

文章编号: 1674—8247(2020)03—0018—04  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.03.004

## 高地应力环境下隧道围岩强度特征研究

余洪璋<sup>1</sup> 冯君<sup>1,2</sup> 姜波<sup>1</sup> 张广泽<sup>1</sup>

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 东北大学, 沈阳 110004)

**摘要:** 本文结合铁路隧道工程实例, 考虑高地应力地质环境及地质构造特征, 将隧道围岩强度进行分类, 通过对构造应力为主的软岩大变形形成机理进行分析, 提出对该类大变形的防控理念, 得出了以下研究结论: (1) 高地应力环境下, 隧道围岩应考虑三种岩石强度, 分别是天然强度、原岩强度和卸荷强度, 对以构造应力为主的隧道围岩大变形和岩爆, 应着重考虑围岩的卸荷强度; (2) 对构造应力为主的软岩大变形, 提出“千层底”加固圈的防控理念, 并提出“快挖、快支、快锚、快封闭”的主动防控设计方法。

**关键词:** 高地应力; 围岩强度; 软岩大变形; 千层底; 防控理念

中图分类号: TU451<sup>+</sup>.1 文献标志码: A

## Study on the Strength Characteristics of Tunnel Surrounding Rock under High Geo-stress Conditions

YU Hongzhang<sup>1</sup> FENG Jun<sup>1,2</sup> JIANG Bo<sup>1</sup> ZHANG Guangze<sup>1</sup>

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;  
2. Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** Combined with engineering projects of railway tunnels, the strength of surrounding rock is classified according to the characteristics of geological structure and geological environment under high geo-stress in this paper. Through the analysis of the formation mechanism of large deformation of soft rock mainly caused by the tectonic stress, the concept of prevention and control of this kind of large deformation is put forward. The following conclusions are obtained: (1) 3 kinds of rock strength shall be considered for the tunnel surrounding rock under high geo-stress conditions, which are natural strength, original strength of rock and unloading strength. Unloading strength of surrounding rock shall be considered in particular for the large deformation and rock burst of tunnel surrounding rock mainly caused by the tectonic stress. (2) For large deformation of soft rock caused by tectonic stress, the prevention and control concept of “thousand-layer bottom” reinforcement ring is proposed, and the active prevention and control design method of “fast excavation, fast support, fast anchoring and fast closure is put forward.

**Key words:** high geo-stress; surrounding rock strength; large deformation of soft rock; thousand-layer bottom; concept of prevention and control

我国西南艰险山区地形、地质条件复杂, 不良地质广布, 各项工程布设困难, 超长且超埋深隧道多处于高

地应力地质环境, 岩爆、大变形等潜在工程地质问题突出。深埋隧道在硬质岩地区易出现岩爆, 在软质岩地

收稿日期: 2020-04-03

作者简介: 余洪璋(1965-), 男, 高级工程师。

基金项目: 四川省科技计划项目(2019YFG0047)

引文格式: 余洪璋, 冯君, 姜波, 等. 高地应力环境下隧道围岩强度特征研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 18-21.

YU Hongzhang, FENG Jun, JIANG Bo, et al. Study on the Strength Characteristics of Tunnel Surrounding Rock under High Geo-stress Conditions [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 18-21.

区则易出现大变形<sup>[1-6]</sup>。

高地应力环境下,隧道工程地质问题及相关处治措施与围岩强度特征相关。目前勘察设计中往往只考虑到了岩石的天然强度,而实际上隧道围岩在高地应力环境下面临三种岩石强度,分别是天然强度、原岩强度和卸荷强度,在不同的高地应力地质环境下,三种强度所表现的工程特征不尽相同,不能统一按照一种强度进行工程特性分析。本文从高地应力环境下可能存在的地质环境变化出发,结合实际铁路工程实例,分析隧道围岩三种强度的工程特性。

1 高地应力环境地质特征

高地应力环境下,隧道工程往往受区域地应力场和不同类型地质构造的影响。

1.1 区域地应力场

地应力为工程建设开挖之前,天然岩体内部赋存的自然应力,地应力场的形成成因非常复杂,一般认为是岩体重力和地球板块历次构造运动发展的结果。实际隧道工程所处地应力场分为宏观和微观两个层面,宏观层面即为区域地应力场,微观层面即为局部地应力场。传统工程地质中对岩体强度特性的研究往往考虑的是局部应力场,而区域地应力场与地层岩性和局部地质构造无关,往往关乎于隧道所处的地质背景。在高地应力环境下,宏观区域地应力场对工程设计、施工的影响至关重要。在相同的地质背景下,软岩不易积聚地应力,而硬岩容易积聚地应力;完整性好的岩体容易积聚地应力,而完整性差的岩体不易积聚地应力。岩体的应力状态是影响高边坡岩体稳定性、地下工程围岩稳定性、大型水电站工程坝基坝肩稳定性的重要因素,也是工程设计的重要指标之一,分析和确定地应力场的分布特征和规律已成为工程力学研究的热点问题之一。深埋隧道穿越高地应力环境时,围岩存在三个强度状态,可以表述为原岩强度、天然强度和卸荷强度。

