU Yang²

(1. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming, Yunnan 650093, China;

2. Department of Civil Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The impact of shallow-buried mountain tunnel construction on ecological vegetation is primarily manifested in two aspects: water stress responses in root systems caused by a drop in the groundwater table and mechanical damage to root systems resulting from ground settlement. An analysis of the hydrogeology in the area surrounding the ancient trees near the Qijiazhuang Tunnel was conducted. Using FLAC3D numerical simulation software, a coupled seepage-stress numerical model was established, with the root systems of the ancient cypress trees simplified into root-soil composite anchorage units. The study investigated the spatiotemporal dynamics of the seepage field in the tunnel site area during the construction period and analyzed the deformation and damage characteristics of the ancient tree root systems induced by tunnel excavation disturbances and quantitatively evaluated the water-stopping effectiveness of the grouting ring based on predictions of water inflow during tunnel excavation. The results indicate that the decline in groundwater level caused by tunnel construction under drainage conditions has a certain impact on the ancient trees at the surface. The extent of root damage induced by excavation disturbance is relatively minor, with tensile stress being the controlling factor for root unit damage. The grouting ring plays a significant role in suppressing water inflow during construction, but its impermeability performance is influenced by the grouting process.

Keywords: tunnels; ecological vegetation; groundwater level; simulation; seepage-stress coupling

0 引言

随着区域经济协调发展的提出, 城际山岭隧道

工程建设需求逐年增多, 有时不可避免穿越生态保护区或珍贵植被^[1-3]。浅埋山岭隧道在施工期对地表植被的生长与生存带来的威胁主要体现在两个方面, 渗水、裂隙水、排水等因素会改变地下水渗流场的分布, 造成地下水位降低, 引发水环境效

* 国家自然科学基金面上项目(52378475)

[作者简介] 曹东福, 高级工程师, 硕士, E-mail: 519345589@qq.com

[收稿日期] 2026-02-25

应^[4-5];根土复合地层应力场和位移场的开挖扰动响应会造成根系不同程度的拉断、撕裂、剪断等损伤,当植被根系损伤程度超过自身可修复的限度,将严重限制植被的生长发育^[6-7]。

工程环境保护近年来也一直备受关注,国内外学者针对地下工程施工对地表植被造成影响和相应的控制措施也开展了大量研究。Gokdemir 等^[8]提出以土壤水基质势作为脆弱性分析指标,将植被的枯萎点纳入环境友好型隧道排水设计,建立土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 模型。高咏等^[9]通过 FEFLOW 地下水模拟软件建立非稳定流数值模型,基于涌水量大小的定量预测,研究了地铁建设对仙鹤门水源地流场动态变化及可能引发的环境水文地质问题。Zheng 等^[10]基于树木年轮宽度探究了隧道排水引起的地下水位下降对马尾松生长速度的影响,研究表明距离隧道轴线 1km 处的树木生长低谷期持续 15 年。但是除了单一生态水位因素,地层的过度沉降同时也产生了一系列生态问题。全占军等^[11]基于遥感及地理信息系统技术,对地表沉陷影响区的植被景观物种进行实时监测,发现原有优势物种退化,植被开始了新一轮发展演替。蒙仲举等^[12]通过调研总结地表沉降、根系赋存及变形破坏特征,认为开挖扰动诱发根系损伤是植被退化的主要原因。潘东江等^[13]将沉陷区优势物种沙柳的根系简化成全长锚固单元和根土复合层,利用 FLAC3D 研究地层扰动后根系单元的细观力学机制和根土复合层的宏观响应特征。

因此,必须结合水文参数和力学效应来分析典型生态敏感区的浅埋隧道开挖诱发的生态环境问题,但相关研究较少。本文以国道 109 新线高速公路段齐家庄隧道工程为依托,基于有限元软件,考虑流固耦合作用,分析遂址区渗流场和地下水位的变化规律,研究开挖扰动作用下根系的力学损伤机制,定量评估注浆圈的止水效果,为友好型山岭隧道建设提供参考。

1 工程概况

国道 109 新线高速公路是北京市重点建设工程项目,东起西六环路军庄立交,西接河北省张涿高速公路,全长约 33.7km。其中,齐家庄隧道位于北京市门头沟区清水镇齐家庄村(见图 1),左线起讫里程 A1K70+075—A1K70+369.14,长度 294.14m,最大埋深 29m;右线 AK70+076.286—AK70+375,长度 298.714m,最大埋深 41m。洞身穿越段地表有 60 多株胸径大于 30cm 的柏树,表层为残坡积土(第四系松散覆盖层),厚度为 0.5~2.0m,以下为强风

化安山岩。经园林局专家鉴定,将胸径大于 30cm 的侧柏认定为古树,因此必须避免施工中引起的地表水位下降及地层过渡沉降对古树的影响。



图 1 线路卫星遥感图像及古树分布
Fig. 1 Linear satellite remote sensing imagery and distribution of ancient trees

