

# 穿越古滑坡川主寺隧道施工地质问题及整治措施\*

刘 海<sup>①②</sup> 沈军辉<sup>①</sup> 魏 伟<sup>①</sup> 管政亭<sup>②</sup>

(①成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 成都 610059)

(②安徽省公益性地质调查管理中心 合肥 230040)

**摘 要** 由于在勘察设计阶段对地质条件的认识不足,或者因改善公路线型的要求,穿越大型古滑坡体的隧道工程难以避免。川主寺隧道即是一个穿越了大型古滑坡体的公路隧道。文章以该隧道赋存的地质条件为基础,初步讨论了古滑坡的基本特征,通过现场调研分析了穿越该古滑坡隧道建设中出现的洞口滑坡以及碎裂围岩坍塌等地质问题。并提出相应的整治措施。其研究成果对于穿越古滑坡隧道的修建具有重要的指导意义。

**关键词** 穿越古滑坡 川主寺隧道 地质问题 洞口滑坡 围岩坍塌 整治措施

中图分类号:U452.12 文献标识码:A

## GEOLOGICAL PROBLEMS AND TREATMENT MEASURES FOR HIGHWAY TUNNEL THROUGH ANCIENT LANDSLIDE

LIU Hai<sup>①②</sup> SHEN Junhui<sup>①</sup> WEI Wei<sup>①</sup> GUAN Zhenting<sup>②</sup>

(①State Key Laboratory of Geo-Hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

(②Public Geological Survey Management Center in Anhui Province, Hefei 230040)

**Abstract** Due to lacking of knowledge of geological conditions in the survey and design stage, or requirements to improve the road line, highway tunnels can be constructed in large ancient landslide mass. For example, the Chuanzhusi tunnel is constructed in a large ancient landslide. This paper bases on the geological conditions of landslide occurrence and the tunnel. A detailed analysis is done on the system characteristics of the ancient landslide. Through investigation and by the construction of geological and mechanical methods, this paper studies the tunneling in through the ancient landslide. It turns up the geological characteristics of the problem, such as holes, rocks and collapse and deformation and failure mechanisms, and suggests remediation measures. The research result for the construction of the tunnel passing through the ancient landslide has an important significance.

**Key words** Passing through ancient landslide, Chuanzhusi tunnel, Geological problems, Slide hole, Rock collapse, Treatment measures

\* 收稿日期:2011-07-20;收到修改稿日期:2012-01-11.

基金项目:成都理工大学优秀创新团队培育计划(HY0084).

第一作者简介:刘海,主要从事地质灾害评价及岩土体稳定性研究方面的工作. Email: gzlhai@126.com

## 1 引言

我国西南地区地势险恶,沟壑纵横,地质条件复杂,依山傍水而行的山区公路常遇到滑坡地质问题。尽管选线阶段可采用避让方案,但由于在勘察设计阶段对地质条件的认识不足,或者是改善公路线型的要求,穿越大型古滑坡体的隧道工程不可避免,由此会带来诸如隧道出口段滑坡的局部复活、进口段地面塌陷、碎裂围岩变形及塌方、偏压以及软弱地基等工程地质问题等隧道施工地质问题,对隧道施工乃至运营安全造成严重威胁。目前有关滑坡地段隧道施工引发地质问题的研究较少,周德培、陶志平等<sup>[1-8]</sup>对蠕动型滑坡的成因以及酿成隧道变形开裂的机理进行了研究;王安福<sup>[9]</sup>、毛坚强<sup>[3]</sup>采用数值模拟手段对滑坡-隧道间的相互作用机理及受力变形规律开展了研究。此外,李文军等<sup>[10]</sup>、马惠民等<sup>[11]</sup>研究了坡体病害与隧道变形相互作用的机理及其防治技术,为滑坡体中隧道病害的防治提供了依据。由于滑坡地质条件的复杂性,穿越滑坡隧道的施工地质问题会各有特点。

