

# 基于 Morgenstern-Price 法的黄土高边坡强度参数反演研究

蔺晓燕<sup>\*1, 2</sup> 张林梵<sup>3</sup> 杨永辉<sup>4</sup>

1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065; 2. 西安石油大学陕西省油气成藏地质学重点实验室, 西安 710065;  
3. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054; 4. 信息产业部电子综合勘察研究院, 西安 710054

**摘要:** 针对黄土高边坡稳定性分析评价时可靠的抗剪强度参数较难获得的问题, 本文以实测的陕西靖边 - 安塞亚区黄土边坡数据为依据, 利用 Slope/W 构建了 17 个、坡高在 40-120m 的边坡模型, 采用 Morgenstern-Price 法进行反演, 得到了研究区域边坡不同边坡高度的综合抗剪强度参数。结果表明, 随着坡高的增大, 黄土的粘聚力  $c$  增大, 内摩擦角  $\varphi$  减小。根据计算结果, 得出 40-120m 边坡高度下黄土综合抗剪强度参数的反演曲线, 可以直接用于黄土边坡稳定性的评价, 为黄土边坡坡形设计提供了可靠的数据支持。

**关键词:** 黄土边坡; 抗剪强度; 参数反演; Morgenstern-Price 法

随着我国黄土高原地区工程建设与开发, 黄土边坡对人们的生产生活安全构成威胁日益突出, 黄土边坡的稳定性也越来越受到重视。据统计<sup>[1]</sup>, 陕西省铜川 - 黄陵一级公路在 15km 长度的黄土区内, 路基开挖涉及到 30m 以上高边坡 40 余处, 边坡最高近 90m; 黄延高速公路黄陵 - 洛川 24km 长的路段上, 开挖形成的路堑边坡有 26 处, 其中大于 30m 的就有 16 处。大量研究表明, 黄土边坡滑动面位置、抗剪强度参数和稳定性系数之间的关系是评价分析的关键。获取黄土强度参数的众多方法中, 反演法<sup>[2]</sup> 由于其工作量大、准确性高, 通过反演法获取强度参数的方法逐渐在边坡工程中得到应用。目前大多数黄土边坡抗剪强度参数反演研究多以单一边坡或滑坡为对象, 对区域黄土边坡抗剪强度参数的变化规律进行系统分析和研究的很少<sup>[3,4]</sup>。因此本文分析了陕北靖边 - 安塞亚区具有明显破坏迹象的极限状态下自然黄土边坡, 通过黄土边坡高度与边坡宽度的相关性对不同高度的坡度进行建模, 并应用 Morgenstern-Price 法对其相应的综合抗剪强度参数进行反演, 绘制不同黄土边坡高度下的粘聚力与内摩擦角的关系曲线, 用于计算已知边坡形状的稳定系数和拟建边坡的设计, 还可以分析已知高边坡的安全系数和稳定性, 以及设计待建边坡的边坡形状。

## 1 研究区黄土边坡调查测量与坡高 - 坡宽拟合

### 1.1 极限状态下黄土边坡形态判定与统计

靖边 - 安塞亚区处于内陆黄土高原中部, 区域内黄土边坡主要分布在杏子河、洛河和无定河的河流沿线(见图 1), 统计内的黄土边坡均位于黄土高原腹地, 地下基岩埋深较大, 统计分析中的所有边坡均为纯黄土边坡, 因此采用吴玮江的黄土滑坡分类标准<sup>[5]</sup>, 假设区域内黄土边坡潜在滑动面为黄土层内滑动。根据不完全统计, 黄土层内滑坡占黄土高原滑坡总数的三分之一以上, 因此, 本文选择的黄土边坡滑动类型是典型的。

抗剪强度参数反演的前提是所选的黄土边坡处于极限

平衡状态, 对于一个给定的黄土边坡, 我们可以通过实地调查来确定它是否处于极限平衡状态。针对此问题, 本文采用李萍<sup>[6]</sup> 提出的 4 个标准, 明确了极限状态边坡的概念, 并结合自然历史分析方法与研究区域的区域地质背景, 研究了黄土边坡变形的标志、尺度和形态, 对不同类型的边坡进行了采样, 确定了其严重程度, 并对其变形和破坏进行了分析和控制。最后, 在研究区域确定了 17 个极限状态的边坡, 坡高范围在 40-130 米(如图 1 所示)。

