

基于水泥土护坡结构的岛尖软土沉管隧道干坞基坑变形机理与稳定性研究

文 / 邓融宁 广西交科集团有限公司

摘要：本文针对岛尖软土地区沉管隧道干坞基坑的变形与稳定性，以某跨江沉管隧道工程为例，采用数值模拟方法探究“悬臂桩+放坡防护”型式中水泥土护坡结构的不同桩长下对基坑变形敏感性及其整体稳定性的影响。结果表明，水泥土局部加固能有效控制干坞基坑变形及稳定性，调整坑顶加固桩桩长能提高基坑整体稳定性系数，边坡底水泥土加固桩对坑底悬臂桩位移影响最显著。在确保支护结构稳定性与经济性前提下，研究得出最佳桩长组合，较原设计方案更经济。本研究可为岛尖软土地区沉管隧道设计与施工提供参考。

关键词：干坞；基坑设计；城市隧道；有限元分析；干坞边坡；沉管隧道

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.11.033

引言

随着我国经济建设加速，跨江沉管隧道成为交通发达地区建设的重点。干坞基坑作为沉管隧道预制施工的核心，尤其在岛尖软土地区，因其土壤特性（高含水率、低强度、易压缩）而面临变形失稳风险，对施工安全构成挑战。

针对干坞基坑的稳定性问题，学术界已开展了相关研究^[1-4]。例如，曾波存等^[2]利用FLAC 3D软件，对不同支护方案进行了数值模拟对比分析，揭示了各方案的变形特征，并优选出最佳支护方案。林永贵等^[3]则采用有限元方法对如意坊基坑进行了实体建模，深入剖析了其潜在的破坏机制。黄光虎等^[4]基于FLAC 3D的强度折减法，对干坞高边坡的稳定性进行了系统分析，验证了该方法在基坑整体稳定性计算中的有效性。此外，关秦川等^[5]还成功应用神经网络模型对干坞边坡的变形进行了预测。这些研究充分表明，数值模拟计算在复杂干坞基坑的分析及风险预测中展现出了显著优势，有效弥补了传统理论计算的不足^[6]。

然而，针对岛尖软土地区的特殊性，现有研究在变形机理和稳定性分析上仍有不足。因此，本文聚焦于岛尖软土沉管隧道干坞基坑，采用数值模拟手段深入探究其变形规律和受力特点，特别关注水泥土护坡结构在不同护坡桩长下的变形敏感性及其对整体稳定性的影响。本文旨在提出一种适用于岛尖软土地区的干坞基坑稳定性分析方法，为优化支护设计、提高施工效率提供理论和技术支持，并为同类工程提供参考。

一、工程概况

本文研究的干坞基坑工程，位于广东省广州市明珠湾区灵山岛尖，专为明珠湾区跨江通道沉管管节预制施

工而设计，总投资约5亿元。该基坑开挖面积约5万平方米，平均深度12米，是华南地区规模最大的岛尖软土干坞基坑之一，面临淤泥质粉质黏土带来的施工挑战。本文研究对象为干坞北侧支护结构，原方案其采用“Φ1m钻孔灌注桩悬臂3.05m支挡+桩顶放坡开挖”支护方案，放坡3级，坡身局部加固采用Φ850@600三轴搅拌桩，设置在每级坡顶，桩长（包括边坡底灌注桩）从地面往坑内依次为28m、20m、6m和28.8m。

本文运用数值模拟技术研究分析，旨在提出相较于原设计更为科学合理的方案，以提升施工效率与安全性。

二、模型构建

首先，本研究采用Midas GTS NX软件进行2D建模，针对所研究的断面进行多工况模拟。鉴于实际土体在自然状态下的加载试验中，其应力应变关系展现出高度非线性特征，单纯依赖单一的弹性模量进行表征显然不够精确，因此土层材料属性选用“修正摩尔库伦”模型进行表征^[7]。针对淤泥质土，本研究采用固结快剪参数，以便更精确地反映当地软土的抗剪强度特性。

