

# 西龙池抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定三维非线性分析

肖明 龚玉锋 俞裕泰

(武汉水利电力大学水力发电工程系 武汉 430072)

**摘要** 采用三维非线性有限元对层状各向异性岩体中洞群围岩稳定性进行了分析论证。通过多种方案计算和比较,论证了大型洞室参数、支护型式优化、支护参数优化以及开挖方式的合理性,为工程设计提供了可靠的依据。

**关键词** 层状各向异性, 围岩稳定, 支护优化

**分类号** TU 45

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2000)05-0557-05

## 1 前言

西龙池抽水蓄能电站位于山西省忻州地区五台县滹沱河与清水河交汇处。装设4台单机容量为300 MW的单机可逆式机组,总装机1200 MW。地下厂房系统有主、付厂房,主变洞,母线洞,出线竖井等。厂房处于泥质条带状灰岩,钙质石英粉砂岩,薄层灰岩,鲕状灰岩和柱状灰岩夹层,厂房端墙有断层F<sub>114</sub>, F<sub>118</sub>和破碎带P<sub>4</sub>, P<sub>5</sub>等,地质条件较为复杂。厂房顶拱上鲕状灰岩,岩体力学参数较低,各向异性岩层基本上为水平向,层状岩体中夹杂着许多极薄层岩体,各向异性较为显著,因此对厂房洞室顶拱的围岩稳定影响较大。为了合理布置地下厂房洞室群,选择优化的支护方式和支护参数,确定可行的洞室施工开挖方案及洞型结构,对整个地下厂房洞室群进行三维稳定分析是非常必要的。

本文通过三维非线性有限元分析,论证洞室群的围岩稳定性,以及影响洞室群围岩稳定各种因素,最后对洞室参数、支护型式、支护参数和开挖方式进行了优化,提出了可行的工程设计和施工方案。

## 2 三维层状岩体力学模式

层状各向异性岩体,在平行于层面的 $xy$ 平面内是各向同性的,垂直于层面的 $z$ 方向则是与层面不同的一个弹性主向。根据弹性理论<sup>[1]</sup>,垂直于层面和

平行于层面的应力 $\sigma$ 与应变 $\epsilon$ 关系为

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_1} - \mu_1 \frac{\sigma_y}{E_1} - \mu_2 \frac{\sigma_z}{E_1} \\ \epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_1} - \mu_1 \frac{\sigma_x}{E_1} - \mu_2 \frac{\sigma_z}{E_2} \\ \epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_2} - \mu_2 \frac{\sigma_x}{E_2} - \mu_2 \frac{\sigma_y}{E_2} \\ \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_1} \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G_2} \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G_2} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $E_1$ ,  $\mu_1$ ,  $G_1$ ,  $E_2$ ,  $\mu_2$ ,  $G_2$ 分别为平行于层面和垂直于层面的弹性模量、泊松比和剪切模量,用矩阵可写成沿层状法向坐标下的应力与应变关系:

$$\{\sigma\} = [D_e]\{\epsilon\} \quad (2)$$

式中:  $[D_e]$ 为沿层状法向坐标下的层状各向异性的弹性矩阵。

在有限元计算中,整体坐标与层状的法向坐标往往是不一致的,为了计算方便,必须把层状法向坐标下的弹性矩阵 $[D_e]$ 和刚度矩阵 $[K]$ 转换到整体坐标下。假设层状法向局部坐标与三维有限元整体坐标的坐标转换矩阵为 $[R]$ ,应力转换矩阵为 $[S]$ ;因此整体坐标下的应力 $\{\sigma\}$ ,应变 $\{\epsilon\}$ 和位移 $\{\delta\}$ ,荷载 $\{F\}$ 与局部坐标下的应力 $\{\sigma\}$ ,应变 $\{\epsilon\}$ 和位移 $\{\delta\}$ ,荷载 $\{F\}$ 可以分别表示为

$$\begin{cases} \{\sigma\} = [S]\{\sigma\} & \{\epsilon\} = [S]\{\epsilon\} \\ \{\delta\} = [R]\{\delta\} & \{F\} = [R]\{F\} \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),经过整理可以得到整体坐标下的荷载和应力为

