



中华人民共和国国家标准

GB/T 37573—2019

露天煤矿边坡稳定性年度评价技术规范

Technical specification for annual evaluation of the stability of open-pit
coal mine slopes

2019-06-04 发布

2020-01-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义、符号..... 1

4 一般要求 2

5 技术要求 3

6 年度评价报告编制要求 5

附录 A（资料性附录） 边坡极限平衡方法分析 7

参考文献 17

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国煤炭工业协会提出并归口。

本标准起草单位：煤炭科学技术研究院有限公司、中煤平朔集团有限公司、神华准格尔能源有限责任公司、呼伦贝尔东明矿业有限责任公司、华能伊敏煤电有限责任公司、云南先锋煤业开发有限公司、中国矿业大学、陕西神延煤炭有限责任公司。

本标准主要起草人：李伟、艾畅、丁新启、周游、曹芳智、王振伟、才庆祥、刘宪权、刘玉福、曹勇、李卫红、王朝文、郑传书、王桂林、陈俊彬、钟晓勇、李继、周伟、张波、王泽强、杨叶齐、李绍臣、刘博文、刘玉凤、王维、李希耀、马明、李正胜、丁鑫品、张忠超、赵汝辉、闫杰、左岩、魏真、罗霄、王俊、王志鹏、张鹏。

露天煤矿边坡稳定性年度评价技术规范

1 范围

本标准规定了露天煤矿边坡稳定性年度评价工作的术语和定义、一般要求、技术要求、年度评价报告编制要求。

本标准适用于露天煤矿边坡稳定性年度评价工作。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB 50021 岩土工程勘察规范
- GB 50123 土工试验方法标准
- GB 50266 工程岩体试验方法标准
- GB 50778 露天煤矿岩土工程勘察规范

3 术语和定义、符号

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

采场边坡 **pit slope**

露天采场内由台阶平盘和台阶坡面组成的总体。

3.1.2

排土场边坡 **dump slope**

由人工排弃形成的堆填体边坡。

3.1.3

工作帮 **working slope**

由正在开采的台阶组成的边帮。

3.1.4

非工作帮 **non-working slope**

由已经结束开采的台阶组成的边帮。

3.1.5

到界边坡 **final highwall**

露天煤矿工作帮或非工作帮或其一部分达到最终境界时的边坡。

3.1.6

边坡稳定性评价 **stability evaluation of slope**

以定性分析为基础,以定量计算为手段,对边坡稳定状态进行验算和评判。

3.1.7

边坡稳定安全系数 safety factor of slope stability

表征边坡稳定程度的指标,是抗滑力和滑动力之比或抗滑力矩与滑动力矩之比。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

F ——边坡稳定安全系数;

F_{st} ——边坡稳定安全系数限值。

4 一般要求

4.1 露天煤矿边坡稳定性年度评价应包括露天煤矿概况、边坡工程地质勘察、岩土体物理力学参数确定、边坡变形破坏机理分析、边坡稳定性分析与评价、防治措施及建议六部分内容。

4.2 露天煤矿边坡稳定性年度评价应在收集已有资料的基础上进行,已有资料包括:露天煤矿概况、工程地质、水文地质、水文气象、地形地貌、采场现状、排土场现状、既往滑坡历史、年度采矿设计、监测资料等。对于资料不详实的区域,应进行边坡工程地质补充勘察。

4.3 年度评价的边坡应包括:

- a) 采场工作帮边坡、非工作帮边坡;
- b) 排土场边坡;
- c) 采场周边、重要构筑物周边的自然斜坡;
- d) 已发生滑坡、崩塌区域;
- e) 地质条件不良区域;
- f) 开采、排弃过程中出现新的不利因素的边坡;
- g) 开采条件(如条区转向等)发生变化的边坡;
- h) 井工开采影响区域的边坡。

4.4 露天煤矿边坡稳定性年度评价应根据工程地质、水文地质条件、采场、排土场周边重要构筑物分布,结合边坡工程地质勘察结果对边坡进行分区研究,每一分区应至少选择3个有代表性的剖面进行稳定性分析评价。剖面线应垂直边坡走向或平行主滑方向布置。对露天煤矿已有监测线、勘探线,应结合监测数据及相关地质资料,进行分析评价。

4.5 露天煤矿边坡稳定性年度评价应采用定性分析和定量分析相结合的方法进行。定性分析主要采用工程类比法和图解分析法。定量分析主要采用极限平衡分析法,基于刚体极限平衡理论和边坡的破坏形式,计算边坡的稳定安全系数。

4.6 边坡稳定安全系数的限值见表1。

表1 边坡稳定安全系数的限值

边坡类型	服务年限 a	稳定安全系数限值 F_{st}
边坡上有特别重要建筑物或边坡滑落 会造成生命财产重大损失者	>20	>1.5
采掘场最终边坡	>20	1.3~1.5
非工作帮边坡	<10	1.1~1.2
	10~20	1.2~1.3
	>20	1.3~1.5
工作帮边坡	临时	1.05~1.2

表 1 (续)

边坡类型	服务年限 a	稳定安全系数限值 F_{st}
外排土场边坡	>20	1.2~1.5
内排土场边坡	<10	>1.2
	≥ 10	>1.3

4.7 露天煤矿边坡稳定性年度评价结果应满足年度生产计划编制需要。

5 技术要求

5.1 边坡工程地质勘察

5.1.1 边坡工程地质勘察应在分析已有地质资料的基础上进行。对资料不详实区域应补充工程地质测绘、勘探。具体应符合 GB 50021、GB 50778 的相关规定。

5.1.2 存在下列一种或多种情况的边坡,可初步判别为有可能失稳的边坡:

- a) 顺坡向卸荷裂隙发育的边坡;
- b) 已发生倾倒变形或蠕变的边坡;
- c) 已发生张拉变形的下软上硬的双层或多层结构边坡;
- d) 在碎裂结构岩体中和散体结构岩体中开挖的边坡;
- e) 存在有倾向坡外的结构面,且结构面的倾角小于坡角并大于其内摩擦角的岩质边坡;
- f) 坡面上出现平行边坡走向的张裂缝或环形裂缝的边坡;
- g) 分布有巨厚层崩积物的边坡;
- h) 基底水浸条件下的排土场边坡;
- i) 固定帮水浸条件下的内排土场边坡;
- j) 被开挖的新、老滑坡体、崩塌体;
- k) 曾经失稳的边坡;
- l) 超出设计技术指标的陡帮边坡及高段排土场边坡。

