

LDP 曲线数值求解中波浪形发展问题的解决

李昌博^{1,2}, 姚磊华¹, 刘立鹏², 孙兴松²

(1. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 围岩纵剖面变形曲线(LDP, longitudinal displacement profile)是采用收敛-约束法进行地下洞室围岩支护设计的基础,针对数值模拟求解 LDP 曲线时存在的曲线形态波浪形发展变化所带来的围岩收敛位移难以准确把握的问题,从开挖步长与剖分精度的角度对解决这一问题进行了研究,同时分析了岩体开挖模拟方法、岩体自重设置对于围岩收敛变形的影响。结果表明:开挖步长对于围岩纵向变形曲线形态具有较大影响,选择不合适时会存在明显波浪形变化问题,求解 LDP 曲线时开挖步选择需要与数值计算网格剖分精度紧密结合;岩体开挖的模拟方式对于 LDP 曲线形态无影响,但对于围岩真实收敛位移具有较大影响;岩体自重对 LDP 曲线形态及围岩最终位移基本无影响。在求解实际工程 LDP 曲线时建议采用与网格剖分长度相等的开挖步长,此时对于 LDP 曲线形态及收敛绝对量值均无影响。研究成果可为地下洞室支护设计中围岩纵剖面曲线的求解提供一定的借鉴和参考。

关键词: 隧道工程; 开挖步长; 数值模拟; 波浪形发展; 围岩纵向变形曲线

中图分类号:U452

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)01-0203-05

Solving the wave-shaped development in LDP curve numerical simulation

LI Changbo^{1,2}, YAO Leihua¹, LIU Lipeng², SUN Xingsong²

(1. School of Engineering & Technology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: The longitudinal displacement profile (LDP) of the surrounding rock is the foundation for the supporting design of underground caverns using the convergence confinement method. However, in the LDP curve calculation with general numerical simulation method, it is difficult to determine the converging displacement of surrounding rocks accurately because of the wave-shape development and variation of the curve. To solve this problem, studies were conducted based on the relationship between the excavation step size and the accuracy of the numerical calculation grid in this paper. And the effect of curve and converging displacement of surrounding rocks caused by excavation simulation method and setting of self-weight of rock mass were analyzed. The results showed that the excavation step size has a great effect on the shape of the longitudinal deformation curve of the surrounding rock. The inappropriate selection of the excavation step size may result in obvious wave-shaped variation. The determination of the tunnel excavation step needs to be closely combined with the accuracy of the numerical calculation grid when solving the LDP curve. The simulation method of rock excavation has no effect on the shape of the LDP curve, but it has a great influence on the true convergence displacement of the surrounding rock. The self-weight of the rock has no obvious effect on the shape of the LDP curve and the final converging displacement of the surrounding rock. When solving the LDP curve of practical projects, it is recommended to use the same excavation step size as the mesh length, which has no effect on the LDP curve shape and the absolute value of convergence displacement of the surrounding rock. The results of this study can provide references for solving the longitudinal profile curve of surrounding rock in the design of under-

收稿日期:2018-10-25; 修回日期:2018-12-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51609266、51879284);中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目(GE0145B452016、GE0145B822017)

作者简介:李昌博(1994-),男,江西吉安,硕士研究生,主要从事岩土工程体稳定性研究。

ground cavity support.

Key words: tunnel engineering; excavation step size; numerical simulation; wave-shaped development; longitudinal displacement profile of surrounding rock

1 研究背景

随着新奥法在地下工程施工中的广泛采用,基于弹塑性分析的收敛约束方法在围岩支护设计中逐渐受到重视^[1]。获得合理可用的围岩纵向变形曲线(LDP 曲线)是采用收敛约束方法设计地下洞室围岩支护参数的基础,目前业界主要是通过数值计算获得该曲线。

