

强风化软岩浅埋暗挖隧道变形分析及防治措施

曾浩

重庆科技大学土木与水利工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年5月16日; 录用日期: 2025年6月6日; 发布日期: 2025年6月18日

摘要

随着交通基础设施建设的推进, 强风化软岩浅埋隧道应用增多, 但因其特殊地质条件与施工环境, 易出现变形问题, 影响施工安全与运营稳定。本文通过对玉龙隧道这一典型工程实例的分析, 总结了强风化软岩浅埋隧道围岩变形的原因。为此, 提出了超前支护、加强初期支护、优化施工方法、等防治措施。研究成果为类似工程的设计和施工提供了重要参考, 同时也为后续深入研究强风化软岩浅埋隧道变形机理与防治技术奠定了基础。

关键词

强风化软岩, 浅埋隧道, 围岩变形, 防治措施

Deformation Analysis and Prevention Measures of Shallow Buried and Hidden Tunnel in Strongly Weathered Soft Rock

Hao Zeng

School of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: May 16th, 2025; accepted: Jun. 6th, 2025; published: Jun. 18th, 2025

Abstract

With the development of transportation infrastructure construction, the application of shallow buried tunnel with strong weathering soft rock is increasing, but due to its special geological conditions and construction environment, deformation problems are easy to occur, affecting the construction safety and operation stability. Based on the analysis of Yulong Tunnel, a typical engineering example, combined with the field monitoring data, this paper deeply analyzes the causes of the deformation of the surrounding rock of the shallow buried tunnel with strong weathering soft rock. It is

found that the characteristics of surrounding rock, tunnel depth, construction method are the main factors leading to deformation. To this end, the prevention and control measures such as advance support, strengthening initial support, optimizing construction methods, controlling groundwater and strengthening monitoring and feedback are put forward. Practice has proved that these measures can effectively control tunnel deformation and ensure construction safety and engineering quality.

Keywords

Strong Weathered Soft Rock, Shallow Buried Tunnel, Surrounding Rock Deformation, Prevention and Control Measures

Copyright © 2025 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

随着我国经济的快速发展,对基础设施的投入不断增长,公路、铁路等交通工程逐渐向地质条件复杂的山区发展[1]。隧道在修建时经常会遇到围岩软弱、强度低等复杂地质条件,导致隧道开挖后极易发生混凝土开裂、钢拱架扭曲、隧道大变形发生侵限等重大工程灾害[2][3],对设计和施工提出了重大挑战。强风化软岩浅埋隧道由于其特殊的地质条件和复杂的施工环境,容易出现各种变形问题,如围岩坍塌、衬砌开裂等,严重影响隧道的施工安全和运营稳定性。因此,研究强风化软岩浅埋隧道变形原因及防治措施具有重要的工程意义和现实价值。强风化软岩是指岩石经过长期风化作用,其结构和强度发生了显著变化,具有强度低、节理裂隙发育、遇水易软化等特点。浅埋隧道则是指隧道埋深较浅,一般小于2倍洞径,其围岩压力分布与深埋隧道存在较大差异。在强风化软岩浅埋隧道施工中,由于围岩自稳能力差,在开挖过程中容易受到扰动而发生变形。同时,浅埋隧道上方的覆盖层较薄,对围岩的约束作用较弱,也增加了隧道变形的风险。国内外学者针对强风化软岩浅埋隧道变形问题进行了大量的研究。李生杰[4]等依托高速公路安远隧道,通过监测数据和数值模拟结果对穿越煤系地层隧道围岩大变形机制进行了分析;李玉平[5]等依托凤合高速公路大草山隧道,通过模拟计算,采用预应力钢束(锚杆)加固围岩松动圈为承载拱后,有效控制围岩及结构变形;王伟[6]等依托在建隧道工程,对洞口浅埋段初支变形及破坏特征进行分析,提出适合该隧道的变形控制措施;宋贵杰[7]为研究隧道开挖过程中浅埋软岩段塌方变形特征,建立三维数值模型并进行数值分析;杜俊[8]等采用有限元数值模拟方法,研究浅埋暗挖地下通道软土地层变形规律,提出预加固措施;任博[9]等对围岩与支护结构协调变形关系进行了探讨;王哲[10]等总结软岩隧道大变形研究现状及软岩隧道大变形控制对策。然而,由于强风化软岩浅埋隧道的地质条件复杂多变,不同地区、不同工程的隧道变形原因和防治措施存在差异,因此,仍需要进一步深入研究,以提高隧道施工的安全性和可靠性。本文将通过对具体工程案例的分析,结合现场监测数据,深入研究强风化软岩浅埋隧道变形的原因,并提出相应的防治措施,为类似工程的设计和施工提供参考。

