

DOI: 10.11779/CJGE2019S1003

# 预留土基坑支护性状的有限元分析

秦会来<sup>1</sup>, 周予启<sup>1</sup>, 周同和<sup>2</sup>, 李冬晓<sup>1</sup>

(1. 中建一局集团建设发展有限公司, 北京 100102; 2. 郑州大学综合设计研究院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 应用小应变硬化土本构模型对郑州典型粉土地层中的预留土支护基坑的支护性状进行有限元分析, 探讨预留土形状参数——顶部宽度、底部宽度等对基坑支护体系变形以及支护桩墙最大弯矩等的影响规律。借助强度折减有限元技术对各工况下支护体系的稳定性进行分析, 通过分析强度折减安全系数, 支护体系整体失稳与预留土局部失稳的先后关系等, 揭示预留土形状参数对基坑支护性状影响的内在原因。并基于有限元计算结果对其它文献中的论断进行研判, 分析其正确性和适用范围。分析结论对今后预留土支护基坑的设计以及优化设计颇具指导意义。

**关键词:** 预留土; 有限元法; 强度折减; 基坑支护

中图分类号: TU463

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S1-0009-04

**作者简介:** 秦会来(1979—), 男, 博士、博士后, 主要从事岩土工程的研究、设计与施工。E-mail: huilaiqin@163.com。

## Retaining traits of berm-retained excavations by FEM

QIN Hui-lai<sup>1</sup>, ZHOU Yu-qi<sup>1</sup>, ZHOU Tong-he<sup>2</sup>, LI Dong-xiao<sup>1</sup>

(1. China Construction First Group Construction & Development Co., Ltd., Beijing 100102, China; 2. Comprehensive Design Institute, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Based on the model for hardening soils with small-strain stiffness, the retaining traits of the berm-supported excavations in silt in Zhengzhou are studied by means of the finite element method. The influences of the berm shape, including the top width and bottom width of berms, on the retaining traits of the retained excavations, such as the maximum horizontal displacement and the maximum bending moment, are studied by analyzing the finite element results. The strength reduction method is employed to deduce the stability of the berm-retained excavations. The laws of influences of berm shape on the retaining traits are studied by analyzing the safety factor obtained by the strength reduction method. Some arguments obtained by the finite element method in available literatures are evaluated by the results obtained here. The conclusions may provide valuable guidance for the design and optimization of embedded retaining walls using earth berms as temporary supports.

**Key words:** earth berm; FEM; strength reduction method; retained excavation

## 0 引言

预留土作为基坑支护的一种手段, 可以有效地控制支护体系的稳定和变形<sup>[1]</sup>。近年来在工程实践中出现了预留土支护与主体结构相结合的支护模式, 也即基坑大开挖阶段留设原状土墩对围护结构支护, 待地下结构施工到满足设计要求后, 在主体地下结构与围护结构之间设置型钢支撑, 挖除预留土, 施工该区域的地下结构, 地下结构施工可顺做也可逆做。预留土与主体结构相结合的支护模式可以解决不能设置预应力锚杆区域的支护问题, 同时显著降低内支撑设置的规模和难度, 应用效果良好, 引起工程界广泛关注。

预留土与主体结构相结合的支护模式中, 需要解决的关键问题就是预留土支护阶段支护体系的设计计算问题。在过去的几十年中, 许多学者运用不同方法对预留土的支护作用进行了分析探讨, 包括等效超载、

等效开挖面等经验方法<sup>[2]</sup>, 修正的极限平衡法<sup>[3]</sup>, 修正弹性地基梁法<sup>[4]</sup>, 数值分析方法<sup>[5]</sup>等, 对预留土支护作用有了一定认识。但由于预留土为局部土体, 支护机理复杂, 其能提供的极限抗力与支护刚度, 以及对坑底部被动区土体抗力和支护刚度增强作用都难于定量分析。当前尚未找到预留土支护设计计算合理方法, 工程实践中的设计计算仍以设计者的经验为准。

本文应用小应变硬化土(HSS)本构模型, 结合郑州地区典型粉土的地层参数, 对预留土支护基坑进行有限元数值分析, 分析探讨预留土形状参数对基坑支护性状的影响, 与以往有限元分析研究文献不同, 本文通过分析强度折减技术所计算的预留土稳定安全

