



Engineering Mechanics 工程力学

朱鸿鹄
南京大学地球科学与工程学院

www.slope.com.cn

第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

南京长江大桥

- 南京长江大桥横跨下关和浦口之间的长江江面，是一座铁路、公路两用的**特大双层钢桁梁桥**。大桥上层为路宽15米、全长4588米的四车道公路桥；下层为宽14米、全长6772米的双轨复线铁路桥，使中国交通大动脉京沪铁路得以贯通。
- 大桥由正桥和引桥两部分组成，正桥**9墩10跨**，长**1576米**，最大跨度**160米**。大桥通航净空宽度120米，桥下通航净空高度为最高通航水位以上**24米**（**长江沿岸都用这个值**），可通过5000吨级海轮。



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

- 南京长江大桥建于1960-1968年，是继**武汉长江大桥**（1955-1957）和**重庆白沙沱长江大桥**（1958-1959）之后第三座跨越长江干流的大桥，是第一座完全由中国设计建造并基本采用**国产材料**的特大型桥梁，因而在中国桥梁史上具有重要意义。该桥曾以“**最长的公铁两用桥**”被记载入《吉尼斯世界记录大全》。
- 时为南京军区司令员的**许世友**，曾调来约**百辆坦克**同时开过桥面，以检验大桥质量。



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

桥梁建设过程的照片



第6章 拉压杆件的

www.slope.com.cn

- 正桥两端为复式桥，小堡顶部为“工

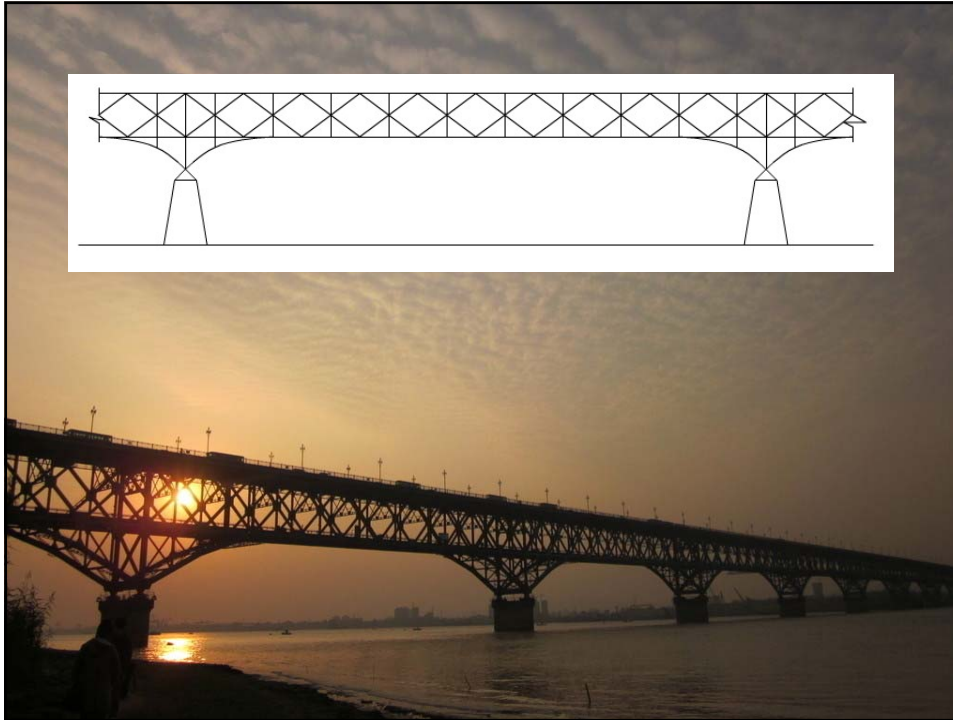


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

- 2011年南京长江大桥日均通过机动车8万辆。
- 由于长期超负荷使用，南京长江大桥进行了多次修补，内容包括了桥墩加固、桥面沥青铺设、修补坑洞等，并更换了1号和4号桥墩的支座。





第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

- 技术顾问委员会主任：李国豪
- 总工程师：梅旸春（1962年逝世于大桥工地）
- 设计总工程师：胡兢铭
- 钢梁总设计师：方秦汉



- 16岁进入同济大学学习并留校任教，1938年开始留学德国8年，获得第二个博士学位。50-60年代，先后参与武汉长江大桥、南京长江大桥的设计。文革期间被迫害。1977年开始出任同济大学校长。李国豪曾被国际桥梁与结构工程协会推选为世界十大著名结构工程专家之一。2005年去世。



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

- 1966年李国豪被隔离审查。他获知南京长江大桥行将通车，他想起了武汉长江大桥的通车典礼中曾出现桥梁晃动的现象，而原因却始终没有找到。
- 为了解决这个难题，他凭着卓越超群的理论基础和创造思维，借助报纸的边角和夹缝，演算推导，在狱中完成了大桥振动的初步理论。此后又托人找到试验模型材料，用极原始的办法偷偷制作出桁梁桥模型。
- 之后在校内监督劳动期间，他把自己的家变作了研究室，做了桥梁模型和扭转试验，并继续完善理论分析和计算。1973年，李国豪完成专著《桁梁扭转理论——桁梁桥的扭转、稳定和振动》。武汉大桥的振动问题和南京大桥的稳定难题迎刃而解，中国大桥设计多年来的心病被医好了。



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

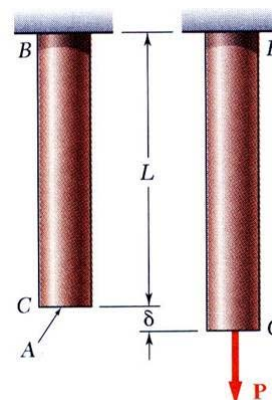
6.1 拉压杆的应力

1. 横截面上的应力:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \text{应力 (stress)}$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \text{应变 (strain)}$$

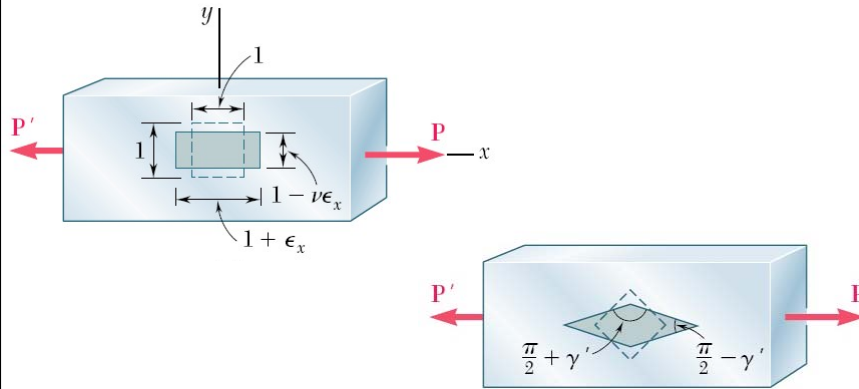
正应力/变!



