

不同开挖工法下超宽断面隧道结构受力特点分析

曹光晔

[上海市市政工程设计研究(总院)集团有限公司, 上海市 200092]

摘要: 随着经济和社会的发展,为满足城市交通功能的需求,超宽断面隧道逐渐增多。因此,对超宽断面隧道的围岩变形和支护受力性能进行研究具有重要意义。结合广东省某暗挖隧道工程,采用有限元软件GTS建立二维有限元模型,通过对隧道周边土体位移和支护结构受力情况的分析,研究不同开挖工法下超宽断面隧道的结构受力特点。分析结果表明:采用中隔壁法(CD法)施工,土体竖向位移主要发生在右侧导洞施工过程中,而采用双侧壁导坑法施工,土体竖向位移主要发生在中导洞施工过程中;在CD法和双侧壁导坑法施工过程中,由于应力集中,初支与临时支撑交接处的弯矩很大;与CD法相比,双侧壁导坑法在施工中的初支弯矩更小;在CD法施工过程中,右侧导洞土体的开挖会导致临时支撑弯矩迅速增大和内力重新分布,而在双侧壁导坑法的施工过程中,中导洞土体的开挖会导致临时支撑弯矩迅速增大和内力重新分布。

关键词: 超宽断面隧道;开挖工法;土体位移;支护结构受力特点

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0232-08

Analysis on Mechanical Characteristics of Super-Wide Cross-Section Tunnel Structures under Different Excavation Methods

CAO Guangye

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: With the development of the economy and society, super-wide cross-section tunnels will increasingly emerge to meet urban transportation demands. Therefore, research on the surrounding soil deformation and mechanical behavior of support structures in such tunnels is of significant importance. Combined with a bored tunnel project in Guangdong, a two-dimensional finite element model is established using the GTS finite element software. By analyzing the displacement of surrounding soil and the mechanical response of support structures, the structural mechanical characteristics of super-wide cross-section tunnels under different excavation methods are studied. The results indicate that the vertical displacement of the soil mainly occurs during the construction of the right pilot tunnel when the central dissepiment (CD) method is adopted, and the vertical displacement of the soil mainly occurs during the construction of the central pilot tunnel when the the double-side drift method is used. The bending moments at the junctions of the initial supports and temporary supports are very large in the construction process by the CD method and double-side drift method due to stress concentration. Compared with the CD method, the double-side drift method results in smaller bending moments in the initial support. In the CD method for construction, the excavation of the right-side pilot tunnel will lead to the rapid increases of bending moments and internal force redistribution of the temporary supports. Similarly, excavation of the central pilot tunnel in the double-side drift method will lead to the analogous effects.

Keywords: super-wide cross-section tunnel; excavation method; soil displacement; mechanical characteristics of support structures

0 引言

随着社会经济的发展,为满足交通功能的需求,城市道路设计通常会设置较多的匝道,从而导致隧道断面在主线与匝道分离处变宽。可以预见,在未

来的城市隧道建设中,超宽断面隧道会越来越多。

周丁恒等^[1]以广州市龙头山隧道为研究对象,根据现场监测数据,对不同围岩情况下的4车道隧道变形规律进行分析总结,并提出控制隧道大变形的工程措施。吴梦军等^[2]对4车道公路隧道在不同施工方法下的施工动态过程进行相似模型试验与数值模拟,研究4车道公路隧道围岩与结构位移、应力、应变及破坏区等的分布与发展规律,得到4车道

收稿日期: 2025-02-28

作者简介: 曹光晔(1994—),男,硕士,工程师,从事工程设计工作。

公路隧道在不同施工方法下的动态施工力学特征。徐前卫等^[3]以深圳市东部过境高速公路连接线工程为例,针对谷对岭Y形喇叭口大断面分岔隧道,通过室内地质力学模型试验和数值模拟等手段,对大断面隧道围岩的渐进性破坏过程、岩体内部变形和应力变化规律展开研究。章慧健等^[4-7]分析了超大跨度隧道分部开挖下的力学特征。徐林生^[8]通过监测数据对大断面隧道衬砌结构受力特征进行研究。

综上所述,当前学术界已对超宽断面隧道的受力变形特征进行研究,但大部分成果集中于4车道断面隧道(隧道宽度约为20 m)。对于开挖宽度更大的超宽断面隧道(如6车道及以上)的结构受力变形特性相关研究较少。此外,大多数针对超宽断面隧道的研究,是基于双侧壁导坑法施工进行分析。本文在前人研究的基础上,以广东省某隧道工程为例,通过数值模拟分析,对开挖宽度更大的断面隧道,在强风化花岗岩层地层中和不同开挖工法下的结构受力特征进行分析研究。

1 工程概况

某隧道工程位于广东地区,隧道采用钻爆法施工,在主线与匝道分、合流处存在3种超宽断面隧道,隧道开挖宽度分别为18.061,23.101和25.855 m。各隧道断面开挖轮廓尺寸如图1至图3所示。

