

## 基于施工过程的大断面隧道变形动态释放规律分析\*

孙州<sup>1,2,3</sup>

(1.上海同岩土木工程科技股份有限公司,上海 200092;2.上海同岩公路养护工程有限公司,上海 200092;  
3.上海地下基础设施安全检测与养护装备工程技术研究中心,上海 200092)

**摘要:** 依托宁波将军山隧道,分析隧道拱顶沉降、边墙收敛、围岩压力、锚杆轴力随开挖进尺的动态释放规律,同时结合现场监测数据验证计算结果的合理性。结果表明,围岩变形随着开挖进尺的增加而增加,分为缓慢增长、快速增长、趋于稳定 3 个阶段,隧道断面未开挖时拱顶沉降释放 20%,上台阶开挖后沉降释放 48%;锚杆轴力随着拱顶沉降、边墙收敛的增大而增大,整体表现为边墙和拱腰处锚杆轴力大、拱顶和拱脚处锚杆轴力小;二次衬砌施作时机建议距离开挖面 42~60 m。

**关键词:** 隧道;开挖进尺;变形;释放规律

**中图分类号:** U445.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2022)02-0139-04

随着高速公路的快速发展,大断面隧道数量增多。国内外学者针对大断面隧道开展了大量研究,如刘长祥等分析了大断面隧道围岩的变形过程;何昌国分析了大跨隧道合理预留变形量;单超等分析了大跨浅埋隧道偏压段的横向偏移规律;曹成勇等结合下穿高速公路大跨隧道,分析了隧道开挖的力学行为;李利平等分析了大断面隧道围岩的渐进破坏过程;吕志强结合东天山隧道,研究了大断面隧道的开挖支护技术;郭军等对大跨公路隧道进行了支护参数优化分析;伍国军等结合施工过程,对浅埋大跨公路隧道进行了支护参数优化分析;蔡鑫等分析了附加荷载作用下大跨隧道的围岩压力和结构内力变化规律;王仁杰等进行了大跨隧道扁平率优化研究。上述研究多侧重于大断面隧道支护参数的优化。该文依托宁波将军山隧道,开展大断面隧道变形动态释放规律研究,探索合理的支护施作时机,为类似工程提供参考。

## 1 工程概况

将军山隧道沿线地形为中间高、两端低,沟谷纵横,风化强烈,山上植被茂盛,覆盖层为第四系残积土和坡洪积碎石、含砾石粉质黏土,下伏为全~微风化晚侏罗统西山头组凝灰岩。隧道净空断面宽度为 16.8 m,高度为 10.85 m,高跨比为 0.65,属于大断面隧道。

根据围岩级别和隧道断面情况,隧道 V 级围岩段采用复合式衬砌结构形式:初期支护为  $\phi 42 \times 5$  双排小导管,长 5 m,纵向间距 3 m,环向间距 0.42 m;中空注浆锚杆长 4.5 m,纵向间距 0.5 m,环向间距 1.0 m;喷射砼,第一层厚度为 26 cm,采用 I20b 型钢@0.50 m,第二层厚度为 20 cm,采用  $\phi 25$  格栅拱架@0.50 m;二次衬砌采用 C40 砼,厚度 55 cm。

## 2 计算模型与参数选取

### 2.1 建立模型

基于现场 V 级围岩段地质特征建立三维数值计算模型,超前小导管注浆加固采用实体单元模拟,锚杆采用 Cable 结构单元模拟,初期支护采用 Shell 结构单元模拟。隧道埋深约 18 m,模型长、宽、高分别为 180、100、55 m。左右边界为水平约束,下边界为垂直约束,上边界为自由边界。沿隧道纵向 50~90 m 处分别在拱顶、边墙每隔 20 m 设置监测点。计算模型见图 1。

### 2.2 参数选取

根据 JTG 3370.1—2018《公路隧道设计规范》,各级围岩的力学参数见表 1。

初期支护结构弹性模量根据钢筋砼计算原理采用等效截面计算,即将钢拱架、格栅拱架弹性模量折算为喷射砼弹性模量。计算方法为:

$$E = E_0 + A_g E_g / A_c$$

\* 基金项目:宁波市交通运输科技项目(201406);贵州省科学技术厅重大科技专项(黔科合重大专项字[2018]3011);浙江省交通运输厅科技项目(2018011)

