



石河子大学学报(自然科学版)  
*Journal of Shihezi University(Natural Science)*  
ISSN 1007-7383,CN 65-1174/N

## 《石河子大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 反井施工下竖井纵向变形曲线的研究  
作者: 陈航, 侯义辉, 王薇, 张燕飞  
DOI: 10.13880/j.cnki.65-1174/n.2021.21.009  
收稿日期: 2019-11-29  
网络首发日期: 2021-02-04  
引用格式: 陈航, 侯义辉, 王薇, 张燕飞. 反井施工下竖井纵向变形曲线的研究[J/OL]. 石河子大学学报(自然科学版).  
<https://doi.org/10.13880/j.cnki.65-1174/n.2021.21.009>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 反井施工下竖井纵向变形曲线的研究

陈航<sup>1</sup>,侯义辉<sup>2</sup>,王薇<sup>3\*</sup>,张燕飞<sup>3</sup>

(1 中铁隧道局集团有限公司市政工程公司,浙江 杭州 310000;2 绍兴市交通建设有限公司,浙江 绍兴 312000;  
3 中南大学土木工程学院,湖南 长沙 410075)

**摘要:**纵向变形(LDP)曲线是收敛约束法的重要组成部分,目前对LDP曲线研究主要集中于隧道开挖过程中各因素对LDP曲线的影响,较少探讨竖井开挖过程中围岩LDP曲线,因此,本文以杭绍台高速公路某隧道反井法施工竖井工程,采用有限元软件建立三维竖井开挖模型,考虑开挖面深度变化及围岩级别等因素,提出量化竖井正向扩挖过程的LDP曲线的函数表达式,并与隧道传统LDP曲线进行了对比分析。结果表明:竖井正向扩挖过程中,开挖面空间效应范围约为6倍开挖半径;开挖面深度及围岩亚类分级对LDP曲线影响较小,基本分级下,围岩越好,竖井开挖面下方曲线越陡峭,开挖面处位移突变越明显,开挖面上方曲线较平缓;竖井LDP曲线与隧道相比存在显著差异,表明开展反井施工下竖井LDP曲线的研究具有重要意义。LDP曲线的获得能为确定支护架设前井壁径向位移提供指导,并为本工程准确运用收敛约束法进行竖井支护设计及稳定性分析提供理论基础。

**关键词:**公路隧道;纵向变形曲线;数值计算;竖井;正向扩挖

**中图分类号:**U455

**文献标志码:**A

## Study on longitudinal deformation profile of shaft under raise-boring method

CHEN Hang<sup>1</sup>, HOU Yihui<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>3\*</sup>, ZHANG Yanfei<sup>3</sup>

(1 China Railway Tunnel Group Co. LTD. Municipal Engineering Company, Hangzhou, Zhejiang 310000, China;  
2 Shaoxing Traffic Construction Co. LTD, Shaoxing, Zhejiang 312000, China;  
3 School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

**Abstract:** Longitudinal deformation (LDP) profile is an important part of convergent constraint method. At present, researches on LDP curve mainly focus on the influence of various factors on LDP curve during tunnel excavation, but seldom discuss the LDP curve of surrounding rocks during shaft excavation. In this paper, based on a shaft by raise-boring method in Hangzhou Taizhou Expressway tunnel, a three-dimensional shaft excavation model is established by finite element software. Functions of longitudinal deformation profile which consider the variation of excavation depth and surrounding rock grade during positive expanding excavation of shaft are given and are compared with tunnel traditional LDP curve. The results indicate that during positive expanding excavation of shaft, spatial excavation effect range are about 6 times shaft radius. Excavation depth and surrounding rock subclass classification have little influence on the LDP curve. Under the basic grading, the better the surrounding rock, the steeper the curve below the shaft excavation surface, the more obvious the displacement change at the excavation surface, and the curve above the excavation surface is gentler. The LDP curve have a significant difference between the shaft and the tunnel, which indicates that the study of the LDP curve under the anti-shaft construction is of great significance. The acquisition of the longitudinal deformation profile will provide guidance for determining the radial displacement of the shaft before the support is erected, and then provide a theoretical basis for the engineering to accurately use the convergence constraint method for shaft support design and stability analysis.

**Key words:** highway tunnel; longitudinal deformation profile shaft; numerical calculation; shaft; positive expanding excavation

目前,竖井已经成为长大公路隧道的重要附属工程之一,在提高隧道通风能力方面有较大的优势<sup>[1]</sup>。竖井开挖后为保证其安全运营,必须施作合理的支护结构,目前国内外及各行各业规范中尚未

收稿日期:2019-11-29

基金项目:浙江省交通科技项目(2017041),湖南省自然科学基金项目(2018JJ2519)

