双层初支软岩大跨车站下穿高层建筑安全研究

刘诣轩

中国铁路设计集团有限公司,天津

收稿日期: 2025年4月28日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年5月31日

摘要

针对软岩地区大跨暗挖车站开挖容易出现大变形问题,本文依托重庆地铁18号线某地铁车站工程,使用 有限元分析软件Midas GTS NX建立三维地层 - 结构模型,分析了在双层初支结构下,软岩地区大跨车站 开挖隧道的拱顶沉降、双层初支应力分布以及地表建筑物沉降随施工阶段的变化。结果显示:双层初支 成环后能有效控制拱顶沉降,拱顶沉降增长最快时间为双层初支成环前一开挖步;二次初支的承担比例 小于一次初支,具体比例可能与开挖进尺和隧道埋深有关;当隧道开挖区域与建筑物的距离较远时,建 筑物会随土体发生向上的位移,建筑物越高,这个距离越短。

关键词

地铁,承担比例,数值模拟,双层初支,软岩

Study on Safety of Double-Layer Primary Support Soft Rock Large-Span Subway Station Underpass Tall Building

Yixuan Liu

China Railway Design Corporation, Tianjin

Received: Apr. 28th, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

To solve the problem of large deformation in the excavation of large-span stations in soft rock area, this paper relied on the project of the Xietaizi Station of Chongqing Metro Line 18 and used the finite element analysis software Midas GTS NX to establish a three-dimensional stratiform-structure model. Changes of arch crown settlement, double-layer primary support initial stress distribution

and surface building settlement with construction phase of tunnel excavation at large-span station in soft rock area. The results show that the arch crown settlement can be controlled effectively after the double-layer primary support is formed, and the arch settlement increases fastest at the first excavation step before the double-layer initial support is ring closed. The proportion of secondary primary support is smaller than that of initial primary support, and the specific proportion may be related to the excavation footage and the depth of tunnel. When the distance between the tunnel excavation area and the building is far away, the building will move upward with the soil mass. The higher the building is, the shorter the distance will be.

Keywords

Subway, Sharing Proportion, Numerical Calculation, Double-Layer Primary Support, Soft Rock

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/

1. 引言

随着城市化的快速发展,我国城市轨道交通的建设规模与速度都快速增长[1],尤其是位于西部的重 庆,其运营轨道交通里程从 2020 年末至 2022 年末增加了约 120 km,其建设速度位居全国前列。重庆地 区地质条件较为复杂,重庆城区内软岩地层广泛存在,软岩大变形对重庆轨道交通建设来说是一项重大 挑战[2]。

为解决软岩大变形问题,国内许多隧道采用了双层初期支护结构。如张德华[3]等依托阜川隧道工程, 实施了三种双层初支方案的现场试验,结果显示在软岩大变形隧道中,双层初支能有效控制隧道变形, 保证围岩稳定性,并提出采用二支紧跟一支分台阶施作的方案变形控制效果较好;李国良[4]等依托郑西 高铁高桥隧道,研究了台阶法双层初期支护在大断面黄土隧道的力学特性,结果表明双层初期支护能有 效控制浅埋以及下穿段大跨隧道拱部下沉及地表沉降;张俊儒[5]等研究了位于全风花岗岩层中采用双层 初期支护的超大断面隧道中拆撑的安全性,得出了双层初期支护比单层初期支护在拆撑过程中的结构受 力转换更加安全;杨利明等人的研究显示双层初支能使隧道竖向位移与水平位移最大减小 19.70%、 15.46%,有效保障隧道施工与长期运营的安全性[6]。

以上研究都证明双层初期支护对位于软岩大变形地区隧道的变形控制是有利的,但目前关于双层初 期支护的研究大多集中于与台阶法的结合使用,有关双层初期支护与双侧壁导坑法结合的研究较少并且 没有具体指出双层初支的受力关系。因此本文依托重庆18号线轨道交通工程某地铁车站工程,结合现场 监控量测与数值模拟手段,分析了双层初期支护结构对软岩大变形地区超大断面开挖隧道的变形控制效 果、机理和双层初支对围岩压力的承担比例,以期对类似工程提供一定参考。

2. 工程背景

2.1. 工程概况

某地铁车站是重庆 18 号线轨道交通工程的一座单拱暗挖地下车站枢纽,与既有轨道交通采用通道换乘。某地铁车站为 14 m 岛式站台车站,为单拱双层结构,采用复合式衬砌,隧道最大开挖宽度为 26.02 m,开挖高度为 22.26 m,开挖面积为 492.84 m²,如图 1 所示。车站拱顶埋深 19.65~40.38 m,覆岩 深度 9.08~37.36 m,车站上覆地层主要为素填土、⑤12 中风化砂质泥岩。