1.2 地质构造特征

岩体是岩石受构造挤压产生各种破裂面后形成的结构体,其弹性势能大部分储存在岩体结构上,只有少部分储存在岩石晶格之间。当岩石坚硬、结构面贯通性差时,由地应力作用产生的弹性势能,主要储存在微裂隙呈半封闭或封闭状态的岩体结构中,弹性势能的高低取决于微裂隙的多少。微裂隙越多弹性势能越高。如果弹性势能过高,隧道开挖卸荷后,势能转变为动能,岩块、岩屑如同子弹出堂,导致岩爆发生。

当岩石坚硬、结构面贯通性好时,由地应力作用产

生的弹性势能,主要储存在结构面相互交切的岩体“框架结构”上,它是“框架结构”发生变位、变形而积聚的能量。隧道开挖卸荷后,围岩为恢复先前的状态,主要表现为以块体为单元的弹性势能的释放。如果“框架结构”初始变形量过大,积聚的弹性势能过高,隧道开挖卸荷后则可能以单个或多个岩块突出、挤出的形式释放弹性势能,其结果就是发生坠落式岩爆、崩塌或大变形。大变形和岩爆是围岩变形的两种极端状态,两者之间还有中间状态。由于中间状态对隧道开挖影响不大,工程界只作为正常的围岩支护对待。随着完整性的降低,当岩体呈碎裂状时,围岩变形大多以蠕变的方式挤出,发展为大变形。以铁路隧道实例列举高地应力环境地质构造特征如表1所示。

表1 高地应力环境地质构造特征(铁路隧道实例)

隧道名称	最大水平主应力 /垂直应力	应力状态	构造运动 模式
中义隧道	1.4	$S_H > S_v > S_h$	平移断层
木寨岭隧道	3.2	$S_H > S_h > S_v$	逆冲断层
柿子园隧道	1.5	$S_H > S_v > S_h$	平移断层

2 隧道围岩强度特征

围岩的强度包含了岩块、岩体的结构面及层间填充物的强度,是隧道围岩的稳定性的决定因素。传统方法进行围岩强度分析时,往往只考虑了岩石天然强度,而高地应力环境下,应根据不同的地质构造作用,选取适宜的岩石强度进行分析。高地应力是一个相对的概念,是相对围岩岩体强度( $R_{cm}$ )而言的。也就是说,当岩体强度与最大原位初始地应力( $\sigma_{max}$ )的比值( $R_{cm}/\sigma_{max}$ )达到某一水平时才可能发生大变形。研究表明,当强度应力比小于0.3~0.5时,即能产生比正常隧道大一倍以上的变形。考虑地层时代、优势结构面产状、岩石强度、岩层厚度、岩体完整性等诸多因素,将高地应力环境下岩石强度归结为天然强度、原岩强度和卸荷强度三类。

2.1 天然强度

围岩天然强度,是指成岩后天然条件下的岩体强度。岩体天然强度决定于矿物组成和内部结构,与地应力、温度等具体赋存环境无关。在高地应力环境下,岩体天然强度也是存在的。如深切河谷在缓慢卸荷条件下,谷坡、谷底基岩强度就是天然强度。河流下切是个地质历史概念,非常缓慢,在这个过程中岩体受到的扰动很小,几乎可以忽略不计,于是在河谷下切过程中,谷坡、谷底基岩就能基本保持原先的矿物结构,近乎天然状态的存在。

## 2.2 原岩强度

原岩强度是指岩体在隧道未开挖的初始应力状态下的强度。按牛顿第三定律,作用力与反作用力是大小相等方向相反的一对力。反作用力只能靠岩体强度提供,可以设想,当地应力小于岩体天然强度时,原岩强度就是天然强度。若地应力逐渐加大,而岩性不变,最终岩体中的地应力就会大于岩体天然强度,这种情况下,原岩强度就会随着地应力增加而增大。

