

岩土工程概念性问题的 案例分析

2016. 3. 武汉

《岩土工程典型案例述评》



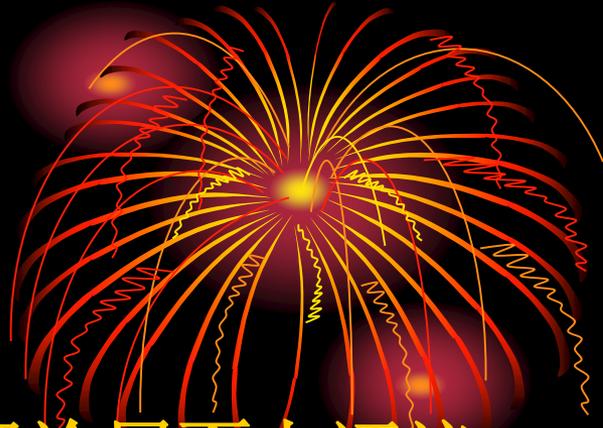
- 作者：顾宝和
- 主审：高大钊、李广信
- 出版：中国建筑工业出版社

- 案例：**32**个
- 附录(涉及术语释义)：**32**个

内容概要



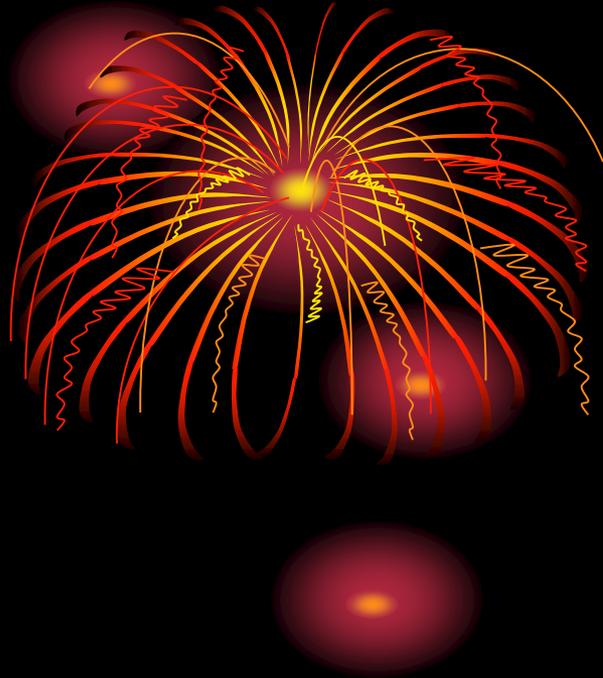
- **32个典型案例**，既有成功，也有失败。
- **工程**：天然地基、桩基、基坑支护、基坑降水、围海造陆、堆山造景、造湖、高填方、铁路、机场跑道、溢洪道、核电厂、放射性废物处置、地质灾害治理等；
- **岩土**：一般第四纪土、淤泥、泥炭质土、残积土、盐渍土、多年冻土、第三纪软岩、风化岩等；
- **问题**：断层、液化、渗透破坏、岩溶塌陷、砂巷、高陡边坡与破碎岩体等；
- **技术方法**：地震反应分析、面波探测、管波探测、地震波**CT**等，
- 反映了岩土工程丰富多彩的个性。

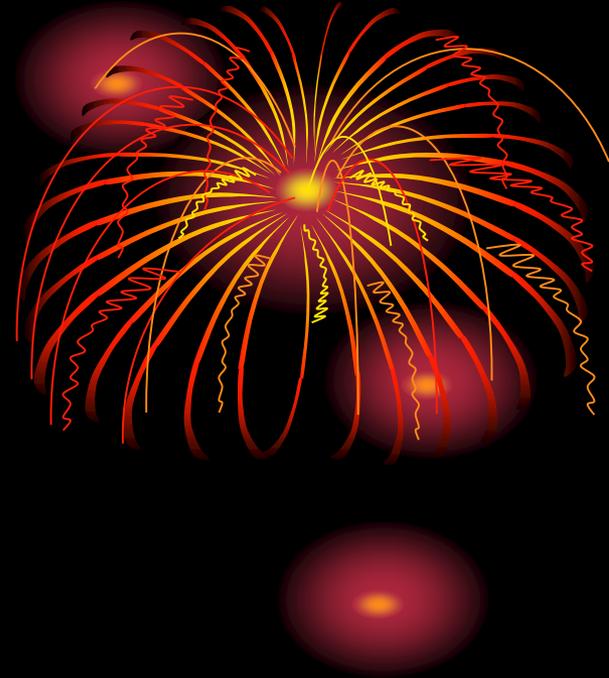


- 案例导引，用通俗语言将问题提升到理论层面上评议。
- 分析了土的孔隙水压力与有效应力原理、
- 软土挤土效应、土的结构强度、盐胀性原理、
- 地下水动态与均衡、潜水渗出面、水动力弥散、
- 岩石力学基本准则、断层活动性、变刚度调平设计、
- 地基基础与上部结构协同作用等问题，岩土工程师
- 必须深知现象背后的科学原理，
- 认识问题要深刻，处理问题要简洁、巧妙。
- 强调概念，反对盲目相信计算，盲目套用规范。

目录

- **1、案例的价值**
- **2、土的结构强度**
- **3、基坑基底隆起与水患**
- **4、基坑降水**
- **5、地震液化**
- **6、岩溶探测和治理**
- **7、结束语**





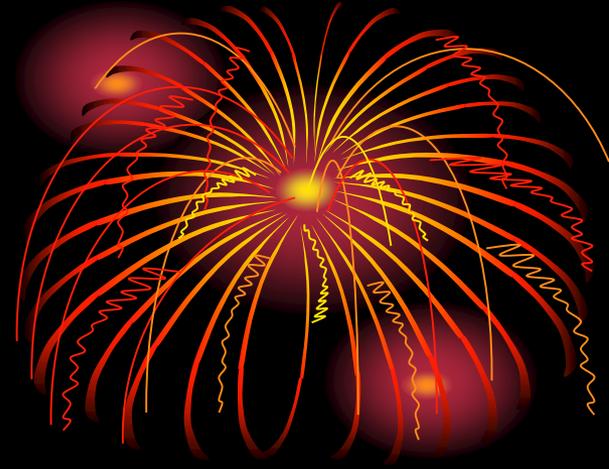
1 案例的价值

典型案例的价值

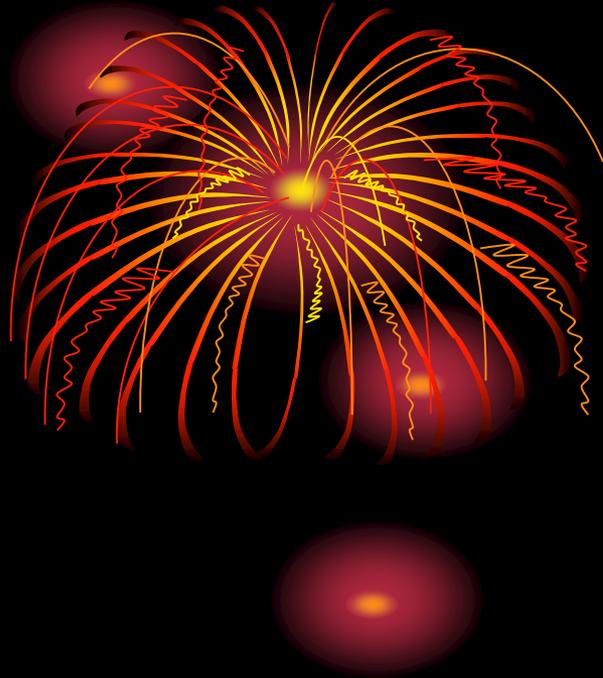


- 太沙基：一个详尽的案例应当受到**10**个具有创新性理论一样的重视。
- 太沙基在实践中，从工程案例中吸取知识和经验，上升为理论，成为岩土工程宗师。
-
- **1**成功的典范，失败的警示；
- **2**一比一的科学实验，计算不可能精确，
唯原型实测才能定量；
- **3**新概念新方法的源泉。

1 成功的典范 举例

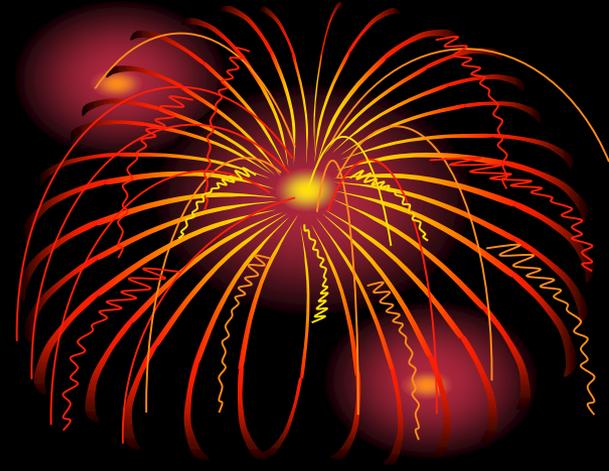


- 唐山体育场岩溶塌陷治理
- 勘察、设计、施工、检验、监测的一条龙服务。
- 信息是成败的关键，采用最有效的手段：
 - 钻探取芯、标准贯入、瞬态面波、地震CT、
 - 沉降观测、水位观测等。
- 查明溶洞、土洞、塌陷分布、形态、机制、规律
- 检测、监测



- 对症下药，标本兼治，一劳永逸
 - 上段——加固地基；
 - 中段——封堵天窗；
 - 下段——截断岩溶水。
-
- 认识问题准确而深刻——岩溶塌陷的科学规律；
 - 解决问题有效而经济——巧妙就是一种艺术。

失败的警示 举例



- 杭州地铁**1**号线湘湖路站
- **2008**年**11**月**15**日突然塌陷，连续墙断裂，大幅内移，坑底升高，湖水灌入，
- 死亡**21**人，重伤**1**人，轻伤**3**人，直接经济损失巨大。
- 基坑最大事故，**8**人判刑，**11**人处分。



- 施工超挖、监测缺失——事故直接原因
- 教训惨重，没齿难忘的警示。
- 勘察设计角度——
- 土性和计算参数的测试和选定；
- 稳定分析应如何计算；
- 内支撑整体稳定性等。
- 《岩土工程典型案例述评》有详细分析
- 反面警示常比正面经验更生动，印象更深刻

2 一比一的科学实验

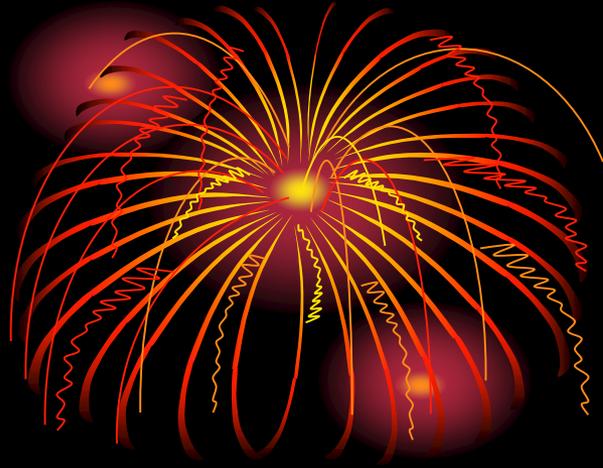


- 计算预测不可能精确，
- 唯原型监测才能真正定量。

日本关西国际机场人工岛

- 上部为厚**20m**吹填软土，砂井处理；
- 下卧层为厚**120m**洪积土，未处理。
- 勘探测试、计算理论先进。
- 设计阶段，计算**50**年沉降：
- 上部软土沉降**6.5m**，机场开通时沉降结束；
- 洪积土沉降**1.5m**，机场开通时预计几十厘米。
- 填土达标高后**6**个月实测，
- 上部软土沉降**5.5m**，小于计算值；
- 洪积土沉降**1.5m**，远大于预计值。





- 重新勘探试验和计算，调整为
- 上部软土沉降**5.5m**，
- 洪积土沉降**5.5m**，总沉降**11.0m**。
- 机场开通时，按实测数据推算，
- **50年总沉降10.34m**，比调整计算小**0.66m**。
- 本案例条件不复杂，问题在于参数。
- 缺乏经验情况下，即使工作认真细致，技术水平高，沉降计算还是没有把握，
- 单纯计算靠不住，原型监测多重要！

概念失误和预测偏差

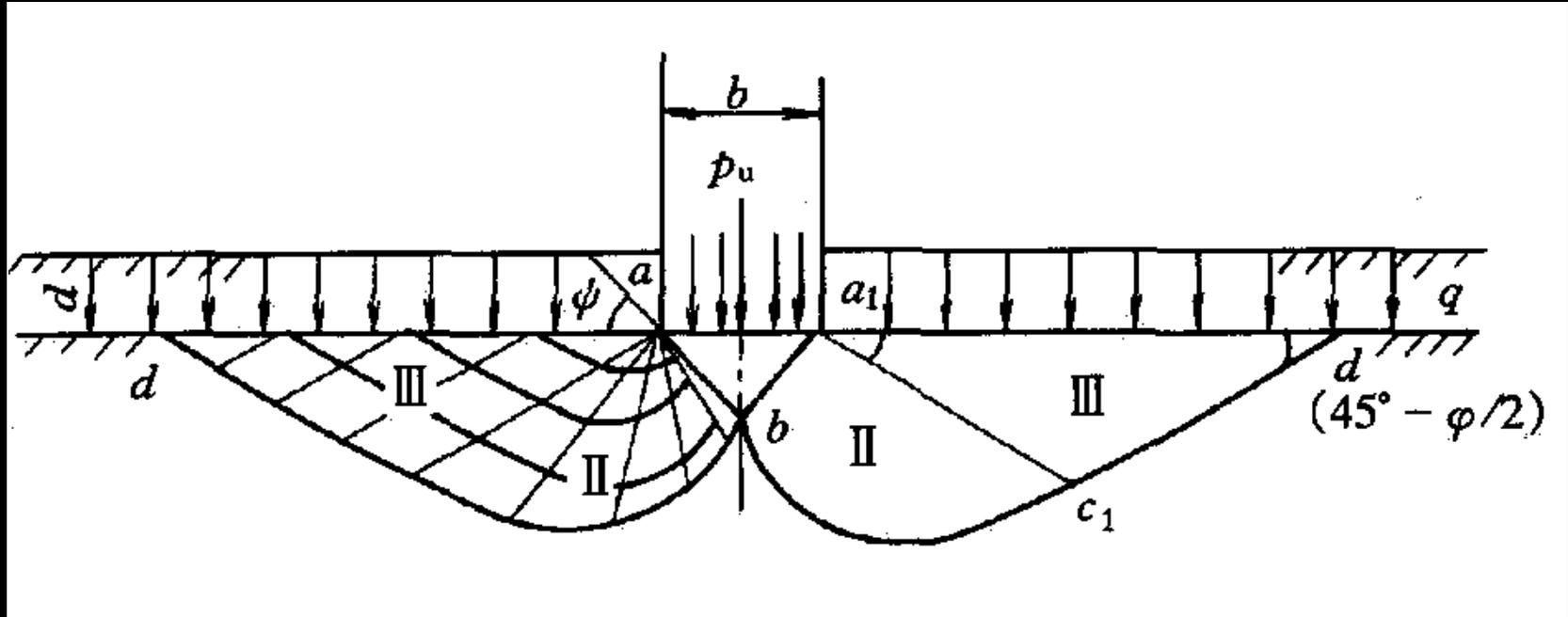
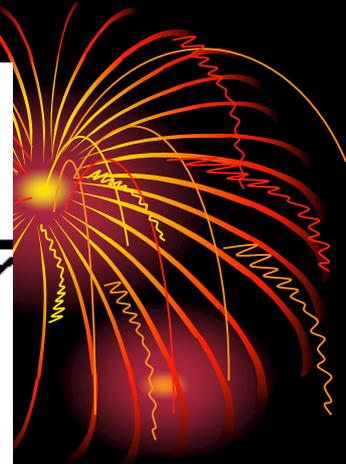
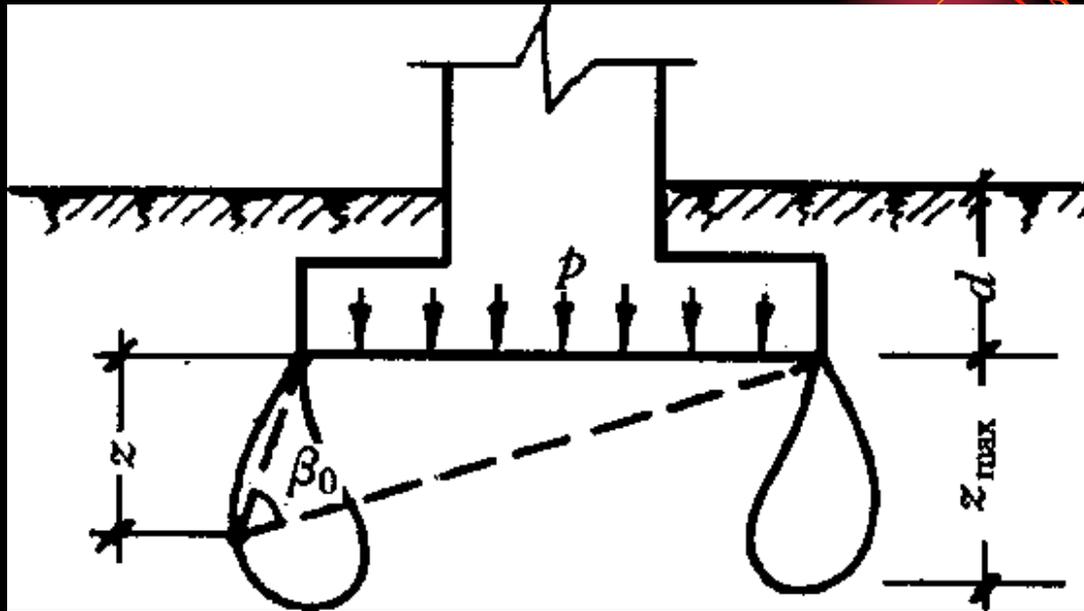


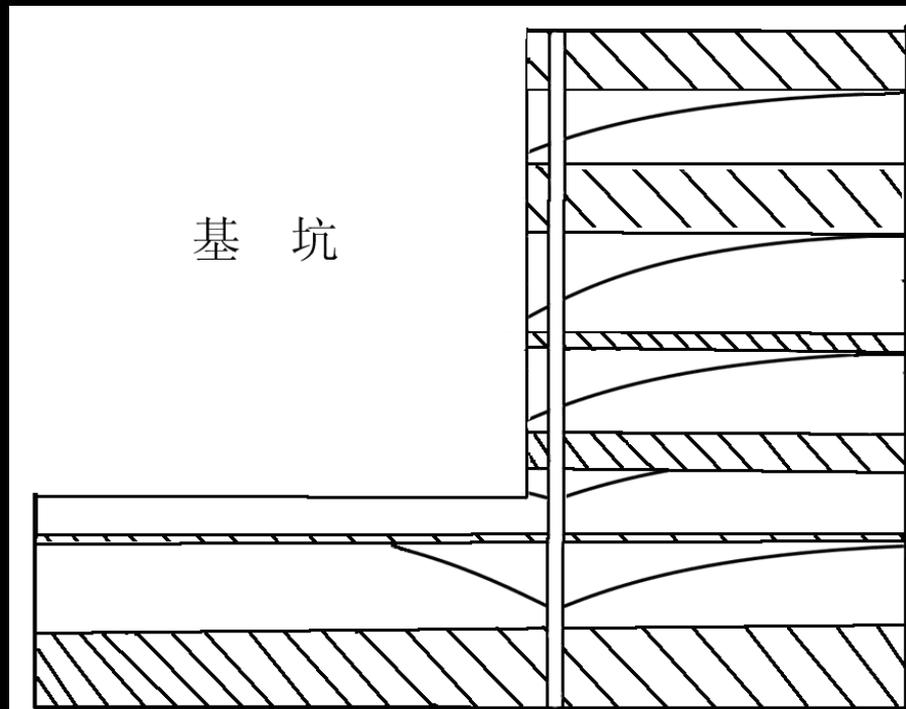
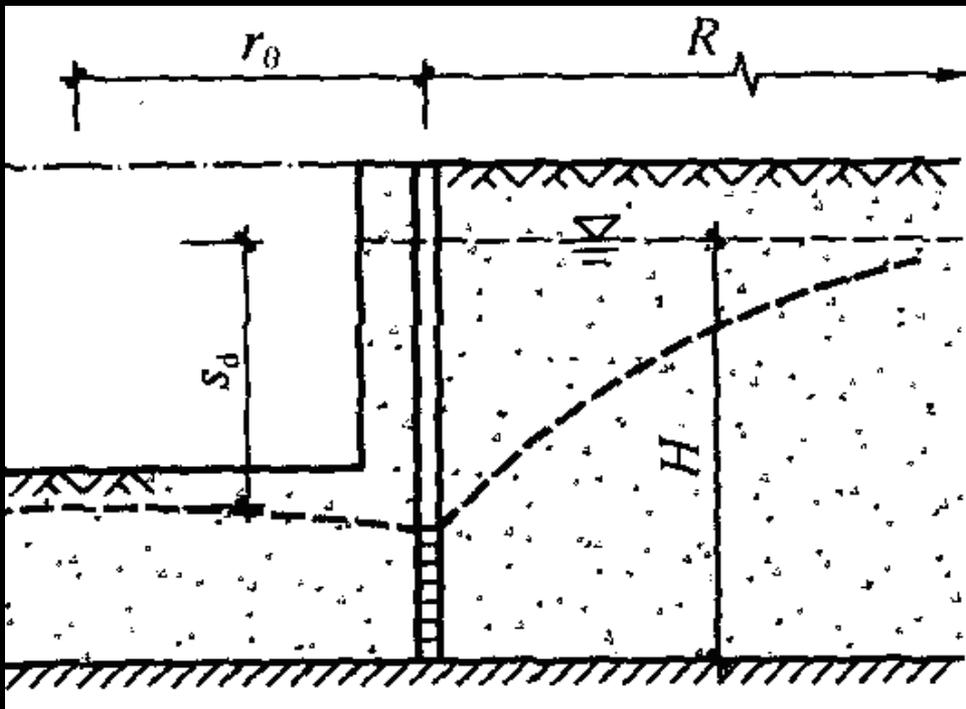
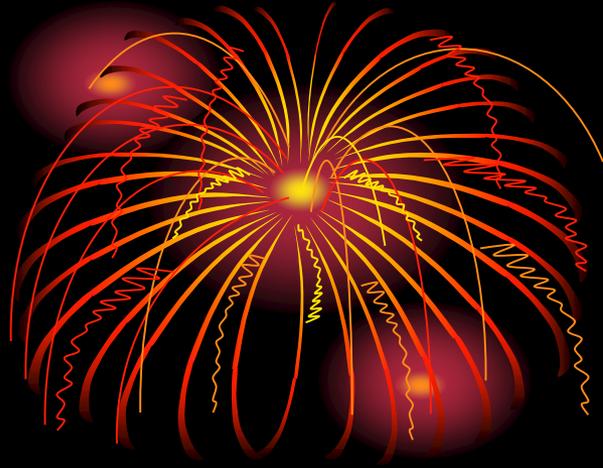
- 概念失误是原则性错误。 质的错误
- 正常预测偏差一般由计算模式、计算参数与工程实际差别引起，与岩土工程特点有关。
- 量的偏差。 为减小偏差：
- 精心勘察设计；
- 现场原型试验或试验性施工；
- 加强工程监测。

