



航道整治岸坡坍岸区的形成条件及机制

唐正涛，胡冬冬，陆雨晨，肖翔

(长江航道规划设计研究院, 长江航道勘察设计院(武汉)有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 护岸工程作为航道整治工程的重要部分, 岸坡的稳定性关系到工程的整体质量、航道的通航安全, 甚至沿岸居民的生命财产安全, 因此岸坡的稳定性至关重要。为了对涉水岸坡的稳定性进行有效分析, 前期需查明岸坡的物质组成、滑动面位置、形成条件及形成机制。以某航道整治岸坡坍岸区为研究对象, 对坍岸区后缘、中部及侧壁外侧开展了地质调查和地质勘探, 初步查明了岸坡坍岸区内外的物质组成。通过标准贯入击数、含水率和直剪指标等对比分析坍岸区域内外土层的物理力学性质差异, 分析了坍岸的形成条件和形成机制。初步判定滑移面所在的位置, 并提出了坍岸区治理的方案。

关键词: 航道整治工程; 岸坡稳定性; 坎岸区; 形成条件; 形成机制

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0129-05

Formation conditions and mechanism of slope collapse area in waterway regulation

TANG Zheng-tao, HU Dong-dong, LU Yu-chen, XIAO Xiang

(Changjiang Waterway Planning Design and Research Institute, Changjiang Waterway Survey
and Design Institute (Wuhan) Co., Ltd, Wuhan 430040, China)

Abstract: The bank protection project is an important part of the waterway regulation project. The stability of the bank slope is related to the overall quality of the project, the navigation safety of the waterway, and even the safety of life and property of the coastal residents. Therefore, the stability of the bank slope is very important. In order to effectively analyze the stability of the wading bank slope, it is necessary to identify the material composition of the bank slope, the position of the sliding surface, and the formation conditions and the formation mechanism in the early stage. Taking a waterway regulation bank slope collapse area as the research object, the geological survey and geological exploration of the rear edge, middle part and outer side wall of the bank collapse area are carried out, and the material composition inside and outside the bank collapse area is preliminarily identified. The differences in the physical and mechanical properties of the soil layers inside and outside the bank collapse area are compared and analyzed through the standard penetration number, water content and direct shear index, and the formation conditions and formation mechanism of bank collapse are analyzed. The position of the slip plane is preliminarily determined, and the proposal for the treatment of the bank collapse area is put forward.

Keywords: waterway regulation project; slope stability; slope collapse area; formation condition; formation mechanism

在航道岸坡稳定性分析中, 降雨和江水位变化是十分重要的因素, 在长江中上游地区雨季滑坡数量占全年滑坡总数的 87%以上^[1-3]。水位下降

时, 岸坡内水位线的变化滞后于岸坡外水位的变化; 水位上升时, 土体密度增加, 饱和度也同时增加, 导致土体抗剪强度降低。大多数学者认为

这是造成岸坡失稳破坏的主要原因^[4-8]。土质岸坡失稳按照运动形式可分为推移式和牵引式^[9]，推移式滑坡是上部岩土层滑动挤压下部产生变形，滑动速度较快，滑体表面波状起伏，多见于有堆积物分布的斜坡地段^[10]；牵引式滑坡主要特征为下部先滑使上部失去支撑而变形滑动，一般速度较慢，多呈上小下大的塔式外貌，横向张性裂隙发育，表面多呈阶梯状或陡坎状，常形成沼泽地^[11]。本文针对某航道整治工程岸坡的已坍岸区开展了地质勘察，有针对性地布置了勘探孔，从水文条件、地层分布组成、岩土体物理力学性质等方面进行形成条件和形成机制分析，查明了滑

移原因，能够为岸坡坍岸区整治提供治理思路和方案依据。

1 坍岸区特征与勘探点布置方案

1.1 坍岸区特征

坍岸区坡顶高程约 27.3 m，坡脚水边高程为 14.2 m，高差 13.1 m，总体坡度约 11°。坍岸区平面范围沿航道方向，上下游长约 153 m，坡顶至坡脚水平距离约 60 m，平面呈圈椅状，坍岸区平面见图 1。坍滑体厚度 5.0~6.0 m、前后缘一般 2.0~3.0 m，约 2.3 万 m³。地层依次为第四系全新统人工堆积层、冲积层。

