

隧道塌方机制及其影响因素离散元模拟

汪成兵¹, 朱合华^{1, 2}

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 安徽理工大学, 安徽 淮南 232001)

摘要: 通过文献查阅及现场调研, 统计分析了大量公路、铁路隧道和水利隧洞塌方工程实例, 对隧道塌方进行了分类, 认为地质条件、隧道埋深、隧道断面形式及大小、地下(表)水、爆破扰动、施工措施不当是隧道塌方的主要影响因素, 并采用隧道塌方高度、隧道埋深、地表陷穴宽度等与隧道跨度的比值以及破裂角作为表征隧道塌方程度的参量, 全面分析了上述因素对隧道塌方的影响。通过与统计资料塌方量的对比, 分析了几种常用隧道松动荷载计算方法的适用性。文中最后运用 PFC^{2D} 程序模拟了隧道塌方的全过程, 分析了隧道塌方影响因素对隧道塌方发生机制的作用, 取得了与统计分析相一致的结论。

关键词: 隧道塌方; 影响因素; 离散元; 数值模型试验

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)03-0450-07

作者简介: 汪成兵(1979-), 男, 安徽怀宁人, 博士研究生, 从事隧道及地下工程方面的研究。E-mail: cbing505@163.com。

Tunnel collapse mechanism and numerical analysis of its influencing factors

WANG Cheng-bing¹, ZHU He-hua^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Key Lab. of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: A large number of engineering facts of tunnel collapse were stated and analyzed through consulting references and field investigation. Through the analysis of the statistical materials, a new classification scheme was proposed, and geological condition, buried depth, form and size of cross section, ground water, blasting disturbance and incorrect construction measures were considered as the main influencing factors of the tunnel collapse. The contributions of these factors to the tunnel collapse were analyzed comprehensively while the ratio of collapse height, buried depth, width of surface subsidence to tunnel span and angle of rupture were taken as the parameters indicating the degree of collapse. The applicability of some calculating methods for determining surrounding rock pressure was studied through the comparison with the statistical materials. The whole process of tunnel collapse was simulated by PFC^{2D}. The contribution of the influencing factors to the tunnel collapse was studied through the results of the numerical simulation which matched the results of statistical materials perfectly.

Key words: tunnel collapse; influencing factors; DEM; numerical model test

0 引言

隧道工程围岩破坏问题一直是岩石力学工作者非常关心的问题之一。隧道围岩破坏机制对围岩压力的计算、支护和施工等具有重要的意义。人们针对隧道围岩的不同破坏模式, 提出了多种隧道围岩压力的计算方法^[1-2]。由于塌方诱发因素多、机理复杂, 因此, 在施工中针对复杂地质时若处理措施不当, 将极易造成塌方灾害的发生。塌方已成为造成工期延误、生命财产损失和隧道运营的一个重要安全隐患^[3-4]。

工程实践表明, 在不同的条件下, 因其影响因素的不同, 隧道塌方的表现形式是不同的。地质条件、设计、施工技术及管理因素通常被认为是影响隧道塌方的主要因素^[4-6]。文献[7~10]对断面形式、隧道埋深

及软岩中不同夹层结构对隧道破坏模式进行了分析。在数值模拟方面, 建立在传统的连续介质力学基础上的有限元法、有限差分法适用于预测损伤和破坏的区域^[11-14], 但难以直接用于计算和模拟隧道塌方的整个过程。PFC^{2D} 是一种适于处理非连续介质力学问题的计算方法, 其基本思想最初于 20 世纪 70 年代由 Cundall 等人提出^[15]。PFC^{2D} 可以模拟颗粒单元的连接和破坏引起颗粒的分离、大变形问题以及颗粒细观结构变化及其力学特性^[16], 其在隧道围岩稳定性分析中已有了许多成功的应用^[17-19]。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40672184; 50639090)

