

DOI: 10.11779/CJGE2014S2010

# 硬化土模型在桩锚与桩撑组合支护深基坑工程中的应用

谢建斌<sup>1</sup>, 曾宪明<sup>2</sup>, 胡井友<sup>3</sup>, 温一波<sup>1</sup>, 吴昌长<sup>1</sup>

(1. 云南大学土木工程系, 云南 昆明 650091; 2. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023; 3. 昆明军龙岩土工程有限公司, 云南 昆明 650021)

**摘要:** 基于硬化土模型 (hardening soil 模型), 针对一位于昆明市中心复杂周边环境桩锚与桩撑组合支护的城市深基坑工程实例, 通过基坑场地土样固结排水三轴压缩试验和固结试验选取了硬化土模型中的参数; 采用 MADIS/GTS 对该基坑工程的开挖支护过程进行三维有限元分析, 并将分析结果与  $m$  法计算结果、工程实测结果进行了对比。分析结果与  $m$  法计算结果、实测数据的对比表明: 硬化土模型可用于桩锚与桩撑组合支护深基坑工程的数值分析; 利用硬化土模型可得较符合实际的基坑开挖变形规律。

**关键词:** 硬化土模型; 深基坑; 桩锚与桩撑组合支护; 三维有限元分析

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0056-08

**作者简介:** 谢建斌(1973-), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程、工程力学理论及试验研究方面的教学和科研。

E-mail: kmxiejb@sina.com。

## Application of hardening soil model in deep excavations supported by pile-anchor and pile-braced composite supporting structures

XIE Jian-bin<sup>1</sup>, ZENG Xian-ming<sup>2</sup>, HU Jing-you<sup>3</sup>, WEN Yi-bo<sup>1</sup>, WU Chang-chang<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. The Third Research Institute of the Corps of Engineers,

General Staff of PLA, Luoyang 471023, China; 3. Kunming Junlong Geotechnical Engineering Co., Ltd., Kunming 650021, China)

**Abstract:** Based on the hardening soil model, a deep excavation supported by pile-anchor and pile-braced composite supporting structures is analyzed. The excavation is located in the downtown of Kunming City, and the surrounding environment of the deep foundation pit is complex. The associated parameters of the hardening soil model are designed by consolidated-drained triaxial compression test and consolidation test. Then three-dimensional finite element analysis of the excavation during constructing and supporting processes is carried out using the software of MADIS/GTS. The results of finite element method are compared with the measured data and the calculated results of  $m$ -method. The comparison shows that the hardening soil model can be adopted to analyze the deep excavation supported by pile-anchor and pile-braced composite supporting structures. The real deformation mechanism and regularity of foundation excavation can be obtained by using the hardening soil model.

**Key words:** hardening soil model; deep excavation; pile-anchor and pile-braced composite supporting structure; three-dimensional finite element analysis

## 0 引 言

当前, 城市深基坑工程不断增多, 基坑平面形状更加复杂, 基坑周边环境也愈加复杂, 基坑常紧邻高层建筑、地铁、重要地下管网等<sup>[1]</sup>, 基坑支护形式也趋于多样化和组合化, 对基坑支护设计的安全度和变形控制提出了更高要求。但目前的基坑开挖支护设计中仍大多采取 Mohr-Coulomb 本构模型 (MC 模型) 并采用  $m$  法、等代梁法以及考虑支护结构与土体协同作用的二维有限元分析法<sup>[2-6]</sup>。事实上, MC 模型不能考虑中间主应力对屈服和破坏的影响, 且三维应力空间中的屈服面存在角点奇异性, 屈服函数在角点处存

在不连续问题, MC 模型屈服曲线棱角点处的数值计算存在奇异点<sup>[2-4]</sup>。再者, 基坑开挖支护具有较明显的时空效应<sup>[5-6]</sup>。因此, 选取 MC 本构模型并采用  $m$  法、等代梁法等近似方法或二维有限元方法分析基坑开挖支护尤其是对桩-锚-撑组合支护形式等复杂深基坑工程有一定局限性<sup>[2-6]</sup>。为更精确地分析复杂深基坑的开挖支护工况, 研究基坑开挖支护过程的时空效应, 包括桩-撑-锚组合支护基坑<sup>[7]</sup>在内的复杂基坑工程目前已较广泛采用三维数值分析方法。以往研究表明<sup>[2-6]</sup>,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51264037); 云南省应用基础研究计划面上项目 (2011FB010, 2012FB117)

