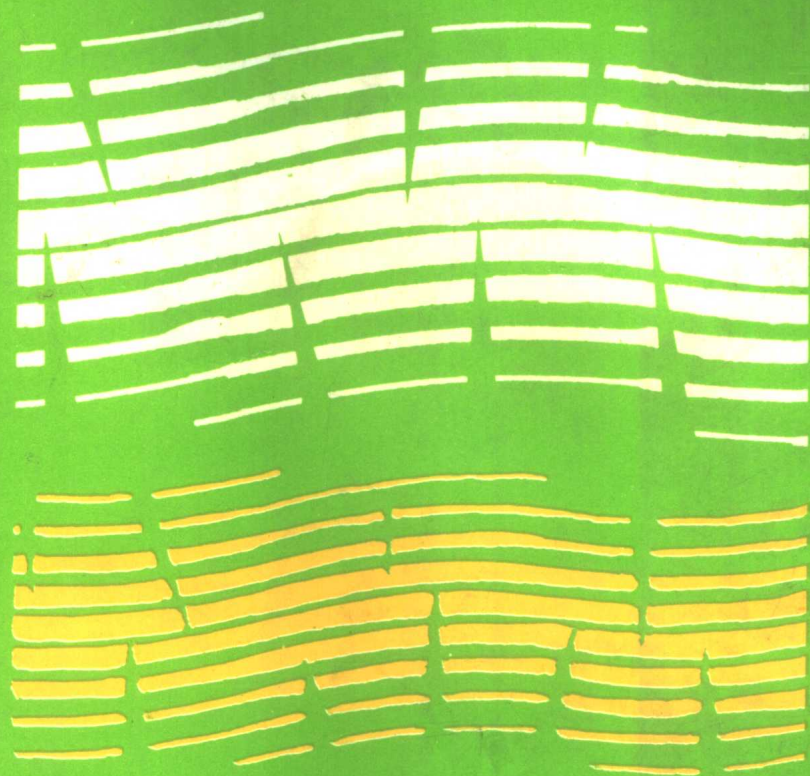


科技用書

延性破壞力學

兼顧理論和實務供材料科系採用的完備參考

工博 町田 進編著



出

賴耿陽譯著

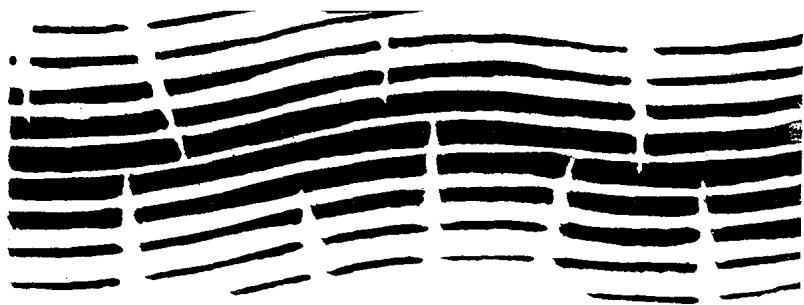
復漢出版社印行

科技用書

延性破壞力學

兼顧理論和實務供材料科系採用的完備參考

工博(田)進編著



賴耿陽譯著

復漢出版社印行

版權所有
翻印必究

B 平裝 二四〇元
精裝 二八〇元

延性破壞力學

七十三 年 十月 一日 出版

原著者：町田

譯著者：賴耿陽

出版者：復漢出版社

地址：台南市德光街六五一號
郵政劃撥三一五九一號

發行人：沈岳林

印刷者：國發印刷廠

本社業經行政院新聞局核准登記局版台業字第〇四〇二號

序

近年來，材料力學或構造力學之一分野的破壞力學顯著增高其實用性，這得助於電腦技術的發展，實際應用上須評價在多方面發揮威力的事項。諸如船舶的脆性破壞、大型容器的低溫脆性、各種構造的疲勞破壞、環境破壞、原子爐壓力容器的照射脆化、高溫脆性的問題等都謀求應用破壞力學。討論材料、構造物的破壞時，一定利用破壞力學手法破壞韌性之定量評價手法、考慮疲勞龜裂之進展的各種構造物設計思想等是直接利用破壞力學的好例子。