国内外很多学者均对 LDP 曲线展开过研究, Panet^[2]给出了弹性条件下 LDP 曲线的拟合公式。Vlachopoulos 等^[3]采用二维轴对称有限元模型,考虑围岩塑性区半径对于掌子面支撑效应的影响,模拟分析得到考虑围岩塑性区与洞室半径间关系的 LDP 曲线公式。吴顺川等^[4]基于 Hoek - Brown 屈服准则,采用 FLAC^{3D}模拟软件,研究了不同应力条件和岩体质量水平下隧道开挖的 LDP 曲线,并得到拟合公式。张传庆等^[5]以 Hoek 经验公式为基础,基于现场围岩监测收敛位移,研究了隧道开挖过程中前期损失位移和 LDP 曲线的求取方法。孙钧等^[6]和苏国韶^[7]对应力释放进行了早期研究,随后杨友彬等^[8]基于应力释放率可近似等效为位移释放率的原理,提出通过体积损失率求解应力释放率的方法。郭瑞等^[9]研究了隧道开挖过程中应力释放与位移释放的相关关系。杜雷功^[10]对水工隧洞的施工关键技术进行了详细阐述。赵大洲等^[11]考虑隧洞施工方式和围岩支护形式等因素,采用数值模拟分析了围岩与衬砌的相互作用关系。

数值计算中,特别是地下洞室开挖围岩稳定性分析中,开挖步长与剖分精度间组合关系对计算结果存在较为明显的影响,目前对采用数值计算方法获得 LDP 曲线过程中开挖步长与剖分精度对于曲线的影响规律及如何消除影响未见相关研究,同时对于岩体开挖模拟方式以及岩体自重等因素对于 LDP 曲线最终形态等亦研究较少。基于此,本文在收集整理现有围岩纵剖面曲线的基础上,采用数值模拟软件对地下洞室开挖过程进行了模拟分析,详尽研究开挖步长与剖分精度间不同组合关系对于围岩纵剖面曲线形态的影响,并论证了岩体开挖模拟方式以及自重等对于 LDP 曲线形态以及围岩最终收敛位移等的影响,给出了如何消除 LDP 曲线存在波浪形发展问题的方法,研究结果可为设计人员采

用收敛 - 约束方法进行地下洞室支护设计中 LDP 曲线的求解提供一定的借鉴和参考。

2 已有围岩纵剖面曲线

2.1 弹性力学解

Panet 基于弹性力学理论分析给出了 LDP 曲线弹性解^[2]:

$$u = \frac{u_R}{u_{\max}} = \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \left[1 - \left(\frac{3}{3 + 4X^*} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中: $X^* = X/R_0$, X 为洞壁点距离掌子面的距离, m; R_0 为洞室半径, m; u_R 为洞壁点的位移, cm; $u_{\max}$ 为洞壁最大位移, cm。

Unlu 等^[12]认为围岩纵剖面曲线并不单纯只与掌子面距离相关,同时与岩体泊松比 ν 亦相关,并提出不同经验公式:

对于 $X^* \leq 0$ 情况

$$u = \frac{u_R}{u_{\max}} = \frac{u_0}{u_{\max}} + A_a(1 - e^{B_a X^*}) \quad (2)$$

对于 $X^* \geq 0$ 情况

$$u = \frac{u_R}{u_{\max}} = \frac{u_0}{u_{\max}} + A_a(1 - (B_b/(A_b + X^*))^2) \quad (3)$$

其中:

$$\frac{u_0}{u_{\max}} = 0.22\nu + 0.19$$

$$A_a = -0.22\nu - 0.19; B_a = 0.73\nu + 0.81$$

$$A_b = -0.22\nu + 0.81; B_b = 0.39\nu + 0.65$$

2.2 基于实测值的拟合

Hoek 对 Chern 等^[13]实测结果进行拟合后,得到如下 LDP 曲线最佳拟合公式^[14]:

$$u = \frac{u_R}{u_{\max}} = [1 + e^{-(X^*/1.1)}]^{-1.7} \quad (4)$$

同时, Hoek 在其 RocSupport 软件中又给出如下围岩纵剖面曲线:

$$u = \frac{u_R}{u_{\max}} = 1/[1 + e^{-(X^*/0.55)}]^{1.7} \quad (5)$$

2.3 数值模拟获取

Vlachopoulos 等^[3]研究发现围岩塑性区对于围岩纵剖面曲线具有较大影响,并提出不同塑性区 R_p 与洞径 R_T 比值($R^* = R_p/R_T$) 时 LDP 曲线:

