

节理裂隙岩体中大断面隧洞围岩与支护结构的 施工过程力学状态

王贵君^{1,2}

(1. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300132; 2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要:采用离散单元法,对节理裂隙岩体中大断面隧洞围岩及支护结构的共同作用及施工过程力学状态,进行数值分析。采用 UDEC 程序中设定的支护结构单元模型和自行开发的呆滞-复活法,模拟分区施工及分段施筑的支护结构,系统地研究了大断面隧洞分步、分区施工过程中围岩与支护结构的共同作用及力学状态。数值计算结果与实测数据吻合很好。

关键词:岩石力学;节理裂隙岩体;大断面隧洞;施工过程力学状态;离散单元法;呆滞-复活法

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)08-1328-07

MECHANICAL STATE OF JOINTED ROCK MASS AND SUPPORT STRUCTURE OF LARGE TUNNEL DURING CONSTRUCTION PROCESS

WANG Gui-jun^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China;

2. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Numerical research on the interaction between the jointed rock mass and the support structure of a tunnel of large section and the mechanical state of the whole tunnel system in the sequential process of the excavation and construction is carried out by adopting the discrete element method (DEM). By using the universal distinct element code (UDEC) built-in structure model and a new developed method—de- and reactivating method, simply D-R method, the support structure which is sequentially constructed in steps and sections is simulated. The interaction and mechanical state of the surrounding rock and the support structure in a sequential construction process for a tunnel of large section are systematically studied, and the numerical results conform very well to the reality.

Key words: rock mechanics; jointed rock; tunnel of large section; mechanical state in the construction process; discrete element method; D-R method

1 引言

在地下岩石工程中,隧洞围岩的稳定主要取决于隧洞围岩应力的重新分布及变形。而隧洞围岩应

力的重新分布及变形过程非常复杂,它不仅与围岩的工程地质及水文地质条件密切相关,而且还与施工方法、施工速度、支护措施和支护时间有关。若隧洞断面很大,一般不能采用一次全断面施工方法,而需采用分区施工方法,例如,上导洞施工法、

收稿日期: 2003-09-01; **修回日期:** 2003-11-07

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2002031045)

作者简介: 王贵君(1956-),男,2001年于德国弗莱贝格工业大学获工学博士学位,北京科技大学博士后,现为教授,主要从事岩石力学与岩土工程等方面的教学与研究工作。E-mail: guijun2001@126.com, guijun2001@yahoo.de.

侧导洞施工法等^[1]。在施工过程中,岩石的开挖与支护的施做首先影响围岩应力的重新分布,继而影响隧洞的变形与稳定性。因此,研究大断面隧洞围岩及支护结构施工过程力学状态,对合理选择施工方法、支护措施和支护时间,对保证工程的安全性及经济性,都有着十分重要的意义^[2,3]。

在大多数情况下,岩体中总会存在诸如节理、层理、劈理、裂隙和断层等软弱不连续体(本文将这些软弱不连续体统称为节理裂隙),使得岩体与完整岩块相比强度大大降低,可变形性和渗透性显著增强。在一般工程荷载作用下,岩体的大部分变形系由节理裂隙的变形组成^[4,5]。应用非连续介质力学范畴的离散单元法(DEM)对工程中节理裂隙岩体的破坏和变形进行分析,可充分反映由节理裂隙切割的岩块互不相关的转动和平移自由度,充分描述节理裂隙岩体的依赖于自由转动、平移及完全变形的性质,也可更符合实际地描述围岩及支护结构施工过程力学状态^[6]。因此,本文拟采用离散单元法及其应用程序 UDEC^[7](universal distinct element code, Itasca, Version 3.00, 1996)研究大断面隧洞围岩及支护结构的相互作用及施工过程力学状态,对施工方法及对隧洞围岩的稳定性和变形做出符合实际的评价。

