

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

小尺寸試片疲勞性質測試技術研究(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2212-E-002-030-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：單秋成

計畫參與人員：蔡賜慶，陳品成，陳維儒

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 5 月 26 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果 報告

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

※※※

※ 小尺寸試片疲勞性質測試技術研究 (1/2)

※

※

※

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

※※※

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 91-2212-E-002-030

執行期間：91年8月1日至92年7月31日

計畫主持人：單秋成

共同主持人：

計畫參與人員：蔡賜慶，陳品成，陳維儒

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立台灣大學機械研究所

中 華 民 國 92 年 5 月 11 日

行政院國家科學委員會
九十一年度研究計畫成果期中報告

小尺寸試片疲勞性質測試技術研究 (1/2)

計畫編號：NSC 91-2212-E-002-030

執行時間：91年8月1日至92年7月31日

主持人：單秋成

研究生助理：蔡賜慶，陳品成，陳維儒

國立台灣大學機械研究所

摘要

機械性質測試常有所謂尺寸效應 (size effect)，此點在斷裂韌性及疲勞性質上尤為眾所周知；現今機械構件日趨輕薄短小，其尺寸常已遠小於一般用作量測材料機械性質之標準試片，當需要對相關微小構件進行分析設計或評估其結構完整性時，往往必須用到構件材料的一些機械性質，此時如透過測試標準試片，所得到的性質可能與微小構件之實際機械性質有所出入，有必要開發測試小尺寸試片的技術。另一方面，即使重工業所使用的大型構件，如必須進行結構完整性分析或殘餘壽命評估，要挖取樣品來掌握其目前之機械性質，樣品的尺寸越小越不會影響結構完整性，所以同樣有必要開發測試小尺寸試片的技術。

從文獻回顧可以看到小尺寸試片疲勞破壞性質之測試技術則最為缺乏，尤其疲勞裂縫延伸性質之小尺寸試片測試則仍不多見；而疲勞破壞在機械失效中佔相當重要的比重，相關之小尺寸試片測試技術十分值得開發，本計劃第一年成功開發了小尺寸之圓桿疲勞裂縫試片，其體積可以為標準試片之幾十分之一，可供使用非常少量材料即可評估材料之疲勞破壞行為。

關鍵詞：縮小試片機械性質測試，圓桿試片，疲勞裂縫延伸性質，旋轉彎曲。

Abstract

It is well known that size effects occur in many mechanical properties. Fracture toughness and fatigue limit are two well known properties that exhibit marked size effects and standard specimens have to be used to get valid properties results. As mechanical devices go smaller and smaller, such standard specimens may appear too large in comparison. Size effects will occur in turn as properties evaluated from these large specimens may not accurately reflect those of the miniature components. Small sized specimens and testing techniques have to be developed for obtaining relevant properties required for stress analysis, design and life assessment of miniature components. On the other hand, even for large scale structures such as those used in power plant and chemical process plants, structural integrity assessment of aged components often required test samples to be cut off from the components. In order not to weaken the structure unnecessarily, such samples should be as small as possible. This again necessitates the development of small sized specimens and the corresponding testing techniques.

A Review on the current literatures on small sized specimens and testing techniques revealed that relevant techniques on fatigue properties evaluation are seriously lacking. In this project, a small rod specimen with surface crack has been developed to evaluate the fatigue crack propagation properties.

Keywords: sub-sized specimens, small rod specimen, rotation bending, fatigue crack propagation.

一、背景

機械性質測試常有所謂尺寸效應 (size effect)，尺寸效應傳統上指以小型試片測得之性質不能準確反映大型結構之相關性質，此點在斷裂韌性及疲勞性質上尤為眾所周知；現今機械構件日趨輕薄短小，其尺寸常已遠小於一般用作量測材料機械性質之標準試片，當需要對相關微

小構件進行分析設計或評估其結構完整性時，往往必須用到構件材料的一些機械性質，此時如透過測試標準試片，所得到的性質可能與微小構件之實際機械性質有所出入，有必要開發測試小尺寸試片的技術。另一方面，即使重工業所使用的大型構件，如必須進行結構完整性分析或殘餘壽命評估，要挖取樣品來掌握其目前之機械性質，樣品的尺寸越小越不會影響結構完整性，所以同樣有必要開發測試小尺寸試片的技術。