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

问题：轴向拉压杆内会有切应力/切应变吗？

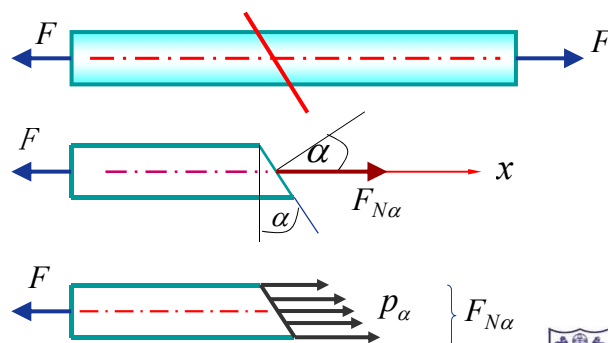


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

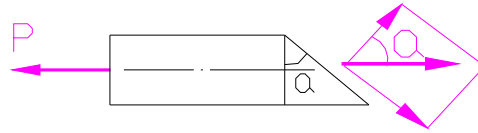
2. 斜截面上的应力:

$$p_{\alpha} = \frac{P}{A / \cos \alpha} = \frac{P}{A} \cos \alpha = \sigma \cos \alpha$$



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn



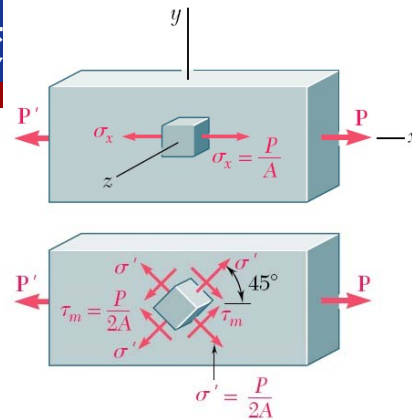
$$p_\alpha = \sigma \cos \alpha \quad \longrightarrow \quad \begin{cases} \sigma_\alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2} \sigma \\ \tau_\alpha = \frac{\sin 2\alpha}{2} \sigma \end{cases}$$



第6章 拉压杆件的应力变

www.slope.com.cn

$$\begin{cases} \sigma_\alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2} \sigma \\ \tau_\alpha = \frac{\sin 2\alpha}{2} \sigma \end{cases}$$



$$\alpha = 0 \text{ 时, } \sigma_{\alpha \max} = \sigma \quad \tau_\alpha = 0$$

$$\alpha = 90^\circ \text{ 时, } \sigma_\alpha = 0 \quad \tau_\alpha = 0$$

$$\alpha = 45^\circ \text{ 时, } \sigma_\alpha = \frac{\sigma}{2} \quad \tau_{\alpha \max} = \frac{\sigma}{2}$$

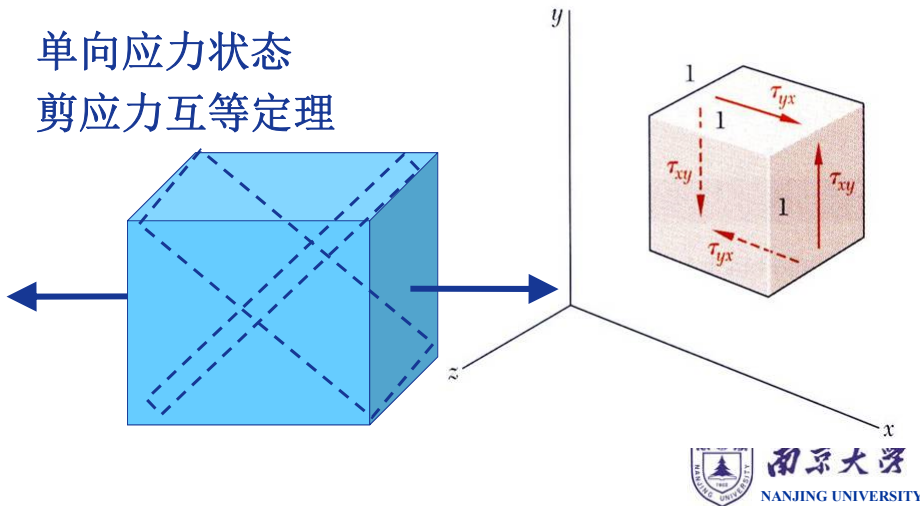


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

3. 单向应力状态

单向应力状态
剪应力互等定理

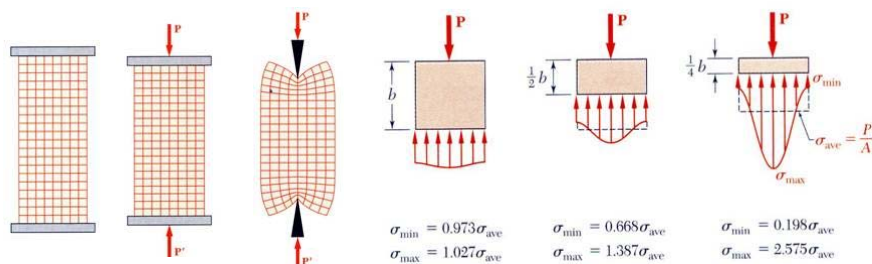


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

4. 公式适用条件

(1) 端部施加荷载方式的影响: **圣维南原理**
(Saint-Venant's Principle)



 **南京大学**
NANJING UNIVERSITY

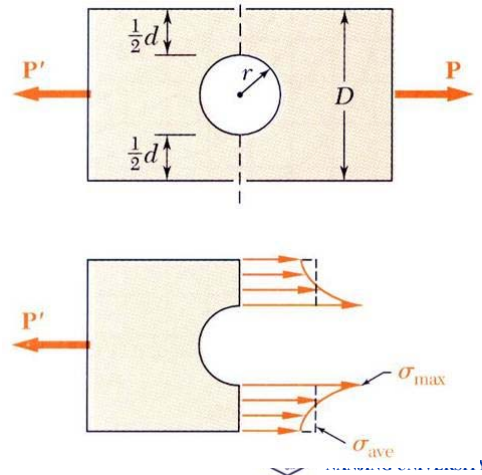
第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

