

# Study on Deformation Features and Comparison of Construction Methods for Shallow Tunnel with Unsymmetrical Loadings

Fan Yang<sup>1</sup>, Jianyi Geng<sup>2</sup>, Xin'an Yang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Zhejiang Wenzhou Shenhai Expressway Co., Ltd., Wenzhou Zhejiang

<sup>2</sup>College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai

Email: 37889145@qq.com

Received: Mar. 4<sup>th</sup>, 2019; accepted: Mar. 18<sup>th</sup>, 2019; published: Mar. 25<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Features of tunnel deformation, ground settlement and plastic-zone distribution under different construction methods are analysed, based on the Anfeng tunnel. The study shows that the curve of ground settlement is not symmetrical and the affected area of deep-buried side is farther than the shallow-buried side. The plastic zone concentrates near the connection direction between arch foot of deep-buried side and arch waist. By comparison, both side drift method under advanced shed-pipe support can control the deformation of tunnel effectively. Results of field monitoring coincide with the numerical results, which prove the numerical results are reliable. The study can provide reference for design and construction of tunnel with unsymmetrical loadings.

## Keywords

Highway Tunnel, Shallow Tunnel with Unsymmetrical Loadings, Deformation Features, Numerical Simulator

---

# 浅埋偏压隧道围岩变形特性及施工方案比选研究

杨帆<sup>1</sup>, 耿建仪<sup>2</sup>, 杨新安<sup>2</sup>

<sup>1</sup>浙江温州沈海高速公路有限公司, 浙江 温州

<sup>2</sup>同济大学交通运输工程学院, 上海

Email: 37889145@qq.com

收稿日期：2019年3月4日；录用日期：2019年3月18日；发布日期：2019年3月25日

## 摘要

以安峰隧道左线洞口段为研究对象，利用数值模拟和现场监测的方法，对强风化岩层浅埋偏压隧道在不同施工方案下的围岩变形和地表沉降规律进行研究。研究表明，浅埋偏压隧道施工引起的地表沉降曲线呈非对称分布，隧道深埋侧的地表沉降影响范围更广。经过方案比选，安峰隧道浅埋偏压段采用超前管棚支护下的双侧壁导坑法进行施工更有利于控制围岩变形。现场监测数据与数值计算反应的结果较为吻合，研究结果具有一定可靠性。

## 关键词

公路隧道，浅埋偏压，变形特性，数值模拟

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

偏压式隧道与一般山岭隧道不同，由于山岭斜坡的存在，其地应力分布并不对称，造成隧道支护结构的受力和围岩变形也具有不对称性。如果偏压隧道的埋深较浅，施工过程中隧道周围岩体更难以维持自稳，容易造成围岩变形超限，甚至诱发塌方、冒顶等灾害。为了规避在此类隧道的施工过程中可能存在的风险，有必要对其围岩变形特性和不同施工方法对围岩的影响进行深入研究。

近年来，诸多学者针对浅埋偏压式隧道的施工关键技术进行了一定的研究。李宏利等[1]采用数值模拟的方法，对浅埋偏压隧道的支护结构的应力-应变特性进行了研究，指出拱脚处支护受力最大。徐前卫等[2]对浅埋偏压隧道施工过程中围岩内应力分布和支护受力的变化进行了研究，得出隧道深埋侧拱脚处和浅埋处拱腰容易产生剪切破坏，且隧道支护受力受地形影响呈现非对称性。王胜军等[3]利用数值模拟的方法研究了CD法施工的浅埋偏压隧道V级围岩段的围岩变形和衬砌受力情况。吴小萍等[4]采用现场检测和数值模拟的方法，研究不同施工方式下浅埋隧道的围岩应力分布规律。李跃强等[5]采用数值模拟的方法，对偏压大断面隧道不同坡度和不同工法施工下洞口边坡岩体的稳定性进行了研究，并提出了优化的施工顺序。刁心宏等[6]研究了不同开挖进尺对隧道围岩稳定性及其变形特征的影响。邱业建等[7]结合室内模型试验，推导了浅埋偏压式隧道围岩压力的极限上限解。钟祖良等[8]研究了双线偏压隧道的围岩应力分布规律和围岩与初期支护间接触压力随施工进展的变化规律。李林等[9]基于室内模型试验，对无偏压隧道和偏压隧道洞口段在地震荷载作用下的隧道结构的动力特性进行了研究，得出了隧道结构内力在不同地震荷载作用下的分布规律。马新民等[10]对采用三台阶七步法进行施工的湿陷性土浅埋偏压隧道的具体工艺进行介绍，并针对施工中存在的 key 问题提出解决方案。

