DOI：10.11779/CJGE20220058

考虑蠕变特性的高应力软岩隧道变形预测方法与实践

郭新新[1]，汪 波*[2]，王振宇[2]，于家武[3]

（1. 成都理工大学环境与土木工程学院，四川 成都 610059；2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室，四川 成都 610031；3. 中铁隧道集团二处有限公司，河北 三河 065201）

摘 要：为研究高应力软岩蠕变特性对隧道围岩变形预测的影响，以木寨岭公路隧道为依托，首先采用三维计算模型与多元线性回归相结合的方法分析初始地应力场，并结合围岩段落划分，选择典型计算断面；其次，提出基于[BQ]值的围岩参数取值方法，确定典型计算断面的围岩参数；而后，开展基于 M-C 模型和 Cvsic 模型的断面变形计算，剖析岩体蠕变特性对围岩变形的影响；最终，对比了预测结果与实际围岩变形。结果表明：①岩体蠕变特性对围岩变形具有明显增大效应，围岩位移增长量与横断面平均主应力呈正相关；②围岩条件越差，蠕变增大效应越显著；横断面平均主应力越大，蠕变增大效应中位移增长量越大，而位移增长率变化不明显；③蠕变特性对围岩变形等级预测有明显影响，M-C 模型预测结果弱于 Cvisc 模型，与实际围岩变形情况存在较大差异。研究结果为在高应力软岩隧道变形预测中引入岩体蠕变效应奠定了实践基础。

关键词：高应力软岩隧道；变形预测；蠕变效应；数值模拟；工程检验

中图分类号：TU431；U45 **文献标识码**：A **文章编号**：1000−4548(2023)03-0652-09

作者简介：郭新新(1990—)，男，博士，副研究员，主要从事隧道工程方面的教学和科研工作。E-mail: zj_gxinxin@163.com。

Methods and practices for deformation prediction in high-stress soft rock tunnels considering creep characteristics

GUO Xinxin[1], WANG Bo[2], WANG Zhenyu[2], YU Jiawu[3]

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. The 2nd Engineering Co., Ltd. of China Railway Tunnel Group, Sanhe 065201, China)

Abstract: To study the influences of high-stress soft rock creep characteristics on deformation prediction of surrounding rock of tunnels, the Muzhailing highway tunnel is taken as the support project. Firstly, the initial ground stress field is analyzed using a three-dimensional simulation model combined with multiple linear regression. The typical calculation sections are selected in conjunction with the section division of the surrounding rock. Secondly, the relevant method based on the [BQ] value is proposed to determine the parameters of the surrounding rock in the typical calculation section. Then, the section deformation is calculated based on the M-C model and the Cvsic model to analyze the influences of the creep characteristics of rock on the deformation of the surrounding rock. Finally, the predicted results are compared with the actual ones. The results show that: (1) The creep characteristics of rock mass have significant increase effects on the deformation, and the displacement growth rate is positively correlated with the average principal stress of cross-section. (2) The worse the surrounding rock condition, the more pronounced the creeping increase effects. The greater the average principal stress of the cross-section, the larger the displacement growth rate in the creep increase effects, while the change in the displacement growth rate is less noticeable. (3) The creep characteristics have significant effects on the prediction of the deformation level of the surrounding rock. The predicted results by the M-C model are weaker than those by the Cvisc model, which are pretty different from the actual deformations of the surrounding rock. The results lay a practical foundation for introducing the creep effects into the deformation prediction of high-stress soft rock tunnels.

Key words: high-stress soft rock tunnel; deformation prediction; creep effect; numerical simulation; engineering inspection

基金项目：国家自然科学基金项目（U2034205）；甘肃省科技计划项目（19ZD2GA005）；中铁隧道集团二处有限公司科技研发计划项目（2020-05）

收稿日期：2022-01-13

*通信作者（E-mail: ahbowang@163.com）

0　引　　言

深埋长大隧道施工中，高应力软弱围岩引发的大变形问题往往是工程管控重点。

按照中国“一带一路”和“八纵八横”战略，目前西部山区包括渝昆高铁、川藏铁路等在建及拟建的隧道工程总计长度将超过 1000 km[1]，预测的围岩大变形现象将尤为频发。目前针对软岩隧道大变形研究，主要包括：工程实录、变形机制、变形预测，以及变形控制技术等[2]。其中，合理变形预测是大变形机制准确辨识的直观成果，更是变形控制技术应用的基础，属软岩隧道大变形研究中“承前启后”的重要环节，对防控变形灾害、提升工程质量、确保结构服役性能等均具关键作用。

围绕着高应力软岩隧道的变形预测，国内外学者已提出了多种预测指标及量化方法，主要包括：基于工程实践的经验方法，如 Singh 等[3]提出的基于埋深和 Q 系统的方法、Goel 等[4]提出的基于隧道净宽和岩体质量 N 的方法；基于半经验半理论的方法，如 Hoek[5]提出的基于岩体强度应力比的方法、陈卫忠等[6]提出的基于修正[BQ]值的方法；基于数学模型或数值计算的方法，如骆顺天等[7]提出的基于统计分析的多指标预测方法。然而，上述的变形预测中都未考虑高应力作用下软岩蠕变效应的影响。

实际上，软岩蠕变效应一直是岩石力学领域研究的重点问题，蠕变造成的隧道支护结构变形、衬砌开裂、渗漏水等更是极为普遍[8-10]。故在高应力软岩隧道变形预测中忽略围岩的蠕变效应，将难以避免地出现变形预测不合理、不准确，继而导致支护技术及体系不匹配、不适用，上述即是部分已建成隧道在建设期或多年运营后出现广泛二衬开裂现象的重要原因，如易峨高公路田心隧道对二衬进行了多次的修复[11]；新鹧鸪山隧道、杜家山隧道在建设阶段均出现了二衬开裂的现象[12-13]。

