

《边坡工程》课程

Slope Engineering

边坡工程的原理与方法

主 讲 人：蔡静森 副教授

电 话：15871769482

Email: jingsencai@cug.edu.cn

中国地质大学（武汉）工程学院

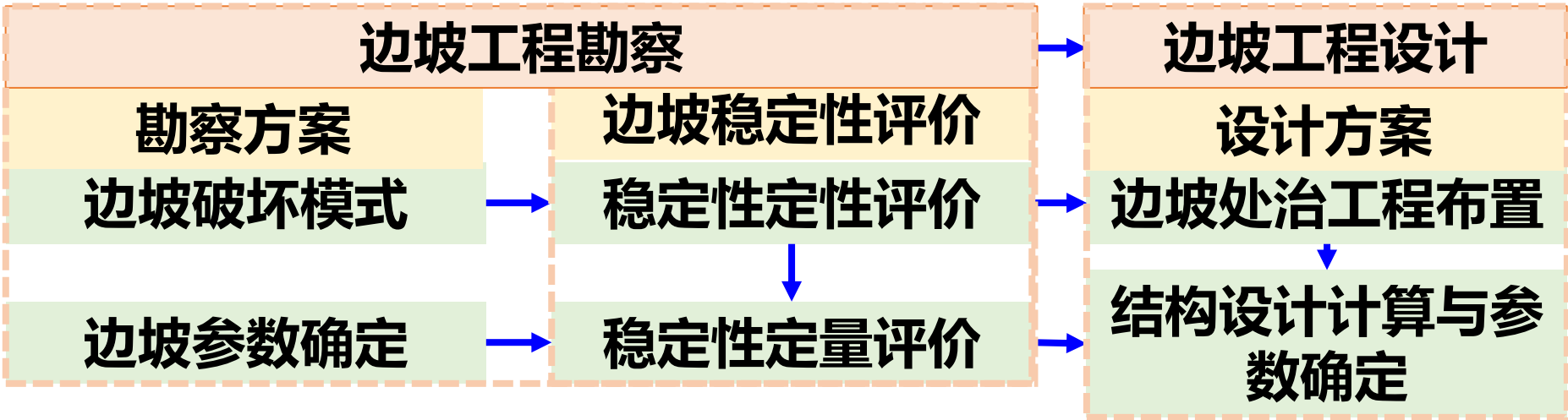


图 边坡工程的主要工作内容

本节课教学内容

2. 1. 边坡工程的主要工作内容

2. 2. 基础资料获取

2. 3. 边坡分析与评价

2. 4. 边坡工程设计基本原则

2. 5. 边坡工程处治的常用措施

2. 1. 边坡工程的主要工作内容

2. 2. 基础资料获取

2. 3. 边坡分析与评价

2. 4. 边坡工程设计基本原则

2. 5. 边坡工程处治的常用措施

2. 1. 边坡工程的主要工作内容

资料获取 与整理

- 资料收集
- 边坡工程勘查
- 概化边坡模型

边坡分析 与评价

- 影响因素分析
- 机理分析
- （稳定性）评价

边坡工程 设计

- 荷载效应分析
- 方案比选
- 结构与验算
- 信息化设计与监测工程

本节课教学内容

2. 1. 边坡工程的主要工作内容

2. 2. 资料获取与整理

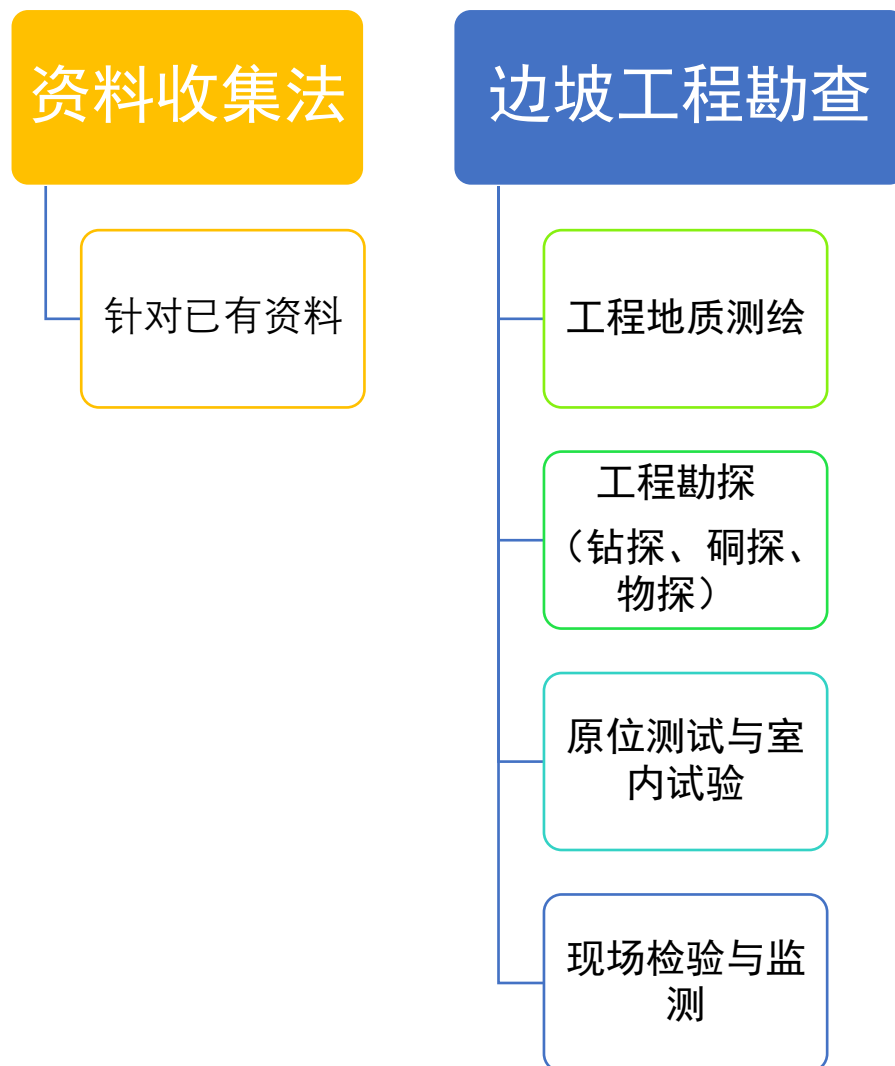
2. 3. 边坡分析与评价

2. 4. 边坡工程设计基本原则

2. 5. 边坡工程处治的常用措施

2. 2. 资料获取与整理

2. 2. 1. 获取资料的途径



2. 2. 资料获取与整理

2. 2. 2. 资料种类

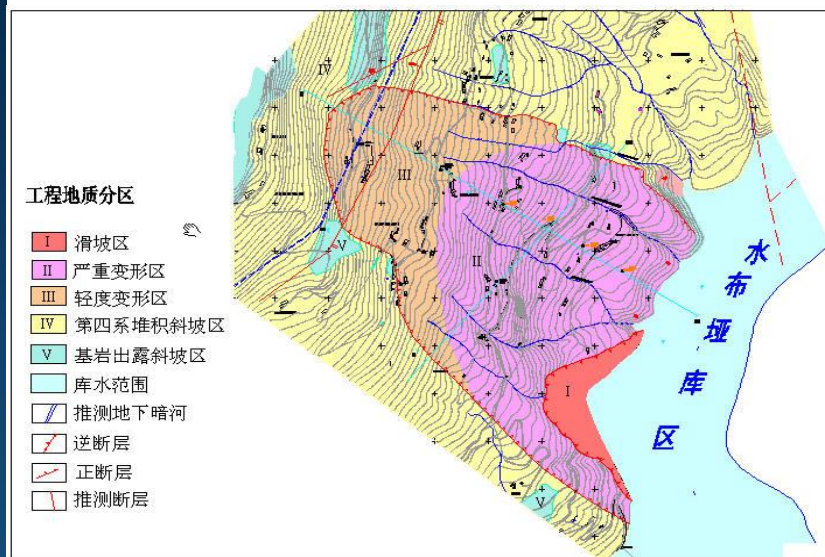
➤ 需获取的主要是工程需求、边坡特点、场地环境及空间条件这几个方面的资料。

- 主体工程规划资料；
- 边坡工程勘查资料（[主要资料](#)）；（专门勘查）
- 变形破坏现象调查资料；
- 位置与地理经济情况；
- 气象水文资料；
- 区域地质调查资料；地震资料；
- 周围已有的相关工程资料；
- 当地工程经验；
- ...

