

基于剪切变形协调的边坡极限平衡法

查水生 姚凯财 张长樑 陈子平

南京宇正建设工程有限公司, 中国·江苏 南京 211200

摘要: 边坡极限平衡法是边坡稳定性分析的主流方法, 具有概念清晰, 实现简单, 易于被工程技术人员掌握的特点, 在边坡及滑坡防治工作中得到了广泛的应用。该方法提出的基于剪切变形协调的边坡极限平衡法将剪切变形协调的力学概念引入极限平衡法中, 避免在分析时的随意性, 使计算结果更科学可靠。

关键词: 剪切变形; 边坡极限; 平衡法

Slope Limit Equilibrium Method Based on Shear Deformation Coordination

Shuisheng Cha Kaicai Yao Changliang Zhang Ziping Chen

Nanjing Yuzheng Construction Engineering Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 211200, China

Abstract: The slope limit equilibrium method is the mainstream method for slope stability analysis, which has the characteristics of clear concept, simple implementation, and easy mastery by engineering and technical personnel. It has been widely used in slope and landslide prevention and control work. The slope limit equilibrium method based on shear deformation coordination proposed by this method introduces the mechanical concept of shear deformation coordination into the limit equilibrium method, avoiding arbitrariness in analysis and making the calculation results more scientific and reliable.

Keywords: shear deformation; slope limit; balancing method

0 前言

边坡极限平衡法是边坡稳定性分析的主流方法, 具有概念清晰, 实现简单, 易于被工程技术人员掌握的特点, 在边坡及滑坡防治工作中得到了广泛的应用。

研究发现, 传统的极限平衡法的条件力假设仅是为了增加约束条件, 将超静定问题转变为静定可解的问题, 没有考虑力学上的合理性, 缺乏力学依据, 具有较大的随意性, 计算所得安全系数的合理程度不能保证。

1 技术方案

提供一种基于剪切变形协调的边坡极限平衡法, 包括:

S100: 将目标边坡进行离散, 从上至下由 $n+1$ 个竖直面将目标边坡分成 n 个条块, 从上至下依次将多个条块记为第 i 条块, 其中 $i \geq 1$, 对应条块 i 底面上下的两个节点分别为第 i 节点及第 $i+1$ 节点, 对应第 i 节点的竖直面为第 i 条分面。

S200: 获取条块模型数据, 模型数据包括条块的几何参数、强度参数、变形参数及滑面水平位移。

令边坡的初始安全系数 F_s 介于 $0.5 \sim 2$ 。

S300: 令第 1 条分面条间法向力 $H_1=0$ 、条间剪切力 $V_1=0$, 并根据模型数据及条间剪切应变求取公式计算得到中间结果数据, 进而根据中间结果数据获取对应第 $n+1$ 条分面的条间法向力 H_{n+1} 。

S400: 判断 H_{n+1} 以及确认 F_s 。

S410: 判断 H_{n+1} 的绝对值是否大于允许误差 δ , 当 H_{n+1} 的绝对值不大于允许误差 δ , 确定边坡的安全系数为 F_s ; 当 H_{n+1} 的绝对值大于允许误差 δ , 则进入 S420。

当 H_{n+1} 的绝对值不大于允许误差 δ , 确定边坡的安全系数为 F_s ; 当 H_{n+1} 的绝对值大于允许误差 δ , 则进入 S420。

S420: 判断 H_{n+1} 是否大于 0, 若 $H_{n+1} > 0$, 则减小安全系数 F_s , 若 $H_{n+1} < 0$, 则增大安全系数 F_s , 进而重复步骤 S300~S410。

在可选的实施方式中, 条块的几何参数包括第 i 个条块的底面与水平面的夹角 θ_i 、第 i 个条块的宽度 B_i 、第 i 个条块的底面长度 L_i 、第 $i+1$ 条分面的长度 h_{i+1} ; 条块的强度参数包括第 i 个条块的粘聚力 C_i 、第 i 个条块的摩擦角以及每个条块的重力 G_i ; 条块的变形参数为第 i 个条块在第 $i+1$ 条分面上土的剪切模量的加权平均值 G_{ei+1} ; 第 i 个条块的滑面水平位移为对应第 $i+1$ 节点的水平位移 u_{i+1} ; 中间结果数据包括第 i 条分面的条间剪切力 V_i 、条间法向力 H_i , 第 $i+1$ 条分面的剪切应变代表宽度 L_{ei+1} 、剪切位移 z_{i+1} 、剪切应变 Se_{i+1} 、剪切应力 Ssi_{i+1} 、条间剪切力 V_{i+1} 、条间法向力 H_{i+1} , 第 i 个条块条底法向力 N_i 以及条底剪切力 T_i 。

