

文章编号: 1674—8247(2022)01—0089—04  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.01.016

## 复杂山区铁路地质选线中工程主要控制因素分析

杨昌义 王 朋 王小兵 蒋兴凯

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**在山区铁路选线中,地质选线与工程选线是一个互动、动态调整的系统工程。本文通过梳理桥梁、隧道和路基在地质选线阶段的主控因素,并结合工程实践进行分析探讨,以便地质工程师尽快找到合适的方案,减少不必要的工作。

**关键词:**地质选线;工程选线;隧道长度与埋深;桥梁跨度与墩高;路基

中图分类号:U212.32 文献标志码:A

### Analysis of Main Engineering Control Factors in Geological Assessment for Route Selection of Railway in Complex Mountainous Areas

YANG Changyi WANG Peng WANG Xiaobing JIANG Xingkai

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In route selection of railway in mountainous areas, geological assessment and engineering assessment constitute an interactive and dynamic systematic project. This paper sorts out the main control factors of bridges, tunnels and earthworks in the geological assessment for route selection, and analyzes and discusses these factors in combination with engineering practice, to help geological engineers to find appropriate schemes as early as possible and avoid unnecessary work.

**Key words:** geological assessment for route selection; engineering route selection; tunnel length and buried depth; bridge span and pier height; subgrade

铁路选线是一个动态调整的系统工程,贯穿于方案研究、勘察设计全过程。选线从其考虑的主要因素和发展历程,可细分为经济选线、地形选线、地质选线、工程选线、环评选线等<sup>[1]</sup>。

地质选线中除首要关注重大地质问题的控制性作用<sup>[2]</sup>外,还需关注工程设置的可能性。其研究的关键控制性因素为隧道长度与埋深、桥梁跨度与墩高、路基边坡高度与坡率。若其中某项控制性因素的指标缺乏工程经验借鉴,可能存在较大的施工和运营风险时,应

增加比较方案进行研究。

本文通过梳理分析桥梁、隧道和路基在地质选线阶段的主控因素,并结合工程实践进行探讨,以期对地质选线提供实践借鉴。

### 1 地质选线中隧道主控因素

地质选线首先研究区域地质,宏观评价并选择区域稳定性较好、地质条件较好的区域作为地质选线的优选廊道。在越岭和峡谷区,隧道是规避地表重大不

收稿日期:2021-06-15

作者简介:杨昌义(1973-),男,高级工程师。

引文格式:杨昌义,王 朋,王小兵,等. 复杂山区铁路地质选线中工程主要控制因素分析[J]. 高速铁路技术,2022,13(1):89-92.

YANG Changyi, WANG Peng, WANG Xiaobing, et al. Analysis of Main Engineering Control Factors in Geological Assessment for Route Selection of Railway in Complex Mountainous Areas[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1):89-92.

良地质灾害的有效形式,但其地下特性和复杂施工条件决定了其施工安全风险高、单位长度投资成本大,经济优选性较差。

### 1.1 隧道埋深控制因素

深埋隧道隧址区最大主应力随埋深增大而增大<sup>[3]</sup>,因此在地质选线中通常最为关注最大埋深( $H_{\max}$ )和最小浅埋( $H_{\min}$ )。隧道埋深大易导致高地应力(岩爆和软岩大变形)、高地温、高压地下水等工程灾害,这些工程灾害多为高风险,决定了工程的可行性。对于埋深较大的隧道,一般采用抬高线路高程、增加线路长度来降低选线的经济指标。隧道最小埋深主要影响工程造价,通常按完整基岩条件下塌方高度的1.5~2.5倍(换算等效洞径)考虑<sup>[4]</sup>。