作者简介:陈航(1986—),男,工程师,主要从事交通工程建设施工及技术研究工作,e-mail:13308489762@163.com。

\*通信作者:王薇(1969—),女,副教授,主要从事地下工程及城市防灾减灾等研究,e-mail:1062840419@qq.com。

给出明确的支护设计详细方案<sup>[2]</sup>,《公路隧道设计细则》<sup>[3]</sup>中指出竖井应采用复合式衬砌结构,从复合式衬砌竖井施工方式及结构受力形式看,结构设计过程中应充分发挥围岩的自承能力。而收敛约束法以充分发挥围岩自承力为基础,将围岩与支护结构视为一个整体,强调围岩与支护结构相互作用以共同承担开挖荷载,因此将收敛约束法引入到竖井支护设计具有重要研究价值。收敛约束法最先使用于隧道结构设计中,其基本组成部分包括围岩特性曲线(ground reaction curve, GRC)、支护特性曲线(support characteristic curve, SCC)、纵向变形(longitudinal displacement profiles, LDP)曲线<sup>[4]</sup>,该法通过围岩特征曲线与支护结构特征曲线相交来确定支护体系的平衡条件,从而求得维护隧道稳定所需的支护力<sup>[5]</sup>,进而确定围岩及支护结构安全系数,分析隧道结构稳定性。

应用收敛约束法的关键是确定支护结构架设前洞壁径向位移值,该值通过 LDP 获得。PANET M<sup>[6]</sup>、HOEK E<sup>[7]</sup> 基于实测资料通过数据拟合的方法得出了 LDP 曲线公式, PANET M<sup>[8]</sup> 在后续研究中对其公式进行了修正; VLACHOPOULOS N 与 DIEDERICHS M S<sup>[9]</sup> 利用弹塑性理论提出了 LDP 新公式,该公式在应用中具有较高的认可度; 吴顺川等<sup>[10]</sup>、耿晓杰等<sup>[11]</sup> 基于广义 Hoke-Brown 准则,提出了考虑隧道应力水平及围岩质量影响的 LDP 曲线表达式,并与现有成果做了对比分析,证明了其适用性; 张常光等<sup>[12]</sup> 将考虑开挖面空间效应的支护力系数法与位移释放系数法进行定性定量分析,得出位移释放系数法适用于各种弹塑性围岩,能更直观反映开挖面效应及影响范围,工程应用前景更加广泛; 张标等<sup>[5]</sup> 根据 FLAC<sup>3D</sup> 模拟结果采用非线性回归的分析方法建立了修正的 LDP 曲线拟合公式,并利用该公式探讨了围岩质量对开挖面附近的位移释放率的影响; 张妍珺等<sup>[13]</sup> 建立了输水隧洞三维数值模型,通过将数值模拟结果与已有理论公式不断推演,最终得出了拟合效果良好的 LDP 曲线修正公式。

以上对 LDP 曲线的研究集中于隧道开挖,较少研究竖井开挖过程中的空间效应,然而在竖井开挖过程中开挖方向与岩体重力方向相同,且使用反井法开挖时,先导孔及扩孔会先贯通整个竖井,之后采用钻爆法正向扩孔形成竖井,这与隧道开挖具有明显差异,所以,使用收敛-约束法研究竖井支护时机时参考隧道开挖纵向曲线研究成果则具有很大的不确定性,因此,为了研究竖井中围岩与支护结构的相

互作用,开展对竖井开挖时围岩纵向变形规律的研究具有重要意义,此外,在竖井开挖过程中开挖面深度不断变化,穿越地层复杂多变,这为考虑竖井纵向变形规律又增加了难度。针对这些问题,本文基于杭绍台高速公路某隧道竖井,利用有限元软件 ANSYS 建立不同围岩级别下三维竖井反井法开挖模型,得出围岩级别及开挖面深度对竖井井壁 LDP 曲线的影响,并利用数学方法拟合得到曲线数学表达式,最后将该曲线表达式与隧道 LDP 曲线进行对比分析,得出竖井与隧道 LDP 曲线的异同点,这可以为该竖井使用收敛约束法确定竖井支护时机及稳定性分析提供理论指导,对类似的工程也具有一定借鉴意义。

## 1 工程概况

杭绍台高速公路某隧道竖井,成井内轮廓设计直径为 5.0 m,井口标高 345.0 m,井底处标高 102.8 m,竖井深度为 242.2 m。竖井采取反井法开挖,即首先自上而下钻导向孔,然后自下而上进行反向扩孔,之后自上而下正向扩孔并施作初期支护,最后自下而上施作二次衬砌。工艺流程如图 1 所示,其中先导孔直径为 0.27 m,反向扩孔直径为 1.4 m,正向扩挖井径为 6 m。