据地勘资料显示,未见明显地表径流,隧道主要地下水类型为碎屑岩裂隙水,主要赋存于岩层裂隙中,水量大小受岩体裂隙的发育程度、充填物的密实性和透水性、裂隙的连通性等控制。基岩裂隙水主要由大气降水及地表水体补给,隧道正常涌水量为 265.29m³/d。

2 计算模型及工况

2.1 模型设计

本次数值模拟选取古树所在段 A1K70+115 断面区间为原型,如图 2 所示。采用 FLAC3D 软件建立三维渗流模型,计算过程考虑流固耦合作用。水平方向按 3 倍洞径以上选取,高度方向取实际地面,纵向取一次开挖进尺 2m,则整个计算范围为 130m×82.7m×3m,如图 3 所示。模型左右、底部以及前后边界取为不透水边界,隧道洞壁取压力水头为 0 的边界条件,顶部边界取为自由边界,地下水位面高度 $H=65\text{m}$,隧道开挖前,水位面以下地层均为饱水地层。通过现场古柏根系形态及分布的调研,结合根系分布特点,将根系简化成以主根为竖向、侧根为分支的全长黏结型锚杆,主根和侧根通过共同节点连接。参考已有文献^[14],侧柏单根最大弹性模量可以达到 0.21GPa,单根抗拉强度 2~6MPa,根土界面黏聚力约 5.33kPa,抗剪强度约 82kPa。

2.2 模型参数

模型中围岩物理力学参数由工程地质勘察报告提供,结合文献选用合理的渗透系数、孔隙比等参数,并对照《工程岩体分级标准》提供的各级围岩物理力学指标,围岩及材料计算参数如表 1 所示。

模型其他参数及假定情况如下。

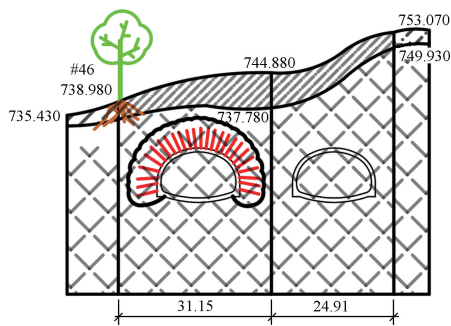


图 2 研究区域地质断面(单位:m)

Fig. 2 Regional geological cross-section(unit :m)

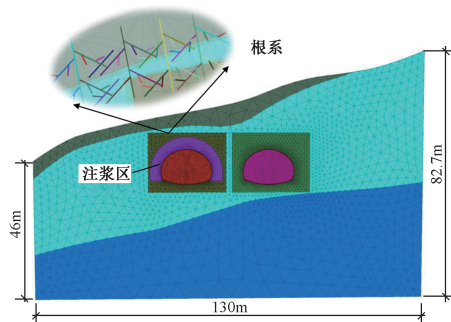


图 3 有限元计算模型

Fig. 3 Finite element computational model

表 1 围岩及材料基本力学参数

Table 1 Basic mechanical properties of surrounding rock and materials							
岩性	弹性模量/ GPa	泊松比	内摩 擦角/ (°)	黏聚力/ MPa	重度/ (kN·m ⁻³)	渗透 系数/ (cm·s ⁻¹)	
残积土	0.021	0.35	22	0.018	1 850	8.2×10 ⁻⁶	
强风化安山岩	1.9	0.33	27	0.150	1 950	5.5×10 ⁻⁴	
中风化安山岩	2.8	0.30	29	0.250	2 000	2.3×10 ⁻⁵	
初期支护	25.0	0.22	—	—	2 500	4.0×10 ⁻⁹	
注浆区	15.0	0.25	—	—	2 400	—	

- 1) 围岩材料选用 Mohr-Coulumb 塑性模型,并等效为连续介质。
- 2) 地下水模拟采用渗流均质流体模型,假定各岩土层的渗透特性具有各向同性。
- 3) 不考虑地下水补给的影响。

2.3 计算工况

如前所述,本文旨在探明隧道开挖对邻近古树的综合影响,具体包括隧道开挖后流场下的水头变化、地层沉降对根系的损伤效应、注浆圈止水效果评估。通过监测关键位置附近孔隙水压力大小变化情况,最终可以得到隧道开挖引起的水位变化;通过监测根系轴向应力及剪应力变化,可以对根系的损伤进行定性分析;通过监测各个时间步的隧道节点不平衡流量,最终得到涌水量随施工进度的变

化。注浆止水效应使浆液充满岩土体裂隙,降低了岩土体的渗透性,封堵优势渗流通道。但是注浆圈的形成质量受注浆工艺与水文地质条件的影响,为了便于数值计算可采取等效模型的方法,按照注浆圈的止水能力,分别近似折算为注浆岩土体当量渗透系数。

3 结果分析

3.1 隧道开挖对渗流场的影响

初始水头高度可通过现场钻孔试验获得,未开挖前隧道自然流场的反演还应综合考虑施工期间降雨的影响,本模型将静水压力水头设定为 65m,对应静水压力水头等值线云图如图 4 所示,沿隧道横断面模拟区域的静水压力近似水平分布,随着深度的增加水头呈逐级递增趋势,由 65m 处的 0,增加到 0m 处的 6.5×10⁵Pa,该趋势与理论计算结果相符。隧道开挖前模拟区域的各级水头等值线分布以及水力坡降都比较均匀,各级水头差值为 0.5×10⁵Pa,且呈现出自然流场下的规律状态,总体呈现较小幅度的变化。

