

国家重点文物保护单位——高句丽将军坟 变形破坏机理研究

何满潮^{1, 2}, 刘成禹¹, 王树仁³, 杨国兴⁴, 毛利勤², 王新波⁴

(1. 中国矿业大学(北京校区) 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学 工程技术学院, 北京 100083;
3. 北京科技大学 土木与环境工程学院 北京 100083; 4. 总装备部工程设计研究总院 北京 100028)

摘要: 在现场调研和工程地质勘察的基础上, 分析了高句丽将军坟变形破坏的特征, 应用三维有限差分程序FLAC^{3D}, 模拟研究了高句丽将军坟分别在自重、局部地基软化和地下水渗流3种工况下的应力场变化和变形破坏规律, 揭示了高句丽将军坟渐进变形破坏的机制: 以软弱地基的固结压密为先导, 继而引起坟体倾斜沉陷, 造成地基隆起、块石间位错张开, 最终导致高句丽将军坟变形破坏的过程。研究结果对将军坟进行稳定性评价和采取有效的防护对策有重要意义。

关键词: 数值分析; 变形破坏机理; 地下水渗流场

中图分类号: O 241

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)13-2220-05

STUDY ON DEFORMATION FAILURE MECHANISM OF GAOJULI'S JIANGJUNFEN OF NATIONAL KEY CULTURAL RELIC PRESERVATION ENGINEERING

HE Man-chao^{1, 2}, LIU Cheng-yu¹, WANG Shu-ren³, YANG Guo-xing⁴, MAO Li-qin², WANG Xin-bo⁴

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

4. The Engineering Design Research Institute of Equipment Department, Beijing 100028, China)

Abstract: Based on the field investigation and the engineering geological exploration, the deformation failure characteristics of Jiangjunfen was analyzed. The changes of the stress field and the rules of the deformation failure of Jiangjunfen under three cases, the gravity field and the local soft foundation and the ground water seepage field, were researched respectively using FLAC technique. The simulation results show that the deformation failure mechanism of Jiangjunfen is a gradual developing process. Firstly, the whole structure of Jiangjunfen subsided into the local soft foundation, then leading to the decline of the northern part of the structure, accompanying with the tensile fracture among stones and the heaving of the groundsill, and at last resulting in the stones sliding and the large scale structure deformation failure of Jiangjunfen. It is helpful to evaluate the stability of Jiangjunfen and to adopt preventing measures to control the evolutionary deformation of Jiangjunfen with the

收稿日期: 2004-03-26; **修回日期:** 2004-05-13

基金项目: 国家基金委创新研究群体基金项目(50221402); 教育部科学技术研究重大项目(10405)

作者简介: 何满潮(1956-), 男, 1981年毕业于长春地质学院工程地质专业, 现任中国矿业大学教授、中国地质大学特聘教授、博士生导师, 主要从事软岩、边坡、工程地质、地热工程及工程岩体三维可视化等方面的教学与研究工作。E-mail: hemanchao@263.net。

research conclusion.

Key words: numerical analysis; deformation failure mechanism; ground water seepage field

1 引言

近年来, 由于人们对文物工程的认识程度有了进一步的提高, 因而, 在文物工程保护方面, 不断加大了经济与技术投入的力度和规模, 取得了不少卓有成效的经验与成果。

由于文物工程形成的年代久远, 受自身组成材料、建筑结构、地质条件及周边环境等多方面因素影响, 常造成不同程度的变形、损伤与破坏现象, 因此, 采用新的技术手段和方法, 弄清造成这种变形、损伤与破坏的原因及其机理, 对文物工程采取及时有效的加固与防护对策, 不仅具有重要的理论意义, 而且对工程实践也具有重要的指导意义。

本文以国家重点文物保护单位——高句丽将军坟(以下简称将军坟)为工程背景, 拟对其变形破坏的机理进行研究, 以采取有效的防护对策, 为成功申报世界文化遗产服务。

2 工程概况

将军坟位于吉林省集安市城北东约 7.5 km 处, 为洞沟古墓群中现存最完整的大型石坟, 外观呈方坛阶梯型, 被誉为“东方金字塔”。据考古推断将军坟是高句丽第 20 代长寿王的陵墓, 建造于公元 5 世纪初。1961 年被首批列入国家重点文物保护单位。为能成功申报世界文化遗产, 特对其变形破坏机理进行了立项研究。

