

第五章 試驗結果與討論

5.1 不同應力狀態試驗結果

本研究改良之儀器目前可進行中空軟岩試體的應力控制與應變控制試驗。應力控制試驗與應變控制試驗分別用在固定正向力以及固定體積兩種軸向束制條件之環剪試驗。對於淺層滑動，滑動面之受剪過程受束制條件可能較接近固定正應力之條件；反之，對於深層滑動或以岩錨加固之邊坡，岩層滑動面之受剪過程受束制條件則可能較接近固定體積之條件。因此固定正應力以及固定體積兩種條件，可以分別視為兩種極限條件。李程遠（2003）認為實心圓柱試體之殘餘強度必須扭轉角達 60 度後，橫截面剪應力才可視為均勻分佈，此時扭力才會趨於較穩定的趨勢。但對於軸向應力較大的情形下，殘餘扭力強度卻未必能完全趨於穩定。

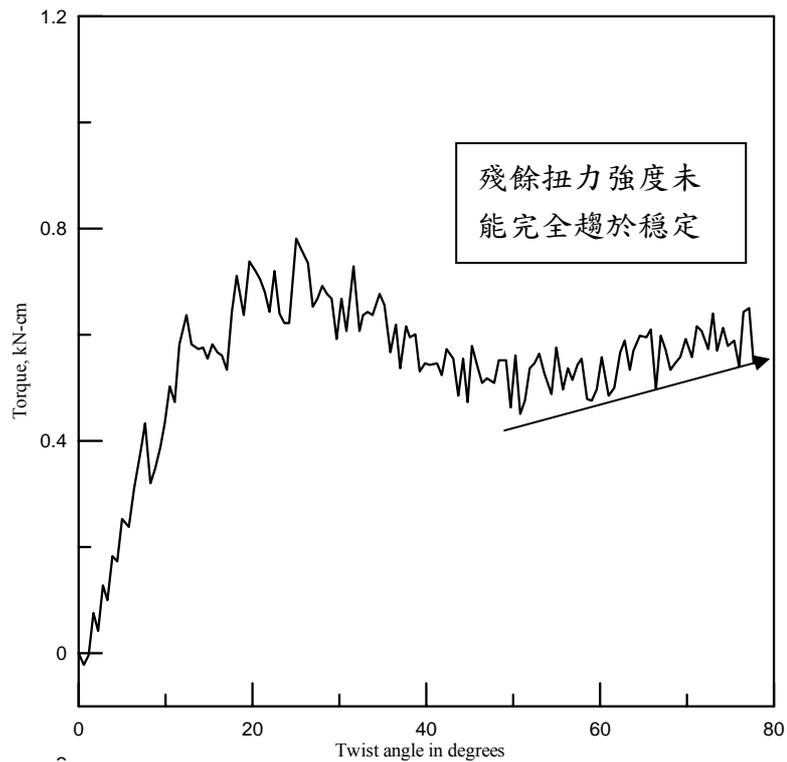


圖 5.1 固定正向力 12.1 kg (李程遠, 2003)

由於本系統的旋轉式油壓缸最大的旋轉角度僅為 100 度，對於實心的圓柱試體可能仍嫌不足。然而若以中空圓柱試體進行環剪試驗僅須扭轉角達 20 度後，即可全面達到殘餘強度，橫截面剪應力即可視為均勻分佈，殘餘扭力即能完全趨於穩定。

試體在扭剪的過程中，不論是固定正向力試驗或固定體積試驗都會先於試體中央產生約為 45 度的裂縫，45 度的裂縫會向上及向下延伸成一破壞面（如圖 3.27），當破壞面延伸至較弱的層面時（此時即達尖峰強度），隨即會產生第二道裂縫，此時第二道裂縫為隨機發生。第二道裂縫會以左右水平向延伸而形成第二道破面，而當第二道

破壞面形成後（如圖 5.2），即達所謂的殘餘強度。



圖 5.2 第二道破壞面產生

5.2 固定正向力之應力控制試驗

本節所述之試驗為固定正向力，是以應力控制之環剪試驗。所採用之試體平均含水量小於 1%，屬於極為乾燥狀態。因此試體材料性質較為脆性，尖峰強度十分明顯。試驗過程中亦會產生 45 度的破裂面及水平破裂面。圖 5.3～圖 5.9 分別為當正向力為 330、660、990 N 下之環剪試驗結果。扭剪速率皆為每秒 0.01 度。試體受剪過程中均為膨脹之現象，並無李程遠（2003）所謂的初期先壓縮，隨後膨脹的現象。推測可能李程遠（2003）所採用之試體注蠟方式，可能無法使金屬環與試體之間填滿，而本研究採用針筒注蠟的方式，已有大幅改善。圖 5.6 在初期時有微微壓縮的情形，推測在試體注蠟完成後，使用刀片修平的過程中，端部的蠟有些微的損傷。軸向應力較大者，相

對強度較高。而圖 5.3 正向力 330N 的扭力—扭轉角關係圖中，殘餘強度在通過 50 度後，有上揚再平衡的趨勢，推測可能為天然試體中褐色鐵礦恰巧出現於第二道破壞面所造成。



