

超高路堑边坡治理工程案例研究 II：治理对策及其过程控制

王浩^{1,2}, 王晓东³, 泮俊³

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350116; 2. 地质工程福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350116;
3. 中国公路工程咨询集团有限公司 中咨华科交通建设技术有限公司, 北京 100195)

摘要: 概述了 K227 滑坡治理工程方案, 对该滑坡分“上、中、下”三段进行施工的全过程开展数值模拟与优化分析, 并与监测反馈信息相互印证, 指导了边坡施工的过程控制, 达到了超高路堑边坡治理“一次规划、分步推进、安全实施、不留后患”的工程控制目标, 并得到以下结论: (1) 将综合工况下边坡整体稳定系数 $F_s = 1.10$ 作为施工过程稳态控制的标准, 以实现超高路堑边坡稳态控制, 保证施工安全及其支护结构的耐久性; (2) 坡脚反压是超高路堑边坡施工过程中确保其具备临时稳定的必要条件, 应谨慎选择对此类临时安全措施调整的时机和节奏; (3) 双排锚索抗滑桩方案的预先规划和及时生效, 对于控制施工期间后山牵引变形发展和边坡稳定条件弱化, 保证施工过程安全及成功治理具有重要的作用; (4) 超高路堑边坡治理过程中存在多种潜在失稳机制, 以及局部和整体变形相互转化的问题, 需要进行多方案模拟优化, 实现局部和整体变形的协调控制; (5) 路堑高边坡动态设计与信息化施工需要由边坡变形破坏驱动设计调整的被动模式, 转化为模拟及预测边坡变形发展规律, 实现施工次生病害的主动控制。

关键词: 边坡工程; 高边坡; 滑坡; 治理; 数值模拟; 稳定控制

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2017)05 - 1152 - 10

A case study of super-high cut slope II: stabilization measures and their process controls

WANG Hao^{1,2}, WANG Xiaodong³, PAN Jun³

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;

2. Geological Engineering Research Center, Fujian Provincial University, Fuzhou, Fujian 350116, China;

3. Zhong Zi Hua Ke Traffic Construction Technology Co., Ltd., China Highway Engineering Consulting Corporation, Beijing 100195, China)

Abstract: In this paper, the mitigation strategy of Landslide K227 was summarized, and the numerical simulation and optimization of the mitigation stages of the upper, middle and lower parts of the slope were conducted. The results of the comparison of the field monitoring and simulation data guided the process controlling of slope construction, which achieved the target of safety, orderliness and control at all the stages of the construction and

收稿日期: 2016 - 06 - 16; **修回日期:** 2016 - 08 - 11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41002127); 交通运输部建设科技项目(201331849A130); 福建省交通运输科技项目(201242)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 41002127), Construction Science and Technology Project from Ministry of Transport of China(Grant No. 201331849A130) and Science and Technology Project from Department of Transportation of Fujian Province(Grant No. 201242)

作者简介: 王浩(1978 -), 男, 2007年于中国铁道科学研究院岩土工程专业获博士学位, 现任副教授, 主要从事边坡稳定性分析及风险评估方面的研究工作。E-mail: h_wang@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0659

no hidden risks. The global safety factor 1.10 was suggested to be the threshold value to define the slope stability under the comprehensive conditions due to the need for stability control of super-high cut slope and their structural durability in the whole construct process. The backfilling at the toe of the slope was imperative to ensure the present stability during the construction of the super-high cut slope. The timing and opportunity to adjust the similar temporary safety precautions should be prudently determined. Planning in advance and installation in time of two rows of anti-slide anchor piles were important to control the reduction of stability and the development of towing deformation in up-rear part of slope, to keep the safety of construction process and to make the remediation successful. There are various potential failure mechanisms in the treatment to super-high cut slope with the transformation of local and global deformation of slope. Therefore, multiple plans are supposed to be simulated and adjusted in order to maintain the compatibility of local and global deformation. The passive mode of the design adjustment due to the slope failure need be to transformed into the active one of simulating the slope deformation in advance, which can control the secondary disasters during the period of construction of cut slopes.

Key words: slope engineering; high slope; landslide; mitigation; numerical simulation; stability control

1 引 言

超高路堑边坡的不断涌现是我国大规模山区高速公路建设突飞猛进过程中的特有现象,没有多少发达国家的经验可咨借鉴。超常规的工程规模和复杂的失稳机制,使边坡治理对策的选择、实施及成败充满挑战,主要表现在以下方面:

(1) 边坡失稳机制的时空复杂性。超高路堑边坡的大规模开挖将揭示不同的风化分带及复杂的地质结构,使边坡局部和整体蕴含多种潜在失稳的空间可能性;较长的施工周期内爆破、降雨等因素的影响,使边坡稳态急剧下降,其破坏时间的预测十分困难;充分体现卸荷作用下高边坡变形孕育的动力过程或时空效应^[1-2]。京珠高速公路 K108 滑坡、兰临高速公路袁家湾滑坡等均因反复变形破坏而闻名^[3-4]。韩国某边坡 7 a 中产生 6 次变形,边坡高度从 45 m 攀升至 155 m;治理经费从 330 万美元增加到 2 600 万美元^[5]。

(2) 边坡治理措施的质量可靠性。超高路堑边坡治理工程是包含支挡、加固、排水和防护等多种措施的复杂系统,任何一种措施的施工时机、实施顺序和完成质量均对工程的整体成败具有直接影响。例如,边坡锚固为隐蔽工程,在锚头、锚筋、外锚结构物和防腐方面的质量问题及预应力损失问题,严重影响其工作性能及长期可靠性^[6-7]。即使是施工质量相对可靠的抗滑桩,也会出现断桩等质量问题,影响其实施效果^[8]。

(3) 边坡施工过程的动态风险性。超高边坡的治理过程必定是一个被外界扰动以及坡体与支挡结构互馈的长期过程,边坡稳态不断变化,一旦不利

因素叠加,均可能产生重大安全风险^[9]。由于施工顺序对施工安全控制及边坡整体稳定性均有明显影响,开展高边坡施工过程动态仿真与信息反馈设计,可以有效控制施工过程风险^[10-12]。

