

大跨度浅埋暗挖法隧道设计关键技术研究

刘 斌¹ 曲树盛²

1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司 天津 300381

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所 天津 300381

摘要: 本文结合长治市长北干线与青兰高速长邯段交叉工程下穿青兰高速暗挖设计, 深入对影响暗挖地表沉降的主要因素进行了有限元对比分析和试验的验证, 主要分析了导洞的尺寸、开挖顺序、锁脚锚杆、顶板形状、覆土厚度的影响, 通过离心机试验验证了上下导洞开挖对地表沉降影响的差别。

关键词: 暗挖; 沉降; 离心机

一、概况

长治市长北干线与青兰高速长邯段交叉工程(安阳互通立交), 该工程位于长治市北出口, 立交区域内涉及相交道路分别为长北干线、襄垣连接线、G309及青兰高速。长北干线为城市主干路, 全长2.48km, 红线宽度55m。长北干线自南向北分别下穿青兰高速, 隧道下穿高速两处暗挖, 最小暗挖覆土2.8m, 暗挖期间高速公路正常通行。

暗挖隧道尺寸净宽14.75m, 净高7.97m, 具体形状如下图1:

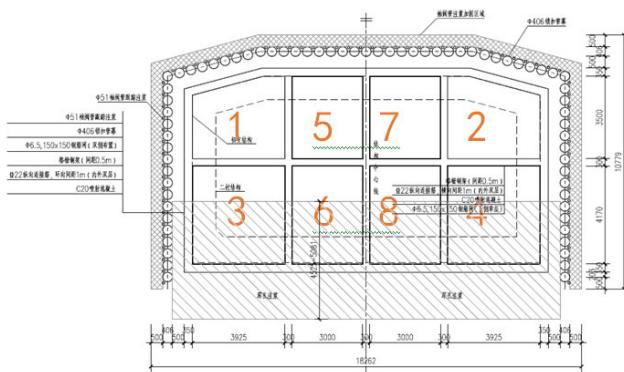


图1 暗挖初支结构图

主要支护参数设计见下表1。

二、隧道施工步骤

- (1) 施作门框梁处的围护结构, 门框梁顶部土方放坡;
- (2) 施工门框梁下的承载钻孔灌注桩;
- (3) 按照预定工艺, 将顶层管幕的钢管按设计轴线依次施工, 并利用钢管接头使之互相连接形成管幕, 利用袖阀管进行注浆;

表1 主要支护参数表

项目	材料及规格	参数
初支	钢筋网	φ6.5, 150×150mm 双侧布置
	锁脚锚管	φ42X3.25 钢焊管, L=2.0m 台阶处节点每处一根 并注浆
	喷射混凝土	C20 厚度0.30m或者0.35m
	格栅钢架	φ25、φ22、φ14、 φ8 钢筋 纵向间距0.5m
	纵向连接筋	φ22 钢筋 内外双层, 环向间距1m

(4) 在顶层管幕的保护下, 开挖顶层门框梁处的土体, 及时浇筑顶层门框梁, 把管幕头部浇入门框梁内;

(5) 从上到下依次施工侧向管幕, 并利用钢管接头使之互相连接形成管幕, 利用袖阀管进行注浆;

(6) 在管幕的保护下, 开挖门框柱处的土体, 及时浇筑顶层门框柱;

(7) 按照施工步序图依次施作上下层导洞, 浇筑二衬结构。

三、有限元对比分析

在暗挖设计中对地表沉降产生影响的主要有以下内容:(1) 导洞的尺寸、(2) 开挖顺序、(3) 锁脚锚杆、(4) 顶板形状、(5) 覆土厚度, 本项目计算中主要针对以上因素进行了建模分析。

1. 有限元建模参数选取

(1) 土层简化

现场的地质条件错综复杂, 土层厚度变化不一, 本次课题结合暗挖穿越土层的特点简化为两层土层, 第一层位于暗挖初支顶部以上, 其余均为第二层土, 具体参数见下表:

