

引用格式: 王智佼, 谢迪, 范晋琰, 等, 2023. 西部某强风化炭质板岩隧道变形力学机制及大变形控制方法研究 [J]. 地质力学学报, 29 (5): 648–661. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023020

Citation: WANG Z J, XIE D, FAN J Y, et al., 2023. Study on the deformation mechanism and large deformation control method of a strongly weathered carbonaceous slate tunnel in western China [J]. Journal of Geomechanics, 29 (5): 648–661. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023020

西部某强风化炭质板岩隧道变形力学机制及大变形控制方法研究

王智佼¹, 谢迪^{2,3}, 范晋琰⁴, 毛玉铤^{2,3}, 陶志刚^{2,3}

WANG Zhijiao¹, XIE Di^{2,3}, FAN Jinyan⁴, MAO Yuting^{2,3}, TAO Zhigang^{2,3}

1. 甘肃长达路业有限责任公司, 甘肃 兰州 730030;
2. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083;
3. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;
4. 华远国际陆港集团有限公司, 山西 太原 030001

1. Gansu Changda Road Industry Co., Ltd, Lanzhou 730030, Gansu, China;
2. State Key Laboratory of Deep Geotechnical Mechanics and Underground Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
3. School of Mechanics and Building Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
4. Huayuan International Land Port Group Co., Ltd, Taiyuan 030001, Shanxi, China

Study on the deformation mechanism and large deformation control method of a strongly weathered carbonaceous slate tunnel in western China

Abstract: In response to the significant soft rock deformation challenges encountered during the construction of the Minxian Tunnel along the Lanzhou–Haikou Expressway (G75), this study conducted a comprehensive analysis of soft rock types and the underlying mechanical mechanisms governing the deformation of the surrounding rock. It presented tailored mechanical transformation strategies to address diverse mechanical mechanisms. Also, it introduced the application of anchor cable with high pre-tightening force, constant resistance and large deformation, a proven solution widely employed in mining and rock engineering. Furthermore, the research proposed a high-prestress and active and passive combined support technique, encompassing pre-reinforced retaining structure, optimally arranged active retaining structure with long and short NPR anchor cables, steel arches, and permanent retaining structure of shotcrete. By implementing numerical simulations and on-site monitoring, the results demonstrated a remarkable reduction in the maximum deformation of the surrounding rock in the test section to only 73 mm, and the pre-tightening forces applied to the anchor cable with constant resistance and large deformation ranged from 280 to 300 kN, underscoring the effectiveness of the optimized retaining technique in controlling surrounding rock deformation. This research highlights the pivotal role of retaining structure with constant resistance and yielding support, which significantly improves deformation control.

Keywords: tunnel engineering; carbonaceous slate; combined retaining structure; numerical simulation; on-site monitoring

摘要: 为解决国家兰海高速(G75)定西段岷县隧道在建设过程中原支护设计方案出现的软岩大变形问题, 通过软岩类型分析、围岩变形力学机制分析, 提出针对不同力学机制的力学转化对策, 引入在矿山及边坡等岩

基金项目: 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室创新基金项目 (SKLGDUEK202201)

This research is financially supported by the Innovation Fund of the State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering (Grant No. SKLGDUEK202201).

第一作者: 王智佼 (1986—), 男, 高级工程师, 从事高速公路项目建设管理工作。E-mail: 277319493@qq.com

通讯作者: 谢迪 (1999—), 男, 在读硕士, 从事隧道工程方面的研究。E-mail: 981643866@qq.com

收稿日期: 2023-02-23; **修回日期:** 2023-05-16; **责任编辑:** 吴芳

石领域广泛应用的高预紧力恒阻大变形锚索，提出了“超前支护+长短 NPR 锚索优化布置主动支护+钢拱架+混凝土喷浆永久支护”的高预应力主被动联合支护技术。通过数值模拟和现场监测效果对比研究，结果表明，现场试验段围岩最大变形量仅为 73 mm，恒阻大变形锚索的预紧力均在 280~300 kN 范围内，可见优化后不同支护技术均对围岩变形起到了控制作用，有效发挥了恒阻让压支护的作用，控制效果明显。

关键词：隧道工程；炭质板岩；联合支护；数值模拟；现场监测

中图分类号：U45 **文献标识码：**A **文章编号：**1006-6616 (2023) 05-0648-14

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023020

0 引言

随着国家“西部大开发”战略的持续推进以及“交通强国”战略的逐步实施，目前，中国每年在轨道交通和公路领域的新增隧道里程均超过 1000 km，新增各类长短隧道超过 1000 座，是世界上各类隧道总量最多的国家（洪开荣，2019；罗刚，2019；田四明和巩江峰，2020）。隧道数量的快速增加对西部地区复杂条件下的山岭隧道软岩大变形控制技术提出了更迫切的需求。从 20 世纪 80 年代建设的南昆铁路家竹箐隧道（张德华等，2004）首次出现严重的围岩大变形开始，在西部地区多条交通线路的山岭隧道中，均出现了严重的围岩大变形灾害，例如兰渝铁路毛羽山隧道（李廷春，2011）、广甘高速杜家山隧道（汪波等，2012）、太岳山隧道（孙光吉等，2021）、国道 317 鹫鸪山隧道（孟陆波等，2017）、兰渝铁路木寨岭隧道（刘阳等，2014）和两水隧道（夏润禾等，2015）、兰新铁路大梁隧道（戴永浩等，2015）、成兰铁路茂县隧道（李磊，2017）及广昆铁路老东山隧道（Cao et al.，2018），软岩大变形问题已经成为西部地区山岭隧道建设过程中最困难和最具有挑战性的关键问题之一（郭长宝等，2017）。因此，开展西部地区广泛存在的层状炭质板岩山岭隧道软岩大变形机理与控制对策的研究具有重要的意义。

国内外学者对软岩隧道大变形问题进行过大量研究工作，取得了丰富的成果。Proctor and White (1946) 针对隧道围岩出现的大变形现象首次提出了膨胀性围岩和挤出性围岩的科学概念。20 世纪 90 年代，挪威学者们在多年的新奥法实施基础上，结合 Barton (1988) 提出的围岩分级和评价系统，提出了以高性能支护材料为核心的挪威法隧道围岩控制理论（沈慧敏，1995）。国内学者也

对这一问题展开了深入的研究，何满潮等（2000）基于现场实践，依据工程地质条件及软岩大变形特征，将大变形机制总结为三大类，并结合地质力学和非线性力学理论，提出了以确定和转换不同软岩巷道复合型大变形机制为核心的软岩工程围岩支护理论。而针对软岩隧道大变形的控制问题，国外已从早期进行被动支护的太沙基理论（太沙基，1960）发展到主动支护的新奥法（韩瑞庚，1987）。中国学者根据室内试验、理论推导及现场监测等方法提出了松动圈理论（董方庭和郭志宏，1992；郭志宏和董方庭，1995；董方庭，2001）、联合支护理论（李永友和李树清，2008；李国良和朱永全，2008；苟彪和张奕斌，2009；郭富利，2010；田洪铭等，2011）、锚喷弧板支护理论（张春等，2003）、隧道三维地应力场回归反演分析理论（孙元春等，2022）等。为更好地控制软岩大变形问题，何满潮团队成功研发出 NPR 锚杆/索结构材料（He et al.，2014）；陶志刚等（2018）对 NPR 锚索的各种特性进行了研究，并得出了 NPR 锚索/杆与围岩体的相互耦合作用能量方程。

针对复杂地质条件下的软岩隧道大变形灾害，虽然已经在软岩大变形机制、围岩大变形控制理论及大变形控制技术等方面均进行了大量的研究，但是没有形成系统而有效的理论体系，而且在西部复杂工程地质条件下的山岭隧道中，采用现有的控制理论设计软岩大变形控制技术无法有效控制围岩变形。渭（源）武（都）高速是国家高速公路网中兰海高速（G75）的重要地段，也是 G75 在甘肃省境内最后一段，其建设对完善我国西部公路网总体布局、改善甘肃区域交通以及带动甘肃中南部经济发展有重要意义。渭武高速定西段岷县隧道所在区域地质情况极其复杂，在穿越断层破碎带和大埋深岭脊段过程中，隧道原支护采用的常规“超前导管+3.5 m 系统锚杆+I20a 钢拱架混凝土+二次衬砌”联合支护技术无法控制围岩