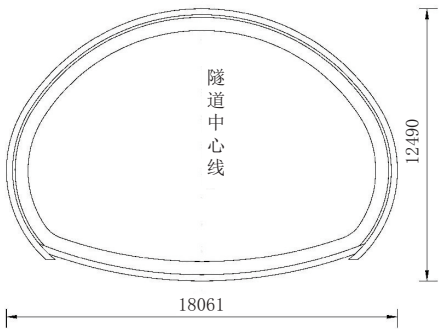


图1 断面1(单位:mm)

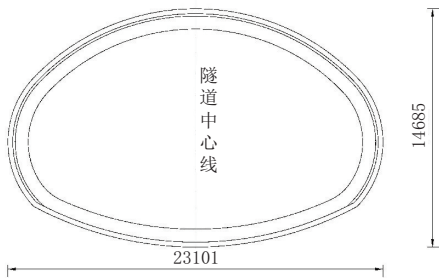


图2 断面2(单位:mm)

本工程超宽断面隧道大部分位于强风化花岗岩地层。因此,本文以强风化花岗岩层为工程地质条

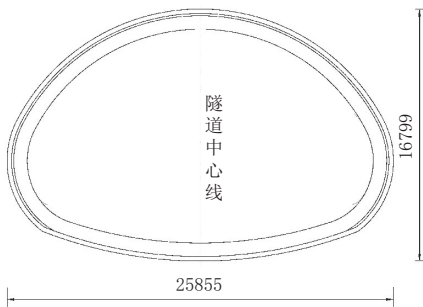


图3 断面3(单位:mm)

件,对比分析各类型超宽断面隧道在不同开挖工法下的结构受力特征。

2 模型建立

2.1 有限元模型

本文采用MIDAS GTS有限元计算软件,建立二维平面应变模型进行分析(见图4)。土体单元采用平面应变单元模拟,初支、二衬及临时支撑采用梁单元模拟,土体采用摩尔—库伦本构模型模拟。模型底部为固定约束边界,两侧为水平方向约束边界。网格单元尺寸为0.5~1.0 m。

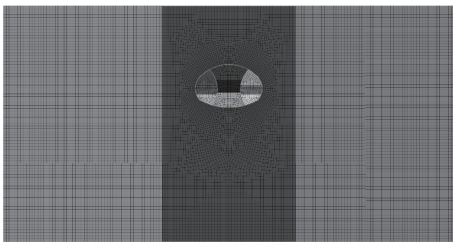


图4 有限元计算模型图

项目团队根据地质勘察资料确定土层重度、弹性模量、黏聚力和内摩擦角等土层参数(见表1)。

表1 土体物理力学参数表

土层	弹性模量/MPa	泊松比	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
强风化花岗岩	282	0.4	20	26	29

各隧道断面衬砌结构设计参数与结构材料参数如表2所示。

表2 隧道衬砌结构设计参数表

断面类型	初支	二衬	临时支撑
断面1	280 mm C25喷射混凝土	600 mm C35钢筋混凝土	220 mm C25喷射混凝土
断面2	300 mm C25喷射混凝土	800 mm C35钢筋混凝土	220 mm C25喷射混凝土
断面3	300 mm C25喷射混凝土	900 mm C35钢筋混凝土	220 mm C25喷射混凝土

2.2 开挖工法

暗挖隧道常用的开挖工法有台阶法、中隔壁法

(以下简称“CD 法”)和双侧壁导坑法。台阶法是将隧道断面分为上、下台阶错距开挖,上台阶开挖超前一定距离后同步推进下台阶施工(见图 5)。CD 法通过设置临时中隔壁,将大断面分为左、右两部分,分部开挖并设置支护,利用中隔壁传递荷载,减小开挖跨度对围岩的扰动(见图 6)。双侧壁导坑法通过先行开挖两侧导坑,形成初期支护结构,然后再开挖中间核心土,从而在施工过程中形成“眼镜”状分块。这种工法可利用初期支护结构控制围岩变形(见图 7)。从经济性的角度看,台阶法施工步骤少,支护形式简单,施工效率高,经济性较好;CD 法需进行分部开挖,并设置临时支护,经济性次之;双侧壁导坑法施工步骤多,需设置的临时支护多,施工效率低,经济性最差。