基金项目: 中建股份科技研发课题(CSCEC-2018-Z-11)

收稿日期: 2019-04-29

系数以及支护体系整体稳定安全系数揭示预留土形状参数对基坑支护性状影响的内在原因, 并根据有限元计算结果对以往基于有限元分析的一些研究结论进行研判, 分析其正确性与适用性。

## 1 有限元模型与参数

选择郑州地区典型粉土地层进行分析, 地层参数见表 1 所示。表 1 中的强度参数取自该地区地勘报告, 其它参数根据地勘报告的压缩模量以及郑州地区多个项目实测变形反演分析后确定。假定所考虑预留土支护基坑开挖深度 14 m, 支护桩墙嵌固深度 17 m, 等效厚度为 1.2 m, C30 混凝土, 暂不考虑地下水的影响。建立有限元模型见图 1 所示。图中  $b_t$ 、 $b_b$  及  $h_b$  分别为预留土的顶部宽度、底部宽度和高度,  $H$  为基坑开挖深度,  $D$  为支护桩墙的嵌固深度。本文计算中, 考虑地面超载为 20 kPa, 基坑每步开挖深度为 1 m, 考虑  $b_t$  的变化范围为 0~14 m,  $b_b$  的变化范围为 6~26 m,  $h_b$  的变化范围为 6~14 m。

表 1 土层计算参数

Table 1 Soil parameters

$c'$	$\phi'$	$E_{50}^{\text{ref}}$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	$\gamma_{0.7}$	$G_0^{\text{ref}}$	$m$
/kPa	/( $^\circ$ )	/MPa	/MPa	/MPa		/MPa	
15	24	15	15	90	$1.0 \times 10^{-4}$	200	0.7

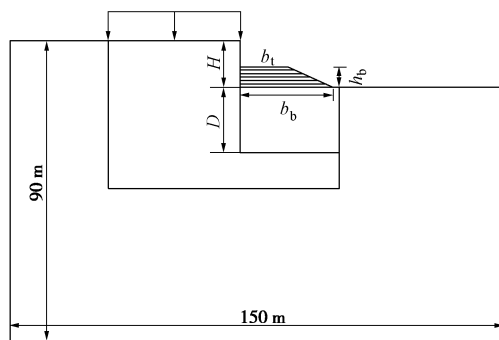


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

## 2 预留土形状参数影响分析

### 2.1 预留土底部宽度参数影响

图 2 中给出了  $h_b$  为 10 m、顶部宽度  $b_t$  为 0~6 m 时,  $\delta_h$  以及  $M$  随预留土底部宽度  $b_b$  的变化曲线。图 2 (a) 给出了曲线上各工况安全系数的变化范围。由图 2 可见, 当预留土稳定安全系数较大时 (图中最小为 1.22),  $\delta_h$  以及  $M$  均随  $b_b$  的增加而降低, 但当  $b_b$  较大时, 降低幅度逐步减小。 $M$  的变化规律与  $\delta_h$  相应变化规律类似。从图 2 也可以发现, 当  $b_b$  较小时, 增加预

留土顶部宽度  $b_t$  对改善支护性状不如  $b_b$  较大时。

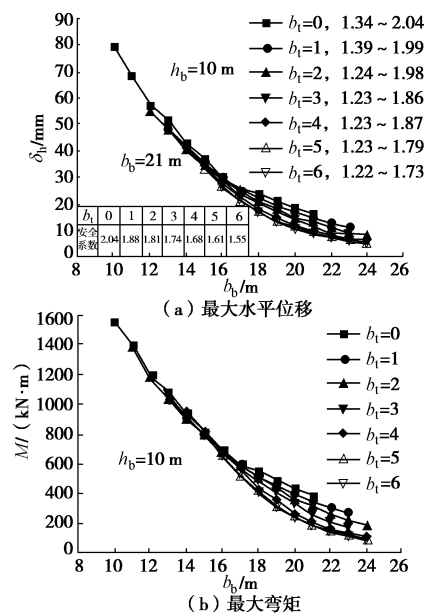


图 2 预留土底部宽度对支护性状的影响 ( $h_b=10$  m)

Fig. 2 Influences of bottom width of berm on retaining traits

( $h_b=10$  m)

