

# 某跨海大桥主塔位工程边坡稳定性三维数值模拟分析

卢书强<sup>1</sup>, 巨能攀<sup>1</sup>, 卢海斌<sup>2</sup>, 范世飞<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 成都 610059;  
(2. 中交水运规划设计院, 北京 100007; 3. 洛阳市文兴置业有限公司, 洛阳 471000)

**摘 要:** 某跨海大桥为一悬索桥, 其主塔位于海中的岛礁上。因岛礁山体略显单薄, 受数条断层及其他构造裂隙的影响, 整体完整性较差。在岩体结构模型概化的基础上, 采用三维有限元数值分析方法, 系统研究了山体边坡在塔基开挖、混凝土浇筑以及工程荷载作用下, 岸坡岩体的应力、变形的分布特征和变化规律, 为工程边坡稳定性和工程设计施工提供了基础资料和参考依据。

**关键词:** 三维有限元数值模拟; 工程边坡; 工程荷载; 边坡稳定性

中图分类号: P642. 2; T P79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)01-0084-03

## 3-D Finite Element Analysis on the Slope Stability of a Main Tower Foundation of the Sea Crossing Bridge

LU Shu-qiang<sup>1</sup>, JU Neng-pan<sup>1</sup>, LU Hai-bin<sup>2</sup>, FAN Shi-fei<sup>3</sup>

(1. National Professional Laboratory of Geological Hazards Prevention, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. China Communications Planning and Design Institute for Water Transportation, Beijing 100007, China; 3. Luoyang Wenxing Realstate Company, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** The main tower of a sea-crossing rope suspension bridge lies on an island. The thin mountain intersected by faults and other structural fissures result in low intactness of rock mass. Based on the simplified structure of rock, 3-D finite element modeling technique is used to analyze systematically the distribution of stress field and strain field in the rock mass of the engineering slope after excavation, pour and engineering load. The main results can be taken as the basic data and theoretical proofs to evaluate slope stability and guide correct excavation.

**Key words:** 3-D finite element modeling; engineering slope; engineering load; slope stability

### 1 概 述

某跨海大桥为主跨跨度 1 650 m 的悬索桥, 其主塔高达 200 余 m, 位于海中的山岛上。该山岛平面上总体呈 NW-SE 向展布(长轴方向), 长 200 m, 宽一般为 50 m(图 1)。从地形地貌上看, 山体四面临空, 略显单薄, 因受数条断层及其他构造裂隙的影响, 再加之海浪作用, 海蚀洞、海蚀崖发育, 山体整体完整性较差。尽管山体边坡在天然条件下是稳定的, 但在工程荷载作用下, 尤其是在海域的灾害性天气——台风共同作用下, 边坡的整体稳定性将在很大程度上控制着大桥的整体布置以及方案成立与否。

研究区地层主要由晚侏罗世九里坪组(J<sub>3j</sub>)酸性流纹斑岩和第四纪松散堆积层组成。除山体顶部有少量坡残积层, 厚度一般< 3.0 m, 四周边坡主要为裸露基岩, 且近海边缘山体以强-弱(中)风化为特点。山体中间鞍部-南侧发育 F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub> 和 F<sub>3</sub> 断层, 并在山体两侧露头处均表现为海蚀沟洞。这 3 条相对较大规模的断裂构造, 在很大程度上控制着山体的岩体结构及其完整性。

结合桥基设计位置, 在考虑工程荷载作用下, 工程边坡最易发生失稳的部位应是南侧边坡, 其余地段发生较大规模失稳的可能性小。为了系统了解并掌握整个南部山坡在大桥修建前后, 其边坡岩体变形和应力状况, 本文在边坡岩体

结构模型概化的基础上, 采用三维弹性有限单元法模拟了塔基开挖, 混凝土浇筑以及工程荷载作用下, 岸坡岩体的变形和应力状况, 进而对工程边坡的稳定性进行了分析评价。