(2) 应力集中 (Stress concentration) 的影响

理论应力集中系数

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_m}$$

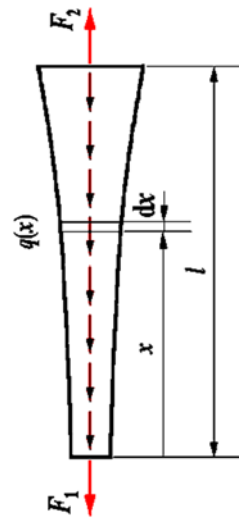


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

(3) 带锥度杆的拉、压

$$\begin{cases} \tau = \tau' = \sigma_x \tan \alpha \\ \sigma_y = \sigma_x \tan^2 \alpha \end{cases}$$



NANJING UNIVERSITY

第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

6.2 强度条件及应用

1. 安全系数和许用应力

轴向拉压杆的破坏条件 $\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A} = \sigma^o = [n][\sigma]$

$[n]$ = 安全系数 (Factor of Safety)

$[\sigma]$ = 许用应力 (Allowable stress)



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

2. 强度条件及应用

轴向拉压杆的强度条件 $\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A} \leq [\sigma]$

3个应用:

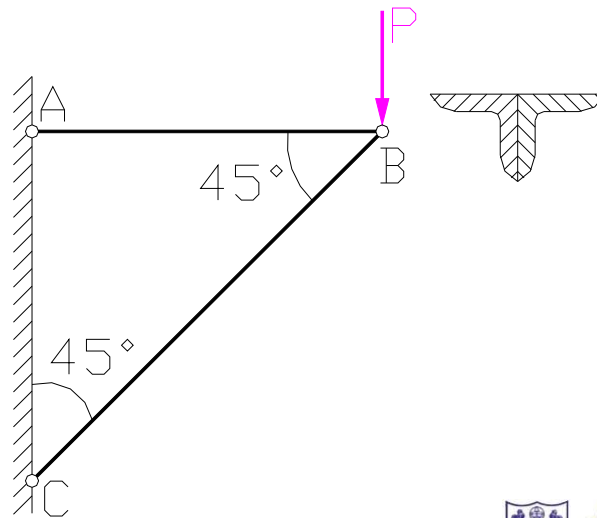
- (1) 校核强度
- (2) 截面设计
- (3) 确定许可荷载



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

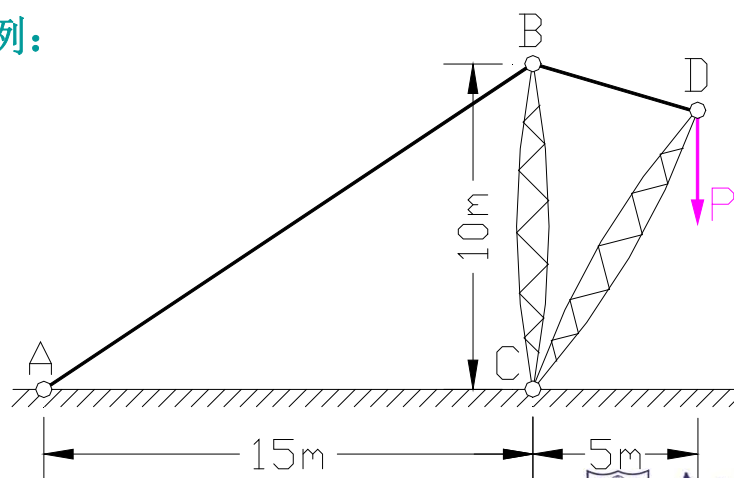
例:



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

例:



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

6.3 拉压杆的变形和位移

1. 虎克定律和纵向变形

虎克定律(Hooke's law): 杆件在线弹性范围内受拉伸或压缩时, 横截面正应力与纵向线应变成正比。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

E : 弹性模量(Young's modulus), 单位为MPa或GPa

E 值取决于材料的性质, 反映了材料在拉压时抵抗弹性变形的能力



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

拉压杆的线应变

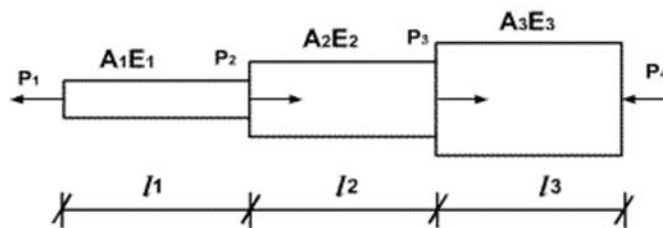
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

拉压杆的轴向位移

$$\Delta L = \frac{\sigma L}{E} = \frac{NL}{EA}$$

EA —抗拉(压)刚度

ΔL —伸长为正, 缩短为负



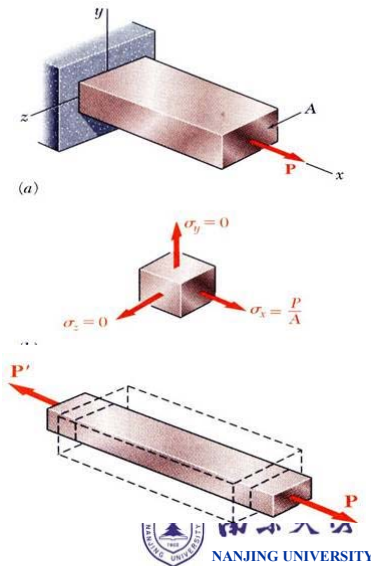
第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

2. 泊松比和横向变形

泊松比(Poisson's ratio)

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|$$

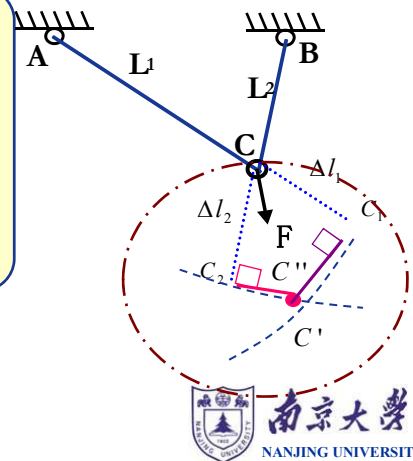


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

3. 桁架节点位移

- 1、分析受力确定各杆的内力 F_{Ni}
- 2、求各杆的变形量 Δl_i
- 3、画节点位移图求节点位移

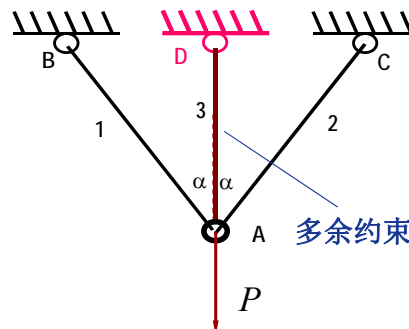


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

6.4 拉、压超静定问题

1. 超静定问题及其解法

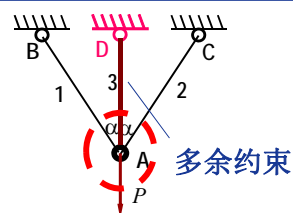


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

解法一：

- | | |
|--------------|-------------|
| 1 超静定次数的判断方程 | 未知量——轴力、约束力 |
| | 方程数——平衡方程 |
| 2 建立补充方程 | 引入变形与受力的关系。 |
| 3 建立平衡方程 | |
| 4 将平衡方程中代入 | 消去力 |
| 5 解线性方程组 | 解得力 |

