

# 梧州市河西防洪堤岸坡三维计算机模拟\*

## Three-dimensional Computer Simulation of the Breakwater's Bank Slope in Hexi District, Wuzhou

张信贵 吴 恒 易念平 潘树青 熊良兵\*\* 沙吉林\*\*  
Zhang Xingui Wu Heng Yi Nianping Pan Shuqing Xiong Liangbing Sha Jilin

(广西大学土木建筑工程学院 南宁市西乡塘 10号 530004)

(College of Civil Engi., Guangxi University, 10 Xixiangtanglu, Nanning, Guangxi, 530004)

**摘要** 用编制的三维有限元程序对梧州防洪堤岸坡两处典型滑坡地段进行三维计算机模拟,模拟结果与实测的结果吻合,验证了程序的可靠性。并且利用程序对抗剪强度参数进行了反演。

**关键词** 三维有限元程序 计算机模拟 滑坡 抗剪强度

中图法分类号 TU 473

**Abstract** By working out three-dimensional finite element analysis program, this paper simulates and calculates two typical landslide's stability of the breakwater's bank slope in Wuzhou. Between results of simulative calculation and those of actual determinate are identical. Results prove that the three-dimensional finite element program is reliable, and counter-analyses the shear strength parameters by using program.

**Key words** three-dimensional finite element program, computer simulation, landslide, shear strength

梧州市地处西江中下游,位于西江和桂江的汇合处。因市区地势较低,洪水灾害十分频繁。从1987年始梧州就被列为全国25座重点防洪城市之一,鉴于目前原防洪堤设防标准低(为20年一遇设计标准),《广西梧州市防洪规范修订报告》提出按50年一遇标准设计防洪堤,以抵御日益严重的洪水灾害。

梧州桂江二桥至盐站段防洪堤(富民防洪堤)是梧州市河西区防洪堤整体设防、分仓布局的重要组成部分。堤段全长1800余米,地貌单元是一级河谷阶地、人工堆积台地和五条被古冲沟切割的阶地地貌。整个堤段的地层因沉积环境变迁,造成地层分布不均匀,连续性差,其主要地层岩性见表1。

整个场地内曾先后发生过多处不同规模的滑坡。主要有桂江二桥滑坡群、燕塘冲滑坡群、新民粮库专用码头滑坡及下富民码头滑坡等。其中有的滑坡已被整治,有的正处于蠕滑阶段。场地内地下水主要为赋存于第四系松散堆积层中的孔隙水,水量较丰富。其

次为赋存于人工填土中的上层滞水和基岩裂隙水。

本文用三维有限元对防洪堤岸坡进行三维计算机模拟,确定目前岸坡的安全度和对滑坡面抗剪强度参数进行反演,并与室内、外实测的参数进行对比。

### 1 模拟计算内容

(1) 模拟滑坡沿原滑动面滑动,并对岸坡整体稳定性进行模拟计算,评价岸坡潜在的安全性。

(2) 对最高洪水位状态下洪水骤退时的岸坡及枯水季节时的岸坡两种工况进行模拟。

(3) 模拟滑坡沿原滑动面滑动时,反演滑坡面的抗剪强度参数 $C$ 、 $\varphi$ 值。

(4) 取如下两典型地段滑坡进行模拟分析:

① 桂江二桥中间滑坡(正在蠕滑阶段)。目前实测状态:滑坡后壁高达3.0m,蠕滑速率为0.02m/d,滑坡周界呈围椅状。

② 燕塘冲滑坡(曾滑动但未经治理)。目前实测状态:滑坡壁高1.0m,滑坡周界很明显,经现场监测,无滑动迹象。

### 2 三维有限元程序

#### 2.1 程序流程

整个程序分四个部分:前处理、有限元计算、稳

1998-12-25收稿。

\* 国家自然科学基金及广西科学基金联合资助(5986800149662010),广西留学回国人员科学基金资助课题(桂计回9652013),广西高校跨世纪学科带头人培养对象专项基金资助课题(桂教科1997第424号)。

\*\* 广西梧州水利电力设计院,梧州市新兴路112号,543002(The Hydroelectricity Design Institute of Wuzhou, 112 Xinxinglu, Wuzhou, Guangxi, 543002)