的稳定，导致围岩出现显著的大变形及支护结构失效现象。

基于何满潮等（2002）提出的复合型大变形力学机制转化策略，结合岷县隧道现场施工情况，对原支护方案进行优化设计，将复合型软岩大变形力学机制成功转化为单一型变形力学机制；将恒阻大变形锚索运用在软岩大变形隧道中，为复杂地质条件下隧道施工建设提供可靠依据；并通过数值模拟和现场监测等方法对新型支护方案进

行效果分析，确保隧道工程的安全可靠性。

1 岷县隧道区域地质条件及力学机制分析

1.1 岷县隧道概况

岷县隧道位于甘肃省定西市岷县县城以北，212 国道以西。隧道进口为岷县茶埠镇西京村，隧道出口南临洮河。隧道进出口均有便道过洮河与 212 国道相接，交通较为便利（图 1）。

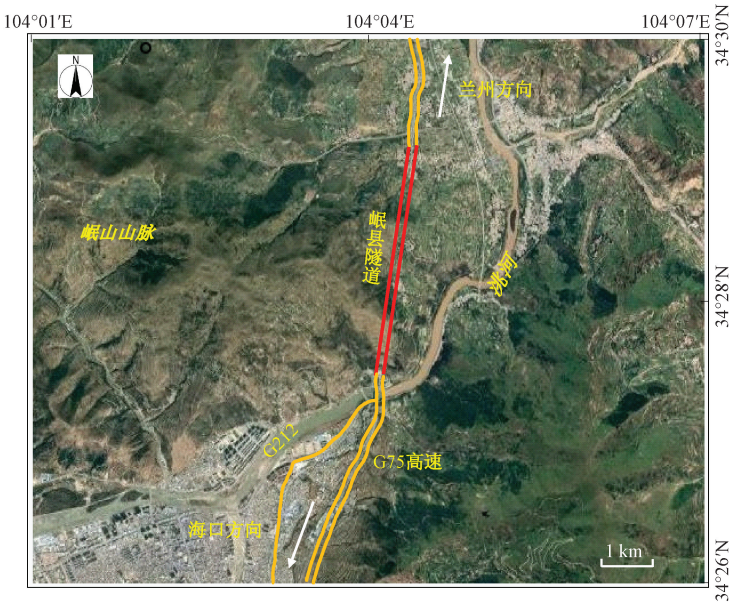


图 1 岷县隧道地理位置示意图

Fig. 1 Location map of the Mianxian tunnel

1.2 地质构造特征

隧道所在区域位于秦岭海西-印支褶皱带，隧道沿线穿过多条复杂构造带。由于板块交汇处的地质活动强烈，导致区域内的褶皱及断层构造十分发育。按褶皱、断裂构造形迹及组合特征，隧址区由北向南主要分布有大草滩复背斜和岷县-宕昌复向斜。与岷县隧道有关的区域断裂为合作-岷县断裂带 F2 断层（图 2），该断裂带通过岷县县城北，长 160 km，宽 20~40 km，由多条断层组成；断层面以北倾为主，倾角 50°~70°。总体呈南西凸出的弧形，北盘向南东斜冲。F2 断层引发了 6 条次级断层，分别为 f21、f22、f23、f24、f25 和 f26，这些断裂大多数被第四系松散沉积层覆盖，在地貌上一般表现为断层崖、垭口、褶皱、滑坡错落等，特征较明显。

1.3 水文地质条件

岷县隧道沿线水系主要为洮河，属于黄河的

一级支流，起源于甘肃省碌曲县，向东流过甘肃省中部和南部，总长度达到 580 km，在岷县处转向北流，最终在刘家峡汇入黄河。岷县隧道位于洮河东流改道北流转折部位，洮河水面宽约 137 m，建有龙王台水电站。在隧道海口方向出口西侧的山沟枯水季节水量很小，雨季时流量增大并堆积泥石流；隧道沿线山岭中的其余河谷枯水季节基本无水量，雨季时有间歇性水流。

1.4 地层岩性特征

岷县隧道围岩主要为强风化炭质板岩、中风化炭质板岩、中风化粉砂岩三类岩石（图 2）。

1.4.1 强风化炭质板岩

黑色，泥质变余结构，薄层状构造。弱胶结，岩体节理裂隙极其发育，强风化炭质板岩呈薄层状，单层厚度 0.5~5 m，结构十分破碎。所取岩芯多为块状，层中不均匀夹有厚 5~10 m 中风化炭质泥板。强风化炭质板岩地层为隧道沿线山体的主

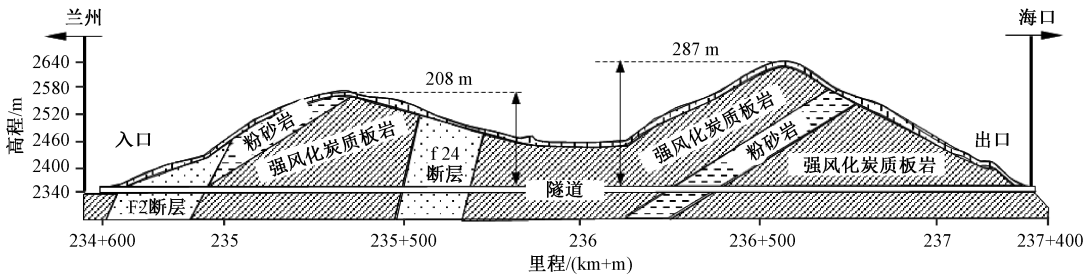


图 2 隧道工程地质纵向剖面图

Fig. 2 Longitudinal profile of tunnel engineering geology

要地层,在隧道出口直接出露地表,岩层产状为 $225^{\circ}\angle 24^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。

1.4.2 中风化炭质板岩

黑色,泥质变余结构,薄层状构造。节理裂隙发育,胶结程度一般,岩体较破碎,岩芯呈碎状、短柱状,锤击声脆,不易击碎。分布于隧道沿线山体的下部,岩层总体产状 $225^{\circ}\angle 24^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。

1.4.3 中风化粉砂岩

灰褐色、灰黑色,砂质,砂质变余结构,块状构造。节理裂隙发育,胶结程度一般,岩体较破碎,岩芯呈碎状、短柱状,锤击声脆,不易击碎。该层在隧道沿线作为夹层赋存于强风化粉砂岩及强风化炭质板岩中,厚度一般为3.1~10.1 m。

受区域内强烈的地质构造运动的影响,岷县隧道围岩基本为V级围岩。在发育的板理、节理及裂隙作用下,岩体十分破碎。因此,岷县隧道的围岩为节理化软岩。

为了解岷县隧道地应力分布情况,在岷县隧道右线中选取里程YK235+090、YK235+170、YK235+300三个断面进行地应力测试。国际岩石力学学会(ISRM)推荐的地应力测试方法主要为空芯包体应变法和水压致裂法(张鹏等,2017;孟文等,2022;李彬等,2022),综合考虑后,在岷县隧道中采用空芯包体应变法进行地应力测量。测试采用中国地质科学院地质力学研究所研制的KX-81型空芯包体三轴地应力计,空芯包体应变计为一个壁厚3 mm的空芯圆筒,内径为30 mm,外径为36 mm。在两层圆筒中间同一圆周处布置有三组等间距(120°)应变花,每组应变花包括四个等间距(45°)的应变片。通过12个应变片,即可以通过单孔测定一点的三维地应力。通过测试得到埋深200 m时隧道的最大主应力值为6.308 MPa,而炭质板岩的最大单轴抗压强度为35.74 MPa。因此,根据《工程岩体分级标准》(中华人民共和国住房和城乡建设部,

