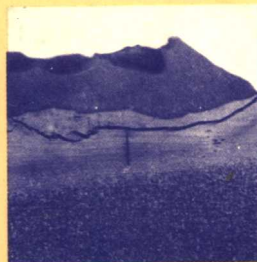
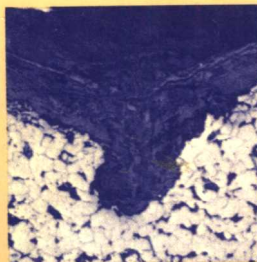
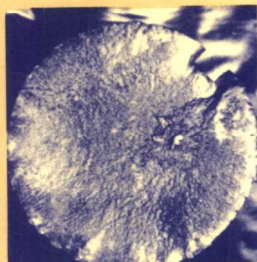
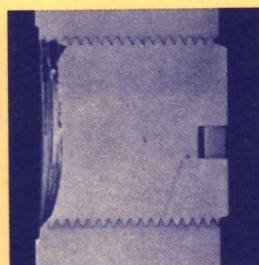
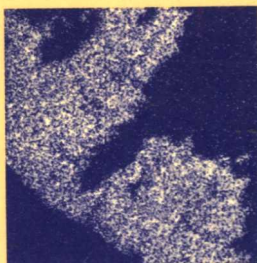
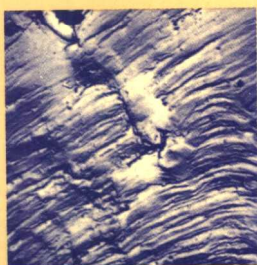


機械機器破損原因及對策

楊義雄・賴子邨 編譯



機械技術出版社 印行



全華科技圖書股份有限公司 經銷

疲勞龜裂之發生與延伸



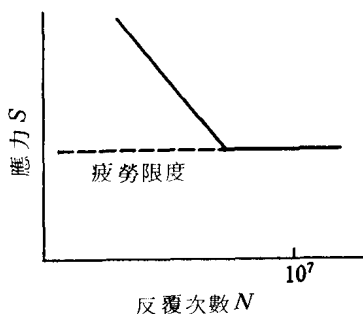
如上所述，結構物材料之破損其中 85～90 %以上起因於疲勞，因此本章特別將有關發生疲勞破損時之機構，疲勞龜裂存在時之壽命預測等加以說明。

首先，將無龜裂或無龜裂狀缺陷存在之材料，加以相當大之反覆應力，加到某一反覆次數時，表面會發生龜裂。如果該應力仍繼續反覆增加時，不久龜裂就會延伸開來，此種現象甚易瞭解。在此二種過程，可想像為不同之物理現象，在此分別就實用上之觀點加以討論。

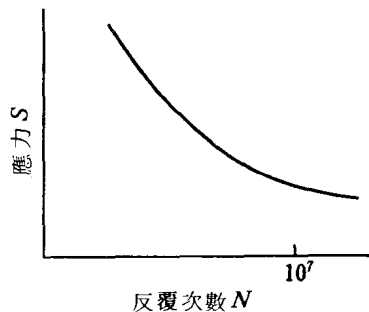
3.1 疲勞破損之特徵

疲勞破損乃是施予材料反覆應力而發生之破損，其特徵如下：

- (1) 反覆應力之振幅，在靜抗拉強度與降伏強度以下時，也會發生。
- (2) 由破壞部分看起來，似乎沒有塑性變形而延伸，破面常有段差，但不太大。
- (3) 加以一定之應力振幅，通常在某些反覆次數後會破斷。
- (4) 應力振幅 S 與破斷為止之反覆次數 N 之間，以對數表示時，大致成直線關係，一般稱為 $S-N$ 曲線，或由發現者之名稱為 Wohler 曲線（參照圖 3.1）。
- (5) 破鋼時，有稱為疲勞限度或耐久限度之值存在，則在此應力振幅以下做無限次數之反覆也不會發生破斷，但在耐久限度以上之應力反覆時，至破斷為止之反覆次數則參差不齊。
- (6) 疲勞限度於平均應力小於彈性限度時，一般不會受此影響，但平均應力大至某一程度時，疲勞限度會受此影響而變小。
- (7) 疲勞限度以下之應力反覆作用，亦不會發生磁滯損失現象。



