

DOI: 10.11779/CJGE202007019

深中通道沉管隧道基槽回淤及边坡稳定性研究

曹影峰^{1, 2}, 李兴高^{*1, 3}, 杨 益^{1, 3}

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088;

3. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044)

摘 要: 跨海沉管隧道因其回淤强度大、晾槽时间长等特点, 大量累积的回淤物威胁到沉管隧道的安全性。以深中通道沉管隧道为背景, 总结试挖槽试验中回淤时空变化规律, 研究回淤对基槽边坡稳定性的影响, 深入分析坡面回淤的局部稳定性影响因素, 结果表明: ①回淤平面分布差异明显, 槽底、北坡、南坡的回淤量依次减小; 回淤竖向分布不均, 从上至下呈递减趋势; 回淤全年分布不均, 洪季时回淤量大, 进入枯季后回淤量减小。②基槽边坡稳定性主要受坡面回淤控制, 放坡清淤可明显改善坡面回淤的稳定性; 回淤厚度、清淤坡率、基槽坡高、边坡坡率增大及回淤抗剪强度降低均不利于坡面回淤的稳定性, 清淤坡率应考虑各影响因素和所处季节综合确定。

关键词: 沉管隧道; 基槽; 回淤; 稳定性; 试挖槽

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)07-1350-09

作者简介: 曹影峰(1993—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事隧道工程的设计与科研工作。E-mail: yfcbjtu@163.com。

Back silting and slope stability of foundation trench in Shenzhen-Zhongshan immersed tunnel project

CAO Ying-feng^{1, 2}, LI Xing-gao^{*1, 3}, YANG Yi^{1, 3}

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing

100088, China; 3. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing

100044, China)

Abstract: Due to the large intensity of back silting and long-term idleness of foundation trench, back silting will threaten the safety of immersed tunnel. Relying on Shenzhen-Zhongshan immersed tunnel project, the change rules of back silting with time and space in the trial trench tests are summarized. A numerical model is established to study the influences of back silting on the stability of foundation trench slope. The factors affecting the local stability of back silting are deeply analyzed. The results show that: (1) The horizontal distribution of back silting is obviously different, that is, the amount of back silting at the bottom, north slope and south slope decreases in turn. The vertical distribution of back silting is uneven, and the thickness of back silting from top to bottom decreases. The amount of back silting varies greatly through out the year, large in flood season but small in dry season. (2) The stability of foundation trench slope is mainly controlled by the back silting, and the stability of back silting can be significantly improved by desilting with slope. The safety factor of back silting decreases with the increase of thickness of back silting, desilting gradient, slope height, slope gradient or the decrease of shear strength of back silting.

Key words: immersed tunnel; foundation trench; back silting; stability; trial trench

0 引 言

在建港珠澳大桥以前, 国内的沉管隧道修建于内河。内河沉管隧道的水文地质条件好、开挖深度小, 基槽稳定性问题不突出。随着近几年跨海沉管隧道的兴起^[1-3], 因其复杂的水文地质条件及较大的开挖深度, 基槽边坡的稳定性才开始引起学者们的广泛关注。对于跨海沉管隧道, 其回淤强度大, 晾槽时间长, 若回淤物在垫层施工或沉管结构沉放期间发生滑塌, 将

会严重威胁沉管隧道的安全^[4]。港珠澳大桥沉管隧道在施工期间, 就曾发生过基槽边坡淤积物滑塌、基槽突淤等异常情况, 迫使沉管返航^[5]。相比于港珠澳大桥, 深中通道所处的海域的回淤强度更大, 在沉管结构安放前, 基槽内的预测回淤量就达到近 $4.0 \times 10^6 \text{ m}^3$,

收稿日期: 2019-07-20

*通信作者 (E-mail: lxx_njtu@163.com)