龙岩双永高速公路 K227 段左侧超高路堑边坡(以下简称 K227 滑坡)挖方高度为 140 m,是福建省挖方最高的路堑高边坡工点。在确定该边坡治理方案,并完成全部 18 级坡面的土石方开挖和支挡加固措施的过程中,需要对上述 3 个基本问题谨慎考虑,综合决策,动态调整,确保安全。

本文承接王浩等^[13]对 K227 滑坡失稳机制的模拟分析成果,在该滑坡治理动态设计过程中,充分预测其实施过程的困难,采用数值仿真技术,对其上、中、下三段分段实施的治理过程开展动态模拟预测及过程优化控制,以揭示该滑坡治理过程中超高边坡和支挡结构相互作用的复杂施工力学机制,并结合监测反馈验证边坡治理工程的实施效果。

2 边坡治理方案

王浩等^[13]对 K227 滑坡的模拟分析与讨论中提出, K227 滑坡在快速开挖卸荷松弛并切断坡脚力学支撑的条件下,产生坡顶岩土张裂变形、深层软弱带剪切蠕动和坡脚沿结构面凌空剪出,边坡临近极限平衡状态;在外界扰动作用下,可能导致稳定性骤降,向坡顶牵引扩展或向坡脚延展扩大,诱发局部或整体的次生灾害。为控制施工过程中的边坡安全性及工程治理后的长期稳定性,优化设置了图 1 所示的治理方案^[13]。

双排锚索抗滑桩作为整体稳定控制措施,按照上、下分段抗滑所提供的抗滑力大小,优化确定

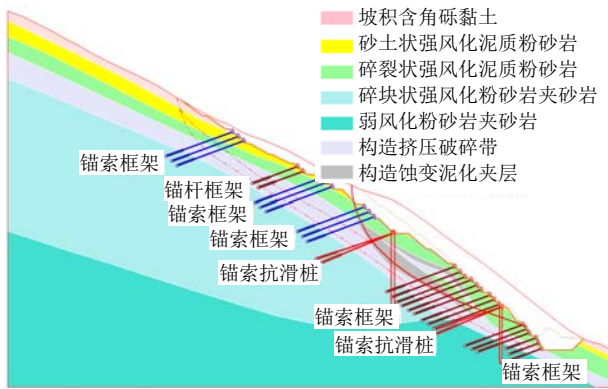


图1 K227 滑坡支挡加固工程断面布置图^[13]

Fig.1 Reinforcement at the cross section of landslide K227^[13]

采用 2 m×2.5 m 的挖孔方桩，由于需要将抗滑桩的嵌固端设置在滑床以下相对稳定的岩层内，导致超长桩身具有很大的弯矩，因此在桩头布设两孔设计拉力 1 000 kN 的拉压复合型锚索以控制桩身弯矩。采用设计拉力 500~700 kN 的压力分散型锚索框架与抗滑桩协同工作，控制超高路堑边坡多级坡面潜在的局部变形破坏模式。此外，还采用了截排水及防护绿化等辅助措施。支挡结构主要设计参数如表 1 所示。

表 1 K227 滑坡支挡加固工程设计参数表

Table 1 Reinforcement design parameters of landslide K227

坡级位置	支挡类型	锚索及抗滑桩设计参数		
		总长度/m	锚固段嵌固段/m	单孔设计拉力或设计抗滑力
16 级	锚索	39~41	10	500 kN
13 级	锚杆	27	10	350 kN
12 级	锚索	39~41	10	500 kN
10 级	锚索	37~39	10	500 kN
9 级脚	桩头锚	44~46	12	1 000 kN
8 级台	抗滑桩	40~43	15	1 000 kN/m
6 级	锚索	35~38	12	700 kN
5 级	锚索	40~42	12	700 kN
4 级	锚索	38~40	12	700 kN
3 级台	桩头锚	40	12	1000 kN
3 级台	抗滑桩	32~35	13	1 000 kN/m
2 级	锚索	35~38	12	700 kN
1 级	锚索	18	12	700 kN

为保证施工过程安全，K227 滑坡的治理是在应急措施基础上，分上、中、下三段实施的。边坡上部治理工程在第 8 级顶部平台内侧设锚索抗滑桩，以及 8 级以上坡面的锚索(杆)框架；中部治理工程包含第 3 级顶部平台的锚索抗滑桩及第 4~6 级锚索框架；下部工程为第 1~2 级锚索框架。基于图 1

所示的边坡地质模型及加固方案，考虑原开挖坡形、变更开挖坡形和支挡结构位置等，采用 Phase² 8.0 岩土开挖有限元程序建立计算模型，如图 2 所示。

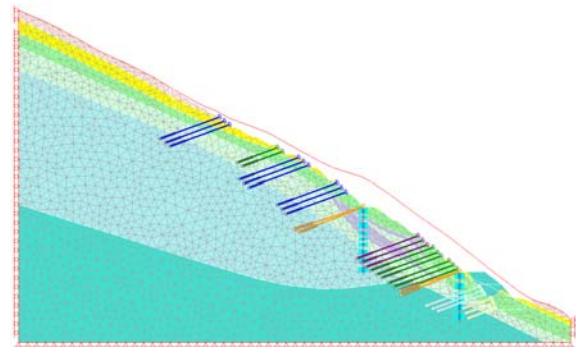


图 2 K227 滑坡支挡加固有限元模型

Fig.2 Finite element meshes of landslide K227 mitigation

模型中采用岩土弹塑性本构模型的力学参数与王浩等^[13]一致，采用 Tieback 锚杆单元模拟边坡锚固；采用 Timoshenko 梁单元模拟抗滑桩，并按桩的布设间距对其截面设计参数进行了等效处理，考虑了桩锚的协同变形，尽量模拟上、中、下三段逐段实施的真实施工过程与实施效果。

