

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201809144

管片衬砌配合碎石可压缩层与锚杆的支护型式研究

刘方¹, 胡雄玉², 高峰¹

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室 成都 610031)

摘要: 针对深埋地层中修建盾构隧道, 特别是围岩表现蠕变特性, 研究一种管片衬砌配合压缩层与锚杆的联合支护技术. 采用有限差分与离散元的耦合计算方法, 进行了管片衬砌壁后注浆、管片衬砌壁后填充碎石可压缩层、管片衬砌配合碎石可压缩层和高强预应力锚杆的支护效果对比研究. 从围岩塑性区发展、沉降随时间变化、管片衬砌弯矩和轴力分析了联合支护效果. 从碎石可压缩层的压缩变形路径、锚固围岩的位移矢量等角度揭示了联合支护的细观作用机理. 研究表明: 仅采取管片衬砌配合碎石可压缩层的让压支护手段无法维持管片衬砌的长期稳定; 联合支护结构型式既可以提高围岩自身承载能力, 也能够有效吸收围岩的蠕变变形. 联合支护的作用机理由两部分构成: 碎石可压缩层的让压作用与高强预应力锚杆加固围岩作用. 其中, 碎石可压缩层的让压机理主要通过颗粒间相互嵌挤和错动移位作用调减管片衬砌壁后接触力; 高强预应力锚杆的加固机理是由锚杆形成的锚固区控制了蠕变变形的过大发展. 研究结果对未来盾构工法修建深部高地应力、强蠕变隧道的支护型式设计具有一定参考价值.

关键词: 盾构隧道; 联合支护; 碎石可压缩层; 高强预应力锚杆

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)11-0055-08

Study on a new type of support structure of segment lining combined with compressible crushed stone and anchor bolt

LIU Fang¹, HU Xiongyu², GAO Feng¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074 China; 2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031, China)

Abstract: A new type support structure combined with compressible crushed stone and high-strength pre-stressed anchor cable is proposed which is suitable for deep inclined shaft construction using shield method with great depth. Different conditions in terms of liner combined with crushed stone and high-strength pre-stressed anchor were simulated. The effect of the combined support was studied by analyzing the plastic zone development of surrounding rock, convergence of surrounding rock and internal force of segmental lining. Moreover, the support mechanism of combined support was revealed from movement characteristics of the crushed stone and displacement vector of the anchored surrounding rock. The results show that only the yielding effect of crushed stone cannot promise the safety of the liner, especially when the creep effect of surrounding rock was considered. The combined support can not only improve the bearing capacity of the surrounding rock, but also effectively absorb the creep deformation of the surrounding rock. The support mechanism of combined support consists of two parts: the yielding effect of crushed stone and surrounding rock reinforcement of anchor cable. The yielding effect of crushed stone was attributed to the mutual squeezing effect and movement effect, while the support mechanism of anchor cable was attributed to reinforcement effect of anchor cable on the surrounding rock. The results have a certain reference value for the design of support structure of shield constructing deep tunnel in the future.

Keywords: shield tunnel; combined support; compressible crushed stone; anchor cable

近年来随着经济发展和工业制造水平的提高, 深部地下空间利用效率不断提高. 跨江越海通道和矿产资源的采掘斜井逐渐采用盾构工法修建. 盾构工法以其施工速度快、安全性高著称. 隧道进入深部

地层, 其围岩条件有别于浅部地层, 主要体现在地应力高、围岩的各向异性和蠕变特征明显, 易形成过大围岩压力, 造成隧道衬砌大变形甚至失效. 盾构隧道以装配式衬砌为支护手段, 衬砌随掘进同步拼装, 围岩应力释放少, 在大理深条件下其衬砌结构必然要面临高地应力和围岩蠕变的威胁.

对于深部巷道支理论国内外学者积累了大量经验, 何满潮等^[1]采用耦合支护方法应对巷道大变形, 即耦合支护手段要具备一定的柔性以适应围岩

收稿日期: 2018-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(51778095)

作者简介: 刘方(1981—), 男, 博士研究生, 高级工程师;

高峰(1964—), 男, 博士生导师

通信作者: 高峰, 106014196@qq.com

大变形,同时要具备一定的刚度以抵抗变形;冯豫等^[2]通过对软岩巷道支护现状的研究发现,软岩巷道的支护要符合先柔后刚,刚柔相济的原则;孙钧^[3]等认为软岩巷道只重视卸压,其支护效果甚微.强调卸压到一定程度要采用强力支护的重要性;黄万朋^[4]通过分析巷道的蠕变特性,认为高地应力下存在蠕变特征的巷道,其支护方法要从改善围岩的应力状态入手;孙晓明等^[5]通过对大量深部软岩巷道支护效果分析,同时结合围岩变形和破坏机制,认为深部巷道应该采用预留刚柔层的支护技术;贾宝山^[6]针对深埋蠕变巷道,提出卸压支护方式,并确定了卸压支护参数;齐春等^[7]研究了可压缩层与围岩直接接触效应,采用数值模型分析可压缩层的存在及参数变化对衬砌结构内力的影响;胡雄玉等^[8-9]针对深部层状围岩中隧道结构易受偏压,出现非对称变形的现象,采用模型试验方法研究陶粒配合锚杆的支护方式对偏压效应的削减效果;Barla^[10]针对大理深下的软岩隧道支护难的问题,提出采用钢拱架配合可压缩性混凝土的联合支护型式;Anagnostour^[11-12]针对高地应力下软岩隧道支护问题,提出了在衬砌径向和环向施加可压缩型材料或者器件单元的两种支护方式型式;Cantien^[13]同样针对高地应力挤压地层中修建隧道的支护问题进行了大量的数值分析,认为让压支护结构的屈服应力不是越小越好,而应接近支护结构的屈服应力.