川主寺隧道是一个穿越了大型古滑坡体的公路隧道,该隧道位于国道 G213 线川汶路改建工程里程桩号 K1+090 ~ K1+590 处,距松潘县川主寺镇南部约 1km,隧道最大埋深约为 94.5m,设计隧道有效净宽 10m,有效净高 5m。尽管古滑坡体处于稳定状态,隧道开挖不会引起古滑坡的整体复活,但在隧道施工过程中出现了诸如隧道出口段滑坡的局部复活、进口段地面塌陷、碎裂围岩变形及塌方、偏压以及软弱地基等工程地质问题,严重影响了施工进度,增加了工程投资。本文以川主寺隧道的工程地质条件为基础,通过隧道施工地质追踪调查及力学分析方法,研究川主寺隧道出口段洞口滑坡、塌方等主要地质问题的特征及变形破坏机理,并提出了相应的治理措施,对于穿越古滑坡隧道的修建具有重要的指导意义。

## 2 隧址区工程地质背景条件

研究区大地构造部位位于松潘-甘孜褶皱带范畴,岷江断裂在隧址区的 NW 侧通过。区内新构造运动以大面积整体性、间歇性抬升为主。地震基本烈度为Ⅷ度。属于地震多发区、高发区,造成该区地震滑坡沿岷江两岸广泛发育。

区内属于亚热带湿润季风气候区,呈青藏高原季风气候特征,多年年均温度为 11.7℃,多年平均降雨量 838.2mm。地下水类型可划分为松散堆积层孔隙潜水和基岩裂隙水 2 大类。岷江为最低排泄基准面。

区内山脉近 SN 向展布,岷江整体呈宽阔状 SN 向流向,两岸山体坡度一般为 30° ~ 50°,古滑坡位于岷江右岸,呈 NE 向展布,受岷江冲刷侵蚀,滑坡平面形态呈扇形。滑坡后缘位于山体中部乡间公路一带,高程约 3080m,前缘伸至岷江河床一带,高程约 2960m,原国道 213 线从滑坡前缘绕过;滑坡后缘顺岷江方向最大宽度约 600m,最小宽度位于前缘一带,约 50m,平均宽度约 300m;滑坡顺坡长度约 400m,堆积体厚度约 50 ~ 110m,总体方量约  $15 \times 10^6 \text{ m}^3$  (图 1)。滑坡形成于岷江 I 级阶地以后,可能为一地震滑坡。

隧道整体上穿越了该古滑坡(图 2),局部地段隧道靠山侧可揭露基岩。从施工揭露情况看,隧道基本上位于滑体中,在部分地段如在 K1+328、K1+334、K1+335 以及 K1+403 可看到滑床(图 2、3)。

古滑坡体主要由未充分解体的灰岩及块碎石土组成,中强风化(图 3)。而滑床以及部分坡表为砂砾石及漂卵砾石(图 4)。所揭露的卵石没有明显的定向排列性,充填棕黄色粉质黏土,卵石土的成层性不明显。此外,还在多个地段出露了潮湿,灰黑色,纹理较好,稍密-密实的粉砂土。

古滑坡体堆积于宽阔阶面近于水平的岷江 I 级阶地之上,堆积体与下伏阶地冲积物间无明显的滑带存在,也未见错动现象,滑坡变形破坏迹象不明显,古滑坡整体稳定性较好。仅有的破坏迹象为原国道 213 线修建时对坡体前缘的切坡造成的局部垮塌以及地表冲沟的冲刷对坡体的破坏。

隧道穿越古滑坡地质载体,其工程地质条件较差,隧道围岩完整性较差,呈碎裂结构,围岩为 V 级,根据隧道施工所揭示的情况,川主寺隧道的主要工程地质问题为洞口段古滑坡的局部解体复活以及由碎裂围岩变形破坏造成的掉块、坍塌、剥落等工程地质问题。

