

文章编号: 1000-7598(2011)09-2577-07

泡沫混凝土预留变形层对深埋软岩 隧道长期稳定性影响研究

陈卫忠^{1,2}, 田洪铭², 杨阜东¹, 耿亚梅¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点试验室, 武汉 430071)

摘 要: 泡沫混凝土的单轴和三轴试验研究表明, 泡沫混凝土具有较高压缩性和良好延性, 可以作为深埋软岩隧道初期支护与二次衬砌之间预留变形层填充材料, 分析了其对宜巴高速公路深埋软岩隧道长期稳定性的影响。研究表明, 深埋软岩隧道在二次衬砌施工之后依然会产生较大的蠕变变形, 单纯依靠提高二次衬砌的厚度, 并不能完全控制住围岩的蠕变变形, 而且衬砌结构很容易由于变形压力过大而发生破坏。泡沫混凝土预留变形层, 可以很好地吸收围岩蠕变变形, 缓解二次衬砌承担的蠕变变形压力, 减小衬砌的变形, 改善其受力, 采用厚度较小的二次衬砌即满足隧道长期运营的要求。

关 键 词: 深埋软岩隧道; 泡沫混凝土; 长期稳定性; 预留变形层

中图分类号: U 459.2

文献标识码: A

Study of effects of foam concrete preset deformation layer on long-term stability of deep soft rock tunnel

CHEN Wei-zhong^{1,2}, TIAN Hong-ming², YANG Fu-dong¹, GENG Ya-mei¹

(1. Research Center of Geotechnical & Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Uniaxial and triaxial tests of foam concrete show that the foam concrete which has the capacity of high compressibility can be used as filling material between primary support and secondary lining in deep soft rock tunnel. And the effects of this filling material which is called preset deformations layer on long-time stability of Yi-Ba expressway is studied. The results show that the creep deformation of surrounding rock in deep tunnel still increase after the construction of secondary lining; and it is hardly to be controlled by the method of increasing the thickness of lining; besides, the secondary lining is more easily destroyed by deformation pressure. However, preset deformation layer of foam concrete is able to decrease the deformation pressure on secondary lining by absorbing the creep deformation of rock. As a result, long-term stability of deep soft rock tunnel can be guaranteed by much thinner secondary lining.

Key words: deep soft rock tunnel; foam concrete; long-term stability; preset deformation layer

1 引 言

近年来, 随着我国铁路、公路建设的不断发展, 穿越高地应力地区且工程地质环境恶劣的软弱围岩长大隧道不断涌现^[1-7]。刚刚开工建设的宜巴高速公路是湖北省“六纵五横一环”公路主骨架中黄梅至巴东“一横”的重要组成部分, 也是沪蓉高速在湖北省西部最后开工的一段, 是迄今湖北省建设难度最大的高速公路项目。该工程段中的峡口隧道、石门

垭隧道和郑家垭隧道都是长度大于 3 500 m、最大埋深达到 1 000 m 以上的大埋深特长隧道, 这些隧道的围岩 50%以上为软弱的粉砂质泥岩、泥质灰岩、页岩等, 是典型的高地应力软岩隧道。对于这样的大埋深软岩隧道与一般硬岩围岩隧道不同, 其围岩变形的时效性明显, 很难仅仅依靠初期支护来控制围岩的变形趋于稳定^[4-6], 文献[6]通过对乌鞘岭隧道的现场试验研究发现, 在高地应力软岩隧道中, 二次衬砌必须适时及早施做, 使二次衬砌分担部分

收稿日期: 2010-08-01

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 40772184)。

第一作者简介: 陈卫忠, 男, 1968 年生, 教授, 主要从事地下工程方面的教学与科研工作。E-mail: wzchen@whrsm.ac.cn

荷载,而且及早施做二次衬砌的做法并不是孤立的,需要与初期支护和二次衬砌之间设置变形预留变形层相结合。初期支护和二次衬砌之间施做变形预留变形层的主要目的是吸收隧道围岩流变变形,降低二次衬砌上的变形压力,保证隧道的长期稳定,这就要求预留变形层的填充材料,一方面要具有较强的吸收变形能力;另一方面其在变形之后还需要具有一定整体性。泡沫混凝土是一种新型的节能型建筑材料,其特点是质轻多孔,变形能力强,当在其中加入纤维材料后,可以进一步增强其延性,是理想的预留变形层填充材料。本文通过对特定配合比下泡沫混凝土的力学性能的试验研究,分析了其变形破坏的特点,并将其应用到宜巴高速公路的深埋软岩隧道之中,通过数值模拟分析了其在吸收围岩变形和改善二次衬砌受力的效果,为深埋软岩隧道的支护型式提供了一个新思路。