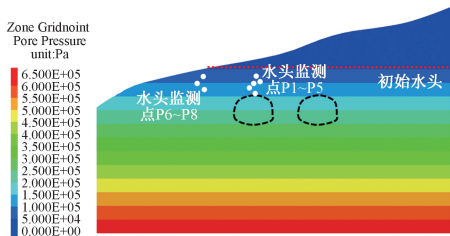


图 4 初始渗流场及孔压监测点布置

Fig. 4 Initial seepage field and pore pressure monitoring point layout

隧道开挖后孔隙水压力随时间的演化规律如图 5 所示,隧道中心岩土体开挖后形成零压临空面,周围水体在孔隙水压差的作用下通过渗流通道不断向隧道汇聚。随着渗流的不断进行,地下水位下降,孔隙水压力零值线相应下移,渗流路径和速度方向也将发生不同程度的改变,初期渗流方向与隧道轮廓线基本垂直,后期水流将沿隧道壁方向入渗,最终形成以隧道为中心类似漏斗状的低汇势渗流场。由于岩土体的渗透系数较小,现场节理和断层均不发育,且齐家庄隧道埋深较浅,隧址上方的静水压力较小,因此不会出现大面积涌水现象。但长期渗水将导致周边孔隙水压力持续降低,呈邻近的隧道降低区、隧道影响范围外的缓慢变化区的空间分布规律。

通过 FLAC3D 对关键点(监测点 P1~P5 为拱顶隧道影响区域、监测点 P6~P8 为古树根系分布区

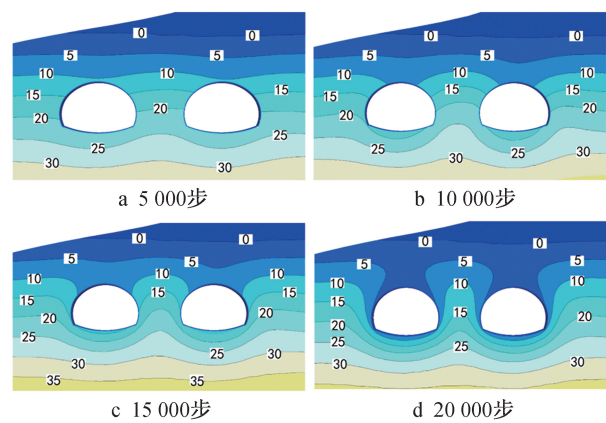


图 5 隧道开挖后不同步下孔隙水压力云图(单位:Pa)

Fig. 5 Cloud map of pore water pressure at different stages following tunnel excavation(unit:Pa)

域)的数据进行提取,获得关键点的水头随时间的变化特征,得出隧址区及邻近典型环境敏感区水文变化情况。隧道中心上方地下水位降深变化曲线如图 6 所示,漏斗区的水位呈指数下降,将导致拱顶上方岩土体处于非饱和状态,如果短期内没有降雨补给或地下水补给,漏斗区将会向外逐渐扩展。得益于岩土体较低的渗透性,地下水的流动不是瞬时的;根系区地下水位降深变化曲线如图 7 所示,远离隧址区(根系区)的水位随时间呈缓慢的线性下降,设定分析时步内,最大水位下降约 1m。但是随着开挖扰动的持续进行,当地下水位下降到一定程度时,根系无法从毛细带吸收足够的水分,将导致植被逐渐枯萎。参考西北干旱地区土壤含水率与地下水位埋深的关系,适宜植被健康生长的地下水位埋深不宜超过 4.5m^[15]。综合分析,齐家庄隧道开挖有必要采取止水措施,以保护古柏正常生长所需的地下水生态平衡埋深。

