



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108548730 A

(43)申请公布日 2018.09.18

(21)申请号 201810300001.6

(22)申请日 2018.04.04

(71)申请人 重庆交通大学

地址 402247 重庆市江津区双福新区福星大道1号

(72)发明人 王俊杰 黄诗渊 李玉桥 袁智洪
张慧萍 赵天龙

(74)专利代理机构 重庆缙云专利代理事务所
(特殊普通合伙) 50237

代理人 王翔

(51)Int.Cl.

G01N 3/24(2006.01)

G01N 33/24(2006.01)

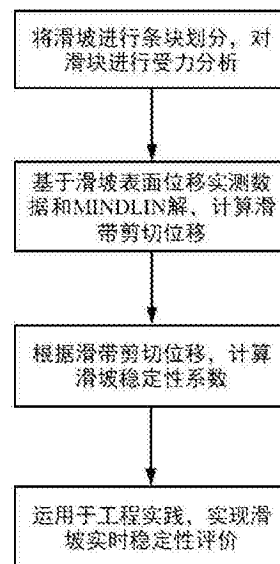
权利要求书1页 说明书6页 附图4页

(54)发明名称

基于传递系数法和表面位移的滑坡稳定性评价方法

(57)摘要

发明提供基于传递系数法和表面位移的滑坡稳定性评价方法。该方法包括将待评价滑坡划分为n个垂直滑块、确定各滑块的应力状态、计算各个滑块底部滑带剪切位移、根据滑带剪切位移计算的滑坡稳定性系数等步骤。该方法基于传递系数法和滑坡实测表面位移数据,建立了滑坡表面位移与滑坡稳定性之间的关系,可通过位移数据对滑坡进行稳定性评价,更好地为滑坡实时监测服务。



1. 基于传递系数法和表面位移的滑坡稳定性评价方法,其特征在于,包括以下步骤:

1) 将待评价滑坡划分为n个垂直滑块,并由上到下依次标记为1、2、……、i、……、n;基于传递系数法,对各滑块进行受力分析;

2) 根据滑块表面位移实测数据和MINDLIN解,计算各个滑块底部滑带的剪切位移;

3) 根据步骤2) 计算得到的滑带剪切位移,计算滑坡稳定性系数;采用稳定性系数评价滑坡的稳定性。

2. 根据权利要求1所述的基于传递系数法和表面位移的滑坡稳定性评价方法,其特征在于,步骤2) 具体包括以下步骤:

2.1) 引入MINDLIN解,计算得到不平衡力对各滑块侧边单独引起的水平位移 u_x ;

2.2) 引入MINDLIN解,计算得到不平衡力对各滑块侧边单独引起的竖向位移 u_y ;

2.3) 根据表面位移实测数据,计算得到滑块底部滑带的剪切位移;其中,滑块底部滑带剪切位移的水平分量为:

$$s_x = \Delta x - u_x \quad (1)$$

滑块底部滑带剪切位移的竖向分量为:

$$s_y = \Delta y - u_y \quad (2)$$

式中, Δx 为滑块总的水平位移,由滑块表面位移实测数据获取; Δy 为滑块总的竖向位移,由滑块表面位移实测数据获取; u_x 为不平衡力对滑块侧边单独引起的水平位移; u_y 为不平衡力对滑块侧边单独引起的竖向位移。

3. 根据权利要求1所述的基于传递系数法和表面位移的滑坡稳定性评价方法,其特征在于,步骤3) 具体包括以下步骤:

3.1) 引入滑带的理想弹塑性剪应力-剪位移关系曲线,根据滑坡实际发生的位移与其临界位移,得到任意滑块i的位移稳定性系数为:

$$F_{Di} = \frac{s_{fi} L_i}{s_i L_i} \quad (3)$$

式中, s_{fi} 为滑块i底部滑带的临界剪位移,根据滑带土的剪切试验得到; s_i 为滑块i底部滑带的现状剪位移; L_i 为滑块i底部滑带的长度;

3.2) 对各滑块的位移稳定性系数加权计算,得到滑坡整体的实时稳定性系数:

$$F_{D-total} = \frac{\sum s_{fi} L_i}{\sum s_i L_i} = \frac{\sum s_{fi} \cos \alpha_i L_i}{\sum (\Delta x_i - u_{xi}) L_i} = \frac{\sum s_{fi} \sin \alpha_i L_i}{\sum (\Delta y_i - u_{yi}) L_i} \quad (4)$$

