

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

鋼筋混凝土樓板火害後之殘餘穿孔剪力

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2211-E-009-023-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：國立交通大學土木工程學系(所)

計畫主持人：鄭復平

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 10 月 31 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

鋼筋混凝土樓板火害後之殘餘穿孔剪力

計畫編號：NSC 94-2211-E-009-023

執行期限：94年8月1日至95年7月31日

主持人：鄭復平 執行機構及單位名稱：國立交通大學

一、中文摘要

本研究擬針對鋼筋混凝土無梁版，進行受火害之力學行為及評量其耐火性能。以ASTM-119升溫曲線加熱，針對不同混凝土強度、溫度延時等變數，量測鋼筋混凝土版溫度分佈情形、載重-位移關係、耐火時效及火害後貫穿殘餘剪力強度等，以了解鋼筋混凝土版之貫穿剪力行為。以為將來實施防火性能規範之參考。

從試驗結果得知，無梁板受高溫侵襲後的破壞模式與常溫相近，混凝土保護層可隔絕大部份熱源，貫穿剪力強度減降低量與歷時成正比，高強度混凝土有爆裂的疑慮。

關鍵字：貫穿殘餘剪力強度，火害，無梁板

Abstract

The experiments of mechanic behaviors and fire resistance of flat slab exposed in fire condition were executed in this research program. The temperature distribution in the concrete flat slab, load - displacement relationship under loading and residual punching shear strength were studied for concrete flat slab heated according to ASTM-119 fire curve were explored.

From test results show that the pattern of failure for specimens after exposed to elevated temperature is similar to that without exposing elevated temperature. The concrete cover can insulate most heat energy from heat source. The reduction of punching shear strength is proportional to the duration of heating. High strength concrete have danger of spalling.

Keywords: residual punching shear strength, elevated temperatures, flat slab

二、緣由與目的

緣由

隨著時代進步，高樓建造物逐漸增加，火災發生頻率也隨著增加，然火場高度增加消防救災的困難性，且伴隨建造物火害後嚴重的破壞。因此，混凝土構件在火災時之耐火性能就顯得非常重要，以及受火害後構件是否還能繼續使用以抵抗各項載重，此種結構安全評估技術，則須建立一套定量方法，用以判斷鋼筋混凝土結構體遭受火害之強度，以作為日後工程實務之參考。

依建築技術規則第七十條規定，柱、樑依使用用途需有一至三小時的防火時效；另樓地板則需要有一至二小時的防火時效。在此時效內，結構物不致倒塌，人員得以逃生及進行救災作業。

鋼筋混凝土版構造系統中，最常見的形式為版-梁共同澆置的樓版系統。當樓版長跨度與短跨度之比值小於2時，樓版的淨載重與活載重將由兩個方向傳給四周的支承梁，因此稱為「雙向版系統」。在雙向版中，為了降低樓層高度，在版的四周刻意不配置梁體，於是整個樓版系統只剩版而沒有梁，因此稱該種樓版系統為無梁版 (Flat Slab) 系統。

由於該種結構系統未配置梁體，故當無梁版系統在承受淨載重與活載重時，易造成所謂的貫穿剪力破壞 (Punching Shear Failure)。因此為了對整個建築物構件受火害的安全性設計及有效評估能更臻完

整瞭解。本研究擬針對鋼筋混凝土版柱接頭區，進行受火害之力學行為及評量其耐火性能。

目的

綜觀前人之研究成果，國內有關建築防火相關法規未臻完善，有必要輔以相關試驗相互印證並加以修改，以提供業界更多的設計選擇，達到促進產業發展與安全兼顧的目標。由於近年來國內政府研究機構積極推動消防性能法規的研究與訂定，對於建築物在火災中的抗火能力更須進一步的了解。

建築物在承受火災後，首先面對的問題便是其安全性問題，如果建築物強度嚴重受損，無法經由修復補強的方法，恢復原來的強度，或者修復補強的費用高昂，超過拆除重建的費用，建築物便要面臨拆除重建的命運。台灣位處環太平洋地震帶上，幾乎所有建築物的結構設計都是由地震力所控制，因此在評估建築物在承受火災後，到底還剩下多少強度，其能承受災後之的能力，便是評估建築物能否經由修復補強的重要指標。因此從建築結構耐火設計觀點，對於版、牆構材應充分發揮隔熱及燒毀的功能，而梁、柱構材應能符合在規定耐火時效內不發生崩塌現象。

