

行政院原子能委員會 委託研究計畫研究報告

鋼筋混凝土開裂試體及裂縫修補試 體製作與測試

計畫編號：932001INER007
受委託機構：朝陽科技大學
計畫主持人：鄭家齊
報告日期：93.11.30

目錄

一、中文摘要.....	1
二、英文摘要.....	2
三、計畫目的.....	3
四、計畫緣起.....	4
五、執行方法與進度.....	5
5.1 試驗規劃與方法.....	5
5.1.1 膨脹水泥性質試驗.....	5
5.1.2 大型混凝土版開裂試驗.....	8
5.2 結果與討論.....	15
5.2.1 膨脹水泥性質試驗.....	15
5.2.2 大型混凝土版試驗.....	20
六、結論與建議.....	26
6.1 結論.....	26
6.2 建議.....	26
七、參考文獻.....	27

一、中文摘要

配合開發核設施混凝土結構體安全評估技術之需求，本計畫的主要目的在製作鋼筋混凝土自然水平開裂縫裂縫於版塊試體。由於製作出不同的開裂裂縫寬度，試體可做為裂縫修補工法之成效評估試塊，並可在修補與未修補之相同破壞狀況之試體進行 NDT 測試，透過研究比對，建立修補後評估技術之背景資料以及提供土木非破壞檢測判讀實習與技術校正。

本計畫製作四塊 1 m×2 m×0.4 m 之混凝土版塊試體，其中兩塊為純混凝土，兩塊內含網格排列鋼筋試體，每個試體之裂縫寬度及形式均相同，其中一塊純混凝土及一塊含鋼筋試體預計日後提供為修補試體。其混凝土強度及鋼筋尺寸配置均模擬圍阻體底版結構，其混凝土水平裂縫為自然開裂，開裂方式是以膨脹水泥注入事先剖開並埋入試體之塑膠管中，膨脹水泥以數小時時間內將混凝土自然開裂，在裂縫裂至預期寬度時再將膨脹水泥抽出。本計畫成功製造出 1mm、3mm 及 5mm 之水平大面積裂縫。

含修補及未修補裂縫試體完成後，可進行非破壞檢測評估，檢測方法預計包括敲擊回音檢測、透地雷達檢測及陣列式超音波檢測。其中敲擊回音試驗結果是以最新研發之轉換函數資料處理法來分析，此法與陣列式超音波探測的方法均為評估裂縫修補狀況之創新研究方式。

二、英文摘要

For the needs of developing techniques for the safety assessment of concrete structures in nuclear facilities, the present project focuses on constructing concrete specimens containing naturally developed delaminated cracks with various crack depths. The specimens can be used for evaluating the repairing techniques which may be applied in the nuclear facilities and be provided for establishing the database for various non-destructive testing techniques.

Four specimens with dimensions 1 m by 2 m by 0.4 m were constructed. Among them, two are unreinforced specimen and the others contain lattice-arranged steel reinforcing bars. One unreinforced and one reinforced plates are provided for future repairing works. In the specimen-design, the concrete strength, size and arrangement of steel bars are all simulating those in the base floor of nuclear power plant. The delaminated cracks are at the depth which was typically appeared in the base floor of nuclear power plant. The method for creating cracks is as following. First, inject strong expansive cement paste into the pre-split carefully arranged plastic tubes buried inside the concrete specimens. And then wait for several hours for expansive cement storing enough force to crack the surrounding concrete. After the cracks open to the designed crack width, the expansive cement were extract from the tube and stop the crack growth. As the results, delaminated cracks with width 1mm, 3mm and 5mm were successfully created.

The specimens can be provided for various NDT methods including impact-echo, ultrasound, short-pulse radar, and ultrasound matrix. Among them, the responses of impact-echo tests will be transferred into the transfer function for more valuable analyses. The matrix ultrasound evaluation is the cutting edge technology for evaluating the damaged and repaired concrete structures.

三、計畫目的

本計畫將建立鋼筋混凝土自然水平開裂縫版塊試體，以提供修補工法確認及進行 NDT 測試，透過研究比對，建立修補後評估技術之背景資料以及提供土木非破壞檢測判讀實習與技術校正用。

由於圍阻體底版之修補成功與否關係著核電廠的安全性及使用年限，且修補的工程浩大技術困難度高，如何研擬適當修補工法並確認修補成效乃是重要課題。本計畫建立之鋼筋混凝土板塊試體其混凝土強度及鋼筋尺寸配置均模擬圍阻體結構，其水平裂縫是將混凝土自然開裂形成，深度亦設計在底版檢測中常出現的裂縫深度。再者，試體製作時，將於實驗室中精密控制其實驗變數—包括不同裂縫寬度、修補與否以及鋼筋存在與否等，因此可提供作為底板大規模修補前的測試試塊，以確認修補工法的成效；並在使用各種非破壞檢測方法來探求裂縫修補狀況時，可有效探求各種變數對 NDT 檢測結果的影響，並整理歸納各種檢測法得適用性：例如在應力波檢測法中修補材料層之厚度是否會影響到訊號的判讀？以及透地雷達在鋼筋層的干擾下是否能有效的探測到修補區域？在建立各種修補後評估技術的背景資料以及歸納整理出修補及未修補狀況的特徵反應後，未來在現地檢測才能有足夠的信心判讀檢測資料，並有效率的全面性評估修補的狀況。

四、計畫緣起

結構混凝土為當今土木工程最常使用的材料，在混凝土緻密性佳及鋼筋保護層充足的狀況下，混凝土結構物不需要特別的保養維護且服務齡期可達五十年以上，然而若施工或設計不良造成鋼筋表層之惰性氧化物因混凝土碳化或鋼筋表面氯離子侵入而破壞時，在充分的氧及濕氣供給下鋼筋會產生腐蝕而使混凝土的使用年限大幅降低。鋼筋銹蝕後的氧化產物體積會大於原體積的數倍而使混凝土受到極大的爆裂壓力（bursting pressure）進而脹裂周圍的混凝土。在鋼筋排列較疏的情況下，腐蝕會產生沿著鋼筋走向的表面裂縫，然而這種情況在混凝土結構物保護層較厚以及鋼筋排列緊密的條件下較不易發生。對於鋼筋排列較密或網格狀鋼筋排列，鋼筋腐蝕會造成沿鋼筋層面之水平斷層狀的開裂裂縫（delaminations）[1]。