## 3 隧道施工地质问题及整治措施分析

### 3.1 古滑坡局部复活体

#### 3.1.1 复活体基本特征分析

洞口滑坡位于川主寺隧道出口端右侧一带,隧

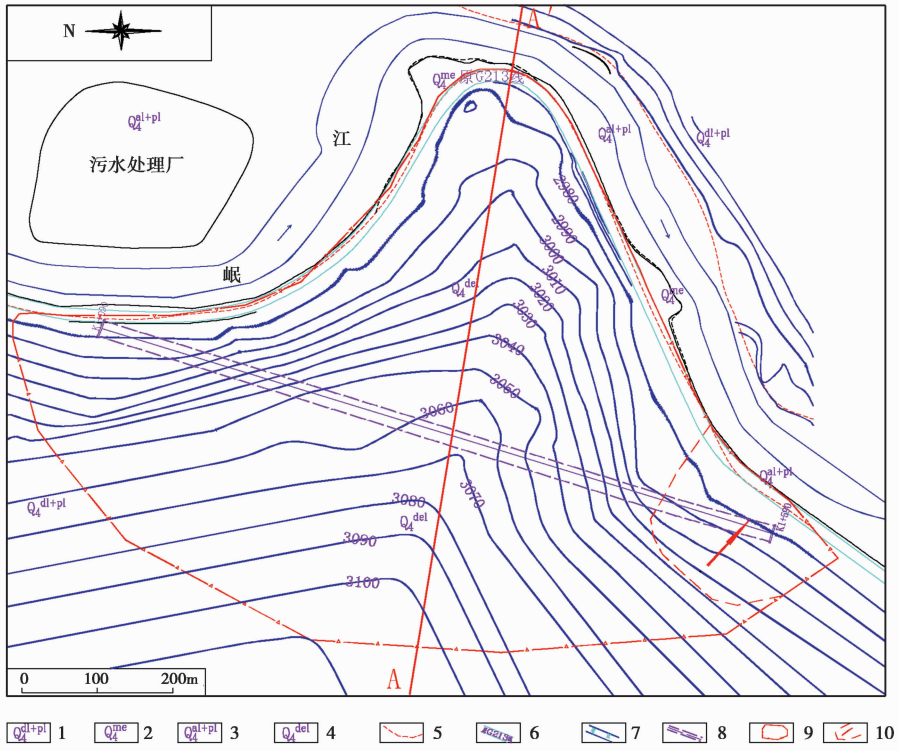


图1 研究区工程地质平面图

Fig. 1 The engineering geology ichnography

1. 第四系残坡积层; 2. 第四系湖海沉积层; 3. 第四系坡洪积层; 4. 滑坡堆积层; 5. 地层界线;
6. 国道213线; 7. 岷江位置; 8. 隧道位置; 9. 滑坡范围; 10. 古滑坡局部复活体

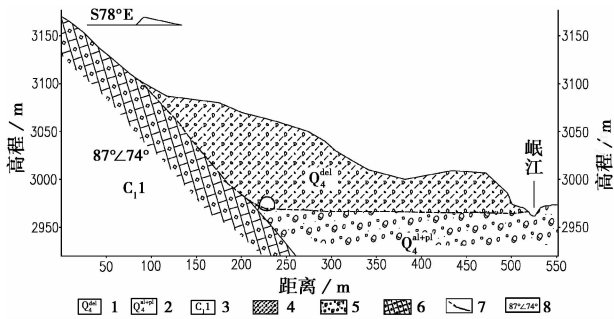


图2 隧道与古滑坡关系(1:1000)

Fig. 2 Profile of the ancient landslide(scale 1:1000)

1. 滑坡堆积层; 2. 第四系冲洪积层; 3. 石炭系下统略阳组; 4. 块状砂岩; 5. 漂卵砾石土; 6. 结晶灰岩; 7. 滑坡推测界线; 8. 岩层产状

道里程桩号为 K1+590 ~ K1+470 段, 滑坡体位于 II 级阶地之上, 坡体整体坡度约 40° ~ 50°, 坡体整体走向为 116°, 与岷江流向基本一致; 坡体整体呈两级台阶状地貌, 第一台阶高程位于 3030 ~ 3035m 一带, 第二台阶位于 L3 长裂缝一带, 其高程为 3000 ~ 3005m (图 5)。在发育部位上属于川主寺古滑坡范畴。

坡体结构上前缘一级阶地灰褐色人工填土, 干

燥。中部夹一层厚 2 ~ 3.5m 含砾粉质黏土, 下部为褐黄色冲洪积含漂卵砾石土 (图 6)。

滑坡体变形破坏特征主要表现为 2 条长裂缝带 (L1、L3) 及 4 条短裂缝 (L2、L4、L5、L6) (图 5)。裂缝呈锯齿状, 延伸长度 5 ~ 70m, 宽度约 3 ~ 15cm, 最大可达 18cm, 下错约 3 ~ 20cm, 最大可达 25cm (图 7)。此外, 后缘截水沟也可见下错迹象, 下错一般 3 ~ 8cm。