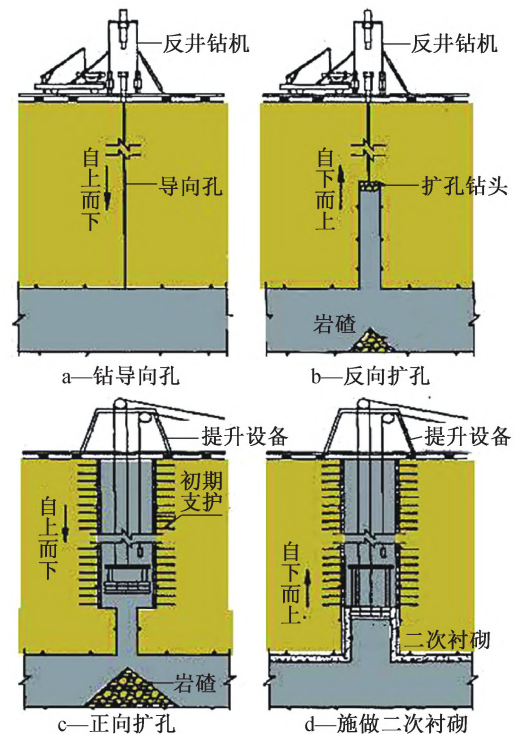


图 1 反井法施工工艺

该竖井所处地层复杂,穿过了Ⅲ级、Ⅳ级、Ⅴ级围岩,各级围岩分布比例见表 1。

表1 竖井围岩分级一览表

竖井长度/m	V级围岩		IV级围岩		III级围岩	
	长度/	比例/	长度/	比例/	长度/	比例/
	m	%	m	%	m	%
242	17.2	7.1	62.6	25.9	162.2	67

从表1可以看出,各级围岩在竖向交叉分布,该竖井III、IV级围岩占比92.9%,按围岩亚类分级方法,IV级围岩主要有IV<sub>1</sub>及IV<sub>2</sub>级。因此,本文选取III级围岩及IV<sub>1</sub>、IV<sub>2</sub>级围岩为研究对象,分析不同级别围岩中竖井开挖时的纵向变形曲线。

## 2 数值模拟及分析

### 2.1 物理参数

本文模型基于ANSYS有限元软件,围岩材料特性按各向同性弹塑性考虑,采用Drucker-Prager系列屈服准则中的DP1准则,材料参数见表2。

表2 材料参数

类别	弹性模量 $E$ / GPa	泊松比 $\mu$	平均重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚力 $C$ /MPa	内摩擦角 $\varphi$ / °
III级围岩	10	0.26	24	1.1	44
IV1级围岩	7	0.31	23	0.7	39
IV2级围岩	3	0.32	21	0.4	33
V级围岩	1.3	0.4	18	0.12	22
III级围岩 锚杆加固区	10	0.26	24	1.32	52.8
C25喷射 混凝土	23	0.2	22	—	—
C30混凝土	31	0.2	24	—	—

注:V级围岩、III级围岩锚杆加固区,C25喷射混凝土、C30混凝土等材料的参数用于验证模型。

### 2.2 模型尺寸

为节省计算资源,模型开挖深度简化为150 m进行规律探究,依据圣维南原理,取岩石的边界约为竖井井径的5~6倍,模型中取岩石边界距井中心30 m。考虑到计算模型的对称性,既能保证精度也能减少计算量,故取1/4模型进行计算。

### 2.3 网格划分及边界条件

模型中围岩采用Solid45实体单元,本模型采用了mesh200单元辅助网格划分,采用映射网格划分方式,沿竖井开挖方向网格尺寸为1 m,模型及网格划分如图2所示。图2中竖井沿-Z方向延伸,模型边界条件为:模型上表面为地面,位于XOY面,取自由约束(无约束),右、下、后表面均为法向约束,前、

左表面为对称约束条件。

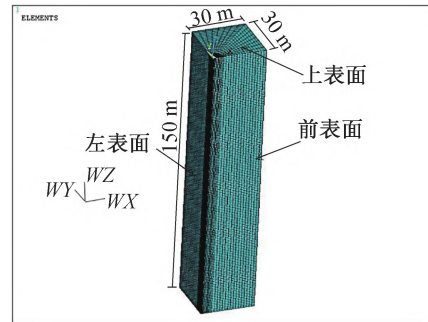


图2 计算模型示意图

### 2.4 模拟过程

ANSYS提供了生死单元功能,可以通过杀死单元来有效模拟竖井开挖过程。本文只考虑土体自重应力作用,忽略土层本身的构造应力。土层在初始地应力下,已完成了固结,故对竖井开挖不形成影响,因此,在模拟中要平衡地应力,对初始位移清零。模拟时选取循环进尺为3 m,整个施工过程如下:(1)形成自重应力场;(2)初始地应力平衡,(3)导孔开挖,贯穿整个模型,(4)反向扩孔开挖,贯穿整个模型,(5)0~-3 m岩体开挖,(6)-3~-6 m岩体开挖,(7)如此循环,完成-6 m至-150 m竖井开挖。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 模拟效果验证

为验证数值模拟的可行性,本文在进行LDP曲线研究之前,首先依据上述建模方法再建立与实际工况类似的模型,将模型结果与实测数据进行对比分析。该通风竖井工期进度如下:2019年8月15日完成先导孔,2019年9月6日完成反向扩孔工作,截止2019年12月3日,已正向扩挖至30.2 m,在正向扩孔过程中,由于爆破剧烈,监测仪器在竖井井壁难以安装,故目前尚未进行井壁径向位移的测量,只进行了地表沉降测量,因此地表沉降将作为模拟结果与现场数据的主要对比项。

根据工程部提供的资料,竖井按“+”形2条测线从井边外延,间距为3 m,共16个测点。测点布置如图3所示,现场情况如图4所示,各测点的平面位置如图5所示,图中N、E分别表示北、东方向,E01至E04表示该方向测点编号,其余测点按相同方法编号。先导孔开挖及扩孔对地表影响较小,测量工作在正向扩挖时进行。实际施工中每个爆破进尺为2.2 m,每开挖2.2 m进行1次数据测量。