计算可靠性有限的原因

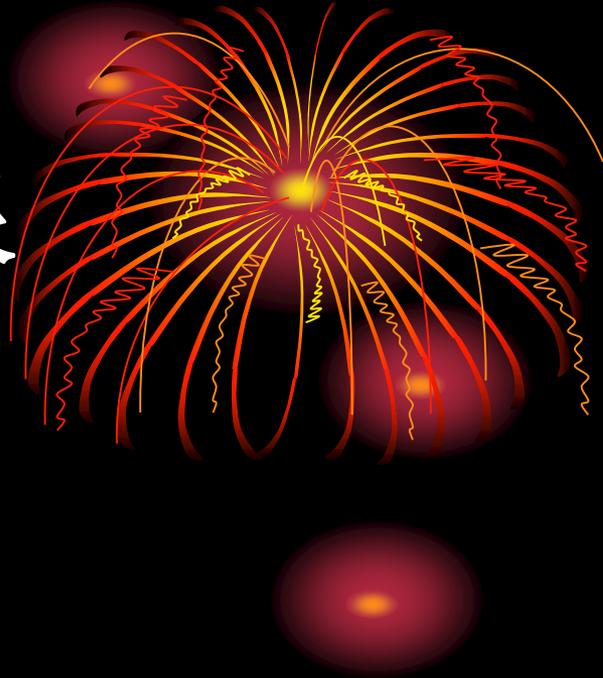


- 计算模式与实际条件的差别，
 - 以地基承载力和基坑降水为例；
- 计算参数的不确定性，
 - 以压缩系数和抗剪强度指标为例。
-
- 地基承载力计算不如载荷试验推算；
- 基坑降水计算有时不如经验估计。





3 新概念新方法的源泉



- 苏联某钢铁基地与湿陷性土
- 北京彩电中心与扩底桩
- 南京造纸厂与水泥粉煤灰碎石桩
- 正负电子对撞机工程与全新活动断裂
-

北京八宝山断裂与电子对撞机工程

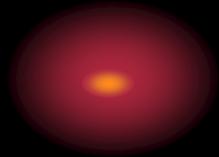
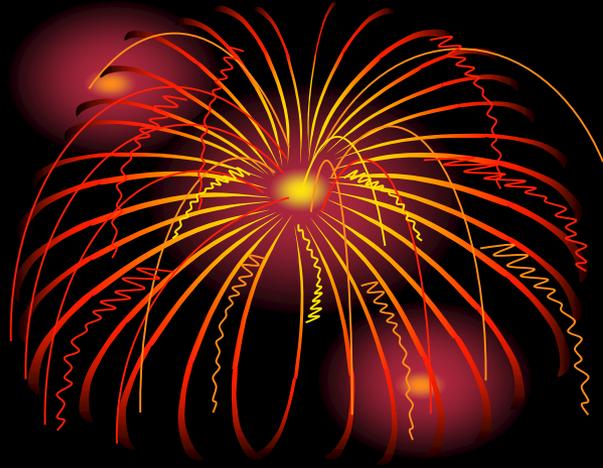


- 预测断裂活动性难度极大，曾长期困扰工程界。
- 八宝山断裂已有活动断裂定论，
- **1984年**，因正负电子对撞机工程深入研究，
- 以确凿证据作出
- 工程使用期间不会发生浅表岩层错动的结论。
- 赢得了时间，节省了投资，
- 为全新活动断裂新概念提供工程范例，
- 打下理论基础。

全新活动断裂新概念



- 以地质历史观为分析依据，
- 注意地质年代尺度与工程年代尺度巨大差别，
- “回顾一万年，展望一百年”。 **1%**
- 新概念得到业内专家普遍赞同，列入《岩土工程勘察规范》，《建筑抗震设计规范》
- 结束在断裂活动性面前束手无策的被动局面。



2 土的结构强度

案例6 济南万科住宅群基础与残积土特性



工程概况

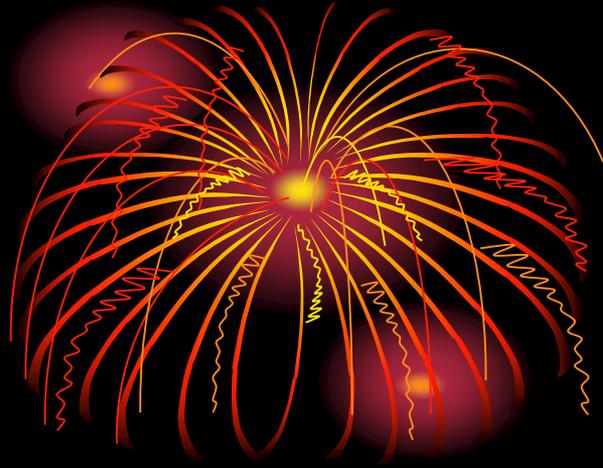
- 7栋高层住宅，
- 地上**28~34**层，地下**2**层，
- 高度近**100m**，
- 剪力墙结构，
- 基底埋深**7.2m**。

地基土概况



地层：①填土、②黄土、③粉质黏土、④卵石、⑤闪长岩残积土、⑥全风化闪长岩、⑦强风化闪长岩、⑧中等风化闪长岩。

持力层：④卵石：局部夹硬塑~坚硬粉质黏土和黏土，部分胶结，层位稳定，未深宽修正承载力特征值**400kPa**，厚**11.70~14.30m**；



- 主要下卧层：
- ⑤闪长岩残积土，土状-粉细砂状，普遍分布，厚度**10m**以上。 指标平均值：
- 含水量**43.8**、孔隙比**1.342**、
- 压缩模量**3.76MPa**、 **$N=15.7$** ，
- 未深宽修正承载力特征值**220kPa**。

基础方案 天然地基



- **2层地下室，基础埋深7.2m，持力层卵石。**
- **基底压力530~620 kPa，修正后满足，局部黏性土夹层适当处理。**
- **下卧层残积土承载力验算通过。**
- **主要问题：室内试验压缩模量低，高层建筑**
- **变形验算不能通过。**

基础方案 桩基础



- 灌注桩，穿过④卵石、⑤闪长岩残积土、⑥全风化闪长岩、⑦强风化闪长岩，以⑧中等风化闪长岩为桩基持力层，嵌岩桩。
- 桩端全断面嵌入中风化闪长岩不小于**2**倍桩径。中风化岩顶面起伏大，应做桩基施工勘察。
- 桩深**27~41m**，有效桩长**20~30m**，需穿过巨厚、胶结卵石及残积土、全风化、强风化岩。

补充测试和决策



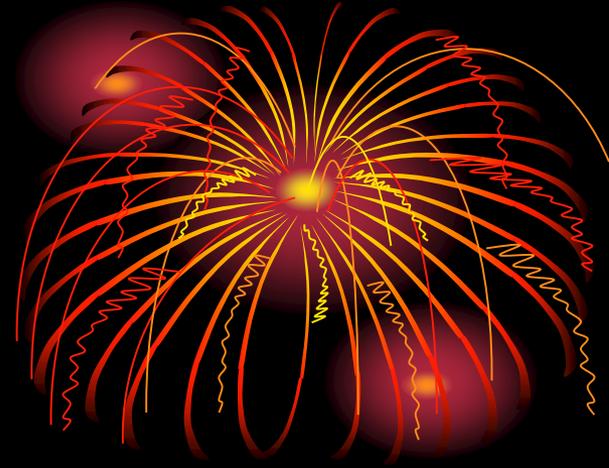
- 残积土深层载荷试验，结果，
- 承载力特征值**500kPa**，变形模量**28MPa**。
- 旁压试验结果：承载力特征值**432~529kPa**，压缩模量为**20~27MPa**。
- 采用天然地基，补充原位测试数据。
- 施工过程中及施工后进行沉降观测，
- 一般 **1~2cm**，最大**22.5mm**。

残积土特点



- **沉积土**：长途搬运沉积，风化碎屑经撞击、摩擦、氧化、溶解、分选，形成卵石、砾石、砂，颗粒坚硬；黏性土蜂窝结构或絮状结构。
- 传统土力学只考虑孔隙比变化，不考虑土粒可压缩性、可被压碎，不研究土的结构强度。
- **残积土**：原地残留，未搬运和分选，
 - 1** 保留岩石残余凝聚力(结构强度)；
 - 2** 颗粒组成不明确，外力作用“颗粒”可压缩或压碎，粒度变细。

残积土测试



- 不同母岩和不同风化环境，
- 残积土特性大不相同。
- 试样小代表性不足，试验数据离散性大；
- 取样易扰动，残余凝聚力或结构强度易破坏。
- 原位测试为主，标准贯入、动力触探、
- 旁压试验、载荷试验等，
- 以载荷试验为主确定地基承载力和变形参数。
- 深圳经验值得借鉴

案例23 墨西哥Texcoco抽水造湖与现场试验



- 墨西哥软土：
- 火山灰湖泊中沉积，**100%**小于**0.005mm**，
- 片状，含水量达**400%**，塑限、液限以百计。
- 原状土十字板强度**10kPa**，灵敏度**10**以上。
- 原状土直立，摇晃几下即成稀泥。
- 抽取地下水，**70**年代地面沉降累计最大**9m**。
- 砂层中井管高出地面数米。
- 端承桩成“高桩承台”，影响抗震性能。

Texcoco改造项目



- 软黏土两层，含水量约**300%**，孔隙比约**10**，
- 上层厚**35m**，下层厚**12 m**，
- 中夹砂层，**50 m**下是**10 m**厚的砂层。

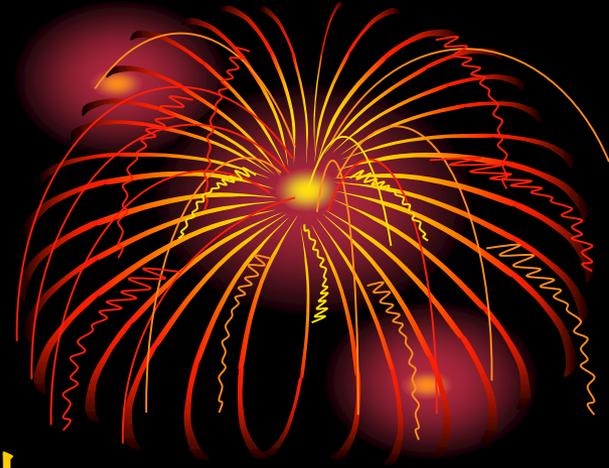
- 现为荒滩，拟改造为大公园。
- 若干人工湖、排水渠道(总长**18km**，深**5m**)、高速公路、飞机场、污水处理场、植树种草等

大量原型试验研究



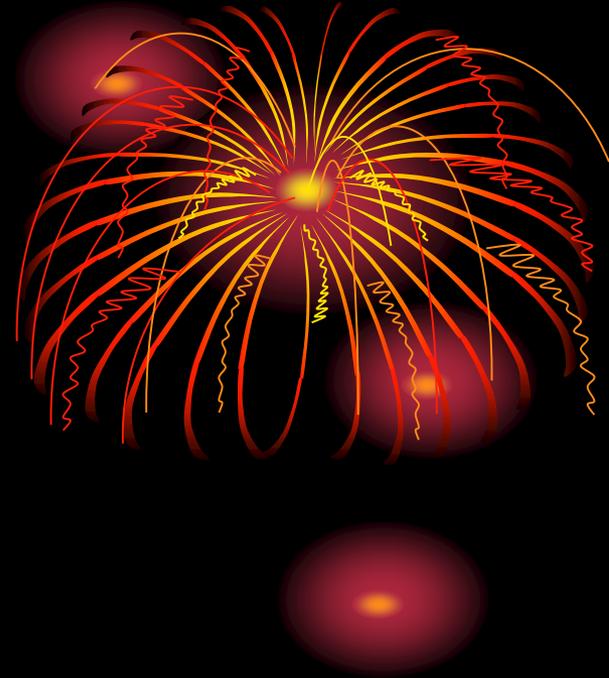
- 历时数年，工地成大实验室。项目：
- 抽水造湖； 补偿式基础；
- 桩基工程； 堆方工程；
- 机场跑道； 高速公路；
- 渠道开挖； 土壤改良，植树种草。
- 工程实施和使用过程中，继续长期观测。
- 常规勘察是设计前期工作的一小部分。

抽水造湖



- 井距**160m**，深**60m**，
- 进入下部砂层，井间设孔压计。
- 自然水位接近地面，井水位深平均**30m**，
- 井间水位平均**20m**，深层沉降标测分层压缩。
- 造湖面积**4.2km × 1.2km**。5年抽水，
- 体积压缩总量**1760万m³**。除边缘外，沉降量约**4 m**，**180**口井总抽水量**700L / s**。
- 不用任何开挖设备和运输工具，
- 造价经济，现场文明。

- 天高不算高，人智高一超。
- 平地沉作湖。不动土一锹。



堆方试验



为湖堤、高速公路，确定堆方稳定性和沉降量，
试段长**100m**，高**3 m**，顶宽**20m**，底宽**60m**。

经**7**年观测，堆方中心沉降**1.40m**。

测斜仪量测深部水平位移，平均**5cm**。

结论：堆方压力下竖向沉降为主。
水平位移很小，堆方稳定。

渠道开挖试验



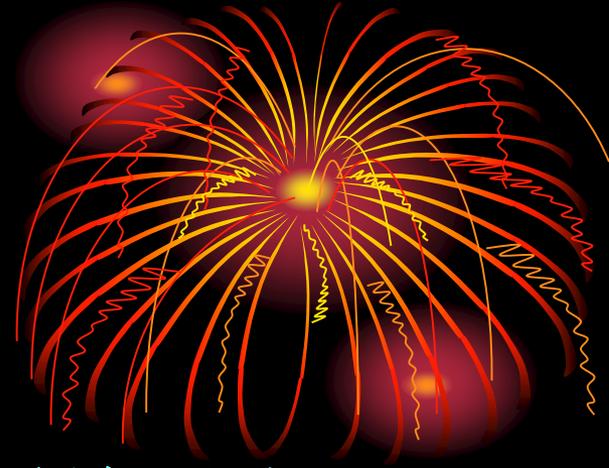
- 按常规计算，稳定坡度**1/12**。
- 灵敏度高，不扰动，利用其结构强度。
- 两个试验段，不用挖土机和运输车，
- 保持水位，用挖泥船水下开挖运输。
- 挖深**4 m**，坡度**1/3**。设监测元件监测
- 开挖、放水、灌水时水平、垂直位移，
- 控制施工速度。
- 多次放水、灌水，四、五年观测，边坡稳定，方法可行。

桩基试验 负摩擦试验



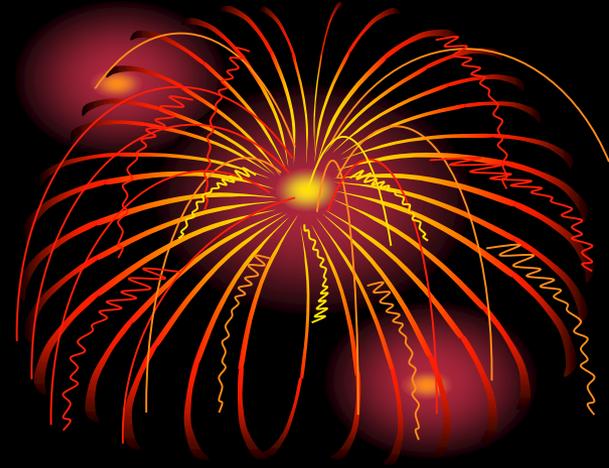
- 试验桩长**30m**，三角形截面，边长**500mm**。
沿桩长设置观测压力元件。
- 第一阶段无附加荷载，
观测抽水地面沉降的负摩擦力；
- 第二阶段为加载试验，考察时未开始。
- 第一阶段随抽水和地面沉降，
地表至**22m**，轴力自上而下增加；
22m下自上而下减小，桩端最小。
- 中性点在**22 m**，以上负摩擦，以下正摩擦。

结构强度的普遍性



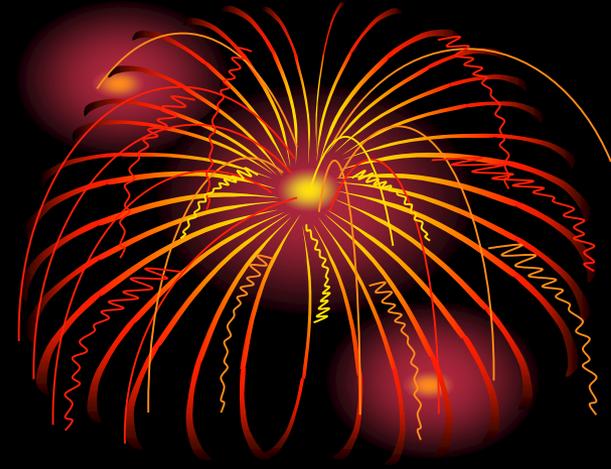
- 土的原状结构具有的强度，
- 非压密固结形成。
- 几乎所有土都有结构性，成因和表现各不相同：
- 结晶岩残积土、黏性土、黄土、红黏土、
- 膨胀土、盐渍土、“硬壳层”、砂土。
- 灵敏度反映结构强度，
- 低灵敏黏土**1~2**，高灵敏黏土**10**以上。
- 结构强度 多数情况一旦破坏，很难恢复。

结构强度的多样性



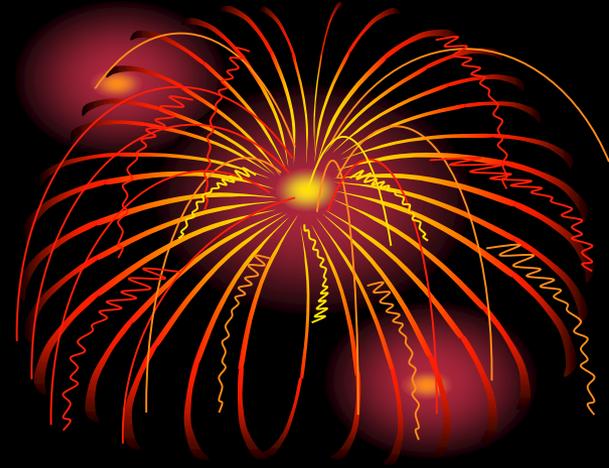
- 软土触变：
- 胶体摇晃，凝胶--溶胶，静止，溶胶--凝胶。
- 有结构--无结构的可逆过程，时间的函数。
- 胶体颗粒小于**0.002mm**。
- 黏性土表面吸附胶体，
- 凝胶生成结构强度，溶胶丧失结构强度。
-

结构强度的多样性



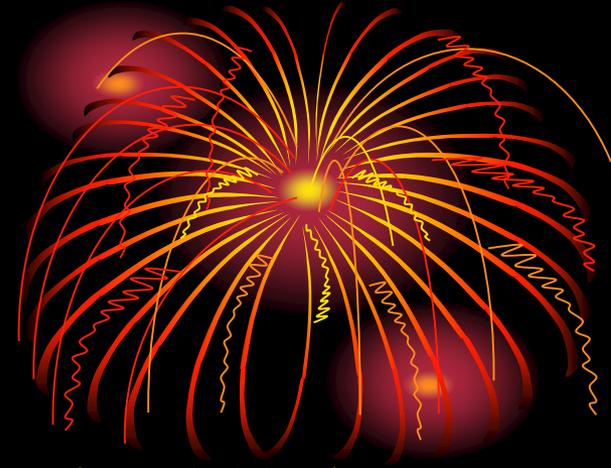
- 红土化：
- 高温高湿氧化环境下，碱金属、碱土金属、硅迁移；铁、铝氧化物积聚。
- 黏粒聚集，负电荷与阳离子结合，
形成水稳性好的结构。
- 盐酸盐红黏土，下接基岩，上硬下软，裂隙。孔隙比高，液限高，黏粒含量高，强度也高。
- 强度形成不能用自重压密和固结状态解释。

