

复杂地质条件下高边坡加固设计与综合治理研究

——以梅河高速公路某高边坡治理为例*

张泽鹏¹, 朱凤贤², 黄放军¹, 周翠英²
(1 广东交通实业投资公司, 广东 兴宁 514500
2 中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275)

摘 要: 梅河高速公路是广东省地质地理条件复杂的山区高速公路之一。其中 K110+778~K110+960 段左侧边坡在施工期间发生了三次滑坡, 影响到了工程的建设与安全。介绍了该边坡的概况, 从其形成条件和诱发因素两个方面较为系统的分析了该边坡的成因及其发展规律, 通过选取代表性的断面, 结合有限元分析技术对其加固前后的稳定性进行了分析, 对该类边坡的治理方案进行了较系统的研究。研究对类似工程中的滑坡治理具有较好的借鉴意义。

关键词: 高边坡; 复杂地质条件; 加固设计; 综合治理; 有限元

中图分类号: TU413.6⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2006) 04-0044-05

复杂地质条件下高边坡的加固设计与有效治理是工程建设中常常遇到的难题之一, 它直接关系到工程的安全、工期和成本, 是十分值得重视的研究课题。梅河高速公路是广东省境内具有代表性的山区高速公路之一, 它东起梅州, 西止河源, 主干线全长 125 公里; 沿线丘谷相间, 地势起伏较大, 地形地貌复杂多变, 地层岩性软弱且分布不均, 地质构造发育, 岩体褶皱、破碎, 地表和地下水充沛, 构成了易产生滑坡病害的地质基础。沿线曾发生过多个自然滑坡、崩塌、坍塌现象, 典型的是 17 标 K110+790~K110+960 滑坡, 施工期间共发生了三次滑坡, 严重影响了整条线路的建设和正常通车。本文从区域地质构造、地层岩性和地下水活动等出发, 阐述了 K110 边坡的滑坡机理及其发展规律, 通过选取代表性的断面, 结合有限元分析与模拟技术对其加固前后的稳定性进行了分析, 对该类边坡的综合治理方案进行了系统研究。该研究不仅可对该边坡的治理提供较好的科学依据, 而且可对其它类似工程中的滑坡治理起到良好的借鉴意义。

川县柳城镇白围里亭南东面山坡上, 场区所处地貌总体上属剥蚀丘陵斜坡地貌, 地势较高, 地形起伏大, 山体植被发育, 山间沟谷发育, 场区东端及西端各发育一条冲沟, 可见终年流水的小溪。山顶高程约 162 m, 沟谷地面高程约 63 m, 长 170 m, 山体自然坡度上部约 18°~21°, 下部约 20°~23°, 近似馒头型, 坡向近北西 342°。斜坡与东江临近, 东江河水自北东流向南西。该边坡设计坡度为 1:1, 最大高度约 26 m, 三级坡 (见图 1)。

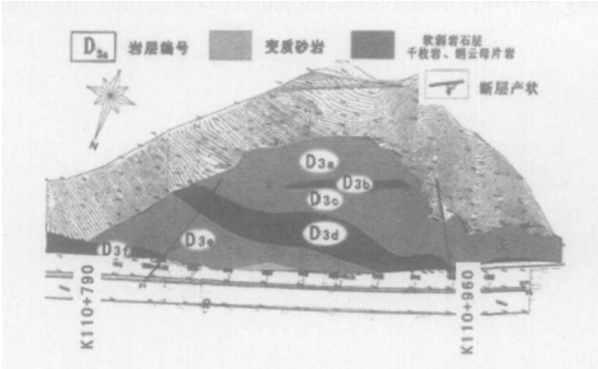


图 1 K110+790~K110+960 地质平面图
Fig. 1 The geology plan of slope K110+790~K110+960

1 工程概况

1.1 边坡概况

根据梅河高速公路第十七标段 K110+790~K110+960 左侧边坡滑坡工程地质补充勘察报告, 梅河高速公路 K110+790~K110+960 边坡位于龙

1.2 滑动情况

该边坡于 2004 年 11 月到 2005 年 6 月出现过 3 次较为严重的滑动。第一次是 2004 年 11 月 3 日在第二级边坡已完成锚杆框架梁的施工、第一级边坡

