

後置式膨脹錨栓之耐震性能測試

鄭皓澤／行政院原子能委員會核能研究所 研發助理工程師

柴駿甫／國家地震工程研究中心 研究員

廖文義／國立台北科技大學土木工程學系 教授

林凡茹／國家地震工程研究中心 助理研究員

林震宇／國家地震工程研究中心 佐理研究員

摘要

後置式膨脹錨栓為藉由膨脹擴座產生錨定力以抵抗拉力與剪力，因其施工方便及可調整度高，實務工程上已廣泛被應用於非結構物與連接物之固定。為探討常見後置式錨栓安裝於無裂縫與有裂縫混凝土基材之耐震性能，本研究依據 ACI 355.2 規範後置式錨栓測試相關規定，進行拉力與剪力破壞試驗、耐震試驗與反覆載重試驗，比較在不同基材下其性能之差異性。由試驗結果得知，混凝土之裂縫對錨栓承載力影響甚大，其極限承載力與彈性勁度比無裂縫之混凝土降低許多，破壞模式亦有所不同。此外，比較各組試驗資料可知，錨栓經由反覆載重後之極限承載力與破壞試驗直接所測得之極限承載力差距甚微。最後，以 ACI 318 規範附錄 D 之公式計算膨脹錨栓承載力並與試驗值比較，ACI 318 規範計算強度與試驗比較下仍屬保守，另由計算強度值與試驗值的差異也可看出各種設計參數之影響程度，本論文試驗結果與建議期能為將來膨脹錨栓相關設計上之參考。

研究動機

台灣建築物大部分是鋼筋混凝土結構，遇到地震或自然破壞等災害，都會造成建築物基礎、柱、樑等結構強度降低或受損，若非結構物設備在震中也受到損壞，則可能發生漏水或淹水等嚴重的二次災害。所

以重要建築物內如何提升非結構物設備的耐震能力，使其不會在地震中因震動損壞降低本身能力，便是一件很重要的課題。錨栓在營建工程上的應用極為廣泛，在於非結構物連接上，扮演極重要的角色，依施作方式不同分為預埋式及後置式，而後置式錨栓由於施工簡易，已廣泛被工程界應用於多種不同的結構物與連著物上，不論在新建結構物或老舊建築的維修及改建方面均提供了比預埋式錨栓更大的使用彈性。因此，本文主要針對後置式錨栓進行研究，其屬於非結構物中不可或缺的角色，依摩擦力方式有化學錨栓、水泥砂漿填塞錨栓及膨脹錨栓，其中以膨脹錨栓在國內建築物中使用率甚高，膨脹錨栓之抗拉強度影響因素包括錨栓種類、外管徑、埋入深度、混凝土強度、錨栓擴座力、混凝土埋置邊距與二個以上間距之錨栓等，但是業界對於膨脹錨栓之擴座錨定原理並非全然瞭解，使得正確的施工程序不受重視，且已施作完成的膨脹錨栓是否完善亦無從檢核，因此可能影響其強度而使無法滿足實際地震力下的相對強度。

地震災害後，醫院在救災當中最重要的一環，當設計醫院時，所需考慮的項目甚多，除了一般建築物所具有的結構體及設備物外，還必須包括滿足不同醫療工作所需的管線及醫用設備。當醫院有大量傷患時，這些設備之設置目的在於協助醫護人員提供必要的緊急醫療與援助，進而有效率的執行各種醫療救護工作。然而審視設計醫院的過程，便會發現對於建築

物抵抗地震能力的比重，只著重於主結構體，而醫院內其餘各部分，都沒能發揮有效的耐震能力。美國加州對於醫院的耐震設計中，雖自 1970 年代起便已致力於提昇非結構物的耐震性能，但在 1994 年的北嶺地震中，仍有好幾間醫院因為非結構物沒有完善的耐震考慮，導致醫院無法在震後立即使用^[1]。在九二一地震之後，災區中大部分醫院建築結構耐震方面皆有傑出的表現，至少都能達到保有原貌及仍有顧及建築物內人員安全的程度，不幸的是院內功能性設施的損壞，導致醫療設備物無法發揮正常的性能，使得醫院醫療功能受阻甚至無法運作，未能在災後第一時間發揮緊急醫療功能，因此醫院中各項非結構物若能保有足夠的耐震強度，便相對提高了醫療設備的經濟價值。

近年來各項工程建設中經常使用吊桿懸吊重要管線，因此鋼筋混凝土與吊桿間的確實接合，是非常重要的課題。在施工時所使用材料的性質與錨定物的各項條件，都與安全有密切的關係，故擬定一套完善的接合設計規範是有其必要性。有鑑於工程界及學術界對膨脹錨栓的受力行為尚未能充分了解，且相關的設計規範未能建立，基於以上考量，本研究乃選擇敲擊式膨脹錨栓埋設於鋼筋混凝土中作為研究的主體，以國內進行懸吊式設備物耐震設計為參考依據，建立一套承受抗拉及抗剪之反覆載重的測試模式，施作於無裂縫與有裂縫之混凝土基材，嘗試探討在不同的基材所表現的力學行為與耐震強度，期望能提供結構設計者有所依據。

試驗標準與測試波

本節先介紹膨脹錨栓試驗所使用之相關規範與試驗所採用之測試波。ACI 355.2「Qualification of Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete and Commentary (ACI 355.2-07)」^[2] 為 ACI 318 規範附錄 D^[3] 認可之後置式膨脹錨栓測試準則，測試對象包括無裂縫或有裂縫之混凝土基材中的後置式膨脹錨栓，試驗結果可用以確認膨脹錨栓強度是否高於規範之設計強度值，或是依據 ACI 355.2 規範^[2] 之試驗結果，作為 ACI 318 規範附錄 D^[3] 錨定設計之設計參數值。

拉力測試波

主要測試錨栓於裂縫混凝土與無邊距效應之影響下，而受到地震拉力負載時之耐震性能情況。進行此試驗，混凝土基材裂縫寬度應在 0.5 mm 以上，採用正弦拉伸載重如圖 1 所示。假定各試驗之錨栓鋼材極限強度值皆相同，分為三階段施加反覆拉力，反覆次數各為 10 次、30 次及 100 次，第一階段的拉力值為 N_{eq} ，其為錨栓極限承載力之 50%；第二階段的拉力值 N_i 為 $0.75N_{eq}$ ；而第三階段的拉力值 N_m 則是 $0.50N_{eq}$ ，此 N_{eq} 值由下式計算之：

$$N_{eq} = 0.5F_{u, test, 3} \sqrt{\frac{f_{c, test, 12}}{f_{c, test, 3}}} \quad (1)$$

其中， $F_{u, test, 3}$ 為拉力極限承載力平均值， $f_{c, test, 12}$ 為受震模擬試驗之混凝土抗壓強度， $f_{c, test, 3}$ 為破壞試驗（本文稱為 Case I）之混凝土抗壓強度，另外，本試驗用之混凝土抗壓強度皆相同，故 $f_{c, test, 12}$ 與 $f_{c, test, 3}$ 值相等。