從文獻資料回顧可以看到CVN 衝擊測試[1-4]，斷裂韌性測試[5-11]及拉伸性質[12-14]有較多的文獻資料，後者包括含環向裂縫之小圓桿試片[5]，短桿(short rod) 試片[6]，含切口小圓盤(notched disk)試片[7]，含橫向加強樑之stress field modified miniature bend 試片 [8]，微型之圓盤CT試片(Disk compact tension specimen)[9]，以及 small punch test [10] 或 bulging test [11] 方法間接推導斷裂韌性。拉伸性質之測試則有利用縮小尺寸之平板狀拉伸試片[12]，也有使用 four-point bending 之 TEM disk size 試片[13]，或利用 Ball indentation 方法[14]。

文獻中有關小尺寸試片疲勞性質測試之探討尚十分有限，主要利用TEM disk size 試片作往復彎曲[15]或往復拉伸[16]，另有嘗試使用Ball indentation 方法求得之拉伸性質間接求取疲勞破壞性質[16]，或往復的punch indentation [17] 進行疲勞測試，但成果仍十分有限。至於疲勞裂縫延伸性質之小尺寸試片測試則仍不多見；而疲勞破壞在機械失效中佔相當重要的比重，相關之小尺寸試片測試技術十分值得開發，本計劃第一年即擬開發小尺寸之圓桿疲勞裂縫試片，希望可建立使用非常少量材料即可評估材料之疲勞破壞行為。

二、研究方法與步驟

本研究採用含表面裂縫之小尺寸圓軸桿件，並以旋轉疲勞之加載方式進行測試，旋轉疲勞試驗機傳統上用於做 S-N 曲線測試，其構造簡單，具備電動馬達、轉軸承、法碼、計數器等，即可架設出整座機台，實驗成本低，僅需油壓試驗機數十至數百份之一價格即可，本研究將之利用到疲勞裂縫延伸之測試，主要著眼點是圓桿試片使用材料較小，是頗具創意之用法。

為探討最小可把試片縮到多小，本研究採用一系列 9 種(3 種直徑，3 種長度)之圓桿試片，其尺寸及編號如表一，其相對大小見圖一。圓桿試片中之裂縫為表面裂縫，起始之切口以放電加工產生，圖二為典型之斷面，其中可清楚看到放電加工之起始切口，疲勞裂縫成長區及最後斷裂區，裂縫之量測初步使用千分頭量角器配合光學顯微鏡，實驗之架構如圖三。我們另正開發利用試桿柔度評估表面裂縫尺寸之方法。表面裂縫之應力強度因子在裂縫前緣每一點均不相同，在分析數據時我們初步使用了 Carpinter [18]所提出之應力強度因子解，我們另進行了更詳細之有限元素法分析，有關柔度法量測表面裂縫尺寸及詳細之應力強度因子結果，正在整理發表中。

此外，為評估從圓桿試片所量到之疲勞裂縫延伸數據之有效性，另準備寬 50mm 厚 12mm 之 CT 試片並進行標準之疲勞裂縫延伸試驗。此尺寸之 CT 試片約為本研究最大之圓桿試片體積之 4.6 倍，最小之圓桿試片體積之 37 倍，CT 試片雖可再予縮小，但受限於上下夾頭之干涉，寬度大概至多能縮小至 1/2~1/4 倍，厚度因受限於塑性區大小之影響，不能自由按比例縮小很多，總體積估計約可縮小至 1/4~1/6 倍，另一方面，屆時加工將會有一定之難度。

三、結果與討論

3.1 表面裂縫之量測

目前使用之表面裂縫量測，僅能裂縫表面弧線長度(2S)裂縫深度(b)無法觀察到，然計算表面裂縫之應力強度因子必須同時掌握2S及b，解決的方式是利用旋轉彎曲循環負載產生不同弧線長度的裂紋，再將試桿拉斷，直接觀測內部的裂紋深度，從而建構出2S-b的關係；對相同直徑的試桿，因為負載條件固定，故裂縫形狀有很好的再現性。圖四為口徑12mm系列試桿2S-b的關係，前人皆以線性方式表示此關係[19]，往後之分析即利用這些關係來計算圓桿裂縫的應力強度因子及內部之生長速度。