洞口滑坡主要是由于川主寺隧道的修建, 在斜坡前缘进行大面积的开挖, 导致坡体前缘临空面进一步加大; 而斜坡坡度较陡, 在重力影响作用下, 岩土体内部结构发生变化, 应力重新调整, 坡体为适应新的应力平衡, 上部岩土向临空方向挤压、滑动。其变形破坏模式为表层土体牵引-推移式滑移。属于古滑坡局部解体复活。

### 3.1.2 复活体整治措施研究

复活体在隧道开挖过程中采用了 H 型钢拱架进行了支护, 经地表监测数据显示复活体整体初步达到稳定状态, 但该复活体在连续强降雨下出现明显的变形拉裂, 对复活体采用传递系数法进行稳定性计算并分析, 选用图 6 作为计算剖面。

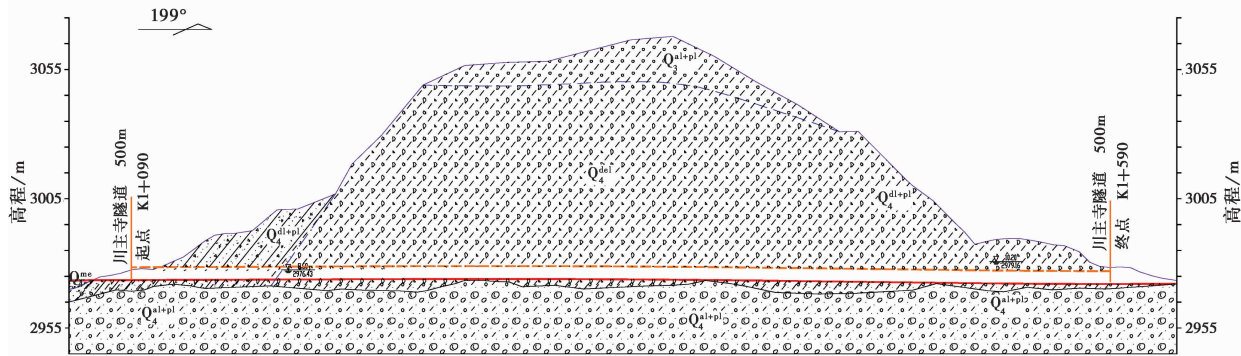


图3 川主寺隧道横断面图(比例 1:1000)

Fig. 3 The profile of Chuanshusi tunnel(scale 1:1000)

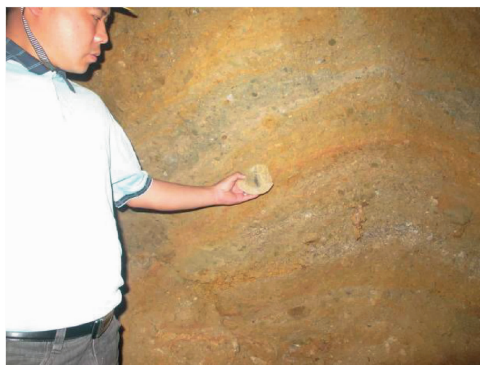


图4 K1+403 掌子面出露卵石

Fig. 4 The pebble of K1+403

计算结果显示,坡体在极端气候下处于欠稳定状态,考虑到环境美观,保持水土的原则,采取如下整治措施:

- (1) 边坡采用框架梁加预应力锚索加固。每隔 4m 设置一排锚索,锚索每孔 4 束  $\phi 15.24$  钢绞线;锚索下倾角采用  $25^\circ$ ,锚固段长为 12m。
- (2) 边坡底部采用喷锚支护。
- (3) 边坡平台设置截水沟,此外在滑坡顶部 5m 外设置截水沟。

### 3.2 隧道碎裂围岩塌方

#### 3.2.1 隧道塌方基本特征分析

川主寺隧道穿越古滑坡地质载体,隧道洞身 K1+470 ~ K1+220 段围岩为碎裂-散体状结构结晶灰岩,裂隙发育,隧道围岩级别为 V 级,围岩稳定性极差,在自重条件下失稳严重,导致支护结构的变形破坏。

川主寺隧道塌方主要位于隧道拱顶部位,如在 K1+237、K1+294、K1+322、K1+372 多个里程桩号处,据统计,在施工过程中共发生了 10 余次,平均每 20m 一处。围岩以碎屑岩块呈连续不间断的下掉,碎屑岩块一般小于 20cm,较大者不超过 50cm,围岩失稳后上方呈不规则形状岩腔,部分位置呈倒漏斗型,残留岩腔深度不一,一般为 50 ~ 100cm,最大延伸可达 3m (图 8)。

