

同霄, 彭建兵, 乔建伟, 等. 不同倾角地裂缝作用下房屋建筑物破坏过程的数值分析[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 37-41, 46. [Tong Xiao, Peng Jianbing, Qiao Jianwei, et al. The Numerical Analysis of the Building Failure Process under the Action of Different Angle Ground Fissures[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(2): 37-41, 46.]

不同倾角地裂缝作用下房屋建筑物破坏过程的数值分析^{*}

同霄¹, 彭建兵^{1,2}, 乔建伟¹, 王飞永¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;
2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 我国的地裂缝分布十分广泛。在快速发展的城镇化进程中, 地裂缝严重影响着国家建设和人居安全。根据大量的地裂缝灾害调查, 在广袤的农村, 地裂缝的主要危害在于其引起的房屋建筑物的破坏。地裂缝的运动过程是缓慢的, 成灾过程是渐进的, 随着时间的推移, 房屋建筑物的破坏程度逐渐加大。基于颗粒流数值计算方法, 对不同倾角地裂缝作用下房屋建筑物破坏过程进行了细观数值分析, 这为总结地裂缝对建筑物的成灾机理提供了数值基础, 也为工程的灾害预防提供了新的参考。

关键词: 地裂缝; 房屋建筑物; 破坏过程; 成灾机理; 颗粒流; 数值分析

中图分类号: X43; U57.2; TU311.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2016)02-0037-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.02.008

地裂缝是一种典型的缓慢变形地质灾害, 其致灾的根本原因在于裂缝形成并到达或接近地表后, 在构造蠕滑、地下水抽取及地表水潜蚀等作用下, 上下盘相对运动而在地表形成的差异形变或不均匀沉降^[1-4]。一旦建筑物跨于地裂缝之上, 或处于地裂缝两侧上下盘的差异形变带内时, 由此产生的附加内力和变形就会使结构产生破坏甚至完全损毁^[5-8]。

自1960年以来, 我国很多地方, 尤其是大华北地区, 相继发生数以千计的地裂缝, 危及到众多城乡建设。据统计, 因地裂缝对建筑物破坏所造成的损失已达数十亿元^[9]。以汾渭盆地为例, 除了西安、咸阳、大同、太原、临汾、运城等一线二线城市, 在广袤的农村也发育有大量的地裂缝, 与农民生活息息相关的正是地裂缝作用下农村自建房屋建筑物的安全使用问题、防治避让等问题。这些问题严重制约着农村城镇化的进行, 同时也严重威胁着当地居民的正常生产和生活。

地裂缝带上的建筑物灾害受地裂缝产状和运动特征等因素的控制, 建筑物本身的体型, 采用的地基处理方式, 基础及结构的形式, 以及地裂

缝通过的部位对建筑物的变形及破坏特征都有一定的影响^[10-12]。本文基于颗粒流数值计算方法, 探讨了不同产状中不同倾角地裂缝对房屋建筑物的破坏过程。

1 房屋建筑物的破坏特征

地裂缝作用造成房屋建筑物破坏主要有墙体开裂、门窗变形和地面开裂。图1~图3为课题组于2013年7月在山西省运城市夏县进行地裂缝灾害调查时拍摄到的房屋建筑物的破坏照片。



图1 墙体开裂

^{*} 收稿日期: 2015-09-18 修回日期: 2015-11-14

基金项目: 国土资源大调查项目(1212011120067)

作者简介: 同霄(1987-), 男, 陕西三原人, 博士研究生, 主要从事地质灾害方面的科研工作. E-mail: tong@chd.edu.cn

通讯作者: 彭建兵(1953-), 男, 湖北麻城人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事工程地质与地质灾害研究.