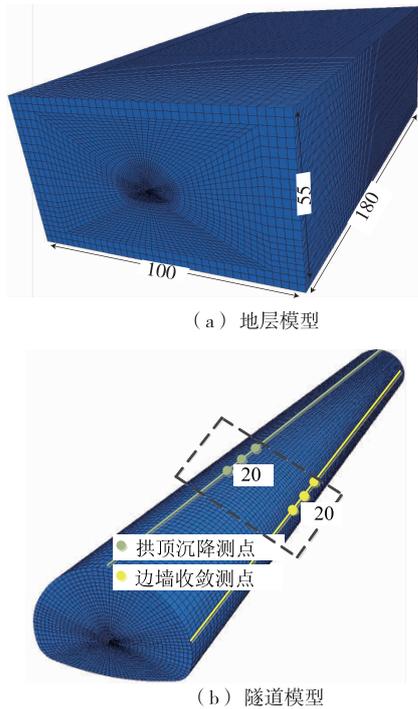


图1 隧道计算模型(单位:m)

表1 围岩的物理力学参数

项目	参数值
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 850
弹性模量/GPa	1.5
泊松比	0.4
黏聚力/kPa	125
内摩擦角/(°)	23

式中: $E$ 为折算后砼弹性模量; $E_0$ 为原砼弹性模量; $A_g$ 为钢拱架截面积; $E_g$ 为钢材弹性模量; $A_c$ 为喷射砼截面积。

锚杆与围岩之间采用摩擦接触,围岩与初期支护及初期支护与二次衬砌之间采用共节点模拟。锚杆等的力学参数见表2、表3。

表2 锚杆的力学参数

项目	参数值
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 800
弹性模量/GPa	210
泊松比	0.2
水泥浆黏聚力/kPa	200
水泥浆刚度/kPa	$1.4 \times 10^4$

### 2.3 模拟工序

采用台阶法开挖,上台阶长度为15 m、开挖进尺为1 m,下台阶开挖进尺为3 m。台阶法计算模型见图2。

表3 钢拱架等的力学参数

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
I20b工字钢	7 800	210	0.20	—	—
C25砼	2 200	23	0.30	—	—
注浆浆液	1 900	22	0.32	450	33

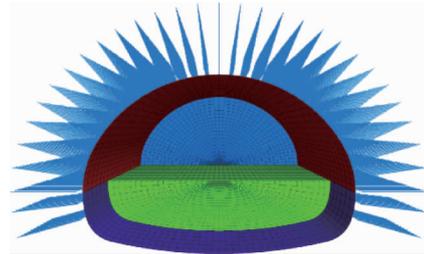


图2 台阶法计算模型

## 3 隧道变形动态释放规律分析

### 3.1 拱顶沉降

不同监测点的隧道拱顶沉降随开挖进尺的变化见图3。由图3可知:拱顶3个测点的沉降随开挖进尺的释放规律基本一致,均随着开挖进尺的增加而逐渐增大,分为缓慢增长、快速增长、趋于稳定3个阶段,距施工掌子面距离越近的测点,其沉降开始时间、稳定时间越早。隧道未开挖到监测断面时,拱顶沉降为4 mm;隧道监测断面上台阶开挖前,拱顶沉降释放20%;下台阶开挖前,拱顶沉降为9.6 mm,释放48%。根据《公路隧道施工技术规范》,二次衬砌施作应在变形基本稳定(位移达到总位移的80%~100%)后进行,二次衬砌施作时机建议距离开挖面42~60 m。