表2 土层参数表

	模型中名称	Es (MPa)	γ (kN/m ³)
土层一	加固土	50	20
土层二	土	50	20

(2) 土层建模尺寸的确定

为更好地模拟实际情况,同时又不增加过大的计算量,本次有限元分析取暗挖两侧各25m范围内土体,暗挖底18m范围内土体进行建模计算。

(3) 网格划分

本次网格划分采用程序自动划分的方法,网格尺寸控制为0.5m。其中初支、钢支撑及锁脚锚杆采用1D单元,其余采用2D单元。

(4) 施工过成模拟

有限元分析中除清晰划分不同施工阶段外,对初支的刚度模拟是变形计算结果准确与否的关键。

通过反复试算调整初支刚度并与现场实际监测结果对比,最后确定采用将混凝土弹模降低至1%来模拟初支刚度对沉降的影响,经对比计算采用此刚度时暗挖中点地表沉降34.7mm,现场实测此处地表沉降35.3mm,相差不足2%,基本与现场实测一致。

2.有限元分析对比工况

(1) 导洞数量的对比

本课题分别计算对比6个、8个、10个导洞对暗挖变形的影响。

(2) 导洞的开挖顺序

分别模拟顺序开挖、先外侧后内侧、先内侧后外侧、上下间隔和上下同步的不同开挖顺序,以对比其对地表变形的影响。

(3) 锁脚锚杆

通过对不同锚杆角度(30°、45°、60°)的计算分析,对比锁脚锚杆对土体变形的影响。

(4) 顶板形状

对比分析平顶和拱顶与梯形顶板在暗挖过程中的变形差异。

(5) 覆土厚度

分别分析覆土深度在2m、3m、5m、8m、10m、15m、20m、30m时的土体变化规律。

(6) 开挖导洞大小

不同尺寸的开挖导洞对沉降存在一定影响,实际项目中大多数暗挖的导洞尺寸并不一致,分别对均分导洞、两边大中间小、两边小中间大的三种导洞尺寸布置进行

计算对比。

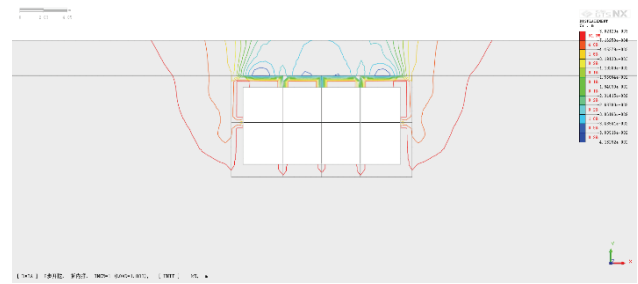


图2 8洞拆撑沉降

不同工况结果详见下表:

表3 不同工况计算结果统计表

模型号	研究内容	工况情况	地表沉降 (mm)
1	导洞数量	6	41.2
2		8	34.7
3		10	29.9
4	开挖顺序	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 (同2)	34.7
5		1, 3, 5, 6, 7, 8, 2, 4	30.1
6		13, 56, 78, 24	38.5
7		5, 6, 7, 8, 1, 3, 2, 4	30.4
8		56, 78, 13, 24	30.4
9	锁脚锚杆	无(同2)	34.7
10		30°	34.5
11		45°	34.4
12		60°	34.3
13	顶板形状	平(同2)	34.7
14		斜	29.7
15		拱	29.6
16	覆土厚度	2	27.5
17		3(同2)	34.7
18		5	47.4
19		8	61.1
20		10	67.2
21		15	73.8
22		20	73
23		30	71.8
24	导洞大小	均分	36.4
25		边小中大	38.5
26		边大中小(同2)	34.7

四、试验对比分析

1.试验原理

砂、土是复杂的松散体系,对其进行评价、土力学计算和理论研究,都要通过土工试验提供必要的数据和结论来进行分析。通过室内制作与现场符合比尺关系的

模型,通过改变不同的外部条件,分析模型的稳定性是常用的物理模型试验手段。常规小比尺模型由于其自重产生的应力远低于原型,因而不能再现原型的特性,无法满足岩土工程中相应的比尺关系,所以试验结果难以和实际工程相符合。为解决这个问题,一种方法是将模型置于超重力场中,使1/N缩尺的模型在N倍g的离心加速度的空间进行试验。由于惯性力与重力绝对等效,且高加速度不会改变工程材料的性质,从而使模型与原型的应力应变相等、变形相似、破坏机理相同,能再现原型特性,这就是土工离心机模型试验的原理。