2015),隧道大变形段的强度应力比为5.67,岩体内的初始地应力水平为高应力状态,因此,岷县隧道围岩属于高应力软岩。

为进一步了解炭质板岩的矿物成分及其相对含量,根据“K值法”对岷县隧道右线不同里程断面位置(YK235+475、YK235+480、YK235+485、YK235+490、YK235+495)处岩样进行全岩矿物及黏土矿物X射线衍射分析,样品处理和分折在北京青辰寰宇石油地质科技有限公司实验室完成,测试仪器采用日本理学TTRⅢ多功能X射线衍射仪,测试结果如表1、表2所示。分析结果表明,炭质板岩的主要矿物成分为石英和黏土矿物,黏土矿物主要为伊利石和绿泥石,因此,岷县隧道围岩属于膨胀性软岩。

表 1 黏土矿物成分相对含量统计表

Table 1 Statistical table of relative contents of clay mineral composition

编号	黏土矿物相对含量/%					
	S	I/S	C/S	It	Kao	C
1	/	/	/	69	6	2
2	/	/	/	60	5	35
3	/	/	/	66	/	34
4	/	/	/	47	/	53
5	/	/	/	62	/	38

注: S—蒙皂石类; I/S—伊蒙混层; It—伊利石; Kao—高岭石; C—绿泥石; C/S—绿蒙混层

表 2 全岩矿物成分相对含量统计表

Table 2 Statistical table of relative contents of the mineral compositions of the whole rock

编号	矿物含量/%						
	石英	黏土矿物	白云石	菱铁矿	黄铁矿	钾长石	石盐
1	56.3	39.6	3.2	/	/	/	0.9
2	35.2	55.1	/	6.1	/	2.2	1.4
3	62.4	18.6	14.4	/	1.1	2.7	0.8
4	68.6	22.8	4.6	2.8	/	/	1.2
5	45.8	19.0	/	3.2	/	2.1	0.9

综上所述,根据岷县隧道的围岩工程地质条

件特征及岩性特征分析,岷县隧道围岩是三种软岩组合形成的复合型软岩,类型为节理化-高应力-膨胀性(JHS)软岩。

2 变形力学机制转化及支护方案优化

岷县隧道在穿越极破碎围岩段过程中,原支护方案无法控制围岩的稳定,导致围岩出现显著的大变形及支护结构失效现象,因此需要依据该软岩隧道变形力学机制对支护设计方案进行优化设计。

2.1 岷县隧道软岩大变形力学机制

基于何满潮等(2002)总结的软岩大变形力学机制分类体系,岷县隧道围岩的变形力学机制类型表现为 $\text{III}_{\text{CB}}\text{II}_{\text{AB}}\text{I}_{\text{AB}}$ 复合型。其中, III_{CB} 表示层理斜交型力学机制, II_{AB} 表示构造应力机制和重力机制, I_{AB} 表示分子吸水+胶体膨胀机制。

因此,岷县隧道难以支护是因为围岩并非具有单一型的变形力学机制,围岩的大变形是由多种变形力学机制共同作用导致。要想有效地进行岷县软岩隧道的支护,仅靠单一类型的支护方法难以奏效,必须采取相对应的工程对策。

2.2 复合型变形力学机制的转化技术

成功进行JHS复合型软岩隧道支护的技术关键是有地把复合型力学机制转化为单一型(王树仁等,2009)。根据该隧道围岩的地质特点和技术条件,采用如下的转化技术(图3)。

2.2.1 混凝土喷层

针对岷县隧道的复合型变形力学机制,首先应该防治围岩的物化膨胀变形机制。岷县隧道水文地质条件简单,围岩中地下水较少,对围岩影响很小,影响岷县隧道围岩软化膨胀的主要为空气中的水分,因此,在掌子面揭露岩体后,首先喷射砂浆混凝土,对围岩表面进行封闭,隔绝空气,从而将 $\text{III}_{\text{CB}}\text{II}_{\text{AB}}\text{I}_{\text{AB}}$ 复合型转化为 $\text{III}_{\text{CB}}\text{II}_{\text{AB}}$ 型机制。

2.2.2 超前支护+长短NPR锚索优化布置主动支护

首先控制节理化软岩隧道掌子面前方岩体的稳定,防止掌子面顶部不稳定岩块的垮落。其次,采用具有高预应力及恒定的高工作阻力特性的NPR锚索对节理化岩体进行改善;NPR短锚索起到对浅部岩体加固和及时进行应力补偿的作用;NPR长锚索起到对关键部位进行支护控制围岩非对称变形和调动深部稳定岩体的强度的作用;从

而将 $\text{III}_{\text{CB}}\text{II}_{\text{AB}}$ 型机制转化为 II_{AB} 型。

2.2.3 钢拱架+混凝土喷浆永久支护

在前面“混凝土喷层+超前支护+长短NPR锚索优化布置主动支护”等技术的实施下,隧道的构造应力已经被支护大部分承担。为了增大支护强度,再采用常规被动支护“钢拱架+混凝土喷浆永久支护”作为初期支护的一部分共同承载围岩变形压力,从而将复合型机制转化为单一的 II_{B} 型重力机制。

复合型变形力学机制转化对策如图3所示。

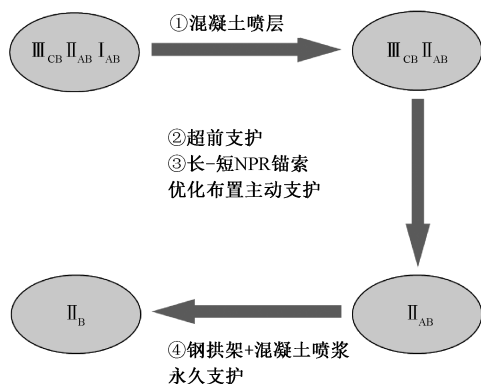


图3 复合型变形力学机制的转化对策

Fig. 3 Transformation countermeasures of a complex deformation mechanical mechanism

2.3 岷县隧道支护方案优化

针对JHS型软岩隧道,依据“刚柔并济”的支护理念,结合 $\text{III}_{\text{CB}}\text{II}_{\text{AB}}\text{I}_{\text{AB}}$ 复合变形机制的转化对策,提出了“超前支护+长短NPR锚索优化布置主动支护+钢拱架+混凝土喷浆永久支护”的高预应力主被动联合支护技术。依据围岩破碎情况,设计新型控制技术支持参数如表3所示。

3 联合支护技术数值模拟分析

采用有限差分数值分析软件FLAC3D建立数值模型,对不同支护技术的控制效果进行模拟,对不同支护技术下的隧道围岩变形云图进行对比。

3.1 模型建立

模型中的岩层均为炭质板岩,单层岩层的厚度为0.5 m,采用均匀节理本构模型,钢拱架及喷射混凝土支护结构采用弹性模型,实体单元模拟;锚杆及锚索采用摩尔-库伦模型,cable单元模拟。模型尺寸设计为长×宽×高=50 m×20 m×50 m。隧道断面为马蹄形,地坪以上部分的开挖半径为6.0 m,