(a) 有明確之疲勞限度存在時
(碳鋼等)



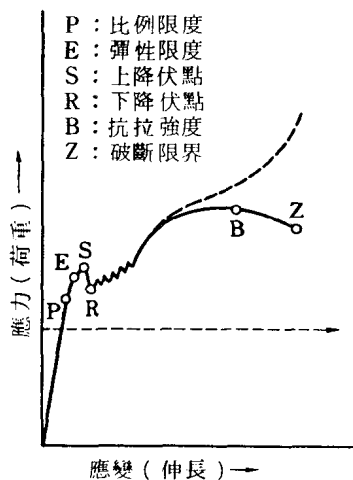
(b) 無明確之疲勞限度存在時
(銅, 鋁合金等)

圖 3.1 S-N 曲線

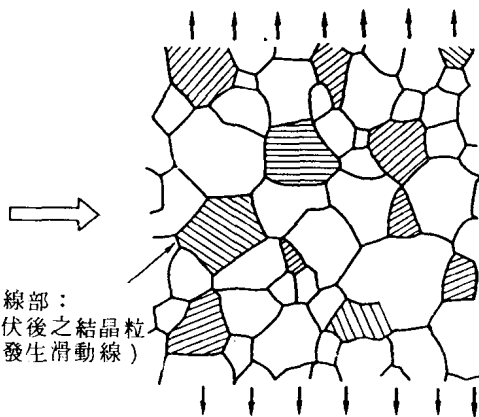
3.2 疲勞龜裂之發生

疲勞龜裂其應力振幅於靜抗拉強度或降伏強度以下有時也會發生。靜抗拉強度附近之反覆應力時尚易理解，但於降伏強度以下之反覆應力振幅會發生破壞之理由，一般較不易接受。在此，以其代表模式說明之。

圖 3.2 所示為目視降伏點與微視塑性變形開始之差異。圖 3.2(a) 為典型之低碳鋼試片，於單向承受伸張時應力 - 應變曲線。S 點與 R 點分別為上、下降



(a) 靜伸張時之應力與應變之關係



(b) 比降伏點略低之應力也會有局部的降伏 (有微視降伏)

圖 3.2 目視降伏點與微視塑性變形開始之差異

伏點，B點為抗拉強度。由常識上可判斷降伏點為試片開始發生塑性變形之起點，亦即，在降伏點以下一般均不會發生塑性變形。但是，如以S10C退火材將其表面施行電解研磨後觀察時（註：碳鋼等施行電解研磨後，可以直接觀察其表面組織。使用之電解液為：磷酸 1000 g，凝膠 20 g 與硝酸 20 g 之配合），較降伏點稍低之應力（ σ_y 為降伏點時約為 $\frac{1}{3} \sigma_u$ ），一部分結晶開始發生塑性變形 [參照圖 3.2 (b)]。在此階段之塑性變形僅為全體之一小部分，將負荷除去後，殘留變形幾乎無法檢驗出。因此，不論目視塑性變形或微視塑性變形，僅為其應力水準之差異而已，此點應加注意。

圖 3.3 所示為靜伸張試驗與疲勞試驗差異之模式。先由零荷重開始慢慢拉伸，通常由試片表面最易滑動部分開始發生塑性變形。如果圖 3.3 (a) 之點線所示部分因伸張而成如圖 3.3 (b) 之變形。再由最大荷重減下來加於壓縮負荷，假