对于 $X^* \leq 0$ 情况

$$u = u_0^* \cdot e^{X^*} \quad (6)$$

对于 $X^* \geq 0$ 情况

$$u = 1 - (1 - u_0^*) \cdot e^{-\frac{3X^*}{2R^*}} \quad (7)$$

$$\text{其中: } u_0^* = \frac{u_0}{u_{\max}} = \frac{1}{3} e^{-0.15R^*}$$

由上述公式可知,基于不同的假设所获得的围岩纵剖面变形公式并不一致,在具体工程中难以直接确定采用哪个公式更为合适,另外由于每个工程所赋存的环境不同,如岩体强度、地应力量级及方向等,使得理论推导公式或基于某个工程测量值的拟合公式均难以直接运用,通常仍需采用数值模拟计算的方式获得具体工程的 LDP 曲线以用于后续支护设计中。

3 数值模型及边界条件

此处以西南某隧洞工程为研究对象,建立数值模拟模型,并给定相同边界条件,以研究开挖步长、开挖方法等的影响。利用 FLAC^{3D} 的自带建模命令建立隧洞三维计算模型,如图 1 所示。

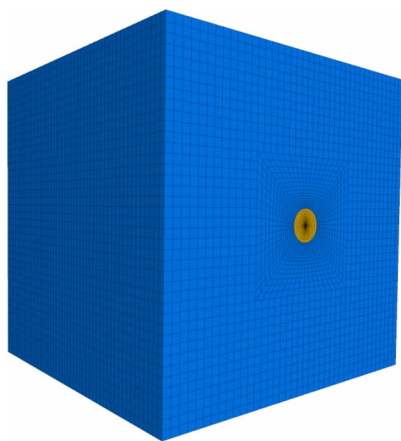


图 1 隧洞三维计算模型

模型沿隧洞轴线方向 (y 向) 长 100 m、宽 (x 向) 100 m、高 (z 向) 100 m,隧洞直径 D 为 10 m,沿隧洞轴线方向网格长度为 1 m ($0.1D$),共剖分 281 600 个单元,含 289 365 个节点。隧洞处于 20 MPa 的静水应力场中, x 、 y 向施加相应 x 、 y 向位移边界限制,模型底面施加 z 向位移限制。岩体为理想弹塑性材料,屈服准则采用 Mohr - Coloumb 准则,物理力学参数如表 1 所示。

表 1 岩体物理力学参数

弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	剪胀角/(°)
2	0.2	2	24	4

4 LDP 曲线影响及处理方法

4.1 开挖步长

钻爆法开挖施工中,一般根据地下洞室断面面积大小,采用台阶法分布开挖,而在数值模拟中通常考虑尽量与施工方法较为接近,所以在求解 LDP 曲线时一般也采用分段开挖的方式进行岩体开挖,此处设置开挖长度分布为 $0.1D$ 、 $0.2D$ 、 $1D$ 及一次性开挖完毕 ($8D$) 4 种情况模拟地下洞室开挖 (均采用 zone cmodel assign null 命令)。不同开挖步长下拱顶围岩收敛变形以及归一化处理后围岩纵剖面变形曲线 (LDP 曲线) 如图 2 所示。