综上，本文以 G75 高速木寨岭公路隧道为研究对象，提出一种基于数值模拟且可考虑岩体蠕变特性的高应力软岩隧道变形预测方法，并将预测结果与未考虑蠕变特性时的结果进行对比，剖析岩体蠕变对围岩变形预测带来的影响，为在高应力软岩隧道变形预测中引入岩体蠕变效应奠定基础与实践。

1　工程概况

木寨岭公路隧道，全长 15.226 km，位于甘肃定西市境内，是渭源至武都高速公路的控制性工程。隧道按山岭区高速公路分离式断面设计，为双向四车道，单洞开挖断面面积大于 120 m^2。

隧道穿越地层以软质炭质板岩和断层压碎岩为主，单轴饱和抗压强度如表 1 所示，均值小于 30 MPa。其中炭质板岩为泥质变余结构，薄层板状构造，受构造影响复杂多变，岩体破碎；断层压碎岩原岩为炭质板岩、灰岩或砂岩，岩体胶结差或无胶结，呈碎裂状松散结构。

表 1　各岩层的单轴饱和抗压强度

Table 1 Uniaxial saturated compressive strengths of rock strata

统计项目	单轴饱和极限抗压强度						
统计指标 岩土名称	统计个数 n	范围值	算术平均值 f_m	标准差 σ_f	变异系数 δ	修正系数	标准值
炭质板岩（P_1）	30	11.23~45.66	28.56	7.99	0.28	0.91	26.0
炭质板岩（C_1）	6	16.37~41.24	25.48	8.53	0.33	0.75	19.2
断层压碎岩	8	12.12~15.94	14.00	1.40	0.10	0.93	13.00

注：已剔除异常值。

木寨岭公路隧道深孔钻探测得最大水平主应力 18.76 MPa，判定属高地应力区。结合岩性，参照《铁路挤压性围岩隧道技术规范中：Q/CR9512—2019》对挤压性围岩的判别标准，木寨岭公路隧道围岩为挤压性围岩，具备有（明显）大变形倾向。

与木寨岭公路隧道平行相距约 1000 m 的兰渝铁路木寨岭隧道，全长 19.1 km，历经 8 a 建设方于 2016 年 7 月贯通。项目建设期间全段落 50%发生了软岩大变形，最大变形约达 3700 mm。由此可以预警到，断面更大的木寨岭公路隧道施工中所面临的上类软岩大变形问题将会更加严峻。

2.　隧址区应力场分析

2.1　实测钻孔应力数据分析

木寨岭公路隧道隧址区内共有 3 个地应力测试孔：①钻孔 S-SK03，于公路隧道 K214+085 处；②钻孔 S-SK05，于公路隧道 K218+400 处；③钻孔 N2，于铁路隧道 DK183+800 处。地应力测试结果如图 1 所示。

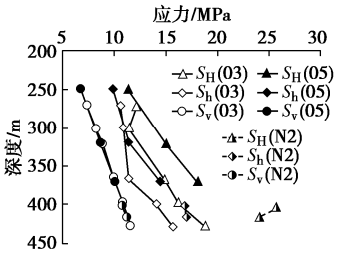


图 1　实测应力分布

Fig. 1 Distribution of measured stress

由图 1 可知，木寨岭公路隧道隧址区地应力总体呈现 S_H（最大水平主应力）>S_h（最小水平主应力）>S_v（垂直主应力）的特征，水平主应力占主导地位，两个水平应力均大于垂直应力，且随埋深增加，各应力分量总体也相应增大；同时，测孔附近的地应力场以 NNE 向挤压为主，印模实测主应力方向为 N39.6°E、N34.1°E、N47°E，与隧道轴线方向大致相同。

2.2 初始应力场反演分析

（1）计算模型与参数

基于木寨岭公路隧道隧址区内工程地质、地形地貌和隧道埋深等分布，并兼顾现有计算机运算能力和计算精度需求，建立模型计算区域选为长 16650 m（X 向）×宽 3 150 m（Y 向），模型底面高程 2400 m，模型顶面（地表面）建立如下：将 CAD（含有等高线）平面图导入 Surfer 软件，采用克里金插值法得到高精度地形坐标值，再将其导入 ANSYS 建立三维数值地质模型；对隧址区内涉及的 11 条主要断层进行了线性近似处理（不规则断层面近似为平面），图 2 为建立的三维地质模型。为便于划分单元，三维模型全部采用 10 节点四面体等参单元（Solid92），共计单元数 594019 个，节点数 883409 个。

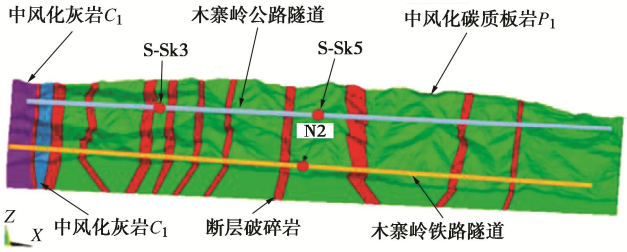


图 2 隧址区三维地质模型

Fig. 2 Three-dimensional geological model

穿越地层主要为中风化炭质板岩（P_1）和断层压碎岩，同时兼顾进洞口分布较广的中风化灰岩（C_1）和中风化炭质板岩（C_1），各地层参数如表 2 所示。

表 2 主要岩层物理力学参数

Table 2 Main physical and mechanical parameters of rock strata

岩体类型	变形模量 E/GPa	泊松比	重度 /(kN·m^{-3})
中风化炭质板岩（P_1）	2.0	0.35	27.0
断层压碎岩	1.5	0.40	27.0
中风化灰岩（C_1）	6.0	0.30	27.0
中风化炭质板岩（C_1）	3.0	0.35	27.0

（2）反演分析方法

本次初始应力场计算采用数值模型结合多元线性回归法进行[14]：首先，根据木寨岭隧道实测地应力成果，将计算域内的地应力场视为自重应力场和边界构造应力场的线性叠加；而后，通过分解、模拟自重应力场及边界荷载应力场；最后，开展多元线性回归分析获取反演地应力场。