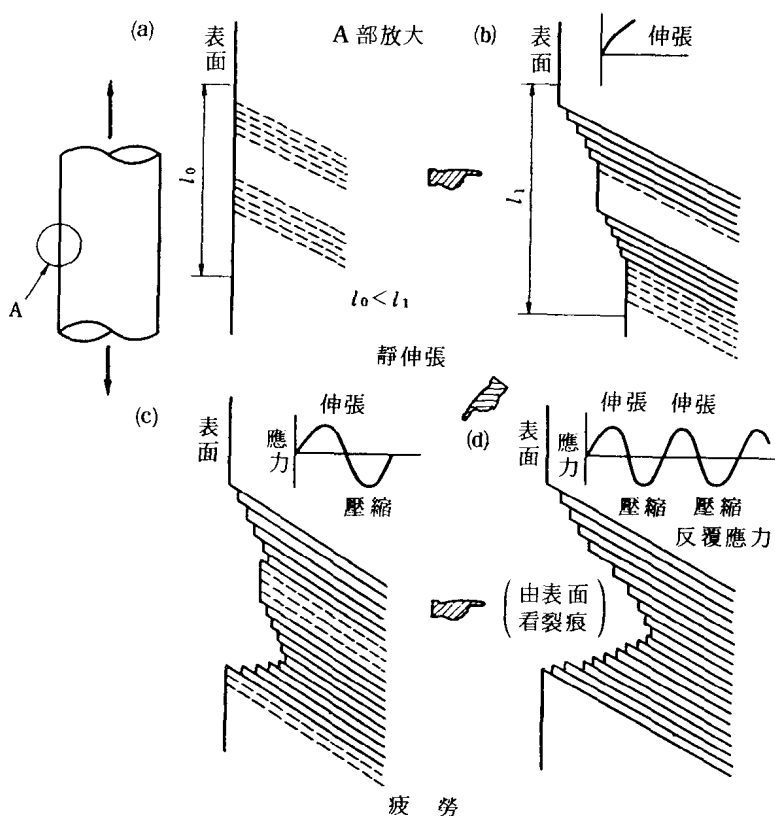


圖 3-3 靜伸張與疲勞機構之差異（模式）

設圖 3.3 (b) 之點線所示部分會滑動，如圖 3.3 (c) 所示之變形。疲勞之情況，應力為反覆如圖 3.3 (d) 所示。由表面所見則成龜裂。如此一再發生龜裂時，龜裂之兩端即發生應力集中，除特殊情況外，龜裂即逐漸成長。

疲勞限度並非不發生龜裂之限界之應力，而是雖發生微小之龜裂，但龜裂不會延伸之限界下之應力。通常設計時所加諸於材料之應力應在疲勞限度以下。此種設計之基礎資料，可參閱 2.4 節之 2，並希望能予活用。

3.3 疲勞龜裂之延伸

前節所發生之疲勞龜裂，由於其後之應力反覆作用，會開始延伸。而實際材料中，有缺口或龜裂狀之缺陷者，疲勞破壞經常由此開始發生，故評估疲勞龜裂延伸特性，對於預測壽命與安全設計上，均極被重視。

圖 3.4 所示為疲勞龜裂成長之模式。龜裂之發生，由無缺陷之表面，製作上之缺陷（加工傷痕、熔接缺陷、夾雜物），缺口（鍵槽、段差及孔）等所引起。不論何者，龜裂之成長，佔大半之壽命。尤其於龜裂發生後，至剛剛開始最終破壞前，龜裂延伸之速度 dl/dN 與應力擴大係數之範圍 ΔK_{III} 間已知成直線關係。以下說明將數種代表性之鋼種，作疲勞龜裂延伸特性之評估。