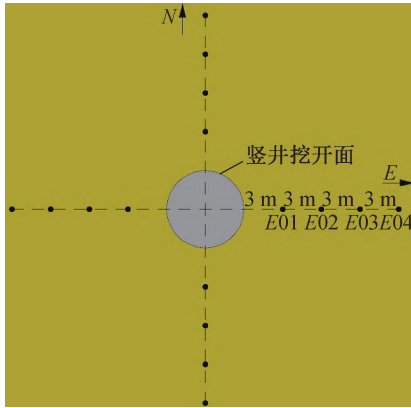


图3 监测点布置图

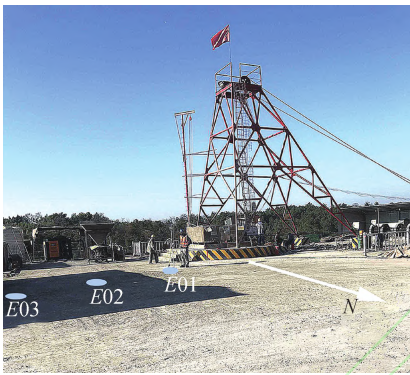


图4 部分监测点现场位置



图5 监测点平面位置

用于验证的数值模型相对于本文研究模型多了初期支护这一过程,现场开挖只深入到Ⅲ级围岩,因此只考虑该级围岩下的初期支护,依据设计资料,Ⅲ级围岩中竖井支护参数为:初期支护采用10 cm厚C25混凝土、长3.0 m的 $\Phi 25$ 锚杆,井口段采用明挖法,衬砌结构由现浇厚55 cm钢筋砼锁口圈与45 cm钢筋砼内衬复合而成,材料使用C30混凝土。模型中锚杆根据等效原则考虑,即锚杆主要是提高围岩的粘聚力和内摩擦角。锚杆加固区围岩的粘聚力和内摩擦角按提高约20%考虑<sup>[14-15]</sup>,初支喷混采用

shell63壳体单元,初期支护所用材料参数见表2。

该模型水平方向尺寸同本文模型,竖直方向考虑到正向扩挖只进行到30.2 m,所以为减小计算量,竖向方向尺寸选为48 m,其中井口段为3 m V级围岩,其余均为Ⅲ级围岩,整个开挖过程为:(1)形成自重应力场;(2)初始地应力平衡;(3)导孔开挖,贯穿整个模型;(4)反向扩孔开挖,贯穿整个模型;(5)0~-3 m井口明挖;(6)0~-3 m锁扣圈支护;(7)-3~-6 m正向扩挖,释放荷载30%;(8)-3~-6 m初期支护,释放荷载70%;(9)重复(6)、(7)2个步骤,完成-3~-30 m岩体开挖及围岩支护。

### 3.1.1 结果与分析

选取E01与E04测点数据,在有限元模型中对应的节点号分别为N-112,N-253。实测数据与模拟结果见图6。

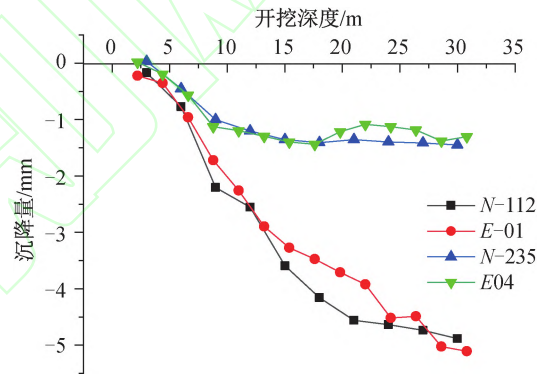


图6 数据对比图

由图6可以看出:实测数据与模拟结果并不完全相符,存在一定误差,但误差范围均在5%以内。监测量与模拟结果均体现了相同的规律:越靠近竖井,沉降量越大;地表沉降随开挖深度不断增加,且深度越大,地表沉降越趋于稳定。开挖过程中地表最大沉降约为5 mm,远低于常规30 mm的控制要求,可以满足变形安全性的要求。因此,利用本文第2节所建立的有限元模型可以探究竖井正向扩挖阶段的LDP曲线。

### 3.2 有限元分析

本文主要研究反井法竖井施工中正向扩挖阶段围岩LDP曲线,同时探讨围岩级别及开挖面深度对竖井围岩LDP曲线的影响,运用控制变量法研究二种因素的影响情况,同一级别围岩中选取4个开挖深度研究,选取的4个监测面为 $Z=-30$ 、 $-60$ 、 $-90$ 、 $-120$  m。由于对称面采用的是对称约束,对称面上节点的位移量可能存在误差,因此,将各监测面上径向位移取值点选在没有约束的平面节点上。本文选取与XOZ面和YOZ面均成45°夹角的平面上的井

壁位移进行分析,监测点位置如图 7 所示,径向位移按式  $u=(u_x^2+u_y^2)^{1/2}$  求得,其中  $u_x$  与  $u_y$  分别为该点  $X$  方向与  $Y$  方向的位移值。