2 泡沫混凝土力学特性试验研究

泡沫混凝土^[8]是利用机械方式将发泡剂(水溶液)制作成泡沫,再将泡沫混入到硅质材料(砂、粉煤灰)、钙质材料(水泥、石灰)等以及各种外掺料和水组成的混合料在泥浆中搅拌,在搅拌过程中,硬质颗粒粘附到泡沫的外壳,使其变为相互隔开的单个气泡,这些气泡的存在增大了泡沫混凝土的压缩性,如图1所示。但由于泡沫混凝土中大量气泡的存在,一般的泡沫混凝土产品存在着收缩性大、易吸水、容易开裂等缺陷。为了克服泡沫混凝土的上述缺陷,笔者在制作混凝土的过程中加入了防水剂和纤维等外加剂以增强其防水和延性性能。

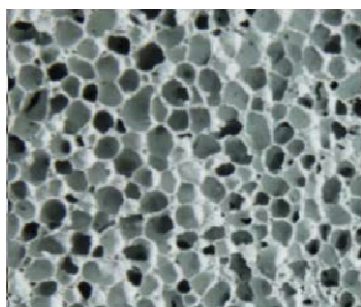


图1 泡沫混凝土中的气泡
Fig.1 Air bubble in foam concrete

本文对特定配合比下泡沫混凝土进行了单轴以及三轴静水压缩试验研究。泡沫混凝土的单轴试验结果如图2所示,从图中可以看出,由于泡沫混凝土中气泡的存在使其强度和变形模量均明显地低于普通混凝土,强度只有3 MPa左右,但泡沫混凝土

的脆性明显降低,延性明显增强,在达到峰值强度之后,其轴向变形持续增加,但并没有发生整体破坏(如图3所示),这主要是因为泡沫混凝土添加的纤维材料,将骨料连接为一个整体,使其在较大变形之后,仍具有一定的残余强度。

