

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

震災後混凝土結構檢測技術之開發 總計畫

Development of Inspection Techniques of Concrete Structures
Subjected to Earthquakes

計畫類別：☐個別型計畫 ☒整合型計畫

計畫編號：NSC89-2625-Z002-024

執行期間：88 年 8 月 1 日至 89 年 7 月 31 日

個別型計畫：計畫主持人：
共同主持人：

整合型計畫：總計畫主持人：吳政忠
共同主持人：劉佩玲
共同主持人：柴駿甫

處理方式：☒可立即對外提供參考
☐一年後可對外提供參考
☐兩年後可對外提供參考
(必要時，本會得展延發表時限)

執行單位：台灣大學應用力學研究所

中華民國 89 年 10 月 1 日

摘要

關鍵詞：彈性波、非破壞檢測、混凝土

在台灣歷經 921 地震後，充分突顯混凝土結構物耐震安全評估與落實之重要性。適當應用非破壞檢測技術於土木營建工程，不僅可確認老舊結構之安全，提昇新建結構的施工效率與品質，亦可降低施工成本提昇營建競爭力。此外，在結構物遭受地震侵襲後，應用非破壞檢測技術，可評估結構災後受損情形，加速災後重建進度。

本計畫主要針對鋼筋混凝土樑進行載重實驗前後，以非破壞檢測方法評估混凝土樑之破壞情形。研究中規畫設計鋼筋混凝土樑載重實驗架構，並製作鋼筋混凝土樑進行新造混凝土樑非破壞檢測試驗，且對於及受到外力載重破壞後之鋼筋混凝土樑進行量測。在對新造混凝土樑進行超音波及暫態彈性波波速量測後發現，混凝土樑的彈性波波速分佈結果可以反映出澆製時來自人為或重力影響的材料不均勻特性。在混凝土樑受到外力破壞後，其彈性波波速的衰減分布結果，亦可反映出混凝土樑的破壞情形。

ABSTRACT

Keywords: concrete, elastic constant, crack, elastic wave

Under the corrosive environments, fatigue loading and aging effects in concrete structures, strength of the materials may be reduced, cracks may propagate, and unexpected catastrophic failure of such structures may happen. To monitor the integrity and avoid such a catastrophic failure of a particular concrete structure, reliable Non-Destructive Evaluation techniques are needed.

The purpose of this project is to design an experimental process for the damage of a full size concrete beam and then detect the degree of damage using NDT methods. In the first phase, a full size reinforced beam has been designed and fabricated. In the second phase, quasi-static loading experiments on the concrete beams will be performed. Both ultrasonic and transient elastic wave velocity measurement techniques were utilized to evaluate the reinforced concrete beam with damages. Results show that the damaged induced wave velocity variations measured by these two methods are well correlated to those of the damage areas in the beam.

目 錄

第零章	整合型計劃摘要	
第一章	緒論.....	1
第二章	實驗設備及試體之設計與製作.....	4
2-1.	設備之設計與製作.....	4
2-2.	試體之設計與製作.....	5
2.2.1	試體 A (剪力破壞模式)	5
2.2.2	試體 B (剪力破壞模式)	8
第三章	新造混凝土非破壞檢測實驗.....	18
3-1.	混凝土超音波波量測.....	18
3-2.	暫態彈性波波速量測系統.....	20
3-3.	實驗結果.....	23
3.3.1	剪力樑破壞實驗.....	23
3.3.2	彎矩樑破壞實驗.....	25
3.3.3	小結.....	26
第四章	結論及未來展望.....	46
致 謝.....		48
參考文獻.....		49

震災後混凝土結構檢測技術之開發

Development of inspection techniques of concrete structures subjected to earthquakes

計劃主持人：吳政忠¹、劉佩玲¹、王仲宇²、廖述濤³、柴駿甫⁴

¹ 台大應力所 ² 中央土木系 ³ 中華土木系 ⁴ 國家地震中心

一、中文摘要

本整合型計畫依鋼筋混凝土結構之非破壞檢測對象與方法分成三個子計畫，研發內容主要為彈性波在混凝土結構非破壞檢測之應用。吳政忠及劉佩玲教授發展鋼筋混凝土樑品質與損傷之非破壞檢測法，並灌製全尺寸試體進行負載實驗，以驗證彈性波波速量測結果能檢測出鋼筋混凝土樑之灌製品質及負載後的破壞情形。王仲宇教授發展適用於混凝土材料之斷層掃描技術，並實際對內建缺陷試體進行影像掃描。廖述濤教授進行混凝土基樁之非破壞檢測理論分析與技術開發，並實際應用於雲林自強大橋沖刷檢測，及 921 集集大地震災後橋樑基樁完整性之評估。

關鍵詞：彈性波、非破壞檢測、混凝土

Abstract

Under the corrosive environments, fatigue loading and aging effects in concrete structures, strength of the materials may be reduced, cracks may propagate, and unexpected catastrophic failure of such structures may happen. To monitor the integrity and avoid such a catastrophic failure of a particular concrete structure, reliable Non-Destructive Evaluation techniques are needed.