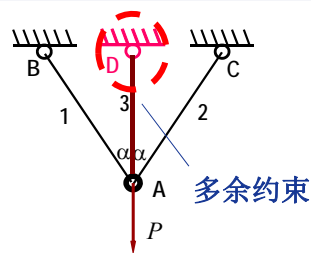


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

解法二（解除约束法）：

- 1 解除约束，使超静定问题变为静定问题
- 2 将解除点由未知力代之
- 3 上述未知力使解除约束点处的位移仍然为0
- 4 求出每个力



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

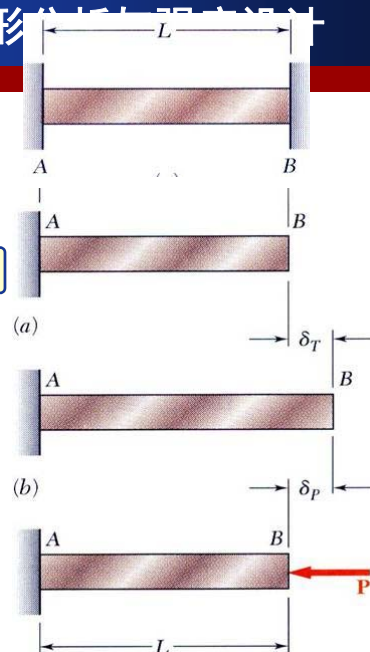
2. 温度应力和装配应力

温度应力（Thermal Stress）

由温度引起杆变形而产生的应力
（热应力）

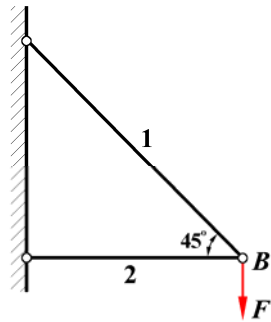
温度引起的变形量

$$\Delta L = \alpha \Delta T L$$

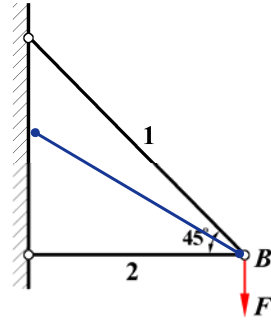


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn



静定问题无温度应力



超静定问题有温度应力

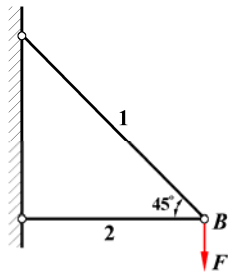


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

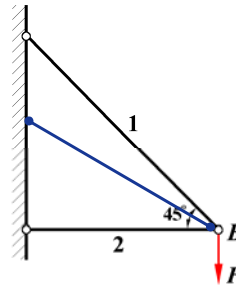
www.slope.com.cn

装配应力 (Assembly Stress)

由于构件制造尺寸产生的制造误差，在装配时产生变形而引起的应力。



静定问题无装配应力



超静定问题有温度应力

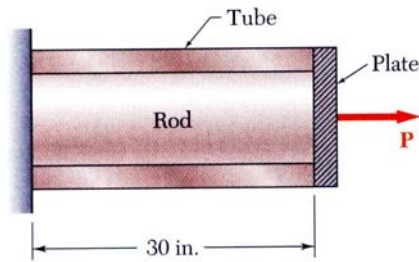


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

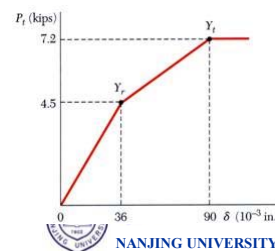
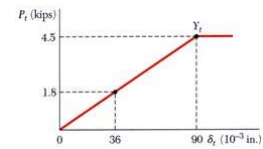
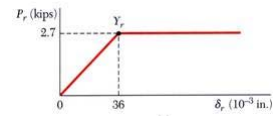
www.slope.com.cn

6.5 拉、压组合杆

1. 组合杆承受荷载作用：超静定问题



工程应用：钢筋混凝土结构的先张法



NANJING UNIVERSITY

第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn



钢筋混凝土灌注桩

UNIVERSITY

第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

2. 组合杆承受温度改变作用

平衡方程

$$N_b = N_s$$

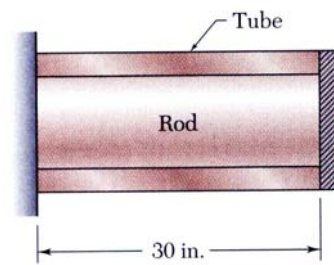
变形几何方程

$$\Delta l_b + \Delta l_c = (\alpha_b - \alpha_s) \Delta T \cdot l$$

物理方程

$$\Delta l_b = \frac{N_b l}{E_b A_b}$$

$$\Delta l_c = \frac{N_c l}{E_c A_c}$$

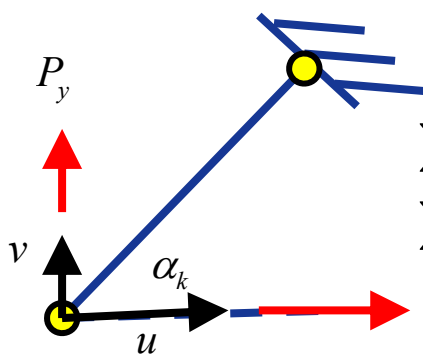


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

6.6 位移法的应用

1. 简单二力杆系结构的位移法求解



(1) 平衡方程

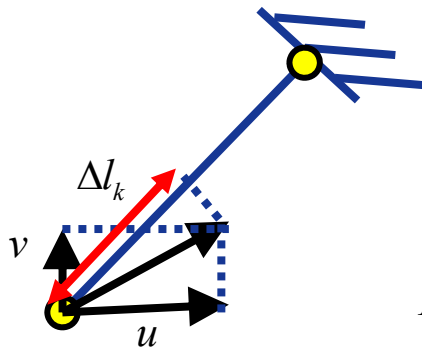
$$\sum X = 0 \quad \sum N_k \cos \alpha_k + P_x = 0$$

$$\sum Y = 0 \quad \sum N_k \sin \alpha_k + P_y = 0$$



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn



(2)几何方程

$$\Delta l_k = -(u \cos \alpha_k + v \sin \alpha_k)$$

(3)物理方程

$$N_k = -E_k A_k \frac{\Delta l_k}{l_k}$$

所以 $N_k = -\frac{E_k A_k}{l_k} (u \cos \alpha_k + v \sin \alpha_k)$ 再代入平衡方程



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

解得 (方程组形式)

$$C_1 u + C_2 v - P_x = 0$$

$$C_2 u + C_3 v - P_y = 0$$

或矩阵形式

$$\begin{Bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_2 & C_3 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \end{Bmatrix}$$



