

基于模拟的沙堡基础评估

摘要

沙堡建筑是海滩游客的常见消遣方式。热爱沙子的人总是绞尽脑汁去建造一座更坚固的城堡，并以此为傲。然而，沙堡仍不可避免地会受到海浪和潮汐的侵蚀。因此，如何建立一个稳定的地基对沙堡的存续具有重要意义。

为了探索最稳定的三维几何形状，我们建立了周期性沙-水细胞自动机模型，对最可能出现的多重几何形状进行实验。我们将沙基离散成一个由一堆刚性沙池和水池组成的三维几何体。基于工程力学知识和实际应用的可行性，我们选择了五种具有显著特性的惯性平台：三角平台、方平台、六棱平台、圆锥平台、椭圆平台等进行了仿真实验。我们得到的最佳几何形状是三角形截台。

在模型中，我们基于多准则判断，通过多元分析制定状态转换规则，并对波浪携沙、沙水间毛细现象进行定量计算。我们使用复杂的三角函数来模拟和再现三维的潮汐波。因此，通过对每个截台上多次实验得到的数据进行回归分析，我们得到了可靠的最优几何形状结果。此外，它可以被量化和可视化。

在建造沙堡的实践中，发现不同的沙水混合比在沙基础上的稳定性中也起着至关重要的作用。通过使用问题 1 的沙粒自动机模型，我们使用浓度梯度法来调整水沙比，并获得有关沙水比和沙基稳定性的一系列数据点。然后，我们使用最小二乘多项式函数逼近来拟合这些数据的曲线。因此，我们获得了沙水比和沙基稳定性的估计函数。然后我们可以找到最佳的沙水混合比为 0.55。

为了研究降雨对结果的影响，我们引入了基于原始模型的降雨模块。它将与潮汐模块一起在沙质基础上工作。同样，我们获得了一系列用于回归分析的数据。我们发现原始的最佳几何形状并不是唯一在降雨条件下表现良好的几何形状，而椭圆形的截头圆锥体在下雨时是另一个更好的几何形状。

灵敏度分析显示了我们模型的强大鲁棒性。同时，我们还提出了一些提高沙质基础稳定性的策略。随后，我们将实验模型和结论总结为简单的语言，以发表在《阳光中的乐趣》上。

此外，我们的模型易于实现和扩展。通过更改代码中的几个参数，我们可以刺激海滩上更加复杂的条件。

关键词:周期性砂-水细胞自动机模型，多元分析，定量可视化，浓度梯度法



目录

1 介绍.....	3
1.1 问题的背景.....	3
1.2 文献综述.....	3
1.3 我们的工作.....	4
2 模型的准备.....	4
2.1 问题分析.....	4
2.2 假设条件.....	4
2.3 符号.....	5
3 最佳的三维几何形状.....	5
3.1 模型制备.....	5
3.2 结果.....	9
4 最佳沙水混合比例.....	10
4.1 模型制备.....	10
4.2 结果.....	11
5 雨天最佳造型.....	12
5.1 修正 CA 模型.....	12
5.2 结果.....	13
6 敏感性分析.....	15
7 优点和缺点.....	16
7.1 优点.....	16
7.2 缺点.....	16
7.3 提示.....	16
8 使沙堡更持久的策略.....	17
9 结论.....	17
文章.....	18
参考文献.....	20
附录：代码.....	21



1 介绍

1.1 问题的背景

玩是人的天性，但在玩的同时要得到某种灵感是不容易的。海滩上有各种形状的城堡，有朴素的，也有精致的。即使在同样的条件下，有些城堡可以长久地维持下去，而有些城堡经不起海浪的冲击，消失得无影无踪。如何使我们的城堡更耐用，这是大多数人都感兴趣的问题。影响沙堡坚固度的因素很多，如沙水混合比、沙的种类、天气等。

在本论文中，我们尝试探索具有最佳稳定性的沙堡基础的三维几何模型。首先，我们需要建立一个数学模型来分析最佳的三维几何形状。其次，基于该模型，我们需要考虑最佳的沙水混合比，以实现沙之间的最佳附着力。此外，考虑到天气的影响，我们需要再次研究最佳 3D 几何形状。

1.2 文献综述

自上个世纪以来，水沙相互作用一直是相关领域学者关注的焦点。他们开展了大量的实验和研究来探索水沙相互作用及其对稳定性的影响。

沙堆的问题。Mason, TG and Levine, AJ and Erta drafts, D and Halsey, TC(1999)[11]对湿沙堆的临界角度进行了研究。杜蒙, Serge 和 IGBIDA, Noureddine(2009)[4]基于隐式欧拉时间预测, 改进 Prigozhin 模型中的公式。j.p. Bouchaud, j. Cates, M. E. and Prakash, J. Ravi and Edwards, S. F.(1995)[1]提出了一种新的沙堆表面动态连续体描述, 并发现了沙堆表面不稳定的“旋节点”角。Dumont, Serge 和 Igbida, Noureddine(2011)[5]使用 Evans 引入的塌缩模型分析了这个问题。

泥沙数学模型。Emiroğlu, 穆罕默德和 Yalama 艾哈迈德和 Er -gdu, Yasemin(2015)[6]探索水和粘土/沙子的比例来研究材料的 satability。然后他们发现最佳比例在 0.43 到 0.66 之间。Groger, Torsten 和 Tuzun, Ugur 和 Heyes, David M(2003)[8]使用 CDEM 测量湿颗粒材料的 od 黏聚力, 证明了 Rumpf 方程的属类一致性。

边坡的稳定性。边坡稳定性是岩土力学和工程的基本问题之一。该课题的研究对河流和交通安全具有重要意义。通过查阅文献, 我们发现主流的分析方法仍然围绕着传统的三种方法: 极限平衡法、极限分析法和数值分析法。这三种方法都是二维到三维空间的一种推广, 存在着多方面的局限性(Gao, Wang & Zhang, 2009[15])。此外, 越来越多的文献已经开始考虑变化。

沙塔的问题。Halsey, Thomas C and Levine, Alex J(1997)[9]认为在大系统极限条件下, 毛细作用力对沙堆稳定性影响显著, 而临界角在大型系统的极限内是很重要的。然后他们分析了沙堡倒塌的原因。同一年, Hornbaker, DJ and Albert, Reka and Albert, Istvan and Barabasi, a - l and Schiffer, Peter(1997)[10]揭示了为什么沙堡可以竖立起来, 并得出湿润液体可以改变量子介质的性质, 从而使质点角大幅度增加的结论。Frayssé, N and Thome, H and Petit, L(1999)[7]也探究了湿度对城堡稳定性的影响。最近一年, Pakpour Maryam, 哈比比 Mehdi 和 Mø我, 彼得和波恩, 丹尼尔(2012)[12]演示了如何构建完美的城堡从沙堡的前景的高度。



沙堡地基具有与边坡稳定相同的原理，并涉及上述几个问题。有多种方法可以解决类似的问题。受单元自动机的启发，我们希望通过沙堡基础模型为边坡稳定性研究提供新的解决方案。

1.3 我们的工作

假设城堡建在同一海滩上，距离水的距离大致相同，用的沙子种类和数量都相同。我们建立了一个基于元胞自动机的模型来表达这个问题。

任务 1 我们使用周期性元胞自动机模拟沙堡的环境，以找到最佳的 3D 模型。我们假设几种最可能的几何形状作为替代形状。然后，我们基于多准则判断，通过多变量分析来制定状态转换规则。通过多次运行元胞自动机，我们探索了沙堡基础的最稳定形状。

任务 2 我们通过拟合持续时间和沙水比例来解决最佳的沙水混合物比例问题。根据任务 1 中的 3D 几何形状，我们根据浓度梯度方法调整比例。记录不同沙水比的模型持续时间。最长的沙质粉底沙与水的比例是我们预期的目标值。

任务 3 考虑降雨的影响，我们调整元胞自动机并重复任务 1 中的过程。然后在这种情况下找出最佳 3D 几何形状。

2 模型的准备

2.1 问题分析

与对沙堆问题的分析不同，海滩上的沙堡是水和沙混合的结果。一方面，随着沙粒粘附程度的增加，沙堡的稳定性将增加。另一方面，沙堡也会受到外力的影响。不断被海浪和潮汐侵蚀，将加速对沙堡的破坏。因此，我们需要找到一个能够综合考虑两个方面对沙堡的影响的模型。

2.2 假设条件

我们对元胞自动机模拟过程作以下假设：

- 沙堡地基仅是沙子和水的混合物，所有空气都已被排出。实际上，我们不可能赤手空拳将沙堆内部变成真空。为了确保实验的准确性，精心设计了使用的沙堡基础，以使沙水混合物中的所有空气都被认为已耗尽。
- 沙堡基础的侧面是倾斜的。三角形的稳定性表明倾斜面具有较高的稳定性。
- 仅考虑波浪对沙堡基础表面的破坏作用。实际上，潮汐和潮汐都会对表面和结构产生影响。但是，我们不考虑波浪引起的结构破坏。因为人们通常在距大海一定距离的地方建造沙堡，而斜坡的侧面足以大大减少海浪对沙堡的影响。
- 沙质基础稳定。沙堡地基不会因非波浪因素而倒塌。
- 波浪不会改变沙堡基础的水沙混合比，而只会从地表腐蚀基础。沙子和水的混合物具有毛细现象，并且沙子基体的表面可以阻挡大部分水进入内部。
- 海浪以最大的沙运能力从沙质地表带走沙。泥沙含量与沙运能力之间的关系用塞国仁的等式[3]