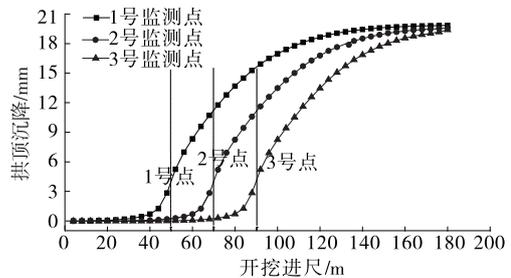


图3 拱顶沉降随开挖进尺的变化

拱顶沉降速度随开挖进尺的变化表现为先增加后减小(见图4)。以1号监测断面为例,开挖距离该监测断面越近,该断面的沉降速率越大,开挖到该断面时,沉降速率达到最大,为0.6 mm/m;之后随着开挖距离的增大,沉降速度逐渐减小,最终趋于稳定,沉降值约20 mm。

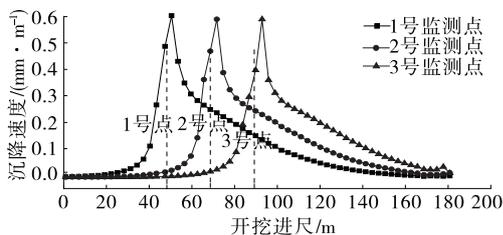


图 4 拱顶沉降速度随开挖进尺的变化

### 3.2 边墙收敛

不同监测点的隧道边墙收敛随开挖进尺的变化见图 5。由图 5 可知:3 个测点左右边墙收敛随开挖进尺的变化规律一致,随施工推进,边墙收敛逐渐增大,收敛速度呈先增大后减小的趋势。以 1 号监测点为例,开挖到达该监测断面前,沉降速度逐渐增大,到达开挖断面时,变形速率达到最大,为 0.55 mm/m,收敛变形为 1.25 mm。监测断面上台阶开挖前,边墙收敛释放 15.6%;下台阶开挖前,收敛变形为 5.2 mm,边墙收敛释放 65%;之后随着开挖距离的增大,沉降速度逐渐减小,最后趋于零,隧道收敛变形为 8 mm。

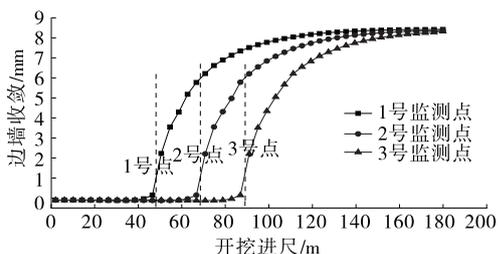


图 5 边墙收敛随开挖进尺的变化

### 3.3 锚杆轴力

隧道锚杆轴力分布见图 6。各部位锚杆轴力均为拉力,整体表现为边墙和拱腰处锚杆轴力值大、拱顶和拱脚处锚杆轴力值小,断面内锚杆轴力最大值位于左右边墙位置,约 45 kN。

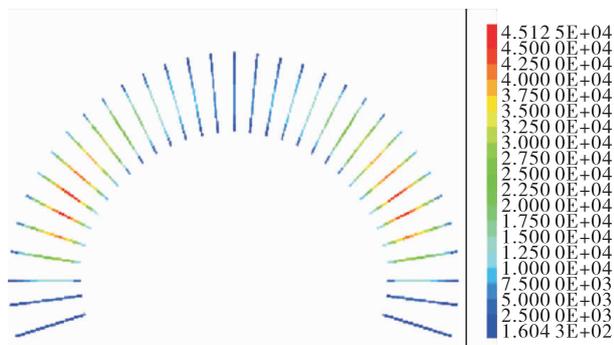


图 6 中间断面锚杆轴力分布(单位:N)

选取监测断面内轴力最大的锚杆为监测锚杆,

得到锚杆轴力随开挖进尺的变化曲线(见图 7)。锚杆轴力的变化规律与拱顶沉降、边墙收敛基本一致,随着开挖进尺的增大而增大,但增大速度逐渐减小,最终趋于稳定,锚杆轴力稳定值约 45 kN。锚杆有效控制了隧道周围岩体的变形,起到了悬吊加固与抑制围岩变形的作用。