5.1.3 边坡稳定性的初步判别宜采用极射赤平投影法、工程地质类比法。对区域地质资料详实的边坡,宜采用工程地质类比法进行判别;岩质边坡宜采用极射赤平投影法进行判别。

5.2 岩土体物理力学参数确定

5.2.1 岩土体物理力学参数确定应在分析已有资料的基础上选取;对资料不详实的边坡应补充岩土体物理力学试验。对已滑移的滑坡,其滑动面的抗剪强度指标宜取残余强度值,或结合反演分析方法确定。

5.2.2 岩土体物理力学参数确定宜采用现场原位试验、室内试验、反演分析和工程类比等方法,结合已有项目成果对比获得。具体应符合 GB 50123、GB 50266 的相关规定。

5.3 边坡变形破坏机理分析

5.3.1 查明边坡失稳影响因素,包括主导因素和诱发因素,前者主要为边坡形状、地层岩性、地质构造等,后者主要指运输载荷、地震/爆破震动、降水或地下水作用等。

5.3.2 边坡变形破坏机理分析宜采用模型试验与数值计算相结合的方式,确定边坡潜在破坏模式。数值计算宜采用有限单元法等数值分析方法。

5.3.3 对有地下水赋存或降水量大的区域,应将地下水与大气降水作为重点影响因素进行分析。

5.3.4 对抗震烈度为 7 度及以上地区的永久性边坡应进行地震工况下边坡变形破坏机理分析。

5.3.5 边坡下部存在采空区时,应考虑采空区对岩体强度的影响,选用合理参数评价采空区对边坡稳定的影响程度。

5.4 边坡稳定性评价

5.4.1 边坡稳定性评价应对分区内现状边坡和年度计划的设计边坡的所有代表性剖面进行稳定性计算。除对边坡自然状态下稳定性进行分析评价外,还应考虑诱发因素影响下的边坡稳定性,如运输载荷、地震、爆破震动、降水或地下水作用等。

5.4.2 边坡稳定分析应以刚体极限平衡方法为基本计算方法。计算方法与计算公式参考附录 A。边坡稳定分析应根据可能发生的滑坡破坏模式选择合适的计算方法,对边坡同一位置的稳定性安全系数应至少采用两种以上方法计算获得,并进行对比和验证。

5.4.3 对于土质边坡和强度极低的岩层、散体结构或碎裂结构的岩质边坡,当滑动面为圆弧形时,宜采用简化毕肖普法(Simplified Bishop)和摩根斯顿-普赖斯法(Morgenstern-Price)进行稳定性计算。

5.4.4 对于可能沿基岩面、原地面、层面、裂隙面、断层面或软弱结构面发生滑动的边坡,当滑动面为平面或折线型时,宜采用摩根斯顿-普赖斯法(Morgenstern-Price)或斯宾塞法(Spencer)进行稳定性计算。

5.4.5 对于块状结构或层状结构的岩质边坡,宜采用萨尔玛法(Sarma)和不平衡推力传递法进行稳定性计算。

5.4.6 对两组或两组以上节理裂隙或结构面切割而成的楔形滑体边坡,宜采用楔体法进行稳定性计算。

5.4.7 对于层状岩体可能发生倾倒破坏的边坡,宜首先采用定性分析和定量分析相结合方法确定可能发生倾倒的部位,采用数值分析方法对边坡稳定性进行判断。

5.4.8 对于崩塌破坏边坡,宜采用定性和半定量分析的方法,评价其稳定性情况。

5.4.9 采场、排土场边坡稳定性分析应进行整体稳定性分析和局部台阶稳定性分析,并对单台阶坡面角、单台阶高度、平盘宽度、最大排弃高度、最终帮坡角进行验证评价。

5.4.10 根据稳定性计算结果进行边坡稳定性分类,分类标准应按表 2 的规定执行。

表 2 稳定性分类表

边坡稳定性安全系数 F	$F < 1.00$	$1.00 \leq F < F_{st}$	$F \geq F_{st}$
边坡稳定性状态	不稳定	基本稳定	稳定

5.5 防治措施及建议

5.5.1 应结合工程地质资料及稳定性分类结果,分析边坡基本稳定、不稳定的原因。对不稳定、基本稳定区域,宜采用监测手段和人工巡视相结合的方法开展防治工作;必要时可采用压坡脚、削坡、设置抗滑桩、锚索等措施进行治理。对稳定区域,宜采用人工巡视的方法开展防治工作,雨季或极端天气下应加强巡视频次。

5.5.2 对于现状和设计边坡稳定性分析结果,结合采矿技术手段,对不合理的现状或设计边坡提出建议,建议内容应包括整体帮坡角、单台阶坡面角、平盘宽度、排土场台阶高度、排土场排弃高度等。

6 年度评价报告编制要求

6.1 露天煤矿概况

6.1.1 露天煤矿概况应包括基本情况、地理位置、交通条件、水文、气象、地形地貌、采矿设计资料。

6.1.2 水文、气象资料应包括以下内容：

- a) 降雨,包括降雨强度和时间;
- b) 对边坡安全有影响的集水面积及地面径流;
- c) 最高、最低气温和最热、最冷月平均气温,在寒冷和严寒地区还应包括最大冻土深度。

6.1.3 地形地貌、采矿设计资料应包括以下内容：

- a) 附有坐标地形和地面建筑物等的最新采剥及排土工程平面图;
- b) 露天煤矿地形地质图;
- c) 露天煤矿年度生产计划;
- d) 露天煤矿地质说明书。

6.2 边坡工程地质勘察

边坡工程地质勘察应包含以下内容：

- a) 已有工程地质资料;
- b) 已有水文地质资料;
- c) 地质资料不详实区域的工程地质补充测绘、补充勘察成果;
- d) 工程地质分区原则及范围;
- e) 代表性剖面选取原则及位置;
- f) 代表性剖面工程地质模型。

6.3 岩土体物理力学参数确定

岩土体物理力学参数确定应包含以下内容：

- a) 已有岩土体试验报告及来源;资料不详实区域的补充岩土体物理力学试验报告;
- b) 反演分析、工程类比分析过程及结果;
- c) 边坡稳定性年度评价物理力学参数推荐值;

