

挤压陡倾千枚岩地层小净距隧道大变形研究

李磊¹, 谭忠盛², 郭小龙², 喻渝³, 罗宁宁⁴

(1. 交通运输部公路科学研究院 桥梁隧道研究中心, 北京 100088; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044;
3. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031; 4. 中国中铁五局集团有限公司 成都工程有限责任公司, 四川 成都 610073)

摘要: 为了探明小净距隧道穿越挤压性软岩地层的大变形机制, 提出相应的大变形控制技术, 本文采用理论分析、数值计算、现场试验等手段对这种隧道大变形的影响因素、围岩变形规律、支护受力特征等进行研究, 得出主要结论如下: (1) 高构造应力、陡倾围岩产状、低围岩强度、近接施工扰动等多因素的耦合作用, 导致了该隧道大变形的发生; (2) 后行隧道对先行隧道的卸荷扰动, 一方面使先行隧道承受偏压荷载, 另一方面使先行隧道中岩柱侧围岩向洞外产生弯曲破坏, 主要表现在先行隧道中岩柱侧边墙位移的减小、初期支护拱部受力状态的转变、二次衬砌拱部和仰拱拉应力的增大; (3) 根据围岩变形和支护受力情况, 按近接施工影响程度对小净距隧道进行分区, 并以此作为控制措施动态调整和工程类比的依据; (4) 严格控制施工工序, 避免先行隧道二次衬砌端头处于后行隧道开挖作业面之内, 并根据应力分布特征调整隧道断面形状, 根据岩体产状特征调整锚杆角度, 根据近接扰动情况对中岩柱进行保护与加固。

关键词: 隧道工程; 高地应力; 陡倾岩层; 绿泥石千枚岩; 小净距隧道; 大变形; 控制技术

中图分类号: U 452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)02 - 0276 - 11

Research on large deformation of tunnels with small intervals in squeezing steeply dipping phyllite strata

LI Lei¹, TAN Zhongsheng², GUO Xiaolong², YU Yu³, LUO Ningning⁴

(1. *Bridge and Tunnel Research Center, Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;*
2. *School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;* 3. *China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China;* 4. *Chengdu Engineering Co., Ltd., China Railway No.5 Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610073, China*)

Abstract: In order to find out the large deformation mechanism of tunnels with small intervals through squeezing soft rock stratum and to propose the control technology of large deformation of surrounding rocks, the influencing factors, the deformation law of the surrounding rock and the mechanical characteristics of the lining structure were studied by theoretical analysis, numerical calculation and field test. Results show that the large deformation of the tunnel is resulted from the coupling effect of multiple factors such as high geostress, steeply dipping strata, low surrounding rock strength and approaching construction. The unloading disturbances of the rear tunnel exerts a bias load to the preceding tunnel on one hand, and on the other hand, results in the bending damage of the

收稿日期: 2018 - 08 - 20; **修回日期:** 2018 - 10 - 15

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2018 - 9020); 国家自然科学基金资助项目(51678034)

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Public Welfare Research Institutes(Grant No. 2018 - 9020) and National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51678034)

作者简介: 李磊(1988 -), 男, 2017年于北京交通大学土木工程专业获博士学位, 现任助理研究员, 主要从事隧道及地下工程变形机制、修建技术等方面的研究工作。E-mail: lilei_1988@outlook.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0998



(a) 一般岩层



(b) 褶曲岩层

图2 掌子面揭露围岩

Fig.2 Uncovered surrounding rock of the tunnel face

隧道进口 YD2K111+700~YD2K112+100 的净岩柱宽度由 24.9 m 渐变至 1.7 m, 属小间距隧道, 施工工法及工序如图 3 所示。



图3 施工工法及工序示意图

Fig.3 Diagrammatic sketch of the construction method and process

该段隧道施工期间, 发生了挤压性软岩大变形, 主要表现为: 先行隧道(右线)拱顶初支纵向开裂, 自掌子面向后延伸近 30 m; 左边墙初支出现横向裂缝, 宽度约 2 mm; 仰拱开裂严重, 主裂缝位于仰拱中间, 与隧道轴线平行, 延长数十米, 最大宽度 3 cm, 支裂缝交错丛生; 部分 IV 级围岩段初期支护钢拱架严重破坏, C35 素混凝土二次衬砌开裂, 如图 4 所示。



(a) 拱顶裂缝

(b) 边墙裂缝

(c) 仰拱裂缝



(d) 初支钢架破坏

(e) 二次衬砌开裂

图4 现场支护结构破坏

Fig.4 Failure cases of the supporting structure

3 隧道大变形影响因素分析

3.1 地应力分析

水压致裂法测得隧道右线 YD2K112+020 底板(埋深 323 m)以下的地应力结果如图 5^[12]所示。

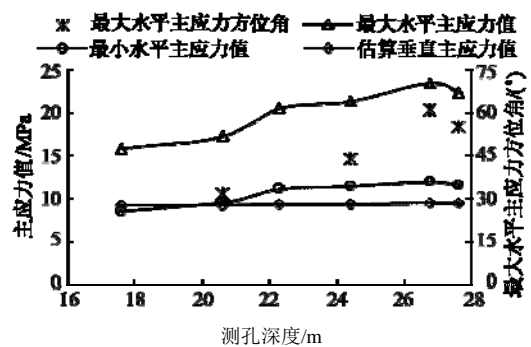


图5 地应力测试结果^[12]

Fig.5 Test results of in-situ stresses^[12]

综合分析最大水平主应力平均值为 21.86 MPa(优势方向 N53.3°E), 最小水平主应力平均值为 11.51 MPa, 水平地应力方向与隧道走向的空间关系如图 6 所示。

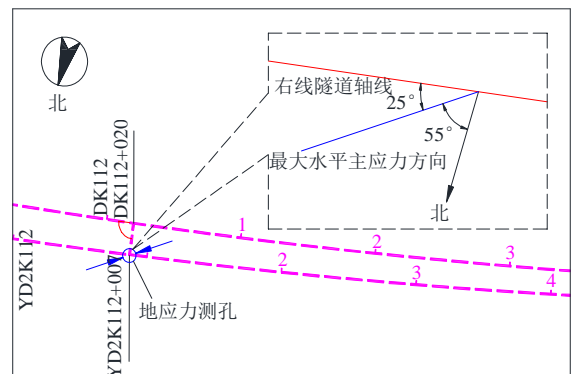


图6 地应力方向与隧道走向的平面关系

Fig.6 Plane relationship between the direction of the ground stress and the trend of the tunnel

