



疲労に関する重要知識 講演資料集

「材料力学におけるモデル化」

東京工業大学名誉教授
小林英男

この資料は、(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 FQA2小委員会 における講演資料を掲載したものです。この資料を引用するにあたっては、下記を明記してください。

(一社)日本溶接協会原子力研究委員会FQA2小委員会ナレッジプラットフォーム公開資料(2017年):「材料力学におけるモデル化」東京工業大学 名誉教授 小林英男

材料力学におけるモデル化

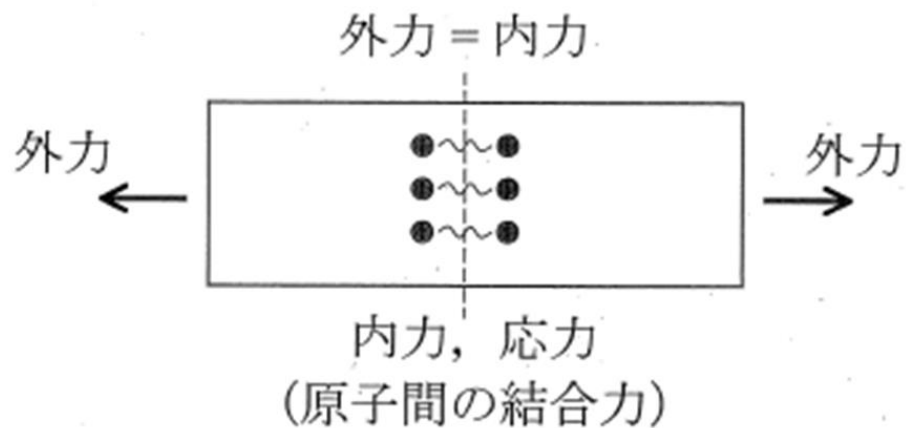
- 形状のモデル化
 - ・構造要素と作用する力の組合せ
- 応力分布のモデル化
 - ・応力の線形分布の仮定
- 応力の多軸性のモデル化
 - ・二軸応力(平面応力、薄板)の仮定

構造要素と作用する力の組合せ

- 棒の引張り(圧縮)
- 板の曲げ(引張り)
- 梁の曲げ
- 柱の圧縮
- 軸のねじり

応力の定義

$$\text{応力} \equiv \frac{\text{力(荷重)}}{\text{断面積}}$$



応力は分布する

- 分布の形は不明
- 分布の形を調べるのが弾性学の目的
- 力の作用点是对象外(サンブナンの原理)
- 応力の線形分布の仮定
(弾性学の成果の利用は結果論)

応力の線形分布の仮定

- 棒、板の引張応力の一様分布
- 梁、板の曲げ応力の線形分布
- 軸のねじり応力の線形分布

応力の大きさ

応力の線形分布の仮定

$$\sigma = \pm E \frac{Z}{R}$$

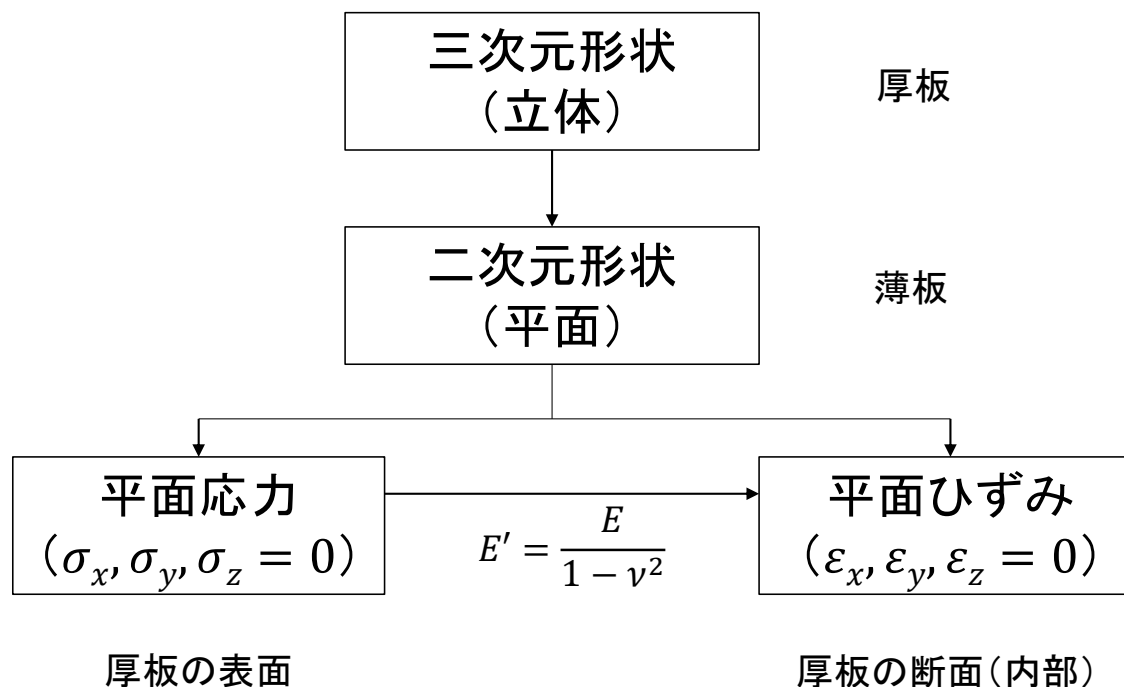
力と応力の関係
(外力と内力のつり合い)

$$M = \int_A \sigma z dA = E \frac{I}{R}$$

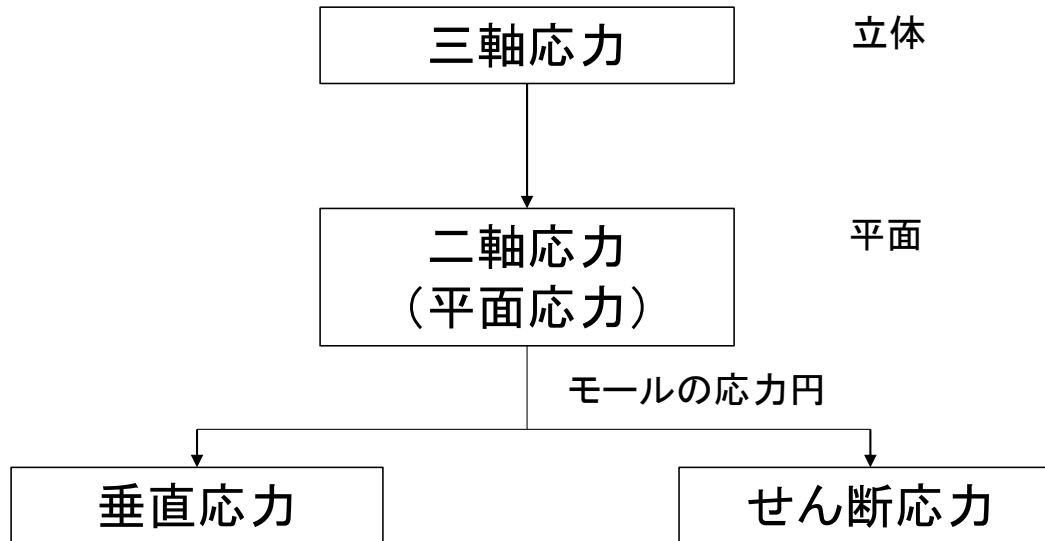
応力の大きさ

$$\sigma = \pm M \frac{Z}{I}$$

三次元形状と二次元形状



応力の多軸性のモデル化



垂直応力とせん断応力の使い分け

- 単軸引張試験における材料の応力-ひずみ曲線(垂直応力表示、せん断応力表示の区別なし、 $\tau = \sigma / 2$)
- 等二軸引張(圧縮)試験において材料の塑性変形なし($\tau=0$ では塑性変形できない)
- 最大せん断応力と二軸の主応力(垂直応力)の関係