- 沙滩沙由天然沙，白色胶木沙和棕色胶木沙组成。该波的泥沙承载能力为 S_v ，估计为 55%[13] 在沙滩上。

$$\frac{\partial (hs)}{\partial t} + \frac{\partial (hvs)}{\partial x} + \alpha\omega (S - S_*) = 0$$

在理想状态下，我们有

$$\frac{\partial (hs)}{\partial t} + \frac{\partial (hvs)}{\partial x} = 0$$

因此，输沙能力与含沙量相等。

为了简化对各个部分的分析，还做了额外的假设。这些假设将在适当的位置讨论。

2.3 符号

表一 列出了本文中使用的符号。

表格 1: 符号	
符号	定义
S_v	波浪的沉积物携带量
F	与沙池相邻的水池数量
U_j	每个周围的沙池周围的水池数量
M, m	沙水比
P	沙池“下落”的边界条件
K	不稳定因素
L	单元空间大小
H	沙堡基础的最大高度
d	沙堡基础宽度
G_i	基座顶部的单元数
G_{∂}	= 2 塌陷边界条件
t_f	砂基础的持续时间
σ	稳定性系数

3 最佳的三维几何形状

在本节中，我们将使用元胞自动机来模拟沙子和水之间的相互作用。我们用几种简单的几何形状做实验，以找到最稳定的沙质基底。

3.1 模型制备

数学建模系列课程资料代码等请关注公众号：科研交流

3.1.1 模型原理

从理论上讲，侧面倾斜的沙堡基座是最稳定的。对于几何形状，草纹是侧面的最突出特征。因此，我们选择最具代表性的形状来进行实验，例如三角形，正方形，六边形，圆锥形，椭圆形截头圆锥形等（如图 1 所示）。我们进行了几个实验，以研究 arris 对沙质基础稳定性的影响。



细胞自动机可以模拟许多复杂的问题。元胞自动机本质上是一个动态系统，定义在由具有离散和有限状态的单元组成的单元空间中。根据某些本地规则，这些单元在离散的时间维度上演化。动态系统在时间维度上得到了发展，已广泛应用于社会，经济，军事和科学研究的各个领域。

该模型是一个周期元胞自动机模型。

3.1.2 模型假设

- 沙子和水都可以看作是压缩的颗粒。
- 可以将沙子和水以一定比例混合在一起，并且可以同时建立相对稳定的沙子基础。
- 我们不考虑水蒸发。
- 波浪与沙质地基之间的接触是温和的，不会引起水和沙子的飞溅。

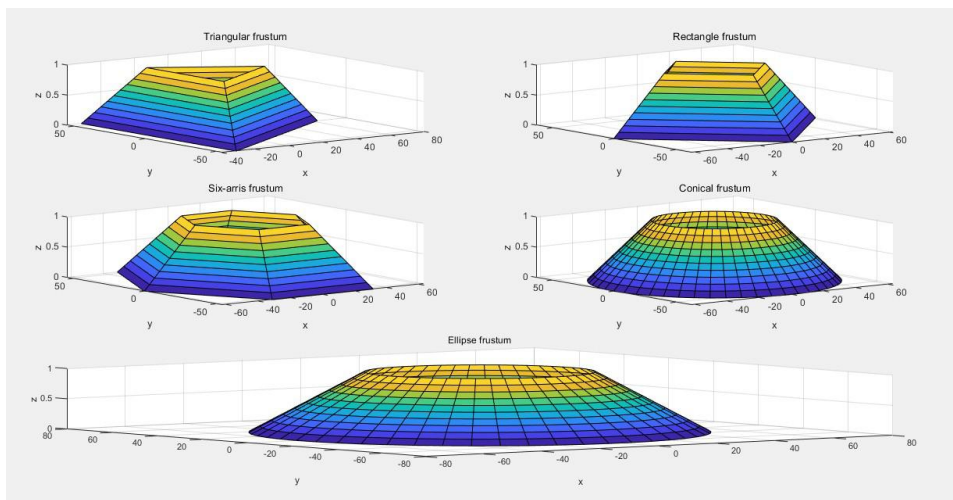


图 1：要测试的几何形状

3.1.3 模型建设

我们从以下几个方面描述了系统的物理特征。

- 细胞是细胞自动机最基本的单位。
- 细胞可以记忆存储状态。
- 元胞自动机的每个细胞都有三种状态，即空细胞、水细胞和沙细胞。
- 下一时刻任何细胞的状态都是由它自己的状态和它 26 个邻居的状态决定的，并有一定的规则。如图 2 所示。

数学建模系列课程、资料、代码等请关注微信公众号：科研交流

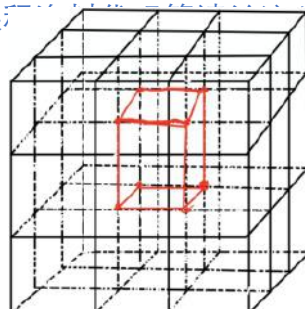


图 2:原理图

3.1.4 规则

- 1.所有单元格都不能向上移动，每次单元格只能移动到与其相邻的网格。
- 2.若沙池附近存在 F ($F \geq P$)水池和 n 个沙池，则该沙池的“不稳定因子”为 k ，则有：

$$K = F - \sigma \sum_{j=1}^n U_j$$

在那里, K 为沙粒池的稳定性，考虑沙粒与水的黏度 U_j 沙细胞的数目是否在中心沙细胞周围。

3.当 $K \geq P$ 时，沙细胞开始“向下移动”，遵循的原则是:沙细胞只能向下或水平移动，优先向向下方向移动，水细胞最多。目标位置变为沙池，原位置变为水池。

当沙细胞向下移动时，中间的水细胞首先改变。如果中间的不是水细胞，相邻的两个细胞将以相同的概率改变。

如果沙池下面没有水池，沙池就会移动到右边的水池或空池。否则，移动到单元格坚持。

4.如果沙细胞附近的水细胞少于 P ，则沙细胞的状态保持不变。

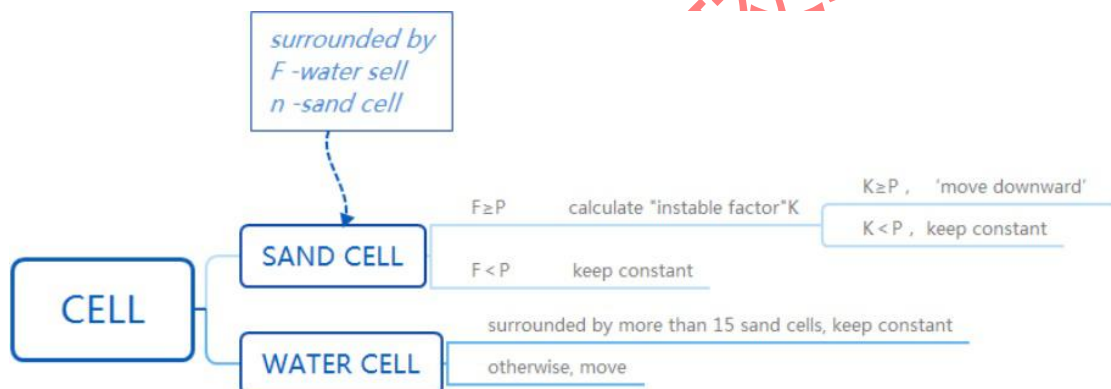


图 3:沙水单元的过渡规律

- 5.如果水细胞毗邻 15 个或更多的沙细胞，细胞保持恒定。
- 6.如果水细胞下方有空细胞，则水细胞以相等的概率优先向下方的空细胞移动;否则，该单元格与其他空单元格的移动概率相等。目标细胞变成水细胞后，原来的细胞变成空的。
- 7.“海波”(由水细胞组成)以一定的模式出现在模型左侧。如果“海浪”右侧有一个空单元格，则该空单元格将转换为水室（中间一个先变，如果中间不是一个空单元 2，两个相邻单元可能会以相同的概率发生变化）。原始的水槽将转换为空槽。
- 如果“海浪”的右侧没有空单元，则水单元在其他方向上的移动概率相同。重复此过程，直到所有水单元遇到空单元并引起状态变化为止。
- 8.底部的沙细胞和空细胞不再转换状态。

3.1.5 算法步骤

步骤 1 初始化元胞自动机，使所有单元格为空。

步骤 2 在元胞自动机中添加一个“沙堡基础”，该基础与元胞自动机保持适当的距离。



步骤 3 随机分配细胞。设沙堡基础的沙水比例为 M ，令 $i = 0$ 。

步骤 4 在元胞自动机的左端，模拟一个“海浪”(由水细胞组成)，其宽度为 L ，高度为 h 。
 h 的公式是

$$h = \begin{cases} 2H \sin\left(\frac{2\pi}{d}i\right) & , 2kd < i < (2k+1)d \\ 0 & , (2k+1)d < i < (2k+2)d \end{cases} \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

