

# 软土地区狭长基坑的抗隆起稳定性分析

黄小江<sup>1</sup> 宋燧恒<sup>2</sup>

1. 浙江嘉兴中达建设有限公司 浙江嘉兴 314300; 2. 西安建筑科技大学 陕西西安 710055

DOI:10.12238/ems.v7i6.13819

**[摘要]** 在工程设计的广阔领域中,软土区域细长型基坑的抗隆起稳定性分析是一项极具挑战性的课题。鉴于现行规范对基坑宽度对稳定性影响的考量尚显不足,设计实践中往往采取偏于保守的策略,缺乏必要的灵活变通。本文借助数值模拟方法,深刻揭示了基坑宽度与隆起变形之间的复杂关系,并得出关键结论:基坑宽度越窄,其隆起变形程度越小,稳定性表现越优。基于此重要发现,本文创新性地提出了基坑宽度分类的概念,并建立了两个经过精细优化的抗隆起稳定性评估模型。这两个模型均将基坑宽度作为核心计算参数,所得安全系数能更精确地反映实际的变形稳定性状态。研究进一步表明,在细长基坑的设计实践中,适当减少围护结构的嵌入深度不仅是可行的,还有助于实现成本控制与工程造价的优化。

**[关键词]** 狭长基坑; 抗隆起稳定性; 基坑宽度

## 1 前言

在现行的众多标准体系中,安全系数的计算需对各项参数影响进行精细量化分析,但遗憾的是,关键设计要素——基坑宽度,尚未被纳入考量范畴。以往评估基坑抗隆起稳定性时,常忽视基坑宽度这一核心要素,致使传统方法在评估狭长型基坑抗隆起变形稳定性上存在显著局限,难以精确判断。故而,深入探究此类基坑的隆起变形特性,既迫切又极具学术价值。

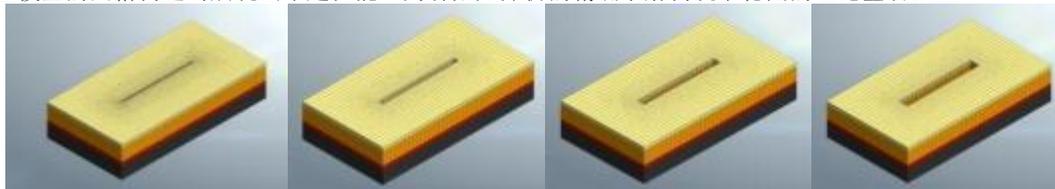
## 2 基坑宽度对隆起变形的影响

在实际生产过程中,工程地质条件纷繁复杂,施工场地更是鲜有完全雷同之例,故而通过实验手段对比不同基坑宽度对隆起变形的影响显得尤为棘手。同时,基坑宽度的变化会直接引致支护结构形式的相应调整,这无疑加剧了探究这两者间关系的复杂性与非直观程度。尽管曾有学者尝试借助模型槽展开分析,但受等比例研究框架之局限,所得参数与变形间的关联性并不突出。幸运的是,数值模拟方法的问世,为我们探究基坑宽度与隆起变形关系开辟了一条崭新途径。

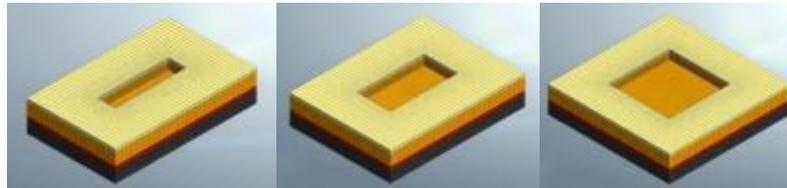
表 2-1 岩层模型参数

层号	土层名称	土层深度 (m)	重度 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力 $c$ (kPa)	内摩擦角 ( $^{\circ}$ )	弹性模量 $E'$ (kN/m <sup>2</sup> )	泊松比 $\nu'$
IV	中风化泥质粉砂岩	22.6~35	24.0	25.0	48.6	80000	0.20

