

文章编号: 1000-7598-(2007)增刊-0501-04

软弱围岩中偏压隧道的剪胀特性研究

杨小礼, 睦志荣

(中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075)

摘 要: 在偏压情况下对不同埋深的 4 车道和 2 车道偏压公路隧道建立其力学模型, 研究其松动围岩力学特征。在考虑应力剪胀对隧道围岩的影响后, 计算出洞周围岩位移、收敛比。研究结果表明: 对于相同的条件, 4 车道偏压公路隧道的围岩剪切破坏带比 2 车道更容易与地面贯通; 随着剪胀角的递增, 围岩位移矢量和隧道拱顶下沉量逐渐减小, 拱脚水平位移逐渐增大; 大跨度隧道围岩位移受剪胀角的影响比小断面隧道显著。

关 键 词: 剪胀; 偏压隧道; 松动围岩; 4 车道隧道

中图分类号: U 451

文献标识码: A

Influence of dilation on stability of bias tunnels in weak rock

YANG Xiao-li, SUI Zhi-rong

(School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Mechanical models have been established for four-lane and two-lane highway bias tunnels with different cover depths by using finite differential code. The mechanical behavior of loose rock masses is studied. The displacement and convergence ratio of surrounding rock are analyzed when the impact of shear dilation to the stability of surrounding rock is considered. From the numerical results, for the same conditions of dilation angle, rock property and cover depth, some conclusions are drawn that the shear fracture band of four-lane highway tunnel tends to be expanded to the ground than that of two-lane highway tunnel, that the displacement vector and crown settlement decreases with the increase in dilation angle, but the horizontal displacement of abutment increases, and that the influence of dilation angle on the large span tunnel is greater than that of small span tunnel.

Key words: dilation; bias tunnel; loose rock mass; four-lane tunnel

1 引 言

在交通隧道建设中, 浅埋偏压隧道(地表倾斜, 埋深小于 2.5 倍坍塌拱高度的隧道, 简称浅埋偏压隧道)占有一定的比重, 如傍山隧道。近年来, 我国出现了少量的 4 车道大断面公路隧道。由于 4 车道公路隧道的扁平率小, 围岩力学特性将变得复杂。文献[1]根据信息优化理论对偏压隧道稳定性进行评价。文献[2, 3]从设计与施工方面对大断面隧道进行了研究。但是, 人们对单拱 4 车道隧道松动围岩的力学行为尚未认识清楚, 因此, 本文对单拱 4 车道隧道的围岩剪胀特性进行了初步研究。

岩土材料具有剪胀特性, 对岩土材料承载力或稳定性有重要的影响。殷建华^[4]采用有限差分法计

算出不同剪胀角下条形基础的极限承载力, 得出剪胀角对泰沙基公式中的 3 个承载能力系数有很大影响。Jeng^[4]研究了砂岩的变形特征及其对隧道变形的影响, 认为砂岩在到达屈服破坏之前就出现塑性应变, 并诱发明显的剪胀变形。结果表明, 剪胀促使软岩发生极大的位移。Fuenkajorn^[6]描述了与时间相关的应变软化和膨胀行为, 推导了强度衰减公式和体积膨胀公式, 并评价了地下洞室的长期稳定性。

在现有的隧道规范中, 都没有考虑应力剪胀对围岩稳定性的影响。本文初步研究了剪胀角对浅埋偏压隧道稳定性的影响。建立偏压公路隧道的力学模型, 对不同埋深的 4 车道和 2 车道偏压公路隧道进行研究; 对隧道因开挖而产生的松动围岩压力、围岩坍塌范围进行研究; 重点分析了应力剪胀对偏

收稿日期: 2007-04-26

基金项目: 交通部西部建设科技项目资助 (No.200631878557)。

作者简介: 杨小礼, 男, 1970 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 从事隧道与岩土等基础工程方面的教学与科研工作。E-mail: yangxl@mail.csu.edu.cn

压隧道围岩位移、收敛比的影响。

2 力学模型

在建立力学模型时, 围岩水平方向范围选左右各取 3~4 倍洞径, 围岩上边界取至地表, 隧道底板向下取 3~4 倍洞径, 即分析范围为 $120 \text{ m} \times (46 \sim 102) \text{ m}$, 偏压角为 25° 。围岩顶部为自由面, 模型其他三边设置位移约束。对以下 4 种情况进行研究分析: 埋深分别为 15 m 和 25 m 的 4 车道偏压隧道; 以及埋深分别为 10 m 和 15 m 的 2 车道偏压隧道。