在那里，

L 是像元空间大小

H 是沙底的最大高度

d 是沙基表面的宽度

步骤 5 运行细胞自动机一次，并计算测试几何图形 G 顶部的细胞数 i 。

步骤 6 如果 $(2k+1)d < i < (2k+2)d$ ， $(k = 0, 1, 2)$ ，底部的水细胞会渗透到地下并以一定的概率 v 消失。 $(v = 2dH)$ 。

步骤 7 如果 $G_i > \frac{G_0}{2}$ ，设置 $i = i + 1$ ，则返回步骤 4。

步骤 8 输出 i 的值是几何图形的沙性持续的时间。该算法的流程如图 4 所示。

3.1.6 P 和 M 的估计

假设波浪的泥沙承载能力为 S_v 。而水的数量

单元格满足 $\frac{p}{17} > 1 - S_v$ 时，此单元格开始向下移动。

这里我们假设 $S_v = 25\%$ 。将 S_v 插入上式中，我们得到 $P = 12$ 。

根据上面的信息，我们知道 M 代表沙孔与水孔的比率。 M 的最优值将在第 4 章中讨论。
这里我们暂时假设 $M = 3.5$ 。

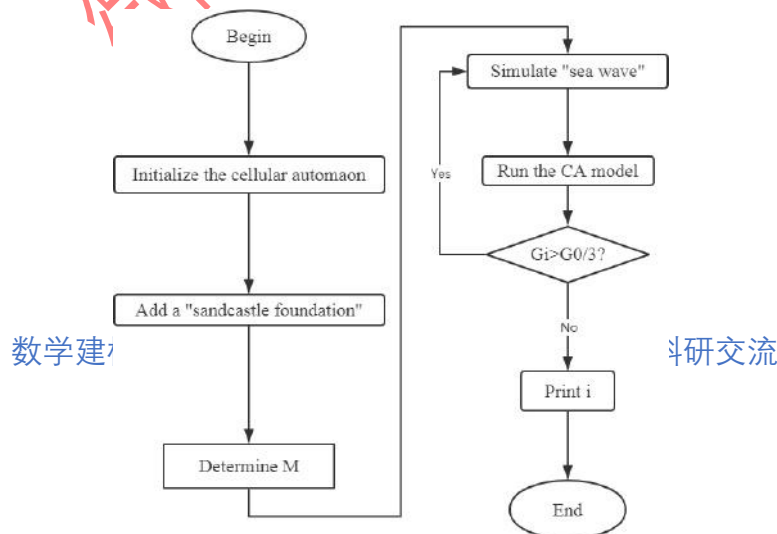


图 4 算法 1 原理图

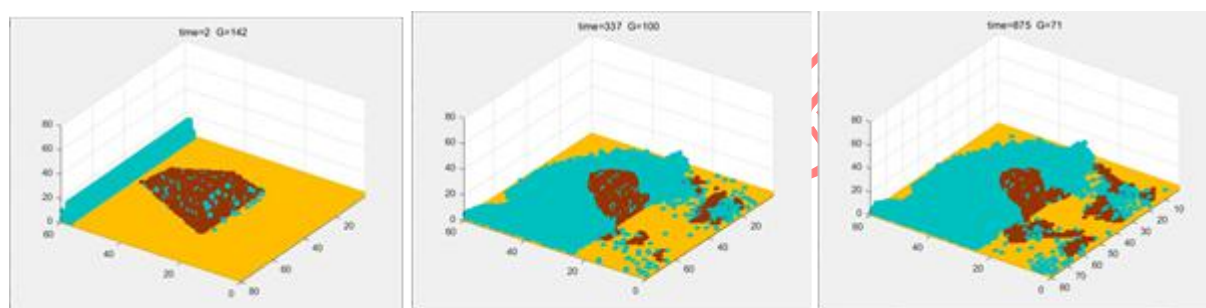


3.2 结果

分析的结果如图 5-9 所示。

从 Matlab 仿真的结果中，不难看出，三角形截头圆锥体在波浪的打动中持续时间最长。这似乎与我们的常识相矛盾。因为在日常生活中，最常见的是圆形的沙底。但是，从自然界的灵感出发，为了减轻压力，返回的鹅的形成通常是人字形。就流体动力学而言，这种形状可以减小前雁对后雁的作用力。因此，当海浪冲刷沙基时，这种结构也有利于几何形状后半部分的稳定性。因此，我们的沙质基础可以做成像海岸一样突出的三角形形状，然后在沙质基础的后半部分建“城堡”，这样我们的基础可以更长寿，城堡也可以更坚固。

在现实生活中，我们也可以将此结论应用于许多领域。例如，船首总是设计成倒三角形的形状。这些都是受流体动力学原理的启发。然后，在演奏过程中，我们可以同样应用这些原则。

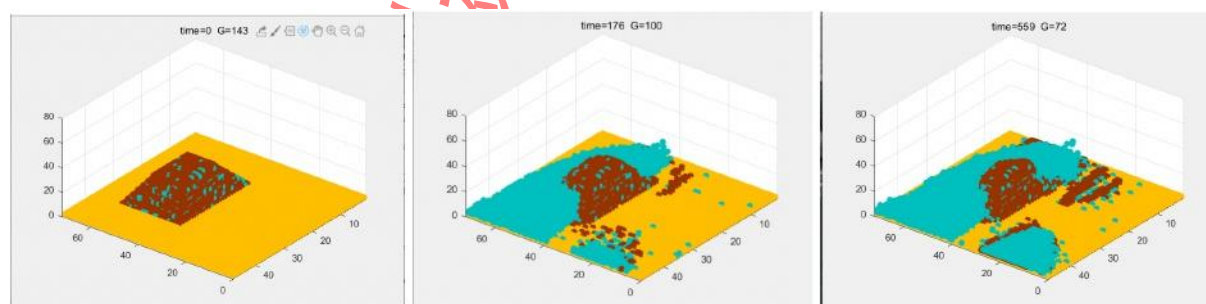


(a) 开始

(b) 过程中

(c) 结束

图 5 三角形锥

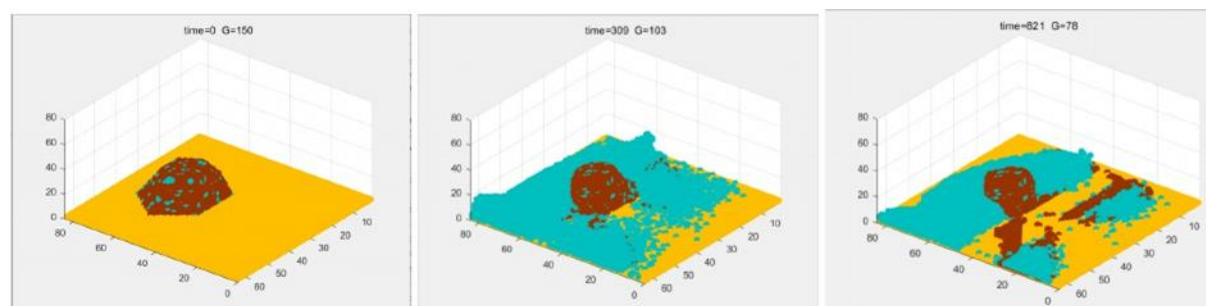


(a) 开始

(b) 过程中

(c) 结束

图 6: 方形截锥



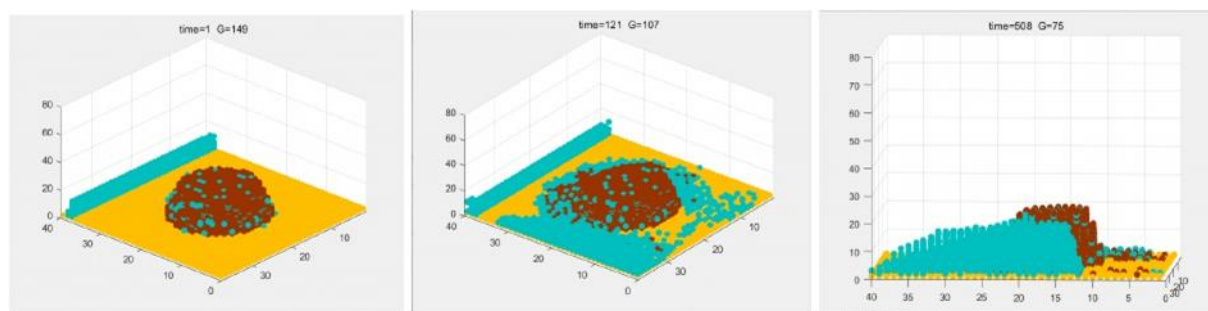
(a) 开始

(b) 过程中

(c) 结束



图 7：六棱锥体

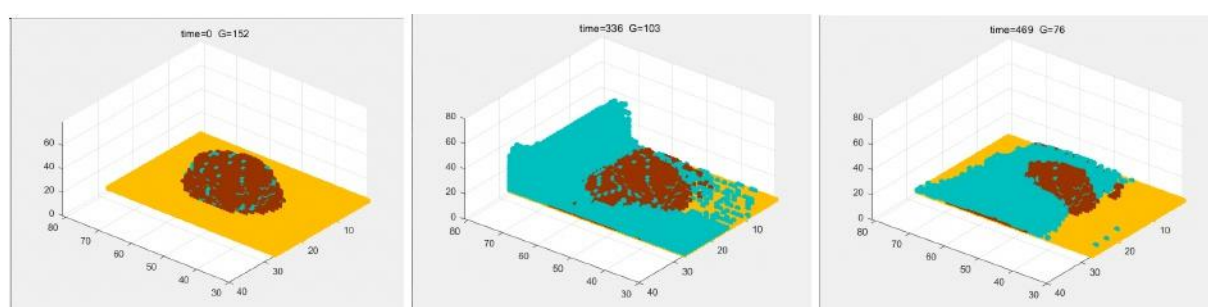


(a) 开始

(b) 过程中

(c) 结束

图 8：锥形截锥



(a) 开始

(b) 过程中

(c) 结束

图 9：椭圆截锥

4 最佳沙水混合比例

4.1 模型制备

4.1.1 模型原理

对不同的水沙混合比例 m 进行了试验 j 。每次实验结束后，我们记录时间(t_j 需要使沙基完全消失，并记录数据点(mjt_j)。通过拟合这些点的函数曲线，得到最佳拟合曲线。进而计算出沙水的最佳配比。

