

文章编号:1672-058X(2012)09-0076-06

基于 ABAQUS 的初始地应力平衡方法研究*

代汝林^{1,2}, 李忠芳^{1,2}, 王 姣^{1,2}

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘 要:初始地应力是岩土工程数值模拟时必需考虑的重要因素,如何在 ABAQUS 有限元软件中对初始地应力进行平衡是确保数值计算结果正确性的关键。针对 ABAQUS 提供的 4 种不同的初始地应力平衡的方法,分别举例验证各种方法进行初始地应力平衡的适用性及其优缺点;分析结果表明:对于简单岩土体,ABAQUS 提供的自动平衡法、关键字定义初始地应力法、ODB 导入法、初始地应力提取法都可以达到平衡的效果,而对于复杂地质条件的岩土体,只有采用自动平衡法和初始地应力提取法才能获得较好的平衡效果;研究结论可为复杂岩土体数值计算提供了参考。

关键词: ABAQUS; 初始地应力; 平衡

中图分类号: TU521

文献标志码: A

地应力是存在于地壳中未受工程扰动的天然应力,也称岩体初始应力、绝对应力或原岩应力。广义上也指地球体内的应力。它包括由地热、重力、地球自转速度变化及其他因素产生的应力。地质力学认为地壳内的应力活动是使地壳克服阻力不断运动发展的原因。地壳各处发生的一切形变如褶皱、断裂等都是地应力作用的结果。初始地应力场是边坡,地下工程或地基岩体稳定性的重要影响因素之一,也是工程设计必不可少的初始条件^[1-3]。

随着我国大型工程项目的发展建设,工程条件日益复杂化。在实测地应力的基础上如何选择有效的分析计算方法,并向设计单位提供合理可靠的初始地应力场就成为一个亟待解决的问题。现阶段虽然地应力场的测量技术取得了较大的发展,但在实际工程中往往由于测试条件、工程投资等方面的限制,只能对为数不多的点进行量测,难以获得对地应力场整体分布的完整认识。所以现在越来越多的岩土工程采用大型商业软件如 ANSYS, ABAQUS, PLAXIS 等对实际工程进行数值模拟,操作方便,投资低。在岩土工程数值计算中,初始地应力场必须予以平衡。这主要是基于以下 3 个方面的原因:

- (1) 岩土工程的特点决定了分析手段多为增量分析,在增量分析中,分析域内的应力总是由应力增量加上初始应力而得,即初始地应力从一开始就影响了分析过程;
- (2) 岩土材料的刚度和应力状态有关;
- (3) 对于涉及开挖、填充的动态岩土工程问题,初始应力场是正确模拟其施工过程的先决条件^[4]。

针对 ABAQUS 提供的 4 种不同的初始地应力平衡的方法,分别举例验证各种方法进行初始地应力平衡的适用性及其优缺点。

收稿日期:2012-01-10;修回日期:2012-01-26.

* 基金项目:重庆市科技攻关计划项目(cstc2011ggA3002).

作者简介:代汝林(1986-),男,重庆綦江人,硕士研究生,从事港口工程研究.

1 地应力平衡原理

(1) 平衡条件。由应力场形成的等效节点荷载要和外荷载相平衡,如果平衡条件得不到满足,将不能得到一个位移为零的初始状态,此时所对应的应力场也不再是所施加的初始应力场。

(2) 屈服条件。若通过直接定义高斯点上的应力状态的方式施加初始应力场,常常会出现某些高斯点的应力位于屈服面之外的情况。超出屈服面的应力虽然会在以后的计算步中通过应力转移调整过来,但这毕竟是不合理的。当大面积的高斯点上的应力超出屈服面之后,应力转移要通过大量的迭代才能完成,而且有可能出现解不收敛的情况^[5]。