混凝土建築結構受火害行為非常複雜，不管要用理論或數值分析都相當困難，但透過試驗工作從試體規劃，製作及至執行試驗工作雖相當費時，其所需費用也相當龐大，但是較能確切反映實際，因此使用試驗方法探究亦有其必要性。有關鋼筋混凝土梁柱版構材在火害後之強度折減程度，在相關文獻中已有完整之資料，但是鋼筋混凝土無梁版版柱接頭貫穿剪力強度之火害力學行為相關研究卻是付之如闕。由於剪力破壞為無預警之脆性行為，

對於鋼筋混凝土無梁版版柱接頭構件在高溫環境下之整體受力行為特性，有其相當重要性，值得加以研究之必要性。

本研究目的為針對無梁版混凝土於高溫時及火害後版柱接頭之貫穿剪力破壞行為。根據已往對於鋼筋混凝土版貫穿剪力研究的文獻及規範顯示，影響貫穿剪力強度的因素有以下：混凝土強度、拉力鋼筋比、壓力鋼筋比、柱形狀尺寸、版厚以及有效深度等。另建築物構件的耐火性能受到各種因素的影響，基本上可分為構件本身、荷重大小及火場條件，為了研究目的通常採用標準耐火試驗規範(例如 CNS 標準或 ASTM E-119)；再者構件本身及荷重大小兩因素，卻又包含無數的組合，然而進行鋼筋混凝土無梁版在高溫加載情況下的行為實屬相當複雜，須有賴於一定比例尺寸的耐火試驗，對其各種情況一一進行實體構件的耐火試驗，並據輔以有限的構件耐火試驗及所用材料的各種性質資料，來分析構件在火場下的耐火性能。本研究擬採取不同混凝土材料強度為參數，在固定跨度下，改變混凝土強度、火害溫度、受熱情形等條件，依據試驗結果探討變化參數對版柱接頭之貫穿剪力影響。綜觀國內建築物之耐火時效都規定在三小時以內，本計畫便以二及三小時此作為加熱時間，同時再施加一柱軸差力，當試體達到加熱時間後，立即停止加熱系統，將試體自然冷卻以後，接著於柱頭端施加外力作用，直到版試體破壞為止，以試驗其貫穿剪力的能力。又為測驗其與未經火害時貫穿剪力的能力之差別，同樣的試驗方法將進行未經火害試體以作為相互比較。

三、試體製作與試驗方法

(一) 試體規劃

本研究計畫分為兩部分，為火害後鋼筋混凝土版貫穿剪力強度力學行為及鋼筋混凝土版貫穿剪力下耐火試驗。試體規劃依上述試驗變數規劃進行，本試驗混凝土版試體尺寸為 1200 mm x 1200 mm x 150 之方形底版，為模擬版柱接頭情形，於版中心配置 250 mm x 250 mm 長 550 mm 之上方柱及 250 mm x 250 mm 長 100 mm 下方柱，版跨度與柱頭尺寸為依照實際一定比例之模型，以實際傳遞貫穿剪力之力學行為。試驗參數規劃為混凝土強度採用二種強度 4000psi (28Mpa)、8000psi (56Mpa)；拉力鋼筋比：1.24%；壓力鋼筋比採用 0.18%；試體內分別於距離表面 2.25cm, 4.5cm 及 7.5cm 處裝設三層熱電耦線，每層裝設六條電耦線，用來量取板內溫度(圖三)。耐火試驗環境溫度依標準昇溫加熱曲線執行；火害延時採 0 小時、二小時、三小時。

(二) 試驗方法

本研究計畫分為兩部分，為鋼筋混凝土版貫穿剪力破壞及火害後鋼筋混凝土版貫穿剪力強度力學行為試驗。

a. 火害後鋼筋混凝土版貫穿剪力試驗

1. 放置四根半圓形簡支鋼棒於加熱加載反力座之上方，調整版至預先畫好的位置線內。
2. 以天車將試體吊起放置於四根半圓形簡支鋼棒上方，以墊片調整支承高度使版與支承間無縫隙產生。
3. 將電熱式高溫爐穿過柱頭及固定鋼棒後放置於版試體上。
4. 在版試體上方與高溫爐隔熱牆邊相接觸面，以隔熱綿填塞並固定於其上，以避免因為版試體變形後爐內高熱從此縫隙中逸出。
5. 調整油壓制動器垂直置放於反力座上。如(圖一)(圖二)。
6. 調整油壓制動器頭部水平，並於柱頭蓋平石膏，務求力量能均勻傳至柱頭。
7. 在試體露出柱頭與高溫爐開孔周

