



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109783947 B

(45) 授权公告日 2020.12.25

(21) 申请号 201910053479.8

(22) 申请日 2019.01.21

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109783947 A

(43) 申请公布日 2019.05.21

(73) 专利权人 南京大学

地址 210008 江苏省南京市鼓楼区汉口路
22号

(72) 发明人 张云 王哲成

(74) 专利代理机构 南京苏高专利商标事务所

(普通合伙) 32204

代理人 孟红梅

(51) Int. Cl.

G06F 30/23 (2020.01)

G06F 119/14 (2020.01)

G06F 111/10 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 108170959 A, 2018.06.15

CN 101614537 A, 2009.12.30

CN 108763725 A, 2018.11.06

王哲成. 抽水条件下拉张型地裂缝开展过程的数值模拟研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库》.2012,第28-36页.

王哲成,张云.地下水超采引起的地裂缝灾害的研究进展.《水文地质工程地质》.2012,第39卷(第2期),第88-93页.

张云.Mechanisms For Earth Fissure Formation due to groundwater extraction in the Su-Xi-Chang area,China.《Bulletin of Engineering Geology & the Environment》.2016,第745-760页.

审查员 卢济敏

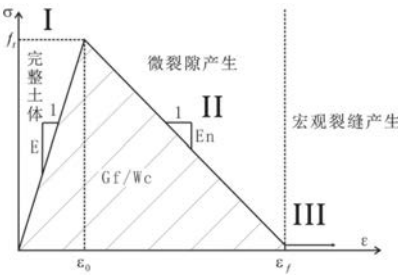
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

一种采水型地裂缝数值模拟方法

(57) 摘要

本发明公开了一种采水型地裂缝数值模拟方法,采用钝化断裂带模型表征地裂缝,将土体破坏分为完整、微裂隙产生和宏观裂缝产生三个阶段,在模拟计算过程中,若有单元小主应变达到完整阶段与微裂隙产生阶段之间的临界应变时,该单元进入软化阶段,在软化阶段,应力随着应变的增加而减小;若有单元小主应变达到软化阶段与宏观裂缝阶段之间的临界应变时,对该单元在裂缝法线方向上的刚度进行折减,从而修正该破坏单元的应力应变矩阵。本发明方法不需要事先给定地裂缝的位置及其地裂缝发生后的扩展方向,能够客观、真实地模拟和预测地下水开采引起的地裂缝,并且在地裂缝出现及扩展后也不需要重新划分网格,计算工作量较小。



1. 一种采水型地裂缝数值模拟方法,其特征在于,所述方法采用钝化断裂带模型表征地裂缝,所述钝化断裂带模型将土体破坏分为完整、微裂隙产生和宏观裂缝产生三个阶段,通过两个临界应变 $\varepsilon_0 = \frac{f_t}{E}$ 和 $\varepsilon_f = \frac{2G_f}{f_t w_c}$ 划分所述三个阶段;其中 f_t 为土体的抗拉强度, E 为土体拉伸模量, G_f 为裂缝能量释放率临界值, w_c 为与土体单元尺寸有关的断裂带宽度;所述模拟方法具体步骤包括:

(1) 建立开采地下水引起的地层移动模型,并根据模拟的具体情况设定初始条件和边界条件;

(2) 对模拟区域进行有限元网格剖分,得到地层移动模型的有限元的离散形式:

$$\begin{bmatrix} K & K' \\ K'^T & \tilde{K} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta w \\ \Delta p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F - Kw_{t-1} - K'p_{t-1} \\ \Delta t Q - \tilde{K}p_{t-1} \end{Bmatrix}$$

其中 K 为整体劲度矩阵, K' 为整体结点孔隙水压力和结点位移的耦合矩阵, $\tilde{K}$ 为整体渗透矩阵, Δw 和 Δp 分别为整体结点位移增量和整体结点孔隙水压力增量, F 为整体结点外荷载, w_{t-1} 和 p_{t-1} 分别为上一时间步结束时的整体结点位移和整体结点孔隙水压力, Q 为源汇项, Δt 为时间步长增量;