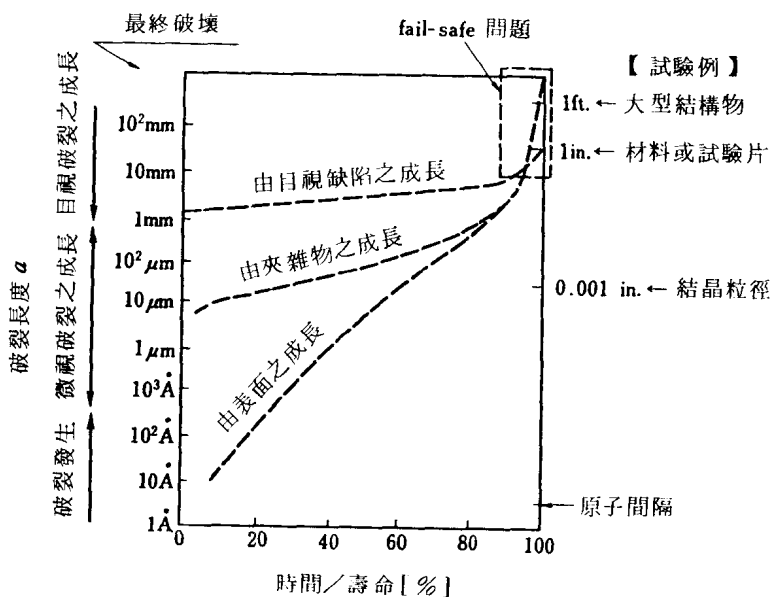


圖 3.4 龜裂成長曲線之概念

3.3.1 實驗方法

使用材料為軟鋼、機械構造用碳鋼（S25C～S55C，4種類），熔接性高拉力鋼（SM50～HT80，3種類），構造用低合金鋼（SCM440 壓延材料及調質材料與沃斯田鐵系不銹鋼 SUS304）共計 11 種類。使用材料之化學成分與機械性質如表 3.1 所示。其顯微鏡組織如照片 3.1 所示。使用材料之抗拉強度為自 40 kgf/mm² 級至 90 kgf/mm² 級之範圍，組織為肥粒鐵+波來鐵，波來鐵，回火麻田散鐵與沃斯田鐵數種。表 3.1 中除上述資料之外，亦將板厚 ¼ 部分作為中心，以軸方向壓延而採取之試片，其回轉彎曲疲勞限度與室溫時之限界 COD 值， δ_c 值亦一併列出以作參考。COD 試片亦由壓延方向採取（板厚 25 × 板寬 50 × 長度 250mm），依 ASTM E399 規定於室溫中實驗。

疲勞龜裂延伸試片之形狀如圖 3.5 所示。試片為 SCM440（板厚之 ¼），由板厚中央部沿壓延方向採取，龜裂長度之測定部分以 #600 紙銼沿軸方向研磨。

試驗機為 ±40 t 電動油壓式同步疲勞試驗機，反覆速度 900 cpm，應力比 $R = 0$ ，每一鋼種試驗 2 支。龜裂長度之測定，試片兩面以 50 倍之讀取顯微鏡觀察，取其平均值整理之。

表 3.1 使用材料之化學成分與機械性質

鋼 種	素材板厚 [mm]	採取方向	化 學 成 分 [Wt. %]								機 械 性 質				回轉彎曲疲勞限度 σ_{wb} [kgf/mm ²]	室溫時之限界 COD, δ_c [mm]
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	$\sigma_{0.2}$ [kgf/mm ²]	σ_B [kgf/mm ²]	El [%]	RA [%]		
SS41	32	L	0.17	0.19	0.63	0.025	0.025	—	—	—	28.5	45.2	37.7	65.1	25.0	1.889
S25C	32	L	0.30	0.23	0.47	0.018	0.018	—	—	—	26.3	49.4	35.9	57.8	21.0	0.958
S35C	32	L	0.42	0.21	0.69	0.022	0.004	—	—	—	34.5	62.1	35.0	53.0	24.0	0.349
S45C	32	L	0.49	0.23	0.77	0.022	0.007	—	—	—	34.3	71.1	22.2	40.9	27.0	0.113
S55C	32	L	0.52	0.18	0.70	0.014	0.014	—	—	—	36.7	71.3	20.2	41.2	25.0	0.066
SM50	35	L	0.18	0.43	1.31	0.025	0.009	—	—	—	35.7	56.0	39.0	72.6	29.0	1.782
HT60	40	L	0.11	0.23	1.25	0.014	0.003	0.16	—	0.13	58.5	69.2	28.6	76.9	35.0	1.213
HT80	36	L	0.11	0.23	0.87	0.013	0.005	0.79	0.50	0.44	71.2	80.6	27.0	74.5	42.0	0.464
SCM440 (as Rolled)	131	L	0.42	0.25	0.74	0.020	0.009	0.01	1.08	0.16	57.2	88.1	18.3	35.8	32.0	0.030
SCM440 (QT)	131	L	0.42	0.25	0.74	0.020	0.009	0.01	1.08	0.16	72.3	95.1	22.7	65.7	48.0	0.586
SUS304	35	L	0.06	0.66	1.03	0.028	0.004	9.37	18.95	—	27.1	62.7	62.6	72.1	31.0	—

