

中国科学院水利水电科学研究院
水利电力部

科学论文集

第 30 集

（结构材料、岩土工程、抗震与爆破）

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是水利水电科学研究院有关结构材料、岩土工程、抗震与爆破方面近期的部分科研成果,共有22篇科研论文和61篇科研论文摘要。主要包括:地下厂房围岩地应力和变形特性,重力坝混凝土温度应力,防渗墙混凝土徐变特性与应力特性,机墩与蜗壳的扭转应力,节理岩体分析模型,水库滑坡的滑速估算,非稳定渗流坝坡稳定计算,土工织物滤层,过水土坝护面材料,岩基劈裂灌浆,联合灌浆工艺,堆石坝料的动力强度与变形特性,堆石料开采控制爆破技术,围堰防渗墙爆破动水压力,水工建筑物强震反应台阵设计,钻孔弹模仪等。

本书可供从事水利水电工程的科研、设计、施工、运行管理方面的技术人员和大专院校有关专业师生参考。

中国科学院
水利电力部 水利水电科学研究院

科学研究论文集

第 30 集

(结构材料 岩土工程、抗震与爆破)

*

水利电力出版社出版 发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 17.25印张 390千字

1988年10月第一版 1988年10月北京第一次印刷

印数0001—1970册 定价5.80元

ISBN 7-120-00365-8/TV 111

目 录

编者说明

地下厂房三维边界元分析.....	陈 平	张有天	王 镭 (1)
岩滩水电站重力坝的混凝土温度应力分析.....	丁宝瑛	黄淑萍	马训义 (13)
龙羊峡厂房矮机墩与蜗壳扭转应力的光弹性法研究.....	张晓宇	何建德	王我宁 (21)
防渗墙混凝土徐变特性的试验研究.....	惠荣炎	易冰若	黄国兴 (31)
鲁布革水电站地下厂房围岩的变形特性试验研究.....	叶金汉	吴永平 (42)	
节理岩体的有限元分析模型.....	吕 明 (55)		
龙羊峡水库滑坡的滑速估计 (流体力学法)	郭崇元 (67)		
ZT-76型钻孔弹模仪及其在岩体工程中的应用	朱登林	柯金炼	王仁武 (77)
三峡二期混凝土防渗墙围堰的应力和变形计算.....	张文正	杨端仪	徐泽平 (93)
固化灰浆和混凝土防渗墙围堰应力和变形分析	徐曾衍 (109)		
在非稳定渗流动水压力作用下坝坡稳定的计算方法	黄 俊	孙玉生	汪炜平 (123)
土工织物滤层的水力特性及设计	周 汾 (133)		
灰土作为过水土坝护面材料的试验研究	范 璞	叶永毅 (148)	
岩基劈裂灌浆的主要特点	张作瑁 (160)		
联合灌浆工艺在复杂岩基处理中的应用	陈荷生 (167)		
鲁布革人工砂的动强度特性及其应力和永久应变关系	常亚屏 (174)		
鲁布革堆石坝坝料的动力变形特性试验研究	俞培基	梁永霞	秦蔚琴 (182)
模拟级配人工堆石料的动力变形试验	梁永霞	俞培基 (193)	
葛洲坝大江围堰防渗墙爆破动水压力观测研究	陆退龄	孙翠兰 (202)	
鲁布革坝堆石料开采控制爆破技术的试验研究.....	黄绍钧	费骥鸣	傅海峰 邢国良 (212)
用控制爆破法拆除烟囱	黄绍钧 (227)		
水工建筑物强震反应台阵设计中的几个问题	苏克忠	杨道友 (234)	
已发表的部分科研论文摘要	(241)		

地下厂房三维边界元分析

陈 平 张 有 天 王 镭

【提要】 本文用三维边界元方法分析了一地下厂房开挖后围岩原始地应力场的应力重分布。采用八结点曲面单元,角点及棱点采用简化重点法处理,显著地节省了内存需要量和计算机时。原始地应力场是根据实测数据用应力函数法进行回归分析求得,它是边界元程序中的一个子程序,因而荷载分析和应力计算工作是由程序一次完成的。

一、前 言

近十几年来,边界元方法在地下结构的应力分析方面的应用越来越多,这是因为边界元方法的基本解适用于无限域或半无限域,不必考虑一个人为的计算外边界。当地下洞室埋深较大时,可近似地认为围岩为无限介质;若埋深较浅,则可视围岩为半无限介质,即地下洞室只有确定的内边界,其外边界是延伸到无限的。

地下洞室在开挖以前存在一个初始应力场,它对于洞室的布置及围岩的稳定有很大的影响。根据实测的若干应力点来回归地下洞室周围的应力场在工程上具有重要意义。本文采用应力函数法来分析地应力场。该法简便易行,精度可满足工程需要,原始地应力场分析可作为边界元程序的一个子程序,应用十分方便。

地下洞室在开挖过程中,相当于原始应力的解除,从而形成了洞室附近的应力重分布。对于跨度大,边墙高,岩体结构复杂的地下洞室来说,确切地掌握开挖后的洞室应力重分布,及时地进行支护以保证围岩的稳定,是地下洞室设计最重要的问题。对地下洞室分析,边界元方法可以充分发挥它的优势。地下厂房的边界元方法分析实践亦证明,所需数据准备工作量小,计算时间短,计算结果满足工程精度要求。

二、应力函数法分析地应力场的基本原理^[1]

应力空间可用Maxwell应力函数 φ_i ($i=1, 2, 3$)来描述,空间任一点处的应力分量与应力函数有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= -\frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial x_k^2} + \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x_j^2} \\ \tau_{ij} &= -\frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial x_i \partial x_j} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} i &= 1, 2, 3 \\ j &= 2, 3, 1 \\ k &= 3, 1, 2 \end{aligned} \quad (1)$$

