

# 大型水平顺层滑坡形成机制数值模拟方法 ——以重庆钢铁公司古滑坡为例

胡新丽, 殷坤龙

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 采用数值模拟方法, 以重庆钢铁公司古滑坡为例, 提出了大型水平顺层滑坡形成机制数值研究的思路, 定量地再现了滑坡从夷平面—斜坡形成—滑坡产生的全过程, 并利用不同模拟组合方案分析了作者首次引入的膨胀力以及水压力、地震力等等因素对滑坡形成的作用, 分析出该大型水平顺层滑坡的形成机制为牵引—平推式滑坡。

**关键词:** 大型水平顺层滑坡; 数值模拟; 滑坡形成机制; 重庆钢铁公司; 古滑坡

**中图分类号:** P642.22

**文献标识码:** A

## 0 引言

研究河流岸坡大型复杂滑坡系统的形成机制, 必然要研究河谷岸坡应力场的演变过程。本文以三峡库区内具典型代表性的重庆钢铁公司古滑坡为例, 恢复其夷平面状态下的初始地应力场, 据河谷发育史, 确定卸荷模拟方案; 考虑地震力、水压力等影响, 并在数值模拟<sup>[1]</sup>过程中首次引入膨胀力, 逐步模拟出不同河谷发育时期的应力应变场, 进而研究大型水平顺层滑坡的形成机制, 弥补了其它分析方法的不足, 即能反映斜坡内部应力应变情况, 又可为进一步研究该类型滑坡的稳定性提供可靠保证。

## 1 重庆钢铁公司古滑坡的地质条件

研究区在新构造运动中的间歇性抬升运动, 反映在层状地貌的发育。存在三级夷平面、五级河流阶地和高漫滩。重钢古滑坡对岸保存了良好的五级阶地及高漫滩。

重钢古滑坡位于重庆市大渡口区长江左岸的冲刷凹岸, 为风化侵蚀堆积地形。具典型的東西橫長圈椅狀滑坡地形, 其后缘为明显的陡崖, 新山村—大坪山一带为盆地二期夷平面, 在它与重钢古滑坡( $Q_3^1$ )之间的斜坡地带自西向东发育有解放村古滑坡( $Q_2^1$ )、新建村古滑坡( $Q_2^1$ )、大坪山古滑坡及搬运

村古滑坡( $Q_2^2$ )。其分布高程分别可与 IV、III、II 级阶地台面相对应。因此, 我们可以从河流发育史来研究重钢古滑坡的形成过程。

滑坡区及周围地层为中侏罗系上沙溪庙组砂岩组和泥岩组及第四系堆积物。

砂岩组( $J_2S(s)$ )为浅灰、灰紫色中细粒长石石英砂岩。一套构成高程 290 m 以上夷平面; 一套为新山村及大坪山古滑床(250 m ~ 225 m 高程)。

泥岩组( $J_2s(m)$ )为紫红色泥岩、粉砂质、砂质泥岩互层, 以粘土矿物为主。

第四系分: ①坡积物( $Q^{dl}$ ); ②滑坡堆积物( $Q^{del}$ ); ③冲积物( $Q^{al}$ ); ④人工堆积物( $Q^{ml}$ )。据钻孔及地面调查, 320 m ~ 160 m 高程区间, 岩性共分 14 层, 泥化夹层位于高程 192 m ~ 188 m, 厚度 > 3 cm, 构成该古滑坡滑面。

研究区地震烈度 VI 度。发育四组裂隙:

1. NE30° ~ 60°/SE 70° ~ 84°;
2. 近 E—W/SN 70° ~ 72°;
3. S—N/EW 90°;
4. NE20° ~ 45°/SE 14° ~ 18°。

区内地下水主要为大气降水及生产用水补给, 长江为其排泄基准面。含水单元有古墓岩滑体裂隙含水单元及松散介质孔隙裂隙含水单元, 均为弱透水性。基岩为隔水层。

收稿日期: 2000-09-28; 改回日期: 2000-06-19。

基金项目: “长江三峡水利枢纽库区重庆钢铁公司厂区滑体稳态地质论证”资助。

作者简介: 胡新丽(1968—), 女(汉族), 博士, 讲师, 1991 年毕业于中国地质大学(武汉)水文地质与工程地质系, 1996 年毕业于中国地质大学(武汉)研究生院, 获硕士学位。现从事岩土工程及工程地质教学科研工作。