2. 强风化软岩浅埋隧道围岩变形原因分析

2.1. 围岩特性

强风化软岩是经过长期风化作用后,岩体强度显著降低、结构松散的一类岩石。其特性主要表现为强度低、结构松散、透水性强、变形大以及工程性质差。由于风化作用,岩石内部的矿物成分发生变化,

胶结物质流失, 导致岩体强度大幅下降, 抗压、抗剪能力较弱。强风化软岩的原有结构被破坏, 岩体呈现破碎状或土状, 颗粒间粘结力差, 易发生崩解或坍塌。风化作用使岩体裂隙发育, 孔隙率增加, 透水性显著增强, 容易受到水的影响, 进一步加剧岩体软化。在荷载作用下, 强风化软岩易发生较大变形, 且具有明显的流变特性, 长期稳定性较差。由于其强度低、稳定性差, 强风化软岩在工程建设中常被视为不良地基, 需采取特殊措施加固。

2.2. 施工方法

不合理的施工方法会对隧道围岩产生较大的扰动, 从而导致隧道变形。由于强风化软岩强度低、结构松散、自稳能力差, 施工方法不当会显著加剧围岩的变形和破坏。传统的爆破开挖方法虽然效率高, 但其产生的强烈震动和冲击波会进一步破坏岩体结构, 导致围岩裂隙扩展和局部坍塌, 尤其是在浅埋条件下, 地表沉降和围岩松弛现象更为明显。机械开挖虽然对围岩扰动较小, 但在强风化软岩中, 机械设备的振动和挤压仍可能引发围岩的应力释放和变形。此外, 施工过程中支护不及时或支护强度不足, 会导致围岩暴露时间过长, 在自重和地下水作用下发生持续变形甚至失稳。超前支护和预加固措施若未有效实施, 也会使围岩在开挖后无法形成稳定的承载拱, 进一步加剧变形。

2.3. 支护结构

支护结构的设计和施工质量直接影响隧道的变形控制效果。若支护结构设计不合理或施工不及时, 围岩容易发生显著变形甚至失稳。例如初期支护强度不足或喷射混凝土厚度不够, 无法有效抑制围岩的应力释放和松弛变形, 导致围岩收敛或局部坍塌。钢拱架间距过大或连接不牢固, 会降低支护结构的整体刚度, 使其难以承受围岩压力, 进而引发较大变形。锚杆长度不足或注浆不充分, 无法有效锚固松散岩体, 导致围岩整体稳定性下降。此外, 支护结构施工滞后或与开挖面距离过大, 会使围岩暴露时间过长, 在自重和地下水作用下发生持续变形。二次衬砌施作时机不当, 如在围岩变形未稳定时过早施作, 可能导致衬砌承受过大荷载而开裂。

2.4. 地下水作用

强风化软岩本身强度低、结构松散, 地下水渗流会进一步软化岩体, 降低其力学性能, 加剧围岩的变形和破坏。地下水的存在使岩体中的黏土矿物发生水化作用, 导致岩体膨胀和强度衰减, 特别是在浅埋条件下, 地下水更容易通过裂隙和孔隙渗入围岩, 使岩体饱水后承载力显著下降。此外, 地下水流动会对围岩产生渗透压力, 加剧岩体裂隙的扩展和贯通, 导致围岩局部失稳甚至坍塌。在隧道开挖过程中, 地下水位的变化会引起围岩应力的重新分布, 进一步诱发围岩变形。开挖后地下水位下降可能导致围岩失水收缩, 而水位回升则可能引起岩体膨胀, 这种干湿循环作用会加速围岩的劣化。同时地下水与岩体中的可溶物质发生化学作用, 可能导致岩体结构进一步破坏。

3. 工程实例分析

3.1. 工程概况

玉龙隧道位于重庆市高新区新森大道段, 全长约 4.1 km。隧道为双洞六车道连拱隧道, 标准段建筑限界净宽 13 m, 净高 5 m, 位于已建白鹭大道正下方, 与已建道路形成立体交通系统, 是较为典型的浅埋隧道。上覆土层主要为已建路基施工期间形成的填土, 稍密状为主, 岩层倾角 7° , 受陡倾裂隙切割影响, 岩土体自稳能力差。隧道开挖分为明挖与暗挖两种方式, 按围岩类型可分为土质隧道及岩质隧道段, 土质隧道明挖施工, 主体结构完成后覆土回填, 岩质隧道段由于需要穿越现状道路且不能中断交通, 因