* 收稿日期: 2005-11-18
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59809008); 广东省自然科学基金重点资助项目 (013188)
作者简介: 张泽鹏 (1974 年生), 男, 工程师; 通讯联系人: 周翠英; E-mail: eeszy@zsu.edu.cn
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

刚开挖完毕时, 截水沟变形开裂并在 K110+825 ~ K110+870 范围内发生滑坡。设计变更为预应力锚索施工; 第二次是 2005 年 3 月底在第一次出险处理方案基本施工完毕后, 由于连续降雨, 约在 K110+835 ~ K110+885 范围内一级平台以上部分边坡产生滑动, 出口在二级边坡坡脚, 后缘约距顶 6m, 同时推动一级边坡滑动; 第三次是在 2005 年 6 月 13 日至 6 月 24 日, 经过一周以上连续暴雨的冲刷, 边坡形成整体下挫滑坡, 滑坡后缘约在截水沟附近, 滑动范围内的所有边坡加固工程全部破坏。

2 滑坡成因

为确定合理的滑坡加固设计方案, 本文从形成条件 (包括区域地质构造、地层岩性、地下水活动等) 和诱发因素两个方面分析滑坡成因^[1-2]。

2.1 形成条件

(1) 区域地质构造的影响。

场地南东外缘见有北东向紫金 ~ 博罗压扭性断裂构造带通过, 北西边缘则有北东向的龙川压扭转张扭性断层穿越, 区域构造从属于华南褶皱系, 其中龙川断裂对本场区影响最大。受断裂带影响, 场区内地层低序次构造痕迹明显, 区域构造应力具有不均匀性, 节理裂隙非常发育, 岩石显示较破碎。场区地层及岩性具有如下明显特征: ①岩体结构面层间结合力差, 摩擦系数小, 结构面间多被泥夹碎屑、泥膜或云母充填; ②软弱破碎带主要以碎屑、碎块、泥及形态各异的岩块组成, 岩块的抗压强度极低, 泡水易软化, 强风化岩手搓易成粉末状, 具滑感; ③地下水对软弱结构的软化、泥化作用甚为明显。

(2) 地层岩性的影响。

据区域地质资料和钻探揭露显示, 本区域地层分为第四系地层和晚古生代泥盆系基岩层。第四系地层主要有滑塌堆积层 (Q_e): 由褐黄色亚粘土和褐红色、棕褐色强风化状、弱风化状碎石基岩垮塌堆积形成, 主要分布于滑坡体内, 推测厚度约为 1.00 ~ 10.00 m; 坡残积土层 (Q_{d1+el}): 主要由亚粘土组成, 含较多 3 mm 左右的石英质砾, 土质不均匀, 主要分布于斜坡表层, 粘性一般, 呈硬可塑状, 厚度 1 ~ 3 m。泥盆系地层分布整个区域中, 岩性有变质砂岩、千枚岩、片岩; 变质砂岩具变晶结构和中厚层状构造, 千枚岩、片岩具鳞片变晶结构和千枚、片状构造, 由于构造作用影响, 岩芯较为破碎。

(3) 地下水活动的影响。

场区内地下水可分为赋存于第四系土层中的孔隙水和赋存于基岩裂隙中的裂隙水两种类型。第四系土层中的孔隙潜水赋存于坡残积层土层中, 由于坡积层和崩积层土性以粉粘粒为主, 局部砾石含量较多, 富水性较好, 为相对的滞水层。基岩裂隙水赋存于泥盆系变质砂岩及片岩、千枚岩中。变质砂岩在区内多为强风化岩, 多呈半岩半土状和碎块状、块状, 节理、裂隙发育, 透水性较好, 局部可能有一定的涌水量, 但涌水量受裂隙的影响, 存在明显的不均匀性。而场区内片岩和千枚岩系软质岩石, 泥质含量较高, 泡水易软化, 在水流作用下易产生崩解, 阻水性较强, 当大气降水时, 地下水易通过变质砂岩中的节理裂隙下渗, 并残存于片岩和板岩之中, 并使其软化, 从而使其强度降低^[3]。

