

文章编号:1006-2106(2013)10-0026-05

不同开挖深度下基坑桩—撑式支护结构研究^{*}

吴剑锋^{**}

(铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142)

摘要:研究目的:随着开挖深度不同的基坑工程越来越多,其围护结构的位移和内力的计算也更加复杂。本文运用有限元程序 ANSYS 建立分析模型,研究不同开挖深度下支护结构的变形及内力,为深基坑支护结构设计提供重要依据。

研究结论:(1)围护结构侧向位移、弯矩随着基坑的开挖而变化,侧向位移、桩身弯矩的最大值一般发生在基坑的开挖面附近;(2)在不同挖深情况下,基坑两侧围护结构的位移、内力都存在差异,在设计时需要分别考虑结构参数;(3)本文对不同挖深基坑支护结构的设计有一定的参考意义。

关键词:ANSYS;基坑开挖深度;位移;内力

中图分类号:TU473 **文献标识码:**A

Study on Pile – strut Bracing Structure of Excavation with Different Excavation Depth

WU Jian – feng

(The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300142, China)

Abstract: Research purposes: More and more excavations with different excavation depth have appeared, Researching the strain and stress of the supporting structure in the conditions of different depth of excavation, a finite element analysis model built on Ansys is proposed in the paper, which provides an important reference for the design.

Research conclusions: (1) The stress and strain of supporting structures change with pit excavation, nearby the pit plane, the value reach to maximum. (2) The result shows that there is the great difference between the stress and strain of supporting structures on two sides. So it's necessary to calculate and analyse supporting structures on two sides separately while design the unbalanced excavation. (3) This paper provides valuable reference to design the unbalanced excavation.

Key words: ANSYS; excavation depths; strain; stress

1 研究背景

近年来,深基坑开挖的数目越来越多,采用有限元软件来模拟基坑开挖被广泛使用。高文华、杨林德^[1]等采用 Mindlin 厚板理论,建立了深基坑支护结构内力与变形时空效应的三维有限元模型,并探讨了分布开挖深度、基坑开挖宽度、边界约束条件、地基流变等因素对支护结构内力和变形时空效应的影响。陆新征

等人^[2]2003 年对某深基坑进行了施工全过程的三维有限元弹塑性分析和模拟,并介绍了其具体实现方法,有限元分析中分别考虑了支护结构和土体之间的相互作用问题,以及各种开挖方案、降水方案对基坑变形的影响。杨光华^[3]等提出了可模拟复杂施工过程的增量计算法,并应用增量法解决了支护结构的入土深度问题,支撑或锚杆施加预应力及支撑拆除过程的计算等计算难题。曾律弦等人^[4]2006 年结合弹性地基梁

^{*} 收稿日期:2013-04-28

^{**} 作者简介:吴剑锋,1983 年出生,男,工程师。

法和深基坑支护结构中的环梁支护结构体系的特点,运用 ANSYS 的空间分析模型来进行环梁支护结构体系的计算分析。常林越等人^[5] 2011 年运用 PLAXIS 3D Foundation 软件建立三维有限元模型分析了基坑开挖对邻近住宅的影响。

以上研究都是针对一般的平衡开挖问题而提出的,而在工程实践中,很大一部分是基坑的不平衡开挖问题,如由于地下室层数等的不同而导致基坑的开挖深度不同。如采用传统的基坑的平衡开挖理论进行设计计算,就会出现两种极端:(1)若采用开挖深度浅的一边进行计算,必将引起工程的不安全;(2)采用开挖深度大的方案进行设计,则会偏于保守,造成一定的工程浪费。因此,在确保整个不平衡基坑安全的情况下,找到最优的设计方案,具有极大社会效益和经济效益。