此采用暗挖的方式。

暗挖施工段(K12+180~K12+300)全长 542 m, 根据隧道埋深类型划分属浅埋隧道, 隧道道路设计高程 330.216~339.738 m, 下穿隧道顶部(匝道)高程约 348.57~352.7 m, 沿线地形坡度 3°~10°, 局部稍大, 可达 40°以上。该段道路覆盖层厚度约 0.6~8.6 m, 基岩岩性主要为泥岩, 强风化层厚度约 0.6~4.0 m。围岩详细分级见表 1。

Table 1. Surrounding rock grading table

表 1. 围岩分级表

埋深	地层代号	围岩岩性	饱和 抗压强度 Rc (MPa)	完整 系数 Kv	BQ	地下水影响 修正系数 K1	主要结构面 修正系数 K2	初始应力 影响修正 系数 K3	[BQ]	计算 围岩 级别
浅埋	J2s	强风化泥岩	3.0	0.57	251.5	0.0	0.4	0	211.5	V

开挖后隧道左侧洞壁倾向 105°, 隧道右侧洞壁倾向 285°, 岩体为强风化泥岩, 围岩强度较低, 抗风化能力弱, 裂隙发育, 成洞条件较差, 围岩自稳能力差, 易产生坍塌, 围岩级别为 V 级。受构造运动和该区域岩体条件的影响, 围岩自稳能力差, 开挖过程中发生塌方的可能性大。

3.2. 变形原因分析

通过对工程地质条件、施工过程和监测数据的分析, 发现该隧道变形的主要原因如下。

3.2.1. 地质特性因素

强风化泥岩饱和抗压强度低, 隧道强风化泥岩饱和抗压强度仅 3.0~4.73 MPa。这使得岩石在受到隧道开挖扰动及上覆岩土体压力时, 难以抵抗变形, 容易发生塑性变形和破坏, 导致隧道周围岩体变形。强风化泥岩抗风化能力差, 在长期风化作用下, 内部结构遭到破坏, 颗粒间连接减弱。当隧道开挖暴露后, 与空气、水等接触, 进一步加速风化进程, 降低岩体稳定性, 引发变形。该区域强风化泥岩裂隙发育, 裂隙破坏了岩体完整性, 使其成为不连续介质。在隧道开挖和后续施工过程中, 裂隙会成为应力集中区域和变形通道, 导致岩体容易沿着裂隙面发生错动、滑移, 进而引发整体变形。

3.2.2. 施工因素

隧道开挖打破了原岩应力平衡状态, 尤其是浅埋隧道, 上覆岩土体较薄, 开挖影响更为显著。机械开挖、爆破等施工活动会对强风化泥岩产生强烈扰动, 引起岩体应力重新分布, 致使围岩向隧道内变形。本隧道采用多种开挖方法, 每次开挖都会对周围岩体造成不同程度扰动, 增加变形可能性。若初期支护施作不及时, 开挖后暴露的强风化泥岩无法及时得到有效支撑, 在自身重力和外部荷载作用下会迅速变形。若支护参数选择不当, 如锚杆长度、间距不合理, 钢架强度不足等, 也无法提供足够支护力来限制岩体变形。

3.2.3. 外部环境因素

地下水活动会显著影响强风化泥岩的稳定性。本隧道虽地下水贫乏, 但雨季时少量地表水沿裂隙下渗形成的地下水, 会软化泥岩, 降低其抗剪强度, 增加岩体重量, 从而促使岩体发生变形。若地下水在裂隙中积聚, 产生的动水压力也会对岩体变形起到推动作用。本地区降雨集中在 5~9 月, 且强度较大。大量降雨会使强风化泥岩含水量增加, 导致其物理力学性质恶化, 抗变形能力进一步降低。雨水入渗还可能引发山体滑坡等地质灾害, 间接影响隧道周围岩体稳定性, 加剧变形。