上述研究主要针对不同情况下浅埋偏压隧道施工中围岩应力的分布规律和支护受力，但对不同施工方案对地表沉降的影响规律的内容提及较少。并且由于洞口段围岩受风化程度高，岩体较为破碎，将大大增加施工风险，更需要对施工中造成的围岩变形和塑性区等特征进行进一步研究。因此，本文基于甬台温高速公路安峰隧道的左线出洞段工程，对隧道周边围岩变形、地表沉降和塑性区分布规律进行分析，

并对目前浅埋偏压隧道采用过的台阶法、预留核心土法和双侧壁导坑法进行比较,得出适用于安峰隧道浅埋偏压段隧道的施工工法。

## 2. 浅埋偏压隧道变形分析与方案比选

### 2.1. 工程概况与计算模型建立

甬台温高速公路温苍段安峰隧道是设计时速为 100 km/h 的六车道高速公路隧道,隧道左洞里程 ZK357 + 470~ZK361.695,左洞长 4255 m;右洞里程 YK357 + 470~YK361 + 725,右洞长 4255 m。安峰隧道位于丘陵区,并在低山丘陵单面穿越,穿越丘陵部分的隧道上方为含碎石粉质黏土覆盖层工程地质条件较差。出洞口附近覆盖层厚度为 7~15.5 m,覆盖层受构造影响较显著,岩体质量差,经鉴定属于 V 级围岩。根据现场地质和地形勘探结果,安峰隧道左线出口 V 级围岩段的对应长度约为 25 m。利用有限元差分软件 FLAC3D 建立该隧道左线出口段强风化岩层浅埋偏压隧道在不同施工工法下的分析模型。隧道计算模型上方的横向坡度取 20°,纵向长度上选定隧道拱顶正上方的覆盖层厚度为 10.7 m。为减少边界效应对计算结果的影响,模型的左右边界取为 3 倍的隧道洞宽(即 48 m),下边界取为 3 倍的隧道洞高(即 36 m)。除了上部边界为自由边界外,其余各边界均采用法向位移约束。不同工法下的隧道计算模型如图 1 所示。

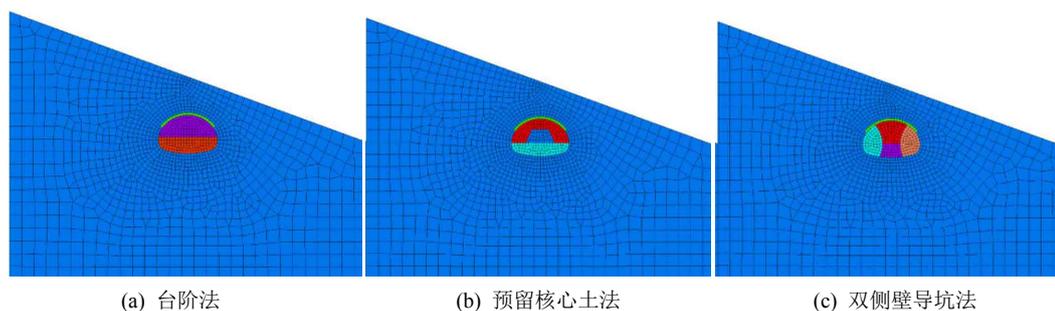


Figure 1. Meshes of calculation model under different construction methods  
图 1. 不同工法计算模型网格

### 2.2. 模型参数确定

在实际数值计算中,岩体采用理想弹塑性的 Mohr-Coulomb 本构模型,初期支护采用 Shell 单元,二次衬砌采用加强初支参数的 Shell 单元模拟,锚杆采用 Cable 单元,开挖岩体采用 Null 单元进行模拟,管棚加固区采用实体单元模拟。初支施作时的架设的型钢拱架、钢筋网以及超前支护中的管棚采用等效弹性模量进行模拟。岩体和支护的力学参数主要根据现行的《公路隧道设计规范》[11]和安峰隧道工程地质勘察报告进行取值,具体如表 1 所示。

Table 1. Mechanical properties of stratum and lining structure  
表 1. 模型中涉及相关力学参数

	密度(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量(GPa)	泊松比	内摩擦角(°)	粘聚力(kPa)
强风化岩	1900	1.2	0.38	24.0	60
喷混	2200	22.5	0.28	/	/
二次衬砌	2250	25	0.26	/	/
管棚加固区	2380	33	0.22	/	/
锚杆	7850	210	/	/	/

