

逾渗与岩石破裂的计算机模拟研究^{*}

彭自正 王殚业 许云廷^{**} 牛志仁^{***}

(江西省南昌中心地震台,南昌 330033)

摘要 用计算机模拟方法研究了岩石破裂的逾渗模型,给出了在微裂隙随机分布情况下破裂集团的分布图象、破裂集团的大小分布规律、总破裂集团数、集团平均大小、 $\bar{b}$ 值、逾渗分维 D 及临界情形。所得结果与其他模型和实验基本一致,表明逾渗模型是描述岩石破裂扩展演化过程的一种较合适的模型。还发现了岩石破裂过程存在的两个转折点,深入研究这两个转折点附近岩石的宏观性质,可为探索地震孕育演化过程的前兆性质提供依据。

关键词: 岩石破裂 破裂过程 模型模拟 计算机模拟 逾渗模型

1 引言

地震的发生与地壳岩石的破裂性质密切相关,研究岩石破裂发生的条件、破裂演变的过程以及伴随岩石破裂而发生的现象,对探索地震孕育演化及地震预报都具有很重要的意义。在这方面,许多地震学者已经做了大量的工作,提出了多种模型。近年来有的作者^[1,2,3]尝试引入逾渗模型来研究岩石破裂问题。

逾渗概念是由 S. K. Broadbent 和 J. M. Hammesley^[4]于 1957 年首先引入的,最初是被用来处理流体在随机多孔介质中的流动问题。他们发现,在流体通过多孔介质时,当多孔介质的孔隙被随机堵塞的比例逐渐增大而达到某一直时,流体就突然被完全堵塞而不能流过介质。这里,随着孔隙被随机堵塞程度的变化而存在一个突然的转折点,在转折点的两侧,流体的流通性质发生根本的变化(通 $\rightarrow$ 不通或不通 $\rightarrow$ 通),出现或消失长程联结性。后来,人们在研究许多其他问题时,发现也存在同样的类似现象。在所有这些不同领域的问题中,存在着一个共同的特点,即随着某种密度、占据数、浓度、比例逐渐变化(增加或减小)到某一定值时,会发生物体宏观性质的某种突然转变,出现或消失长程联结性。人们把这种长程联结性的突然转变称为逾渗转变,而产生逾渗转变的密度、占据数、浓度、比例等的值称为临界概率 p_c (或逾渗阈值)^[5]。

岩石破裂时所发生的微裂隙产生、扩展、丛集、贯通的过程,实质上也是一个长程联结性突然产生的过程,这启示人们可以尝试用逾渗现象的方法来处理岩石破裂问题。

大量的研究和实验表明,即使是宏观上完整的岩石,它的内部也会包含着大量尺度不同、形状多样的微裂隙,关于地壳岩石破裂及其统计性质,已有作者进行了研究^[6],本文暂不涉及岩石微裂隙产生的机制,仅尝试建立一种岩石破裂及演变的逾渗模型,并进行相应的计算机模

• 地震科学联合基金资助课题

•• 江西省地震局,南昌 330039

••• 陕西省地震局,西安 710068

拟。

2 岩石破裂的逾渗模型及计算机模拟

将所研究的岩体区域(简化情形为二维正方形平面区域)均匀地划分为大小相等的正方形小方块,每一小方块视为一个格点,岩体就由这样的格点连接而组成为点阵,各个小方块上独立地按某一概率 p 随机存在有微裂隙。若两个相邻的小方块都存在有微破裂,则它们就属于同一破裂集团。在初级近似下,假定每个小方块上的微破裂长度相等,因而各个破裂集团的总破裂长度仅由破裂集团占据的格点数决定。这样,就建立了“规则点阵、最近邻作用、座逾渗”模型,这里需要解决的问题是:(1)在不同概率 p 的情况下,破裂集团的大小分布 $n(s)-s$ 及其相应的有关性质;(2)在什么样的临界概率 p_c 情况下,岩体中出现跨越(贯通)的破裂集团(即岩体发生“破坏”)。