基于上述原因,本文通过工程实例采用有限元程序 ANSYS 对此类问题进行计算探讨。

2 计算模型及计算工况

2.1 工程概况

某基坑纵向全长 96 m,宽度 40 m,自然地面标高为 ±0.0,基坑左右两侧的坑外堆载都为 15 kPa。支护形式采用钻孔灌注桩结合支撑的围护结构,钻孔桩直径 0.8 m,桩间距 1.0 m,桩长 22 m。支撑截面为 0.7 m × 0.6 m,支撑底面标高 -3.0 m。桩体的弹性模量 $E = 3 \times 10^4$ MPa,支撑的弹性模量 $E = 4 \times 10^4$ MPa。

基坑左右两侧的开挖深度分别为 H_1, H_2 ,开挖区 1、2 的分界线位于基坑中部。土层分布及物理学性质如表 1 所示。

表 1 土层物理学性质

层序	土层名称	厚度 /m	$\gamma /(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c / kPa	$\varphi /(^{\circ})$
①	褐黄色粉质黏土	2.0	18.8	15.0	13.5
②	灰色淤泥质粉土	3.7	17.8	8.0	14.75
③	灰色淤泥质粉土	3.9	16.9	6.0	7.25
④	暗绿色粉质黏土	16.4	20.2	33.0	13

2.2 计算模型及工况

考虑到实际土体的特性和桩土之间的关系,建立基于通用有限元程序 ANSYS 的二维分析模型,分别采用实体单元、梁单元和杆单元来模拟土体、围护桩和支撑,土体的本构模型使用 Drucker - Prager 弹塑性模型,建立桩土接触单元,并应用非线性分析、单元生死等技术,使计算结果与实际更加贴近。

在 Ansys 程序中,DP 材料选项使用 Drucker - Prager 屈服准则,此屈服准则为 Mohr - Coulomb 准则给予近似,以此来修正 Von Mises 屈服准则,即在 Von

Mises 表达式中包含一个附加项。
屈服准则的定义表达式如下:
$$F = 3\beta\sigma_m + [\frac{1}{2}\{S\}^T[M]\{S\}]^{\frac{1}{2}} - \sigma_y = 0 \quad (1)$$

式中 σ_m ——平均应力 $= \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$;
 $\{S\}$ ——偏差应力;
 β ——材料常数;
 $[M]$ ——Mises 屈服准则中的 $[M]$ 。

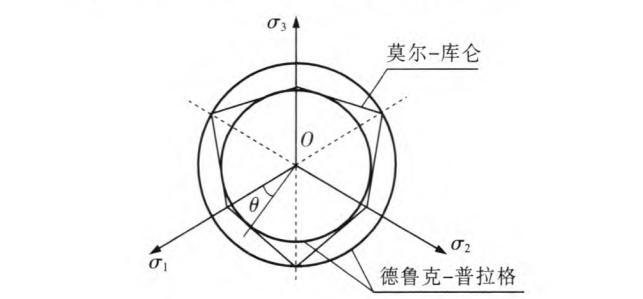


图 1 在 π 平面上 Drucker - Prager 屈服线和 Mohr - Coulomb 屈服线

Drucker - Prager 屈服准则在主应力空间的屈服面为直立圆锥,它在 π 平面上的横截面如图 1 所示。Drucker - Prager 屈服准则可以看作 Mohr - Coulomb 准则为避免数值计算困难而作的光滑近似,而且 Drucker - Prager 屈服准则还可以通过调整圆锥的大小来适应 Mohr - Coulomb 准则。