表 3 岷县隧道新型控制技术支持参数及原支护技术参数对比表

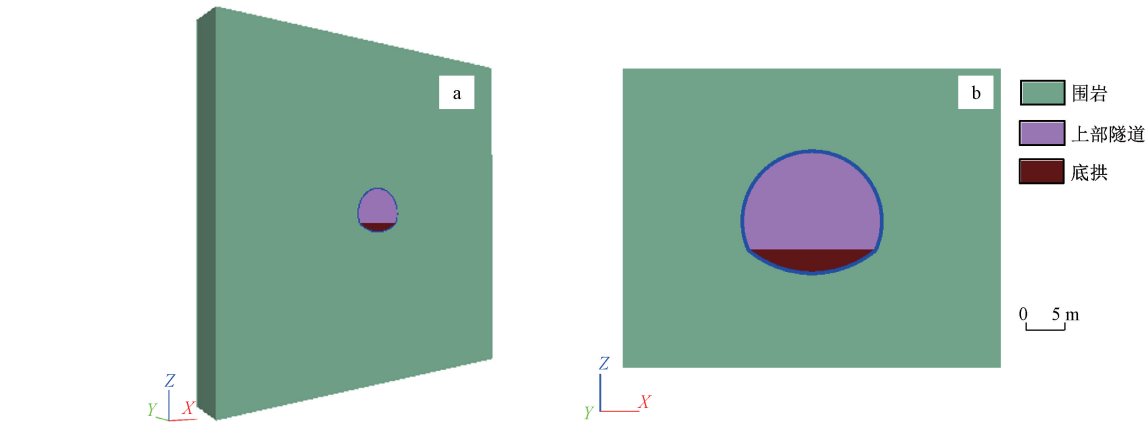
Table 3 Comparison table for support parameters of the new control technique and the original technique for the Minxian tunnel

原支护方案				新型支护方案			
支护形式		支护参数		支护方式		支护参数	
超前支护	小导管	$\varnothing \times L = 42\text{ mm} \times 4500\text{ mm}$ ，外插角 10° ， 间排距 $350\text{ mm} \times 1200\text{ mm}$		小导管		$\varnothing \times L = 42\text{ mm} \times 4500\text{ mm}$ ，外插角 10° ， $\times 1200\text{ mm}$	
	普通锚杆	全断面支护， $\varnothing \times L = 25\text{ mm} \times 3500\text{ mm}$ ， 间排距 $1000\text{ mm} \times 600\text{ mm}$		短 NPR 锚索		全断面施工， $\varnothing \times L = 21.8\text{ mm} \times 7300\text{ mm}$ ， $\times 600\text{ mm}$	
初期支护	锁脚注浆锚管	$\varnothing \times L = 89\text{ mm} \times 3500\text{ mm}$		长 NPR 锚索		拱顶施工， $\varnothing \times L = 21.8\text{ mm} \times 12300\text{ mm}$ ， $\times 600\text{ mm}$	
	钢筋网	拱顶施工， $\varnothing\ 8\text{ mm}$ ，框架尺寸 150 mm		柔性网		型号 JD PET120 $\times$ 120MS，网格尺寸 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$	
	喷射混凝土	$\times 150\text{ mm}$		W 钢带		Q235 钢： $W \times L = 280\text{ mm} \times 3000\text{ mm}$ ，孔径 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$	
	钢筋网	C25 混凝土，厚度 260 mm		托盘		钢板： $W \times L \times T = 300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 16\text{ mm}$	
	喷射混凝土	全断面 I20a 工字钢，排距 600 mm		钢拱架		全断面 I20a 工字钢，排距 600 mm	
永久支护	钢筋网			喷射混凝土		C25 混凝土，厚度 260 mm	
	钢筋网			钢筋网		C30 钢筋混凝土，厚度 500 mm	

注： $\varnothing$ 为直径； L 为长度； W 为宽度； T 为厚度

圆心角为 215° ，底拱部分开挖半径为 8.5 m ，高度为 2.5 m ，如图 4 所示。模型的左右、前后及顶部施加应力边界条件，底部进行固定约束。模型的

应力边界条件根据埋深 200 m 时的现场地应力实测结果，水平应力为 6.3 MPa ，隧道走向应力水平 4.7 MPa ，模型顶部施加应力 3.5 MPa 。



a—模型整体图；b—模型正视图

图 4 隧道数值计算模型

Fig. 4 Numerical calculation model for the tunnel

(a) Model overall figure; (b) Model front view

3.2 模型参数

数值模型中的参数选取是影响数值计算结果可靠性的关键因素。岩体特性受岩块力学特性和结构弱面赋存特征的共同影响。因此，现有数值计算中，往往通过岩体质量评价体系将岩石和岩体进行联系，从而将岩石的力学参数转换为岩体的力学参数。Hoek and Diederichs (2006) 基于地质强度指标岩体质量评价体系，提出了岩体和岩石参数的转换方法，具体计算公式如下：

$$\frac{E_m}{E_r} = 0.02 + \frac{1 - 0.5D}{1 + e^{(60 + 15D - GSI)/11}} \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_r} = \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)]}{2(1 + a)(2 + a)} \left(\frac{m_b}{4 + s} \right)^{a \cdot s - 1} \quad (2)$$

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right)} \quad (3)$$

$$a = 0.5 + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (4)$$

式中， E_m 、 E_r —岩体和岩块的弹性模量，GPa； σ_m 、 σ_r —岩体和岩块的抗压强度，MPa； GSI (geological strength index) —工程岩体的地质强度指标，用来评估工程岩体的质量； D —岩体的扰动损伤系数，采用钻爆法开挖时隧道岩体损伤系数取 0.5 ； s 、 m_i —岩体材料常数； m_b 、 a —岩体特征

参数（无量纲）。数值模型相关参数见表 4—表 6。

效果，以隧道原支护为基础，优化设计 4 种支护方案进行数值计算，如表 7 所示。

3.3 数值模拟方案

为了对比不同支护技术对软岩大变形的支护原方案采用原支护对策，主要包括长度 3.5 m

表 4 岩体力学参数

材料	密度/ (kg/m ³)	弹性模量/ GPa	泊松比	内聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ MPa	法向刚度/ GPa	剪切刚度/ GPa
岩体	2500	1.05	0.25	0.8	21	0.5	—	—
板理面	—	—	—	0.5	18	0.1	30	12

表 5 锚杆及锚索力学参数

	横截面积/ m ²	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ GPa	水泥浆黏结刚度/ (N/m ²)	水泥浆黏聚强度/ Pa	预紧力/ N
普通锚杆	3.79×10 ⁻⁴	210	0.182	2×10 ⁷	2×10 ⁵	70×10 ³
普通锚索	3.73×10 ⁻⁴	200	0.445	2×10 ⁷	3×10 ⁵	150×10 ³
NPR 锚索	3.73×10 ⁻⁴	200	0.938	2×10 ⁷	3×10 ⁵	280×10 ³

表 6 钢拱架-喷射混凝土等效支护体力学参数

钢拱架	混凝土 型号	混凝土 厚度/mm	等效容重/ (kN/m ³)	等效弹性 模量/GPa	等效 泊松比
I20a	C25	260	23	31.55	0.20
HW175	C25	260	24	51.43	0.22

表 7 数值模拟方案

方案	变更内容	锚杆/m	钢拱架
原方案	原支护	3.5	I20a
方案 a	更换钢拱架	3.5	H175
方案 b	原锚杆—普通锚索	7	I20a
方案 c	普通锚索（短+长）	7+12	I20a
方案 d	NPR 锚索（短+长）	7+12	I20a

的普通锚杆、I20a 工字钢拱架及厚度 26 cm 的 C25 喷浆混凝土。

方案 a 为了对比不同钢拱架对围岩的支护效果。采用 3.5 m 长的普通锚杆+HW175 型钢拱架+26 cm 厚的 C25 喷浆混凝土的支护方案。

方案 b 为了对比锚索与系统锚杆对围岩的支护效果。采用 7 m 普通锚索+HW175 型钢拱架+26 cm 厚的 C25 喷浆混凝土的支护方案。

方案 c 为了体现长、短普通锚索相结合的方式控制围岩变形的效果。采用 7 m 普通锚索+12 m 普通锚索+HW175 型钢拱架+26 cm 厚的 C25 喷浆混凝土的支护方案。

方案 d 为了对比普通锚索与 NPR 锚索的控制效果。采用长度 7 m 的恒阻锚索+12 m 恒阻锚索+HW175 型钢拱架+26 cm 的 C25 喷浆混凝土的支护方案。