剪力測試波

主要測試錨栓於裂縫混凝土與無邊距效應之影響下，而受到地震剪力負載時之耐震性能情況。進行此試驗，混凝土基材裂縫寬度應在 0.5 mm 以上，採用正弦剪力載重如圖 2 所示，且裂縫面應平行於施力方向。假定各試驗之錨栓鋼材極限強度值皆相同，分為三階段施加反覆剪力，反覆次數各為 10 次、30 次及 100 次，第一階段的剪力值 $\pm V_{eq}$ ，其定為極限承載力 $F_{5\%}$ 之 50%；第二階段的剪力值 $\pm V_i$ 為 $0.75 \pm V_{eq}$ ；而第三階段的剪力值 $\pm V_m$ 則是為 $0.50 \pm V_{eq}$ ，上述之 $\pm V_{eq}$ 值由下式計算之：

$$F_{5\%} = F_m(1 - Kv) \quad (2)$$

$$V_{eq} = 0.5 \cdot F_{5\%} \quad (3)$$

Load level	N_{eq}	N_i	N_m
Number of cycles	10	30	100

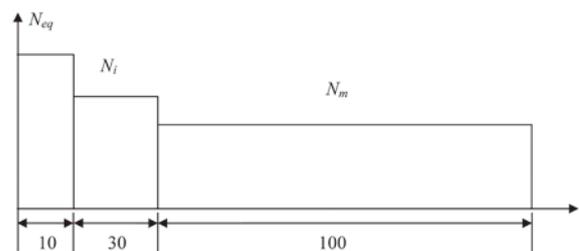


圖 1 ACI 355.2 之拉力受震模擬試驗測試波

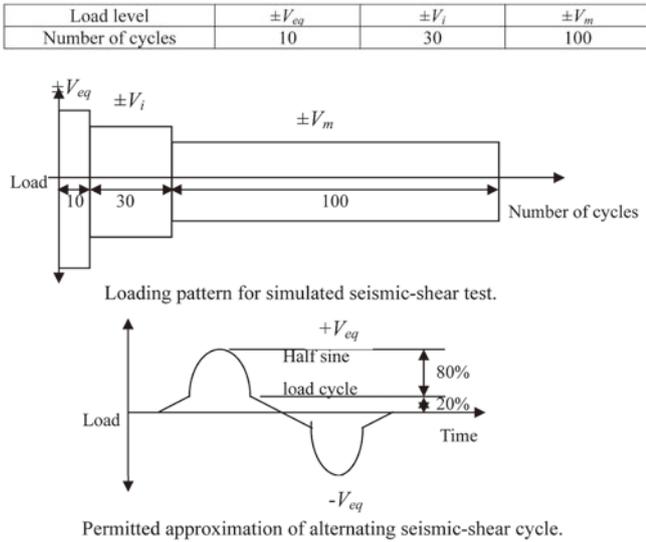


圖 2 ACI 355.2 之剪力受震模擬試驗測試波

其中， F_m 為極限承載力平均值， K 為統計常數（如表 1 所示）， v 為變異係數。

表 1 統計常數 K

Number of tests	K
2	13.090
3	5.310
4	3.957
5	3.400
6	3.091

拉力試驗

本拉力試驗之目的在探討敲擊式膨脹錨栓承受拉力之力學行為，其包含破壞模式、極限承載力及力量與變位的關係。探討膨脹錨栓於拉力試驗中，由兩種（有無裂縫）不同混凝土基材比較其結果，本研究採用之試驗條件如下：

1. 混凝土塊基材設計強度為 210 kgf/cm²
2. 不考慮邊距及埋置深度影響
3. 於無裂縫、有裂縫影響下比較拉力強度的折減情況

試驗架構與儀器配置

1. 混凝土

本研究試驗用之混凝土設計強度為 210 kgf/cm²，混凝土基材分為無裂縫與有裂縫兩種試體，其尺寸分別為 300 × 30 × 15 cm 與 240 × 30 × 15 cm 兩種試體設計圖如圖 3 所示，錨栓埋置深度皆為 4 cm，為避免邊距效應之影響，依 ACI 318 規範附錄 D [3] 之埋置點

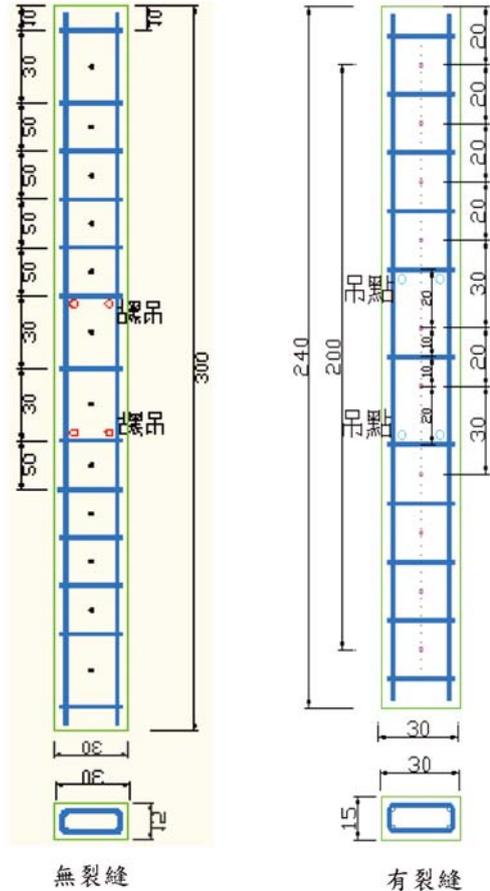


圖 3 拉力試驗不同尺寸之矩形混凝土塊

與邊距均預留 1.5 倍以上的距離，於試體澆置完後，經實際 28 天抗壓試驗結果，混凝土 28 天抗壓強度為 234 kgf/cm²。無裂縫混凝土試體共有兩組，為避免混凝土強度不同兩組皆是採同一批混凝土進行灌置，每一組試體之錨栓邊距、深度都相同，錨栓埋置數量總共有 12 個孔位，依試驗方式不同分配不同點數施作，再將其結果討論與比較；有裂縫混凝土試體亦共有兩組，同樣採同一批混凝土灌置，每一組試體之錨栓邊距、深度都相同，錨栓埋置數量總共 8 個孔位。混凝土表面裂縫製作之方法，參考 ACI 355.2 規範 [2] 進行，其裂縫寬度都在 0.5 mm 以上，且深度都達 9 cm 以上，且裂縫面應垂直於施力方向。

2. 試驗設備與配置

參考 ASTM E488 [4] 之拉力試驗設備如圖 4 所示。加入本試驗配置自行設計組裝之膨脹錨栓拉力試驗設備如圖 5 所示，用以量測膨脹錨栓埋設於無裂縫與有裂縫之混凝土基材，求得單獨拉力作用時，力量與位移之關係。

