



## (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106295017 B

(45)授权公告日 2019.10.25

(21)申请号 201610667957.0

(56)对比文件

(22)申请日 2016.08.15

CN 103218494 A, 2013.07.24, 全文.

(65)同一申请的已公布的文献号

CN 105160165 A, 2015.12.16, 全文.

申请公布号 CN 106295017 A

咸玉建等.基于有限元强度折减系数法岩土  
边坡稳定性分析与抗滑桩设计.《地质科技情  
报》.2015,(第4期),2.3部分.

(43)申请公布日 2017.01.04

审查员 丛磊

(73)专利权人 河海大学

地址 211100 江苏省南京市江宁区佛城西  
路8号(72)发明人 张坤勇 杜伟 李广山 陈恕  
李威(74)专利代理机构 南京纵横知识产权代理有限  
公司 32224  
代理人 朱妃 董建林

(51)Int.Cl.

G06F 17/50(2006.01)

权利要求书2页 说明书5页 附图4页

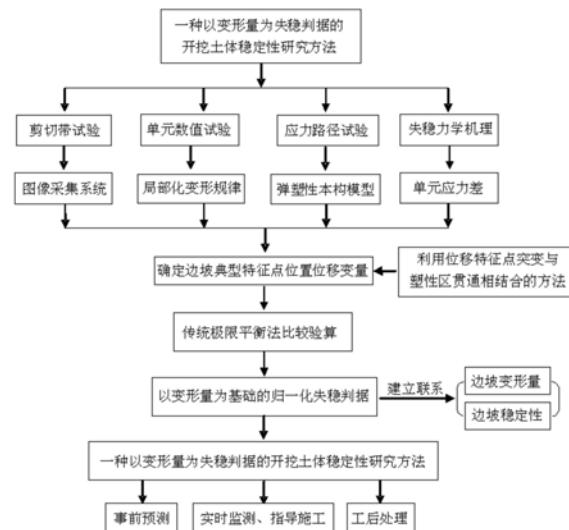
## (54)发明名称

一种以变形量为失稳判据的开挖土体稳定  
性分析方法

## (57)摘要

本发明公开了一种以变形量为失稳判据的开挖土体稳定性分析方法,包括以下步骤:1)建立能反映开挖边坡土体应力变形规律的土体弹塑性本构模型,通过有限元计算、分析,确定开挖边坡典型特征点位置位移变形量与开挖边坡内在稳定性之间的关系,并确定开挖边坡不同阶段的稳定性安全系数;2)采用传统的极限平衡法验证可靠性;3)对开挖边坡典型特征点位置位移变形量进行归一化处理,获得归一化变形参量,建立归一化变形参量和开挖边坡内在稳定性之间的关系;4)开展现场监测开挖边坡的实际变形量,根据该关系,确定并监控开挖边坡内在稳定性。采用有限元强度折减法对边坡进行应力变形分析,将边坡的变形量进行归一化处理后与其稳定性联系起来。

CN 106295017 B



1.一种以变形量为失稳判据的开挖土体稳定性分析方法,其特征在于,包括以下步骤:

1)建立能反映开挖边坡土体应力变形规律的土体弹塑性本构模型,通过有限元计算,对开挖边坡土体应力变形规律进行分析,确定开挖边坡典型特征点位置位移变形量与开挖边坡内在稳定性之间的关系,并确定开挖边坡不同阶段的稳定性安全系数;

2)将开挖边坡不同阶段的稳定性安全系数与采用传统的极限平衡法计算所得的开挖边坡稳定性结果进行比较,验证开挖边坡不同阶段的稳定性安全系数的可靠性;

3)对开挖边坡典型特征点位置位移变形量进行归一化处理,获得归一化变形参量,并以归一化变形参量为基础为失稳判据的稳定判断标准,建立归一化变形参量和开挖边坡内在稳定性之间的关系;

4)开展现场监测开挖边坡的实际变形量,根据归一化变形参量和开挖边坡内在稳定性之间的关系,通过查询与实际变形量相等或相近的归一化变形参量,确定并监控开挖边坡内在稳定性;

所述步骤1)中的确定开挖边坡典型特征点位置位移变形量与开挖边坡内在稳定性之间的关系,并确定开挖边坡不同阶段的稳定性安全系数,具体为,

利用有限元强度折减法,采用典型特征点位移突变与塑性区贯通相结合的方法来分析开挖边坡内在稳定性,分别作出折减系数与坡顶点、坡中点、破脚点位置的水平位移关系图,从而确定开挖边坡不同阶段的稳定性安全系数;

