



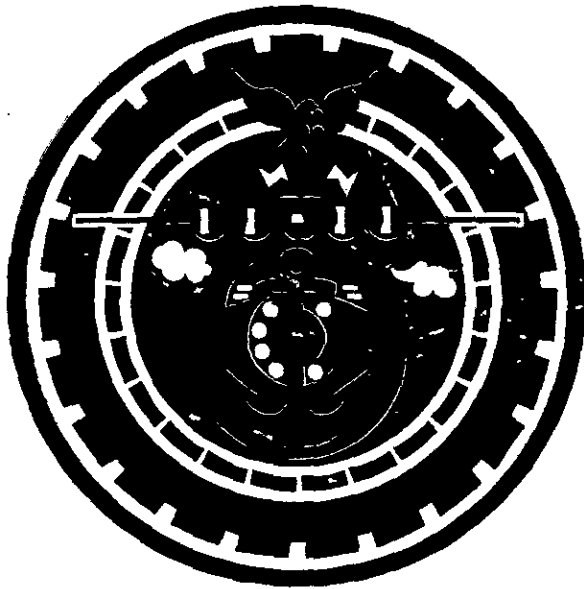
RRPG89050023 (177.P)

研究報告

廢輪胎應用於公路填方之可行性研究 (第二期)

A Feasibility Study on The Use of Shredded Tires as
Backfill Material for Highway Embankments (II)

研究報告



委託單位：交通部

執行單位：國立交通大學土木工程系

中華民國八十九年十月

本報告為研究案不代表交通部意見

廢輪胎應用於公路填方之可行性研究 (第二期)

A Feasibility Study on The Use of Shredded Tires
as Backfill Material for Highway Embankments

(II)

研究報告

計畫主持人：黃安斌

協同主持人：謝啟萬

委託單位：交通部

執行單位：國立交通大學土木工程系

中華民國八十九年十月

摘要

一部車輛之製造成份包括各種石化、金屬材料，其中金屬部份大都可輕易的回收再利用，但石化材料尤其是廢輪胎則因分解不易而且量大，不容易有效的加以回收利用。公路土堤施工所需之填方料數量非常龐大，若將廢輪胎切成碎片使用於公路之填方工程上則可大量而且有效的處理廢輪胎。在美國已有數州試驗過採用廢輪胎碎片作為公路之填方料並獲得成功的結果。廢輪胎之主要成份為可燃性之炭氫化合物，因此廢輪胎碎片之使用必須注重防火。同時廢輪胎常含有鋼絲和其他之有機化合物，若將廢輪胎碎片埋入地下，其濾出液對土壤/地下水可能產生之污染也必須加以了解。本研究案第一期研究在交通部及多家廠商之支持，以及交通大學及屏東科技大學共同的努力得以興建 110 公尺長 6 公尺高之廢輪胎加勁土堤並以廢輪胎橡膠料末與瀝青混合做鋪面。本期之研究將進行廢輪胎碎片與土壤混合物做為路基材料之工程性質與長期表現的相關室內及室外試驗，試驗項目包括材料之基本物理性質試驗（粒徑分析試驗、比重試驗、阿太保限度試驗與夯實試驗），壓縮性試驗、透水試驗、三軸壓密不排水試驗、微應變往復式三軸試驗及大型直接剪力試驗、沈陷量量測、溫度監測、濾水分析，以探討材料之工程性質。試驗結果顯示在 0%、10%、25%三種混合比中，三軸壓密不排水試驗所獲得之有效凝聚力 c' 相當接近，但有效摩擦角 ϕ' 則是以混合比 = 25% 時為最高 ($\phi' = 39.0^\circ$)，而混合比 = 10% 時為最低 ($\phi' = 21.8^\circ$)。在反覆載重作用下，混合比的增加會造成對應剪力模數 G_{eq} 降低。不同尺寸試體的大型直接剪力試驗結果也顯示尺度效應對試驗結果會造成影響。本報告敘述廢輪胎再生利用方式、材料特性、實際使用之工程案例，說明試驗規劃與操作方法，並對試驗與觀測結果進行討論。

目 錄

摘要.....	i
目錄.....	ii
表目錄.....	iv
圖目錄.....	v
第一章 緒論.....	1-1
1.1 廢輪胎的基本成份.....	1-1
1.2 廢輪胎的處理方式.....	1-3
1.3 傳統輕質材料的特點.....	1-9
1.4 廢輪胎碎片做為輕質填方的優點.....	1-10
1.5 研究目的.....	1-11
1.6 研究方法.....	1-12
第二章 輪胎碎片的材料特性.....	2-1
2.1 夯實密度.....	2-1
2.2 壓縮性.....	2-5
2.3 剪力強度.....	2-9
2.4 水力傳導係數.....	2-13
2.5 濾水.....	2-15
2.6 施工建議.....	2-17
第三章 廢輪胎碎片土堤施工建議.....	3-1
3.1 廢輪胎碎片工程特性與施工注意事項.....	3-1
3.2 施工建議步驟.....	3-3
3.2.1 土堤施工.....	3-3
3.2.2 鋪面施工.....	3-5
3.2.3 護欄施工.....	3-5
第四章 美國使用廢輪胎於公路工程之經驗.....	4-1
4.1 Minnesota 州之經驗.....	4-1

4.2 Oregon 州之經驗	4-2
4.3 Wisconsin 州之經驗.....	4-3
4.4 Maine 州之經驗	4-5
第五章 試驗材料及程序	5-1
5.1 基本物理性質試驗	5-2
5.1.1 粒徑分析.....	5-2
5.1.2 阿太保限度試驗法.....	5-2
5.1.3 比重試驗.....	5-3
5.1.4 夯實試驗.....	5-3
5.2 壓縮性試驗.....	5-3
5.3 透水試驗.....	5-5
5.4 三軸壓密不排水試驗 (CIU-AC)	5-7
5.5 微應變往復式三軸試驗	5-10
5.6 直接剪力試驗	5-14
5.7 土堤現地觀測	5-16
5.7.1 沈陷量之觀測.....	5-16
5.7.2 濾水分析.....	5-16
5.7.3 溫度變化量測.....	5-16
第六章 試驗結果及討論	6-1
6.1 室內試驗.....	6-1
6.1.1 現地土壤之基本物理性質	6-1
6.1.2 夯實試驗.....	6-5
6.1.3 壓縮性試驗.....	6-7
6.1.4 透水試驗.....	6-10
6.1.5 三軸壓密不排水試驗 (CIU-AC)	6-12
6.1.6 微應變往復式三軸試驗	6-20
6.1.7 直接剪力試驗	6-25
6.2 土堤現地觀測	6-34
6.2.1 沈陷量觀測.....	6-34
6.2.2 濾水分析.....	6-39
6.2.3 溫度觀測.....	6-41
第七章 結論與建議	7-1

7.1 結論.....	7-1
7.2 建議.....	7-3
參考文獻	參-1
附錄 A 微應變往復式三軸試驗結果	A-1
附錄 B 大型直接剪力試驗結果.....	B-1
附錄 C 第一期研究成果重點節錄.....	C-1
附錄 D 期中審查意見與辦理情形	D-1
附錄 E 期末審查意見與辦理情形.....	E-1

6.10	不同圍壓下混合比與滲透係數關係圖	6-12
6.11	三軸試驗(CIU-AC)的軸差應力-應變與超額孔隙水壓-應變曲線(Chip Ratio=0%)	6-14
6.12	三軸試驗(CIU-AC)的軸差應力-應變與超額孔隙水壓-應變曲線(Chip Ratio=10%)	6-15
6.13	三軸試驗(CIU-AC)的軸差應力-應變與超額孔隙水壓-應變曲線(Chip Ratio=25%)	6-16
6.14	三軸試驗(CIU-AC)的有效應力路徑圖 (Chip Ratio=0%)	6-17
6.15	三軸試驗(CIU-AC)的有效應力路徑圖 (Chip Ratio=10%)	6-18
6.16	三軸試驗(CIU-AC)的有效應力路徑圖 (Chip Ratio=25%)	6-19
6.17	剪力模數 (G) 隨剪應變之變化情形 (Chip Ratio = 0%)	6-22
6.18	剪力模數 (G) 隨剪應變之變化情形 (Chip Ratio = 10%)	6-22
6.19	正規化剪力模數 (G_{eq}/G_{max}) 與剪應變之關係 (Chip Ratio = 0%)	6-23
6.20	正規化剪力模數 (G_{eq}/G_{max}) 與剪應變之關係 (Chip Ratio = 10%)	6-23
6.21	正規化剪力模數 ($G_{eq}/G_{max,0\%}$) 與剪應變之關係	6-24
6.22	阻尼係數與剪應變之關係 (Chip Ratio= 0%)	6-24
6.23	阻尼係數與剪應變之關係 (Chip Ratio= 10%)	6-25
6.24	直剪試驗比較 (試體尺寸：20× 20cm ² , $\sigma_n=49.1\text{kPa}$, 橫向應變=5%)	6-28
6.25	直剪試驗比較(試體尺寸：20× 20cm ² , $\sigma_n=98.1\text{kPa}$, 橫向應變	

	=5%)	6-29
6.26	直剪試驗比較(試體尺寸: 20× 20cm ² , $\sigma_n=196.2\text{kPa}$, 橫向應變=5%)	6-30
6.27	不同試體尺寸之直剪試驗結果(試體尺寸: 20× 20cm ² 與 45× 45cm ² , Chip Ratio=10%, 橫向應變=5%,)	6-31
6.28	不同試體尺寸之直剪試驗結果(試體尺寸: 20× 20cm ² 與 45× 45cm ² , Chip Ratio=25%, 橫向應變=5%).....	6-32
6.29	50%Chip Ratio 直剪試驗(試體尺寸: 20× 20cm ² , 橫向應變=20%)	6-33
6.30	純黏土層高層變化圖	6-36
6.31	30 公分輪胎碎片與 30 公分黏土互層高層變化圖....	6-37
6.32	100 公分土壤覆蓋層下回填 400 公分厚之輪胎碎片高層變化圖	6-38
6.33	200 公分土壤覆蓋層下回填 300 公分厚之輪胎碎片高層變化圖	6-39
6.34	各孔號平均溫度變化圖	6-45

表 目 錄

表 1.1 廢輪胎之回收量、處理量、儲存量	1-1
表 1.2 廢輪胎之基本成分組成	1-2
表 1.3 廢輪胎回收處理費費率	1-3
表 1.4 歐、美、日各國廢胎處理現況及未來規劃	1-8
表 2.1 不同尺寸碎片適用之夯模	2-3
表 2.2 廢輪胎夯實試驗結果	2-4
表 2.3 輪胎碎片的壓縮性	2-8
表 2.4 輪胎碎片與 Ottawa 砂混合之剪力強度	2-11
表 2.5 輪胎碎片與 Crosby Till 混合之剪力強度	2-12
表 2.6 TCLP 有毒物濾水標準	2-16
表 2.7 TCLP 金屬含量標	2-16
表 5.1 三軸試驗內容	5-8
表 5.2 直接剪力試驗內容	5-15
表 6.1 夯實試驗結果	6-3
表 6.2 滲透試驗結果	6-11
表 6.3 三軸壓密不排水試驗之有效摩擦角及凝聚力	6-13
表 6.4 混合比 0%與混合比 10%之最大剪力模數	6-20
表 6.5 各混合比之橫向應變=5%直剪試驗資料	6-26
表 6.6 直剪試驗不同混合比及不同直剪盒尺寸大小之摩擦角 (橫向應變=5%)	6-27
表 6.7 沈陷量觀測結果	6-35
表 6.8 濾水檢驗結果	6-40
表 6.9 溫度觀測資料	6-43

圖 目 錄

圖 1.1 國立屏東科技大學興建廢輪胎加勁土堤位置	1-13
圖 2.1 輪胎碎片與 Ottawa 砂和 Crosby Till 混合之乾密度比較	2-5
圖 2.2 壓縮試驗儀器裝置	2-8
圖 2.3 輪胎碎片透水試驗儀器裝置	2-14
圖 2.4 輪胎碎片與砂混合之水力傳導係數	2-14
圖 5.1 壓縮性試驗裝置圖	5-4
圖 5.2 三軸透水試驗三軸室圖	5-6
圖 5.3 Boart Longyear Permeability Panel	5-7
圖 5.4 三軸試驗裝置完成進行剪動階段	5-9
圖 5.5 三軸試體之局部應變量測	5-12
圖 5.6 對應楊氏模數與阻尼係數之計算	5-13
圖 5.7 大型直接剪力試驗儀	5-15
圖 5.8 柔性承壓板	5-16
圖 5.9 溫度量測現地孔位圖	5-18
圖 5.10 敲擊方式鑽孔	5-19
圖 5.11 沖洗鑽探法鑽孔	5-20
圖 6.1 現地取樣土壤之粒徑分佈圖	6-2
圖 6.2 Chip Ratio=10%之粒徑分佈圖	6-3
圖 6.3 Chip Ratio=25%之粒徑分佈圖	6-4
圖 6.4 各混合比之夯實試驗結果	6-6
圖 6.5 Chip Ratio=0%之壓縮性試驗	6-7
圖 6.6 Chip Ratio=10%之壓縮性試驗	6-8
圖 6.7 Chip Ratio=25%之壓縮性試驗	6-9
圖 6.8 Chip Ratio = 100%之壓縮性試驗	6-10
圖 6.9 不同混合比之圍壓與滲透係數關係圖	6-11

圖 6.10	不同圍壓下混合比與滲透係數關係圖.....	6-12
圖 6.11	三軸試驗(CIU-AC)的軸差應力-應變與超額孔隙水壓-應變曲 線(Chip Ratio=0%).....	6-14
圖 6.12	三軸試驗(CIU-AC)的軸差應力-應變與超額孔隙水壓-應變曲 線(Chip Ratio=10%).....	6-15
圖 6.13	三軸試驗(CIU-AC)的軸差應力-應變與超額孔隙水壓-應變曲 線(Chip Ratio=25%).....	6-16
圖 6.14	三軸試驗(CIU-AC)的有效應力路徑圖 (Chip Ratio=0%)	6-17
圖 6.15	三軸試驗(CIU-AC)的有效應力路徑圖 (Chip Ratio=10%)	6-18
圖 6.16	三軸試驗(CIU-AC)的有效應力路徑圖 (Chip Ratio=25%)	6-19
圖 6.17	剪力模數 (G) 隨剪應變之變化情形 (Chip Ratio = 0%)	6-22
圖 6.18	剪力模數 (G) 隨剪應變之變化情形 (Chip Ratio = 10%)	6-22
圖 6.19	正規化剪力模數 (G_{eq}/G_{max}) 與剪應變之關係 (Chip Ratio = 0%)	6-23
圖 6.20	正規化剪力模數 (G_{eq}/G_{max}) 與剪應變之關係 (Chip Ratio = 10%)	6-23
圖 6.21	正規化剪力模數 ($G_{eq}/G_{max,0\%}$) 與剪應變之關係.....	6-24
圖 6.22	阻尼係數與剪應變之關係 (Chip Ratio= 0%)	6-24
圖 6.23	阻尼係數與剪應變之關係 (Chip Ratio= 10%)	6-25
圖 6.24	直剪試驗比較 (試體尺寸：20× 20cm ² , $\sigma_n=49.1$ kPa, 橫向應變=5%) ..	6-28
圖 6.25	直剪試驗比較(試體尺寸：20× 20cm ² , $\sigma_n=98.1$ kPa, 橫向應變	

=5%) 6-29

圖 6.26 直剪試驗比較(試體尺寸：20× 20cm², $\sigma_n=196.2\text{kPa}$, 橫向應變
=5%) 6-30

圖 6.27 不同試體尺寸之直剪試驗結果(試體尺寸：20× 20cm² 與 45
× 45cm², Chip Ratio=10%, 橫向應變=5%,) 6-31

圖 6.28 不同試體尺寸之直剪試驗結果(試體尺寸：20× 20cm² 與 45
× 45cm², Chip Ratio=25%, 橫向應變=5%)..... 6-32

圖 6.29 50%Chip Ratio 直剪試驗(試體尺寸：20× 20cm², 橫向應變
=20%) 6-33

圖 6.30 純黏土層高層變化圖 6-36

圖 6.31 30 公分輪胎碎片與 30 公分黏土互層高層變化圖 6-37

圖 6.32 100 公分土壤覆蓋層下回填 400 公分厚之
輪胎碎片高層變化圖 6-38

圖 6.33 200 公分土壤覆蓋層下回填 300 公分厚之
輪胎碎片高層變化圖..... 6-39

圖 6.34 各孔號平均溫度變化圖 6-45

第一章 緒論

隨著經濟蓬勃發展，交通便利，國人汽機車擁有率亦快速成長，在這種情形下，當交通工具壽命殆盡時，一些衍生出來對環境產生衝擊的廢棄物亦隨之增加，根據環保署估計，民國七十二年至七十八年間，台灣地區累積了超過 50 萬噸的廢輪胎，而這些廢輪胎在當時，多是以露天方式隨意堆放，不但容易引發火災，也會因為積水而孳生病媒蚊，對生命財產造成損害。根據民國 88 年的統計資料顯示（如表 1.1 所示），近年來在環保署廢棄物回收基金會努力下，累積的廢輪胎已由民國 85 年以前的 13 萬 6 千噸有逐年減少的趨勢，但目前每年廢輪胎仍以約 12 萬 5 千噸的速率成長，因此，尋求更多的廢輪胎再利用方式，確實有其必要性及急迫性。

表 1.1 廢輪胎之回收量、處理量、儲存量(摘自廢輪胎處理基金會)[6]

年度	回收量(Kg)	處理量(Kg)	儲存量(Kg)
79/10~84/12	284,922,157	148,981,911	136,010,246
85/01~85/12	82,062,384	88,521,086	-6,458,702
86/01~86/12	59,172,750	63,036,936	-3,864,186
累計量	426,157,291	300,539,933	125,687,358

1.1 廢輪胎的基本成份

廢輪胎由橡膠、碳黑、鋼絲及尼龍纖維所組成，其基本成份組成如表 1.2 所示，主要包括橡膠、硫化劑、硫化促進劑、促進劑、抗氧化劑、加強劑、填充物、軟化劑與染色劑。其主要成分描述如下：

表 1.2 廢輪胎之基本成分組成[2,5]

組成	主要成分物
橡膠	天然橡膠、合成橡膠
硫化劑	硫、有機硫
硫化促進劑	塞挫類促進劑
促進劑	氧化鋅、硬脂酸
抗氧化劑	安類抗氧化劑、酚類抗氧化劑、蠟
加強劑	碳黑、白碳
填充物	碳酸鈣、黏土
軟化劑	石油類過程油、松焦油、芳香油
染色劑	鈦白、氧化鋅

2.1 橡膠

橡膠份量約佔全胎 70% 以上，其組成源自石油的有機化合物分成天然及合成兩種，現在使用上一般都是合成橡膠。此種橡膠的成分主要是以苯乙烯-丁二烯 (styrene-butadiene rubber, SBR) 和聚丁二烯 (butadiene rubber) 為主。

2.2 碳黑

碳黑是填裝在輪胎中，將硫化橡膠補強，增加結合物穩定的一種填料。其補強(reinforcement)的定義就是當兩種物質結合時，彼此機械性質互相配合以補齊不足之處。當純橡膠經硫化後抗拉強度少於 350psi，但當加入碳黑 50% 後則可大致 3500psi。

2.3 硫化劑

硫化劑的功能為使橡膠鏈交，聯成三度空間網狀織，賦予產品所希望的物理性質。他同時也是輪胎中硫元素的主要來源。

2.4 軟化劑

軟化劑又稱塑化劑，一般為礦油和焦油產品，其功能是幫助膠料混合、增加單力、產生黏力。

1.2 廢輪胎的回收處理方式

根據財團法人廢輪胎資源回收管理基金管理委員會資料顯示，我國每年至少產生 10 萬公噸廢輪胎，目前台灣廢輪胎資源再利用之回收價格根據行政院環境保護署於八十八年六月十七日公告（參閱表 1.3）。

表 1.3 廢輪胎回收處理費費率[8]

現行輪胎規格分類	重量	售價	每年銷售量	現行費率
內徑 10"以下及機車胎				10 元/條
內徑 12"~14"				50 元/條
內徑 15"~19"				60 元/條
內徑 20"~23"	40 kg	4000-5000 元/條	30 萬條	150 元/條
內徑 24"以上及特種胎	70~80kg	15,000 元/條	40 萬條	300 元/條

而現階段廢輪胎的處理方式，大略可分為掩埋、原型利用、回收再利用、以及切碎研磨再利用等方法，各種處理方式的優缺點分述如下。

1. 掩埋

將廢輪胎掩埋，可解決因露天堆置廢輪胎，所帶來的火災以及蚊蟲疾病等危險。但由於掩埋的廢輪胎會佔據龐大的空間，因而縮短掩埋場的壽命。所以通常需將廢輪胎切碎後再進行掩埋，但也因此大量地提高處理費用。

目前，各國對廢輪胎的處理仍然以掩埋的方式居多，以美國、英國及義大利等國家為例，約有 60% 以上的廢輪胎，使用掩埋法來處理（李清華等，1992）[3]。但目前世界各國對廢輪胎的掩埋條件都有嚴格的限制，而荷蘭已明訂於公元 2000 年時，完全禁止廢輪胎的掩埋。

2. 原型利用

將廢輪胎做原型利用，可分為直接原物利用及翻修輪胎兩種方式。

(1) 直接原物利用

將廢輪胎以各種不同的型式組合在一起後，可沉入水底以

提供作為魚類繁殖溫床的人工魚礁，亦可應用於邊坡之護坡工程以防止土石崩落，另外放置於碼頭堤岸可降低船隻撞擊力，而海岸堤防的消波塊也有採用。台灣目前也有廠商引進美國 En-Core Systems 處理方式，將廢棄的普通輪胎，使用高壓捆包機(tire baler)，壓縮成固定尺寸之橡皮塊，再以鋼線捆紮，以利搬運及使用之安全性。可應用於景觀親水護岸、道路路堤、河川護岸堤體、攔水壩壩體，於國外已有相當之案例。但是原物利用的組合費用並不便宜，且使用量有限，對於解決日益嚴重的廢輪胎堆積問題幫助有限。

(2) 翻修輪胎

所謂翻修輪胎是把老舊輪胎的舊胎面刮除，貼上新胎面使之成為再生胎。但由於現今小客車輪胎大多使用輻射鋼絲胎，橡膠的生產技術也有很大的進步，壽命比傳統輪胎長，而小型車的新胎與翻修胎的價位相差不大，因此翻修胎的市場主要在於高價位的卡車胎及大貨車胎等大型輪胎，如日本普利司通公司在日本即擁有多家的翻修輪胎廠。但是由於這類大型輪胎僅佔所有使用輪胎總數的一小部份，所以此類舊輪胎利用方式，對現在龐大的廢輪胎堆置問題也沒有多大助益。在日本，翻修輪胎的製造比例，已由 1981 年的 13% 下降至 1988 年的 11%，或許與此因素有關。

3. 能源回收再利用

將廢輪胎作能源回收利用可分為燃燒及熱解兩大類，分別說明如下。

(1) 燃燒

輪胎所含的能量幾乎比各個等級的煤都要來的高。研究報告指

出 (Bryan, 1993), 經過燃燒之後, 純橡膠廢輪胎切片所產生的能量約為 16,000Btu/lb, 含鋼絲及棉紗的廢輪胎碎片約為 14,200 Btu/lb, 含棉紗的廢輪胎碎片約為 15,500Btu/lb, 而煤所含能量約為 13,700 Btu/lb, 無煙煤約為 12,750 Btu/lb, 以此考量, 可以用燃燒的方式來回收廢輪胎內所含的熱量, 以減少煤的使用量, 並削減一部份廢輪胎堆置的問題。除了燃燒能量高的優點之外, 廢輪胎燃燒後的殘餘灰渣少也是一大特點。

利用廢輪胎作為輔助燃料最普遍的行業為水泥業, 美國、加拿大、英國以及日本各國都有許多成功的例子; 其次為造紙業, 美國、日本各國有多家造紙廠商使用廢輪胎作為造紙廠的輔助燃料; 此外有一些業者直接以廢輪胎燃燒發電來回收廢輪胎中的熱值, 如美國的 Oxford Energy 公司、英國 Elm Energy and Recycling Ltd. 等。以燃燒的方式對廢輪胎進行再利用, 對於現有的廢輪胎問題有相當大的幫助, 而燃燒時所得的高溫氣體以及焚燒爐壁中間的冷卻水, 亦可用於室內栽培及溫水游泳池, 以進行再一步的利用 (李清華等, 1992) [3]。

雖然以廢輪胎作為燃料有許多優點, 但在設廠之初, 對於燃燒時污染的防治以及燃燒後殘餘灰渣的處理, 必須要有詳細的規劃與相當程度的投資, 此外, 廢輪胎燃燒廠附近的居民可能會有不小的反對聲浪, 業者應於事前做好環境影響評估以及可行性分析, 並以完善的事前規劃與良好的營運管理, 降低附近居民心中的疑慮。國內亞洲水泥公司的花蓮水泥廠就因當地居民的抗議, 而遲遲無法使用廢輪胎作為燃料。

(2) 熱解

廢輪胎熱解乃是將廢輪胎置於缺氧的環境下, 用加熱的方式將廢輪胎中的有機化學鍵破壞, 進而產生新的物質。廢輪胎經過

熱解之後，通常可產生重油、碳黑、橡膠殘渣、鋼絲以及瓦斯等物質。而各種再生物質的比重，會隨著廢輪胎組成的成分不同而有所改變，廢輪胎經過熱解之後，平均每公噸可產生330kg的重油、重油熱質量三分之一的瓦斯、130kg的碳黑、190kg的橡膠殘渣，以及30kg的鋼絲。而熱解所需的溫度大約介於260°C~595°C，當熱解溫度上升，氣體的產量會增加，油產量會減少，但與碳黑的產量無太大的關聯。

雖然廢輪胎經過熱解之後，可以產生如重油、瓦斯等高熱值的物值，但處理成本相當高，並不是一種經濟的作法。所以，若非當地政府有額外的補助，以熱解對廢輪胎進行再利用的方式並不廣泛，目前各國採用熱解方式處理廢輪胎的比例極為有限。

4. 切碎研磨再利用

廢輪胎的粉碎方式約可分為兩種：於常溫下經切片機切碎，或利用液態氮冷凍後經超低溫粉碎機粉碎。而粉碎過後的廢輪胎碎片，再以特殊機器將鋼絲及尼龍紗等非橡膠物質加以分離，以取得粒徑細小的(<5mm)橡膠粉。所得橡膠粉可以加入不同的化學添加劑製成各種成品：如高速公路護欄、防波堤、鐵路平交道、人造草皮、運動場跑道、兒童遊樂場地、屋頂防護墊、橡膠板、植草磚、及汽車踏墊等，具有安全、富安全、富彈性、耐候性強、隔音效果良好等優點，而且不易龜化或老化，為一附加價值高的產品。

文獻報導(Rubber and Plastic News, 1993)此類橡膠粉可於道路施工時，直接加入瀝青中加以混合，以做為鋪設道路面的橡膠瀝青，以橡膠瀝青鋪設的路面，有減低噪音、防止路面老化、破裂等優點，並可減少路面潮濕時所造成的打滑現象，與反光造成的視覺盲點，而壽命約為傳

統瀝青路面的兩倍。且鋪設橡膠瀝青可消耗大量的廢輪胎，據估計，在美國只要有 1/8 新鋪設的瀝青混凝土道路被橡膠瀝青所取代，就可消耗美國全年所產生的廢輪胎，因此美國國會通過相關法案(Intermodal Surface Transportation Efficiency Act, ISTEA)規定從 1994 年開始，有聯邦政府補助建造之道路，必須每年增加 5% 的橡膠粉作為鋪路材料，一直到 1997 年達到 20% 為止，不過，後來由於既得到利益團體的遊說，以及橡膠瀝青路面的鋪設成本較高(約為傳統瀝青路面的 1.2 倍~2 倍之間)兩方面的因素，以致遲遲未能徹底執行。

而歐、美、日各國廢胎處理現況及未來規劃可參考表 1.4。以資源保育的觀點著眼，廢輪胎粉碎後再利用可以使原有橡膠重複使用，最符合資源永續利用的原則，但是有關廢輪胎粉碎後所得之橡膠粉的應用技術及市場仍有待研究開發。

表 1.4 歐、美、日各國廢胎處理現況及未來規劃 [5]

國別	年廢輪胎產量	現行處理方式	未來規劃
德國	64.5 萬噸	<ul style="list-style-type: none"> ◆水泥廠 26% ◆其他熱能再利用 2% ◆輪胎翻新 15% ◆再生橡膠、橡膠粉 7% ◆原物利用 2% ◆切片 8% ◆其他(掩埋、囤積) 40% 	<ul style="list-style-type: none"> ◆建立焚燒場 ◆發展新的回收在利用技術 ◆道路工程之應用
法國	40 萬噸	<ul style="list-style-type: none"> ◆大多掩埋 	<ul style="list-style-type: none"> ◆設立焚燒設備
英國	45 萬噸	<ul style="list-style-type: none"> ◆掩埋、囤積 67% ◆能源(含水泥窯) 9% ◆再製胎 18% ◆再生橡膠 6% 	<ul style="list-style-type: none"> ◆燃燒發電 ◆道路工程
義大利	27 萬噸	<ul style="list-style-type: none"> ◆再製胎 25% ◆再生(橡膠粉) 6% ◆熱能利用 4% ◆其他利用 5% ◆掩埋 60% 	<ul style="list-style-type: none"> ◆燃燒以回收能源
美國	2.76 萬噸	<ul style="list-style-type: none"> ◆掩埋或囤積 68% ◆能源回收 10% ◆再生橡膠(粉) 5% ◆柏油橡膠 1% ◆再製胎 12% ◆輸出 4% 	<ul style="list-style-type: none"> ◆焚燒作為燃料 ◆製作橡膠瀝青 ◆將橡膠粉與高分子聚合物混合，以製作新的且附加價值高的產品
日本	84 萬噸	<ul style="list-style-type: none"> ◆能源(含水泥窯) 43% ◆再製胎 9% ◆再生橡膠 12% ◆輸出 25% ◆其他 11% 	<ul style="list-style-type: none"> ◆再生膠 ◆再製胎 ◆輸出 ◆能源利用

1.3 傳統輕質材料的特點

各國對於廢輪胎的再利用方式，仍然是處於一個摸索的階段，其中最好方式為當作水泥窯的燃燒材或是橡膠瀝青來使用。不過，若換一個角度來看，將經過切碎處理的廢輪胎，作為大地工程的填方材料，單就在使用量的考量上，就是一個極大的優點。本報告將針對通常用於大地工程的輕質填方材料與廢輪胎碎片作一個的比較。

根據 Ahmed and Lovell (1993)[11]所做研究顯示，在美國常用來取代傳統大地材料的物質包括：木屑、樹皮、泥煤、灰渣、礦渣、膨脹頁岩(expanded shale)、混凝土碎片(scrap cellular concrete)以及發泡聚苯乙烯(expanded polystyrene)，對於上述物質，其個別之特性如下：

1. 松樹或樅樹的樹皮

密度大約介於 $0.57 \text{ g/cm}^3 \sim 1.04 \text{ g/cm}^3$ 。樹皮很難夯實，掩埋前需要一些事前的處理，使對地下水的污染減到最小，長期沉陷量大約是夯實後總厚度的 10%。

2. 松樹或樅樹的木屑

密度大約介於 $0.82 \text{ g/cm}^3 \sim 1.04 \text{ g/cm}^3$ 。若經過適當地密封後，可使用於永久地下水面之下，也可做為築堤材料。

3. 泥煤

密度大約是 $0.31 \text{ g/cm}^3 \sim 1.04 \text{ g/cm}^3$ 。在長期荷重下，過大的沉陷量是一大考量。

4. 燃油灰爐、礦渣、灰砵

密度介於 $1.04 \text{ g/cm}^3 \sim 1.63 \text{ g/cm}^3$ 。這些材料中含有一些膠結的物質，會吸收水份而增加重量，而淋洗出來的物質對於鄰近的結構物和地下水也會造成影響。

5. 混凝土碎片(scrap cellular concrete)

密度 1.04 g/cm^3 。在夯實時，會產生極明顯的體積改變的現象，若施與過多的夯實滾壓，會使此物質成為粉末狀。

6. 膨脹黏土或頁岩(expanded clay or shale)

密度 $0.32 \text{ g/cm}^3 \sim 1.04 \text{ g/cm}^3$ 。作為一個輕質填方材料而言，有良好的工程性質，不過成本稍高，而且需要至少 0.5m 以上的表土覆蓋。

7. 貝殼(蠔、蛤)

密度為 1.14 g/cm^3 。在美國大西洋沿岸養殖貝殼類的大小通常是 12 mm~75 mm，如果疏鬆地堆放，因材料間彼此互鎖的效應，在很低的密度下即得到相當高的承載能力。

8. 發泡聚苯乙烯(expanded polystyrene)

密度為 $0.02 \text{ g/cm}^3 \sim 0.10 \text{ g/cm}^3$ ，是一種極輕的材料，不過這個材料非常貴。但在某些特殊的情況下，使用這種材料有其優異性。

9. 低密度混凝土(使用 Elastizell 發泡劑)

共分為六級，其密度漸次增加，分別為 0.39 g/cm^3 、 0.49 g/cm^3 、 0.59 g/cm^3 、 0.68 g/cm^3 、 0.81 g/cm^3 、以及 1.30 g/cm^3 。用波特蘭水泥、水、以及 Elastizell 發泡劑混合之後，在現地製作的產品，大多用在高速公路的路堤、基礎、橋樑的連接路段。

綜上所述，木頭易受生化分解而且缺乏耐久性；某些灰渣和礦渣在經過淋洗之後，會溶出重金屬進而污染到地下水，貝殼在內陸不易取得，大部份的人造材料都很貴，而且產量不大。

1.4 廢輪胎碎片做為輕質填方的優點

廢輪胎碎片不易使生化分解、供應量充足、而且是屬於回收再利用其價格相對低廉，如果能夠用在公路的路堤、軟弱道路的路基、以及擋土牆的背填土中，可因較輕的單位重，使擋土牆的水平土壓力大幅地減少，也能減輕軟弱地層上填

方沉陷問題。

用廢輪胎碎片作為軟弱、易受壓縮基礎上的輕質填方，其工程性質有下列的優點：

1. 沉陷減少。
2. 不易被生物分解，與木屑有很大的不同。
3. 價格便宜，易於取得，不像膨脹頁岩或貝殼在材料取得上，較有困難。
4. 排水性極佳。

1.5 研究目的

前期研究已經在屏東科技大學興建 110 公尺長 6 公尺高之廢輪胎加勁土堤（如圖 1.1 所示），由於廢輪胎碎片作為填方在國內尚屬首例，對於本土環境污染特性及長期潛變行為仍有待後續研究，並建立廢輪胎土堤之溫度變化資料、土堤濾水長期化學性質資料、土堤長期荷重位移關係。本期計畫研究目的為：

1. 對廢輪胎碎片應用於土方工程之技術可行性進行室內試驗與現地觀測，提出初步設計與施工建議。由於國內尚未有類似研究，本研究的成果可供今後利用廢輪胎作為輕質土方回填與路面填充料之重要參考。
2. 對利用廢輪胎作為填方與路面填充料之實體工程做長時期的觀察。這些觀察包括濾出液之收集和分析、溫度量測、土體沈陷、路面服務品質之記錄和預估建立本土化資料作為推廣應用廢輪胎於路堤施工之依據。
3. 大量消耗國內日益增加之廢輪胎數量，解決環保問題，並替代日漸稀少價格昂貴之砂石級配。且因廢輪胎具高剪力強度及透水性，單位重較土壤減輕一半以上，適用於坍方之處理，可節省基礎土壤之處理費用。

1.6 研究方法

本研究承續第一期研究計畫中在國立屏東科技大學興建完成廢輪胎加勁土堤，對於台灣所產生之廢輪胎碎片的力學性質需要進一步的建立。廢輪胎碎片填方之應力應變關係，廢輪胎碎片之潛變對於使用廢輪胎碎片工程結構之表現有直接的影響。這些重要參數也需要加以研究與確認。在第一期研究計畫中，試驗道路已安裝一系列的沉陷板，以便長期觀察土堤的表現。除讀取這些沉陷板數據之外，應該進一步在試驗室中從事廣泛的試驗以確定廢輪胎碎片的力學性質。

本研究工作包含室內試驗與現地觀測，室內試驗計畫採用廢輪胎碎片與土壤不同的混合比例，進行夯實試驗、三軸壓密不排水試驗、直接剪力試驗與透水試驗，藉以瞭解混合比例對其力學行為的影響。另外使用不同尺寸的三軸試驗與直接剪力試驗試體來探討尺度效應對於試驗結果的影響。至於現地觀測則是長期量測土堤內使用不同廢輪胎碎片與土壤混合比各區域溫度之分佈及土體沈陷狀況，分析土堤內受濾出液而可能產生之污染，定期取水作化學分析。

屏東科技大學野生動物保育中心

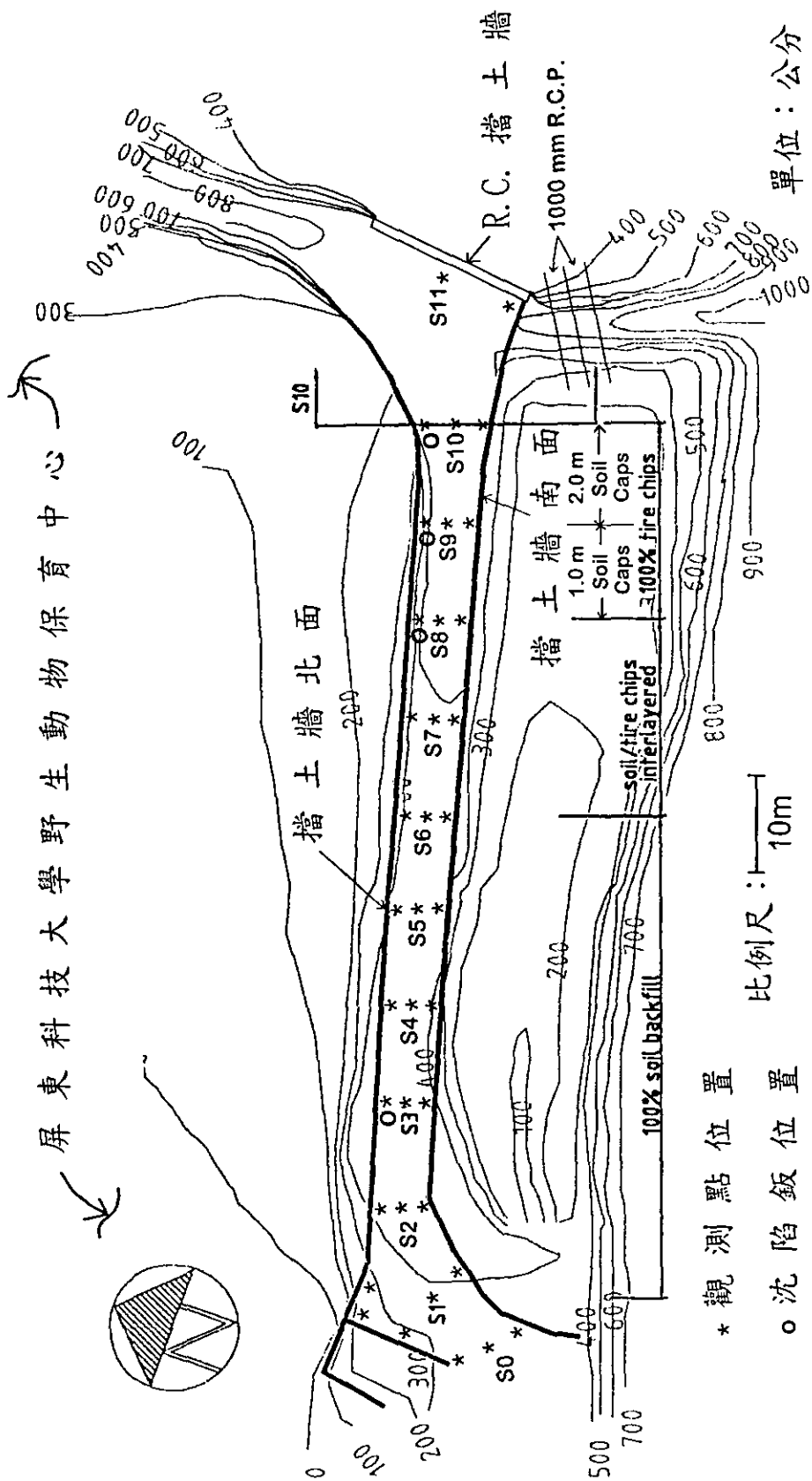


圖 1.1 國立屏東科技大學興建廢輪胎加勁土堤位置

第二章 輪胎碎片的材料特性

一般輪胎碎片及與土壤的混合物在土木工程上的應用大致有下列幾種：(1) 輕質的土堤回填土；(2) 輕質的擋土牆回填土；(3) 排水層；和 (4) 溫度隔離層，因此可以大量取代岩石及土壤作為回填料的功能。公路土堤施工所需之填方料數量非常大，若將廢輪胎切成碎片使用於公路之填方工程上，則可大量而且有效的處理廢輪胎。

學者研究 (Ahmed and Lovell, 1993[11]; Bosscher and Edil, 1994[16]) 指出：輪胎碎片因低單位重、高滲透性、剪力強度較一般砂土高，作為擋土牆回填料及排水層和輕質回填土都十分合適。本章介紹輪胎碎片的材料特性，以及使用輪胎碎片為工程材料時，其施工上需注意事項。

2.1 夯實密度

在夯實能量與方式對輪胎碎片的乾密度影響方面，Humphrey et al. (1993)[28] 用氣乾的輪胎碎片(最大粒徑 38 mm，未去除玻璃纖維)，依 AASHTO T180-86 規範，進行夯實試驗。夯實能量從「修正夯實」降至「60%的標準夯實」，乾密度為 0.62 g/cm^3 ，只減少了 0.03 g/cm^3 。而「濕法」夯實和「乾法」夯實的結果，只有 0.016 g/cm^3 的差別。Ahmed and Lovell (1993)[11] 對粒徑 6.3 mm~25.4 mm 廢輪胎碎片進行夯實試驗，夯實能量分別為「修正夯實」、「標準夯實」、以及「50%的標準夯實」。乾密度從未夯實的 0.4 g/cm^3 變化為夯實後的 $0.48 \text{ g/cm}^3 \sim 0.59 \text{ g/cm}^3$ ，結果顯示夯實能量的施加可增加廢輪胎碎片乾密度。Bosscher and Edil (1994)[16] 針對粒徑 50 mm ~75 mm 廢輪胎碎片進行振動臺試驗，由於輪胎碎片的鋼絲互相交纏再加上輪胎碎片本身易吸收震動，使得夯實效果不佳，乾密度為 0.56 g/cm^3 。而標準夯實試驗分別使用直徑為 152.4 mm 及 305 mm 的模具，乾密度只相差 0.01 g/cm^3 ，分別為 0.60 g/cm^3 及 0.59 g/cm^3 ，夯實模具尺寸對夯實結

果沒有明顯影響。Humphrey and Manion (1997)[20]對最大粒徑 50mm 的輪胎碎片進行夯實試驗，分為「修正夯實」、「標準夯實」、以及「60%的標準夯實」三種夯實能量。「修正夯實」能量所得結果比其餘兩種高了 0.02 g/cm^3 ，為 0.67 g/cm^3 。「濕式」夯實，採浸泡過夜的輪胎碎片，含水量大約為 5.3%，若施以「60%的標準夯實」的能量，「濕式」夯實只比「乾式」夯實大了 0.06 g/cm^3 。因此，含水量對夯實後乾密度，沒有很大的影響。Masad et al. (1995)[32]使用最大粒徑為 4.75 mm 的廢輪胎碎片與渥太華砂混合，分為十二層，放入直徑 71 mm、高 147 mm 的模具中，用 12 kg (117.6 N)的鐵塊對各層施以敲擊夯實，結果渥太華砂夯實後的乾密度為 1.74 g/cm^3 、純廢輪胎碎片為 0.62 g/cm^3 、混合材料(重量比 50/50)為 1.30 g/cm^3 ，相當於相對密度 90%下的情形。這個數據顯示了輪胎碎片夯實後乾密度大約只有渥太華砂的三分之一。

Ahmed and Lovell (1993)[11]對粒徑 6.3 mm ~25.4 mm 的廢輪胎碎片施以夯實能量，進行乾密度的探討，其乾密度從未夯實的 0.4 g/cm^3 到夯實後的 $0.48 \text{ g/cm}^3 \sim 0.59 \text{ g/cm}^3$ ，雖然文章中提到乾密度大致隨著碎片尺寸的上升而增加，但趨勢並不明顯。Wu et al. (1997)[39]對 2 mm~38 mm 的廢輪胎碎片進行乾密度研究，乾密度在 0.50 g/cm^3 和 0.58 g/cm^3 之間，碎片尺寸影響不大，這與 Ahmed and Lovell (1993)[11]的試驗結果相似。張明元(1998)[4]針對最大粒徑為#5(3.8 mm)和 15(1.3 mm)的純廢輪胎碎片，以振動臺進行最大乾密度試驗，結果為 $0.53 \text{ g/cm}^3 \sim 0.55 \text{ g/cm}^3$ ；最小乾密度採 ASTM D4254 規範的 A 法，為 $0.45 \text{ g/cm}^3 \sim 0.48 \text{ g/cm}^3$ 。試驗結果顯示碎片尺寸對最大、最小乾密度無多大關聯。

若廢輪胎碎片中鋼絲或尼龍紗沒有剝除，對乾密度會有明顯的影響，根據 STM C127 規範所測定的廢輪胎碎片的比重試驗結果，可知：

1. 碎片含鐵線及玻璃纖維：比重 1.05
2. 碎片只含鐵線(人工分離):比重 1.10
3. 碎片只含玻璃纖維(人工分離): 比重 1.02

至於輪胎碎片與土壤混合後，若是依據 ASTM D698 與 ASTM D1557 中的夯

實試驗方法來求得土壤最大乾密度與最佳含水量，則在取樣土壤經過篩分析試驗後，其通過 No. 4 篩的重量百分比需大於 70%，然而輪胎碎片及碎片與土壤混合物並無法達到此項要求，因而不適用此夯實試驗方法而需再作修正。考量一般輪胎碎片顆粒的大小，必需用更大的夯實模具及夯實能量。如表 2.1 所示，夯實能量相當於 D-698 的 60% 到 D-1557 的 100%。研究結果顯示，夯實能量及含水量對乾密度的影響很小(如表 2.2 所示)。在混合輪胎碎片與 Ottawa 砂和 Crosby Till 混合後操作夯實試驗所得到的乾密度比較發現，混合輪胎碎片比例小於 10% 的情形下，不建議採用 ASTM D4253 的震動法(如圖 2.1 所示)。因而 ASTM D6270 建議採用 ASTM D698 的 60% 夯實能量，夯模體積為 0.0125 m³，夯錘重量 44.5N，在落距 457 mm 的高度下，需分 5 層每層 44 下進行夯實。

表 2.1 不同尺寸碎片適用之夯模 (摘自 ASTM D6270) [9]

最大粒徑(mm)	模具直徑 (mm)	模具體積 (m ³)
75	254	0.0125
75	305	0.0148
51	203 and 305	—

表 2.2 廢輪胎夯實試驗結果 (摘自 ASTM D6270) [9]

Compaction method ^a	Particle size range (mm)	Tire shred type	Source of tire shreds	Dry density (kg/m ³)
Loose	2 to 75	Mixed	Palmer Shredding	341
Loose	2 to 51	Mixed	Pine State Recycling	482
Loose	2 to 25	Glass	F & B Enterprises	495
Loose	2 to 51	Mixed	Sawyer Environmental	409
Loose	51 max.	Mixed	----	466
Loose	25 max.	Mixed	----	489
Vibration	25 max.	Mixed	----	496
Vibration	13 max.	Mixed	----	473
50% Standard	51 max.	Mixed	----	614
50% Standard	25 max.	Mixed	----	641
60% Standard	2 to 75	Mixed	Palmer Shredding	620
60% Standard	2 to 51	Mixed	Pine State Recycling	643
60% Standard	2 to 25	Glass	F & B Enterprises	618
60% Standard	2 to 51	Mixed	Sawyer Environmental	625
Standard	2 to 51	Mixed	Sawyer Environmental	640
Standard	51 max.	Mixed	----	635
Standard	38 max.	Mixed	----	645
Standard	25 max.	Mixed	----	653
Standard	13 max.	Mixed	----	633
Standard	20 to 75	----	Rodefelf	594 ^b
Standard	20 to 75	----	Rodefelf	560 ^c
Modified	2 to 51	Mixed	Sawyer Environmental	660
Modified	51 max.	Mixed	----	668
Modified	25 max.	Mixed	----	685
---	50.8	Mixed	----	410 to 570

Notes: a. Compaction methods:

Loose = no compaction; tire shreds loosely dumped into compaction mold

Vibration = Method D 4253

50% Standard = Impact compaction with compaction energy of 296.4 kJ/m³

60% Standard = Impact compaction with compaction energy of 355.6 kJ/m³

Standard = Impact compaction with compaction energy of 296.4 kJ/m³

Modified = Impact compaction with compaction energy of 2693 kJ/m³

b. 152 mm diameter mold compacted by 4.54 kg rammer falling 305 mm

c. 305 mm diameter mold compacted by 27.4 kg rammer falling 457 mm

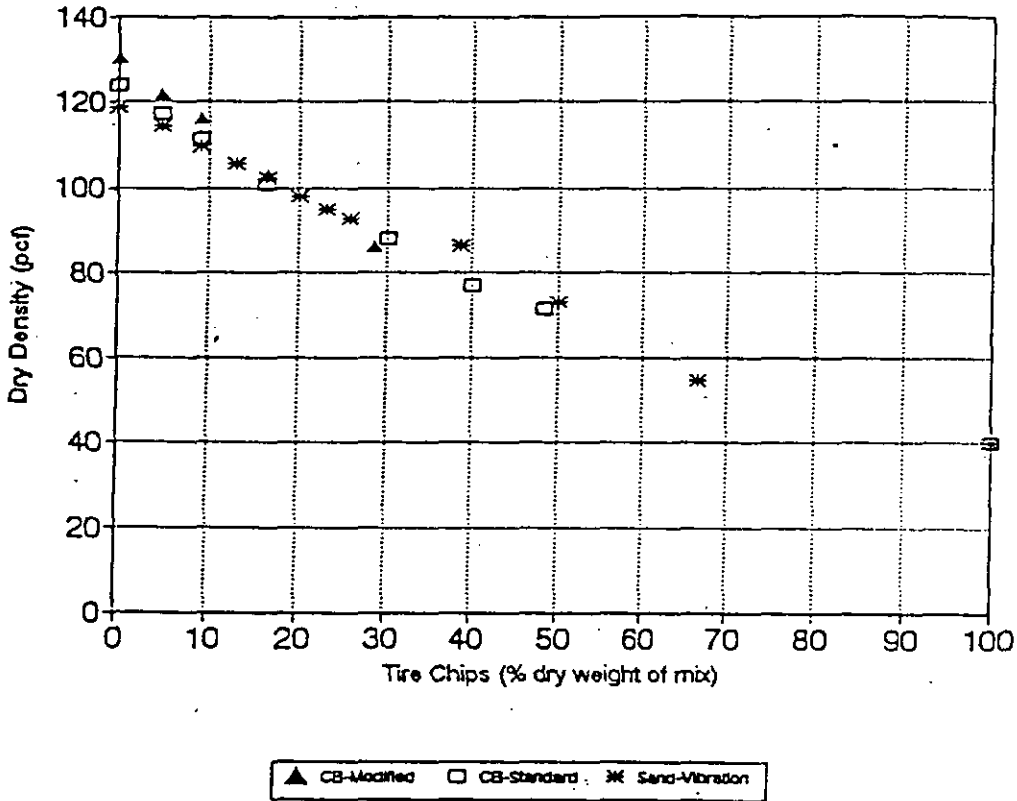


圖 2.1 輪胎碎片與 Ottawa 砂和 Crosby Till 混合之乾密度比較 (摘自 ASTM D6270) [9]

2.2 壓縮性

輪胎碎片 (或碎片與土壤混合物) 的壓縮性大小，可將輪胎碎片 (或碎片與土壤混合物) 放置於剛性的圓柱管中，施加軸向壓力並量測軸向應變大小。因為輪胎碎片具有高壓縮性，所以試驗試體須有相當厚度，其厚度與直徑比建議應大於一，並應減少管壁間的摩擦。為增加試驗的準確性，力荷重元應分別置於上下兩，以平均值計算，壓縮試驗儀器裝置如圖 2.2 所示。

如欲求得側向壓力係數 K_0 及柏松比 μ ，則需裝置壓力計於圓柱管壁中，量測其大小並可代入下列公式計算

$$K_0 = \sigma_h / \sigma_v \tag{2.1}$$

$$\mu = K_0 / (1 + K_0) \tag{2.2}$$

式中

K_0 ：側向壓力係數

μ ：柏松比

σ_h ：側向壓力

σ_v ：垂直壓力

Manion and Humphrey (1997) [30]曾就不同混合比例的礫石與輪胎碎片進行壓縮試驗，結果顯示在 $\sigma_v = 50$ psi 而且礫石含量低於 50% 的狀況下，側向壓力係數 (K_0)、柏松比 (μ)、材料的勁度 (E ，彈性模數) 與變形性 (ε) 差異不大。但是當礫石含量為 75% 時，其側向壓力係數 (K_0)、柏松比 (μ)、材料的勁度 (E) 均有顯著增加，而變形性 (ε) 則降低 (如表 2.3 所示)。

Bosscher and Edil (1993) [15] 針對不同比例的混合材料進行壓縮性試驗，當加載次數增加，最大壓縮量逐漸增大，而純砂的最大壓縮量為 1.9%，比純輪胎碎片的 38% 小得多。若輪胎碎片佔整體重量 30% 以上時，沉陷量明顯增加。

Ahmed and Lovell (1993) [11] 對通過 4 號至 50.8 mm 篩未去除鋼絲的廢輪胎碎片，進行壓縮性試驗，不銹鋼模具直徑 305 mm、高 318 mm、筒壁厚 10 mm。加壓、解壓循環共分四次，前兩次循環先加載到最大應力 172.5 kPa，相當於 7.58 m 的覆土深，再解壓至 0.83 kPa；於第三循環時，應力加載至 102.9 kPa，再解壓為 6.86 kPa；在第四循環中，加載至最大應力，再完全解壓。可以發現三種機制：

1. 顆粒重新排列和滑動產生的壓縮，發生在第一循環，而且不可回復。
2. 顆粒彎曲和伸長，是壓縮的主要貢獻，在解壓後可回復。
3. 顆粒本身回塑性變形產生的壓縮，不可回復。

根據上述三個機制，若加大圍壓及覆土壓，或將孔隙以不易壓縮的物質填充即可使壓縮量減少。另根據試驗結果，若廢輪胎碎片佔總重 30% 以上時，壓縮量會大幅上升。

張明元 (1998) [5] 以大小為 #5 (最大粒徑 3.8 mm) 和 #15 (最大粒徑 1.3 mm) 的廢

輪胎碎片進行單向度壓密試驗，當垂直應力為 79.9 kPa 時，應變量可達 30%以上。而乾燥狀況下比浸水飽和狀況下的壓縮量還要大。在混合材料中，當廢輪胎碎片佔總重的 30%以上時，材料的壓縮性會大幅地增加。

Bosscher and Edil (1994)[16]以直徑 152 mm 的模具，對 50 × 75 mm 的輪胎碎片作壓縮性試驗，試體剛開始的孔隙率為 0.67(乾密度為 0.41 g/cm³)，當壓縮量為 36%時，孔隙率降為 0.5，此時的垂直壓力為 686.9 kPa。大部分的塑性壓縮發生在第一次加壓階段，而解壓時也有不小的回彈量。接著的幾次循環跟第一循環有著相似的應力、應變曲線，但回彈量較小。輪胎碎片/土壤的混合比例，會大幅影響應力、應變關係，若砂佔總重 40%以上時，壓縮量由 30% ~ 40%降至 20%。

Benda (1995)[12]研究不同尺寸的輪胎碎片與砂以不同比例混合的材料，主要沉陷發生在第一次加載階段，而且不可回復，但減壓時，仍可看到明顯的回彈量。通常在一般的材料中，隨著加載次數的增加，回彈量會相對地減少。

Humphrey and Manion (1997) [29]對最大粒徑 50mm 的輪胎碎片進行壓縮性試驗，當垂直應力為 68.6 kPa，垂直應變 20% ~ 25%，若應力繼續增加到 412.6 kPa，只再增加了 15% ~ 20%的垂直應變。顯示出低應力時，輪胎碎片具高度壓縮性，當應力狀態升高時，壓縮性明顯減低。

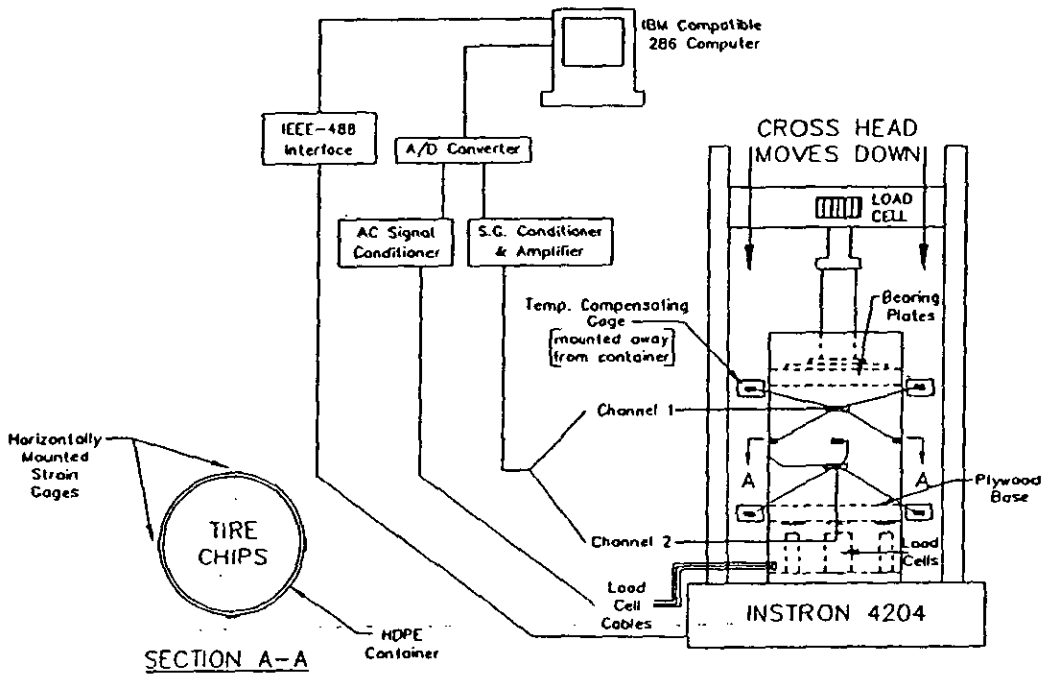


圖 2.2 壓縮試驗儀器裝置 (Nickels and Humphery, 1997)[29]