高焦炉古滑坡滑带土为一种亲水性极强的高膨胀性土,蒙脱石含量高达75 %。室内膨胀试验结果(表 1)表明:在有荷载试验下膨胀量较小,但却能产生平均大 100KPa 的膨胀力。据此分析,在地质历史时期,由于地下水的不断运动,以蒙脱石为主的古滑

体滑带土遇水必然会产生膨胀,但在上部荷载及围压的作用下,滑带土不易产生膨胀,但却能产生较大的膨胀力。因此,在模拟滑坡形成过程中,有必要考虑膨胀力的作用。依据大型现场试验数据,抗剪强度为: $c=0.04\text{MPa}$ , $\varphi=10^{\circ}$ 。

表 1 古滑带泥化夹层膨胀性试验成果表  
Table 1 Testing result list of argillation expansibility in paleo-silding zone

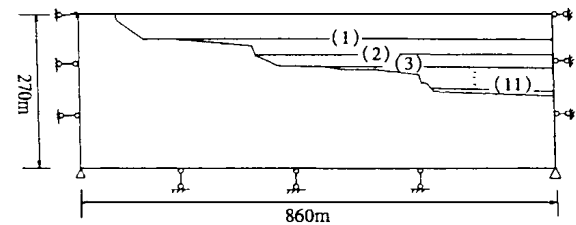
样品号	自由膨胀率 (%)	无荷载膨胀量 (%)	有荷载膨胀量(%)			膨胀力 (KPa)	备 注
			50KPa	100KPa	200KPa		
1	60	2.7	0.63	0.50	0.01	150	质地细腻,含水量较高
						110	
2	50	1.7	0.26	0.07		50	质地较粗,含水率较低

2 地质力学模型及模拟方案的确定

2.1 初始地质力学模型的建立

目前的岸坡是盆地I期夷平面形成以来长江下切作用的结果,因此,我们选该期夷平面状态的应力场作为初始应力场,既以该夷平面在重钢渝钢村一大坪山一线的320 m±高程作为初始地质模型最高界面。其最低界面以长江河床在此的最低处150 m±高程为界。

依据 1:1 万底图选取二维初始地质模型,整个剖面为1 720 m× 270 m。自夷平面至50 m高程力学模型的建立(图 1): 1)力学模型范围的确定,具河谷两岸在夷平面状态的对称性,以河谷中心为对称轴,取滑坡所在的左岸进行计算。计算断面面积为860 m× 270 m。2)初始边界条件确定,初始地应力场视为以自重应力为主的天然应力场。位移边界见图 1。



(1)第一次模拟河流下切卸荷荷载边界线  
(2)第二次模拟河流下切卸荷荷载边界线  
(3)第三次模拟河流下切卸荷荷载边界线  
⋮  
(11)第十一次模拟河流下切卸荷荷载边界线

图 1 初始状态力学模型

Fig. 1 Mechanic model of initial state

2.2 岸坡影响因素的确定

地壳浅层表应力场的形成和变化,一般都是通过卸荷过程来实现的。自然岸坡发育首先与地壳抬升、河流侵蚀下切密切相关<sup>[4]</sup>,它导致河谷边坡应力场的演化。因此,重钢岸坡演化的因素之一是河流下切及侧蚀卸荷。据前面地质分析,还确定了地震力、水压力及滑带土膨胀力等影响因素:

1. 河谷下切侧蚀卸荷荷载。正确确定河流下切卸荷的方式,是得出合理的岸坡演化史、滑坡形成机制的先决条件。据河流发育史及研究重点,下切及侧蚀共分为 11 步见图 1。

