

基于单元重构的岩土工程复杂地质断层建模方法

张雨霆, 肖明, 左双英

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对岩土工程数值分析中地质断层建模困难的问题, 提出基于单元重构的岩土工程复杂地质断层建模方法。该方法首先对分析对象进行独立离散, 建立不考虑地质断层的模型。再通过单元重构, 可将地质断层嵌入已建模型, 实现复杂地质断层的自动建模。所谓单元重构, 是首先使用八节点六面体单元, 建立不考虑断层的分析模型, 再借助四节点四面体, 五节点四棱锥和六节点三棱柱等单元形态, 对地质断层穿过的网格进行处理, 重构为由多种单元形态构成的模型。然后结合岩土工程断层建模实例, 将该方法应用于复杂地下岔管、重力坝坝肩和坝基以及大型地下洞室群的断层建模, 可证明其有效性。进一步以大型地下洞室群为例, 将考虑地质断层的洞室群模型导入通用软件, 采用实体单元模拟地质断层进行开挖计算, 并与不考虑断层的情形对比分析发现, 考虑地质断层后, 围岩位移和应力分布都呈现出不连续性, 被断层切割部位的围岩变形增大, 应力出现松弛。这表明含有地质断层的重构模型可以用于数值计算, 且能有效反映出地质断层对洞室围岩稳定的影响, 从而可证明该建模方法的可靠性, 为岩土工程的复杂地质断层建模提供便捷的实现途径。

关键词: 岩土工程; 地质断层; 建模; 单元重构

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)09 - 1848 - 08

METHODOLOGY FOR MODELING OF COMPLEX GEOLOGICAL FAULTS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING BASED ON ELEMENT RECONSTRUCTION

ZHANG Yuting, XIAO Ming, ZUO Shuangying

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: The modeling of geological faults is a difficult issue in the numerical analysis of geotechnical engineering. The methodology for modeling of complex geological faults is proposed by using element reconstruction. This method firstly discretizes the analysis objects without taking geological faults into consideration. Then, by conducting element reconstruction, the geological faults can be constructed into the model. The element reconstruction is to establish fault-free models by using eight-node hexahedron element at first. Afterwards, by using four-node tetrahedron, five-node rectangular pyramid and six-node triangular prism, the meshes that are intersected by structural planes can be reconstructed and the fault-contained model is obtained. And the fault-contained model has multi-form elements. Then, the proposed method is illustrated with its applications to several geotechnical examples, including the modeling of geological faults in complex underground bifurcation pipe, abutment and foundation of gravity dam and large-scale underground caverns. These applications prove the effectiveness of proposed method. The numerical analysis is further conducted by taking underground caverns as an example. By using common software, the excavation simulation is performed on the fault-free model and fault-contained model of underground caverns, respectively. The elements of geological faults in fault-contained model are directly simulated by entity elements. By comparing the results of different

收稿日期: 2008 - 12 - 22; **修回日期:** 2009 - 04 - 01

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(90715042); 国家杰出青年科学基金资助项目(50725931); 国家科技支撑计划项目(2008BAB29B01)

作者简介: 张雨霆(1984 -), 男, 2006年毕业于武汉大学水利水电学院水利水电工程专业, 现为博士研究生, 主要从事地下工程和管道结构方面的研究工作。E-mail: magicdonkey@163.com

models, it is discovered that the distributions of surrounding rock deformation and stress show a remarkable discontinuous feature in the fault-contained model. The surrounding rock intersected by geological faults observes an increase of displacement and a release of stress. This indicates that the meshes generated by the proposed modeling method can be used in numerical analysis and influences of geological faults on surrounding rock stability can be properly reflected as well. Thus, the reliability of proposed method is demonstrated, providing the modeling of complex geological faults in geotechnical engineering with a convenient way.

Key words: geotechnical engineering; geologic fault; modelling; element reconstruction

1 引言

断层是岩土工程建设中经常遇到的地质构造,它是地壳岩层因受力达到一定强度而发生破裂,并沿破裂面发生明显相对移动的产物。地质断层通常被泥和地下水充填,变成软弱结构,这些软弱地质断层在岩体中广泛分布,构成了岩土工程中失稳的主要因素。以地下工程为例,地下洞室结构的破坏大多就是受到地质断层结构影响造成的。又由于地下工程的规模越来越大,地下洞室结构日趋复杂,使处在复杂地质环境中的洞室群被断层结构面切割,因此较难模拟地质断层的影响。