其中,挖边坡内在稳定性的失稳判据为,

定义应力差 $x$ ,

$$\chi = \frac{[2c \cos \varphi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi] - (\sigma_1 - \sigma_3)}{2}$$

其中, $c$ 为凝聚力, $\varphi$ 为内摩擦角, $\sigma_1$ 为主应力, $\sigma_3$ 为小主应力;

将单元数值试验获得的室内试验结果带入计算应力差,并判断应力差是否大于零;

当应力差 $x > 0$ 时,则单元未破坏;

当从坡脚到坡顶的所有单元的应力差 $x \leq 0$ 时,即为边坡极限平衡状态,则边坡破坏,在滑动面上的土体单元剪应力全部达到了剪应力的极限状态。

2.根据权利要求1所述的一种以变形量为失稳判据的开挖土体稳定性分析方法,其特征在于:所述步骤1)中的建立能反映开挖边坡土体应力变形规律的土体弹塑性本构模型,具体为,

1-1)不同应力路径下进行剪切带试验;

1-2)应用弹塑性模型开展土体单元的单元数值试验;

1-3)通过对剪切带试验和单元数值试验获得的室内试验结果进行分析,建立能反映开挖边坡土体应力变形规律的土体弹塑性本构模型。

3.根据权利要求1所述的一种以变形量为失稳判据的开挖土体稳定性分析方法,其特征在于:所述步骤1)中的通过有限元计算,对开挖边坡土体应力变形规律进行分析,具体为,

在有限元计算中分析土体天然状态和实际开挖应力路径对土体应力变形特性的影响,并将天然边坡失稳与开挖边坡失稳的位移变形进行区别。

4.根据权利要求2所述的一种以变形量为失稳判据的开挖土体稳定性分析方法,其特

征在于：所述步骤1-1) 的不同应力路径下进行剪切带试验，采用描画网格法对室内试验过程中的剪切带形成和发展进行跟踪观察，具体为，

采用设定厚度的橡胶薄膜覆于试样表面，在薄膜上描绘出方形栅格，试验过程中采用图像采集系统进行实时拍摄，追踪记录剪切带发展前后的模型照片，应用图像处理系统分析剪切带形成与发展的过程，并获得剪切带的变形规律。

5. 根据权利要求4所述的一种以变形量为失稳判据的开挖土体稳定性分析方法，其特征在于：所述方形栅格的尺寸为 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 。

6. 根据权利要求4所述的一种以变形量为失稳判据的开挖土体稳定性分析方法，其特征在于：所述图像采集系统为高清摄像机或照相机。

7. 根据权利要求4所述的一种以变形量为失稳判据的开挖土体稳定性分析方法，其特征在于：所述步骤1-2) 的应用弹塑性模型开展土体单元的单元数值试验，具体为，

应用弹塑性模型，采用与剪切带试验中相同的描画网格法对弹塑性模型进行计算而得到计算结果，将计算结果与剪切带试验得到的剪切带的变形规律进行比较，分析开挖应力路径条件下剪切带的形成、发展和局部化变形的规律。

8. 根据权利要求1所述的一种以变形量为失稳判据的开挖土体稳定性分析方法，其特征在于：所述步骤3) 中的对开挖边坡典型特征点位置位移变形量进行归一化处理，选择坡顶点位置的水平位移作为归一化处理的基本变形参量。

9. 根据权利要求1所述的一种以变形量为失稳判据的开挖土体稳定性分析方法，其特征在于：所述步骤4) 中的现场监测包括开挖前、开挖过程以及开挖后的施工监测。

## 一种以变形量为失稳判据的开挖土体稳定性分析方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种开挖土体稳定性分析方法,特别是涉及一种以变形量为失稳判据的开挖土体稳定性分析方法,属于岩土工程土坡稳定尤其是开挖边坡稳定性分析应用领域。

### 背景技术

[0002] 开挖边坡的重要性开挖引起的土体变形与破坏广泛存在于水利、土木、交通、市政等工程建设中,一直受到学术界和工程界的广泛关注。采用有限元方法对开挖土体进行稳定性分析,首先要发展反映真实应力状态下开挖应力路径土体本构模型;其次要能对开挖土体从稳定、渐进破坏和整体失稳的全过程进行合理描述;最后还需建立简单可靠的失稳判据以方便对开挖土体稳定性进行评估。