由图 6 可知, 虽然最大水平主应力与隧道轴线小角度相交, 但是换算至隧道断面内的水平应力约 13.39 MPa, 围岩侧压力系数约 1.4, 在这种高地应

力环境下开挖隧道，洞周水平位移增长明显。千佛山斜冲断层倾向 SE，倾角 70°~80°，使得隧道存在一定程度偏压，不利于围岩自稳和结构整体受力。

3.2 围岩结构及强度分析

钻孔窥视法观测隧道右线边墙和底板的围岩内部结构形态^[12]如图 7, 8 所示。

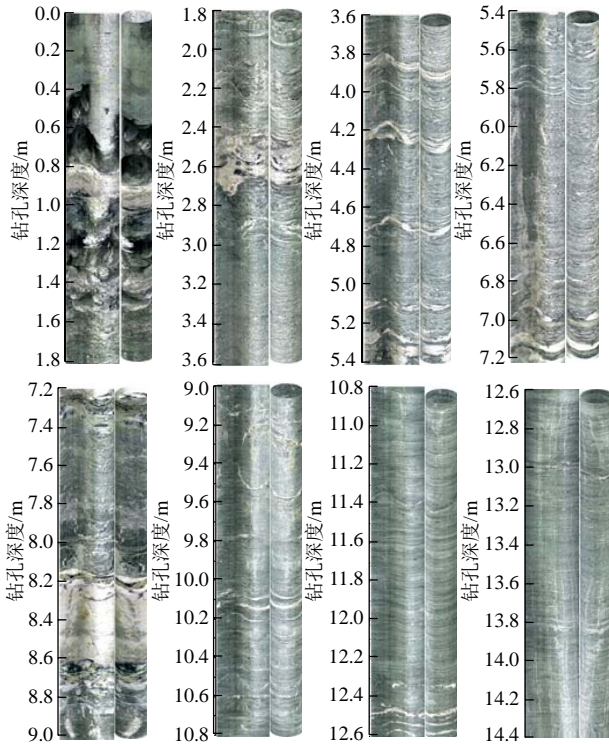


图 7 边墙围岩孔中观测图^[12]

Fig.7 Observation chart of surrounding rock boreholes on the side wall^[12]

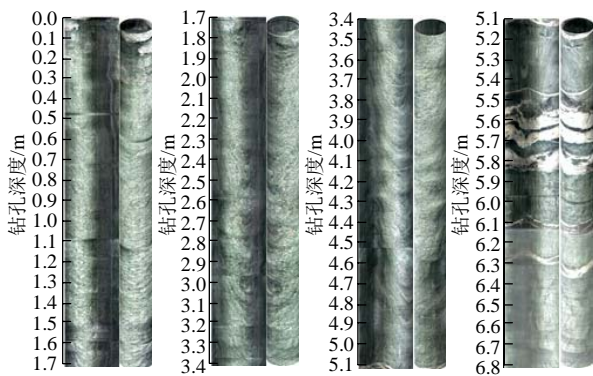


图 8 底板围岩孔中观测图^[12]

Fig.8 Observation chart of the surrounding rock borehole under the floor^[12]

由图 7 可知，边墙围岩钻孔中的 14.4 m 有效窥视深度范围内，0.4~1.6 m 的围岩空洞遍布，完整性非常差，1.6~10.0 m 的围岩软弱夹层较多，10.0 m 以上的围岩完整性较好。

由图 8 可知，底板围岩钻孔中的 6.0 m 有效窥

视深度范围内的围岩相对完整，只在 5.4~5.8 m 处存在软弱夹层。

基于围岩状态的钻孔窥视结果，采用原位点荷载法测得的边墙和底板内部围岩强度如图 9 所示。

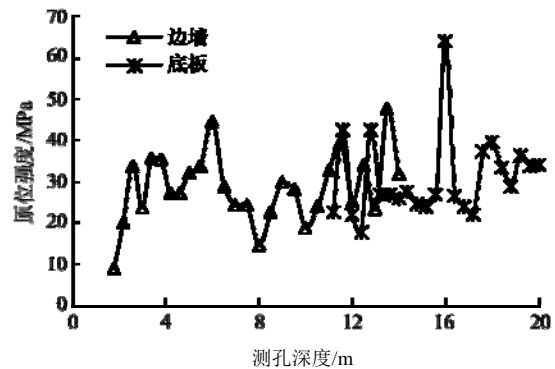


图 9 围岩原位强度测试结果

Fig.9 In-situ test results of the strength of the surrounding rock

由图 9 综合确定边墙和底板处的岩石原位强度平均值分别为 28.65 和 27.16 MPa，根据该区段的地质构造和节理裂隙发育情况，岩体强度按岩石强度的 40% 确定^[13]，得到边墙和底板处的岩体强度分别为 11.46 和 10.86 MPa。

杨家坪隧道进口小净距段的水平构造地应力作用明显，岩体强度较低，施工多次扰动后，围岩破坏范围大，岩体结构不利于隧道的侧向稳定，进而影响隧道结构的整体受力。

3.3 近接施工影响效应分析

近接工程施工的空间效应对隧道的稳定性影响作用显著，本文首先以 FLAC^{3D} 模拟分析杨家坪隧道小净距段后行隧道施工对先行隧道的影响。

3.3.1 计算模型及参数

隧道埋深按 330 m 考虑，隧道断面内的模型尺寸取 3D~5D(D 为洞跨)，以应力边界实现高地应力环境的模拟。隧道小净距渐变段落距离长达几百米，为了减少模型的计算难度，选取隧道净距为 2~30 m 的 16 个工况分别计算。计算工况及模型网格分别如图 10, 11 所示。模拟过程按工程实际采用两

