第8章 クリープと環境強度

目 的 クリープ現象および環境 強度に関する基本的な 事項を理解する.



8.1 クリープ

- 8.1.1 クリープの重要性
- 8.1.2 事例紹介
- 8.1.3 クリープ曲線
- 8.1.4 クリープの機構
- 8.1.5 変形機構図

8.2 環境強度

- 8.2.1 温度の影響
- 8.2.2 環境の影響

8.1 クリープ

8.1.1 クリープの重要性

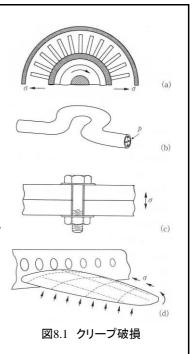
クリープ(creep)

材料に一定荷重を加えたまま、高温(融点の30~40%以上)にさらし続けた際に、ひずみが増加する現象を言う。

耐クリープ設計

所定の温度と荷重下で, 所定の時間, 破損することなく耐えられるように設計すること. 状況に応じて, 下記の4つに対応する必要がある.

- ①変位拘束: 精密な寸法と微小空隙を維持しなければならない.例:タービンブレード(図(a))
- ②ラプチャー拘束: 寸法精度は重要ではないが,破損してはならない.例:内圧のかかるパイプ(図(b))
- ③応力緩和型: 初期応力が時間の経過と共に緩和されてはならない.例:ボルト締結(図(c))
- ④座屈拘束型: 細棒や薄板に圧縮荷重を受ける場合, 座屈してはならない. 例:航空機主翼上部板 (図(d))



8.1.2 事例紹介 - 航空機エンジンのタービンブレード

- ・航空機エンジンのタービンブレードは、その性能を決める重要な部品である。 そのため、現在でも日夜、研究開発が進行している。
- ・エンジン効率を向上させるために、使用温度を上昇させることが必要であるが、材料の耐クリープ性の向上が必要となる.
- ・耐クリープ性向上の具体的方法は、①超合金(耐熱金属)の開発、②組織 形態の制御、③冷却方法の工夫、である(①は工業材料学で学んだ).



図8.2 航空機とジェットエンジン

組織形態の制御

- ・図8.3左から, 多結晶, 柱状 結晶, 単結晶である.
- ・この処置は、高温下で弱部 となる結晶粒界の影響を除 去するために行われてきた.

冷却の工夫

- 図8.3の右図は、内部から表面へ小穴を通して気体を流せるようになっているブレードである。
- ・表面に断熱膜を生み出す。

使用温度の向上

以上の努力により,年1℃ず つ使用温度が上昇している!



1500 X: 1400 1300 1300 1100 1100 1940 1950 1960 1970 1980 開発年

図8.4 使用温度の向上

8.1.3 クリープ曲線

クリープ曲線 (creep curve)

一定の温度で一様断面の丸棒に一定の大きさの引張荷重を加えた際の時間と変形量あるいはひずみの関係を表す曲線. 現象は3段階に分類される.

遷移クリープ (transient creep)

- ・まず、負荷の瞬間に弾性ひずみと時間に依存しない塑性ひずみの和からなる瞬間ひずみを生じる.
- ・その後、加工硬化が顕著になり、ひずみ速度が時間とともに減少する.

定常クリープ (steady creep)

・加工硬化と組織回復が釣り 合い、ひずみ速度が一定と なる.

加速クリープ (tertiary creep)

・ひずみ速度が加速し、最終破断に至る.



図8.5 クリープ曲線

8.1.4 クリープの機構

定常クリープの機構

- ・金属の定常クリープでは、作用応力 の n 乗に比例する2つの機構が存 在する.
- ①高応力:転位クリープ, 指数 n=3~8
- ②低応力:拡散クリープ, 指数 n=1
- ・クリープの形態は、8.1.5で説明する 変形機構図から調べられる.