由图 2 可知,岩体开挖步长对于 LDP 曲线形态影响很大,如采用 $0.2D$ 、 $1D$ 开挖长度时,曲线存在明显波浪形态,这势必使得采用收敛约束方法进行围岩支护设计时无法采用该曲线来选择合理的支护距离和支护体强度;开挖体长度为 $0.1D$ 和 $8D$ 时,即分别对应 1 个剖分网格和一次性开挖完所有待开挖岩体时,LDP 曲线形态较为光滑,无明显波浪形态存在。故而,在采用数值模拟方法求解地下洞室岩体开挖时围岩 LDP 曲线,应注意开挖步长对于围岩纵向变形曲线形态的影响,可采用开挖长度为单个剖分单元体长度或一次性开挖完的方式,此时所获得的归一化围岩 LDP 曲线较为理想,但需要注意的是采用 1 个单元长度或一次性开挖方式时,仍需要考虑该方式对于围岩最终收敛变形量值的影响。

4.2 开挖模拟方式

在现有数值模拟分析软件中,对于岩体开挖的模拟一般是通过将需要挖去的单元体直接删除或“杀死”等方式进行,如 FLAC^{3D} 软件中采用 delete 或 zone cmodel assign null 命令消除待开挖岩体,再将模型计算至平衡状态,以此模拟隧洞开挖过程。FLAC^{3D} 软件中一直存在大体积岩体开挖惯性效应导致的塑性区体积过大问题,最新版本的 FLAC^{3D} 软件中为防止在静力求解过程中出现非真实惯性效应导致的洞壁围岩非真实性的破坏,采用 zone relax 命令给待开挖单元体乘以 0 ~ 1 之间的某一系数,对称性地逐渐降低开挖单元刚度、应力以及密度,当系数降为 0 时单元本构模型变为 null,同时移除施加于单元体上所有力或位移边界,以此模拟开挖过程。图 2 显示采用无应力释放方式开挖时, $0.1D$ 和 $8D$ 开挖步长对于 LDP 曲线形态基本无影响,但最终位移收敛量值存在明显不同,此处采用 zone cmodel assign null 和 zone relax 两种不同的命令来模拟 $0.1D$ 和 $8D$ 两种不同开挖长

度下围岩 LDP 曲线形态,具体如图 3 所示。

由图 3 可知,LDP 曲线在距离掌子面 5 倍洞径外逐渐趋于稳定,FLAC^{3D} 软件常规的 zone cmodel assign null 命令或者新版软件中 zone relax 命令所计算得到的围岩纵剖面变形曲线基本相同。采用不同模拟方式下洞壁围岩收敛变形量值如图 4 所示。

由图 4 可知,同一开挖步长下采用 zone relax 和 zone cmodel assign null 两种不同命令计算时,围岩收敛位移表现出不同的变化形式。一次性挖完时 (8D),采用 zone relax 命令计算时所得到的围岩收敛位移在掌子面后与采用 zone cmodel assign null 命令计算值具有较大差异,并随着距离增加而逐渐加大。这将给采用收敛-约束方法进行支护设计时带来很大的困惑,即相同支护系统、相同安装时机却得

到不同的支护安全系数。而采用 0.1D 长度开挖时 (每次开挖一个单元长度),两种模拟方式得到的围岩收敛位移在任何时刻均较为一致,且所得围岩最终收敛位移与弹塑性力学芬纳解更为接近,所以推荐采用 0.1D 开挖方式获得更为合理的曲线形态和围岩最终收敛位移,以便于支护设计选择。

4.3 其他因素

LDP 曲线提出时假设岩体赋存于静水应力场中,但是多数学者在利用数值模拟方法求解围岩变形时,通常会设定岩体密度(重度),用以考虑在自重应力作用下岩体的变形,此处对相同应力场情况下,仿真模拟了有、无岩体自重两种不同的情况,以分析自重对 LDP 曲线和围岩最终位移的影响,结果如图 5 所示。