综上所述,深部巷道支护原则主要是先柔后刚、先让后抗、柔让适度、刚柔相济,具体做法为:提高围岩自身承载能力,允许围岩产生一定的变形量,当围岩变形到一定程度时采用强支护.

本文针对盾构工法修建深部隧道所面临的挑战,借鉴传统工法的支护原则提出了管片衬砌配合碎石可压缩层与高强预应力锚杆的新型支护型式.其具体做法及支护思想为:首先沿洞周布置高强预应力注浆锚杆,以锚杆主动加固围岩,充分利用围岩承载力;其次在管片衬砌壁后空隙充填碎石散粒体吸收围岩应变能;最后管片衬砌安装在围岩外侧,发挥被动支撑作用来稳定围岩.着重分析了高地应力考虑围岩蠕变作用下管片衬砌、碎石层和高强预应力锚杆不同组合下围岩塑性区分布、位移以及管片衬砌的受力特征.分析管片衬砌配合碎石可压缩层与高强预应力锚杆的联合支护效果.

1 蠕变试验

针对某深埋盾构工程现场泥岩进行单轴压缩蠕变试验,以期得到不同加载下的流变特征,如图 1 所示.由图可见,泥岩试样在每一级应力条件下,均由

初始的蠕变衰减阶段逐渐转变为蠕变速率恒定的稳定蠕变阶段,且在最后一级荷载时出现加速蠕变阶段.随着应力水平的增加,泥岩的蠕变速率逐渐增大,说明在较高应力水平下,泥岩呈现的蠕变特性更加显著,产生更多的蠕变变形.在应力水平较低时,泥岩在短时间内即达到峰值,以瞬时变形为主,持续蠕变的变形量较小,随着时间的推移,蠕变变形速率逐渐收敛,变形速率最终趋近于零,蠕变变形量逐渐为定值;在应力水平较高时,泥岩在较长一段时间内保持蠕变变形速率不变,蠕变变形量以线性增加,稳定蠕变阶段持续时间越来越短;当达到最后一级应力时,泥岩的蠕变速率快速增大,瞬时变形显著减小,以蠕变变形为主.

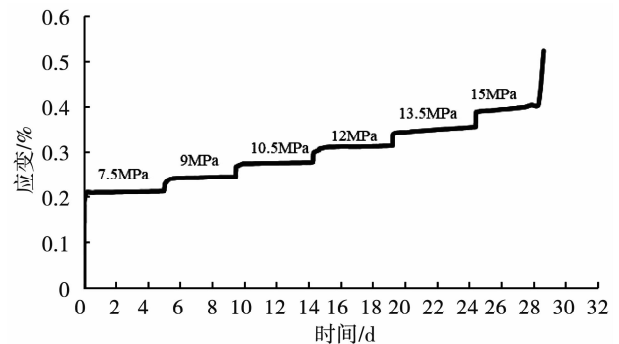


图 1 不同应力水平下泥岩的蠕变曲线

Fig. 1 Creep curves of mudstone under different stress levels

2 支护型式分类

为研究管片衬砌配合碎石可压缩层与锚杆的联合支护型式作用效果.设置管片衬砌背后注浆和管片衬砌配合“碎石可压缩层”两类支护型式予以对比.3种支护结构型式如图 2 所示.衬砌内径为 6.6 m,厚度 35 cm.采用 C40 混凝土浇筑.围岩及管片衬砌结构的物理力学参数如表 1 所示^[14].地应力条件为竖向应力 15.0 MPa,水平应力 20.0 MPa^[14].

表 1 岩体和衬砌力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of the surrounding rock and liner

名称	弹性模量 /GPa	密度 /kg/m ³	摩擦角 /°	粘聚力 /MPa	泊松比
岩体	10.0	2 320.4	32.0	4.0	0.21
管片衬砌	32.5	2 500.0	-	-	0.20

