

## 第四章

### 試驗結果與討論

#### 4-1 前言

本研究旨在求得各種溫度下纖維強化複合材料加強筋在混凝土內之握裹力及拉拔滑動變位之變化，並探討不同尺寸及不同埋置長度的纖維強化複合材料加強筋對混凝土之拉拔試驗破壞模式。

為了使混凝土試體能將外界溫度均勻傳遞至內部，而且使得試體中心之纖維強化複合材料加強筋在埋置長度內的溫度能夠一致，所以本研究選擇採用圓柱形的試體，而且因為考量到混凝土的保護層厚度與溫度傳遞對握裹力之影響、控制破壞模式為拉出破壞、足夠的埋置長度及現有電熱式高溫爐尺寸之限制，而設計採用的試體尺寸為直徑 20cm 高 30cm 及 35cm 之圓柱形試體。

#### 4-2 拉拔試驗之破壞模式

在拉拔試驗進行後，可由觀察混凝土圓柱試體表面的破壞情況得知包括保護層的厚度是否足夠、試驗時高溫對混凝土圓柱試體本身的傷害、纖維強化複合材料加強筋的耐熱能力以及纖維強化複合材料加強筋的尺寸及埋置長度對混凝土圓柱試體破壞模式的影響。

拉拔試驗之破壞模式可分為纖維強化複合材料加強筋之拉出破壞、混凝土圓柱試體之劈裂破壞及纖維強化複合材料加強筋本身的拉斷破壞，其中纖維強化複合材料加強筋之拉出破壞又可分為纖維棒表面噴砂與混凝土試體間的握裹失敗導致纖維棒被拉出及纖維棒光滑本體與表面噴砂間的界面黏膠發生破壞導致握裹失敗。以下針對在不同溫度下各種纖維強化複合材料加強筋的尺寸及埋置長度對混凝土試體破壞模式之影響來討論。

#### 4-2-1 常溫下拉拔試驗試體之破壞模式

[圖 4-1~4-5]分別為 10mm  $\phi$ 、13mm  $\phi$ 、16mm  $\phi$ 、20mm  $\phi$  及 25mm  $\phi$  等五種尺寸纖維棒在埋置長度為 12  $\phi$  的混凝土試體試驗後之情況，觀察圖中可發現混凝土試體表面在纖維棒被拉出後由於應力集中的因素使得試體表面呈現角錐狀的突起破裂，但試體其餘部分並無明顯裂縫，由觀察試驗後之纖維棒(見圖 4-26~4-27)發現其表面噴砂並無脫落現象，因此判斷破壞模式為纖維棒表面噴砂與混凝土間握裹失敗導致纖維棒拉出破壞，如表 4-1 所示。

#### 4-2-2 100°C 下拉拔試驗試體之破壞模式

在溫度加熱到 100°C 的試體中，因為混凝土試體經過加熱會使強度及楊氏係數降低，所以在混凝土破裂的情況上會較為和緩。

由[圖 4-6]可知，10mm  $\phi$  纖維棒這一組試體在各種埋置長度時還是皆為纖維棒的拉出破壞，觀察纖維棒被拉出後之表面情況(見圖 4-28~4-29)發現纖維棒的表面噴砂與常溫時比較雖有較多脫落部分差異，但纖維棒光滑部分並未露出因此仍然可判斷此時試體之破壞模式為纖維棒表面噴砂與混凝土間之握裹失敗使得纖維棒拉出破壞。

[圖 4-7~4-9]分別為 100°C 下纖維棒直徑 13mm 埋置深度為 4  $\phi$ 、8  $\phi$  及 12  $\phi$  的混凝土試體試驗後之情況，觀察圖中可知在纖維棒埋置長度為 8  $\phi$  及 12  $\phi$  時，試體的表面除了有角錐狀的突起破裂外其餘部分有明顯的裂縫，判斷此時除了纖維棒的拉出破壞外還有混凝土試體劈裂的現象產生。

[圖 4-10~4-12]分別為 100°C 下纖維棒直徑 16mm 埋置長度為 4  $\phi$ 、8  $\phi$  及 12  $\phi$  的混凝土試體試驗後之情況，觀察圖中可知纖維棒埋

置長度為  $8\phi$  及  $12\phi$  的試體因為握裹力過大及混凝土強度和楊氏係數降低使得混凝土試體發生劈裂破壞，而埋置長度為  $4\phi$  的試體則因為混凝土強度降低使得纖維棒與混凝土間的握裹力下降導致纖維棒的拉出破壞。