關於延性破壞，直到最近，在研究、應用上未必有明確的成果，最大理由之一是延性破壞在本質上為伴有大規模塑性變形的破壞，幾不可能適用線形破壞力學，但最近由於非線形破壞力學的發展，對延性破壞奠定利用巨視力學處置的基礎。

本書的目標是從破壞力學立場討論延性破壞，站在巨視材料力學的立場或工學立場，敘述安定延性龜裂的發生、成長、不安定傳播各過程受何種物理量支配，如何記述其舉動，如何適用於實際上的問題。

第1章簡述延性破壞的概念與其意義，第2章敘述平滑延性破壞的微視機構和連續體力學處置。第3章簡單解說破壞力學處置上必要的基礎概念。第4～6章對延性龜裂的發生、安定成長、不安定傳播，說明力學支配參數、材料特性值與其評價法，各種影響因子等。第7章着重此種破壞在實用上成重要問題的壓力保持機器——特別是配管的構造，稍詳細說明應用例。

本書重視實用性，未必為破壞力學處置法的觀念也載述，盡量參考新成果。延性破壞的現象比脆性破壞複雜，其材料力學處置法仍有待今後研究。

編者

1984年7月

延性破壞力學 / 目次

第 1 章	序論—延性破壞的概念與意義	1
第 2 章	延性破壞的微視機構	5
2.1	Plateau 的理論	5
2.2	Thomason 的理論	8
2.3	McClintock 的理論	13
第 3 章	破壞力學的基礎概念	18
3.1	K 概念	18
3.1.1	龜裂前端應力場	18
3.1.2	應力擴大係數	22
3.1.3	能量解放率	24
3.1.4	龜裂前端塑性域	26
3.1.5	K_c 破壞條件	27
3.1.6	應用於疲勞、腐蝕問題	29
3.2	J 積分概念	30
3.2.1	J 積分的定義與物理意義	30
3.2.2	龜裂前端應變場	32
3.2.3	J 積分評價法	33
3.2.4	J_c 破壞條件	34
3.3	COD 概念	35
3.3.1	Dugdale 模型	35
3.3.2	COD 評價法	37
3.3.3	COD 破壞條件	38

3.3.4	CTOA 概念	38
3.4	R 曲線 (龜裂進展阻力曲線) 概念	40
第 4 章	從龜裂前端發生延性龜裂	44
4.1	龜裂存在下的延性破壞	44
4.1.1	Knott 的理論	45
4.1.2	Gerberich 的理論	47
4.1.3	Weiss 的理論	48
4.2	能量準則	50
4.2.1	Broberg 的觀念	51
4.2.2	其他的能量準則	52
4.3	從龜裂前端發生延性龜裂時的材料參數	54
4.3.1	Si 的求法	55
4.3.2	J_{Ic} 的求法	58
4.4	各種因子對 δ_i , J_{Ic} 的影響	62
第 5 章	延性龜裂的安定進展	65
5.1	安定進展的龜裂前端附近應力, 應變場的理論解析	65
5.2	表示龜裂進展之特色的參數	76
5.2.1	R 曲線與其物理意義	76
5.2.2	$J-R$ 曲線的適用界限	80
5.2.3	對龜裂進展的能量準則	83
5.3	有關安定龜裂進展的材料參數與各種因子	85
5.3.1	各種 R 曲線用實驗的測定法	85
5.3.2	影響 R 曲線的各種因子	98
5.4	延性龜裂進展的數值解析	103
5.4.1	有限要素法的龜裂進展模型化	103
5.4.2	用有限要素法解析龜裂前端附近的應力、應變場	107
5.4.3	用有限要素法模擬計算各種參數	109
5.4.4	依據龜裂進展量準則的龜裂進展模擬	118