圍間隙再以隔熱棉塞住，以避免爐內高熱向外擴散。在柱頂端及其周圍以隔熱棉塞住，以保護接頭不受高溫而發生軟化的現象，加載過程中並適時以隔熱綿填塞固定。

8. 變位儀固定架設及量測安裝。熱電耦線接上資料擷取器。
 9. 將油壓制動器加載測試，當力量測試達預壓噸數 13 噸並確保資料無誤後，停止加載力量，此力量將保持一定不變，開始進行實驗。
 10. 高溫爐在油壓機施力時同時開啟點火加熱，直到試驗時間結束，以 ASTM-119 規定之升溫曲線(圖四)加熱，每隔 10 秒鐘記錄一次所有熱電耦線傳送來的溫度資料及變位儀傳送來的變形資料。
 11. 直到二小時或三小時的預定加熱時間到達後，將施加之軸力維持並停止加熱動作及利用爐內進行自然冷卻，在 24 小時後進行加載動作，再進行加載試驗。
 12. 試驗時是以一定之變位速度，每次增加之變位固定，直到試體破壞為止，此時即可得到火害後其所能抵抗貫穿剪力強度。
 13. 將試體吊出，觀察版破壞面及裂縫分佈情形，量取破壞面大小，以求得剪力錐形破壞裂縫的角度，並拍照記錄。
- ### b. 鋼筋混凝土版貫穿剪力強度試驗

本試驗之試體裝設作業均與火害試驗完全相同，不同的是並未加熱。

1. 放置四根半圓形簡支鋼棒於加熱加載反力座之上方，調整版至預先畫好的位置線內。
2. 以天車將試體吊起放置於四根半圓形簡支鋼棒上方，以墊片調整支承高度使版與支承間無縫隙產生。
3. 調整油壓制動器頭部水平，並於柱頭蓋平石膏，務求力量能均勻傳至柱頭。如(圖一)(圖二)。

4. 變位儀固定架設及量測安裝。
5. 將油壓制動器以 0.02 mm/min 速率加載測試，力量測試達 1~2 噸，觀察數據，確保資料讀取無誤後，開始進行實驗。
6. 設定油壓制動器以位移速率 0.002mm/min 控制進行加載，直到試體破壞試驗終止。每隔 10 秒記錄一次所有變位移送來的變形資料。
7. 試體破壞時，產生一聲低沉的聲響，此即貫穿剪力破壞發生的瞬間，觀察版試體底部情形，發現貫穿剪力破壞時，待版試體破壞後，停止試驗。
8. 將試體吊出，觀察版破壞面及裂縫分佈情形，量取破壞面大小，以求得剪力錐形破壞裂縫的角度，並拍照記錄。

四、試驗結果與討論

(1) 預測貫穿剪力強度

根據 ACI 預測貫穿剪力強度有以下三個公式

$$V_{n,ACI} = 0.265 \left(2 + \frac{4}{\beta_c} \right) \sqrt{f'_c} b_o d$$

$$V_{n,ACI} = 0.265 \left(2 + \frac{\alpha_s d}{b_o} \right) \sqrt{f'_c} b_o d$$

$$V_{n,ACI} = 1.06 \sqrt{f'_c} b_o d$$

上述三個公式中第一個公式考慮板的長寬比，第二個公式考慮板的 b_o/d 效應，第三個公式完全不考慮其它因素，本試驗使用方形板，因此採用第一個公式。

混凝土因受高溫而降低其抗壓強度，本研究採用陳舜田教授回歸分析得到火害後混凝土應力應變關係

$$0^\circ C \leq T \leq 400^\circ C$$

$$f_r = (1.032 - 0.001T) \times f'_c$$

$$400^\circ C \leq T \leq 600^\circ C$$

$$f_r = (1.38 - 0.0019T) \times f'_c$$

$$T \geq 600^\circ C$$

$$f_r = (0.66 - 0.0007T) \times f'_c$$

f'_c : 混凝土抗壓強度(kgf/cm²)

f_r : 火害後混凝土殘餘之極限抗壓強度(kgf/cm²)