[0003] 对于均质土坡,传统研究方法主要有:极限平衡法、极限分析法和滑移线场法等。传统极限平衡方法的特点是假设滑移体是理想的刚塑性体,可以计算出较真实安全系数,但完全不考虑土体的应力-应变关系,不能反映边坡的破坏机制及描述边坡失稳的产生、发育和破坏的过程,即不能得到开挖施工过程的稳定性发展规律。

[0004] 现行的边坡失稳判据主要有以下三种:(1)有限元迭代求解过程的不收敛;(2)以塑性区(或等效塑性应变)从坡脚到坡顶贯通;(3)以坡体内特征部位位移发生突变。前两种失稳判据是根据坡体内部应力与应变的发展规律提出,而第三种判据是根据坡体外部特征表现提出的,随着内摩擦角和黏聚力的降低,坡体内部出现塑性区,边坡开始逐渐产生一定的内在变形,随着塑性区的发展,边坡变形逐渐积累,最后塑性区完全贯通,边坡将沿着塑性开展区发生滑移,表现为特征点位移突变,此时也不能满足计算收敛条件。

[0005] 虽然目前已有通过真三轴试验对土体的力学特性进行模拟和研究,但作为一种复杂应力状态下的非常规室内试验方法,还很少有系统的试验方法研究,而且现有的少量真三轴试验方法也都集中于不同三维应力条件下土体强度特性的研究,对应力应变关系的研究还很少,而要开展符合真实三维应力状态下不同应力路径的岩土应力应变规律并开展应力变形数值分析,必须依据相应的室内真三轴应力路径试验方法,开展符合工程实际的复杂应力条件下应力路径真三轴试验,才能对土在复杂应力状态下的各向异性应力应变关系进行合理描述。

### 发明内容

[0006] 本发明的主要目的在于,克服现有技术中的不足,提供一种以变形量为失稳判据的开挖土体稳定性分析方法,凭借有限元方法在考虑施工过程和土体真实应力应变关系方面的优势,通过采用合理的本构模型开展有限元计算,对开挖边坡开展符合真实复杂应力条件下的应力变形分析,建立变形量和开挖边坡内在稳定性之间的联系,从而可以实现事前预测、事中监测和事后处理。

[0007] 为了达到上述目的,本发明所采用的技术方案是:

- [0008] 一种以变形量为失稳判据的开挖土体稳定性分析方法,包括以下步骤:
- [0009] 1) 建立能反映开挖边坡土体应力变形规律的土体弹塑性本构模型,通过有限元计算,对开挖边坡土体应力变形规律进行分析,确定开挖边坡典型特征点位置位移变形量与开挖边坡内在稳定性之间的关系,并确定开挖边坡不同阶段的稳定性安全系数;
- [0010] 2) 将开挖边坡不同阶段的稳定性安全系数与采用传统的极限平衡法计算所得的开挖边坡稳定性结果进行比较,验证开挖边坡不同阶段的稳定性安全系数的可靠性;
- [0011] 3) 对开挖边坡典型特征点位置位移变形量进行归一化处理,获得归一化变形参量,并以归一化变形参量为基础为失稳判据的稳定判断标准,建立归一化变形参量和开挖边坡内在稳定性之间的关系;
- [0012] 4) 开展现场监测开挖边坡的实际变形量,根据归一化变形参量和开挖边坡内在稳定性之间的关系,通过查询与实际变形量相等或相近的归一化变形参量,确定并监控开挖边坡内在稳定性。
- [0013] 本发明进一步设置为:所述步骤1)中的建立能反映开挖边坡土体应力变形规律的土体弹塑性本构模型,具体为,
- [0014] 1-1) 不同应力路径下进行剪切带试验;
- [0015] 1-2) 应用弹塑性模型开展土体单元的单元数值试验;
- [0016] 1-3) 通过对剪切带试验和单元数值试验获得的室内试验结果进行分析,建立能反映开挖边坡土体应力变形规律的土体弹塑性本构模型。
- [0017] 本发明进一步设置为:所述步骤1)中的通过有限元计算,对开挖边坡土体应力变形规律进行分析,具体为,
- [0018] 在有限元计算中分析土体天然状态和实际开挖应力路径对土体应力变形特性的影响,并将天然边坡失稳与开挖边坡失稳的位移变形进行区别。
- [0019] 本发明进一步设置为:所述步骤1-1)的不同应力路径下进行剪切带试验,采用描画网格法对室内试验过程中的剪切带形成和发展进行跟踪观察,具体为,
- [0020] 采用设定厚度的橡胶薄膜覆于试样表面,在薄膜上描绘出方形栅格,试验过程中采用图像采集系统进行实时拍摄,追踪记录剪切带发展前后的模型照片,应用图像处理系统分析剪切带形成与发展的过程,并获得剪切带的变形规律。
- [0021] 本发明进一步设置为:所述方形栅格的尺寸为 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 。
- [0022] 本发明进一步设置为:所述图像采集系统为高清摄像机或照相机。
- [0023] 本发明进一步设置为:所述步骤1-2)的应用弹塑性模型开展土体单元的单元数值试验,具体为,
- [0024] 应用弹塑性模型,采用与剪切带试验中相同的描画网格法对弹塑性模型进行计算而得到计算结果,将计算结果与剪切带试验得到的剪切带的变形规律进行比较,分析开挖应力路径条件下剪切带的形成、发展和局部化变形的规律。
- [0025] 本发明进一步设置为:所述步骤1)中的确定开挖边坡典型特征点位置位移变形量与开挖边坡内在稳定性之间的关系,并确定开挖边坡不同阶段的稳定性安全系数,具体为,
- [0026] 利用有限元强度折减法,采用典型特征点位移突变与塑性区贯通相结合的方法来分析开挖边坡内在稳定性,分别作出折减系数与坡顶点、坡中点、破脚点位置的水平位移关系图,从而确定开挖边坡不同阶段的稳定性安全系数;