第 6 章 延性龜裂的不安定進展性	122
6.1 延性龜裂的不安定進展現象	122
6.2 用 R 曲線的不安定理論	125
6.2.1 用 $G-R$ 曲線的不安定理論	125
6.2.2 用 $J-R$ 曲線的不安定理論	130
6.2.3 用 $COD-R$ 曲線的不安定理論	142
6.2.4 利用 $CTOA-R$ 曲線的不安定理論	144
6.3 代表性試法的 T_{app} 表示式	145
6.4 不安定破壞的數值解析	153
6.5 不安定延性破壞理論的實驗檢證	157
6.6 其他工學簡易評價法	159
6.6.1 用 Net-Section stress 評價強度	160
6.6.2 破壞評價線圖法 (failure assessment diagram)	164
第 7 章 配管及壓力容器的延性破壞	176
7.1 配管及壓力容器的軸方向破壞	176
7.1.1 有貫通龜裂的耐壓圓筒	176
7.1.2 有表面龜裂的耐壓圓筒	180
7.1.3 氣體輸送管的破壞	184
7.2 配管的周方向破壞	190
7.2.1 用極限荷重基準推定破壞	191
7.2.2 Net-Section Stress 所致破壞的推定 I	193
7.2.3 Wet-Section Stress 所致破壞的推定 II	197
7.2.4 配管的不安定破壞	201
7.3 肘管、分歧管的內壓破壞	241
7.4 壓力容器噴嘴的不安定破壞	242
7.5 結語	248

第1章 序論

延性破壞的概念與意義

直到材料破壞前，產生的應變小時，稱為脆性破壞（brittle fracture）。非脆性材料直到破壞前，常發生顯著的永久應變。因粘性或塑性流動，構件材斷面減少到零而分離的極端場合稱為破裂（rupture）。產生不少塑性流動，有破面（fracture surface）存在，從破裂到破壞的變形少的過程稱為延性破壞（ductile fracture）。脆性破壞與破裂是在破壞所致變形量的觀點上之兩極端現象，延性破壞位於它們的中間（實際上，脆性破壞、破裂在用語上，對兩極端破壞模式並不能嚴密使用，包括多少有延性破壞側面的場合，常如此稱呼），嚴性破壞很難嚴密定義，破壞的機構也複雜，未解明的部份比脆性破壞、破裂多。

在對破壞之巨視連續體力學立場的古典理論，如圖 1.1 所示，有表

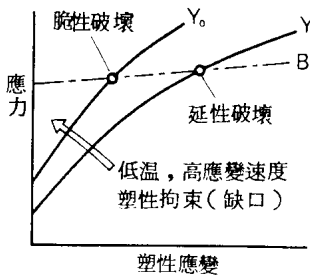


圖 1.1 Ludwik 的理論

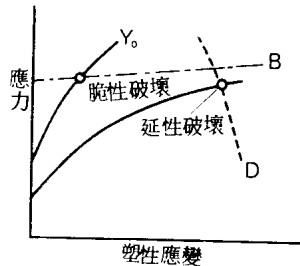


圖 1.2 Davidenkov 的理論

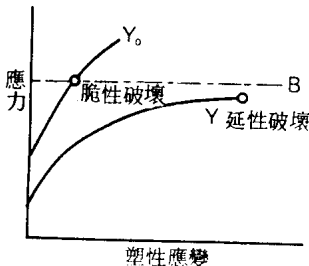


圖 1.3 Orwan 的理論

成塑性應變之函數的材料固有破壞應力曲線 (fracture stress curve) , 在材料流動應力曲線 (flow stress curve) 與破壞應力曲線對溫度、應變速度、塑性拘束等很鈍感, 流動應力曲線對它們很敏感, 破壞時的應變有差異, 脆性破壞、延性破壞的區別只是相對的。

後來主要針對鋼, 脆性破面與延性破面在結晶學的立場, 確認破壞機構在物理上不同, Davidenkov 提出圖 1.2 的假說, 破壞壓力曲線有脆性破壞應力曲線與延性破壞應力曲線。但是, Orowan 實驗表示性破壞 (或剪斷型破 - fibrous fracture) 並無固有的破壞應力曲線, 提出從圖 1.2 除去曲線 D 的圖 1.3 所示觀念, 無缺口時, 流動應力曲線 Y 與 B 曲線不相交, 引起延性破壞, 此時的應變與應力不定。

上述的理論本針對平滑材, 對缺口材也不着眼於缺口所致的局部應力或應變, 而是着眼於公稱 (或平均) 應力或應變, 這是由於有缺口、龜裂、介在物、空隙之類幾何學不連續存在時, 難行彈塑性力學處理, 同時, 當時也缺乏對延性破壞的微視性研究成果。