(2) 破壞模式

高強度試體在經過 3 小時高溫侵襲以後，表面會有局部產生爆裂的現象，也造成此試體之殘餘貫穿剪力強度偏低。其餘試體較無此現象(圖五)。試體底部在靠近邊緣有一近似方形之裂縫，除此之外並有許多近似小方格之裂縫(圖六)。

(3) 溫度上升情形

在剛開始加溫時，由於使用電熱高溫爐功率稍有不足，升溫速度較慢，隨後溫度就快速上升，在溫度上升到 100 度左右，4000psi 強度試體有一明顯停頓，越往內部越明顯，而此溫度也隨著深度的減少而增高，此乃因混凝土內部水份開始蒸發消耗熱能所造成，隨後溫度又開使上升，但速度也稍有降低(圖七)。

高強度的 8000psi 混凝土板情況與普通強度試體有類似情形，但是在 100 度左右上升停頓的現象並不明顯，此乃因高強度的混凝土使用較少水量所造成(圖八)。

(4) 溫度與深度之關係

板內溫度隨著爐溫的升高其差距也逐漸增大，在經過 3 小時的加熱，爐溫雖然超過 1000 度，但是 4000psi 與 8000psi 混凝土板的平均溫度在不同深度為：2.25cm 處為 362 及 432；4.5cm 處為 230 及 266；7.5cm 處為 167 及 181(表一及圖九)。可以在薄薄的 2.25cm 就降低到幾乎為爐溫的 1/3，可見混凝土隔熱性能之優越。

(5) 力量與變位之關係

在施加載重初期與一般混凝土之性質並無多大差異，力量與變位幾乎成為線性之關係，普通強度混凝土大約在 $0.5f'_c$ 開使產

生非線性關係，而高強度混凝土則可保有較高的線性關係，一但到達極限載重時，承載力量瞬間急速降低，可見其破壞為脆性破壞，高強度混凝土所降低的承載力遠較普通強度混凝土為大，可見高強度混凝土具有更高的脆性(圖十)。

(6)殘餘貫穿剪力強度

除了高強度混凝土因產生爆裂，使得其殘餘貫穿剪力強度偏低。普通強度混凝土及高強度混凝土殘餘貫穿剪力強度減少的速度相差不大，都維持在每小時減少 6 公噸的貫穿剪力強度(表二，圖十一)。

五、計畫結果與自評：

試驗中有幾點為可能造成誤差的原因於下列做討論：

- (1) 預埋在試體內部做溫度量測的熱電耦線可能因灌漿時的衝擊而使位置有所偏離，造成測溫點位不正確。
- (2) 高強度混凝土在加溫時會產生爆裂的情形，此現象可能會使強度降底許多。
- (3) 電高溫爐功率較為不足，初期溫度提升較慢。

五、參考文獻

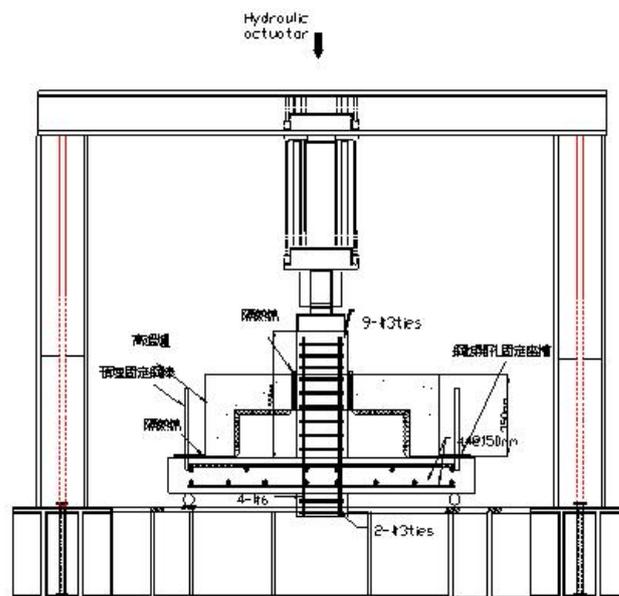
1. “Standard Methods of Fire Building Construction and Materials”,(ASTM E119),1986 Annual Book of ASTM Standards, V.04.07, ASTM, Philadelphia, p353-p379.
2. “Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements”, ACI 216R-89, American Concrete Institute, 1989.
3. 林銅柱,“鋼筋混凝土結構物耐火設計研習會演講稿”,國立台灣工業技術學院
4. 黃清賢,“建築與防火”,徐氏基金會,1988.
5. 盧天財,“纖維加勁高強度混凝土版之耐火性能”,國立交通大學土木工程研究所碩士論文,(2002)
6. 劉靖國,“高強度鋼筋混凝土梁火害撓曲行為之研究”,國立台灣工業技術學院碩士論文,(1992)
7. 李中彥,“玻璃纖維貼片補強混凝土版之貫穿剪力行為”,碩士論文,國立交通大學土木工程研究所,(1998)
8. 林炳炎,“混凝土的耐火性能及熱性質”,營建世界,1986
9. Rixom M.R. & Mailvaganan, N.P. "Chemical Admixtures for Concrete", E, & F.N. Spon,London,1986,2nd edition,p.306。
10. Khoury, G. A. (1992) “Compressive Strength of Concrete at High Temperatures: a Reassessment “ Magazine of Concrete Research, Vol. 44, No. 161, pp. 291-309.
11. 陳舜田,“建築物火害及災後安全評估法”國立台灣科技大學營建工程系,1999