2.2 诱发因素

边坡开挖后, 应力调整, 坡体松弛。在突发性大暴雨的持续作用下, 孔隙水压力增大, 坡脚排水不畅, 地下水位抬高, 坡脚千枚岩层饱水浸泡软化, 随着水位的变化, 潜水面明显改变斜 (边) 坡土体的应力状态, 土体结构面的抗剪强度显著降低, 土强度不足, 坡体饱水自重急剧增加, 而坡脚加固措施尚未施工完成发生效应, 从而造成坡体沿相对软弱面或结构面 (层面) 产生滑动位移的顺层滑坡^[4]。

3 边坡病害分区及稳定性分析

3.1 边坡病害分区

该边坡滑坡范围较大, 根据其滑动后的地貌景观和地表裂缝的展布, 可划分为 4 个边坡病害区, 如图 2 所示。

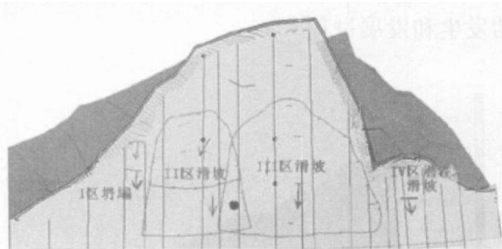


图 2 K110+778 ~ K110+960 边坡病害分区图

Fig.2 The sectional plan of slope K110+778 ~ K110+960

(1) I 区边坡坍塌。

里程 K110+778 ~ K110+835 范围, 三级边坡已产生局部坍塌, 坍塌范围未超出三级边坡的高度。

(2) II 区边坡滑坡。

里程 K110+835 ~ K110+875 范围, 已发生边

坡滑动, 滑坡出口有两级, 滑体最大厚度约 8 m, 平均厚度约 5 m, 体积约 $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。主滑带依附于千枚岩的层面或层间错动带形成, 滑动带揉皱、挤压破碎严重、呈鳞片状、云母含量高, 具受水后强度极低的特性。该滑坡系沿层间错动带形成的顺层滑动。

(3) III区边坡滑坡。

里程 K110+875~K110+955 范围, 已发生边坡整体滑动, 滑坡出口在 I 级边坡坡脚处, 自深部反翘剪出破坏, I 级平台表面反翘, 滑坡整体下错约 4.0 m, 整体向前移动约 4.5 m。滑动体平均厚度约 12.5 m, 体积约 $7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该滑动带有一定厚度, 且埋深较大, 下滑呈整体下错和前缘挤压剪出的形式。

(4) IV区潜在滑动。

里程 K110+955~K110+960 范围, 已发生滑坡, 后缘见有深 1.2 m、宽约 0.2 m 的裂缝, 下错约 0.3 m, 前缘坡脚碎落台已反翘, 存在整体滑动变形, 推测滑动带沿 $20^\circ \sim 23^\circ$ 的结构面下滑。由于滑坡出口距路面很近, 可能发展到路面范围内, 此段滑坡的危害性更大。滑坡的后缘裂缝和侧缘裂缝已贯通, 滑动面已形成, 前缘出口反翘明显, 滑坡处于大滑动前的临界状态, 有随时滑下的可能。

3.2 边坡稳定分析

考虑到 III 区边坡已发生了整体滑动, 危害性很大, 本文特别针对 III 区边坡中的 K110+905 断面采用非线性有限元进行了稳定性计算。针对边坡的非线性有限元方法有很多^[5], 考虑到边坡失稳破坏时, 发生了相当大的位移或变形, 本文选用大变形几何非线性分析方法来模拟和分析边坡失稳破坏的发生和发展过程^[8]。

