

第一章 緒論

1-1 研究動機

傳統鋼筋混凝土結構物，使用鋼筋來抵抗拉力以解決混凝土韌性不足、抗拉強度低等缺點。但是埋置在混凝土中的鋼筋假如生鏽，不只會使得鋼筋強度降低，產生的鐵鏽也會破壞混凝土保護層並導致結構物毀損。一般情況下，鋼筋在混凝土中並不容易生鏽，這是因為混凝土中的鹼性環境會令鋼筋表面產生一層氧化鈍態膜，所以混凝土在安定的鹼性狀態下本身就具有防止鋼筋腐蝕的作用，但是一旦氯離子滲入混凝土保護層，原本的鹼性環境會偏向酸性，並產生一連串連鎖反應(圖一)，破壞原本狀態安定的鈍態膜，使得鐵離子不斷析出並產生鐵銹。因此在許多環境潮濕並充滿氯離子的地區，鋼筋便容易產生鏽蝕。尤其沿海地區興建的結構物特別容易遭受空氣中鹽份的侵襲，像港灣設施以及污水處理廠這類所處環境充滿造成鋼筋鏽蝕因子的建築物，防蝕措施便成為設計上的一大挑戰，如果沒有妥善考慮鋼筋腐蝕問題，輕者減少結構物的使用壽命，重者結構物塌陷，造成生命財產的損失。

為解決鋼筋鏽蝕問題，目前多採用下列幾項防蝕措施：(一)鋼筋施加防蝕披覆、(二)陰極處理、(三)改善混凝土品質、(四)添加劑，其中在鋼筋外施加防蝕披覆是唯一能將腐蝕鋼筋的因素直接排除的方法，環氧樹脂塗佈鋼筋(Epoxy Coated Reinforcement，簡稱 ECR)便屬於防蝕披覆鋼筋的一種。從 70、80 年代開始，環氧樹脂塗佈鋼筋一直被認為是相當有效的防蝕方式。但是使用環氧樹脂做為鋼筋表面披覆材質，會降低鋼筋與混凝土間的握裹能力，除此之外，ECR 會有

環氧樹脂塗層剝落導致鋼筋失去防蝕能力的問題【39】，塗層的厚薄關乎塗層的抗剝落能力以及 ECR 握裹能力，ECR 塗層越厚越不易剝落但是握裹能力較差，相反的，ECR 塗層越薄雖然越容易剝落，但是提供的握裹能力較理想【11】，尤其是在承受高溫時，ECR 的環氧樹脂塗層會因高溫下的相變化(phase-transition)而弱化或因高熱發生熱分解(thermal decomposition)[圖 2-14]，並伴隨著混凝土本身抗壓強度、抗張強度的降低，在種種因素參雜下，火場高溫中 ECR 握裹能力衰減的機制將顯得十分複雜。

鋼筋抗拉強度之發揮有賴於鋼筋與混凝土間之握裹力，因此為評估 ECR 於火害高溫下的握裹能力表現，ECR 火場下握裹能力衰減情形乃成為本研究所要探討的主要課題。



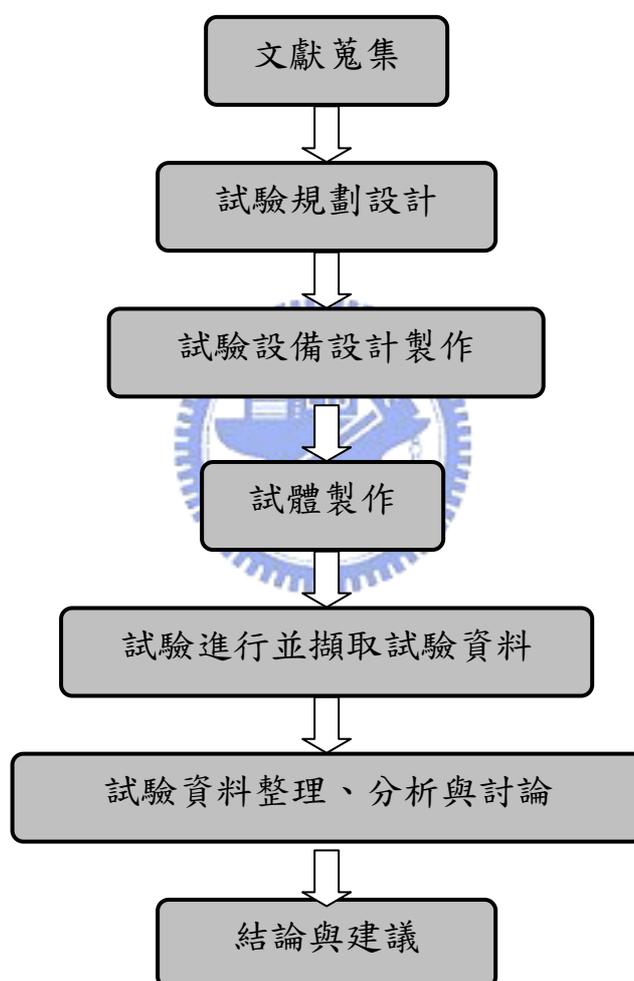
1-2 研究目的

影響握裹力的因素很多，包括鋼筋尺寸、埋置長度、表面粗糙度、混凝土強度、束制條件(混凝土保護層、間距、箍筋效應)等。雖然 ECR 能有效提升建築結構物防銹能力，但是由於 ECR 本身握裹能力比一般鋼筋差，加上 Epoxy 有高溫下強度弱化並發生熱劣解的物理性質【1】。因此本研究將探討不同塗佈厚度、不同尺寸、不同埋置長度之 ECR 於固定強度之混凝土中受高溫下的握裹力衰減情形及破壞模式之關係。

1-3 研究方法與流程

本研究使用強度 4000psi 混凝土圓柱試體，並採用兩種尺寸的鋼筋與 ECR，分別以三種長度埋置鋼筋以及兩種不同厚度的 ECR 於圓

柱試體中心。將灌製完畢的混凝土圓柱試體養護 28 天後放入烘箱內烘乾一週取出，依據圖三的升溫曲線加熱試體，當試體中心溫度達到所要求的四種目標溫度後，連同另外一組未加熱的試體以每分鐘 2 頓的拉拔速率進行拉拔試驗，比較各組試體在加熱後握裹能力衰減情形，以及其破壞模式。研究流程如下圖所示。



1-4 本論文之架構

本篇論文共分為五個章節，首先第一章先敘述研究動機、研究目的、研究方法及流程，第二章為文獻回顧，第三章為試驗計畫與試驗方法，第四章為試驗結果分析及討論，最後第五章為結論及建議。



第二章 文獻回顧

2-1 Epoxy Coated Reinforcement 相關文獻

2-1-1 Epoxy 簡介【1,2】

環氧樹脂(Epoxy)是一種分子結構中，含有兩個或兩個以上環氧基的高分子化合物。環氧樹脂應用價值的發現確立於 1930 年。在瑞士 De Trey Freres 公司的皮里卡斯坦(Pierre Castan)和美國 Devoe & Reynolds 公司的格林里(Greenlee)的研究中，使用有機多元胺使合成樹脂固化，並發現其高粘接強度，環氧樹脂才漸漸顯露出其價值。1946 年，美國開始工業化生產環氧樹脂。環氧樹脂之所以能引起人們的重視是由於：(1)擁有優良的物理性質、粘接能力以及具有電絕緣、耐化學藥品等特性，(2)原料容易取得，製造技術及設備簡單。由於環氧樹脂在反應性、耐藥品性、柔軟性、黏性、強韌性等方面表現皆佳，除了大量應用在積層板製造(包括電路板印刷)，黏著劑及模壓製品(如電子零件封裝)外，亦普遍應用於建築營造方面，如(1)塗料：工廠的保護油漆、地面防水塗料，以及金屬管線的防鏽塗料。(2)結構用黏著劑：FRP bar 表面噴砂的介面黏劑，FRP 貼片補強時用的黏著劑。(3)土木結構之補強和修復：房屋裂縫修補。

2-1-2 ECR 簡介【1,3】

環氧樹脂塗裹鋼筋(Epoxy Coated Reinforcement)，英文簡稱 ECR，是 FHWA(Federal Highway Administration 美國聯邦公路總署)於 1974 年提出的鋼筋防蝕系統，目的是利用環氧樹脂來隔絕鋼筋與氯離子以防止鋼筋產生鏽蝕。在使用率方面，目前為止全世界已有將近 100,000 座建築結構物採用 ECR 防蝕系統，裡面包括 20,000 座的

高架快速道路，ECR 總累積用量為四百五十萬噸。建築工事上，ECR 多採用 FBE(Fusion Bonded Epoxy)加工處理，此種塗層稱作 FBE 粉體塗層，方法是在高溫旋轉的帶電鋼筋上面噴灑 FBE 粉末，靜電會使粉末自行均勻附著在鋼筋上，此法多為工廠預先施作(plant-applied FBE)。本實驗所用的 ECR 則是採用兩劑式塗料(two-part liquid kit)處理，適用於現地施工，方法是將兩劑原料以一定比例混合後，以人工方式塗刷於鋼筋上，兩劑式塗料一般用來重新塗刷 ECR 切割後的斷面，以及局部小面積需求的鋼筋防銹處理。

2-1-3 Epoxy 等高分子材料的玻璃晶相轉換與熱劣解現象【1】

高分子材料在受熱時會發生熱轉換現象(Thermal Transition)，環氧樹脂材料從高溫到低溫依序會有四種熱轉換狀態(α 、 β 、 γ 、 δ -transition)，而玻璃相轉換(glass transition)亦即轉換溫度最高的 α -transition。玻璃轉換溫度(T_g)就是達到玻璃相位轉換所需的溫度，當高分子材料的溫度低於 T_g 時，會由高溫柔韌的橡膠態，轉變成低溫像玻璃一般堅硬易脆的性質，關於各種形式的熱轉換現象於文獻【1】中有較詳細的介紹。