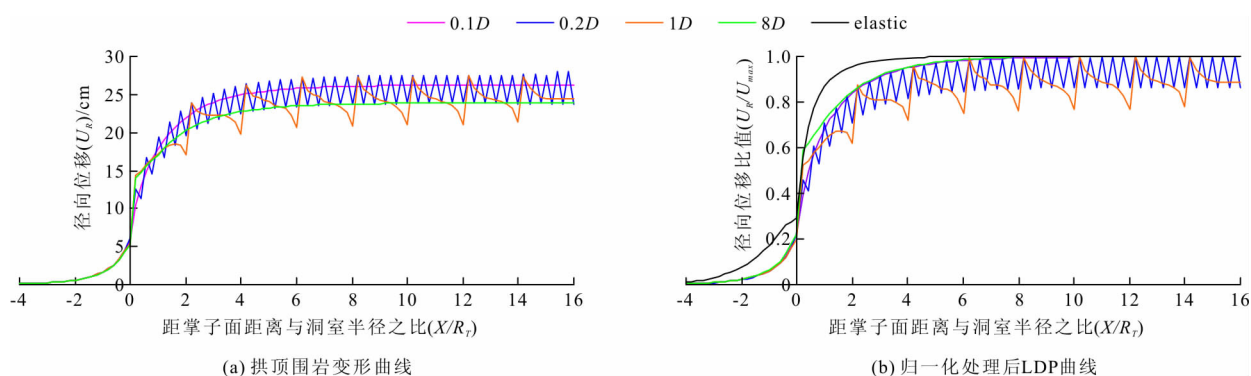


图 2 不同开挖步尺寸下 LDP 曲线

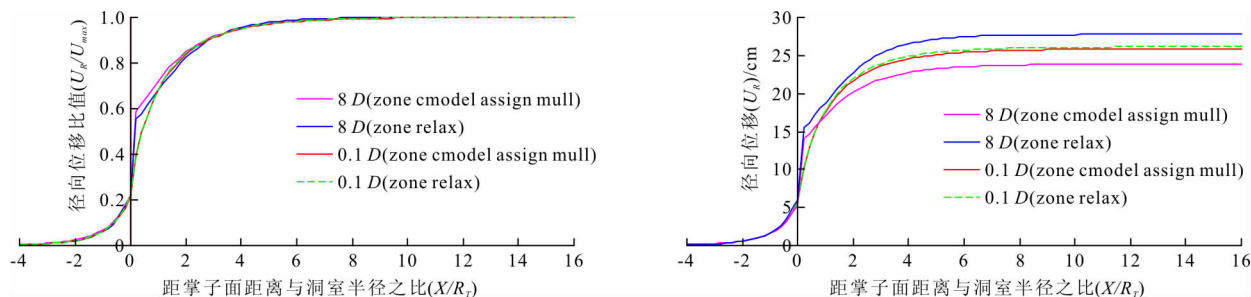


图 3 两种命令计算的不同开挖方式下 LDP 曲线

图 4 两种命令计算的不同开挖方式下 LDP 曲线

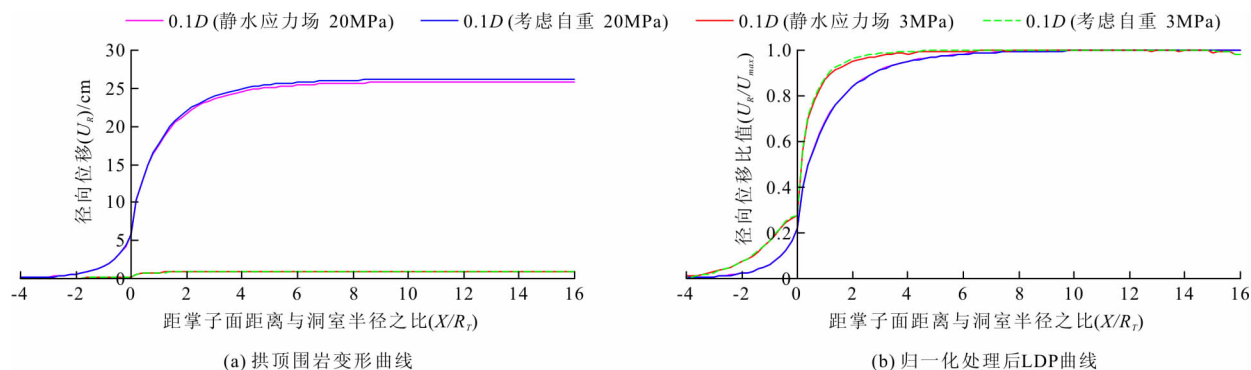


图 5 岩体自重对 LDP 曲线的影响

由图5可知,在数值模拟中考虑自重应力作用时围岩变形略大于不设置岩体密度(自重)的静水压力场情况,较高地应力作用围岩屈服范围更大时这种差异会变大,但之间量值相差总体较小,LDP曲线形态及发展型式基本相近。所以,采用数值计算的方法获取LDP曲线时,是否设置自重应力场对于LDP曲线的影响较小,基本可忽略不计。

5 结 论

本文对采用数值模拟技术获取围岩纵剖面变形曲线时如何避免曲线波浪形变化以及开挖模拟方法、设置岩体自重等对于LDP曲线的影响进行了研究,主要得出以下结论:

(1)采用数值模拟方法求解围岩开挖纵剖面变形曲线时,岩体开挖步长对曲线形态影响较大,曲线易于存在明显波浪形态。开挖长度为单个剖分单元体长度或一次性开挖完的方式可有效避免该问题,但仍需考虑不同方式对于围岩最终收敛变形的影响。

(2)开挖步数越长,采用直接删除单元或应力释放法围岩最终收敛变形计算值差距越大,开挖长度与剖分单元长度相同时,两种模拟方式得到的收敛位移时刻一致,且弹塑性力学解更为接近,推荐采用该方法获取LDP曲线,以便于支护设计选择。

(3)采用数值计算获取LDP曲线时,是否设置自重应力场对于曲线影响较小,基本可忽略不计。

本文对获得合理可用LDP曲线进行了研究,可为隧洞支护设计提供一定的参考,但由于隧洞工程多穿越不同岩性及质量地层,如何考虑岩体参数随机分布对于LDP曲线的影响需要进一步开展研究。

参考文献:

- [1] 杨峰,王连国,陆银龙,等. 岩土工程中收敛约束法的研究现状[J]. 煤炭科技, 2009(2): 11-12.
- [2] PANET M. Le calcul des tunnels par la méthode convergence - confinement[M]. Paris: Presses de L'école Nationale des Ponts et Chaussées, 1995.
- [3] VLACHOPOULOS N, Diederichs M S. Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2009, 42(2): 131-146.
- [4] 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.