3 工况分类

为全面对比 3 种不同支护结构型式,进行如下工况研究:管片衬砌壁后压注不可压缩的水泥砂浆;管片衬砌壁后填充密实度为 0.55 的碎石可压缩层

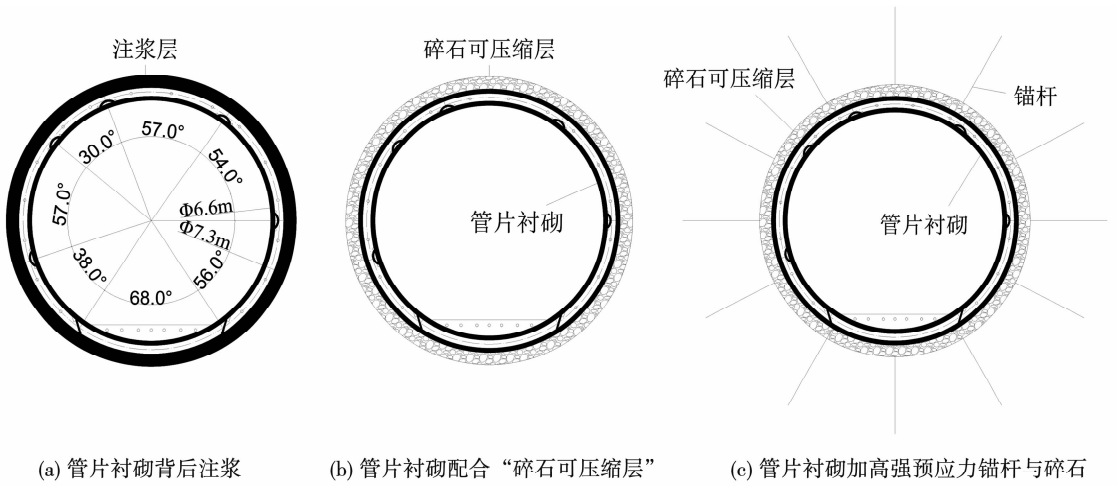


图 2 支护结构型式设计

Fig. 2 Design drawings of support structure

(粒径 5 ~ 10 mm 碎石的密实度一般 0.55 ~ 0.96^[15]), 填充厚度取 20 cm、40 cm、60 cm、80 cm 4 种类型; 管片衬砌配合碎石可压缩层与高强预应力锚杆, 其中锚杆长度 2.4 m, 环向间距 0.6 m, (IV、V 类围岩巷道(净跨度 5 ~ 10 m)中, 长度 2.0 ~ 2.4 m 的锚杆应用广泛, 锚杆间距 0.6 ~ 0.8 m^[16]). 单个管片宽度为 1.8 m, 锚杆的排距为 1.8 m, 碎石填充层的厚度仍按照 20 cm、40 cm、60 cm、80 cm. 具体支护工况如表 2 所示.

4 数值分析

4.1 计算模型

数值分析采用 FLAC^{2D} 和 PFC^{2D} 耦合模型. 其中, 碎石填充层采用 PFC^{2D} 中的颗粒单元模拟, 围岩、注浆层、锚杆和衬砌分别采用 FLAC^{2D} 实体单元、cable

单元和梁单元模拟. 不同支护工况的数值模型如图 3 所示, 模型半径 R 为 40 m.

表 2 工况分类

Tab. 2 Classification of calculation

编号	支护结构型式
A1	管片衬砌壁后填充 20 cm 碎石
A2	管片衬砌壁后填充 40 cm 碎石
A3	管片衬砌壁后填充 60 cm 碎石
A4	管片衬砌壁后填充 80 cm 碎石
B1	管片衬砌壁后填充 20 cm 碎石 + 锚杆
B2	管片衬砌壁后填充 40 cm 碎石 + 锚杆
B3	管片衬砌壁后填充 60 cm 碎石 + 锚杆
B4	管片衬砌壁后填充 80 cm 碎石 + 锚杆
C	管片衬砌壁后注浆

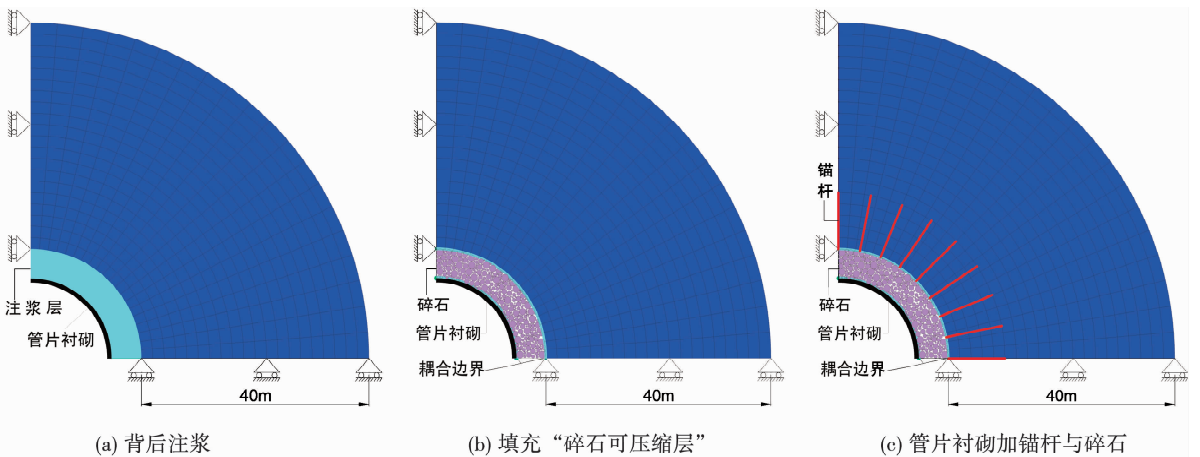


图 3 数值模型

Fig. 3 Numerical models

4.2 计算参数

数值模型中围岩采用 Cvisc 蠕变模型, 蠕变模

型见图 4 所示, 通过对泥岩的流变曲线进行参数识别得到的蠕变参数如表 3 所示. 碎石层在 PFC^{2D} 中

的细观参数^[14]如表 4 所示. 锚杆的预应力为 130 kN. 注浆体、碎石和锚杆的相关参数见表 5 ~ 6.