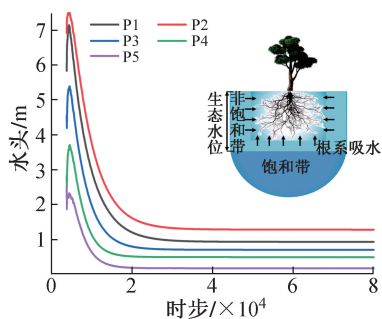


图 6 隧道中心上方地下水位降深变化曲线

Fig. 6 Groundwater level drawdown profile above the tunnel centre

3.2 开挖扰动对根系的影响

如图 8 所示,开挖扰动诱发根系损伤主要为根

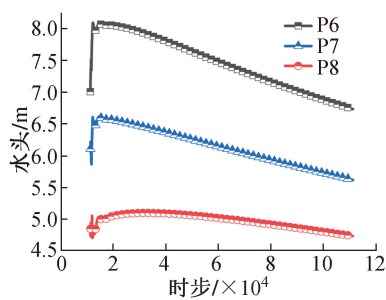


图 7 根系区地下水位降深变化曲线

Fig. 7 Groundwater drawdown profile in the root zone

系拉断和根系剪断。由于根系-土体界面摩擦特性的存在,土体过度沉降将使根系承受拉伸力,若根系所承受的机械拉力超过其自身的强度时,根系将处于拉损伤状态;如果根系-土体拥有较高的界面接触强度,隧道开挖致使周围岩土体收缩,地层错动将使根系承受剪应力^[16],容易致使根系扭曲变形或剪断破坏。但侧柏属于乔木系植物,其根系的细胞组织拥有一定的愈伤和自修复能力,如果开挖扰动造成的根系破坏程度在其可修复范围内,损伤部位通过应力处理机制消除外力负效应,且一定的水分和养分补给之后,将再次具备抵御外力干扰的能力^[17]。因此,本研究将通过 FLAC3D 对开挖扰动范围及根系关键点位置的竖向位移、轴向应力和剪应力进行监测,进而对根系损伤进行评价。

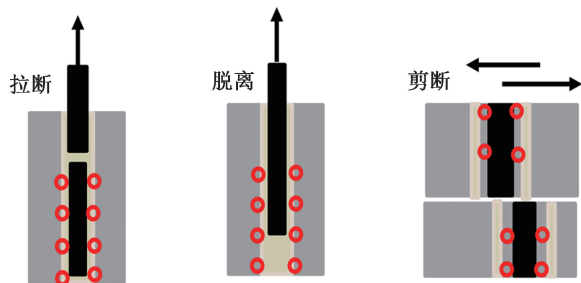


图 8 开挖诱发根系损伤的 3 种情况

Fig. 8 Three scenarios where excavation causes root damage

地层沉降等值线云图及根系变形如图 9 所示,分析可知,考虑地下水影响隧道开挖后,拱顶最大沉降量为 16mm,同时拱底向上抬升最大位移值为 4.5mm。由于齐家庄隧道埋深较浅,且隧址区围岩风化严重,围岩的竖向位移影响达到地表,地表最大沉降处接近 12mm。实际开挖顺序为左线先于右线,且右线埋深较大,故右线隧道沉降值及扰动程度比左线偏大。但位移沉降量总体处于允许范围,开挖扰动区趋势向右扩展,对根系的影响处于利好状态。越靠近隧址区根系的沉降量越大,表明受扰

动的程度也剧烈,最大沉降量为 8.6mm,位于侧根系的末尾段。根系分布错综复杂且相互粘连,当部分细小根系受到机械力作用时,将会传递至主根系并进一步蔓延。

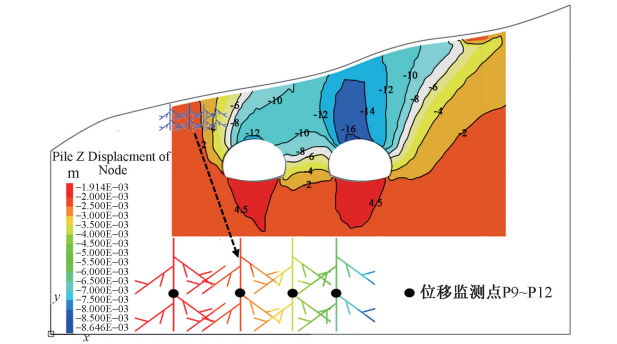


图 9 地层沉降等值线云图及根系变形

Fig. 9 Cloud map of stratum subsidence and root deformation

图 10 进一步展示了主根系竖向沉降随时间的变化及根系轴向应力分布。由图 10 可知,根系响应时间几乎与开挖扰动是同步的,即扰动-变形-受损。如前文所述,空间位置靠近隧址区的根系沉降量较大,最大沉降量为 6.5mm。由于主根系弹性模量一般高于周边地层弹性模量,其随地层下沉,将处于受力拉直状态。从根系轴向应力分布可知,主根系主要承受拉应力,最大拉应力为 53kPa,其分布位置与最大沉降位置吻合。根系承受的最大轴向应力低于其极限抗拉强度,不会发生永久性拉断损伤,但如果根系承受的轴向拉应力大于土壤-根系界面摩擦力,界面将发生剥离,根系将脱离原来位置。短时间内将会影响根系对水分及营养元素的获取,进而影响植物的活性。