(3) 考虑初始条件和边界条件,求解步骤(2)中的方程组,得到当前时间步的整体结点位移增量和整体孔隙水压力增量,从而得到各单元的应变增量和应力增量,进而得到各单元的累计应变和应力;

(4) 判断是否有单元小主应变达到临界应变 ε_0 ,若达到则该单元进入软化阶段,在软化阶段,应力随着应变的增加而减小;判断是否有单元小主应变达到临界应变 ε_f ,若达到则该单元产生破坏,出现垂直于小主应变方向的宏观裂缝,在宏观裂缝出现后,对该单元在裂缝法线方向上的刚度进行折减,从而修正该破坏单元的应力应变矩阵;在单元出现宏观裂缝后,将单元的应力应变矩阵修正为:

$$[D]^{cs} = [D]^s - [D]^s [N] ([D]^c + [N]^T [D]^s [N])^{-1} [N]^T [D]^s$$

其中,

$$[D]^c = \begin{bmatrix} D^{nn} & 0 & 0 \\ 0 & D^{ns} & 0 \\ 0 & 0 & D^{nt} \end{bmatrix}$$

$[D]^{cs}$ 为含裂缝土体的应力应变矩阵, $[D]^s$ 为未开裂土体的应力应变矩阵, $[D]^c$ 为裂缝的应力应变矩阵, $[N]$ 为以垂直和平行于裂缝方向建立的局部坐标系与整体坐标系之间的坐标转换矩阵, n 、 s 、 t 为裂缝处局部坐标系的三个坐标轴方向, n 垂直于裂缝方向, s 和 t 平行于裂缝方向, D^{nn} 为裂缝的法向刚度, D^{ns} 、 D^{nt} 为裂缝的切向刚度;法向刚度和切向刚度的计算式为:

$$D^{nn} = \frac{EE_s}{E - E_s}$$

$$D^{ns} = D^{nt} = \frac{\beta}{1 - \beta} G$$

其中,E、G分别为土的拉伸模量和剪切模量, E_s 为应力应变软化段直线的斜率,为负值, β 为剪力传递系数;

(5) 返回步骤(2),进行下一时间步的计算,直至所有时间步模拟结束。

2. 根据权利要求1所述的一种采水型地裂缝数值模拟方法,其特征在于,所述步骤(3)中,各单元的应变增量 $\{\Delta \varepsilon\} = [B] \{\Delta w\}^e$,应力增量 $\{\Delta \sigma\} = [D] \{\Delta \varepsilon\}$,累计应变 $\{\varepsilon\}_t = \{\varepsilon\}_{t-1} + \{\Delta \varepsilon\}$,累计应力 $\{\sigma\}_t = \{\sigma\}_{t-1} + \{\Delta \sigma\}$;其中 $[D]$ 为单元的应力应变矩阵, $[B]$ 为单元应变矩阵, $\{\Delta w\}^e$ 为单元结点位移增量列向量, $\{\varepsilon\}_{t-1}$ 、 $\{\varepsilon\}_t$ 分别为t-1时刻和t时刻的单元应变, $\{\sigma\}_{t-1}$ 、 $\{\sigma\}_t$ 分别为t-1时刻和t时刻的单元应力。

3. 根据权利要求1所述的一种采水型地裂缝数值模拟方法,其特征在于,在单元进入软化阶段后,应力随着应变的增加而减小,具体方法是:在全过程曲线上找到单元当前应变对应的应力,并与单元当前应力求差得到该单元的不平衡应力;如果该不平衡应力大于收敛的阈值,则将该单元应力调整到全过程曲线上对应的应力,并且将不平衡应力对应的荷载反向加载到该单元的结点上,计算相应的应变和应力;重复这一过程,直至单元的不平衡应力不超过收敛的阈值。