#### 1.1.1 以构造应力影响为主的情况

深埋隧道洞身岩体地应力复杂,在三轴应力中,以构造应力为主。洞身最大主应力为水平主应力( $\sigma_1 = \sigma_H$ ),埋深仅控制垂直应力( $\sigma_2 = \sigma_V$ )。隧道是否可行需进行区域地质及构造分析,对较为复杂特殊的区域地质则应进行专题地质研究论证。一般情况下局部地应力大多集中分布在褶皱轴部和断层转折附近,隧道优选沿最大主应力方向布置。当减小边墙开挖临空面时受到最大主应力影响易产生不利变形,因此隧道选线应尽可能垂直或大角度与构造轴面相交,并采用椭圆形或圆形隧道断面<sup>[5]</sup>。

#### 1.1.2 非构造应力影响为主的情况

隧道洞身最大主应力( $\sigma_1 = \sigma_V$ )由隧道最大埋深决定。参照《新建成都至兰州铁路地应力测试报告》及当前深埋隧道地应力估算,超大埋深( $H = 1\,500 \sim 2\,000\text{ m}$ )岩体垂直应力可按照静水应力法估算, $\sigma_V = \gamma H$ ( $\gamma$ 为岩体重度, $H$ 为隧道埋深),一般岩体取值 $\gamma = 20 \sim 28\text{ kN/m}^3$ ,当 $H$ 取值 $2\,000\text{ m}$ 时, $\sigma_V = 40 \sim 55\text{ MPa}$ 。隧道结构物的抵抗能力一般仅 $3 \sim 5\text{ MPa}$ ,地应力通过折减传递到结构物,若洞壁折减地应力接近或超过结构强度,支护结构破坏风险较大,应尽量避免。

既有大埋深代表性工程有:

(1)雅砻江锦屏水电站锦屏山隧道最大埋深为 $2\,375\text{ m}$ ,埋深大于 $1\,500\text{ m}$ 的洞段( $12.8\text{ km}$ )占隧道全长的 $73.1\%$ 。辅助洞在埋深 $1\,350\text{ m}$ 处实测最大主应力为 $44.2\text{ MPa}$ ,在埋深 $2\,300\text{ m}$ 处的最大主应力约为 $70.1\text{ MPa}$ 。地应力以自重应力为主<sup>[6]</sup>。

(2)锦屏引水隧洞洞群,最大埋深约为 $2\,525\text{ m}$ 。

(3)大瑞铁路重点隧道一般埋深为 $1\,200 \sim 1\,500\text{ m}$ 。

(4)成兰铁路重点隧道一般埋深为 $850 \sim 1\,650\text{ m}$ 。

大埋深产生的工程地质问题是高地应力(岩爆与大变形),典型区域如处于青藏地块的川藏铁路水平地应力优势方向大致为 $N50^\circ E$ ;最大水平地应力为 $64\text{ MPa}$ ,最小水平地应力为 $38\text{ MPa}$ (埋深 $2\,000\text{ m}$ ),穿越雅鲁藏布江缝合带隧道最大地应力达 $78\text{ MPa}$ ,因此在这地区选线隧道埋深尤其重要。

从以上工程实践中可发现,隧道埋深在 $2\,500\text{ m}$ 左右已具有工程实例,超过则工程防护技术难度急剧增加,且无工程实践参考,风险较大,在选线中应尽量避免。

### 1.2 隧道长度控制因素

长隧道尤其是超长隧道可缩短线路长度,但会导致乘客景观和舒适度较差、工程建设周期增大、工程投资急剧增加。隧道技术经济比较主要在于通风、防灾救援的工程可行性和施工组织的经济性。随着电气化铁路的普及推广,通风已不再作为主控关键因素,但超长隧道在防灾救援方面的风险因子随长度增加而剧增。双线隧道互为救援可一定程度上缓解风险,但长度增加,越岭段埋深增大,长度与埋深双重控制,越岭隧道辅助坑道的选择会大幅度增加成本,降低经济性。隧道越长,往往埋深越大,高地应力、高地温、高压涌水突泥、有害气体、放射性等都会明显突出,隧道施工及运营条件难度增大,因此在选线中应综合考虑在长度与埋深进行比选。