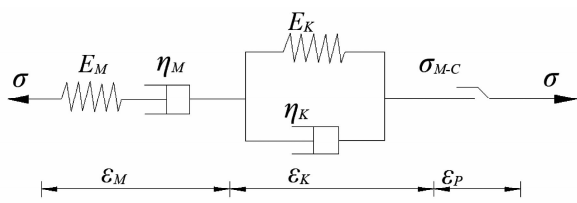


图 4 Cvisc 蠕变模型
Fig. 4 Cvisc creep model

蠕变模型相应的方程为：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_M} + \left(\frac{\sigma}{\eta_M} \right) t + \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K} t} \right) + \varepsilon_p \quad (1)$$

式中： ε_p 为塑性变形； E_M 、 η_M 、 E_K 、 η_K 分别为 Maxwell 体和 Kelvin 体的弹性模量与黏滞系数。

表 3 数值模型中围岩的蠕变参数

Tab. 3 Creep parameters of the surrounding rock in simulation model

名称	E_M /GPa	E_k /GPa	η_M /GPa · h	η_k /GPa · h
围岩	1.50	0.86	1.45	2.05

表 4 PFC^{2D}颗粒模型细观参数

Tab. 4 Parameters of crushed stone in PFC^{2D}

密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	法向刚 度/Pa	切向刚 度/Pa	摩擦 因数	粒径比 / R_{\max}/R_{\min}
2 120.0	5.0×10^5	5.0×10^5	0.45	0.50

表 5 壁后填充层的力学参数

Tab. 5 Physico-mechanical parameters of filling layer

名称	弹性模 量/GPa	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^3$)	摩擦 角/ $^\circ$	粘聚力 /MPa	泊松比
注浆	2.00	2 400.0	38.0	5.7	0.20
碎石	0.18	1 780.0	36.0	10.0	0.25

表 6 锚杆参数

Tab. 6 Physico-mechanical parameters of anchor bolt

弹性模量 /GPa	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	长度 /m	直径 /mm
200.0	600.0	800.0	4.0	25.0

5 计算结果

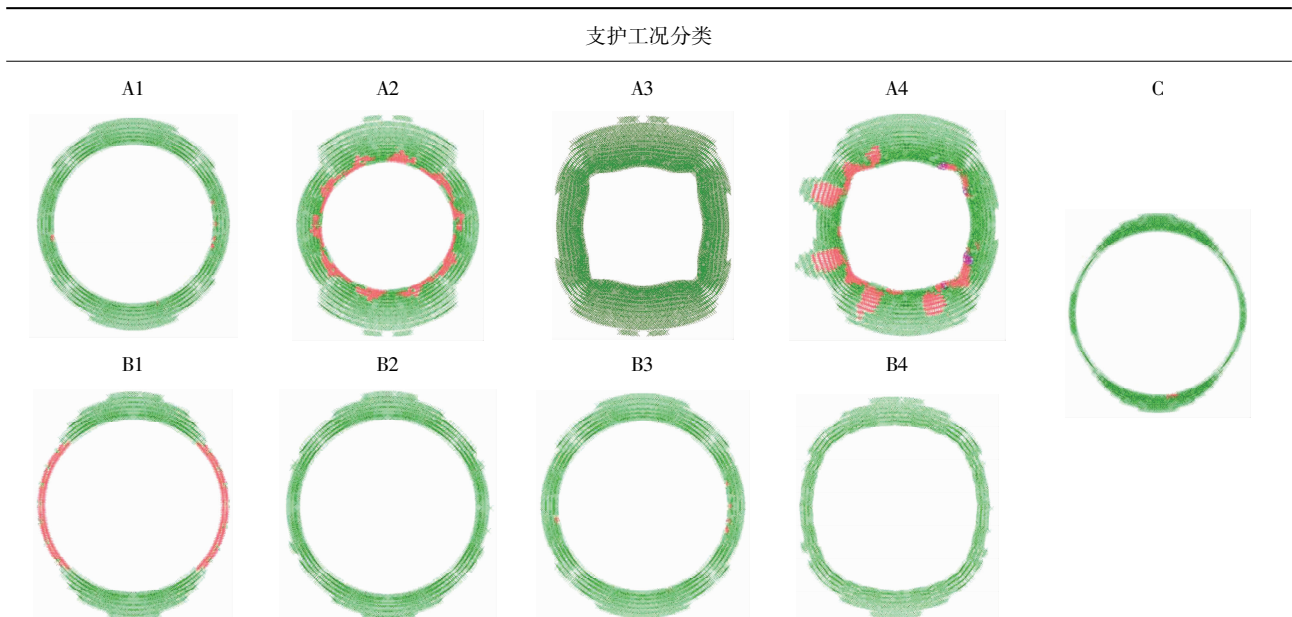
5.1 围岩塑性区分布特征

蠕变计算时间 2.1 年时不同支护工况下洞周围岩塑性区的分布见表 7. 由表可见, 不同支护结构型式下洞周围岩塑性区形状类似, 塑性区主要集中在拱顶与拱底. 对比可见, 不同支护结构型式下洞周围岩塑性区范围有所不同. 其中, 管片衬砌壁后注浆下(工况 C)洞周围岩的塑性区范围最小, 管片衬砌壁后填充 80 cm 碎石(工况 A4)下洞周围岩塑性区范围最大.