6.4 边坡变形破坏机理分析

6.4.1 边坡变形破坏机理分析应包含以下内容：

- a) 边坡变形破坏机理分析代表性剖面的选取;
- b) 分析方法的选取与理由;
- c) 自然状态下代表性剖面的计算过程及结果;
- d) 诱发因素影响下代表性剖面的计算过程及结果;
- e) 边坡变形机理、潜在破坏模式和破坏影响范围评价。

6.4.2 代表性剖面的计算过程及结果,应包括边坡体的应力、变形、塑性区等内容。

6.5 边坡稳定性分析与评价

边坡稳定性分析与评价应包含以下内容：

- a) 边坡稳定性分析的方法选择;
- b) 各分区边坡稳定安全系数限值的选取;

- c) 边坡稳定性分析的计算过程与结果；
- d) 诱发因素影响下边坡稳定性分析的计算过程与结果；
- e) 边坡(整体/局部)稳定性评价与分类。

6.6 防治措施及建议

6.6.1 防治措施宜包括边坡不稳定、基本稳定、稳定区域形成的原因分析与总结以及已有防治措施的效果分析。

6.6.2 建议宜包括边坡不稳定、基本稳定、稳定区域宜采取的防治措施的建议。

附录 A
(资料性附录)
边坡极限平衡方法分析

A.1 简化毕肖普法

采用简化毕肖普法(见图 A.1)计算边坡稳定性安全系数时,应按式(A.1)计算:

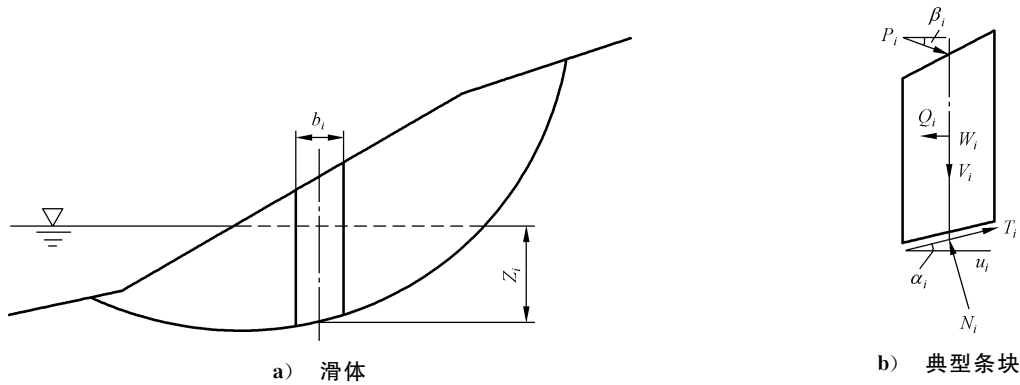


图 A.1 简化毕肖普法计算简图

$$F = \frac{\sum \{ [(W_i + V_i + P_i \sin \beta_i) \sec \alpha_i - u_i b_i \sec \alpha_i] \tan \varphi'_i + c'_i b_i \sec \alpha_i \} / (1 + \tan \alpha_i \tan \varphi'_i / F)}{\sum [(W_i + V_i + P_i \sin \beta_i) \sin \alpha_i + M_{Q_i} / R - P_i h_{P_i} \cos \beta_i / R]} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

W_i ——第 i 条块重量,单位为千牛(kN);

V_i ——第 i 条块垂直向地震惯性力(V 向上取“—”,向下取“+”),单位为千牛(kN);

P_i ——作用于第 i 条块的外力(不含坡外水压力),单位为千牛(kN);

u_i ——第 i 条块底面的单位孔隙压力,单位为千牛每米(kN/m);

b_i ——第 i 条块宽度,单位为米(m);

α_i ——第 i 条块底面与水平面的夹角(以水平线为起始线,逆时针为正角,顺时针为负角,单位为度(°);

β_i ——第 i 条块的外力 P_i 与水平线的夹角(以水平线为起始线,顺时针为正角,逆时针为负角,单位为度(°);

c'_i ——第 i 条块底面的有效凝聚力,单位为千帕(kPa);

φ'_i ——第 i 条块底面的内摩擦角,单位为度(°);

M_{Q_i} ——第 i 条块水平向地震惯性力 Q_i 对圆心的力矩,单位为千牛米(kN·m);

Q_i ——第 i 条块水平向地震惯性力(Q_i 方向与边坡滑动方向一致时取“+”,反之取“—”),单位为千牛(kN);

h_{P_i} ——第 i 条块的外力 P_i 水平方向分力对圆心的力臂,单位为米(m);

R ——滑动面圆弧半径,单位为米(m);

F ——边坡稳定性安全系数。

A.2 摩根斯顿-普赖斯法

当采用摩根斯顿-普赖斯法边坡稳定性安全系数时,应按下列改进方法计算:

a) 改进方法 1

见图 A.2,应按式(A.2)~式(A.11)计算:

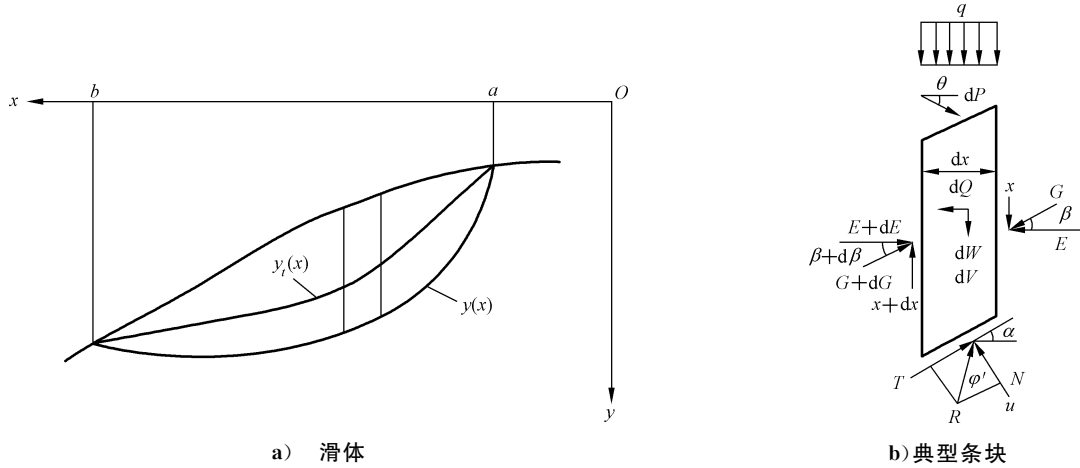


图 A.2 摩根斯顿-普赖斯法(改进方法 1)计算简图

$$\int_a^b p(x)s(x)dx = 0 \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

$$\int_a^b p(x)s(x)t(x)dx - M_e + M_p = 0 \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