2. 地震力。采用静力法考虑地震荷载的作用。地震力按下式计算

$$P_{\max}=W/(g^{\circ}a_{\max})=k^c\cdot W$$

由于场区距震中较远,只考虑水平地震力。分别考虑六度(场区基本烈度)、并按五度及七度地震烈度进行敏感性核算。

3. 膨胀力。据前述膨胀力试验,该区泥化夹层膨胀力按 100KPa 列入计算。

4. 水压力。由于计算时间段较长,江水位取 202.55 m,概率为千年一遇。重钢古滑体后缘最高地下水位211.0 m,前缘最低水位202.0 m。

2.3 模拟方案的确定及网格剖分

为了确定各影响因素对岸坡滑坡形成的贡献,作了不同因素组合方案,共四大组:

- I: 考虑自重及下切侧蚀卸荷;
- II: 考虑自重、下切侧蚀卸荷及水压力;
- III: 考虑自重、下切侧蚀卸荷、水压力、膨胀力;
- IV: 考虑自重、下切侧蚀卸荷、水压力、膨胀力及地震力(5、6、7 三种不同烈度)。

在综合考虑岩土体性质、工程卸荷位置的基础上, 将研究剖面剖分为 598 个单元, 634 个节点。

3 重钢滑坡形成机制过程分析

3.1 数值模拟结果分析

3.1.1 初始应力场

初始应力场表现为明显的自重应力场。初始位移场成均匀下降型。未出现拉破坏及塑性破坏区。

3.1.2 不同卸荷方案影响分析

每步河流下切侧蚀卸荷后, 在卸荷区附近均出现应力重分布。第四次卸荷, 新建村古滑坡后部也出现拉破坏区, 新建村滑坡形成。

从图 2 可以看出: ①第一至第四次卸荷后, 水平位移曲线呈均匀增大, 卸荷还未对重钢古滑坡产生明显影响。但第三次卸荷后, 新建村古滑坡形成, 这与实际是一致的。②第五次卸荷起, 前部节点位移增大, 且随卸荷范围向重钢古滑坡前缘靠近, 水平正向位移增大; ③自第七次卸荷, 此时卸荷已相当接近重钢古滑体前缘, 水平位移突然增大, 此步后的水平位移曲线也均有自坡内向坡外位移值先下降后突然上升的规律。说明古滑坡是从此时开始进入滑动状态; ④第十一次卸荷后水平位移又开始变小, 说明重钢古滑坡滑动已逐步停止, 而此时对应的阶地正是 I 级阶地。说明重钢古滑坡形成于 II 级阶地形成期。卸荷作用是其主要诱发因素。

3.1.3 不同模拟方案影响分析

从图 3 可以看出: ①卸荷作用首先已使重钢古

滑坡前缘产生较大的水平正向位移, 说明河流下切及侧蚀卸荷是其主要诱发因素; ②膨胀力加入后, 水平位移增大, 说明该力对滑坡形成相当敏感; 同样各种地震烈度下地震力产生的作用也是很大的, 它促使水平位移自临空面向坡内变化加剧, 促使滑坡滑动失稳。

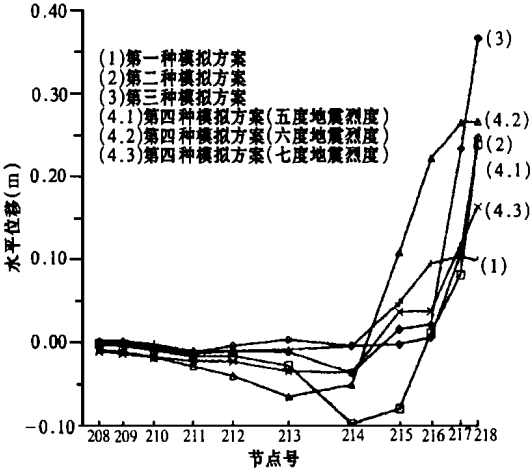


图 3 各模拟方案高焦炉古滑体下部水平位移图(第 10 次卸荷)  
Fig. 3 Horizontal displacement of the lower Gaojiaolu paleo-landslide of different simulation scheme