The purpose of this project is to

integrate the existing and newly developed NDT methods for the evaluation of damaged concrete structures. Wu and Liu developed a NDT method, which is based on the elastic wave velocity measurement, for the quality and damage estimation on concrete beam. Experiments on a full size concrete beam were conducted to evaluate the feasibility of the newly developed NDT method. Wang developed a CT method for the defects image scanning in concrete material. Preliminary demonstration of the method was performed on a specimen with artificial defects. Liao developed a NDT method for pile inspection, the result has been applied to the evaluation of bridge damage by the Ji-Ji earthquake.

Keywords: Elastic wave, Nondestructive evaluation, Concrete

二、緣由與目的

台灣處環太平洋地震帶，地震頻繁，時有強震侵襲，結構物耐震技術與震災前後結構物安全檢測技術之研發與落實，為極重要之課題。非破壞評估方法（Nondestructive Evaluation, NDE）可用來檢測公共工程結構因施工不良，人為破壞（超重），天然災害（地震、水災）等所引

起的裂縫和損壞，提供定量之結構損傷數據。完整準確的結構損傷數據可進一步做為結構體完整性及耐久性評估之基礎。對於非全面性之結構損傷，結構補強或修補往往比拆除重建更具經濟效益。鋼筋混凝土結構種類繁多，梁、柱、版、橋柱、橋基、基樁等，相對應之檢測方法亦各有不同。依檢測區域大小來分，有局部、次結構（如梁、柱）及整體結構（如整棟大樓、整座橋梁）檢測技術。依非破壞檢測方法分則有超音波(ultrasonics)、脈衝雷達、暫態彈性波法(transient elastic wave)、電磁波法、音射法(acoustic emission)、放射線法和紅外線熱影像等方法。

本整合型計畫從非破壞檢測理論、數值模擬、訊號處理、檢測實驗與量測儀器製作等方向著手，進行混凝土結構非破壞檢測人力整合與技術開發，除避免研發人力、目標分散，資源浪費外，亦積極落實土木非破壞檢測科技，提昇我國之營建競爭力。目前結果顯示，已具能力檢測研判混凝土梁、版與基樁之破壞與缺陷。另外，本整合型計畫充分利用國內現有之科技，自行製造組裝量測儀器，除大幅降低購置國外現成儀器之經費，亦落實國內營建非破壞檢測科技。本計畫借用國家地震工程研究中心之場所與設備，進行大型梁載重、損傷實驗及後續之檢測實驗，成果對於混凝土結構損傷檢測有極大助益。

三、震災後混凝土結構檢測技術之開發——總計畫（吳政忠、劉佩玲、柴駿甫）

（一）摘要

本計畫主要針對鋼筋混凝土樑進行載重實驗前後，以非破壞檢測方法評估混凝土樑之破壞情形。研究中規畫設計鋼筋混凝土樑載重實驗架構，並製作鋼筋混凝土

樑進行新造混凝土樑非破壞檢測試驗，且對於及受到外力載重破壞後之鋼筋混凝土樑進行量測。在對新造混凝土樑進行超音波及暫態彈性波波速量測後發現，混凝土樑的彈性波波速分佈結果可以反映出澆製時來自人為或重力影響的材料不均勻特性。在混凝土樑受到外力破壞後，其彈性波波速的衰減分布結果，亦可反映出混凝土樑的破壞情形。

（二）研究成果

現實狀況中，結構物中樑構件經常發生兩種破壞模式—彎曲破壞及剪力破壞，故計畫中試體之設計將針對此兩種破壞模式分別製作兩根樑試體，以應證所使用之量測方法能夠檢測樑試體中破壞的情形。

1. 試體設計及實驗架構

本試驗計畫設計兩根樑試體，其破壞形式分別為剪力及彎矩破壞。以極限強度設計法設計，為簡化分析，假設樑支承為鉸接、力量輸入只有垂直力。其中樑跨度六公尺、總荷重 70 公噸、混凝土強度 $f_c' = 280 \text{ kg/cm}^2$ 、鋼筋抗拉強度 $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ 、箍筋抗拉強度 $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ 為使設計簡化。研究中先設計一剪力破壞之樑試體，在依其設計將主筋鋼筋量減少以達彎矩破壞之形式。試體 A 為剪力破壞模式，試體 B 之設計為彎矩破壞模式，如圖 3-1、3-2 所示。

本試驗設備主要可分為加載裝置、反力支撐架、分配加載之鋼樑等三部分，如圖 3-3、3-4 所示。

2. 剪力破壞實驗結果

為獲得混凝土樑灌製均勻度及破壞後波速變化之參考基準，在混凝土樑施壓之前，將混凝土樑側面分割成 3×25 共 75 個

區域，逐點進行超音波及暫態彈性波波速的量測。

如圖 3-5 為施壓前之超音波波速及暫態彈性波波速分布圖。由結果可發現，混凝土樑下半區域的波速總比上半區域來的高。這是由於試體灌製時，由於重力的效應，使骨材沉澱至試體底部所造成。必須注意的是，兩者結果的差異來自傳播路徑的不同。然而，由此結果顯示出彈性波波速量測結果的確可檢驗出混凝土結構試體之非均質特性。