在既定的参数范围内,我们巧妙地运用 MidasGTS/NX 软件,精心构建了七个宽度各异的基坑有限元模型(具体参见图 1(a)至(g)),这些模型的网格构造均展现出卓越性能,为有限元分析的精确求解构筑了稳固的理论基石。



(a) 宽度扩展至 2.5 米之宽广境界, (b) 具备长达 5 米的辽阔幅面, (c) 宽度竟赫然达到 7.5 米之壮观, (d) 更有甚者,其宽度竟赫然有 10 米之宽敞。



(e) 宽 20m (f) 宽 4 (g) 宽 80m

图 1 各宽度基坑模型

## 2.2 基坑宽度对隆起变形的影响

针对所构建的七座矩形基坑,我们逐一开展了细致的有限元数值模拟分析,模拟开挖过程顺利完成,逐一获取了各基坑的最终竖向位移数据。值得注意的是,这七座基坑的最大隆起变形点均精确地位于其几何中心。基坑宽度递增时,最大隆起变形量依次为 12.4 毫米、41.4 毫米、74.1 毫米、82.4 毫米、89.9 毫米、94.2 毫米及 93.5 毫米。对这些数据

的深入探究,使我们得以更深刻地揭示基坑宽度与坑底隆起量之间的复杂关联。

## 2.1 不同宽度基坑建模

本研究精心构建了基坑模型,审慎排除了其他潜在变量的影响,仅采纳统一插入深度的连续墙体设计方案,未设置任何支撑结构。鉴于探究基坑宽度与隆起变形之间的规律性联系为本研究之核心,故在此特定研究框架下,对于可能因上述设置而偏离实际操作或施工标准之情形,均不予纳入考量范畴。

本研究聚焦于特性鲜明的基坑基础,采纳摩尔-库仑理论框架下的 MC 模型以模拟岩土层的力学行为(详细参数参见表 2-1),并选用硬化土壤模型(HS 模型)以刻画土层特性。为优化计算效率,本研究对既有地层与设计参数进行了合理精简,并据此构建了包含 2.5 米、5 米、7.5 米、10 米、20 米、40 米及 80 米等多种开挖宽度的场景。进而,深入分析了不同开挖宽度条件下,土体本构模型选定深度与其水平位移间复杂多变的关联规律。

模拟结果显示,基坑隆起程度与其宽度之间存在显著相关性。具体而言,基坑宽度较窄时,隆起量相应缩减;而宽度逾越某一临界值后,二者关系趋于稳定。据此推断,基坑在隆起稳定性方面的安全裕度随其宽度呈现反向变化趋势,即基坑宽度减小,为维持其隆起稳定性所需的安全裕度则需

相应提高。此规律深刻揭示了基坑宽度对稳定性的本质影响。

### 3 以宽度为基准的基坑分类

在基坑宽度受限的条件下,其对地表隆起变形的影响机制成为一个亟待精细剖析的学术议题。为精准捕捉该特性,首要任务是明确狭窄基坑的界定范畴。传统上,长宽比例被用作评估标准,然而此法难以充分揭示尺寸效应的复杂内涵。2016年,王洪新教授创造性地提出了一种基于基坑宽度的分类框架,该框架以圆弧滑动模式为理论基础,创新性地选取最后一道支撑与墙体交点作为圆心,通过判断能否形成完整滑动面来精细区分宽基坑与窄基坑。其中,滑动面与坑底交点至坑底边缘的垂直距离被定义为临界宽度 $b_0$ 。当实际基坑宽度 $b \geq b_0$ 时,归为宽基坑;反之, $b < b_0$ 时,则判定为窄基坑。此分类方法巧妙联结了基坑宽窄与滑动半径的关系,为精确分析并优化窄基坑抗隆起稳定性提供了有力支撑。