転位クリープ

・刃状転位が析出物に衝突すると、図 8.6に示すように上昇方向へ力を受ける。常温で刃状転位はすべり面上で のみ移動するが、4.1.4節で説明した ように、高温では原子拡散により上昇 運動を生ずる。

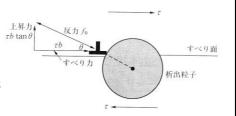


図8.6 転位が受ける上昇力

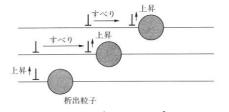


図8.7 転位クリープ

- ・その後、図8.7のように刃状転位は上昇運動を繰り返して、クリープ変形を生じさせる.
- ・以上のように、転位クリープの場合のひずみ速度は、上昇力と原子拡散と関係するから、

$$\dot{\varepsilon}_{SS} = CD\sigma^n \tag{8.1}$$

ここで, C は材料定数, D は拡散係数, である. また拡散係数は,

$$D = D_0 e^{-Q/(\overline{R}T)} \tag{8.2}$$

である. 上式で Q はクリープの活性化エネルギー, R は気体定数(8.31 J mol⁻¹ K⁻¹), T は温度である. 上2式を組み合わせると,

$$\dot{\varepsilon}_{SS} = CD_0 \sigma^n e^{-Q/(\overline{R}T)} = C' \sigma^n e^{-Q/(\overline{R}T)}$$
(8.3)

・以上より、転位クリープの機構と評価式が理解される.

拡散クリープ

- ・作用応力が低下すると、各結晶粒の粒界における原子拡散によるクリープ変形が支配的となる(図8.8). $T/T_M(T_M: \text{融点})$ が高いときには、結晶粒内の原子拡散(格子拡散)も生ずる.
- ・結晶粒径 d が大きい程,原子が拡散すべき距離が長くなるので,ひずみ速度は遅くなる.
- ・結局、関係式として以下の式が成り立つ.

クリープ破壊

- ・粒界における原子拡散によりボイドが一旦形成すると、ボイドは成長を続ける(図8.9).
- ・ついには荷重を支えられずに破断に至る.

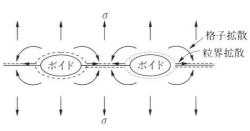


図8.9 原子拡散によるボイドの形成

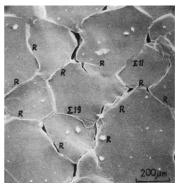


図8.10 α Fe-Siの粒界における ボイドの成長(T=700°C, σ =29MPa)

8.1.5 変形機構図

変形機構図

クリープでは、種々の変形機構が競合する. これをまとめて示す図が変形機構図である(図8.11).

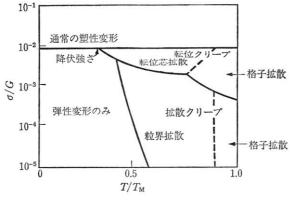


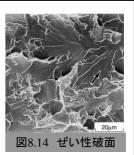
図8.11 変形機構図

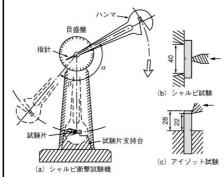
8.2 環 境

8.2.1 温度の影響

低温ぜい性

シャルピー試験(図8.12)により求めた温度と吸収エネル ギーの関係(図8.13)から明らかなように、軟鋼等では温 度低下と共に著しくぜい化する. これは, 低温で転位移 動が困難になるためである.





ぜい性破面率 100 200 3 8 У吸収エネルギ 吸収エネルギー ぜい性破固率 100 -80 試験温度 (℃)

図8.12 衝撃試験

図8.13 軟鋼の温度と吸収エネルギー関係

ヤング率および静的強度

- ・温度上昇にともない原子の熱振動エネルギーが上昇するため、ヤング率は 低下する.
- 温度上昇にともない転位の移動が容易となるため、静的強度は低下し、逆 に延性は増加する.

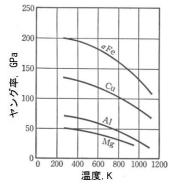


図8.15 ヤング率の温度依存性

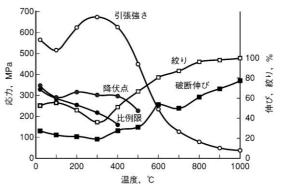


図8.16 軟鋼の機械的性質の温度依存性

8.2.2 環境の影響

応力腐食割れ

- ・合金(表8.1)が引張応力の下で環境 の影響をうけ、著しくぜい化して破壊 する現象.
- ・狭義には、き裂先端のアノード溶解により割れが進行する場合を応力腐食割れ(stress corrosion cracking, SCC)といい、吸蔵された水素によるぜい化により割れが進行する場合を水素ぜい化(hydrogen embrittlement, HE)という.