熱劣解為較劇烈的熱分解(Thermal decomposition)，當高分子材料達到熱劣解溫度時，會發生大幅度的重量損失(Weight Loss)，並產生大量氣體，欲分析高分子聚合物的熱劣解溫度，可以利用熱重分析儀(Thermo-Gravity Analyzer)，擷取高分子聚合物在高溫下的 Weight Loss 情形，來觀察熱劣解的溫度點。[圖 2-16]為各類材料在各種溫度下的熱重損失概略圖，熱重損失遽變處即發生熱劣解，關於熱劣解的現象於文獻【1】中有較詳細的介紹。

2-2 握裹力基本原理

由於載重通常不會直接作用在鋼筋上，所以載重只能透過其周圍混凝土來傳遞力量給鋼筋，以達到承擔應力的效果，其中握裹力即是此一傳遞力量。根據ACI Committee 408【6】定義，握裹應力(bond stress)為一沿著鋼筋與混凝土界面所傳遞的應力。混凝土與鋼筋間之結合力乃是沿著鋼筋縱向在變化，即鋼筋單位表面積所受之剪應力。因此鋼筋與混凝土間界面的性質對於握裹應力有著極密切的關係。一般認為構成握裹力之要素分為下列三部分：

(1) 鋼筋與混凝土間之卡榫力 (Interlock)

為鋼筋竹節與與混凝土間互鎖的作用力，當鋼筋與混凝土更進一步滑動時，此支承應力更形重要。

(2) 鋼筋與混凝土間之化學粘結力 (Chemical Adhesion)

由於混凝土中之水泥水化作用，產生具有強度之水泥膠體化學反應物，由兩者介面之粘結作用產生部分之握裹應力，當構件承受低應力時，握裹抵抗由化學粘結力所提供。當鋼筋滑動時，此種有限的握裹抵抗會隨即消失。

(3) 鋼筋與混凝土間之摩擦力 (Friction)

鋼筋本身表面粗糙或凹凸不平，在平行相對運動時所發生之抵抗力稱為摩擦力。當化學粘結力喪失，且鋼筋與混凝土間有輕微滑動發生時，握裹強度則轉由摩擦力及混凝土作用於鋼筋凸緣所造成之卡榫力所共同提供。

鋼筋握裹應力的發展，主要由平行與垂直於竹節等方向的分力所構成，鋼筋握裹應力元素的分布情形如[圖2-13]所示，

文獻【4】中在研究握裹力之分解時，假設光面鋼筋試體僅承受

摩擦力與化學黏結力，試驗時利用位移計監測光面鋼筋與混凝土試體之相對滑移情形，一旦滑移開始即視為化學黏結力已消失而摩擦力單獨作用，如此可分解化學黏結力與摩擦力兩部分；另外，假設竹節鋼筋同時擁有化學黏結力、摩擦力與承壓力，則將相同條件竹節鋼筋試體之握裹荷重扣除光面鋼筋試體之握裹荷重，即可計算承壓力之大小。根據試驗結果，在常溫(25°C)時化學黏結力、摩擦力與承壓力這三種元素分別佔全體握裹力之15%、21%及64%。這些握裹抵抗的效果，係因鋼筋中的應力而改變。當構材承受低應力時，握裹抵抗主要由化學黏結力所提供，由於此種力量所產生的握裹抵抗受到限制，大約在14.1~21.1kg/cm² (200~300psi)之間，且當鋼筋滑動時，此種有限的握裹力抵抗隨即消失，所以化學黏附力並不是提供握裹強度的主要來源。當化學黏結力喪失，而且鋼筋與混凝土之間有輕微滑動發生時，握裹強度則由摩擦力與混凝土作用於鋼筋突緣所造成的承壓力共同提供。若鋼筋與混凝土更進一步滑動，則此承壓應力更為重要【7】。

2-2-1 握裹破壞模式及影響因素

根據Soroushian 等人對於單根鋼筋拉拔試驗(pullout test)中為能表現出鋼筋局部握裹行為，在試體規劃鋼筋埋置長度之決定，需考慮鋼筋之埋置長度與握裹應力平均分佈及受力之衰減現象，建議埋置長度為4倍鋼筋直徑以內。此埋置長度雖短但可使鋼筋被拉出時產生一均佈的握裹應力，且經由試驗結果發現，此埋置長度並不會使受力衰減。在Ezeldin 和Balaguru的實驗中，竹節鋼筋握裹力破壞模式有：

1. 拉出式破壞(pullout failure)
2. 劈裂破裂式破壞(splitting and explosive failure)

3. 劈裂式破壞(splitting failure)

4. 鋼筋拉斷破壞(tension failure)

上述四種型式主要模式為拉出式破壞和劈裂式破壞，當平行鋼筋徑向力造成鋼筋周圍混凝土完全破裂而終止握裹應力(軸向力)傳遞時，謂之劈裂式破壞。而軸向力造成鋼筋脫離混凝土者，謂之拉出式破壞。若鋼筋周圍混凝土較薄，小於3倍鋼筋直徑，則易遭劈裂而產生平行鋼筋主軸方向之裂縫，為劈裂式破壞；但若鋼筋周圍混凝土較厚，則因劈裂不易之故，其破壞模式即轉變為拉出式破壞。Ezeldin and Balaguru 求平均握裹應力 u_c 時係利用實驗之極限荷重 (P_{max}) 做計算。平均握裹應力是假設握裹應力沿鋼筋埋置長度方向作均勻分佈。事實上握裹應力並非均勻分佈，但假設握裹應力是均勻分佈時，則平均握裹應力如下式所示：

$$u_c = \frac{P_{max}}{\pi dl}$$



其中 d ：鋼筋標稱直徑

P_{max} ：極限荷重

l ：鋼筋埋置長度

在 Soroushian 等人研究中發現，混凝土在不同的圍束力下，其裂縫的傳遞與擴張也有不同的形式。在混凝土中竹節鋼筋的握裹抗力 (bond resistance) 主要由鋼筋竹節與混凝土間的卡樺作用來提供。而竹節抵抗混凝土會在較低的握裹應力下產生傾斜裂縫，傾斜裂縫產生後，鋼筋應力藉由內壓力轉換到混凝土上，而此力的徑向分量類似於混凝土內部的內壓力，會產生勁向張力造成劈裂式破壞。鋼筋在混凝土之充分圍束力作用下，可抑制這些裂縫而產生拉出破壞。

另外對於微觀之下，鋼筋握裹應力分布的情形，【8】中 Abrishami

and Mitchell則是根據[圖2-2]所表示的傳遞機制提出下列公式：

$$U(\pi d_b dx) = A_s (f_s + df_s) - A_s f_s$$

亦即

$$U = \frac{A_s df_s}{(\pi d_b dx)}$$

此公式用以表示在dx長度內，鋼筋的應力U， [圖2-2]為微觀之下鋼筋握裹力傳遞的情形，由上式可知，鋼筋握裹應力與鋼筋承受軸拉應力的改變率(df_s/dx)成正比。

ACI committee 408 規範建議壓力強度與握裹力之關係如 2-1 式 (單位 psi)，ACI 318 則提出埋置長度之設計規範(2-2)。

$$U_n = 35\sqrt{f'_c}$$

2-1

$$\lambda_s = \frac{0.04 A_b f_y}{\sqrt{f'_c}}$$

2-2



λ_s ：鋼筋埋置長度

A_b ：鋼筋斷面積

f_y ：鋼筋降伏應力

f'_c ：混凝土抗壓強度

Orangun與Breen【40】於 1977 年根據Tefer的水壓理論，分析鋼筋周圍混凝土應力分布，並提出由鋼筋間距及鋼筋保護層，判斷握裹破壞型形式的假設。針對Grade 60 鋼筋，他們利用鋼筋埋置長度 λ_s 、保護層厚度C、鋼筋(箍筋)間距S、鋼筋直徑 d_b 、箍筋效應與混凝土壓力強度等參數，然後將梁撓曲試驗結果曲線，以非線性回歸方式，計算出

握裹力的計算公式如下：

$$U = \left(1.2 + \frac{3C}{d_b} + \frac{50d_b}{\lambda_s} + \frac{A_{tr}}{500Sd_b} \right) \sqrt{f'_c}$$

λ_s ：鋼筋埋置長度

d_b ：鋼筋標稱直徑

$C = \min(C_c, C_s) + d_b$ ， $C/d_b \leq 2.5$

A_{tr} ：斷面箍筋面積

S ：箍筋間距

經過換算之後，可得基本發展長度：

$$\lambda_{lb} = \frac{10211d_b}{\phi \sqrt{f'_c} \left(1 + 2.5 \left(\frac{C}{d_b} \right) + K_{tr} \right)}$$



λ_{lb} ：基本發展長度

ψ ：修正係數

2-2-2 環氧樹脂防蝕披覆對握裹應力的影響

鋼筋表層塗覆環氧樹脂具有防蝕效果，但對混凝土握裹力有負面影響。Idun and Darwin【9】和 Hamad【10】等人研究發現混凝土與環氧樹脂間的黏結力很小。混凝土握裹力因鋼筋表層塗覆環氧樹脂而顯著降低，減低程度與鋼筋幾何形狀、鋼筋直徑和塗層厚度等因素有關。Choi【11】等人發現塗層的厚度愈厚時，握裹強度愈小。且初始之荷重—撓度曲線斜率愈低，此證明塗層厚度會影響鋼筋與混凝土結

合強度，且直徑愈小時愈明顯，但當鋼筋直徑愈大竹節高度愈高時，塗層厚度的影響就較小。在 FHWA-RD-74-18【12】中指出將環氧樹脂塗佈鋼筋置入尺寸為 250×250×350mm 的混凝土角柱中(如圖 2-3)進行試驗，環氧樹脂塗佈鋼筋相對於普通鋼筋的滑動比率，在未承載端之滑動不應大於 1.3；在承載端之滑動不應大於 1.6，而其握裹強度不小於 80%。Obada 等人【13】參照 ASTM 標準試驗法【14】設定鋼筋置入試體深度為 15cm 及 12cm 進行拉拔試驗，結果發現環氧樹脂塗佈鋼筋的握裹強度顯著降低了 25%至 40%；拉拔破壞大約發生在滑移量 0.40mm 左右。

