

## 摘要

本研究致力於探討有機黏土對於玻璃纖維/環氧樹脂複合材料在機械特性上的影響。拉伸機械特性、彎曲機械特性以及層間破壞行為都在本文討論範圍之內。為了證明有機黏土所帶來的影響，三種不同比重含量分別為 2.5wt%、5wt% 及 7.5wt% 的有機黏土，先經由機械攪拌後輔以超音波強力震盪使其均勻散布在環氧樹脂當中，利用手工積層步驟將混合好的基材塗佈於同向性的玻璃纖維布上，形成玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板材以供實驗測試。大型萬能拉伸試驗機將用於在試片的纖維方向以及側向纖維方向施力進行拉伸測試。而三點式彎曲試驗則可獲得複合材料的彎曲機械特性。另外，雙懸臂梁試片將用於得到纖維複合材料的破壞行為。從拉伸實驗中發現，當有機黏土添加的比例增高時會造成纖維方向拉伸強度的下降；但在側向纖維方向上之拉伸強度則有明顯的提升，在側向纖維方向的材料模數上亦有相同的效果。在側向纖維方向的試片斷裂面上利用電子掃描式顯微鏡做細部觀察，可以得知整體材料機械特性的提升，是因為有機黏土增強了玻璃纖維與環氧樹脂界面的黏著性所造成。在側向纖維方向的材料彎曲強度也可發現相同的趨勢。模態一的破壞試驗可測得有機黏土的比重增加時，複合材料的韌性會有明顯的下降。不同於之前的同向性板材，擬均態複合板材試片將製作完成且進行拉伸試驗，實驗結果顯示有機黏土的添加對於此類型複合材料板材並沒有明顯的影響。

# ABSTRACT

This research is aimed to investigate the organoclay effect on mechanical behaviors of the fiber/epoxy/organoclay nanocomposites. Tensile, flexure and fracture behaviors were considered in this study. To demonstrate the organoclay effect, three different loadings, 2.5, 5 and 7.5 wt% of organoclay were dispersed in the epoxy resin using mechanical mixer followed by sonication. The corresponding glass/epoxy nanocomposites were prepared by impregnating the organoclay epoxy mixture into the dry glass fiber through a vacuum hand lay-up process. For the tensile behaviors, the coupon specimens were tested in MTS machine in both longitudinal and transverse directions. The flexural properties were characterized using three point bending tests. In addition, the fracture behaviors of the fiber composites were determined from the double cantilever beam specimens. From the tensile tests, it was revealed that the longitudinal tensile strength decrease as the organoclay loading increases, on the other hand, the transverse tensile strength as well as the transverse tensile modulus increases with the increase of the organoclay. SEM observation on the transverse failure specimens indicates that the enhanced mechanism is due to the interfacial bonding between the fibers and the surrounding matrix modified by organoclay. The similar tendency was also found in the transverse flexural strength of the composites. From the mode I fracture tests It was indicated that with the increase of the organoclay, the corresponding fracture toughness of the composites decreases appreciably. In addition to the unidirectional lamina, the quasi-isotropic laminates with organoclay were prepared and tested in tension. Experimental results depict that the strength of the laminates is not affected appreciably by the organoclay.

# 目錄

摘要 .....	i
ABSTRACT .....	ii
目錄 .....	iii
圖表目錄 .....	v
第一章 序言 .....	1
1.1 研究背景與文獻回顧 .....	1
1.2 研究目標 .....	5
第二章 材料製程 .....	7
2.1 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料之製作流程 .....	7
第三章 同向性複合材料板材之機械行為 .....	10
3.1 簡單拉伸試驗 .....	10
3.1.1 $[0]_5$ 拉伸實驗 .....	11
3.1.2 $[90]_5$ 拉伸實驗 .....	13
3.1.3 $[10]_5$ 拉伸實驗 .....	15
3.2 彎曲實驗 .....	18
3.2.1 $[0]_5$ 彎曲實驗 .....	19
3.2.2 $[90]_5$ 彎曲實驗 .....	20
第四章 多重方向性複合材料板材之機械行為 .....	22
4.1 $[\pm 45]_s$ 拉伸剪力試驗 .....	22

4.2	[0/±45/90] <sub>s</sub> 複合材料板材拉伸實驗.....	24
4.2.1	[90/±45/0] <sub>s</sub> 複合材料板材拉伸實驗 .....	25
4.2.2	[60/15/-75/-30] <sub>s</sub> 複合材料板材拉伸實驗.....	25
4.2.3	[67.5/22.5/-67.5/-22.5] <sub>s</sub> 複合材料板材拉伸實驗.....	26
4.3	[90/±30] <sub>s</sub> 複合材料板材拉伸實驗.....	26
第五章	積層間破壞韌性實驗.....	28
第六章	結論.....	31
參考文獻	.....	32



## 圖表目錄

表 3-1	5 層同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板之規格大小與有機黏土含量及硬化過程壓力對照表.....	35
表 3-2	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向拉伸破壞強度與有機黏土含量對照表.....	36
表 3-3	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向拉伸材料模數 E1 與有機黏土含量對照表.....	37
表 3-4	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在側向拉伸破壞強度與有機黏土含量對照表.....	38
表 3-5	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在側向拉伸材料模數 E2 與有機黏土含量對照表.....	39
表 3-6	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在[10]5 拉伸破壞強度與有機黏土含量對照表.....	40
表 3-7	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向之彎曲破壞強度與有機黏土含量對照表.....	41
表 3-8	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在側向纖維方向之彎曲破壞強度與有機黏土含量對照表.....	42
表 4-1	4 層 E-LR 0908-14 [ $\pm 45$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板之規格大小與有機黏土含量及硬化過程壓力對照表.....	43
表 4-2	4 層 E-LR 0908-14 [ $\pm 45$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗之拉伸破壞強度與有機黏土含量對照表.....	43
表 4-3	8 層 E-LR 0908-14 [ $90/\pm 45/0$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗之拉伸破壞強度與有機黏土含量對照表.....	44
表 4-4	8 層 E-LR 0908-14 [ $60/15/-75/-30$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗之拉伸破壞強度與有機黏土含量對照表.....	44
表 4-5	8 層 E-LR 0908-14 [ $67.5/22.5/-67.5/-22.5$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗之拉伸破壞強度與有機黏土含量對照表....	44
表 4-6	6 層 E-LR 0908-14 [ $90/\pm 30$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗之拉伸破壞強度與有機黏土含量對照表.....	45

表 5-1	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在脫層試驗之臨界能量釋放率與有機黏土含量對照表.....	45
圖 2.1	E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板之硬化過程 ..	46
圖 2.2	等向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板之外型示意圖.....	46
圖 3.1	拉伸試驗之試片規格圖.....	47
圖 3.2	E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在纖維方向拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖.....	47
圖 3.3	添加比重為 2.5% 有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖	48
圖 3.4	添加比重為 5% 有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖	48
圖 3.5	添加比重為 7.5% 有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖	49
圖 3.6	根據不同有機黏土含量相對於纖維方向拉伸試驗之奈米複合材料纖維方向拉伸強度柱狀圖.....	49
圖 3.7	E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在纖維方向拉伸試驗中拉伸應力對真實應變曲線圖.....	50
圖 3.8	添加比重為 2.5% 有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向拉伸試驗中拉伸應力對真實應變曲線圖.....	50
圖 3.9	添加比重為 5% 有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向拉伸試驗中拉伸應力對真實應變曲線圖.....	51
圖 3.10	添加比重為 7.5% 有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向拉伸試驗中拉伸應力對真實應變曲線圖.....	51
圖 3.11	根據不同有機黏土含量相對於纖維方向拉伸試驗之奈米複合材料纖維方向拉伸材料模數 $E_1$ 柱狀圖.....	52
圖 3.12	添加比重為 5% 有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料試片在纖維方向剖面圖.....	52
圖 3.13	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方	

	向拉伸試驗後試片破壞情形(由左至右依序為有機黏土含量比重為0%; 5%).....	53
圖 3.14	E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在橫向拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖.....	53
圖 3.15	添加比重為 2.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在橫向拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖.....	54
圖 3.16	添加比重為 5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在橫向拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖.....	54
圖 3.17	添加比重為 7.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在橫向拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖.....	55
圖 3.18	根據不同有機黏土含量相對於橫向拉伸試驗之奈米複合材料側向拉伸強度柱狀圖.....	55
圖 3.19	E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在橫向拉伸試驗中拉伸應力對真實應變曲線圖.....	56
圖 3.20	添加比重為 2.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在橫向拉伸試驗中拉伸應力對真實應變曲線圖.....	56
圖 3.21	添加比重為 5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在橫向拉伸試驗中拉伸應力對真實應變曲線圖.....	57
圖 3.22	添加比重為 7.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在橫向拉伸試驗中拉伸應力對真實應變曲線圖.....	57
圖 3.23	根據不同有機黏土含量相對於橫向拉伸試驗之奈米複合材料側向拉伸材料模數 $E_2$ 柱狀圖.....	58
圖 3.24	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在橫向拉伸試驗後試片破壞情形(由左至右依序為有機黏土含量比重為0%; 2.5%; 5%; 7.5%).....	58
圖 3.25	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在纖維側向方向經由掃瞄式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形.....	59
圖 3.26	添加比重為 2.5%有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維側向方向經由掃瞄式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形.....	59
圖 3.27	添加比重為 5%有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維側向方向經由掃瞄式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形.....	60

圖 3.28	添加比重為 7.5%有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維側向方向經由掃瞄式電子顯微鏡 (SEM)觀測斷裂面破壞情形.....	60
圖 3.29	E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在 $[10]_5$ 拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖.....	61
圖 3.30	添加比重為 2.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在 $[10]_5$ 拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖.....	61
圖 3.31	添加比重為 5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在 $[10]_5$ 拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖.....	62
圖 3.32	添加比重為 7.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在 $[10]_5$ 拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖.....	62
圖 3.33	根據不同有機黏土含量相對於拉伸試驗之奈米複合材料 $[10]_5$ 拉伸強度柱狀圖.....	63
圖 3.34	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在側向拉伸試驗後試片破壞情形(由左至右依序為有機黏土含量比重為 0%; 2.5%; 5%; 7.5%).....	63
圖 3.35	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在偏軸 10 度方向經由掃瞄式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形.....	64
圖 3.36	添加比重為 2.5%有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在偏軸 10 度方向經由掃瞄式電子顯微鏡 (SEM)觀測斷裂面破壞情形.....	64
圖 3.37	添加比重為 5%有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在偏軸 10 度方向經由掃瞄式電子顯微鏡 (SEM)觀測斷裂面破壞情形.....	65
圖 3.38	添加比重為 7.5%有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在偏軸 10 度方向經由掃瞄式電子顯微鏡 (SEM)觀測斷裂面破壞情形.....	65
圖 3.39	三點式彎曲實驗試片規格.....	66
圖 3.40	三點式彎曲實驗架構.....	66
圖 3.41	E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向彎曲試驗中彎曲應力對位移之曲線圖.....	67
圖 3.42	添加比重為 2.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹	

	脂奈米複合材料在纖維方向彎曲試驗中拉伸應力對位移之曲線圖	67
圖 3.43	添加比重為 5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向彎曲試驗中彎曲應力對位移之曲線圖	68
圖 3.44	添加比重為 7.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向彎曲試驗中彎曲應力對位移之曲線圖	68
圖 3.45	根據不同有機黏土含量相對於 3 點彎曲試驗之奈米複合材料纖維方向彎曲強度柱狀圖	69
圖 3.46	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向彎曲試驗後試片破壞情形(由上至下依序為有機黏土含量比重為 0%; 2.5%; 5%; 7.5%)	69
圖 3.47	E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在側向纖維方向彎曲試驗中彎曲應力對位移之曲線圖	70
圖 3.48	添加比重為 2.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在側向纖維方向彎曲試驗中彎曲應力對位移之曲線圖	70
圖 3.49	添加比重為 5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在側向纖維方向彎曲試驗中彎曲應力對位移之曲線圖	71
圖 3.50	添加比重為 7.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在側向纖維方向彎曲試驗中彎曲應力對位移之曲線圖	71
圖 3.51	根據不同有機黏土含量相對於 3 點彎曲試驗之奈米複合材料側向纖維方向彎曲強度柱狀圖	72
圖 3.52	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在側向纖維方向彎曲試驗後試片破壞情形(由上至下依序為有機黏土含量比重為 0%; 2.5%; 5%; 7.5%)	72
圖 3.53	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料經由三點式彎曲實驗在纖維側向方向利用掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形	73
圖 3.54	添加比重為 2.5%有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料經由三點式彎曲實驗在纖維側向方向利用	

	掃瞄式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形.....	73
圖 3.55	添加比重為 5%有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料經由三點式彎曲實驗在纖維側向方向利用掃瞄式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形.....	74
圖 3.56	添加比重為 5%有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料經由三點式彎曲實驗在纖維側向方向利用掃瞄式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形.....	74
圖 4.1	E-LR 0908-14 [ $\pm 45$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖.....	75
圖 4.2	添加比重為 2.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 [ $\pm 45$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖 ....	75
圖 4.3	添加比重為 5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 [ $\pm 45$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖 .....	76
圖 4.4	添加比重為 7.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 [ $\pm 45$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖 ....	76
圖 4.5	根據不同有機黏土含量相對於 [ $\pm 45$ ] <sub>s</sub> 拉伸試驗之奈米複合材料拉伸強度柱狀圖.....	77
圖 4.6	E-LR 0908-14 [ $\pm 45$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在側向拉伸試驗後試片破壞情形(有機黏土含量比重為: (a)0%; (b)5%).....	77
圖 4.7	E-LR 0908-14 [ $90/\pm 45/0$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖.....	78
圖 4.8	添加比重為 2.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 [ $90/\pm 45/0$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖	78
圖 4.9	根據不同有機黏土含量相對於 E-LR 0908-14 [ $0/\pm 45/90$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在不同角度下拉伸強度柱狀圖 .....	79
圖 4.10	E-LR 0908-14 [ $90/\pm 45/0$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗後試片破壞情形.....	79
圖 4.11	添加比重為 2.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 [ $90/\pm 45/0$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗後試片破壞情形 .....	80
圖 4.12	E-LR 0908-14 [ $60/15/-75/-30$ ] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖.....	80
圖 4.13	添加比重為 2.5%有機黏土含量 E-LR 0908-14 [ $60/15/-75/-30$ ] <sub>s</sub> 玻璃	

	纖維/環氧樹脂傳統複合材料在拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖	81
圖 4.14	E-LR 0908-14 [60/15/-75/-30] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗後試片破壞情形.....	81
圖 4.15	添加比重為 2.5%有機黏土含量 E-LR 0908-14 [60/15/-75/-30] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗後試片破壞情形 .....	82
圖 4.16	E-LR 0908-14 [67.5/22.5/-67.5/-22.5] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖.....	82
圖 4.17	添加比重為 2.5%有機黏土含量 E-LR 0908-14 [67.5/22.5/-67.5/-22.5] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖.....	83
圖 4.18	E-LR 0908-14 [67.5/22.5/-67.5/-22.5] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗後試片破壞情形.....	83
圖 4.19	添加比重為 2.5%有機黏土含量 E-LR 0908-14 [67.5/22.5/-67.5/-22.5] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗後試片破壞情形.....	84
圖 4.20	E-LR 0908-14 [90/±30] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖.....	84
圖 4.21	添加比重為 5%有機黏土含量 E-LR 0908-14 [90/±30] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖 .....	85
圖 4.22	根據不同有機黏土含量相對於 [90/±30] <sub>s</sub> 拉伸試驗之奈米複合材料拉伸強度柱狀圖 .....	85
圖 4.23	E-LR 0908-14 [90/±30] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗後試片破壞情形.....	86
圖 4.24	添加比重為 5%有機黏土含量 E-LR 0908-14 [90/±30] <sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗後試片破壞情形 .....	86
圖 5.1	雙懸臂梁試片概觀.....	87
圖 5.2	雙懸臂梁試片真實實驗圖.....	87
圖 5.3	修正梁公式(MBT)的修正缺陷長度推導圖 .....	88
圖 5.4	添加有機黏土含量 2.5%之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在積層間破壞韌性試驗中拉伸應力對時間曲線圖	88

圖 5.5	根據不同有機黏土含量相對於積層間破壞韌性試驗之奈米複合材料臨界能量釋放率柱狀圖.....	89
圖 5.6	同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料經歷積層間破壞韌性實驗後由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形.....	89
圖 5.7	添加有機黏土含量 2.5%之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料經歷積層間破壞韌性實驗後由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形.....	90
圖 5.8	添加有機黏土含量 5%之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料經歷積層間破壞韌性實驗後由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形.....	90
圖 5.9	添加有機黏土含量 7.5%之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料經歷積層間破壞韌性實驗後由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形.....	91



# 第一章 序言

## 1.1 研究背景與文獻回顧

近年來，複合材料的發展不僅在學術界亦或業界都引起十分廣泛的關注，大量纖維/樹脂類複合材料已應用於交通業以及航太工業方面，甚至延伸至運動用品產業中。傳統複合材料的纖維可承受大部分的應力以及加強了整個材料的強度，而樹脂部分則提供了力量傳遞的介質並使複合材料能擁有更佳的韌性。隨著奈米科技的日漸成熟，不同種類的奈米等級填充物添加於樹脂當中形成聚合物，會在聚合物的物理性質或是化學性質表現上產生明顯的改善。層狀矽酸鹽類的黏土由於其片狀的密集結構性，擁有非常高的面積比例(aspect ratio)，可以利用改質的方式將其表面做離子交換，形成容易與樹脂類產生鍵結的有機黏土，進而增強了聚合物的機械性質。此種優異的聚合物特性已經為複合材料界所注意，部分的研究已經著手於奈米級有機黏土添加於纖維/樹脂複合材料中的材料性質之探討。

在纖維/樹脂複合材料添加粉體已經在複合材料界中為一研究之走向。Wang [1] 等人做了添加不同粉體如玻璃珠、陶瓷及碳黑酚醛到酚醛樹脂複合材料及添加玻璃粉體的碳纖維/酚醛樹脂複合材料，先做三點式彎曲試驗證明添加入不同粉體後，的確是能影響酚醛樹脂材料的機械彎曲特性，彎曲強度與彎曲材料模數皆會受到影響，但並不一定是成長的趨勢。而在碳纖維/酚醛樹脂複合材料當中，添加玻璃粉體只有在添加比重為 10wt% 時有最佳效果，當添加比例大於 10wt% 時，彎曲機械特性反而會有所下降。最後在熱機械行為可以發現當環境溫度越高時，彎曲強度與彎曲材料模數會因有添加玻璃粉體而下降越快；但 Shiner 等人 [2] 添加微米級尼龍顆粒及

奈米級黏土進入碳纖維/樹脂複合材料當中，經由動態機械分析測試得到，即使不同規格等級的粉體皆對於此複合材料中聚合物之鏈結並沒有太大的改善；另外在平面剪力強度上，不同顆粒大小的粉體對於整體材料也不能帶來穩定之增益，結論出微米和奈米的粉體對於此複合材料會帶來不穩定之機械性質影響。而 Gilbert 等人 [3] 則是添加鐵粉體於碳纖維/樹脂複合材料中，並施與平面韌性實驗來測試其造成的影響，發現在第一模態破壞韌性實驗(Mode I fracture Toughness Test)，當添加鐵粉比重為 10wt% 時，能夠使複合材料有最好的韌性，原因是因為添入了鐵粉後，使缺陷長成的路徑因鐵顆粒阻礙而變得彎曲。此增益情形與在平面剪力強度的機械性質上是一致的，不過在添加鐵粉比重為 15wt% 時，會因帶入氣泡太多而導致平面剪力強度些許下降。另外在模式二的破壞韌性材料常數上，並沒有一穩定成長的趨勢顯現。Hussain 等人 [4] 選用不同大小的三氧化二鋁粉體 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )，添加一定比例於碳纖維/樹脂複合材料當中，利用三點式彎曲試驗、壓縮剪力試驗及平面應變破壞韌性實驗去探討其機械性質，證明添加不同比例大小之三氧化二鋁粉體造成熱殘留應力於纖維與樹脂界面的影響，既而可以提升全面的機械特性，緣於其粉體能夠加強碳纖維與樹脂之間的黏著性；此外，奈米級的三氧化二鋁粉體所造成的增益普遍比微米級的同種粉體來的大，更為均勻的混合在樹脂當中可更有效的增強是作者們所推測出來的結論。最後是 Yasuda 等人 [5] 則是研究加入碳粉體對於碳纖維/樹脂複合材料的影響，並以有無表面處理的碳纖維來做實驗，發現無表面處理之複合材料會因破壞在基材上而使纖維不容易被破壞，因此強度會有所提升；有表面處理的複合材料因基材和纖維之間的鏈結增加造成纖維較易破壞，會減低其彎曲強度；而在高添加比例的碳粉體後，彎曲強度會增加材料中的氣泡比例而使有所減弱。相同地，在收縮率方面，無表面處理的碳纖維是會受到添加碳粉體的影響而有所收縮的。

