

草果山隧道支护措施优化

曲宏略^{1,2}, 吴昆铭^{1,2}, 张勇³, 李兴华³, 李彪^{1,2}, 张建经⁴

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 2. 天然气地质四川省重点实验室, 四川 成都 610500;

3. 云南省建设投资控股集团有限公司市政总承包部, 云南 昆明 650000;

4. 西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘要:笔者以蔓耗—金平高速公路草果山深埋隧道为研究对象,采用数值计算分析与现场试验段监测验证相结合的方法,对隧道支护措施进行优化。选取隧道典型断面建立数值计算模型,对比分析三种支护方案,研究不同的支护类型与锚杆长度对隧道的变形控制效果。基于此,对草果山隧道支护措施进行了优化,取消了原有支护设计中的钢拱架,并在现场开展试验段监测对比验证,研究表明:监测数据与模拟结果具有较好的一致性,具备支护措施优化的可行性。支护措施优化结果减少了施工工序,降低了工程造价,可为同类隧道工程提供参考和借鉴。

关键词:草果山隧道;支护方案;数值模拟;围岩变形;试验段监测

中图分类号:U455;TU94+2;TL75+2.2

文献标识码:A

文章编号:1001-2184(2021)02-0001-05

Optimization of Supporting Measures for Caoguoshan Tunnel

QU Honglue^{1,2}, WU Kunming^{1,2}, ZHANG Yong³, LI Xuehua³, LI Biao^{1,2}, ZHANG Jianjing⁴

1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500;

2. Natural Gas Geology Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan, 610500;

3. Municipal General Contracting Department, Yunnan Construction Investment Holding Group

Co., LTD, Kunming, Yunnan, 650000; 4. Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan, 610031)

Abstract: This paper optimizes the supporting measures for Caoguoshan deep-buried tunnel of Manhao-Jinping Expressway through numerical calculation and analysis, as well as verification applying field monitoring results of the test section. Based on a typical tunnel section, numerical calculation model is established to compare and analyze three different supporting schemes, and study the deformation of tunnel with different supporting types and length of anchor bolt. The supporting measures of Caoguoshan Tunnel are optimized and steel arch in the original design are cancelled. Filed monitoring and verification of the test section shows that the monitoring data and the simulation results are in well consistency, which proves the feasibility of optimization in this paper. Optimization of supporting measures brings reduction in construction process and saving of engineering cost, and provides reference for similar tunnel projects.

Key words: Caoguoshan Tunnel; supporting scheme; numerical simulation; surrounding rock deformation; monitoring of test section

1 概述

随着我国基础设施建设的发展,公路、铁路工程在我国西南部呈网状铺开,隧道的数量不断增加,隧道埋深也越来越大,如二郎山隧道、秦岭终南山隧道等,高应力隧道的施工安全也得到越来越多的关注。因此,如何在确保施工安全条件下,

合理优化支护措施,对于高应力隧道建设具有非常重要的意义。近年来,随着计算机技术的不断发展,数值计算方法被广泛应用到隧道监测验证和预测之中^[1-6]。对于针对初期支护优化的研究,陶志刚^[7]等通过数值模拟软件对 NPR 锚索间距进行优化,通过与现场试验结果的对比分析,提出了该方案的优化方向。何尉详等^[8]为解决隧道仰拱初期支护钢拱架缺失,根据数值模拟计算结果,采用中空注浆锚杆对仰拱进行注浆补强,取

收稿日期:2020-12-27

基金项目:国家自然科学基金(51809221);深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金(SKLGDUK1910);蔓耗至金平高速公路项目草果山隧道岩爆预测与防控关键技术研究(JTSZ-MJGS-2019-042)。

得较好的整治效果。

申志军^[9]等开展现场试验对初期支护不同组合形式进行研究,其结果表明在深埋岩质隧道初期支护中,采用“网喷+钢架”或“网喷+系统锚杆”即可。关宝树^[10]指出初期支护的重要施工原则即必须使之与围岩成为一体才能发挥其功能,初步设计的支护方案应视施工中围岩的揭露情况灵活变动。

