

梅大高速公路路基边坡失稳条件与滑坡机理初探

岳中琦

Study on the instability condition and landslide mechanism of subgrade slope in Mei-Da Expressway

YUE Zhongqi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202408001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于Mein-Larson入渗模型的凹形边坡稳定性分析

Stability analysis of concave slope based on Mein-Larson infiltration model

胡庆, 吴益平, 苗发盛, 张龙飞, 李麟玮 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 26-35

降雨矿震叠加作用下抚顺西露天矿边坡稳定性分析

Analysis on the slope stability of Fushun West Open-pit Mine under superimposed action of rainfall, mine and earthquake

刘向峰, 郭子钰, 王来贵, 高晗 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 40-46

模糊数学评判和数值模拟相结合的土质边坡稳定性综合评价

Integrated assessment of soil cutting slope stability using fuzzy mathematics and numerical simulation

王崇敬, 张龙, 刘国伟 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(6): 69-76

建房切坡条件下边坡稳定性分析

Analysis of slope stability under the condition of cutting for house-building

杜显祥, 房浩, 曹佳文 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 40-47

基于不同方法的江苏镇江地区下蜀土边坡稳定性分析与评价

Evaluation of Xiashu loess slope stability in Zhenjiang area using different methods

瞿婧晶, 陆燕, 吴曙亮, 刘健, 苟富刚 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 35-42

露天矿边坡稳定性的层次分析-模糊综合评价耦合分析

Open-pit mine slopes stability analysis based on analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation model

李志国, 徐涛, 刘永杰, 赵立春, 徐勇超, 杨天鸿, 郑小斌 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 116-123



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202408001

岳中琦. 梅大高速公路路基边坡失稳条件与滑坡机理初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(4): 1-12.

YUE Zhongqi. Study on the instability condition and landslide mechanism of subgrade slope in Mei-Da Expressway[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(4): 1-12.

梅大高速公路路基边坡失稳条件与滑坡机理初探

岳中琦^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)理学院, 广东 深圳 518055;

2. 香港大学土木工程系, 香港 999077)

摘要: 文章对广东梅大(梅州—大埔)高速公路路基边坡失稳和滑坡的成因机制进行了初步研究和分析, 基于香港路基边坡失稳滑坡调查研究资料、成果和现场勘察获得了失稳路基边坡附近完全风化花岗岩土的颗粒分布和液限塑限含水率, 定量计算、分析了该段路基边坡稳定性。通过 Google 地形图分析了失稳路基边坡附近的几个可能汇水区域和汇水量, 对该路基边坡失稳与滑流的成因机制进行了分析。研究认为山坡公路建设需要开挖削坡和填土, 可完全改变自然山坡汇水流域; 公路可成为瞬态河流, 将大量雨水跨流域调流到其他公路边坡或山坡, 导致边坡失稳和滑坡, 形成公路坍塌丢失。这种路基边坡失稳模式亟待深入研究并加强防范。

关键词: 边坡稳定性; 滑坡机理; 山区公路; 降雨; 汇水盆地; 跨流域调水

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)04-0001-12

Study on the instability condition and landslide mechanism of subgrade slope in Mei-Da Expressway

YUE Zhongqi^{1,2}

(1. School of Science, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen, Guangdong 518055, China; 2. Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: This paper presents a preliminary investigation of the instability and landslide of a road subgrade slope that occurred on May 1, 2024 along Mei-Da Expressway. The investigation method is on the basis of past investigation results and findings about instability and landslide of road subgrade slopes in Hong Kong. The Mei-Da Expressway subgrade was constructed by cutting and filling on mountainous slopes. The landslide occurred at a fill slope along a gully. The fill soil was excavated from local soil of completely decomposed granite (CDG). The paper tests the particle size distribution and liquid and plastic limits of the three CDG soil samples that were excavated from adjacent natural slopes. It then examines the stability of the fill slope with a simplified geological slope model. It further investigates the catchments before and after the road construction. It then presents a possible mechanism for the slope instability and landslide. The field observations by others can confirm this mechanism. The cutting and filling of the hillside slopes significantly changed the runoff paths of the three natural catchments above the road. The road can intercept the runoff along the three gullies and direct all the runoff into the fill slope. The large volume of rainfall water can erode and liquefy the fills, which can cause the instability and landslide of the road subgrade slope. There is an urgent

收稿日期: 2024-08-01; 修订日期: 2024-08-06

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372336)

作者简介: 岳中琦(1962—), 男, 安徽宣城人, 教授, 主要从事岩土工程、地质地震灾害防治方面的研究。E-mail: Yueqzq@hku.hk

need to further investigate this mode of road subgrade instability and landslide since it is not uncommon.

Keywords: slope stability; landslide mechanism; mountainous road; rainfall; catchment basin; water transfer across basins

0 引言

2024 年 5 月 1 日夜间 2 点, 广东梅大(梅州—大埔)高速公路路基边坡失稳, 导致坍塌和滑坡灾害, 见图 1(a)。据梅州市 5 月 2 日下午新闻发布会通报, 高速公路路面塌方造成 48 人死亡, 另有 3 人 DNA 待进一步比对确认, 30 人受伤在院救治。

路基边坡失稳导致路面坍塌和滑坡时有发生^[1-3]。1995 年 8 月 13 日香港南朗山道发生大型路基边坡失稳, 导致了路面坍塌和滑坡灾害事件^[4-8], 当时南朗山道上一辆正在行驶的小汽车司机发现前方道路缺失, 立即在塌方道路边停车, 见图 1(b)。2000 年 8 月 25 日香港石澳道发生大型路基边坡失稳, 导致了路面塌方和滑坡灾害事件, 一辆小汽车掉入塌方坑, 见图 1(c)。从图 1 中可观察到, 梅大高速坍塌与香港过去沿公路发生的坍