有機黏土添加於玻璃纖維/樹脂複合材料或是添加於碳纖維/樹脂複合材料的材料性質探討已經有部分的成果呈現。利用真空佐以樹脂轉注法 (VARIM) 的製作方法 [6] 添加微量之有機黏土用於玻璃纖維/熱固性樹脂複合材料當中，彎曲試驗可證明此添加物可增強傳統複合材料之彎曲強度及彎曲係數。在熱性質方面，藉由熱分解溫度( $T_{dec}$ )可以得知有機黏土將有效提升聚合物中交聯作用的密度，但根據不同的樹脂種類，動態機械性質分析(DMA)上在特定的有機黏土含量後所提升的效果並不顯著。由另外一方面的角度來看，手工積層法佐以真空狀態利用高溫熱壓成形 [7] 應用於玻璃纖維/樹脂奈米複合材料具有同樣的機械性質增強效果。場發射電子顯微鏡(SEM)所拍攝之照片可以清楚的觀察到有機黏土在纖維/樹脂介面上造成更強的黏著性。此外，在高溫  $50^{\circ}\text{C}$  下，奈米複合材料展現了良好的吸水特性顯示其中的有機黏土成分有效阻礙了水分的穿透。另外 Chowdhuty 等人 [8] 也是用手工積層的步驟，製作出含有奈米有機黏土的碳纖維/樹脂的複合材料板材，並進行三點式彎曲實驗和動態機械行為的分析(DMA)，發現在添加有機黏土比中為 2.5 wt% 時，其不論是彎曲強度或彎曲材料模數都能有最大的增益效果，並且動態機械分析來檢測複合材料在有無後硬化過程(Thermal post curing)是否會影響其玻璃轉脆溫度，實驗結果證實硬化溫度的確會產生影響。唯 Miyagawa 等人 [9] 探討了有機黏土在碳纖維/樹脂複合材料上的影響。利用超音波震盪的混合方式及手積層的疊層步驟，添加有機黏土在此複合材料板材上的彎曲材料模數會呈現下降的趨勢，但在彎曲強度方面的趨勢則不夠明顯。在平面剪力強度方面亦沒有辦法很明顯看出有機黏土對此複合材料的影響。

Vlasveld 等人 [10] 分別在乾燥和潮溼環境下製作奈米複合材料。利用單根纖維斷裂試驗(Single fibre fragmentation test)得知在潮溼的環境下，纖

維臨界長寬比(Critical aspect ratio)會比在乾燥環境下而有所增加。添入有機黏土後，所測得的纖維臨界長寬比也能產生增加的結果。但在添加有機黏土後，纖維臨界長寬比與纖維和基材模數比( $E_f/E_m$ )的趨勢，卻與剪力遲滯原理(Shear lag model)推論恰恰相反。本篇歸論出兩個原因造成此現象，一是在融化(Melt)的過程當中，基材的黏滯性會產生屈服應力於纖維周圍，另外一方面是因為有機表面改質劑(Organic surfactant)的熱不穩定性所造成的介面鍵結減弱。Park 等人 [11] 則建立出添加黏土填充物以及含有氣泡的複合材料機械之剪力行為模組，並以簡單的剪力實驗加以佐證其所算出來的結果會與實驗值十分相近，並證明模組中必須充分考慮填充物與氣泡含量的比例。

Rice 等人 [12] 利用樹脂轉注薄層法(Resin film infusion)和濕式纏繞法(Wet-winding)添加有機黏土在碳纖維/樹脂奈米複合材料上，透過光學顯微鏡觀察其產品品質上的差異，並以 4 點彎曲試驗(4 point bending flexural test)測得彎曲強度和彎曲係數，最後經由場發射電子顯微鏡觀察纖維與樹脂介面的破壞情形作為參考依據。從光學顯微鏡所觀察的照片中顯示，使用樹脂轉注薄層法的浸潤過程可產生高品質的奈米複合材料；反之濕式纏繞法因添加有機黏土增加了基材的黏稠度，容易在碳纖維/環氧樹脂奈米複合材料產品中含有氣泡降低其品質。材料性質的方面，兩種材料製作方法都對材料機械性質所產生的加強性並不顯著。Timmerman 等人 [13] 經由動態機械性質分析測試得知，黏土本身物理特性是添加其於奈米複合材料中造成增強機械性質的主因，而並非是與樹脂之間產生額外的交聯作用。藉由層間剪切試驗，含微量有機黏土(2phr、5phr)之奈米複合材料的積層間剪切強度(Interlaminar Shear Strength)逐漸減弱；但又在側向彎曲試驗中，因含量增加而得到逐漸增強的側向彎曲強度。根據這兩種相反趨勢，大膽推測

微量的有機黏土將自行旋轉其長度方向平行於纖維方向的結論。再由低溫下的循環性微龜裂試驗觀察得知，添加有機黏土可使龜裂密度較傳統複合材料有所下降。Becker 等人 [14] 經由第一模態破壞韌性試驗，測量出奈米複合材料之平面斷裂所需強度可依有機黏土含量之增加而逐漸提升。在積層間剪切強度中，未因有機黏土含量的增加而有明顯的增強現象。場發射電子顯微鏡顯示在試片斷裂面上，有機黏土增強了碳纖維與樹脂介面的黏著性，使破壞機制由單純的介面脫層情形轉移至延著有機黏土結塊方向的龜裂。而 Zhou 等人 [15] 先藉由動態機械分析得到添加有機黏土進入樹脂材料後，材料的玻璃轉脆溫度會隨著含量增高而升高，並利用分散良好的試片做拉伸試驗獲得有機黏土含量越高，強度越強但材料模數反之下降。之後應用於碳纖維/環氧樹脂複合材料上，發現對於材料的拉伸強度和拉伸模數皆會根據添加比例持續增加，試片的吸水性也跟著上升。

## 1.2 研究目標



本研究目的著重於探討有機黏土在玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料介面上所造成的影響。利用簡單拉伸試驗在纖維方向分別為 0 度、90 度及 10 度的同向性試片當中，根據添加不同含量的有機黏土來求得材料強度。透過應變規的讀取，纖維方向及纖維側向材料模數不難求得並對其趨勢做一分析，三點式彎曲實驗另一方面提供此同向性試片在彎曲強度的表現。多重方向性的板材也在此研究的討論範圍之內， $[\pm 45]_s$  交叉對疊、 $[0/\pm 45/90]_s$  及  $[0/\pm 60]_s$  的準向性複合材料板材是否能因為有機黏土的界面增強而產生不同的破壞強度及破壞機制是值得探討的。最後在層間的破壞情形可以利用積層間破壞韌性實驗來觀察，並求得試片的臨界能量釋放率。部分的試片斷裂面會利用掃瞄式電子顯微鏡觀測有助於奈米複合材料內部介面上的破

壞機制並做一分析。



## 第二章 材料製程

### 2.1 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料之製作流程

此玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料之基材中具備了 3 種基本原料。樹脂部分使用的是雙酚醛類樹脂(Diglycidyl ether of bisphenol A, DGEBA)，由 Resolution Performance Products 公司所提供型號 EPON 828，具有化學當量約 188，是本複合材料製作流程中基材所使用的主要物料。在此奈米複合材料的合成上所採用的是有機黏土(Closite I.30E，由 Nanocor Inc.所獲得)，此黏土為三明治層狀結構之矽酸鹽類，經由表面改質後可以輕易的分散在聚合物當中，並與胺基-硬化型的樹脂產生均勻的混合。硬化劑選用的是由 Huntsman Corp.所生產之 polyoxypropylenediamine D-230，活化氫當量約 67，將在一定的溫度中加速環氧樹脂分子間之交聯作用。

基材可以經由不同的添加物得以增強玻璃纖維奈米複合材料介面鏈結，進而獲得更佳的機械性質。以下的製作的基材製作過程以及手工積層的步驟，皆遵照郭濬清 [16] 在 2005 年發表之論文當中的製程延伸至此。本研究所使用的有機黏土為了證明其為簡單的純物質，將先置於真空烤箱當中，利用高溫 90°C 下烘烤六個小時佐以真空狀態，去除掉在常溫時蘊藏在有機黏土中的水氣。特定重量的有機黏土經由電子磅秤精算後再與環氧樹脂 EPON 828 以要求的比例進行混合。機械攪拌器(詠欣公司所提供)所在常溫下先以每分鐘 100 轉的速度初步攪拌混合物 10 分鐘，藉由加熱器升溫到 80°C 後用迴路控溫器保持溫度並以每分鐘 800 轉高速攪拌。在高溫攪拌的過程當中，混合溶液會由原先的黏稠狀態變得稀薄，這現象有助於之後實驗步驟的處理程序。事實上，經由機械性攪拌所帶來的剪切力並無

法使層狀的有機黏土結構物失去層與層之間的鍵結,其利用片狀表面積與樹脂連結進而有效的加強聚合物之機械性質將有所局限。有鑒於此,指向式超音波震盪攪拌器將在此破壞鍵結步驟上扮演相當吃重的角色。指向式超音波震盪攪拌器是將其探棒置於混合溶液中,利用高功率的輸出裝置提供高電壓訊號,在探棒上探頭的指向性方向產生高頻之超音波震盪溶液中的分子結構,藉此打斷有機黏土層間鍵結來使結構物能夠以片狀的方式分散於溶液當中。本研究中所使用的指向式超音波震盪攪拌器為 Misonix 公司所生產的 Sonicator 3000,以每秒 90 到 120 瓦特的輸出功率範圍高頻震盪有機黏土/環氧樹脂混合溶液 30 分鐘,為了避免震盪時所產生的高溫對混合溶液造成化學性質上的改變,混合溶液燒杯外圍將利用大量的冰水來維持燒杯在常溫的狀態中。因為輸出的功率極高,冰水的更換要十分頻繁,大約 500ml 的冰水要以 8 分鐘為一循環持續補充。然而在機械攪拌和高速超音波震盪過後,有許多的微氣泡已經從這兩種分散步驟混入溶液中,容易在基材上形成氣孔產生應力集中的現象使機械性質減弱。因此除氣會是提升其整體效果的有效步驟,將分散好的混合溶液放入真空烤箱中以常溫除氣 10 分鐘,過程中可以發現大量的氣泡從燒杯中冒出並快速的破滅,此乃證明溶液中存在的微氣泡之多是難以想像的。需注意的一點是,除氣時,溶液的流動性會對除氣的效果造成很大的影響,超音波震盪後的混合溶液會隨著時間增長而恢復其原本黏稠的特性,因此分散步驟後馬上除氣會有最佳的效果。在除氣過程後,硬化劑將以化學當量等量的方式,依照比例大約三分之一的環氧樹脂重量經由電子磅秤測重後加入混合溶液當中,在機械攪拌的幫助下常溫 10 分鐘均勻混合形成基材。製作完成的基材將備用於製造玻璃纖維/環氧樹脂之奈米複合材料上。

手工積層(Hand lay-up)佐以真空袋封裝為本研究採用之玻璃纖維/環

氧樹脂奈米複合材料人工製作方法。E 系列單方向性玻璃纖維布(E-LR 0908-14, 由 Vectorply 公司所提供)將裁切成 30 公分乘 30 公分長寬大小, 同樣尺寸之數片會在事前準備完畢利於進行手工積層的步驟。使製作完成的基材均勻淋布在玻璃纖維片上, 利用塑膠滾筒滾壓的方式在纖維方向上來回施力以求每束纖維絲都能夠完全浸潤在基材當中, 依照幾何方向設計改變纖維方向再疊合一層玻璃纖維布並重複上一個步驟直到層數符合實驗所預估為止。本研究中所疊合的共有三種不同樣式的玻璃纖維/環氧樹脂之奈米複合材料板: 首先是同方向性之板材, 其中玻璃纖維的方向完全一致;  $[\pm 45]_s$  對稱複合材料板之疊合方法是將玻璃纖維材料依纖維方向偏移正負 45 度角交叉疊合並以中心面為基準上下對稱; 擬均態(Quasi-isotropic)積層板  $[0/+45/-45/90]_s$  及  $[0/-60/+60]_s$  則是以中心面為基準, 上下對稱且依照預估的纖維方向疊合製成。手工積層完成後的成品之表面依序鋪上珍珠布、離型布以及與堆疊層數相同數量之棉布以吸附多餘排出的基材, 翻轉之後在試片另一面做同樣的布置, 最後將整體放置於不銹鋼板上並覆上真空袋, 以高黏性的矽膠條封裝並確認四周無縫隙後移入熱壓機中。整個模板利用熱壓的方式從常溫升溫至  $100^{\circ}\text{C}$  後持溫三小時, 再升溫至  $125^{\circ}\text{C}$  後持溫三小時使其硬化。硬化步驟的溫度控制流程繪於圖 2.1, 其中壓力會依照有機黏土含量之不同, 分別在比重為 0%、2.5%、5% 及 7.5% 有機黏土含量的板材上分別施予特定的壓力, 其值會整理於表格並列於不同板材之章節。熱壓過程全程利用真空幫浦抽氣達成真空狀態, 目的一方面是消除材料中所包含的氣泡, 另一方面為吸出多餘的基材。熱壓完成經自然冷卻後即可得到玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板, 其外形繪於圖 2.2, 經大型鑽石刀片切割機裁切成試片以供試驗所使用。

## 第三章 同向性複合材料板材之機械行為

纖維材料最大的特色就是具有方向性的機械性質。在纖維方向的機械特性與在纖維側向方向的機械特性會有非常大的不同，就目前的纖維材料來說，在纖維方向的強度是最強韌的，而纖維方向側向則為最弱。現在本章節目的為添加奈米有機黏土於傳統玻璃纖維/環氧樹脂同向性複合材料板材當中，利用簡單拉伸試驗以及三點式彎曲實驗，在纖維方向及纖維側向方向進行測試，材料的拉伸強度與彎曲強度可以經由數據記錄輕易求得，可以做為本複合材料板材的一個機械特性的基礎，接下來的章節再做更為廣泛的不同方向疊層的應用。

### 3.1 簡單拉伸試驗



在進行試驗之前，分析奈米複合板材的基本公式應輔助於確認試驗的數值是否合理、正確。在本章節當中進行了三種不同纖維方向分別為 $[0]_5$ 、 $[90]_5$ 及 $[10]_5$ 的同向性板材的拉伸試驗，可以得到纖維方向、側向方向和偏軸 10 度的拉伸強度。之後又利用應變規可以測得纖維方向與側向方向的材料模數，並一起做最後的探討。

同方向奈米複合板材的規格大小與熱壓過程中試片上所受壓力值可見於表 3-1，從板材上所裁切下來的試驗試片厚度分別為表 3-2 中所列，大約都在 1.45mm 左右，所有的試片皆為長度 200mm 和寬度 18mm 以備於拉伸試驗所使用。玻璃纖維貼片將黏貼於試片的尾端兩側，用於確定大型萬能拉伸試驗機的夾頭不會直接對試片受夾的部位因力量太大而造成破壞。受測的試片長度為 100mm 且纖維方向是特定於受力方向以求得真正的機械性

質如圖 3.1 所表示。萬能拉伸試驗機(MTS 810 system)以每秒  $10^{-4}$  的應變量利用位移控制，在纖維方向進行位置移動。MTS Basic Test Ware 軟體將以 1 點/1 秒的時間間隔同步紀錄試片所受的拉力與機台本身的位移量，經由 Excel 軟體做一數據整理後可以得到拉伸強度與位移量的關係圖。若要得到材料模數(Modulus)，可經由應變規去做一精密的測量。本研究所使用是由 Vishay 公司所生產，型號 EA-13-240LZ-120/E 的單向型應變規，其電阻值為  $120\Omega \pm 0.3\%$ ，而放大因子在  $24^{\circ}\text{C}$  時為  $2.1 \pm 0.5\%$ ，黏著劑的部分也是使用同公司所生產的 M-Bond 200。試片的部分因為其兩側凹凸不平，因此得先做表面處理。利用關西黏劑研究所生產的 AB 膠，在試片預貼應變規之特定位置塗抹上薄薄的一層，並利用美工刀刀背部分刮平使其盡量平整。接下來等待八個小時乾燥後，再利用規格 600 的砂紙輕磨造成些微粗糙的平面以利於黏貼應變規。應變規的黏貼方式是在應變規的背面先塗上一層助劑後，等一分鐘使其稍乾後塗上黏著劑並以姆指平推至試片上特定部位，對其施壓一分鐘助於應變規能完整黏貼以求得真正的應變值。試片的正反兩側同一部位都將貼上應變規，利用焊槍焊接電線並將其兩端接於自製的惠斯同電橋上，信號放大器(Vishay 2210B)一方面穩定輸入電壓 3 伏特進入電橋中，另一方面接收輸出電壓；試片所承受的力量將由 MTS 伺服器所提供，輸出訊號統一由訊號收集埠集結後送入電腦，計算軟體 LabView 將即時訊號顯示於電腦螢幕上，實驗全程會紀錄在自我選定的檔案當中利用 Excel 製成圖表，材料強度與材料模數都可因此而得知。

### 3.1.1 $[0]_5$ 拉伸實驗

纖維方向強度方面可先由 Basic Test Ware 的紀錄檔中數據換算所得知，時間與應力的曲線圖為圖 3.2 到圖 3.5，數據則列於表 3-2 並將數據做

全數平均後統整繪製柱狀圖於圖 3.6。簡單可以發現似乎添加有機黏土於玻璃纖維/環氧樹脂複合材料中在纖維方向的強度並沒有改善，反而在未添加與添加有機黏土含量 2.5%、5%、7.5% 之後其值依序為 756MPa、697MPa、668MPa 及 664MPa 有些許下降的趨勢。初步推測是環氧樹脂的脆性因添加有機黏土之後反而更加強烈，而且經由圖 3.12 的纖維方向試片剖面圖可以看到，纖維並不是完全直立的，因此纖維與纖維之間的樹脂，在纖維方向拉伸實驗時，就會有部分受到拉力。添加黏土而使樹脂變得易脆，反倒承受不住拉力而產生了裂痕，造成試片整體上的破壞。

另一方面，實驗結果取真實應變至 0.1% 並利用趨勢線求出纖維方向的材料模數  $E_1$ ，由應變規測得真實應變與應力曲線則繪於圖 3.7 至 3.10，每個圖中兩條曲線分別是由同根試片正反兩面黏貼之應變規取得，在動態放大器所設定的放大因子為 200。全數試片的數據皆列於表 3-3 並做全數平均後繪製柱狀圖於圖 3.11。發現其值並不如強度有降低的趨勢，其值皆約在 36GPa 左右，有機黏土的影響可以說是無法突顯出來。這樣的情形可以歸咎於玻璃纖維是支撐複合材料試片受力的主幹，相較下基材的貢獻近幾微不足道。因此即使添加有機黏土於複合材料中，材料特性還是不能有所增強。

試片的破壞情形可以見於圖 3.13。非常特殊的一點是破斷後的試片呈掃帚般裂開，證明其中纖維與纖維間界面基材的破壞是造成試片破壞的主要原因。在進行實驗過程當中，應力值爬升直到一極限值後，試片上產生缺陷伴隨著應力值驟降，可以很清楚的聽到試片有如竹片爆裂般的聲響。維持些許時間後又產生缺陷並使應力值再次下降，此情況重複多次至試片應力值接近於零為止。多處的纖維束塊有如撕裂般散布在試片測量範圍

內。各個添加不同有機黏土的試片皆有如此現象，為一致性的試片破壞情形。

### 3.1.2 [90]<sub>5</sub> 拉伸實驗

纖維方向的材料機械特性已經探討完畢。接下來將焦點聚集至纖維方向呈 90 度的側向方向上。因側向方向並不是玻璃纖維方向的延伸方向，因此纖維材料的高強度機械性質將不能有所幫助，這時候必須靠著連接纖維與纖維之間的基材與纖維本身的表面黏著性來承受應力。添加有機黏土於複合材料中是否能有效加強其機械特性將成為本實驗的觀察重點。

試片規格與[0]<sub>5</sub> 拉伸實驗相同，但試片上纖維方向將與大型拉伸試驗機的施力方向垂直。特別的是，因纖維側向方向強度極低，MTS 萬能拉伸試驗機將以  $10^{-5}$  的應變率來做位移控制。試片的應力與時間曲線可以見於圖 3.14 至圖 3.17，最高與最低的數值因誤差而不予採計。其數據列於表 3-4 並取統整並取平均繪製不同有機黏土含量之柱狀圖於圖 3.18。未添加有機黏土之玻璃纖維/環氧樹脂複合材料的強度僅有 15.6MPa，但在添加有機黏土比重分別為 2.5%、5%與 7.5%之後，其強度值依序上升為 20.8MPa、22.7MPa 和 27.2MPa。其趨勢一路提升，證明有機黏土的確能夠加強玻璃纖維/環氧樹脂複合材料在側向方面的機械強度，與[0]<sub>5</sub> 的試驗結果為些許下降的情形大不相同。而增強的原因可歸類於均勻分散於材料中的有機黏土片狀結構之表面離子分別與纖維和樹脂之間形成鏈結增加了界面的黏著性，必須施予更大的力量才能產生在界面上的破壞。

玻璃纖維側向方向的真實應力應變可由試片兩側的應變規所得到，因真實應變改變很小所以取側向材料模數至破斷點。而側向方向的材料模數

$E_2$  可以利用趨勢線的公式中得知，而在動態放大器所設定的放大因子為 500。其測得真實應變與應力曲線則繪於圖 3.19 至 3.22，每個圖中兩條曲線分別是由同根試片正反兩面黏貼之應變規取得，所有試片數據則列於表 3-5 並統整取平均繪製不同有機黏土含量之數據柱狀圖於圖 3.23。在未添加有機黏土之玻璃纖維/環氧樹脂複合材料側向的材料模數  $E_2$  是 6.5MPa，而添加有機黏土比重分別為 2.5%、5% 與 7.5% 之後，其值依序上升為 8.76GPa、9.99GPa 和 10.85GPa，與側向方向強度情形相似。證實有機黏土在界面改善纖維與樹脂的黏著性，不但能使玻璃纖維/環氧樹脂複合材料的側向強度上升，且還能讓其側向材料特性有同樣的加強。

