

文章编号:1671-8879(2006)02-0051-06

考虑地震影响的小间距隧道围岩流变损伤

李云鹏¹, 王芝银¹, 韩常领², 霍 明², 艾传志¹

(1. 石油大学(北京)机电工程学院, 北京 102249; 2. 中交集团 第一公路勘察设计院, 陕西 西安 710075)

摘 要:针对隧道围岩的流变特性,基于拟静力法建立了隧道围岩在流变过程中有地震作用时的长期变形与稳定性分析格式,并对三车道小间距隧道的开挖施工过程进行了粘弹塑性数值分析,探讨了地震对小间距隧道围岩与支护结构的影响。数值仿真对比分析表明:地震因素对隧道周边各点的水平位移影响较大,对竖向位移影响较小;中间岩壁在地震影响下,可能发生错动破坏,而且在施工方法的共同影响下有侧向移动的趋势,这将对小间距隧道的安全稳定产生不利的影响。给出了在典型施工方式下,三车道隧道围岩破坏特征及其施工过程中小间距隧道洞周特殊点粘弹塑性的变形规律,可作为小间距隧道设计参考。

关键词:隧道工程;流变损伤;小间距隧道;围岩;地震;数值模拟

中图分类号:U451.2 **文献标识码:**A

Rheologic Damage and Earthquake Influence on Surrounding Rock of Small Spacing Tunnels

LI Yun-peng¹, WANG Zhi-yin¹, HAN Chang-ling², HUO Ming², AI Chuan-zhi¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum (Beijing),
Beijing 102249, China; 2. First Highway Survey and Design Institute, Chinese
Communications Construction Group, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: Based on quasi-static method, considering the earthquake action in rheological process of surrounding rock for small spacing tunnels, the formulas for analyzing the long-term deformation and stability are set up. The visco-elasto-plastic numerical simulation is studied in consideration of the excavating construction, and the influence of earthquakes on the surrounding rock and supports is researched for three roadway tunnels with small spacing. It is shown by the comparison of simulating results that the earthquake factors have larger influence on horizontal displacements than on vertical ones at all points on tunnel boundary. The shear damage and lateral movement of the rock interval between two tunnels may take place due to earthquakes and construction, which have an unfavorable effect on the safe and the stability of tunnels with small spacing. The damage characteristic of surrounding rock and the visco-elasto-plastic deformation law at particular points are given under the condition of typical construction way for three driveway tunnels. Those have a reference meaning for tunnel engineering design. 2 tabs, 9 figs, 8 refs.

Key words: tunnel engineering; rheological damage; tunnels with small spacing; surrounding rock; earthquake; numerical simulation

0 引言

近年来,有不少学者对小间距隧道做了许多研究工作,从不同角度或不同的侧重面获得了一些很有价值的研究结果,为小间距隧道的设计施工和发展奠定了良好的理论基础^[1-6]。本文考虑隧道围岩的流变损伤特性和受地震影响时的力学响应,给出了围岩隧道在流变过程中有地震作用的长期变形与稳定性分析格式,并对小间距隧道围岩及中隔壁的长期稳定性进行了探讨和模拟分析。通过数值仿真对比分析,给出了在典型施工方式下三车道隧道围岩破坏特征及其小间距隧道周边特殊点粘弹塑性变形规律和中间岩壁的变形规律,所获结果均可供小间距隧道工程设计参考。

1 围岩流变损伤分析的基本方程

在公路隧道施工或当围岩变形还未达到稳定或处于流变变形阶段时,隧道所在地区发生地震,将会改变围岩变形轨迹,变形出现分叉现象,这将对隧道围岩及支护结构稳定性造成很大影响。即使围岩已经处于变形稳定状态,由于地震的动力作用,又会使变形速率重新激活,转入新的变形路径,甚至出现急剧加速变形,导致支护结构丧失功能,围岩失去安全可靠。地震对隧道围岩和支护结构的这种动力作用,可采用动力分析法或等效静力法来进行分析^[7]。