例：已知：ABCD为刚体，钢索的 $E=177\text{Gpa}$ ， $A=76.36\text{mm}^2$ ， $P=20\text{kN}$ 。求C点的铅垂位移。

$\frac{1}{2}P\Delta C_y = \frac{N^2 L}{2EA}$

$\sum M_A = 0 \quad N = 11.6\text{kN}$

钢丝绳的总伸长量
 $\Delta L = \Delta L_B + \Delta L_D = NL/EA = 1.37\text{mm}$

$\Delta C_Y = 1/2(\Delta L_B/\cos 30^\circ + \Delta L_D/\cos 30^\circ) = \Delta L/2 \cos 30^\circ = 0.79\text{mm}$

例：图示桁架AB和AC杆均为钢杆，弹性模量 $E=200\text{GPa}$ ， $A_1=200\text{mm}^2$ ， $A_2=250\text{mm}^2$ ， $P=10\text{KN}$ 强度设计

试求：节点A的位移（杆AB长 $L_1=2\text{M}$ ）

解：受力分析

$N_1 = 2P \quad N_2 = -\sqrt{3}P$

变形计算

$\Delta L_1 = \frac{N_1 \cdot L_1}{E \cdot A_1}$

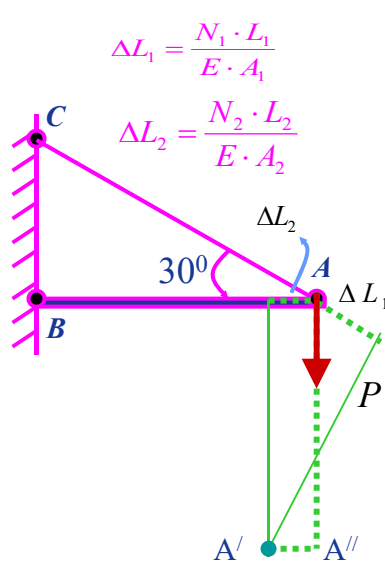
$\Delta L_2 = \frac{N_2 \cdot L_2}{E \cdot A_2}$

用垂线代替圆弧线

南京大学 NANJING UNIVERSITY

第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn



$$\Delta L_1 = \frac{20 \times 10^3 \times 2}{200 \times 10^9 \times 200 \times 10^{-6}} = 1 \text{ mm}$$

$$\Delta L_2 = \frac{17.3 \times 10^3 \times 1.73}{200 \times 10^9 \times 250 \times 10^{-6}} = 0.6 \text{ mm}$$

$$L_{A-A''} = \frac{\Delta L_1}{\sin 30^\circ} + \frac{\Delta L_2}{\tan 30^\circ} = 3 \text{ mm}$$

$$L_{A'-A''} = \Delta L_2 = 0.6 \text{ mm}$$

$$L_{A-A'} = \sqrt{3^2 + 0.6^2} = 3.06 \text{ mm}$$

NANJING UNIVERSITY

第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

6.7 拉伸与压缩时材料的力学性能

一 金属材料拉伸力学性能

力学性能：材料在受力后的表现出的变形和破坏特性 ——不同的材料具有不同的力学性能

材料的力学性能可通过实验得到

——常温静载下的拉伸、压缩试验

 南京大学
 NANJING UNIVERSITY

第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

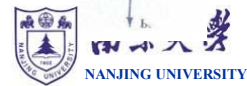
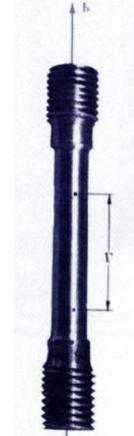
1. 低碳钢拉伸力学性能

Q235:屈服强度为235MPa的钢材

拉伸标准试件的**标距** (gauge length)



$$l=10d \quad \text{或} \quad l=5d$$



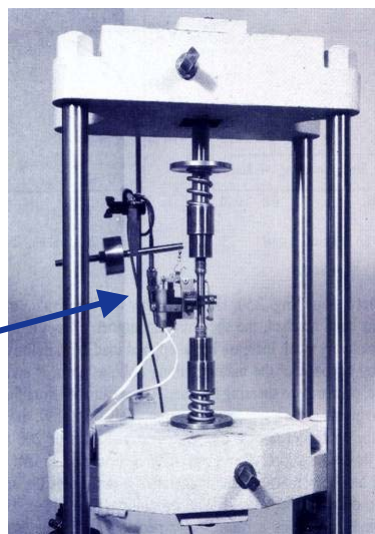
第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

拉伸试验设置

拉力试验机

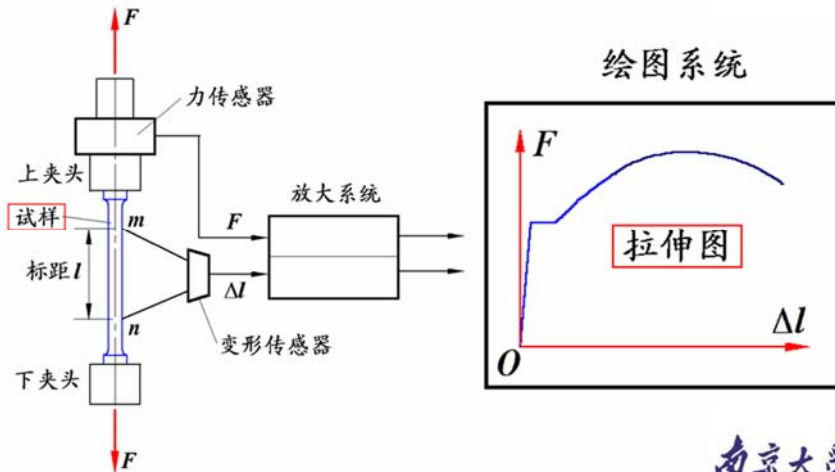
位移测量仪器



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

拉伸试验与拉伸图 ($F-\Delta l$ 曲线)