一种采水型地裂缝数值模拟方法

技术领域

[0001] 本发明涉及地质工程领域的数值模拟方法,具体涉及一种地下水开采引起地裂缝的数值模拟方法。

背景技术

[0002] 地下水开采改变了土层的应力状态,如果土中一点的应力状态满足一定条件,该点会产生剪切破坏或拉裂破坏。当土中破坏点越来越多,连成一片并出露于地表时就形成了地裂缝,地裂缝形成后还可能进一步扩展。可见,采水型地裂缝的形成经历了一个从无到有、从小到大的发展过程。地裂缝的形成可对地表建(构)筑物、地下管线等造成严重破坏。为了科学防治地裂缝灾害的发生,对地裂缝的发生和发展进行数值模拟和预测是十分必要的。然而,地裂缝形成后土体中存在显著的不连续面,而常用的有限单元法是基于连续体问题的,因此,如果采用有限单元法模拟地裂缝,需要将地裂缝作为单元边界。但是,在开采地下水引起的地裂缝发生之前,其位置是未知的,地裂缝发生后其扩展方向也是未知的,因此,在采用有限元模拟时,需要根据地裂缝的发生和发展不断地重新划分网格,使得计算工作量巨大,实际上难以进行。同时,由于网格的重新划分,相邻计算步网格的拓扑结构不同,这使得相邻两个时间步的位移、孔隙水压力、应力等数据传输出现困难。另一方面,采水型地裂缝模拟不仅涉及到地下水渗流和土体变形的耦合计算,还涉及到比一般工程问题(如混凝土结构)大得多的空间尺度和时间尺度,因此,地裂缝数值模拟中的有限单元尺寸和时间增量步长都较大。由于这些原因,目前采水型地裂缝数值模拟进展缓慢,且多为事先给定地裂缝的位置及其扩展方向,这与实际地裂缝模拟要求相去甚远。

发明内容

[0003] 发明目的:为了克服现有技术用于模拟地下水开采引起的地裂缝的不足,本发明提供了一种采水型地裂缝数值模拟方法,该方法不需要事先给定地裂缝的位置及其地裂缝发生后的扩展方向,能够客观、真实地模拟和预测地下水开采引起的地裂缝,同时,该方法在地裂缝出现及扩展后也不需要重新划分网格,计算工作量较小,可以方便地应用于采水型地裂缝的模拟。

[0004] 技术方案:为解决采水型地裂缝数值模拟的困难,本发明的一种地下水开采引起的地裂缝的数值模拟方法采用钝化断裂带模型表征地裂缝,所述钝化断裂带模型将土体破

坏分为完整、微裂隙产生和宏观裂缝产生三个阶段,通过两个临界应变 $\varepsilon_0 = \frac{f_t}{E}$ 和 $\varepsilon_f = \frac{2G_f}{f_t w_c}$

划分所述三个阶段;其中 f_t 为土体的抗拉强度, E 为土体拉伸模量, G_f 为裂缝能量释放率临界值, w_c 为与土体单元尺寸有关的断裂带宽度;所述模拟方法具体步骤包括:

[0005] (1) 建立开采地下水引起的地层移动模型,并根据模拟的具体情况设定初始条件和边界条件;

[0006] (2) 对模拟区域进行有限元网格剖分,得到地层移动模型的有限元的离散形式;

$$[0007] \quad \begin{bmatrix} K & K' \\ K'^T & \tilde{K} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta w \\ \Delta p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F - Kw_{t-1} - K'p_{t-1} \\ \Delta t Q - \tilde{K}p_{t-1} \end{Bmatrix}$$

[0008] 其中K为整体劲度矩阵, K' 为整体结点孔隙水压力和结点位移的耦合矩阵, $\tilde{K}$ 为整体渗透矩阵, Δw 和 Δp 分别为整体结点位移增量和整体结点孔隙水压力增量, F 为整体结点外荷载, w_{t-1} 和 p_{t-1} 分别为上一时间步结束时的整体结点位移和整体结点孔隙水压力, Q 为源汇项, Δt 为时间步长增量;

[0009] (3) 考虑初始条件和边界条件, 求解步骤(2)中的方程组, 得当前时间步的整体结点位移增量和整体孔隙水压力增量, 从而得到各单元的应变增量和应力增量, 进而得到各单元的累计应变和应力;

[0010] (4) 判断是否有单元小主应变达到临界应变 ε_0 , 若达到则该单元进入软化阶段, 在软化阶段, 应力随着应变的增加而减小; 判断是否有单元小主应变达到临界应变 ε_f , 若达到则该单元产生破坏, 出现垂直于小主应变方向的宏观裂缝, 在宏观裂缝出现后, 对该单元在裂缝法线方向上的刚度进行折减, 从而修正该破坏单元的应力应变矩阵;