2 UDEC 结构单元模型

如果支护结构是一次性施做的,采用 UDEC 结构单元模型来模拟支护结构比较方便,结构大小、位置可视,其内力参数大小与分布均可用图形表达。但是,当支护结构不是一次施做,而是分段多次施工完成的时候,采用 UDEC 结构单元就不能自动将后步施做的支护结构与前步施做的支护结构相联接,计算中支护结构的整体性得不到保障。因此,必须采用数值过程来人工干预计算数据,将分段多次施做的支护结构联接起来。

在实际工程中,临时支护结构往往与永久支护结构共同承载。在分步(区)施工中,临时支护结构往往还会在一定时间内单独存在,起着支撑、隔离的作用。但是,当前版本的离散单元法程序 UDEC 中的结构单元还不能模拟此种情况。没有围岩或其他结构介质与之接触,此种结构单元还不能单独存在。在实际计算中,此种两侧没有岩体的裸体支护结构必须拆除,才能继续进行后面的计算。

3 D-R方法

针对 UDEC 结构单元存在的弊端,利用 UDEC 携带的 FISH 编程语言,开发了一种近似的支护结构模拟方法——呆滞-复活法,简称 D-R 方法。

实际上,D-R 方法是各种数值方法在模拟岩土工程的开挖和支护过程的原始基本思路之一。在模型网格化时,首先按照喷射混凝土或浇注混凝土支护结构的尺寸预留支护结构范围;在开挖时,将这一范围内的单元呆滞,即将其刚度和重度置为零或接近零的值。当设置支护结构时,再将这一范围内的单元激活,并给予它们与支护结构相应的物理力学参数。此方法虽然已在有限元法和差分元法中广泛应用,但尚未见到用于离散元法的报道。

在这个呆滞与复活的过程中,必须解决强度和刚度匹配的问题,即采用合适的支护结构范围内岩体及节理的强度和刚度,以保证这些离散的支护结构单元与所模拟的均质支护结构的力学特性相匹配。首先,在支护结构范围内的节理不应有剪切破坏及大的剪切变形产生,节理的抗剪强度必须与支护结构的抗剪强度相一致。其次,支护结构范围内的节理剪切刚度也必须与支护结构及支护结构与围岩的接触面的剪切刚度相适应。根据 Kulatilake 等人的研究结果,岩块的剪切模量 G 与节理平行于节理面的抗剪刚度 k_s 之比应为 $0.008 \sim 0.012$,而节理的垂直于节理面的压缩刚度 k_n 与 k_s 之比应该与岩块的弹性(变形)模量 E 与 G 之比相同^[8]。但是,随着 G/k_s 值的增大,达到力学(变形)平衡时所需计算时间会大大增加。根据计算经验^[9],本文得到了合适的参数比例关系,较好地解决了这一难题。

D-R 方法的应用,使采用 UDEC 模拟分步(区)施工时的围岩及(临时)支护结构的力学状态得以实现,拓展了 UDEC 的应用范围。

4 计算模型

Coschütz 高速公路隧道(Tunnel Coschütz in Saxonia, Germany)穿过的主要岩层是古生代的玄武岩,其上赋存浅红色凝灰岩、白垩纪风化灰岩以及第四纪沉积层。上覆岩层厚度在西北入口处约为 5 m,在隧道中部(山丘腹部)约为 50 m。隧道穿过

的岩体富含节理裂隙和断层。岩层中 4 组主节理 (K1 ~ K4) 在掘进面上的投影分别为 -76° , 54° , -65° 和 -30° 。岩石质量指标为差、很差, 局部较好。该隧道工程由 2 个并列隧洞组成, 2 轴间距离为 25 m, 单一隧道的开挖断面宽约 16 m, 高约 12 m, 形状为由 6 个不同半径的圆弧组成的马蹄形, 开挖断面约为 154 m^2 (图 1)。

