深厚淤泥爆炸挤淤填石围堤稳定性的有限元分析

程李凯
(福建省交通建设质量安全监督局，福建 福州 350001)

摘要：结合福建罗源湾可门作业区4#，5#泊位深厚淤泥爆炸挤淤围堤工程，运用Midas/GTS有限元程序建立深厚淤泥爆炸挤淤填石围堤的稳定分析模型。基于有限元强度折减理论，对其安全系数进行求解，探讨相关参数对填石围堤滑动稳定性的影响。

关键词：深厚淤泥；填石围堤；稳定性；有限元

中图分类号：TU 473　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1002-4972(2013)03-0067-05

Stability of dike constructed by explosive squeezing mud and stone-filling method in deep soft ground based on finite element analysis

CHENG Li-kai
(Bureau of Communication Quality and Safety Supervision of Fujian Province, Fuzhou 350001, China)

Abstract: Based on the dike constructed by explosive squeezing mud and stone-filling method in deep soft ground of No. 4 & No. 5 berth at Kemen port, Luoyuan bay, Fujian province, this paper establishes the stability analysis model of dike by Midas/GTS finite element program. The safety factors of stability are solved based on the strength reduction theory, and the effects on stability of relevant parameters of filling stone are discussed.

Key words: deep mud; filling dike; stability; finite element

目前对于深厚淤泥爆炸挤淤围堤滑动稳定性分析尚无较为成熟的方法，围堤形状与传统堤坝不同，其复杂性也增加了力学分析上的困难。稳定性研究进展方面，李涛等[1]就淤泥粘聚力随深度增加与否从部分和总体稳定分析推导出两种稳定计算公式；另外，谭昌明等[2-3]对合理的泥石置换深度提出了可行的分析方法。本文结合福建罗源湾可门作业区4#，5#泊位深厚淤泥爆炸挤淤围堤提出了可能的围堤置换形式，并在此基础上运用Midas/GTS有限元程序建立深厚淤泥爆炸挤淤填石围堤的稳定分析模型，基于有限元强度折减理论，对其安全系数进行求解，同时探讨相关参数对填石围堤滑动稳定性的影响。

1　强度折减系数法与Midas/GTS程序

1.1　基于有限元强度折减法的基本原理

强度折减法就是将坡体的强度参数c和tanφ同时除以一个折减系数F，得到一组新的c_e和φ_e值，然后将其作为初始参数重新输入模型进行再次计算，直至模型发生破坏，此时的F值即为计算模型的安全系数。

强度参数的折减按下式进行：

$$c_e=c/F_{trial} \quad (1)$$

$$\tan\varphi_e=\tan\varphi/F \quad (2)$$

$$\varphi_e=\arctan(\tan\varphi/F) \quad (3)$$

1.2　稳定安全系数的物理意义

有限元强度折减法求出的安全系数的物理意

收稿日期：2012-12-06

作者简介：程李凯（1969—），男，高级工程师，从事港口与航道工程。

义见图1。若土坡的应力分布为σ_{ij} (x,y)，则相应滑裂面上的正应力σ和剪应力τ的合力与滑动体所受的外力w相平衡，即σ和τ的分布反映了滑动体ABC上全部外力在滑裂面AB上的作用效果。

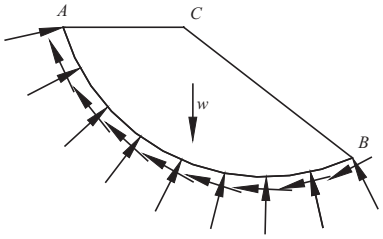


图1 滑动体受力示意

边坡失稳时，土体的破坏区通常从一点开始逐渐扩展直到整条滑裂面贯通，同时土体的内力也随之不断地变化。假设土坡沿某一滑裂面发生破坏，则对破坏面上的各点均有：

$$\tau=\tau_f/F \qquad (4)$$

式中：τ为沿滑裂面的剪应力；τ_f为该点的抗剪强度；F为强度折减系数。

当滑裂面上的一点i处于极限平衡状态时，在该点滑裂面曲线方向取微元长度向量Δl_i，令$T_i=\tau_i \Delta l_i$和$R_i=-\tau_{fi} \Delta l_i/F_i$（图2），则有：

$$T_i + R_i = \tau_i \Delta l_i - \frac{\tau_{fi}}{F_i}\Delta l_i = 0 \qquad (5)$$