[0027] 其中,挖边坡内在稳定性的失稳判据为,

[0028] 定义应力差 $x$ ,

$$[0029] \chi = \frac{[2c \cos \varphi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi] - (\sigma_1 - \sigma_3)}{2}$$

[0030] 其中,其中, $c$ 为凝聚力,  $\varphi$ 为内摩擦角,  $\sigma_1$ 为大主应力,  $\sigma_3$ 为小主应力;

[0031] 将单元数值试验获得的室内试验结果带入计算应力差,并判断应力差是否大于零;

[0032] 当应力差 $x > 0$ 时,则单元未破坏;

[0033] 当从坡脚到坡顶的所有单元的应力差 $x \leq 0$ 时,即为边坡极限平衡状态,则边坡破坏,在滑动面上的土体单元剪应力全部达到了剪应力的极限状态。

[0034] 本发明进一步设置为:所述步骤3)中的对开挖边坡典型特征点位置位移变形量进行归一化处理,选择坡顶点位置的水平位移作为归一化处理的基本变形参量。

[0035] 本发明进一步设置为:所述步骤4)中的现场监测包括开挖前、开挖过程以及开挖后的施工监测。

[0036] 与现有技术相比,本发明具有的有益效果是:

[0037] 目前,边坡工程的安全稳定性是通过现场观测来体现的,但实测只能测出位移的发展,无法测出安全系数;传统的极限平衡法只能给出安全系数,不能给出土体位移与应力分布。本发明采用有限元强度折减法对边坡进行应力变形分析,充分考虑了边坡的变形因坡体几何因素与物理因素的不同而变化,将边坡的变形量进行归一化处理后与其稳定性联系起来,在工程实践中可以依据实测位移和有限元计算结果对边坡稳定性进行动态监测,加以实时预报从而可以保证边坡的安全。

[0038] 上述内容仅是本发明技术方案的概述,为了更清楚的了解本发明的技术手段,下面结合附图对本发明作进一步的描述。

## 附图说明

[0039] 图1为本发明的实施过程流程图;

[0040] 图2为本发明的莫尔-库伦破坏包线;

[0041] 图3为某工点开挖边坡断面尺寸;

[0042] 图4为某工点开挖边坡断面示意图;

[0043] 图5为某工点开挖边坡位移等值线图;

[0044] 图6为某工点开挖边坡失稳时的塑性应变等值线图;

[0045] 图7为开挖边坡典型位置折减系数与水平位移量关系图;

[0046] 图8为某工点开挖边坡极限平衡法计算结果。

## 具体实施方式

[0047] 下面结合说明书附图,对本发明作进一步的说明。

[0048] 本发明提供一种以变形量为失稳判据的开挖土体稳定性分析方法,如图1所示,包括以下步骤:

[0049] 1)建立能反映开挖边坡土体应力变形规律的土体弹塑性本构模型,通过有限元计

算,对开挖边坡土体应力变形规律进行分析,确定开挖边坡典型特征点位置位移变形量与开挖边坡内在稳定性之间的关系,并确定开挖边坡不同阶段的稳定性安全系数。

[0050] 其中,建立能反映开挖边坡土体应力变形规律的土体弹塑性本构模型,具体为,

[0051] 1-1) 不同应力路径下进行剪切带试验;