模型支护结构剖面示意图如图 2 所示。为简化计算和建模方便,对模型进行如下处理。

(1) 桩体和支撑的尺寸取值与实际相同。土体的计算深度取基坑开挖深度的 2 ~ 3 倍,计算宽度自开挖边界向外取开挖深度的两倍^[6]。

(2) 边界条件的设置,将模型左右两侧对 x 方向水平约束,模型的底面水平向和垂直向约束^[7]。

(3) 由于基坑横向尺寸达到 40 m,需设置立柱,故在支撑与立柱的结点处添加 y 方向的位移约束来模拟立柱的作用,位移设为 0.15 cm。

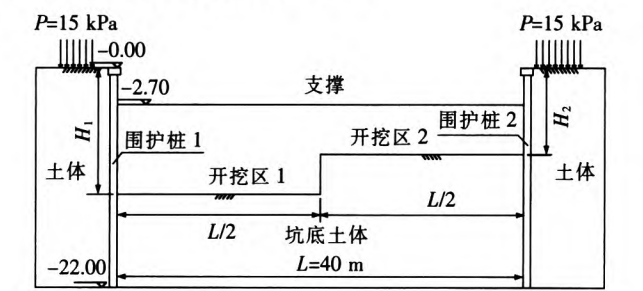


图 2 模型支护结构剖面示意图

计算工况如下：

工况一。全场开挖第一层土体至支撑底位置，并浇筑混凝土支撑。

工况二。待支撑强度达到要求强度后，全场开挖第二层土体深至 $-H_2$ 。

工况三。2 区土体开挖结束，继续开挖 1 区一侧的土体，直至 $-H_1$ 。

3 计算结果及分析

下面将分别计算在四种不同的开挖深度 H_1 、 H_2 组合($H_1 = H_2 = 6\text{ m}$; $H_1 = 7.5\text{ m}$, $H_2 = 6\text{ m}$; $H_1 = 9\text{ m}$, $H_2 = 6\text{ m}$; $H_1 = 10.5\text{ m}$, $H_2 = 6\text{ m}$;)下,支护结构变形及内力的变化情况,并加以总结。

3.1 桩身水平位移

(1)在工况一($H_1 = H_2 = 3\text{ m}$)下,基坑全场开挖至 -3.0 m ,支撑尚未发挥作用;在工况二($H_1 = H_2 = 6\text{ m}$)下,基坑全场开挖 $H_2 = 6\text{ m}$,支撑发挥作用。1#、2#桩(如图 2 所示)在工况一、二下水平位移(为方便比较,对 2#桩的位移取绝对值,以下相同),如图 3 所示。

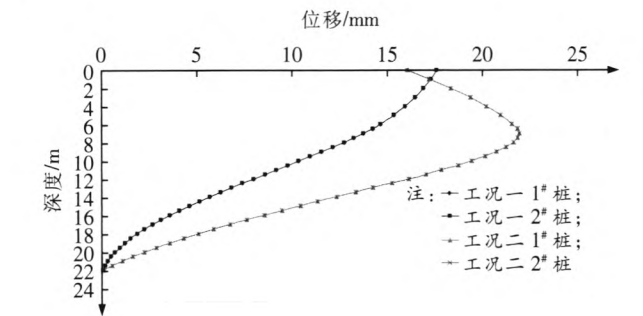
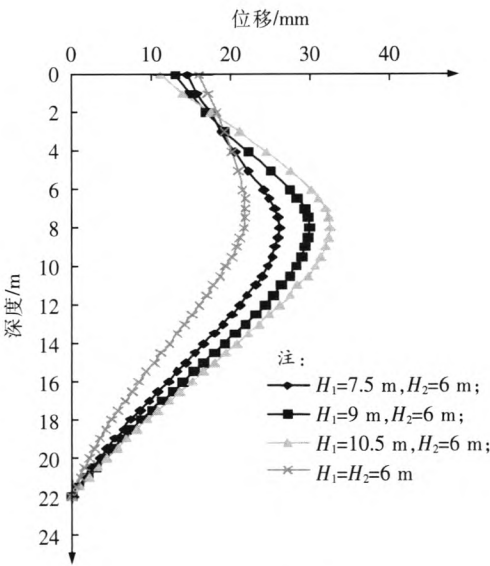