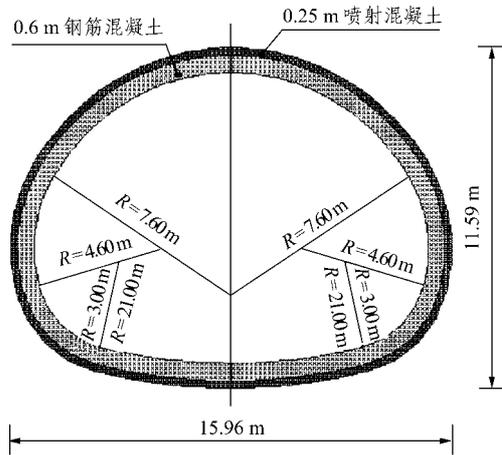


图 1 单一隧道断面

Fig.1 Cross section for one tube

在平面计算模型中, 只考虑岩体自重作用, 上覆岩层的厚度取 20 m。模型里含有 2 组贯通节理, 其倾角分别为 54° , -65° 。假定被节理切割的岩块是可变形的, 其变形为弹塑性的, 符合 Mohr-Coulomb 准则。采用“Coulomb 平面接触滑动模型”描述节理的应力-变形关系。根据实测与计算经验, 计算中采用的岩块和节理变形及强度参数如

表 1 所示。

作者采用上述模型系统分析研究了应用上导洞施工法和侧导洞施工法时每一施工步骤的应力状态、围岩及支护结构中的塑性区、节理裂隙的剪切位移、围岩的位移、支护结构内力及变形等^[9]。限于篇幅, 本文仅介绍支护结构为喷射混凝土及浇筑钢筋混凝土材料、采用侧导洞施工方法时得到的部分计算结果。针对锚杆及锚喷联合支护的作用的研究成果, 恕不能一一详细给出, 本文仅作概要说明。

采用左、右侧导洞施工方法时, 获得实际的初始地应力后的计算步骤如下 (见图 2): (1) 开挖左导洞, 即将开挖范围内的单元删除或使其“呆滞”。(2) 施做左导洞临时支护。采用 UDEC 方法时, 施加支护结构单元; 采用 D-R 方法时, 将临时支护范围内的单元按支护结构参数复活。(3) 开挖右导洞。(4) 施做右导洞临时支护。(5) 开挖上核部 (包括顶板部分)。采用 UDEC 方法时, 必须将相邻的左、右导洞的临时支护也挖掉; 采用 D-R 方法时, 保留相邻左、右导洞的临时支护。(6) 施做顶板部分临时支护。(7) 拆除与上核部相邻的左、右导洞的临时支护, 开挖下核部 (包括底板部分、相邻的左、右导洞的临时支护)。(8) 施做底板部分临时支护。(9) 一次性施做内衬砌。

为了模拟各施工步骤之间的时间间隔, 使开挖、施筑临时支护、永久支护及围岩应力转移和支护结构内力变化更符合实际工程, 根据计算经验^[9], 在每一步骤内都循环 1 000 次; 在最后一步中, 计算直至岩体变形稳定。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	支护层厚 d/m	密度 $\gamma/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	压缩模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	侧向变形 系数 ν	抗拉极限强度 σ_t/MPa	抗压强度 σ_{cs}/MPa	残余强度 σ_{rs}/MPa
岩石/节理*		2 600	23	1.6	0.21	-	-	-
混凝土	UDEC 方法	0.25+0.6	2 500	23	0.15	20	40	10
	D-R 方法	0.25+0.6	2 600	23	0.21	-	-	-

材料	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	抗拉强度 σ_t/MPa	节理*法向刚度 $k_n/\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$	节理*切向刚度 $k_s/\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$	节理*内摩擦 角 $\varphi_f/(\circ)$	节理*粘聚力 c_j /MPa	节理*抗拉强 度 σ_{jt}/MPa
岩石/节理*	0.4	35	0.2	2.3	1.6	3.5	0.1	0
混凝土	UDEC 方法	-	-	23.0	16.0	60.0	5.0	1
	D-R 方法	2.0	40	1.0	23.0	16.0	60.0	5.0