2. 相似准则

确定相似比是离心机模型试验正确模拟原型的关键。确定的方法一般有两种,依据控制方程进行量纲分析的方法和按力学相似规律的分析法。下表列出了常用的土工离心机模型试验的相似比。

表4 常用离心试验的基本相似比尺
(模型和原型采用相同材料)

类型	物理量	相似关系	试验取值
材料特性	弹性模量	S_E	1
	泊松比	S_ν	1
	质量密度	S_ρ	1
几何特性	竖向长度	S_{ly}	1/N
	水平长度	S_{lx}	1/N
	抗弯刚度	S_{EI}	1/N ⁴
	线位移	$S_y=S_{ly}$ $S_x=S_{lx}$	1/N
	速度	$S_v=S_l/S_t$	1
动力特性	质量	$S_m=S_\rho S_{ly} S_{lx}^2$	1/N ³
	刚度	$S_k=S_{EI}/S_{ly}^3$	1/N
	阻尼	$S_c=S_m/S_t$	1/N ²
	时间	$S_t=(S_m/S_k)^{0.5}$	1/N
	物理量	相似关系	试验取值
	频率	$S_f=1/S_t$	N
	水平速度	$S_{vx}=S_x/S_t$	1
	水平加速度	$S_{ax}=S_x/S_{t2}$	N
	重力加速度	S_g	N
	水平流速	$S_{ux}=S_{lx}/S_t$	1
	流量	$S_{Qx}=S_{ux} S_{lx} S_{ly}$	1/N ²
	水平压强	$S_p=S_\rho S_g S_{ly}$	1
	水平力	$S_{Fx}=S_\rho S_{lx} S_{ly}$	1/N ²
	竖向力	$S_{Fy}=S_\rho S_{lx}^2$	1/N ²
	集中力	$S_F=S_E S_{l2}$	1/N ²
	弯矩	$S_M=S_{Fx} S_{ly}$	1/N ³
	扭矩	$S_{Mt}=S_{Fx} S_{lx}$	1/N ³

3. 模型设计与加工

(1) 相似比设计

根据本次试验的主要研究内容,以安阳互通立交工程暗挖隧道1、3开挖洞室尺寸为原型。

结合试验室土工模型箱尺寸,综合确定本次模型试验的相似比为1:80,相似关系如下表所示。

表5 相似比设计

试验参数	单位	相似比尺 (模型:原型)
加速度	m/s ²	80
线性尺寸	m	1/80
抗弯刚度	Nm ²	1/804

(2) 模型设计

原型初支结构厚度为350mm,材料为C20混凝土,按等效抗弯刚度1:N⁴比尺进行相似设计。同时,由于实际暗挖施工过程中,土体开挖后初支结构不能及时支护到位,土体会存在一定的凌空面,产生一定的净空收敛,这一过程在数值分析中通常可以采用初支刚度折减的方法进行等效模拟,根据本项目实际工程的现场实际沉降数据分析,将初支结构刚度按1%进行折减考虑,能够较为准确的模拟地表沉降。基于以上分析计算,并结合模型材料强度、加工精度等因素,综合确定隧道初支模型采用尼龙材料进行加工,该材料的弹性模量为2.7GPa,按等效抗弯刚度相似比得到模型壁厚为2mm,该初支模型通过3D打印成型,如下图所示。土体采用标准砂进行制模。

本次试验主要对三种浅埋工况进行模拟,对应原型隧道的埋深分别为2m、5m、8m。

(3) 土体开挖模拟方法

土体开挖采用排液法进行试验模拟。初支结构模型加工为封闭箱体,内部充满水体,在初始状态下,水体可以限制初支的变形,模拟初始状态;试验开始后,排出模型内水体,初支结构发生变形,模拟土体开挖及初支受力变形,从而实现了对地表沉降进行试验模拟。