表 2.3 輪胎碎片的壓縮性 (Manion and Humphrey, 1992)[9]

%gravel	K_0 average	μ average	$E_{10\% \text{ strain}}$	$E_{\text{vert}} (\sigma_v = 50 \text{ psi})$
0	0.44	0.30	18.1	39%
50% 2in	0.34	0.25	20.9	25%
25% 3/4in	0.32	0.24	30.2	33%
50% 3/4in	0.33	0.25	35.6	27%
75% 3/4in	0.54	0.35	71.7	17%

2.3 剪力強度

含輪胎碎片土壤的剪力強度可由直接剪力試驗(ASTM D3080)與三軸試驗推求。因為一般回填土使用的輪胎碎片尺寸均大於土壤顆粒好幾倍，且較大的碎片會有鋼絲摻雜，對三軸試驗而言，為避免鋼絲刺破包覆試體的橡皮膜，因此橡皮膜之材質需另做考量。受限於傳統土壤三軸試驗試體尺寸的大小約為直徑 75 mm、高度 150 mm，為避免過大的尺度效應，必須對於輪胎碎片尺寸有所限制，其大小應小於 25 mm，為儘量接近實際所使用之輪胎碎片尺寸，並降低尺度效應，一般採用大尺寸試驗盒的直接剪力試驗。

Ahmed(1993)與 Edil and Bosscher(1996)[9]將不同的輪胎碎片尺寸與 Ottawa 砂或 Crosby Till 混合，進行三軸試驗與直接剪力試驗，試驗結果如表 2.4 與表 2.5 所列。

對 Ottawa 砂而言，在小應變的狀態下（約 5%）， ϕ （摩擦角）隨著與輪胎碎片混合比例的增加而降低，當混合比例介於 16.5%與 29.2%、50%與 66.5%之間時， ϕ 角的降低尤其明顯。在相同的應變狀態下，較大尺寸的輪胎碎片（1 in 與 0.5 in 比較），有較高的 ϕ 角。混合輪胎碎片的 Ottawa 砂的剪力強度，會隨著應變量的增加而提高，類似應變硬化（strain hardening）的行為。在某些混合比例之下確實能夠提高 Ottawa 砂之剪力強度。

對 Crosby Till 而言，在小應變的狀態下（約 5%）， ϕ （摩擦角）隨著與輪胎碎片混合比例的增加而降低，當混合比例介於 16.3%與 30.2%之間時， ϕ 角的降低尤其明顯。混合輪胎碎片的 Crosby Till 的剪力強度，會隨著應變量的增加而提高，類似應變硬化（strain hardening）的行為。在相同的應變狀態下，較大尺寸的輪胎碎片（1 in 與 0.5 in 比較），有較高的 ϕ 角。在某些混合比例之下，混合輪胎碎片的 Crosby Till 的剪力強度確實較純 Crosby Till 之剪力強度為高。

Winters (1991) [38]的研究結果顯示，疏鬆堆放時，完整輪胎的摩擦角介於 7° ~ 43° 之間，夯實過後，可大於 85° 。所有試體都沒有達到傳統所謂「破壞」

的程度，而完整輪胎的凝聚力為零。

Foose et al. (1996) [25]針對最大粒徑分別為：過 50 mm (< 50 mm)、過 100 mm (50 mm ~ 100 mm)、過 150 mm (100 mm ~ 150 mm)，最小粒徑 6 mm 的輪胎碎片進行直剪試驗，在低正向壓力（近乎零）時，多數試體沒有尖峰應力值。不同粒徑廢輪胎碎片的破壞包絡線近似，於試驗施加的最大正向應力 80.4 kPa 內，為一條抗剪角 30° ，凝聚力截距 2.94 kPa 的直線。若廢輪胎碎片的重量佔全部的 30% 以上時，剪力強度大幅地下降。

Humphrey et al. (1993) [28]根據直剪試驗結果指出：在試驗中，並沒有尖峰剪應力，純輪胎碎片的摩擦角為 $19^\circ \sim 26^\circ$ ，而凝聚力為 4.3 kPa ~ 11.5 kPa。

根據 Benda (1995) [12]環剪儀的試驗結果，輪胎碎片的摩擦角為 30° ，不管碎片尺寸如何 (50 mm ~ 150 mm)，破壞包絡線在正向應力小於 80.4 kPa 時，都呈直線。

Masad et al. (1995) [32]使用最大粒徑 4.75 mm 的廢輪胎碎片及渥太華砂，施作三軸壓密排水試驗，試體直徑 71 mm，高度 141 mm，相對密度控制在 90%，得到下列的結論：

1. 軸差應力與軸向應變

廢輪胎碎片有應變硬化的現象，軸差應力隨著軸向應變上升呈線性增加，但幅度不大，圍壓 349.9 kPa 時，軸差應力約為 499.8 kPa，若軸向應變大於 25%，軸差應力仍有上升的趨勢。

2. 剪應力與正向應力

隨著廢輪胎含量的上升，則凝聚力增加，抗剪角下降。

Wu et al. (1997) [39]對不同粒徑、外形所操作的「固定最大主應力三軸試驗」，試體直徑 100 mm，高 200 mm，所有輪胎碎片（最大粒徑分別為 38 mm、1 mm、9.5 mm、及 2 mm）摩擦角介於 $45^\circ \sim 60^\circ$ 。

表 2.4 輪胎碎片與 Ottawa 砂混合之剪力強度 (摘自 Ahmed, 1993 與 Edil and Bosscher, 1996) [9]

Test No,	Size of Chips (in.)	Chip/Mix ratio (t)	Confining Pressure (psi)	Strain Levels (%)	A (psi)	$\tan \alpha$	r^2	c (psi)	ϕ (°)
TRS01	No-Chip	0	4.50	5	-0.24	0.6615	0.9998	0	41.41
TRS02				10	-	-	-	-	-
TRS03				15	-	-	-	-	-
TRS04	1.00	16.5	4.64	5	2.17	0.6006	0.9996	2.71	36.91
TRS05	1.00	16.5	14.50	10	1.05	0.6252	0.9998	1.35	38.70
TRS06	1.00	16.5	2886	15	-	-	-	-	-
TRS07	1.00	29.16	4.50	5	5.52	0.4944	0.9943	6.35	29.63
TRS08	1.00	29.16	14.50	10	3.04	0.6110	0.9992	3.84	37.66
TRS09	1.00	29.16	28.86	15	2.65	0.6286	0.9993	3.41	38.95
TRS010	1.00	40.00	4.64		5.15	0.3957	0.9988	5.61	23.31
TRS011	1.00	40.00	14.36	10	2.10	0.5413	0.9972	6.10	32.77
TRS012	1.00	40.00	28.86	15	4.09	0.6013	0.9999	5.12	36.96
TRS013	1.00	50.00	4.64	5	-0.68	0.3562	0.9601	0.00	20.87
TRS014	1.00	50.00	14.36	10	4.54	0.4362	0.9988	5.05	25.86
TRS015	1.00	50.00	28.71	15	3.84	0.5519	0.9986	4.60	33.50
TRS016	1.00	66.54	4.50	5	2.23	0.1699	0.9999	2.26	9.78
TRS017	1.00	66.54	14.36	10	2.89	0.3324	0.9901	2.00	19.41
TRS018	1.00	66.54	28.72	15	4.91	0.3759	0.9992	5.30	22.08
TRS019	0.50	37.05	4.64	5	5.26	0.3891	0.9998	5.71	22.90
TRS020	0.50	37.05	14.50	10	5.48	0.5383	1.0000	6.50	22.57
TRS021	0.50	37.05	28.71	15	4.42	0.6238	0.9998	5.66	38.59
TRS022	1.00	38.78	4.64	5	6.55	0.4299	0.9964	7.25	25.46
TRS023	1.00	39.32	14.36	10	5.17	0.5684	0.9985	6.28	34.64
TRS024	1.00	39.37	28.71	15	4.08	0.617	0.9999	5.18	38.10

- otes :
1. All samples are prepared using vibratory compaction.
 2. Chip ratio is the air-dried weight of chips divided by the dry weight of mixture expressed in percent

表 2.5 輪胎碎片與 Crosby Till 混合之剪力強度 (摘自 Ahmed,1993 與 Edil and Bosscher,1996) [9]

Test No.	Size of Chips (in)	Chip Ratio (%)	Confining Pressure (psi)	Strain Levels (%)	a (psi)	$\tan\alpha$	r^2	c (psi)	$\phi(^{\circ})$
TRC01	No-Chip	0	4.5	5	6.14	0.4299	0.99701	6.80	25.46
TRC02	No-Chip	0	14.0	10	9.28	0.4914	1.0000	10.66	29.43
TRC03	No-Chip	0	28.71	15	9.72	0.5099	0.9996	11.30	30.66
				20	9.58	0.5151	0.9996	11.18	30.00
TRC04	1.0	16.27	4.64	5	7.43	0.3873	0.9979	8.06	22.79
TRC05	1.0	16.27	14.36	10	6.21	0.5810	0.9982	7.63	35.52
TRC06	1.0	16.27	28.71	15	7.77	0.5686	0.9992	9.45	34.65
				20	5.71	0.6232	0.9992	7.30	38.55
TRC07	1.0	30.16	44.52	5	6.82	0.2610	0.9991	7.67	15.14
TRC08	1.0	30.16	14.36	10	9.96	0.3740	0.9997	10.74	21.96
TRC09	1.0	30.16	28.86	15	9.88	0.4748	0.9973	11.23	28.35
				20	8.82	0.5460	0.9971	10.53	33.09
TRC10	1.0	40.05	4.64	5	5.50	0.2205	0.9947	5.64	12.74
TRC11	1.0	40.05	14.36	10	7.65	0.3598	0.9990	8.20	21.09
TRC12	1.0	40.05	28.71	15	8.39	0.4543	0.9991	9.42	27.02
				20	8.44	0.5271	0.9999	9.93	31.87
TRC13	1.0	48.49	4.64	5	4.93	0.2025	0.9985	5.03	11.68
TRC14	1.0	48.49	14.36	10	6.69	0.3472	0.9999	7.13	20.32
TRC15	1.0	48.49	28.36	15	7.81	0.4441	0.9999	8.72	26.37
				20	7.92	0.5208	0.9999	9.20	31.39
TRC16	0.5	39.80	4.64	5	6.17	0.1173	0.9980	6.21	6.74
TRC17	0.5	39.80	14.36	10	9.37	0.2181	0.9875	9.60	12.60
TRC18	0.5	39.80	28.86	15	11.07	0.3130	0.9866	11.66	18.24
TRC19	0.5	39.64	14.6						
TRC20	0.5	39.79	14.36						

2.4 水力傳導係數

輪胎碎片(或輪胎碎片與土壤混合物)的水力傳導係數可藉由 ASTM D2434 之定水頭試驗量測, 碎片大小應小於 19 mm, 由於輪胎碎片具有較高的壓縮性, 因此需藉由孔隙比控制, 試驗儀器必需能給予軸向應力, 並保持固定的孔隙比。量測流經試體的水頭損失及時間, 求得水力傳導係數 (coefficient of hydraulic conductivity, k)。透水試驗儀器裝置如圖 2.3 所示。

Edil and Bosscher (1996) [9]在不同的壓力狀態下探討輪胎碎片與砂土混合之水力傳導係數, 試驗結果(如圖 2.4 所示)顯示水力傳導係數 (k) 隨著壓力的提高而增加; 而 k 值隨著砂土比例的增加而降低, 此一現象在砂土比例由 0% 增加 30% 至時, 尤其明顯, 當砂土比例超過 30% 時, k 值則變化不大。

Bressette (1984)[19]對廢輪胎碎片進行定水頭試驗, 分別為粗切過的輪胎碎片(chopped scrap tire, 片狀面積近乎 50.8 mm^2)、切碎的輪胎碎片(shredded tire, 50.8 mm 篩的過篩率為 100%)、以及礫石材料(過 50.8 mm、38.1 mm、19.05 mm、和 17.7 mm 篩網的過篩率分別為 100%、99%、43%、39%、1%), 三者的 k 值都維持在 1 cm/sec, 顯示出滲透性與廢輪胎碎片的級配方式, 沒有太大關聯。Blumenthal and Zelibor (1992)[14]所作的研究指出, 最大粒徑為 38.1 mm 和 19.05 mm 的廢輪胎碎片的平均 k 值分別是 2.07 cm/sec 與 1.93 cm/sec。Ahmed and Lovell (1993)[11]用通過 4 號至 50.8 mm 篩大小、尚未去除鋼絲的廢輪胎碎片進行定水頭試驗, 試體 k 值為 5.4 cm/sec ~ 6.5 cm/sec。

張明元(1998)[4]針對#5(最大粒徑 3.8 mm)和#15(最大粒徑 1.3 mm)的廢輪胎碎片, 將相對密度控制在 90%操作透水性試驗, 試驗結果顯示:

1. 定水頭試驗所得的廢輪胎碎片滲透係數約為 2 cm/sec ~ 3 cm/sec。
2. 圍壓介於 98 kPa ~ 294 kPa 時, 三軸透水試驗所得的 k 值為 10^{-4} cm/sec ~ 10^{-3} cm/sec。
3. 廢輪胎碎片顆粒尺寸越小, 則滲透性越小, 但影響有限。

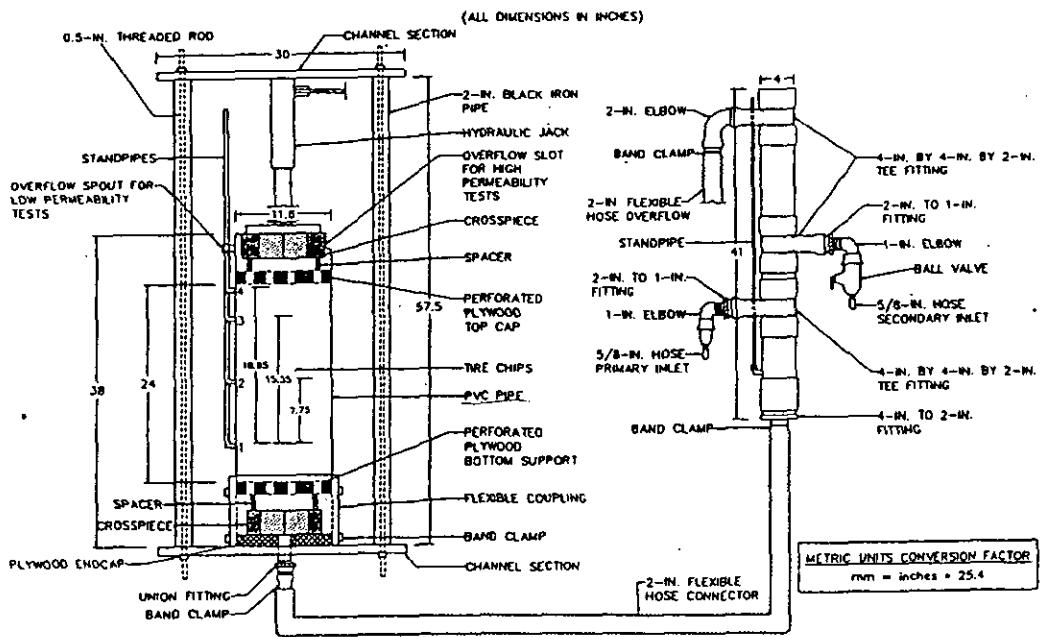


圖 2.3 輪胎碎片透水試驗儀器裝置(Humphrey and Chen, 1998)[9]

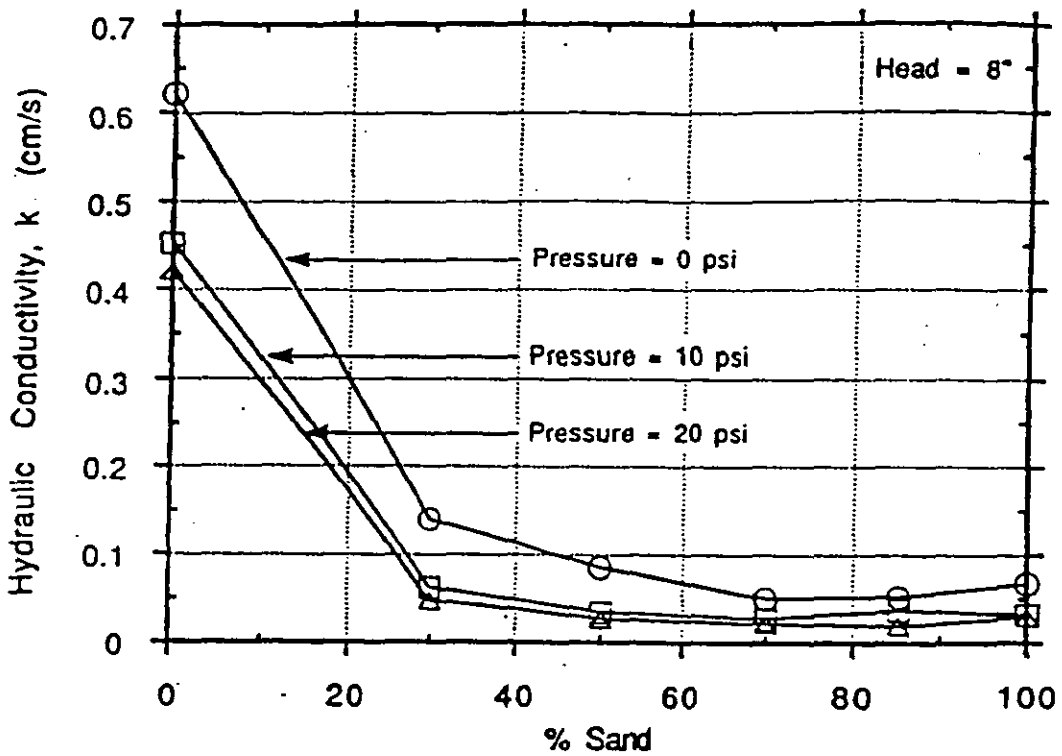


圖 2.4 輪胎碎片與砂混合之水力傳導係數(Edil and Bosscher, 1996)[9]

2.5 濾水

輪胎碎片的濾水分析係依據 USEPA Method 1311 有毒物濾水分析程序 (Toxicity Characteristics Leaching Procedure, TCLP)，試驗室分析結果。一般物質含有金屬成分所以 PH 值偏低，含有有機質則 PH 值會偏高，但輪胎碎片兩者成分均有所以趨向中性，而其金屬及有機質含量均在 TCLP 標準之下，顯示輪胎碎片並非有害廢棄物。在現地的濾水收集分析結果，無論輪胎層在地下水位以上或以下，均顯示出錳和鐵的成分較多，而有關有機質方面則在地下水位上並沒有偵測到數據，在地下水位之上也含量極少。在某些區域錳的含量超過第二級飲用水標準，而第二級飲用水標準依據顏色、味覺、嗅覺來評定，並非依據健康有害程度，因此其濾水成分有待進一步研究，但設計時仍建議應用在地下水位之上。表 2.6 為 Radian(1989)[9]所提出之 TCLP 有毒物濾水標準，而表 2.7 則是 ASTM D6270 的 TCLP 金屬含量標準。

表 2.6 TCLP 有毒物濾水標準(Radian,1989)[9]

Contaminant	Regulatory Level (mg/L)	Contaminant	Regulatory Level (mg/L)
Volatile organics		Semivolatile Organics	
Acrylonitrile	5.0	o,m,p-cresols (ea)	10.0
Benzene	0.07	Hexachlorobenzene	0.13
Bis(2-chloroethyl)ether	0.05	Hexachloroethane	4.3
Carbon Disulfide	14.4	Nitrobenzene	0.13
Carbon tetrachloride	0.07	Pentachlorophenol	3.6
Chlorobenzene	1.4	Phenol	14.4
Chloroform	0.07	Pyridine	5.0
1,2-Dichlorobenzene	4.3	2,3,4,6-Tetrachlorophenol	1.5
1,4-Dichlorobenzene	10.8	2,4,5-Trichlorophenol	5.8
1,2-Dichloroethane	0.40	2,4,6-Trichlorophenol	0.30
1,1-Dichloroethylene	0.10		
2,4-Dinitrotoluene	0.13		
Hexachlorobutadiene	0.72		
Isobutanol	36.0		
Methylene Chloride	8.6	Metals	
Methyl Ethyl Ketone	7.2	Arsenic	5.0
1,1,1,2-Tetrachloroethane	10.0	Barium	100
1,1,2,2-Tetrachloroethane	1.3	Cadmium	1.0
Tetrachloroethylene	0.1	Chromium	5.0
Toluene	14.4	Lead	5.0
1,1,1,-Trichloroethane	30.0	Mercury	0.20
1,1,2,-Trichloroethane	1.2	Selenium	1.0
Trichloroethylene	0.07	Silver	5.0
Vinyl Chloride	0.05		

表 2.7 TCLP 金屬含量準 (摘自 ASTM D-6270) [9]

Concentration in extract	Ag µg/L (ppb)	As µg/L (ppb)	Ba µg/L (ppb)	Cd µg/L (ppb)	Cr µg/L (ppb)	Hg µg/L (ppb)	Pb µg/L (ppb)	Se µg/L (ppb)
TCLP Regulatory Limit	5000	5000	100000	1000	5000	200	5000	1000
Virginia DOT	NA	NA	NA	1.55	2.8	NA	19.6	NA
Scrap Tire Management*	ND	2	590	ND	48	0.4	16	ND
Maine	ND	ND	357	185	84	ND	216	ND

Note: NA= not available, not measured or not reported for that study

ND= non-detect

*Maximum value reported for the seven tire products that were tested

第三章廢輪胎碎片土堤施工建議

本研究參考國內外土堤施工規範 ASTM 廢輪胎碎片工程應用規範 (ASTM D6270-98) 及本案於國立屏東科技大學興建輪胎碎片土堤之經驗彙整將輪胎碎片之工程特性施工注意事項及施工建議步驟分節討論。

3.1 廢輪胎碎片工程特性與施工注意事項

1. 輪胎碎片經滾壓夯實之後，重量為一般夯實土壤的 $1/3\sim 1/2$ ，由於在軟弱或易壓縮土壤上興建土堤會引起邊坡穩定或沉陷的問題，輪胎碎片為該項用途之理想輕質回填料。
2. 輪胎碎片的隔熱性為一般土壤的 8 倍，因此採用 150 mm~450 mm 厚的輪胎碎片於道路下方其具有可隔熱防凍的效果，於冬天可減少冰凍土壤厚度，而於春天溶雪其間可改進路基之承载力，並且於房屋地下室採用輪胎碎片回填可減少熱能損失而可減少熱能的支出。
3. 因輪胎碎片具有低夯實單位重、高滲透性、及低熱導性，以上這些特點使輪胎碎片為應用在擋土牆背填土之用途具吸引力，其側向土壓力係數約為一般土壤的一半，並亦可應用在地工合成材加勁擋土牆為回填土方。
4. 輪胎碎片的水力傳導係數一般大於 $1\text{cm}/\text{sec}$ ，可應用於許多排水之用途上，其中包括法式排水，垃圾掩埋場底部襯裡及覆蓋層之封蓋層及現地污水系統及濾水收集系統。
5. 以上討論所採用之輪胎尺寸有兩種，其中一種最大尺寸為 75 mm，另外一種最大尺寸為 300 mm，其尺寸約為四分之一輪胎或 600mm 長度之碎片亦有可採用之用途，在任何情況下，輪胎碎片至少一面需與鋼絲分離。

6. 通常此種尺寸輪胎碎片層夯實厚度約為 300mm，並可採用圓筒滾輪式、羊腳滾輪式、震動夯實式滾壓或堆土機夯實，機具最小重量約為 90 kN，大片輪胎碎片通常回填厚度為 900mm 並採用堆土機夯實，對大部分情況，至少需來回 6 次的滾壓夯實。
7. 在輪胎碎片層上避免因交通流量而造成路面過度變形，應具有足夠的覆土厚度，厚度則依交通流量載重而定。流量較小的道路其覆土厚度須達 0.8 m，而於為鋪面之道路，則可依交通流量可採用 0.3m 至 0.5m 之覆土，較大流量的道路其覆土厚度則須達 1 m~2 m。設計者則需依特定計畫之荷重、輪胎碎片厚度、鋪面厚度及其他狀況設計覆土之厚度，不論任何用途，為避免輪胎鋼絲暴露在外面，輪胎碎片應採用土壤覆蓋以避免與公眾接觸。
8. 當輪胎碎片上將鋪設路面材料及應用於排水用途時，需採用地工不織布或地工織物完整包圍，以減少細粒料土壤進入輪胎碎片內之空隙中。
9. 整支輪胎及輪胎側邊可以應用於擋土牆施工或經組合後成為排水涵洞。
10. 輪胎碎片回填方應用時應注意可能產生之溫度反應，可能引起之反應包括鋼絲曝露引起氧化效應與橡膠之氧化，細菌或許對上述二種反應具影響性，但其效應仍在研究中，下面幾種因素均可能增加曝露鋼絲及橡膠之氧化效應，其中包括與空氣接觸，與水接觸，高度阻熱效應並配合厚度覆土、鋼絲高度曝露率、小尺寸輪胎碎片且含橡膠粉末、有機及非有機質養分等因素均可能增加細菌之效應。
- 10.1 下列指導綱要之目的在於減少增加輪胎碎片過熱之各項因素之產生，為提升隔熱效果建議增加覆土厚度，及限制輪胎碎片厚度不得超過四公尺，並建議採用較薄之輪胎碎片層，並大致分為二類，第一類輪胎碎片層厚度少於 1.0 公尺，第二類其厚度介於 10 公尺至 30 公尺之間，並建議設計時可採用較大尺寸之輪胎碎片，較厚之覆土層，此項建議以輪胎碎片層為主，至於輪胎碎片與土壤形成之複合層則建議土壤應不含有機

質。

10.2 對於第一類及第二類施工，應採不受污染之輪胎碎片，其不應含油漬、汽油、柴油等成分，並且輪胎碎片在任何狀況下應不含可燃物。

10.3 第一類輪胎碎片層施工時，輪胎碎片應有不超過 50%(重量)通過 38mm 之篩網及不超過 5%(重量)通過 4.75mm 篩網，以減少過熱之現象。

10.4 第二類輪胎碎片層施工，輪胎碎片應有不超過 25%(重量)通過 38mm 篩網及最多 1%(重量)通過 4.75mm 篩網，且輪胎碎片應不含木頭碎片、及其之易燃之有機物質，不內含於輪胎碎片之金屬重量，少於 1%(重量)，內含於輪胎碎片內之金屬其超出之長度於 75%碎片中期長度應不超過 25mm，於 100%碎片中應不超過 50mm。

10.5 於第二類輪胎碎片施工中，應減少空氣與水之入滲，並且應避免含有機質土壤(例如表土)與輪胎碎片相接觸，施工中可於輪胎碎片層之上方與側邊以 0.5mm 厚含有至少 30%細質土壤回填，並於回填土與碎片間以地工織物分隔，質土壤應不含有機質，上部之細質回填土上方回填所需厚度之覆土，如土堤上有鋪面施工時建議應瀑設置路肩處以減少入滲之可能性。

10.6 於第二類輪胎碎片層施工中，如採用輪胎碎片於回填土方下方為排水層時應避免輪胎碎片與空氣及日光相接觸，並建議可於回填方外部採用碎料為排水材，在有些情況下可採用優良級配碎料為排水層，如輪胎碎片回填於牆面旁時，則建議於排水孔附近以優良級配之碎料回填，並以織布將碎料與輪胎碎片分離。

2 施工建議步驟

3.2.1 土堤施工

土堤施工的步驟約可分成以下九項：

1. 清除地上物 -

施工的第一步是清除標的位置上所有的雜草及雜木，並堆放於指定之場所。

2. 放樣 -

依設計圖之位置及高程將道路路址放樣於現地。

3. 開挖 -

放樣位置確定後，依道路設計之高程由 S0 至 S10 之順序開挖。

4. 基礎施作 -

按照道路設計圖，於現地放樣基腳位置，並作階梯式開挖(每層階梯落差為 30cm)。於基礎底下鋪設一層不織布，再澆置 20cm 厚，80cm 寬，強度為 $210\text{kg}/\text{cm}^2$ 之混凝土。基礎澆置完成後，於其上覆蓋不織布，並澆水養護兩週，然後疊砌倍力磚。

5. 倍力磚疊砌 -

每塊倍力磚以毛面朝外，光面朝內，且公榫朝上，母榫朝下，順序排列，每疊砌四層即加回填土。

6. 加勁格網鋪設 -

為確保地工格網鋪設之平整度，鋪設前回填土先夯實達到規定之標準，再行鋪設；鋪設時，於格網末端之兩側打設鋼棒或木樁，以避免格網於回填時產生反摺或移動並確保格網鋪設之平整。每隔四層倍力磚，鋪設一層格網。

7. 不織布鋪設 -

3m 長不織布：分三摺鋪設，底面 100cm、牆面 60cm、以及回摺面 140 cm，鋪設於 S0 至 S6 之區段。

8.5 m 長不織布：分三摺鋪設，底面 590cm、牆面 60cm、以及回摺面 200cm，鋪設於 S6 至 S10 之區段。

8. 回填夯壓 -

在 S6 至 S8 之區段使用廢輪胎碎片與土壤之互層，廢輪胎碎片每層回填厚 15cm 再於其上回填 15cm 之土壤，再以壓路機滾壓。S8 至 S10 之區段使用 100%

廢輪胎碎片做回填，在回填 30 cm 廢輪胎碎片後以 20 噸挖土機來回滾壓三遍。每次回填夯壓厚度約為 30cm 並以震動壓路機壓實，其夯實度達標準夯實最大乾密度之 95%(利用核子密度儀檢測)以上，才回填下一層土方。緊鄰牆面約 30cm 寬之間距；回填透水砂以小型震動夯實機夯壓。每兩層回填土夯壓完成後(回填高度約 60cm)，回包不織布，再鋪設加勁格網及下一層不織布。

9. 排水管鋪設 -

為確保廢輪胎之污水能完全收集，於每根排水管下方均需鋪設不透水布，再放置排水管。3"排水管(縱向)連續鋪設於混凝土基礎上方及倍力磚內側；每根排水管之間，用套管連接以防排水管之間脫落。2"(橫向)排水管之間距為 3m，水管下方先放置不透水布。不透水布上方放一層透水性砂料然後再安放排水管。排水管上方覆蓋透水性砂料。排水管後方沿原土堤與新填土之界面有一層類似垂直排水帶功能之不織布；寬 1m、常 2m。鋪設每塊排水帶，使毛面朝內，不織布鋪面朝外。

3.2.2 鋪面施工

當回填土達到設計高程時，在回填土上方鋪放一層不織布然後鋪設 25cm 厚之碎石級配，並進行滾壓。添加橡膠粉末之瀝青混凝土在預拌廠按照預定之比例混合(橡膠粉末取代 1%之骨材)。橡膠粉末是在瀝青預拌廠以高壓空氣打入攪拌器中與瀝青及骨材混合一分鐘，然後輸送到工地。預拌瀝青混凝土鋪放於滾壓完成之碎石級配上，厚度 5cm 再加以滾壓。

3.2.3 護欄施工

護欄結構主要是倍力磚，其疊砌高度超出瀝青混凝土路面約 50cm，以倍力磚做為護欄。

第四章 美國使用廢輪胎於公路工程之經驗

廢輪胎於公路工程方面之使用在美國許多州已進行多年的研究。本章將這些工程經驗做一整理與敘述。

4.1 Minnesota 州之經驗

在公路工程上，路堤施工所需要之填方料數量非常大。在 1985 年，美國 Minnesota 州林務局 (Department of Natural Resources) 因該州之廢輪胎正以破紀錄之速度在增加，同時又需要更經濟之方法建造通過該州森林軟弱地層之林業，一廢輪胎公司便提出同時解決上述二個問題之方法 (Engstorm and Lamb, 1994) [23]。該公司建議以廢輪胎作為此道路之構築材料，稱之為輕質回填材 (Geisler et al., 1989) [26]。此輕質回填材可提供將道路「浮標」於軟弱地層之功能。在 Minnesota 州環保署 (Pollution Control Agency) 之許可下，公司與 Minnesota 州林務局在該州北部林業道路中，著手進行設計並建造了一段以廢輪胎為材料之試驗道路。廢輪胎材料則分別使用了完整之廢輪胎、部分完整之廢輪胎及廢輪胎碎料等不同之型態。截至目前為止，該試驗道路及該州其他以廢輪胎為道路構築材料之道路，皆仍然提供良好的服務品質。證明了在軟弱地層上，用廢輪胎輕質回填材構築道路之可行性。由於廢輪胎碎料異於施工之考量，目前道路路基回填材則多採用碎料之型態。

以廢輪胎碎料最為道路之輕質回填材之優點，可謂不勝枚舉。首先，在一般環境下，廢輪胎碎料不論在水位之上或水位之下，皆不生有機劣化。此項特性超越了以木塊、木片及木屑為輕質回填材所需憂慮之有機劣化之可能性。再廢輪胎碎料之單位重僅為 $320 \text{ kg/m}^3 \sim 640 \text{ kg/m}^3$ ，在不穩定之地質區域，如此單位重可以減少巨額之地盤改良費用。廢輪胎碎料異於運送及鋪設，並且具足孔隙之特性，對於道路路基提供了優良之排水特性。使用廢輪胎碎料作為

道路之回填材，不但可以降低成本，更可減少日趨匱乏之砂石的使用量。

值得一提的是，在使用廢輪胎做為道路回填材之前，必須將廢輪胎清潔至不含油脂，以避免污染地下水，同時，Minnesota 州之環保署警告，於強酸之環境下（pH 值等於 3）廢輪胎之濾出液可能含有重金屬，亦可能造成土壤及地下水之污染（Twin City Test Corporation, 1990）[37]。

廢輪胎碎料做為道路之輕質回填材，更有許多工程性質方面之優點。首先，壓實之廢輪胎碎料的孔隙率仍高於清潔之礫石（Geisler et al., 1989）[26]，美國加州公路局（California Department of Transportation）進行定水頭滲透試驗之結果顯示，廢輪胎碎料之滲透性係數約為 3000 公尺/日，以廢輪胎碎料構築路基，於瀝青面層下排水性質之改善，可延長道路之服務年限。同時，因廢輪胎碎料有相當之彈性，受路面載重時雖然會產生較大之變形量（Dresher et al., 1992）]]，但亦能將路面所承受之載重傳至其地下之地層（Geisler et al., 1989）。廢輪胎碎料且能吸收相當之震動能量，使構築道路實之震動夯實過程不至危害鄰近之構物。廢輪胎碎料不但易於夯實及壓密，各碎粒因其多角之形狀極優良之摩擦質，而能緊密結合互鎖在一起（Geisler et al., 1989）[26]。

至 1992 年止，Minnesota 州之環保署已記錄了 23 處使用廢輪胎碎料為之工包括私用車道、鎮道、縣道及林業道路等，共使用了二百二十萬個廢輪胎。

Oregon 州之經驗

1991 年，美國 Oregon 州公路局（Oregon Department of Transportation）亦曾將廢輪胎碎料應用於填方，以其輕質回填材之特性，解決路堤及邊坡之穩定問題。ODOT5 之地滑搶修計畫，位於美國 42 號公路 59.3 英哩處，滑坡發生於山高 15 英呎之新建公路路堤，其滑動超過了路堤之趾部，並延伸了 150 英呎，沿路堤下之一條小溪。

ODOT 將路堤回填之一部分改由廢輪胎碎料回填材來取代，滑動驅動力因而

減小，構築方法為在廢輪胎碎料之頂端及側坡覆以三英尺厚之夯實覆蓋土壤，其上再鋪設傳統之路基級配及瀝青面層。五千八百噸的廢輪胎碎料（約為五十八萬個廢輪胎），取代了約為十二萬八千噸的土壤重。

廢輪胎碎料使用載重 28 噸之底部傾卸式拖車，由距離本計畫 150 英哩~250 英哩處運送來到計畫地點。運送廢輪胎碎料至工地之交通費為 10 美元/噸，鋪設及夯實之費用則為 8.33 美元/噸。廢輪胎碎料以每層三英尺之厚度使用 D-8 推土機進行鋪設及夯實。廢輪胎碎料在拖車運送時之鬆方密度約為 30 pcf，現地夯實後之密度約為 45 pcf，夯實之覆蓋土壤、路基級配及瀝青面層鋪設後之密度可達 52 pcf。從沈陷板及面層水準量測資料得知，由於夯實之覆蓋土壤、路基級配及瀝青之鋪設，在 12.5 英尺厚之廢輪胎碎料填方部分，得到 20 英吋之沈陷量（13.4%之應變量）。

地瀝青鋪面完工後，使用 ODOT 之落錘式撓度儀（Falling Weight deflectometer），進行撓度試驗，所得之撓度，約為原土壤路堤所產生撓度之兩倍，此乃由於廢輪胎碎料填方部分在力學上有較大之受力半徑。載重卡車行經廢輪胎碎料填方時，則會有行經橋面時之震動感覺。然 ODOT 之地滑搶修計畫，為了應用廢輪胎碎料為輕質回填材，來取代以土壤構築路堤之技術是可行的。

Wisconsin 州之經驗

美國威斯康辛大學（University of Wisconsin-Madison）對廢輪胎碎料於土壤環境工程方面之應用，如廢輪胎碎料與砂土混合後之工程性質、廢輪胎碎料於公路路堤之設計準則、廢輪胎碎料構築公路路堤之施工方法及行為表現、利用廢輪胎碎料減低有機化合物經地下水之擴散等問題，進行一系列之研究。

在廢輪胎碎料與砂土混合後之工程性質方面，美國威斯康辛大學（Foose et al., 1987）[24]在其所進行之直接剪力試驗皆為一直線，然而廢輪胎碎料與砂土混合之破壞包絡線則為一曲線，並約略成二條直線段之形式。在承受較低之圍壓

時，廢輪胎碎料與砂土混合材料之初始內摩擦角 ϕ_1 可達 67° ，而同樣單位重砂土之內摩擦角約為 34° 。試驗結果同時顯示，廢輪胎碎料與砂土混合後，所承受之圍壓亦為決定其抗剪強度之重要因素。研究顯示，廢輪胎碎料與砂土混合材料之抗剪強度，其控制因素主要在於廢輪胎碎料的含量及砂土單位重，若將切碎之廢輪胎與砂土混合，則更能發揮二者之優點。也就是說，廢輪胎碎料與砂土混合材料之初始內摩擦角 ϕ_1 將隨著廢輪胎碎料的含量之增加而增大。同時，當廢輪胎碎料與砂土混合材料之單位重由 15.7 kN/m^3 時，初始內摩差角 ϕ_1 將隨之增加 15° 。

限制廢輪胎碎料推廣應用之因素常為其對高度壓縮性所產生之懷疑。Bosscher 便曾對廢輪胎碎料構築公路路堤之施工方法和其行為表現，在 Madison 附近進行實地試驗 (Bosscher et al., 1993) [15]。由試驗結果顯示，經過載重卡車連續不斷之通行，仍表現出令人滿意之結果。此實地試驗包含了七種不同狀況之廢輪胎碎料及其與砂土混合方式。經過兩年之試驗結果顯示，以廢輪胎碎料構築之路堤的沈陷量略大於以砂土構築之路堤的沈陷量。然而，若於廢輪胎碎料的頂面及側坡以一公尺厚之夯實覆蓋土壤，以廢輪胎碎料構築之路堤之沈陷量則以相對於以砂土構築之路堤的沈陷量。實地試驗並發現，以一般常用之施工機械即可得到良好之效果，且經由振動式及重力式之滾壓機具所得之夯實效果大致相同。

Bosscher 亦針對以廢輪胎碎料構築公路路堤之設計步驟準則，進行了研究探及建議 (Bossche et al., 1993) [15]。結果顯示，當廢輪胎碎料之尺寸小於 75mm ，最易於施工。為了達到最小之壓縮量，於廢輪胎碎料之頂端應覆蓋一公尺厚夯實覆蓋土壤。值得特別提出的是，因為道路路堤在構築的過程中，初期將先產生一相當之塑性變形，而後皆伴隨著所謂殘餘彈性變形。一般公路路堤之施工去，皆為等到塑性變形終了後，始進行地瀝青鋪面之鋪設。此時，線性模型有元素法 (FEM) 便可用來正確設計地瀝青撲面之厚度。也就是說，設計者可以試驗之資料利用 FEM 來預測廢輪胎碎料構築之路堤，受載重時的沈陷量，以瀝青鋪面厚度設計參數。

4.4 Maine 州之經驗

美國緬因州立大學 (University of Maine) 對廢輪胎碎料用於輕質路基回填材及擋土牆背填方之工程性質，如級配、比重、夯實密度、抗剪強度、壓縮性、側向土壓力係數、及滲透係數等，亦進行各方面之研究 (Humphrey and Sandford, 1993) [28]。緬因州立大學選取了新英格蘭地區 (New England) 三個州 (Massachusetts、Vermont、Maine) 內之四家廢輪胎供應商，對其生產碎料之工程性質加以分析研究。

依 AASHTO T27-87 得知，此四家廢輪胎碎料供應商，其生產之碎料皆為礫石尺寸範圍 (13~76mm)，且為均勻級配。依 AASHTO T85-85 得知，廢輪胎比重範圍，介於 1.14~1.27 之間，還不到一般土壤比重之一半。廢輪胎碎料之尺寸有時可達三英吋，試驗採用直徑及高度皆為十英吋之模，以類似 Proctor 試驗之方式將廢輪胎碎料分三層施以夯實，每層以重 10 磅 (4.5 公斤) 之擊錘，落高 2 呎 (305mm)，均勻夯打 25 下。試驗結果顯示，若以標準 Proctor 試驗 60% 能量進行夯實，所得夯實密度僅低於 100% 能量進行之夯實密度 30 kg/m^3 。而分別以乾碎料及濕碎料進行試驗，所得的夯實密度也僅有 16 kg/m^3 之差別。廢輪胎料夯實密度之範圍，介於 $618 \text{ kg/m}^3 \sim 642 \text{ kg/m}^3$ 之間，約為一般土壤夯實密度 1/3，證明廢輪胎碎料應用於輕質路機回填材之可行性。

廢輪胎碎料之抗剪強度參數，則以邊長為 305 mm (12 英吋)，深度為 229 mm (9 英吋) 之剪力盒，進行之直接剪力試驗得到。廢輪胎碎料內摩擦角之範圍，於 $19^\circ \sim 25^\circ$ 之間，而凝聚力之範圍，則介於 8 kPa ~ 12 kPa 之間。廢輪胎碎料壓縮性，則以類似單向度壓密試驗之步驟進行，試驗所用之金屬環之直徑為 305 mm (12 英吋)，所有試驗皆進行三次之加壓及解壓過程。初始壓縮曲線之斜率大，顯示有非常高之可壓縮性，其應變量約可達 40%。解壓及再壓曲線之斜率很平緩且接近，顯示廢輪胎碎料經重複載重後將較少量之彈性變形。廢輪胎

碎料彈性模數 (E) 之範圍，介於 770 kPa ~1250 kPa 之間，而柏松比 (μ) 之範圍，則介於 0.2~0.32 之間。至於側向土壓力係數 K_0 之範圍則介於 0.26~0.47 之間。

廢輪胎碎料之滲透性係數，依美國加州公路局 (California Department of Transportation) 設計之定水頭滲透試驗之結果顯示，不論廢輪胎碎料之密度及孔隙率為何，滲透係數至少為 1.5 cm/sec，亦即為潔淨礫石範圍。

第五章 試驗材料及程序

承續第一期之計畫，本研究使用屏東科技大學於第一期計畫中興建的廢輪胎加勁土堤所使用的現地回填土壤，將土壤取回後，通過4號篩以下部分，作為試驗土壤。而廢輪胎碎片採用最大粒徑1cm的顆粒狀碎片，為了製作三軸試驗所需試體因此廢輪胎碎片的尼龍絲及鋼絲已分離出來。

為瞭解廢輪胎碎片做為路基材料之工程性質，本研究將針對不同的廢輪胎碎片與黏土之混合比（Chip Ratio, 廢輪胎碎片重量/試體總重量）進行室內試驗。於初始規劃設計試驗內容時，考量以四種混合比（0、10%、25%、50%）之組合操作試驗，惟因為試驗數量過多，並參考學者之研究結果（Manion and Humphrey, 1997）[30]顯示在混合比大於25%時，壓縮性有明顯之改變，以及混合比大於16%時，剪力強度有明顯之變化（Ahmed, 1993; Edil and Bosscher, 1996）[11,22]。因此採用0、10%、25%三種混合比操作試驗，室內試驗內容包括

1. 基本物理性質試驗

藉由粒徑分析試驗、比重試驗、阿太保限度試驗與夯實試驗建立黏土與廢輪胎碎片之基本物理性質資料，並參考夯實試驗所得到的最大乾密度與最佳含水量，做為三軸壓密不排水試驗與直接剪力試驗時依據。

2. 壓縮性試驗

因廢輪胎碎片具高壓縮性，為了解其壓縮行為，本試驗採用直徑15cm的試體，以混合比為（0、10%、25%、100%）進行三次循環載重試驗。

3. 透水試驗

為了解廢輪胎碎片與土壤混合物滲透係數大小，進行定水頭三軸透水試驗。

4. 三軸壓密不排水試驗（CIU-AC）

以三種混合比（0、10%、25%）與試體尺寸（直徑：3 in、4 in）來操作試驗，以探討不同混合比之力學行為，以及廢輪胎碎片因為不同試體尺寸所反應之尺度效應。對 4 in 直徑以下的試體而言，為避免過大顆粒所造成之尺度效應，取現地回填土壤通過 4 號篩以下部分製作。純土壤試體是以 3 in 直徑的試體操作試驗。

試體密度係參考夯實試驗所得到的最大乾密度與最佳含水量，對黏土而言，為 98% 的最大乾密度與夯實曲線乾側相對的含水量；對混合土壤（混合比：10%、25%）而言，也採用 98% 的最大乾密度與夯實曲線乾側相對的含水量。

3. 直接剪力試驗

以三種混合比（0、10%、25%、50%）、試體尺寸（20 cm × 20 cm 與 45 cm × 45 cm）與廢輪胎碎片尺寸（最大粒徑 1cm）來操作試驗，以探討不同混合比之力學行為，以及因為不同試體尺寸所反應之尺度效應。試體密度之決定與三軸壓密不排水試驗相同。

除上述之室內試驗外，並對興建之廢輪胎加勁土堤做現地觀測，觀測內容包括高程變化量測、滲水分析以及溫度變化量測。

5.1 基本物理性質試驗

5.1.1 粒徑分析

土壤粒徑分析試驗法依據 ASTM D452 篩分析與 ASTM D422 比重計法，將現地回填土壤進行試驗，篩分析法是採用篩號為 1/2 in、No.4、No.10、No.20、No.40、No.60、No.140 與 No.200。

5.1.2 阿太保限度試驗法

土壤的液塑性限度根據 ASTM D4318 土壤液性限度（LL）試驗法、ASTM

D427 土壤塑性限度 (PL) 試驗與塑性指數 (PI) 決定法。

5.1.3 比重試驗

根據 ASTM D 854 土壤比重試驗，利用比重瓶測定土壤比重，用於分析土壤重量與體積之關係。

5.1.4 夯實試驗

因為廢輪胎碎片大小為 10 mm 小於規範要求 19mm，採用 Proctor 標準夯實試驗 (ASTM D698)，以推求最大乾密度與最佳含水量。本研究以最大粒徑 1cm 的顆粒狀廢輪胎碎片搭配四種混合比 (0%、10%、25%、50%) 進行夯實試驗。

5.2 壓縮性試驗

由於廢輪胎碎片的壓縮量很大，若要將廢輪胎碎片應用到填方材料上，則因其能容忍的壓縮量頗為有限，故必須針對廢輪胎碎片的壓縮性有所瞭解，本研究除了進行壓縮性試驗以求得廢輪胎碎片的應變量以外，更進一步以加壓-解壓-再加壓的步驟，模擬預壓工法處理廢輪胎碎片應用在路基填土材料的可行性。

試驗方法為將試體製作直徑為 15cm，其厚度與直徑比為 1:1，並將按照需求夯實度之夯實試體置於一剛性圓柱中 (如圖 5.1)，置於 5T 萬能試驗機上給予軸向應力做三次循環載重，應變速率為 1 mm/min，量測其軸向應力及軸向應變之讀數變化。

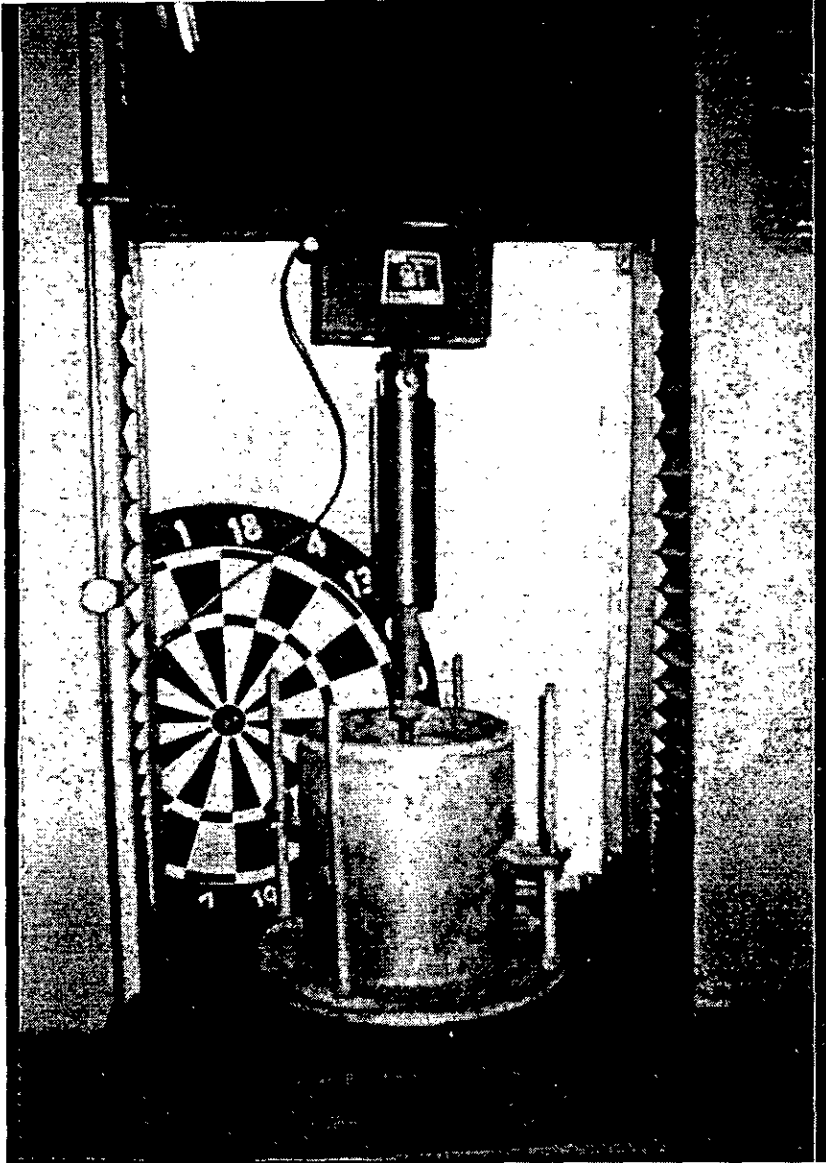


圖 5.1 壓縮性試驗裝置圖

5.3 透水試驗

在工程的應用上，材料的滲透性是很重要的，以路基填土材料為例，其滲透性需夠高以利排水，才不會產生過高的超額孔隙水壓導致路基破壞。本研究即針對純廢輪胎碎片及其與現地土壤混合後的試體，進行三軸透水試驗，以求取試體的滲透性。

本透水試驗採用三軸壓密不排水試驗之三軸試驗室，試體尺寸大小為直徑 4 in 高 8in(如圖 5.2)，調節壓力設備及體積量測為 Boart Longyear Permeability Panel(如圖 5.3)。在試體達到飽和狀態，調整圍壓大小，記錄時間及流出試體的水量，待流出水量穩定之後可量測不同配比試體在不同圍壓下之滲透係數大小。

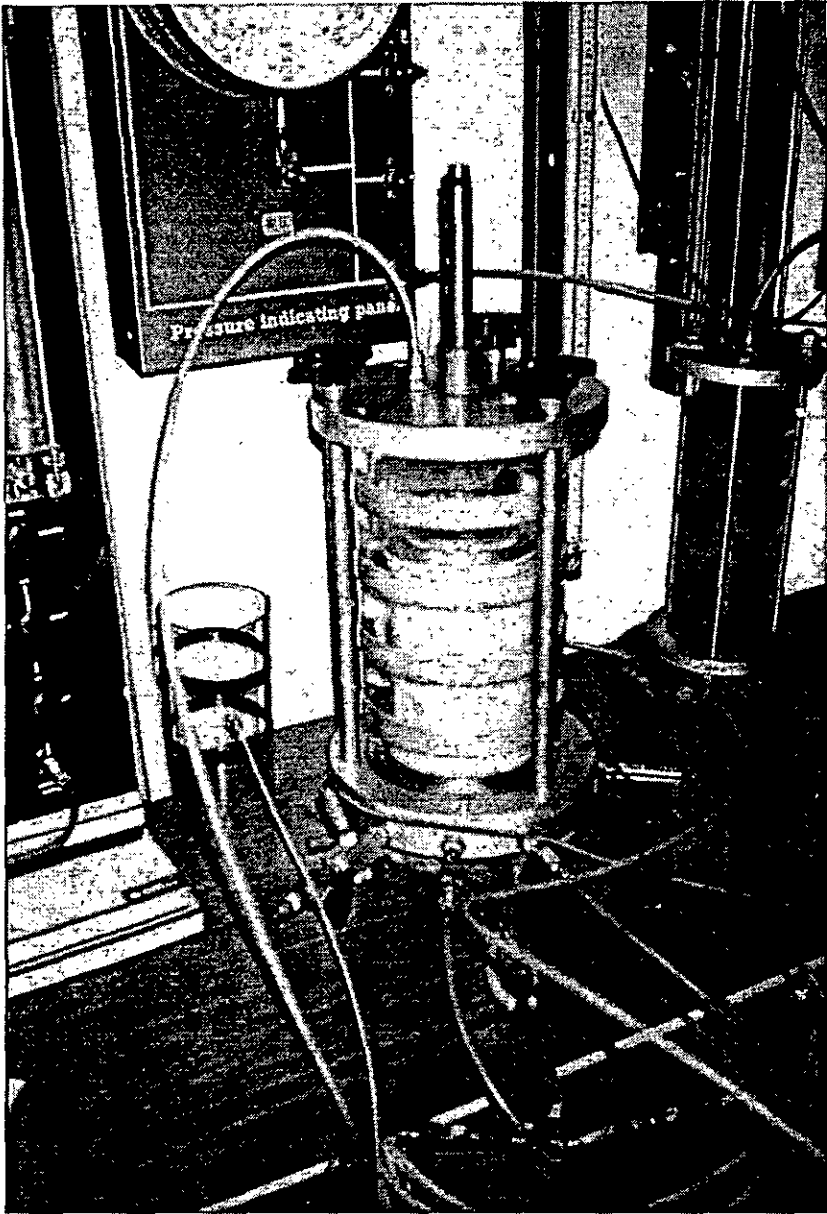


圖 5.2 透水試驗所用三軸室

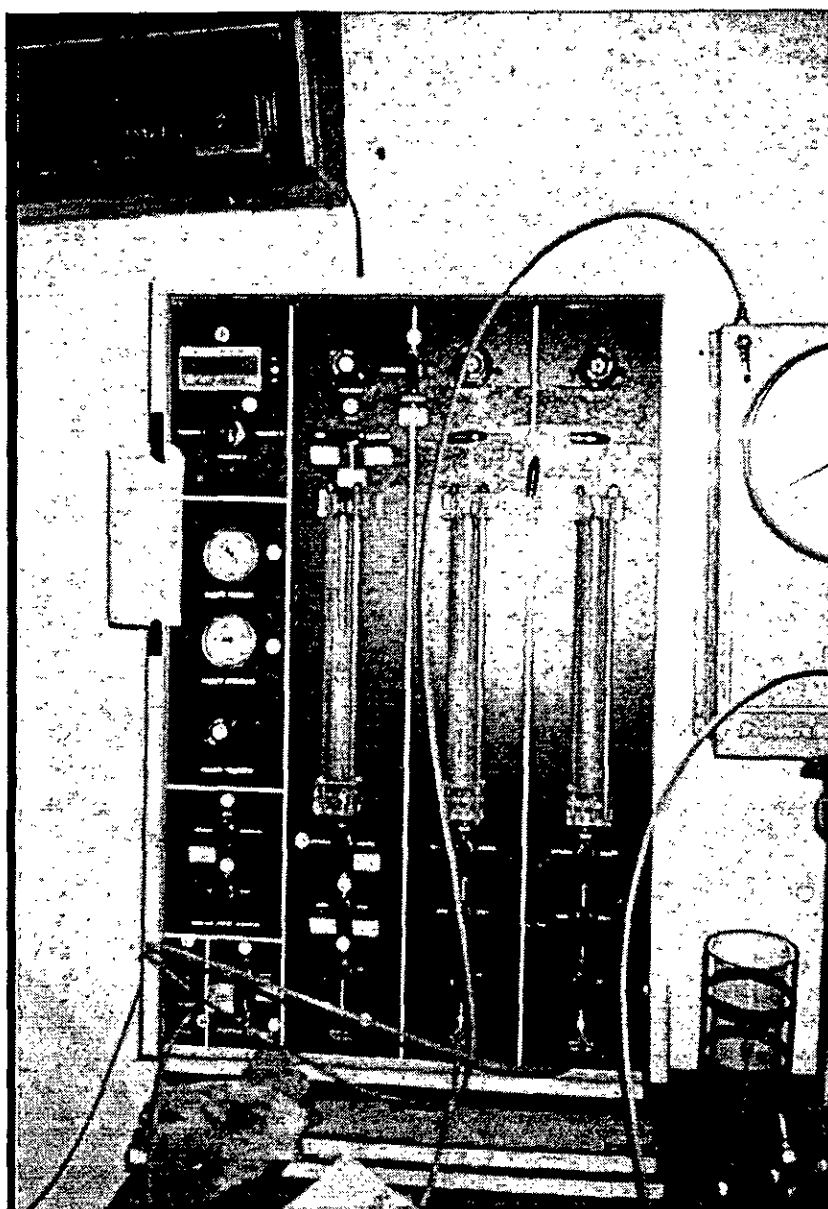


圖 5.3 Boart Longyear Permeability Panel

4 三軸壓密不排水試驗 (CIU-AC)

本試驗使用自動化擷取系統之三軸試驗儀器，採應變控制，應變速率為每分鐘 0.5%，進行壓密不排水-軸向壓縮試驗，試驗內容如表 4.1 所示。

其三軸試驗流程如下：

試體製作

試體的乾密度與含水量可由夯實試驗結果的最大乾密度與最佳含水量推求。在決定試體大小（直徑、高度）後，由上述資料計算試體所須乾土量及用水量。而其所需之用量，利用乾密度控制，分五層夯實之。