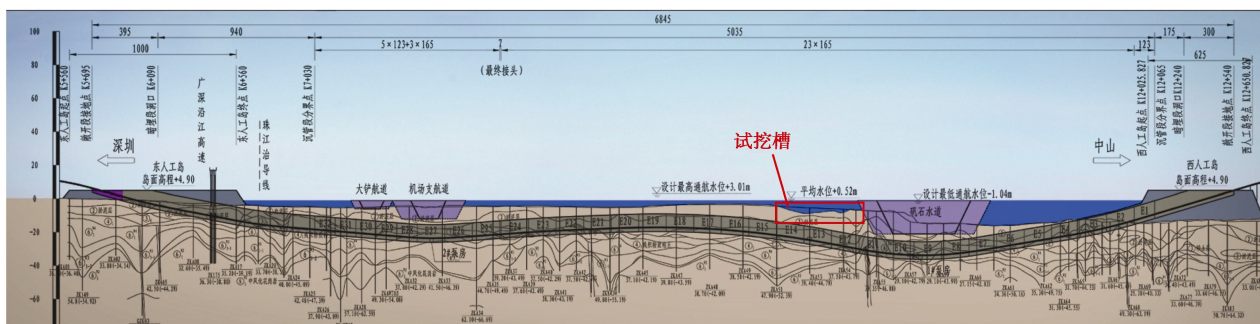


图 1 隧道纵断面图

Fig. 1 Longitudinal section of tunnel

如若全部清除, 施工费用将达到 2 亿元, 如何在保证边坡稳定性的前提下减少清淤量成为跨海沉管隧道需重点研究的问题。

目前已经有不少学者对基槽边坡的稳定性展开研究, 并取得了较好的成果。贺少辉等^[6]以长江沉管隧道为背景, 采用水槽模型试验和理论分析相结合的方式, 研究了沉管沉放过程中, 水流流态变化对基槽边坡稳定性的影响。肖明清^[7]结合理论计算和试验成果, 对南京长江沉管隧道的基槽稳定性进行了评价, 并对基槽边坡的合理坡率问题展开了研究。周顺华等^[8-9]结合离心模型试验和弹塑性有限元分析的成果, 认为水下边坡的稳定性与水深无关, 且破坏始于坡脚。喻卫华^[10]采用强度折减法研究了静水场中水下多级边坡的破坏模式, 指出对多级边坡仅仅采用单一滑动面理论分析未必能得到正确的结果, 需要视坡角、台阶宽度等因素综合确定。已有研究成果大多针对静水条件或水流作用下的基槽边坡稳定性, 鲜有考虑回淤作用的影响。

本文在归纳深中通道沉管隧道项目中试挖槽试验得到的回淤物的时空变化规律的基础上, 结合数值模型深入研究了回淤对基槽边坡稳定性的影响, 并对影响坡面回淤局部稳定性的各因素进行了敏感性分析, 研究成果可为同类工程提供指导。

1 项目概况

深中通道跨越珠江口海域, 是连接深圳、中山、广州三地的大型集群工程, 项目全长约 24 km, 其中沉管隧道长 5035 m, 由 32 个管节组成。标准管节长 165 m, 宽 46 m; 变宽管节长 123.8 m, 宽 46~55.46 m。沉管隧道在纵向上呈舒缓的“W”型, 基槽开挖深度范围为 2.3~30.3 m。隧道纵断面见图 1。

基槽开挖的地层条件复杂多变, 根据地层分布, 基槽开挖采用横向分级、纵向分段的方法。本文的主要研究对象为西岛斜坡段以外的基槽边坡 (E7~E32

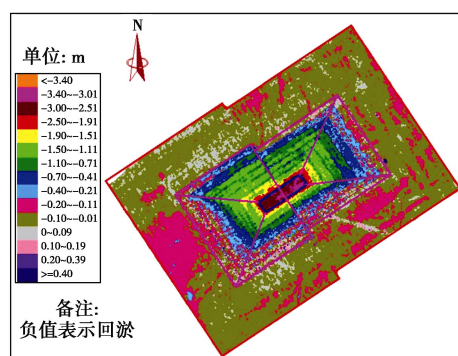
管节), 试挖槽位置如图 1 所示, 具体设计方案为: ①淤泥与淤泥质土层按南北侧坡进行区分, 南坡采用 1:5 的坡率, 北坡采用 1:7 的坡率; ②黏土 (含粉质黏土及夹砂层)、砂层及全风化岩层采用 1:3 坡率; ③强风化、中风化岩层采用 1:1 坡率。

2 试挖槽回淤观测

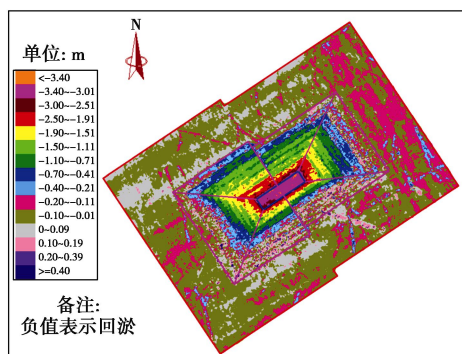
深中通道所在矾石水道海域径流流量和水流含沙量年内分布不均, 导致基槽内的回淤情况非常复杂。为掌握与实际相符的回淤规律, 中交广州航道局联合交通运输部天津水运工程科学研究所和南京水利科学研究院在深中通道隧道基槽水域开展了试挖槽回淤观测试验。本文基于为期 1 a 的观测资料^[11-13], 对试挖槽内回淤随时间和空间的变化规律进行总结。

2.1 试挖槽回淤规律

采用 Hypack 软件将前后两次水深测量数据进行差值计算, 得到两次测量之间的回淤色差图。图 2 为前 4 个月和整个观测期的回淤色差图, 回淤平面分布差异明显, 槽底、北坡、南坡的回淤量依次减小。且前 4 个月和整个观测期的回淤色差图接近, 说明回淤全年分布不均, 主要发生在洪季的前 4 个月。在观测末期, 槽底、北边坡、南边坡的平均回淤厚度分别达到 3.21, 1.08, 0.31 m。



(a) 第1~118天

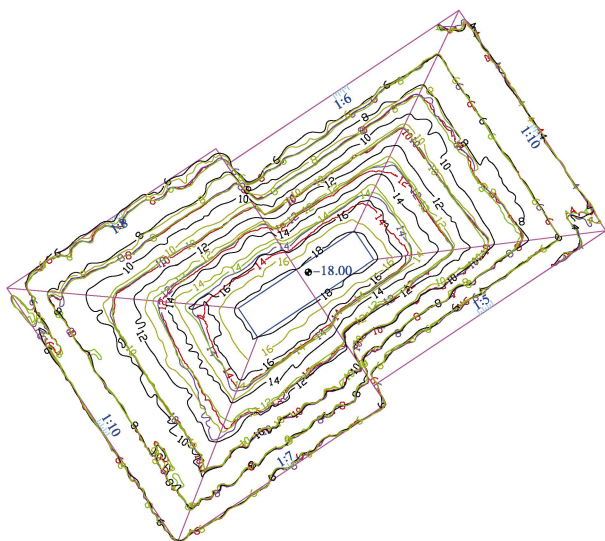


(b) 第1~345天

图2 回淤色差图

Fig. 2 Chromaticity difference diagram of back silting

图3为观测期的等深线对比图,从图中可以看出,等深线向槽底缓慢移动,北边坡等深线移动比南边坡明显,下部等深线比上部移动明显。结合图2,3可知,从坡顶至坡脚,回淤厚度呈递增趋势,且坡顶回淤厚度较坡底小得多。



