

软岩隧道挤压变形的概率模型

赵延喜, 李 浩

(江苏省交通规划设计院股份有限公司 隧道设计所, 江苏 南京 210005)

摘 要:软岩隧道的挤压变形是深部高地应力区岩石地下工程中的主要地质灾害之一,对其发生的可能性及其分级的预测是工程建设中必须解决的重大问题。基于概率分析理论,通过研究挤压性围岩大变形破坏机理,建立了软岩隧道挤压变形发生的概率及挤压程度分级模型。影响挤压变形的两个主要因素是岩体单轴抗压强度 σ_{cm} 和初始垂直地应力 p_0 ,将强度应力比 σ_{cm}/p_0 作为判别因子建立挤压变形概率模型。利用该模型对国内乌鞘岭隧道工程挤压变形情况进行分析,结果与实际情况符合较好,说明该模型在研究隧道挤压变形发生的可能性及挤压程度分级中具有良好的实用性和有效性。

关键词:软岩隧道;挤压变形;围岩稳定;概率模型

中图分类号:U455

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)05-0042-05

Probabilistic Model of Squeezing Deformation in Soft Rock Tunnel

ZHAO Yanxi, LI Hao

(Department of Tunnel Design, Jiangsu Institute of Transportation Planning and Design Co. Ltd, Nanjing, Jiangsu 210005, China)

Abstract: The squeezing deformation problem of soft rock tunnel is one of the main geological hazards in rock engineering underground in deep high geological stress zone and the prediction of the possibility occurred and the classification of squeezing deformation are important issues to be solved in many engineering constructions. Through studying the mechanism of squeezing deformation and failure in surrounding rock and based on the principle of probabilistic analysis, a model for predicting the possibility and classification of squeezing deformation of soft rock tunnel was established. The main control factors of squeezing deformation such as uniaxial compressive strength σ_{cm} and initial vertical stress p_0 were chosen for the analysis, and the σ_{cm}/p_0 was regarded as the discriminant factor of probabilistic model. Squeezing deformation of Wuqiaoling tunnel was used for verifying the model and results showed that the model could be used to predict the possibility and classification of squeezing deformation in soft rock tunnel.

Key words: soft rock tunnel; squeezing deformation; surrounding rock stability; probabilistic model

在 高 地 应 力 环 境 下 开 挖 隧 道, 对 软 岩 来 说, 影 响 围 岩 稳 定 性 的 主 要 因 素 为 塑 性 大 变 形, 或 者 称 为 挤 压 大 变 形。 围 岩 塑 性 挤 压 变 形 会 导 致 支 护 结 构 变 形、 破 损, 若 出 现 严 重 挤 压, 还 会 发 生 坍 塌、 卡 机 (隧 道 掘 进 机 施 工) 等 事 故, 导 致 工 程 被 迫 中 断。 如, 荷 兰 西 斯 凯 尔 特 河 隧 道 施 工 过 程 中 因 围 岩 挤 压 强 烈 而 被 困 两 周; 引 黄 工 程 隧 道 施 工 过 程 中 掘 进 机 遇 到 软 岩 挤 压 变 形 而 长 时 间 被 困, 给 工 程 带 来 严 重 后 果。 目 前 对 于 软 岩 挤 压 大 变 形 隧 道 的 研 究, 主 要 侧 重 于 常 规 定 性 定 量 分 析, 概 率 分 析 方 法 应 用 较 少。 李 树 军^[1] 针 对 龙 溪 隧 道 高 地 应 力 挤 压 变 形 的 特 殊 性, 分 析 了 隧 道 施 工 过 程 中 因 高 地 应 力 造 成 的 隧 道 大 变 形 的 特 点 及 机 理, 并 对 典 型 地 段 进 行 了 数 值 分 析, 确 定 了 大 变 形 地 段 安 全、 经 济、 合 理 的 支 护 参 数。 陈 铁 骑^[2] 以 锦 屏 二 级 水 电 站 隧 洞 工 程 建 设 为 背

收稿日期:2011-06-15

基金项目:国家自然科学基金项目(50909038)。

作者简介:赵延喜(1980—),男,河南南阳人,工程师,博士,主要从事隧道工程方面的设计与研究工作。

E-mail:yanxi009@163.com.