### 2.3. 进口段变形特性与方案比选

安峰隧道左线出口段具有埋深浅、存在偏压、围岩破碎(V级)且隧道断面大等特点,为了保证隧道开挖过程中围岩的稳定,根据工程特殊性和相关工程经验,现场计划选取台阶法、预留核心土法和双侧壁导坑法三种不同的隧道施工方案。其中,台阶法上下台阶分别高6.2 m、4.5 m,预留核心土法各层中轴线处高度自顶而下分别为3 m、3.9 m和3.8 m,双侧壁导坑法两侧跨度4.80 m。各工法的每段施工台阶的长度根据设计和工程经验取为4.0 m。本节从隧道周边关键监测点变形、地表沉降和围岩塑性区分布三个角度分析浅埋偏压隧道的变形特征,并对三种工法进行比选,以期得到适用于安峰隧道浅埋偏压段的施工工法。

#### 2.3.1. 关键监测点变形

对拱顶沉降和边墙的收敛的控制是贯穿安峰隧道左线出口施工整个施工阶段的重点和难点,为了准确的获取隧道周边的变形情况,数值计算以及实际隧道施工中的对隧道拱顶沉降和左、右边墙收敛的位移监测点见图2。通过数值计算得到的不同施工方案对应的隧道拱顶沉降、边墙收敛和仰拱隆起的最终变形量统计情况见表2。

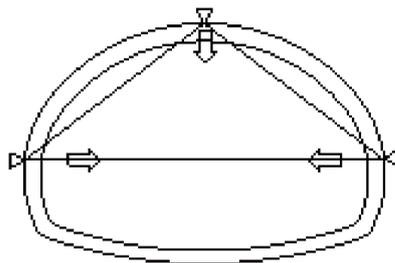


Figure 2. Layout of monitoring points  
图2. 隧道变形监测点布置

Table 2. Deformation of monitoring points under different construction methods  
表2. 不同工法关键监测点变形表(单位: mm)

施工工法	拱顶沉降	左边墙收敛	右边墙收敛	仰拱隆起
台阶法	30.41	13.12	10.30	8.47
预留核心土法	25.77	10.94	7.27	8.21
双侧壁导坑法	20.91	9.09	5.21	7.12

从表2可以得出,各工法施工的隧道拱顶的沉降量比隧道的左、右边墙收敛值和仰拱的隆起量大。由于偏压的存在,埋深较深侧(即该模型的左侧)对应的隧道边墙的收敛值要明显大于埋深较浅侧的边墙收敛值,三种不同工法对应的右边墙收敛比左边墙收敛量分别小29.2%、44.3%和64.9%,可推测出隧道偏压主要存在于浅埋隧道隧道的埋深较深侧。

三种不同施工工法在四个隧道关键变形监测点处引起的变形量均有双侧壁导坑法 < 预留核心土法 < 台阶法的规律,其中台阶法和预留核心土法造成的拱顶沉降要明显大于双侧壁导坑法,沉降量分别大9.50 mm和4.64 mm。可以得出,虽然在控制仰拱隆起上,三种工法的施工效果相差不大,但从控制拱顶沉降和左、右边墙收敛的效果而言,双侧壁导坑法要明显优于台阶法和预留核心土法。

#### 2.3.2. 地表沉降

三种不同施工方案施工后斜坡地面的沉降曲线如图3所示。三种不同工法施工后的倾斜地面沉降的

曲线规律基本一致。从图中可以发现由于偏压的存在,斜坡地表处的沉降量和沉降范围并不像无偏压式隧道呈现对称分布。就两侧距离隧道中轴线相同距离处对应的地面沉降量而言,埋深较深测要明显大于埋深较浅侧。从图中可以看出,浅埋测在距离隧道中轴线 10 m 外的地表沉降可控制在 3 mm 之内,浅埋测的地表沉降范围约为 1 倍洞径。而深埋测在距离隧道中轴线 10 m 处的沉降为 10~15 mm,其地面沉降曲线斜率较平缓,其影响范围可达到 40 m 之外,即约 3 倍洞径。同时,地面最大沉降量并不发生在隧道拱顶处对应的地面处,而是在其拱顶偏向浅埋侧一定距离处,本模型三种工法施工后地面最大沉降发生在隧道拱顶右侧 2.3~2.8 m 范围内。