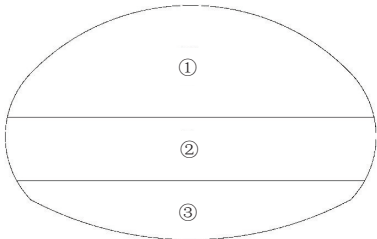


图 5 台阶法开挖步骤示意图

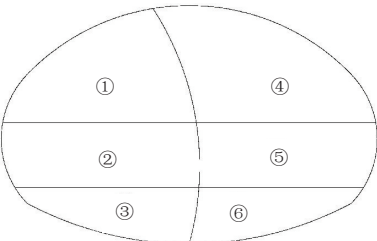


图 6 CD 法开挖步骤示意图

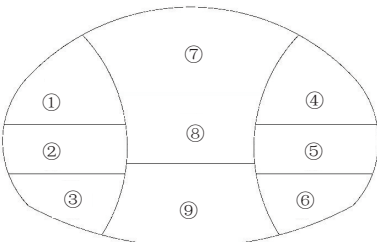


图 7 双侧壁导坑法开挖步骤示意图

计算工况如表 3 所示。

3 不同开挖工法结果对比

3.1 周边土体竖向位移

3.1.1 台阶法施工

由表 4 可知,对于断面 1,在上台阶施工过程中,隧道拱顶部位土体最大竖向位移约为 3.8 mm;在下台阶施工过程中,随着周边土体应力进一步释放,隧

表 3 计算工况表

计算工况	断面类型	开挖工法
J1-1	断面 1	台阶法
J1-2	断面 1	CD 法
J2-1	断面 2	台阶法
J2-2	断面 2	CD 法
J2-3	断面 2	双侧壁导坑法
J3-1	断面 3	台阶法
J3-2	断面 3	CD 法
J3-3	断面 3	双侧壁导坑法

道拱顶部位土体竖向位移进一步发展,最大竖向位移约为 12.0 mm。待初支仰拱施工完成后,隧道周边土体位移基本稳定。

表 4 断面 1 不同开挖步骤中隧道周边土体竖向位移 单位:mm

施工步骤	周边土体最大 竖向位移	该施工步骤中土体 竖向位移变化
上台阶施工	3.8	—
下台阶施工	12.0	8.2

由表 5 可知,对于断面 2,在上台阶施工过程中,隧道拱顶部位土体最大竖向位移约为 5.9 mm;在中台阶施工过程中,随着周边土体应力进一步释放,隧道拱顶部位土体竖向位移进一步发展,最大竖向位移约为 20.1 mm。隧道周边土体竖向位移变形主要发生在上台阶和中台阶开挖过程中,下台阶施工对土体竖向位移的影响较小。

表 5 断面 2 不同开挖步骤中隧道周边土体竖向位移 单位:mm

施工步骤	周边土体最大 竖向位移	该施工步骤中土体 竖向位移变化
上台阶施工	5.9	—
中台阶施工	20.1	14.2
下台阶施工	18.9	-1.2
初支仰拱施工	21.0	2.1

由表 6 可知,对于断面 3,在上台阶施工过程中,隧道拱顶部位土体最大竖向位移约为 5.0 mm;在中台阶施工过程中,随着周边土体应力进一步释放,隧道拱顶部位土体竖向位移进一步发展,最大竖向位移约为 23.4 mm。隧道周边土体竖向位移变形主要发生在中台阶开挖过程中。

表 6 断面 3 不同开挖步骤中隧道周边土体竖向位移 单位:mm

施工步骤	周边土体最大 竖向位移	该施工步骤中土体 竖向位移变化
上台阶施工	5.0	—
中台阶施工	18.0	13.0
下台阶施工	23.4	5.4
初支仰拱施工	22.9	-0.5

3.1.2 CD 法施工

由表 7 可知,对于断面 1,采用 CD 法施工,在不

同的施工步序中,周边土体最大位移分别为 1.6,3.5,2.6,3.9,11.6,12.0,12.9 mm。最大竖向位移变化发生在右下导洞施工过程中,在该施工步序中,竖向位移变化为 7.7 mm。在初支封闭成环后,临时中隔壁的拆除对土体竖向位移的影响不大,仅增大 0.9 mm。

表 7 断面 1 不同开挖步序中隧道周边土体竖向位移 单位:mm

施工步序	周边土体最大 竖向位移	该施工步序中土体 竖向位移变化
左上导洞施工	1.6	—
左下导洞施工	3.5	1.9
左侧初支仰拱施工	2.6	-0.9
右上导洞施工	3.9	1.3
右下导洞施工	11.6	7.7
右侧初支仰拱施工	12	0.4
临时中隔壁拆除	12.9	0.9

由表 8 可知,对于断面 2,采用 CD 法施工,最大竖向位移变化发生在右下导洞施工过程中,在该施工步序中,竖向位移增大 11.5 mm;其次为左导洞中台阶施工,在该施工步序中,竖向位移增大 5.3 mm。在初支封闭成环后,临时中隔壁的拆除对土体竖向位移的影响不大,仅增大 1.9 mm。最终隧道拱部土体最大竖向位移为 22.6 mm。