根据 u_{i+1} 及 θ_i 计算得到第 i 个条块及第 $i+1$ 个条块在条分面处的剪切位移 z_{i+1} , 根据 B_i 与 B_{i+1} 计算得到剪切应变代表宽度 L_{ei+1} , 根据 z_{i+1} 及 L_{ei+1} 计算得到剪切应变 Se_{i+1} , 根据 Se_{i+1} 及 G_{ei+1} 计算得到剪切应力 Ssi_{i+1} , 根据 Ssi_{i+1} 及 h_{i+1} 计算得到条间剪切力 V_{i+1} , 根据 G_i 、 V_i 、 V_{i+1} 、 L_i 、 ϕ_i 以及计算得到第 i 个条块的条底法向力 N_i , 根据 N_i 、 ϕ_i 、 C_i 以及 L_i 计算得到条底剪切力 T_i , 根据 N_i 、 θ_i 、 T_i 、 H_i 计算得到 H_{i+1} , 其中 $c_i=C_i/F_s$ 、 $\phi_i=\phi_i/F_s$ 。

在可选的实施方式中, 根据 u_i 、 θ_i 及 θ_{i+1} 计算得到在第 i 个条块及第 $i+1$ 个条块在条分面处的剪切位移 Z_{i+1} 的步骤包括:

$$Z_{i+1} = u_{i+1} * (\tan(\theta_{i+1}) - \tan(\theta_i))$$

在可选的实施方式中, 根据 B_i 与 B_{i+1} 计算得到剪切应变代表宽度 L_{ei+1} 的步骤包括:

$$L_{ei+1} = (B_{i+1} + B_i) / 2$$

在可选的实施方式中, 根据 z_{i+1} 与 L_{ei+1} 计算得到剪切应变 S_{ei+1} 的步骤包括:

$$S_{ei+1} = z_{i+1} / L_{ei+1}$$

在可选的实施方式中, 根据 S_{ei+1} 及 G_{ei+1} 计算得到剪切应力 S_{si+1} 的步骤包括:

$$S_{si+1} = S_{ei+1} * G_{ei+1}$$

在可选的实施方式中, 根据 S_{si+1} 及 h_{i+1} 计算得到条间剪切力 V_{i+1} 的步骤包括:

$$V_{i+1} = S_{si+1} * h_{i+1}$$

在可选的实施方式中, 根据 G_i 、 V_i 、所述 V_{i+1} 、 c_i 、

L_i 、 θ_i 以及 ϕ_i 计算得到第 i 个条块的条底法向力 N_i 的步骤包括:

$$N_i = (G_i + V_i - V_{i+1} - c_i * L_i * \sin(\theta_i)) / (\tan(\phi_i) \sin(\theta_i) + \cos(\theta_i))$$

在可选的实施方式中, 根据 N_i 、 ϕ_i 、 c_i 以及 L_i 计算得到条底剪切力 T_i 的步骤包括:

$$T_i = N_i * \tan(\phi_i) + c_i * L_i$$

在可选的实施方式中, 根据 N_i 、 θ_i 、 T_i 、 H_i 计算得到 H_{i+1} 的步骤包括:

$$H_{i+1} = N_i * \sin(\theta_i) - T_i * \cos(\theta_i) + H_i$$

2 附图说明

实施例提供的基于剪切变形协调的边坡极限平衡法的示意性流程图见图 1, 实施例提供的基于剪切变形协调的边坡极限平衡法的条块离散图见图 2, 实施例提供的第 i 个条块的几何尺寸示意图见图 3, 实施例提供的第 $i+1$ 条分面上条块间剪切位移 z_{i+1} 计算示意图见图 4, 实施例提供的边坡条块受力分析图见图 5。

