

强度折减 DDA 方法及其在稳定分析中的应用

刘 君, 黄盛铨, 孔宪京

(大连理工大学 土木水利学院工程抗震研究所, 大连 116024)

摘 要: 在自行研制的非连续变形分析 (discontinuous deformation analysis, DDA) 程序中实现了自动强度折减法以模拟边坡的稳定性和安全系数。通过锦屏高边坡和某重力坝深层滑动的计算分析以及与刚体极限平衡法和有限元方法的比较研究可以看出, 强度折减 DDA 法可以较高精度求出岩石高边坡的安全系数, 但求得的重力坝深层抗滑稳定安全系数要低于刚体极限平衡法的结果。基于强度折减技术的 DDA 与 FEM 的耦合方法, 可以较准确地求出重力坝深层抗滑稳定安全系数。

关 键 词: 非连续变形分析 (DDA); 强度折减; 有限元; 稳定性

中图分类号: TV642.3

文献标识码: A

DDA with shear strength reduction technique and its application to stability analysis

LIU Jun, HUANG Sheng-quan, KONG Xian-jing

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: An extension version of discontinuous deformation analysis (DDA) is presented. In order to calculate the safety factor of slope, the shear strength reduction technique is accomplished in the self-developed DDA program. Two examples, one is a high rock slope and the other one is a gravity dam, are simulated using this extended DDA program. From the results, we can find that the stability safety factor of rock slope can be calculated by DDA with shear strength reduction. But the safety factor of gravity dam from DDA is lower than that from limited equilibrium method and FEM. DDA coupled with FEM can give a reasonable factor of safety. The results show that DDA or DDA coupled FEM with shear strength reduction technique can be used to calculate the factor of safety and simulate the failure process of slopes.

Key words: discontinuous deformation analysis; finite elements; strength reduction; stability

1 引 言

对于边坡、坝肩和建筑物地基的稳定性分析, 是以极限分析理论为基础的, 通过寻找最危险滑动面和滑向, 计算极限状态的阻滑力和实际受载下的滑动力的比值, 确定其稳定性的安全度 (抗滑稳定安全系数)。此类稳定分析方法是把滑动体视为刚体, 采用刚体极限平衡的分析方法, 其只考虑了力/力矩的平衡, 而没有考虑变形的影响^[1]。1975年 Zienkiewicz 采用弹塑性有限元法, 通过逐步降低土的强度来计算边坡的安全系数, 首次在边坡稳定分析中应用了强度折减有限元法^[2]。

对于节理岩体系统, 一般将岩体系统等效为均

匀连续体通过有限元法计算其安全系数, 而忽略了节理和裂隙等不连续面对岩体稳定的直接影响。石根华博士提出的非连续变形分析法 DDA^[3] (discontinuous deformation analysis), 主要应用于分析裂隙岩体的安全稳定性。该方法将每一个完整的块体作为一个单元, 将节理、裂隙、断层等构造面和不同材料分区的界面等作为块体的边界, 块体与块体之间用法向弹簧及剪切簧连接, 从而将被不连续面所切割的块体系统连成一个整体进行计算。DDA 方法具有完备的块体运动学理论及其数值实现以及严格的平衡假定、正确的能量耗散过程和较高的计算效率。DDA 不仅允许块体自身有位移和变形, 而且

允许块体间有滑动、转动、张开等运动形式, 所以 DDA 方法能够模拟多块体系统的大位移和大变形问题。DDA 方法的最大优点就是它具有完备的块体运动学理论。块体之间的接触搜索和接触的开—合迭代称为块体运动学。块体之间的接触搜索是确定可能的接触对以及接触形式。由于接触条件的未知和接触位置的不断变化, 系统的平衡方程要采用迭代求解。迭代过程的收敛要使所有的接触对满足无拉伸和无嵌入条件。加设和移去罚弹簧的开—合迭代过程就是使所有接触对最终满足无拉伸和无嵌入的接触约束条件。在开—合迭代过程中, 滑动接触满足库仑摩擦定律。开—合迭代收敛后, 块体系统的接触状态、接触位置和接触力可以较准确地得到。