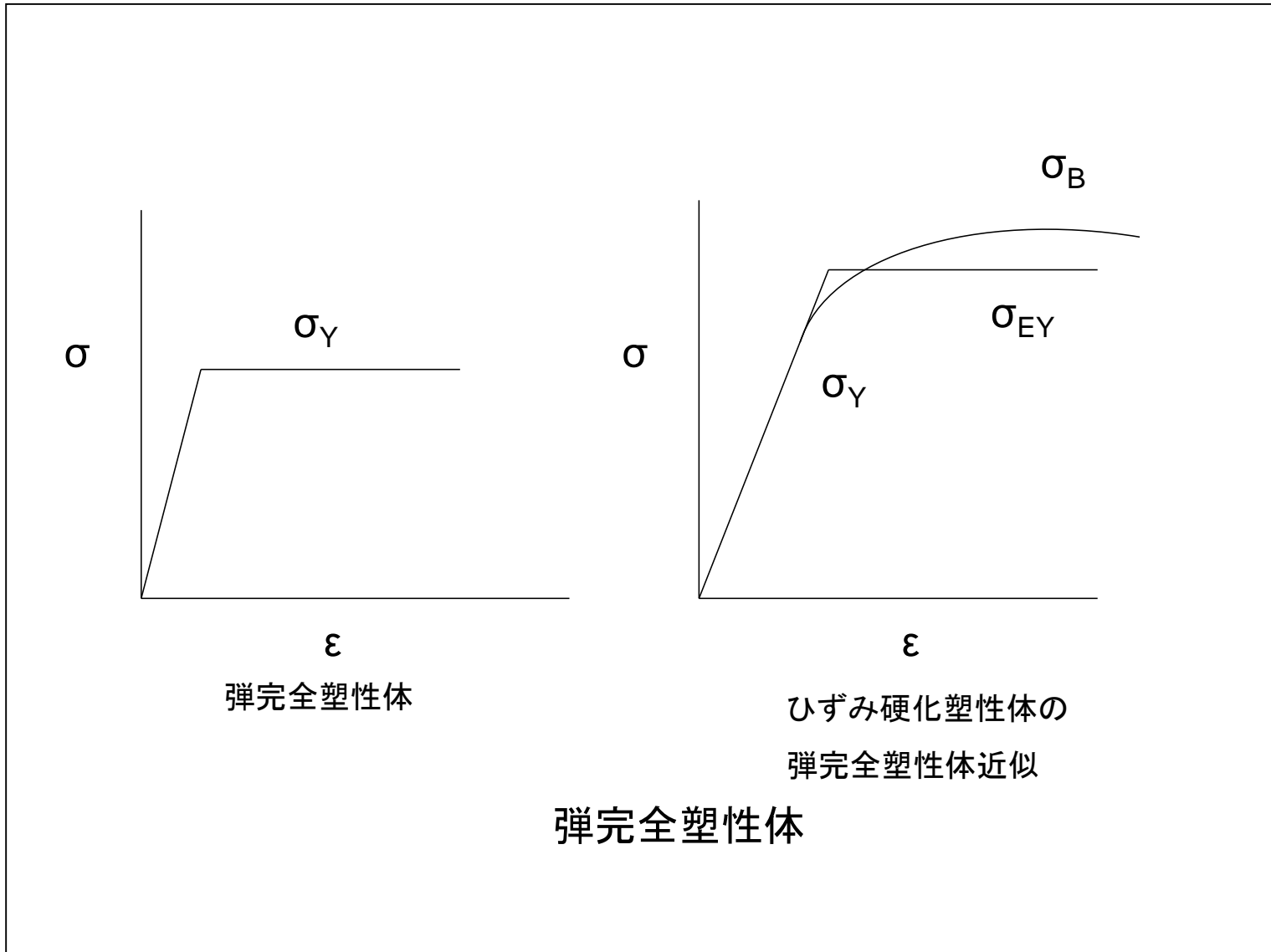
$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

塑性変形のモデル化

- 構成方程式のモデル化
- メカニズムのモデル化

弾塑性変形の構成方程式

- 弾性体
- 弾完全塑性体
- ひずみ硬化塑性体
(全ひずみ理論に従う塑性体)
- ひずみ増分理論は対象外



弾完全塑性体のモデル化

- ひずみ硬化塑性体の弾完全塑性体近似
- 有効性降伏応力(流動応力)
 - $\sigma_{EY} = \sigma_Y$ (弾完全塑性体)
 - $\sigma_{EY} = \frac{\sigma_Y + \sigma_B}{2}$
 - $\sigma_{EY} = \sigma_B$
- σ_{EY} は材料定数(近似が成立するように設定)

モデル化の有効性

- 解析が容易
- 応力の線形分布
- 重ね合わせの原理の適用

梁の塑性崩壊の解析

- 材料力学の学識(力と応力の関係)で解析可能
- 引張りと曲げが作用する矩形断面梁
- 見掛け上の弾性応力表示

- ・引張応力 $P_m = \frac{F}{bh}$

- ・曲げ応力 $P_b = \frac{6M}{bh^2}$

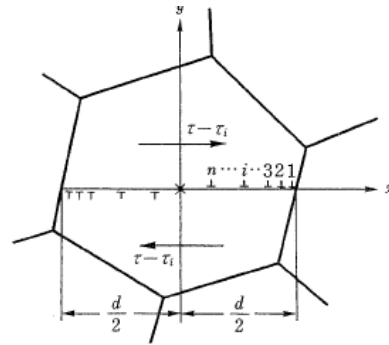
- 塑性崩壊条件 $\frac{P_b}{\sigma_{EY}} = \frac{3}{2} \left[1 - \left(\frac{P_m}{\sigma_{EY}} \right)^2 \right]$

破壊力学の解析

- 引張負荷の塑性域と応力分布
- 除荷(圧縮負荷)の塑性域と応力分布
- 両者の重ね合わせ

塑性変形のメカニズムのモデル化

- 多結晶体の塑性変形は複数のすべり面のすべりの累積
- すべりの駆動力はすべり面に作用するせん断応力
- 単一のすべり面(最大せん断応力面)のすべりにモデル化
- すべり面分離により伸びを表現
- 体積不変の法則を満足



(a) 結晶粒界に堆積した同一すべり面上の刃状転位群

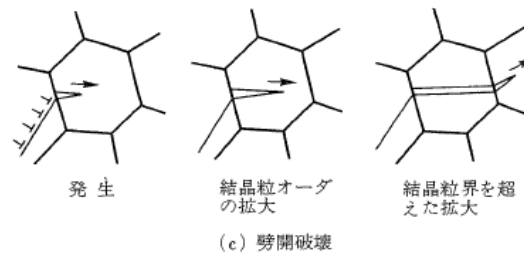
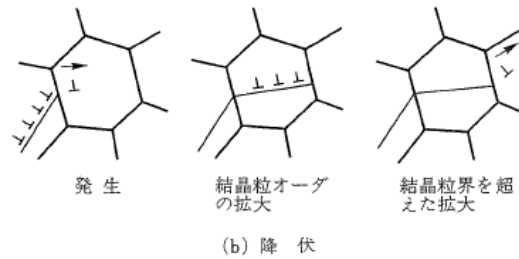
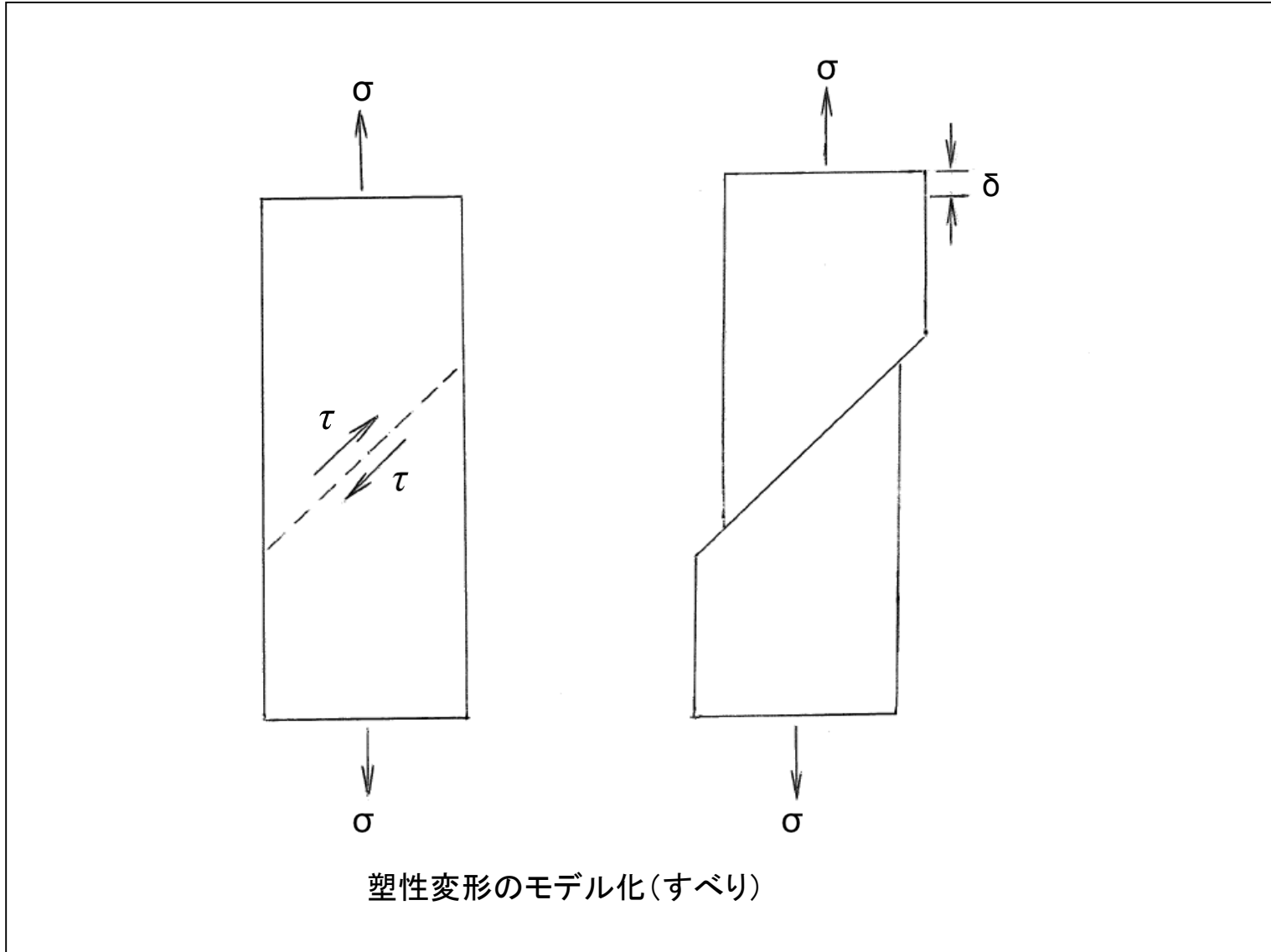