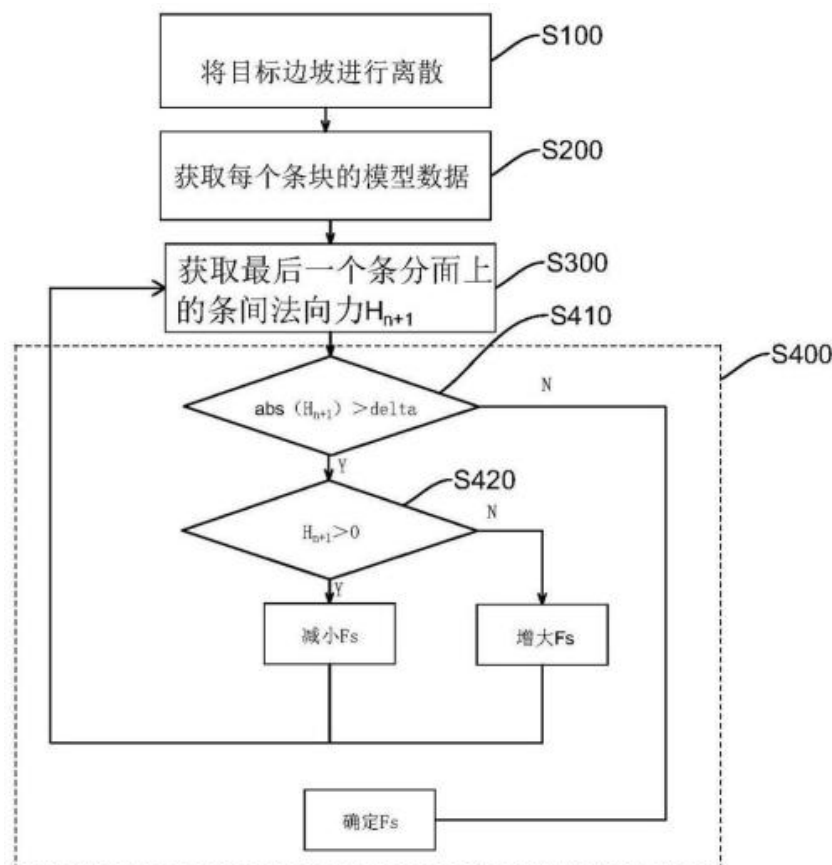


图 1 实施例提供的基于剪切变形协调的边坡极限平衡法的示意性流程图

力 N_i 以及条底剪切力 T_i 。

其中, 条块的变形参数为第 i 个条块在第 $i+1$ 个条分面上土的剪切模量的加权平均值 G_{ei+1} 。该数据均能够通过现有技术的测量等方法进行得到, 在此对其不做详细阐述。

S300: 获取最后一个条分面上的条间法向力 H_{n+1} 。

令第 1 条分面的条间法向力 $H_1=0$ 以及条间剪切力 $V_1=0$, 并根据模型数据及条间剪切应变求取公式计算得到中间结果数据, 进而根据中间结果数据获取对应第 $n+1$ 个条分面上的条间法向力 H_{n+1} 。

具体的, 在第 i 个条块及第 $i+1$ 个条块在条分面处的条分面处的剪切位移 z_{i+1} 可以根据 u_{i+1} 、 θ_i 及 θ_{i+1} 计算得到, 具体包括:

$$z_{i+1}=u_{i+1}*(\tan(\theta_i)-\tan(\theta_{i+1}))$$

剪切应变代表宽度 Le_{i+1} 能够根据 B_i 与 B_{i+1} 计算得到, 具体包括: $Le_{i+1}=(B_i+B_{i+1})/2$ 。

剪切应变 Se_{i+1} 能够根据 z_{i+1} 与 Le_{i+1} 计算得到, 具体包括: $Se_{i+1}=z_{i+1}/Le_{i+1}$ 。

能够根据 Se_{i+1} 及 G_{ei+1} 计算得到剪切应力 S_{si+1} , 具体包括: $S_{si+1}=Se_{i+1}*G_{ei+1}$ 。

条件剪切力 V_{i+1} 能够根据 S_{si+1} 述 h_{i+1} 计算得到, 具体步骤包括: $V_{i+1}=S_{si+1}*h_{i+1}$ 。第 1 个条分面的条间剪切力为零。

