

软弱围岩隧洞位移和应力释放规律研究*

刘乃飞¹, 李宁¹, 郭晓刚¹, 冉建西², 张岩³

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048; 2. 新疆水利水电勘测设计研究院, 乌鲁木齐 830000;
3. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 西安 710054)

摘要: 软弱围岩强度低、自稳能力差, 在隧洞施工中易引起不同程度的塌方, 造成生命财产的损失。因此, 研究及时支护情况下软岩隧洞围岩的位移和应力释放规律显得尤为重要。笔者采用三维数值方法系统研究了隧洞开挖过程中的位移变化规律, 并结合二维数值分析方案研究了围岩应力释放系数随工作面推进的关系。研究表明: (1) 埋深、洞径和洞型等对拱顶位移释放系数影响较小, 而岩性对其影响显著; (2) 拱顶位移释放随应力释放变化过程大致可分为3个阶段, 且岩性越差达到相同位移释放率时所需的应力释放率也越大; (3) 研究断面前后一倍洞径是围岩应力调整的主要阶段, 且应力释放率随岩性的弱化而增强; (4) 初期支护对岩性较差的隧洞效果更明显。

关键词: 软岩隧洞; 数值试验; 应力释放系数; 位移释放系数

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)03-0643-08

Release Law of the Displacement and Stress for the Soft-rock Tunnels

Liu Naifei¹, Li Ning¹, Guo Xiaogang¹, Ran Jianxi², Zhang Yan³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P.R. China;
2. Xinjiang Investigation, Design and Research Institute of Water Conservancy and Hydropower, Urumqi 830000, P.R. China;
3. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, P.R. China)

Abstract: Because of the poor strength and lack of self-supporting ability of soft rock, it is easy to cause landslide in tunnel construction and create loss of life and property. Therefore, the study on the releasing rules of the displacement and stress of underground cavern is very important. The displacement variation of surrounding rock when the face is advancing and the stress release rule are studied by using two-dimensional numerical analysis scheme. This study shows that: (1) the release coefficient of displacement is less affected by the depth, diameter and shapes of the tunnel and is significantly impact by lithology; (2) the displacement release curve against the stress release ratio can be roughly divided into three phases and the stress release ratio increases with the weaken of lithology; (3) the main release stage of stress is in $-1D \sim 1D$ of the analytic section and the rate of stress relieving increases with the decrease of lithology; (4) the supporting effect is more significant for the tunnel in poor surrounding rock.

Keywords: soft-rock tunnel; numerical experiment; stress release ratio; displacement release ratio

* 收稿日期: 2016-11-05(修改稿)

作者简介: 刘乃飞(1985-), 男, 陕西榆林人, 博士生, 主要从隧洞工程和多场耦合方面的研究。

E-mail: liunaifei1985@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(51179153, 51509200); 西安理工大学博士学位论文创新基金(310-11202J306); 西安科技大学培育基金(2014036)

0 引言

软岩具有强度低、自稳能力差和明显的流变特性,因此在软岩中修建隧洞,如对围岩变形和应力规律不了解或支护不合理,往往因变形过大而引起隧洞破坏。因此,了解软岩隧洞围岩变形和应力随工作面推进规律的研究尤为重要。

国内外许多专家学者在隧洞围岩位移和应力特性方面做了大量的研究工作。Samir 等^[1]采用三维数值分析方法研究了锚喷隧洞的变形规律。Alejano 等^[2]、张常光等^[3]研究了隧洞开挖过程中的纵向变形特性。揭秉辉等^[4]基于应力反转法研究了大型洞室分层分步开挖过程中不同部位围岩位移释放规律。唐德高等^[5]利用三维弹性和弹塑性有限元法分析了泊松比、侧压力系数等多种因素对掘进面前后释放位移的影响。刘仲秋等^[6]对隧洞开挖释放荷载的不同模拟方法进行了对比分析。郭建新等^[7]运用理论分析和现场监测的方法研究了软破围岩隧洞开挖过程中的时空效应。同时,在隧洞围岩应力释放规律方面也取得了丰硕的研究成果^[8-10]。Kang 等^[11]研究了煤矿巷道的应力分布规律。Lu 等^[12]、Rui 等^[13]对隧洞开挖过程中围岩的受力特性进行了研究。杨树新等^[14]通过对地下洞室掘进过程中围岩应力变化的监测结果,将围岩应力变化分为应力释放、应力调整和应力平稳 3 个阶段。陈志敏^[15]提出了两类在高地应力软弱围岩条件下使用开挖应力释放率模型的方法。赵岩^[16]、高峰等^[17]对隧洞断面的荷载释放率进行了探讨。李俊鹏^[18]、仇玉良等^[19]、刘涛等^[20]等初步建立了应力释放与位移释放的关系。