試片概觀破壞情形可參照於圖 3.24，試片的破斷情形可以很簡單的分辨出是試片纖維與纖維界面的斷裂為破壞主因。實驗過程中應力值一路上升直到試片斷裂後驟降為很小的值，試片破裂面只有一處，代表是整支試片最為脆弱、不能承受應力的位置。根據受力對稱的關係，試片斷裂面位於試片中間是最為恰當的。前三根試片的斷面都符合需求，不過唯一有機黏土含量為 7.5% 時的斷面偏於試片某端，代表其受力狀況並不對稱，此方面的問題還需要更深入的研究與探討。

電子掃瞄顯微鏡照片可以深入試片細部觀察界面間的破壞情形。使用儀器為國立清華大學原子科學所之電子掃瞄式顯微鏡 JEOL JSM-6330F 及國立虎尾科技大學材料科學與工程系之電子掃瞄式顯微鏡 JEOL-6360。先在試片表面以 40 毫安培的電流濺鍍金膜 60 秒使其斷裂面導電性增資以更容易顯影，碳膠固定試片於基座表面後置於顯微鏡中並抽真空至  $9.65 \times 10^{-5}$  Pa，以 15KV 的電壓掃瞄經過試片斷裂面並觀察其破壞機制，影像將放大 500 至 1000 倍並以電子檔方式做一儲存。一系列照片將示於圖 3.25 到

圖 3.28。在未添加有機黏土的玻璃纖維/環氧樹脂複合材料中，可以非常清楚的看到脫落的纖維之表面非常的乾淨，並沒有樹脂的結塊黏附於其上。整根纖維是赤裸且看起來十分光滑，在背景當中也可以發現形狀非常完整的樹脂溝槽並整齊排列，顯示此試片的破壞機制是纖維與環氧樹脂之間的界面破壞所造成。但添加有機黏土後，破壞的行為似乎有轉變的趨勢，在添加有機黏土比重為 2.5% 時，照片中可以看出有些許的樹脂結塊已經開始隨機附著於脫落之纖維表面，代表破壞的機制已經開始在轉變，而且在添加更高含量之有機黏土時會更加嚴重，大量的樹脂結塊已經將脫層纖維團團包住，樹脂溝槽的完整性也破壞殆盡，證明試片的破壞機制已經從纖維與樹脂的界面破壞轉成樹脂間的破壞，樹脂結塊的邊緣裂痕是破壞發生的地方，破壞的形狀非常不規則但隨處可見，為一致的破壞情形。

### 3.1.3 [10]<sub>5</sub> 拉伸實驗



有機黏土在玻璃纖維/環氧樹脂複合材料的界面特性除了經由複合材料的 1 纖維方向和 2 纖維的側向方向可以做一比較之外，對於能夠承受剪切力的結果還可以經由偏軸方式的拉伸實驗結果來求得，因此受力方向與試片纖維方向呈 10 度偏軸的拉伸實驗為本研究所採用的方法。同樣與之前拉伸試片規格相同，但在裁切試片時會將試片上的纖維方向與受力方向有 10 度的偏移，同時為了使在整根試片的應力狀態是均勻分布的，在試片兩側之玻纖墊片的剪裁也有所改變。由 Sun 在 92 年時發表的文獻 [17] 當中可以得知在複合材料中應力與應變關係：

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \bar{S}_{11}\sigma_0 \\ \varepsilon_{yy} &= \bar{S}_{12}\sigma_0 \\ \gamma_{xy} &= \bar{S}_{16}\sigma_0\end{aligned}\quad (3.1)$$

其中  $\sigma_0 = \sigma_{xx}$  為拉伸方向的應力， $\varepsilon_{xx}$ 、 $\varepsilon_{yy}$  和  $\gamma_{xy}$  分別為拉伸方向、側向方向的應變與剪力應變， $\bar{S}_{ij}$  為一材料特性矩陣。經由推算後玻纖墊片的角度需與 X 軸所承夾角為

$$\cot \phi = -\frac{\bar{S}_{16}}{\bar{S}_{11}}\quad (3.2)$$

其中  $\bar{S}_{16}$  大略估算為  $0.333\text{GPa}^{-1}$ ，而  $\bar{S}_{11}$  則可以由  $[0]_5$  拉伸實驗中所得。因此根據各有機黏土添加含量不同的機械特性，在未添加有機黏土的玻纖墊片需製作的斜角角度為約 38 度，其餘有添加有機黏土之試片的玻纖墊片角度都得傾斜 39 度。

假設  $[10]_5$  複合材料板材在 x 方向施予一軸向均布力  $\sigma_x$ ，在與板材纖維方向呈 10 度角偏移，板材平面剪應力可以輕易獲得

$$\tau_{12} = -\sin \theta \cos \theta \sigma_x\quad (3.3)$$

在因此偏軸 10 度的試片所受剪應力可寫成

$$\sigma_{12} = -\sin 10 \cdot \cos 10 \cdot \sigma_x\quad (3.4)$$

整體試片的應力時間曲線將表示在圖 3.29 到圖 3.32。數據則列於表 3-6 並統整數據平均後繪製不同有機黏土含量之柱狀圖於圖 3.33。在未添加有機黏土時的玻璃纖維/環氧樹脂複合材料之偏軸 10 度強度為 27.9MPa，經由添加有機黏土含量 2.5% 後其值提升至 31.1MPa，而有機黏土含量 5% 時

數值為 36.1MPa，最後是有機黏土含量為 7.5% 時的結果為最高約 39.2MPa。整體分析來看，可以證明有機黏土的增加的確是可以在界面的剪切方向有一定程度的加強且與側向拉伸強度的趨勢相同，都是依照增加的比例逐漸的增強。

試片概觀的破壞情形可以視於圖 3.34。所有試片的斷裂面都位於纖維與纖維之間並沿著纖維方向斷裂，證明在界面上斷裂的還是試片遭受破壞的主要原因，並與之前章節拉伸實驗結果試片一致。實驗過程與 $[90]_5$ 十分類似，應力值都上升到一定極限後試片應聲斷裂，整體試片斷裂位置皆靠近試片中央，顯示受力狀況對稱且一致。

細部的試片破壞情形可利用掃瞄式電子顯微鏡做一觀察示於圖 3.35 至圖 3.38，照片所顯示的結果與 $[90]_5$ 拉伸實驗的情形類似。在未添加有機黏土的試片斷裂面上，脫落的纖維都是十分乾淨且光滑的，顯示沒有任何樹脂結塊附於其上，此時主要破壞機制應為纖維與樹脂之間的脫落所造成。開始添加有機黏土為 2.5% 之後，已經有部分少量的樹脂結塊出現於脫落纖維上，但背景的樹脂溝槽還算完整，等到添加 5% 與 7.5% 有機黏土含量後，大量的樹脂已經黏附在纖維上方使人難以辨識，樹脂溝槽也因此而被破壞其完整性，坑坑洞洞的情形非常嚴重。破壞機制已更改為樹脂間的破斷才是破壞主因，樹脂邊緣的裂痕可以充分證明這一點，代表有機黏土的添加是可以增強樹脂與纖維之間的黏著性的。

從同方向性的拉伸實驗當中，本研究測得了纖維方向、纖維側向方向及偏軸 10 度方向的強度情形，其中除了在纖維方向的強度趨勢是些許下降之外，其他兩個實驗在有添加有機黏土進入複合材料中的情形都是有所改善，並藉由 SEM 照片可以輔助得知有機黏土可以使樹脂結塊黏著於脫層之

纖維，而且隨著含量的增加黏附的情形更加明顯，由此可以證明有機黏土的確是可以加強纖維與樹脂界面上的強度。另外在纖維方向及纖維側向方向上的材料模數也可以利用應變規求得，在纖維側向方向的影響非常明顯，但在高含量時的成長趨勢有所緩和，證明有機黏土的添加所能增強的機械特性還是有所極限，但在同向性複合材料之側向方向還是有大幅度的改善。

## 3.2 彎曲實驗

試片的受力情形除了有在平面方向下所受到的拉伸與壓縮行為外，還有在平面外的彎曲行為。前一節已經探討完畢同向性玻璃纖維/環氧樹脂複合材料在拉伸方向的機械行為，此節會將其試片在彎曲方面之機械行為做一完整的介紹。

一般彎曲實驗有分為三點式彎曲實驗與四點式彎曲實驗兩種，本研究當中是採用三點式的彎曲實驗(3 point-bending test)。整體實驗流程與試片規格全部遵照美國標準實驗準則 ASTM 在 2002 年所發布的 D790 [18] 當中的規定所建立。試片將由同向性五層複合材料板材上所裁剪下來，並參考準則中對於厚度小於 1.6mm 的材質試片規格需為 50.8mm 長且 12.7mm 寬，機具之墩距應設為 25.4mm 寬。適當尺寸之試片平均置於墩距上並在距離墩距各為 12.7mm 的中線位置施與一均布力，整體實驗架設可見於圖 3.39。因為施力之極限值大小不同，本實驗改採用由弘達公司所生產之小型拉伸試驗機，可提供荷重 20Kg 的微小施力壓頭，以每分鐘 0.07mm 的移動方式在試片中線持續施壓，內部程式以 1 點/1 秒的記錄方式得到壓頭位移距離及荷重數值。數據將由 Excel 做數值運算並輸出圖表以供參考，同樣有機黏土含量之試片將會製作四片以上並實驗以確認實驗的準確性，實驗儀器

架設概觀可以參照圖 3.40。

在此三點式的彎曲實驗當中，彎曲應力的求得方式與拉伸實驗大不相同。根據 [18] 其應力值的計算方法如下：

$$S = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.5)$$

在式子當中， $P$  為壓頭施予的壓力， $L$  是礮矩兩端之間的距離； $b$  和  $d$  分別是試片的寬度與厚度，而  $S$  即為此部位之應力值。在這個實驗當中，經由此式運算後，公式所得到的受力值為試片底端中線所承受的彎曲應力。

### 3.2.1 [0]<sub>5</sub> 彎曲實驗

各種不同含量的有機黏土試片之應力與壓頭位移曲線示於圖 3.41 到圖 3.44，全部實驗數據將列於表 3-7 且統整數據平均後繪製柱狀圖於圖 3.45。不難發現是否添加有機黏土，彎曲強度值都在 650MPa 上下跳動，代表有機黏土在纖維方向帶來的增強效果並不顯著。此原因可比照於 [0]<sub>5</sub> 拉伸實驗，玻璃纖維為承受應力之主要材料，其受力極限遠大於基材可承受範圍。因此添加有機黏土即使可些許增強基材的強度，但與玻璃纖維本身承受應力部分相較之下可說是微乎其微，並不容易在此實驗中觀察出來。

試片的破壞概觀可見於圖 3.46。實驗過程中應力值一路爬升到極限之後緩緩下降，並不如其他實驗會有應力驟降的情形。而試片的斷裂情形也並不易發現，在試片中線左右會開始慢慢浮現折痕，並往兩側擴散。直到實驗結束都未發生完全斷裂的部位，是目前為止與其他破壞試片皆不相同的現象。

### 3.2.2 [90]<sub>5</sub> 彎曲實驗

在拉伸實驗中可以得知[90]<sub>5</sub> 的同向性玻璃纖維/環氧樹脂複合材料可因添加有機黏土而增強機械性質，此特性是否可延伸至由彎曲實驗中也有所改善，是耐人尋味的一點。實驗步驟與試片規格皆與 3.2.1 節相同，應力對壓頭位移曲線可得於圖 3.47 至圖 3.50，最高與最低的數值因誤差而不予採計，整體數據將列於表 3-8 並繪製柱狀圖於圖 3.51。令人滿意的是，在彎曲實驗當中，分別添加有機黏土含量 2.5%、5% 及 7.5% 後其值依序為 45.4MPa、51.3MPa 及 52.7MPa，比起未添加有機黏土的數值 34.4MPa，有機黏土含量越多，試片能承受的彎曲強度越高，成長的趨勢十分卓越，可以比未添加有機黏土之試片增強 50% 左右的彎曲強度。

破壞後的試片排列於圖 3.52。雖然試片近似完整，但是從近距離不難看出試片的缺陷位置。由於壓頭的施力位置並不一定都在纖維束的間縫上，但是破壞的情形一定發生在最接近壓頭位置的纖維束間並可明顯分辨。應力值到一極限後會有下降情形且試片開始產生缺陷但未完整斷裂，斷裂位置藕斷絲連但已不能再承受應力。

試片的斷裂面的細部情形可以經由 SEM 電子掃描式顯微鏡來做一仔細的觀察，照片將列於圖 3.53 至圖 3.56。從未添加有機黏土的試片斷裂面中可以得知，纖維與樹脂的脫層情形是非常乾脆的，在脫層的纖維上完全沒有樹脂的殘留與結塊，證明了此試片的破壞機制是由纖維和樹脂之間的脫層為主要破壞情形。不過當添加有機黏土進入傳統玻璃纖維/環氧樹脂複合材料當中之後，破壞的機制開始變的複雜。添加有機黏土比例越高時，可以發現越來越多的樹脂結塊黏附於脫層的纖維上，並可以從樹脂結塊上看

到裂開的邊緣。這一點證明了破壞機制已經由原本的纖維與樹脂之間的脫層轉化成樹脂與樹脂之間的破裂，此情形與前面的試片斷裂面破壞情形十分雷同。簡單來說，在纖維側向方向進行三點式彎曲實驗，也是可以證明纖維與樹脂之間的黏著性經由添加有機黏土而有所增強，進而影響到整體玻璃纖維/環氧樹脂複合材料的彎曲強度。

從同向性玻璃纖維/環氧樹脂複合材料的彎曲實驗中，可以發現其兩個實驗結果與拉伸實驗的結果是十分相似的。在纖維方向的實驗因為纖維本身強度太高而使有機黏土的增強效果可以被忽略，但是在纖維側向方向，試片的強度已不再是由纖維主導，而是轉移至纖維與樹脂之間界面來承受，這時有機黏土在界面上使樹脂易黏附於纖維的優點就可以清楚展現，並且不論是在簡單拉伸實驗或是三點式彎曲實驗當中隨著添加比例的不同都可以見其明顯的成長優勢，在有機黏土含量 7.5% 時都能有 50% 以上的增益，不失為一種值得廣泛應用的奈米級粉體。



## 第四章 多重方向性複合材料板材之機械行為

纖維材料的特點為具有方向性，沿纖維方向的機械強度會是最強，反之纖維側向方向為最弱。也因為此特點的緣故，同向性的複合材料就會在纖維的側向方向最不易承受應力，這在應用上面會是一大問題。所以在纖維方向的製作上面，必須利用多方向性的積層方法，以在不同方向的纖維來補強在某特定方向上特別脆弱的缺點。此章節即為在多重方向性的玻璃纖維/環氧樹脂複合材料上添加有機黏土，觀察不同有機黏土含量之試片是否會產生不同之強度。 $[\pm 45]_s$ 、 $[0/\pm 45/90]_s$ 及 $[0/\pm 60]_s$ 此三種多重方向性複合材料一樣利用手工積層的方式堆疊，基材的製作、手工滾壓的方法和熱壓的過程與同向性複合材料一致，唯獨層數不同與壓力大小經估算後稍作改變。試片裁切為 20cm 長，18mm 寬，兩側黏上 5 公分長之玻纖墊片並等候八小時使其固定，再利用大型萬能拉伸試驗機 MTS 810 以  $10^{-4}$  的應變率實行位移控制，並以 1 點/1 秒的時間間隔記錄時間、位移與受力值供 Excel 做計算並繪製圖表。

### 4.1 $[\pm 45]_s$ 拉伸剪力試驗

$[\pm 45]_s$  拉伸剪力試驗目的在於求得 $[\pm 45]_s$  複合材料板材的拉伸平面剪力強度。根據文獻 [19] 當中，假設 $[\pm 45]_s$  複合材料板材在 x 方向施予一均布力  $\sigma_x$ ，在與板材纖維方向呈正負 45 度角偏移，即卡氏座標系下的應力情況可列成

$$\sigma_x \neq 0; \sigma_y = 0 \text{ and } \sigma_{xy} \neq 0 \quad (4.1)$$

在與纖維方向呈正 45 度角與負 45 度角的剪應力大小相同，但方向不同，可表示為

$$\sigma_{xy}[+45] = -\sigma_{xy}[-45] \quad (4.2)$$

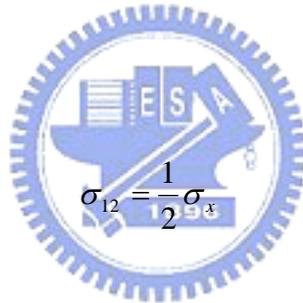
利用轉換矩陣可以將其座標轉換至板材纖維方向，所有平面應力可以列於下列矩陣

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \cos \theta \sin \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \cos \theta \sin \theta \\ -\cos \theta \sin \theta & \cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

由式，板材平面剪應力可以輕易獲得

$$\sigma_{12} = -\sin \theta \cos \theta \sigma_x + \sin \theta \cos \theta \sigma_y + (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \sigma_{xy} \quad (4.4)$$

在偏移負 45 度角層間時



$$\sigma_{12} = \frac{1}{2} \sigma_x \quad (4.5)$$

在偏移正 45 度角層間時

$$\sigma_{12} = -\frac{1}{2} \sigma_x \quad (4.6)$$

此試驗板材為 4 層的玻璃纖維布交叉疊合形成，其厚度大約為 1.26mm，其因添加不同有機黏土含量而改變試片上所受壓力值可見於表 4-1。

添加不同有機黏土含量的 $[\pm 45]_s$  複合材料板材的拉伸應力對時間曲線示於圖 4.1 至圖 4.4。整體數據列於表 4-2 並統整繪製柱狀圖於圖 4.5。由圖可知，剪切破壞強度在未添加有機黏土時為 32.2MPa，但依序加入有機黏土 2.5%、5% 及 7.5% 後其值一路上升成為 35MPa、37.4MPa 和 42.6MPa。整體強度還是會受到添加不同有機黏土含量而有所成長，也是有一定增加強

度的情形。此趨勢可以對照的組別為 $[10]_5$  拉伸實驗，因為這兩組實驗皆在探討出在試片剪切方向有機黏土對於纖維與樹脂界面上的改善。但在 $[\pm 45]_5$  拉伸剪力試驗所得到的拉伸平面剪切應力會比 $[10]_5$  拉伸實驗所得到的數值高，原因可解釋成在積層的方式上， $[\pm 45]_5$  的試片是交叉對疊且上下對稱，會比 $[10]_5$  的單向性試片在承受應力上多了加成的效果，最終都可以得到有機黏土的確可以有效增強纖維與樹脂界面之間的黏著性進而提升平面剪切強度。

$[\pm 45]_5$  拉伸試驗的試片破斷情形拍攝於圖 4.6，試片的斷裂面可以清楚發現破壞走向是沿著纖維方向斷裂，且因試片交叉堆疊所以呈現剪刀刀口形狀。在實驗過程當中，應力隨著試片瞬間破斷而驟降即告實驗結束。圖中所有試片的破壞情勢十分一致，證明其皆為纖維與纖維之間的破斷。

## 4.2 $[0/\pm 45/90]_5$ 複合材料板材拉伸實驗

除了十字交叉的 $[\pm 45]_5$  試片外，能夠有對稱性並無平面外應力的多重方向性的複合材料堆疊為 $[0/\pm 45/90]_5$  和 $[0/\pm 60]_5$  是此實驗製程使用的兩種積層方式。在這些試片當中因更多種角度使其受力情形會更加複雜，本研究所致力的有機黏土增強效果是否也能有所突顯出來將是觀察重點。 $[0/\pm 45/90]_5$  擬均態試片在本研究當中有傳統的無添加有機黏土的傳統複合材料板材與添加有機黏土 2.5wt% 的奈米複合材料板材兩種，其熱壓硬化時壓力值與 $[\pm 45]_5$  試片之熱壓壓力值一致，但因總疊合層數增加為 8 層，因此試片厚度會改變約為 2.5mm 左右，其餘試片規格及實驗步驟都與前一節之 $[\pm 45]_5$  拉伸試驗相同。在本章節此準向性試片將做三種不同角度的裁切，分別使整體複材角度變更為  $[90/\pm 45/0]_5$ 、 $[60/15/-75/-30]_5$  及

[67.5/22.5/-67.5/-22.5]<sub>s</sub> 以利於探討試片破斷時的破壞情形。

#### 4.2.1 [90/±45/0]<sub>s</sub> 複合材料板材拉伸實驗

此實驗試片並無作旋轉角度上的裁切，因此其最內層為 0 度依積層角度順序排列至外層為 90 度。無添加有機黏土和添加有機黏土含量 2.5% 試片之應力與時間曲線示於圖 4.7 至圖 4.8，兩者數據列於表 4-3 且繪製柱狀圖於圖 4.9。其數值大約為 250MPa 上下，並無太大差別，代表有機黏土的影響並沒有表現出來，配合試片的破壞情形可以更清楚的了解其原因。