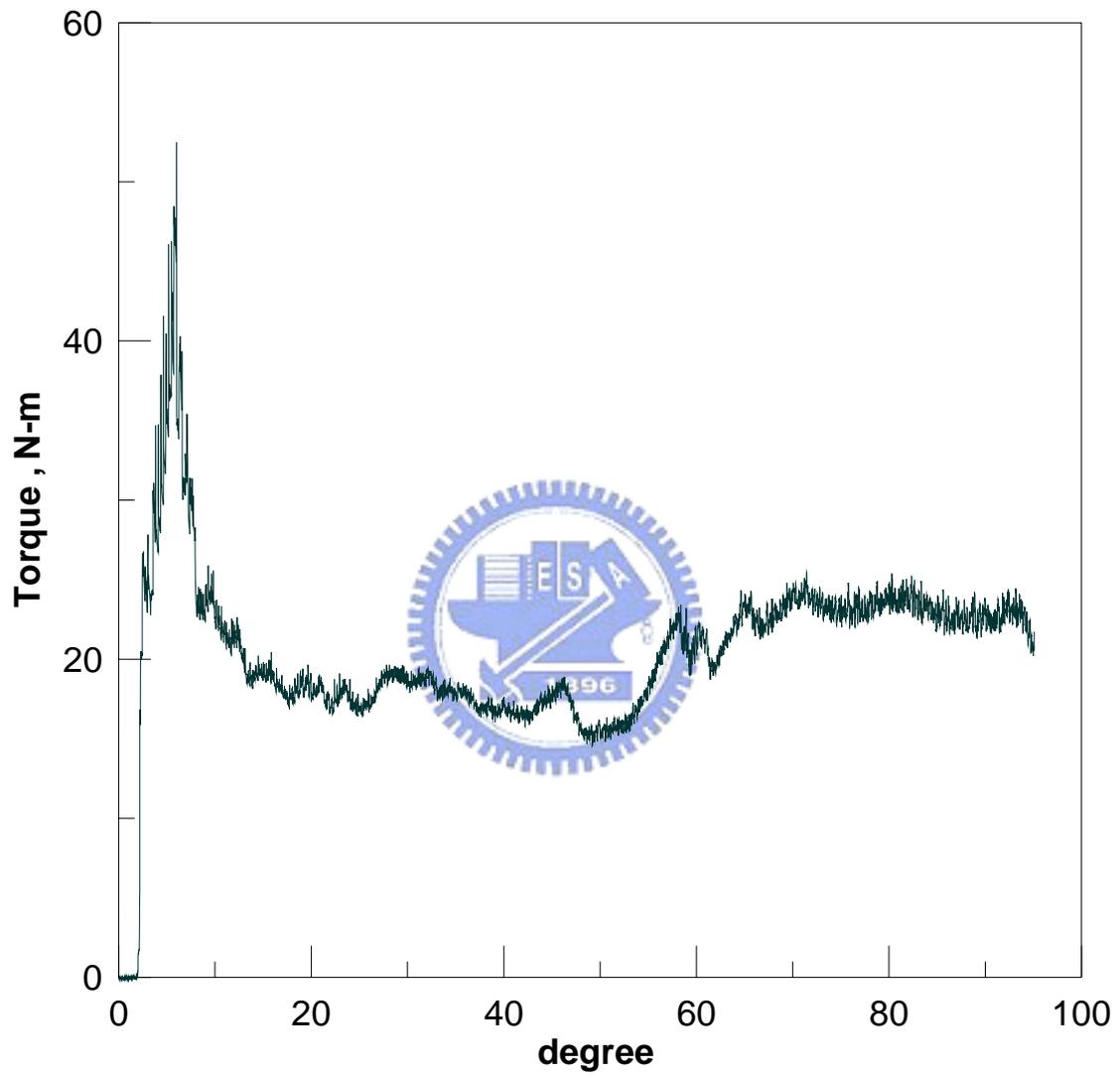


圖 5.3 正向力 330N 下之扭力—扭轉角關係圖

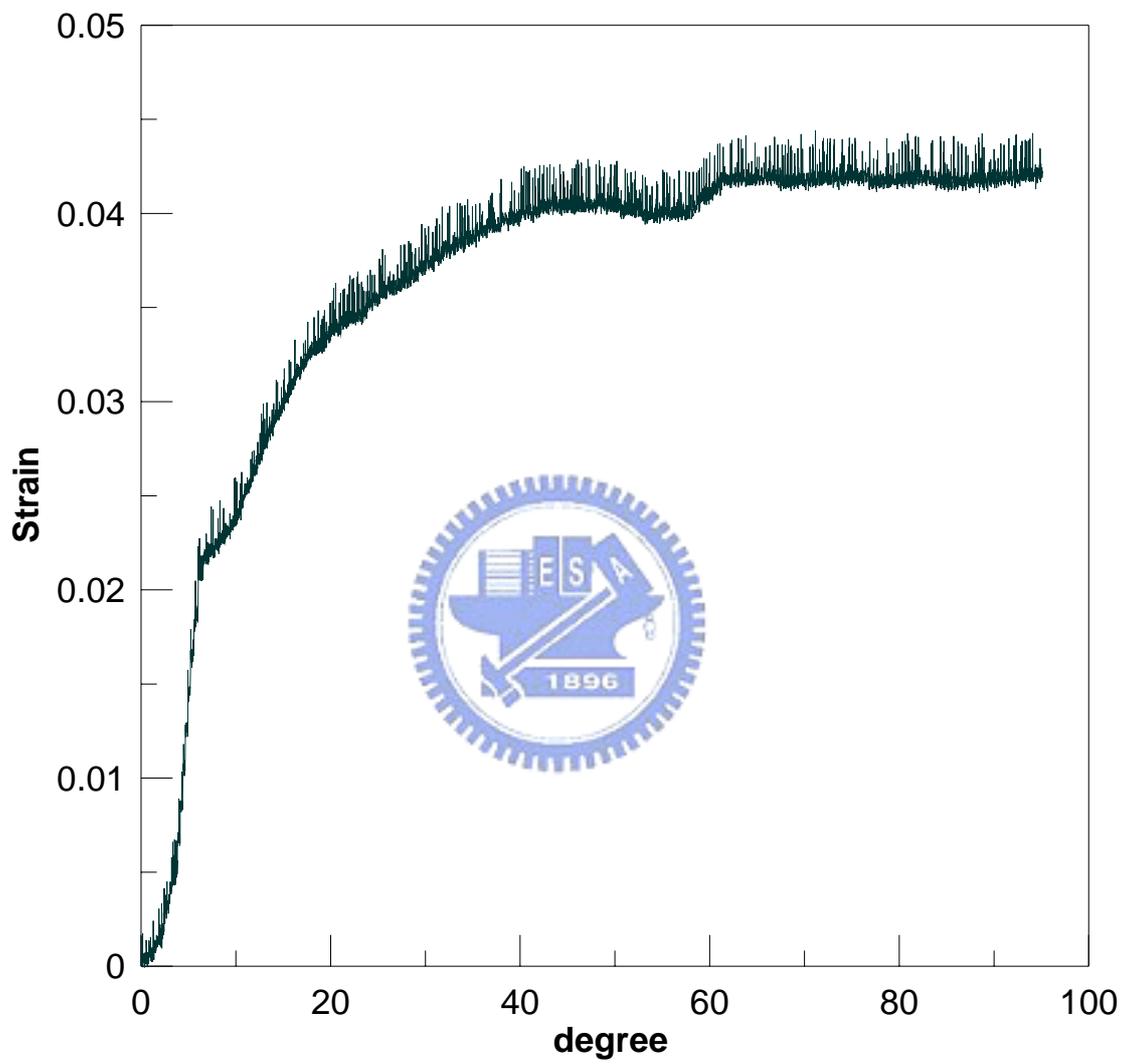


圖 5.4 正向力 330N 下之垂直應變—扭轉角關係圖

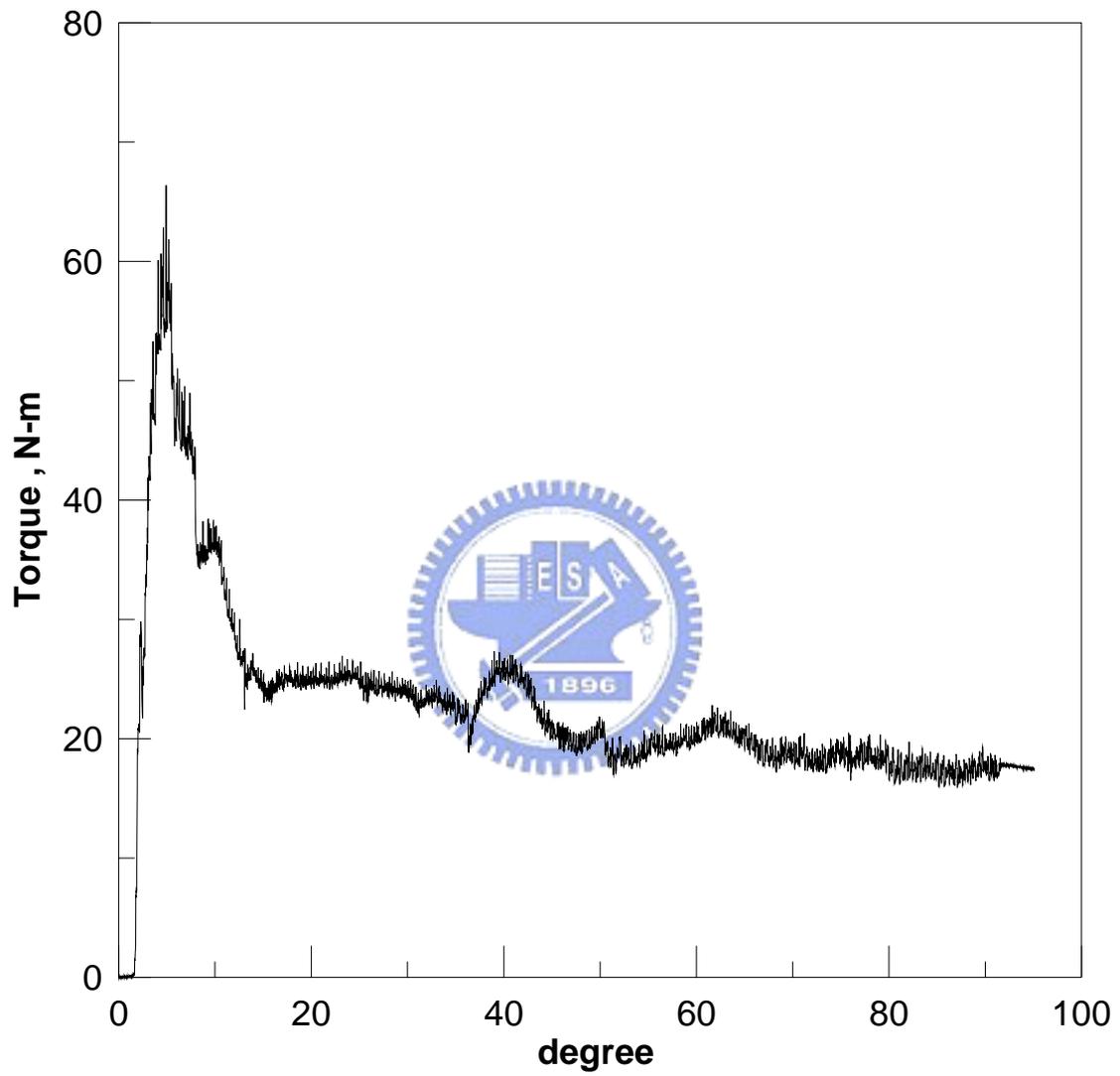


圖 5.5 正向力 660N 下之扭力—扭轉角關係圖

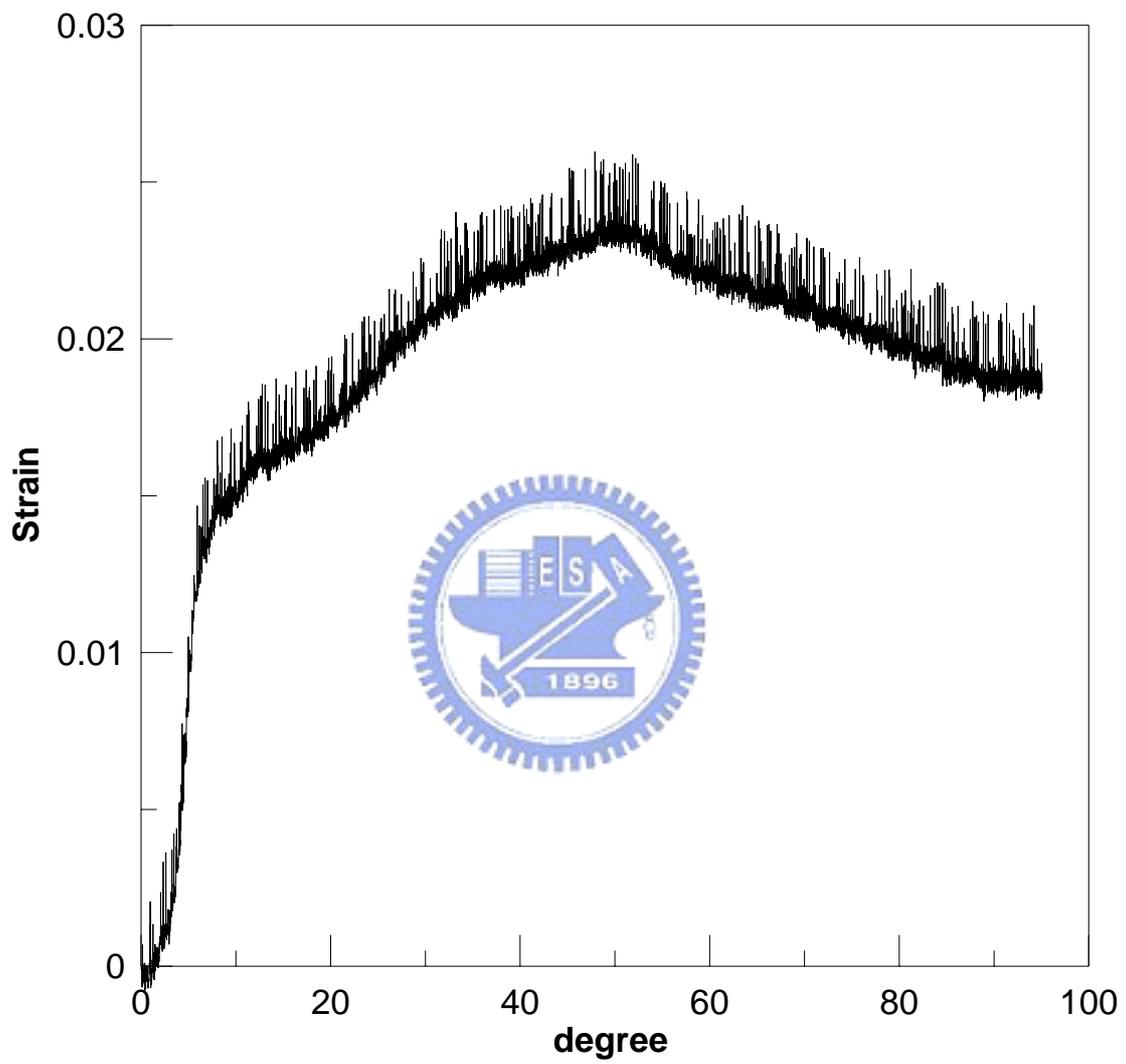


圖 5.6 正向力 660N 下之垂直應變—扭轉角關係圖

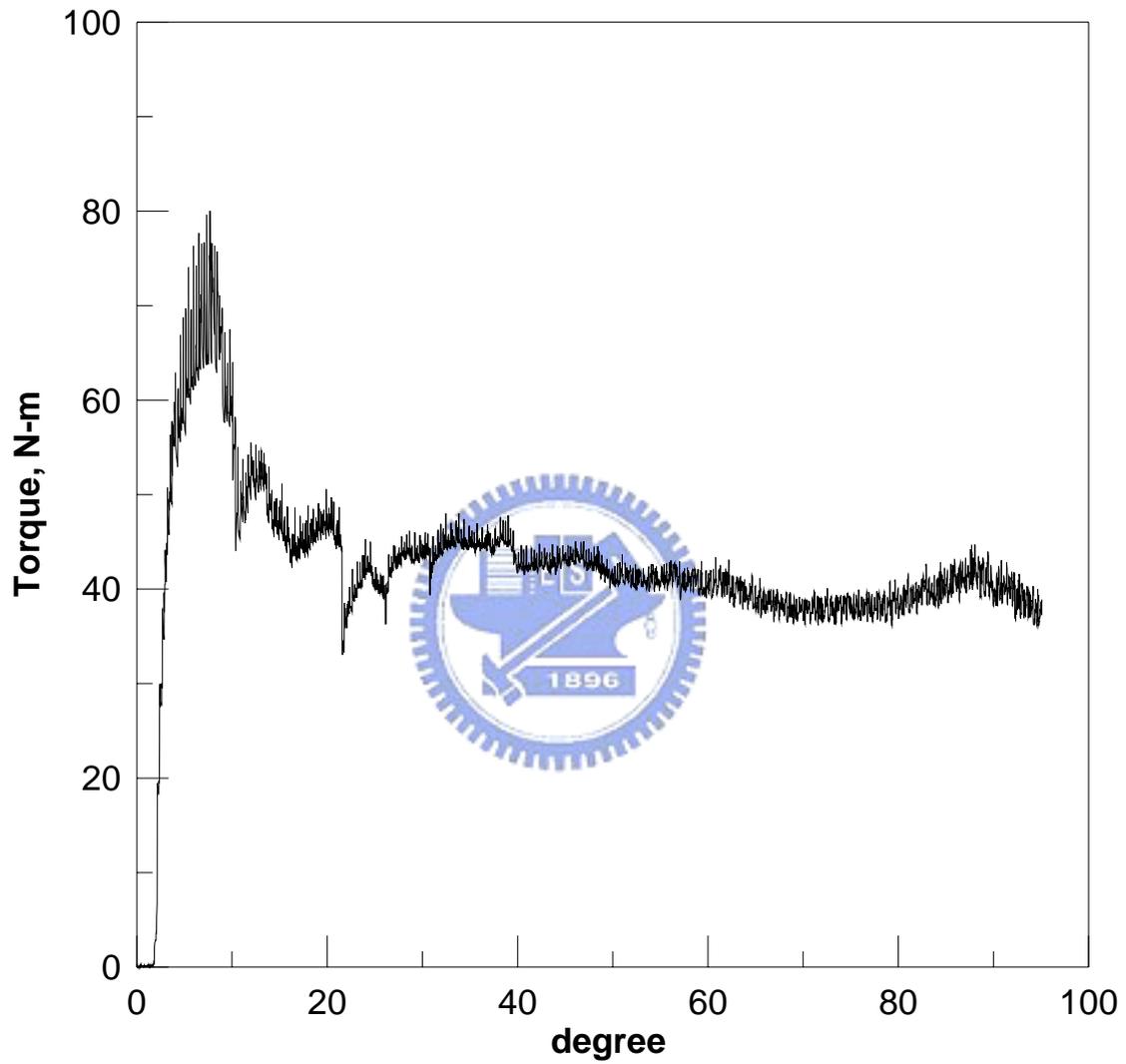


圖 5.7 正向力 990N 下之扭力—扭轉角關係圖

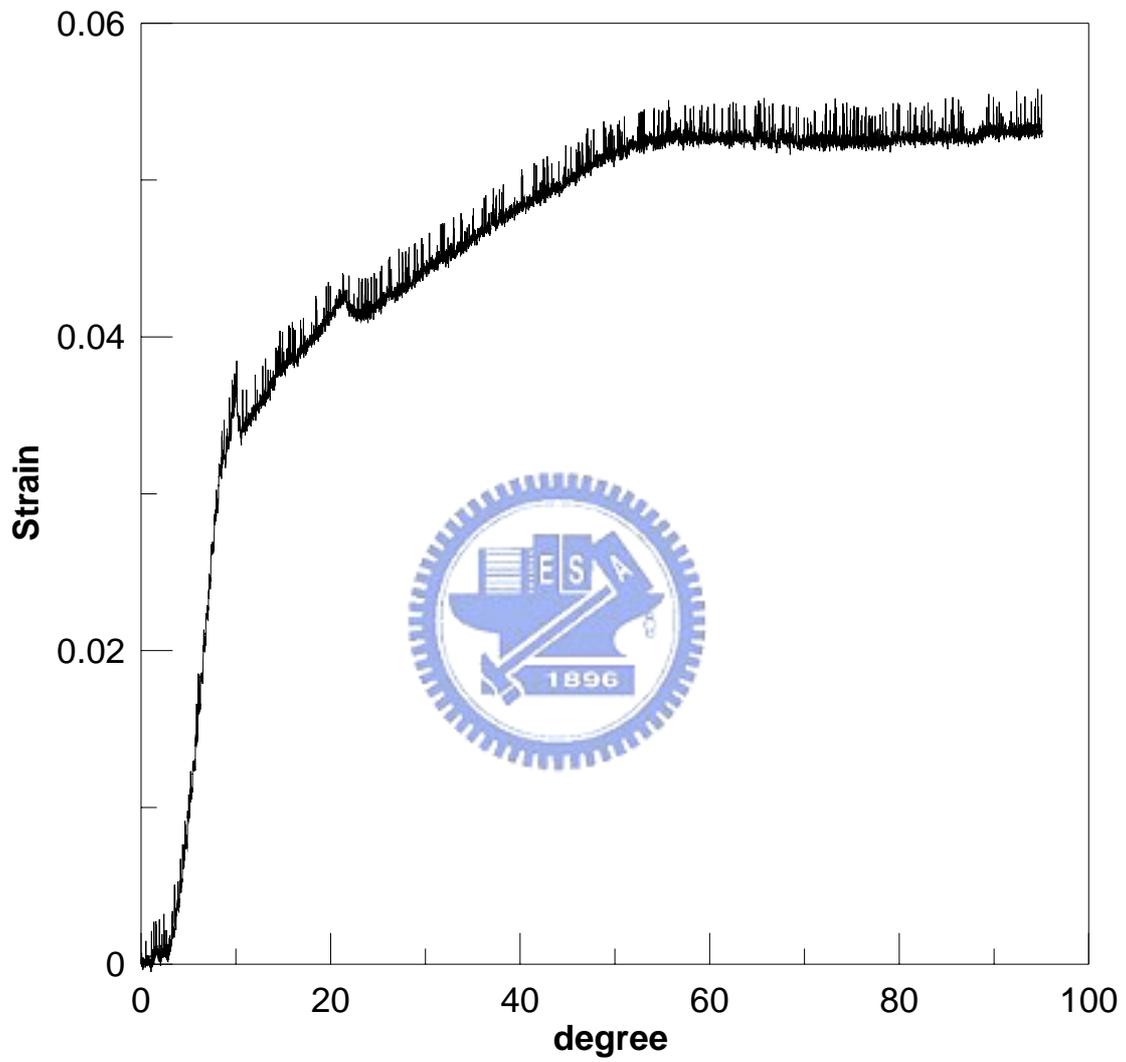


圖 5.8 正向力 990N 下之垂直應變—扭轉角關係圖

