



环境地学数据融合平台

ENVIFUSION

线上直播课

2021年8月



北水国际
BEIJING WATER INTERNATIONAL

使用EnviFusion进行
地面沉降模拟

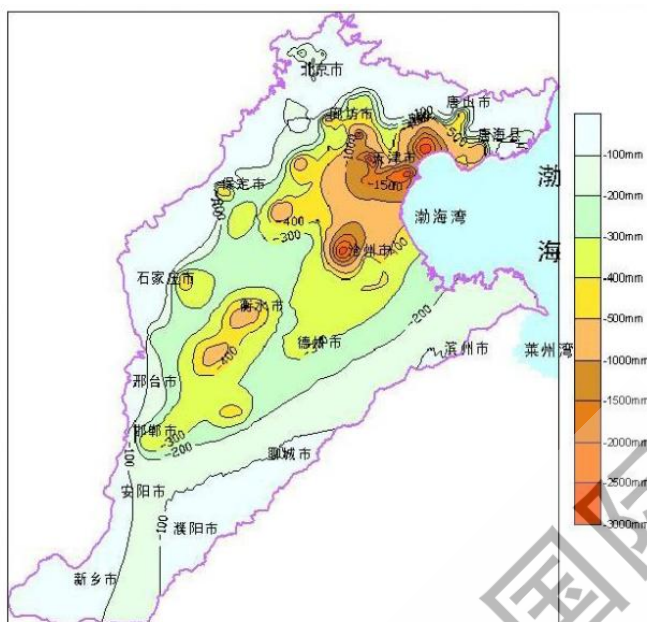
什么是地面沉降？

在自然因素或人类工程经济活动影响下，导致地壳表面标高降低的一种局部的下降运动。

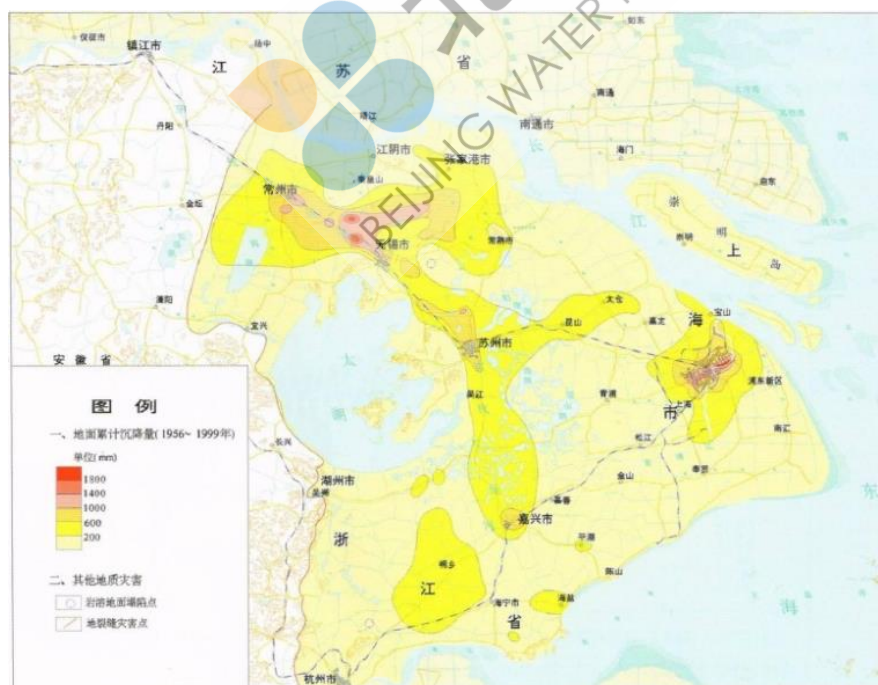


地面沉降成因

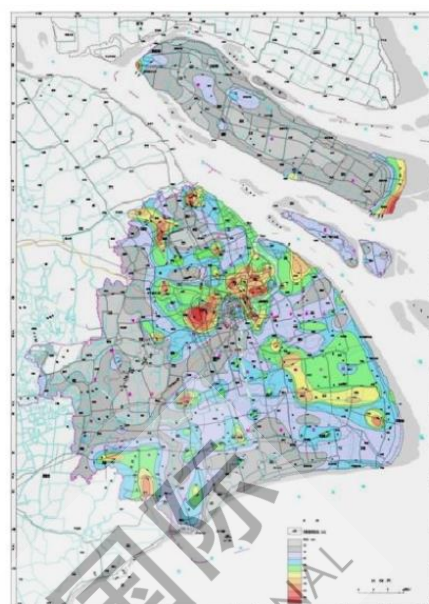
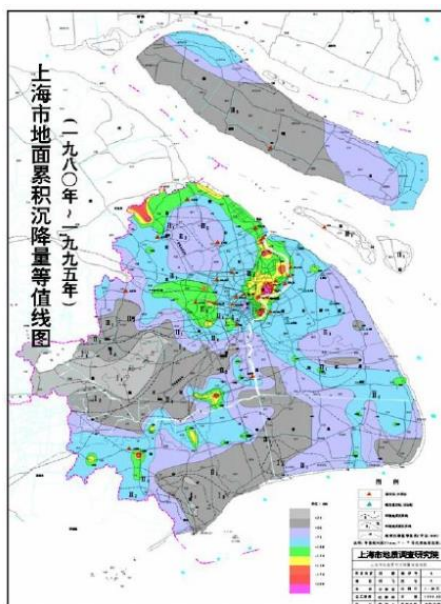
- 自然因素：构造下沉、地震、火山活动、气候变化、地应力变化及土体自然固结等。
- **人为—地下流体资源开发**：过量抽汲地下水（或油、气）引起水位（或油、气压）下降，在欠固结或半固结土层分布区，土层固结压密、含水层压缩而造成的大面积地面下沉现象，如上海、天津、苏锡常地区的地面沉降。
- 人为—岩溶塌陷：岩溶区自然资源开发导致的岩溶塌陷。
- 人为—固体矿产开采：因地下大面积采空引起顶板岩（土）体下沉造成地面碟状洼地。