初支隧道模型在设计时考虑了进气孔和排水阀门,能够实现内部液体的全部排出,阀门的开关通过气动阀门进行控制。

(4) 试验工况

本次试验主要对三种浅埋工况进行模拟,埋深分别为2m、5m、8m,具体工况如下表所示。

表6 试验工况表

序号	初支埋深		开挖洞室
	原型/m	模型/mm	
1	2	25	上
2			下
3	5	62.5	上
4			下
5	8	100	上
6			下

4. 试验数据分析

4.1 地表沉降时程曲线

试验过程中通过激光位移计对地表位移情况进行监测，得到了地表沉降的时程曲线，如下图所示。

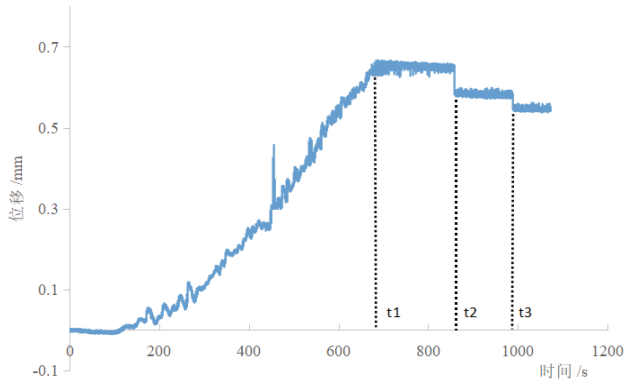


图3 试验过程典型点位移时程曲线

通过监测到的典型点位的位移时程曲线可以反映出整个试验过程：

(1) 试验中0-t1时间段内，离心机的转速逐渐提高，加速度值逐渐达到试验设定的80g过程。该过程中位移为正向变化，主要是由于土体前期已完成固结，升g过程中土体再次发生沉降量较小，而固定传感器的支架刚度有限，沉降相对较大，因此表现为正向位移。

(2) t1-t2时间段内，固定传感器的支架稳定后，土体继续固结至相对稳定，t2时刻前的位移作为该测点位置计算地表沉降的初始值。

(3) t2时刻为上洞室开挖的时刻，通过打开排水阀，将上洞室内的水体排出，隧道收敛变形，造成地表的首次沉降，至t3沉降基本达到稳定。

(4) t3时刻为下洞室开挖的时刻，通过打开排水阀，将下洞室内的水体排出，隧道收敛变形，造成地表的再次沉降，至沉降达到稳定后试验结束。

后续试验数据分析中，仅对不同洞室开挖后的沉降稳定计算结果进行分析，并且将结果根据相似比换算为原型结构的沉降值。

4.2 最大沉降分析

对比不同埋深条件下，隧道完成两个洞室开挖后的地表最终沉降，2m覆土条件下地表的沉降量最大，约13mm，覆土增到到5m和8m时沉降基本稳定，约8mm，可见地表沉降量随着覆土厚度的增大而减小，并逐渐稳定的趋势。

4.3 开挖过程分析

对比不同埋深条件下，隧道在分步完成上、下两个洞室开挖时所产生的地表沉降，如下图所示。

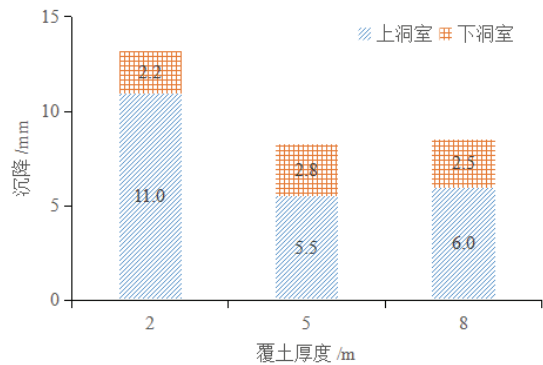


图4 分步开挖沉降值

从图中可以看出，在不同的覆土条件下，上洞室开挖所引起地表沉降均大于下洞室，因此控制上洞室开挖过程中的沉降对于总体沉降控制具有重要意义。另外，覆土2m条件下，上洞室开挖引起沉降占总沉降的比例约83%，当覆土增大到5m和8m时，这一比例降低到了约70%，可见覆土厚度的不同影响上下洞室开挖产生的沉降比例，对于较小的覆土厚度，特别应做好上洞室开挖的沉降控制措施。