核能電廠設施是國家重要的公共建設，其預力或鋼筋混凝土圍阻體結構為核子反應爐的主要屏蔽，安全性的要求極高。圍阻體為巨積混凝土結構，其混凝土厚度可達二公尺，排置多層網格狀鋼筋，且最外層鋼筋上方之混凝土保護層厚度有15公分以上，因此鋼筋若產生腐蝕會造成沿鋼筋層之層狀開裂，裂層的方向大多與表面平行，由目視觀察結構表面不容易得知裂縫的範圍、深度及走向。然而裂縫的位置可由非破壞評估的方式偵測，例如核一廠二號機混凝土底版即是以敲擊回音法檢測[2]，其檢測結果顯示上層鋼筋區域確有水平開裂裂縫存在，而檢測所得之裂縫範圍與滲水位置及鑽心結果呼應。在確認裂縫位置後必須進行裂縫的修補以恢復底版結構的整體性，裂縫若以環氧樹脂等修補材料高壓灌入底版伸縮縫及裂縫區域，是否能填滿裂縫將為修補計畫成功的關鍵。由於核設施功能及環境的特殊性，未來仍須以非破五、執行方法與進度

為配合開發核設施混凝土結構體安全評估技術之需求，本研究計劃建立鋼筋混凝土自然水平開裂版塊試體，以作為日後修補工法效能評估之試驗試體，並可建立修補後評估技術之資料，提供土木非破壞檢測判讀實習與技術校正。

五、執行方法與進度說明

本計畫執行年限為一年，目前已完成開裂試體的製作，開裂方式是以膨脹水泥注入事先剖開並埋入試體之塑膠管中，膨脹水泥以數小時時間內將混凝土自然開裂，在裂縫裂至預期寬度時再將膨脹水泥抽出。在正式製作大版塊開裂試體前必須對膨脹水泥做性質的測試，並且以較小試塊確認裂縫開裂機制的可行性。以下為試驗規劃與方法的介紹以及試驗結果與討論。

5.1 試驗規劃與方法

5.1.1 膨脹水泥性質試驗

為使混凝土試體內部能產生自然水平裂縫，將預先剖半之塑膠管，埋置於混凝土中，待試體成型並養護完成後，於塑膠管內填充膨脹性水泥（無聲破碎劑—POWER BRISTAR H）[3]，藉由內部水管膨脹方式產生試體之自然裂縫，為了能了解膨脹性水泥（無聲破碎劑）之特性，確保混凝土試體內部能被膨脹水泥如期產生所需之自然裂縫，因此本試驗在製作所需之大型混凝土版前初步先製作小型試體，包括圓柱試體（ $\phi 15\text{cm}\times 30\text{cm}$ ）與小型混凝土版（ $70\text{cm}\times 70\text{cm}\times 40\text{cm}$ ），來試驗開裂狀況，以下將分別說明混凝土試體之製作與試驗。

(1) 圓柱試體試驗（ $\phi 15\text{cm}\times 30\text{cm}$ ）

本試驗的目的在探求膨脹水泥最佳之拌合水溫、預埋塑膠管最適當直徑、及停止裂縫生長的方法。試體製作的過程如下：

- (a) 將塑膠管剖半(圖 1)再重新以膠帶黏合後埋入圓柱試體中間並澆製混凝土(圖 2)。
- (b) 在需製造裂縫齡期，將預先製作好的鐵絲(圖 3 及圖 4)置於塑膠管內，將拌合好之膨脹性水泥灌入塑膠管內(圖 5)，最後等待至所需之裂縫寬度產生(圖 6、圖 7、圖 8)，即抽出塑膠管內部之鐵絲，使部分膨脹水泥抽離，暫停裂縫生長，再將其膨脹性水泥完全清除。

在圓柱試體試驗過程中，混凝土設計強度為 $210\text{kg}/\text{cm}^2$ ，試驗變數包括塑膠管直徑、膨脹性水泥之水灰比、與膨脹水泥拌合之水溫、將膨脹水泥抽出之方式等等。



圖 1、剖半之塑膠管



圖 2、不同直徑大小之塑膠管



圖 3、不同直徑大小之塑膠管



圖 4、彈簧形狀之鐵絲



圖 5、膨脹性水泥於塑膠管內



圖 6、產生 1mm 裂縫寬度之圓柱



圖 7、產生 1mm 裂縫寬度之圓柱



圖 8、產生 1mm 裂縫寬度之圓柱

(2) 小型混凝土版試驗 (70cm×70cm×40cm)

本試驗的目的在製作版狀試體測試設計之塑膠管配置及深度是否可順利造成管間之水平裂縫，以及測試膨脹水泥灌製流程，並做先期之非破壞檢測試驗。混凝土設計強度為 210kg/cm^2 ，其養護齡期 25 天之抗壓強度如表 1 所示，預埋塑膠管於混凝土版試體 22.5cm 之深度，且管切割面需與混凝土版面平行，見圖 9，塑膠管為 $\phi 28\text{mm}$ ，共置入四支，其中一二支及三四支之間隔均為 3cm，二三支間隔為 20cm，第一支與第四支管與側邊距離為 15cm。膨脹性水泥之水灰比為 0.3，拌合水溫為 $20\sim 22^\circ\text{C}$ ，試驗時之大氣溫度為 32°C 。