已有的研究在隧道支护过程围岩变形特征与安全评估方面取得了重要成果,拟采用数值模拟,对比草果山隧道轻微岩爆段在不同支护措施下隧道的变形规律,对隧道原支护方案进行优化,并在现场实际工程中验证了该优化方案的合理性与可行性,能够为类似工程提供参考。草果山隧道为蔓耗至金平高速公路的最长分离式隧道,属于控制性工程。草果山隧道起讫桩号:左线 ZK33+947.04-ZK40+952,右线 YK33+955-YK40+960。隧道全长 7 005 m,为特长隧道,海拔高程介于 1 125~2 126 m 之间,相对高差 1 001 m,最大埋深 903.8 m,隧道围岩以二长岩与花岗岩为主。现场在 K35+140 处进行了地应力测试,根据测试结果并参照陶征宇判据,判断结果为轻微岩爆,并且在 K35+480(埋深 507 m)处曾出现轻微掉块和异常声响,属轻微岩爆现象。根据现场的施工情况以及考虑到轻微岩爆对隧道支护的安全性影响较小^[11],笔者选择草果山隧道 K35+200—K35+600 轻微岩爆段进行取消钢拱架的优

化措施,通过研究该段围岩的变形情况来判断支护措施优化的效果。

2 数值模型的建立

2.1 数值模型

选取 K35+200—K35+600 段作为计算模型,该模型见图 1,计算模型长 400 m,宽 570 m,顶面按照实际地形选取高程。利用 Hypermesh 软件进行网格划分,加密了隧道及附近网格,共划分 90 288 个单元,并导入 Flac3D5.0 软件进行计算。

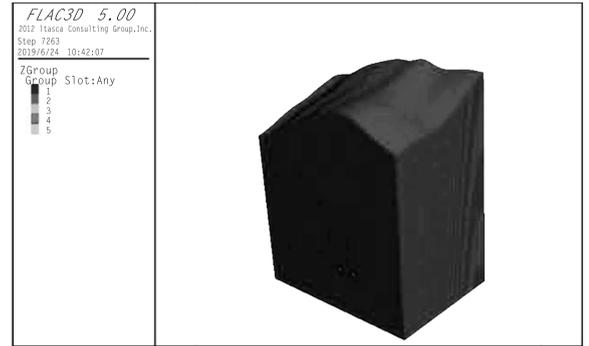


图 1 隧道计算模型图

2.2 边界条件及计算参数

隧道模型底面和四个侧面施加法向固定位移约束,上表面为自由边界。岩体应力应变关系计算采用适于岩土体力学行为的 Mohr-Coulomb 本构模型。根据室内三轴试验结果与草果山隧道地质资料,选取该模型的岩体物理力学性质参数见表 1。根据现场资料,K35+200—K35+600 区段围岩级别及设计支护参数见表 2。

表 1 岩体物理力学性质参数

密度 /kg·m ⁻³	弹模 /GPa	剪切模量 /GPa	体积模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角	抗压强度 /MPa
2 600	45	18.2	28.3	0.3	38.99	36.94	135

表 2 K35+200—K35+600 区段围岩级别及设计支护参数表

围岩 级别	初期支护					混凝土二次衬砌		预留 变形量 /mm	
	喷射混凝土 /cm		锚杆 /m			钢筋网	钢架		
	拱、墙	仰拱	位置	长度	间距	/mm	/cm		
Ⅳ1 级 岩爆段	22		拱	2.5	1.0×1.0	12@200×200 (拱、墙部)	12(II6)	35	80