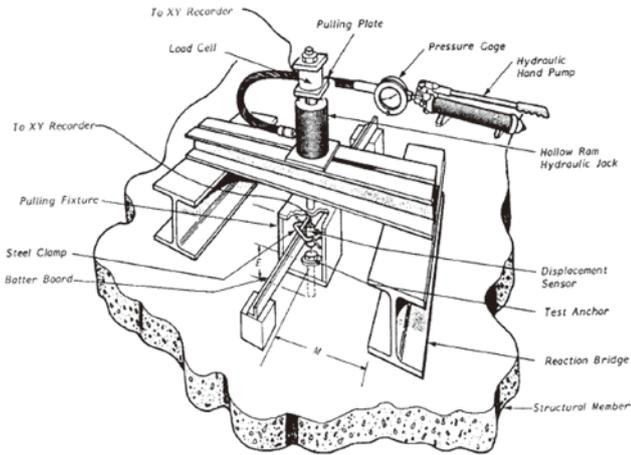


圖 4 ASTM E488 拉力試驗機制

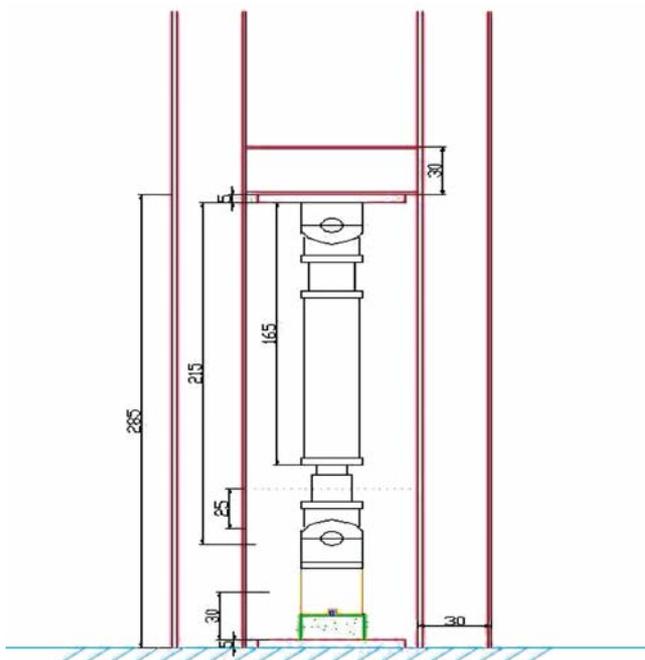


圖 5 拉力試驗配置與示意圖

試驗方法與參數

1. 試驗方法

先進行破壞試驗求得膨脹錨栓之極限承載力。為了瞭解膨脹錨栓於受震過後之極限承載力變化，將上述試驗結果運用於 ACI 355.2 規範^[2]之測試波測試，待施加完畢後，再以破壞試驗之步驟作用拉力至錨栓破壞為止；為了更明確得知膨脹錨栓於彈性範圍之曲線情況，先進行反覆載重試驗測試，試驗完畢後之結果再與上述試驗相互比較。

2. 試驗參數

(1) 破壞試驗 (Case I)

前置作業完成後，啟動資料擷取器與油壓機，並以位移控制方式執行試驗，以連續式之加載速率（每秒 0.1 mm）施加於錨栓上，由千斤頂帶動箱型接合器拖動螺桿施加拉力於膨脹錨栓上直到破壞。

(2) 受震模擬試驗 (Seismic test)

膨脹錨栓之受震模擬試驗，目的在模擬震動發生時錨栓強度之變化情形。試驗配置如同上述，因試驗機制無法以地震歷時方式輸入，為了模擬動態地震力之情況，加載方式選用 ACI 355.2 規範^[2]與破壞試驗 (Case I) 之降伏強度依圖 1 規定製作如圖 6 所示之波形，並以力量控制方式執行試驗，使反覆拉力載重垂直於剪力面施作。分為三階段施加反覆拉拔力，反覆次數各為 10 次、30 次及 100 次，加載頻率均為 200 Hz（週期為 0.005 sec）進行試驗。第一階段的拉力值 N_{eq} ，本文其定為錨栓破壞試驗 (Case I) 極限承載力之 50%；第三階段的拉力值 N_m 為降伏強度之 25%；而第二階段的拉力值 N_i 則是 N_{eq} 與 N_m 之中值。另一方面，ACI 355.2 規範^[2]之拉力加載歷時主要適用於有裂縫混凝土，為了使有無裂縫之混凝土試驗結果能相互比較，而使用無裂縫混凝土之承載力代替有裂縫混凝土之極限承載力，作為受震模擬試驗中 N_{eq} 大小的依據。為了求得無裂縫之承載力，由破壞試驗 (Case I) 的結果找出各點曲線上前段較陡之彈性勁度，再以梯形積分公式計算出各點曲線所圍至位移 4 mm 之面積，求出各點面積與彈性勁度之平均值，並利用已知條件得出承載力。

(3) 破壞試驗 (Case II)

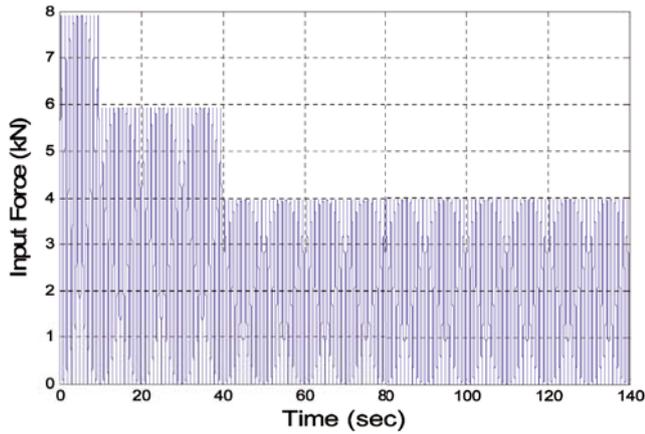


圖 6 拉力受震模擬試驗測試波

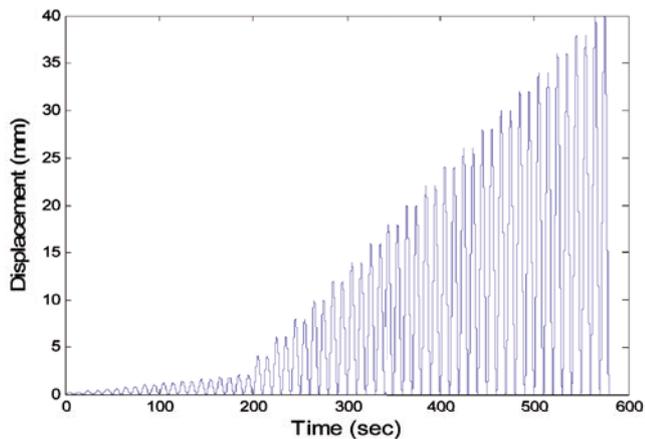


圖 7 拉力反覆載重試驗測試波

膨脹錨栓經由受震模擬試驗完畢後，並以位移控制方式執行試驗，以連續式之加載速率（每秒 0.1 mm）施加於錨栓上，由千斤頂帶動箱型接合器拖動螺桿施加拉力於膨脹錨栓上直到破壞為止，Case II 與 Case I 不同處僅在於 Case II 為先經受震模擬試驗再拉拔至破壞。