3.3. 强风化软岩浅埋隧道围岩变形防治措施

3.3.1. 超前支护

超前支护是控制围岩变形的关键措施之一。隧道采用超前小导管、管棚等超前支护措施，对隧道掌子面前方的围岩进行预加固，提高围岩的自稳能力，减少隧道开挖过程中的变形。隧道进出洞口每环设置 93 根管棚，其中主洞每环设置 81 根，中导洞每环设置 12 根，管棚采用 $\phi 127$ mm，壁厚 8 mm 的热轧无缝钢管，单根总长为 80 m，环向间距中至中 40 cm。隧道在 K12+284~K12+324 段下穿高新大道，此段采用超前大管棚支护，每环设置 87 根，其中主洞每环设置 87 根，中导洞不设置管棚，管棚采用 $\phi 152$ mm，壁厚 10 mm 的热轧无缝钢管，单根总长为 14 m，环向间距中至中 40 cm。隧道在 V [a]、V [b]、中导洞拱顶、车行横通道拱顶、集水池拱顶均设置超前小导管，小导管采用 $\phi 42 \times 5$ mm 热轧无缝钢管，每根长度 $L = 4$ m，环向间距 0.4 m，纵向间距间隔 3 榀拱架。外插角沿开挖轮廓线向外 $10^\circ \sim 15^\circ$ 。

3.3.2. 加强初期支护

增加初期支护的强度和刚度，如加大喷射混凝土厚度、加密锚杆和钢筋网、采用型钢拱架等，及时对开挖后的围岩进行支护，约束围岩的变形。以本项目为例，隧道拱部采用 R25 中空注浆锚杆，边墙采用 C22 砂浆锚杆并挂设单层 $\phi 8$ 钢筋网形成组合受力体系，支护锚杆及钢筋网参数根据地层岩性确定，喷混凝土均采用湿喷技术。根据不同衬砌情况分别采用 I16、I18、I20a、I22b、I25b 拱墙或全环型钢拱架及拱部 $\phi 42$ 超前小导管或拱部 $\phi 127$ 或 $\phi 152$ 超前大管棚加强支护。喷射砼施工时，于拱墙范围每节钢架上预埋倒梯形(锥形)PVC 注浆管，PVC 注浆管紧临钢架布置，纵向间距为每榀钢架的间距。在初支混凝土达到设计强度 80% 方可进行初支背后充填注浆，注浆压力一般为 0.1~0.2 MPa，注浆材料采用纯水泥浆，当注浆量与设计注浆量大致接近并达到设计终压后即可终止注浆，主线围岩支护参数详见隧道支护衬砌 (表 2)。

Table 2. Parameter table of support lining of main line arch tunnel
表 2. 主线连拱隧道支护衬砌参数表

衬砌类型及 适用条件	预留 变形量	初期支护										超前支护
		C30 喷射微纤维 早强混凝土			系统锚杆 长度/间距(环 × 纵)		钢筋网($\phi 8$) 间距(环 × 纵)		钢架			
		拱部	边墙	仰拱	拱部	边墙	拱部	边墙	部位	类型	间距	
Va: V级围岩 浅埋地段	15 cm	29	29	29	400/100 × 60 (中空)	400/100 × 60 (砂浆)	20 × 20	20 × 20	全环	I22b	0.6 m	$\phi 42$ 超前 小导管或 $\phi 127$ 大管棚 加强支护
Vb: V级围岩下 穿高新大道 及交叉口段	15 cm	32	32	32	450/100 × 50 (中空)	450/100 × 50 (砂浆)	20 × 20	20 × 20	全环	I25b	0.5 m	$\phi 42$ 超前 小导管或 $\phi 152$ 大管棚 加强支护

3.3.3. 施工方法

根据隧道的地质条件和埋深，选择合理的施工方法可以有效减少对围岩的扰动及控制隧道变形。以本项目为例，隧道下穿高新大道下穿道及白鹭大道，邻近高新区管委会建筑物及规划白鹭广场，根据本项目的特点，全隧采用机械开挖施工，隧道中导洞采用全断面法开挖，人行横通道、雨水泵站检修通道采用上下台阶机械开挖方法，主洞洞身采用 CRD 机械开挖法，隧道下穿高新大道段、车行横通道交叉口段、下穿白鹭大道浅埋段采用双侧壁机械开挖施工方法，隧道施工方法如表 3。

Table 3. Statistical table of tunnel construction methods
表 3. 隧道施工方法统计表

衬砌地段	三车道隧道	中导洞	雨水泵站集水池隧道	人行横通道	车行横通道	雨水泵站检修通道
V级围岩 A型衬砌	连拱隧道 交叉中隔壁(CRD)法	全断面法	台阶法	中隔墙内预留	/	全断面法
V级围岩 B型衬砌	连拱隧道(分段) 双侧壁导坑法	全断面法	台阶法	/	台阶法	/