1999年5月13日收到初稿,1999年9月10日收到修改稿。

作者肖明简介:男,硕士,1957年生,1986年毕业于武汉水利电力大学水建系水力发电专业,现任教授,主要从事地下工程和水力发电方面的研究工作。

$$\begin{cases} [F] = [R]^T [R] \{\delta\} \\ [Q] = [S]^T [D_e] [S] \{\epsilon\} \end{cases} \quad (4)$$

对比整体坐标和局部坐标下的平衡方程和应力方程, 可得整体坐标下的刚度和弹性矩阵:

$$\begin{cases} [K] = [R]^T [K_p] [R] \\ [D_e] = [S]^T [D_e] [S] \end{cases} \quad (5)$$

### 3 三维层状岩体开挖弹塑性分析方法

本文采用增量变塑性刚度法进行迭代计算<sup>[2]</sup>。该方法是将洞室开挖荷载分解为弹性荷载和塑性荷载两部分。对弹性荷载采用一次施加于结构上计算, 对塑性荷载则分级进行加载计算。对每一级塑性荷载 $\{\Delta R_p\}_i$ 可按式(6)进行迭代计算:

$$[K_e] \{\delta\}_i = \{\Delta R_p\}_i + [K_p] \{\delta\}_{i-1} \quad (6)$$

式中:  $[K_e]$  和  $[K_p]$  为结构的弹性刚度和塑性刚度;  $\{\Delta R_p\}_i$  和  $\{\delta\}_i$  为第  $i$  级塑性荷载和位移增量。由于层状各向异性岩体沿层面和垂直于层面的物理力学特性不同, 沿两个方向的破坏特性也就不同。在弹塑性分析时应分别对平行于层面和垂直于层面两个方向进行判断。迭代计算时, 对垂直于层面的屈服函数采用 Zienkiewicz-Pande 的双曲线屈服准则<sup>[3]</sup>:

$$F = \sqrt{-\alpha(\sigma_m + \frac{\beta}{2\alpha})} + \sqrt{\alpha_0 + \gamma - \beta^2/4\alpha} = 0 \quad (7)$$

式中:  $\sigma_m = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ ;  $\alpha_0 = \sqrt{J_2/g(\theta)}$ ;  $\alpha = -\sin^2\varphi$ ;  $\beta = 2c\sin\varphi\cos\varphi$ ;  $\gamma = a^2\sin^2\varphi - c^2\cos^2\varphi$ ;  $c$ ,  $\varphi$  为垂直于层面的粘结力和摩擦角;  $a$  为双曲线形状系数。

当按式(7)判断单元进入塑性状态后, 应先将单元应力状态沿屈服面方向拉回到屈服面, 再根据屈服面上的应力状态修正塑性刚度  $[K_p]$  代入式(6)进行迭代计算。

对平行于层面的破坏情况应分别校核垂直于层面的拉裂和沿层面滑动两种情况。首先根据式(3)计算沿层面法向局部坐标下的应力分量:

$$\{\sigma\} = [S]^T \{\sigma\} \quad (8)$$

然后根据局部坐标下的应力分量校核垂直于层面的正应力状态, 当:

$$\{\sigma_z\} > R_1 \quad (9)$$

说明垂直层面的正应力超过岩体的极限抗拉强度  $R_1$ , 平行于层面方向将开裂, 此时必须将超出层面抗拉强度的应力  $\Delta\sigma_z = \sigma_z - R_1$  转化成节点荷载, 并将其转移。当平行于层面的阻滑力小于滑动力, 即:

$$(f\sigma_z + c)/\sqrt{\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2} < k \quad (10)$$

式中:  $f$ ,  $c$  为沿层面的摩擦系数和粘结力,  $k$  为沿层

面滑动的安全系数。此时平行于层面方向将产生剪切滑动, 同时也应将超出抗剪强度的剪力:

$$\Delta\tau = \sqrt{\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2} - (f\sigma_z + c) \quad (11)$$

转化成节点荷载, 并将其转移。

对垂直于层面和平行于层面两个方向的破坏状态判别和迭代完毕后, 由于有限元数值计算的误差, 单元的应力状态并不一定位于屈服面上。为了保证迭代计算的收敛性, 使屈服单元应力状态沿屈服面滑动, 为此对每一级增量荷载迭代计算完毕后, 可以将单元应力状态沿垂直于层面方向将应力状态拉回到屈服面上来。所修正的应力值按下式计算<sup>[4]</sup>:

$$\{\Delta\sigma^*\} = -F(\{\sigma\}) \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} / \left( \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} \right) \quad (12)$$