景,对高地应力下大断面隧洞混凝土施工技术进行了研究。陶波等^[3]在对乌鞘岭深埋长隧道进行长期围岩收敛变形观测的基础上,分析了该隧道左、右主洞的收敛变形规律。王丙堤^[4]从地质超前预报、隧道支护结构和施工方法三个方面探讨了高地应力软弱围岩大变形的控制方法,并结合在具体施工中的应用,进行了现场监测测量验证。李鹏等^[5]应用有限差分软件 FLAC3D 对高地应力区断层带隧道工程中施工力学形态和变形空间效应进行了数值模拟。从现有资料来看,景诗庭^[6]曾对隧道中的概率模型进行过初步探讨,但除此之外,国内对于软岩挤压变形的概率问题研究较少。隧道往往深埋于地下,存在大量不确定性,制约因素众多,现有研究方法侧重于定性的分析,即使采用数值模拟的方法,得出的结果也往往为定值,而采用概率模型将定值演变为概率,更能反映工程实际,基于此,提出了挤压变形隧道的概率模型。

1 挤压性围岩大变形破坏机理

在隧道开挖以前,隧道围岩往往处于三向受压状态,结构面闭合,处于稳定状态,当隧道开挖以后,原有的应力平衡状态被打破,导致应力重新分布,部分区域则出现应力集中,当应力大于围岩单轴抗压强度时,则岩体开始变形破坏。Hoek^[7]研究认为,当岩体强度应力比小于 0.2 时,围岩切向应变急剧增加,如果支护不及时或支护不合理,则会出现严重的围岩稳定性问题,隧道围岩和开挖面都会出现坍塌。岩体强度应力比和切向应变之间的关系如图 1 所示,其中,A 点表示开挖面的径向变形,B 点为开挖面的轴向变形。

根据研究,挤压破坏可分为三种形式。

1)完全剪切破坏:由于隧道周边围岩受到的剪应力大于其强度而发生剪切破坏。

2)弯曲变形破坏:节理或层状围岩容易发生弯曲变形破坏,如薄层沉积岩、云母片岩等。

3)剪切滑移破坏:主要发生在厚层沉积岩中,沿层面发生滑移挤出。

根据工程实际,认为软岩挤压变形破坏机理为:

1)高地应力作用

隧道处于高地应力下,部分处于极高地应力下,软岩岩体强度较低,不但会产生显著的塑性变形,而且表现为长期的流变特性,从而导致极大的变形产生。

2)开挖影响

隧道开挖导致围岩切向应力增大,径向应力减小,由于水平主应力较大,导致隧道顶部和底部出现应力集中,引起围岩发生塑性或粘性流动。

3)软弱围岩的流变特性

由于围岩单轴抗压强度很低,使得其流变界限也比较小,围岩应力很容易达到其流变下限,流变变形往往持续时间长、变形大,当变形超过一定值时,支护结构被压坏,导致洞室围岩劈裂破坏。

4)扩容膨胀

高地应力下比较软弱、破碎的岩体,其结构面在开挖以外往往处于挤压密实状态,当开挖以后,应力得以释放,剪应力的作用使得某些结构面出现扩容现象,在微观上为晶粒之间的错动、滑移,宏观上表现为围岩体积随时间发展出现膨胀。