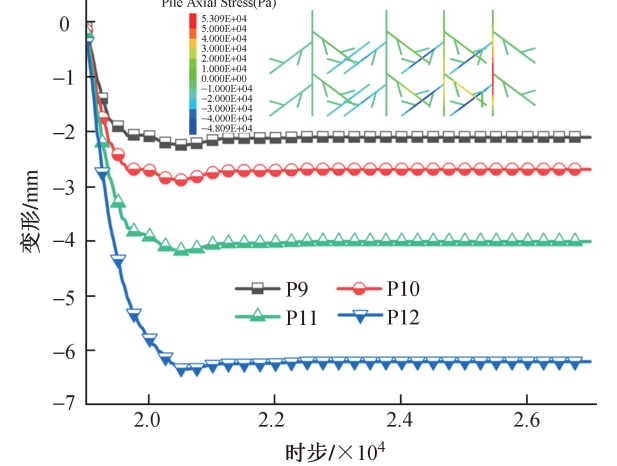


图 10 根系轴向应力分布及变形规律

Fig. 10 Axial stress distribution and deformation patterns in root systems

根系是植物最主要器官之一,是植物生长中获取水分和营养物质的重要保证。植物根系受到外界胁迫时,根系的受力状况及损伤形式与土层的运动状态相关^[18]。隧道开挖后,在上方区域易形成高剪应力区,容易导致周边围岩处于剪切塑性状态。如果围岩的塑性圈传递至根土复合层,易导致根系的剪损伤。根系剪应力分布及随开挖时步的变化如图 11 所示,根系整体受剪应力的影响较小,最大剪应力为 0.65kPa,分布在靠近隧址区的侧根系上。因主根系横截面积较宽,固土力和与土壤的摩擦力就越大,抵抗剪切的能力越强。剪应力随开挖时步逐渐增大,表明根系的损伤是一个逐渐累积的过程,因此施工过程中减小扰动并及时支护,有利于减弱对隧址植物根系的损伤程度。

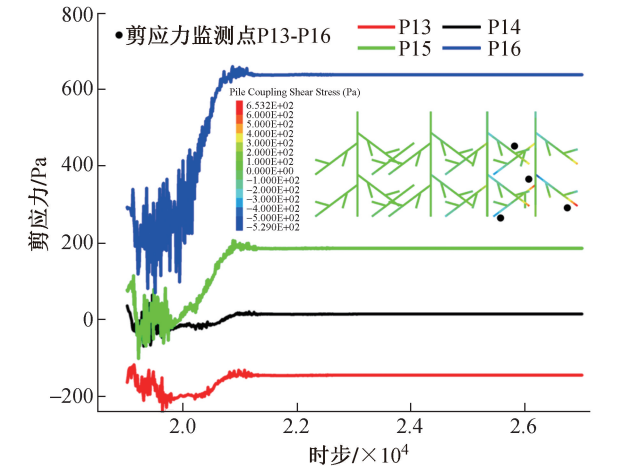


图 11 根系剪应力分布及变化规律

Fig. 11 Distribution and variation patterns of root shear stress

3.3 注浆区止水效果评价

隧道邻近古树段埋深 14~17.5m,古树树冠投影距离隧道垂向距离 6~7m,采用人工加机械的开挖方式,辅助措施采用超前预注浆结合地表深层补水施工技术。选用无化学毒性作用的超细水泥-水玻璃注浆材料,采用分层、低压、限流的注浆工艺控制浆液在地层的扩散范围。注浆圈水层的形成质量对渗流路径和隧道涌水量起控制作用,分别取注浆区渗透系数 10~12cm(不均匀注浆层)和完全隔水(理想注浆层)来模拟止水效果,分别对应注浆工况 1 和注浆工况 2。

通过 FISH 函数统计节点的不平衡排水量,来监测注浆前后隧道涌水量的变化^[19]。如图 12 所示,未注浆工况下,初期最大涌水量约为 7.6m³/d,折合每延米约 3.9m³/d,施作注浆圈后,不同注浆工况下最大涌水量分别降低为 5.2,3.1m³/d,稳定状

态涌水量降低为 1.6,0.3m³/d。由于理想注浆层抗渗性能较好,洞内涌水大部分从未注浆底板处渗入。分析 18 000 步渗流时长两种注浆工况孔隙水压力云图(见图 13),注浆圈止水效果明显,古树区域地表水头几乎未受到扰动,隧道上方降水漏斗也未形成。注浆止水圈对于减少施工期间地下水位变化发挥了重要作用。

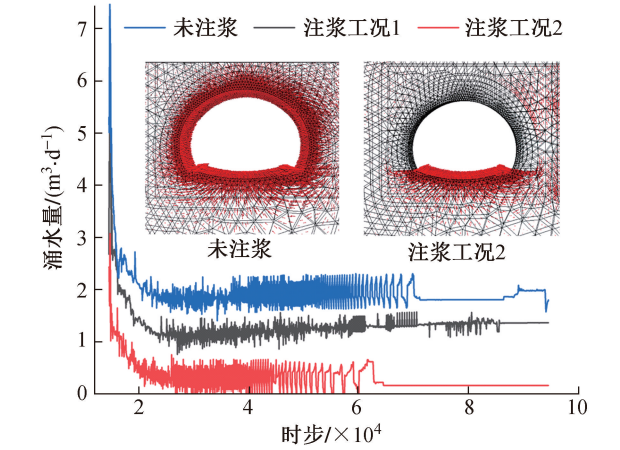


图 12 注浆前后涌水量时程曲线及渗流矢量对比
Fig. 12 Comparison of water inflow duration curves and seepage vectors before and after grouting

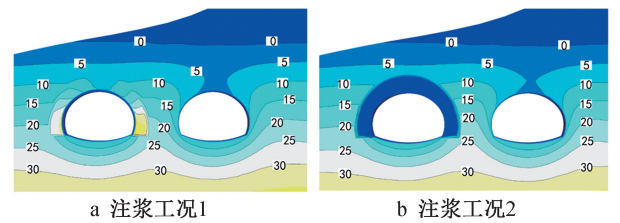


图 13 不同注浆工况孔压云图(单位:Pa)
Fig. 13 Borehole pressure cloud maps for different grouting conditions(unit: Pa)