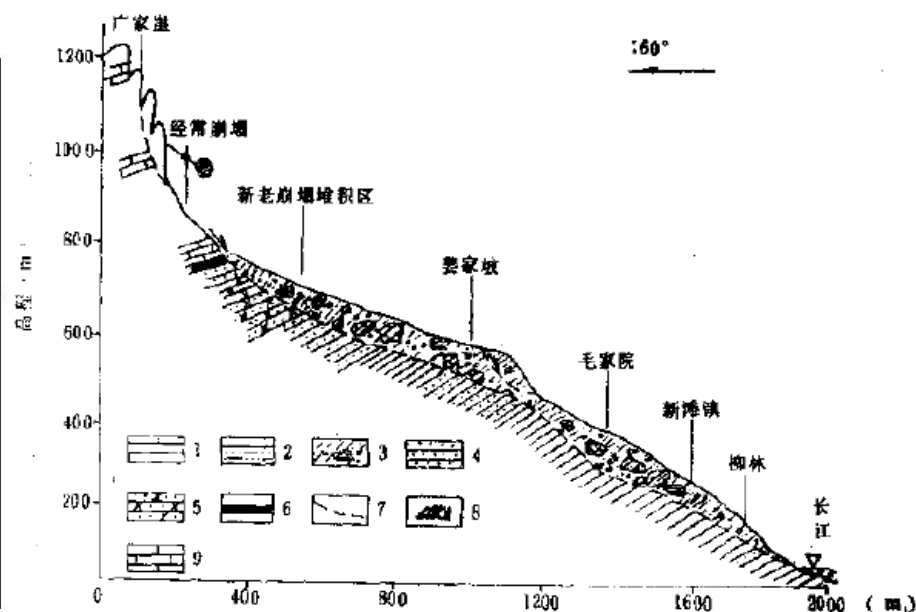
2.2. 资料获取与整理

2.2.3. 概化边坡模型

- ▶ 边坡模型体现了我们对边坡特点、主体工程对边坡的需求、所处场地环境及空间条件的基本认识。



工程地质平面图



工程地质剖面图

本节课教学内容

2. 1. 边坡工程的主要工作内容

2. 2. 资料获取与整理

2. 3. 边坡分析与评价

2. 4. 边坡工程设计基本原则

2. 5. 边坡工程处治的常用措施

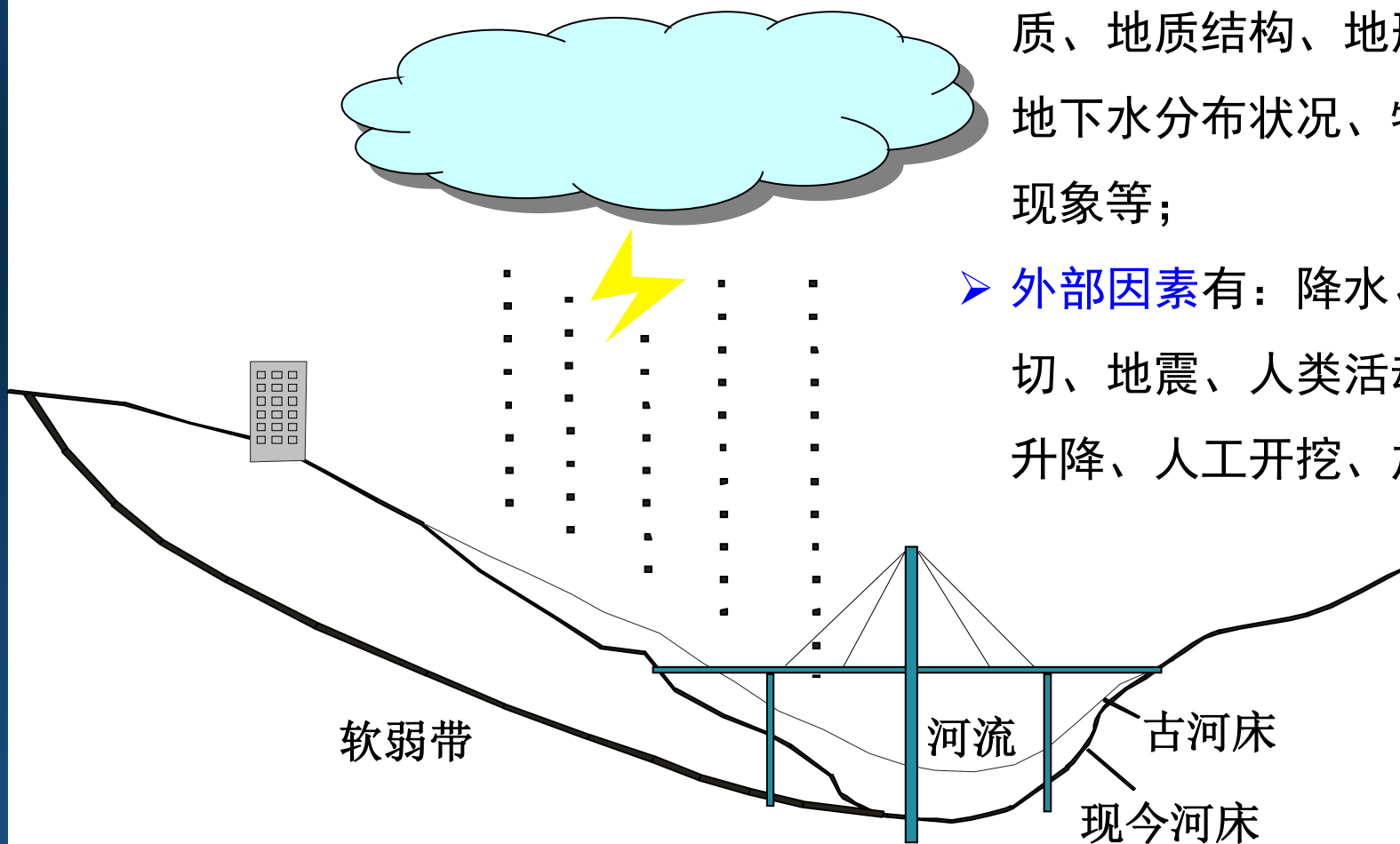
2.3. 边坡分析与评价

2.3.1. 影响因素分析

➤ 可分为内部因素和外部因素。

➤ 内部因素有：岩土类型与性质、地质结构、地形条件、地下水分布状况、物理地质现象等；

➤ 外部因素有：降水、河流下切、地震、人类活动（库水升降、人工开挖、加载）等。



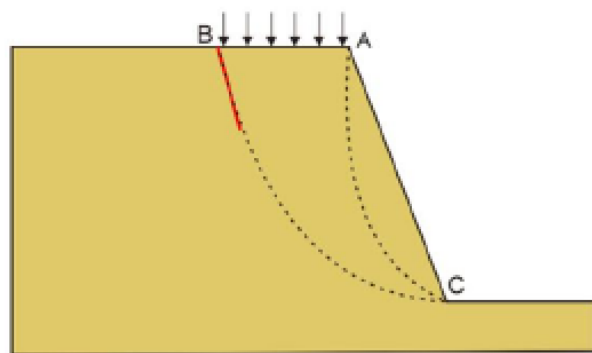
2. 3. 边坡分析与评价

2. 3. 2. 变形破坏的机理分析

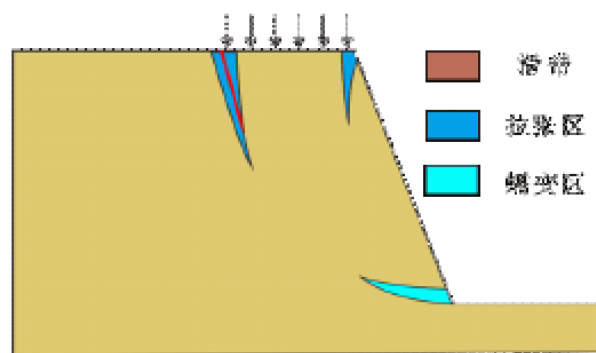
- **机理分析**是对系统内部要素的分析研究，从而找出一定空间范围内岩土体的发展变化规律的一种科学研究方法；
- **变形破坏的机理分析**就是对边坡变形破坏的**因子作用规律与破坏模式**进行系统分析。