如图1所示，坑顶位于模型左侧，右侧为坑底；干坡身每级坡平台和坑顶位置采用水泥土搅拌桩进行护坡，从左往右依次命名为1~3号桩；基坑采用搅拌桩进行坑内加固，坑边采用灌注桩（4号桩）进行悬臂支护。基坑深度为12m，从左往右每级坡高依次为3m、2.95m、3m，平台宽依次为3.25m、4m、2m，1~3号桩悬臂高度依次为1.8m、2m、2m；边坡坡率为1:1.5；坑边超载设置为30kPa。依次以L1、L2、L3为变量，分别建立3组模型进行数值模拟计算。

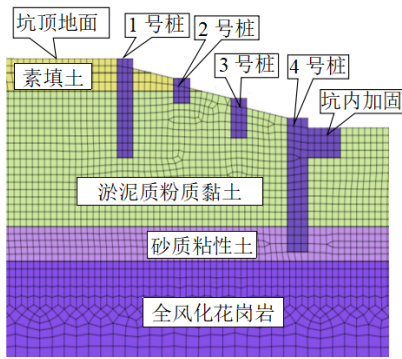


图1 干坞基坑有限元模型图

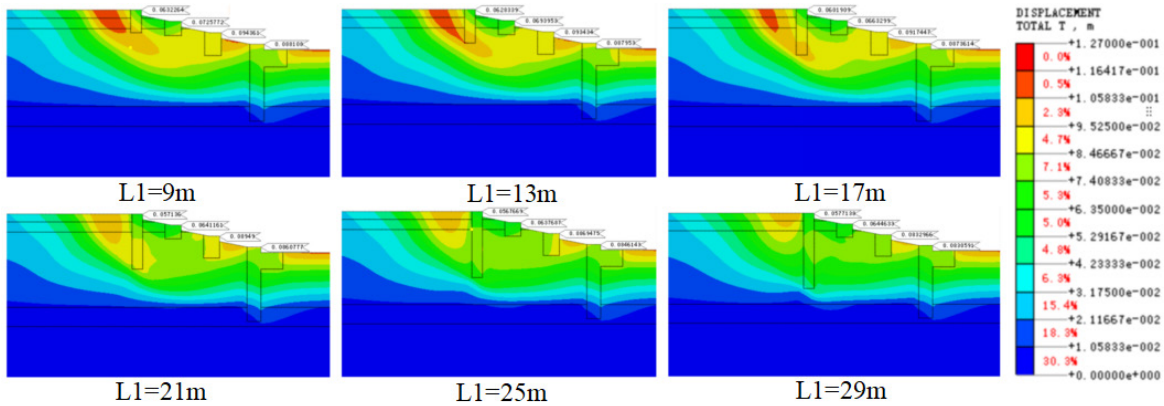


图2 L1为变量时基坑位移云图

将结果制成折线图，如图3所示。由统计折线图可知，位移量从大到小依次为坑顶地面、3号桩、4号桩、2号桩、1号桩。随L1增加，3号和4号桩位移递减，1号和2号桩先减后增（L1=21m时出现极小值），坑顶地面位移亦先减后增（L1=29m时极小）。在单调递减区间内，位移量平均减小率分别为坑顶地面75.5%、1号桩41.25%、2号桩59.38%、3号桩60.83%、4号桩25.42%。显然，L1增加对坑顶地面位移减小效果最显著，其次是3号和2号桩，对4号桩影响最小。L1>29米后，坑顶及1、2号桩位移增大，因1号桩足够长，阻隔了土体塑性区扩散，使应力主要由1、2号桩承担，而3、4号桩主要承担坡体内部土压力。