其他文獻，如【30】中認為 ECR 由於本身鋼筋幾何形狀[圖 2-1]，會導致握裹能力降低。就一般鋼筋幾何形狀來看，鋼筋竹節連續的凹凸形狀，混凝土填補凹穴部份就形成連續性的卡榫，猶如機械的螺紋一般。當鋼筋施加防蝕披覆處理，鋼筋節距會變小，這表示混凝土節距間的卡榫斷面減小，其握裹強度便相對減弱。鋼筋防蝕處理後節高變低、節距變小、竹節傾角變小、竹節由稜角型改變為和緩的圓弧形等因素，使拉拔握裹強度減小。對於相同塗厚的 ECR，就握裹強度來說，ECR 塗厚增加對大直徑的鋼筋影響較小，對小直徑的鋼筋影響較大【5】。

2-2-3 混凝土性質對握裹力影響

混凝土性質將因使用材料、配比設計、添加卜作嵐材料(飛灰、爐石、矽灰)、樹脂及化學添加劑等而變化，對握裹應力發展或介面性質亦具有相當的影響。研究顯示握裹力與混凝土壓力強度間有一關係存在，一般認為握裹力(U)與混凝土壓力強度的平方根成一線性關

係，而 Gradneer 等人【15】改變養護時間與養護溫度，發現握裹力與混凝土壓力強度的 0.8 次方成一線性關係，並發現早期混凝土的壓力強度、張力強度及握裹強度隨養護時間的升高而增加。

Brettman 等人【16】認為高性能混凝土為了滿足流動性與工作性，添加強塑劑，會降低握裹強度約 14%，若拌合均勻澆置施工搗實將只降低 6%；添加矽灰、飛灰、爐石等可提高混凝土強度及工作性並達到經濟性，Mor and Avi 的研究【17】顯示添加矽灰會降低混凝土的孔隙率(porosity)及界面區域(transition zone)的厚度，因此將改善混凝土與鋼筋間界面性質並增加其黏結性的握裹行為。Benze 等人【18】研究發現添加矽灰會改善介面結構係因矽灰分子會與 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶體量，而使界面愈趨緊密，且矽灰會填充骨材表面的孔隙，造成緊密且較均勻的微觀結構(micro structure)。Gjovrv 等人【19】亦發現矽灰會降低界面區的孔隙，並由 X-ray 的分析得知介面區域後度降低的原因有三：(1)降低了自由水(free water)的累積(2)於鋼筋與將體界面區域處，CH 晶體選擇方向性(preferential Orientation)會降低(3)由於 CH 晶體與矽灰之卜作嵐反應而造成介面區域的緊密。由以上得知，矽灰會提升界面性質並增加握裹強度，又隨添加量增加，極限握裹力處的滑動量也會相對的降低並多發生脆性破壞。

混凝土壓力強度提高，其裂縫擴展速率隨之增加，多呈脆性破壞，所以提高混凝土壓力強度時，也要提高張力強度。一般研究顯示使用鋼纖維對混凝土抗壓強度增加有限，但對能量吸收及抗裂的能力有很大的幫助。以添加鋼纖維於混凝土的試驗證實鋼纖維確有增加混凝土張力強度的功效，若選擇適當鋼纖維形式及用量時，會有效抑制裂縫成長，並提升張力強度。

2-3 混凝土之一般性質及熱學性質

2-3-1 水泥之組成成分及其性質

混凝土中負責膠結的部份為波特蘭水泥，而波特蘭水泥係以石灰石和粘土作為基本的混合物，將其生料經過處理均勻混合後，在高溫窯中燒結成熟料，再添加適量石膏後加以研磨，進而形成水泥。而水泥主要成分為CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃四種化學成分，另含有少量之MgO、Na₂O、K₂O、SO₃及游離石灰等。以上所描述的化學成分在高溫窯中隨溫度的升高而生成矽酸三鈣(C₃S)、矽酸二鈣(C₂S)、鋁酸三鈣(C₃A)、鐵鋁酸四鈣(C₄AF)等四種熟料礦物，之中以C₂S、C₃S活性最大，為影響強度最主要的因素。

2-3-2 水泥漿體與水泥砂漿受熱後之變化

水泥漿體在受熱時，其性質主要受到水份改變及礦物分解與融合之影響，通常水泥漿體受熱溫度在105°C以內會使毛細孔水膠孔水蒸發，而250°C~700°C則為水泥水化物結晶水之分解溫度，隨著溫度增加，水泥漿體水化產物之變化如下所示：

常溫~105°C	毛細孔水及膠孔水蒸發
105°C~440°C	矽酸鈣水化物結晶水分解(C-S-H→C-S+H)
440°C~580°C	氫酸化鈣結晶水分解(C-H→C+H)
605°C~1000°C	碳酸鈣結晶水分解

水泥漿體在受熱溫度超過650°C以上時，分解後之水泥水化物會逐漸重新燒結成水泥熟料，再生化學變化而重具鍵結力。水泥漿體受熱後除有上述化學成分變化外，在物理性質上亦有所變化，通常物體在受熱後皆會發生體積膨脹之現象，但是水泥漿體在受熱溫度超過

150°C後，由於水份之散失，反而有體積收縮之現象，其水泥漿體長度與溫度之關係，如[圖2-4]所示。

水化性波特蘭水泥砂漿之熱膨脹係數依不同飽和程度而變，一般約在 $11 \times 10^{-6} \sim 16 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 之間。當溫度升高時，水泥漿體的毛細孔水張力減低而引起膨脹壓力，當試體乾燥時，則不會膨脹，即不含水或飽和時，在此二種極端情況下，其膨脹係數都比部份飽和水泥漿體小。

由[圖2-5]可觀察出新拌之水泥漿體，當試體內之相對濕度達到70%有最大的熱膨脹係數。而[圖2-6]之老舊水泥漿體，當試體內之相對濕度達到50%有最大的熱膨脹係數。又熱膨脹係數本身會隨著齡期而下降，這是由於硬固水泥漿體的結晶材料增加而減少了部份膨脹壓力（Swelling Pressure），膠體漸漸減少，因為若沒有膠體就沒有這種熱膨脹係數變化之現象。

水泥的化學成份及細度在水泥砂漿早期時亦會影響其膨脹係數，隨齡期增長其膠體漸漸減少，則無影響。綜合以上各點可知水泥漿體之熱膨脹係數主要受到含水飽和度、細骨材含量、空氣相對濕度、齡期、水泥顆粒細度及化學成份等因素的影響。

2-3-3 骨材之熱學性質

在粗骨材之中主要的成分，不外乎 O、Si、Al、Fe、Ca、Mg、K、Na 等元素。不過又因為骨材中各種元素含量的不同而區分為矽質骨材（酸性骨材）及石灰質骨材（鹼性骨材）。而且因為骨材種類之不同，相對的其耐火性質亦會有所不同。各種骨材之主要性質如下：

1. 矽質骨材（Siliceous Aggregate）：

通常矽質（酸性骨材）之主要成分為石英(Quartz)。而石英在受

熱溫度為575°C左右時，其晶相會由 α 相轉到 β 相，此時將會產生約2.4%的體積膨脹，不過當溫度達到573°C~900°C時，石英的體積將不再膨脹，而當溫度超過900°C時，石英便會產生不規則之體積變化。

2. 石灰質骨材(Carbonate Aggregate)：

主要成分為 CaCO_3 ，石灰石中主要成分矽酸鈣在溫度達750°C左右時開始分解，因為礦物分解需要吸收大量的熱量，故有抵抗溫度上升之趨勢。石灰質骨材在常溫下之熱膨脹係數約為 $5.5 \times 10^{-6} \sim -1$ ，至1000°C時約為常溫的2.5倍以上。若骨材有較高含量之黑雲母，則在650°C以上會有較高之熱膨脹率。

2-3-4 骨材熱學性質對混凝土性質之影響

由文獻【20】可知在高溫下，骨材種類對混凝土抗壓強度有相當之影響。[圖2-7]顯示石英在溫度變化下之線性膨脹量圖，很明顯在573°C之地方有突然之急劇膨脹量發生，此乃 α -石英 \rightarrow β -石英所產生之現象，造成混凝土龜裂致使混凝土強度驟然降低。

骨材在高溫下依據岩種有不同之膨脹係數，大部份皆隨溫度上昇而增加其膨脹率，對混凝土之影響如下所述：

1. 安山岩質骨材、玄武岩質骨材、徐冷高爐爐渣及碎石等耐熱性優異，故使用此類骨材之耐火性良好。
2. 石灰質骨材在高溫之熱膨脹率很大，且會分解，但使用該材質之混凝土，不會產生爆裂現象。
3. 花崗岩及黏板岩質骨材，呈現良好之結晶結構，其本身之耐火性差，使用此類骨材時會導致耐火性降低。
4. 使用石英質骨材之混凝土，其加熱溫度與火災損害之結果示於[圖

2-8]。可利用此圖決定受火災損害時之石英質骨材混凝土之修補深度。

2-3-5 混凝土之熱學性質

1. 熱傳導

$$K = -q / (dT/dx)$$

式中：q=熱流通量

dT/dx =溫度梯度

影響熱傳導率的主要因素為含水量、骨材、齡期、水泥漿體、孔隙大小與分佈的影響。在常溫時，溫度的變化對熱傳導率的影響不大，但當含水量增加時，熱傳導率將迅速的增大。

2. 熱膨脹

水泥砂漿與骨材組成混凝土，而兩者受熱後的熱膨脹性質並不一致。骨材本身是由多種材料所組成，其熱膨脹係數依其礦物成分而定，一般而言，骨材的體積均隨溫度升高而增加，但關係並非線性。當溫度下降時，骨材尺寸可回復，但水泥砂漿則否。水泥砂漿的熱膨脹性質和骨材大不相同，由於水泥砂漿受熱後，在溫度低於110°C時，試體尺寸將增長，當大於110°C時，由於水分已開始消散將開始收縮，而當溫度出過150°C之後，則因試體產生化學變化，而持續收縮。在相對濕度50%到70%之間時，熱膨脹係數將達到最大。因此兩者之間的熱膨脹係數差異，將導致混凝土的裂縫形成。