[0052] 采用描画网格法对室内试验过程中的剪切带形成和发展进行跟踪观察,具体为,

[0053] 采用设定厚度的橡胶薄膜覆于试样表面,在薄膜上描绘出尺寸为 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的方形栅格,试验过程中采用高清摄像机或照相机之类的图像采集系统进行实时拍摄,追踪记录剪切带发展前后的模型照片,应用图像处理系统分析剪切带形成与发展的过程,并获得剪切带的变形规律。

[0054] 1-2) 应用弹塑性模型开展土体单元的单元数值试验;

[0055] 应用弹塑性模型,采用与剪切带试验中相同的描画网格法对弹塑性模型进行计算而得到计算结果,将计算结果与剪切带试验得到的剪切带的变形规律进行比较,分析开挖应力路径条件下剪切带的形成、发展和局部化变形的规律。

[0056] 1-3) 通过对剪切带试验和单元数值试验获得的室内试验结果进行分析,建立能反映开挖边坡土体应力变形规律的土体弹塑性本构模型。

[0057] 其中,通过有限元计算,对开挖边坡土体应力变形规律进行分析,具体为,在有限元计算中分析土体天然状态和实际开挖应力路径对土体应力变形特性的影响,并将天然边坡失稳与开挖边坡失稳的位移变形进行区别。

[0058] 其中,确定开挖边坡典型特征点位置位移变形量与开挖边坡内在稳定性之间的关系,并确定开挖边坡不同阶段的稳定性安全系数,具体为,

[0059] 利用有限元强度折减法,采用典型特征点位移突变与塑性区贯通相结合的方法来分析开挖边坡内在稳定性,分别作出折减系数与坡顶点、坡中点、破脚点位置的水平位移关系图,从而确定开挖边坡不同阶段的稳定性安全系数;

[0060] 其中,挖边坡内在稳定性的失稳判据为,

[0061] 定义应力差 $x$ ,如图2所示,

$$[0062] \chi = \frac{[2c \cos \varphi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi] - (\sigma_1 - \sigma_3)}{2}$$

[0063] 其中,其中, $c$ 为凝聚力,  $\varphi$ 为内摩擦角,  $\sigma_1$ 为大主应力,  $\sigma_3$ 为小主应力;

[0064] 将单元数值试验获得的室内试验结果带入计算应力差,并判断应力差是否大于零;

[0065] 当应力差 $x > 0$ 时,则单元未破坏;

[0066] 当从坡脚到坡顶的所有单元的应力差 $x \leq 0$ 时,即为边坡极限平衡状态,则边坡破坏,在滑动面上的土体单元剪应力全部达到了剪应力的极限状态。

[0067] 以简单开挖工况为基本算例,某工点开挖边坡断面尺寸及开挖过程示意如图3和图4,图4(a)是采用一次开挖的方式所开挖的边坡断面,图4(b)是采用三级开挖的方式所开挖的边坡断面;利用有限元强度折减法,采用典型特征点位移突变和塑性区开展贯通判据来分析边坡的稳定性,如图5和图6所示,图5(a)是一次开挖完成的边坡位移等值线图、图5(b)是一级开挖完成的边坡位移等值线图、图5(c)是二级开挖完成的边坡位移等值线图、图5(d)是三级开挖完成的边坡位移等值线图;再分别作出折减系数与坡顶点、坡中点、破脚点

位置的水平位移关系图,如图7所示,从而可确定边坡的不同阶段安全系数。

[0068] 2) 将开挖边坡不同阶段的稳定性安全系数与采用传统的极限平衡法计算所得的开挖边坡稳定性结果(如图8所示)进行比较,验证开挖边坡不同阶段的稳定性安全系数的可靠性。

[0069] 3) 选择坡顶点位置的水平位移作为归一化处理的基本变形参量,对开挖边坡典型特征点位置位移变形量进行归一化处理,获得归一化变形参量,并以归一化变形参量为基础为失稳判据的稳定判断标准,建立归一化变形参量和开挖边坡内在稳定性之间的关系。

[0070] 4) 开展现场监测开挖边坡的实际变形量,根据归一化变形参量和开挖边坡内在稳定性之间的关系,通过查询与实际变形量相等或相近的归一化变形参量,确定并监控开挖边坡内在稳定性;其中的现场监测包括开挖前、开挖过程以及开挖后的施工监测。