这些研究工作为隧洞工程建设的快速发展和安全施工奠定了坚实的理论基础,但大都偏重于某一具体工程或某些特定的影响因素,很少综合考虑影响隧洞变形和应力释放的多种因素(如围岩类别、洞型、洞径等),而综合考虑这些因素对于优化施工工艺及判别隧洞稳定性具有重要的意义。因此,本文采用三维数值分析方法,系统研究了隧洞开挖过程中的位移变化规律,并结合二维数值分析方案研究了围岩应力释放系数随工作面推进的关系。该研究成果对于确定合理支护时机和估算实际监测中丢失的变形等均具有较大的参考价值。

1 分析模型及方案设计

1.1 数值模型

洞型分别选用工程中常见的城门洞形和圆形,城门洞形隧洞的高跨比为 1.5。根据分析经验,洞室分析范围以洞中心为准,上部取 5 倍洞径,左右各取 4 倍洞径,下部取 3 倍洞径。对于三维分析,沿洞轴线方向取 10 倍洞径作为分析的边界,即以研究断面为界取其前后各 5 倍洞径作为分析边界。岩体材料特性按均质各向同性的弹塑性考虑,采用 Drucker-Prager 屈服准则。本文利用 ANSYS 软件进行三维分析,用 FINAL 进行二维分析,主要考虑在及时支护情况下隧洞围岩位移和应力的变化规律。模型中锚杆用杆单元模拟,喷层用梁单元模拟,岩体用实体单元模拟,计算模型边界条件除上部为垂直荷载边界外,其余各侧面和底面均为法向约束边界,计算时按自重应力场考虑,并采用分部开挖模拟施工情况,计算模型的单元划分如图 1。

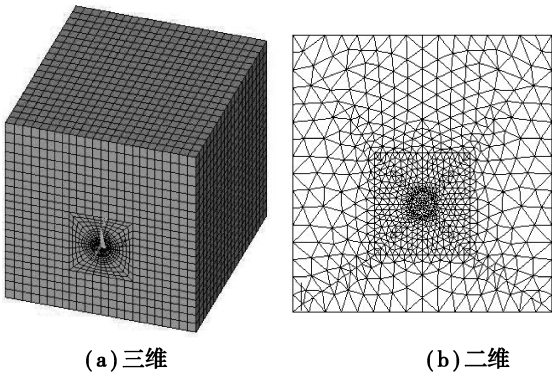


图 1 数值分析模型

Fig. 1 Numerical analysis model

1.2 分析方案设计

依据工程经验,按相互协调的原则选取 3 组参数方案。仿真分析中一次支护紧跟工作面施做,为便于对比分析结果,初期支护统一采用喷层厚 200 mm,挂钢筋网,2 m 锚杆。具体分析方案如表 1 所示。

表 1 位移释放规律分析方案参数表

Table 1 Parameters for the analysis of displacement release

参 数 围 岩	弹性模量 /GPa	泊松 比	粘聚力 /MPa	摩擦角 /(°)	洞径 /m	埋深 /m
Ⅳ类	4.00	0.32	0.60	35.0	5, 10, 15	20, 50,
Ⅴ类	0.90	0.35	0.15	30.0	3, 5, 10	100, 200,
土洞	0.05	0.40	0.05	28.0	3, 5	500

注:当洞径或跨度大于或等于 10 m 时,分析的最小埋深为 50 m。

2 位移释放规律研究

为了便于将不同影响因素下的隧洞变形进行对比分析,本文将数值分析的位移值进行了归一化处理,即用位移释放系数(指距开挖面一定距离处某点在任一方向上的洞壁位移与距开挖面足够远时的同一位置、同一方向上的洞壁收敛变形之比)来表示工作面推进对分析断面位移的影响,归一化处理后位移变化规律如下文所述。

2.1 圆形隧洞

2.1.1 IV类围岩隧洞

IV类围岩圆形隧洞位移释放系数随工作面推进的变化曲线如图2所示(图中 L 指分析断面距掌子面的距离, D 指隧洞的直径,下同),限于篇幅,此处仅给出部分分析结果。

由图2(b)和(c)可以看出,研究断面拱顶处围岩的收敛变形值随埋深的增大而有明显的增加,但位移释放系数受埋深的影响较小。同一参数方案下,相同洞径不同埋深的隧洞,拱顶围岩的位移释放系数变化曲线几乎重合,工作面推进到相同位置时的位移释放系数差值均未超过3%。