模具準備完之後便秤取之前所計算的土及水的用量，並將之分五層放入模具內進行夯實的工作。試體製作完成後，將模具拆除，進行試體的整修工作，利用刮刀將試體整平。

安裝試體

將橡皮膜套上試體鋼模，使用抽氣機使橡皮膜與鋼模內壁緊密貼合，放上透水石、濾紙及蓋板，套上橡皮環。將試體置於三軸室中，加圍壓，通以除氣水。

飽和與壓密試體

將試體給予適當圍壓進行飽和，因本試驗土壤屬於低滲透性之黏性土壤，需採用高壓飽和方式進行，放置 4 至 5 天，進行 B Check，B 值需能達到 0.93 以上。

於飽和完成後，將圍壓調至預定壓力，進行壓密步驟，其體積量測需趨於緩和沒有變化。飽和壓密階段約需一星期的時間。

受剪

飽和壓密完後，調整應變速率為每分鐘 0.5% 的試體高度。確認 LVDT、荷元、電腦資料擷取系統運作正常，即可開始剪動（如圖 5.4）。以直徑 3 in、高 4 in 試體為例，需時 50 分鐘。

表 5.1 三軸試驗內容

試體直徑 (inches)	輪胎碎片/土壤混合比 (%)	圍壓 (kPa)	數量 (個)
3	0	49.1、98.1、196.2	3
4	25、10	49.1、98.1、196.2	6
		總計 (個)	9

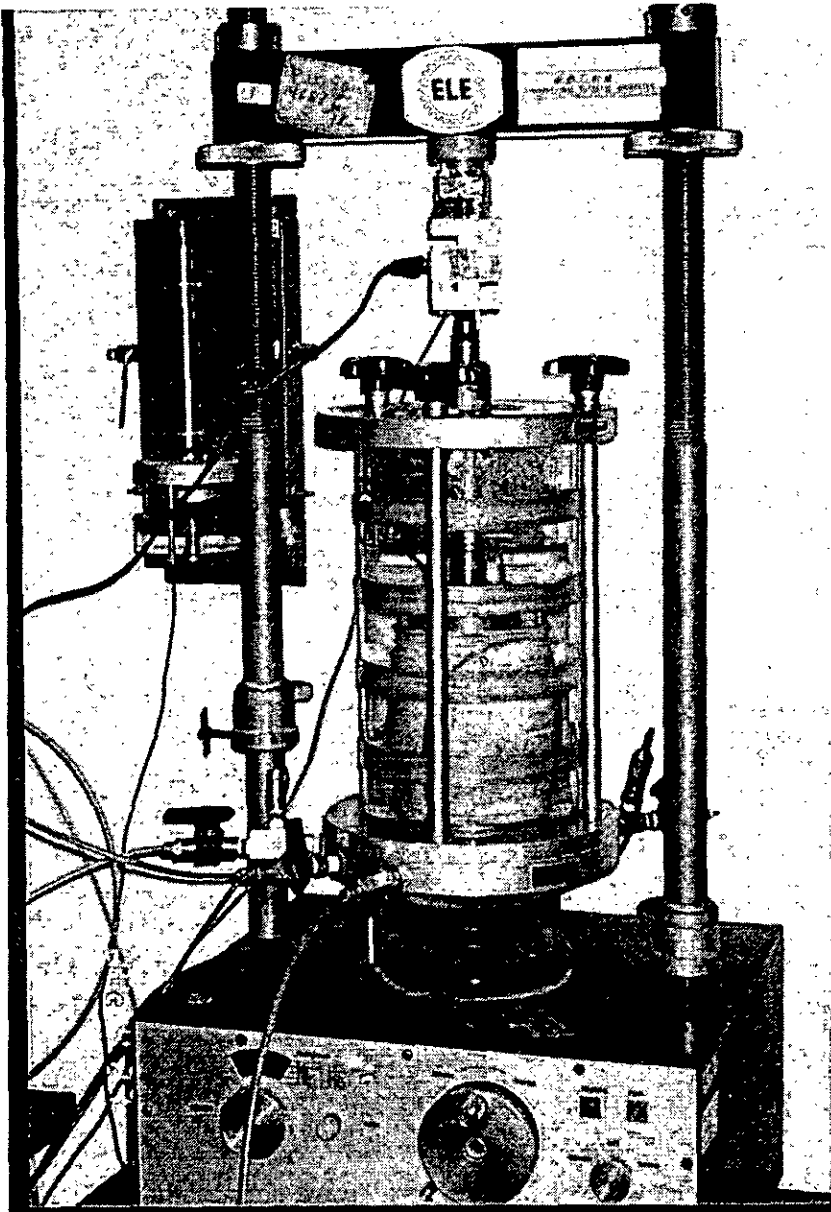


圖 5.4 三軸試驗裝置完成進行剪動階段

5.5 微應變往復式三軸試驗

本試驗採用步進馬達制動三軸儀進行應變控制之往復式三軸試驗，以決定試體極端變形量範圍在 $10^{-4}\%$ 至 2% 間，往復受載情況下之彈性模數與阻尼係數。共振柱試驗 (resonant column test) 或現地波速量測是傳統，決定大地工程材料動態彈性模數之方法。在進行這些試驗時大地工程材所受之應變量約在 $10^{-4}\%$ 左右。1980 年代初期，英國 Imperial College 研究群發展出三軸試驗局部應變 (local strain) 之量測技術 (Burland, 1989) 後，已能成功的在應變量小至 $10^{-4}\%$ 時為三軸試體量測應力應變關係。Toki et al. (1995)[35] 綜合過去十多年歐洲、美國及日本使用局部應變量測技術之經驗而提出充分之證據指出，只要應變量相以，大地工程材料之彈性模數不會因為靜態或動態受力而有所差別。Toki et al. (1995)[35] 因此建議，以應變控制之往復式三軸試驗完全的取代傳統共振柱試驗。使用三軸試驗之重要優點是我們可以用同一試體來決定所需應變範圍內之彈性模數與阻尼係數。共振柱試驗對試體所施加之應變通常小於 $10^{-1}\%$ ，在應變量大於 $10^{-1}\%$ 時則必須使用另一試體採用三軸試驗儀器，以不同之受力模式做試驗。因此當共振柱與三軸試驗混和使用時，有可能會在試驗方法改變時產生試驗數據不連續之現象。

本系列之試驗依據 Toki et al. (1995)[35] 之建議，採用交通大學大地工程試驗室自行研發之應變控制往復式三軸試驗裝置 (Huang et al., 1994)，進行所需之試驗而不使用共振柱試驗。三軸試驗裝置之加載系統是由一高解析度，高扭力之直驅步進馬達所組成。馬達之最大扭力為 220 N-m，每旋轉一圓周細分為 14,400 步，可由步進的數目、旋轉的方向與速度來控制馬達乃至於試體受力的方向與變形速率。由於此步進馬達扭力夠大而無須變速齒輪，馬達可直接透過高密度之滾珠螺桿 (ball screw) 將旋轉動能轉換成線性動能 (馬達每旋轉 5 圈，滾珠螺桿移動 25.4mm)，而提供往復式三軸試驗所需之動力。此一設計之重點在施力方向反轉時不會產生背隙 (backlash)，而每 1mm 之移動，使用本加載系

統可分成約 120,925 (614400×5/25.4) 步來控制，因此有足夠之解析度在所需之應變範圍內進行試驗。

三軸試體直徑 70 mm 高度 160 mm，使用夾具分別將兩組非接觸式趨近儀 (non-contact proximator) 與兩組三軸室內 LVDT 固定於三軸試體上，做局部應變量測，如圖 5.5 所示。所使用之非接觸式趨近儀量測範圍 2 mm，解析度在 0.1 μm (10⁻⁶ mm) 以下。室內 LVDT 試體之量測範圍 4 mm，解析度 5 μm。軸向受力採用三軸室內，最大量測範圍 400 kg 之載重元來量測，軸向變形同時也使用安置於三軸室外，最大量測範圍 50 mm，解析度 0.05 mm 之位移轉換器 (LVDT)。三軸試體之製作，乾密度、含水量以及飽和程序與前述三軸壓密不排水試驗相同。試體在飽和壓密完成之後將連接試體之排水閥關閉 (不排水試驗)，於設定之應變範圍內以 1Hz 之速率往復受載 20 來回。試體之彈性模數與阻尼係數是根據往復受載達到穩定情況下 (20 來回受載後期) 所得之應力應變曲線環 (stress-strain loop) 來計算。因為三軸試驗是採用軸向之往復受載，所求得之彈性模數稱之為對應楊式模數 (equivalent Young's modulus, E_{eq})，如圖 5.6 所示。

$$E_{eq} = \frac{(\sigma'_a - \sigma'_c)}{(\varepsilon_a)_{SA}} \quad (5.1)$$

其中：

σ'_a = 三軸試體所受之軸向有效應力

SA 指的是單向波幅 (single amplitude)，也就是往復應變最大應變幅度 (從極限壓力到極限張力) 之一半。阻尼係數 (damping ratio, h) 之計算為

$$h = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W1 + W2} \quad (5.2)$$

其中：

ΔW 、 $W1$ 、與 $W2$ 之定義如圖 5.6 所示。

一般在處理彈性模數與應變關係時，大多以剪力模數與剪應變來表示，因此本系列之試驗中所量測得到之 E_{eq} 與軸向應變 (ε_a) 將以下式分別轉換為對應剪力模數 (equivalent shear modulus, G_{eq}) 與剪應變 (γ):

$$G_{eq} = \frac{E_{eq}}{2(1+\nu)} \quad (5.3)$$

$$\gamma = (1+\nu)\varepsilon_a \quad (5.4)$$

其中：

ν = 土壤試體之柏松比，在飽和不排水狀況下假設為 0.5

在往復試驗完成之後將排水閥打開，讓超額孔隙水壓回復平衡，然後進行下一應變範圍之試驗。每一試體使用 3 至 4 種應變範圍做往復式三軸試驗。

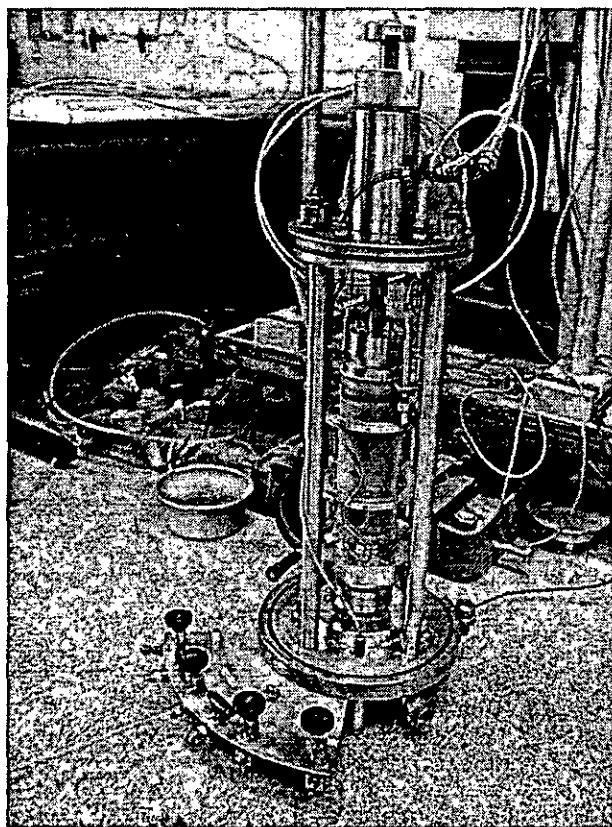


圖 5.5 三軸試體之局部應變量測

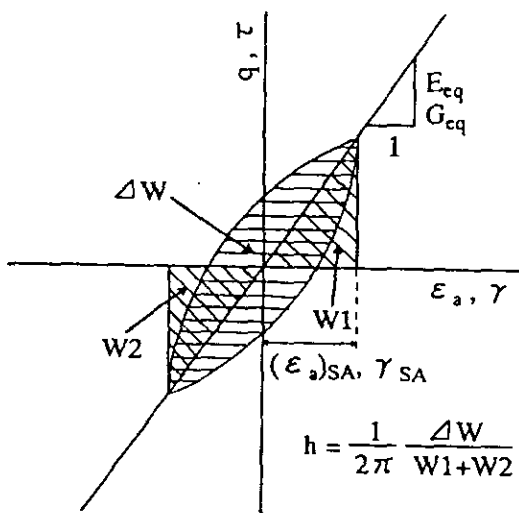


圖 5.6 對應楊氏模數與阻尼係數之計算

5.6 直接剪力試驗

本試驗採用符合 ASTM D5321 之大型直接剪力試驗儀 (如圖 5.7)。剪力盒尺寸最大為 45cm × 45cm，為進行試樣尺寸對直剪試驗影響之研究，根據不同試驗配置不同尺寸之剪力盒 (45cm × 45cm、20cm × 20cm)，而上下剪力盒之高度均為 10cm，材質則為高碳鋼 H 型梁，其具有質輕與堅硬之特點。

試驗方法為將土壤或土壤摻廢輪胎碎片的混合物置於直剪盒中，依據所需夯實度，採用震動夯實器，將試體夯實至指定高度。因考量夯實度為 90% 的試體，其 45 公分*45 公分之夯實能量施加不易，因此採用夯實度為 80% 作為試驗依據。試驗過程中所施加的正向應力主要由一個油壓荷重系統所供應的，此油壓系統組件包括一個油壓幫浦及一個垂直方向施力的油壓千斤頂，最大出力可達到 5 噸。其施加正向應力的方式為事先經由兩側的垂直連桿將垂直力以點荷重方式施加至承壓板，再經由承壓板將正向應力傳遞至土壤試體上，本試驗設計之正向應力大小為 49.1kPa、98.1kPa、196.2kPa，施加之作用力最大達 4 噸。水平剪動力則是由一組 220 伏特的電動馬達所供應。最大功率為 3.75Kw，轉速最高可達 750RPM，剪動速率範圍為 0.4mm/min~6mm/min。一般在操作直剪試驗時，所施加的正向應力均是透過一剛性承壓板將其均佈在受剪的試體，但是當承壓板與土壤試體的接觸面不平整時，則受剪試體會受有受力不平均之情形產生，於是隨著正向應力的施加，其差異沉陷也就越大，有鑑於此，為保持正向力均勻的作用在試體上，因此採用柔性承壓板傳遞應力(如圖 5.8)。此外試體在受剪時其土壤顆粒會擠壓重新排列，需施加更大的正向力抵抗其上升，因此力量控制要保持定值不易，以致試驗易發生誤差。本試驗正向力為 49.1kPa 時考慮儀器在較小荷重下之精度而採用呆載重方式施加應力，最後將剪動速率調整至為 1mm/min 進行試驗。試驗內容如表 5.2 所示。

表 5.2 直接剪力試驗內容

試體尺寸 (cm)	輪胎碎片尺寸	輪胎碎片/土壤混 合比(%)	垂直應力 (kPa)	數量 (個)
20X20	最大粒徑 1cm 的顆 粒狀碎片	10、25、50	49.1、98.1、196.2	9
20X20	-	0	49.1、98.1、196.2	3
45X45	1cm	10、25	49.1、98.1、196.2	6
			總計 (個)	18

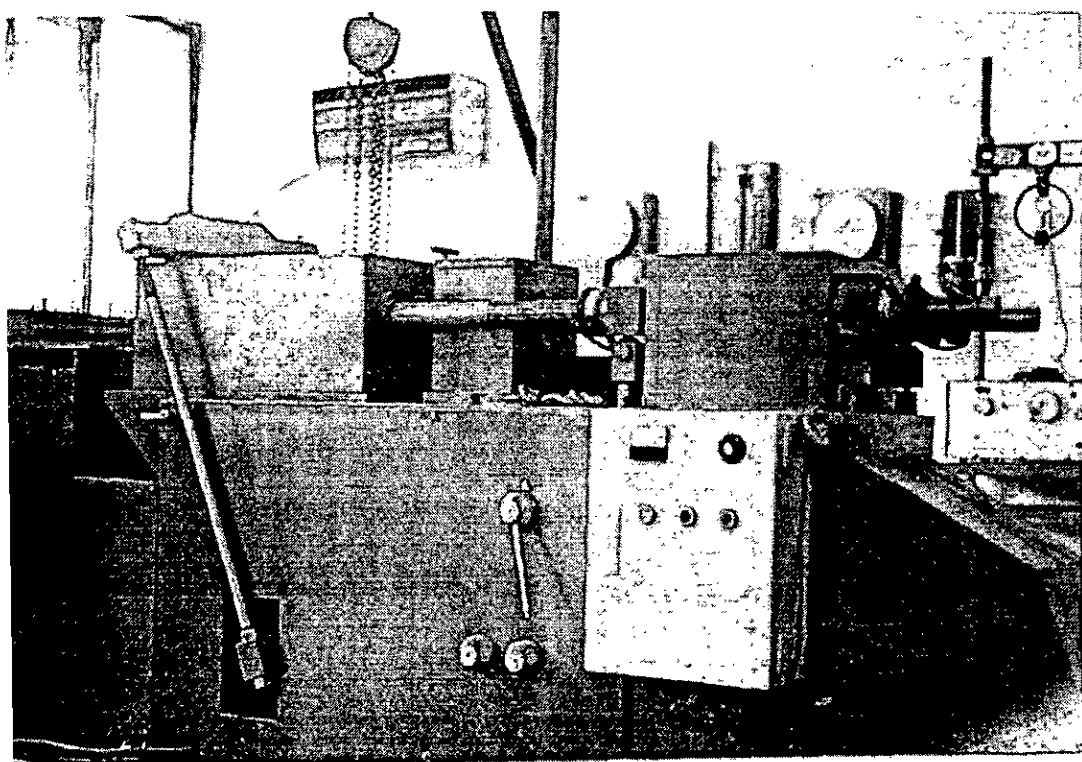


圖 5.7 大型直接剪力試驗儀

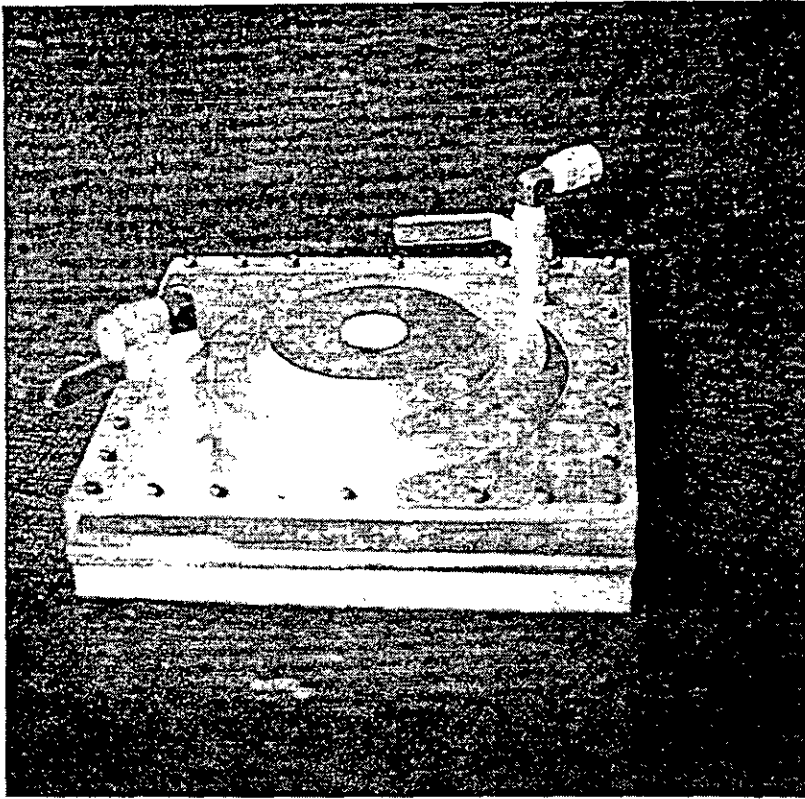


圖 5.8 柔性承壓板

5.7 土堤現地觀測

5.7.1 沈陷量之觀測

由於廢輪胎碎片具壓縮性，及在夯實重機械作用下部分倍力擋土牆有橫向位移之跡象，因此對於採用廢輪胎碎片與土工複合材料混合土壤興建的路堤其長期穩定性，有待後續研究觀察。本研究定期於現地作測量，觀察其高程變化。

5.7.2 濾水分析

廢輪胎之主要成分為可燃性之碳氫化合物，因此廢輪胎碎片之使用必須注重防火。同時廢輪胎常含有鋼絲和其他之有機化合物，若將廢輪胎碎片埋入地中，濾出液對土壤與地下水可能產生之污染也必須加以了解。計畫自廢輪胎碎片與

建之實體土堤中長期收集濾水進行水質分析，分析土堤濾水酸鹼值、重金屬及有害物質之濃度，以判定廢輪胎濾水對環境之衝擊。本計劃興建之土堤於國立屏東科技大學，屏東地區全年少雨，氣候炎熱因此取水量不多，取得的濾水送至屏東科技大學環境工程與科學系環境科技服務中心檢驗。本研究每季於現地取水檢驗，觀察水質變化。

5.7.3 溫度變化量測

廢輪胎碎片為可燃物，如需於本國大量應用廢輪胎碎片興建土堤，需具備本土化資訊，本案計畫擬對實體廢輪胎土堤長期觀測土堤內廢輪胎溫度之變化，以確保後續應用之安全性。為了解廢輪胎碎片公路土堤內部溫度之變化，須埋設適當量測裝置，以便長期監測分析。試驗規劃為請鑽探公司依設計之埋設位置、深度鑽孔(如圖 5.9 所示)。因北面土堤有土工格網鋪設，鑽孔位置靠近南面土堤。S1~S6 鑽孔平均分散，避免集中於一段。

S1~S6 為現地黏土層，採用標準貫入試驗的敲擊方式鑽孔(如圖 5.10 所示)，S6 之後因有廢輪胎層，利用敲擊方式有明顯的回彈作用，更改為沖洗鑽探法鑽孔(如圖 5.11 所示)。因廢輪胎碎片具有鋼絲，在鑽掘過程中極為困難、緩慢，且有高溫的現象。

鑽孔完成後，將兩英吋 PVC 管打入該深度位置，再將包覆布料的較小尺寸量測管，裝入 PVC 管中，裝置溫度計於管中預留抽線置於管外，蓋住開口完成。量測方法為將末端安裝有溫度計的內管抽出，記錄溫度計數據即可。本研究每季於現地量測溫度，觀察溫度變化。

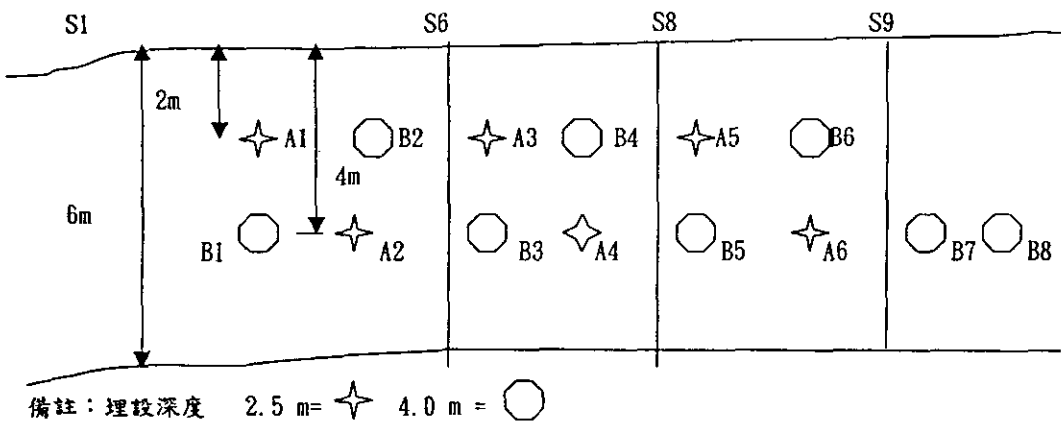


圖 5.9 溫度量測現地孔位圖

1. S1~S6：完全由現地土壤回填。
2. S6~S8：在 100 公分土壤覆蓋層之下方採用層狀回填方式 (30 公分厚輪胎碎片和 30 公分厚粘土互層)。
3. S8~S9：在 100 公分土壤覆蓋層下方回填 400 公分厚之輪胎碎片。
4. S9~S10：在 200 公分土壤覆蓋層下方回填 300 公分厚之輪胎碎片。

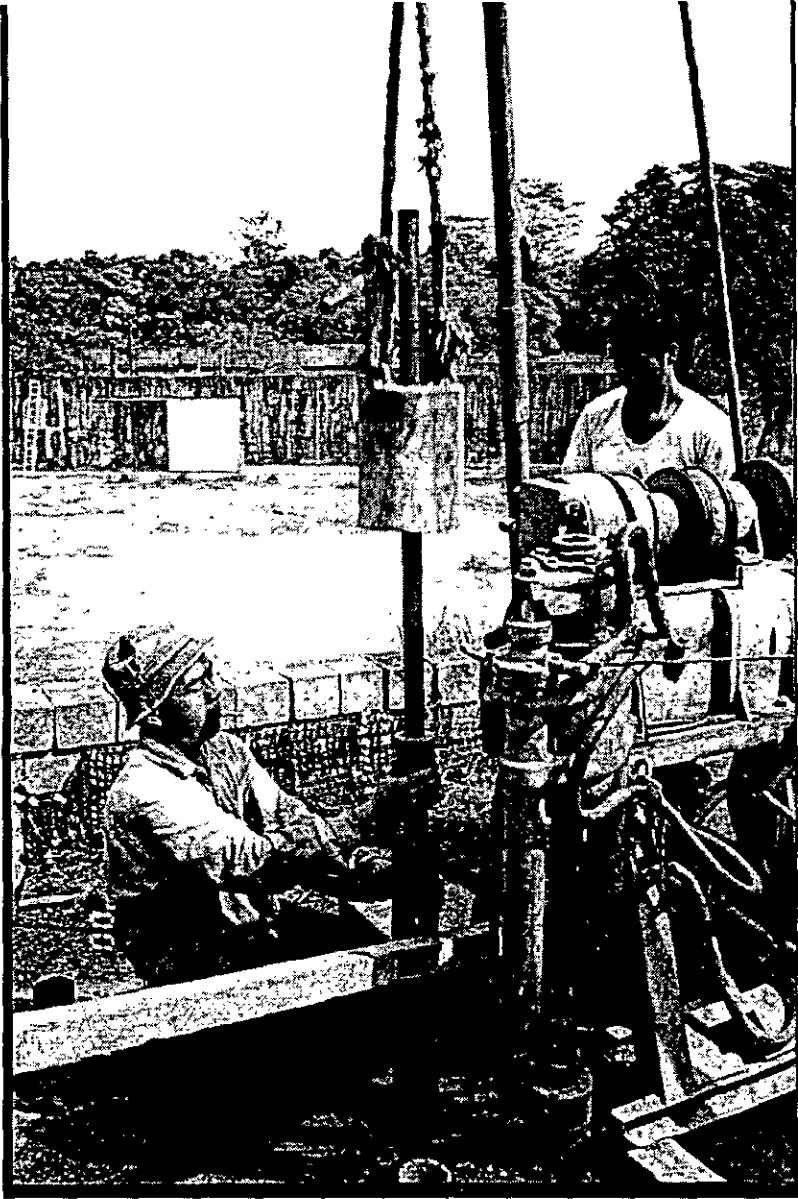


圖 5.10 敲擊方式鑽孔



圖 5.11 沖洗鑽探法鑽孔

第六章 試驗結果及討論

現階段試驗完成之室內試驗項目包括材料之基本物理性質試驗（粒徑分析試驗、比重試驗、阿太保限度試驗與夯實試驗），壓縮性試驗、透水試驗、三軸密不排水試驗、微應變往復式三軸試驗及大型直接剪力試驗。

現地觀測部分則已經進行七次高程變化量測與三次濾水分析及多次的溫觀測。

1 室內試驗

1.1 現地土壤之基本物理性質

如圖 6.1 所示為現地取樣土壤之粒徑分佈圖，通過 4 號篩的部分約佔約現取樣土壤的 98%，因此以通過 4 號篩的土壤操作試驗應足以反應現地狀態。照土壤粒徑分析試驗法結果，根據統一土壤分類法可將其分類為 CL。

通過 200 號篩的部分約佔約通過 4 號篩的土壤的 80%，其 D_{50} 為 0.08mm。阿太保限度試驗試驗結果，液性限度為 35.9%、塑性限度為 16.3%。

土壤比重試驗結果顯示，土壤之比重為 2.64；對照廢輪胎碎片的比重為 1.2，可看出廢輪胎碎片比重小於土壤之二分之一。

如圖 6.2 及 6.3 為 Chip Ratio= 10%、25%之粒徑分佈曲線，廢輪胎碎片之最大粒徑大小於 4.75mm。

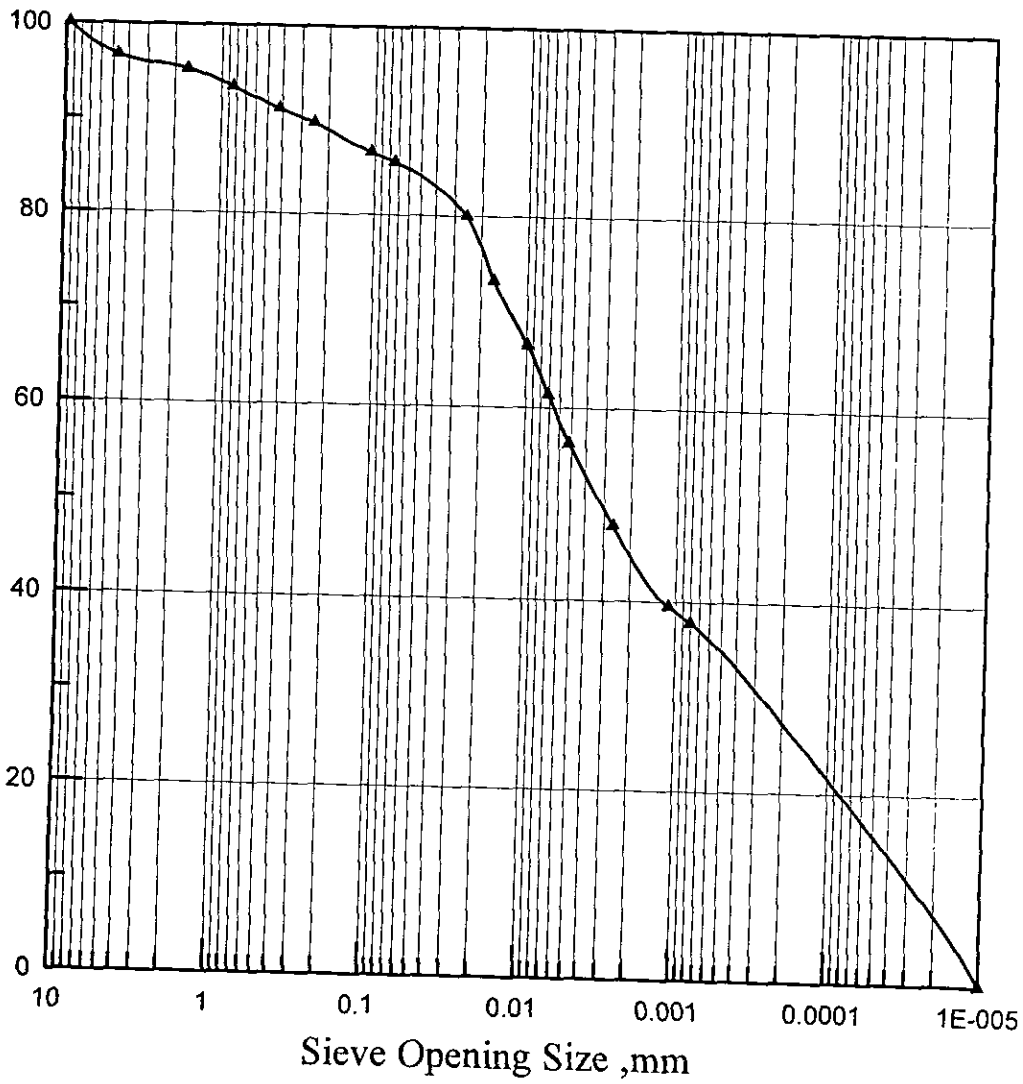


圖 6.1 現地取樣土壤之粒徑分佈圖

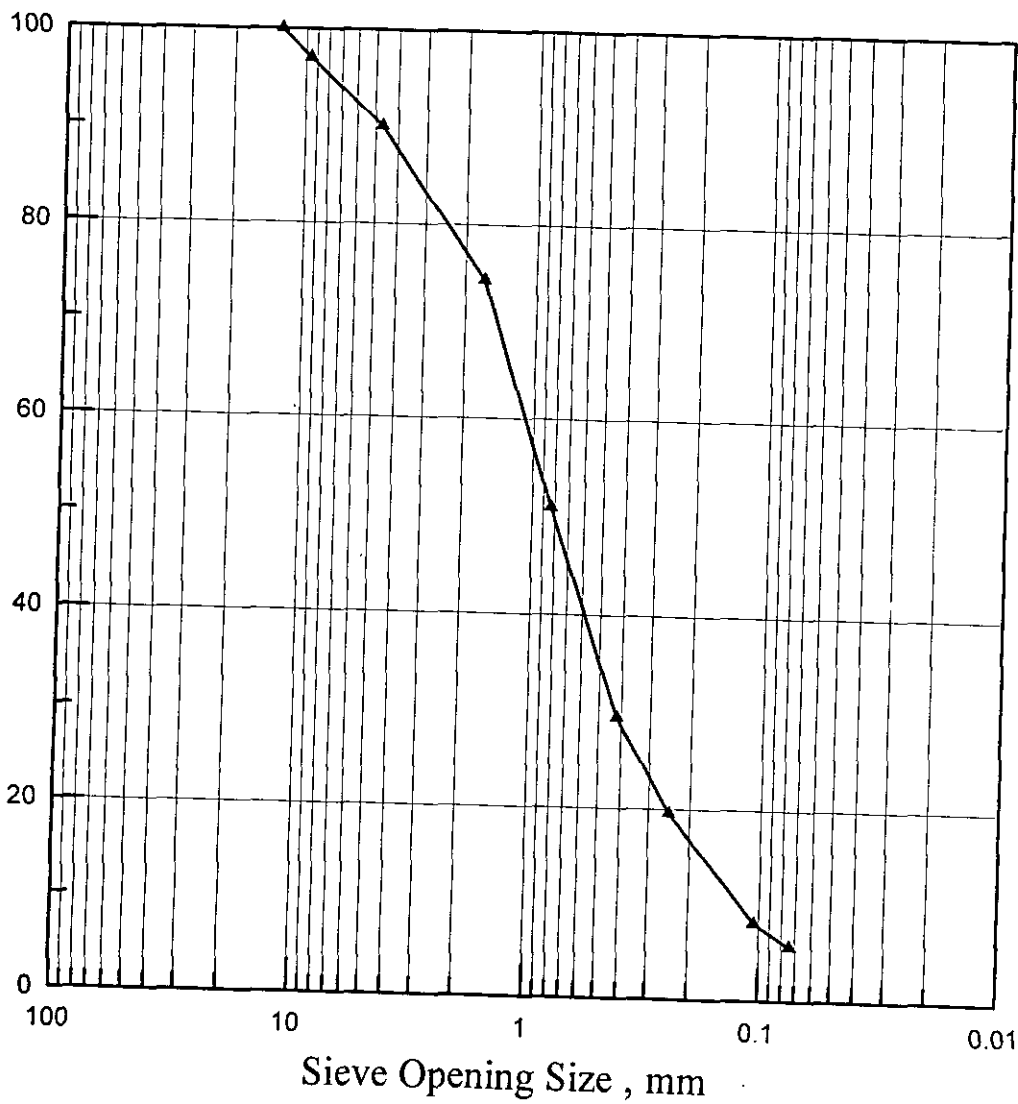


圖 6.2 Chip Ratio=10%之粒徑分佈圖

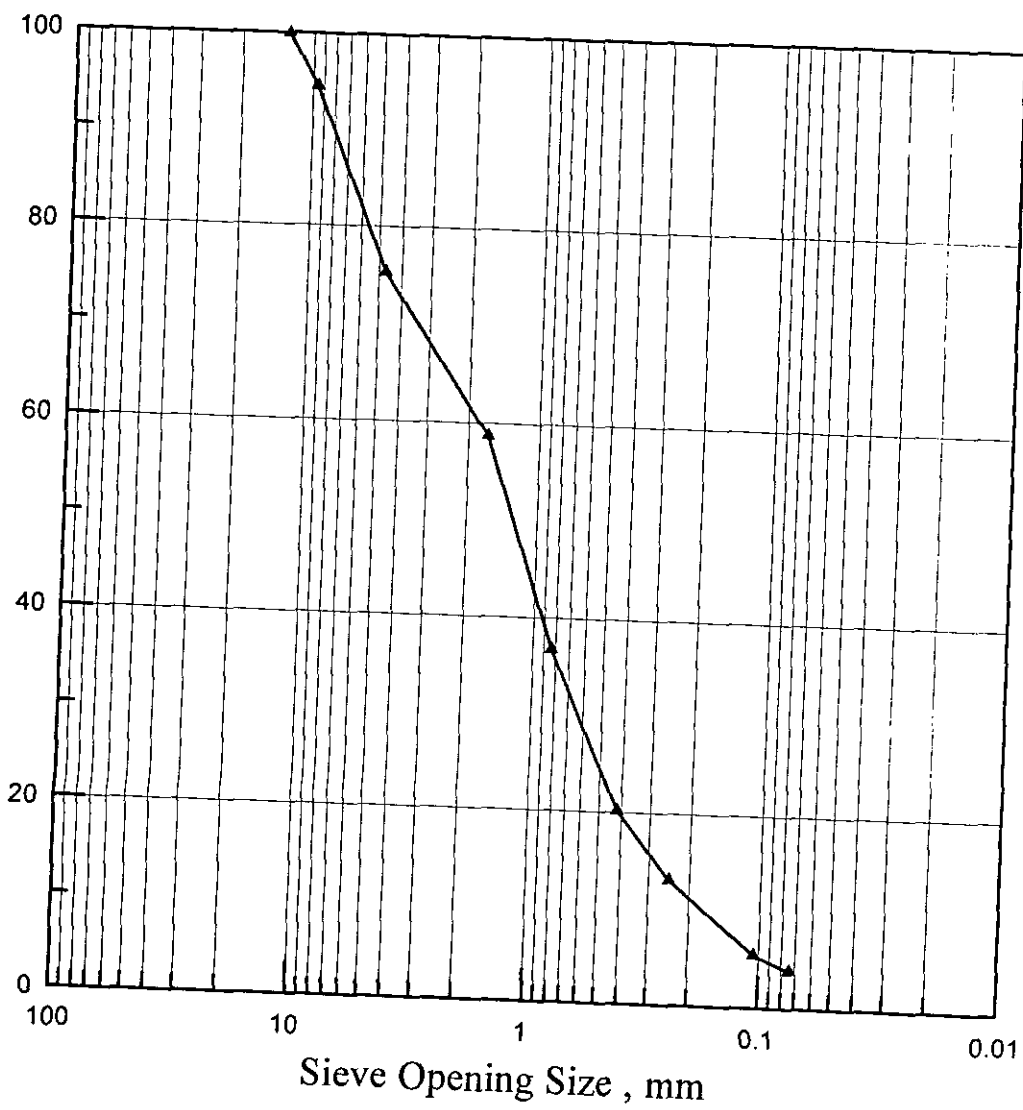


圖 6.3 Chip Ratio=25%之粒徑分佈圖

6.1.2 夯實試驗

本研究以廢輪胎碎片為最大粒徑 1cm 的顆粒狀碎片搭配四種混合比 (0、10%、25%、50%) 進行夯實試驗。其結果可供三軸、直剪試驗及往復式三軸試驗試體製作之夯實度參考。試驗結果如表 6.1 與圖 6.4 所示。

如表 6.1 所示因輪胎碎片不吸水，其最佳含水量是由現地土壤決定，隨著混合比的增加，最佳含水量也隨之減少。當混合比=50%時，最佳含水量明顯的減少至 17%，而最大乾密度隨著混合比增加而明顯減少至 1.17 g/cm^3 。顯示在相同的夯實能量之下，摻有廢輪胎碎片的土壤，可獲得較小的單位重，因此適合做為輕質回填材料之選擇。

表 6.1 夯實試驗結果

混合比 (%)	最大乾密度 (g/cm^3)	最佳含水量 (%)
0	1.640	22.8
10	1.518	22.1
25	1.372	20.5
50	1.178	17.0

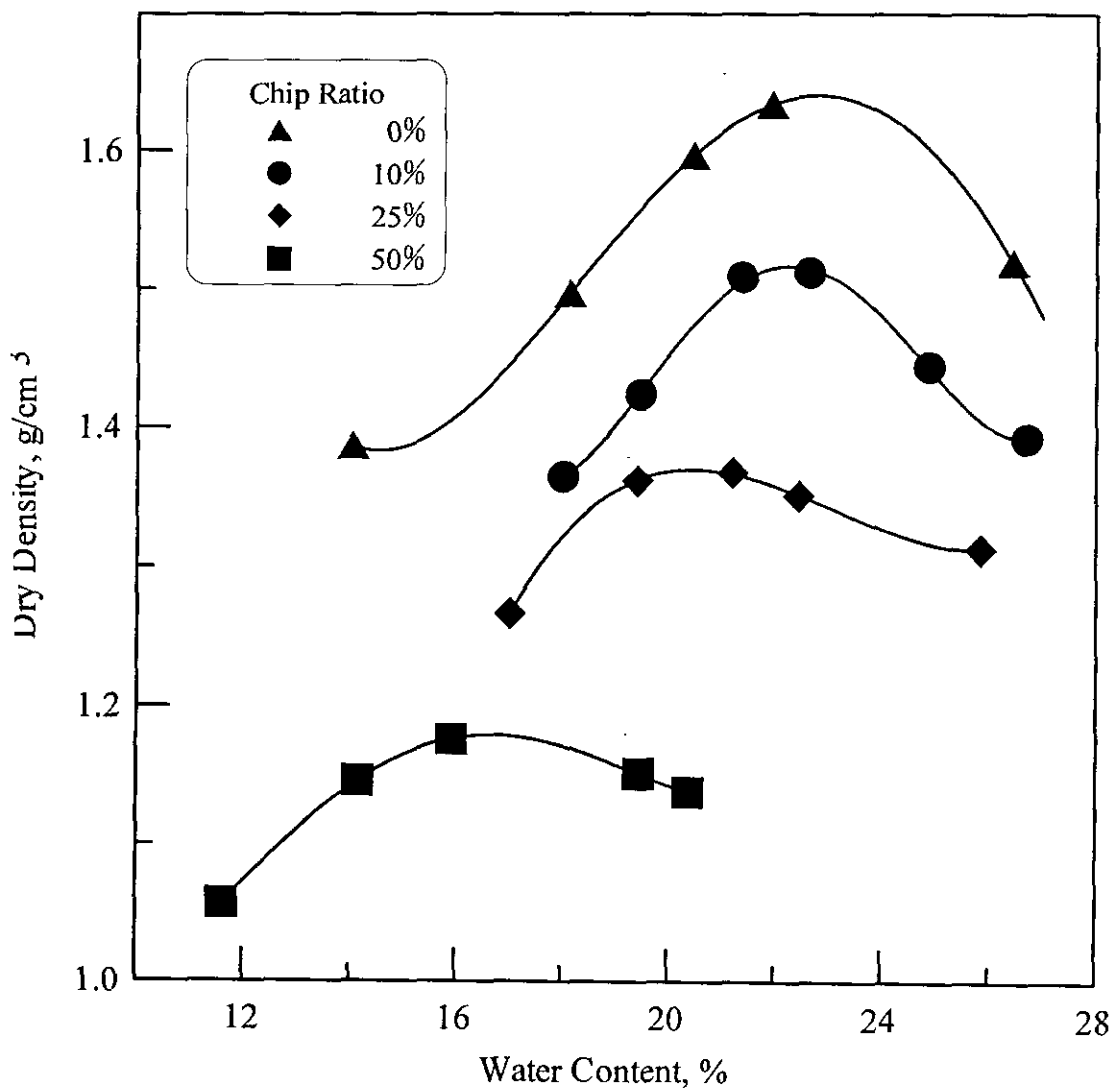


圖 6.4 各混合比之夯實試驗結果

5.1.3 壓縮性試驗

本試驗最大加載荷重採應力控制試驗，試體壓縮最大受力為 5 噸。在 100% 純廢輪胎碎片時，因其孔隙比較大，在較小載重下即已經達到很大之變形量，因此採應變控制為 40%，其試驗結果如圖 6.5~6.8 所示。

由試驗結果可知，主要變形量均在第一循環載重，添加廢輪胎碎片會增加其塑性變形範圍，若為純廢輪胎其壓縮變形量更為可觀，因此需添加土壤減少塑性變形。

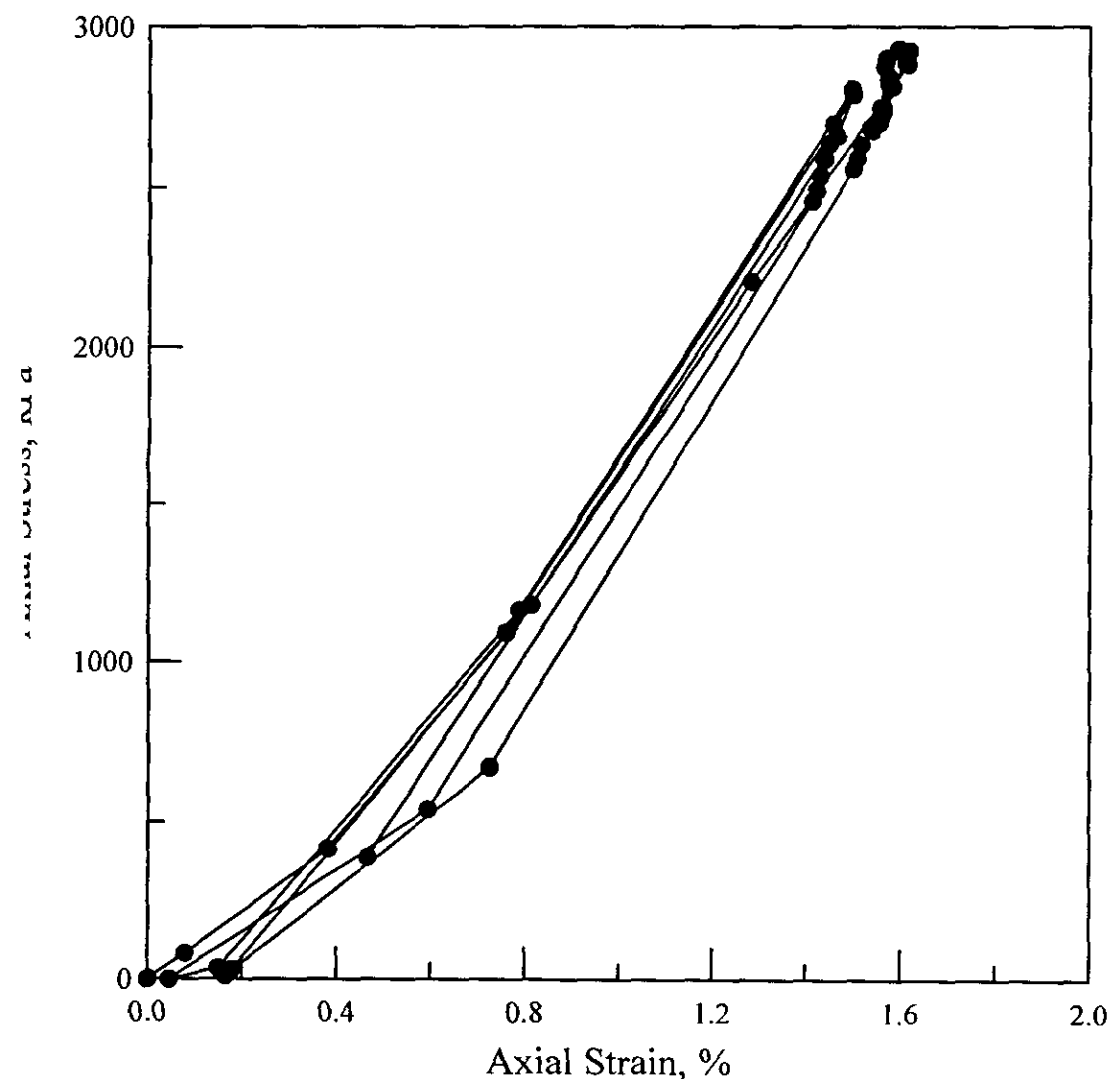


圖 6.5 Chip Ratio = 0%之壓縮性試驗

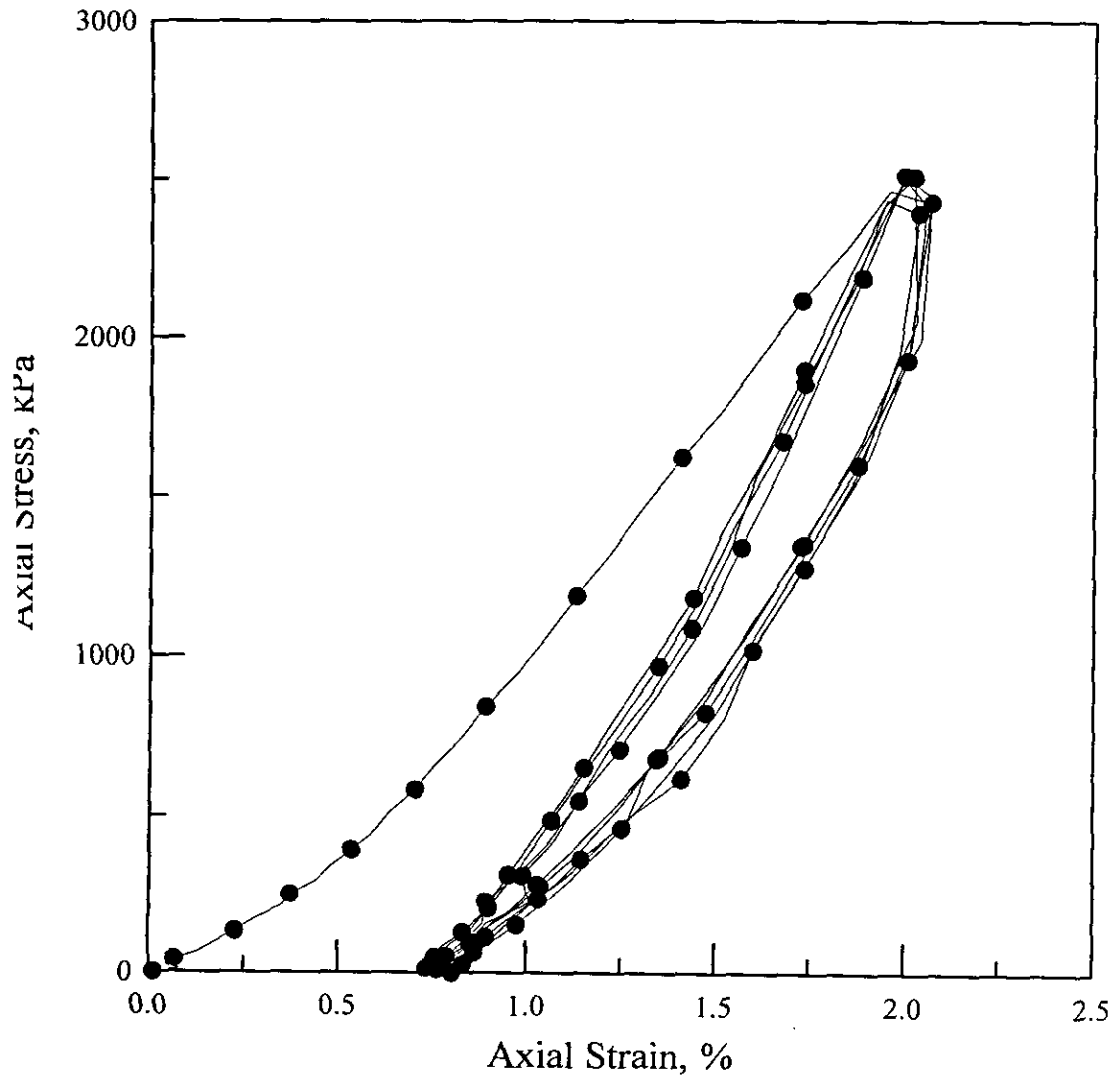


圖 6.6 Chip Ratio = 10%之壓縮性試驗

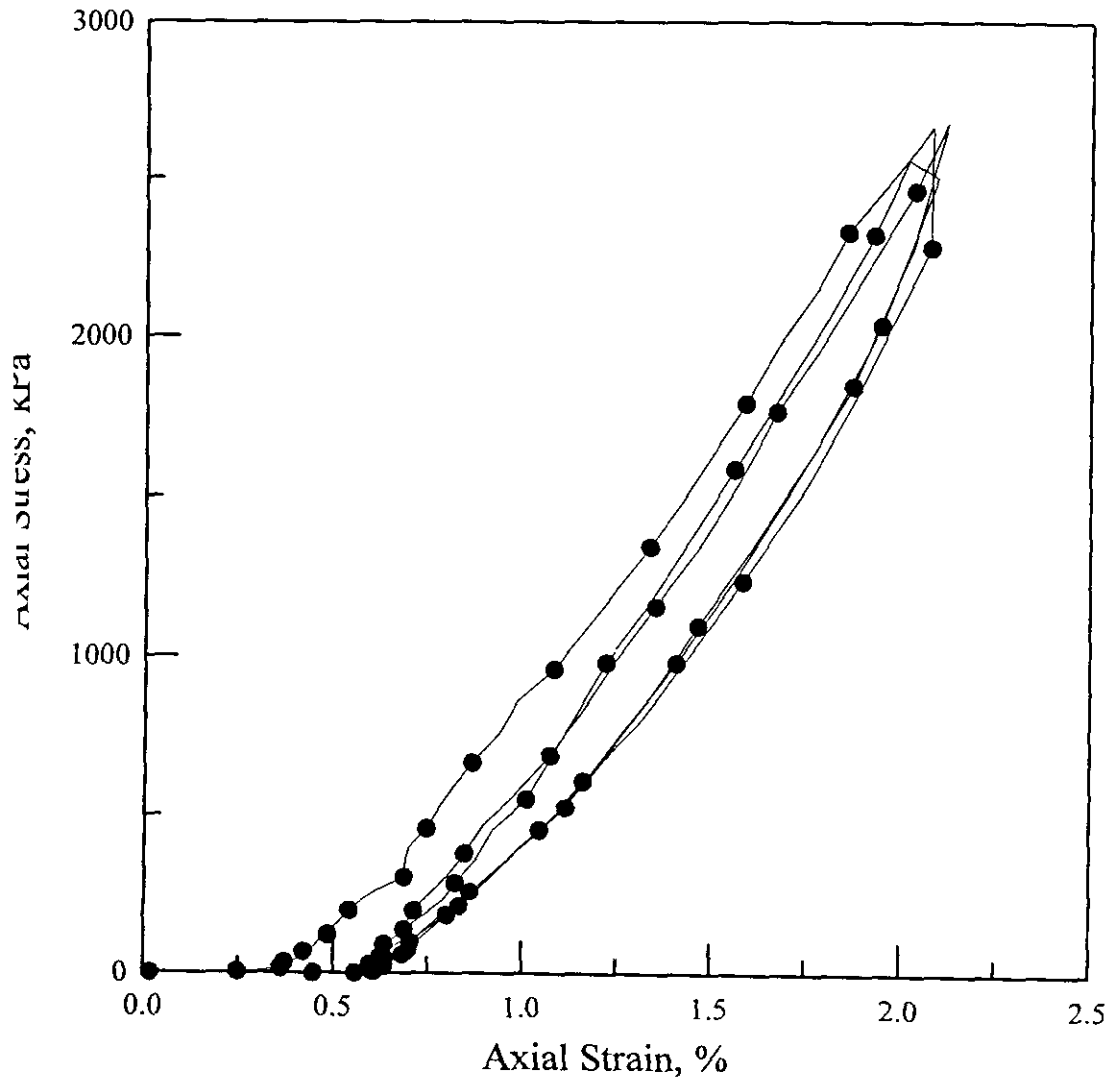


圖 6.7 Chip Ratio = 25%之壓縮性試驗

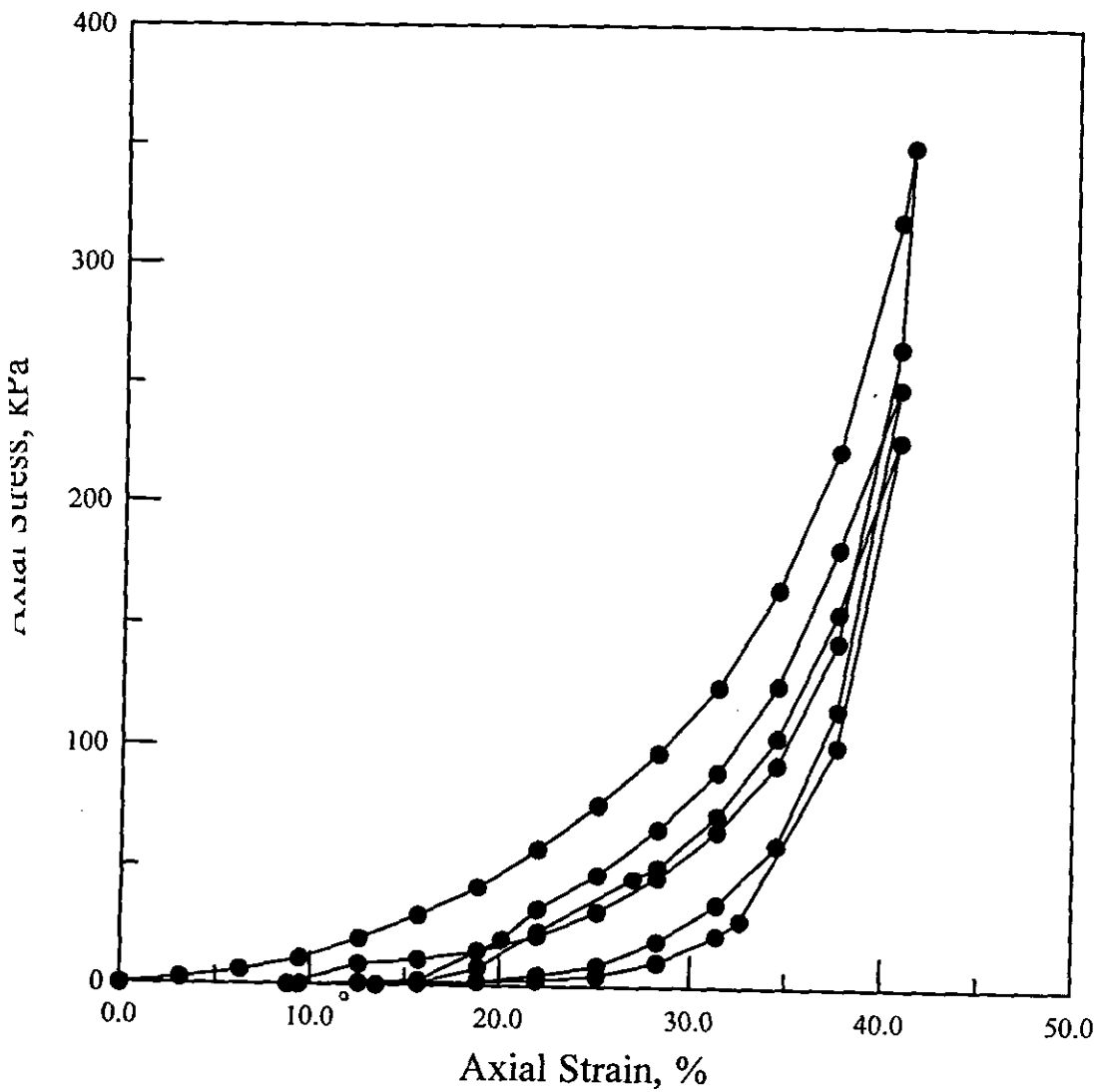


圖 6.8 Chip Ratio = 100%之壓縮性試驗

4 透水試驗

透水試驗結果列於表 6.2，圍壓與滲透係數關係如圖 6.9 所示。在圍壓增加形下，試體趨於緊密，試體的滲透係數隨之降低。比較不同圍壓下廢輪胎含量與滲透係數變化情形，在廢輪胎碎片含量越多的情形下，試體之滲透越高。