図 2.4 多結晶の降伏と劈開破壊の過程



延性破壊のメカニズム

- すべり面分離
 - 純金属
 - 丸棒の点状破壊
 - 板ののみの刃先状破壊
- 微小空洞の成長と合体
 - 第二相粒子(介在物)
 - カップコーン破壊

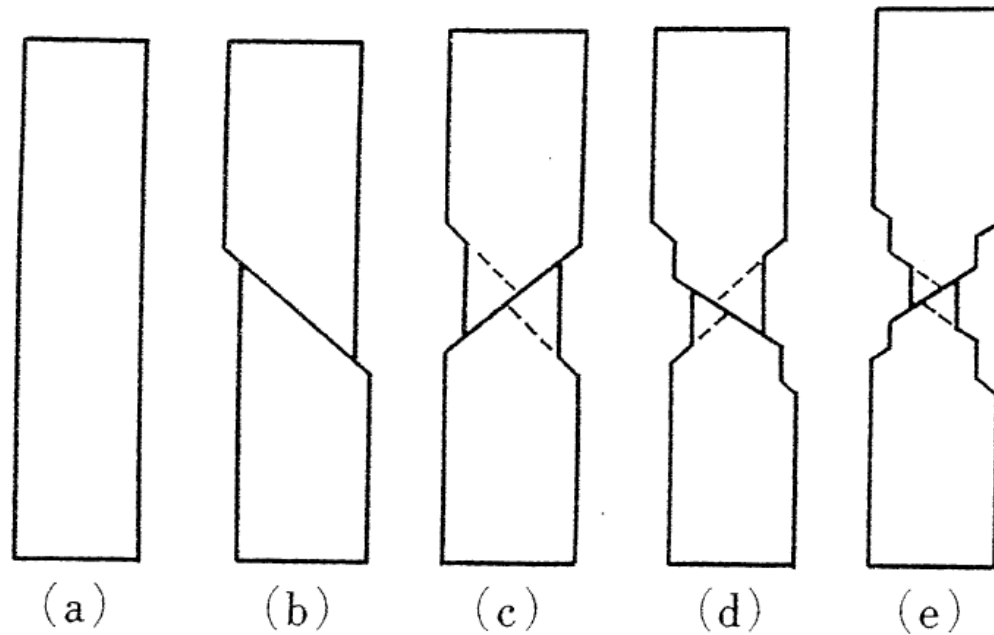


図 2.14 点状破壊, のみの刃先状破壊の過程

破壊力学への適用

- き裂先端でのすべり面分離
- き裂先端の塑性鈍化
- き裂先端開口変位

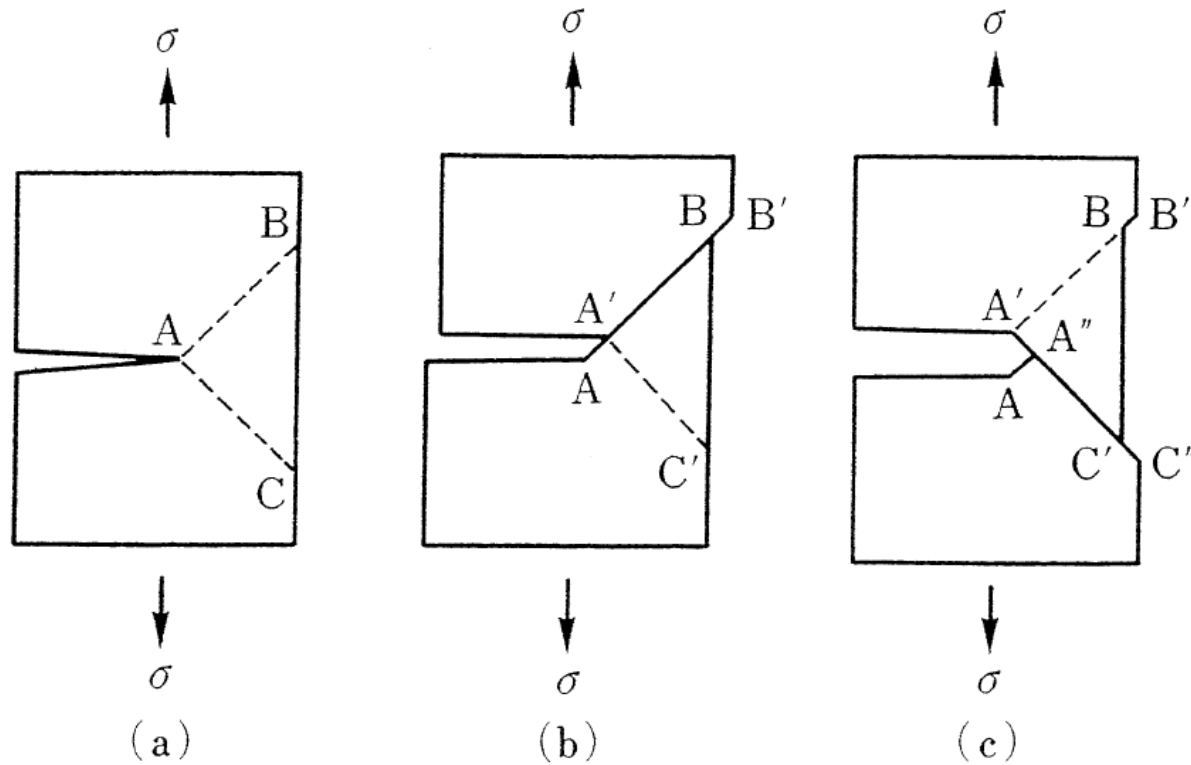


図 5.2 き裂先端でのすべり面分離機構²⁾

き裂先端でのすべりのメカニズム

- き裂先端が転位源
- 転位射出は降伏応力と無関係
- 塑性域形成にはき裂先端以外の転位源が寄与

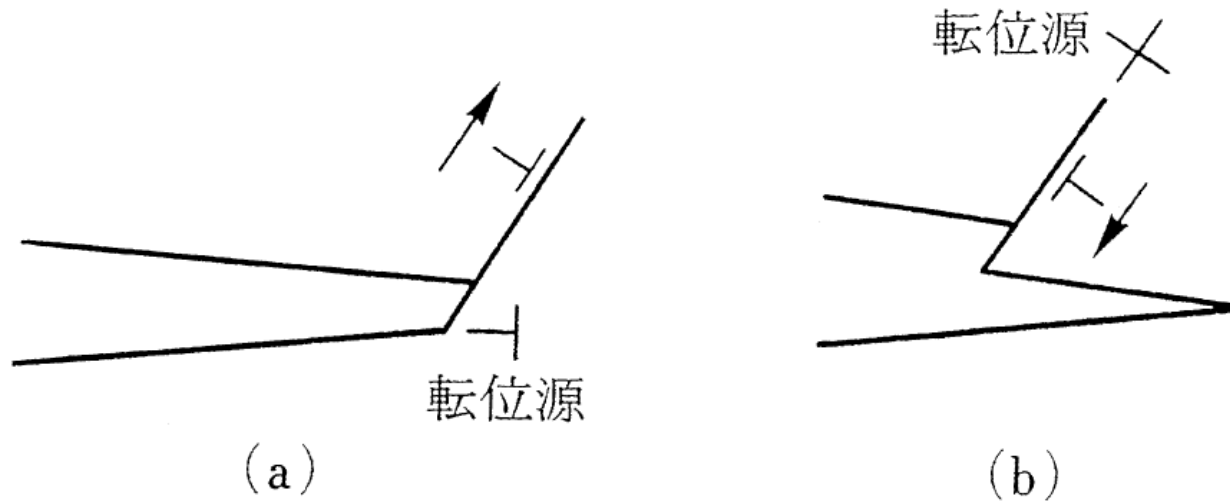


