

臺灣二〇〇四年國際科學展覽會

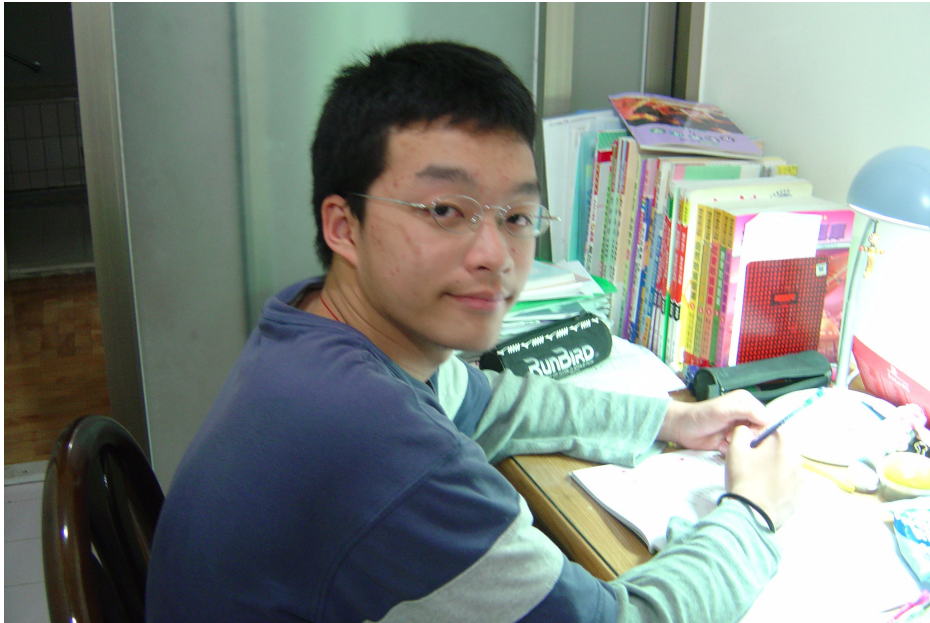
科 別：工程學科

作品名稱：美國紐約世貿中心大樓為何倒塌

學 校：臺北市立民族國民中學

作 者：陳一葦、楊皓鈞

作者簡介



我出生於平凡安康的小家庭，從小我的個性就很開朗，樂觀，總是笑不離口，所以爸媽都叫我快樂小子，曾於國小五年級時隨家到日本，也在日本小學唸了一年，這一年讓我學會簡單的日文，也開擴了我的視野。現在也是民族國中學生自治會會長。我酷愛運動尤其特愛籃球，也代表參加市中運游泳賽。目前最大的希望是我能順利通過學測，考上理想高中。



楊皓鈞，今年 14 歲，興趣是打球與玩電腦等等這一類沒什麼建設性的活動。最喜歡體育跟理化，因為運動可以讓我忘記一些不愉快的事，而理化這門科目可以做很多很多有趣的實驗，而且處處都充滿了驚奇，嗯…最拿手的應該是與打球與繪畫它們都可使我放鬆心情。希望這次的活動可以讓我有更多一分的成長、多一分的收穫及認識更多的人，使自能更了解自己。

ABSTRACT

Why Did World Trade Center Collapse

The World Trade Center in New York City was collapsed after attacked by the terrorist. Although the design of this building did not consider the attack by the terrorist, however, this event also exposed the weakness of a high-rise building. This study is aimed at examining the cause of the collapse of the World Trade Center. A series of experimental studies was carried out to examine the strength of steel material under elevated temperature. Experimental studies were also performed on model steel frames under fire to simulate the situation of World Trade Center under fire. It is found that the strength of steel structure decayed under fire event. The upper stories lost its support from the floor that was subjected to fire load and the collapse of the floor under fire induced impact load from the upper stories. Progressive failure occurred on the subsequent floors due to the impact from the upper stories. This phenomenon was also observed in the experimental study of the model frame tests. This study has successful reproduced the failure mode of the World Trade Center in New York City.