[0071] 本发明的创新点在于,本发明采用有限元强度折减法对边坡进行应力变形分析,充分考虑了边坡的变形因坡体几何因素与物理因素的不同而变化,将边坡的变形量进行归一化处理后与其稳定性联系起来,在工程实践中可以依据实测位移和有限元计算结果对边坡稳定性进行动态监测,加以实时预报从而可以保证边坡的安全。

[0072] 以上显示和描述了本发明的基本原理、主要特征及优点。本行业的技术人员应该了解,本发明不受上述实施例的限制,上述实施例和说明书中描述的只是说明本发明的原理,在不脱离本发明精神和范围的前提下,本发明还会有各种变化和改进,这些变化和改进都落入要求保护的本发明范围内。本发明要求保护范围由所附的权利要求书及其等效物界定。

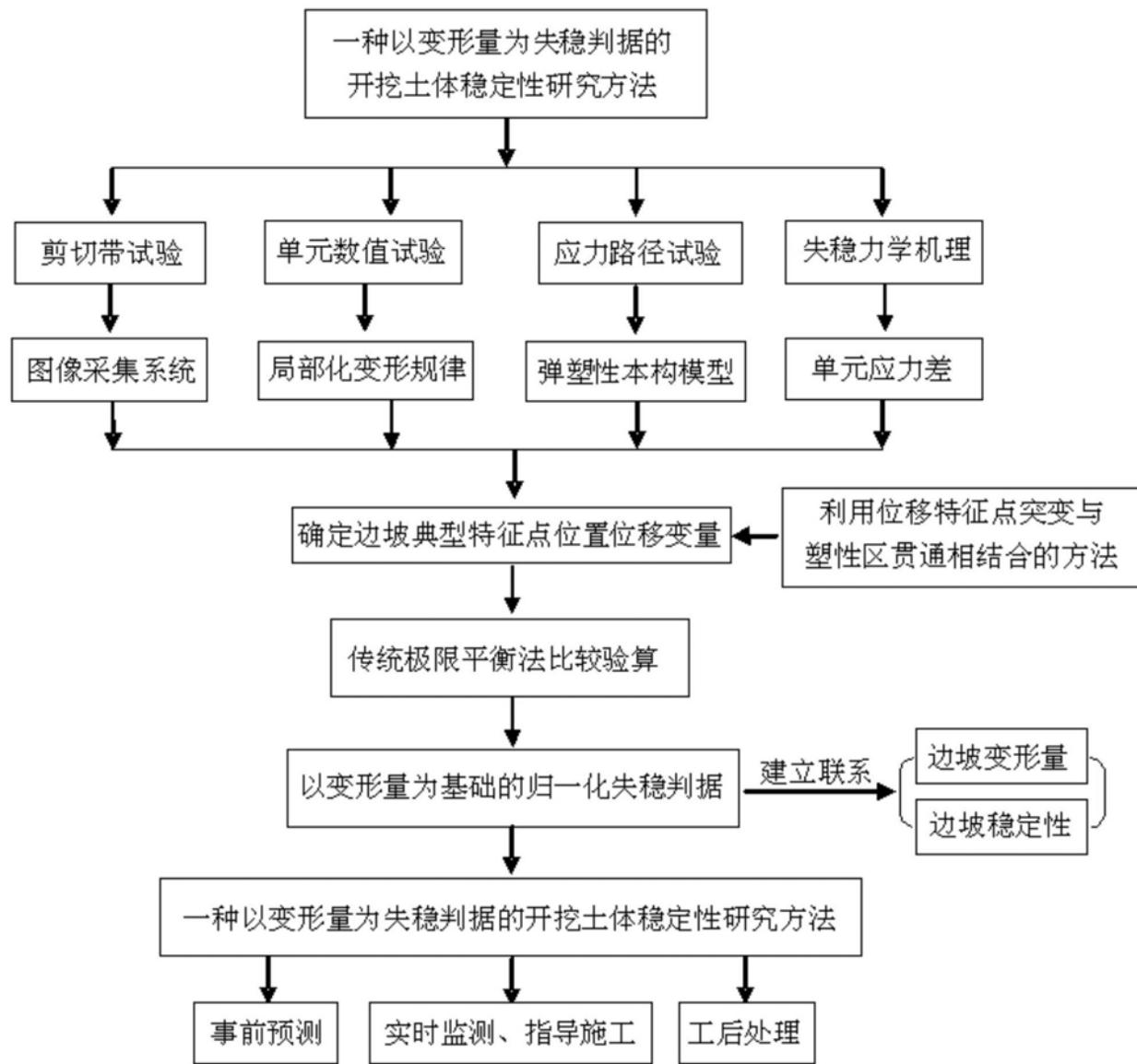


图1

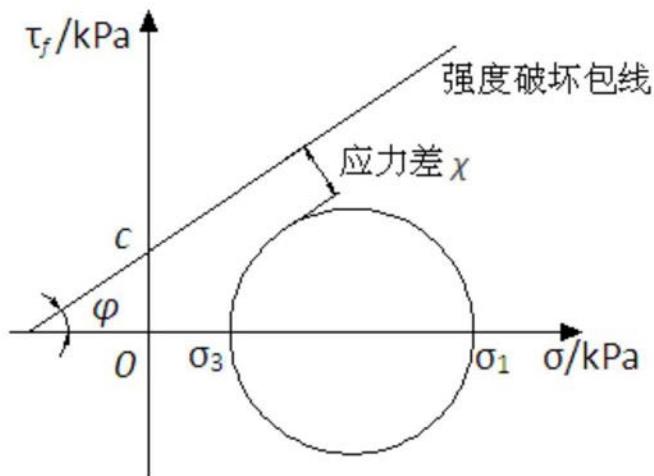


图2

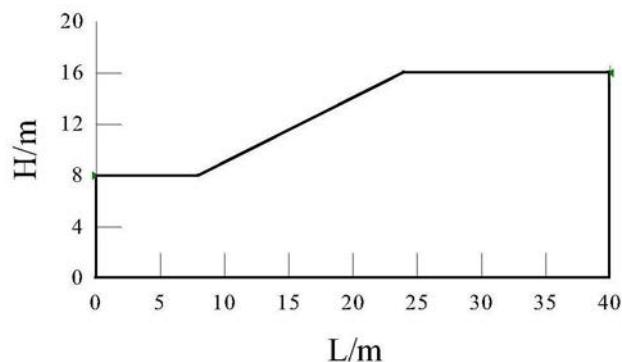


图3