### 2.2 预留土顶部宽度参数影响

图 3 给出了  $h_b=12, 6$  m,  $b_b=18, 20, 24$  m 时, 支护体系最大水平位移  $\delta_h$  随预留土顶部宽度  $b_t$  的变化曲线。图中曲线上各点位所标注的数字为由强度折减法计算所得支护体系或预留土的稳定安全系数。由图 3 (a) 可见, 对于一定的预留土底部宽度  $b_b$ , 随着预留土顶部宽度  $b_t$  的增加, 强度折减所得的稳定安全系数降低。由强度折减所得的图 3 (a) 中所对应工况的典型失稳破坏面如图 4 所示, 也即图 3 (a) 所对应工况中, 预留土自身稳定性差于支护体系的整体稳定性。不难理解, 对于一定的预留土底部宽度  $b_b$  和预留土高度  $h_b$ , 随着预留土顶部宽度  $b_t$  的增加, 预留土边坡变陡, 稳定性变差, 但此时预留土的体积是增加的。由图 3 (a) 可见, 当预留土稳定系数低于 1.4 左右时, 支护体系最大水平位移  $\delta_h$  随预留土顶部宽度的增加而增大, 当安全系数大于 1.4 时, 随预留土顶部宽度的增加, 支护体系最大水平位移  $\delta_h$  减小, 但减小速率逐步下降。可见, 对于同一预留土底部宽度, 当预留土稳定性安全系数低于一定值时, 增加预留土顶部宽度对支护性状反而不利。从本文计算的近 600 个工况来看, 该稳定性安全系数的分界点大约为 1.4。

图 3(b)中对应的预留土高度  $h_b$  为 6 m, 当  $b_b=18, 20, 24$  m 时, 预留土自身稳定性安全系数较高, 此时可能出现支护体系整体稳定安全系数低于预留土局部稳定安全系数的情况。图 3 (b) 中标识的强度折减安

全系数也可以说明这一点, 当支护体系整体失稳先于预留土局部失稳时, 预留土顶部宽度的增加虽然会造成预留土边坡变陡, 但会增大预留土体积和重量, 对支护体系的整体稳定来说, 预留土形状和重量才是控制因素, 因此预留土顶部宽度的增加会提高支护体系的稳定安全系数。当预留土顶部宽度较大时, 预留土的稳定安全系数也可能低于支护体系的整体稳定性, 如图 3 (b) 中  $b_b=18, 20\text{ m}$  时曲线的后面部分所示。

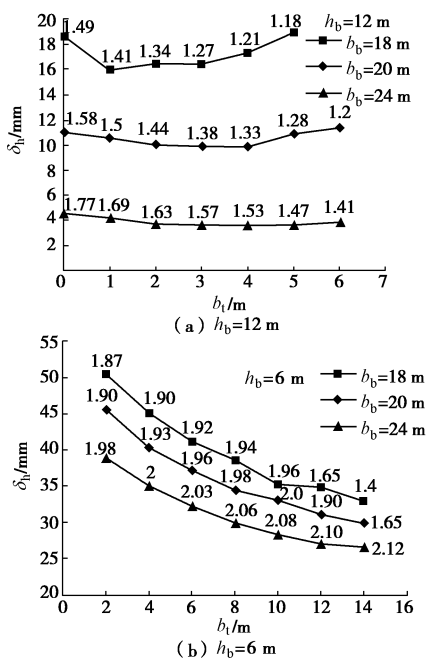


图 3 同一底部宽度时预留土顶部宽度对水平位移的影响  
Fig. 3 Influences of top width of berm on horizontal displacement under same bottom width

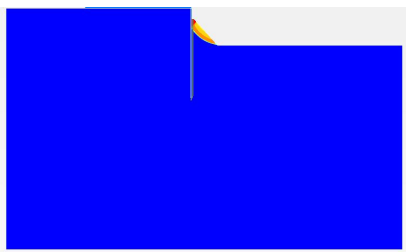
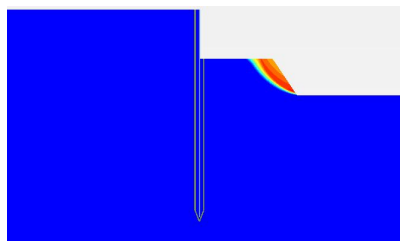
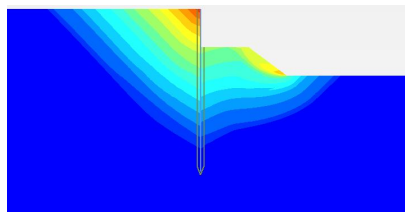