收稿日期: 2007-05-14

前人的研究在理论方面虽已取得诸多成果, 但尚未能对隧道塌方各因素的影响程度进行全面综合的定量分析。此外, 从规范制订情况来看, 我国铁路隧道设计规范采用的是由大量工程实际总结出来的塌方公式作为松动荷载, 水工隧洞设计规范中围岩压力的计算方法是建立在工程类比和经验公式的基础之上, 而公路隧道设计规范仅是沿用铁路隧道的规定。因此, 公路隧道从规范制订来看, 尚须做进一步的研究工作。本文通过文献查阅及现场调研, 统计分析了大量隧道塌方工程实例, 对隧道塌方提出了分类, 全面分析了隧道塌方影响因素对隧道塌方发生机制的作用。通过与统计资料的对比, 分析了几种常用隧道松动荷载计算方法的适用性。文中最后采用 PFC^{2D} 对隧道塌方影响因素进行了数值分析, 并与统计结果进行了对比。

1 隧道塌方统计分析

1.1 隧道塌方类型

塌方类型的划分方法有多种, 一般根据塌方的原因、形式、规模、机理、发生的部位等进行划分^[20-22]。本文共统计了 108 例有效塌方实例, 其中公路隧道 46 例, 铁路隧道 48 例, 水工隧洞 14 例, 根据塌方形态, 将其分为局部塌方、拱形塌方、塌穿型塌方 3 类。3 种塌方类型的分布比例如图 1 所示, 其中由于局部塌方报道的很少, 统计资料中的塌方分布比例与实际有些出入。

1.2 隧道塌方的主要影响因素分析

引起隧道塌方的直接原因主要有工程地质条件、地下(表)水、支护措施、爆破扰动等, 其统计示意图如图 2 所示。为表征隧道的塌方程度, 取隧道塌方高度(h)、隧道埋深(H)、地表陷穴宽度(L)等与隧道跨度(B)的比值以及破裂角(φ)为参量, 对上述因素对隧道塌方的影响程度进行分析。

(1) 地质条件

塌方一般发生在围岩级别较低的软弱破碎岩性地段, 对于围岩级别较高, 地质条件良好的隧道会出现局部的掉块, 一般不会出现整体稳定性破坏。对统计资料进行分析汇总, 围岩级别对隧道塌方的影响如表 1 所示。从表中可以看出, 围岩级别越低, 隧道发生

塌方的情况越严重, 发生塌穿型塌方的隧道埋深也越大。

(2) 隧道埋深

隧道埋深是隧道塌方的又一主要影响因素, 且隧道埋深不同时, 其塌方的表现形式也不尽相同。公路及铁路隧道不同围岩级别条件下塌方隧道的平均埋深如表 2 所示。隧道埋深对隧道塌方的影响如表 3 所示, 其中区域的划分是按照统计资料在划分区域内平均分布的原则进行的。

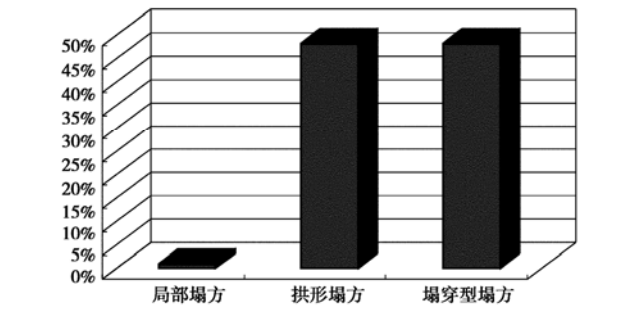


图 1 塌方类型分布统计示意图
Fig. 1 Distribution of collapse modes

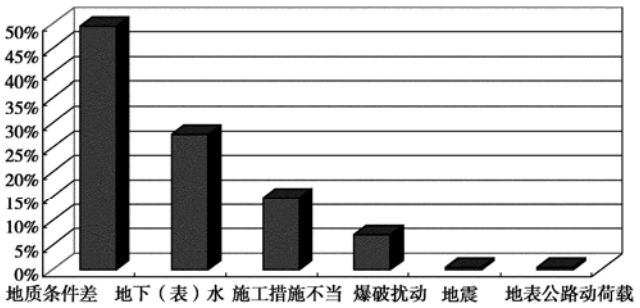


图 2 塌方主要原因统计示意图

Fig. 2 Statistic of the main causes of collapse

通过对以下数据的分析, 可以看出如下规律:

- a) 当围岩级别相同时, 隧道埋深越小, 隧道越易发生塌穿型塌方;
- b) 隧道埋深对拱形塌方的塌方程度存在一定的影响, 隧道埋深越大, 拱形塌方程度越严重, 当隧道埋深达到一定程度时, 塌方程度又趋于减弱;
- c) 对塌穿型塌方而言, 地下水起控制作用。

(3) 隧道断面形式、大小

表 1 不同围岩级别下隧道塌方情况

Table 1 The state of tunnel collapse under different surrounding rocks

塌方类型	比值	围岩级别					
		公路隧道				铁路隧道	
		III级	IV级	V级	VI级	IV级	VI级
拱形塌方	h/B 平均值	1.02	1.29	1.92	0.73	0.905	1.105
	H/B 平均值	—	3.03	3.21	4.09	2.35	2.51
塌穿型塌方	L/B 平均值	—	1.08	1.46	2.07	1.37	1.50
	φ 平均值	—	91.3°	83.5°	86.2°	84.2°	78°

表 2 不同围岩级别条件下塌方隧道的平均埋深

Table 2 The average buried depth of collapsed tunnels under different surrounding rocks

塌方类型	平均埋深/m						
	公路隧道				铁路隧道		
	III级	IV级	V级	VI级	IV级	V级	VI级
拱形塌方	119.3	74	166	—	46.5	40.7	—
塌穿型塌方	—	37.0	44.2	45.0	20.2	17.4	40.7

表 3 隧道埋深对隧道塌方的影响

Table 3 Effect of buried depth on tunnel collapse

考察指标	拱形塌方隧道埋深/m			塌穿型塌方 H/B		
	<60	60~100	>100	<1.5	1.5~3.7	>3.7
h/B 平均值	0.98	1.65	1.39	—	—	—
L/B 平均值	—	—	—	1.08	1.59	2.11
φ 平均值	—	—	—	92.7°	86.8°	82.0°

表 4 隧道断面对隧道塌方的影响

Table 4 Effect of cross section on tunnel collapse

塌方类型	比值	隧道类型			
		二车道公路隧道及 双线铁路隧道	三车道公路隧道	单线铁路隧道	水工隧洞
拱形塌方	平均塌方高度	15.3 m	19.2 m	7.25 m	16.9 m
	h/B 平均值	1.33	1.69	1.12	1.99
	平均埋深	27.8 m	65.5 m	19.7 m	26.7 m
塌穿型塌方	H/B 平均值	2.43	3.98	2.95	4.39
	L/B 平均值	1.15	2.94	2.20	3.19
	φ 平均值	93.6°	78.6°	82.8°	86.05°

公路隧道、铁路隧道及水工隧洞在断面形式及大小上有较大的区别，公路隧道高跨比多在 0.6~0.8 之间，单线铁路隧道高跨比在 1.2 左右，双线铁路隧道高跨比约为 0.8，与二车道公路隧道相近，因此在此项分析中将其与公路隧道二车道归为一类，水工隧洞高跨比约为 1.0。隧道断面对隧道塌方的影响如表 4 所示。

分析表 4 数据，可以看出如下规律：

a) 对拱形塌方，三车道公路隧道平均塌方高度最大，塌方程度最严重，二车道公路隧道及双线铁路隧道次之，单线铁路隧道最小；

b) 对塌穿型塌方，三车道公路隧道平均埋深最大，塌方程度最严重，二车道公路隧道及双线铁路隧道平均埋深大于单线铁路隧道，但单线铁路隧道的塌方程度高于二车道公路隧道及双线铁路隧道。

(4) 地下（表）水

我国隧道施工或使用多年的经验说明，隧道的塌方事故相当大的一部分是在雨季当地下水大量涌现时发生的，而且实测资料表明，雨期隧道地压往往比干旱季节地压力大 50%~100%^[23]，所以地下（表）水对隧道稳定性的影响是很显著的。

从统计资料可以看出，地下（表）水是引起隧道塌方的第二大主要因素，且塌穿型塌方多数受地下（表）水影响。地下（表）水对塌方的影响如表 5 所示。从表中可以看出，受地下（表）水影响的拱形塌