设应力各分量均为坐标的函数,用二次函数式可以较好地表示原始地应力场的分布。

由式(1)可知,应力函数应为坐标的四次函数。完整的四次函数式共有35项,考虑到常数项及一次项对应力无影响,每个应力函数有31个待定常数,三个应力函数则有93个待定常数。但应力函数还应满足位移协调方程式,即93个待定常数不都是独立的,经简化,应力函数的多项式应为:

$$\begin{aligned}\varphi_i = & a_{i0}(x_i^4 - x_i^2 x_j^2 + x_i^2 x_k^2 - x_j^2 x_k^2) + a_{i1}(x_i^3 x_k - x_j x_k^3) \\ & + a_{i2}(x_i x_k^3 - 3x_i x_j^2 x_k) + a_{i3}(x_i x_j^3 - 3x_i x_j x_k^2) + a_{i4} x_i^3 + a_{i5} x_k^3 \\ & + a_{i6} x_i x_j^2 + a_{i7} x_j^2 x_k + a_{i8} x_i^2 x_k + a_{i9} x_j x_k^2 + a_{i10} x_i x_j x_k + a_{i11} x_k^2 \\ & + a_{i12} x_j^2 + a_{i13} x_j x_k \\ & (i=1, 2, 3, j=2, 3, 1, k=3, 1, 2)\end{aligned}\quad (2)$$

三个应力函数共有40个常数待求。将式(2)代入式(1),即可得出用坐标表示的各应力分量表达式。

一个三维地应力观测点可测得六个应力分量,若有 P 个三维观测点,可建立 $6P$ 个方程式。

地应力场还应满足边界条件。当松软覆盖层较薄,近似可以认为地表为岩面,在地表面任一点,其法向应力及沿地表切平面上任意两个互相正交方向的剪应力应为零。在计算域内选择 q 个地面点,可以建立 $3q$ 个方程式。设选定的地面点法线方向余弦为 l_1, m_1, n_1 ,与其共同构成笛卡儿坐标系的另二坐标轴的方向余弦各为 $l_2, m_2, n_2; l_3, m_3, n_3$ 。则可得如下 $3q$ 个方程式:

$$\sigma_x = \sigma_x l_1^2 + \sigma_y m_1^2 + \sigma_z n_1^2 + 2\tau_{xy} l_1 m_1 + 2\tau_{yz} m_1 n_1 + 2\tau_{zx} n_1 l_1 = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned}\tau_x = & \sigma_x l_1 l_2 + \sigma_y m_1 m_2 + \sigma_z n_1 n_2 + \tau_{xy}(l_1 m_2 + l_2 m_1) + \tau_{yz}(m_1 n_2 + m_2 n_1) \\ & + \tau_{zx}(n_1 l_2 + n_2 l_1) = 0\end{aligned}\quad (4)$$

$$\begin{aligned}\tau_z = & \sigma_x l_1 l_3 + \sigma_y m_1 m_3 + \sigma_z n_1 n_3 + \tau_{xy}(l_1 m_3 + l_3 m_1) + \tau_{yz}(m_1 n_3 + m_3 n_1) \\ & + \tau_{zx}(n_1 l_3 + n_3 l_1) = 0\end{aligned}\quad (5)$$

共可得出方程数为 $m=6P+3q$ 个。未知数(待定常数)为 $n=40$ 。要求 $m \geq n$,可用如下矩阵形式表示方程组:

$$[A]\{a\} = \{b\} \quad (6)$$

式中 $[A]$ 为 m 行40列矩阵, $\{a\}$ 为40阶列阵, $\{b\}$ 为 m 阶列阵。当 $m > n$ 时,式(6)为矛盾方程组,可用最小二乘法求得待定系数。待定系数求得后,即可按式(1)求得空间任意点的各应力分量。

三、边界元方法的基本原理

1. 边界元线性方程组的建立

利用弹性力学中的Betti互换功定理,对于边界为 S 的计算域 V ,可建立边界积分方程

$$c_{ij}(P)u_j(P) + \int_S u_j(Q)T_{ij}(P, Q)dS(Q)$$

$$= \int_S t_i(Q) U_{ij}(P, Q) dS(Q) + \int_V f_j(R) U_{ij}(P, R) dV(R) \quad (7)$$

其中 $U_{ij}(P, Q)$, $T_{ij}(P, Q)$ 为基本解^[1], f_i 为体积力, u_i 和 t_i 分别为边界上的位移和作用力。当 P 点在边界上, 且边界在 P 点

光滑时, $c_{ij} = \frac{1}{2} \delta_{ij}$, 当 P 点在 V 域内,

$c_{ij} = \delta_{ij}$; 当 P 点在域外时, $c_{ij} = 0$ 。

对于三维计算域 V 来说, 它的边界表面是曲面。把边界曲面离散成 n 个单元。为提高精度, 采用四边形八结点二次单元, 把单元结点总体坐标 x_i 转换到单元局部坐标 ξ, η 上 (图 1), 并且单元上的物理量和几何量也采用同一插值函数, 即

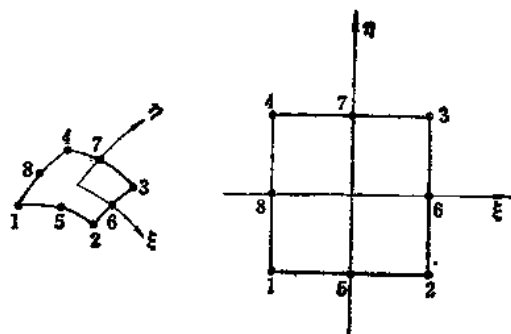


图 1 三维问题的四边形八结点二次单元

$$\left. \begin{aligned} x_i(\xi, \eta) &= N^{(k)}(\xi, \eta) x_i^{(k)} \\ u_i(\xi, \eta) &= N^{(k)}(\xi, \eta) u_i^{(k)} \\ t_i(\xi, \eta) &= N^{(k)}(\xi, \eta) t_i^{(k)} \end{aligned} \right\} (k=1, 2, \dots, 8) \quad (8)$$