初期支护考虑锚杆、钢拱架、钢筋网和喷射混凝土的共同作用,采用等效的方法考虑钢拱架及钢筋网,初期支护力学参数取值^[12]见表 3。

2.3 方案设计及其计算结果

数值模拟的锚喷支护模型图见图 2。该次研究共设计 3 种支护方案,具体方案见表 4。隧道采

表 3 初期支护力学参数

材料参数	弹性模量 /GPa	泊松比	重度 /kN·m ⁻³
钢拱架、钢筋网、混凝土	36	0.2	23
钢筋网、混凝土	30	0.18	22.5
锚杆	200	0.3	78.5

用全断面分步开挖方式,5 m 一次开挖,开挖完成后进行支护,再继续循环开挖。对隧道拱顶与两侧边墙位移变化进行监测,并根据位移变化分析隧道开挖与支护过程中的变形情况。

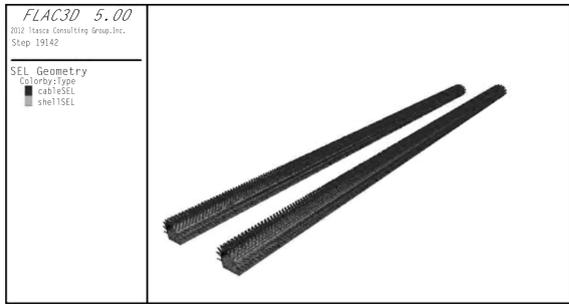
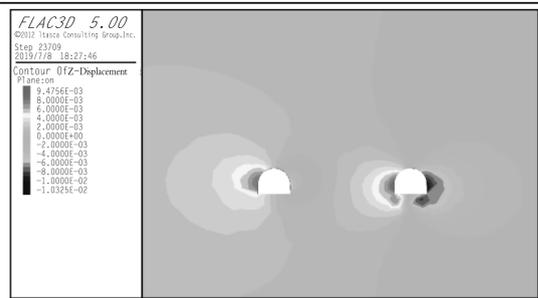


图 2 锚喷支护模型

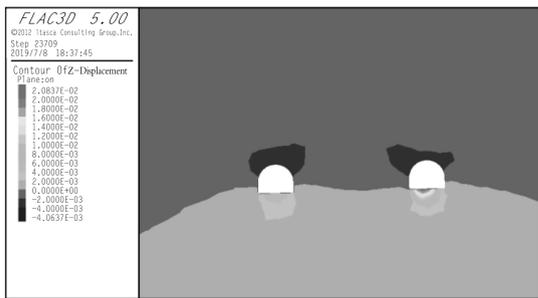
表 4 方案设计

方案	锚杆 /m	喷射混凝土 /cm	钢拱架(间距) /m
方案一	2.5	22	1.2
方案二	2.5	12	无
方案三	3.5	12	无

(1)方案一。锚杆间距为 1.0 m×1.0 m,锚杆长度为 2.5 m,混凝土选用 C25,喷射混凝土厚度为 0.22 m。钢拱架间距为 1.2 m。K35+600 处位移云图见图 3。



(a) X 向位移云图

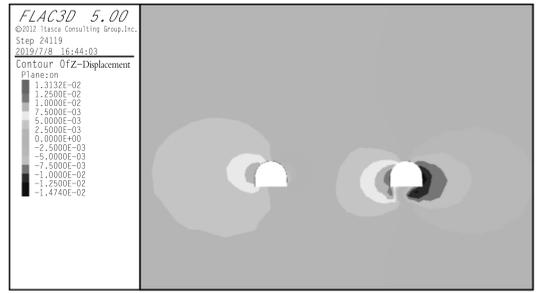


(b)Z 向位移云图

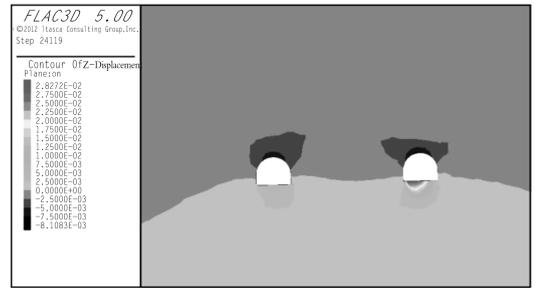
图 3 方案一位移云图(m)