具体而言: 碎石填充层厚度越大, 洞周围岩塑性区分布范围越大; 对于特定厚度的碎石填充层, 不同支护结构型式下围岩塑性区也存在很大差异, 以厚度 70 cm 碎石填充层为例: 支护工况 A3 下洞周围岩塑性区范围要明显大于支护工况 B3 下洞周围岩塑性区范围.

表 7 隧道周围岩体的塑性区范围

Tab. 7 Plastic damage zone of surrounding rock around tunnel



5.2 围岩位移

碎石填充层厚度为 40 cm 时 2 种支护结构型式下围岩拱顶沉降量随时间的变化如图 5 所示, 由图可见, 隧道开挖后 2.1 月内围岩蠕变变形速率较高, 大部分蠕变变形在此段时间内完成。

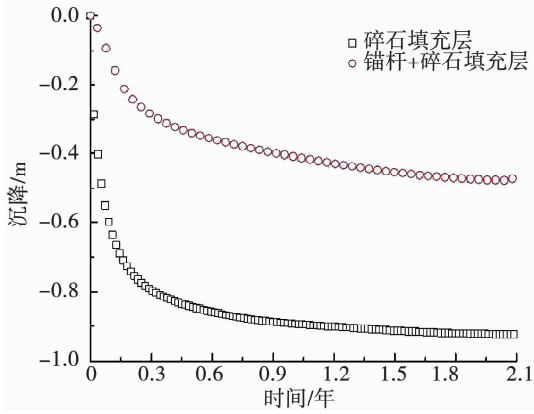


图 5 围岩沉降随时间的变化

Fig. 5 Change of surrounding rock settlement with time

管片衬砌壁后仅填充 40 cm 厚碎石时围岩沉降量稳定值为 9.4 cm, 高强预应力锚杆配合 40 cm 厚碎石层的联合支护结构型式下围岩沉降量稳定值 3.5 cm. 由此可见, 高强预应力锚杆在一定程度上改

善了围岩的蠕变性质, 增强了围岩的抗变形能力, 对抑制围岩变形起到了积极的作用. 高强预应力锚杆配合碎石的联合支护结构型式对围岩的沉降控制要优于碎石填充层的支护结构型式。

5.3 管片衬砌内力

蠕变计算时间为 2.1 年时不同支护工况下管片衬砌弯矩、轴力如图 6 和图 7 所示. 表 8 列出了衬砌弯矩和轴力的具体量值。

由图可见, 支护工况 C 下管片衬砌的弯矩、轴力均最大. 随着碎石填充层厚度增加, 支护工况 A1-A4、B1-B4 下的弯矩和轴力量值均逐渐减小; 对比还可见, 同一种厚度碎石填充层时不同支护结构型式下管片衬砌的弯矩、轴力量值也存在很大差异, 以厚度 60 cm 碎石填充层为例: 支护工况 A3 下管片衬砌的弯矩和轴力值要明显大于支护工况 B3 下管片衬砌的弯矩和轴力值。

综上所述: 管片衬砌壁后填充碎石层下, 其内力量值较壁后注浆下的内力量值小. 表明碎石可压缩层具有良好的让压效应; 碎石可压缩层配合高强预应力锚杆的联合支护型式对管片衬砌内力的改善程度要明显优于只填充碎石可压缩层的支护结构型式, 表明高强预应力锚杆配合碎石可压缩层的联合支护型式兼具了加固围岩与让压效应。