鉴于木寨岭隧道水压致裂法所测得的地应力结果无垂直面内的剪切应力，故计算中选取自重应力场和 5 个边界水平构造应力场，如图 3 所示：①自重应力场，对模型底面及侧面施加法向约束，并对模型施加 Z 向重力荷载；②X 向水平构造应力场，对模型两侧 x 面施加 X 向水平均布荷载与三角荷载模拟该方向上的构造应力，底面及未加载的两个侧面施加法向约束；③Y 向水平构造应力场，对模型两侧 y 面施加 Y 方向水平均布荷载与三角荷载，底面及未加载的两个侧面施加法向约束；④XOY 面剪切构造应力场，在模型侧面施加边界位移以等效模拟剪应力，具体而言在 x，y 面施加 0.01 m 的水平控制位移[15]。

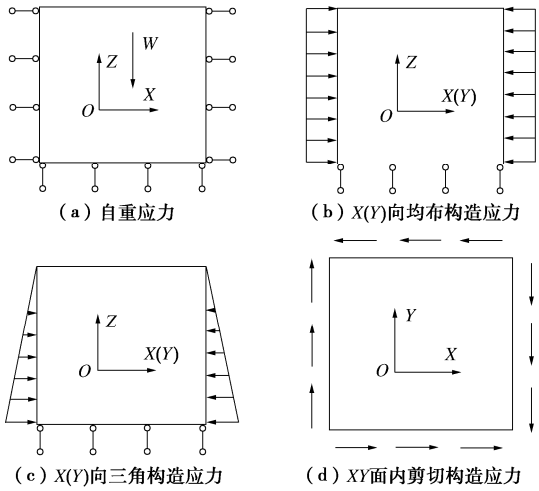


图 3 模型加载示意图

Fig. 3 Model loading

（3）反演结果与分析

提取图 3 应力场作用下三维模型计算结果中 S-SK03、S-SK05 测点处地应力反演值，综合运用多元线性回归方法得到木寨岭公路隧道地应力回归方程：

$$\sigma=2.789+1.293\sigma_0-1064.325\sigma_1-18.334\sigma_2+450.412\sigma_3+6.802\sigma_4+211.061\sigma_5 \quad 。 \tag{1}$$

式中：σ 为应力场回归值；σ_0 为自重应力；σ_1 为 X 向均布构造应力；σ_2 为 X 向三角构造应力；σ_3 为 Y 向均布构造应力；σ_4 为 Y 向三角构造应力；σ_5 为 XY 面内剪切构造应力。

经计算，得到复相关系数 r=0.9788，接近于 1，表明反演数据与钻孔 S-SK03、S-SK05 处测值的变化规律较为吻合。为检验初始应力场各影响因素的显著性，计算得到偏相关系数：V_1=245.44，V_2=2.9，V_3=611.32，V_4=10.3，V_5=781.93，V_6=8.01。可以看出回归方程 σ_0，σ_3，σ_4 项系数与回归应力值有较大关系，说明该 3 项与木寨岭公路隧道现场实测值具有较强的关联性，均不可剔除；虽然 σ_5 的偏相关系数较小，

表 3 N2 钻孔主应力反演与实测对比

Table 3 Comparison between inversion and measurement of N2 principal stress

钻孔编号	测点	S_H/MPa				S_h/MPa				S_v/MPa			
		实测值	回归值	绝对误差	相对误差	实测值	回归值	绝对误差	相对误差	实测值	回归值	绝对误差	相对误差
N2	1	25.7	25.1	0.6	2.3%	16.8	20.5	3.7	22.2%	10.7	12.8	2.1	19.2%
	2	24.1	25.4	1.3	5.7%	17.0	20.9	3.9	23.0%	11.1	13.3	2.2	19.1%

表 4 围岩弹塑性参数

Table 4 Elastic-plastic parameters of surrounding rock

岩体类型	界限	变形模量 E/GPa	泊松比 ν	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 φ/(°)	重度 γ /(kN·m^{-3})	备注
炭质板岩	上限	2.00	0.35	0.80	28	27.0	[BQ]=214
	下限	1.20	0.38	0.50	25	27.0	[BQ]=54
断层压碎岩	—	1.20	0.39	0.45	24	27.0	

但考虑到 σ_5 是唯一反映模型剪应力的工况，所以本次反演仍然保留此项；而 σ_2 和 σ_4 的偏相关系数较小，予以剔除。

进一步将未代入回归分析的铁路隧道钻孔 N2 处测值与回归值进行比较，如表 3 所示，主应力反演结果与实测值较为接近，绝对误差 0.58～3.9 MPa，相对误差 2.26%～22.98%，佐证了本次地应力反演的可靠性。

基于隧址区地应力场反演结果，提取木寨岭公路隧道轴线（以左线为例）地应力数据，绘制应力场分布规律如图 4 所示，考虑到数值模拟过程中界面端部效应的影响，剔除了左、右洞口段部分应力数据。

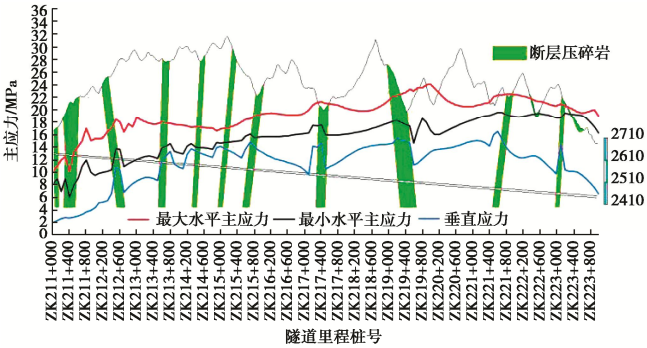


图 4 初始应力场分布规律

Fig. 4 Distribution laws of initial stress field

图 4 揭示木寨岭公路隧道初始地应力场具有如下特征：

（1）隧道埋深越大，垂直主应力越大，且与埋深基本呈线性关系；水平主应力则与埋深未有明显关联，显示隧址区水平构造应力较发育。

（2）木寨岭公路隧道轴线方向上主应力值关系表现为 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$，即最大水平主应力>最小水平主应力>垂直主应力，表明木寨岭公路隧道隧址区的初始应力场是以水平构造应力为主导的。