此外,由于受早期岩体内部大裂隙控制,更有部位塌方位置出现光滑壁面,如 K1+361 掌子面处,其壁面高约 2m,围岩失稳后导致超前导管大面积外露。

根据分析川主寺隧道塌方原因主要有 2 个方面:(1) 围岩结构破碎,围岩级别差,受裂隙面控制,沿裂隙面或者层面滑动,开挖后立即坍塌;(2) 部分地段围岩开挖后能保持稳定,或者局部坍塌后仍保

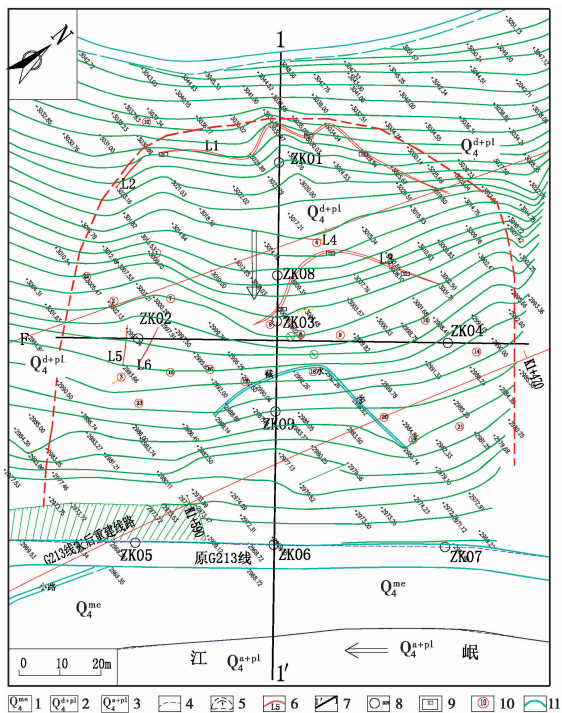


图5 滑坡工程地质平面图

Fig. 5 The Engineering geology ichnography of landslide

- 1. 第四系人工堆积层; 2. 第四系坡洪积层; 3. 第四系冲洪积层; 4. 地质界线; 5. 滑坡范围及滑动方向; 6. 裂缝及编号; 7. 剖面线及编号; 8. 钻孔及编号; 9. 探槽及编号; 10. 监测点及编号; 11. 截水沟