為探討混凝土樑在受到外力作用後，其破壞情形對縱波波速的影響。在混凝土樑波速量測後進行四點彎矩破壞實驗，加載的歷程如下表所示：

加載階段	制動器位移	制動器頻率
一	10±2.5 cm	0.1Hz
二	12.5±2.5 cm	0.1Hz
三	15±2.5 cm	0.1Hz
四	20±2.5 cm	0.1Hz
五	22±15 cm	0.05Hz

加載後，樑試體主要產生剪力破壞裂縫，由底部支撐沿 45 度角逐漸向上生長。在破壞後，重複前述的量測方法進行波速量測，以得知混凝土在受到外力破壞後的波速變化情形。如圖 3-6 所示為超音波及暫態彈性波波速衰減分布圖，由結果可以發現，波速衰減較明顯的區域與實際破壞較嚴重的區域大致上相同。衰減最嚴重的區域，為樑的兩個支撐點開始的 45 度角傾斜剪力破壞裂縫附近，剛好與本實驗設計樑的剪力破壞結果，如圖 3-7，一致。

3. 彎矩破壞實驗結果

試體 B 所進行的為三點彎矩實驗，施力直接作用於混凝土樑的中點，則破壞區域可預期的，將出現在樑的中心偏下的部

位。因此，量測的區域分割，在中央部分較為細密。

波速量測結果如圖 3-8 所示，在自然狀態波速量測完成後，分成三個階段以力量控制進行加載。加載過程如下表所示：

試驗加載階段	制動器加載力量
一	15 ton
二	25 ton
三	30 ton

圖 3-9 及圖 3-10 分別為超音波及暫態彈性波速衰減分布圖。由結果可發現，試體中央附近的下半部分，波速的衰減最為嚴重，這與彎矩破壞實驗的結果相符合，圖 3-11。

由於彈性波在傳播中遇到微裂縫時，必須改變傳播路徑，方能到達接收器端，因此，波速的衰減程度取決於波源至接收器的路徑之間，微裂縫產生的數目。由以上結果可以發現，超音波及暫態彈性波波速衰減的區域皆與實際破壞的位置一致。值得注意的是，暫態彈性波較超音波的波速衰減較為明顯且分布情形有些許不同，其原因在於其量測方式造成波傳路徑的不同。超音波量測是在混凝土樑的兩面以對接的方式進行量測，波傳路徑是行經混凝土樑的橫斷面，也就是說，波傳路徑與主要的破壞裂縫平行，因此波傳路徑所受的影響較小，相對的，衰減也較小。反觀之，暫態彈性波量測是在混凝土樑側面進行，因此，波傳路徑與大部分的彎矩裂縫垂直，造成波傳路徑增長，波速也會大幅衰減。

(三) 結論

由本計劃實驗結果，可以發現波速的量測結果，的確可以用以評估混凝土結構物的灌製均勻度，及結構物在受到外在負

載後的破壞分布情形。然而，必須注意的是，超音波法與暫態彈性波法由於量測原理不同，其量測結果與應用限制會有些許不同，是必須釐清的。如本實驗所示，超音波波速量測必須將波源及接收兩探頭於試體兩側對接，且必須事先得知兩探頭的距離，這在實際現地的量測中並不容易達成，況且，在大型的混凝土結構物中，超音波能量大幅衰減，訊號不容易量測，因此，超音波法通常僅能適用於較小的試體。反觀，暫態彈性波法，由於只需在試體一表面進行量測，因此，特別適用於現地大型結構物如水壩、堤防等的波速量測，除此之外，此系統的操作便利性，亦適合對結構進行大面積的多點量測。

在未來的應用方面，對於新建混凝土結構，可以暫態彈性波波速量測系統進行大面積量測，可獲得結構灌製均勻度，輔以傳統的鑽心法，將波速較低的部分實際鑽心後進行抗壓實驗，以評估混凝土結構的整體強度。此外，新的結構物在建造完成後，若先紀錄彈性波波速分布，則未來結構受到如地震等外力作用後，可再次量測波速分布，以波速的衰減來做為評估結構物的破壞程度及損毀區域之參考。總言之，本研究結果，提供一個新的現地混凝土結構非破壞檢測方法，用以評估新建結構之均勻性，及災後結構的損毀情形。

四、混凝土版之裂縫偵測理論及技術開發 --子計畫一（王仲宇）

（一）摘要

斷層掃描是一種利用外來探測的能量來觀察目標物的反應進而對目標物進行成像的技術；本論文選擇較適用於土木結構的級數展開法作為斷層掃描的理論依據，以線性走時內差法作為二維正算追蹤波行