在假定微裂隙存在概率 p 从 0.1 变化到 0.9,步长 0.1(在临界概率 p_c 附近则步长加密为 0.01、0.001)的情况下,对 48×48 、 50×50 、 64×64 、 96×96 等各种不同大小的正方形点阵的破裂集团分布图象、破裂集团大小分布 $n(s)-s$ 、 $\tilde{b}$ 值、逾渗分维 D 、临界情况等利用计算机进行了模拟和研究,所得结果分述如下。

2.1 破裂图象及破裂集团大小分布 $n(s)-s$

设 $s=0,1,2,\dots$ 分别表示破裂集团的大小($s=0$ 表示不存在破裂的格点), $n(s)$ 分别表示破裂集团大小为 s 的集团数,对 48×48 点阵, p 从 0.1 到 0.9 的破裂图象如图 1 所示(缺 $p=0.4$)。

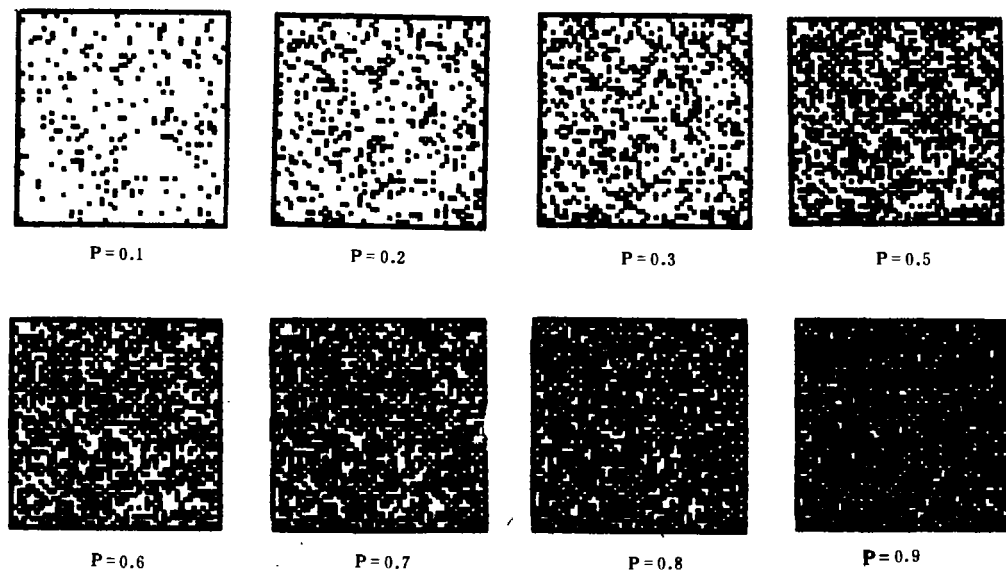


图 1 各种不同 p 值情况下的破裂图象(48×48 点阵)

Fig. 1 The distribution pattern of fracture cluster under various p (for 48×48 lattice).

图 1 中,黑色格点表示存在微破裂,白色格点表示不存在微破裂.对 48×48 点阵模拟所得典型破裂集团大小分布 $n(s)$ - s 见表 1, $n_p(0)$ - p 、 $S_{\max}$ - p 变化关系见图 2. 图 2 中 $n_p(0)$ 表示破裂概率为 p 时不存在破裂的格点数, $S_{\max}$ 为最大破裂集团的大小,实线对应于有限区域情形,虚线对应于无限区域情形。

2.2 总破裂集团数 K_P

各种点阵情形下,不同 p 值时的总破裂集团数 K_P 见表 2, K_P - p 关系曲线见图 3. 从表 2 和图 3 中可以看出,当 p 较小时,随着 p 的增加, K_P 也增大,表示小破裂集团数目增大,微裂隙的破裂占优势;当 p 增大到一定值(表中为 $p=0.3$,更精细的步长可求得为 $p \approx 0.26$)后,随着 p 的增大,总集团数 K_P 反而减小,这是因为,一方面,新生成的小破裂集团在继续增加,另一方面,小破裂集团逐渐合并形成较大破裂集团,而且集团合并的趋势大于微裂隙新生成的趋势,因而破裂集团总数在经历最大值后反而减小。