方的程度较严重，塌穿型塌方相对埋深（隧道埋深/隧道跨度）及对地表的影响程度较大。

(5) 爆破扰动

根据统计资料，爆破扰动是引起隧道塌方的第四大主要因素。爆破对隧道塌方的影响如表 6 所示。从表中可以看出，爆破对隧道拱形塌方及塌穿型塌方有一定的影响，受爆破扰动的隧道塌方程度较严重。

(6) 施工措施不当

施工措施不当是引起隧道塌方的又一大主要因素。这些不当措施主要包括施工中锚杆长度不够，数量不足，角度不对；台阶法施工时，上台阶的支护不成封闭环；用格栅拱时，未设锁脚锚杆，下部开挖使其失去支承点；衬砌滞后掘进过长，初期支护不及时，或初期支护暴露时间太久，二衬未及时跟上；初期支护未达到设计要求，强度不足等。

(7) 设计原因

设计地质条件与开挖实际不符，设计的开挖支护方法不当，支护型式、支护时间和支护参数欠妥，未能针对断层、富水等不良地质条件地段进行专门设计等是造成隧道塌方的重要原因之一。

1.3 隧道松动荷载分析

统计资料中隧道松动荷载值按几种不同的计算方法的计算结果与实际值的比较如图 3、4 所示，几种计算方法求得的平均值与实际平均值的比较如图 5 所示。

表 5 地下（表）水对隧道塌方的影响

Table 5 Effect of ground water on tunnel collapse

地下（表）水	拱形塌方		塌穿型塌方	
	h/B 平均值	H/B 平均值	L/B 平均值	φ 平均值
受地下（表）水影响	1.67	3.53	2.02	85.0°
不受地下（表）水影响	1.10	2.38	1.64	92.0°

表 6 爆破对隧道塌方的影响

Table 6 Effect of blast on tunnel collapse

爆破扰动	拱形塌方		塌穿型塌方	
	h/B 平均值	H/B 平均值	L/B 平均值	φ 平均值
受爆破扰动	1.39	2.82	2.51	79.6°
不受爆破扰动	1.3	2.51	1.73	88.7°