### 4 考虑基坑宽度的抗隆起稳定性分析方法改进

在工程领域的优化策略,必须恪守两大基本原则。首要原则在于,必须与既有方案保持高度的契合性,包括理论支撑、表述架构及成效展现等多个维度,以确保在工程设计与制造实践中得以顺利施行并广泛推广。其次,优化策略须在既有方案之上实现实质性的创新与超越,而非仅仅是对既有内容的简单重组或对新概念的泛泛界定,否则将丧失其实践应用的真正意义。

在狭长基坑的抗隆起稳定性评估中,传统的部规法面临构建全面滑动面之难题,且常忽略邻域土体产生的力矩效应,构成其主要局限。本节基于部规法所遵循的圆弧滑动失效模式,通过修正基本假定、调整滑动面预设位置,创新性地融入两种优化策略,旨在精确刻画尺寸效应对抗隆起稳定性影响的内在机理。此两种新方法仅调整计算模型横截面形态,而核心计算公式(即公式1-2)及安全系数标准仍遵循部规法体系:一级、二级、三级基坑的安全系数分别需满足高于2.2、1.9、1.7的阈值要求。

#### 4.1 方法

传统的抗隆起稳定性评估方法经由创新手段得以革新,该方法通过优化核心预设框架,并融入对侧壁后方土体作用于滑动圆心力矩效应的精细考量策略。然而,在修正基本预设的过程中,若忽视侧壁对滑动面分割的实质性影响,则显得颇为理想化。因此,本章节对滑动面的位置进行了重新界定,使其更趋近于实际情况,并全面分析了侧翼土体对滑动圆心产生的力矩效应。

##### 4.1.1 基本假定

(1) 针对宽度未触及临界阈值的狭长型基坑,最终支撑结构与防护墙交汇之处被精准定位为滑动圆心 $O$ 。自 $O$ 点向对侧桩端引出的线段 $OC'$ ,被定义为滑动半径 $R'$ 。据此,垂直于基坑走向的线段 $AB$ 及其镜像 $A'B'$ ,与圆弧区段 $BCC'B'$ 相互衔接,共同勾勒出一个假定的圆弧状滑动界面模型。

(2) 计算模型土体成层分布;

(3) 摩尔-库仑强度准则被用于评估土壤的抗剪强度特性,其核心在于以表达式 $\tau = \sigma_z \cdot \tan \phi + c$ 进行量化,该表达式综合考量了多种力学因素。

(4) 在遵循部门既定标准的前提下,于滑动界面 $BCC'$ 之上,本研究未将土体水平侧向压力纳入考量范畴,而是聚焦于重力效应及坑外荷载在滑动面上合理分布所产生的分力作用机制。

(5) 在评估过程中,我们未能将各界面土体所受水平侧压力产生的抗剪切效应纳入考量范畴,同时,滑动面 $AB$ 段与 $A'B'$ 段上剪力所构成的防滑力矩,以及墙体 $CN$ 自身具备的抗弯力矩等三大关键力矩要素,均被视为安全冗余量而予以忽视。

全储备不参与稳定性评价。

#### 4.2 宽度的影响

我们针对特定的地下室开挖项目实例进行了深入研究。在调整基坑横向尺寸后,我们运用了行业通用的计算方法,并结合本研究提出的两种创新算法进行了试算分析,旨在深入探究基坑宽度对提升抗隆起安全性能的作用机制。经过精确计算,确定了该基坑实例的临界宽度为18.6米。当基坑宽

度低于此临界值时,我们采用新方法对其抗隆起稳定性进行分析。值得注意的是,依据行业标准方法计算的安全裕量保持恒定,不受基坑宽度变化的影响,而新算法得出的安全裕量则与基坑宽度呈线性关系,即基坑越窄,安全裕量越大。这一现象充分展示了尺寸效应,即随着基坑宽度的减小,隆起变形程度减轻,整体稳定性增强。新方法在验证行业标准方法结论的基础上,进一步量化了基坑宽度对形变稳定性的具体影响细节。