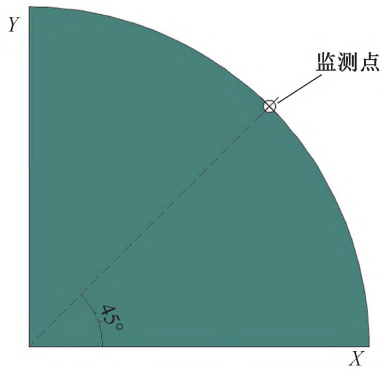


图 7 监测点布置示意图

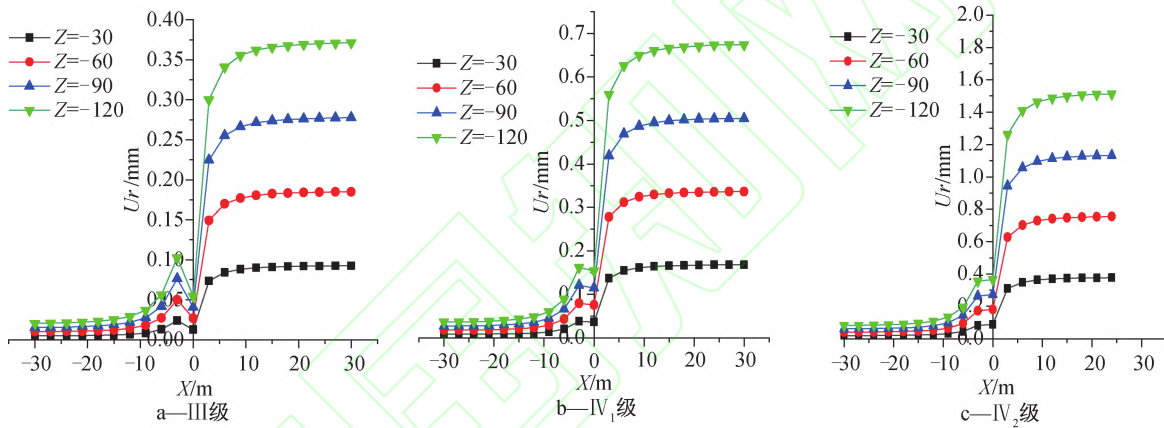


图 8 不同级别围岩不同深度处 LDP 曲线

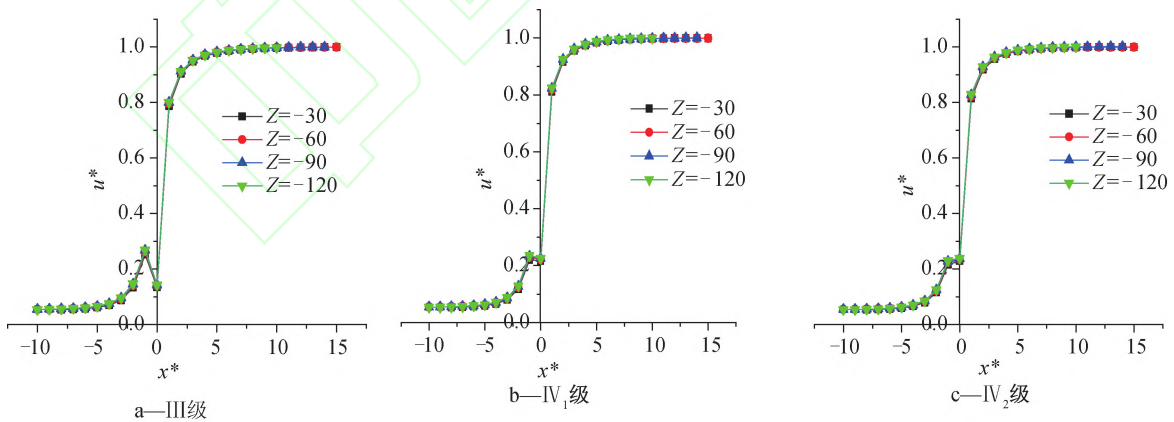


图 9 不同级别围岩不同深度处 LDP 曲线

对各种情况下的位移曲线进行归一化处理,便能得到反映开挖面空间效应的 LDP 曲线。用位移释放系数描述围岩位移释放程度,其定义为任意时刻某点围岩径向位移值与无支护状态下该点稳定后的位移最终值之比<sup>[12]</sup>,取  $u_t$  为任意开挖时刻某点围岩的径向位移值, $u_\infty$  为该处距离开挖面无限远处的围岩最终位移值,则位移释放系数为  $u^* = u_t / u_\infty$ 。令  $x^* = X/R$ ,表征各监测面与开挖面之间的相对距离,其中, $R$  为

### 3.2.1 开挖面深度变化对 LDP 曲线的影响

通过数值模拟及数据处理,获得不同围岩级别下各深度处径向位移值,图 8、图 9 为各级围岩中不同深度下的 LDP 曲线图。其中  $X$  是监测面距开挖面距离,当  $X>0$  时,指该位置位于开挖面上方, $X<0$  时,表示指该位置位于开挖面下方; $u_r$  指该位置处竖井井壁径向位移值,向内为正,向外为负。从图中可以看出,由于先导孔及反向扩挖的缘故,竖井各断面处都有初始位移的存在。当监测面位于开挖面上方时,随着距离开挖面越远,竖井井壁位移值不断增大,在达到一定距离后,径向位移值趋于稳定,此时径向位移值可以视为最大位移量  $u_\infty$ 。围岩越差,则最大位移量  $u_\infty$  越大。