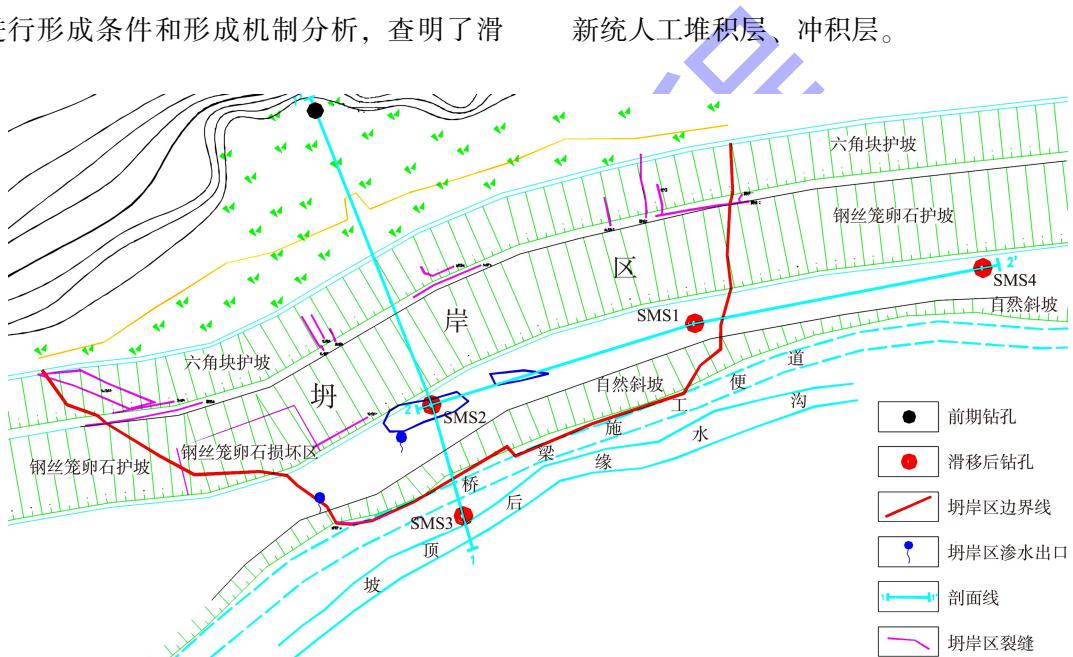


图 1 坍岸区平面

1.2 坍岸区勘探点布置方案

为查明并比较分析坍岸区域内外的地质及水文等条件，以便于坍岸区的成因条件及机制分析研究，在坍岸区内针对坍岸区横向布置 2 个钻孔 SMS1 和 SMS2，在坍岸区后缘坡顶布置 1 个钻孔 SMS3，在坍岸区域外靠下游侧布置 1 个钻孔 SMS4。这样以 SMS3、SMS2 及前期钻孔 JH33 形成 1 条坍岸区纵向剖面，以 SMS2、SMS1、SMS4 形成 1 条坍岸区横向剖面。勘探

点平面布置见图 1。

2 坍岸区岩土层物质组成及物理力学性质

根据勘察揭露，在坍岸区范围附近的岩土层分为 5 个单元层，自上而下分别为 ①₁ 杂填土 (Q_{ml}^{al})、①₂ 素填土 (Q_{ml}^{ml})、② 粉质黏土 (Q₄^{al})、③ 粉细砂 (Q₄^{al}) 和 ③_{T1} 粉质黏土 (Q₄^{al})，其中 ③_{T1} 层为 ③ 粉细砂 (Q₄^{al}) 中的夹层，在钻孔 SMS1、SMS2 中有揭露。坍岸区纵向地质剖面见图 2。