- 人为—工程环境效应：大规模城市改造建设产生地面沉降效应。



华北平原地面沉降等值线图



长江三角洲地面沉降图



地面沉降危害

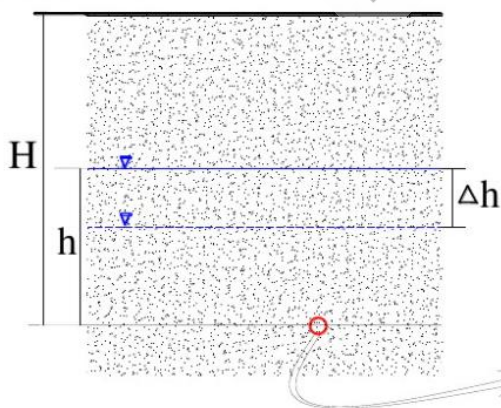
- 毁坏地表或地下建筑物和生产设施；
- 不利于建设事业和资源开发。发生地面沉降的地区属于地层不稳定的地带，需要更多的投资进行城市建设和资源开发；
- 造成海水倒灌。地面沉降区多出现在沿海地带。地面沉降到接近海面时，会发生海水倒灌，使土壤和地下水盐碱化、港湾设施失效等情况。

含水层压缩沉降模拟—SUB模块

- 含水层压缩引起的地面沉降可以概化为孔隙含水层地下水**三维渗流模型 (MODFLOW)** 与**一维垂向固结沉降过程 (SUB)** 的耦合模型。
- 美国地调局 (USGS) 在**MODFLOW**的基础上开发了IBS模块，用于模拟水头变化造成的地层压缩过程。
- 厚度大的弱透水层和粘土夹层排水滞后造成土体变形滞后，USGS开发了SUB模块。**解决滞后排水和压缩过程**，更准确地模拟地面沉降量。
- 由于SUB模块可以产生或吸纳多余的水量，可以看作是MODFLOW中的一个特殊模块，与MODFLOW联合运行求解。