灌製膨脹水泥時，是將試體一端抬高，使其傾斜約 40° ，冀依靠膨脹水泥的流動性將其灌入塑膠管內。

表 1、養護齡期 25 天之抗壓強度

試體編號	抗壓強度(kg/cm^2)
1	361.10
2	346.06
3	352.66

混凝土版塊試體製造出自然水平裂縫後，以敲擊回音法試驗於試體上方每格 2cm 測一次，共有四條測線位於與塑膠管平行方向 (圖 10)，其中編號 s1 及 s4 測線與左邊界與右邊界距離為 8 及 10 公分，編號 s3 及 s4 測線位於二及三支塑膠管間。



圖 9、試體灌入膨脹水泥後 (正面)

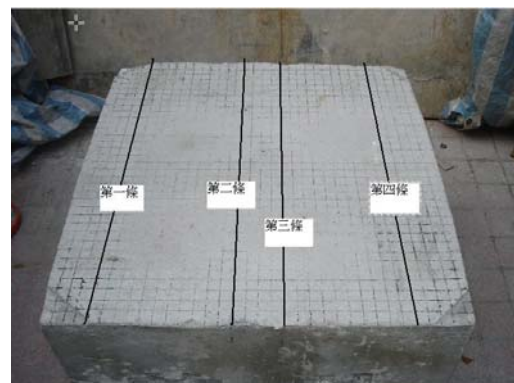


圖 10、敲擊回音檢測之測線位置

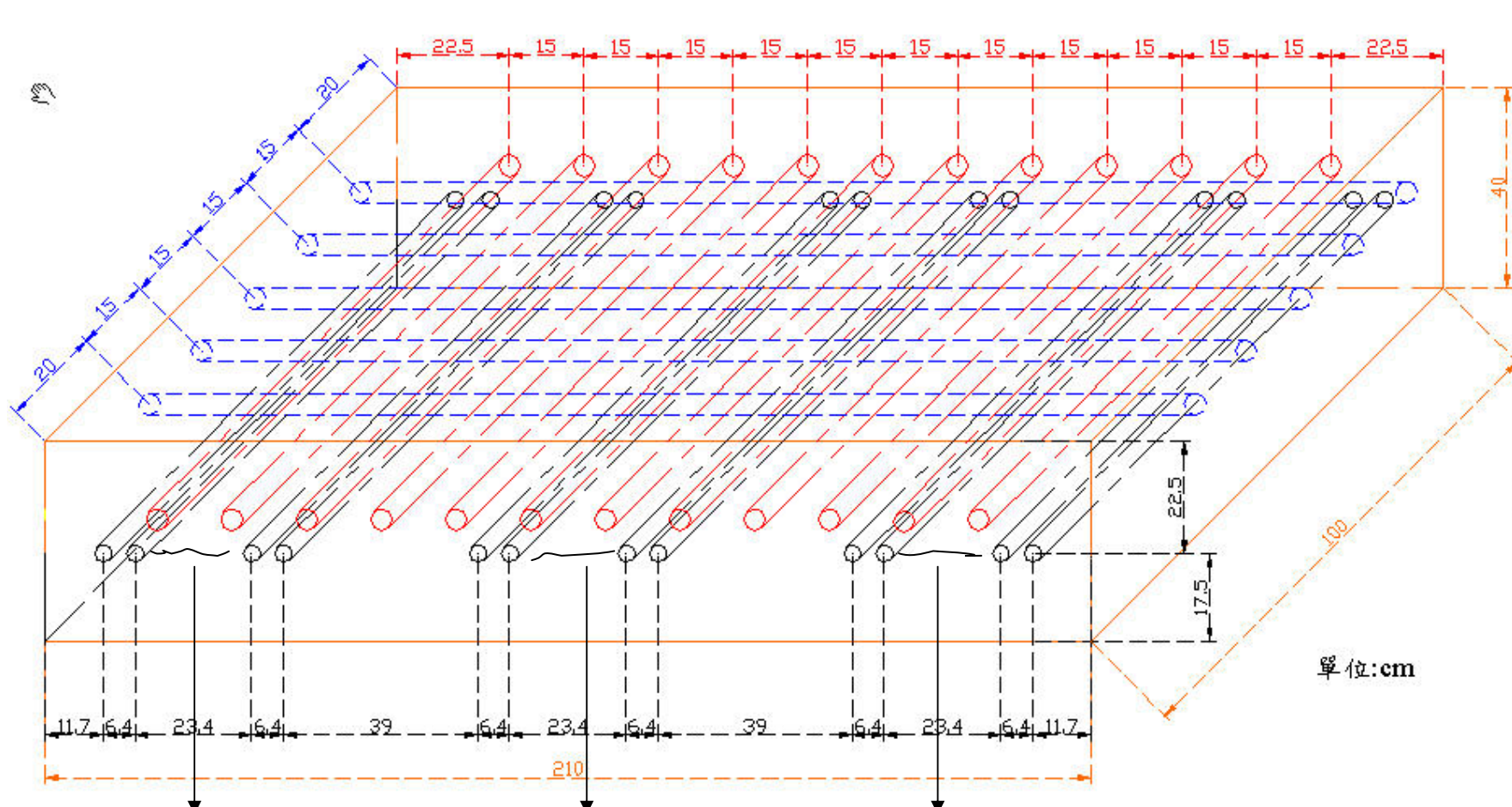
5.1.2 大型混凝土版開裂試驗

版試體計劃製作尺寸為長×寬×高=210cm×100cm×40cm 之四塊混凝土版塊，試體之實驗變數為裂縫開裂寬度、修補與否、鋼筋存在與否，其中控制裂縫開裂寬度為 3mm、1mm 及 5mm，其規劃量測裂縫開裂寬度之位置在塑膠管間隔為 23.4 公分之區域，如圖 11 所示。四塊混凝土版塊分別為 (1) 有鋼筋-無修補 (2) 有鋼筋-有修補 (3) 無鋼筋-無修補 (4) 無鋼筋-有修補等之四種混凝土版塊。為模擬核電廠底板混凝土鋼筋排置，預埋之鋼筋採用 #10 (ϕ 32.2mm) 網格狀排列，鋼筋間距均為 15 公分，最小保護層厚度為 13.4 公分。PVC 管為直徑為 28mm，其埋設位置亦示於圖 11，在開裂過程中每個量測裂縫開裂區域裝置三個位移計 (LVDT)，進行監測裂縫開裂狀況。