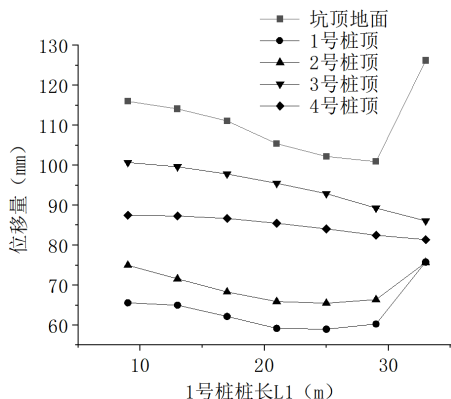


图3 L1为变量时基坑位移计算结果折线图

三、模型计算结果及分析

(一) 桩长对塑性区的影响分析

我们首先以1号桩桩长L1为变量（9至33m），其余桩长固定（L2=5m, L3=8m, L4=28.8m），进行建模计算，基坑位移云图如图2所示。结果显示，随L1增加，坑外土体塑性区逐渐减小并向地表移动。当L1<21m时，存在从坑顶至坑内贯通的塑性区，表明有潜在圆弧滑动破坏趋势。增至L1=21m时，该塑性区基本被1号桩隔断，故选定L1=21m进行后续分析。

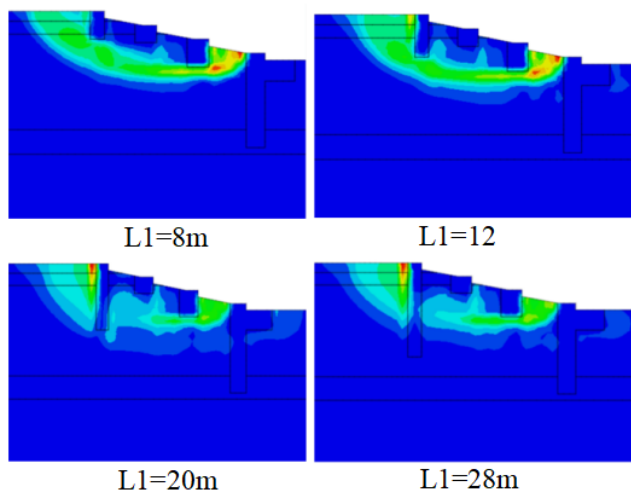
鉴于2号桩后土体塑性变形较小，3号桩右侧易应力集中，考虑经济性，提出仅增加3号桩长的方案。以L3为变量（8至24m），其余桩长固定，进行建模计算。结果显示，随L3增加，3号和4号桩间边坡土体塑性区逐渐减小，整体潜在滑动面被阻隔，L3=16m时完全阻隔。L3增加主要影响3、4号桩间坡身土体塑性区，对其余部分影响不显著。因此，建议L3取16m。

统计各工况桩顶位移发现，位移量依旧从大到小排列，但当L3>12m后，3号桩位移超过2号桩，因3号桩阻隔了部分贯通塑性区，分担更多主动土压力。在单调递减区间内，位移量平均减小率分别为坑顶地面0.62%、1号桩5.00%、2号桩34.38%、3号桩58.75%、4号桩64.38%。显然，L3增加对4号桩位移减小效果最显著，其次是3号桩（接近1号桩影响），再次为2号桩，对1号桩和坑顶地面影响可忽略。因此，改变3号桩长对减小坑顶地面位移效果不显著，但对减小坑底支护桩顶位移较为明显。

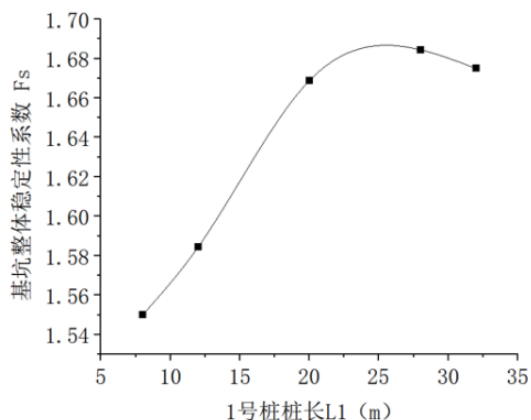
(二) 桩长对基坑整体稳定性影响

通过上述计算结果，可看出对于基坑潜在整体滑动面，1号桩具有直接阻隔能力，因此以2~4号桩的桩长为定量（L2=5m、L3=8m、L4=28.8m），L1为变量（8~32m）进行建模计算分析。为使基坑的整体稳定性计算能得到