表 1 堤基岩性柱状图

Table 1 Columnar section of foundation rock and soil stratum at river bank

| 序号<br>Sequence | 层位<br>Layer | 厚度<br>Thickness      | 代号<br>Code       | 柱状图<br>Columnar section | 岩性描述<br>Rock and Soilmass descrip-<br>tion  | 备注<br>Remarks  |
|----------------|-------------|----------------------|------------------|-------------------------|---|--|
| 1              | ①           | 0~ 17.15<br>0~ 17.20 | γ Q <sub>4</sub> |                         | 人工填土, 按照回填土的成分又可分为素填土和杂填土。 Artificial soil, be classified as plain fill and miscellaneous fill by component   | 杂填土主要分布于阶地之上, 而堤基台地则大多由素填土构成, 厚薄不一。 Miscellaneous fill is mainly scattered on terrace, platform of river bank mostly consists of plain fill; thickness isn't even. |
| 2              | ②           | 0~ 18.50             | alQ <sub>4</sub> |                         | 粉质粘土, 褐黄(灰), 软至可塑, 夹薄层粉细砂, 属新近沉积物。 Silty clay, drab-yellow (grey), wead plastic to plastic, newly sedimental substance containing thin bed silt and fine sand.  | 分布于大部分场地, 性质各异, 厚度变化大。 It is scattered on ground largely; character differs, thickness varies largely.   |
| 3              | ③           | 0~ 13.55             | alQ <sub>4</sub> |                         | 粘土, 黄(浅黄), 质纯, 可至硬塑 均一。 Clay, yellow (light yellow), pure, plastic to hard plastic, even.   | 分布于整个场地, 性质较好, 厚度变化大。 It is scattered on all the ground, fine character, but thickness varies largely.   |
| 4              | ④           | 0~ 15.30             | alQ <sub>4</sub> |                         | 粉质粘土, 灰(灰黑), 含有机质, 局部地段底部含砾, 可塑, 夹粉细砂层。 Silty clay, grey (grey-black), organic component is contained. Parts of an area contain gravel, silt and fine sand bed. | 分布于整个场地, 连续性好, 厚度变化大。 It is scattered on all the ground, continuation, but thickness varies largely.   |
| 5              | ⑤           | 0~ 2.00              | alQ <sub>4</sub> |                         | 砂卵石, 砂以粉细砂为主, 卵石磨圆度一般, 含量大于 25%, 松散至稍密状。 Sand and pebble; silt and fine sand is prominent in sand; pebble polishes smooth; content exceeds 25 percent.          | 局部地段有分布, 厚度较薄。 It is scattered on parts of an area; thickness is even.   |
| 6              | 不详          | unknown              | ε h <sub>3</sub> |                         | 细砂岩、粉砂岩夹泥岩、板岩。 风化程度一般, 埋藏较深。 Fire sand rock, silt sand rock containing mudstone, plate rock, weak weathering, hidden deeply in the earth.                       | 基岩起伏变化大。 Foundation rock bed rises and falls largely.  |

定渗流计算 后处理 主要计算流程如下:

首先据提供的地质资料确定计算区范围(计算区范围取 1.5~ 2 倍的实测滑坡范围), 然后进行单元剖分, 形成单元的信息码、结点坐标、单元材料、地下水情况信息、荷载信息、约束信息等有限元计算的初始数据。形成数据文件后, 进行有限元计算。三维有限元计算中, 土体单元采用 8 节点三维等参元, 土体本构模型采用邓肯张模型, 模型参数由三轴试验与经验取用, 土体破坏准则采用摩尔-库伦准则。三维稳定渗流按下述定解方程, 运用三维有限元求解水头函数  $H$ :

$$\frac{\partial}{\partial x} [k_x \cdot \frac{\partial H}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [k_y \cdot \frac{\partial H}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [k_z \cdot \frac{\partial H}{\partial z}] + w = 0,$$

在  $K$  内;

$$H(x, y, z)|_{s_1} = f(x, y, z), \text{ 在 } s_1 \text{ 上};$$

$$k_x \frac{\partial H}{\partial x} \cos(n, x) + k_y \frac{\partial H}{\partial y} \cos(n, y) + k_z \frac{\partial H}{\partial z} \cos(n, z) = q, \text{ 在 } s_2, s_3 \text{ 上};$$

$$H(x, y, z)|_{s_3+s_4} = Z(x, y), \text{ 在 } s_3 \text{ 及 } s_4 \text{ 上}.$$

式中:  $H$ — 水头函数;  $q$ — 边界上单位面积流量的流量空间渗流区域;  $s_1$ — 已知水头值的边界面;  $s_2$ — 给定流量曲面;  $s_3$ — 浸润面;  $s_4$ — 逸出段;  $k_x, k_y, k_z$ — 土体在  $x, y, z$  方向的渗透系数;  $k$ — 入渗量或蒸发量;  $n$ — 界面的法线方向