注: 这里的节理包括支护结构与围岩的接触面。

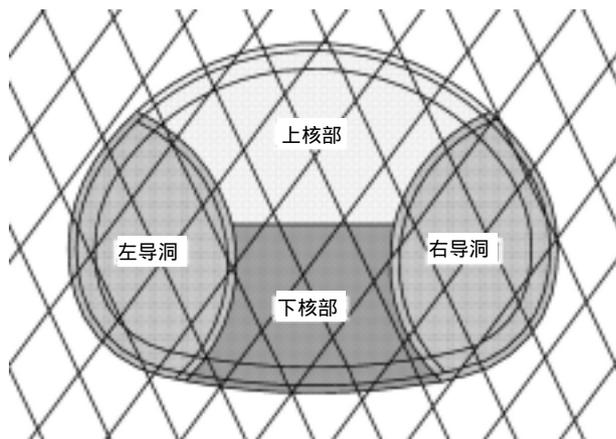


图 2 侧导洞法施工时隧道断面开挖分区

Fig.2 Excavation segments of the cross section for the side wall driving

5 部分计算结果

5.1 采用 UDEC 结构单元

在开挖了左、右导洞并施筑了临时支护后,围岩应力重新分布的结果使得在隧洞核部(两导洞之间的部分)及侧壁围岩中产生了应力集中,而在两侧导洞的底板近处,卸载作用明显,岩体内有拉应力产生,个别单元因拉应力过大而处于塑性状态,如图 3(a)所示。

由于程序的限制,开挖上核部时,与之相邻的左、右两侧导洞的临时支护结构也必须拆除。围岩应力转移的结果造成隧道两侧壁更大的应力集中,而顶板附近及下核部围岩应力降低很多,应力降低深度达到开挖总高度的 $2/3$,在顶板围岩中拉应力达到 0.2 MPa 。由于开挖卸荷作用,在下核部的上部、2 侧导洞底板均产生了塑性区。与此相对应,顶板被节理切割的岩层中形成很大的楔形垮落体,发生向下的位移达 17 mm ,如图 3(b)所示。

当施做了顶板临时支护后,支护结构限制了顶板楔形体的继续垮落,尽管由于支护的延迟在楔形体内及其边缘产生了塑性区,但位移速度被大大降低,并很快趋于平稳,如图 3(c)所示。应该说明的是,顶板部分的临时支护结构与先前施做的两侧导洞的临时支护结构的联接是采用自己编制的 FISH 过程实现的,保证了临时支护结构的整体性。

在后续施工步中,顶板围岩应力变化不大,顶板岩层中的塑性区也没有大的扩展。在底板岩层

中,应力降低区的深度比顶板的应力降低区要小。围岩的位移亦没有大的增加,最后位移稳定,如图 3(d)所示。

根据数值计算结果,如果临时支护施做及时,即使不施做内衬砌,隧道围岩也是稳定的。在这种情况下,围岩应力分布、节理的最大剪切位移、顶底板的最大位移,以及围岩内的塑性区范围都与采用双层衬砌时的情况相差不多。这说明内衬砌主要是起安全储备作用。

尽管围岩中富含节理裂隙,但支护结构中的轴向应力分布仍然比较均匀。二次衬砌中的轴向应力最大值(0.13 MPa)远小于一次衬砌中的轴向应力最大值(0.80 MPa)。支护结构承受的弯矩总体上也比较均匀,在与顶板楔形垮落体相应的剪切面附近弯矩最大,内外层支护结构中最大弯矩值分别为 $0.032, 0.036 \text{ MN} \cdot \text{m}$ 。根据支护结构内力计算结果,得到相应的支护结构安全系数为 3.8 。

5.2 采用 D-R 方法

在采用 D-R 方法模拟支护结构时,由于网格化的需要,支护结构范围内岩石被更多节理裂隙切割而愈显破碎,在此范围内存在初始应力集中。当左、右 2 侧导洞开挖并施做了临时支护结构后,在临时支护结构中应力集中愈显突出。这期间的围岩塑性区分布及围岩位移与采用 UDEC 结构单元时基本相同,如图 4(a), (b)所示。