在 DDA 方法中, 块体的位移和变形是通过块体形心的一阶位移函数来描述的, 因此采用这样的一阶位移场只能得到块体内部的常应力并且限制了块体复杂变形的能力。另一方面, 由于 DDA 和 FEM 都采用隐式算法求解, 因此通过对 DDA 中的块体进行有限元网格剖分, 用有限元方法来描述块体内部的位移场和应力场, 而块体的运动和块体之间的接触仍采用 DDA 方法来模拟, 从而可以结合 FEM 和 DDA 方法两者的优点。由此可见, DDA 与 FEM 的耦合既能够很好地模拟块体的复杂变形、提高了块体内应力场的精度, 又可以模拟块体之间的不连续变形问题。DDA 与 FEM 耦合法是将 DDA 中的块体通过有限元网格划分, 用有限元描述块体内部的位移场和应力场, 而块体的运动和块体之间的接触仍采用 DDA 方法来模拟。耦合法既能很好地模拟块体的复杂变形、提高了块体内应力场的精度, 又可以模拟块体之间的不连续变形问题, 从而结合了 DDA 与 FEM 两者的优点。

本文在自行研制的非连续变形分析程序的基础上, 通过自动折减节理面的抗剪强度来计算边坡和重力坝的抗滑稳定安全系数。通过锦屏高岩石边坡和某重力坝的深层抗滑稳定对强度折减 DDA 方法进行了考证。由计算可以看出, 强度折减 DDA 法可以较高精度求出岩石高边坡的安全系数, 但求得的重力坝深层抗滑稳定安全系数要低于刚体极限平衡法和有限元法的结果。通过 DDA 与 FEM 的耦合, 可以较准确地求出重力坝深层抗滑稳定安全系数。这表明, 强度折减 DDA 方法可以用于岩石边坡的稳定分析和重力坝抗滑稳定分析, 并可以直观描述出边坡/重力坝的破坏过程, 是一种有发展潜力的数值方法。

2 DDA 与 FEM 耦合法^[4, 5]

DDA 与 FEM 耦合有外部耦合和内部耦合两种方法。外部耦合是对求解域的一部分采用 DDA 方法分析, 另一部分采用 FEM 或 BEM 分析, 在交界处满足一定的位移协调条件, 通过迭代求得问题的解答。内部耦合是将 DDA 中的块体通过有限元网格划分, 用有限元描述块体内部的位移场和应力场, 而块体的运动和块体之间的接触仍采用 DDA 方法来模拟, 它采用统一的平衡方程求解^[6]。本文所指的耦合法为内部耦合法(以下简称耦合法)。耦合法既能很好地模拟块体的复杂变形、提高了块体内应力场的精度, 又可以模拟块体之间的不连续变形问题, 从而结合了 DDA 与 FEM 两者的优点。如图 1 所示, 系统由接触节理面分成多个块体块体内部由 4 节点等参元网格划分。节理位置及属性(图 1 中的实线)可由用户指定或由前处理程序按照现场观测资料的统计数据自动生成, 然后采用阵面推进法自动生成四边形网格(图 1 中的虚线)。假设块体系统由 n 个块体组成, 通过总势能最小化可以得到与有限元法基本相同的总体平衡方程 $[K]\{D\}=\{F\}$ 。计算流程如图 2 所示。有关 DDA 与 FEM 耦合算法的详细论述可参考文献[6]。