许多学者利用数值分析的方法,对地质断层进行了研究,使断层分析理论得到了较大的发展。赵海军等^[1]采用理论分析和数值计算的方法,对陡倾断层上下盘开挖的岩移机制进行了研究;张志强等^[2]应用 FINAL 有限元分析软件中独有的 COJO 单元模拟接触面,对软弱夹层的分布对洞室稳定性的影响进行了研究;朱维申等^[3]通过系统的数值仿真试验,研究了断层的厚度、倾角、弹性模量和地应力侧压力系数等 4 个主要因素对隧洞稳定的影响;王祥秋等^[4]对含软弱夹层的层状围岩建立了有限元模型,用 Goodman 接触面单元模拟层间接触面,将计算结果和实测数据进行了对比。这些数值分析着重于研究断层的计算方法,并没有考虑地质断层在三维空间内分布的任意性,因此多把地质断层的模拟简化为二维问题,分析也仅限于隧洞等简单断面。而实际工程中,地质断层具有较大的复杂性。以水电站地下洞室为例,由于洞室群众多,必须采用三维建模才能模拟洞室纵横交错的形态。而三维建模时,对洞室群结构本身的离散就是一项复杂的工作^[5],且当地质断层穿过地下洞室群后,由于地质断层与洞室相交的任意性,若将地质断层和地下洞室群按照实际情况进行离散,则是一项更加困难的工作,尚未有文献给出有效的解决方法。

在总结以往研究工作的基础上,本文提出了一

种基于“单元重构”思想的岩土工程复杂地质断层建模方法。该方法首先不考虑断层,对分析对象独立离散。再对断层穿过网格,运用单元重构方法,可快速将复杂地质断层建入模型。通过将该建模方法应用于岩土工程中几个断层模拟的实例,可证明该建模方法的有效性。进一步将含有地质断层结构的模型导入大型岩土工程软件,用实体单元模拟断层结构进行计算,可验证含地质断层模型的可靠性,为岩土工程的复杂地质断层建模提供了便捷的实现途径。

2 基本思路

采用本文方法进行复杂地质断层建模,用实际建出的网格模拟地质断层,基本思路可以概括为:

(1) 首先根据分析对象的布置和格局,建立不考虑地质断层的模型。以水电站地下洞室为例,虽然其规模巨大,且洞室众多彼此交错,但借助 AutoCAD 和 OpenGL 等开发工具,这项工作已变得十分简洁,可以快速实现复杂洞室群的建模^[6]和可视化^[7]。

(2) 考虑地质断层的存在,对已建模型中被断层穿过的网格进行单元重构,离散出考虑了断层结构的模型。根据本文的单元重构算法,模型每进行一次单元重构,可将一条结构面建入模型。因此,每模拟一条地质断层而又要考虑断层的厚度时,需要对模型进行 2 次单元重构,即需要把 2 条结构面建入模型。

(3) 对岩土工程中各类需要进行地质断层分析の場合,应用基于单元重构的建模方法,建出含有地质断层的模型,从而验证该方法的有效性。

(4) 以地下洞室为例,编写接口程序,将考虑了地质断层的模型导入大型岩土工程软件,用实体单元模拟断层结构,计算并对分析地质断层对地下洞室群围岩稳定的影响,验证该方法的可靠性。

上述几项工作,思路(1)已有了较为成熟的实现方法,因此下面主要对思路(2)~(4)进行详述。

3 基于单元重构的地质断层建模

3.1 单个结构面的建模方法

首先，采用六面体八节点单元，建立不模拟断层结构的模型；然后，再考虑地质断层的存在。此时，暂不考虑地质断层实际延伸范围，即构成地质断层的结构面都被视为无限延伸的平面，则在不模拟断层的模型中，被结构面穿过的单元，即八节点六面体单元被结构面切割，单元被任意平面切割后的形态如图 1 所示。

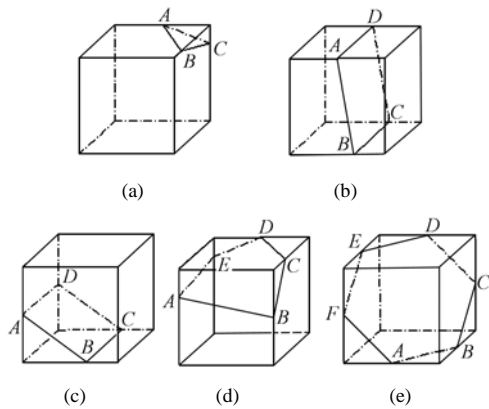


图 1 单元被任意平面切割后的形态

Fig.1 Forms of element cutting by arbitrary plane

上述截面形态，除了图 1(b)将原单元划分为 2 个六面体八节点单元，其他形态的截面切割原单元后都产生了多面体，它们形态复杂，难以识别并进行计算。因此，应考虑对这些多面体添加面内辅助线和体内辅助线，将其划分为四节点四面体，五节点四棱锥，六节点三棱柱等可被识别和使用的单元形态。