路徑的方法，並延伸提出三維線性走時內差法的數學運算模式；在二維反算的部分則選擇速度分佈之聯立疊代重建法作為搭配，並嘗試利用應力波對一些土木基本構建做二維的斷層掃描檢測。初步顯像結果對尺寸較大的缺陷已經有不錯的結果，對於較小的缺陷與鋼筋則不甚明顯，經修正後可加強影像的對比改善顯像結果；三維線性走時內差法分析模型在已知介質速度分布的條件之下可正確模擬出波之最短路徑，往後可再結合反算理論發展出可應用於土木結構非破壞檢測之顯像技術。

（二）研究成果

本研究嘗試先將二維斷層掃描的方法應用於土木結構元件，以自製小型結構試體為檢測目標，藉以驗證方法的可靠性與實用性。試體內部包含空洞、裂縫以及大小不等的鋼筋斷面，以震波斷層掃描的方法由試體表面量得數據資料，經過數值分析將結果顯像再與實際分布做一比較，因此整個顯像步驟分為二個部份：第一個部份是由實驗方法利用應力波對試體進行量測，取得各條路徑的走時；第二個部份再將這些資料以自行發展的線性走時內差法配合速度分佈聯立疊代重建法的演算法分析之，再與斷層掃描軟體 DOGS Firstomo 做比對，以便對自行發展之程式的特徵及缺點有所認知，作為後續研究之參考。實驗試體之配置與數值分析結果如下：

1. 試體(一)：探討斷面中有一中空圓洞缺陷的情形，而空洞直徑 5.7 公分與斷面尺寸的比值約 0.35，如圖 4-1 所示；斷面的主要介質波速值定為 3637 m/s(此為真實試體混凝土的平均波速)，而空洞的波速則以主要介質的百分之一 36.37 m/s 表示。在顧及計算效率與收斂情形之下考慮個別方塊收斂的情形，關於 LTI 結合 SIRT

的分析結果皆選擇 20 次疊代，計算出的斷面波速分布情形如圖 4-2，波行路徑分布情形如圖 4-3，由 Firstomo 軟體計算出的斷面波速分布情形如圖 4-4。

2. 試體(二)：則探討斷面包含一根直徑 3.4 公分鋼筋的情形，如圖 4-5 所示，主要介質波速值定為 3783 m/s，而鋼筋的波速則以實際鋼筋波速 5863 m/s 表示。由 LTI 結合 SIRT 計算出斷面的波速分布情形如圖 4-6，波行路徑分布情形如圖 4-7，由 Firstomo 軟體計算之結果如圖 4-8。

3. 試體(三)：最後探討鋼筋與裂縫同時存在的問題，這是最具代表性的混凝土構件探傷問題，試體配置如圖 4-9 所示，主要介質波速值定為 3805 m/s，而鋼筋的波速則以實際鋼筋波速 5863 m/s 表示。由 LTI 結合 SIRT 計算出斷面的波速分布情形如圖 4-10，波行路徑分布情形如圖 4-11，由 Firstomo 軟體計算之結果如圖 4-12。

本文的第二部分延伸二維平面所採用之線性走時內插法 (LTI) 而推導出三維線性走時內插法的數學模式運用於三維射線追蹤上來搜尋波行路徑，假設結構體中介質各向同性，且為完全彈性以簡化計算過程，在以知介質速度的前提下進行追蹤波行路徑的工作。以模擬試體進行波行路徑數值模擬計算，其配置及計算結果如下：

1. 模擬試體(一)：如圖 4-12 所示，試體一為 30540550cm 的長方體，以 1 單位來模擬介質慢度，試體中假設有一垂直異質層，以慢度為 5 單位來模擬，訊號發射源的位置座標為(0cm,35cm,15cm)，接收源為對面邊界面上的二十個點，波行路徑計算結果如圖 4-13 所示。

2. 模擬試體(二)：模擬波通過一垂直裂縫的情形。模擬試體為一個 14x18x30cm 的長方體，共分成 759515 個單位立方塊，以 1 單位來模擬介質慢度，試體中含一層三

角形的垂直異質體來模擬裂縫的形式，慢度值設為 100 單位，立體配置如圖 4-14 所示，投影於 XY 與 YZ 平面的配置如圖 4-15 所示，訊號的發射源與接收點配置於裂縫的兩邊；利用 LTI 程式進行數值模擬波行路徑，計算結果如圖 4-16 所示。

3. 模擬試體(三)：模擬波通過一斜裂縫的情形。模擬試體的大小與切割單位力方塊的形式與試體二相同，主要介質仍以 1 單位來模擬其慢度，試體中含一層四方形的傾斜異質體來模擬裂縫的形式，慢度值設為 100 單位，立體配置如圖 4-17 所示，投影於 XY 與 YZ 平面的配置如圖 4-18 所示，訊號的發射源與接收點配置於裂縫的兩邊；利用 LTI 程式進行數值模擬波行路徑，計算結果如圖 4-19 所示。