- **因子作用规律与破坏模式需结合具体边坡特点进行分析。**
- **应明确对象。**
- **应动态分析。**

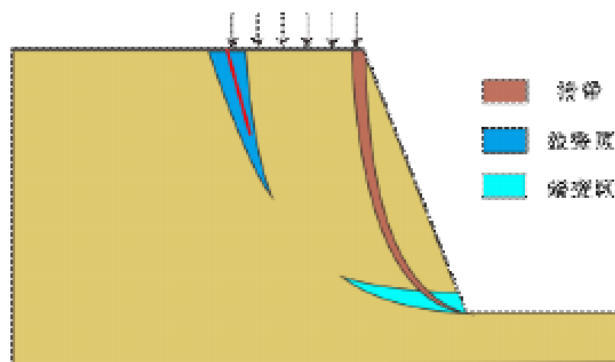
- 黄土边坡；
- 碎石土边坡；
- 危岩体边坡；
- 顺倾岩质边坡；
- 反倾层状岩质边坡。



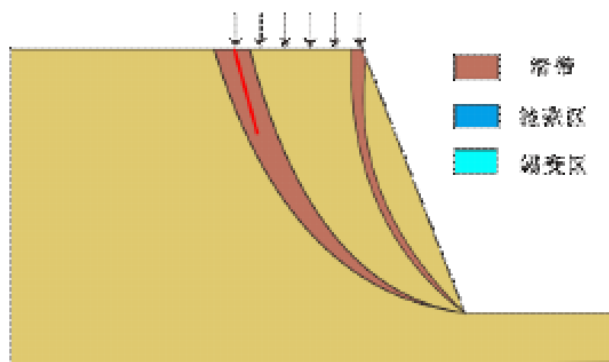
(a) 黄土边坡潜在滑动面



(b) 蠕变区，拉张区形成



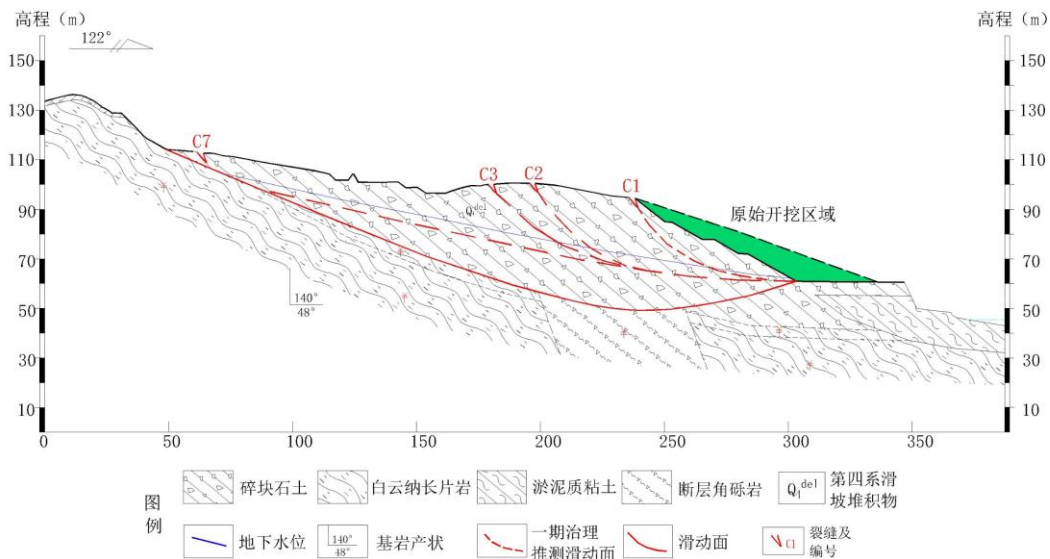
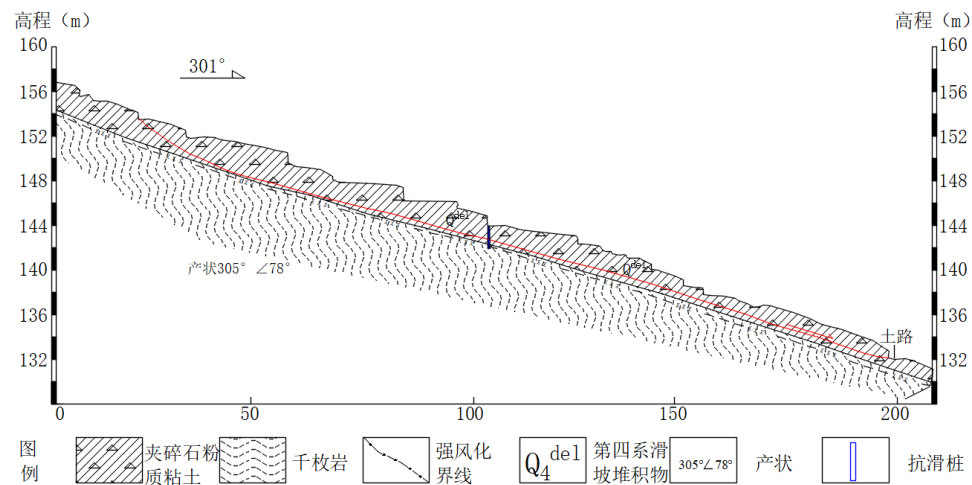
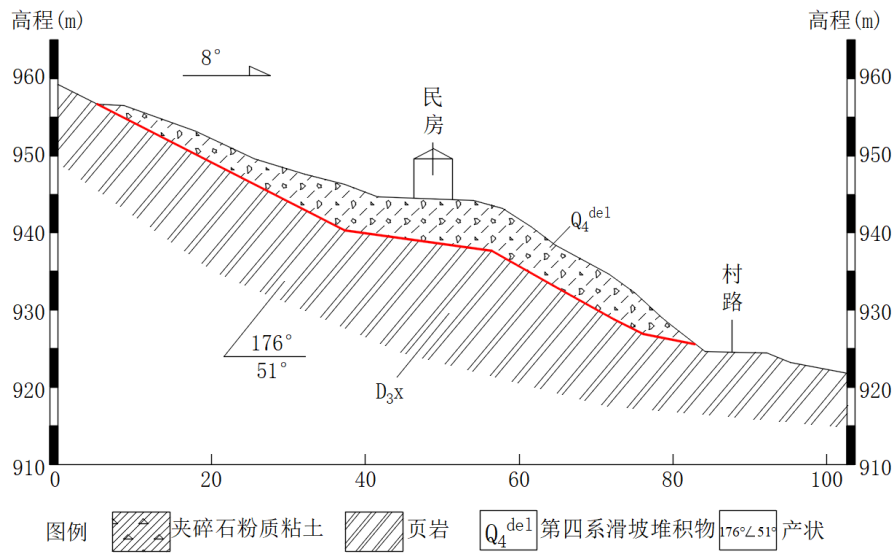
(c) 浅表层发生破坏