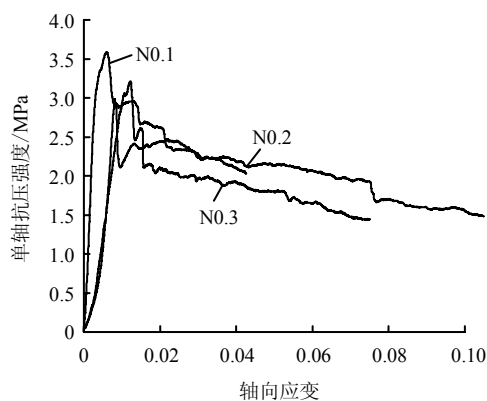


图2 泡沫混凝土单轴试验结果
Fig.2 Uniaxial test results of foam concrete

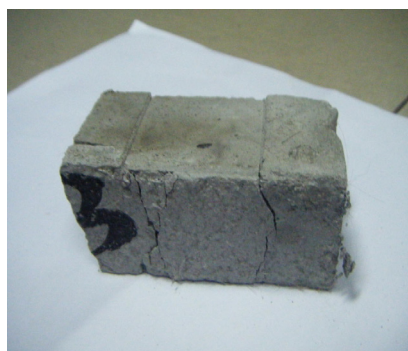


图3 泡沫混凝土单轴破坏形态
Fig.3 Destroyed pattern of uniaxial test of foam concrete

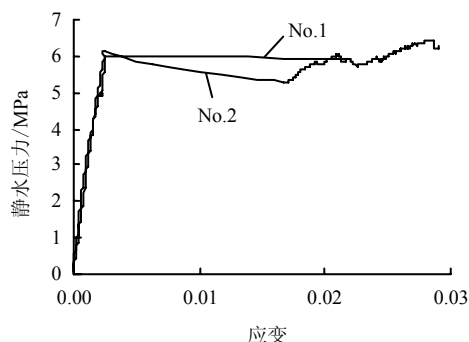


图4 泡沫混凝土静水压缩试验曲线
Fig.4 Hydrostatic compression test results of foam concrete

此外,泡沫混凝土材料还具有在静水压力下容易屈服的特性,其在静水压力下的应力-应变曲线如图4所示,从图中可以看出,当静水压力为6.2 MPa

时，泡沫混凝土即进入塑性屈服状态。屈服后的泡沫混凝土试件如图 5 所示，可以看出，在静水压力作用下，虽然试样没有发生整体破坏，但其体积压缩明显，这再次说明了泡沫混凝土良好的延性特性，此外需要说明是，由于端部效应的影响，静水破坏时泡沫混凝土试样中部的压缩量略大于两端。



图 5 泡沫混凝土静水压破坏形态

Fig.5 Destroyed patterns of hydrostatic compression test

从泡沫混凝土的试验研究结果可以看出，泡沫混凝土具有良好的变形能力和延性，且变形后一般不会出现整体破坏是一种理想的隧道预留变形层填充材料。本文结合宜巴高速的深埋软岩隧道，对泡沫混凝土预留变形层对深埋软岩隧道长期稳定性的影响做进一步的分析。

3 泡沫混凝土预留变形层对隧道长期稳定影响分析

3.1 工程概况

宜巴高速公路东起宜昌市夷陵区龙泉镇，西接沪蓉高速重庆巫山段，全长 173.614 km，路线区地势复杂，地形起伏变化大，因此，需要修建数条特长隧道，其中的峡口隧道长为 6 458 m、石门垭隧道长为 7 525 m 和郑家垭隧道长为 3 850 m，而且这些隧道的埋深一般都在 1 000 m 以上，隧道洞身经过区域的地应力在 30 MPa 左右，有的地方更是达到了 40 MPa 以上。此外，该区的围岩泥质含量较高，强度较低，单轴抗压强度在 20 MPa 以下，而且该类岩石遇水后具有明显的膨胀性，容易开裂，强度会进一步降低，现场遇水膨胀开裂后的岩石如图 6 所示。对于这种软化系数接近 1 的隧道，在建设过程中除了要注意隧道开挖产生的瞬时大变形之外，还要对隧道围岩的流变变形给予足够的重视。

为了分析宜巴高速公路围岩的流变变形特点，本文对现场取的岩样进行了围压为 30 MPa 的室内蠕变试验研究。其典型的蠕变试验曲线如图 7 所示，从图中可以看出，该岩石在偏应力作用下具有明显

的流变特性，当偏应力较低时，蠕变主要以衰减蠕变和稳定蠕变为主，当偏应力大于 60 MPa 之后，围岩产生了明显的加速蠕变，其蠕变速率的变化如图 8 所示。试样最终的蠕变变形约占总变形的 50%，因此，必须采用合理的隧道支护型式来应对隧道蠕变变形的发展。