表一 試體加熱終了各點熱電耦線溫度

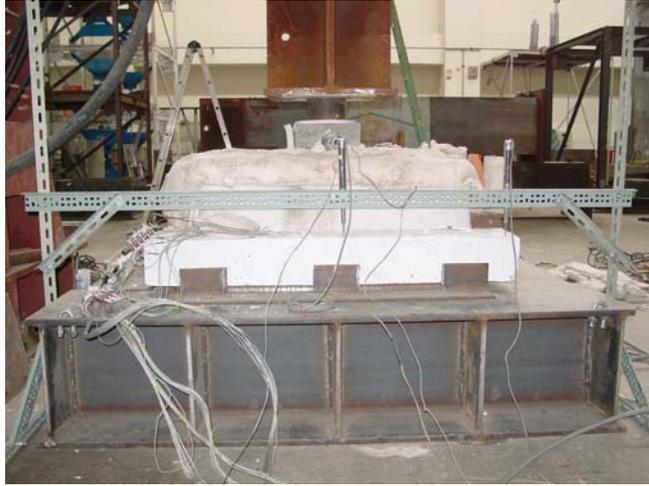
試體加熱終了各點熱電耦線溫度								
	深度	a	b	c	d	e	f	溫度平均
280-2hr	2.25cm	318	313	300	345	380	340	332.665
	4.5cm	194	189	179	160	219	175	185.995
	7.5cm	131	139	115	130	155	125	132.16
280-3hr	2.25cm	426	317	261	386	466	318	362.33
	4.5cm	185	298	207	286	250	245.33	230.495
	7.5cm	142	189	142	180	166	142	167
560-2hr	2.25cm	204	177	179	223	179	155	186.16
	4.5cm	143	132	168	154	136	134	144.495
	7.5cm	116	111	142	122	115	108	119
560-3hr	2.25cm	407	464	499	389	412	422	432.16
	4.5cm	244	282	320	242	223	285	266
	7.5cm	140	208	223	184	157	174	180.995