(4) 反覆載重試驗

膨脹錨栓之反覆載重試驗，目的在討論承受反覆載重下錨栓試驗之力變形曲線變化情況。試驗配置如同上述，加載方式選擇使用正弦波形作為反覆拉力之施加方式，並以位移控制方式執行試驗，如圖 7 所示，由階梯方式一直加至最大位移 40 mm。由圖中可看出，此測試波之每兩個迴圈產生一個振幅，以連續式之加載速率（每 20 秒 0.2 mm）施加於錨栓上，測試波前 200 秒為較小之振幅，此段目的是為了得知錨栓於彈性階段之曲線變化情況；而於 200 秒後之加載速率為每 20 秒 0.4 mm，此段則為了得知錨栓於塑性階段之曲線變化情況。

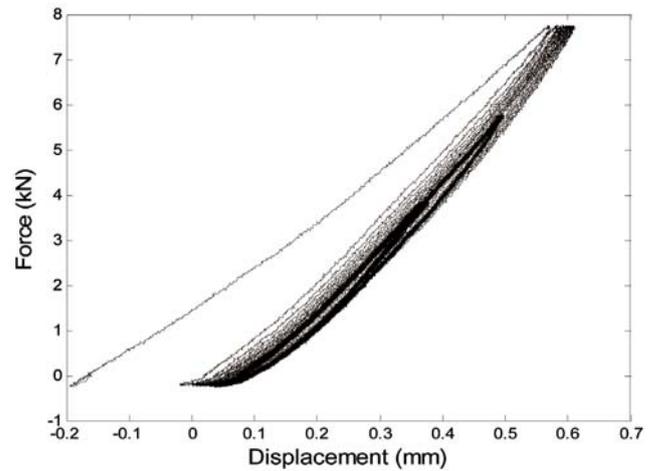


圖 8 受震模擬試驗之力與變位關係圖

試驗結果與參數

1. 拉力試驗

(1) 拉力破壞試驗（Case I）

本試驗不論是無裂縫混凝土或有裂縫混凝土之錨定破壞模式，均為錨栓拔出破壞並伴隨混凝土部分承拉面碎裂現象，亦為 ACI 318 規範附錄 D [3] 所列之膨脹錨栓常見的拉力破壞模式之一。

試驗中依不同基材之混凝土試驗結果如表 2 所示，錨栓承載力方面，錨栓並無因經過受震後有明顯降低。另一方面，由表中明顯看出，無裂縫混凝土相較於有裂縫混凝土之試驗結果較高，故證實裂縫對於膨脹錨栓之承載力與彈性勁度影響甚大。

表 2 拉力試驗結果

		試驗方法	平均點數	極限承載力 (kN)	彈性勁度 (kN/mm)
混凝土基材	無裂縫	破壞試驗 (Case I)	4	17.93	17.79
		受震模擬試驗	4		17.94
		破壞試驗 (Case II)	4	17.49	18.56
		反覆載重試驗	6	19.12	16.34
	有裂縫	破壞試驗 (Case I)	5	14.32	4.00
		受震模擬試驗	6		13.62
		破壞試驗 (Case II)	2	17.48	10.76
		反覆載重試驗	3	15.68	13.25

(2) 拉力受震模擬試驗與破壞試驗 (Case II)

如圖 8 所示，以測試所得之極限拉力強度 50% 作為加載振幅，並依據 ACI 355.2 [2] 規定之加載歷時進行加載。圖中可觀察出，試驗斜率大致相近，由於 ACI 355.2 [2] 測試波之特性，可看出試驗大致上分為三組迴圈，依序往下遞減。若由表 2 拉力破壞試驗 (Case I) 結果與受震模擬試驗後之拉力破壞試驗 (Case II) 結果可看出，受震模擬試驗後之錨栓承载力相近於破壞試驗 (Case I) 之錨栓，代表受震模擬試驗之加載對破壞強度影響有限。

(3) 拉力反覆載重試驗

同拉力破壞試驗，本試驗不論是無裂縫混凝土或有裂縫混凝土之錨定破壞模式，均為錨栓拔出破壞並伴隨混凝土部分承拉面碎裂現象。

試驗中依不同基材之混凝土試驗結果如表 2 所示，由表中明顯看出，無裂縫混凝土相較於有裂縫混凝土之試驗結果較高，故證實裂縫對於膨脹錨栓之承载力與彈性勁度影響甚大。

剪力試驗

本剪力試驗之目的在探討敲擊式膨脹錨栓承受剪力之力學行為，其包含破壞模式、極限承载力及力量與變位的關係。探討膨脹錨栓於剪力試驗中，由兩種不同混凝土基材比較其結果，本研究試驗相關條件如下：

1. 混凝土塊設計強度為 210 kgf/cm²
2. 不考慮邊距及埋置深度影響
3. 探討無裂縫、有裂縫影響下剪力強度的折減情況

試驗架構與儀器配置

1. 混凝土

同拉力試驗，本研究試驗用之混凝土設計強度為 210 kgf/cm²，混凝土基材亦分為無裂縫與有裂縫兩種試體，其尺寸分別為 300 × 30 × 15 cm 與 240 × 30 × 15 cm 兩種試體設計圖如圖 9 所示，錨栓埋置深度皆為 4 cm，同樣為避免邊距效應影響，依 ACI 318 規範附錄 D [3] 之埋置點與邊距均預留 1.5 倍以上的距離，另混凝土 28 天抗壓強度為 234 kgf/cm²。無裂縫混凝土試體共有兩組，混凝土強度、錨栓邊距、深度都相同，錨栓埋置數量總共有 12 個孔位，依試驗方式不同分配不同

點數施作，再將其結果討論與比較；有裂縫混凝土試體亦有兩組，錨栓埋置數量總共 8 個孔位。混凝土表面裂縫製作之方法，需參考 ACI 355.2 規範 [2] 進行，其裂縫寬度 0.5 mm，且深度達 9 cm，且裂縫面應垂直於施力方向。依試驗方式不同分配不同點數施作，再將其結果討論與比較。

2. 試驗設備與配置

參考 ASTM E488 [4] 之剪力試驗設備如圖 10 所示。加入本試驗配置自行設計組裝之膨脹錨栓剪力試驗設備如圖 11 所示，用以量測膨脹錨栓埋設於無裂縫與有裂縫之混凝土基材，求得單獨剪力作用時，力量與位移之關係。