模拟方案支护结构模型图如图 5、图 6 所示。

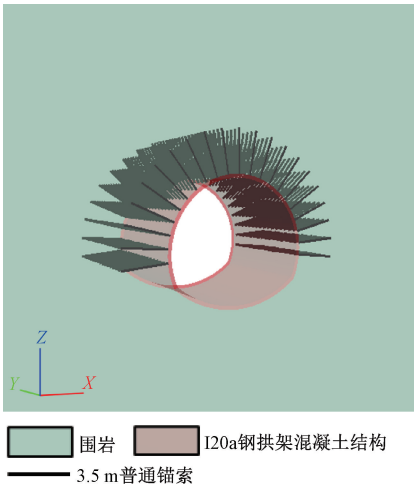


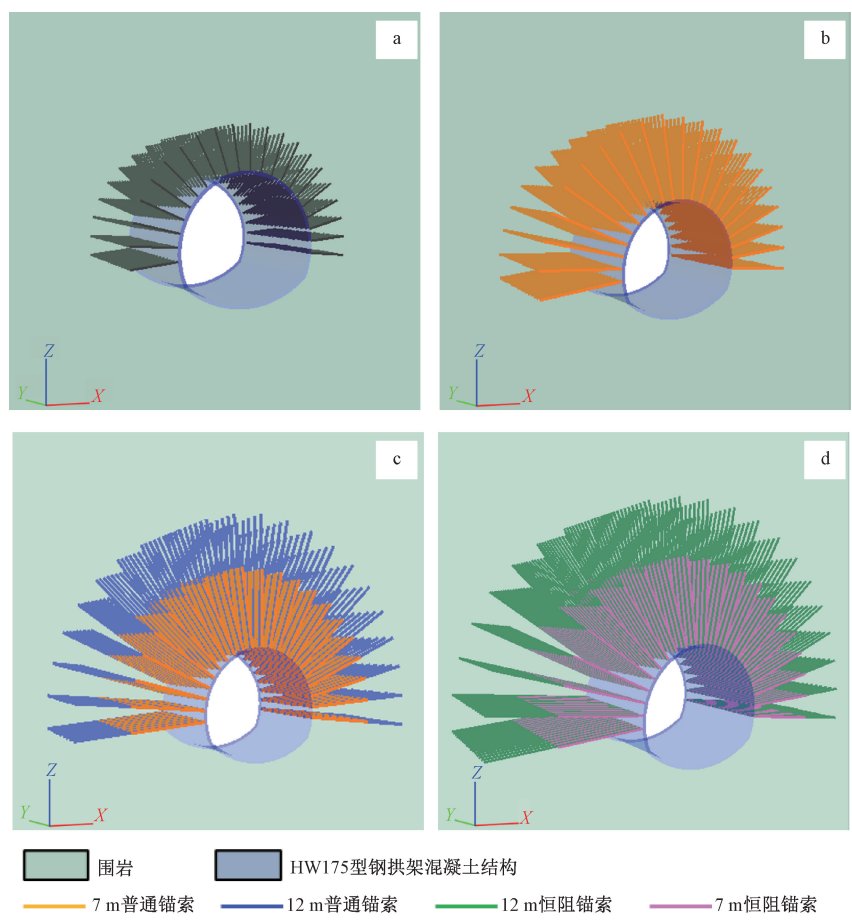
图 5 原支护方案支护结构模型图

Fig. 5 The diagram of the original retaining structure

3.4 结果分析

针对上述 5 种不同的支护技术，对不同支护技术下的隧道进行数值计算，最终得到的不同支护技术下的隧道围岩位移变形云图如图 7、图 8 所示。

结果表明，不同的支护对策对围岩的支护效果显著不同。原支护技术下，初期支护的最大变形量达到 450 mm，隧道两侧及拱肩的围岩扰动影响深度最大。更换重型钢拱架（HW175）后（方案 a），由于钢拱架的承载能力提高，围岩最大变形量降低至 400 mm，变形量仍然较大。将普通锚杆更换为 7 m 锚索后（方案 b），由于锚索的抗拉强度大于锚杆，而且长度增大，因此，锚索群对围岩的控制效果也显著增大，隧道周围变形更加



a—方案 a 支护结构模型图; b—方案 b 支护结构模型图; c—方案 c 支护结构模型图; d—方案 d 支护结构模型图

图 6 优化方案支护结构模型图

Fig. 6 The diagram of the optimized retaining structures

(a) Scheme a; (b) Scheme b; (c) Scheme c; (d) Scheme d

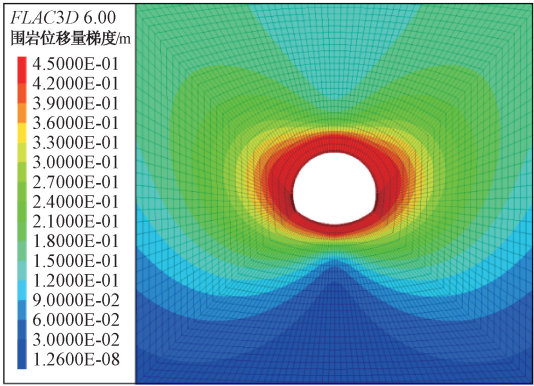


图 7 原支护隧道围岩位移变形云图

Fig. 7 Displacement deformation nephogram for the tunnel surrounding rock of the original retaining structure

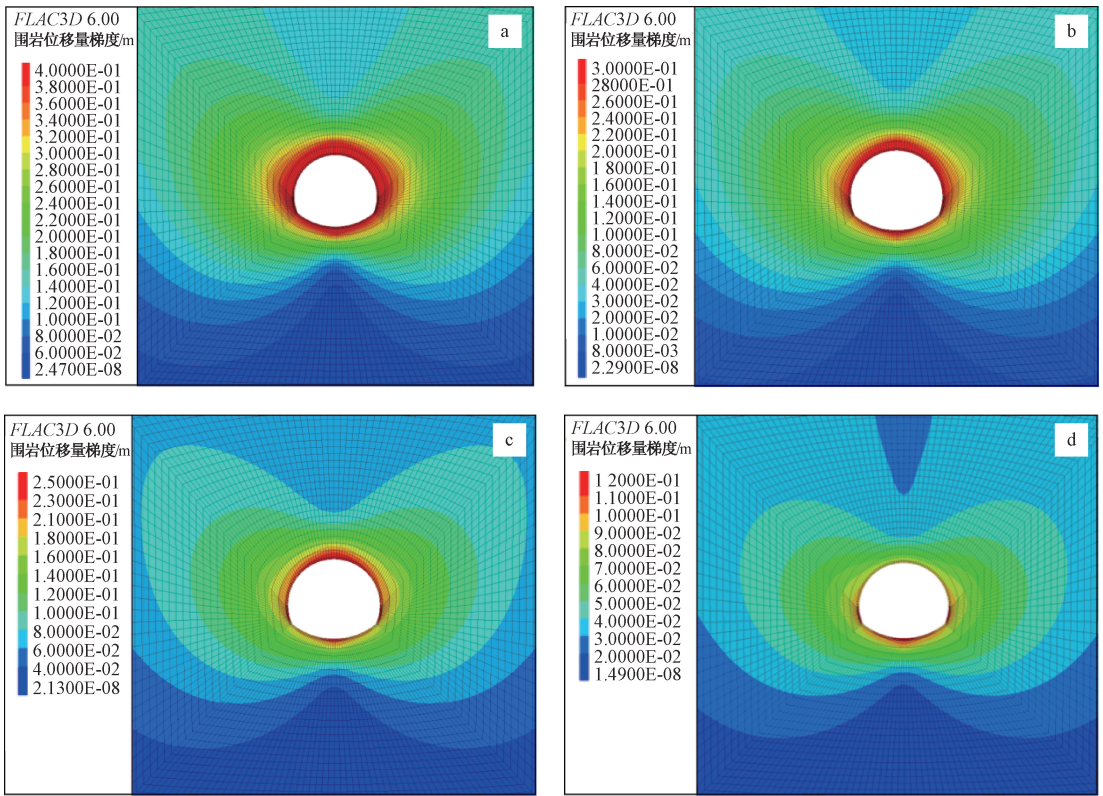
均匀, 最大变形量降低至约 300 mm 左右。为了调动更深处围岩的承载能力, 将全范围 7 m 长的锚索更换成“7-12-7-12”布置结构 (方案 c), 模拟结果显示 12 m 的锚索可以显著改变围岩的位移场,