(2)方案二。取消钢拱架,锚杆间距为 1.0 m×1.0 m,锚杆长度为 2.5 m,混凝土选用 C25,喷

射混凝土厚度为 0.12 m。K35+600 处位移云图见图 4。



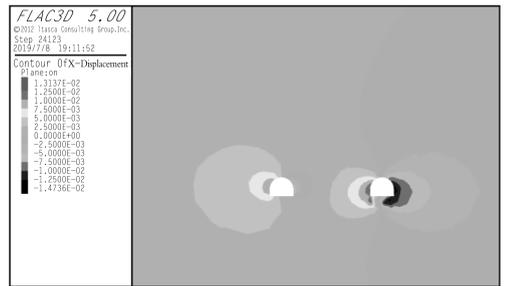
(a) X 向位移云图



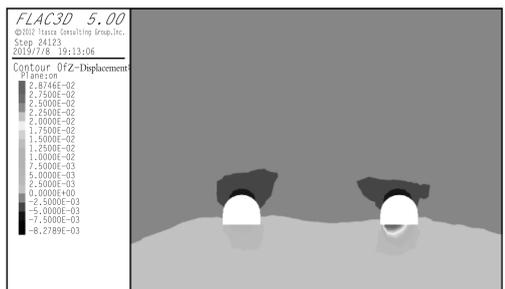
(b)Z 向位移云图

图 4 方案二位移云图(m)

(3)方案三。取消钢拱架,锚杆间距为 1.0 m×1.0 m,锚杆长度为 3.5 m,混凝土选用 C25,喷射混凝土厚度为 0.12 m。K35+600 处位移云图见图 5。



(a) X 向位移云图



(b)Z 向位移云图

图 5 方案三位移云图(m)

选取 K35+250、K35+350、K35+450、K35+550 四个典型剖面进行分析,将三个支护方案位移计算结果整理后见表 5。

表 5 三个支护方案位移计算结果表

方案编号	隧道	拱顶下沉量/cm	洞周收敛/cm		
			左侧	右侧	总收敛
方案一	左线	0.4	0.8	0.6	1.4
	右线	0.42	0.9	1.2	2.1
方案二	左线	0.84	1.05	0.77	1.82
	右线	0.9	1.27	1.05	2.32
方案三	左线	0.86	1.06	0.78	1.84
	右线	0.93	1.29	1.06	2.35

方案一拱顶最大沉降量为 0.42 cm,总收敛值最大为 2.1 cm。方案二是在方案一的基础上取消了钢拱架,拱顶最大沉降量达到 0.9 cm,增大了 114.3%,总收敛值最大为 2.32 cm,增大了 10.5%,说明钢拱架对隧道变形控制具有一定的作用,尤其是对拱顶的沉降控制效果较为明显。方案三是在方案二的基础上将锚杆加长了 1 m,其拱顶沉降量和最大收敛值为 0.86 cm 和 2.35 cm,相较于方案二,拱顶沉降量与洞周收敛值有 4.4%与 1.3%的变化,可以表明加长锚杆对支护作用效果有所提升,但提升效果不明显。

由于公路隧道监控量测没有全国统一的规范标准,且铁路隧道安全等级高于公路隧道,参考铁路规程^[13],方案二与方案三皆满足其初期支护极限位移 30 mm 的要求。但由于该段处于岩爆发生段,而岩爆的发生又具有突发性和不可预知性,为保证施工人员的作业安全,选择方案三作为试验段的支护措施。