图 3 工况一、二下 1#、2#桩水平位移比较图

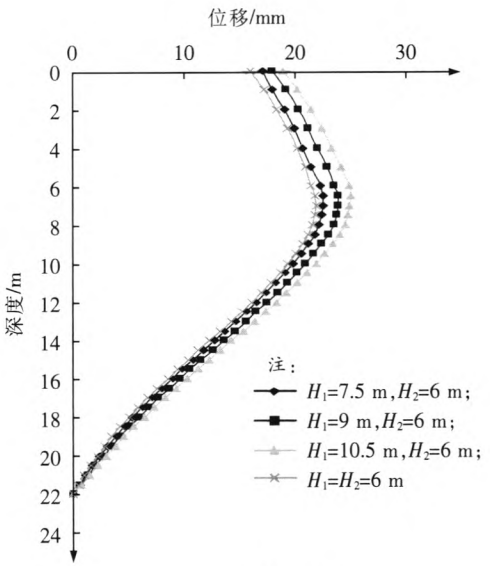
由图 3 可见,在工况一、二下,由于 1、2 区开挖深度相同,故 1#、2#桩的位移相对称。工况一下最大水平位移位置在桩顶处,工况二下最大水平位移位置下移至基坑开挖面附近;随着开挖的进行,桩身水平位移逐渐增大,但在桩身上部,水平位移有所减小。

(2)在工况三下,2 区开挖结束,1 区继续开挖,在四种不同的开挖深度 H_1 、 H_2 组合($H_1 = H_2 = 6\text{ m}$; $H_1 = 7.5\text{ m}$, $H_2 = 6\text{ m}$; $H_1 = 9\text{ m}$, $H_2 = 6\text{ m}$; $H_1 = 10.5\text{ m}$, $H_2 = 6\text{ m}$)下 1#、2#桩的水平位移如图 4(a)、(b)所示,并将工况二($H_1 = H_2 = 6\text{ m}$)下桩的水平位移附上,以便于比较。

由图 4 可见,工况三下,2 区开挖结束,1 区继续向下开挖至 $-H_1$,与工况二相比较:1#桩最大水平位移 S_1 的值随着 H_1 的增加而增大,且效果很显著,桩身最大水平位移位置有下移的趋势,桩身上部水平位移与



(a) 1# 桩



(b) 2# 桩

图 4 工况三下 1#、2#桩水平位移比较图

工况二相比,继续减小;2#桩最大水平位移 S_2 的值随着 H_1 的增加而略有增加。四种不同的的开挖深度 H_1 、 H_2 组合下 S_1 、 S_2 值如表 2 所示。

表 2 桩身位移最大值 S_1 、 S_2				
$(H_1/H_2)/\text{m}$	6/6	7.5/6	9/6	10.5/6
S_1/mm	21.9	25.2	29.9	32.5
S_2/mm	21.9	22.7	23.9	25.0
$ S_1 - S_2 /S_1$	0	9.9%	20.1%	23.1%

1#桩一侧的开挖深度 H_1 由 6 m 增大至 10.5 m , S_1 由 21.9 mm 增至 32.5 mm ,增长了 32.6% , S_2 由 21.9 mm 增加至 25.0 mm ,增加了 12.4% 。 H_1 由 6 m 变化到 10.5 m , S_1 与 S_2 的差额由 0 增至 23.1% 。由

此可见:随着 H_1 的增大, S_1 、 S_2 值的变化都很大, 其中 S_2 增幅达到了 12.4%, 这说明了局部开挖区挖深的增大不仅对局部支护结构的水平位移产生影响, 还会对周边结构产生一定的影响; 基坑内挖深分别为 $H_1 = 9\text{ m}$, $H_2 = 6\text{ m}$, $H_1 = 10.5\text{ m}$, $H_2 = 6\text{ m}$, 且挖深分界线位于基坑中部时, 两侧的桩身最大水平位移 S_1 、 S_2 差值都大于 10%, 在工程设计中, 要分别进行考虑, 不能用传统的对称方法进行处理。而 $H_1 = 7.5\text{ m}$, $H_2 = 6\text{ m}$, S_1 、 S_2 差值较小, 可以按对称方法处理。

3.2 桩身内力分析

在工况一下, 基坑全场开挖至 -3.0 m , 支撑尚未发挥作用; 在工况二 ($H_1 = H_2 = 6\text{ m}$) 下, 基坑全场开挖了 $H_2 = 6\text{ m}$, 并浇筑混凝土支撑。工况二下的桩体弯矩云图如图 5 所示。同时将 1#、2# 桩在工况一、二下的桩身弯矩整理如图 6 所示。