数学建模系列课程资料代码等请关注公众号：科研交流

4.1.2 算法步骤

采用 3.1.3 节确定的同一模型，对不同沙水比条件下沙堡地基的稳定性进行了试验。

步骤 1 设置 $j = 1$ 。

步骤 2 初始化细胞自动机:让 $m_j = 2$ 生成足够大的细胞空间。指定所有单元格为空。在距离单元格空间适当距离处，根据 3.1.3 节的结果生成最佳几何形状的沙堡基。

步骤 3 随机赋沙水比值(沙粒:水 = m_j)，并赋值 $i = 0$ 。



步骤 4 在元胞自动机的左端，模拟一个宽度为 L 、高度为 h 的“海浪”。 h 的公式是：

$$h = \begin{cases} 2H \sin\left(\frac{2\pi}{d}i\right) & , 2kd < i < (2k+1)d \\ 0 & , (2k+1)d < i < (2k+2)d \end{cases} \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

在那里

L 是单元格空间大小

H 为沙基的最大高度

d 为沙基面宽度

步骤 5 运行细胞自动机一次，并计算测试几何图形 G 顶部的细胞数 i 。

步骤 6 如果 $(2k+1)d < i < (2k+2)d$ ， $(k = 0, 1, 2)$ ，底部的水细胞会潜入地下并以一定的概率消失 $v = 2d$ 。如果 $G_i > G_0$ ，设置 $i = i + 1$ ，返回步骤 4。

步骤 7 如果 $G_i > \frac{G_0}{2}$ ，设置 $i = i + 1$ ，则返回步骤 4。

步骤 8 令 $t_j = i$ ，记录数据点 (m_j, t_j) 。如果 $m_j < 40$ ，则设置 $j = j + 1$ ，返回步骤 2。

步骤 9 通过拟合所有数据点获得曲线的拟合函数。

该算法的流程如图 10 所示。

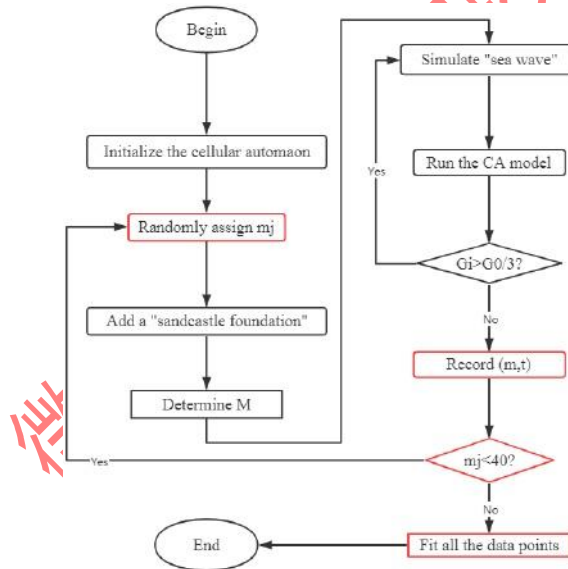


图 10 算法 2 原理图

4.2 结果

利用周期元胞自动机，我们收集了持续时间作为沙水比的函数。下表是我们实验产生的数据点。

表 2：不同水沙比例的持续时间

水：沙	0.02 00	0.05 00	0.08 00	0.11 00	0.140 0	0.170 0	0.200 0	0.23 00	0.260 0
时间	163	209	163	147	150	90	88	34	33



然后将上述结果与十次多项式拟合，得到以下图片（图 11）。

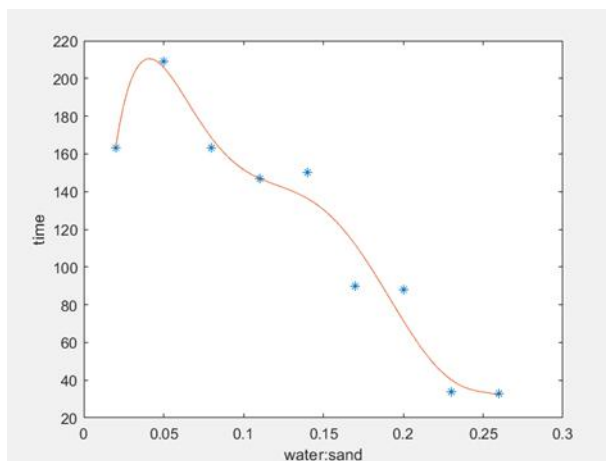


图 11：拟合曲线

结果分析：

通过浓度梯度法研究水沙比稳定性，我们获得了一系列数据。用 poly- 关注数学模型近似拟合，根据最小二乘的名义函数，获得拟合曲线。由曲线可知，最佳水沙比为 0.05 左右。

5 雨天最佳造型

5.1 修正 CA 模型

5.1.1 模型假设

- 沙基表面水沙的毛管现象足够强。因此雨水只能缓慢地影响基础的表面，而不会改变它的内部结构。
- 虽然沙水比是逐渐变化的，但沙水比并不影响几何形状的稳定性的，因此可以忽略沙水比的影响。
- 降雨和波浪共同影响沙土地基，但不影响底面水的渗透速率。
- 降雨强度不会导致沙土地基突然崩塌。

5.1.2 与基本模型的异同

- 区别：除雨水侵蚀外，波浪对沙质基础的影响仍然存在。
- 相似之处：仍然选择最具代表性的三角形，正方形，六边形和圆锥形，椭圆形截头圆锥体进行实验，并研究不同几何上表面对砂基础稳定性的影响。

5.1.3 算法步骤

步骤 1 初始化细胞自动机，即生成足够大的细胞空间并将所有细胞初始化为空。



步骤 2 将“沙堡基金会”添加到距细胞自动机适当距离的细胞自动机中。

步骤 3 随机分配单元格。将沙堡基础的沙水比例设为 M ，并指定 $i = 0$ 。

步骤 4 在细胞自动机的左端，模拟一个“海浪”(水细胞)，其宽度为 L ，高度为 h 。 h 的公式是

$$h = \begin{cases} 2H \sin\left(\frac{2\pi}{d}i\right) & , 2kd < i < (2k+1)d \\ 0 & , (2k+1)d < i < (2k+2)d \end{cases} \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

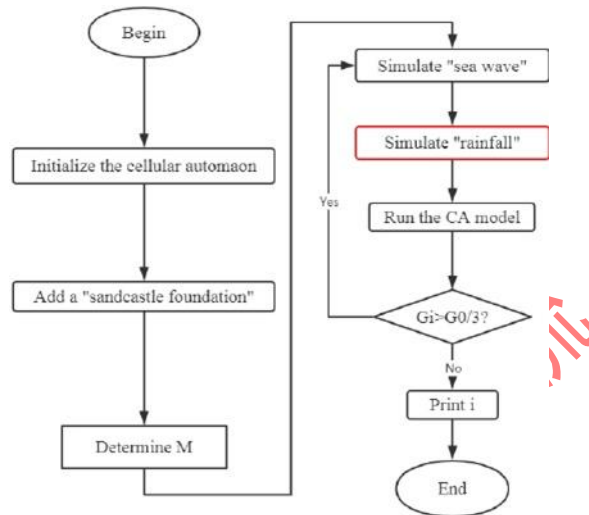


图 12 算法 3 原理图

在那里

L 是单元格空间大小

H 为沙基的最大高度

d 为沙基面宽度

步骤 5 在细胞空间的顶部，细胞将自身转化为一个水细胞，有一定的概率 $u = 20dH$ 。

步骤 6 运行细胞自动机一次，并计算测试几何图形 G 顶部的细胞数 i 。

步骤 7 如果 $(2k+1)d < i < (2k+2)d$ ， $(k = 0, 1, 2)$ ，底部的水细胞会以一定的概率 v 渗入地下并消失。假设 $v = \frac{H}{2d}$

步骤 8 如果 $G_i > \frac{G_0}{2}$ ，令 $i = i + 1$ ，返回到步骤 4。

步骤 9 输出 i 的值是几何图形的沙性持续的时间。

该算法的流程如图 12 所示。

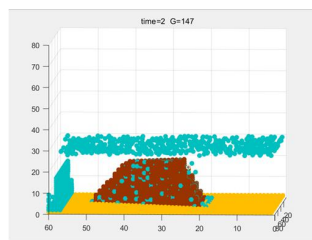
数学建模系列课程资料代码等请关注公众号：科研交流

5.2 结果

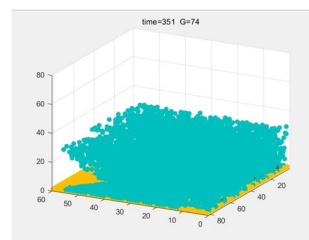
分析的结果如图 13-图 17.