試片的破斷面可見於圖 4.10 和圖 4.11。前者為添加有機黏土的玻璃纖維/環氧樹脂複合材料，在斷面的近觀可以看到最內層之纖維斷裂為破壞主因，此現象也可以在添加有機黏土含量 2.5% 的圖中得到，顯示有機黏土的界面影響在此機械特性中並不顯著。



#### 4.2.2 [60/15/-75/-30]<sub>s</sub> 複合材料板材拉伸實驗

[60/15/-75/-30]<sub>s</sub> 複合材料板材將裁剪成標準尺寸大小的試片，內部偏移角度最小已變成 15 度。無添加有機黏土和添加有機黏土含量 2.5% 試片之應力與時間曲線示於圖 4.12 至圖 4.13，兩者數據列於表 4-4 且繪製柱狀圖於圖 4.9。其數值降為 210MPa 附近，歸咎於當已無平行受力方向的纖維支撐時，有機黏土帶來的界面影響似乎也不顯著。

試片斷面的近拍情況示於圖 4.14 和圖 4.15。兩者皆可發現在最小偏軸角度的纖維上有斷裂的痕跡，顯示受力纖維崩裂是形成試片破壞的機制，與有機黏土帶來界面的增強無任何關連。

### 4.2.3 $[67.5/22.5/-67.5/-22.5]_s$ 複合材料板材拉伸實驗

在 4.2.1 與 4.2.2 節的結果皆未能展現出在界面上的破壞機制，有機黏土的增強效果十分不明顯。最後嘗試裁切 $[67.5/22.5/-67.5/-22.5]_s$  複合材料板材試片使其偏軸最小角度之層面為 22.5 度，並重複拉伸實驗行為。無添加有機黏土和添加有機黏土含量 2.5% 試片之應力與時間曲線示於圖 4.16 至圖 4.17，兩者數據列於表 4-5 且繪製柱狀圖於圖 4.9。數值位於 230MPa 左右，添加有機黏土後的機械特性再度沒有提升，代表有機黏土在所謂的多重方向性複合材料板材上並沒有實質的幫助。

試片的斷面情形可以從圖 4.18 和圖 4.19 得知。偏軸 22.5 度的纖維斷裂不難被分辨出來，纖維的破壞還是操控著此試片的破斷情形，不論是在有無添加有機黏土的情況之下都是此種結果，呼應了前面有機黏土因纖維材料本身強度太強而使效果無法顯現的說法。

### 4.3 $[90/\pm 30]_s$ 複合材料板材拉伸實驗

試片的疊合方式為 $[0/\pm 60]_s$ ，其熱壓過程和壓力值皆與 $[\pm 45]_s$  拉伸實驗之試片相同，惟層數較多所以厚度約為 1.8mm，製作好的板材將旋轉角度裁切成 $[90/\pm 30]_s$  佐以與前章節相同尺寸的拉伸試片供於實驗，觀察玻璃纖維/環氧樹脂複合材料的破壞狀況，控制變因為添加有機黏土含量 5%，與未添加有機黏土的複合材料做一比較與探討。試片的應力與時間曲線示於圖 4.20 到圖 4.21，整體數據將列於表 4-6 並繪製柱狀圖於圖 4.22。數值不論有無添加有機黏土於其中都位在 230MPa 附近，與 4.2 節之準向性複合材料板材的結果非常一致，有機黏土的改善效果相較之下幾乎可以完全被忽

略。

試片斷裂面如圖 4.23 和圖 4.24 依舊可以發現，內層偏軸較小角度的纖維斷裂是試片毀壞的原因，破壞的纖維會是隨機出現在共軛的層面上，不一定會一併發生。纖維與樹脂之間界面的脫離依舊不是主導試片破斷的破壞機制。

綜合了以上各種擬均態複合材料的拉伸試驗，本研究不斷嘗試旋轉裁切角度以求纖維與基材界面上的斷裂為主導之破壞機制，但其實驗結果似乎並不如預期，試片的破斷還是以偏移最小角度的纖維因承受不了應力而毀壞，因此破壞強度都幾乎由玻璃纖維貢獻，有機黏土所造成的增強機械特性並無法明顯施於此擬均態複合材料。但在 $[\pm 45]_s$ 對疊板材上反而有機黏土影響甚鉅，根據添加的含量增加，剪切強度能夠更強。試片的破斷也都是由於剪切行為所造成，證明有機黏土使纖維與樹脂之間黏著性變好對於此種材料是可以使單純剪切方向有所增強，但並不適用於更多重方向性的複合材料板材。

## 第五章 積層間破壞韌性實驗

從前面兩個章節的研究與探討，大致上對此類玻璃纖維/環氧樹脂複合材料板材輔以添加有機黏土的平面機械特性已經做一完整的介紹。但試片的拉伸與彎曲實驗所帶來之破壞情形並非只發生在試片平面上，另一種可能的破斷還有可能是歸咎於試片內部層與層之間剝離，也就是所謂的脫層。本章節將利用在出平面的方向施予一拉伸力造成試片的脫離，來探究其中有機黏土所帶來之破壞特性的影響。

在研究試片積層間破壞韌性實驗分類有 3 種:(1)雙懸臂梁實驗(Double Cantilever Beam Test)；(2)末端彎曲實驗(End Notched Flexure Test)及(3)疊層剪切實驗(Cracked Lap Shear Test)。因為本研究主要探討第一模態積層間破壞韌性，因此選擇雙懸臂梁實驗。由美國標準實驗準則 ASTM 在 2001 年修正的 D-5528 [20] 可以得到整個實驗標準試片規格以及操作流程。試片由同向性之玻璃纖維/環氧樹脂複合材料所組成，堆疊 12 層並以之前 $[\pm 45]_s$ 。拉伸實驗試片的熱壓過程進行硬化，厚度大致上為 3.3mm。試片將裁切成 23cm 長且 2cm 寬，試片的概觀將繪於圖 5.1。在手工積層的過程當中，第 6 層與第 7 層的纖維布之間會嵌入一小片離型布深度約 6cm 至 6.5cm，預先製造試片內部層間缺陷，並在裁切好的試片中保留 5.5cm 以上的缺口。缺陷兩邊最外側的邊緣部分利用粗砂紙先磨過後再利用應變規黏著劑將活動門扣固定於上，以方便壓頭夾取並施力。弘達公司所提供的微力型拉伸試驗機使用 200Kg 的荷重元，利用壓頭夾取活動門扣兩端並在垂直試片平面方向以利進行拉伸行為，真實實驗架構則示於圖 5.2。

積層間破壞韌性實驗可以經由公式得到一能量釋放率(Energy

release rate),  $G_I$ , 下標 I 代表的是第一模式(Mode I)。在荷重到達一極值開始產生缺陷的延伸時,  $G_{Ic}$ , 臨界能量釋放率, 可以代表一個試片在一個拉伸-反拉伸循環中在單位截面積上所釋放的能量值, 進而去判定整體材料的脆性或韌性。此雙臂梁的能量釋放率的估算方法如下:

$$G_I = \frac{3P\delta}{2b(a+\Delta)} \quad (5.1)$$

式子當中  $P$  是施力,  $\delta$  為試片受力端邊緣兩側張開的距離,  $b$  與  $a$  分別是試片的寬度與原缺陷長度。雖然公式算法是根據一簡單懸臂梁固定一端並在另一端施與一垂直力所導出, 但在 Hashemi 等人和 O'Brien 等人 [21,22] 研究中可發現本實驗採用的是雙懸臂梁試片, 因為在缺陷尖端的試片橫切面將不是一個固定端, 梁原理的校正公式將修正式(5.1)當中缺陷長度之部分, 需要加上一校正值  $|\Delta|$  使缺陷長度變為  $a+|\Delta|$ 。  $|\Delta|$  是由撓度的開三次方根號與試片缺陷長度的逼近線在 X-Y 座標圖上, 當 Y 軸值為 0 時, X 軸與座標原點之間距, 範例圖可示於圖 5.3。在此撓度可表示為

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (5.2)$$

$P$  是施力,  $\delta$  為試片受力端邊緣兩側張開的距離。

實驗過程將由施力-未施力(Load-unloading)為一循環進行多次的反覆拉伸行為。微小型拉伸試驗機以初速 3mm/min 的速度定速位移, 當試片缺陷末端準備開始延伸時將速度調降為 0.5mm/min 緩慢拉伸模擬位移近乎不變, 並在到達缺陷伸長量後 25mm/min 反方向回復位移起始點。全程壓頭位移量、經過時間和荷重情形都將以 4 秒/1 點的時間間隔紀錄成電子檔案方便 Excel 做數據處理並繪製圖表。

試片的施力與位移曲線循環圖可見於圖 5.4 為其中一組有機黏土含量 7.5% 試片的結果。前五個循環之臨界能量釋放率數據將做一平均後列於表 5.1 並繪製柱狀圖於圖 5.5。不難發現其值因有機黏土的增加而持續下降，代表在纖維與樹脂之間的界面能儲存的能量相對減少，脆性變高。而樹脂主要的功能是在界面傳遞力量，有機黏土會使其韌性下降，且依添加比例的增高隨之越來越低。顯示有機黏土是不利於樹脂的韌性而使其脆性增強，呼應在前面章節界面破壞強度因樹脂變脆而有所減低的結論。

試片層間的脫層情形可以利用掃瞄式電子顯微鏡觀察其現象並見於圖 5.6 到圖 5.9，其內部的破壞機制與之前章節的微觀結果十分近似。未添加有機黏土的試片上脫落纖維是乾淨且光滑的，沒有參雜樹脂結塊於其上，脫落後的溝槽形狀也十分完整，證明其為纖維與樹脂界面之間的破壞。反之在添加有機黏土含量為 2.5% 之後，少量樹脂結塊開始隨機黏著於纖維上，微量的樹脂破裂邊緣依稀可見。在添加有機黏土含量 5% 後情形非常嚴重，整個纖維幾乎被樹脂結塊包覆住，很難分辨，添加有機含量 7.5wt% 的試片也有同樣的破壞情形。背景的溝槽完整性因樹脂結塊黏於纖維上而遭受破壞，顯示有機黏土對層間的樹脂與纖維附著性依舊存在，但臨界能量釋放率的降低也是因為有機黏土的添加而使界面變脆，因此這優缺點必須根據需求做一番的衡量。

## 第六章 結論

經由前面章節所做的試驗以及電子顯微鏡微觀行為，有機黏土添加於玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料的特性可以略窺一二。在本研究當中，當有機黏土添加於側向纖維方向實驗當中時較易看出增強效果，因為側向纖維方向是纖維最弱的一個方向，整體強度必須依靠環氧樹脂及纖維的界面來承受。相較之下，如果界面連結能夠變的更緊密時，破壞的強度就越高，有機黏土正巧是一種提供高強度且大面積鍵結的粉體，因此在側向拉伸強度及側向彎曲強度亦或 $[\pm 45]$ 。拉伸試驗的拉伸強度上，都能有持續、接近線性成長的趨勢。此證明了有機黏土不僅在聚合物中能夠增強機械性質，也能添加於複合材料使其展現更佳的材料特性。增強原因的具體證據可經由電子顯微觀測行為所佐證。在電子顯微鏡觀察的圖片當中，隨著有機黏土比重的增高，由有機黏土與環氧樹脂所產生之結塊明顯黏著於脫層的玻璃纖維絲上的情形逐漸增加。因此可以合理的推測經超音波震盪後分解之片狀有機黏土表面易與環氧樹脂與玻璃纖維表面產生鍵結，進而提升兩者之間的黏著性造成在材料特性上的加成效果，且當有含量越高時，殘留在玻璃纖維上的樹脂結塊就越多，代表其黏著性越佳。

在破壞力學方面，積層間破壞韌性實驗可以得知添加有機黏土後，樹脂的韌性是有所下降的，此現象也都可以發現於纖維方向的拉伸實驗以及多重方向性的板材試片上，顯示有機黏土在韌性上帶來的減弱會是其一弱點。魚與熊掌，不能兼得，這是在科學上面時常出現的情況，因此在應用方面應該多加考慮、斟酌。

## 參考文獻

- [1] Wang, S., Adanur, S. and Jang, B.Z. (1997). Mechanical and Thermo-Mechanical Failure Mechanism Analysis of Fiber/Filler Reinforced Phenolic Matrix Composites, *Composites part B: Engineering*, **28**(3): 215-231.
- [2] Shiner, C.A., Timmerman, J.F., Williams, E.P.M. and Seferis, J.C. (2003). Thermal and Mechanical Characteristics of Nano Modified Fiber-Reinforced Composites, *International SAMPE Symposium and Exhibition*, **48**(2): 2539-2544.
- [3] Gilbert, E.N., Hayes, B.S. and Seferis, J.C. (2002). Variable Density Composite Systems Constructed by Metal Particle Modified Prepregs, *Journal of Composite Materials*, **36**(17): 2045-2060.
- [4] Hussain, M., Nakahira, A. and Niihara, K. (1996). Mechanical Property Improvement of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Filler Dispersion, *Materials Letters*, **26**(3): 185-191.
- [5] Yasuda, E., Tanabe, Y., Manocha, L.M. and Kimura, S. (1988). Matrix Modification by Graphite Powder Additives in Carbon Fiber/Carbon Composite with Thermosetting Resin Precursor as a Matrix, *Carbon*, **26**(2): 225-227.
- [6] Haque, A., Shamsuzzoha, M., Hussain, F. and Dean, D. (2003). S2-Glass/Epoxy Polymer Nanocomposites: Manufacturing, Structures, Thermal and Mechanical Properties, *Journal of Composite Materials*, **37**(20): 1821-1837.
- [7] Kornmann, X., Rees, M., Thomann, Y., Neola, A., Barbezat, M. and Thomann, R. (2005). Epoxy-Layered Silicate Nanocomposites as Matrix in

Glass Fibre-Reinforced Composites, *Composites Science and Technology*, **65**(14): 2259-2268.

- [8] Chowdhury, F.H., Hosur, M.V. and Jeelani, S. (2006). Studies on the Flexural and Thermomechanical Properties of Woven Carbon/Nanoclay-Epoxy Laminates, *Materials Science & Engineering A: Structure Materials*, **421**(1-2): 298-306.
- [9] Miyagawa, H., Jurek, R.J., Mohanty, A.K., Misra, M. and Drzal, L.T. (2006). Biobased Epoxy/Clay Nanocomposites as a New Matrix for CFRP, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **37**(1): 54-62.
- [10] Vlasveld, D.P.N., Parlevliet, P.P., Bersee, H.E.N. and Picken, S.J. (2005). Fibre-Matrix Adhesion in Glass-Fibre Reinforced Polyamide-6 Silicate Nanocomposites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **36**(1): 1-11.
- [11] Park, J.Y. and Zureick, A. (2005). Effect of Filler and Void Content on Mechanical Properties of Pultruded Composite Materials under Shear Loading, *Polymer Composites*, **26**(2): 181-192.
- [12] Rice, B.P., Chen, C., Cloos, L. and Curliss, D. (2001). Carbon Fiber Composites: Organoclay-Aerospace Epoxy Nanocomposites, Part I, *SAMPE Journal*, **37**(5): 7-9.
- [13] Timmerman, J.F., Hayes, B.S. and Seferis, J.C. (2002). Nanoclay Reinforcement Effects on the Cryogenic Microcracking of Carbon Fiber/Epoxy Composites, *Composites Science and Technology*, **62**(9): 1249-1258.
- [14] Becker, O., Varley, R.J. and Simon, G.P. (2003). Use of Layered Silicates to Supplementary Toughen High Performance Epoxy-Carbon Fiber Composites, *Journal of Materials Science Letters*, **22**(20): 1411-1414.

- [15] Zhou, G., Lee, L.J. and Castro, J. (2003). Nano-Clay and Long Fiber Reinforced Composites Based on Epoxy and Phenolic Resins, *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*, **2**: 2094-2098.
- [16] 郭濬清, “應變率對纖維複合材料側向抗壓強度影響之探討,” 交通大學機械工程研究所論文, 2005.
- [17] Sun, C.T. and Chung, I. (1993). An Oblique End-Tab Design for Testing Off-axis Composite Specimens, *Composites*, **24**(8): 619-623.
- [18] ASTM D790-02, “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials”, *Annual Book of ASTM Standards*, 2002.
- [19] Adams, D.F., Carlsson, L.A. and Pipes, R.B. (2003). *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials*, CRC Press, New York.
- [20] ASTM D5528-01, “Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites”, *Annual Book of ASTM Standards*, 2001.
- [21] Hashemi, S., Kinloch, A.J. and Williams, J.G. (1989). Corrections Needed in Double-Cantilever Beam Tests for Assessing the Interlaminar Failure of Fibre-Composites, *Journal of Materials Science Letters*, **8**(2): 125-129.
- [22] O’Brien, T.K. and Martin, R.H. (1993). Round Robin Testing for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Composites Materials, *Journal of Composites Technology & Research*, **15**(4): 269-281.

表 3-1 5 層同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板之規格大小與有機黏土含量及硬化過程壓力對照表

Organoclay content(wt %)	Dimension(mm <sup>3</sup> )	Pressure(Psi)
0	300×300×1.54	5
2.5	300×300×1.46	14
5	300×300×1.48	22
7.5	300×300×1.45	30



表 3-2 同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向拉伸破壞強度與有機黏土含量對照表

Organoclay content(wt%)	Tensile strength(MPa)
0_A	771
0_B	732
0_C	751
0_D	764
0_E	779
0_F	741
0_G	781
0_H	708
2.5_A	688
2.5_B	677
2.5_C	696
2.5_D	696
2.5_E	728
5_A	661
5_B	681
5_C	618
5_D	673
5_E	675
5_F	693
5_G	677
5_H	671
5_I	657
7.5_A	661
7.5_B	674
7.5_C	657

表 3-3 同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向拉伸材料模數 E1 與有機黏土含量對照表

Organoclay content (wt%)	E1_1 (GPa)	E1_2 (GPa)	E1_Average (GPa)	Tensile strength (MPa)	Strain_1	Strain_2	Failure strain
0_A	38	34.6	36.3	771	0.024	0.022	0.023
0_B	38.8	33.9	36.35	732	0.021	0.019	0.02
0_C	36.3	33.8	35.05	763	0.023	0.023	0.023
0_D	35.2	32.4	33.8	778	0.024	0.023	0.0235
2.5_A	39.2	38.7	38.95	688	0.017	0.015	0.016
2.5_B	35.4	34.5	34.95	677	0.016	0.016	0.016
2.5_C	35.8	35.8	35.8	696	0.02	0.02	0.02
5_A	40.3	38	39.15	661	0.009	0.007	0.008
5_B	38.4	36	37.2	681	0.017	0.017	0.017
5_C	36.4	35.7	36.05	618	0.018	0.016	0.017
7.5_A	36.9	36.7	36.8	661	0.018	0.016	0.017
7.5_B	35.9	35.6	35.75	674	0.02	0.02	0.02



表 3-4 同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在側向拉  
伸破壞強度與有機黏土含量對照表

Organoclay content(wt %)	Transverse tensile strength(MPa)
0_A	16.78
0_B	14.86
0_C	16.95
0_D	13.86
2.5_A	19.2
2.5_B	19.44
2.5_C	22.9
2.5_D	22
2.5_E	22.3
2.5_F	18.52
5_A	21.44
5_B	22.5
5_C	23.5
5_D	23
5_E	22.9
7.5_A	27.3
7.5_B	24.23
7.5_C	29.12
7.5_D	25.4
7.5_E	28.8
7.5_F	28.5

表 3-5 同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在側向拉伸材料模數 E2 與有機黏土含量對照表

Organoclay content (wt%)	E2_1 (GPa)	E2_2 (GPa)	E2_Average (GPa)	Transverse tensile strength (MPa)	Strain_1	Strain_2	Failure strain
0_A	6.64	6.6	6.62	11.41	0.0017	0.0016	0.00165
0_B	6.38	6.14	6.26	16.95	0.0027	0.0026	0.00265
0_C	6.54	6.88	6.71	13.86	0.0021	0.0021	0.0021
2.5_A	9.46	8.33	8.895	22.9	0.0029	0.0027	0.0028
2.5_B	9.31	8.17	8.74	22	0.0023	0.0027	0.0025
2.5_C	9.28	8.24	8.76	24	0.0028	0.0026	0.0027
2.5_D	9.41	8.14	8.775	22.3	0.0022	0.0027	0.00245
5_A	10	9.97	9.985	21.1	0.0021	0.002	0.00205
5_B	10.2	9.94	10.07	23.5	0.0023	0.0023	0.0023
5_C	10.1	9.75	9.925	22.9	0.0023	0.0023	0.0023
7.5_B	11.6	10.8	11.2	23.1	0.002	0.0022	0.0021
7.5_C	11.2	10.3	10.75	25.4	0.0022	0.0025	0.00235
7.5_D	11.3	10.8	11.05	28.8	0.0025	0.0027	0.0026
7.5_E	11.1	9.7	10.4	28.5	0.003	0.0025	0.00275

表 3-6 同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在[10]5 拉  
伸破壞強度與有機黏土含量對照表

Organoclay content(wt%)	In-plane shear strength(MPa)
0_A	29.33
0_B	27.21
0_C	27.2
2.5_A	30.75
2.5_B	31.53
2.5_C	32.13
2.5_D	30.1
5_A	36.63
5_B	35.06
5_C	35.68
5_D	34.98
5_E	37.15
5_F	37.1
7.5_A	39.13
7.5_B	39.74
7.5_C	38.86