借助图 2 中 4 种单元形态，通过添加面内和体内辅助线，可实现对图 1 中的任意平面切割单元后的单元重构。单元重构的规则和重构后生成的单元形态详见表 1。表 2 给出了每种类型截平面切割八节点六面体进行单元重构后生成单元类型统计。可以看出，除了图 1(b)所示截平面单元在重构后仍为八节点六面体单元，其他类型截平面单元的重构都使用了原模型中没有的单元形态。虽然原单元被重构后，新增单元数目较多，但由于单元重构仅在断层穿过的单元进行，因此重构模型的单元总数增加较少。同时，可以实现考虑结构面存在的全自动单元重构，这样大大降低了建模难度，也显著提高了建模速度。

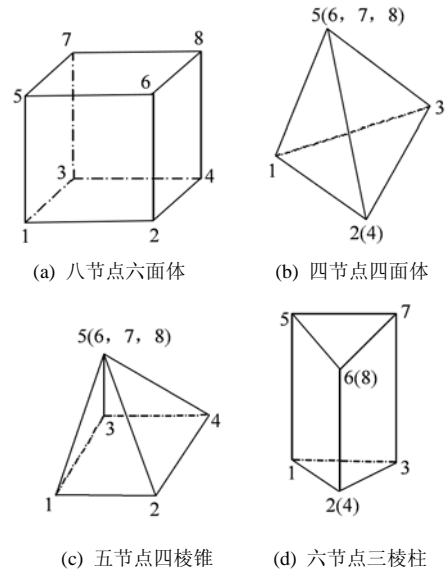


图 2 单元重构中使用的单元形态

Fig.2 Element forms in element reconstruction

需要说明，为使重构的模型可用于结构计算，应保证进行单元重构后的模型在单元交界面上的节点和棱边是融合的。从表 1 可以看出，新增的体内辅助线和单元体内新增的节点 *O*，都只属于该单元自身，因此不存在与相邻单元的网格融合问题，而面内辅助线的添加可根据下述规则：

当结构面 *AB* 与平面 1234 的相邻棱 12, 24 相交(见图 3)时，规定将节点 1, 4 相连，从而生成面内辅助线 14，将五边形 134BA 分成三角形 134 和四边形 14BA。单元重构时，对所有出现结构面与单元面的相邻棱相交的情形，都使用这个规则来添加面内辅助线，则可保证相邻单元之间的网格融合。

3.2 多个结构面的建模方法

为模拟实际断层结构，应当考虑断层的厚度，即需要建出含 2 个及以上的结构面模型。这就需要对上述得到的考虑了单个结构面的模型进行多次结构面建模。由于此时的模型已经具有图 2 所示的多种单元形态，则进行多次结构面建模时，需要解决非八节点六面体的单元被任意平面切割后的单元重构问题。

图 2 和表 3 都给出了常规单元和其他形态单元之间的关系，可以看出，将八节点六面体中的 2, 3 和 4 个节点重合，即可分别退化成六节点三棱柱、五节点四棱锥和四节点四面体。因此，对这些退化单元进行重构时，可将其视为存在重合节点的八节点六面体单元，仍然使用八节点六面体的存储格式(见表 3)，则可以套用表 1 的算法，完成退化单元的重构。

表 1 各种截平面的单元重构示意
Table 1 Diagram of element reconstruction for every kind of cutting planes

平面切割单元	面内辅助线	体内辅助线	重构后生成的单元形态	备注
	46, 47, 67	O1, O2, O3, O4, O5, O6, O7		点 O 为体心 1234 - 567 的形心
	25, 47	无		-
	38, 28, 67	O1, O2, O3, O4, OA, OB, OC, O8, OD, OE, BE		点 O 为体心 1234 - ABC8DE 的形心
	25, 28, 58, 47, 17, 14	AO, BO, CO, DO, EO, FO, O1, O2, O3, O4, O5, O6, O7, O8		点 O 为六边形 ABCDEF 的形心

表 2 单元重构完成后生成单元类型统计
Table 2 Statistic of elements after element reconstruction

截平面	生成单元个数/个			
	四面体	四棱锥	三棱柱	八节点六面体
三角形	5	3	1	0
棱相对四边形	0	0	0	2
棱相交四边形	0	0	2	1
五边形	4	6	2	0
六边形	10	6	0	0

