



“十三五”国家重点图书出版规划项目
中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

胡麻岭富水弱胶结砂岩 隧道施工技术

周 焯 何志军 朱永全 等

编著

Constuction Technology
for Humaling
Water-rich Weak-cemented Sandstone Tunnel



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



“十三五”国家重点图书出版规划项目
中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

胡麻岭富水弱胶结砂岩 隧道施工技术

周 焯 何志军 朱永全 等



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书主要介绍胡麻岭富水弱胶结砂岩隧道施工技术。全书共九章,主要内容包括:胡麻岭隧道工程概况,第三系富水弱胶结砂岩地层特征和围岩工程特性,软流塑状围岩失稳机理,施工方法试验与选择,施工降水与围岩疏干技术,大理深软流塑地层围岩加固技术与工法,隧底围岩扰动液化综合治理技术,风险控制与管理技术等。

本书可供隧道及地下工程建设管理、设计、施工的工程技术人员学习参考,同时可作为相关院校师生的学习资料。

图书在版编目(CIP)数据

胡麻岭富水弱胶结砂岩隧道施工技术 / 周焯等编著

—北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.5

ISBN 978-7-114-14589-6

I. ①胡… II. ①周… III. ①山岭隧道—隧道施工
IV. ①U459.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 053836 号

穿越——中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

书 名:胡麻岭富水弱胶结砂岩隧道施工技术

著 者:周 焯 何志军 朱永全 等

责任编辑:王 霞 谢海龙

责任校对:赵媛媛

责任印制:张 凯

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京印匠彩色印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:10.75

字 数:300千

版 次:2018年5月 第1版

印 次:2018年5月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-14589-6

定 价:68.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

编写委员会

主任：熊春庚 何志军 赵国旗

副主任：王庆林 孙韶峰 魏洲泉 曲桂有 宫建岗

李雷 冀聪明 张有生 舒丽红

主编：周焯 何志军 朱永全

副主编：陈东杰 刘俊成 杨木高 王胜国

编委：解方亮 尚尔海 朱元生 朱宝 毕德灵

袁维瑜 牟杰 高勤运 林安宁 卫鹏华

冷广川 孙成刚 杨喆坤 龚鹏 张勇

吴晨 李绍杰 刘君堂 彭峰

在国家重点铁路干线兰渝铁路的建设中,以胡麻岭特长铁路隧道为代表,陇东区、陇西盆地集中出现了第三系富水弱胶结砂岩。第三系富水弱胶结砂岩沉积地质时代距今 250 万 ~ 2400 万年,成岩性差,泥质弱胶结,结构脆弱,遇水浸润(泡)或长时间暴露极易产生结构破坏,由于砂岩复杂的水稳特性,加之施工扰动,很快变成松散的砂状,砂岩渗水后很快达到饱和状态,围岩发生塑性流坍、滑移或产生外挤现象。对此,国内外知名专家、学者曾多次现场考察,专题论证,将本项目段列为“国内罕见、世界性难题”。

胡麻岭特长铁路隧道的成功建设,是第三系富水弱胶结砂岩隧道建设的代表性作品,凝聚了参建者的艰辛、智慧与奉献。

书中介绍了胡麻岭富水弱胶结砂岩隧道施工技术与实例,主要内容包括:胡麻岭隧道工程概况与设计,第三系富水弱胶结砂岩地层特征和围岩工程特性,软流塑状围岩失稳机理,施工方法试验与选择,施工降水与围岩疏干技术,大埋深软流塑地层围岩加固技术及工法,隧底围岩扰动液化综合治理技术和风险控制与管理技术等。

当前隧道建设亟待一本大埋深软流塑地层、流砂地层隧道建设的技术专著,本书的及时出版,相信对第三系富水弱胶结砂岩地层隧道、大埋深流砂地层隧道建设问题的处理具有指导意义和参考价值。

伴随高速铁路网建设的不断推进,“交通强国”战略和“一带一路”倡议的深入实施,第三系富水弱胶结砂岩地层隧道、大埋深流砂地层隧道建设将越来越多。为此,我们需要提高软流塑地层和流砂地层隧道修建技术,创新施工工法,大幅提升软流塑地层和流砂地层等不良地质隧道的建设水平,为中国铁路隧道建设技术的发展与进步贡献力量。