表8.1 応力腐食割れを生じる合金

合		金	腐	Û	環	境
Al	合	企	大	気		
			NaCl 7	k溶液		
			NaCl + H ₂ O ₂ 水溶液			
			海	水		
Mg	合	金	水			
			海岸	の大気		
			NaCl -	K2CrO4	水溶液	
Cu	台	金	水,水	蒸気		
			アンモ	ニア蒸気		
炭	素	344	NaOH	水溶液		
			NaOH	+ Na ₂ SiO	3 水溶液	
			硝酸塩	水溶液		
低	合 金	錮	H ₂ S水	溶液(高品	長力鋼)	
			海水 (強力鋼,	3強力鋼)	
オーステナイト系			高 温 水			
ステンレス鋼			塩化物水溶液			
			ポリチ	オン酸水液	容液	
マルテンサイト系			高温高圧水			
ステンレス鋼			NaCl 4	k溶液		
			NaOH	水溶液		
			H ₂ S 水	溶液		
イン	ノコネ	、ル	水 蒸	気+SC		
			濃縮ボ	イラ水 (2	260 °C ~ 430)°C)
			NaOH	水溶液 (2	260 °C ~ 430	(C)
			3.	っ酸		

SCCの特徴

- ① 合金に起る. 純金属はSCCをほとんど起さないが, 微量の不純物を含むと割れるようになる.
- ② 外部から加わる応力にせよ、残留応力にせよ、引張応力の存在が必要であり、圧縮応力によっては生じない。極小さい応力でも持続して負荷されるとSCCを起す。
- ③ 合金に特有の腐食性環境中で生じや すい(表8.1). 全面腐食が生ぜず, 金 属光沢を保つ場合でも割れる.
- ④ 応力は腐食を促進するだけでなく、本来じん性のある材料を危険なぜい性破壊に導く.
- ⑤ き裂は貫粒形, 粒界形(図8.17)があり, 合金の種類, 腐食性環境の相違によっ て変化する.

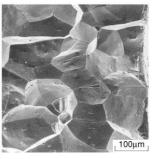


図8.17 SCCによる粒界割 れ(破面)

8章演習問題

問題 1 定常クリープにおける2つの機構を説明せよ.

問題 2 化学プラントの円管が p=6 MPa の内圧を受けている. この管は510 °Cで 9 年間円周応力($\sigma=pr/t$)に耐えることが必要である. 設計者はステンレス鋼で作られた内径 2r=40 mm, 肉厚 t=2 mm の管を指定している. メーカーの仕様書から, 510°Cで作用応力 200 MPa の時, 定常クリープ速度が 8.3×10^{-10} s⁻¹ であることが分かっている. 問題にしている条件下で合金のクリープ速度は次式に従うと考える.

$$\dot{\varepsilon} = A \sigma^5 e^{-Q/(\overline{R}T)}$$

本合金の場合, クリープひずみ 0.01 において破損寸前になるとして, 上記の設計の安全性を調べよ.

問題 3 環境強度に関し、以下の現象を説明せよ.

- (3-1) 低温ぜい性
- (3-2) 応力腐食割れ

問題 4 温度が上昇するとヤング率および降伏応力はどのように変化するか 述べよ.

8章演習問題解答

問題 1 8.1.4節参照

問題 2 円管の円周方向応力は、 $\sigma = \frac{pr}{t} = \frac{6 \times 20}{2} = 60 \text{ (MPa)}$ 応力が 200 MPaの時、

$$Ae^{-Q/(\overline{R}T)} = \frac{\dot{\varepsilon}}{\sigma^5} = \frac{8.3 \times 10^{-10}}{(200)^5} = 2.59 \times 10^{-21} \,(\text{MPa}^{-5}\text{s}^{-1})$$

よって応力が 60 MPa の時のひずみ速度は,

$$\dot{\varepsilon} = 60^{5} \cdot 2.59 \times 10^{-21} = 2.01 \times 10^{-12} \, (\text{s}^{-1})$$

9年に生ずるクリープひずみは、

$$\varepsilon = 2.01 \times 10^{-12} \cdot 60^2 \times 24 \times 365 \times 9 = 5.7 \times 10^{-4}$$

したがって、この管の設計は安全である.

問題 3 8.2節参照.

問題 4 8.2.1節参照.