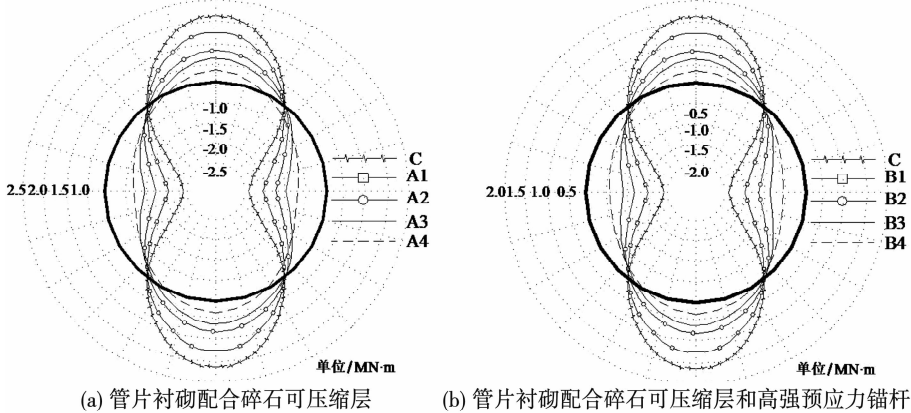


图 6 弯矩分布形式

Fig. 6 Distribution of bending moment

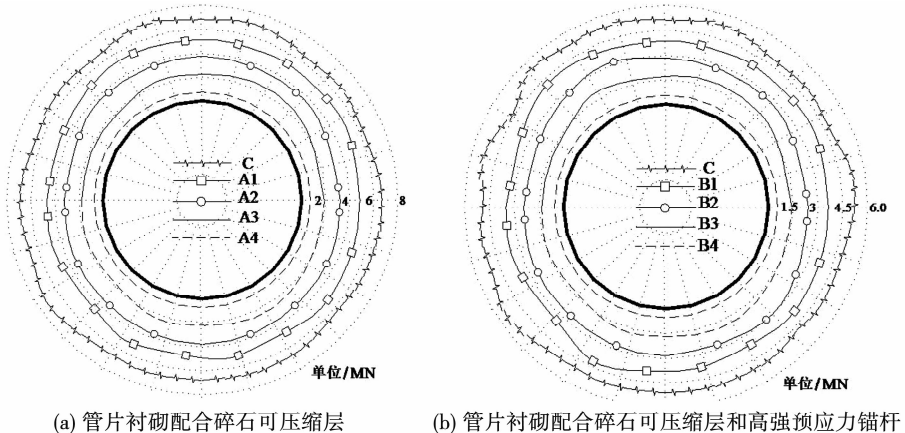


图 7 轴力分布形式

Fig. 7 Distribution of axial force

表 8 管片衬砌内力值

Tab. 8 Internal force values of segment lining

支护工况	弯矩/kN · m		轴力/kN
	拱顶	拱腰	
A1	-1 840.5(最大负弯矩)	2 100.6(最大正弯矩)	5 242.1(最大轴力)
A2	-1 494.5(最大负弯矩)	1 811.3(最大正弯矩)	3 901.3(最大轴力)
A3	-1 207.5(最大负弯矩)	1 427.6(最大正弯矩)	2 015.7(最大轴力)
A4	-811.8(最大负弯矩)	1 263.7(最大正弯矩)	863.5(最大轴力)
C	-2 206.3(最大负弯矩)	2 405.4(最大正弯矩)	7 142.8(最大轴力)
B1	-1 394.8(最大负弯矩)	1 648.7(最大正弯矩)	4 295.5(最大轴力)
B2	-1 017.4(最大负弯矩)	1 290.1(最大正弯矩)	3 012.3(最大轴力)
B3	-698.5(最大负弯矩)	846.4(最大正弯矩)	1 752.6(最大轴力)
B4	-350.5(最大负弯矩)	519.5(最大正弯矩)	520.6(最大轴力)
C	-1 725.3(最大负弯矩)	196.74(最大正弯矩)	5 322.4(最大轴力)

6 联合支护作用机理

6.1 碎石层的让压机理

图 8 为管片衬砌壁后碎石与围岩相互作用过程中的移动和接触力调整图。其中,接触力链的粗、密程度越大表明颗粒之间,颗粒与围岩、衬砌间的接触力越大。

由图可见,在碎石填充的初始阶段,碎石颗粒由于受围岩形变控制向衬砌侧发生径向移动。同时,衬砌的拱顶,拱肩和拱腰侧的碎石填充层间接触力链粗细分明。其中,拱腰侧接触力最大,拱肩侧接触力最小。这与初始地应力场的分布形式相吻合。

在碎石填充后的稳定阶段,碎石颗粒由于受围岩形变控制,衬砌拱腰侧碎石向拱肩侧移动,拱肩侧碎石向拱顶侧移动。对比可见,衬砌的拱顶、拱肩和拱腰侧碎石填充层间接触力链变细。同时,衬砌的拱顶、拱肩和拱腰侧接触力链粗细趋于一致。以上表明,碎石层通过颗粒间相互嵌挤和错动移位作用有

效削减了衬砌壁后的围岩压力,同时对于减小衬砌壁后的不均匀压力起到了重要作用。

6.2 高强预应力锚杆的作用机理

图 9 为围岩蠕变计算时间为 1.0 年时围岩与碎石层的位移矢量图。其中,位移矢量箭头方向反映位移方向,箭头大小直接反映位移的大小。对比可以看出,管片衬砌壁后填充碎石的支护结构型式下围岩的径向位移要明显大于高强预应力锚杆配合碎石填充层的联合支护结构型式下围岩的径向位移。图 10 为围岩蠕变计算时间为 1.0 年时围岩的剪切应变增量图,对比同样可见,管片衬砌壁后填充碎石的支护结构型式下围岩的剪切应变增量要明显大于高强预应力锚杆配合碎石填充层的联合支护结构型式下围岩的剪切应变增量。同时可见,高强预应力锚杆的存在有效抑制了围岩发生剪切应变的范围。