隧道正洞采用 CRD 交叉中隔壁法, 临时支护采用 I22b 钢拱架, 设置 $100 \times 100 \text{ mm } \phi 8$ 单层钢筋网片, 设置 $\phi 22$ 砂浆锚杆@ $100 \times 60 \text{ cm}$, $L = 2.5 \text{ m}$, 上台阶掌子面采用 C25 混凝土喷射 8 cm 厚封闭, 临时支护侧采用 C25 混凝土喷射 10 cm 厚; 隧道正洞下穿既有结构物段采用双侧壁导坑法, 临时支护采用 I25b 钢拱架, 设置 $100 \times 100 \text{ mm } \phi 8$ 单层钢筋网片, 设置 $\phi 22$ 砂浆锚杆@ $100 \times 50 \text{ cm}$, $L = 2.5 \text{ m}$, 上台阶掌子面采用 C25 混凝土喷射 8 cm 厚封闭, 临时支护侧采用 C25 混凝土喷射 10 cm 厚。

3.3.4. 控制地下水

本项目尽管地下水量较小, 但其对围岩变形的影响仍不可忽视。由于强风化软岩强度低、结构松散, 即使少量地下水的渗流也会软化岩体, 降低其力学性能, 加剧围岩变形。可采用超前注浆技术, 在开挖面前方进行局部注浆, 填充岩体裂隙, 阻断地下水的渗流路径, 同时提高围岩的整体性和承载力。在初期支护中采用防水措施, 在喷射混凝土中加入防水剂, 或在支护层背后铺设防水板, 防止少量地下水渗透至开挖面, 减少对围岩的软化影响。设置简易的排水系统如洞内排水沟或排水孔, 及时排除围岩中的积水, 降低水压对围岩的作用。对于局部渗水点, 可采用堵水注浆或埋设导水管进行针对性处理。

3.3.5. 加强监测与反馈

在开挖前布置全面的监测网络, 包括地表沉降监测点、洞内收敛监测断面以及地下水位观测孔等, 对围岩变形、应力变化和地下水动态进行全方位监测。其次, 采用自动化监测技术, 如全站仪、测斜仪和光纤传感器等, 提高数据采集的精度和效率, 确保监测结果的实时性和可靠性。在施工过程中, 根据监测数据动态分析围岩变形趋势, 及时反馈至设计和施工团队, 调整支护参数和施工方法。监测项目一般包括拱顶下沉、周边收敛、围岩压力、支护结构内力等。

4. 结论

强风化软岩浅埋隧道变形是由多种因素共同作用引起的, 包括围岩特性、施工方法、支护结构和地下水作用等。通过对强风化软岩浅埋隧道工程实例(玉龙隧道)的分析, 总结出变形原因并针对这些变形原因提出了超前支护、加强初期支护、优化施工方法、控制地下水和加强监测与反馈等防治措施。这些措施在实际工程中取得了良好的应用效果, 有效地控制了隧道变形, 保证了隧道施工安全和工程质量。

基金项目

重庆科技大学硕士研究生创新计划项目(项目批准编号: YKJCX2420613)。

参考文献

- [1] 李建敦, 肖靖, 江鸿, 杨林, 陈世豪. 浅埋软岩隧道大变形特征及控制措施[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 1243-1249.

- [2] 雷军, 张金柱, 林传年. 乌鞘岭特长隧道复杂地质条件下断层带应力及变形现场监测分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1367-1371.
- [3] 赵志刚, 吴忠仕, 王伟, 杨林, 冯德定. 大断面浅埋黄土隧道大变形控制技术及其效果分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(6): 2470-2477.
- [4] 李生杰, 谢永利, 吴丹泽, 朱小明. 穿越煤系地层隧道围岩大变形机制及处治研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(Z2): 3501-3508.
- [5] 李玉平, 田世雄, 胡玉琨, 边磊, 连鹏. 炭质板岩隧道大变形段“围压拱”支护方案[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(Z1): 137-146.
- [6] 王伟, 李忠, 沈学军, 林玉刚, 李赤谋, 毛永强. 软弱围岩隧道洞口浅埋段变形特征及控制措施研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(9): 103-109.
- [7] 宋贵杰. 浅埋软岩段隧道进洞施工变形特征与失稳分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2018, 48(2): 53-60, 71.
- [8] 杜俊, 梅志荣, 傅立磊, 陈永照. 浅埋暗挖地下通道软土地层变形规律及预加固措施[J]. 铁道建筑, 2019, 59(3): 52-55, 68.
- [9] 任博, 王碧剑, 肖晓. 软弱地层大断面浅埋隧道围岩与初支结构协调变形规律研究[J]. 公路工程, 2019, 44(6): 104-108.
- [10] 王哲, 刘钦, 刘磊, 赵红宇, 黄坤鹏. 软岩隧道大变形研究现状及控制对策[J]. 铁道建筑, 2022, 62(12): 138-142.