式中:  $F(\{\sigma\})$  为修正前应力状态对应的屈服函数。将应力状态修正完后再进入下一步增量荷载迭代计算。

### 4 洞室围岩稳定论证项目及选择

由于西龙池抽水蓄能电站地下厂房所处的地质条件较为复杂, 为了选择合理洞室结构型式、支护型式和施工开挖方式, 对洞室群围岩稳定分析进行以下项目论证:

(1) 洞室间距选择 为了选择合理的洞室布置, 对主厂房和主变洞之间为 40m, 45m 和 50m 三个方案进行分析。经过几个方案的比较, 考虑洞室岩柱不被塑性区、拉裂区贯穿并保留有一定的完好岩柱情况下, 选择洞室间距为 50m。

(2) 顶拱矢高比选择 西龙池层状各向异性岩体具有许多薄层结构, 顶拱矢高比对洞室顶拱开挖成型影响很大。在洞室稳定分析时, 计算了矢高比为 0.3, 0.25, 0.2 等几个方案, 最后确定矢高比为 0.3。

(3) 顶拱支护型式选择 设计考虑采用各种支护型式: 钢筋混凝土支护+锚杆+锚索; 锚杆+锚索+钢纤维喷层; 锚杆+锚索+钢纤维喷层+混凝土拱肋; 锚杆+锚索+钢纤维喷层+混凝土拱肋。通过比较选择了支护方案 5, 采用该支护方案, 使得顶拱塑性区、拉损区范围较小, 顶拱下沉位移较小, 顶拱围岩稳定性、安全性较好。

(4) 支护参数选择 研究了洞室顶拱和边墙上有各种长、短锚杆, 锚索和各种预应力锚杆、锚索及各种支护布置间距等 9 种支护参数。最后选定支护参数方案 9, 即: 主厂房顶拱锚杆 32@1.5×1.5m,  $L = 8m$ , 锚索 160T@4.5×4.5m,  $L = 25m$ , 另外加 3 根长 30m 的对穿锚索; 边墙锚杆 32@1.5×1.5m,  $L = 8m$ , 锚索 160T@4.5×6.0m,  $L = 20m$ 。

(5) 洞型的选择 研究了主变洞大小, 安装场



高低和副厂房高低对围岩稳定的影响。分析证明:洞室尺寸越小越有利。最后选择了小主变洞尺寸和安装场底部不开挖的方案。

(6) 支护时间的选择 考虑岩性较软弱, 具有粘弹塑性的流变特征, 开挖计算采用不同的开挖释放荷载系数以模拟支护时间早晚和支护承担的地应力荷载。分别计算了释放系数为 0.0, 0.25, 0.5, 和 0.75 四个方案。分析证明: 支护时间越早, 支护承担的荷载越大。最后综合比较选择了开挖释放荷载系数为 0.5 的方案。

(7) 断层对厂房端墙稳定的影响 在厂房端墙有断层  $F_{112}$ ,  $F_{118}$  和破碎带  $P_4$ ,  $P_5$  对厂房端墙的影响尤为显著。分析证明须改变副厂房高度及加强支护等措施予以解决断层对端墙的影响。

(8) 开挖方式对围岩稳定的影响 根据洞室布置和施工条件, 拟定了四种不同开挖方式。综合分析比较各种开挖方式的塑性、开裂区分布和洞室应力及洞周变形, 最后选定先开挖顶拱中导洞后开挖拱座的方案。

### 5 三维整体稳定分析

根据上述八个方面的研究, 选定主厂房和主变洞之间为 50m, 顶拱矢高比为 0.3, 洞室开挖释放荷载系数为 0.5, 支护型方案 5 锚杆+ 锚索+ 吊索+ 钢纤维喷层+ 混凝土拱肋和支护形式的支护参数 9 (见上节 (4) 支护参数选择), 安装场底部不开挖的洞型结构, 先开挖顶拱中导洞, 后开挖拱座的分期施工方案, 分八期自上而下开挖。根据上述选定方案, 对地下厂房整个洞室群进行了三维整体稳定分析。

在三维整体稳定分析时, 沿 X 轴 (垂直厂房纵轴线) 取了 400m, 沿 Y 轴 (厂房纵轴线) 取 251m, 沿 Z 轴 (与大地坐标重合) 取 350m。一共剖分了 12 992 空间等参单元和 14 376 个空间节点。地下厂房洞室群的开挖单元见图 1, 主要岩体的物理力学参数见表 1。采用层状各向异性三维非线性方法对整个洞室群进行了分析, 有以下几个特点:

#### 5.1 洞周位移场分布特征

主厂房顶拱下沉的最大位移 1.79 cm, 发生在第三期顶拱开挖完毕时位于主厂房洞室的中部。从第四期开挖随着洞室边墙的增高, 顶拱位移有所回弹。由于层状岩体垂直层面的弹性模量较小, 所以顶拱位移回弹量很小, 到第八期开挖完毕, 厂房顶拱只回弹 0.3 cm。主厂房洞室边墙的位移从第四期开挖开始, 位移不断增大到第八期上游边墙最大位移为 4.76 cm, 位于主厂房与引水洞交口处; 下游边墙最大位移为 5.83 cm, 位于母线洞与主厂房交口处, 典型断面洞周位移分布见图 2。由此说明地下洞室交叉

口处围岩的变形较大, 需要重点支护。

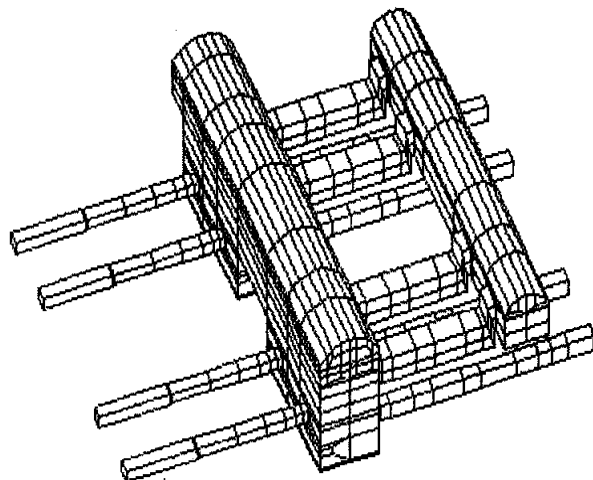


图 1 三维有限元计算开挖单元网格

Fig 1 Three-dimensional finite element mesh of underground houses

表 1 厂区内主要岩体物理力学参数

Table 1 Mechanical and physical parameters of rock masses

岩性	平行 变模 $E$ /GPa	垂直 变模 $E$ /GPa	泊松 比 $\mu$	粘 结 力 $c$ /MPa	摩 擦 角 $\varphi$ /°	抗拉 强度 $R_t$ /MPa	抗压 强度 $R_c$ /MPa	容 重 $\gamma$ /kN·m <sup>-3</sup>
厚、中厚 鲕状灰岩	11.2	8.2	0.27	0.8	35	0.35	30	27
厚层泥质 灰岩	12.0	9.0	0.23	1.7	39	0.50	60	27
薄层灰岩	8.0	5.0	0.29	1.0	35	0.40	38	26
断 层 $F_{112}, F_{118}$	0.01	0.01	0.42	0.2	26	0.001	1.0	26

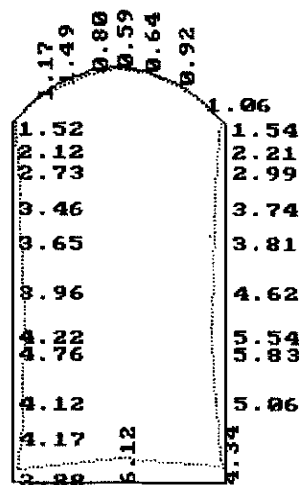


图 2 主厂房典型断面位移分布 (单位: cm)

Fig 2 Displacement distribution of main house section

厂房端墙位移受断层和破碎带影响较大。左端墙  $F_{112}$  断层离端墙较远, 约有 30m, 端墙最大位移为 2.12 cm; 右端墙除了有断层  $F_{118}$  的影响外, 紧靠端墙还有破碎带  $P_4$  的影响, 所以端墙最大位移达