3. 熱擴散率

熱擴散率是溫度改變時物體內發生的熱變化率，為一簡單指數，用於表示混凝土所能忍受的溫度改變程度；通常由混凝土溫度變化速

率來量測，再根據熱傳導率和比熱值推求之，其關係如下：

$$\alpha = K / \rho \cdot c$$

其中： α = 熱擴散率 (mm^2/min)

κ = 熱傳導係數 ($\text{Watt}/\text{m}^\circ\text{C}$)

ρ = 混凝土密度 (kg/m^3)

c = 比熱 ($\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$)

混凝土的含水量對其熱擴散率有甚大的影響，但在高溫時，由於水分已散失殆盡，使熱擴散率的變化不大。一般而言，溫度與混凝土熱擴散率約略呈反比趨勢。

4. 比熱

混凝土的比熱與水灰比、溫度、孔隙分佈及含水量等相關，骨材的影響則不如其他因素。當含水量、溫度增加時，比熱也隨之上升。混凝土比熱在500焦耳/kg左右有一明顯的最高值，一般值約介於840至1170焦耳/kg之間。

2-4 混凝土受高溫作用下之性質變化

2-4-1 高溫作用下混凝土之物理化學變化

受高溫作用時，混凝土的組成物中除了骨材成份分解及晶相改變外，水泥水化作用下產生之水化物亦將分解失去結晶水。

【21,22,23】當溫度達 105°C 時，混凝土中的毛細孔水、吸附水開始脫離。而此時僅屬物理變化。當溫度達 200°C 時 C-S-H 膠體開始脫去鍵結水，發生化學變化。當溫度在 250°C 至 300°C 之間時，含 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 之水化物（如 $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ）中的鍵結水大部份皆散失。而 C-S-H 膠體之鍵結水約散失20%左右。當溫度在 400°C 至 700°C 之間

時，C-S-H 膠體剩餘80%之鍵結水將在此階段完全分解，但在500°C左右，漿體中之水份大部份皆已分解喪失。當溫度在500°C至800°C之間時，Ca(OH)₂ 開始分解，矽質骨材約在573°C時，SiO₂ 之結晶走向會由α相轉變成β相，因熱振動能量的增加，使體積產生約0.4%的膨脹量。石灰質骨材之溫度達750°C的高溫時，碳酸鈣(CaCO₃)開始分解，釋放出二氧化碳(CO₂)。當溫度在800°C至1000°C之間時，水泥之水化物部份被燒結生成 C₂S、C₃A、C₄AF 等水泥之主要成份。當溫度達1425°C時，其餘之水泥水化物有進一步熔結生成 C₃S。

2-4-2 高溫作用下混凝土之抗壓強度

混凝土被利用於結構物主要是用來抵抗壓應力，所以在高溫下混凝土殘餘抗壓強度仍為災後建物鑑定最重要的性質。【24,25】

溫度升高使界面產生裂縫，於200°C以上 C-S-H 膠體開始分解。一般而言，隨加熱溫度上升，殘餘強度比會直線下降，超過700°C即大部份之混凝土之殘餘強度已降至低於30%以下，其後也無法恢復其強度。但加熱溫度500°C以下時火害混凝土冷卻後在空氣中其強度會繼續下降，約一個月時達最低值，其後隨著時間經過其強度漸漸恢復，冷卻後一年即恢復90%，如[圖2-9]所示，楊氏係數亦在冷卻後由於補充水份可與強度同樣之恢復。

2-4-3 混凝土之爆裂與剝落

混凝土爆裂與剝落之現象經常可以在火害現場之結構上發現，其發生通常在加熱之前半小時。一般混凝土受高溫作用而產生之破裂模式有以下三種：【26,27】

1.骨材劈裂

由於混凝土之一面迅速受熱，使混凝土接近受熱之部份產生雙軸向壓力，這種溫度應力作用在骨材上，致使較大骨材造成張力破壞，並沿著平行於受熱面劈裂。

2.角隅剝離

由於外部溫度升高使邊界角隅處混凝土產生張力分量，而使混凝土角隅處剝離。

3.孔隙壓力蒸氣過大造成破壞

由於混凝土孔隙中之水份在受熱後產生蒸氣，使孔隙中之壓力逐漸加大，當壓力超過混凝土抗拉強度時，便造成混凝土之剝落甚至爆裂。混凝土濕度越大，在加溫時造成之孔隙壓力越大，故越易破壞。反之若水分含量越少時，剝落的危險就相對減少，且爆裂成大片的危險幾乎不會發生，加熱速率越快，則混凝土表面部分與中心部分之溫度差越大，伴隨產生的熱應力越大，使得剝落或爆裂的危險也越大。混凝土若厚度減少，則兩邊飽和層較接近，水分不易消散，爆裂較易產生。加熱方式若為單面加熱時，水分可以從不加熱之另一面排除，降低了爆裂的危險。反之雙面加熱時，水分較不易消散，則爆裂危險較大。是否有鋼筋存在也是一項重要的因素，鋼筋存在時，將產生圍束作用，較不易產生裂縫。但鋼筋的存在也會造成介面上的改變，因此保護層容易剝落。

2-4-4 升溫速率及延時對混凝土之影響

文獻【28】曾對高溫作用下在不同升降溫度條件下混凝土抗壓強度之變化，進行探討，歸納出下列結果：

最高溫延時之前一小時為混凝土抗壓強度折損之主要時段，而強度損失幾乎都發生在前二小時內。最高溫延時，對混凝土抗壓強度之折減，在低溫有顯著影響，但隨溫度的增加，其影響程度隨之降低，在高溫則效應不大。其原因可能是混凝土在低溫時借孔隙水、膠體及晶體骨架傳遞熱能，延時較長可使熱能傳至混凝土中心產生較多之界面裂縫。而在高溫時，熱能傳遞以輻射為主，傳遞速率較快，界面破裂在很短的時間內已發生。因此延時對混凝土抗壓強度之折減，在高溫時效應減低。升降溫度的快慢，會引起骨材與水泥間膨脹不諧和，而使界所產生之裂縫多寡不同。而當溫度在 600°C 以上，混凝土骨材界面因破裂已相當嚴重，此時升降溫速度之影響相對減小。

在延時方面，文獻【28】Mohamedbhai 所作試驗是以爐溫達目標溫度控制，而文獻【29】則以試體中心達目標溫度控制做最高溫延時試驗，其結果與上述1、2 點相符，更進一步發現 $400^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ 為強度主要之折減區域， 300°C 以下折損程度並不明顯。在升降溫速率方面，文獻【30】中分別以 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 及 $1.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 兩種速率加熱，結果發現 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 下混凝土的殘餘強度反而比 $1.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 下的低，原因可能是 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 與 $1.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 皆屬相當緩慢之加熱速率，此時的孔隙壓力與熱應力的影響並不明顯，反而是在較慢的加熱速率下，試體於高溫下曝露的時間較長產生有害變化及轉換，反使強度變低。但本試驗所採用的升溫速率乃依ASTM E-119之升溫曲線，其升溫速率高達 $107.6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，此時孔隙壓力與熱應力的影響就相當明顯，甚至會有爆裂的情形發生。

2-4-5 火害後混凝土之應力應變關係

有關火害對混凝土應力應變行為之影響，Schneider U.及Haksever

A.曾於1976年經由試驗推求火害中之應力應變關係【31】，如[圖2-10]所示；Lie T.T.等，則提出混凝土之殘餘極限強度與火害溫度之關係【32】，如[圖2-11]；陳舜田教授與謝滄海教授曾於1989年綜合此二關係，模擬火害後混凝土之應力應變關係【33】，如[圖2-12]所示，以數學式表示如下：

$$f_c = \begin{cases} fr \cdot \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{\max} - \epsilon_c}{\epsilon_{\max}} \right)^2 \right] & \epsilon_c < \epsilon_{\max} \\ fr \cdot \left[1 - \left(\frac{\epsilon_c - \epsilon_{\max}}{3\epsilon_{\max}} \right)^2 \right] & \epsilon_{\max} < \epsilon_c \end{cases}$$

其中：

$$fr = \begin{cases} (1 - 0.001T) \cdot fc' & 0^\circ C \leq T \leq 500^\circ C \\ (1.375 - 0.00175T) \cdot fc' & 500^\circ C \leq T \leq 700^\circ C \\ 0 & 700^\circ C < T \end{cases}$$

$$\epsilon_{\max} = 0.0025 + (6T + 0.04T^2) \times 10^{-6}$$

f_c ：混凝土之應力(kgf/cm²)

fr ：火害後混凝土殘餘之極限抗壓強度(kgf/cm²)

fc' ：常溫混凝土之極限抗壓強度(kgf/cm²)

ϵ_c ：混凝土之應變(mm/mm)

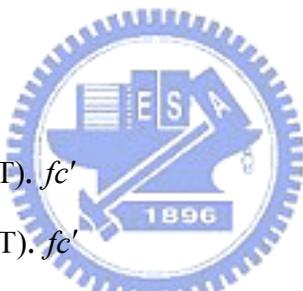
ϵ_{\max} ： fr 所對應之極限應變(mm/mm)

其後，楊旻森與陳舜田教授為進一步瞭解火害後混凝土之應力應

變關係【34】，製作了175個直徑12cm、高24cm的圓柱試體，其中水灰比為0.75、0.65、0.525及0.45等五種，火害延燒溫度則有常溫、200°C、300°C、400°C、500°C、600°C及800°C等七種，經抗壓試驗及迴歸分析得到火害後混凝土應力與應變關係，其數學式如下所示：

$$f_c = \begin{cases} fr \cdot \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{\max} - \epsilon_c}{\epsilon_{\max}} \right)^2 \right] & \epsilon_c < \epsilon_{\max} \\ fr \cdot \left[1 - \left(\frac{\epsilon_c - \epsilon_{\max}}{3\epsilon_{\max}} \right)^2 \right] & \epsilon_{\max} < \epsilon_c \end{cases}$$