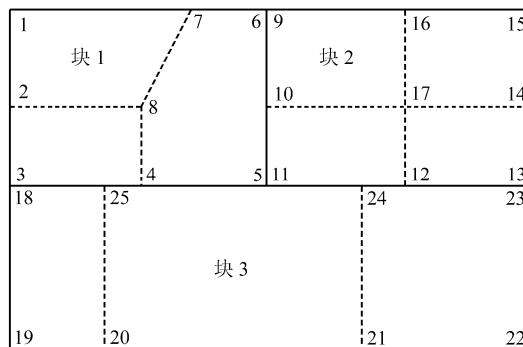


图 1 用有限元网格剖分的块体系统

Fig.1 Block system with finite element mesh

3 锦屏高边坡稳定分析

锦屏一级水电站位于雅砻江中游, 水库设计正常蓄水位 1880 m, 总库容 77.6 亿 m^3 。坝区为典型的深切“V”型峡谷, 相对高差为 1 500~1 700 m。左岸主要由中上三叠统杂谷脑组(T_{2-3z})变质岩组成。其中 1 850 高程以下主要为大理岩、角砾状大理岩, 1850~2 300 m 高程范围主要为变质砂岩和粉状质板岩。岩层总体产状为: $0^\circ\sim 30^\circ$, $NW\angle 25^\circ\sim 45^\circ$, 走向与河流基本平行, 为典型的反向坡。坝区以

NE~NNE向的断层最为发育,断层规模大。河谷卸荷深度大,边坡岩体由表至里可划分为强卸荷、弱

卸荷、深卸荷和新鲜4个区^[7]。

选择左岸典型勘探剖面VI-VI(坝轴距349.5 m)