表 8 断面 2 不同开挖步序中隧道周边土体竖向位移 单位:mm

施工步序	周边土体最大 竖向位移	该施工步序中土体 竖向位移变化
左上导洞施工	2.5	—
左中导洞施工	7.8	5.3
左下导洞施工	5.8	-2.0
左侧初支仰拱施工	5.6	-0.2
右上导洞施工	6.5	0.9
右中导洞施工	18.0	11.5
右下导洞施工	20.1	2.1
右侧初支仰拱施工	20.7	0.6
临时中隔壁拆除	22.6	1.9

由表 9 可知,对于断面 3,采用 CD 法施工,最大竖向位移变化发生在右中、右下导洞施工过程中,在该施工步序中,竖向位移分别增大 5.7 mm 和 6.6 mm;其次为左导洞中台阶施工,在该施工步序中,竖向位移增大 4.4 mm。在初支封闭成环后,临时中隔壁的拆除对土体竖向位移的影响不大,仅增大 3.7 mm。最终隧道拱部土体最大竖向位移为 25.2 mm。

3.1.3 双侧壁导坑法施工

由表 10 可知,对于断面 2,采用双侧壁导坑法施工,左侧和右侧导洞施工引起的土体竖向位移很小,土体竖向位移变化基本发生在中导洞施工过程中。在中导坑上、中、下台阶施工过程中,土体竖向位移

表 9 断面 3 不同开挖步序中隧道周边土体竖向位移 单位:mm

施工步序	周边土体最大 竖向位移	该施工步序中土体 竖向位移变化
左上导洞施工	3.6	—
左中导洞施工	8	4.4
左下导洞施工	8	0
左侧初支仰拱施工	7.4	-0.6
右上导洞施工	7.4	0
右中导洞施工	13.1	5.7
右下导洞施工	19.7	6.6
右侧初支仰拱施工	20.4	0.7
临时中隔壁拆除	24.1	3.7

的变化值分别为 5.2,10.7,6.4 mm。最终隧道拱部土体最大竖向位移为 25.2 mm。

表 10 断面 2 不同开挖步序中隧道周边土体竖向位移 单位:mm

施工步序	周边土体最大 竖向位移	该施工步序中土体 竖向位移变化
左上导洞施工	1.4	—
左中导洞施工	2.7	1.3
左下导洞施工	1.2	-1.5
左侧初支仰拱施工	1.5	0.3
右上导洞施工	1.2	-0.3
右中导洞施工	2.9	1.7
右下导洞施工	1.6	-1.3
右侧初支仰拱施工	1.7	0.1
中上导洞施工	6.9	5.2
中中导洞施工	17.6	10.7
中下导洞施工	24.0	6.4
中部初支仰拱施工	24.0	0
临时中隔壁拆除	25.2	1.2

由表 11 可知,对于断面 3,采用双侧壁导坑法施工,左侧和右侧导洞施工引起的土体竖向位移很小,土体竖向位移变化基本发生在中导洞施工过程中。在中导坑上、中、下台阶施工过程中,土体竖向位移的变化值分别为 4.5,15.0,11.2 mm。最终隧道拱部土体最大竖向位移为 37.8 mm。

3.1.4 对比分析

首先,从控制每一个开挖步序的土体竖向变形角度看,双侧壁导坑法的施工效果最好,CD 法次之,台阶法最差。

其次,在 CD 法施工过程中,土体竖向位移主要发生在右侧导洞施工过程中。这主要有 2 个原因:一是随着右侧导洞的开挖,右侧导洞隧道上方的土体松散区进一步发展,进而与左侧导洞隧道上方的土体松散区连通;二是随着临时支撑右侧土体的开挖,临时支撑对顶部土体的约束作用逐渐降低。

最后,在双侧壁导坑法施工过程中,土体竖向位

表 11 断面3不同开挖步序中隧道周边土体竖向位移 单位:mm

施工步序	周边土体最大 竖向位移	该施工步序中土体 竖向位移变化
左上导洞施工	1.6	—
左中导洞施工	5.8	4.2
左下导洞施工	5.8	0
左侧初支仰拱施工	5.1	-0.7
右上导洞施工	4.4	-0.7
右中导洞施工	5.3	0.9
右下导洞施工	5.3	0
右侧初支仰拱施工	4.6	-0.7
中上导洞施工	8.7	4.1
中中导洞施工	23.7	15.0
中下导洞施工	34.9	11.2
中部初支仰拱施工	35.5	0.6
临时中隔壁拆除	37.8	2.3

移主要发生在中导洞施工过程中,原因与CD法相同。

3.2 支护结构内力

3.2.1 台阶法施工

从分布上看,在台阶法施工过程中,弯矩较大处主要出现在上、下台阶开挖过程中初支的拱脚处,即锁脚锚管或锁脚锚杆的布置处(见图8和图9)。待初支仰拱封闭成环后,初支弯矩最大的位置为拱脚处。除拱脚处外,拱腰两侧的弯矩也较大,隧道拱顶部位为拱形结构,因此弯矩较小。轴力较大处主要出现在初支拱腰处,仰拱处的轴力最小。