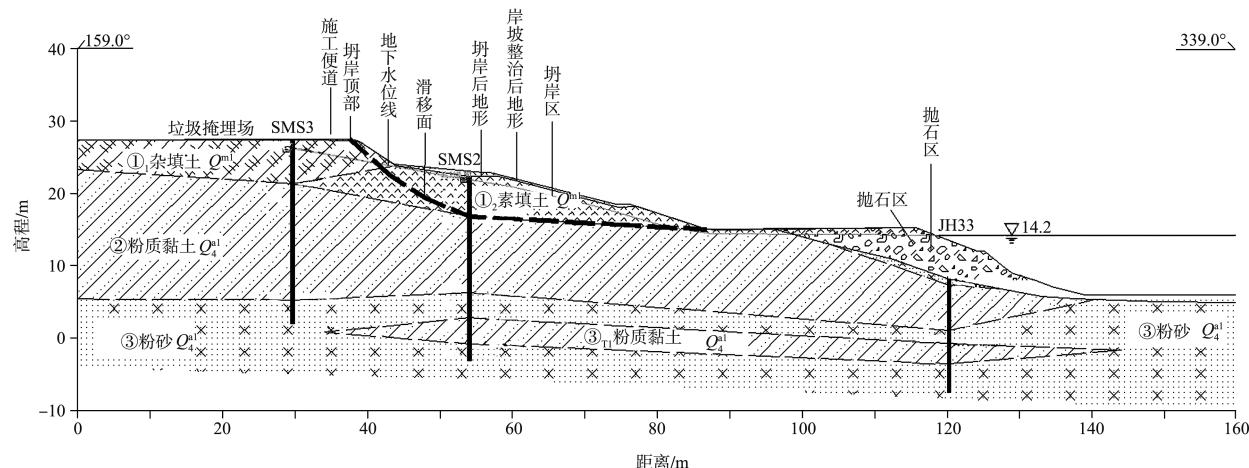


图2 坍岸区纵向地质剖面

2.1 原位测试分析

按土层统一统计坍岸区内钻孔SMS1、SMS2、SMS3的标准贯入试验击数平均值，按土层单独统计坍岸区外钻孔SMS4的标贯击数平均值，见表1。可以看出，坍岸区外①₂素填土和②粉质黏土两个土层中的标贯击数比坍岸区内同样两个土层中的标贯击数有所偏高。

表1 标准贯入击数

土层	标贯击数/击	
	SMS1、SMS2、SMS3	SMS4
① ₂ 素填土	3.5	4.0
②粉质黏土	5.6	6.8
③粉细砂	21.0	20.0

2.2 室内土工试验分析

统一统计坍岸区内钻孔SMS1、SMS2、SMS3

的②粉质黏土层的含水率、直接快剪指标，单独统计坍岸区外钻孔SMS4的②粉质黏土层的含水率、直接快剪指标平均值，见表2。

表2 ②粉质黏土层的含水率、直接快剪指标

钻孔	含水率/%	直接快剪	
		黏聚力 C/kPa	内摩擦角 φ/(°)
SMS1、SMS2、SMS3	34.8	5.96	6.87
SMS4	30.9	9.58	9.03

可以看出，坍岸区内钻孔SMS1、SMS2、SMS3的②粉质黏土层的含水率比坍岸区外钻孔SMS4的②粉质黏土层的含水率偏高，SMS1、SMS2、SMS3的②粉质黏土层的直接快剪指标比SMS4的②粉质黏土层的直接快剪指标偏低。根据勘察中的原位测试及室内试验成果，分析得出各岩土层物理力学指标建议值，见表3。

表3 各岩土层物理力学指标建议值

土层	密度/(g·cm ⁻³)	饱和密度/(g·cm ⁻³)	直接快剪		饱和快剪	
			黏聚力 C/kPa	内摩擦角 φ/(°)	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 φ/(°)
① ₁ 杂填土	-	-	3~6	20~23	2~5	17~20
① ₂ 素填土	1.89	1.93	8~12	16~20	6~10	14~18
②粉质黏土	1.86	1.86	18~23	9~13	16~20	7~10
③粉细砂	1.90	1.90	0	32~36	0	28~32
④ _{Ti} 粉质黏土	1.84	1.86	17~22	8~12	15~19	6~9

3 坍岸形成条件分析

3.1 岩土性质条件

坍岸区江水位浮动范围及以上岸坡土层为①₁杂填土、①₂素填土等松散土层，在土体自重作用下，易产生蠕动变形，不利于岸坡稳定。

3.2 地形地貌条件

坍岸区地形总体呈前缓后陡形态，中前部综合坡角11°，单级岸坡坡度14°~18°，后缘填土形成陡坡约33°，局部60°左右，高约3.5 m，在后缘重力作用下对坡体的变形破坏创造了有利条件。

