

# 软弱易滑边仰坡隧道提前进洞关键技术研究

周朝德

中国水利水电第七工程局有限公司 国际工程公司 四川成都 610213

DOI: 10.12238/jpm.v5i6.6939

**[摘要]** 隧道的进洞工程是山岭隧道顺利建设的重要工程节点, 依托雅万高铁2号隧道, 本文分析了该工程存在的主要技术挑战和仰坡坍塌主要因素, 提出桩基护拱“负仰坡”提前进洞技术, 通过数值模拟对参数进行了优化。结果表明桩基护拱“负仰坡”提前进洞技术能够有效控制软弱易滑边仰坡的地层位移问题。

**[关键词]** 高速铁路; 隧道; 边仰坡; 提前进洞; 桩基护拱

## Research on key technology of advance entry of soft and slippery slope tunnel

Zhou Chaode

Sinohydro Seventh Engineering Bureau Co., Ltd. International Engineering Company, Chengdu, Sichuan 610213

**[Abstract]** The tunnel entry project is an important engineering node for the smooth construction of mountain tunnel. Relying on the No.2 tunnel of Ya-Wan high-speed railway, this paper analyzes the main technical challenges and the main factors of elevation slope collapse, puts forward the technology of "negative elevation slope" in advance, and the parameters are optimized through numerical simulation. The results show that the technology of "negative slope" can effectively control the displacement of the slope slope.

**[Key words]** high-speed railway; tunnel; side slope; advance hole; pile arch

### 引言

随着高速铁路建设的飞速发展, 隧道作为高速铁路穿越山岭地区的主要构筑物得到了大量的建设。由于山岭地区特殊的地形地貌和地质条件, 隧道进洞工程通常是整个隧道的重要节点<sup>[1]</sup>。目前, 隧道进洞前通常需要对仰坡进行开挖, 并在喷锚加固的条件下创造洞口有利工作面<sup>[2]</sup>。传统工法对洞口植被、周边生态与景观不可避免造成破坏, 同时, 开挖形成的高陡边坡同时打破了隧道洞口段坡体的应力平衡状态, 进而形成滑坡、崩塌等隧道洞口地质灾害<sup>[3]</sup>。

众多学者针对洞口边仰坡地质灾害的防治进行了广泛的研究。张运良等以太真隧道工程为例, 采用现场调查、数值模拟和现场监测技术, 针对隧道进洞施工过程中的边仰坡滑塌机理、处治措施以及二次进洞技术开展研究<sup>[4]</sup>; 黄瑞通过对高坡隧道进口边、仰坡滑移成因的分析, 提出了结合反压回填和明洞暗做的洞口滑移处治方案<sup>[5]</sup>; 王晓帆针对滇东北特长隧道复杂地质条件, 结合“开挖前-开挖后-支护后”3个阶段过程模拟稳定性分析与施工组织等因素, 进行洞口边仰坡“永临结合”综合设计<sup>[6]</sup>。

然而, 对于软弱易滑仰坡, 存在对工程扰动敏感, 地质灾害治理难度大、成本高, 风险源复杂等问题, 常规的仰坡灾害防治措施难以满足工程需求。本文依托雅万高铁2号隧道, 基于“围岩-边坡”互相作用机理, 提出了桩基护拱“负仰坡”提前进洞技术, 保证雅万高铁项目的顺利实施。

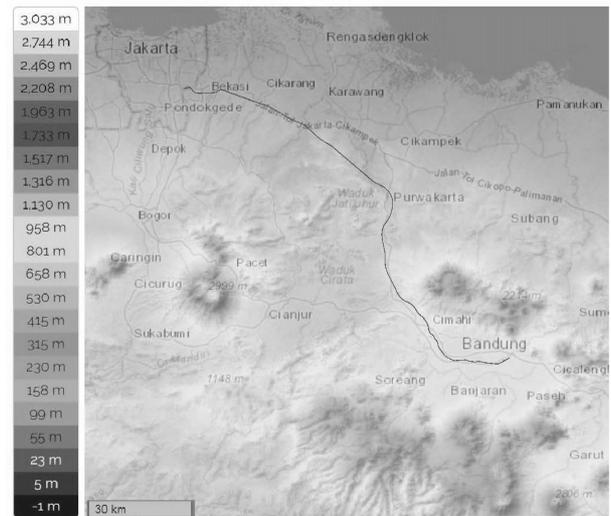


图1 雅万高铁沿线地形

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

雅万高铁, 全称雅加达-万隆高速铁路项目, 是中国首个海外高铁项目, 也是东南亚第一条最高设计时速 350 公里的高铁铁路。如图 1 所示, 雅万高铁沿线地貌单元依次有冲积平原、冲洪积平原、丘陵、低山及山间盆地, 丘陵、低山区地形起伏较大, 两端平原及盆地地形平缓, 地表多被城镇及村镇覆盖, 局部辟为耕地, 建筑物密集。其中, 2 号隧道位于丘陵地带,