13.2 cm。由此说明端墙变形主要受破碎带的影响。

### 5.2 洞周塑性开裂区的分布特征

第一期开挖主厂房顶拱中导洞时，顶拱没有出现塑性和开裂区，第二期和第三期开挖是将厂房顶拱向拱座扩大，此时顶拱的塑性和开裂区也逐步扩大。当顶拱开挖完毕时，厂房顶拱的拉损区达 2~4 m，在上游拱座处局部区域塑性区深达 6 m。随后的四到八期开挖，洞室边墙的塑性开裂区逐步加大。直至开挖完毕，主厂房上游边墙开裂区约为 2 m，塑性区局部只有 5 m，下游边墙开裂区为 2~9 m，只分布在与母线洞的交口处见图 3，说明母线洞等交叉口对于围岩的塑性开裂区分布影响较大。在四到八期开挖过程中，主厂房上、下游边墙上部的塑性区随下部开挖有所回弹，而厂房顶拱的塑性开裂区回弹较少，说明水平向的层状岩体对于厂房顶拱的稳定影响较大。

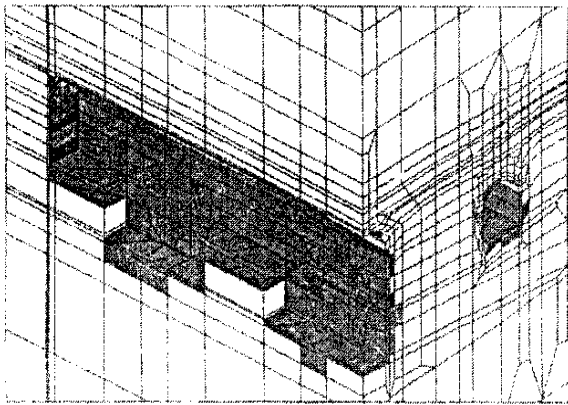


图 3 三维整体计算沿厂房纵轴线塑性和开裂区分布图  
Fig 3 Distribution of plastic and crack regions for main houses

在厂房两端分别受断层 F<sub>112</sub>和 F<sub>118</sub>的影响，所以两端边墙随各期开挖的进行，几乎被拉损区和塑性区所覆盖。说明端墙的断面对于围岩稳定影响很大。

### 5.3 洞室应力和锚杆、锚索应力分布特征

随着各期开挖，洞周的径向应力释放而切向应力增加。由于岩体为水平向层面，而垂直向弹性模量值较小，所以洞室顶拱的径向应力释放较大，切向应力增加明显；而边墙的径向应力释放较小，切向应力增加也不大。从图 4 洞周应力等值线分布规律可看出，洞室开挖完毕，上下游边墙的应力分布较均匀，而洞室顶拱和底部拐角处的应力集中较明显。

洞周的锚杆和锚索、吊索、混凝土拱肋的应力都随着各期的开挖而逐步加大，直至开挖到第八期应力达到最大值。主厂房顶拱锚索，锚杆和混凝土拱肋的最大应力分别为 887.1, 902, -16.5 MPa；主厂房边墙锚索和锚杆的最大应力分别为 999.8,

235.4 MPa，应力均在强度允许范围内，且有一定的富余。说明优化选择的支护方式和支护参数是较合理的。

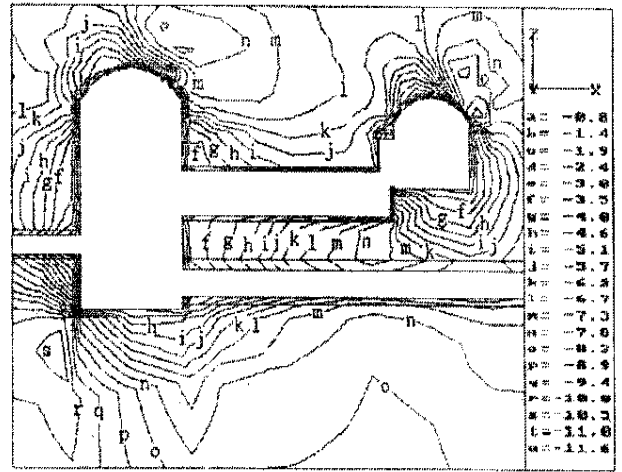


图 4 西龙池抽水蓄能地下厂房三维计算中部断面第三主应力等值线图  
Fig 4 Iso line of the minor principal stress for middle section of main houses

## 6 结束语

(1) 西龙池抽水蓄能电站地下厂房处于复杂的层状各向异性岩体之中，对类似地下厂房洞室进行三维非线性有限元分析是十分必要的。

(2) 采用层状各向异性三维非线性有限元计算模式分析西龙池抽水蓄能电站地下厂房洞室围岩稳定，较好地反映层状各向异性对围岩稳定的影响。对于不同地质条件，选择正确合理的力学模式进行分析十分重要。