3 上部工程模拟及其过程控制

由于 12 级顶部有一村道和水管需要改移，上部工程的刷方大体是分两个阶段：第 1 阶段开挖第 13~18 级坡面，刷方土体较少，大都顺坡滑落至第 4~7 级坡面；第 2 阶段开挖第 9~12 级坡面，刷方土体较多，填充了坡脚切坡的缺口。根据两阶段刷方情况和支挡锚固实施过程，进行若干工况的数值仿真，分析其稳定状态及破坏机制统计，如表 2 所示。

表 2 K227 滑坡上部工程施工过程模拟成果表

Table 2 Simulated results of the upper part of mitigation

时步	开挖施工情况	支挡加固施工情况	稳定系数	变形破坏空间特征
1	第 13~18 级	仅开挖	0.999	初始滑动面 卸载滑落界面
2	第 13~18 级	第 13 级锚固	0.999	初始滑动面 卸载滑落界面
3	第 13~18 级	第 16 级锚固	1.000	初始滑动面 卸载滑落界面
4	第 9~12 级	仅开挖	1.273	初始滑动面 卸载回填界面
5	第 9~12 级	第 12 级锚固	1.281	初始滑动面 卸载回填界面
6	第 9~12 级	第 10 级锚固	1.295	初始滑动面 卸载回填界面
7	第 9~12 级	上排锚桩	1.355	初始滑动面 卸载回填界面

图 3 给出第 3 时步所示完成第 1 阶段施工时边

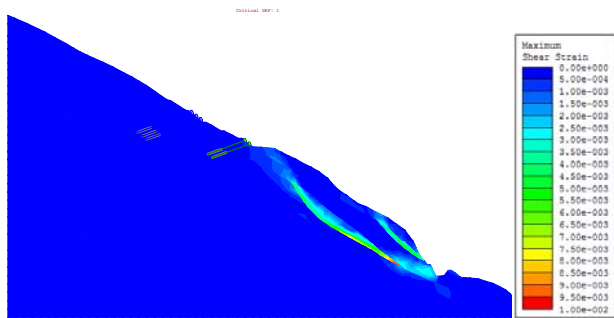


图 3 第 3 个施工时步的最大剪应变增量云图

Fig.3 Maximum shear strain increment of the 3rd constructing stage

坡变形破坏模式，后部山体小规模卸载，土方土体近乎极限坡角自然滑落至边坡中部，在堆填界面酝酿潜在的变形破坏，尚未形成坡脚反压，对边坡整体变形的控制还未体现，对下部已滑动变形体的稳定性几乎没有改善。上部已实施的锚固工程也未直接作用到滑动块体，边坡整体稳定系数 $F_s = 1.0$ ，为极限状态，破坏模式体现为沿初始滑动面失稳及沿卸载滑落界面失稳 2 种情况，且 2 种变形破坏的可能性均极高，边坡下部的安全性难以得到保证。王浩等^[13]中提到，此时边坡应急张拉的锚索变形增长较快，作为坡面反力构件的方木逐步断裂，实际条件下边坡变形破坏特征明显。

为避免边坡稳态恶化，在第 13 级坡面迅速实施了锚杆框架，并加快了第 2 阶段的卸载开挖。卸载土方在坡脚挖方缺口逐渐压密，形成较强的反压，边坡稳定系数 F_s 达 1.273，整体稳定性显著提高。此时，监测显示边坡变形发展也趋于停滞。

图 4 给出第 7 时步完成上部所有加固措施后的边坡变形破坏特征，边坡潜在破裂面仍是初始滑动面和卸载回填界面；但坡脚卸载反压土体产生类似柔性挡墙的支挡作用，破裂面没有继续向下延展，完成上部工程施工后，边坡稳定系数最终达到 1.355，图 5 给出第 7 时步边坡总位移云图。

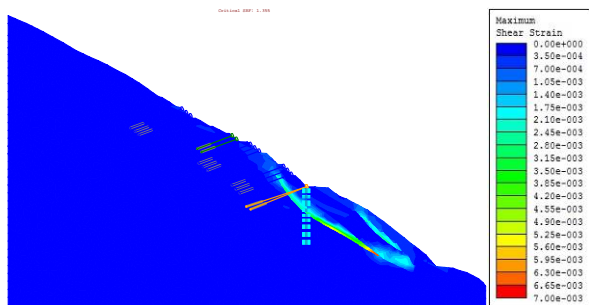


图 4 第 7 个施工时步的最大剪应变增量云图

Fig.4 Max. shear strain increment of the 7th constructing stage

模拟显示在边坡上部卸载反压，可以保证边坡整体稳定性，使抗滑桩等关键施工步骤的实施具有安全保障。图 5 显示，依此施工步骤完成上部工程时，抗滑桩上段初始滑动体的变形被上排抗滑桩拦截，抗滑桩上段产生明显水平变形，计算桩土相对位移峰值约 7.20 cm，相互作用效果强烈，说明抗滑桩表现出较好的支挡效果。此时初始滑动面后部牵引变形量值相对微小，上部工程的实施对于控制滑坡后缘牵引扩大发挥了很好的效果。而抗滑桩下部的初始滑动块体变形量值较均匀，量值在 2~3 cm，与边坡监测管的变形量值在相同量级。

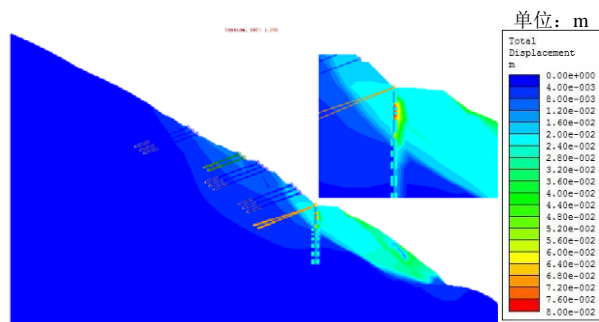


图 5 第 7 个施工时步的总位移云图

Fig.5 Total displacement of the 7th constructing stage

模拟分析优化提出采用表 2 给出的施工时步来控制施工过程。图 6 为 2010 年 8 月 20 日上排抗滑桩的施工情况，卸载反压保证了边坡整体的稳定条件，此关键施工过程安全控制的成功，是滑坡成功治理过程中的最重要的步骤。



图 6 边坡上部工程施工实景(2010 年 8 月 20 日)

