

两种计算软件对清江水布垭工程的数值分析比较*

孙爱花 朱维申 隋斌

(山东大学岩土与结构工程研究中心 济南 250061)

摘要 采用二维 ANSYS 有限元计算软件和三维有限差分 FLAC^{3D} 计算软件, 对清江水布垭工程的围岩稳定性进行 4 种计算工况的数值分析。对地下洞室的 16 个关键点的位移、应力和塑性区进行 2 种计算软件的结果对比分析。最后得出了相应的结论。

关键词 地下工程, 位移, 塑性区, 不同软件对比

分类号 O 241

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)增 2-4952-04

SIMULATION ANALYSIS BY TWO DIFFERENT PROGRAMS IN UNDERGROUND POWERHOUSE OF SHUIBUYA PROJECT

Sun Aihua, Zhu Weishen, Sui Bin

(Research Center of Geotechnical and Structure Engineering, Shandong University, Jinan 250061 China)

Abstract This paper uses ANSYS and FLAC^{3D} to carry out simulation analysis on four options in underground power-house of Shuibuya Project. ANSYS is a two dimensional finite-element program and FLAC^{3D} is a three dimensional explicit finite-difference program. This paper selects 16 key points at contour of cavern in underground powerhouse of Shuibuya Project, then analysis results by the two programs on the displacement and stress of the these key points and plastic zone are compared. Some relevant conclusions are given.

Key words underground engineering, displacement, plastic zone, comparison of different programs

1 前言

清江水布垭工程位于清江中游河段巴东县境内, 地下厂房布置在坝址右岸。厂房布置区位于坝子沟、张性大断层 F₂、马崖高边坡以及清江右岸岸坡所围成的四边形山体之内, 且有断层 F₃ 贯穿其中。电站建筑物主要由引水渠、岸塔式进水口、引水洞、主厂房、地面变电站、尾水洞、尾水平台以及尾水渠等组成, 采用 4 台装机。

地下厂房区地层从上至下由茅口组灰岩(P_{1m})、栖霞组灰岩(P_{1q}¹~P_{1q}¹⁵)、马鞍山组煤系地层(P_{1ma})、黄龙组(C_{2h})及泥盆系写经寺组(D_{3x})等岩层组成。地下洞室穿越的岩层多由软硬相间的岩层组成。在岩

土工程计算中, 经常用三维有限差分 FLAC^{3D} 计算软件(以下简称 FLAC^{3D})进行计算^[1~8], 而较少用二维 ANSYS 有限元计算软件(以下简称 ANSYS)作计算。本文以清江水布垭工程为例, 用 ANSYS 和 FLAC^{3D} 进行计算, 并对 2 种计算软件的结果进行对比分析。

2 地质概化模型与计算条件

2.1 地质概化模型

针对清江水布垭工程地下厂房洞室围岩的工程地质特征和其结构形式, 采用如图 1 所示的地质概化模型。地质概化模型包括了引水洞、主厂房、尾水洞、母线洞。计算区域内主要考虑的岩层有 P_{1q},

2004 年 1 月 16 日收到初稿, 2004 年 2 月 17 日收到修改稿。

* 国家自然科学基金(59939109)重点资助项目。

作者 孙爱花 简介: 女, 现为山东大学硕士研究生, 主要从事岩体稳定性和计算岩石力学等方面的研究工作。E-mail: sunaihua6@mail.sdu.edu.cn。

P_{1ma} , C_{2h} , D_{3x} 等地层。建模时取厂房横断面水平方向为 X 轴, 铅垂方向为 Y 轴, 纵轴线为 Z 轴。坐标原点取在主厂房上游侧墙一侧, 高程为 179.00 m 处。计算范围: X 方向 -210~200 m; Y 方向 -180.00 m 处至地表。洞室顶部到地表的埋深为 162 m。二维的计算剖面共划分 2 598 个节点和 2 535 个单元。采用 8 节点的平面应变单元和 2 节点的杆单元。准三维的计算模型是在二维计算模型的基础上沿 Z 向拖了 10 m 形成。二维网格划分^[2]如图 1 所示。

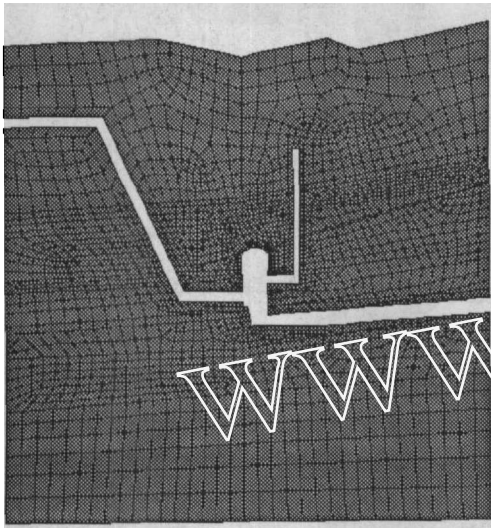


图 1 二维网格划分图
Fig.1 2D mesh of model

本文分别采用 ANSYS 和能反映复杂岩体非线性变形特性的 FLAC^{3D}, 对清江水布垭工程的实际模型进行了 4 种计算工况(表 1)的数值分析。为了方便地比较 2 种计算软件的结果, 在本文的分析中, 沿主洞室边界取了 16 个关键点。