结构强度的多样性



- 黄土：干旱或半干旱环境生成，
- 粉土粒以点接触为主架空结构，少量盐晶和黏粒胶结形成结构强度；水稳性差，产生湿陷。
- 盐渍土：决定于阳离子、阴离子组分和含量；
● 溶陷性、盐胀性。
- “硬壳层”：干缩形成结构强度。
- 砂土：粒状土，不同排列有不同强度，
● 实际黏聚力有时不一定是0。

结构强度的多样性



膨胀土： 亲水黏土矿物

胀缩性： 随气候反复；

超固结性： 反复胀缩形成，侧压力系数高；

裂隙性： 密集镜面状剪切裂隙；

强度特性： 随含水量增大衰减，

勘察含水量不代表工程实况；

放坡： 自然稳定坡角； 挡土： 静止土压力高，

土压力算不准，防止增湿强度降低，快速作业。

地基： 大压力有利，

无理论计算方法，按胀缩性分级采取措施。

传统土力学的局限

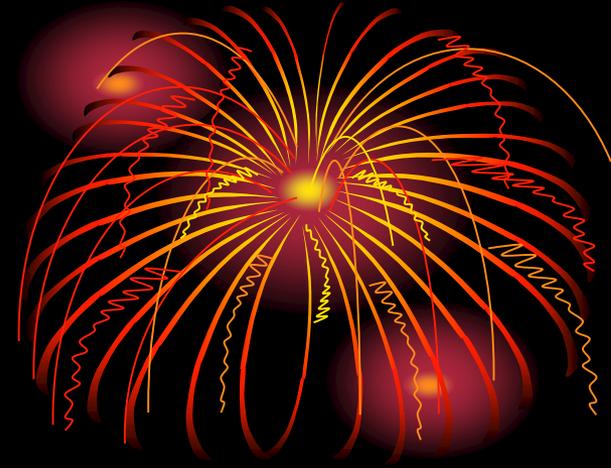


- 传统土力学是重塑土力学，饱和土力学。
- 传统土力学未考虑结构性；非饱和土力学不成熟
- 岩土工程用土力学应注意其局限。
- 黏性土的状态——原状土与重塑土不同；
- 固结试验——理论上限于饱和土；
- 三轴试验固结和排水——理论上限于饱和土。



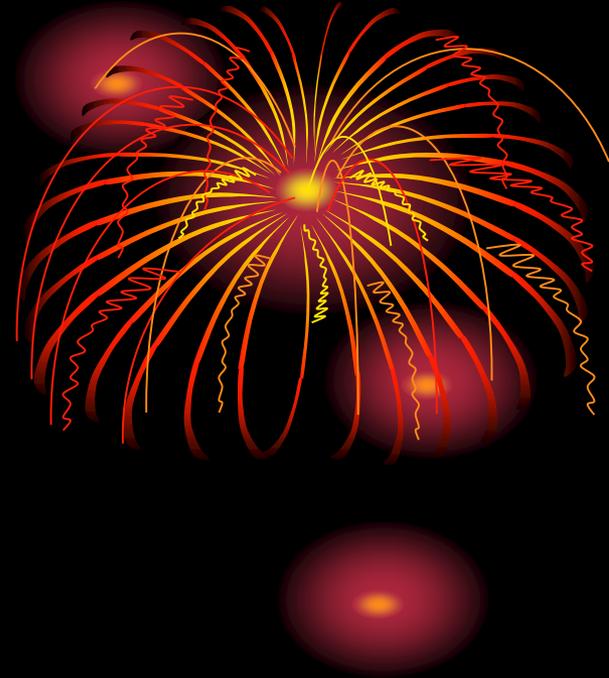
- 土的结构性难以用传统土力学理论说明：
- 孔隙水压力与有效应力原理；
- 土的压密状态或固结状态；
- 建立在有效应力基础上的
- 强度理论和测试方法；
- 沈珠江：土体结构性数学模型和相应理论
- 用原位测试和原型试验补充不足，
- 载荷试验、试桩、试验性施工、原型监测等。

原型试验

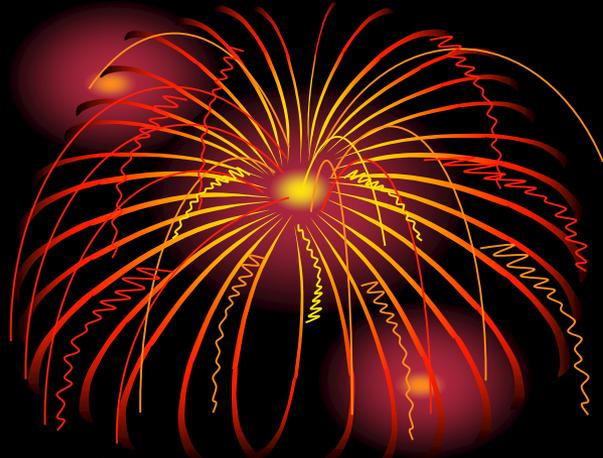


- 墨西哥**TEXCOCO**;
- 敦煌盐胀性土(案例**30**); 青藏铁路(案例**32**);
- 载荷试验、试桩: 现场原型试验、试验性施工;
- 《地基处理规范》: 预压、强夯、强夯置换、注浆、复合地基, 均强调现场试验或试验性施工;
- 新编《高填方地基技术规范》《机场岩土工程设计规范》要求:
- 高填方大面积施工前, 在代表性场地进行现场试验或试验性施工, 确定或优化施工方法和参数。

- **3 基坑隆起和水患**



广东某工程

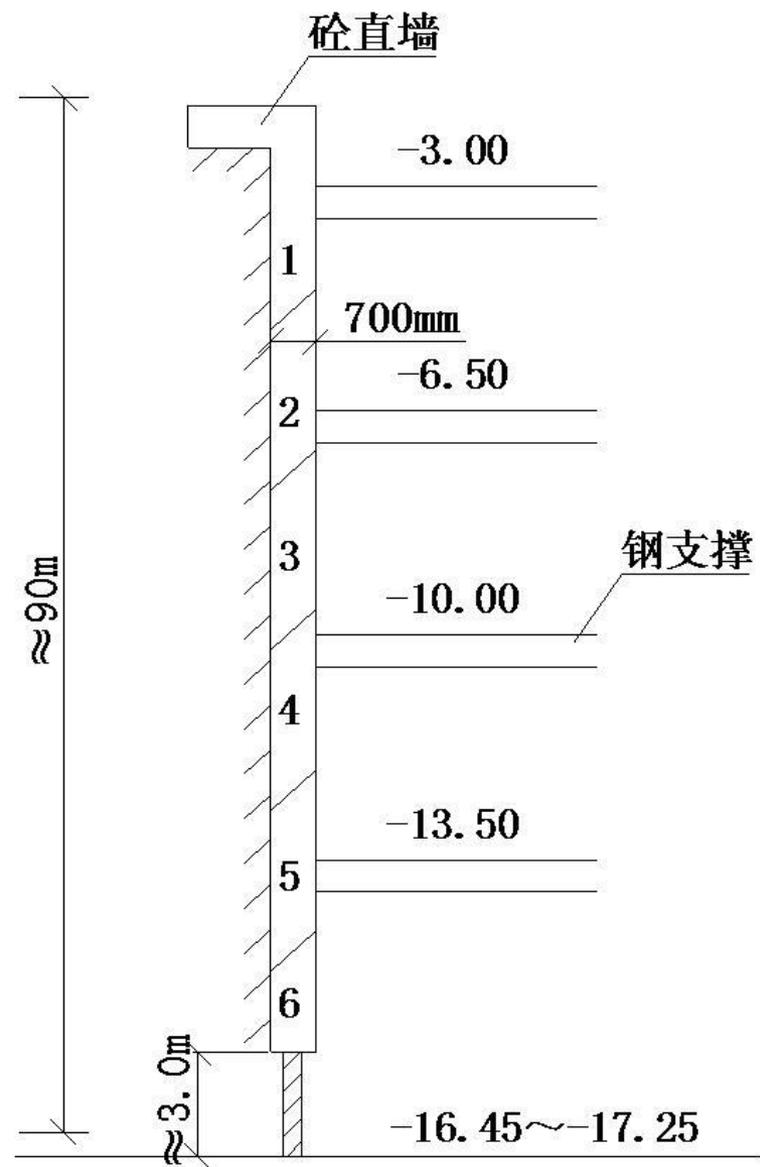
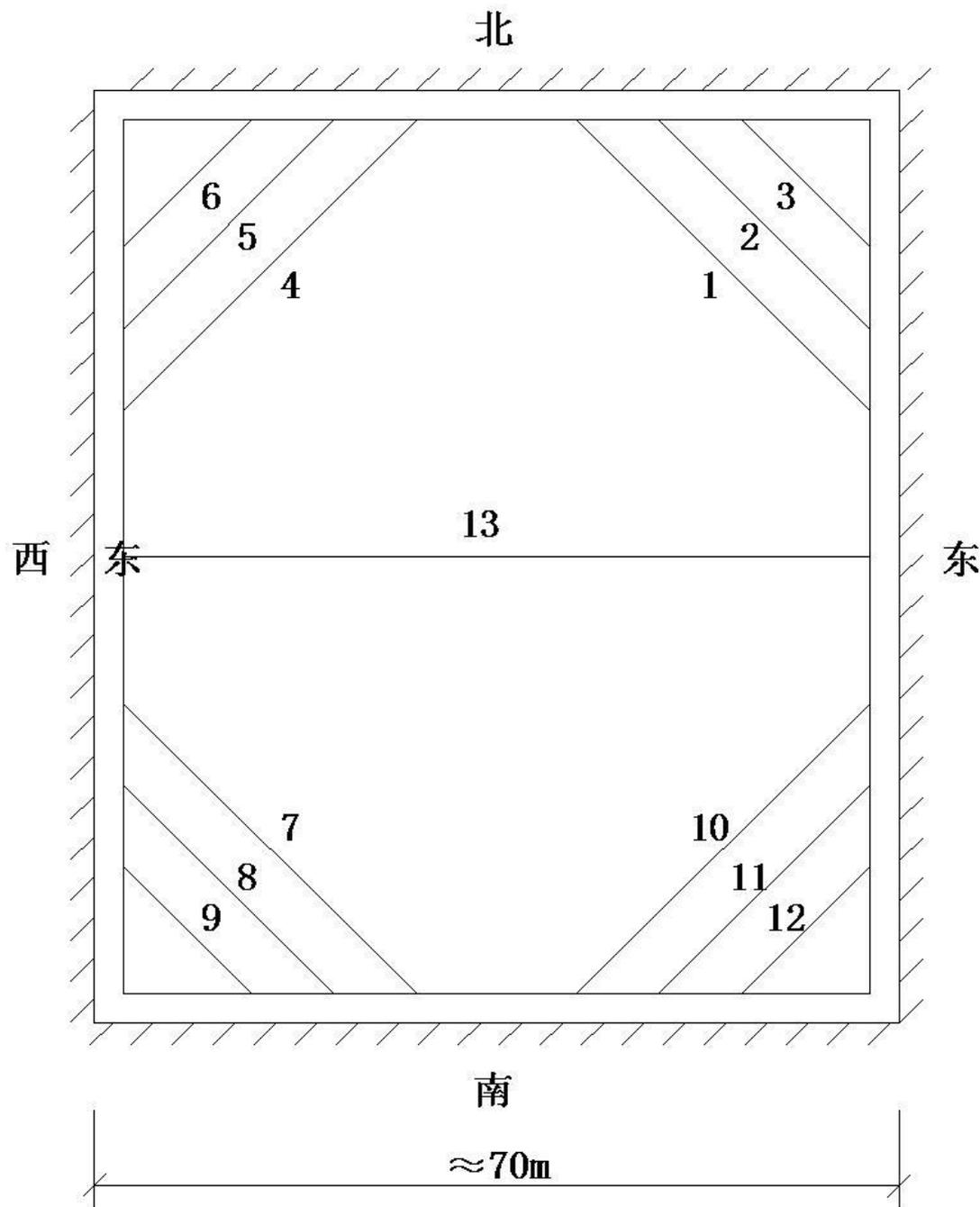


- 工程概况
- 地面上**27**层，总高**99.8m**，地面以下**4**层，基坑深度**16.5m**。地下室平面尺寸为：
 - 东西宽约**70m**，南北长约**90m**。
- 土质概况
- 海积、海陆交互沉积，厚度极不均匀，海陆交互沉积以下为残积土，顶面深约**23m**。

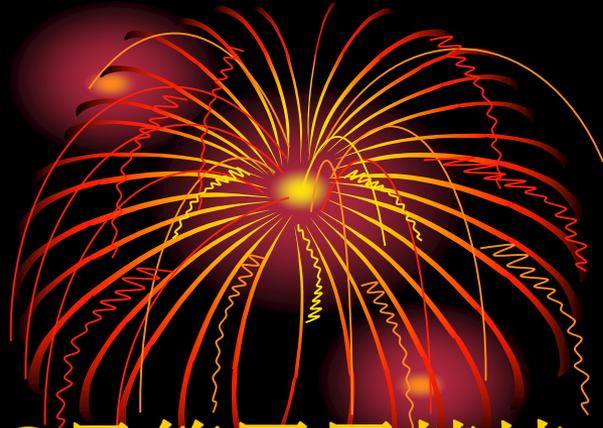
支护结构



- 无嵌固深度的逆作挡墙+钢结构内支撑；
- 搅拌桩加旋喷桩截水围幕。
- 钢筋混凝土直墙分**6**层，
- 钢支撑**4**层，
 - 分别支撑在第一、二、四、五层直墙上。
 - 标高为**-3m**、**-6.5m**、**-10m**、**-13.5m**。
- 每层直墙分**35**段，钢支撑**13**道，
- 每角有**3**道，**45**度角对撑，
- 东西向水平支撑一道。



事故经过



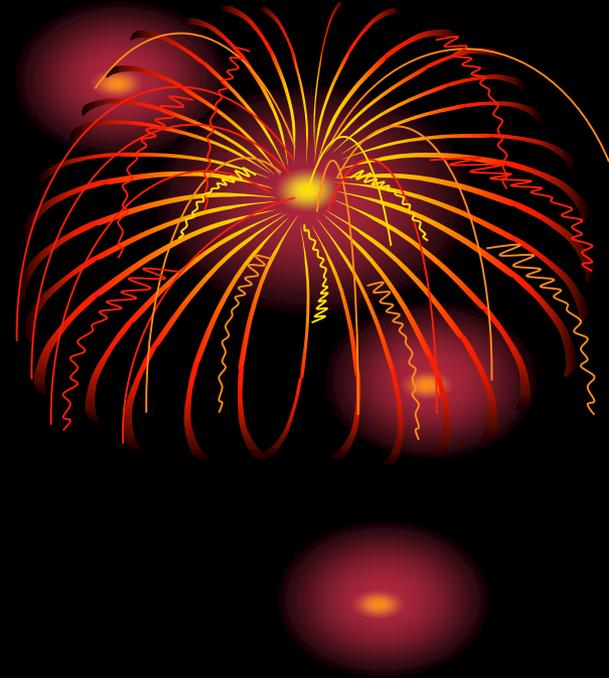
- 挡土墙从上至下逆作施工，**4月10日**第四层挡墙封闭，开挖深度应**11.7m**，但实测已达
- **15.0m**，局部**16.8m**，低于第四层钢支撑。
- 此时第四层钢支撑尚未安装，第三层还有**1号**和**13号**未安装。
- **4月28日**测试，超过**130MPa**的已达**24**个，超过**150MPa**的已达**20**个。
- 第一层支撑受压构件变成了受拉构件。



- **4月30日**，发现挡墙下沉和倾斜明显增加。
- **5月2、3日**连续暴雨，加速险情。
- **5月6日上午**，坑外地表累计下沉**176mm**，下午**2时**，基坑南面钢支撑连续爆裂、端部多处开裂、脱落、失稳，坑底土隆起**200mm**。
- **4时**全线撤离，居民疏散。**4点30分**，坑内频繁爆裂声响，东南角首先坍塌，墙体后仰滑入坑内。接着西南角也后仰滑入坑内，坑外**3**栋房屋整体滑入坑内（滑距**20**余米）。
- 晚上**8**时许，整个基坑全部倒塌。由于人员撤离及时，未造成人员死亡。

事故原因分析

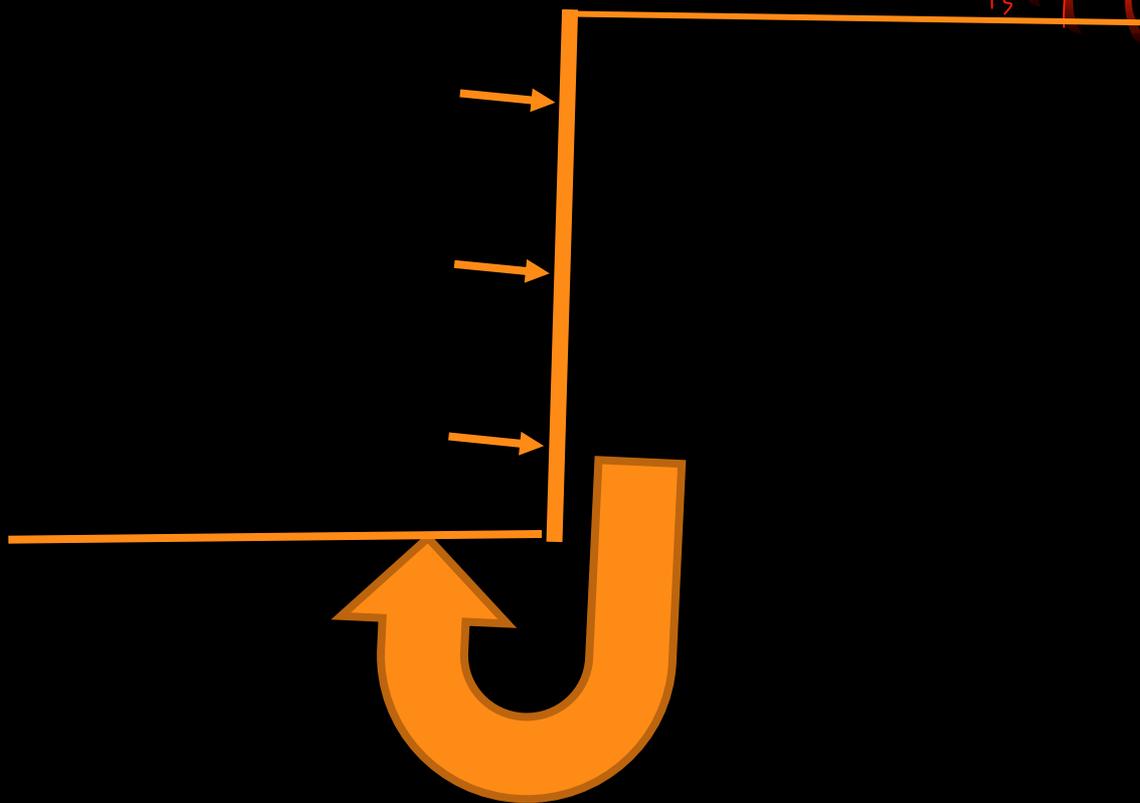
- **1** 地质条件复杂；
- **2** 严重超挖；
- **3** 设计方案重大失误。



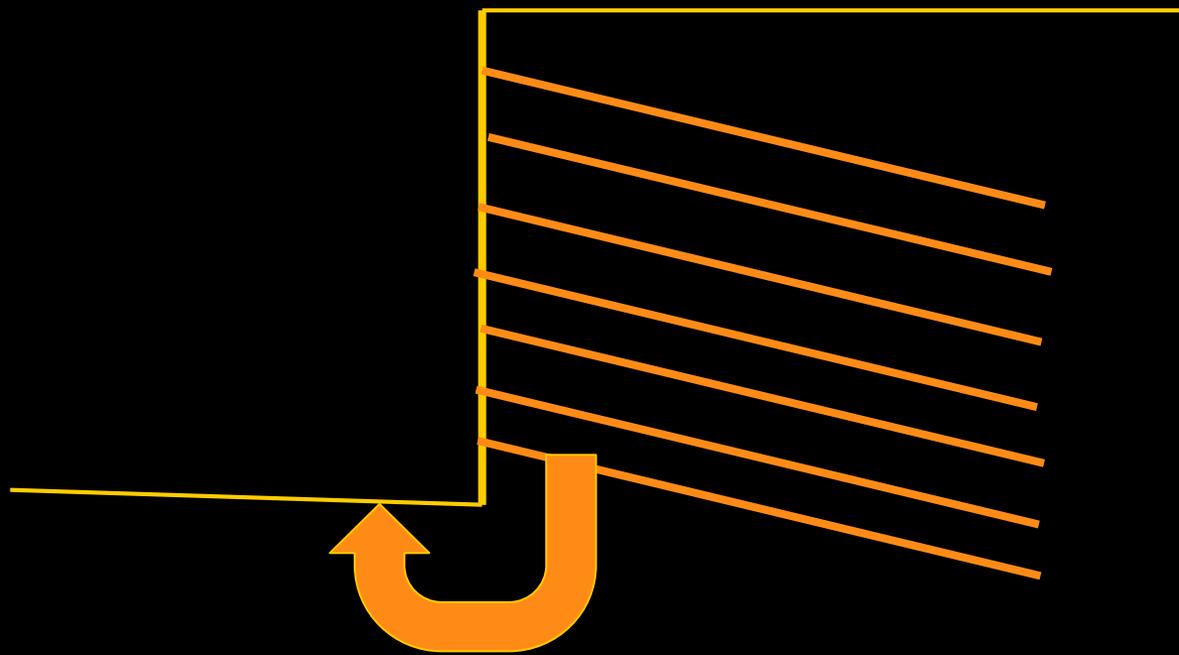


- 软土深基坑采用无嵌固深度的混凝土挡墙逆作围护，严重概念性错误。
- 设计者仅考虑侧土压力，忘记了竖向力的问题。随基坑加深，基坑内外竖向压力差越来越大，
- 如土质好，可依靠承载力平衡；
- 如土质软，压力超过土的强度，必然产生塑性流动和破坏，
- 表现在坑内隆起，护壁后仰，整体滑动。