- [5] 张传庆,冯夏庭,周辉,等. 隧洞围岩收敛损失位移的求取方法及应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 997-1003+1012.
- [6] 孙钧,王炳鉴. 地下结构有限元解析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1988.
- [7] 苏国韶. 高地应力下大型地下洞室群稳定性分析与智能优化研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [8] 杨友彬,郑俊杰,赖汉江,等. 一种改进的隧道开挖应力释放率确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2251-2257.
- [9] 郭瑞,方勇,何川. 隧道开挖过程中应力释放及位移释放的相关关系研究[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(9): 46-50.
- [10] 杜雷功. 长大深埋水工隧洞设计关键技术研究与实践[J]. 水利水电技术, 2017, 48(10): 1-9.
- [11] 赵大洲,丛苹,崔超,等. 引汉济渭工程黄三段输水隧洞围岩变形与压力分析[J]. 水利水电技术, 2017, 48(8): 59-62+125.
- [12] UNLU T, GERCEK H. Effect of poisson's ratio on the normalized radial displacements occurring around the face of a circular tunnel[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2003, 18(5): 547-553.
- [13] CHERN J C, SHIAO F Y, YU C W. An empirical safety criterion for tunnel construction[C]// Proceedings of the Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering. Taipei, 1998: 222-227.
- [14] 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]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2000, 15(2): 187-213.