図 5.3 転位源が (a) き裂先端の場合と (b) き裂先端以外の場合の比較³⁾

疲労破壊への適用

- 疲労き裂の発生のメカニズム
- 第1段階のき裂進展のメカニズム
- 第1段階から第2段階への遷移のメカニズム
- ストライエーションの形成のメカニズム

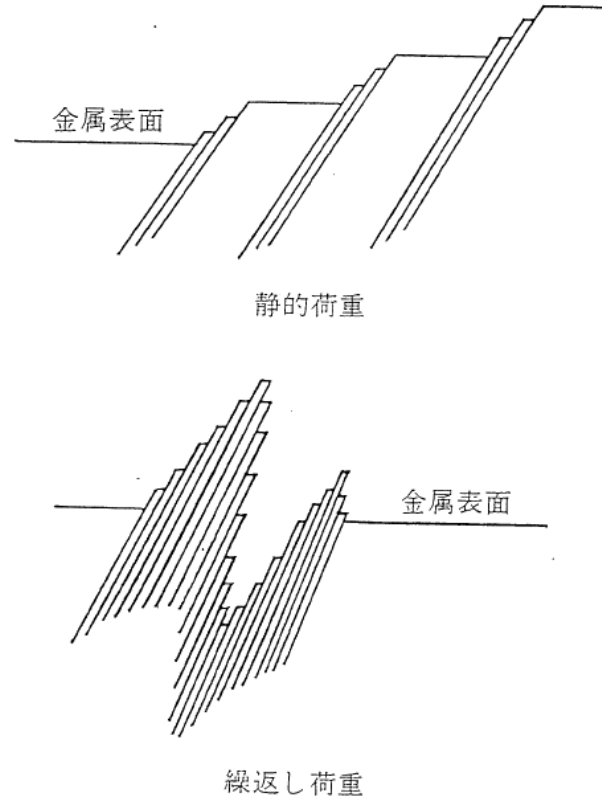


図 5・81 静的荷重下と繰返し荷重下のすべり帯の断面形状

P. J. E. Forsyth(中沢 一, 小林英男訳): 金属疲労の基礎, 養賢堂, (1975), 39.

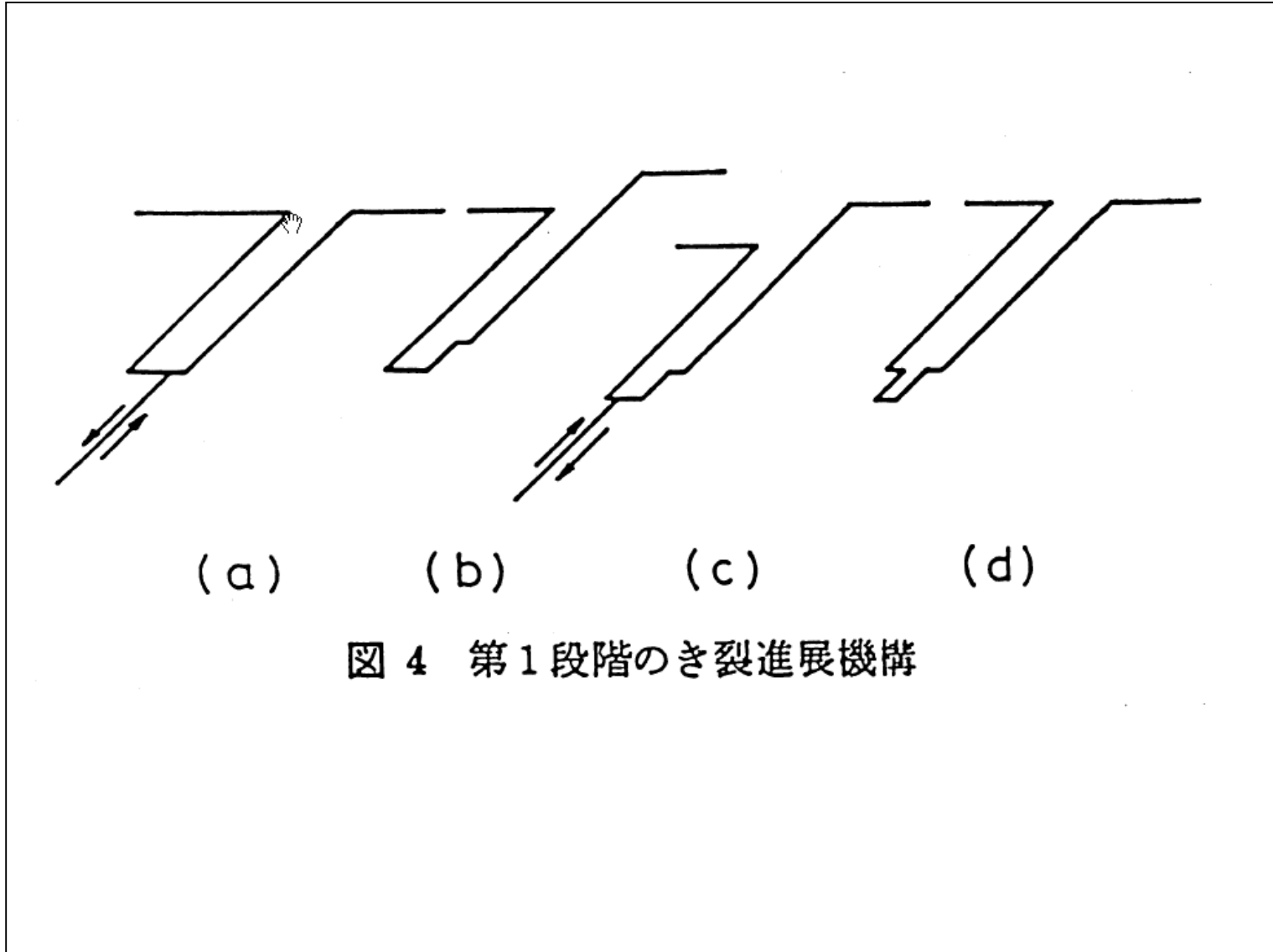


図 4 第 1 段階のき裂進展機構

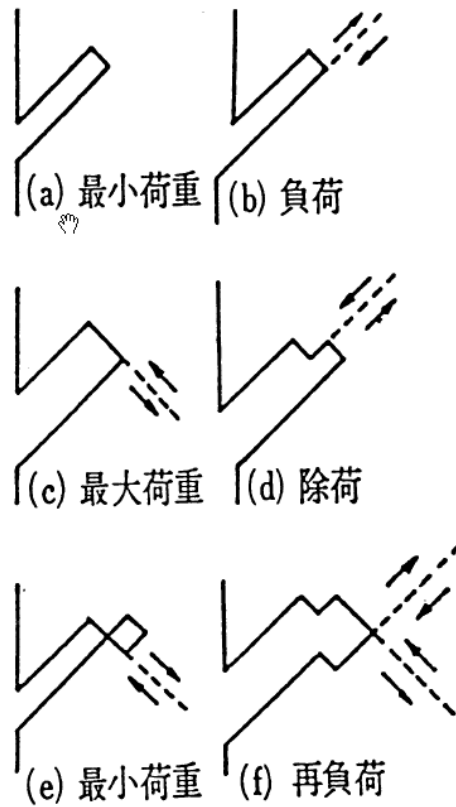
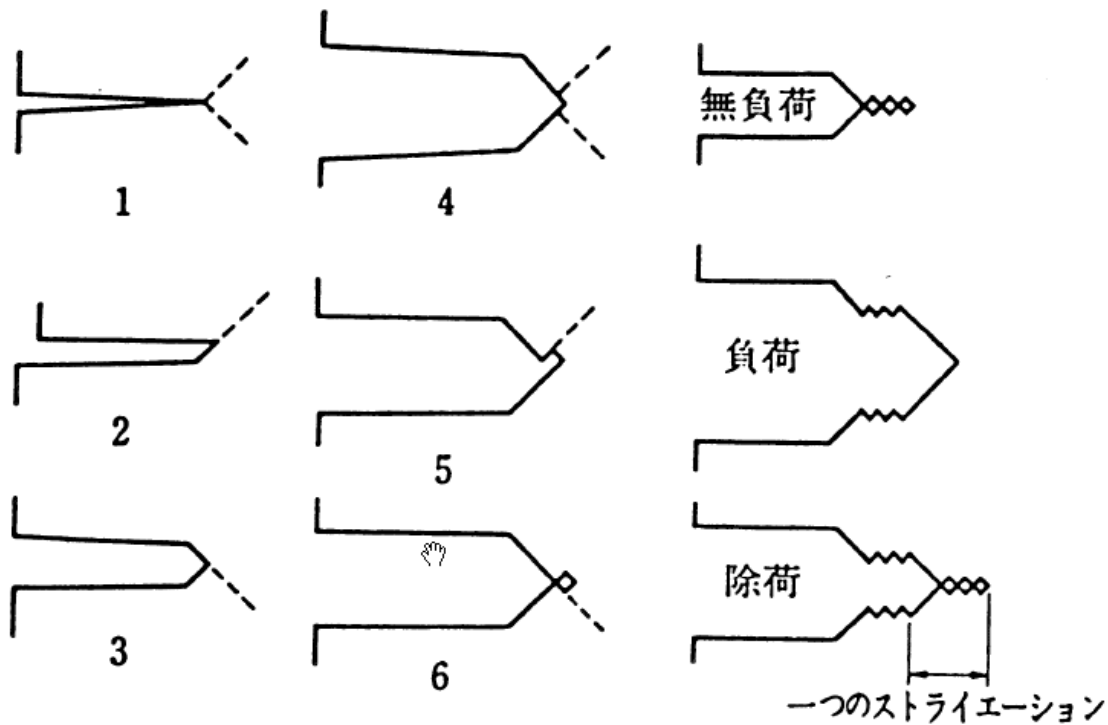