混凝土之設計抗壓強度為 $280\text{kg}/\text{cm}^2$ ，配比計算表如(表 2)，另有 15 個 ϕ 15cm × 30cm 之圓柱試體於水中養護，其中 12 個進行齡期 7、14、28、90 天之抗壓強度及彈性模數 (E 值) 試驗，另外保留 3 個圓柱試體為能隨時檢測混凝土波速、介電常數等非破壞檢測所需之材料性質。所需之試體製作完成後，需配合透地雷達檢測、敲擊回音檢測及陣列超音波檢測等現場施測，並進行比對。之後，其中兩塊試體需以環氧樹脂 (epoxy) 對開裂裂縫試體進行修補工作，並在修補後再進行 NDT 測試 (包括上述測試項目)。

表 2、混凝土配比設計(kg/m^3)

水膠比	水泥+卜作嵐材料	粗骨材	細骨材	強塑劑
0.47	409	889	824	3.3



裂縫寬度位置 (3mm) 裂縫寬度位置 (1mm) 裂縫寬度位置 (5mm) ← 設計三種最大裂縫寬度

圖 11、大型混凝土版試驗之內部構造示意圖 (黑色：內徑 $\phi 28\text{mm}$ 塑膠管；紅色：上層 #10 鋼筋，藍色：下層 #10 鋼筋)

(1) 試體製作

- (a) 將塑膠管剖半，並以膠帶封住裂口暫時恢復管狀（圖 12），並確認無混凝土滲入之虞。
- (b) 製作模板，預埋塑膠管於混凝土版試體 22.5cm 之深度，且管切面需與混凝土版面平行，並將#10 鋼筋置於離水管之上方 1cm 處，採用網格狀排置鋼筋（見圖 11），其鋼筋中心與中心間隔為 15cm，且長向鋼筋在下，短向鋼筋在上，最小保護層厚度為 13.4cm。共有四個試體模板（二個僅預埋塑膠管，另外二個同時預埋有塑膠管及鋼筋）（圖 13～圖 16）。
- (c) 預埋鐵條（鐵條外部包有熱縮套管，以便於混凝土終凝後之抽出）於模板中（圖 17），可作為混凝土澆置完成後，所需之位移計（LVDT）之裝置，以及作為未來用環氧樹脂（epoxy）修補混凝土試體之灌入通道。
- (d) 預埋四個可承受二噸以上之吊鈎，以提供試體灌注膨脹性水泥於塑膠管時吊起傾斜用或移動試體之用。
- (e) 澆注混凝土於模板（圖 18、圖 19）。
- (f) 進行試體之養護，養護方式為在模版頂面注入清水養護，再以塑膠布鋪蓋於上方，待試體強度到達即拆模，並抽出預埋之鐵條及熱縮套管（圖 20、圖 21）。

(2) 膨脹性水泥試驗

由於小型版試體試驗時膨脹水泥漿未能充分填滿塑膠管，因此本試驗採用自製之灌漿槍澆製，試驗進型的步驟如下：

- (a) 裝置位移計（LVDT）於混凝土版上，用熱熔槍加以固定，其位移計裝置方式（圖 22～圖 25）。
- (b) 將彈簧狀之鐵絲放置於塑膠管內（圖 26）。
- (c) 將量好之水與膨脹性水泥拌合均勻，並使用灌漿槍（圖 27）將其灌入塑膠管內（先對混凝土版的左右兩側之塑膠管灌入，使其達到 3mm、5mm 之裂縫寬度）（圖 28）。
- (d) 待試體裂縫到達所要求之裂縫寬度，即抽出預先埋置之鐵絲，並用電鑽將其餘之硬固之膨脹性水泥挖出，使其停止繼續開裂（圖 29～圖 32）。
- (e) 混凝土版兩側所要求的 3mm 及 5mm 裂縫寬度完成後，繼續對試體之中間所要求之裂縫寬度為 1mm 進行開裂，方法如同以上步驟。



圖 12、以膠帶封住暫時恢復管狀



圖 13、預埋塑膠管於混凝土版試體
22.5cm 之深度



圖 14、二個預埋有塑膠管及鋼筋
之模板



圖 15、二個僅預埋塑膠管之模板



圖 16、鋼筋排列方式



圖 17、預埋鐵條與熱縮套管



圖 18、澆置混凝土



圖 19、澆置完成



圖 20、試體養護



圖 21、抽出鐵條



圖 22、變位計放置之位置圖

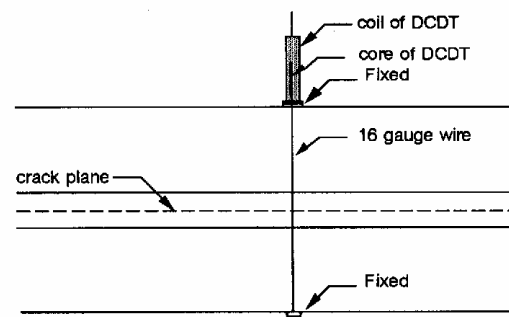


圖 23、位移計裝置方式示意圖



圖 24、用熱熔膠將 LVDT 黏牢



圖 25、用熱熔膠將底部固定



圖 26、鐵絲放置於塑膠管內



圖 27、灌漿槍



圖 28、將膨脹水泥灌入 PVC 管



圖 29、膨脹性水泥產生化學作用



圖 30、開始微裂縫產生(約 0.35mm)



圖 31、抽出塑膠管內之鐵絲



圖 32、用電鑽將較硬之膨脹水泥挖除

5.2 結果與討論

5.2.1 膨脹水泥性質試驗

(1) 圓柱試體試驗 ($\phi 15\text{cm}\times 30\text{cm}$)