无嵌固直墙基底隆起



土钉墙基底承载力不足 引发隆起破坏



某基坑水患









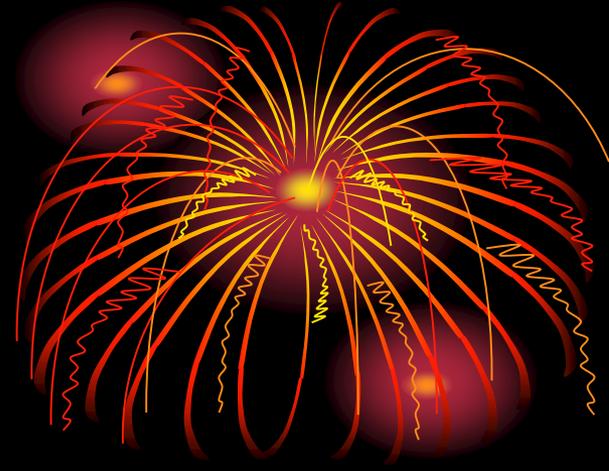


案例15 北京郊区某工程的基坑渗透破坏

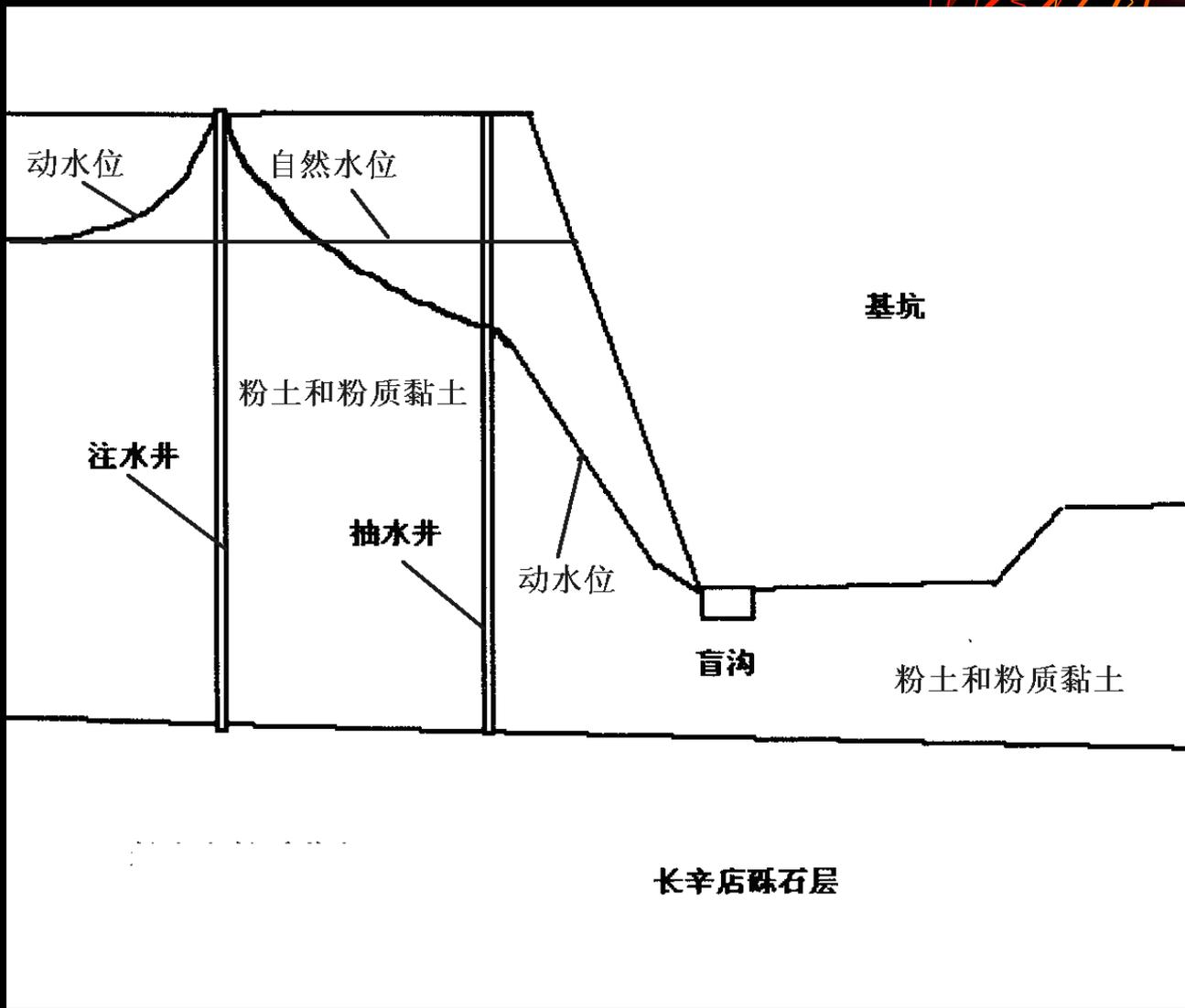


渗透破坏

概况



- 上部粉土和黏性土，厚约**12m**；
- 下部巨厚新近系长辛店砾石层(卵石，半胶结)。地下水水位：地面以下**2m**。
- 基坑长**76m**，宽**38m**，深**9.1m**，放坡开挖，坑中坑。天然地基，粉土和粉黏为持力层。
- 降水回灌结合，**36**个降水井，井深**12m**，到达长辛店砾石层顶面，回灌井在降水井外围。



实施



- 挖至**7m**，再挖一铲发现地下水，水位深**8.1m**，水量较大。
- 认为上覆粉土和黏性土竖向渗透系数远大于水平渗透系数，估计为**2m/d**。
- 无法继续降水。
- 基坑内侧周边强行挖至深度**9.4m**(深于基坑标高**300mm**)，碎石回填成盲沟，集水坑抽出。

问题



- 继续开挖，接近设计标高时冒水，似“泉眼”；盲沟顶部“橡皮土”，开挖较浅处情况正常。
- 坑内**4**处载荷试验(实际完成**2**处)。
 - 压板面积**2m²**，要求承载力特征值**250kPa**。
- 实际：**1**号极限承载力**350kPa**；
- **2**号不正常，加载很小即大量沉降，未能完成。
- 地基土严重扰动，放弃天然地基，用桩基础。

判断失误，方案失误



- 是渗透破坏，非渗透系数垂直远大于水平。
- 自然水位**2m**，基坑深**9.1m**，降水井深**12m**，砾石层顶，深于基坑底不到**3m**，有回灌井。
- 含水层渗透性强、厚度大，降水井全深度在弱透水性土中，抽水只能井底进入，不能有效降低砾石层水头。
- 周边盲沟排水对上层滞水和降深不大潜水有效，本案例强透水层水头高出坑底**7.1m**，盲沟降水不可能。

渗透破坏

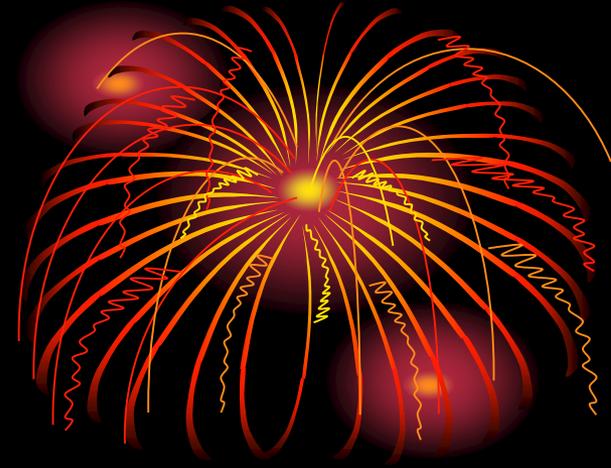


- 土体骨架由于渗透力作用而发生的破坏现象，主要包括流土和管涌。
- 流土：向上渗流地下水流速超过临界状态，渗透力使水流逸出处的土粒处于悬浮状态，造成地面隆起、水土流失的现象。
- 管涌：渗流作用下，土中的细粒通过骨架孔隙通道随渗流水从内部逐渐向外流失，形成管状通道，可使土体破坏的现象。

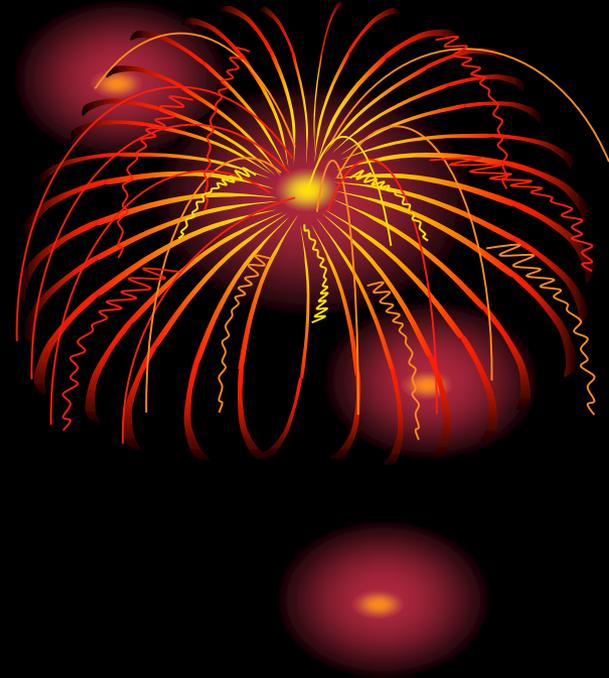
流土与管涌的区别



- 流土：发生在颗粒较细而均匀的土中；
- 管涌：发生在颗粒粗细不均匀的土中。
- 流土：发生时土粒全面悬浮，迅速失去强度；
- 管涌：开始流失细颗粒，逐渐发展为管状通道，渐进式破坏。
- 流土比管涌更危险。
- 突涌：力学平衡问题，开挖速度较快，承压水头将黏性土拱破，形成裂缝，水土涌出，坑底隆起、破坏。



- 压力超越临界度，基坑顿成万泉湖。
- 强度尽失地基毁，一池泥水难排除。



● 4 基坑降水

案例18

基坑降水设计与计算中的问题



- 平面**40m×50m**，深度**12.0m**，
- 水位深**2.5m**，需降水至**13m**。
- 地层：**0.0~2.2m**填土；**2.2~15.0m**细中砂夹多层较簿黏性土；**15.0~19.0m**黏土；**19.0m**以下砂土与黏性土互层。
- 大口径管井降水，间距**6.0m**，沿基坑周边布置，共**32**口，封闭状。
- 井深**17.0m**，深入黏土约**2.0m**，完整井，井结构符合规定。

降水设计

填土

2.3m



2.5m

自然水位

细中砂夹黏性土

降水设计水位



13.0m

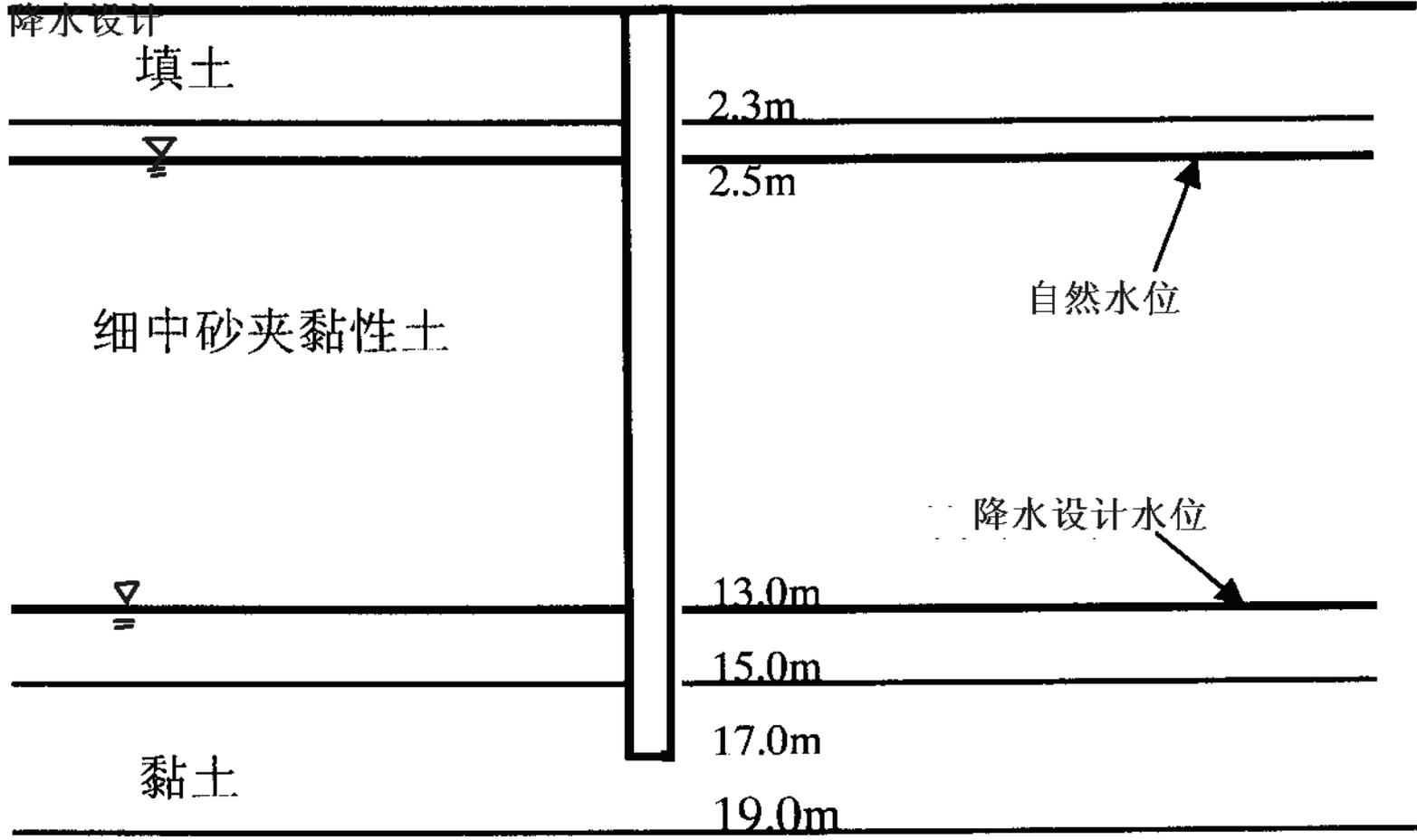
15.0m

黏土

17.0m

19.0m

砂土

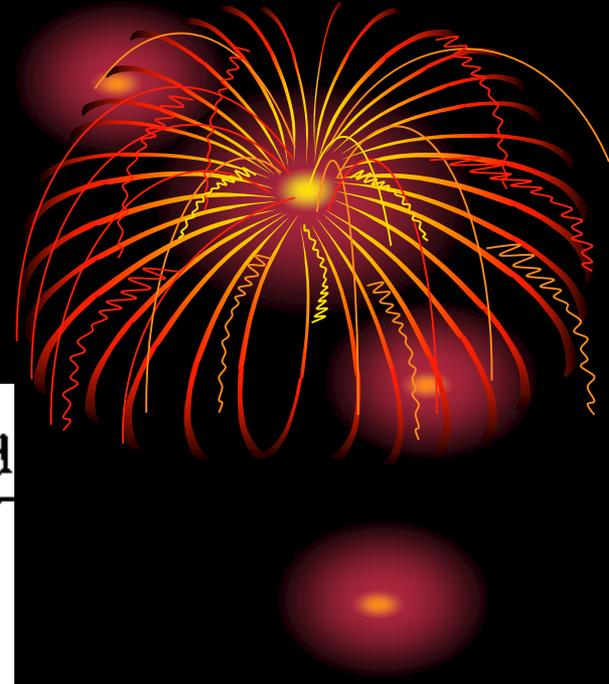


按《建筑基坑支护规程》 “大井法”计算

$$Q = \pi k \frac{(2H - s_d) s_d}{\ln\left(1 + \frac{R}{r_0}\right)}$$

因细中砂含黏性土薄夹层，概化后渗透系数取综合值**0.8m/s**。

计算得总涌水量**180m³/d**，每井平均涌水量**5.6 m³/d**，似符合一般经验。



实施



- 基坑降水运行情况与计算结果相差甚大，初期出水情况尚可，接着越抽越少，再后来所有井都不能正常出水，
- 一抽就干，一停有水，坑壁不断渗水，无法正常开挖作业，
- 只得采用垒砂袋、明排等措施，勉强完成基坑开挖。

讨论

计算假定与实际之间的差别

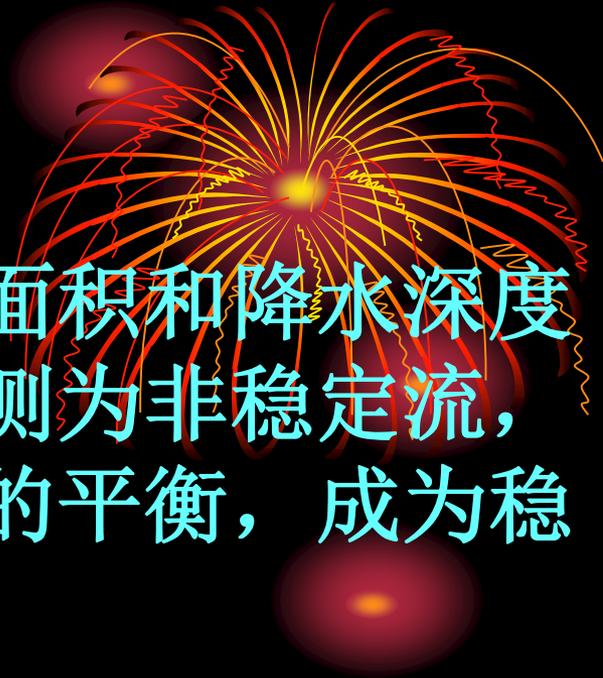


- “大井法”源于裘布衣公式，实际与假定基本符合时虽然粗糙，但可用；差别较大时，计算结果可能严重偏离实际。
- 裘布衣公式**1863**年导出至今**150**年，从稳定流到非稳定流，从解析法到数值法，认识水平有了很大提高，计算方法不断创新。
- 现仍用裘布衣理论，可能由于其简单明了，计算方便，基坑降水要求精度不高。
- 但必须充分理解实际条件与理论假设之间的差别，提高自觉性，避免陷入误区。



1 假定稳定流，实际可能非稳定流

- 补给和抽水平衡时，水位和水量才能稳定，抽水大于补给必继续疏干含水层，处于非稳定状态。
- 基坑抽水初始抽水量较大，以迅速将水位降至设计要求，疏干含水层，为非稳定流阶段；
- 随着基坑周边疏干范围扩大，水力坡度降低，流量渐渐减少，抽水量与补给量平衡时达到稳定，这是稳定流阶段。