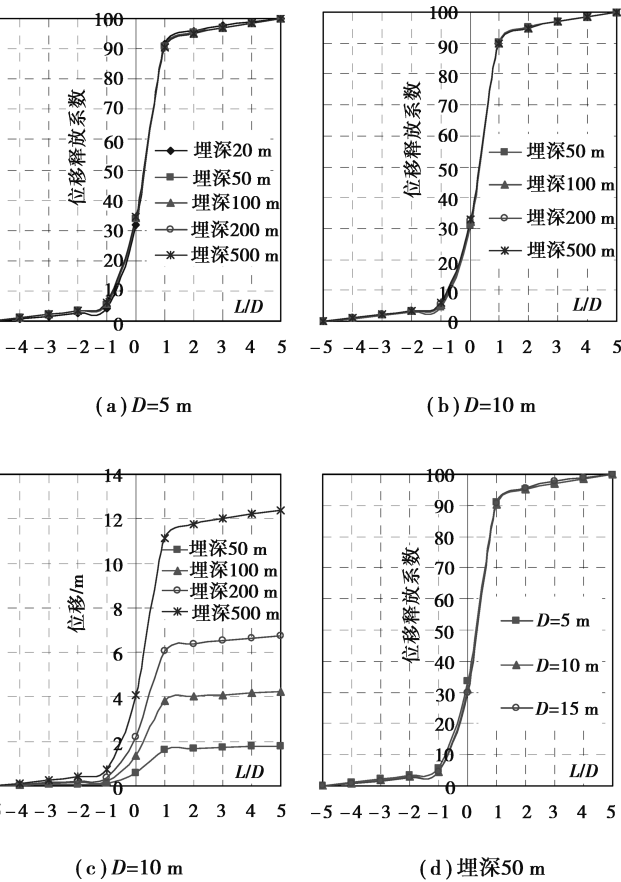


图2 IV类围岩位移释放系数变化曲线
Fig. 2 Curves of displacement release ratio for rock IV

图2(d)为选取各洞径埋深为50m的计算结果对比图。显然,洞径的变化对位移释放系数的影响也非常有限,洞径5m和洞径15m方案在工作面推进到研究断面时的位移释放系数分别为33.6%和29.8%,相差仅3.8%。工作面由距研究断面 $-1D$ 推进到 $1D$ 的过程中,洞径5m、10m、15m的位移释放系数变化幅度分别为85.4%、85.7%和86.1%。可见,在及时支护情况下,洞径较大的隧洞,其拱顶变形更集中于分析断面前后 $1D$ 。

2.1.2 V类围岩隧洞

V类围岩圆形隧洞位移释放系数随工作面推进的变化曲线如图3所示。

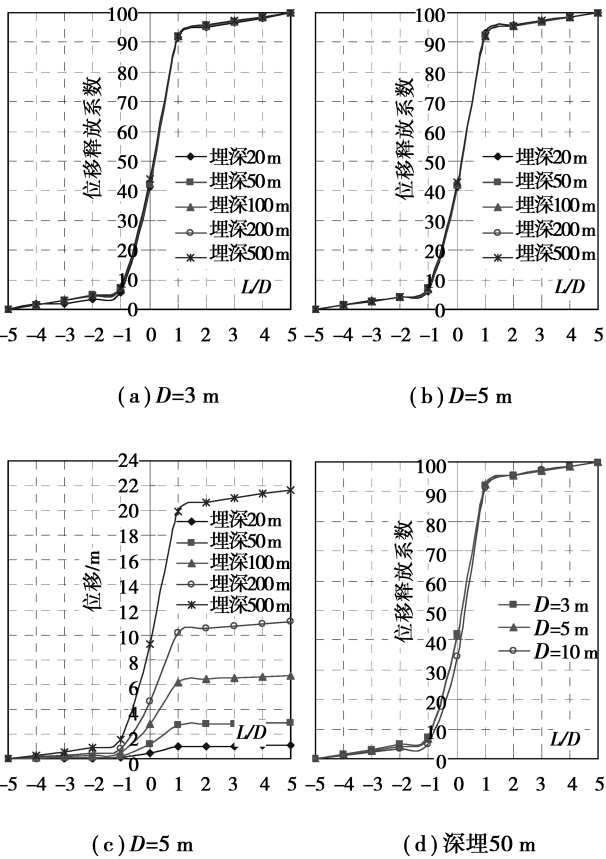


图3 V类围岩位移释放系数变化曲线
Fig. 3 Curves of displacement release ratio for rock V

由图3可以看出,V类围岩位移释放系数变化规律与IV类围岩基本相同。此外,由图3(d)可以看出,洞径3m和洞径10m方案在工作面推进到研究断面时的位移释放系数分别为42.0%和34.5%,相差7.5%。可见,洞径较大时位移释放反倒相对缓慢。在及时支护情况下,洞径较大的隧洞其拱顶变形更集中于研究断面前后一倍洞径,这与IV类围岩情况下取得的认识一致。