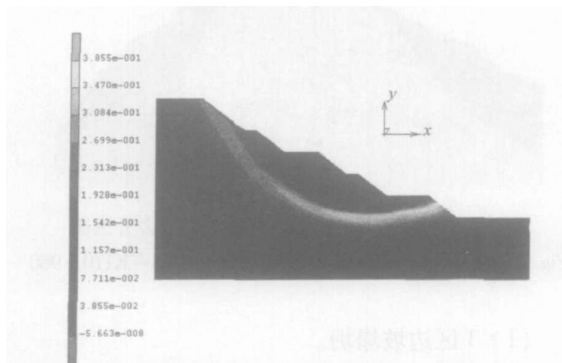


图 3 K110+905 断面等效塑性剪应变分布图

Fig. 3 Equivalent elastic strain of the section

K110+905 断面水平距离为 145.9 m, 垂直距离 43.4 m (图 2)。边界条件为左右两侧水平约

束, 下部 X、Y 方向约束。根据梅河高速公路第十七标段 K110+790~K110+960 左侧边坡滑坡工程地质补充勘察报告, 计算参数选取如下: 坡残积亚粘土: $c=10.0 \text{ kPa}$ $\varphi=9^\circ$, 饱和容重为 19 kN/m^3 , 变形模量 $E=20\,000 \text{ kPa}$ 泊松比 $\mu=0.3$ 强风化变质砂岩: $c=10.0 \text{ kPa}$ $\varphi=9^\circ$, 饱和容重为 22.2 kN/m^3 , 变形模量 $E=230\,000 \text{ kPa}$ 泊松比 $\mu=0.3$

图 3 是 K110+905 断面等效塑性应变分布图, 从图中可看出塑性区自坡角向上贯通至坡顶, 边坡发生破坏, 其安全系数 0.83 等效塑性应变数值较大。

4 边坡综合治理及稳定分析

4.1 边坡综合治理

4.1.1 坡形坡率设计 根据梅(州)河(源)华江至蓝口段第十七合同段治理施工图设计总说明, 本边坡仍设计为台阶式边坡, 台阶高根据地层强度特征及满足地层强度条件, 取 8.0 m; 总边坡角取 25° 确定各平台宽, 碎落台取 10.0 m, 一级取 15.0 m、二级 4.0 m、三级取 12.0 m、四级, 五级取 4.0 m。部体边坡坡度、分级平台率以平台宽调整, 从而作为上级加固防护工程的基础起到分散沿坡面的应力传递的作用。坡脚岩性软弱, 存在坡脚挤压变形的情况, 取其坡率为 1: 1.25。

4.1.2 边坡加固类型选择 根据边坡工程地质条件, 首先, 确定坡体结构及不同的边坡部分变形破坏模式, 在此基础上, 进行稳定性分析与计算, 根据计算结果确定边坡加固工程规模及类型, 针对不同的边坡变形破坏模式, 分别采用不同的加固工程措施。

(1) 针对坡脚应力集中的加固。

有效消除坡脚应力集中, 确保边坡稳定, 是本工点成败的关键^[5]。过去一般多采用挡墙、加厚护面墙等, 而本路段地下水发育, 不宜采用挡土又挡水的工程措施; 故宜根据千枚岩干燥时强度较好的特性采用钢花管注浆技术, 既能防止坡脚挤压破坏又能起到加固地基的作用。在本设计中, 坡脚第一级边坡加固, 采用钢锚管框架; 一级平台和碎落台采用钢花管注浆加固, 使一级平台下的地层固结。

(2) 针对边坡失稳的加固。

边坡存在倾向临空的软弱结构面, 其总倾角为 $20^\circ \sim 23^\circ$, c 约为 $8 \sim 10 \text{ kPa}$ φ 约为 $7^\circ \sim 9^\circ$, 需进行有效加固; 稳定的持力地层应为与该强度指标对应的地层, 否则将由于无根基导致加固失败。加固

将以预应力锚索框架为主，配合坡脚钢锚管框架。坡脚以钢花管注浆为重点配合排除地下水。

4.2 边坡加固后稳定分析

对 K110+905断面我们采用预应力锚索方案，共布置 13根 520 kN 级锚索，如图 4所示。

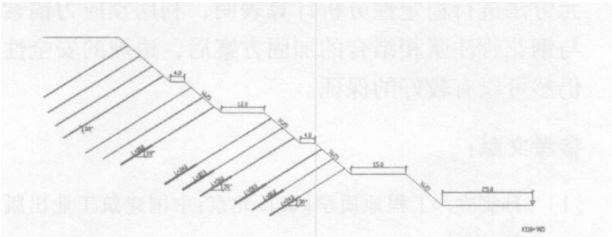


图 4 预应力锚索布置图

Fig 4 The collocation of prestressed anchor cables

预应力锚索通过锚固段作用在滑坡体的作用力 P 可分解为平行滑动面并与滑动方向相反的抗滑分力 P_1 和垂直于滑动面的正压力 P_2 ，如图 5所示。因此，预应力锚索对滑坡体所提供的抗滑力 P 为抗滑分力 P_1 与正压力 P_2 在滑动面产生的摩擦力 $(P_2 \tan \varphi)$ 之和^[7]，即：