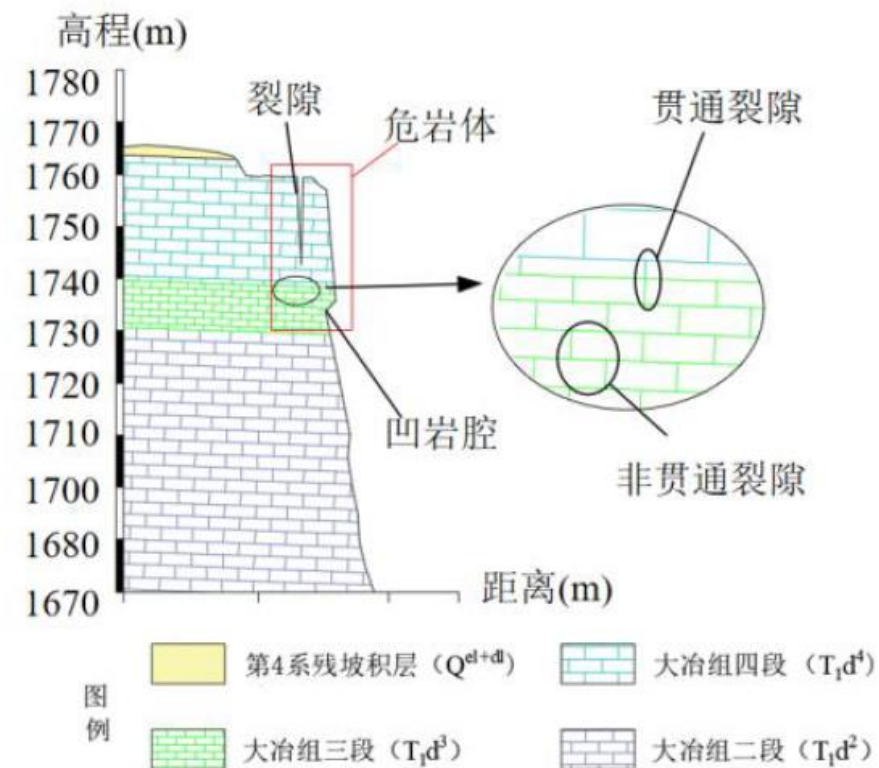


(d) 发生整体破坏

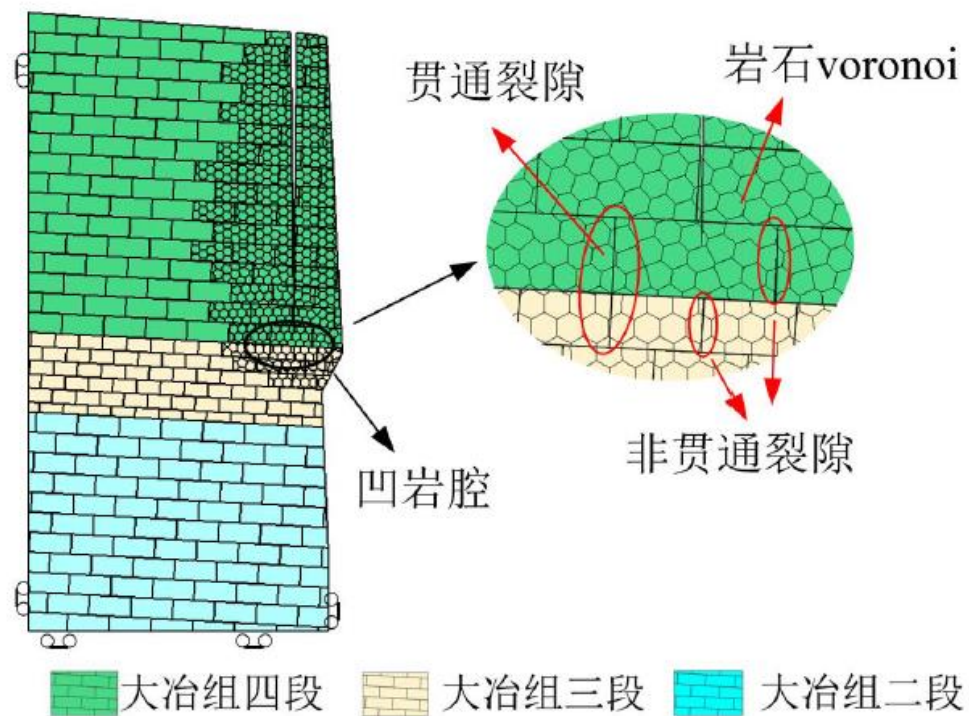


前缘浅表层滑动-后缘裂隙拉张破坏-深层滑动面贯通-整体滑动





(a) 危岩体剖面图



(b) 危岩体离散元数值模型

- 对于土质边坡，黏性土的破坏面基本上为圆弧形，无黏性土的破坏面基本上为直线形。
- 对于岩质边坡，多沿软弱结构面发生滑移，破坏面可分为直线形、折线形、楔形。对于较大规模的碎裂结构岩质边坡，破坏面为圆弧形。如岩土界面与边坡倾向一致时，则可能发生沿界面的滑移。

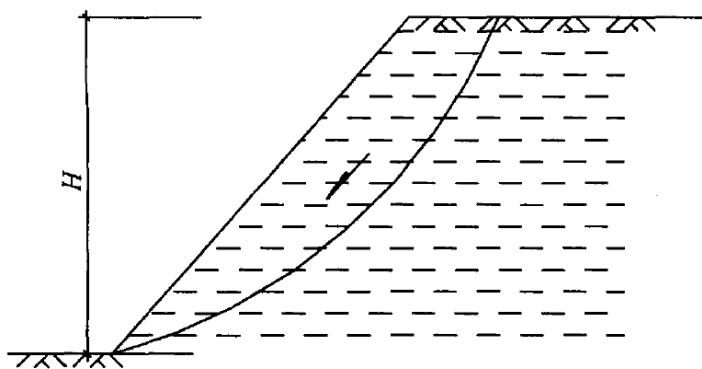


图 8-4-1 圆弧形滑动示意图

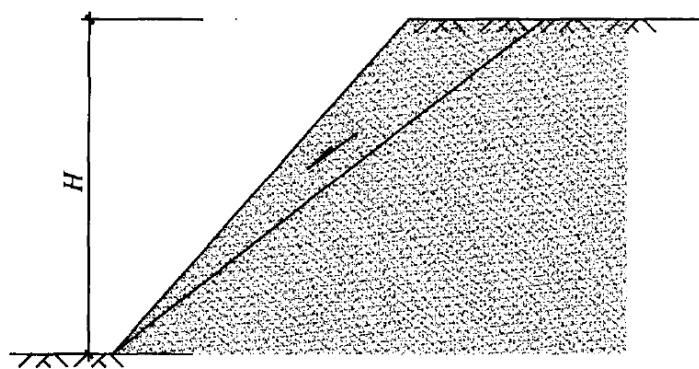


图 8-4-2 直线形滑动示意图

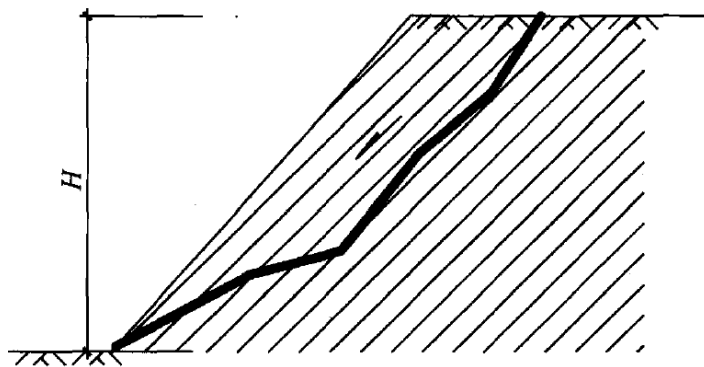


图 8-4-3 折线形滑动示意图

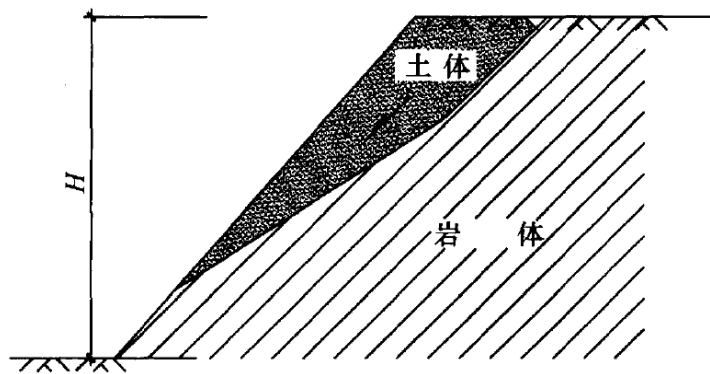


图 8-4-4 界面滑动示意图

2. 3. 边坡分析与评价

2. 3. 2. 变形破坏的机理分析

➤ 在机理分析的基础上，我们能够：

- (1) 总结出该类边坡的变形破坏模式；
- (2) 明确影响边坡变形破坏的主控因素；
- (3) 确定边坡所处变形破坏阶段和发展趋势；
- (4) 明确边坡稳定性的空间分区特征；
- (5) 建立合理的数学力学模型；
- (6) 选取可靠的计算参数、计算方法以及破坏判据。