收稿日期: 2014-07-28

基坑开挖支护数值分析中常用 Duncan–Chang 模型 (DC 模型)、MC 模型、Drucker–Prager 模型 (DP 模型)、修正剑桥模型、软土流变模型、Hardening–Soil 模型 (HS 模型, 硬化土模型) 等。其中, 硬化土模型由于具有可考虑土体压缩性、可模拟土体应力增量随应变逐渐减小的硬化现象、能更好反映土体卸荷时的应力–应变关系、能考虑土体的剪胀性及中性加载、采用 MC 破坏准则、模型主要参数可通过常规三轴试验及固结实验获取等优点<sup>[7-12]</sup>而在基坑开挖支护数值分析中得到较广泛推广应用。目前国内外已有部分采用土体硬化模型进行基坑开挖支护数值分析的成功经验。国外, Teo 等<sup>[8]</sup>应用硬化土模型分析了深基坑工程; Chanaton 等<sup>[9]</sup>研究了泰国曼谷地区黏土 HS 模型中刚度和强度参数的选取问题。王海波等<sup>[10]</sup>应用硬化土模型研究了地下工程开挖问题; 李亚玲等<sup>[11]</sup>研究了硬化土模型中的参数选取问题; 王卫东等<sup>[12]</sup>开展了土体硬化模型参数的试验研究并将研究成果应用于基坑开挖的数值分析中; 贺晨等<sup>[13]</sup>、杜佐龙等<sup>[14]</sup>以及龚东庆等<sup>[15]</sup>基于硬化土模型研究了基坑支护变形特性; 上海市现行基坑工程技术规范<sup>[12]</sup>更是推荐采用硬化土模型进行基坑数值分析。本文针对昆明市区一复杂周边环境桩锚与桩撑组合支护深基坑工程实例, 通过三轴试验和固结试验选取硬化土模型中的参数; 采用 MADIS/GTS 对该基坑工程开挖支护过程进行三维有限元分析, 比较分析结果与  $m$  法计算结果、工程实测结果。

### 1 硬化土模型

硬化土模型 (hardening soil 模型) 为等向硬化弹塑性模型<sup>[8-12]</sup>, 主应力空间中的硬化土模型屈服面如图 1 所示。

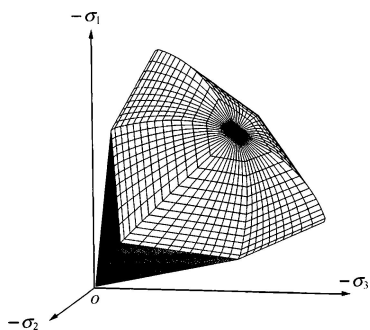


图 1 主应力空间中的硬化土模型屈服面

Fig. 1 Yield surface of HS model in principal stress space

硬化土模型的基本原理是将固结排水三轴压缩试验主加载时土体轴向应变  $\epsilon_1$  与偏应力  $p$  间的关系近似为如图 2 所示的双曲线关系。

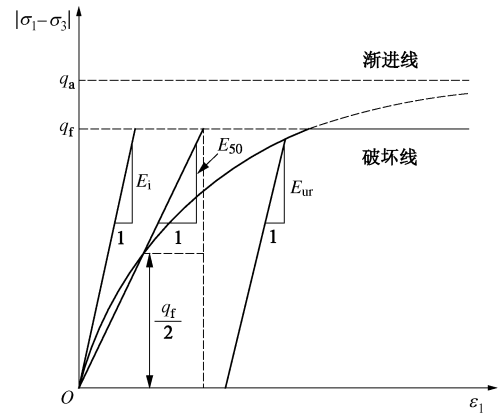


图 2 固结排水三轴压缩试验土体轴向应变与偏应力的关系

Fig. 2 Relationship between axial strain and deviator stress of soils under consolidated-drained triaxial compression test

在图 2 中,  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别为图 1 所示土体的最大和最小主应力,  $q_a$  为土体剪切强度的渐近值,  $q_f$  为土体破坏时的极限偏应力,  $E_i$  为土体初始弹性模量,  $E_{oed}$  为土体固结试验切线模量,  $E_{50}$  为土体主加载时割线刚度模量,  $E_{ur}$  为土体卸载再加载应力路径刚度模量。

由硬化土模型基本原理可知, 硬化土模型<sup>[7-15]</sup>包括强度参数、刚度参数和高级参数 3 大类 11 个参数, 分别为土体的有效内摩擦角  $\phi'$ , 有效黏聚力  $c'$ , 剪胀角  $\psi$ , 土体破坏比  $R_f$ , 土体参考应力  $\sigma^{ref}$ , 土体固结排水三轴压缩试验的参考割线刚度模量  $E_{50}^{ref}$  (与参考应力  $\sigma^{ref}$  相应)、土体固结试验参考切线模量  $E_{oed}^{ref}$ , 土体卸载再加载试验参考模量  $E_{ur}^{ref}$  (与参考应力  $\sigma^{ref}$  相应)、土体模量应力水平相关幂指数  $m$ 、土体卸载再加载泊松比  $\mu_{ur}$  和土体正常固结时的侧压力系数  $K$ 。其中  $\psi$  是土体剪切试验时法向位移与切向位移的函数; 破坏比  $R_f$  为土体固结排水三轴压缩试验时  $q_f$  与  $q_a$  的比值;  $m$ 、 $\sigma^{ref}$  和  $\mu_{ur}$  可参考文献[8]、[9]、[11]、[12]并结合 MADIS/GTS、Plaxis 等软件取值;  $\phi'$ 、 $c'$ 、 $E_{oed}^{ref}$ 、 $E_{50}^{ref}$  和  $K$  可通过固结排水三轴压缩试验及固结试验获取;  $E_{ur}^{ref}$  可由固结排水三轴压缩试验过程的加载—卸载—再加载循环测得。由土体固结排水三轴压缩试验结果计算参数  $E_{oed}^{ref}$ 、 $E_{50}^{ref}$ 、 $E_{ur}^{ref}$ 、 $K$  和  $R_f$  值的公式为