最后对计算结果进行数据处理, 运用 AutoCAD 进行图形显示, 使有限元计算结果可视化。

## 2.2 岸坡稳定性模拟计算

运用三维有限元程序计算每个土体单元点上的应力大小和方向, 然后插值确定计算区内每点的应力:

将滑面上的力向滑坡的主要方向投影, 在该滑动方向上分解出下滑力和抗滑力, 总的抗滑力和下滑力之比作为抗滑稳定系数  $K$ 。

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n [c_i \cos(T_v) + c_i \operatorname{tgh} + \sigma \cos(T_v - 90)] \Delta A}{\sum_{i=1}^n [c_{zi} \cos(T_{zv}) + f_x \cos(T_{xv}) + f_y \cos(T_{yv} - 90)] \Delta A}$$

式中:  $c_{zi}, f_x, f_y$ — 第  $i$  个滑动面上的应力和剪应力;  $T_v, T_{xv}, T_{yv}$ — 分别为应力  $c_{zi}, f_x, f_y$  与主滑方向的夹角;  $\Delta A$ — 第  $i$  个滑面的面积;  $V$ — 主滑方向。

滑面的构成用空间椭球体来模拟, 需要用到 5 个特征点:  $A, B, C, D, E$  (见图 1) 稳定性分析时给出  $A, B, C, D, E$  5 个特征点的 3 个坐标值的范围 ( $x_{\min} \sim x_{\max}, y_{\min} \sim y_{\max}, z_{\min} \sim z_{\max}$ ) 和它们的步长。求出计算区范围内的多组滑面, 每组滑面和有限元网格相交, 得到构成滑面的单元面, 经过插值和座标转换求得每个单元面上的法向正应力和剪应力, 然后按上述公式计算  $K$  值。

表 2 三维有限元模拟计算结果

Table 2 Results of simulative calculation of three-dimensional finite element

| 滑坡<br>Landslide   | 有无渗流<br>Permeable<br>stream | 整体稳定安全<br>系数 Stable<br>safety coefficient<br>of the whole | 原滑坡稳定安全<br>系数 Stable safety<br>coefficient of<br>former landslide |
|---|-----------------------------|---|---|
| 桂江二桥中间滑坡<br>Middle-landslide of the<br>2nd bridge over Guijiang | 有 Yes                       | 1.05  | 0.81  |
|   | 无 No                        | 1.10  | 0.86  |
| 燕塘冲滑坡<br>slide in Yantangchong                                  | 有 Yes                       | 1.19  | 1.39  |
|   | 无 No                        | 1.18  | 1.43  |

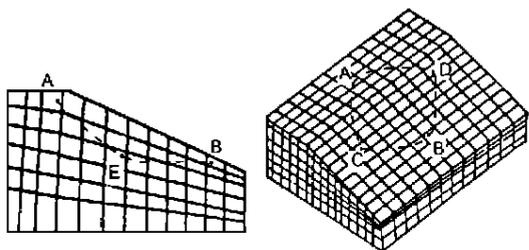


图 1 空间椭球体的 5 个特征点示意图

Fig. 1 Sketch of 5 characteristic points in three dimensional ellipsoid

每个滑面的滑动切向由滑坡的滑动矢量  $V$  与每个滑面的法向确定。  $V$  用滑动方向与整体座标  $x, y, z$  夹角  $\tau_x, \tau_y, \tau_z$  表示, 一般滑动方向取用沿边坡方向。 由输入的土层参数, 通过以上多组滑面搜索, 得到一系列滑面及对应的安全系数  $K$  值, 同时反演危险滑面上的抗剪强度参数

2.3 数据文件输入格式

举例说明 1 组数据输入格式:

| 数据                     | 注释                   |
|------------------------|----------------------|
| 0. 0, 100. 0, 0. 0     | X 座标的最小值及最大值         |
| - 70. 0, 70. 0, 0. 0   | Y 座标的最小值及最大值         |
| - 10. 0, 50. 0, 0. 0   | Z 座标的最小值及最大值         |
| 1                      | 共 组数据                |
| 1                      | 第 组数                 |
| 1                      | 第 组数据中第 1 个特征点 (A 点) |
| 0, 80. 0, 0. 0         |                      |
| 0. 0, 0. 0, 0. 0       | 三个座标方向的范围和分割数        |
| 4. 2, 15. 6, 10. 0     |                      |
| 2                      | 第 组数据中第 2 个特征点 (B 点) |
| 42. 4, 42. 4, 0. 0     |                      |
| 0. 0, 0. 0, 0. 0       | 三个座标方向的范围和分割数        |
| 3. 0, 3. 0, 0. 0       |                      |
| 3                      | 第 组数据中第 3 个特征点 (C 点) |
| 65. 0, 65. 0, 0. 0     |                      |
| 65. 1, 80. 0, 0. 0     | 三个座标方向的范围和分割数,       |
| 12. 5, 12. 5, 0. 0     |                      |
| 4                      | 第 组数据中第 4 个特征点 (D 点) |
| 65. 5, 65. 0, 0. 0     |                      |
| - 60. 0, - 60. 0, 0. 0 | 三个座标方向的范围和分割数        |
| 12. 5, 12. 5, 0. 0     |                      |
| 5                      | 第 组数据中第 5 个特征点 (E 点) |
| 63. 0, 63. 0, 0. 0     |                      |
| 0. 0, 0. 0, 0. 0       | 三个座标方向的范围和分割数        |
| 3. 0, 6. 8, 3. 0       |                      |