形函数为

$$\left. \begin{aligned} N^{(1)}(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)(-\xi-\eta-1) \\ N^{(2)}(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)(\xi-\eta-1) \\ N^{(3)}(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)(\xi+\eta-1) \\ N^{(4)}(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)(-\xi+\eta-1) \\ N^{(5)}(\xi, \eta) &= \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1-\eta) \\ N^{(6)}(\xi, \eta) &= \frac{1}{2}(1-\eta^2)(1+\xi) \\ N^{(7)}(\xi, \eta) &= \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1+\eta) \\ N^{(8)}(\xi, \eta) &= \frac{1}{2}(1-\eta^2)(1-\xi) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

这样, 求边界上的物理量就转化为求结点上的物理量, 式 (7) 就由积分方程转化为一线性代数方程。在无体积力的情况下, 式 (7) 可写成

$$c_{ij}(P) u_j(P) + \sum_{e=1}^{n_1} \sum_{m=1}^6 u_j(e(m)) \bar{H}_{ij}(P, e(m)) = \sum_{e=1}^{n_1} \sum_{m=1}^6 t_j(e(m)) G_{ij}(P, e(m)) \quad (10)$$

其中

$$\bar{H}_{ij}(P, e(m)) = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 T_{ij}(P, Q(\xi, \eta)) N^{(m)}(\xi, \eta) J(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (11)$$

$$G_{ij}(P, e(m)) = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 U_{ij}(P, Q(\xi, \eta)) N^{(m)}(\xi, \eta) J(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} J^1 &= J_1^1 + J_2^1 + J_3^1 \\ J_i &= \frac{\partial x_i}{\partial \xi} \frac{\partial x_k}{\partial \eta} - \frac{\partial x_i}{\partial \eta} \frac{\partial x_k}{\partial \xi} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$(i=1, 2, 3, j=2, 3, 1, k=3, 1, 2)$$

这里 e 为单元号, $e(m)$ 为第 e 个单元中第 m 个结点, $N^{(m)}(\xi, \eta)$ 为相应的形函数。

依次对边界上每一个结点建立式(10), 就得到一线性方程组, 可用矩阵形式写为

$$[C]\{u\} + [\bar{H}]\{u\} = [G]\{t\} \quad (14)$$

注意到 c_{ij} 仅当 $i=j$ 时才有值, 而当 $i \neq j$ 时, $c_{ij}=0$ 。令 $[\bar{H}] = [C] + [\bar{H}]$, 得

$$[H]\{u\} = [G]\{t\} \quad (15)$$

根据给定的边界条件, 将未知量放在左端, 已知量放在右端, 得到

$$[A]\{x\} = \{b\} \quad (16)$$

解此方程组, 可以求得边界上全部结点的物理量。

2. 地下洞室开挖数值模拟

在地下洞室开挖之前, 岩体中存在着初始地应力场。隧洞开挖后初始地应力场重新分布。在用边界元方法来进行地下洞室开挖的应力分析时, 首先要给出开挖面上的边界条件。开挖生成了新的边界, 若要保持开挖前后围岩应力状态不变, 须在开挖边界上施加与原来初始地应力相平衡的外力。事实上, 开挖洞室的表面是没有外力作用的自由边界, 因而开挖的力学作用就是相当于在边界上施加与由初始地应力场所产生的外力大小相同但方向相反的作用力, 即通常称之为反转荷载的作用力。

设 P 为开挖面上的一点, 它的外法向方向余弦为 n_i , 在该点处的初始地应力场值为 σ_{ij} , 由弹性力学可知, 在 P 点的作用力可写为

$$t_i = \sigma_{ij} n_j \quad (17)$$

把 t_i 反方向, 即为反转荷载

$$t_i^* = -t_i = -\sigma_{ij} n_j \quad (18)$$

由于初始地应力场可以通过实测地应力值回归分析得出, 因而对开挖边界上任一点处的初始地应力值均可求得。根据式(18)即可求得任一点处的反转荷载, 以此作为地下洞室荷载按边界元方法分析。在反转作用力荷载作用下, 由边界元方法可求得一个应力场 σ_{ij}^* , 它与初始地应力场 σ_{ij}^0 迭加, 即得开挖后的应力场(图2)。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \sigma_{ij}^* \quad (19)$$

3. 内部点及边界结点的位移和应力的计算

当边界上的全部物理量求得以后, 利用式(10), 可求得域内任一点 P 的位移, P 点

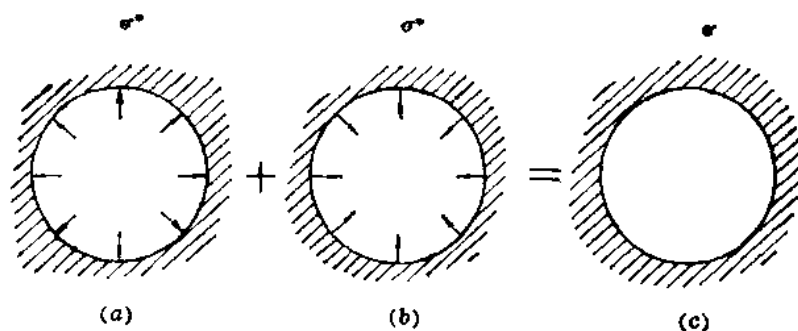


图 2 隧洞开挖数值模拟
(a)初始应力场; (b)反转荷载的应力场; (c)开挖后的应力场

的应力可根据下式计算:

$$\sigma_{ij} = \sum_{e=1}^n \sum_{m=1}^s t_m \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 D_{ijk} N^{(m)} J d\xi d\eta - \sum_{e=1}^n \sum_{m=1}^s u_m \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 S_{ijk} N^{(m)} J d\xi d\eta \quad (20)$$