（3）隧道轴线方向最大主应力在 20 MPa 左右，结合岩石单轴饱和抗压强度值（<30 MPa）分析，可判定木寨岭公路隧道为极高地应力隧道。

（4）断层对初始应力场有影响，近断层区域初始应力场出现了明显的波动。

3 蠕变特性对变形预测的影响研究

3.1 蠕变模型及参数

隧道地勘资料显示，隧道穿越的中风化炭质板岩（P_1）的[BQ]值变化范围较大，故设定炭质板岩（P_1）的弹塑性参数为一变化区间，上限取中风化炭质板岩（P_1）参数，下限取强风化炭质板岩（P_1）参数；断层岩参数为单一不变值；具体参数如表 4 所示。

根据已开展的炭质板岩蠕变相关研究，特别是与木寨岭公路隧道情况相近、具有较高借鉴意义的木寨岭铁路隧道的相关岩体蠕变研究[16-17]，选用既能描述岩石黏弹性蠕变状态，又能描述等速蠕变破坏的 Cvsic 模型来模拟木寨岭公路隧道的蠕变效应。

结合已开展的炭质板岩蠕变特性试验成果[18-19]，综合木寨岭公路隧道施工过程中的围岩位移表现，选取炭质板岩的蠕变参数取值如表 5 所示。鉴于目前针对断层压碎岩的蠕变试验较少，蠕变数据难以获得，考虑本次模拟中断层压碎岩的原岩主要为炭质板岩，且变形模量为炭质板岩平均变形模量的 75%，模拟中将断层压碎岩的蠕变参数取炭质板岩蠕变参数的 75%。

表 5 木寨岭隧道围岩蠕变参数

Table 5 Creep parameters of surrounding rock in Muzhailing tunnel

围岩岩性	Maxwell 剪切模量 G_M/GPa	Maxwell 黏度 η_M /(GPa·h^{-1})	Kelvin 剪切模量 G_K/GPa	Kelvin 黏度 η_K /(GPa·h^{-1})
炭质板岩	1.00	8300	2.00	138
断层压碎岩	0.75	6225	1.50	103.50

注：灰岩蠕变参数按炭质板岩参数选取。

3.2 计算方案与实施

为剖析岩体蠕变特性对变形预测的影响，计算分

两部分开展，其一为基于 Cvsic（蠕变）模型的计算，其二为基于现今数值模拟中最常用的 M-C 模型（莫尔库仑理想弹塑性模型）的计算。

（1）计算断面及参数

岩体特性、地应力场是影响软岩隧道围岩变形的核心因素，故计算断面的选取将首先以设计文件划分的沿线岩性分布为依据划分计算段落，后再根据隧道初始地应力分布情况（图 4）选取各计算段落中应力水平最大与最小的两个断面作为典型计算断面；同时，鉴于木寨岭公路隧道炭质板岩[BQ]值变化范围较大，且[BQ]作为围岩分级的核心指标直接影响计算参数的取值[20]，故设定其弹塑性参数 E，c，φ，ν 以[BQ]平均值为基础（[BQ]=214，54 对应表 5 中上限、下限参数），采用线性差值进行调整，而蠕变参数则保持不变；具体计算断面及参数如表 6 所示（以左线为例）。

（2）数值模拟的实现

采用多工况计算模式，即模拟不同围岩（弹塑性）参数、蠕变参数和初始应力场下的隧道开挖位移量，数值模拟以 Flac3D 重启动功能为基础，使用 Fish 语言设置参数随工况变化，共计模拟 192 个计算工况。

计算模型中的隧道断面尺寸同设计（两车道高速公路隧道断面）。模型开挖边界：水平和竖直方向均设置洞壁到边界 50 m。建立模型包含 8591 个单元，12542 个节点，如图 5 所示。

在上边界施加荷载模拟隧道埋深；在左右边界施加荷载模拟水平应力场。具体实施步骤：

Step1：模型地应力平衡模拟。采用应力-边界法（S-B 法），根据图 4 中的地应力分布，对选定断面的初始地应力场进行模拟。

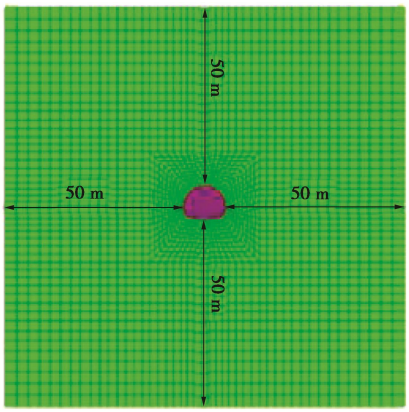


图 5 隧道计算模型图

Fig. 5 Model for tunnel calculation

Step2：隧道开挖弹塑性（M-C 准则）分析。将围岩设置为 M-C 模型，并赋予相应弹塑性参数，默认最大不平衡力与典型内力的比率小于 10^{-5} 时，收敛。

Step3：隧道开挖蠕变分析。调用 Step1 中应力场模型，将围岩设置为 Cvisc 模型，并赋予相应蠕变参数，同时，为保证模拟计算中围岩变形发展完全，本分析步时间取 1.5 a，即 13140 h。

3.3 预测结果与分析

（1）围岩位移对比分析

提取各计算工况的最大位移（开挖轮廓最大变形值）如图 6 所示；绘制以 M-C 模型最大位移为基准的 Cvisc 模型最大位移增长量、增长率如图 7 所示，其中增长量为两种模型位移计算结果的差值，增长率为增长量与 M-C 模型最大位移的比值。

表 6 木寨岭公路隧道变形预测相关计算资料（左线）

Table 6 Data of deformation prediction of Muzhailing highway tunnel (left line)