隧道两侧拱肩的围岩变形量显著降低, 隧道表面最大变形量降低至 250 mm 左右。将普通锚索全部更换成恒阻锚索后, 形成新的“7-12-7-12”支护体系 (方案 d), 在高预紧力、恒定的高工作阻力及滑移吸能特性作用下, 围岩变形场的非均匀程度显著降低, 围岩变形量也显著降低, 最大变形量降至 120 mm 左右。

综上所述, 通过数值模拟计算, 高预应力主被动联合支护技术中所涉及支护手段对隧道围岩大变形均有一定控制能力。

4 现场监测

为了验证新型高预应力主被动联合支护技术的控制效果, 在岷县隧道右洞内, 选择 YK235+480—YK235+500 段作为试验段, 该范围内的岩体仍然是强风化炭质板岩, 岩层倾角为 50°~90°。



a—方案 a 围岩位移变形图；b—方案 b 围岩位移变形图；c—方案 c 围岩位移变形图；d—方案 d 围岩位移变形图

图 8 优化方案隧道围岩位移变形云图

Fig. 8 Displacement deformation nephogram for the tunnel surrounding rock of the optimized schemes

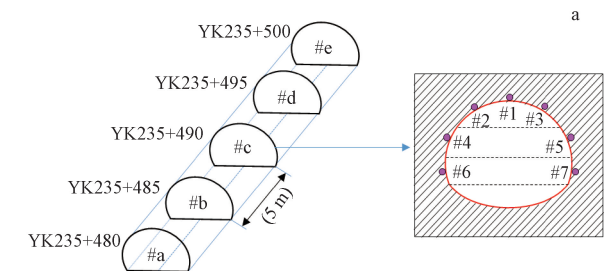
(a) Scheme a; (b) Scheme b; (c) Scheme c; (d) Scheme d

4.1 监测方案

4.1.1 围岩变形监测

在试验段内以 YK235+480 为起点，每隔 5 m 设置 1 个监测断面，共布置 5 个监测断面（#a、#b、#c、#d、#e），如图 9a 所示。在每个监测断面

内设置 7 个监测点，分别设置在断面的拱顶、左右拱肩、左右拱腰、左右拱脚，如图 9a 所示。当初期支护完成后，在各监测点用反光片进行站点布设，安排专人采用全站仪进行每日监测并记录，如图 9b 所示。



a—监测点布置图；b—现场实测图

图 9 围岩变形监测方案

Fig. 9 Scheme for monitoring the surrounding rock deformation

(a) Layout of the monitoring points; (b) Field measurement map

4.1.2 恒阻大变形锚索受力监测

恒阻大变形锚索受力的监测点选取#1、#2、#3 点进行监测。恒阻大变形锚索的受力通过特制的圆环状应变测力计进行监测。首先, 将测力计安

装在恒阻体圆环上, 添加一块钢板将其固定在锚索托盘和围岩中, 如图 10 所示。当围岩变形时, 形变压力可以通过测力计传递到锚索恒阻体上, 对恒阻大变形锚索的正常工作没有影响。



a—右拱肩锚索受力监测; b—拱顶锚索受力监测

图 10 恒阻大变形锚索受力监测

Fig. 10 Stress monitoring of anchor cable with constant resistance and large deformation

(a) Stress monitoring of the right arch shoulder of the anchor cable; (b) Stress monitoring of the vault of the anchor cable

4.2 监测结果及分析

4.2.1 围岩变形演化规律

以 YK235+485 监测断面 (#b) 为例, 进行监测结果分析。

围岩变形主要指初期支护施工完成后的围岩

表面收敛变形量, 当永久衬砌浇筑后, 该断面内的围岩变形即无法监测。对于 #b 监测断面, 从初次支护完成至二次衬砌浇筑截止, 隧道表面位移监测共进行 78 天, 各监测点的变化曲线如图 11 所示。

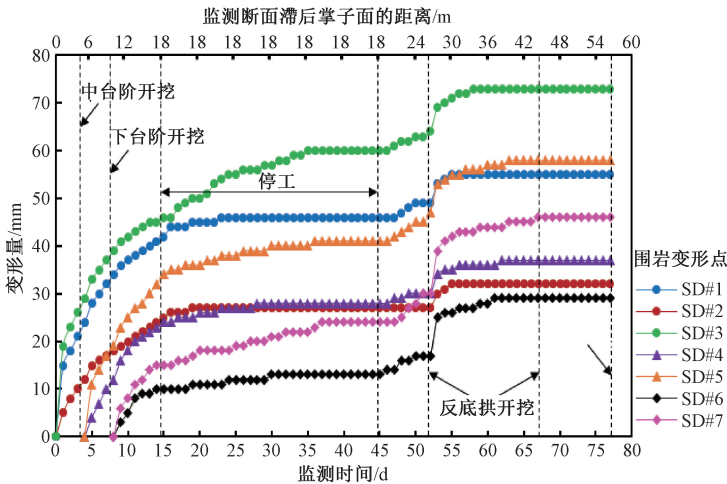


图 11 YK235+485 监测断面围岩变形监测曲线

Fig. 11 Monitoring curves of the surrounding rock deformation in the YK235+485 section

隧道断面内的围岩变形量由大到小依次出现于右拱肩、右拱腰、拱顶、右拱脚、左拱腰、左拱肩、左拱脚, 但隧道的围岩变形量都大幅度下降, 隧道围岩断面内各点的最大位移量均小于 100 mm, 右拱肩最大变形量仅为 73 mm。在新的

复合支护技术实施后, NPR 锚索与板岩岩层之间的不同夹角导致锚索对岩层的锚固作用不同, 继而产生不同的围岩变形; 在围岩不同的位置, 虽然变形量不同, 但是变形发展过程基本相同。随着掌子面的掘进, 监测点与掌子面距离逐渐增大,

围岩变形速率逐渐降低；隧道停工期间，由于没有开挖扰动行为的影响，围岩变形速率均较小，停工期内各监测点的变形速率在 0.13~2.15 mm/d 范围内；最后发现，采用三台阶法进行掌子面开挖掘进时，不同区域的开挖对围岩的变形扰动具有不同的影响，底拱的开挖对围岩变形也有很大的影响。

4.2.2 恒阻大变形锚索受力分析

针对 5 个监测断面的变形监测结果，仍然以 YK235+485 监测断面为例，进行监测结果分析。#b 监测断面内各监测点恒阻大变形锚索的受力监测曲线如图 12 所示。