$$p(x) = \left(\frac{dW}{dx} + \frac{dV}{dx} + q + \frac{dP}{dx} \sin \theta \right) \sin(\tilde{\varphi}' - \alpha) - u \sec \alpha \sin \tilde{\varphi}' + \tilde{c}' \sec \alpha \cos \tilde{\varphi}' - \left(\frac{dQ}{dx} - \frac{dP}{dx} \cos \theta \right) \cos(\tilde{\varphi}' - \alpha) \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

$$s(x) = \sec(\tilde{\varphi}' - \alpha + \beta) \exp \left[- \int_a^x \tan(\tilde{\varphi}' - \alpha + \beta) \frac{d\beta}{d\zeta} d\zeta \right] \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

$$t(x) = \int_a^x (\sin \beta - \cos \beta \tan \alpha) \exp \left[\int_a^\zeta \tan(\tilde{\varphi}' - \alpha + \beta) \frac{d\beta}{d\beta} d\zeta \right] d\zeta \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

$$M_e = \int_a^b \frac{dQ}{dx} h_e dx \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

$$M_p = \int_a^b \frac{dP}{dx} l_p \cos \theta dx \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

$$\tilde{c}' = \frac{c'}{F} \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

$$\tan \tilde{\varphi}' = \frac{\tan \varphi'}{F} \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

$$\tan \beta = \lambda f(x) \quad \dots\dots\dots (A.11)$$

式中:

dx ——条块宽度,单位为米(m);

- c' ——条块底面上的有效凝聚力,单位为千帕(kPa);
 φ' ——条块底面上的内摩擦角,单位为度($^{\circ}$);
 $\tilde{c}'$ ——条块底面上折减后的有效凝聚力,单位为千帕(kPa);
 $\tilde{\varphi}'$ ——条块底面上折减后的内摩擦角,单位为度($^{\circ}$);
 dW ——条块重量,单位为千牛(kN);
 q ——条块顶部的垂直均布荷载,单位为千牛每米(kN/m);
 M_e ——各条块水平地震惯性力对条块底部中点力矩之和,单位为千牛米(kN·m);
 M_P ——各条块加固力的水平分力对条块底部中点力矩之和,单位为千牛米(kN·m);
 dQ, dV ——条块的水平向和垂直向地震惯性力(dQ 方向与边坡滑动方向一致时取“+”,反之取“-”; dV 向上取“-”,向下取“+”),单位为千牛(kN);
 dP ——作用于条块的外力(不含坡外水压力),单位为千牛(kN);
 u ——作用于条块底面的单位孔隙压力,单位为千牛每米(kN/m);
 α ——条块底面与水平面的夹角(以水平线为起始线,逆时针为正角,顺时针为负角),单位为度($^{\circ}$);
 β ——条块侧面的合力与水平方向的夹角(以水平线为起始线,逆时针为正角,顺时针为负角),单位为度($^{\circ}$);
 $d\beta$ ——相对于上一跳开的条块侧面合力与水平方向的夹角的增量,单位为度($^{\circ}$);
 λ ——确定 $\tan\beta$ 值的待定系数;
 $f(x)$ —— $\tan\beta$ 值在 x 方向上的分布形状,可取 $f(x)=1$;
 θ ——外力与水平方向的夹角(以水平线为起始线,顺时针为正角,逆时针为负角),单位为度($^{\circ}$);
 h_e ——水平地震惯性力到条块底面中点的垂直距离,单位为米(m);
 l_P ——外力的水平分力到条块底面中点的垂直距离,单位为米(m)。

b) 改进方法 2

见图 A.3,应按式(A.12)~式(A.20)计算:

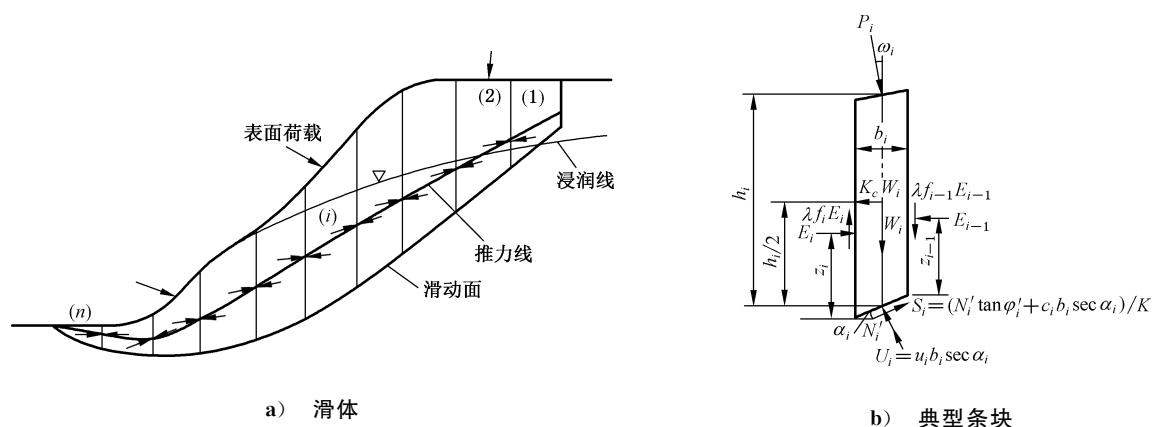


图 A.3 摩根斯顿-普赖斯法(改进方法 2)计算简图

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=1}^{n-1} \Psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=1}^{n-1} \Psi_j) + T_n}, (\text{当 } E_0 = 0, E_n = 0 \text{ 时}) \quad \dots\dots\dots (\text{A.12})$$

$$R_i = [W_i \cos \alpha_i - K_c W_i \sin \alpha_i + P_i \cos(\omega_i - \alpha_i) - U_i] \tan \varphi'_i + c'_i b_i \sec \alpha_i \quad \dots\dots (\text{A.13})$$

$$T_i = W_i \sin \alpha_i + K_c W_i \cos \alpha_i - P_i \sin(\omega_i - \alpha_i) \quad \dots\dots\dots (\text{A.14})$$