$$P = P_1 + P_2 \tan \varphi =$$

$$P_1 [\sin(\alpha + \beta) \tan \varphi + \cos(\alpha + \beta)]$$

式中： P_1 为锚索预应力设计值， α 为滑动面的倾角， β 为锚索与水平面的夹角即锚固角， φ 为滑动面的内摩擦角。

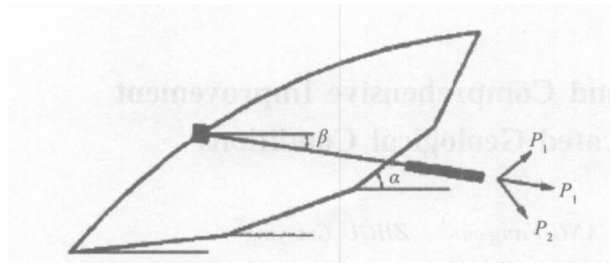


图 5 预应力锚索对滑坡体作用力分解图(引自文献^[7])

Fig 5 Disassembly of the stress of prestressed anchor cable (From Ref ^[7])

(1) 不考虑降水影响的边坡稳定性。

此断面加固后的稳定性分析计算参数和边界条件与加固前相同，图 6是 K110+905断面加固后的等效应变分布图。对比加固前后的等效塑性应变分布图，加固后不仅最大等效塑性应变数值减少，且等效塑性应变区仅出现在锚索加固区的后边缘，潜在滑动面向后移动，使边坡安全性有了很大提高。

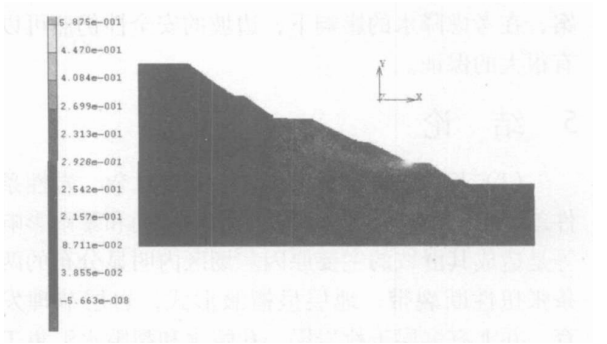


图 6 加固后 K110+905断面等效塑性剪应变分布图

Fig. 6 Equivalent elastic strain of reinforced section

(2) 考虑降水影响的边坡稳定性。

19 kN m³，变形模量 $E = 20\,000$ kPa 泊松比 $\mu = 0.3$ 强风化变质砂岩： $c = 8.0$ kPa $\varphi = 7^\circ$ ，饱和容重为 22.2 kN m³，变形模量 $E = 230\,000$ kPa 泊松比 $\mu = 0.3$ 同时加固方案在预应力锚索方案的基础上考虑钢花管注浆，其布置见图 7。

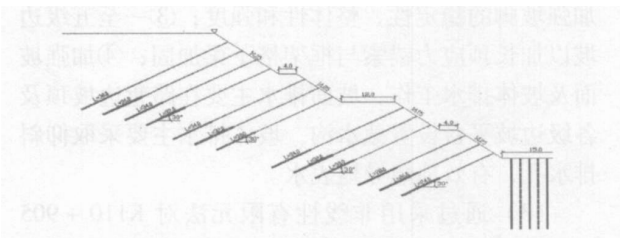


图 7 注浆钢花管布置图

Fig. 7 The collocation of concrete - steel tubes

对 K110+905 断面再次利用大变形有限元进行稳定性分析，得到如图 8所示的等效应变分布图。从图中可以看出，潜在滑动面继续向后移动，说明利用预应力锚索与钢花管注浆相结合的加固方