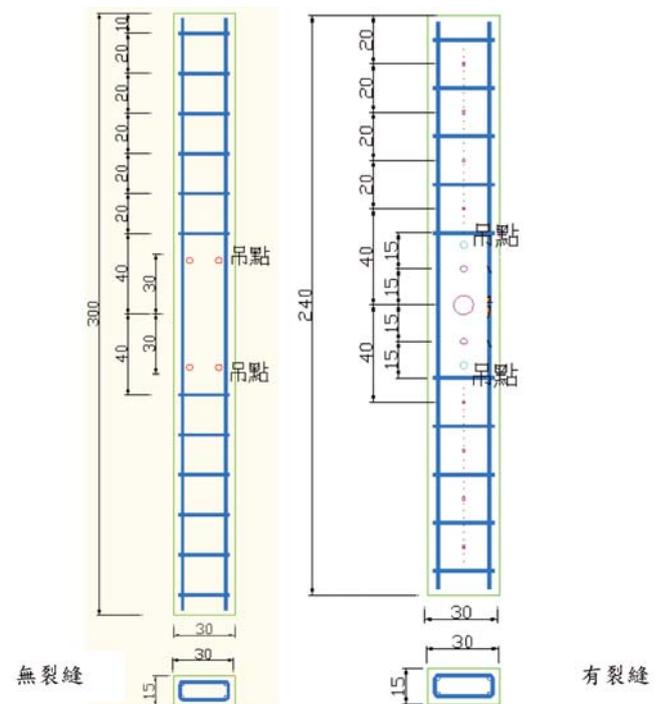


圖 9 剪力試驗不同尺寸之矩形混凝土塊

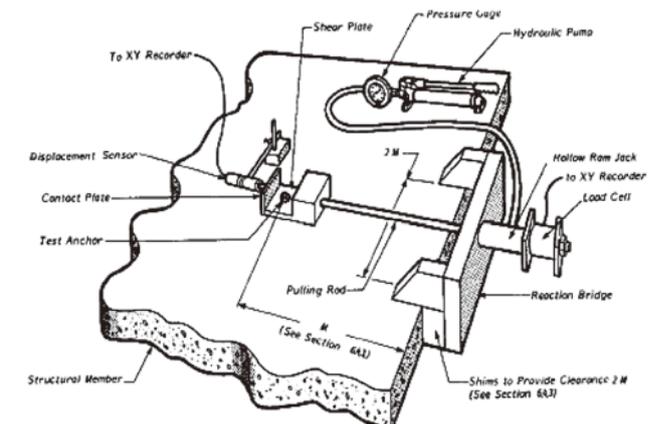


圖 10 ASTM E488 剪力試驗機制

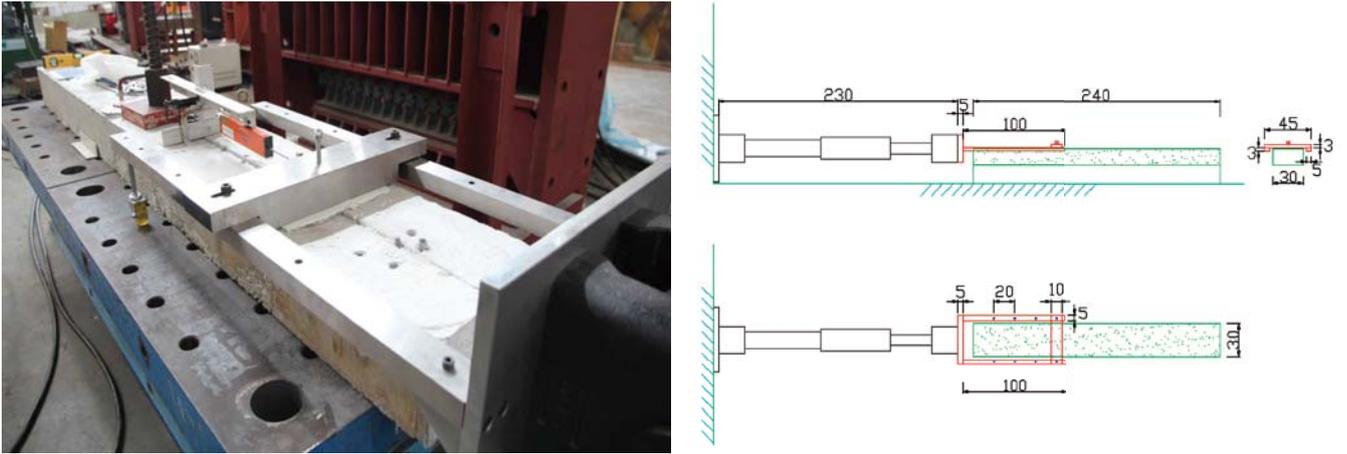


圖 11 剪力試驗配置與示意圖

試驗方法與參數

1. 試驗方法

先進行破壞試驗求得膨脹錨栓之極限承載力。為了瞭解膨脹錨栓於受震過後之極限承載力變化，將上述試驗結果運用於 ACI 355.2 規範^[2]之測試波測試，待施加完畢後，再以破壞試驗之步驟作用剪力至錨栓破壞為止；為了更明確得知膨脹錨栓於彈性範圍之曲線情況，而進行反覆載重試驗測試，試驗完畢後之結果再與上述試驗相互比較。

2. 試驗參數

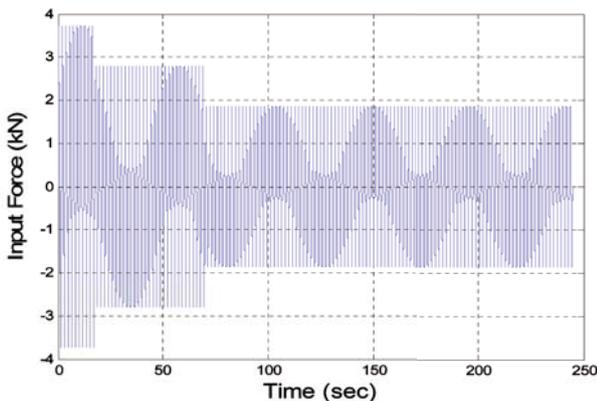
(1) 破壞試驗 (Case I)

前置作業完成後，啟動資料擷取器和油壓幫補，並以位移控制方式執行試驗，以連續式之加載速率（每秒 0.1 mm）施加於錨栓上，由千斤頂帶動夾具於螺桿，單一方向剪力載重平行於剪力面施作直到破壞。

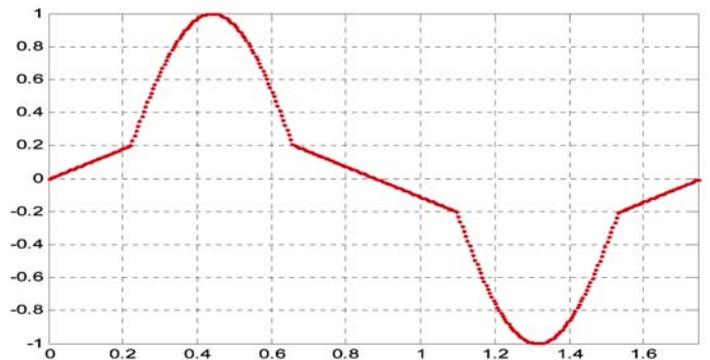
(2) 受震模擬試驗 (Seismic test)