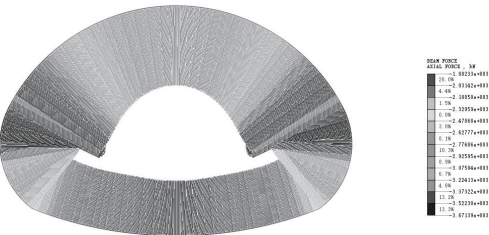


图 8 初支轴力图(断面3)(单位:kN)

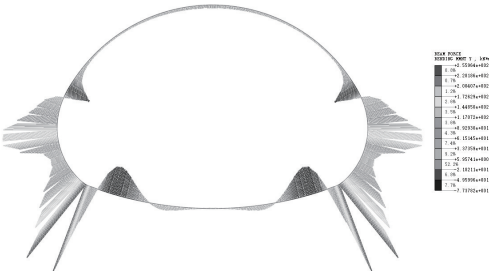


图 9 初支弯矩图(断面3)(单位:kN·m)

从表 12 和表 13 中的数值来看,对于断面 1,拱脚应力集中处的弯矩约为 259.9 kN·m;仰拱边缘处最大弯矩约为 65.4 kN·m;拱腰处最大弯矩约为 45.0 kN·m。对于断面 2,拱脚应力集中处的弯矩约

为 204.6 kN·m;仰拱边缘处最大弯矩约为 50.0 kN·m;拱腰处最大弯矩约为 68.0 kN·m。对于断面 3,拱脚应力集中处的弯矩约为 256.0 kN·m;仰拱边缘处最大弯矩约为 77.4 kN·m;拱腰处最大弯矩约为 151.0 kN·m。

表 12 初支轴力 单位:kN

部位	断面 1	断面 2	断面 3
拱顶	2 112	2 413.0	2 734
拱腰	2 737	3 384.0	3 668
拱脚	1 827	2 039.0	2 502
仰拱	1 342	1 461.5	2 243

表 13 初支弯矩 单位:kN·m

部位	断面 1	断面 2	断面 3
拱顶	8.0	31.0	7.4
拱腰	45.0	68.0	151.0
拱脚	259.9	204.6	256.0
仰拱	65.4	50.0	77.4

3.2.2 CD法施工

从分布上看,在施工过程中,随着左导洞上、下台阶的开挖,初支弯矩最大处主要出现在临时中隔壁与初支交接处,之后随着右侧导洞的施工,临时中隔壁的弯矩逐渐增大(见图 10 和图 11)。待初支封闭成环并拆除临时中隔壁支撑后,弯矩最大处出现在拱脚处,以及原临时中隔壁支撑与初支交接处。拱腰处轴力最大,拱顶处和仰拱处轴力较小。临时钢支撑的轴力在左下导洞完成后达到最大值,随着右侧导洞的开挖,轴力逐渐减小(见图 12)。

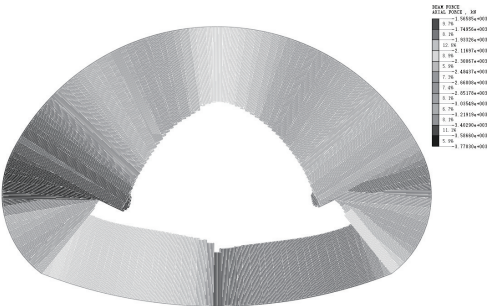


图 10 初支轴力图(断面3)(单位:kN)

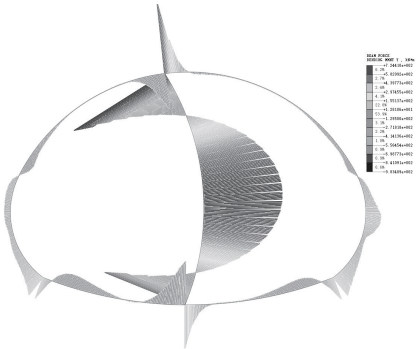


图 11 初支弯矩图(断面3,临时中隔壁拆除前)(单位:kN·m)

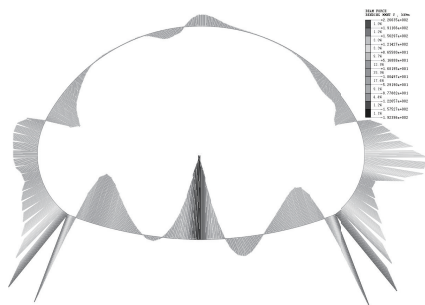


图 12 初支弯矩图(断面 3,临时中隔壁拆除后)(单位:kN·m)