土分析软件 Geo-Studio, 采用有限元极限平衡法进行计算, 即先通过 Sigma/W 模块进行有限元分析, 得到边坡土体的应力 - 应变状态; 再将有限元计算结果代入 Slope/W, 求得边坡的安全系数和潜在滑动面位置。

本文研究中, 放坡清淤以精挖区域的上边缘点作为放坡起点。鉴于南北两侧边坡相互影响较小, 在建模过程中只考虑单侧边坡。计算模型示意图见图 6, 坡顶到左边界的距离 B 取坡高的 2.5 倍, 坡脚距底边界距离 L 与坡高 H_p 相等, 模型右边界与坡脚距离取 25 m。材料模型选用莫尔库仑模型, 采用土体的浮重度进行计算。研究过程中的回淤厚度均指放坡清淤前的坡面平均回淤厚度 h , 即坡面中点处的回淤厚度。

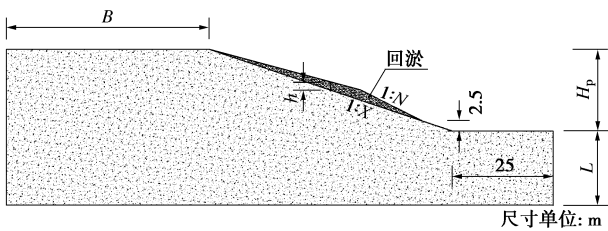


图 6 计算模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of computational model

本文数值模型中的边坡土体选用深中通道地勘报告^[21]中的典型土层粉砂和淤泥, 并采用与实际工程相适应的坡率。回淤物的性质较软弱, 其抗剪强度参数难以准确测定。因此将表层淤泥的直剪快剪指标进行 50% 的折减后作为坡面回淤的抗剪强度指标。土体的物理力学参数见表 1。

表 1 土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

土层名称	饱和重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比	固结快剪	
				c $/kPa$	φ $/(^{\circ})$
淤泥	15.3	4.71	0.40	6.69	8.04
粉砂	20.0	25.20	0.30	8.00	17.70
回淤	12.6	3.00	0.43	1.30	0.70

4 回淤对基槽边坡稳定性的影响

坡面回淤厚度不同时, 放坡清淤后基槽边坡的稳定性存在一定差异。以 1 : 5 坡率的淤泥边坡为例, 坡高采用较不利的 30 m, 清淤坡率采用 1 : 3, 对放坡清淤后的基槽边坡安全系数进行比较。图 7, 8 分别为放坡清淤后的基槽边坡安全系数和潜在滑动面形式。由图 7, 8 可知, 当回淤厚度较小时, 基槽边坡的安全系数和潜在滑动面均与无回淤状态时相近, 潜在失稳形式为整体滑动失稳, 如图 8 (a), (b) 所示; 当回淤厚度较大时, 潜在失稳形式为坡面回淤的局部失稳, 如图 8 (c), (d) 所示, 随着回淤厚度的继续增大,

边坡安全系数急剧下降。

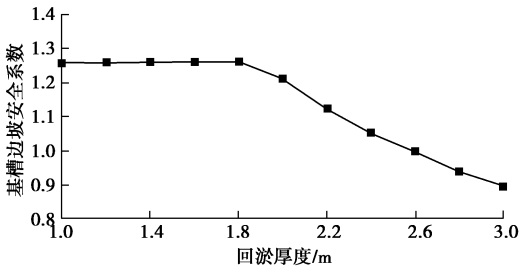


图 7 不同回淤厚度时基槽边坡的安全系数

Fig. 7 Safety factors of slope with different thicknesses of back silting

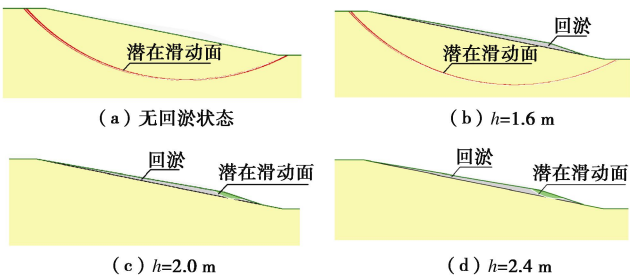


图 8 基槽边坡潜在滑动面

Fig. 8 Potential slip surfaces of foundation trench slope

为更全面分析基槽边坡的稳定性变化过程, 可以将基槽边坡的稳定性问题一分为二。在回淤作用下, 基槽边坡同时具有整体滑动失稳和坡面回淤局部失稳的趋势。边坡整体滑动失稳和坡面回淤失稳都具有其各自的安全系数, 两者中的较小值即为基槽边坡的安全系数。通过改变滑入、滑出点范围的方式, 分别搜索基槽边坡整体滑动失稳和坡面回淤局部失稳的安全系数, 所得结果见图 9。