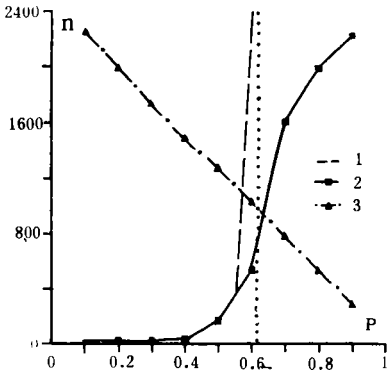


图 2 $n_p(0)$ - p 、 $S_{\max}$ - p 变化图
(50×50 点阵)

1 无限点阵; 2 有限点阵;
3 $n_p(0)$ - p 曲线

Fig. 2 Curves of $n_p(0)$ - p and $S_{\max}$ - p
(for 50×50 lattice).

表 1 48×48 点阵情形破裂集团的大小分布 $n(s)$ - s

p		0.1		0.2		0.3		0.4		0.5		0.6		0.7		0.8		0.9	
n(s)		s	n(s)	s	n(s)	s	n(s)	s	n(s)	s	n(s)	s	n(s)	s	n(s)	s	n(s)	s	n(s)
0		2080	1	1853	0	1626	0	1402	0	1192	0	968	0	729	0	473	0	234	
1		146	1	196	1	178	1	132	1	84	1	44	1	7	1	6	1	1	
2		22	2	40	2	40	2	36	2	22	2	7	4	1	1825	1	2069	1	
3		6	3	19	3	25	3	25	3	14	3	1	9	1					
4		4	4	10	4	20	4	16	4	14	4	7	1555	1					
				5	5	5	12	5	14	5	4	5	3						
				6	3	6	7	6	11	6	5	6	1						
				8	1	7	5	7	7	7	6	8	1						
				9	1	8	3	8	6	8	6	9	1						
				11	1	9	2	9	3	9	4	10	3						
						10	3	10	3	10	3	12	1						
						12	1	11	2	11	1	21	2						
						13	1	12	2	14	1	22	1						
						20	1	13	3	15	2	23	1						
								15	1	16	2	25	1						
								16	3	17	2	27	1						
								18	2	20	1	35	1						
								24	1	22	1	114	1						
								28	1	25	2	124	1						
								33	1	26	1	776	1						
										28	2								
										30	1								
										34	2								
										35	1								
										39	1								
										47	1								
										48	1								
										52	1								

表 2 各种不同点阵情形下总破裂集团数 K_P

$N \times N$	p	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
48×48	K_P	178	277	299	269	190	78	10	7	2
50×50		195	301	335	263	185	102	31	9	2
64×64		316	490	539	439	300	124	46	11	4
96×96		689	1093	1208	1052	698	281	98	18	2

2.3 破裂集团平均大小 Sav

破裂集团的平均大小按以下公式进行计算^[5]：

$$Sav = \frac{\sum_{s=1}^{\infty} s^2 n(s) / N \times N}{\sum_{s=1}^{\infty} s n(s) / N \times N}$$

(1)

在各种点阵情况下，集团平均大小 Sav 见表 3， Sav - p 的关系曲线见图 4。

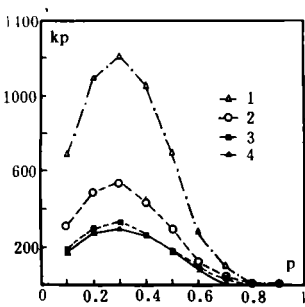


图 3 K_P - p 变化图

1 96×96 点阵；2 64×64 点阵；
3 50×50 点阵；4 48×48 点阵

Fig. 3 Curves of K_P - p .

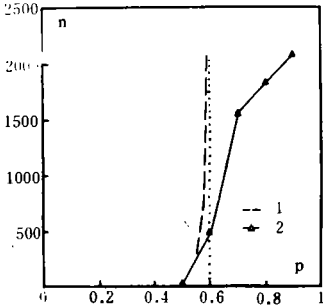


图 4 Sav - p 变化图

1 无限点阵；2 有限点阵

Fig. 4 Curves of Sav - p (for 48×48 lattice).