$$\left. \begin{aligned} E_{oed}^{ref} &= E_{oed} \left( \frac{c' \cos \phi' - \sigma_1' \sin \phi'}{c' \cos \phi' + \sigma^{ref} \sin \phi'} \right)^{-m} \\ E_{50}^{ref} &= E_{50} \left( \frac{c' \cos \phi' - \sigma_3' \sin \phi'}{c' \cos \phi' + \sigma^{ref} \sin \phi'} \right)^{-m} \\ E_{ur}^{ref} &= E_{ur} \left( \frac{c' \cos \phi' - \sigma_3' \sin \phi'}{c' \cos \phi' + \sigma^{ref} \sin \phi'} \right)^{-m} \\ K &= 1 - \sin \phi' \\ R_f &= \frac{q_f}{q_a} \\ q_f &= \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \left( \sigma_3' + c' \frac{\cos \phi'}{\sin \phi'} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

式中,  $\sigma'_1$  和  $\sigma'_3$  分别土体最大和最小有效主应力。

## 2 工程概况

昆明医科大学附属第一医院干部住院综合楼工程位于昆明市西昌路 295 号昆明医科大学附属第一医院内。综合楼建筑面积约 84568 m<sup>2</sup>, 地上 22 层, 设 3 层地下室。根据设计, 昆明医科大学附属第一医院干部住院综合楼需开挖周长 352.9 m、最大深度为 18.05 m 的地下室深基坑并进行基坑支护。图 3 为昆明医科大学附属第一医院干部住院综合楼基坑及其周边环境俯视图。表 1 为综合楼基坑工程地质勘察揭示的基坑场地自上而下土层情况。综合楼基坑开挖支护深度范围内涉及 8 个主层、11 个亚层。



图 3 基坑及其周边环境俯视图

Fig. 3 Vertical view of excavation and its surroundings

表 1 综合楼深基坑开挖支护深度范围涉及土层

Table 1 Soil layers of deep excavation of buildings

土层	土层状态	土层厚度/m
杂填土层①	土质松散	0.80~3.50
粉土层②	中压缩性	0.70~3.30
黏土层② <sub>1</sub>	中压缩性	0.70~3.30
粉土层③	中压缩性	1.00~5.60
砾砂层③ <sub>1</sub>	饱和、中密	0.50~1.70
粉质黏土层③ <sub>2</sub>	可塑—硬塑	0.60~2.70
粉土层④	中压缩性、含少量腐质物	0.40~4.60
圆砾层④ <sub>1</sub>	饱和、中密	0.40~4.60
黏土层④ <sub>2</sub>	可塑	0.50~4.30
粉土层⑤	中压缩性	1.00~11.30
粉质黏土层⑤ <sub>1</sub>	可塑—软塑	0.50~7.80
砾砂层⑤ <sub>2</sub>	饱和、中密	0.50~2.10
黏土层⑥	可塑—硬塑	0.60~6.40
粉土层⑥ <sub>1</sub>	中压缩性、含少量腐质物	0.50~5.70
黏土层⑦	中压缩性、含少量腐质物	0.50~9.60
粉土层⑦ <sub>1</sub>	中压缩性	0.50~3.70
粉土层⑧	中密—密实	0.50~9.60
粉质黏土层⑧ <sub>1</sub>	可塑—硬塑、中压缩性	0.60~5.00
砾砂层⑧ <sub>2</sub>	饱和、中密	0.40~3.80

由图 3 可知, 综合楼基坑周边环境较为复杂。基坑南侧建筑物为正在建设的昆明医科大学附属第一医院影像中心楼(钢筋混凝土建筑物, 6 层, 基础形式为 25 m 桩基础), 距基坑开挖线 10.1 m; 基坑东北侧建筑物是昆明医科大学附属第一医院外科住院楼(钢筋混凝土建筑物, 17 层, 18 m 长桩基础), 距基坑开

挖线 21.8 m; 基坑西北侧分布的建筑物为昆明医科大学附属第一医院污水处理站(筏板基础), 距基坑开挖线约 7.2 m; 基坑西侧建筑物为贵金属研究所住宅区(钢筋混凝土结构, 墙下钢筋混凝土条形基础), 距基坑西侧开挖线最近距离约 12 m。

综合楼基坑工程地质勘察揭示, 基坑场地枯水期稳定地下水位埋深在 0.80~1.35 m 之间, 地下水仪标高在 1887.15~1888.39 m 之间, 场地常年地下水位变化幅度在 0.50~1.00 m 之间; 基坑场地抽水试验揭示, 当水位降深至地表以下 18.0 m、等效半径为 41.8 m 时, 预测基坑涌水量为 7969 m<sup>3</sup>/d, 基坑降水影响半径为 721.7 m。

## 3 基于 HS 模型的基坑工程数值分析

### 3.1 基坑土层物理力学性能指标

在综合楼基坑开挖支护施工前, 开展了基坑场地补充勘察, 并取场地土样, 采用 GDS 多功能三轴仪对基坑场地具备试验条件的土样进行固结排水三轴压缩试验、固结排水三轴压缩加载—卸载—再加载试验; 采用全自动三联固结仪对可开展试验的土样进行常规固结试验。对部分无法进行固结排水三轴压缩试验及固结试验的土层土样, 相应  $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ ,  $E_{50}^{\text{ref}}$  和  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  按下式估算, 即