其中：



$$fr = \begin{cases} (1.032 - 0.001T) \cdot f_c' & 0^\circ C \leq T \leq 400^\circ C \\ (1.38 - 0.0019T) \cdot f_c' & 400^\circ C \leq T \leq 600^\circ C \\ (0.66 - 0.0007T) \cdot f_c' & 600^\circ C < T \end{cases}$$

$$\epsilon_{\max} = 0.0025 + (6T + 0.04T^2) \times 10^{-6}$$

第三章 試驗計劃與方法

3-1 試驗計劃

本研究針對不同直徑號數不同埋置長度的鋼筋與環氧樹脂塗佈鋼筋(Epoxy-Coated reinforcement, ECR)應用於一般強度混凝土內在不同的溫度環境下對其握裹力之影響為研究主題，研究不同塗層厚度的環氧樹脂塗佈鋼筋在一般強度之混凝土內部，於不同加熱溫度下和一般鋼筋比較其握裹力的衰減情形及變化。

本研究主要考量的因子包括加熱溫度、鋼筋及環氧樹脂塗佈鋼筋之尺寸、環氧樹脂鋼筋之環氧樹脂塗層厚度、埋置長度，並探討各項因子與握裹力及握裹破壞模式間之相互關係。

3-2 試驗變數

本研究中所使用之試驗變數分為鋼筋及環氧樹脂塗佈鋼筋的尺寸、環氧樹脂塗佈鋼筋的塗層厚度、埋置長度以及加熱溫度。為了要了解一般塗層及超厚塗層的環氧樹脂塗佈鋼筋在高溫的環境下握裹能力衰減情形和一般鋼筋的差異，本研究將環境溫度的變數設為常溫、100°C、200°C、400°C、600°C五種狀況，至於環氧樹脂塗佈鋼筋部分，其塗層厚度分為正常塗厚(107~159 μm)以及兩倍厚度塗層(396~470 μm)，另外考慮環氧樹脂塗佈鋼筋在不同尺寸下，環氧樹脂塗層對其握裹能力的影響程度並不相同，所以本研究採用#4($d_b=1.3\text{cm}$)及#6($d_b=1.9\text{cm}$)兩種不同尺寸的環氧樹脂塗佈鋼筋，並各別以(1)#4：5 d_b 、10 d_b 、15 d_b 以及(2)#6：10 d_b 、15 d_b 、20 d_b 等深度埋置於混凝土圓柱試體中，各變數如下表所示。

本試驗之各項變數

塗層厚度	0 層(一般鋼筋)、1 層(正常塗厚)、2 層(兩倍塗厚)	
鋼筋尺寸	#4、#6	
加熱溫度	#4	常溫、100°C、200°C、300°C、400°C
	#6	常溫、100°C、200°C、400°C、600°C
埋置深度	#4	5d _b 、10d _b 、15d _b
	#6	10d _b 、15d _b 、20d _b



3-3 試驗材料

1. 混凝土：採用台灣水泥製品廠新竹分廠之預拌混凝土，詳細配比資料如表 3-1 所示。
2. 環氧樹脂塗佈鋼筋：使用 Everwide Chemical Co.提供的兩劑式塗料手工塗製而成，AB 兩劑型號各為 A 劑：Epowide FE046A1 以及 B 劑：Epowide 8415B，其化學及物理性質詳見表 3-2。塗製方法是先將 AB 兩劑以 3:1 的體積混合攪拌，並淋在表面乾淨無汙的鋼筋上，藉由塗料本身的重力及流動性，使其自然分佈在鋼筋上，厚塗層的製作方法則是增加塗佈次數，將塗佈工作分為數天進行，以此增加其塗層厚度，塗料乾燥後以德國 ElektroPhysik 公司製造的膜厚計[圖 3-1]測量塗層厚度，選其塗厚均勻且適合者為本實驗用環氧樹脂塗佈鋼筋，所有試體鋼筋之塗厚詳見[表 3-3~

3-]，過程詳見 3-4-1 節，[圖 3-2]為準備完成後不同角度所拍攝的外觀。

3. 鋼筋：本研究使用#4 及#6 竹節鋼筋為實驗埋置鋼筋，竹節鋼筋 CNS 編號為 D13 及 D19，鋼筋化學成分如[表 3-11]所示，鋼筋之幾何形狀及規格尺寸如[表 3-12]。
4. 電熱偶線：K Type 電熱偶線[圖 3-3]。
5. 防火棉：由玻璃纖維所製，隔熱且不燃燒之防火隔熱棉。
6. 蓋平石膏：仲輝公司型號 S-420 之蓋平石膏。

3-4 試體規劃

本研究測量握裹力的方式乃採用鋼筋單邊露出的圓柱試體進行拉拔試驗測其拉拔力。圓柱試體混凝土的部份，其設計抗壓強度為 4000psi，圓柱試體的尺寸則依鋼筋及環氧樹脂塗佈鋼筋的埋置長度而定，如[圖 3-4]所示，混凝土圓柱試體的直徑為 20cm，高度則是鋼筋埋置深度加上離鋼筋底端 10cm 的保護層厚度，總共有六種高度，分別為埋置竹節鋼筋編號 D13(#4)筋的 16.5cm、23cm、29.5cm，以及埋置竹節鋼筋編號 D19(#6)筋的 29cm、38.5cm、48cm，加熱溫度 D19 試體部分則為常溫、100°C、200°C、400°C、600°C，至於 D13 試體組的#4 筋由於超過 400°C 後其衰減程度變化已不大，所以增設目標溫度 300°C。三樣埋置物、六種圓柱試體長度、五個目標溫度，總共 90 顆試體。並同時製作 6 個直徑 10cm 高 20cm 的圓柱試體做抗壓試驗，以瞭解混凝土實際抗壓強度。

3-4-1 試體製作

試體製作主要分為三個部份，首先是環氧樹脂塗佈鋼筋的塗佈作業，再來是試體模具的準備工作，最後則是灌注圓柱試體。

1. 環氧樹脂塗佈作業：原料為 Everwide Chemical Co.提供的兩劑式塗料，兩劑型號分別為 A 劑:Epowide FE046A1 以及 B 劑:Epowide 8415B。塗佈之前首先需將鋼筋表面所有髒污刷除，確定鋼筋表面清潔乾燥。接下來，將 AB 兩劑以 3:1 的體積混合攪拌，並淋在表面乾淨無汙的鋼筋上，用架子垂直固定鋼筋至一定高度，藉由塗料本身的重力及流動性，使其自然流佈在鋼筋上，塗料乾燥後以德國 ElektroPhysik 公司製造的膜厚計測量塗層厚度，選其塗層均勻且適合者為本實驗用環氧樹脂塗佈鋼筋，欲增加膜厚則增加塗佈次數，再重複一次塗佈作業，並一樣以膜厚計確定其塗層是否均勻且厚度合於要求，環氧樹脂塗佈鋼筋製作完成後，將鋼筋固定在固定器內，從固定器下伸出所要埋置的長度，固定後在其底部黏貼電熱偶線，在實驗時用以監測中心溫度。所有環氧樹脂塗佈鋼筋之塗層厚度詳見[表 3-3~3-10]，經過四分位法量測統計取其平均值，#6 環氧樹脂鋼筋塗佈一次的厚度平均 159 μm ，塗佈兩次平均 470 μm ，#4 環氧樹脂鋼筋塗佈一次的厚度平均 107 μm ，塗佈兩次平均 396 μm 。
2. 製作試體模具[圖 3-5]：準備 90 個長寬皆為 30cm 的正方形壓克力底板、90 個內徑 20cm 的 PVC 空心圓管，90 支空心圓管共可分為六組，分別為埋置#4 筋的 16.5cm、23cm、29.5cm，以及埋置#6 筋的 29cm、38.5cm、48cm，每組 15 支。製作模具前，先使用清水將圓柱型 PVC 模具及方形壓克力底板擦拭乾淨，等其風乾

後，將圓柱型 PVC 模具平放於方形壓克力底板的中央，然後使用 Silicone 將圓柱型 PVC 模具的底部跟方形壓克力底板間的縫隙填滿以防灌注試體時混凝土從縫隙間滲漏。將 90 個圓柱型 PVC 模具跟方形壓克力底板黏好後，於內部塗上一層薄油脂來增加潤滑性，以避免在搗實時試體底部因漿體的流動性不夠而有小孔洞的產生，也可利用其潤滑性來減輕拆模與清模的困難。

3. 灌注試體：準備工作完成後開始進行灌注試體，分為兩部分，一為抗壓試體，另一則是埋置纖維強化複合材料加強筋之混凝土試體。抗壓試體部分為直徑 10cm 高 20cm 之圓柱試體，將其分為 3 層搗實，每層搗實 25 下，搗實完成後將其表面以鏟刀鏟平，至於直徑 20cm 的 90 顆環氧樹脂塗佈鋼筋握裹力拉拔試驗試體一樣需分成 3 層搗實，每層搗實 25 下，將試體表面鏟平後在圓柱型 PVC 模具上架上固定器，並將鋼筋從固定器中心孔緩慢插入，在插入鋼筋的時候，需注意的是應該將鋼筋穿過固定器中心孔輕放於尚未乾的混凝土上然後輕輕敲擊圓柱型 PVC 模具的周圍使鋼筋自行緩慢的陷入混凝土中達到所需的埋置長度為止，如此一來可避免若直接將鋼筋插入到混凝土時，在圓柱試體表面鋼筋周圍處會產生混凝土凹陷的現象。完成後之試體如[圖 3-6]所示。另外，由於電熱式圓桶高溫爐的高度達到 60cm，比拉拔試驗試體的高度還高，所以還需灌注六組不同高度之墊塊，實驗時用以放置試體，使圓柱試體頂面的高度盡量接近高溫爐的頂面，以利實驗進行。