以成兰铁路为例,全线新建隧道 $32$ 座,总长 $332.44\text{ km}$ ,平均长度超过 $10\text{ km}$ ,为我国在建长大隧道较为密集铁路之一,超过 $20\text{ km}$ 隧道 $3$ 座,最长隧道长 $28.47\text{ km}$ ,隧道比 $72.6\%$ 。隧道大多深埋,埋深 $500\text{ m}$ 以上段落达 $237\text{ km}$ , $1\,000\text{ m}$ 以上段落达 $86\text{ km}$ ,最大埋深 $1\,850\text{ m}$ 。

既有工程中,比较典型的长隧道有:成兰铁路平安隧道( $28.4\text{ km}$ )、青藏铁路新关角隧道( $32.6\text{ km}$ )、大瑞铁路高黎贡山隧道( $34.50\text{ km}$ )、日本青函隧道( $53.85\text{ km}$ ),世界最长铁路隧道为瑞士圣哥达基线隧道,全长 $57.1\text{ km}$ 。拟建川藏铁路最长隧道为易贡隧道,长 $42.48\text{ km}$ 。既有工程实践证明,当前建成隧道以 $53\text{ km}$ 为极限,大多应控制在 $30\text{ km}$ 以下,地质选线时主要应结合地质及构造条件进行系统分析比选,尽量避免超长隧道。

## 2 地质选线中桥梁主控因素

桥跨是桥梁技术复杂性的代表指标,地质人员掌

握桥跨最大值,有利于在地质选线中推荐桥位,尤其在峡谷地区桥位地质选线中可减少推荐研究桥位数量,缩小研究范围,避免重复研究,尽早稳定线路方案。随着铁路向西部复杂艰险山区的深度推进,高墩大跨桥梁跨越大江深谷时桥位决定线位,因此地质选线时应结合地质条件并考虑桥跨及墩高的技术可行性。

2.1 桥梁跨度控制因素

桥跨因桥式而异,应结合功能需要和地形、地质条件综合比选。桥梁大致可分为梁桥(简支、刚构)、拱桥、斜拉桥、悬索桥等。平坦地形跨越既有道路时常采用 T 构梁,桥跨的控制因素为桥梁本身的结构荷重及附加荷载引起的强度、刚度极限受限,当桥跨越大时,以结构荷载为主,附加荷载为辅。

已建成的铁路桥梁跨度为:钢梁跨度 168 m,混凝土梁跨度 128 m。特殊结构跨度更大,如京沪高速铁路南京大胜关长江大桥钢桁架桥采用双连拱(108 + 192 + 2 × 336 + 192 + 108) m,安康铁路汉江桥采用 176 m 钢斜腿,兰渝铁路朝阳嘉陵江单线特大桥(96 + 176 + 88) m,这些都是大跨度特殊桥尝试成功的案例<sup>[7]</sup>。随着技术发展,桥跨也在逐渐突破,但在常规选线时通常采用普通跨度。

2.2 桥梁墩高控制因素

桥梁墩高是桥梁的关键参数之一,受控于地基强度、基础和桥墩墩体结构的强度、刚度。地基强度主要取决于地层岩性的特性(尤其是岩体强度、节理裂隙发育程度、充填物特性、埋深与围压、地下水等)。现实中地基岩体组合条件极其复杂,通过参数计算获得地基承载力的可靠性较低,现场大型载荷试验测试可准确取得,但不可能在不同深度均进行大型现场载荷试验。地基强度的极限值理论上是完整岩石室内岩块试验强度,现实岩体的复杂性决定了采用桩基础可靠度更高,因此高墩一般都采用桩基。百米高墩的结构底部应力约为 2.2 ~ 2.5 MPa,150 m 高墩可达到 3.3 ~ 3.8 MPa,已接近于岩石地基基本承载力  $\sigma_0$  允许值。