基于以上所述,在隧道围岩变形的任一时步内发生地震,根据能量守恒和转换定律,可导出分析系统考虑地震作用的有限元增量平衡方程

$$\sum \int_v [B]_n^T \{\Delta \sigma\}_n dv - \{\Delta f\}_n - \{f_m(a_x, a_y)\}_n = 0 \quad (1)$$

式中: $[B]_n$ 、 $\{\Delta \sigma\}_n$ 、 $\{\Delta f\}_n$ 、 $\{f_m(a_x, a_y)\}_n$ 分别为 Δt_n 时段内的几何矩阵、应力增量列阵、外载荷增量列阵和地震惯性等效节点力列阵。

$$\begin{aligned} \langle \{f_m(a_x, a_y)\}_n \rangle &= \begin{cases} \sum \int_v [N]_n^T \{f_m\} dv \\ 0 \end{cases} \\ a_x &> 0 \text{ 或 } a_y > 0 \\ a_x &= 0 \text{ 和 } a_y = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: a_x 为微小时步 Δt 内地震水平最大加速度; a_y 为微小时步 Δt 内地震垂直最大加速度。

$$a_x = \alpha_x g, \quad a_y = \alpha_y g \quad (3)$$

式中: g 为重力加速度; α_x 、 α_y 分别为地震系数,可通过地区地震烈度确定。

$$\langle f_m \rangle = \begin{cases} f_{xm}(x, y) \\ f_{ym}(x, y) \end{cases} = -m \begin{cases} a_x(x, y) \\ a_y(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

地震作用过程中围岩同时受到一定的损伤,因此在 Δt_n 时段内的增量应力形式有^[8]

$$\begin{aligned} \{\Delta \sigma\}_n &= [\tilde{D}]_n (\{\Delta \epsilon\}_n - \{\Delta \epsilon^{ve}\}_n - \\ &\quad \{\Delta \epsilon^{vp}\}_n) + [\tilde{D}]_n \{\epsilon^e\}_n \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\{\Delta \epsilon\}_n$ 、 $\{\Delta \epsilon^{ve}\}_n$ 、 $\{\Delta \epsilon^{vp}\}_n$ 分别为 Δt_n 时步内的全应变增量、粘弹性应变增量和粘塑性应变增量; $\{\epsilon^e\}_n$ 为 t 时刻的弹性应变; $[\tilde{D}]_n$ 为等效弹性矩阵,其增量矩阵为

$$[\Delta \tilde{D}]_n = [\Delta M]_n^T [D] [M]_n + [M]_n^T [D] [\Delta M]_n \quad (6)$$

式中: $[M]$ 和 $[\Delta M]$ 为四阶连续性张量或称为有效损伤张量 M_{ijkl} 的矩阵和增量矩阵形式。

将式(5)、(6)代入式(1)中,可得到考虑地震作用时岩体粘弹塑性损伤有限元分析方程

$$\begin{aligned} [\tilde{K}] \{\Delta u\}_n &= \{\Delta f\}_n + \{\Delta f^{ve}\}_n + \\ &\quad \{\Delta f^{vp}\}_n + \{\Delta f^d\}_n + \langle \{f_m(a_x, a_y)\}_n \rangle \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $[\tilde{K}]$ 为考虑损伤时的刚度矩阵; $\{\Delta f^{ve}\}_n$ 为由粘弹性应变增量引起的附加力; $\{\Delta f^{vp}\}_n$ 为由粘塑性应变增量引起的附加力; $\{\Delta f^d\}_n$ 为由于岩体损伤发展而引起的附加力,称之为损伤演化附加力。

$$[\tilde{K}] = \sum \int_v [B]_n^T [\tilde{D}]_n [B]_n dv \quad (8)$$

$$\{\Delta f^{ve}\}_n = \sum \int_v [B]_n^T [\tilde{D}]_n \{\Delta \epsilon^{ve}\}_n dv \quad (9)$$

$$\{\Delta f^{vp}\}_n = \sum \int_v [B]_n^T [\tilde{D}]_n \{\Delta \epsilon^{vp}\}_n dv \quad (10)$$

$$\{\Delta f^d\}_n = \sum \int_v [B]_n^T [\tilde{D}]_n \{\Delta \epsilon^e\}_n dv \quad (11)$$