(a) 崩解前 (b) 崩解后

图 6 现场岩石的遇水崩解

Fig.6 Disintegration of surrounding rock

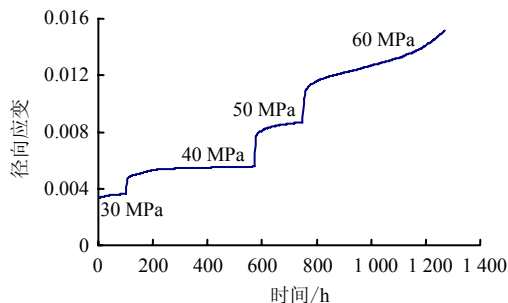


图 7 围岩室内三轴蠕变试验结果

Fig.7 Triaxial creep test result of surrounding rock

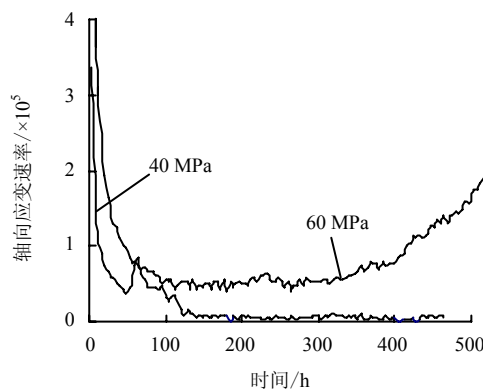


图 8 不同偏应力下蠕变速率比较

Fig.8 Comparison of creep rates of different deviatoric stresses

3.2 围岩蠕变损伤模型及其参数确定

从现场取样的室内蠕变试验结果可以看出，围岩整个蠕变过程包括衰减蠕变、稳定蠕变和加速蠕变 3 个过程，而传统的幂函数蠕变模型不能反映加速蠕变过程，本文通过引入一个与累积蠕变应变相关的损伤因子来反映蠕变过程中的非线性。

假设总的蠕变变形 ε_c 可以表示为： $\varepsilon_c = \varepsilon_t + \varepsilon_s + \varepsilon_d$ ，其中 ε_t 为瞬态蠕变， ε_s 为稳态蠕变， ε_d 为损伤引起的蠕变。对于瞬态蠕变和稳态蠕变可以用幂函数模型来表示即：

$$\varepsilon_t + \varepsilon_s = \frac{A(\sigma_{eq})^n t^{m+1}}{m+1} \quad (1)$$

式中： σ_{eq} 为蠕变等效力，在三轴试验中 $\sigma_{eq} = \sigma_1 - \sigma_3$ ， m, n 为材料常数。

而对于损伤引起的蠕变 ε_d 可以表示为： $\varepsilon_d = \frac{D_c(\varepsilon_t + \varepsilon_s)}{1 - D_c}$ ，其中 D_c 为蠕变损伤，很多的蠕变试验都表明^[9-11]，蠕变损伤与累积蠕变应变密切相关，本文假设蠕变损伤 D_c 与累积蠕变应变 $\bar{\varepsilon}_c$ 满足指数函数关系：

$$D_c = 1 - \exp(-\alpha \bar{\varepsilon}_c) \quad (2)$$

由此，建立了围岩的蠕变损伤方程可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_c &= \frac{A(\sigma_{eq})^n t^{m+1}}{(m+1)(1-D_c)} \\ D_c &= 1 - \exp(-\alpha \bar{\varepsilon}_c) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

为了验证上述蠕变损伤模型的合理性，本文采用最小二乘法对试验数据进行拟合，拟合的结果如图 9 所示，可以看出，该蠕变损伤模型可以较好地反映出围岩蠕变变形的非线性阶段，拟合得到的材料参数见表 1。

表 1 围岩蠕变参数

Table 1 Creep parameters of surrounding rock

A	n	m	α
1.4408×10^{-5}	0.383	-0.833	87.231

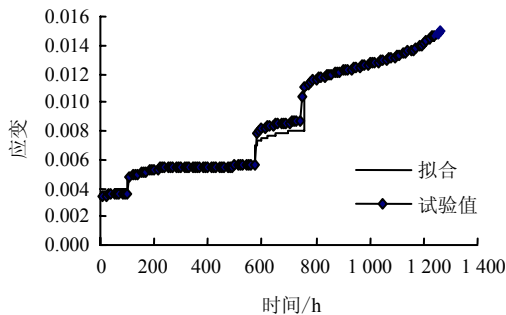


图 9 试验数据与拟合数据比较

Fig.9 Numerical fitting results of creep test

3.3 泡沫混凝土材料模型的选取

泡沫混凝土的试验研究表明，它具有典型的静水压缩破坏的特性，因此，传统的摩尔-库仑模型屈

服准则不能应用到泡沫混凝土中。本文采用 ABAQUS 中的 crushable foam^[12]材料模型来模拟泡沫混凝土的屈服，该模型适用于体积硬化材料，其屈服函数为

$$F = \sqrt{q^2 + \alpha^2(p - p_0)^2} - B = 0 \quad (4)$$

式中： p 为静水压力； q 为 Mises 应力； α 和 B 为材料参数。其屈服函数在 p - q 面上为一椭圆形，如图 10 所示。该模型的基本参数有：屈服压应力系数为 $K = \frac{\sigma_c^0}{p_c^0}$ ，屈服静水压力系数为 $K_t = \frac{p_t}{p_c^0}$ ，其中， σ_c^0 为初始单轴抗压强度； p_c^0 为初始静水抗压强度； p_t 为静水抗拉强度，根据室内试验结果具体的力学参数如表 2 所示。