E-mail: dicexy_1@chd.edu.cn



图2 门窗变形



图3 地面开裂

图1是山西省运城市夏县禹王乡西董村的房屋破坏照片。该房屋新建不久,因位于地裂缝带上,导致房屋出现了不均匀沉降,墙体上产生了倒八字形裂缝,裂缝穿过窗户,使窗户严重变形。图2是山西省运城市夏县裴介镇大吕村的房屋门窗破坏照片。图3是山西省运城市夏县禹王乡禹王村小学地面开裂,地裂缝从该小学教学楼前的空地斜穿而过,地裂缝两侧地面产生不均匀沉降,导致水泥地面开裂,严重影响了学校日常的教学工作且埋下安全隐患。

2 颗粒流方法

本文数值分析采用 PFC2D 计算软件。PFC2D (Particle Flow Code 2 Dimensions) 程序是颗粒流数值程序之意,是由美国 Itasca Consulting Group Inc 开发的数值软件,利用显式差分算法和离散元理论开发的微/细观力学程序,它是从介质的基本粒子结构的角度考虑介质的基本力学特性,并认为给定介质在不同应力条件下的基本特性主要取决于粒子之间接触状态的变化,适用研究粒状集合体的破裂和破裂发展问题,以及颗粒的流动(大位移)问题。目前该软件在国内外已被广泛应用于各研究领域^[13]。颗粒流数值计算软件,有三个显著的优点。①它有潜在的高效率。因为圆形物体间

的接触探测比角状物体间的更简单。②对可以模拟的位移大小实质上没有限制。③由于它们是由黏结的粒子组成,块体可以破裂。综合这些因素,采用颗粒流软件计算地裂缝活动下建筑物变形破坏是合理的。

3 数值分析

3.1 建模思路

根据地裂缝灾害调查时对村民的询问得知,现在农村自建房,一般墙体采用的是砌体结构,又称砖石结构。砌体的抗压强度较高而抗拉强度很低,因此,砌体结构构件主要承受轴心或小偏心压力,而很少受拉或受弯。一般地基采用无筋扩展基础,是由砖、三合土、灰土、毛石、混凝土等材料组成的墙下条形基础。这类基础的材料抗压强度较高,但抗拉和抗弯能力较低,容易被拉裂,属于浅基础类型。本文数值计算采用的模型几何示意图如图4所示。土体尺寸为 $10\text{ m} \times 5\text{ m}$,地基为条形基础,尺寸为 $8\text{ m} \times 0.5\text{ m}$,建筑物墙体为砖墙,尺寸为 $5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 。

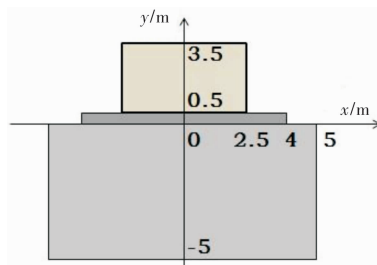


图4 房屋建筑物的几何示意图

在 PFC2D 中,颗粒组成的各种物质的力学性质是由颗粒间的接触模型来决定的,接触模型分为刚度模型、滑动模型、黏结模型。刚度模型是接触力和相对位移之间的弹性关系;滑动模型是在法向力和切向力之间建立的两个接触球体相对运动的关系;黏结模型限定了法向力和切向力的合力的最大值。刚度模型分为两种:线性模型和 Hertz-Mindlin 模型。滑动模型是两个接触实体的内在特性,采用限制剪切力的方式,在张拉时无法向强度,并允许滑动。该模型总是激活的,除非设置了接触黏结。滑动模型采用摩擦系数来定义。摩擦系数采用两个接触实体中最小的那个摩擦系数。黏结模型主要有两种:接触黏结模型、平行黏结模型。接触黏结模型是点接触,可以得到一个力;平行黏结模型是有限尺寸(圆形或矩形截面)上的平行粘结,可以得到一个力和一个力矩。两种模型可以同时激活。本文数值计算中选取的是线性模型和接触黏结模型。对于颗粒本身而言,有两个需要确定的参数:颗粒半径/ m 和颗粒的密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ 。颗粒的半径越小,和实际物质的