摘要

紐約世界貿易中心大樓在遭遇恐怖份子攻擊後倒塌，雖然大樓之設計可能並未考慮恐怖份子的攻擊，但此次事件亦暴露超高層大樓的脆弱，本研究乃探討紐約世貿大樓破壞之原因，研究過程中首先以一系列之試驗探討鋼鐵材料在高溫下之行爲，尤其是高溫對鋼材強度之影響。其次並進行鋼骨模型骨架受火燒之破壞試驗，發現在高溫燒烤下鋼骨軟化而失去承載能力，而無法承載上方樓層之重量，上方樓層倒塌後往下形成一衝擊力，並造成往下連續之衝擊，最後導致整體結構倒塌，模型結構試驗亦證實世貿大樓之破壞模式。

壹、前言

2001 年 9 月 11 日的晚上，我正做完功課，打開電視準備要休息一下，沒想到眼前出現了令人驚悚的畫面：「一架飛機正往美國紐約世貿大樓飛，然後筆直地撞了上去」。起先我還以為是電影，但是後來發現不是，紐約世貿大樓開始燃燒，且產生大量的濃煙，過了一段時間大樓直直的倒下來，此時我心頭出現很多問題，例如：為何飛機會撞到世貿大樓？為何大樓被飛機撞到會倒塌？為何世貿大樓被飛機撞到後在一個多小時後才倒塌？而健教課程下冊第三章中也剛好討論到火災的問題，且寒假作業中也要討論 911 事件賓拉登回教徒與美國的衝突，911 世貿大樓倒塌已成為生活中常被討論的問題，而在這些問題中除了知道大樓被撞是恐怖份子所為外，摩天大樓為何如此脆弱一直困惑著我們，因此想以此研究來解答我們心中的疑惑。而因鋼骨在高溫下軟化可能是世貿大樓倒塌的原因，因此首先探討高溫對鋼鐵材料強度的影響，希望能對此有些基本知識，其次並以鋼骨結構模型模擬世貿大樓受火害的情形，以探討世貿大樓倒塌的原因。

貳、研究方法與過程

由 911 事後報章雜誌的報導中，得知世貿大樓是用鋼骨所建造，我們假設世貿大樓是因為飛機的汽油燃燒建築物的鋼骨，使鋼骨軟化而倒塌，因此我們設計了兩個實驗，分別是(一) 鋼鐵材料在不同溫度下的強度實驗，(二) 世貿大樓模型受火燒的結構破壞實驗。希望透過這兩種實驗來研究鋼鐵受高溫燃燒軟化時強度的變化，及世貿大樓鋼骨結構受高溫軟化對大樓倒塌的影響，以下分別說明這兩個試驗。

一、鋼筋在不同溫度下的強度實驗

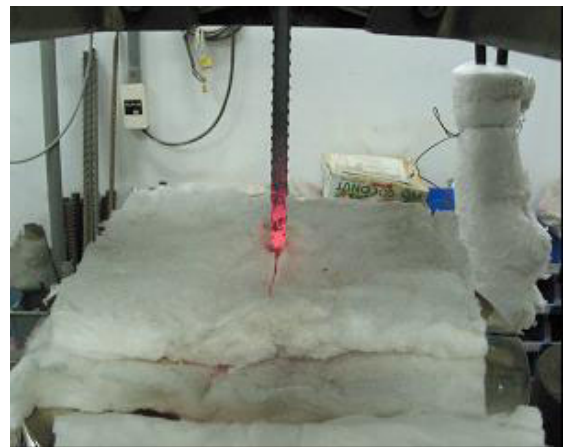
此試驗之目的在於探討鋼筋在不同溫度下所能承受的力量大小，試驗時乃利用圖一之材料試驗機首先測試鋼筋在室溫下的強度，再將圖二之高溫電爐置放於試驗機中，將鋼筋通

過高溫爐，並將高溫爐加熱到攝氏 $200^{\circ}C$ 、 $400^{\circ}C$ 、 $600^{\circ}C$ 、 $800^{\circ}C$ 、 $900^{\circ}C$ 時再將鋼筋拉斷，以測試鋼筋的拉力強度變化。試驗之照片見圖三~圖八。

圖 一 材料試驗機(中間為高溫爐)



圖 二 高溫爐



圖三 鋼筋在加熱中



圖四 加熱溫度為 900 度



圖五 加熱溫度為 911 度



圖六鋼筋在高溫下被拉斷



圖七 以遊標尺測量鋼筋直徑



圖八 鋼筋在不同溫度下被拉斷 (由上至下分別為室溫、 200°C 、 400°C 、 600°C 、 800°C 、 900°C ，最下方為試驗前之原來鋼筋)

二、世貿大樓模型受火燒的結構實驗

在完成鋼筋受高溫時強度變化的材料試驗後，也希望知道當以此類鋼鐵材料做成大樓模型後，此類模型結構是否會如同紐約世貿大樓般倒塌，因此乃再進行世貿大樓模型的火燒倒塌實驗。因此乃將鋼筋銲接連結成骨架，放上重物，見圖九~圖十一。再用噴燈燃燒，觀察其變化，見圖十二。研究過程如下：

