

淤泥区狭长基坑抗隆起稳定性分析

卢 瀚

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 针对珠三角某综合管廊工程坑底土层为深厚淤泥的情况,采用有限元软件进行数值模拟,基于强度折减法对基坑破坏模式进行分析。计算结果表明:狭长类基坑破坏时,依旧表现为坑底产生较大的隆起变形,但呈现的滑动面会受到对侧支护桩约束影响,计算得到安全系数明显高于半无限体假定下的圆弧滑动结果,也更符合实际情况。现进一步分析了坑底加固深度、基坑宽度等对深厚淤泥类软土中狭长基坑坑底抗隆起稳定性的影响。其研究结果可为类似工程提供参考。

关键词: 狭长基坑;深厚淤泥;抗隆起稳定性;强度折减法;HS 模型

中图分类号: TU753

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)12-0248-04

0 引 言

珠三角地区分布的深厚流塑状淤泥具有剪切强度低、含水量高、压缩性高、渗透性低的特点,是全国最软的软土之一^[1]。软土的力学特性决定了基坑设计和施工难度大、造价高,且易出现工程事故。在软土地区建设综合管廊类狭长工程时,基坑的坑底抗隆起稳定成了开挖建设期间安全性的控制因素之一^[2,3]。

传统的规范解析方法^[4]采用考虑土体剪切强度指标、值的圆弧滑动模式来计算坑底抗隆起稳定性。但该方法不考虑狭长基坑两侧支护与土体的相互作用,计算得出的圆弧滑动面往往超过了基坑宽度,与实际情况不符。近年来,国内外学者针对不同因素对坑底抗隆起稳定性的影响进行了研究。张飞^[2]通过离心机试验和数值分析得出基坑抗隆起稳定性应特别重视坑内外水位和墙体插入深度。俞建霖^[5]通过对比现有解析法结合实际案例得出软弱土中规范要求的安全系数偏高并提出了考虑基坑宽度影响的抗隆起稳定性算法。王洪新^[6]认为小窄基坑具有更好的稳定性,提出了一种考虑尺寸效应的基坑稳定性安全系数解析算法。郑刚^[7]基于不连续布局优化法对土体强度在深度上的不均匀性对坑底抗隆起稳定性进行了研究,并指出应考虑窄基坑的空间效应对安全系数的提高作用。陈孝湘^[8]基于强度折减法对狭长基坑的坑底隆起破坏模式进行了研究,得出内支撑的部位

和基坑宽度对稳定性均有影响。

现基于强度折减法,采用土体硬化(HS)模型对珠三角深厚淤泥地区的某综合管廊基坑工程破坏模式进行了研究,分析了基坑宽度、深度、坑底加固等对坑底抗隆起稳定性的影响。

1 数值分析方法简介

数值分析方法^[9]可根据土层分布的性质、基坑宽度对土体变形的影响、土体开挖和支撑架设的施工过程等综合分析,合理地描述基坑破坏时的性状。数值分析选取的本构模型和参数应能反应土体塑性性质,以准确模拟主动和被动土压力,从而合理地模拟基坑变形^[10]。

1.1 土体硬化(HS)模型

HS 模型为 Plaxis 软件中的一种本构模型,可描述多种土体的破坏和变形特征^[9,10]。该模型可同时考虑土体的剪切硬化和压缩硬化,可适用于分析土体开挖卸荷类问题,已成为基坑数值分析中应用最多的模型之一。HS 模型共有 11 个参数,包括刚度参数:三轴固结排水试验的参考割线模量 E_{50}^{ref} 、固结试验的参考切线模量 E_{ocd}^{ref} 、三轴固结排水卸载再加载试验的参考卸载再加载模量 E_{ur}^{ref} 、刚度应力水平参数 m ; 强度参数:有效粘聚力 c 、有效内摩擦角 φ 、剪胀角 ψ ; 高级参数:卸载再加载泊松比 ν^{ur} 、参考应力 p^{ref} 、破坏比 R_f 、正常固结下侧压力系数 K_0 。

本构模型中原状土剪切强度 c 和 φ 可通过地勘报告获得。根据 Plaxis 材料手册^[11]: $K_0 = 1 - \sin(\varphi)$, $p^{ref} = 100 \text{ kPa}$, $\nu^{ur} = 0.2$, 黏性土的剪胀角 ψ 一般取为 0, 软