表 3 常规单元与退化单元的关系
Table 3 Relationship between regular and degenerate elements

单元类型	节点编号存储格式	重合节点数/个	
常规单元	八节点六面体	1 2 3 4 5 6 7 8	0
退化单元	六节点三棱柱	1 2 3 2 5 6 7 6	2
	五节点四棱锥	1 2 3 4 5 5 5 5	3
	四节点四面体	1 2 3 2 5 5 5 5	4

应该指出, 在退化单元的重构过程中, 由于程序仍识别为八节点六面体单元, 则在当前单元重构完成时, 必然生成了一些节点共线或共面, 而并不构成实体的单元。因此, 需要对新生成的单元进行检查, 以剔除这一类单元, 检查的标准有以下 2 条:

(1) 单元存储格式中的 8 个节点编号, 不相同的节点编号数量要大于 3 个, 因为只有 3 个或 3 个以下不同节点的单元最多仅能构成一个平面, 而无法形成实体。

(2) 单元的体积大于 0。

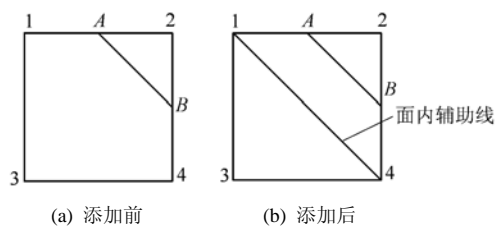


图 3 面内辅助线添加规则

Fig.3 Rule of adding face auxiliary line

只有当同时满足上述标准时，生成的单元才可以充入新模型。

3.3 重构模型的单元形态优化

由于地质断层在岩体中分布具有任意性，为保证考虑断层结构的重构单元有良好的计算效果，需要对重构模型进行必要的单元形态优化。

首先，在不考虑地质断层时，就应建出具有良好单元形态的模型，即应使模型的八节点六面体单元尽量接近正六面体。同时，在结构分析所关心的重点部位应适当加密网格。借助 AutoCAD 等开发工具建模，可完全由人工控制生成网格的形态，因此这一步对单元的形态优化较容易实现^[6]。

进行单元重构时，可对结构面切割单元平面后的棱边内的线段长短边之比进行控制，以优化单元形态。如图 4(a)所示，真实的结构面走向将平面的两棱边分为 a_1 、 a_2 和 b_1 、 b_2 ，由于未对结构面走向进行控制，生成的以 a_1 和 b_1 构成直角边的三角形过于狭长。此时，可引入一控制长短边比的参数 λ ，规定结构面截单元棱边后，生成长短边之比应满足：

$$\max \left[\frac{\max(a_1, b_1)}{\min(a_1, b_1)}, \frac{\max(a_2, b_2)}{\min(a_2, b_2)} \right] \leq \lambda \quad (1)$$

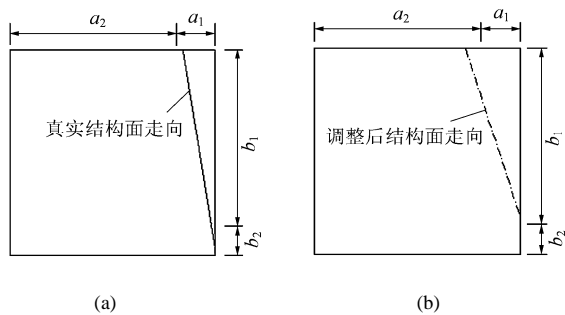


图 4 重构单元时的网格优化

Fig.4 Mesh optimization when reconstructing elements

可以看出，引入 λ 后，图 4(b) 中的结构面有了一定的调整，生成的以 a_1 和 b_1 构成直角边的三角形的单元形态得以改善，避免了单元重构过程中过于狭长单元的出现。

在单元内对结构面走向进行微调，虽然使得建出的地质断层结构面略显“坑洼”，但由于模型的每个单元都不大，因此对模拟地质断层的总体走向影响很小，但却可以显著改善重构模型的单元形态。

4 岩土工程中的复杂地质断层建模

根据基于单元重构的地质断层建模方法，可在已建好的不考虑地质断层的模型基础上，实现考虑复杂地质断层的快速建模，即可概化为解决“在已建的模型中，建入多个任意截平面”的问题。

4.1 复杂地下岔管的断层建模

对一抽水蓄能电站地下高压岔管结构的地质断层进行建模。首先建立将不考虑断层的模型(见图 5(a))，共剖分了 14 519 个八节点六面体单元，共 16 882 个节点。然后对模型进行单元重构，共考虑了 3 条相交的断层，共 6 个结构面，断层的厚度均为 0.5 m。重构后模型网格共有 44 466 个单元和 28 210 个节点(见图 5(b))，各种类型的单元数目和所占比例见表 4。