3.3 气候条件

坍岸发生前 20 余天基本一直有降雨天气，降雨量较大，雨水入渗后会加速岸坡内部土体特性的改变，加速地下水循环和水力联系，易于引起土体蠕动变形。

3.4 坍岸区地下水位偏高

钻孔 SMS1、SMS2、SMS3 位于坍岸区内，SMS4 位于坍岸区外。根据对钻孔的地下水位观测，SMS1 中稳定水位比江水位高 8.19 m、比坍岸区外 SMS4 中稳定水位高 4.12 m，SMS2 中稳定水位比江水位高 7.75 m、比坍岸区外 SMS4 中稳定水位高 3.69 m，SMS3 中稳定水位比江水位高 11.96 m。由此可见，坍岸区内地下水位较江水位及坍岸区外地下水位均高出很多，并已经接近于地表(图 3、4)，水力梯度较大。江水位为场区地表和地下水最低排泄基准面，地表水、地下水由坡表和松散层(杂填土及素填土)向江中排泄，降低了土体的强度，导致岸坡的变形破坏。地下水位过高降低了坍岸区内土体的强度及坍岸区滑动带的抗滑力，进而影响坍岸区岸坡的稳定性。

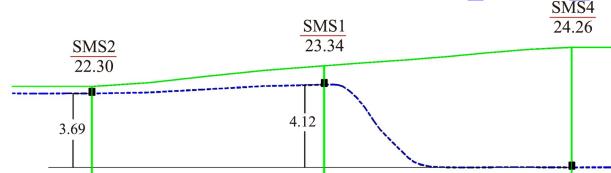


图 3 坍岸区内、外钻孔水位相对高差 (单位: m)

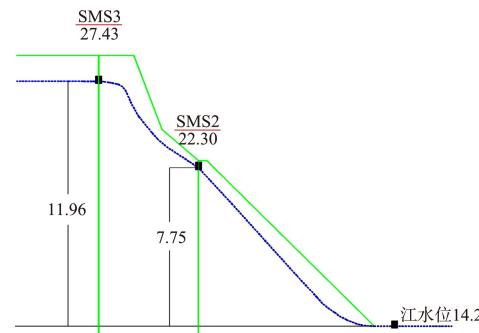


图 4 坍岸区内钻孔水位与江水位相对高差 (单位: m)

3.5 坍岸区坡顶道路后方的地表过长积水

据调查，坍岸区坡顶道路后方的空地及水沟里积水时间长，且地势高，空地及水沟里的地表水入渗可能向坍岸区内渗流，引起坍岸区内地下

水位抬升。

3.6 坍岸区后缘坡顶重载问题

在坍岸区后缘坡顶有一条临时道路，经常会有重载卡车、混凝土罐车等经过，加大了坍岸区后缘的动荷载，增加了坍岸区土体的下滑力，不利于坍岸区的稳定。

4 坍岸形成机制

1) 护岸工程完成后，河床坡脚进行了抛石处理，高程 23 m 以下进行护岸治理，综合坡度约 11°，高程 23 m 以上为自然岸坡，坡度较陡，形成早期的前缓后陡地形。

2) 受强降雨影响，后缘积水严重，岸坡地下水位大幅度抬升，岸坡土层从上至下依次为①₁ 杂填土、①₂ 素填土、② 粉质黏土，② 粉质黏土为相对隔水层，地下水下渗深度有限，大部分从①₁ 杂填土、①₂ 素填土层内渗出排入江中，从而改变了土的性能，降低了土体强度。

3) 强降雨后，受地表水、地下水的影响，在土体自重及外部荷载影响下，后缘出现拉裂缝，岸坡产生蠕动变形。

4) 蠕动变形后，地表仍有积水，地下水仍处于高位，未能得到及时疏排，岸坡出现大量拉裂缝，逐渐形成了坍岸。

5) 根据上述土层性状分析，①₁ 杂填土属中等透水、①₂ 素填土属弱透水，土层性状较差；② 粉质黏土属微-不透水层，软可塑状，土层性状一般。根据钻孔揭露，结合岸坡地形形态、土层性状及分布特征综合分析，坍岸变形是在①₁ 杂填土、①₂ 素填土内，② 素填土底面大概率为坍岸变形底部边界即滑移面，下部② 粉质黏土浅部土层可能受上部牵引作用稍有变化。

5 结语

1) 坍岸区内存在地下水位偏高、坡顶道路后方积水时间长、后缘坡顶重载等 3 个地质问题。第 1 个问题降低了坍岸区地下水位以下土体的抗剪强度；第 2 个问题可能抬升坍岸区内地下水位；

第3个问题有助于增加坍岸区的下滑力。3个工程地质问题均不利于坍岸区的稳定。

2)结合岸坡地形形态、土层性状及分布特征综合分析, 坍岸变形是在①₁杂填土、①₂素填土内, ①₂素填土底面大概率为坍岸变形底部边界即滑移面, 下部②粉质黏土浅部土层可能受上部牵引作用稍有变化。