2.1.3 土质隧洞

土质圆形隧洞位移释放系数随工作面推进的

变化曲线如图 4 所示,此处也仅给出部分分析结果。

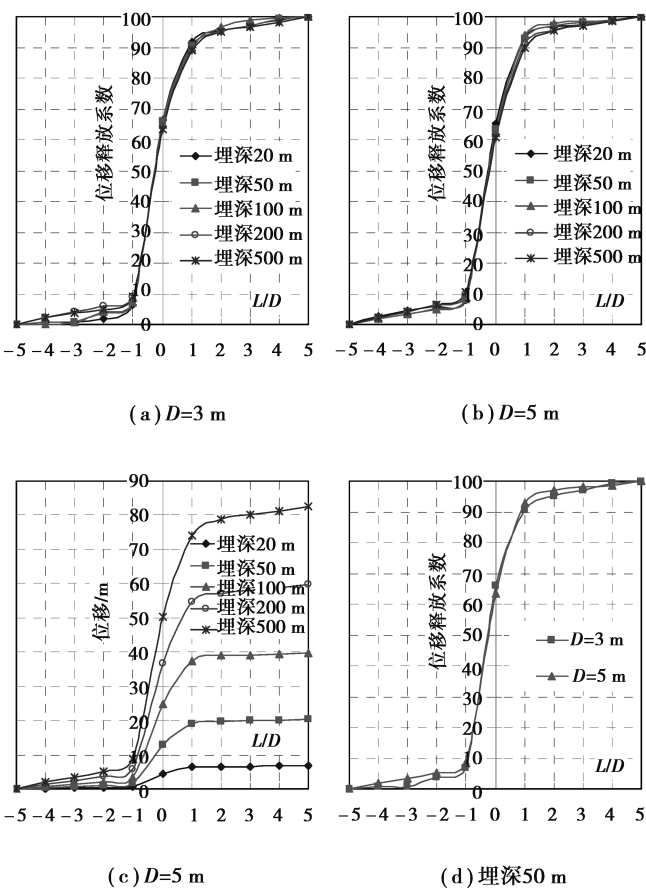


图 4 土质隧洞位移释放系数变化曲线

Fig. 4 Curves of displacement release ratio for soil tunnel

土质隧洞各方案拱顶围岩位移释放系数变化规律与前两种方案相似。洞径 3 m 隧洞的计算结果显示,埋深为 20 m 和 500 m 时,工作面推进到研究断面时的位移释放系数分别为 66.3% 和 63.4%,相差为 2.9%;且在工作面推进到研究断面之前,埋深 500 m 的曲线在埋深 20 m 的曲线之上,而工作面经过研究断面之后,埋深 500 m 的曲线则在埋深 20 m 曲线之下,即埋深较大的隧洞在及时支护情况下位移释放比埋深较小的隧洞均匀,曲线更为平缓。洞径 5 m 情况下,各埋深计算结果的对比与洞径 3 m 的情况相似。

由于土质隧洞成洞条件差,因此,只对洞径 3 m 和 5 m 的情况进行了分析,两者之间的对比情况如图 4(d) 所示,选取各洞径埋深为 50 m 的计算结果进行比较。洞径 3 m 和洞径 5 m 的方案在工作面推进到距研究断面 1 倍洞径时的位移释放系数分别为 90.5% 和 92.9%,相差 2.4%。工作面由距研究断面 $-1D$ 推进到 $1D$ 的过程中,洞径 3 m、5 m 的位移释放系数变化幅度分别为 83.6% 和 84.7%,

洞径较大的隧洞在及时支护情况下,其拱顶围岩的位移释放更为集中于研究断面前后一倍洞径的开挖过程。

2.1.4 综合对比

在圆形洞室的各计算方案中,选取洞径 5 m、埋深为 50 m 的计算结果进行对比,如图 5 所示。

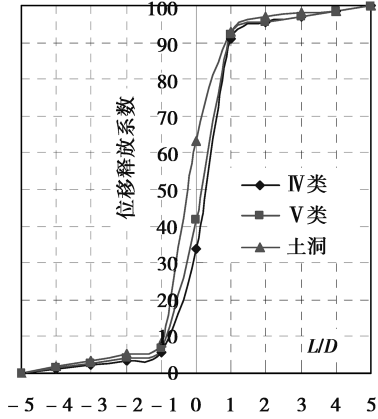


图 5 对比分析曲线

Fig. 5 Comparison analysis of curves

从图 5 中可以看出,在工作面推进到距研究断面 $-1D$ 前,曲线几乎重合,且位移释放系数均较小。围岩的位移释放主要发生在工作面由 $-1D$ 推进到 $1D$ 之间,在工作面推进到 $1D$ 时,位移释放系数均达到了 90% 以上。可见,一次支护及时施做有效地限制了距研究断面较远的工作面开挖对研究断面的扰动作用,即围岩变形主要发生在研究断面附近的开挖过程。工作面推进到研究断面时,不同围岩条件下的位移释放系数分别为 33.6%、41.6% 和 63.3%。可见,围岩类别越差,开挖对研究断面的扰动作用就越明显,位移释放也更为迅速。

2.2 城门洞形隧洞

分析表明,城门洞形隧洞位移释放规律和圆形隧洞位移释放规律类似,因此,仅给出埋深 50 m 时各类围岩不同洞径对位移释放系数的影响曲线,如图 6。

由图 6(a)~(c) 可以看出,城门洞形隧洞位移释放规律和圆形隧洞相同,洞径较大时隧洞拱顶变形更为集中于研究断面前后一倍洞径,即可认为围岩力学参数相同的情况下,支护结构对洞径较大的隧洞支护效果更为明显。