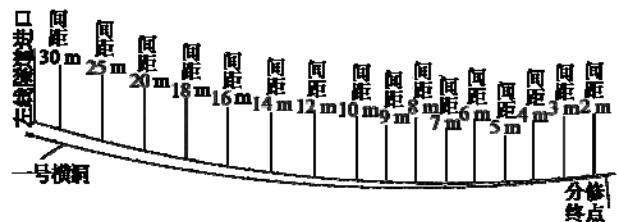


图 10 数值计算工况设计方案

Fig.10 Design scheme of numerical calculation working conditions

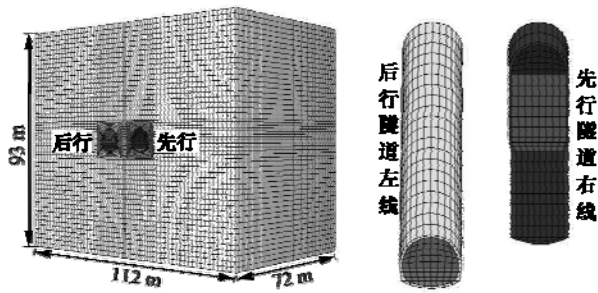


图 11 数值计算网格模型
Fig.11 Grid model of numerical calculation

台阶, 上台阶高度 6.09 m, 下台阶高度 2.50 m, 仰拱深度 1.37 m, 台阶长度按图 3 所示。

选用多节理模型(ubiquitous-joint model)模拟层状千枚岩地层。岩层倾角 85° , 岩层走向与隧道轴线平行, 详细计算参数如表 1^[14]所示。

表 1 围岩计算参数^[14]

Table 1 Calculation parameters of surrounding rock^[14]

弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	黏聚力 c_1/MPa	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\phi_1/(\text{^\circ})$	层面黏聚力 c_2/MPa	层面内摩擦角 $\phi_2/(\text{^\circ})$
1	0.32	0.5	2.78	28.5	0.1	24

初期支护和二次衬砌分别采用壳单元和实体单元模拟, 其参数取值按张德华等^[15]所述方法确定。

3.3.2 计算结果分析

(1) 隧道间距对围岩变形的影响

不同间距下的先行隧道围岩变形计算结果如图 12 所示, 图中先行隧道变形增量是后行隧道施工对先行隧道影响前后的变形量差值, 正值为增大, 负值为减小。

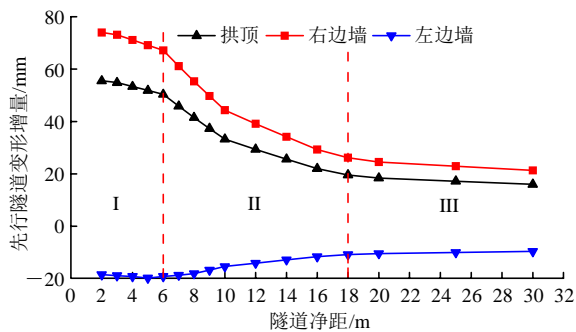


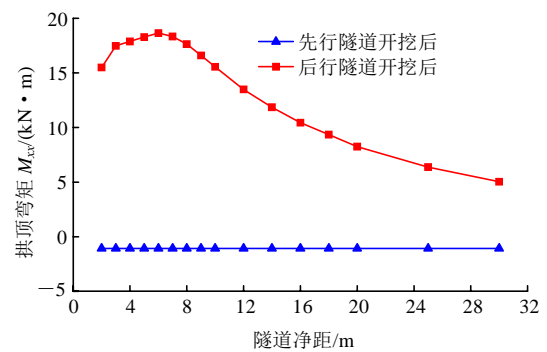
图 12 不同间距后行隧道对先行隧道变形的影响
Fig.12 Influence of the post construction tunnel on the deformation of first construction tunnel under different spacings

由图 12 可知, 后行隧道施工引起先行隧道拱顶和右边墙(远离中岩柱)位移增大, 左边墙(靠近中岩柱)位移减小。其原因: 一是后行隧道施工, 对先行

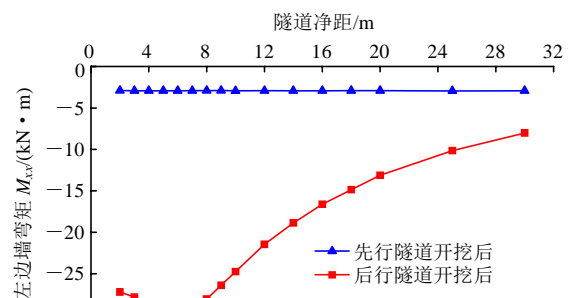
隧道围岩产生了新的扰动, 围岩破坏范围进一步增大; 二是后行隧道施工, 对先行隧道左侧围岩产生卸荷作用, 中岩柱向左侧压弯, 加之高构造应力的作用, 隧道偏压明显。根据图 12 所示不同间距的影响程度, 将影响区段划分为 3 个分区: I 强影响区 $0 \sim 6 \text{ m}$ ($0 \sim 0.6D$), II 中影响区 $6 \sim 18 \text{ m}$ ($0.6D \sim 3D$), III 弱影响区 ($>3D$), 并以此作为类比的依据, 在施工过程中选取不同的变形控制措施。

(2) 隧道间距对初期支护的影响

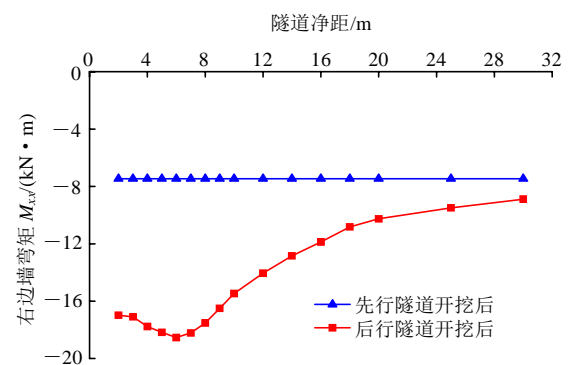
不同间距下的先行隧道初期支护受力计算结果如图 13 所示。



(a) 初期支护拱顶弯矩



(b) 初期支护左边墙弯矩



(c) 初期支护右边墙弯矩

图 13 不同间距后行隧道对先行隧道初期支护的影响
Fig.13 Influence of post construction tunnel on the initial support of the first construction tunnel under different spacings