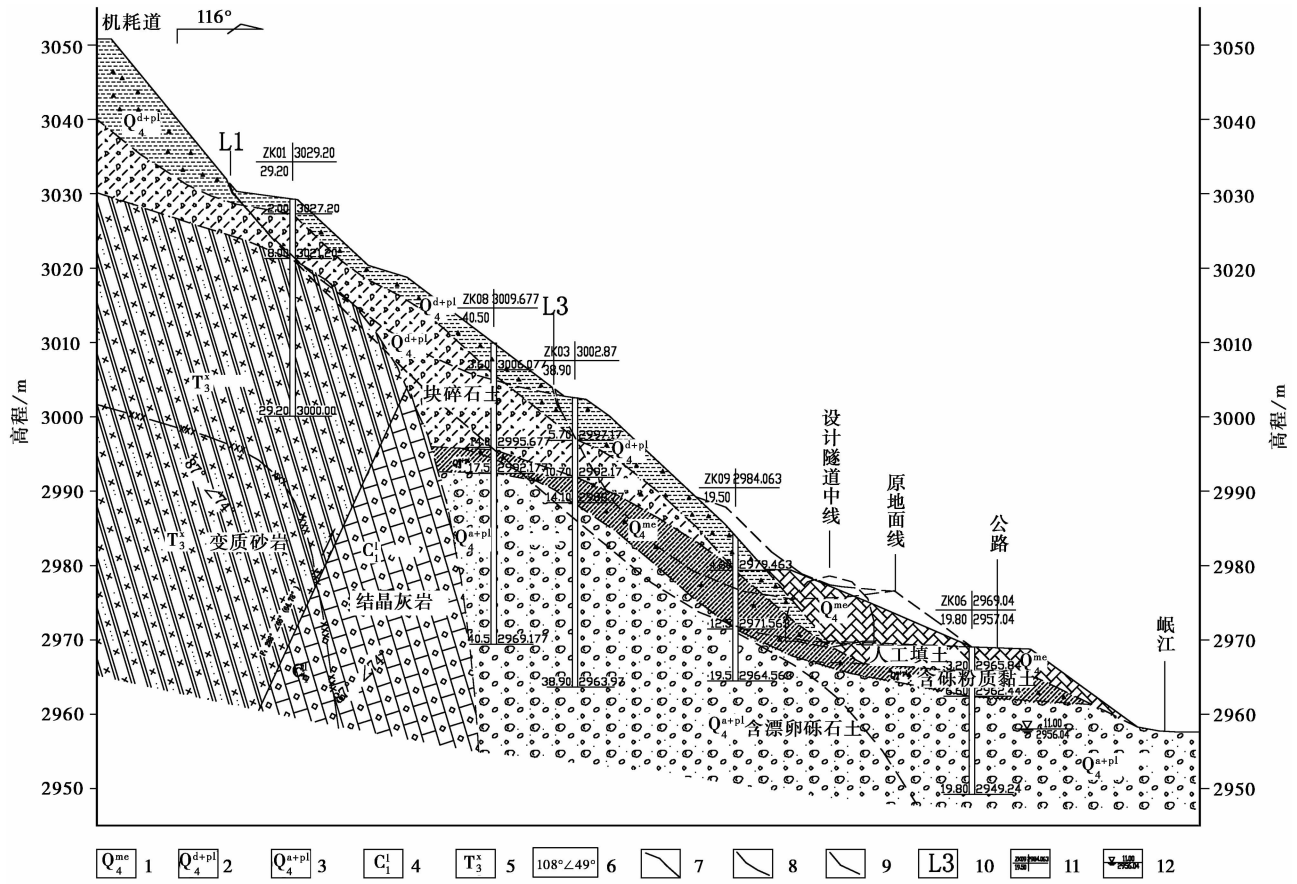


图6 滑坡剖面图

Fig. 6 The profile of landslide

1. 第四系人工堆积层; 2. 第四系坡洪积层; 3. 第四系冲洪积层; 4. 石炭系下统略阳组; 5. 三叠系西康群新都桥组变质砂岩;
6. 岩层产状; 7. 地层界线; 8. 风化界线; 9. 潜在滑面; 10. 裂缝编号; 11. 钻孔编号孔深及高程; 12. 水位线



图7 L3 裂缝发育特征

Fig. 7 The fracture characteristics of L3

表1 岩土体抗剪强度参数取值表

Table 1 the rock and soil shear strength parameters

取值方法	反算法		试验法		综合取值	
	c/kPa	$\Phi/(^\circ)$	c/kPa	$\Phi/(^\circ)$	c/kPa	$\Phi/(^\circ)$
块碎石土	30	28	26	26	28	27
砾质粉土	18	17	15	15	16.5	16

表2 稳定性计算结果

Table 2 Calculation results of stability

工况	$\Gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	稳定性系数 K	剩余下滑推力 $F/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	安全系数
天然	19	1.05	700.7	1.18
暴雨	21	1.01	803.1	1.02
地震	19	0.94	1160.3	1.10
暴雨+地震	21	0.86	1639.2	1.05

### 3.2.2 隧道塌方整治措施研究

在隧道施工过程中塌方严重威胁施工人员及机械,造成较为严重的人员伤亡及经济财产损失,对塌

持稳定,但支护后应再次对围岩扰动,促使围岩应力再次达到新的平衡,使得岩体再次变形破坏从而导致坍塌。其变形破坏机理是围岩在回弹应力和重分布的应力作用下发生的主要以拉、压应力造成的张裂、拉裂破坏及卸荷回弹(图9)。



图8 K1+322处塌方  
Fig. 8 The collapse of K1+322

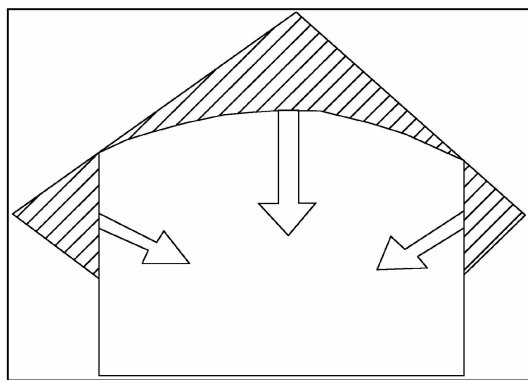


图9 围岩破坏模式  
Fig. 9 Failure model of surrounding rock

方的整治尤为重要,同时,如处理不当,还留下工程质量隐患,对隧道的正常运营造成极大的影响。

原设计采用工字型钢拱架,但在施工支护下效果不明显,前方掌子面围岩掉块严重,隧道围岩变形强烈。为更有效的支护围岩,在本隧道工程上采用了如下整治措施:

(1)川主寺隧道施工开挖方式为拱顶 $120^\circ$ φ42超前小导管注浆加固围岩,台阶式开挖,紧跟掌子面H型钢拱架+喷锚支护。施工得宜,未出现初期支护大变形等情况。

(2)塌方体处理,在塌方处先将塌方体进行稳固,喷射C20混凝土加钢筋网片进行固结、封闭,以形成整体受力圈。

(3)塌方段开挖与支护:①注浆压力应维持在 $1.0 \sim 2.0$  MPa。注浆必须能固结以及松散的岩土体,待注浆体达到强度后方可开挖。②短台阶环状开挖,留核心土法,辅之以长短管棚注浆方法开挖;加强围岩量测,根据量测及时反馈指导施工。

## 4 结论与建议

(1)在确保古滑坡稳定条件下,在其内修建隧道是可行的;但处于蠕滑变动的古滑坡中则不适宜修建,在这种条件下应以避让为主。

(2)川主寺滑坡整体稳定,隧道开挖不会引起滑坡整体失稳,但由于滑坡堆积体结构较松散,隧道围岩质量差,其施工地质问题主要为围岩坍塌、塌方及洞口段隧道开挖引起的滑坡局部失稳问题。

(3)洞口段采用台阶法施工时,尽量缩短台阶长度以确保隧道稳定性,拱部采取预加固措施的同时,加强对边墙及仰拱等部位的支护措施。尽早完成洞门,增强洞口段稳定性。

(4)对于埋深不大的松散破碎围岩段隧道施工时,应该采取将较强的如超前小导管预支护手段、采用短台阶法开挖并减小循环进尺以及及时封闭仰拱结合起来才能起到良好的施工效果。

## 参 考 文 献

- [1] 陶志平,周德培.滑坡地段隧道变形机理的模型试验[J].工程地质学报,2003,11(3):323~327.  
Tao Zhiping,Zhou Depei. Model test on deformation mechanism of tunnel at landslide site. Journal of Engineering Geology, 2003,11(3):323~327.
- [2] 张鲁新,周德培.蠕动滑坡成因及隧道变形机理的分析[J].岩石力学与工程学报,1999,18(2):217~221.  
Zhang Luxin,Zhou Depei. Cause of creep landslide formation and mechanism of deformation of tunnel. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999,18(2):217~221.
- [3] 毛坚强,周德培.滑坡-隧道相互作用受力变形规律的研究[J].西南交通大学学报,2002,37(4):371~376.  
Mao Jianqiang,Zhou Depei. Deformation analysis for landslide-tunnel interaction. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002,37(4):371~376.
- [4] 陶志平,周德培.用抗滑桩整治滑坡地段隧道变形的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(3):457~460.  
Tao Zhiping,Zhou Depei. Model testing research on controlling tunnel deformation in landslide field with antislade piles. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(3):457~460.
- [5] 陶志平,周德培.蠕动型滑坡隧道的变形规律及灾害预测[J].西南交通大学学报,2007,42(2):163~168.  
Tao Zhiping,Zhou Depei. Deformation law and disaster prediction of tunnel in creep landslide. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007,42(2):163~168.
- [6] 陶志平,周德培.滑坡地段隧道变形的地质力学模型及工程防

治措施[J]. 铁道工程学报, 2006, 2(1): 61~66.

Tao Zhiping, Zhou Depei. The geological mechanics models of tunnel deformation at landslide site and engineering controlling measure. Journal of Railway Engineering Society, 2006, 2(1): 61~66.

[7] 周德培, 毛坚强, 等. 隧道变形与坡体灾害相互关系及其预测模式[J]. 铁道学报, 2002, 24(1): 81~86.

Zhou Depei, Mao Jianqiang, et al. Relationship between tunnel deformation with slope disasters and its prediction model. Journal of the China Railway Society, 2002, 24(1): 81~86.