金屬材料的脆性破壞是結晶裂開面的原子間結合破壞的裂開破壞 (cleavage fracture) 為主要的微視機構。延性破壞在基本上是結晶滑移所致的破壞 (shear fracture)。用電子顯微鏡觀察時, 延性破面大都由小凹坑 (dimple) 連續組成, 內含介在物等第 2 相。在巨視上, 變形主為垂直應力主導型時有接近圓形的等軸小凹坑 (equi-axial dimple), 為剪斷應力主導型時有它被拉伸的伸長小凹坑 (elongated dimple)。

延性破壞的過程大部分為空隙 (void) 的發生與空隙的成長、合體 (合併) 兩過程, 後者的過程決定破斷的應變, 顯出延性破壞的性格。平滑材延性破壞的微視力學處置大都以空隙的成長與合體的過程為對象。

空隙的構成機構有：

- (a) 非金屬介在物或第 2 相粒子等材質不均勻部的破裂或與母材的剝離。
- (b) 微小的裂開破壞。
- (c) 轉位的糾纏。

材料全體變形, 同時以介在物等為核發生空隙, 它成長而合體。空

隙間的材料發生與拉力試片蜂腰 (necking) 同樣的內部蜂腰 (internal necking)，引起空隙的合體。以空隙之成長為重要過程的延性破壞受應變履歷、應力靜水壓成分、介在物平均分佈距離、介在物異方性等影響。即使把前述理論用於局部應力應變分佈，也無法說明延性破壞的這方面。

延性較大的材料中，有巨觀性龜裂或銳缺口存在時，會因遭受外部變形，龜裂前端鈍化，但因顯著的應變斜度，局部有平滑材那種延性破壞機構，從某處發生延性龜裂，此稱安定延性龜裂 (stable ductile crack)，是會因增大變形而進展的龜裂。發生安定延性龜裂後，若再增大變形，此種安定延性龜裂成長，終至破斷，但在某些條件，即使不再增大變形，龜裂也會繼續進展，至於破斷，產生不安定延性破壞 (unstable ductile fracture)，重要的是有顯著應變集中的龜裂存在時，即使構件材的全體公稱應變或公稱應力低，也可能發生延性破壞。此時，即使材料為延性，直到構造的破壞的全體塑性應變小，也可說是脆性破壞。這在評價構造物或機械的耐破壞安全性時為極重要的問題。

荷重負荷系的剛性非常大，位移控制型負荷或類似時，只要外部變形不增大，龜裂不進展，不易發生不安定破壞，但荷重系的剛性小時，龜裂進展所致構件材的變形增大而使龜裂進展，包含龜裂的斷面減少，它所致龜裂斷面以外彈性部份的應力減少所致變形的減少可增大，在有些條件，即使不增大外部變形，也引起龜裂進展，這對應於延性龜裂的不安定傳播，因而，荷重負荷系的剛性或撓性 (compliance) 很影響不安定延性破壞。

此種不安定延性破壞在實用上的重要例有核能廠的機器——特別是壓力容器及配管熔接部的問題，核能廠的機器若發生破壞事故，放射能造成的災害、經濟上的損失極大，脆性破壞固不待言，不安定延性破壞發生率也須極力抑低。

例如 1 次冷却系配管以沃斯田鐵不銹鋼配管構或時，不會發生脆性破壞，不過，在核能廠供用期間，曾有應力腐蝕疲勞等所致的龜裂，有此種龜裂的配管因地震或錯誤動作而受過大荷重時，須以機率論討論延性龜裂的發生、成長或不安定傳播所發生的配管破斷。另須考慮配管系構造為剛性較低 (撓性大) 的構造特性。

對上述破壞事故的安全性評價基準有破斷前洩漏(Leak Before Break-LBB)的思想,亦即,即使發生龜裂而成長,其龜裂也安定成長,在貫穿管壁而充分探知壓力媒體洩漏前,若不發生不安定傳播,在分斷前可探知洩漏而適當處置,可避免裝置的致命損傷。