式中, α_i 为滑块i底边与水平面的夹角; u_{xi} 为不平衡力作用下滑块i侧边顶点的水平位移; u_{yi} 为不平衡力作用下滑块i侧边顶点的竖向位移; Δx_i 为任意滑块侧边顶部总的水平位移,由滑块表面位移实测数据获取; Δy_i 为任意滑块侧边顶部总的竖向位移,由滑块表面位移实测数据获取;

3.3) 采用稳定性系数评价滑坡的稳定性。

基于传递系数法和表面位移的滑坡稳定性评价方法

技术领域

[0001] 本发明涉及边坡工程稳定性评价技术,具体涉及一种滑坡稳定性评价方法。

背景技术

[0002] 滑坡预警是滑坡研究的核心问题,也是岩土工程所关心的技术难题之一,它为选择滑坡的合理加固处理方案提供定量指标。

[0003] 在工程中,计算滑坡稳定和滑坡变形通常独立分析,滑坡稳定性计算多采用极限平衡法或有限元强度折减法。其中,极限平衡法未考虑滑面的应力-应变关系,仅提供一个整体的稳定性系数,无法反映坡体的变形状态。有限元强度折减法虽然考虑了应力应变关系,能够得到不同折减情况下的变形状态和滑坡稳定性系数,但同时折减抗剪强度不仅不能充分说明抗剪强度的弱化机制,而且折减后实际的应力状态发生了改变,无法描述滑坡的实际变形情况。在实际工程中,滑坡监测数据与滑坡的稳定性难以建立起联系,导致难以根据滑坡的实时监测数据对滑坡的稳定性进行实时评价。

[0004] 因此,亟需开发一种通过滑坡表面位移数据对滑坡进行稳定性评价的方法,以更好地为滑坡实时监测服务。

发明内容

[0005] 本发明的目的是提供基于传递系数法和表面位移的滑坡稳定性评价方法,以解决现有技术中存在的问题。

[0006] 为实现本发明目的而采用的技术方案是这样的,基于传递系数法和表面位移的滑坡稳定性评价方法,包括以下步骤:

[0007] 1) 将待评价滑坡划分为 n 个垂直滑块,并由上到下依次标记为1、2、……、 i 、……、 n 。基于传递系数法,对各滑块进行受力分析。

[0008] 2) 根据滑块表面位移实测数据和MINDLIN解,计算各个滑块底部滑带的剪切位移。

[0009] 3) 根据步骤2) 计算得到的滑带剪切位移,计算滑坡稳定性系数。采用稳定性系数评价滑坡的稳定性。

[0010] 进一步,步骤2) 具体包括以下步骤:

[0011] 2.1) 引入MINDLIN解,计算得到不平衡力对各滑块侧边单独引起的水平位移 u_x 。

[0012] 2.2) 引入MINDLIN解,计算得到不平衡力对各滑块侧边单独引起的竖向位移 u_y 。

[0013] 2.3) 根据表面位移实测数据,计算得到滑块底部滑带的剪切位移。其中,滑块底部滑带剪切位移的水平分量为:

$$[0014] \quad s_x = \Delta x - u_x \quad (1)$$

[0015] 滑块底部滑带剪切位移的竖向分量为:

$$[0016] \quad s_y = \Delta y - u_y \quad (2)$$

[0017] 式中, Δx 为滑块总的水平位移,由滑块表面位移实测数据获取。 Δy 为滑块总的竖向位移,由滑块表面位移实测数据获取。 u_x 为不平衡力对滑块侧边单独引起的水平位移。 u_y

为不平衡力对滑块侧边单独引起的竖向位移。

[0018] 进一步,步骤3)具体包括以下步骤:

[0019] 3.1)引入滑带的理想弹塑性剪应力-剪位移关系曲线,根据滑坡实际发生的位移与其临界位移,得到任意滑块i的位移稳定性系数为:

$$[0020] \quad F_{Di} = \frac{s_{fi}L_i}{s_iL_i} \quad (3)$$

[0021] 式中, s_{fi} 为滑块i底部滑带的临界剪位移,根据滑带土的剪切试验得到。 s_i 为滑块i底部滑带的现状剪位移。 L_i 为滑块i底部滑带的长度。