[0011] (5) 返回步骤(2), 进行下一时间步的计算, 直至所有时间步模拟结束。

[0012] 在具体的实施方案中, 所述步骤(3)中, 各单元的应变增量 $\{\Delta \varepsilon\} = [B] \{\Delta w\}^e$, 应力增量 $\{\Delta \sigma\} = [D] \{\Delta \varepsilon\}$, 累计应变 $\{\varepsilon\}_t = \{\varepsilon\}_{t-1} + \{\Delta \varepsilon\}$, 累计应力 $\{\sigma\}_t = \{\sigma\}_{t-1} + \{\Delta \sigma\}$; 其中 $[D]$ 为单元的应力应变矩阵, $[B]$ 为单元应变矩阵, $\{\Delta w\}^e$ 为单元结点位移增量列向量, $\{\varepsilon\}_{t-1}$ 、 $\{\varepsilon\}_t$ 分别为 $t-1$ 时刻和 t 时刻的单元应变, $\{\sigma\}_{t-1}$ 、 $\{\sigma\}_t$ 分别为 $t-1$ 时刻和 t 时刻的单元应力。

[0013] 在具体的实施方案中, 在单元进入软化阶段后, 应力随着应变的增加而减小, 具体方法是: 在全过程曲线上找到单元当前应变对应的应力, 并与单元当前应力求差得到该单元的不平衡应力; 如果该不平衡应力大于收敛的阈值, 则将该单元应力调整到全过程曲线上对应的应力, 并且将不平衡应力对应的荷载反向加载到该单元的结点上, 计算相应的应变和应力; 重复这一过程, 直至单元的不平衡应力不超过收敛的阈值。

[0014] 在具体的实施方案中, 在单元出现宏观裂缝后, 将单元的应力应变矩阵修正为:

$$[0015] \quad [D]^{cs} = [D]^s - [D]^s [N] ([D]^c + [N]^T [D]^s [N])^{-1} [N]^T [D]^s$$

[0016] 其中,

$$[0017] \quad [D]^c = \begin{bmatrix} D^{nn} & 0 & 0 \\ 0 & D^{ns} & 0 \\ 0 & 0 & D^{nt} \end{bmatrix}$$

[0018] $[D]^{cs}$ 为含裂缝土体的应力应变矩阵, $[D]^s$ 为未开裂土体的应力应变矩阵, $[D]^c$ 为裂缝的应力应变矩阵, $[N]$ 为以垂直和平行于裂缝方向建立的局部坐标系与整体坐标系之间的坐标转换矩阵, n 、 s 、 t 为裂缝处局部坐标系的三个坐标轴方向, n 垂直于裂缝方向, s 和 t 平行于裂缝方向, D^{nn} 为裂缝的法向刚度, D^{ns} 、 D^{nt} 为裂缝的切向刚度; 法向刚度和切向刚度的计算式为:

$$[0019] \quad D^{nn} = \frac{EE_s}{E - E_s}$$

$$[0020] \quad D^{ns} = D^{nt} = \frac{\beta}{1-\beta} G$$

[0021] 其中,E、G分别为土的拉伸模量和剪切模量, E_s 为应力应变软化段直线的斜率,为负值, β 为剪力传递系数。

[0022] 有益效果:本发明的一种采水型地裂缝的数值模拟方法可以模拟开采地下水引起的地裂缝,预测地下水开采条件下地裂缝发生的位置以及随后的扩展方向,以及地裂缝两侧土体的水平位移和垂向位移。与现有技术相比,具有以下优点:

[0023] (1)不需要事先给定地裂缝的位置以及地裂缝的扩展方向,地裂缝的发生和扩展完全取决于土体的应力变化及其破坏,从而实现真正意义上的地裂缝模拟。

[0024] (2)可以在已有的考虑水流和土体变形非线性耦合作用的地面沉降模拟有限元软件的基础上加以适当修改,计算过程中不需要重新划分网格,计算工作量较小。

[0025] (3)可以实现多条裂缝的模拟。

附图说明

[0026] 图1为本发明方法中钝化断裂带模型本构关系图;