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{oad}}^{\text{ref}} &= (0.8 \sim 1.1)E_s^{1-2} \\ E_{50}^{\text{ref}} &\approx E_{\text{oad}}^{\text{ref}} \\ E_{\text{ur}}^{\text{ref}} &= (3 \sim 5)E_{50}^{\text{ref}} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

式中,  $E_s^{1-2}$  为土体的压缩模量。

采用硬化土模型时, 由试验及估算得到的昆明医科大学附属第一医院干部住院综合楼基坑开挖支护所涉及土层主要物理力学性能参数如表 2 所示。表 2 中, 砾砂层③<sub>1</sub>、圆砾层④<sub>1</sub> 的物理力学性能参数及带\*参数为经验值。

### 3.2 基坑支护方案

鉴于综合楼深基坑工程具有: ①基坑最大开挖深度为 18.05 m, 属深基坑; ②基坑四周均有较重要的建筑物, 基坑周边环境较复杂, 基坑变形控制要求高; ③基坑西侧及西南侧距基坑施工红线距离较近, 基坑四周都没有足够空间可进行放坡开挖; ④基坑西侧建筑物业主不允许本工程锚索进入其建筑物基础以下空间范围; ⑤基坑支护涉及砾砂、圆砾、粉土等强透水和透水土层等特点。经研究, 确定综合楼深基坑采用“桩锚与桩撑联合支护本基坑侧壁”的支护方案并采取“双层截水帷幕+内排外灌”的基坑地下水控制措施。双层截水帷幕分别为“支护桩外设长度 18 m、直径 600 mm、间距 400 mm 的长螺旋深层搅拌桩下接



表 2 综合楼基坑土层主要物理力学性能参数

Table 2 Physical and mechanical indices of soil layers in deep excavation of buildings

土层名称	$\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi /(^{\circ})$	$k/(\times 10^6 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$E_s/\text{MPa}$	$E_{\text{ref}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$
杂填土层①	17.0	15.0*	5*	4.81	3.41	3.75	3.75	11.3
粉土层②	19.3	30.0	9.5	159.01	8.87	8.87	8.87	26.6
黏土层② <sub>1</sub>	18.9	48.4	10.1	12.03	6.89	6.89	6.89	20.7
粉土层③	19.9	33.9	10.7	84.53	6.90	6.9	6.9	20.7
砾砂层③ <sub>1</sub>	21.0	0*	25.0	100000*	15.0	15	15	45
粉质黏土层③ <sub>2</sub>	20.0	34.7	9.2	13.87	7.03	7.03	7.03	21.09
圆砾层④ <sub>1</sub>	22.0	0*	30.0	100000*	25.0	25	25	75
黏土层④ <sub>2</sub>	18.7	48.4	7.3	16.23	5.52	5.5	5.5	22
粉土层⑤	19.3	33.1	19.5	79.47	12.04	13.2	26.4	79.2
粉质黏土层⑤ <sub>1</sub>	18.4	41.2	6.7	46.85	6.22	6.84	13.68	54.72
黏土层⑥	19.1	56.6	10.3	20.32	12.9	13.41	26.82	80.47
黏土层⑦	19.3	65.8	11.1	13.55	12.63	13.1	26.2	78.6
粉土层⑦ <sub>1</sub>	19.8	49.2	19.1	79.66	14.03	14.59	29.17	87.52
粉土层⑧	19.4	60.3	13.0	20.11	13.5	14.04	28.07	84.21

表 3 综合楼深基坑支护结构参数

Table 3 Parameters of supporting structures for excavation

剖面编号	基坑深度/m	支护桩长度/m	剖面锚索总长/m	整体稳定系数	抗倾覆稳定性系数
1-1	18.05	32.0	216	1.401	1.523
2-2	18.05	33.0	218	1.320	1.404
3-3	18.05	33.0	229	1.335	1.418
4-4	17.25	32.0	内撑	1.455	1.581
5-5	17.25	32.0	内撑	1.355	1.503
6-6	17.25	35.0	内撑	1.379	1.481
7-7	18.05	35.0	222	1.377	1.364
8-8	17.25	37.5	218	1.349	1.566
9-9	18.05	35.0	222	1.462	1.436

14 m 长三重管高压旋喷桩”外层截水帷幕以及“支护桩间长度 32 m、直径 900 mm、间距 200 mm 的三重管高压旋喷桩”内层截水帷幕, 双层止水帷幕深度均为 32 m。此外, 还按照支护结构安全等级一级标准设计了该基坑监测方案, 主要监测基坑周边地表竖向位移、基坑侧壁顶部水平及竖向位移、支护桩深层水平位移、格构柱竖向位移、支撑轴力、锚索轴力等项目。表 3 为基于硬化土模型参数设计的综合楼深基坑支护结构参数。图 4 为综合楼深基坑支护及监测平面布置图。

表 3 中, 各剖面支护桩的桩径均为 1.5 m, 各剖面支护桩的中心距均为 2.0m。

### 3.3 有限元模型

基于硬化土本构模型, 采用 MADIS/GTS 建立综合楼基坑开挖支护三维有限元模型。图 5 为基坑及其周边建筑物三维有限元模型, 图 6 为基坑支护结构三维有限元模型。