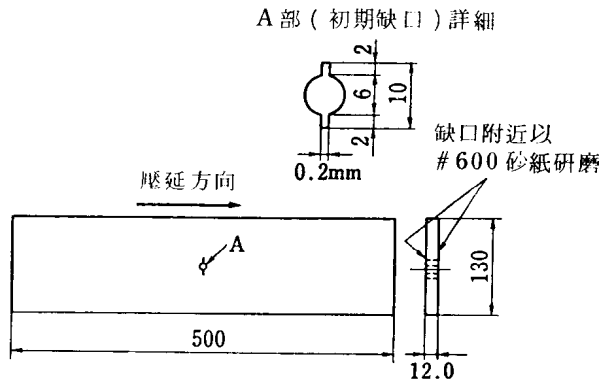


圖 3.5 疲勞龜裂延伸試驗片形狀

3.3.2 實驗結果

圖 3.6 所示為上述 11 鋼種之疲勞龜裂延伸速度 dl/dN 與應力擴大係數之範圍 ΔK 之關係，應力擴大係數 K 之計算可由下式求得：

$$K_I = \sigma_a \sqrt{\pi l \cdot \sec(\pi l / W)}. \quad (3.1)$$

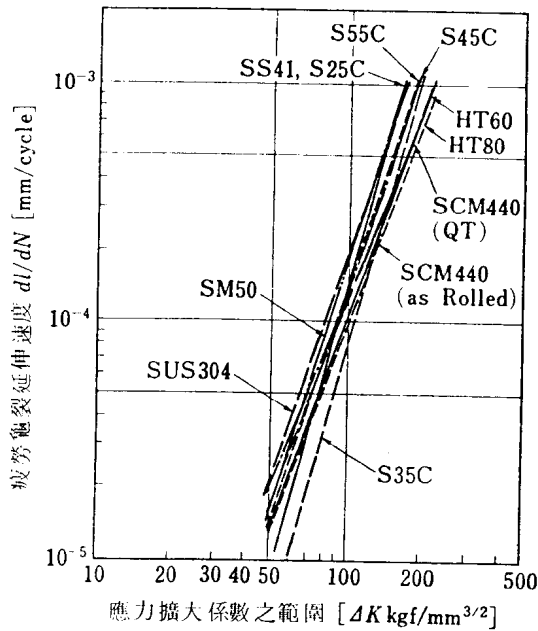
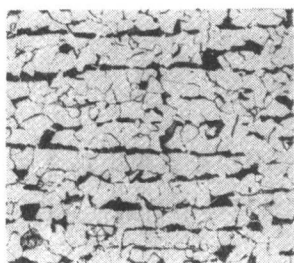
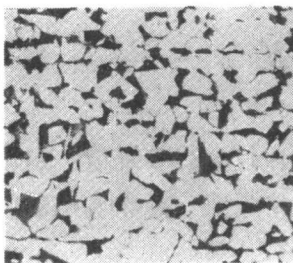