4. 模擬試體(四)：模擬波通過另一種斜裂縫的情形。模擬試體的大小與切割單位力方塊的形式與試體三相同，主要介質仍以 1 單位來模擬其慢度，裂縫之慢度值設為 100 單位，立體配置如圖 4-20 所示，投影於 XY 與 YZ 平面的配置如圖 4-21，訊號的發射源與接收點配置於裂縫的兩邊；利用 LTI 程式進行數值模擬波行路徑，計算結果如圖 4-22 所示。再利用 Firstomo 軟體進行分析所得之波行路徑比較如圖 4-23 所示。

(三) 結論

混凝土結構非破壞檢測技術之開發可將工程品質之良劣透明化、結構物之損傷狀況得以作有效的評估，實為達到防災目的有利的方式。本研究運用之斷層掃描正反算計算模式對土木構件斷面之顯像成果將可提供實際結構體預測鋼筋、孔洞、裂縫等異質物質發生的機率及位置。往後可發展適用於檢測波波長接近或大於待檢測物尺寸的繞射斷層掃描理論，使土木結

構斷層掃描的適用性大大提高；另一方面，幾年以雷射激發物體表面震動產生超音波的技術已經逐漸成形，其特性不但發射起始時間精準並且無須接觸表面，這將大大的提升實驗走時資料的精度；最後在三維的斷層掃描技術方面，往後在結合反算模式理論後將能對結構物的三維射線追蹤提供一新的方法及貢獻。

五、以非破壞檢測技術檢定基樁缺陷之幾何資料(II)-子計畫二(廖述濤、吳政忠)

(一) 摘要

本計畫從理論及實驗方面深入研究基樁的脈波反應法、平行震測法、超震波法以及阻抗縱剖分析法，以了解這些方法能否獲得完整及有缺陷基樁的詳細幾何資料。

本研究在長期投入理論研究與數值模式開發後，在本年度計畫執行期間，適逢我國遭遇慘痛的 921 集集大地震，立即投入實地檢測並評估橋樑基樁完整性之工作，因此亦累積了豐富的實驗資料。同時亦發現非破壞檢測技術應用於檢測現有橋樑基礎下之基樁仍困難重重。主要的原因在於檢測的複雜度因各種不同的結構元件的參與而大幅提高，例如重要的影響因素包括樁帽與基礎板效應、群樁效應與礮柱等上部結構效應等。針對這個問題，本研究提出初步理論上的解決方法，即“理論樁長增量逼近法”與“樁底反射波隔離法”。而現地實驗亦有了豐富的成果，除了介紹美國目前最新研究情況外，並研究此次檢測複雜的集鹿大橋的結果與新建單樁之檢測結果的比較。

(二) 研究成果

如圖 5-1 所示，本研究計畫除了深入

探討脈波反應法、平行震測法、超震波法與阻抗縱剖分析法對新建單樁的檢測成效外，亦因集集大地震後之現場檢測工作而累積了許多對含樁帽之基樁的理論與實驗上之研究成果。茲將研究結果與討論分述如下：

- (1) 在微小樁帽下，不論使用位移歷時曲線或力學導納曲線，還是能明確地推估出樁長。但在樁帽厚度超過 2m 或翼寬過大時，使用位移歷時曲線或力學導納曲線來推估樁長皆有重大之困難。
- (2) 無論施力大小如何改變，只要施力點超出樁之邊緣 0.4 公尺以上，即使樁帽厚度較薄，亦無法準確推估出樁長。因此在現地檢測時，施力點是否敲擊到基樁範圍內是十分重要的。
- (3) 影響推估樁長之最主要的因素為樁帽之尺寸。當尺寸過大時樁帽內之波傳影響即已覆蓋過樁底反射波的有效顯示，在此種情況下，即使仍可從力學導納曲線中得出樁帽之尺寸，卻仍很可能無法求出樁長。
- (4) 對於含樁帽之基樁，甚難推估過大之樁長，即使增加施力大小也無法有太大的改善。
- (5) 兩種現場檢測之力學導納曲線結果亦驗證了上述之結論，即結構複雜且含樁帽效應之集鹿大橋，如圖 5-2 所示，與結構單純的新建單樁案例，如圖 5-3 所示，之檢測成效差異大。
- (6) 為了解決含樁帽之基樁的檢測問題，本研究提出兩種解決方法，即(1)理論樁長增量逼近法與(2)樁底反射波隔離法。以理論樁長增量逼近法為例，如圖 5-4 所示，此方法的基本精神在於先利用有限元素數值模式來模擬現場之實際樁帽加上任意長度之基樁的反應。將模擬的反應曲線與實測的反應曲線相減，從而去除掉樁帽部份之波傳反應，如此可獲得「剩餘反應曲線」。藉著將虛擬樁長由短逐漸加長之過程中，觀察「剩餘反應曲線」之變化，便可決定出實際樁長所在之長度區間。在此區間內經由虛擬