図 5 第1段階から第2段階
への遷移機構



(a) 負荷過程 (b) 除荷過程 (c) 1サイクル負荷

図 9.12 ストライエーションの形成機構¹²⁾

Unzipping モデル

- 従来のモデル

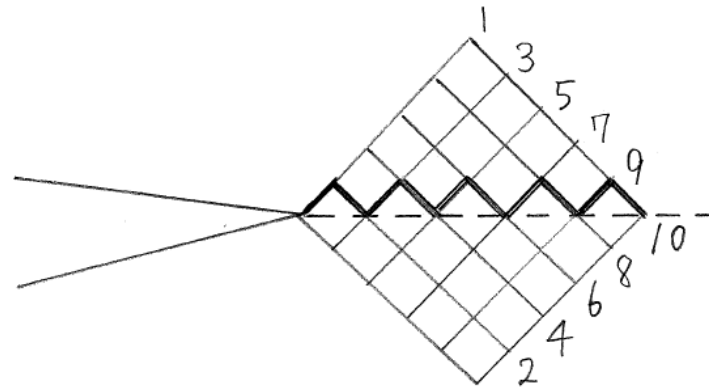
き裂長さ増分 = (き裂先端開口変位) / 2

- Unzipping モデル

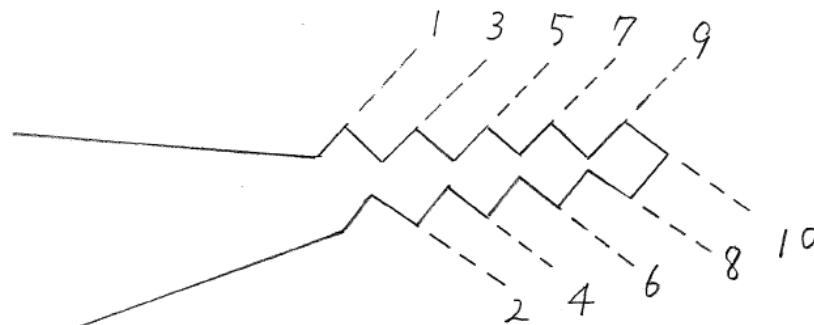
開口せずに進展するメカニズム

(Liu, H.W and Kobayashi, H.,

Stretch Zone Width and Striation Spacing –
The Comparison of Theories and Experiments,
Scripta Metallurgica, Vol.14, pp.525-530, 1980)



(a)



(b)

Unzipping Model of Crack Growth

関数関係のモデル化

□ 線形関係

- ・フックの法則 $\sigma = E\varepsilon$

□ 非線形関係

- ・塑性変形 $\sigma = C\varepsilon^n$

- ・S-N曲線 $\sigma_a N_f^k = Const.$

□ 遷移事象

- ・吸収エネルギーの温度依存性

金属材料の水素脆化

- 水素脆化、水素脆性(hydrogen embrittlement)は正しくない用語
- 脆性破壊(へき開破壊)とは関係ない
- 破壊靱性の低下なし
- 拡散性水素が塑性変形(すべり)を助長し時間依存型破壊をもたらす事象

水素脆化は応力腐食割れ

- 広義の応力腐食割れ(SCC, Stress Corrosion Cracking)
 - 活性径路割れ(APC, Active Pass Corrosion)
 - 水素誘起割れ(HIC, Hydrogen Induced Cracking)

- 環境脆化は応力腐食割れ
 - 高強度鋼の水素脆化、遅れ破壊、置き割れ
 - 炭素鋼のアルカリ脆化
 - 黄銅のシーズンクラッキング

材料試験方法

- SSRT(Slow Strain Rate Test)試験

- 応力腐食割れ試験(水素誘起割れ試験)
 - da/dt - K 関係
 - K_{ISCC} (K_{IH})

- 疲労試験
 - S - N 関係
 - da/dN - ΔK 関係

相対絞り

- SSRT試験結果の判定基準のうちで、最も重要な材料特性は絞り
- 相対絞り(RRA, Relative Reduction of Area)の定義

$$RRA = \frac{\text{水素中SSRT試験の絞り}}{\text{大気中または不活性ガス中SSRT試験の絞り}}$$

- 判定基準
絞りの実測値 \times RRA \geq 絞りの規格値

オーステナイト系ステンレス鋼の SSRT試験に影響を及ぼす因子

- 化学成分
- 水素純度
- 水素圧力
- 試験温度
- 試験速度
- 試験片寸法

オーステナイト安定度に及ぼす化学成分の影響

規格におけるオーステナイト系ステンレス鋼の化学成分範囲

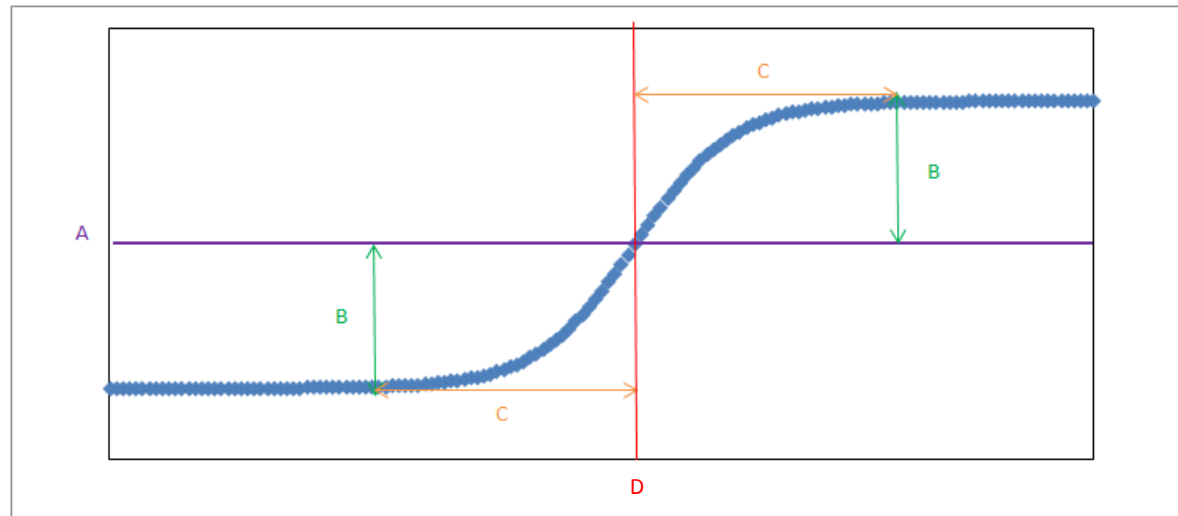
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Cu
SUS304	≦0.08	≦1.00	≦2.00	≦0.045	≦0.030	8.00-10.50	18.00-20.00	規定なし	規定なし	規定なし
SUS304L	≦0.03	≦1.00	≦2.00	≦0.045	≦0.030	9.00-13.00	18.00-20.00	規定なし	規定なし	規定なし
SUS316	≦0.08	≦1.00	≦2.00	≦0.045	≦0.030	10.00-14.00	16.00-18.00	2.00-3.00	規定なし	規定なし
SUS316L	≦0.03	≦1.00	≦2.00	≦0.045	≦0.030	12.00-15.00	16.00-18.00	2.00-3.00	規定なし	規定なし
SUS310S	≦0.08	≦1.50	≦2.00	≦0.045	≦0.030	19.00-22.00	24.00-26.00	規定なし	規定なし	規定なし

Ni当量式 規格に規定されている化学成分で判別可能

$$\text{Nieq (mass\%)} = 12.6 \text{ C} + 0.35 \text{ Si} + 1.05 \text{ Mn} + \text{Ni} + 0.65 \text{ Cr} + 0.98 \text{ Mo}$$