3.2.2.1 断面 1

由表 14 和表 15 可知,在左侧导洞施工过程中,由于临时中隔壁支撑与初支交接处的应力集中,弯矩最大值约为 360.4 kN·m;拱腰处弯矩最大值约为 39.4 kN·m;左侧拱顶初支弯矩最大值约为 66.0 kN·m;临时中隔壁支撑弯矩最大值约为 41.2 kN·m。随着右侧导洞的施工,在临时中隔壁支撑与初支交接处,初支弯矩减小,弯矩最大值约为 135.7 kN·m,该处临时中隔壁支撑弯矩约为 237.5 kN·m。此外,左侧拱腰处弯矩变化不大,为 35.2 kN·m;仰拱处弯矩有所增大,为 106.5 kN·m;临时中隔壁支撑弯矩急剧增大,为 121.4 kN·m。待初支成环并拆除临时中隔壁支撑后,原初支与临时中隔壁处应力重新分布,弯矩减小为 73.1 kN·m;拱腰处和仰拱处的弯矩变化不大;拱脚处仍存在应力集中现象,弯矩最大值约为 269.5 kN·m。

待初支成环并拆除临时中隔壁后,拱腰处轴力最大,为 2 690 kN;拱顶处和仰拱处的轴力最小,分别为 1 530 kN 和 1 567 kN。

3.2.2.2 断面 2

在左侧导洞施工过程中,由于临时中隔壁支撑与初支交接处的应力集中,弯矩最大值约为 457.4 kN·m;拱腰处弯矩最大值约为 34.5 kN·m;左侧拱顶初支弯矩最大值约为 96.2 kN·m;临时中隔壁支撑弯矩最大值约为 71.0 kN·m。随着右侧导洞的施工,在临时中隔壁支撑与初支交接处,初支弯矩减小,弯矩最大值约为 199.0 kN·m,该处临时中隔壁支撑弯矩约为 277.8 kN·m。此外,左侧拱腰处弯矩变化不大,为 59.2 kN·m;仰拱处弯矩有所增大,为 128.7 kN·m;临时中隔壁支撑弯矩急剧增大,为 171.6 kN·m。待初支成环并拆除临时中隔壁支撑后,原初支与临时中隔壁处应力重新分布,弯矩减小为 120.6 kN·m;拱腰处和仰拱处弯矩变化不大;拱脚处仍存在应力集中现象,弯矩最大值约为 249.3 kN·m。

待初支成环并拆除临时中隔壁后,拱腰处轴力

最大,为 3 378 kN;拱顶处和仰拱处的轴力最小,分别为 1 838 kN 和 1 989 kN。

3.2.2.2 断面 3

在左侧导洞施工过程中,由于临时中隔壁支撑与初支交接处的应力集中,弯矩最大值约为 743.4 kN·m;拱腰处弯矩最大值约为 74.5 kN·m;左侧拱顶初支弯矩最大值约为 83.7 kN·m;临时中隔壁支撑弯矩最大值约为 299.4 kN·m。随着右侧导洞的施工,在临时中隔壁支撑与初支交接处,初支弯矩减小,弯矩最大值约为 659.4 kN·m,该处临时中隔壁支撑弯矩约为 983.4 kN·m。此外,左侧拱腰处弯矩变化不大,为 75.0 kN·m;仰拱处弯矩有所增大,为 398.7 kN·m;临时中隔壁支撑中部弯矩急剧增大,为 724.4 kN·m。待初支成环并拆除临时中隔壁支撑后,原初支与临时中隔壁处应力重新分布,弯矩减小为 20.2 kN·m;拱腰处和仰拱处弯矩变化不大;拱脚处仍存在应力集中现象,弯矩最大值约为 226.0 kN·m。

待初支成环并拆除临时中隔壁后,拱腰处轴力最大,为 3 766.8 kN;拱顶处和仰拱处的轴力最小,分别为 2 180.8 kN 和 2 217.3 kN。

表 14 初支轴力		单位:kN		
部位	断面 1	断面 2	断面 3	
拱顶	1 530	1 838	2 180.8	
拱腰	2 690	3 378	3 766.8	
拱脚	1 752	2 208	2 453.7	
仰拱	1 567	1 989	2 217.3	
临时中隔壁	1 391	1 715	2 092.8	

表 15 初支弯矩		单位:kN·m		
部位	断面 1	断面 2	断面 3	
初支与临时钢支撑交接处(初支)	73.1	120.6	20.2	
拱顶	14.7	35.0	25.7	
拱腰	36.2	61.0	75.0	
拱脚	269.5	249.3	226.0	
仰拱	108.1	129.5	192.4	
初支与临时钢支撑交接处(临时钢支撑)	237.5	457.4	983.4	
临时钢支撑(中部)	121.4	171.6	724.4	