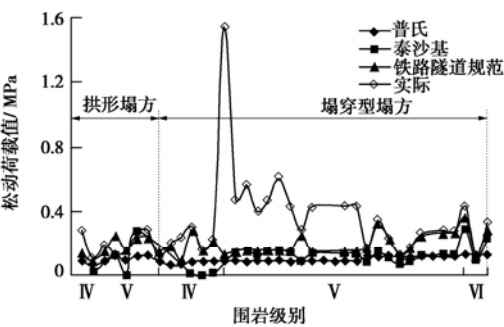


图 3 铁路隧道松动物载值对比

Fig. 3 Dynamo-relaxed load of railway tunnels

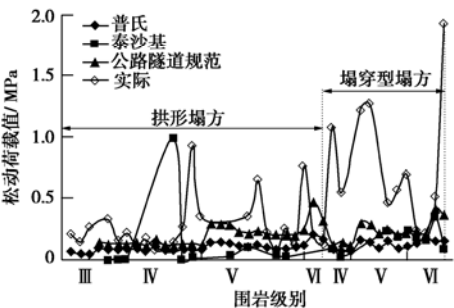


图 4 公路隧道松动物载值对比

Fig. 4 Dynamo-relaxed load of road tunnels

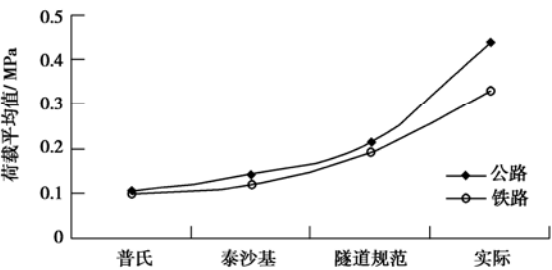


图 5 计算平均值与实际平均值对比

Fig. 5 Comparison between calculated and actual mean values

从图中可以得出如下规律：

（1）相比较而言，按公路（铁路）隧道规范求得的荷载值最为接近实际，普氏计算结果偏于保守。普

氏理论对拱形塌方较塌穿型塌方与实际更为接近，而泰沙基公式对塌穿型塌方较拱形塌方更为合适，尤其是对围岩级别较低的浅埋隧道；

（2）对比公路隧道和铁路隧道的计算结果可以看出，公路隧道塌方量总体上大于铁路隧道塌方量。铁路隧道规范的计算结果比公路隧道规范计算结果更为接近实际。

2 隧道塌方影响因素离散元分析

与其他数值计算程序不同，PFC^{2D} 通过设置颗粒的细观参数来反映材料的宏观力学特性。为实现对工程问题的定量模拟，应首先进行试样的数值实验，以取得反映工程材料宏观力学特性的颗粒的细观参数，进而通过试样数值实验所取得的细观参数，来模拟研究实际问题。因受计算机计算能力的限制，本文采用模型试验与数值模拟相结合的方法，对隧道塌方问题进行研究。模型几何相似比 $C_l=50$ ，重度相似比 $C_\gamma=1$ ，根据相似理论^[24]， $C_u=C_\sigma=1$ ， $C_c=C_E=50$ ，式中 μ ， φ ， c ， E 分别表示模型材料的泊松比、内摩擦角、黏聚力及弹性模量。

2.1 模型材料力学性质数值实验

试验共模拟了两种模型材料，两种模型的颗粒半径为 2~5 mm，颗粒放大系数为 1.6，初始孔隙率为 0.12。试样数值实验过程与文献^[25]相同，此处不再详述。根据土工实验规范^[26]，实验中围压分别为 10，25，50 kPa。试样模拟计算结果以公路隧道规范围岩物理力学指标标准值为参考^[27]。模型基本参数及计算结果如表 7 所示。

2.2 隧道塌方离散元模拟

数值模型试验方案如表 8 所示。计算时，对隧道断面形式进行了简化，如图 6 所示。参考表 7，模拟衬砌材料（初期支护）及地表水侵入后围岩等效材料参数取值如表 9 所示。

表 7 花 PFC 模型的基本参数及计算结果

Table 7 Basic parameters of PFC model and the calculated results

序号	颗粒密度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	颗粒法向接触刚 度 $/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	颗粒切向接触刚 度 $/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	颗粒摩 擦系数	颗粒黏结 强度/N	计算结果			
						E/MPa	μ	c/kPa	$\phi/(\text{°})$
模型材料 1	2300	4×10^8	4×10^8	0.3	10	40.5	0.32	8.5	28.3
模型材料 2	2100	2×10^8	1.5×10^8	0.14	5	21.3	0.42	3.54	20.8

表 8 数值模拟计算方案

Table 8 Numerical calculating schemes

序号	模型材料	隧道埋深/m	支护	地表水	隧道断面
方案 1	材料 1	0.20	无	无	二车道
方案 2	材料 1	0.74	无	无	二车道
方案 3	材料 2	0.74	无	无	二车道
方案 4	材料 1	0.74	无	无	三车道
方案 5	材料 1	0.74	有	无	二车道
方案 6	材料 1	0.74	无	有	二车道

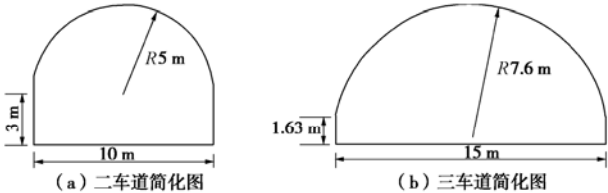


图 6 隧道断面简化图（原型）

Fig. 6 Simplified figure of tunnel section

数值计算过程如下：①生成颗粒，并在自重作用下压密；②设置颗粒的摩擦系数、黏结强度，开挖隧道，进行计算。

因颗粒材料具有一定的孔隙率，经多次试验，取颗粒密度分别为 2300，2100 kg/m³ 时围岩的自重应力场与岩体密度为 2100，1900 kg/m³ 时的自重应力场相同。