收稿日期: 2022-02-19

作者简介: 卢瀚(1991—), 男, 工学硕士, 工程师, 从事结构和岩土设计工作。

土 m 取 0.8, $R_f=0.9$ 。

对于刚度参数通常取 $E_{50}^{ref}=E_{ocd}^{ref}$, $E_{ur}^{ref}=3E_{ocd}^{ref}$, $E_{ocd}^{ref}\approx E_{s1-2}$, 其中 E_{s1-2} 为压力区间 100 kPa~200 kPa 下的土体压缩模量。但对于软土地区,该刚度关系并非完全适用甚至会得到不合理的结果。王卫东等^[12]对上海地区软土层 HS 模型刚度参数进行了试验研究和工程验证,并收集了多个国内外研究得出的参数;刘关虎等^[13]对珠海深厚淤泥区的 HS 模型刚度参数进行了均匀试验和反分析,并汇总了国内外各地区刚度参数间及与压缩模量的关系。根据上述文献的研究成果和数据收集成果,初步得出软土层的硬化土刚度关系为 $E_{50}^{ref}=(0.5\sim1.8)E_{ocd}^{ref}$, $E_{ur}^{ref}=(2.9\sim13)E_{ocd}^{ref}$, $E_{ocd}^{ref}\approx E_{s1-2}$ 。

坑底土体进行加固后性质会发生较大的变化,黄绍铭和高大钊^[14]指出水泥土的参考割线模量 E_{50}^{ref} 与其无侧限抗压强度 q_u 之间的大致关系为: $E_{50}^{ref}=126 q_u$ 。

1.2 强度折减法

有限元强度折减法最早应用于分析边坡稳定问题^[15],已有大量算例和分析研究表明该方法使用简单、准确,近年来在基坑工程数值分析中也得到了广泛应用。强度折减法的基本原理为逐步降低土层的剪切强度 c 和 $\tan \varphi$,代入有限元模型中进行计算,直到计算不收敛时,位移-强度折减系数曲线的转折点即为安全系数 RF ,其计算表达式(1)如下,式中: $\varphi_{reduced}$ 和 $c_{reduced}$ 为折减后的内摩擦角及粘聚力。

$$RF=\frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_{reduced}}=\frac{c}{c_{reduced}} \tag{1}$$

2 工程实例分析

2.1 工程概况

珠三角某市地下综合管廊新建工程,拟建场地属三角洲堆积(河、海)地貌。管廊总长度约 7 km,基坑剖面如图 1 所示:开挖深度约为 6.0 m,宽度约 10.85 m,采用 PU400×170 拉森钢板桩支护,竖向设两道 $\phi 609\times 16$ 钢管支撑,坑内采用三轴搅拌桩进行满堂加固。

2.2 有限元模型的建立

该综合管廊基坑工程是一种狭长形基坑,采用 Plaxis 2D 建立二维有限元模型,围护桩采用板单元模拟,支撑采用锚杆单元模拟,土体采用高精度三角形平面应变单元模拟,有限元模型如图 2 所示。

基于强度折减法的安全系数获得方法为:土层强度折减系数 RF 由初始值 1.0 以 0.01 的步长逐步

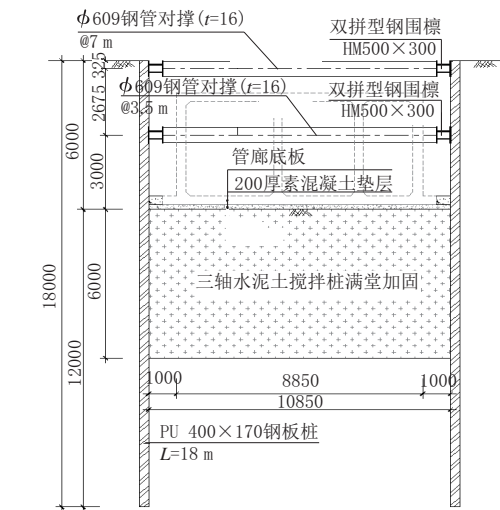


图 1 综合管廊基坑剖面图

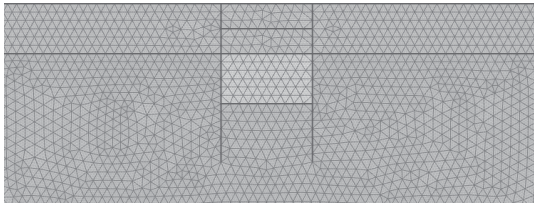


图 2 综合管廊基坑有限元模型

增加,直至计算无法收敛,选取坑底变形量最大的节点建立隆起量与强度折减系数的关系曲线,曲线的转折点对应的强度折减系数即为安全系数。基坑开挖步骤模拟如表 1 所列。

表 1 基坑开挖步骤模拟一览表

施工阶段	分析工况
1	初始应力平衡
2	位移清零
3	围护桩及坑底加固施工,施加坑外超载
4	第一道支撑施工
5	开挖至第二道支撑底
6	第二道支撑施工
7	开挖至坑底
8	土体强度折减