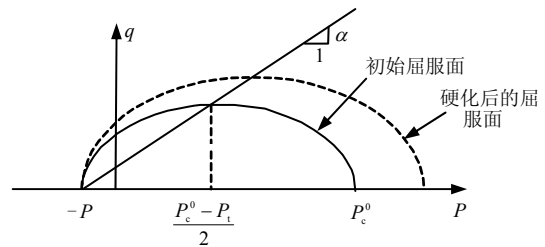


图 10 crushable foam 材料屈服面
Fig.10 Yield surface of crushable foam

表 2 泡沫混凝土材料参数表

Table 2 Mechanical parameters of foam concrete

弹性模量 /GPa	泊松比	干密度 /(g/cm ³)	K^0	K^t	单轴抗压强度 /MPa
0.62	0.41	720	0.48	0.1	3.0

3.4 计算方案

根据宜巴高速公路的现场情况，本次计算选择的隧道埋深为 1 000 m，侧压力系数取为 1.0。为了分析泡沫混凝土预留变形的效果，本文采用两种支护方案：方案 1：无预留变形层的刚性支护方案，初期喷射混凝土厚度为 25 cm，二次衬砌厚度为 75 cm；方案 2：有预留变形层的柔性支护方案，初期喷射混凝土厚度为 25 cm，泡沫混凝土预留变形层厚度为 30 cm，二次衬砌厚度为 45 cm，如图 11 所示，支护结构的力学参数如表 3 所示。

数值模拟共由 4 步完成，①进行地应力平衡得到围压的初始应力场；②隧道开挖，施工喷射混凝土和锚杆，根据经验，初期支护承担开挖释放荷载的 60%，其余由围岩承担；③待变形稳定后，施做

二次衬砌；④对围岩进行流变计算，计算时间为 50 年。

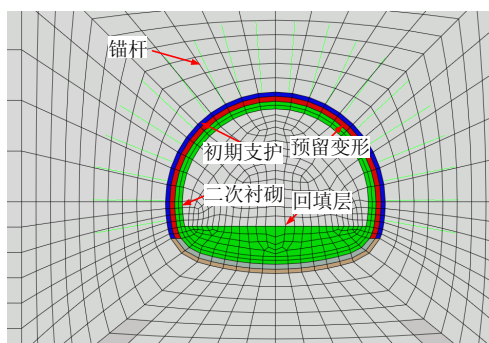


图 11 方案 2 预留变形层设置形式
Fig.11 Preset deformations layer in scheme 2

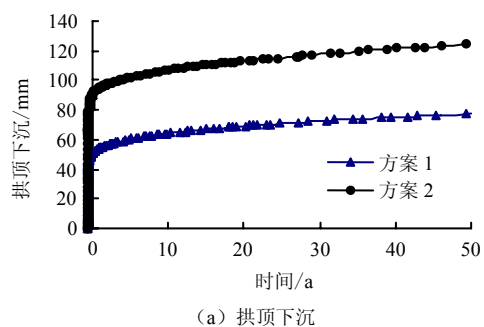
表 3 围岩及支护材料力学参数表
Table 3 Mechanical parameters of rock and lining

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	密度 /(g/cm^3)
围岩	3	0.3	2.47	32	2.69
混凝土	30	0.17	16.99	58.7	2.50