4 监测结果对比分析

在施工过程中,对隧道中心线上方地下水位降深变化及古树根系变形开展了全过程监测,监测点布置如图 14 所示。通过对实测数据的系统整理与时程分析,掌握了施工扰动条件下地下水位与根系响应的演化特征。在此基础上,将现场监测结果与有限元数值模拟结果进行对比分析,以验证数值模型的合理性及参数取值的可靠性,从而为后续变形预测与施工控制提供依据。

现场监测结果与有限元数值模拟所得地下水位变化曲线整体均呈指数衰减特征(见图 15),二者变化趋势基本一致,吻合程度较好,表明所建立的渗流-变形耦合模型能够较为合理地反映施工扰动条件下地下水位的演化规律。不同之处在于,当水

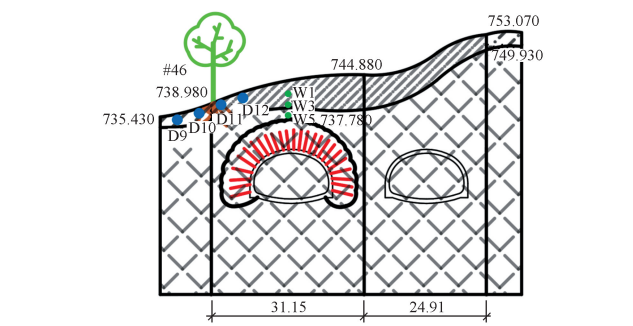


图 14 监测点布置(单位:m)
Fig. 14 Layout of monitoring points(unit: m)

位变化逐渐趋于稳定阶段时,实测水位整体略高于数值模拟结果。该差异主要源于数值模型在参数选取及边界条件处理中的理想化假定,例如将土体渗透系数视为均质并简化地下水补给条件,可能导致计算中地下水排泄速率偏大;而实际工程受土体非均质性、局部弱透水层分布及周边地下水补给等因素影响,地下水位的维持能力相对更强,因此稳定阶段实测水位略高于模拟结果。总体而言,该偏差处于合理范围内,表明模型计算结果具有较好的工程适用性。

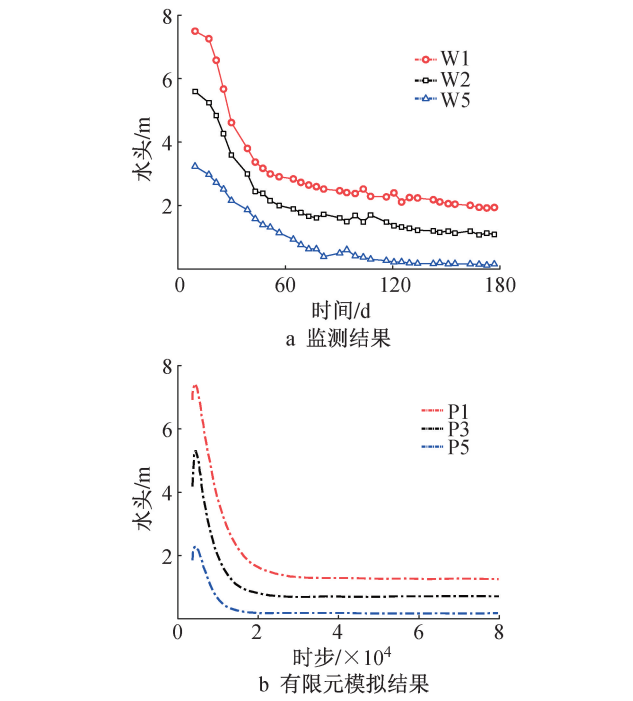


图 15 隧道中心上方地下水位降深变化对比
Fig. 15 Comparison of groundwater level drawdown variations above the tunnel centerline

现场监测结果与有限元数值模拟得到的古树根系变形曲线整体均呈现“先减小后趋于稳定”的变化规律(见图 16),表明施工扰动初期根系变形发展较为明显,随后逐渐进入相对稳定阶段。其中,

靠近隧址区一侧的根系沉降量最大,说明该区域受施工扰动影响更为直接。总体而言,两者在变形发展趋势及空间分布特征方面基本一致,吻合程度较好,表明所建立的数值模型能够较为合理地反映施工条件下古树根系的受力与变形特征,可为相关保护与控制措施的制定提供参考依据。