车站下穿、侧穿高层建筑风险源为高层住宅 A 及商业 B,高层住宅 A 小区为砼 21/25 F 框架结构,地表高层存在 12.7 m 高差,如图 2 所示。

隧道开挖区段岩体较为完整,不存在结构面,因此围岩不会产生结构变形,但由于岩性偏软及地下 空间跨度偏大,围岩因地下空间施工会产生较明显的材料变形,因此采用双层初期支护结构进行变形控 制,并研究其支护机理。



Figure 1. Schematic diagram of the cross-section of a certain subway station (unit: m) 图 1. 某地铁车站横断面示意图(单位: m)



Figure 2. High-rise residential building A 图 2. 高层住宅 A

2.2. 隧道变形监测结果与分析

施工单位在施工现场对双层初支结构施工段选取了 DK12+650 作为监测断面。

2.2.1. 拱顶沉降

对于拱顶沉降,施工单位使用杆式位移计在离掌子面 1 m、3 m 和 5 m 处的 3 个测点进行了监测,如 图 3 所示。位移时程曲线和位移变化速率时程曲线如图 4 所示。从图中可以看出距离掌子面越远,拱顶 沉降越小; 3 个测点的拱顶沉降值在 25 天之后趋于稳定,25 天后沉降速率几乎为 0,3 个点的沉降稳定 值大致分别为 12.5 mm、8.0 mm 和 6.2 mm。



Figure 3. On-site installation of rod-type displacement meters 图 3. 现场杆式位移计安装





2.2.2. 拱顶处接触压力

施工单位采用土压力盒监测拱顶处围岩 - 一次初支接触压力和一次初支 - 二次初支接触压力,现场 安装如图 5 所示。



Figure 5. On-site installation diagram of pressure gauges 图 5. 现场压力计安装图

拱顶处围岩 - 一次初支和一次初支 - 二次初支的接触压力时程曲线如图 6 所示。从图中可以看出接触压力随时间变化趋势与拱顶沉降变化趋势大体一致,在监测开始后 20 天趋于稳定,围岩 - 初支接触压力和 双层初支接触压力最终稳定值大概在 300 Kpa 和 120 KPa。围岩压力从一次初支传递到二次初支的压力从 18%逐渐增加到了 35%,即一次初支承担的围岩压力大致为二次初支的 22%~54%,最终稳定时为 54%。



Figure 6. Time-history curve of contact pressure 图 6. 接触压力时程曲线

3. 数值模拟结果与分析

3.1. 模型建立与参数选择

模型采用数值模拟软件 Midas GTS NX 建立。考虑到隧道洞径的 3~5 倍为隧道开挖的主要影响范围, 超出此边界后隧道开挖的影响较小,为尽可能减少边界效应,将模型左右和下部边界设定为距离隧道中 心 5 倍洞径,上部边界为地表。隧道模型大小设置为 262 m×156 m×150 m。两层初支和二次衬砌都采 用实体单元模拟,初支和钢拱架的联合支护作用通过等效刚度模拟,考虑到一次初支在初支成环之前几 乎不能承担围岩压力,故在一次初支成环之前将其材料设置为弹性模量为 1 的材料,后文中称其为无属 性初支,成环之后将其更换为正常属性的初支材料。模型共划分 192,544 个单元,166,284 个节点,满足 计算精度要求,计算模型如图 7 所示。支护结构参数参照《铁路隧道设计规范》(TB 10003-2016)取值。 围岩参数按地勘报告取值,如表 1 所示。



Figure 7. Numerical analysis model 图 7. 数值分析模型

Table	1. Surrounding rock parameters
表1.	围岩参数

材料	重度/(kN·m/3)	弹性模量/GPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比
素填土	20.5	0.01	10	8	0.45
岩土层	25.5	1.3	648	33	0.37

3.2. 数值模拟步骤

根据实际工程,开挖方法采用双侧壁导坑法,具体开挖步骤如图 8 所示。下文将图中红色框内数字分别称作导洞 1~导洞 9。为减少对地面建筑物的影响,在远离建筑物的前 50 m 和后 55 m 开挖进尺为 5 m,中间 45 m 开挖进尺为 2.5 m。