竖井开挖半径,当  $x^*>0$  时,指监测面位于开挖面上方, $x^*<0$  时,表示指该位置位于开挖面下方。

图 9 是各级围岩中不同深度下的 LDP 曲线图,比较各级围岩下的 LDP 曲线可知:围岩位移释放系数不随深度增加而变化;不同工况下围岩开挖面的影响范围约为  $6R$ 。这说明围岩位移释放系数受开挖深度影响较小。

图 8、图 9 显示 III 级围岩在开挖面处出现位移

“突跳”现象。这主要是因为高级别围岩即质量较好围岩对卸荷效应敏感性更高,围岩更容易出现底鼓及内缩效应,而围岩开挖后,内缩效应消失,位移出现“突跳”。

### 3.2.2 围岩级别对 LDP 曲线的影响

由上面分析可知,开挖面深度变化对 LDP 曲线影响较小,因此,选取深度为  $Z = -60$  m 时的数据分析围岩级别对 LDP 曲线的影响。图 10 为不同围岩级别下围岩纵向位移曲线,图 11 为不同围岩级别下围岩 LDP 曲线。由图 10 可知,随着围岩级别下降,围岩径向位移值显著增大;由图 11、12 可知,在  $IV_1$  级围岩及  $IV_2$  围岩中,LDP 曲线几乎重合。因此,同级别围岩中亚类分级对围岩释放系数影响较小。

比较  $IV$  级围岩与  $III$  级围岩下的 LDP 曲线,LDP

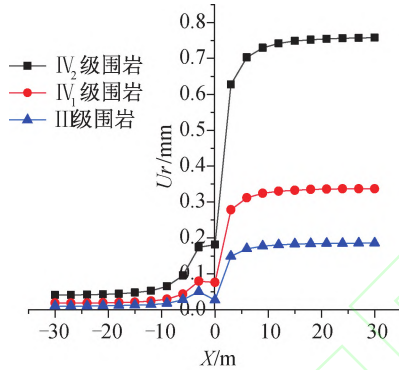


图 10 不同级别围岩纵向位移曲线

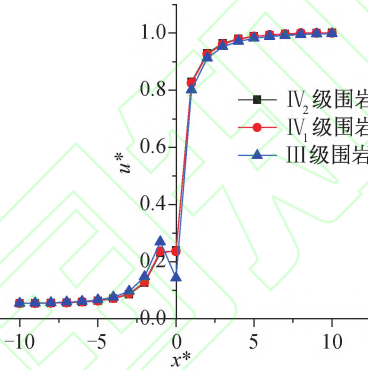


图 11 不同级别围岩 LDP 曲线

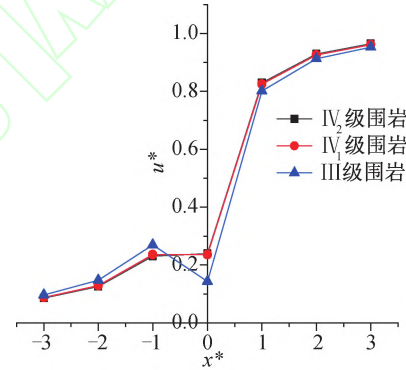


图 12 不同级别围岩开挖面附近 LDP 曲线

### 3.3 LDP 曲线拟合及误差分析

以上分析表明,围岩深度对位移释放系数的影响较小,但围岩级别对位移释放系数影响较大,为量化这一影响,采用麦夸特法(Levenberg-Marquardt)及通用全局优化法(Universal Global Optimization)对

$$\begin{cases} u^* = p_1 + p_2/x^* + p_3/(x^*)^2 + p_4/(x^*)^3 + p_5/(x^*)^4 + p_6/(x^*)^5 + p_7/(x^*)^6 + p_8/(x^*)^7 + p_9/(x^*)^8, & -1 < x^* < 0; \\ u^* = 0.0096x^* + 0.2368, & x^* \leq -1; \\ u^* = \frac{[p_1 + p_3(x^*)^2 + p_5(x^*)^4 + p_7(x^*)^6]}{[1 + p_2(x^*)^2 + p_4(x^*)^4 + p_6(x^*)^6]}, & x^* \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

表 3  $IV$  级围岩拟合公式系数取值表

系数	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$
$x^* \leq -1$	0.054 696	0.053 710	0.441 910	-0.197 218	-0.771 063	0.094 547	0.565 047	0.365 088	0.063 577
$x^* \geq 0$	0.236 803	21.930 301	16.305 603	14.062 803	13.887 678	0.247 274	0.247 977	—	—

$$\begin{cases} u^* = p_1 + p_2/x^* + p_3/(x^*)^2 + p_4/(x^*)^3 + p_5/(x^*)^4 + p_6/(x^*)^5 + p_7/(x^*)^6 + p_8/(x^*)^7 + p_9/(x^*)^8, & x^* \leq -1; \\ u^* = -0.125 55x^* + 0.141 59, & -1 < x^* < 0; \\ u^* = \frac{[p_1 + p_3(x^*)^2 + p_5(x^*)^4 + p_7(x^*)^6]}{[1 + p_2(x^*)^2 + p_4(x^*)^4 + p_6(x^*)^6]}, & x^* \geq 0. \end{cases} \quad (2)$$