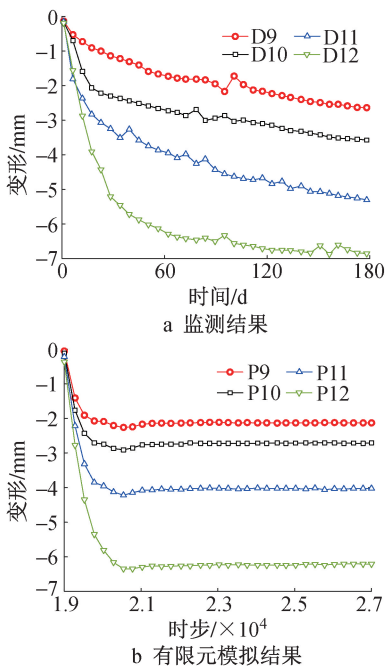


图 16 根系变形对比

Fig. 16 Comparative plot of root system deformation

5 结语

以新线 109 齐家庄隧道侧穿古树群为背景,基于有限差分软件建立渗流-应力耦合模型,从生态水位下降、根系损伤评估及注浆圈止水效果系统研究了山岭隧道建设对生态植被的影响,并与监测结果进行对比分析,得出以下结论。

1)分析了山岭隧道开挖对渗流场扰动的一般规律。渗流场数值模拟结果显示,开挖导致隧址区内地下水渗流状态发生改变,地下水在孔压作用下向隧道内渗流,导致隧道上方地下水位降幅和孔隙水压力降幅较大,渗流场以隧道为中心呈漏斗状分布。古树分布区地下水位降幅相对较缓,但存在降至植被所需生态水位以下的风险。

2)将隧址区古树根系简化成锚固单元,考虑流固耦合作用,研究了隧道施工后桩单元的受力变形宏观响应特征。结果表明:地层沉降导致根系承受的拉应力低于其极限抗拉强度,根系随地层协同下沉,不会发生永久性拉断损伤,但可能致使根土界面分离。隧址周围的高剪应力区未传递至根土复合地层,所以不会造成根系大面积的剪断损伤。

3)基于涌水量的监测对注浆圈的止水效果进行评估。为保护地表侧柏不受水环境效应的影响,注浆圈的施作是有必要的,但施工过程中必须严格把控注浆工艺,保证注浆圈的厚度、密实度和连续性,进而提高注浆圈整体抗渗性能。

参考文献:

[1] 吴全立,耿伟. 超浅埋暗挖隧道穿越名木古树保护方案的研究[J]. 地下空间与工程学报,2005,1(5):754-758.
WU Q L, GENG W. Research of the protection scheme of rare trees with cut-in-extremely-shallow-depth tunnel passing through [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2005,1(5):754-758.

[2] 李国梁,胡伟锋,吕永刚,等. 穿越古冲沟段隧道支护结构优化及变形特征研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(13):114-119.
LI G L, HU W F, LÜ Y G, et al. Research on optimization of support structure and deformation characteristics of tunnel passing through paleo gully[J]. Construction technology, 2025,54(13):114-119.

[3] 刘建友,吕刚,赵勇,等. 京张高铁新八达岭隧道穿越风景名胜区环境保护技术[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(8):1361-1366.
LIU J Y, LÜ G, ZHAO Y, et al. Environmental protection techniques for new Badaling tunnel of Beijing to Zhangjiakou high-speed railway crossing scenic and historic interest area[J]. Tunnel construction,2021,41(8):1361-1366.

[4] 成盛. 基于生态需水保护的 山岭隧道地下水限排研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
CHENG S. Research on groundwater limiting emissions for mountain tunnel based on ecological water demand [D]. Chongqing:Chongqing University,2016.

[5] 张洪伟. 富水隧道施工期地下水运移特征模拟及水环境效应[D]. 兰州:兰州交通大学,2021.
ZHANG H W. Simulation of groundwater movement characteristics and water environment effect during construction of water-rich tunnel [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University,2021.

[6] 李有芳,刘静,张欣,等. 外力作用下 4 种植物根系易损部位的研究[J]. 林业科学研究,2017,30(1):63-68.
LI Y F, LIU J, ZHANG X, et al. Study on the vulnerability of the roots of four species under external forces[J]. Forest research, 2017,30(1):63-68.

[7] 高岩,党晓宏,汪季,等. 采煤沉陷区不同裂缝处小叶杨根系损伤特性[J]. 水土保持通报,2022,42(1):34-41,48.
GAO Y, DANG X H, WANG J, et al. Damage characteristics of populus simonii root systems at different cracks in mining subsidence area [J]. Bulletin of soil and water conservation, 2022,42(1):34-41,48.

[8] GOKDEMIR C, RUBIN Y, LI X J, et al. Vulnerability analysis method of vegetation due to groundwater table drawdown induced by tunnel drainage [J]. Advances in water resources, 2019, 133:103406.

[9]

高咏,梁聪,车增光. 南京典型段地铁工程对地下水流动动态的影响[J]. 科学技术与工程,2020,20(28):11711-11717.
GAO Y, LIANG C, CHE Z G. The influence of typical subway project in Nanjing on underground flow dynamics [J]. Science technology and engineering, 2020, 20(28): 11711-11717.

[10]

ZHENG W, WANG X L, TANG Y, et al. Use of tree rings as indicator for groundwater level drawdown caused by tunnel excavation in Zhongliang Mountains, Chongqing, Southwest China [J]. Environmental earth sciences, 2017, 76(15): 522.