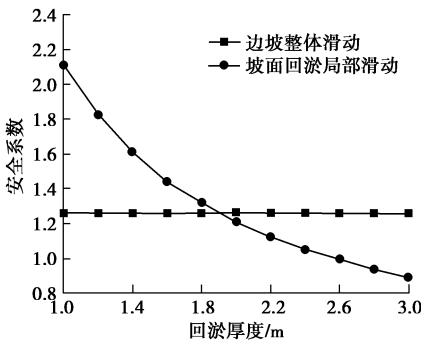


图 9 不同失稳状态对应的安全系数

Fig. 9 Safety factors in different instable states

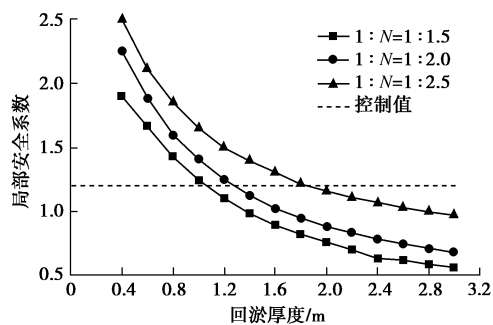
由图 9 可知, 对于基槽边坡的整体滑动失稳, 回淤厚度的增大会使其安全系数略有增加; 坡面回淤的局部安全系数随回淤厚度的增大而迅速减小。因此, 当回淤厚度较小时, 坡面回淤物的滑动趋势较弱, 基槽边坡的稳定性受边坡土体影响。在回淤厚度增大到

一定值后,其下滑趋势超过了边坡整体滑动的趋势,基槽边坡的稳定性主要受坡面回淤的控制。

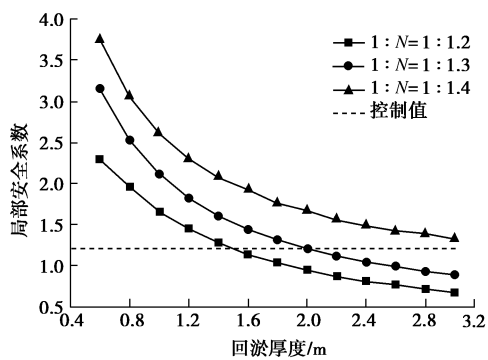
5 坡面回淤局部稳定性研究

5.1 清淤坡率对坡面回淤稳定性影响

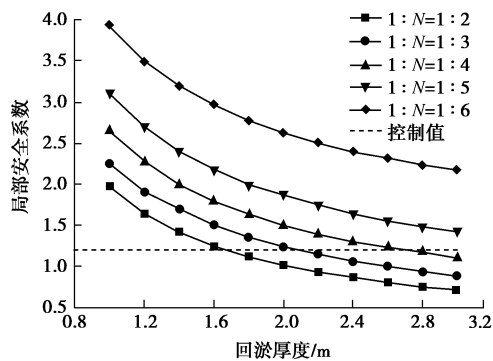
本节中基槽高度取较不利的30 m。图10为采用不同清淤坡率(1:N)处理回淤物后坡面回淤的局部安全系数-回淤厚度曲线。由图10可知,当坡面回淤厚度一定时,清淤坡率越缓,回淤物的局部安全系数越大。这表明,当基槽边坡的坡高和坡率一定时,坡面回淤物的厚度越大,所采用的清淤坡率宜越缓。当坡面回淤厚度相同时,基槽边坡越缓,坡面回淤的局部安全系数越大。这说明了坡度越缓的基槽边坡对回淤物的承载能力越好。



(a) 边坡坡率1:3



(b) 边坡坡率1:5



(c) 边坡坡率1:7

图10 坡面回淤局部安全系数

Fig. 10 Local safety factors of back silting

由图10可知,当坡面平均回淤厚度达到2.8 m时,

通过放坡清淤,1:5和1:7坡率的基槽边坡坡面回淤的局部安全系数分别达1.398和2.098,明显高于基槽设计要求的安全系数控制值1.2,说明1:5和1:7坡率的槽边坡对回淤物有较好的承载能力。对坡率为1:3的基槽边坡,当坡面平均回淤厚度达2 m时,即使采用1:2.5的坡率对回淤进行放坡处理,其坡面回淤的安全系数为1.164,低于控制标准值。由此可知,对于1:3~1:7坡率的南边坡,其坡面回淤厚度较小,采用放坡清淤的方式是可行的;北边坡回淤厚度较大,应将1:3坡率的北边坡坡面回淤全部清除。

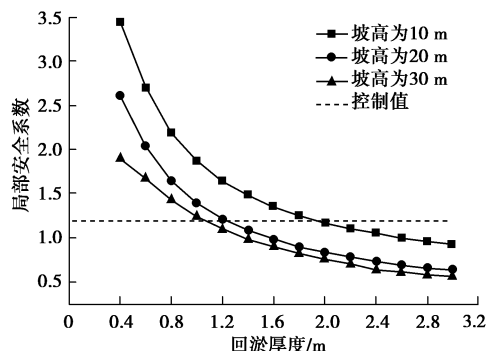
5.2 坡高对坡面回淤稳定性影响

(1) 坡高对坡面回淤稳定性影响规律研究

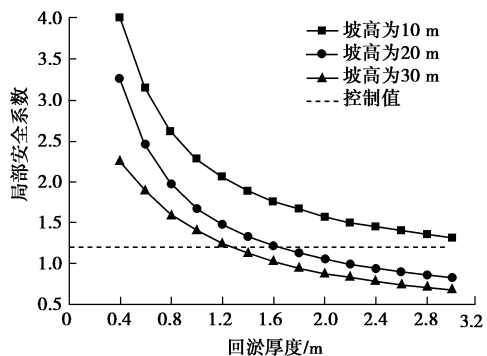
基槽坡高不仅影响边坡的整体稳定性,对坡面回淤的局部稳定性也有较大影响。本节研究中,分别选取高度为10, 20, 30 m的基槽边坡建立数值模型。