表 3-7 同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向之彎曲破壞強度與有機黏土含量對照表

Organoclay content(wt%)	Flexure strength(MPa)
0_A	633.1
0_B	636
0_C	633.6
0_D	643.9
2.5_A	662.8
2.5_B	611
2.5_C	659.2
2.5_D	688.3
5_A	640.3
5_B	636.3
5_C	695.7
5_D	622.4
7.5_A	668.5
7.5_B	673.2
7.5_C	634.44
7.5_D	654.2

表 3-8 同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在側向纖維方向之彎曲破壞強度與有機黏土含量對照表

Organoclay content(wt%)	Transverse flexure strength(MPa)
0_A	37.52
0_B	32.6
0_C	32.78
0_D	34.54
2.5_A	45.26
2.5_B	43.31
2.5_C	44.89
2.5_D	47.96
5_A	48.67
5_B	48.72
5_C	51.78
5_D	56.02
7.5_A	49.13
7.5_B	58.06
7.5_C	57.17
7.5_D	46.26

表 4-1 4 層 E-LR 0908-14 [ $\pm 45$ ]<sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板之規格大小與有機黏土含量及硬化過程壓力對照表

Organoclay content (wt %)	Dimension(mm <sup>3</sup> )	Pressure(Psi)
0	250×250×1.26	9
2.5	250×250×1.28	14
5	250×250×1.24	22
7.5	250×250×1.27	29

表 4-2 4 層 E-LR 0908-14 [ $\pm 45$ ]<sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗之拉伸破壞強度與有機黏土含量對照表

Organoclay content(wt%)	In-plane shear strength(MPa)
0_A	28.85
0_B	33.05
0_C	33.15
0_D	33.75
2.5_A	36.15
2.5_B	31.25
2.5_C	35.15
2.5_D	37.25
5_A	37.25
5_B	36.7
5_C	37.75
5_D	38
7.5_A	44.15
7.5_B	38.75
7.5_C	45.05
7.5_D	42.35

表 4-3 8 層 E-LR 0908-14 [90/±45/0]<sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗之拉伸破壞強度與有機黏土含量對照表

Organoclay content(wt%)	Tensile strength(MPa)
0_A	264
0_B	263.8
2.5_A	240.3
2.5_B	257.1

表 4-4 8 層 E-LR 0908-14 [60/15/-75/-30]<sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗之拉伸破壞強度與有機黏土含量對照表

Organoclay content(wt%)	Tensile strength(MPa)
0_A	213.9
0_B	223.6
2.5_A	211.4
2.5_B	206.7

表 4-5 8 層 E-LR 0908-14 [67.5/22.5/-67.5/-22.5]<sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在拉伸試驗之拉伸破壞強度與有機黏土含量對照表

Organoclay content(wt%)	Tensile strength(MPa)
0_A	242.8
0_B	232.2
2.5_A	218.9
2.5_B	225.4

表 4-6 6 層 E-LR 0908-14 [90/±30]<sub>s</sub> 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在  
 拉伸試驗之拉伸破壞強度與有機黏土含量對照表

Organoclay content(wt%)	Tensile strength(MPa)
0_A	227
0_B	241
0_C	225
0_D	228
5_A	203
5_B	216
5_C	237
5_D	236

表 5-1 同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在積層間破  
 壞韌性試驗之臨界能量釋放率與有機黏土含量對照表

Organoclay content(wt%)	GIC(KJ/m <sup>2</sup> )	Average GIC(KJ/m <sup>2</sup> )
0_A	1.68,1.75,1.94,1.82,1.77	1.78
0_B	2.01,1.96,2.02,2.02,1.99	2
2.5_A	1.84,1.84,1.8,1.83,1.86	1.84
2.5_B	1.54,1.61,1.75,1.76,1.69,1.8	1.69
5_A	1.26,1.18,1.21,1.31,1.29	1.25
5_B	1.08,1.1,1.04,1.17,1.31,1.2,1.4	1.19
7.5_A	0.9,0.91,0.98,1.1,0.99	0.98
7.5_B	1.18,1.21,1.26,1.29,1.19,1.2,1.1,1.1,1.1	1.18

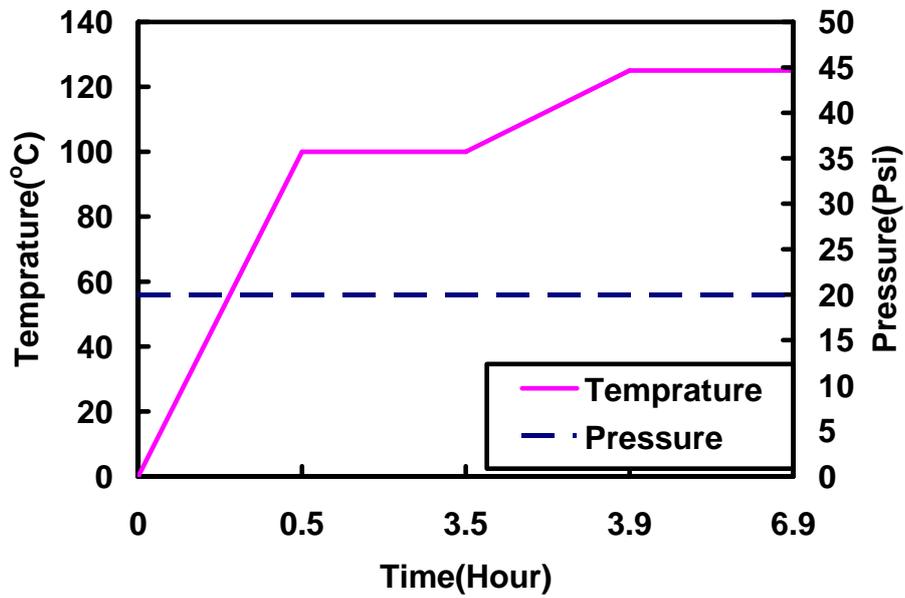


圖 2.1 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板之硬化過程

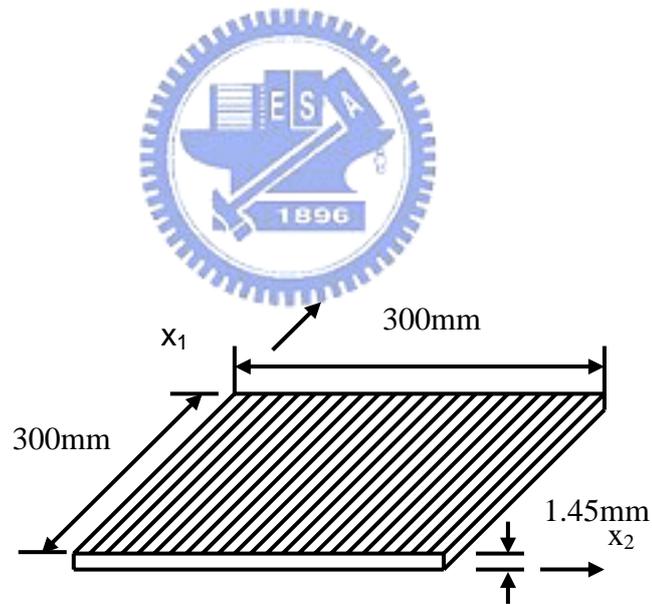


圖 2.2 等向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料板之外型示意圖

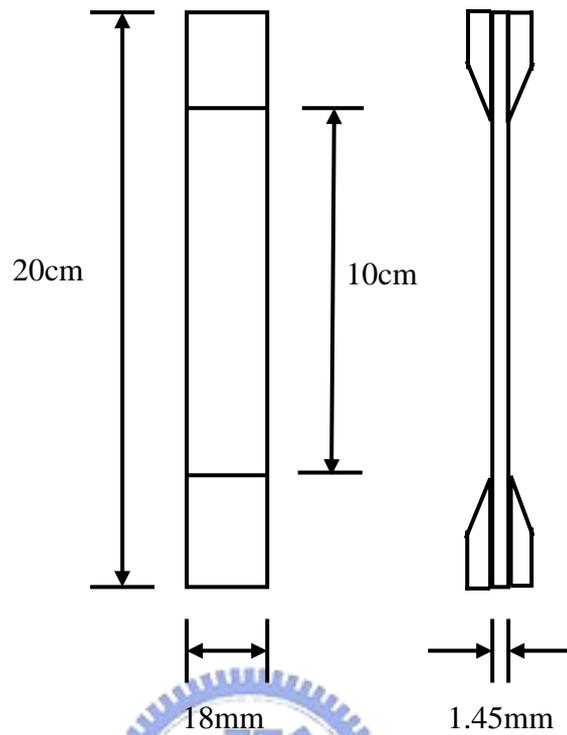


圖 3.1 拉伸試驗之試片規格圖

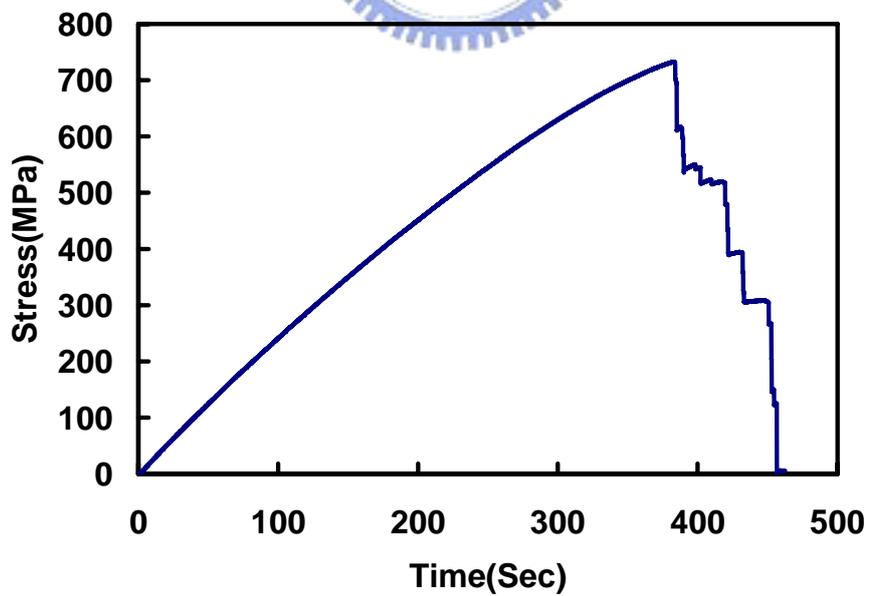


圖 3.2 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在纖維方向拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖

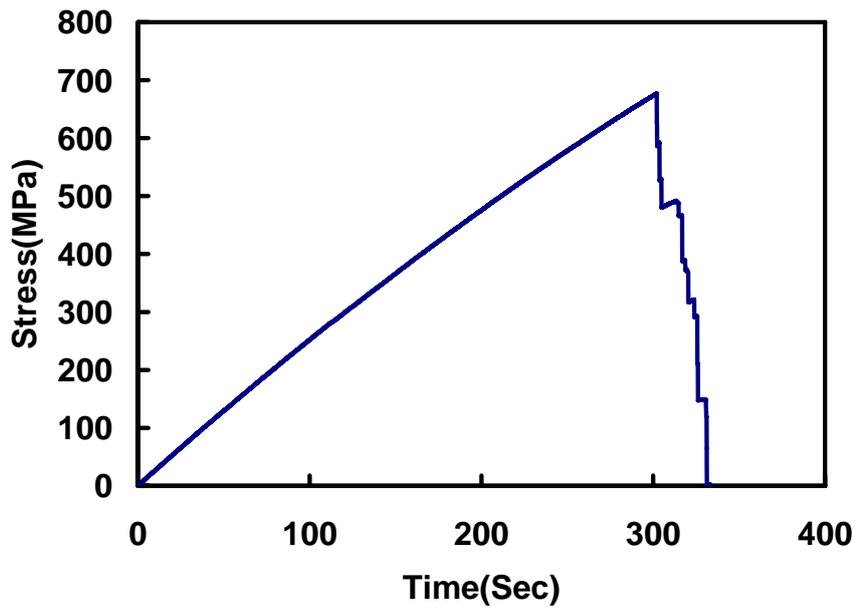


圖 3.3 添加比重為 2.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖

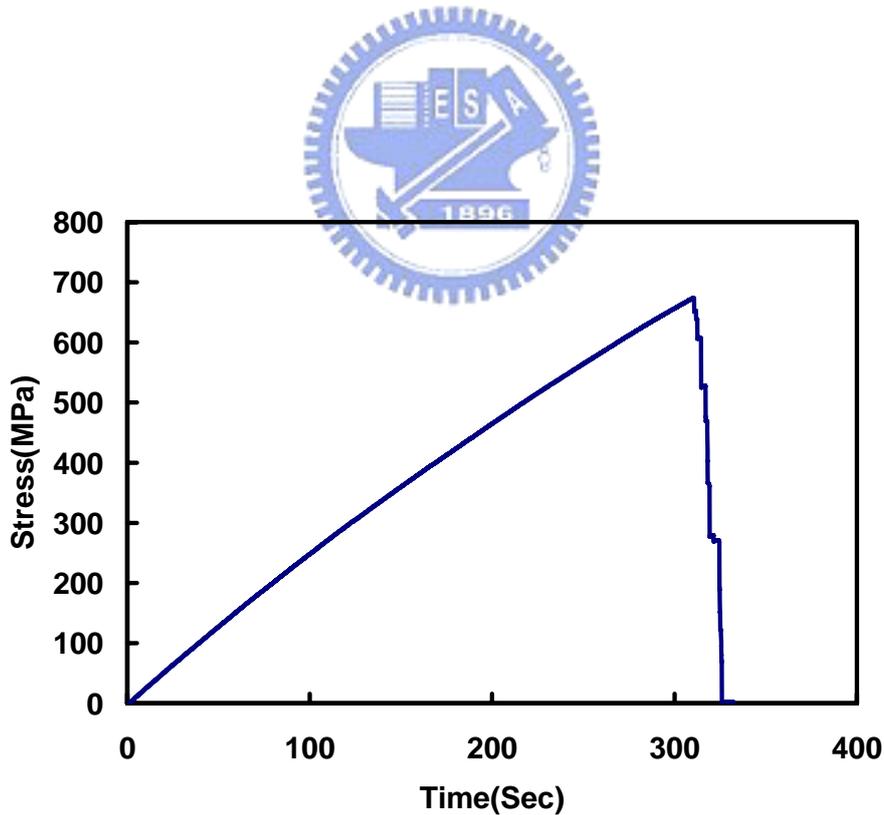


圖 3.4 添加比重為 5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖

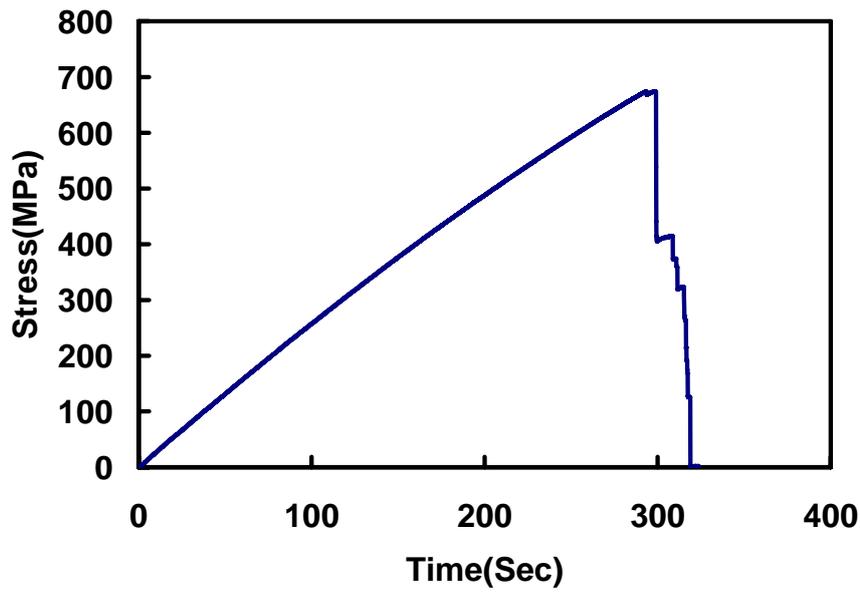


圖 3.5 添加比重為 7.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖

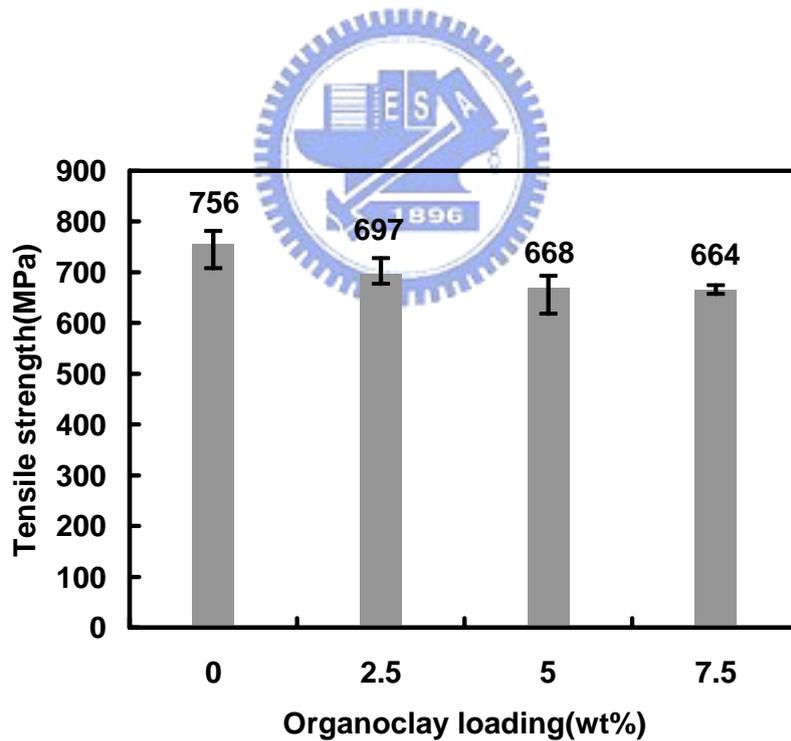


圖 3.6 根據不同有機黏土含量相對於纖維方向拉伸試驗之奈米複合材料纖維方向拉伸強度柱狀圖

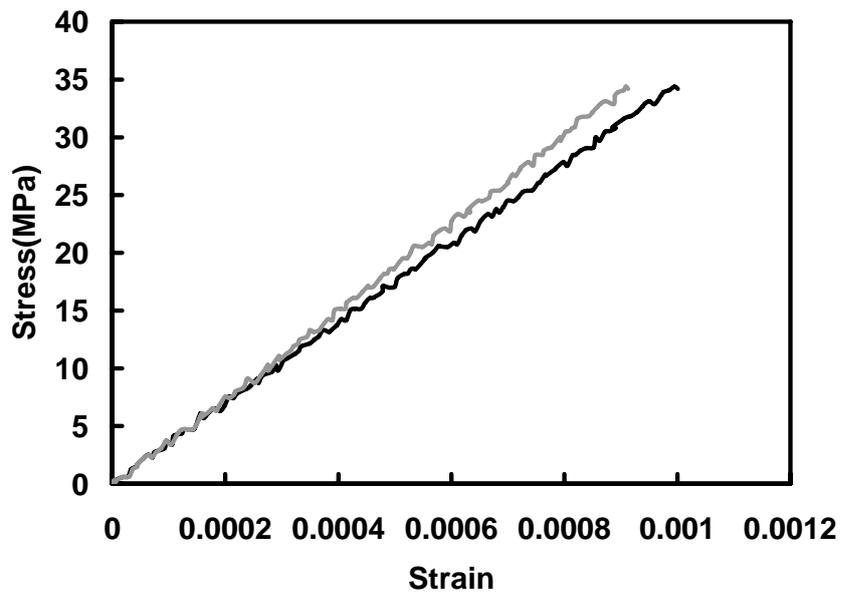


圖 3.7 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在纖維方向拉伸試驗中拉伸應力對真實應變曲線圖

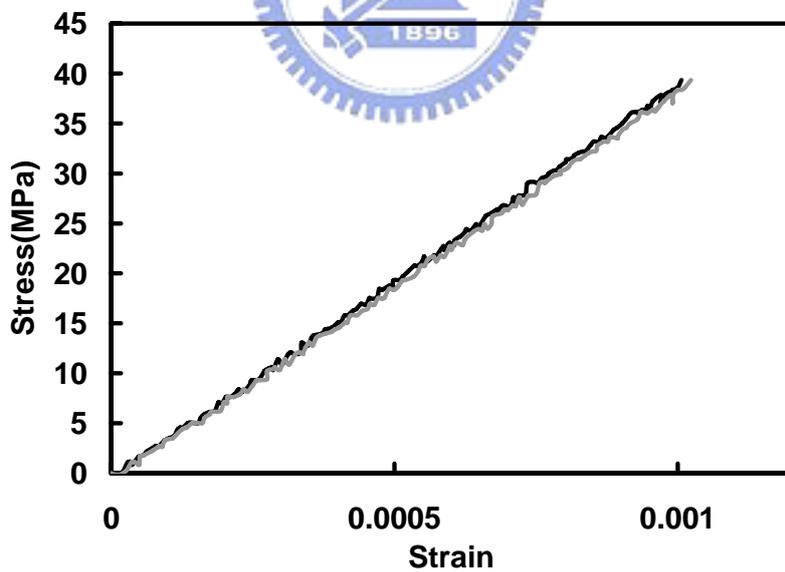


圖 3.8 添加比重為 2.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向拉伸試驗中拉伸應力對真實應變曲線圖