3.3. 数值模拟结果与分析

为了减小边界效应和体现地面建筑物影响,选择中间 45 m 两端断面和中间断面分析。分析断面与监测断面 DK12 + 650 的位置关系如图 9 所示。



3.3.1. 拱顶沉降

图 10 和图 11 分别是三个断面拱顶沉降随施工步骤的变化和变化速率。由于数值分析软件可以在未 开挖时就监测到施工后拱顶处原地层的位移,从图 10 中可以发现,在开挖到断面之前,拱顶处的原地层 就已经发生位移,在掌子面离断面较远时,拱顶处会出现微小的隆起(小于 0.5 mm),这些隆起是由于已 经开挖处地层的向下的沉降作用引起的;同时还可以发现,断面距离始发断面越远,拱顶沉降最终稳定 值也在变大。

图 11 表明,各断面拱顶沉降的变化趋势几乎相同。导洞1开挖之后,各断面的拱顶沉降速率均出现快速增加的情况,在开挖导洞5、6时,沉降速率增加最快,沉降增加值也最高,这表明使用双侧壁导坑法施工时,应格外注意这两开挖步时的安全状态。当初支成环时,即使没有将一次初支考虑到受力体系中,拱顶沉降的增加速率与增加值都出现了减小的现象;而当将一次初支考虑进受力体系后(即

图 10 和图 11 中更换一次初支属性后),虽然断面导洞 8、9 仍然在依次开挖,但拱顶沉降增加速率和 增加值都出现大幅的减小,这表明双层初支能有效控制拱顶沉降的发展。从图 8 中还可以发现,断面 1 和断面 2 的拱顶沉降变化速率与具体数值几乎完全一样,而断面 3 则明显大于断面 1 和断面 2,该原因 可能有两点:1)因为断面 1 与断面 2 之后的开挖进尺均为 2.5 m,而断面 3 后的开挖进尺为 5 m;2)各 断面的埋深不同,断面 1 和断面 2 处为浅埋段,断面 3 处为深埋段,断面 2 距深埋段距离仅 2.5 m,断 面 1 处为 25 m。

从图 9 中可以发现监测断面 DK12+650 的位置与断面 2 最接近,处于断面 2 后 5 m 处位置。由于施 工监测数据只能从断面成环之后开始监测,图 4 中监测数据与图 10 中更换初支属性后的数据大致对应。 对比图 4 中监测数据和图 10 中断面 2 数据可以发现,图 4 中距离掌子面 1 m 点的数据较为吻合。



Figure 10. Vault settlements of each section 图 10. 各断面拱顶沉降



Figure 11. Vault settlement rates of each section 图 11. 各断面拱顶沉降速率

3.3.2. 初支受力分析

图 12 和图 13 分别是初支拱顶处最大主应力和二次初支间拱顶处最大主应力随施工步骤的变化图, 图 12 中在初支成环前存在的初支拱顶处最大主应力是原来地层地应力;图 14 和图 15 是不同阶段三个断 面处一次初支整体所受最大主应力云图。从图 14 中可以看出在初支刚成环时,初支拱顶处最大主应力与 原地应力相比变化不大;这一点从图 14 中也可以发现,在初支刚成环时,弹性模量为1的一次初支所受 最大主应力值大约在 10⁻⁶~10⁻⁵ Kpa 范围内,可以忽略不计一次,说明此时围岩压力几乎全部由二次初支 承担。而在更换初支属性,双层初支结构起作用后,从图 13 可以看出,二次初支所受主应力出现了一定 程度的减小。单层初支研究表明初支成环后,在地层变化不大的情况下初支受力会逐渐上升直至稳定[7] [8],此处二次初支主应力的减小,表明一次初支承担起了相当程度的围岩压力。







Figure 13. Maximum principal stress at the vault of the secondary lining 图 13. 二次初支拱顶处最大主应力

此外从图 12 和图 13 中可以看出,在更换初支属性后到主应力大小基本稳定时,二次初支承担比例 逐渐上升,断面 1 二次初支拱顶处主应力大小从一次初支间主应力大小的 29%上升至 78%,断面 2 从 28% 上升至 47%,这一数据与监测数据大致吻合,断面 3 则是从 6%上升至 19%。三个断面二次初支承担比例的不同,可能是因为隧道开挖进尺和埋深并不是完全一致的,断面 1 后一开始是 2.5 m 进尺开挖,45 m 后开始 5 m 进尺开挖,其后 25 m 处开始为深埋段;断面 2 后一开始也是 2.5 m 进尺开挖,22.5 m 后开 始 5 m 进尺开挖,其后 2.5 m 处开始为深埋段;而断面 3 之后则是一直 5 m 进尺开挖,其后一直为深埋 段。这可能说明开挖进尺越大、埋深越大,双层初支结构中的二次初支承担围岩压力比例越低,这一点 需要进一步研究。