由图 13 可知, 后行隧道开挖后, 先行隧道拱部

初期支护由负弯矩转变为正弯矩；边墙负弯矩明显增大，且左边墙成为初期支护受力的薄弱环节。

(3) 隧道间距对二次衬砌的影响

不同间距下的先行隧道二次衬砌受力计算结果如图 14, 15 所示。

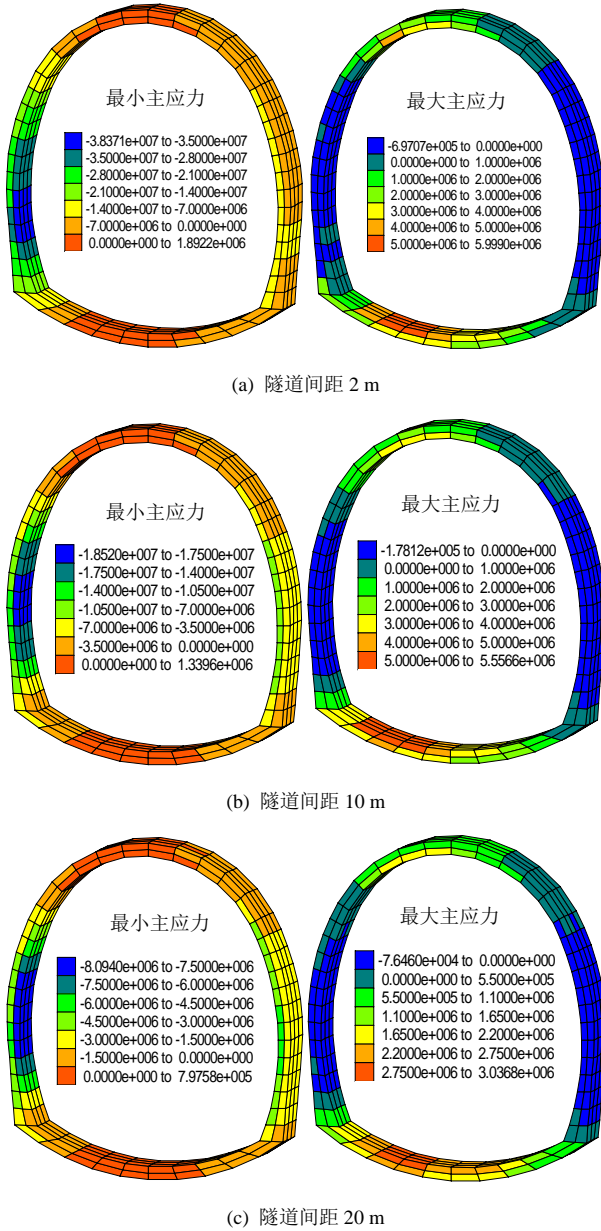
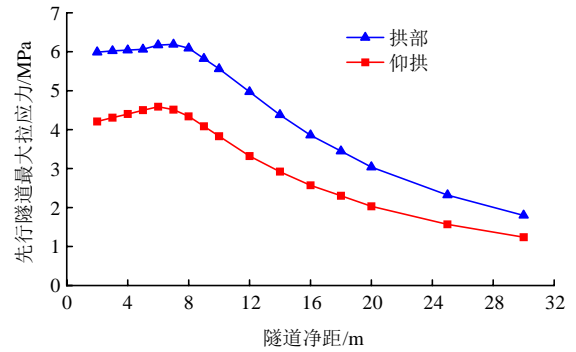


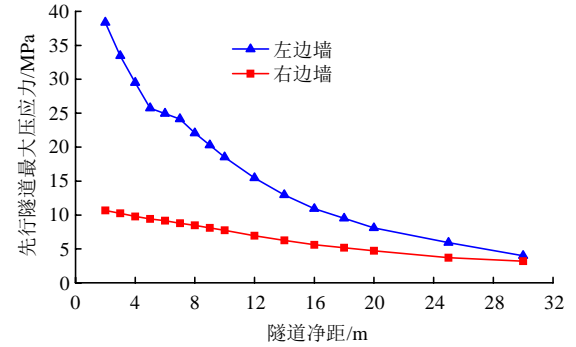
图 14 不同间距先行隧道二次衬砌应力(单位: Pa)

Fig.14 Secondary lining stress of the first construction tunnel under different spacings(unit: Pa)

由图 14, 15 可知, 最大拉应力发生在仰拱和拱顶, 最大压应力发生在靠近中岩柱一侧边墙, 先行隧道二次衬砌最大受力随着隧道净距的增大而减小, 其影响曲线拐点与围岩变形、初期支护受力基本一致。该地质环境下的隧道, 当隧道净距小于 6 m (0.6D)时, 后行隧道开挖导致先行隧道靠近中岩柱



(a) 二次衬砌最大拉应力



(b) 二次衬砌最大压应力

图 15 不同间距后行隧道对先行隧道二次衬砌的影响

Fig.15 Influence of the post construction tunnel on the secondary lining of the first construction tunnel under different spacings

一侧拱部及仰拱发生拉破坏, 靠近中岩柱一侧边墙发生压破坏; 当隧道净距大于 6 m (0.6D)时, 后行隧道开挖导致先行隧道仰拱发生拉破坏。

综上所述, 后行隧道施工对先行隧道的围岩变形及支护受力影响很大, 但因初期支护为柔性结构, 二次衬砌为刚性结构, 二次衬砌应力调整更加明显, 易发生开裂破坏, 因此施工时应严格控制开挖作业面、初期支护作业面和二次衬砌作业面的空间距离, 保证隧道结构整体安全。

4 大变形控制技术试验研究

通过上述研究, 明确了杨家坪隧道小净段大变形的诱发因素及作用特征, 针对性地优化施工工艺和支护参数对隧道大变形进行控制。

4.1 控制技术方案

调整隧道施工工序: 右线掌子面领先左线掌子面 3D, 右线二衬滞后左线仰拱 2D, 如图 16 所示。较原施工方案, 减少了先行隧道的应力调整时间, 改善了支护结构的整体受力, 避免了后行隧道开挖对先行隧道二次衬砌的影响。

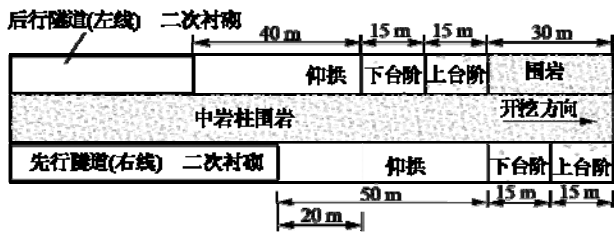


图 16 试验方案的施工方法及工序

Fig.16 Diagrammatic sketch of the construction method and process for test scheme

针对高水平构造应力和陡倾层状岩体，调整隧道断面和支护参数如表 2 和图 17 所示。

新隧道断面形式减少了洞周应力集中，改善了结构受力，更适合高水平构造应力环境；锚杆与岩层大角度相交，一方面与围岩形成“组合梁”，提高了围岩的抗弯性能，另一方面发挥了穿层锚固作用，