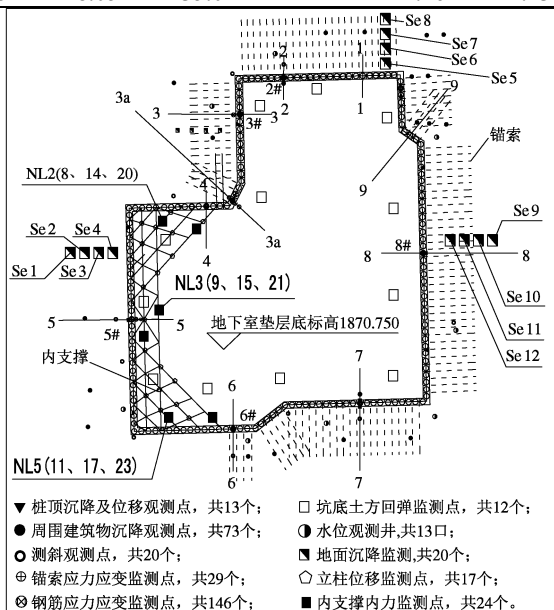


图 4 基坑支护及监测平面布置图

Fig. 4 Floor plan of supporting structures for excavation and monitoring sites

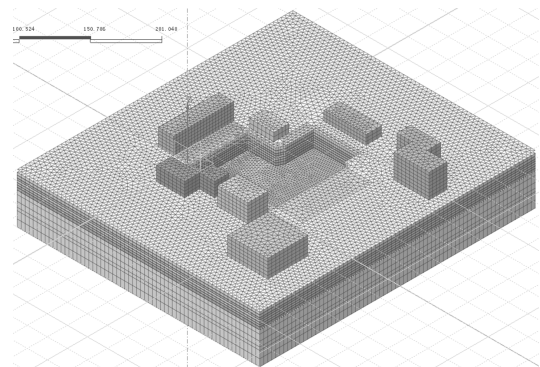


图 5 基坑及其周边建筑物三维有限元模型

Fig. 5 3-D FEM of excavation and its surroundings

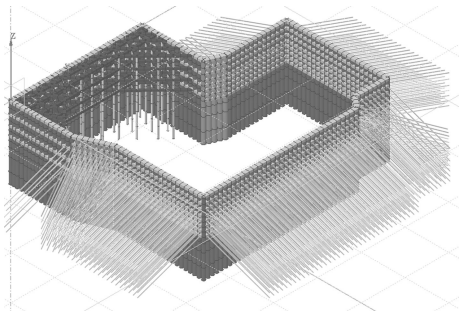


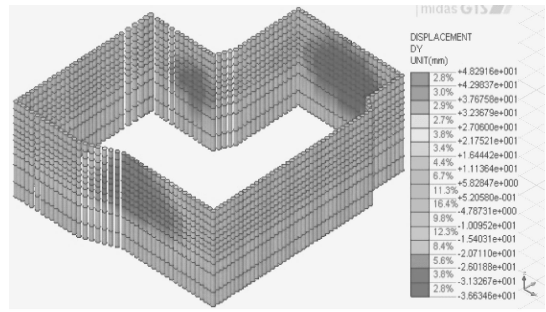
图6 基坑支护结构三维有限元模型

Fig. 6 3-D FEM of supporting structures for excavation

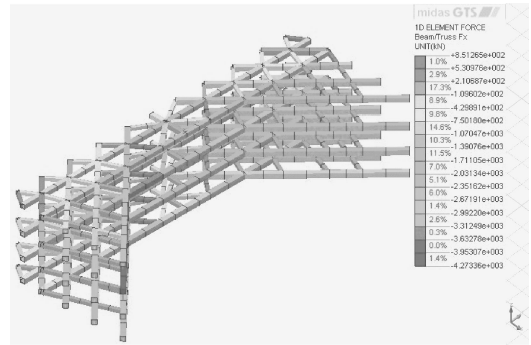
在图5和图6中,土体模型尺寸为215 m(水平横向)×200 m(水平纵向)×60 m(高度),土体采用实体单元,支护桩、内支撑、冠梁、腰梁和立柱采用梁单元,锚索采用锚单元(植入式桁架单元),支护桩、内支撑、冠梁、腰梁和立柱材料为C35钢筋混凝土,密度为2500 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为31.5 GPa,泊松比为0.25,锚索弹性模量为195 GPa。整个基坑(含土层、基坑支护结构及其周边建筑物)有限元模型共有100190个单元、97199节点。

### 4 结果分析与讨论

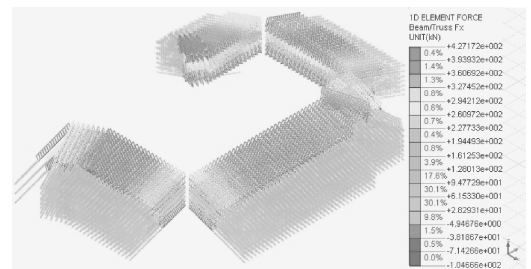
图7为综合楼基坑开挖支护完成时的三维有限元分析计算结果。其中,图7(a)为基坑周边地表竖向位移三维有限元计算结果;图7(b)和图7(c)分别为支护桩深层X方向和Y方向的水平位移三维有限元计算结果;图7(d)为内支撑轴力三维有限元计算结果;图7(e)为锚索轴力三维有限元计算结果。