2.3. 边坡分析与评价

2.3.3. 稳定性分析

稳定性系数：

➤ 当前状态与**极限状态**的比较！

$$FS = \frac{\text{抗力}}{\text{作用力}}$$

定性分析

- 成因历史分析法（自然历史分析法）
- 工程地质类比法
- 图解分析法

定量分析

- 刚体极限平衡法
- 数值模拟算法（有限元、边界元、离散元等）
- 概率分析法

- **边坡稳定性计算方法，根据边坡类型和可能的破坏形式，可按下列原则确定：**

- ①**土质边坡和较大规模的碎裂结构岩质边坡宜采用圆弧滑动法计算。**

- ②**对可能产生平面滑动的边坡宜采用平面滑动法进行计算。**

- ③**对可能产生折线滑动的边坡宜采用折线滑动法进行计算。**

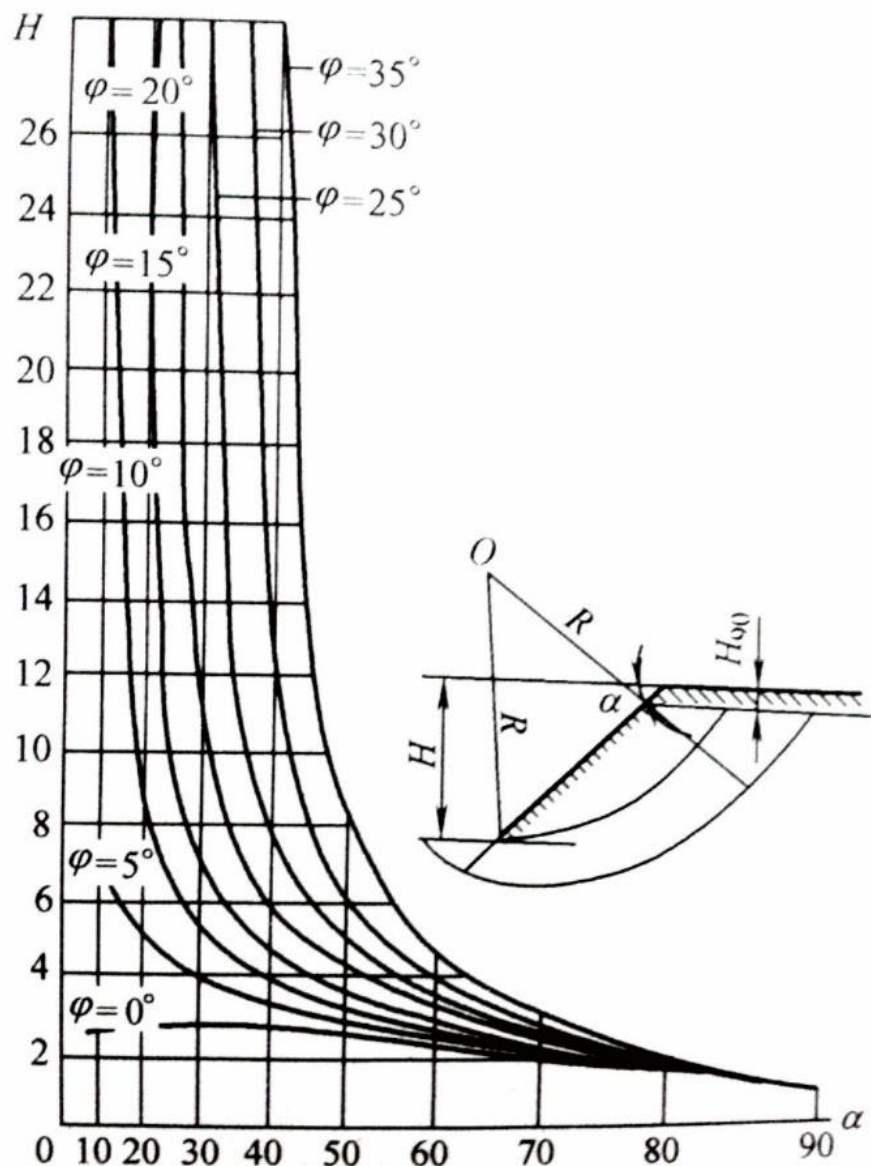
- ④**对地质结构复杂的岩质边坡，可配合采用赤平极射投影法和实体比例投影法分析。**

- ⑤**当边坡破坏机制复杂时，宜结合数值分析法进行分析。**

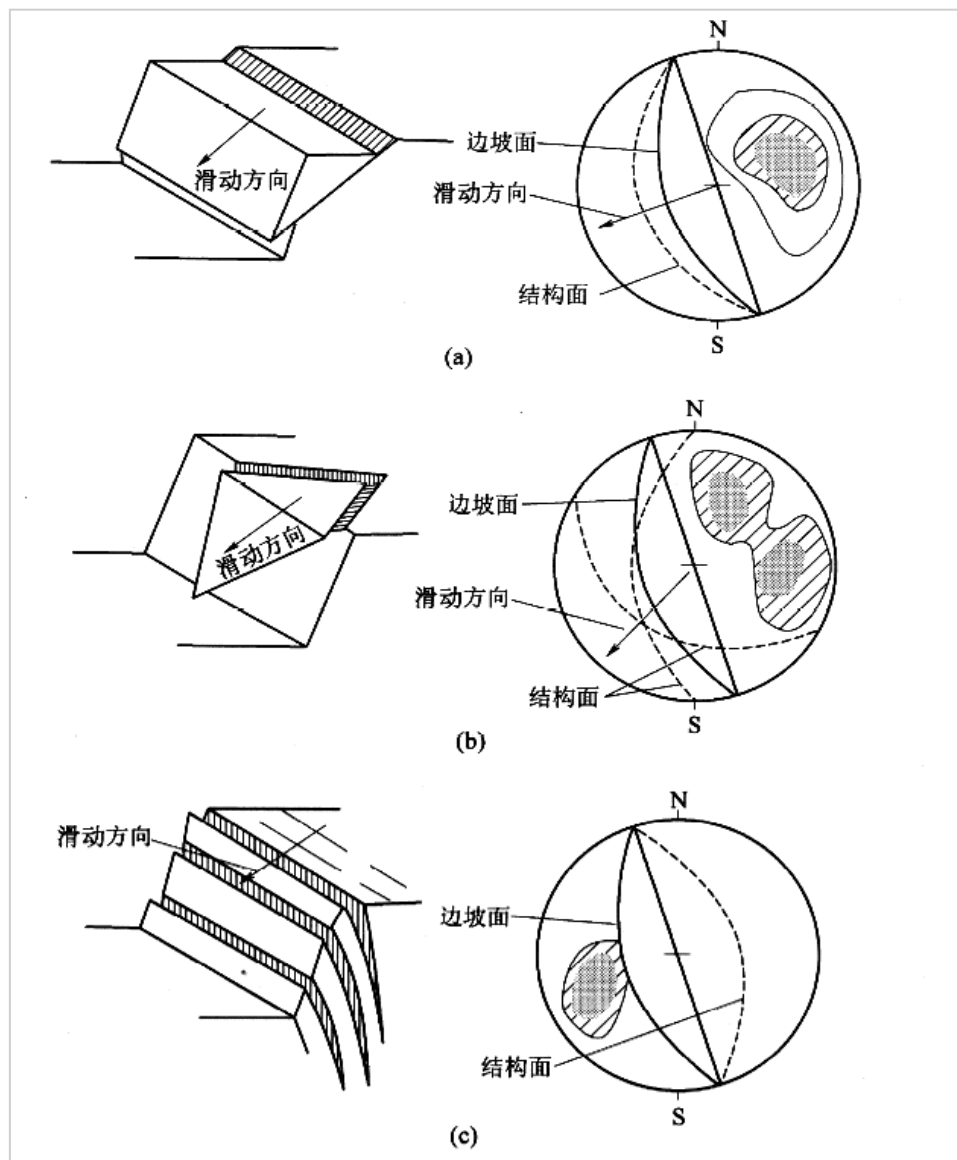
- **工程地质类比方法**主要是依据工程经验和工程地质学分析方法，按照坡体介质结构及相关条件，与已有的类似边坡进行类比，进行边坡破坏类型及稳定性状态的定性判断。
- 例如：自然斜坡的外形受地质结构、岩性、气候条件、地下水赋存状况、坡向等多因素影响。由于重力因素的作用，通常稳定的高坡要比稳定的低坡平缓。