计算模型如图 7，8 所示，其分别有 42915，23576 个颗粒。其中，有地表水的计算工况是在隧道开挖完成后，计算由于地表水侵入而引起的隧道塌方破坏。

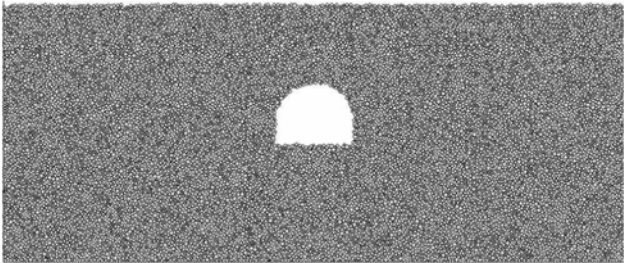


图 7 计算模型(埋深 0.2 m)

Fig. 7 Calculating model (0.2 m)

2.3 计算结果分析

模拟计算结果如表 10 所示，计算结果与前述统计资料中相同条件下的统计值的比较如图 9 所示，各方案最终破坏形态如图 10 所示。

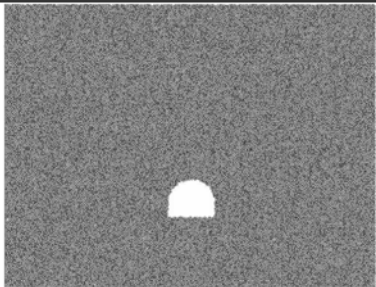


图 8 计算模型(埋深 0.74 m)

Fig. 8 Calculating model (0.74 m)

表 9 墙体、衬砌材料及地表水侵入后围岩等效材料参数

Table 9 Parameters of wall, line and equivalent surrounding rock

materials after infiltration of surface water					
序号	颗粒密度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	颗粒法向接 触刚度 $/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	颗粒切向接 触刚度 $/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	颗粒摩 擦系数	颗粒黏 结强度 /N
墙体	—	2.0×10^9	2.0×10^9	0.0	—
衬砌材料	2500	1.5×10^9	1.5×10^9	0.6	20
围岩等效材料	2800	1.0×10^8	1.0×10^8	0.1	2

表 10 计算结果

Table 10 Calculated results

方案	塌方高度/m	地表陷穴 深度/m	地表陷穴 宽度/m
方案 1	—	0.1475	0.1487
方案 2	0.1059	0.0000	0.0000
方案 3	0.1753	0.0220	—
方案 4	0.3103	0.0250	0.0000
方案 5	0.0477	0.0000	0.0000
方案 6	—	0.0320	—