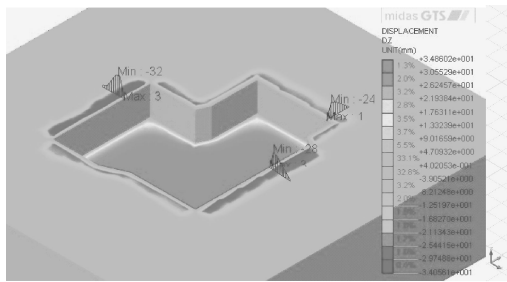
(c) 支护桩深层Y方向水平位移三维有限元计算结果



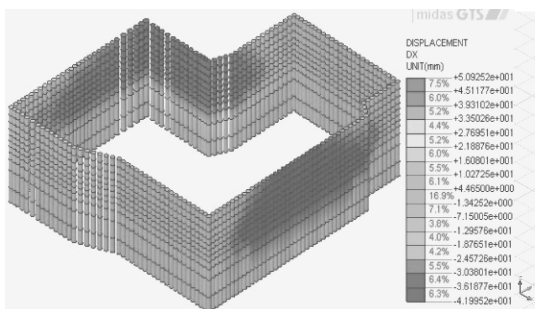
(d) 内支撑轴力三维有限元计算结果



(e) 锚索轴力三维有限元计算结果



(a) 基坑周边地表竖向位移三维有限元计算结果

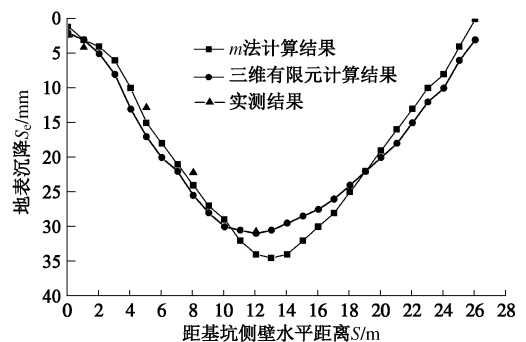


(b) 支护桩深层X方向水平位移三维有限元计算结果

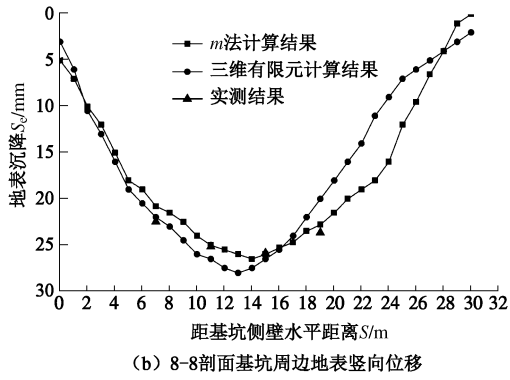
图7 基坑开挖支护完成时的三维有限元分析计算结果

Fig. 7 Floor plan of supporting structures for excavation and monitoring sites

为分析综合楼基坑三维有限元分析结果的准确性,设计中还针对表2综合楼深基坑支护结构参数采用m法进行计算。图8为5-5剖面 and 8-8剖面基坑周边地表竖向位移、支护桩深层水平位移三维有限元分析结果与m法计算结果、工程实测结果比较情况。图9为#2测斜孔和#6测斜孔所在的基坑支护桩深层水平位移三维有限元分析结果与m法计算结果、工程实测结果比较情况。



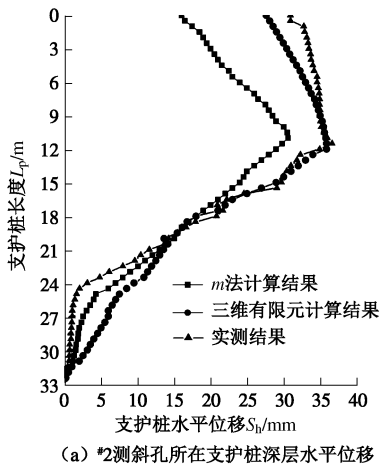
(a) 5-5剖面基坑周边地表竖向位移



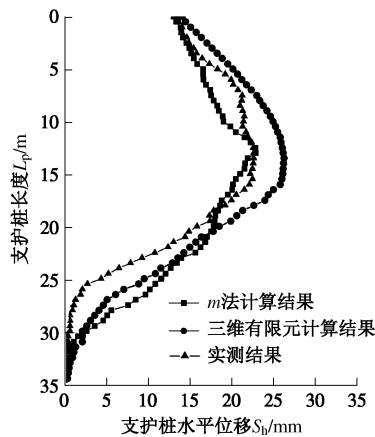
(b) 8-8剖面基坑周边地表竖向位移

图 8 基坑周边地表竖向位移

Fig. 8 Ground settlement around foundation pit



(a) #2测斜孔所在支护桩深层水平位移



(b) #6测斜孔所在支护桩深层水平位移

图 9 支护桩深层水平位移

Fig. 9 Deep horizontal displacement of retaining piles

表 4 为四道内支撑梁支撑轴力三维有限元分析结果与  $m$  法计算结果、工程实测结果的对比情况。表 5 为 2-2 剖面 and 3a-3a 剖面 7 排锚索轴力三维有限元分析结果与  $m$  法计算结果、工程实测结果的对比情况。