1. 先做一個 20cm x 20cm x 20cm 的測試骨架，在其最上層加上載重，但未用火燒，並且不斷加重，直到其倒塌，以測試可以加多少的重量，記錄倒塌情形，以瞭解其承受載重的能力，由於在高溫下強度將下降，因此室溫下之試驗可以協助瞭解骨架最大強度之範圍，避免測試骨架過強，在火燒下仍無法破壞，因此本次試驗可作為後續進行火燒試驗的參考。
2. 做一個 30cm x 30cm x 30cm 較大的骨架，以方便放置載重鐵塊。並在上面放大約 70kg 的重物，並用噴燈燃燒，直到倒塌下來為止，記錄倒塌情形。
3. 開始進行多層骨架的測試，此次做了一個 20cmx20cmx20cm 的三層骨架，在第一層加重 2 kg 模擬一般樓層重量，第二層 5.4 kg 模擬樓層重及飛機重，第三層 32.7 kg 模擬上部樓層總重，並用噴燈燒直到倒塌為止，記錄倒塌情形。
4. 依據前幾次的經驗，考量噴燈燒烤的位置及鐵塊加載的方式，修正骨架的大小，並設計模擬飛機撞擊樓層及上下樓層的世貿大樓模型骨架，修正骨架的大小，此次做了三個 25cm x 25cm x 25cm 的四層骨架，每一個骨架第一層 4.6 kg（模擬正常的樓層重量），第二層放 11.4 kg 的重量（模擬樓層重量再加上飛機的重量），第三層加重 21.8 kg（模擬飛機撞擊點上面部份樓層的重量），第四層加重 24.3 kg（此亦模擬飛機撞擊樓層上面部份的重量）。每一個骨架都燒了大約十分鐘，用噴燈燒直到倒塌為止，記錄倒塌情形。



圖九 學銲接(不過最後試體仍請專人銲接)