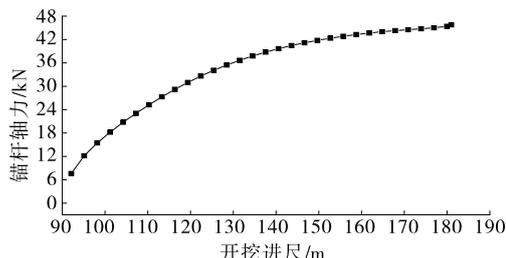


图 7 锚杆轴力随开挖进尺的变化

## 4 现场监测与分析

### 4.1 围岩压力分析

围岩压力的变化见图 8。由图 8 可知:上台阶开挖后,围岩压力快速增加,随着围岩应力的重新分布,压力有所降低,拱顶与右拱腰处压力释放较大,分别为 43.6%、49.2%;下台阶开挖后,围岩压力继续增加;二次衬砌施作后,各部位围岩压力逐渐趋于稳定。拱顶和右边墙处围岩压力较大,最大压力为 150.2 kPa;左、右拱腰处的压力较小,分别为 84.1、92.9 kPa。隧道围岩压力分布整体呈对称形式(见图 9)。

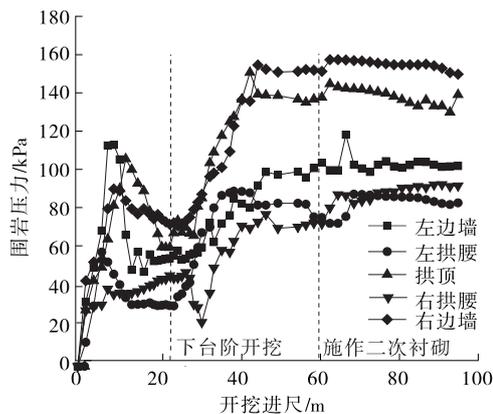


图 8 围岩压力随开挖进尺的变化

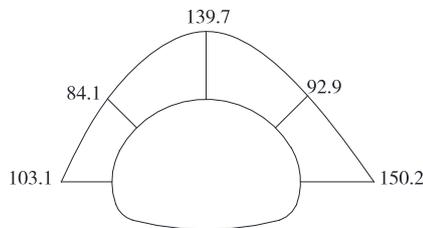


图 9 围岩压力分布(单位:kPa)

## 4.2 锚杆轴力分析

锚杆轴力随隧道开挖进尺的变化见图 10。由图 10 可知:上台阶开挖后,锚杆轴力迅速增加,各部位锚杆处于受拉状态,拱顶处锚杆轴力最大;下台阶开挖后,锚杆轴力变化不大,最大为 33.1 kN(68.6 MPa),相对于模拟值偏小,主要是因为隧道开挖到锚杆支护位置时围岩已释放一部分变形,锚杆施作相对滞后。锚杆轴力分布整体表现为锚杆中心轴力大、两端轴力小(见图 11),表明锚杆穿过了围岩松动区,起到了悬吊加固与抑制围岩变形的作用。

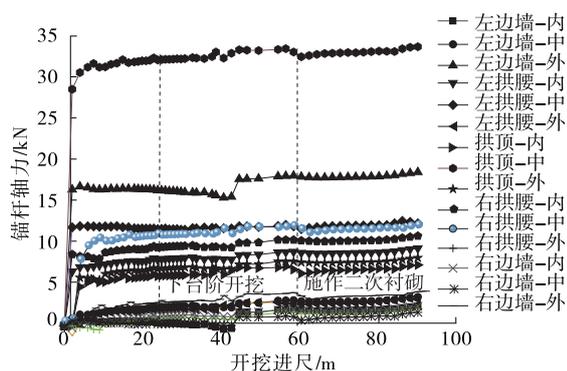


图 10 锚杆轴力随开挖进尺的变化

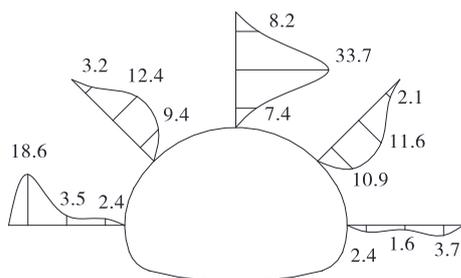


图 11 锚杆轴力分布(单位:kN)