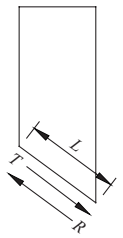


图2 微元Δl_i受力

于是对于整个滑裂面则有：

$$\sum \tau_i \Delta l_i - \sum \frac{\tau_{fi}}{F}\Delta l_i = 0 \qquad (6)$$

当式（6）第2项不等于零时，那么总存在一个$\overline{F}$使：

$$\sum \frac{\tau_{fi}}{F}\Delta l_i = \frac{\sum \tau_{fi}\Delta l_i}{\overline{F}} \qquad (7)$$

$$\overline{F} = \sum \tau_{fi}\Delta l_i / \sum \tau_i \Delta l_i \qquad (8)$$

进一步可得沿滑裂面的各点均达到极限平衡时土体的平均强度折减系数：

$$F = \int_l \tau_f \mathrm{d}l \Big/ \int_l \tau \mathrm{d}l \qquad (9)$$

2 爆炸挤淤围堤典型断面整体滑动稳定性

采用Midas/GTS有限元的phi-c折减系数法，利用其中的平面应变单元建立围堤稳定性的二维模型，模型各参数和图形分别见表1和图3，置换深度H为25 m，海水水位h为0 m，泥石混合层厚度a为2.5 m。各材料采用Mohr-Coulomb本构模型。

表1 围堤稳定数值模拟材料特性

土体	天然密度/(t·m^{-3})	泊松比	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/GPa
填 石	2.00	0.25	0.2	40	200
吹填砂	1.70	0.30	0.2	25	13
淤 泥	1.57	0.45	17.0	2	5
泥石混合层	2.00	0.41	7.8	17	44
粉质黏土	1.80	0.35	22.0	15	20

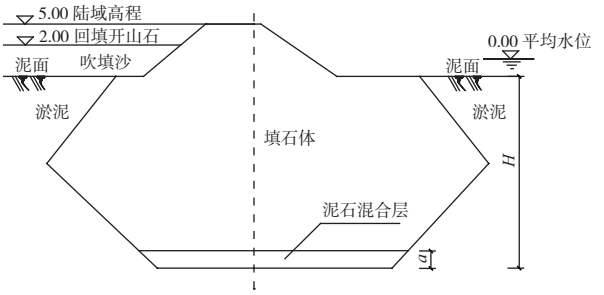


图3 模型参数

福建罗源湾可门作业区4#，5#泊位西围堤和北围堤的整体抗滑动安全系数计算结果见表2。可以看出，各断面的整体滑动稳定安全系数均大于1.0，处于稳定状态。

表2 整体滑动稳定安全系数

围堤	钻孔断面	抛石层底高程/m	实际泥石混合层厚度/m	稳定安全系数
西围堤	K0+120	−22.20	0.8	1.5
	K0+175	−23.70	1.6	1.6
	K0+210	−26.49	0.8	1.9
	K0+290	−24.84	1.6	1.5
	K0+470	−27.88	1.4	2.0
	K0+660	−21.84	1.0	1.4
北围堤	K0+940	−35.31	2.0	1.7
	K1+050	−28.32	6.0	1.3
	K1+190	−39.87	0.6	2.7
	K1+252	−33.09	2.3	2.1
	K1+290	−32.78	0.8	1.9
	K1+400	−29.05	0.4	2.0

为了探讨不同置换效果下深厚淤泥爆炸挤淤围堤的稳定性，分别计算围堤不同挤淤效果（不同置换形式和置换率）的稳定性。

1）置换形式1 ——围堤全部被填石所置换。

以北围堤为例，经过求解，围堤内侧填土有斜向下的位移，最大可达0.56 m；围堤底部出现应力集中，是应力最大的地方，最大有效剪应力达到120 kPa，同时底部产生一定的压缩位移。当围堤底部全部被填石置换时，围堤整体滑动安全系数计算结果为4.8，围堤不会发生整体滑动破坏。

2）置换形式2 ——围堤下部全部为泥石混合层。

分析围堤下部置换率分别为20%，40%，60%和80%时的围堤稳定性，不同置换率对围堤的最大位移影响不大。当泥石层厚度为2 m，置换率为20%时，围堤抗整体滑动安全系数为2.7，不会发生整体滑动破坏。当泥石混合层厚度和置换率不同时，根据围堤抗整体滑动安全系数计算结果，泥石混合层厚度及其置换率对整体滑动稳定性的影响关系见图4。可以看出，当泥石置换率达到10%，泥石混合层厚度为4 m时，发生整体滑动破坏；当置换率为0，即为纯淤泥层时，厚度达到2 m时，就处于整体滑动的边缘。