樁長之再細分並重複以上分析過程，可將實際樁長逼近至所需精度。

凝土梁測試設備、場地及相關技術支援，使本計畫得以順利進行。

(三) 結論

在國科會連續這幾年來支持此一研究主題之下，使得基樁非破壞檢測技術的研究漸漸豐富成熟，本年度計劃更因集集大地震而有了許多實際檢測應用的機會。這些豐富的成果在此概述如下：

推導出平行震測(PS)法之理論背景，完成相關之有限元素數值模擬模式，並且在實驗室完成完整與有缺陷基樁之小型試體試驗。

在阻抗縱剖分析(IL)法方面，完成了無土壤效應下之缺陷柱的理論推導部分，並且應用至漸變斷面之缺陷上。

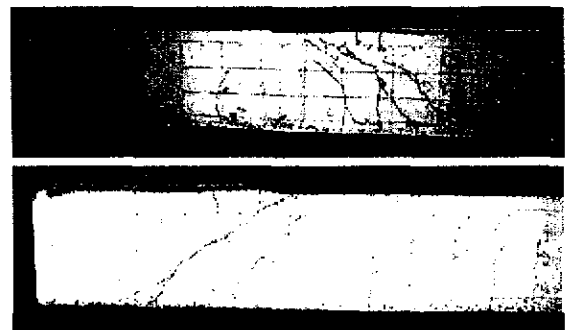
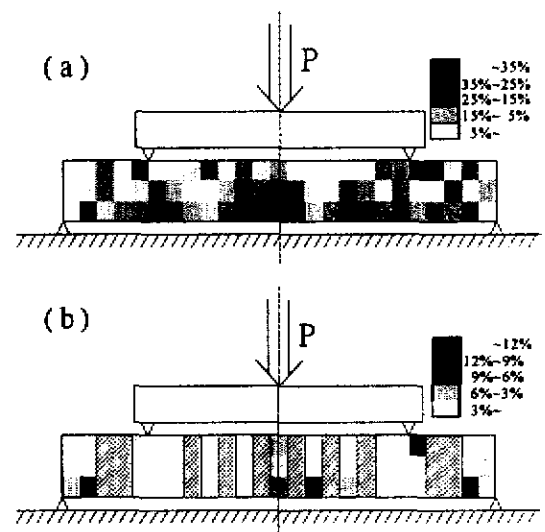
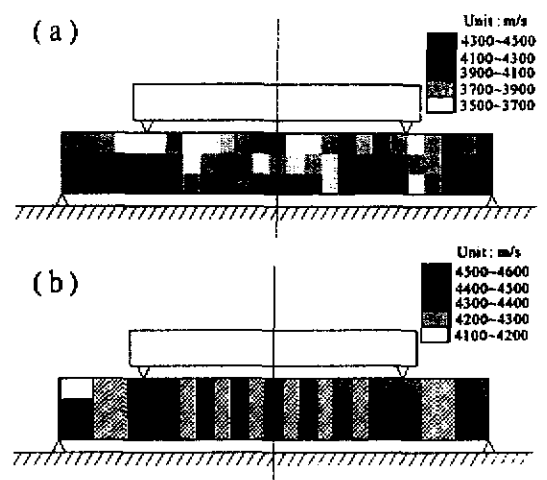
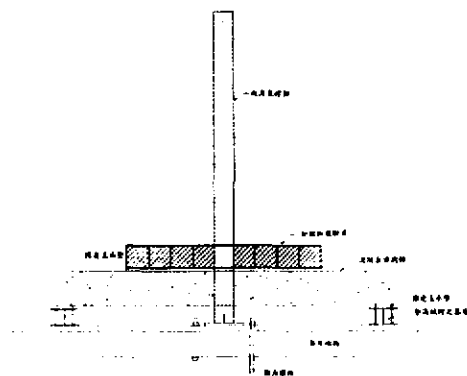
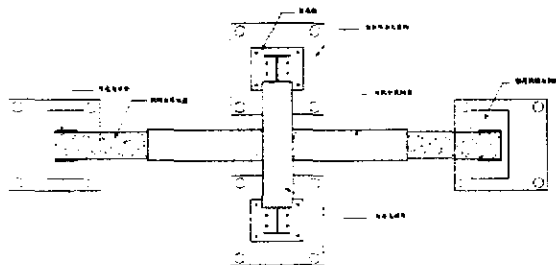
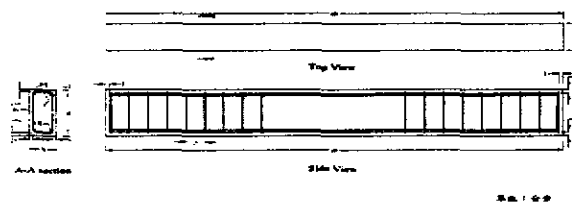
在較為成熟的敲擊反應(IR)法方面，則首先開發了有限元素模擬程式，並以美國1989年在加州之現地大型基樁實驗檢測所得為對象，進行模擬比對，以了解數值模式的可靠性。在現地實測驗証方面則對雲林自強大橋作沖刷的檢測，並在集集大地震後至南投集鹿大橋進行基樁完整性評估，並與新竹某新建單樁之檢測結果做比較。從而深入了解欲檢測含樁帽之基樁時，所可能遭遇之困難。隨即著手理論研究，來找出解決之道。初步已提出理論上可行之兩種方法，即“理論樁長增量逼近法”與“樁底反射波隔離法”。此兩種方法只待更進一步的實驗驗証與修正的工作，未來應有很高的應用價值。