式中 D_{ijk} , S_{ijk} 为两个三阶张量^[2,4]。

边界结点的位移在求解方程式 (16) 时已经得到。为了求边界结点的应力, 对每一个结点可以列出以下方程组:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij} n_j &= \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} n_i u_{,i,i} + (u_{,i,j} + u_{,j,i}) \frac{E}{2(1+\nu)} n_j = t_i \\ \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \frac{\partial x_1}{\partial \xi} + \frac{\partial u_i}{\partial x_2} \frac{\partial x_2}{\partial \xi} + \frac{\partial u_i}{\partial x_3} \frac{\partial x_3}{\partial \xi} &= \frac{\partial u_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \frac{\partial x_1}{\partial \eta} + \frac{\partial u_i}{\partial x_2} \frac{\partial x_2}{\partial \eta} + \frac{\partial u_i}{\partial x_3} \frac{\partial x_3}{\partial \eta} &= \frac{\partial u_i}{\partial \eta} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

其中, 未知数是 $u_{,i,j}$, t_i 是边界结点处的作用力, 位移导数 $\frac{\partial u_i}{\partial \xi}$, $\frac{\partial u_i}{\partial \eta}$ 可根据位移的结点值插值得到。在求得 $u_{,i,j}$ 后, 即可求得 σ_{ij} , 进而求得主应力和主应力方向。

4. 奇异积分的处理方法^[6]

对于式 (11) 和式 (12) 中的积分, 当 P 点不在单元 e 上时, 被积函数无奇异性, 可用高斯积分方法进行求积。但是当 P 点为 e 单元上一个结点时, 式 (11) 和式 (12) 中的积分函数出现了奇异性。若 $P \neq e(m)$, 则当 $Q \rightarrow P$ 时, $U_{ij} \in O\left(\frac{1}{r}\right)$, $T_{ij} \in O\left(\frac{1}{r^2}\right)$, $N^{(m)} \in O(r)$, 式 (11) 及式 (12) 积分均有值。式 (11) 可直接用高斯积分法来求值, 但式 (12) 要作奇异积分处理, 即根据 P 点在单元中的位置把四边形单元分成两个或三个三角形子单元 (图 3), 在每个子单元上的积分可用高斯积分求得, 所求积分值 $\bar{H}_{ij}$ 可以化成若干个子单元上的积分之和。若 $P = e(m)$, 则有 $N^{(m)} = 1$, 此时 G_{ij} 积分有值, 但需经过上述的奇异积分处理方可求得其值。而对 $\bar{H}_{ij}$ 的积分, 经上述处理后仍不能求得其值。此时, 可以通过下述方法 (刚体位移法) 来求得与 $\bar{H}_{ij}$ 有关的值。

假定在计算域内所求作用力 $t_i = 0$, 使全域沿坐标轴各方向分别发生一刚体位移 $u = I$, 此时式 (15) 成为:

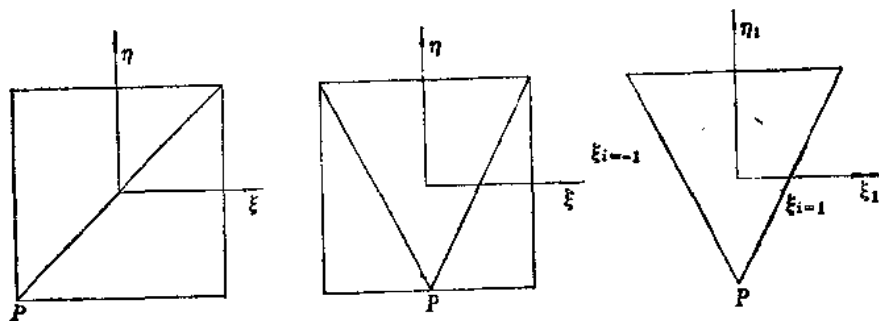


图3 三维问题中二次单元的子单元及子单元上的无量纲坐标系

$$[H]\{u\}=0 \quad (22)$$

因而, 对于内域问题, 有 (注意到 $c_{ij} + \bar{H}_{ij} = H_{ij}$)

$$H_{ij}(P, P) = - \sum_{P \in e(m)} \bar{H}_{ij}(P, e(m)) \quad (23)$$

而对无限域问题, 则应为^[4]

$$H_{ij}(P, P) = I - \sum_{P \in e(m)} \bar{H}_{ij}(P, e(m)) \quad (24)$$

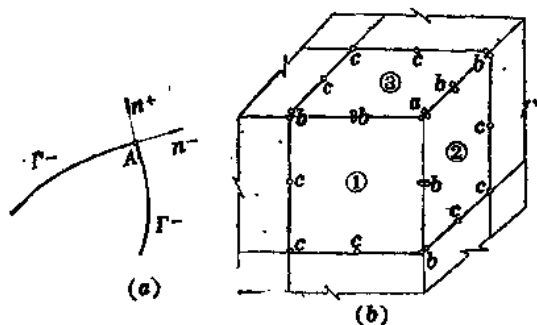


图4 角点示意图

(a) 二维问题; (b) 三维问题

a—角点; b—棱点; c—一般点; ①、②、③—单元与

5. 角点的处理——简化重点法^[3]

由于基本解 $T_{ij}(P, Q)$ 是与结点的外法向方向余弦有关, 因而当结点的外法向方向不连续时, 一个点就成了两个(棱点)或三个(角点)点, 统称为角点(图4)。

在角点处, 除去外法线方向有间断外, 一般来说, 作用在结点两侧边界上的作用力也不连续。以图4a中A点为例, 有

$$t_i^+ \neq t_i^- \quad (25)$$

但是在角点处的位移却是连续的, 并且有唯一值, 即

$$u_i^+ = u_i^- \quad (26)$$

这就是说, 对于平面问题, 角点上有二个位移分量, 四个作用力分量, 较之一般结点多两个物理量, 因而必须对角点进行适当处理, 才能进行边界元方法求解。

通常按重点来处理角点。以图4a为例, 角点A为两个单元所共有, 可以用坐标相同但外法向不同的两个点来表示, 即 A^+ 和 A^- (图5)。这样边界结点的未知数与其所建立的方程式数目相等, 问题可解。这种处理方法十分简便, 对程序不必作任何修改。采用这种方法求得的解在角点处可能不符合弹性力学精确解的要求, 即角点应力张量可能是不对称的, 但其影响是局部的, 不影响解的总体精度。