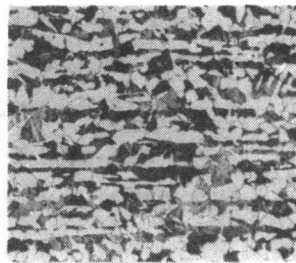
圖 3.6 疲勞龜裂延伸速度 dl/dN 及應力擴大係數範圍 ΔK 之關係



(a) SS41



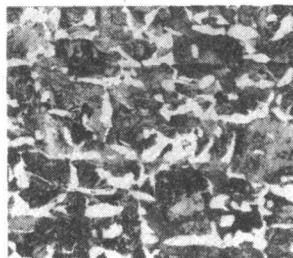
(b) S25C



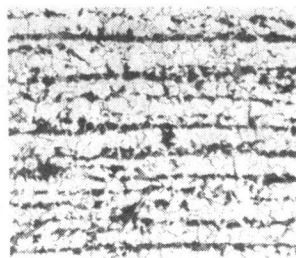
(c) S35C



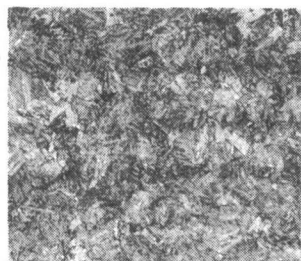
(d) S45C



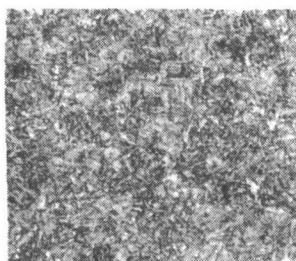
(e) S55C



(f) SM50



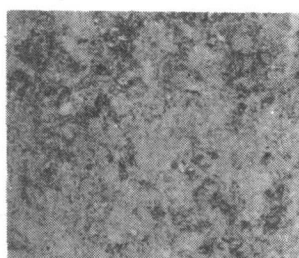
(g) HT 60



(h) HT 80



(i) SCM440



(j) SCM440



(k) SUS 304

100 μ m

照片 3.1 使用材料之顯微鏡組織

式中 σ_s : 反覆應力
 l : 龜裂長度之半長
 W : 試片之半寬

各鋼種間，龜裂延伸速度以 S35C 最慢，SUS304 最快，差距約為 2.5 倍。圖 3.6 所示之直線關係，係由下式整理所得，其係數以最小自乘法求得。

$$dl/dN = C(\Delta K)^m. \quad (3.2)$$

式中 C 與 m 為材料係數，可由表 3.2 所得。

此材料係數 C 及 m 與機械性質 (σ_B) 之間，一般認為有良好之相關性存在。

圖 3.7 所示為材料係數 C 與 m 之關係， C 與 m 間大約成直線關係，可用下式表示之：

$$\log \frac{1}{\sqrt{C}} = m + 2. \quad (3.3)$$

() 內之數值為各材料之抗拉強度，由式中可看出抗拉強度愈高， C 值愈大， m 值愈小之趨勢。

圖 3.8 所示為材料係數 C 與抗拉強度之關係，雖然有甚大之差異，但一般抗拉強度愈高時，材料係數 C 亦有隨之愈大之趨勢。

表 3.2 材料係數 C 與 m 之值

鋼 種	符 號	C	m
SS41	1	2.12×10^{-12}	3.89
S25C	2	2.12×10^{-12}	3.89
S35C	3	2.85×10^{-12}	3.70
S45C	4	4.99×10^{-11}	3.20
S55C	5	4.33×10^{-11}	3.24
SM50	M 5	2.51×10^{-11}	3.41
HT60	W 6	1.71×10^{-10}	2.88
HT80	W 8	2.63×10^{-10}	2.82
SCM440 (as Rolled)	M 4-25 26	5.20×10^{-9}	2.12
SCM440 (QT)	M 4-27 28	8.71×10^{-10}	2.56
SUS304	SU	8.04×10^{-11}	3.18