地应力平衡是为了使数值模拟获得一个存在初始应力,而无初始应变的状态。当考虑自重场是产生地应力场的主要因素时,显然重力是外力,初始应力场是内力,将提取出的内力施加于数值模拟后再施加重力,是内力和外力平衡,从而获得较精确的没有受到人为因素干扰情况下的数值模型的初始状态。在实际工程数值模拟中,如果已知初始应力场和外界边界条件,根据上述原理便能得到一个平衡的初始应力场;而当仅仅具有初始应力场的数据而无法获知外界边界条件时,则应该将初始应力场单独导入模型中获得各点应力,然后通过二次导入内力场并在各点施加对应的集中荷载,即将初始应力场考虑为内力,施加在节点上的集中荷载无视为外力,也能够获取相应的平衡的初始应力场,而无初始应变。一般认为平衡前后应力的数量级不变,而土体位移的数量级达到 $E-04$ (m) 即认为初始地应力平衡结果可以接受,对后续的分析工作没什么影响(其中土体不能发生较大的变形)。

2 地应力平衡的基本方法

在 ABAQUS 有限元软件中,提供了 5 种定应力平衡方法,分别是;

- ① (AUTOBALANCE) 自动平衡法;
- ② * INITIAL CONDITIONS, TYPE = STRESS, GEOSTATIC;
- ③ * INITIAL CONDITIONS, TYPE = STRESS, FILE = file, INC = inc;
- ④ * INITIAL CONDITIONS, TYPE = STRESS, INPUT = XX. DAT;
- ⑤ * INITIAL CONDITIONS, TYPE = STRESS, GEOSTATIC, USER。

以上 5 种方法并不是每一种适用于所有的岩土模型,方法从易到难。

方法①的自动平衡法,它省去了自重应力以及生成相应初应力文件和导入的麻烦。在(GEOSTATIC)地应力中选择自动增量步就能使用自动地应力平衡功能,还能指定允许的位移变化容限。不过自动地应力平衡支持有限的几种材料如弹性,塑性等,而其起单元也有一定的要求。

方法②为关键字定义初始地应力法,这种方法需要给出不同材料区域的最高和最低点的自重应力及其相应坐标。所采用的几何模型一般较规则,表面水平,能够通过考虑水平两个方向的侧压力系数值来施加初始应力场。关键字定义初始地应力法只适合土体表面水平的土体,而初始地应力提取法由于外插的应力有一定的误差,因此对于材料是弹塑性的复杂土体,应力转移要通过大量的迭代才能完成,而其有可能出现不收敛的情况,平衡效果可能不是很理想。

方法③是 ODB 导入法,这种方法可使用之前算过的 ODB 文件结果,也就是说提前计算一个初始应力 ODB 文件,定义初始应力时直接指定 ODB 文件即可。

方法④初始应力提取法,首先将已知边界条件施加到模型上进行计算,然后将计算得到的每个单元的应力外插到形心点出,导出 $S11, S22, S33, S12, S13, S23$ 六个应力分量。这种方法是最为通用的方法,可以实用于不同材料,不规则的地形,适用性强。

方法⑤是采用用户子程序 SIGINI 来定义初始应力场,可以定义其为应力分量为坐标、单元号、积分点号等变量的函数,要达到精确平衡需已知具体边界条件,在实际中应用较少,对此不作研究^[6-10]。

3 简单岩土体初始地应力平衡分析

简单土体计算模型如图 1,基本尺寸为 $50\text{ m} \times 50\text{ m} \times 30\text{ m}$ ($X \times Y \times Z$),计算采用理想弹塑性本构模型, Mohr-coulomb 屈服准则,模型底部采用全自由度约束 ($U1 = U2 = U3 = 0$), X 方向 $U1$ 固定 ($U1 = 0$), Y 方向 $U2$ 固定 ($U2 = 0$), (其中 x 向表示岸坡方向, y 向表示垂直于纸面方向, z 向为竖直方向),有限元计算模型如图 2,岩土参数如表 1。