提高了围岩的抗滑性能^[16]；组合中空锚杆，进一步改善了锚杆对围岩锚固效果。

4.2 试验监测方案

在先行隧道 YD2K112+290 断面进行围岩变形和结构受力监测，测点布置如图 18 所示。其中测力锚杆编号 1~4 表示锚杆轴力测点，1Y 和 2Y 分别表示围岩与初期支护、初期支护与二次衬砌接触压力，1W 和 1N 分别表示钢架外翼缘和内翼缘应力，2W 和 2N 分别表示二次衬砌外侧钢筋和内侧钢筋应力。

4.3 试验结果分析

4.3.1 围岩变形

现场监测先行隧道典型断面围岩变形时程曲线如图 19 所示。由图 19 可知，先行隧道变形可以分为快速增长、先期稳定和后行隧道影响 3 个阶段。

表 2 支护参数

Table 2 Support parameters

方案	断面形式	超前支护			喷射混凝土		钢架		锚杆			
		类型	根数	纵向间距/m	单根长/m	等级	厚度/cm	类型	间距/m	拱部	边墙	间距
设计原方案	浅仰拱边墙小曲率		27					I18	1	3 m 砂浆锚杆	3 m 砂浆锚杆	1.2 m×1.0 m
		φ42 mm 小导管		3.2	4.5	C30	25					
试验新方案	深仰拱边墙大曲率		30					H175	0.8	3 m 中空锚杆	6 m 中空锚杆	1.2 m×0.8 m

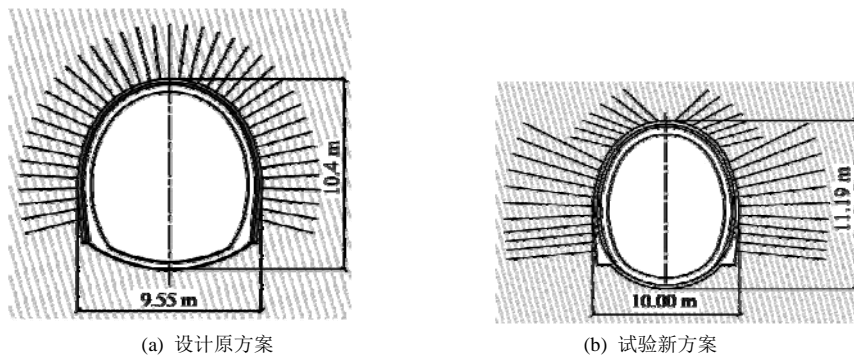


图 17 隧道断面及锚杆布置示意图

Fig.17 Diagrammatic sketch of the tunnel section and anchor arrangement

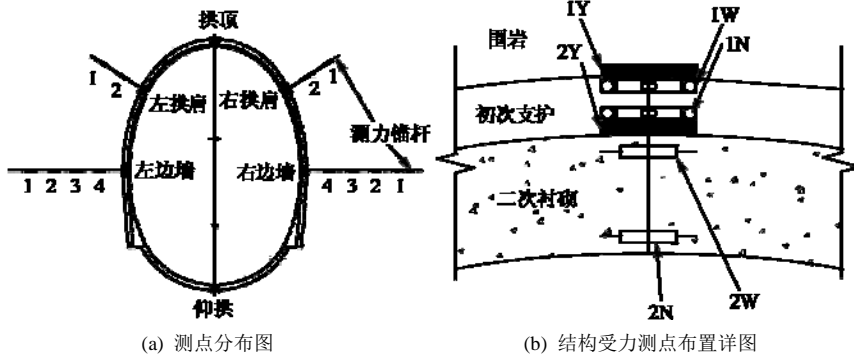


图 18 测点布置示意图

Fig.18 Schematic diagram of measuring points

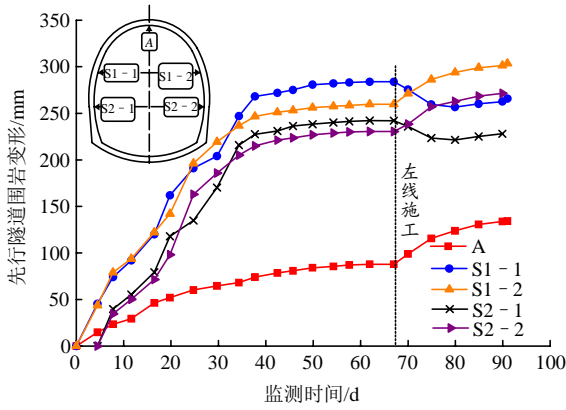


图 19 围岩变形时程曲线

Fig.19 Time-history curves of the surrounding rock deformation

先行隧道施工后，围岩变形快速增长，约 40 d 趋于稳定；当后行隧道掌子面接近先行隧道监测断面时，先行隧道拱顶下沉及远中岩柱侧边墙位移增大，如 A, S1 - 2, S2 - 2 测点所示；近中岩柱侧边墙位移减小，如 S1 - 1, S2 - 1 测点所示。

4.3.2 初期支护受力

现场监测初期支护受力如图 20~23 所示，图 21~23 中的负值表示受压，正值表示受拉。

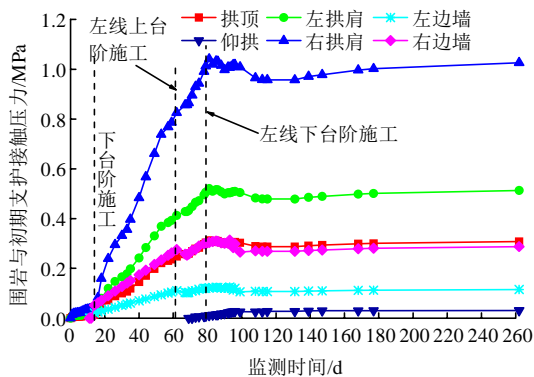
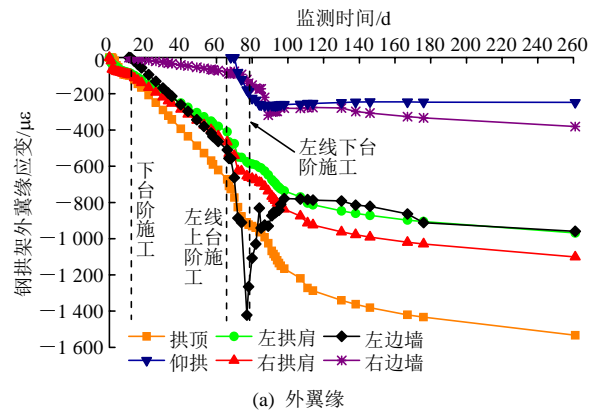