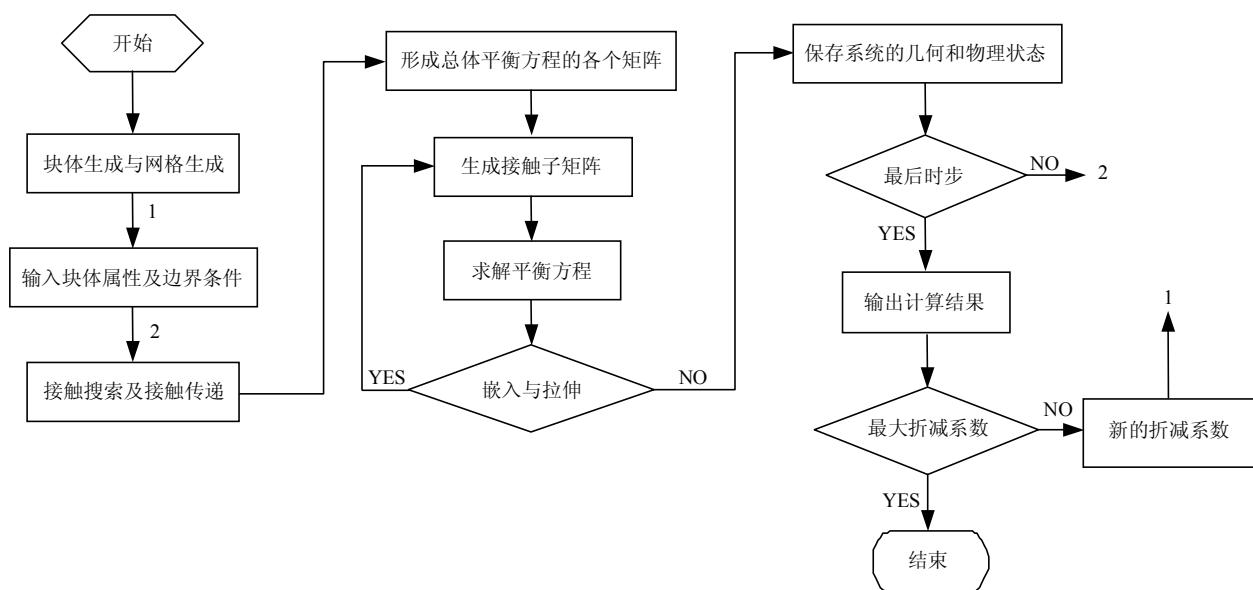


图2 DDA与FEM计算流程图

Fig.2 Schematic flow chart of DDA+FEM

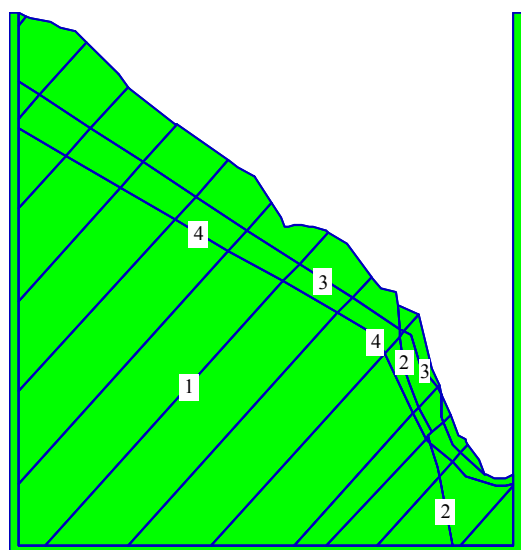


图3 VI-VI地质剖面 and 计算模型

Fig.3 VI-VI geology section and computational model

进行边坡稳定性计算。计算范围为:河床中心线往岸坡以内 750.0 m,垂直向高程为 1 490~2 320 之间(图 3) 节理面标号如图 1 所示,各节理面的参数取值见表 1。岩体的天然重度取为 27.0 kN/m^3 。

采用 DDA 方法分析,计算时间步长取为 0.01s,共计算了 5 000 步,其中前 4 000 步采用静力方式计算以模拟重力场,后面的 1 000 步采用动力方式计算。折减系数增量为 0.02。如果边坡在某个折减

表 1 左岸陡坡节理面计算参数		
Table 1 Parameters of joints for DDA		
节理编号	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
1	200	35.0
2	20	16.7
3	345	30.8
4	575	37.4

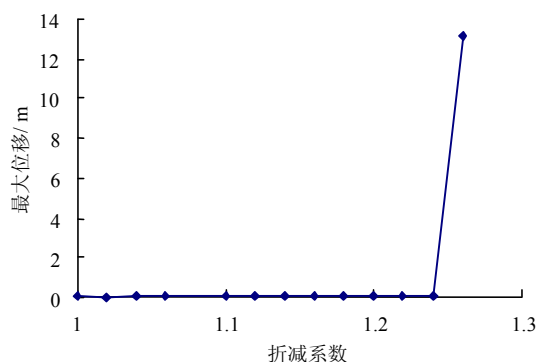


图4 折减系数与最大位移

Fig.4 Reduction coefficient and displacement.

系数下发生失稳破坏,则边坡的某些块体将发生加速运动,出现较大的位移。图 4 给出了边坡最大位移与折减系数之间的关系。从图中可以看出,该边坡的稳定安全系数为 1.24,比文献[7]采用极限平衡法得到的安全系数 1.223 稍高一点。在折减系数为

1.26 时, 块体位移与时间的关系曲线如图 5 所示, 计算终止时边坡的破坏状态如图 6 所示。

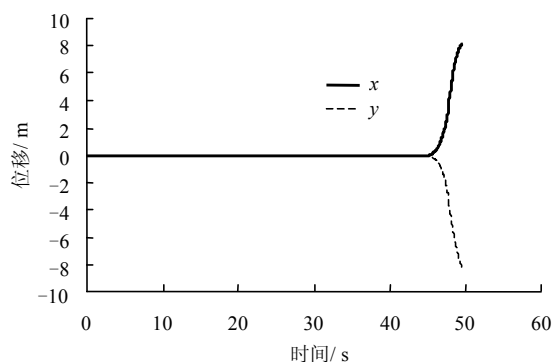


图 5 位移与时间的关系 (折减系数 1.26)