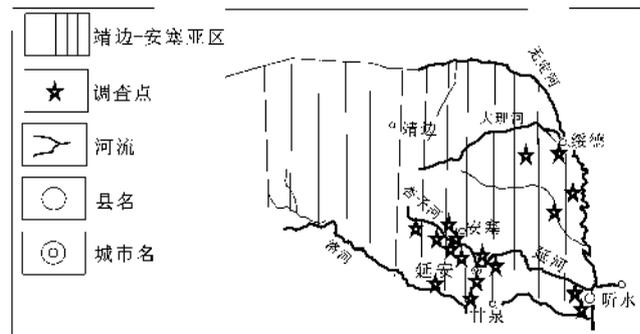


图 1 靖边 - 安塞亚区范围和极限状态下黄土边坡位置

### 1.2 研究区黄土边坡坡高与坡宽拟合分析

对研究区域内 17 个极限状态下黄土边坡的边坡高度和边坡宽度进行了相关分析, 采用指数模型重复试验计算进行拟合, 得到相关系数为 0.89 的拟合公式(1)。该拟合公式为后期建立边坡模型时任意设置边坡高度提供了依据, 为了增加对比度, 已知边坡高度, 利用拟合回归方程计算边坡宽度, 这样边坡形态确定, 即可利用数据建立边坡模型。

$$L=0.79291H^{1.10242} \quad (1)$$

其中  $H$  为边坡高度, 从坡脚到坡顶的垂直距离;  $L$  为坡宽, 从坡肩水平投影与坡脚的水平距离。

### 2 抗剪强度参数反演模型建立

按照郑明新强度参数反算法基本原理<sup>[7]</sup>, 可以采取类似条件下两个或多个断面方程联立求解, 在同一区域当边坡

坡高相差不大时,其含水量、滑移状态及物理力学参数相近。统计分析方法在滑坡运动学模型<sup>[8,9]</sup>的研究中更为常用。因此将联立的断面高差控制在5m,按照10m一个高度区间取一组强度参数反演值代表这一段坡高范围内强度参数。根据设置的坡度高度,通过坡高-坡宽拟合方程(1)得到相应的坡度宽度,设置内摩擦角 $\varphi$ 和重度 $\gamma$ , $\varphi$ 的值为5-35°,值梯度为5°。边坡顶部20m范围内,重度 $\gamma$ 取值为16.1kN/m<sup>3</sup>;距离边坡顶部20-70m,重度 $\gamma$ 取值为18.0kN/m<sup>3</sup>;距离边坡顶部大于70m,重度 $\gamma$ 取值为21.0kN/m<sup>3</sup>。

利用GeoStudio中的Slope/W模块构建模型,采用Morgenstern-Price法反演综合内聚力 $c$ 。如图2所示为靖边-安塞亚区坡高80m的边坡模型,设定稳定系数 $F_s=1.0$ 、内摩擦角 $\varphi=30^\circ$ 时,试算得到粘聚力 $c=24$ kPa。按此步骤,逐次建立不同坡高的边坡模型,得到每10米坡高区间内有3条 $c-\varphi$ 关系曲线交于一点,交点的坐标为坡高在这10m范围内极限状态边坡的综合抗剪强度参数,如图3所示。依此,得到研究区黄土边坡坡高在40-120m内8组相近坡高(10m范围)抗剪强度参数反演值,见表1。

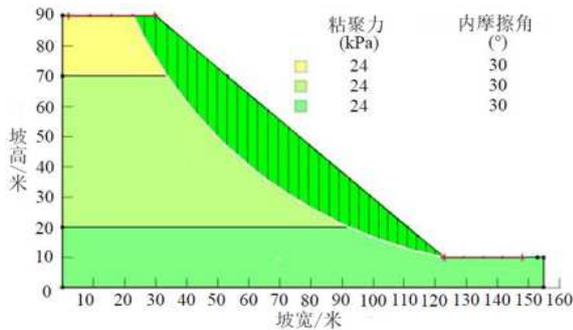


图2 利用Slope/W建立靖边-安塞亚区坡高80m的边坡模型

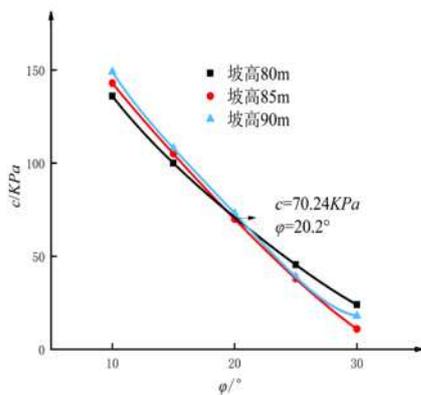


图3 靖边-安塞亚区边坡高度80-90m的抗剪参数反演结果

表1 靖边-安塞亚区不同边坡高度综合抗剪强度参数反演值

边坡高度 $H/m$	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	粘聚力 $c/kPa$
40-50	34.92	4.53
50-60	35.08	8.25
60-70	24.63	37.25
70-80	21.12	61.60
80-90	20.20	70.24
90-100	17.48	91.54
100-110	15.01	114.80
110-120	14.98	118.60