从结果可以看出，当降雨时，几何形状的稳定性的变化。三角棱镜降低冲击力的优势并不明显。椭圆平截头体的性能稍好一些。大概是因为对降雨量和砂粒量相同的情况下，三角形截台的表面积大于椭圆截台的截台。因此，当上方发生干涉时，椭圆截台可以在一定程度上减小水平方向上的力。



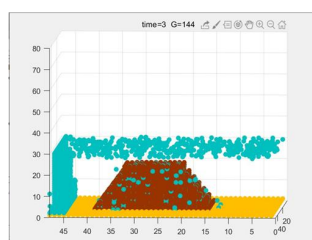


(a) 开始

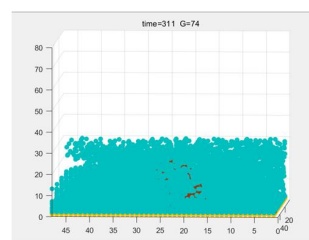


(b) 结果

图13: 三角平截头体

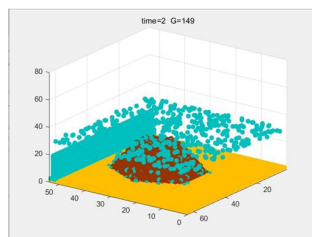


(a) 开始

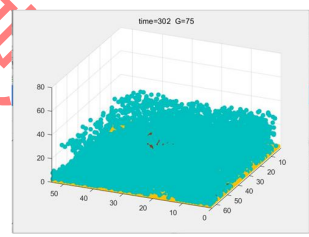


(b) 结果

图14: 方形视锥

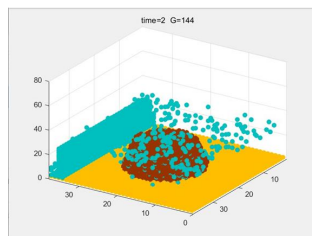


(a) 开始

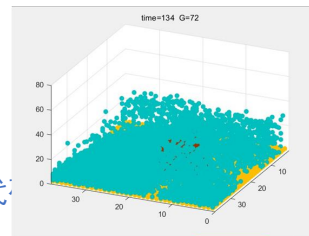


(b) 结果

图15: 六节平截头体



(a) 开始



(b) 结果

图16: 圆锥台



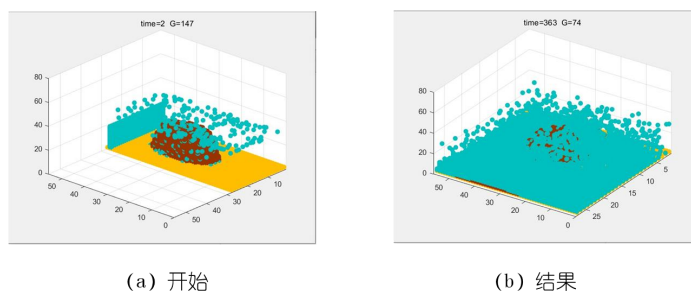


图17：椭圆锥

三角平截头体具有很强的抵抗波的能力，在某种程度上抵消了他的棱角带来的影响。因此，在雨天，三角形和椭圆形截头圆锥体具有相当大的稳定性。

6 敏感性分析

通过上述分析，得出了最佳沙基形状和最佳沙水比。同时，我们对模型中的许多参数进行了假设。为了保证模型的鲁棒性，我们从以下几个方面对模型进行了测试。（由于时间限制，仅对三棱柱进行分析。）

首先，海浪携带的泥沙。不同大小的波浪会对沙土地基表面产生不同程度的影响。也会影响地基的持久性。在之前的模型中，我们由 Dou 的输沙方程得到：

$$\frac{\partial (hs)}{\partial t} + \frac{\partial (hvs)}{\partial x} = 0$$

在理想的试验条件下，输沙能力与含沙量相等。然后我们设置 $S_v = 55\%$ 。

第二，沙基的宽度。根据常识，基座面积大的物品比基座面积小的物品站立得更稳定。对于沙质地基，较大的沙质地基有利于分散海浪的冲击。它也有可能持续更长的时间。该参数的选择可能会对最佳砂质模型的选择产生影响。

进一步，确定了沙土的稳定系数。在模拟过程中，我们将稳定因子设为 σ ，据此计算出沙土的失稳因子。由此判断沙土是否会按 k 移动。根据稳定系数的不同，计算出的沙土失稳系数也不同。此时，沙基的稳态状态也可能发生变化。

最后给出了上表面被破坏的临界条件。因为城堡要建在高地上，所以有一个稳定的城堡是很重要的。在上述实验中，当 $G_i < \frac{G_0}{2}$ 时认为沙质基层表面已变质。

我们的模型设计允许我们改变这些参数。接下来，我们将详细分析以下元素对模型的影响。

- 泥沙量
- 几何形状的长度属性
- 不稳定因素
- 砂基础损害判断

我们记录每种情况下 10%、5%、-5%和-10%的变化结果。表 3 显示了结果。



表 3：灵敏度分析结果

	-10%	-5%	0	5%	10%
S_r	超时	1684i	875i	796i	615i
H	636i	726i	875i	1354i	超时
d	702i	835i	875i	926i	953i
σ	693i	805i	875i	948i	1062i
$G_{\text{分钟}}$	1242i	966i	875i	801i	762i

从以上数据可以看出，这些参数对稳定性的影响范围扩大了。

输沙量分析结果表明，输沙量对沙土地基的影响不可低估。要建立一个稳定的沙基，选择合适的沙 是至关重要的。尽量寻找黏附性强的沙，以相对降低海浪对泥沙的能力。

对沙土地基几何性质的分析结果表明，建立宽沙土地基也是提高沙土地基稳定性的一种好方法。沙丘越宽，海浪的影响就越容易分散。沙基有可能持续更长时间。

失稳因素分析结果表明，沙土与水的黏附作用对沙土地基的稳定性也有很大影响。

对沙土损伤判断灵敏度的分析结果表明，无论使用什么作为判断依据，都不会影响模型的最终结果。

7 优点和缺点

7.1 优点

•我们的模型是建立在一定理论基础上的。在查阅了大量文献后，我们对模型的参数进行了仔细的选择。通过这种方式，我们可以使我们的模型尽可能接近现实。

考虑到现实条件，测试了几种基本几何形状。从而得到了一个有意义的模型。实验结果都是易于实现的几何形状，具有较高的可操作性。

•虽然我们没有在每个形状上都做实验，但我们的模型有足够的灵活性来测试更多的情况。我们只需要改变一些参数来做更深入的研究。例如，模型可以测试任何几何形状的沙基的稳定性，如果我们把城堡建造离大海更远一点，会有什么不同。

•该模型还可以根据所使用的沙子类型进行测试，以找到其最佳的沙水混合比例。只要知道这类沙子的一些参数，就可以满足不同的沙堡爱好者的要求。

7.2 缺点

- 由于设备的限制，元胞自动机模型并不十分精确，质量也可能达不到我们更高的期望。
- 忽略了巨大海浪的影响，因此模型在有剧烈海浪的海滩上的适用性还需要进一步完善。
- 事实上，在某些情况下，这些假设可能不成立。我们的模式还存在一些争议。

7.3 提示

我们试图用模拟方法模拟海滩上的情况。然而，由于时间的限制，我们对实际情况做了



很多假设。例如，不管水的蒸发，将波浪的频率设置为一个相对固定的值，等等。接下来，我们可以尝试释放一些假设，让沙堡也可以根据现实更生动地变化。我们可以通过改变程序的一些参数和添加更多的规则来探索更多的可能性。

8 使沙堡更持久的策略

根据敏感性分析结果和讨论，提出了提高沙土地基稳定性的以下对策。

- 寻找沙滩上不同的沙子。不同沙土混合形成的沙堡地基的稳定性表现出很大的差异。如果我们可以选择不同的沙子和混合一些水，我们可以用手测试沙子。如果沙子可以压成球，来回滚动而不散开，那么沙子是合适的。

- 既然是“城堡”，选址也很重要。我们最好在涨潮时选择一个离波浪有一定距离的地方。但可能会有麻烦，我们需要付出更多的努力去取水。为了解决这个问题，我们可以在你的“建筑工地”附近挖一个足够深的洞。