3-4-2 試體養護、烘乾

澆製試體 48 小時內拆模取出試體，並在 $23\pm 1.7^{\circ}\text{C}$ 溫度下濕治，在最初 48 小時濕治時間內應不受震動。拆模後試體濕治之意是指試體全部表面應經常保有游離水。之後可將試體浸於飽和石灰水中或儲於合乎 CNS 3037 水硬性水泥及混凝土試驗用濕養櫃及濕養室規定之濕養室中。試體不可置於水滴下或流動之水中。

本研究是討論環氧樹脂塗佈鋼筋應用於一般強度混凝土在高溫中之握裹力，因為當中有牽涉到高溫加熱的問題，所以烘乾便成為一個相當重要的步驟，試驗的試體必須在適當的溫度下 (105°C) 持續烘乾一段時間 (約一週)，以將試體內部大部分的水分逼出，目的是使之後在加熱混凝土試體時不至於因為試體內部含有水分而造成壓力過大及發生爆炸的現象，烘乾後之試體應放置在乾燥的環境中並儘速將其進行試驗，以免混凝土試體又將水分吸入。所以烘乾的步驟在安全上是相當重要且需特別注意的項目。

3-4-3 抗壓試驗

進行抗壓試驗的直徑 10cm 高 20cm 之圓柱試體於養護 28 天後取出放置乾燥的環境中，之後送至材料實驗室進行抗壓試驗。試驗時要將試體準確的放置在試驗機的中心，以防止有偏心的現象，加壓時應連續地增加，不得有震動現象發生，加壓的速率應維持在每秒鐘 $1.41\text{kgf}/\text{cm}^2$ (0.14MPa) 至 $3.52\text{kgf}/\text{cm}^2$ (0.34MPa) 之間視混凝土強度而定，在預估最大抗壓強度之上半段加壓時間內可用稍高之加壓速率，當試體即將破壞前發生快速降服現象時，試驗機之加壓速率不得再予以調整。

3-5 試驗設備

1. 烘箱：試體於加熱前先行將其烘乾以防加熱過程中發生爆炸。
2. 50 噸容量之油壓缸：施作拉拔試驗時加壓的工具[圖 3-7]。
3. 電動泵浦：將油打入油壓缸之工具[圖 3-8]。
4. 電熱式圓桶高溫爐：用以將試體加熱至所需之溫度[圖 3-9]。
5. 夾具：為經過熱處理之鋼材料設備。此夾具放置在試驗設備之最上方，為將油壓缸之上推力轉變為拉拔力之設備[圖 3-10]，夾具的斜角設計可將部分拉拔力轉為夾住鋼筋的勁向分力，並均勻分散在整個夾合面，此式夾具裝卸容易，解決老式夾具笨重不便且安裝步驟繁瑣的問題。
6. LVDT：LVDT(Linear Variable Differential Transformer 線性差動變壓器)，用以量測拉拔實驗時鋼筋之變位，range 0~6cm。
7. LVDT 模組：由一個 LVDT 固定架以及鎖在架上的兩支 LVDT 組成，兩支 LVDT 位於鋼筋兩側對稱位置，分別量取兩側位移量，求其平均則可得到位於兩個 LVDT 中間的鋼筋的位移量。[圖 3-11]
8. 反力鐵架：支撐油壓缸並提供拉拔力之反力。
9. LVDT 套圈：裝置在混凝土圓柱試體頂面與鋼筋之交界處上，以作為 LVDT 量測滑移變位之參考位置。
10. 資料擷取器：使用三聯公司所代理的型號 UCAM10B 之擷取器及型號 USB20A 之擴大器，在試體加熱過程中負責溫度資料的收集及紀錄。[圖 3-12]
11. 移動式資料擷取器：在拉拔實驗過程中負責荷重計及 LVDT 的資料收集及記錄。[圖 3-13]

3-6 試驗設置及步驟

由於本實驗加熱時所使用的電熱式圓桶高溫爐的高度達到60cm，遠高於圓柱試體的六組高度，所以在澆製拉拔試驗試體時需另外再配合六組圓柱試體高度，分別澆製六組不同高度的混凝土墊塊，用來放置拉拔試驗試體。墊塊需長時間暴露在高溫之中，所以將所有墊塊包上防火棉以增加使用壽命，將試體放上對應其高度的混凝土墊塊後，試體表面的高度會接近但略低於電熱式圓桶高溫爐，目的是讓試體能完全暴露在高溫環境之下，避免加熱不均勻的情況發生。以上準備工作完成後即開始進行拉拔試驗。為方便了解，試驗的步驟分成下面幾個部份敘述：(1)電熱耦線連接(2)設備架設(3)加熱(4)拉拔試驗。

1. 電熱耦線連接：首先將混凝土墊塊放置於電熱式圓桶高溫爐的內部中，再將圓柱試體放置在混凝土墊塊之上並且將圓柱試體內預先埋置的電熱耦線接到 USB20A 型訊號放大器的 109CH 上，另外在放大器的 110CH 接上另外一條電熱耦線，負責監測並紀錄圓桶式高溫爐內的溫度，用以觀察高溫爐實際的升溫曲線與升溫效率，供後續實驗參考比對。另外加熱器上亦需連接電熱耦線監測爐溫，加熱器才能依據爐溫控制加熱的電流大小，以符合實驗要求的升溫曲線。
2. 設備架設：電熱耦線連接完成後，將電熱爐閉合鎖緊，再把反力架架設在試體上方，鋼筋此時應該順利穿過反力架上方開孔且位在孔洞中心位置，接著將 LVDT 套圈套在鋼筋上鎖緊，再將 LVDT 模組固定在電熱爐的螺栓上，調整 LVDT 模組的高度和位置，讓兩支 LVDT 探測針的頂端都能夠接觸到套圈上伸出的鐵片，LVDT

模組安置完成後，再依序將油壓千斤頂、下墊片、Load Cell、上墊片放上，放置時注意鋼筋要穿過中心開孔，不能接觸到設備的孔壁上，確認裝設無誤後再上夾具。全設備的架設完成示意圖如[圖 3-14]所示，[圖 3-15~圖 3-22]則為架設過程及全設備實體圖。

3. 加熱：當所有設備架設完成之後，即開始進行加熱的程序。使用電熱式圓桶高溫爐依照 ASTM E-119 耐火標準加熱速率升溫，加熱時需確認連接在加熱器上用來探測高溫爐內爐溫的電熱耦線的感應端已放置在爐中，以避免加熱器因無法確知目前爐溫而持續增加電流造成意外。
4. 拉拔試驗：待各試體中心溫度達到所設定的目標溫度之後，開始操作電動油壓泵浦來進行拉拔的動作，以每分鐘上升 2 頓的拉拔速率持續加載來進行拉拔的動作，直到發生握裹失敗或是鋼筋拉斷而停止[圖 3-23]。

第四章 試驗結果與討論

前言

本研究旨在求得各種溫度下環氧樹脂塗佈鋼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環氧樹脂塗佈鋼筋經拉拔試驗後對混凝土產生的破壞模式。

為了使混凝土試體內部能均勻受熱，而且使試體中心之鋼筋在埋置長度內的溫度能夠一致，所以本研究選擇採用對稱的圓柱形試體，另外考量到混凝土的保護層厚度與溫度傳遞對握裹力之影響以及為了控制破壞模式為拉出破壞，而設計採用的試體尺寸為直徑 20cm 之圓柱形試體。另外，考慮到在 400°C 後 ECR 的環氧樹脂塗層早已燃燒殆盡，其影響自然不如 100°C、200°C 環氧樹脂塗層產生巨大變化時來得大，故特將 D13 試體組的 600°C 改設為 300°C，一方面鑒於 D13 試體組的鋼筋直徑以及埋置深度都較小，握裹強度也較小，假如加熱到 600°C 其變化會比較難察覺，所以 D13 試體組 600°C 部份將改為 300°C，並與 D19 試體組 400°C 一起討論。

4-1 試體的破壞模式

在拉拔試驗進行後，可藉由觀察混凝土圓柱試體表面的破壞情況得知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、鋼筋的尺寸及埋置長度對混凝土圓柱試體破壞模式的影響以及環氧樹脂塗層是否會改變鋼筋拉拔破壞的特性。

拉拔試驗之破壞模式可分為鋼筋拉出破壞(pullout failure)、混凝土圓柱試體之劈裂破壞(splitting failure)。以下針對在不同中心溫度下各種鋼筋尺寸、埋置長度及塗厚對混凝土試體破壞模式之影響來討論。

4-1-1 常溫下拉拔試驗試體的破壞模式

常溫之下，D13 試驗組之試體全都為拉出破壞，如[圖 4-1、圖 4-2]所見，圓柱試體表面沒有發展出任何裂縫，且鋼筋拔出後的開口非常平整，為典型的拉出破壞模式。

而D19 試驗組之試體，在 $15d_b$ 、 $20d_b$ 埋深時，混凝土普遍都有裂縫發展，尤其是ECR的部分，埋深 $15d_b$ 、 $20d_b$ 的試體都有明顯開裂情形，塗層越厚開裂越嚴重[圖 4-3]，雙層塗厚的試體在 $20d_b$ 時甚至發生嚴重的爆裂式劈裂破壞[圖 4-4]，造成此現象的原因將於 4-4 節中詳加討論。總括來說，常溫時，埋置一般鋼筋的試體可在埋深 $15d_b$ 、 $20d_b$ 時發現輕微的裂縫產生，埋置單層塗厚ECR的試體在埋深 $15d_b$ 時發現較明顯的裂縫， $20d_b$ 時裂縫完全延伸到試體底部，埋置雙層塗厚ECR的試體則是在埋深 $15d_b$ 、 $20d_b$ 時試體皆遭裂縫劈開， $20d_b$ 者為嚴重的爆裂式劈裂破壞。常溫下試體之破壞模式紀錄詳見[表 4-1]。