[0022] 3.2)对各滑块的位移稳定性系数加权计算,得到滑坡整体的实时稳定性系数:

$$[0023] \quad F_{D-total} = \frac{\sum s_{fi}L_i}{\sum s_iL_i} = \frac{\sum s_{fi} \cos \alpha_i L_i}{\sum (\Delta x_i - u_{xi})L_i} = \frac{\sum s_{fi} \sin \alpha_i L_i}{\sum (\Delta y_i - u_{yi})L_i} \quad (4)$$

[0024] 式中, α_i 为滑块i底边与水平面的夹角; u_{xi} 为不平衡力对滑块i侧边单独引起的水平位移。 u_{yi} 为不平衡力对滑块i侧边单独引起的竖向位移; Δx_i 为任意滑块侧边顶部总的水平位移,由滑块表面位移实测数据获取; Δy_i 为任意滑块侧边顶部总的竖向位移,由滑块表面位移实测数据获取;

[0025] 3.3)采用稳定性系数评价滑坡的稳定性。

[0026] 本发明的技术效果是毋庸置疑的:

[0027] A.在传递系数法的基础上,引入了MINDLIN解,建立了滑坡表面位移与滑坡稳定性系数的关系,进而可实现滑坡的位移预警;

[0028] B.根据滑坡实时监测的表面位移数据,可通过MINDLIN解计算滑带的剪切位移。根据滑带剪切位移计算滑坡的稳定性系数,可实现滑坡的稳定性评价。

附图说明

[0029] 图1为方法流程图;

[0030] 图2为滑坡示意图;

[0031] 图3为任意滑块i的受力示意图;

[0032] 图4为MINDLIN解示意图;

[0033] 图5为滑坡推力分解示意图;

[0034] 图6为滑块推力水平向分力分布形式示意图;

[0035] 图7为等效水平分布力示意图;

[0036] 图8为滑带弹塑性剪应力-剪位移曲线示意图。

具体实施方式

[0037] 下面结合实施例对本发明作进一步说明,但不应该理解为本发明上述主题范围仅限于下述实施例。在不脱离本发明上述技术思想的情况下,根据本领域普通技术知识和惯用手段,做出各种替换和变更,均应包括在本发明的保护范围内。

[0038] 实施例1:

[0039] 参见图1,本实施例公开基于传递系数法和表面位移的滑坡稳定性评价方法,包括

以下步骤:

[0040] 1) 参见图2,将待评价滑坡划分为n个垂直滑块,并由上到下依次标记为1、2、……、i、……、n。

[0041] 参见图3,对于任意一个滑块i,在不考虑外部作用时,

[0042] 滑块i的法向方向受力平衡关系式为:

$$[0043] \quad N_i = W_i \cos \alpha_i + P_{i-1} \sin (\alpha_{i-1} - \alpha_i) \quad (1)$$

[0044] 滑块i的下滑力总和为:

$$[0045] \quad T_i = W_i \sin \alpha_i + P_{i-1} \cos (\alpha_{i-1} - \alpha_i) \quad (2)$$

[0046] 滑块i的抗滑力为:

$$[0047] \quad S_{fi} = N_i \tan \varphi_i + c_i B_i / \cos \alpha_i \quad (3)$$

[0048] 式中, N_i 为滑块所受正压力,kN; α_i 为第i个滑块与水平面的夹角, $^\circ$; W_i 为滑块的重力,kN; B_i 为滑块的宽度,m; P_{i-1} 为第i块滑块受到上一滑块的剩余推力,即该滑块受到的不平衡力,kN; T_i 为第i块滑块的下滑力,kN; c_i 为滑面的黏聚力,kPa; φ_i 为滑面的内摩擦角; S_{fi} 为滑块抗滑力,kN。

[0049] 在传统的传递系数法中,通常通过对抗滑力进行折减或对下滑力进行扩大的方法,进而求得稳定性系数。但这种方式无法得到变形数据。本实施例为了建立滑坡变形与稳定性之间的关系,对传统传递系数法的基本假定进行以下改进:

[0050] a. 假设滑块能够发生变形,认为滑块底部(即滑带)的变形满足理想弹塑性剪应力—剪位移本构模型,其极限剪应力满足莫尔库伦破坏准则。

[0051] b. 认为各滑块在上部推力作用下发生平动的基础上,还发生了侧向和竖向的变形,上一滑块对下一滑块的剩余推力并不是集中力作用,而是分布力。

[0052] c. 对抗滑力不进行折减,也不对下滑力进行扩大。

[0053] 因此,剩余推力 P_i 可表示为:

$$[0054] \quad P_i = T_i - S_{fi} \quad (4)$$

[0055] 2) 根据滑块表面位移实测数据和MINDLIN解,计算各个滑块底部滑带的剪切位移。

[0056] 对于任一滑块,其表面水平位移 Δx 等于滑带的水平位移 s_x 加上不平衡力对滑块侧边单独引起的水平位移 u_x 。同理,其表面竖向位移 Δy 等于滑带的竖向位移 s_y 加上不平衡力对滑块侧边单独引起的竖向位移 u_y 。

[0057] 参见图4,明德林(mindlin)理论是在布西奈斯克(Boussinesq)解答的基础上推导出竖向或水平向荷载作用在半无限弹性体内部时体内任一点的应力与应变的数学解。

[0058] 在实际工程中,滑块所受不平衡力引起滑块变形。对于传递系数法中的任意滑块,其受到的不平衡力就是上部滑块对其的剩余推力与作用于该滑块上其它外力的合力。对于传递系数法中划分的条块通常除第一个滑块和最后一个滑块是三角形外,其余滑块均为四边形(矩形或梯形)且侧边为竖直状。因此,可引入MINDLIN解,得到半无限弹性体内深度c处作用水平向和垂直向集中力P时,体内任一点的应力与应变的数学解。

[0059] 当弹性半无限体内部深度c处作用水平集中力Q时,则离地面深度z处的任意一点M的侧向、竖向变形分别为:

$$[0060] \quad u_x = \frac{Q}{16\pi G(1-\nu)} \left\{ \begin{array}{l} \frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{x^2}{R_1^3} + \frac{1}{R_1} + \frac{(3-4\nu)x^2}{R_2^3} + \frac{2cz}{R_2^3} \left(1 - \frac{3x^2}{R_2^2} \right) \\ + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2+z+c} \left[1 - \frac{x^2}{R_2(R_2+z+c)} \right] \end{array} \right\} \quad (5)$$

$$[0061] \quad u_z = \frac{Qx}{16\pi G(1-\nu)} \left\{ \frac{z-c}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z-c)}{R_2^3} - \frac{6cz(z+c)}{R_2^5} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2(R_2+z+c)} \right\} \quad (6)$$

[0062] 式中, Q为水平集中力, G为剪切模量, ν 为泊松比, 其余长度参数含义详见图4所示。

[0063] 滑坡中的除第一个三角形滑块外的任意一个滑块, 认为其侧边受到上一滑块的推力作用, 但推力方向并不是水平方向或竖直方向, 因此需要进行力的分解。参见图5, 滑块i的合力方向与滑块底部滑面平行, P_{i-1} 为滑块所受不平衡力, 将 P_{i-1} 分解成水平方向的分量 P_x 和竖直方向的分量 P_y 。此时, 可根据MINDLIN解计算得到水平和竖直方向集中力作用下滑块侧边所产生的水平位移及竖向位移。

[0064] 2.1) 通过对MINDLIN解进行简化, 在二维情况下, 水平集中力作用点所处竖直面上各点的变形计算公式即可表示为:

$$[0065] \quad u_x = \frac{Q}{16\pi G(1-\nu)} \left\{ \begin{array}{l} \frac{3-4\nu}{|z-c|} + \frac{1}{|z-c|} + \frac{2cz}{(z+c)^3} \\ + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{|z-c|+z+c} \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$[0066] \quad u_z = 0 \quad (8)$$

[0067] 从上式可知, 在水平集中力的作用下, 滑块侧面上的竖向位移为0, 但水平位移不可忽略。

[0068] 将滑块上部推力考虑成三角形分布, 根据式7, 得到了水平集中力作用下滑块侧边变形的解析解。参见图6, 按照滑块上部推力的三角形分布, 需采用数值积分的方式进行计算。