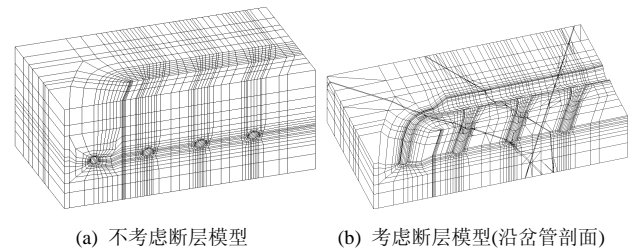


图 5 不考虑和考虑断层结构的地下岔管模型

Fig.5 Fault-free and fault-contained models of underground bifurcation pipe

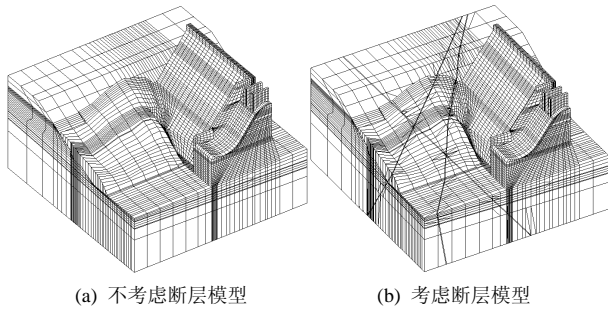
表 4 重构模型中各种类型的单元数目和所占比例

Table 4 Each type's elements' number and proportion in reconstructed model

岩土工程应用实例	复杂地下岔管		重力坝坝肩和坝基		大型地下洞室群	
	数目	所占比例/%	数目	所占比例/%	数目	所占比例/%
八节点六面体	17 920	40.3	42 996	58.7	17 429	45.3
六节点三棱柱	8 493	19.1	9 595	13.1	7 205	18.7
五节点四棱锥	6 270	14.1	8 131	11.1	5 572	14.5
四节点四面体	11 783	26.5	12 525	17.1	8 293	21.5
总计	44 466	100.0	73 247	100.0	38 499	100.0

4.2 重力坝坝肩和坝基的断层建模

对一重力坝坝肩和坝基的地质断层进行建模。首先建立不考虑断层的模型(见图 6(a))，共剖分了 40 228 个八节点六面体单元，共 46 699 个节点。然后对模型进行单元重构，共考虑了 3 条相交的断层，共 6 个结构面，断层的厚度均为 1.0 m。重构后模型网格共有 73 247 个单元和 61 976 个节点(见图 6(b))，各种类型的单元数目和所占比例见表 4。



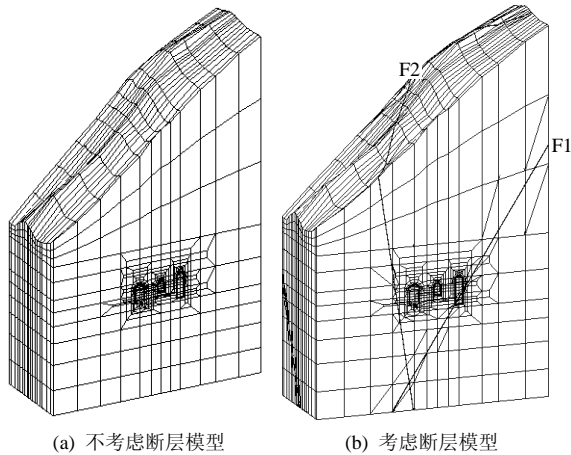
(a) 不考虑断层模型 (b) 考虑断层模型

图 6 不考虑和考虑断层结构的重力坝模型

Fig.6 Fault-free and fault-contained models of gravity dam

4.3 大型地下洞室群的断层建模

对一水电站地下洞室群的地质断层进行建模。首先建立不考虑断层的模型(见图 7(a)), 共剖分了 15 484 个八节点六面体单元, 共 16 746 个节点。然后对模型进行单元重构, 建立考虑地质断层的模型, 共考虑了 2 条断层, 分别为 F1 和 F2, 共 4 个结构面, 其断层厚度分别为 1.0 和 0.5 m。重构后模型网格共有 38 499 个单元和 26 902 个节点(见图 7(b)), 各种类型的单元数目和所占比例见表 4。