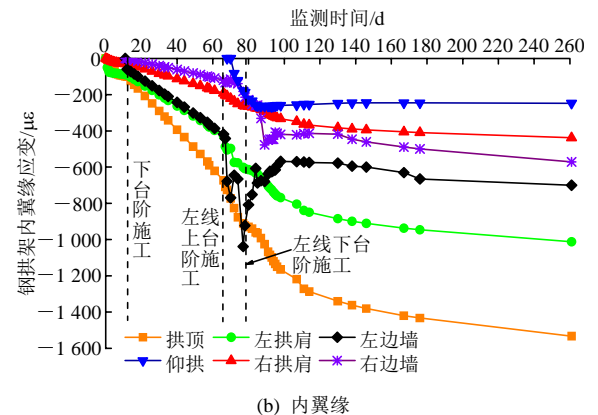
图 20 围岩与初期支护接触压力时程曲线

Fig.20 Time-history curves of the contact pressure between the surrounding rock and the initial support

由图 20 可知，先行隧道围岩与初期支护接触压力在上台阶开挖后增长较小，在下台阶施工后增长明显；当后行隧道上台阶通过先行隧道监测断面时，先行隧道左边墙和左拱肩围岩接触压力减小，当后行隧道下台阶通过该监测断面时，各点接触压力均出现下降台阶，而后缓慢增长，约 100 d 时趋于稳定。围岩与初期支护接触压力产生下降台阶的原因是后行隧道开挖，对先行隧道左侧围岩产生卸荷作用，导致围岩对初期支护的抗力减小。在高构造应力、左倾围岩和卸荷偏压的共同作用下，初期支护拱肩受力较大，尤其是右拱肩压力值达到 1.1 MPa。



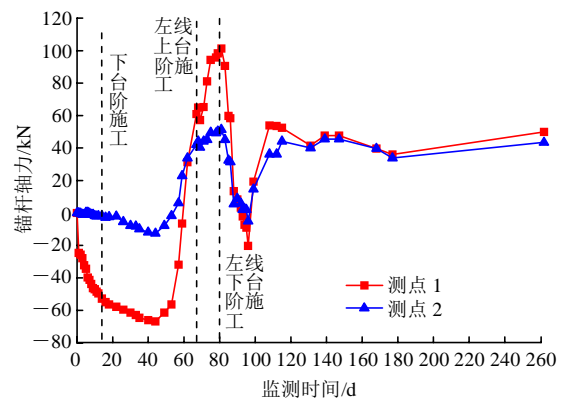
(a) 外翼缘



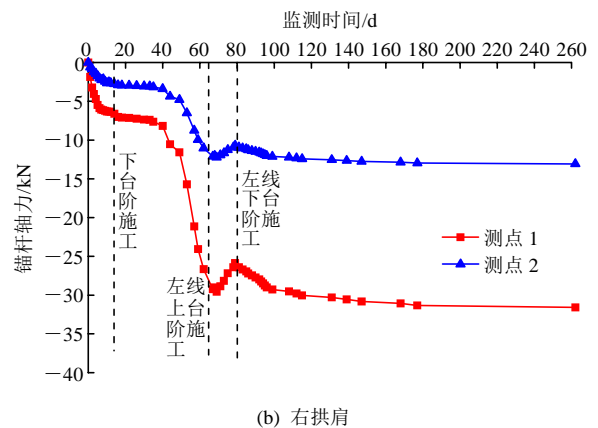
(b) 内翼缘

图 21 型钢拱架应变时程曲线

Fig.21 Time-history curves of the strain of the steel arch



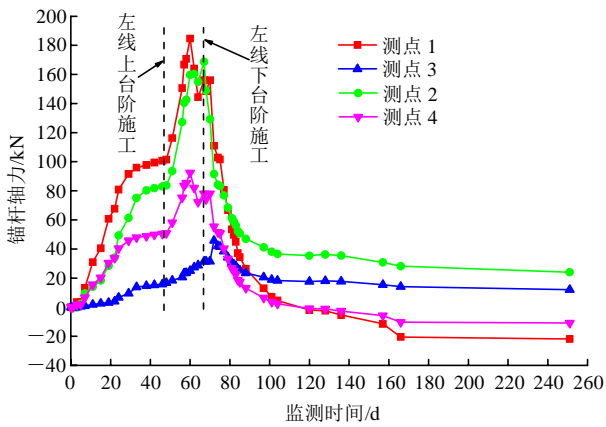
(a) 左拱肩



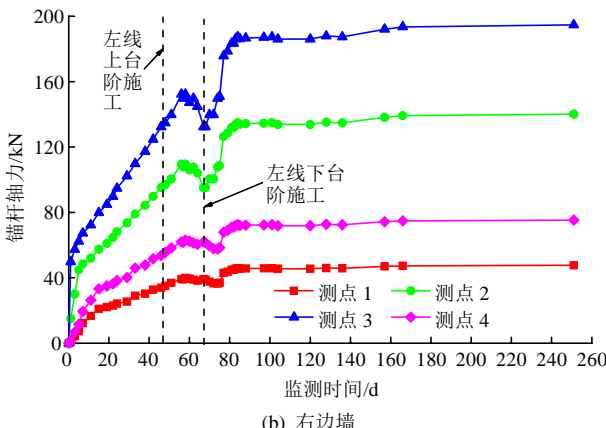
(b) 右拱肩

图 22 拱肩锚杆轴力时程曲线

Fig.22 Time-history curves of the axial force of the bolt on the arch shoulder



(a) 左边墙



(b) 右边墙

图 23 边墙锚杆轴力时程曲线

Fig.23 Time-history curves of the axial force of the bolt on the side wall

由图 21 可知, 型钢施作初期, 其应变呈线性增长约 60 d, 当后行隧道通过先行隧道监测断面时, 左右边墙型钢应变骤增, 拱部型钢应变增速放缓, 经过约 15 d 的应力调整, 各测点应变平稳增长, 约 120 d 趋于稳定。后行隧道施工导致先行隧道型钢应变增长规律变化同样是后行隧道开挖卸荷所致。左侧围岩对初期支护的抗力减小, 型钢向中岩柱侧弯曲变形, 这与数值计算结果显示的边墙初期支护由负弯矩转变为正弯矩的现象一致。监测结果表明型钢整体受压, 以拱顶受力最大, 这是由于围岩侧压力大, 边墙内挤严重所致。