3)坡顶紧邻垃圾掩埋场, 建议做好垃圾掩埋场的地表水疏排, 对坡顶采取防渗措施, 隔断垃圾掩埋场与岸坡的水力联系。

4)建议对高程23 m以上自然边坡采取削坡降缓措施, 并对坡顶填土层进行压实加固。对坍岸区①₂素填土进行换填, 并进行分层压实处理, 除采取合理的护顶、护坡和护脚措施外, 还应设置通畅的排水措施, 建议设置反滤层防止地表水的潜蚀和江水的冲刷淘蚀。

参考文献:

- [1] DU J, YIN K, LACASSE S. Displacement prediction in colluvial landslides, Three Gorges Reservoir, China [J]. Landslides, 2013, 10(2): 203-218.
- [2] HUANG Q X, WANG J L, XUE X. Interpreting the influence of rainfall and reservoir infilling on a landslide[J]. Landslides, 2016, 13(9): 1139-1149.

(上接第97页)

- [3] 李士中.京杭大运河新开挖航道对高速铁路桥墩的影响[J].铁道建筑, 2020, 60(8): 33-36.
- [4] 盛军其, 李佳玮, 金彬彬, 等.航道开挖对下方已建地铁工程的影响性分析[J].水运工程, 2018(9): 151-155, 160.
- [5] 张建勋, 陈福全, 简洪钰.被动桩中土拱效应问题的数值分析[J].岩土力学, 2004, 25(2): 174-178, 184.
- [6] 陈福全, 杨敏.地面堆载作用下邻近桩基性状的数值分析[J].岩土工程学报, 2005, 27(11): 1286-1290.
- [7] 中国建筑科学研究院.建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [8] 中国建筑科学研究院.建筑地基处理技术规范: JGJ 79—

- [3] GUO D, MASANORI H, JIA H. Influential factors on slope stability and landslide mobility [J]. American society of civil engineers, 2013, 31(8): 247-254.
- [4] 吴琼, 唐辉明, 王亮清, 等.库水位升降联合降雨作用下库岸边坡中的浸润线研究[J].岩土力学, 2009, 30(10): 3025-3031.
- [5] 江泊清, 项伟, 曾雯, 等.三峡库区黄土坡临江滑坡体水岩(土)相互作用机理[J].岩土工程学报, 2012, 34(7): 1209-1216.
- [6] SONG K, YAN E, ZHANG G, et al. Effect of hydraulic properties of soil and fluctuation velocity of reservoir water on landslide stability [J]. Environmental earth sciences, 2015, 74(6): 1-11.
- [7] 熊荣军, 唐正涛, 孙爱国.某滑坡滑带土特征三轴压缩试验研究[J].水运工程, 2013(9): 49-54.
- [8] 唐正涛, 孙爱国, 熊荣军, 等.某滑坡滑带土应力应变关系模型研究[J].水运工程, 2014(12): 156-161, 184.
- [9] 谭福林, 胡新丽, 张玉明, 等.不同类型滑坡渐进破坏过程与稳定性研究[J].岩土力学, 2016, 37(S2): 597-606.
- [10] 王宝亮, 彭盛恩, 陈洪凯.推移式滑坡形成机制的力学演绎[J].地质灾害与环境保护, 2010, 21(2): 74-77.
- [11] 刘定霞, 张青云, 李占飞, 等.大型牵引式土质滑坡形成机制分析及稳定性评价:以甘洛县西西岬村滑坡为例[J].资源环境与工程, 2020, 34(2): 238-242.

(本文编辑 武亚庆)

2012 [S].北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

- [9] 铁道第三勘察设计院集团有限责任公司.铁路桥涵设计规范: TB 10002—2017[S].北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [10] 上海市基础工程集团有限公司, 苏州嘉盛建设工程有限公司.建筑地基基础工程施工质量验收标准: GB 50202—2018[S].北京: 中国计划出版社, 2018.
- [11] 济南大学, 莱西市建筑总公司, 山东省工程建设标准造价协会.建筑基坑工程监测技术规范: GB 50497—2009[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [12] 同济大学, 中国铁路经济规划研究院.公路与市政工程下穿高速铁路技术规程: TB 10182—2017[S].北京: 中国铁道出版社, 2018.

(本文编辑 王璁)