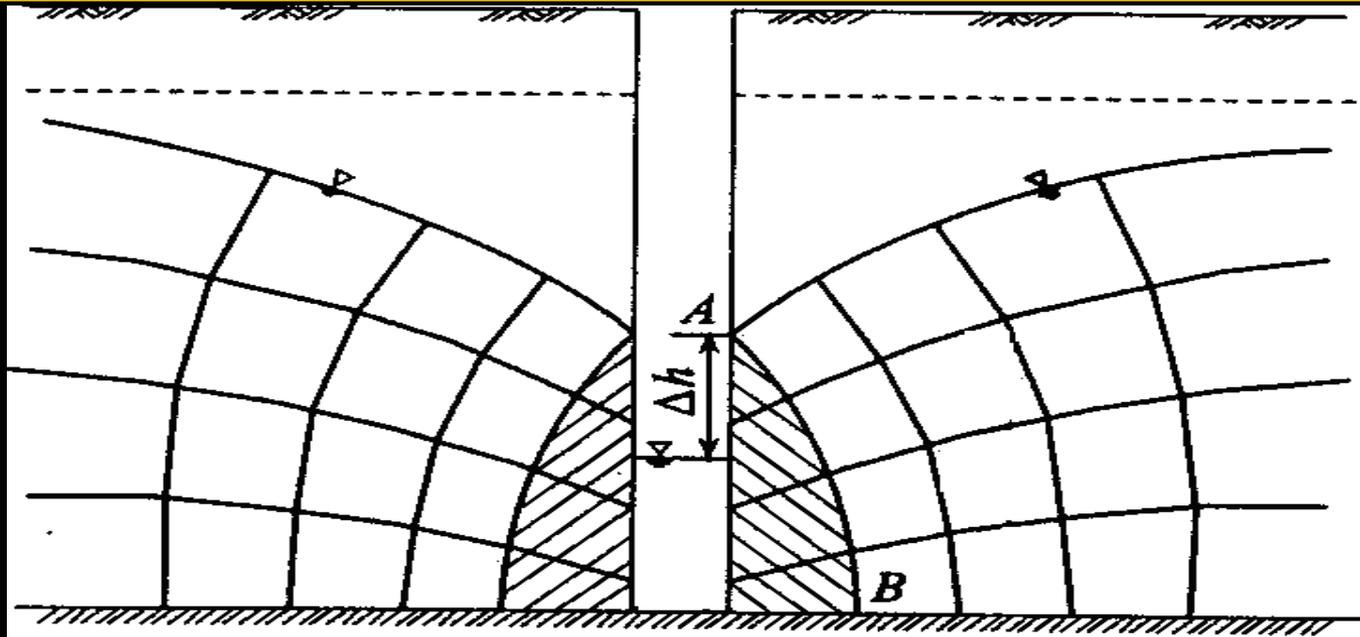
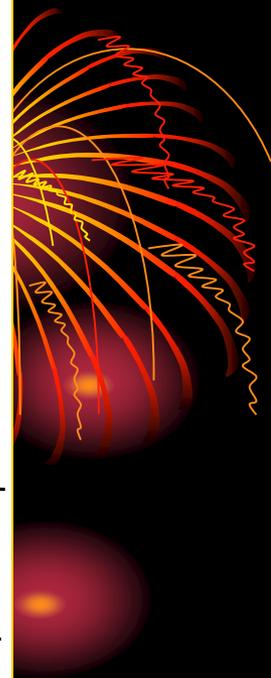
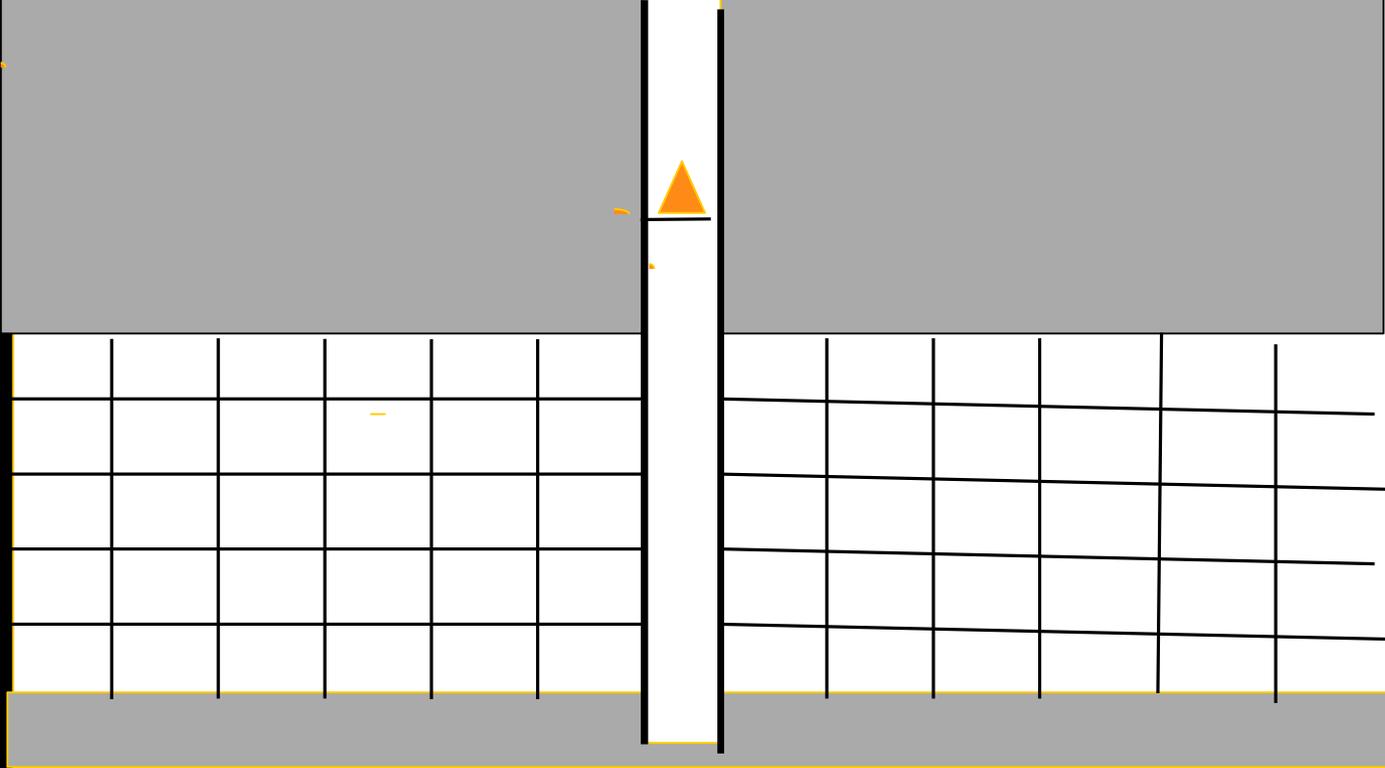


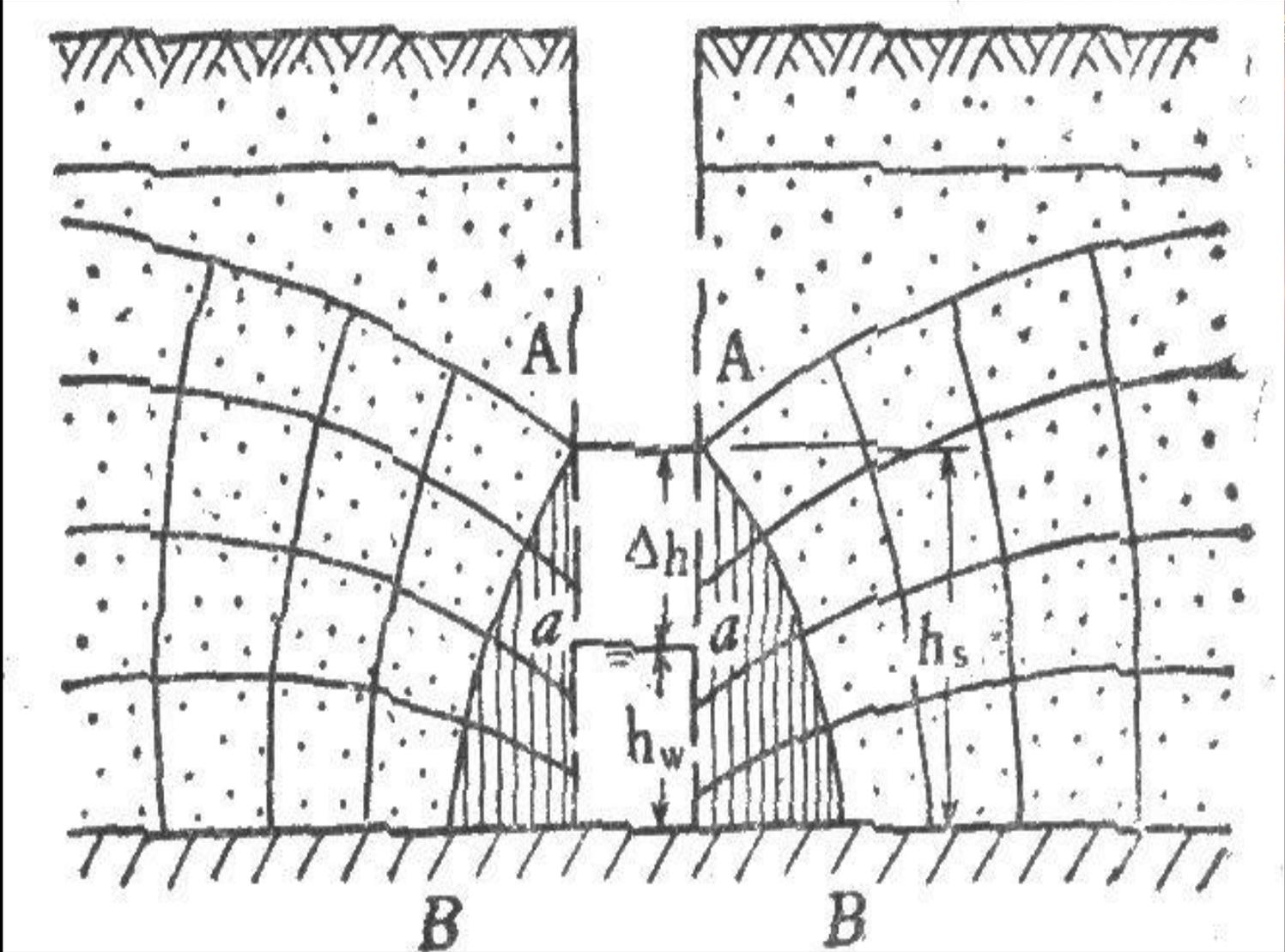
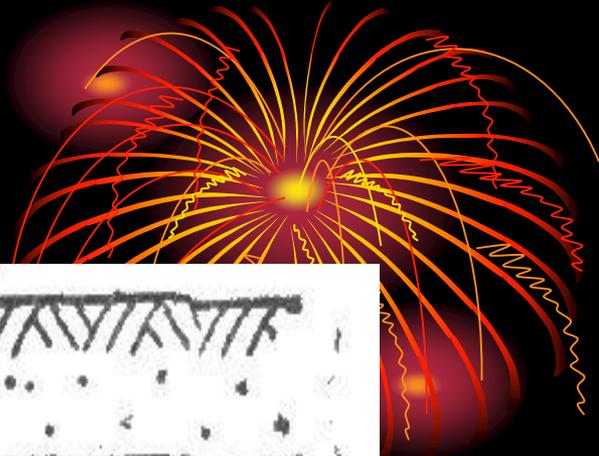
- 对富水性强，补给条件好，基坑面积和降水深度不大的工程，降水初期，基坑外侧为非稳定流，后期逐渐稳定，达到抽水与补给的平衡，成为稳定流；
- 对富水性弱，补给条件差，基坑面积和降水深度大的工程，可能直到工程结束仍为非稳定流。
- 基坑内侧处在封闭降水条件下，无补给，故自始至终都是非稳定流。
- 对前者，用稳定流计算可能有一定价值；
- 对后者，用稳定流计算意义不大。

2 假定潜水井降深不能过大， 实际一般为大降深



- 裘布衣假定，流入完整井中的水为径向轴对称流，忽略渗流矢量垂直分量。承压水流线水平，等势线垂直，符合假设，水力梯度为 ds/dx 。
- 潜水有弯曲的潜水面，流线弯曲，等势面不垂直，水力梯度为 ds/dl (l 为流线微分弧长)。裘布衣假定意味着令 $ds/dx=ds/dl$ ，即等势面垂直，等势面上不同深度的水力梯度均相等。
- 该假设只有在水力梯度小的条件下才成立，即降深与含水层厚度之比较小才基本符合实际。







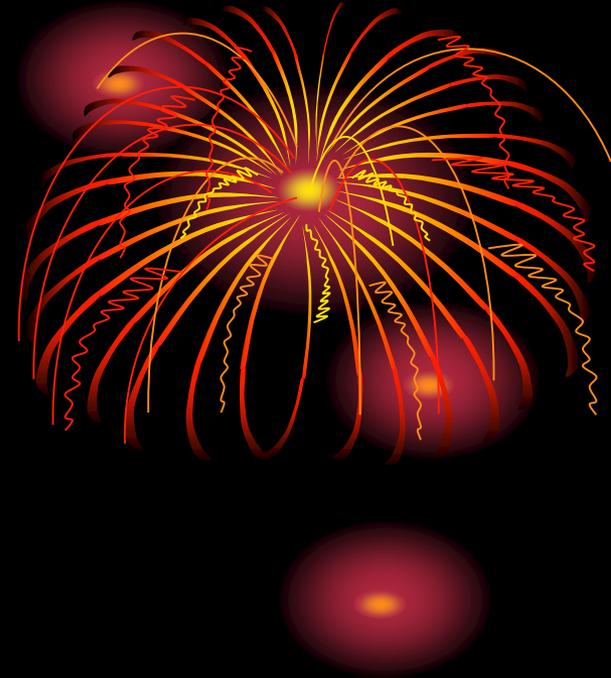
- 按裘布衣假定计算的水位低于实际自由水位，偏不安全。离抽水井越近，偏差越大。抽水井的降深越大，偏差越大。
- 基坑降水无法限制抽水井降深，如水位降到离潜水层底面很近时仍用裘布衣公式，无实际意义。本案例含水层厚度仅为**12.5m**，设计水位降深达**10.5m**，降水水位离含水层底板只剩**2.0m**，与裘布衣假定出入太大，计算结果肯定严重偏离实际。

3 影响半径问题



- 裘布衣影响半径、
- 经验公式计算影响半径、
- 抽水试验影响半径、
- 基坑降水影响半径、
- 实际上不是同一概念。
- 裘布衣影响半径——独立参数，虚拟的参数，
- 离抽水井 R 的圆周断面上存在一个常水头

影响半径经验公式



- 承压水奚哈德公式

$$R = 10s\sqrt{k}$$

- 潜水库萨金公式

$$R = 2s\sqrt{kh_0}$$

- 与 **s**、**k**、**h₀** 有关，非独立参数

- 潜水井裘布衣公式，**R** 为独立参数

$$h_0^2 - h_{10}^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{R}{r_{10}}$$

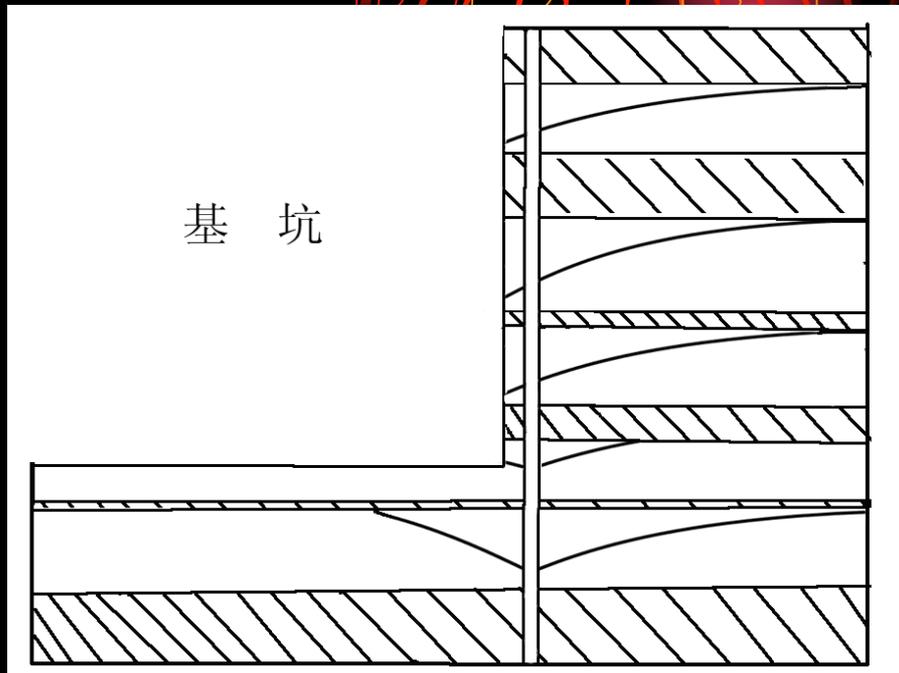
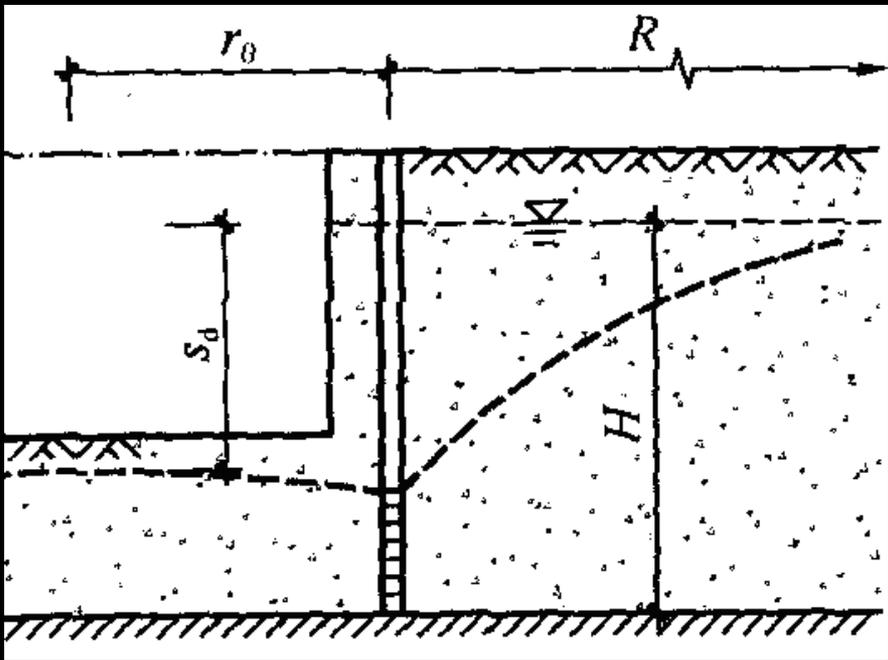
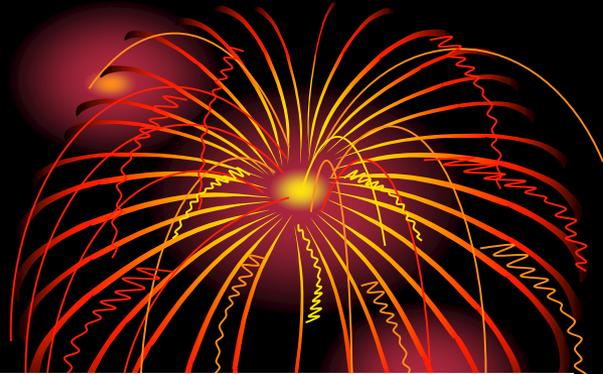


- 抽水试验影响半径——不仅与 s 、 k 、 h_0 有关，还与含水层分布，与补给类型和补给强度有关。
- 基坑降水“大井法”影响半径—— R 是“大井”的影响半径而非单井抽水的影响半径。
- 井群内侧作为“大井”，稳定时与井水位齐平，实际上随时间逐渐疏干的非稳定流过程。
- 用经验公式和抽水试验确定的影响半径作为裘布衣公式计算参数，存在逻辑矛盾。

4 弱透水层的阻隔和渗出面问题



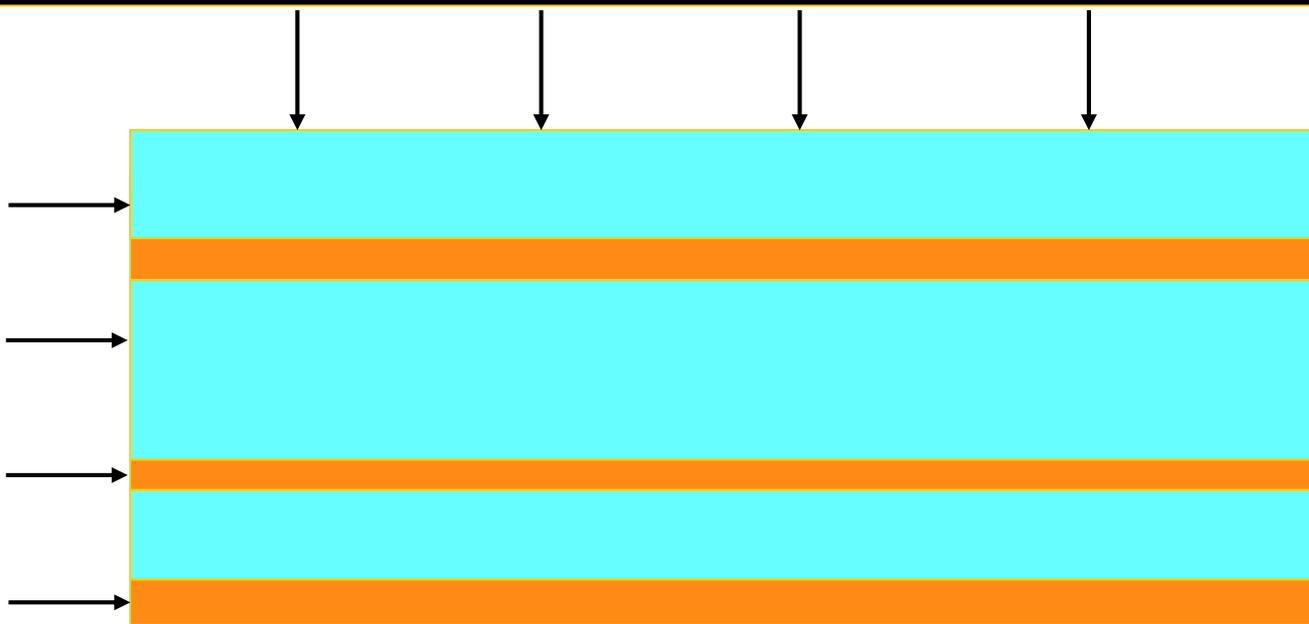
- 综合渗透系数问题
- 公式假定含水层均匀，实际夹弱透水层，计算时视为一大层，受弱透水层阻隔形不成降落漏斗，实际与计算严重背离。
- 水平流动渗透系数可加权平均，垂直不可。
- 相当于存在多层地下水，每一小层的水力坡度都很小，故流量也小，井内水位虽降得很深，但抽不出多少水来，而基坑侧壁依然渗水，造成降水失效。