由图 22 可知, 拱部锚杆施作初期整体受压, 伴随后行隧道掌子面接近先行隧道监测断面, 左拱肩锚杆受力逐渐变为受拉, 且波动幅度很大; 右拱肩锚杆受力虽有少许波动, 但整体所受压力持续增长。这是由于后行隧道施工对中岩柱侧的围岩扰动, 改变了锚杆与围岩的锚固状态, 在围岩机械握裹作用下, 锚杆受力不断调整。

由图 23 可知, 边墙锚杆施作初期, 轴力增长较快, 但右边墙锚杆轴力明显大于左边墙。随着后行

隧道掌子面接近先行隧道监测断面, 左侧边墙锚杆轴力陡然增长, 其峰值出现在后行隧道上、下台阶段工作面之间, 后行隧道掌子面通过后, 锚杆轴力迅速减小, 局部转变为受压, 表明锚杆作用基本丧失, 需要对中岩柱进行二次加固; 右边墙锚杆在后行隧道通过时, 出现一个下降台阶后迅速恢复, 最终达到稳定受力状态。

4.3.3 二次衬砌受力

拱墙二次衬砌滞后于初期支护成环 20 d, 现场监测二次衬砌受力时程曲线如图 24, 25 所示。图 25 中负值表示受压, 正值表示受拉。

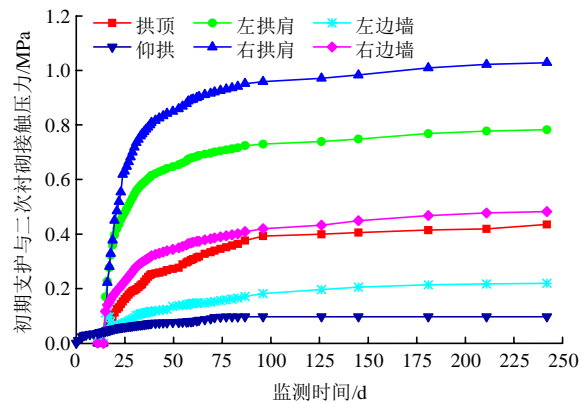
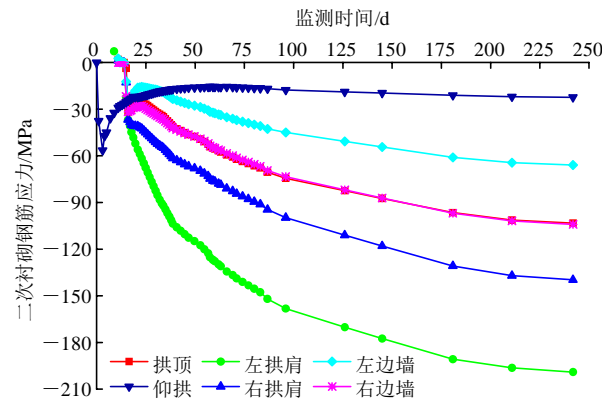


图 24 初期支护与二次衬砌接触压力时程曲线

Fig.24 Time-history curves of the contact pressure between the initial support and the secondary lining

由图 24 可以知, 初期支护与二次衬砌接触压力在二次衬砌施工后迅速增长, 50 d 时增速变缓, 约 125 d 趋于稳定。初期支护与二次衬砌接触压力最大值依然位于右拱肩, 左边墙和仰拱处的接触压力较小, 与初期支护受力状况基本相同。

由图 25 可知, 二次衬砌施作初期, 混凝土强度不足, 钢筋与混凝土无法协调变形, 钢筋受力增长较快, 在拆模后的 6 d 时间里, 由于卸荷作用, 存在应力下降段, 之后持续增长, 100 d 后趋稳。与接



(a) 外侧

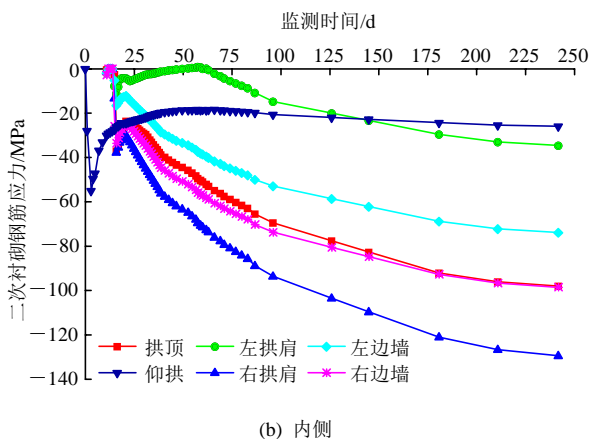


图 25 二次衬砌钢筋应力时程曲线

Fig.25 Time-history curves of the stress of the steel bar in the secondary lining

触压力相对应, 二次衬砌钢筋受力在拱肩处较大, 其中左拱肩最大钢筋受压 199 MPa(换算混凝土受压 32.5 MPa), 边墙和仰拱处较小。

由于调整了施工工序, 二次衬砌受力基本不受后行隧道的施工扰动影响, 没有出现受力突变现象, 实际中也未开裂, 表明新施工方案是可行的。但是二次衬砌施作后, 仍承受了较大的围岩压力, 工程实际中应进一步优化初期支护参数, 分析二次衬砌的合理施作时机, 提高二次衬砌的安全储备。

5 结 论

本文通过理论分析、数值计算和现场试验等手段研究了小净距隧道穿越高地应力陡倾层状软岩的大变形控制技术, 得到的主要结论如下:

(1) 杨家坪隧道进口小净距段地应力环境复杂, 构造应力影响作用明显, 岩层产状陡倾, 各向异性显著, 岩体强度较低, 自稳能力较差, 施工扰动后, 边墙围岩挤压、弯折破坏严重; 后行隧道施工, 进一步劣化了先行隧道洞周围岩, 尤其是严重降低了中岩柱围岩的完整性和承载力。高构造应力、陡倾围岩产状、近接施工扰动等多因素的耦合作用, 导致了隧道大变形现象的产生。

(2) 在高地应力陡倾层状软岩地层中施工小间距隧道, 后行隧道开挖对先行隧道中岩柱侧围岩产生卸荷作用, 一方面导致先行隧道逐步变为偏压状态, 另一方面导致先行隧道中岩柱侧陡倾层状岩体向洞外发生弯曲破坏, 这就使得先行隧道拱部钢架由受压转变为受拉, 拱顶和远中岩柱侧边墙位移加