段落起讫里程（ZK）	主要岩性	[BQ]均值	计算断面 1	计算断面 2	段落起讫里程（ZK）	主要岩性	[BQ]均值	计算断面 1	计算断面 2
212+000—+185	①	190.5	211+900	212+100	216+005—217+100	①	171	216+100	217+100
212+185—+385	①	54	212+200	212+300	217+100—+300	①	54.3	217+100	217+300
212+385—+585	②	—	212+400	212+500	217+300—+520	②	—	217+300	217+500
212+585—+785	①	54	212+600	212+700	217+520—+720	①	54.3	217+600	217+700
212+785—213+355	①	189	212+800	213+200	217+720—219+030	①	214	217+700	219+000
213+355—+555	①	92.8	213+400	213+500	219+030—+230	①	84.3	219+100	219+200
213+555—+715	②	—	213+600	213+700	219+230—219+610	②	—	219+300	219+600
213+715—+915	①	92.8	213+800	213+900	219+610—810	①	84.3	219+700	219+800
213+915—214+285	①	190	214+000	214+200	219+810—221+340	①	203	219+900	221+100
214+285—+385	①	114	214+300	—	221+340—+540	①	92.5	221+400	221+500
214+385—+505	②	—	214+400	214+500	221+540—221+690	②	—	221+600	—
214+505—+705	①	93	214+600	214+700	221+690—+890	①	92.5	221+700	221+800
214+705—+830	①	133	214+800	—	221+890—222+810	①	196.8	221+900	222+800
214+830—215+030	①	54.3	214+900	215+000	222+810—223+010	①	92.5	222+900	223+000
215+030—+150	②	—	215+100	—	223+010—+105	②	—	223+100	—
215+150—+635	①	54.3	215+400	215+600	223+105—+305	①	92.5	223+200	223+300
215+635—+805	②	—	215+700	215+800	223+305—224+000	①	190.6	223+400	224+000
215+805—216+005	①	54.3	215+900	216+000					

注：岩性①为炭质板岩，岩性②为断层压碎岩；里程 K212 前、及 K224 后，因垂直应力小，地应力场模拟出现明显偏差，予以剔除。

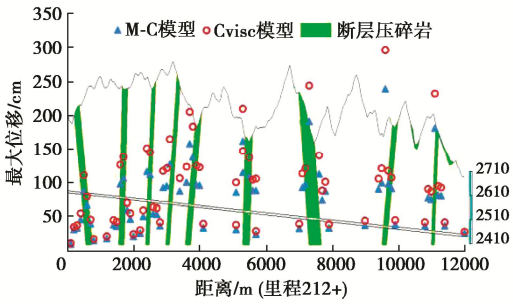


图 6 最大位移

Fig. 6 Maximum displacement

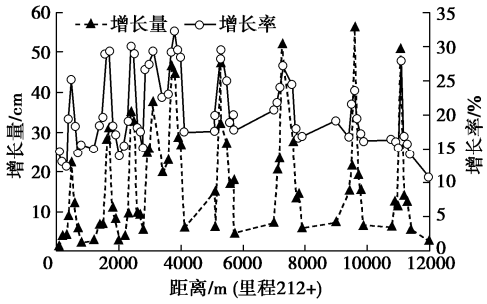


图 7 Cvisc 模型最大位移增长量、增长率

Fig. 7 Maximum displacement increments and growth rates by Cvisc model

由图 6，7 可以看出：①Cvisc 模型计算得到的最大位移明显大于 M-C 模型，其中，M-C 模型最大位移 7.1～240.2 cm、平均值 71.6 cm，而 Cvisc 模型最大位移区间 9.1～296.7 cm、平均值 88.3 cm；特别在断层区域及其附近，Cvisc 模型的最大位移增加显著。②当围岩为炭质板岩时，Cvisc 模型的位移增长率、增长量的主体区间为 10 cm，20%；当围岩为断层压碎岩时，量值增加至 40～50 cm，30%。

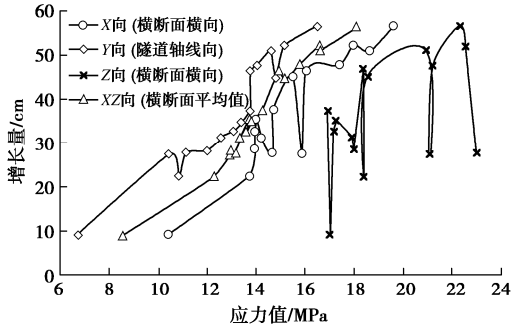
上述分析可看出，高应力软岩隧道变形预测中如忽略岩体蠕变特性将会导致围岩位移计算偏小，进而影响后续对挤压变形程度的（预）判定。

（2）蠕变增大效应与应力场相关性分析

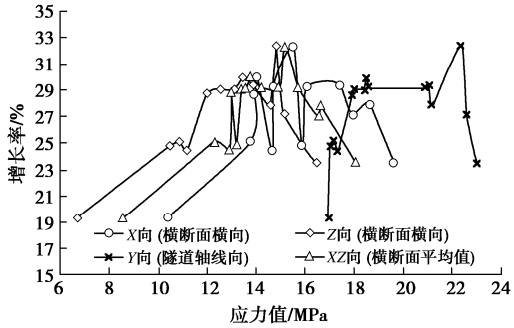
前述，围岩的蠕变特性对变形具有明显的放大效应，后续分析中，定义 Cvisc 模型相比于 M-C 模型的位移增长量、位移增长率为蠕变增大效应。从图 6，7 可进一步看出，不同里程的蠕变增大效应并不一致，究其原因主要受两方面因素影响，一是应力场，二是围岩的物理力学参数。