塌事件惊人相似, 应具有共同因素和成因机制。

岳中琦等^[9-10]给出了人造边坡失稳滑坡的根本因素, 这个根本因素就是边坡工程安全设计理论存在缺陷。产生这个缺陷的自然因素是土体遇到水会损失抗剪抗拉强度, 坡面发生侵蚀、塑性变形和液性流动, 从而演变成滑坡、泥土流或泥石流。在岳中琦等^[9-10]的基础上, 本文再研究和分析上述公路路基边坡失稳和滑坡的一种共同成因机制。这个机制就是山坡公路能够极大地改变原来山坡自然径流路线, 进行跨流域调水, 导致公路成为临时河流, 进而造成公路路基边坡失稳、导致大型滑坡。本文将通过以下 5 个方面来诊断该路基边坡失稳因素、滑坡过程和成因机制: 路基边坡土的物理力学性质、路基边坡的稳定性分析、路基边坡土的滑坡流动角和液化含水量分析、路基边坡汇水区域和汇水水量分析、公路跨流域调水的其他证据。



图 1 路基边坡失稳滑坡的 3 个实例

Fig. 1 Three cases of instability and landslides on road subgrade slopes

1 路基边坡土的物理力学性质

1.1 颗粒分布

梅大高速公路的失稳路基与边坡是开挖和填埋自然山坡岩土体形成的。该处基岩是早白垩纪中粒斑状黑云母二长花岗岩。该花岗岩经过常年的化学和物理风化作用, 在山坡表层形成了厚度不等的完全风化花岗岩土体(图 2)。图 2 是失稳路基边坡附近山坡的完全风化花岗岩土体 3 个取样点的照片, 具体地点可参见图 3。1#、2#、3#采样点的海拔分别是 127, 115, 95 m, GPS 分别是 24°29.285 0'N, 116°40.534 0'E; 24°29.250 0'N, 116°40.539 0'E; 24°29.090 0'N, 116°40.478 0'E。该组照片揭示了该完全风化花岗岩土体主要由粒径在 1~10 mm 的白色半透明石英颗粒和细颗粒土体组成。取

样点 1#、2#有较多的细颗粒土体, 取样点 3#有很少的细颗粒土体。3 个取样点都处于人工开挖的陡倾到直立斜坡, 取样点 3#最为高陡且在鸭塘附近。

在香港大学土木工程系土工实验室, 利用新创建的完全水洗筛分方法^[11], 将每个土样的颗粒按照颗粒大小完全筛选和分离出来, 获得了如图 4 所示的 19 组按照颗粒大小分布的颗粒物质。再根据每组颗粒物质的质量和土体总干质量, 计算获得了每个土样的颗粒大小分布曲线图(图 5)。图 6—7 分别给出了 2#土样中的 5 组砾粒、8 组砂粒的立体显微镜图像。图 8 分别给出了 2#土样中的 3 组粉粒、3 组黏粒的扫描电镜图像。这些细观立体图像直接揭示了完全风化花岗岩土的砾粒、砂粒、粉粒、粗黏粒和中黏粒是没有任何磨圆的棱角状, 长短轴直径相差不大的立体颗粒, 这些颗粒

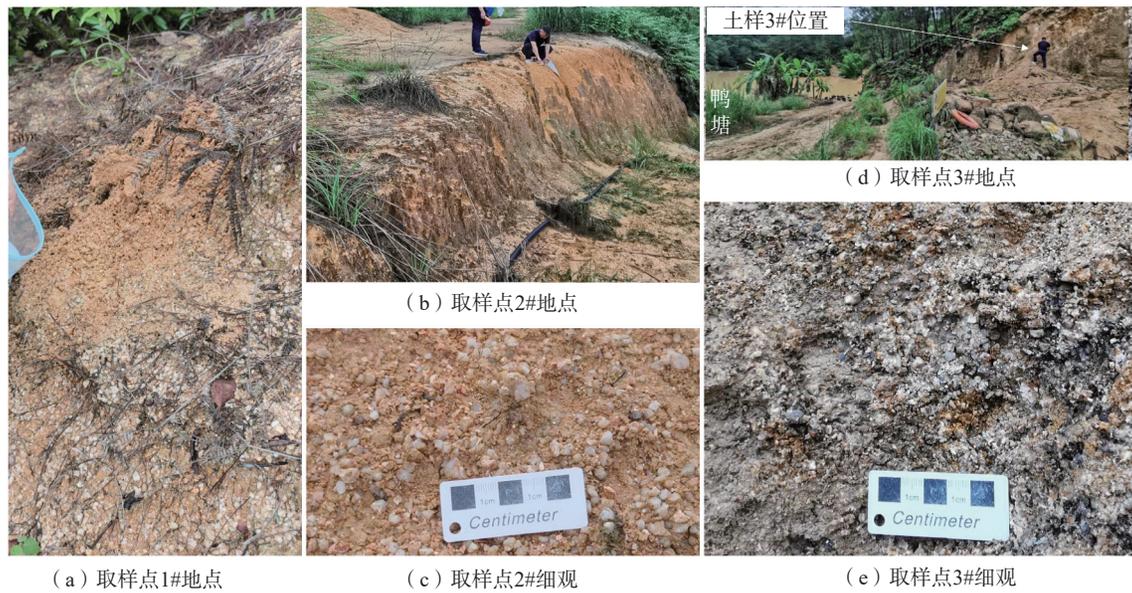


图 2 失稳路基边坡附近山坡完全风化花岗岩土体 3 个取样点的现场照片

Fig. 2 Site photographs illustrating the CDG soil samples at three natural slopes adjacent to the road subgrade slope failure