在图 4(c)中,顶板部分临时支护施做后,2 侧导洞上部临时支护结构的支撑与隔离作用得到进一步发挥,限制了顶板楔形岩体的垮落。

在将下核部岩体连同相邻的临时支护结构挖除、施筑了底板临时支护结构并一次性施筑内衬砌后,在整个隧道断面内构成封闭的承载圈。此时,围岩塑性区比采用 UDEC 结构单元时要小得多。采用 D-R 方法得到的节理剪切位移及岩体线性位移总体上与采用 UDEC 结构单元得到的相似,如图 4(d)所示。计算过程中顶板下沉与底板起鼓量的变化如图 5 所示,顶板下沉与底板起鼓的最大值分别为 $14.7, 1.6 \text{ mm}$ 。这与实测结果吻合较好^[10]。由图 5 还可清楚地看出顶底板开挖、衬砌施做等施工步骤的计算时刻。

采用 D-R 方法时,直接计算得到的支护结构的应力安全系数最小值为 3.0 ,比采用 UDEC 方法得到的安全系数低。这是由支护结构范围内网格化后的应力集中程度加大造成的。

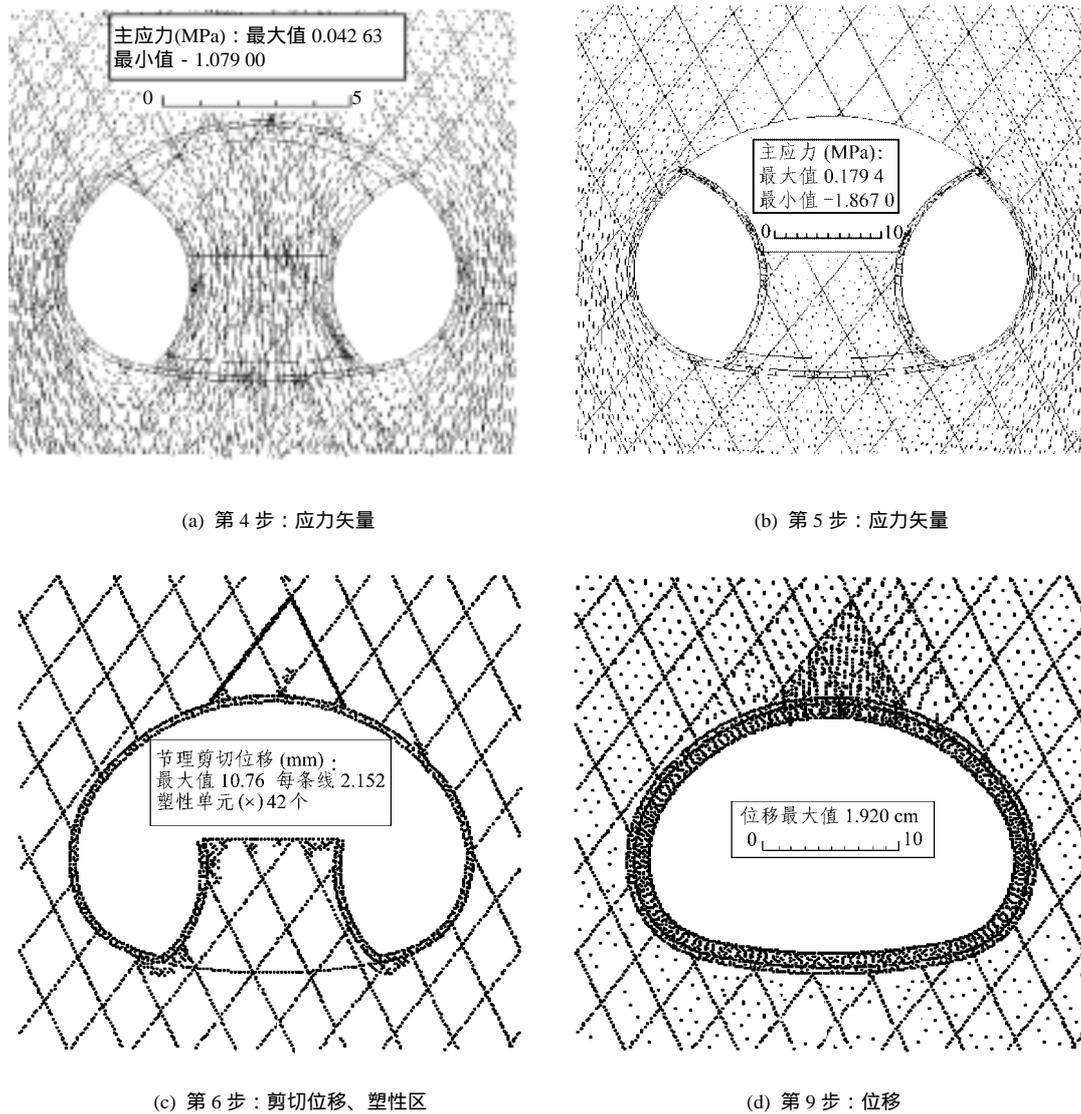


图3 采用 UDEC 结构单元模型模拟支护结构侧导洞分区施工时若干施工步的计算结果

Fig.3 Calculating results of selected steps in side wall driving using UDEC built-in structure model