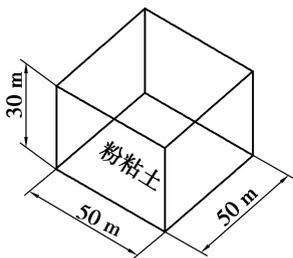


图 1 简单土体计算模型

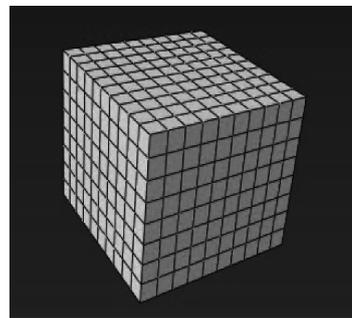


图 2 有限元计算模型

表 1 岩土材料参数

材料	重度 γ /(kN/m^3)	弹性模量 E /MPa	泊松比 ν	粘聚力 C /kPa	内摩擦角 φ /°
粉粘土	20	18	0.35	32	14

分别采用 4 种地应力平衡方法进行计算,其计算结果如表 2。

表 2 各种方法平衡地应力时的应力和位移表(代表值)

名称(状态)	应力/Pa	位移/m	结论
未采用平衡方法	-1.658e+04	-1.648e-02	
自动平衡法	-1.658e+04	-1.578e-17	达到平衡要求
关键字定义初始地应力法	-2.940e+04	-9.646e-18	达到平衡要求
ODB 导入法	-1.658e+04	-4.698e-17	达到平衡要求
初始地应力提取法	-1.660e+04	-1.752e-06	达到平衡要求

由表 2 可知,未平衡地应力时,土体有 2~4 cm 的位移,平衡之后土体的初始位移变小很多,对后续的工作基本没影响。对于土体表面水平,土体形状规则的单层土体,以上 4 种方法均可以达到平衡要求,可按自己需求选取。

4 复杂地层条件下岩土体初始地应力平衡分析

复杂岩土体计算模型如图 3,计算采用理想弹塑性本构模型, Mohr-coulomb 屈服准则,底部 $80\text{ m} \times 70\text{ m}$ ($X \times Y$),左边高 38 m ,右边 30 m ,坡度 $1:10$ (其中沿坡度方向有 5 m 厚的粉粘土层, 5 m 厚的粉砂层,其余为中分化泥岩层)。模型底部全自由度约束,左右 x 方向约束,前后 y 方向约束,(其中 x 向表示岸坡方向, y 向表示垂直于纸面方向, z 向为竖直方向。)有限元模型如图 4,岩土材料参数如下表 3。

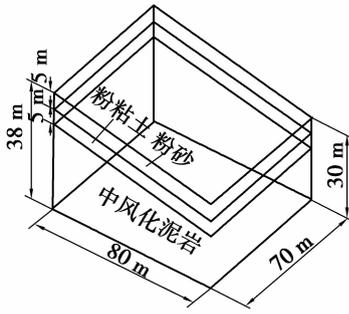


图 3 复杂岩土体模型

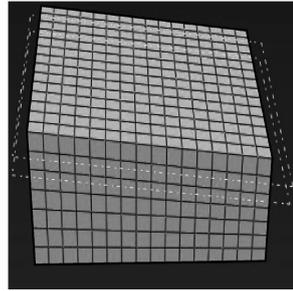


图 4 有限元计算模型

表 3 岩土材料参数

材料	重度 γ /(N/m^3)	弹性模量 E /MPa	泊松比 ν	粘聚力 C /kPa	内摩擦角 φ /°
粉粘土	20	18	0.35	32	14
粉砂	21	20	0.35	35	22
中风化泥岩	24	1.0×10^3	0.2	70	35