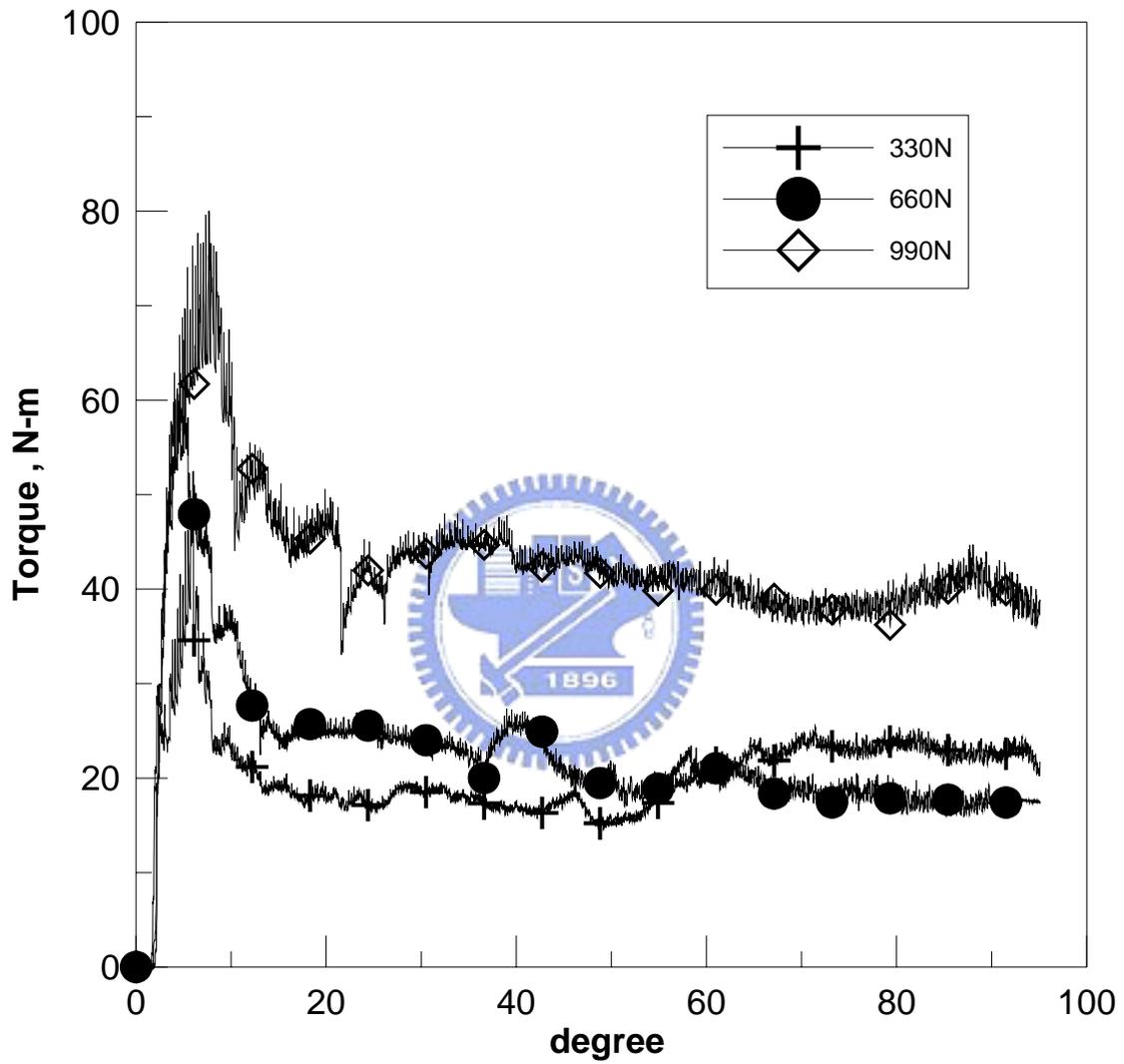


圖 5.9 不同軸力條件之固定正向力扭剪試驗比較

5.3 固定體積之應變控制試驗

本節所述之試驗為固定體積，是以應變控制之環剪試驗。所採用之試體亦為平均含水量小於 1%，屬於極為乾燥狀態的香山相砂岩。試體材料性質較為脆性，尖峰強度十分明顯。圖 5.10~圖 5.16 分別為初始正向力為 330、660、990 N 下之固定體積環剪試驗結果，試體受剪過程中普遍均有在第一道破壞面形成前，軸向應力迅速增加之現象。破壞面的形成順序亦會先於試體中央產生約為 45 度的裂縫，裂縫會以 45 度的方向，向上及向下延伸成一破壞面，當破壞面延伸至較弱的層面時，隨即會產生第二道裂縫。圖 5.13、圖 5.15 在第二道裂縫形成後軸向應力便無法維持。在拆下試體後發現第二道破壞面為粉質細砂岩強度極低，推測為軸向應力無法維持的主要原因。圖 5.16 中初始正向力 660N，在最終時無法達殘餘狀態，亦是此原因。