3.2.3 双侧壁导坑法施工

从分布上看,在双侧壁导坑法施工过程中,随着左侧导洞上、下台阶的开挖,初支弯矩最大处主要出现在临时中隔壁与初支交接处,之后随着右侧导洞的施工,右侧导洞的初支和临时中隔壁支撑的内力基本一致。这说明左、右侧导洞开挖后,两者间的相互影响很小(见图 13 至图 15)。随着中导洞的开挖,临时中隔壁支撑弯矩迅速增大,初支与临时支撑交接处的弯矩变小。待初支封闭成环并拆除临时中隔壁后,

壁支撑后,弯矩最大处出现在拱脚处,以及原临时中隔壁支撑与初支交接处。

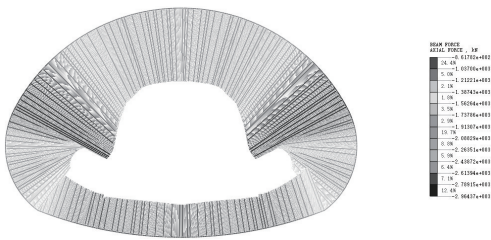


图 13 初支轴力图(断面3)(单位:kN)

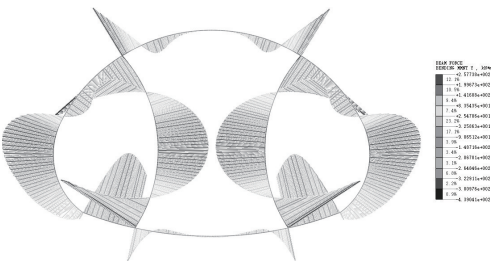


图 14 初支弯矩图(断面3,临时中隔壁拆除前)(单位:kN·m)

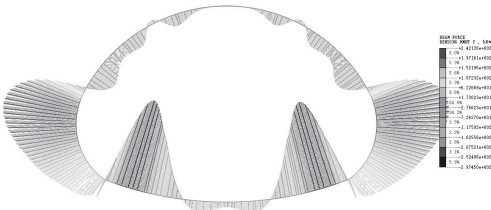


图 15 初支弯矩图(断面3,临时中隔壁拆除后)(单位:kN·m)

3.2.3.1 断面2

由表 16 和表 17 可知,在左侧导洞施工过程中,由于临时中隔壁支撑与初支交接处的应力集中,弯矩最大值约为 363.0 kN·m;拱腰处弯矩最大值约为 38.5 kN·m;左侧拱顶初支弯矩最大值约为 77.9 kN·m;临时中隔壁支撑弯矩最大值约为 45.3 kN·m。随着中导洞的施工,在临时中隔壁支撑与初支交接处,初支弯矩减小,弯矩最大值约为 250.0 kN·m,该处临时中隔壁支撑弯矩约为 304.4 kN·m。此外,左侧拱腰处弯矩增大,为 76.9 kN·m;仰拱弯矩增大,为 198.2 kN·m;临时中隔壁支撑弯矩急剧增大,为 152.3 kN·m。待初支成环并拆除临时中隔壁后,原初支与临时中隔壁处的应力重新分布,弯矩减小为 62.2 kN·m;拱腰处和仰拱处的弯矩变化不大;拱脚处仍存在应力集中现象,弯矩最大值约为 179.3 kN·m。

待初支成环并拆除临时中隔壁后,拱腰处轴力最大,为 2 968 kN,拱顶处和仰拱处的轴力最小,分别为 1 936 kN 和 1 457 kN。

3.2.3.2 断面3

从数值上看,在左侧导洞施工过程中,临时中隔壁支撑与初支交接处的应力集中,弯矩最大值约为

387.3 kN·m;拱腰处弯矩最大值约为 70.1 kN·m;左侧拱顶初支弯矩最大值约为 91.8 kN·m;临时中隔壁支撑弯矩最大值约为 28.9 kN·m。随着中导洞的施工,在临时中隔壁支撑与初支交接处,初支弯矩减小,弯矩最大值约为 257.7 kN·m,该处临时中隔壁支撑弯矩约为 439.0 kN·m。此外,左侧拱腰处弯矩增大,为 235.7 kN·m;仰拱处弯矩增大,为 326.9 kN·m;临时中隔壁支撑弯矩急剧增大,为 224.9 kN·m。待初支成环并拆除临时中隔壁后,原初支与临时中隔壁处的应力重新分布,弯矩减小为 25.9 kN·m;拱腰处和仰拱处的弯矩变化不大;拱脚处弯矩最大值约为 74.7 kN·m。

待初支成环并拆除临时中隔壁后,拱腰处轴力最大,为 2 964.4 kN;拱顶处和仰拱处的轴力最小,分别为 2 036.2 kN 和 1 510.3 kN。

表 16 初支轴力		单位:kN
部位	断面2	断面3
拱顶	1 936	2 036.2
拱腰	2 968	2 964.4
拱脚	1 797	1 510.3
仰拱	1 457	1 263.3
临时中隔壁	1 462	1 617.1