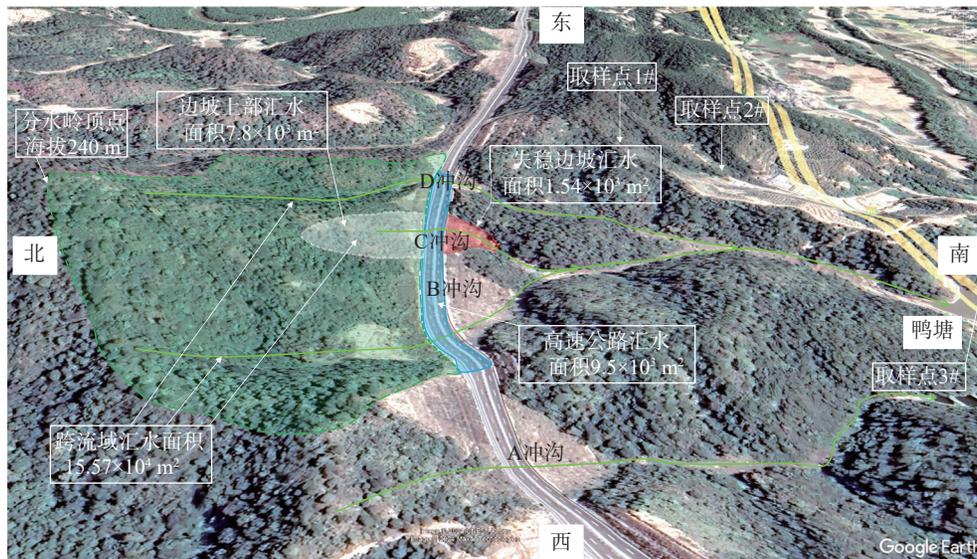


图 3 梅大高速公路路基边坡失稳滑坡前的自然冲沟和可能公路跨流域调水汇水盆地

Fig. 3 Natural gullies and catchments and cut or fill slopes above and below Mei-Da Expressway before the landslide

之间的摩擦系数很大。1#、3#土样有相同的颗粒形态结果。

1.2 塑限液限含水率

在实验室，根据相关规范进一步测量了这 3 个土样粒径小于 0.425 mm 试样的塑限(w_p)和液限(w_L)含水率。土样 1#、2#、3#的塑限含水率分别是 30.74%、35.76%、24.36%，液限含水率分别是 84.59%、103.74%、41.32%。图 9 给出了 3 个完全风化花岗岩土样的塑性指数(I_p)与液限对应关系。从图 9 可见，土样 1#、2#、3#(粒径小于 0.425 mm)都属于黏土类土。土样 2#是极

高液限黏土，土样 1#是很高液限黏土，土样 3#是中液限黏土。从而，该类土体(原状土和压实土)的有效内摩擦角和有效黏聚力应该都不等于 0。

1.3 土体力学性质

根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)，土样 1#、3#均为砂类土，土类名称分别是黏土质砂、含细粒土砂。土样 2#为细粒土，土类名称是高液限黏土。

根据香港完全风化花岗岩土的大量测量总结^[12]，原状完全风化花岗岩土的总体容重是 16 ~ 21 kN/m³，干容重 14 ~ 19 kN/m³，有效内摩擦角 35° ~ 44°，有效黏聚力



图 4 2#完全风化花岗岩土样从砾粒到黏粒的 19 组颗粒物

Fig. 4 The 19 sub-size groups of CDG particles from gravel to fine clay

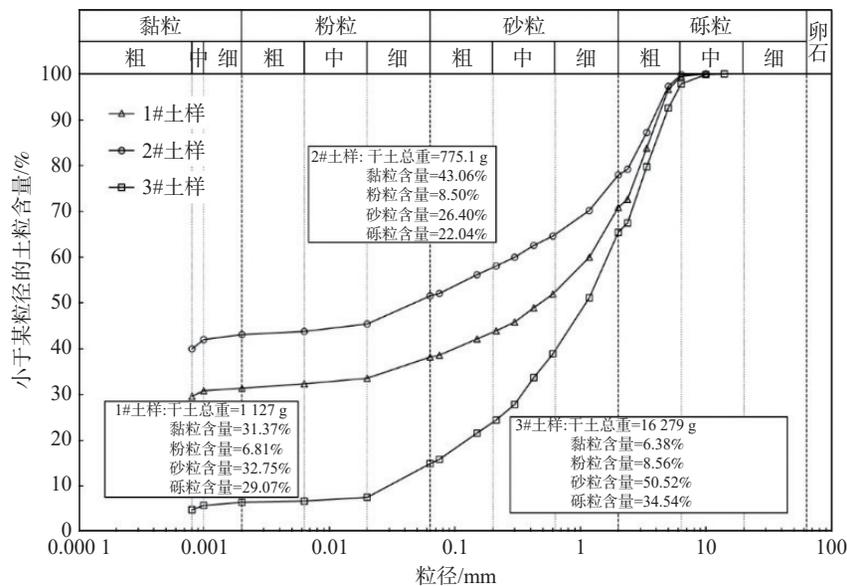


图 5 失稳路基边坡附近山坡的完全风化花岗岩土的颗粒大小质量分布曲线

Fig. 5 The complete mass-based particle size distributions of three CDG soil samples adjacent to the failed subgrade slope

5 ~ 15 kPa, 渗透系数 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ m/s。经过现场压实的完全风化花岗岩填土的总体容重是 19 ~ 21 kN/m³, 干容

重 15 ~ 19 kN/m³, 有效内摩擦角 38° ~ 42°, 有效黏聚力 0 ~ 5 kPa, 渗透系数 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ m/s。



图 6 2#土样 5 组砾粒的立体显微镜图像

Fig. 6 The stereo-microscopic images of five sub-size gravel groups of sample 2# CDG particles