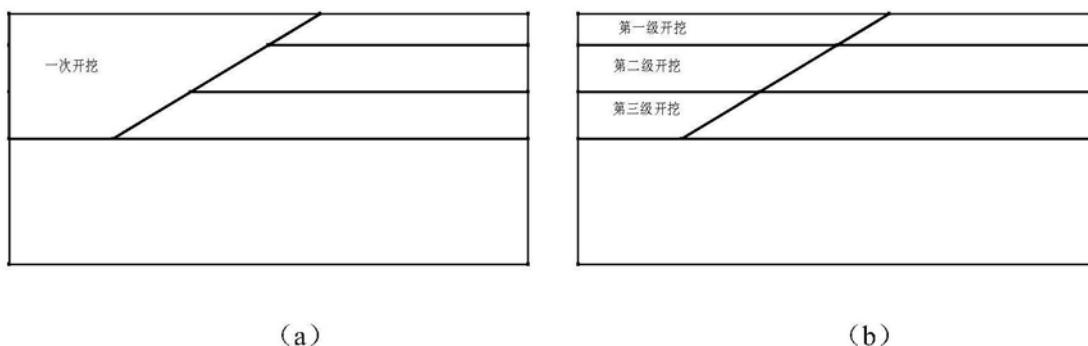


图4

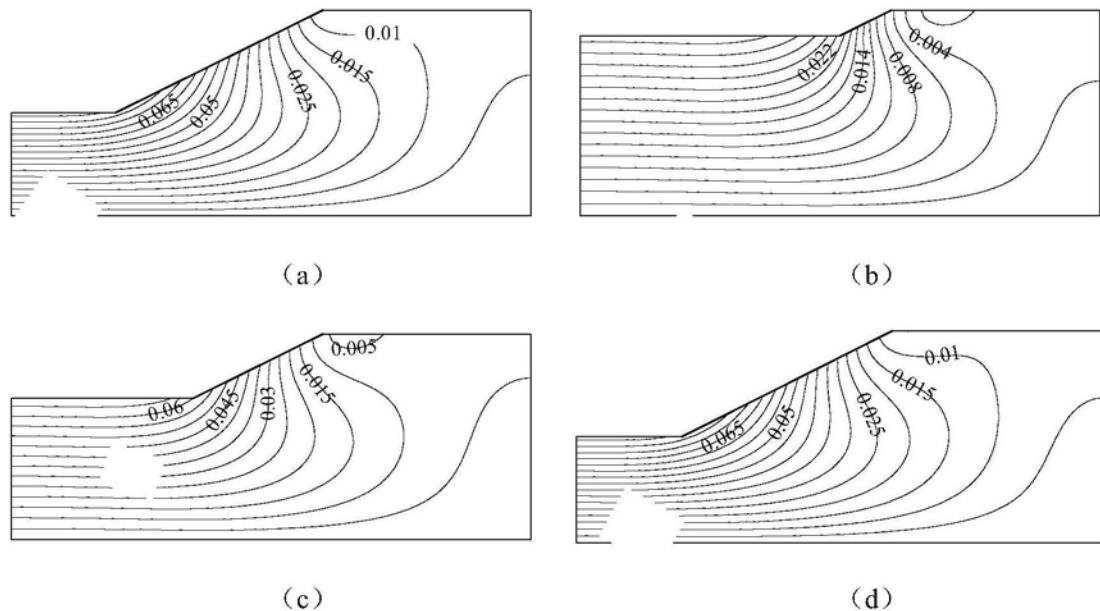


图5

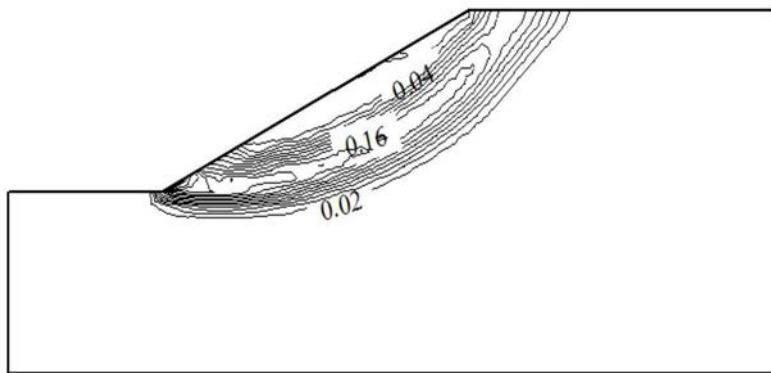


图6

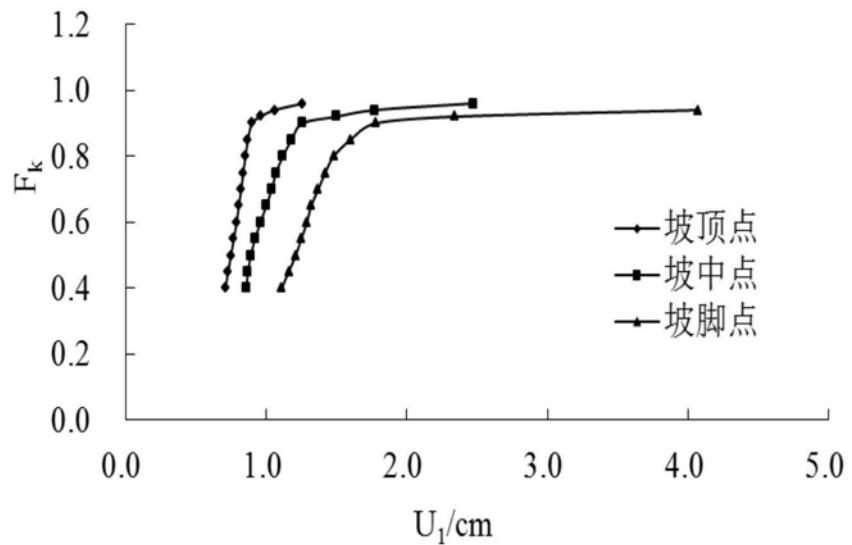


图7

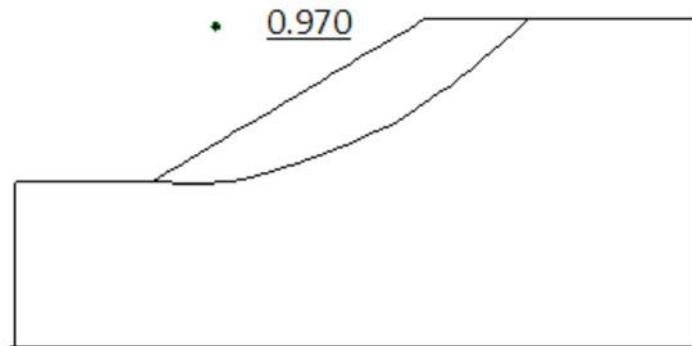


图8