3.2 試桿長度之影響

試桿長度之縮短，可減少測試材料的體積，然而，當長度縮短至某種程度時，夾具易造成裂紋觀測上困難，或夾持區附近有邊界效應產生。

圖五為相同直徑12mm下，不同長度尺寸的裂縫延伸結果之比較，不同長度試桿1-1-2、1-2-1、1-3-1數據幾乎吻合。所以口徑12mm下，長度因素不至影響到測試結果。圖六為相同直徑6mm下，不同長度尺寸的裂縫延伸結果，圖中可明顯看出3-1、3-2系列測試結果較相近，當長度縮短至43mm時，其生長速率相較之下比較低。

3.3 試桿直徑之影響

比起長度縮短，試桿直徑縮小，其減少材料體積的程度，更為顯著，然而，直徑縮小的同時，所加負載力量，也要進行調整，此外，測試過程中，所能量測的弧線長變化也隨之減小，為了獲得夠多的數據點，間隔旋轉數(ΔN)要調低。

圖七為長度L=86mm時，不同直徑試桿1-1-2、2-1-4、3-1-4的結果，從圖中可看出，直徑12mm與8mm試桿之結果相若，6mm試桿則有較高之生長速度。至於L=56mm的結果與L=86mm系列大致相似；L=43mm時，三種直徑之結果均相若(圖八)。

3.4 圓桿疲勞裂縫成長結果與CT試片結果比較

圖九為各種不同長度與直徑之圓桿試件之疲勞裂縫成長結果與CT試片結果比較，圖中代號有C字者為CT試片，整體而言，大部份的圓桿試件之疲勞裂縫成長結果與CT試片結果可以說是相當吻合，有少數兩三個情形下圓桿試件之結果與CT試片結果稍有距離，必須指出圖中結果皆為原始數據，未經裂縫封閉U值估算，在旋轉彎曲下量測裂縫封閉有其困難，初步數據顯示圖九中之差異大致可由裂縫封閉得到解釋，總而言之，使用圓桿試件量測疲勞裂縫延伸數據是相當可行的方法。

3.5 縮小尺寸技術之運用

使用圓桿試件，除了材料用量可以較少外，其幾何形狀也十分有利於再生試片(Reconstituted Specimens)之應用，所謂再生試片是指祇有少量材料，或祇有測試過的試片殘骸，設法將這些有限之材料連接到其他材料上，做成完整的試片加以使用，例如取衝擊破斷之試片的一段，兩端以所螺紋方式或焊接方式連接上其他材料，再加工做成小圓桿試件，即可作疲勞裂縫延伸測試，如此使用的材料量比目前要少更多，同樣之材料如要製成CT試片，則有較多的困難，因此本研究之成果對於祇有少量材料但卻要進行疲勞裂縫延伸測試有正面的幫助。

四、結論

本研究成功開發出使用小尺寸圓桿試件進行疲勞裂縫延伸測試的方法，初步結果顯示所量得數據與標準測試所得者相若，對於祇有少量材料但卻要進行疲勞裂縫延伸測試有正面的幫助。

五、未來工作展望

本研究之進度基本符合預定目標，未來之工作除繼續完成圓桿試件疲勞裂縫延伸測試之詳細探討外，尚有：

- (1) 探討再生試片(Reconstituted Specimens) 應用在疲勞裂縫延伸之可能性。
- (2) 建立Ball Indentation 測試系統之設計及初步建構，並進一步利用之作拉伸性質及其他機械性質的量測。