(3) 研究处于复杂地质条件下的地下洞室开挖和支护，对洞室结构，支护型式，支护参数，洞室布局，开挖方式等进行优化分析，对保证工程稳定，加快施工速度，节省工程投资具有重大的意义。

### 参 考 文 献

- 1 河海大学 弹性力学问题的有限单元法[M] 北京: 水利出版社, 1982, 80
- 2 俞裕泰, 肖明 大型地下洞室围岩稳定三维弹塑性有限元分析[J] 岩石力学与工程学报, 1987, 6(1): 47~ 56
- 3 Zienkiewicz O C, Pande GW. Some useful forms of isotropic yield surfaces for soil and rock mechanics[A]. In: Pande G W ed Finite Element in Geomechanics[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1977, 179~ 190
- 4 Sirivardane, Desai C S. Computational procedures for non-linear three-dimensional analysis with some advanced constitutive laws [J]. Int J. Num. Analysis Method in Geomech., 1983, 7: 143 ~ 171

## THREE DIMENSIONAL STABILITY ANALYSIS ON SURROUNDING ROCK OF UNDERGROUND HOUSES OF XILONGCHI PUMPED STORAGE HYDRO-POWER STATION

Xiao Ming, Gong Yufeng, Yu Yutai

(Wuhan University of Hydraulic Electric Engineering, Wuhan 430072 China)

**Abstract** The stability of underground houses in stratified anisotropic rocks is analyzed using three dimensional nonlinear finite element model. Through comparison of the results of assorted computation schemes, rational arrangement of large-scale houses and optimum selection of anchoring support as well as feasible excavation sequences are illustrated. The results provide a reliable basis for project design.

**Key words** stratified anisotropy, surrounding rocks stability, anchoring support optimization

## 珊瑚礁钙质土中桩基工程承载性状研究

单华刚

(中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

**博士学位论文摘要** 在钙质土这种特殊岩土介质中的桩基工程具有特殊的承载性状。本文全面综合了钙质土中桩基工程现有的研究成果,通过室内模型桩试验、理论分析、数值计算等方法对钙质土中的桩基承载性状进行了系统的研究。

(1) 简要分析了钙质砂砾特殊物理力学性质,提出了一种考虑内摩擦角随围压增大而减小的钙质砂非线性剪胀 K-G 模型;

(2) 详细分析了钙质砂中桩侧摩阻力性状及其影响因素,通过桩土界面摩擦特性研究,从桩土共同作用角度出发,指出了桩侧土的压缩性是影响挤入桩侧阻力的重要因素,因颗粒破碎而产生较大压缩性是钙质土低桩侧阻力的重要成因,并在此基础上,探讨了考虑桩侧土压缩性的挤入桩侧阻力理论计算方法;

(3) 详细分析了钙质砂中桩端阻力性状及其影响因素,指出桩端土的颗粒破碎而产生较大变形是造成低桩端阻力的主要原因。同时结合球形孔穴扩张桩端破坏模式,提出了一个考虑变形参数的桩端阻力计算理论模型,并在此基础上建立了一个简单计算模型;

(4) 针对珊瑚礁软硬互层地基问题,提出了拟三层弹性连续体系中桩端持力层应力分析模型,建立了该类地层桩端阻力理论计算模型的解析解,并由此解决了桩端礁灰岩层的冲剪阻力计算问题和临界厚度的确定方法;

(5) 在考虑钙质砂桩基承载性状特征前提下,运用荷载传递函数法,成功地导出了变剪切刚度系数的单桩荷载——沉降非线性计算模型的解析解,并进行了试验验证;

(6) 分析了珊瑚礁区典型特征波浪对大、小直径桩的波浪力,通过模型试验,分析了钙质砂中桩基水平承载性能,并进行了与一般石英砂的对比分析。

**关键词** 珊瑚礁,钙质土,桩基工程,承载力,沉降,试验研究,理论分析

## RESEARCH ON BEARING BEHAVIOUR OF PILE IN CALCAREOUS SOIL OF CORAL REEF

Shan Huagang

(Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China)

2000年7月6日收到来稿。

作者 单华刚 简介:男,1973年生,2000年7月在中国科学院武汉岩土力学研究所获工学博士学位,导师是汪稔研究员;现在中国科学院武汉岩土力学研究所复杂岩土介质力学性质与应用开放实验室工作,主要从事特殊土与非饱和土力学特性的研究工作。