图解法

- 用一定的曲线和图形表征边坡相关参数之间的定量关系，由此求出边坡安全系数，或已知安全系数及其它参数，边坡坡角、坡高以及结构面倾角)仅一个未知的情况下，求出稳定坡角或极限坡高，此类方法相当于力学计算的简化。



不同强度指标条件下均质边坡高度-坡角
关系曲线



赤平极射投影法

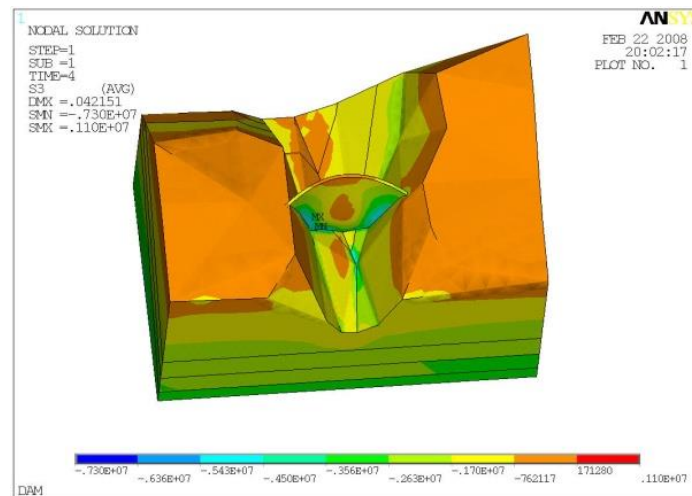
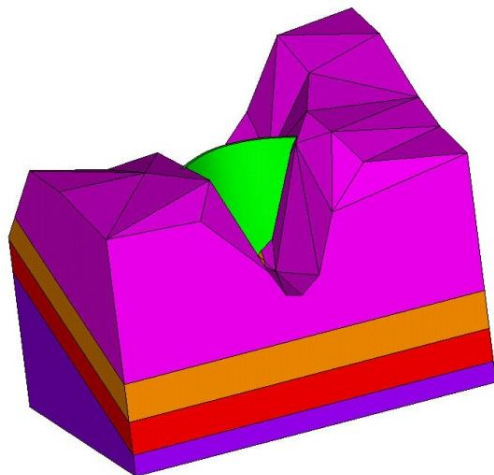
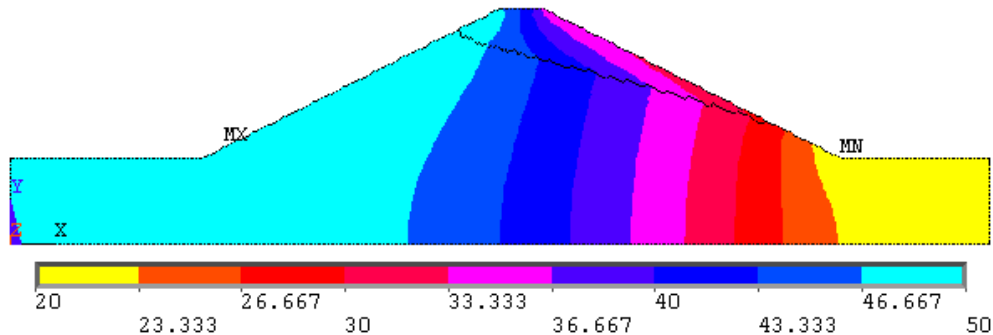
赤平极射投影法是岩质边坡稳定性分析评价的常用方法。该方法既可确定边坡结构面(包括边坡临空面)的空间组合关系, 给出可能不稳定结构体的几何形态、规模大小及其空间分布位置, 也可确定不稳定结构体可能的位移方向, 作出边坡稳定状态的初步评价。

刚体极限平衡法

- 假设：

- 只考虑破坏面上的极限破坏状态，而不考虑岩土体的变形。即视岩土体为刚体。
- 破坏面上的强度由 C 、 ϕ 值决定，遵循强度判据。
- 压力以正压力和剪应力的形式集中作用于边界面上，均视为集中力。
- 三维问题简化为二维（平面）问题来求解。

数值模拟计算法

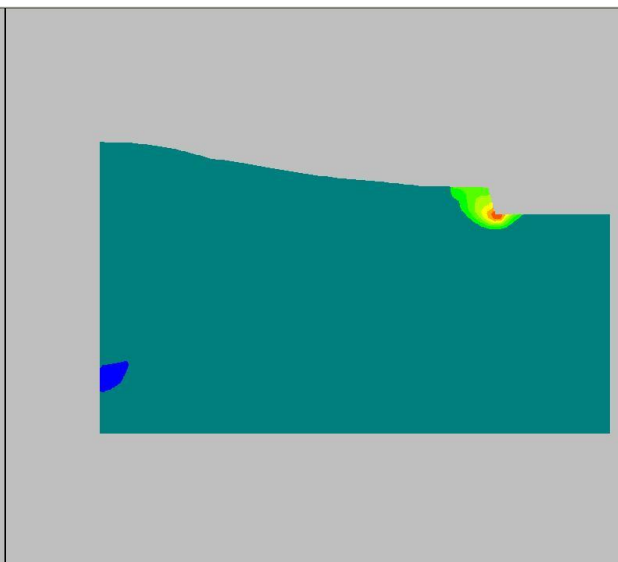


FLAC3D 3.00
 Step 21820 Model Perspective
 03:08:38 Thu Oct 15 2009

Center: X: 5.000e+001 Y: 8.550e+000 Z: 1.250e-001
 Rotation: X: 90.000 Y: 0.000 Z: 0.000
 Dist: 2.766e+002 Mag.: 1
 Increments: Move: 1.100e+001 Rot.: 10.000

Contour of X-Displacement
 Magfac = 0.000e+000
 -8.8967e-003 to 0.0000e+000
 0.0000e+000 to 5.0000e+000
 5.0000e+000 to 1.0000e+001
 1.0000e+001 to 1.5000e+001
 1.5000e+001 to 2.0000e+001
 2.0000e+001 to 2.5000e+001
 2.5000e+001 to 3.0000e+001
 3.0000e+001 to 3.4154e+001
 Interval = 5.0e+000

Itasca Consulting Group, Inc.
 Minneapolis, MN USA



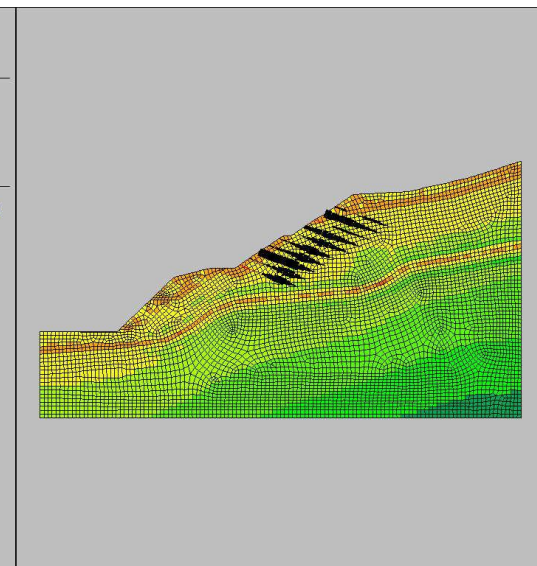
FLAC3D 3.00
 Step 65612 Model Perspective
 00:23:48 Tue Apr 27 2010

Center: X: 6.000e+001 Y: 3.210e+001 Z: 1.000e+000
 Rotation: X: 90.000 Y: 0.000 Z: 0.000
 Dist: 3.328e+002 Mag.: 1
 Ang: 22.600