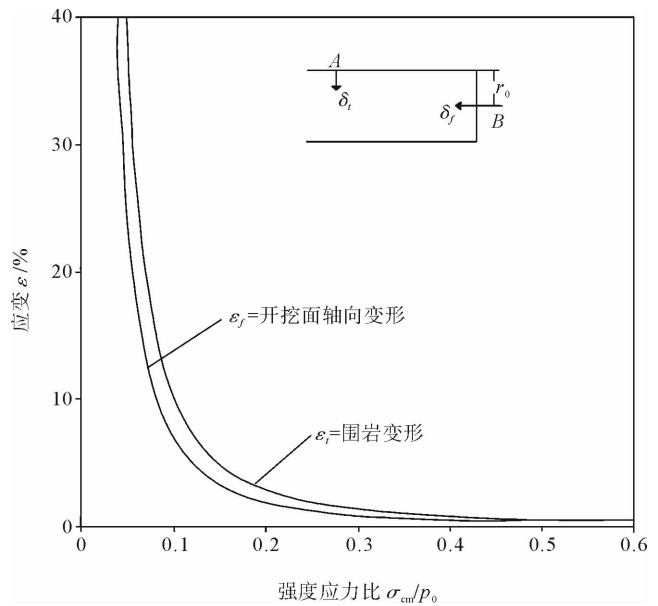


图 1 岩体强度应力比与应变率关系图

Fig. 1 Relationship between the ratio of strength-stress and the strain rate

2 软岩挤压变形概率计算模型

Hoek 等^[8]认为,在软弱岩体开挖施工中,当岩石强度应力比 $\sigma_{cm}/p_0 < 1/3$ 时,挤压变形急剧增加。切向应变为径向位移与隧道直径的比值,根据监测,当切向应变接近 2% 时,围岩达到稳定与不稳定过渡区,随着应变继续增大,隧道将处于不稳定状态,需要考虑支护是否合适,详细制定支护措施,因此隧道稳定性问题可用围岩切向应变来确定。事实上,围岩的支护措施,反映到计算公式里,可用支护压力来代替。根据大量的工程资料数据,采用曲线拟合的方法可得深埋隧道围岩的塑性应变比和切向应变^[8]:

$$\frac{d_p}{d_0} = \left(1.25 - 0.625 \frac{p_i}{p_0}\right) \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0}\right)^{\left(\frac{p_i}{p_0} - 0.57\right)}, \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{\delta_i}{d_0} = \left(0.002 - 0.0025 \frac{p_i}{p_0}\right) \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0}\right)^{\left(2.4 \frac{p_i}{p_0} - 2\right)}. \quad (2)$$

其中: d_p —塑性区直径; d_0 —隧道直径; p_i —内部支护压力; σ_{cm} —初始垂直地应力(静水压力); δ_i —隧道径向变形; σ_{cm} —岩体单轴抗压强度。

$$\sigma_{cm} = (0.0034 m_1^{0.8}) \sigma_{ci} [1.029 + 0.025 e^{(-0.1 m_1)}]^{GSI} \quad (3)$$

其中: σ_{ci} —完整岩石单轴抗压强度; m_1 —反映岩体内部摩擦特性的常数; GSI —反映岩体强度与岩块强度关系的地质强度指标。

基于式(2),可对实际隧道工程变形量进行预测,通过对大量工程进行研究,挤压程度划分为(图 2): $\epsilon < 1\%$,无挤压; $1\% < \epsilon < 2.5\%$,轻微挤压; $2.5\% < \epsilon < 5\%$,严重挤压; $5\% < \epsilon < 10\%$,非常严重挤压; $\epsilon > 10\%$,灾难性挤压。