以断层压碎岩为例，分析蠕变增大效应与应力场间的关系。图 8 为不同应力场与蠕变位移增长量、增长率的关系曲线。

由图 8 可以看出：①蠕变位移增长量与 *X* 向（横断面横向）、*Z* 向（横断面竖向）应力具有强关联性，总体呈现随应力值增大而变大的特性，而与 *Y* 向（隧道轴线向）应力无关联性，表现为跳跃式波动，这与工程实践结论是基本一致的；从整体变化规律言，位移增长量既受 *X* 向应力，也受 *Z* 向应力的影响，当采用 *XZ* 向平均应力（*X* 向、*Z* 向应力的平均值）作为评价位移增长量变化的指标时，其与应力值间呈现了明显的线性正相关特性，为建立评价指标奠定了基础。②蠕变位移增长率与 *X* 向应力、*Y* 向应力、*Z* 向应力，以及 *XZ* 向应力均无明显的线性相关特性。鉴于位移增长率表现出的变化范围较小，尤其是当应力值位于 10～20 MPa 时，位移增长率整体仅在 20%～30%轻微波动，故仍建议采用 *XZ* 向平均应力评估对位移增长率的影响。



（a）蠕变位移增长量



（b）蠕变位移增长率

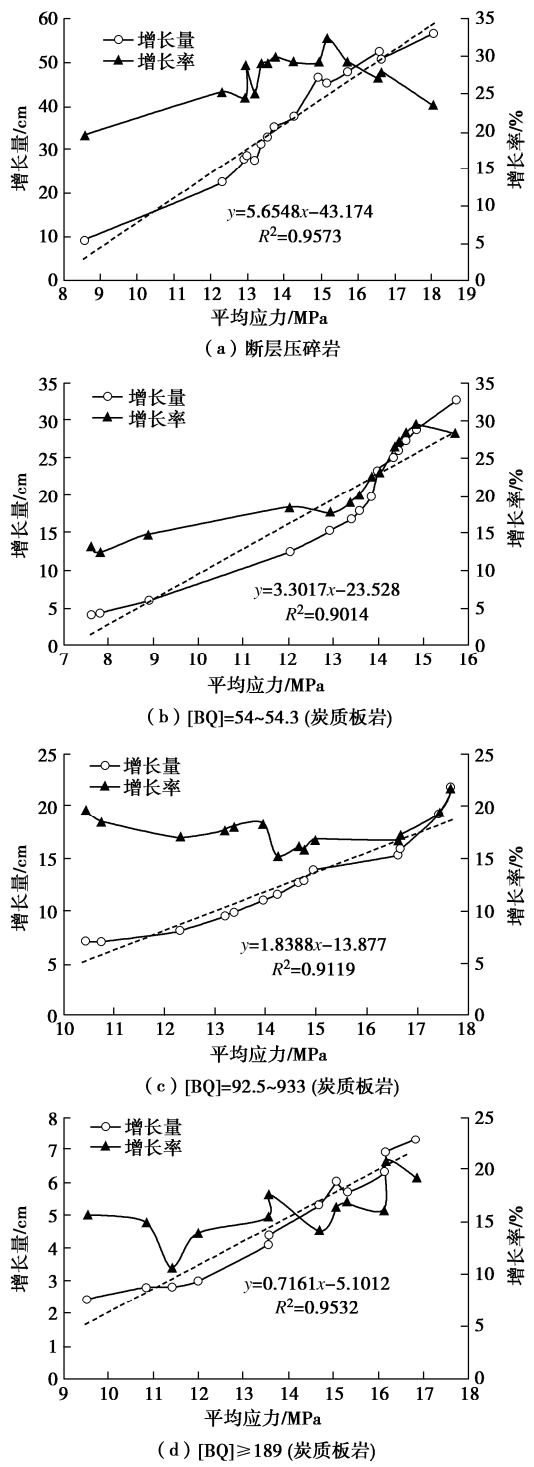
图 8 蠕变增大效应与应力场关系

Fig. 8 Relationship between creep increase effect and stress field

（3）蠕变增大效应的影响分析

在明确蠕变增大效应与 *XZ* 向平均应力强关联后，进一步分析不同岩性及 *XZ* 向平均应力值与蠕变增大效应间的关系。图 9 给出了不同岩性时，蠕变位移增长量、增长率与 *XZ* 向平均应力关系曲线。

由图 9 可以看出：①蠕变位移增长量方面：随 *XZ* 向平均应力增大，位移增长量逐渐变大，且增长量与平均应力间近似呈线性正相关，即断层压碎岩、[BQ]=54～54.3（炭质板岩）、[BQ]=92.5～93（炭质板岩）、[BQ]≥189（炭质板岩）与平均应力关系均可采用线性拟合函数表示：$y=5.65x-43.17$，$y=3.30x-23.53$，$y=1.84x-13.88$，$y=0.72x-5.10$，且 R^2 均超过了 0.9。从 *x* 系数可见，*XZ* 向平均应力对断层压碎岩的影响要明显大于炭质板岩，影响程度随[BQ]的增大而减小。



（a）断层压碎岩

（b）[BQ]=54~54.3 (炭质板岩)

（c）[BQ]=92.5~933 (炭质板岩)

（d）[BQ]≥189 (炭质板岩)

图 9 不同岩性时，蠕变增大效应与 *XZ* 向平均应力关系曲线

Fig. 9 Relation curve between creep increase effect and *XZ* average stress under different lithologies

②蠕变位移增长率方面：断层压碎岩、[BQ]=54～54.3（炭质板岩）、[BQ]=92.5～93（炭质板岩）、[BQ]≥189（炭质板岩）的分布区间、平均值依次为“19.4%～32.3%，27.3%；12.3%～29.4%，21.4%；15.1%～21.6%，17.7%；10.6%～20.8%，16.0%”。从量值上言，断层压碎岩的位移增长率明显大于炭质板岩，且当围岩为炭质板岩时，增长率呈现出随[BQ]增大而（有所）减小的现象；从具体位移增长率变化上言，*XZ* 向平均应力为 13～15 MPa 时，断层压碎岩、[BQ]=54～54.3（炭质板岩）的位移增长率出现一定上升，并在此区间达到最大值，其后出现一定下降，而[BQ]=92.5～93（炭质板岩）、[BQ]≥189（炭质板岩）的位移增长率基本恒定；与位移增长量相比较时，*XZ* 向平均应力对位移增长率的影响明显要小，可认为基本恒定，采用平均值进行评价。