式(7)为对任意 Δt_n 时步均适用的流变过程中的基本控制方程,当 Δt_n 内有地震作用时,用式(4)确定 $\{f_m\}$ 后,由式(2)计算 $\{f_m(a_x, a_y)\}$; 对于 Δt_n 内无地震作用时, $\{f_m(a_x, a_y)\}_n = 0$ 。应该指出,当地震作用时,将 Δt 划分为微小时步,根据地区地震频谱给出序列 a_x 、 a_y ,按微小时步由式(7)进行分析计算;在无地震作用时段,时步 Δt 可取较大值。

2 工程应用

某高速公路一支线双排三车道小间距隧道工

程,毛洞高 11.237 m,宽 16.110 m,二次支护后支护厚度为 0.78 m,隧道沿线可细划分为四类围岩段,采用双侧导坑法进行开挖方式及预设计(图 1),隧道间距 7.25 m,埋深 35 m。计算模型取沿 X、Y 方向范围为洞径 3 倍以上,两侧水平约束,底部竖向约束,区域顶面自由。以自重形成初始应力场并进行模拟开挖。利用所研制程序进行粘弹塑性损伤有限元数值模拟。模拟主要考虑 II 类围岩,粘弹塑性模型采用西原模型,岩体材料性能参数根据现场勘察及经验获取,其计算参数见表 1。施工过程的模拟包括初始应力场模拟、锚喷支护、全断面支护等,共分 25 步模拟,其中考虑地震对小间距隧道影响的模拟。分析时,取隧道所在地域地震烈度为 8 度(按最不利情况考虑),由地震烈度和地震系数之间的关系及式(3)得到 $a_x=1.470,a_y=0.735$ 。

2.1 变形规律分析比较

应用双侧导坑法开挖施工过程为先左洞后右

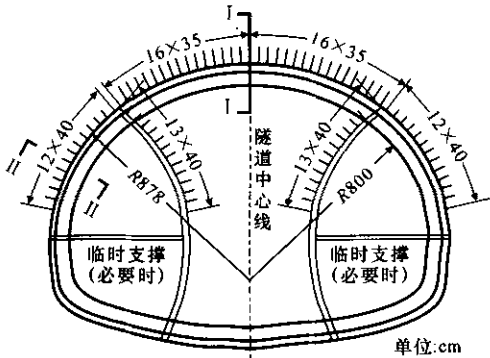


图 1 三车道隧道设计图及双侧导坑法施工示意图

表 1 围岩计算力学参数			
围岩类别	C/MPa	$\varphi/(^{\circ})$	μ
II	0.30	28	0.35
围岩类别	E/GPa	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\eta_1/(\text{MPa}\cdot\text{d})$
II	1.30	23.00	104 000
围岩类型	$\eta_2/(\text{MPa}\cdot\text{d})$	E_1/GPa	R_n/MPa
II	800	12.91	1.20

洞,各洞是先内后外、先上后下的开挖施工顺序。考虑到施工的进度及其结构的特点,隧道断面二次支护后考虑粘弹塑性流变分析,并考虑地震的影响。隧道周边特殊点位置见图 2,相应特殊点的最终位移比较见表 2。图 3~图 5 给出了有无支护及有无地震影响情况下小间距隧道周边特殊点的变形规律曲线。