室内试验由于岩块强度不同,不能准确取得现场地基承载力。高墩大跨桥梁一般采用桩基,深入岩体较深部位,确保基底应力可靠传递至周边岩土。在国际工程中<sup>[8]</sup>,桩基的承载力通过现场试桩验证和确定,试桩数量有明确要求,而国内铁路工程试桩较少,仅在部分特殊结构桥梁中采用现场载荷试验验证。地基承载力决定了墩高的取值,地质选线时应结合地质条件推荐研究桥位。

目前已建成铁路典型的高墩桥如表 1 所示。

表 1 典型高墩桥表

桥名	桥跨/m	墩形	最大墩高/m
内昆铁路花土坡特大桥主桥	64 + 2 × 104 + 64	圆端形空心墩	110
宜万铁路渡口河特大桥	72 + 128 + 72	矩形空心墩	128
渝利铁路蔡家沟大桥	80 + 3 × 144 + 80	A 型空心墩	139
玉磨线元江特大桥	108 + 152 + 249 + 152 + 108	双柱式刚架墩	154

随着科技的发展,桥梁墩高也在不断刷新记录。从荷载特殊性和桥梁安全性考虑,当前铁路工程桥梁墩高最大宜为 154 m,超越该值时缺乏工程实践参考,应尽量避免。

3 地质选线中路基主控因素

路基主要分为挖方和填方,在工程设置比选中有隧道与路基比选、桥梁与路基比选。路基关键参数的限值,体现在边坡高度( $H$ )和坡率( $r$ )上。本文所讨论的是除天然边坡以外的人工边坡,边坡高度和坡率是一对孪生的组合参数。

深挖边坡高度主要受坡脚(应力集中区)剪切力破坏控制,控制条件为坡脚岩土抗剪强度处于极限平衡状态,表达式为等效内摩擦角(综合内摩擦角) $\varphi_D$ 不小于人工边坡坡度 $\alpha$ 角(临界值为二者相等),即:

$$\arctan(\tan\varphi + kc/(\gamma H\cos\theta)) = \varphi_D$$
$$\varphi_D \geq \alpha$$

(1)

式中: $\varphi$ ——岩土内摩擦角;

$k$ ——系数;

$c$ ——岩土粘聚力;

$\gamma$ ——边坡岩土重度;

$H$ ——边坡高度;

$\theta$ ——破裂面倾角(临界极限 $\theta = \varphi_D$ )。

由于岩土组合特性的复杂性,综合内摩擦角 $\varphi_D$ 不易通过参数计算精准取得,在工程实践中多根据岩土组合进行反算验证,并根据工程经验进行调整。尤其是破碎岩体边坡综合内摩擦角主要受节理裂隙发育程度和充填物特性、地下水情况等多因素控制,因此通过简易计算可靠度难以保障,通常采用高边坡结合锚索锚杆加固和坡面格构梁等加固措施,以提高边坡的可靠性。填方边坡高度的理论计算值远大于实际设计采用值,填方边坡因土体扰动后再碾压压实度较天然固结沉降的原状土差,因此,通过上述验算的填方边坡

高度一般小于挖方边坡高度。

桥路分界结合部的路基填方高度,除了受自身岩土特征控制影响以外,还受到桥台抗倾覆的结构属性控制,铁路工程一般桥路分界高度为6~8 m。

## 4 结论

本文基于岩土力学原理并结合铁路工程设计中的基本思路,探讨了铁路地质选线中隧道、桥梁、路基工程的主要控制因素,梳理了地质选线过程中对主要控制因素的基本要点,同时梳理了当前在建和既有建成工程的典型代表取值,以期建立宏观概念,为地质选线时拟推荐方案提供参考依据,减少不必要工作。得出主要结论为:

(1)隧道埋深控制因素为最大埋深( $H_{\max}$ )和最小浅埋( $H_{\min}$ )。最大埋深影响技术可行性,最小浅埋仅影响经济指标。

(2)以构造应力为主的情况:隧道主要受构造应力控制影响,隧道走向尽量与主构造应力平行较为有利,埋深一般不作为关注要点。

(3)非构造应力影响为主的情况:隧道的超大埋深可按照静水应力法估算,避免洞壁折减地应力大于支护结构强度。隧道埋深超过2 500 m 缺乏工程实践,在选线中应尽量避免。

(4)隧道长度控制因素主要为通风、防灾救援的工程可行性,其次是施工组织的经济性。若可增设辅助坑道,地质选线时可弱化关注隧道长度。当前建成隧道以53 km 为最长,国内大多控制在30 km 以下,主要应结合地质及构造条件进行系统分析比选。

(5)桥梁跨度控制因素主要为桥梁本身的结构荷重及附加荷载引起的强度、刚度极限等。桥跨越大时,控制因素主要以结构荷载为主,附加荷载为辅。

(6)桥梁墩高主要受控于地基强度、基础和桥墩墩体结构自身的强度、刚度等,结构底部应力应小于岩石地基承载力允许值。

(7)路基关键控制参数是边坡高度和坡率,由于岩土组合特性的复杂性和安全储备需要,填方边坡高

度理论计算值远大于实际设计采用值,一般根据工程经验对取值进行调整。铁路工程通常桥梁、路基分界高度为6~8 m。

## 参考文献:

- [1] 朱颖,魏永幸. 复杂艰险山区铁路减灾选线[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(6): 1-4.  
ZHU Ying, WEI Yongxing. Disaster Reduction Techniques for Route Selection of Railway in Complex and Dangerous Mountain[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(6): 1-4.
- [2] 宋章,魏永幸,王朋,等. 复杂艰险山区地质灾害特征及减灾选线研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(5): 8-12.  
SONG Zhang, WEI Yongxing, WANG Peng, et al. Research on Geological Disaster Characteristics and Location for Disaster Reduction in Complex and Dangerous Mountainous Areas[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5): 8-12.
- [3] 唐浩,李天斌,孟陆波,等. 川藏铁路二郎山深埋隧道的地应力场反演分析[J]. 铁道建筑, 2015, 55(3): 65-69.  
TANG Hao, LI Tianbin, MENG Lubo, et al. Back Analysis of Ground-Stress Field for Erlangshan Deep Buried Tunnel on Sichuan-Tibet Railway[J]. Railway Engineering, 2015, 55(3): 65-69.
- [4] TB 10003-2016 铁路隧道设计规范[S].  
TB 10003-2016 Code for Design of Railway Tunnel[S].
- [5] 张广泽. 乌鞘岭隧道F<sub>7</sub>断层围岩工程特性及工程措施研究[J]. 铁道标准设计, 2005, 49(9): 24-28.  
ZHANG Guangze. Study on Engineering Characteristics and Engineering Measures of Surrounding Rock of F7 Fault in Wushaoling Tunnel[J]. Railway Standard Design, 2005, 49(9): 24-28.
- [6] 卿三惠,杨家松,黄世红. 高压富水地层超深埋特长隧道施工技术研究[J]. 铁道工程学报, 2009, 26(1): 86-91.  
QING Sanhui, YANG Jiasong, HUANG Shihong. Research on the Construction Technology for Deep-Buried Long Tunnel in High-Pressure and Water-Rich Stratum[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26(1): 86-91.
- [7] TB 10002-2017 铁路桥梁设计规范[S].  
TB 10002-2017 Code for Design on Railway Bridge and Culvert[S].
- [8] 杨昌义,蒋楚生. 防灾减灾理念在孟加拉铁路项目地勘工作中的应用[J]. 一带一路报道(中英文), 2019(6): 110-113.  
YANG Changyi, JIANG Chusheng. Application of Disaster Prevention and Reduction Concept in the Geological Investigation of Railway Projects in Bangladesh[J]. The Belt and Road Reports, 2019(6): 110-113.