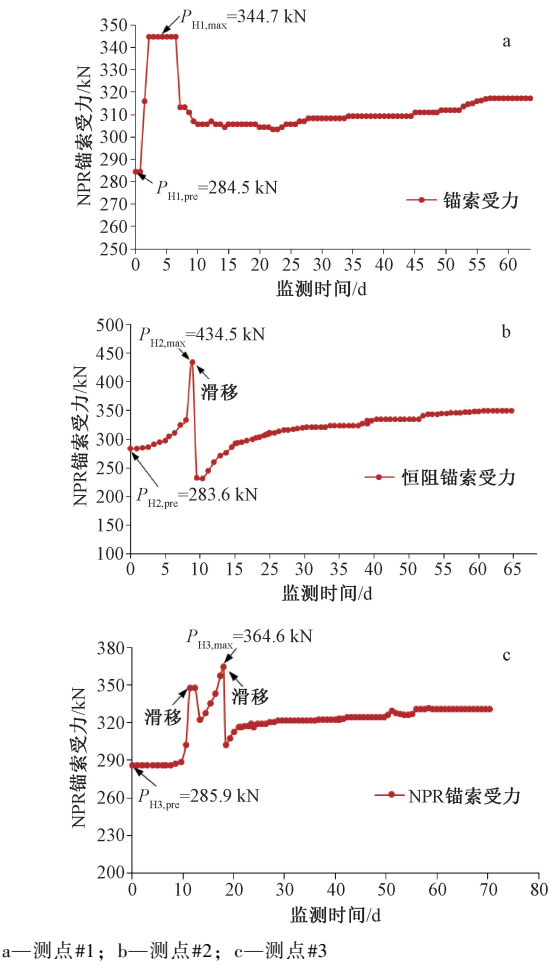


图 12 YK235+485 (#b) 监测断面内恒阻大变形锚索受力监测曲线

Fig. 12 Monitoring curves of the stress on the anchor cable with constant resistance and large deformation in the YK235 + 485 (#b) section
(a) Measuring point # 1; (b) Measuring point # 2; (c) Measuring point #3

恒阻大变形锚索的预紧力均在 280~300 kN 范

围内，及时为围岩提供了较高的径向约束力，降低了围岩的应力调整幅度，限制了围岩中的松动圈的发展；各监测点的恒阻锚索的最大荷载均达到恒定阻力值 350 kN，表明恒阻锚索发挥了恒阻让压支护的作用，而且由于围岩的应力状态和变形过程不同，不同位置的恒阻锚索的受力变形过程也不相同，但基本都经历三个阶段：锚索受力随着围岩变形量的增大也逐渐增加；到达恒阻值后恒阻套筒开始滑移，锚索受力逐渐降低；随着围岩变形继续发展，恒阻锚索受力重新缓慢增大，增速缓慢且最终幅度较小，受力较稳定。

5 结论

(1) 通过围岩破碎程度分析、地应力实测、X 射线衍射等实验，明确岷县隧道软岩类型为三种软岩组合形成的复合型软岩，按主要特征其类型为节理化-高应力-膨胀性 (JHS) 软岩。

(2) 针对 JHS 型软岩隧道，依据“刚柔并济”的支护理念，结合 III_{CB} II_{AB} I_{AB} 复合变形机制的转化对策，提出了“超前支护+长短 NPR 锚索优化布置主动支护+钢拱架+混凝土喷浆永久支护”的高预应力主被动联合支护技术。

(3) 对原支护方案与各改进支护方案进行数值模拟对比，通过隧道围岩变形云图对比分析，发现高预应力主被动联合支护技术中所涉及支护手段对隧道围岩大变形均有一定控制能力。

(4) 现场试验段围岩变形和恒阻大变形锚索受力监测的结果表明，采用新型支护技术后，围岩变形量大大降低，最大变形出现在隧道右侧拱肩部；恒阻大变形锚索施工完成后，随着围岩变形的发展，依次经历受力增大、恒阻套筒吸能滑移及受力稳定等三个阶段，有效发挥了恒阻让压支护的作用。

(5) 采用长短 NPR 锚索进行主动让压支护体系，相较于普通锚杆支护，可以充分发挥 NPR 锚索的恒阻大变形的吸能特性，可以有效地将围岩变形控制在施工允许范围内。

References

BARTON N, 1988. Rock mass classification and tunnel reinforcement selection using the q-system [C] // Symposium on Rock Classification Systems for Engineering Purposes. Cincinnati,

- Ohio, USA.
- CAO C Y, SHI C H, LEI M F, et al., 2018. Squeezing failure of tunnels: A case study [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77: 188-203.
- DAI Y H, CHEN W Z, TIAN H M, et al., 2015. Study on large deformation and supporting scheme of soft rock in Daliang tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34 (S2): 4149-4156. (in Chinese with English abstract)
- DONG F T, 2001. Loose circle support theory and application technology of roadway surrounding rock [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House. (in Chinese)
- DONG F T, GUO Z H, 1992. Surrounding rock loose circle roadway support theory [J]. *Optical Blasting Anchor Spray Communication* (1): 1-5. (in Chinese)
- DONG F T, 2001. The supporting theory based on broken rock zone and its application technology [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House. (in Chinese)
- GUO B, ZHANG Y B, 2009. Research on the control technology for large deformation of carbon schist of Xinshuhe Tunnel [J]. *Journal of Railway Engineering Society* (11): 40-44. (in Chinese with English abstract)
- GUO C B, ZHANG Y S, WANG T, et al., 2017. Discussion on geological hazards and major engineering geological problems in the middle part of the North-South active tectonic zone, China [J]. *Journal of Geomechanics*, 23 (5): 707-722. (in Chinese with English abstract)
- GUO F L, 2010. Research on large deformation mechanism of soft rock of Baozhen tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University. (in Chinese with English abstract)
- GUO Z H, DONG F T, 1995. Loosening zone of surrounding rock and roadway support [J]. *Mine Pressure and Roof Management*, 000 (3): 111-114. (in Chinese)
- HAN R G, 1987. New Austrian Method of Underground Engineering [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- HE M C, JING H H, SUN X M, 2000. Research progress of soft rock engineering geomechanics in China coal mine [J]. *Journal of Engineering Geology*, 8 (1): 46-62. (in Chinese with English abstract)
- HE M C, JING H H, SUN X M, 2002. Soft rock engineering mechanics [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- HE M C, GONG W L, WANG J, et al., 2014. Development of a novel energy-absorbing bolt with extraordinarily large elongation and constant resistance [J/OL]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67: 29-42.
- HOEK E, DIEDERICHS M S, 2006. Empirical estimation of rock mass modulus [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43 (2): 203-215.
- HONG K R, 2019. Development and Thinking of Tunnels and Underground Engineering in China in Recent 2 Years (From 2017 to 2018) [J]. *Tunnel Construction*, 39 (5): 710-723. (in Chinese with English abstract)
- LI B, ZHANG W, WEN R, 2022. Study on the hydraulic fracturing in-situ stress measurement in super-long highway tunnels in southern Shaanxi: engineering geological significance [J]. *Journal of Geomechanics*, 28 (2): 191-202. (in Chinese with English abstract)
- LI G L, ZHU Y Q, 2008. Control technology for large deformation of highland stressed weak rock in Wushaoling tunnel [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 25 (3): 54-59. (in Chinese with English abstract)
- LI L, 2017. Study on squeezing large deformation mechanism and control technology of phyllite tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University. (in Chinese with English abstract)
- LI T C, 2011. Large deformation control technology for Maoyushan tunnel in soft rock under high in-situ stresses [J]. *Modern Tunnel Technology*, 48 (2): 59-67. (in Chinese with English abstract)
- LI Y Y, LI S Q, 2008. Analysis of surrounding rock bearing mechanism in deep soft rock roadways with associate support of anchoring and grouting [J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 23 (1): 10-14. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y, WU X J, LIU Z Q, et al., 2014. Discussion of and solutions for the large deformation mechanism of a tunnel in carbonaceous slate [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 51 (6): 19-24. (in Chinese with English abstract)
- LUO G, 2019. Statistics of super-long highway tunnels over 10 km in China [J]. *Tunnel Construction (Chinese and English)*, 39 (8): 1380-1383. (in Chinese with English abstract)
- MENG L B, PAN H S, LI T B, et al., 2017. Secondary lining cracking mechanism and the best time for supporting the Zhegushan Tunnel [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 54 (2): 129-136. (in Chinese with English abstract)
- MENG W, TIAN T, SUN D S, et al., 2022. Research on stress state in deep shale reservoirs based on in-situ stress measurement and rheological model [J]. *Journal of Geomechanics*, 28 (4): 537-549. (in Chinese with English abstract)
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2015. Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218-2014 [S]. Beijing: China Planning Press. (in Chinese)
- PROCTOR, R V, WHITE T L, 1946. Rock tunneling with steel supports [M]. Youngstown, OH: Commercial Shearing and

Stamping Co.