2.3 算例验证

以该工程深厚淤泥区的试验段基坑为算例,根据勘察报告,②层淤泥的基本地质参数见表 2 所列,坑底加固土的有效内摩擦角和有效粘聚力参数参考文献[16],取值分别为 50 kPa 和 40°。同时建立有限元模型与现场监测结果相互验证,以获得适合该工程的其他物理力学参数。

表 2 土层基本物理力学参数表

层号	土名	厚度 /m	$c/(\text{°})$	φ/kPa	E_{s1-2}/MPa
②	淤泥	26.7	16.9	9.0	2.4

根据本文 1.1 节得出的软土 HS 模型各刚度参数间的近似关系, 结合试验段围护桩水平位移监测数据进行反分析, 得出②层淤泥刚度参数关系为:
 $E_{50}^{ref}=1.5E_{ocd}^{ref}, E_{ur}^{ref}=8E_{ocd}^{ref}, E_{ocd}^{ref} \approx E_{s1-2}$ 。坑底加固土的无侧限抗压强度为 $q_u=0.5 \text{ MPa}$, 各刚度参数关系按常规取值: $E_{50}^{ref}=E_{ocd}^{ref}, E_{ur}^{ref}=3E_{ocd}^{ref}, E_{ocd}^{ref} \approx E_{s1-2}$ 。该算例 HS 模型参数见表 3 所列。基坑开挖至坑底后的支护桩水平位移与监测数据对比结果如图 3 所示。

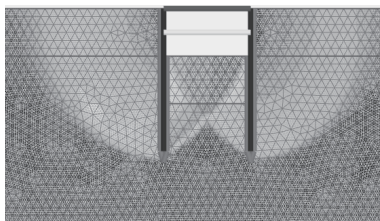
表 3 HS 模型参数表

层号	土名	m	ψ	ν	p^{ref} / kPa	R_f	K_0	$E_{50}^{ref} / \text{MPa}$	$E_{ocd}^{ref} / \text{MPa}$	$E_{ur}^{ref} / \text{MPa}$
②	淤泥	0.8	0	0.2	100	0.9	0.84	3.6	2.4	19.2
—	加固土	0.8	0	0.2	100	0.9	0.36	63	63	189

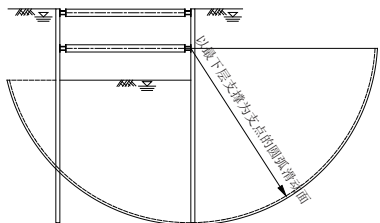
从图 3 可以看出数值模拟的曲线能够与监测数据较好地吻合, 可以较为真实地反映该基坑围护桩的变形趋势, 最大深层水平位移发生在地面下 4.5 m 处, 有限元计算值为 14.38 mm, 实测值为 15.1 mm, 说明 HS 本构模型及相应的物理力学参数选取有一定的合理性, 符合工程计算要求。

2.4 基坑破坏形态

数值分析模拟的基坑破坏时形态如图 4(a)所示: 深厚淤泥下狭长基坑破坏表现为坑底土体发生较大的隆起变形, 围护桩底端向坑内移动, 同时坑底土体沿围护桩底面滑动时不再表现为完整的圆弧, 而是呈现出“ω”形的破裂面。强度折减法计算得出的基坑安全系数为 2.24, 较规范圆弧滑动法得出的抗隆起安全系数 1.98 提高了 13%, 同时试验段的基坑监测数据表明坑底最大隆起量仅为 5.48 mm, 远未达到隆起破坏的临界点, 说明对侧围护桩及土体对狭长基坑的破坏形态和安全系数有较显著的影响, 有限元计算方法更能反映该基坑工程的真实情况。