六、參考文獻

1. E. Lucon, , *ASTM STP 1329*, 1998, pp.15-31.
2. J. F. Kalthoff and M. Gregor, *ASTM STP 1329*, 1998, pp.98-109.
3. T. Varga and D.H. Njo, *ASTM STP 1204*, 1993, pp.118-129.
4. A. S. Kumar, B. S. Louden, F. A. Garner and M. L. Hamilton, *ASTM STP 1204*, 1993, pp.47-61.
5. D. Sarchamy and M.G. Burns, *ASTM STP 1329*, 1998, pp.353-362.
6. L. M. Barker, *Engineering fracture Mechanics*, Vol.9, 1977, pp.361-169.
7. M. Bernard, J.W. Provan and H.V. Lakshminarayana, *ASTM STP 1204*, 1993, pp.143-161.
8. M. P. Manahan, *International Journal of fracture*, 1991.
9. D. J. Alexander, *ASTM STP 1204*, 1993, pp.130-142.
10. W. Geary and J.T. Dutton, *ASTM STP 1329*, 1998, pp.588-601.
11. J. R. Foulds, M. Wu, S. Srivastav and C. W. Jewett, *ASTM STP 1329*, 1998, pp.557-574.
12. M. L. Hamilton, M. A. Blotter and D. J. Edwards, *ASTM STP 1204*, 1993, pp.368-385.
13. S. Nunomura, T. Nishijima, Y. Higo and A. Hishinuma, *ASTM STP 1204*, 1993, pp.256-266.
14. F. M. Haggag, *ASTM STP 1204*, 1993, pp.27-44.
15. G. R. Rao and B. A. Chin, *ASTM STP 1204*, 1993, pp.267-274.
16. S. Nunomura, S. Noguchi, Y. Okamura, S. Kumai and S. Jitsukawa, *ASTM STP 1204*, 1993, pp.275-288.
17. J.C.M. Li, *Sprita Metallurgica*, vol.13, p. 1021-1026, 1979.
18. A. Carpinteri, R. Brighenti & A. Spagnoli, *Fat. & Fract. of Engng. Mater. & Struct.*, Vol.21, 1998, pp.1027-1035.
19. M. M. Freitas, and D. Francois, *Fat. & Fract. of Engng. Mater. & Struct.*, Vol 18, No 2, 1995, pp.171-178.

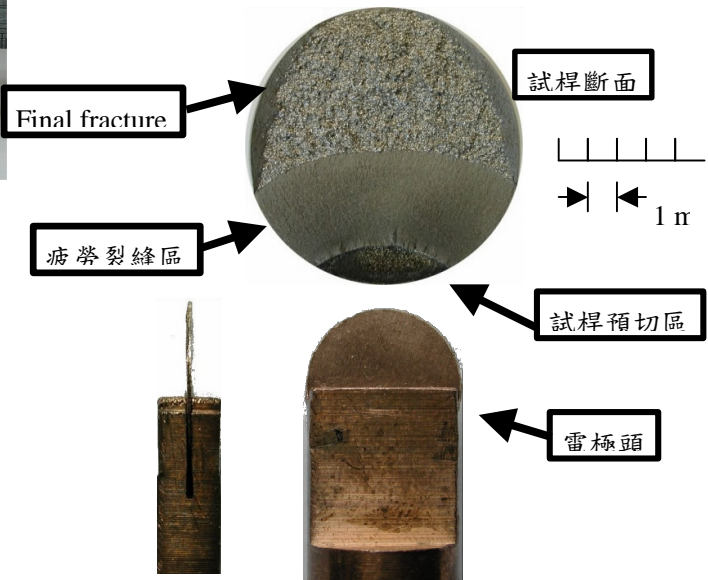
| D | L (單位: mm) | | | 試桿編號方式 |
|----|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------|
| | 86 | 56 | 43 | |
| 12 | 1-1(V) | 1-2(² / ₃ V) | 1-3(¹ / ₂ V) | D — L — N |
| 8 | 2-1(⁴ / ₉ V) | 2-2(⁸ / ₂₇ V) | 2-3(² / ₉ V) | |

| | | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------|
| 6 | 3-1(¹ / ₄ V) | 3-2(¹ / ₆ V) | 3-3(¹ / ₈ V) | 口徑 長度 編號 |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------|