SHEN H M, 1995. Recommendation of Norway tunnel construction method NTM [J]. Journal of Railway Engineering Society, (3): 40-48. (in Chinese with English abstract)

SUN G J, DENG X L, YUAN P B, 2021. Research on Disaster Mechanism and Control of Permian Mudstone Tunnel in North China [J]. Railway Investigation and Surveying, 47 (2): 44-49. (in Chinese with English abstract)

SUN Y C, XIN M G, WANG Y, et al., 2022. Measurement and Regression Analysis of the Tunnel Geostress of a Heavy Haul Railway [J]. Railway Investigation and Surveying, 48 (1): 16-20, 44. (in Chinese with English abstract)

TAO Z G, ZHAO S, ZHANG M X, et al., 2018. Numerical simulation research on mechanical properties of constant resistance bolt/cable with large deformation [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 35 (1): 40-48. (in Chinese with English abstract)

TERZAGHI K, 1960. Theoretical soil mechanics [M]. XU Z Y, trans. Beijing: Geological Press. (in Chinese)

TIAN H M, CHEN W Z, TAN X J, et al., 2011. Study on reasonable support scheme on soft rock tunnel in high geostress zone [J].

Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 30 (11): 2285-2292. (in Chinese with English abstract)

TIAN S M, GONG J F, 2020. Statistics of China Railway Tunnels as of the end of 2019 [J]. Tunnel Construction, 40 (2): 292-297. (in Chinese with English abstract)

WANG B, LI T B, HE C, et al., 2012. Analysis of failure properties and formatting mechanism of soft rock tunnel in Meizoseismal areas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31 (5): 928-936. (in Chinese with English abstract)

WANG S R, LIU Z W, QU X H, et al., 2009. Large deformation mechanics mechanism and rigid-gap-flexible-layer supporting technology of soft rock tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 22 (6): 90-95. (in Chinese with English abstract)

XIA R H, CUI X P, ZHOU Q, 2015. Analysis of tunnel lining deformation in complex geology and engineering control technology [J]. Journal of Railway Engineering Society, 32 (8): 66-72. (in Chinese with English abstract)

ZHANG C, LOU Y M, SUN S H, et al., 2003. Application and discussion on floor arch board technology in project with water inrush and swelling soft rock, 31 (6): 53-55. (in Chinese with English abstract)

ZHANG D H, WANG M S, FU H X, et al., 2004. Determination of parameters for bolts in strong extrusion tunnel [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering (13): 2201-2204. (in Chinese with English abstract)

ZHANG P, SUN Z G, WANG Q N et al., 2017. In-situ stress

measurement and stability analysis of surrounding rocks in the north section of deep buried tunnel in Muzhailing [J]. Journal of Geomechanics, 23 (6): 893-903. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

戴永浩, 陈卫忠, 田洪铭, 等, 2015. 大梁隧道软岩大变形及其支护方案研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 34 (S2): 4149-4156.

董方庭, 郭志宏, 1992. 围岩松动圈巷道支护理论 [J]. 光爆锚喷通讯 (1): 1-5.

董方庭, 2001. 巷道围岩松动圈支护理论及应用技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社.

苟彪, 张奕斌, 2009. 新蜀河隧道炭质片岩大变形控制技术研究 [J]. 铁道工程学报 (11): 40-44.

郭长宝, 张永双, 王涛, 等, 2017. 南北活动构造带中段地质灾害与重大工程地质问题概论 [J]. 地质力学学报, 23 (5): 707-722.

郭富利, 2010. 堡镇软岩隧道大变形机理及控制技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学.

郭志宏, 董方庭, 1995. 围岩松动圈与巷道支护 [J]. 矿山压力与顶板管理, (3-4): 111-114.

韩瑞庚, 1987. 地下工程新奥法 [M]. 北京: 科学出版社.

何满潮, 景海河, 孙晓明, 2000. 软岩工程地质力学研究进展 [J]. 工程地质学报, 8 (1): 46-62.

何满潮, 景海河, 孙晓明, 2002. 软岩工程力学 [M]. 北京: 科学出版社.

洪开荣, 2019. 近 2 年我国隧道及地下工程发展与思考 (2017—2018 年) [J]. 隧道建设, 39 (5): 710-723.

李彬, 张文, 文冉, 2022. 陕南特长公路隧道水压致裂法地应力测量结果及工程地质意义分析 [J]. 地质力学学报, 28 (2): 191-202.

李国良, 朱永全, 2008. 乌鞘岭隧道高地应力软弱围岩大变形控制技术 [J]. 铁道工程学报, 25 (3): 54-59.

李磊, 2017. 千枚岩隧道挤压性大变形机理及控制技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学.

李廷春, 2011. 毛羽山隧道高地应力软岩大变形施工控制技术 [J]. 现代隧道技术, 48 (2): 59-67.

李永友, 李树清, 2008. 深部软岩巷道锚注联合支护围岩承载机理分析 [J]. 湖南科技大学学报 (自然科学版), 23 (1): 10-14.

刘阳, 伍晓军, 刘志强, 等, 2014. 关于碳质板岩隧道大变形机理及应对措施的探讨 [J]. 现代隧道技术, 51 (6): 19-24.

罗刚, 2019. 中国 10 km 以上超长公路隧道统计 [J]. 隧道建设, 39 (8): 1380-1383.

孟陆波, 潘皇宋, 李天斌, 等, 2017. 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, 54 (2): 129-136.

孟文, 田涛, 孙东生, 等, 2022. 基于原位地应力测试及流变模型的深部泥页岩储层地应力状态研究 [J]. 地质力学学报, 28 (4): 537-549.

长江水利委员会长江科学院，2014. 工程岩体分级标准：GB/T 50218—2014 [S]. 北京：中国计划出版社，2014.

沈慧敏，1995. 推荐挪威隧道施工法 NTM [J]. 铁道工程学报 (3): 40-48.

孙光吉，邓小龙，原鹏博，2021. 华北二叠系泥岩隧道灾变机理及控制研究 [J]. 铁道勘察，47 (2): 44-49.

孙元春，辛明高，汪洋，等，2022. 某重载铁路隧道地应力测试与反演分析 [J]. 铁道勘察，48 (1): 16-20, 44.

太沙基. K. 1960. 理论土力学 [M]. 徐志英，译. 北京：地质出版社.

陶志刚，赵帅，张明旭，等，2018. 恒阻大变形锚杆/索力学特性数值模拟研究 [J]. 采矿与安全工程学报，35 (1): 40-48.

田洪铭，陈卫忠，谭贤君，等，2011. 高地应力软岩隧道合理支护方案研究 [J]. 岩石力学与工程学报，30 (11): 2285-2292.

田四明，巩江峰，2020. 截至 2019 年底中国铁路隧道情况统计 [J]. 隧道建设，40 (2): 292-297.

汪波，李天斌，何川，等，2012. 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，31 (5): 928-936.

王树仁，刘招伟，屈晓红，等，2009. 软岩隧道大变形力学机制与刚-隙柔层支护技术 [J]. 中国公路学报，22 (6): 90-95.

夏润禾，崔小鹏，周泉，2015. 复杂地质隧道衬砌变形分析与工程治理技术 [J]. 铁道工程学报，32 (8): 66-72.

张春，娄玉民，孙树华，等，2003. 底梁弧板技术在涌水性膨胀型软岩工程中应用 [J]. 煤炭科学技术，31 (6): 53-55.

张德华，王梦恕，符华兴，等，2004. 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，23 (13): 2201-2204.

张鹏，孙治国，王秋宁，等，2017. 木寨岭深埋隧道北段地应力测量与围岩稳定性分析 [J]. 地质力学学报，23 (6): 893-903.

中华人民共和国住房和城乡建设部，2015. 工程岩体分级标准：GB/T 50218-2014 [S]. 北京：中国计划出版社.