2.1 地层岩性

将军坟位于鸭绿江及其支流的 3 级阶地, 地形相对平坦, 整体上北高南低; 将军坟场区地层为第四系中更新统冲、洪积阶地堆积物(Q_2^al), 岩性呈现出明显的阶地二元结构, 上部为细粒部分, 主要为含砂、砾石粘性土及细砂, 下部为卵石。

2.2 地质构造

将军坟周围主要构造为凉水—太平—集安断裂, 该断裂所属的华夏系构造由 SN 向的水平扭转作用的构造应力形成。本区的新构造运动方式和缓、平静。

2.3 地下水

由岩土工程勘察可知, 将军坟场区地下水可分为 2 层:

(1) 上层滞水

含水层为粉质粘土, 1[#]孔静止水位埋深 3.65 m (高程 260.93 m); 6[#]孔静止水位埋深 4.00 m (高程 257.92 m), 主要补给途径为大气降水, 主要排泄途径为大气蒸发。

(2) 深部潜水

含水层为细砂和卵石, 静止水位埋深 16.70~17.00 m (高程 245.38~246.96 m), 主要为径流补给排泄。

2.4 其他

据通化市地震局资料, 该区抗震设防烈度小于 VI 度, 属不设防区。鉴于将军坟为国际闻名的历史古迹, 考虑到鸭绿江断裂中段历史上曾发生过中强地震, 震源浅, 破坏较强, 因此, 将军坟按最低烈度为 VI 度或 VII 度设防为宜。

集安市属亚温带大陆性气候。

3 变形破坏特征

将军坟外观呈方坛阶梯型, 底部为一层方形基础石, 边长约为 32 m, 厚为 0.45 m。其上 7 层阶坛加顶盖石高为 12.40 m。坟体表层由 1 100 多块花岗岩石块砌成, 内部充填漂石、卵石和砂砾石土等。方形的墓室建在阶坛顶部中央, 边长约 5.5 m, 高约 5.0 m。墓室通道开口方位 SW232°。

将军坟的变形破坏主要有以下特征: 沉陷倾斜、追踪张裂、地面隆起、块石断裂、块石剥落、块石外移以及块石倾斜等, 前 3 个特征属于整体变形破坏, 主要发生在将军坟的东北和西北侧面; 后 4 个特征则属于局部变形破坏, 在将军坟的 4 个外侧面与墓室及通道均有不同程度发生。

3.1 整体变形破坏特征

(1) 沉陷倾斜

沉陷倾斜表现为多层阶坛整体沉陷倾斜, 主要体现在将军坟的东北侧面的右侧(如图 1 所示)和西北侧面的左侧(如图 2 所示)。



图 1 将军坟东北侧面沉陷倾斜、追踪张裂图

Fig.1 Deformation failure and crack on the northeast side of Jiangjunfen due to settlement



图 2 将军坟西北侧面沉陷倾斜、追踪张裂图

Fig.2 Deformation failure and crack on the northwest side of Jiangjunfen due to settlement

(2) 追踪张裂

追踪张裂与沉陷倾斜伴生，其特征是石块间的缝隙加宽，追踪而上，局部伴随压裂现象，充填物从石块间的缝隙处外露，主要表现在将军坟东北侧面的右侧和西北侧面的左侧。

(3) 地面隆起

地面隆起由沉陷倾斜引起，表现为对应部位的护基石隆起，主要分布于将军坟东北侧面的右侧(如图 3 所示)和西北侧面的左侧地表(如图 4 所示)。



图 3 将军坟东北侧面护基石隆起图

Fig.3 Swelling deformation of bedstone on the northwest side of Jiangjunfen due to settlement

3.2 局部变形破坏特征

(1) 块石断裂

块石断裂在将军坟的 4 个外侧面和墓室及通道内普遍存在。断裂方向多为竖向，且多发生在块石



图 4 将军坟西北侧面护基石隆起图

Fig.4 Swelling deformation of bedstone on the northwest side of Jiangjunfen due to settlement