大, 近中岩柱侧边墙位移减小; 由于隧道间距的不同, 后行隧道对先行隧道的影响程度也存在差异, 应根据影响程度分区, 动态调整适宜的控制措施。

(3) 在高构造应力和陡倾层状岩体的组合作用下, 当先行隧道二次衬砌端头处于后行隧道掌子面之前时, 后行隧道施工导致先行隧道二次衬砌拱部和仰拱拉应力增大, 边墙压应力增大。若隧道间距较小, 易引发拱部和仰拱的二次衬砌拉裂, 近中岩柱侧边墙的二次衬砌压裂。因此, 在工程实际中施工小净距隧道时, 应严格控制施工工序, 避免先行隧道二次衬砌端头处于后行隧道开挖作业面之内。

(4) 调整先后行隧道的施工工序后, 减少了后行隧道对先行隧道的扰动时间, 使先行隧道的应力调整基本在初期支护阶段完成, 改善了结构的受力状态; 优化隧道断面形状, 减少了洞周围岩应力集中, 提高了支护结构对复杂应力环境的适应性; 锚杆与岩层垂直或大角度相交, 穿层锚固作用显著, 形成的“组合梁”提高了层状岩体抗弯性能和层面抗滑性能, 但由于施工的多次扰动, 会降低锚杆的作用效果, 应注意对中岩柱侧的围岩进行补强加固。

参考文献(References):

- [1] 刘颜青, 钟世航, 卢汝绥, 等. 小净距并行隧道力学状态的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 590 - 594.(LIU Yanqing, ZHONG Shihang, LU Rusui, et al. Experimental study on mechanical characteristics of twin tunnels with small spacing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 590 - 594.(in Chinese))
- [2] 胡元芳. 小线间距城市双线隧道围岩稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1 335 - 1 338.(HU Yuanfang. Stability analysis of surrounding rocks of double-hole urban tunnel with small interval[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1 335 - 1 338.(in Chinese))
- [3] 谭忠盛, 孟德鑫, 石新栋, 等. 大跨小间距黄土隧道支护体系及施工方法研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(11): 82 - 89.(TAN Zhongsheng, MENG Dexin, SHI Xindong, et al. Research on support system and construction method for large-section small spacing tunnel in loess[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(11): 82 - 89.(in Chinese))
- [4] 仇文革. 地下工程近接施工力学原理与对策的研究[博士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2003.(QIU Wenge. The study on

- mechanics principle and countermeasure of approaching excavation in underground works[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.(in Chinese)
- [5] 刘阳, 伍晓军, 刘志强, 等. 关于碳质板岩隧道大变形机制及应对措施探讨[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(6): 19 - 24.(LIU Yang, WU Xiaojun, LIU Zhiqiang, et al. Discussion of and solutions for the large deformation mechanism of a tunnel in carbonaceous slate[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(6): 19 - 24.(in Chinese))
- [6] 付厚利, 宋秀群, 茅晓辉. 深埋HJ复合型软岩洞室导洞法让压效果研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2009, 28(6): 45 - 50.(FU Houli, SONG Xiuqun, MAO Xiaohui. Research on effect of pressure relief for chambers in deeply buried HJ composite soft rocks with pilot-tunneling method[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2009, 28(6): 45 - 50.(in Chinese))
- [7] 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 Qixiang, 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.(in Chinese))
- [8] 晏启祥, 何川, 姚勇, 等. 软岩小净距隧道施工力学效应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(5): 693 - 697.(YAN Qixiang, HE Chuan, YAO Yong, et al. Study on mechanical effect of small-distance tunnels located at soft ground[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(5): 693 - 697.(in Chinese))
- [9] 刘阳. 软岩大变形隧道小净距段变形与受力分析[硕士学位论文][D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2015.(LIU Yang. Deformation and stress analysis of soft rock tunnel with large deformation and small distance[M. S. Thesis][D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2015.(in Chinese))
- [10] 施玉晶. 软岩大变形小净距隧道支护结构研究[硕士学位论文][D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.(SHI Yujing. Study on supporting structures of soft rock tunnel with large deformation and small distance[M. S. Thesis][D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.(in Chinese))
- [11] 中铁二院工程集团有限责任公司. 新建成都至兰州铁路杨家坪隧道工程地质勘察报告[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2012.(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Engineering geological survey report of Yangjiaping Tunnel on new Chengdu-Lanzhou Railway[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2012.(in Chinese))
- [12] 中铁二院工程集团有限责任公司, 北京交通大学, 天地科技股份有限公司. 成兰铁路杨家坪隧道进口工区地应力及围岩强度测试报告[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 北京: 北京交通大学, 北京: 天地科技股份有限公司, 2014.(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Beijing Jiaotong University, Tiandi Science and Technology Co., Ltd. Testing report on in-situ stress and surrounding rock strength at the entrance of Yangjiaping Tunnel on Chengdu-Lanzhou Railway[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Beijing: Beijing Jiaotong University, Beijing: Tiandi Science and Technology Co., Ltd., 2014.(in Chinese))
- [13] 王成虎, 郭啟良, 贾龙. 基于Hoek-Brown强度准则的高应力判据理论分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3 325 - 3 332.(WANG Chenghu, GUO Qiliang, JIA Long. Theoretical analysis of high stress criterion based on the Hoek-Brown criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3 325 - 3 332.(in Chinese))
- [14] 吴永胜, 谭忠盛, 李少孟. 挤压性大变形隧道围岩基本特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增1): 398 - 402.(WU Yongsheng, TAN Zhongsheng, LI Shaomeng. Experimental study on the basic characteristics of tunnel in squeezing surrounding rock with large deformation[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(Supp.1): 398 - 402.(in Chinese))
- [15] 张德华, 刘士海, 任少强. 高地应力软岩隧道中型钢与格栅支护适应性现场对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2 258 - 2 266.(ZHANG Dehua, LIU Shihai, REN Shaoqiang. Research on selection of steel and steel grid for tunnel support in soft rock with high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(11): 2 258 - 2 266.(in Chinese))
- [16] 李磊, 谭忠盛, 郭小龙, 等. 高地应力陡倾互层千枚岩地层隧道大变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1 611 - 1 622.(LI Lei, TAN Zhongsheng, GUO Xiaolong, et al. Large deformation of tunnels in steep dip strata of interbedding phyllite under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1 611 - 1 622.(in Chinese))