水平渗透与垂直渗透的不同

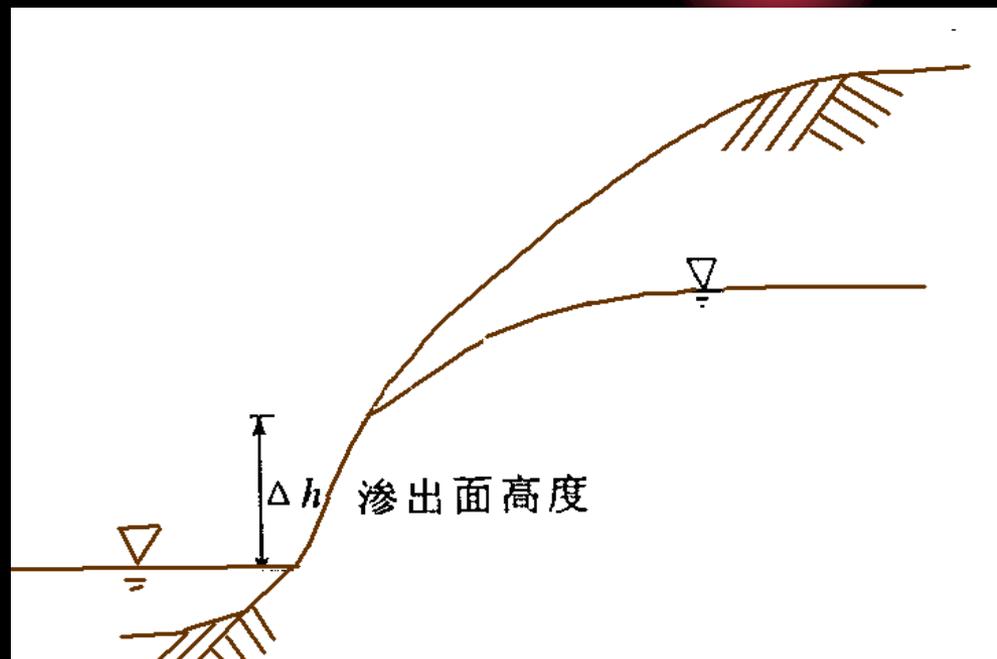
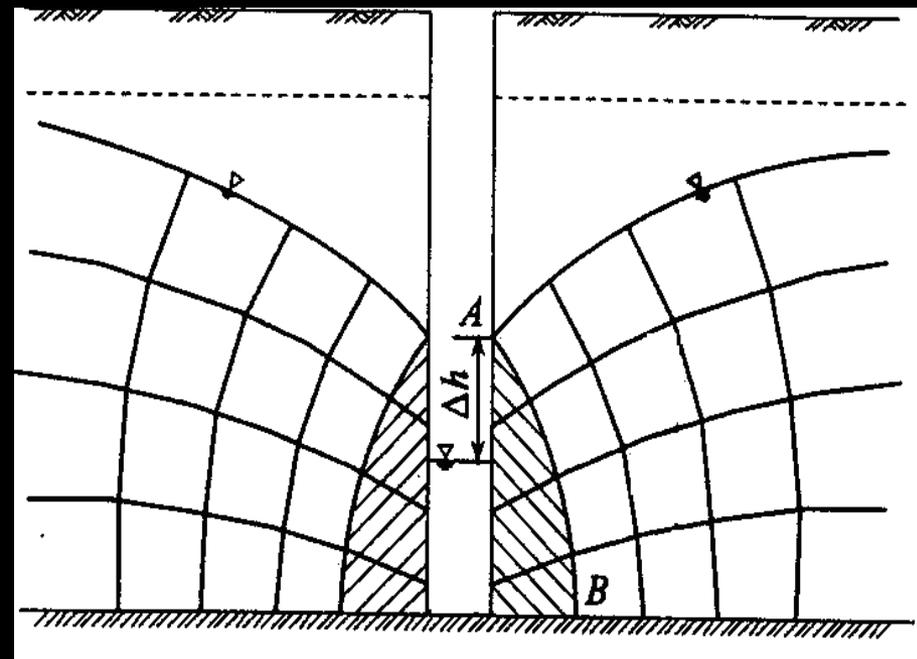


- 相当于并联和串联，
- 快车与慢车纵列前行，速度取决慢车。
- 必须重视隔水层对渗透竖向分量的影响

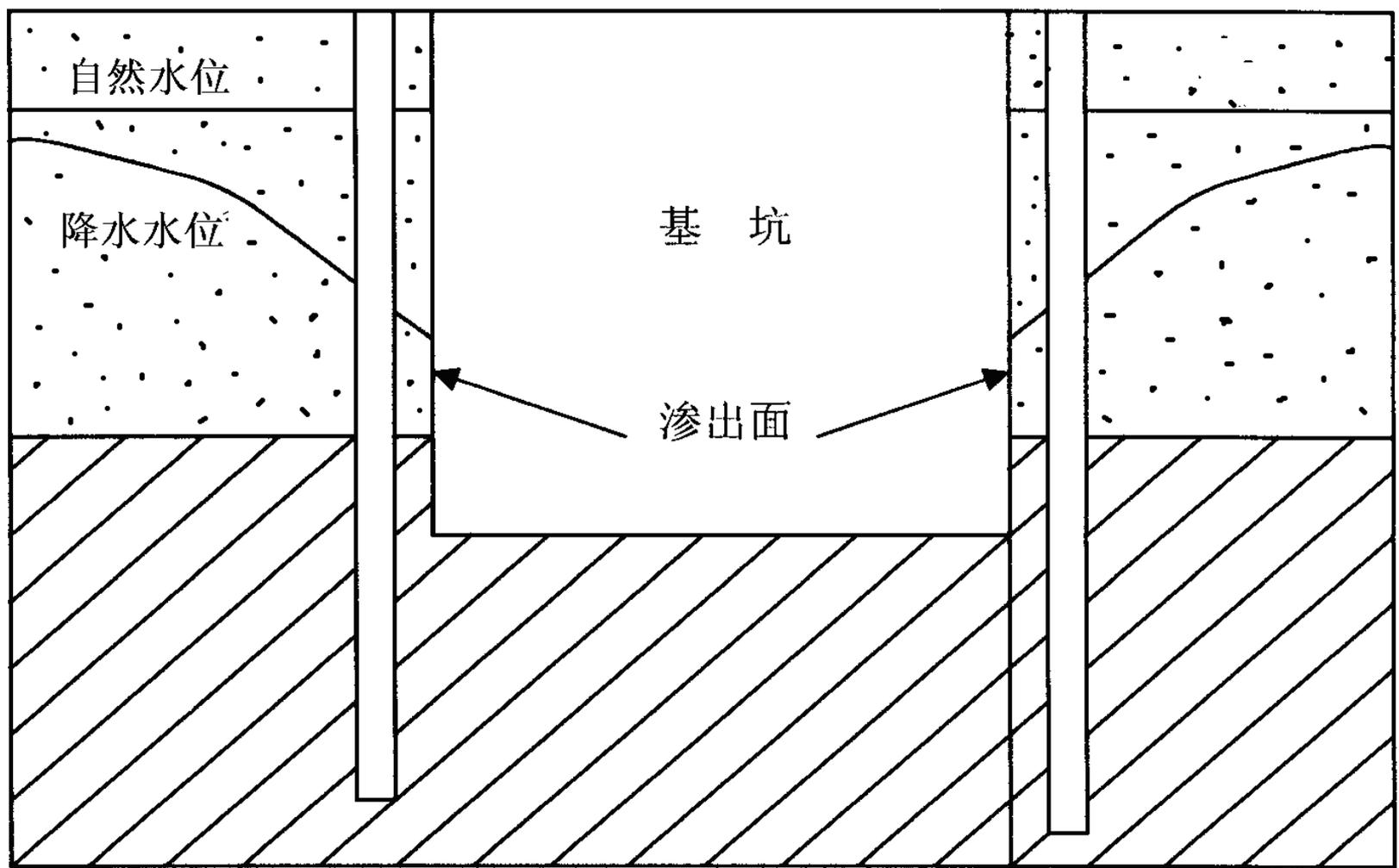


潜水渗出面

- 潜水计算两大难题：潜水面和渗出面(附录16)
- 渗出面与井阻损失不同



坑底或坑壁存在隔水层时的“疏不干”现象

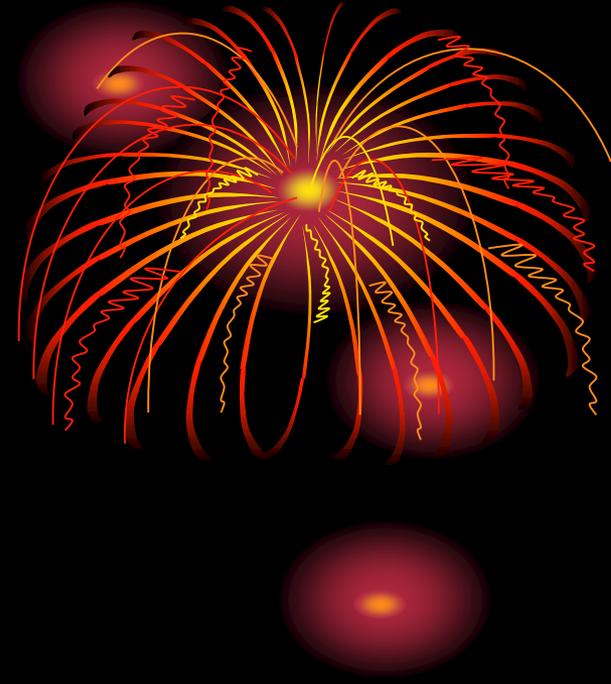


5 非稳定流理论和数值法



潜水比承压水复杂：

- (1) 导水系数是变数而不是常数；
 - (2) 既要考虑水平分量，还要考虑垂直分量；
 - (3) 弹性储存量很少，主要是与给水度有关的含水层疏干，不是瞬间完成，而是逐渐释放。
- 无解析解，只能数值模拟，基坑降水缺乏经验。
- 数值法前景广阔，但不能过分依赖，应正确把握模型，正确选定参数，处理好边界条件，力求接近实际而又符合基本原理，否则同样会导致严重失误。



• 5 地震液化

案例25 岸边地震液化和地震液化的基本经验

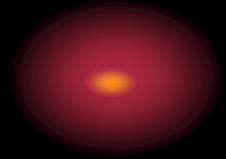
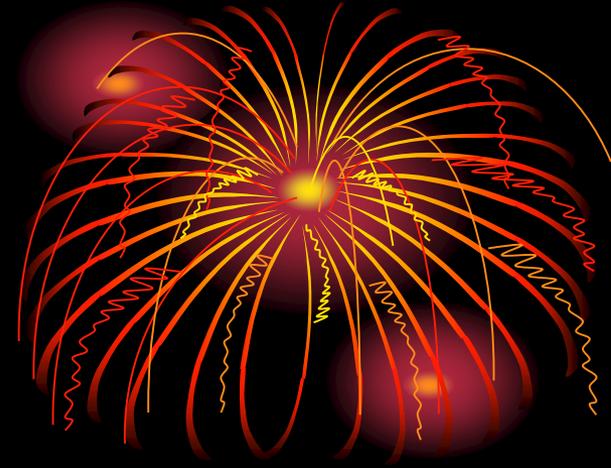


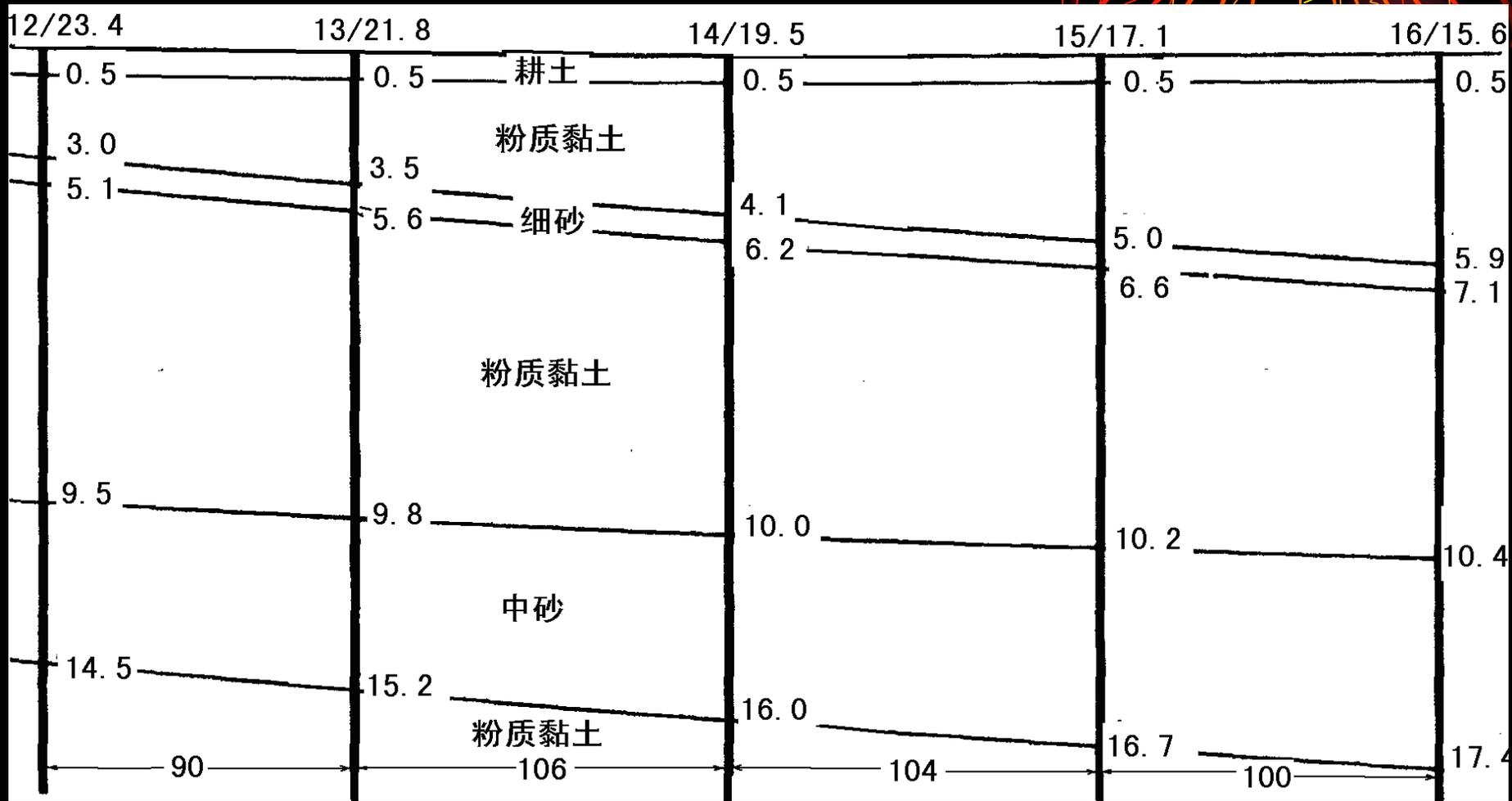
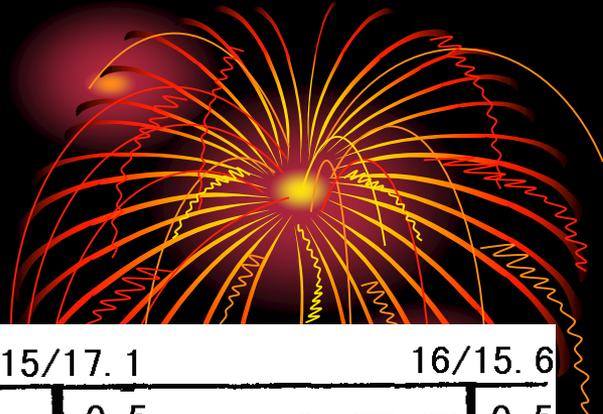
工程概况

- 6层砖混住宅区，无地下室。
- 场地：**400m×600m**，
- 位于一级阶地边缘，略向漫滩倾斜，坡度**2%**。
- 东侧为河漫滩，阶地高于河漫滩约**3m**。

地基概况

- 耕土：
- 粉质黏土：厚**2.5~5.4m**；
- 细砂： **$N=8\sim10$** ，**1.2~2.1m**；
- 粉质黏土：厚**3.3~4.4m**；
- 中砂： **$N=24\sim32$** ，厚**5.0~7.0m**；
- 粉质黏土：未揭穿。



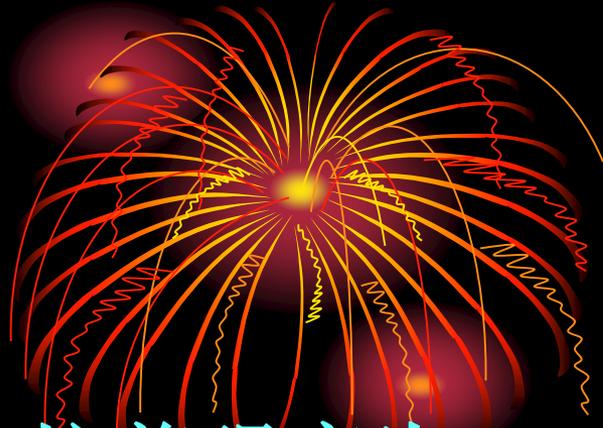


液化判别



- 按当时《工业与民用建筑抗震设计规范》判别
- 上层砂土可液化，下层砂土不液化。
- 上层砂土厚度小，液化轻微，不作地基处理。
- 可液化层虽很薄，但向河漫滩倾斜，
- 地震液化可能导致场地滑移，后果严重，
- 应地基处理，消除液化。

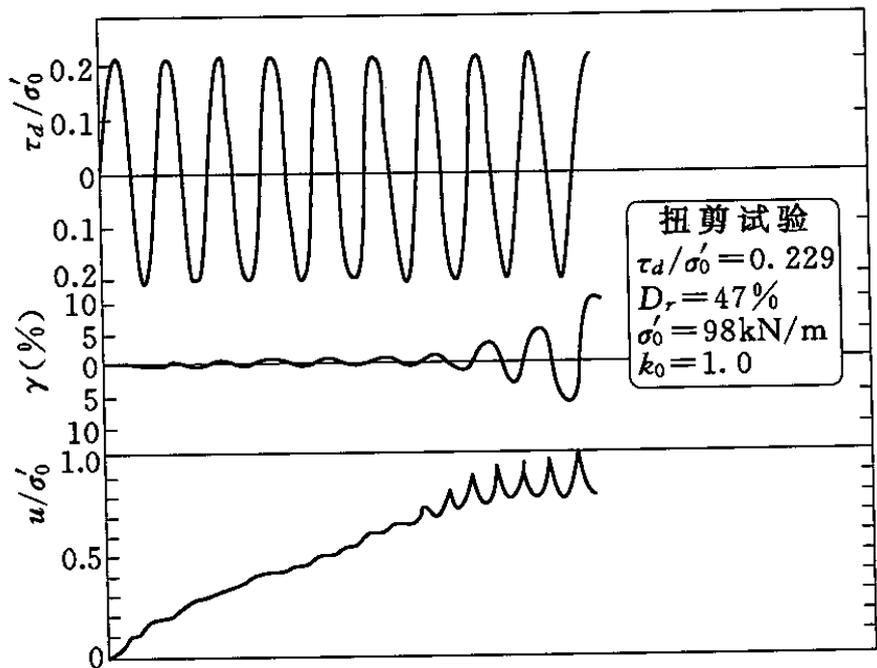
地震液化



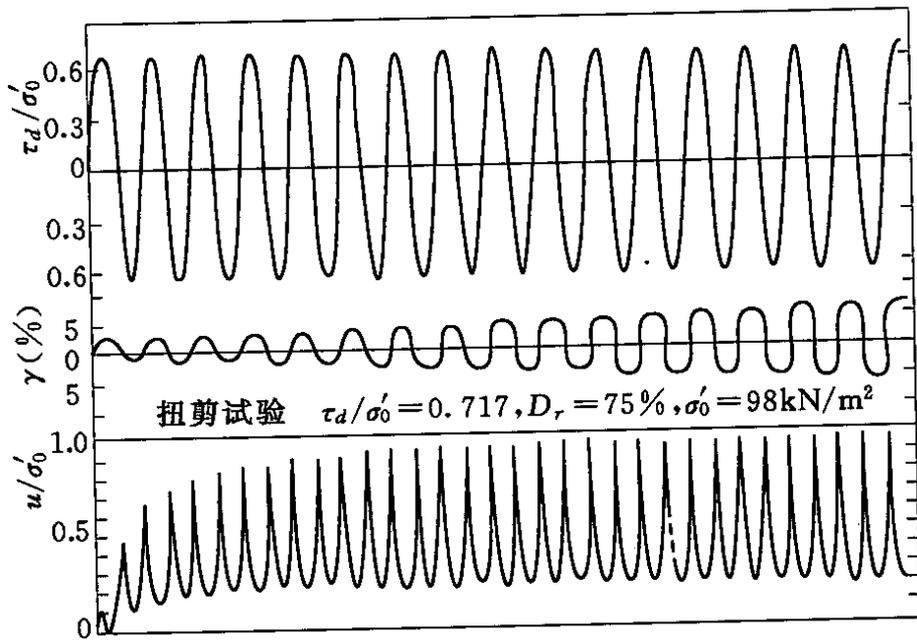
- 广义液化：按有效应力原理，土的抗剪强度为：

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' = c' + (\sigma - u) \tan \varphi'$$