图 4 强度折减法所得预留土典型失稳模式  
Fig. 4 Typical failure mode of berms by strength reduction method

图 5 给出了与图 3 (b) 工况对应的典型的支护体系整体失稳模式和预留土失稳模式。



(a) 预留土失稳模式



(b) 支护体系整体失稳模式

图 5 强度折减法所得典型失稳模式 ( $h_b=6\text{ m}$ )  
Fig. 5 Typical failure modes of berms by strength reduction method ( $h_b=6\text{ m}$ )

### 3 现有分析结论的验证

GEORGIADIS<sup>[6]</sup>基于以 Mohr Coulomb 为屈服准则的理想弹塑性本构模型, 借助 Plaxis 有限元软件对预留土支护基坑的支护性状进行了多工况下的分析计算。根据对有限元计算结果的统计回归分析, GEORGIADIS 提出了无量纲折减系数  $R$  与参数  $2(H-h_b/2)/(b_t+b_b)$  和墙土相对刚度参数  $K$  之间具有确定的函数关系,  $R$  和  $K$  的计算公式如下:

$$R = \frac{\delta - \delta_b}{\delta - \delta_1} \quad (1)$$

$$K = \frac{EI}{E_s L^4} \quad (2)$$

式中  $\delta$  为开挖深度为  $H$  的无预留土支护基坑的最大位移;  $\delta_b$  为预留土支护基坑的最大位移;  $\delta_1$  为基坑开挖深度为  $(H-h_b)$  时基坑的最大位移;  $EI$  为支护桩墙的抗弯刚度;  $E_s$  为土体杨氏模量;  $L$  为支护桩墙总长。

在本文近 600 计算工况中, 选取预留土参数满足以下条件的各计算工况: 高度  $h_b=6\text{ m}$ , 预留土顶部宽度  $b_t$  和底部宽度  $b_b$  之和满足  $(b_t+b_b)/2=14\text{ m}$  条件。所选各工况中, 参数  $2(H-h_b/2)/(b_t+b_b)$  为定值 2.33, 根据 GEORGIADIS 的结论, 此时应该具有相同的  $R$  值或者说  $\delta_b$  值, 而本文有限元计算结果见表 2 所示。

表 2 同一  $R$  值时的支护性状

Table 2 Retaining traits under same values of $R$			
$m$	$\delta_b/\text{mm}$	$\delta/\text{mm}$	安全系数
0.67	39.53	33.13	1.40
1.33	35.20	28.92	1.96
2.00	34.50	27.81	1.98
2.67	34.49	27.89	2.00
3.33	35.07	28.37	2.00

由表 2 可见, 当预留土边坡坡度系数  $m$  在 1.33~3.33 之间变化时, 支护体系的最大位移基本相等, 与 GEORGIADIS 的结论相符, 但当  $m$  为 0.67 时, 支护体系的变形明显增大 10% 以上, 查看强度折减计算结

果可以发现, 当  $m=0.67$  时, 发生的是如图 5 (a) 中所示的预留土的稳定失稳, 而表 2 中的其它工况发生的是如图 5 (b) 中所示的支护体系整体稳定失稳。

选择本文中强度折减后发生预留土失稳的工况进行分析, 预留土参数如下: 高度  $h_b=10$  m, 预留土顶部宽度  $b_t$  和底部宽度  $b_b$  之和满足  $(b_t+b_b)/2=10$  m, 参数  $2(H-h_b/2)/(b_t+b_b)$  为定值 1.0。所选各工况支护体系最大位移计算结果见图 6 所示, 由图 6 可见对于相同的折减系数  $R$ , 支护体系的最大水平位移和地面沉降并不相近, 而是随预留土边坡的坡度系数增加而减小。