由多次的試驗經驗得知，塑膠管的直徑大小以選用外徑為 28mm 為佳，且當裂縫產生時，膨脹性水泥使裂縫產生之速度，與膨脹性水泥之容量(即塑膠管之直徑大小)、水灰比、室外溫度、拌合之水溫有著密切關係，若無謹慎使用將造成破裂速度過快(圖 33、圖 34)，甚至爆炸之可能性，反之若塑膠管直徑太小(圖 35， $\phi 22\text{mm}$)或水溫太低(圖 36)也會造成無法開裂之情形，其膨脹性水泥廠商提供之基本限制範圍如表 3 所示，但由本次試驗所得針對不同室溫下適用之水溫如表 4 所示，可做為日後試驗所選用試驗變數之依據。



圖 33、裂縫開裂速度過快之圓柱

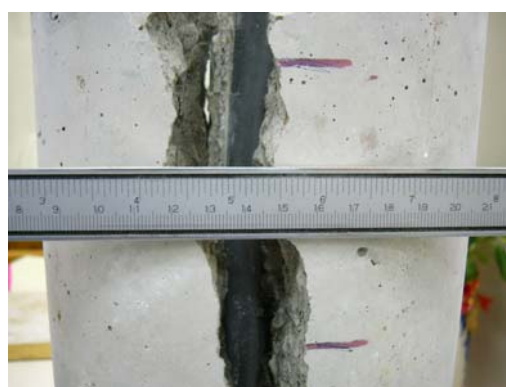


圖 34、開裂速度過快之裂縫寬度



(a)



(b)

圖 35、塑膠管太小($\phi 22\text{mm}$)，膨脹水泥容量不夠，造成試體無法開裂(a)側示圖 (b)俯示圖。



(a)



(b)

圖 36、PVC 管(φ28mm)，拌合水溫太低，造成試體無法開裂(a)俯示圖(b)側示圖。

表 3、膨脹性水泥（無聲破碎劑）之基本限制範圍

Type \ Item	Temperature Range of Rock or Concrete	Temperature of POWER BRISTAR	Water Temperature
POWER BRISTAR H	25~35°C (77~95°F)	below 35°C (95°F)	Max. 30°C (86°F)
備註	取自材料上之說明		

表 4、由經驗得到膨脹性水泥（無聲破碎劑）之合適應用範圍

大氣溫度	水灰比	拌合水溫
18~21°C	0.3	*26°C
22~26°C	0.3	*25~26°C
27~35°C	0.3	*20~22°C
*由於膨脹性水泥膨脹速度不太穩定，且拌合水溫為較難以掌控部分，會視情況而調整其水溫。		

(2) 小型混凝土版試驗 (70cm×70cm×40cm)

版試體約經過八十分鐘之時間產生初始裂縫，如圖 37~圖 41 所示，試體在膨脹水泥灌入端順利產生塑膠管間水平開裂裂縫，最大開裂寬度為 3mm。但由

於膨脹水泥灌入時快速失去流動性，塑膠管後端未能有效填入，因此試體之背面無裂縫之產生，如圖 39。由此實驗可知膨脹水泥的施作流程需再檢討改進。

運用敲擊回音法探測裂縫，以轉換函數的方式正規化頻譜[4,5]，將每條測線所得之頻譜之頻率為 Y 軸，檢測位置為 X 軸，以顏色表現各頻率的振幅值，以 3-D 繪圖軟體繪出結果如圖 42~圖 45，其中 X 軸之 0 點位置在灌入方向的末端。

圖 42 顯示 s1 測線檢測結果，由於測線靠近試體左側面，此面於圖 40 可清楚觀察到裂縫持續至距離末端約 2/3 處，裂縫至表面距離約為 20cm，在圖 42 中可清晰觀察到在頻率 9kHz 處有持續高振幅，乃由應力波來回反射於表面與裂縫間所造成，由混凝土波速 3800 m/s 可推算頻率 9kHz 所反應之裂縫深度為 20 cm ($3800/(2*9000)=0.2$ m)，然而由檢測可知裂縫反應延伸至離試體末端約 10cm 處。s2 及 s3 測線之檢測結果顯示於圖 43 及 44，可發現如圈出裂縫範圍所示，水平裂縫僅延伸至距離前端 30 公分左右，在 s3 測線離前端 15-30 公分處，高振幅尖峰移至 13-15kHz 左右，可推斷裂縫有往淺處延伸的趨勢。在 s4 測線之檢測結果（圖 45）可見裂縫反應較為持續，但在試體後半端也就是 X 軸在 0 至 35 處裂縫反應較為複雜，推斷此區域有多重裂縫產生。