[0069] 参见图7, 7a表示滑块不平衡推力分布, 7b表示各段受力分布, 7c表示等效集中力。对于任意滑块i, 其受到上部推力的水平分力为 P_x , 将其分布为三角形荷载后, 用m个节点将侧边等分为m-1段, 那么对于第j个节点上的荷载大小即为:

$$[0070] \quad P_x^j = \frac{j-1}{m-1} \frac{2P_x}{H_i} \quad (9)$$

[0071] 式中, P_x 为该滑块所受上部推力的水平分力; m为滑块侧边节点划分数量, $m > 1$; j为节点号; H_i 为滑块i的侧边高度。

[0072] 将j-1节点和j节点的荷载(kPa)等效成集中力(kN), 其值即为图7b中梯形的面积, 如下式:

$$[0073] \quad P_x^j = \frac{P_x^j + P_x^{j-1}}{2} h_j = \frac{P_x^j + P_x^{j-1}}{2} \frac{H_i}{m-1} \quad (10)$$

[0074] 式中, h_j 为第j个节点与第j-1个节点之间的距离。

[0075] 将公式10代入公式9, 可得:

$$[0076] \quad P_x^j = \frac{j-1+j-2}{m(m-1)} P_x = \frac{2j-3}{(m-1)^2} P_x \quad (11)$$

[0077] 根据上述分解,可获得侧边的 $m-1$ 个等效集中力,再将式11代入式7,即可得到每个等效集中力作用范围下侧边 $1 \sim m$ 个节点上的水平位移。由于地表位移是关注的重点,则只需求得各段等效集中力对滑块侧边顶部节点(节点1)产生的水平位移,然后进行累加,进而得到该点的水平位移。因此,在采用公式7计算时,对于顶点的深度 z 取为0,而各等效集中力作用点深度 c_j 则应根据分的段数进行取值:

$$[0078] \quad c_j = \frac{2j-3}{2} \frac{H_j}{m-1} \quad (12)$$

[0079] 对于顶点(节点1),任意一等效集中力对其产生的水平位移即为:

$$[0080] \quad u_x^j = \frac{P_x}{(m-1) H_j} \frac{2\nu^2 - 5\nu + 3}{4\pi G(1-\nu)} \quad (13)$$

[0081] 从上式可发现,任意一等效集中力对顶点处的水平位移是相同的,将 $m-1$ 个等效集中力累加,得到滑块侧边在上部推力作用下顶点(节点1)的水平位移,其值仅与荷载大小、侧边高度以及土体参数有关,与节点数无关。

$$[0082] \quad u_x = (n-1)u_x^j = \frac{P_x}{H_j} \frac{2\nu^2 - 5\nu + 3}{4\pi G(1-\nu)} \quad (14)$$

[0083] 2.2) 通过对MINDLIN解进行简化,在二维情况下,竖向集中力作用点所处竖直面上各点的变形计算公式可表示为:

$$[0084] \quad u_x = 0 \quad (15)$$

$$[0085] \quad u_z = \frac{P}{16\pi G(1-\nu)} \left[\frac{3-4\nu}{|z-c|} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{z+c} + \frac{(z-c)^2}{|z-c|^3} + \frac{(3-4\nu)(z+c)^2 - 2cz}{(z+c)^3} + \frac{6cz(z+c)^2}{(z+c)^5} \right] \quad (16)$$

[0086] 根据步骤2.1),可得到任意一等效竖向集中力对滑块侧边顶点产生的竖向位移:

$$[0087] \quad u_z^j = \frac{P_y}{(n-1) H_j} \frac{2\nu^2 - 5\nu + 3}{2\pi G(1-\nu)} \quad (17)$$

[0088] 从上式可发现,任意一等效集中力对顶点处的竖向位移也是相同的,将 $m-1$ 个等效集中力累加,得到滑块侧边在上部推力作用下顶点(节点1)的竖向位移,

$$[0089] \quad u_y = (n-1)u_z^j = \frac{P_y}{H_j} \frac{2\nu^2 - 5\nu + 3}{2\pi G(1-\nu)} \quad (18)$$

[0090] 2.3) 根据滑坡监测数据,可以得到滑块的表面位移实测数据。根据表面位移实测数据,计算得到滑块底部滑带的剪切位移。其中,滑块底部滑带剪切位移的水平分量为:

$$[0091] \quad s_x = \Delta x - u_x \quad (19)$$

[0092] 滑块底部滑带剪切位移的竖向分量为:

$$[0093] \quad s_y = \Delta y - u_y \quad (20)$$

[0094] 式中, Δx 为滑块总的水平位移,由滑块表面位移实测数据获取。 Δy 为滑块总的竖向位移,由滑块表面位移实测数据获取。 u_x 为不平衡力对滑块侧边单独引起的水平位移。 u_y