SUB模块原理

饱和多孔介质的失水压密原理——太沙基 (Terzaghi) 一维固结理论



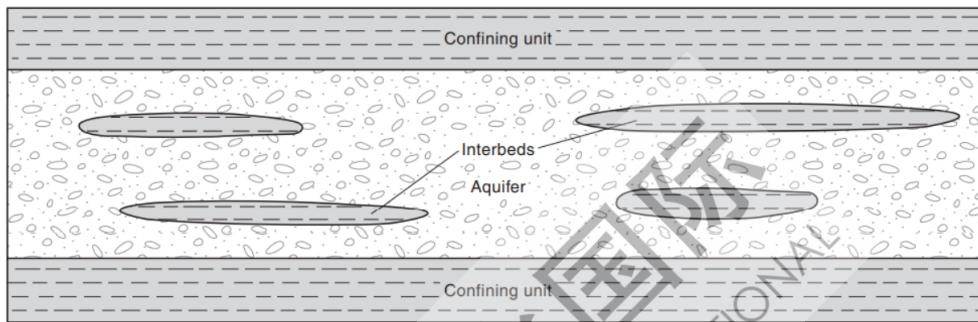
有效应力 = 总应力 - 孔隙水压力

假设地层应变以垂向为主，忽略水平应变

$$\sigma'_{zz} = \sigma_{zz} - p$$

SUB模块原理

- 等有效应力作用下，砂砾层的压缩量小于粘性土的压缩量
- 粘性土累积厚度越大，压缩总量越大
- 粘性土的厚度超过一定程度后（如1.5m），需要考虑滞后压缩效应



SUB模块原理

- 使用MODFLOW模型计算孔隙含水层水头变动

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \epsilon = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

- 水头变动引起的土体变形量

$$\Delta b = S_{sk} b \Delta h \quad S_{sk} = \begin{cases} S_{ske}, & h' > h'_{\min} ; \\ S_{skv}, & h' \leq h'_{\min} . \end{cases}$$

- 根据水头与预固结水头的比较，分为弹性释水和非弹性释水过程，所用的含水层估计储水率不同

SUB模块原理

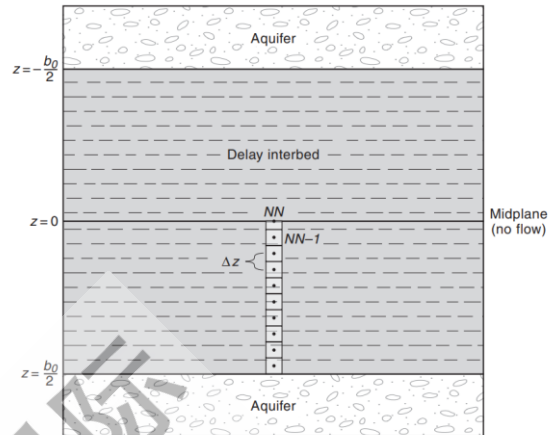
- 当粘土厚度较小时，可视为非滞后释水

$$q_i^m = \frac{S'_k{}^m}{\Delta t^m} (h^m - H^{m-1}) + \frac{S'_{ke}{}^m}{\Delta t^m} (H^{m-1} - h^{m-1})$$

$$\text{其中 } S'_k{}^m = \begin{cases} S'_{ke} & h^m > H^{m-1} \\ S'_{kv} & h^m \leq H^{m-1} \end{cases}$$

- 当粘土厚度较大时，需要模拟滞后释水

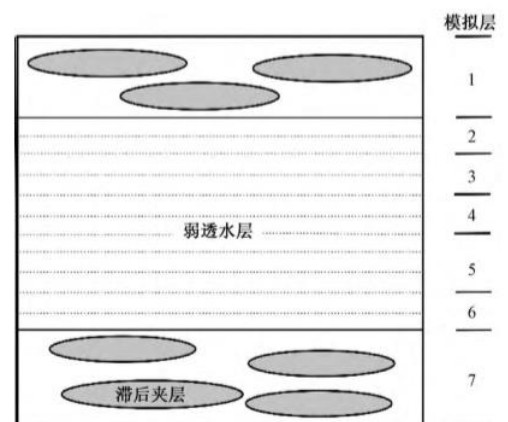
$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S'_s}{K'_v} \frac{\partial h}{\partial t} \quad Q_j = \frac{4\Delta x_j \Delta y_j K'_v}{\Delta z} (h_1^m - h_j^m)$$