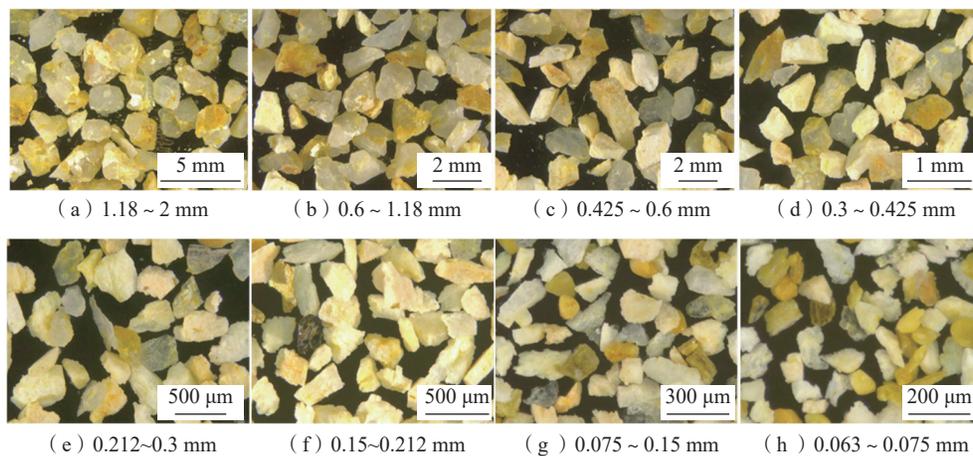


图 7 2#土样 8 组砂粒的立体显微镜图像

Fig. 7 The stereo-microscopic images of eight sub-size sand groups of sample 2# CDG particles

2 路基边坡的稳定性分析

根据相关报道、现场照片和 Google 地形图,图 10 给出了一幅简化的梅大高速公路路基边坡地质力学模型剖面。(1)路基填土边坡坡度为 30° 。车辆荷载在边坡稳定性分析中等效为车道上均匀分布荷载。根据《公路工程技术标准》(JTG B01—2014),高速公路汽车荷载为公路-I级,计算四车道公路 I 级荷载为 10 kPa。(2)考虑 2 种地下水情况:一种是地下水很深,另一种是地下水很浅。(3)根据上述完全风化花岗岩土的试验结果和香港统计数据,采用了 4 组有效抗剪强度情况,它们的有效黏聚力和有效内摩擦角分别是(5 kPa, 35°)(10 kPa, 35°)(5 kPa, 40°)(10 kPa, 40°)。原状完全风化花岗岩土的总体容重均假设为 20 kN/m^3 。(4)在图 10

中给出了 13 条潜在滑动面。

根据岳中琦等^[13]的方法,图 11 按照潜在滑动面距离边坡表面的深度,给出了这 13 条潜在滑动面的安全系数分布。安全系数计算方法是基于极限平衡原理的 Spencer 有限条分法。从图 11 可以观察到,该模型边坡的整体安全系数在浅层较大,中部最低,深部增大。它们随着潜在滑动面深度增大,从浅层的较大值逐渐降低到中部的最小值区间,再逐渐升高。最小安全系数(最不稳定)位置在潜在滑移面 6(深度 6.6 m)到 8(深度 9.7 m)之间。这个最不稳定潜在滑动区间与图 12 揭示的公路路基失稳滑坡范围的对应程度相当高。

图 11(a)给出了在缺少地下水影响下,该边坡 13 条潜在滑动面的安全系数均大于 1.8,属于稳定程度相当高的情况。地下水对该边坡的稳定性有极大的降低影

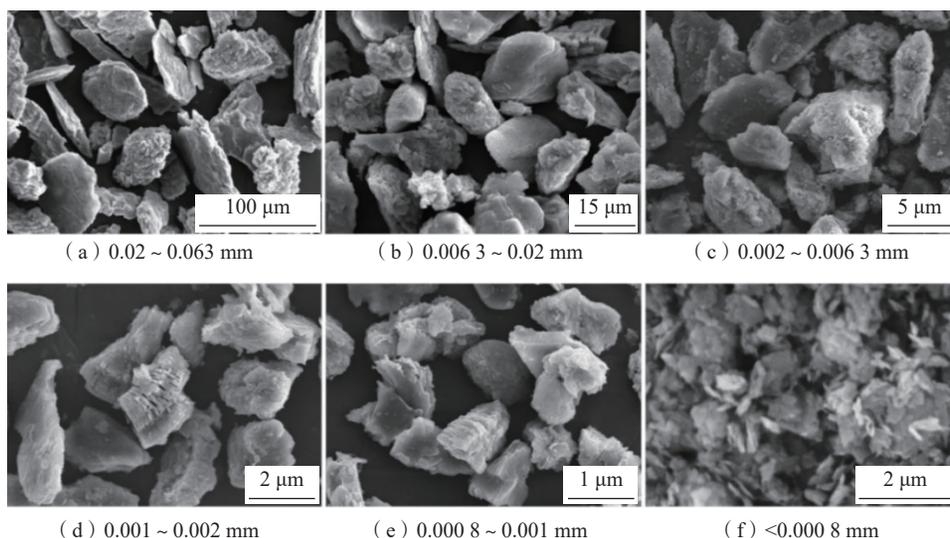


图 8 2#土样的粉粒、黏粒的扫描电镜图像

Fig. 8 The SEM images of three sub-size silt and three sub-size clay groups of sample 2# CDG particles

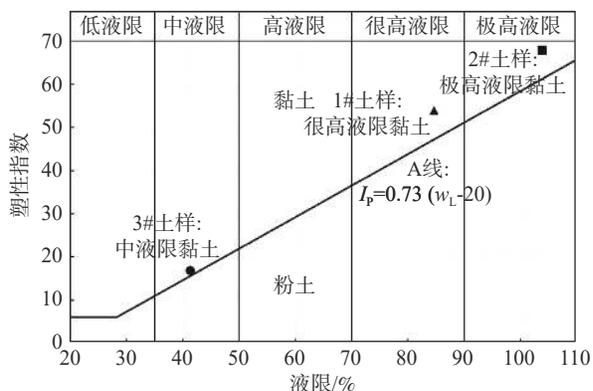


图 9 3个完全风化花岗岩土样的塑限指数与液限对应关系

Fig. 9 The variations of plasticity index with liquid limit for three CDG samples

响。图 11(b)给出了在极高地下水位情况下,该边坡 13 条潜在滑动面的安全系数均大幅下降,潜在滑动面 6 和 8 的最小安全系数分别是 1.024 和 1.058,接近整体失

稳状态。特别的,表层潜在滑动面 13 的最小安全系数从 1.62 降低到 0.95,见图 11(a)(b)。这表明浅层边坡土体容易被渗透雨水侵蚀形成滑坡,向边坡下方流动。