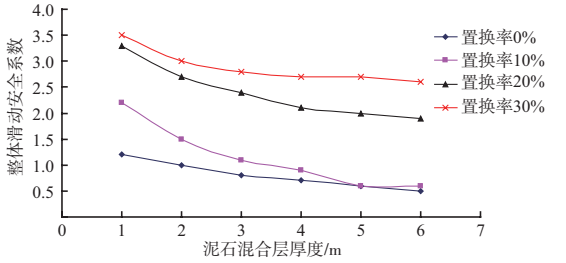


图4　不同泥石置换层厚度和置换率时围堤抗整体滑动安全系数

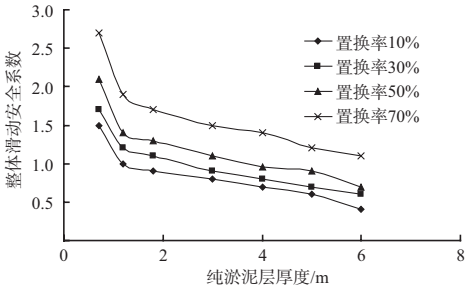
可以看出，围堤抗整体滑动安全系数与泥石混合层厚度及置换率近似呈指数关系。在不同置换率下，安全系数与泥石混合层厚度的关系式为：

$$\begin{cases} K_Z=1.40\exp(-0.17D_{sm}) & \text{置换率为0\%} \\ K_Z=2.64\exp(-0.27D_{sm}) & \text{置换率为10\%} \\ K_Z=3.44\exp(-0.11D_{sm}) & \text{置换率为20\%} \\ K_Z=3.45\exp(-0.05D_{sm}) & \text{置换率为30\%} \end{cases} \quad (10)$$

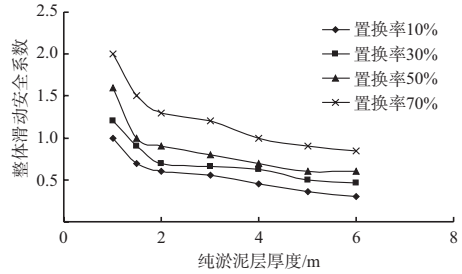
式中：D_{sm}为泥石混合层厚度（m）。

3）置换形式3——围堤下部为泥石混合层和淤泥层。

围堤下部为泥石混合层和淤泥层时，围堤整体滑动稳定安全系数随未置换淤泥厚度的变化而变化，泥石混合层厚度为2 m和6 m时其变化关系如图5所示。可以看出，淤泥层厚度越大，泥石混合层置换率越低，稳定性越差，越易发生整体滑动破坏。



a）泥石混合层厚度为2 m



b）泥石混合层厚度为6 m

图5　不同的置换率下围堤整体滑动安全系数与纯淤泥层厚度关系

3　各个因素对围堤整体滑动的影响

影响围堤稳定程度的因素大致可分为3类，即围堤本身填料与几何性质、地质因素、海况情况。在此结合工程实际，选取影响围堤稳定性的5个重要参数进行对比分析，即泥石置换深度H（反映工程的施工质量）、填石体的内摩擦角φ_s（反映工程的施工质量）、淤泥的内摩擦角φ_y和黏聚力c_y（反映工程的地质因素）和泥石混合层厚度a（反映工程的施工质量）。选取的方案如下：保持5个参数中的4个参数为常量，1个为变量，计算围堤稳定安全系数的变化情况。

3.1　泥石置换深度的影响

对泥石置换深度H分别取15，17.5，20，

22.5，25和30.0 m计算安全系数。不同泥石置换深度对应着不同的围堤滑动面形态，其中置换深度25.0 m时的围堤滑动面形态见图6，此时围堤的可能滑动面基本处于淤泥层中。由图7可知，当置换深度≥15 m时，围堤就基本处于安全状态。在工程实际中，为保证围堤的稳定（F_s≥1.2），泥石置换应达到一定的深度（H≥23 m）；当H<22.5 m时，围堤安全系数基本保持不变；当H>22.5 m时，围堤安全系数随置换深度的加大快速增长。