对于多种介质问题, 采用重点法时在各子域内将各角点分成两个或三个结点(图5b), 再按边界元方法求解就无困难。

这种处理方法的缺点是结点总数增多了, 方程组的阶数也因之加大了, 对于五维问题尤为严重。

对角点还有其它一些处理方法, 如Chandonneret方法^[5]、杜庆华方法[●]等。这些方法中, 有些并未能够降低方程组的阶数, 有的处理方法虽能降低方程组的阶数, 但在程序上实现起来比较麻烦, 限于篇幅, 此处不赘述。通过对结点的实际边界条件的研究, 发现对于均匀域而言, 当角点各个重点的未知量的总和如果不超过两个(二维问题)或三个(三维问题), 对这样的角点完全可以在其各重点中任选一点来建立方程, 而对其它的点则不必建立方程。考虑到角点上未知量分布不同, 以及沿单元积分要考虑到角点的不同的外法线方向, 仍需将角点用几个点来表示, 它们坐标相

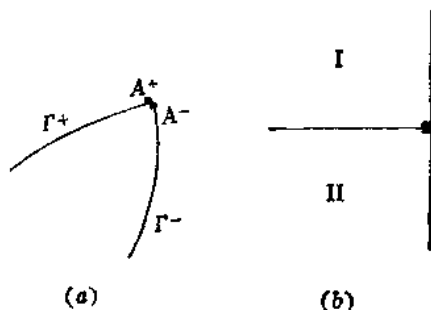


图5 角点用重点表示示意图
(a)均匀域; (b)非均匀域

同, 但仅用其中一个点来表示它在方程组中的行列位置, 这一方法称之为简化重点法, 可显著减少运算量, 并且在程序上容易实现。但要指出的是, 简化重点法并非对任何边界条件都能适用, 仅当角点总未知量个数等于问题的维数时才能采用。表1列出了平面问题在角点处可能的边界条件及其处理的方法。

表1中考虑到 $u_1^+ = u_1^-$, 故对序号1的边界条件, 角点总未知数为两个。序号1~4为常见的边界条件, 而序号5~6的边界条件较少遇到, 因而就实用观点来说, 简化重点法较其它各种角点处理方法优越。

四、地下厂房围岩应力分析

根据前述的原理, 我们编制了三维线弹性边界元程序, 并对一电站地下厂房作了初步分析。

厂房位于雄厚的山体内, 主要岩层为三迭系关岭组灰质白云岩及白云质灰岩和永宁镇组灰岩。主要断层有两条, 位于厂房底板以下, 对厂房稳定影响不大, 计算中予以忽略, 近似认为厂房处于均匀无限介质中, 围岩物理力学性质取为 $E=40000\text{MPa}$, $\nu=0.22$ 。

厂区附近共有六个实测地应力值, 经应力函数法回归分析先求得地应力场[●], 原始地应力场可近似示如图6。厂房开挖相当于在开挖面上作用与地应力场相平衡荷载的反转值。以此反转荷载进行无限域中三维边界元线弹性分析。

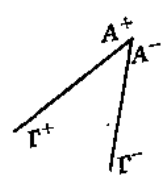
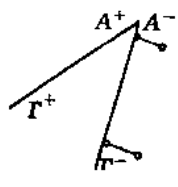
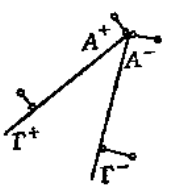
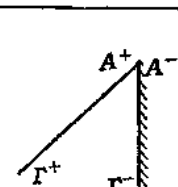
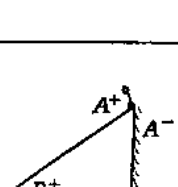
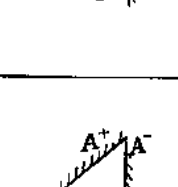
厂房计算尺寸为 $125 \times 18 \times 37.2\text{m}$, 图7画出了它的边界元网格剖分示意图, 共取结点386个, 单元92个, 采用简化重点法, 建方程点仅为278个。图8~图13中分别画出了上

● 杜庆华、姚振汉, 固体力学的边界积分方程边界元法, 固体力学学报编辑部, 1982。

● 张有天、王镭, 用应力函数法分析鲁布革地下厂房地应力场, 水利水电科学研究院, 1985年12月。

表 1

角点边界条件及其处理方法

序号	边 界 条 件	点 号	u_1	u_2	t_1	t_2	备 注
1		A ⁺	未 知	未 知	已 知	已 知	简化重点法
		A ⁻	未 知	未 知	已 知	已 知	
2		A ⁺	已 知	未 知	已 知	已 知	简化重点法
		A ⁻	已 知	未 知	未 知	已 知	
3		A ⁺	已 知	已 知	已 知	未 知	简化重点法
		A ⁻	已 知	已 知	未 知	已 知	
4		A ⁺	已 知	已 知	已 知	已 知	简化重点法
		A ⁻	已 知	已 知	未 知	未 知	
5		A ⁺	已 知	已 知	已 知	未 知	重 点 法
		A ⁻	已 知	已 知	未 知	未 知	
6		A ⁺	已 知	已 知	未 知	未 知	重 点 法
		A ⁻	已 知	已 知	未 知	未 知	