由[圖 4-13~4-14]所示， $20\text{mm}\phi$  及  $25\text{mm}\phi$  纖維棒這兩組試體皆為劈裂破壞模式，除了握裹力過大外，由於這兩組試體的纖維棒直徑較大，相對的混凝土柱試體的保護層可能不足夠所以會產生劈裂破壞。在  $100^{\circ}\text{C}$  下試體在破壞時期雖然因為圍束力的喪失而發生混凝土試體的劈裂破壞，但是因為混凝土受高溫後性質上的差異使其破裂的情況有較為和緩的現象。

#### 4-2-3 $200^{\circ}\text{C}$ 下拉拔試驗試體之破壞模式

由[圖 4-15~4-16]可看出在溫度達到  $200^{\circ}\text{C}$  時，纖維棒直徑為  $10\text{mm}$  埋置長度為  $8\phi$  以下的破壞模式為拉出破壞，而埋置長度達到  $12\phi$  時混凝土試體表面幾乎沒有破裂，[圖 4-17~4-20]分別為  $13\text{mm}\phi$ 、 $16\text{mm}\phi$ 、 $20\text{mm}\phi$  及  $25\text{mm}\phi$  等五種尺寸纖維棒在埋置長度為  $4\phi$  的混凝土試體試驗後之情況，在溫度達到  $200^{\circ}\text{C}$  時由於混凝土強度及楊氏係數降低使得纖維棒與混凝土間之握裹力比常溫時下降許多，且在纖維棒被拉出後混凝土試體表面無明顯破裂，而觀察被拉出的纖維棒試體表面(見圖 4-30~4-31)發現纖維棒表面噴砂大部分已經脫落露出纖維棒光滑部分，因此可判斷此時之破壞模式為纖維棒與混凝土間之握裹力下降及纖維棒光滑本體與表面噴砂間的界面黏膠失敗導致拉出破壞。

#### 4-2-4 300°C 下拉拔試驗試體之破壞模式

由表 4-1 所示，在 300°C 下的試體在拉拔時期破壞的模式皆為纖維棒的拉出破壞，因為試體已經被加熱到高達 300°C，混凝土試體本身也已經有被燒裂的情況出現，不過混凝土試體被燒裂的情況並不是試體失敗的主要原因。[圖 4-26~4-33] 為直徑 16mm 的纖維強化複合材料加強筋在各種溫度下進行拉拔試驗後的正、側視圖，[圖 4-26~4-29] 為溫度較低的狀態下的試驗結果，可看到纖維棒本身與其表面噴砂還很完整，故這個時候若試體的破壞模式為拉出破壞則皆屬於纖維棒的表面噴砂與混凝土試體間的握裹失敗所導致的破壞模式，而 [圖 4-30~4-33] 屬於溫度較高的部分，可看到在 200°C 時，纖維棒本體與其表面噴砂已經有部分脫落了，而加熱到 300°C 時更可看到纖維棒的表面噴砂已經大部分脫落露出纖維棒的光滑表面了，由此可判斷在加熱達到 300°C 時由於纖維棒本體與其表面噴砂間所使用的界面黏膠環氧樹脂 (EPOXY) 已經因為高溫而變質破壞使得表面噴砂脫落而造成握裹失敗，另外由 [圖 4-33] 所示，纖維棒本體已經產生裂縫證明纖維棒的強度已經有所衰減，而由 [圖 4-21~4-25] 可看到在加熱到 300°C 下的混凝土試體部分只有些許的燒裂裂縫，因此可判斷在 300°C 以上的高溫環境下，埋置纖維強化複合材料加強筋的混凝土圓柱試體的破壞模式是由纖維棒本體與表面噴砂間的界面黏膠變質失敗所造成的拉出破壞。

#### 4-3 拉拔試驗之握裹力

表 4-2~4-7 為五種尺寸的纖維強化複合材料加強筋在各種埋置長度中的握裹試驗結果。如 [圖 4-34~4-36] 所示，隨著纖維棒的埋置長度增加其個別對應的握裹力也隨著增加，由圖中可看到纖維棒尺

寸越大者握裹力對溫度的曲線斜率越大，表示纖維棒尺寸越大者受到溫度的影響越多，由此可知若要在有高溫疑慮的地方採用纖維強化複合材料加強筋應考慮到試體尺寸大小與溫度間之關係，以免因溫度升高使得握裹力一下子下降太多導致發生危險。