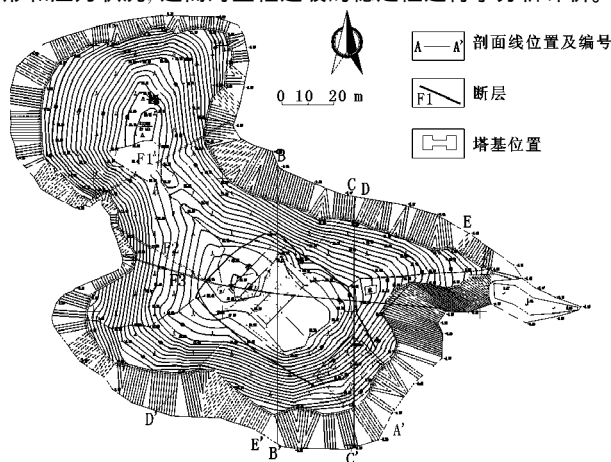


图 1 边坡工程地质平面图

### 2 三维有限元模型的建立

根据工程区的地质条件, 建立概化模型如图 2 所示。

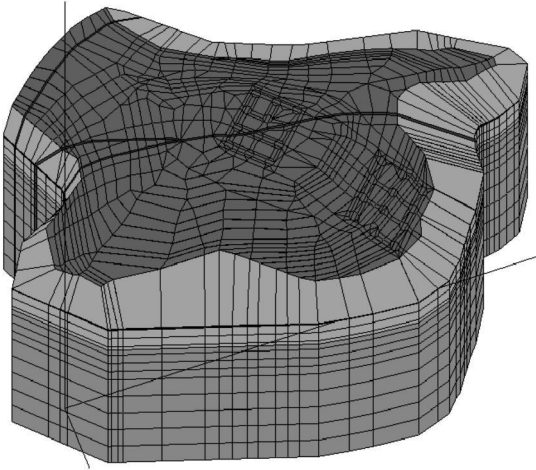


图 2 计算模型

计算所使用的坐标系垂直方向为  $Y$  轴,正方向铅直向上,其数值和海拔高度相同,深度取地表到海拔高程 $-80\text{ m}$ 。 $X$  轴正方向指向正东, $Z$  轴正方向指向正南,其数值和实际距离相同(图 2)。计算模型包括整个东南侧山体,也即以  $F_1$  为界,西北侧为约束边界,其余均为临空的自由边界。

模型中材料类型主要考虑流纹斑岩按风化程度划分的三个级别岩体,结构面模拟主要考虑对山体的岩体结构及其完整性有重大控制作用的断裂构造,即  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  断层,其余节理裂隙的影响均在岩体力学参数取值中加以考虑。

根据边坡工程地质调查及现场结构面等大剪试验成果,参照与此山体边坡相类似地质条件的有关工程结构面及岩体强度参数,对该边坡岩体和断层的力学参数进行了综合评价(表 1)。

表 1 岩体力学参数表

岩体及断层	弹性模量 /MPa	泊松比	容重 /( $\text{MN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	内聚力 /MPa	摩擦角 $^\circ$	抗拉强度 /MPa
微风化岩体	25000	0.30	0.0258	2.0	53	3.0
中风化岩体	12000	0.32	0.0253	0.8	39	1.0
强风化岩体	4000	0.35	0.0245	0.2	32	0
$F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$	1000	0.40	0.0238	0.05	22	0

计算采用三维弹塑性有限元程序(3D- $\sigma$ ),运用 Drucker-Prager 屈服准则,模型单元采用六面体 20 节点等参数单元,共划分 27 959 个单元和 116 999 个节点。