Figure 14. Maximum principal stress of the primary support when the primary support forms a ring 图 14. 初支成环时一次初支最大主应力



Figure 15. Maximum principal stress of the primary support when replacing its properties 图 15. 更换一次初支属性时一次初支最大主应力

3.3.3. 地表建筑物沉降

建筑物与隧道空间位置关系如图 16 所示,图中位于隧道左侧较高的建筑物为高层住宅 A,位于隧道 右侧较矮的建筑物为商业 B。

图 17 为高层住宅 A 和商业 B 的最终沉降值,其中负值表示向下位移,正值表示向上位移。从图中可以看出两个建筑物靠近隧道的一次都发生了向下的位移,高层住宅 A 位移最大值为 6.10 mm,商业 B 为 2.74 mm;而远离隧道的一侧则发生了向上的位移,高层住宅 A 位移最大值为 2.01 mm,商业 B 为 0.16 mm。高层住宅 A 和商业 B 的倾斜最大值分别为 0.00018 和 0.000088 都小于 0.002 的限值,符合安全要求。

提取两座建筑物竖向位移最大点进行分析,如图 18 所示。从图 18 中可以看出,在开挖区域距离建筑物较远时建筑物首先发生向上的位移,当开挖区域靠近建筑物时,才开始出现向下的位移,高层住宅A 在导洞1开挖至距离建筑物 12.5 m 时开始发生向下位移,商业 B 则是在导洞1开挖至距离建筑物 17.5 m 时开始发生向下位移,整体沉降在导洞1开挖完成后逐渐稳定。



(a) 建筑物与隧道平面位置关系



(b) 建筑物与隧道横断面位置关系





图 17. 高层建筑物最终沉降值



Figure 18. Variation of settlement values with construction steps 图 18. 沉降值随施工步骤的变化

4. 结论

论文使用数值模拟分析了采用双层初支结构时,位于软岩大变形地层中特大断面隧道使用双侧壁导 坑法开挖过程中的拱顶沉降、初支在不同阶段所受最大主应力的变化以及其下穿建筑物的沉降变形进行 了分析,得出了以下结论:

(1) 双层初支结构能有效控制围岩的拱顶沉降。但在双层初支成环前,尤其是开挖导洞 5 与导洞 6 时,拱顶沉降发展尤为迅速,在这一期间应当考虑增强支护结构以及监控量测。

(2) 双层初支联合作用时,能承担更多的围岩压力。二次初支承担比例会随施工步数(时间)不断增加 直至稳定,二次初支承担比例可能和开挖进尺和埋深有关,开挖进尺越长、埋深越大,二次初支承担比 例越低。因此建议在使用双层初支时,一次初支的厚度应大于二次初支厚度。

(3) 当开挖区域距离建筑物较远时,建筑物会出现随土体发生向上的位移,当开挖区域靠近建筑物一 定距离时才会发生向下的沉降,这个距离与建筑物的高度有关,建筑物越高,该距离越短。

参考文献

- [1] 朱合华,丁文其,乔亚飞,等.简析我国城市地下空间开发利用的问题与挑战[J]. 地学前缘, 2019, 26(3): 22-31.
- [2] 王永甫, 唐晓松, 郑颖人, 等. 重庆轨道交通工程岩质围岩分级方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S1): 40-47.
- [3] 张德华, 雷可, 谭忠盛, 等. 软岩大变形隧道双层初期支护承载性能对比试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S2): 86-92.
- [4] 李国良, 宋冶, 李雷, 等. 大断面黄土隧道台阶法双层支护技术[J]. 中国工程科学, 2014, 16(8): 54-63.
- [5] 张俊儒, 欧小强, 郑强, 等. 超大断面隧道在双层初期支护下的拆撑安全性研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(6): 108-116.
- [6] 杨利明,刘语泉,杨文波,等.破碎软弱围岩隧道双层初支施工方案研究[C]//《施工技术》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2022年全国土木工程施工技术交流会论文集(中册).北京:施工技术杂志社,2022:21-26.
- [7] 林锋,陶家清,高恒潮,等.特大断面泥质软岩隧道浅埋段施工力学特征及工法适应性分析[J].公路,2022, 67(12):388-396.
- [8] 万飞,谭忠盛,杨森森,等. 浅埋富水软弱围岩隧道支护受力特征及方案研究[J]. 中国工程科学, 2014, 16(8): 45-53.