表 6.2 滲透試驗結果

K, cm/s	圍壓	49.1kPa	98.1kPa	196.2kPa
		Chip Ratio		
0%		1.10E-07	8.40E-08	1.10E-08
10%		3.00E-07	2.59E-07	1.59E-07
25%		6.09E-07	5.25E-07	4.76E-07

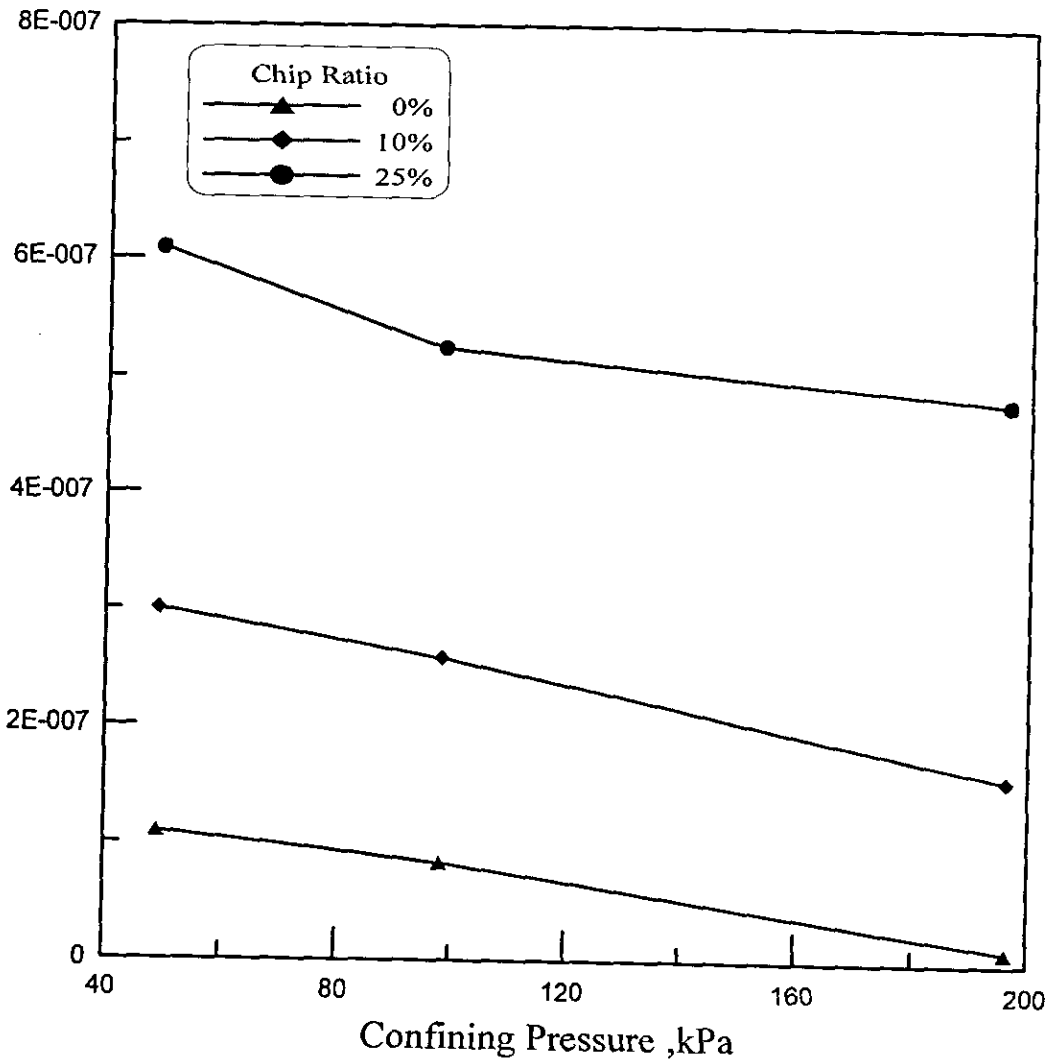


圖 6.9 不同混合比之圍壓與滲透係數關係圖

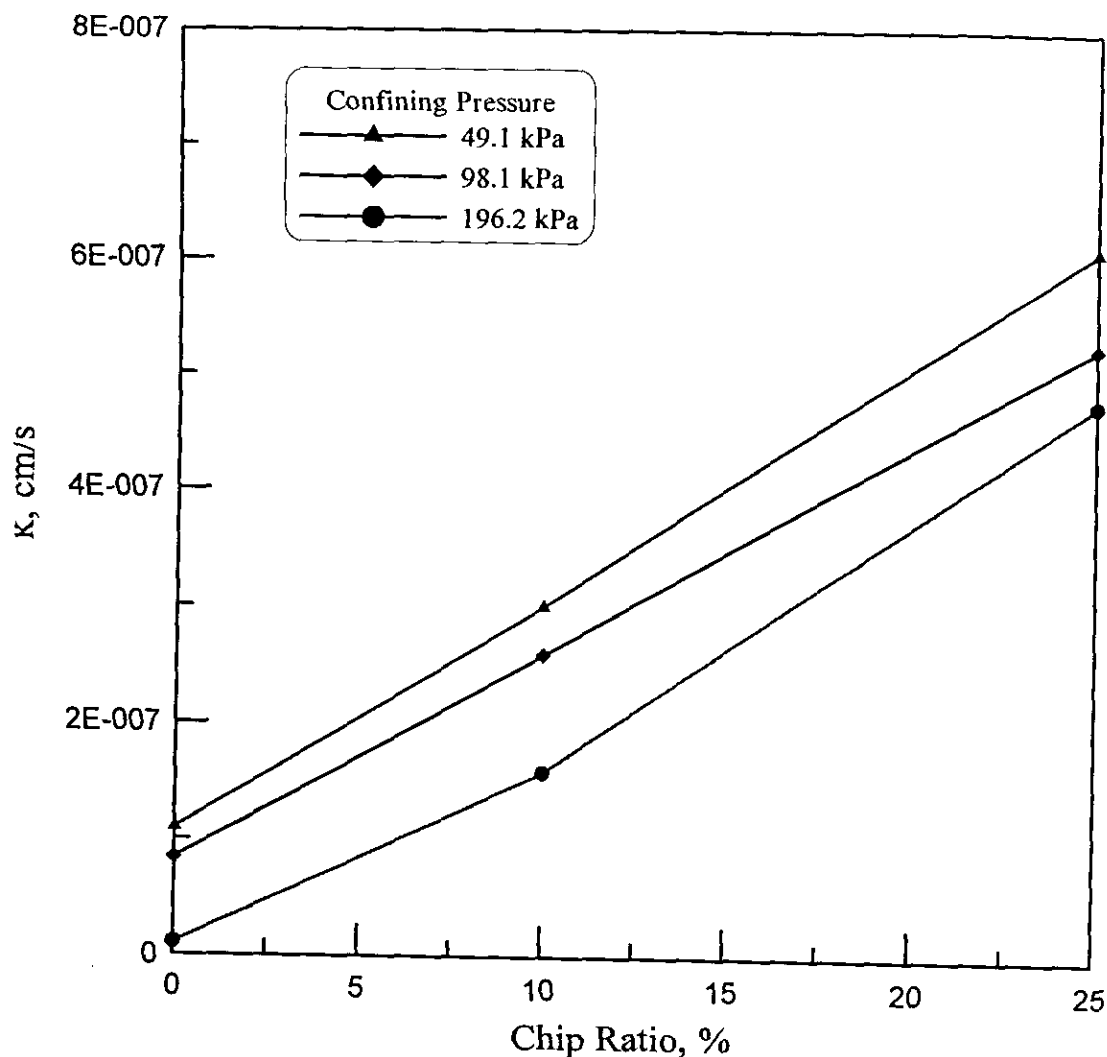


圖 6.10 不同圍壓下混合比與滲透係數關係圖

6.5 三軸壓密不排水試驗 (CIU-AC)

本試驗將試體製作為 98% 的最大乾密度與夯實曲線乾側相對的含水量狀況，分五層夯實，飽和時間約一星期，進行 B Check，B 值需能達到 0.93 以上。然後施加圍壓至預定壓力，壓密一至二天，觀察其體積變化趨於穩定，則開始作不排水之剪動，結果如圖所示。此外將記錄之軸差應力及孔隙水壓資料整理繪製成軸差應力-應變與超額孔隙水壓-應變曲線有效應力路徑圖，如圖 6-16 所示， c' 及 ϕ' 如表 6.3。

在混合比 = 0% 之純黏土三軸壓密不排水試驗結果，試驗其初始軸差應力 (deviator stress) 隨軸向應變量而急遽增加，圍壓為 49.1 kPa 及 98.1 kPa 時，向應變量約為 8% 時即進入高原狀態 (plateau state)，屬應變硬化之現象。

而超額孔隙水壓 (excess pore water pressure) 則在約 3% 的軸向應變量時由初始的正值轉換為負值 (如圖 6.11 所示), 顯示其體積有先產生收縮然後膨脹之現象。

圖 6.12 及圖 6.13 為混合比 = 10% 及 25% 之三軸壓密不排水試驗在三種圍壓狀態下的試驗結果, 其軸差應力皆隨軸向應變量的增加而逐漸增加, 10% 混合比之曲線直至軸向應變量達 22% 以上, 才減緩上升的趨勢, 此點與 Masad et al. (1996) 將渥太華砂與廢輪胎碎片混合進行三軸壓密排水試驗所獲致之結論相合, 當混合比為 25% 時其應力應變曲線更為陡峭, 顯示其有較高之勁度, 甚至「尖峰值」出現, 並進入殘餘強度區。而在含有廢輪胎之孔隙水壓變化方面, 其超額孔隙水壓在低圍壓下之發展趨勢亦如同純黏土夯實試體一般, 由初始之正值轉換為負值, 顯示其體積亦是有先產生收縮然後膨脹之現象, 而其餘的超額孔隙水壓皆剛開始直趨上升, 然後在慢慢消滅, 但仍為正值, 其表示含有廢輪胎碎片之混合試體體積持續受壓縮變化, 產生正的超額孔隙水壓, 隨著時間慢慢消退。

表 6.3 顯示有效摩擦角及凝聚力隨混合比之不同而有明顯的變化。混合比 25% 之夯實試體具有較混合比 = 0% 與 10% 為高的摩擦角 ($\phi' = 39.0^\circ$), 其抗強度遠較混合比 = 0% 與 10% 為高。而在 10% 混合比時摩擦角明顯的下降, 於混合比 = 0% 時之情況, 顯示適度的摻雜廢輪胎碎片確實可以提高土壤的剪強度。

表 6.3 三軸壓密不排水試驗之有效摩擦角及凝聚力

Chip Ratio	C' (kPa)	ϕ' ($^\circ$)
0%	12.6	32.8
10%	29.0	21.8
25%	12.6	39.0

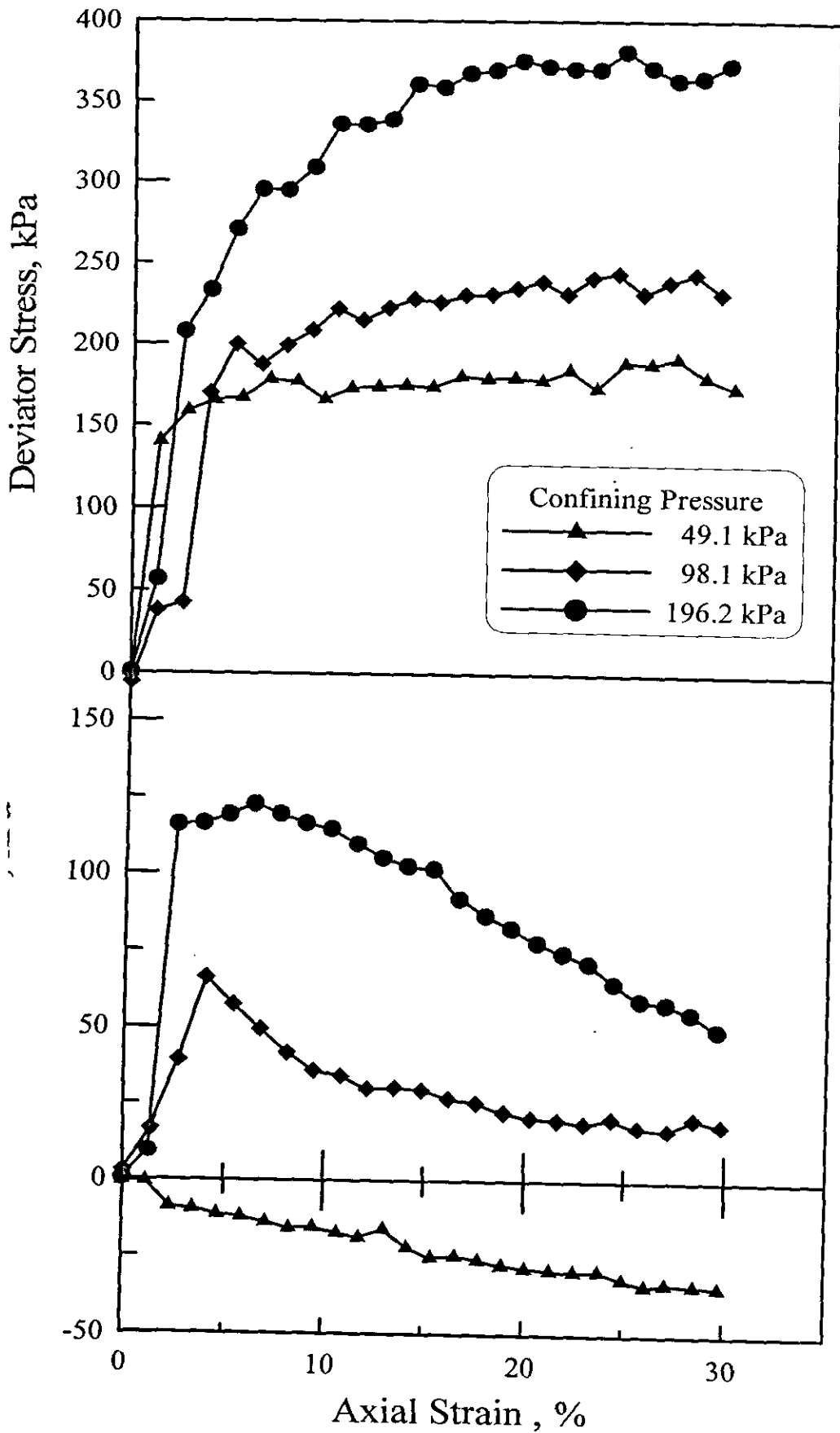


圖 6.11 三軸試驗(CIU-AC)的軸差應力-應變與超額孔隙水壓-應變曲線

(Chip Ratio = 0%)

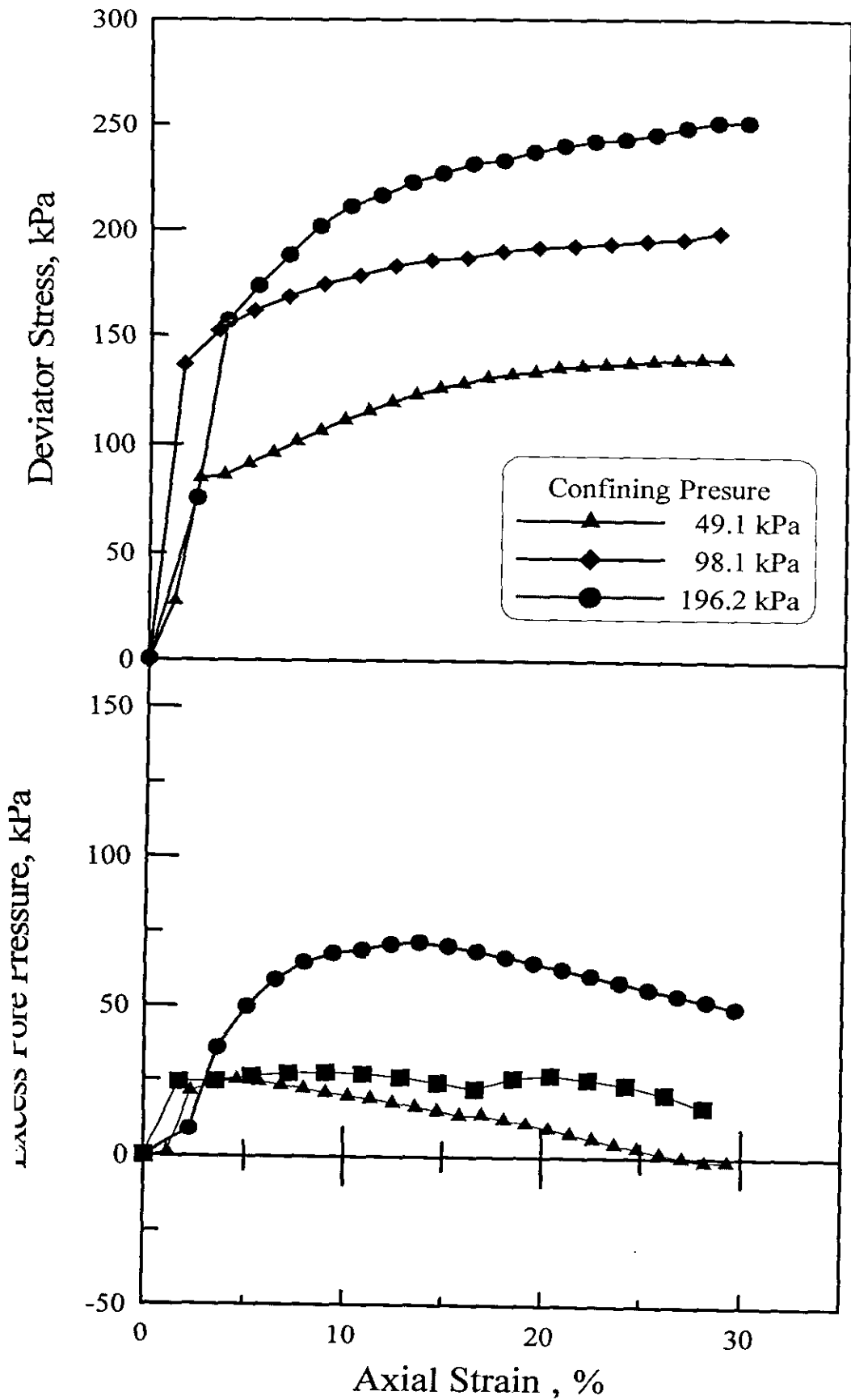


圖 6.12 三軸試驗(CIU-AC)的軸差應力-應變與超額孔隙水壓-應變曲線

(Chip Ratio = 10%)

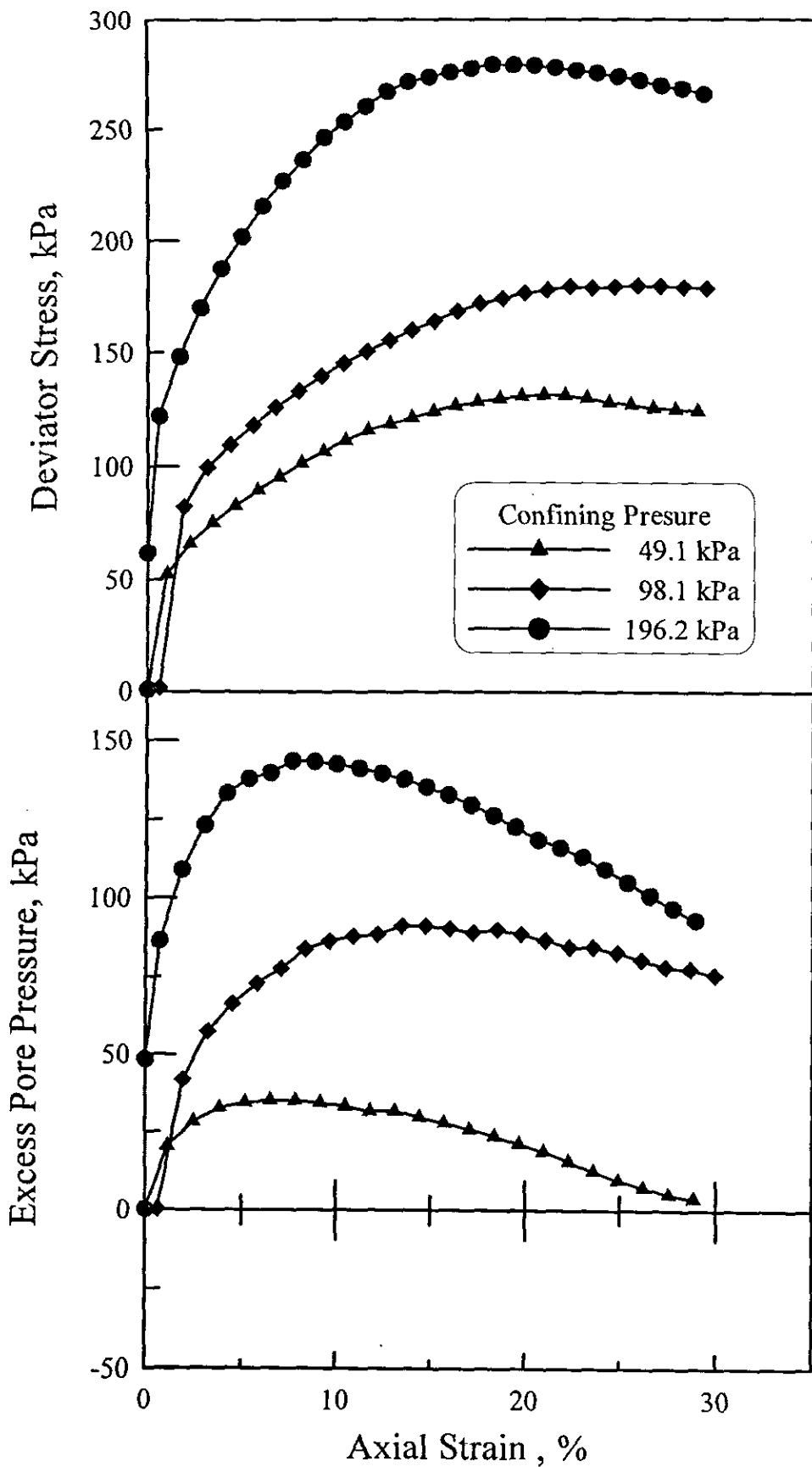


圖 6.13 三軸試驗(CIU-AC)的軸差應力-應變與超額孔隙水壓-應變曲線

(Chip Ratio = 25%)

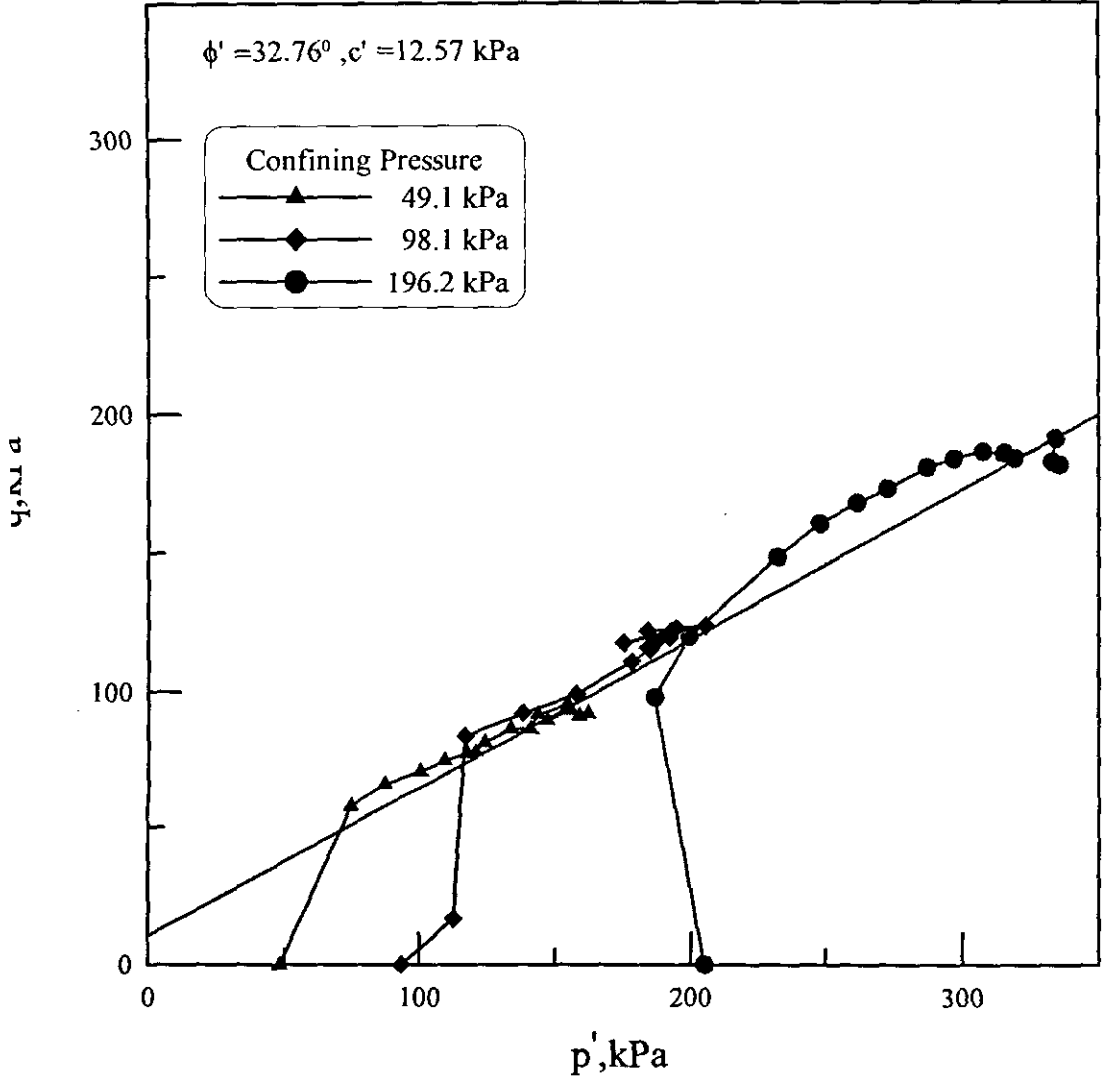


圖 6.14 三軸試驗(CIU-AC)的有效應力路徑圖 (Chip Ratio = 0%)

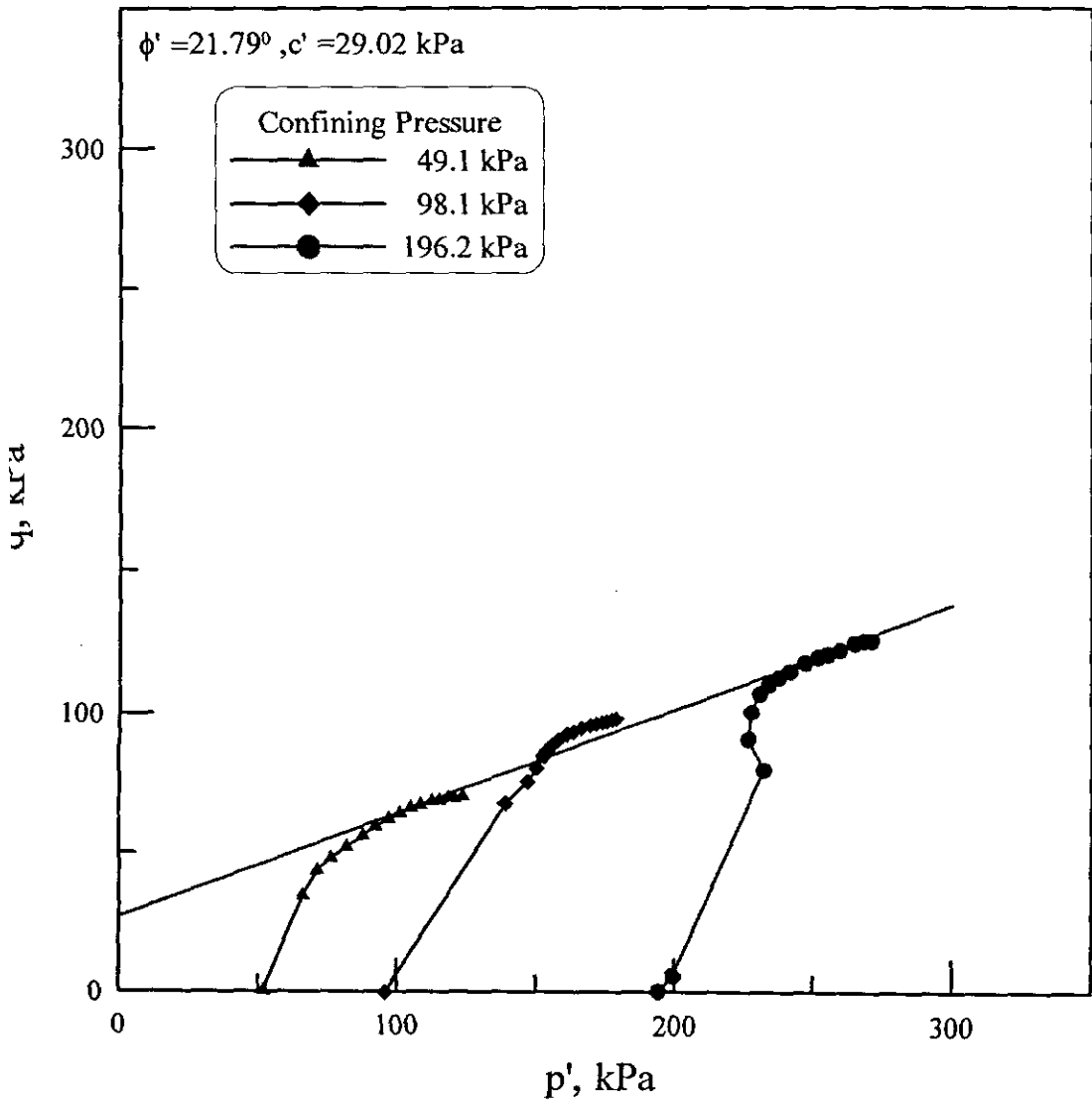


圖 6.15 三軸試驗(CIU-AC)的有效應力路徑圖 (Chip Ratio=10%)

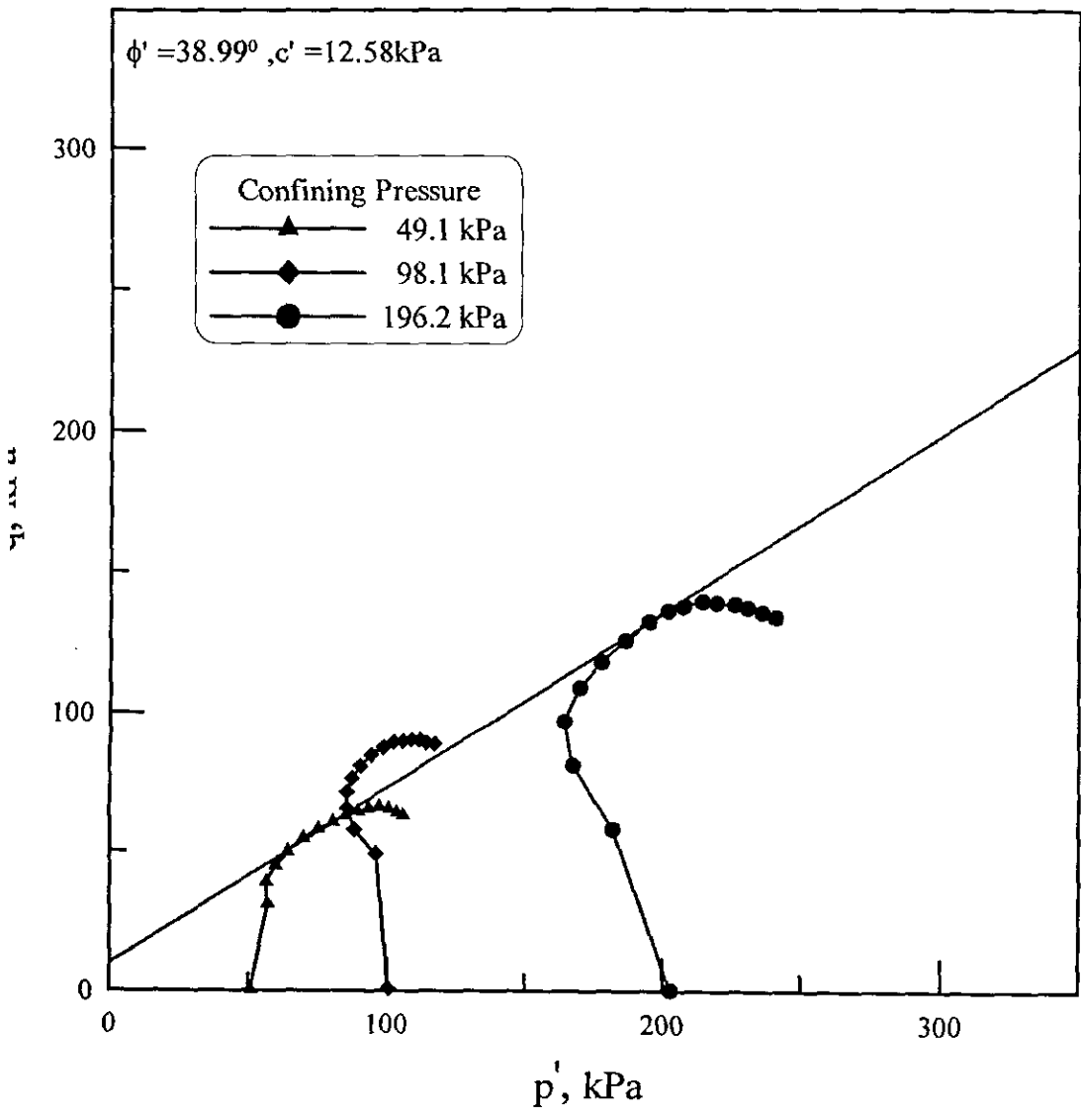


圖 6.16 三軸試驗(CIU-AC)的有效應力路徑圖 (Chip Ratio=25%)

6.1.6 微應變往復式三軸試驗

本計畫中採用相對夯實度 98% 之純黏土試體與混合比 10% 試體各別進行了圍壓 (σ'_c) = 0.5、1、2 kg/cm² (σ'_c = 49.1、98.1、196.2 kPa) 之應變控制往復三軸試驗。

這些試驗之結果，不同應變範圍下所量得之軸差應力 (σ_d) 與軸向應變 (ε_a) 之應力應變曲線環 (stress-strain loop) 展示於附錄 A。使用應力應變曲線環以及 4.3 節所描述之程序來計算對應剪力模數 G_{eq} 以及阻尼係數， h 。圖 6.17 與圖 6.18 分別顯示混合比 0% 與 10% 在不同圍壓下，其剪力模數 (G) 隨剪應變之變化情形。

表 6.4 列舉純黏土 (混合比=0%) 與混合比 10% 在軸向應變小於 10⁻⁴% 時所得之最大剪力模數 (G_{max})，也就是試驗所得最大之 G_{eq} 值。

表 6.4 混合比 0% 與混合比 10% 之最大剪力模數

混合比	相對夯實度，%	圍壓，kPa	G_{max} ，MPa
0%	98	49.1	24.16
0%	98	98.1	110.70
0%	98	196.2	223.73
10%	98	49.1	27.47
10%	98	98.1	105.78
10%	98	196.2	104.58

圖 6.19 與圖 6.20 分別顯示混合比 0% 與 10% 之正規化剪力模數 (G_{eq}/G_{max}) 與剪應變 (γ) 之關係，隨 γ 的遞增，其 G_{eq}/G_{max} 有迅速遞減之趨勢。如圖 5.20 (混合比=0%) 所示，圍壓對 G_{eq}/G_{max} 的變化並沒有明顯之影響，此點與 Toki (1995)[35] 之研究結果相符。對於混合比=10% (圖 6.20)，圍壓對 G_{eq}/G_{max} 之變化則有較明顯的影響，但是趨勢並不一致。在大多數的狀況下，顯然

$\sigma'_c=196.2\text{kPa}$ 在相近之剪應變範圍內有較 $\sigma'_c=98.1$ 高之 G_{eq}/G_{max} ，應是 σ'_c 的增加造成廢輪胎碎片與土壤顆粒緊密接觸後，擴大其彼此間之接觸面積，同時亦發揮輪胎碎片的延展性，造成 G_{eq}/G_{max} 對於剪應變範圍的變化敏感性降低所致。

圖 6.21 是以混合比=0%在不同圍壓下之 G_{max} 為參考（在此稱 $G_{max,0\%}$ ），比較混合比的變化對於正規化之 $G_{eq}/G_{max,0\%}$ 所造成的影響。如圖 5.22 所示，在相剪應變範圍下， σ'_c 的增加使混合比=10%的 $G_{eq}/G_{max,0\%}$ 降低，顯示輪胎碎片揉度效應會隨著 σ'_c 增加而提高。當 $\sigma'_c=196.2\text{kPa}$ 且 $\gamma < 0.05\%$ 時，混合比=10%之 $G_{eq}/G_{max,0\%}$ 約僅為混合比=0%的 40%。

圖 6.22 與圖 6.23 分別顯示混合比=0%與 10%之阻尼係數， h 與剪應變之關係。如圖 6.22 與 6.23 所示，有效圍壓對 h 與 γ 間之關係並沒有明顯之影響，此現象與文獻中之報導一致（Toki et al., 1995）[35]。

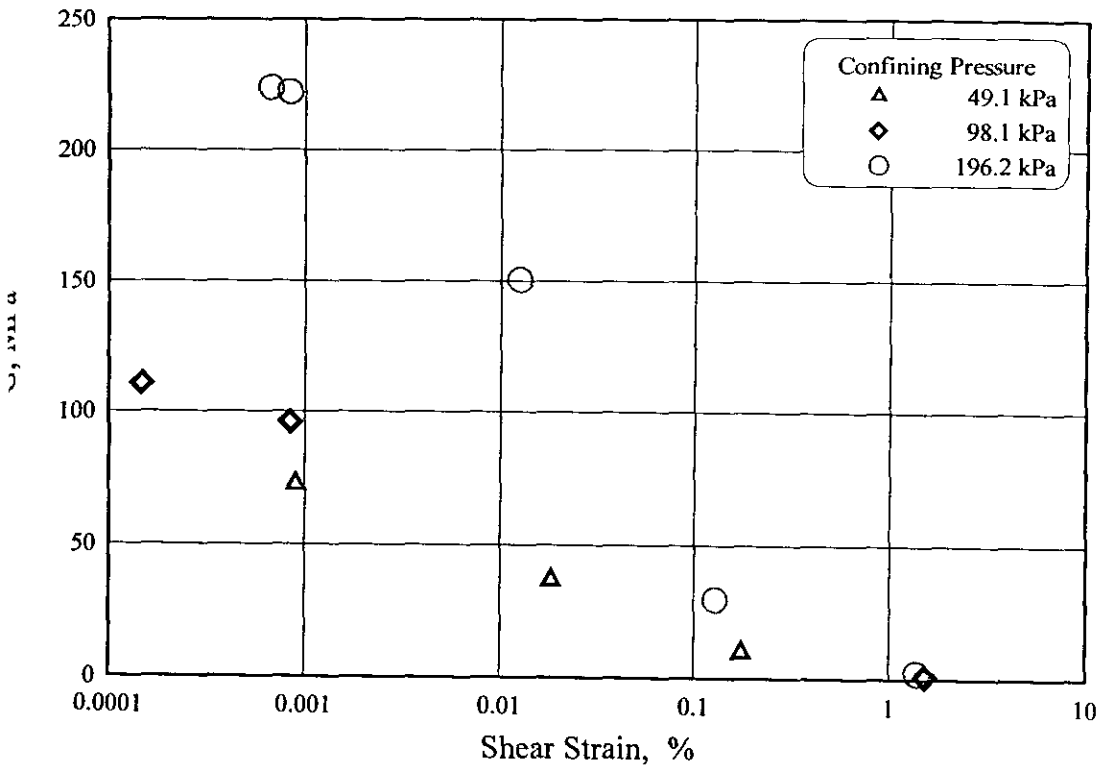


圖 6.17 剪力模數 (G) 隨剪應變之變化情形 (Chip Ratio = 0%)

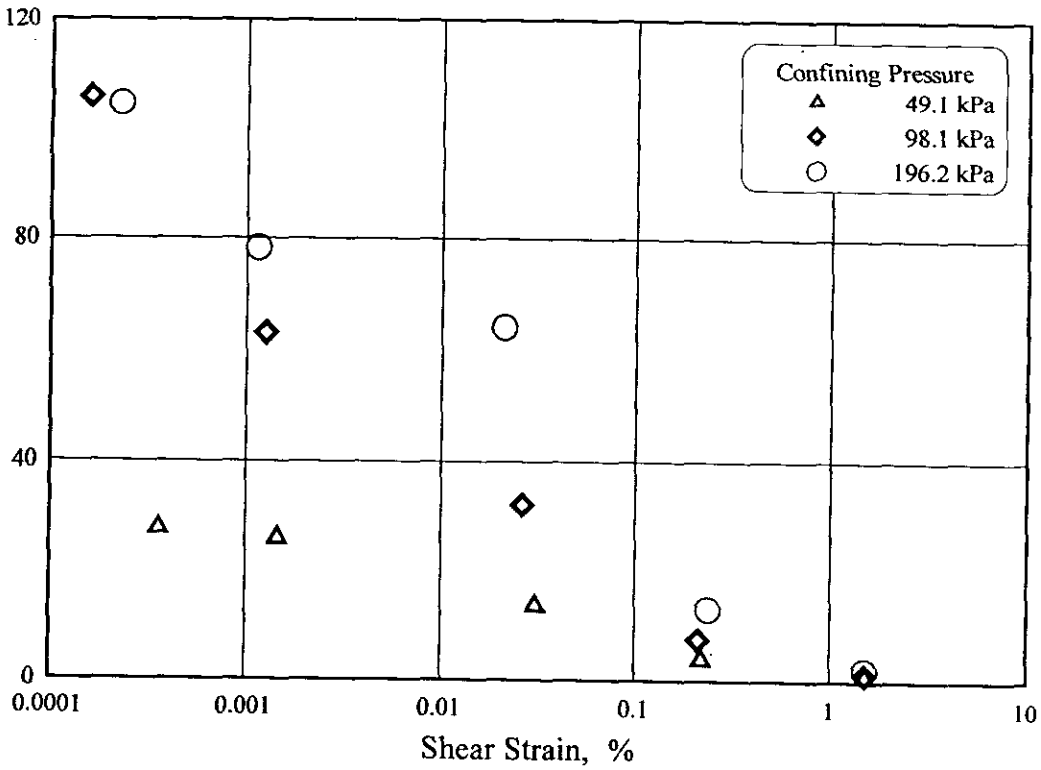


圖 6.18 剪力模數 (G) 隨剪應變之變化情形 (Chip Ratio = 10%)

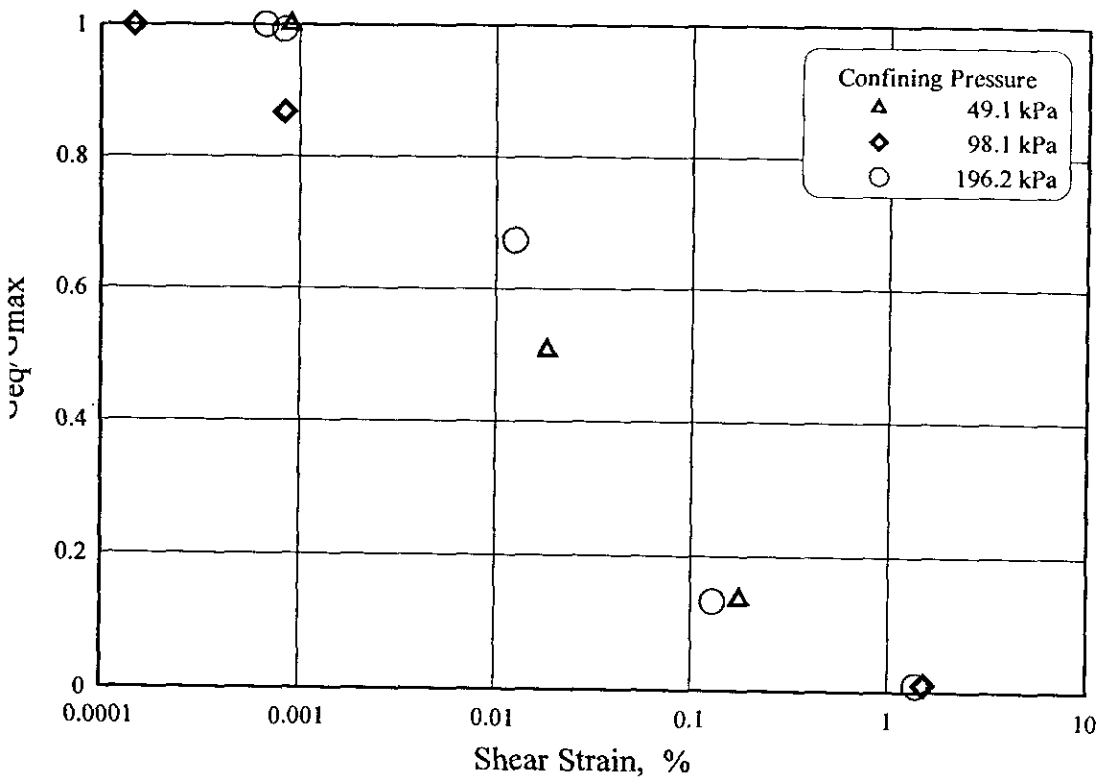


圖 6.19 正規化剪力模數 (G_{eq}/G_{max}) 與剪應變之關係 (Chip Ratio = 0%)

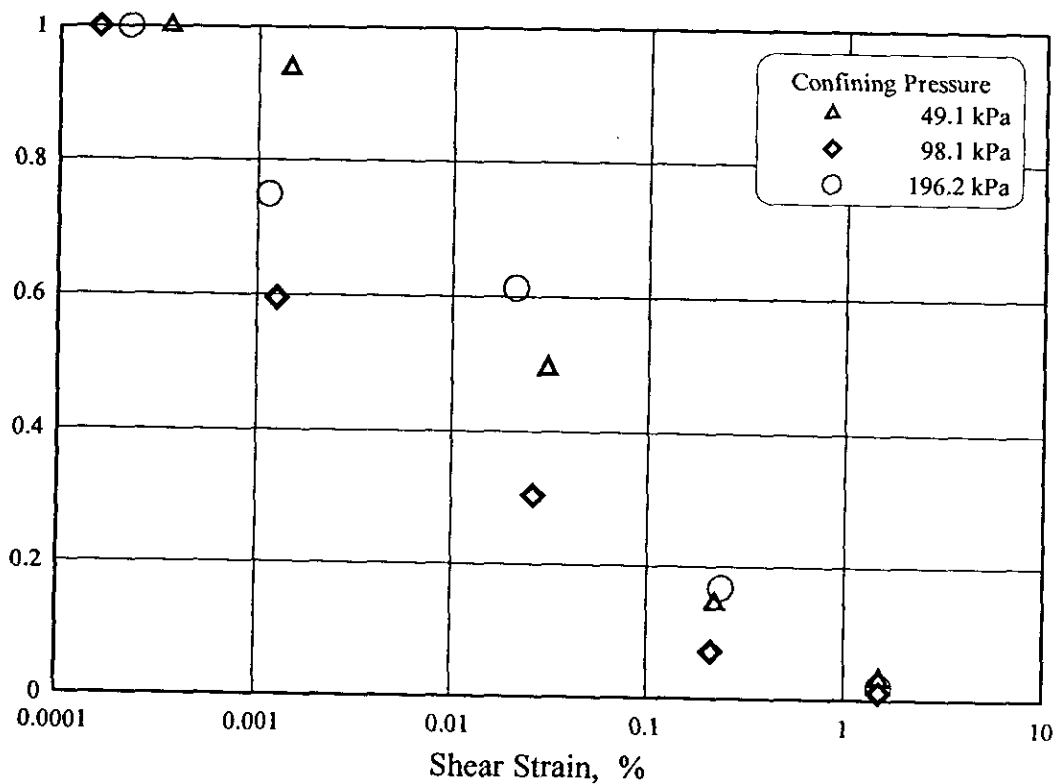


圖 6.20 正規化剪力模數 (G_{eq}/G_{max}) 與剪應變之關係 (Chip Ratio = 10%)

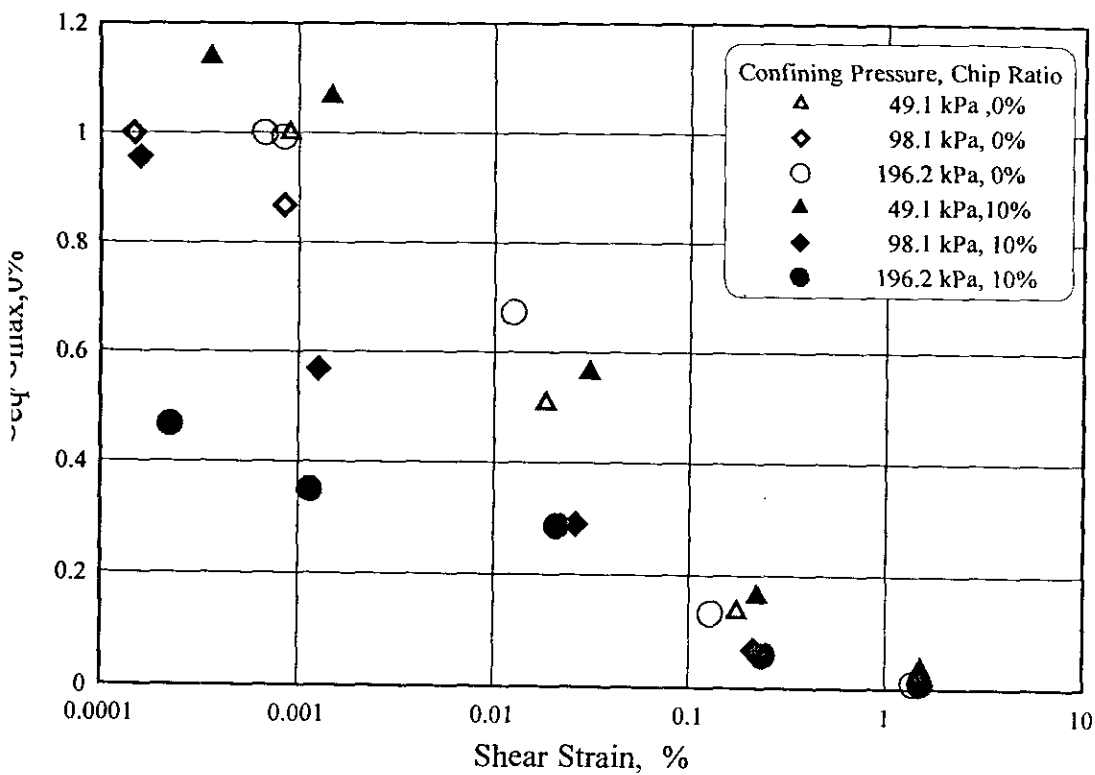


圖 6.21 正規化剪力模數 ($G_{eq} / G_{max, 0\%}$) 與剪應變之關係

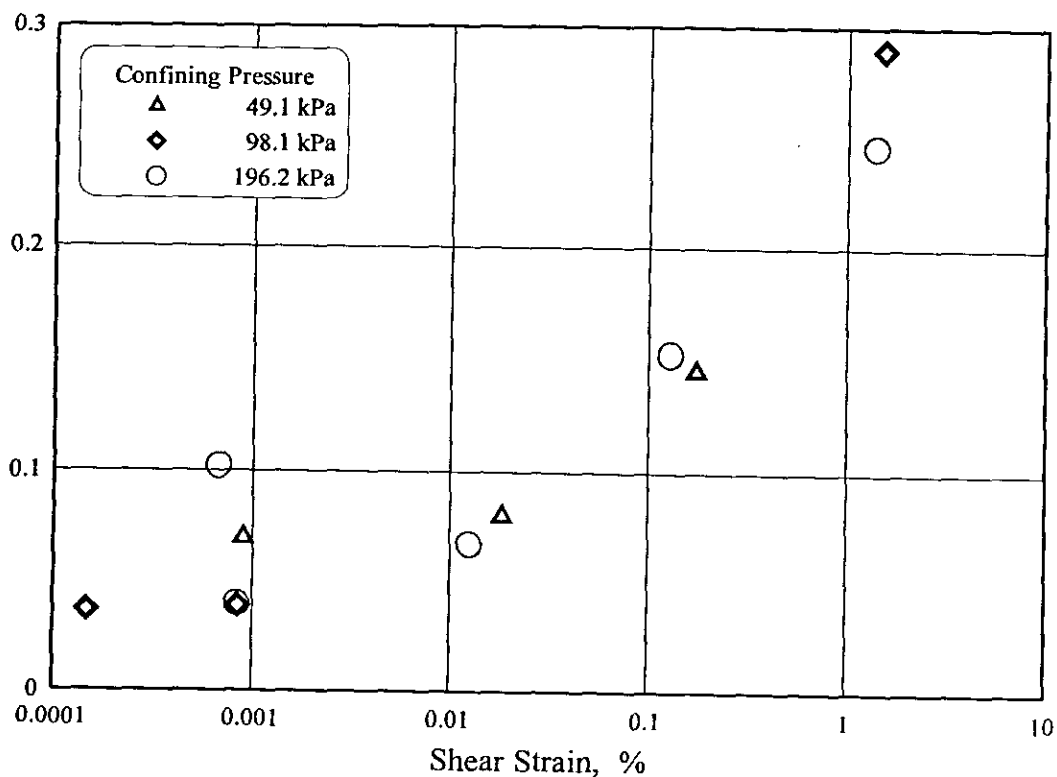


圖 6.22 阻尼係數與剪應變之關係 (混合比 = 0%)

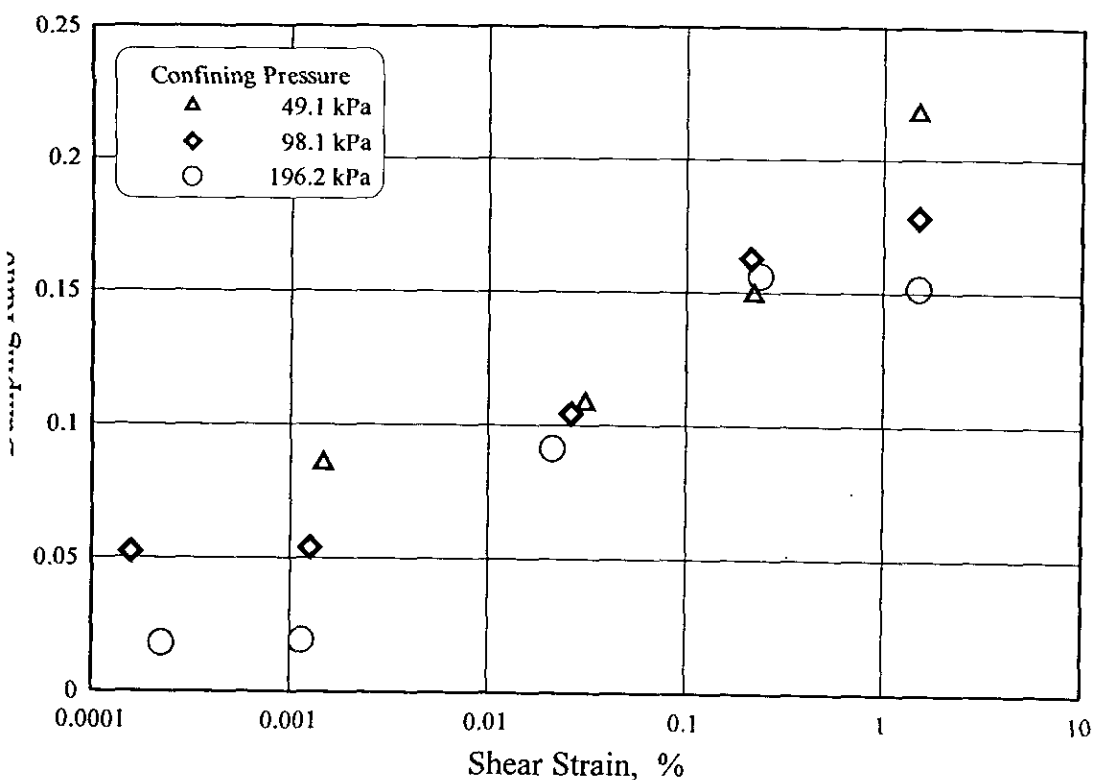


圖 6.23 阻尼係數與剪應變之關係 (Chip Ratio = 10%)

6.7 直接剪力試驗

本試驗試體製作繁瑣耗時消耗土量龐大，當試體大小為 45 公分× 45 公分是土壤與輪胎碎片混合物重量就重達 40 公斤。此外因儀器本身加壓裝置無法維持固定壓力，在 98.1kPa、196.2kPa 時隨著剪動位移加大，其正向壓力也隨之增加，在大於 5% 橫向應變量尤其明顯。所以在 5% 之前採人工調整壓力，以保垂直載重之穩定；但是試體大小為 20× 20cm 的 49.1kPa 正向壓力採呆載重方式，因此無垂直載重浮動之狀況。為明顯區分其差異，圖中正向壓力為 49.1kPa、98.1kPa 之部分，以虛線表大於 5% 橫向應變量之試驗數據，實線表調整穩定輸出垂直壓力部分，試驗之基本資料如表 6.5 其試驗結果如表 6.6 其個別詳細之應力應變曲線參照附錄 B 所示。