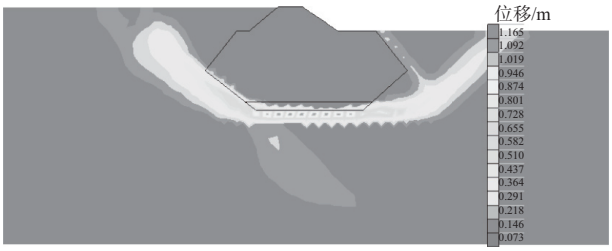


图6 泥石置换深度25.0 m时围堤滑动面形态

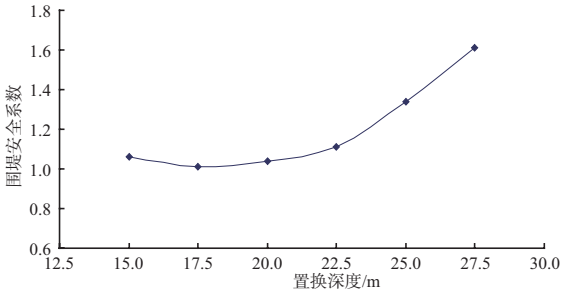


图7 围堤安全系数随置换深度的变化关系

3.2 填石体内摩擦角的影响

对填石体的内摩擦角φ_s分别取13°，15°，17°，20°，25°，30°，37°，45°，60°计算安全系数。不同填石体内摩擦角对应着不同的围堤滑动面形态，其中φ_s=20°时，围堤滑动面形态见图8，此时堤身有发生滑动的趋势。由图9可知，当φ_s<30°时，围堤安全系数随着填石体内摩擦角的增大而提高；当φ_s>30°时，围堤安全系数随填石体内摩擦角的变化趋于平稳；φ_s<20°时，围堤堤身有发生滑动的趋势；当φ_s<15°时，围堤处于不安全状态。工程实际中，应保证围堤填石体堤身具有一定的密实度。

3.3 淤泥内摩擦角的影响

其他参数不变，淤泥内摩擦角φ_y取不同的值计算围堤的安全系数。不同淤泥内摩擦角对应着不同的围堤滑动面形态，其中淤泥内摩擦角为4°时

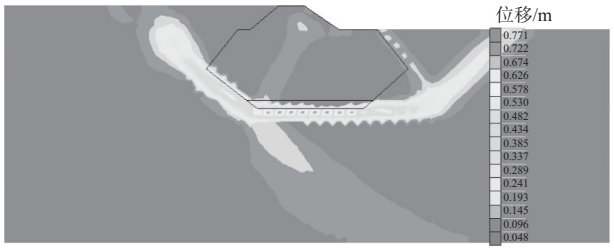


图8 填石体内摩擦角φ_s=20.0° 时围堤滑动面形态

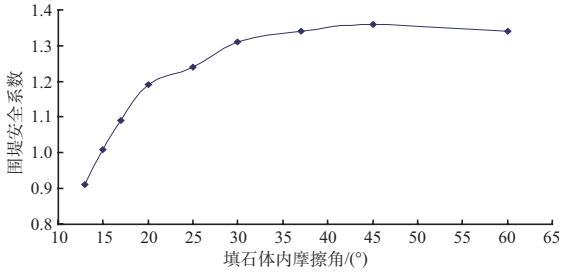


图9 围堤安全系数随填石体内摩擦角的变化

的围堤滑动面形态见图10，同时由图11可知，随着淤泥内摩擦角的增大（φ_y>4°），围堤底部粉质黏土层有明显发生滑动的趋势，围堤安全系数随着淤泥内摩擦角的增大呈线性增大。

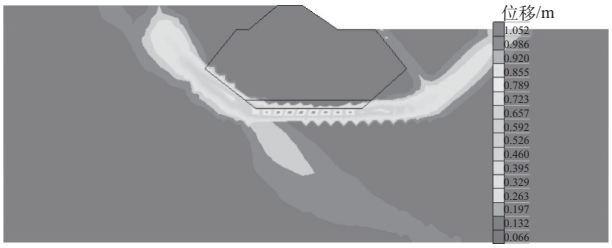


图10 淤泥内摩擦角4.0°时围堤滑动面形态

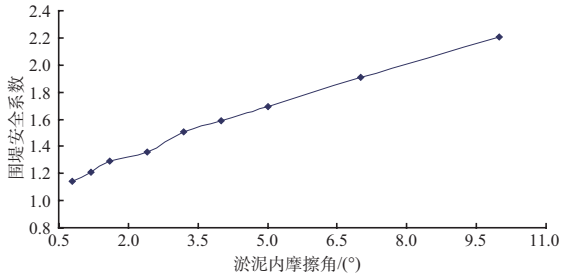


图11 围堤安全系数随淤泥内摩擦角的变化关系

3.4 淤泥粘聚力的影响

其他参数不变，淤泥粘聚力c_y取不同的值计算围堤的安全系数。不同淤泥粘聚力对应着不同的围堤滑动面形态，并从中得出安全系数与淤泥粘聚力的变化关系见图12，可知围堤安全系数随着淤泥粘聚力的增大基本呈线性增大，当c_y<10 kPa