3 路基边坡土的滑坡流动角和液化含水量分析

滑坡流动角 (travel angle) 是滑坡顶端到滑坡体前缘连线与水平线之间的夹角,是表示滑坡体流动性的重要指标^[14]。滑坡流动角越小,表明滑坡土体的流动能力越强。降雨与地下水造成的滑坡土体,其流动能力越强,表面所含水体越多。图 12 是梅大高速公路路基边坡失稳塌陷滑坡后的现场照片。滑坡顶端海拔 121 m,滑坡体流动前缘海拔 98 m,滑动水平距离 136m。这获得了最大的滑坡流动角为 9.6°。

据现场观察报道,该滑坡体上所有水都流到该山坡下方的鸭塘(图 13)。鸭塘海拔 79 m,与该公路水平距离大约 538 m,因此可获得最小滑坡流动角为 4.5°。

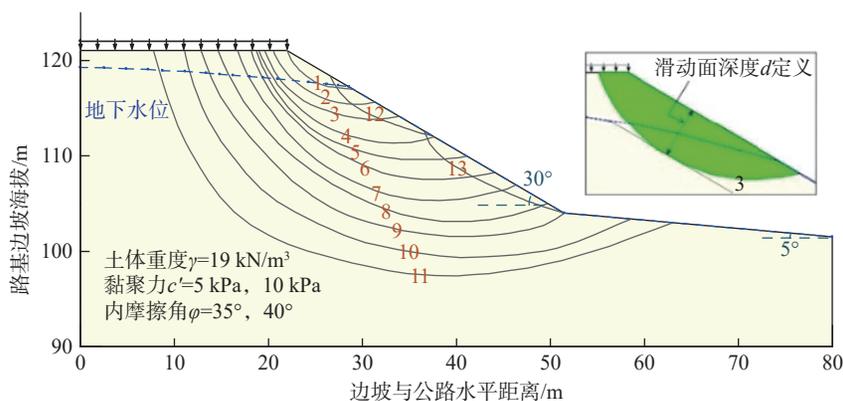


图 10 路基边坡地质力学的简化模型剖面

Fig. 10 Simplified geological model for the road subgrade slope

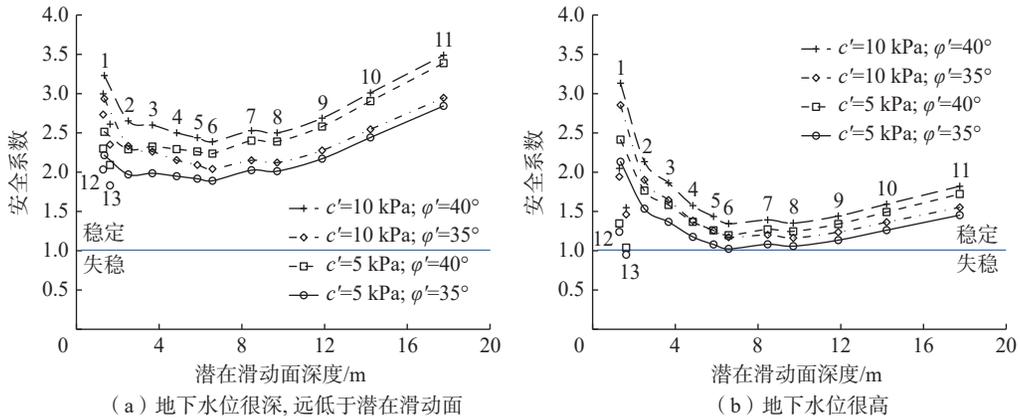


图 11 路基边坡稳定性安全系数分布参数分析结果

Fig. 11 Variations of the factor of safety value with the slip depth for 13 potential slips of the road subgrade slope



图 12 路基边坡失稳滑坡后现场照片和沿 C 冲沟最小滑移距离和高程

Fig. 12 Site photograph illustrating Mei-Da Expressway landslide and the maximum travel angle along C gully

图 14 给出了香港特区政府土力工程处调查和统计的 168 个香港人造边坡滑坡案例的最小滑坡流动

角与滑坡体积的关系^[15]。共计有 6 类滑坡：开挖削坡边坡的滑移失稳、冲刷失稳，填土边坡的滑移失稳、冲刷失稳、液化失稳，挡土墙失稳。从图 14 可观察到：(1)滑坡体积越大，滑坡流动角越小；(2)重力滑移失稳的流动角最大，水体冲刷失稳的流动角较小，土体液化失稳的流动角最小；(3)重力滑移失稳的流动角一般都大于松散砂土的休止角(30°)；(4)水体冲刷和土体液化失稳的流动角一般都小于松散砂土的休止角(30°)，大于饱水松散土休止角(15°)。



图 13 路基边坡失稳后滑坡沿 C 冲沟最大滑移距离和高程

Fig. 13 The Google map for the road subgrade slope and the minimum travel angle along C gully

据现场报道，梅大高速公路路基边坡失稳滑坡的路面长约 17.9 m，面积约 184.3 m²。假设深度 10 m，那么滑坡体积为 1 843 m³。因此，根据该滑坡体积，可把该滑坡的最大、最小流动角(9.6°、4.5°)画到图 14 上。从中可以观察到，该滑坡的流动角远远小于所有 168 个滑坡的流动角。参考香港降雨滑坡的雨量，可以论断：造成梅大高速公路路基边坡失稳的滑坡土体含水量远大于香港降雨滑坡土体含水量。

再考虑到该失稳边坡附近的完全风化花岗岩土的

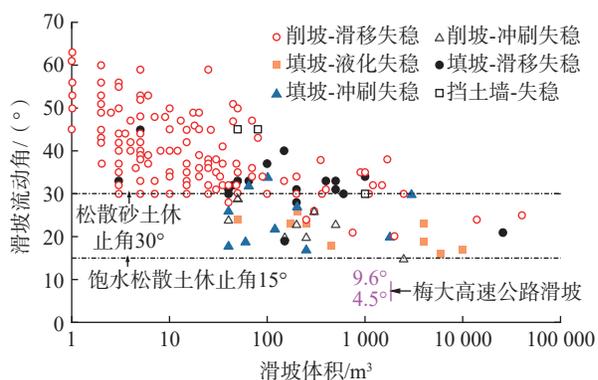


图 14 边坡失稳后滑坡最小滑坡流动角与滑坡体积的香港统计数据关系

Fig. 14 Variations of travel angle with landslide volume from statistic data of Hong Kong