類似上述情形的不只限於核能廠,也存在於一般的壓力保持機器(壓力容器、配管等),特別是保持壓縮性的高氣體壓時,因氣體的壓縮性而積蓄大能量,而且,多少洩漏所致的壓力降也少,相當於機械性負荷的高撓性場合。在壓力容器的破壞事故例,始於脆性龜裂的發生傳播,在較小規模停止後,也轉移成延性不安定破壞,變成大規模破壞。在近年鋪設的各種漫長氣體輸送管線,此問題也是材料選定上最重大的問題。

第2章 延性破壞的微視機構

延性破壞在現象上經下述過程而發生，亦即，材料內在介在物或析出物變形而破壞，該處發生空隙，其次，此空隙因外荷重的增加而成長，空隙的大小超過某界限時，空隙間母相(matrix)的內部蜂腰(internal necking)或局部剪斷帶(local shear band)造成延性破壞，因而，為微視解析延性破壞，含介在物或析出物等第2相粒子的金屬材料受外力時，須有理論說明第2相粒子內部或附近發生何種應力或應變，它們成何值時發生空隙。

也要有理論說明這些發生的空隙因外荷重增加，如何成長後，連結而至最終的破斷。

為在微視上掌握延性破壞而解析，理應從上述兩方面構築理論，但是，本書在確保構造的安全性的觀點，主要討論延性破壞的巨視方面，此時的主對象為金屬材料延性破壞的條件——亦即上述兩方面中，後者空隙連結而最終破斷的條件，本章介紹延性破壞條件的代表——Plateau理論、Thomason理論及McClintock理論。

2.1 Plateau的理論

Plateau的理論最終是求金屬材料內存在的介在物體積率 V_f 與延性破壞應變 ϵ_f 之間的關係式，如下假定：

- ① 變形前形成空隙的介在物模型化成垂直荷重方向而半徑 a_0 的圓板形龜裂，隨著施加變形，如圖 2.1.1 所示，變形為長軸 $2a$ 、短軸 $2b$ 而以 BB' 為軸的旋轉橢圓體空隙。
- ② 空隙成長、空隙間的材料滿足下示條件時，發生蜂腰(necking)而破斷。

$$\frac{b}{L} = k_2 \quad (\text{常數}) \quad (2.1.1)$$

L 為空隙間的間隔， k_2 為常數。

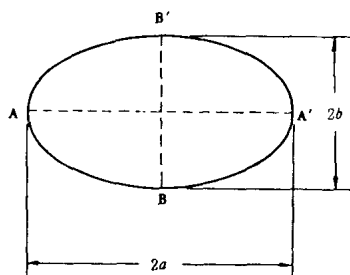


圖 2.1.1 理想化的空隙形狀

$$C = \frac{d\epsilon_b}{d\epsilon} \quad (2.1.2)$$

用以上的假定，如下求延性破壞的條件，先導入下式定義的應變集中係數， $d\epsilon_b$ 為圖 2.1.1 所示 BB' 的相對伸度， ϵ 為材料的全體應變（overall strain）。此應變集中係數 C 是有下式特性的參數。變形的初期——亦即空隙為龜裂的狀態（圖 2.1.1） $BB' = 0$ ，在 A 點（或 A' 點）的曲率半徑 $r = b^2/a$ 成零時，若遭變形， $d\epsilon_b$ 成無限大， C 成無限大。另一方面，變形增大， A 點（或 A' 點）的 r 接近無限大， $d\epsilon_b$ 與 $d\epsilon$ 相等， C 接近 1。在 A 點（或 A' 點）的應變集中程度也依存於龜裂的長度 a ，長度愈大時，應變的集中愈大。 C 依存於 a/r 的因子，考慮前述 C 的特性，以下式表示：

$$\frac{d\epsilon_b}{d\epsilon} = C = 1 + \frac{k_1 a}{r} = 1 + k_1 \frac{a^2}{b^2} \quad (2.1.3)$$

k_1 為常數。

因 $d\epsilon_b = db/b$ ，最後得下式關係式。

$$\frac{db}{b} = \left(1 + k_1 \frac{a^2}{b^2} \right) d\epsilon \quad (2.1.4)$$

在此考察兩極端的場合。

〔情形 1〕 介在物與母同樣變形的場合。

此時， ϵ 與 a 的關係如下示，亦即在 AA' 方向施加 $\epsilon/2$ 的壓縮應變

$$a = a_0 \exp\left(-\frac{\epsilon}{2}\right) \quad (2.1.5)$$

由式 (2.1.4) 和式 (2.1.5) 得

$$b db = \{ b^2 + k_1 a_0^2 \exp(-\epsilon) \} d\epsilon \quad (2.1.6)$$

將之積分得

$$b^2 = \frac{2k_1 a_0^2}{3} \exp(-\epsilon) [\exp\{3(\epsilon - \epsilon_0)\} - 1] \quad (2.1.7)$$