应用弹塑性力学模型和 Mohr-Coulomb 屈服准则, 杨氏模量 $E = 150 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.32$, 凝聚力 $c = 40 \text{ kPa}$, 重度 $\gamma = 22.56 \text{ kN/m}^3$, 内摩擦角 $\varphi = 33^\circ$, 取剪胀角 $\psi = n\varphi$; 参数 n 分别为: 0, 1/3, 2/3, 1。

3 偏压隧道松动围岩力学特征

图 1 描述了 4 车道偏压隧道 (埋深为 25.0 m, 剪胀角 $\psi = 0$, f 除外) 在不同应力释放状态下的围岩最大剪切应变率。图 1 (a), 当应力释放率 $r = 50\%$ 时, 隧道右侧拱肩部位有小范围的剪切破坏带。随着洞周应力的继续释放, $r = 55\%$ 时, 剪切破坏带自拱肩向地面延伸, 呈笔直条带状, 见图 1 (b)。当 $r = 60\%$ 时, 隧道左侧拱肩出现一定范围的剪切破坏带, 顶板围岩开始有下滑趋势, 见图 1 (c)。当洞周应力释放率为 65% 时, 从图 1 (d) 中可以发现, 剪切破坏带继续向围岩深处发展, 顶板岩石下滑趋势进一步增强。在图 1 (e) 中, 剪切破坏带与地面趋于贯通, 这时松动围岩的破裂角大致为 53° , 小于文献[7]的内侧围岩破裂角。图 1 (f) 为 4 车道偏压隧道 (埋深 15 m, $\psi = 0^\circ$) 在洞周应力释放 65% 时的最大剪切变率, 此时由于隧道上方松动围岩变形过大, 顶板岩石下沉过大, 围岩失稳。

对不同应力释放下的 2 车道偏压隧道 (埋深 15 m, $\psi = 0^\circ$) 也进行了研究, 发现其剪切破坏带主要集中在右侧拱肩上方的围岩。

偏压隧道变形大, 荷载明显不对称。破裂面形成后, 围岩最容易失稳。为避免滑动面的形成, 对围岩进行必要的支护。从以上分析得出, 在进行大断面隧道开挖时, 应选择合理的施工方法, 把握支护时机, 在开挖后及时进行喷锚支护等加固措施, 尽快封闭围岩, 避免破裂面的形成。若支护不及时, 且外侧围岩的刚度又不足抑制内侧围岩变形的发展, 则内侧围岩将继续向里变形、发展和形成新的破裂面, 导致顶板岩石下沉过大, 最终失稳。

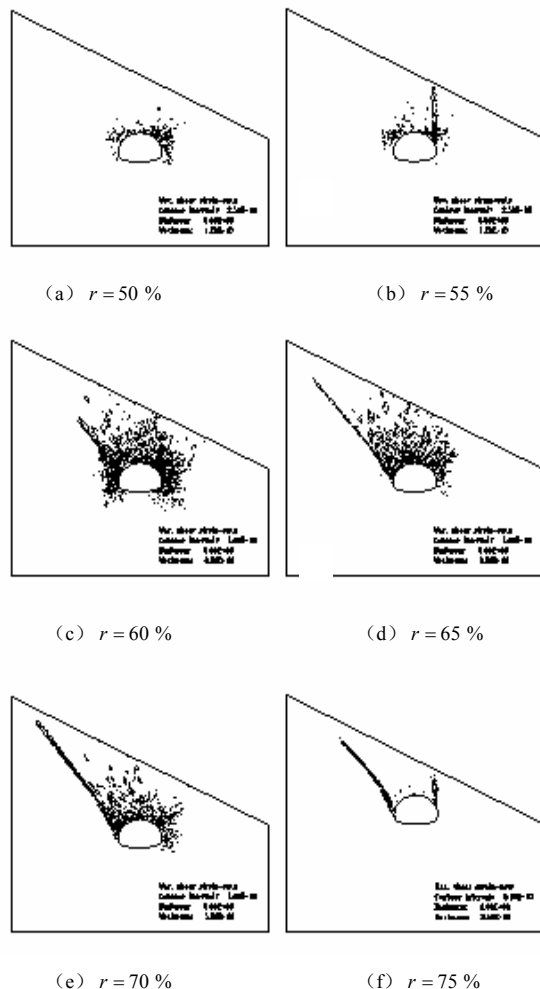


图 1 4 车道偏压隧道最大剪切应变率图
Fig.1 Maximum shear strain rate of four lane highway bias tunnel