在城门洞形洞室的各方案中选取洞径 5 m、埋深为 50 m 的计算结果进行对比,如图 6(d) 所示。从图中可以得到和圆形隧洞相同的规律,即对于较软弱的围岩,初期支护对围岩变形的限制作用非常

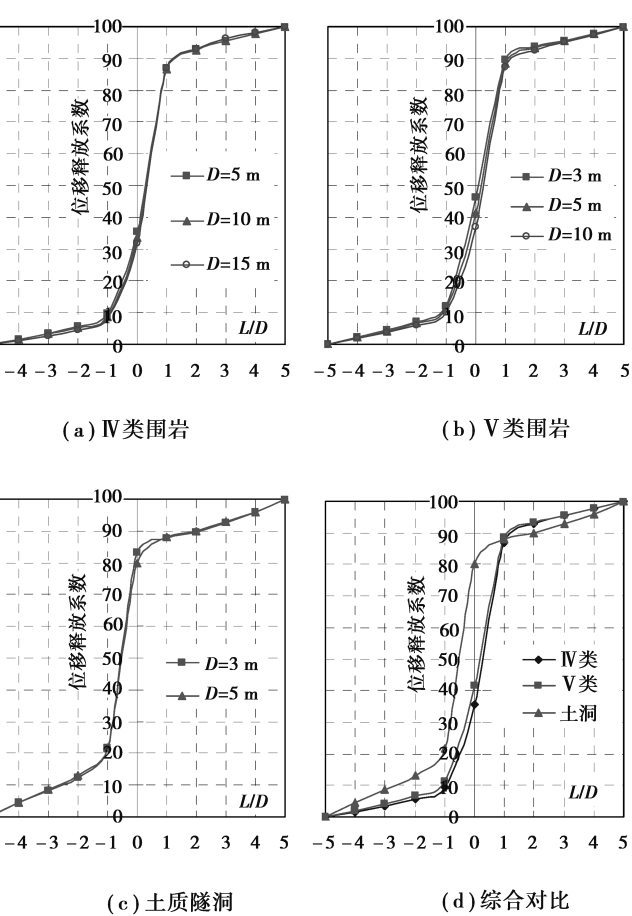


图6 城门洞形隧洞位移释放系数变化曲线

Fig. 6 Curves of displacement release ratio for the arched section tunnel

明显。总体而言,围岩力学性质较弱的隧洞,拱顶处围岩的位移释放较为均匀。受支护结构的作用,各方案的位移释放均主要发生在工作面由-1倍洞径推进到1倍洞径的过程。

3 应力释放规律研究

由前文研究成果可知,一次支护紧跟工作面时,埋深及洞径对围岩位移释放的影响十分有限。因此,本节取埋深50 m、洞径5 m的方案采用FINAL软件进行二维分析,建立位移释放系数与应力释放系数(应力释放系数指开挖后围岩的有效变形模量与初始变形模量的比值)之间的对应关系,进而综合前节研究成果,推求应力释放系数与工作面的关系。

3.1 应力释放与位移释放的对应关系

3.1.1 圆形隧洞

图7为圆形隧洞应力释放系数与位移释放系数的对应关系曲线。围岩受开挖扰动的初期,各类围岩的位移释放速率均快于应力释放,即较少的应

力就会引起较大的变形,此时各类围岩位移释放系数与应力释放系数的比值分别为3.0、2.4和1.7。随后,各曲线均趋于平缓,位移释放系数与应力释放系数的比值在一定范围内保持稳定。岩性较好围岩的位移释放系数随应力释放系数的变化曲线表现出明显的线性特征,而其他岩性较差的隧洞在应力释放率达到80%之后,位移释放率又进入加速发展阶段。从图中还可以看出,围岩类别越差,达到相同位移释放率时对应的应力释放率也越大。