表二 殘餘貫穿剪力強度

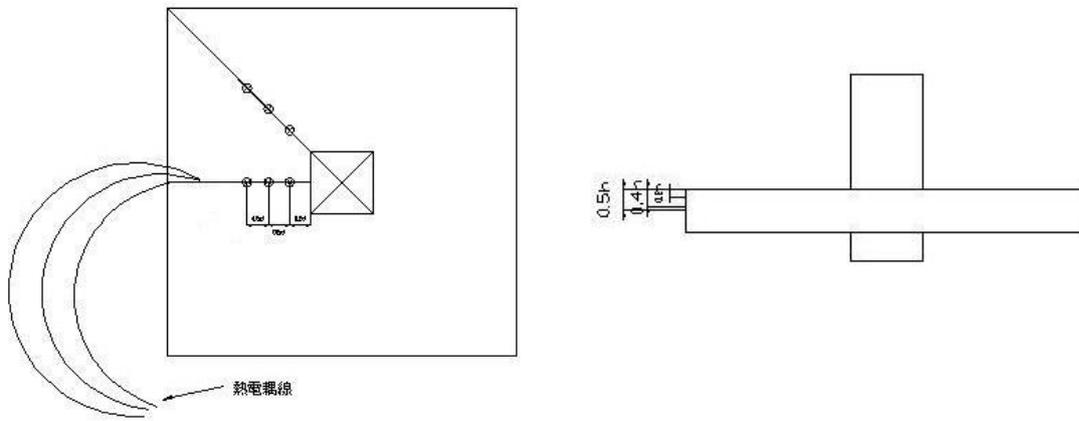
試體編號	受火害面	壓力鋼筋比	拉力鋼筋比	混凝土抗壓強度 f' (MPa)	版厚度(cm)	加熱情形(hr)	試驗荷重 (ft)	計算荷重 (ft)
1a	受壓面	0.18	1.24	28	15	0	65.26844	42.71
2a	受壓面	0.18	1.24	28	15	2	52.0441	38.1
3a	受壓面	0.18	1.24	28	15	3	47.62582	37.5
4b	受壓面	0.18	1.24	56	15	0	66.63222	60.4
5a	受壓面	0.18	1.24	56	15	2	54.62753	57.4
6a	受壓面	0.18	1.24	56	15	3	31.9106	51.9