少会使沙子缺乏粘性。所以要准确把握沙与水的比例。由以上结论可知，最优水沙比？。如果我们没有合适的工具来控制比例，我们可以选择一些在海浪冲刷过的地方被海水浸泡过的沙子。

- 确保每粒沙都湿润。在建造沙质地基时，我们可以从搅拌水泥中得到一些启发。在地基顶部上建一个 *A'ljannulusA'I*，然后将水倒入火山口，直到它高达外缘。之后，为了加快水的渗入，我们可以用手不断搅动沙子，直到水基本渗入为止。更重要的是，在城堡建造的过程中，随着水的蒸发，表面的沙子会变得越来越干燥，所以我们需要不断地向城堡表面喷水。或者采取其他措施确保沙子湿润。

- 在部队的环境下建立更大的沙土地基。这可以增强其抗干扰能力。如果可能的话，用石头、木板、塑料板等来阻挡海浪或加固沙质表面。

9 结论

在实验中，我们设计了一个周期性的沙-水细胞自动机模型。这个模型模拟了海滩上的实际情况。采用多元分析方法，设计了细胞空间中各细胞的状态变化规律。首先，我们建立了 sand-foundaion 模块和 wave 模块，并模拟它们在单元空间中的相互作用，以找到最佳的几何形状。这是三角形截锥。然后用最小二乘法拟合蛇与水的比例与持续时间的曲线。对函数图像进行分析，确定最佳水沙比。由于是在户外，我们不得不考虑天气的影响。在模型中加入降雨模块后，我们发现问题 1 的结果发生了一些变化，最优形状为三角形和椭圆形截台。经过敏感性分析，结果具有较好的鲁棒性，结果可信。虽然我们的模型具有良好的可扩展性和灵活性，但也存在一定缺陷。假设太多使得模型与实际情况仍有一定差距。然而，我们讨论了一些切实可行的方法来提高沙堡的稳定性。比如如何选择沙子和施工场地，如何实现沙-水比等。在未来，我们仍然有机会继续优化我们的模型。



文章

沙堡建筑的秘密

“哦,不!我的“城堡”又一次被海浪摧毁了。”一个家伙喊道。

你是否曾经困惑于如何让你的沙堡更持久?你想知道世界上最坚硬的沙堡是什么吗?现在让我告诉你它的秘密。



资源:www.photophoto.com

因为有很多因素对沙堡有影响。我们设计了一个自动模型来模拟沙堡的地基。通过设置环境和材料,让电脑成为我们的“设计师”。它可以自动模拟海滩上的环境。经过一次又一次的尝试,它可以告诉我们哪种形状对我们的“城堡”保持得更久最有利。

第一步,为您的城堡打基础。沙堡基础的形

状决定了它所承受的力。沙质底有各种形状。我们发现它们有一个共同点-它们都具有倾斜的侧面。因此,我们选择几种典型的惯性平截头体来测试其稳定性。例如,三角形,正方形,六边形,三角形和椭圆形的视锥等。

经过多次尝试,我们的“设计师”告诉我们,最持久的几何形状是三角截台,这种形状可以最大限度地减少对沙质地基下半部分的影响。在我们的实验中,它能比其他的在海滩上站得更久。所以建议你做一个这样的粉底。

下一步是把沙子和水掺在一起。既然你知道 sandcastle 粉底的最佳形状,你可能想知道我们应该在沙子里加入多少水。

众所周知,沙子太松了,没法固定。这都是缘于水,使沙粒能够“谦逊”彼此。“水太多沙就会流,水太少沙就会碎。”那么,多少钱比较合适呢?在实验中,我们通过绘制持续时间和沙 水比的函数图来确定最佳的沙水混合比例。结果如下图所示。从图中可以看出,最佳的水沙 比在 0.05 左右。

到目前为止,我们假定天气晴朗。要是下雨怎么办?这个“秘密”还管用吗?同样,我们运行了我们的模型,但是我们的城堡应该有一些调整。为了模拟雨的过程,我们在沙子上添加了雨滴。由此可见,沙堡的变形过程呈现出不同的特征。它更有可能被冲过沙滩。此时的最佳几何形状是一个三角形截锥体或椭圆截锥体。



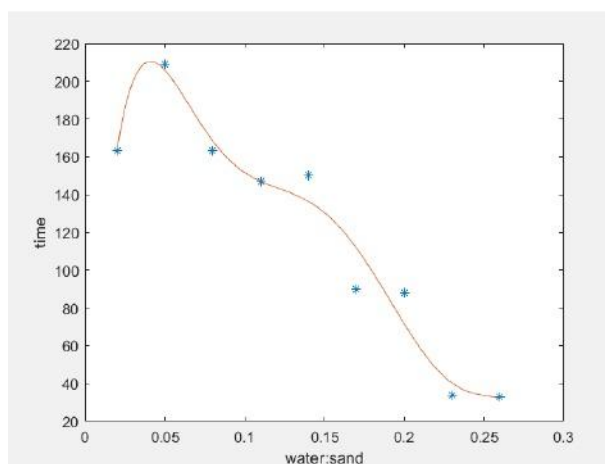
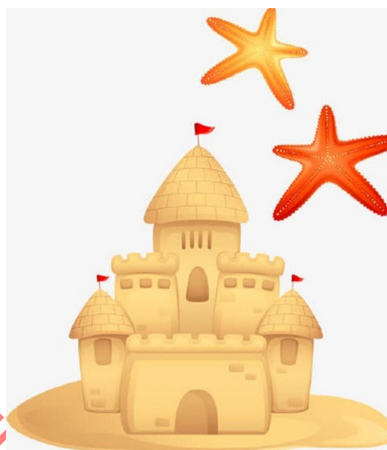


图 18: 拟合曲线

此外，你要试着混合不同种类的沙子。当你弯曲你的城堡，不要忘记保持你的城堡潮湿。但是要小心不要向模型中添加太多的水。如果可能的话，你甚至可以用脚来排干红红的水，夯实粉底。



资源: www.51yuansu.com

当然，还有许多其他的策略你可以用来建造你的城堡。但我想提醒你们的是，熟能生巧。如果你想成为一个大师，你需要掌握更多的技能。不要因为失败就失去信心。还有许多建造城堡的秘密等着你去发现。

下次你去海滩的时候，你可以试试这些技巧，看看是否有效。“实践出真知。”要成为真正的大师，你需要找到适合你的秘密。



参考文献

- [1] J.P. Bouchaud, M.E. Cates, J.Ravi Prakash 和 S.F.Edwards。连续沙堆模型中的磁滞和亚稳态。物理 Rev. Lett., 74: 1982-1985, 1995 年 3 月。
- [2] 陈友亮, 刘庚屯, 李宁, 杜曦, 王素然, 拉格菲·阿扎姆。结合半降雨效应的边坡稳定性评估。工程地质学报, 266, 202。
- [3] 窦国仁, 董凤武, 窦喜兵。波浪和潮汐的挟沙能力。科学快报, 443-446 页, 1995 年。11 - 1784 / N。
- [5] Serge Dumont 和 Nouredine Igbida。关于崩溃的沙堆问题。 2011。
- [6] Mehmet Emiroğlu, Ahmet Yalama 和 Yasemin Erdoğan。用不同粘土/砂比生产的预拌粘土灰泥的性能。应用粘土科学, 115: 221-229, 2015 年。
- [7] N Fraysse, H Thomé 和 L Petit。湿度对沙堆稳定性的影响。《欧洲物理杂志 B 凝聚态和复杂系统》, 1999 年 11 月 4 日: 615-619。
- [8] Torsten Gröger, Ugur Tüzün 和 David M Heyes。湿颗粒材料内聚力的建模和测量。粉末技术, 133 (1-3): 203-215, 2003 年。
- [9] Thomas C Halsey 和 Alex J Levine。沙堡如何下落。《物理评论快报》, 80 (14): 3141, 1998。
- [10] DJ Hornbaker, Réka Albert, István Albert, A-L Barabási 和 Peter Schiffer。是什么使沙堡保持站立? Nature, 387 (6635): 765-765, 1997。
- [11] TG Mason, AJ Levine, DErtas 和 TC Halsey。湿沙堆的临界角。物理评论 E, 60 (5): R5044, 1999。
- [12] Maryam Pakpour, Mehdi Habibi, Peder Møller 和 Daniel Bonn。如何构造完美的沙堡。科学报告, 2 (1): 1-3, 2012 年。
- [13] 王艳贵, 王兆印, 曾庆华和吕秀珍。模拟砂物理性质的实验研究与相似分析。沉积研究杂志, 1992。
- [14] 叶宝俊, 郑泽宗和张光宗。渗透率和强度各向异性对弱水泥岩边坡稳定性的 3d 影响。266, 2020。
- [15] 高玉峰, 王 Di 和张飞。3d 土坡稳定性分析方法的研究现状与展望。43: 456-464, 2015 年。