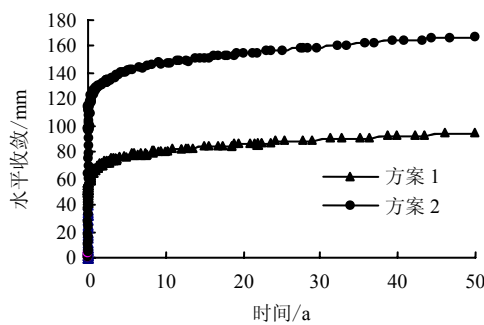
4 计算结果分析

高地应力软岩隧道，在二次衬砌施工完成之后，随着时间的延续，隧道围岩会出现明显的蠕变变形，如图 12 所示，可以看出两种支护方案下，围岩都出现了较大的蠕变变形：方案 1 的拱顶下沉达到了 77 mm，水平收敛达到了 93 mm，方案 2 的拱顶下沉为 124 mm，水平收敛为 167 mm。从图中还可以看出，围岩的蠕变变形速率在隧道修建之初的前三年之内较大，该时间段内围岩产生的蠕变变形占总的蠕变变形的 80%以上，随后围岩的蠕变速率趋于稳定，拱底下沉和水平收敛约为 0.20 mm/a。

根据上文建立的蠕变损伤模型，可以得到隧道开挖之后围岩的蠕变损伤区，如图 13 所示。从图中可以可出，隧道周边蠕变损伤较大，围岩内部的损伤值较小，这与隧道的监测数据相符，从蠕变损伤区的范围来看，方案 1 虽然加大了二次衬砌的厚度，但并没有很好地限制住围岩蠕变变形的发展，在隧道的周边形成了一定范围的蠕变损伤区；方案 2 采用了相对刚度较低的支护参数，预留变形层允许围岩产生一定的蠕变变形，因此，其蠕变损伤区域较方案 1 略大，但蠕变损伤区域仍然控制在 1.5 倍的洞径范围之内。

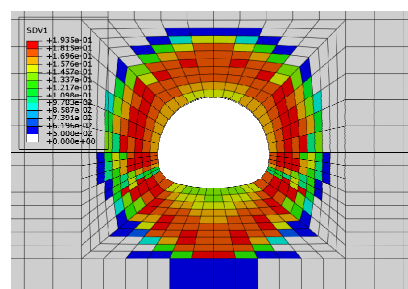


(a) 拱顶下沉

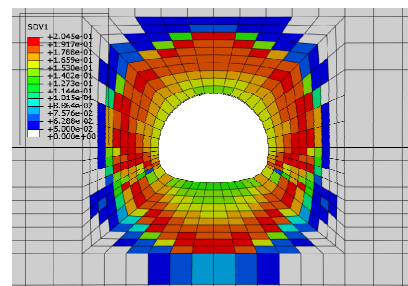


(b) 水平收敛

图 12 两种方案下围岩变形随时间的变化
Fig.12 Variations of creep deformations of surrounding rock in two schemes



(a) 方案 1



(b) 方案 2

图 13 两种方案下围岩蠕变损伤区
Fig.13 The creep damage zone of surrounding rock in two schemes

根据软岩隧道支护的基本原理^[13]，隧道支护的工程力 $P_S = P_T - (P_D + P_R)$ ，其中 P_T 为隧道开挖后围岩向临空区运动的合力， P_D 围岩以变形形式转化掉的工程力， P_R 为围岩的自承力。因此，在保证围岩

的蠕变损伤区域在可控范围之内, 的情况下, 允许围岩产生一定流变变形, 可以极大地改善支护结构的受力, 减小其变形。

两种支护方案下二次衬砌的变形如图 14 所示, 从图中可以看出, 二次衬砌的变形与围岩的蠕变规律基本一致, 说明在高地应力的软岩隧道中二次衬砌的主要作用就是承担围岩的蠕变变形产生工程力。方案 2 在初衬与二衬之间添加了变形内力较强的泡沫混凝土, 允许围岩产生一定蠕变变形, 使变形转化的工程力明显增大, 因此其变形明显的小于方案 1, 从量值上看, 拱顶下沉减少了 52.6%, 水平收敛减少了 71.5%。为了进一步说明泡沫混凝土对减小二次衬砌变形的影响, 本文还对 10 cm 和 20 cm 泡沫混凝土预留变形层进行了计算, 计算的结果如表 4 所示, 可以看出当采用 30 cm 泡沫混凝土预留变形时, 二次衬砌的变形最小。