五、结论

1. 有限元分析结论

通过有限元分析我们深入了解了不同条件下暗挖过程变形的基本规律，主要结论如下：

(1) 导洞的大小对沉降影响是较为明显的，导洞尺寸增大沉降会明显增大，并且水平导洞之间减小中间导洞的尺寸能明显减小地表沉降。

(2) 不同开挖顺序对沉降有一定影响，先开挖中间导洞或者先开挖上层导洞时沉降较小。

(3) 锁脚锚杆作为构造措施在暗挖中经常用到，但因其与土体粘结机理较为复杂在计算中未能真实体现，故从计算结果看锁脚锚杆对沉降的影响很小。

(4) 顶板形状对暗挖沉降存在一定影响，采用梯形顶板或者拱形顶板进行暗挖时沉降明显减小。

(5) 覆土厚度也是暗挖沉降的一个关键参数, 随着覆土加厚沉降会随之增大, 覆土达到一定厚度时会形成土拱效应, 根据本课题研究对象, 当覆土厚度达到1倍暗挖宽度时开始形成土拱效应。

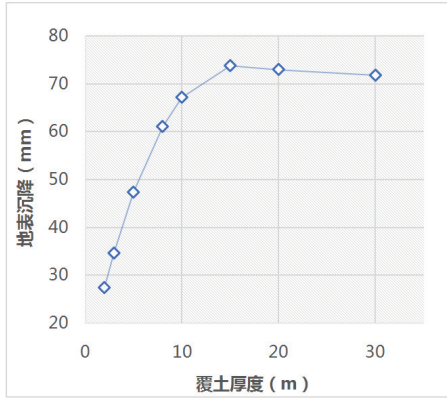


图5 覆土厚度对沉降影响统计图

2. 实验对比结论

浅埋暗挖隧道施工过程中, 地表沉降与地层预加固、掌子面大小、初支刚度、开挖进尺、支护间隔等多种复杂因素相关, 主要结论如下:

(1) 2m覆土条件下地表的沉降量最大, 约13mm, 覆土增到到5m和8m时沉降基本稳定, 约8mm, 可见地表沉降量随着覆土厚度的增大而减小, 并逐渐稳定的趋势。

(2) 在不同的覆土条件下, 上洞室开挖所引起的地

表沉降均大于下洞室。

(3) 覆土2m条件下, 上洞室开挖引起沉降占总沉降的比例约83%, 当覆土增大到5m和8m时, 这一比例降低到了约70%, 可见覆土厚度的不同影响上下洞室开挖产生的沉降比例。

此实验结果跟有限元计算对比变形趋势是相同的, 相对变形比例有一定差异, 具体数值见下表:

表7 上下洞开挖对沉降影响对比表

	实验	有限元计算
上洞开挖	5.5	15.4
下洞开挖	8.3	20.8
上洞开挖沉降占比	66.26%	74.0%

总体上上洞开挖导致的沉降占比达到了七成左右。

参考文献

- [1] 罗立娜. 大跨度地下工程浅埋暗挖法施工技术与安全风险控制[J]. 工程技术研究, 2021, 6(11): 6-8. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2021.11.003.
- [2] 崔泽强, 李九超. 浅埋暗挖大跨度隧道变形特征及控制分析[J]. 建筑机械, 2022, (01): 32-35. DOI: 10.14189/j.cnki.cm1981.2022.01.027.
- [3] 吕琪. 浅埋暗挖法隧道施工技术的发展分析[J]. 工程建设与设计, 2019, (02): 183-184. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2019.01.288.