圖 37、膨脹水泥反應後，產生水平裂縫之情形



圖 38、試體正面（膨脹水泥反應後）



圖 39、試體背面（膨脹水泥反應後，
無裂縫產生）



圖 40、試體右側（膨脹水泥反應後）



圖 41、試體左側（膨脹水泥反應後）

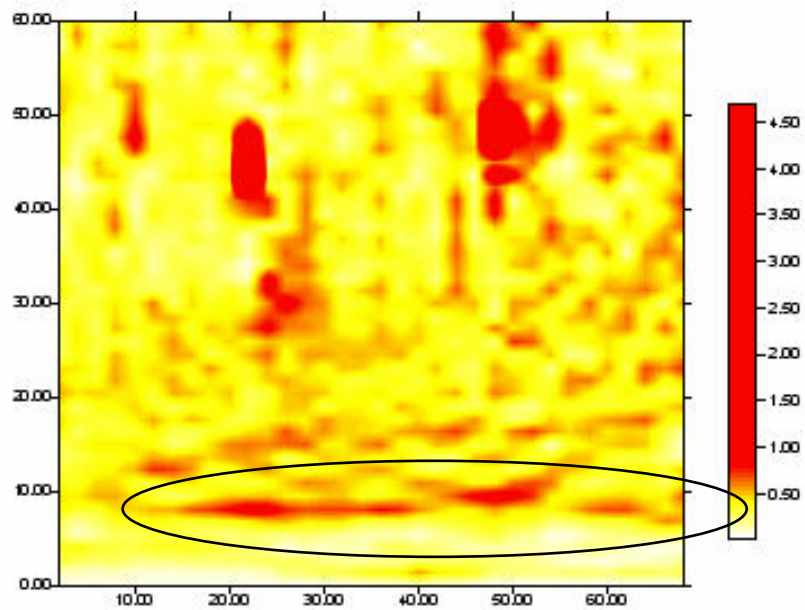


圖 42、s1 測線之圖形（X 軸：點位，Y 軸：頻率，顏色：振幅）

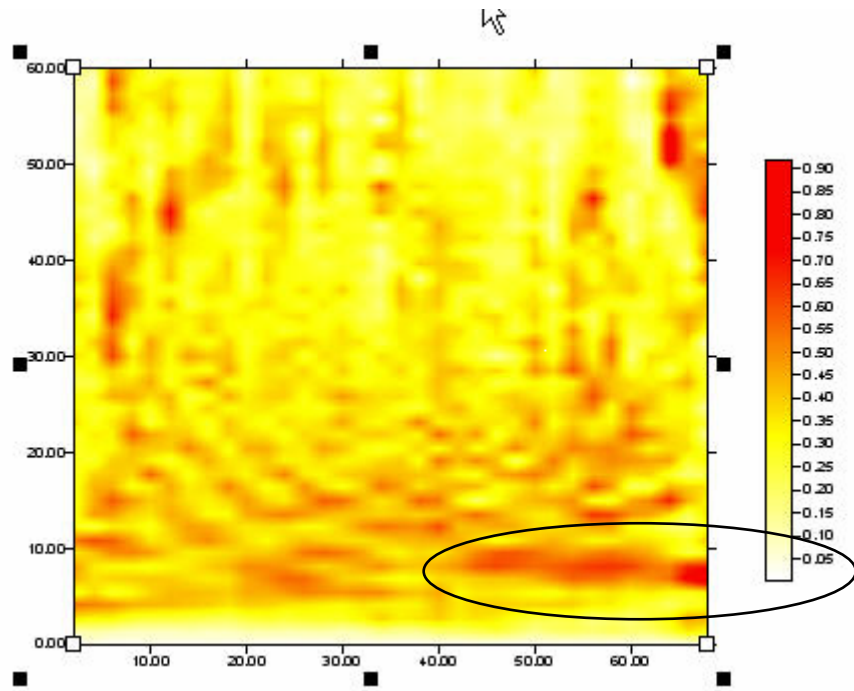


圖 43、s2 測線之圖形 (X 軸：點位，Y 軸：頻率，Z 軸：振幅)

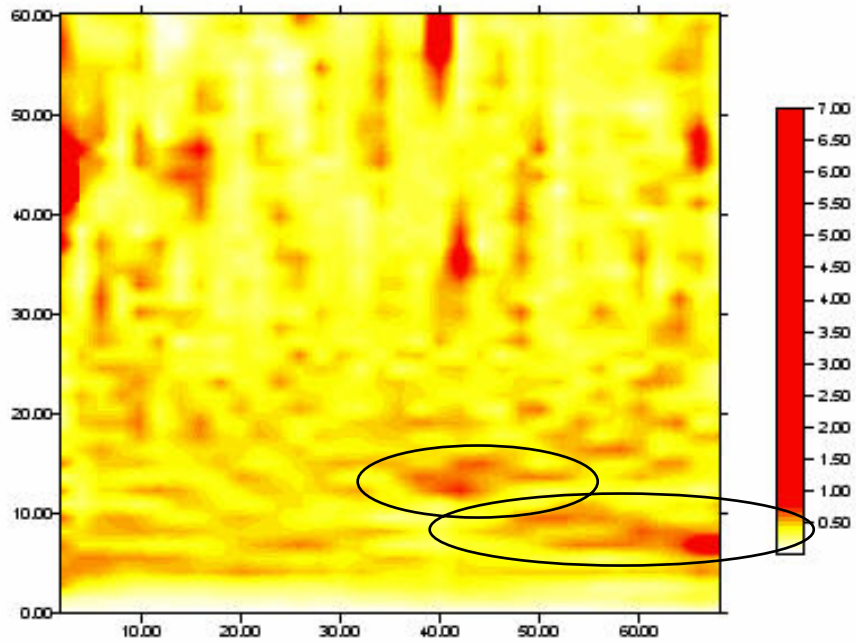


圖 44、第三條測線之圖形 (X 軸：點位，Y 軸：頻率，Z 軸：振幅)

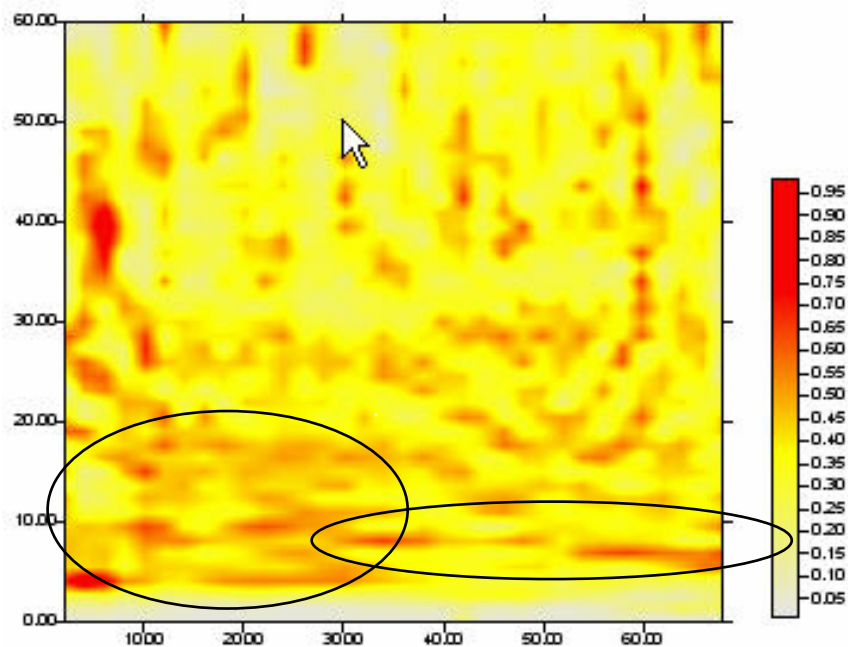


圖 45、第四條測線之圖形 (X 軸：點位，Y 軸：頻率，Z 軸：振幅)