2.2 材料参数和地应力场

表 1 4 种计算工况情况

Table 1 Four cases for computation

工况	加锚情况	母线洞、引水洞及
		尾水洞情况
1	毛洞开挖(无锚, 管道不打折)	材料随层, 各项参数不变
2	毛洞开挖(无锚, 管道打折)	材料弱化等效处理
3	等效支护开挖(加锚, 管道不打折)	材料随层, 各项参数不变
4	等效支护开挖(加锚, 管道打折)	材料弱化等效处理

注: 为了在二维分析中近似模拟各支洞的影响, 对支洞部位做了材料弱化处理, 即将母线洞、引水洞、尾水洞材料的弹性模量和粘聚力减少一半; 根据文[7], 等效加锚采用的是将加锚区原来材料的弹性模量 E 和粘聚力 c 提高 1.2 倍, 加锚区^[2]的范围取 7 m。

(1) 各岩层力学参数详见表 2。

(2) 地应力场。考虑到现场实测结果, 计算时采用铅垂向按自重应力场施加, 水平向应力的侧压系数取 $K_r=1$ 。

2.3 施工开挖

在主厂房上下游侧墙吊车梁附近 7 m×7 m 的 P_{1q}^3 岩层处对软岩采用混凝土进行置换。对于加锚杆采用等效方法, 提高岩体的强度和刚度来体现锚固作用^[8], 开挖与加锚同步进行。开挖顺序^[2](VI→I→II+VIII→III+VII→IV→V)和洞周关键点(1~16)位置如图 2 所示。

3 计算分析

3.1 ANSYS 与 FLAC 结果比较

3.1.1 位移

从图 3 可以看出: 4 种计算工况下, FLAC^{3D} 的位移计算结果除顶拱的点外, 其余 15 个点的位移

表 2 地下厂房岩层力学参数

Table 2 Mechanical parameters of rock masses of underground workshop

岩 层	重度 /kN·m ⁻³	变形模量 E/GPa	泊松比 μ	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	抗拉强度 /MPa
$P_{1q}^{12-3} \sim P_{1m}$	26.0	12.00	0.27	0.90	47	0.90
P_{1q}^{12-2} , P_{1q}^{11} , P_{1q}^{10} , P_{1q}^7 , P_{1q}^5 , P_{1q}^4 , P_{1q}^3 , C_{2h} (上部)	27.0	17.50	0.25	1.10	51	1.25
P_{1q}^{12-1} , P_{1q}^{10} , P_{1q}^8 , P_{1q}^6 , P_{1q}^3 , P_{1q}^1 , C_{2h} (下部)	25.0	6.50	0.30	0.70	41	0.65
P_{1ma}	22.0	1.50	0.35	0.40	29	0.35
D_{3x}	25.0	3.50	0.30	0.60	37	0.50
D_{3h}	25.0	11.00	0.27	0.85	47	0.90
P_{1q}^3 上部剪切带	25.0	0.15	0.40	0.01	12	0.00
F_{30}	25.0	1.00	0.35	0.50	27	0.20
混凝土	24.5	30.00	0.25	1.70	60	1.70

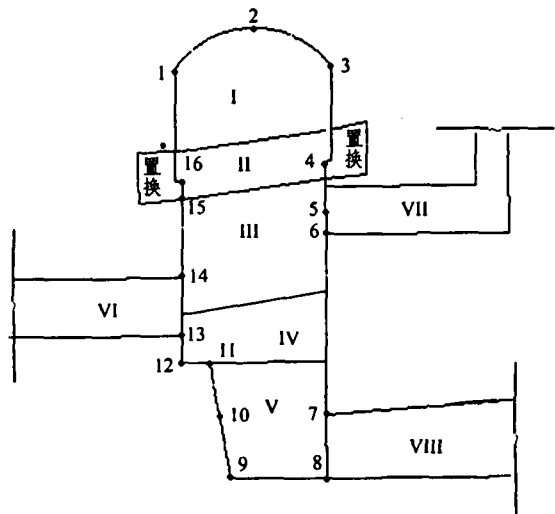


图2 开挖步与洞周关键点位置示意图
Fig.2 Schematic of excavation steps and some key points of cavern