5.3 锚喷联合支护

实际工程中，在岩石质量指标为很差、岩体特别破碎地段，进行临时支护时，在侧导洞上部 and 上核部顶板加打 $\phi 36$ mm 精轧螺纹钢全长锚固锚杆。视施锚部位及岩石破碎程度不同，锚杆长度分别为 1.5 ~ 4.0 m。在分别分析了单独施做(喷射/钢筋)混凝土或锚杆情况下围岩与支护结构共同作用机制及围岩与支护结构的稳定性和变形的基础上，采用 UDEC 锚杆单元和结构单元模拟研究了锚喷联合支护在大断面隧洞分步开挖过程中的作用^[9]。研究表明：设计合理、强度足够的锚杆系统，可大大减小因开挖而引起的可能的围岩拉应力区，提高

节理裂隙的抗剪强度，提高围岩的自承能力，增大围岩 - 支护系统的安全储备；锚杆对局部可能冒落或滑落的危岩的加固及悬吊作用非常突出；锚杆系统的失效，一方面是由于锚杆与围岩之间起粘结作用的灰浆在剪应力作用下发生剪切破坏而引起，另一方面可能是因为不合理的支护参数所造成的，例如，锚杆过短(甚至小于节理裂隙切割的岩块的尺度)，锚杆间距过大等；保证锚杆外端部与喷射混凝土的紧密连接，是充分发挥锚喷联合支护效用的有效措施之一；采用锚喷联合支护时的围岩位移与只采用喷射混凝土时的围岩位移差别不大。