表 4 和表 5 中, 负值表示内支撑梁承受压力;  $r_1$  和  $r_2$  分别为内支撑梁支撑轴力  $m$  法计算结果与实测结果、有限元法计算结果与实测结果的比较值;  $r_3$  和  $r_4$  分别为锚索轴力  $m$  法计算结果与实测结果、有限元法

计算结果与实测结果的比较值。

表 4 内支撑轴力实测结果与计算分析结果对比表

Table 4 Comparison between calculated and measured results of axial forces of supporting structures

支撑轴力	实测 /kN	$m$ 法 /kN	有限元法/kN	比较值	
				$r_1$	$r_2$
第一道撑	NL2	-986.86	-1017	-1040	1.03 1.05
	NL3	-1436.00	-2037	-1300	1.42 0.91
	NL5	-797.56	-1043	-719	1.31 0.90
第二道撑	NL8	-1868.68	-1725	-2170	0.92 1.16
	NL9	-2245.25	-2917	-2100	1.30 0.94
	NL11	-3453.36	-1434	-3100	0.42 0.90
第三道撑	NL14	-2282.64	-1988	-2060	0.87 0.90
	NL15	-1912.52	-3363	-1410	1.76 0.74
	NL17	-2371.21	-1900	-2410	0.80 1.02
第四道撑	NL20	-1176.56	-1313	-1230	1.12 1.05
	NL21	-1246.54	-2936	-989	2.36 0.79
	NL23	-1746.46	-1422	-1530	0.81 0.88

表 5 锚索轴力实测结果与计算分析结果对比表

Table 5 Comparison between calculated and measured results of axial forces of supporting structures

锚索轴力	实测 /kN	$m$ 法 /kN	有限元法/kN	比较值	
				$r_3$	$r_4$
2-2 剖面	第 1 排	256.96	298.67	286	1.16 1.11
	第 2 排	439.14	429.13	401	0.98 0.91
	第 3 排	331.62	593.14	302	1.79 0.91
	第 4 排	276.25	688.50	258	2.49 0.93
	第 5 排	332.67	713.20	336	2.14 1.01
	第 6 排	354.23	660.22	348	1.86 0.98
	第 7 排	265.45	614.26	290	2.31 1.09
3a-3a 剖面	第 1 排	379.48	390.62	416	1.03 1.10
	第 2 排	282.74	485.79	307	1.72 1.09
	第 3 排	196.47	657.75	201	3.35 1.02
	第 4 排	376.34	801.66	298	2.13 0.79
	第 5 排	375.69	700.90	358	1.88 0.95
	第 6 排	354.12	621.73	370	1.76 1.04
	第 7 排	321.43	519.61	335	1.62 1.04

由图 7~9 可知:

(1) 三维有限元分析得到的基坑周边地表竖向位移与距基坑侧壁的水平距离间呈“抛物线”分布规律。因此, 采用经典  $m$  法进行基坑支护设计时, 选取“抛物线法”确定基坑周边地表沉降较合适。

(2) 基于硬化土模型, 采用三维有限元分析的结果与  $m$  法计算结果、工程实测结果总体吻合, 但采用三维有限元分析时, 由于充分考虑了基坑开挖支护的空间效应而更接近实测结果。因此, 采用硬化土模型可得较符合实际的基坑开挖变形规律。由表 3 和表 4 可知, 基于硬化土模型, 采用三维有限元分析计算的结果更接近工程实测结果。

基于硬化土本构模型, 采用三维有限元分析设计的昆明医科大学附属第一医院干部住院综合楼基坑开

挖支护方案在实施中取得了良好效果。该综合楼基坑于2013年1月18日开始施工止水帷幕,2013年1月18日开始施工支护桩,2013年5月5日开始施工冠梁,2013年6月20日开始施工第一道内支撑,2013年6月25日开始施工第一排锚索,2013年6月10日开挖第一层土。基坑支护结构于2013年11月1日完成施工。基坑支护完成时的情形如图10所示。



图10 施工完成的桩锚与桩撑组合支护综合楼基坑

Fig. 10 Photo of completed excavation

## 5 结 论

基于硬化土模型,针对桩锚与桩撑组合支护的昆明医科大学附属第一医院干部住院综合楼基坑工程实例,提出硬化土本构模型参数选取方法,并采用MADIS/GTS对基坑工程开挖支护过程进行三维有限元分析,得到如下结论:

(1) 硬化土模型可考虑土体压缩性、可模拟土体应力增量随应变逐渐减小的硬化现象、能更好反映土体卸荷时的应力-应变关系、能考虑土体的剪胀性及中性加载、采用MC破坏准则、模型主要参数可通过常规三轴试验及固结实验获取,可用于桩锚与桩撑组合支护深基坑工程的数值分析。