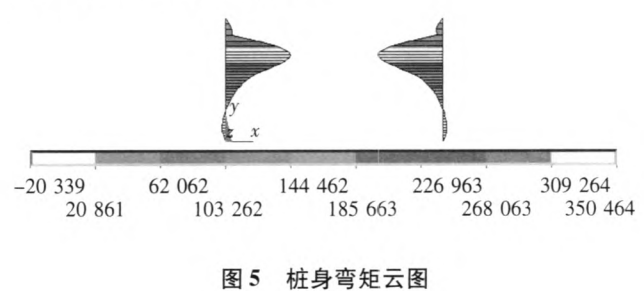


图 5 桩身弯矩云图

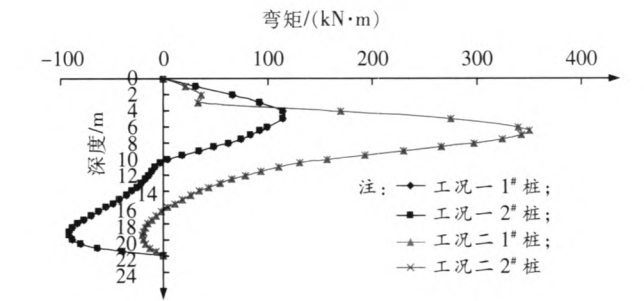
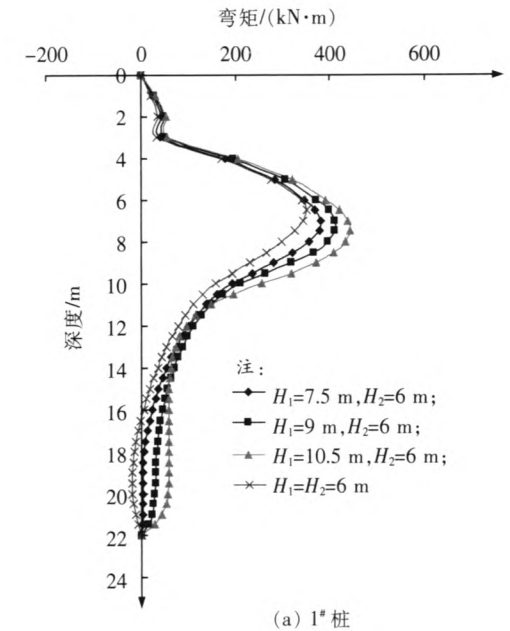


图 6 工况一、二下 1#、2# 桩身弯矩比较图

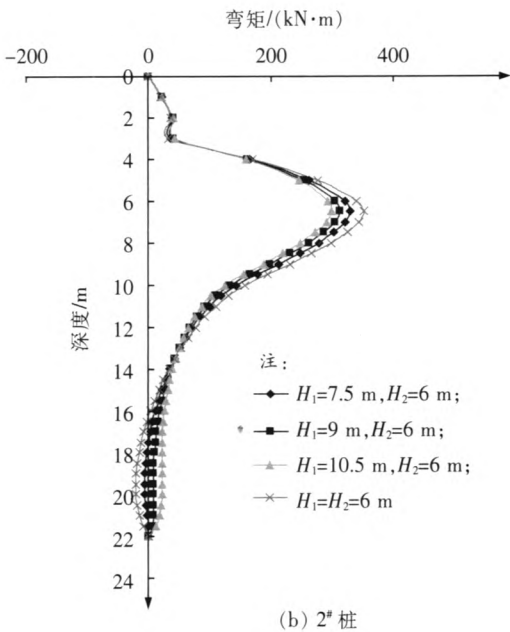
由图 6 可见, 在工况一、二下, 由于 1、2 区开挖深度相同, 故 1#、2# 桩的桩身弯矩相等。工况一下, 1#、2# 桩最大桩身弯矩 $M_1 = M_2 = 114\text{ kN} \cdot \text{m}$, 位于基坑开挖面附近位置; 工况二下, 1#、2# 桩最大桩身弯矩 $M_1 = M_2 = 350\text{ kN} \cdot \text{m}$, 其位置下移至坑底附近位置。