附录：代码

```
function createSandWorld(long, width, height, ratio)
close;
space = zeros(3*width, 2*long, 4*height);
space(:, 1:end, 1) = 2;
d=10;
space = createThreePyramid(space, long, width, height, 5, d, ratio);
G=getSandNum(space, height);
Gi=getSandNum(space, height);
time=0; draw(space, time, Gi)
while Gi>=(G/2)
time=time+1; space = createWave(space, time, width, height);
draw(space, time, Gi)
space = moveWater(space);
space = permeate(space, time, width, height);
draw(space, time, Gi)
space = moveSand(space);
draw(space, time, Gi)
Gi=getSandNum(space, height);
end end

function sixPyramid=createSixPyramid(B,L,H,s,d,p)
dim=size(B);
pos=sym('pos',[9,3]);
pos(1,:)= [dim(1)-1-d, round(dim(2)/2-L/4), 2];
pos(2,:)= [pos(1,1), round(dim(2)/2+L/4), 2];
pos(3,:)= [round(pos(1,1)-sqrt(3)*L/4), round(pos(2,2)+L/4), 2];
pos(4,:)= [round(pos(1,1)-sqrt(3)*L/2), pos(2,2), 2];
pos(5,:)= [pos(4,1), pos(1,2), 2];
pos(6,:)= [pos(3,1), round(pos(1,2)-L/4), 2];
pos(7,:)= [pos(6,1), round(dim(2)/2-L*s/2), H+pos(1,3)-1]; pos(8,:)= [round(pos(7,1)+sqrt(3)*s*L/4),
round(pos(7,2)+3*s*L/4), H+pos(1,3)-1];
pos(9,:)= [pos(7,1), round(dim(2)/2+L*s/2), H+pos(1,3)-1];
plane=sym('plane',[1,6]);
plane(1)=getPlane(pos(1,:), pos(2,:), pos(8,:));
plane(2)=getPlane(pos(2,:), pos(8,:), pos(3,:));
plane(3)=getPlane(pos(4,:), pos(9,:), pos(3,:));
syms x
plane(4)=subs(plane(1), x, 2*pos(3,1)-x);
plane(5)=getPlane(pos(5,:), pos(6,:), pos(7,:));
plane(6)=getPlane(pos(1,:), pos(6,:), pos(7,:));
z1=double(pos(8,3)); z2=double(pos(1,3));
x1=double(pos(4,1)); x2=double(pos(1,1));
y1=double(pos(6,2)); y2=double(pos(3,2));
for z=z1:-1:z2
for x=x1:x2
for y=y1:y2
```



```

B(x,y,z)=1;
end
end
end
end
B=insertWater(B,p);
sixPyramid=B;
end
function circular=createCircular(B,L,W,H,d,p)
dim=size(B);
a=W/2;b=L/2;c=dim(3)-1;
pos=sym('pos',[4,3]);
pos(1,:)=[dim(1)-1-d,ceil(dim(2)/2),2];
pos(2,:)=[ceil(pos(1,1)-a),ceil(pos(1,2)+b),2];
pos(3,:)=[ceil(pos(1,1)-2*a),pos(1,2),2];
pos(4,:)=[pos(2,1),ceil(pos(1,2)-b),2];
x1=double(pos(3,1));x2=double(pos(1,1));
y1=double(pos(4,2));y2=double(pos(2,2));
for z=H+1:-1:2
for x=x1:x2
for y=y1:y2
if z <= c+1-sqrt(e2^*((x-pos(2,1))^2/a2^+(y-pos(1,2))^2/b2^))
B(x,y,z)=1;
end
end
end
end
end
B=insertWater(B,p);
circular=B;
end

function fourPyramid=createFourPyramid(B,L,W,H,s,d,p)
pos=sym('pos',[4,3]);
dim=size(B);
pos(1,:)=[dim(1)-1-d,round((dim(2)-L)/2),2];
pos(2,:)=[pos(1,1),pos(1,2)+L,2];
pos(3,:)=[pos(1,1)-W,pos(2,2),2];
pos(4,:)=[round((pos(1,1)+pos(3,1))/2+(W*s)/2),...
round((pos(1,2)+pos(2,2))/2+(L*s)/2),...
H+pos(1,3)-1];
plane=sym('plane',[1,4]);
plane(1)=getPlane(pos(1,:),pos(2,:),pos(4,:));
plane(2)=getPlane(pos(2,:),pos(3,:),pos(4,:));
syms x y
plane(3)=subs(plane(1),x,pos(1,1)+pos(3,1)-x);
plane(4)=subs(plane(2),y,pos(1,2)+pos(2,2)-y);
z1=double(pos(4,3));z2=double(pos(1,3));
x1=double(pos(3,1));x2=double(pos(1,1));

```

数学建模系列课程资料代码等请关注公众号：科研交流



```
for x=x1:x2
for y=y1:y2
if eval(plane(1))>=z && eval(plane(2))>=z && eval(plane(3))>=z
&& eval(plane(4))>=z
B(x,y,z)=1;
end
end
end
end
B=insertWater(B,p);
fourPyramid=B; end

function threePyramid=createThreePyramid(B, L,W,H,s,d,p)
dim=size(B); pos=sym('pos',[5,3]);
pos(1,:)= [dim(1)-1-d,round(dim(2)/2),2];
pos(2,:)= [pos(1,1)-W,pos(1,2)-round(L/2),2];
pos(3,:)= [pos(2,1),pos(1,2)+round(L/2),2];
pos(4,:)= [pos(1,1)+round((2/3)*W*(s-1)),pos(1,2),H+pos(1,3)-1];
pos(5,:)= [pos(4,1)-W*s,pos(4,2)+round((L*s)/2),pos(4,3)];
plane=sym('plane',[1,3]);
plane(1)=getPlane(pos(1,:),pos(2,:),pos(4,:));
plane(2)=getPlane(pos(1,:),pos(3,:),pos(4,:));
plane(3)=getPlane(pos(3,:),pos(2,:),pos(5,:));
z1=double(pos(4,3));z2=double(pos(1,3));
x1=double(pos(3,1));x2=double(pos(1,1));
y1=double(pos(2,2));y2=double(pos(3,2));
for z=z1:-1:z2
for x=x1:x2
for y=y1:y2
if eval(plane(1))>=z && eval(plane(2))>=z && eval(plane(3))>=z
B(x,y,z)=1;
end
end
end
end
B=insertWater(B,p);
threePyramid=B;
end

function rain=createRain(B,W,H)
dim=size(B);
p=H/(20*W);
for x=2:dim(1)-1
for y=2:dim(2)-1
if rand(1)<p
B(x,y,dim(3)-50)=-1;
end end end rain=B; end
```

数学建模系列课程资料代码等请关注公众号：科研交流




```

=getSandPos(B); sand=[sx,sy,sz]; for i=1:waterNum inserted=0; while inserted==0
randIndex=randi(length(h(sand))); point=sand(randIndex,:); if B(point(1),point(2),point(3))== - 1
continue else B(point(1),point(2),point(3))=-1;
inserted=1; end end end end water=B; end

function pos=moveSand(B)
P=12; [sx,sy,sz]=getSandPos(B); sands = [sx,sy,sz].';
for sand = sands x=sand(1);y=sand(2);z=sand(3);
if y<1 continue end if x<2 || y==1 B(x,y,z)=0; continue end
if B(x,y,z-1)==0 B(x,y,z)=0; B(x,y,z-1)=1; continue end
U=getClassNum(B,[x,y,z],1, -1); if U<P continue else K=getUnstableFactor(B,[x,y,z],U); if
K<P continue
else if (isempty(find(B(x-1:x+1,y-1:y+1,z-1)==-1,1))
&& isempty(find(B(x-1:x+1,y-1:y+1,z-1)==0,1)))if B(x,y,z-1)==-1 B(x,y,z)=-1; B(x,y,z-1)=1;
continue
end
set1=B(x-1,y-1:y+1,z-1).'; set2=B(x+1,y-1:y+1,z-1).';
set3=B(x-1:x+1,y-1,z-1); set4=B(x-1:x+1,y+1,z-1);
sets=[set1,set2,set3,set4]; nums=zeros(1,4); for i=1:4
nums(i)=length(find(sets(:,i)==-1));
end
num,index
=max(nums); if index==1 if B(x-1,y,z-1)==0 B(x,y,z)=0; B(x-1,y,z-1)=1;
elseif B(x+1,y,z-1)==-1 B(x,y,z)=-1; B(x-1,y,z-1)=1;
else if num==2 B(x,y,z)=-1;
B(x-1,y+(-1)^randi(2),z-1)=1; elseif num==1 if B(x-1,y-1,z-1)==-1
B(x,y,z)=-1; B(x-1,y-1,z-1)=1; else
B(x,y,z)=-1; B(x-1,y+1,z-1)=1; end end end

elseif index==2 if B(x+1,y,z-1)==0 B(x,y,z)=0; B(x+1,y,z-1)=1;
elseif B(x+1,y,z-1)==-1 B(x,y,z)=-1; B(x+1,y,z-1)=1;
else if num==2 B(x,y,z)=-1; B(x+1,y+(-1)^randi(2),z-1)=1; elseif
num==1 if B(x+1,y-1,z-1)==-1 B(x,y,z)=-1; B(x+1,y-1,z-1)=1; else
B(x,y,z)=-1; B(x+1,y+1,z-1)=1; end end end

elseif index==3 if B(x,y-1,z-1)==0 B(x,y,z)=0; B(x,y-1,z-1)=1;
elseif B(x,y-1,z-1)==-1 B(x,y,z)=-1; B(x,y-1,z-1)=1; else
if num==2 B(x,y,z)=-1; B(x+(-1)^randi(2),y-1,z-1)=1; elseif num==1 if B(x-1,y-1,z-1)==-1
B(x,y,z)=-1; B(x-1,y-1,z-1)=1; else B(x,y,z)=-1; B(x+1,y-1,z-1)=1; end end end

else if B(x,y+1,z-1)==0 B(x,y,z)=0; B(x,y+1,z-1)=1; elseif B(x,y+1,z-1)==-1
B(x,y,z)=-1; B(x,y+1,z-1)=1; else if num==2 B(x,y,z)=-1; B(x+(-1)^randi(2),y+1,z-1)=1; elseif num==1
if B(x-1,y+1,z-1)==-1 B(x,y,z)=-1; B(x-1,y+1,z-1)=1; else B(x,y,z)=-1; B(x+1,y+1,z-1)=1;
end end end end continue else
peerArea=B(x-1:x,y-1:y+1,z); peerClass=vertcat(find(peerArea==0),find(peerArea==
=-1));
peerClassNum=length(peerClass); if peerClassNum>0 if isempty(find(mod(peerClass,2)==1,