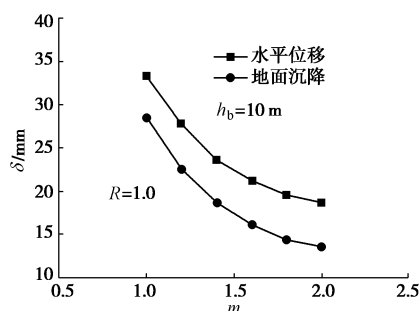


图 6 同一  $R$  值下基坑支护变形与  $m$  的关系

Fig. 6 Relationship between deformation and berm slope  $m$  under same value of  $R$

现有文献中有限元计算结果还有另外一种观点, 也就是预留土支护性状与预留土体积相关<sup>[7]</sup>, 由上文对 GEORGIADIS 论断的检验过程可以发现, 这一观点同样是有局限性的, 因为对于上文验证案例中当参数  $2(H-h_b/2)/(b_t+b_b)$  相同时, 预留土的体积也是相同的。可见对于预留土支护基坑, 用单参数 (预留土体积)、两参数  $[H-h_b/2, (b_t+b_b)/2]$  都是不合适的。预留土的支护作用与  $h_b$ 、 $b_t$ 、 $b_b$  均相关。

## 4 结 论

本文采用有限元方法对预留土支护基坑的支护性状进行了分析, 并从强度折减所得支护体系或预留土的失稳情况着手, 分析探讨了预留土参数对基坑支护性状影响的内在规律和原因。通过分析, 得出如下结论。

(1) 当预留土自身稳定能力较好, 支护体系的最大水平位移  $\delta_h$  及支护桩墙最大弯矩  $M$  随预留土底部宽度  $b_b$  增大而减小, 但减小幅度逐步降低。

(2) 当预留土稳定安全系数不大于 1.4 时, 对于同一预留土底部宽度  $b_b$ , 增加预留土顶部宽度  $b_t$  会降低预留土稳定安全系数, 从而引起预留土支护效果变差。

(3) 当支护体系及预留土稳定安全系数大于 1.4 时, 对于同一预留土底部宽度  $b_b$ ,  $\delta_h$  以及  $M$  随预留土顶部宽度  $b_t$  的增加会减小, 但减小幅度逐步降低。

(4) 当支护体系整体稳定安全系数高于预留土稳定安全系数时, GEORGIADIS 的论断以及支护性状与预留土面积相关论断是可行的, 但当预留土稳定安全系数低于支护体系整体稳定安全系数时, GEORGIADIS 的论断以及预留土面积相关论断是错误的。

## 参考文献:

- [1] 李顺群, 郑 刚, 王英红. 反压土对悬臂式支护结构嵌固深度的影响研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3427 - 3431. (LI Shun-qun, ZHENG Gang, WANG Ying-hong. Influence of earth berm on embedment depth of cantilever retaining structure for pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3427 - 3431. (in Chinese))
- [2] FLEMING W G K, WELTMAN A J, RANDOLPH M F, et al. Piling Engineering[M]. 3rd. Taylor & Francis, 2008.
- [3] DALY M P, POWRIE W. Undrained analysis of earthberms as temporary supports for embedded retaining walls[J]. Proceeding of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2001, 149(4): 237 - 248.
- [4] 张 浩, 郭院成, 石名磊, 等. 坑内预留土作用下多支点支护结构的变形内力计算[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 162 - 168. (ZHANG Hao, GUO Yuan-cheng, SHI Ming-lei. Calculation of deformation and internal force of multi-pivot retaining structure considering influence of earth berm[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 162 - 168. (in Chinese))
- [5] 刘 畅, 孙盼盼, 赵露伟, 等. 基坑开挖反压土截面特性对基坑性状影响的有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(3): 788 - 795. (LIU Chang, SUN Pan-pan, ZHAO Lu-wei, et al. Finite element analysis of earth berm excavation pit traits affect section properties[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(3): 788 - 795. (in Chinese))
- [6] GEORGIADIS M, ANAGNOSTOPOULOS C. Effect of berms on sheet pile wall behavior[J]. Géotechnique, 1998, 48(4): 569 - 574.
- [7] SMETHURST J A, POWRIE W. Effective-stress analysis of berm-supported retaining walls[J]. Proceeding of the Institution of Civil Engineers—Geotechnical Engineering, 2008, 161(1): 39 - 48.