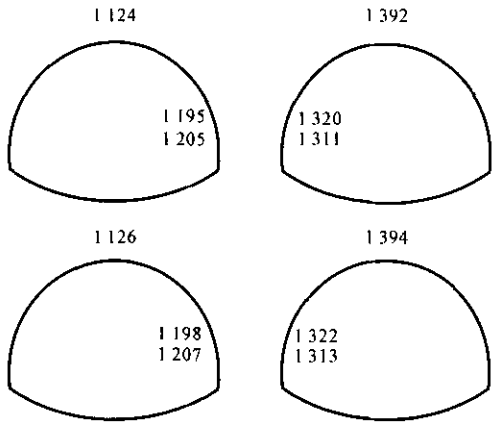


图 2 隧道周边特殊点位置示意图

表 2 隧道周边特殊位置最终变形稳定值比较

特殊 点	不考虑地震影响时的粘弹塑性位移				考虑地震影响时的粘弹塑性位移			
	无支护情况		有支护情况		无支护情况		有支护情况	
	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
1 207	—	—	-6.97×10^{-4}	-2.89×10^{-3}	—	—	-3.61×10^{-3}	-3.46×10^{-3}
1 313	—	—	8.82×10^{-4}	-2.30×10^{-3}	—	—	-8.49×10^{-4}	-3.65×10^{-3}
1 198	—	—	-9.46×10^{-4}	-6.20×10^{-3}	—	—	-3.96×10^{-3}	-5.47×10^{-3}
1 322	—	—	9.40×10^{-4}	-6.43×10^{-3}	—	—	-7.13×10^{-4}	-3.65×10^{-3}
1 126	—	—	-1.69×10^{-4}	-1.25×10^{-2}	—	—	-2.56×10^{-3}	-1.20×10^{-2}
1 394	—	—	2.42×10^{-3}	-1.21×10^{-2}	—	—	-2.16×10^{-3}	-1.29×10^{-2}
1 205	-4.37×10^{-3}	-6.25×10^{-3}	-1.11×10^{-3}	1.73×10^{-3}	-7.24×10^{-3}	-4.52×10^{-3}	-3.61×10^{-3}	-3.46×10^{-3}
1 311	4.00×10^{-3}	-6.36×10^{-3}	-5.66×10^{-3}	-8.18×10^{-3}	8.86×10^{-4}	-4.36×10^{-3}	-8.49×10^{-4}	-3.65×10^{-3}
1 196	-4.06×10^{-3}	-9.82×10^{-3}	1.51×10^{-3}	-1.65×10^{-4}	-6.98×10^{-3}	-7.66×10^{-3}	-3.96×10^{-3}	-5.47×10^{-3}
1 320	3.91×10^{-3}	-9.85×10^{-3}	-5.69×10^{-3}	-1.47×10^{-2}	6.70×10^{-4}	-7.72×10^{-3}	-7.13×10^{-4}	-6.10×10^{-3}
1 124	-1.23×10^{-4}	-1.80×10^{-2}	-1.41×10^{-3}	1.64×10^{-4}	-3.01×10^{-3}	-1.48×10^{-2}	-2.56×10^{-3}	-1.20×10^{-2}
1 392	1.87×10^{-5}	-1.81×10^{-2}	-7.69×10^{-3}	-1.48×10^{-2}	-2.88×10^{-3}	-1.61×10^{-2}	-2.16×10^{-3}	-1.29×10^{-2}