地势起伏大，植被覆盖率较高。隧道进口自然坡度约 8°~11°，隧道进口地段地层主要为第四系更新统火山堆积层(Qos)黏土、粗圆砾土，其中黏土硬塑状，标贯 N≥14，具弱膨胀性，根据土工试验报告，天然含水率 W=45.6~61.0%，天然孔隙比 e=1.265~1.574，液性界限 WL=67.3~85.6%，粘聚力 C=50~63kPa，内摩擦角 φ=13.2~22.6°，具天然含水率高、孔隙比大、液限高，但自然状态下强度较高的特点，围岩分级为 V 级。地下水主要为第四系孔隙潜水和基岩裂隙水，钻探揭露埋深 2.35~5.25m (高程 90.73~139.38m)，隧道洞身存在孔隙水及基岩裂隙水。

1.2 工程重难点分析

工程原计划采用三台阶临时仰拱法进洞，但在后续施工中多次发生仰坡多次发生滑塌现象，如图 2 所示。经调查，边仰坡开挖揭露地层为粗圆砾土及黏土，正线右侧上部为灰褐色粗圆砾土，表层 0.5m 含较多植物根系，下部为棕红色黏土，其余大部揭露黄褐色及棕红色黏土。正洞开挖处揭露棕红色黏土，表层黏土较为松散且含水量较大。

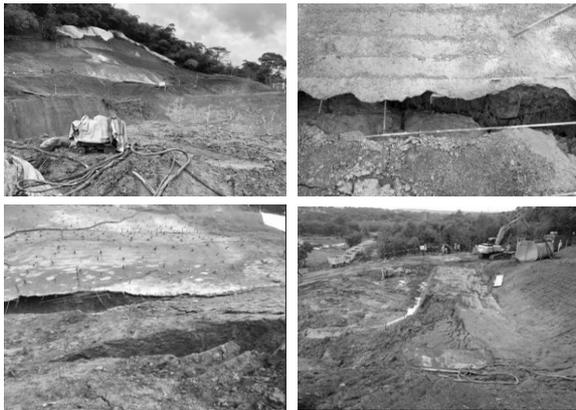


图 2 2 号隧道进口坍塌情况

经分析，该隧道洞口坡度较缓，植被茂密，土体强度较高，在自然状态下，边坡稳定，洞口周围部分土体滑移主因是人为因素造成的人工滑移。施工时洞口附近清表以及洞口右侧开挖操作平台，植被遭到破坏，但未及时采取排水、止水措施，导致排水不畅。长期雨季施工雨水下渗，致使土体饱和、呈软塑到流塑、使土体软化，抗剪强度大大降低，造成土体易失稳变形。同时，由于施工时坡脚开挖卸载，坡中平整施工平台形成陡立面，破坏坡体力学平衡，造成滑塌现象。

2 桩基护拱“负仰坡”提前进洞技术方案

2 号隧道出口土质松散，且存在偏压情况，进洞施工需要对既有边坡进行大范围开挖，若施工遇见雨季，施工造成的扰动存在原始地表滑移失稳的风险，因此本文提出桩基护拱“负仰坡”提前进洞方案，见图 3。