表 6.5 各混合比之橫向應變=5%直剪試驗資料

Chip Ratio	試體大小(cm)	$\epsilon_a(\%)$	正向應力 (kPa)	剪應力 (kPa)	夯實度 (%)
0%	20x 20	5	49.1	47	80
		5	98.1	70	85
		5	196.2	104	86
10%	20x 20	5	49.1	56	77
		5	98.1	90	75
		5	196.2	120	75
	45x 45	5	49.1	54	81
		5	98.1	78	82
		5	196.2	118	82
25%	20x 20	5	49.1	47	77
		5	98.1	71	79
		5	196.2	90	78
	45x 45	5	49.1	38	81
		5	98.1	66	85
		5	196.2	105	85
50%	20x 20	5	49.1	30	72
		5	98.1	55	70
		5	196.2	83	71

表 6.6 直剪試驗不同混合比及不同直剪盒尺寸大小之摩擦角

(橫向應變=5%)

Chip Ratio	直剪盒大小(cm)	橫向應變(%)	摩擦角 (度)	凝聚力(kPa)
0%	20x 20	5	20.5	30
10%	20x 20	5	22.2	41
	45x 45	5	22.9	34
25%	20x 20	5	15.2	38
	45x 45	5	23.6	19
50%	20x 20	5	18.9	16

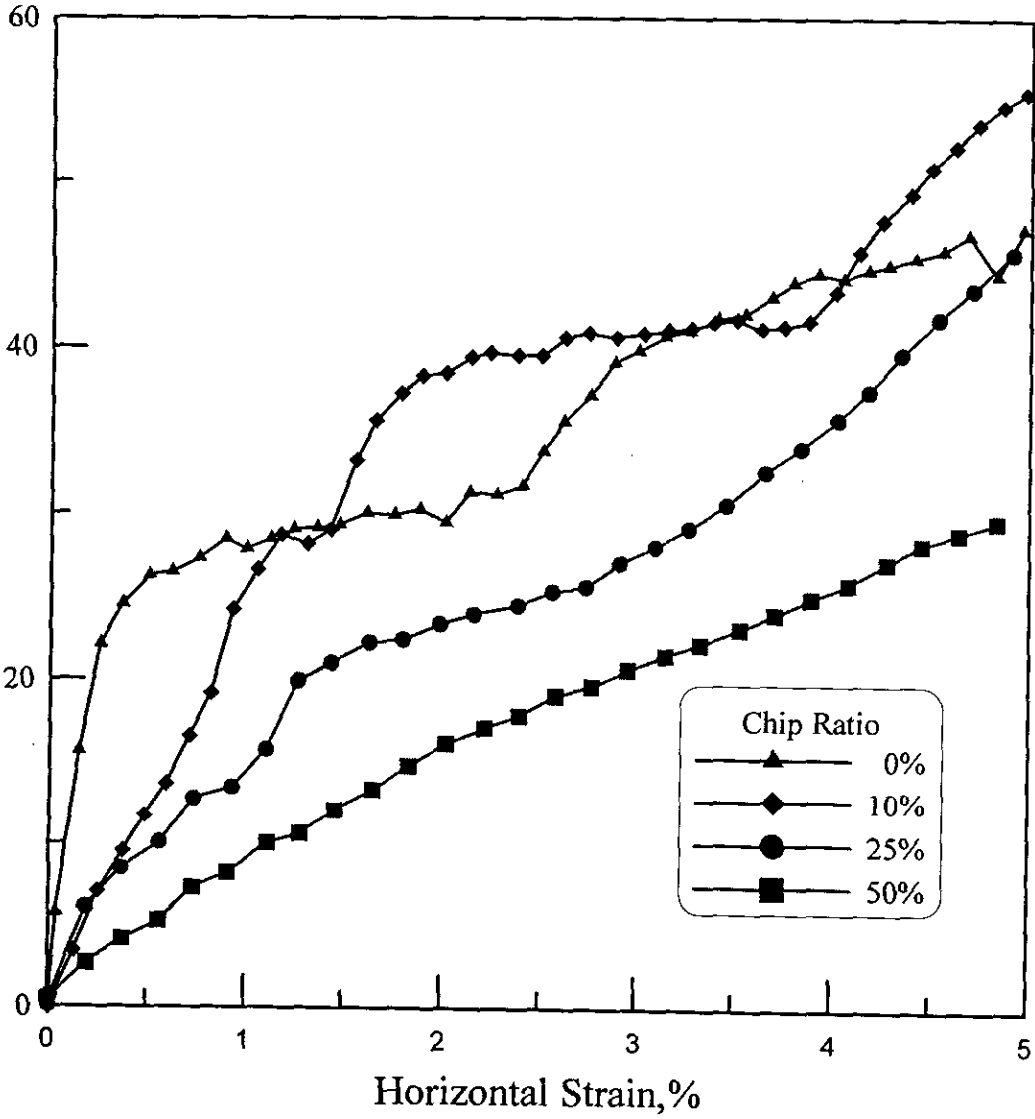


圖 6.24 直剪試驗比較(試體尺寸：20x 20cm², $\sigma_n=49.1\text{kPa}$, 橫向應變=5%)

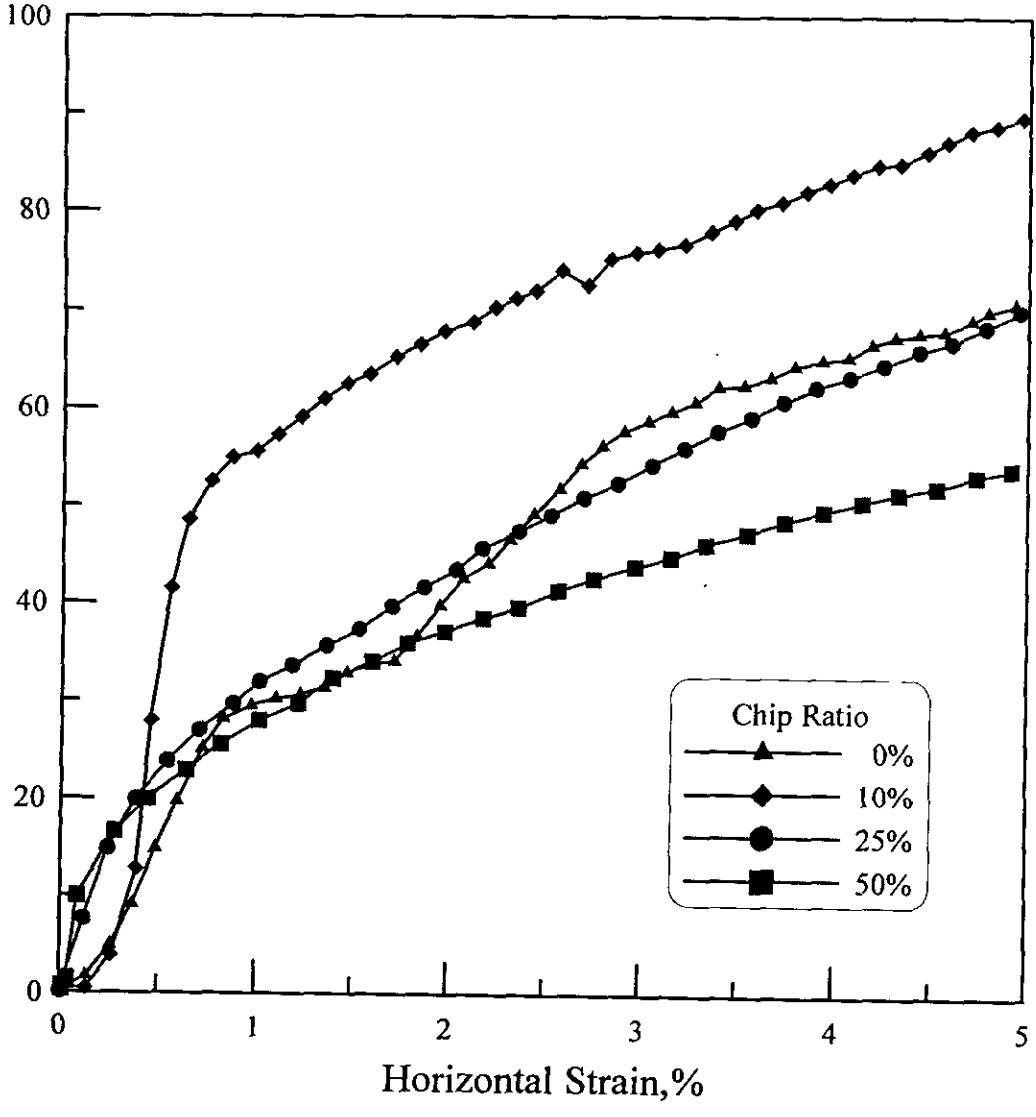


圖 6.25 直剪試驗比較(試體尺寸: 20x 20cm², $\sigma_n=98.1\text{kPa}$, 橫向應變=5%)

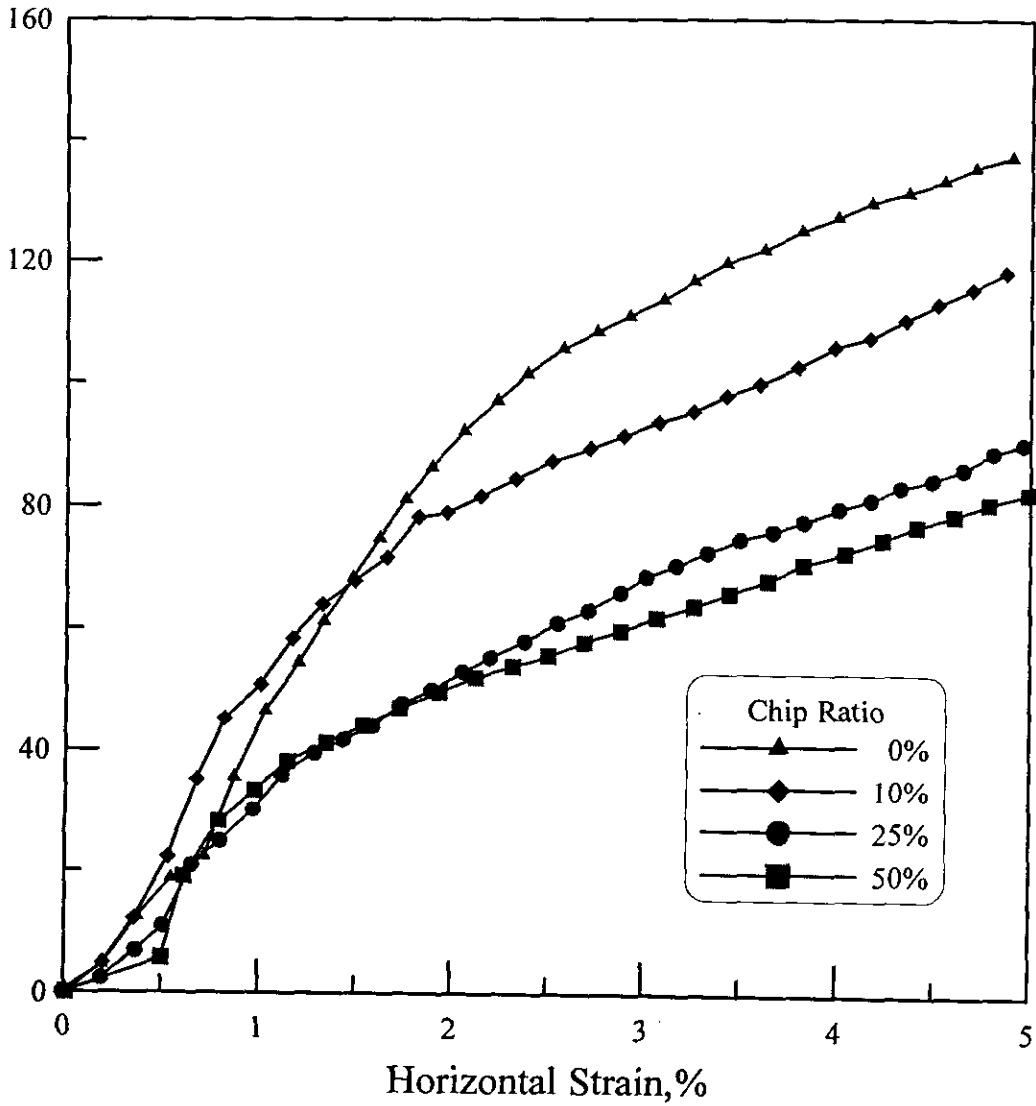


圖 6.26 直剪試驗比較(試體尺寸: $20 \times 20 \text{cm}^2$, $\sigma_n = 196.2 \text{kPa}$, 橫向應變=5%)

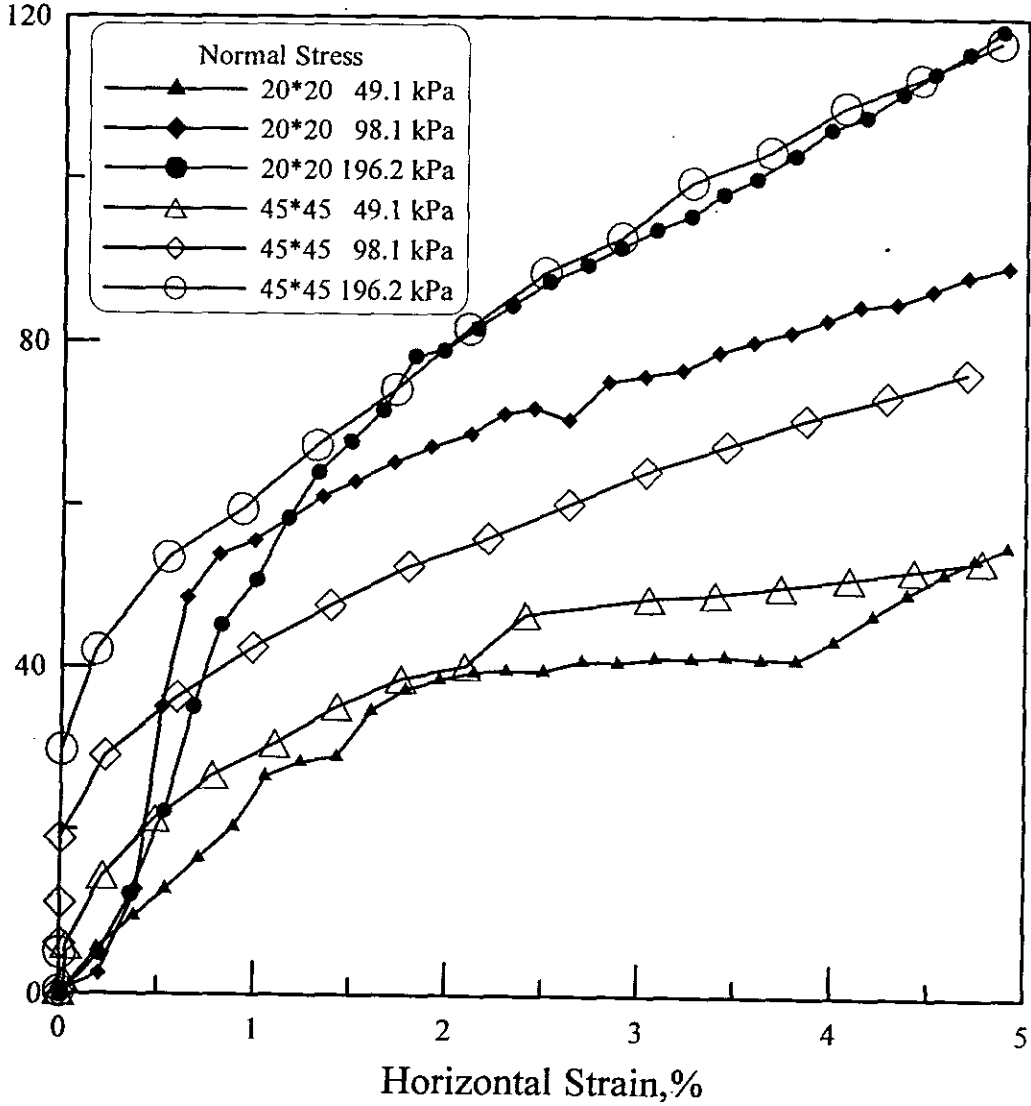


圖 6.27 不同試體尺寸之直剪試驗結果(試體尺寸：20x 20cm² 與 45x 45cm², Chip Ratio=10%, 橫向應變=5%,)

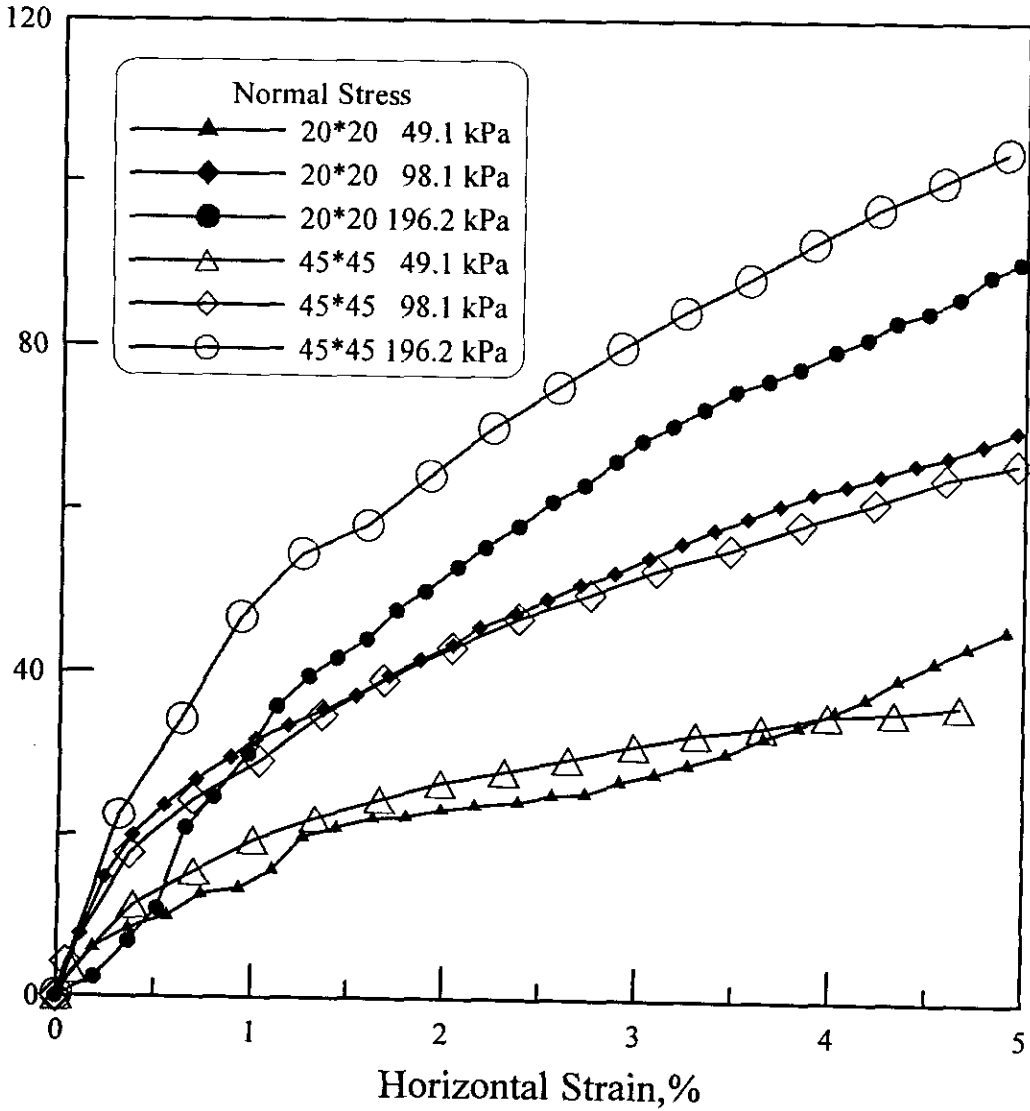


圖 6.28 不同試體尺寸之直剪試驗結果(試體尺寸：20x 20cm² 與 45x 45cm², Chip Ratio=25%, 橫向應變=5%)

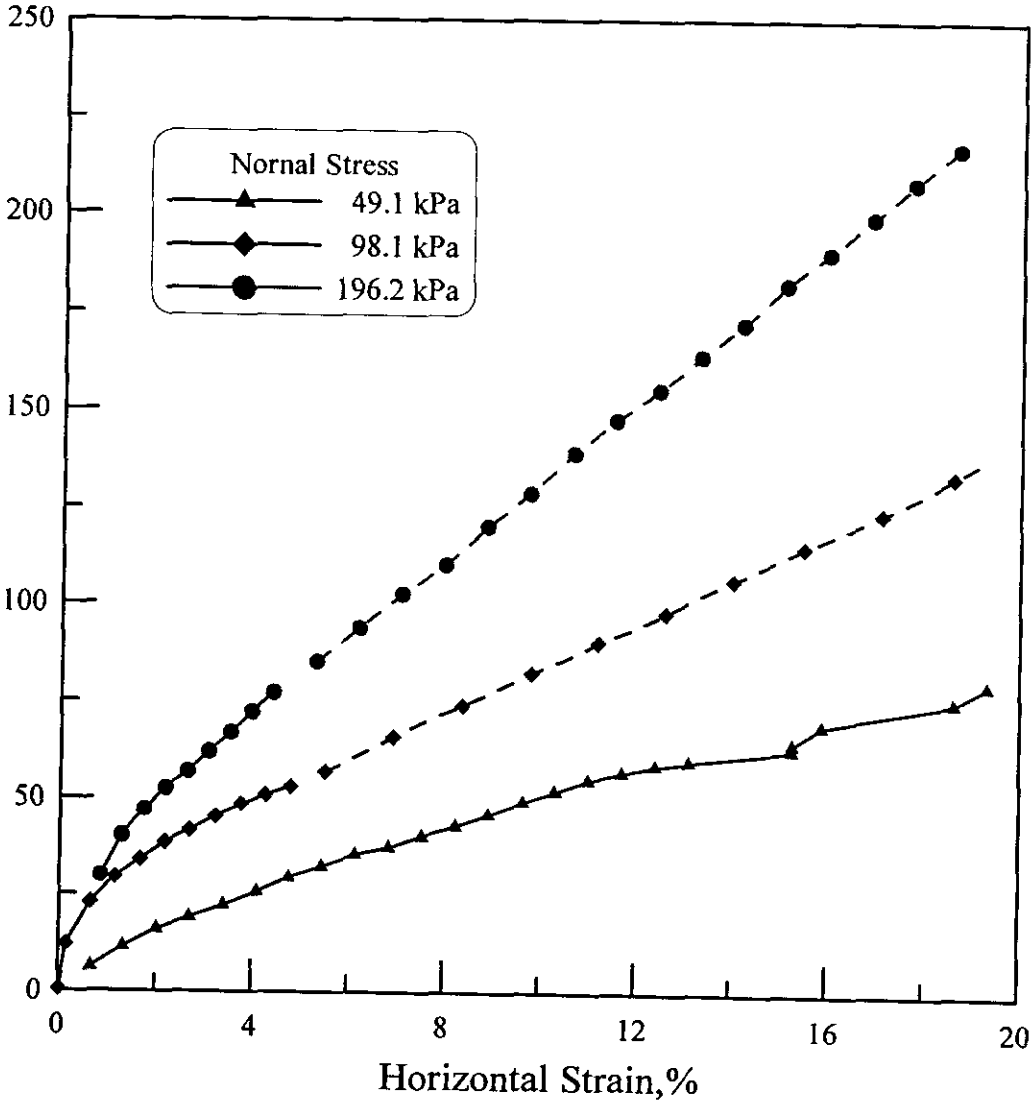


圖 6.29 50% Chip Ratio 直剪試驗(試體尺寸: 20× 20cm², 橫向應變=20%)

根據上列之直剪試驗比較圖結果及附錄 B 可知，在試體尺寸為 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ ，摩擦角會隨著輪胎碎片增加而增加，但大於 10% 後卻明顯下降，顯示小輪胎碎片在該試體尺寸大小下有其邊界效應。而在試體尺寸為 $45 \times 45 \text{ cm}^2$ 隨輪胎碎片含量增加而增加，輪胎碎片含量為 25% 時其摩擦角為 23.6° ，相純黏土之摩擦角 20.5° 明顯有其加勁之效果，並且凝聚力也相對降低。並且此可知，廢輪胎碎片在直接剪力試驗之試體尺寸有其尺寸效應，在較大尺寸有較明顯的廢輪胎含量與摩擦角成正比之關係。

如試體尺寸為 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 在不同正向壓力下各混合比比較圖（圖 6.24、5、6.26）所示，試體在低正向壓力下，無明顯強度之差別，但隨著正向壓力增加，剪力強度會隨著廢輪胎碎片增加而降低，如 50% 的混合比之剪應力降低 10% 混合比的 60%。

而綜合 $45 \times 45 \text{ cm}^2$ 與 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 試體尺寸之結果發現（圖 6.27、6.28），試體在低正向壓力下，仍無明顯差距，而在廢輪胎碎片含量為 25% 時其正向壓力 96.2 kPa ，試體尺寸 $45 \times 45 \text{ cm}^2$ 比 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 在軸向應變為 5% 時強度約高 5%。此外在廢輪胎碎片含量為 50% 時其應力應變曲線趨於線性，表示由於廢輪胎碎片含量較多，土壤含量較少，因此在受剪時，多為輪胎與輪胎間顆粒來提供應力，其應力應變行為已由廢輪胎碎片提供強度。

土堤現地觀測

1 沈陷量觀測

本研究每一至二個月於現地作測量，觀察其高程變化。如表 6.7 所示，沈陷變化非常小，最大僅 2.3 cm，似乎趨於穩定。乃因土堤興建至今車流量不且無重車行經，往後需作重車動態載重試驗較能符合實際狀況，但整體表為良好。

表 6.7 沈陷量觀測結果

高程點	設計高程	12/29/99	02/24/00	05/08/00	07/04/00	08/21/00	09/12/00	10/10/00
S1	420.0	451.6	450.7	451.0	450.8	449.8	451.0	449.4
S2	458.0	482.7	481.8	482.3	482.05	480.8	482.1	480.7
S3	496.0	511.9	511.3	511.4	511.3	510.5	511.5	510.3
S4	534.0	550.3	549.2	549.4	549.05	548.5	549.4	548.0
S5	572.0	582.4	581.5	581.4	581.3	580.8	581.5	580.1
S6	610.0	613.8	612.9	612.8	612.8	612.3	613.0	611.4
S7	647.0	647.2	646.2	646.2	646.05	645.7	646.4	644.6
S8	685.0	682.3	681.6	681.6	681.55	681.1	681.9	679.9
S9	723.0	717.5	716.7	716.8	716.8	716.2	716.6	715.2
S10	761.0	759.3	758.4	758.7	758.55	758.1	758.4	757.1

(unit : cm)

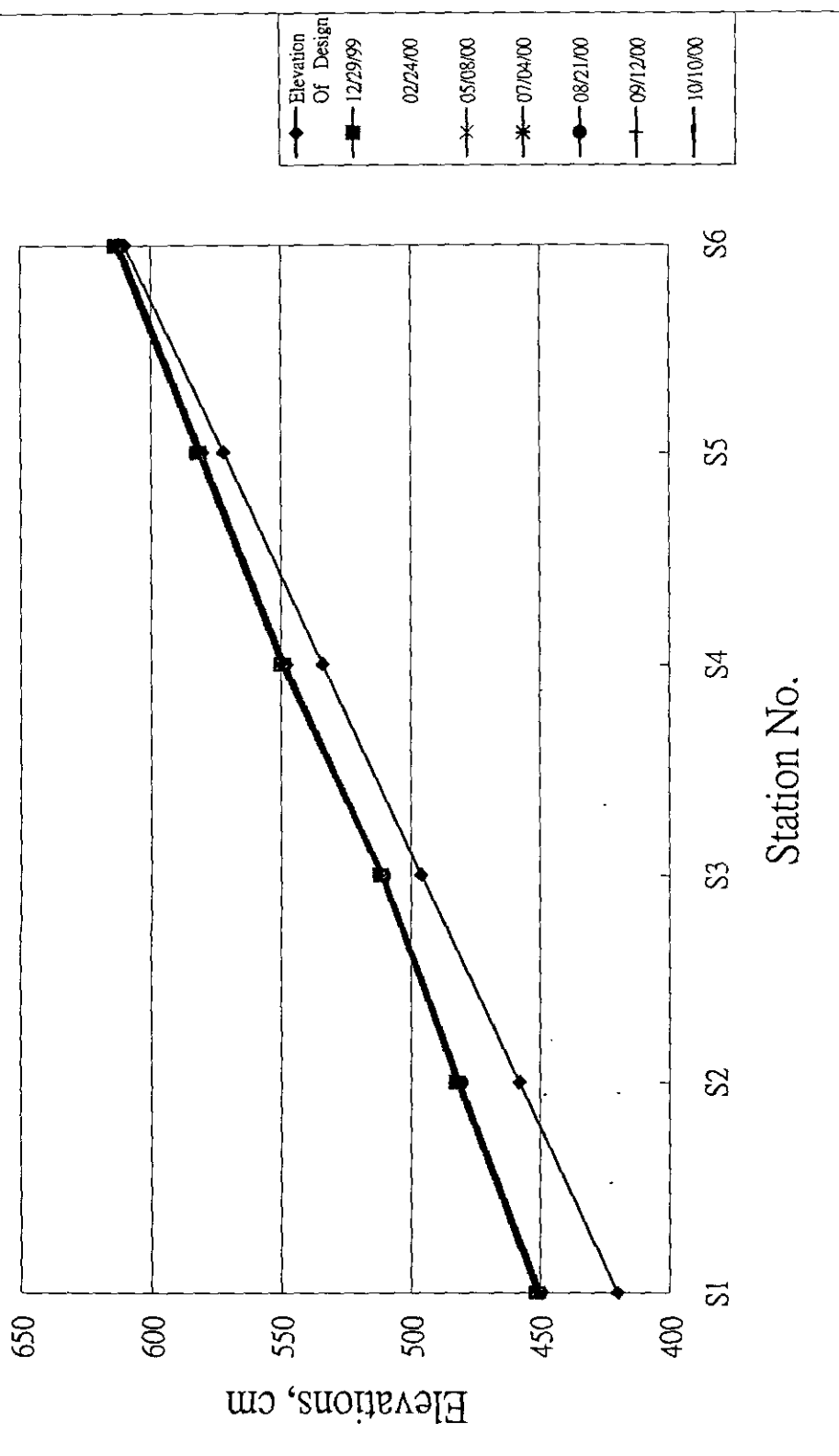


圖 6.30 純黏土層高層變化圖

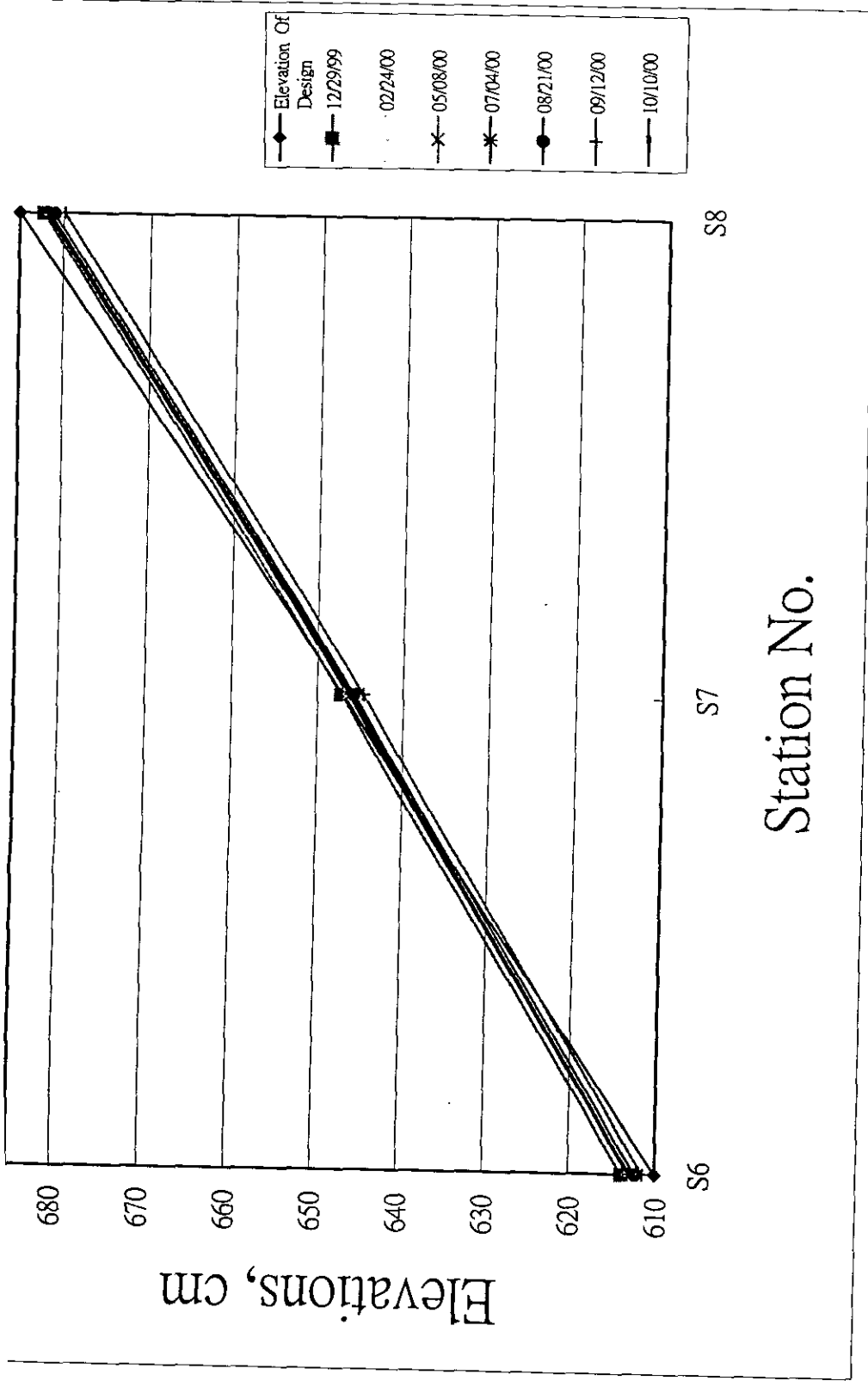


圖 6.31 30 公分輪胎碎片與 30 公分黏土互層高層變化圖

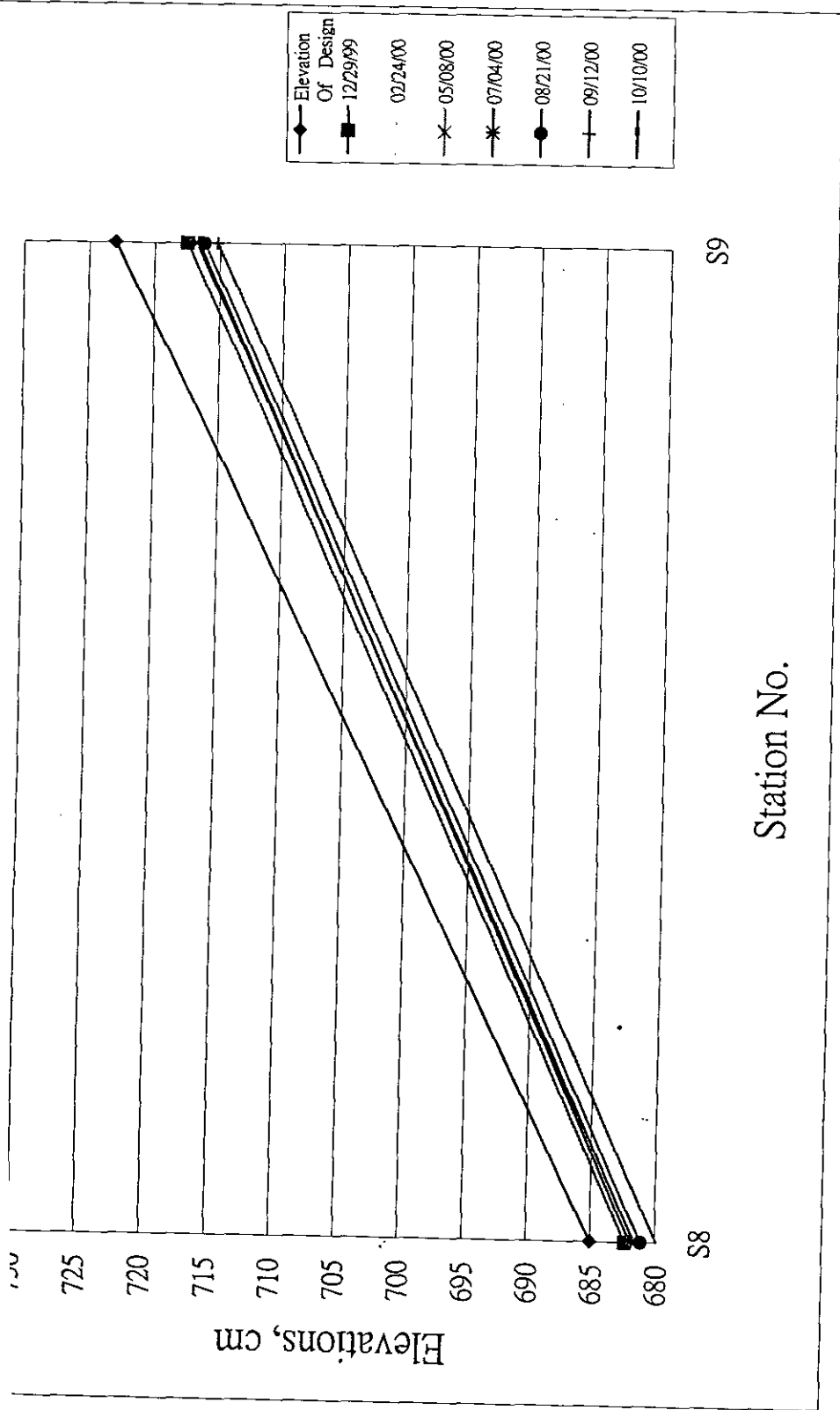


圖 6.32 100 公分土壤覆蓋層下回填 400 公分厚之輪胎碎片高層變化圖

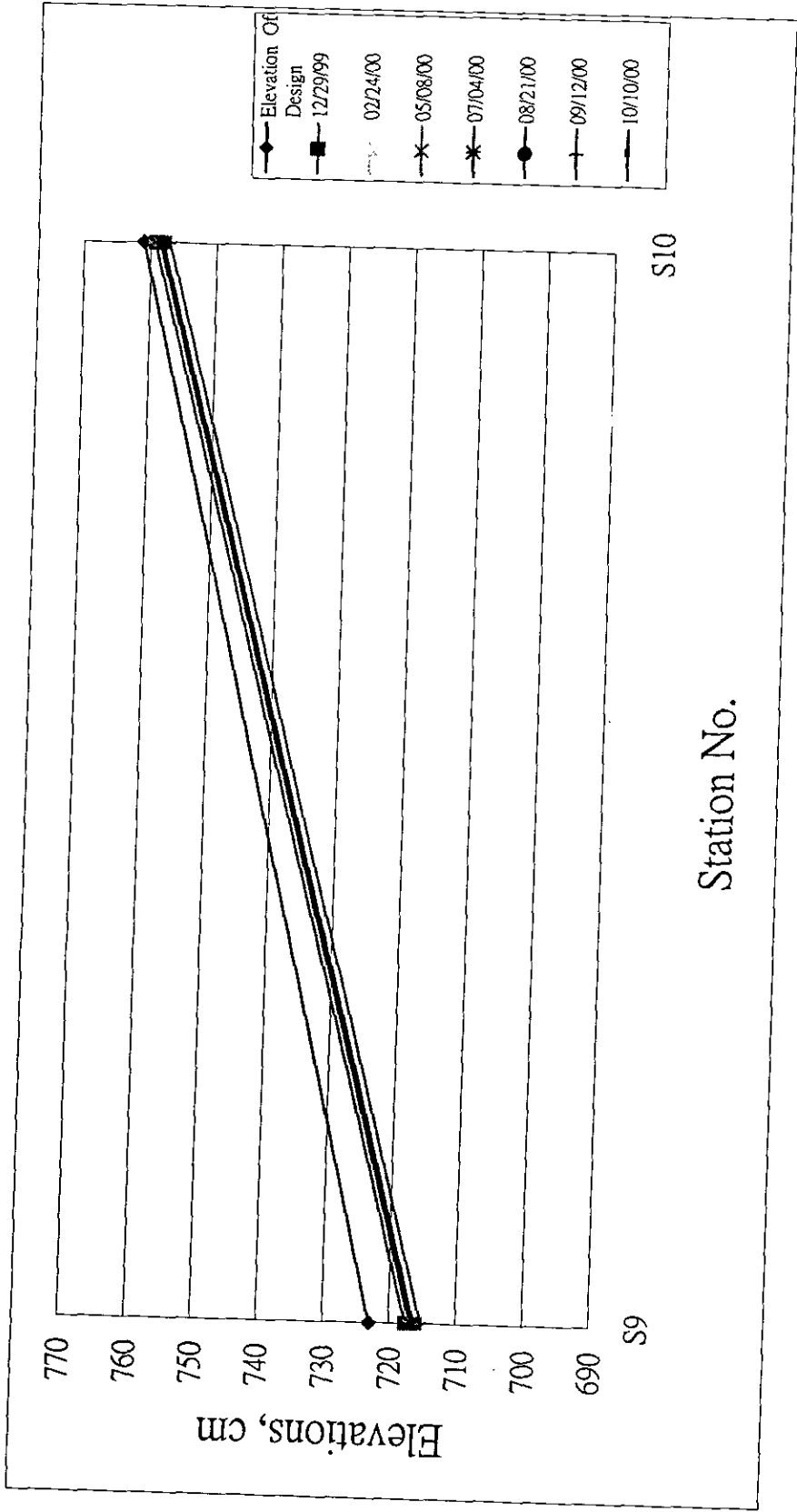


圖 6.33 200 公分土壤覆蓋層下回填 300 公分厚之輪胎碎片高層變化圖

6.2.2 濾水分析

本計劃興建之土堤取得的濾水送至屏東科技大學環境工程與科學系環境科技服務中心檢驗，檢驗結果如表 6.8 所示，檢驗結果顯示，相較於 ASTM D6270 的 TCLP 金屬含量標準、放流水標準及飲用水標準，經由雨水的對照顯示在 Ba、Cd、Pb、Hg 方面並無成分過高的傾向，甚至符合一般污水排放標準。如運用在一般非水源區之道路，應對環境不會產生嚴重影響。

表 6.8 濾水檢驗結果

目	88/12/16 檢測結果	89/04/02 檢測結果	89/08/27 檢測結果	雨水	放流水標準	飲用水標準	單位
I	6.97	6.03	-	6.29	6.0~9.0	6.0~8.5	
	0.57	-	-	-	20	0.5	mg/L
	6.28	6.48	1.86	N.D	-	250	mg/L
b ⁻	5.34	-	-	-	-	10.0	mg/L
b ₂	N.D	-	-	-	-	-	mg/L
p ²⁻	142.86	45.73	20.94	1.31	-	250	mg/L
D	18.5	21.4	5.0	366.5	200	-	mg/L
s	270	385	184	20	-	500	mg/L as CaCO ₃
S	506	347	233	16	-	800	mg/L
D ₅	0.8	0	2.0	14	50	-	mg/L
	N.D	N.D	N.D	-	-	2.0	mg/L
	N.D	-	-	-	0.03	0.005	mg/L
	N.D	N.D	N.D	N.D	1.0	0.05	mg/L
	N.D	-	-	-	0.005	0.002	mg/L
	5.5	13.0	4.3	0.5	-	-	mg/L
	0.05	N.D	0.19	N.D	10	0.3	mg/L
	0.03	0.01	0.01	0.01	-	0.05	mg/L
	N.D	0.2	N.D	N.D	5.0	5.0	mg/L

2.3 溫度觀測

經溫度監測結果，2.5 m 孔號之溫度均高於 4m 孔號之溫度，但溫度均低於 30°C，根據文獻指出，一般橡膠適用範圍為-15°C~85°C，況且此為輪胎專用之

合成橡膠更耐高溫，因此無燃燒之虞。且因本試驗回填土採輪胎碎片與黏土混合，設計的黏土覆土厚度至少為 1m，甚至達 3m，加上橫向均有 30cm 之排水粒料，因此不致於讓深度較深之孔號有溫度過高之可能。

加勁土堤溫度量測結果如表 6.9 所示，由表內的資料很明顯的可以看出，由於土壤越接近表層其所接收的太陽輻射越多，因此可發現埋設深度為 2.5m 的溫度，其溫度較 4m 埋設深度偏高，且夏季的溫度較高。

由回填厚度比較，在 S8~S9 (A5、A6、B5、B6) 區間是在 100 公分土壤覆蓋層下方回填 400 公分之輪胎碎片，因該區段輪胎碎片含量較其他區段多，而橡膠在土壤內由於材料本身會產生熱量，再加上輪胎碎片在吸收輻射後不易散熱，因此該區段所量測的溫度都較其他區段來的高；其次為 S9~S10 (B7、B8，200 公分土壤覆蓋層下方回填 300 公分後之輪胎碎片) 因其輪胎碎片含量較 S8~S9 區段少，且輪胎碎片上覆蓋了 200 公分的土壤，土壤吸收了大部分的太陽輻射，所以該區段的溫度又略低；S6~S8 (100 公分土壤覆蓋層之下方採 10 公分層狀回填) 由於輪胎碎片量較少，在夯實之後輪胎碎片會與土壤混合，因此溫度又更低；在 S1~S6 區段完全由現地土壤回填，不含輪胎碎片，因此該區段之溫度為該試驗土堤內溫度較低的區段。

綜合上述之結果可知，在越接近表層其土壤的溫度越高，且在輪胎碎片越厚的回填層其溫度也越高。

表 6.9 溫度觀測資料

	89年4月27日			89年5月25日			89年6月27日		
	早上	中午	下午	早上	中午	下午	早上	中午	下午
野外溫度	28	29	26	37.1	38.2	36.2	35.5	39	35
A1	26	26	26	27.8	27.5	28.2	29.1	29.1	29.1
B1	25.1	25	25.5	26.1	27.8	26.1	29	27.6	28.5
A2	25.1	25.2	25	26	27.5	26.1	27	28	27.5
B2	25.8	26	25.5	27	27	27	28.1	28.6	29.1
A3	28.8	29	29.5	30.5	31	31	32.5	32	32
B3	28.2	28.8	28	29	29.2	29	31	31	30
A4	27	27.5	27	28	28.7	28	28.9	29	29
B4	28.2	28.1	28.5	29.6	29	29.9	31.5	31.5	31.2
A5	32.5	32.5	32	34.2	34	29.2	36	35	36
B5	27.8	27.2	28	27.5	27.1	27.3	28.8	29	29
A6	28.9	27.6	29	29.5	29	29.2	30.1	32	30.1
B6	31.2	30.3	31	33	32.9	32.9	34.2	33.5	34.1
B7	-	-	-	-	-	-	29.2	29.9	29.5
B8	27	27	27.5	32.8	28	28	28.1	29.1	28.9

	89年7月25日			89年8月26日			89年9月25日		
	早上	中午	下午	早上	中午	下午	早上	中午	下午
野外温度	28.1	37.5	32	29.8	33	25.5	28.1	30.8	28
A1	30.8	30.5	30.5	29.5	28	29	29.2	29	29.1
B1	28	28	28	28.5	28	27.5	28.2	28.5	28.1
A2	27.1	28	27.5	27	28	26	27.5	27.5	27.1
B2	29.1	29	29	28.1	28	28	28.1	28.3	28.1
A3	33.8	33	33.5	33	32	32	32.1	32	31
B3	31	31	31	31	31	30.5	30.9	31	30.5
A4	29.1	29.5	29.7	29.3	29	29	29.5	29	28.9
B4	31.9	32.5	32	31.2	31.5	32	31.8	31.5	31
A5	37.1	38	38.5	34.7	34.5	35	35	35	34
B5	29.5	29.5	29	29.1	29	30	29.1	29	29
A6	31.5	29.5	31	30.5	30.4	31	30.3	30.5	29.1
B6	34	33	34	32.9	32.5	33	32.5	37	31
B7	30.5	31	31	30.7	30.5	31	30.5	30.9	30
B8	29.5	30	30	26.1	29.5	31	27	29	28

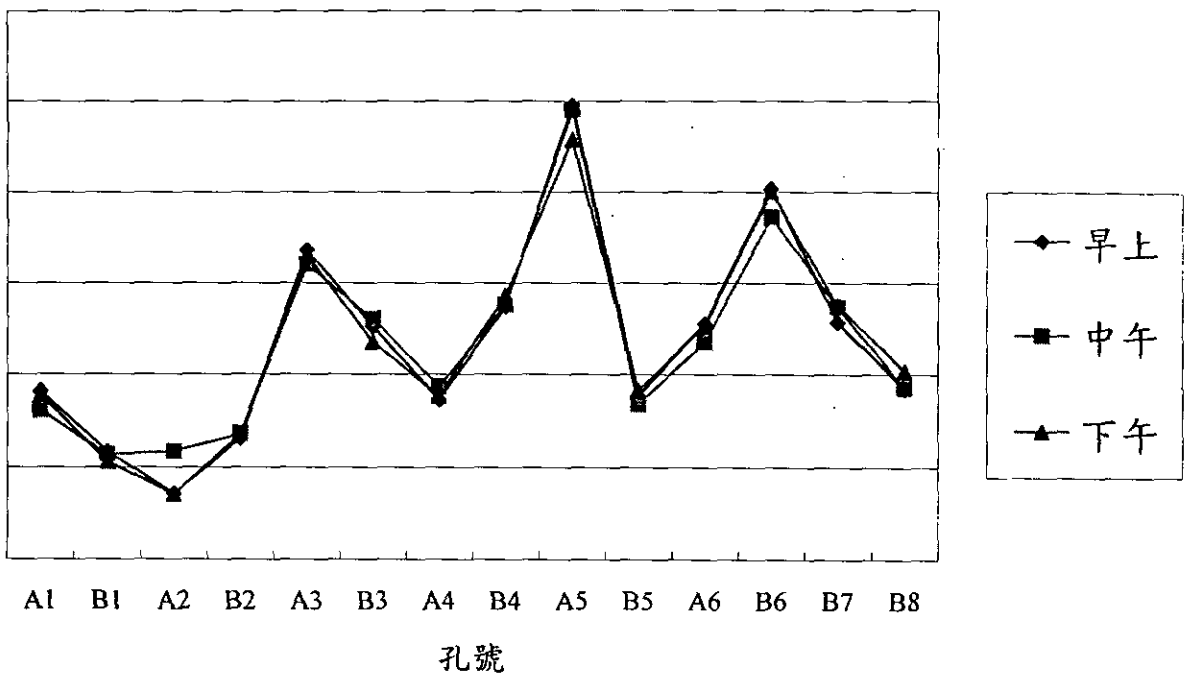


圖 6.34 各孔號平均溫度變化圖

第七章 結論與建議

本計畫除延續前期計畫於屏東科技大學所興建110公尺長6公尺高之廢輪胎勁土堤實施長期之現地高程、滲水與溫度觀測外，並根據不同的土壤與廢輪胎片混合比例進行一系列室內之物理與力學試驗，以瞭解其工程性質。本章將根據試驗與觀測之結果，提出以下結論與建議。

1 結論

1. 夯實試驗結果顯示最大乾密度隨著混合比的增加而降低，可以將廢輪胎碎片作為輕質填充材料，但較高的混合比在試體製作時欲達到夯實度90%以上，相對的較不容易。因此與現場施工之使用上，除考慮減輕負載外，亦需衡量夯實效果的難易度。
2. 滲透係數隨著混合比的增加而增加，其透水性遠較一般純土壤回填料為高，有助於排水並減輕負載。
3. 不同的混合比所提供的剪力強度因土壤顆粒與廢輪胎碎片間的互制效應而改變。由三軸壓密不排水(CIU-AC)試驗結果顯示混合比的變化將對其剪力強度有明顯的影響。對於試驗的三種混合比(0%、10%、25%)於受剪的過程中，由於本身統體材料不同，以及不同的體積變化反應所

此點與 Toki et al. (1995) [35]之研究結果相符。10%的混合比隨著圍壓的增加將使 G_{eq}/G_{max} 對 γ 的遞減關係減緩，降低 G_{eq}/G_{max} 對於剪應變範圍變化的敏感性。比較不同混合比之對應剪力模數 (G_{eq}) 發現，在圍壓 = 98.1kPa 與 196.2kPa 時，混合比 = 10%的 G_{eq} 較混合比 = 0%時為低，且圍壓 σ'_c 的增加使混合比 = 10%的 $G_{eq}/G_{max,0\%}$ 降低，顯示輪胎碎片的揉度效應會隨著 σ'_c 增加而提高。

5. 廢輪胎碎片在直接剪力試驗之試體尺寸有其尺寸效應，不同尺寸之直接剪力試驗所獲得之摩擦角亦有所不同。混合比由 0%依序增加至混合比為 50%時其應力應變曲線則由應變硬化行為逐漸轉化為趨於線性上升，表示由於廢輪胎碎片含量較多，土壤含量較少，因此在受剪時，多為輪胎與輪胎間顆粒來承受應力，其已由原來土壤之應力應變行為逐漸轉換為廢輪胎碎片之應力應變行為。
6. 對於現地高程、滲水與溫度之觀測方面，沈陷量觀測顯示沈陷量變化非常小。滲水檢驗分析結果亦符合一般污水排放標準，如運用在一般非水源區之道路，應對環境不會產生嚴重影響。
7. 不同時段（早上、中午、下午）之溫度觀測結果顯示，在越接近表層其土壤的溫度越高，且在輪胎碎片越厚的回填層其溫度也越高。但是土堤內輪胎碎片之溫度不至於高到會將土壤中之水分蒸發或者使輪胎碎片燃燒之地步，因此從溫度之觀點來看，使用輪胎碎片與土壤混和做土堤之安全的。

2 建議

1. 三軸壓密不排水(CIU-AC)試驗結果所顯示之有效摩擦角 ϕ' 有必要就更高之混合比 (>25%) 進行試驗，以尋求最佳之廢輪胎混合比。
2. 微應變往復式三軸試驗目前乃是進行初步之探討，對於廢輪胎混合比的動態載重行為，有必要做進一步的研究，來探求一般道路以廢輪胎碎片作為回填料的動態特性，可提供作為沈陷量之預估與不同反覆載重作用之阻泥效應。

參考文獻

南山, 1996, "環保新招-利用廢輪胎做為公路路基回填材料之研究"交通與安全, 第 299 期, 8-12 頁

廢輪胎資源化利用技術與策略研討會", 1996

清華、郭葉輝、喬泰智 1992, "廢輪胎可行處理技術評析", 技術與工程, 七月號

明元 1998, "廢輪胎碎片之大地工程特性研究"國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文

佳魁 1999, "廢輪胎碎片在不同相對夯實度下之大地工程性質"國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文

安斌、謝啟萬, 「廢輪胎應用於公路填方之可行性研究」, 第一期, 2000

孟人 1999, "廢輪胎焚化污染特性之研究"國立台灣大學環境工程學研究所碩士論文

0, "橡膠工業", 第 24 卷, 第八期

0, Annual Book of ASTM STANDARDS D 6270-98

med, I. And Lovell, C. W. (1992), "Use of Waste Materials in Highway Construction: State the Practice and Evaluation of the Selected Waste Products", Transportation Research Record 1345, pp. 1-9.

med, I., and Lovell, C.W. 1993, "Rubber Soils as Lightweight Geomaterials", Transportation Research Record 1422, pp.61-70.

ida, C. C., 1995, "Engineering Properties of Scrap Tires Used in Geotechnical Applications," Report 95-1, Material and Resolution Division, Vermont Agency of Transportation, Montpelier, Vt.

nal, A., 1996, "Laboratory study on the use of tire shreds and rubber sand un backfills and forced soil application," PhD thesis, Purdue University, West Lafayette, Ind.

mental, M., and Zelibor, J. L., 1992, "Utilization of Waste Materials in Civil Engineering," Scrap Tires Used in Rubber-Modified Asphalt Pavement and Civil Engineering. Applications, CE, New York, pp.182-192.

ischer, P.J., Edil, T.B., and Eldin, N., 1993, "Construction and Performance of a Shredded Waste Tire Test Embankment," Transportation Research Record, No. 1345, Transportation

Research Board, Washington, D.C. pp. 44-52.

Bosscher, P. J., and Edil, T. B., 1994, "Engineering Properties of Tire Chips and Soil Mixtures," ASTM Geotechnical Testing, pp. 453-464.

Bosscher, P.J., Edil, T.B., and Kuraoka, S., 1995, "Design of Highway Embankments Using Fire Chips," Report on Use of Scrap Tires in Civil and Environmental Construction, Environmental Geotechnical Report No. 95-2, University of Wisconsin-Madison.

Bosscher, P. J., Edil, T. B., and Kuraoka, S., 1997, "Design of Highway Embankments "Using Fire Chips," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp.295-304.

Bressette, T., 1984, "Used Tire Material as an Alternative Permeable Aggregate," California Department of Transportation.

Burland, J.B., (1989) "Small is Beautiful – the Stiffness of Soils at Small Strains," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.26, No. 4, pp.499-516.

Chesher, A., Newcomb, D., and Bouhaja, M., 1992, "Development of Design Guideline for Use of Shredded Tires as a Lightweight Fill in Road Subgrade and Retaining Walls," Department of Civil and Mineral Engineering, University of Minnesota.

Edil T. B. and Bosscher P. J. 1992, "Development Of Engineering Criteria For Shredded Waste Tires In Highway Applications Final Report".

Edil, T.B., and Bosscher, P.J., 1996, "Engineering Properties of Tire Chips and Soil Mixtures," Geotechnical Testing journal, ASTM, Vol. 17, No.4, pp.453-464.

Engstrom, G. and Lamb, R., 1994, "Using Shredded Waste Tires as a Lightweight Fill Material for Road Subgrades," A Summary Report, Minnesota Department of Transportation.

Engstrom, G.J., Benson, C.H., and Bosscher, P.J., 1995, "Sand Reinforced with Shredded Waste Tires," Report on Use of Scrap Tires in Civil and Environmental Construction, Environmental Geotechnical Report No. 95-2, University of Wisconsin-Madison.

Engstrom, G. J., Benson, C. H. and Bosscher, P. J. 1996, "Sand Reinforced with Shredded Waste Tires", Journal of Geotechnical Engineering, pp. 760-767.

Engstrom, E., Cody, W., and Niemi, M.K., 1989, "Tires for Subgrade Support," presented at the Annual Conference on Forest Engineering Meeting, Coeur D'Alene, Aug. 27-30.