第 i 个条块的条底法向力 N_i 能够根据 G_i 、 V_i 、 V_{i+1} 、 c_i 、 L_i 、 θ_i 以及 ϕ_i 计算得到, 具体包括:

$$N_i=(G_i+V_i-V_{i+1}-c_i*L_i*\sin(\theta_i))/(\tan(\phi_i)\sin(\theta_i)+\cos(\theta_i))$$

条底剪切力 T_i 能够根据 N_i 、 ϕ_i 、 C_i 以及 L_i 计算得到, 具体包括:

$$T_i=N_i*\tan(\phi_i)+C_i*L_i$$

条分面上的条间法向力 H_{i+1} 可以根据 N_i 、 θ_i 、 T_i 、 H_i 计算得到, 具体包括: $H_{i+1}=N_i*\sin(\theta_i)-T_i*\cos(\theta_i)+H_i$ 。进而根据上述公式至第 1 个条块到第 n 个条块 (也即最后一个条块) 进行受力分析, 进而计算得到最后一个条分面 (也即第 $n+1$ 个条分面) 上的条间法向力 H_{n+1} 。需要说明的是, 上述的 $c_i=C_i/F_s$ 、需要说明的是, c_i 为第 i 个条块的条底黏聚力, 为第 i 个条块的内摩擦角, 且第 1 处节点的 $V_1=H_1=0$ 。

S400: 判断 H_{n+1} 以及确认 F_s 。

S410: 判断 H_{n+1} 的绝对值是否大于允许误差 δ , 当 H_{n+1} 的绝对值不大于允许误差 δ , 确定边坡的安全系数 F_s , 也即, 根据确定的安全系数 F_s 计算得到的最后一个条分面上的条间法向力能够在预设的允许误差 δ 内。需要说明的是, 允许误差 δ 可以根据实际情况具体确定, 在此不做详细阐述。

需要说明的是, F_s 为边坡的安全系数, 并记初始的安全系数 F_s 介于 0.5~2, 在本实施例中, 另初始的安全系数 $F_s=1$ 。当然在其他实施例中, 初始的安全系数 F_s 并不仅限于 1。

而当 H_{n+1} 的绝对值大于允许误差 δ 时, 则进入 S420。

S420: 判断 H_{n+1} 是否大于 0, 当 $H_{n+1} > 0$ 时, 减小安全系数 F_s , 当 H_{n+1} 小于 0 时, 增大安全系数 F_s , 进而再重复步骤 S300~S410。

换句话说, 需要根据改变后的 F_s 计算 c_i 以及进一步计算 H_{n+1} 。具体的, 也需要根据改变后的 c_i 以及重新计算 N_i 以及 T_i , 进而根据重新得到的 N_i 、 T_i 及 c_i 计算得到 H_{n+1} , 进而再重复步骤 S300~S410。

容易理解的, 在进入判断 H_{n+1} 是否大于 0 的步骤后, 根据 H_{n+1} 是否大于零进行对 F_s 的增减, 以重新计算 c_i 以及再根据重新得到的 N_i 、 T_i 及 c_i 计算得到 H_{n+1} , 直至 H_{n+1} 处于允许误差内, 进而确定目标边坡的安全系数 F_s 。

4 有益效果

4 有益效果

实施例提出的基于剪切变形协调的边坡极限平衡法将剪切变形协调的力学概念引入极限平衡法中, 通过将目标边坡离散为多个条块后, 对每个条块进行力学计算, 进而得到最后一个条分面上的 H_{n+1} , 并根据判断步骤, 最终得到目标边坡的安全系数 F_s , 在分析中引入了力学分析, 避免在分析时的随意性, 使计算结果更科学可靠。

参考文献:

- [1] 田光辉,沈明荣,杨瑞芳,等.锯齿形结构面剪切流变及非线性本构模型分析[J].西南交通大学学报,2018,53(5):9.
- [2] 赵永虎,刘高,毛举,等.基于灰色关联度的黄土边坡稳定性因素敏感性分析[J].长江科学院院报,2015,32(7):5.
- [3] 霍晨琛.地下水位上升对黄土高填方边坡稳定性的影响研究[D].西安:长安大学,2016.