Fig.6 Photo of construction at the upper slope(Aug.20, 2010)

在此施工过程中，在第 8 级平台恢复了深部位移监测孔 ZK1-3，王浩等^[13]中的图 14 给出了该测孔的位移-深度曲线，可以准确判断滑动面的深度在 17~20 m，20 m 以下为较稳定的滑床。图 7 给出 2010 年滑动面位移-时间发展过程曲线。

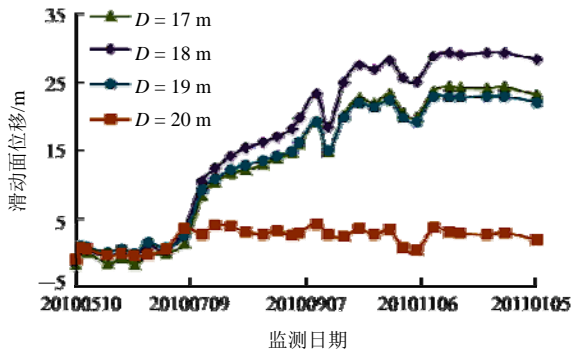


图7 监测到滑动带的位移-时间曲线

Fig.7 Monitored curves of displacement of slip surface varied with time

在卸载反压形成初期,即5~6月,边坡变形较小;2010年7月,由于抗滑桩开挖扰动及台风暴雨影响,滑坡变形突然产生10 mm以上的明显增量;2010年8~9月,随着先期实施的8根抗滑桩逐步浇筑,边坡趋于稳定,但是仍有变形波动;2010年10月以后,全部16根抗滑桩陆续完成,逐步发挥抗滑能力,边坡变形逐步稳定。

4 中部工程模拟及其过程控制

中部工程包含第4~8级刷方锚固及第3级顶部平台的锚索抗滑桩工程。考虑到这部分是初始滑动的主体部分,其实施过程也分2个阶段完成。第1阶段是第4~6级边坡锚固工程,第2阶段是第3级顶部平台的锚索抗滑桩工程。同样进行若干施工工况的数值模拟及优化分析,统计如表3所示。

表3 K227滑坡中部工程施工过程模拟成果表
Table 3 Simulated results of the mid part of mitigation

时步	开挖情况	支挡加固情况	稳定系数	变形破坏空间特征
8	第4~8级	仅开挖	1.337	初始滑动面变形
9	第4~8级	第6级锚固	1.341	初始滑动面变形
10	第4~8级	第5级锚固	1.341	初始滑动面变形
11	第4~8级	第4级锚固	1.343	初始滑动面变形
12	第4~8级	下排锚桩	1.370	初始滑动面变形

在完成第4~8级的刷方后,边坡稳定系数由1.355小幅下降至1.337,由于保留了坡脚3级关键的反压土体,工程扰动效应相对较小。因此,边坡整体稳定性并没有明显降低。在第4~6级锚固工程陆续实施过程中,边坡稳定系数稳步提升至1.343;当完成第3级平台锚索抗滑桩后,边坡稳定系数上

升较为显著,达到1.370。图8,9给出第12时步中部工程完成时,边坡最大剪应变增量和总位移云图。模拟计算过程中,边坡潜在破坏模式仍表现为初始滑动块体的变形,量值为3~4 cm,略有增加,但幅度很小;上排桩的桩土相对位移峰值微增至7.35 cm,而下排桩的桩土相对位移峰值约5.6 cm,变化均相对较小。总体而言,随着开挖过程,上部工程进一步显现对后部牵引变形的控制,中部工程较好地实现了对上排桩下部滑动变形主体的控制,实现了分段抗滑的工程控制目标。模拟结果表明在维持坡脚3级反压土体的条件下,边坡整体稳定性不会显著降低,抗滑桩工程的实施具有安全保障。

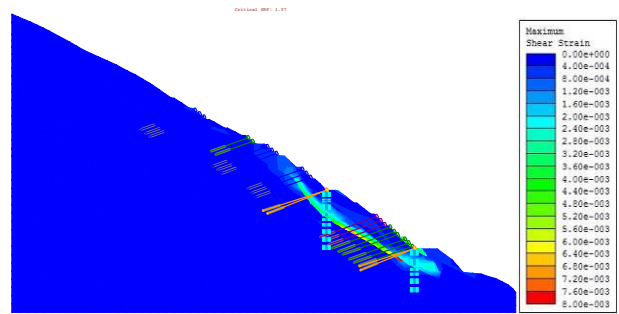


图8 第12个施工时步的最大剪应变增量云图

Fig.8 Maximum shear strain increment of the 12th constructing stage

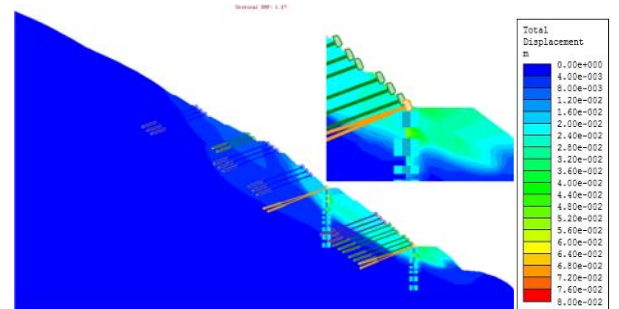


图9 第12个施工时步的总位移云图(单位: m)

Fig.9 Total displacement of the 12th constructing stage (unit: m)

图10反映了2011年7月4日边坡施工情况。此时,正在实施第5,6级锚索的钻孔注浆或张拉锁定。由于下部有3级土体反压,虽然施工时经历了2011年长达5个月的连续降雨不利工况,但是深部位移监测未发现明显的边坡变形活动迹象,边坡整体保持稳定,先期实施的支挡结构变形增量较小,没有发生超载破坏,施工过程较为安全。这些现象均与数值模拟得到边坡变形趋缓,整体稳定的状态相吻合,说明按照表3所示第8~12时步的施工步



图 10 边坡上部工程施工实景(2011 年 7 月 4 日)

Fig.10 Photo of construction at the middle slope(July 4, 2011)