- Heimdahl, T. C., and Drescher, A., 1999, "Elastic Anisotropy of Tire Shreds," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 383-389.
- Humphrey, D. N., Sanford, T. C., and Cribbs, M. M., 1993, "Shear Strength and Compressibility of Tire Chips for Use as Retaining Wall Backfill," *Transportation Research Record* 1422, pp. 29-35.
- Humphrey, D. N., and Nickels, W. L., Jr. 1997, "Effect of tire chips as lightweight fill on pavement performance," *Proc. of the XIV Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Humphrey, D. N., Manion, S. M., 1997, "Properties of Tire Chips for Lightweight Fill," *Tire Chips for Lightweight Fill*, pp. 1343-1356.
- Huang, A.B., Hsu, S.P., and Kuhn, H.R., (1994) "A Multiple Purpose Soil Testing Apparatus," *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol.17, No.2, pp.227-232.
- Jee, J. H., Salgado, R., Bernal, A., and Lovell, C. W., 1999, "Shredded Tires and Rubber-Sand as Lightweight Backfill," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 132-141.
- Masad, E., Tara, R., Ho, C., and Papagiannakis, T., 1995, "Engineering Properties of Shredded Tires as a Lightweight Fill Material," *Geotechnical Testing Journal*, pp. 297-304.
- Man, J., 1990, "Minnesota Happenings-Lightweight Rubber Tire Fill," *The Center Line*, Winter 1990, 6 p.
- Mullisoz N., Edil T. B., and Bensn C. H., 1998, "Interaction Between Reinforcing Geosynthetics And Soil-Tire Chip Mixtures," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 1109-1119.
- Nakai, S., Shybuya, S., and Yamashita, S., 1995, "Standardization of Laboratory Test Methods Determine the Cyclic Deformation Properties of Geomaterials in Japan," *Proceedings, the Pre-Failure Deformation of Geomaterials*, Sapporo, Japan, Vol.2, pp.741-784.
- Reedie, J. J., Humphrey, D. N. and Sandford, T. C., 1998, "Tire Shreds as Lightweight Retaining Wall Backfill: Active Conditions," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 1061-1070.
- Retaining Wall in City Test Corporation, 1990, "Waste tires in sub-grade road beds," A report on the environmental study of the use of shredded waste tires for roadway sub-grade support, prepared for the Minnesota Pollution Control Agency.
- Roberts, P., 1991, "Use of Tire Chips in a Highway Embankment", Res. Update U 91-5, Vermont Agency of Transportation, Montpelier, Vt.
- Shan, W. Y., Benda, C. C., and Cauley, R. F., 1997, "Triaxial Determination of Shear Strength

of Tire Chips,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp. 479-482.

附錄 A 微應變往復式三軸試驗結果

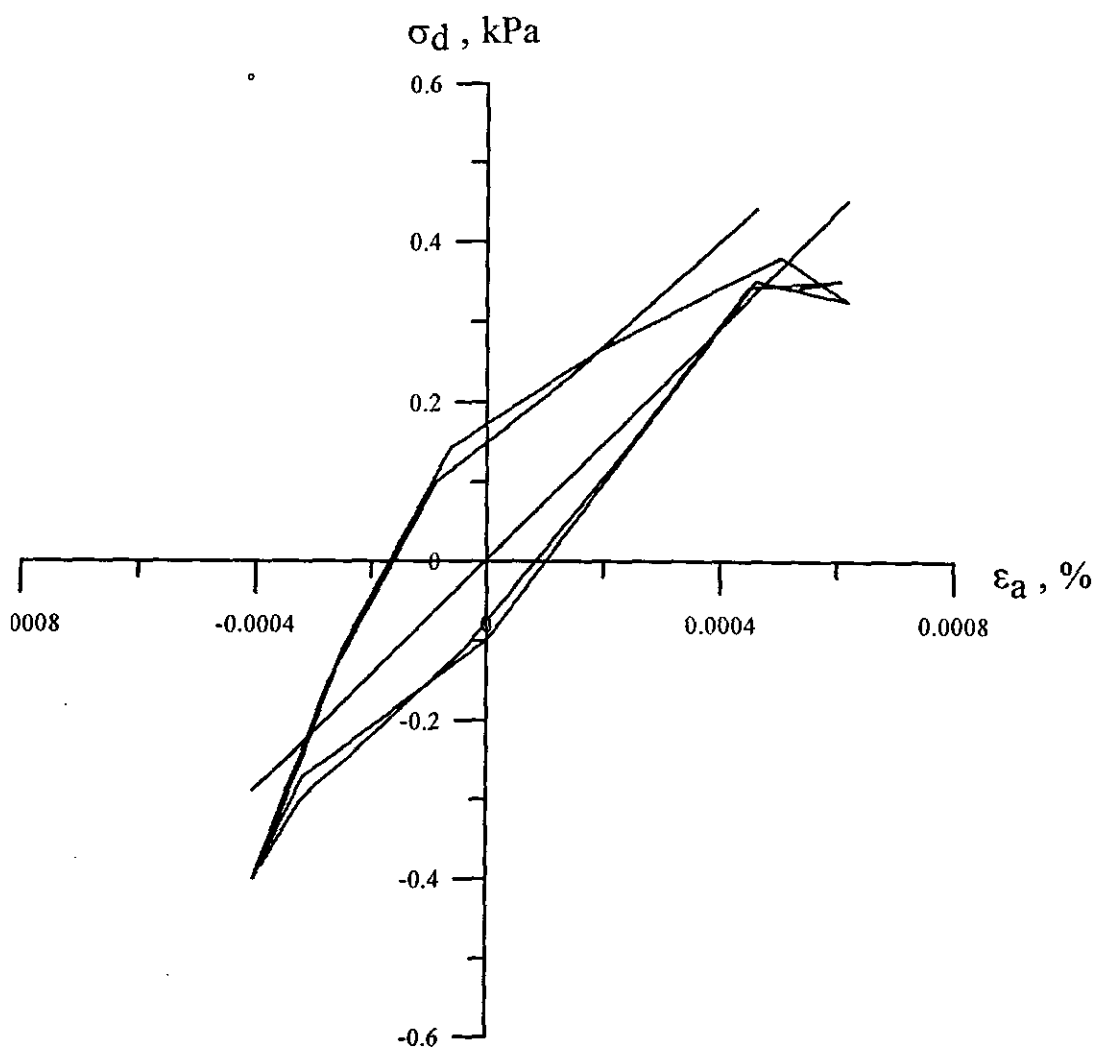


圖 A.1 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=0%, 圍壓=49.1 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-5}$)

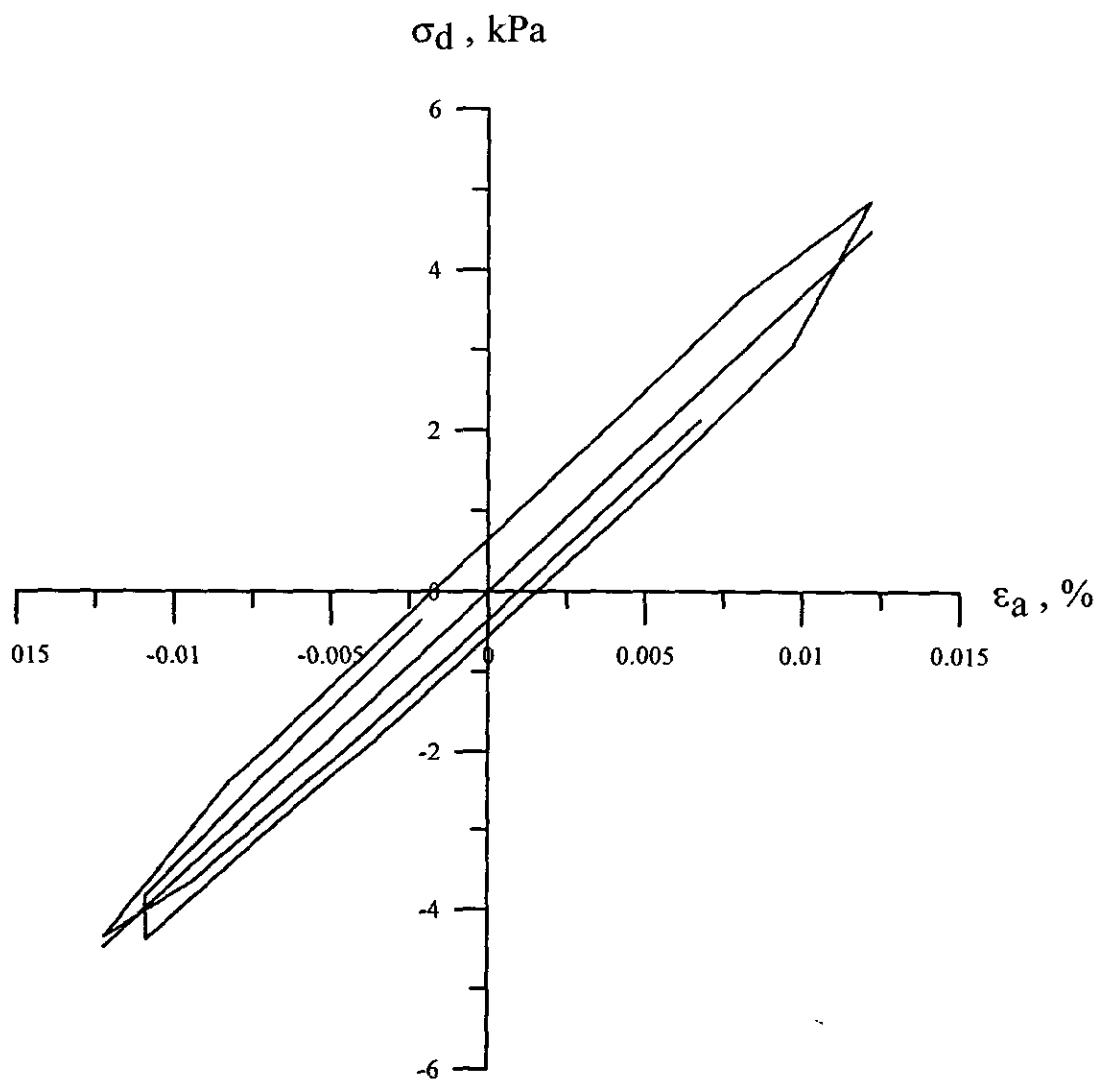


圖 A.2 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=0%, 圍壓=49.1 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-4}$)

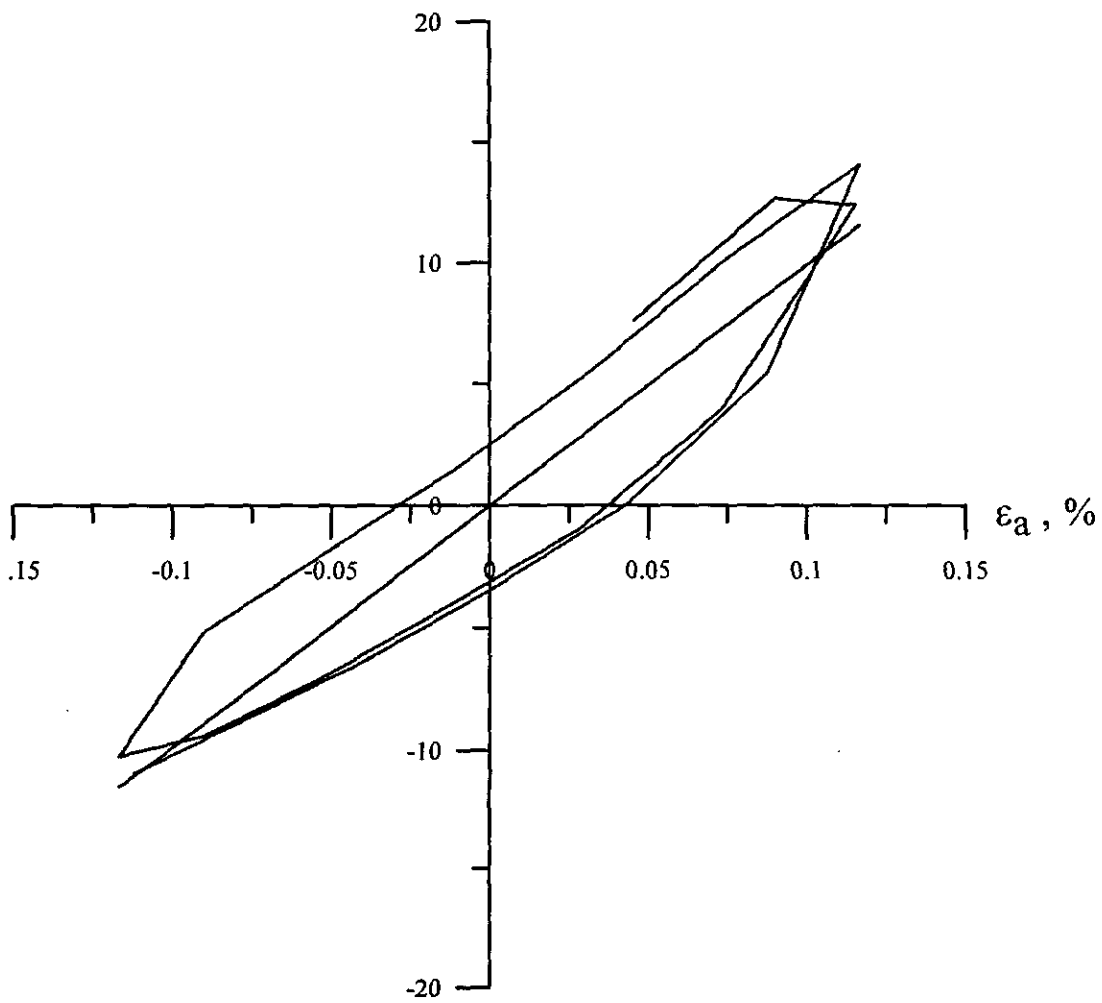


圖 A.3 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=0%, 圍壓=49.1 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-3}$)

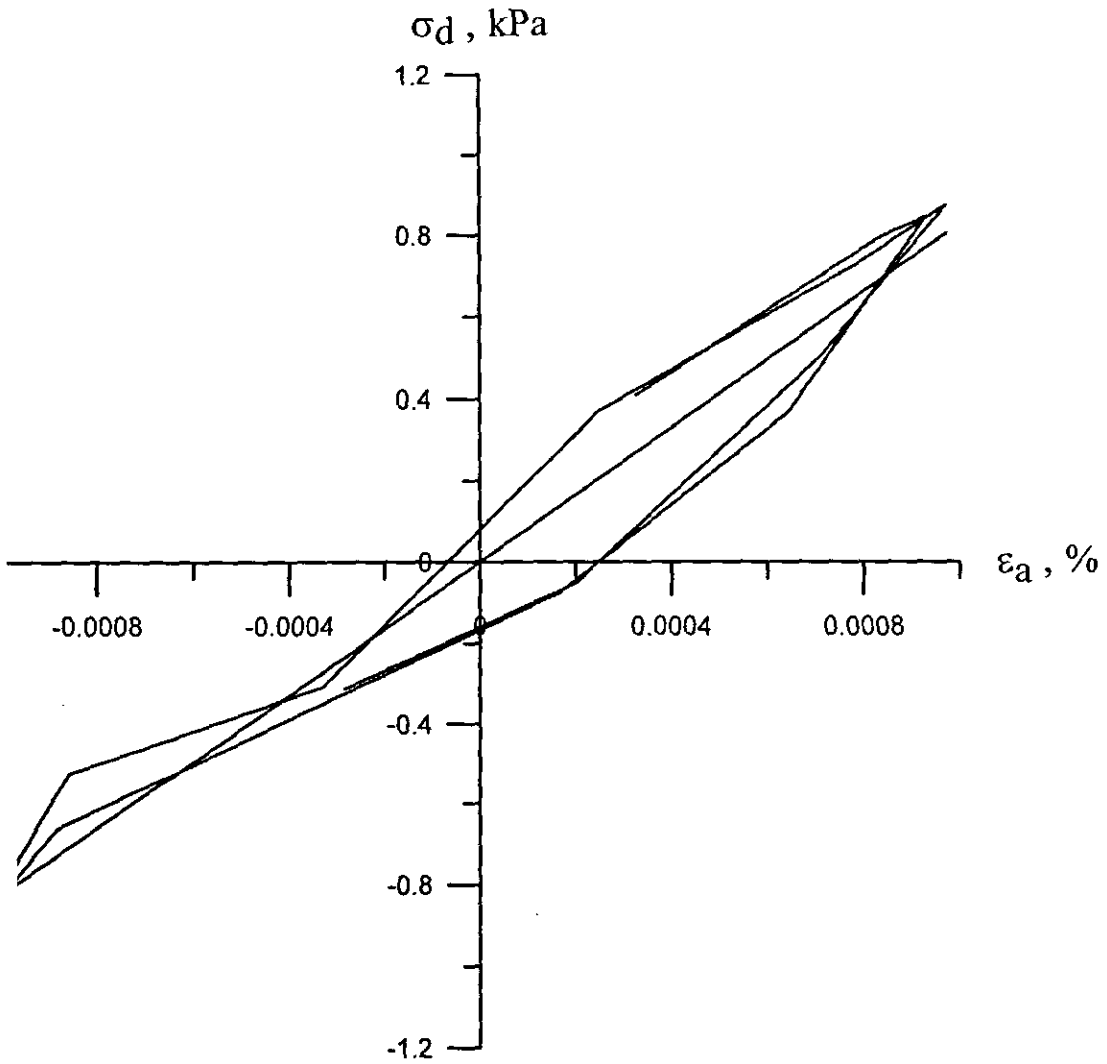


圖 A.4 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ε_a)
 (Chip Ratio=10%, 圍壓=49.1 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-5}$)

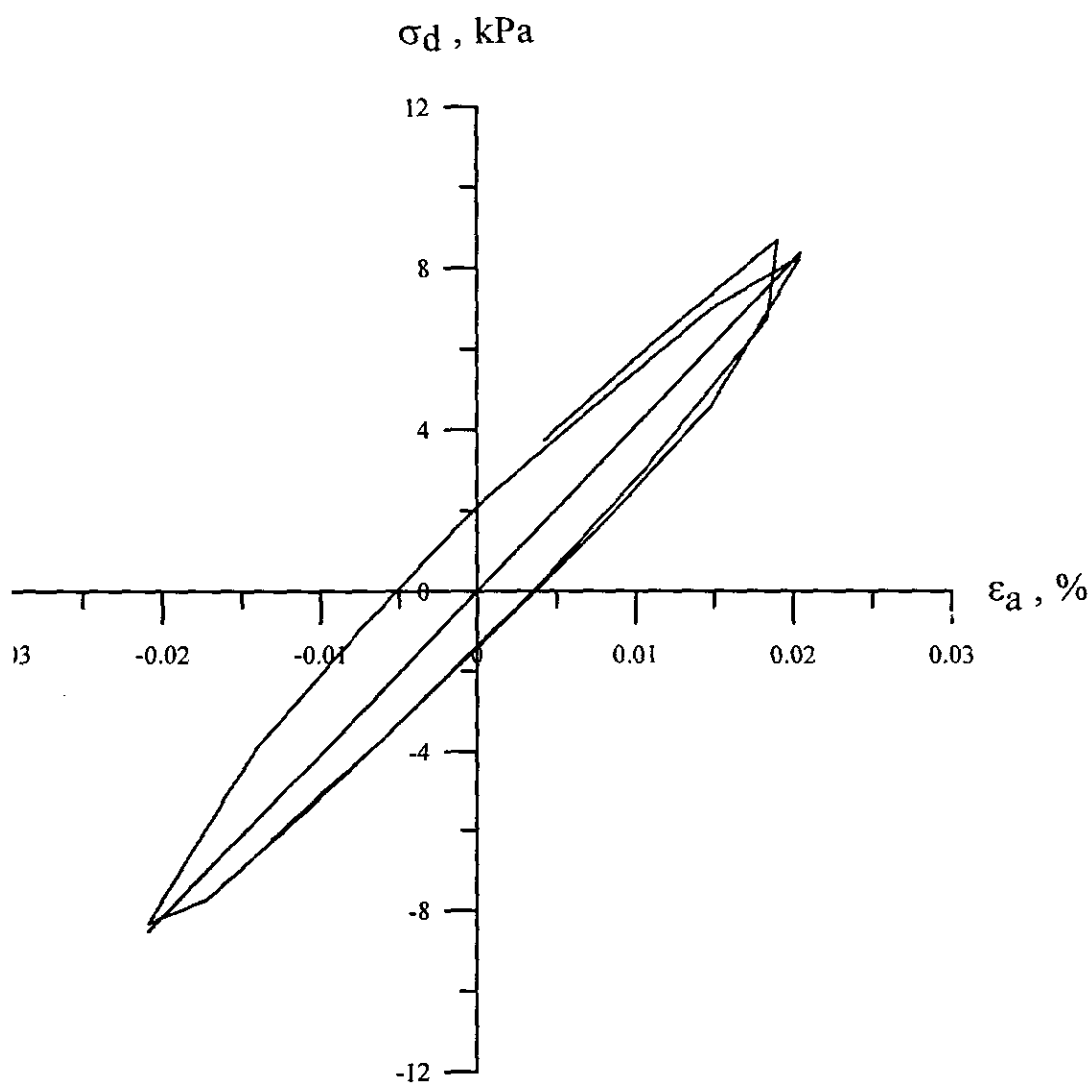


圖 A.5 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=10%, 圍壓=49.1 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-4}$)

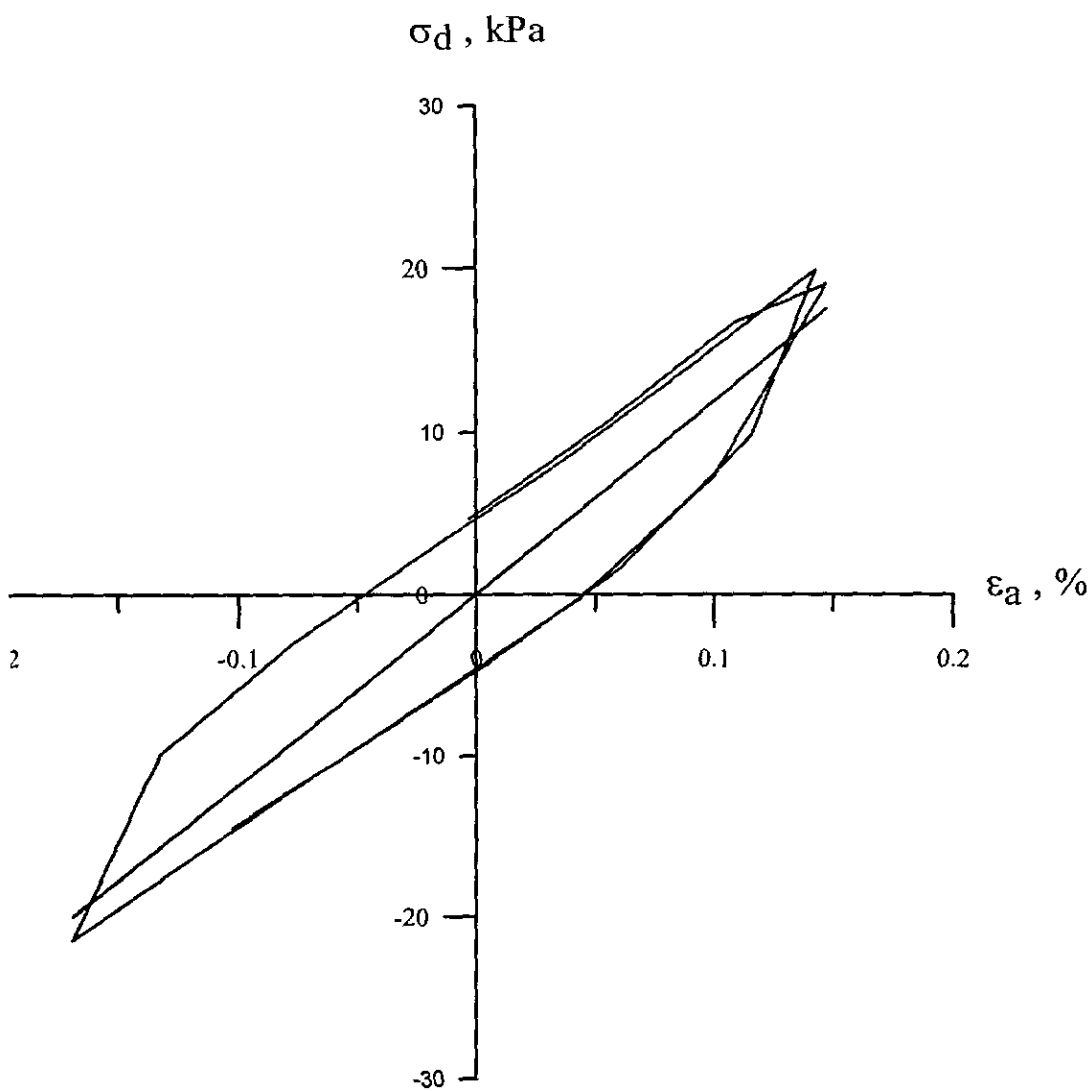


圖 A.6 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=10%, 圍壓=49.1 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-3}$)

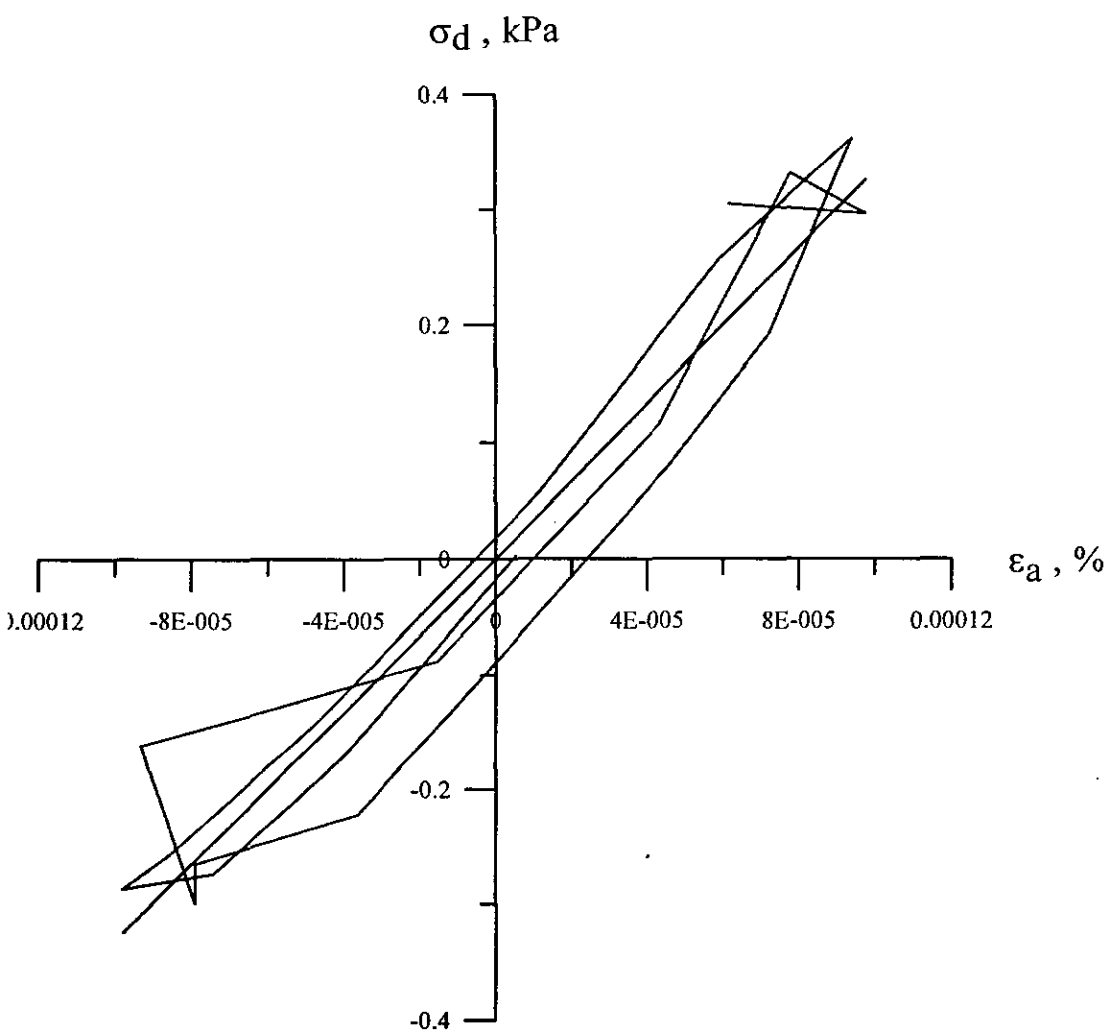


圖 A.7 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=0%, 圍壓=98.1 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-6}$)

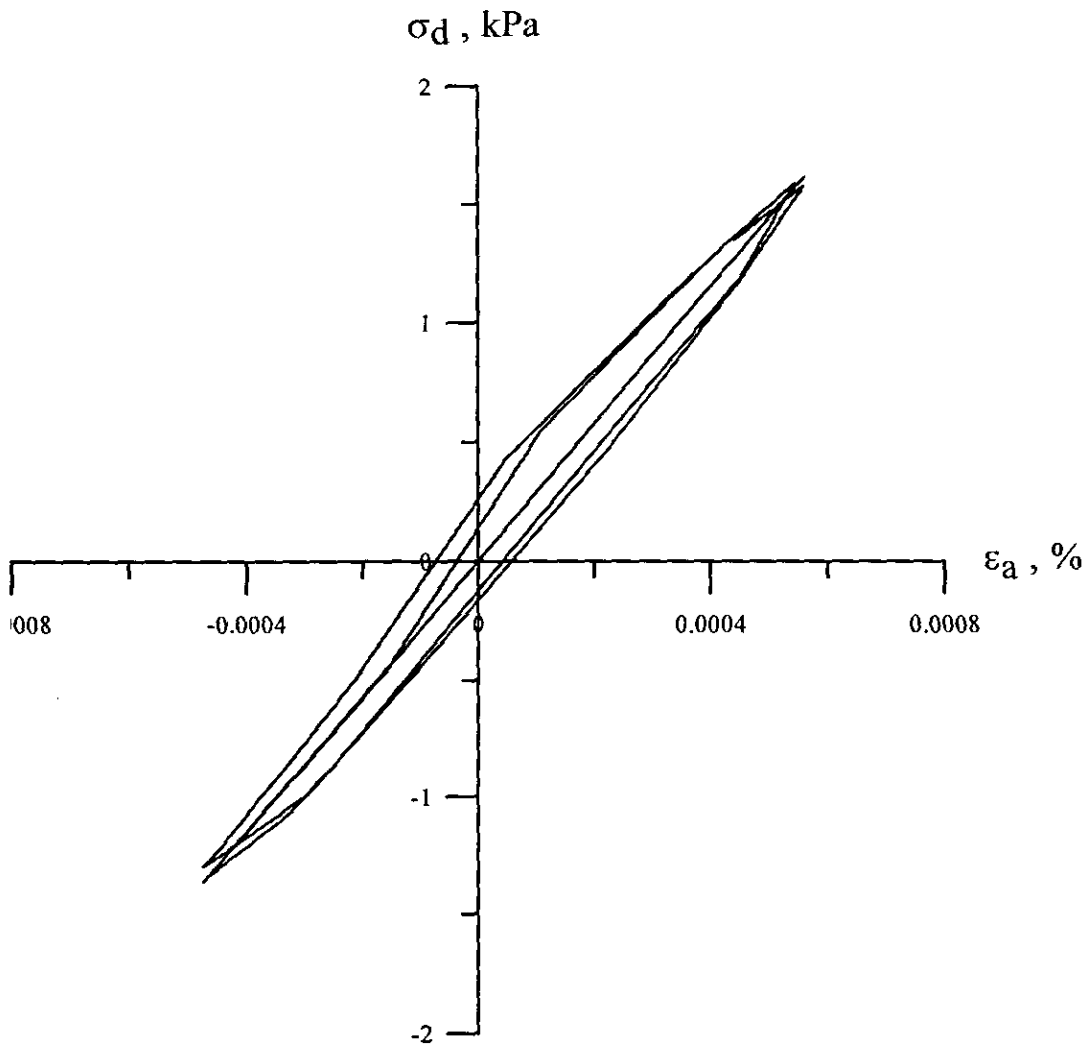


圖 A.8 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=0%, 圍壓=98.1 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-5}$)

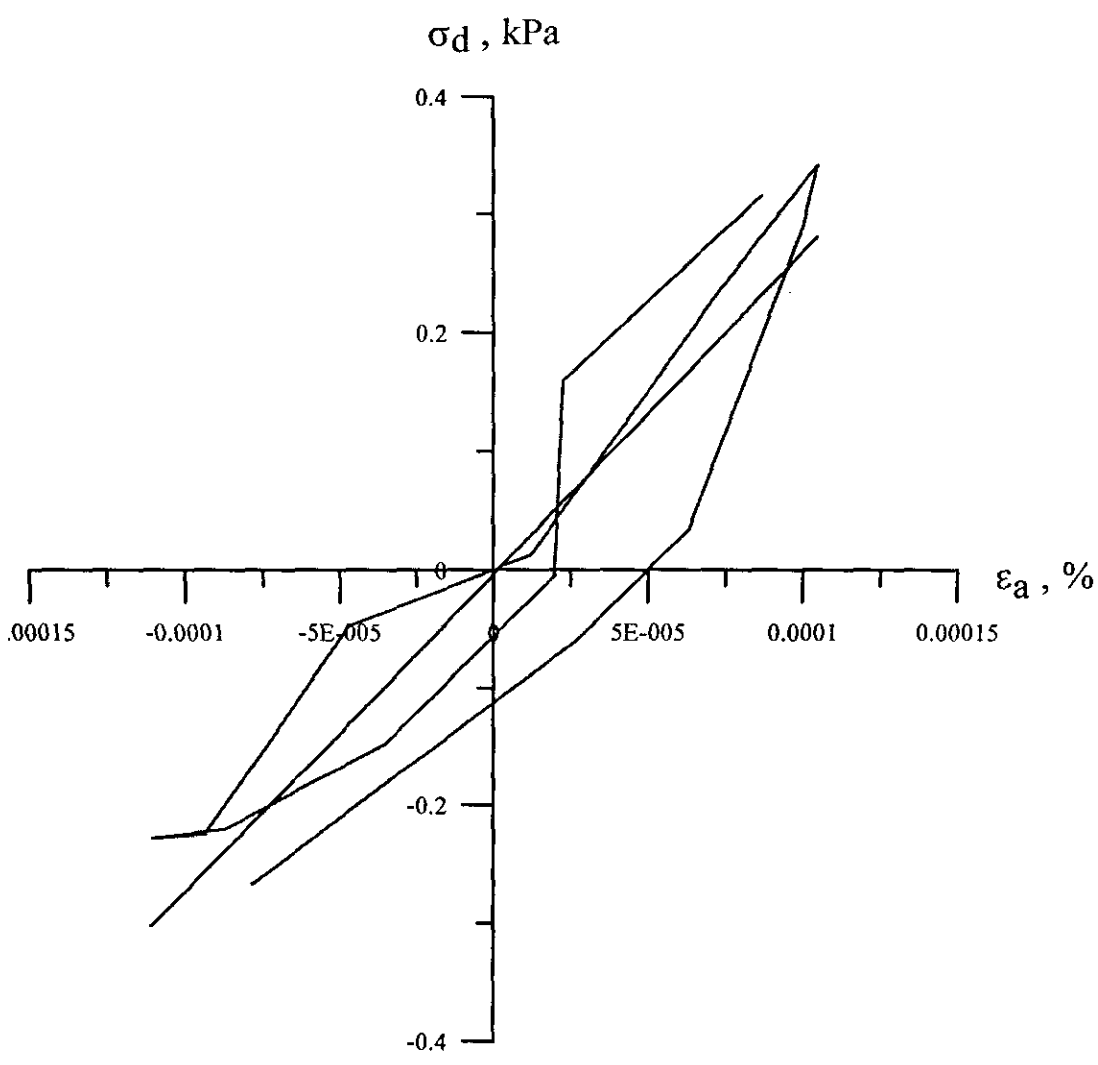


圖 A.9 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=10%, 圍壓=98.1 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-6}$)

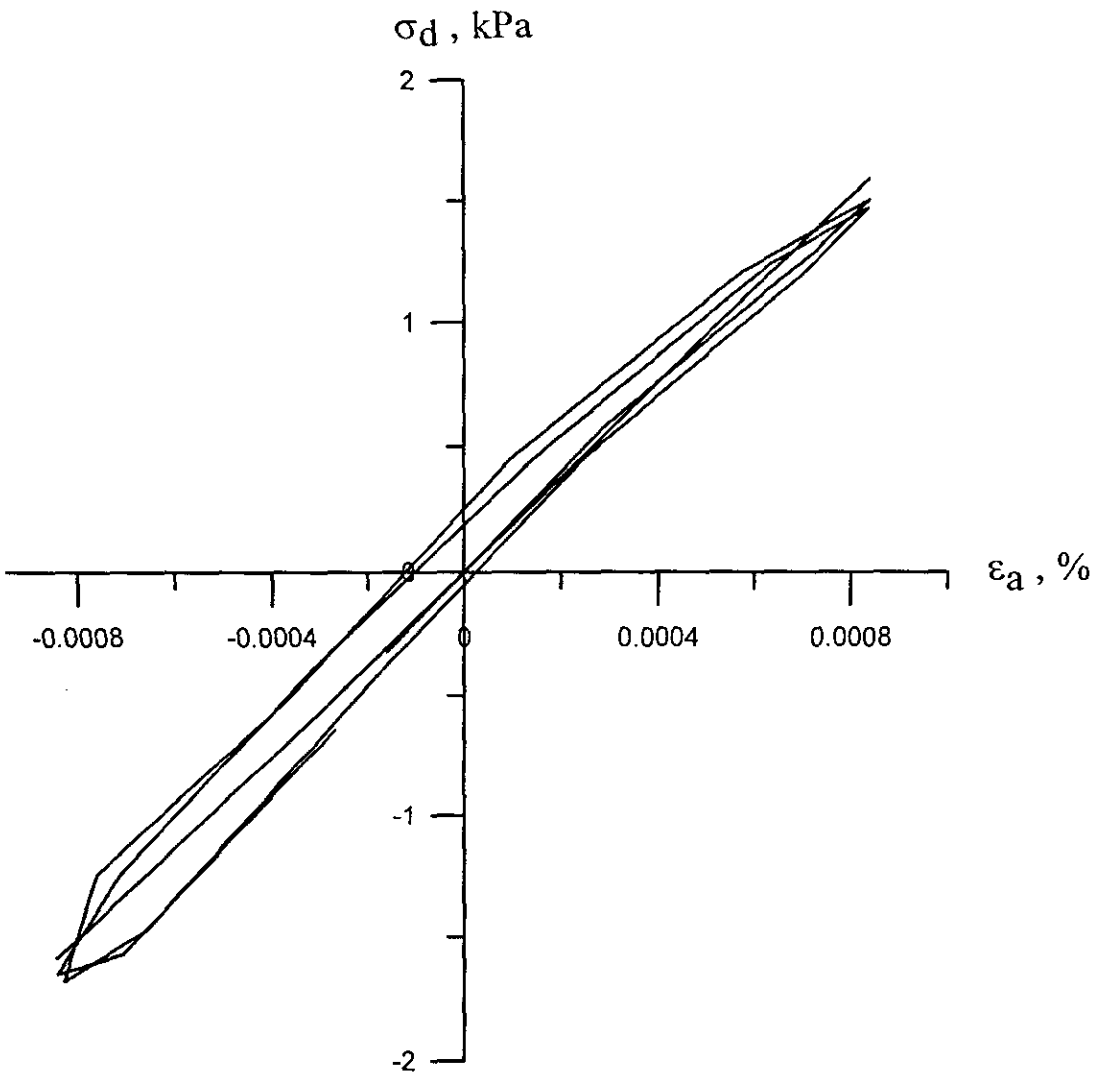


圖 A.10 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=10%, 圍壓=98.1 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-5}$)

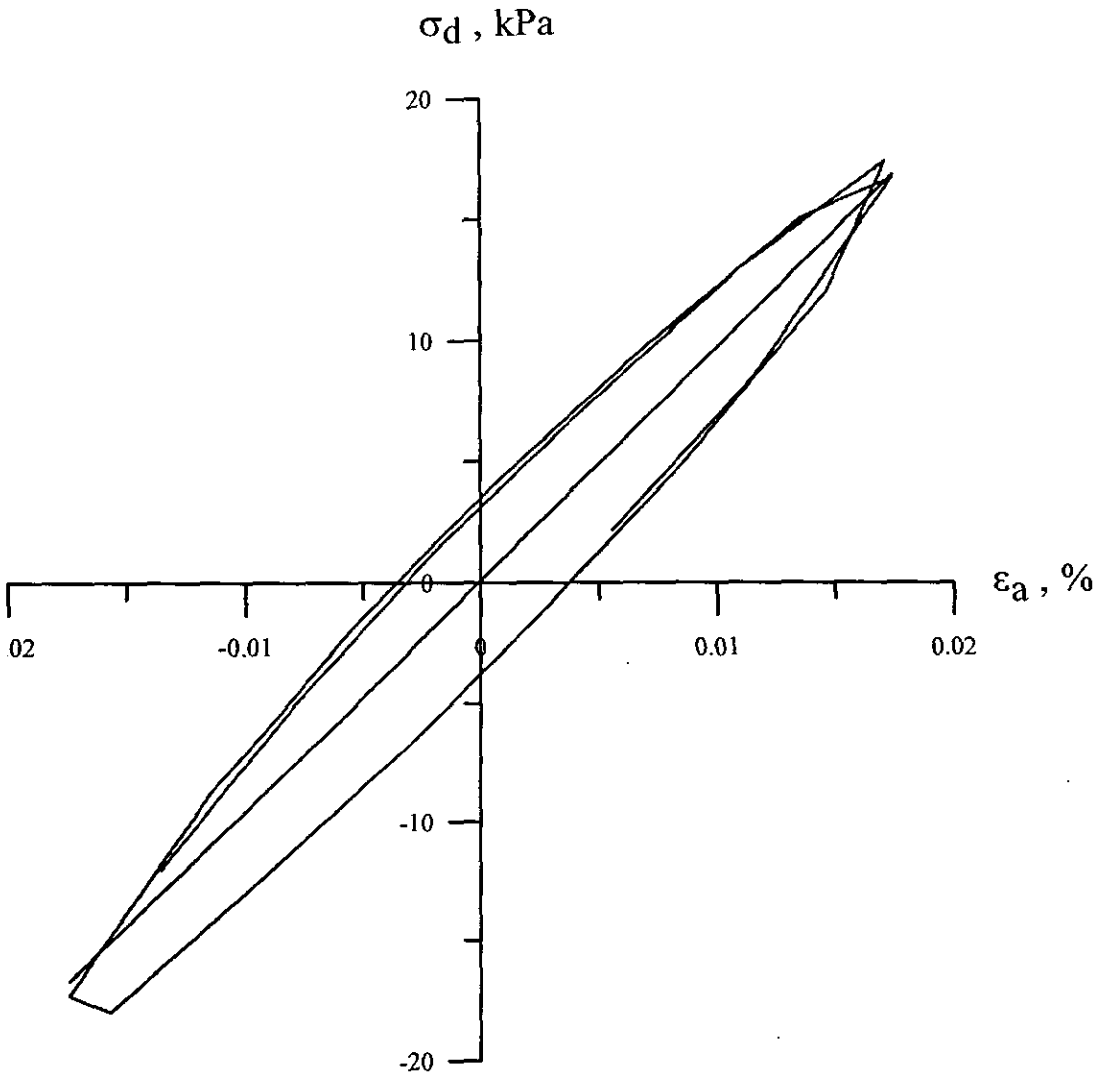


圖 A.11 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ε_a)
 (Chip Ratio=10%, 圍壓=98.1 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-4}$)

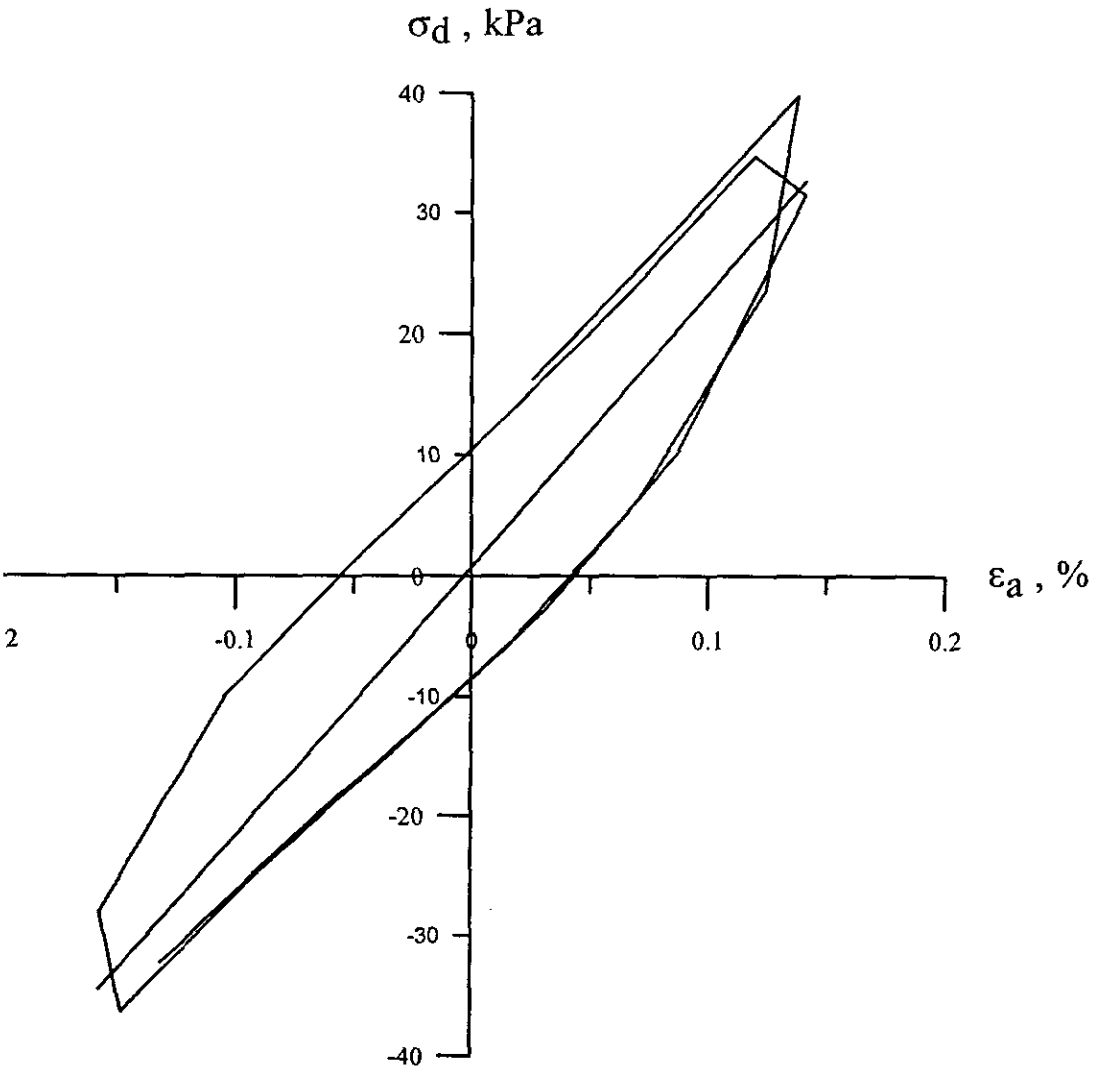


圖 A.12 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=10%, 圍壓=98.1 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-3}$)

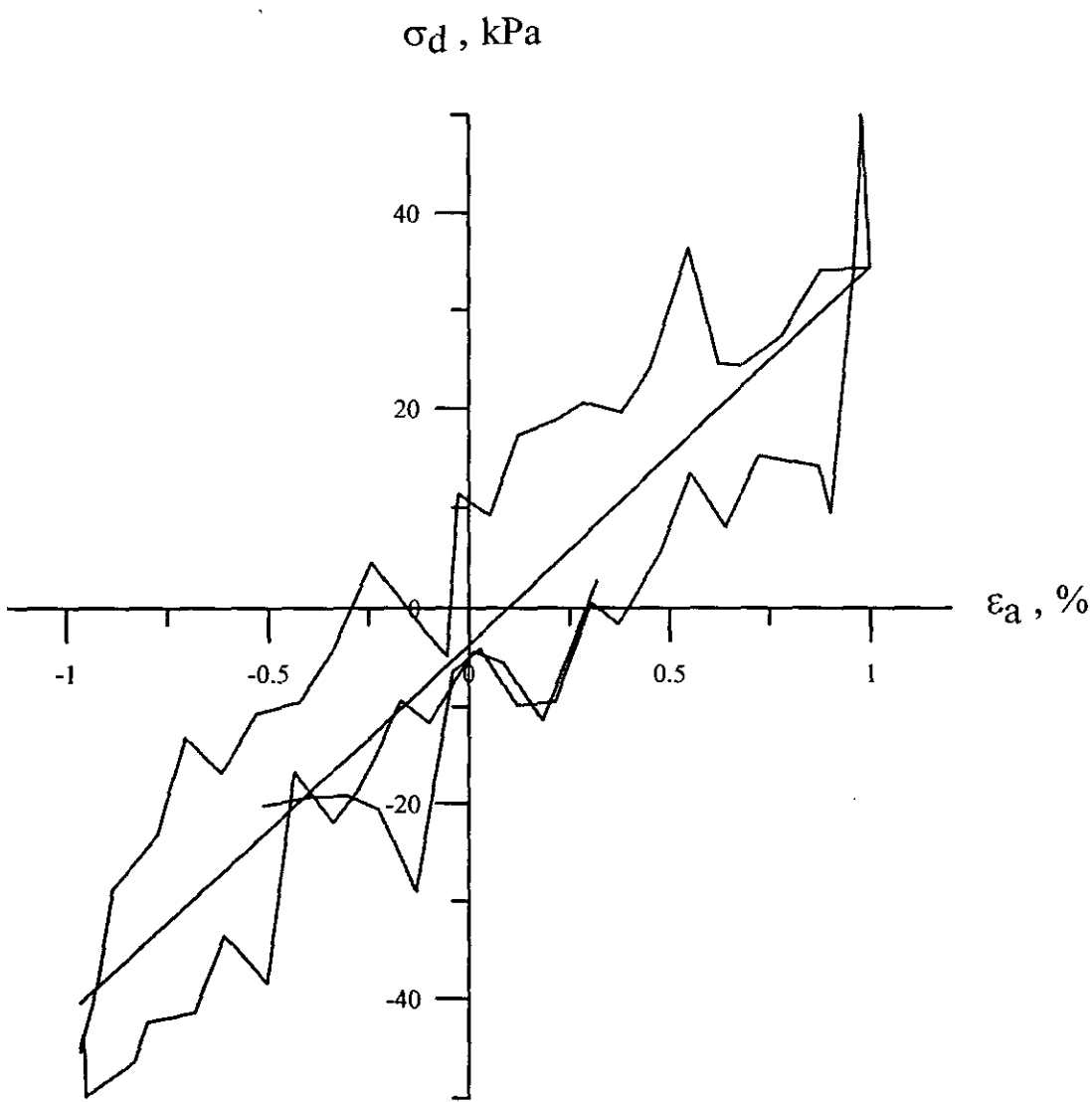


圖 A.13 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=10%, 圍壓=98.1 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-2}$)

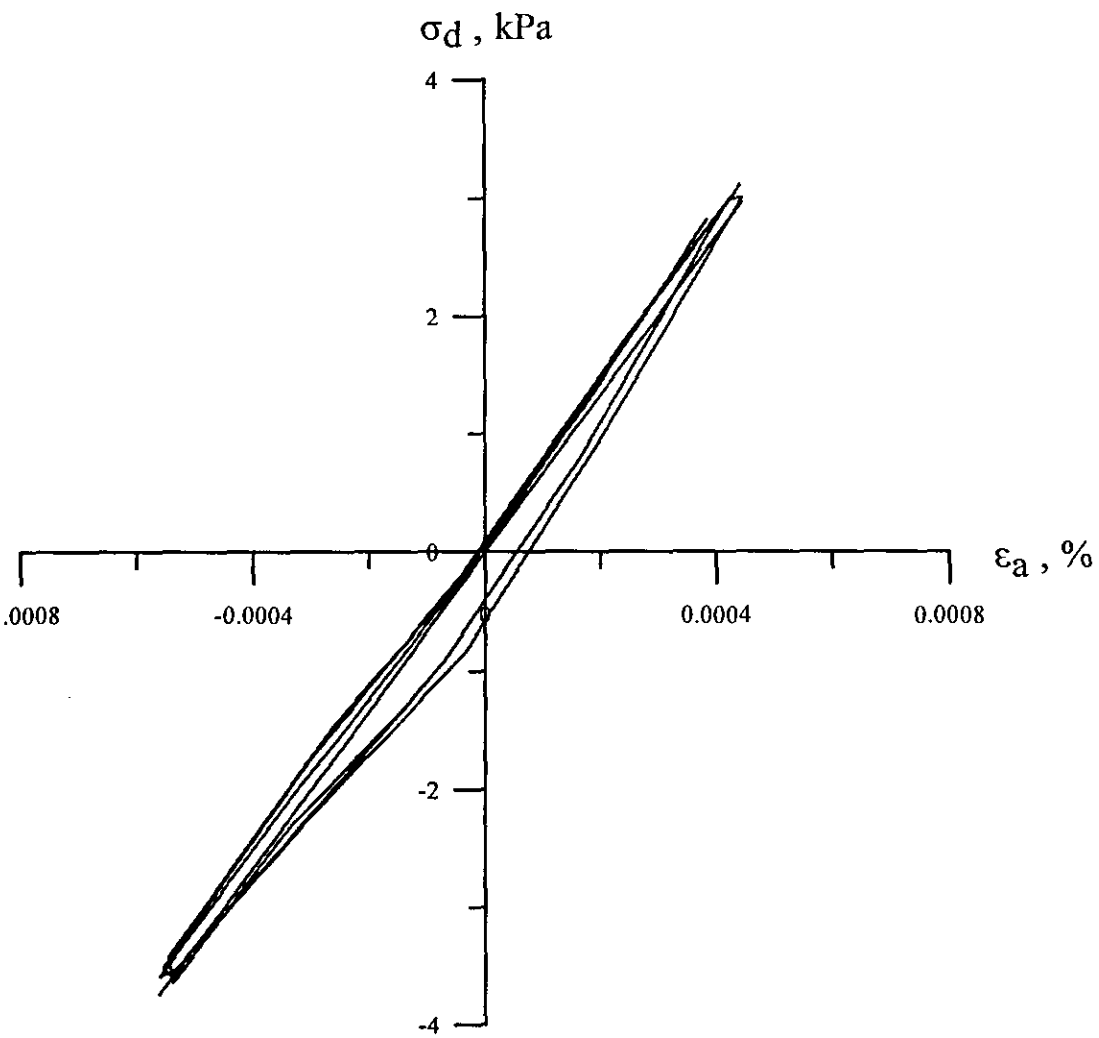
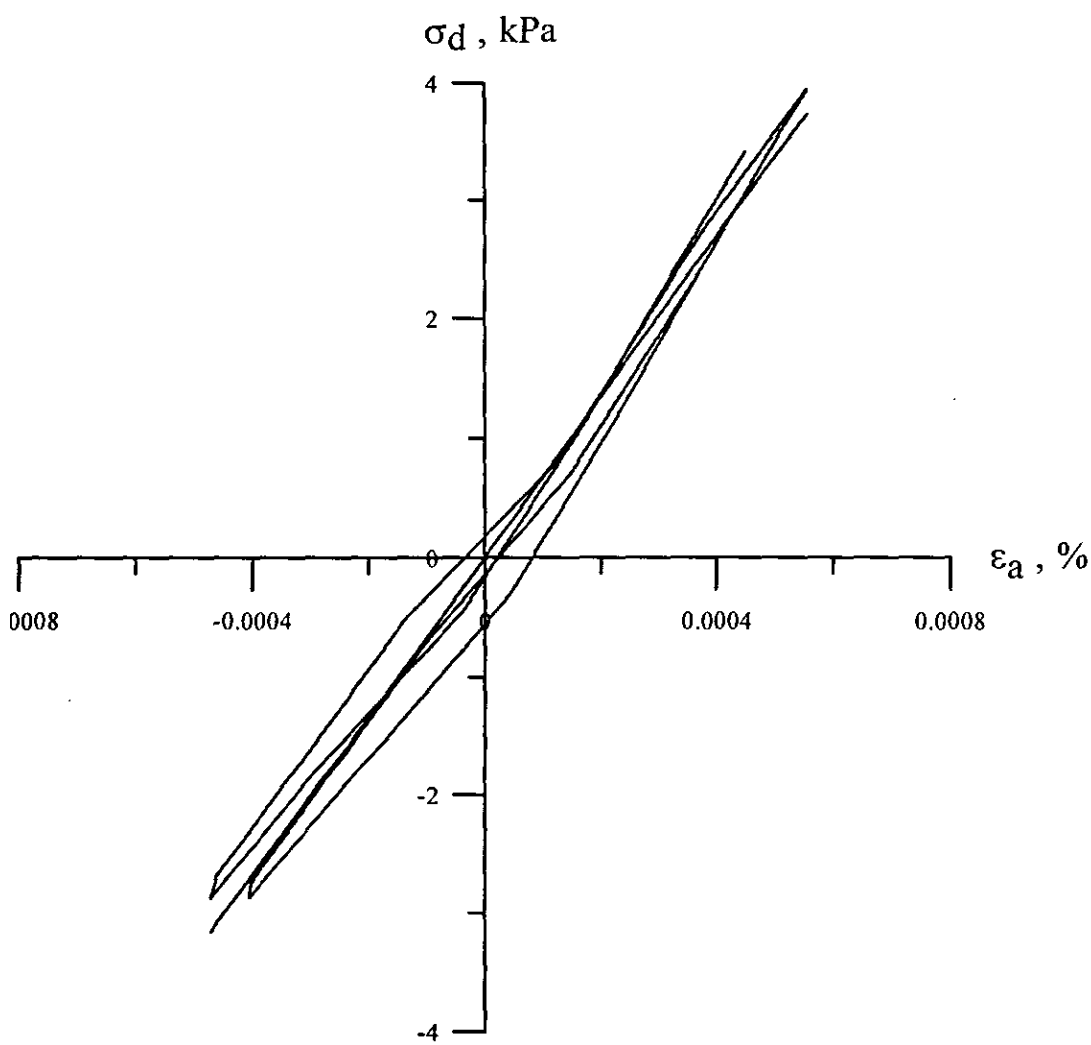


圖 A.14 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=0%, 圍壓=196.2 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-6}$)



圖?微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=0%, 196.2 kPa, 1×10^{-5})

圖 A.15 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=0%, 圍壓=196.2 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-5}$)