ϵ_0 為 $b = 0$ 時的 ϵ 值。另一方面的 ligament 長度 L 也與 (2.1.5) 同樣，變形為

$$L = L_0 \exp\left(-\frac{\epsilon}{2}\right) \quad (2.1.8)$$

介在物的體積率 V_f 與粒子的大小 a_0 ，平均間隔 L_0 之間有下示關係。

$$\frac{L_0}{a_0} = \frac{2}{3} \left(\frac{1 - V_f}{V_f} \right) \quad (2.1.9)$$

將它們代入 (2.1.1) 的破斷條件， ϵ_f 可如下求得

$$\epsilon_f = \epsilon_0 + \frac{1}{3} \ln \left[1 + \frac{2}{3} \frac{k_2^2}{k_1} \left(\frac{1 - V_f}{V_f} \right)^2 \right] \quad (2.1.10)$$

〔情形 2〕 介在物為剛性時（接近實際的模型）
介在物不變形

$$a = a_0 \quad (2.1.11)$$

解代入式 (2.1.3) 的微分方程式。

$$b^2 = k_1 a_0^2 [\exp \{2(\epsilon - \epsilon_0)\} - 1] \quad (2.1.12)$$

因粒子不變形，介在物間的 **ligament**（韌帶）長度為

$$L = L_0 \exp\left(-\frac{\epsilon}{2}\right) + 2a_0 \left\{ \exp\left(-\frac{\epsilon}{2}\right) - 1 \right\} \quad (2.1.13)$$

用與情形 1 同樣的場合， ϵ_f 成為

$$\epsilon_f = \epsilon_0 + \frac{1}{2} \ln \left[1 + \frac{k_2^2}{k_1} \left\{ \frac{2}{3} \frac{1+2V_f}{V_f} \exp\left(-\frac{\epsilon_f}{2}\right) - 2 \right\}^2 \right] \quad (2.1.14)$$

Plateau 用 Edelson 對 2 相 Cu 基合金實驗求出的體積率與延性破壞應變的關係，檢討此理論式的妥當性（圖 2.1.2）。由圖可知 Plateau 理論式求得的曲線與實驗值很一致，此理論頗有妥當性。

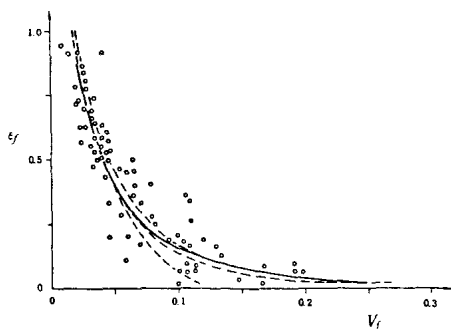


圖 2.1.2 複合金的伸度

但式 (2.1.10)，式 (2.1.14) 中有 k_1, k_2 兩任意常數，成為破壞開始條件的 k_2 缺乏明確的物理意義，實驗方面的實證不夠。

2.2 Thomason 的理論

Thomason 考慮圖 2.2.1 所示，正方形斷面的角柱狀空隙均勻分佈於材料的場合，延性破壞對應於空隙間的 **ligament** 部發生內部蜂腰的時點，考察引起蜂腰的條件，將之定式化。理論化的前提是如下假定

- ① 應力場為平面應變狀態。
- ② 材料為剛性完全塑性體，亦即成極限荷重時，開始發生蜂腰。
- ③ 空隙的形狀為圖 2·2·1 所示的角柱，它們均勻分佈於材料內。