5.2.2 大型混凝土版試驗

大型混凝土版之設計抗壓強度為 280kg/cm^2 ，其齡期 7、14 天之 f_c' 及 E 值列於表 5，圖 46 顯示不同齡期之 E 值量測時應力與應變趨勢圖。

表 5、不同養護齡期之抗壓強度及彈性模數

齡期 (天數)	試體編號	抗壓強度 (kg/cm^2)	f_c' 平均值 (kg/cm^2)	彈性模數 (E 值)	E 值平均值	ASTM 規定之 E 值
7	1	268	258.67	*	203000	*
	2	252		205000		238000
	3	256		201000		240000
14	1	333	350.33	201000	217666.67	274000
	2	367		239000		287000
	3	351		213000		281000
備註	* 試驗值錯誤不以取用 ** 設計強度為 280 kg/cm^2					

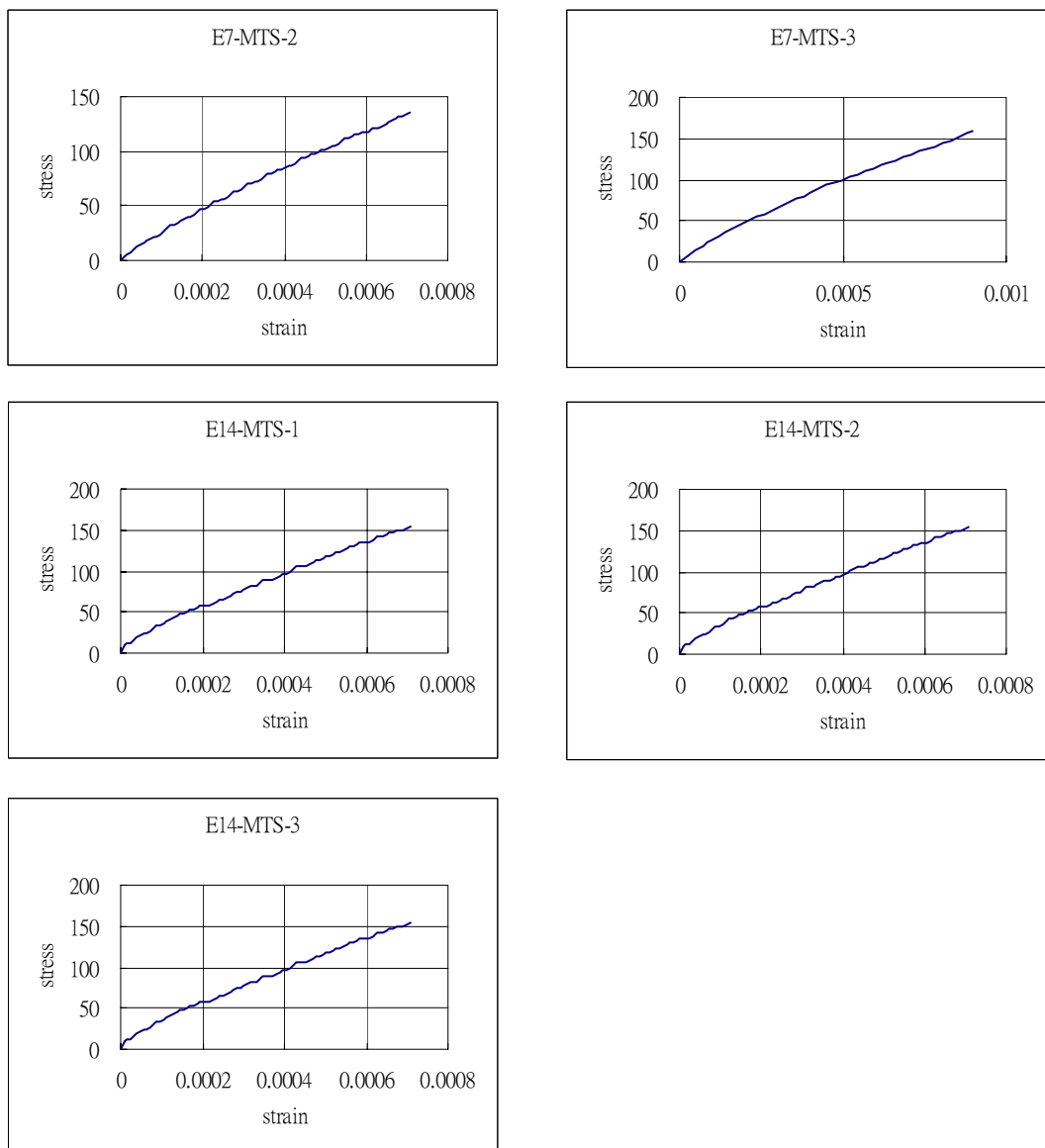


圖 46、混凝土圓柱試體之應力應變趨勢圖

(*E7-MTS-2 中, E 為彈性模數, 7 為養護齡期七天, 2 為試體編號, 依此類推。)

裂縫在預期區間內均形成水平之層狀裂縫, 裂縫寬度整理如表 6, 由於澆灌膨脹水泥至開裂混凝土到預期寬度之時間比預計長很多, 僅有無鋼筋試體設計裂縫寬度為 3mm 及 5mm 之區域有 LVDT 之開裂位移紀錄, 其他裂縫區域未能以 LVDT 紀錄, 僅紀錄試體正面及背面顯示之裂縫寬度。以下為各試體裂縫走勢之詳細說明:

- (1) 預埋鋼筋、塑膠管之混凝土版: 由於裂面上方有鋼筋束制, 而底部被多重支承束制, 3mm 及 5mm 之開裂裂縫僅能沿水平方向, 開裂之速度極慢, 直到

兩天後才達到設計裂縫寬度。裂縫開裂狀況見圖 47~圖 50，由圖中可知在兩側邊的開裂裂縫寬度較內部為大，此是因兩側缺乏束致所造成。由表六可知在同一量測裂縫開裂區域最後裂縫寬度在試體正面及反面並不相同，而平均裂縫寬度在設計寬度為 3、1 及 5 mm 區域分別為 3.34、0.95 及 4.17 mm。

- (2) 預埋塑膠管之混凝土版: 裂縫開裂狀況見圖 51~圖 56，在首先灌入膨脹水泥之 3mm 及 5mm 裂縫區域(靠近試體兩外側部分)，裂縫首先在塑膠管與側邊間形成，再往塑膠管間區域及版內部區域推進，而在試體內側均形成 Y 字型的分叉裂縫走勢(見圖 51)。由於無鋼筋束制，裂縫大約於八小時中形成。由表六可知在設計寬度 3mm 及 5mm 裂縫區域以 LVDT 量測以及試體正面及反面量測的結果均顯示裂縫寬度靠正面較小而較背面較大，而在 1mm 區域正好相反。比較 LVDT 量測與表面量測之平均裂縫寬度可知表面呈現之裂縫寬度可能較內部寬度為大。平均表面裂縫寬度在設計寬度為 3、1 及 5 mm 區域分別為 3.59、0.89 及 5.67 mm。

表 6、裂縫寬度整理

試體項目 裂縫項目		預埋塑膠管之試體			預埋鋼筋-塑膠管之試體		
		3mm	1mm	5mm	3mm	1mm	5mm
LVDT 開裂位移紀錄 (mm)	1	3.87	/	4.20	/	/	/
	2	3.31	/	4.59	/	/	/
	3	3.05	/	5.33	/	/	/
LVDT 平均開裂寬度(mm)		3.41	/	4.71	/	/	/
(1)正面裂縫寬度(mm)		3.5	1.1	5.67	4	1.47	4
(2)背面裂縫寬度(mm)		3.67	0.67	5.67	2.67	0.43	4.33
平均開裂寬度((1)+(2))/2		3.59	0.89	5.67	3.34	0.95	4.17



圖 47、預埋鋼筋及塑膠管之試體開裂之情況(正面)



圖 48、預埋鋼筋及塑膠管試體(右側)



圖 49、預埋鋼筋及塑膠管試體(左側)



圖 50、預埋鋼筋及塑膠管試體開裂之情況(背面)



圖 51、僅預埋塑膠管試體開裂之情況(正面)



圖 52、預埋塑膠管試體之開裂情況



圖 53、預埋塑膠管試體(中間部分)之開裂



圖 54、預埋塑膠管試體之左側



圖 55、預埋塑膠管試體之右側



圖 56、僅預埋塑膠管試體開裂之情況(背面)

六、結論與建議

6.1 結論

本計畫以試體注入膨脹水泥方式，緩慢製造混凝土裂縫，由於裂縫形成過程緩慢，因此可控制製造出任何裂縫寬度。本計畫成功製造出接近 1、3 及 5mm 寬度之大範圍水平層狀裂縫，可提供成為各種裂縫修補工法之試驗試體，而所建立之試體其內含裂縫深度及鋼筋尺寸排置，均模擬核設施底板狀況，因此可使得各種非破壞檢測技術取得最接近現場狀況之未修補及修補後裂縫的檢測資料，在建立各種技術之完整背景資料下，核設施裂縫修補後的現地評估工作可更有效率的完成。

由於水平裂縫修補後非破壞檢測評估之研究在國內外均屬於新的研究主題，本計畫已初步採用之敲擊回音法轉換函數的分析可以圖像方式呈現裂縫的深度與走勢。配合核研所進行之陣列式乾點式超音波探頭的偵測，若能有效分辨修補狀況，其研究成果未來可在學術期刊發表，且乃是非破壞檢測技術在土木工程上之一大突破。

6.2 建議

- (1) 由於比較 LVDT 量測與表面量測之平均裂縫寬度可知表面呈現之裂縫寬度可能較內部寬度為大，未來若需了解修補區域內部真正裂縫寬度，仍需裝置內部裂縫開裂寬度量測機制。
- (2) 由於膨脹水泥受試體本身溫度之影響甚鉅，在夏天澆灌時再兩小時內即可開裂，在冬天試體溫度較低時，可能需 1 天以上的時間才能形成裂縫，因此未來可在預留孔道中以內試鏡的方式偵測試體內部裂縫真正寬度，無需使用設置繁複之 LVDT。

七、參考文獻

- [1] V.K. Raina, Concrete Bridges, Inspection, Repair, Strengthening, Testing and Load Capacity Evaluation, Chapter 4, pp.10-63, McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1994.
- [2] 敲擊回音顧問公司,「核一廠二號機反應器廠房基作滲水案結案報告」
- [3] POWER BRISTAR H, Onoda Cement Co., LTD. Japan.
- [4] C.C. Cheng, C. P. Yu, and H.C. Chang, 'On the Feasibility of Deriving Transfer Function from Rayleigh Wave in the Impact-Echo Displacement Waveform', the Proceedings of 'Advances in Nondestructive Evaluation', Key Engineering Materials, Vols. 270-273, p 1484, 2004.
- [5] C.C. Cheng and C.P. Yu, "An Investigation of the Transfer Function of the Impact-Echo Response and its Application", in Compact Disk - IDN 517, 15th WCNDT, Nov. 2000, Roma, Italy.