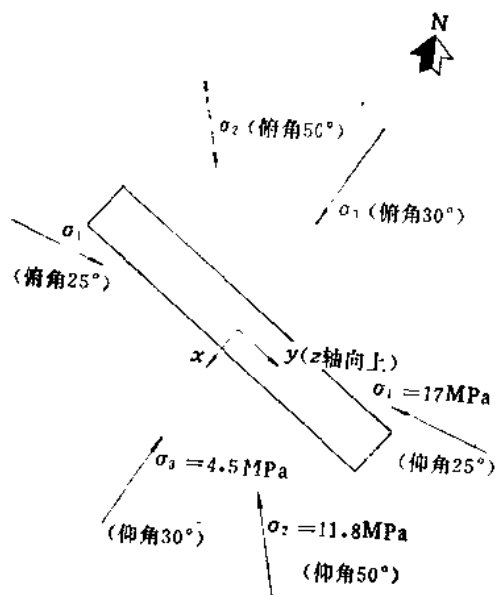


图 6 地下厂房与地应力关系图

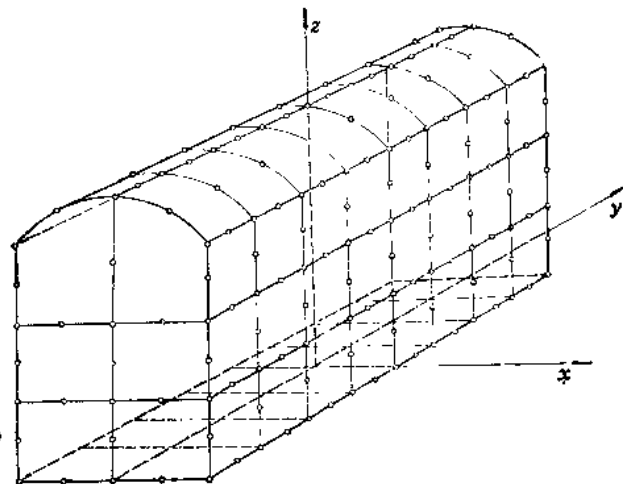


图 7 地下洞室边界元网络剖分图

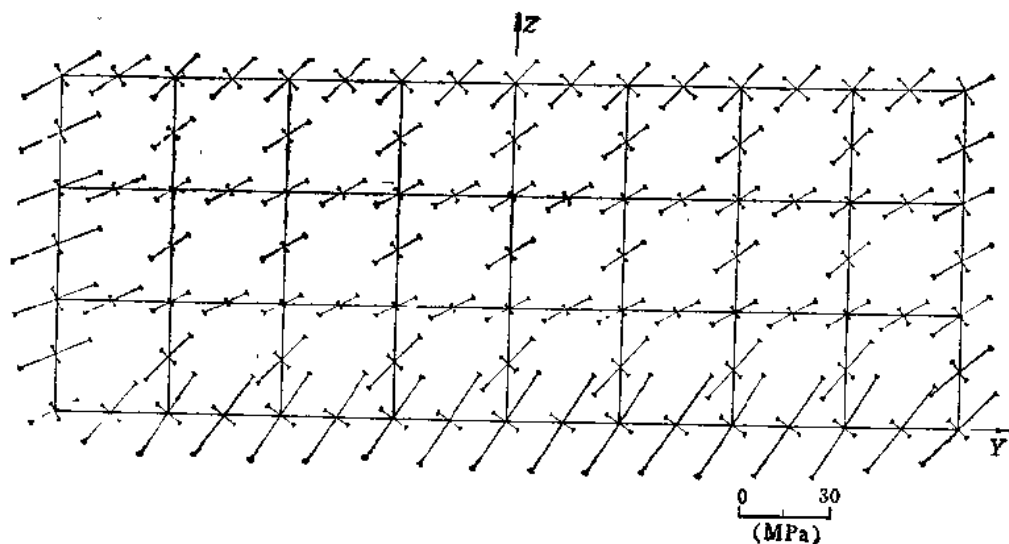


图 8 上游面侧边墙应力图

下游边墙、底板、顶拱及两端墙上的应力图，还计算了12个内部点的应力。限于篇幅，本文没有画出内部点的应力图。计算结果是顶拱最大沉陷变位为3.60mm，底拱最大上抬变位为4.65mm，边墙沿法线方向向洞内最大变形为5.36mm（上游侧）及5.80mm（下游侧）。上游侧墙与底拱棱角处出现较大应力集中，最大主应力达-43.28MPa（图8）；下游侧最大主应力较小，为-38.92MPa（图9）；顶拱两侧应力集中度较小，但下游侧主应力较大，主要是受原始地应力场控制。值得提出的是两端墙中部均有范围不大的拉应力区，最大拉应力达12.09MPa，可能使端墙中部出现裂缝，由于拉应力值不大，裂缝一