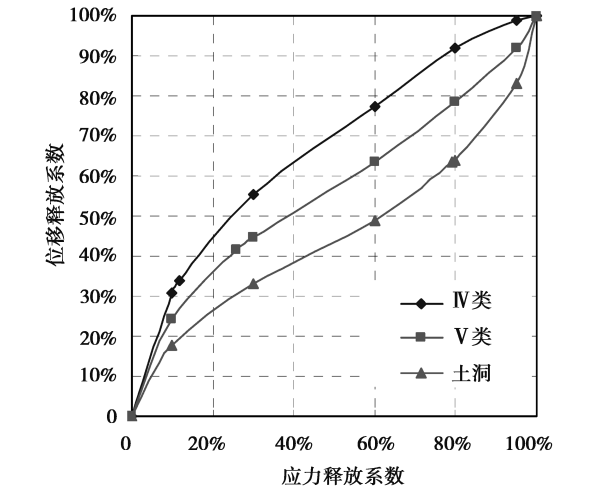


图7 应力释放系数与位移释放系数关系曲线

Fig. 7 Curves of displacement release ratio against stress release ratio

3.1.2 城门洞形隧洞

图8为城门洞形隧洞应力释放系数与位移释放系数的关系曲线,变化规律与圆形隧洞相应方案的关系曲线十分相似,因此相关结果在此不再赘述。

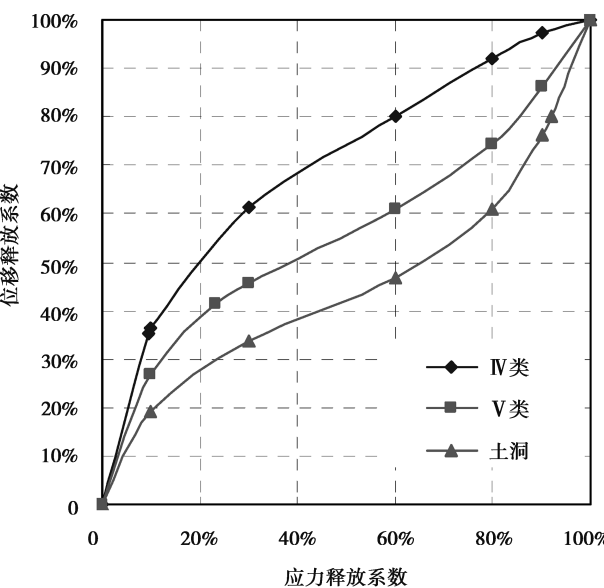


图8 应力释放系数与位移释放系数关系曲线

Fig. 8 Curves of displacement release ratio against stress release ratio

3.2 应力释放与工作面推进的关系

3.2.1 圆形隧洞

根据前文的研究成果可以得到应力释放系数随工作面推进的变化曲线,如图9所示。

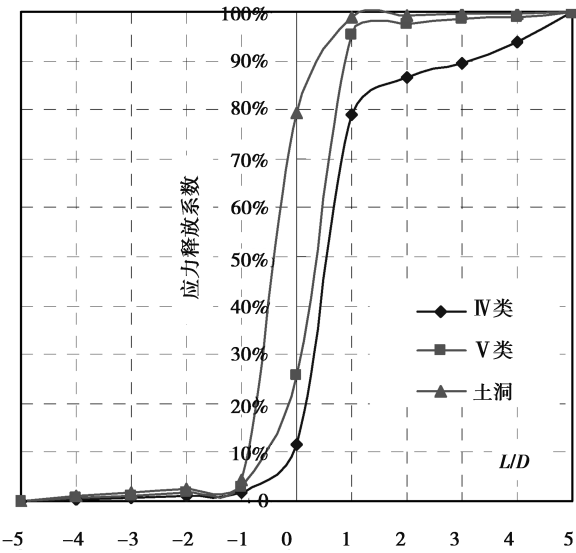


图9 圆形隧洞应力释放系数变化曲线

Fig. 9 Curves of stress release ratio for circular tunnel

由图9可以看出各分析方案应力释放均主要集中在 $-1D \sim 1D$ 范围内,释放量达75%。即研究断面前后 $1D$ 范围时是围岩内应力调整的主要阶段。而 $1D \sim 5D$ 范围内,围岩的应力释放继续发展,但释放速度远小于 $-1D \sim 1D$ 的范围。

对圆形洞室各方案之间进行对比可以看出,围岩力学性质最弱的土质隧洞,其应力释放较其他两个方案要快。在工作面经过研究断面后,土洞的应力释放量仍始终大于其他两种方案,但各方案间应力释放量的差值在逐渐缩小,土质隧洞的应力释放最为集中。可见,在一次支护紧跟工作面施做时,岩性较好的隧洞应力释放较均匀,在工作面经过研究断面较远距离后,应力释放量仍较大。

3.2.2 城门洞形隧洞

由图10可以看出,城门洞形隧洞围岩应力释放系数随工作面推进的关系曲线和圆形隧洞的情况相类似。3种计算方案在 $-1D \sim 1D$ 范围内的应力释放量占到总量的65%以上。而在 $1D \sim 5D$ 范围内,围岩的应力释放继续发展,但应力释放速度远小于 $-1D \sim 1D$ 的范围。

各方案之间的对比情况也与圆形洞室的结果

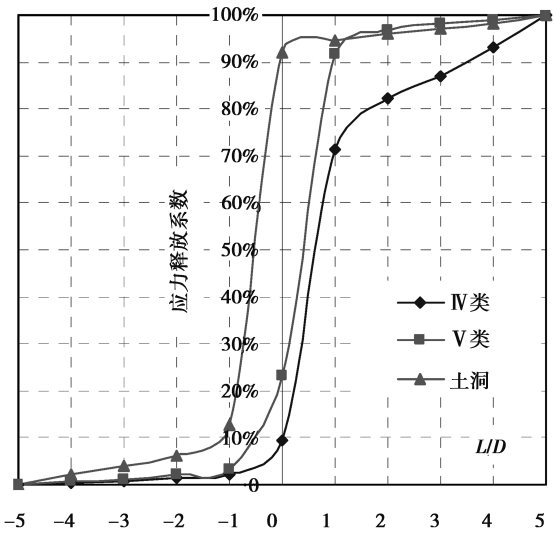


图10 城门洞形隧洞应力释放系数变化曲线

Fig. 10 Curves of stress release ratio for the arched section tunnel

相似。在工作面推进到研究断面之前,土质隧洞的应力释放较其他两个方案要快。显然,围岩类别越差,受开挖扰动越明显,而较好围岩条件下则正好有相反的结论,应力释放基本从开挖到研究断面时才开始,且距工作面较远之后仍有较明显的释放。