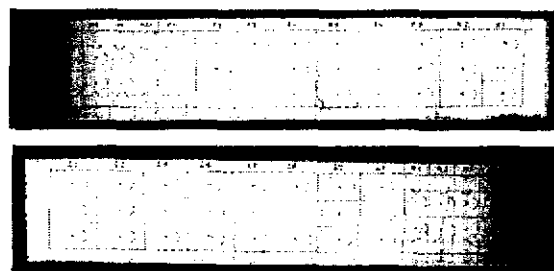
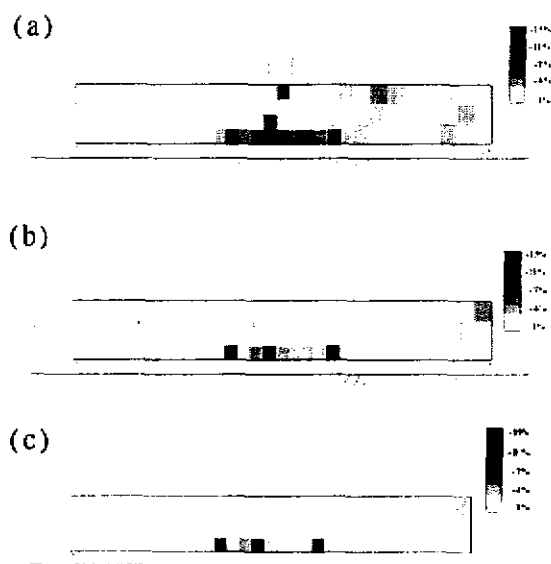
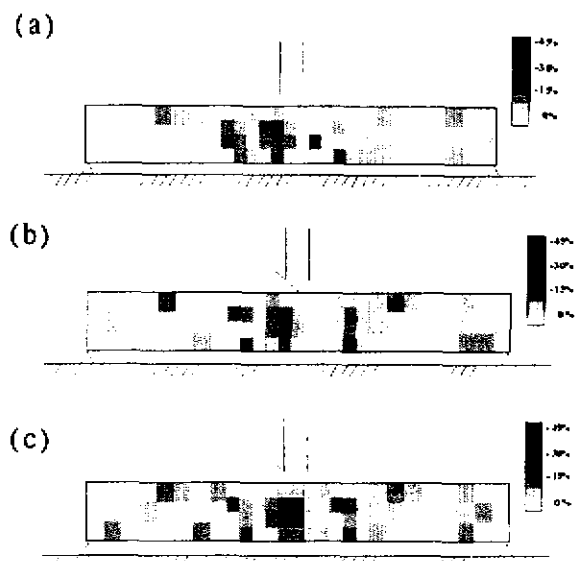
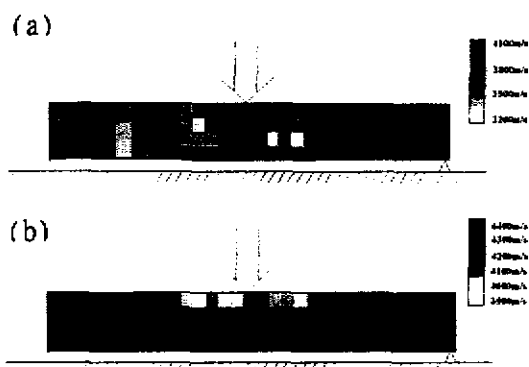
感謝國科會支持此研究計劃，以主持人觀點而言，其成果除了具有相當明顯之價值外，更因此次集集地震災後的應用而看出其實際工程應用上之價值。

六、致謝

感謝國家地震工程中心提供之大型混

Figure 1 shows three views of a mechanical part: a Top View, a Side View, and a section A-A. The Top View is a rectangle with a central slot and a small circular feature on the left. The Side View shows the profile of the part, including the slot and the circular feature. Section A-A is a cross-section of the part, showing internal features and dimensions.