表 17 初支弯矩		单位:kN·m
部位	断面2	断面3
初支与临时钢支撑交接处(初支)	62.2	25.9
拱顶	4.8	33.9
拱腰	77.8	242.1
拱脚	179.3	74.7
仰拱	179.6	297.5
初支与临时钢支撑交接处(临时钢支撑)	250.0	439.0
临时钢支撑(中部)	152.3	224.9

3.2.4 对比分析

在弯矩方面,从分布上看,台阶法施工形成的初支,其应力主要集中于拱脚处;CD法和双侧壁导坑法施工形成的初支,其应力除集中于拱脚处外,在原初支与临时中隔壁支撑交接处也较大。从数值上看,相较于台阶法,CD法和双侧壁导坑法在施工过程中,由于初支与临时中隔壁支撑处的应力集中,形成的初支弯矩更大。此外,与CD法相比,双侧壁导坑法施工的导洞更小,应力集中导致的弯矩更小,形成的初支弯矩也更小。

在轴力方面,从分布上看,各种开挖工法施工形成的初支轴力,最大值均位于拱腰处,其次为拱脚处,拱顶和仰拱处的轴力相对较小。从数值上看,总

体而言,CD法与台阶法施工形成的初支轴力较大,双侧壁导坑法施工形成的初支轴力相对较小,以拱腰处的初支轴力为例,CD法与台阶法施工形成的轴力分别为3 766.8 kN和3 688.0 kN,双侧壁导坑法施工形成的初支轴力为2 964.4 kN。

采用双侧壁导坑法施工可有效降低临时中隔壁支撑的轴力。

与台阶法相比,CD法和双侧壁导坑法在施工过程中,由于应力集中,初支与临时支撑交接处的弯矩很大,因此施工中需重点监测。

与CD法相比,双侧壁导坑法施工形成的初支弯矩更小。

在CD法施工过程中,右侧导洞土体的开挖会导致临时支撑弯矩迅速增大和内力重新分布。在双侧壁导坑法施工过程中,左、右侧导洞开挖的相互影响可忽略不计,但中导洞土体的开挖会导致临时支撑弯矩迅速增大和内力重新分布。因此,在此开挖步序中,需重点监测临时支撑的内力变化情况。

4 结 论

本文通过建立二维有限元模型,对超宽断面隧道的围岩变形和支护结构受力特征进行分析,得到以下结论。

(1)在CD法施工过程中,土体竖向位移主要发生在右侧导洞施工过程中。这主要有2个原因:一是随着右侧导洞的开挖,右侧导洞隧道上方的土体松散区进一步发展,进而与左侧导洞隧道上方的土体松散区连通;二是随着临时支撑右侧土体的开挖,

临时支撑对顶部土体的约束作用逐渐降低。

(2)在双侧壁导坑法施工过程中,土体竖向位移主要发生在中导洞施工过程中,原因与CD法相同。

(3)与台阶法相比,在CD法和双侧壁导坑法施工过程中,由于应力集中,初支与临时支撑交接处的弯矩很大,因此施工过程中需重点监测。

(4)在CD法施工过程中,右侧导洞土体的开挖会导致临时支撑弯矩迅速增大和内力重新分布。在双侧壁导坑法施工过程中,左、右侧导洞开挖的相互影响可忽略不计,而中导洞土体的开挖会导致临时支撑弯矩迅速增大和内力重新分布。因此,在此开挖步序中,需重点监测临时支撑的内力变化情况。

参考文献:

- [1] 周丁恒,曹力桥,曲海锋,等.不同围岩情况下特大断面公路隧道施工变形监测与控制[J].岩石力学与工程学报,2009,28(12):2510-2519.
- [2] 吴梦军,黄伦海.四车道公路隧道动态施工力学研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增刊1):3057-3062.
- [3] 徐前卫,丁文其,朱合华,等.超大断面隧道软弱围岩卸荷渐进破坏特性研究[J].土木工程学报,2017,50(1):104-114.
- [4] 章慧健,龚伦,仇文革,等.隧道分部开挖的围岩松动区演变分析[J].岩土工程学报,2014,36(12):2323-2329.
- [5] 郑康成,丁文其,金威,等.特大断面隧道分步施工动态压力拱分析研究[J].岩土工程学报,2015,37(增刊1):72-77.
- [6] 施有志,李建锋,李汪颖,等.扁平超大断面隧道的施工力学特征及其动力稳定性分析[J].上海交通大学学报,2015,49(7):1023-1029.
- [7] 罗彦斌,董方方,王传武,等.考虑分部开挖的超大跨度公路隧道围岩压力计算方法研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(8):1637-1646.
- [8] 徐林生.大断面高速公路隧道复合式衬砌结构受力监测分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2009,28(3):528-530.