为了减少边坡的大范围开挖，因此隧道出口采用提前进洞的方式，隧道洞门采用直切式洞门。在施工时，延长洞门结构，

同时明暗分界里程至隧道出口里程的高边坡范围内线路两侧打设 φ1500 钻孔灌注桩，桩基上浇筑冠梁，并在隧道顶部架设护拱结构，之后进行隧道开挖。

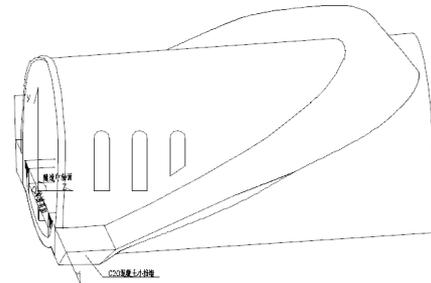


图 3 隧道“负仰坡”提前进洞三维示意图

3 方案参数优化

根据工程经验，洞门长度越长，进洞越早，施工时开挖边坡范围越少，边坡越稳定，但同时由于洞门长度的增加造价也随之增加。因此，在保证洞口边坡稳定和隧道稳定的前提下，优化洞口段桩基护拱结构的设计参数也尤为重要。本文通过数值模拟方法对桩基护拱结构桩基的长度与间距以及洞门结构的长度进行研究，旨在得出既安全又经济的设计方案。

3.1 计算模型

本节采用 MIDAS 有限元计算软件对隧道及山体变形机理进行计算分析。计算采用二维计算模型，长 100m，高边坡最长距离 90m，矮边坡距离 60m，模型两边及底部施加约束，抗滑锚固桩计算模型结构如图 4 所示。

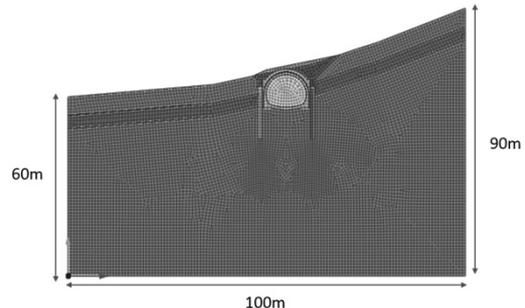


图 4 数值计算模型

采用基于修正摩尔库伦强度准则的弹塑性本构模型，护拱结构为 C35 钢筋混凝土结构，桩基及冠梁为 C35 钢筋混凝土结构，隧道结构为 C35 钢筋混凝土，计算中均采用弹性本构模型。桩基直径为 1500mm，将桩基刚度等效成贯通的地连墙结构，为方便计算，地连墙 h=1500mm，等效公式如下式所示。

$$E_{C35} \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) = E \frac{bh^3}{12}$$

根据公式计算得地连墙弹模 E=14.35GPa。围岩和结构物理参数分别如表 1 所示。

表 1 计算参数

土层/结构	重度/kN/m³	弹性模量/MPa	割线刚度/MPa	切线刚度/MPa	卸载弹性模量/MPa	粘聚力/kPa	摩擦角	泊松比
填土石	18	10	10	12	36	30	10	0.3
黏土 II	17	10	10	12	36	30	10	0.3
黏土 III	17	10	10	12	36	35	10	0.3
泥岩 W4	20	25	25	30	90	40	23	0.3
泥岩 W3	20	25	25	30	90	45	23	0.3
衬砌	25	32.5	/	/	/	/	/	0.2
冠梁	25	32.5	/	/	/	/	/	0.2
护拱	25	32.5	/	/	/	/	/	0.2
桩基	25	32.5	/	/	/	/	/	0.2

3.2 计算结果

(一) 护拱长度优化结果

护拱计算长度范围为6~40m, 护拱每次增加2m, 桩基个数每次增加1个, 桩基长度为20m, 桩间距2m。图5地层位移随护拱长度变化曲线, 从图中可以看出护拱长度较短时(≤20m), 随着护拱长度增加, 地层位移显著降低, 当护拱长度超过20m后, 地层位移变化虽仍在降低, 但是变化趋势显著减缓。

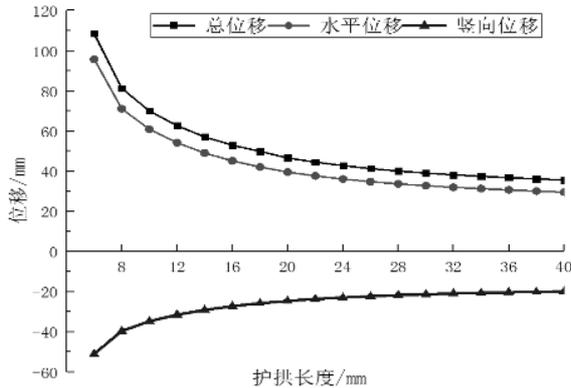


图5 地层位移-护拱长度

(二) 桩基长度优化结果

图6是地层位移随桩基长度变化曲线, 从图中可以看出, 当桩基长度较小时, 地层位移较大, 随着桩基长度的增加, 位移显著降低, 当桩基长度增加到20m时, 继续增加桩长, 位移基本保持不变。