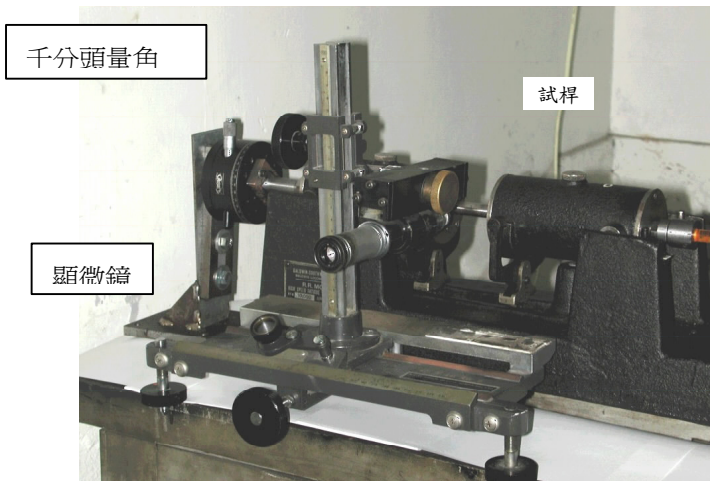
表一 試桿尺寸規劃表



圖一：不同長度與直徑之圓桿疲勞試片



圖二：圓桿表面裂縫之典型斷面

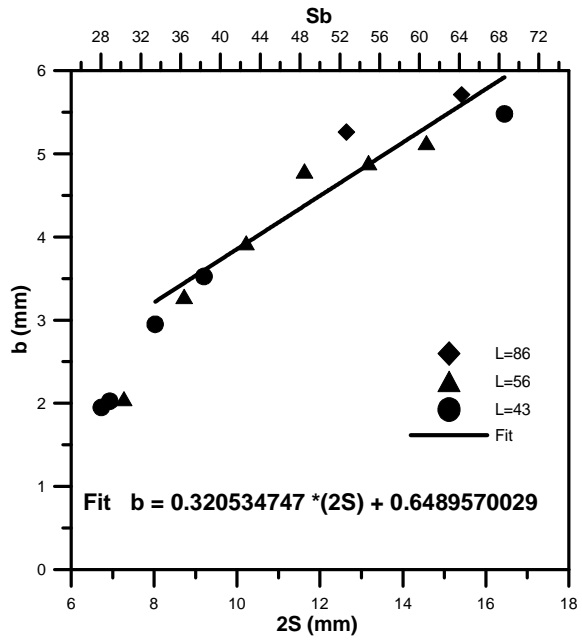


千分頭量角

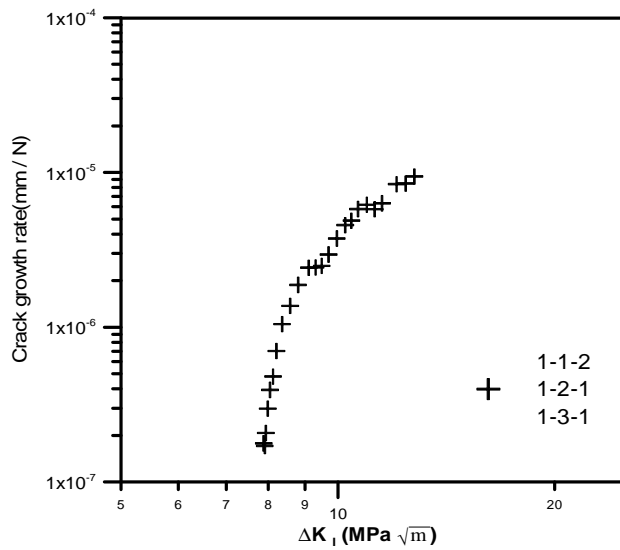
試桿

顯微鏡

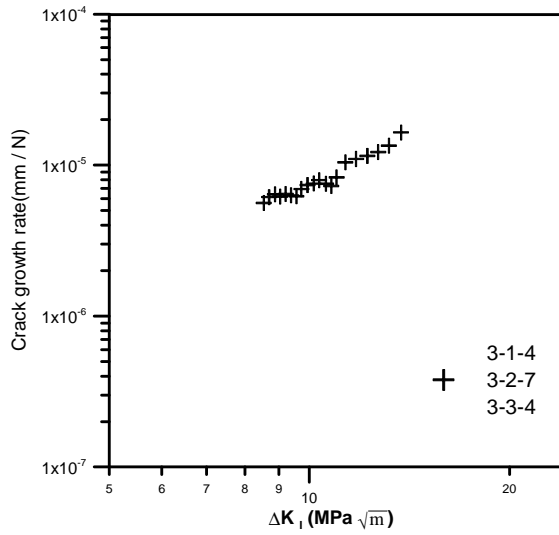
圖三：圓桿試片實驗與表面裂縫量測之架構



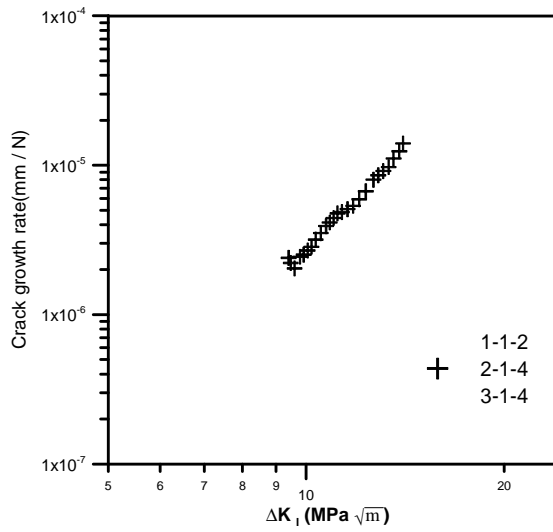