图11为基槽边坡坡率为1:3时,不同坡高情况下的坡面回淤局部安全系数-回淤厚度曲线。由图11可知,当坡面的回淤厚度相同时,边坡坡高越大,放坡清淤后的局部安全系数越小;且清淤坡率越缓,局部安全系数随坡高改变而发生变化的幅度越大。

由图11可知,减缓清淤坡率可提高回淤物的稳定性。当坡面平均回淤厚度为3 m时,10 m高的基槽边坡采用1:2的清淤坡率即可使回淤物的安全系数大于控制标准值1.2;然而对于30 m高的基槽边坡,即使采用1:2.5的清淤坡率,回淤物的安全系数仍小于1,需将其全部清除才能满足安全性要求。



(a) 清淤坡率1:N=1:1.5



(b) 清淤坡率1:N=1:2

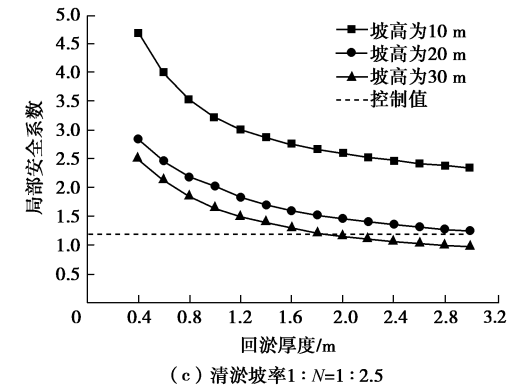


图 11 不同坡高的基槽坡面回淤局部安全系数(边坡坡度 1 : 3)
Fig. 11 Local safety factors of back silting with different slope heights (slope rate of 1 : 3)

图 12 为基槽边坡坡率为 1 : 5 时, 不同坡高情况下的坡面回淤局部安全系数 - 回淤厚度曲线。与 1 : 3 坡率的基槽边坡相比, 1 : 5 坡率的基槽边坡对回淤物的承载能力要好很多。当坡面平均回淤厚度达到 3 m 时, 采用 1 : 4 的清淤坡率, 10, 20, 30 m 高的基槽坡面回淤局部安全系数分别为 3.055, 1.681, 1.329, 均明显高于控制标准值 1.2。

图 13 为基槽边坡坡率为 1 : 7 时, 不同坡高情况下的坡面回淤局部安全系数 - 回淤厚度曲线。由图 13 可知, 当坡面回淤厚度达到 3 m 时, 采用 1 : 6 的清淤坡率, 10, 20, 30 m 高的基槽坡面回淤的局部安全系数分别为 5.461, 2.868, 2.172, 均明显高于控制标准值 1.2。相比于 1 : 3 和 1 : 5 坡率的边坡, 1 : 7 坡率的边坡回淤承载能力更好。

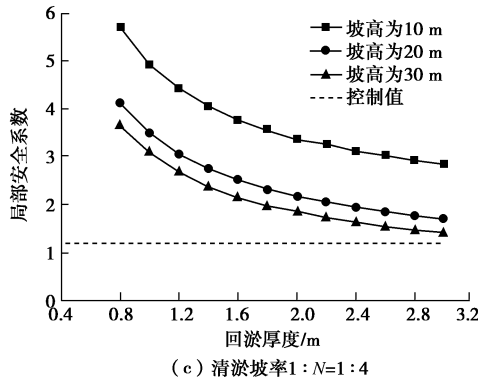
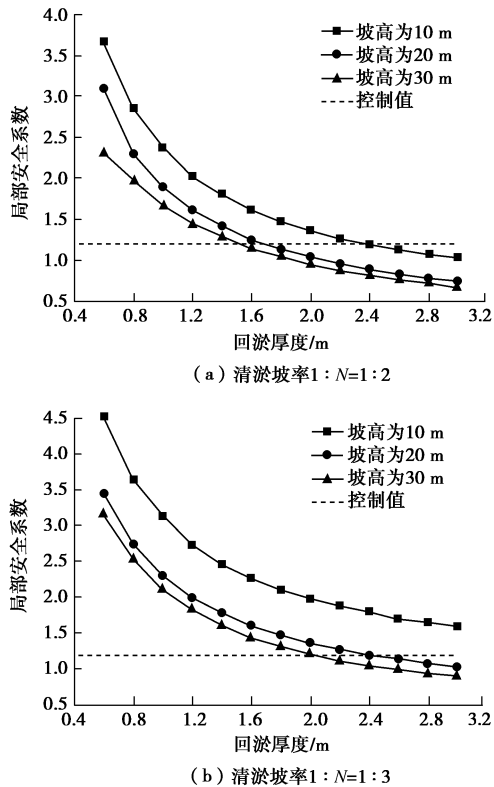


图 12 不同坡高的基槽坡面回淤局部安全系数(边坡坡度 1 : 5)
Fig. 12 Local safety factors of back silting with different slope heights (slope rate of 1 : 5)