### 5 考虑基坑宽度的抗隆起稳定性分析的讨论

相较于宽敞型基坑,细长型基坑展现出了更为卓越的稳定性,此特性在业界被形象地称作“尺寸效应”。在挖掘深度一致的条件下,细长基坑的围护结构所需插入比例可适当缩减。然而,现行设计规范未能充分纳入这一尺寸效应,致使设计策略趋于拘谨保守。故而,对基坑变形机理进行深入细致的研究,并精确表征尺寸效应,显得尤为重要。否则,若仅片面强调插入比例与强度指标,此做法既缺乏科学性,亦非经济合理之选。

既往的探索与革新之路,皆聚焦于探寻理想的滑动界面,旨在狭窄且纵深的基坑有限幅宽之中,精确描绘出滑动轮廓的全貌。期间,数种典型的计算模型尤为引人注目:其一,通过滑动圆弧中心点水平位移策略,全面描绘滑动界面之形态;其二,依据土体剪切破坏面倾角,界定楔形区域以表征滑动面;其三,尝试降低滑动圆弧中心点位置,以构建完整的滑动形态。本课题所提两大策略及前述诸法,既合于规范标准,又精准彰显了基坑宽度于提升隆起稳定性之关键效用。诸计算途径所得抗隆起安全指标,均凸显窄基坑之尺寸效应:基坑宽度愈窄,隆起稳定性愈显增强,安全指标亦随之提升。

在秉承传统规范方法精髓的基础上,研究者们凭借高精度的数学工具,对基坑抗隆起稳定性评估模型实施了更为精细的优化。借助滑动圆心探寻算法,该模型能精确地在不同位置计算出安全系数,并绘制出动态变化曲线,进而精确锁定最小安全系数所对应的滑动圆心位置,为合理滑动界面的判定提供了坚实的理论支撑。随着对基坑隆起变形机制的深刻洞察及变形特性的精确刻画,这些研究成果亟需融入设计优化方案之中,旨在有效降低工程造价。本章研究结论表明,细长型基坑的宽度愈小,其尺寸效应愈显著,整体结构强度亦愈强。在不考虑其他变形控制指标的前提下,可适当缩减围护结构的嵌入深度。即便在面临其他变形控制要求,需使围护桩深入土体较大幅度时,只要遵循当前最为稳妥的行业规范方法,细长型基坑的抗隆起稳定性安全系数仍可达标。

### 6 小结

(1) 我们采用数值模拟手段,深刻探究了基坑宽度与地表隆起程度间的内在关联,研究结果显示出一种普遍规律:基坑宽度逐步减小时,地表隆起程度亦呈现相应的递减态势。此发现有力地验证了狭长形基坑内存在显著的尺寸效应。

(2) 本文介绍了一种创新的基坑宽度分类体系,摒弃了传统上依据长宽比例进行划分的做法,转而依据基坑的入土深度及其底部支撑的深度,重新界定了细长型基坑的定义范畴,并给出了精确计算临界宽度的公式。

(3) 我们创新性地研发了两类基坑抗隆起稳定性评估模型,并对既有标准方法进行了优化与创新,巧妙地将基坑宽度因素纳入考量范畴,显著提高了安全系数计算的精确度,能够更精确地反映基坑在实际变形过程中的稳定性特征。

(4) 基于一种创新的方法论体系,本研究深入探讨了窄幅基坑尺寸效应对结构整体加固效能的深刻影响,并据此在狭长基坑的设计策略上获得了新颖的洞见:可适度减少围护结构的埋深,以期实现设计效能的最优化。

#### [参考文献]

- [1] 吴钰彬. 软土地区狭长型基坑变形及空间效应分析[J]. 福建建设科技, 2025, (02): 28-31+48.
- [2] 蔡子勇, 刘屹, 乔世范. 深厚软土狭长基坑地连墙变形特性[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15561-15571.
- [3] 罗超. 组合型钢支撑在狭长型深基坑中的应用[J]. 江苏建筑, 2023, (06): 135-139.