[0027] 图2为本发明方法中软化阶段应力与应变迭代示意图;

[0028] 图3为本发明实验例中概化的地质模型示意图;

[0029] 图4为本发明实验例中模拟区域的网格划分示意图;

[0030] 图5为本发明实验例抽水过程中土层中小主应力分布及地裂缝的发展示意图;

[0031] 图6为本发明实验例中地裂缝起裂前地表剪应变分布图。

具体实施方式

[0032] 下面结合附图和实施例对本发明作更进一步说明。

[0033] 本发明实施例公开的一种采水型地裂缝数值模拟方法,该方法采用钝化断裂带模型表征地裂缝,具体模拟方法包括以下步骤:

[0034] (1)建立开采地下水引起的地层移动模型,并根据模拟的具体情况设定初始条件和边界条件。本步骤中,根据土骨架平衡条件和水流连续性条件,考虑到土体变形的非线性特征,建立全耦合的开采地下水引起的地层移动模型

$$[0035] \quad \begin{cases} -G\nabla^2 u + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \\ -G\nabla^2 v + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} = -\gamma \\ \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{k}{\gamma_w} \nabla^2 p + Q = 0 \end{cases} \quad (1)$$

[0036] 式中,G为土骨架的剪切模量; ν 为土骨架的泊松比; $\varepsilon_v = -\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$ 为土骨架的体积应变,以压为正; u 和 v 分别为 x 和 y 轴方向的位移; p 为孔隙水压力; γ 为土的重度; γ_w 为水的重度; k 为渗透系数; Q 为源汇项。

[0037] 根据模拟的具体情况,给出初始条件为 $u|_{t=0}=0$

[0038] $v|_{t=0}=0$

[0039] $p|_{t=0}=p_0(x,y)$

[0040] 和边界条件为

[0041] $p|_{\Gamma_1}=p^*$ (第一类孔隙水压力边界条件)

[0042] $\frac{\partial p}{\partial n}|_{\Gamma_2}=q^*$ (第二类孔隙水压力边界条件)

[0043] $u|_{S_1}=u^*$ (位移边界条件)

[0044] $v|_{S_1}=v^*$ (位移边界条件)

[0045] 式中, n 为边界的外法线方向; p^* 为已知孔隙水压力; q^* 为已知孔隙水压力在边界法线方向的导数; u^* 、 v^* 分别为已知水平位移和垂向位移; $p_0(x,y)$ 为抽水前孔隙水压力的分布; Γ_1 为孔隙水压力已知的边界; Γ_2 为孔隙水压力的法向导数已知的边界; S_1 为位移已知的边界。

[0046] (2)对模拟区域进行有限元网格剖分。将模拟区域离散为四边形等参单元,进行单元分析。对单元 e ,其单元劲度矩阵

$$[K]^e = \iint_e [B]^T [D] [B] dx dy$$

[0048] 单元结点孔隙水压力和结点位移的耦合矩阵为

$$[K']^e = \iint_e [B]^T \{M\} [N'] dx dy$$

[0050] 单元渗透矩阵为

$$[\tilde{K}]^e = -\frac{\Delta t}{\gamma_w} \iint_e \left(k_x \frac{\partial [N']^T}{\partial x} \frac{\partial [N']}{\partial x} + k_y \frac{\partial [N']^T}{\partial y} \frac{\partial [N']}{\partial y} \right) dx dy$$

[0052] 式中, $[D]$ 为单元的应力应变矩阵; $[B]$ 为单元应变矩阵; $\{M\} = [1 \ 1 \ 0]^T$; $[N'] = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4]$, N_i ($i=1,2,3,4$)为形函数; Δt 为时间步长增量。

[0053] 将所有单元的劲度矩阵、耦合矩阵和渗透矩阵进行集合,可得到(1)式的有限元的离散形式为

$$[0054] \quad \begin{bmatrix} K & K' \\ K'^T & \tilde{K} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta w \\ \Delta p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F - Kw_{t-1} - K'p_{t-1} \\ \Delta t Q - \tilde{K}p_{t-1} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