Block Contour of Max. Prin. Stress
 -8.1617e+005 to -5.0000e+005
 -5.0000e+005 to -4.0000e+005
 -4.0000e+005 to -3.0000e+005
 -3.0000e+005 to -2.0000e+005
 -2.0000e+005 to -1.0000e+005
 -1.0000e+005 to 0.0000e+000
 0.0000e+000 to 1.0000e+005
 1.0000e+005 to 1.5819e+005
 Interval = 1.0e+005

cable Axial Force
 Magfac = 0.000e+000
 tension
 compression
 Maximum = 1.414e+005

Itasca Consulting Group, Inc.
 Minneapolis, MN USA



稳定性计算结果合理与否：与定性分析判断一致，同时与边坡的宏观变形破坏现象一致。具体如下：

（1）稳定性计算结果应符合常规和经验判断；

（2）各常规工况下稳定性计算结果应与相应条件下的实际表现以及边坡变形破坏阶段相符合。

边坡工程安全等级

| 边坡类型 | | 边坡高度 | 破坏后果 | 安全等级 |
|-----------------|-----------|-----------------------------|------|-----------------------------|
| 岩质边坡 | 岩体类型为Ⅰ或Ⅱ类 | $H\leqslant 30$ | 很严重 | 一级 |
| | | | 严重 | 二级 |
| | | | 不严重 | 三级 |
| | 岩体类型为Ⅲ或Ⅳ类 | $15\leqslant H\leqslant 30$ | 很严重 | 一级 |
| | | | 严重 | 二级 |
| | | $H\leqslant 15$ | 很严重 | 一级 |
| | | | 严重 | 二级 |
| | | | 不严重 | 三级 |
| | | | 土质边坡 | $10\leqslant H\leqslant 15$ |
| 严重 | 二级 | | | |
| $H\leqslant 10$ | 很严重 | 一级 | | |
| | 严重 | 二级 | | |
| | 不严重 | 三级 | | |

- 破坏后果不严重的上述边坡工程的安全等级可定为二级。
- 失事后果很严重、严重的下列建筑边坡工程，其安全等级应定为一级：a. 由外倾软弱结构面控制的边坡工程；b. 危岩、滑坡地段的边坡工程；c. 边坡塌滑区内或边坡塌方影响区内有重要建（构）筑物的边坡工程。

表 4.1.4 岩质边坡的岩体分类

| 边 坡 岩体类型 | 判 定 条 件 | | | |
|-------------|-------------|----------------|---|---|
| | 岩 体 完整程度 | 结 构 面 结合程度 | 结构面产状 | 直立边坡 自稳能力 |
| I | 完整 | 结构面结合 良好或一般 | 外倾结构面或外倾不同 结构面的组合线倾角 $>75^{\circ}$ 或 $<27^{\circ}$ | 30m 高的边 坡长期稳定, 偶有掉块 |
| II | 完整 | 结构面结合 良好或一般 | 外倾结构面或外倾不同 结构面的组合线倾角 27° $\sim 75^{\circ}$ | 15m 高的边 坡稳定, 15m \sim 30m 高的边坡 欠稳定 |
| | 完整 | 结 构 面 结 合差 | 外倾结构面或外倾不同 结构面的组合线倾角 $>75^{\circ}$ 或 $<27^{\circ}$ | 15m 高的边 坡稳定, 15m \sim 30m 高的边坡 欠稳定 |
| | 较完整 | 结构面结合 良好或一般 | 外倾结构面或外倾不同 结构面的组合线倾角 $>75^{\circ}$ 或 $<27^{\circ}$ | 边坡出现局 部落块 |
| | | | 外倾结构面或外倾不同 | 8m 高的边坡 |

建筑边坡稳定性评价标准

- 边坡工程稳定性验算时，其安全系数应不小于下表中的设计安全系数的要求，否则应对边坡进行处理。
- 对地质条件很复杂或破坏后果极严重的边坡工程，其设计安全系数宜适当提高。

设计安全系数

| | 一级边坡 | 二级边坡 | 三级边坡 |
|----------------|------|------|------|
| 平面滑动法 折线滑动法 | 1.35 | 1.30 | 1.25 |
| 圆弧滑动法 | 1.30 | 1.25 | 1.20 |

- 我国的边坡工程技术规范主要是由涉及边坡工程的建筑、水利、水电、公路和铁路等行业各自制定的，如《建筑边坡工程技术规范》（GB 50330—2002）、《水利水电工程边坡设计规范》（SL 386—2007）、《水电水利工程边坡设计规范》（DLT 5353—2006）、《公路路基设计规范》（JTGD 30—2004）、《铁路路基设计规范》（TB 10001—2005）等，这些规范都对相关行业的边坡设计安全系数进行了详细规定。
- 在进行边坡工程的设计时，**必须按照相关行业的技术标准来选择设计安全系数**，只有这样边坡的安全稳定才有保障。
- 必须注意，随着人类认识水平的提高和科学技术的进步，**边坡工程技术规范总会隔一段时间进行修订**，设计人员必须适时地采用最新的行业规范。

本节课教学内容

2. 1. 边坡工程的主要工作内容

2. 2. 资料获取与整理

2. 3. 边坡分析与评价

2. 4. 边坡工程设计基本原则

2. 5. 边坡工程处治的常用措施

2. 4. 边坡工程设计基本原则

2. 4. 1. 边坡工程设计的极限状态设计原则

边坡工程设计要解决的根本问题是在**稳定**与**经济**之间选择一种合理的平衡，以最经济的途径使边坡及其支护结构满足稳定性和可靠性的要求。

可靠性是指支护结构在规定的时间内，在规定的条件下，保持自身整体稳定的能力，它是安全性、适用性和耐久性的总称：

①**安全性**：支护结构在正常施工和正常使用时能承受可能出现的各种荷载作用，以及在偶然时间发生时及发生后应能保持必须的**整体稳定性**；

②**适用性**：支护结构在正常使用时能**满足预定的使用要求**，如作为建筑物环境的边坡及其支护结构能保证主体建筑物的正常使用；

③**耐久性**：支护结构在正常维护下，**随着时间的变化**，**仍能保持**自身整体稳定，同时不会因边坡的变形而引起主体建筑物的**正常使用**。

2. 4. 边坡工程设计基本原则

2. 4. 1. 边坡工程的极限状态设计原则

➤ 边坡工程设计主要是应用**结构可靠度理论**，在保证边坡稳定性的前提下对支护结构采用**极限状态设计原则**。

（1）**承载能力极限状态**是指支挡结构强度破坏、锚固系统失效、边坡失稳（**安全性**）；

（2）**正常使用极限状态**是指支护结构和边坡变形量、危及邻近建(构)筑物正常使用、耐久性能不能满足结构设计年限要求等（**适用性与耐久性**）。

2. 4. 边坡工程设计基本原则

2. 4. 2. 边坡工程设计中的荷载效应原则

- 在边坡工程设计中涉及的主要荷载有：岩土体自重，边坡上各种建筑物产生的附加荷载，地下水产生的诸如静水压力、渗透压力等荷载，以及地震荷载等。
- 在边坡工程设计中涉及的荷载，根据结构设计原理有永久荷载、可变荷载和偶然荷载。
- 各种荷载的取值应根据不同极限状态的设计要求取不同的代表值：永久荷载一般以其标准值作为代表值，可变荷载一般以其标准值、组合值、准永久值作为代表值。
- 各种荷载效应组合应根据有关国家现行规范，按照最不利原则进行。

2. 4. 边坡工程设计基本原则

2. 4. 3. 边坡工程设计中的设计计算原则

➤ 在边坡工程设计中必须进行下列验算：

（1）支护结构强度计算，包括锚杆抗拉，立柱、挡板、挡墙及其基础的抗压、抗弯、抗剪及局部抗压承载力均应满足要求。

（2）在锚杆挡墙设计中，必须进行锚杆抗拔承载力和立柱与挡墙基础的地基承载力验算。

（3）当边坡工程失败可能影响到周围的建筑物时，应对支护结构进行整体或局部稳定性验算。

（4）如果对边坡工程的变形控制有较高要求时，应对边坡进行变形分析，并根据分析结果采取有效的措施控制变形量，使之满足规定要求。

2. 4. 边坡工程设计基本原则

2. 4. 4. 边坡工程设计中的综合处治原则

在边坡工程设计中，应根据边坡的具体情况，结合主体工程建筑物实施**多措施综合处治原则**。在保证边坡自身整体稳定的前提下，综合考虑主体建筑物、周边建筑物、周边环境以及整体美观、适用、经济等特点进行优化设计。