更合理的结果，故采用强度折减法，其计算结果云图及其折线图如图4所示。



(a) 稳定性结果云图



(b) 结果折线图

图4 1号桩桩长L1为变量时基坑整体稳定性计算结果云图及折线图

由图4(a)可知，当 $L1 \geq 20m$ 时，基坑潜在整体滑动面被阻隔，同时1号桩顶的主动区靠近地表位置开始出现应力集中区。由图4(b)知， $L1=25m$ 时，曲线出现极大值，意味着 $L1=25m$ ，基坑整体稳定性最大。

通过前两小节的计算结果可知，最佳桩长组合宜为 $L1=25m$ 、 $L2=5m$ 、 $L3=16m$ 、 $L4=28.8m$ ；其建议方案对比原设计，大大减少了总桩长，实现了经济性。

结语

通过本文研究可得出以下结论：

(1) 岛尖软土地区的沉管隧道干坞基坑，由于其特殊的土壤条件（高含水率、低强度、易压缩），在施工过程中存在显著的变形失稳风险；对于“放坡+支护桩”方案中的边坡，采用混凝土局部加固的方式对变形及稳定性控制较为有效。

(2) 对于3级放坡的软土干坞基坑，通过调整坑顶的加固桩桩长（1号桩）能更有效地提高基坑整体稳定性系数；边坡底的加固桩（3号桩）对坑底悬臂桩的位移起到直接影响作用；因此对于坡身加固，从经济性和安全性角度，应重点加长1号桩，3号桩次之，2号桩可以弱化。

(3) 混凝土护坡结构在干坞基坑支护中表现出良好的性能。通过调整不同位置的护坡桩长，可以显著影响基坑的变形和稳定性。本研究通过数值模拟计算，得出了最佳桩长组合（ $L1=25m$ 、 $L2=5m$ 、 $L3=16m$ 、 $L4=28.8m$ ），相较于原设计大大减少了总桩长，实现了经济性的同时，也提高了支护结构的整体稳定性。

综上所述，本研究为岛尖软土地区的沉管隧道干坞基坑设计和施工提供了有益的参考和指导。在未来的工程中，应继续探索更为先进的支护技术和方法，以不断提高施工效率和安全性。

参考文献

- [1] 祝加欣. 基于ABAQUS软件的某基坑项目边坡稳定性分析[J]. 工程技术研究, 2023, 8(03): 27-29+37.
- [2] 曾波存, 潘传宗, 任耀谱, 等. 沉管隧道轴线干坞深基坑支护结构设计方案比选研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(13): 42-48.
- [3] 林永贵, 杨春山. 沉管隧道干坞基坑格形连续墙支护方案评价及其影响因素[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(04): 571-575.
- [4] 黄光虎, 滕伟福, 高林. 基于强度折减法的港珠澳大桥沉管隧道干坞工程高边坡稳定性分析[J]. 安全与环境工程, 2012, 19(03): 111-115.
- [5] 关秦川, 张志勇, 冯浩. 大型干坞边坡变形及其神经网络预测模型[J]. 西南交通大学学报, 2004, (02): 157-161.
- [6] 张志勇, 傅德明, 杨国祥. 干坞边坡稳定性计算及边坡变形规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, (09): 1505-1509.
- [7] 胡建林, 孙利成, 崔宏环, 等. 基于修正摩尔库伦模型的深基坑变形数值分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7717-7723.

作者简介：邓融宁（1991年10月），男，壮族，广西壮族自治区柳州市人，岩土工程师，在读博士研究生，广西交科集团有限公司，研究方向：地下结构及岩土工程。