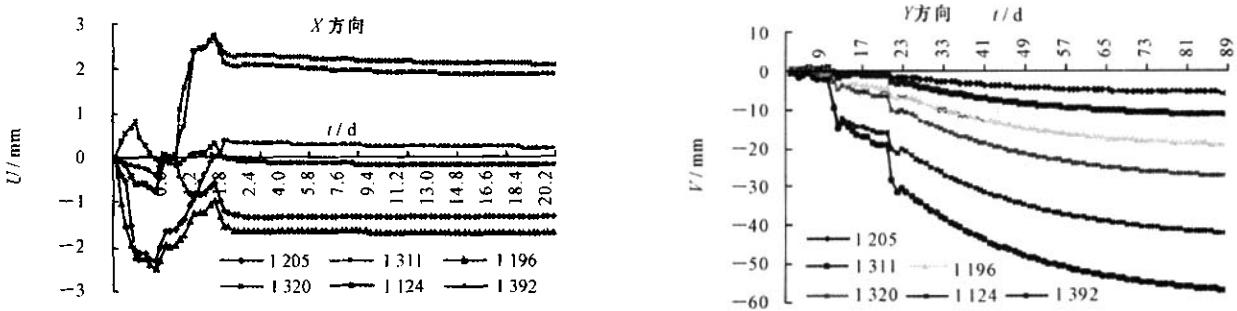


图 3 无支护情况的隧道围岩周边特殊点流变位移曲线

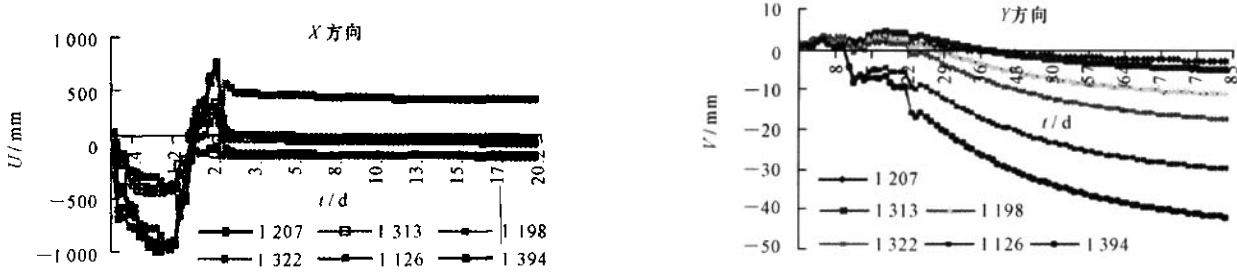


图 4 有支护情况的隧道支护周边特殊点流变位移曲线

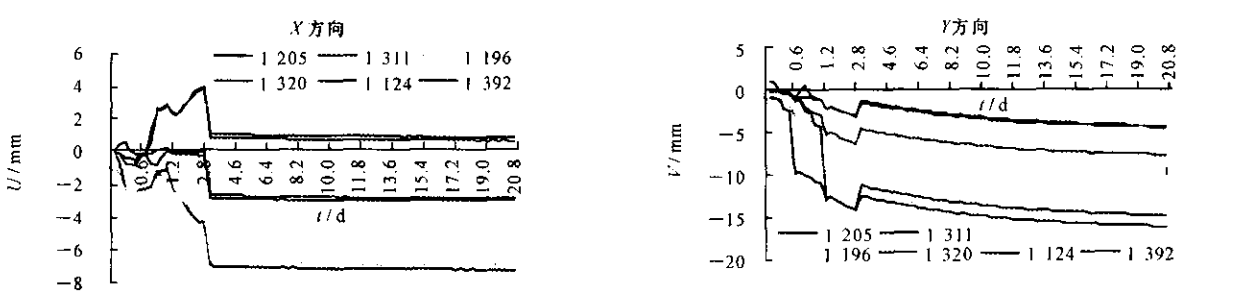


图 5 无支护且考虑地震影响情况的隧道围岩周边特殊点流变位移曲线

由图 3、图 5 及表 2 所列数据可见,在左洞靠中间岩壁处无支护情况下 X 方向的位移比有支护情况下 1 205 点处增大近 3 倍,在 1 196 点处增大约 1.1 倍,且 X 方向位移出现变号;在洞顶 1 124 点处增大近 10 倍;而在右洞 1 392 点增大近 2 个量级。所有各点 Y 方向也出现变号及量值增大和复杂变化的现象。其原因一是支护作用引起位移产生增量,更重要的是支护随着施工进行而分段施作的缘故。将无支护情况下考虑和不考虑地震因素的结果进行比较,发现各点 X 方向的位移基本无变号,增量在侧壁处为 2 倍左右,由下至上呈增加趋势,Y 方向位移变化较小。对于有支护且考虑地震和不考虑地震影响的结果进行比较发现,无论是围岩周边还是支护洞周各特殊点的变形均表现出了 X 方向的变形受地震影响较大、Y 方向较小的特点,图 3~图 5 证实了这一现象。由图 3~图 6 中各曲线变化规律可知,在地震发生瞬间各点位移出现很明显的突变现象,在经微震荡后逐渐趋于稳定。由 1 205-1 311 和 1 196-1 320 点间的相对位移分别为 0.26×10^{-3} m