2.4. 边坡工程设计基本原则

2.4.5. 边坡工程设计中的方案比选及优化原则

➤ 认真调查研究，充分进行方案比选

设计前应认真进行调查研究，广泛收集资料，查明山体 and 地基的工程地质、水文地质条件，获取必要的岩土物理力学参数，充分进行方案比选。各类支挡工程设计都应根据工程用途、工程地质条件等做好支挡结构的方案与清方减载或其他能代替支挡结构的方案比选工作。

➤ 支挡结构设计中应进行以下各种方案的比选工作

(1) 平面位置的确定：根据工程需要，结合工程总平面布置图、工点地形图、纵断面图及相应的工程地质资料，确定支挡结构的起、终点位置。

(2) 支挡结构类型的选择：根据工程特点、地质条件、当地材料供应情况、进行支挡结构类型的方案比选。

(3) 支挡结构建筑材料及截面尺寸的比选

➤ 方案的比选要综合考虑各因素

设计方案的比选，在满足技术可行、安全可靠的前提下，应综合考虑施工条件、环境影响及造价等因素。注重经验特别是地方经验！

防治措施建议

例 设计工况②时， $F = 1.22 < 1.35$
为欠稳定状态

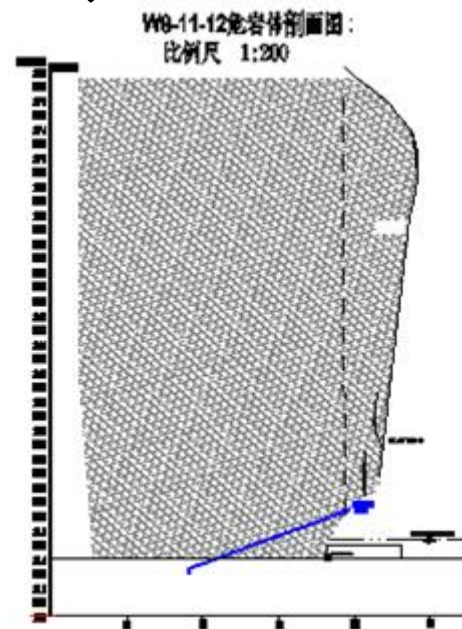
方案一：锚固+钢筋网喷护；

方案二：局部清除+支撑柱支撑+锚杆（索）锚固+钢筋网喷护+M7.5浆砌条石进行封腔；

推荐方案：方案二造价低、施工简单，但对其下部的公路有影响，导致公路无法行车。方案一采取锚固和挂网喷护措施，可不影响其下部公路行车要求，推荐方案一。

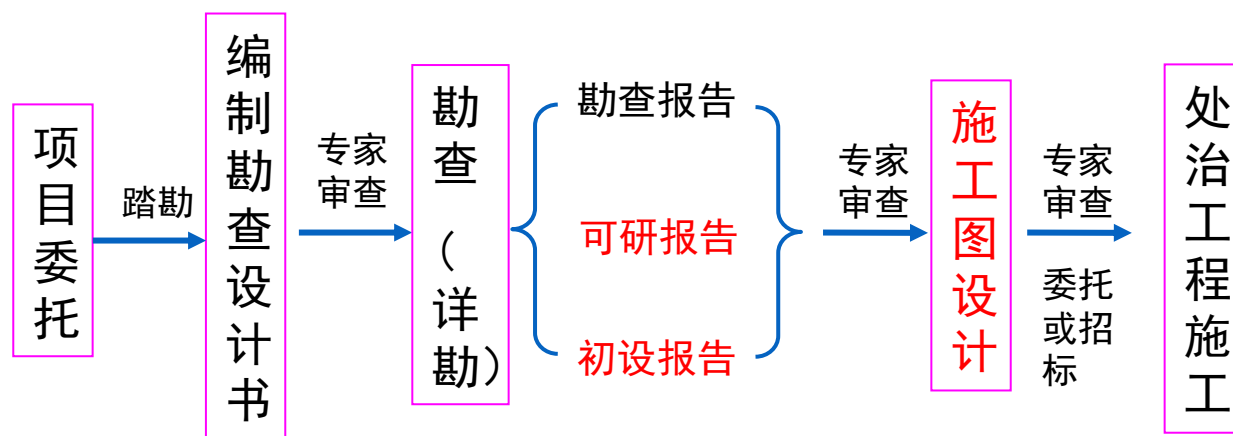


W9-11-12 坠落式破坏



2. 4. 边坡工程设计基本原则

2. 4. 6. 边坡工程设计中的分阶段设计原则



2. 4. 边坡工程设计基本原则

2. 4. 7. 边坡工程设计中的信息化设计原则

由于岩土介质的复杂性、可变性和不确定性，地质勘察参数难以准确确定，加之设计理论和设计方法带有经验性和类比性。因此边坡工程设计往往难以一次定型，**需要根据施工中反馈的信息和监控资料不断效核、补充和完善设计**，这是目前边坡工程设计中较为科学的动态设计方法。

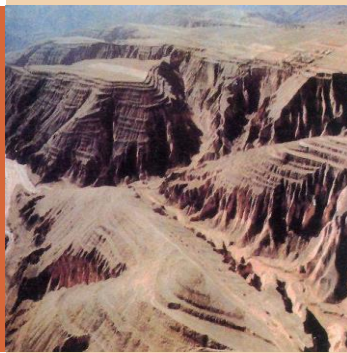
边坡处治措施的选择不仅要遵循防治原则还要结合变形破坏的方式、类型等工程实际条件。

处治措施



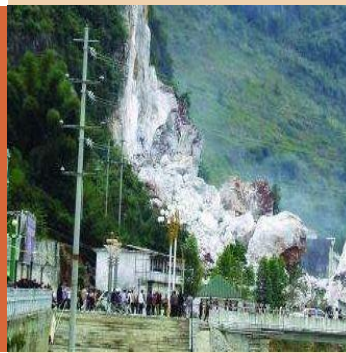
风化剥蚀

坡面防护：砌石、喷射混凝土、植被防护等



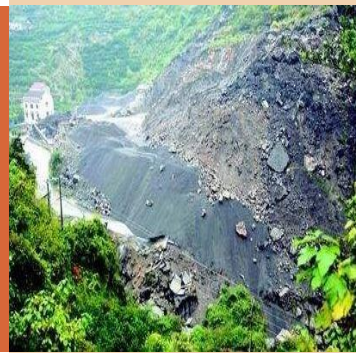
水流侵蚀

冲刷防护：植物、抛石、浆砌片石、石笼等



落石崩塌

支撑、防护网、锚固等



坡体变形

锚固、抗滑桩、排水等

边坡设计的部分经验性认识

- (1) 边坡工程设计前，应进行详细的工程勘察，对周围环境的危害性作出预测，获得设计所需的各项参数；指出主要结构面的所在位置；提供边坡设计所需要的各项参数；并对边坡稳定性作出准确的评价。**
- (2) 工程设计时应依山就势，防止大挖大填；**
- (3) 边坡设计时应保护和整治边坡环境；**
- (4) 边坡的支挡结构应进行排水设计；**
- (5) 支挡结构后部的填土，应选择透水性强的填料；**
- (6) 边坡工程的平面布置和立面设计应考虑对周边环境的影响，满足美化环境、体现生态保护的要求。**

本节课教学内容

2. 1. 边坡工程的主要工作内容

2. 2. 资料获取与整理

2. 3. 边坡分析与评价

2. 4. 边坡工程设计基本原则

2. 5. 边坡工程处治的常用措施

2. 5. 边坡工程处治的常用措施

- 放缓边坡
- 支挡（挡土墙与抗滑桩）
- 加固（注浆、锚杆、锚索）
- 防护（植物防护、工程防护）
- 排水（地表排水与地下排水）



谢谢!

Shot at Angels Landing in Zion National Park
Mar. 12, 2016