(a) 不考虑断层模型 (b) 考虑断层模型

图 7 不考虑和考虑断层结构的地下洞室群模型

Fig.7 Fault-free and fault-contained models of underground cavern group

5 含地质断层的重构模型计算分析

为表明上述复杂地质断层建模方法的可靠性, 需保证考虑断层结构的重构模型能用于数值计算。因此, 以地下洞室群重构模型为例, 将其导入大型岩土工程软件 FLAC^{3D} 进行计算和对比分析。

5.1 重构模型导入 FLAC^{3D}

大型岩土工程软件 FLAC^{3D}, 为结构计算提供了丰富的单元类型库^[8, 9], 包括八节点六面体、六节点三棱柱、五节点四棱锥和四节点四面体等单元种类(见图 8)。

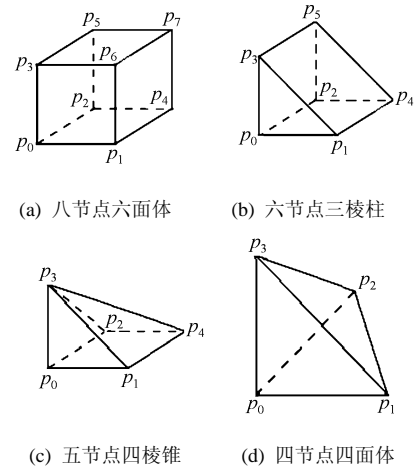


图 8 FLAC^{3D} 的单元类型

Fig.8 Element type of FLAC^{3D}

可以看出, FLAC^{3D} 提供的计算单元类型包括了单元重构过程中使用的所有单元形态, 与图 2 所示的单元形态相比, 只是编号规则不同。因此, 通过编制接口程序, 可以实现考虑了断层结构的重构模型对 FLAC^{3D} 程序的无缝导入(见表 5)。

表 5 重构模型节点编号在 FLAC^{3D} 中的编号规则

Table 5 Rule of converting reconstructed model into FLAC^{3D}

单元类型	FLAC ^{3D} 中的格式								
	类型名	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
八节点六面体	B8	1	2	3	5	4	7	6	8
六节点三棱柱	W6	1	3	5	2	7	6	-	-
五节点四棱锥	P5	1	2	3	5	4	-	-	-
四节点四面体	T4	1	2	3	5	-	-	-	-

5.2 地下洞室群的开挖计算和对比分析

从图 9 可以看出, 三大洞室被 F1 和 F2 地质断层切割明显, 2 条断层在 1[#]~2[#]机组段的主厂房下游的洞周相交汇, 围岩被结构面切割尤为严重。

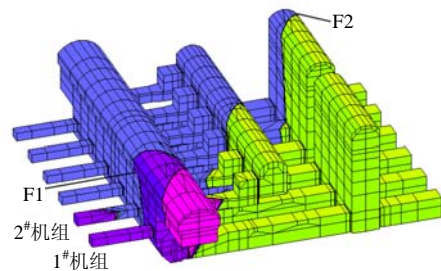


图 9 洞室群开挖单元被断层结构切割的形态

Fig.9 Form of excavation elements of cavern group cutted by geologic faults

将图 7 中不考虑断层模型和含有断层模型分别导入 FLAC^{3D} 进行洞室开挖计算, 采用莫尔 - 库仑屈服准则。其中, 对重构模型用实体单元直接模拟其中的断层结构。围岩和断层单元的岩石物理力学参数取值见表 6^[10]。计算的工况为毛洞一次开挖, 将是否考虑了断层结构的计算成果予以对比分析。由于 2 条断层的厚度分别为 1.0 和 0.5 m, 结构面间距较大, 因此在计算过程中, 相邻结构面的节点并未发生相互嵌入的情形, 且由于计算工况为一次开挖, 围岩和断层单元没有受到重复的加卸荷作用, 受到开挖扰动影响较小。因此, 在考虑断层结构的开挖计算中, 没有因围岩和断层单元的参数取值相差较大而造成计算不收敛。

表 6 岩体物理力学参数取值^[10]

Table 6 Physico-mechanical parameters of rock mass^[10]

材料	变形模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	抗拉强度 /MPa	容重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
围岩	10.0	0.26	1.5	45	1.67	27
断层	0.1	0.40	0.6	23	0.00	23

从洞周位移分布规律看(见图 10), 不考虑断层时, 主厂房的顶拱位移在 4 cm 左右, 上游边墙位移为 11 cm 左右, 母线洞所在岩柱的变形在 2 cm 左右。整体来看, 无断层切割洞周围岩的变形连续, 变化梯度也较为均匀。考虑断层结构后, 顶拱部位被断层切割, 拱顶一侧位移在 2 cm 左右, 下游拱座一侧的位移在 4 cm 左右; 上游边墙被断层切割后, 在断层下盘的边墙变形增幅明显, 达到 13 cm; 母线洞所在的岩柱被断层切割, 变形增大, 达到 3~5 cm。可以看出, 考虑断层切割后, 围岩的变形呈现出不连续性, 在上游边墙和母线洞所在岩柱的断层单元都发生了一定的张开位移, 造成围岩局部的变形增大。