和 1.51×10^{-3} m 可知,由于地震的影响中间岩壁相邻纵截面(线)有一定的位移错动量,易引起中间岩壁出现破坏区扩大的现象。

2.2 塑性破坏区分析比较

在给定间距及用双侧导坑开挖方式情况下,给出了小间距隧道在有无支护以及考虑和不考虑地震情况下的围岩周边塑性破坏区图。由无支护的两种情况可知,小间距隧道的中间岩壁破坏区较大,表现出不稳定的潜在因素,特别是在地震因素的影响下,塑性区有明显的增大,整个中间岩壁墙几乎全部进入塑性破坏状态,中间岩壁有可能局部失稳、整体失稳或造成隧道垮塌。由此可见,在施工期间一旦发生地震,隧道结构的稳定将受到较大威胁。

由图 7(a)、(b)可见,在有支护情况下隧道的抗震性能比较好,支护对地震影响起到了很大的抑制作用,所以在施工期间应及时支护,并在地震多发区要加强支护力度,使隧道具有足够的抵抗强地震扰动的能力,确保隧道长期安全稳定。由塑性区图及隧道周边位移变化规律分析可知,在无地震影响时

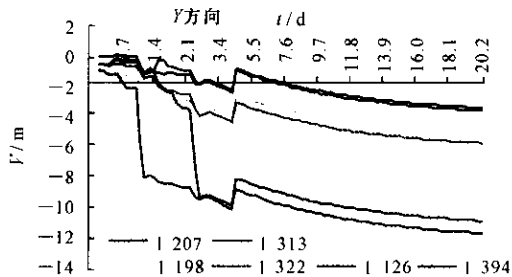
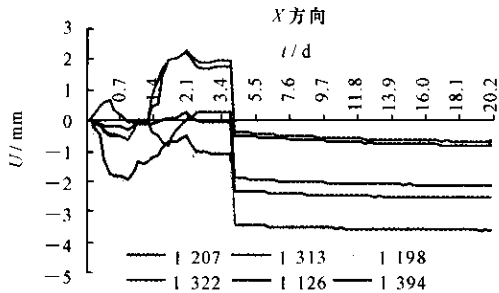


图 6 有支护且考虑地震影响情况的隧道支护周边特殊点流变位移曲线

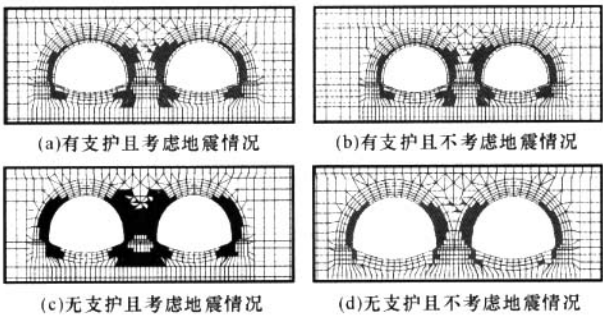


图 7 双侧壁导坑法在考虑多种因素下的最终塑性区图
隧道中间岩壁随着施工的不断进行有逐渐变宽的趋势,即横向膨胀竖向压缩;而在地震因素的影响下,隧道中间岩壁有侧向倾斜变形的趋势,而且塑性区在地震发生的瞬间突然扩大。此后,随着时间的推移隧道变形逐渐趋于稳定,塑性区范围不再有明显变化,基本趋于稳定状态。