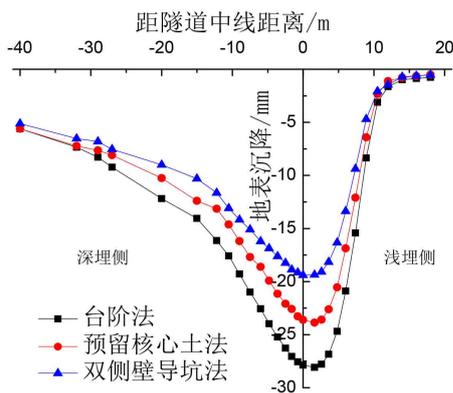


Figure 3. Ground settlement curve under different construction methods  
图 3. 不同工法地表沉降曲线

另外,采用双侧壁导坑法施工的浅埋偏压隧道引起的最大地面沉降为 19.4 mm,而台阶法和预留核心土法施工引起的倾斜地面最大沉降分别为 28.08 mm 和 23.87 mm,相较双侧壁导坑法施工引起的沉降要分别大 44.7%和 23.1%。因此,从控制地表沉降的效果而言,选择双侧壁导坑法要明显优于台阶法和预留核心土法。

综合三种不同隧道施工工法对浅埋偏压隧道的关键监测点围岩变形、地表沉降两个方面的影响,建议安峰隧道左线出口段浅埋偏压式隧道采用双侧壁导坑法进行施工。

### 3. 现场监测分析

甬台温高速公路复线温苍段安峰隧道左线隧道出洞段 V 级围岩部分的浅埋偏压隧道采用双侧壁导坑法配合超前管棚支护进行施工,该段对应里程标号 ZK361 + 660~ZK361 - 685。由于该段埋深浅、岩体条件差,施工容易造成隧道塌方或隧道变形超限情况,因此在施工过程中对地面沉降、隧道拱顶沉降、边墙收敛等关键点进行监测。限于篇幅,本文仅对隧道关键点变形进行分析。

#### 3.1. 隧道关键点变形现场监测

选取 ZK361 + 683 和 ZK361 + 673 (以下简称断面 1 和断面 2)两个典型的断面进行现场监测和数值模拟的对比分析,两个监测断面的拱顶沉降曲线和边墙收敛曲线如图 4 所示。

如图 4 所示,数值计算的隧道关键监测点变形结果与断面 2 更为接近,主要是因为隧道建模的埋深与断面 2 更为接近,说明数值计算的结果具有一定的可信度。而实际情况中隧道纵向方向上也存在一定坡度,即断面 1 对应的隧道埋深小于断面 2,而在建模过程中仅考虑平面方向的偏压相关的坡度,因此断面 1 和断面 2 的相同测量量之间存在差异,但两者反应的趋势基本相近。从图 4 中可以看出,数值计算模拟的浅埋偏压隧道变形规律与实际情况相吻合,各断面处拱顶沉降和边墙收敛均在断面施工后 35 天

逐渐趋于平缓。沉降量分别最终稳定在 21.05 mm 和 24.9 mm，边墙总收敛量分别稳定在 12.03 mm 和 21.73 mm，均在规范许可的变形范围之内。

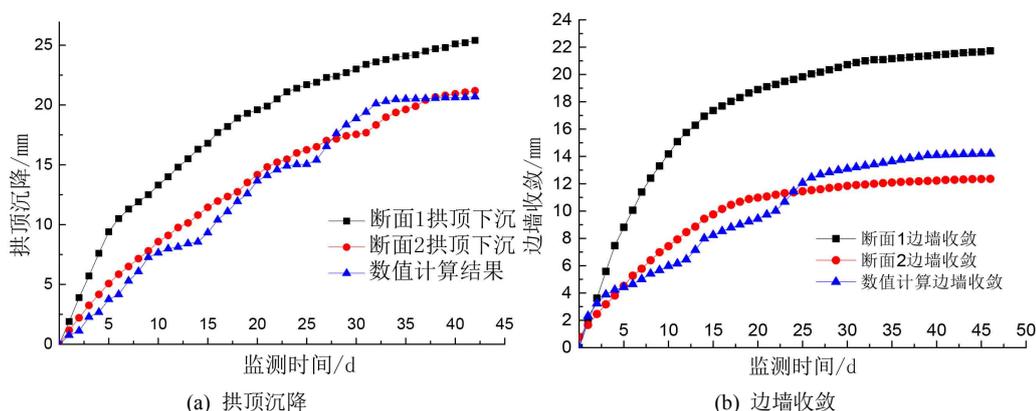


Figure 4. Field monitoring of tunnel deformation  
图 4. 现场监测隧道关键变形量

### 3.2. 地表沉降现场监测

两个断面处对地面的沉降监测点布置以隧道中轴线为中心，向两侧每隔 2 m 布置一个地表沉降监测点，每个断面共布置 11 个监测点，断面 1 和断面 2 监测的最终地面沉降曲线如图 5 所示。可以看出，两个监测断面地表沉降曲线相似且反应的规律与本文中图 3 所反映的规律相同。断面 1 和断面 2 拱顶处对应地面的沉降量分别为 14.92 mm 和 17.61 mm，断面 1 监测结果与数值计算的结果相近，进一步验证了数值计算结果的可靠性。