3.1.4 膨胀力影响分析

通过对第九次卸荷后第一种模拟方案及第二种模拟方案的关键单元应力对比(表 2)及关键节点垂向位移对比(表 3)。可以看出, 加入膨胀力后, ①自坡内向向外, 应力值均增大, 在 20 % 以上, 由于应力集中, 在剪出口附近应力值增量起伏不规则; ②垂直向上位移增大, 自坡内向坡外, 增量百分比小, 在临空面附近位移也有起伏现象。说明膨胀力在滑坡形成过程中有明显的影

3.1.5 地震力的影响分析

从第九次卸荷不同地震烈度的成果对比(表 4、5)可看出:

- 1. 随地震烈度增大, 水平应力值相应增大, 但七度时, 由于产生破坏单元的影响而有异常;
- 2. 随烈度增大, 水平应力值自坡内向坡外由小一大一小的趋势, 变为大一小, 在临空面附近, 随烈度增大由压应力变为拉应力;
- 3. 水平位移随烈度增大, 在坡内负位移增大, 越向坡外, 正向位移增大, 七度时位移也有异常。

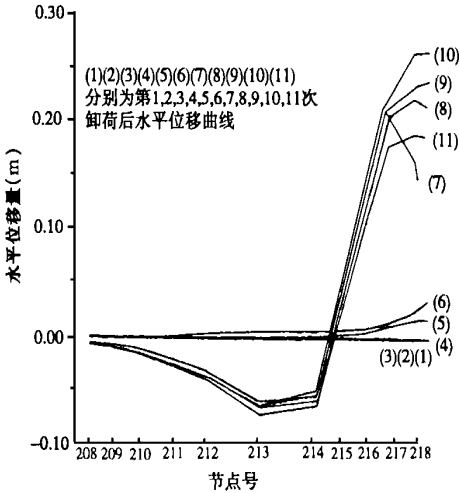


图 2 六度地震烈度下各卸荷方案水平位移图  
Fig. 2 Horizontal displacement of each unloading Scheme under VI seismic force

表 2 膨胀力加入前后第九次河流卸荷垂向应力变化分析表

Table 2 Vertical stress change list of the 9th river unloading fore and after considering swelling force

关键单元号	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213
方案 I (MPa)	- 2. 096	- 1. 725	- 1. 734	- 2. 233	- 2. 083	- 0. 671	- 2. 623	- 6. 115	- 4. 069	- 1. 778
方案 II (MPa)	- 2. 529	- 2. 107	- 2. 106	- 2. 818	- 2. 560	- 1. 167	- 3. 846	- 5. 409	- 1. 947	- 1. 852
差值百分比	20. 66	22. 18	21. 48	26. 19	22. 91	73. 89	46. 62	- 11. 54	- 54. 46	4. 44

表 3 膨胀力加入前后第九次河流卸荷垂向位移应力变化分析表

Table 3 Vertical displacement change list of the 9th unloading fore and after considering swelling force

关键节点号	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218
方案 I (m)	0. 0229	0. 0261	0. 0301	0. 0277	0. 0227	0. 0398	0. 0424	- 0. 0784	- 0. 0402	0. 0652	0. 1070
方案 II (m)	0. 0236	0. 0263	0. 0302	0. 0278	0. 0228	0. 0401	0. 0441	- 0. 523	- 0. 0494	0. 0500	0. 1143
差值百分比	3. 10	0. 76	0. 33	0. 36	0. 44	0. 75	4. 00	33. 30	- 22. 90	- 23. 33	6. 81

表 4 不同地震烈度下第九次河流卸荷重钢古滑坡下部水平应力分析表

Table 4 Horizontal stress change of the lower paleo- landslide of the 9th unloading under different seismic intensity

关键单元号	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213
5°烈度(MPa)	- 1. 000	- 1. 029	- 1. 003	- 0. 880	- 0. 988	- 0. 636	- 0. 656	- 0. 299	- 0. 474	- 1. 658
6°烈度(MPa)	- 1. 262	- 1. 363	- 1. 267	- 1. 275	- 1. 231	- 0. 422	- 0. 057	- 1. 754	- 0. 327	- 0. 158
7°烈度(MPa)	- 1. 130	- 1. 085	- 1. 075	- 1. 132	- 1. 161	- 0. 095	- 0. 811	- 1. 640	- 1. 212	1. 4619