- 饱和土在动力、静力或渗透作用下，由固体转为液体，抗剪强度丧失的现象。
- 松砂剪缩，孔压迅速上升，剪应变迅速增加而破坏；
- 密砂孔压和剪应变保持稳定变化，荷载相当高时强度仍不破坏。



(a) 松砂



(b) 密砂

规范液化判别方法的由来



- 开始时引进**Seed**简化法，
- 扰动砂样制成密度与原状土“相等”试样，动三轴仪液化试验，代入**Seed**公式，判断液化。
- 试验可重复性很差，试样失去原状结构，密度与原状土不能相等，还有仪器、动应力模拟、用于现场判别等问题。
- 作为研究手段不错；解决工程问题，不现实。
- 改用“概念加经验”方法。

概念：影响液化的主要因素



- 地震设防烈度、地震分组；
- 场地条件：土性(砂土、粉土及其密实度)、
上覆压力、水位。
- N 值表征密实度：松砂和密砂在循环荷载作用下
表现完全不同。
- 或用静力触探，不用动三轴试验。
- 深度表征上覆有效压力。

经验：现场调查测试 统计分析



- 分别在液化场地和非液化场地进行标贯试验
- (以喷水冒砂为标志),
- **1970**年通海地震、**1975**年海城地震、
- **1976**年唐山地震等,
- 将试验成果用两组判别统计分析
- (“液化组”和“非液化组”),
- 多次调整修改后得到现行规范的判别方法

判别方法的局限性



- 不确定因素多，随机性强，只大致判断。
- 液化与非液化交叉，液化组与非液化组均有不成功子样。判别成功率**90%**，并非可靠性**90%**。
- 地震烈度、地震分组、地震历时的不确定性；
- 只考虑黏粒含量，粗、中、细、粉砂一律对待；
- 液化后密实度不能真正代表液化前密实度。
- 参与统计子样代表性有限，将局部地区经验推广到全国，可靠性不会太高，

方法的简捷和实用



- 花了很多专家和科技人员的心血：
- 寻找既科学又简便的判别方法，
- 现场原位测试，大量计算分析。
- 理论虽不完善，但简便、实用，
- 可靠性优于基于动三轴试验的**Seed**法。
- 了解其中问题，才能自觉应用。
- 理性认识深刻，解决问题简捷。
- 认识问题是大道理，要懂；
- 解决问题是硬道理，要做。

平原液化



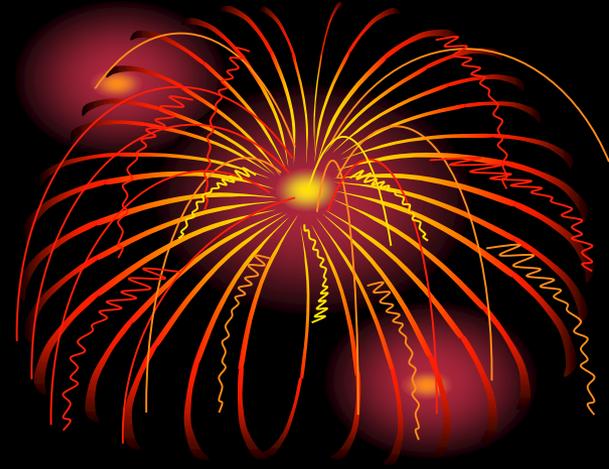
- 平原液化地基失效与喷水冒砂有关。
- 喷水冒砂流失，地面严重变形，无法计算。
- 振动使松砂趋密产生超静水压力，超静压消散喷水冒砂实质是渗透破坏，使土变松。
- 喷水使土极不均匀，模型试验喷水前“水夹层”
- 唐山三次试验：震后**2**个月深部砂土变密，浅部变松；震后**11**个月浅部恢复。
- 密实度和强度变化复杂，前期振动液化增密，
- 后期渗流液化变松，固结恢复有较长时间过程。

岸边液化



- 斜坡岸边液化失稳与侧向扩展或滑移有关，
- 后果比喷水冒砂更严重。
- 液化层很薄，也发生严重后果。
- 《建筑抗震设计规范》液化指数计算和液化程度判别，其实只适用于喷水冒砂。
- 侧向扩展实例：天津毛条厂。
- 临近河岸，柱向河岸侧移，房顶垮塌。

《建筑抗震设计规范》



- **4.3.16**

- 在故河道以及临近河岸、海岸和边坡等有液化侧向扩展或流滑可能的地段内不宜修建永久性建筑，否则应进行抗滑动验算、采取防土体滑动措施或结构抗裂措施。

唐山地震、阪神淡路地震



唐山液化滑移张裂



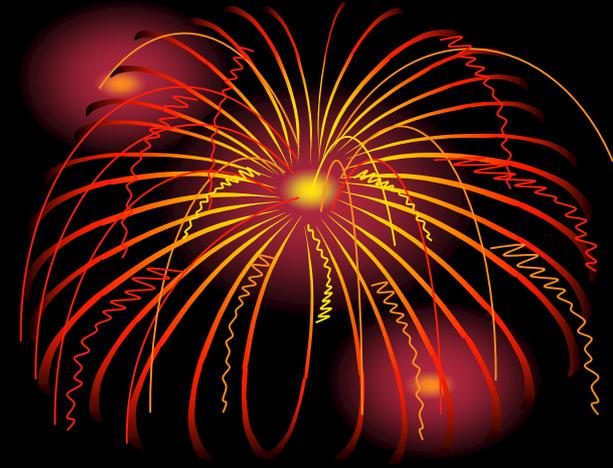
唐山地震不同自振周期的表现



怎样对待规范？

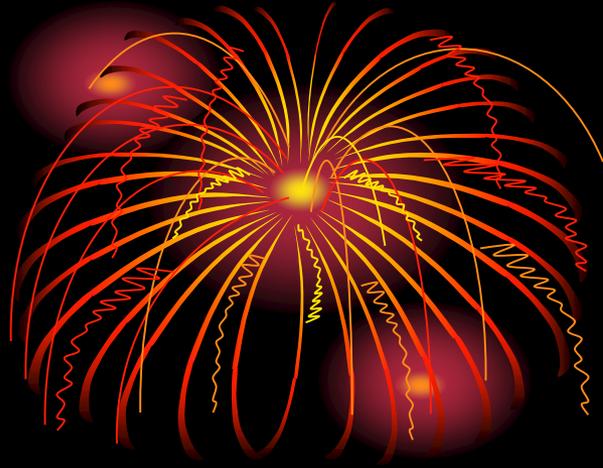


- 规范要遵守，但不能盲目，基本概念和基本经验不能忘记。
- 规范的权威性；规范的作用；规范局限性：
- **1** 规范只规定量大面广普遍性问题，不能包含一切特殊问题。
- **2** 规范只规定成熟被公认的经验，争议尚无定论的问题先放一放，继续探索和积累。
- 神圣化、绝对化，盲目、迷信，有害。
- 在理解科学原理和基本经验的基础上执行。



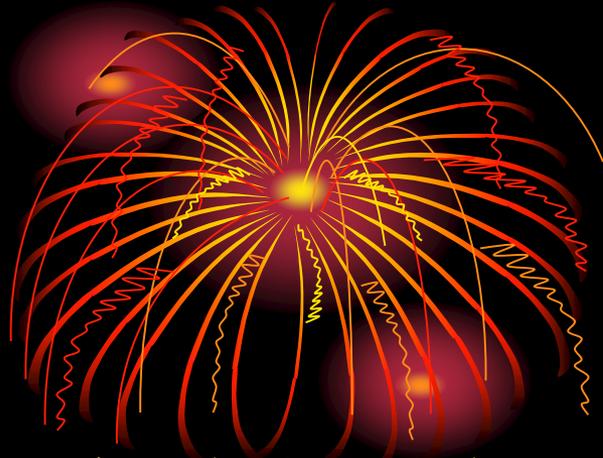
6 岩溶探测和治理





- **案例29** 长昆客专怀化南站
岩溶的综合探测技术

地质和工程概况



- 长沙至昆明高铁 怀化南站
- 第四系杂填土、粉质黏土、黏土，含砾砂，厚一般**10~20m**。
- 基岩为白云质灰岩，中厚-厚层，节理裂隙较发育，岩溶强烈发育，全场分布。
- 岩溶水连通性好，孔隙潜水和地表水下渗补给。
- 填方可能岩溶塌陷。采用低桩板和桥结构，将荷载通过钻孔桩直接作用在完整岩体上，一柱一桩，最大桩长**84.0m**

地质和工程概况



溶洞埋深**3.7~79.0m**，洞高**0.2~24.30m**，
多无充填。

钻孔遇洞率**70.9%**，线溶率**0.36%~48.57%**。

地下水位多高于可溶岩顶板。

溶洞大小、深浅和分布极不规律，

单纯钻探无法查明。

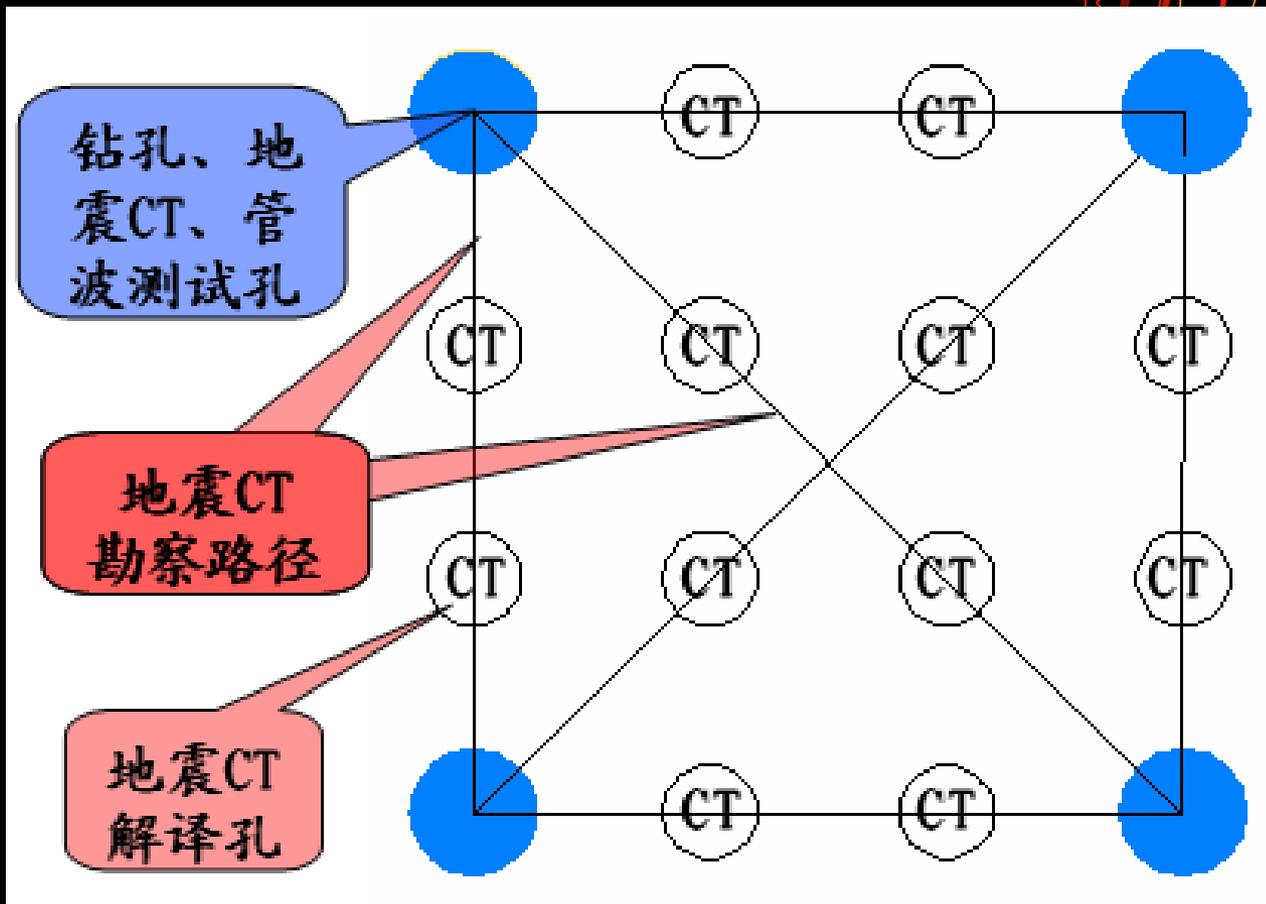
结合钻探，采用地震波**CT**和管波技术，

解决了难题。

探测方法



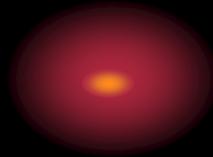
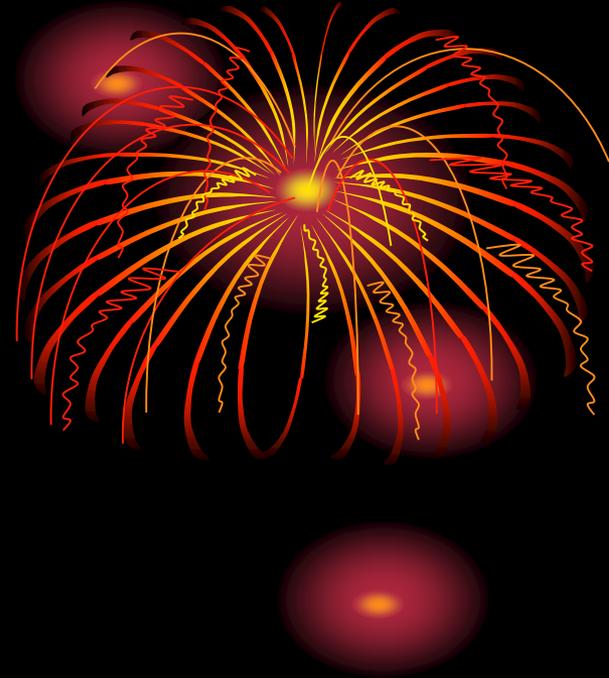
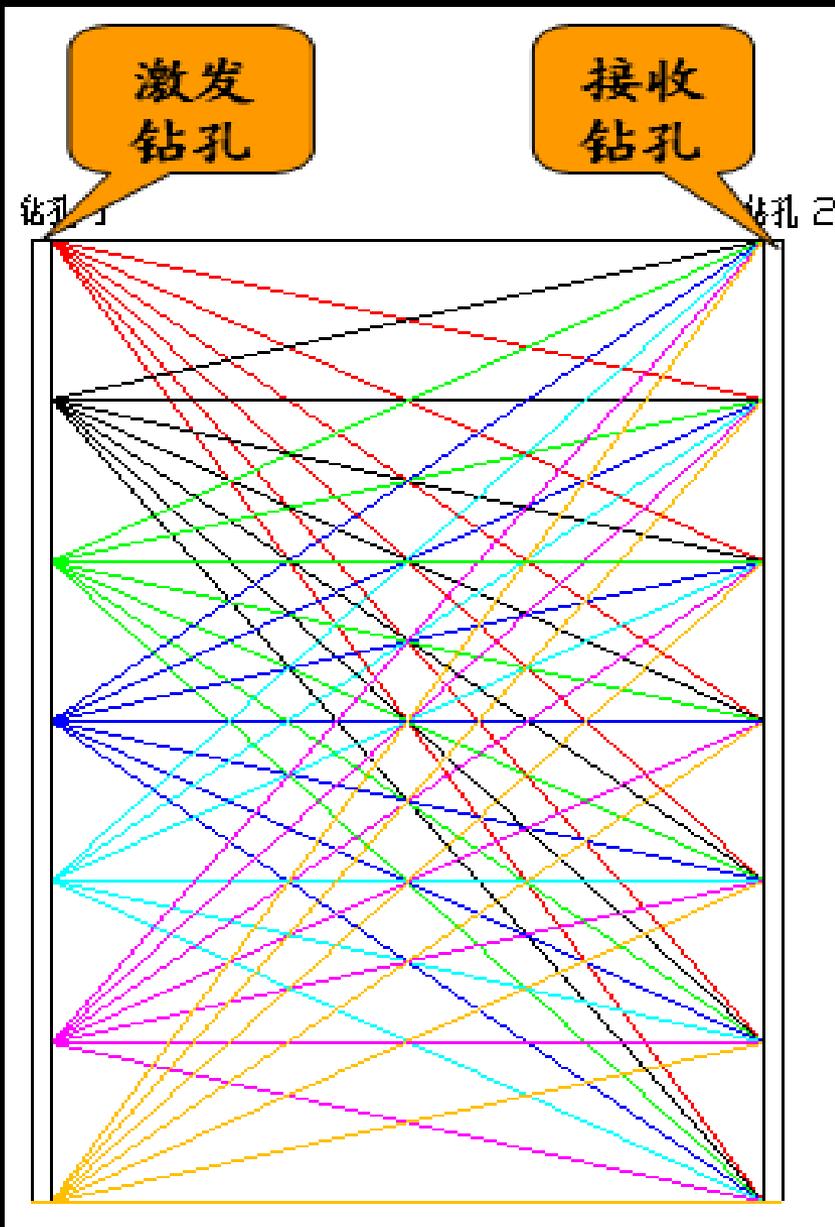
- 例如：一个桥墩**16**根桩 为一组，
- 纵向桩间距**6.0m**，横向桩间距**5.5m**，
- **4**钻孔，取芯鉴定；兼管波探测；兼地震**CT**激发孔和接收孔，相邻孔间孔透。
- 地震**CT**最大孔透距离**24.4m**，最小**16.5m**。
- 发现孔底溶洞依然发育时加深，以最深溶洞底板下**10~15m**控制，确保孔底完整基岩。



地震波CT



- 利用射线走时重构岩土波速分布，
- 坚硬完整岩体波速高，裂隙、溶蚀、空洞低速异常。波速差异是探测的物理基础。
- 一发多收扇形系统，组成密集交叉射线网络。
- 激发深度间隔**1.0m**，接收深度间隔**0.5m**，
- 反演形成被测区域波形图像，划分岩体性质，
- 确定溶洞、溶蚀、裂隙发育带等的分布。



管波技术

- 液体与固体相邻，液体振动在界面附近产生沿界面传播的界面波，称广义瑞利波。孔内称管波。
- 管波在孔壁外一定范围内沿钻孔轴向传播，除在孔径变化、孔底和孔液表面产生反射外，在管波有效探测范围内任何波阻抗变化都会产生反射。
- 波阻抗变化必是孔侧存在不良地质体(溶洞、溶蚀、软层、风化带、裂隙发育带等)。
- 管波能量强、衰减慢，很容易识别。
- 有效探测半径**2.0m**，分辨力**0.3m**，竖向探测精度非常高。



优势互补



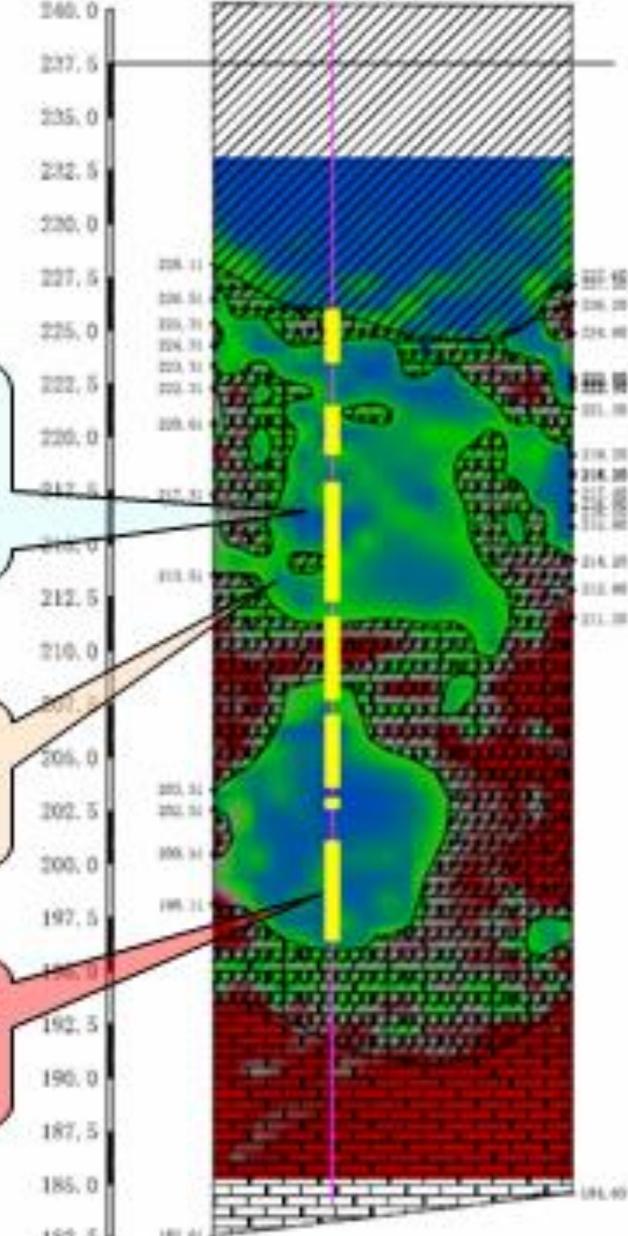
- **钻探**：直接勘探手段；但孔径不足一百毫米，“一孔之见”，不能查明洞隙分布和形态。
- **地震波CT**：提供大量孔间信息，全面；
但某些条件不易正确解释。
- **管波**：范围不大；但精度很高，弥补钻孔和地震波CT不足，直径**2m**对桩基很有价值。
- 三种方法优势互补，达到有效查明桩基相关地段隐伏洞隙目的。