卢春房

2017 年 12 月

胡麻岭隧道是兰渝铁路干线的重点工程,隧道全长 13.61km,其中有 3.25km 穿越第三系饱和富水弱胶结砂岩地层,形成众多大小不等的水囊,受施工扰动的影响,围岩液化十分严重,涌水、流砂等安全隐患突显,该项目段被专家列为“国内罕见,世界性难题”,全路“头号重点工程”。

2008 年至今,我们先后立项开展了“胡麻岭富水弱胶结砂岩隧道施工技术研究”、“浅埋偏压软流塑状围岩隧道综合施工技术研究”、“饱和弱成砂岩隧道挑高段综合施工技术研究”和“大断面高地应力软岩隧道大变形控制综合技术”等,取得了一系列丰硕成果。

本书系统总结了胡麻岭富水弱胶结砂岩隧道施工技术与建设经验,介绍了胡麻岭隧道工程概况与设计,第三系富水弱胶结砂岩地层特征和围岩工程特性,软流塑状围岩失稳机理,施工方法试验与选择,施工降水与围岩疏干技术,大埋深软流塑地层围岩加固技术与工法,隧底围岩扰动液化综合治理技术和风险控制与管理技术。

本书由周焯、何志军、朱永全、陈东杰、刘俊成、杨木高、王胜国等撰写,书中引用了设计方案、技术交底、施工组织设计和研究论文资料,引用了“浅埋偏压软流塑状围岩隧道综合施工技术研究”、“饱和弱成砂岩隧道挑高段综合施工技术研究”和“大断面高地应力软岩隧道大变形控制综合技术”成果报告资料。书中的成果凝聚了王庆林、李国良、刘国庆、肖广智、张民庆和任成敏等国内专家及建设、设计、施工等一线工程技术人员的辛劳与智慧。在此,要感谢以上同志在提供资料和文字编写过程中所提供的帮助。

本书理论与实践并重,经典理论、方法与现代新技术、新方法相结合。为第三系富水弱胶结砂岩地层隧道、大埋深流砂地层隧道建设提供参考,可供工程技术人员和在校研究生阅读参考。

由于时间仓促,水平有限,仍有不少错误和不足,恳请专家和读者批评指正。

作者

2017 年 12 月

第一章 胡麻岭隧道工程概况	1
第一节 工程概况	1
一、兰渝铁路概况	1
二、胡麻岭隧道概况	1
三、第三系弱胶结砂岩地层概况	3
四、第三系弱胶结粉细砂岩地层特性	3
五、饱和弱胶结砂岩隧道施工中的主要技术问题	5
第二节 勘察设计	5
一、勘察依据、方法及经过	5
二、完成的工作量	5
三、主要地质特征描述及围岩分级	6
第三节 施工过程中的地质工作	7
一、补充地质勘察	7
二、专家研讨	7
三、科研攻关	7
第二章 第三系富水弱胶结砂岩地层特征和围岩工程特性	9
第一节 物理性能试验	9
一、颗粒组成	9
二、含水率	10
三、密度	10
四、固结系数	10
五、渗透系数	11

第二节 力学性能试验	12
一、单轴抗压强度	12
二、剪切强度	15
三、蠕变强度	16
第三节 地层特性	24
一、工程地质特性	24
二、地层性态变化特性	24
第四节 围岩工程特性	25
一、围岩汗状渗水	25
二、围岩呈流塑状	25
三、围岩呈涌水、流砂状	26
四、围岩扰动液化	26
第五节 前期施工涌水、流砂情况及困难	28
一、1号斜井重庆方向正洞	28
二、2号斜井兰州方向正洞	28
第三章 软流塑状围岩失稳机理	30
第一节 围岩含水率与稳定性的关系	30
一、降水前后围岩含水率测定	30
二、降水前后围岩变形监测数据分析	33
三、降水前后施工进度对比	34
第二节 软塑状围岩掌子面汗状渗水	35
一、汗状渗水产生的机理	35
二、汗状渗水条件	36
三、汗状渗水特性	37
四、汗状渗水的危害	38
五、汗状渗水治理的综合降水技术要点	39
第三节 流塑状围岩变形挤出	39
一、流塑状态的表现	39
二、流塑状态产生的机理	39
三、流塑状态形成的条件	40
四、流塑状态形成因素	40
五、流塑状态危害	42