表 5 不同地震烈度下第九次河流卸荷重钢古滑坡下部水平位移分析表

Table 5 Horizontal displacment change of the lower paleo- landslide of the 9th unloading under different seismic intensity

关键节点号	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218
5°烈度(cm)	0. 47	0. 17	- 0. 05	0. 54	0. 14	- 6. 14	- 8. 07	- 6. 04	- 4. 68	0. 05	9. 2
6°烈度(cm)	- 0. 82	- 1. 01	- 1. 63	- 2. 72	- 3. 84	- 6. 44	- 5. 36	10. 06	20. 59	23. 67	24. 04
7°烈度(cm)	- 1. 11	- 1. 43	- 1. 90	- 2. 30	- 2. 48	- 3. 95	- 4. 53	1. 54	0. 93	7. 42	11. 24

3.2 重钢古滑坡形成机制分析

综合以上分析计算, 我们认为: 重钢古滑坡及新建村古滑坡变形破坏与多种因素有关。重钢古滑坡形成于Ⅱ级阶地形成时期。其前缘首先破坏, 属牵引式—平推式混合型形成机制, 新建村古滑坡形成于Ⅳ级阶地形成时期, 形成机制与重钢古滑坡一样, 但缺少膨胀力的影响。其中, 岩体结构及岩性组合是滑坡形成的物质基础, 河谷下切卸荷是滑坡形成的主导因素, 为变形提供了动力及空间条件; 膨胀力和水压力的作用加速了古滑体的破坏; 地震力作用是滑坡产生的主要诱发因素。

4 结 论

1. 采用数值研究方法研究大型水平顺层滑坡形成机制这一新思路是可行有效的; 并可为同类滑坡的研究提供了新的方法。

2. 计算表明, 重钢古滑坡及新建村古滑坡均为牵引—平推式顺层滑坡。新建村古滑坡形成于中更新世时期, 相当于Ⅳ级阶地形成时期; 高焦炉古滑坡形成于晚更新世中期, 即形成于Ⅱ级河流阶地形成时期, 与定性分析十分相符。

3. 将膨胀力定量的首次引入数值计算, 结果表明它对滑坡的形成具十分重大的影响。

参考文献:

[ 1 ] 胡新丽. 重庆钢铁公司古滑坡形成机制研究. 地质科技情报. 1998, 17(增刊2).

[ 2 ] 潘别桐, 黄润秋. 工程地质数值法[ M ]. 北京: 地质出版社, 1994. 4.

[ 3 ] 张年学, 盛祝平, 孙广忠. 长江三峡库区顺层岸坡研究[ M ]. 北京: 地震出版社, 1993.

[ 4 ] E. T. Brown. Analytical and computational methods in engineering rock mechanics[ M ]. Allen & Unwin Press. 1987.

# Study on the Numerical Simulation Method of Large Translational Landslide in Horizontal Sedimentary Rocks

——Taking Chongqing Iron & Steel Co. Landslide as Example

HU Xin-li and YIN Kun-long

(*Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430073 China*)

**Abstract:** Based on the example of Chongqing Iron & Steel paleo-landslide, a numerical study clue for the simulation of large translational landslide in horizontal sedimentary rocks is testified by using numerical simulation method. The whole processes that consist of the initial status of planation surface, evolution of slope and occurrences of landslide are quantitatively reproduced. The effect of factors on the development of the landslide, such as the soils welling force, which is the first chance to be considered as an important factor in this case during its long term studies, water pressure and seismic force, is discussed by comparing the different schemes of simulation. A retrogressive-translational movement has been proposed for this paleo-landslide, according to the step analysis of numerically simulated results.

**Key word:** large translational landslide; numerical simulation; mechanism of landslide formation; Chongqing Iron & Steel paleo-landslide