4 剪胀时的围岩特性

图 2 为埋深 25 m 的 4 车道偏压隧道在应力释放 50% 时的洞周位移矢量图。随着剪胀角的增大, 围岩的承载能力逐渐提高, 围岩位移逐渐减小。 $\psi = 0^\circ$ 时, 最大位移矢量 $d_{\max} = 6.4 \text{ cm}$; $\psi = 11^\circ$ 时, $d_{\max} = 5.6 \text{ cm}$; $\psi = 22^\circ$ 时, $d_{\max} = 5.4 \text{ cm}$; $\psi = 27^\circ$ 时, $d_{\max} = 5.3 \text{ cm}$ 。围岩变形主要集中在拱顶、仰拱和左侧墙脚处。当支护强度不够时, 洞室左侧墙脚围岩往往由于变形过大, 导致围岩失稳。此时, 拱部围岩在自重应力场作用下向洞内变形, 导致两侧围岩受挤压, 而偏压更加剧了这种趋势。

从表 1 可知, 隧道拱顶下沉量随着剪胀角的增大而减小, 而仰拱隆起基本不受剪胀角的影响。拱脚水平位移随着剪胀角的增大而增大, 且左侧拱脚位移量值和增幅显著大于右侧拱脚位移, 收敛比随着剪胀角的增大而显著增大。

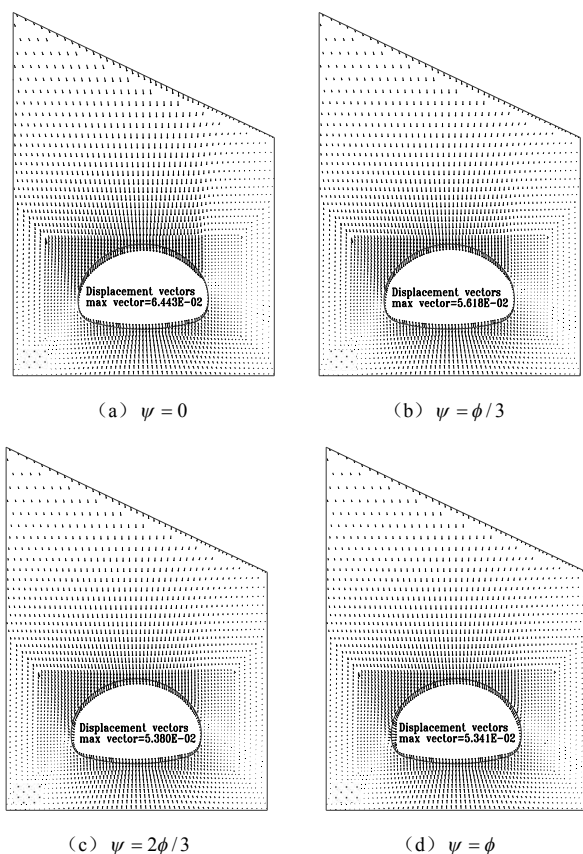


图2 四车道偏压隧道洞周位移矢量图(单位: m)
Fig.2 Displacement vector of four lane highway bias tunnel(unit: m)

表1 洞周围岩位移与收敛比
Table 1 Displacement of surrounding rock and convergence ratio

车道数	埋深 /m	剪胀角 / (°)	拱顶 下沉 /mm	仰拱 隆起 /mm	左侧拱脚 水平位移 /mm	右侧拱脚 水平位移 /mm	跨度 /m	收敛比 /%
4	15	0	67.68	37.81	6.957	-5.462	20.0	0.062
		11	58.48	37.91	12.02	-4.044	20.0	0.080
		22	55.08	38.03	19.74	-4.175	20.0	0.120
		33	52.1	38.12	32.82	-6.477	20.0	0.196
4	25	0	64.22	47.02	9.778	-6.776	20.0	0.083
		11	55.45	46.75	18.9	-7.835	20.0	0.134
		22	52.89	46.59	31.65	-11.71	20.0	0.217
		33	51.3	46.38	52.84	-19.55	20.0	0.362
2	10	0	14.2	17.92	3.583	-3.075	11.4	0.058
		11	13.26	17.92	4.474	-2.889	11.4	0.065
		22	12.63	17.95	5.873	-2.896	11.4	0.077
		33	12.29	17.9	8.335	-3.174	11.4	0.101
2	15	0	14.88	21.34	5.032	-3.249	11.4	0.073
		11	14.71	21.28	6.718	-3.716	11.4	0.092
		22	14.56	21.22	9.237	-4.544	11.4	0.121
		33	14.36	21.14	13.65	-6.221	11.4	0.174