## 4.3 围岩变形

拱顶沉降随开挖进尺的变化见图 12。隧道上台阶开挖后,拱顶沉降逐渐增加,前期沉降速度较快,之后沉降速率逐渐减小,最后拱顶沉降稳定为 6.5 mm。拱顶和拱顶左边部分下沉量相对右边较大,且略有波动,主要是由于距离掌子面较近,受到前方爆破震动的影响。下台阶开挖后,拱顶沉降增加 2 mm,总体沉降约 8 mm,相对于数值模拟结果偏小,原因是隧道开挖前围岩已释放一部分变形、施作二次衬砌后没有继续监测围岩变形。

隧道净空收敛的变化见图 13。隧道整体向内收敛,最大值为 6.5 mm,相对于模拟值偏小 19%,主要是因为隧道开挖前围岩已释放一部分变形。

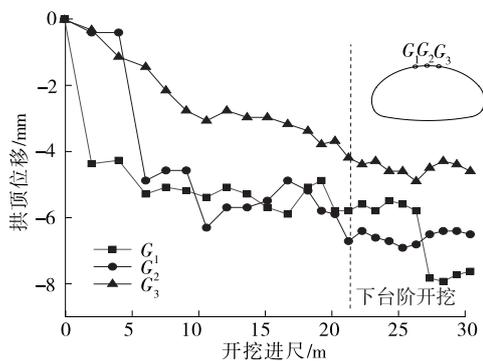


图 12 拱顶沉降随开挖进尺的变化

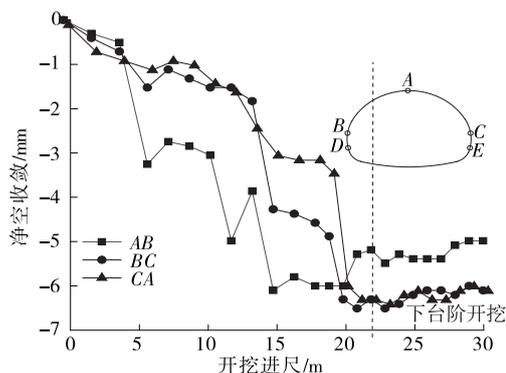


图 13 净空收敛随开挖进尺的变化

## 5 结论

(1) 沿隧道纵向,隧道变形随开挖进尺的释放规律基本一致,变形随着开挖进尺的增加而增大,分为缓慢增长、快速增加、趋于稳定 3 个阶段。上台阶开挖后变形释放 48%~65%,围岩压力释放 43.6%~49.2%。

(2) 隧道变形收敛、锚杆轴力实测值分别比模拟值减小 19%、27%,主要是由于隧道开挖前围岩已释放一部分变形。监测数据表明各指标均处于稳定状态。

(3) 隧道二次衬砌施作时机建议距离开挖面 42~60 m。采用台阶法施工时,严格控制循环进尺、台阶长度等参数,从而确保围岩的稳定。

## 参考文献:

- [1] 刘长祥,吕常新.三车道大断面高速公路隧道稳定性数值模拟[J].地下空间与工程学报,2007,3(4):688-693.
- [2] 何昌国.软弱围岩大跨隧道合理预留变形量分析及初期支护刚度优化[J].隧道建设(中英文),2018,38(增刊2):227-231.

(下转第 157 页)

单位共同商讨解决,设计变更尽量提前,以便在施工过程中及时变更,避免造成不必要的工程损失。

(4) 加强现场签证控制。由于公路工程具有施工周期长、材料价格不定等特点,前期的工程预算不可能对整个施工期产生的费用作详尽预测,需进行现场签证以确定最终的施工费用。

(5) 进行合同索赔。在公路工程施工过程中,若出现施工条件、施工方法、施工材料、设备配备等与招标文件不一致,或未在规定时间内支付工程款,或由于业主原因造成工程延期等,均会造成合同索赔。在进行合同索赔时,重点是采取协调一致的原则,管理人员主动阐述索赔原因及价格,通过双方沟通达成协议。