3 模拟结果与分析

对岸坡整体稳定性和原滑坡稳定性模拟的结果见表 2, 表 2 为最危险滑面的安全系数  $K$  值

模拟的潜在滑体范围和实测滑体范围平面相对布置见图 2 图 3

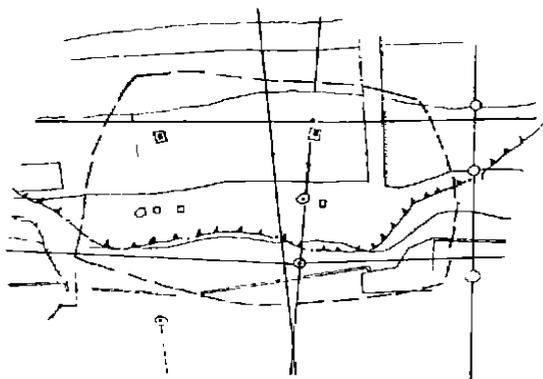


图 2 模拟滑坡与桂江二桥中实测中间滑坡相对位置图

Fig. 2 Relative positions of simulative landslide and real survey and drawing middle-landslide of second bridge over Guijiang

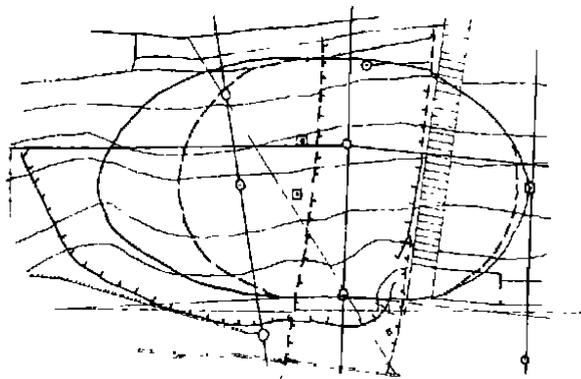


图 3 模拟滑坡与燕塘冲实测滑坡相对位置图

Fig. 3 The relative positions of simulative landslide and real survey and drawing landslide in Yantangchong

模拟滑坡面反演出的抗剪强度参数与实测参数对比情况见表 3 结果表明, 桂江二桥中间滑坡处于临界失稳至失稳状态, 燕塘冲滑坡处于稳定状态, 这与实际滑坡监测结果一致。 模拟的潜在危险滑坡体范围与实测的滑坡体范围有较好的相似性。 整体稳定性计算的安全系数  $K$  值与沿原滑面滑动的滑坡稳定性计算的安全系数  $K$  存在差距。 究其原因, 主要是受以下两个方面的因素影响。 一是计算的滑坡体范围不同。 按原滑坡滑坡面模拟时, 计算区范围与原滑坡完全一致; 按整体稳定性计算时, 计算范围为计算机在

表3 模拟滑坡抗剪强度参数与实测参数对比

Table 3 Comparison between the shear strength parameters of simulative landslide and actual determinate parameters

| 滑坡<br>Landslide   | 模拟滑坡面的平均参数<br>Average parameters of<br>simulative landslide surface |         |            | 实测参数标准值 Standard<br>value of determinate parameters       |            |  |            |
|---|---|---------|------------|---|------------|--|------------|
|   | 有无渗流<br>Permeable<br>stream   | C (kPa) | $\phi$ (°) | 原位直剪试验参数<br>Parameters of shear strength test on the spot |            | 室内残余剪切试验参数<br>Parameters of residual shear strength test in the door |            |
|   |   |         |            | C (kPa)   | $\phi$ (°) | C (kPa)  | $\phi$ (°) |
| 桂江二桥中间滑坡<br>Middle-landslide<br>of the 2nd bridge over Guijiang | 有 Yes   | 7.6     | 10.6       | 7~21  | 7.5~12     | 6.3  | 6.6        |
| 燕塘冲滑坡<br>Landslide in Yantangchong                              | 无 No  | 7.1     | 9.90       |   |            |  |            |
|   | 有 Yes   | 9.6     | 8.30       | 15.2  | 8.2        | 12.8   | 6.3        |
|   | 无 No  | 9.0     | 8.10       |   |            |  |            |