$$\Psi_{i-1} = \frac{(\sin \alpha_i - \lambda f_{i-1} \cos \alpha_i) \tan \varphi'_i + (\cos \alpha_i + \lambda f_{i-1} \sin \alpha_i) F}{\Phi_{i-1}} \quad \dots\dots\dots (\text{A.15})$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n [b_i (E_i + E_{i-1}) \tan \alpha_i + K_c \omega_i h_i - 2 P_i \sin \omega_i h_i]}{\sum_{i=1}^n [b_i (f_i E_i + f_{i-1} E_{i-1})]} (\text{当 } M_0 = 0, M_n = 0 \text{ 时}) \quad \dots\dots\dots (\text{A.16})$$

$$M_i = E_i z_i \quad \dots\dots\dots (\text{A.17})$$

$$E_i \Phi_i = \Psi_{i-1} E_{i-1} \Phi_{i-1} + K T_i - R_i \quad \dots\dots\dots (\text{A.18})$$

$$\Phi_i = (\sin \alpha_i - \lambda f_i \cos \alpha_i) \tan \varphi'_i + (\cos \alpha_i + \lambda f_i \sin \alpha_i) F \quad \dots\dots\dots (\text{A.19})$$

$$\Phi_{i-1} = (\sin \alpha_{i-1} - \lambda f_{i-1} \cos \alpha_{i-1}) \tan \varphi'_{i-1} + (\cos \alpha_{i-1} + \lambda f_{i-1} \sin \alpha_{i-1}) F \quad \dots\dots\dots (\text{A.20})$$

式中:

- K_c ——水平地震惯性力影响系数;
- α_{i-1} ——第 $i-1$ 条块底面与水平面的夹角(以水平线为起始线,逆时针为正角,顺时针为负角),单位为度($^{\circ}$);
- ω_i ——第 i 条块外力 P_i 与竖直方向夹角(以铅垂线为起始线,逆时针为正角,顺时针为负角),单位为度($^{\circ}$);
- M_i ——第 i 条块与第 $i+1$ 条块间的条间力矩,单位为千牛米($\text{kN} \cdot \text{m}$);
- z_i ——第 i 条块与第 $i+1$ 条块间的条间力 E_i 至条间侧面底的距离,单位为米(m);
- h_i ——第 i 条块高度,单位为米(m);
- U_i ——第 i 条块底面水压力的合力,单位为千牛(kN), $U_i = u_i b_i \sec \alpha_i$;
- φ'_{i-1} ——第 $i-1$ 滑动条块底面的有效内摩擦角,单位为度($^{\circ}$);
- E_i, E_{i-1} ——作用于第 i 条块的左右两边条块间的法向力,单位为千牛(kN);
- $\lambda f_i E_i$ ——第 i 条块与第 $i+1$ 条块间的剪切力,单位为千牛(kN), λf_i 为条块间法向力与剪切力的比值函数 $\lambda f(x)$ 在该条分位置的数值;
- $\lambda f_{i-1} E_{i-1}$ ——第 i 条块与第 $i-1$ 条块间的剪切力,单位为千牛(kN), λf_{i-1} 为条块间法向力与剪切力的比值函数 $\lambda f(x)$ 在该条分位置的数值;
- λ ——条块间法向力与剪切力比值函数的比例系数;
- $f(x)$ ——条间力函数,可采用 $f(x) = 1$ (相当于斯宾塞法)或半正弦函数;
- R_i, R_n ——第 i 条块与第 n 条块底面抗滑力的合力,单位为千牛(kN);
- T_i, T_n ——第 i 条块与第 n 条块底面滑动力的合力,单位为千牛(kN).

A.3 不平衡推力传递法

不平衡推力传递法(见图 A.4)应按式(A.21)~式(A.25)计算:

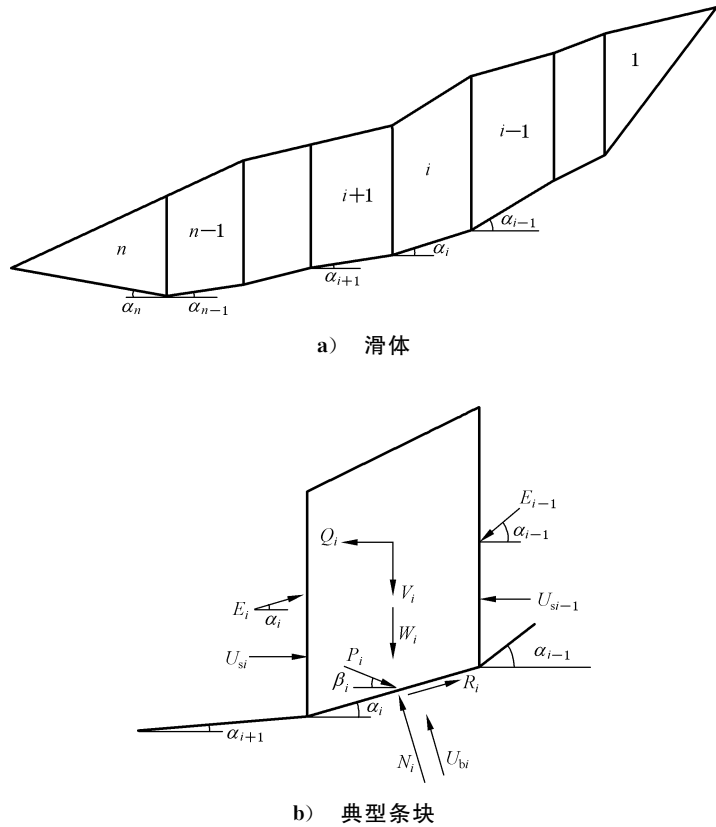


图 A.4 不平衡推力传递法计算简图

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i+1}^n \Psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i+1}^n \Psi_j) + T_n} \dots\dots\dots (A.21)$$

$$R_i = [(W_i + V_i) \cos \alpha_i - U_{bi} - (Q_i - U_{si} + U_{si-1}) \sin \alpha_i + P_i \sin(\alpha_i + \beta_i)] \tan \varphi'_i + c'_i b_i \sec \alpha_i \dots\dots\dots (A.22)$$

$$T_i = (W_i + V_i) \sin \alpha_i + (Q_i - U_{si} + U_{si-1}) \cos \alpha_i - P_i \cos(\alpha_i + \beta_i) \dots\dots\dots (A.23)$$

$$\Psi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi'_i / F \dots\dots\dots (A.24)$$