4-1-2 100°C 下拉拔試驗試體的破壞模式

中心溫度 100°C 下，D13 試驗組之試體全都為拉出破壞，拉出的開口平整，和常溫時無異。

D19 試驗組之試體部分，普遍都有開裂的情形，埋置一般鋼筋的試體 $10d_b$ 、 $15d_b$ 、 $20d_b$ 都為劈裂破壞[圖 4-5~4-7]，其開裂程度隨著埋深增加，埋置單層及雙層塗厚ECR的試體 $10d_b$ 、 $15d_b$ 、 $20d_b$ 亦都為劈裂破壞[圖 4-8]。就結果看來，在中心溫度 100°C 下，D19 試驗組普遍都有開裂發生，開裂程度主要隨著埋深增加，塗層厚度對開裂程度的影響較常溫時輕。中心溫度 100°C 時試體之破壞模式紀錄詳見[表 4-2]。

4-1-3 200°C 下拉拔試驗試體的破壞模式

中心溫度 200°C 下，D13 試驗組之試體多為拉出破壞，劈裂破壞則多發生在一般鋼筋埋深 $10d_b$ 、 $15d_b$ 的試體上，至於埋置 ECR 的試體則沒有發現任何開裂發生。

D19 試驗組在埋置一般鋼筋的部分，埋深 $10d_b$ 、 $15d_b$ 的試體外部有發現試體燒裂產生的小裂縫[圖 4-9~4-10]，但並無沿裂縫發生劈裂破壞， $20d_b$ 試體則為劈裂破壞。埋置 ECR 的試體在各埋深下都有明顯開裂發生，其開裂情形如[圖 4-11~4-13]。綜合中心溫度 200°C 下的實驗結果，可以發現中心溫度 200°C 時，D19 試驗組的試體外表開始有輕微的燒裂情形(此時外部爐溫約達 600°C)，一旦握裹力發展至一定強度，試體便可能沿燒裂裂縫發生劈裂破壞，經觀察，開裂的程度和埋深及塗層厚度並無直接關聯，只能確定埋深越長者越容易發生劈裂破壞，但其開裂的程度可能需視混凝土受高溫破壞的程度而定，本實驗的加熱方式是採用外部高溫加熱，來增加試體升溫效率，整個加熱過程的溫度資料經整理，可發現試體中心與外部爐溫的升溫曲線呈現如[圖 5-1]，這種加熱方式會有試體內外溫度分布不均的情形，在溫度分布及加熱時間都不盡相同的情況下，將不易預測試體混凝土遭受到什麼程度的破壞，關於此情形的改善方式，將於第五章的建議中加以討論。200°C 下試體之破壞模式紀錄詳見[表 4-3]。

4-1-4 D19 400°C (D13 300°C) 下拉拔試驗試體的破壞模式

D13 試驗組中心溫度 300°C 時只有在外圍發現混凝土燒裂的裂縫，各種埋深下均無劈裂破壞發生，因為中心溫度 300°C 下混凝土及鋼筋握裹處的強度已經大幅衰減，混凝土與鋼筋間的握裹力已無法發

展出足夠達到劈裂試體的徑向分力，所以不同於 200°C 時會在長埋深的試體發現劈裂破壞。

D19 試體組中心溫度 400°C 時，劈裂破壞多發生在埋置一般鋼筋的試體[圖 4-14~4-15]，埋置 ECR 的試體則多為拉出破壞，只有單層塗厚埋深 15d_b 的試體發生劈裂破壞[圖 4-16]，其他試體只有發現表面燒裂裂痕。試體之破壞模式紀錄詳見[表 4-4]。

4-1-5 D19 600°C (D13 400°C) 下拉拔試驗試體的破壞模式

D13 試體組在中心溫度 400°C 的情形和 300°C 時一樣，全部都是拉出破壞。

D19 試體組在中心溫度 600°C 時，亦皆為拉出破壞，此時試體混凝土多呈燒裂的狀態，但裂縫只在試體外部發展，在平行鋼筋的方向都沒有開裂發生，其外觀如[圖 4-17~圖 4-18]的試體所見，故皆視為拉出破壞。試體之破壞模式紀錄詳見[表 4-5]。

4-2 拉出後的鋼筋外觀比較

藉由觀察拉拔試驗拉出後的鋼筋及 ECR 外觀，可以了解 ECR 的環氧樹脂塗層在高溫下的變化，亦可藉此判斷鋼筋及 ECR 拉出過程其握裹行為上有何不同。

4-2-1 埋置於加熱與未加熱試體的一般鋼筋在拉出後外觀的比較

[圖 4-19]為加熱與未加熱試體埋置的一般鋼筋拔出後的外觀比較，可以發現未加熱試體中拉拔出的鋼筋，其竹節間充滿承受剪切破壞後隨著鋼筋一起夾帶而出的混凝土硬塊，此硬塊切面平整，緊緊附

著於竹節之間。不同於未加熱的試體，加熱試體中拔出的一般鋼筋，其混凝土四處散落且呈現灰化狀態，顯示出加熱後試體中心混凝土泥水脆弱灰化的問題。

4-2-2 埋置於加熱與未加熱試體的 ECR 鋼筋在拉出後外觀的比較

[圖 4-20]為加熱與未加熱試體埋置的 ECR 拔出後的外觀比較，可以發現 ECR 在拉出後其狀態可以分為三類。

第一類為未加熱的 ECR，其竹節上可以很明顯地發現與混凝土摩擦的痕跡，從這點可以確定竹節處的環氧樹脂塗層在拉出時會抵抗 ECR 與混凝土間的錯位，而其外觀完整無損，表示未加熱的環氧樹脂塗層其強度仍足以抵抗混凝土反力，做為提供卡榫力的介質(一般鋼筋是以竹節為卡榫力傳遞的介質)。

第二類為中心溫度 100°C、200°C 時達到玻璃轉換溫度(88°C)的 ECR，可以看出整個環氧樹脂塗層已經因為高溫而變質，竹節頂端的環氧樹脂塗層全部都被剷除，竹節旁殘餘的混凝土碎屑可以看出，竹節處的環氧樹脂塗層脫落後，裸露出的鋼筋竹節仍保有卡榫的功能。

第三類為中心溫度 400°C、600°C 等高溫下達到熱劣解溫度(220°C)的 ECR，很明顯的，環氧樹脂塗層已經因為高溫而消失殆盡，竹節之間也沒有任何環氧樹脂塗層殘留，這表示原本以環氧樹脂塗層為卡榫力傳遞界面的鋼筋，會因為環氧樹脂界面的消失而產生空隙，理論上空隙一旦過大，鋼筋會因為失去束制而立刻失去握裹能力，不過實驗所用的 ECR 塗層厚度只介於 0.1mm~0.4mm 之間，此空隙並不足以使鋼筋完全失去握裹能力，但是對於 D13：0.8mm 及 D19：1.2mm 的節高來說，0.1mm~0.4mm 之空隙已足以影響鋼筋卡榫力的發展。

4-2-3 常溫下 ECR 與一般鋼筋拉出後之外觀比較

[圖 4-21]為常溫下 ECR 與一般鋼筋拔出後外觀之比較，未塗裹的鋼筋拔出後會有大量混凝土硬塊緊緊附著在上面，而 ECR 則沒有這種現象，這表示混凝土泥水與 ECR 塗層介面的附著度不佳，這跟接觸面本身性質有關，附著度差表示混凝土與塗層之間的摩擦力較一般鋼筋低，這樣的性質也會直接影響到 ECR 的握裹行為，關於靜摩擦力對握裹強度的貢獻於 4-4 將加以推導並討論。

4-2-4 各種溫度狀態下 ECR 與一般鋼筋外觀比較

[圖 4-22]為 D19 試體組的拉拔結果，由右至左為未加熱一般鋼筋、未加熱 ECR、100°C ECR、200°C ECR、400°C ECR、600°C ECR，[圖 4-23]為 D13 試體組的拉拔結果，由右至左為加熱過一般鋼筋、未加熱 ECR、100°C ECR、200°C ECR、300°C ECR、400°C ECR，相互比對下可以發現，塗層遭破壞的情形隨溫度增加而更嚴重。塗層完全消失則發生在 300°C 到 400°C 之間，300°C 仍有殘餘少量環氧樹脂，至 400°C 時則完全消失。

4-3 拉拔試驗之極限握裹強度

[表 4-6~4-7]各別為 D13 及 D19 試驗組試驗結果之極限拉拔力，[表 4-8~4-9]各別為 D13 及 D19 試驗組試驗結果之平均握裹應力(拉拔力/鋼筋表面積)。接下來第一、第二節將分別針對不同埋深以及不同塗層厚度下握裹強度與中心溫度變化的關係，討論常溫和加熱後塗層厚度以及埋置長度對握裹力的影響。第三節則綜合所有握裹強度影響因素，討論升溫下握裹強度的折減情形。

4-3-1 各個埋深下握裹強度與溫度變化的關係

D13 試體組之握裹強度變化見[圖 4-24~4-26]，D19 試體組之握裹強度變化見[圖 4-27~4-29]。綜合 D13 試體組三種埋深在各溫度下的握裹強度可以發現，單層塗厚 ECR 的握裹強度普遍較雙層塗厚者高。過 100°C 後，普通鋼筋的握裹強度則遠強於兩種塗厚的 ECR。至於未加熱時，普通鋼筋握裹強度有略低於 ECR 鋼筋的傾向，這與文獻【5】與預期中的結果有所出入，造成此現象的原因將在第五章加以討論並予以建議

D19 試體組的部份，試體加熱後，普通鋼筋的握裹強度亦如預期般遠高於各個塗層的 ECR。綜合實驗結果發現，加熱過後，ECR 的握裹強度全部低於一般鋼筋，雙層塗厚的 ECR 其握裹強度則普遍略低於單層塗厚的 ECR。