膨脹錨栓之受震模擬試驗，目的在模擬震動發生時錨栓強度之變化情形。試驗配置如同上述，因試驗機制無法以地震歷時方式輸入，為了模擬動態地震力之情況，加載方式選用 ACI-355.2 規範^[2]與破壞試驗之極限承載力製作如圖 12 所示，並以力量控制方式執行試驗，使反覆剪力載重平行於剪力面施作。分為三階段施加反覆剪力，反覆次數各為 10 次、30 次及 100 次，加載頻率均為 200 Hz（週期為 0.005 sec）進行試驗。第一階段的剪力值 $\pm V_{eq}$ ，本文將其定為破壞試驗 (Case I) 之極限承載力 $F_{5\%}$ 之 50%；第三階段的剪力值 $\pm V_m$ 為第一階段的剪力值 $\pm V_{eq}$ 之 50%；而第二階段的剪力值 $\pm V_i$ 則是 $\pm V_{eq}$ 與 $\pm V_m$ 之中值。待三階段的反覆力施加完畢後，再以破壞試驗 (Case I) 的步驟施加剪力至錨栓破壞為止。

(3) 破壞試驗 (Case II)



(a)



(b)

圖 12 剪力受震模擬試驗測試波；(a) 為整體波形，(b) 為 0 至 1.8 秒單一波形圖。

膨脹錨栓經由受震模擬試驗完畢後，並以位移控制方式執行試驗，以連續式之加載速率（每秒 0.1 mm）施加於錨栓上，由千斤頂帶動夾具於螺桿，單一方向剪力載重平行於剪力面施作直到破壞。

(4) 反覆載重試驗

膨脹錨栓之反覆載重試驗，目的在承受反覆載重之下錨栓試驗結果曲線之變化情況。試驗配置如同上述，加載方式選擇使用正弦波形作為反覆剪力之施加方式，並以位移控制方式執行試驗，由階梯方式至最大位移 ±40 mm 如圖 13 所示。由圖中可看出，此測試波之每兩個迴圈產生一個振幅，以連續式之加載速率（每 20 秒 0.2 mm）施加於錨栓上，測試波前 200 秒為較小之振幅，此段為了得知錨栓於彈性階段之曲線變化情況；而於 200 秒後之加載速率為每 20 秒 0.4 mm，此段為了得知錨栓於塑性階段之曲線變化情況。

試驗結果與參數

1. 剪力試驗

(1) 剪力破壞試驗 (Case I)

本試驗不論是無裂縫混凝土或有裂縫混凝土之錨定破壞模式，均為螺桿斷裂破壞，亦為 ACI 318 規範附錄 D [3] 所列之膨脹錨栓常見的剪力破壞模式之一。

試驗中依不同基材之混凝土試驗結果如表 3 所示，錨栓承載力方面，錨栓並無因經過受震後有明顯降低。另一方面，由表中明顯看出，無裂縫混凝土相較於有裂縫混凝土之試驗結果較高，故證實裂縫對於膨脹錨栓之承載力與彈性勁度影響甚大。

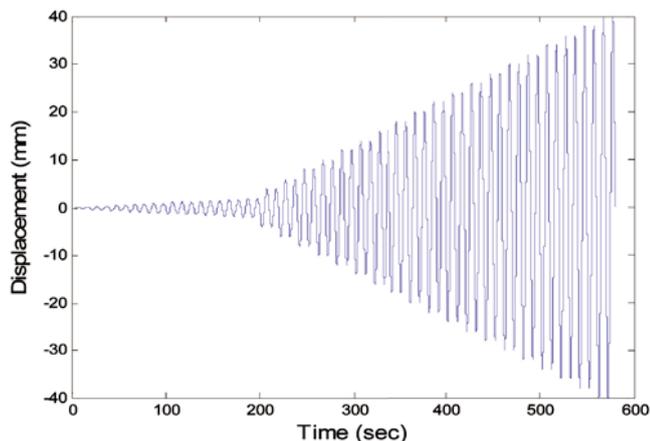


圖 13 剪力反覆載重試驗測試波

表 3 剪力試驗結果比較

		試驗方法	平均點數	極限承載力 (kN)	彈性勁度 (kN/mm)
混凝土基材	無裂縫	破壞試驗 (Case I)	4	13.24	8.57
		受震模擬試驗	3		3.63
		破壞試驗 (Case II)	3	13.78	12.73
		反覆載重試驗	3	13.25	4.63
	有裂縫	破壞試驗 (Case I)	4	11.02	6.67
		受震模擬試驗	6		3.08
破壞試驗 (Case II)		6	8.32	4.94	

(2) 剪力受震模擬試驗

如圖 14 所示，此試驗結果測試所得之極限剪力強度 $f_{5\%}$ 之 0.5 作為加載振幅，並依據 ACI 355.2 [2] 規定之加載歷時進行加載。

圖中明顯觀察出，在第一圈加載時較不穩定，但其後試驗即趨於穩定，且斜率隨著反覆加載的次數增加而有明顯趨緩的情形，顯示強度確實有因此而降低；若由剪力破壞試驗 (Case I) 結果與受震模擬試驗後之剪力破壞試驗 (Case II) 結果可看出，受震模擬試驗後之錨栓承載力相近於破壞試驗 (Case I) 之錨栓。

試驗結果與規範設計強度比較

目前膨脹錨栓已逐漸被廣泛運用，固定於混凝土基材之膨脹錨栓設計，可參照內政部頒布之「結構混

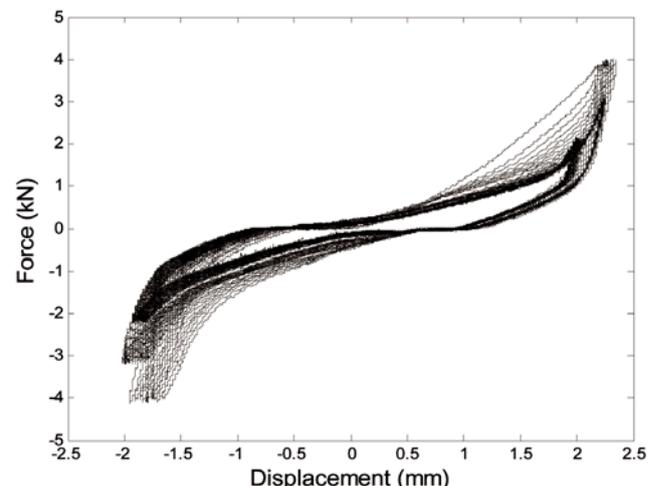


圖 14 受震模擬試驗之力與變位關係圖

「混凝土設計規範」附錄 D 或美國 ACI 318 規範附錄 D^[3]。本章先介紹各設計公式之內容，再將膨脹錨栓之試驗結果與後置式錨栓公式計算值進行比較，從比較得知雙方的差距，進而得知若在實務上使用膨脹錨栓，以 ACI 318 規範附錄 D^[3] 之公式評估膨脹錨栓的承載力是否合適，或是該做出若干的修正，另外由 ACI 318 規範附錄 D^[3] 公式計算值與實際值的差異也可看出各種設計參數是否恰當，希望能作為將來膨脹錨栓設計規範修訂之參考。