(2) 三维有限元分析得到的基坑周边地表竖向位移与距基坑侧壁的水平距离间呈“抛物线”分布规律。采用经典 $m$ 法进行基坑支护设计时,选取“抛物线法”确定基坑周边地表沉降较合适。

(3) 三维有限元分析结果与 $m$ 法计算结果、工程实测结果对比表明,针对桩锚与桩撑组合支护深基坑工程,基于硬化土模型,采用三维有限元分析计算的结果更接近工程实测结果。

(4) 基坑支护形式日益趋于多样化和组合化,对基坑支护设计的安全度和变形控制提出了更高要求。工程实例表明,基于硬化土本构模型,采用三维有限元分析设计桩锚与桩撑组合支护深基坑的开挖支护方案可用于工程实践。

### 参考文献:

[1] 刘焕存,黎良杰,王程亮,等. 紧邻地铁站基坑支护设计

与变形控制[J]. 岩土工程学报, 2012, 33(增刊): 654 - 658.

(LIU Huan-cun, LI Liang-jie, WANG Cheng-liang, et al. Design and deformation control of excavation support project close subway station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 33(S0): 654 - 658. (in Chinese))

[2] 刘英,于立宏. Mohr-Coulomb屈服准则在岩土工程中的应用[J]. 世界地质, 2010, 29(4): 633 - 639. (LIU Ying, YU Li-hong. Application of Mohr-Coulomb yield criterion in geo-technical engineering[J]. Global Geology, 2010, 29(4): 633 - 639. (in Chinese))

[3] 贾善坡,陈卫忠,杨建平,等. 基于修正Mohr-Coulomb准则的弹塑性本构模型及其数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2051 - 2058. (JIA Shan-po, CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, et al. An elastoplastic constitutive model based on modified Mohr-Coulomb criterion and its numerical implementation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2051 - 2058. (in Chinese))

[4] 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, 2010, 31(1): 258 - 264, 326. (XU Zhong-hua, WANG Wei-dong. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 258 - 264, 326. (in Chinese))

[5] 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, 25(4): 488 - 491. (LU Xin-zheng, SONG Er-xiang, JI Lin, et al. 3-Dimension FEA for the interaction between excavation support structure and soil in a very deep pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 488 - 491. (in Chinese))

[6] 宋二祥,娄鹏,陆新征,等. 某特深基坑支护的非线性三维有限元分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 538 - 543. (SONG Er-xiang, LOU Peng, LU Xin-zheng, et al. Nonlinear 3D finite element analysis of an extremely deep excavation support system[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(4): 538 - 543. (in Chinese))

[7] 王召磊,杨志银,张俊,等. 桩撑锚组合支护结构的三维数值分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 230 - 232. (WANG Zhao-lei, YANG Zhi-yin, ZHANG Jun, et al. Three-dimensional numerical analysis of combined support structure of pile-strut bracing-anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S0): 230 - 232. (in Chinese))

[8] TEO P L, WONG K S. Application of the hardening soil



- model in deep excavation analysis[J]. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 2012, **5**(3): 152 - 165.
- [9] CHANATON Surar, SUCHED Likitlersuang, DARIUSZ Wanatowski, et al. Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff Bangkok clays[J]. Soils and Foundations, 2012, **52**(4) : 682 - 697.
- [10] 王海波, 宋二祥, 徐明. 地下工程开挖土体硬化模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, **50**(3): 351 - 354. (WANG Hai-bo, SONG Er-xiang, XU Ming. Hardening-soil-model for underground construction[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, **50**(3): 351 - 354. (in Chinese))
- [11] 李亚玲, 张彬, 苏海峰, 等. Hardening - soil 模型中参数选取试验研究[J]. 工程地质学报, 2012, **20**(增刊 1): 164 - 169. (LI Ya-ling, ZHANG Bin, SU Hai-feng, et al. Parameter selection based on test with hardening-soil model[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, **20**(S1): 164 - 169. (in Chinese))
- [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 - 2289. (WANG Wei-dong, WANG Hao-ran, XU Zhong-hua. Experimental study of parameters of hardening soil model for numerical analysis of excavations of foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(8): 2283 - 2289. (in Chinese))
- [13] 贺晨, 陈建宏, 张志飞, 等. 基于 Hardening - Soil 模型基坑支护变形特性研究[J]. 矿业研究与开发, 2010, **30**(2): 44 - 46. (HE Chen, CHEN Jian-hong, ZHANG Zhi-fei, et al. Study on the deformation characteristics of foundation pit support based on hardening-soil model[J]. Mining Research and Development, 2010, **30**(2): 44 - 46. (in Chinese))
- [14] 杜佐龙, 王士峰, 刘祥勇, 等. 应用 H-S 模型进行巨型深基坑的开挖优化分析[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(增刊): 248 - 253. (DU Zuo-long, WANG Shi-feng, LIU Xiang-yong, et al. Optimization of earthwork for a super-large deep excavation based on hardening-soil constitutive model[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S0): 248 - 253. (in Chinese))
- [15] 龚东庆, 郑渊仁. 硬化土体模型分析基坑挡土壁与地盘变形的评估[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(S2): 175 - 178. (KUNG GORDON Tung-chin, JHENG Uen-zen. Evaluation of analyzing excavation- induced wall deflection and ground movement using hardening soil models[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S2): 175 - 178. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)