分别采用 4 种地应力平衡方法进行计算,各种方法平衡地应力时的应力和位移云图如图 5 - 14。

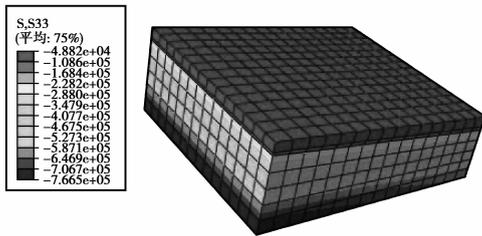


图 5 未平衡初始地应力时 Z 方向的应力云图

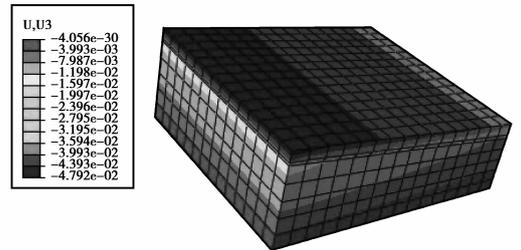


图 6 未初始地应力平衡时 Z 方向的位移云图

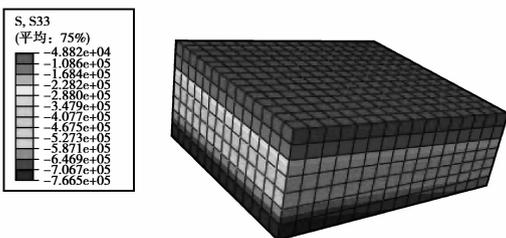


图 7 方法①平衡初始地应力时 Z 方向的应力云图

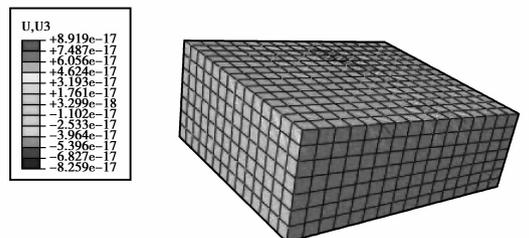


图 8 方法①初始地应力平衡时 Z 方向的位移云图

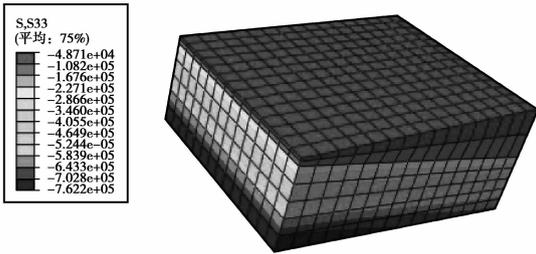


图 9 方法②平衡初始地应力时
Z 方向的应力云图

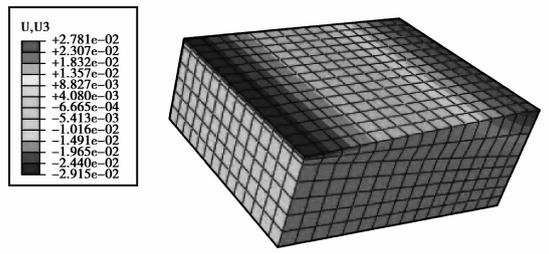


图 10 方法②初始地应力平衡时
Z 方向的位移云图

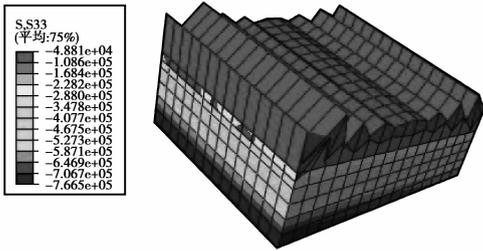


图 11 方法③平衡初始地应力时
Z 方向的应力云图

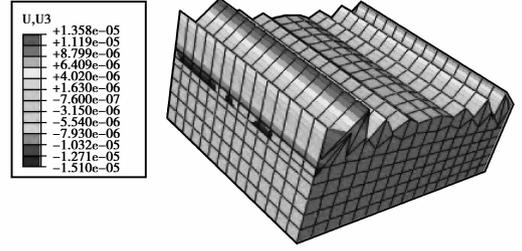


图 12 方法③初始地应力平衡时
Z 方向的位移云图

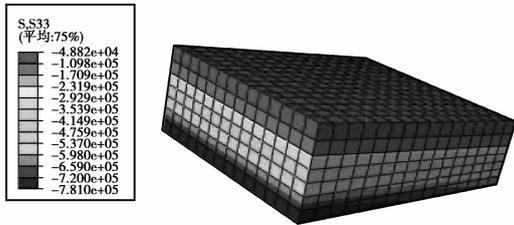


图 13 方法④平衡初始地应力时
Z 方向的应力云图

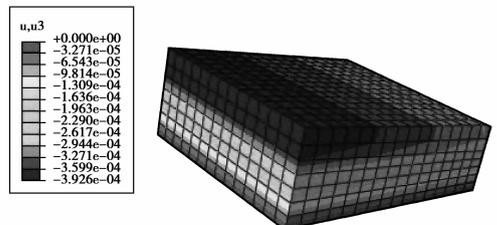


图 14 方法④初始地应力平衡时
Z 方向的位移

从图 5 - 14 可以看出,自动平衡法平衡初始地应力时很完美。用关键字定义初始地应力法平衡初始地应力时土体已经隆起,平衡没达到要求。而采用 ODB 导入法平衡初始地应力,土体两侧已经发生变形,此时的土体可能已经破坏,没有达到平衡的效果。对于初始地应力提取法平衡初始地应力时可以看出土体由厘米级变成毫米级,土体的变形及位移都可以接受,结果较为理想。因此对于形状复杂岩土体,建议采用自动平衡法或初始地应力提取法来平衡初始地应力,其中自动平衡法较为简单,初始地应力法相对较为复杂。

5 结 论

(1) 未平衡地应力时,土体有 2 ~ 4 cm 的位移,平衡之后土体的初始位移变小很多,对后续的工作基本没影响。从地应力平衡前后土体位移精度的比较验证了 ABAQUS 地应力平衡的适用性。

(2) 对于材料单一,表面水平的简单岩土体,采用自动平衡法、关键字定义初始地应力法、ODB 导入法、初始地应力提取法均较为实用,鉴于平衡精度和操作方便性综合考虑,可自行考虑和选择。

(3) 对于形状及材料复杂,表面倾斜,不规则的复杂岩土体土体,建议采用自动平衡法或初始地应力提取法平衡初始地应力。其中自动平衡法较为简单,初始地应力法相对较为复杂。

参考文献:

- [1] 王大伟,赵艳. 初始地应力场分析方法探讨[J]. 水电站设计,2007,23(4):38-41
- [2] 邵建国. 岩体初始地应力场的反演回归分析[J]. 水力水电科学进展,2000,10:81-88
- [3] 侯明勋,葛修润. 岩体初始应力场分析方法研究[J]. 岩土力学,2007,28(8):1626-1630
- [4] 刘仲秋,章青,束加庆. ABAQUS 软件在岩体力学和初始地应力反演中的应用[J]. 水力发电,2008,34(6):35-37
- [5] 曹金凤,石亦平. ABAQUS 有限元分析常见问题解答[M]. 北京:机械工业出版社,2009
- [6] 费康,张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010