2.3 二次衬砌变形规律比较

由图 8 所示应力分布图可知,对于考虑与不考虑地震的两种情况,应力分布变化规律及量值变化大小均无明显的过大变化。

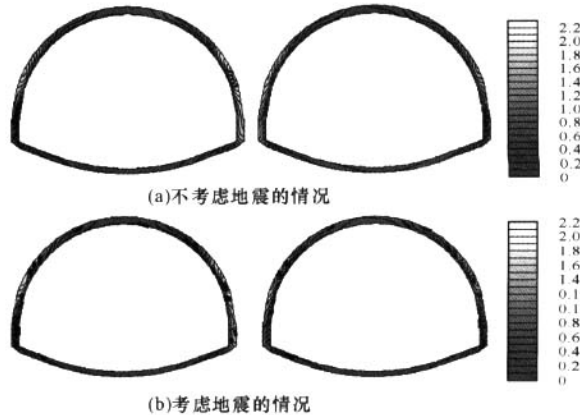


图 8 二次衬砌最大剪应力等值线图

图 9 给出了考虑与不考虑地震因素时二次衬砌的各点位移变化规律。由图 9 中(a)、(b)可见,考虑地震时,衬砌顶点(拱顶点)的垂直下移量减小,与不考虑地震因素情况相比减小 14.3%,而底鼓量(底板中点)增大 28.6%。由图 9 中(c)、(d)相比知,考

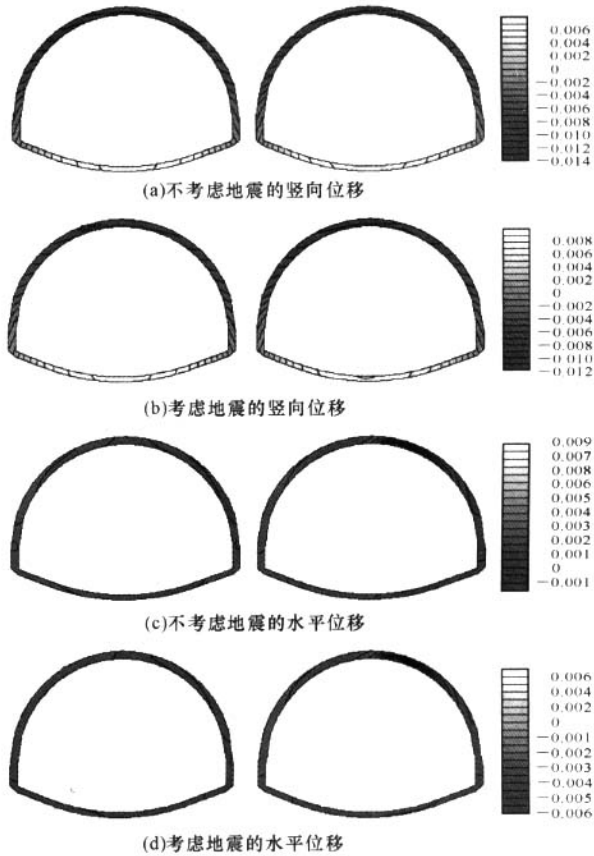


图 9 二次衬砌最终位移等值线图

考虑地震时的衬砌最大水平位移量比不考虑地震时增大 1.67 倍。由此可见,在地震因素的影响下,衬砌结构主要发生水平侧移,并有相对向上移动的趋势,且水平侧移量远大于相对向上移动量,这对隧道结构的整体稳定性将产生很大的影响。

由此可推断,在地震发生的情况下,衬砌结构存在有整体移动的可能性。

3 结 语

(1)由于支护随施工进行且分段施作,造成了隧道围岩周边出现复杂变化的变形,左右洞周各点的位移变化规律有明显差异,且水平方向位移出现变号现象。

(2)在无支护情况下,由于受地震因素的影响,

隧道周边各点水平方向位移受影响比较大,一般均大于无地震情况下的 2 倍以上(由下至上呈增加趋势),而竖向位移受影响量值较小。在有支护情况下,地震对隧道围岩变形规律的影响基本与前述规律相同,仍然是水平方向受影响比较明显,但其量值比无支护情况小得多,支护对地震的影响起到了明显的抑制作用。

(3)由中间岩壁上下相邻的横向连线,即 1 205—1 311 和 1 196—1 320 点间的相对位移分别为 0.26×10^{-3} m 和 1.51×10^{-3} m,其两条线的水平错动量为 1.25×10^{-3} m,可见地震使中间岩壁相邻位置发生错动,引起中间岩壁出现破坏区扩大的现象。建议对中间隔墙进行及时支护,确保其安全性。