液限质量含水率在 41.32% ~ 103.74%。假设边坡土体的干容重为 18 kN/m³, 那么导致 1 843 m³ 滑坡土体达到液化所需的水量体积是 1 370 ~ 3 441 m³。平均液限质量含水率为 76.55%, 那么所需液化水量为 2 539 m³。因此, 所需起始液化边坡滑坡土体的水量为 1 370 ~ 3 441 m³,

平均水量 2 539 m³。

4 路基边坡汇水区域和汇水水量分析

根据上述分析, 需要数千立方米以上的水才可以将路基边坡失稳滑坡液化流动到冲沟远处。据报道, 梅州在 5 月 1 日之前一直下雨, 因此, 地面植物树木等截留水量、地表低洼储存水量和渗透到山坡土体水量都应该达到饱和, 雨水主要以地表径流的形式从高处流向低处到冲沟。本文作者缺乏当地具体的降雨量数据, 仅根据香港相关降雨滑坡数据进行分析。图 3 给出了梅大高速公路失稳滑坡路基边坡周边的 4 条自然冲沟(A、B、C、D 沟)和可能汇水盆地。高速公路是在山坡上开挖削坡和填土建造的。A、C、D 冲沟分别在公路上方和下方有削坡和填土边坡, B 冲沟仅在公路下方有填土边坡。其中, C 冲沟的填土边坡就是此失稳路基边坡。B、C 冲沟很快汇入一条冲沟, 再与 D 冲沟汇合流入鸭塘。在鸭塘南边山坡下方建有土坝。图 15 给出了路基边坡滑坡后的 B、C、D 冲沟和对应的汇水盆地。



(a) B、C 冲沟和汇水盆地现场照片



(b) C、D 冲沟和汇水盆地现场照片

图 15 梅大高速公路路基边坡失稳滑坡后的 B、C、D 冲沟和可能公路跨流域调水汇水盆地

Fig. 15 Natural gullies and catchments and cut or fill slopes above and below Mei-Da Expressway after landslide in subgrade slope

图 3、图 15 揭示了 B、D 冲沟填土边坡下方的沟道被植被覆盖。C 冲沟填土边坡下方的沟道裸露、缺乏植被覆盖。这可能揭示了 B、D 冲沟填土边坡在公路建成

后, 冲沟缺乏洪水流动。而 C 冲沟在公路建成后, 一直有洪水沿该冲沟流入鸭塘。因此, 公路建设改变了原有自然雨水径流流道, 成为跨流域调水和运水的截水通道。

其次,公路下方 A、B、C、D 冲沟填土边坡的面积分别为 4 300, 8 400, 1 540, 1 430 m²。A、B、D 冲沟填土边坡在这段梅州降雨期间没有失稳滑坡, 仅仅 B 冲沟填土边坡表面有轻微土体侵蚀, 见图 12、图 15(a)、图 16。

这些现象揭示落在填土边坡上的雨水量极其有限, 难以导致路基边坡整体失稳和滑坡。C 冲沟填土边坡的失稳与滑流必须存在从公路上方或地下流入到该边坡土体的大量径流雨水。



图 16 梅大高速公路路基边坡失稳滑坡段的公路与上方山坡之间存在洪水残留土石体

Fig. 16 Debris of soil and rock blocks at B gully above the road

根据该段公路 Google 地形图, 可以划出 4 处可能将雨水通过径流汇入 C 冲沟填土边坡的汇水盆地。它们是: C 冲沟填土边坡本身(面积 $1.54 \times 10^3 \text{ m}^2$)、公路路面(面积 $9.5 \times 10^3 \text{ m}^2$)、C 冲沟上方自然山沟汇水盆地(面积 $7.8 \times 10^3 \text{ m}^2$), 和 B、C、D 冲沟上方的跨流域汇水盆地(面积 $15.57 \times 10^4 \text{ m}^2$) (图 3)。图 15 具体给出了 B、C、D 冲沟和对应汇水盆地的现场照片, 揭示了 B 冲沟最大、D 冲沟其次、C 冲沟最小。

假设降雨量是 48 mm/h, 这 4 个汇水面积获得雨水量 $3.0 \times 10^3 \text{ m}^3$ 所需要的降雨时间分别是 40.6, 6.6, 8.0, 0.4 h。因此, 唯有跨流域汇水盆地存在提供大量径流的可能。

另外, 从分水岭顶点到 C 冲沟填土边坡的最大距离是 800 m, 海拔高差大约 40 m, 平均最小径流坡度是 4.5° 。根据修改的 Bransby-Williams 公式^[16], 最大流量从顶点到达填土边坡的时间大约是 28 min。这个最大汇水时间相当于 0.4 h 的最小降雨时间, 因此, 跨流域汇水盆地有恰当时间给失稳填土边坡提供大量径流水。

5 公路跨流域调水的其他证据

图 16 揭示了梅大高速公路路基边坡失稳滑坡段的西边公路与上方山坡之间存在大量土石体。这些混乱堆放的土石体可能揭示它们是被山坡上大量雨水径流冲到这个位置。它们也可以堵塞公路排水沟渠, 使得径流雨水流入公路道面。图 15(a) 揭示了公路上的 B 冲沟已经形成了一个面积较大的洪积扇。图 16 中的洪水带来的土石体就是位于该洪积扇前方。

图 17 揭示了梅州地区高速路边经常使用的隔水条。这隔水条使得公路径流一直沿着道面流动, 直到公路排水沟渠。但是, 如果径流量过大和排水沟渠堵塞或破坏, 那么, 大量径流会流入公路下方填土边坡(例如 C 冲沟填土边坡), 导致失稳和滑坡。大量径流使得滑坡体极大液化, 与洪水一道流入下方鸭塘。