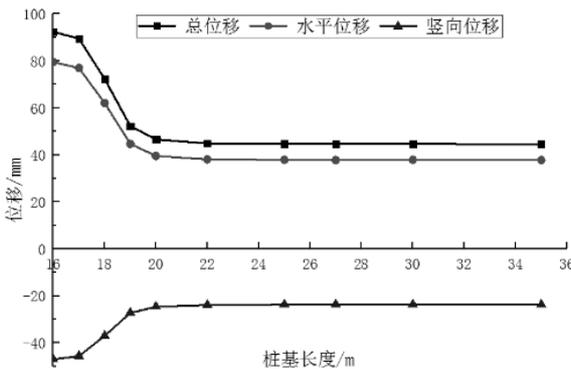


图6 地层位移-桩基长度

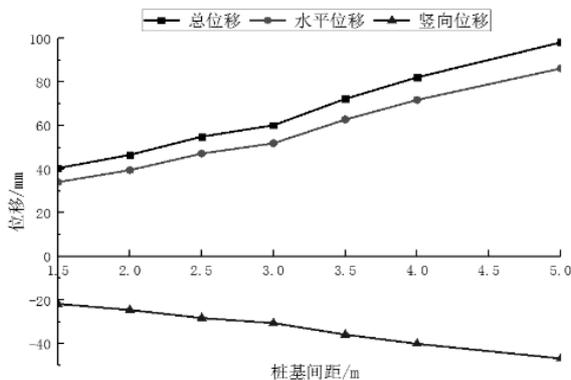


图7 地层位移-桩基间距

(三) 桩基间距

图7是地层位移随桩基间距的变化曲线, 从图中可以看出, 桩基间距与地层位移呈现正相关的趋势, 桩基间距越大, 地层

位移越大, 基本呈线性增长。

3.3 优化效果

根据优化结果采用1.5桩基间距、20m桩基和护拱长度作为最终方案, 并通过现场监测对本文进洞方案优化效果进行评价, 如图8所示。

可以看出随着时间的增加, 两个断面初支拱顶位置沉降位移显著增加, 在2021年3-4月中旬, 拱顶沉降位移增加减缓, 之后沉降位移增加一段后趋于稳定, 断面拱顶最大沉降位移为265.2mm。



图8 洞口拱顶沉降曲线

4 结论

本文对软弱易滑边仰坡隧道提前进洞技术进行了研究, 提出了高桩纵横梁及桩腰护拱结构辅助隧道下穿方案, 并对护拱长度、桩基长度以及桩基间距优化进行数值分析, 取得了较好的工程效果, 并得到了以下结论:

- 1、护拱长度较短时(≤20m), 随着护拱长度增加, 地层位移显著降低, 当护拱长度超过20m后, 地层位移仍在降低, 但幅度减少。
- 2、当桩基长度较小时, 地层位移较大, 随着桩基长度的增加, 位移显著降低, 当桩基长度增加到20m时, 继续增加桩长, 位移基本保持不变。
- 3、桩基间距与地层位移呈现正相关的趋势, 桩基间距越大, 地层位移越大, 基本呈线性增长。

【参考文献】

[1]蔡建华, 曾健新, 王立娟等. 艰险山区隧道边仰坡地质风险勘察及评价研究[J]. 隧道建设(中英文): 1-10.  
 [2]张同文. 高速公路隧道洞口施工技术研究[J]. 江西建材, 2022(12): 279-280+283.  
 [3]徐容, 宋元平. 山岭公路隧道引导进洞法[J]. 西部交通科技, 2021(03): 133-137.  
 [4]张运良, 陈富东, 陈英烈等. 隧道边仰坡滑塌处治及二次进洞施工技术实例研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(04): 992-1000.  
 [5]黄瑞, 陈游东. 土质隧道洞口边、仰坡滑移处治技术探讨[J]. 公路, 2019, 64(08): 241-245.  
 [6]王晓帆. 滇东北某高速公路多因素耦合隧道边仰坡综合设计[J]. 公路, 2022, 67(02): 395-399.

作者简介: 周朝德(1974-), 男, 四川成都人, 高级工程师, 从事铁路工程施工技术与管理工作。