圖十 以小模型模擬世貿大樓



圖 十一 量鋼塊的重量

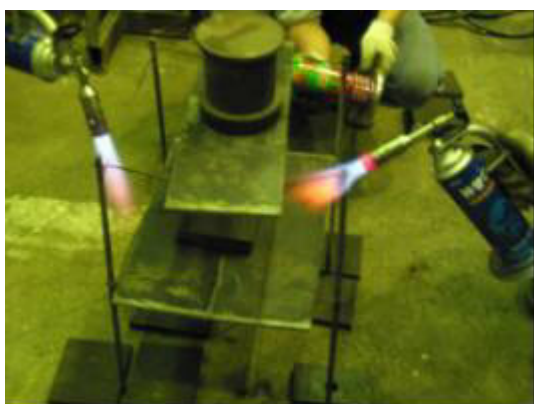


圖 十二 以噴燈燃燒鋼架

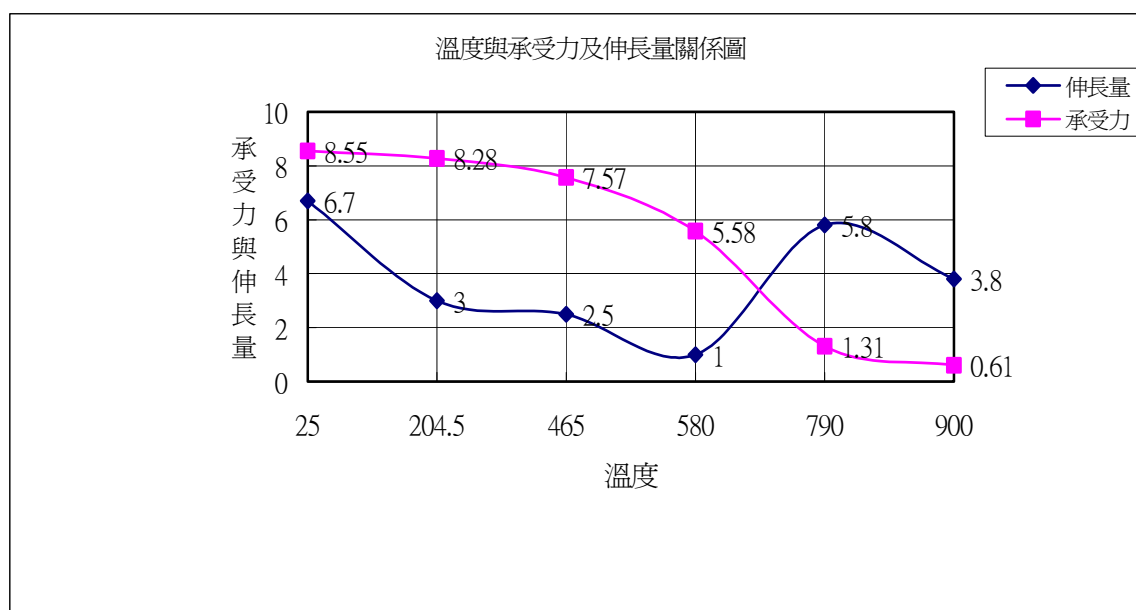


圖十三 鋼架在高溫燒烤下倒塌

參、研究結果與討論

一、鋼筋在不同溫度下的強度實驗

我們用材料試驗機，測出溫度分別在室溫、 200°C 、 400°C 、 600°C 、 800°C 、 900°C 度時鋼筋的強度變化，結果如圖十四：



圖十四 溫度與鋼筋承受力(公噸)與伸長量(公分)關係圖

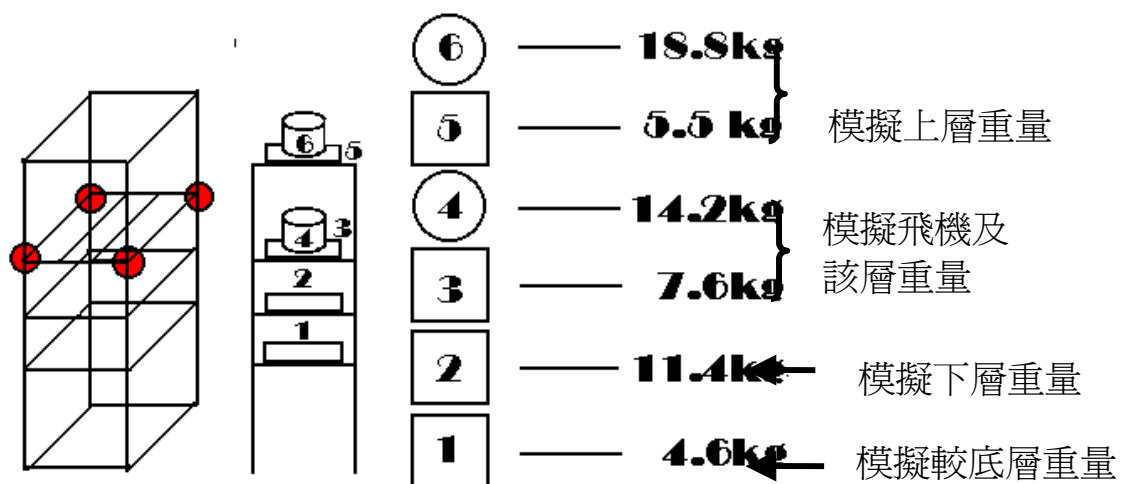
由上圖中可發現溫度超過攝氏二百多度時，鋼筋的強度即開始下降，超過五百度時其強度即急遽下降，而鋼筋在 900°C 時，它的強度嚴重下降，只剩原來在室溫時強度的百分之七。而量測鋼筋拉斷後之伸長量則發現鋼筋在溫度增加後其伸長量逐漸降低，但超過 580°C 後其伸長量則再加大，呈現軟化之現象，當溫度接近攝氏八百度時，不僅其強度下降，且因鋼筋變軟，受拉的伸長量亦相對的增加甚多。

二、 世貿大樓模型受火燒的結構實驗

1. 先做一個 20cm x 20cm x 20cm 的骨架，並且不斷加重，使其倒塌（測試可以加多少的重量）結果在 120~140 kg 就倒塌下來。由此試驗得知在類似之骨架，若加上火燒，其載重將小於 140 kg，此可作為後續試驗骨架設計之參考。
2. 做一個 30cm x 30cm x 30cm 的骨架，上面放大約 50 kg 的鐵塊，並用噴燈燃燒，本應在 600~700°C 之間倒塌，但是到達 1000 多°C 後尚未倒塌，後來又加了 20