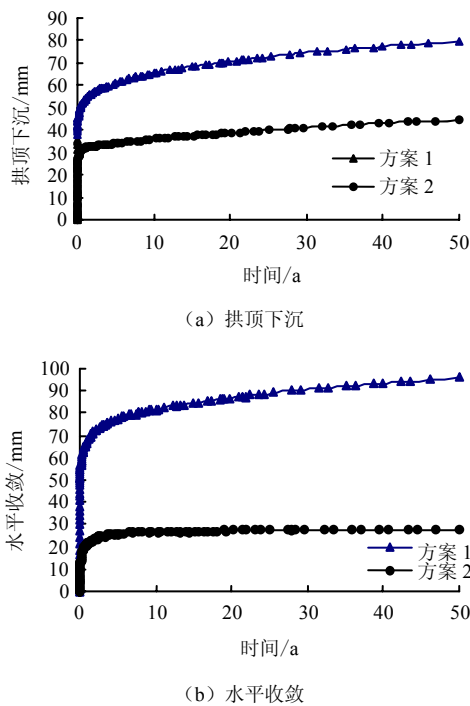


图 14 两种方案下二次衬砌变形随时间的变化
Fig.14 Variations of deformations of secondary lining in two schemes

表 4 不同厚度泡沫混凝土计算结果

Table 4 Results for different depths of foam concrete

泡沫混凝土 厚度/cm	围岩变形/mm		二次衬砌变形/mm	
	拱顶下沉	水平收敛	拱顶下沉	水平收敛
0	77	93	79	95
10	97	126	75	76
20	114	158	59	36
30	124	167	44	27

此外, 支护结构所能承受的工程力是有限的, 如支护形式不合理会导致衬砌结构的开裂和破坏。在本次计算过程中, 方案 1 虽然增大了二次衬砌的厚度和支护刚度, 但由于围岩蠕变变形压力没有得到有效的释放, 二次衬砌在拱腰以及拱脚的位置出现了较大的塑性破坏区; 方案 2 虽然二次衬砌的支护厚度较小, 但由于泡沫混凝土预留变形层对围岩流变变形的吸收作用, 减小了二次衬砌结构的受力, 只是在拱脚应力集中的区域产生了较小的塑性区如图 15 所示。

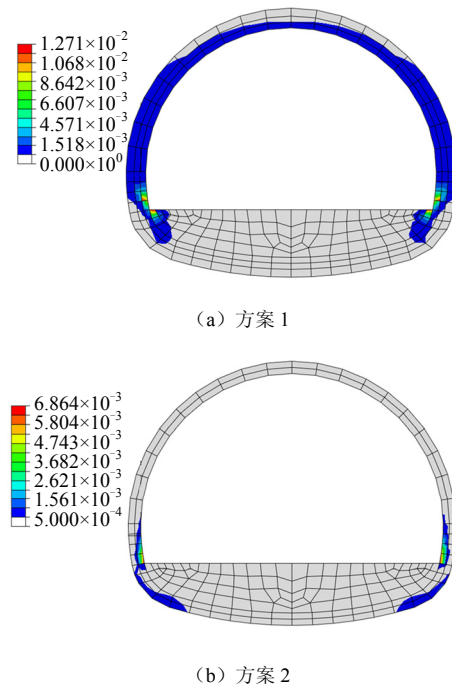


图 15 两种方案下二次衬砌塑性区分布
Fig.15 Distributions of plastic zone of secondary lining in two schemes

5 结 论

(1) 泡沫混凝土材料与传统的混凝土相比, 其脆性明显降低, 压缩性和变形能力明显增强, 当在泡沫混凝土中加入纤维材料后, 由于纤维材料对骨料的连接作用, 使泡沫混凝土在发生较大的变形之后, 仍然保持为一整体, 不发生整体破坏, 具有一定的残余强度, 因此, 是一种良好的隧道预留变形层填充材料, 具有广阔的工程应用前景;