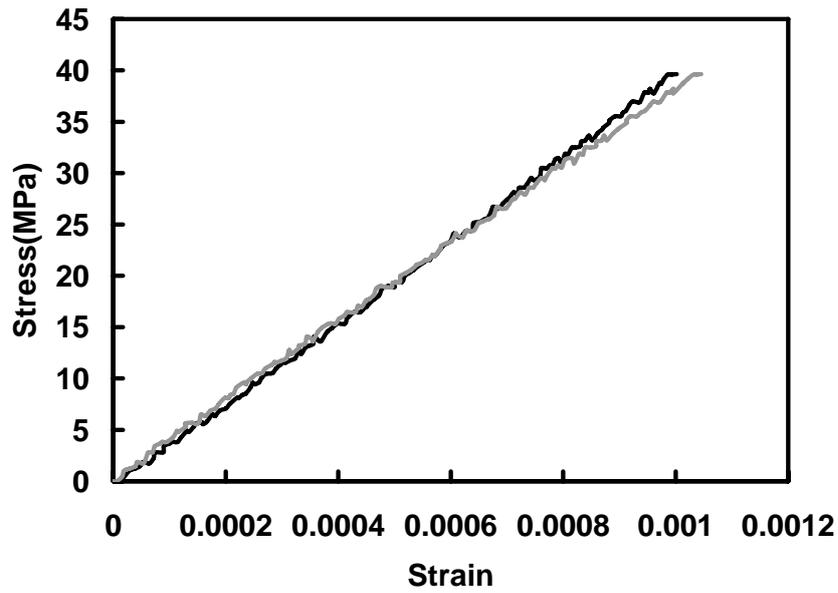


圖 3.9 添加比重為 5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂  
奈米複合材料在纖維方向拉伸試驗中拉伸應力對真實應變曲線圖

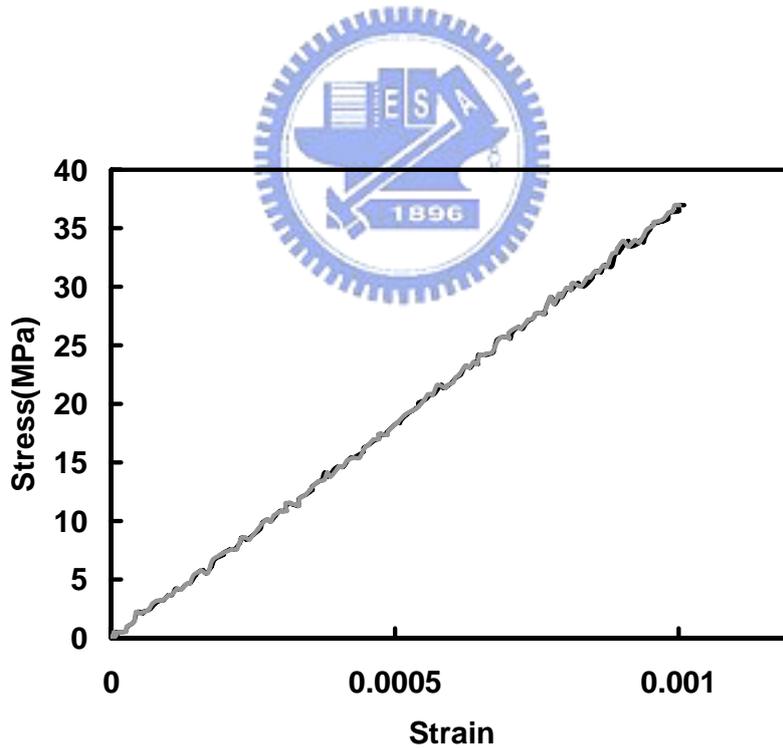


圖 3.10 添加比重為 7.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹  
脂奈米複合材料在纖維方向拉伸試驗中拉伸應力對真實應變曲線圖

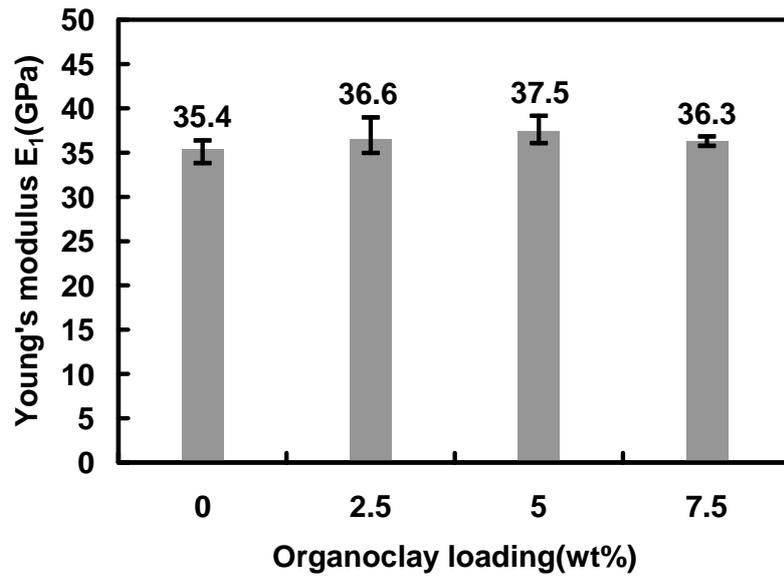


圖 3.11 根據不同有機黏土含量相對於纖維方向拉伸試驗之奈米複合材料纖維方向拉伸材料模數  $E_1$  柱狀圖

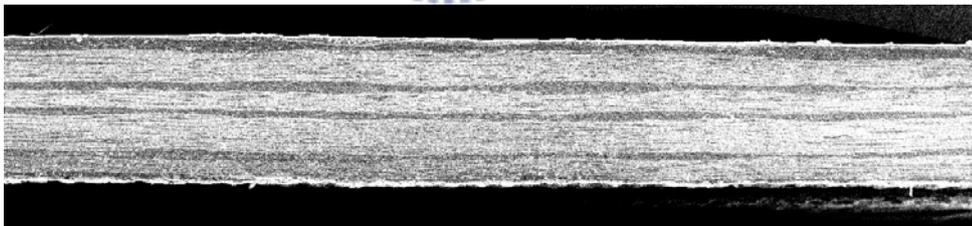


圖 3.12 添加比重為 5% 有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料試片在纖維方向剖面圖



圖 3.13 同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向拉伸試驗後試片破壞情形(由左至右依序為有機黏土含量比重為 0%; 5%)

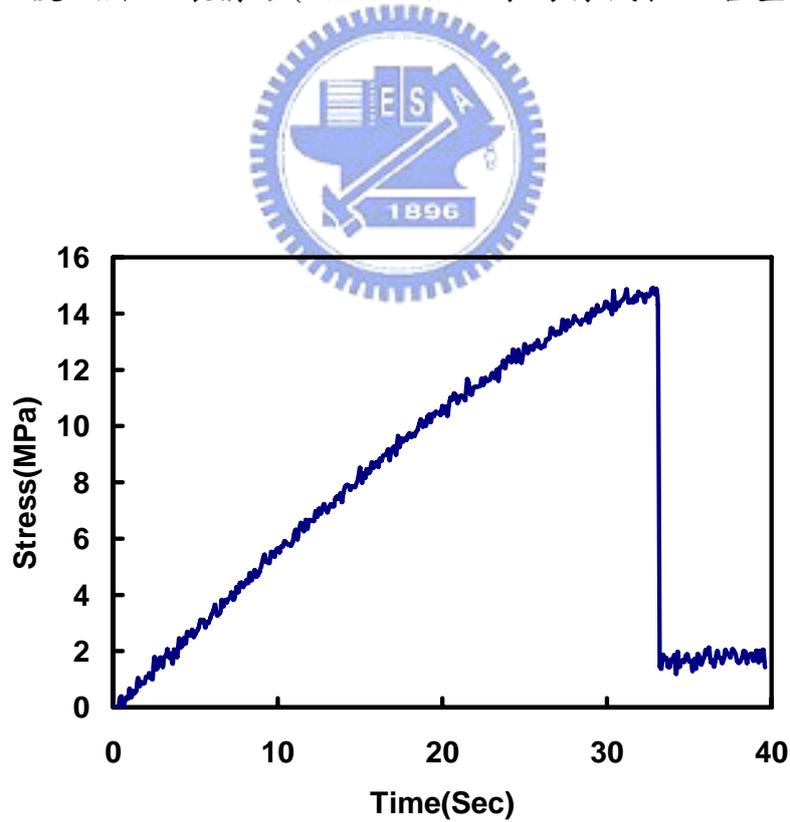


圖 3.14 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在橫向拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖

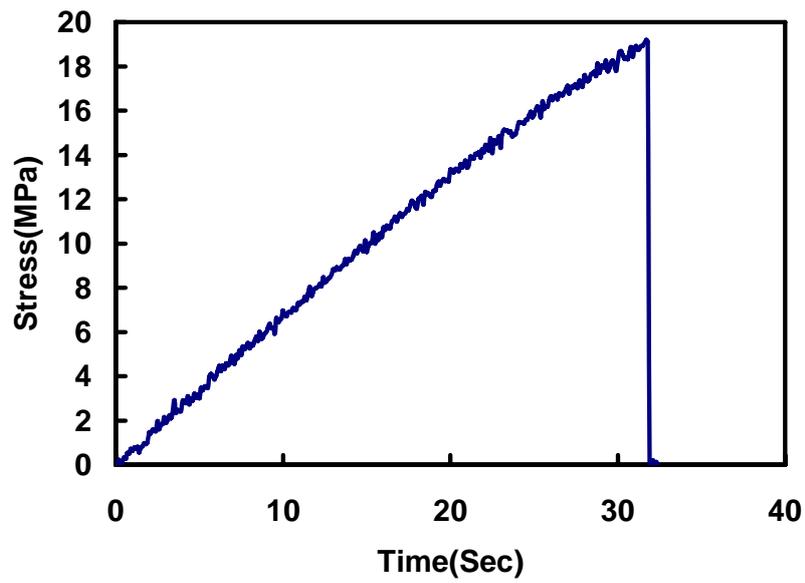


圖 3.15 添加比重為 2.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在橫向拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖

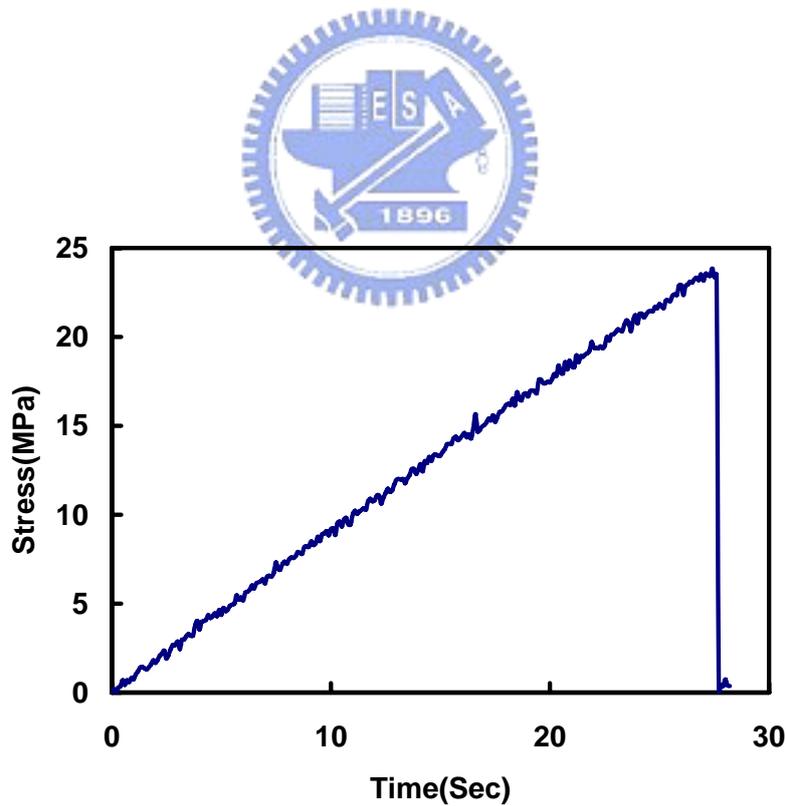


圖 3.16 添加比重為 5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在橫向拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖

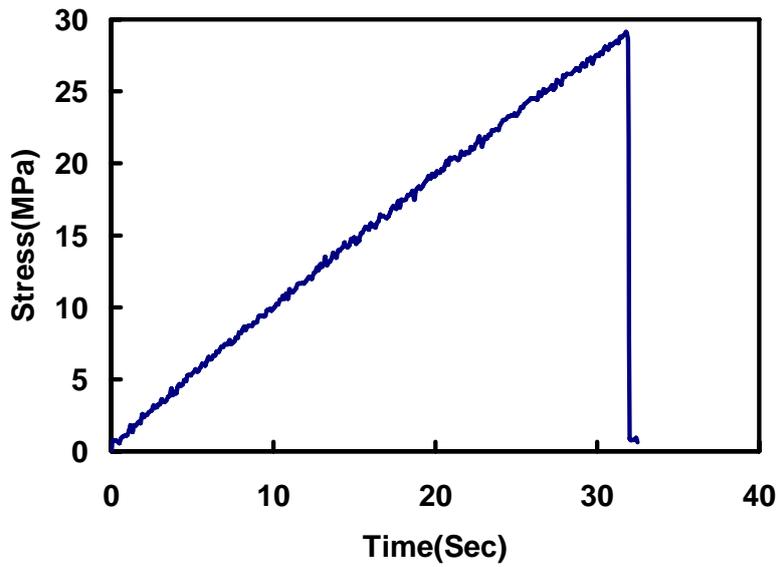


圖 3.17 添加比重為 7.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在橫向拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖

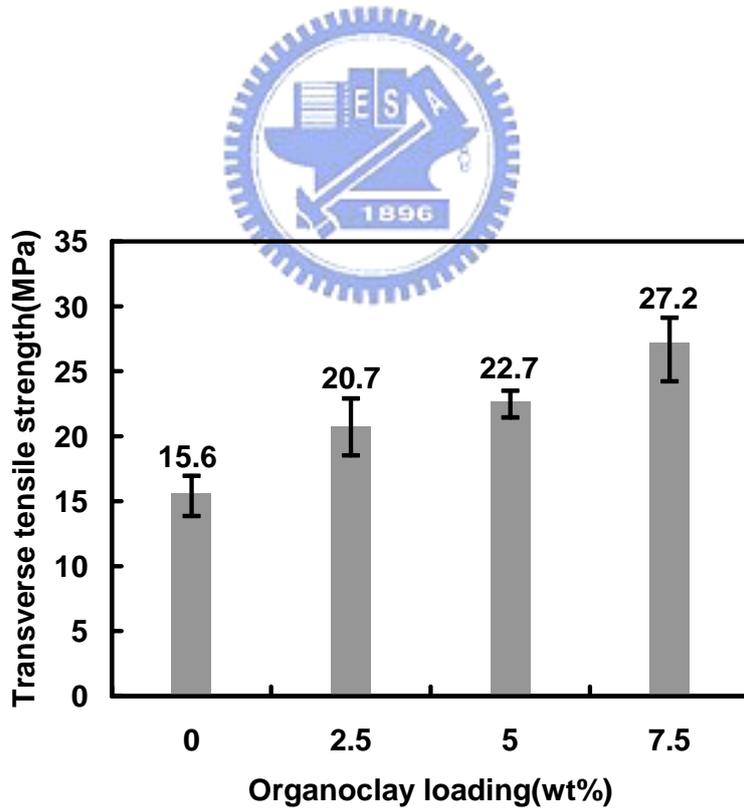


圖 3.18 根據不同有機黏土含量相對於橫向拉伸試驗之奈米複合材料側向拉伸強度柱狀圖

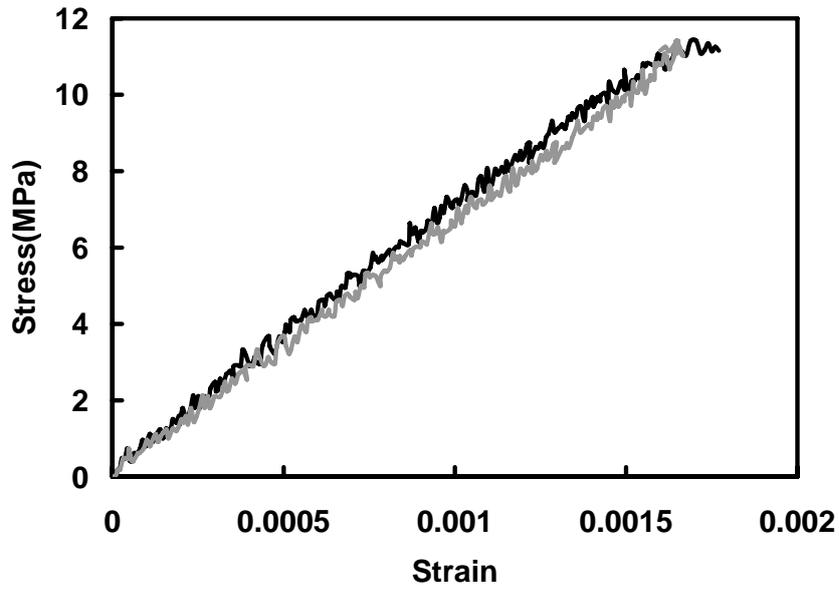


圖 3.19 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在橫向拉伸試驗中拉伸應力對真實應變曲線圖

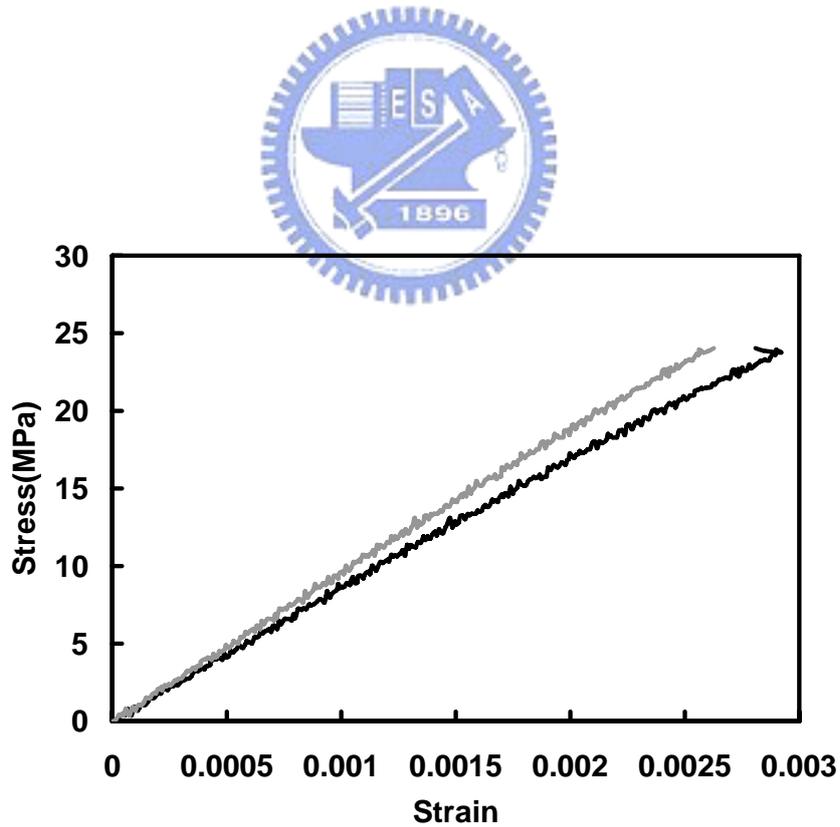


圖 3.20 添加比重為 2.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在橫向拉伸試驗中拉伸應力對真實應變曲線圖

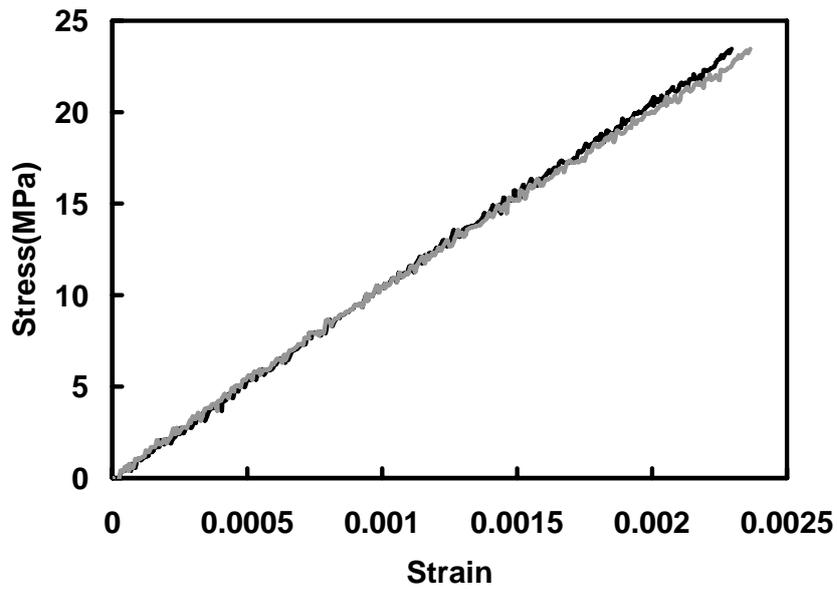


圖 3.21 添加比重為 5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在橫向拉伸試驗中拉伸應力對真實應變曲線圖