表 3 破裂集团平均大小 Sav 的计算结果

$N \times N$	p	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
48×48	K_P	1.57	2.74	4.67	8.76	20.12	475.65	1535.32	1819.02	2068.00
50×50		1.66	2.67	4.41	11.13	54.59	303.08	1488.44	1962.09	2198.00
64×64		1.50	2.45	4.51	10.69	44.75	549.70	2695.75	3228.05	3682.00
96×96		1.52	2.54	4.87	9.49	37.40	1062.21	6065.13	7270.85	8299.00

从表 3 和图 4 中可以看出，在 p 值较小的极限下， $Sav \approx 1$ ，表示在低概率情况下，占优势的是单破裂集团；随着 p 的增加， Sav 也增加；当 $p \rightarrow c$ 时， Sav 急剧增加，出现跨越集团，产生贯通破裂，岩石区域产生“破坏”；对于无限区域， $Sav \rightarrow \infty$ ，即出现无穷大破裂集团。图 4 中实线对应有限区域情形，虚线对应无限区域情形。

2.4 $\bar{b}$ 值

大小地震之间的统计规律遵从著名的 Gutenberg-Richter 公式

$$\lg N = a - bM \tag{2}$$

研究表明^[7], 实验室中所观测到的微破裂事件的统计特性和地震的统计特性有明显的相似性, 公式(2)可以适用于从大地震一直到小的微破裂的整个范围。

由 $M \sim \log A$ 、 $A \sim L^2$, 有 $M \sim \log L^2$, 式中 M 为面波震级, A 为破裂面积, L 为破裂长度。

在逾渗问题中, L 相当于破裂集团的大小 S , 于是 $M \sim \log S^2$, 类比于 Gutenberg-Richter 公式, 可得

$$\log n(s) = \tilde{a} - \bar{b} \log s^2 \tag{3}$$

按上述公式, 求得在各种不同点阵、不同概率 p 情况下的 $\bar{b}$ 值, 如表 4 所示(表 4 中加括号的值表示因样本数太少, 计算结果不可靠)。

表 4 各种不同点阵情况下的 $\bar{b}$ 值计算结果

$N \times N$	p	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
48×48	$\bar{b}$	1.3409	1.2191	0.9771	0.7398	0.5263	(0.2049)	(0.0861)		
50×50		1.3749	1.1792	0.9837	0.7178	0.4208	0.2525	(0.1402)	(0.0590)	
64×64		1.4836	1.2995	1.0380	0.7879	0.4726	0.2137	(0.1318)	(0.0875)	
98×98		1.6483	1.3866	1.1593	0.9002	0.6157	0.2543	(0.1625)	(0.0689)	

$\bar{b}$ 随 p 的变化曲线如图 5 所示, 它与按其他模式得到的频度-震级曲线斜率在震前随时间变化^[8](图 6)非常相似。

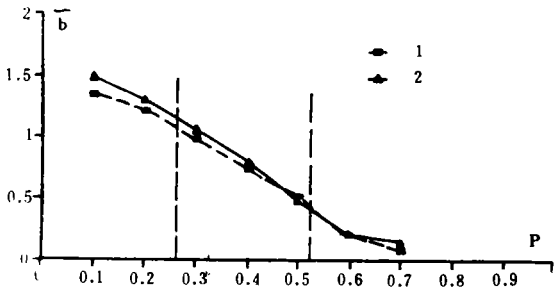


图 5 $\bar{b}$ - p 变化图
1 48×48 点阵; 2 64×64 点阵
Fig.5 Curves of $\bar{b}$ - p .

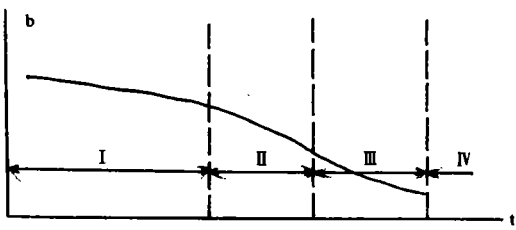


图 6 孕震阶段频度-震级曲线斜率 b 随时间变化图
Fig.6 Changes of b value with time in seismicogenic process.