Fig.5 The displacements and time



图 6 边坡失稳破坏形态

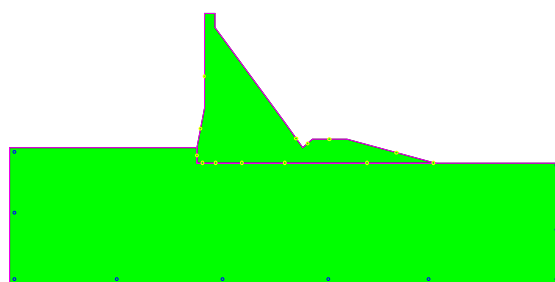
Fig.6 The mode of slope failure

4 重力坝深层抗滑稳定分析

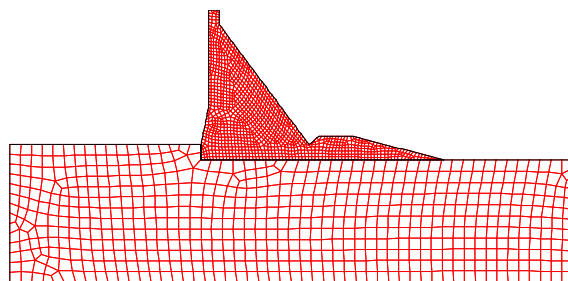
某重力坝的计算剖面如图 7 所示。考虑坝基下 -14 m 的节理面与下游冲坑构成的单滑面滑动模式。计算荷载为: 上、下游校核洪水位, 滑动面上的扬压力。滑动面的计算参数为: $c=0.818$ MPa, $\varphi=44.885^\circ$ 。坝体的混凝土弹性模量 $E=25.5$ GPa, 泊松比 $\mu=0.167$, 重度 $\rho=24$ kN/m³。地基岩体的弹性模量 $E=15.0$ GPa, 泊松比 $\mu=0.23$, 重度 $\rho=27$ kN/m³。采用 DDA 方法、DDA 与 FEM 耦合方法, 并与刚体极限平衡法的结果进行比较。

计算时间步长取为 0.01 s, 共计算了 500 步。其中前 50 步用以模拟重力场, 然后用 100 步逐步

施加水压力和扬压力。前 200 步采用静力方式分析模拟加荷过程, 最后的 300 步采用动力方式分析。强度折减系数增量为 0.1。



(a) DDA



(b) DDA+FEM

图 7 计算模型

Fig.7 Computational model

图 8 为滑动面位移与折减系数之间的关系。可以看出, 采用 DDA 方法得到的安全系数为 2.9, 比刚体极限平衡法的安全系数 4.2 低 31 %, 这与文献[8]的结论基本一致。导致安全系数比较低的原因是由于 DDA 方法的一阶位移函数和接触点过少造成的。而 DDA 与 FEM 耦合得到的安全系数为 4.0, 只比刚体极限平衡法的结果低 4.8 %。由此可见, 对于重力坝的深层抗滑稳定分析宜采用 DDA 与 FEM 的耦合方法。在折减系数为 4.2 时, 滑动面上节点位移与时间的关系曲线如图 9 所示。由图 9 可以看出, 2 s 后节点位移与时间呈抛物线关系, 说明重力坝发生了深层滑动。

5 结 论

非连续变形分析方法可以求解多块体系统的大位移和大变形问题。在每一时间步, 系统满足平衡条件, 所有接触对满足无拉伸、无嵌入约束条件和库仑摩擦定律。为提高 DDA 模拟块体复杂变形的能力和块体内部应力场的精度, 可以采用网格划

分 DDA 中的块体,用有限元描述块体内部的位移场和应力场,从而可以改善 DDA 方法中由于一阶位移近似所造成的块体内部的常应力以及对块体变形能力的限制。DDA 与 FEM 耦合法结合了两者的优点,充分发挥了各自的优势。