尺寸越接近,计算结果越真实,但是由于计算机运算能力的限制,采用较小的颗粒半径建立的模型运算耗时巨大,本文通过多次试算,当半径为 0.025 m 时,既能保证运算结果的准确性,又能在较短的时间内计算得到结果;三种不同材料的颗粒密度通过土工试验确定得到。在接触黏结模型中,有四个参数需要确定:法向刚度 $kn/(N \cdot m^{-1})$ 、切向刚度 $ks/(N \cdot m^{-1})$ 、法向黏结强度 n_bond/N 和切向黏结强度 s_bond/N 。颗粒的刚度分为法向和切向,刚度是指材料在受力时抵抗弹性变形的能力,是材料弹性变形难易程度的表征。通过材料的弹性模量可计算得到材料的刚度^[14],在确定了刚度参数后,对于强度参数的确定,在颗粒流中称为标定。一般采用室内试验和数值试验对比拟合的方法来确定强度参数。不断尝试调整 n_bond 和 s_bond 的取值,当数值计算模拟的曲线和试验曲线吻合为止。本文通过标定得到的黄土黏结强度参数,钢筋混凝土搅拌桩的黏结强度为 $2.0 \times 105/N$ ^[15],采用强度等比缩小的方法确定墙体和基础的黏结强度,数值计算的取值如表 1 所示。

为了模拟地裂缝运动情况,分别在土体模型的两端施加 X 方向水平位移约束,以实现模拟在水平向相对静止的土体,在地裂缝下盘底部施加 Y 方向即竖直向位移约束作为不动盘,而在地裂缝上盘施加强制位移来控制模拟地裂缝上盘的下降过程和垂直位移量。在土体中设置一条地裂缝,倾角分别为 30° 、 60° 、 90° ,地裂缝左侧为下盘,右侧为上盘。开始模拟试验后,上盘每天匀速下降 3 cm,下降过程在 1 h 中完成,稳定 23 h 后,再进行下一次下降。下降过程为 10 d,共下降 30 cm,下降结束后继续计算直到建筑物不发生变化为止,观察墙体的破坏过程,三种不同倾角的地裂缝数值模型如图 5 所示。

3.2 结果分析

图 6 是三种工况的计算结果汇总,其中 a ~ c

为地裂缝倾角为 30° 时上盘沉降量分别为 3 cm、15 cm 和 30 cm 的模型接触图。d ~ f 为地裂缝倾角为 60° 时上盘沉降量分别为 3 cm、15 cm 和 30 cm 的模型接触图。h ~ j 为地裂缝倾角为 90° 时上盘沉降量分别为 3 cm、15 cm 和 30 cm 的模型接触图。随着地裂缝的不断运动,试验第 1 d 结束后,沉降为 3 cm,三种工况下墙体都发生了倾斜,地基在上盘土体这一侧发生了脱空,三种工况下墙体和地基都没有发生破坏。试验第 5 d 结束后,沉降为 15 cm, 90° 地裂缝的墙体右下角发生破裂,三种工况下墙体倾斜加剧,地基脱空程度变大。实验第 10 d 结束后,沉降为 30 cm, 90° 地裂缝的地基中部由于抗弯抗拉强度低,发生了拉张破坏, 90° 地裂缝的墙体右侧的裂口不断张开,破坏严重。 60° 地裂缝的墙体中部发生破坏。 30° 地裂缝的墙体中部也出现较小的裂纹。

通过数值计算可以看出,对于无筋扩展基础这类以脆性变形为主的基础,随着地裂缝的运动,由于地裂缝两侧的土体发生不均匀沉降,地基首先发生倾斜,进一步发生弯曲,当沉降量越来越大时,地基在上覆建筑物荷载和自身重力的作用下发生破坏。破坏主要以张拉破坏为主。砌体结构的墙体随着沉降量的增加,首先发生倾斜,当倾斜达到一定角度时,墙体在底部产生拉张破裂,破裂会随着沉降的发生而越来越严重,延伸至墙体顶端或向着墙体内部发展。