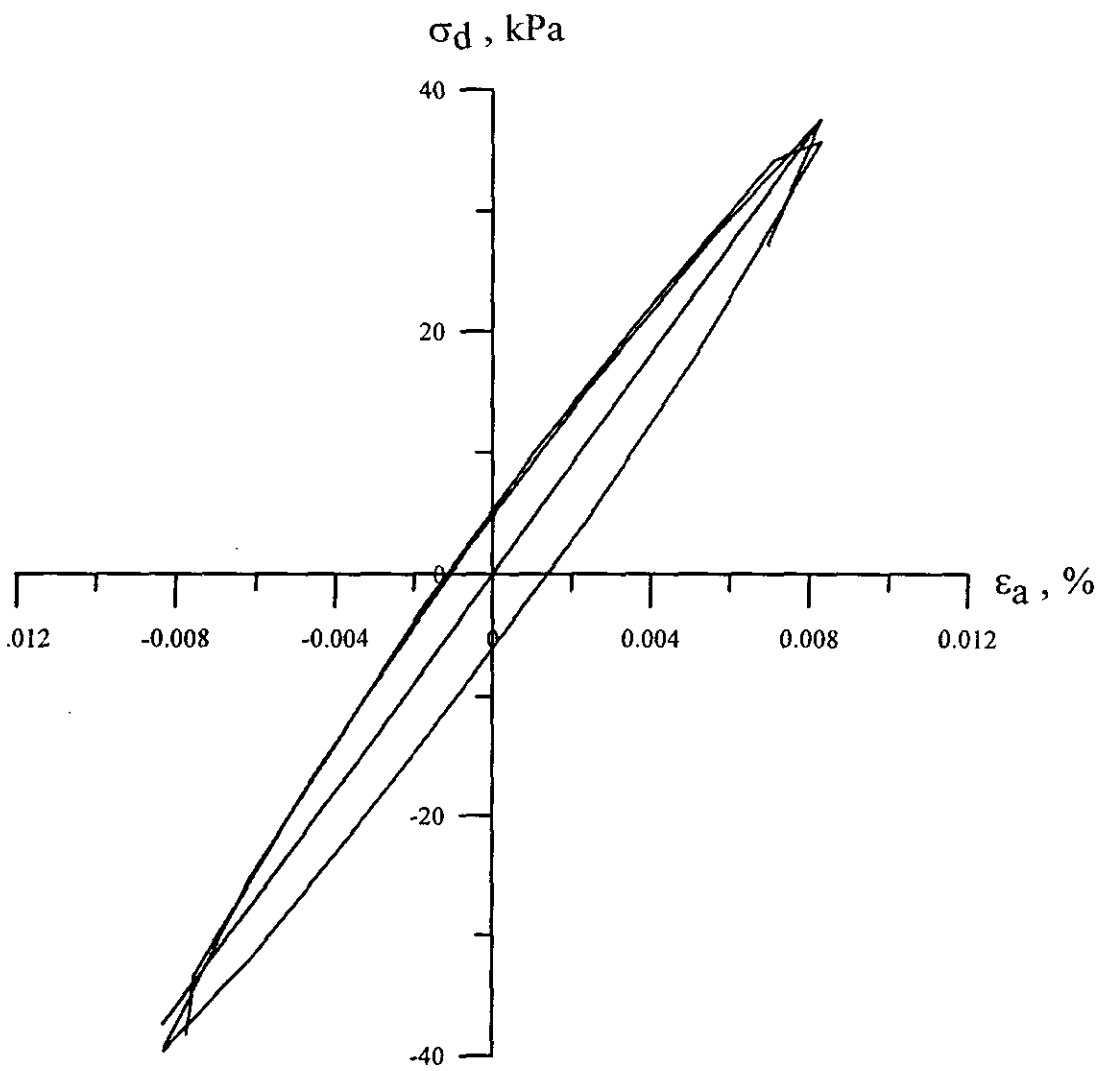


圖 A.16 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=0%, 圍壓=196.2 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-4}$)

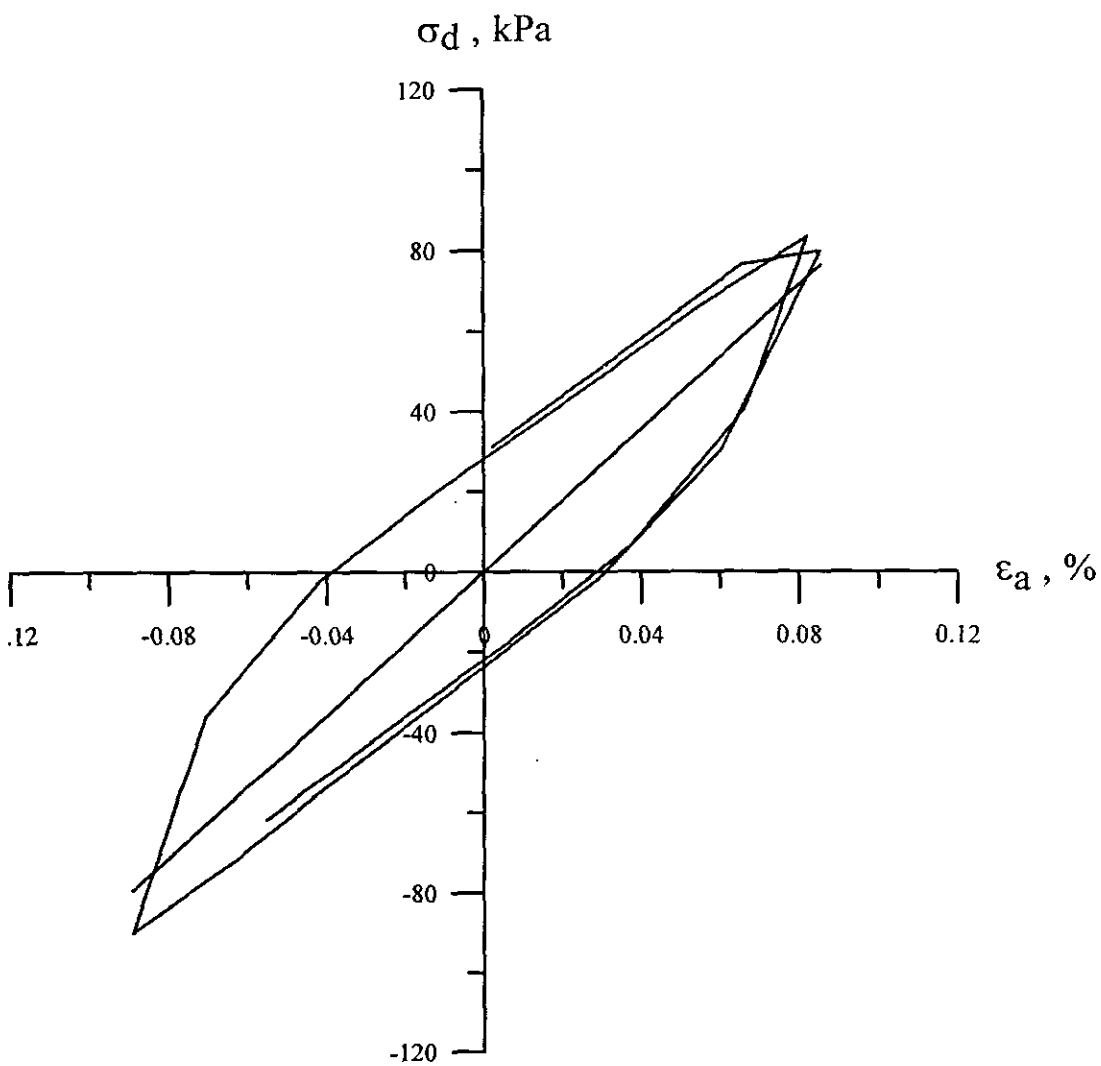


圖 A.17 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=0%, 圍壓=196.2 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-3}$)

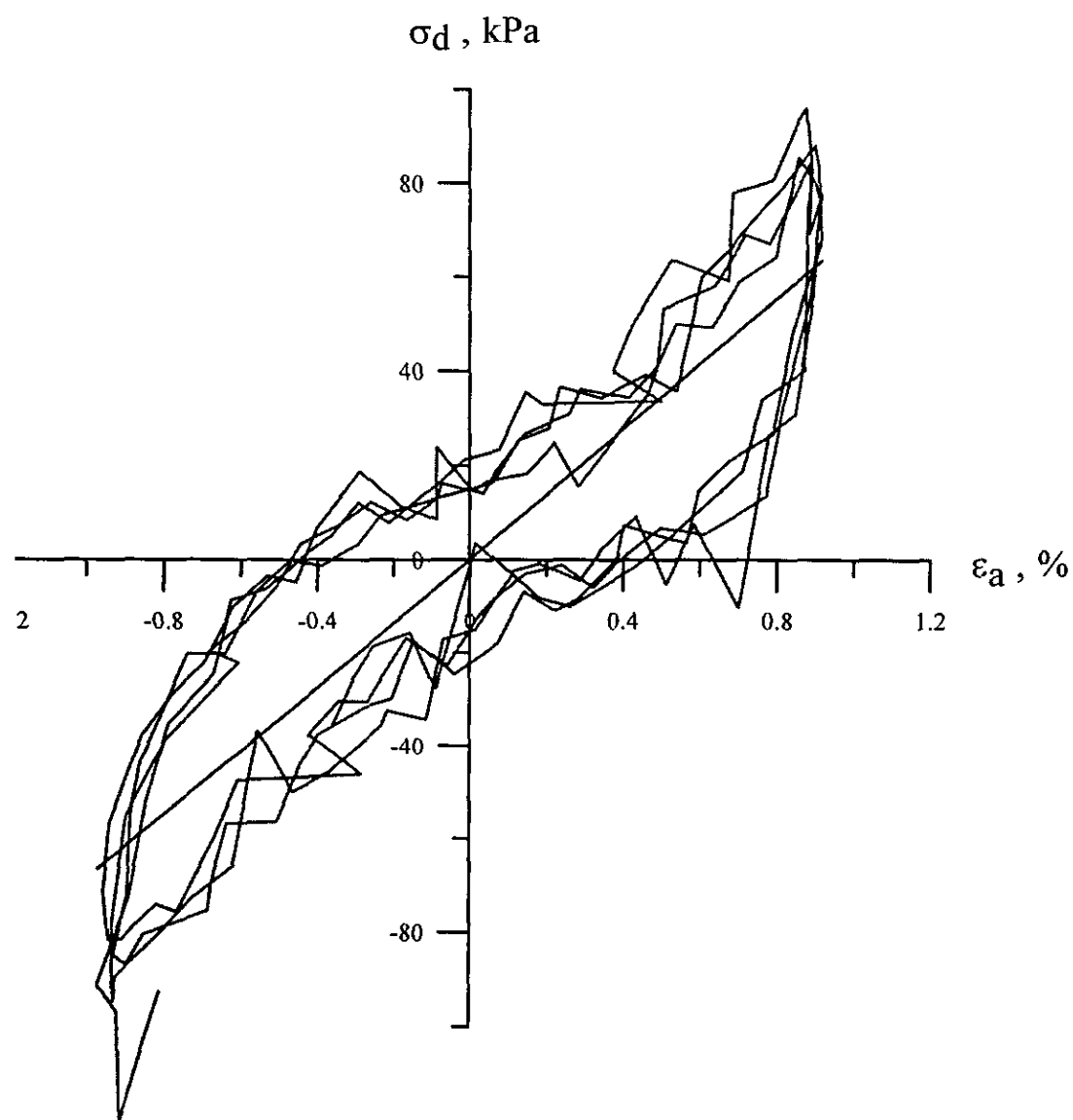


圖 A.18 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ε_a)
 (Chip Ratio=0%, 圍壓=196.2 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-2}$)

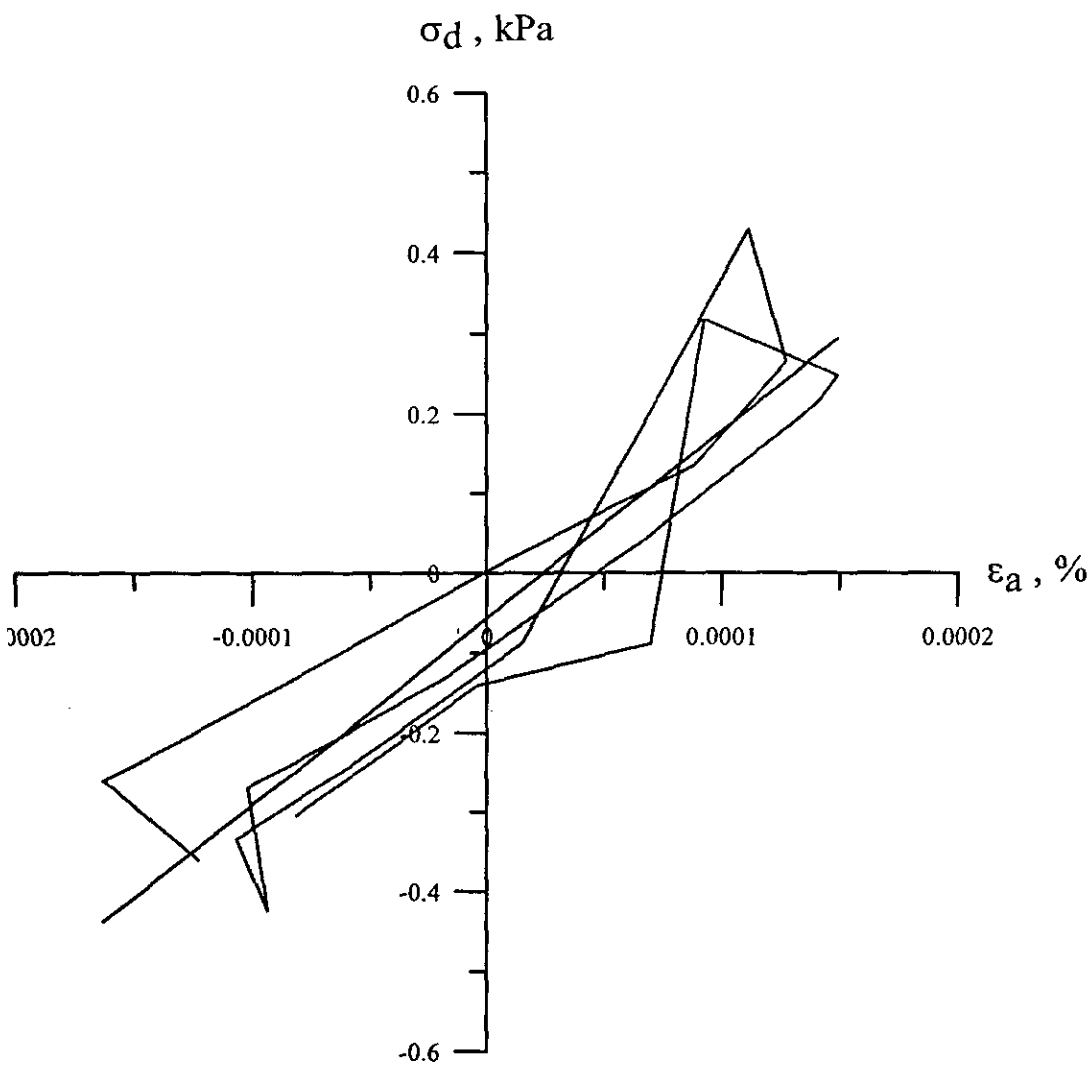


圖 A.19 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=10%, 圍壓=196.2 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-6}$)

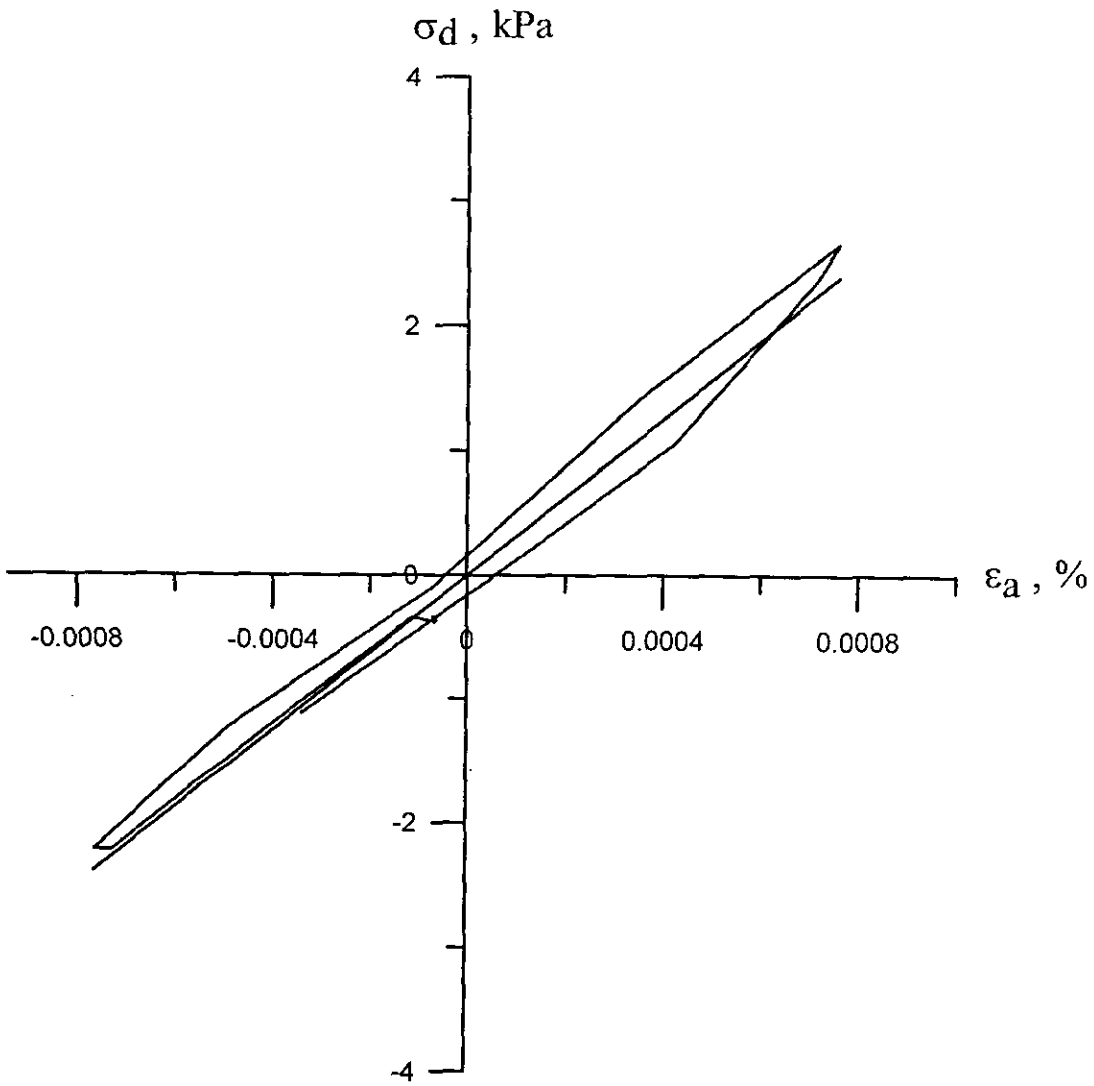


圖 A.20 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ε_a)
 (Chip Ratio=10%, 圍壓=196.2 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-5}$)

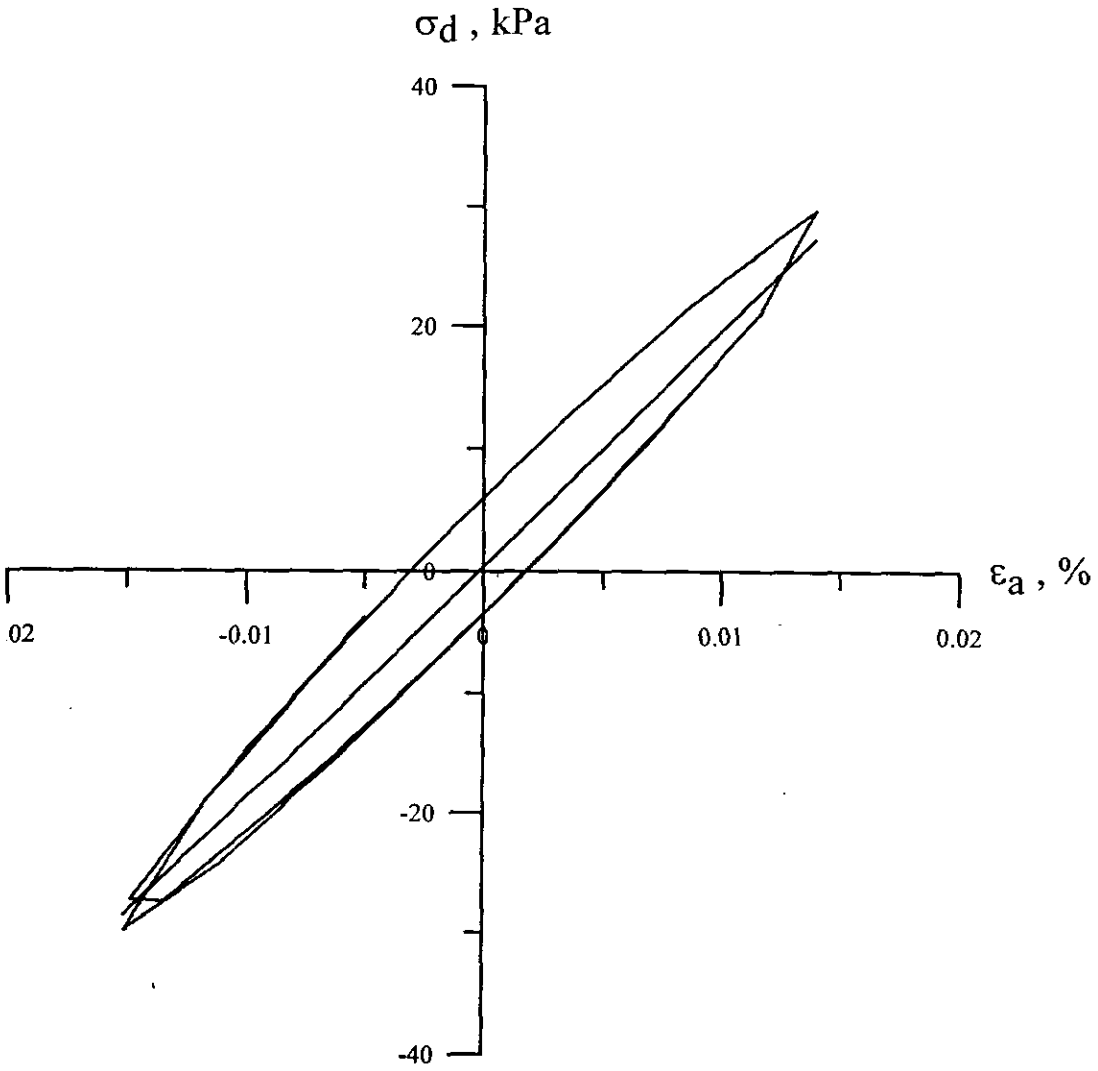


圖 A.21 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=10%, 圍壓=196.2 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-4}$)

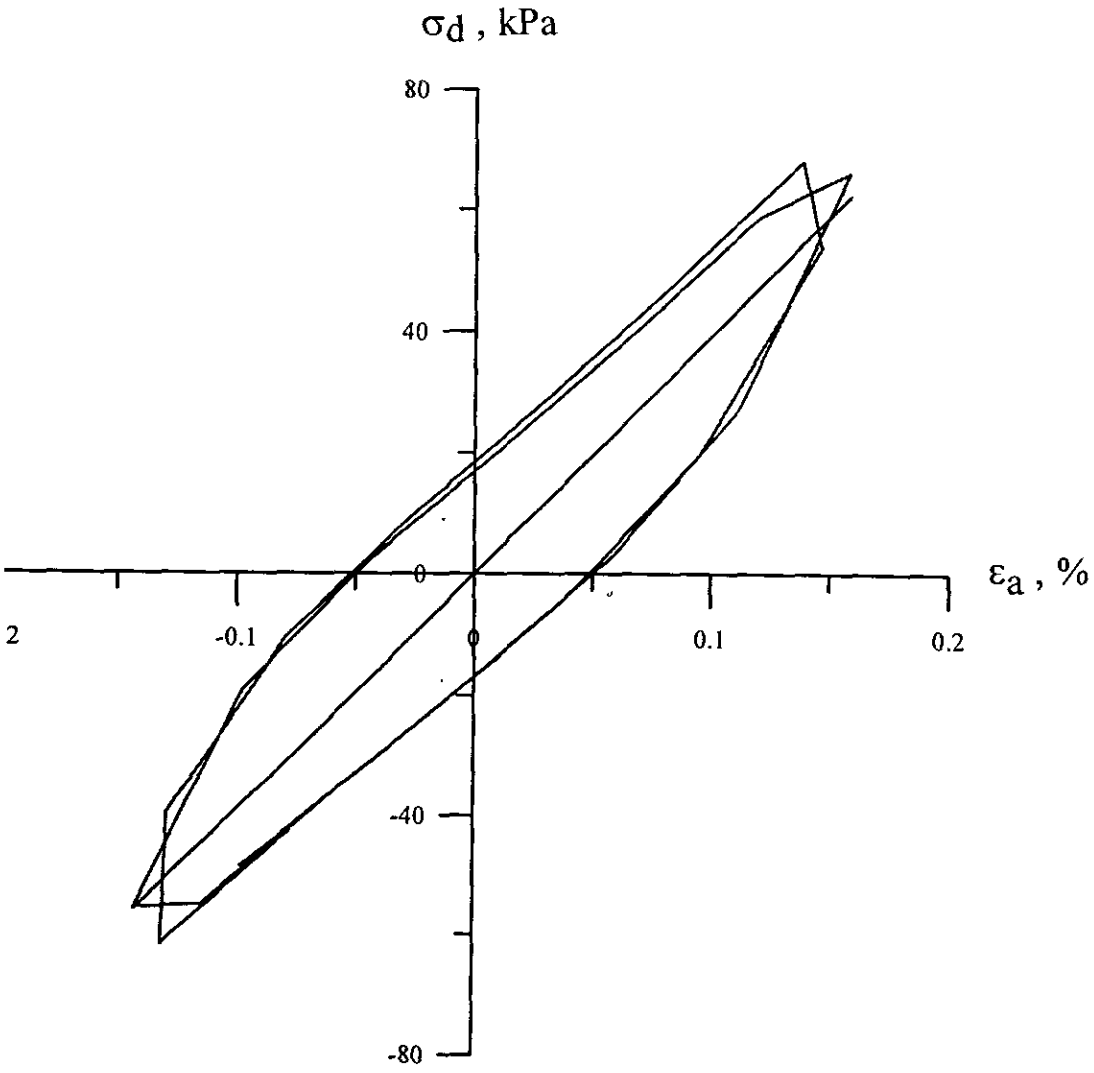


圖 A.22 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=10%, 圍壓=196.2 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-3}$)

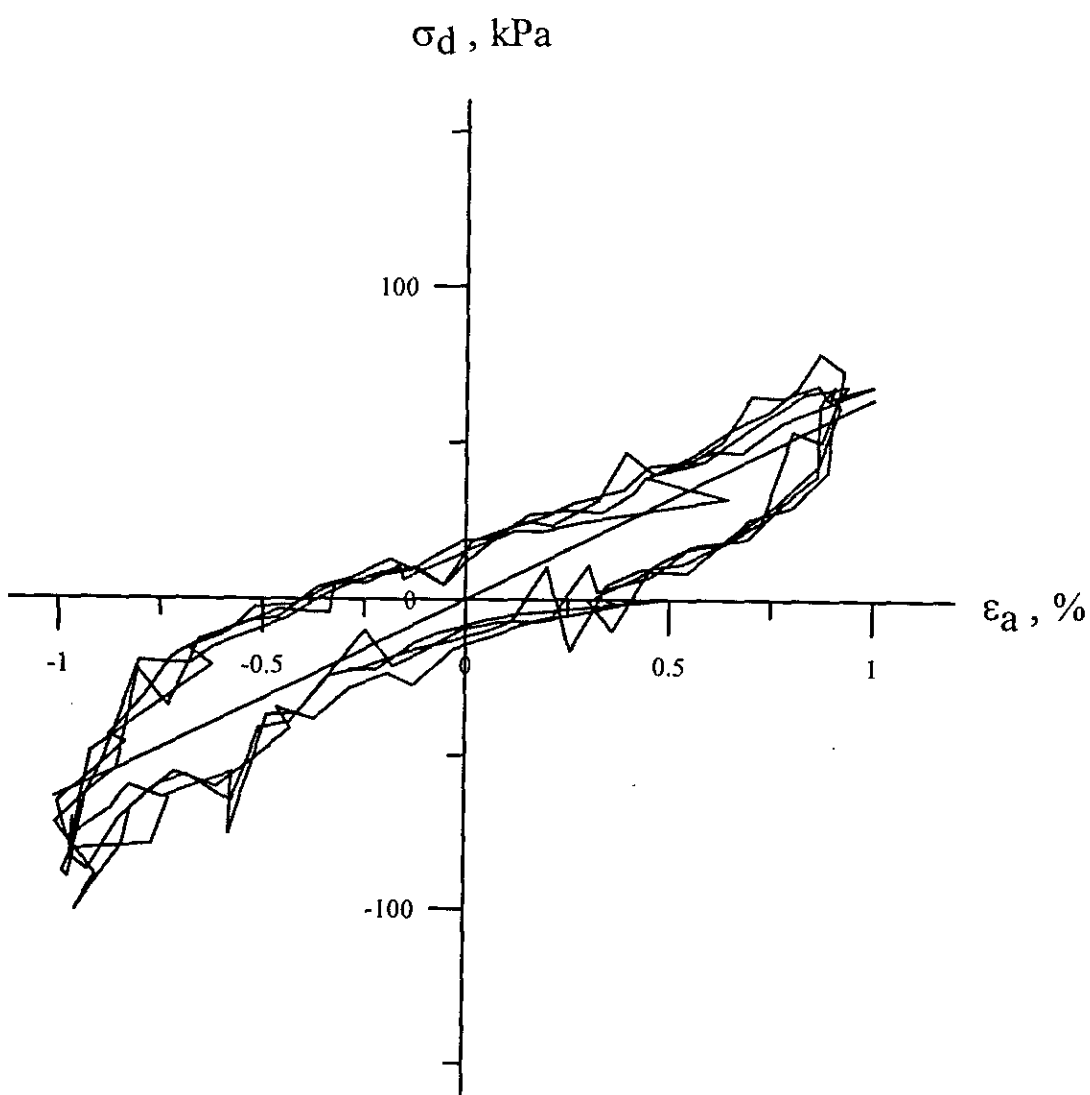


圖 A.23 微應變往復式三軸試驗軸差應力(σ_d)與軸向應變曲線(ϵ_a)
 (Chip Ratio=10%, 圍壓=196.2 kPa, 軸向應變範圍 $\pm 1 \times 10^{-2}$)

附錄 B 大型直接剪力試驗結果

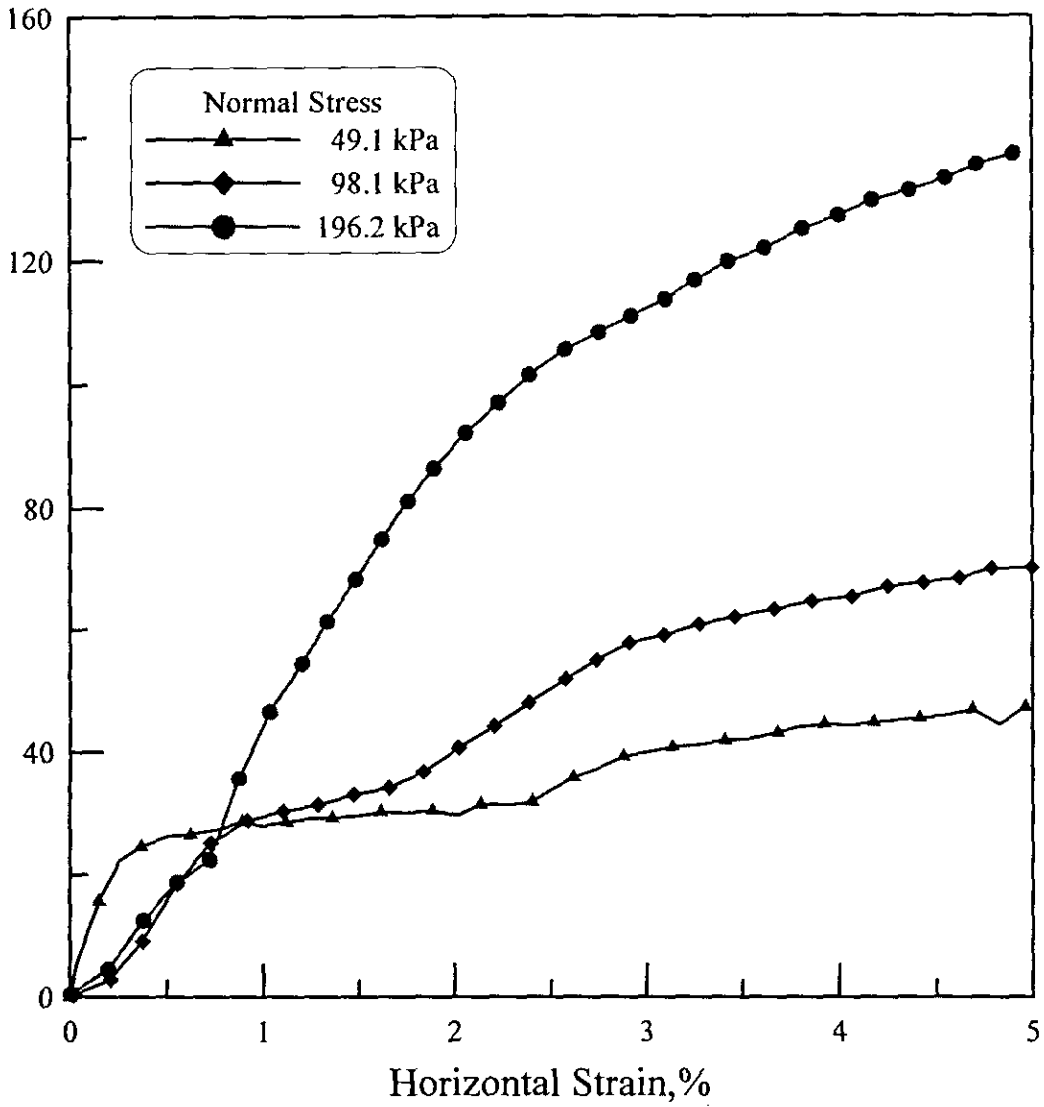


圖 B.1、0%Chip Ratio 直剪試驗(試體尺寸：20× 20cm², 橫向應變=5%)

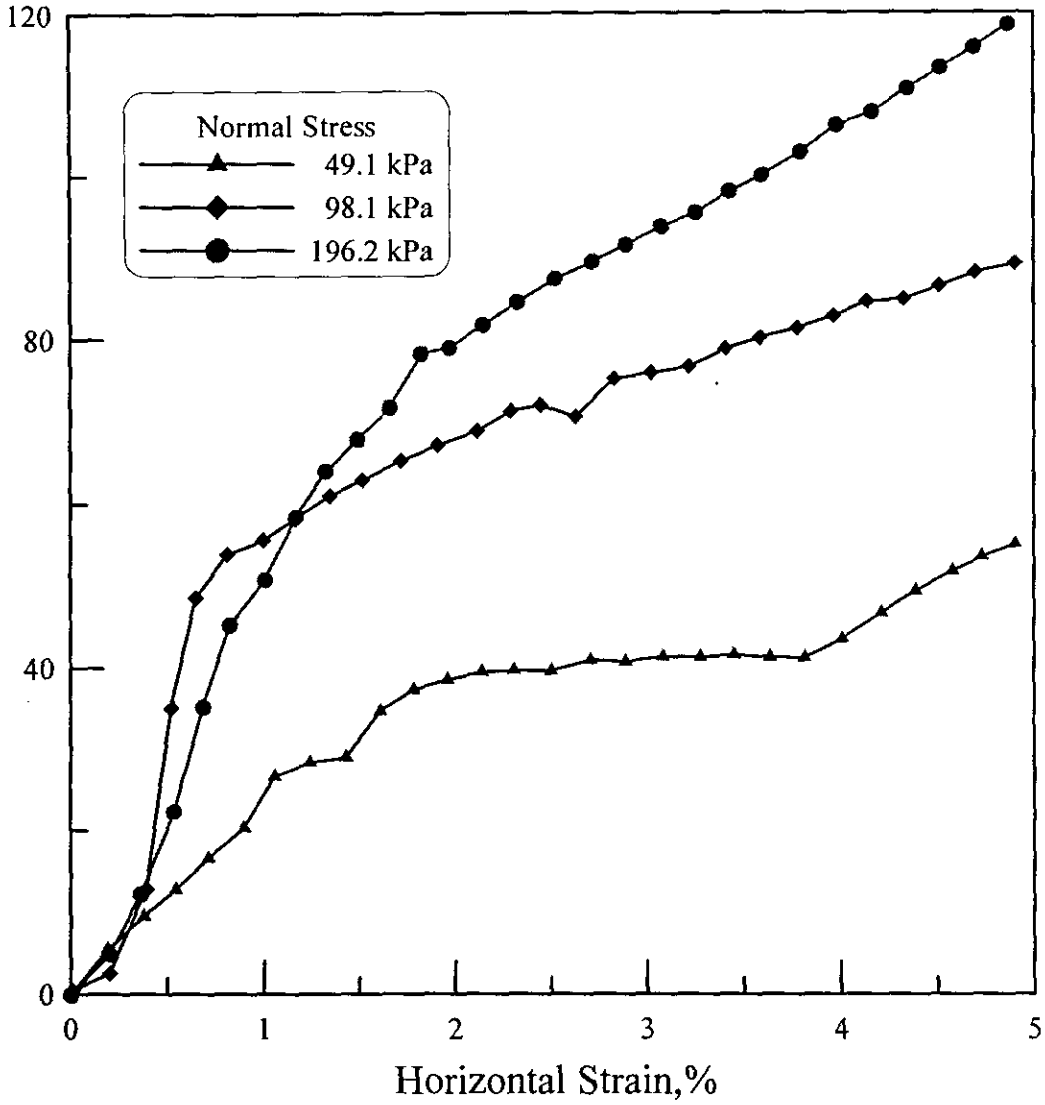


圖 B.2、10% Chip Ratio 直剪試驗(試體尺寸：20× 20cm², 橫向應變=5%)

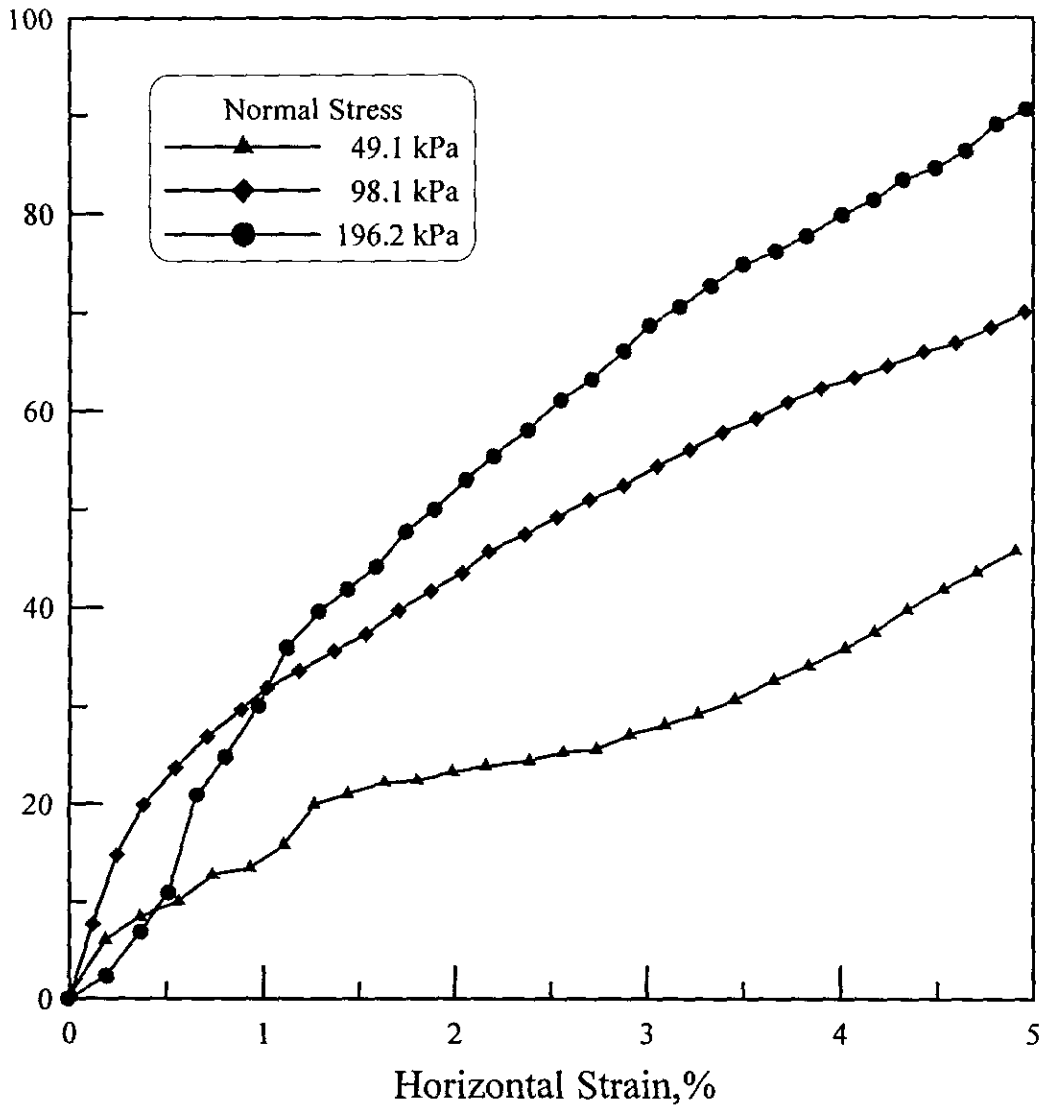


圖 B.3 - 25% Chip Ratio 直剪試驗(試體尺寸: 20x 20cm², 橫向應變=5%)

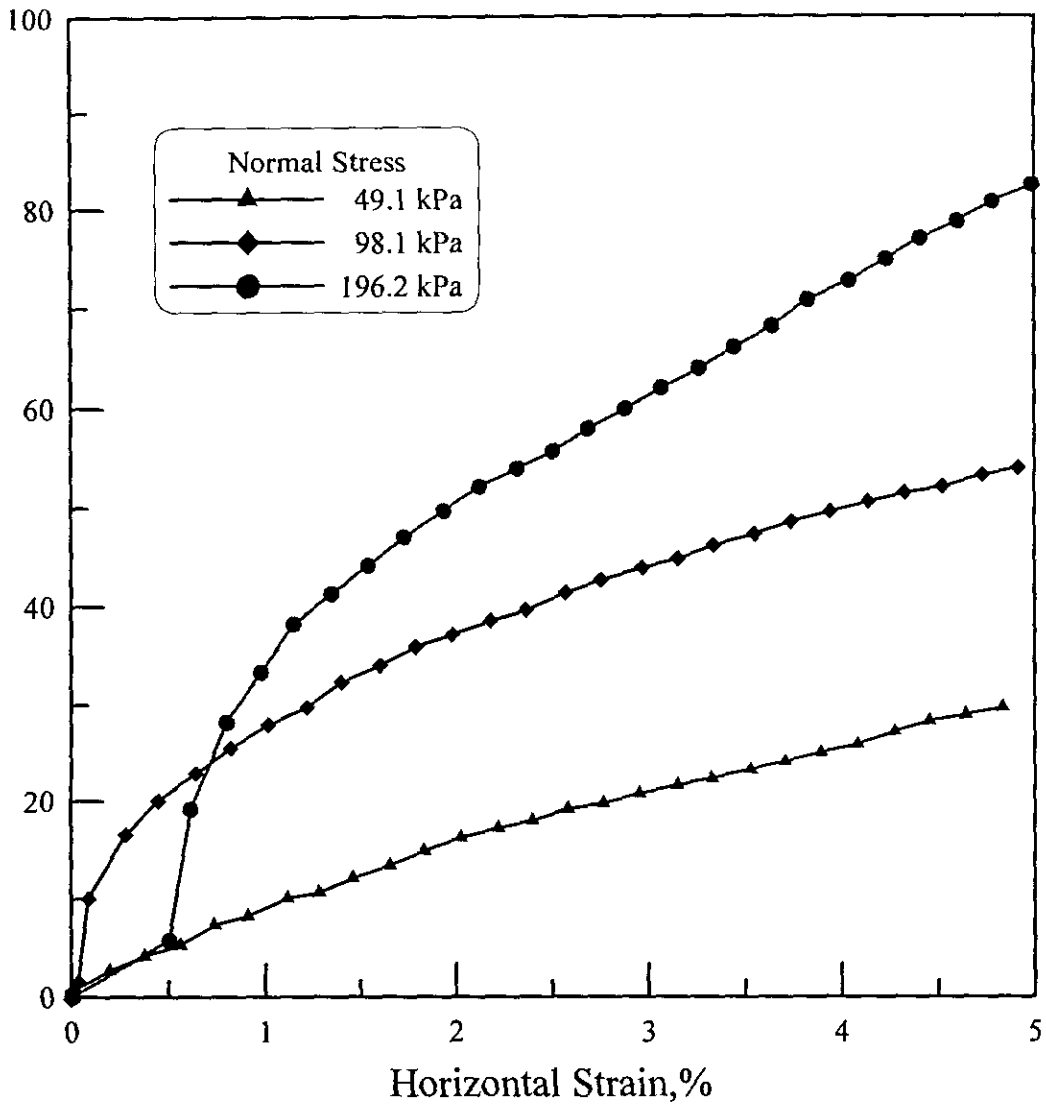


圖 B.4、50% Chip Ratio 直剪試驗(試體尺寸：20× 20cm²，橫向應變=5%)

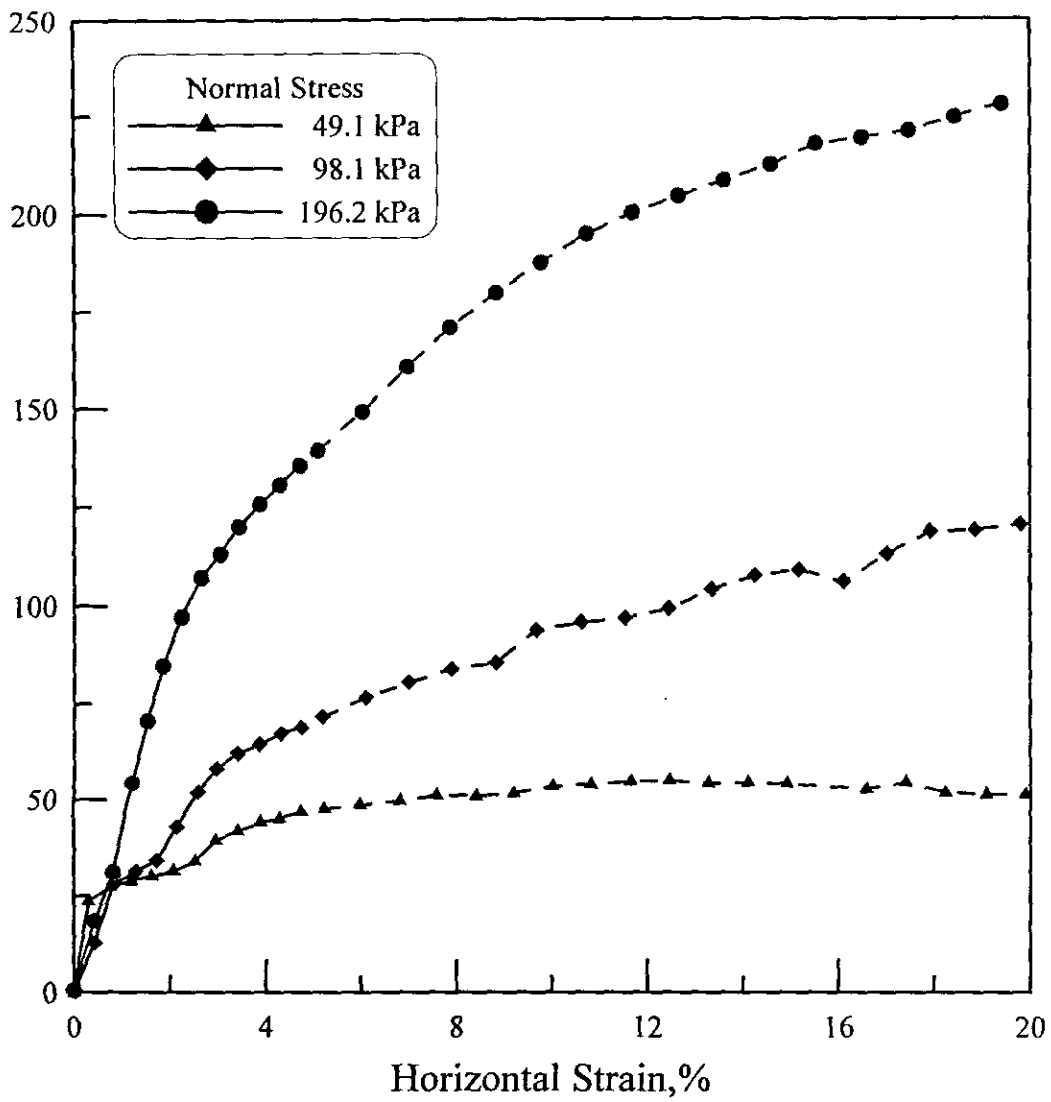


圖 B.5、0%Chip Ratio 直剪試驗(試體尺寸：20× 20cm²，橫向應變=20%)

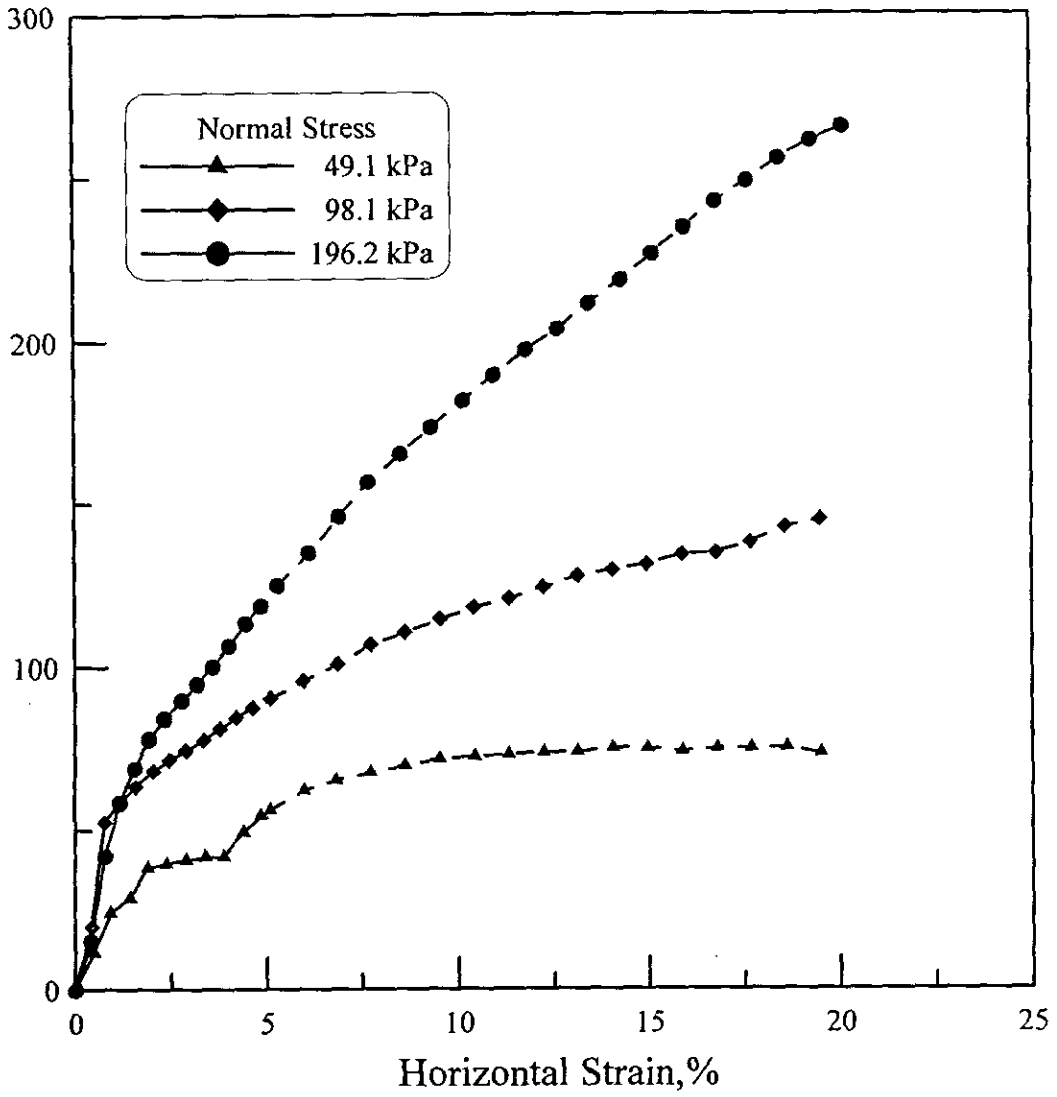


圖 B.6、10%Chip Ratio 直剪試驗(試體尺寸：20x 20cm², 橫向應變=20%)

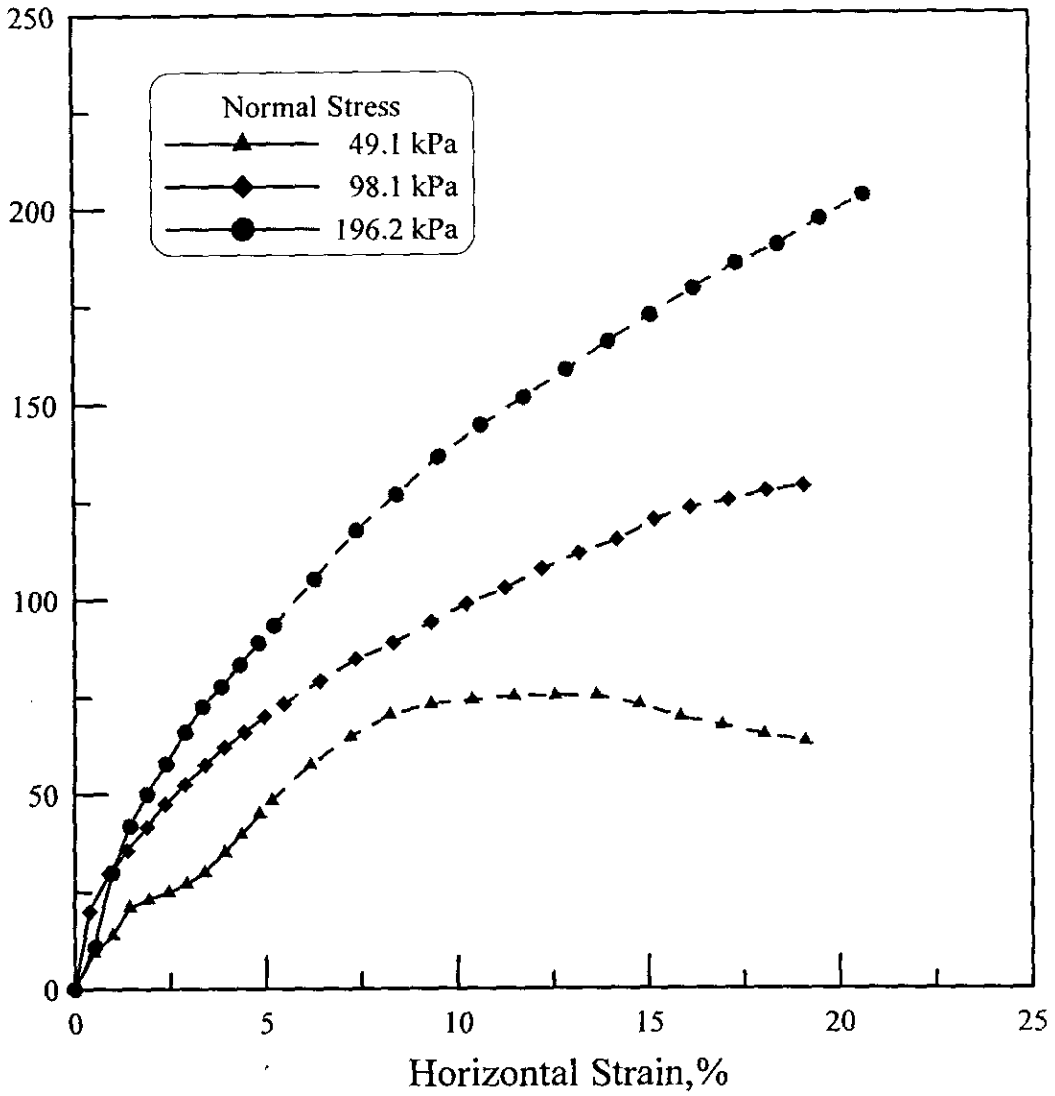


圖 B.7、25% Chip Ratio 直剪試驗(試體尺寸：20× 20cm², 橫向應變=20%)

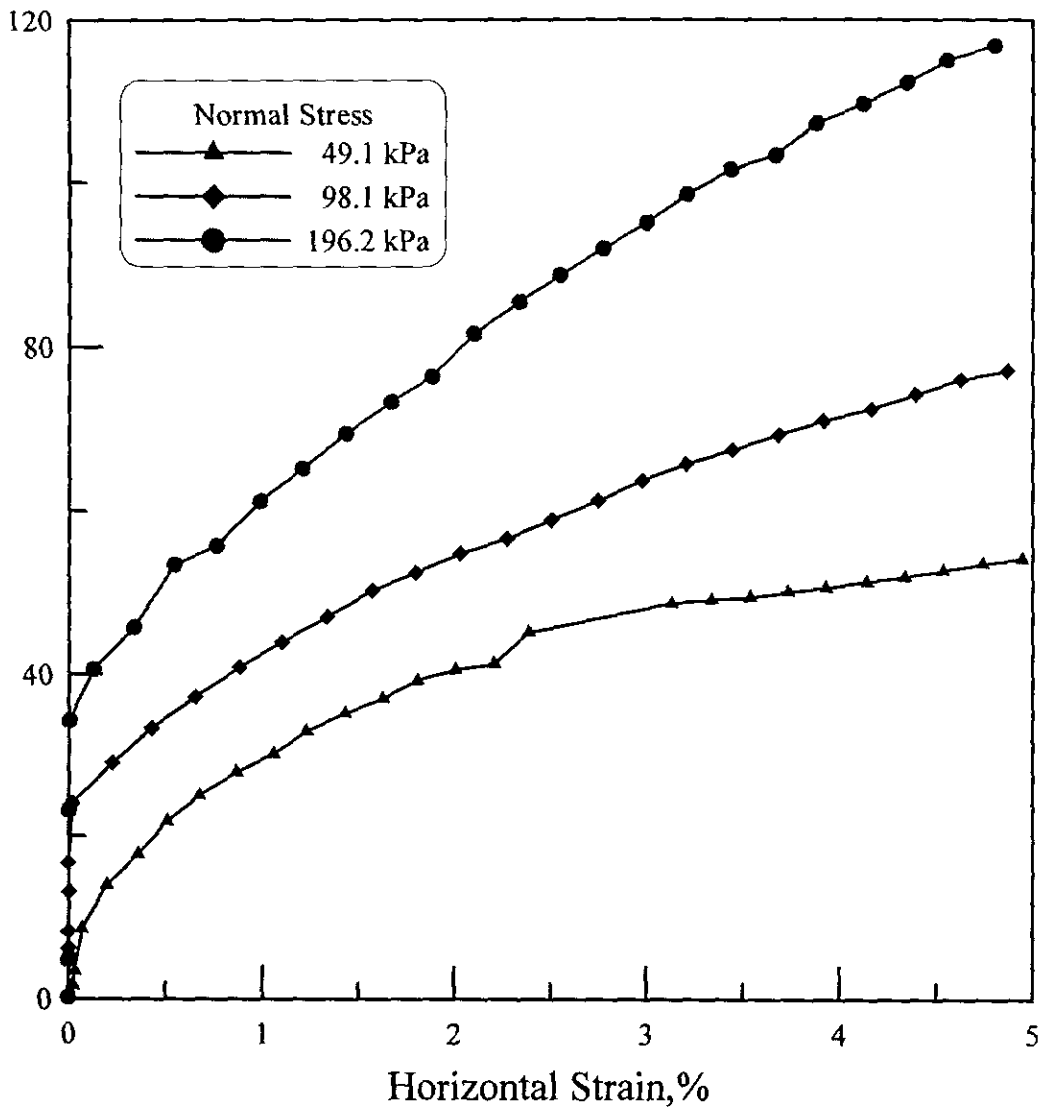


圖 B.9、10% Chip Ratio 直剪試驗(試體尺寸：45x 45cm², 橫向應變=5%)