3 计算结果分析

首先对工程区应力实测结果进行拟和,反演出模型边界应力,并获得工程区初始应力场。在此基础上,对岸塔基开挖,钢筋混凝土浇筑以及加载状况下进行模拟分析。

3.1 塔基开挖后结果分析

(1) 应力场特征。塔基开挖后,最大主应力表现为与临空面平行(桩孔侧壁)或相切(桩孔底脚)的趋势(图 3)。应力场形成的主要范围为距桩孔底部 5~10 m。

最大主应力( $\sigma_1$ )变化范围为 $-2.622\sim 0.066\text{ MPa}$ (负值为压应力,正值为拉应力),在桩孔底部易产生应力集中。另外,在断层附近出现较大的应力变化梯度,交汇部位出现明显的应力集中。其中在桩孔底部应力最大值达 $-0.979\sim -1.128\text{ MPa}$ 。在基坑顶部,应力值相对较低,局部出现拉应力(图 4)。(注:“+”为拉应力,“-”为压应力,以下同)

(2) 变形场特征。桩基开挖完成后,桩孔周边岩体必然向减荷方向(临空面)发生回弹变形,具体表现在垂直  $Y$  轴方向的临空面(底部)向上拱起,水平方向的临空面(桩孔侧壁)水平向临空面方向移动。在各临空面中,岩体的位移一

般又以侧壁中部( $X$ 、 $Z$  方向)和底板中部( $Y$  方向)为最大,向四周逐步减小,如图 5 所示。

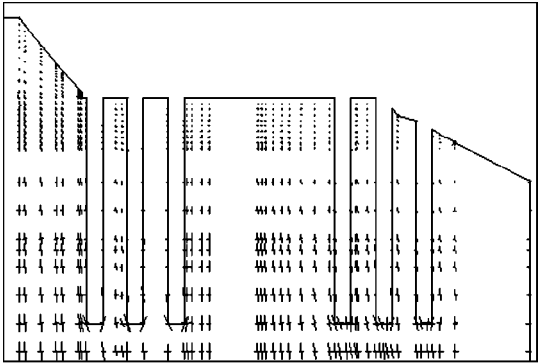


图 3 主应力矢量图(A-A'剖面)

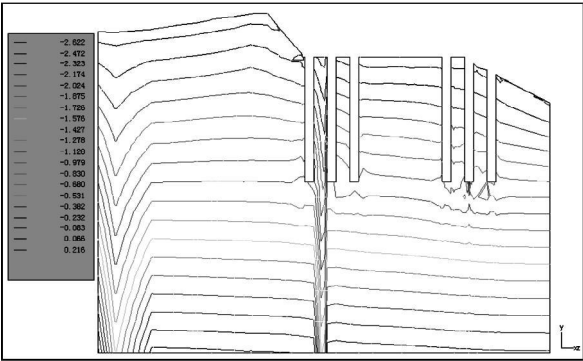


图 4 最大主应力( $\sigma_1$ )等值线(A-A'剖面)

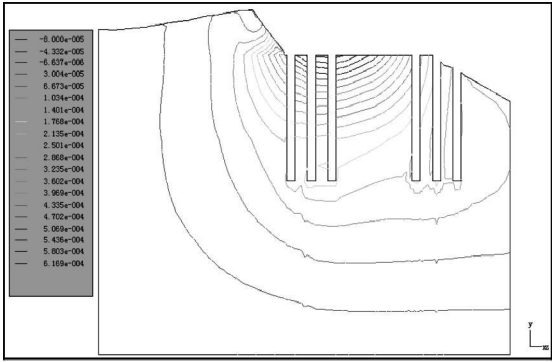


图 5  $Y$  方向位移等值线(A-A'剖面)

计算结果表明:桩基开挖完成后,桩孔周边岩体的变形总体上量值很小,一般在  $0.01\sim 0.35\text{ cm}$  之间; $X$  方向的位移量值约为 $-0.035\sim 0.14\text{ cm}$ ,最大变形出现在桩孔侧壁的中部以及基坑的顶部,桩孔侧壁上、下部位的变形较小; $Z$  方向的位移量值约为 $-0.10\sim 0.039\text{ cm}$ ,最大变形也出现在桩孔侧壁的中部以及基坑的顶部,桩孔侧壁上、下部位的变形较小; $Y$  方向的位移量值约为  $0.03\sim 0.616\text{ cm}$ ,最大变形出现在底板中部以及相邻桩孔间顶部岩体,量值达  $0.616\text{ cm}$ 。