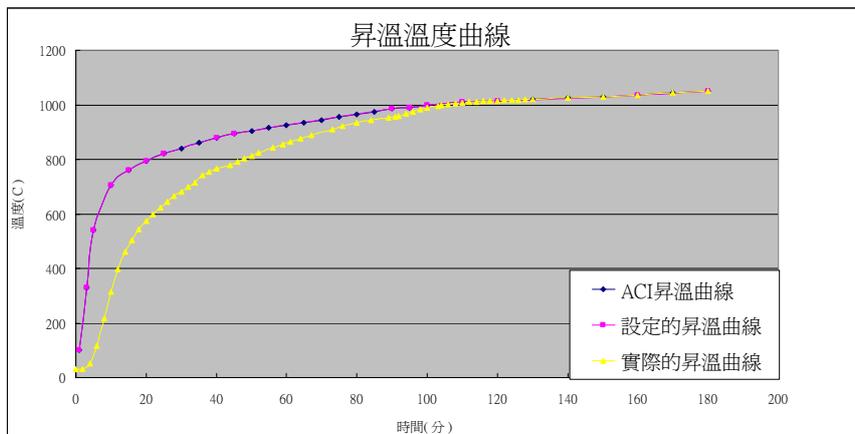
圖一 試驗設備裝置圖



圖二 試驗設備裝置照片



圖三 熱電偶線裝置圖



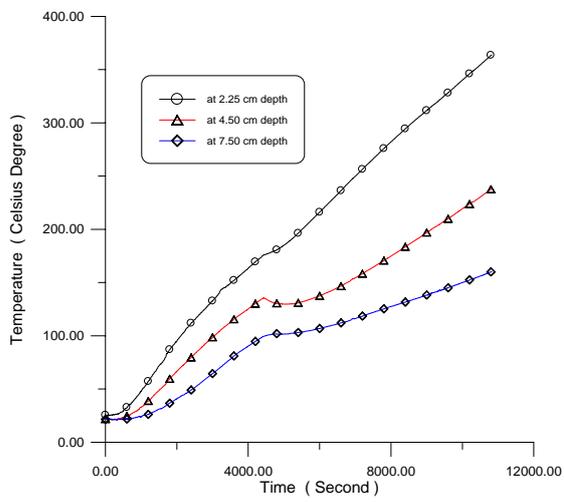
圖四 升溫曲線圖



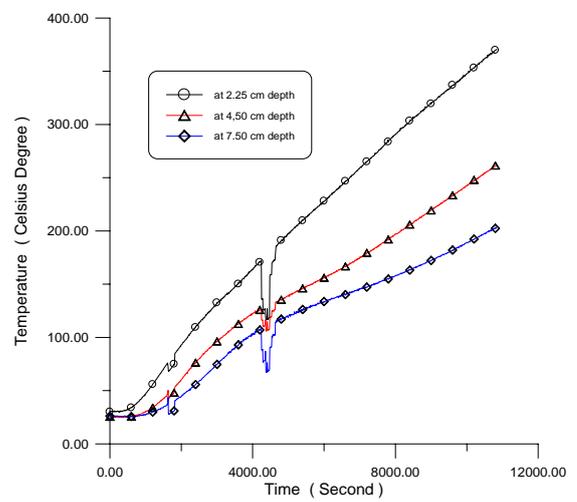
圖五 試體破壞頂面照片



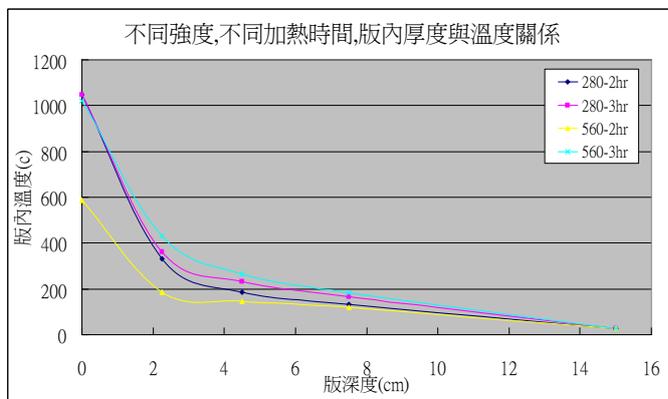
圖六 試體破壞底面照片



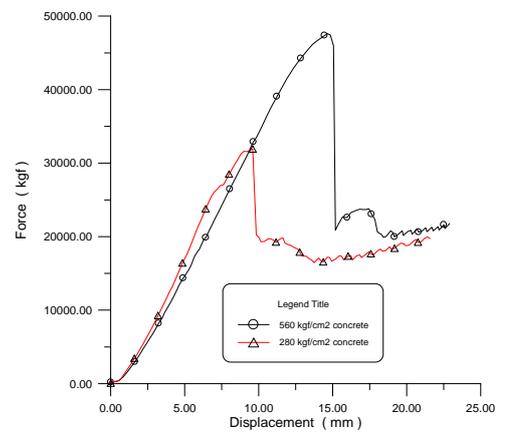
圖七 4000psi 混凝土升溫歷時圖



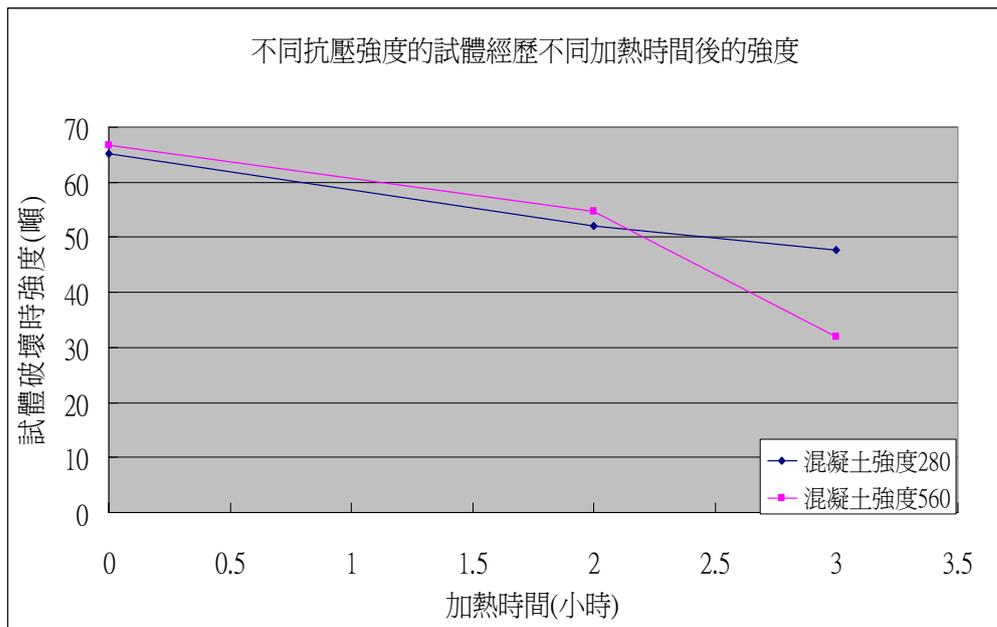
圖八 8000psi 混凝土升溫歷時圖



圖九 深度與溫度關係圖



圖十 力量與變位關係圖



圖十一 殘餘貫穿剪力強度