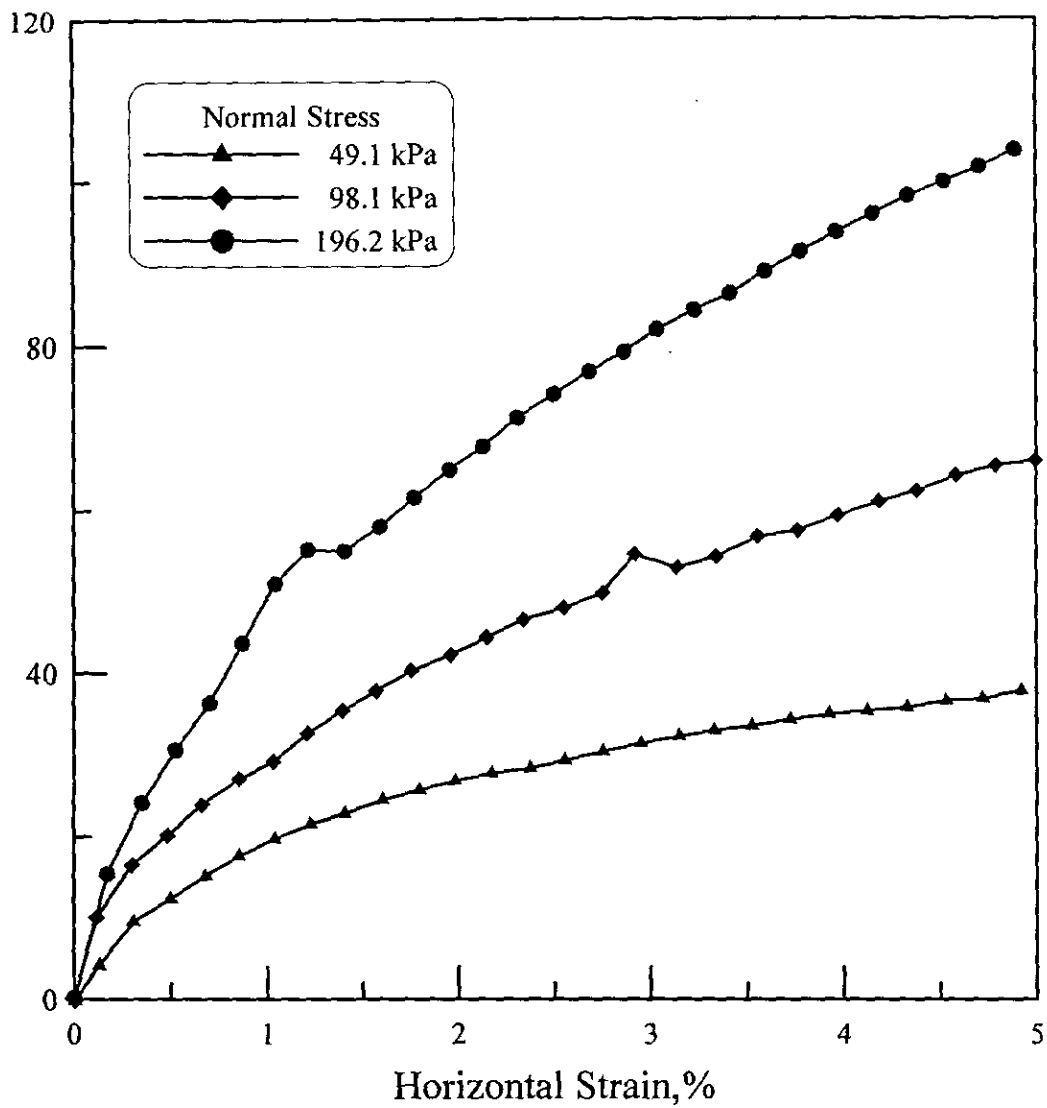
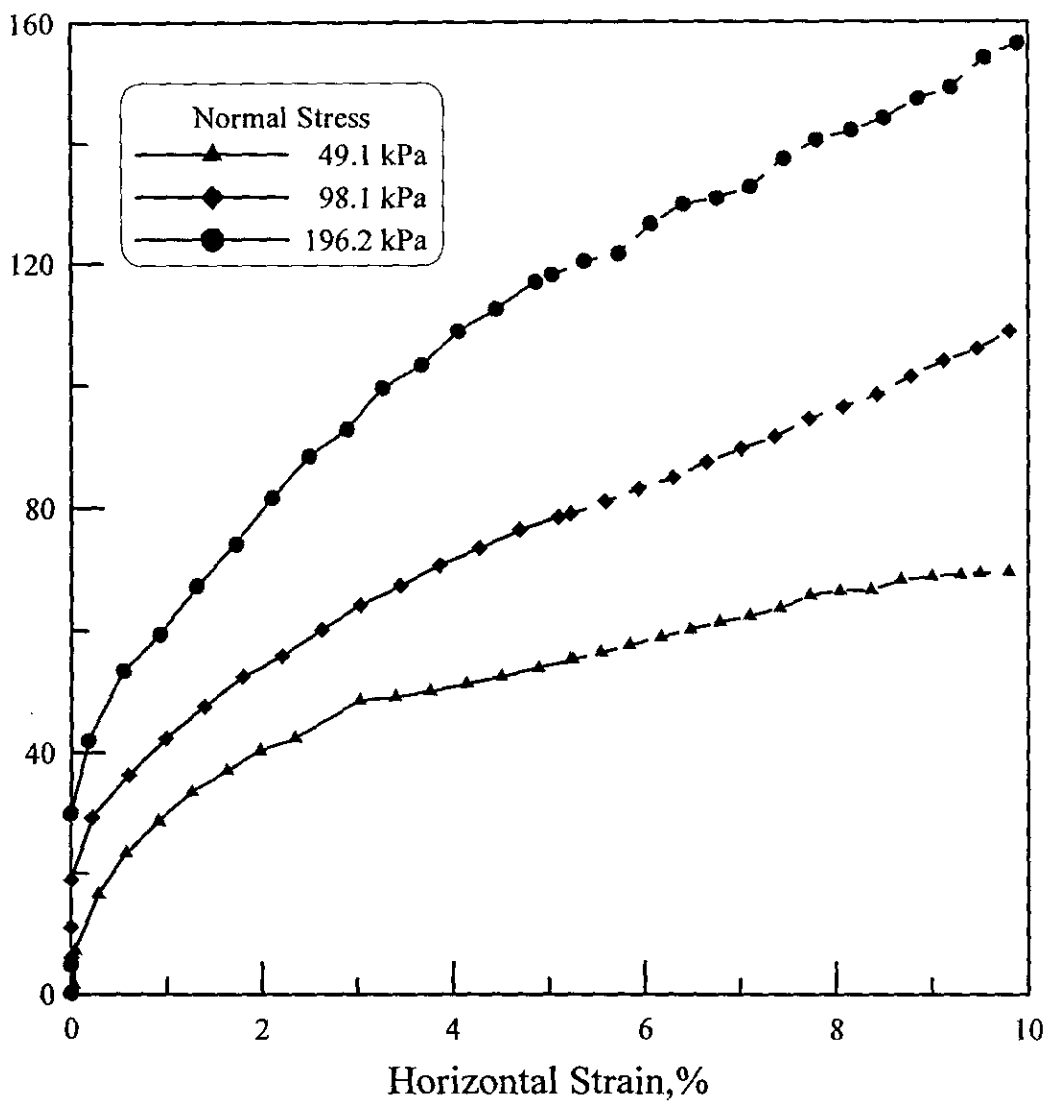
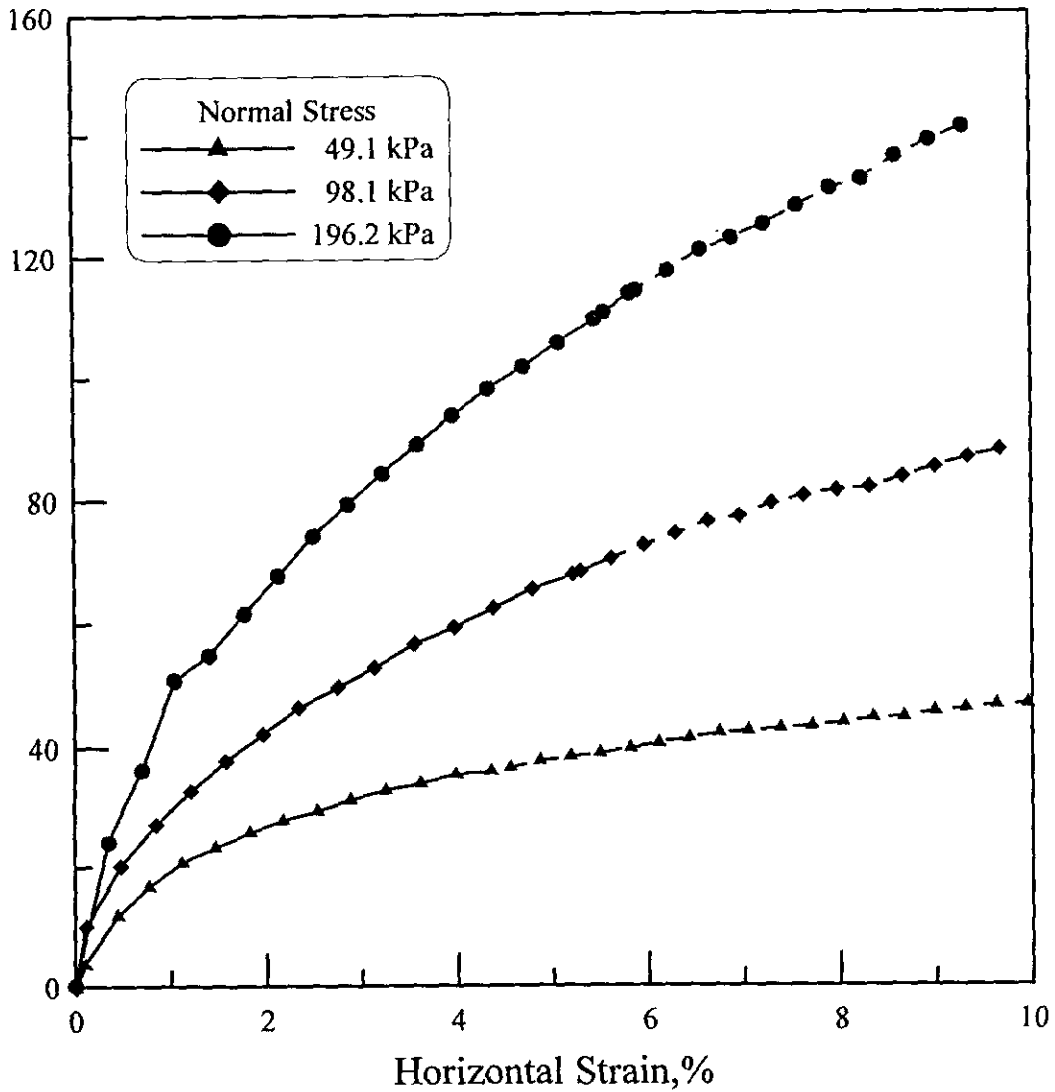


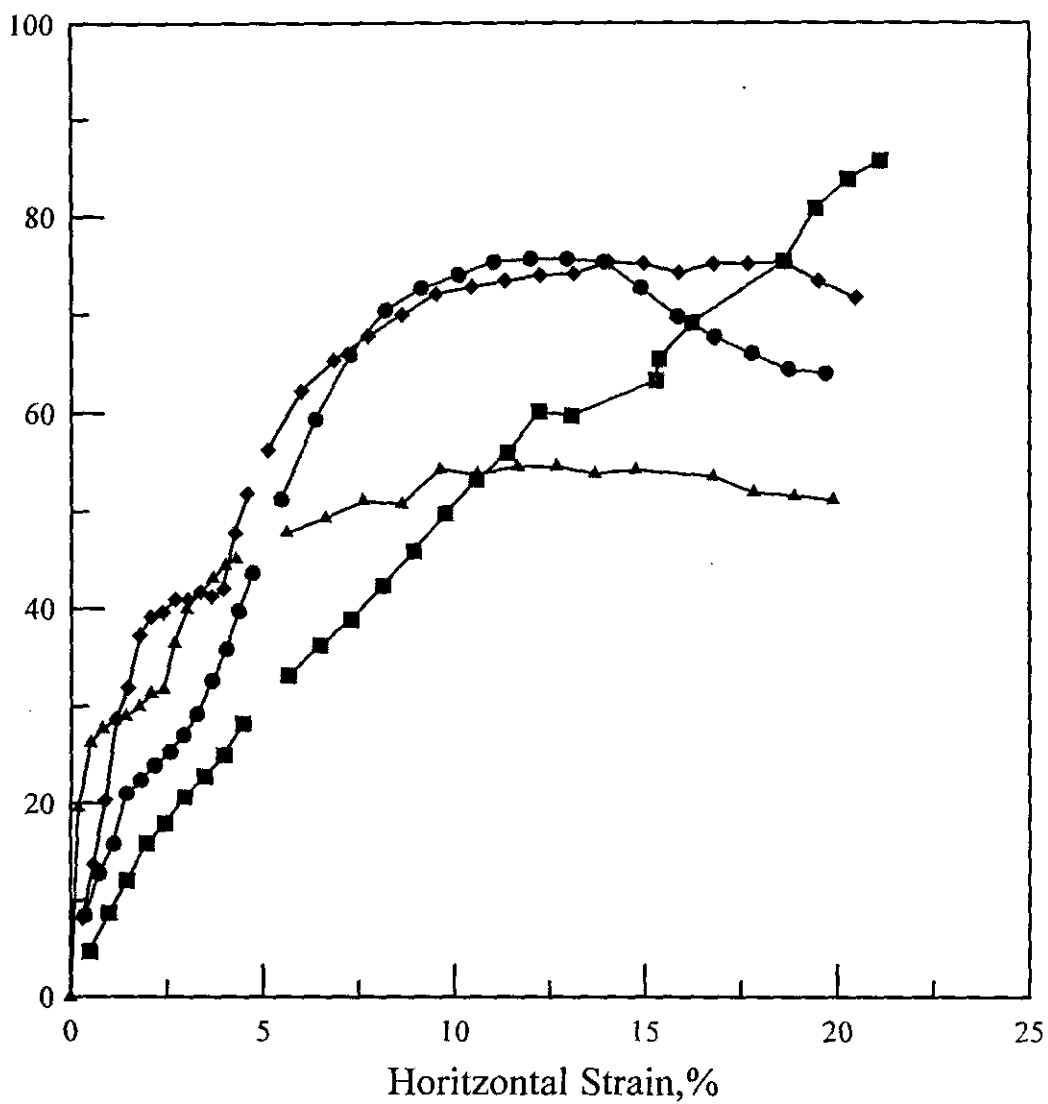
圖 B.10、25% Chip Ratio 直剪試驗(試體尺寸：45× 45cm², 橫向應變=5%)



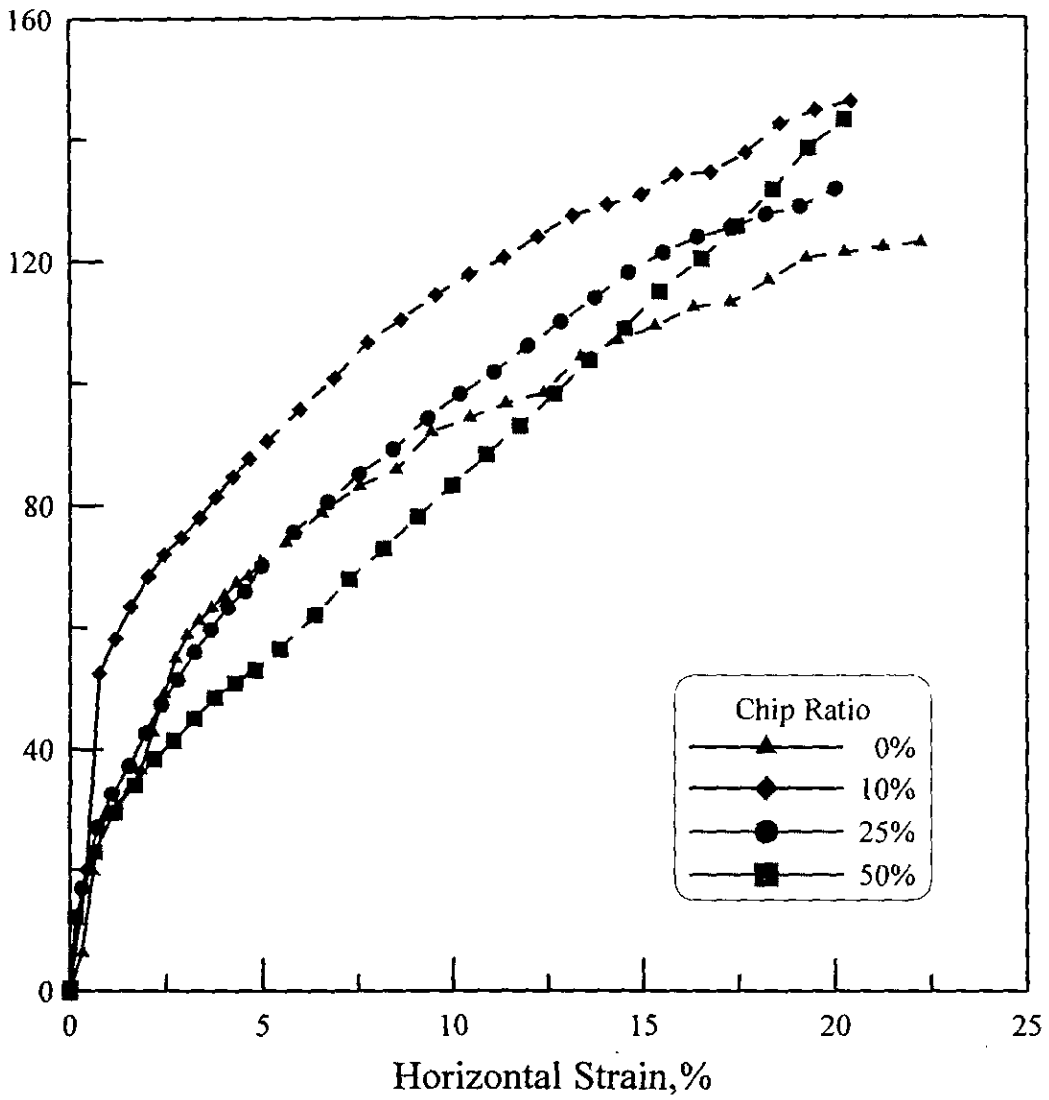
B.11、10%Chip Ratio 直剪試驗(試體尺寸：45× 45cm²，橫向應變=10%)



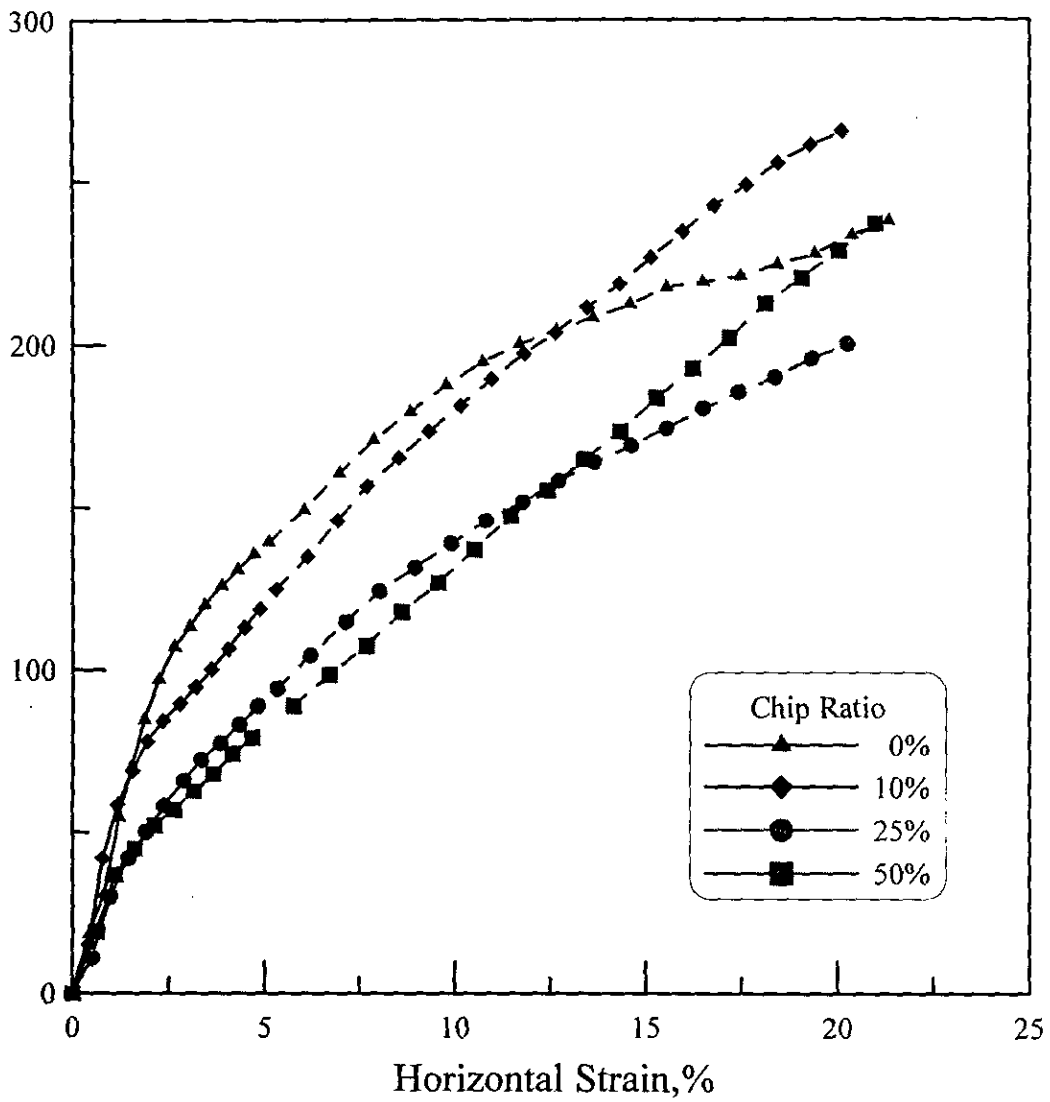
§ B.12、25% Chip Ratio 直剪試驗(試體尺寸：45x 45cm²，橫向應變=10%)



B.13、直剪試驗比較(試體尺寸: 20x 20cm², $\sigma_n=49.1\text{kPa}$, 橫向應變=20%)



B.14、直剪試驗比較(試體尺寸：20× 20cm²,σ_n=98.1kPa, 橫向應變=20%)



B.15、直剪試驗比較(試體尺寸: 20× 20cm², $\sigma_n=196.2\text{kPa}$, 橫向應變=20%)

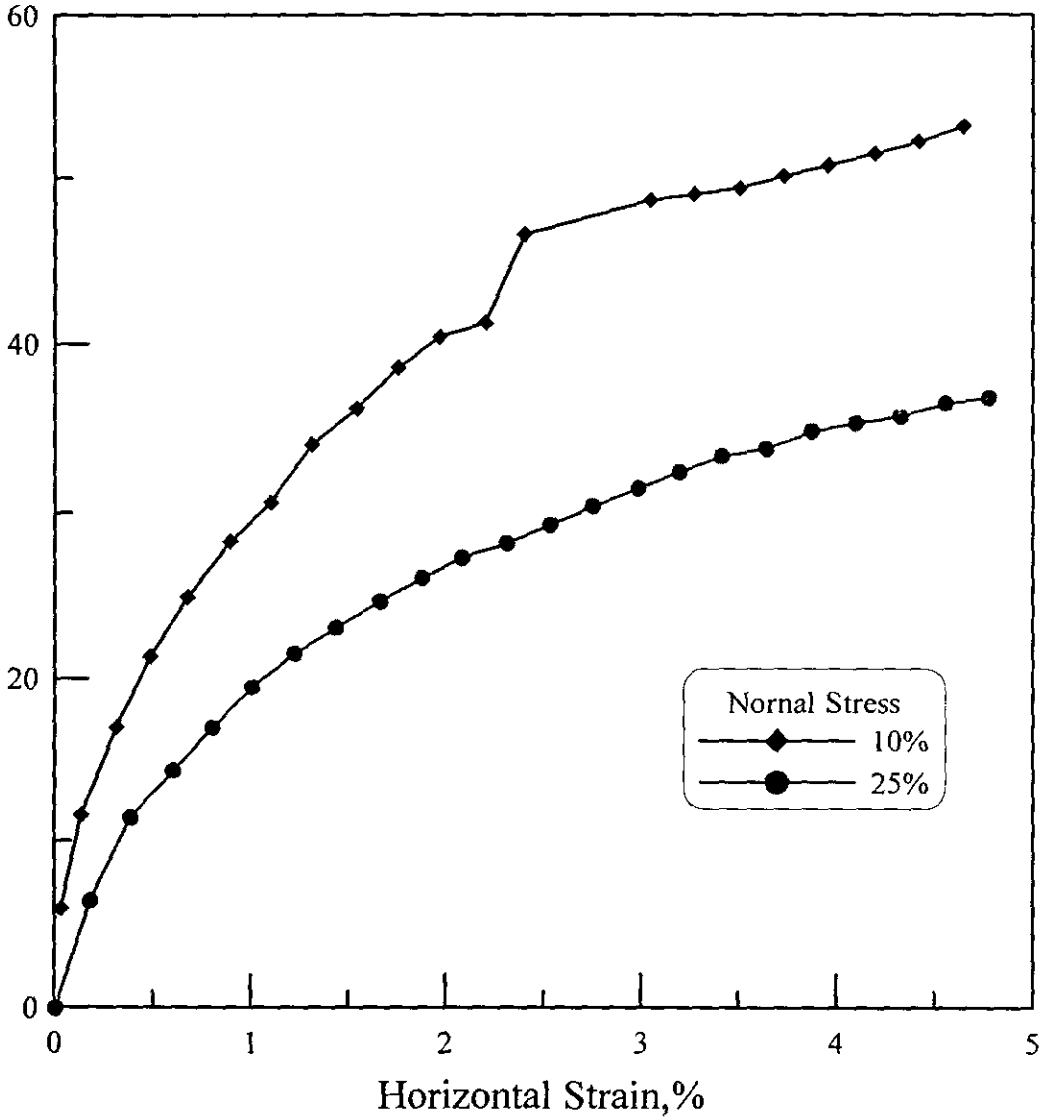


圖 B.16、直剪試驗比較(試體尺寸：45x 45cm², $\sigma_n=49.1\text{kPa}$, 橫向應變=5%)

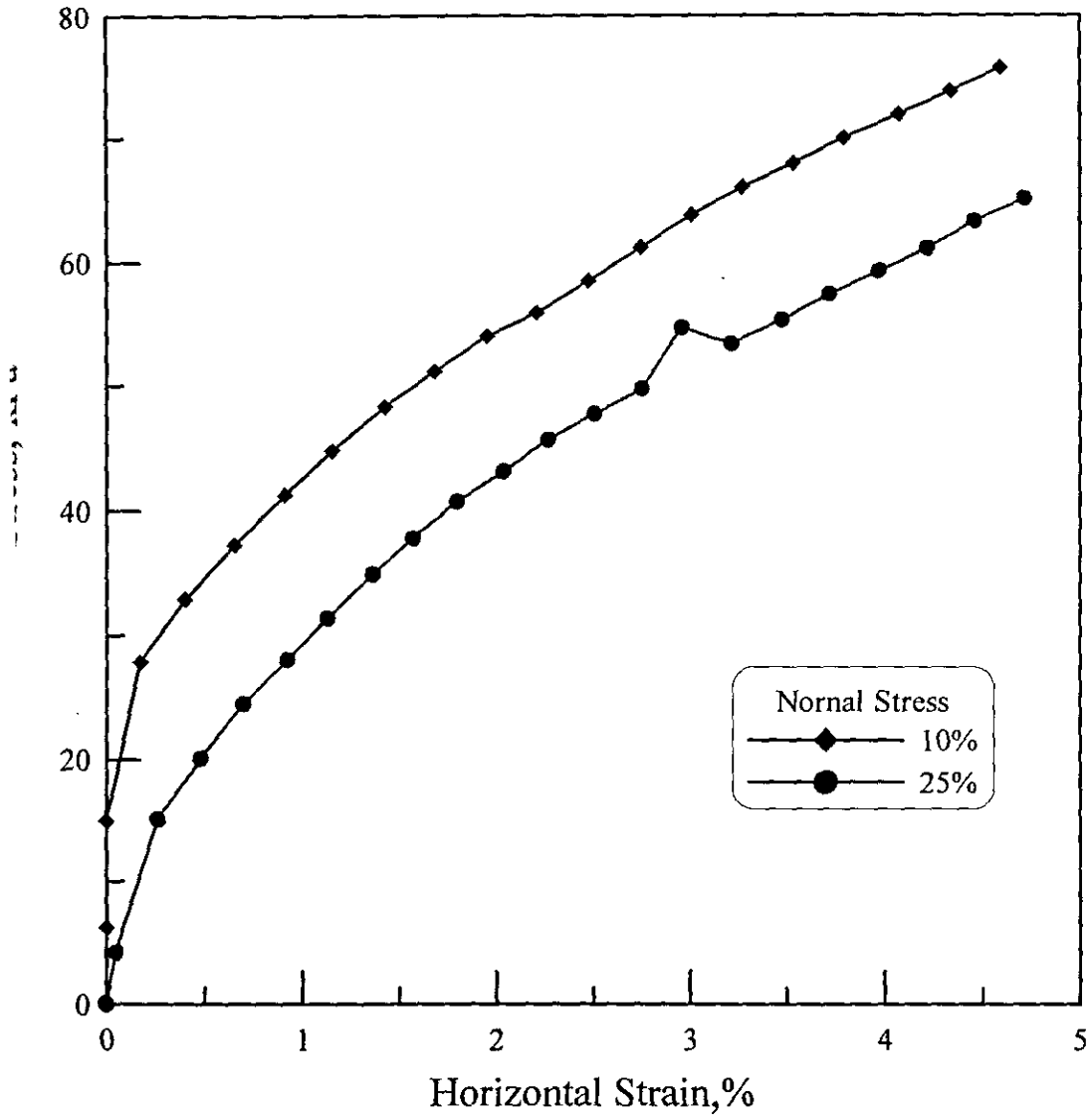


圖 B.17、直剪試驗比較(試體尺寸：45x 45cm², $\sigma_n=98.1\text{kPa}$, 橫向應變=5%)

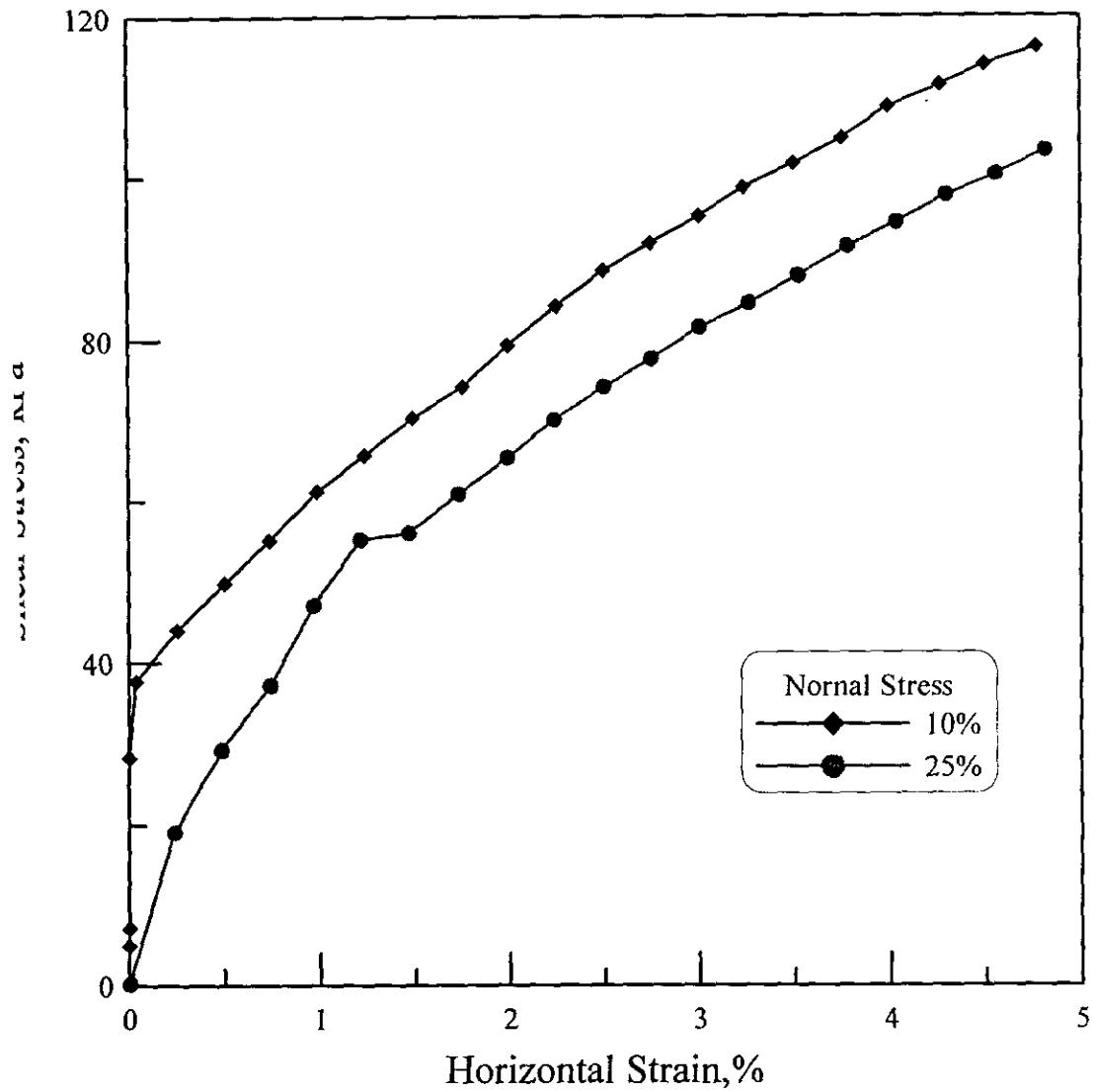


圖 B.18、直剪試驗比較(試體尺寸：45x 45cm², $\sigma_n=196.2\text{kPa}$, 橫向應變=5%)

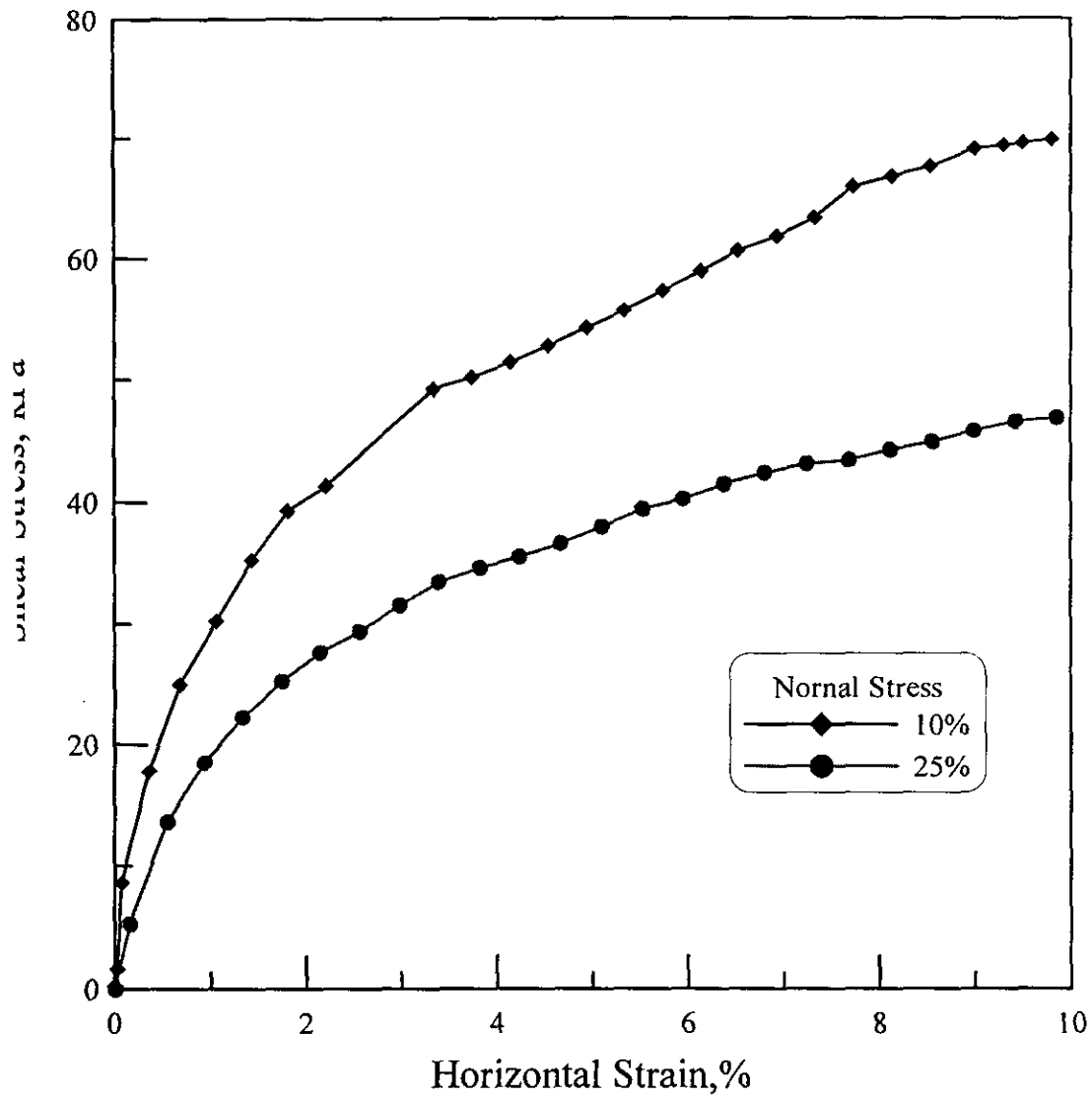


圖 B.19、直剪試驗比較(試體尺寸：45x 45cm², $\sigma_n=49.1\text{kPa}$, 橫向應變=10%)

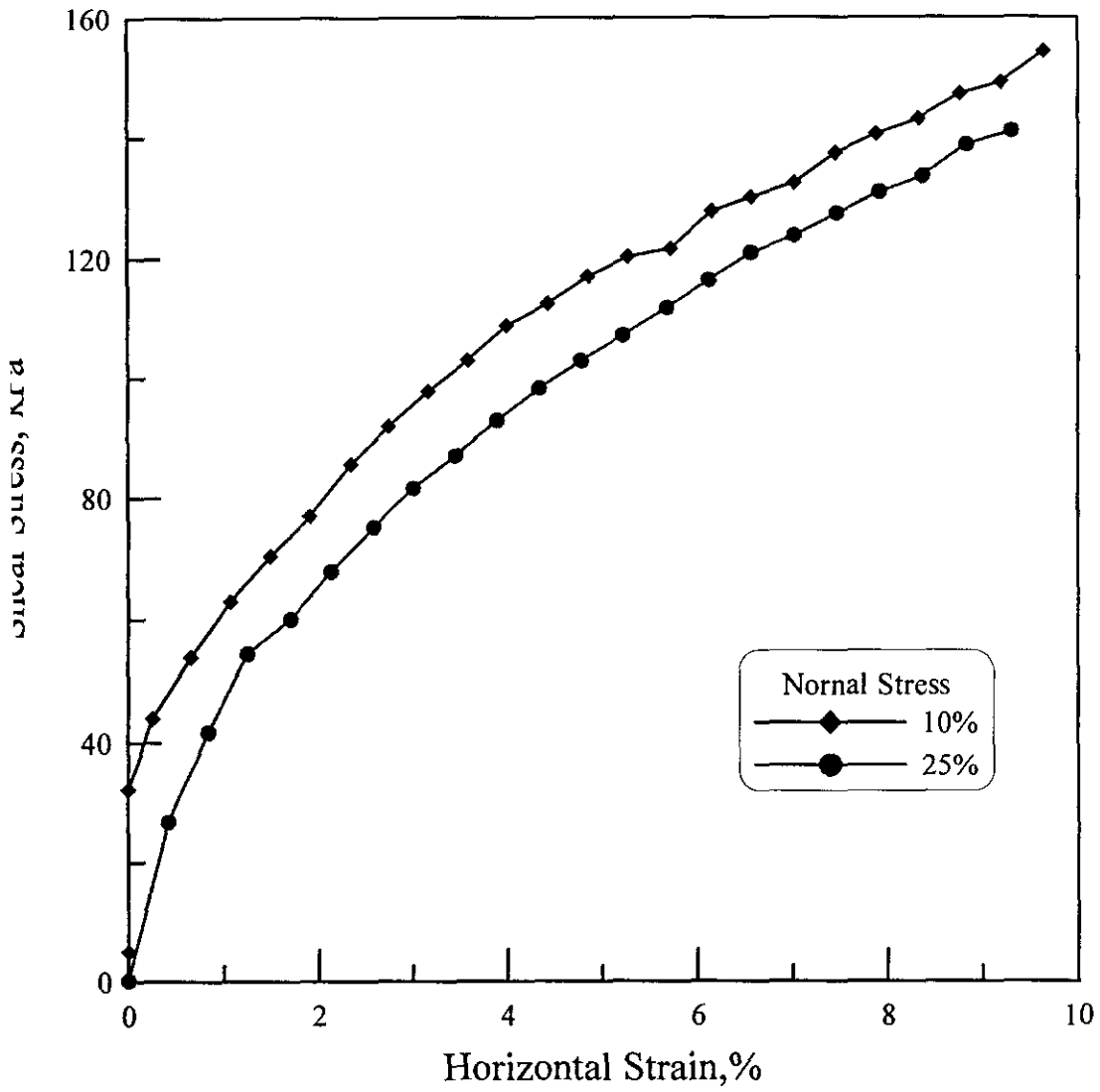


圖 B.20、直剪試驗比較(試體尺寸: 45x 45cm², $\sigma_n=98.1\text{kPa}$, 橫向應變=10%)

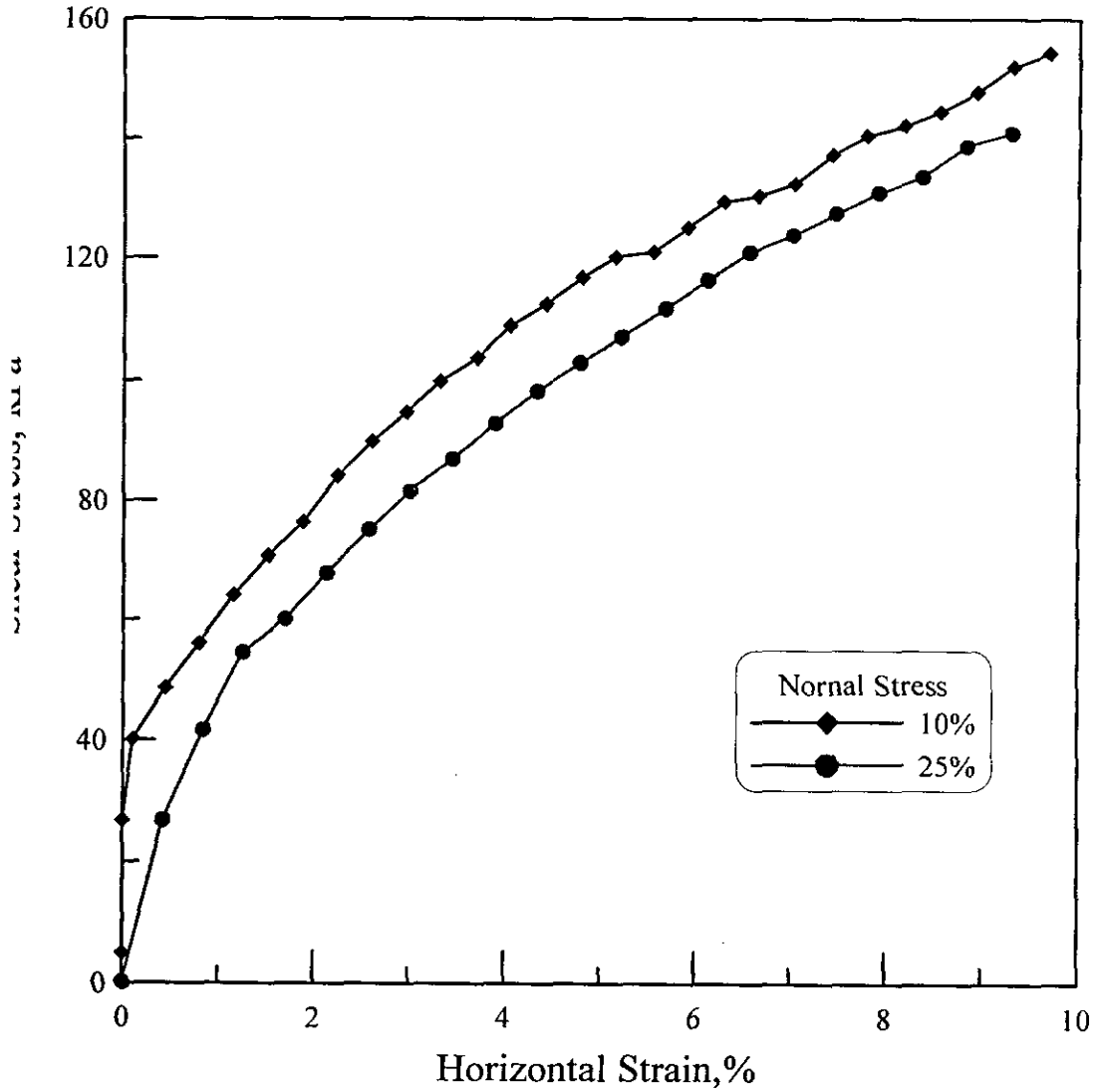


圖 B.21、直剪試驗比較(試體尺寸：45x 45cm², $\sigma_n=196.2\text{kPa}$, 橫向應變=10%)

附件C 第一期研究成果重點節錄

將廢輪胎碎片運用於公路填方中，於本計畫第一期研究中，著重於路堤之現場施工，第二期研究則以廢輪胎碎片混合土壤之工程特性、力學行為、以及建立長期現場觀測資料為重點。

根據第一期之施工經驗和完工後對路堤之觀察獲致以下結論：

1. 以國內現有的機具和人員可以勝任此類工程。
2. 施工期間除了天雨的影響之外，輪胎碎片中的鋼絲曾多次將施工車輛的輪胎戳破。未來施工時應該使用滾輪式之壓路機來夯實廢輪胎碎片。
3. 完工後之倍力磚牆面不平整，有橫向移動的跡象，這可能與廢輪胎碎片的高壓縮性有關。
4. 添加廢輪胎橡膠末之瀝青鋪面品質不理想，在多處發現有瀝青與骨材分離的現象。瀝青混凝土似乎很軟，用腳即可以將瀝青破壞，此一現象尤其以路堤之西端最為嚴重。但根據營造廠商所述，在 S1 西邊 15m 之鋪面適用常溫瀝青混凝土鋪設，是在試驗區之外而且並未添加廢輪胎橡膠末。常溫瀝青混凝土是修補路面之用，在鋪設初期通常較軟，但其強度會隨時間增加。
5. 本試驗道路的造價可能比傳統土堤要高。使用廢輪胎碎片的經濟價值必須與因為處理廢輪胎而產生的社會與環保成本相比較才能顯現。

附錄 D 期中審查意見與辦理情形

工局林裕益先生：

見：

請問目前廢輪胎碎片的國內生產與供應情形如何？

在公路工程上較可能以拌合的方式，但須注意滾壓分層所造成的不均勻沈陷。

請與普通土堤成本作比較。

覆：

輪胎碎片之生產方面絕不是問題（請參閱第一章），但若大量使用後是否會缺貨則不得而知。

成本比較部分已於第一期報告中詳細記載，但若需仔細考慮每一項成本，勢必比傳統土堤貴許多，但因拋棄廢輪胎本身帶有環境成本及社會成本，在國外則是立法鼓勵使用並有補助，相對減少成本。

各局

面意見：

施工中建議作夯實度試驗以利控制品質。

請提供輪胎切碎供料成本與砂石作比較。

報告 2.6 節中提到『運用輕質回填料，仍須注意沈陷』，若是如此，是否有其使用困難？

防凍效果，建議增加實驗數據。

其濾水試驗結果對環境危害不明顯，是否與廢輪胎碎片無直接於水中浸泡有關，請說明。

覆：

因廢輪胎碎片尺寸過大，不適用傳統夯實試驗，目前國外之施工建議只能要求用多重的機械滾壓及次數，便可接受，除外因取樣困難只能由施工程序來要求（請參閱第三章）。

成本費用已於第一期研究報告中。

需考量其優缺點作一權衡。

遵照辦理。

請參閱請參閱第六章之濾水檢驗結果。

南大學邱垂德教授：

見：

國外將輪胎壓製成塊減少壓縮性，國內已由廠商引進該技術，但處理後並無

進一步利用，此項資訊可加入文獻部份。

現地的沈陷量數據應增加。

溫度量測富創意但於報告中並未提及為何要量測溫度，建議溫度讀取採連續方式觀測。

置：

遵照辦理，請參閱第一章。

遵照辦理，請參閱第六章。

因在國外文獻中有因廢輪胎碎片鋪築之公路有燃燒之案例，本研究已在設計階段作考量，增加其透氣性，但仍作溫度之觀測，了解其變化狀況。溫度連續量測因經費有限，先有基本資料再進一步研究改進。

力大學陳建旭教授

電：

建議能找到最佳配比。

S9 斷面有側向位移現象，應研究其原因除高陡外，是否有其他原因？

報告中規劃三軸試驗，飽和時間長，是否考慮作不飽和試驗並能否增加回彈模數

置：

最佳配比無一定答案，依設計狀況而定，所以現先將不同混合比狀況下，探討它的力學行為。

試驗路堤的沈陷則需由相關試驗結果再來討論其他影響因素。

回彈模數試驗，因量測不易，困難度較高。三軸試驗現階段先完成重要數據（請參閱第六章），再討論不飽和試驗。

區技術學院郭來松教授

電：

建議去瞭解沈陷原因及加入路面服務品質參數。

夯實度建議用非破壞檢測，期末應放入四個不同斷面的比較。

為何不採拌合的方式施工，其與分層方式的關係為何？因材料彈性大，可吸收能量，可供在不同用途，如基礎底板、輕質混凝土。

置：

遵照辦理，因現地廢輪胎碎片尺寸較大且不均勻並具有鋼絲，非破壞檢測量測技術之研發有待研究，不同斷面之高程請參閱第六章。

其施工方式採較方便之三明治工法，經由現地觀察結果，現地土壤在經夯實後，自然與廢輪胎混和，與拌合施工有相同效果。

區部周勝次顧問

電：

請問氣體是否會在某種高溫下產生？

應探討動力載重下之沈陷行為也應放入期末報告，以符合公路狀況，此計畫名稱為可行性研究，因此無論正面或負面結果均要有所建議，服務品質也應納入報告中

覽：

遵照辦理。

遵照辦理，請參閱第七章。

附錄 E 期末審查意見與辦理情形

通部主持人周勝次顧問

見：

屏科大土堤之沈陷量小，是否是因交通量小所致。

覆：

：是，有其相關因素，本研究單位會繼續作動態載重之比較。

路局代表

見：

依照規範，實際施工之相對夯實度需達 95%，目前以 98% 操作試驗與結論所提夯實不易，是否有實際施作上之困難（如要夯到 95% 夯實度）。

覆：

確實有困難。但因有此研究，可事先瞭解其材料特性，訂定相關施工規範。因廢輪胎碎片具壓縮性，夯實不易，在國外案例指出，是以滾壓機具、滾壓次數來作施工要求，因此在實用範圍是需要監造與施工單位協調。

公局代表

見：

何種 Chip Ratio 較適用於公路填方？比如說：透水性，沈陷量（應提建議）。

覆：

根據現階段試驗結果並無一適當之最佳配比，因各混和比各有其優缺點，需就容許沈陷與載重等因素共同作考量。

二局代表

見：

既然為可行性研究，應明確說明是否可行、或在何種條件下可行，並指出其臨界混比。

建議第一期研究成果應納入報告中，一併說明。

p.5-37 Cd、Pb、Hg 之無毒害結論何來，表上之 N.D 代表何意思？

應用於多雨區，其濾出液將會如何？

期中、期末會議紀錄應納入附錄。

：

根據現階段試驗結果並無一適當之最佳配比，因各混和比各有其優缺點，需就設計目的作考量。

遵照辦理。

N.D 表示該成分含量過低無法測得含量，會加入補充說明。
推測濃度應更低。
遵照辦理。

鐵局代表

試體之拌合料如何均勻準備。
一般路基使用透水材而非黏土，是否實用上有差距。
路堤沈陷觀測之膨脹現象是否為廢輪胎之溫度效應所造成？
沈陷量可否與各級公路之沈陷量規範作比較。

覆：

不均勻試體會造成試驗結果混亂，不易分析，本研究除進行重複性試驗外，並將試驗結果與其他文獻結果比較參考，試驗結果顯示結果之一致性（請參閱第六章）。
本研究係路堤而非路基，因此就地取材採用現地土壤。
膨脹路堤段為純土壤回填，與廢輪胎無關，推測應為測量錯誤，其原因為剛興建時之參考點有誤所致，但自 88 年後之測量數據無誤，且其相對沈陷量很小（請參閱第六章）。
遵照辦理。

華顧問代表

年初 CNN 報導美國某些州已禁用廢輪胎做為公路回填料（可能產生粉塵、有毒氣體.....）目前此方法是否可繼續執行？
p.2-17 「溫度冷熱為 8 倍」，是否代表其內部會較高之溫度？
p.2-17 「75~300mm」是否可於試驗中施做，而最佳粒徑為何？
P.2-17 「厚度 < 4m」是否為 < 4cm 之筆誤？
是否能增加含有輪胎碎片之混和土壤之粒徑分佈曲線。
可靠性分析應列入報告中。

〔：

廢輪胎碎片為一種再利用資源，無法預期未來廢輪胎再利用之發展。
在美國主要為隔離低溫，防止受凍膨脹破壞路面（已經修改書面資料以便研讀）。
目前並無法找出最佳配比，應就個案研究最佳配比與粒徑。
確定為 4m。
遵照辦理，請參閱第六章。
以現有試驗數量與花費時間考量，有執行上的困難。

陳建旭教授

：

根據報告，廢輪胎似乎是取代粗骨材之角色，請問拌合料之粒徑分佈狀況？可否與國工局之規範作比較？

拌合料之孔隙率？

建議做為路肩材料、擋土牆等，若作為路提，應考量長期承載之效應。三軸與直剪之 C 、 ϕ 相差很大，何者為對？

覆：

粗骨材為良好之工程材料，並無意取代粗骨材。

遵照辦理。

遵照辦理。

現階段只考慮做次要道路使用，及山區道路崩坍之臨時處理緊急通行道路（質輕），可配合加勁材。

1. 三軸為有效應力之 c' 、 ϕ' ，直剪為總應力之 c 、 ϕ 。

2. 兩者之夯實度不同。

3. 三軸試驗結果具代表性。

雲技術學院郭來松教授

見：

因本人先期刊中報告曾到國立屏東科技大學視察土堤情形，土堤有橫向位移之趨勢，且實際上交通流量並非很大，因此其沈陷量應為靜態沈陷，建議在報告上應加註說明。

請問第四章中提到為了作三軸試驗將輪胎碎片之鋼絲抽離，是否其他室內試驗也是如此，因加入鋼絲後其強度相對會提高許多。

結論 p.6-1 第三點中提到「三軸壓密不排水試驗在 0%、10%、25% 三種混合比中，有效凝聚力 c 相當接近」，但實際與表格不太相符，應於結論中作修訂。

圖 5.2~5.5 夯實曲線建議整理為一張圖，以了解其趨勢。

圖 5.9 建議說明其覆土厚度。

p.5-8 之最大應力應改為最大受力。

：

遵照辦理。

是的，其他室內試驗也採用鋼絲抽離之試體。雖不切合實際，但因鋼絲會戳破三軸試驗之橡皮膜，因此需將輪胎鋼絲抽離。

遵照辦理，請參閱第六章。

遵照辦理，請參閱第六章。

遵照辦理，已經更正。

大沈得縣教授

：

p.5-8~p.5-11 壓縮性試驗結果，請再做確認。

因為輪胎碎片含量大於 25% 之試體不易處理，但大於 10% 者是否適合實際狀況(因夯實度 < 90%) 並建議於結論中應說明如何使用，用多少最適合。

應加入扁平率與粒徑。

對於輪胎碎片之鋼絲與化學成分，是否應再確定濾出液是否符合標準。

輪胎碎片為輕質材料，但不易夯實，是否適合做長期使用之路基。

建議將一期之結果彙整於結論中增加其完整性。並建議加做第三期以建立長期資料，擬定施工規範。

覆：

10% 之各項試驗均有許多不規律現象，因此本研究單位會再做壓縮性試驗以確認其特性，請參閱第六章。

遵照辦理，於結論中敘述各混和比之各項試驗狀況。

輪胎碎片之形狀非常不規則，不易加以定性描述。

遵照辦理。

本研究係路堤而非路基，因此有其不同處。

本研究單位會繼續做長期之觀測，並繼續相關之研究。

通部主持人周勝次顧問

覆：

第二章之施工建議，建議獨立出章節，並加入相關之公路施工設計規範。

覆：

遵照辦理，請參閱第三章。