ACI 318 設計公式

在 ACI 318 規範附錄 D^[3] 有後置式錨栓中的膨脹式及削切式錨栓之規範，本試驗之錨栓適用於 ACI 318 規範附錄 D^[3] 膨脹錨栓之相關規定。規範之設計強度，取下列破壞型式設計值之最小值：

一、拉力：

(1) 鋼材破壞 (Steel failure) 強度：

$$N_{sa} = nA_{se}f_{uta} \quad (4)$$

其中 n 為錨栓根數， N_{sa} 為預埋式擴頭錨或彎鉤錨栓之鋼材拉力強度， A_{se} 為單根螺桿的有效拉力斷面積， f_{uta} 為錨定螺桿鋼材抗拉極限強度（不能超過 $1.9f_{ya}$ 與 $8,750 \text{ kgf/cm}^2$ (125000 psi)）。

(2) 混凝土破壞 (concrete breakout) 強度：

$$N_{cb} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}}\psi_1\psi_2\psi_3N_b \quad (5)$$

$$N_b = k_c\sqrt{f'_c}h_{ef}^{1.5} \quad (6)$$

其中 N_{cb} 為單根錨栓之混凝土拉破強度， N_b 為單根錨栓於有裂縫混凝土之混凝土拉破強度， $A_{Nco} = 9h_{ef}^2$ 為邊距或間距不是控制因素之單根錨栓混凝土破壞之投影面積， A_{Nc} 為邊距或間距控制因素之單根錨栓之混凝土破壞之投影面積， f'_c 為混凝土抗壓強度， h_{ef} 為埋置深度， $k_c = 10$ 為預埋式錨栓， $k_c = 7.2$ 為後置式錨栓， ψ_i 為設計參數，以 $c_{a,min}$ 為最小邊距，則 $\psi_1 = 1$ 為邊距效應修正因數，若 $c_{a,min} \geq 1.5h_{ef}$ ； $\psi_2 = 1.0$ 為有裂縫混凝土； $\psi_2 = 1.4$ 為無裂縫混凝土； $\psi_3 = 1$ 若 $c_{a,min} \geq c_{ac}$ ，臨界邊距 c_{ac} 。

由於式 (6) 之 k_c 值為 ACI 318 規範^[3] 經由大量的無裂縫混凝土試驗數據以 5% 失敗率強度定義決定，且

ACI 318 規範^[3] 中有說明，若錨栓有依據 ACI 355.2 規範^[2] 進行試驗，則 N_b 須用式 (7) 求得之 $F_{N5\%}$ 取代，並以式 (8) 檢核 k_c 是否於合理範圍內，如表 4 所示。

表 4 ACI 355.2 規定後置式錨栓之混凝土拉破強度範圍

試體	最小值	最大值
無裂縫混凝土	10	13
有裂縫混凝土	7	9

$$F_{N5\%} = F_m(1 - Kv) \quad (7)$$

$$k_c = \frac{F_{N5\%}}{\sqrt{f'_c}h_{ef}^{1.5}} \quad (8)$$

其中 $F_{N5\%}$ 為單根錨栓之混凝土拉破強度推算 5% 失敗率強度， F_m 為拉力極限承載力平均值， K 為統計常數（如表 1 所示）， v 為變異係數。

如表 4 所示，若 k_c 於合理範圍內或大於規範所要求之範圍，此時拉力強度計算公式應選用為混凝土破壞公式計算；若 k_c 小於規範所要求之範圍，此時拉力強度計算公式應選用為拉脫破壞公式計算。

(3) 拉脫 (Pullout failure) 強度：

$$N_{pn} = \psi_4 N_p \quad (9)$$

其中 N_{pn} 為單根錨栓之拔出強度， N_p 為單根錨栓於有裂縫混凝土之拔出強度， ψ_i 為設計參數，則 $\psi_4 = 1.0$ 為有裂縫混凝土； $\psi_4 = 1.4$ 為無裂縫混凝土。

由於 ACI 318 規範附錄 D^[3] 所示之拉脫強度僅適用於預埋式的擴頭錨栓及彎鉤錨定物，不能應用於膨脹錨栓之強度計算，必須依據後置混凝土錨栓品質試驗方法之試驗結果推算 5% 失敗率強度而得 $F_{Np5\%}$ 值，因此本文以式 (10) 代入式 (9) 計算膨脹錨栓之拉脫強度 N_{pn} 。

$$F_{Np5\%} = F_m(1 - Kv) \quad (10)$$

其中 $F_{Np5\%}$ 為單根錨栓之拔出強度推算 5% 失敗率強度， F_m 為拉力極限承載力平均值， K 為統計常數（如表 1 所示）， v 為變異係數。

二、剪力：

(1) 鋼材破壞 (Steel failure) 強度：

$$V_{sa} = n0.6A_{se}f_{uta} \quad (11)$$

$$F_{V_{5\%}} = F_m(1 - Kv) \quad (12)$$

其中 n 為錨栓根數， V_{sa} 為預埋式擴頭錨或彎鉤錨栓之鋼材剪力強度， $F_{V_{5\%}}$ 為單根錨栓之鋼材剪力強度推算 5% 失敗率強度， A_{se} 為單根螺桿的有效剪力斷面積， f_{uta} 為錨定螺桿鋼材抗拉極限強度（不能超過 $1.9 f_{ya}$ 與 $8,750 \text{ kgf/cm}^2(125000 \text{ psi})$ ）， F_m 為剪力極限承载力平均值， K 為統計常數（如表 1 所示）， v 為變異係數。

ACI 318 規範附錄 D^[3] 說明後置式錨栓之剪力強度由鋼材破壞強度控制， V_{sa} 必須設定為依據後置式混凝土錨栓品質試驗方法之試驗結果為佳，否則可採用式 (11) 為替代性計算公式。

試驗值與規範計算值之比較

由於本文拉力試驗之結果皆為混凝土破壞，因此以設計規範式 (5) 代入計算比較。由表 5 中可歸納出以

下兩種結論：(1) 無裂縫混凝土之 N_{cb} 與 $F_{N_{5\%}}$ 計算值相較下，顯示 N_{cb} 值遠大於 $F_{N_{5\%}}$ 值，故設計規範式 (5) 中之設計參數 ψ_2 代入 N_{cb} 結果較不保守。(2) 由設計規範中 k_c (7.2) 求得 N_{cb} 與有無裂縫混凝土之 N_{cb} 計算值相較下，顯示規範值小於試驗值，故規範值較為保守。