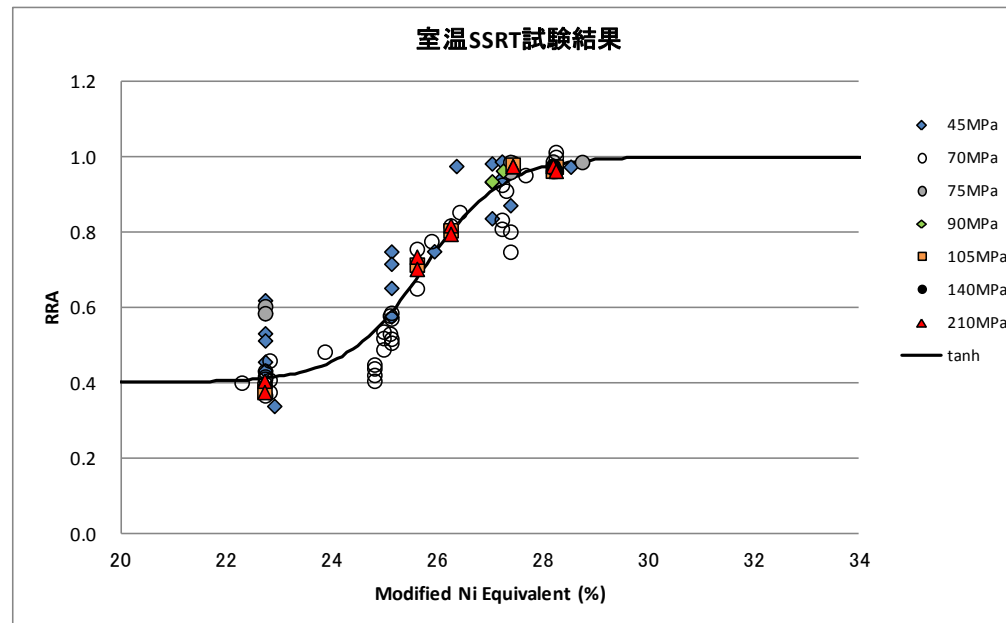
・平山 俊成、小切間 雅彦、Fe-Cr-Ni系マルテンサイト変態に対する化学組成の影響、日本金属学会誌 34(1970)507-510

Tanh曲線近似

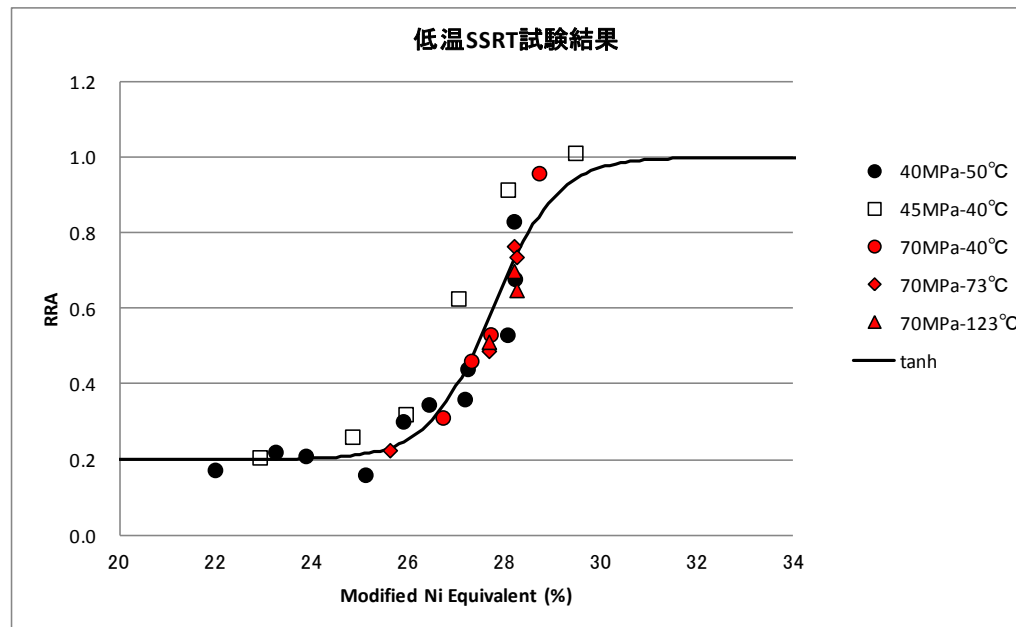


$$RRA = A + B \tanh((\text{Ni当量} - D)/C)$$

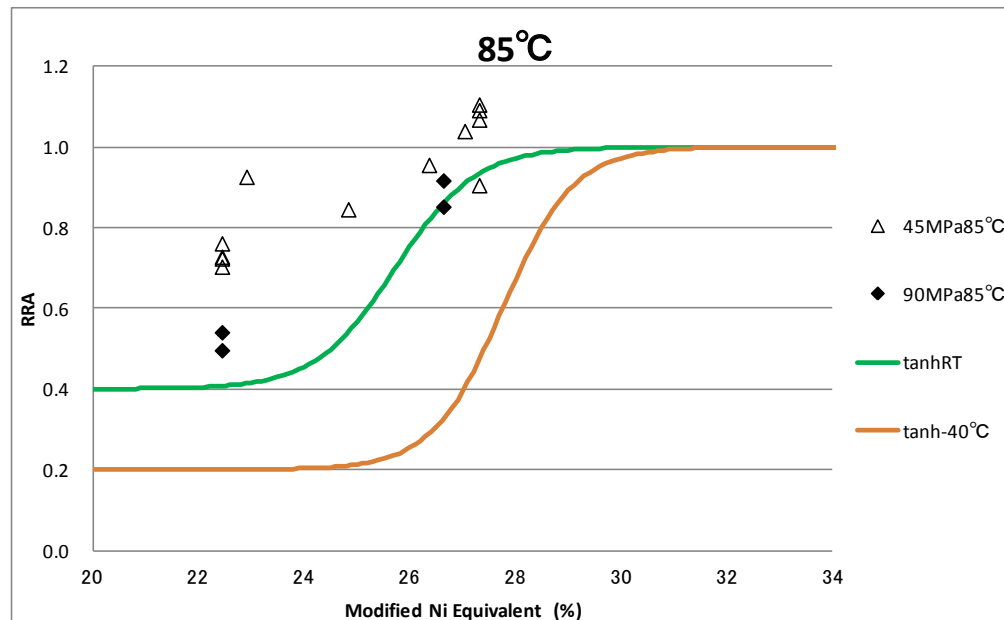
室温データの検証



低温データの検証



高温データの検証



オーステナイト系ステンレス鋼の 評価の結論

□ SUS316およびSUS316Lの使用

- ・絞りが75%以上、Ni当量が28.5%以上の場合に、70MPaにおいて-40～85℃で使用できる。
- ・絞りが75%以上、Ni当量が26.3%以上の場合に、90MPaにおいて20～85℃で使用できる。

参考文献

□ 破壊靱性に及ぼす水素の影響

H.Kobayashi, K.Hirano, H.Kayakabe, and H.Nakazawa, Influence of Hydrogen on Fracture Toughness of High Strength Steels, Advances in Fracture Research, 5th International Conference on Fracture, Cannes, France, Vol.4, pp.1909-1916, (1981-4-2)

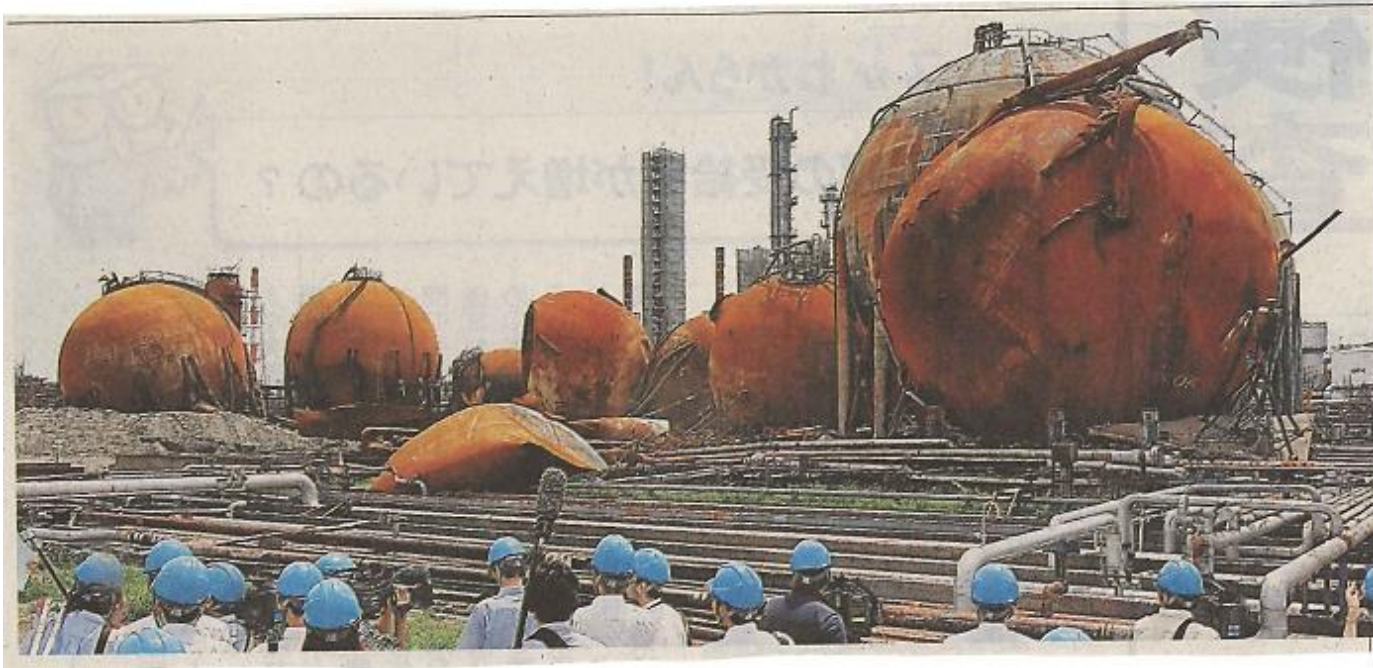
- 山田敏弘、小林英男、論文/水素ステーション設備に使用する材料の選定基準、高圧ガス、Vol.49, No.10, pp.885-893, (2012)