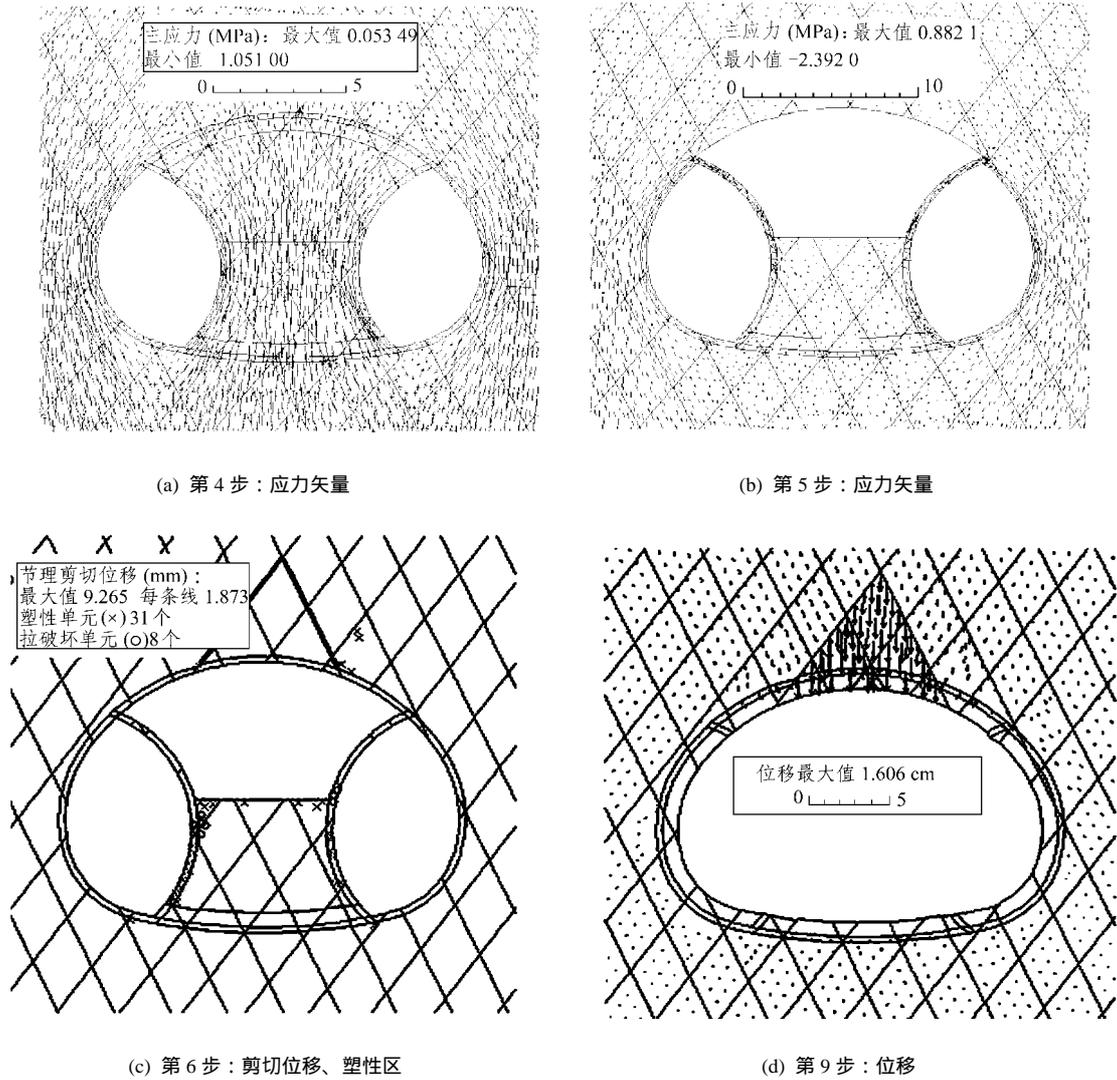


图 4 采用 D-R 方法模拟支护结构侧导洞分区施工时若干施工步的计算结果

Fig.4 Calculating results of selected steps in side wall driving using D-R method

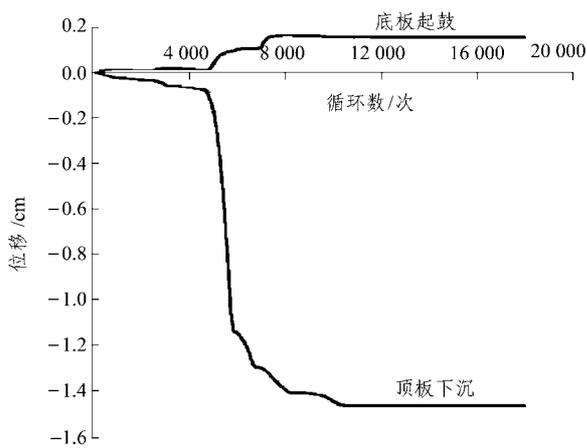


图 5 采用 D-R 方法模拟支护结构，侧导洞分区施工时顶板下沉与底板起鼓在计算过程中的变化

Fig.5 Roof subsidence and floor lift calculated using D-R method in side wall driving