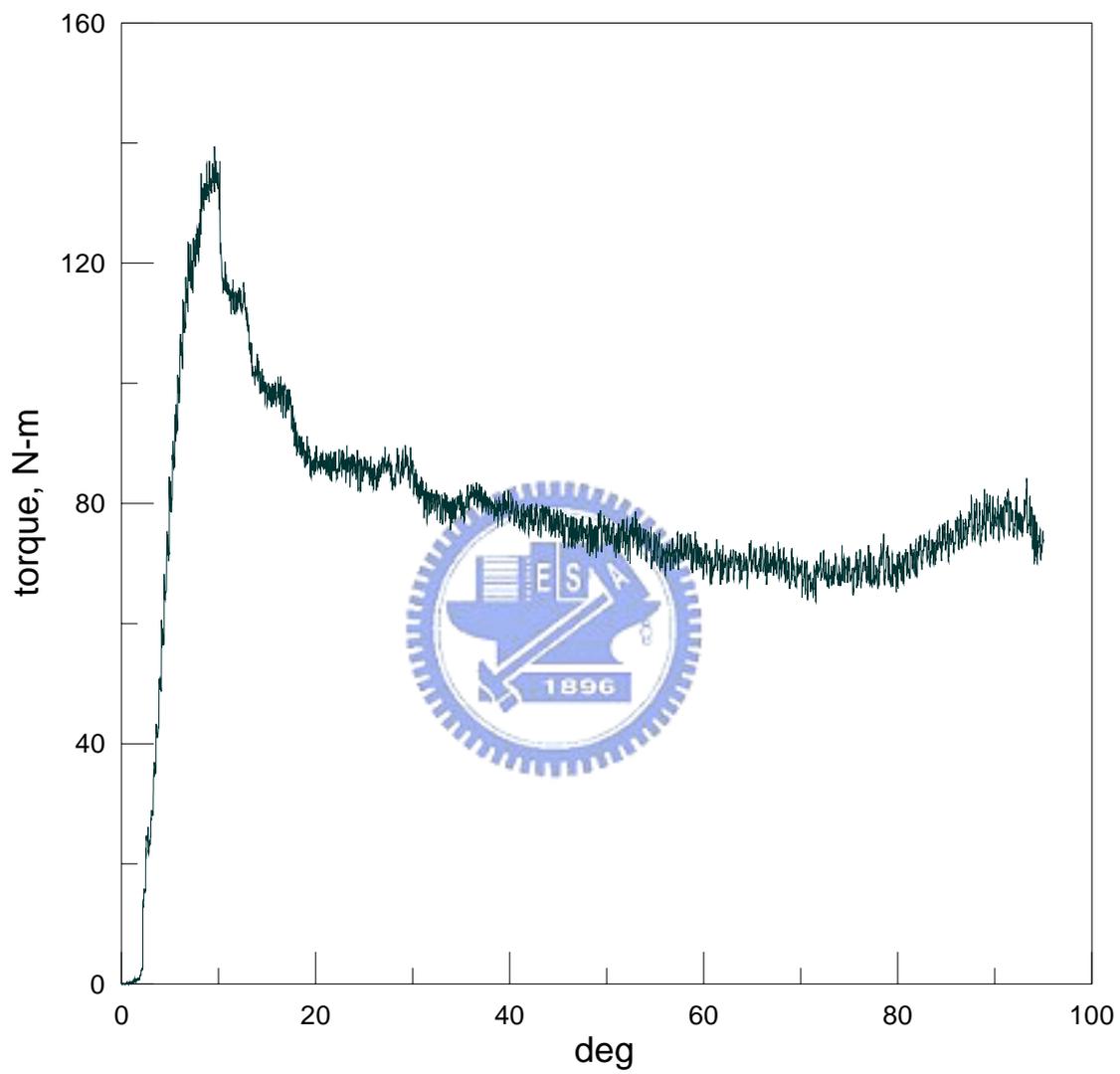


圖 5.10 初始軸應力 330N 下之固定體積扭剪試驗結果

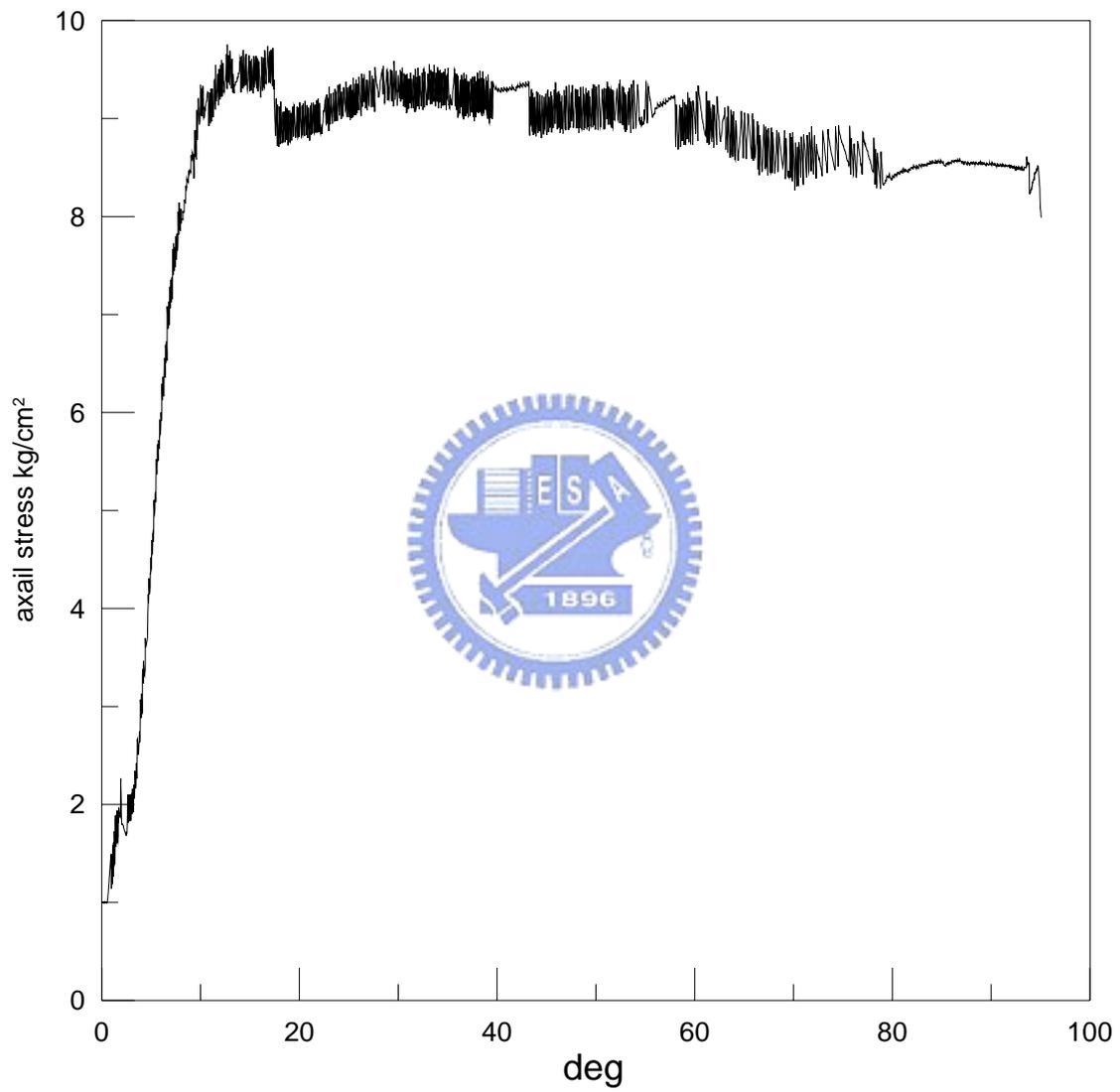


圖 5.11 初始軸應力 330N 下之垂直應力—扭轉角關係圖

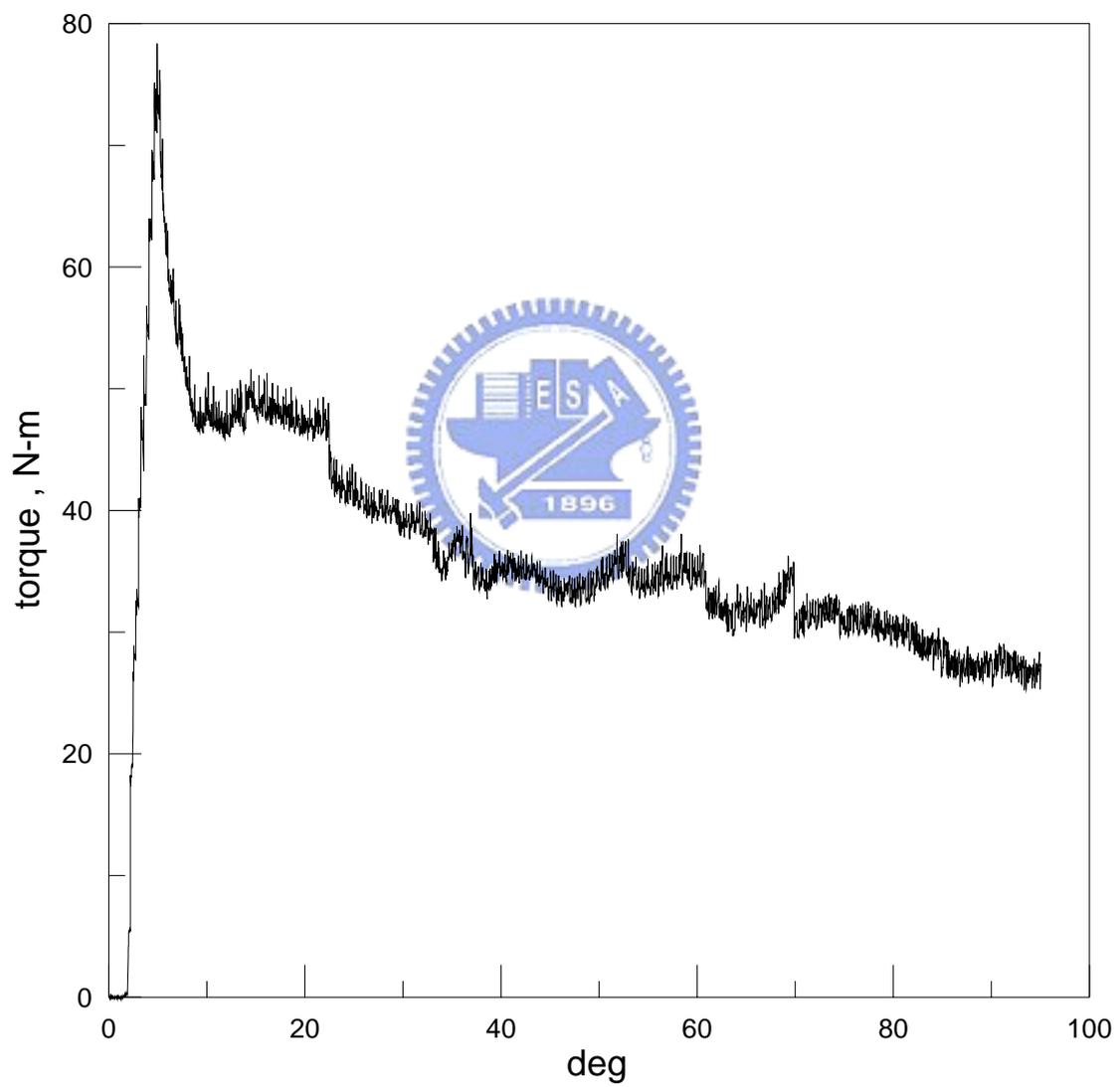


圖 5.12 初始軸應力 660N 下之固定體積扭剪試驗結果

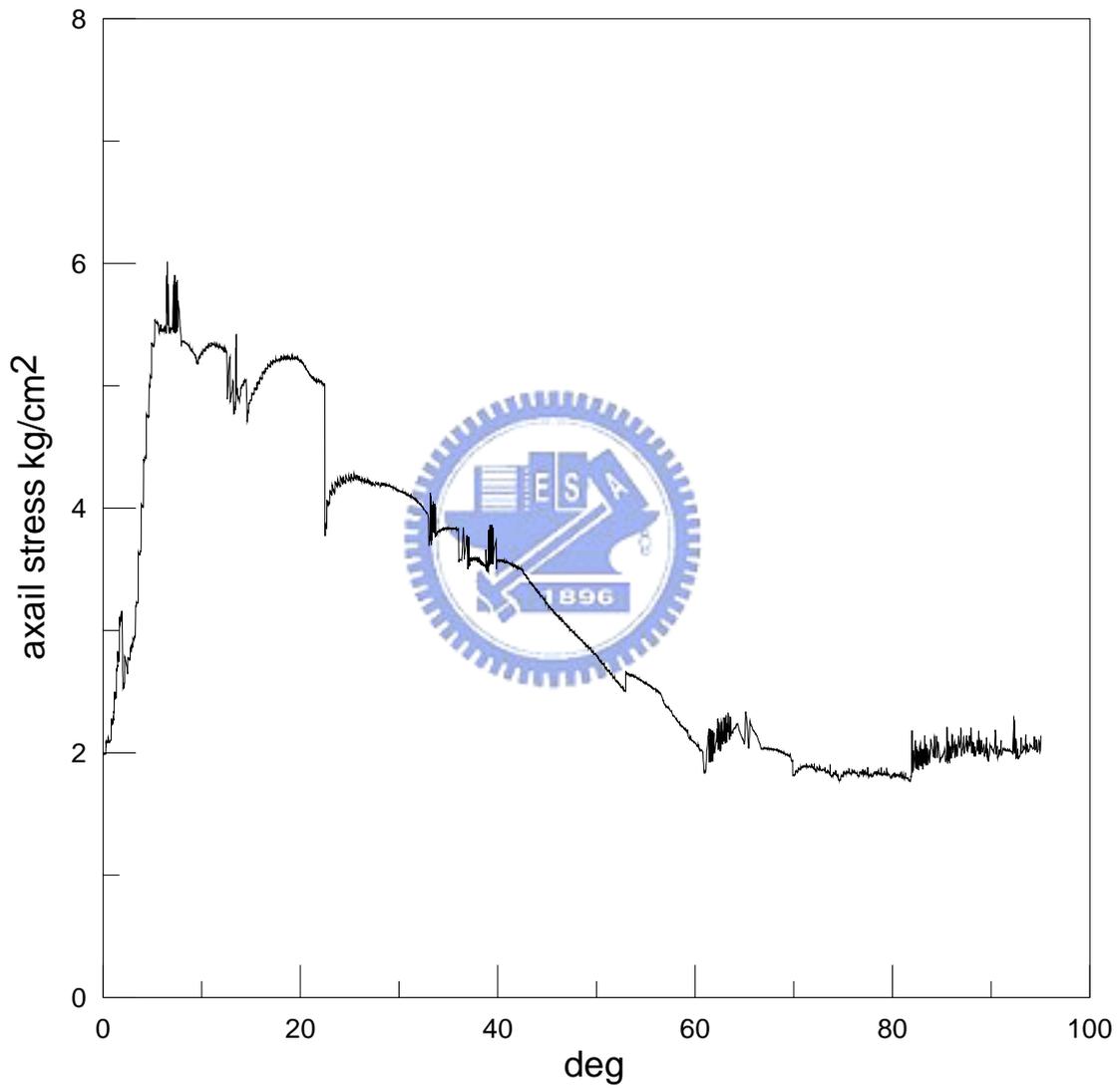


圖 5.13 初始軸應力 660N 下之垂直應力—扭轉角關係圖

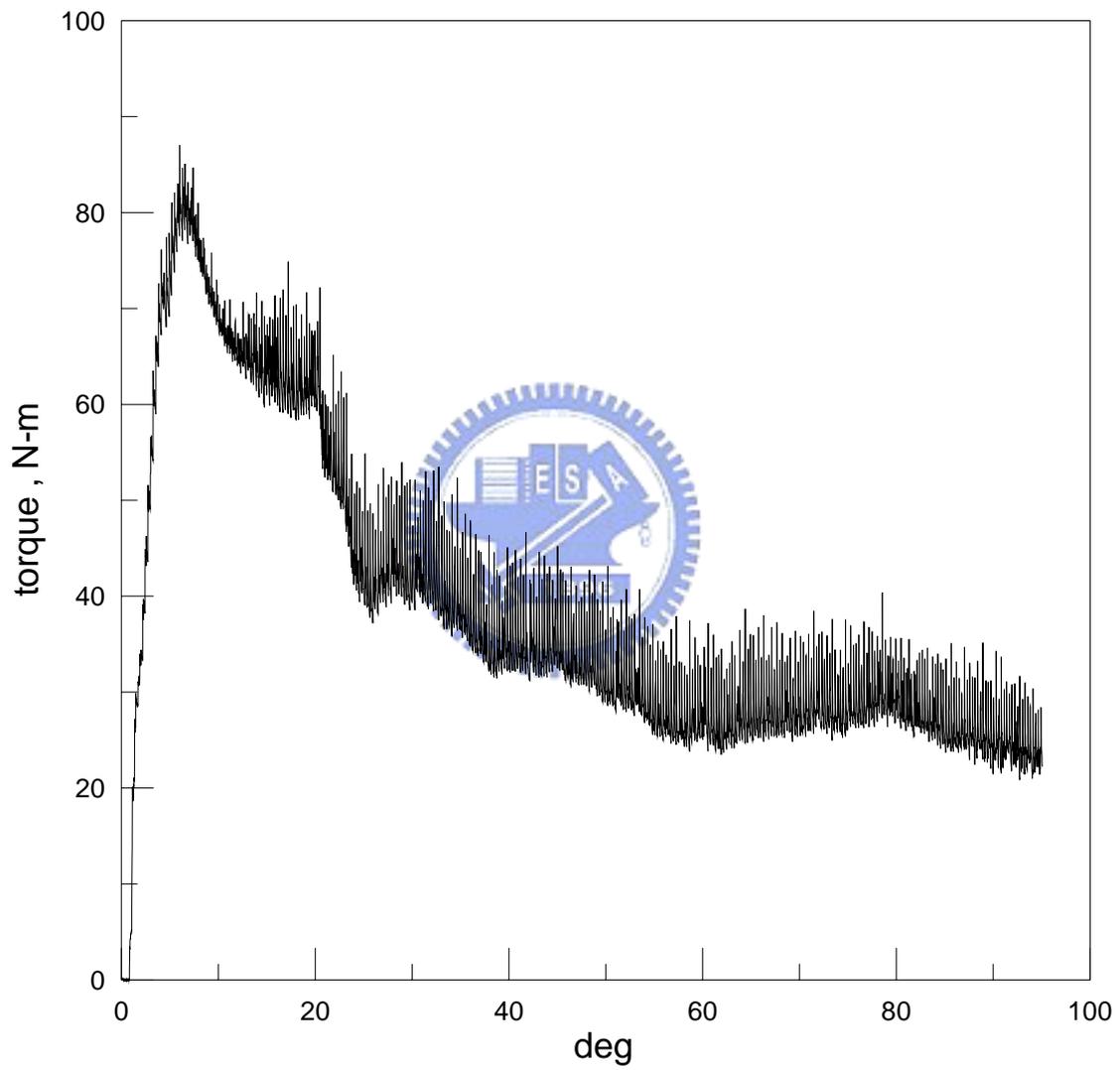


圖 5.14 初始軸應力 990N 下之固定體積扭剪試驗結果