剪力試驗之結果皆為螺桿斷裂，因此以設計規範式 (12) 代入計算比較。另外，也會將相同之試驗數據代入式 (11)，以兩種不同之設計規範公式與試驗結果作比較，由表 6 中可看出，設計規範之 $F_{V_{5\%}}$ 計算值遠小於最小試驗值，顯示規範為使失敗率降至 5%，同時本試驗樣本數據少，因此若要採用本試驗值推算設計值，須將試驗值降低至相當保守的剪力強度設計值。設計規範之 V_{sa} 計算值大於最小試驗值，顯示規範式 (11) 會高估膨脹錨栓之抗剪強度，因此並不適合於膨脹錨栓抗剪預估。

表 5 拉力試驗結果與設計規範比較

	試驗	極限承载力 平均值 F_m (kN)	統計常數 (K)	變異係數 (v)	k_c	$F_{N_{5\%}}$ (kN)	N_{cb} (kN)	規範計算值 N_{cb} (kN) 【註 1】	誤差百分比 (%)		
									【註 2】	【註 3】	
混凝土 基材	無裂縫	破壞試驗 (Case I)	17.93	3.96	0.14	6.6	7.96	15.13	12.10	90	-20
		破壞試驗 (Case II)	17.49	3.96	0.13	7.0	8.51	12.43		46	-2
	有裂縫	破壞試驗 (Case I)	14.32	3.40	0.04	9.0	10.80	10.80	8.64	-20	
		破壞試驗 (Case II)	16.79	5.31	0.08	7.4	8.88	8.88		-2	

- 【註】1. 規範計算值 N_{cb} 之 k_c 為 7.2
- 2. 誤差百分比 = $(N_{cb} - F_{N_{5\%}}) / F_{N_{5\%}}$
- 3. 誤差百分比 = $(\text{規範計算值 } N_{cb} - N_{cb}) / N_{cb}$

表 6 剪力試驗結果與設計規範比較

	試驗	極限承载力 平均值 F_m (kN)	統計常數 (K)	變異係數 (v)	最小試驗值 (kN) 【註 1】	規範計算值 $F_{V_{5\%}}$ (kN)	規範計算值 V_{sa} (kN)	誤差百分比 (%)		
								【註 2】	【註 3】	
混凝土 基材	無裂縫	破壞試驗 (Case I)	13.24	3.96	0.08	12.41	9.05	16.58	-27	33
		破壞試驗 (Case II)	13.78	5.31	0.05	13.03	10.34		-20	27
	有裂縫	破壞試驗 (Case I)	11.02	3.96	0.09	9.97	6.94		-30	66
		破壞試驗 (Case II)	8.32	3.09	0.15	7.18	4.47		-38	130

- 【註】1. 最小試驗值為試驗中最小之極限承载力
- 2. 誤差百分比 = $(\text{規範計算值 } F_{V_{5\%}} - \text{最小試驗值}) / \text{最小試驗值}$
- 3. 誤差百分比 = $(\text{規範計算值 } V_{sa} - \text{最小試驗值}) / \text{最小試驗值}$

結論與建議

結論

本研究主要利用試驗方法針對敲擊式膨脹錨栓在相同混凝土強度、錨栓深度與邊距情況下，分別進行抗拉與抗剪之破壞試驗、受震模擬試驗及反覆載重試驗的結果進行探討，並配合有無裂縫之混凝土基材，觀察錨栓受影響之程度，由本研究之試驗結果可歸納出下列幾點結論：

1. 裂縫對於膨脹錨栓抗拉、抗剪極限承載力與彈性勁度影響甚大。當膨脹錨栓施作於有裂縫混凝土基材內，錨栓與混凝土之握裹力降低許多，因而混凝土產生半錐形破壞模式，無法發揮預期強度。
2. 同樣是進行拉力破壞試驗之情況下，受震模擬試驗後之錨栓承載力強度與彈性勁度相近於破壞試驗 (Case I) 之錨栓，因此膨脹錨栓於 ACI 355.2 規範^[2] 之測試波反覆載重作用下，錨栓依然保持原有強度。
3. 同樣是進行剪力破壞試驗之情況下，受震模擬試驗後之錨栓承載力相近於破壞試驗 (Case I) 之錨栓，但彈性勁度為不穩定，因此膨脹錨栓於 ACI 355.2 規範^[2] 之測試波反覆載重作用下，錨栓雖然保持原有承載力，但彈性勁度會因混凝土或鋼材控制而變化。
4. 由於試驗中所用之混凝土係由廠商所提供，其相同時間澆置確有不同之抗壓強度，因此本研究之試驗結果可能無法準確得知錨栓埋置於相同混凝土中的強度，在後續研究中應盡量於相同之混凝土試體施作，避免數據差異甚大。
5. 由試驗值與 ACI 318 規範附錄 D^[3] 之設計值比較，得知以下結論：敲擊式膨脹錨栓之試驗值均較 ACI

318 規範附錄 D^[3] 的後置式錨栓規範計算值大，發現若以 ACI 318 規範附錄 D^[3] 估計錨栓之承載力，結果較為保守。

建議

因為膨脹錨栓之強度與破壞模式會受到錨栓本身材質、混凝土條件及施工等因素影響，因此少許之試驗數據會額外不同，然而大致上還是保留與其它數據相同之趨勢。下列幾點建議，後續研究時應盡量避免或加強，並提供對後續可能之研究方向。

1. 為了確保安裝錨栓的一致性，其中錨栓埋置深度與垂直度影響甚大，因此建議在鑽孔時應使用輔助工作以確保埋置深度與垂直度，減少其誤差。
2. 在發生地震時，建築物以不規則情況下劇烈晃動，拉力與剪力可能同時發生於錨栓，建議可採用模擬地震力之試驗，並施加拉力與剪力之反覆作用，以得知錨栓受地震等反覆力的影響。

參考文獻

1. 黃喬俊，「消防撒水系統耐震問題研究」，國立成功大學建築研究所碩士論文，民國九十二年。
2. ACI Committee 355, 《Qualification of Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete and Commentary (ACI 355.2-07)》，American Concrete Institute, Detroit, 2007.
3. ACI Committee 318, 《Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318R-05)》，American Concrete Institute, Detroit, 2005.
4. ASTM E488, 《Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete and Masonry Elements》，ASTM International, United States, 2003.
5. ASCE 7-05, 《Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures》，American Society of Civil Engineers, 2006.
6. 「建築物耐震設計規範及解說」，內政部營建署頒布，2011 年。



社團法人
中國土木工程學會
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

電話：(02) 2392-6325

傳真：(02) 2396-4260

e-mail: service@ciche.org.tw

一個凝聚產官學土木專業知識的團體
一個土木人務必加入的專業學術團體
一個國際土木組織最認同的代表團體
一個最具歷史且正轉型蛻變中的團體

歡迎加入學會



<http://www.ciche.org.tw>
請上網下載入會申請表