## 2.3 卸荷强度

卸荷强度是指处于高地应力条件下的岩体,在应力解除后的强度。在高地应力环境钻探,岩芯出现饼化现象,强度急剧丧失,就是原岩强度转化为卸荷强度的实证。在隧道开挖中,初揭时围岩强度较高,随着时间的推移,强度逐渐丧失,甚至手掰即开,跟初揭时判若两样,过程中还伴随着围岩的显著变形。大变形和岩爆,本质上都是应力解除导致的,可以说是高地应力环境下围岩的卸荷现象。

## 3 围岩变形防控理念

在高地应力环境下,传统的围岩变形防控理念也不尽完全适用。隧道围岩大变形尤其是高地应力下大变形问题已成为世界性的地下工程难题之一。国内外已有诸多高地应力环境下发生大变形灾害的工程案例,如陶恩隧道、惠那山隧道、南昆铁路的家竹菁隧道、兰渝铁路木寨岭隧道、兰新铁路乌稍岭隧道、金川有色金属矿区巷道等<sup>[7-12]</sup>。针对隧道围岩变形破坏的诱发机制和表现形式,国内外专家学者相继提出了多种防控理论学说。其中较为广泛认可的有“新奥法”、“收敛约束法”、“软岩工程力学支护理论”等。“新奥法”是由奥地利学者 L. V. RABCEWICZ 于 1948 年提出<sup>[9-11]</sup>的,并于上世纪 60~70 年代引入我国。该学说的主要思想是充分利用围岩的自承能力,采用锚杆和喷射混凝土为主要支护手段,及时对围岩进行加固,适应围岩的变形,防止产生有害松弛变形。“收敛约束法”又称为“围岩支护特性曲线法”<sup>[13-15]</sup>,该方法的发展有赖于岩石力学和“新奥法”的发展。收敛约束思想最初由 Fenner 提出,该方法应用弹塑性理论推导出了隧道支护压力与隧道开挖边界位移的关系曲线,根据该曲线的基本特征,认为隧道支护压力随隧道边界位移的增大而减小。该方法反映了围岩与支护之间的相互作用机理,对于如何充分发挥围岩的自承能力具有较大意义。“软岩工程力学支护理论”<sup>[16-17]</sup>由何满潮院士提出,运用工程地质学和现代大变形力学

相结合的方法,通过分析软岩变形力学机制,提出了以转化复合型变形力学机制为核心的新的软岩巷道支护理论。

尽管国内外学者对隧道围岩变形破坏的防控理论进行了大量研究,并在实际的隧道工程中予以应用,解决了一些实际工程问题。但随着我国基础设施的快速发展,针对处于高地应力环境,且往往发生主要以构造应力为主的大变形的工程建设项目,其大变形的设计应有新的防控理念。

### 3.1 防控理念

大变形的本质是原岩解除应力所致,其根本原因是由于卸荷强度比原岩强度低得多,在卸荷过程中不可避免地出现显著变形。

由于原岩的开挖卸荷,洞壁处出现应力集中,当围岩强度足够时,应力很快形成新的平衡,这就是围岩自稳;但围岩强度过低,卸荷后原岩发生破坏,无法在洞壁处形成平衡,则应力集中将向围岩深部发展,若长时间无法形成新的平衡,则表现为围岩的持续变形,这种变形将可能使整个洞室丧失稳定带来不可接受的后果。因此,在隧道开挖后,要迅速采取加固措施,避免围岩强度过度丧失。理想的办法就是,开挖后迅速喷混凝土、实施短锚杆,先稳住围岩,形成类似“千层底”的加固圈,然后再实施长锚杆,将“千层底”的根生到原岩中。同时架设钢架并尽快封闭,并根据情况适当注浆,改善围岩强度,形成良好的受力拱。为了减小对围岩的扰动,提高卸荷强度,缩短封闭时间,还应推行机械化开挖。因为采用矿山法施工,爆破过程始终有突发性,容易造成既有结构面突然张开,卸荷强度显著降低。

综上所述,软岩大变形应遵循“适度释放、主动控制、强化支护、后注浆修复围岩、充分调动围岩的自承载能力,控制塑性区发展”的防控理念,即通过一定强度的支护结构,采用大型机械配套,改善开挖方法,强化锚杆,加强钢架,以实现“快挖、快支、快锚、快封闭”,以较小的代价实现对围岩的保护和主动加固,最终达到变形防控目的。

### 3.2 工程案例

成兰铁路跃龙门隧道 3 号斜井工区埋深约 1 100 m,地层岩性为震旦系邱家河组( $Z_bq$ )炭质板岩、页岩夹砂质板岩,岩体强度约 3 MPa。施工中过程中发生了严重大变形,最大变形量达 2 m 以上,跃龙门隧道 3 号斜井工区正洞变形如图 1 所示。