### 3 反演结果

根据上述反演计算,得到了靖边-安塞亚区8个坡高范围的抗剪强度参数值(如表1),不同坡高的抗剪强度参数的反演值如图4所示。

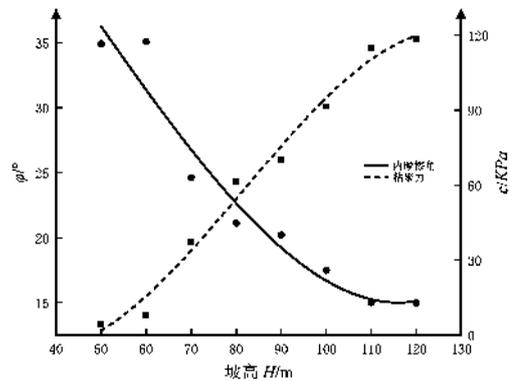


图4 靖边-安塞亚区不同边坡高度综合抗剪强度参数反演值

图4中的曲线显示,当坡高增大时,粘聚力增大,内摩擦角减小。坡高越大,边坡沉积的黄土年份越久,反而内摩擦角值越低,这与目前的理解不同,分析有两个原因:(1)常规试验的应力状态与实际的潜在滑动表面上应力不一致<sup>[10]</sup>:在常规试验中,使用400kPa作为最大限制压力,在较大坡高的潜在滑动表面的应力可能远高于该值。(2)从低应力到高应力,常规莫尔-库仑包络线不发生非线性变化,但实际上其斜率是逐渐减小,常规试验结果高估了高应力(>400kPa)下的内摩擦角。

当坡度较低时,内摩擦角的波动对摩擦力(抗滑力)影响轻微,对稳定性变化影响不大。当坡度较高时,内摩擦角的波动对摩擦力(抗滑力)的影响较大,即当坡高增加时,内摩擦角对边坡稳定性的影响更加明显。从极限平衡计算原理分析,小坡高边坡的潜在滑动面浅而陡,滑动面法向应力小,内摩擦角的抗滑作用小,稳定性主要是粘聚力的函数。大坡高边坡的潜在滑动面较深且平缓,滑动面正应力较大,粘聚力对整个潜在滑动面的影响不再像小坡高边坡那样明

显。此时,内摩擦角主要控制边坡的稳定性。

#### 4 结论

靖边 - 安塞亚区的黄土边坡随坡高的增加,黄土的凝聚力增大,内摩擦角减小。当坡高增加时,内摩擦角对抗剪强度的贡献相比内聚力更加突出。边坡高度在 40-80m 范围内时,当坡高增加 10m,内聚力增加 2-24kPa;坡高在 90-120m 范围内时,当坡高增加 10m,内聚力增加 25-45kPa。

根据反演法得到的坡高和抗剪强度参数曲线,可以根据坡高,直接得到研究区内黄土边坡的抗剪强度参数,该方法可用于已知边坡稳定性系数的初始判断,和治理工程中设计边坡形状。

#### 参考文献

- [1] 李萍. 黄土边坡可靠性研究 [D]. 长安大学, 2006.
- [2] XIAO-YAN L, LIN-FAN Z, ZE Y, et al. Inversion analysis of the shear strength parameters for a high loess slope in the limit state [J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(01): 252-264.
- [3] 焦力, 李坤阳. 黄延公路黄土路堑高边坡结构特征及其设计方法研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(02):

136-138.

- [4] 刘超. 黄土高边坡抗剪强度参数反演研究 [D]. 长安大学, 2014.
- [5] 吴玮江, 王念秦. 黄土滑坡的基本类型与活动特征 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 02): 38-42.
- [6] 李萍, 王秉纲, 李同录. 自然类比法在黄土路堑边坡设计中的应用研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26(02): 1-5.
- [7] 郑明新. 论滑带土强度特征及强度参数的反算法 [J]. 岩土力学, 2003(04): 528-532.
- [8] KENNETH, J., HS ü. Catastrophic Debris Streams (Sturzstroms) Generated by Rockfalls [J]. GSA Bulletin, 1975, 86(1): 129-140.
- [9] Okuda S (1984) Features of debris deposits of large slope failures investigated from historical records. Annu Disaster Prev Res Inst 27(1): 353-368. (In Japanese)
- [10] YONGTAO Y, WENAN W, HONG Z. Searching for critical slip surfaces of slopes using stress fields by numerical manifold method [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(6): 1313-1325.