作用于条块侧面上的推力按式(A.25)计算：

$$E_i = T_i - R_i / F + \Psi_i E_{i-1} \dots\dots\dots (A.25)$$

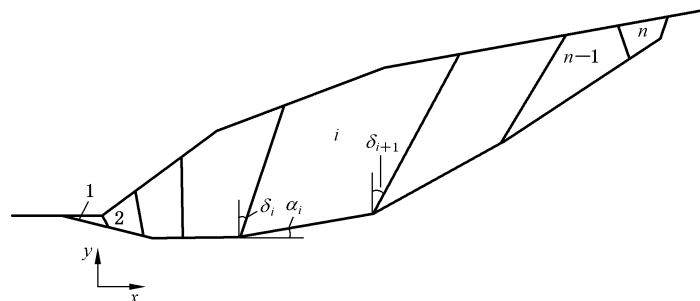
式中：

- Ψ_i ——第 i 滑动条块侧面的推力传递系数；
- U_{bi} ——第 i 滑动条块底面的孔隙压力,单位为千牛(kN)；
- U_{si} ——第 i 滑动条块左侧面的孔隙压力,单位为千牛(kN)；
- U_{si-1} ——第 i 滑动条块右侧面的孔隙压力,单位为千牛(kN)；
- E_{i-1} ——第 $i-1$ 滑动条块作用于第 i 滑动条块的推力,单位为千牛(kN)；
- E_i ——第 $i+1$ 滑动条块作用于第 i 滑动条块侧面的反作用力,单位为千牛(kN),与第 i 滑动条块的推力大小相等,方向相反。

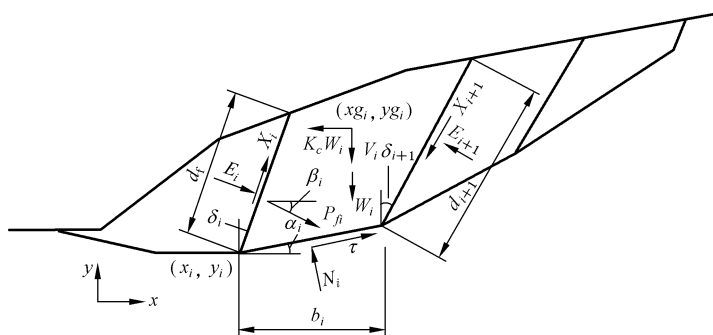
A.4 萨尔玛法

A.4.1 萨尔玛法

见图 A.5,应按式(A.26)~式(A.39)计算:



a) 滑体



b) 典型条块

图 A.5 萨尔玛法计算简图

$$K_c = \frac{a_n + a_{n-1}e_n + a_{n-2}e_ne_{n-1} + \cdots + a_1e_ne_{n-1} \cdots e_3e_2 + E_1e_ne_{n-1} \cdots e_1 - E_{n+1}}{p_n + p_{n-1}e_n + p_{n-2}e_ne_{n-1} + \cdots + p_1e_ne_{n-1} \cdots e_3e_2} \dots\dots\dots (A.26)$$

$$a_i = \frac{R_i \cos \tilde{\varphi}'_{bi} + (W_i + V_i) \sin(\tilde{\varphi}'_{bi} - \alpha_i) + S_{i+1} \sin(\tilde{\varphi}'_{bi} - \alpha_i - \delta_{i+1}) - S_i \sin(\tilde{\varphi}'_{bi} - \alpha_i - \delta_i)}{\cos(\tilde{\varphi}'_{bi} - \alpha_i + \tilde{\varphi}'_{si+1} - \delta_{i+1}) \sec \tilde{\varphi}'_{si+1}} \dots\dots\dots (A.27)$$

$$p_i = \frac{(W_i + V_i) \cos(\tilde{\varphi}'_{bi} - \alpha_i)}{\cos(\tilde{\varphi}'_{bi} - \alpha_i + \tilde{\varphi}'_{si+1} - \delta_{i+1}) \sec \tilde{\varphi}'_{si+1}} \dots\dots\dots (A.28)$$

$$e_i = \frac{\cos(\tilde{\varphi}'_{bi} - \alpha_i + \tilde{\varphi}'_{si} - \delta_i) \sec \tilde{\varphi}'_{si}}{\cos(\tilde{\varphi}'_{bi} - \alpha_i + \tilde{\varphi}'_{si+1} - \delta_{i+1}) \sec \tilde{\varphi}'_{si+1}} \dots\dots\dots (A.29)$$

$$R_i = \tilde{c}'_{bi} b_i \sec \alpha_i + P_{fi} \cos(\alpha_i + \beta_i) + [P_{fi} \sin(\alpha_i + \beta_i) - U_{bi}] \tan \tilde{\varphi}'_{bi} \dots\dots\dots (A.30)$$

$$S_i = \tilde{c}'_{si} d_i - U_{si} \tan \tilde{\varphi}'_{si} \quad \dots\dots\dots (\text{ A.31 })$$

$$S_{i+1} = \tilde{c}'_{si+1} d_{i+1} - U_{si+1} \tan \tilde{\varphi}'_{si+1} \dots\dots\dots (A.32)$$

$$\tan \tilde{\varphi}'_{bi} = \tan \varphi'_{bi} / F \quad \dots\dots\dots (A.33)$$

$$\tilde{c}'_{bi} = c'_{bi} / F \quad \dots\dots\dots (A.34)$$

$$\tan \tilde{\varphi}'_{si} = \tan \varphi'_{si} / F \quad \dots\dots\dots (A.35)$$

$$\tilde{c}'_{si} = c'_{si} / F \quad \dots\dots\dots (A.36)$$

$$\tan \tilde{\varphi}'_{si+1} = \tan \varphi'_{si+1} / F \quad \dots\dots\dots (A.37)$$

$$\tilde{c}'_{si+1} = c'_{si+1} / F \quad \dots\dots\dots (A.38)$$

作用于第 i 条块左侧面上的推力按式(A.39)计算:

$$E_i = \alpha_{i-1} - p_{i-1} F + E_{i-1} e_{i-1} \quad \dots\dots\dots (A.39)$$

式中:

- c'_{bi} ——第 i 条块底面上的有效凝聚力,单位为千帕(kPa);
- φ'_{bi} ——第 i 条块底面上的内摩擦角,单位为度($^{\circ}$);
- $\tilde{c}'_{bi}$ ——第 i 条块底面上折减后的有效凝聚力,单位为千帕(kPa);
- $\tilde{\varphi}'_{bi}$ ——第 i 条块底面上折减后的内摩擦角,单位为度($^{\circ}$);
- c'_{si} ——第 i 条块第 i 侧面上的有效凝聚力,单位为千帕(kPa);
- φ'_{si} ——第 i 条块第 i 侧面上的内摩擦角,单位为度($^{\circ}$);
- $\tilde{c}'_{si}$ ——第 i 条块第 i 侧面上折减后的有效凝聚力,单位为千帕(kPa);
- $\tilde{\varphi}'_{si}$ ——第 i 条块第 i 侧面上折减后的内摩擦角,单位为度($^{\circ}$);
- c'_{si+1} ——第 i 条块第 $i+1$ 侧面上的有效凝聚力,单位为千帕(kPa);
- φ'_{si+1} ——第 i 条块第 $i+1$ 侧面上的内摩擦角,单位为度($^{\circ}$);
- $\tilde{c}'_{si+1}$ ——第 i 条块第 $i+1$ 侧面上折减后的有效凝聚力,单位为千帕(kPa);
- $\tilde{\varphi}'_{si+1}$ ——第 i 条块第 $i+1$ 侧面上折减后的内摩擦角,单位为度($^{\circ}$);
- $U_{si}、U_{si+1}$ ——第 i 侧面、第 $i+1$ 侧面上的孔隙压力,单位为千牛(kN);
- U_{bi} ——第 i 条块底面上的孔隙压力,单位为千牛(kN);
- P_{fi} ——作用于第 i 条块上的加固力,单位为千牛(kN);
- $\delta_i、\delta_{i+1}$ ——第 i 条块第 i 侧面和第 $i+1$ 侧面的倾角(以铅垂线为起始线,顺时针为正角,逆时针为负角),单位为度($^{\circ}$);
- E_{n+1} ——第 n 条块右侧面总的正压力,单位为千牛(kN),一般情况下 $E_{n+1}=0$;
- E_1 ——第 1 条块左侧面总的正压力,单位为千牛(kN),一般情况下 $E_1=0$;
- K_c ——临界水平地震加速度;
- α_i ——第 i 条块底面与水平面的夹角,单位为度($^{\circ}$);
- β_i ——第 i 条块上加固力与水平面的夹角,单位为度($^{\circ}$);
- b_i ——第 i 条块底面水平投影长度,单位为米(m);
- $d_i、d_{i+1}$ ——第 i 条块第 i 侧面和第 $i+1$ 侧面的长度,单位为米(m)。

A.4.2 萨尔玛法-改进法 1

见图 A.6,应按式(A.40)~式(A.44)计算:

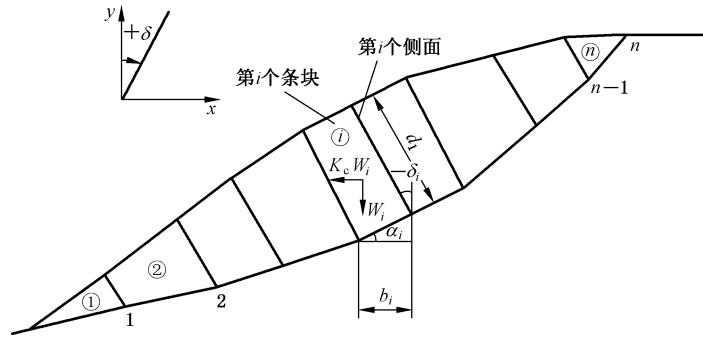


图 A.6 萨尔玛法-改进法 1 计算简图

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^n \lambda_{i-1} [(\tilde{c}'_{bi} \cos \tilde{\varphi}'_{bi} - u_{bi} \sin \tilde{\varphi}'_{bi}) b_i \sec \alpha_i] + \\
 & \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i [(\tilde{c}'_{si} \cos \tilde{\varphi}'_{si} - u_{si} \sin \tilde{\varphi}'_{si}) \sec(\alpha'_i + \delta_i - \tilde{\varphi}'_{bi} - \tilde{\varphi}'_{si}) \sin(\Delta \alpha_i - \Delta \tilde{\varphi}'_{bi}) d_i] \\
 & = \sum_{i=1}^n \lambda_{i-1} (W_i + V_i + P_i \sin \beta_i) \sin(\alpha_i - \tilde{\varphi}'_{bi}) + (K_c W_i - P_i \cos \beta_i) \cos(\alpha_i - \tilde{\varphi}'_{bi}) \\
 & \dots\dots\dots (A.40)
 \end{aligned}$$

$$\lambda_0 = 1$$

$$\lambda_i = \prod_{j=1}^i \frac{\cos(\alpha'_j + \delta_j - \tilde{\varphi}'_{bj} - \tilde{\varphi}'_{sj})}{\cos(\alpha'_j + \delta_j - \tilde{\varphi}'_{bj} - \tilde{\varphi}'_{sj})}, i = 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad \dots\dots\dots (A.41)$$

$$\tan \tilde{\varphi}'_{bj} = \tan \tilde{\varphi}'_{bj} / F \quad \dots\dots\dots (A.42)$$

$$\tan \tilde{\varphi}'_{sj} = \tan \tilde{\varphi}'_{sj} / F \quad \dots\dots\dots (A.43)$$

$$\tan \tilde{\varphi}'_{sj} = \tan \tilde{\varphi}'_{sj} / F \quad \dots\dots\dots (A.44)$$

式中:

- u_{bi} ——第 i 条块底面的单位孔隙压力,单位为千牛每米(kN/m);
- u_{si} ——第 i 条块侧面的单位孔隙压力,单位为千牛每米(kN/m);
- d_i ——第 i 条块第 i 侧面的长度,单位为米(m);
- $\varphi'_{bj}, \varphi'_{sj}$ ——第 j 个侧面左侧和右侧条块底面的有效内摩擦角,单位为度(°);
- φ'_j ——第 j 个侧面的有效内摩擦角,单位为度(°);
- α'_j, α_j ——第 j 个侧面左侧和右侧条块底面的倾角,单位为度(°);
- $\Delta \alpha_i, \Delta \tilde{\varphi}'_{bi}$ ——第 i 个侧面右侧条块相对左侧条块 α_i 和 $\tilde{\varphi}'_{bi}$ 的增量,单位为度(°);
- $\tan \tilde{\varphi}'_{bi}, \tilde{c}'_{bi}, \tan \tilde{\varphi}'_{si}, \tilde{c}'_{si}$ 的计算分别见式(A.33)~式(A.36)。