另外, 图 1(a)、图 12、图 15、图 16 是 C 冲沟填土边坡滑坡残留土体现场照片。照片揭示了这些残留的边坡土体含水率不高, 应该远低于塑限和液限含水率。因此, 该照片更进一步揭示了导致 C 冲沟填土边坡失



图 17 梅州地区高速公路经常使用的路边隔水条

Fig. 17 Kerb commonly constructed along expressway in Meizhou for controlling runoff on pavement

稳滑坡的大量水体不可能是来自于公路路基填土或原来完全风化花岗岩土体的地下水流。因此,这些大量径流水体是从公路道面流到 C 冲沟填土边坡。公路跨流域调水导致了道面大量径流。

据媒体报道^[17],“本次塌方路段曾在 2022 年 8 月出现水毁病害,坡面溜塌、急流槽损坏,此后进行了加固以及完善排水系统。修复工程方案从 2023 年的 4 月到 9 月分批建设完成。”图 18 揭示了, B、C、D 冲沟汇合后的径流汇入的鸭塘(土坝)的现场照片。据媒体报道^[17],“去年,何深威承包下庵前村山塘水库改做鸭塘,其位置便在塌方处下方山脚,直线距离约 400 m。”“接连降雨,何深威看着鸭塘水位不断上涨,去鸭舍的那截土路被淹了,开铲车也不管用,他又换了条小船运饲料。其间,鸭塘在高速汇聚而下的排水中变得愈发浑浊。他回忆说,4 月 28 日上午,水沿边坡一涌而下,‘哗哗’冲了近一小时,掺着不少泥沙。等他 5 月 1 日凌晨再接到村委会通知,鸭舍几乎被塌方下来的土压塌了,现场也拉了警戒线无法靠近。”“出现塌方前,村民何

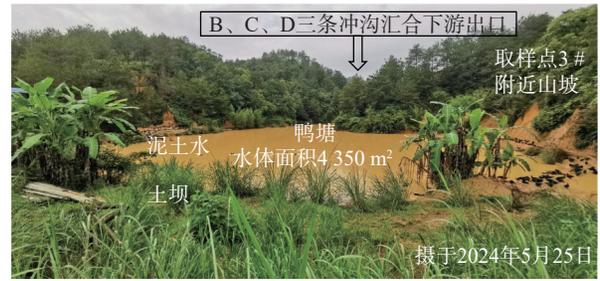


图 18 B、C、D 冲沟汇合的径流汇入鸭塘(土坝)的现场照片

Fig. 18 Site photograph illustrating mud water in the duck pool below B, C and D gully

深威一度以为高速边坡‘行洪’了。”

上述现场描述的鸭塘水变化,证明了公路或其排水系统将大量径流雨水汇入鸭塘。鸭塘面积大约 4 350 m²,鸭塘水深增加 1 m 所需的水量是 4 350 m³。这个水量与上述 1 h 跨流域汇水总量相当,也与启动路基边坡土液化所需总水量相当。

6 路基边坡失稳滑坡过程的诊断描述

根据以上资料和分析,对该段路基边坡失稳滑坡过程可以有如下诊断。高速公路削坡和填土建设改变了原来的雨水径流途径,分别沿 B、C、D 冲沟向山坡下方流到鸭塘。B、D 冲沟的排水量被极大降低,C 冲沟排水量极大升高。从而,原来分别由 B、C、D 冲沟承担的面积大约有 16.5×10⁴ m² 的汇水山坡区域,都流进公路道面上。再加上道面边上建立的隔水条,该雨水径流会在道面上流动,形成如图 19 所示的公路河流。公路排水系统可能被从高处山坡带来的土石堵住。

土体是由多种多样的砾粒、砂粒、粉粒和黏粒组成的混合物。它们随着含水量的增大,会发生塑性流变和液性流动,最终会与水体一道形成洪水,汇流到远处。因此,大量径流雨水就会从道面流入填埋 C 冲沟的填



图 19 香港南朗山道跨流域调水、汇入山坡径流形成河流的现场照片

Fig. 19 Site photograph illustrating flooding on Nanlang Shan Road due to road functioning as catchwater for several catchments

土边坡, 导致表层土体逐渐侵蚀和掏空, 进而发生填土边坡整体失稳滑动。由于坡面流水多且在一段时间不断汇入, 导致这些滑坡土体与径流雨水一道, 沿原来 C 冲沟继续向下方流动, 直到鸭塘。

图 19 是图 1(b) 揭示的公路路基边坡失稳滑坡的相关照片^[6-8]。图 19 中的照片是 1997 年 8 月 22 日在维修和加固香港南朗山道路路基边坡失稳滑坡工程的照片。该照片揭示了南朗山道跨流域调水、汇入山坡径流形成河流, 河流流速大约 1.4 m/s, 流量大约 1.0 m³/s。跨流域调水的山坡汇水面积约 16×10⁴ m², 这相当于梅大高速公路路基边坡失稳滑坡的跨流域汇水盆地面积 15.57×10⁴ m²。距离南朗山道滑坡点 2 km 的雨量计获得的 1 h 降雨量 31.25 mm。该跨流域汇水盆地 1 h 所获得的总降雨大约 5.0×10³ m³。在 1995 年 8 月 13 日该段路基边坡失稳滑坡前, 测得的 1 h 降雨量为 48.25 mm。因此, 导致该路基边坡失稳滑坡的山道河流流量应该大于 1.0 m³/s、小于 1.5 m³/s。再考虑南朗山道路路基边坡滑坡土体体积是 2 600 m³, 假设边坡土体的干容重 18 kN/m³, 那么滑坡土体重量是 4 775 t。如果土体平均液限质量含水率为 42%~104%, 那么所需液化水量体积为 2 387~4 775 m³。该所需含水量与实测和计算获得的总体降雨量相当。