### 3.2.5 竣工验收阶段

竣工验收是公路工程项目建设的最后一道程序,主要包括竣工结算和竣工决算两部分。该阶段的造价控制主要通过查看与工程施工有关的合同文本、协议文件、施工图纸、签证单等,依据国家规定的计算规则,按照施工图纸、分包合同等进行工程量计算,使工程造价符合实际情况,并检查落实变更手续、施工记录、验收签收的完整性。

## 4 结语

道路施工过程中的造价管理是道路施工技术良好实施的重要保证。在公路工程建设过程中,从项目决策开始,一直到图纸设计、投标报价、工程施工及竣工验收等,各阶段的造价控制相互独立又相辅相成,只有每个阶段的造价管理控制得当,才能促进建设、施工、监理、设计单位认真履行各自职责,提高

建设工程实施的透明度和公信度,降低工程成本和投资风险。

### 参考文献:

- [1] 袁大龙.全过程造价管理在建设工程造价控制中的应用[D].济南:山东大学,2006.
- [2] 洪洁波,郭海东.浅析造价管理在公路工程施工招投标中的应用[J].科技信息(学术版),2007(27):599.
- [3] 李高萍.公路工程造价在施工中的全过程控制[J].城市建设理论研究(电子版),2011(31):1-4.
- [4] 陈伟娣,肖秋明.基于灰色理论的山区高速公路造价估算[J].公路与汽运,2019(4):172-176.
- [5] 何咏竹.公路工程预算编制及成本控制要点分析[J].公路与汽运,2019(4):169-171.
- [6] 高佩,刘伟军.基于 VECM 的公路工程地材价格影响因素分析[J].公路与汽运,2020(2):156-160.
- [7] 李珏,肖丽红,黄祺.基于案例推理模型的公路工程造价估算研究[J].长沙理工大学学报(社会科学版),2013,28(1):97-101.
- [8] 柯妍.EPC 项目建设全过程工程造价管理研究[D].长春:长春工程学院,2021.
- [9] 李珍珍.电厂东路工程造价风险评估与应对策略研究[D].青岛:青岛大学,2021.
- [10] 张文超.公路建设项目工程造价全过程管理控制措施分析[J].低碳世界,2020,10(7):209-210.
- [11] 高竞程.高速公路工程造价影响因素及控制研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2020.
- [12] 李娇.公路工程项目全阶段造价管控措施分析[J].城市建设,2020,17(12):181-182.

收稿日期:2021-08-24

\*\*\*\*\*

(上接第 142 页)

- [3] 单超,钟宇健,姚崇凯,等.大跨软弱围岩浅埋隧道偏压段横向偏移规律测试[J].公路,2019(8):214-220.
- [4] 曹成勇,施成华,彭立敏,等.下穿高速公路的浅埋大跨隧道开挖力学行为分析[J].现代隧道技术,2017,54(5):122-129+154.
- [5] 李利平,李术才,赵勇,等.超大断面隧道软弱破碎围岩渐进破坏过程三维地质力学模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(3):550-560.
- [6] 吕志强.软弱围岩大断面隧道开挖支护施工技术[J].施工技术,2020,49(13):51-55.
- [7] 郭军,余顺,丁浩.三车道公路隧道支护参数优化分析[J].公路交通技术,2013(6):76-80+84.

- [8] 伍国军,陈卫忠,戴永浩,等.浅埋大跨公路隧道施工过程中和支护优化的研究[J].岩土工程学报,2006,28(9):1118-1123.
- [9] 蔡鑫,刘辉喜,陈福斌,等.附加荷载引起大跨扁平隧道变形破坏的模型试验研究[J].现代隧道技术,2020,57(4):150-157+170.
- [10] 王仁杰,刘志强,刘阳,等.挤压性围岩大跨隧道扁平率优化研究[J].现代隧道技术,2020,57(增刊 1):713-720.
- [11] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路隧道设计规范 第一册 土建工程:JTG 3370.1-2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

收稿日期:2021-05-10