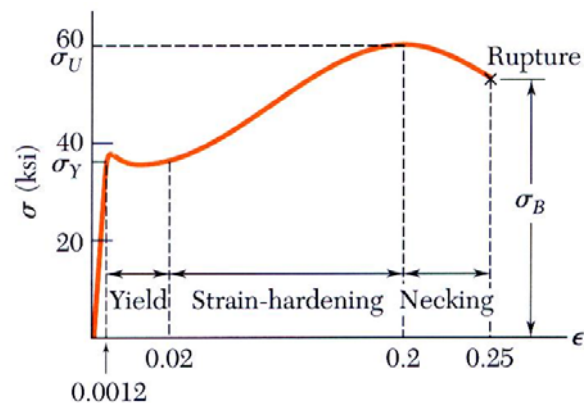
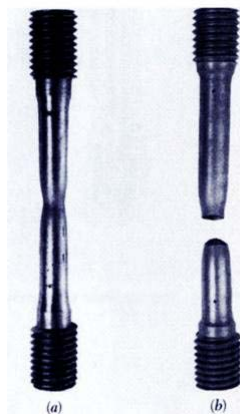
南京大学
NANJING UNIVERSITY

第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

拉伸的4个阶段：弹性-屈服-强化-颈缩

Elasticity-yield-hardening-necking



南京大学
NANJING UNIVERSITY

第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

(1) 弹性阶段: oA

oA' 为直线段, AA' 为微弯曲线段

$$\sigma = E\varepsilon$$

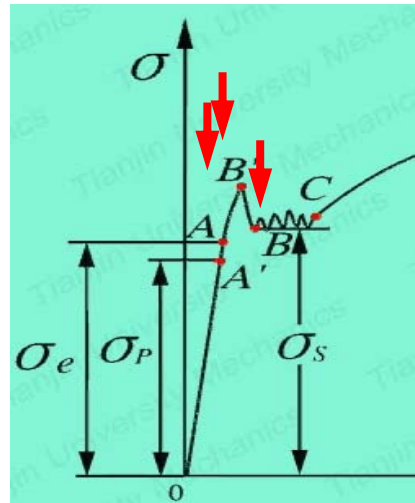
σ_p - 比例极限 **proportional limit**

σ_e - 弹性极限 **elastic limit**

(2) 屈服阶段: $B'C$

σ_s - 下屈服点 **lower yield point**

(屈服段内最低的应力值)



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

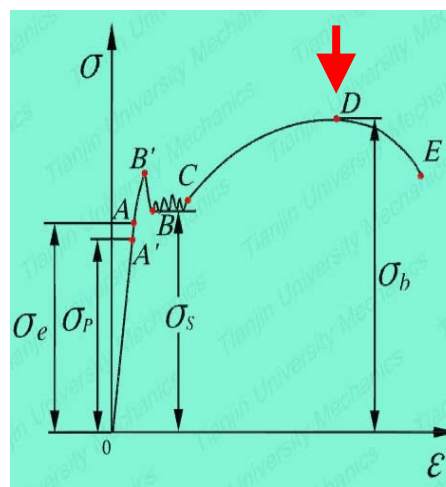
(3) 强化阶段: CD

σ_b — 强度极限 **breakage point**

拉伸过程中最高的应力值,

又称抗拉强度 **tensile strength**

(4) 颈缩阶段: DE



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

2个塑性指标：断后伸长率、断后截面收缩率

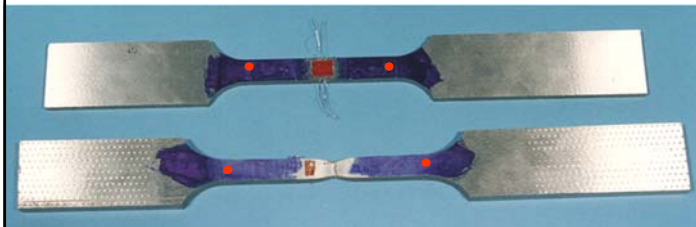
塑性：材料能经受较大塑性变形而不破坏的能力

断后伸长率 Percentage elongation after fracture

$$\delta = \frac{\Delta l_0}{l} \times 100\%$$

l —试验段原长（标距）

Δl_0 —试验段残余变形



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

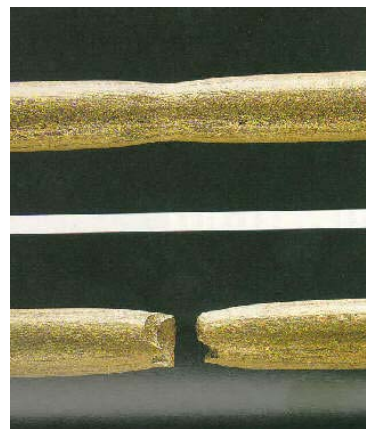
www.slope.com.cn

截面收缩率 Percentage reduction of area

$$\psi = \frac{A - A_1}{A} \times 100\%$$

A —试验段横截面原面积

A_1 —断口的横截面面积



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

$\delta > 5\%$ 塑性材料（低碳钢、硬铝）

$\delta < 5\%$ 脆性材料（灰口铸铁、陶瓷、岩石）

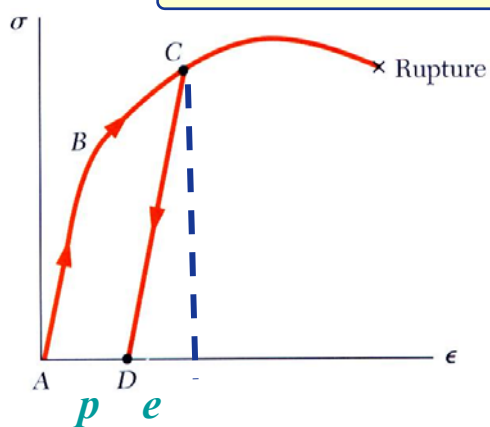
请区分：黄金？玻璃？混凝土？橡胶？



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

卸载、再加载规律和冷作硬化



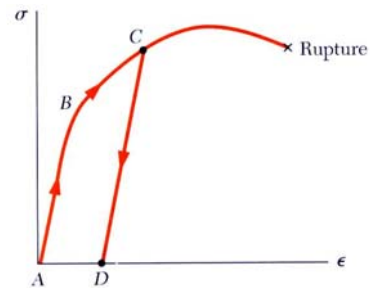
冷作硬化：在常温下将钢材拉伸超过屈服阶段，卸载后又继续加载，材料的比例极限提高而塑性变形降低的现象