时，围堤处于失稳状态。围堤施工完毕后，地基土强度随着固结时间的持续而逐渐增大。若围堤填石和堤内填土同时施工，则围堤有发生整体滑动破坏的可能性；但随着时间的持续，围堤底部未置换的淤泥层强度逐渐提高，待提高到一定程度时，围堤内侧的填土再行施工，可避免围堤发生整体滑动破坏。

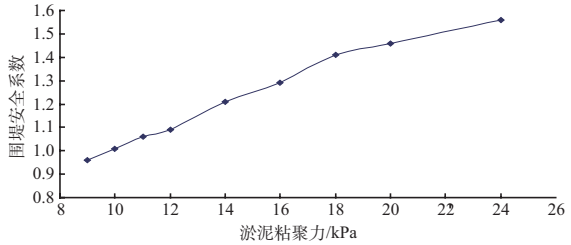


图12　围堤安全系数随淤泥黏聚力的变化关系

3.5　泥石混合层厚度的影响

其他参数不变，泥石混合层厚度a取不同的值计算围堤的安全系数。不同泥石混合层厚度对应着不同的围堤滑动面形态，并从中得出安全系数与泥石混合层厚度的变化关系见图13，可知随着泥石混合层厚度的增大，围堤滑动面形态无变化。围堤安全系数随着泥石混合层厚度的增大而减小，但变化量并不大，这说明泥石混合层厚度的变化对围堤稳定的影响并不明显。

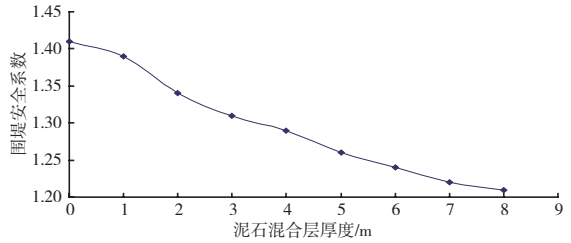


图13　围堤安全系数随泥石混合层厚度的变化关系

4　结论

1）围堤底部出现应力集中，是应力最大的地方，并产生一定的压缩位移。当泥石置换率达到10%，泥石混合层厚度为4 m时，就会发生整体滑动破坏；当置换率为0，即为纯淤泥层时，当厚度达到2 m时，就处于整体滑动的边缘。

2）分析了相关模型参数对围堤稳定的影响：①当泥石混合层厚度为2.5 m，置换深度≥15 m时，围堤基本处于安全状态，在工程实际中，为保证围堤的稳定（F_s≥1.2），泥石置换应达到一定的深度（H≥23 m，即置换率达到84%），但有待进一步工程验证和完善；当泥石置换深度H<22.5 m时，围堤安全系数基本保持不变；当H>22.5 m时，围堤安全系数随置换深度的加大快速增长。②当φ_s<20°时，围堤堤身有发生滑动的趋势，围堤安全系数随着填石体内摩擦角的增大而提高；当φ_s>30°时，围堤安全系数随填石体内摩擦角的变化趋于平稳；当φ_s<15°时，围堤处于不安全状态。③围堤安全系数随着淤泥内摩擦角的增大呈线性增大，当φ_y>4°时，围堤底部粉质黏土层有明显发生滑动的趋势。④围堤安全系数随着淤泥黏聚力的增大基本呈线性增大，当c_y<10 kPa时，围堤处于失稳状态。⑤围堤安全系数随着泥石混合层厚度的增大而减小，但变化量不大。

参考文献：

[1]　李涛, 宋月光, 江礼茂. 爆炸排淤填石坝的稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1 127–1 132.

[2]　谭昌明, 姜朴. 爆炸挤淤法筑堤中的土工问题[J]. 水利水电科技进展, 1997, 17(4): 18–20.

[3]　谭昌明, 姜朴. 挤淤法修筑防波堤稳定性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 109–112.

（本文编辑　武亚庆）