六、流塑状态围岩注浆固结技术要点	42
第四节 流砂状围岩涌水、流砂	43
一、涌水、流砂状态的表现	43
二、涌水、流砂机理	43
三、富水弱胶结砂岩地层涌水、流砂形成因素	46
四、涌水、流砂危害	46
五、涌水、流砂预防技术要点	47
第四章 施工方法试验与选择	49
第一节 施工方法的选择过程	49
第二节 盾构法方案研究	50
一、盾构法适应性分析	51
二、盾构法施工设计	52
三、盾构法施工围岩稳定性分析	58
四、风险及存在问题	61
第三节 冻结法方案研究	61
一、整体方案	61
二、施工工艺流程	62
三、冻结帷幕设计	63
四、制冷系统设计	67
五、冻结施工	68
六、冻胀与融沉控制	69
七、风险及存在的问题	69
第四节 矿山法可行性分析与开挖方法确定	70
一、盾构法和矿山法适应性比较	71
二、矿山法可行性理论分析	73
三、矿山法适应性研究	75
四、大埋深软流塑地层围岩加固技术与工法	76
第五章 施工降水与围岩疏干技术	77
第一节 洞内降水短距离围岩疏干技术	77
一、轻型井点负压降水的基本原理	77
二、洞内真空井点围岩疏干技术	78
三、洞内轻型井点施工工艺	80

四、效果分析·····	81
第二节 超前导洞降水长距离围岩疏干技术·····	81
一、目的·····	81
二、导洞降水及施工方案·····	81
三、超前导洞和辐射降水技术·····	81
四、效果分析·····	82
第三节 低渗透性地层地表深井降水技术·····	82
一、低渗透性地层地表深井降水试验·····	82
二、7号竖井地表深井降水·····	84
三、井深100m以下地表深井降水·····	86
四、井深100m以上的地表超深井降水试验·····	89
五、洞内外综合降水·····	97
第六章 大埋深软流塑地层围岩加固技术与工法·····	98
第一节 浅孔双液回退劈裂注浆辅助施工技术·····	98
一、目的·····	98
二、双液回退劈裂注浆技术·····	98
三、应用效果·····	99
第二节 超细水泥注浆技术·····	100
一、目的·····	100
二、注浆材料·····	100
三、径向注浆技术·····	101
四、注浆效果检查评定标准·····	102
第三节 超前振动插管地层预扰动注浆加固技术·····	102
一、技术特点·····	102
二、工艺原理·····	102
三、工艺技术·····	103
四、应用实例及效果·····	104
第四节 超前帷幕注浆加固技术·····	105
一、帷幕注浆加固技术·····	105
二、帷幕注浆施工工艺·····	107
三、帷幕注浆效果分析及评价·····	109
第五节 第三系砂岩斜井挑高段施工技术·····	112

一、技术简介	112
二、挑高段施工方案比选与确定	112
三、直接进入正洞横向贯通单侧喇叭状挑高技术	117
四、小结	120
第六节 双侧壁和 CRD 工法	120
一、双侧壁工法	120
二、CRD 工法	124
第七节 浅埋段隧道地表旋喷加固技术	125
一、技术特点	125
二、地表竖直旋喷加固方法	126
三、施工工艺及技术	126
四、施工效果及评价	126
第七章 隧底围岩扰动液化综合治理技术	127
第一节 饱和弱胶结砂岩液化特性	127
一、扰动液化概念	127
二、扰动液化机理	127
三、饱和弱胶结砂岩施工扰动液化现象	128
第二节 饱和弱胶结砂岩在施工扰动下的液化判定	130
一、扰动液化的主要影响因素	130
二、液化判定	131
三、扰动液化的危害	132
第三节 饱和弱胶结砂岩运营动载下振动液化分析	132
一、模型的建立	133
二、计算结果与分析	136
第四节 扰动液化综合治理技术	137
一、施工降水	137
二、围岩注浆	137
三、基底换填	137
四、其他措施	137
五、治理效果	137
第八章 风险控制与管理技术	139
第一节 安全管理技术	139