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

优点：提高强度，降低塑性，节约材料
 缺点：脆性增强，影响加工，容易开裂



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

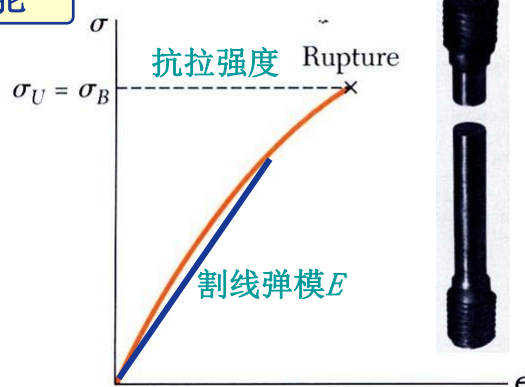
www.slope.com.cn

2. 铸铁拉伸力学性能

典型脆性材料
 (Brittle material)

- 1) 无明显的直线段
- 2) 无屈服阶段
- 3) 无颈缩现象
- 4) 延伸率很小

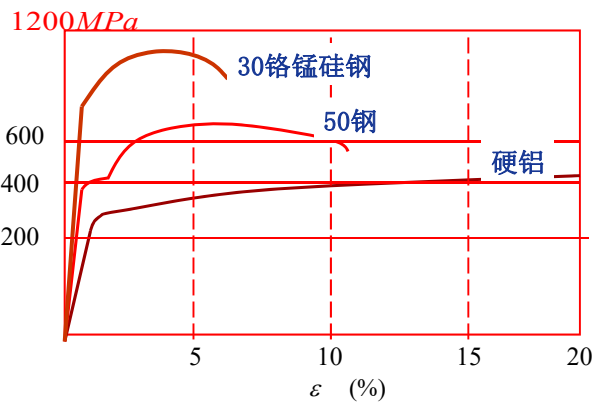
破坏具有突发性，不宜做受拉构件



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

3.其他金属材料拉伸力学性能



共有的特点:

断裂时具有较大的残余变形, 均属塑性材料

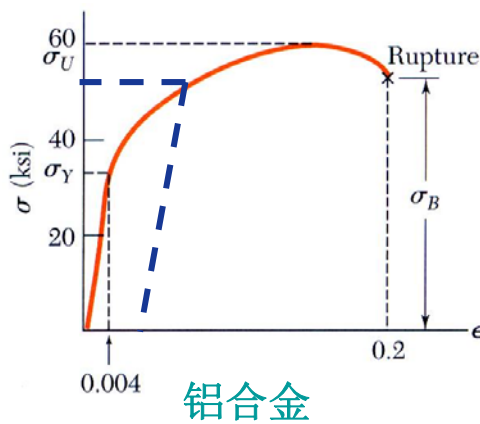


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

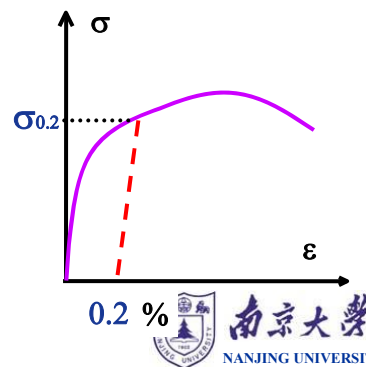
www.slope.com.cn

有些材料没有明显的屈服阶段

对于这些材料用名义屈服应力表示 $\sigma_{0.2}$



铝合金

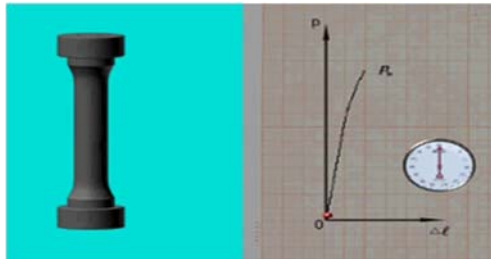


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

二 材料压缩力学性能

1. 低碳钢压缩力学性能

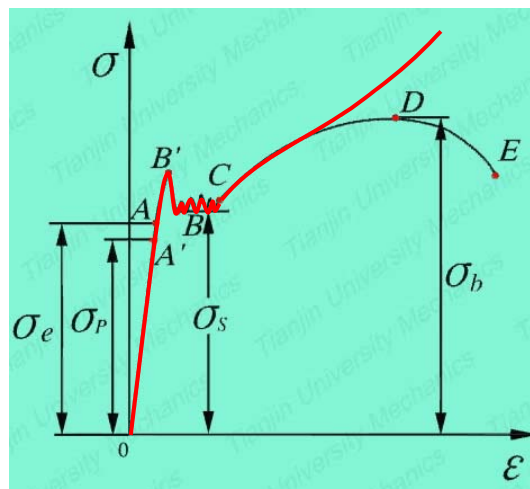


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

弹性阶段、屈服阶段均与拉伸时大致相同

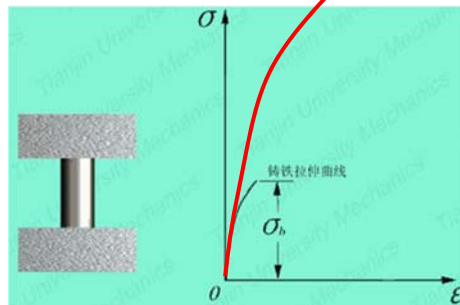
超过屈服阶段后，
外力增加面积同时相应增加，无
破裂现象产生
(变形过大导致
无法正常使用)



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

2. 铸铁压缩力学性能



$$\sigma_b^{\text{压}} \approx (4 \sim 5) \sigma_b^{\text{拉}}$$



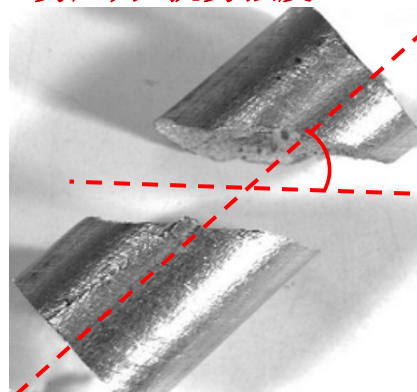
第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

剪应力 > 抗剪强度

$$\begin{cases} \sigma_\alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2} \sigma \\ \tau_\alpha = \frac{\sin 2\alpha}{2} \sigma \end{cases}$$

$$\alpha = 45^\circ \text{ 时, } \tau_{\alpha \max} = \frac{\sigma}{2}$$



破坏面大约为35-39°的斜面

为什么不刚好是45度?