在三种工况中,倾角 90° 的墙体和地基破坏程度最为严重,倾角 30° 的墙体和地基破坏程度最轻。这是由于地裂缝两侧的土体是不均匀沉降,在地裂缝两侧的土体相对运动的过程中,地裂缝作为接触面,会产生摩擦力,摩擦力会减弱上盘的下降趋势,同时摩擦力也减弱了下盘相对的上升趋势。正是因为这个摩擦力的存在,一般在地表监测地裂缝活动速率为 0.1 cm/年至 10 cm/年,而实际下部断层的活动速率要大于地表监测的数据。在开挖的探槽剖面中可以看出,地表处的位

表 1 数值计算参数

序号	分组名称	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	法向刚度 $kn/(N/m)$	切向刚度 $ks/(N/m)$	法向黏结强度 n_bond/N	切向黏结强度 s_bond/N	颗粒半径/m
①	黄土	1800	1×10^6	1×10^6	1×10^3	1×10^3	0.025
②	墙体	2200	1×10^7	1×10^7	1.5×10^3	2.0×10^3	0.025
③	基础	2700	2.5×10^7	2.5×10^7	3×10^3	4.5×10^3	0.025

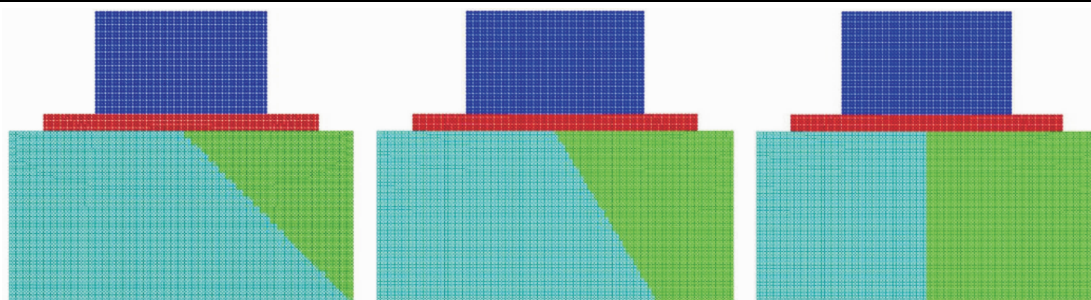


图 5 倾角分别为 30° 、 60° 、 90° 的三种地裂缝数值模型

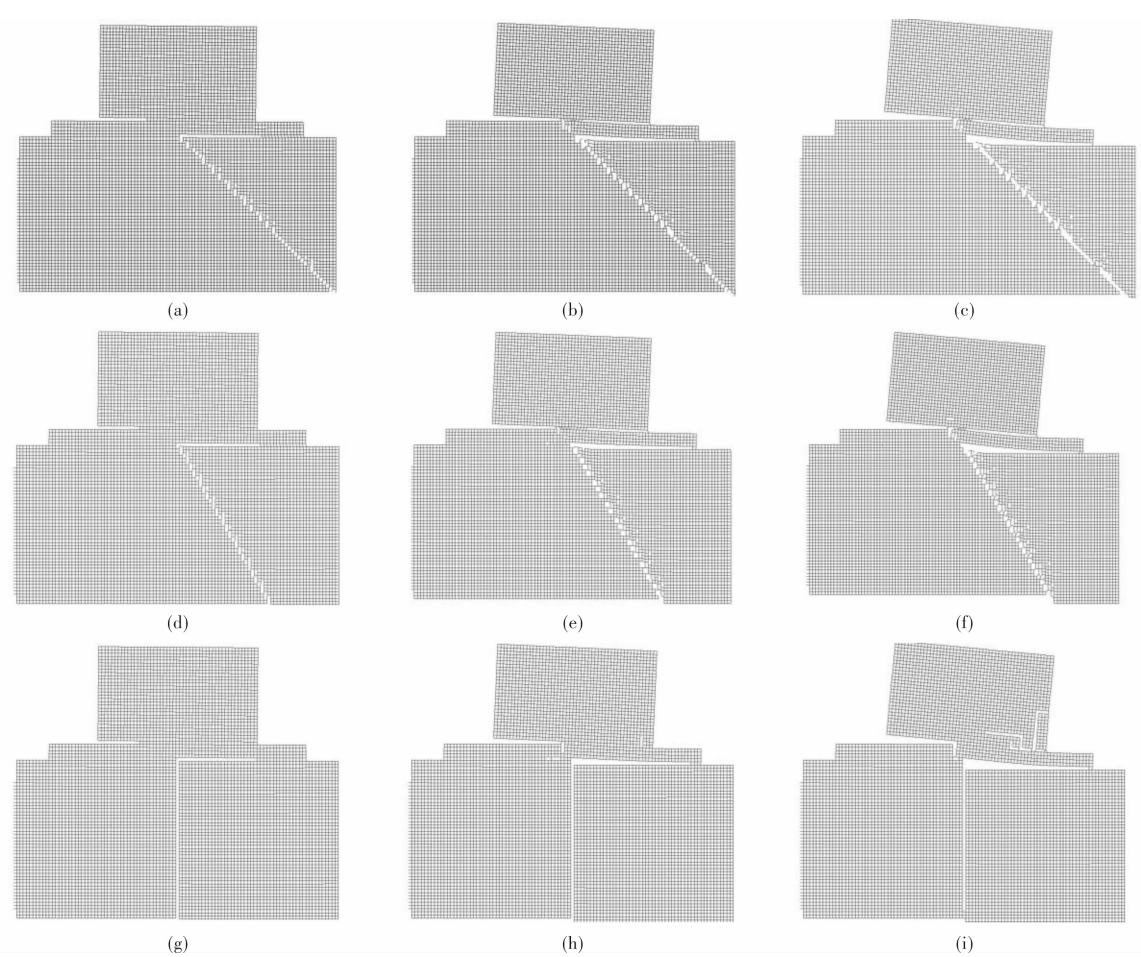