综上所述,高强预应力锚杆与围岩形成的锚固区减小了围岩蠕变变形速度,增强了围岩的抗变形能力,控制了围岩蠕变变形的过大发展。

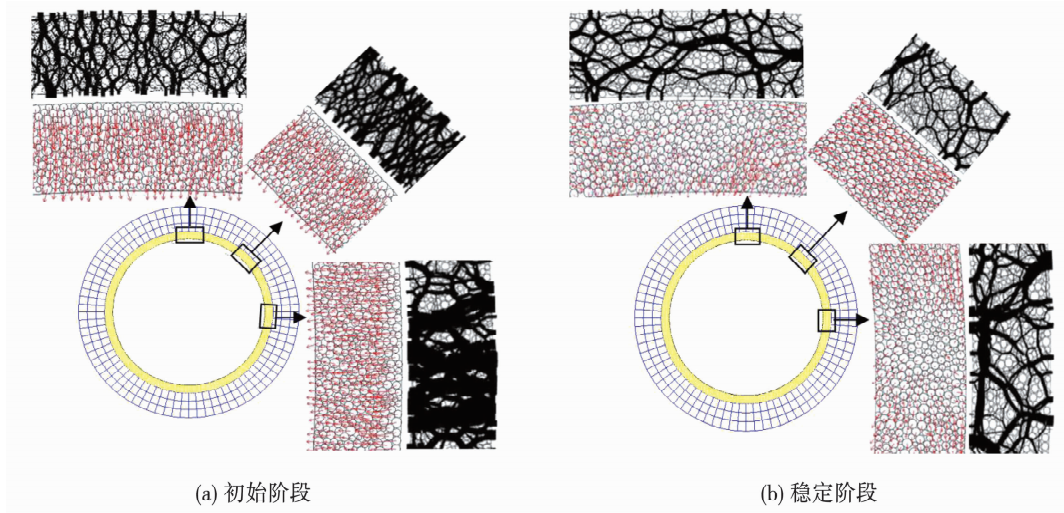


图 8 碎石移动和接触力演变

Fig. 8 The movement characteristic and contact force adjustment of the crushed stone

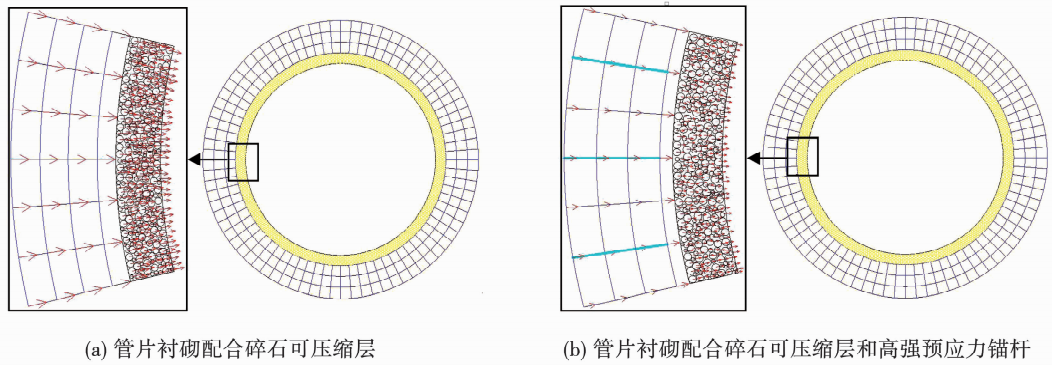


图 9 位移矢量

Fig. 9 The displacement vector

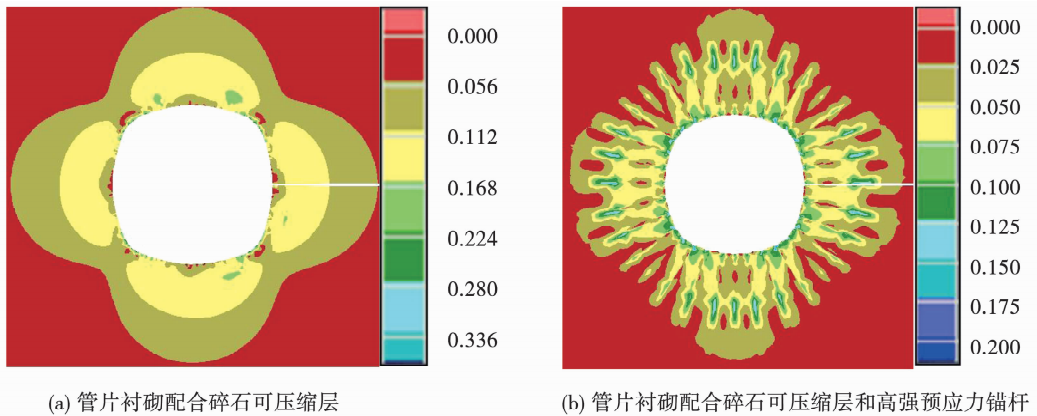


图 10 围岩的剪切应变增量

Fig. 10 Shear strain increment of the surrounding rock

7 结 论

针对深埋地层中修建盾构隧道,特别是围岩表现蠕变特性,研究一种管片衬砌配合压缩层与锚杆的联合支护技术.分析了联合支护的效果和作用机理.得出如下结论:

1)管片衬砌配合碎石可压缩层和高强预应力锚杆配合碎石可压缩层的联合支护结构型式虽对围岩塑性区的控制不如注浆填充,但均能一定程度地减小管片衬砌的内力.