为不平衡力对滑块侧边单独引起的竖向位移。

[0095] 3) 根据步骤2) 计算得到的滑带剪切位移, 计算滑坡稳定性系数。采用稳定性系数评价滑坡的稳定性。

[0096] 引入滑带的理想弹塑性剪应力—剪位移关系曲线。当滑块所受下滑力等于抗滑力时, 该滑块底部滑带处于B点状态, 定义该滑块底部滑带处于临界剪位移状态。当滑块所受下滑力小于抗滑力时, 该滑块底部滑带处于0-B线性阶段, 定义该滑块处于未达到临界剪位移状态。当滑块所受下滑力大于抗滑力时, 该滑块底部滑带处于B点以后状态, 定义该滑块发生了剪切破坏。参见图8, 对于任意滑块*i*, 其底部滑带的剪应力—剪位移关系为:

$$[0097] \quad \tau_i = \begin{cases} a_i s_i (s_i \leq s_{fi}) \\ \tau_f = a_i s_{fi} (s_i \geq s_{fi}) \end{cases} \quad (21)$$

[0098] 式中, a_i 为剪切刚度, kPa/mm; s_i 为剪切位移, mm; s_{fi} 为滑块的临界剪切位移, mm。

[0099] 3.1) 根据滑坡实际发生的位移与其临界位移, 得到任意滑块*i*的位移稳定性系数为:

$$[0100] \quad F_{Di} = \frac{s_{fi} L_i}{s_i L_i} \quad (22)$$

[0101] 式中, s_{fi} 为滑块*i*底部滑带的临界剪位移, 根据滑带土的剪切试验得到。 s_i 为滑块*i*底部滑带的现状剪位移。 L_i 为滑块*i*底部滑带的长度。

[0102] 3.2) 对各滑块的位移稳定性系数加权计算, 得到滑坡整体的实时稳定性系数:

$$[0103] \quad F_{D-total} = \frac{\sum s_{fi} L_i}{\sum s_i L_i} = \frac{\sum s_{fi} \cos \alpha_i L_i}{\sum (\Delta x_i - u_{xi}) L_i} = \frac{\sum s_{fi} \sin \alpha_i L_i}{\sum (\Delta y_i - u_{yi}) L_i} \quad (23)$$

[0104] 式中, α_i 为滑块*i*底边与水平面的夹角。 u_{xi} 为不平衡力作用下滑块*i*侧边顶点的水平位移。 u_{yi} 为不平衡力作用下滑块*i*侧边顶点的竖向位移。 Δx_i 为任意滑块侧边顶部总的水平位移, 由滑块表面位移实测数据获取。 Δy_i 为任意滑块侧边顶部总的竖向位移, 由滑块表面位移实测数据获取。