图6 地裂缝作用下房屋建筑物的破坏过程

错小，而下部的位错较大，这也是由于接触面的摩擦力造成的。对于不同倾角的地裂缝，倾角越大，接触面越小，受摩擦力的影响越小，在相同的沉降速度下，地表沉降量越大，地裂缝两侧土体不均匀沉降越大，建筑物的破坏程度越严重。反之，倾角越小，接触面越大，受摩擦力的影响越大，在相同的沉降速度下，地表沉降量越小，

地裂缝两侧土体不均匀沉降越小，建筑物的破坏程度越轻微。图7是三种工况地面不均匀沉降的对比图，可以清楚地看出90°地裂缝的地面不均匀沉降最大，30°地裂缝的地面不均匀沉降最小。所以在沉降速度一致，建筑物强度相同的情况下，地裂缝倾角越大，对建筑物的破坏程度越大。

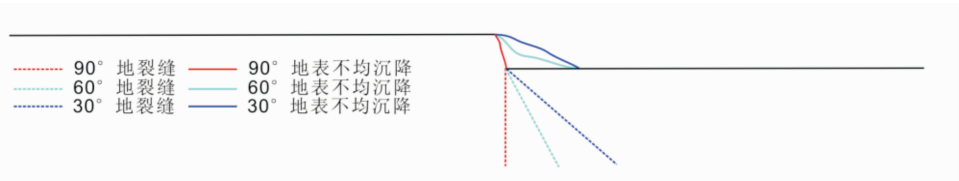


图7 三种工况地面不均匀沉降对比

图8为假设地裂缝停止运动，继续计算直到建筑物不发生变化为止，墙体和地基的破坏形态。对比图6可以看出，倾角30°的建筑物没有发生明显变化。倾角60°的地基在上盘的部位发生拉张断裂，墙体中部的裂缝水平延伸，并且产生了两条近平行的裂缝。倾角90°的地基在上盘的部位也发生拉张断裂，墙体右侧的裂缝一条垂直向上部延

伸，一条水平向墙体内部延伸，这两条裂缝呈90°分布。虽然地裂缝停止运动，但是地基和墙体已经发生了倾斜、弯曲、甚至细小的破裂，这些变形会随着时间的增加而加剧，所以当地裂缝减慢运动或者停止运动后，未破坏的建筑物仍然可能在未来的时间内发生破坏。