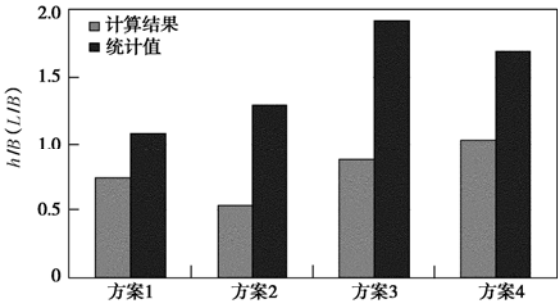


图 9 计算结果与统计值的比较

Fig. 9 Comparison between calculated and actual results

从计算结果可以看出：

（1）隧道埋深不同，塌方形式不同。埋深较小时，隧道发生塌穿型塌方，而当隧道埋深达到一定值

时, 可在隧道拱顶形成一稳定的压力拱, 隧道只发生拱形塌方。

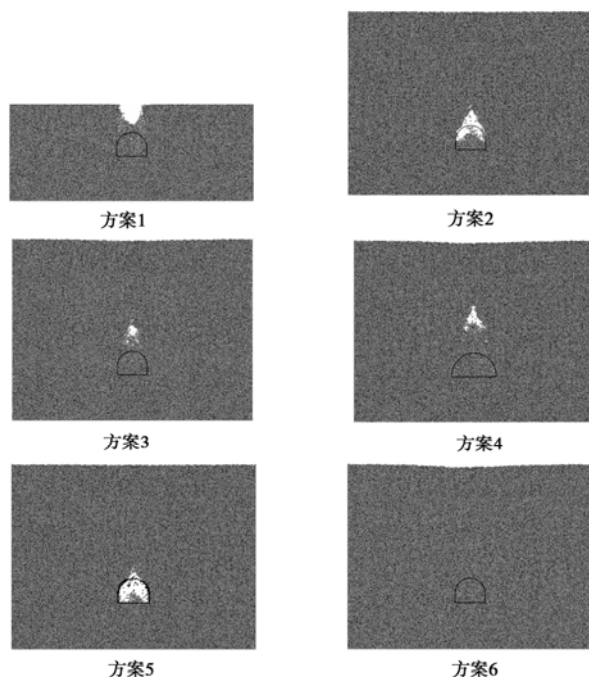


图 10 隧道最终破坏形态

Fig. 10 Final failure shape of tunnel

(2) 围岩强度越低, 隧道塌方程度越严重。

(3) 三车道隧道塌方程度较二车道隧道塌方程度严重。

(4) 支护可以有效地抑制塌方, 改善围岩的受力状态。地表水的入侵对隧道塌方影响严重, 并可致使深埋隧道的地表产生下沉。

(5) 与实际值相比较, 计算结果偏小, 这应是由于实际情况下的隧道塌方大多是在有地下(表)水的作用下发生的。

3 结 论

(1) 根据塌方形态及部位, 将塌方分为局部塌方、拱形塌方、塌穿型塌方 3 类。

(2) 根据统计资料分析, 认为地质条件、隧道埋深、隧道断面形式及大小、地下(表)水、爆破扰动、施工措施不当及设计原因是隧道塌方的主要影响因素。

(3) 对隧道松动荷载, 相比较而言, 按隧道规范求得的荷载值比普氏理论和泰沙基公式的计算结果与实际更接近, 且铁路隧道规范的计算结果比公路隧道规范计算结果更为接近实际。这也进一步说明, 公路隧道松动荷载的确定方法还有待进一步研究。

(4) 统计资料与数值模拟结果均表明: 隧道围岩级别越低, 隧道高跨比越小, 隧道塌方程度越严重;

隧道埋深不同, 隧道塌方表现形式不同; 支护可以有效地抑制塌方, 而地下(表)水的入侵可严重恶化隧道的塌方程度。

(5) 对隧道塌方影响因素的数值模拟分析结果与塌方统计资料所得出的结论相一致, 说明采用颗粒流方法模拟隧道塌方是可行的。

参考文献:

- [1] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983. (YU Xue-fu, ZHENG Yin-ren, LIU Huai-yuan. The stability analysis of the surrounding rock mass in underground engineering[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House. 1983. (in Chinese))
- [2] 于学馥. 现代工程岩土力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1995. (YU Xue-fu. The foundation of modern engineering rock and soil mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese))
- [3] 黄润秋, 等. 圆梁山特长隧道施工地质灾害问题预测[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(2): 111 - 115. (HUANG Run-qiu, et al. Assessment and prediction of geohazards of the deep-lying long tunnel in the Yuanliangshan[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(2): 111 - 115. (in Chinese))
- [4] TÜRKMEN Sedat, ÖZGÜZEL Nuri. Grouting a tunnel cave-in from the surface: a case study on Kurtkulagi - irrigation tunnel, Turkey[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003(18): 365 - 375
- [5] 冯卫星, 况 勇, 陈建军. 隧道坍方案例分析[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2002: 163 - 165. (FENG Wei-xing, KUANG Yong, CHEN Jian-jun. Case analysis of tunnel collapse[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2002: 163 - 165. (in Chinese))
- [6] 霍玉华. 浅埋公路隧道施工塌方事故的预防与整治技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(7): 84 - 89. (HUO Yu-hua. Study on prevention of collapse accident in shallow buried highway tunnel and its countermeasures[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(7): 84 - 89. (in Chinese))
- [7] 赵兴东, 段进超, 唐春安, 等. 不同断面形式隧道破坏模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增 2): 4921 - 4925. (ZHAO Xing-dong, DUAN Jin-chao, TANG Chun-an, et al. Study on failure mode of tunnels with different sections[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S2): 4921 - 4925. (in Chinese))
- [8] ZHU W C, LIU J, TANG C A, ZHAO X D, BRADY B H. Simulation of progressive fracturing processes around