- [7] 王金昌,陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006
- [8] 朱向荣,王金昌. ABAQUS 软件中部分土模型简介及其工程应用[J]. 岩土力学,2004,25(2):114-148
- [9] 庄茁,章青. ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M]. 北京:科学出版社,2005
- [10] 刘顺淑. 多级有限元法在接触问题上的应用[J]. 渝州大学学报:自然科学版,1996(2):13-16

Research on Initial Geo-stress Balance Method Based on ABAQUS

DAI Ru-lin^{1,2}, LI Zhong-fang^{1,2}, WANG Jiao^{1,2}

(1. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of Hydraulic and Water Engineering of Ministry of Education,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Initial geo-stress is an important factor in geo-technical engineering numerical simulation and how to balance initial geo-stress in ABAQUS finite element software is the key to ensuring the validity of numerical calculation results. According to four kinds of different initial geo-stress balance methods provided by ABAQUS, this paper separately uses examples to verify the practicability, advantages and disadvantages of each method to conduct initial geo-stress balance and analysis results show that, as for simple geo-technical, the auto-balance method, keywords initial geo-stress definition method, ODB import method and initial geo-stress extraction method provided by ABAQUS can achieve the balance effect, however, with regard to geo-technical of complex geo-conditions, only auto-balance method and initial geo-stress extraction method can obtain better balance effect. The research conclusion can present reference for numerical calculation of complicated geo-technical.

Key words: ABAQUS; initial geo-stress; balance