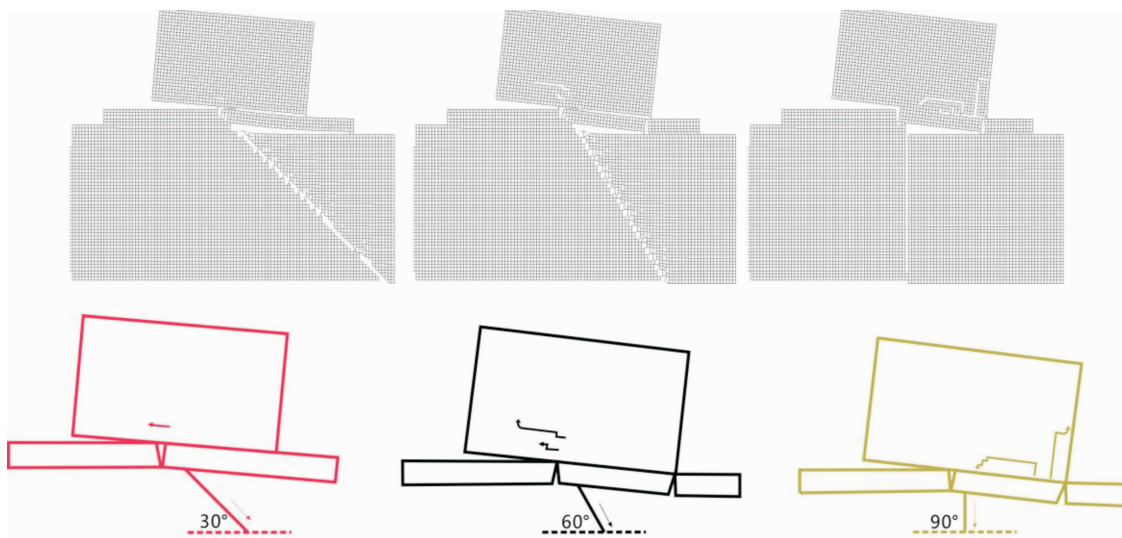


图8 三种工况建筑物的最终破坏形态

4 结论

本文在地裂缝灾害调查的基础上, 采用颗粒流对不同倾角的地裂缝对建筑物的破坏过程进行了数值分析, 得出以下结论:

(1) 由于地裂缝上、下盘相对位错而导致地裂缝带内土体不均匀沉降, 这是造成建筑物的破坏的主要原因。

(2) 一般农村采用无筋扩展的墙下条形基础, 当地裂缝带通过建筑物时, 随着地裂缝的运动, 地基首先发生弯曲, 进一步发生拉张破坏。

(3) 一般农村采用砌体结构的墙体, 当地裂缝带通过建筑物时, 随着地裂缝的运动, 墙体发生倾斜, 然后在墙体底部产生拉张裂纹, 裂纹会扩大并延伸。

(4) 倾角为 30° 、 60° 、 90° 的三种工况下, 倾角为 90° 的地裂缝对建筑物的破坏程度严重, 倾角为 30° 的地裂缝对建筑物的破坏程度轻微。

(5) 农村采用的砌体结构和无筋扩展的墙下条形基础的材料抗压强度高, 而抗拉、抗剪强度较低, 即刚性材料。在地裂缝的运动过程中建筑物易发生弯曲、倾斜、拉张破坏, 为了避免这一情况的发生, 基底宽度要大于上部墙宽, 且为了保证基础不被拉张破坏, 基础必须具有相应的高度。或者在经济条件允许的情况下, 可采用非刚性材料或柔性材料, 即钢筋混凝土基础, 从而保证房屋建筑物长期、安全的使用。

参考文献:

- [1] 彭建兵, 张勤, 黄强兵, 等. 西安地裂缝灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] 王景明. 地裂缝及其灾害的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000.
- [3] 彭建兵, 张俊, 苏生瑞, 等. 渭河盆地活动断裂与地质灾害[M]. 西安: 西北大学出版社, 1992.
- [4] 孙晓涵, 彭建兵. 清徐县地裂缝活动与地下水开采定量关系[J]. 灾害学, 2015, 30(4): 107-112.
- [5] 王景明, 王春梅, 刘科. 地裂缝及其灾害研究的新进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 303-313.
- [6] 赵其华, 王兰生. 构造重力扩展机制的地质力学模拟研究[J]. 工程地质学报, 1995, 3(1): 21-27.
- [7] 卢全中, 彭建兵, 范文, 等. 陕西三原双槐树地裂缝的发育特征[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 458-462.
- [8] 李永善, 李金正, 武旭东, 等. 西安地裂缝[M]. 北京: 地震出版社, 1986.
- [9] 彭建兵. 中国活动构造与环境灾害研究中的若干重大问题[J]. 工程地质报, 2006, 14(1): 5-12.
- [10] 张家明. 西安地裂缝研究[M]. 西安: 西北大学出版社, 1990.
- [11] 刘玉洁, 聂忠权, 张骏, 等. 断裂错动引起上覆土体的破裂效应研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(9): 78-80.
- [12] 黄强兵, 彭建兵, 闫金凯, 等. 地裂缝活动对土体应力与变形影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 903-908.
- [13] Itasca Consulting Group. PFC2D user's manual (version3. 1) [R]. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, 2004.
- [14] McGuire W and R H Gallagher. Matrix structural analysis[M]. New York: John Wiley & Sons, 1979: 87.
- [15] 贾敏才, 王磊, 周健. 基坑开挖变形的颗粒流数值模拟[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(5): 612-617.

(下转第46页)

A Study on Risk Assessment and Zoning of Sea Ice Disaster in China

Yuan Benkun^{1,2}, Cao Conghua^{1,2}, Jiang Chongbo^{1,2}, Guo Kecai^{1,2}, Li Ge^{1,2},
Shang Jie^{1,2} and Liu Qinzhen³

(1. *North China Sea Marine Forecast Center, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*;
2. *Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Environment and Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266061, China*; 3. *National Marine Hazard Mitigation Center, State Oceanic Administration, Beijing 100194, China*)

Abstract: Sea ice disaster is one of the major marine disasters in the Bohai Sea and Northern Yellow Sea of China. In this paper, the thickness, concentration and period of sea ice and the concentration, scale of all kind of disaster-bearing bodies are selected as assessment index, and the coastal waters under the jurisdiction of every municipal administrative zone in the main frozen sea area in China and the comprehensive classification of seven areas in the Bohai Sea are selected as basic assessment unit, the risk of sea ice disaster in China is comprehensively assessed by weight analysis method etc. . On this basis, the risk of sea ice disaster in China is divided by the actual demand for risk of sea ice disaster, and the distribution of risk level is plotted. The results reveal the distribution for risk of sea ice disaster in China, which can provide the basis for the risk management and the planning of disaster prevention and reduction of sea ice disaster.

Key words: Bohai Sea; Northern Yellow Sea; ice condition; sea ice disaster; risk assessment and zoning; disaster-inducing factors; disaster-bearing body

(上接第 41 页)

The Numerical Analysis of the Building Failure Process under the Action of Different Angle Ground Fissures

Tong Xiao¹, Peng Jianbing^{1,2}, Qiao Jianwei¹ and Wang Feiyong¹

(1. *College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China*;
2. *Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Xi'an 710054, China*)

Abstract: The distribution of ground fissures in our country is very extensive. In the process of rapid urbanization, the ground fissure seriously affected the national habitat construction and safety. According to a lot of ground fissure disaster investigation, in the vast rural areas, the main hazards of ground fissure is due to the destruction of the houses and buildings. The motion process of ground fissure is slow, the disaster process is gradual, with the passage of time, and damage degree of buildings is gradually increasing. Based on particle flow numerical calculation method, we analyze the failure process of buildings under different angle ground fissures, which provides a numerical evidence to summarize the mechanism of ground fissures on buildings, and also a new reference for engineering disaster prevention.

Key words: ground fissure; building; failure process; disaster mechanism; particle flow code; numerical analysis