3 试验段监测结果分析

草果山隧道在 K35+564-K35+600 段进行了试验段,在原设计支护类型上取消了钢拱架支护措施,采用方案三支护措施进行支护。通过对现场的监控量测,得到试验段的变形情况。隧道周边位移与拱顶沉降测点布置示意图见图 6,分别在试验段三处位置对洞内变形的情况进行监控测量,其结果见表 6。

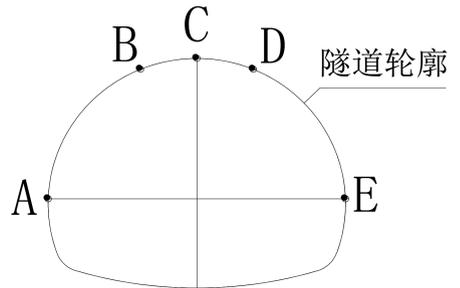


图 6 隧道周边位移与拱顶沉降测点布置示意图

表 6 试验段监控量测洞内变形数据汇总及结果一览表

断面桩号	测点编号	埋设日期	累计 监测天数/d	围岩 级别	当前变形率 /mm/d	当前累计 形量/mm	设计预留 变形量/mm	管理 位移	管理 等级
K35+570	B	2019-11-01	14	IV1	-0.10	-10.50	80	$U < U_n/3$	III
	C	2019-11-01	14	IV1	-0.12	-10.14	80	$U < U_n/3$	III
	D	2019-11-01	14	IV1	-0.13	-10.25	80	$U < U_n/3$	III
	A ₁ E ₁ 测线	2019-11-01	14	IV1	-0.11	-7.40	80	$U < U_n/3$	III
K35+589	B	2019-11-04	11	IV1	-0.15	-9.92	80	$U < U_n/3$	III
	C	2019-11-04	11	IV1	-0.13	-10.49	80	$U < U_n/3$	III
	D	2019-11-04	11	IV1	-0.10	-10.14	80	$U < U_n/3$	III
	A ₁ E ₁ 测线	2019-11-04	11	IV1	-0.12	-7.00	80	$U < U_n/3$	III
K35+603	B	2019-11-07	8	IV1	-0.15	-9.44	80	$U < U_n/3$	III
	C	2019-11-07	8	IV1	-0.13	-9.24	80	$U < U_n/3$	III
	D	2019-11-07	8	IV1	-0.12	-9.07	80	$U < U_n/3$	III
	A ₁ E ₁ 测线	2019-11-07	8	IV1	-0.10	-4.46	80	$U < U_n/3$	III

根据草果山隧道后期现场试验段结果及现场半个月的监控量测报告,未观察到岩爆现象,监测断面拱顶最大下沉量为 1.05 cm,而数值模拟结

果拱顶最大下沉量为 0.93 cm,数值模拟与现场试验段实际情况较吻合。草果山试验段监测结果满足规范要求,因此,在草果山隧道岩爆预测结果

为轻微岩爆段采取取消钢拱架的措施是可行的。

4 结语

笔者通过数值模拟手段及现场试验段监测验证,针对草果山隧道预测结果为轻微岩爆段区域进行了岩爆防治的支护措施设计优化研究。

(1)采用数值模拟,对比分析了三种不同的支护方式下围岩变形特征,表明在取消了钢拱架后,隧道的变形虽然有了一定的增长,但仍然满足隧道围岩变形安全规范要求,草果山隧道轻微岩爆段具备取消钢拱架支护的可行性。

(2)对草果山隧道 K35+564-K35+600 段进行取消钢拱架的现场试验,根据现场试验段变形监测结果表明在取消了钢拱架后,隧道的拱顶下沉量最大为 0.74 cm,洞周收敛值最大为 1.05 cm,收敛值满足安全规范要求。实际监测数据与模拟结果有较好的一致性,验证了数值模拟计算结果的合理性。

(3)通过对草果山隧道的支护措施优化,取消了钢拱架的架设,降低了支护成本,加快了施工进度,为类似工程提供了参考。

参考文献:

- [1] 李沿宗,高攀,邹骞,等.木寨岭隧道变形分析及初期支护参数优化研究[J].隧道建设,2011,31(3):320-324+339.
- [2] 田明杰,仇文革,朱旺,等.单线铁路隧道施工量测信息分析与初期支护优化研究[J].铁道建筑,2018,58(11):78-82,90.
- [3] 高美奔,李天斌,郑建国,等.背斜核部区隧道初期支护变形机理及支护对策[J].现代隧道技术,2019,56(1):169-175.
- [4] 田明杰,仇文革,朱旺,等.单线铁路隧道施工量测信息分析与初期支护优化研究[J].铁道建筑,2018,58(11):78-82,90.
- [5] 黄海昀,仇文革,黄骥,等.石质铁路隧道初期支护优化研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(1):152-161.
- [6] 宗书合,褚玉勇.马湾隧道浅埋偏压段初期支护变形原因分析及参数优化[J].隧道建设(中英文),2017,37(S2):211-

217.

- [7] 陶志刚,罗森林,李梦楠,等.层状板岩隧道大变形控制参数优化数值模拟分析及现场试验[J].岩石力学与工程学报,2020,39(3):491-506.
- [8] 何尉祥,申玉生,何永辉,等.隧道仰拱初期支护钢架缺失整治技术[J].铁道科学与工程学报,2016,13(6):1114-1121.
- [9] 申志军,黄海昀,李思,等.初期支护组合形式有效性现场试验研究[J].隧道建设(中英文),2018,38(2):161-170.
- [10] 关宝树.矿山法隧道关键技术[M].北京:人民交通出版社,2016.
- [11] 李天斌,孟陆波,郑建国,等.大陆西部深埋隧道岩爆特徵及其地质力学模式[C].隧道协会、岩石力学与工程学会地下工程分会、土木工程学会隧道与地下工程分会.第十一届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会论文集(A卷).隧道协会、岩石力学与工程学会地下工程分会、土木工程学会隧道与地下工程分会:中国岩石力学与工程学会,2012:108-115.
- [12] GB50086-2015,岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[S].
- [13] Q/CR 9218-2015,铁路隧道监控量测技术规程[S].

作者简介:

曲宏略(1984-),男,山东青州人,博士,副教授,从事岩土工程抗震、地质灾害评价与防治、地下结构灾害防护与监测等方面的教学及科研工作;

吴昆铭(1996-),男,四川仪陇人,硕士研究生,从事工程地质方面研究;

张勇(1985-),男,云南寻甸回族彝族自治县人,工程师,从事公路建设方面施工技术与管理工作的;

李学华(1974-),男,云南红河哈尼族彝族自治州建水县人,正高级工程师,从事公路建设方面施工技术与管理工作的;

李彪(1990-),男,山东菏泽人,博士、副教授,从事岩土工程微震监测与岩体稳定性评价方面的研究工作;

张建经(1960-),男,四川成都人,博士,教授,博士生导师,从事岩土工程结构抗震、铁路和公路路基工程、边坡及新型支挡防护结构的研究。

(责任编辑:吴永红)

白鹤滩水电站蓄水高程已超716米 首批机组迎来发电倒计时

4月22日,位于四川省凉山州宁南县与云南省昭通市巧家县交界的金沙江畔最高气温突破39度,世界在建最大的水电站项目白鹤滩水电站右岸地下厂房灯火仍然通明,由中国能建葛洲坝机电公司承建的8台发电机组安装工作如火如荼进行,厂房内约800名安装工人正向首批机组发电做最后冲刺。

据介绍,白鹤滩水电站是国家“西电东送”的重大工程,电站总装机容量1600万千瓦,其安装的百万千瓦机组也是世界单机容量最大的水电机组,建成后其单台水轮发电机日发电量可达到2400万度电。目前,水电站机组安装工作已经近半,首批机组将于7月1日前进行发电。

(中国新闻网 2021年4月23日)