(2) 通过泡沫混凝土预留变形层对宜巴高速公路深埋软岩隧道长期稳定性的研究发现, 在高地应力软岩隧道中, 隧道开挖之后会产生较大的蠕变变形, 仅仅采用增加二次衬砌厚度的支护方案, 很容易由于围岩流变变形压力的增大导致衬砌结构的破

坏, 通过在二次衬砌与初期支护之间设置具有较高变形能力的泡沫混凝土预留变形层, 可以很好地吸收围岩的流变变形压力, 改善结构受力, 保证衬砌结构的长期稳定;

(3) 对于宜巴高速公路埋深在 1 000 m 左右的高地应力软岩隧道而言, 当采用厚度为 30 cm 的泡沫混凝土预留变形层时, 50 年后拱底下沉控制在 44 mm, 水平收敛控制在 27 mm, 可以满足隧道长期安全运营的要求。

参 考 文 献

- [1] 李光令, 王兵. 鹫鸪山隧道塌方处理技术研究[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(6): 70—73.
LI Guang-ling, WANG Bing. Collapse treatment measures in Zhegushan tunnel[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2003, 40(6): 70—73.
- [2] 张文强, 王庆林, 李建伟, 等. 木寨岭隧道大变形控制技术[J]. 隧道建设, 2010, 30(2): 157—161.
ZHANG Wen-qiang, WANG Qing-lin, LI Jian-wei, et al. Case study on large deformation control technology of Muzhailing Tunnel[J]. *Tunnel Construction*, 2010, 30(2): 157—161.
- [3] 雷军, 张金柱, 林传年. 乌鞘岭特长隧道复杂地质条件下断层带应力及变形现场监测分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1367—1371.
LEI Jun, ZHANG Jin-zhu, LIN Chuan-nian. Analysis of stress and deformation site-monitoring in fault zone of Wuqiaoling tunnel under complex geological conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1367—1371.
- [4] 刘志春, 李文江, 孙明磊, 等. 乌鞘岭隧道F4断层区段监控量测综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1502—1511.
LIU Zhi-chun, LI Wen-jiang, SUN Ming-lei, et al. Monitoring and comprehensive analysis in F4 section of Wuqiaoling tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(7): 1502—1511.
- [5] 晏启祥, 何川, 姚勇. 软岩隧道施工特性及其动态力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 572—577.
YAN Qi-xiang, HE Chuan, YAO Yong. Study on construction characteristic and dynamic behavior of soft rock tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(3): 572—577.
- [6] 刘志春, 李文江, 朱永全, 等. 软岩大变形隧道二次衬砌施作时机探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 580—588.
LIU Zhi-chun, LI Wen-jiang, ZHU Yong-quan, et al. Research on construction time of secondary lining in soft rock of large-deformation tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3): 580—588.
- [7] 张宇, 伍晓军, 何川. 位移向量方位趋势线在乌鞘岭隧道工程中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1448—1456.
ZHANG Yu, WU Xiao-jun, HE Chuan. Study on application of displacement vector orientation trend line to Wuqiaoling tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(7): 1448—1456.
- [8] 张磊, 杨鼎宜. 轻质泡沫混凝土的研究及应用现状[J]. 混凝土, 2005, (8): 44—48.
ZHANG Lei, YANG Ding-yi. State of study and application of lightweight foam concrete[J]. *Concrete*, 2005, (8): 44—48.
- [9] 陈锋, 杨春和, 白世伟. 盐岩储气库蠕变损伤分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 945—949.
CHEN Feng, YANG Chun-he, BAI Shi-wei. Investigation on creep damage of natural gas storage in salt rock layer[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(6): 945—949.
- [10] 陈卫忠, 王者超, 伍国军. 盐岩非线性蠕变损伤本构模型及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 467—472.
CHEN Wei-zhong, WANG Zhe-chao, WU Guo-jun. Nonlinear creep damage constitutive model of rock salt and its application to engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 467—472.
- [11] 贾善坡. Boom clay 泥岩渗流应力损伤耦合流变模型、参数反演与工程应用[D]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 2009.
- [12] ABAQUS. ABAQUS analysis user's manual[M]. U.S.: ABAQUS Inc., 2003.
- [13] 何满朝, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.