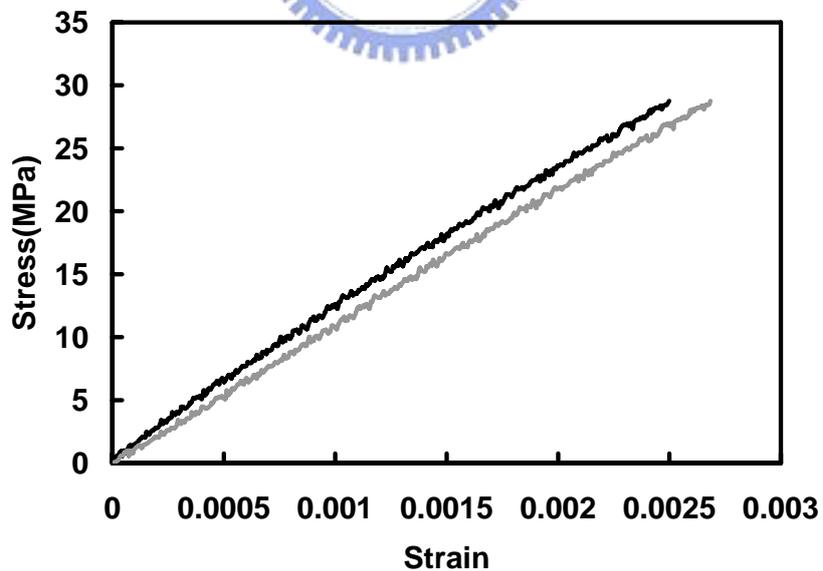


圖 3.22 添加比重為 7.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在橫向拉伸試驗中拉伸應力對真實應變曲線圖

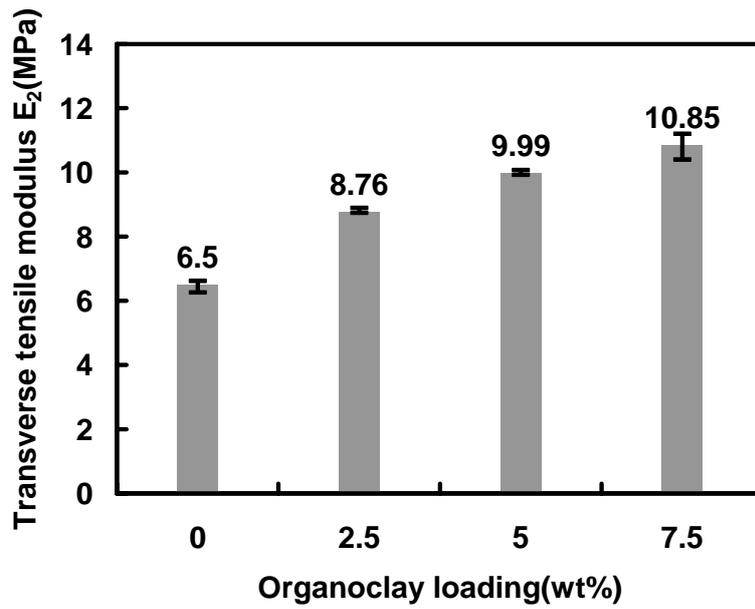


圖 3.23 根據不同有機黏土含量相對於橫向拉伸試驗之奈米複合材料側向拉伸材料模數  $E_2$  柱狀圖



圖 3.24 同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在橫向拉伸試驗後試片破壞情形(由左至右依序為有機黏土含量比重為 0%; 2.5%; 5%; 7.5%)

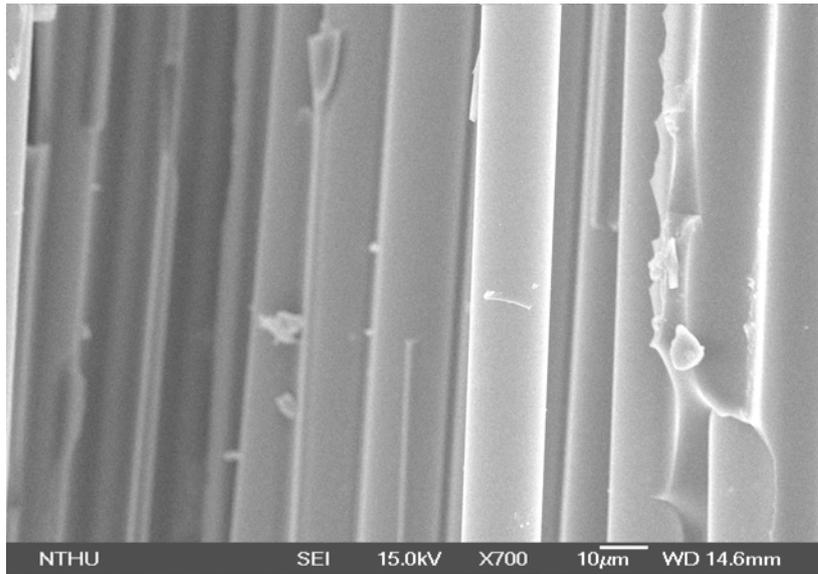


圖 3.25 同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在纖維側向方向經由掃瞄式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形

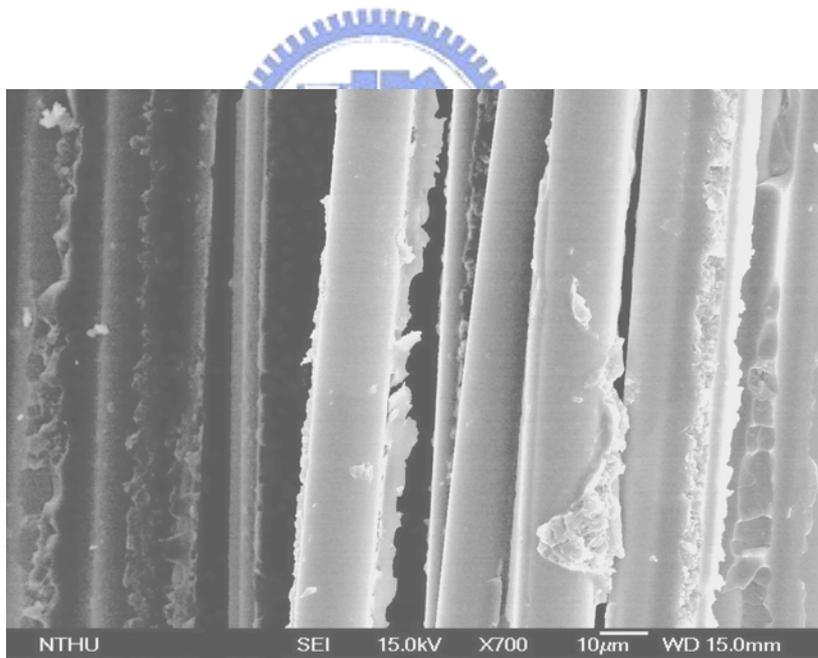


圖 3.26 添加比重為 2.5%有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維側向方向經由掃瞄式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形

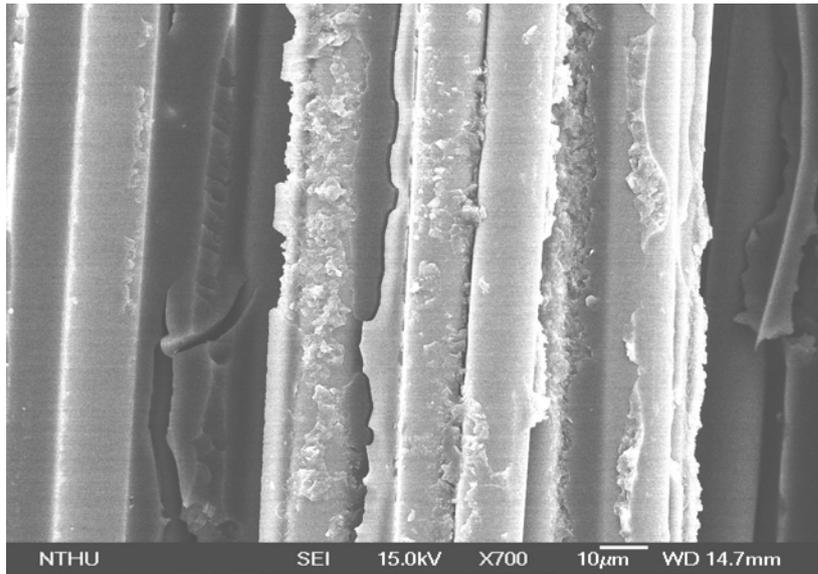


圖 3.27 添加比重為 5%有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維側向方向經由掃瞄式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形

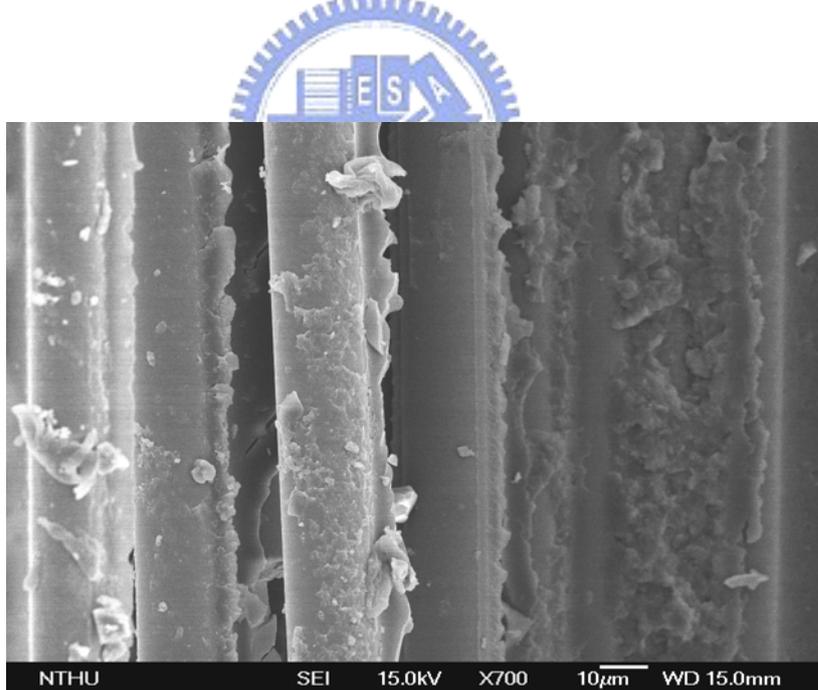


圖 3.28 添加比重為 7.5%有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維側向方向經由掃瞄式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形

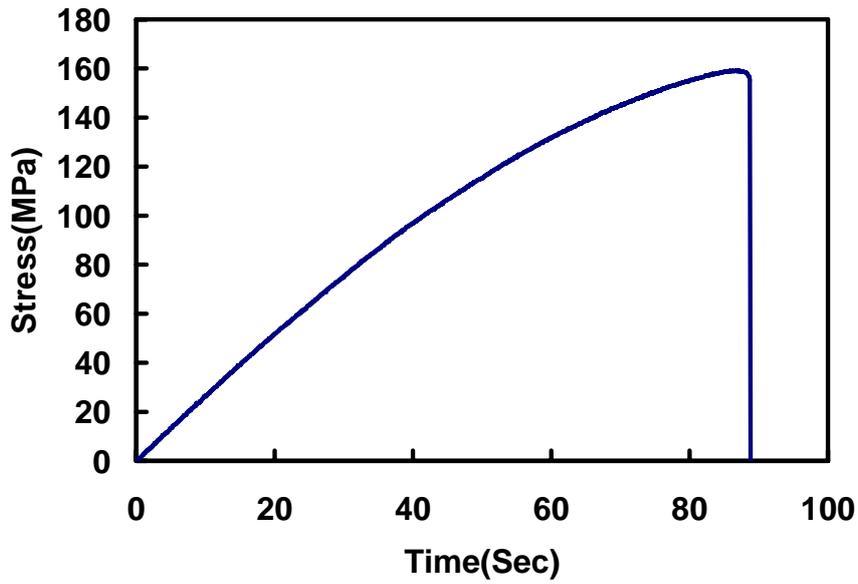


圖 3.29 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在 $[10]_5$  拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖

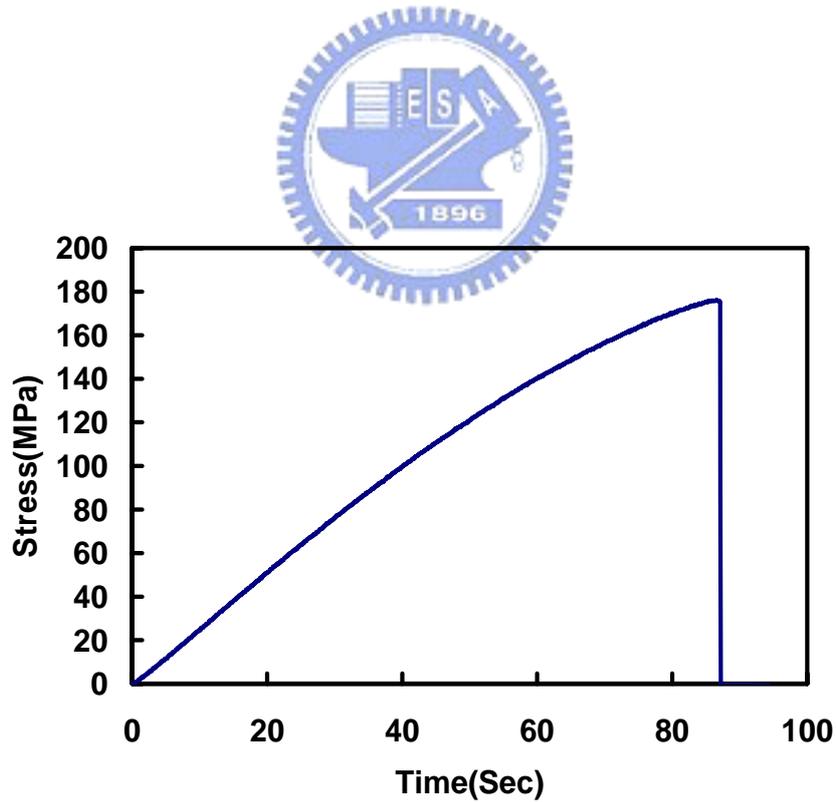


圖 3.30 添加比重為 2.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在 $[10]_5$  拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖

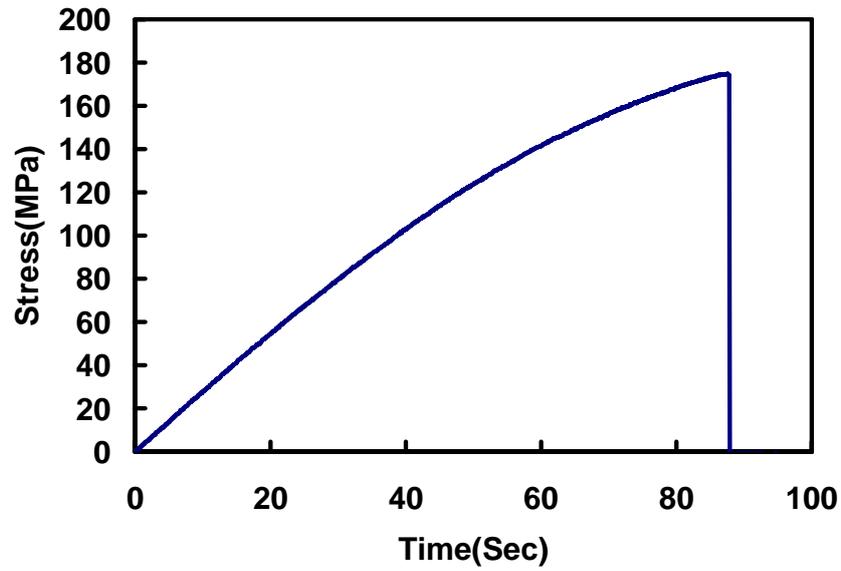


圖 3.31 添加比重為 5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在 $[10]_5$ 拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖

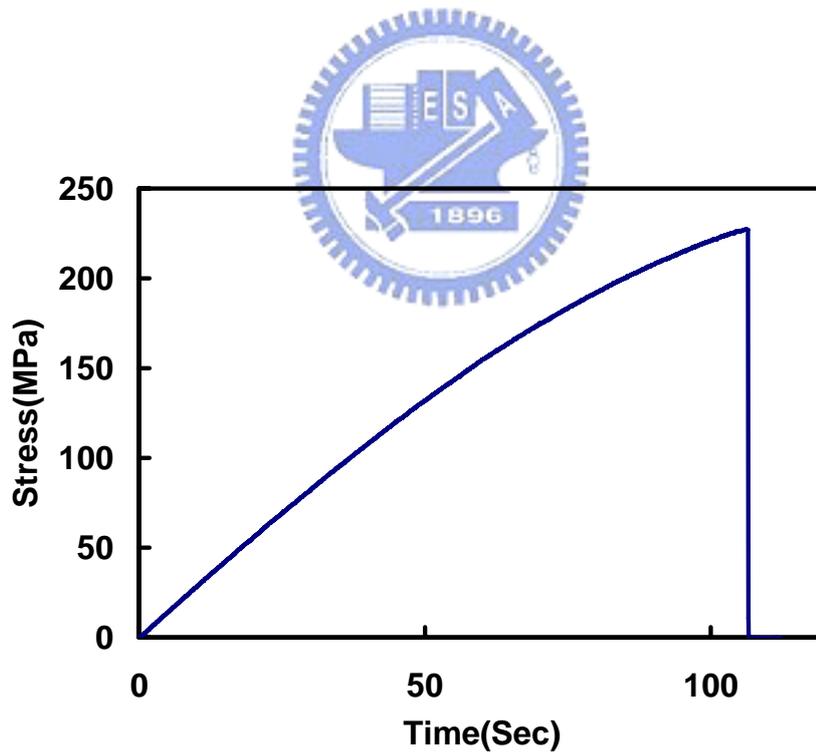


圖 3.32 添加比重為 7.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在 $[10]_5$ 拉伸試驗中拉伸應力對時間曲線圖

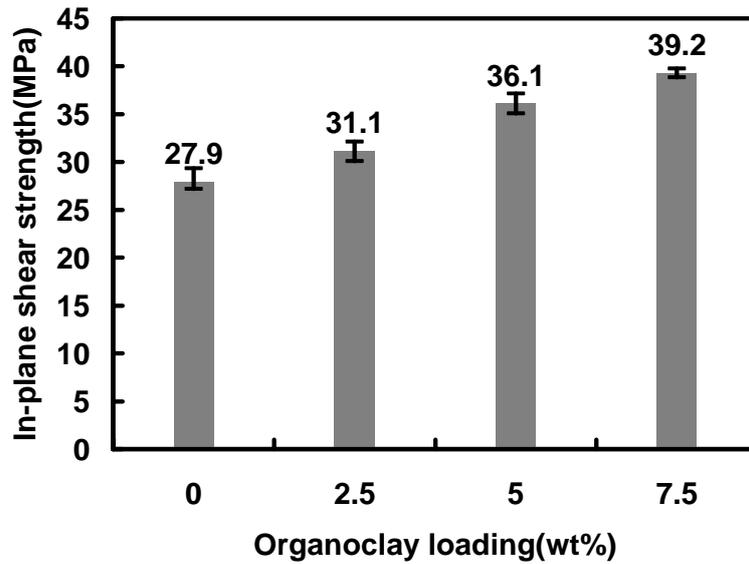


圖 3.33 根據不同有機黏土含量相對於拉伸試驗之奈米複合材料[10]<sub>5</sub> 拉伸強度柱狀圖



圖 3.34 同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在側向拉伸試驗後試片破壞情形(由左至右依序為有機黏土含量比重為 0%; 2.5%; 5%; 7.5%)

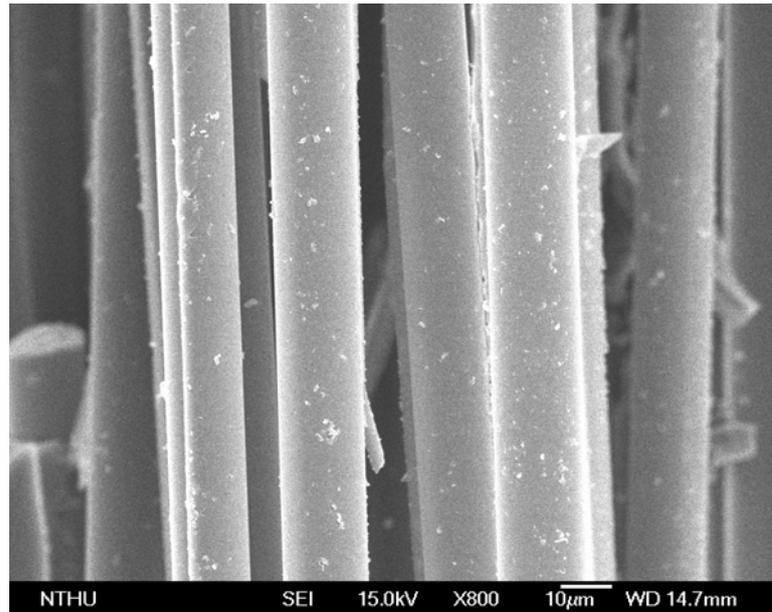


圖 3.35 同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂傳統複合材料在偏軸 10 度方向經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形