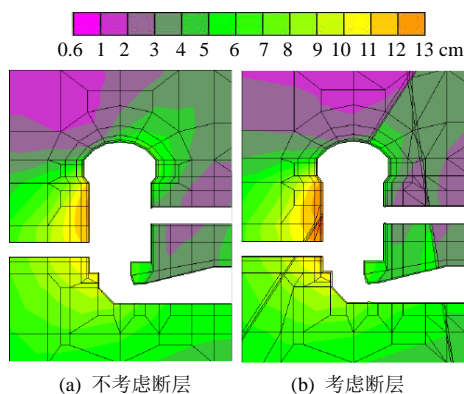


图 10 洞周位移分布规律

Fig.10 Laws of displacement distribution of surrounding rock

规定应力压为正, 拉为负。从洞周第一主应力分布规律(见图 11)看, 在断层穿过的上游边墙和母线洞岩柱部位, 第一主应力都出现了显著的降低。其中, 上游边墙第一主应力为 2 MPa, 较不考虑地质断层的情形减小 4 MPa 左右; 在母线洞岩柱部位, 沿断层穿过的部位应力出现松弛, 降幅在 5 MPa 左右。

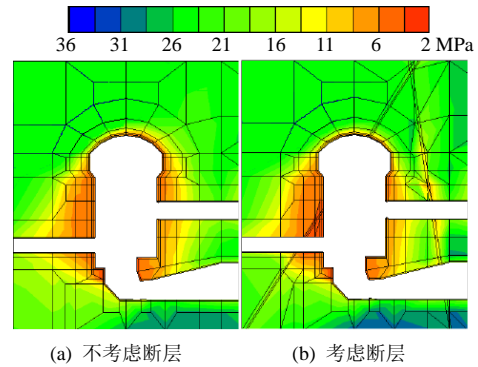


图 11 洞周第一主应力分布规律

Fig.11 Distribution laws of the first principal stress of surrounding rock

图 12 给出了洞周第三主应力分布规律。考虑断层切割后, 第三主应力(见图 12(b))在顶拱部位呈现出不连续性, 断层切割部位的围岩上下盘应力差值在 6 MPa 左右, 上游边墙和母线洞岩柱部位的应力也出现松弛, 但由于不考虑断层的第三主应力已较小, 故这些部位被断层切割后的应力降幅不甚明显。

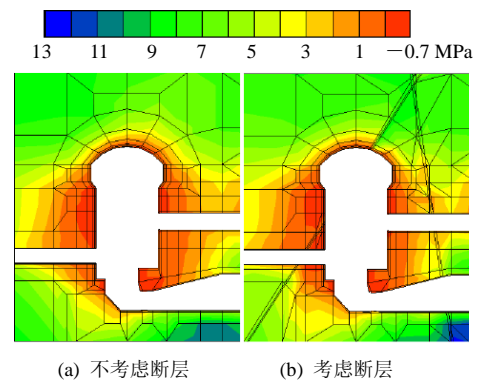


图 12 洞周第三主应力分布规律

Fig.12 The third principal stress of surrounding rock

可以看出, 考虑断层后, 洞周围岩变形呈现出不连续性, 在主厂房上游和母线洞岩柱部位的断层单元出现张开趋势, 使得断层切割的围岩变形增大。洞周应力受断层结构的影响显著, 被断层穿过的部位应力出现松弛, 第一主应力降幅明显。计算所反映的规律与一般规律一致, 表明含有断层的重构模型可以用于数值计算, 且能够有效反映地质断层

对围岩稳定的影响, 从而证明了重构模型的可靠性。

6 结 论

本文主要解决了岩土工程数值分析中复杂地质断层的建模问题, 通过对断层建模方法的有效性和可靠性的验证, 可以得到以下结论:

(1) 首先对分析对象进行独立离散, 再考虑断层结构, 仅对断层穿过的网格进行单元重构, 可以快速将地质断层嵌入已建模型, 从而方便实现了考虑复杂地质断层的岩土工程数值分析建模。

(2) 通过对岩土工程中断层建模的实例分析, 表明本文建模方法可以在已建模型的基础上, 快速离散出考虑了多组地质断层的模型, 从而可证明其应用于实际工程的有效性。