的角部；有些断裂则沿节理面发展，断裂方向受节理面控制。

(2) 块石剥落

块石剥落在将军坟的 4 个外侧面和墓室及通道内普遍存在。剥落主要表现为沿块石顶面外缘凸起的内侧向外、向下发展的崩落，且多发生在块石的边角部；有些剥落则沿节理面发展，剥落面的方向受节理面控制。

(3) 块石外移

块石外移移距从几厘米到几十厘米不等。有些块石是整体外移；有些块石只是一端外移；有些块石则是一端外移，而另一端内移；有些块石的外移同时带动了内填卵、漂石的外露；局部块石的外移在整体上表现为整个阶梯块石的外移。

(4) 块石倾斜

块石倾斜主要表现在将军坟的 4 个外侧面，倾斜角度从几度到几十度不等。倾斜主要表现为内倾。

4 数值建模过程

4.1 地质模型

根据现场调研及工程勘察结果，将军坟的地质模型如图 5 所示。

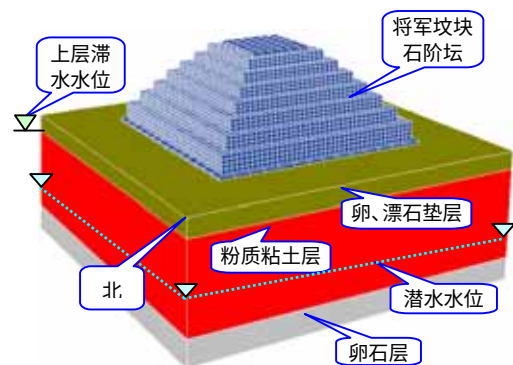


图 5 将军坟的地质模型图

Fig.5 Geological model

4.2 数值建模

本文选用三维有限差分计算程序 FLAC^{3D}(fast Lagrangian analysis of continua)进行计算分析。该程序尤其适用于模拟计算地质材料和岩土工程的力学行为。根据计算对象的形状划分相应网格。FLAC^{3D}程序包括了反映地质材料力学效应的特殊计算功能，可计算地质类材料的高度非线性、不可逆剪切破坏和压密、粘弹(蠕变)、孔隙介质的应力 - 渗流耦合、热 - 力耦合以及动力学问题等^[1]。

FLAC^{3D} 程序建立在拉格朗日算法基础上，采用显式算法来获得模型全部运动方程(包括内变量)的时间步长解，从而可以追踪材料的渐进破坏和垮落。本文主要采用各向同性弹性材料模型进行计算。构建将军坟三维计算模型，计算范围下部地基长 50 m，宽 50 m，厚度取 20 m，上部结构按前述尺寸建模。将军坟数值模型的网格剖分如图 6 所示。计算模型共划分 37 992 个单元，42 171 个节点。

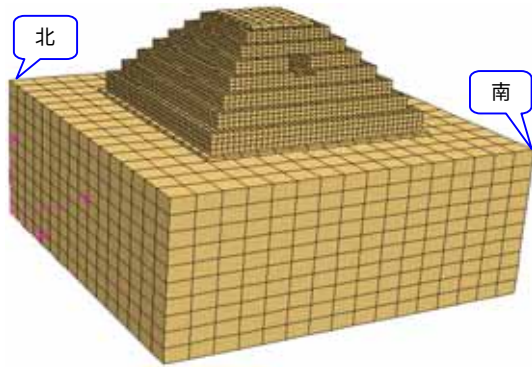


图 6 数值模型的网格剖分图
Fig.6 Grid mesh of the numerical model

4.2.1 模型分类及边界条件

为了全面、客观地揭示将军坟的变形破坏机理，再现将军坟的变形破坏过程及预测将军坟的变形破坏趋势，构建了以下 3 个类型的数值模型：

- (1) 将军坟在自重应力场下固结沉降的数值模型。
- (2) 粉质粘土层固结压密局部积水条件下的数值模型。
- (3) 底部卵石层在潜水渗流作用条件下的数值模型。