3.2.3 无支护的城门洞形洞室

图11为不做支护时城门洞形隧洞的应力释放曲线。

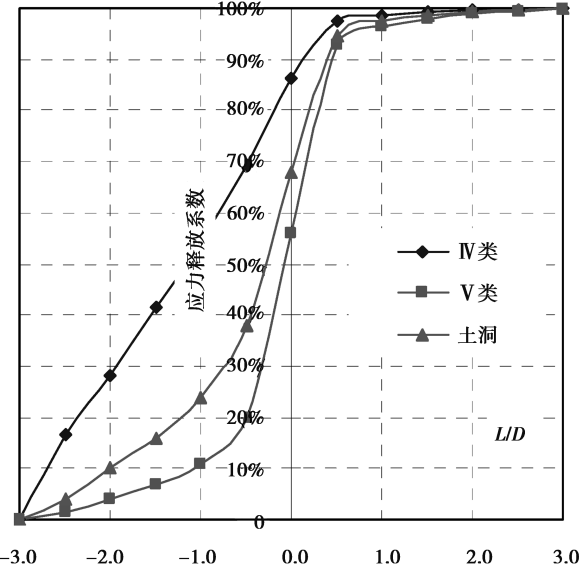


图11 无支护隧洞应力释放系数变化曲线

Fig. 11 Curves of stress release ratio without supports

由图可知,无支护情况下,工作面推进到研究断面之前,各方案的应力释放量明显大于支护方

案,工作面开挖对研究断面的扰动作用较大,导致工作面距研究断面较远时应力释放已经较大。而施做支护时,支护结构有效地限制了围岩的变形,从而降低了较远处开挖对研究断面的扰动作用。

从图 11 可以看出,在工作面推进到距研究断面一倍洞径之后,无支护的围岩内部应力调整已基本完成,位移释放系数接近 100%。而对于有支护的情况,由于支护结构的限制,力学性质较弱的围岩也不再有较大的应力释放,而力学性质较好的围岩,支护结构对其的影响作用并不明显,所以图 10 中的Ⅳ类围岩在这一阶段仍有较大应力释放。可见,支护结构对软弱围岩应力释放的控制作用要强于对较好围岩类别的作用。

4 结论

软弱围岩隧洞成洞条件差,开挖后需及时施做初期支护,然而对于及时支护条件下隧道变形和应力释放规律却少有研究。本文通过数值试验系统研究了这一规律,主要取得了以下认识:

(1)洞径、洞型、埋深等对隧洞拱顶变形影响显著,但对位移释放系数的影响较小,且相同条件下城门洞形隧洞的位移释放率略大。因此对于特定围岩中的隧洞,可以采用同一条位移释放曲线来推求监测中丢失的变形和确定二次衬砌施做的时机。

(2)隧洞所在围岩类别对位移释放系数的影响较大,岩性越差开挖扰动越明显,位移释放也越迅速,初期支护对变形的约束作用也越显著。

(3)初期支护紧跟工作面施做时,围岩受开挖扰动初期,位移释放速率往往大于应力释放速率。随后两者呈线性增长关系,但岩性较差的围岩在应力释放的后期又有加速趋势。同时,岩性越差,达到相同位移释放量时所需的应力释放量越大。

(4)应力释放曲线表明,初期支护紧跟工作面施做时,研究断面前后 $1D$ 是围岩内应力调整的主要阶段,且应力释放速率随岩性的弱化而增大。

(5)初期支护对围岩应力释放规律影响显著,且对岩性较差隧洞围岩应力释放的限制作用(使释放更为集中)要强于岩性较好的隧洞。

参考文献(References)