上述分析可知，围岩条件越差，蠕变增大效应越大；围岩 *XZ* 向平均应力越大，蠕变增大效应中的位移增长量越大，而增长率则相对恒定。同时，基于对最好的围岩条件，即[BQ]≥189（炭质板岩）的分析，发现其位移增长率仍超 10%，故在高应力软岩隧道（设计）变形预测中计入岩体蠕变特性是必要的。

4 工程检验

基于国际广泛采用的 Hoek 方案将隧道挤压变形等级分为 4 级，即轻微挤压变形（1%≤ε≤2.5%），中等挤压变形（2.5%＜ε≤5%），严重挤压变形（5%＜ε≤10%），极严重挤压变形（ε＞10%）。以表 6 中数据为基准，并将计算断面 1 和计算断面 2 的最大位移平均值作为本段落的变形代表值，得到 M-C 模型、Cvisc 模型的变形等级预测结果如图 10 所示。

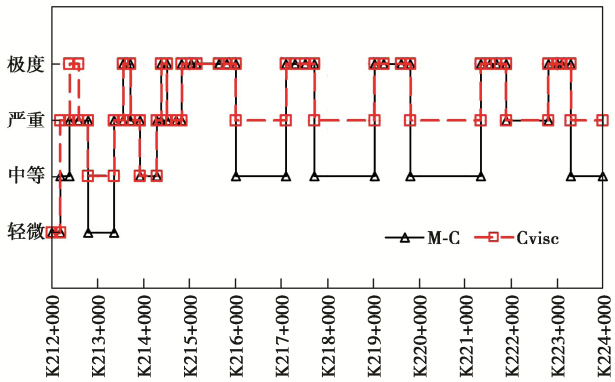


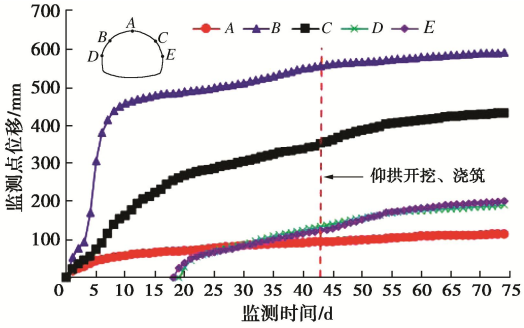
图 10 不同围岩本构模型变形等级预测结果

Fig. 10 Predicted results of deformation grade of different constitutive models for surrounding rock

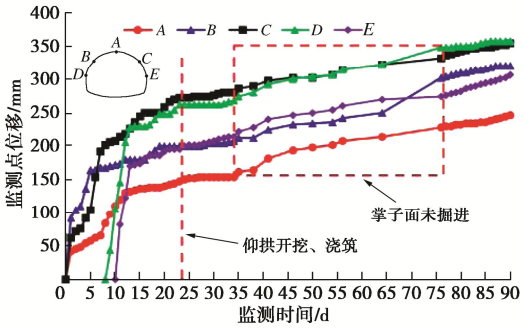
由图 10 可以看出，岩体的蠕变特性对围岩变形等级预测有明显影响，M-C 模型预测的结果明显弱于 Cvisc 模型，主要差异集中在里程 216+000～221+300。结合现场具体施工情况反馈，里程 216+000～219+000，采用强力支护模式时，涉及主要支护参数：H175 钢拱架@0.6 m/0.8 m 间距、C25 喷射混凝土@28 cm/25 cm 厚、Φ8（全断面）双层钢筋网、系统砂浆锚杆 4/5 m@1.0 m 间距，仍无法有效控制围岩变形，最大变形多数超 30 cm，平均 40～50 cm，频繁出现了喷

射混凝土开裂，乃至钢拱架扭曲等现象，归属“严重-极度”挤压变形，建设难度极大，与 Cvisc 模型预测结果较一致。

图 11 为典型断面监测位移曲线，图中位移数据可证，木寨岭公路隧道岩体蠕变特性对位移的增大效应非常明显、且持续时间长，故在设计阶段的变形等级划分中计入高应力下软岩蠕变特性是必要的。



（a）ZK218+425断面



（b）YK218+825断面

图 11　典型断面位移

Fig. 11 Displacements of typical section

以 Cvisc 模型预测结果为基准，预测木寨岭公路隧道全线（K212—K214）以“严重—极度”挤压变形为主体。其中，“极度”占比 25.83%（3100/12000），“严重”占比 64.79%（7775/12000），“中等”占比 7.83%（940/12000），轻微 1.54%（185/12000）。

5　结　　论

（1）木寨岭公路隧道隧址区初始应力场以水平构造应力为主导，三向主应力值关系为 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$，其中最大水平主应力约 20 MPa，近断层区域初始应力场有明显变化。

（2）不考虑围岩蠕变特性时最大位移 7.1～240.2 cm，平均值 71.6 cm，计入蠕变特性后围岩变形明显增大，最大位移 9.1～296.7 cm，平均值 88.3 cm；在断层及其附近，蠕变效应会导致位移显著增加。

（3）蠕变位移增长量与 *X* 向、*Z* 向应力强关联，呈现随应力值增大而变大的特性，而与 *Y* 向应力无关联性；当采用 *XZ* 向平均应力作为评价增长量变化的指标时，位移增长量与应力值间呈明显线性正相关。

（4）围岩条件越差，蠕变增大效应越显著；围岩 *XZ* 向平均应力越大，位移增长量越大，而位移增长率则相对恒定，可采用平均值进行设计估算。

（5）岩体蠕变特性对围岩变形等级预测有明显影响，M-C 模型的预测结果明显弱于 Cvisc 模型；基于 Cvisc 模型的预测结果揭示木寨岭公路隧道全线将以“严重—极度”挤压变形为主体，占比 90%以上。

参考文献：

[1] TIAN Siming, WANG Wei, GONG Jiangfeng. Development and prospect of railway tunnels in China(including statistics of railway tunnels in China by the end of 2020)[J]. Tunnel Construction, 2021, **41**(2): 308-325.