(3) 以大型地下洞室群为例, 将考虑了断层结构的重构模型导入大型岩土工程软件 FLAC^{3D}, 用实体单元模拟断层结构进行洞室开挖计算。通过与不考虑断层的计算结果对比可以发现, 考虑断层结构时, 位移和应力规律都有显著不同, 其中位移和应力分布都呈现出不连续性, 被断层切割部位的围岩变形增大, 应力出现松弛, 可以明显看出断层结构对围岩的影响。这表明根据本文建模方法离散出的含有地质断层的模型, 能够用于结构计算, 且能有效反映地质断层对结构稳定的影响, 从而可证明其应用于实际工程的可靠性。

(4) 由于只对断层穿过的网格进行单元重构, 重构模型中仍以八节点六面体单元为多数(见表 4), 四节点四面体的常应变单元数量较少。因此, 运用重构后的模型进行计算, 仍可保证计算结果具有较高的精度。

本文为研究适于地质断层的数值分析方法奠定了建模基础, 下一步将结合已有的研究成果^[11], 进一步研究地质断层滑动系数、层面应力等指标的计算方法, 从而更全面地反映地质断层的影响。

参考文献(References):

[1] 赵海军, 马凤山, 李国庆, 等. 断层上下盘开挖引起岩移的断层效应[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1 372 - 1 375.(ZHAO Haijun, MA Fengshan, LI Guoqing, et al. Fault effect due to underground excavation in hangingwalls and footwalls of faults[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1 372 - 1 375.(in Chinese))

[2] 张志强, 李 宁, 陈方方, 等. 不同分布距离的软弱夹层对洞室稳定性的影响研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1 363 - 1 368.(ZHANG

Zhiqiang, LI Ning, CHEN Fangfang, et al. A study of influence of weak interlayers distributed at different intervals on opening stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1 363 - 1 368.(in Chinese))

[3] 朱维申, 阮彦晟, 李晓静, 等. 断层附近应力分布的异常和对隧洞稳定性的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(4): 685 - 689.(ZHU Weishen, RUAN Yansheng, LI Xiaojing, et al. Abnormal stress distribution adjacent to a fault and its influence on stability of tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(4): 685 - 689.(in Chinese))

[4] 王祥秋, 杨林德, 高文华. 含软弱夹层层状围岩地下洞室平面非线性有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 729 - 732.(WANG Xiangqiu, YANG Linde, GAO Wenhua. 2D nonlinear FE analysis for underground openings located in the layered rock mass with softening joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 729 - 732.(in Chinese))

[5] 苏 超. 巨型地下洞室群有限元计算的数字化建模[J]. 水力发电, 2005, 31(9): 25 - 26.(SU Chao. Digital modeling of finite element method for huge underground cavern group[J]. Water Power, 2005, 31(9): 25 - 26.(in Chinese))

[6] 郑永兰, 肖 明. 复杂地下洞室群三维有限元网格剖分在 CAD 中的实现[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增 2): 4 988 - 4 992.(ZHENG Yonglan, XIAO Ming. Realization of 3D FE mesh subdivision for complicated underground cavity group in CAD[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp.2): 4 988 - 4 992.(in Chinese))

[7] 陈俊涛, 肖 明, 郑永兰. 用 OpenGL 开发地下结构工程三维有限元图形系统[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 1 015 - 1 020.(CHEN Juntao, XIAO Ming, ZHENG Yonglan. Development of 3D graphics system of finite elements for underground engineering using OpenGL[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 1 015 - 1 020.(in Chinese))

[8] 彭文斌. FLAC^{3D} 实用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.(PENG Wenbin. Practical guidebook for FLAC^{3D}[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.(in Chinese))

[9] 廖秋林, 曾钱帮, 刘 彤, 等. 基于 ANSYS 平台复杂地质体 FLAC^{3D} 模型的自动生成[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 1 010 - 1 013.(LIAO Qiulin, ZENG Qianbang, LIU Tong, et al. Automatic model generation of complex geologic body with FLAC^{3D} based on ANSYS platform[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 1 010 - 1 013.(in Chinese))

[10] 段乐斋. 水利水电工程地下建筑物设计手册[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1993.(DUAN Lezhai. Guidebook for the design of underground structures in hydraulic engineering[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1993.(in Chinese))

[11] 肖 明, 陈俊涛. 大型地下洞室复杂地质断层数值模拟分析方法[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 880 - 884.(XIAO Ming, CHEN Juntao. Numerical simulation and analysis method of complex geologic faults in large underground chamber[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 880 - 884.(in Chinese))