[0055] 式中, K 为整体劲度矩阵; K' 为整体结点孔隙水压力和结点位移的耦合矩阵; $\tilde{K}$ 为整体渗透矩阵; $\Delta w = [\Delta u \ \Delta v]^T$ 为整体结点位移增量; Δp 为整体结点孔隙水压力增量; F 为整体结点外荷载; w_{t-1} 和 p_{t-1} 分别为上一时间步结束时的整体结点位移和整体结点孔隙水压力。

[0056] (3)考虑初始条件和边界条件,解方程组(2),可得当前时间步的结点位移增量和孔隙水压力增量,从而可计算各单元的应变增量

$$[0057] \quad \{\Delta \varepsilon\} = [B] \{\Delta w\}^e \quad (3)$$

[0058] 和应力增量

$$[0059] \quad \{\Delta \sigma\} = [D] \{\Delta \varepsilon\} \quad (4)$$

[0060] 进而可计算各单元的累计应变

$$[0061] \quad \{\varepsilon\}_t = \{\varepsilon\}_{t-1} + \{\Delta \varepsilon\} \quad (5)$$

[0062] 和累计应力

$$[0063] \quad \{\sigma\}_t = \{\sigma\}_{t-1} + \{\Delta \sigma\} \quad (6)$$

[0064] 其中, $\{\Delta w\}^e$ 为单元结点位移增量列向量, $\{\varepsilon\}_{t-1}$ 、 $\{\varepsilon\}_t$ 分别为 $t-1$ 时刻和 t 时刻的单元应变, $\{\sigma\}_{t-1}$ 、 $\{\sigma\}_t$ 分别为 $t-1$ 时刻和 t 时刻的单元应力。

[0065] (4) 采用钝化断裂带模型表征地裂缝。钝化断裂带模型土体破坏分为完整、微裂隙产生(软化)和宏观裂缝产生三个阶段(图1)。若在第 t 步计算中, 有单元小主应变达到临界应变

$$[0066] \quad \varepsilon_0 = \frac{f_t}{E} \quad (7)$$

[0067] 则该单元进入软化阶段, 这时应力随着应变的增加而减小。式(7)中, ε_0 为土单元从完整阶段到微裂隙产生阶段之间的临界应变; f_t 为土体的抗拉强度; E 为土体拉伸模量。这时, 可采用图2所示的迭代法计算, 迭代过程如下:

[0068] ①设某单元应力超过抗拉强度值 f_t 达到 $A(\sigma_1, \varepsilon_1)$, 在图2的全过程曲线上找到 ε_1 对应的点 $B(\sigma_2, \varepsilon_1)$, 此时该单元的不平衡应力为 $\sigma_1 - \sigma_2$ 。

[0069] ②如果该不平衡应力大于收敛的阈值(预先设定为 0.1 kPa), 则将该单元应力调整到 B 点, 并且将不平衡应力 $\sigma_1 - \sigma_2$ 对应的荷载反向加载到该单元的结点上, 代表应力释放的过程, 将该单元标记为软化单元, 将其模量设定为一个很小的正值, 如 $1e-10 \text{ kPa}$ 。

[0070] ③返回到步骤(2), 重新进行计算(第二次迭代)。在这步计算中的荷载只有上一步应力释放对应的反向加载, 而且该软化单元模量很小, 所以不会产生明显的应力增量, 但应变明显增加, 达到 $C(\sigma_2, \varepsilon_2)$, 这时再用 C 点的应变 ε_2 计算全过程曲线上的应力 σ_3 (D 点), 这时该单元的不平衡应力为 $\sigma_2 - \sigma_3$ 。

[0071] ④返回步骤②, 直至前后两次迭代计算的不平衡应力不超过给定的阈值。

[0072] 若单元的小主应变达到临界应变

$$[0073] \quad \varepsilon_f = \frac{2G_f}{f_t w_c} \quad (8)$$

[0074] 则该单元产生破坏, 出现垂直于小主应变方向的宏观裂缝。式(8)中, ε_f 为微裂隙产生(软化)阶段与宏观裂缝产生阶段之间的临界应变; G_f 为裂缝能量释放率临界值; w_c 为与单元尺寸有关的断裂带宽度。宏观裂缝出现后, 基于应变可加性原理对该单元在裂缝法线方向上的刚度进行折减, 从而修正该破坏单元的应力应变矩阵

$$[0075] \quad [D]^{cs} = [D]^s - [D]^s [N] ([D]^c + [N]^T [D]^s [N])^{-1} [N]^T [D]^s \quad (9)$$