[8] 张鲁新, 周德培. 蠕动滑坡成因及隧道变形机理的分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 217~221.

Zhang Luxin, Zhou Depei. Cause of creep landslide formation and mechanism of deformation of tunnel. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 217~221.

[9] 王安福, 马惠民. 襄渝线柴家坡隧道变形机理的数值模拟分析

[J]. 兰州滑坡泥石流学术研讨会文集, 兰州: 兰州大学出版社, 1998.

Wang Anfu, Ma Huimin. The numerical simulation analysis of the deformation mechanism in Chaijiapo tunnel, Xiangfan-Chongqing line. Proceedings Symposium on Landslide and Debris Flow in Lanzhou, Lanzhou: Lanzhou University Press, 1998.

[10] 李文军, 等. 斜坡病害与隧道变形问题综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, 6(1): 74~80.

Li Wenjun, et al. Slope disease and tunnel deformation problem discussion. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1995, 6(1): 74~80.

[11] 马惠民. 坡体病害地段隧道变形类型和机理[J]. 甘肃科学学报, 2003, 15(增刊): 87~94.

Ma Huimin. Types and mechanism of tunnel deformation in slope disaster section. Journal of Gansu Sciences, 2003, 15(s): 87~94.

## 2012 城市地质环境与可持续发展论坛(一号通知)

**会议议题:** 1. 城市地质环境、规划与保护; 2. 城市综合安全与评价; 3. 城市防灾减灾途径和方法; 4. 城市灾害评价和预警; 5. 城市水资源安全、开发、管理和应急; 6. 城市水文地质和城市地球物理; 7. 城市循环经济的发展途径; 8. 城市的环境容量与质量; 9. 港口的高效开发与环境保护; 10. 地下空间利用及岩土工程与地质环境问题; 11. 城市灾害链现象、识别和防范; 12. 近来频发大地震与中国城市地质安全

**会议地点:** 香港大学, 香港, 中国

**会议时间:** 2012年12月3~7日(2012年12月3日全天报到注册; 2012年12月4~5日学术大会; 2012年12月6~7日会后考察)

**会议主办单位:** 中国工程院 土木、水利与建筑工程学部, 中国地质调查局, 教育部城市环境与可持续发展联合研究中心, 香港大学

**会议承办单位:** 香港大学土木工程系

**会议论文和语言:** 论文或摘要题目由论文撰写者根据大会议题自由选定。会议论文或详细摘要应为未经发表过的最新成果, 学术委员会将组织专家对所提交的论文进行审查。论文和摘要格式请严格按照编排格式排版(排版格式见二号通知)。论文题目、作者姓名和单位通讯地址要用中文和英文2种文字给出。论坛发言和论文将中文(普通话)和英文并用。经学术委员会审稿的优秀论文推荐到《工程地质学报》、《岩石力学与工程学报》或《Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering》发表。

**论文和摘要截止时间:** 2012年8月1日。

**会议费用:** 会议代表注册费 HK \$ 2000 港元(陪同及在校学生 HK \$ 1000 港元); 会后香港考察: HK \$ 300 港元/人/天; 住宿自理。

**会后考察:** 将安排会议代表和陪同在 12 月 6-7 日参观香港有关城市地质环境与可持续发展场地和工程。包括中国香港世界地质公园; 香港地下隧道和山地渠道防洪工程; 香港滑坡防治工程; 大嶼山昂坪大佛; 港珠澳大桥; 香港垃圾填埋工程。

**大会秘书处:** 秘书长: 岳中琦(电话 852-28591967, 手机 852-97251967, 电邮 yueqzq@hku.hk); 副秘书长: 宋玉环(电话 86-10-82998121, 手机 86-13661349288, 电邮 engineer2003@mail.igcas.ac.cn); 刘琦(电话 86-21-65985200, 手机 86-13917983456, 电邮 liuqi\_tongji@163.com)

**会务联系人:** (1) 香港大学: 香港薄扶林道香港大学土木工程系, 联系人: 郭小姐(Ruby Kwok)(电话 852-22194986; 传真 852-25595337; 电邮 ugsd2012@hku.hk);

(2) 同济大学: 上海市杨浦区四平路 1239 号, 同济大学地下建筑与工程系(邮编 200092) 联系人: 刘琦(传真 21-65985210; 其他同上)