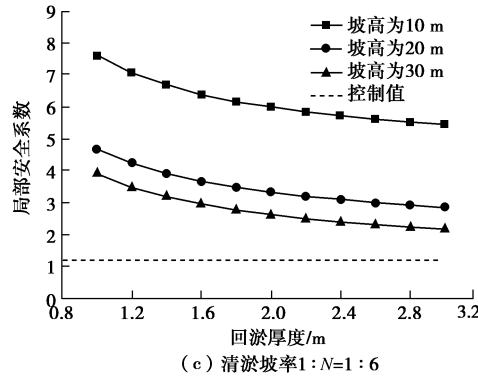
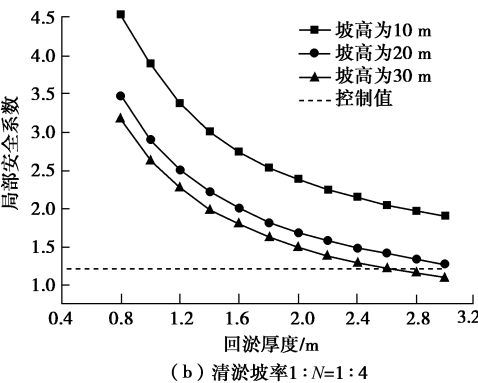
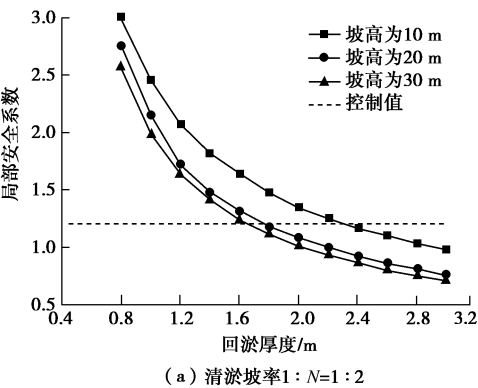


图 13 不同坡高的基槽坡面回淤局部安全系数(边坡坡度 1 : 7)
Fig. 13 Local safety factors of back silting with different slope heights (slope rate of 1 : 7)

(2) 不同坡高基槽边坡的回淤承载能力

综上所述,坡高对坡面回淤物的稳定性有较大影响。对于高度较小的基槽边坡,通过放坡清淤即可使坡面回淤物保持稳定。而对于高度较大的基槽边坡,当坡面回淤厚度较大时,放坡清淤可能仍无法满足安全性要求,需将坡面回淤物全部清除。

表 2 列出了不同坡高与坡率下,基槽边坡所对应的回淤承载值,即当坡面回淤厚度达到该值时,采用放坡清淤能使坡面回淤的安全系数大于 1.2。由表 2 可以看出,1:3,1:5,1:7 坡率基槽边坡的回淤承载能力均较好,当基槽高度不超过 20 m 时,其回淤承载值均大于 3 m。但当基槽高度达到 30 m 后,1:3 坡率的基槽边坡回淤承载值变为了 1.8 m,可见 1:3 坡率基槽边坡的承载能力对坡高值更敏感。

表 2 不同基槽边坡的回淤承载值

Table 2 Load values of back silting for different slopes (m)			
坡高/m	边坡坡率		
	1:3	1:5	1:7
10	>3	>3	>3
20	>3	>3	>3
30	1.8	>3	>3

(3) 清淤坡率的确定

根据试挖槽回淤观测试验得到:在为期 345 d 的观测期内,北边坡和南边坡的平均回淤厚度分别为 1.08, 0.31 m。深中通道沉管隧道的基槽粗挖完成后,要经过 1~2 a 的晾槽。因此北边坡和南边坡的预估平均回淤厚度分别为 1.14~2.29, 0.33~0.66 m, 研究中以最大预估估值作为控制标准。

结合图 11~13 中数据,总结出了表 3 中的不同基槽边坡清淤坡率上限值,即清淤坡率小于该值时,可使坡面回淤的安全系数值大于 1.2。由表 3 可知,南边坡的回淤厚度较小,对坡底回淤进行少量清除,即对 1:3, 1:5, 1:7 坡率的基槽南边坡,分别采用较陡的 1:1.5, 1:2, 1:2 清淤坡率,坡面回淤物即可保持稳定。而北边坡的回淤厚度较大,对于 1:3 的基槽边坡,当坡高较大时,需将回淤物全部清除才能满足安全性要求;对于坡高值较小的 1:3 坡率基槽边坡和坡率为 1:5, 1:7 的基槽边坡,通过放坡清淤即可满足基槽安全性要求并减少清淤量的目的。因此,在确定放坡清淤方案时,应结合回淤厚度进行区分。

表 3 回淤放坡处理的坡率上限值

Table 3 Upper limit values of desilting slope rate						
边坡坡率	南边坡			北边坡		
	10 m	20 m	30 m	10 m	20 m	30 m
1:3	1:1.5	1:1.5	1:1.5	1:2	1:2.5	1:3
1:5	1:2	1:2	1:2	1:2	1:3	1:4
1:7	1:2	1:2	1:2	1:2	1:3	1:4

注:回淤放坡坡率与边坡坡率相等时,为将回淤物全部清除。

5.3 回淤抗剪强度指标对稳定性影响规律

前文研究中,将表层淤泥的直剪快剪指标进行

50%的折减作为坡面回淤的抗剪强度指标。实际回淤物的抗剪强度与晾槽时间和季节相关,有必要对回淤物抗剪强度值的影响作进一步研究。将表层淤泥的直剪快剪指标中的内摩擦角和黏聚力分别进行 30%, 50%, 70%的折减作为坡面回淤的抗剪强度指标,按前文分析方法分别计算坡面回淤的局部安全系数。