根据应变与挤压程度的关系,可得出挤压风险概率如下。

不发生挤压问题的概率

$$P_{few} = p(\epsilon < 1\%); \quad (4)$$

轻微挤压问题概率

$$P_{minor} = p(1\% < \epsilon < 2.5\%); \quad (5)$$

严重挤压问题概率

$$P_{severe} = p(2.5\% < \epsilon < 5\%); \quad (6)$$

非常严重挤压问题概率

$$P_{verys} = p(5\% < \epsilon < 10\%); \quad (7)$$

灾难性挤压问题发生概率

$$P_{extreme} = p(\epsilon > 10\%). \quad (8)$$

3 实例分析

3.1 工程概况

乌鞘岭特长隧道位于既有兰新线兰武段打柴沟与龙沟车站之间。设计为 2 座单线隧道,长 20 050 m,线间距 40 m,2 座隧道线路纵坡相同,为 11% 单面下坡,隧道洞身最大埋深 1 100 m 左右。在桩号为 7+700 处,发育有断层,断层带宽约 40 m,走向北北西,倾向东北,倾角 70°,长 3.5 km,岩石破碎,两盘产状相抵,节理较发育,为逆断层。根据地应力反演计算,最大主应力为 31.4 MPa,最大主应力方向为北东 28° 左右。断层带影响范围内围岩类别为 V 类,属于软弱围岩。

3.2 随机变量选取

本研究中由于岩体较为破碎,将其视为各向同性,则根据勘察资料,随机变量如表 1 所示,表中随机变量

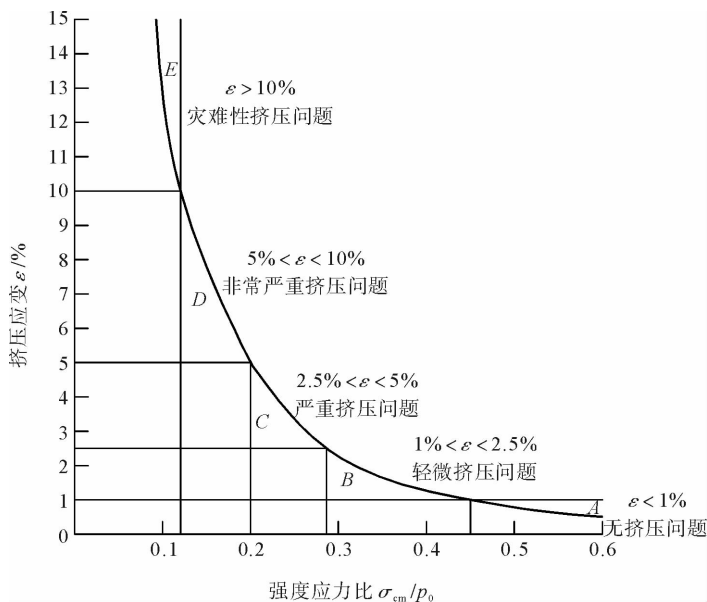


图 2 挤压程度与挤压应变关系图^[6]

Fig. 2 Relationship between squeezing degree and squeezing strain

由 Hoek 等^[8]提供的指标确定。

3.3 计算结果

本计算基于蒙特卡洛方法,蒙特卡洛(Monte Carlo)模拟是一种通过设定随机过程,反复生成时间序列,计算参数估计量和统计量,进而研究其分布特征的方法。当系统中各个单元的可靠性特征量已知,但系统的可靠性过于复杂,难以建立可靠性预测的精确数学模型或模型太复杂而不便应用时,可用随机模拟法近似计算出系统可靠性的预测值,随着模拟次数的增多,其预测精度逐渐提高。步骤如下:

1) 根据提出的问题构造一个简单、适用的概率模型或随机模型,使问题的解对应于该模型中随机变量的某些特征(如概率、均值和方差等),所构造的模型在主要特征参量方面要与实际问题或系统相一致。

2) 根据模型中各个随机变量的分布,在计算机上产生随机数,实现一次模拟过程所需的足够数量的随机数。通常先产生均匀分布的随机数,然后生成服从某一分布的随机数,方可进行随机模拟试验。