- 一、技术方案可靠 139
- 二、施工工艺严谨 139
- 三、安全技术措施完善 142
- 四、安全保证措施有效 143
- 第二节 质量管理技术 145
 - 一、施工过程质量监控的范围及重点 145
 - 二、质量监控的方法与手段 145
 - 三、质量管理制度 146
 - 四、关键工序质量控制技术措施 146
- 第三节 施工组织与信息化管理技术 150
 - 一、双侧壁工法施工组织 150
 - 二、信息化管理技术 151
 - 三、建立现场联合工作组机制 151
- 第九章 结论 153
 - 一、第三系富水弱胶结砂岩的地层性质和围岩工程特征 153
 - 二、第三系粉细砂岩隧道围岩含水率与稳定性的关系 154
 - 三、第三系富水弱胶结砂岩地层降水疏干与注浆加固围岩的多分部施工方法 154
 - 四、渗透性极低地层洞内外施工综合降水技术 155
 - 五、大埋深软流塑及流砂地层的围岩加固技术和工法 156
 - 六、存在问题及展望 156
- 参考文献 158

第一章 胡麻岭隧道工程概况

兰渝铁路是我国西南、西北之间最便捷、快速的通道,该线北接兰新、包兰、兰青、陇海铁路,南连宝成、襄渝、达成、渝怀、沪汉蓉铁路,是我国《中长期铁路网规划(2008年调整)》中的重要铁路干线。胡麻岭隧道长度大、地质复杂、施工风险高,是兰渝铁路的关键性控制工程。

本章介绍兰渝铁路和胡麻岭隧道工程概况、第三系弱胶结砂岩地层特性概况及主要工程技术问题,同时介绍勘察设计过程和施工过程中的加深地质工作。

第一节 工程概况

一、兰渝铁路概况

为了加快西部经济发展,带动沿线地区脱贫致富,改善民生民计,实现西北和西南地区优势互补,保障西部大开发战略的顺利实施和全面建成小康社会目标的顺利实现,中国铁路总公司和甘肃、四川、重庆三省市决定投资建设兰渝铁路。兰渝铁路北起甘肃省兰州市枢纽,经渭源、岷县、宕昌县、陇南市(武都区),经过陕西省宁强县进入四川省,经广元市、苍溪县、阆中市、南部县、南充市(顺庆区)、武胜县至重庆市合川、北碚,是西南西北之间最便捷、快速的通道(图 1-1-1)。

二、胡麻岭隧道概况

胡麻岭特长隧道是兰渝铁路的关键性工程,位于甘肃省榆中县、定西市境内,全长 13611m,设计为客货共线双层集装箱,开通时速 160km,线下预留 200km/h,为双线大断面隧道,最大开挖断面 165m^2 ,如图 1-1-2 所示。隧道原设计地质以砂岩为主,设计有 4 座斜井。其中 3、4 斜井在施工中遇到了第三系弱胶结饱和粉细砂岩地层,其成分以石英为主,呈黄色、橘黄色,粉细粒结构,泥质弱胶结,局部夹有砾岩薄层,成岩作用极差,属极软岩。该地层施工难度极大,进度缓慢。因满足不了工期要求,先后增加了 5 号、7 号、8 号三个辅助坑道,其辅助坑道设置如图 1-1-3 所示。



图 1-1-1 兰渝铁路线路示意图

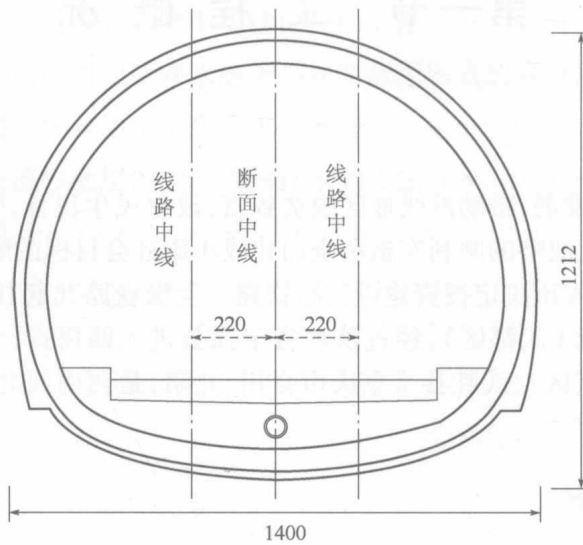


图 1-1-2 胡麻岭隧道横断面(尺寸单位:cm)

施工揭示 3、4、7 和 8 号斜井坑道部分段落穿越了第三系富水弱胶结砂岩地层;4 号、5 号正洞之间 DK76 + 350 ~ DK79 + 600 段 3250m 穿越第三系富水弱胶结砂岩地层。其中正洞有 140m 下穿水库,99m 下穿河流,且地表有很多洞穴,地表水可不经渗透直接灌入;受地震连发带影响,区域内裂隙较多,为孔隙裂隙水提供了通道。所以水害是胡麻岭隧道富水弱胶结砂岩地层的主要问题。