圧力設備の耐震性能評価

- LPガス球形貯槽の火災爆発事故
- 鋼管ブレース構造の耐震性能評価
- 高圧ガス設備の耐震性能評価
- 支持構造物の耐震性能評価
- 溶接継手の耐震性能評価
- 基礎ボルトの耐震性能評価

コスモ石油千葉製油所の 火災爆発事故の概要

- 東北地方太平洋沖地震で、LPガス出荷設備の球形貯槽1基の鋼管ブレースが破断
- 直後の茨城県沖地震で、球形貯槽が倒壊
- 接続配管を破損し、LPガスが漏えい
- 大規模火災が継続(10日間)
- 設備内の球形貯槽17基が破裂、爆発



3

事故の社会的影響

- 隣接事業所の火災事故 2件
- 近隣住宅地の被害と一時避難勧告
- 周辺地域の風評被害
- 福島第一原子力発電所の事故がなかったら
(いじめ問題)

事故の原因と教訓

- 鋼管ブレース構造の耐震性能の不足
- 開放検査において貯槽の満水状態を継続
- 貯槽間の接続配管系が複雑で、可とう性が低下
- 緊急遮断弁の開状態での固定措置
- 大規模火災の想定なし(シビヤアクシデントとアクシデントマネジメント)

事例1



- 14:46の東北地方太平洋沖地震で、水で満液状態であった球形貯槽の複数のブレースが損傷
- 15:15の茨城県沖地震後に貯槽が倒壊

事例2



- ・14:46の東北地方太平洋沖地震、15:15の茨城県沖地震後に、2基の球形貯槽において、複数のブレースが損傷しているのが発見された。
- ・1基は水で満液、他の1基は液化ブタンで満液の状態であった。

筋交い構造

- 木造建屋
- 筋交い(すじかい)、筋違い(すじちがい)
- 柱と柱の間に、2本を斜めに交差させて、
取付ける補強材
- 角材、交差部分の接合なし

ブレース構造

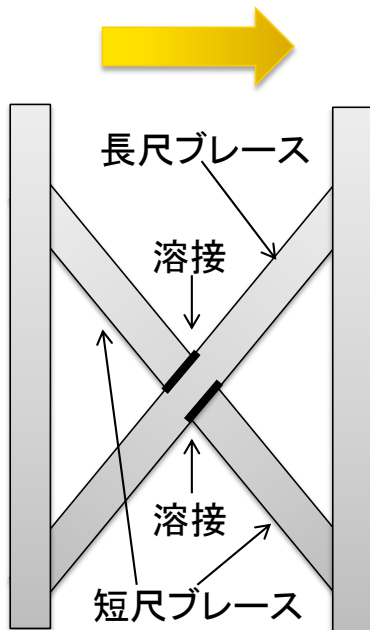
- 貯槽などの支持構造
- 鋼管ブレースとタイロッドブレース
- 交差する2本の鋼管ブレースの軸中心線は食い違い、取付ける柱(鋼管)の軸中心線とも一致しない。
- 2本の鋼管ブレースの一体化溶接構造により、軸中心線の不一致を解消

ブレースの耐震性能評価

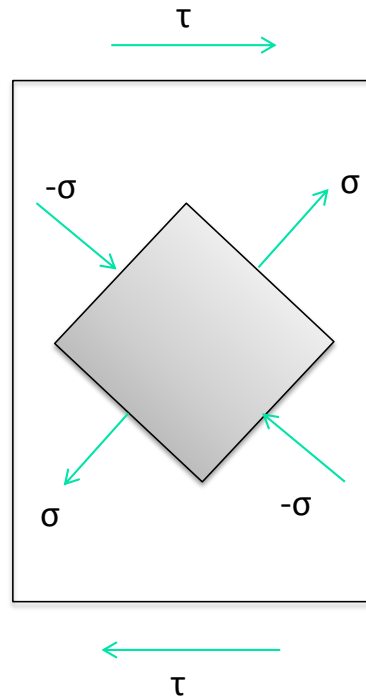
- 耐震告示
ブレース1本のみでの評価

- 2本の交差するブレースの溶接構造
耐震告示で評価の明示なし
応力の多軸性あり

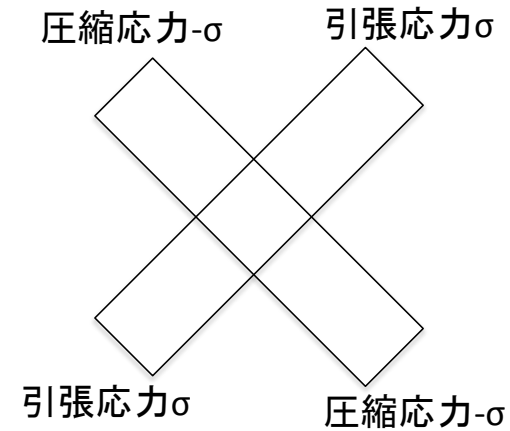
鋼管ブレース構造の応力



交差するブレースの
溶接構造



せん断応力と二軸応力

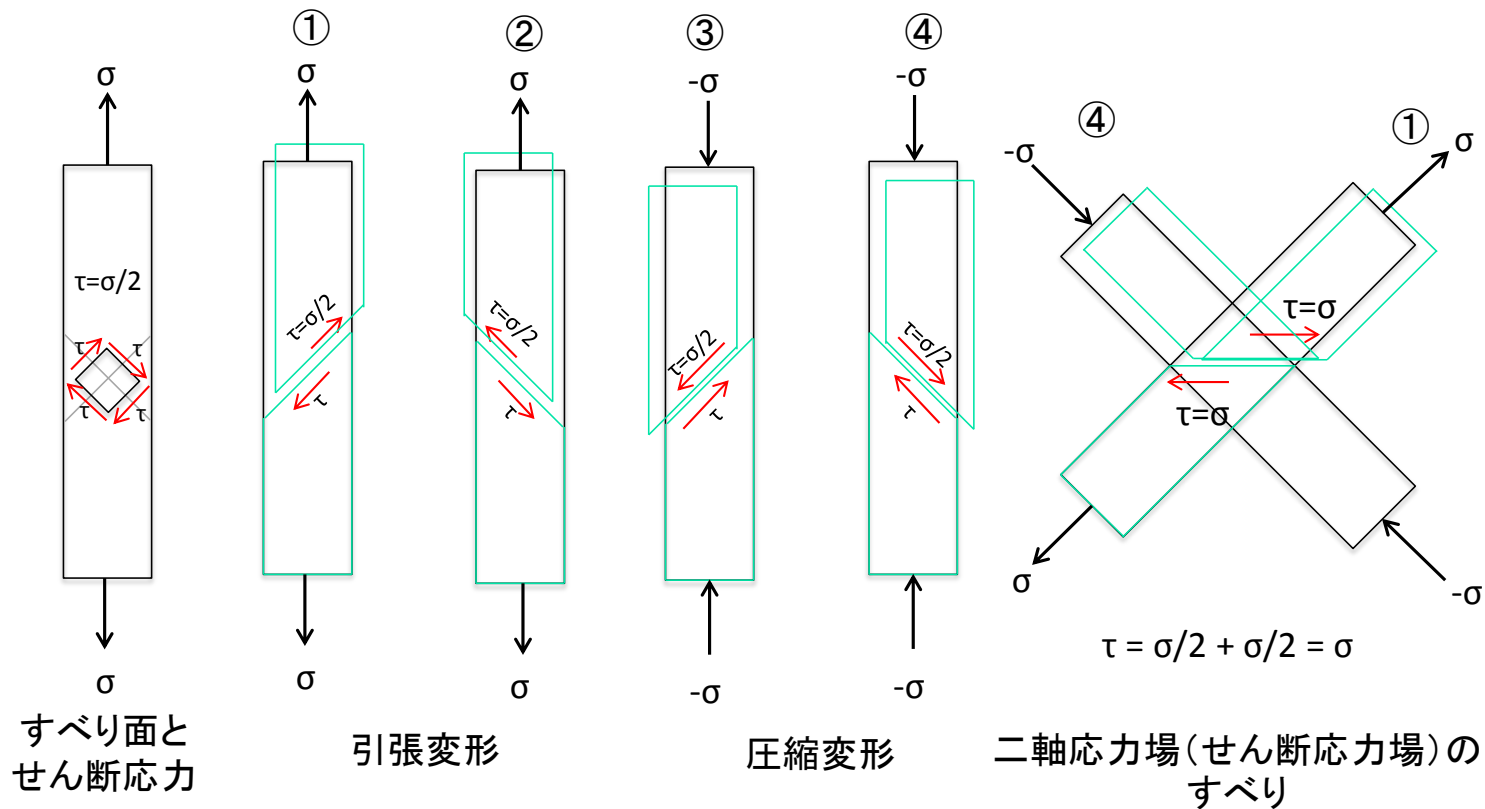


溶接構造の応力

鋼管ブレース構造の応力

- せん断力 S と圧縮力 P が作用
- 2本の交差するブレースの応力
 - ・引張ブレース
 $\sigma_t = AS - BP$
 - ・圧縮ブレース
 $\sigma_c = -AS - BP$
- 圧縮ブレースの崩壊が先行(従来)
 - ・交差部分の評価なし