计算模型侧面限制水平移动，底面限制垂直移动，模型其余部分为自由面。在渗流分析中，依据水文钻孔观测资料，在模型底部设定北高南低的潜水面的最大水头差值为 1.6 m^[2, 3]。

4.2.2 数值模型计算参数

根据现场取样和岩土力学试验结果，并考虑到岩石的尺度效应^[4]，计算采用的岩土物理力学参数见表 1。

表 1 岩土物理力学参数表
Table1 Physico-mechanical parameters of rocks and soils

序号	岩土名称	密度 (/kg·m ⁻³)	体积模量 /MPa	剪切模量 /MPa
1	花岗岩块石	2 600	8 000	6 000
2	充填漂石、卵石、砂砾石土	2 200	3 000	2 000
3	卵、漂石垫层	2 000	60	40
4	粉质粘土层	1 900	30	20
5	卵石层	2 150	70	50
6	浸润填土层	2 080	30	20
7	浸润粘性土层	1 950	20	10

5 变形破坏机理分析

5.1 自重应力下的位移场特征

在自重应力下，地基基础在固结沉降的过程中，将军坟的位移场呈现为明显的中间大两头小的漏斗型不均匀下沉(如图 7 所示)。该不均匀沉降的结果将进一步增大粉质粘土层固结挤压密实的程度，从而阻塞了地表浅部大气降水自北向南渗流的通道，最终导致了将军坟北面表土层上部积水越来越多。

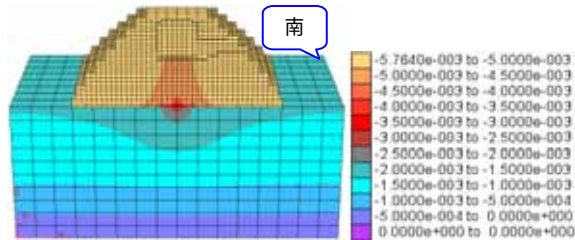


图 7 自重应力下固结沉降的位移场图(单位: m)
Fig.7 Displacement field for consolidation settlement under gravity field(unit: m)

5.2 局部积水条件下变形破坏特征

5.2.1 局部积水条件下的位移场特征

如图 8 所示，由于局部积水的浸润软化作用，在重力荷载作用下，出现了将军坟整体向北侧梯度倾斜下沉的现象，并且发生了坟体和地基沉降不协调的特征。一方面造成了将军坟向北侧倾斜下沉，另一方面由于沉降不匀造成了护基石隆起的现象。数值模拟结果与现场的变形破坏现象是一致的。

5.2.2 局部积水条件下的应力场特征

图 9 为局部积水条件下的最大主应力图。从图 9 可以看出，在坟体的北侧与基础石接触部位出现了

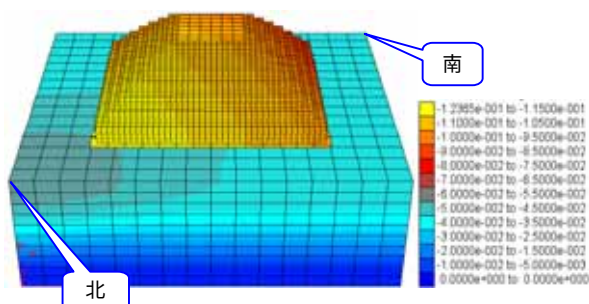


图8 局部积水条件下的竖向(z方向)位移图(单位: m)

Fig.8 Vertical(z direction) displacement field under the local soft foundation (unit: m)

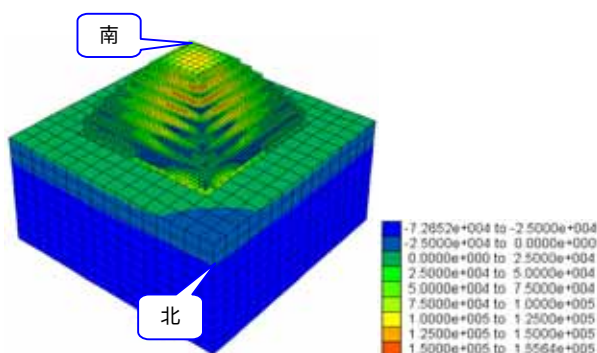


图9 局部积水条件下的最大主应力图(单位: Pa)