(4)由塑性破坏规律分析可知,支护对地震的影响起到很大的抑制作用,在地震多发区加强支护力度,将使隧道具有足够的抵抗强地震扰动的能力,确保隧道长期安全稳定。

(5)无地震影响时,隧道中间岩壁随着施工进行有逐渐变宽的趋势,即横向膨胀竖向压缩;而在地震的影响下,隧道中间岩壁有侧向倾斜变形的趋势,而且塑性区在地震发生瞬间突然扩大,此后,随着时间的推移,隧道变形逐渐趋于稳定,塑性区范围不再有明显变化,基本趋于稳定状态。

(6)在地震情况下,衬砌结构内部应力变化不太明显,拱顶下移量减小,底鼓量增大,水平侧移量远大于相对向上移动量,衬砌结构有整体移动的可能性。

参考文献:

References:

- [1] 刘洪洲. 双洞小净距隧道设计施工的技术应用研究[C]//. 2003 年全国公路隧道学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2003:125-130.
LIU Hong-zhou. The Study on Application Technology of Construction and Design for double Tunnels with Little Distances[C]//. Proceedings of Symposium on Highway Tunnel (China, 2003). Beijing: People's Communications Press, 2003:125-130.
- [2] 靳晓光,刘伟,陈少华,等. 小净距公路隧道施工过程的数值模拟[C]//. 2003 年全国公路隧道学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2003:118-124.
JIN Xiao-guang, LIU Wei, CHENG Shao-hua, et al.

- Numerical Simulation of Construction Process of Highway Tunnel with Little Distances[C]//. Proceedings of Symposium on Highway Tunnel (China, 2003). Beijing: People's Communications Press, 2003:118-124.
- [3] 张玉军,朱维申,杨家岭. 近距离双隧道开挖与支护稳定性的粘弹塑性有限元计算[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(增刊):855-859.
ZHANG Yu-jun, ZHU Wei-shen, YANG Jia-lin. Visco-elasto-plastic FEM Calculation on the Stability of the Excavation and Lining Structure for a Nearby Double Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999,18(Sup):855-859.
- [4] 刘胜利,施成华,彭立敏,等. 小间距隧道施工期间洞室与结构的稳定性评判[J]. 西部探矿工程,2003(3):108-111.
LIU Sheng-li, SHI Cheng-hua, PENG Li-min, et al. Evaluation on Stability of Chamber and Structure of Small-interval Tunnel During Construction[J]. West-China Exploration Engineering, 2003(3):108-111.
- [5] 刘艳青,钟世航,卢汝绥,等. 小净距并行隧道力学状态的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(5):590-594.
LIU Yan-qing, ZHONG Shi-hang, LU Ru-sui, et al. Experimental Study on Mechanical Characteristics of Twin Tunnels with Small Spacing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000,19(5):590-594.
- [6] 王明年,李志业,刘智成,等. 软弱围岩 3 孔小间距平行浅埋隧道施工力学研究[J]. 铁道建筑技术,2002(4):11-14.
WANG Ming-nian, LI Zhi-ye, LIU Zhi-cheng, et al. A Mechanical Research on Shallow Buried Three-hole Parallel Nearby Tunnel Construction for Soft Rock[J]. Railway Construction Technology, 2002(4):11-14.
- [7] 黄润秋,许强,陶连金,等. 地质灾害过程模拟和控制研究[M]. 北京:科学出版社,2004.
HUANG Run-qiu, XU Qiang, TAO Lian-jin, et al. Study on the Simulation and Control for the Geology Disaster Process[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [8] 王芝银. 隧道围岩粘弹塑性损伤有限元分析的统一模式[J]. 西安公路交通大学学报,1997,17(2):32-35.
WANG Zhi-yin. A Unified form of Visco-elastic-plastic-damage Finite Element Analysis for Surrounding Rock of Tunnels[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1997, 17(2):32-35.