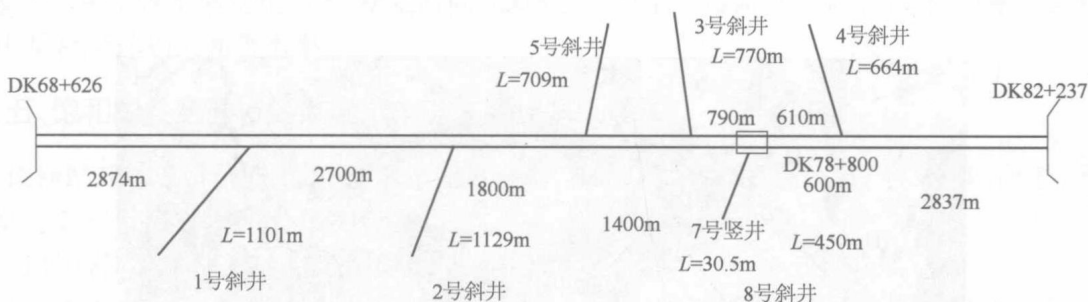


图 1-1-3 胡麻岭隧道辅助坑道示意图

三、第三系弱胶结砂岩地层概况

1. 形成背景

根据《甘肃省区域地质志》，本区域上第三系地层划分为陇东区、陇西盆地的甘肃群，为一套橘黄色、浅棕黄色泥质砂岩、泥岩互层的地层，属陆相湖盆及山间凹地沉积，沉积地质时代距今 250 万 ~ 2400 万年。

第三系粉细砂岩地层岩性较单一，颗粒较均一，结构紧密，属新生代沉积，受构造运动影响较小，节理、裂隙不发育。因此，在天然状态下，存在构造裂隙的可能性非常小，地下水主要赋存于砂岩孔隙水中，由于砂岩胶结程度、黏粒含量及补给途径的不同，使地下水分布具有不均匀性，表现为局部地段砂岩含水率偏高或地下水相对富集，水文地质条件十分复杂。

隧道通过地区地貌属黄土梁、峁区，地表覆盖有厚度较大的砂质黄土，沟谷发育。第三系砂岩为隧道的主要含水层，地下水类型为基岩裂隙（孔隙）水，为弱富水区，由降水入渗及上游沟谷浅层地下水沿基岩面径流补给。

2. 分布区域

第三系砂岩在兰州盆地和定西盆地分布范围较广，沉积厚度较大。兰州地区除新城盆地（河口、新城一带）基底为白垩系地层外，榆中（定远）、城关、七里河、安宁堡及西固盆地，下伏基岩均为第三系红色砂岩或碎屑岩类，在地貌上多表现为黄土梁峁和河谷阶地上覆风积和冲洪积黄土，下伏第三系泥岩、砂岩及砾岩，分布情况如图 1-1-4 所示。

四、第三系弱胶结粉细砂岩地层特性

上第三系粉细砂岩成岩性差，泥质弱胶结，结构脆弱，遇水浸润（泡）或长时间暴露极易产生结构破坏，由于复杂的水稳特性，加之施工扰动，砂岩很快变成松散的砂状，渗水后很快达到饱和状态，发生塑性流坍、滑移或产生外挤现象。

对此，国内外知名专家、学者曾多数次现场考察，专题论证，将其确定为“国内罕见、世界性难题”。

1. 物理力学指标

砂岩大部分为泥质弱胶结，局部夹有钙质胶结的薄层，成岩性极差，结构较紧密，渗透系数小，其工程性质更接近于具有压密作用的粉细砂层，其主要物理力学指标见表 1-1-1。



图 1-1-4 兰州至定西段地质分区示意图

围岩物理力学指标统计

表 1-1-1

隧道名称	颗粒名称	含水率 (%)	含泥量	细度模数	比重 G_s	孔隙比 e	压缩系数 a_{1-2}	黏粒含量 (%)	渗透系数 K_1 (cm/s)
胡麻岭隧道	粉细砂岩	4.3 ~ 19.5	21	0.7	2.60	0.36 ~ 0.48	0.07	6.0 ~ 12.0	$4.0 \times 10^{-5} \sim 5.2 \times 10^{-5}$