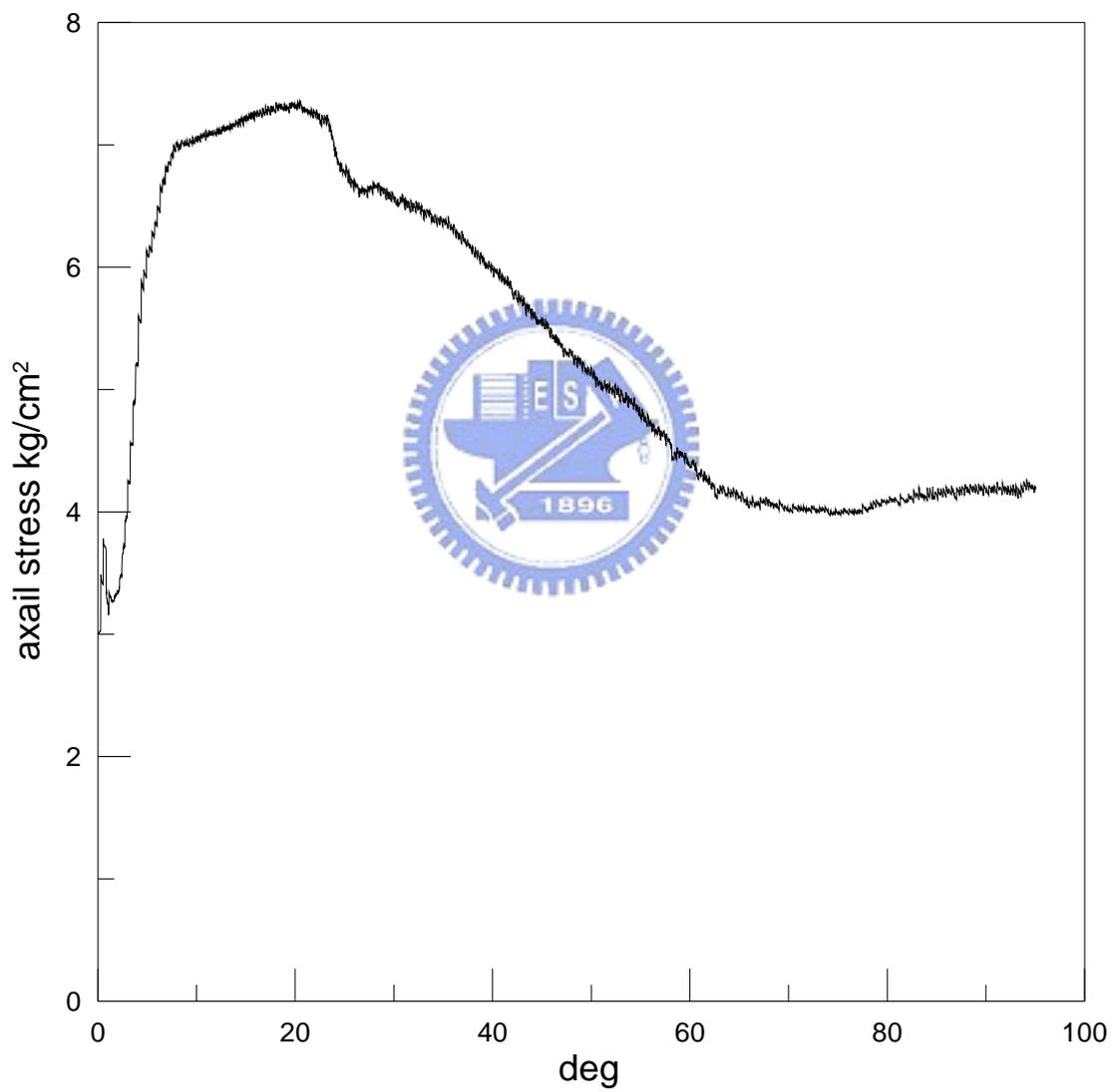


圖 5.15 初始軸應力 990N 下之垂直應力—扭轉角關係圖

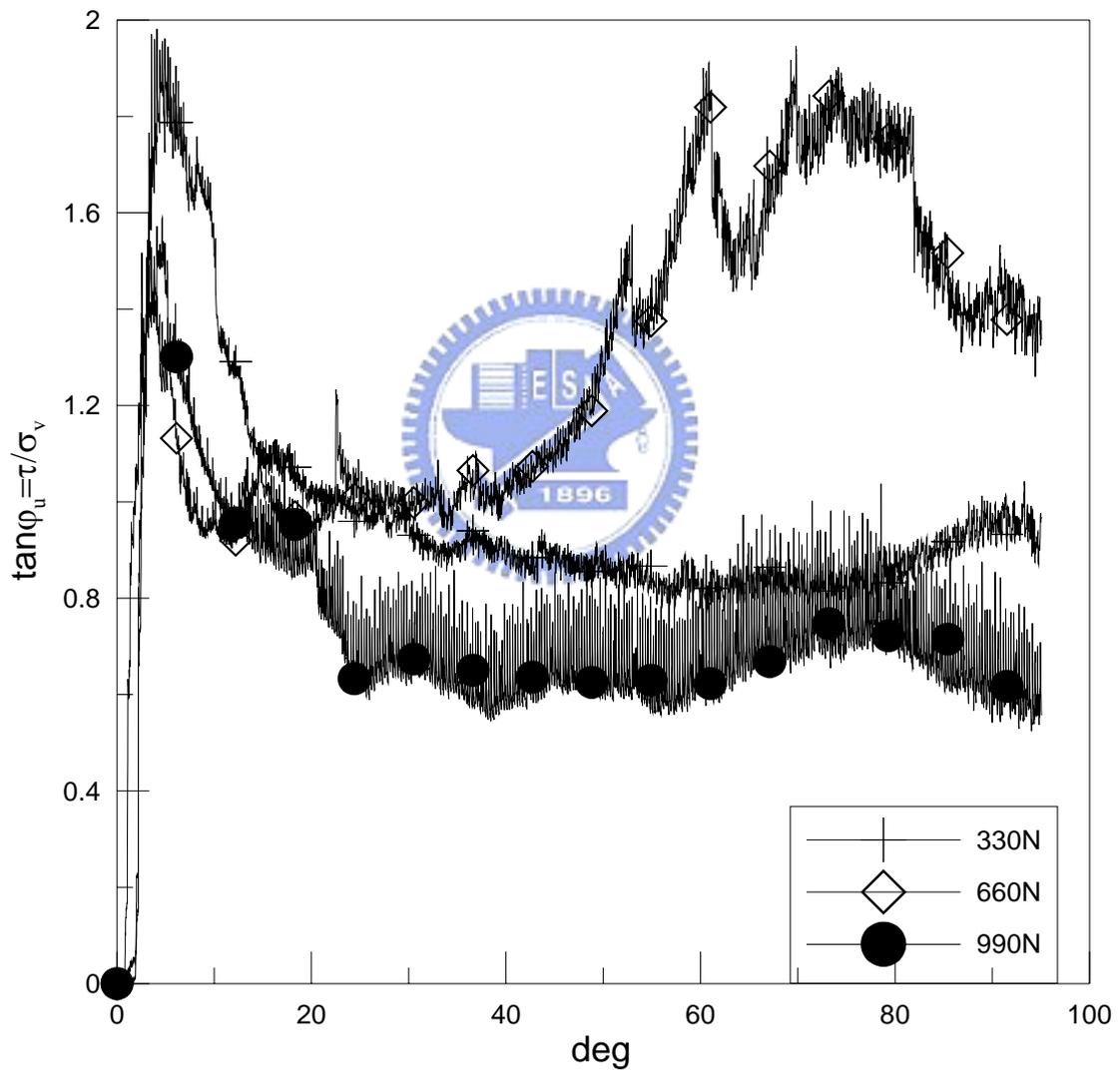


圖 5.16 不同初始軸應力下之固定體積扭剪試驗結果比較

5.4 結果討論

前兩節所述之試驗所採用之試體皆為新竹縣寶山第二水庫的天然軟弱砂岩，本節中將進一步討論該等試驗結果。所有試體皆為中空試體，試體尺寸內徑為 4.0cm，外徑為 7.2cm，高度為 10cm，為了鑽取中空試體，以風乾降低其含水量，提升其剪力強度（單壓強度可提升至 1MPa 以上，如圖 5.17）。試體尺寸之規劃邏輯乃參仿 Satta and Townsend (1981) 之應力誤差估計方法。

實心試體扭力強度要達到穩定，需要之變形量大，而中空試體的變形則變形量較小，本研究發現以中空環剪試驗結果之扭力—扭轉角曲線已能完全趨於穩定，可見得改良後的多功能剪力試驗儀，可適用於軟岩試體。

以圖 5.7 為例，可估計其極限扭力為 33.32N-m (340.03kg-cm)，可利用公式 (4.5) 求得降伏強度為 4.2kg/cm^2 ，並推得降伏扭矩為 27.29N-m (278.48kg-cm)，由圖 5.7 可知其扭轉角為 2 度（剪應變為 0.0012），此段可視為線彈性段。參考同一材料單壓試驗之應力—應變關係（如圖 5.17），由應力—應變曲線直線段可推估乾燥天然試體其彈性模數約為 887.5MPa，再由剪應力與剪應變的關係可得剪力模

數為 358.5MPa，由公式 (5.1) 彈性模數與柏松比的公式可得剪力模數應為 349.2MPa，所得結果相當接近。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5.1)$$