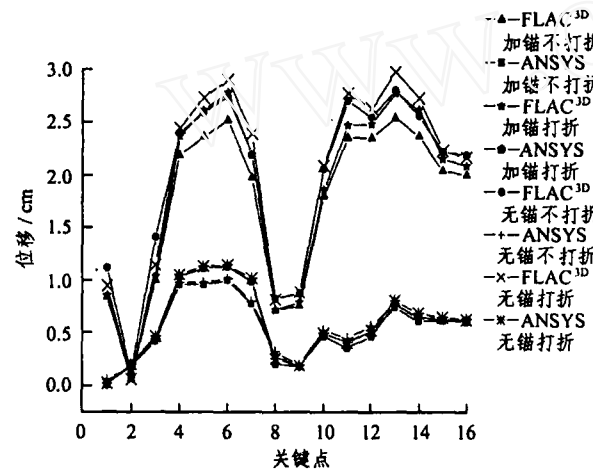


图3 洞周 16 个关键点的位移图
Fig.3 Displacement of 16 key points

都要比 ANSYS 的计算结果大, 且最大大 4 倍; 位移最大点出现的位置均为关键点 6; 曲线的走势基本相同。用 ANSYS 和 $FLAC^{3D}$ 进行计算, 加锚比无锚的位移最大均能减少 10%。为了更容易看出 2 种软件计算结果的差距, 现将几个关键点的 4 种计算工况下 2 种软件的计算位移列入表 3。

3.1.2 应力

在求出关键点的应力时, 由于 ANSYS 的各层材料参数不同, 为了使岩体内的点接近实际的值, 采用了平均法。对于 $FLAC^{3D}$, 由于软件本身无法准确读出岩体内某一点的应力值, 故在 $FLAC^{3D}$ 中采用了一种近似的算法, 将边界节点的相邻单元的常应力加以平均, 用来表示公共边界中点处的应力。由结果可以看出, 4 种计算工况 ANSYS 的应力计算结果要比 $FLAC^{3D}$ 大得多, 最大大 5.6 倍; 曲线

表3 代表性的几个关键点的位移

Table 3 Displacements of some representative key points

软件	关键点	不同计算工况位移/cm			
		1	2	3	4
ANSYS	6	1.01	1.14	0.99	1.13
$FLAC^{3D}$	6	2.74	2.90	2.52	2.78
ANSYS	7	0.79	1.01	0.77	0.98
$FLAC^{3D}$	7	2.19	2.39	1.97	2.19
ANSYS	14	0.63	0.68	0.60	0.65
$FLAC^{3D}$	14	2.56	2.73	2.37	2.62
ANSYS	15	0.64	0.64	0.61	0.61
$FLAC^{3D}$	15	2.22	2.23	2.04	2.15

走势基本相同; 最大拉应力出现的位置均为关键点 4 处。

3.1.3 塑性区

ANSYS 和 $FLAC^{3D}$ 在相同的条件下, 计算的塑性区相差不大。

3.1.4 分步位移与总位移

图 4 为关键点 6 的 2 种计算软件的位移变化趋势图。从图中可以看出, $FLAC^{3D}$ 和 ANSYS 在同样采用 D-P 模型的情况下, 工况 1, 3 前 4 步位移所占的比例比工况 2, 4 前 4 步位移所占的比例大, 最大相差 4.31%。ANSYS 与 $FLAC^{3D}$ 加锚不打折与无锚不打折相比、加锚打折与无锚打折相比, 使用同一种软件的情况下, 位移所占的百分比相差不大, 最大相差均不超过 1%。2 种计算软件在计算情况相同的条件下, 前 2 步相差较大, 最大相差 17.67%。

3.2 $FLAC^{3D}$ 两种模型的比较

在实际工程的计算中, $FLAC^{3D}$ 常采用 Mohr-Coulomb(M-C)模型。为了比较在 $FLAC^{3D}$ 中 M-C 模型和 Drucker-Prager(D-P)模型, 也将 M-C 模型做了上述 4 种计算工况的计算, 将 $FLAC^{3D}$ 中 2 种模型

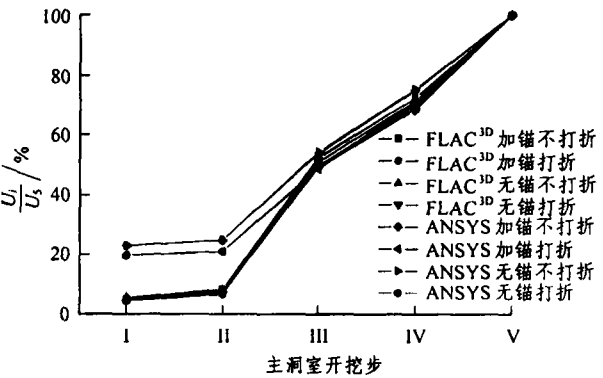


图4 2 种软件的位移变化趋势图

Fig.4 Variation law of displacement by different programs

进行比较。

3.2.1 位移

从图 5 可以看出：2 种模型的位移相差不是很大，最大相差不超过 10%；2 种模型的计算中，工况 2，4 比工况 1，3 的位移要大，最大相差 10%；2 种模型的计算中，加锚比无锚的位移最大相差约 10%。