```

数学建模系列课程资料代码等请关注公众号：科研交流



```

offset=index(randIndex); if B(x-1,y-1+floor(offset/2),z)==-1
B(x,y,z)=-1; B(x-1,y-1+floor(offset/2),z)=1;
else B(x,y,z)=0; B(x-1,y-1+floor(offset/2),z)=1;
end continue else if length(find(mod(peerClass,2)==0))==2
if B(x,y+(-1)^randi(2),z)==-1 B(x,y,z)=-1; B(x,y+(-1)^randi(2),z)=1;
else B(x,y,z)=0; B(x,y+(-1)^randi(2),z)=1; end else offset=peerClass/2; if B(x,y-2+offset,z)==-1
B(x,y,z)=-1; B(x,y-2+offset,z)=1; else B(x,y,z)=0; B(x,y-2+offset,z)=1;
end end continue end end end end end end pos = B; end

function pos=moveWater(B) [wx,wy,wz]=getWaterPos(B); sea = [wx,wy,wz].'; dim=size(B);
for water = sea x=water(1);y=water(2);z=water(3); if (x==1||y==1||x>dim(1)-1||y>dim(2)-1)&& y
=0
B(x,y,z)=0; continue elseif y==0||x==0 continue end if getClassNum(B,[x,y,z],-1,1)>= 12
continue else underArea=B(x-1:x+1,y-1:y+1,z-1); underNull=find(underArea==0); un-
derNullNum=length(underNull);
peerArea=B(x-1:x+1,y-1:y+1,z); peerNull=find(peerArea==0); peerNullNum=length(peerNull); if
underNullNum > 0 offset=getOffset(underNull); if mod(offset,3)==2 B(x,y,z)=0;
B(x,y-1+floor(offset/3),z-1)=-1; elseif mod(offset,3)==0 B(x,y,z)=0; B(x+1,y-2+floor(offset/3),z-
1)=-1;
elseif mod(offset,3)==1 B(x,y,z)=0; B(x-1,y-1+floor(offset/3),z-1)=-1;
end continue elseif peerNullNum>0 offset=getOffset(peerNull);
if mod(offset,3)==2 B(x,y,z)=0; B(x,y-1+floor(offset/3),z)=-1;
elseif mod(offset,3)==0 B(x,y,z)=0; B(x+1,y-2+floor(offset/3),z)=-1;
elseif mod(offset,3)==1 B(x,y,z)=0; B(x-1,y-1+floor(offset/3),z)=-1;
end continue end end end pos = B; end

function pos=permeate(B,time,W,H) [wx,wy,wz]=getWaterPos(B); sea=[wx,wy,wz];
groundIndexs=find(wz==2).';
p=H/(2*W); a1 = time/(2*W); a2 = round(a1); if (a1<=a2) && isempty(groundIndexs) for
index=groundIndexs if rand(1)<=p x=sea(index,1);y=sea(index,2);z=sea(index,3); if x==0 ||
y==0 continue end B(x,y,z)=0; end end end pos=B; end

function wave=createWave(B,time,W,H) d = size(B); x = d(1) -1; a1 = time/(2*W); a2 =
round(a1);
if a1<=a2 wave=B; else h=ceil(2*H*sin(2*pi*time/W)); if h<2 h=2;
end B(x,2:h+1) = -1; wave=B; end end

function equation=getPlane(A,B,C) syms x y jz D=[ones(4,1),[x,y,jz];A;B;C];detd=det(D);
z=solve(detd,jz);equation=z; end

function k=getUnstableFactor(B,Pos,factor) x=Pos(1);y=Pos(2);z=Pos(3);
p=0.02; area=B(x-1:x+1,y-1:y+1,z-1:z+1);
angles=[1,3,7,9,19,21,25,27];
edges=[2,4,6,8,10,12,16,18,20,22,24,26];
centers=[5,11,13,15,17,23]; indexs=find(area==1).'; for index=indexs dz=ceil(index/9 );

```

数学建模系列课程资料代码等请关注公众号：科研交流



```

if isempty(find(angles==index,1)) if dx>2 a=area(2:dx,:); else a=area(dx:2,:);
end if dy>2 a=a(:,2:dy,:); else a=a(:,dy:2,:);
end if dz>2 a=a(:,2:dz); else a=a(:,dz:2);
end count=length(find(a==-1)); factor=factor-(p*count); elseif isempty(find(edges==index,1)) if
dx==2 if dy>2 a=area(:,2:dy,:); else a=area(:,dy:2,:); end
if dz>2 a=a(:,2:dz); else a=a(:,dz:2); end
elseif dy==2 if dx>2 a=area(2:dx,:); else a=area(dx:2,:); end
if dz>2 a=a(:,2:dz); else a=a(:,dz:2); end
elseif dz==2 if dy>2 a=area(:,2:dy,:); else a=area(:,dy:2,:); end if dx>2 a=a(2:dx,:); else
a=a(dx:2,:); end end
count=length(find(a==-1)); factor=factor-(p*count); elseif isempty(find(centers==index,1)) if
dx==2 if dx>2 a=area(2:dx,:); else a=area(dx:2,:); end
elseif dy==2 if dy>2 a=area(:,2:dy,:); else a=area(:,dy:2,:); end
elseif dz==2 if dz>2 a=area(:,2:dz); else a=area(:,dz:2); end end
count=length(find(a==-1)); factor=factor-(p*count); else factor=factor+0; end end k=factor;
end

function offset=getOffset(posNull)
if isempty(find(mod(posNull,3)==1, 1))
k=find(mod(posNull,3)==1);
index=posNull(k); randIndex=randi(length(index)); offset=index(randIndex); else randIndex=
randi(length(posNull)); offset=posNull(randIndex);
end end

function num=getClassNum(B,Pos,rowClass,assignClass)
x=Pos(1);y=Pos(2);z=Pos(3);
area=B(x-1:x+1,y-1:y+1,z-1:z+1);
num=length(find(area==assignClass));
if rowClass==assignClass num=num-1; end end

function num=getSandNum(B,h)
num=length(find(z==(h+1))); end

function draw(B,time,g)
dim=size(B); [x1,y1,z1]=getWaterPos(B); [x2,y2,z2]=getSandPos(B); [x3,y3,z3]=getLandPos(B);
figure(1) clf('reset'); hold off
h3=scatter3(x3,y3,z3,'MarkerEdgeColor',[1 .75 0],'MarkerFaceColor',[1 .75 0]);
h3.DisplayName='Land Cell'; xlim([0 dim(1)]) ylim([1 dim(2)]) zlim([0 dim(3)])
title(['time=',num2str(time),' G=',num2str(g)]);
hold on
h1=scatter3(x1,y1,z1,'MarkerEdgeColor',[0 .75 .75],'MarkerFaceColor',[0 .75 .75]);
h1.DisplayName='Water Cell'; hold on
h2=scatter3(x2,y2,z2,'MarkerEdgeColor',[.6 .2 0],'MarkerFaceColor',[.6 .2 0]);
h2.DisplayName='Sand Cell'; view(218,46); end

function [x,y,z]=getWaterPos(B)
dim = size(B);
wX,wY
= find(B==-1);
water = [wX,mod(wY,dim(2)),ceil(wY./dim(2))]; x=water(:,1);y=water(:,2);z=water(:,3); end

```

数字建模系列课程资料代码等请关注公众号：科研交流



```
sX,sY
= find(B==1);
sand = [sX,mod(sY,dim(2)),ceil(sY./dim(2))];
x=sand(:,1);y=sand(:,2);z=sand(:,3); end

function [x,y,z]=getLandPos(B)
dim = size(B);
lX,lY
= find(B==2);
land = [lX,mod(lY,dim(2)),ceil(lY./dim(2))]; x=land(:,1);y=land(:,2);z=land(:,3); end
```

微信公众号：科研交流

数学建模系列课程资料代码等请关注公众号：科研交流