给定的计算区范围内自动搜索出的最危险滑坡体范围,两者存在误差。二是土层空间分布的影响,因土层空间变异较大,加上计算区范围的误差,加剧了两计算区内土层空间变异性。

由反演的抗剪强度参数 C、 $\phi$  值可以看出,反演的参数与实测参数的标准值相当,但也存在一定的误差,误差幅度不大。误差的原因主要是土层的空间变异性引起的。

#### 4 结语

(1) 模拟的结果与实测的结果吻合,说明采用 Duncan-chang 非线性土体本构模型的三维有限元程序计算结果是比较符合实际情况的,证明了程序的可靠

性。

(2) 反演的抗剪强度参数均值与实测的抗剪强度参数标准值相当。

(3) 因土层连续性差,空间分布变异大,计算中对边界条件做了相应简化,这是实测结果与模拟结果存在差距的主要原因。

#### 参考文献

- 1 丰定祥, 吴家秀, 葛修润. 边坡稳定性分析中几个问题的探讨. 岩土工程学报, 1990, 12 (3): 1~9.
- 2 魏泽光, 黄俊, 许国安等. 三维稳定渗流的有限元计算. 水利学报, 1982, (1): 39~47.
- 3 罗晓晖. 深基坑开挖渗流与应力耦合分析. 工程勘察, 1996, (6): 73~41.

(责任编辑: 蒋汉明 黎贞崇)

## 242个科研机构整体转制进入实施阶段

经国务院同意, 科学技术部和国家经贸委 5月 26日 在京联合召开 10个国家局所属 242个科研机构改革座谈会, 至此, 已经国务院批准的 10个产业部门所属科研机构管理体制改革方案, 将开始进入具体实施阶段。它标志着我国科研机构运行机制发生根本性转变。

科技部副部长徐冠华指出, 我国目前的科技体制和机制还存在不少问题, 突出表现在: 独立于企业之外的科研机构仍然过多, 部门和地方条块分割又进一步导致机构重复设置、课题重复研究; 科研机构尚未建立“开放、流动、竞争、协作”的机制, 活力不足, 制约创新; 人员流失十分严重; 相当一批科研机构的专业设置多年未进行大的调整, 设备老化, 后劲不足, 已难以适应当前市场经济发展和行业技术进步的要求。

徐冠华说, 走科技产业化道路, 把应用开发类的研究所转制, 是针对我国研究体制的现状提出的。目前的改革有利战略高新技术和重大共性技术的研究开发工作。首先, 政府对面向市场的研究开发工作的支持正在经历着重大的调整, 调整的方向是从过去以支持科技项目为主转向以支持科技产业化为主, 促使研究开发机构或者未来的科技企业能够形成一个从研究开发进入市场竞争, 得到市场回报的投入后, 再从从事新的研究开发的良性循环。其次, 在我们能够促使面向市场的技术尽可能形成良性循环的机制的同时, 就有可能把现在研究经费集中到从事战略高新技术和共性技术的开发上, 大幅度地增加投入强度。

谈到政府将对科技产业化的支持措施, 徐冠华强调, 高新技术产业高风险压力使得科研机构和科研人员不愿意轻易“下海”, 同时高新技术产品生命周期短, 技术更新很快, 市场竞争非常激烈, 所以需要有一个更灵活的、适应于创新的管理机制, 人才在高新技术产业发展中往往起着决定性作用, 我们必须制定相应的政策, 鼓励科技人员“下海”发展高科技产业。

据国家经贸委副主任张志刚介绍, 按照有利于建立以企业为主体的工业科研体制和技术创新体系, 有利于科技成果产业化, 有利于调动院所积极性, 进一步发挥现有科技力量的原则, 经科技部、国家经贸委、中编办、财政部审核, 这 242个科研机构的转制方案确定: 有 131个院所进入企业(集团); 40个院所转为科技型企业, 实行属地化管理; 18个院所保留事业单位性质, 转制为中介机构; 24个院所并入学校、划转其他部门或撤并; 12个(涉及 29个院所) 转为中央直属大型科技企业。

(摘自《科技日报》1999年 5月 27日)