[圖 4-37~4-39]分別為纖維棒埋置長度為  $4\phi$ 、 $8\phi$  及  $12\phi$  的握裹應力與溫度之關係圖，在圖中可發現每一種尺寸的纖維棒其握裹應力皆隨溫度呈現一定比例的下降趨勢，其中常溫狀態到加熱  $100^{\circ}\text{C}$  時這一段握裹應力相對於溫度之線段的斜率大於其他段加熱溫度間的直線斜率，表示纖維強化複合材料加強筋埋置於混凝土試體中在加熱達到  $100^{\circ}\text{C}$  下其握裹應力降低的速度最快。在常溫下各尺寸間的握裹應力有一定比例的差距，隨著加熱溫度的上升各纖維棒尺寸間的握裹應力會降低且彼此間的差距也逐漸減小，在加熱達  $100^{\circ}\text{C}$  時各尺寸間的握裹應力皆與常溫時的趨勢大致相同，但因為混凝土試體經過加熱後強度及楊氏係數皆會降低，進而造成混凝土的握裹能力也發生減弱的現象，所以在加熱溫度  $100^{\circ}\text{C}$  下各纖維棒尺寸間的握裹應力與常溫相比之下較低。由圖中可觀察出埋置長度越小，在常溫到  $100^{\circ}\text{C}$  的曲線斜率越大，表示埋置長度越小握裹應力受溫度影響越大。

如[圖 4-30]及[圖 4-31]，當加熱溫度超過  $200^{\circ}\text{C}$  時纖維強化複合材料加強筋的表面噴砂已經有部分脫落了，這是因為高溫使得纖維棒本體與表面噴砂間的界面黏膠環氧樹脂已經開始變質，導致在進行拉拔試驗時界面黏膠無法負荷拉拔力而使纖維棒本體與表面噴砂分離，纖維棒本體被拉出混凝土試體而分離的噴砂則黏附在混凝土試體的接觸面上，在此種情況下握裹能力和纖維棒噴砂界面與混凝土試體間之握裹性質關連性並不大，所以在加熱溫度達到  $200^{\circ}\text{C}$  時各纖維棒尺寸間的握裹應力已下降的相當多而且彼此間的握裹應力差距逐漸

縮小。

當溫度加熱到達 300°C 時因為纖維棒本體與其表面噴砂間的界面黏膠環氧樹脂變質失敗，纖維棒本體與表面噴砂分離，導致佔握裹力大部分比例的纖維棒表面噴砂及混凝土間的摩擦力消失，使得各纖維棒尺寸間的握裹應力已降至非常低了，彼此間的差距也比 200°C 時更小了。

參考文獻【39】利用統計回歸分析的方法，計算出握裹力的計算公式：

$$\frac{u}{\sqrt{f'_c}} = 5.207 - 0.052 \frac{c}{d_b} - 4.388 \frac{d_b}{L} - 0.012t$$

其中：

$u$  = 握裹應力 (kg/cm<sup>2</sup>)

$f'_c$  = 混凝土強度 (kg/cm<sup>2</sup>)

$c$  = FRP bar 中心到混凝土外圍之距離 (mm)，本實驗中  $c=100\text{mm}$

$d_b$  = FRP bar 直徑 (mm)

$L$  = 埋置長度 (mm)

$t$  = 試體中心 FRP bar 之溫度 (°C)

[圖 4-40~4-44] 為各尺寸纖維棒的握裹應力與埋置長度之關係圖，由圖中可發現同一尺寸的纖維棒埋置長度越長的握裹應力也越高，由於埋置長度  $8\phi$  為  $4\phi$  的兩倍所以在  $4\phi$  到  $8\phi$  這一段直線斜率較大，而  $8\phi$  到  $12\phi$  這一段斜率就比較小。

#### 4-4 拉拔試驗之滑動變位

[圖 4-45~4-48] 為在常溫、100°C、200°C 及 300°C 下纖維棒埋置長度為  $12\phi$  時拉拔試驗試體之載重位移圖，由於  $4\phi$  及  $8\phi$  拉拔試驗

試體的載重位移圖與  $12\phi$  有大致相同的趨勢，故列出  $12\phi$  的拉拔試驗結果予以討論。

由[圖 4-45~4-48]可知在各種溫度下纖維棒的埋置長度越長者在拉拔期間纖維棒與混凝土試體間的變位會越大，而隨著溫度的上升各尺寸纖維棒的拉拔滑動變位會逐漸下降。經由統計回歸分析可得到載重與位移之關係如表 4-8~4-11 所示。

在常溫時，纖維棒的埋置長度越長者拉拔滑動變位會越大，而且由於此時混凝土試體未經加熱性質上比較脆硬，一旦發生握裹失敗纖維棒與混凝土間即會立刻產生相當大的變位。在  $100^{\circ}\text{C}$  時，由圖中可看到載重位移曲線的斜率比常溫情況時較小，這表示由常溫加熱到  $100^{\circ}\text{C}$  後纖維棒與混凝土試體間的變位改變趨於和緩，而在加熱到達  $200^{\circ}\text{C}$  以上纖維棒與混凝土試體間的握裹應力降低使得在發生握裹失敗時纖維棒的滑動變位比較不會有突然性的改變。