曲线存在显著差异,这种差异在开挖面下方及开挖面处表现的尤其明显,围岩级别越高,在开挖面下方围岩位移释放系数越大,图 11 中体现为曲线越陡。这是由于高级别围岩对卸荷效应敏感性高,在重力方向更容易出现卸荷回弹及内缩效应,导致位移释放系数较大。

$III$  级围岩开挖面处围岩位移出现“突跳”现象,而  $IV$  级围岩“突跳”现象则较弱。由以上分析可推测,深埋高质量围岩在围岩开挖前要特别注意变形过大问题,当利用平面数值模型求得围岩变形量过大时,应考虑超前支护。

监测面位于开挖面上方时,围岩级别对围岩释放系数影响较小,不同级别围岩下围岩释放系数收敛速度基本一致,但相对而言,围岩级别越高,围岩释放系数越小。



表 4 Ⅲ级围岩拟合公式系数取值

系数	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$
$x^* \leq -1$	0.055 059	0.067 497	0.562 168	-0.485 995	-1.955 500	-1.666 946	-0.479 801	0.019 869	0.019 640
$x^* \geq 0$	0.141 590	18.532 781	13.455 229	11.707 986	11.389 202	0.571 198	0.573 221	—	—

以上拟合公式在 $-1 < x^* < 0$ 段采取了线性拟合,因此不做误差分析,仅针对非线性拟合公式进行误

差分析。表 5 为各级围岩开挖面下方( $x^* \leq -1$ )及开挖面上方( $x^* \geq 0$ )拟合公式误差分析结果。

表 5 拟合结果的误差分析

围岩级别	误差分析							
	RESE		SSE		R		DC	
	$x^* \leq -1$	$x^* \geq 0$	$x^* \leq -1$	$x^* \geq 0$	$x^* \leq -1$	$x^* \geq 0$	$x^* \leq -1$	$x^* \geq 0$
Ⅳ级围岩	1.23e-5	0.000 401	7.32e-9	6.923e-6	0.999 99	0.999 99	0.999 99	0.999 99
Ⅲ级围岩	1.18e-5	0.000 058	6.75e-9	1.45e-5	0.999 99	0.999 99	0.999 99	0.999 99

由表 5 可知,以上各分析指标均表明该拟合结果效果极佳。

### 3.4 与隧道 LDP 曲线的对比

通过以上分析获得了竖井正向扩挖时的 LDP 曲线公式,将本文所得公式与隧道传统 LDP 曲线公式进行对比,可以得到竖井 LDP 曲线公式与隧道 LDP 曲线公式的异同点。以Ⅲ级围岩中的纵向变形公式为例,选取隧道中常用的 Panet 公式<sup>[8]</sup>及 V-D 公式<sup>[9]</sup>进行对比分析,其中 Panet 公式适用于围岩质量较好及埋深较浅的工况,V-D 公式应用范围较广,可以适合不同的工程条件。

对 V-D 公式及 Panet 公式,其计算公式及取值可参考文献[10]获得,针对本文Ⅲ级围岩情况,V-D 公式中,可取  $R_p^{\max} = 2.3$  m,各公式所得 LDP 曲线如图 13 所示。

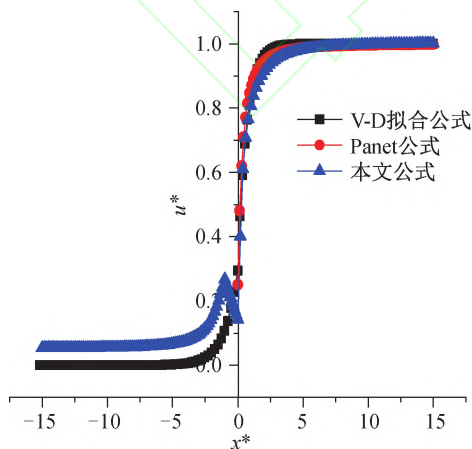


图 13 竖井与隧道 LDP 曲线对比

由图 13 可知:

(1)竖井与隧道 LDP 曲线整体上呈现一致的规律:随开挖面的推进,围岩位移释放系数由小到大逐步递增,并最终趋于稳定。但变化中仍然存在差异,

距离开挖面较远时,竖井开挖面下方围岩位移释放系数变化规律与隧道开挖面前方围岩的基本一致,但竖井位移释放系数明显较大,这是反井法施工产生的影响;开挖面下(前)方围岩距离开挖面较近时,竖井位移释放系数出现先增大后减小的过程,而隧道中位移释放系数则一直呈现递增的规律;隧道开挖面后方岩体较快的趋于稳定,LDP 曲线收敛速度更快,图中体现为曲线上升速度更快、斜率更大,因此若在竖井中参考隧道 LDP 曲线确定支护时机,则会出现支护过早,低估围岩自稳能力的情况。