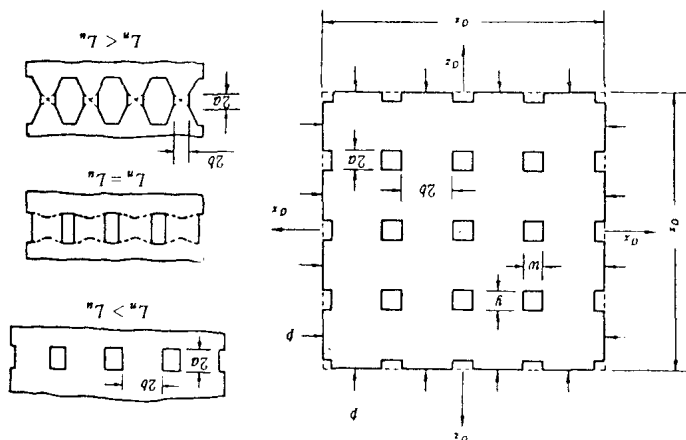


圖 2·2·1 含有空隙的平面應變狀態之要素與內部腰蜂所致空隙的合體

④ 母相均勻變形，不受空隙存在的影響，亦即，空隙隨母相均勻變形。

在以上的假定下，如下導出延性破壞的條件式，如圖 2·2·1 所示，有角柱狀空隙時，空隙間的 ligament 部被周圍的母相強力拘束，達極限荷重時，作用於 ligament 部的實斷面應力為 σ_n 、母相的降伏剪斷應力為 k ，比值 $\sigma_n/2k$ （拘束係數）大於 1，其大小依存於 ligament 部的長度 $2b$ 與空隙的大小 $2a$ ，在母相的部份，考慮圖 2·2·2 的速度場，由上界法求 $\sigma_n/2k$ 與 a/b 的關係。圖 2·2·3 為其結果，由圖可知，拘束係數 $(\sigma_n/2k)$ 因 a/b 值而大變化， a/b 小於 1 時（亦即，空隙小於 ligament 長度的場合）會突然上升。亦即，ligament 部發生蜂腰所必要的應力 σ_n 激升，不易發生蜂腰。

其次，如圖 2·2·1 所示， z 方向有 σ_z 的應力、 x 方向有 σ_x 的外部應力作用時，求全體的變形優先或 ligament 部引起蜂腰而變形集中該

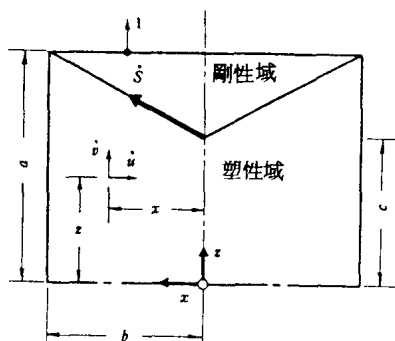


圖 2.2.2 求內部蜂腰的拘束係數上界值的平面應變速度場 ($a \geq c \geq 0$)

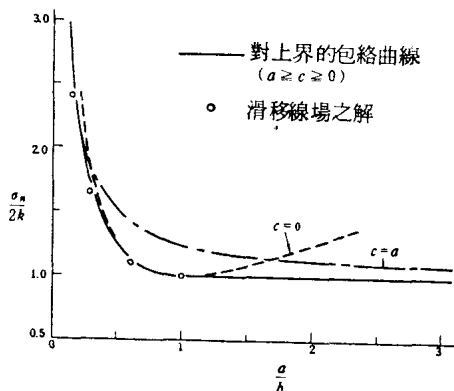


圖 2.2.3 拘束係數與縫腰時形狀的關係

處的界限條件。延性破壞的準則 (criterion) 是變形集中於 ligament 部的階段。

材料全體均勻變形時的荷重是如圖 2.2.1 規定記號，作用於要素的外部荷重 L_n 為

$$L_n = \sigma_x \delta_x \quad (2.2.1)$$

空隙間的 ligament 達極限荷重，引起蜂腰時的外部荷重 L_n 如下示：

$$L_n = \sigma_n (\delta_x - nw) + p\delta_x \quad (2.2.2)$$

n 為距離 δ_x 內的空隙總數， p 為作用於材料的靜水壓，因而，變形集中