在工况三下, 2 区开挖结束, 1 区继续开挖, 在四种不同的开挖深度 H_1 、 H_2 组合下 1#、2# 桩的桩身弯矩如图 7(a)、(b) 所示。

由图 7 可见, (1) 工况三下, 2 区开挖结束, 1 区继续向下开挖至 $-H_1$, 与工况二相比: 1# 桩最大桩身弯矩 M_1 的值随着 H_1 的增加而增大, 桩身最大弯矩位置有下移的趋势; 2# 桩最大桩身弯矩 M_2 的值随着 H_1 的增加而减少。



(a) 1# 桩



(b) 2# 桩

图 7 工况三下 1#、2# 桩桩身弯矩比较图

(2) 四种不同的的开挖深度 H_1 、 H_2 组合下 M_1 、 M_2 值如表 3 所示。

表 3 桩身弯矩最大值 M_1 、 M_2

$H_1/H_2/\text{m}$	6/6	7.5/6	9/6	10.5/6
$M_1/(\text{kN} \cdot \text{m})$	350.5	379.1	410.3	443.6
$M_2/(\text{kN} \cdot \text{m})$	350.5	328.5	312.4	298.8
$ M_1 - M_2 /M_1$	0	13.3%	23.9%	32.6%

1 区的开挖深度 H_1 由 6 m 增大至 10.5 m , M_1 由 $350.5\text{ kN} \cdot \text{m}$ 增至 $443.6\text{ kN} \cdot \text{m}$, 增长了 21%, M_2 由 $350.5\text{ kN} \cdot \text{m}$ 下降至 $298.8\text{ kN} \cdot \text{m}$, 下降了 14.8%。
 H_1 由 6 m 增至 10.5 m , M_1 与 M_2 的差额由 0 增至

32.6%。由此可见:随着 H_1 的增大, M_1 、 M_2 值的变化都很大,特别是的 M_2 降幅达到了14.8%,这主要是由于2#桩水平位移的变化及支撑的变形所引起的。同时也说明了局部开挖区挖深的增大不仅对局部支护结构的内力产生影响,还会对周边结构有一定的影响;基坑内挖深分别为 $H_1=7.5\text{ m}$, $H_2=6\text{ m}$, $H_1=9\text{ m}$, $H_2=6\text{ m}$, $H_1=10.5\text{ m}$, $H_2=6\text{ m}$,且挖深分界线位于基坑中部时时,两侧的桩身最大弯矩 M_1 、 M_2 差值都远大于5%,在工程设计中,要分别进行考虑,不能用传统的对称方法进行处理。

3.3 支撑轴力分析

在工况二($H_1=H_2=6\text{ m}$)下,支撑发挥作用,其杆内产生轴力;工况三下,在四种不同的开挖深度 H_1 、 H_2 组合下的支撑轴力也不相同,各情况下的支撑轴力值如图8所示。

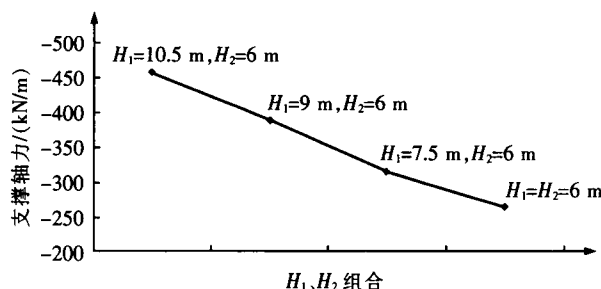


图8 不同开挖深度组合下支撑轴力的变化图

由图8所示,支撑轴力随着 H_1 的增加而增大,且变化幅度较大。这主要是由围护桩位移的变化和支撑变形所引起的。

4 结论

(1) 围护结构侧向位移的分布形态基本为两头小,中上部较大,支撑的设立对减小结构的侧向位移起了积极的作用。随着开挖深度的增加,围护结构上部侧向位移略有减小。另外,最大侧向位移一般发生在基坑的开挖面附近。