2.5 逾渗分维

具有自相似结构的体系都具有分形结构, 在逾渗模型中, 当 $p < p_c$ 时, 格点破裂概率不高, 破裂集团的形成基本上是按一定的模式“逐次建造”的。因此这时的破裂集团是自相似的; 当 $p \rightarrow p_c$ 时, 岩体中开始出现无限大破裂集团(跨越集团), 岩体进入临界状态, 因此, 初始的跨越

破裂集团仍然具有相似结构；当 $p > p_c$ ，跨越破裂集团尺度急剧增大，破裂集团的密度向均匀化发展，微破裂逐渐充实整个区域，这时，破裂集团不再具有自相似性^[9]。

采用下列公式计算逾渗过程中的各阶分维值^[10]：

$$D_q = \frac{1}{1-q} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log \sum P_i^q}{\log(1/\epsilon)}$$

(4)

式中 ϵ 为把所研究区域分割成小正方形区域的边长， P_i 为各小正方形区域内破裂格点数与总格点数之比。

按(4)式

$$D_0 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N}{\log(1/\epsilon)}$$

称为容量维

$$D_1 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{-\sum P_i \log P_i}{\log(1/\epsilon)}$$

称为信息维

$$D_2 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{-\log(\sum P_i^2)}{\log(1/\epsilon)}$$

称为关联维

对 48×48 、 64×64 点阵计算所得的 D_0 、 D_1 和 D_2 值见表 5(原则上只能计算 $p < p_c$ 时的分维，但为了比较， $p > p_c$ 时的分维也进行了计算)。

表 5 48×48 、 64×64 点阵情形下逾渗分维值

N×N	p	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
48×48	D ₀	1.3250	1.5936	1.7282	1.8044	1.8572	1.8980	1.9296	1.9577	1.9800
	D ₁	1.3156	1.5742	1.7087	1.7870	1.8428	1.8873	1.9217	1.9527	1.9779
	D ₂	1.3040	1.5560	1.6914	1.7724	1.8313	1.8789	1.9156	1.9490	1.9762
64×64	D ₀	1.3538	1.5869	1.7141	1.7891	1.8472	1.8914	1.9253	1.9541	1.9781
	D ₁	1.3494	1.5751	1.7005	1.7754	1.8352	1.8820	1.9183	1.9503	1.9763
	D ₂	1.3429	1.5632	1.6876	1.7636	1.8254	1.8748	1.9130	1.9471	1.9748

从表中可以看出，当 p 逐渐增大时， D_0 、 D_1 和 D_2 均逐渐增大，在临界概率 p_c (约为 0.6)附近， $D_0 \approx 1.89-1.90$ 。

2.6 临界情形

逾渗模型研究的是长程联结性的突然转变的性质，在岩石破裂问题的研究中，在临界概率 p_c 附近，微裂隙的变化特别剧烈，通常把 $|p-p_c| \rightarrow 0$ 的区域称为临界区域。在临界区域，逾渗概率 $P(p)$ 在 $p < p_c$ 时为 0，当 p 从 $p=p_c$ 趋向 1 时， P 突然增大也逐渐趋于 1(图 7)，破裂集团平均大小 S_{av} 在 $p \rightarrow p_c$ 时，趋于 ∞ (图 4)。

3 结论

由以上的计算机模拟结果中可以得到以下几点认识：

(1) 逾渗模型处理的是无序系统中由于相互联结程度变

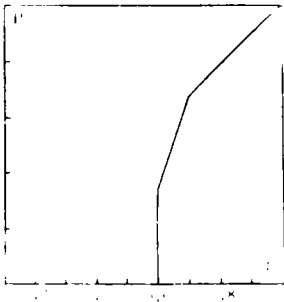


图 7 $P(p)$ - p 变化曲线

Fig. 7 Curve of $P(p)$ - p (for 48×48 lattice).

化所引起的效应,它存在长程联结性的突变,因而可能是用于描述岩石破裂扩展演化过程的一个较合适的模型;计算机模拟的结果与其它模型结果及实验结果也基本一致。

(2)当 p 增大时,岩石破裂过程存在两个转折点,一个是在 $p=0.26$ 附近,总破裂集团数在达最大值后由增大变为减小,表示微裂隙相互作用进入急剧增大阶段;另一个是 $p=p_c$ 附近, $S_{\max} \rightarrow \infty$, $P(p)$ 产生阶跃,且急剧增大,岩石产生贯通破裂(出现跨越集团);从 $\bar{b}$ 变化图象上看,在这两个转折点附近 $\bar{b}$ 值的变化也较剧烈,深入研究在这两个转折点附近(特别是第一个转折点附近)岩石的宏观性质,可为进一步探索岩石破裂过程以致地震孕育过程中的前兆性质提供依据。