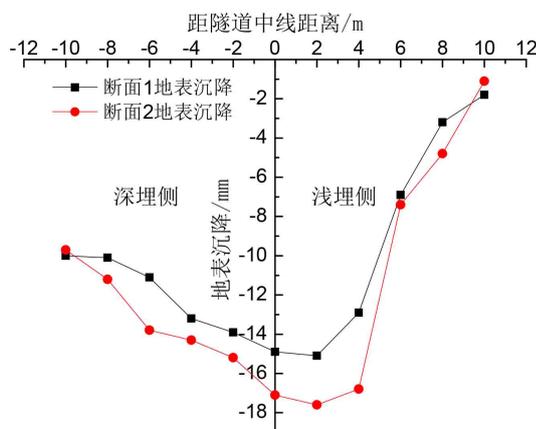


Figure 5. Curve: Field monitoring of ground settlement  
图 5. 现场监测地表沉降曲线

## 4. 结论

1) 浅埋偏压隧道施工造成的地面沉降曲线与无偏压隧道明显不同，其埋深较深侧的沉降曲线缓，地表受影响的范围大。根据数值计算和现场监测资料，安峰隧道左线出口段浅埋偏压隧道浅埋侧在距隧道中线 10 m 外地面基本不受影响，而深埋侧在距离中线 10 m 处地面沉降仍有 10 mm。根据数值计算结果分析，该工程浅埋侧地表沉降范围约为隧道轮廓线外 1 倍洞径，而深埋侧地表沉降范围可达到轮廓线外

3 倍洞径。

2) 与无偏压隧道塑性区分布不同, 浅埋偏压隧道施工中, 围岩塑性区的分布并不对称, 其主要沿着深埋侧拱脚和浅埋侧拱腰连线方向, 呈现“/”形的分布规律, 而在浅埋测的拱脚处塑性区的分布范围较小。

3) 利用数值计算方法分析台阶法、预留核心土法和双侧壁导坑法对强风化岩浅埋偏压隧道施工过程中, 隧道周边关键点变形、地面沉降和塑性区大小差异的影响, 得出双侧壁导坑法更适用于强风化岩浅埋偏压隧道工程的结论。数值计算的结果与安峰隧道现场检测数据较吻合, 说明分析结果具有可靠性, 可为相关工程的设计与施工提供参考。

## 参考文献

- [1] 李宏利. 浅埋偏压隧道支护结构受力特性及施工优化方案研究[J]. 山西交通科技, 2018(1): 51-54.
- [2] 徐前卫, 程盼盼, 苏培森, 等. 浅埋偏压隧道进洞施工力学特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(5): 1311-1318, 1380.
- [3] 王胜军. Midas GTS 在浅埋偏压隧道开挖分析中的应用[J]. 土工基础, 2013, 27(2): 75-78.
- [4] 吴小萍, 唐冬冬, 华戈, 等. 开挖技术在麻栗垭隧道施工中的应用[J]. 公路工程, 2018, 43(4): 176-179.
- [5] 李跃强. 浅埋偏压大断面隧道洞口段开挖顺序优化[J]. 公路, 2018, 63(2): 286-291.
- [6] 刁心宏, 朱陈, 于洋. 不同开挖方案下隧道围岩稳定性及变性特征分析[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(1): 21-27.
- [7] 邱业建, 彭立敏, 雷明锋. 浅埋偏压隧道围岩压力上限法解析解[J]. 土木工程学报, 2015, 48(6): 106-113.
- [8] 钟祖良, 刘新荣, 刘元雪, 等. 浅埋双侧偏压小净距隧道围岩压力计算与监测分析[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(2): 63-68.
- [9] 李林, 何川, 耿萍, 等. 浅埋偏压洞口段隧道地震响应振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2540-2548.
- [10] 马新民, 贾东荣, 谢君泰. 高铁湿陷性黄土浅埋偏压隧道施工技术控制[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(3): 74-78.
- [11] 中华人民共和国交通部. JTGD70-2004, 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3431, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ojtt@hanspub.org](mailto:ojtt@hanspub.org)