骤来推动施工过程，可以实现施工安全控制，并保证工程结构施工质量。

5 下部工程模拟及其过程控制

下部工程全面施工中坡脚开挖较为关键，模拟中对一次开挖、逐级加固施工方案(第 13, 14, 15 时步)和逐级开挖、逐级加固施工方案(第 16, 17, 15 时步)进行对比研究。表 4 给出模拟得到的实施过程中边坡稳态的变化及其变形特征。

表 4 K227 滑坡下部工程施工过程模拟成果表

Table 4 Simulated results of the lower part of mitigation

时步	开挖情况	支挡加固情况	稳定系数	变形破坏空间特征
13	第 1~3 级	仅开挖	1.273	初始滑动面变形
14	第 1~3 级	第 2 级锚固	1.282	初始滑动面变形
15	第 1~3 级	第 1 级锚固	1.273	初始滑动面变形
16	第 3 级	无支护	1.312	初始滑动面变形
17	第 2 级	第 2 级锚固	1.283	初始滑动面变形

逐级开挖、逐级加固施工过程中，边坡稳定性下降比较平稳，安全控制更好；而一次开挖、逐级加固方案，边坡稳定系数迅速下降至 1.273，幅度更为明显。但是，反压土体卸除后，下排锚索抗滑桩能够提供相应的抗力，随着第 1~2 级锚索的实施，实现了置换反压土体的效果，也能够保证施工过程安全。因此，考虑工期要求，最后采取一次开挖、逐级施工方案，在 2012 年元旦前完工，顺利通车。

图 11 给出了第 15 时步下部工程全部完成时边坡变形破坏模式，图 12 为完成治理后，边坡总位移云图。在第 1~2 级锚索的主动加固作用下，计算显示抗滑桩水平变形峰值均略减少 1~2 cm。移除坡脚反压，边坡潜在变形破坏特征恢复至初始滑动的

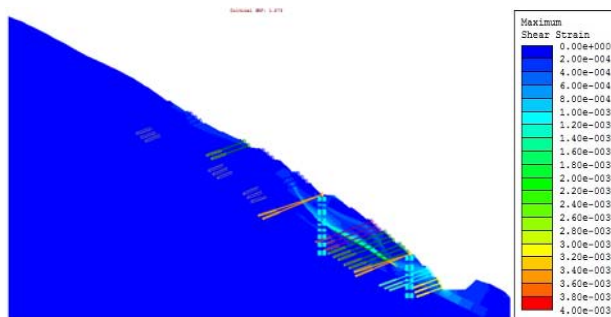


图 11 第 15 个施工时步的最大剪应变增量云图

Fig.11 Maximum shear strain increment of the 15th constructing stage

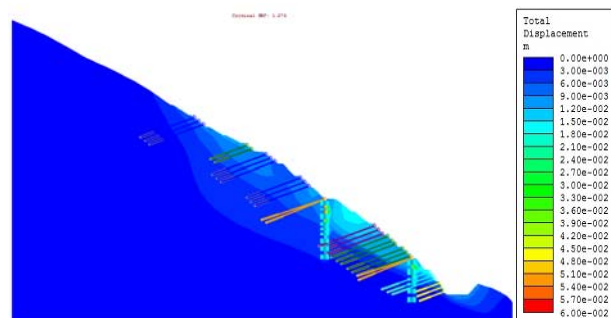


图 12 第 15 个施工时步的总位移云图(单位: m)

Fig.12 Total displacement of the 15th constructing stage (unit: m)

形态，但边坡稳定系数 $F_s = 1.273$ ，工程治理达到设计和施工的预期目标，也体现施工过程安全控制取得成功。

图 13 为 2012 年 4 月，在通车 3 个多月以后的边坡全貌。如今该边坡已安全运营 4 a，坡面被植被完全覆盖，与周边山体融为一体；建立的边坡远程自动化监测系统，也证明通车 4 a 来，边坡整体稳定安全，滑坡治理取得成功。



图 13 边坡全部工程结束时的影像(2012 年 4 月 12 日)

Fig.13 Photo of slope after construction(April 12, 2012)

6 讨论

6.1 施工过程中边坡稳态控制问题

超高路堑边坡具有工程规模大、治理周期长和

外界扰动强烈的特点, 施工过程中的稳态控制非常重要。K227 滑坡治理过程经历了 2 个完整的雨季, 要保证施工过程安全, 若简单强调“开挖一级、施工一级”的泛泛原则是不够的。如何考虑超高边坡施工力学行为, 统筹一个科学的施工工序与操作方案, 不仅是施工组织问题, 更是边坡设计人员的技术责任。基于数值模拟的全过程仿真分析与优化, 为 K227 滑坡优化确定“上、中、下”三段分段实施的总体施工方案, 并为预测与防控施工过程的次生灾害提供了技术支撑。

《公路路基设计规范》(JTG D30—2004)对于边坡稳定系数有 3 种工况的要求, 即天然工况、暴雨工况和地震工况, 但是缺少施工过程中边坡稳态控制的标准^[14]。施工过程中边坡稳态控制标准涉及 3 个基本问题: (1) 施工过程中边坡是否会产生整体变形破坏。(2) 即使没有整体破坏, 但边坡稳定系数偏低, 可能产生坡体蠕动变形, 导致锚固结构超载破坏, 抗滑桩或锚索框架等混凝土构件在硬化达到设计强度值之前, 产生早期开裂变形, 甚至断桩, 影响其耐久性。(3) 施工过程中边坡稳定系数偏低, 支挡结构存在初始缺陷, 将难以保证边坡在全寿命周期内承受罕遇工况或极端工况的冲击。