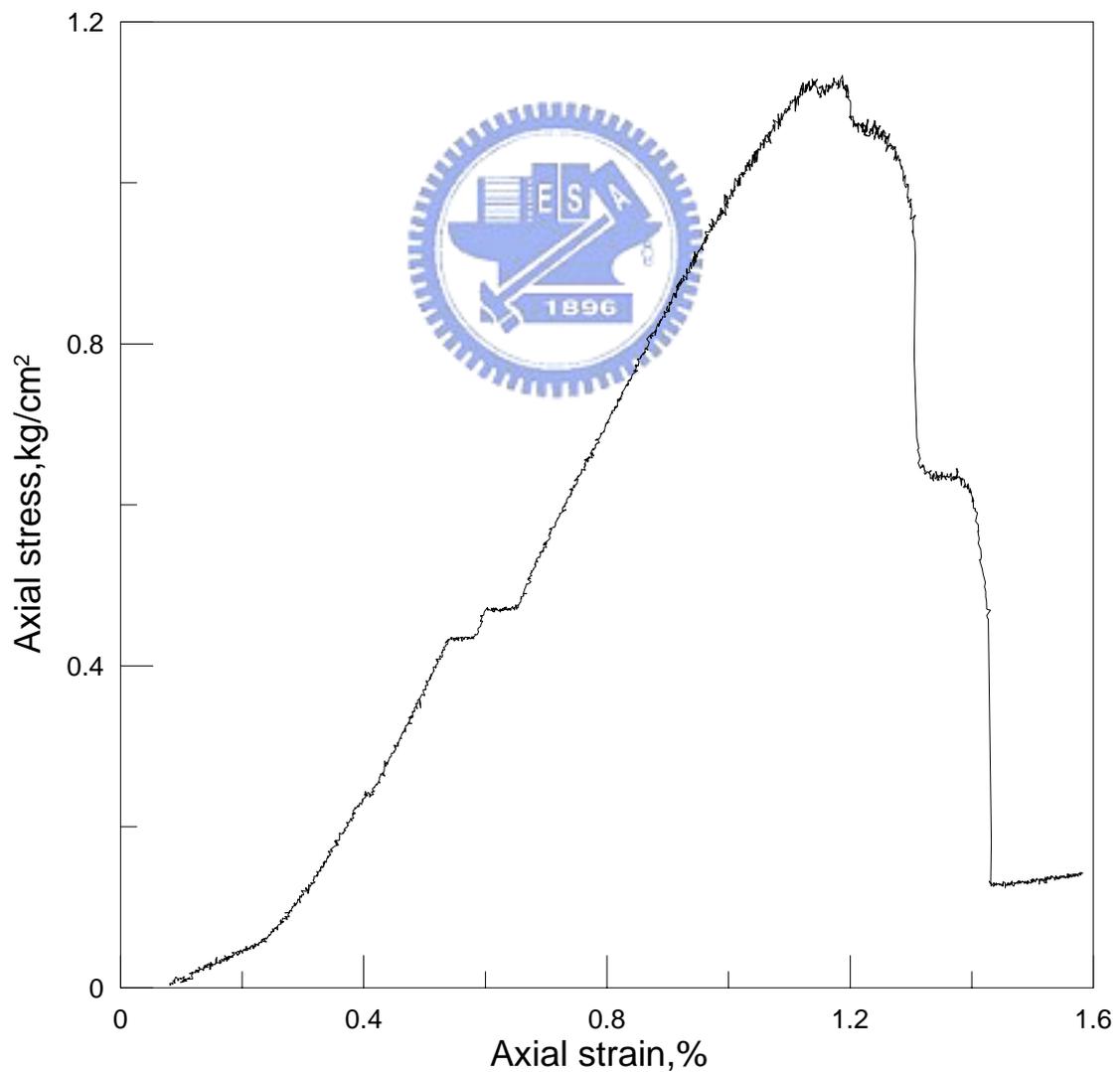


圖 5.17 乾燥天然試體應力與應變圖 (林智惠，2004)

軟弱岩石的中空環剪試驗在應變量在 0.0012 時為線彈性段，可適用線彈性公式。

利用單壓試驗所求得的彈性模數與扭剪試驗所求得的剪力模數，十分接近可知其數據應屬合理，但由於尺寸並未完全符合 Sadda and Townsend (1981) 由彈性理論推出之限制條件（內外徑不符造成剪應力不平均，長度不符造成端板效應影響），因此應力多少會有些許誤差。

此次研究初始假設天然軟弱岩石為理想彈塑性材料，但實際上剪應力通過比例極限後，可能為一拋物線。當剪應變持續增加，剪應力通過尖峰強度後隨即下降，最後達完全塑性狀態。由於線彈性段後的拋物線求得並不容易。本次研究中，將拋物線簡化成為一個近似三角形，將半徑 2.0~3.6 切割成 100 等分，以下方公式 (5.2) 的概念，並利用 EXCEL 試算表推估數點而趨近其圖形。

$$T = \int_{R_i}^{R_o} \tau \times dA \times r \times dr \quad (5.2)$$

再以圖 5.7 為例，可由尖峰扭矩值推估扭轉角為 8 度，換算剪應變為 0.005，由線彈性段向上延伸推估可得其剪應力值為 18.293 kg/cm²。推估尖峰強度 = (延伸推估值 - 殘餘強度) × 折減係數 + 殘餘強度，此次折減係數採用 (1/2、2/5、1/5) 依次代入。

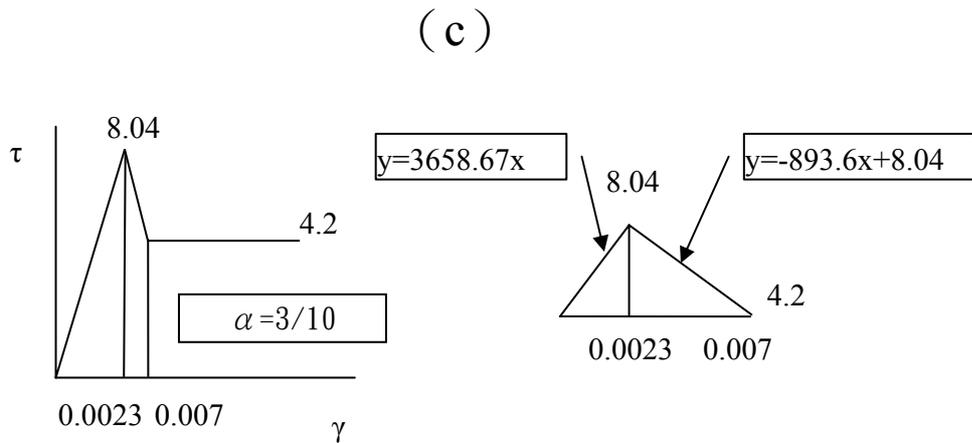
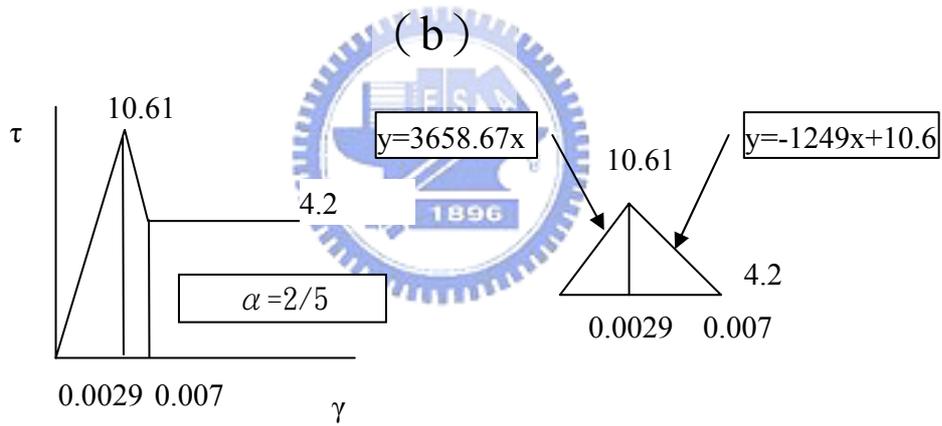
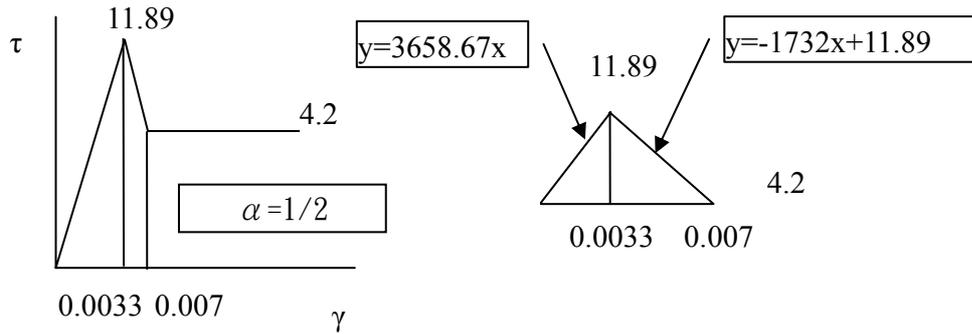
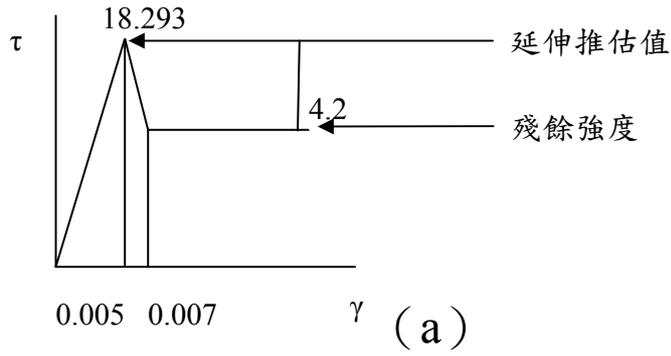
圖 5.17 為拋物線之簡化三角形，其中圖 5.18 (a) 為線彈性段向上延伸後的基本圖，圖 5.18 (b)、圖 5.18 (c)、圖 5.18 (d) 的左側分別為基本圖乘上不同折減係數 α 後的簡化三角形，右側則皆為簡化三角形的放大圖，並各以二條直線方程式表示。由於扭轉角與剪應變為一幾何關係，不受實心或中空試體的影響。因此，當斷面扭轉 θ 時，我們可推得各點的剪應變，再將各點的剪應變代回二條直線方程式，即可得各點剪應力 τ_i 。各點的面積 $A_i=2\pi\rho_i$ ，各點的力臂 ρ_i 。由公式(5.2)可轉成下式：

$$T = \sum_{i=1}^{100} T_i = \sum_{i=1}^{100} \tau_i \times (2\pi\rho_i) \times \rho_i \quad (5.3)$$



圖 5.19 的做法是將扭轉角整數的點做為扭矩檢核點，首先以圖 5.18 (a) 之簡化三角形代入，發現其扭矩值偏高；繼而以圖 5.18 (b) 之簡化三角形代入，發現其扭矩值仍偏高，但有向左下方移動的趨勢；續以圖 5.18 (c) 之簡化三角形代入，發現已十分接近扭矩值。