6 结 论

通过对大断面隧道围岩及支护结构相互作用、施工过程力学状态的研究，可得如下结论：

(1) 尽管隧道断面很大，围岩受节理裂隙切割而显破碎，但采用分区施工方法(上导洞法或侧导洞法)，隧道围岩与支护结构在施工过程中及成洞之后都是稳定的。

(2) 正是由于围岩内节理发育，顶板中极易产生楔形垮落体，必须及早进行临时支护，尤其是及早施做顶板部分的临时支护结构，才能防止围岩坍塌，阻止大的变形发生。

(3) 采用侧导洞施工方法比采用上导洞施工方法对施工过程中的围岩应力重分布、继而对围岩与

支护结构的稳定更为有利,围岩中的塑性区、顶板部分临时支护结构所受荷载以及围岩与支护结构的位移均较小。位移计算结果与实测结果基本吻合。

(4) 该隧道的外层衬砌(临时支护)即可承担围岩的全部荷载,二次衬砌(内层衬砌)主要起安全储备的作用。

(5) 采用D-R方法,更符合实际地模拟大断面隧洞分区、分步施工时,施工过程中围岩与支护结构的力学状态和共同作用机制,拓展了UDEC的应用范围。

参考文献(References):

- [1] Müller-Salzburg L, Der F D B. Tunnelbau[M]. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 1978.
- [2] 朱维申,何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京:科学出版社,1996.(Zhu Weishen, He Manchao. Stability of the Surrounding Rock under the Complicated Conditions and the Dynamic Construction Mechanics of Rock Mass[M]. Beijing: Science Press, 1996.(in Chinese))
- [3] 朱维申,李术才,白世伟等. 施工过程力学原理的若干发展和工程实例分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(10):1586-1591.(Zhu Weishen, Li Shucai, Bai Shiwei, et al. Some developments of principles for construction process mechanics and some case history studies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1586-1591.(in Chinese))
- [4] Brown E T. The Nature and Fundamentals of Rock Engineering[M]. London: Elsevier, 1993. 1-23.
- [5] Aydan Ö, Kawamoto P. Discontinuities and their effect on rock mass[A]. In: Barton, Stephanson eds. Rock Joints[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990. 149-156.
- [6] Bandis S, Barton N, Christianson M. Application of a new numerical model of joint behavior to rock mechanics problems[A]. In: Proceedings of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints[C]. Björkliden: A. A. Balkema, 1985. 345-356.
- [7] Itasca Consulting Group Inc. UDEC, User's Manual, Version 3.00[CP]. Minneapolis: HC Itasca, 1996.
- [8] Kulatilake P H S W, Ucirt H, Wang S, et al. Use of the distinct element method perform stress analysis in rock with non-persistent joints and to study the effect of joint geometry parameters on the strength and deformability of rock masses[J]. Rock Mech. Rock Eng., 1992, 25(4): 253-274.
- [9] Wang Guijun. Numerische Untersuchungen zum Bruch- und Verformungsverhalten von geklüfteten Gebirgsbereichen beim Tunnelbau[M]. Freiberg: TU Bergakademie Freiberg, 2001.
- [10] Tondera D. In-situ Vermessungen Beim Bauen des Tunnels Coschötz[R]. Freiberg: TU Bergakademie Freiberg, 2001.

2005年度《岩石力学与工程学报》编委扩大会议通知

自《岩石力学与工程学报》第六届编委会于2003年5月成立以来,分别在青岛(2003年8月)和宜昌(2004年5月)召开了两次编委扩大会议。经研究决定,2005年度《岩石力学与工程学报》第六届编委扩大会议于2005年11月上旬在杭州召开。具体时间和中国岩石力学与工程学会主办的“边坡、基坑与地下工程新技术新方法研讨会”的举办时间同步(利用会议间隙晚上召开)。会议主题为:

(1) 《岩石力学与工程学报》编辑部工作汇报,各位编委就如何进一步提高刊物质量发表意见;

(2) 评选优秀论文(2003年1月以来在本刊发表的文章),请每位编委于2005年9月15日前向编辑部推荐2篇优秀论文(请给每篇论文提交300字的推荐意见);

(3) 表彰优秀审稿专家;

(4) 商讨和筹备2006年编委会换届事宜。

请第六届编委会名誉主编、主编、副主编、编委、顾问编委提前做好各自的工作,做好按时参加会议的准备(因故不能参加,请预先说明,或派代表参加)。

《岩石力学与工程学报》第六届编委会

《岩石力学与工程学报》编辑部

2005年4月7日