因此, 根据以上数据, 或许可以推论, 梅大高速公路路基边坡失稳和滑坡前, 当地 1 h 降雨量应该有 31 mm。

7 结语

(1) 公路路基边坡失稳、坍塌、滑坡和远流在香港偶有发生, 在其他建有公路的山区和城市也常有发生。它们有一种共同的因素, 就是山坡公路可以极大地改变自然山坡汇水流域。如果公路排水系统建设不完善或者局部被小型侵蚀土石体堵塞, 可导致公路道面成为瞬态光滑河床。大量从多个自然汇水流域的径流雨水可集中在道面上流动。公路成了河流, 大量雨水沿公路导流到其他汇水流域或漫过路边进入下方路基边坡。

(2) 在大量径流作用下, 路基边坡会发生表层土体侵蚀, 进而整体失稳, 形成滑坡、坍塌或丢失公路路段造成路坑。如有快速行驶车辆不能及时停车, 就会冲入路坑, 造成更大的人员伤亡和经济损失。

此类山坡公路跨流域调水机制亟待我们深入研究和加强防范。

参考文献(References):

[1] 殷跃平. 地质灾害风险调查评价方法与应用实践 [J].

中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): I - II. [YIN Yueping. Geological hazard risk investigation and evaluation method and its application practice [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(4): I - II. (in Chinese)]

- [2] 岳中琦. 香港滑坡灾害防治和社会效益 [J]. 工程地质学报, 2006, 14(增刊 1): 12 - 17. [YUE Zhongqi. Hong Kong landslide prevention and its social benefits [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(Sup 1): 12 - 17. (in Chinese with English abstract)]
- [3] Geotechnical Engineering Office. Highway slope manual [R]. Hong Kong: Civil Engineering and Development Department, The Government of the Hong Kong Special Administration Region, 2000: 116.
- [4] 黎佐贤. 一九九五年八月十三日深湾道山泥倾泻事件报告 [R] //第一册: 就土力工程处的调查所作的独立检讨. 香港: 香港政府, 1996: 12. [SIR JOHN KNILL. Independent review of the investigation by the geotechnical engineering office [R] //Volume 1 of the report on the Shum Wan Road landslide of 13 August 1995. Hong Kong: Hong Kong Government, 1996: 12. (in Chinese)]
- [5] 土力工程处. 一九九五年八月十三日深湾道山泥倾泻事件报告 [R] //第二册: 山泥倾泻调查结果. 香港: 香港政府土木工程署土力工程处, 1996: 49. [GEO. Findings of the landslide investigation [R] //Volume 2 of the report on the Shum Wan Road landslide of 13 August 1995. Hong Kong: Geotechnical Engineering Office(GEO), Hong Kong Government, 1996: 49. (in Chinese)]
- [6] YUE Zhongqi. Report surface drainage analysis of the 1995 Shum Wan road landslide site [R]. Expert witness report prepared for the Department of Justice, HKSAR Government, 1999: 4.
- [7] YUE Zhongqi. Supplementary report no. 1 surface drainage analysis of the 1995 Shum Wan road landslide site [R]. Expert witness report prepared for the Department of Justice, HKSAR Government, 2000: 5.
- [8] YUE Zhongqi. Supplementary report no. 2 surface drainage analysis of the 1995 Shum Wan road landslide site [R]. Expert witness report prepared for the Department of Justice, HKSAR Government, 2000: 10.
- [9] 岳中琦, 徐前. 现今斜坡工程安全设计理论的根本缺陷与灾难后果 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1601 - 1606. [YUE Zhongqi, XU Qian. Fundamental drawbacks and disastrous consequences of current geotechnical safety design theories for slopes [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(9): 1601 - 1606. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 岳中琦. 全球岩土工程领域共同挑战性问题的土力学理

- 论根源 [J] . *岩土工程学报*, 2015, 37(增刊 2): 11 - 15. [YUE Zhongqi. Challenging issues in global geotechnical profession caused by soil mechanics [J] . *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(Sup2): 11 - 15. (in Chinese with English abstract)]
- [11] MA Shengnan, SONG Yi, LIU Jiawei, et al. Extended wet sieving method for determination of complete particle size distribution of general soils [J] . *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(1): 242 - 257.
- [12] Geotechnical Engineering Office. Geoguide 1: Guide to retain wall design [S] . Hong Kong: Civil Engineering and Development Department, The Government of the Hong Kong Special Administration Region, 2017: 245.
- [13] 岳中琦, 康兴宇. 土质斜坡存在唯一最小安全系数的数据作图论证及原因分析 [J] . *工程地质学报*, 2022, 30(1): 83 - 100. [YUE Zhongqi, KANG Xingyu. Existence and reason of a global minimum factor of safety of soil slopes [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(1): 83 - 100. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张明, 殷跃平, 吴树仁, 等. 高速远程滑坡-碎屑流运动机理研究发展现状与展望 [J] . *工程地质学报*, 2010, 18(6): 805 - 817. [ZHANG Ming, YIN Yueping, WU Shuren, et al. Development status and prospects of studies on kinematics of long runout rock avalanches [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(6): 805 - 817. (in Chinese with English abstract)]
- [15] Geotechnical Engineering Office. Guidelines for classification of consequence-to-life category for slope features, GEO Technical Guidance Note No. 15 (TGN 15) [S] . Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, 2007: 14.
- [16] 土力工程处. 斜坡岩土工程手册 [S] . 香港: 香港特别行政区政府土木工程署, 1998: 308. [GEO. Geotechnical manual for slopes [S] . Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, 1998: 308. (in Chinese)]
- [17] 任雾, 陈蕾, 刘昱秀. 梅大高速涉事边坡: 脆弱地带与养护之困 [N/OL] . 澎湃新闻人物, (2024-05-12) [2024-07-15]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1798838205926423083&wfr=spider&for=pc> [REN Wu, CHEN Lei, LIU Yuxiu. The slope involved in Mei-Da Expressway: The fragile zone and the difficulty of maintenance [N/OL] . The Paper Person, (2024-05-12) [2024-07-15]. (in Chinese)]