[11]

全占军,程宏,于云江,等. 煤矿井田区地表沉陷对植被景观的影响——以山西省晋城市东大煤矿为例[J]. 植物生态学报,2006,30(3):414-420.
QUAN Z J, CHENG H, YU Y J, et al. Assessment of subsidence impact on vegetation landscape in coal mining area: a case study of dongda mine in Jincheng city, Shanxi Province [J]. Journal of plant ecology, 2006, 30(3): 414-420.

[12]

蒙仲举,任晓萌,陈晓燕,等. 采煤塌陷对沙柳根系损伤机理研究[J]. 北方园艺,2014(1):66-68.
MENG Z J, REN X M, CHEN X Y, et al. Study on damage mechanism of roots of salix psammophila by mining subsidence [J]. Northern horticulture, 2014(1): 66-68.

[13]

潘东江,张农,赵一鸣,等. 西部矿区植被根系采动损伤特征及细观力学机制[J]. 煤炭学报,2017,42(2):373-380.
PAN D J, ZHANG N, ZHAO Y M, et al. Characteristics and mesoscopic mechanics of vegetation roots damage induced by mining in western mining area [J]. Journal of China coal society, 2017, 42(2): 373-380.

[14]

那顺. 北沙柳等 4 种植物根-土界面拉拔摩阻特性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
NA S. Study on pulling friction characteristics of root-soil Interface of salix psammophila and other four plants [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.

[15]

卢志敏. 隧道防水及水土保持和生态保护初步研究 [D]. 重庆:重庆交通大学,2009.
LU Z M. Preliminary study of soil and water conservation and ecological protection as well as waterproof of tunnel [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.

[16]

高永涛,柴金飞,吴顺川,等. 基于 3DEC 的隧道开挖围岩变形特性研究[J]. 矿业研究与开发,2015,35(8):61-66.
GAO Y T, CHAI J F, WU S C, et al. Deformation characteristics of surrounding rock during tunnel excavation based on 3DEC [J]. Mining research and development, 2015, 35(8): 61-66.

[17]

张绍良,张黎明,侯湖平,等. 生态自然修复及其研究综述 [J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(1): 160-166.
ZHANG S L, ZHANG L M, HOU H P, et al. Research overview on natural restoration of ecosystem [J]. Journal of arid land resources and environment, 2017, 31(1): 160-166.

[18]

BI Y L, ZHANG J, SONG Z H, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate root damage stress induced by simulated coal mining subsidence ground fissures [J]. Science of the total environment, 2019, 652: 398-405.

[19]

邱凌. 富水深埋 TBM 隧道突涌水机理分析及反坡排水设计 [J]. 施工技术(中英文), 2026, 55(7): 93-98.
QIU L. Water intrush mechanism analysis and reverse slope drainage design in water-rich deep-buried TBM tunnel [J]. Construction technology, 2026, 55(7): 93-98.

(上接第 133 页)

[5]

岳树桥,周质炎,彭芳乐. 盾构隧道管片插入式快速连接件作用机理分析[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(3):532-536.
YUE S Q, ZHOU Z Y, PENG F L. Mechanism analysis of plug-in quick-joint connector for shield tunnel segment [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2010, 6 (3): 532-536.

[6]

官林星,孙巍,张孟喜,等. 盾构隧道环向快速连接件力学性能试验研究[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(6):967-974.
GUAN L X, SUN W, ZHANG M X, et al. Mechanical performance and experimental research on circumferential fast connector of shield tunnel [J]. Tunnel construction, 2022, 42(6): 967-974.

[7]

肖明清,薛光桥,赵明应. 采用快速连接件的盾构隧道纵缝接头受力性能试验研究 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59 (5): 154-162.
XIAO M Q, XUE G Q, ZHAO M Y. Experimental research on mechanical performance of longitudinal joint of shield tunnels with quick connectors [J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(5): 154-162.

[8]

WU Y D, DING W Q, CHEN Q, et al. Flexural behaviour of longitudinal segment joints with quick C-T type connectors and their corrosion characteristics [J]. Tunnelling and underground space technology, 2025, 161: 106542.

[9]

柳献,张雨蒙,王如路. 地铁盾构隧道衬砌结构变形及破坏探讨[J]. 土木工程学报,2020,53(5):118-128.
LIU X, ZHANG Y M, WANG R L. Discussion on deformation and failure of segmental metro tunnel linings [J]. China civil engineering journal, 2020, 53(5): 118-128.

[10]

张雨蒙,张姣龙,曹伟飏,等. 盾构隧道新型衬砌结构受力性能与设计参数[J]. 现代隧道技术,2018,55(5):201-209.
ZHANG Y M, ZHANG J L, CAO W B, et al. Mechanical behaviors and design parameters of segmental tunnel linings with new type of joints [J]. Modern tunnelling technology, 2018, 55 (5): 201-209.

[11]

薛光桥,肖明清,何应道,等. 盾构隧道管片新型接头研发与在水下隧道中的应用 [J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44 (12): 2362-2375.
XUE G Q, XIAO M Q, HE Y D, et al. Development of a novel type of joint for shield tunnel segments and its application in underwater tunnels [J]. Tunnel construction, 2024, 44 (12): 2362-2375.