(3)在临界概率 p_c 附近, $n(s)$ 随 S 的变化很剧烈,进一步加大点阵尺度,深入探索在 p_c 附近破裂集团的变化形态,可能对探索地震发生前的临震现象有一定的意义。

(4)本文的讨论是建立在微裂隙随机分布假定下,没有考虑应力分布和岩石微破裂的物理过程和能量变化。已有作者指出^[3],须从物理上深入探索岩石破裂逾渗过程的相变的本质,才能对岩石破裂的逾渗模型及地震学含义有真正的理解,对此作者拟另文讨论。

(本文 1995 年 1 月 19 日收到)

参考文献

- 1 M Bebbington, D Vrer-Jones and X Zheng. Percolation theory; a model of rock fracture. *Geophys J Int*, 1990, (100): 215—220.
- 2 T L Chelidze. Percolation and fracture. *Phys Earth Planet Inter*, 1982, (28): 93—101.
- 3 吴忠良. 逾渗模型的地震学含义. *地球物理学进展*, 1992, 7(4): 38—45.
- 4 S R Broadbent and J M Hammersley. Percolation processes. *Proc Camb Phil Soc*, 1957, 53: 629—41.
- 5 (美) R 泽仑. 非晶态固体物理学. 黄昀等译. 北京: 北京大学出版社, 1988. 153—165.
- 6 牛志仁, 施行觉. 岩石分形断裂的统计理论. *地球物理学报*, 1992, 35(5): 595—603.
- 7 C H Scholz. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rocks and its relation to earthquakes. *Bull Seismol Soc America*, 1968, 58(1): 399—415.
- 8 V I Mjachkin, et al. Two models for earthquake forerunners. *Pure Appl Geophys*, 1975, 113(1—2): 169—181.
- 9 邓昭镜. 超微粒与分形. 重庆: 西南师范大学出版社, 1993. 321—324.
- 10 (日) 高安秀树. 分数维. 沈步明, 常子文译. 北京: 地震出版社, 1989. 160—168.

(下转第 60 页)

FITTING METHOD OF DEFORMED PARAMETER WITH DISTINCT PERIOD AND ITS APPLICATION TO PROCESSING OF FAULT DEFORMATION DATA

Bo Wanju, Xie Juemin and Xong Fucheng

(*First Crustal Deformation Monitoring Center, SSB, Tianjin 300180*)

Abstract

In this paper, the methods for processing data measured across faults and the results of their application to earthquake prediction are systematically introduced and summarized. A fitting method of deformed parameter with distinct period is presented. As an example of Yanjiatai vertical base line, the method is proved to be practical for getting rid of noise and extracting the crustal deformation anomalies. The method and indexes for judging seismic three elements by using faults movement data are also presented, and based on them the problem of determining risky area is emphatically discussed.

Key words: Fault displacement, Data analysis, Single disciplinary prediction, Fitting method of deformed parameter with distinct period

(上接第 28 页)

A COMPUTER SIMULATION STUDY ON PERCOLATION AND ROCK FRACTURE

Peng Zizheng and Wang Danye

(*Seismological Station of Nanchang, Nanchang 330033*)

Xu Yunting

(*Seismological Bureau of Jiangxi Province, Nanchang 330039*)

Niu Zhiren

(*Seismological Bureau of Shaanxi Province, Xi'an 710068*)

Abstract

In this paper, the percolation of rock fracture is studied by using computer simulation method, and when micro-fractures distribute randomly, fracture cluster distribution pattern, fracture cluster size distribution law, total fracture cluster number, cluster mean size, δ value, percolation fractal dimension D , critical case and so on are given. The results according with other models and laboratory experiments show that the percolation mode is a suitable model for describing rock fracture process. Two turning points in rock fracture process are found, thus authors point out that studying macroscopic character of rock nearby those two turning points can better research precursory character in seismogenic process.

Key words: Rock rupture, Rupture process, Model simulation, Percolation, Computer simulation