基于笔者多年来从事边坡病害治理的经验与思考, 当高边坡的变形体积达到一定的规模, 施工过程中若不能保证其具有基本的稳定前提条件, 则一般是不太可能采用常规支挡加固措施保证其永久安全。在相当数量的边坡案例数值模拟分析中, 笔者也发现边坡整体稳定系数 $F_s = 1.10$ 左右, 一般是边坡主滑面产生深层剪切蠕动的起始阶段和稳定系数下降趋势的拐点。笔者曾负责的 120 多个路堑高边坡长达 5 a 的边坡动态监测项目中, 当深部位移监测捕捉到微小量值但是特征明确的深层侧向位移时, 一般后缘张裂缝和侧界剪切裂缝均特征不显著、甚至没有。王恭先等^[15]基于 G. Ter-Stepanian 提出的滑带土的可用抗剪强度理论, 认为当边坡稳态下降时, 坡体内原生的软弱带或潜在破裂带内不同点的抗剪强度被不均匀调动, 将产生球状蠕动带和应力重分布, 是滑坡孕育的初始阶段。王浩^[16]继承中铁西北科学研究院关于滑坡变形阶段划分及其稳定度演化规律的思想, 建议将边坡整体稳定系数 $F_s = 1.10$ 和边坡深层侧向位移孕育特征的显现, 作为边坡渐进破坏过程中进入蠕动阶段的标志。基于此认识, 为避免坡体蠕动使支挡结构产生初始开裂, 而影响其耐久性, 笔者推荐将边坡整体稳定系数

$F_s = 1.10$ 作为施工过程中边坡稳态控制标准。此控制标准不仅要考虑天然工况, 在福建这样的多雨地区, 尚应考虑一年中平均降雨强度对施工时边坡稳态的扰动。对地下水活动性较强的滑坡地段, 由于降雨诱发的地下水水位升高或裂隙充水扰动作用, 将导致边坡稳态大幅下降, 还需适当提高控制标准^[17]。

图 14 给出了 K227 滑坡开挖诱发整体变形破坏时($F_s = 1.012$), 以及表 2~4 对应时步为 1~15 的各个施工工况模拟过程中边坡稳态的变化规律。在不考虑降雨的条件下, 施工过程中边坡稳定系数 F_s 基本控制在 1.25 以上。詹松等^[18]在总结广东高速公路路堑边坡设计的经验, 认为降雨条件下土质边坡的安全系数可减低 0.2~0.3。而根据笔者的经验, 降雨导致边坡安全系数下降的幅度与边坡体积规模、岩土性质、地下水入渗和排泄条件均有较大的关系, 但一般降雨导致边坡稳定系数下降的幅度在 0.1~0.2。即使 K227 滑坡在施工时有设置地表水疏排系统, 并具有较好的地下水排泄条件, 但在持续降雨条件下, 其整体稳定系数仍有可能降至 1.10 左右。因此, 就 K227 滑坡治理来说, 设定并执行综合工况下边坡整体稳定系数 $F_s = 1.10$ 作为施工过程中边坡稳态控制的标准, 可以保障施工安全及支护结构的耐久性, 并保证该超高路堑边坡在施工过程中, 虽然边坡位移监测孔侦测到明确的变形位置, 但是基本没有被剪断, 边坡总体变形得到了有效控制。

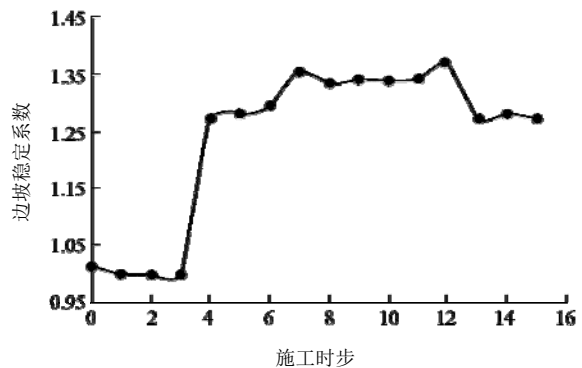


图 14 边坡施工各时步边坡稳定系数变化曲线

Fig.14 Changing process of safety factor of slope during excavation stages

6.2 何时撤除坡脚反压土体的讨论

K227 滑坡是双永(永春—永定)高速公路建设的控制性工程, 是在 2012 年元旦正式通车前一天才完成全部支挡加固和防护结构的施工。在此过程中, 由于工期紧迫, 施工单位和业主均有提前打开工作面, 加快施工进度之强烈冲动, 何时撤除坡脚反压土体是问题的核心。由图 14 可以看出, 在第 4 施工

时步中，卸载土体在坡脚形成反压关键块体，在提高边坡整体稳定性扮演了关键的角色，也是整个工程的成败之举。数值仿真模拟了当完成上部工程后，若全部挖除下部的反压土体，边坡稳定系数 $F_s = 1.05$ ，接近极限平衡状态。过早的挖除反压土体，完全可能诱发滑体向深部的转移，甚至可能损毁已实施的支挡工程，造成边坡整体下滑，难以处治。由于采用数值模拟对解除坡脚反压的时机进行了优化分析，确定了在下排锚索抗滑桩施工完成后方能解除反压工程的明确意见，统一了参建各方的认识，是滑坡治理成功的关键。

事实上，上、中、下三段施工过程中，有一些也是存在交叉作业的。例如，由于抗滑桩均是按“跳一挖一”的次序实施，在上部工程第 8 级顶抗滑桩浇注一半数量时，边坡中部的锚固工程已经开始动手实施；在中部工程第 3 级顶抗滑桩浇注一半数量时，就开始着手坡脚 3 级反压土体的撤除。但是，总体而言，施工和业主单位能够认真听取设计、咨询单位的意见，把控制住撤除坡脚反压土体的时机和节奏，为确保治理工程的安全实施提供了保障。

6.3 双排锚索抗滑桩设置方案的讨论

在边坡中、上部设置双排锚索抗滑桩是 K227 滑坡治理的主体方案。方案论证时，参建各方对于在滑坡体下部设置抗滑桩似乎没有异议，但是否需要设置双排桩存在一定的争论；尤其是，上排锚索抗滑桩似乎只承担了滑体上段小部分块体的下滑力。边坡失稳机制模拟分析做出了在不利条件下，该边坡变形破坏“必将继续向上牵引、向下延伸、以及向深部发展和扩大”的预测，是确定上排设桩方案的基本前提，其目的正是在于加强施工过程中的稳态控制，避免滑坡牵引发展，导致边坡治理失败。