[0076] 其中,

$$[0077] \quad [D]^c = \begin{bmatrix} D^{nn} & 0 & 0 \\ 0 & D^{ns} & 0 \\ 0 & 0 & D^{nt} \end{bmatrix} \quad (10)$$

[0078] 式中, $[D]^{cs}$ 为含裂缝土体的应力应变矩阵; $[D]^s$ 为未开裂土体的应力应变矩阵; $[D]^c$ 为裂缝的应力应变矩阵; $[N]$ 为以垂直和平行于裂缝方向建立的局部坐标系与整体坐标系之间的坐标转换矩阵; n 、 s 、 t 为裂缝处局部坐标系的三个坐标轴方向, n 垂直于裂缝方向, s 和 t 平行于裂缝方向。 D^{nn} 为裂缝的法向刚度; D^{ns} 、 D^{nt} 为裂缝的切向刚度。法向刚度和切向刚度的计算式为

$$[0079] \quad D^{nn} = \frac{EE_s}{E - E_s}$$

$$[0080] \quad D^{ns} = D^{nt} = \frac{\beta}{1 - \beta} G$$

[0081] 其中, E 、 G 分别为土的拉伸模量和剪切模量, E_s 为应力应变软化段直线的斜率, 为负值, β 为剪力传递系数。

[0082] 含裂缝单元的应力应变关系为 $\{\Delta \sigma\} = [D]^{cs} \{\Delta \varepsilon\}$ (11)

[0083] 式中, $\{\Delta \sigma\}$ 为应力增量; $\{\Delta \varepsilon\}$ 为应变增量。

[0084] (5) 返回到步骤 (2), 进行下一时间步的计算, 直至所有时间步模拟结束。

[0085] 下面结合具体实验例对本发明做进一步说明以验证本发明方法的效果。根据松散沉积物的成因和埋藏条件, 苏锡常地区第四纪土层可划分为一个潜水含水层和三个承压含水层, 含水层间为黏土、粉质黏土组成的弱透水层。自上世纪70年代, 苏锡常地区大量开采地下水, 且开采量主要来自第二承压含水层。大量地下水开采使该地区不仅产生严重的地面沉降, 也出现了地裂缝。自从1989年发现第一条地裂缝以来, 苏锡常地区迄今共出现地裂缝26条, 且大多数地裂缝发生于无锡西部, 这里第四纪土层厚度较小, 基岩埋深相对较浅, 基岩面起伏大, 第三承压含水层缺失。根据现场调查, 苏锡常地区地裂缝的发育大部分与下伏基岩隆起有关, 发育位置多在基岩隆起区上方附近。根据苏锡常地区地裂缝发育区的地质条件, 可概化出图3所示的地质模型, 图4为模拟区域的网格划分。

[0086] 地裂缝出现以前, 土体可作为连续体, 根据土骨架平衡条件和水流连续性条件, 考虑到土体变形的非线性特征, 可以得到如式 (1) 的全耦合的开采地下水引起的地面沉降模型。其初始条件为 $u|_{t=0} = 0$

$$[0087] \quad v|_{t=0} = 0$$

$$[0088] \quad p|_{t=0} = 10y$$

[0089] 边界条件为

$$[0090] \quad p|_{s1} = 10y$$

$$[0091] \quad \left. \frac{\partial p}{\partial n} \right|_{s1, s2, s3, s4} = 0$$

$$[0092] \quad u|_{s1, s3, s4} = 0$$

$$[0093] \quad v|_{s2, s3} = 0$$

[0094] 其中, 边界 $S1$ 、 $S2$ 、 $S3$ 、 $S4$ 如图2所示, n 为边界的外法线方向, 坐标原点位于模拟区域的左下角。

[0095] 图5为模拟结果, 从图中可以看到, 抽水10天后, 在基岩隆起区上方及侧边界处的地表附近出现了拉应力, 在基岩隆起区上方地表处还出现了一条地裂缝 (图5-b); 抽水40天