[0105] 3.3) 采用稳定性系数评价滑坡的稳定性。

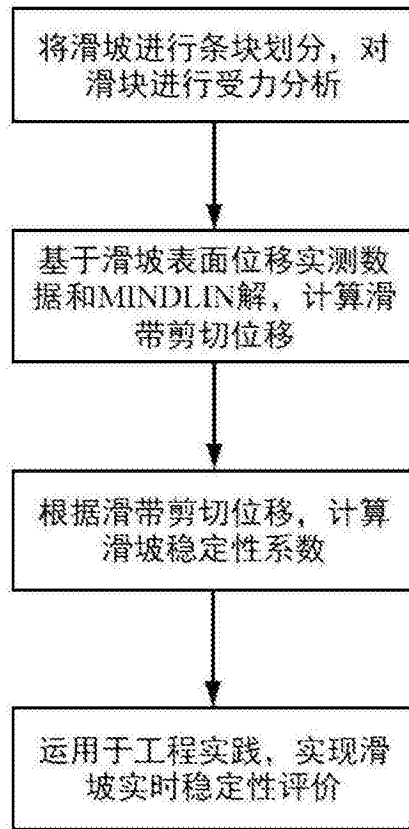


图1

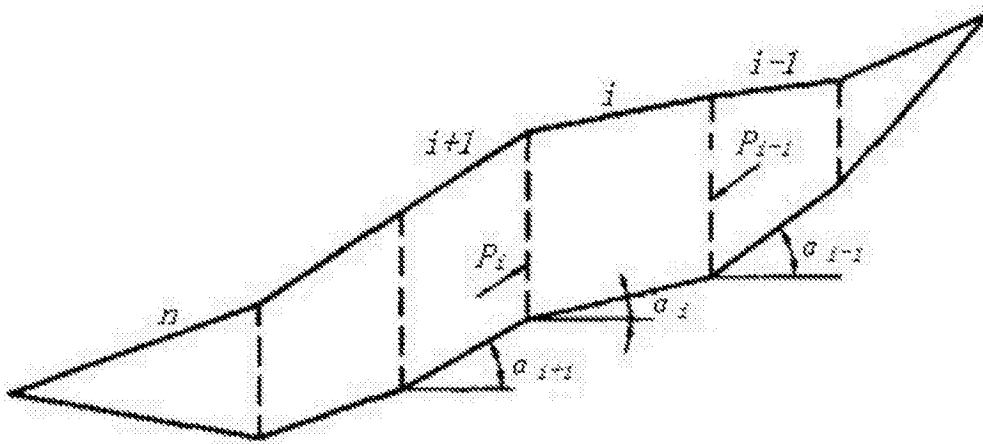


图2

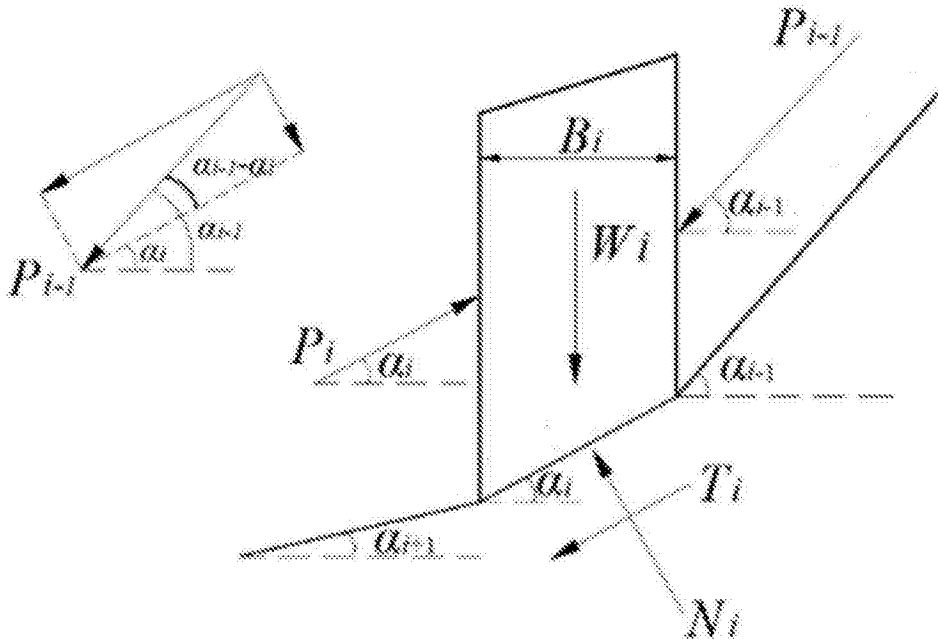


图3

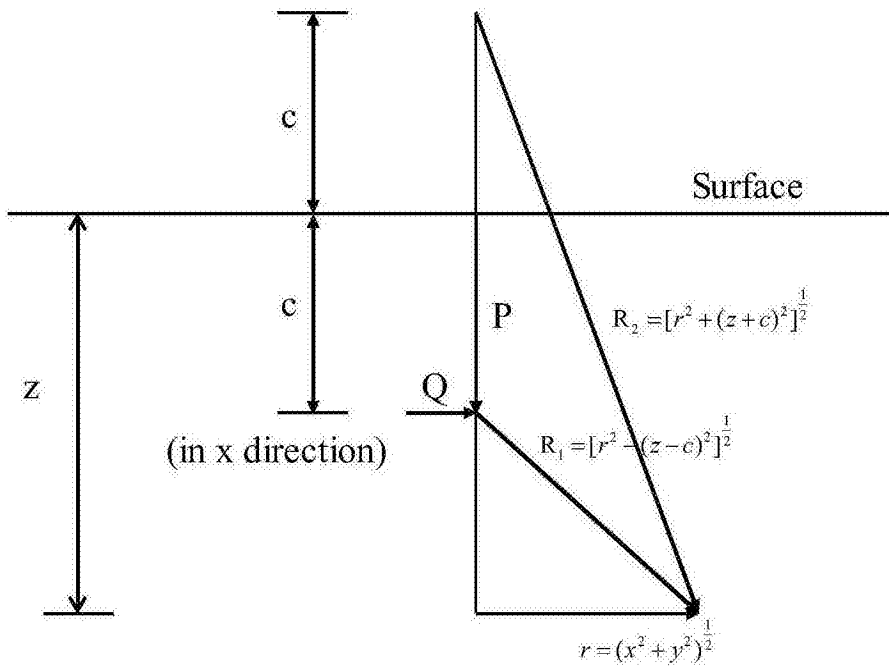