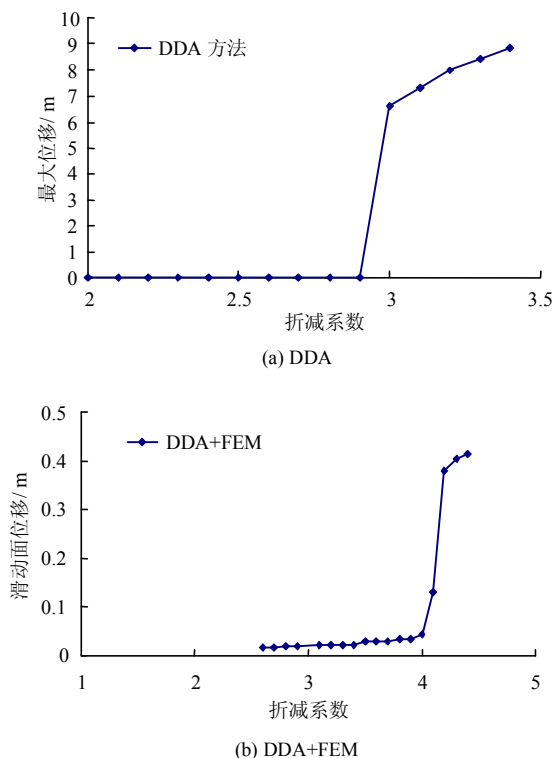


图 8 折减系数与最大位移
Fig.8 Reduction coefficient and displacement

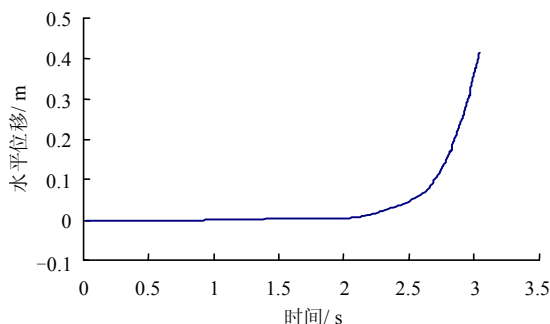


图 9 滑动面位移与时间关系(折减系数为 4.2)
Fig.9 The displacements and time.

本文在自行研制的非连续变形分析程序的基础上,通过自动折减节理面的抗剪强度来计算边坡和重力坝的抗滑稳定安全系数。通过锦屏高岩石边坡和某重力坝的深层抗滑稳定对强度折减 DDA 方法进行了考证。由计算结果可以看出,强度折减 DDA 法可以较高精度求出岩石高边坡的安全系数,但求得的重力坝深层抗滑稳定安全系数要低于刚

体极限平衡法和有限元法的结果。基于强度折减技术的 DDA 与 FEM 耦合算法可以较准确地求出重力坝深层抗滑稳定安全系数。这表明,结合了强度折减技术的非连续变形分析与有限元耦合的方法可以用于岩石高边坡的稳定分析和重力坝抗滑稳定分析,并可以直观描述出边坡/重力坝的破坏过程,是一种有发展潜力的边坡稳定分析数值方法。

参考文献

- [1] 卓家寿, 章青. 不连续介质力学问题的界面元法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. *Geotechnique*, 1975, 25(4): 671—689.
- [3] SHI G H and GOODMAN R E. Generalization of two-dimensional discontinuous deformation analysis for forward modeling[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1989, 13: 359—380.
- [4] 刘君, 陈健云, 孔宪京, 等. 基于 DDA 与 FEM 耦合方法的碾压混凝土坝抗震安全性分析[J]. *大连理工大学学报*, 2003, 43(6): 793—798.
LIU Jun, CHEN Jian-yun, KONG Xian-jing, et al. Seismic stability analysis of rolled compacted concrete dam based on approach of DDA coupled with FEM[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2003, 43(6): 793—798.
- [5] 刘君, 孔宪京. SHYU KUOKAI. DDA 与 FEM 耦合法在分缝重力坝非线性分析中的应用[J]. *计算力学学报*, 2004, 21(5): 585—591.
LIU Jun, KONG Xian-jing, SHYU KUOKAI. DDA coupled FEM and its application to concrete gravity dams with joints[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2001, 21(5): 585—591.
- [6] SHYU K. Nodal based discontinuous deformation analysis[Ph.D. Dissertation]. [s. l.]. Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, 1993.
- [7] 荣冠, 周创兵, 江进辉, 等. 锦屏一级水电站左岸边坡渗流计算及稳定性分析[J]. *长江科学院院报*, 2005, 22(6): 49—53.
RONG Guan, ZHOU Chuang-bing, JIANG Jin-hui, et al. Seepage calculation and stability analysis of left slope of Jinping I Hydropower Station[J]. *Chinese Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2005, 22(6): 49—53.
- [8] 张国新, 金峰. 重力坝抗滑稳定分析中 DDA 与有限元方法的比较[J]. *水力发电学报*, 2004, 23(1): 10—14.