(a)数值分析的坑底隆起破坏形态



(b)规范解析法的圆弧滑动坑底隆起破坏形态

图 4 基坑破坏形态图示

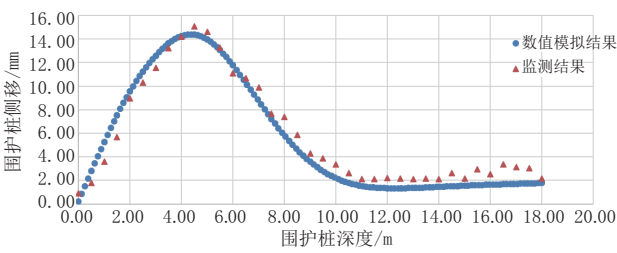


图 3 数值模拟曲线与监测结果对比图

3 坑底抗隆起稳定性的影响因素分析

3.1 基坑深度和宽度对坑底抗隆起稳定性的影响

现对各深度、宽度下的基坑坑底抗隆起稳定性进行了比较分析: 基坑深度 h 由初始值 6 m 以 1 m 步长增加为 9 m, 各深度下基坑宽度 w 为 6~24 m, 其他参数保持不变, 得出安全系数随基坑深度和宽度的关系曲线如图 5 所示。以基坑深度 $h=6 \text{ m}$ 为例, 不同基坑宽度下的坑底隆起破坏形态如图 6 所示。

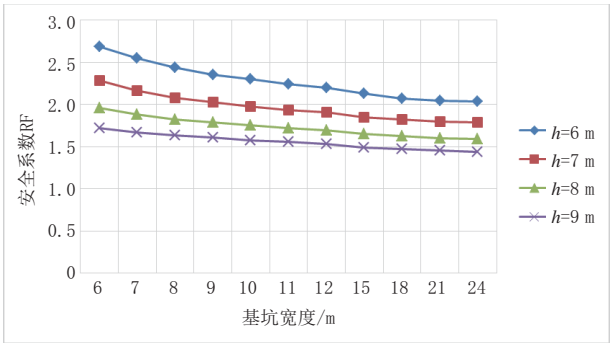


图 5 不同开挖深度下安全系数与基坑宽度的关系曲线

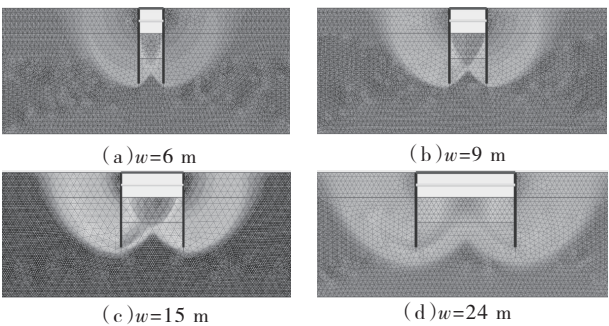


图 6 不同宽度基坑的坑底隆起破坏形态图示

图 5 分析结果表明: 同样深度下的基坑, 其坑底抗隆起稳定性安全系数随着基坑宽度的增加而逐渐降低; 基坑越狭长(宽深比越小), 基坑稳定性越高, 同时坑底抗隆起安全系数随深度的增加而降低得越快。从图 6 有限元分析的基坑破坏形态可以看出, 随

着基坑宽度的增加,坑底滑动面叠加的部分逐渐减少,直至相互分离而呈现为两侧相互独立圆弧滑动面,坑底抗隆起安全系数也基本不再随基坑宽度的增加而变化。

3.2 坑底加固对坑底抗隆起稳定性的影响

深厚淤泥类软土地区基坑设计时,常采用坑内土体加固的措施,以提高基坑开挖期间被动区土体的抗力。为研究坑底加固土体厚度对基坑稳定性的作用,现保持基坑宽度为6 m,将基坑开挖深度由初始值 $h=6$ m以1 m步长增加为9 m,各开挖深度下坑底加固厚度由2 m以1 m步长增加至9 m,得出安全系数随基坑深度和坑底加固厚度的关系曲线如图7所示。