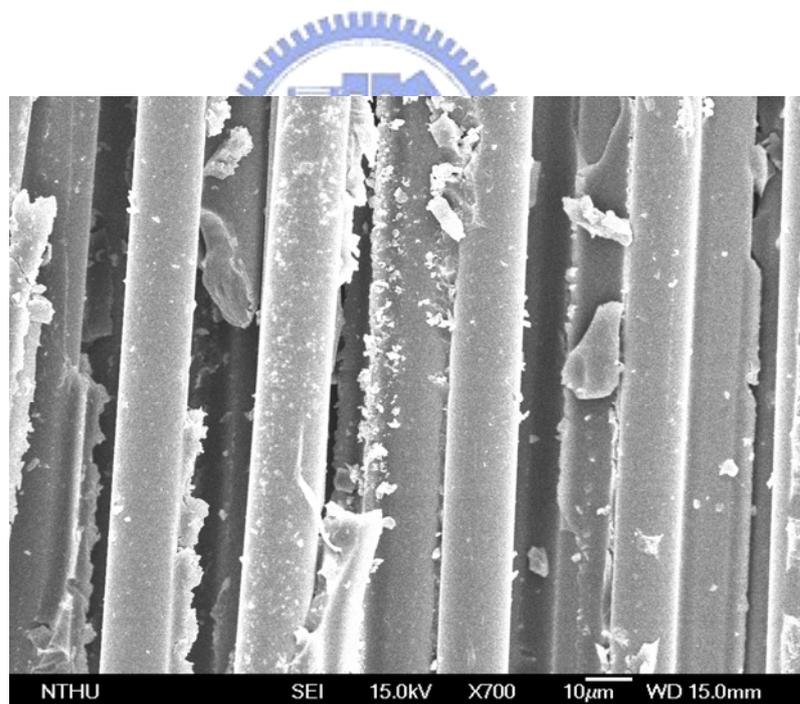


圖 3.36 添加比重為 2.5%有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在偏軸 10 度方向經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形

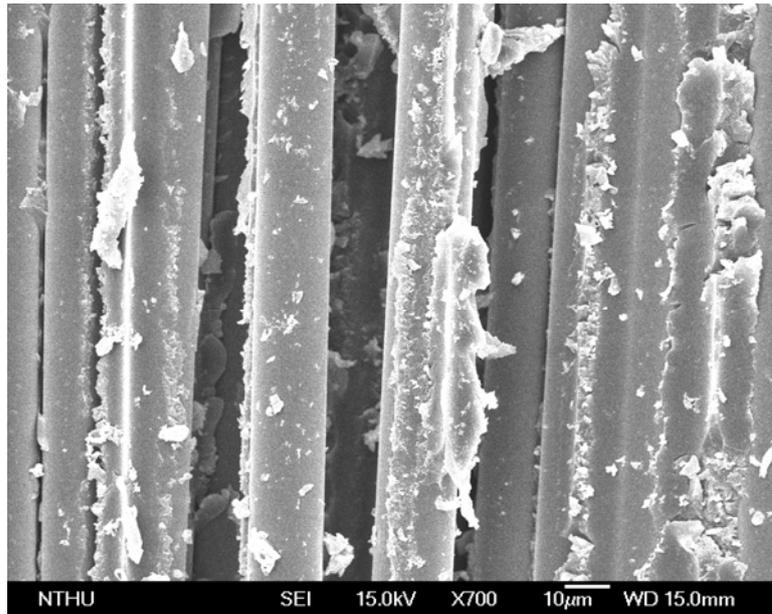


圖 3.37 添加比重為 5%有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在偏軸 10 度方向經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形

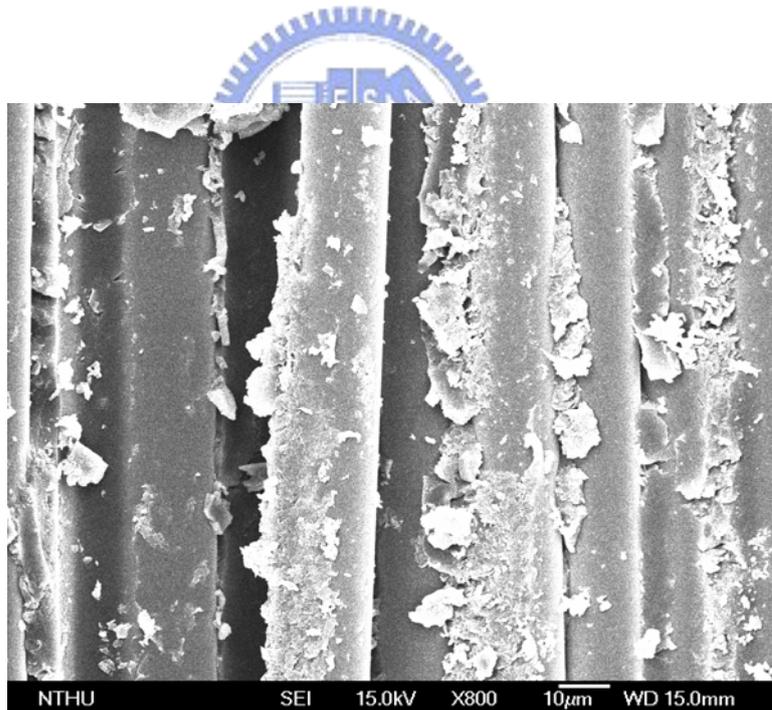


圖 3.38 添加比重為 7.5%有機黏土含量之同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在偏軸 10 度方向經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀測斷裂面破壞情形

## Three Point Bending Tests

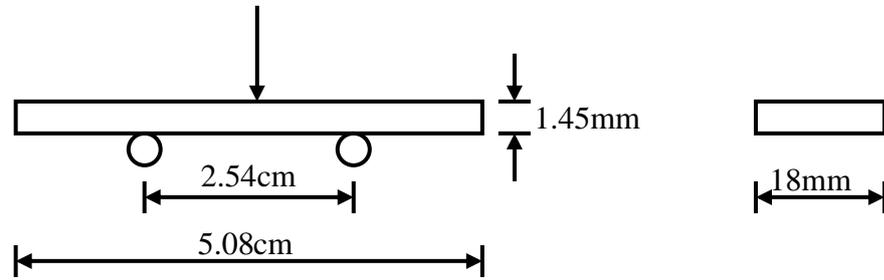


圖 3.39 三點式彎曲實驗試片規格

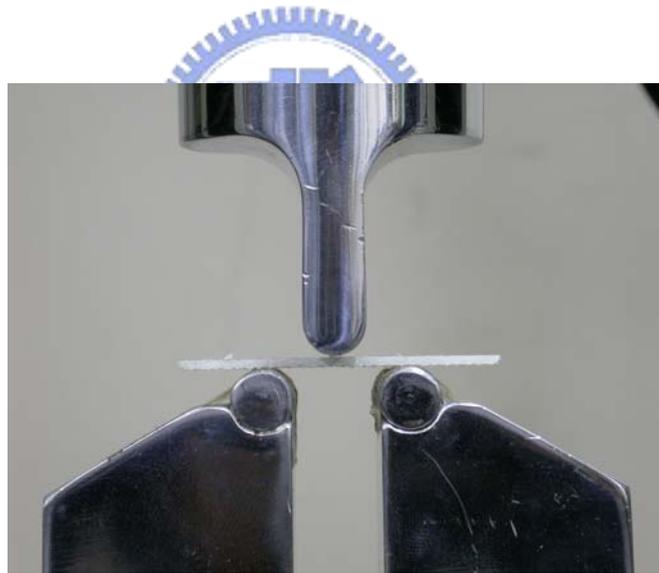


圖 3.40 三點式彎曲實驗架構

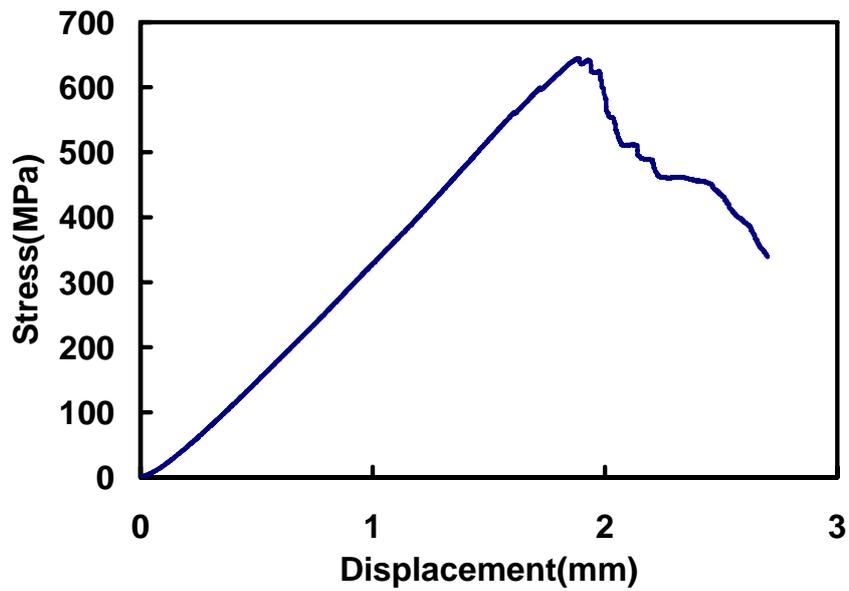


圖 3.41 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向彎曲試驗中彎曲應力對位移之曲線圖

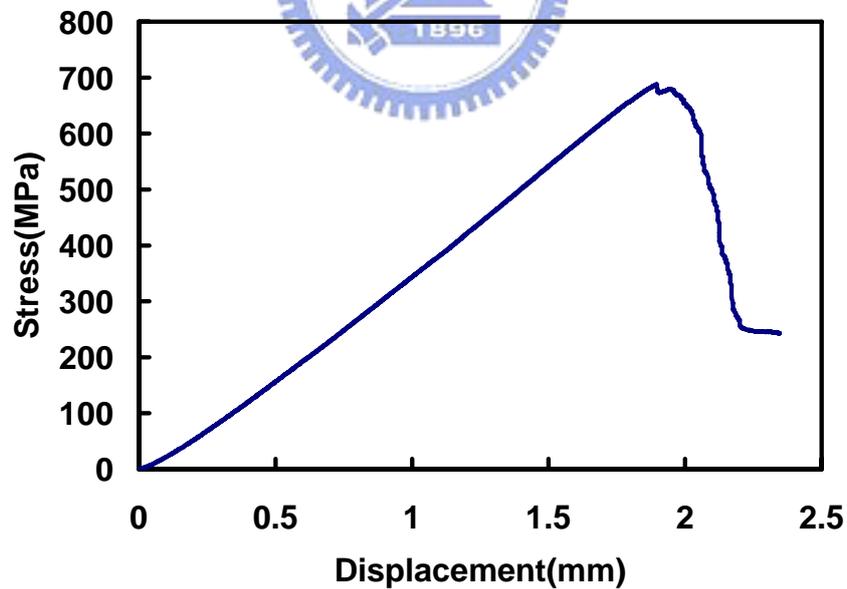


圖 3.42 添加比重為 2.5% 有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向彎曲試驗中拉伸應力對位移之曲線圖

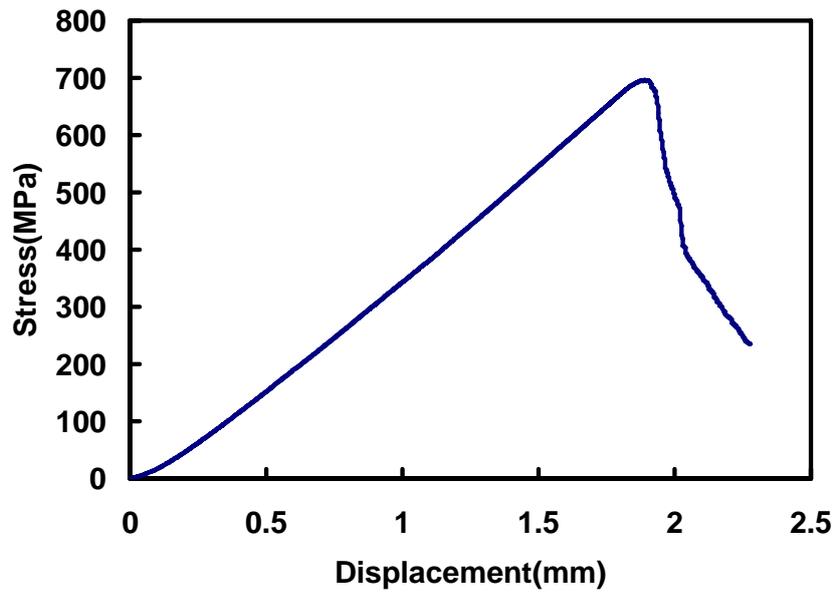


圖 3.43 添加比重為 5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂  
奈米複合材料在纖維方向彎曲試驗中彎曲應力對位移之曲線圖

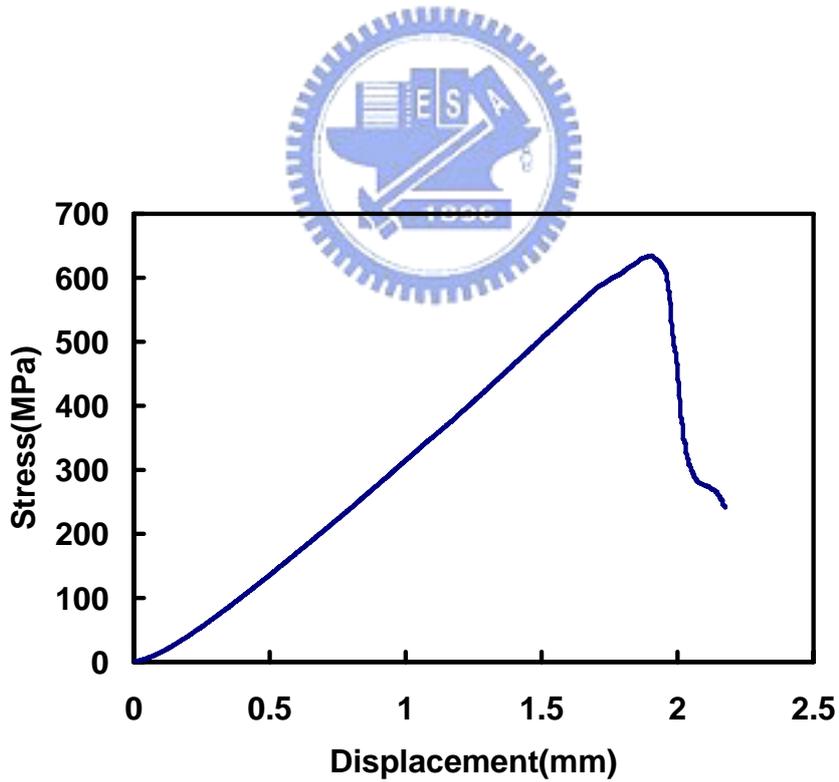


圖 3.44 添加比重為 7.5%有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂  
奈米複合材料在纖維方向彎曲試驗中彎曲應力對位移之曲線圖

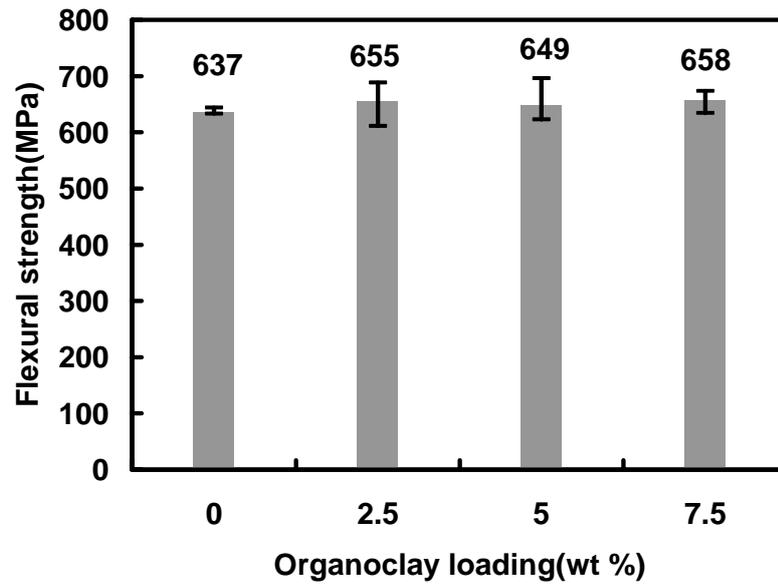


圖 3.45 根據不同有機黏土含量相對於 3 點彎曲試驗之奈米複合材料纖維方向彎曲強度柱狀圖

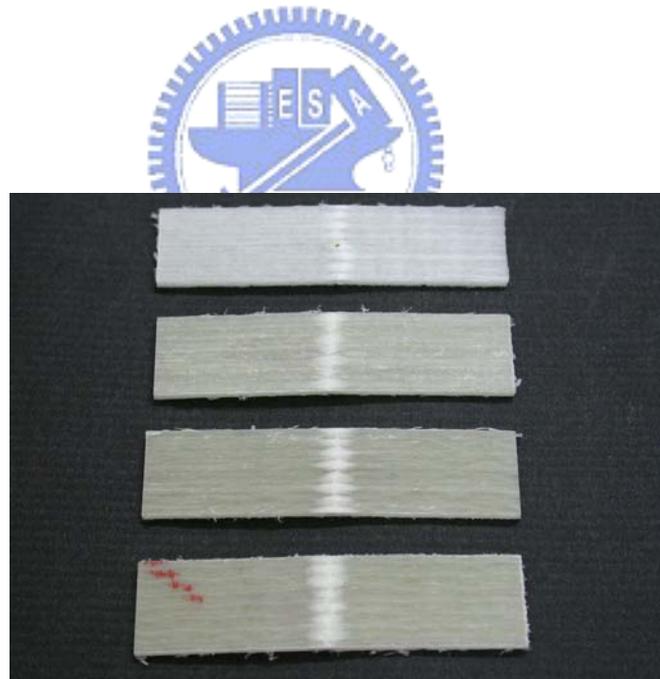


圖 3.46 同向性 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在纖維方向彎曲試驗後試片破壞情形(由上至下依序為有機黏土含量比重為 0%; 2.5%; 5%; 7.5%)

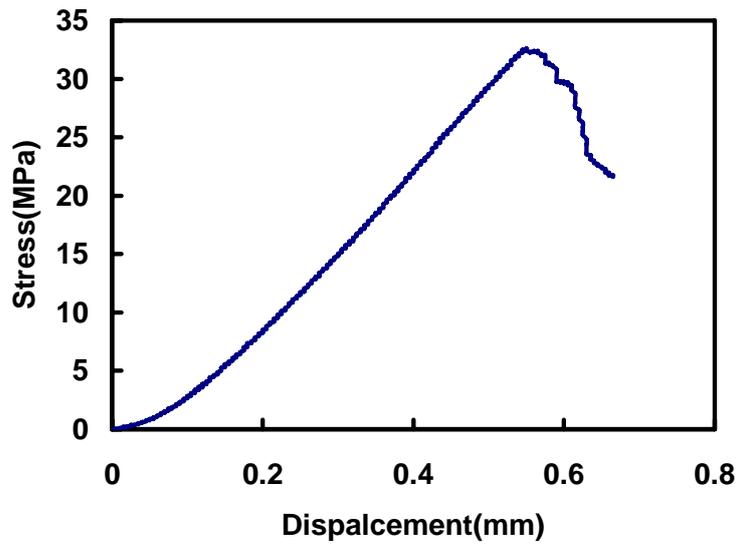


圖 3.47 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在側向纖維方向彎曲試驗中彎曲應力對位移之曲線圖

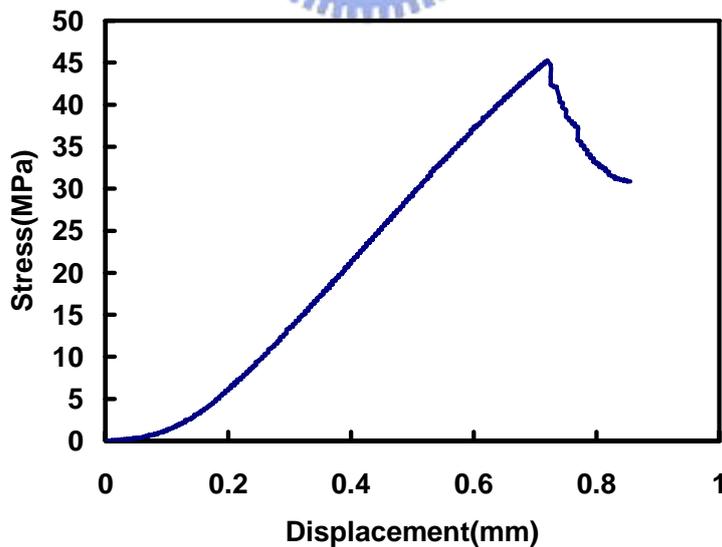


圖 3.48 添加比重為 2.5% 有機黏土含量之 E-LR 0908-14 玻璃纖維/環氧樹脂奈米複合材料在側向纖維方向彎曲試驗中彎曲應力對位移之曲線圖