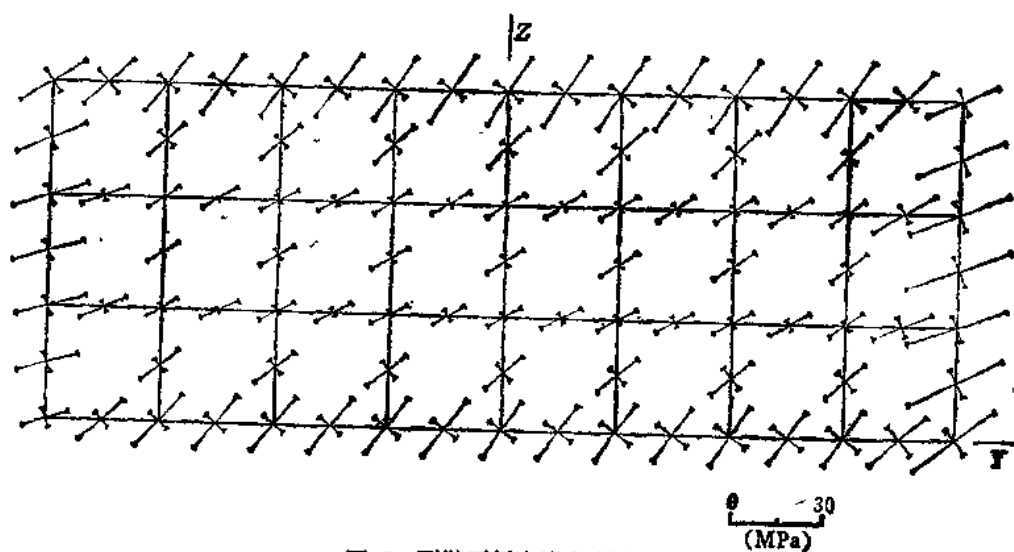


图 9 下游面侧边墙应力图

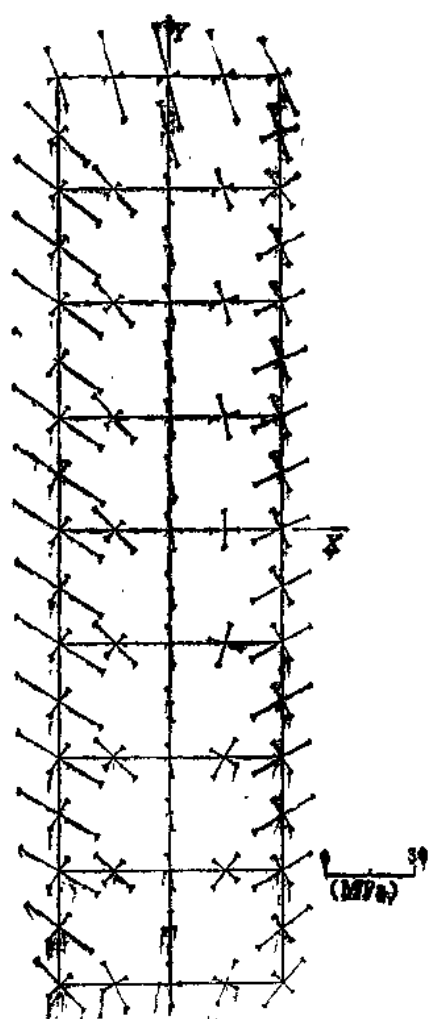


图 10 底板应力展开图

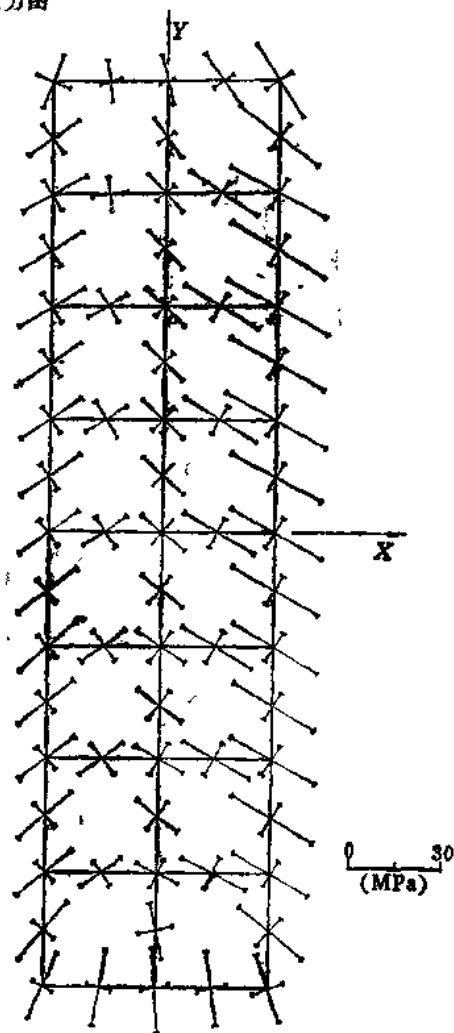
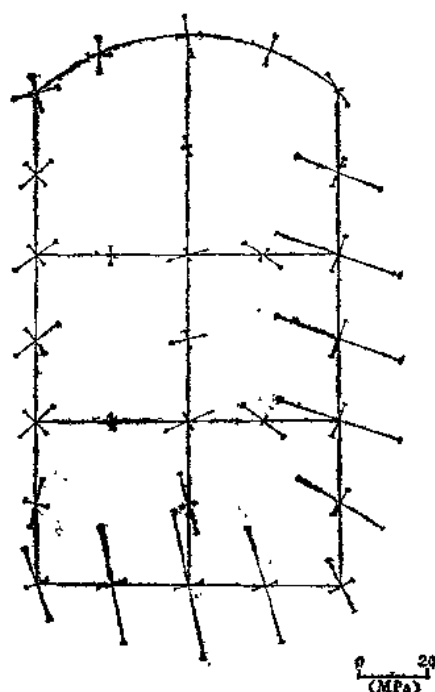
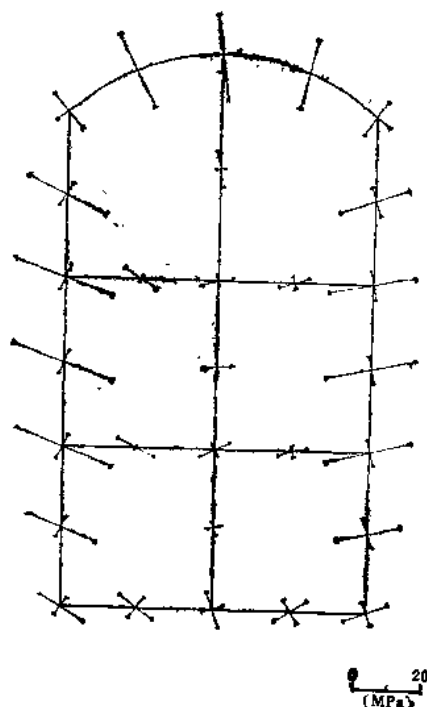


图 11 顶拱应力展开图

图 12 端面 $y=62.5$ 应力图图 13 端面 $y=-62.5$ 应力图

出现后, 应力将重新分布, 估计裂缝发展深度很小, (不致恶化稳定条件) 底板中部也有不大的拉应力。

计算是在M-160计算机上进行的。所有结点的未知量均为位移未知量。形成方程组的时间为 $cpu=3890s$, 解方程组时间为 $cpu=2740s$, 矩阵所需内存为695556个。如果不按简化重点法而采用重点法未作, 则预计形成方程组的时间为 $cpu=5400s$, 所需矩阵内存为1340964个, 求解方程组的时间约为 $cpu=7340s$ 。可见, 简化重点法比重点法可以节省大量内存和计算时间。

五、结 论

(1) 应力函数法是原始地应力场反演分析的简便有效方法, 可以极为方便地求出空间任意点的地应力张量, 并计算出相当于开挖作用的反转荷载, 将荷载分析和应力计算一次完成。既反映了原始地应力场对围岩应力重分布的影响, 又显著提高了效率。