2. 地下水

钻孔揭示圆砾土中未见地下水,下部砂岩中有少量地下水,说明地下水以孔隙水为主,且分布具有不均匀性,仅局部地段砂岩含水率偏高或地下水相对富集。隧道正洞及斜井内地下水以大气降水入渗和岩体容积储量水为主要补给来源。钻孔水文地质试验成果资料见表 1-1-2。

隧道钻孔水文地质试验成果资料

表 1-1-2

编号	位置	孔深 (m)	试验情况简述及岩性	混合静止水位 (m)	试验段落 (m)	抽(提)水试验				
						降深 S (m)	出水量 Q (L/s)	单位涌水量 q (L/s·m)	计算渗透系数 K (m/d)	影响半径 R (m)
HMSZ-1	DK70 + 320 R12m	146.0	提水,黄土、粉质黏土	9.0	0 ~ 146.0	66.3	0.003	1.52×10^{-5}	1.4×10^{-7}	—
HMSZ-2	DK73 + 640 R12m	161.8	混合抽水试验、砾岩	126.2	0 ~ 161.8	22.7	0.029	1.28×10^{-3}	4.1×10^{-3}	54.0
HMSZ-3	DK79 + 900 R12m	198.1	提水,砂岩泥岩	64.8	0 ~ 195.0	100.8	0.163	1.62×10^{-3}	1.36×10^{-3}	85.8

3. 稳定性

该砂岩的成分组成、胶结及含水情况具有不均一性,且开挖后受水体浸泡及外部条件的影响,稳定性具有随时间延续显著变差的特点。通过对部分掌子面的砂岩含水率的延时变化分

析,发现上台阶含水率变化不大,稳定时间相对较长,而中下台阶开挖后受渗水影响含水率在3~5h后就会达到饱和含水率。

五、饱和弱胶结砂岩隧道施工中的主要技术问题

该地层开挖后自稳能力极差,掌子面不稳定,易坍塌,经常出现底板冒水、流砂、涌水、沉降大、初支变形等现象,主要原因为:

(1) 围岩固结不均匀,渗透系数小,降水难度大。

(2) 渗水浸泡围岩,围岩软化,在开挖下台阶时壁面围岩层层剥离,造成支护接腿无法实施,拱脚以上支护背后脱空,上断面支护突然沉降变形,无法进行下断面施工。

(3) 掌子面渗水,核心土崩塌,围岩层层剥离,超前导管上方严重脱空,从而造成大型塌方。

(4) 拱脚、基底浸泡成淤泥,机械设备无法施工,开挖下台阶经常出现突然沉降。

(5) 经常遇到水囊,开挖后受重力和水压的作用突然涌出,形成涌水流砂,造成掌子面后方未封闭的初期支护突然变形。

(6) 饱和粉细砂在施工过程中受机械、人员的扰动,围岩有液化现象,施工难度大。

第二节 勘察设计

一、勘察依据、方法及经过

胡麻岭隧道工程地质勘察工作依据《兰渝线兰州至广元段初、定测工程地质勘察大纲》及《铁路工程地质勘察规范》(TB 10012—2007)第4章“隧道工程”第4.3.5条、第4.3.7条及第4.3.8条的要求进行。通过初测、定测及补充定测三个阶段,在分析区域地质和既有资料的基础上,通过地面调绘、物探、钻探、试验等综合勘探方法,查明了隧道通过区岩土层的类型、分布范围及深度等;施工中根据隧道开挖揭示情况,开展超前地质预报,对局部地段进行了施工地质勘察工作,进一步分析隧道工程地质条件,为隧道设计、施工提供翔实资料。

初测阶段在大面积遥感判识及区域地质成果资料基础上,以野外地质调绘为主,进行代表性勘探,2006年7月完成可行性研究报告。

定测阶段按照《兰渝线兰州至广元段定测工程地质勘察大纲》要求,并严格执行了国家和行业现行的规范及规程等,在详细工程地质调绘的基础上,采用物探、钻探、化验等综合勘探和测试方法,完成了工程地质勘察工作,2008年6月完成初步设计。

补充定测阶段依据初步设计审查意见,开展了补充地质勘察及钻探工作,2009年8月完成施工图设计。

施工阶段根据隧道现场实际情况,取样试验,并结合科研工作,进行了钻探和洞内取样试验工作。

二、完成的工作量

胡麻岭隧道全长13611m,勘察设计阶段完成钻探1516.5m/17孔,物探13.7km,其中