与2车道偏压隧道(埋深15 m)相比,4车道偏压隧道(埋深15 m)的拱顶下沉量值远远大于拱

脚水平位移,说明4车道公路隧道应以拱顶下沉作为判断围岩是否失稳的依据。4车道隧道拱顶下沉量值随着剪胀角增大而减小的幅度远远大于2车道偏压隧道。4车道隧道拱顶下沉量值从 $\psi = 0^\circ$ 时的67.68 mm下降到 $\psi = 33^\circ$ 时的52.1 mm,降幅为15.58 mm,而相同埋深的2车道隧道降幅仅仅为0.52 mm。同时,4车道偏压隧道拱脚的水平位移随着剪胀角递增而增长的幅度也远远大于2车道偏压隧道。4车道隧道左侧拱脚水平位移从 $\psi = 0^\circ$ 时的6.96 mm增大到 $\psi = 33^\circ$ 时的32.82 mm,增幅为25.86 mm,而相同埋深的2车道隧道增幅仅为8.62 mm,说明大跨度隧道围岩位移受剪胀角的影响比小断面隧道显著。

从表1还可知:深埋隧道的洞周位移在相同情况下均比浅埋隧道的大,但4车道公路隧道的拱顶下沉例外,其原因是拱顶岩石在深埋情况下具有一定的自稳能力。

5 结 论

(1) 随着应力的逐步释放,剪切破坏带向围岩深处扩展,当破裂面与地面贯通时,顶板上部松动围岩柱下沉过大,造成围岩失稳。当 $r = 70\%$ 时,4车道偏压公路隧道(埋深25 m, $\psi = 0^\circ$)围岩的剪切破坏带与地面趋于贯通,这时围岩的破裂角大致为 53° 。4车道偏压隧道的拱顶下沉量值远远大于拱脚水平位移,因此,4车道公路隧道应以拱顶下沉作为判断围岩是否失稳的依据。

(2) 随着剪胀角的递增,围岩的承载能力逐渐提高,围岩位移逐渐减小。隧道拱顶下沉量随着剪胀角的增大而减小,而仰拱隆起基本不受剪胀角的影响。拱脚水平位移随着剪胀角的增大而增大,且左侧拱脚位移量值和增幅显著大于右侧拱脚位移,收敛比随着剪胀角的增大而显著增大。

(3) 大跨度隧道围岩位移受剪胀角的影响比小断面隧道显著。

参 考 文 献

- [1] 杨小礼,李亮,刘宝琛. 偏压隧道结构稳定性评价的信息优化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 484—488.
YANG Xiao-li, LI Liang, LIU Bao-chen. Evaluation on structure stability of unsymmetrically loaded tunnels using the theory of information optimization analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2002, 21(4): 484—488.
- [2] 蒋树屏, 刘洪洲, 鲜学福. 大跨度扁担隧道动态施工的相似模拟与数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (5): 567—572.
- JIANG Shu-ping, LIU Hong-zhou, XIAN Xue-fu. Physical simulation and numerical analysis of dynamic construction behavior of large-space tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(5): 567—572.
- [3] 蒋树屏, 黄伦海, 胡学兵. 超大断面公路隧道的设计与研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1 (1): 54—61.
- JIANG Shu-ping, HUANG Lun-hai, HU Xue-bin. Design and study of highway tunnel with super-large cross section[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(1): 54—61.
- [4] YIN J H, WANG Y J, Seilvadurai APS. Influence of nonassociation on the bearing capacity of a strip footing[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(11): 985—989.
- [5] JENG Fu-shu, WENG Meng-chai, HUANG Tsan-hwei, et al. Deformational characteristics of weak sandstone and impact to tunnel deformation[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 2002, 17: 263—274.
- [6] Fuenkajorm K, Serata S. Numerical simulation of strain-softening and dilation of rock salt[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract**, 1993, 30(7): 1 303—1 306.
- [7] 王兵, 谢锦昌. 偏压隧道模型试验及可靠度分析[J]. 工程力学, 1998, 15(1): 85—92.
- WANG Bing, XIE Jin-chang. Model test and reliability analysis of an unsymmetrically loaded tunnel[J]. **Engineering Mechanics**, 1998, 15(1): 85—92.