4-3-2 各種塗層厚度下握裹強度與溫度變化的關係

D13 試體組之握裹強度變化見[圖 4-30~4-32]，D19 試體組之握裹強度變化見[圖 4-33~4-35]。埋置深度愈長者，握裹強度普遍愈高，但是握裹強度並沒有隨著長度呈等倍的線性增長。這是因為在拉拔試驗中，沿著埋置開口至試體內部，整個埋置長度上握裹應力的分布情形是非均佈的，接近開口處的鋼筋提供了大部分的握裹強度，離埋置開口越遠其握裹強度的貢獻則越小。綜合[圖 4-24~4-35]所有變化圖，可以發現，ECR 的握裹強度的損失主要集中在 100°C 前後，而普通鋼筋握裹強度的損失主要發生在 200°C 的時候，以整體趨勢來說，過 200°C 之後，所有試體的握裹強度開始以接近線性且和緩的曲線下降，此時 ECR 與鋼筋在握裹強度折減上的表現較為相近，因為此時

環氧樹脂已經燃燒殆盡，ECR 和普通鋼筋的外觀已經無異，其行為也因此更相近。

4-3-3 握裹強度的折減情形

[圖 4-36~4-41] 為各個尺寸與埋置長度的鋼筋與 ECR 在各溫度下握裹強度除以室溫時握裹強度所得到的握裹強度殘餘率(%), [圖 4-42~4-43] 為 D13、D19 試體組不同埋深時的殘餘率平均過後, 所得到的整體握裹強度殘餘率, 從圖中可以發現 200°C 過後 ECR 和鋼筋的殘餘率成固定的比例下降, 以 D13 試體組的殘餘率來說, 200°C 過後的鋼筋握裹強度殘餘率約保持在 ECR 殘餘率的 1.7 倍上下, D19 試體組的鋼筋則約保持在 ECR 殘餘率的 1.2 倍。[圖 4-44~4-49] 則為 100% 減去各溫度下握裹強度殘餘率所得到的握裹強度衰減率(%), [圖 4-50~4-51] 為 D13、D19 試體組不同埋深時的衰減率平均過後, 所得到的整體握裹強度折減趨勢, 可以發現 ECR 握裹強度折減主要發生在 100°C, 100°C 之後折減率愈趨平緩, 和鋼筋握裹強度折減的趨勢相近。

4-4 ECR 與鋼筋的外觀幾何形狀對握裹行為之影響

[圖 4-52] 為 ECR 及鋼筋的外觀比較, 可以發現 ECR 竹節有較大的楔形斜角(β), 有效的節間距(d) 也比鋼筋小, 由 [表 3-3~3-10] 統計的節頂及節底模厚來看, ECR 最大節高(h) 與鋼筋相較下並無太大的變化, 但是在較接近竹節處的節高(h') 會因為節間距上的模厚增加而變小。為解說竹節幾何外觀的影響, 以下以 [圖 4-53] 的握裹力元素示意圖來表示竹節處握裹力發展時所有作用力及其分量的分布, 由鋼筋元

素上的力平衡可推導出握裹力會等於 $F_b \sin\alpha + F_f \cos\alpha$ ，而徑向劈裂力 (radial splitting force) 等於 $F_b \cos\alpha - F_f \sin\alpha$ ，以楔角的影響來看，楔形斜角愈大(α 愈小)會使握裹力減小，而發展出更強的徑向分力，而以摩擦力(F_f)的影響來看，摩擦力愈小則握裹力愈小，而徑向劈裂力則相對增加。由 ECR 本身的物理及幾何性質來代入，可以發現 ECR 較大的斜角以及較小的摩擦力，會造成較大的徑向劈裂力，以及減低鋼筋的握裹力，而隨著膜厚增加，斜角也相對增加，使得雙層膜厚 ECR 更容易造成試體劈裂。這就是本實驗埋置 ECR 的未加熱試體偏向劈裂破壞，且握裹強度也較普通竹節鋼筋小的原因。

4-5 拉拔試驗之握裹滑移量

鋼筋與 ECR 在拉拔過程中，左右“拉拔力-滑移量關係曲線”的主要因素在於其破壞模式。本實驗由拉拔過程得到的“拉拔力-滑移量關係曲線”依其破壞模式主要區分為三種類型。

1. 拉出破壞：其“拉拔力-滑移量關係曲線”如[圖 4-54]所示，當拉拔力達到圖中 A 點臨界值時，接近埋置口的鋼筋及 ECR 其握裹應力值超過混凝土抗剪強度，混凝土遭剪壞，因此滑移量開始迅速增加，此時鋼筋週遭混凝土已剪壞的部份只剩摩擦力提供握裹力，而埋置於更深處，週遭混凝土尚未遭剪壞的地方則繼續提供卡榫力及摩擦力來維持其握裹強度，這時握裹強度並不會迅速降低，甚至有增加的趨勢，從圖中可以發現 A-B 的過程中，其曲線開始上下抖動，這是混凝土不斷破壞並解壓所帶來的影響。當拉拔力達到圖中 B 點極限握裹強度時，鋼筋已非拉伸的狀態，而是整根鋼筋開始滑移，只剩摩擦力提供其握裹強度，隨著鋼筋拉

- 出，其摩擦力愈小，直到整根拉出時，鋼筋將完全失去其握裹力。
2. 劈裂破壞：其“拉拔力-滑移量關係曲線”如[圖 4-55]所示，當拉拔力達到圖中 A 點臨界值時，混凝土就已經因為劈裂而損失大部分束制能力，與拉出破壞比較下劈裂破壞 A-B 的歷時極短(此部份曲線亦會呈現上下大幅度抖動)，過 B 點的極限握裹強度後，鋼筋開始大量滑移，握裹能力也隨之下降。
 3. 爆裂式劈裂破壞：其“拉拔力-滑移量關係曲線”如[圖 4-56]所示，爆裂式劈裂破壞會使混凝土嚴重劈裂而完全失去束制能力，劈裂發生時會有大規模的力量釋放，劈裂發生後鋼筋迅速失去握裹能力。



第五章 結論與建議

5-1 結論

由本實驗的各項結果，我們可以歸納出幾項結論：

1. ECR 的環氧樹脂塗層會改變鋼筋竹節的幾何形狀，使其竹節楔形斜角較一般竹節鋼筋大，而有效節距則比一般竹節鋼筋短。ECR 鋼筋會因為竹節幾何形狀的改變而增加其徑向分力的發展，導致試體更容易劈裂。
2. 混凝土高溫加热的結果，會導致整體強度降低以及楊氏係數變小，在握裹行為的影響上，抗張強度(f_t)降低將導致試體易於劈裂，抗剪強度(f_s)降低則會使竹節卡榫間的混凝土易遭剪切破壞，楊氏係數降低(E)會使混凝土中心埋置鋼筋的孔洞容易擴張。
3. ECR 握裹強度的折減，主要發生在 100°C 前後，除了溫度對混凝土握裹行為的影響外，高分子材料加熱至玻璃轉換溫度(glass transition temperature)後所發生的熱轉換現象(thermal transition)，亦是致使 ECR 在 100°C 後握裹強度頓減的原因之一(本實驗 ECR 採用的環氧樹脂玻璃轉換溫度約在 88°C)，隨著溫度增加，環氧樹脂塗層強度會因為超過玻璃轉換溫度而愈趨脆弱，拉拔時會因承受不住混凝土卡榫之反力而剝落。
4. ECR 的環氧樹脂塗層在 220°C 發生熱劣解後將會漸漸燃燒殆盡，根據拉拔後鋼筋外觀的觀察發現， 400°C 時將沒有任何塗料殘存，其握裹行為視同竹節節高縮小的一般鋼筋，握裹強度衰減情形也與鋼筋非常相近。
5. 隨著溫度增加，普通鋼筋握裹強度的折減沿著較平緩的曲線發

生，其握裹強度折減主要是因為混凝土受熱後抗剪及抗張強度減少以及楊氏係數降低所致。

6. 鑒於 ECR 握裹強度在高溫加熱後的折減，所以結構物抗拉構材採用環氧樹脂作為防蝕披覆材質時，須避免有火害疑慮的地方，在有高耐溫需求並同時要求鋼筋抗銹蝕能力的建築物，可以考慮加強其防火披覆工作，或者改用其他防蝕披覆和防蝕措施。
7. 本實驗未加熱試體的 ECR 握裹強度普遍高於鋼筋，這個現象並不符合文獻【5】的實驗結果，這可能是在進行未加熱的 ECR 試驗組的實驗時，儀器所發生不可預期的嚴重訊號干擾，才導致資料錯誤，經檢查發現，此干擾為擷取器接頭接觸不良所致。

5-2 建議

最後針對本實驗在過程中所遇到的問題提出建議以做為未來相關研究的參考：



1. 在試體加熱方面，本實驗加熱過程採用的升溫曲線是利用外部高溫來加速試體升溫速度，但是這樣會造成試體溫度內外不均的情形[圖 5-1]。本實驗用以量測溫度的電熱偶線乃埋置於試體中央，所以實驗過程中只能針對試體中心溫度進行監測，而無法確定試體從裡到外的溫度分布情形，這可能會影響到實驗結果的判讀。為了控制溫度對混凝土強度的影響，所以未來進行相關實驗時，建議採用如[圖 5-2]的加熱曲線，以目標溫度恆溫加熱的方式並固定加熱時間，這樣可使試體中心達到目標溫度時，其試體內外呈現一樣溫度及加熱時間，以期達到相同中心溫度下的試體都具有相同強度折減情形的目標。

2. 量取鋼筋握裹滑移量時，鎖在鋼筋上用來當作量測基準點的 LVDT 套圈會因為環氧樹脂受高溫軟化而掉落，在進行拉拔試驗時，須注意 LVDT 套圈是否鬆動，以防止 LVDT 量測時發生錯誤。
3. 建議拉拔試驗試體可以採用鋼筋兩端露出的方式灌置，在拉拔試驗中量取兩端滑移量。量測得到的滑移量可用來套入 Mathey、Watstein 所提出的臨界握裹應力準則【42】，以兩端位移量判斷臨界握裹應力，來比對拉拔試驗結果。另外藉由兩端位移量，可以獲知鋼筋實際的拉伸量及滑移情形，。