3) 根据概率模型的特点和随机变量的分布特性,设计和选取合适的抽样方法,并对每个随机变量进行抽样(包括直接抽样、分层抽样、相关抽样、重要抽样等)。

4) 按照所建立的模型进行仿真试验、计算,求出问题的随机解。

5) 统计分析模拟试验结果,给出问题的概率解以及解的精度估计。

根据蒙特卡洛法原理,模拟 10 000 次,得到应变分布直方图(图 3)、挤压变形超越概率分布图(图 4)及挤压变形累积概率分布图(图 5)。

表 1 输入随机变量表

Tab. 1 The list of input random variables

随机变量	分布类型	均值	标准差
σ_{ci} / MPa	正态分布	65	7.0
m_i	正态分布	17	1.7
GSI	正态分布	20	2.2
p_0 / MPa	正态分布	25	2.5

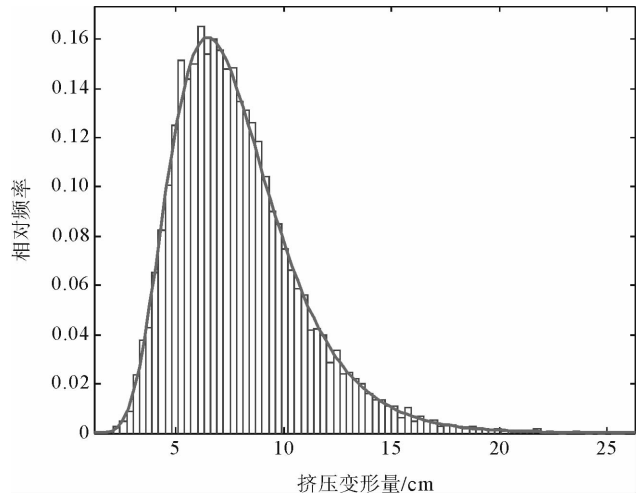


图 3 挤压变形量分布直方图

Fig. 3 The distribution histogram of squeezing deformation

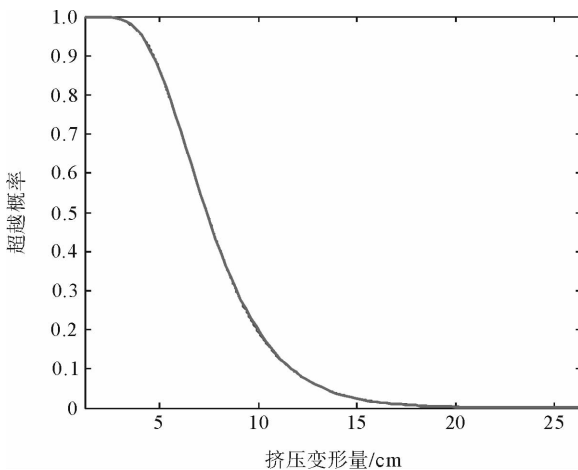


图 4 挤压变形量超越概率分布图

Fig. 4 The distribution of exceeding probability and squeezing deformation

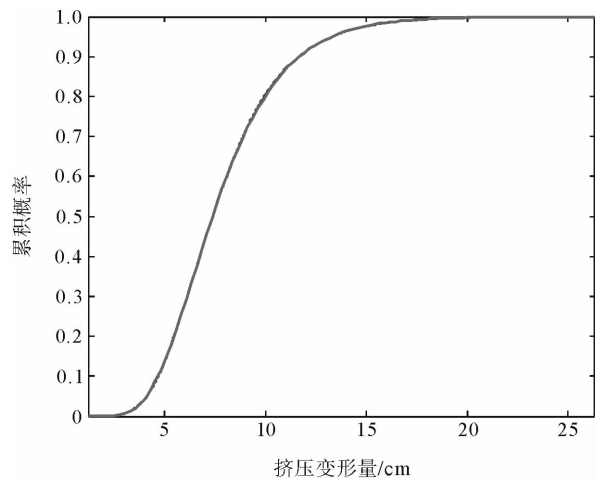


图 5 挤压变形量累积概率分布图

Fig. 5 The cumulative probability distribution of squeezing deformation

从直方图可以看出,挤压变形近似服从对数正态分布,均值为 7.86%,为严重挤压。

根据图 4 和图 5 数据计算可得:

不发生挤压失稳的概率为 $P_{\text{few}} = p(\epsilon < 1\%) = 0$,

轻微挤压概率为 $P_{\text{minor}} = p(1\% < \epsilon < 2.5\%) = 1.27\%$,

严重挤压概率为 $P_{\text{severe}} = p(2.5\% < \epsilon < 5\%) = 12.65\%$,

非常严重挤压概率为 $P_{\text{verys}} = p(5\% < \epsilon < 10\%) = 66.33\%$,

灾难性的挤压概率为 $P_{\text{extreme}} = p(\epsilon > 10\%) = 19.75\%$ 。

因此,断层处一定会发生挤压问题,且挤压程度在严重挤压以上,大部分为非常严重挤压,对隧道施工影响最大,容易发生卡机、塌方等工程事故,在断层处一定要加强监测,做好地质灾害的预报工作,并采取预防措施。

4 结论

1) 基于概率分析理论,研究了挤压性围岩大变形破坏机理,建立了软岩隧道挤压变形发生的概率及挤压程度分级模型。选取影响挤压变形的主要因素为岩体单轴抗压强度 σ_{cm} 、初始垂直地应力 σ_{cm} ,并将强度应力比 σ_{cm}/p_0 作为判别因子,建立了挤压变形概率模型。

2) 采用概率模型对乌鞘岭隧道工程断层处挤压变形情况进行分析,结果显示,该处发生挤压问题概率为 100%,非常严重挤压概率为 66.33%。由于工程中的不确定性,概率模型对问题的刻画更加符合工程实际,本文模型为类似的工程研究提供了思路。

参考文献:

- [1] 李树军. 高地应力大变形隧道变形特性及工程应对措施分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2009, 7(3): 33-35.
LI Shujun. Analysis on deformation characteristics and counter measures about high ground stress and big distortion tunnel [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2009, 7(3): 33-35.
- [2] 陈铁骑. 高地应力下大断面隧洞混凝土施工技术研究[J]. 铁道建筑, 2009, 1(5): 74-76.
CHEN Tieqi. Research of large section tunnel concrete construction technology under high ground stress[J]. Railway Engineering, 2009, 1(5): 74-76.
- [3] 陶波, 伍法权, 郭啟良, 等. 高地应力环境下乌鞘岭深埋长隧道软弱围岩流变规律实测与数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1827-1834.
TAO Bo, WU Faquan, GUO Qiliang, et al. Research on rheology rule of deep-buried long Wuqiaoling tunnel under high crustal stress by monitoring and numerical analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1827-1834.
- [4] 王丙堤. 高地应力软弱围岩变形控制方法[J]. 铁道工程学报, 2006, 7(4): 57-61.
WANG Bingdi. Exploration on control method for deformation of stressed highland weak surrounding rock[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006, 7(4): 57-61.
- [5] 李鹏, 林志, 张亚兴. 高地应力区断层带隧道施工力学研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2009, 28(1): 29-32.
LI Peng, LIN Zhi, ZHANG Yaxing. Study on mechanical behavior of tunnel construction at fault zone with high ground stress[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2009, 28(1): 29-32.
- [6] 景诗庭. 地下坑道稳定性的模糊概率分析[J]. 石家庄铁道学院学报, 1989, 2(2): 33-39.
JING Shiting. Fuzzy probability analysis of underground tunnel stability[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 1989, 2(2): 33-39.
- [7] HOEK E. Big tunnels in bad rock[J]. Journal of Eotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 22(9): 726-740.
- [8] HOEK E, MARINOS P. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses[J]. Tunnels and Tunneling International, 2000, 11(2): 1-22.