最後可以推論剪應力—剪應變曲線應最接近折減係數為 1/5 的圖形，且求得的尖峰強度較實際略小，但可趨向保守。



(d) Not to Scale

圖 5.18 拋物線之簡化三角形

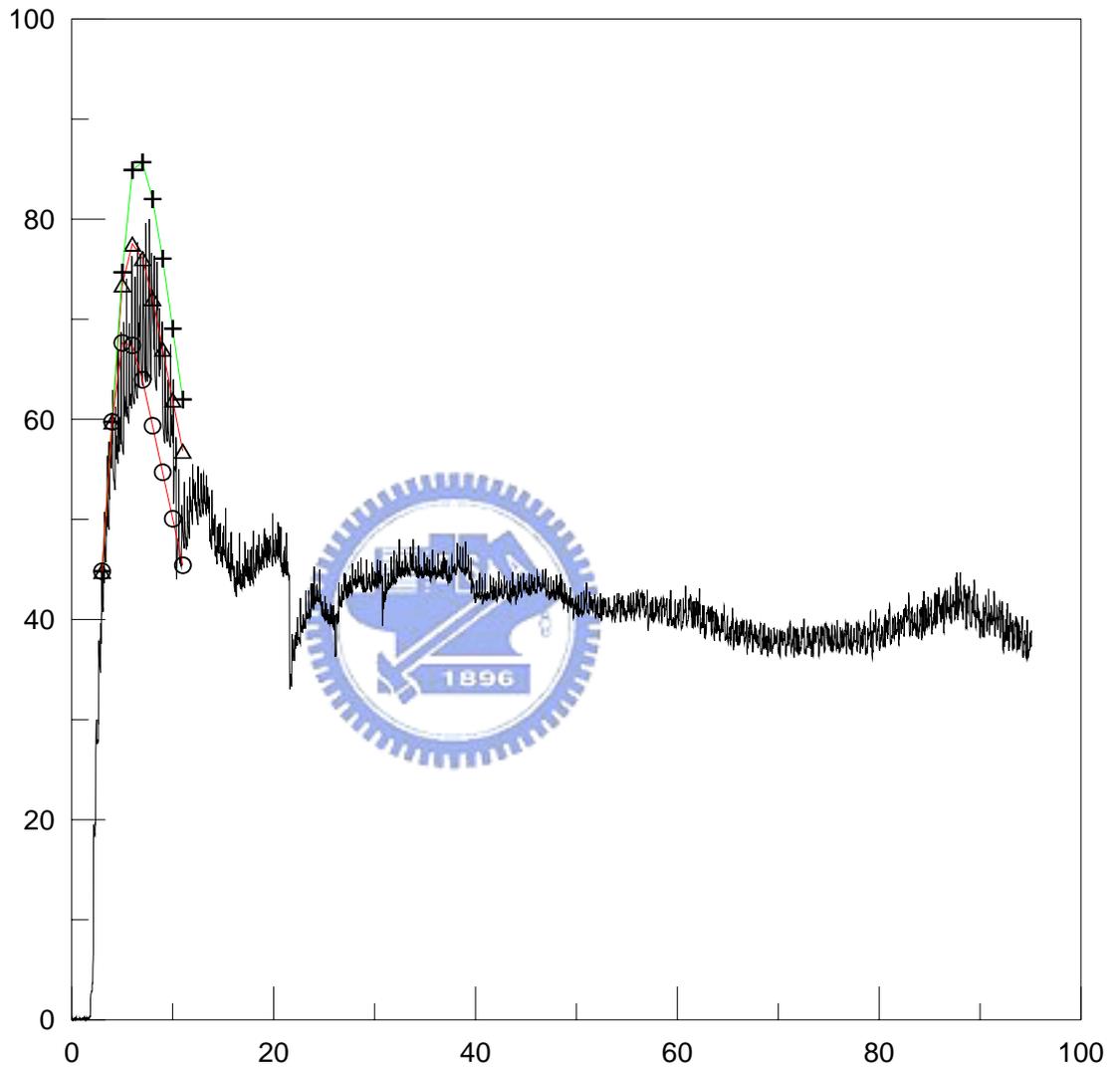
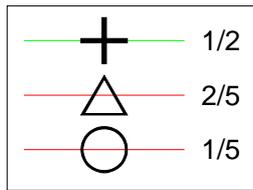
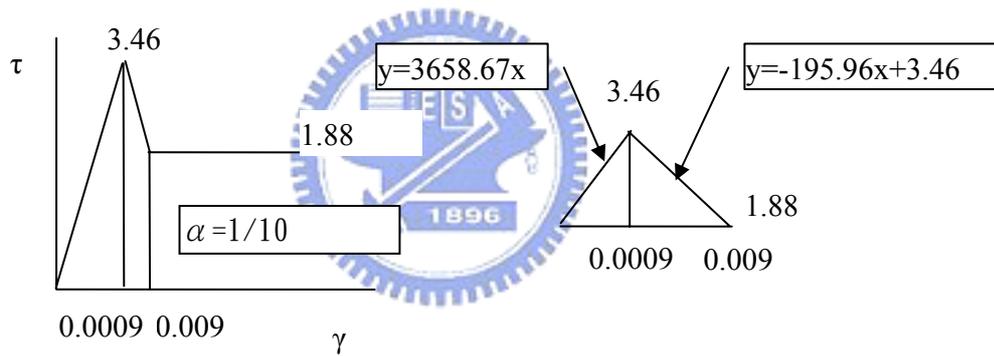


圖 5.19 以不同折減係數曲線趨近塑性段

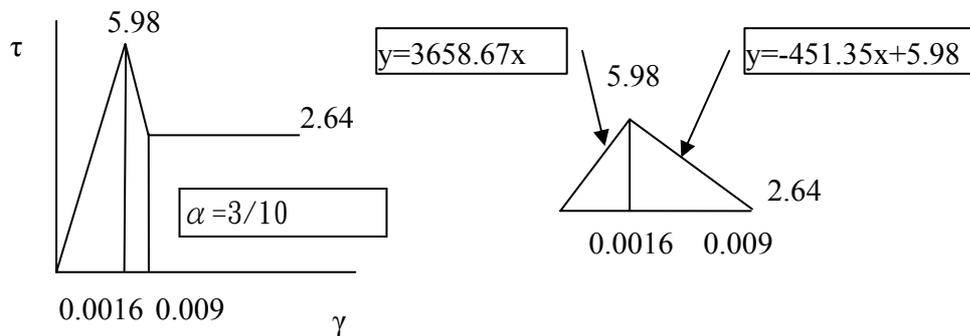
同理，可使用相同的方法推估正向應力為 330N、660N 下的應力—應變曲線，如圖 5.20 所示。圖 5.21 為尖峰強度線性回歸、圖 5.22 為殘餘強度線性回歸，經過計算可得軟岩之凝聚力 c 與摩擦角 φ 。

表 5.1 軟岩的 c 、 φ 值

參數	尖峰強度	殘餘強度
c	1.2733	0.5867
φ	62.21	42.29



(a)



(b)

Not to Scale

圖 5.20 固定正向力 (a) 330N、(b) 660N 下模擬應力—應變曲線

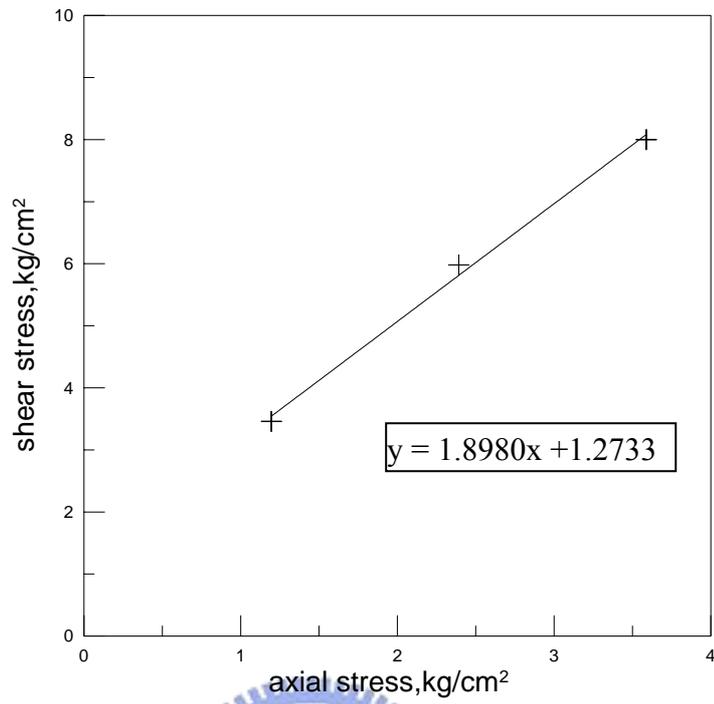


圖 5.21 尖峰強度線性回歸

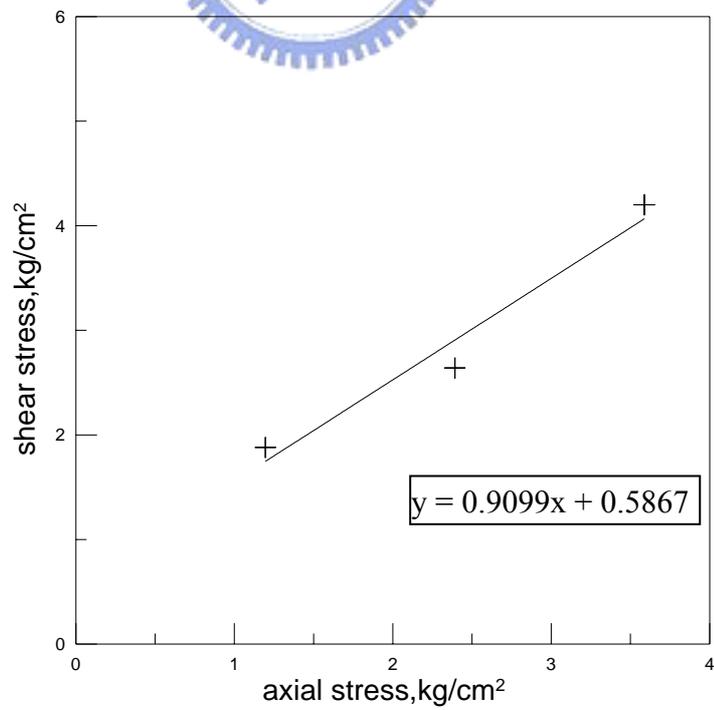


圖 5.22 殘餘強度線性回歸