后,地表附近的拉应力分布区范围增加,第一条裂缝的长度也增加,且在第一条裂缝左侧出现了第二条裂缝(图5-c)。受第二条裂缝的影响,地表附近的拉应力区的宽度进一步缩小但深度增加、向深部延伸,集中分布在两条平行裂缝附近,这时裂缝下方砂土层的压应力也开始减小。随着抽水达到稳定,裂缝和拉应力区继续向深部开展(图5-d),整体开展方向呈垂直向下,拉应力区进一步向两条裂缝靠拢,特别是两条裂缝之间的地表还出现了一定的压应力区。这些模拟结果与野外调查情况基本符合。图6为两条地裂缝出现前地表处的剪应变分布图,可以看到,两条地裂缝并没有发生在剪应力较大处,反而发生在剪应变为零的地方,即该点处局部地面沉降不均匀程度并不高,但其最小主应力为拉力,且可以达到区域内拉力的最大值。第一条裂缝出现后,由于应力传递的中断,裂缝两盘产生明显错动。

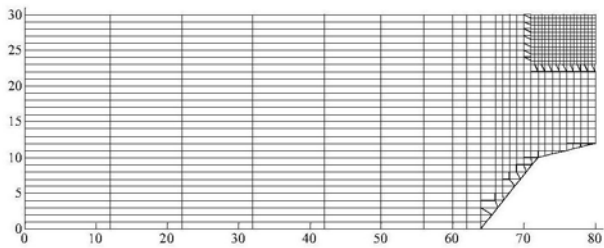


图4

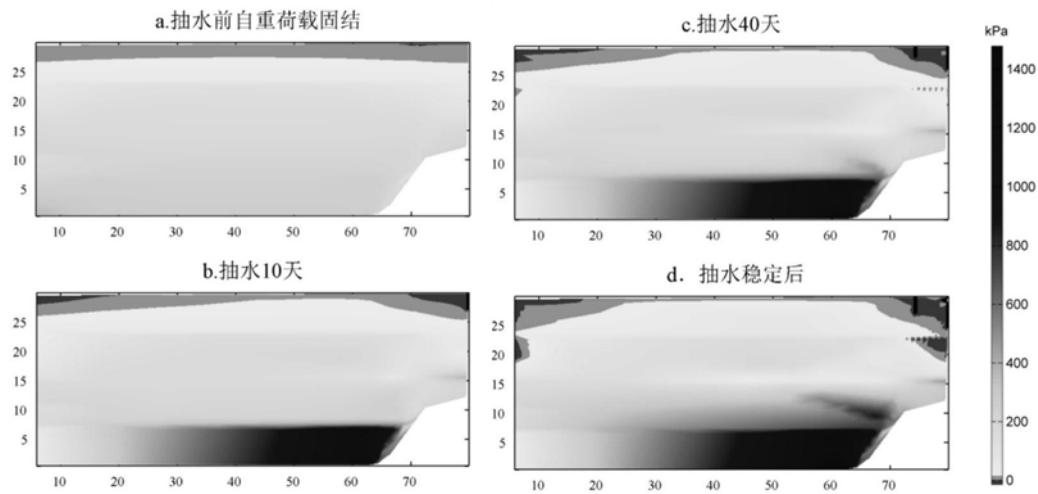


图5

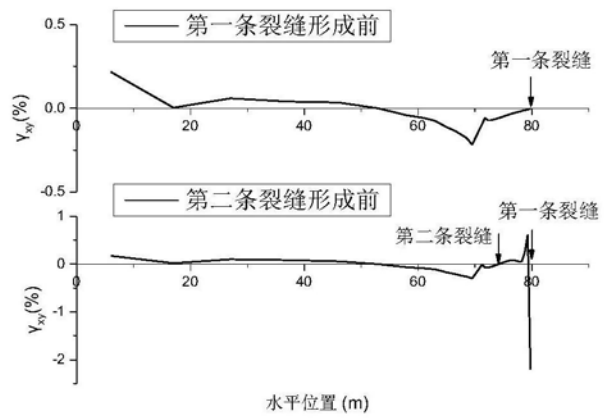


图6