根据现场围岩变形特征,采取主动控制技术。



图1 跃龙门隧道3号斜井工区正洞变形图

(1)将开挖断面调整为圆形断面,更有利于结构受力。(2)根据变形发展特点,设计多层支护,采用长短组合锚杆主动加固围岩。(3)配置大型机械,实现快速开挖,快速封闭成环,减少围岩松弛。

通过上述措施,成洞变形量控制在30 cm以内,大变形得到有效防控。现场成洞效果影像如图2所示。



图2 现场成洞效果影像图

## 4 结论

本文将高地应力地质环境及地质构造因素下的隧道围岩强度分为三类,并结合工程实例,对以构造应力为主的软岩大变形防控理念进行了综合分析,得到以下结论:

(1)高地应力环境下,隧道围岩应考虑三种岩石强度,分别是天然强度、原岩强度和卸荷强度。在不同的高地应力地质环境下,三种强度所表现的工程特征不尽相同,不能统一按照一种强度进行工程特性分析。

(2)对以构造应力为主的隧道围岩大变形和岩爆,应着重考虑围岩的卸荷强度。

(3)针对构造应力为主的软岩大变形,本文提出了“千层底”加固圈的防控理念,并提出了“快挖、快支、快锚、快封闭”的主动防控设计方法。

## 参考文献:

- [1] 王连国,李明远,王学知. 深部高应力极软岩巷道锚注支护技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2889-2893.  
WANG Lianguo, LI Mingyuan, WANG Xuezhi. Study on Mechanisms and Technology for Bolting and Grouting in Special Soft Rock Roadways under High Strss [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2889-2893.
- [2] 杨树新. 中国陆域地壳应力场分布特征研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.  
YANG Shuxin. Study on the Distribution Characteristics of Crustal Stress Field in Chinese Mainland [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [3] 景锋,盛谦,张勇慧,等. 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2056-2062.  
JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yonghui, et al. Research on Distribution Rule of Shallow Crustal Geostress in China Mainland [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2056-2062.
- [4] 景锋,盛谦,张勇慧,等. 我国原位地应力测量与地应力场分析研究进展[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 51-58.  
JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yonghui, et al. Study Advance on In-site Geostress Measurement and Analysis of Initial Geostress Field in China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 51-58.
- [5] 王连捷,崔军文,张晓卫,等. 中国大陆科学钻主孔现今地应力状态[J]. 地球科学, 2006, 31(4): 505-512.  
WANG Lianjie, CUI Junwen, ZHANG Xiaowei, et al. In-situ Stress State in the Main Borehole of the Chinese Continental Scientific Drilling [J]. Earth Science, 2006, 31(4): 505-512.
- [6] 赵德安,陈志敏,蔡小林,等. 中国地应力场分布规律统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1265-1271.  
ZHAO De'an, CHEN Zhimin, CAI Xiaolin, et al. Analysis of Distribution Rule of Geostress in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1265-1271.
- [7] 张祉道. 家竹箐隧道施工中支护大变形的整治[J]. 世界隧道, 1997, 34(1): 7-16.  
ZHANG Zhidao. Renovation of Support Deformation in Jiazhujing Tunnel Construction [J]. Modern Tunnelling Technology, 1997, 34(1): 7-16.
- [8] 张德华,王梦恕,符华兴,等. 强挤压型隧道锚杆支护参数的确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(13): 2201-2204.  
ZHANG Dehua, WANG Mengshu, FU Huaxing, et al. Determination of Parameters for Bolts in Strong Extrusion Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(13): 2201-2204.
- [9] 刘高,张帆宇,李新召,等. 木寨岭隧道大变形特征及机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S2): 5521-5526.  
LIU Gao, ZHANG Fanyu, LI Xinzha, et al. Research on Large Deformation and Its Mechanism of Muzhailing Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5521-5526.

(下转第27页)