(2)竖井开挖面处( $x^* = 0$ 时)产生的位移对最终位移的贡献远低于隧道,相差约为 50%。

(3)观察整条曲线,竖井开挖面影响范围更大,开挖面空间效应更强。

通过以上对比分析可知,竖井 LDP 曲线与隧道 LDP 曲线存在较多差异,因此,为更好地在竖井中应用收敛约束法确定围岩支护时机及进行稳定性分析,需对竖井 LDP 曲线展开更多、更深入的研究,避免盲目类比隧道 LDP 曲线的研究成果。

## 4 结论

(1)竖井开挖中,围岩亚类分级及开挖深度变化对 LDP 曲线的影响较小。基本分级下,围岩级别对 LDP 曲线的影响主要集中在开挖面下方,围岩级别越高即围岩越好,围岩位移释放系数越大,但在开挖面上方,位移释放系数随围岩级别升高而减小,围岩位移突跳现象越明显。

(2)竖井开挖面空间效应范围约为 6 倍开挖半径。

(3)本文提出了量化Ⅲ、Ⅳ级围岩 LDP 曲线的函数表达式。与隧道传统 LDP 曲线相比,竖井开挖面处产生的位移对最终位移的贡献远低于隧道,相



差约为 50%;并且二者在开挖面前后的位移释放系数的大小及收敛速度等均存在差异。该结果可为本工程确定支护时间及稳定性分析提供理论指导,并为类似工程提供一定的参考。

(4)本文主要研究了Ⅲ级、Ⅳ级等围岩质量较好但开挖深度较浅的竖井开挖面空间效应,以后应对软弱围岩及深大竖井展开更进一步的研究。

### 参考文献(References)

- [1] 李广建. 公路隧道大口径深竖井施工技术 & 支护参数研究[D]. 西安:长安大学,2017:1-10.
- [2] 谢阳,赵玉成,武淑敏,等. 电缆隧道圆形竖井结构设计方法研究[J]. 铁道标准设计,2017,61(6):111-115.  
XIE Y,ZHAO Y C,WU S M,et al. Study on design method of circular vertical shaft structure in cable tunnel[J]. Railway Standard Design,2017,61(6):111-115.
- [3] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计细则:JTG/T D70-2010[S]. 北京:人民交通出版社,2010:244-250.
- [4] CARRANZA-TORRES C,FAIRHURST C. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock-masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion[J]. Tunneling and Underground Space Technology,2000,15(2):187-213.
- [5] 张标,崔岚,郑俊杰. 基于 Hoek-Brown 屈服准则的修正纵向变形曲线分析[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(增刊1):52-57.  
ZHANG B,CUI L,ZHENG J J. Analysis of modified longitudinal deformation profile based on Hoek-Brown failure criterion[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2017,13(S1):52-57.
- [6] PANET M,Guénot A. Analysis of convergence behind the face of a tunnel [C]// Proceedings of the international symposium on tunneling. London:Institute of Mining and Metallurgy,1982:197-204.
- [7] HOEK E,BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,1997,34(8):1165-1186.
- [8] PANET M. Understanding deformations in tunnels[M]// Hudson J A,Brown E T,Fairhurst C,et al. Comprehensive Rock Engineering. Oxford:Pergamon,1993:663-690.
- [9] Vlachopoulos N,Diederichs M S. Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels. Rock Mechanics and Rock Engineering,2009,42(2):131-146.
- [10] 吴顺川,耿晓杰,高永涛,等. 基于广义 Hoek-Brown 准则的隧道纵向变形曲线研究[J]. 岩土力学,2015,36(4):946-952,987.  
WU S C,GENG X J,GAO Y T,et al. A study of the longitudinal deformation of tunnels based on the generalized Hoek-Brown failure criterion[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(4):946-952,987.
- [11] 耿晓杰. 深埋条件下隧道稳定性评价方法及应用研究[D]. 北京:北京科技大学,2015.
- [12] 张常光,曾开华. 收敛约束法中隧道开挖面空间效应方法比较[J]. 岩土力学,2016,37(5):1417-1424.  
ZHANG C G,ZENG K H. Comparisons of spatial-effect approaches for tunnel excavation using convergence-confinement method[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(5):1417-1424.
- [13] 张妍珺,苏凯,周利,等. 基于收敛-约束法的隧洞纵向变形演化规律研究与支护时机估算[J]. 岩土力学,2017,38(增刊1):471-478.  
ZHANG Y J,SU K,ZHOU L,et al. Estimation of ground support installation time based on the tunnel longitudinal displacement of convergence-confinement method [J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(S1):471-478.
- [14] 李之达,蔡佳骏,刘劲勇,等. 殷家岩隧道施工过程有限元模拟与分析[J]. 西部探矿工程,2005,17(9):115-118.  
LI Z D,CAI J J,LIU J Y,et al. Finite element simulation and analysis of the construction process of Yinjiayan tunnel [J]. West-china Exploration Engineering,2005,17(9):115-118.
- [15] 周荣. 大坪里隧道竖井施工过程数值模拟与研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007:43-51.

(责任编辑:张忠)