kg的重物才倒塌下來，但是並沒從中整個倒塌。由此試驗中得知在高溫下，骨架仍可承擔 70kg 的載重，而骨架銲接時品質不一，致其破壞模式並非從中間破壞。

3. 做了一個 20cm x 20cm x 20cm 的三層骨架，在第一層加重 5.2 kg，第二層 5.4 kg，第三層 32.7 kg，才燒一下就倒塌，主要原因仍是銲接不良。
4. 決定以 25cm x 25cm x 25cm 的骨架作較詳細之研究，共做了三個 25cm x 25cm x 25cm 的四層骨架，每一個骨架第一層 4.6 kg（模擬正常的樓層重量），第二層放 11.4 kg 的重量（模擬樓層重量再加上飛機的重量），第三層加重 21.8 kg（模擬飛機撞擊點上面部份樓層的重量），第四層加重 24.3 kg（此亦模擬飛機撞擊樓層上面部份的重量）。骨架之加熱點及重物放置情形如下圖。每一個骨架都燒了大約十分鐘，其結果是：第一個骨架沒有從中間倒塌，反而向側方向倒塌（主因是有一根鋼筋沒有焊好，使重量不平均所致），第二個骨架又有一根鋼筋沒焊好，雖然在急救後修好，但是有一根已經燒得變形太大，所以可能又影響了倒塌。第三個骨架很成功的由中間倒塌，與世貿大樓倒塌的情形一樣。



圖十五 加熱點及重物放置圖

四、討論

1. 鋼筋在不同溫度下的強度實驗

當鋼筋受高溫時其強度逐漸下降，當溫度超過 400℃ 時強度開始大幅下降，尤其當溫度到 900℃ 時其強度僅剩 7% 左右。世貿大樓受波音 767 飛機撞擊，估計飛機所攜帶之汽油有 50 噸左右，燃燒一個小時溫度應已超過 900℃，其鋼骨材料強度已嚴重受損，強度不足。

2. 世貿大樓模型受火燒的結構實驗

模型試驗所受的變數甚多，如在拿噴燈時，手會晃動，使其無法一直在一定點加熱，會影響實驗的溫度，可能對結果有影響。而若重物沒有很準確的放在正中間，或鋼筋銲接的牢度不一致也會影響倒塌方向。但最後仍然成功的模擬出類似於紐約世貿大樓倒塌的模式，亦即僅在中間某一層加以燒烤，仍造成整體大樓的破壞，且破壞亦為瞬間向下倒塌之模式，如圖十三。

肆、結論與建議

在本研究中從動手作這些試驗，讓我們學習到甚多的知識，尤其是竟然可以用簡單的原理來嘗試說明世貿大樓的破壞原因，但也由於受限於設備及我們目前的知識有限，希望將來能有機會再對此主題作更深入的探討，以下為這次我們所得的一些結論與建議：

1. 鋼鐵材料受熱後強度逐漸減低，尤其當溫度高達 900°C 時其強度已低於 7% 以下。
2. 世貿倒塌之主要原因是飛機撞擊後其所攜帶之大量汽油產生大火之燒烤，大火之燒烤在一個多小時後，鋼骨溫度已高達溫度 900°C 以上，把鋼骨燒軟，造成大樓倒塌。
3. 世貿大樓向下倒塌模式，是因中間受飛機撞擊層軟掉，而上面之樓層重量太重，當底下之樓層失去支撐力時，上面之樓層重量產生向下衝擊力，所以倒塌時就一層一層的往下壓下來，此與迷你模型試驗時最後之破壞為瞬間向下倒塌之模式相同。
4. 在進行鋼筋拉力試驗時，在高溫爐外包上耐火棉，以免加溫時高熱散佈出來，影響到萬能試驗機，我們想如果鋼骨外面也包上耐火棉，應該也可避免鋼骨被大火直接燒烤而軟化，不過最重要的是不要有恐怖份子的破壞，不然實在很難防範。
5. 本研究雖證實鋼鐵在高溫下強度嚴重下降，但其何以下降，牽涉冶金的理論，希望以後能有機會再學習。
6. 依據建築設計之要求(見參考文獻 1)，高樓應有三小時的耐火災燃燒的能力，但世貿大樓燃燒一小時多即倒塌，可能是飛機的汽油太多，再加上飛機的撞擊破壞，但這是恐怖份子的攻擊，應該是一種特例，也希望不再有恐怖份子，否則實在很難防範。

伍、參考文獻

1. 內政部營建署，建築技術規則，營建雜誌社，63 頁，民國九十年
2. 金文森，現代營建，263 期，29~38 頁，民國九十年
3. 人民網 <http://www.people.com>
4. 銀河快報 <http://www.arch.net.tw>