Fig.9 Maximum principal stress field under the local hydrops (unit: Pa)

拉应力,然后在东北与西北两侧面,拉应力随阶坛向上逐渐向斜上方扩展,直至坟体的顶部,这与现场追踪张裂趋势是一致的;另外,在坟体北侧从基础底面直至坟体顶部,出现了拉、压分区现象,最大拉破坏位置位于坟体上部阶坛,这与现场的块石间接触缝隙的大小变化情况是吻合的。

5.3 潜水渗流作用下的变形破坏特征

在基础底部卵石层潜水渗流作用下,同样出现了将军坟整体向北侧梯度沉陷倾斜的特征(如图10所示)。但下沉的量值较小,最大下沉量只占粉质粘土层固结压密局部积水条件下沉降量的1/4左右,说明造成将军坟沉陷倾斜变形破坏的主要原因是粉质粘土层固结压密局部积水条件所致,而底部卵石层潜水渗流作用对将军坟的沉陷倾斜变形影响不大。

6 结 论

(1) 将军坟变形破坏的主要机制是:地基压密、积水软化、变形拉裂、沉陷隆起。即整个坟体在自重应力下使所作用的地基土发生压密,阻挡北侧地

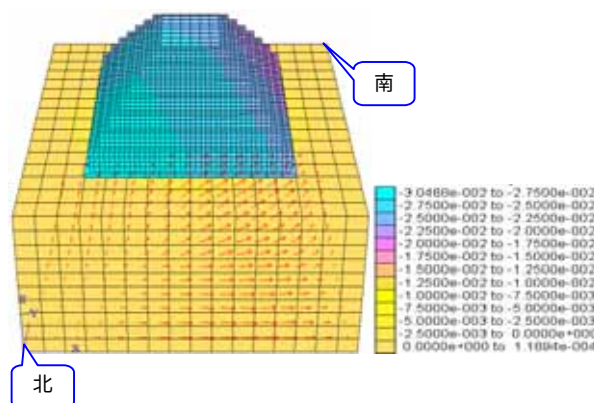


图10 潜水渗流作用下的竖向位移及流速矢量图(单位: m)

Fig.10 Vertical displacement and flow vector under the condition of groundwater seepage(unit: m)

表水向南渗流,形成积水,使北侧地基土发生软化,软化后的地基和上部坟体共同作用,使坟体块石之间发生变形拉裂,坟体倾斜沉陷引起周围地表土体发生隆起。

(2) 块石受整体变形破坏影响产生应力集中,导致块石边角部应力较大,块石断裂和剥落多发生在块石的边角部。此外,长时期的风化、大气降水的浸润腐蚀等,也是造成条块石沿节理面剥落、损伤的一个重要原因。

(3) 渗水加剧风化。如将军坟墓室内顶板(盖顶石)大面积渗水,尤其沿节理面的渗水在冬季易产生冻胀劈裂。

(4) 造成将军坟整体倾斜变形破坏的主要原因是粉质粘土层固结压密后,形成局部积水软化地基所致,基础底部卵石层潜水的渗流作用对上部坟体结构造成的沉降影响较小。

参考文献(References):

- [1] Itasca Consulting Group Inc.. FLAC^{3D} (2.0) user's manual[R]. Minnesota, USA: Itasca Consulting Group Inc., 1996.
- [2] 陈平, 张有天. 裂隙岩体渗流与应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(4): 299 - 308.(Chen Ping, Zhang Youtian. Coupling analysis of seepage/stress for jointed rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 13(4): 299 - 308.(in Chinese))
- [3] 章根德, 王羽, 石占中. 地质材料中的流-固耦合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 856 - 859.(Zhang Gende, Wang Yu, Shi Zhanzhong. Study for fluid-solid-interaction in geological media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp.): 856 - 859.(in Chinese))
- [4] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(He Manchao, Jing Haihe, Sun Xiaoming. Soft Engineering Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))