验证孔

10-ZD-30073

10-ZD-30074

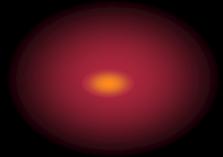
高程 (m) 240.31 240.20



地震CT
确定
岩溶

地震CT
确定溶蚀

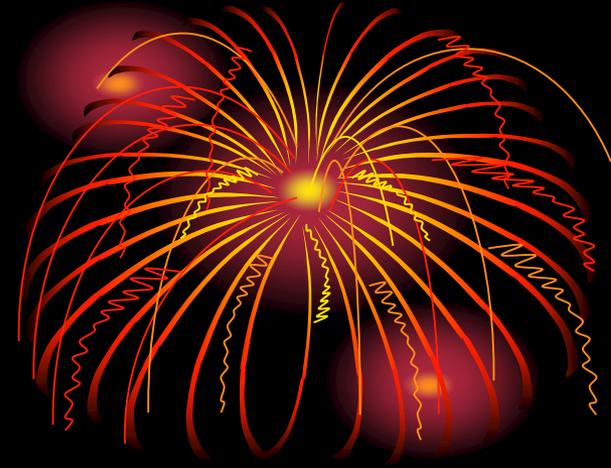
钻探揭
示溶洞



对工程物探的期待



- 物探不仅可在勘察前期提供线索，还可在施工图设计和施工阶段发挥不可或缺作用，
- 能发现桩基相关部位大于**0.5m**的洞隙，还能检验钻孔的真实性！
- 物探可为工程建设做更大贡献，可成为勘察工作的主力军，
- 为工程物探的发展和科技进步增强了信心。



- 鬼斧神工千百态，凿成陷阱工程裁。
- 钻探管波加**CT**，勾出洞隙免受灾。



- **案例27 唐山市体育中心**
- **岩溶塌陷治理**

唐山市体育中心岩溶塌陷概况

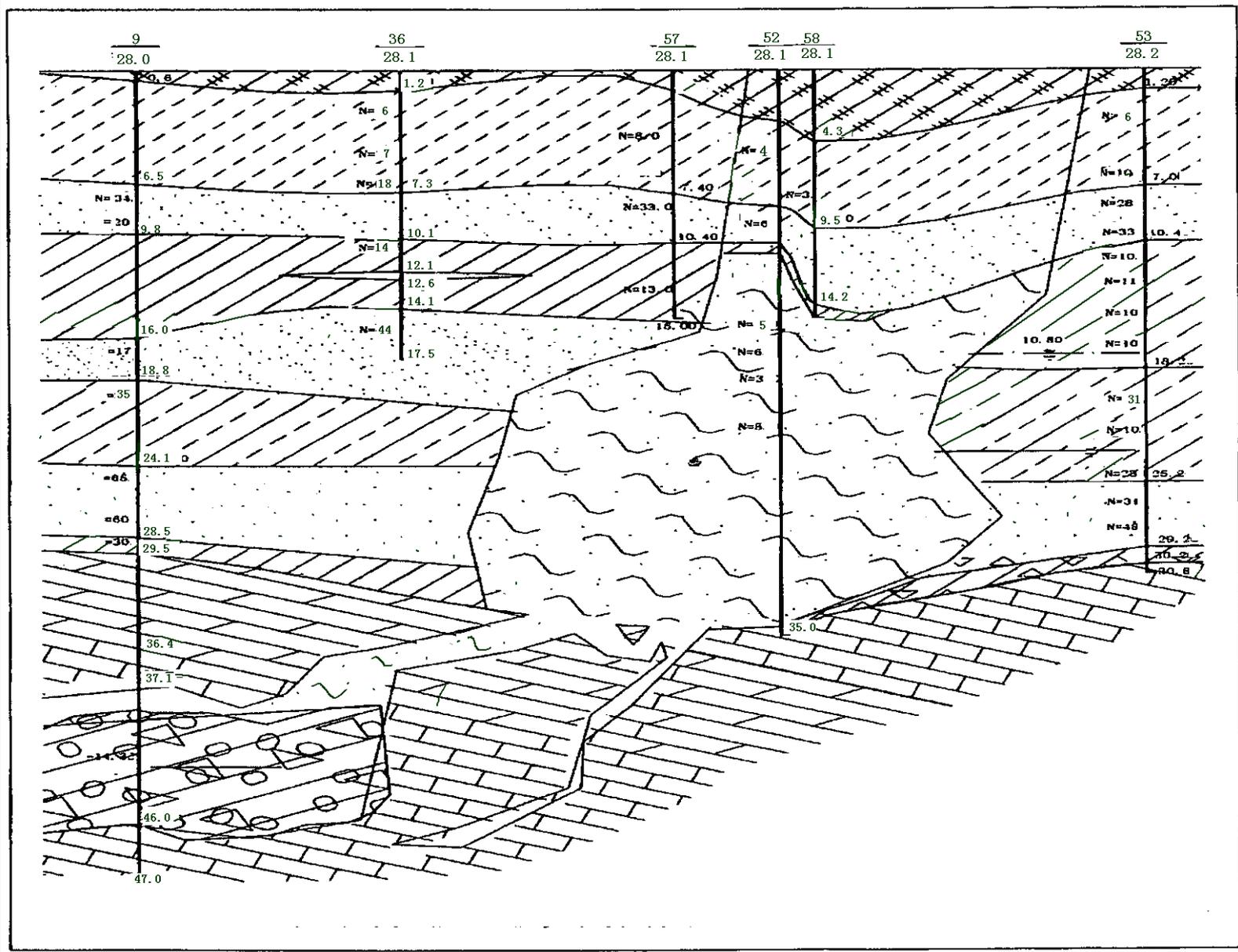
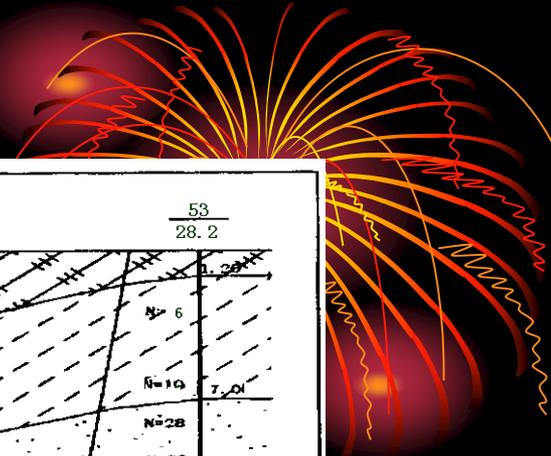


- **1988年6月6日**，第二田径训练馆地面塌陷，深**6.5m**，面积约**35m²**。碎石填满。
- **6月15日**再塌陷，两混凝土柱陷入，房顶坍塌，同时主席台西北角地面沉陷，**2001年4月**最大沉陷达**47cm**，面积**496m²**，成危险建筑。
- **1991年**始，多次勘察，未进行治理勘察设计。为迎接**2001年9月18日**全国陶瓷博览会，市政府决定对岩溶塌陷彻底勘察和治理。

塌陷松动带



- 塌陷范围土体被潜蚀、破坏，形成松动带，
- 强度明显降低，
- 标贯锤击数显著低于正常值。
- 明丰房地产公司场地标贯试验**14**次，锤击数最大仅**6**击，有的测不出锤击数；
- 正常地层黏性土最低**6**击，砂土最低**25**击。
- 瑞雷波易发现土洞和松动带，波速显著降低。



地层和地质条件



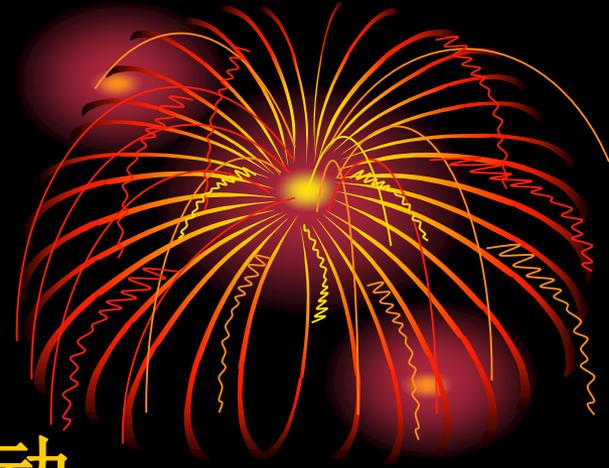
- 第四系厚约**22~ 44m**，黏性土和砂土互层。
- 基岩为寒武系泥灰岩和灰岩，青白口系页岩和砂岩，灰岩中岩溶发育。
- 岩溶发育受断裂带控制。
- 岩溶裂隙水与孔隙水间有粉质粘土和棕褐色残积黏土相隔，但分布并连续，形成“天窗”，为土洞和塌陷形成创造条件。

水文地质条件



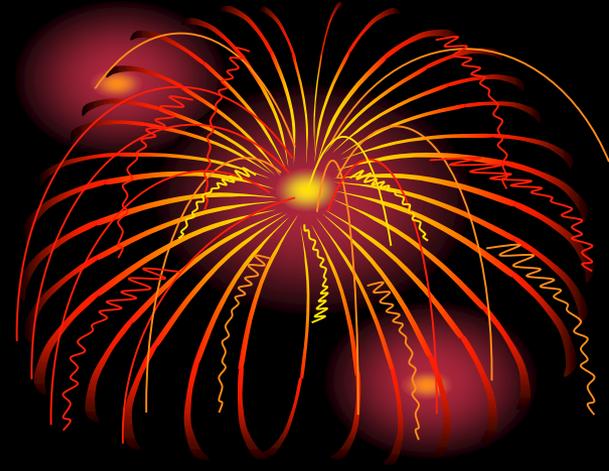
- 第一含水层(细砂), 已基本疏干, 水量很小。
- 第二含水层(细砂), 局部疏干, 水位较稳定。
- 第三含水层(中粗砂), 局部疏干, 不连续。
- 裂隙岩溶水含水组, 因开采, 埋深远低于第四系孔隙水。总体流向由西北向东南, 受天窗汇流影响, 局部与基岩水流向相反。
- 形成多层漏斗, 孔隙水与裂隙岩溶水既各自独立, 又有一定水力联系。

岩溶塌陷发育条件



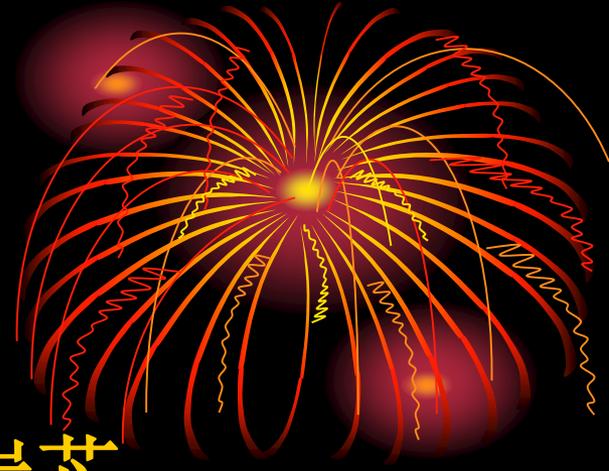
- **1 潜蚀：** 孔隙水向岩溶水竖向流动；
- **2 真空吸蚀：** 地下水位在基岩面附近波动；
- **3 岩溶通道：** 提供水流带走泥砂的出路；
- **4 水动力条件：** 开采岩溶水，水位急剧下降。

治理措施 三段式

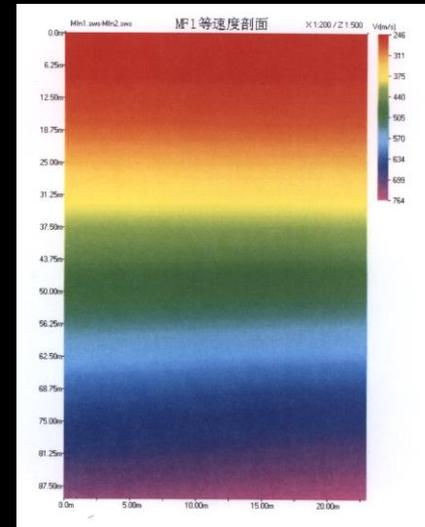
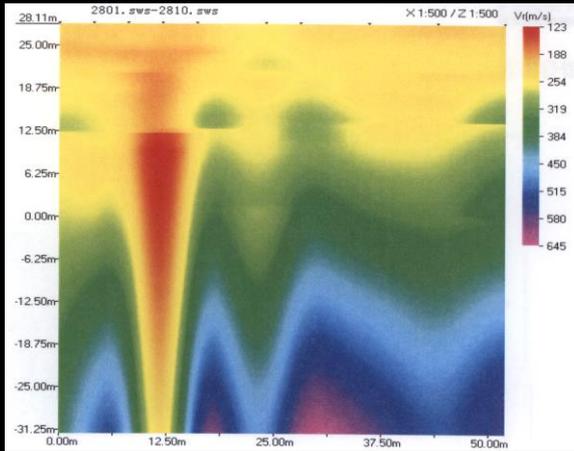
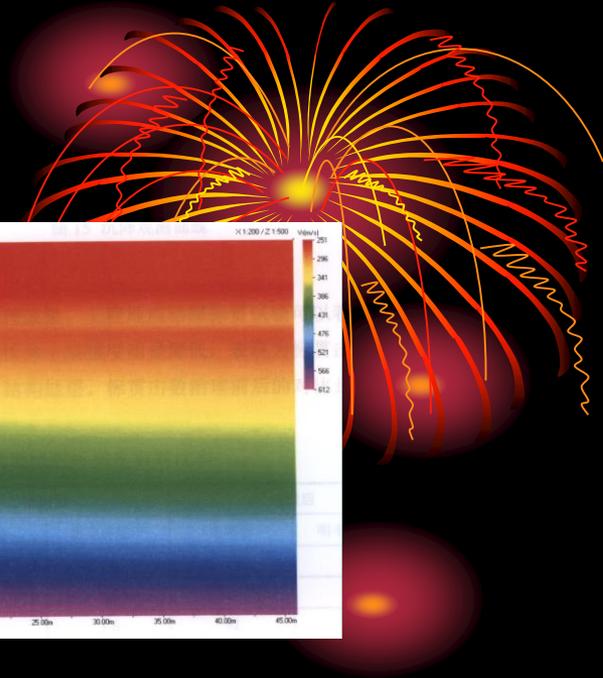
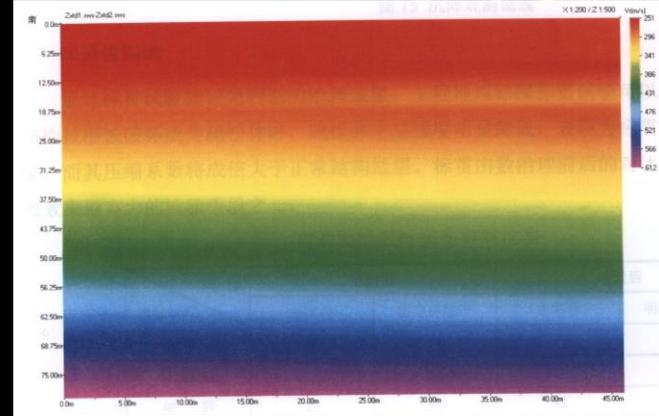
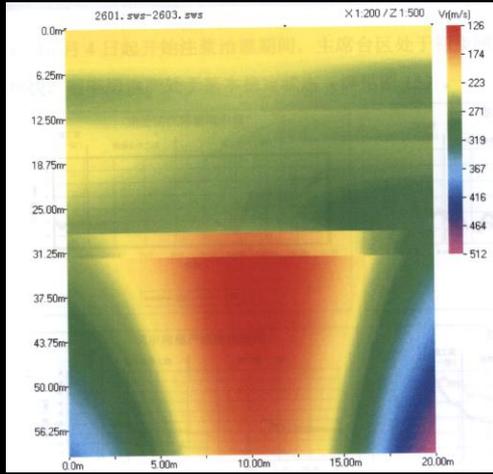


- 上段：充填加固土洞和松动带，
旋喷与高压注浆；
- 中段：封堵残积红土缺失的“天窗”，
旋喷与高压注浆；
- 下段：充填溶洞通道，截断岩溶水流动，
充填骨料，注浆。
-
- 标本兼治。

治理效果检验



- 钻探取样：取出水泥结石体岩芯；
- 瑞雷波法、地震波**CT**：波速增**2~3**倍，
- 由杂乱变水平；
- 沉降观测：由下降至稳定；
- 原位测试：松动带**N**值显著提高；
- 水位观测：不再存在漏斗、平行断层的等水位线。



7 结束语

- 把握概念

- 综合判断



本书涉及概念性问题举例



- 地下水方面：
- 动态与均衡、渗出面、渗透破坏、稳定流与非稳定流、水动力弥散；
- 岩石地基方面：
- 岩石强度准则、结构面、岩石地基承载力；
- 地质作用与地震：
- 断层活动性、潜蚀和真空吸蚀、地震反应、侧向扩展和液化滑移；
- 其他：基坑隆起、渐进式破坏、盐胀性。

概念



- 概念是客观规律的科学概括，不是局部的经验，不是未经检验的理论假设。
- 概念是本质，概念是理性，概念有深刻的内涵，放之四海而皆准。
- 概念需在不断实践中逐步认识，掌握基本概念是岩土工程师必备素质，是贯彻岩土工程科学性的集中表现。



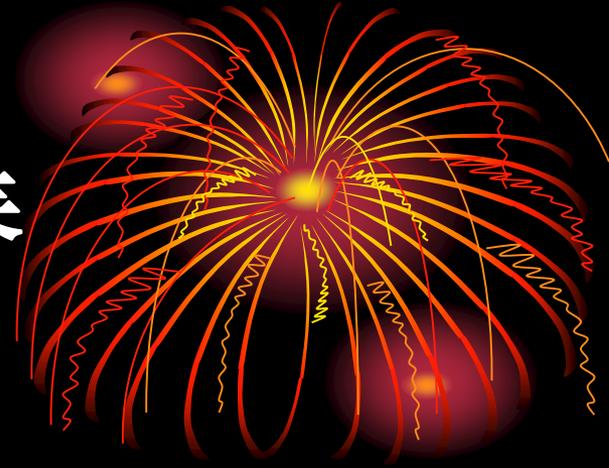
- 表面的、片面的、非理性的经验，只见现象，不见本质，停留在初级的感性认识阶段。
- 凭直观的局部经验处理问题，
容易犯原则性错误。
- 在理论指导下总结的经验，是全面的、系统的，达到了高级的理性认识阶段，能透过现象，看到本质，举一反三。
- 只有植根于理性的经验才有生命力。

综合判断

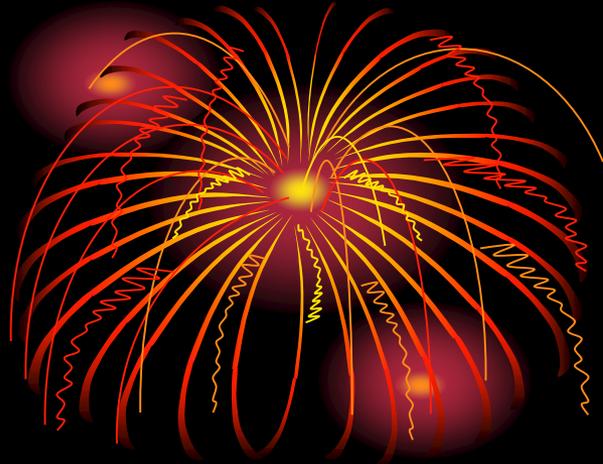


- 岩土工程远不如结构工程严密、完善和成熟，
- 充满条件的不确知性、参数的不确定性和信息的不完善性。
- 计算与实测总有差别，影响因素多而复杂，只能通过分析、归纳、综合，作出判断。
- 地基承载力、地基基础和基坑设计、边坡稳定、事故调查等一切疑难问题均需综合判断。
- 综合判断是衡量岩土工程师水平的主要标志。要多谋善断，有很强的分析能力、概括能力、入木三分的洞察力，
- 为锻炼这方面的能力要下一辈子功夫。

岩土工程师素质的培养



- 熟悉基本概念，善于综合分析；
- 工程师是理论与实践结合的职业群体；
- 知之者不如好之者，好之者不如乐之者；
- 工程师素质是岩土工程强国的标志。



● 谢谢各位!