SUB模块原理

- 在同一模拟层中，可将具有相同垂向渗透系数和相同弹性、非弹性储水率的滞后夹层组合成一个滞后夹层系统进行分析

$$b_{equiv} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i^2} \quad n_{equiv} = \frac{\sum_{i=1}^N b_i}{b_{equiv}}$$



SUB模块实例

工具: EnviFusion

MODFLOW水流模型:

网格: 20*40*3

应力期: 4个共3000天

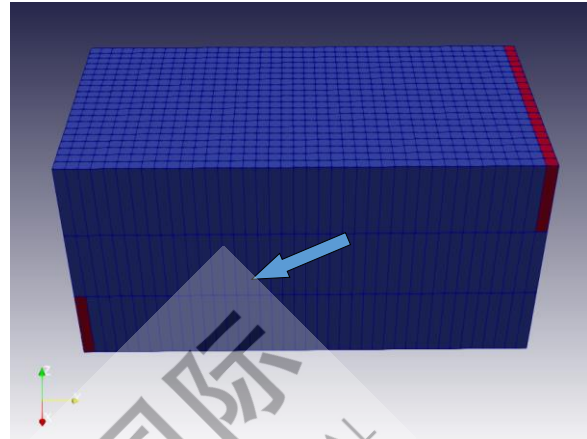
水流方向: 由北1层向南3层

北部边界: 通用水头边界

南部边界: 通用水头边界

井边界: 第三层4口抽水井

南



北

SUB模块实例

SUB模块参数:

非滞后压缩: 弹性骨架储水率、非弹性骨架储水率, 初始压缩量、
预固结水头

滞后压缩: 夹层材质数

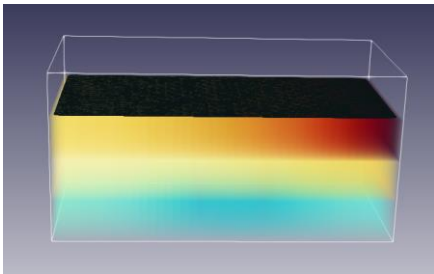
垂向渗透系数、弹性储水系数、非弹性储水系数

等效比例因子、等效厚度

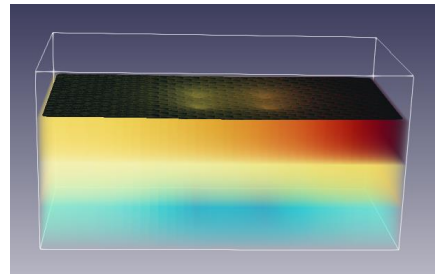
初始水头、初始预固结水头、初始压缩量

SUB实例

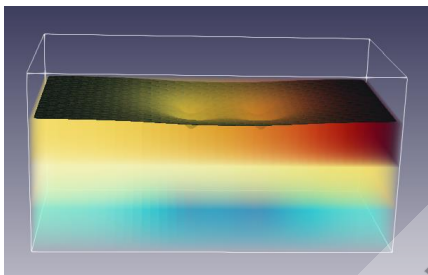
1d



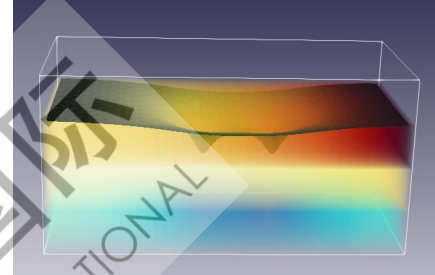
1000d



2000d



3000d



北水国际
BEIJING WATER INTERNATIONAL