圖四: D=12mm 表面弧線長(2S)與深度(b)關係



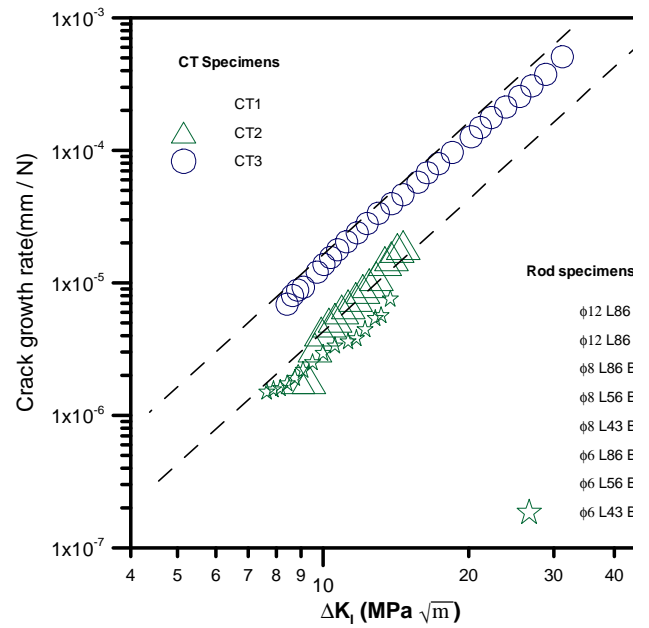
圖五: D=12mm, 不同長度試桿之裂縫成長速度關係圖

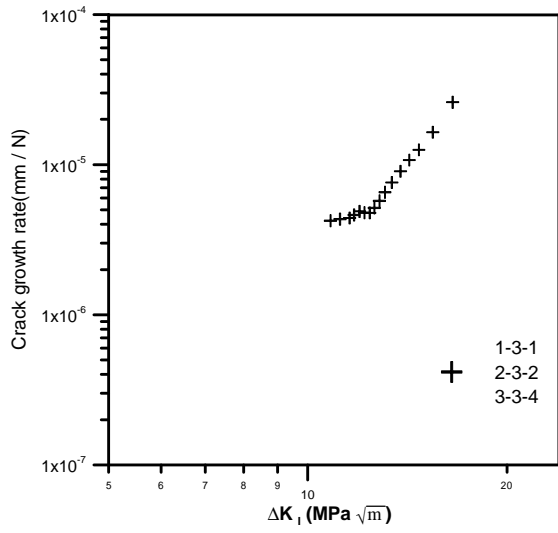


圖六: D=6mm, 不同長度試桿之裂縫成長速度關係圖



圖七: L=86mm, 不同直徑試桿之裂縫成長速度關係圖





圖八: L=43mm, 不同直徑試桿之裂縫成長速度關係圖

圖九: 各種圓桿裂縫成長結果與 CT 試片結果比較