- ZHU Ying. Force Analysis and Experimental Study of Longitudinal Connected Slab Track on Long-span Bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [8] 高亮, 辛涛, 肖宏, 等. 高速铁路桥上不同轨枕型式动力特性对比[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 68–72.
- GAO Liang, XIN Tao, XIAO Hong, et al. Comparative Study on Dynamic Characteristics of Different Sleeper Types on Bridge in High Speed Railway [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(1): 68–72.
- [9] 赵坪锐, 杨荣山, 刘学毅. 简支梁桥上连续结合式无砟轨道层间连接设计[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(2): 14–17.
- ZHAO Pingrui, YANG Rongshan, LIU Xueyi. Interlaminar Connection Design of Continuous Combined Ballastless Track on Simply Supported Bridge [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2): 14–17.
- [10] CHEN Zhaowei, ZHAI Wanming, CAI Chengbiao, et al. Safety Threshold of High-speed Railway Pier Settlement Based on Train-Track-Bridge Dynamic Interaction [J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(2): 202–210.
- [11] 翟婉明, 蔡成标, 王开云. 高速列车-轨道-桥梁动态相互作用原理及模型[J]. 土木工程学报, 2005, 38(11): 132–137.
- ZHAI Wanming, CAI Chengbiao, WANG Kaiyun. Mechanism and Model of High-speed Train-Track-Bridge Dynamic Interaction [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(11): 132–137.
- [12] 蔡成标, 徐鹏. 弹性支承块式无砟轨道结构参数动力学优化设计[J]. 铁道学报, 2011, 33(1): 69–75.
- CAI Chengbiao, XU Peng. Dynamic Optimization Design of the Structural Parameters of Low Vibration Track [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(1): 69–75.
- [13] 李永乐, 夏飞龙, 李龙, 等. 大跨度钢桁梁斜拉桥无砟轨道桥面竖向静力刚度特性[J]. 铁道学报, 2014, 36(12): 79–83.
- LI Yongle, XIA Feilong, LI Long, et al. Vertical Static Stiffness of Ballastless Tracks Laid on Long-span Steel Truss Cable-stayed Bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(12): 79–83.
- [14] 曲村, 高亮, 乔神路. 高速铁路长大桥梁 CRTS I 型板式无砟轨道无缝线路力学特性分析[J]. 铁道标准设计, 2011(4): 12–16.
- QU Cun, GAO Liang, QIAO Shenlu. Mechanical Property Analysis on CRTS I Ballastless Continuously Welded Track on Long Bridge of High-speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2011(4): 12–16.
- [15] 徐浩, 林红松, 代丰, 等. 孟加拉帕德玛大桥无砟轨道结构形式适应性分析[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(4): 30–34.
- XU Hao, LIN Hongsong, DAI Feng, et al. Structural Adaptability Analysis of Ballastless Track on Bangladesh Padma Bridge [J]. High Speed Railway Technodgy, 2018, 9(4): 30–34.

(编辑:刘会娟 白雪)

(上接第21页)

- [10] 卿三惠, 黄润秋. 乌鞘岭特长隧道软弱围岩大变形特性研究[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(2): 7–14.
- QING Sanhui, HUANG Runqiu. Study on the Large Deformation Characteristics of the Soft Rocks in Wushaoling Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2005, 42(2): 7–14.
- [11] 江权, 史应恩, 蔡美峰, 等. 深部岩体大变形规律: 金川二矿巷道变形与破坏现场综合观测研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1337–1348.
- JIANG Quan, SHI Ying'en, CAI Meifeng, et al. In-situ Observation on Large Deformation and Failure of Deep Tunnel: Case Study for the Jinchuan No. 2 Mine [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1337–1348.
- [12] 冯雪磊, 马凤山, 赵海军, 等. 深部高地应力碎胀巷道岩体变形破坏与收敛监测分析[C]//2018年全国工程地质学术年会论文集. 西安: 中国地质学会:《工程地质学报》编辑部, 2018: 725–732.
- FENG Xuelei, MA Fengshan, ZHAO Haijun, et al. Analysis of Rock Mass Deformation and Fracture and Convergence Monitoring of Deep Bulking Roadway under High Ground Stress [C]. Proceedings of National Annual Engineering Geology Academic Conference in 2018. Xi'an: Editorial Dedarpmnt of Journal of Engineering Gedogy, Geological Society of China, 2018: 725–732.
- [13] 付雄. 基于收敛-约束原理的地下洞室稳定性分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- FU Xiong. Analysis of Stability in Underground Engineering Based on Convergence-confinement Theory [D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [14] 陈建勋, 楚锟, 王天林. 用收敛约束法进行隧道初期支护设计[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2001, 21(2): 57–59.
- CHEN Jianxun, CHU Kun, WANG Tianlin. Design of Initial Support of Tunnel with Convergence Constraint Method [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2001, 21(2): 57–59.
- [15] 唐雄俊. 隧道收敛约束法的理论研究与应[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- TANG Xiongjun. Theoretical Research and Application of Tunnel Convergence Constraint Method [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [16] 李占金. 鹤煤五矿深部岩巷变形机理及控制对策研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009.
- LI Zhanjin. Study on Deformation Mechanism and Control Strategy for Deep Rock Roadway in the Fifth Coal Mine of HBCG [D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2009.
- [17] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- HE Manchao, JING Haihe, SUN Xiaoming. Engineering Mechanics of Soft Rock [M]. Beijing: Science press, 2002.

(编辑:刘会娟 白雪)