2)在高地应力和围岩蠕变效应综合影响下,隧道衬砌仅采取让压支护的手段远远不够,围岩蠕变变形会持续发展较大值,管片衬砌无法维持长期稳定;高强预应力锚杆配合碎石可压缩层的联合支护结构型式可以同时提高深部岩体的承载能力和长期强度并实现有效地让压,从而保证管片衬砌的长期安全.

3)联合支护的作用机理由两部分构成:碎石可压缩层的让压作用与高强预应力锚杆加固围岩作用.其中,碎石可压缩层的让压机理主要通过颗粒间相互嵌挤和错动移位作用来削减管片衬砌壁后接触力;高强预应力锚杆的加固机理主要是形成的锚固

区改善了围岩的蠕变性质,增强了围岩的抗变形能力.

参考文献

- [1]何满潮,景海河,孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 21
HE Manchao, JING Haihe, SUN Xiaoming. Soft rock engineering mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2002: 21
- [2]冯豫. 中国煤矿软岩巷道支护理论与实践[M]. 中国矿业大学出版社, 1996: 36
FENG Yu. The support theory and practice of soft rock roadway in coal mine of china [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1996: 36
- [3]孙钧. 隧道力学问题的若干进展[J]. 西部探矿工程, 1993, 5(4): 1
SUN Jun. Some advances of tunnel mechanics [J]. West-China Exploration Engineering, 1993, 5(4): 1
- [4]黄万朋. 深井巷道非对称变形机理与围岩蠕变及扰动变形控制研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2012
HUAGN Wanpeng. Analysis on the laws of deep tunnel's asymmetric deformation and control technology of surrounding rock's rheological and disturbed deformation[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2012
- [5]孙晓明,何满潮,杨晓杰. 深部软岩巷道锚网索耦合支护非线性设计方法研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1061
SUN Xiaoming, HE Manchao, YANG Xiaojie. Research on

- nonlinear mechanical design method of bolt-net-anchor coupling support for deep soft rock tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(7): 1061
- [6] 贾宝山, 解茂昭, 章庆丰, 等. 卸压支护技术在煤巷支护中的应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(1): 116
JIA Baoshan, XIE Maozhao, ZHANG Qingfeng, et al. Application of pressure-relief support technique to coal roadway [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(1): 116
- [7] 齐春, 何川, 封坤, 等. 煤矿斜井管片衬砌与可压缩层联合支护的效果 [J]. *西南交通大学学报*, 2018, 53(4): 772
QI Chun, HE Chuan, FENG Kun, et al. Combined support of segmental lining and compressible layer of coal mine shafts [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University* [J]. 2018, 53(4): 772
- [8] 胡雄玉, 何川, 吴迪, 等. 层状围岩管片衬砌配合陶粒与锚杆的联合支护技术研究 [J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(6): 1093
HU Xiongyu, HE Chuan, WU Di, et al. Combined support technology of segment linings with compressible crushed stone and anchor bolts in layered rock [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(6): 1093
- [9] 胡雄玉, 何川, 杨清浩, 等. 管片衬砌配合陶粒可压缩层支护结构型式的模型试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2017, 50(12): 111
HU Xiongyu, HE Chuan, YANG Qinghao, et al. Model test of new-type support structure for segment lining combined with compressible ceramic [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(12): 111
- [10] Barla, G. Bonini, M. Semeraro. Analysis of the behavior of a yield-control support system in squeezing rock [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2011, 26: 146
- [11] Anagnostou, G, Cantienni, L. Design and analysis of yielding support in squeezing ground [C]//11th ISRM Congress of the International Society for Rock Mechanics and Rack engineering, Lisbon, 2007, 829
- [12] Bonini M, Anagnostou G. Tunnel boring machines under squeezing conditions [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2010, 25(2): 139
- [13] Cantienni L, Anagnostou G. The interaction between yielding supports and squeezing ground [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2009, 26: 309
- [14] 胡雄玉, 晏启祥, 何川, 等. 管片衬砌配合碎石可压缩层的斜井支护结构型式及其应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(3): 2803
HU Xiongyu, YANG Qixiang, HE Chuan, et al. A new type of support structure of segment lining combined with compressible crushed stone and its applications in deep inclined shaft [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(3): 2803
- [15] 唐正光, 王苏达, 吴培关, 等. 碎石的可压实性及压实对渗透性能的影响 [J]. *昆明理工大学学报: 理工版*, 2006, 31(5): 61
TANG Zhengguang, WANG Suda, WU Peiguan, et al. Study of ram ability of crushed stones and its effect on permeability [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology: Science and Technology*, 2006, 31(5): 61
- [16] 何满潮, 袁和生, 靖洪文, 等. 中国煤矿锚杆支护理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 98
HE Manchao, YUAN Hesheng, JING Hongwen, et al. Theory and practice of bolt supporting of coal mines in China [M]. Beijing: Science Press, 2004:98

(编辑 苗秀芝)