图4

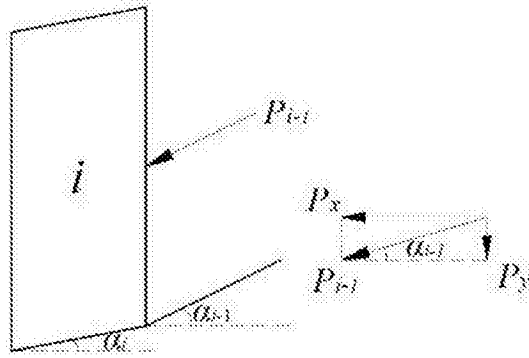


图5

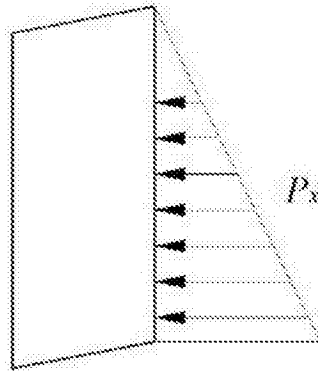


图6

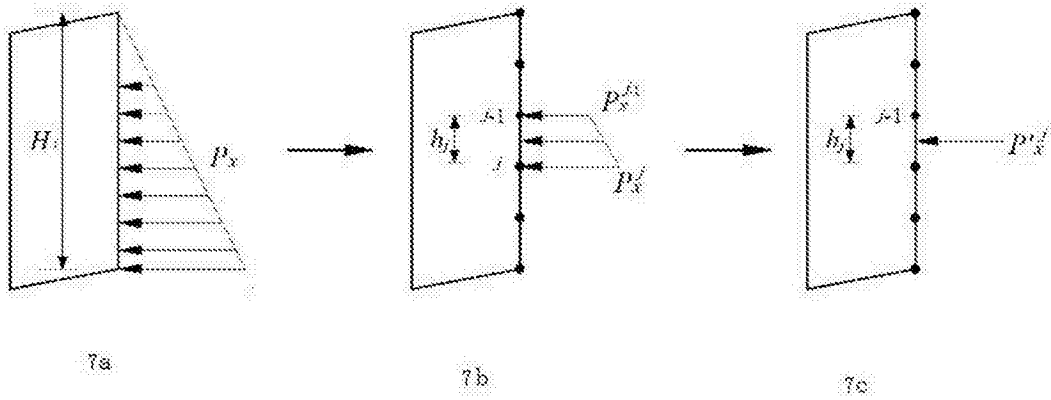


图7

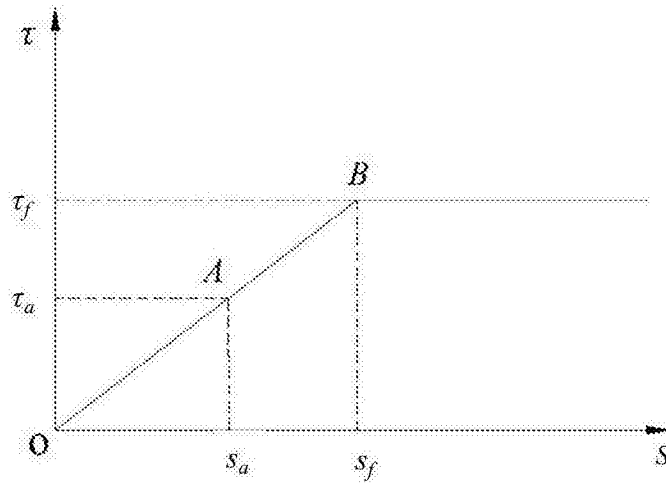


图8