(2) 当岩石相对比较均一, 用三维边界元方法分析单一地下洞室围岩稳定将比用有限元方法要显著节省数据工作量, 充分发挥边界元方法的优势。

(3) 本文采用角点用重点编号, 单点建立方程的简化重点法的处理方法比传统的方法节省内存和机时, 对三维问题效果尤为显著。

(4) 如何将边界元方法用以分析非均质及有洞室群的三维问题, 尚待进一步工作,

参 考 文 献

- [1] 张有天、胡嘉昌, 地应力场的趋势分析, 水利学报, 1984, 4。
- [2] 张有天、王镭、陈平, 边界元方法的直接列式法, 水力发电1983, 8。
- [3] 陈平、张有天、王镭, 边界元方法的角点问题, 中国岩石力学与工程学会岩石力学数值计算及模型试验会议论文集(即将出版)1986。
- [4] Brebbia, C.A., Tells, J.C.F., Wrobel, L. C., Boundary Element Techniques, 1984.
- [5] Watson, J.O., Advanced Implementation of the Boundary Element Method for Two-And-Three-Dimensional Elastostatics, Developments in Boundary Element Methods—1, Ed, by K. Banerjee and R. Butterfield, London, 1979.

The Stress Analysis of Underground Power House
by Boundary Element Method

Chen Ping, Zhang Youtian, Wang Lei

Abstract

Stress redistribution of primal stress field in the rock mass due to excavation of an underground cavern is analysed by boundary element method. The corner nodes produced by adopting the eight nodes quadratic element is treated by modified multinode method, which can remarkably save the necessary storage and the CPU time. The calculation of the primal stresses in the rock mass using stress function method based on the data measured in situ is included in the program as a subroutine. So that both the load and stress analysis can be performed by one program.

岩滩水电站重力坝的混凝土 温度应力分析

丁宝琰 黄淑萍 马训义*

【提要】 本文应用温度徐变应力有限单元法,对岩滩水电站大坝混凝土进行温度徐变应力分析,为确定大坝的浇筑方案、控制标准和冷却措施提供依据。

一、前言

广西岩滩水电站是红水河上的一座大型水电站,电站枢纽由重力式混凝土溢流坝、左右岸重力坝、发电厂房、开关站及垂直升船机组成。最大坝高为111m,坝顶长525m,装机容量为110万kW ($4 \times 27.5\text{kW}$),正常高水位223.0m时库容为24.3亿 m^3 。混凝土总量为320万 m^3 (其中大坝为203.53万 m^3)。大坝的施工采取底孔明渠导流方案,1986年3月浇筑纵向导墙及左岸导流底孔坝段混凝土。

本文是在已确定大坝的分缝以两条纵缝为原则的基础上,进一步对基础块混凝土的温度应力进行研究,为确定分层方案,以及一年内不同月份的允许浇筑温度和冷却措施提供依据。

根据实际施工的可能性,确定进行计算的分层方案为1.5m和3.0m;浇筑间歇期为5d和7d;计算的坝段为电站坝段及18#坝段(纵向导墙)。由大坝实际分缝长度,18#坝段横缝宽26.5m,纵缝长度小于横缝长度;而电站坝段分两条纵缝时,第一块长26.0m,其横缝小于纵缝长度。所以在计算中统一按块长26.5m考虑。

二、计算基本数据^①

1. 气温、水温 and 风速 (表1)

表 1

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年平均
多年月平均气温(℃)	11.6	13.3	17.6	21.7	24.9	26.4	27.3	26.6	24.9	21.3	16.7	12.8	20.4
多年月平均水温(℃)	14.4	14.8	17.9	21.6	24.1	24.7	25.6	25.7	25.1	22.9	19.9	16.5	21.1
平均风速(m/s)	1.52	1.68	1.65	1.69	1.43	1.08	1.19	1.02	1.16	1.27	1.40	1.46	1.38

* 广西电力勘测设计院。

① 广西电力工业局勘测设计院,岩滩水电站混凝土大坝温度控制报告,1984年7月。

2. 混凝土配合比和粉煤灰掺量(表2)

表 2

水泥品种及 标 号	水 灰 比		粉 煤 灰 掺 量 (%)			用水量 (kg/m ³)	胶 凝 材 料 量 (kg/m ³)			碎 石 (kg/m ³)				人工砂 (kg/m ³)
	计算	实际	代水泥	代砂	合计		水泥	代水泥 粉煤灰	代砂 粉煤灰	8~20	20~40	40~80	80~ 120	
525° 普通水泥	0.67	0.59	20	4	30	114	136	34	24	257	386	386	579	581

混凝土标号200°

3. 水泥水化热和绝热温升(表3)

表 3

项 目 \ 龄 期	1	2	3	4	5	6	7	14	28	最 终
水化热(J/kg)	64.058	106.763	144.026	161.192	176.883	190.499	200.129	244.509	261.675	294.751
绝热温升(°C)	5.62	10.00	12.64	14.25	15.50	16.75	17.56	21.46	22.86	25.86

4. 地基弹模

地基弹模平均值为 2.3×10^4 MPa, 其大值平均值为 3.27×10^4 MPa.

5. 地基和混凝土的泊桑比、容重、比热、导热系数和膨胀系数(表4)

表 4

项 目	地 基	混 凝 土
泊 桑 比 μ	0.20	0.167
容 重 ρ (kg/m ³)	3000	2400
比 热 C (J/kg·°C)	921.1	921.1
导热系数 λ (J/m·d·°C)	2210630	2210630
热膨胀系数 α (1/°C)	0.00001	0.000008

6. 混凝土弹模、强度和极限拉伸值(表5)

表 5

项 目 \ 龄 期 (d)	3	7	28	90	180	365
抗压强度(MPa)	11.9	17.1	25.2	30.0	33.9	37.4
弹 模 (MPa)	15000	21700	27600	31000	34300	35800
极 限 拉 伸 (10^{-4})		0.4~0.5	0.6~0.65	0.85		