在上部工程施工期间，位移监测孔捕捉到后山孕育牵引滑体迹象，位于第 14 级平台的 ZK2-5[#] 监测孔揭示，在 16 m 处有明显的滑动变形活动迹象，如图 15 所示。对照补勘钻孔，这一深度存在厚度约 15 cm 的泥化薄层。随着上部预加固锚索的逐步生效，特别是抗滑桩成桩后体现出较强的支挡效应，牵引变形逐步减缓，趋于稳定。边坡能够在开挖条件下经历 2011 年完整雨季，而保持整体稳定，上排锚索抗滑桩的预先设置和及时生效功不可没。在初步设计中还提供了在第 3、4 级平台设置两排微型桩来替代下排抗滑桩的比选方案，其目的是增加工作面，以并行作业，缩短施工周期。基于边坡施

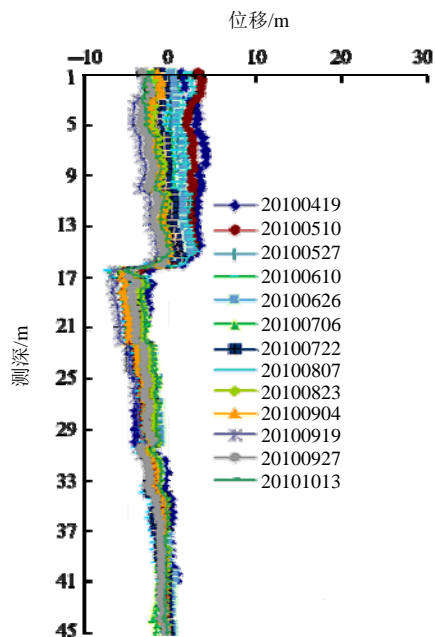


图 15 后山牵引变形体的深部位移监测曲线

Fig.15 Monitored curve of displacement deep inside the hill

工过程安全控制要求和支挡结构耐久性的长期考量，最终选择钢筋混凝土桩的方案，笔者也认为是一个合适的选择。

6.4 局部与整体变形的协调控制

超高路堑边坡治理方案如何统筹局部失稳机制与整体失稳机制的协调控制，是确定治理方案及工程造价中需要特别考虑的环节。K227 滑坡治理方案除了双排抗滑桩，还包括了多级坡面的锚索框架工程，显然不可能对 K227 滑坡全部 18 级坡面均布设加固措施。由于缺乏主次分明的全局考虑，全坡面布设加固工程却遭遇整体破坏的事例也不鲜见^[3-5]。

超高路堑边坡与古老滑坡灾害治理的不同在于，在相似的岩土地层和坡体结构条件下，存在多种潜在失稳可能，以及局部和整体变形相互转化的问题，需要进行多坡面的变形控制。由于超高边坡整体坡率较陡，也需要考虑滑体越桩顶剪出的可能，因此设置锚索框架来规避这种风险，使之与抗滑桩协同工作。另一方面，在断面桩位优化设置的方案比选中，需要考虑双排桩具有足够的相对距离，避免桩距过小使滑坡推力相互传递而削弱桩的整体抗滑能力，以实现分段抗滑的目标，分别控制上、中、下三段的局部变形破坏。

K227 滑坡设计方案对边坡上、中、下三段的支挡加固布设是综合考虑上述因素的结果。边坡第 13~18 级主要是牵引变形段，地形较平缓，岩土体较完整，产生局部变形破坏的可能性较低。因此采

用坡率法对坡形改造后,在第13级和第16级分段采用锚固措施进行预加固处理。第9~12级主要是原滑坡的张拉变形段,由于多道张裂缝的存在,岩土体完整性较差,为控制松散土体变形破坏,在第10,12级采用锚索加固,在第9级采用锚索桩的悬臂部分兼顾了局部支挡,对桩间土采用孔窗式护面墙进行防护。第4~8级为主要滑动体部分,岩土体卸荷松弛严重,在第7~8级结合顶部宽缓平台,刷除表层4~6 m松动岩土,采用系统锚杆结合TBS植草进行防护处理,对4~6级坡面,兼顾了局部变形和整体变形的控制,满布锚索框架工程与下排抗滑桩协同工作。第1~3级为滑动剪出变形段,岩体挤压破碎极为明显,在第1,2级均布置了预应力锚索框架工程。上述锚固工程结合上、下两排抗滑桩,形成了兼顾局部变形和整体变形控制的完整支挡加固体系。

6.5 再论动态设计与信息化施工

路堑高边坡动态设计及信息化施工是近年来倡导的设计思想,王浩^[16]曾详细讨论过这一流程的技术框架。之前,动态设计和信息化施工特别强调的是根据施工过程的地质校核和监测反馈,对边坡分析模型进行动态调整,大部分是由于现场地质条件的变化或监测到变形破坏现象来驱动边坡动态设计的流程,总体来看被动性较多。回顾K227滑坡的治理过程,全过程数值仿真分析对于边坡失稳机制、演化规律、稳态预测和过程控制的研究成果,可以为边坡治理设计与施工提供更具体、有效的前瞻指导,具有相当的主动性。动态设计和信息化施工有必要从被动性向主动性发展,使边坡施工全过程风险防控更具有预见性,并确保治理工程的长期可靠性。

总体来说,K227滑坡治理过程中,正确的认识和分析边坡变形破坏的特征表象,反复推敲和斟酌边坡工程地质模型,严谨而细致的开展边坡数值模拟的正、反分析,将模拟成果与实际监测结果和施工过程监控相互校核,对边坡潜在失稳机制和稳态发展趋势做出正确的评估,指导了边坡治理方案规划和施工过程安全控制。说明动态设计与信息化施工是路堑高边坡设计的灵魂。

7 结 论

本文概述了K227滑坡治理工程方案,采用数

值仿真技术对该滑坡分“上、中、下”三段分步实施的过程进行模拟分析,与现场反馈与监测信息相互印证,指导和优化了边坡施工的过程控制,并得到以下结论:

(1) K227滑坡的治理过程,实现了对超高路堑边坡关键施工步骤的主动控制,保证该滑坡治理“一次规划、分步推进、安全实施、不留后患”。

(2) 采用数值仿真技术可以对边坡施工全过程进行多方案仿真模拟和论证比选,预测不利工况和潜在施工病害,控制施工过程及稳态变化,优化工程实施方案,实现边坡设计的信息化和智能化。

(3) 超高路堑边坡病害治理需要统筹应急抢险工程措施、局部变形控制措施和整体支挡加固方案的协调控制,谨慎选择临时安全措施的撤除时机和节奏,实现边坡治理过程的安全控制。

(4) 路堑高边坡动态设计与信息化施工需要由边坡变形破坏驱动设计调整的被动状态,转化为反演边坡失稳机制、预测稳态发展趋势、规划总体治理方案和优化控制施工过程的主动状态。

致谢 本文引用了中铁西北科学研究院提供的边坡动态变形监测成果,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1 525 - 1 544.(HUANG Runqiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1 525 - 1 544.(in Chinese))
- [2] 邹团结, 夏晓慧, 罗萍. 路堑高陡边坡开挖变形的时空效应分析[J]. 公路工程, 2012, 37(6): 48 - 51.(ZOU Tuanjie, XIA Xiaohui, LUO Ping. Analysis about Tau-effect of soil deformation within the deep road slope[J]. Highway Engineering, 2012, 37(6): 48 - 51.(in Chinese))
- [3] 张玉芳. 京珠高速公路108滑坡及防治工程分析[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(6): 633 - 637.(ZHANG Yufang. Analyses of landslide No.108 in Beijing-Zhuhai highway and its treatment measures[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(6): 633 - 637.(in Chinese))
- [4] ZHANG F Y, LIU G, CHEN W W, et al. Human-induced landslide on a high cut slope: a case of repeated failures due to multi-excavation[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2012, 4(4): 367 - 374.
- [5] LEE S G, HENCHER S R. The repeated failure of a cut-slope despite continuous reassessment and remedial works[J]. Engineering

- Geology, 2009, 107(1/2): 16 - 41.
- [6] 郑静, 韩龙, 朱本珍, 等. 边坡锚固工程质量问题及其影响[J]. 铁道工程学报, 2009, (1): 27 - 31.(ZHENG Jing, HAN Long, ZHU Benzhen, et al. The problems related to the anchorage engineering for slope and its effects[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, (1): 27 - 31.(in Chinese))
- [7] 曾宪明, 陈肇元, 王靖涛, 等. 锚固类结构安全性与耐久性问题探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2 235 - 2 242. (ZENG Xianming, CHEN Zhaoyuan, WANG Jingtao, et al. Research on safety and durability of bolt and cable-supported structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2 235 - 2 242.(in Chinese))
- [8] 常聚友, 高景宏, 刘志军. 山区铁路抗滑桩完整性检测及断桩原因分析[J]. 铁道工程学报, 2012, (3): 40 - 43.(CHANG Juyou, GAO Jinghong, LIU Zhijun. Integrity testing of anti-slide pile for railway in mountain area and analysis of causes for pile fracture[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, (3): 40 - 43.(in Chinese))
- [9] 王浩, 林一夫, 吴栋梁, 等. 复杂路堑高边坡病害治理效果模糊层次评价[J]. 工程地质学报, 2014, 22(5): 936 - 943.(WANG Hao, LIN Yifu, WU Dongliang, et al. Fuzzy hierarchy analysis for treatment effect of complex cutting high slope disease[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(5): 936 - 943.(in Chinese))
- [10] 赵尚毅, 郑颖人, 唐树名. 路堑边坡施工顺序对边坡稳定性影响数值模拟分析[J]. 地下空间, 2003, 23(4): 370 - 374.(ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, TANG Shuming. Numerical simulation analysis for the influence of construction process of deep cut slope on its stability[J]. Underground Space, 2003, 23(4): 370 - 374.(in Chinese))
- [11] 肖世国, 周德培. 岩石高边坡的动态设计施工模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1 372 - 1 374.(XIAO Shiguo, ZHOU Depei. Dynamic design and construction mode of high rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1 372 - 1 374.(in Chinese))
- [12] 晏鄂川, 唐辉明, 何森, 等. 路堑变坡工程的动态仿真分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 246 - 250.(YAN Ehuang, TANG Huiming, HE Miao, et al. Real-time simulation for slope engineering of highway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 246 - 250.(in Chinese))
- [13] 王浩, 王晓东, 泮俊. 超高路堑边坡治理工程案例研究 I: 边坡失稳机制模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 899 - 909.(WANG Hao, WANG Xiaodong, PAN Jun. A case study of super-high cut slope I: simulation and analysis of slope instability mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 899 - 909.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国专业标准编写组. JTG D30-2004 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.(The Professional Standards Compilation Groups of the People's Republic of China. JTG D30-2004 Code for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [15] 王恭先, 徐峻岭, 刘光代, 等. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 中国铁道科学出版社, 2004: 136 - 138.(WANG Gongxian, XU Junlin, LIU Guangdai, et al. The science and control technology of landslide[M]. Beijing: China Railway Science Press, 2004: 136 - 138.(in Chinese))
- [16] 王浩. 岩质路堑高边坡设计理论与方法研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2007.(WANG Hao. Study on the design theory and methods for deep cut rock slopes[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Chinese Academy of Railway Sciences, 2007.(in Chinese))
- [17] 王浩, 孙木子, 马新凯, 等. 路堑边坡平面滑动演化过程及远程滑动机制的模拟与分析[J]. 工程地质学报, 2015, 23(03): 438 - 447.(WANG Hao, SUN Muzi, MA Xinkai, et al. Simulation and analysis of sliding evolution process and long run-out sliding mechanism for plane sliding of cutting slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(03): 438 - 447.(in Chinese))
- [18] 詹松, 汤连生, 杨文甫. 广东高速公路路堑边坡失稳原因与防治分析[J]. 工程地质学报, 2006, 14(2): 184 - 189.(ZHAN Song, TANG Liansheng, YANG Wenfu. Causes and preventive measures of cut slope failures on expressways in Guangdong province[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(2): 184 - 189.(in Chinese))