- underground excavations under biaxial compression[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005(20): 231 - 247.
- [9] 王贵君. 节理裂隙岩体中不同埋深无支护暗挖隧洞稳定性的离散元法数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(7): 1154 - 1157. (WANG Gui-jun. DEM analysis on stability of unsupported tunnels in jointed rock masses at different depths[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(7): 1154 - 1157. (in Chinese))
- [10] HSU S C, CHIANG S S, LAI J R. Failure mechanisms of tunnels in weak rock with interbedded structures[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2004, 41(3): 34.
- [11] SCHULLER H, SCHWEIGER H F. Application of a multilaminate model to simulation of shear band formation in NATM-tunnelling[J]. *Computers and Geotechnics*, 2002, 29: 501 - 524.
- [12] SITHARAM T G, Madhavi Latha G. Simulation of excavation in jointed rock masses using a practical equivalent continuum approach[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2002, 39: 517 - 525.
- [13] STERPI D. Application of the FEM to the stability of shallow tunnels[J]. *New Frontiers in Computational Geotechnics-Preceding of 1st International Workshop on New Frontiers in Computational Geotechnics-banef*, 2002: 14 - 15, 61 - 68.
- [14] TRINH Q N, BROCH E, LU M. Three dimensional modeling of a tunnel cave-in and spiling bolt support[C]// ISRM International Symposium 2006, 4th Asian Rock Mechanics Symposium.
- [15] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive large scale movement in block rock system[C]// *Proceeding of Symposium of ISRM*, 1971, 1.
- [16] CUNDALL P A. Particle flow code in 2 dimensions command and fish reference summary[M]. Minnesota: Itasca Consulting Group Inc, 1999.
- [17] FAKHIMI A, CARVALHO F, ISHIDA T, LABUZ J F. Simulation of failure around a circular opening in rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2002(39): 507 - 515.
- [18] WANG C, TANNANT D D. Rock fracture around a highly stressed tunnel and the impact of a thin tunnel liner for ground control[J]. *Internal Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2004, 41(3): 1 - 8.
- [19] FUNATSU T, HOSHINO T, ISHIKAWA M, SHIMIZU N. Numerical analysis for better understanding mechanism of support effect on ground stability by using distinct element method[C]// *ISRM International Symposium 2006, 4th Asian Rock Mechanics Symposium*.
- [20] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (GUAN Bao-shu. *Gist of tunnel engineering design*[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [21] 周建民, 金丰年, 王 斌, 等. 洞室交叉部位塌方的处理技术[J]. *地下空间与工程学报*, 2005, 1(2): 278 - 282. (ZHOU Jian-min, JIN Feng-nian, WANG Bin, et al. *Techniques of settling collapse at grotto's Intersection*[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005, 1(2): 278 - 282. (in Chinese))
- [22] 高 玮, 杨明成, 郑颖人. 隧道围岩破坏模式的进化神经网络识别[J]. *岩土力学*, 2002, 23(6): 691 - 694. (GAO Wei, YANG Ming-cheng, ZHENG Ying-ren. *Identification of collapse type of surrounding rock mass of tunnels using evolutionary neural network*[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(6): 691 - 694. (in Chinese))
- [23] 朱维申, 何满朝. 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, 1995. (ZHU Wei-shen, HE Man-chao. *Stability of surrounding rock under complex conditions and dynamic construction mechanics of rock mass*[M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese))
- [24] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005. (YANG Jun-jie. *Similarity theory and structure model test*[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005. (in Chinese))
- [25] 周 健, 池 永. 砂土力学性质的细观模拟[J]. *岩土力学*, 2003, 24(6): 901 - 906. (ZHOU Jian, CHI Yong. *Mesomechanical simulation of sand mechanical properties*[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(6): 901 - 906. (in Chinese))
- [26] 袁聚云. 土工试验与原理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003. (YUAN Ju-yun. *Soil mechanics and its principle*[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003. (in Chinese))
- [27] JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (JTG D70—2004 *Code for design of road tunnel*[S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))