A.5 楔体法

采用楔体法(见图 A.7),当滑动方向沿 CO 时,应按式(A.45)计~式(A.63)算:

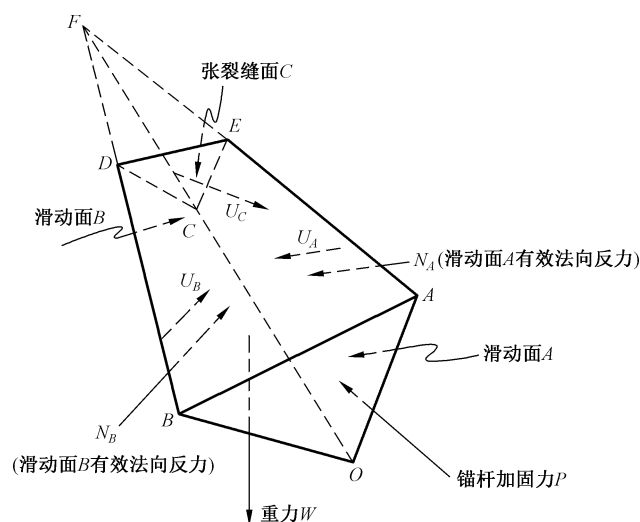


图 A.7 楔体法计算简图

$$F = \frac{c'_A A_A + c'_B A_B + N_A \tan \varphi'_A + N_B \tan \varphi'_B}{m_{WS} W + m_{CS} U_C + m_{PS} P} \quad (\text{A.45})$$

$$N_A = qW + rU_C + sP - U_A \quad (\text{A.46})$$

$$N_B = xW + yU_C + zP - U_B \quad (\text{A.47})$$

$$q = (m_{ab} m_{wb} - m_{wa}) / (1 - m_{ab}^2) \quad (\text{A.48})$$

$$r = (m_{ab} m_{cb} - m_{ca}) / (1 - m_{ab}^2) \quad (\text{A.49})$$

$$s = (m_{ab} m_{pb} - m_{pa}) / (1 - m_{ab}^2) \quad (\text{A.50})$$

$$x = (m_{ab} m_{wa} - m_{wb}) / (1 - m_{ab}^2) \quad (\text{A.51})$$

$$y = (m_{ab} m_{ca} - m_{cb}) / (1 - m_{ab}^2) \quad (\text{A.52})$$

$$z = (m_{ab} m_{pa} - m_{pb}) / (1 - m_{ab}^2) \quad (\text{A.53})$$

$$m_{ab} = \sin \Psi_a \sin \Psi_b \cos(\alpha_a - \alpha_b) + \cos \Psi_a \cos \Psi_b \quad (\text{A.54})$$

$$m_{wa} = -\cos \Psi_a \quad (\text{A.55})$$

$$m_{wb} = -\cos \Psi_b \quad (\text{A.56})$$

$$m_{ca} = \sin \Psi_a \sin \Psi_c \cos(\alpha_a - \alpha_c) + \cos \Psi_a \cos \Psi_c \quad (\text{A.57})$$

$$m_{cb} = \sin \Psi_b \sin \Psi_c \cos(\alpha_b - \alpha_c) + \cos \Psi_b \cos \Psi_c \quad (\text{A.58})$$

$$m_{pa} = \cos \Psi_p \sin \Psi_a \cos(\alpha_p - \alpha_a) - \sin \Psi_p \cos \Psi_a \quad (\text{A.59})$$

$$m_{pb} = \cos \Psi_p \sin \Psi_b \cos(\alpha_p - \alpha_b) - \sin \Psi_p \cos \Psi_b \quad (\text{A.60})$$

$$m_{ws} = \sin \Psi_s \quad (\text{A.61})$$

$$m_{cs} = \cos \Psi_s \sin \Psi_c \cos(\alpha_s - \alpha_c) - \sin \Psi_s \cos \Psi_c \quad (\text{A.62})$$

$$m_{ps} = \cos \Psi_s \cos \Psi_p \cos(\alpha_s - \alpha_p) + \sin \Psi_p \cos \Psi_s \quad (\text{A.63})$$

式中：

A_A ——滑动面 A 的面积,单位为平方米(m^2);

c'_A ——滑动面 A 的有效凝聚力,单位为千帕(kPa);

φ'_A ——滑动面 A 的内摩擦角,单位为度($^\circ$);

A_B ——滑动面 B 的面积,单位为平方米(m^2);

- c'_B ——滑动面 B 的有效凝聚力,单位为千帕 (kPa);
- φ'_B ——滑动面 B 的内摩擦角,单位为度($^\circ$);
- Ψ_a, α_a ——滑动面 A 的倾角和倾向,单位为度($^\circ$);
- Ψ_b, α_b ——滑动面 B 的倾角和倾向,单位为度($^\circ$);
- Ψ_c, α_c ——张裂缝面 C 的倾角和倾向,单位为度($^\circ$);
- Ψ_P, α_P ——锚杆加固力 P 的倾角和倾向,单位为度($^\circ$);
- Ψ_S, α_S ——滑动面 A 、 B 交线的 OC 倾角和倾向,单位为度($^\circ$);
- U_A ——滑动面 A 上的孔隙压力,单位为千牛(kN);
- U_B ——滑动面 B 上的孔隙压力,单位为千牛(kN);
- U_C ——张裂缝面 C 上的孔隙压力,单位为千牛(kN);
- W ——楔形体重量,单位为千牛(kN);
- P ——锚杆加固力,单位为千牛(kN)。

参 考 文 献

[1] GB 50175—2014 露天煤矿工程质量验收规范
[2] GB 50197—2015 煤炭工业露天矿设计规范
[3] GB 50330—2013 建筑边坡工程技术规范
[4] GB 50421—2018 有色金属矿山排土场设计规范
[5] GB 50968—2014 露天煤矿工程施工规范
[6] SL 386—2007 水利水电工程边坡设计规范