取较不利的 30 m 高的基槽边坡进行数值建模, 1:3, 1:5, 1:7 坡率的基槽边坡分别采用 1:2.5, 1:4, 1:6 的清淤坡率。图 14 为不同折减比例的情况下,坡面回淤局部安全系数-回淤厚度曲线。由图 14 可知,当坡面回淤厚度相同时,回淤物的抗剪强度指标越小,其局部安全系数越小。且回淤物的抗剪强度指标越小,当回淤厚度增大时,坡面回淤的安全系数下降速度越快。当折减比例为 30%时,1:3 坡率的基槽边坡可承载回淤厚度不到 0.8 m。当折减比例为 70%时,各坡率边坡可承载回淤厚度均超过 2.4 m。

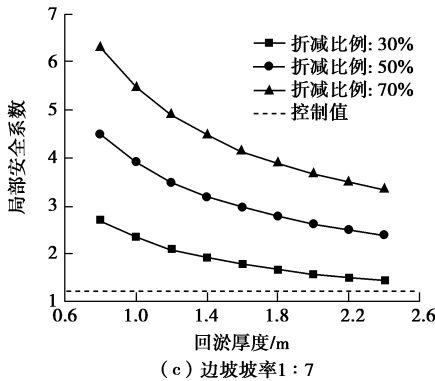
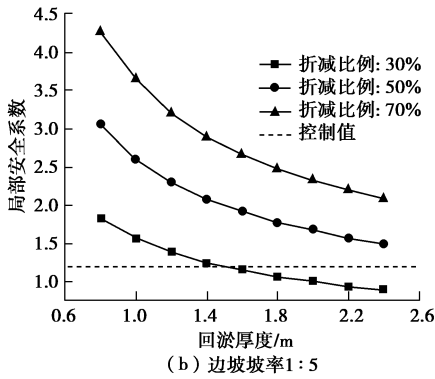
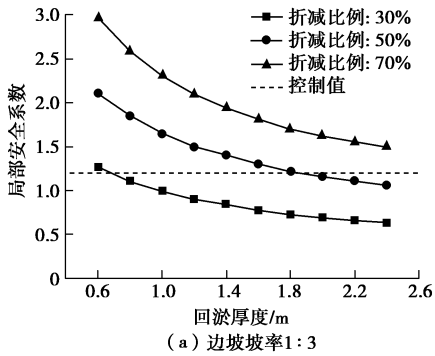


图 14 抗剪强度不同时的回淤局部安全系数

Fig. 14 Local safety factors of back silting with different shear strengths

由试挖槽回淤观测试验成果可知,洪季中坡面的浮泥厚度较大,浮泥具有密度小、抗剪强度低的特征。进入枯季后,回淤物逐渐密实而抗剪强度得到一定提升。若沉管结构沉放前正处于回淤强度较大的洪季,坡面回淤物的抗剪强度较低,且可能产生新的回淤物累积,应综合考虑精挖前累积的回淤厚度、基槽坡率、坡高、晾槽时间长短等因素,尽量采用较缓的清淤坡率或将回淤全部清除。若沉管结构沉放前正处于枯季,坡面回淤的抗剪强度在密实过程中得到了较大提高,南北两侧边坡通过放坡清淤的方式均能满足基槽边坡的稳定性要求。

6 结 论

(1) 基槽回淤分布特征复杂。回淤平面分布差异明显,槽底、北坡、南坡的回淤量依次减小。回淤竖向分布不均,从上至下呈递减趋势。回淤全年分布不均,洪季时回淤量大,枯季时回淤量小,回淤物逐渐密实而密度增大。

(2) 回淤厚度较小时,基槽边坡的稳定性主要由边坡土体控制,回淤厚度对基槽边坡稳定性影响不大。回淤厚度较大时,基槽边坡的稳定性由坡面回淤控制,坡面回淤的局部安全系数随回淤厚度的增大而迅速减小。

(3) 回淤物厚度增大、清淤坡率增大、基槽坡高增大、边坡坡度增大、回淤抗剪强度降低均不利于坡面回淤的稳定性,清淤坡率应考虑各影响因素和所处季节综合确定。

(4) 基槽南北边坡的回淤量差异明显。在确定放坡清淤方案时,应对南北坡加以区分。

参考文献:

- [1] 吕勇刚. 港珠澳大桥沉管隧道工程[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(9): 1193 - 1195. (LÜ Yong-gang. Immersed tunnel project of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(9): 1193 - 1195. (in Chinese))
- [2] 徐国平, 黄清飞. 深圳至中山跨江通道工程总体设计[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(4): 627 - 637. (XU Guo-ping, HUANG Qing-fei. General design of Shenzhen-Zhongshan river-crossing link project[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(4): 627 - 637. (in Chinese))
- [3] 许超. 大连湾海底隧道项目 PPP 方案研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018. (XU Chao. A Study on PPP Implementation of Dalian Cross-Sea Tunnel Project[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese))
- [4] 方华. 沉管隧道基槽边坡稳定性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010. (FANG Hua. A Study on Slope Stability of the Foundation Trench of Immersed Tube Tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese))
- [5] 杨华, 王汝凯, 韩西军, 等. 港珠澳大桥沉管隧道基槽泥沙回淤研究总述及创新实践[J]. 水道港口, 2018, 39(2): 125 - 132. (YANG Hua, WANG Ru-kai, HAN Xi-jun, et al. Research summary and innovative practice on back silting of foundation trench in the Hong Kong-Zhuhai-Macao immersed tunnel project [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(2): 125 - 132. (in Chinese))
- [6] 贺少辉, 张弥, 王磊, 等. 高速铁路长江沉管隧道节段沉放对基槽边坡稳定坡率的影响研究[C]// 海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会, 1999, 北京. (HE Shao-hui, ZHANG Mi, WANG Lei, et al. Effect of immersed tunnel's sinking on slope stability of foundation trench slope in Yangtze River high speed railway project[C]// Cross-strait Academic and Technical Seminar on Tunnels and Underground Engineering, 1999, Beijing. (in Chinese))
- [7] 肖明清. 长江沉管隧道水下基槽边坡的稳定性与合理坡率[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(1): 42 - 46. (XIAO Ming-qing. Stability and suitable slope ratio of underwater foundation trench in Yangtze River immersed tunnel project[J]. Modern Tunnelling Technology, 2001, 38(1): 42 - 46. (in Chinese))
- [8] 周顺华, 刘建国, 李尧臣. 水下边坡稳定性分析[J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(2): 180 - 185. (ZHOU Shun-hua, LIU Jian-guo, LI Yao-chen. Analysis of the stability of underwater slope[J]. Tunnel Construction, 2002, 37(2): 180 - 185. (in Chinese))
- [9] 刘建国, 周顺华, 宫全美. 水下边坡稳定性计算模式的探讨[J]. 上海铁道大学学报, 2000(2): 35 - 38. (LIU Jian-guo, ZHOU Shun-hua, GONG Quan-mei. Discussion on calculation model of underwater slope stability[J]. Journal of Shanghai Tiedao University, 2000(2): 35 - 38. (in Chinese))
- [10] 喻卫华. 水下基槽边坡的稳定性分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2010. (YU Wei-hua. Analysis on Stability of Underwater Slope[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [11] 何波, 苏煜, 杨景鹏, 等. 深圳至中山跨江通道工程沉管隧道基槽回淤观测试验专题——现场回淤实测分析报告[R]. 广州: 中交广州航道局有限公司, 2017. (HE Bo, SU Yu, YANG Jing-peng, et al. Observation Test of Back Silting in the Shenzhen-Zhongshan Immersed Tunnel Project: Analysis Report of Field Measurement[R]. Guangzhou: China Jiaotong Guangzhou Waterway Bureau Co., Ltd., 2017.

- (in Chinese))
- [12] 韩志远, 谢勇亮. 深圳至中山跨江通道工程沉管隧道基槽回淤观测试验专题——试挖槽水域现场勘测资料成果汇编[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2017. (HAN Zhi-yuan, XIE Yong-liang. Observation Test of Back Silting in the Shenzhen-Zhongshan Immersed Tunnel Project: Compilation of the Site Survey Materials in the Trial Trench Waters[R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engine, 2017. (in Chinese))
- [13] 金文良, 韩志远, 李怀远, 等. 深中通道沉管隧道试挖槽回淤特征研究[J]. 水道港口, 2019, 40(1): 1 - 6. (JIN Wen-liang, HAN Zhi-yuan, LI Huai-yuan, et al. Back silting analysis of the trial dredged-trough for immersed tube tunnel of Shenzhen-Zhongshan Link[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2019, 40(1): 1 - 6. (in Chinese))
- [14] 林 枫, 陶履彬, 朱合华. 水下边坡稳定性分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(增刊 1): 2149 - 2153. (LIN Feng, TAO Lü-bin, ZHU He-hua. Research on stability of submerged slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(S1): 2149 - 2153. (in Chinese))
- [15] 刘 博. 波浪作用下海底斜坡稳定性的极限分析上限方法与数值分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2014. (LIU Bo. Upper Bound Approach of Limit Analysis and FE Numerical Analysis of Stability of Submarine Slope Considering the Wace-Induced Pressure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [16] 王 旭, 刘东升, 宋强辉, 等. 基于极限平衡法的边坡稳定性可靠度分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(3): 839 - 844. (WANG Xu, LIU Dong-sheng, SONG Qiang-hui, et al. Slope Stability Reliability analysis based on limit equilibrium methods[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(3): 839 - 844. (in Chinese))
- [17] TSCHUCHNIGG F, SCHWEIGER H F, SLOAN S W. Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. Part II: Back analyses of a case history[J]. Computers & Geotechnics, 2015, 70: 178 - 189.
- [18] SHI L, SUN G. Improvement of the finite-element-based limit equilibrium method to include changes in groundwater: a case study of a deforming bank slope from the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(9): 333.
- [19] 种记鑫. 基于有限元极限平衡法的锚固边坡稳定性分析[J]. 防灾减灾学报, 2017, 33(4): 32 - 38. (CHONG Ji-xin. Stability analysis of anchored soil slope based on finite element limit equilibrium method[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2017, 33(4): 32 - 38. (in Chinese))
- [20] 杨 辉. 边坡稳定分析的有限元极限平衡法原理及程序实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2014. (YANG Hui. The Theory and Programming Implementation of Limit Equilibrium Method Based on the Finite Element Stress Field[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese))
- [21] 徐国平, 张尧禹, 肖西卫, 等. 深圳至中山跨江通道工程(岛隧工程)施工图设计——工程地质勘察报告[R]. 北京: 中交公路规划设计院有限公司, 2017. (XU Guo-ping, ZHANG Yao-yu, XIAO Xi-wei, et al. Construction Design of Shenzhen-Zhongshan River-Crossing Passag (Island Tunnel Project): Engineering Geological Survey Report[R]. Beijing: CCCC Highway Consultants CO., Ltd., 2017. (in Chinese))