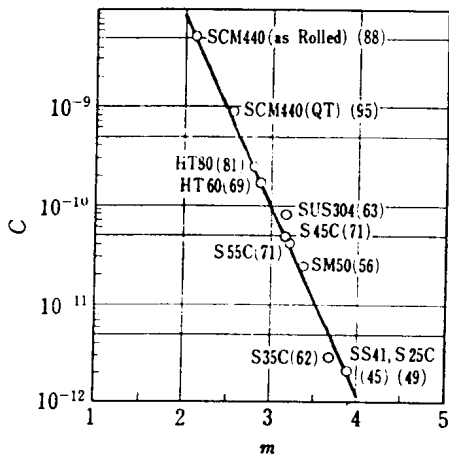


圖 3.7 材料係數 C 與 m 之關係

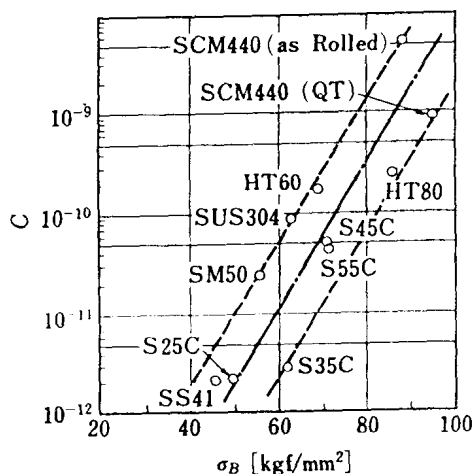


圖 3.8 材料係數 C 與抗拉強度之關係

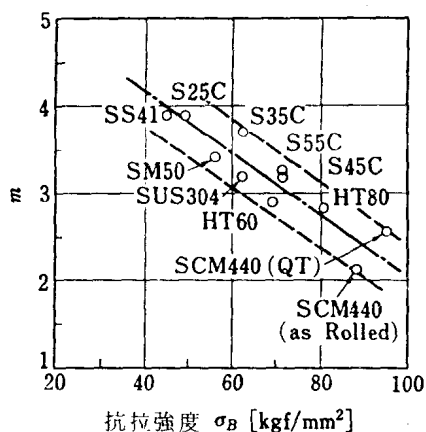


圖 3.9 材料係數 m 與抗拉強度之關係

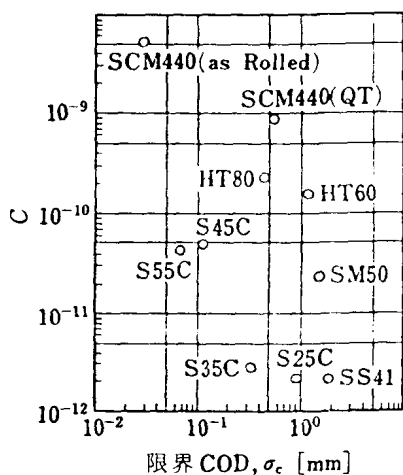


圖 3.10 材料係數 C 與限界 COD 之關係

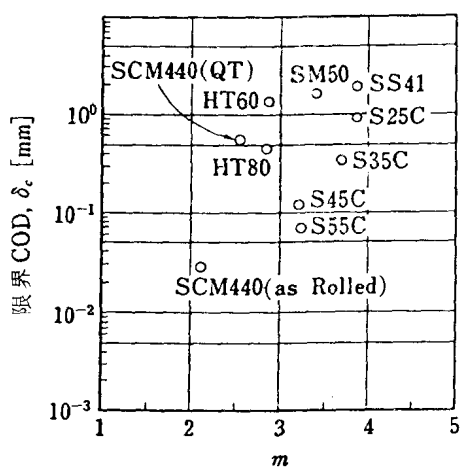


圖 3.11 材料係數 m 與限界 COD 之關係

圖 3.9 所示為材料係數 m 與抗拉強度之關係，可認為與圖 3.8 有相同之趨勢。

雖然如此，材料係數 C 與 m 及限界 COD 值之間一般認為多少有相關性存在（參照圖 3.10 與圖 3.11）。由此可推斷，表示韌性之數值與龜裂延伸特性間並無相關性存在。

3.4 最終破壞

發生龜裂或有尖銳龜裂狀之缺陷時，再加以一定以上之外力，必然發生激烈破斷。大部分之情形為發生脆性破壞。此時之破面成為裂開破面（參照照片2.3與照片2.4）。通常，以對龜裂面成垂直方向所作用之力量使發生破斷情況者較多（模式Ⅰ型）。此時之應力擴大係數稱為臨界應力擴大係數，以 K_{Ic} 表示之。 K_{Ic} 係表示對破壞之抵抗，故又稱破壞韌性值，可想為材料固有之值。尤其在由疲勞龜裂至發生最終破壞之情況時，稱為疲勞破壞韌性值，此值較靜試驗所得之值，約小10~15%左右，其理由乃由於疲勞龜裂先端所形成之條痕寬度不同所引起。