塑性変形のモデル化(すべり)とせん断応力



相当応力

- 多軸応力の一軸応力への置換え
- ミーゼスの相当応力

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\}}$$

- トレスカの相当応力

$$\sigma_{\text{eq}} = \sigma_1 - \sigma_3$$

- せん断応力場(σ 、 $-\sigma$)の応力差

$$\text{応力差} = \sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma - (-\sigma)) = 2\sigma$$

鋼管ブレース構造の破壊モード

- 長尺ブレース
 - ・交差部分は鋼管の実体あり
- 短尺ブレース
 - ・交差部分は鋼管の実体なし(長尺ブレースの鋼管)
- 鋼管ブレース(長尺または短尺)の破壊モード
 - ・引張りによる塑性崩壊
 - ・圧縮による塑性崩壊または座屈(圧壊)

交差部分の破壊モードの検証

- 実体のある長尺ブレースの破壊
- 長尺ブレースが引張応力を受ける場合
- ただし、長尺ブレースの圧壊なし
- しかし、短尺ブレースの圧縮応力が重畳
- 相当応力(せん断応力)の増大による塑性崩壊

ブレース破断のメカニズム

- 長尺ブレースが引張応力を受ける場合、交差する短尺ブレースの圧縮応力が重畳して、交差部分の相当応力(せん断応力)が増大する。
- 地震動で長尺ブレースは容易に引張降伏し、塑性変形する。
- 地震動の繰返し負荷で長尺ブレースは引張方向に伸び、絞りを生じ、破断する。
- 同時に、交差する短尺ブレースとの溶接継手が破断する。

まとめ

- 2本の鋼管ブレースの交差部分では、二軸応力により、相当応力(せん断応力)が増大し、塑性変形による破断の原因となる。
- 長尺ブレースが引張応力を受ける場合が、交差する溶接取付けの短尺ブレースが引張応力を受ける場合よりも、相当応力は高くなる。すなわち、長尺ブレースの破断が先行する。
- 現行のブレースの耐震性能の評価に、交差部分の相当応力を考慮する必要がある。

参考文献

- 小林英男、大野卓志、佐野尊、小山田賢治、
球形貯槽支柱の鋼管ブレース構造の耐震
性能に関する研究、
日本機械学会論文集(A編), Vol.79,
No.864, pp.1329-1339,(2013-8)

高圧ガス設備耐震設計基準の改正

- 新設
 - ・平成25年11月29日改正、平成26年1月1日施行
- 既設対応
 - ・平成26年5月21日
 - ・経済産業省大臣官房商務流通保安審議官
→各都道府県知事
 - ・「鋼管ブレースを有する球形貯槽の耐震性の向上について」
耐震評価方法および耐震工事の実施について、
1年以内に都道府県へ報告

鋼管ブレースの強度評価

□ 交差する2本の鋼管ブレース(①と②、仰角 θ)の応力

① 引張応力 σ_t'

② 圧縮応力 σ_c'

□ 鋼管ブレース①の交差部分の応力

引張応力 $\sigma_t = \sigma_t' + \sigma_c \cos 2\theta$

せん断応力 $\tau = \sigma_c' \sin 2\theta$

□ 判定基準(許容引張応力 f_t)

$$\sqrt{\sigma_t^2 + 3\tau^2} \leq f_t$$

強度設計(耐震設計)の課題

- 圧力容器(塔槽類)の設計
 - ・圧力容器 規格体系
 - ・機械工学(材料力学)の世界
- 支持構造物の設計
 - ・建築構造物 規格体系
 - ・建築学(構造力学)の世界
- 両者の整合なし(用語から違う)
 - ・規格体系の不整合
 - ・圧力容器と支持構造物の接合における不整合

材料力学と構造力学の違い

□ 弾塑性学

- ・実際の構造(形状)が対象
- ・応力分布と応力成分(多軸)

□ 材料力学

- ・構造を部材(単純形状)にモデル化
- ・応力分布は線形を仮定、応力成分は二軸
- ・部材の接合(形状不連続)も対象

□ 構造力学

- ・構造を部材(棒、板)の集合体としてモデル化
- ・内力(応力ではない)
- ・部材の接合(節点)は対象外

基礎ボルトの耐震性能

- 兵庫県南部地震の教訓
 - 基礎ボルトがねじ部で破断し、建物が崩壊
 - 限界塑性吸収エネルギー率の向上
- 材料の伸びの確保
 - 建築構造用圧延棒鋼SNRの制定
 - SS400, SS490→SNR400, SNR490
- 基礎ボルトの形状の検討
 - 軸部の降伏がねじ部の破断に先行

衝撃を受ける棒の ひずみエネルギー

- 直径 d の部分の応力 σ_0
- 一様断面の棒

$$U_a = \frac{\sigma_0^2}{2E} Al$$

- 段付棒

$$\begin{aligned} U_b &= \frac{\sigma_0^2}{2E} \frac{Al}{2} + \frac{1}{2E} \left(\frac{\sigma_0}{4} \right)^2 \frac{4Al}{2} \\ &= \frac{5}{8} U_a \end{aligned}$$

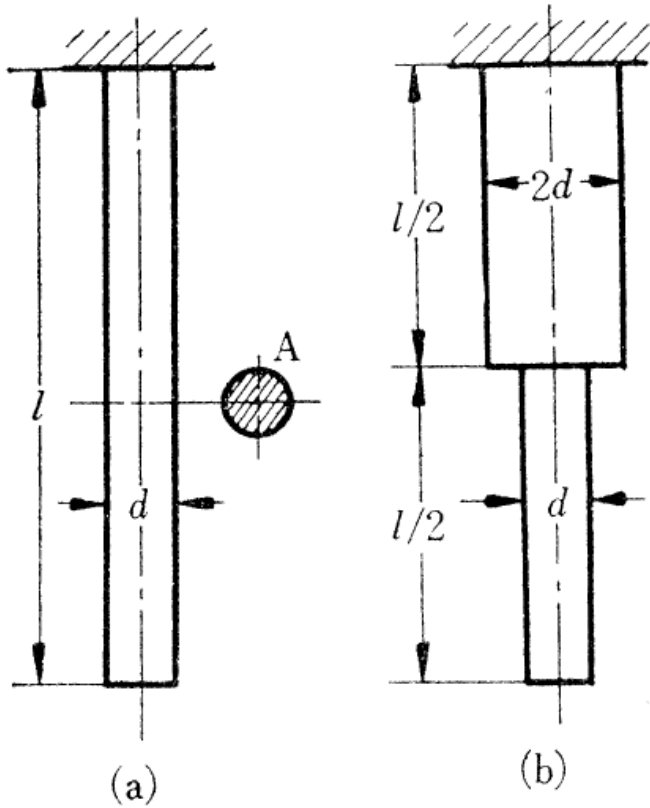


図 11.28 歪エネルギーの比較

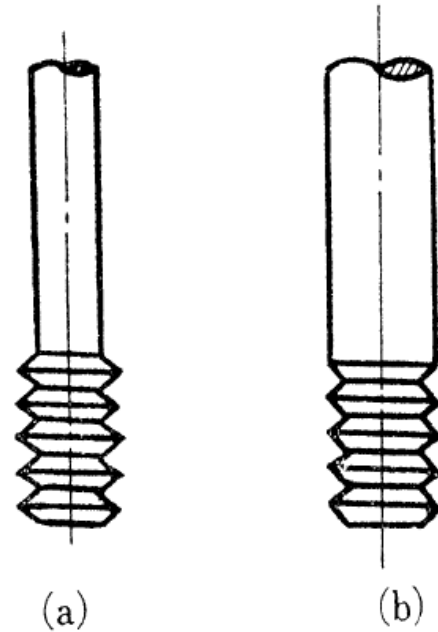


図 11.29 衝撃をうけるボルト

基礎ボルトのエネルギー吸収能力

- 軸部の降伏がねじ部の破断に先行(現行)

$$\frac{\text{ねじ部の有効断面積}}{\text{軸部の断面積}} > \frac{\text{降伏応力}}{\text{引張強さ}} = 0.7$$

- ひずみエネルギーの確保(基本)
軸部の直径 = ねじ部の谷径