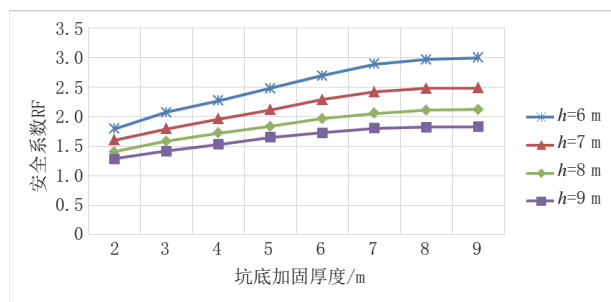


图7 不同开挖深度下安全系数与坑底加固的关系曲线图

有限元分析结果表明,在坑底加固厚度不超过7 m时,坑底抗隆起稳定性安全系数与坑底加固厚度呈线性正相关关系,当坑底加固厚度超过7 m时,坑底抗隆起稳定性安全系数已基本不再随加固厚度的增加而提高;对各深度下的基坑,加固厚度小于2 m时,开挖至坑底时计算已无法收敛,基坑已发生土体隆起破坏。

该管廊基坑工程大规模实施阶段,个别桩号的基坑在坑底加固未达到设计强度即开始开挖施工,结果在未开挖到坑底时就出现了部分土体隆起、围护桩向坑内倾斜、周边道路明显沉降和开裂的险情。该实例验证了上述有限元分析结果,反映出坑底加固对保证深厚软土下基坑安全有着至关重要的作用。

4 结论

基于强度折减法对深厚淤泥区的综合管廊类狭长基坑进行了坑底抗隆起稳定性分析,得出以下结论:

(1)基于强度折减法和HS本构模型的数值分析方法能够与工程实例较好地吻合,其结果可以判定基坑工程设计的合理性,为分析狭长基坑稳定性提供行之有效的手段。

(2)深厚淤泥中的狭长基坑破坏时依旧表现为

坑底发生较大的隆起变形,围护桩底端向坑内移动。同时受对侧支护结构的影响,坑底土体沿围护桩底面滑动时不再表现为完整的圆弧,而是呈现出“ω”形的破裂面。

(3)基坑宽度对坑底抗隆起稳定安全系数有一定的影响,表现为基坑越狭长,基坑稳定性越高,同时坑底抗隆起安全系数随深度的增加而降低得越快。当基坑宽度增加至坑底滑动面相互分开时,该安全系数即基本不再变化。

(4)一定厚度内的坑底加固与坑底抗隆起稳定性安全系数呈线性正相关关系,当坑底加固厚度达到临界值以上后,该安全系数基本不再变化。因此,选择合适的坑底加固厚度可达到高效、安全、合理、经济的设计目标。

参考文献:

- [1] 张玉成,杨光华,胡海英,等.珠三角深厚软土地区浅基坑支护若干问题探讨[J].岩土工程学报,2014,36(zk1):1-11.
- [2] 张飞,李镜培,孙长安,等.软土狭长深基坑抗隆起破坏模式试验研究[J].岩土力学,2016,37(10):2825-2832.
- [3] 张雪婵.软土地基狭长型深基坑性状分析[D].杭州:浙江大学,2012.
- [4] JGJ-120—2012,建筑基坑支护技术规程[S].
- [5] 俞建霖,龙岩,夏霄,等.狭长型基坑工程坑底抗隆起稳定性分析[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(11):2165-2174.
- [6] 王洪新.考虑二维和三维尺寸效应的基坑抗隆起稳定安全系数[J].岩土工程学报,2013,35(11):2144-2152.
- [7] 郑刚,俞丹瑶,程雪松,等.考虑土体强度不均匀性时宽窄基坑坑底隆起稳定研究[J].岩土工程学报,2019,41(S1):1-4.
- [8] 陈孝湘,赵金飞,唐自强,等.基于强度折减法的狭长基坑坑底抗隆起稳定研究[J].地下空间与工程学报,2015,1.
- [9] 徐中华,王卫东.敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J].岩土力学,31(1):258-264.
- [10] Potts D M, Zdravkovi? L, Addenbrooke T I, et al. Finite element analysis in geotechnical engineering: application [M]. 2. Thomas Telford London, 2001.
- [11] Plaxis. Material models manual[J], 2020.
- [12] 王卫东,王浩然,徐中华.基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J].岩土力学,2012,33(8):2283-2290.
- [13] 刘关虎,崔江余,徐西彬,等.硬化土模型在淤泥土层参数反分析中的应用与研究[C].第十一届建筑物改造与病害处理学术研讨会暨第六届工程质量学术会议论文集,2016.
- [14] 黄绍铭,高大钊.软土地基与地下工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [15] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(3):343-346.
- [16] 侯新宇,刘松玉,童立元.被动区深搅桩加固对地铁深基坑变形的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2010(1):35-36.