[2] LI Zhijun, GUO Xinxin, MA Zhenwang, et al. Research status and high-strength pre-stressed primary (type) support system for tunnels with large deformation under squeezing conditions[J]. Tunnel Construction, 2020, **40**(6): 755-782.

[3] SINGH B, JETHWA J L, DUBE A K, et al. Correlation between observed support pressure and rock mass quality[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1992, **7**(1): 59-74.

[4] GOEL R K, JETHWA J L, PAITHANKAR A G. Tunnelling through the young Himalayas—a case history of the Maneri-Uttarkashi power tunnel[J]. Engineering Geology, 1995, **39**(1/2): 31-44.

[5] HOEK E, MARINOS P. Predicting squeeze (Part 2) [J]. Tunnels and Tunnelling International, 2000, **32**(12): 33-36.

[6] 陈卫忠, 田　云, 王学海, 等. 基于修正[BQ]值的软岩隧道挤压变形预测[J]. 岩土力学, 2019, **40**(8): 3125-3134. (CHEN Wei-zhong, TIAN Yun, WANG Xue-hai, et al. Squeezing prediction of tunnel in soft rocks based on modified [BQ] [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(8): 3125-3134. (in Chinese))

[7] 骆顺天, 杨凡杰, 周　辉, 等. 基于统计分析的地下厂房边墙最大收敛变形多指标预测方法[J]. 岩土力学, 2020, **41**(10): 3415-3424. (LUO Shuntian, YANG Fanjie, ZHOU Hui, et al. Multi-index prediction method for maximum convergence deformation of underground powerhouse side wall based on statistical analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(10): 3415-3424. (in Chinese))

[8] 赵阳升. 岩体力学发展的一些回顾与若干未解之百年问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(7): 1297-1336. (ZHAO Yangsheng. Retrospection on the development of rock mass mechanics and the summary of some unsolved centennial

problems[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(7): 1297-1336. (in Chinese))

[9] 王道远, 刘 佳, 张 逵, 等. 高地应力深埋隧道断裂破碎带大变形控制方法现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(4): 658-666. (WANG Daoyuan, LIU Jia, ZHANG Chuo, et al. Field tests on large deformation control method for surrounding rock of deep tunnel in fault zone with high geostress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(4): 658-666. (in Chinese))

[10] 徐国文, 何 川, 汪 耀, 等. 流变荷载作用下隧道裂损二次衬砌结构安全性能研究[J]. 土木工程学报, 2016, **49**(12): 114-123. (XU Guowen, HE Chuan, WANG Yao, et al. Study on the safety performance of cracked secondary lining under action of rheological load[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, **49**(12): 114-123. (in Chinese))

[11] 白国权. 隧道二衬严重开裂段病害综合治理研究[J]. 铁道标准设计, 2014, **58**(8): 133-138. (BAI Guoquan. Research on comprehensive treatment for severe cracking of tunnel secondary lining[J]. Railway Standard Design, 2014, **58**(8): 133-138. (in Chinese))

[12] 孟陆波, 潘皇宋, 李天斌, 等. 鹧鸪山隧道二次衬砌开裂机理及支护时机探讨[J]. 现代隧道技术, 2017, **54**(2): 129-136. (MENG Lubo, PAN Huangsong, LI Tianbin, et al. Secondary lining cracking mechanism and the best time for supporting the zhegushan tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, **54**(2): 129-136. (in Chinese))

[13] 汪 波, 李天斌, 何 川, 等. 强震区软岩隧道大变形破坏特征及其成因机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(5): 928-936. (WANG Bo, LI Tianbin, HE Chuan, et al. Analysis of failure properties and formatting mechanism of soft rock tunnel in meizoseismal areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(5): 928-936. (in Chinese))

[14] 汪 波, 何 川, 吴德兴, 等. 苍岭特长公路隧道地应力场反演分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(2): 628-634. (WANG Bo, HE Chuan, WU Dexing, et al. Inverse analysis of in situ stress field of Cangling super-long highway tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(2): 628-634. (in Chinese))

[15] 代 聪, 何 川, 陈子全, 等. 超大埋深特长公路隧道初始地应力场反演分析[J]. 中国公路学报, 2017, **30**(10): 100-108. (DAI Cong, HE Chuan, CHEN Ziquan, et al. Inverse analysis of initial ground stress field of deep embedded and extra long highway tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, **30**(10): 100-108. (in Chinese))

[16] 李建伟, 雷胜友, 李 振, 等. 木寨岭隧道炭质板岩流变力学特性研究[J]. 隧道建设, 2012, **32**(1): 36-40. (LI Jianwei, LEI Shengyou, LI Zhen, et al. Investigation on rheologic properties of carbonaceous slate in muzhailing tunnel[J]. Tunnel Construction, 2012, **32**(1): 36-40. (in Chinese))

[17] 宋勇军, 雷胜友, 邹 翀, 等. 干燥与饱水状态下炭质板岩蠕变特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, **11**(3): 619-625, 664. (SONG Yongjun, LEI Shengyou, ZOU Chong, et al. Study on creep characteristics of carbonaceous slates under dry and saturated states[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, **11**(3): 619-625, 664. (in Chinese))

[18] 陶志刚, 罗森林, 康宏伟, 等. 公路隧道炭质板岩变形规律及蠕变特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2020, **49**(5): 898-906. (TAO Zhigang, LUO Senlin, KANG Hongwei, et al. Analysis of deformation law and creep characteristics of carbonaceous slate in highway tunnel[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, **49**(5): 898-906. (in Chinese))

[19] 徐慧臣. 木寨岭深埋隧道板岩吸水强度软化结构效应实验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019. (XU Huichen. Experimental Study on Strength Softening of Slate after Water Absorption Due to Structure Effects for Muzhailing Deep-Buried Tunnel[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2019. (in Chinese))

[20] WANG M N, WANG Z L, TONG J J, et al. Support pressure assessment for deep buried railway tunnels using BQ-index[J]. Journal of Central South University, 2021, **28**(1): 247-263.