- [1] Maghous S, Bernaud D, Eduardo C. Three-dimensional numerical simulation of rock deformation in bolt-supported tunnels: A homogenization approach [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2012, 31: 68-79.
- [2] Alejano L R, Rodríguez-Dono, Veiga M. Plastic radii and longitudinal deformation profiles of tunnels excavated in strain-softening rock masses [J]. Tunneling and Under-ground Space Technology, 2012, 30(3): 169-182.
- [3] 张常光,赵均海,张庆贺. 基于统一强度理论的深埋圆形岩石隧道收敛限制分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 110-114. (Zhang Changguang, Zhao Junhai, Zhang Qinghe. Convergence confinement analysis of deep circular rock tunnels based on unified strength theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 110-114. (in Chinese))
- [4] 揭秉辉,江权. 大型洞室分层开挖围岩位移释放率与支护效用探讨[J]. 水力发电, 2012, 38(8): 51-54. (Jie Binghui, Jiang Quan. Discussion on displacement release ratio and supporting effectiveness of wall rock in the excavation of large underground cavern [J]. Water Power, 2012, 38(8): 51-54. (in Chinese))
- [5] 唐德高,王桐封. 地下洞室掘进面空间效应的三维有限元分析[J]. 工程兵工程学院学报, 1988(3): 43-51. (Tang Degao, Wang Tongfeng. Three-dimension finite element analysis of the space effect underground cavities' heading face [J]. Journal of Corps Engineering University, 1988(3): 43-51. (in Chinese))
- [6] 刘仲秋,廉照彬,章青. 引水隧洞开挖释放荷载模拟方法的对比研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 415-422. (Liu Zhongqiu, Lian Zhaobin, Zhang Qing. Comparative analysis of excavation unloading simulation methods for the diversion tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2): 415-422. (in Chinese))
- [7] 郭建新,高永涛. 基于软破围岩锚喷支护位移理论的隧道支护时间分析[J]. 辽宁科技大学学报, 2009, 32(5): 456-466. (Guo Jianxin, Gao Yongtao. Analysis of protection time of tunnel based on displacement theory of shotcrete and bolt support for weak surrounding rock

- [J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2009, 32 (5): 456-466. (in Chinese))
- [8] 孙文杰,孔亮,郑颖人,等. 基于安全系数的地铁车站衬砌优化设计探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 116-121. (Sun Wenjie, Kong Liang, Zheng Yingren, et al. Discussion on Lining Optimization Design of Subway Station Based on Safety Factor[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 116-121. (in Chinese))
- [9] 刘先珊,刘新荣,王军. 乌江渡扩机工程尾水岔洞三维有限元分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(6): 88-92. (Liu Xianshan, Liu Xinrong, Wang Jun. 3-D FEM Analysis of Tail Trace Tunnel in Wujiangdu Extension Project in P. R. China [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(6): 88-92. (in Chinese))
- [10] 肖强,郑颖人,陈庆,等. 有衬砌隧道设计计算探讨——隧道稳定性分析讲座之三[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(2): 259-267. (Xiao Qiang, Zheng Yingren, Chen Qing, et al. Study on Lined Tunnel Design Methods[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(2): 259-267. (in Chinese))
- [11] Kang Q R, Tang J X, Hu H, et al. Stress distribution rule of roadway affected by overhead mining in gently inclined coal seams group [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21 (Supp. 3): 529-535.
- [12] Lu W B, Yang J H, Yan P, et al. Dynamic response of rock mass induced by the transient release of in-situ stress [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2012, 53(9): 129-141.
- [13] Rui C G. Effect of stress disturbance induced by construction on the seismic response of shallow bored tunnels [J]. Computers and Geotechnics Sciences, 2013, 49(4): 338-351.
- [14] 杨树新,李宏,白明洲,等. 高地应力环境下洞室开挖围岩应力释放规律[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 26-30. (Yang Shuxin, Li Hong, Bai Mingzhou, et al. The wall-rock's stress releasing regularity arose by cavern excavation in the high stress condition [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35 (1): 26-30. (in Chinese))
- [15] 陈志敏. 高地应力软岩隧道围岩压力研究和围岩与支护结构相互作用机理分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2012. (Chen Zhimin. The study of surrounding rock pressure and interaction mechanism between surrounding rock and supporting structure in the weak rock tunnels with high geostress [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [16] 赵岩. 大断面隧道施工过程荷载释放规律研究[D]. 济南: 山东大学, 2011. (Zhao Yan. Research of the load releasing law during the construction process of large section tunnel [D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese))
- [17] 高峰,孙常新. 隧道开挖模拟的支撑荷载法研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(4): 70-77. (Gao Feng, Song Changxin. Research on support load method in simulation of tunnel excavation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23 (4): 70-77. (in Chinese))
- [18] 李俊鹏. 开挖过程中隧洞围岩应力释放规律及软岩支护时机研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007. (Li Junpeng. Rules of stress release in tunnel during excavation and the opportunity of support in soft rock [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [19] 仇玉良,姚红志,胡晓勇,等. 风积沙地层大跨公路隧道施工过程力学行为分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(3): 112-119. (Qiu Yuliang, Yao Hongzhi, Hu Xiaoyong, et al. Mechanical behavior in the construction of large span highway tunnel in aeolian sand strata [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25 (3): 112-119. (in Chinese))
- [20] 刘涛,沈明荣,高伟君,等. 连拱隧道围岩压力的释放率分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1): 50-54. (Liu Tao, Sheng Mingrong, Gao Weijun. Rock mass pressure release rate analysis for double-arch tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3 (1): 50-54. (in Chinese))