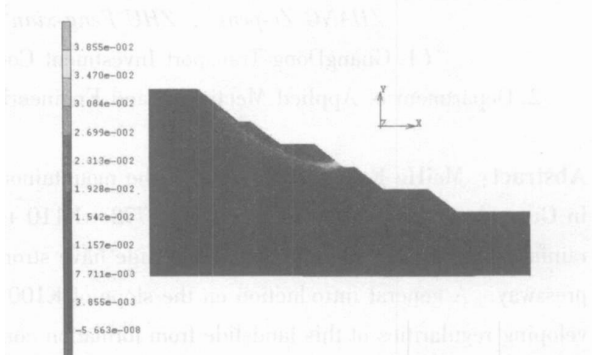


图 8 考虑降水影响 K110+905断面等效塑性剪应变分布图

Fig. 8 Equivalent elastic strain of saturated section

案, 在考虑降水的影响下, 边坡的安全性仍然可以有很大的保证。

5 结 论

(1) K110 边坡的地质构造极为复杂、岩性条件差、水文条件非常不利及受施工扰动和暴雨影响等是造成其滑坡的主要原因。场区内明显分布的两条张扭性断裂带, 地层呈褶皱形式, 岩层节理发育, 并夹有多层千枚岩层, 孔隙水和裂隙水汇集于千枚岩层上下, 在突发性大暴雨的持续作用下, 坡脚千枚岩层饱水浸泡软化, 岩体结构面的抗剪强度显著降低, 坡体饱水自重急剧增加, 而坡脚加固措施仍未施工完成发生效应, 从而造成坡体沿相对软弱面或结构面(层面)产生滑动位移的顺层滑坡。

(2) 针对该边坡的复杂性, 分析了滑坡发生机理, 提出了复杂地质条件下高边坡治理的方案: ①彻底清挖滑塌物, 采取注浆技术改良土体结构; ②采取有效的工程措施(钢花管、钢锚管)加强坡脚的稳定性、整体性和强度; ③一至五级边坡以加长预应力锚索与框架格子梁加固; ④加强坡面及坡体排水工作, 坡面排水主要在路堑边坡顶及各级边坡平台设置截水沟, 坡体排水主要采取仰斜排水孔, 有效地疏导地表水。

(3) 通过采用非线性有限元法对 K110+905 断面加固前后的稳定性分析和比较, 可以看出, 加固后的最大等效塑性应变数值减少了, 且加固后的

等效塑性应变区出现在锚索加固区的后边缘, 潜在滑动面向后移动了, 说明采取预应力锚索方案进行处理后边坡安全性有了很大提高。另外, 即使在考虑降水影响后, 孔隙水压力增加, 土体强度改变, 软弱层软化, 有效抗剪强度降低, 通过大变形有限元方法进行稳定性分析计算表明, 利用预应力锚索与钢花管注浆相结合的加固方案后, 边坡的安全性仍然可以有较好的保证。

参考文献:

- [1] 孙宪立. 工程地质学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [2] 武汉地质学院, 成都地质学院, 南京大学地质系, 等. 构造地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1979.
- [3] 崔政权, 李宁. 边坡工程—理论与实践最新发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [4] 汪康民, 彭胤宗. 岩土工程[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 2001.
- [5] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346.
- [6] 周翠英, 刘祚秋, 董立国. 边坡失稳破坏过程的大变形有限元分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 644-647, 652.
- [7] 刘祚秋, 周翠英, 尚伟. 东深供水改造工程 BIII2 边坡预应力锚索加固优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 1020-1024.

Research on Reinforcement Design and Comprehensive Improvement for High Slopes Under Complicated Geological Conditions

ZHANG Zepeng¹, ZHU Feng-xian², HUANG Fang-jun¹, ZHOU Cuiying²

(1. Guangdong Transport Investment Company, Guangdong Xingning 514500 China

2. Department of Applied Mechanics and Engineering Sun Yat sen University, Guangzhou 510275 China)

Abstract MeHe Expressway is one of the mountainous area expressways under complicated geological conditions in Guangdong Province, China. K100+778~K110+960 is a typical one with three times sliding in the period of rain fall seasons. The sliding of this landslide have strong affections for the construction and management of this expressway. A general introduction on the slope of K100+778~K110+960 then analyses the mechanism and developing regularities of this landslide from formation conditions and induced factors are given. According to taking a certain cross section as an example, the slope stability before and after reinforcement is compared with the FEM simulation, then the reinforcement method for this kind of landslide with complex conditions is discussed; and also presents a useful reference for the similar types of landslides in the major project is presented.

Key words High slope; complicated geological conditions; reinforcement design; comprehensive Improvement; FEM simulation