(2) 桩身弯矩最大值及支撑轴力随着开挖深度的增加而增加,最大桩身弯矩一般发生在基坑的开挖面附近。

(3) 在不同挖深情况下,基坑两侧围护结构的位移、内力都存在差异,在设计时需要分别考虑结构参数。

(4) 本文是基于挖深分界线在基坑中部的前提下进行的计算,但在实际工程中,挖深分界线的位置往往是变化的,故下一步有必要基于挖深分界线位置的变化对基坑支护结构的影响进行研究。

参考文献:

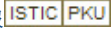
- [1] 高文华,杨林德. 软土深基坑支护结构内力与变形时空效应的影响因素分析[J]. 土木工程学报,2001(5):92-98.
Gao Wenhua, Yang Linde. Analysis of Factors on Time-Space Effect of Internal Force and Deformation for Retaining Structure of Deep Foundation Pit Under Soft Soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2001(5): 92-98.
- [2] 陆新征,宋二祥,吉林,等. 某特深基坑考虑支护结构与土体共同作用的三维有限元分析[J]. 岩土工程学报,2003(4):488-491.
Lu Xinzhen, Song Erxiang, Ji Lin, etc. 3-Dimensional FEA for the Interaction between Supporting Structure of Excavation and Soil in a Very Deep Pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003(4): 488-491.
- [3] 杨光华. 深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[J]. 岩土力学,2004(12):25-29.
Yang Guanghua. Practical Calculation Method of Retaining Structures for Deep Excavations and Its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(12): 25-29.
- [4] 曾律弦,潘泓. ANSYS在环梁支护结构体系中的应用[J]. 四川建筑科学研究,2006(4):88-90.
Zeng Lvxiang, Pan Hong. Application of ANSYS in the Ring Beam Retaining Structure of Deep Foundation Pit[J]. Sichuan Building Science, 2006(4): 88-90.
- [5] 常林越,沈健,徐中华. 敏感环境下深基坑的设计与三维数值分析[J]. 铁道工程学报,2011(11):52-57.
Chang Linyue, Shen Jian, Xu Zhonghua. Design and 3D Numerical Analysis of a Deep Excavation in Close Proximity to Sensitive Properties[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(11): 52-57.
- [6] 王一鸣. 有限元理论在基坑工程中的应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2006.
Wang Yiming. Study on Application of Finite Element Method in Foundation Pit[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [7] 张丙强. 内撑式支护软土基坑有限元分析[J]. 岩土工程界,2006(3):49-51.
Zhang Bingqiang. Analysis of Braced Excavations in Soft Clays Using FEM[J]. Geotechnical Engineering World, 2006(3): 49-51.

(编辑 曹淑荣)

不同开挖深度下基坑桩一撑式支护结构研究

作者：[吴剑锋](#), [WU Jian-feng](#)

作者单位：[铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津, 300142](#)

刊名：[铁道工程学报](#) 

英文刊名：[Journal of Railway Engineering Society](#)

年, 卷(期): 2013(10)

参考文献(7条)

- 高文华;杨林德 软土深基坑支护结构内力与变形时空效应的影响因素分析[期刊论文]-[土木工程学报](#) 2001(05)
- 陆新征;宋二祥;吉林 某特深基坑考虑支护结构与土体共同作用的三维有限元分析[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 2003(04)
- 杨光华 深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[期刊论文]-[岩土力学](#) 2004(12)
- 曾律弦;潘泓 ANSYS在环梁支护结构体系中的应用[期刊论文]-[四川建筑科学研究](#) 2006(04)
- 常林越;沈健;徐中华 敏感环境下深基坑的设计与三维数值分析[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2011(11)
- 王一鸣 有限元理论在基坑工程中的应用研究[学位论文] 2006
- 张丙强 内撑式支护软土基坑有限元分析[期刊论文]-[岩土工程界](#) 2006(03)

引用本文格式: [吴剑锋](#), [WU Jian-feng](#) [不同开挖深度下基坑桩一撑式支护结构研究](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2013(10)