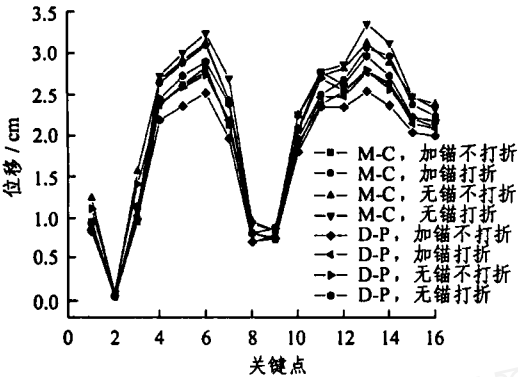


图 5 2 种模型的位移图
Fig.5 Displacement of two models

3.2.2 分步位移与总位移

图 6 为关键点 6 的 8 种计算工况下的分步位移与总位移的关系图。从图中可以看出：2 种模型在加锚和无锚计算工况下，曲线的走势是相同的，但是工况 1，3 和工况 2，4，D-P 模型 2 种情况相差比 M-C 模型相差要大一些，D-P 模型相差在 2% 以内，M-C 模型模型相差在 0.5% 以内。

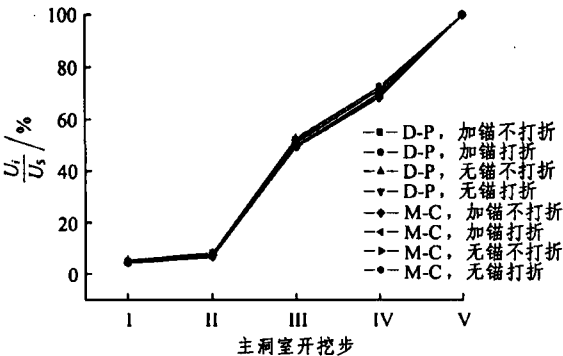


图 6 2 种模型位移变化趋势图
Fig.6 Variation law of displacement of different models

3.2.3 塑性区

M-C 模型和 D-P 模型在求塑性区面积上相差很大，M-C 模型算出的塑性区面积远远大于 D-P 模型

算出的塑性区面积。

4 结 论

(1) 用 ANSYS 和用 FLAC^{3D} 计算时，加锚和无锚的位移对比变化不是很大，加锚后洞周的位移一般减少 10% 左右；加锚和无锚对应力的影响较大。但是，与实际的工程结果相比，FLAC^{3D} 的位移、应力结果可能更接近工程实际、更安全一些。

(2) 用 ANSYS 和用 FLAC^{3D} 计算时，算出的位移相差较大，FLAC^{3D} 所求点的位移最大是 ANSYS 所求点的位移的 4 倍。

(3) 2 种屈服模型的位移相差不是很大，而塑性区相差很大，M-C 模型的塑性区要比 D-P 模型的塑性区大得多。

(4) 由于 FLAC^{3D} 是针对岩土工程而编制的软件，应认为其结果可信度高一些。而 ANSYS 主要用于结构工程分析，与岩土工程介质的差异要大些。

参 考 文 献

1 朱维申, 李术才, 陈卫忠等. 清江水布垭工程地下厂房围岩锚固方案优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 1): 2 127~2 131

2 朱维申, 李术才, 陈卫忠等. 清江水布垭枢纽地下厂房洞室群施工开挖与支护的优化方案分析及稳定性研究报告: 地下厂房锚固方案优化的二维和三维非线性有限元分析(分报告之四)[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2002

3 邹爱清, 周火明. 清江水布垭枢纽地下厂房洞室群稳定性分析及施工开挖与支护的优化方案分析及稳定性研报告: 地下厂房区围岩力学参数选取的优化研究(分报告之一)[R]. 武汉: 长江科学院, 2002

4 丁秀丽, 盛 谦, 邹爱清等. 水布垭枢纽地下厂房施工开挖与加固的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 1): 2 162~2 167

5 胡 颖, 谢军兵. 水布垭水电站引水发电系统开挖与支护[J]. 水力发电, 2002, (10): 69~71

6 张 练, 丁秀丽, 付 敬. 清江水布垭枢纽地下洞室施工开挖数值分析[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(3): 42~46

7 张玉军, 朱维申. 三峡工程船闸高边坡锚固方案的平面有限元计算[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(1): 70~74

8 朱维申, 程 峰. 能量耗散本构模型及其在三峡船闸高边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 261~264