因为斜截面上同时存在正应力引起的摩擦力的影响



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

铸铁的摩擦系数 $f \doteq \tan 20^\circ$

$$\begin{cases} \sigma_\alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2} \sigma \\ \tau_\alpha = \frac{\sin 2\alpha}{2} \sigma \end{cases} \rightarrow \tau_\alpha' = \tau_\alpha + f \sigma_\alpha = \frac{\sin 2\alpha}{2} \sigma + \frac{1 + \cos 2\alpha}{2} \sigma \tan 20^\circ$$

当 $\frac{d\tau_\alpha'}{d\alpha} = 0$ 时, τ_α' 达到最大值

$$\tan 2\alpha \tan 20^\circ = 1$$

$$\alpha = 35^\circ$$



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

3. 混凝土和石料受压性能



$$\sigma_b^{\text{压}} \geq 10 \sigma_b^{\text{拉}}$$



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn



土的三轴压缩试验



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn



少筋梁：受拉区钢筋布置过少，混凝土受拉开裂（混凝土抗拉强度很小）



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

建筑物墙体的剪切破坏（地震后）



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

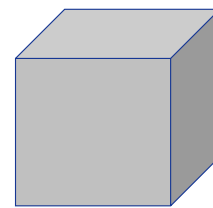
www.slope.com.cn

混凝土标准立方体抗压强度: 边长为150mm的立方体试块，在 $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 的温度和相对湿度在90%以上的潮湿空气中养护28d后，用标准的试验方法测得的抗压强度

混凝土等级: C15, C20, C25, C30, ..., C70, C75, C80

抗压强度
=15MPa

150mm



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

三 复合材料的力学性能

组成：基体材料、增强材料

纤维增强塑料(Fiber Reinforced Polymer)

- 玻璃纤维增强塑料（GFRP），俗称玻璃钢
- 碳纤维增强塑料（CFRP）

特点：重量轻、比强度高、比刚度高

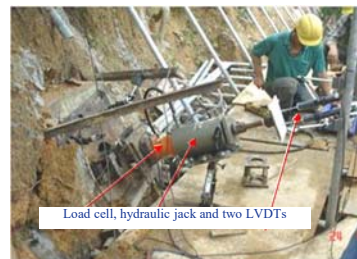


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

GFRP土钉用于边坡支护的研究

Zhu, H. -H., Yin, J. -H., Yeung, A. T., and Jin, W. (2011). Field pullout testing and performance evaluation of GFRP soil nails. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 137(7), 633-641.*

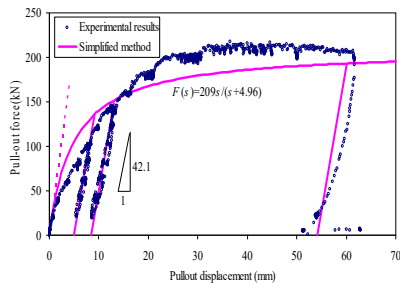


Load cell, hydraulic jack and two LVDTs



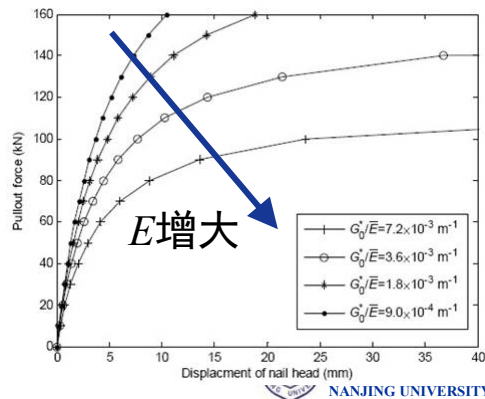
第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn



拉拔力-钉头位移曲线

$$\frac{d^2 F}{dx^2} = \frac{4G_0^* F}{\pi^2 \bar{E} D^3 \tau_{ult}^2} \left(\frac{dF}{dx} - \pi D \tau_{ult} \right)^2$$



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

四 材料力学性能指标

(1) 性能指标:

弹性抗力指标: 比例极限 σ_p 、弹性极限 σ_e

材料刚度指标: 弹性模量 E 、泊松比 μ 、剪切模量 G (Shear Modulus)、体积模量 K (Bulk Modulus)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right| \quad G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad K = \frac{E}{3(1-2\mu)}$$

第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

(2) 塑性、脆性材料性能比较：

1. 塑性：塑>脆，韧性：塑>脆
2. 抗拉强度：塑>脆，抗压强度：塑<脆
3. 塑性材料应力均匀，脆性材料应力集中
4. 金属的强度和韧性负相关

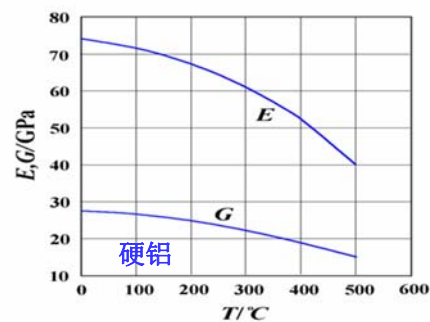
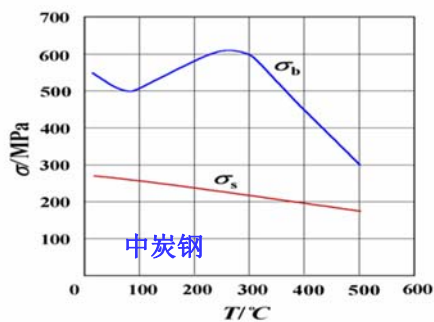


第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

五 温度对力学性能的影响

1. 升温：材料强度↓，塑性↑，弹性模量↓，泊松比↑
2. 降温：塑性↓



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn



世贸双塔之所以倒塌，主要是因为建塔的钢铁在高温燃烧下软化，而发生倒塌。

——**钢结构的天然缺陷：耐火性差**



第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

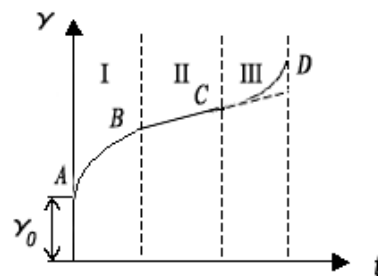
www.slope.com.cn

六 粘弹性和时效性概念

1. **蠕变 creep**: 恒定温度和应力作用下，材料的变形随时间发展而增大的现象

3个阶段：**初始蠕变-稳定蠕变-破坏蠕变**

岩石和土均会发生蠕变现象，
可视为粘弹性体或粘弹塑性体



NANJING UNIVERSITY

第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计

www.slope.com.cn

2. **(应力)松弛relaxation**: 恒定温度和应变条件下, 材料的应力随时间发展而减小的现象

3. **弹性后效elastic lag**: 在加载和卸载过程中, 材料的应变变化滞后于应力变化的现象



作业：无

www.slope.com.cn