3.2 混凝土浇筑成桩阶段结果分析

为了了解钢筋混凝土浇筑成桩后(图 6),混凝土桩及其周边岩体的应力-变形场特征,以及对整个老虎山岸坡稳定性的影响,也通过上述的剖面进行分析。

(1) 应力场特征。混凝土浇筑成桩后,桩基周边岩体的应力发生明显的变化,在桩基底部产生应力集中显现,其最大主应力( $\sigma_1$ )量值为 $-1.125\sim -0.075\text{ MPa}$ (图 7),最小主应力( $\sigma_3$ )量值为 $-0.462\sim -0.019\text{ MPa}$ ,剪应力( $\tau_{xy}$  和  $\tau_{yz}$ )量值为 $-0.14\sim 0.14\text{ MPa}$ 。

(2) 变形场特征。混凝土浇筑成桩后的变形与成桩前相

比较小,主要产生在桩基周边岩体附近, X 方向位移为  $-0.018 \sim 0.104$  cm, Y 方向位移为  $0.102 \sim 0.524$  cm, Z 方向位移为  $-0.0359 \sim 0.0378$  cm。岩体及桩基的变形主要以垂直方向(Y 方向)为主,在整个老虎山岸坡范围内,以桩基区域变形最大,周边逐渐减小。

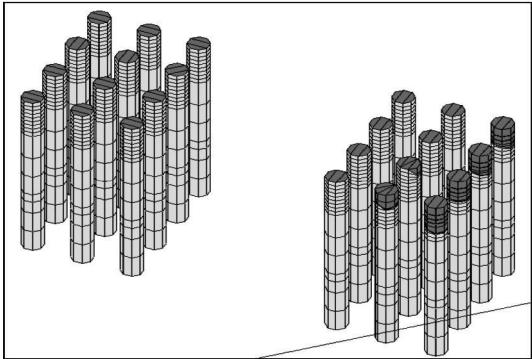


图 6 桩基空间布置图

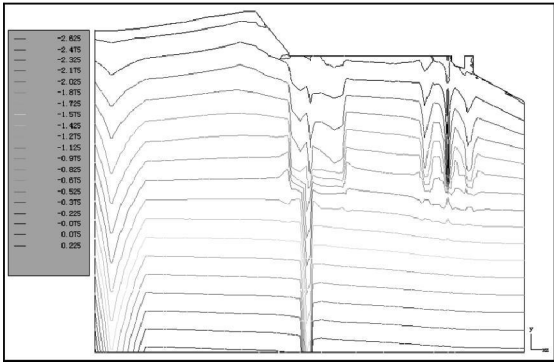


图 7 最大主应力( $\sigma_1$ )等值线(A-A'剖面)

3.3 最不利荷载组合条件下结果分析

结合地质条件及各种可能出现的荷载组合情况,通过平面极限平衡稳定性分析表明,在工况(恒载+横桥向风)条件下,岸坡的稳定性系数最低。为了解该荷载作用下,混凝土桩及其周边岩体的应力-变形场特征以及对整个老虎山岸坡稳定性的影响,对该工况下进行了计算分析。加载方式和量值如图 8 所示。

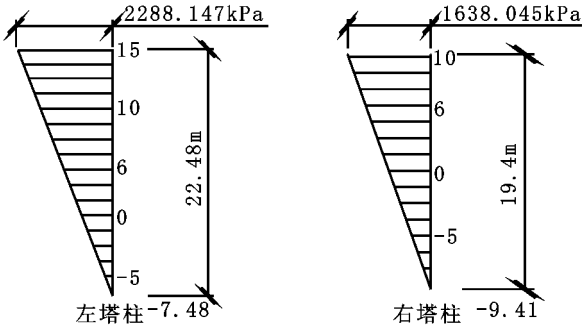


图 8 侧向荷载分布形式图

(1) 应力场特征。考虑荷载后,桩基周边岩体的应力有所变化,在桩基底部出现应力集中现象,局部出现拉应力(图参考文献:

9)。其中最大主应力( $\sigma_1$ )量值为  $-1.855 \sim 0.088$  MPa,最小主应力( $\sigma_3$ )量值为  $-0.440 \sim 0.983$  MPa,剪应力( $\tau_{xy}$ 和 $\tau_{yz}$ )量值为  $-0.3 \sim 0.38$  MPa。

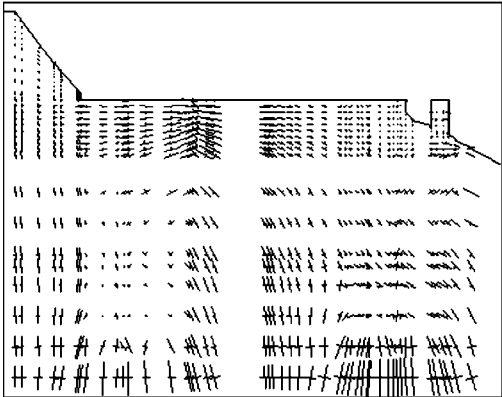


图 9 主应力矢量图(A-A'剖面)

(2) 变形场特征。在最不利荷载作用下与混凝土浇筑成桩阶段相比,虽然变形主要产生在桩基周边岩体附近,但位移明显增大。X 方向位移为  $0.131 \sim 1.413$  cm, Y 方向位移为  $-0.064 \sim -1.042$  cm, Z 方向位移为  $0.048 \sim 1.47$  cm。岩体及桩基的变形主要以水平方向(X、Z 方向)为主(图 10),在整个老虎山岸坡范围内,以桩基区域(特别是塔基向坡外侧)变形最大,周边逐渐减小。

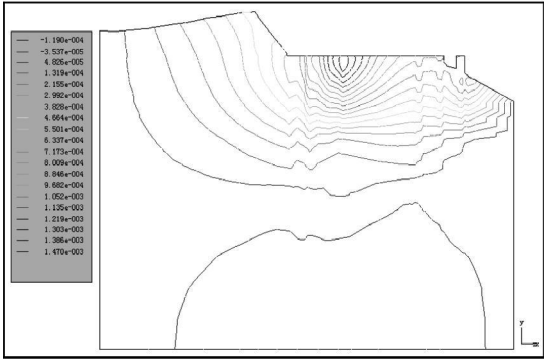


图 10 Z 方向位移等值线(A-A'剖面)

4 结 论

通过对工程区边坡三维有限元数值模拟计算,有如下认识:

- (1) 桥基所在山体应力场以自重应力为主,桥基开挖过程中,基坑周围岩体主应力发生偏转,且变形以向基坑内侧卸荷回弹为主,开挖对老虎山南部山体边坡稳定性有一定影响。
- (2) 通过对在荷载作用下和混凝土浇筑成桩后正常荷载作用下的应力场、位移场特征对比分析,可以看出在荷载作用(恒载+横桥向风)下,岸坡的最大、最小主应力分布虽有所变化,但量值变化较小;各剖面 X、Y、Z 方向位移值有所增加,但累加位移最大值不超过 1.5 cm。因此,即使在这种最不利的荷载组合(恒载+横桥向风)作用下,也不会对岸坡稳定性构成威胁,山体岸坡仍处于稳定状态,不存在变形稳定性问题。

[1] 潘永坚. 某跨海大桥主塔位工程边坡稳定性研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(4): 380- 384.

[2] 程东幸, 刘大安, 丁恩保, 等. 反倾岩质边坡变形特征的三维数值模拟研究——以龙滩水电站工程边坡为例进行三维变形特征分析[J]. 工程地质学报, 2005, 13(2): 222- 226.

[3] 潘永坚. 舟山大陆连岛工程西堠门大桥北塔位天然岩质边坡的稳定性[J]. 山地学报, 2004, 22(4): 467- 471.

[4] 朱杰兵, 卢桂臣, 曾平, 等. 舟山西堠门跨海大桥基岩工程地质研究[J]. 人民长江, 2005, 36(4): 25- 27.