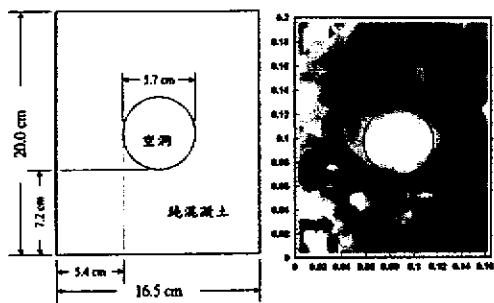


圖 4-1

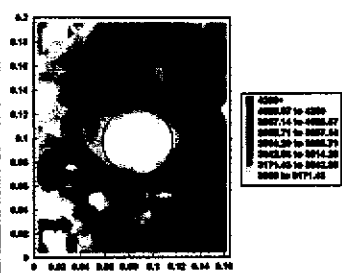


圖 4-2

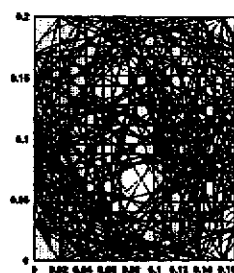


圖 4-11

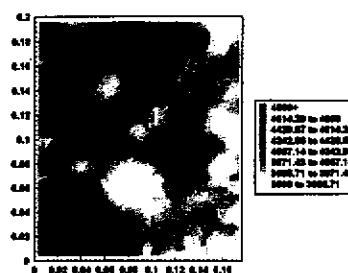


圖 4-12

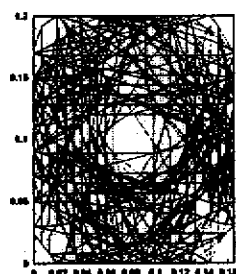


圖 4-3

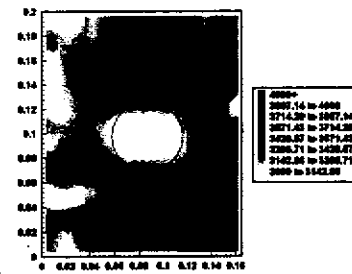


圖 4-4

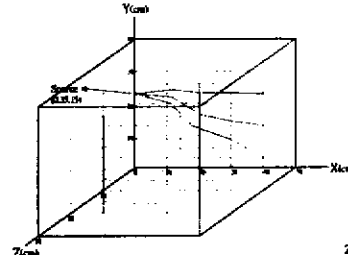


圖 4-13

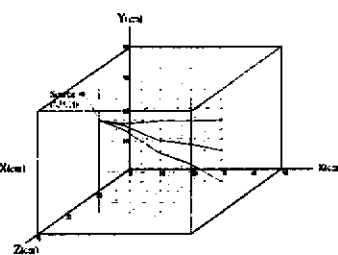


圖 4-14

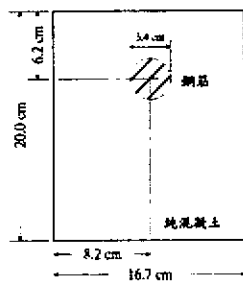


圖 4-5

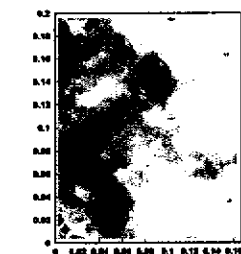


圖 4-6

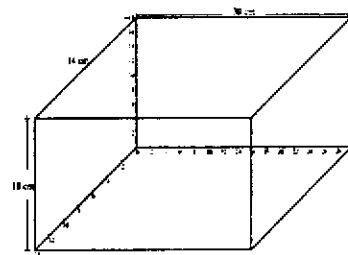


圖 4-15

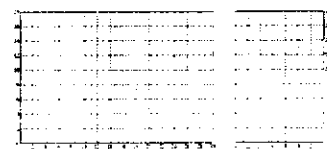


圖 4-16

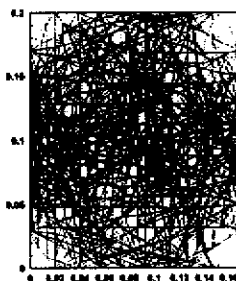


圖 4-7

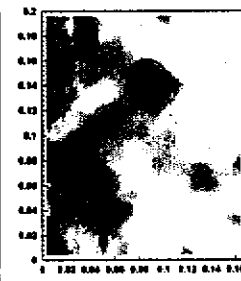


圖 4-8

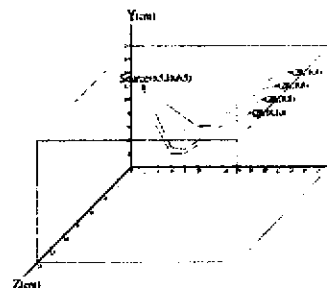


圖 4-17

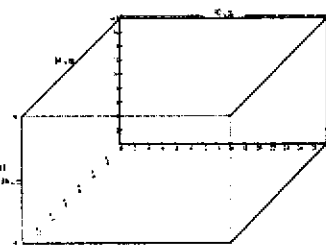


圖 4-18

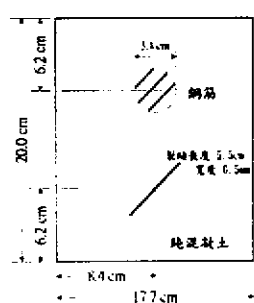


圖 4-9

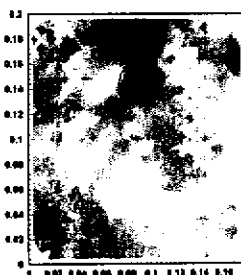


圖 4-10

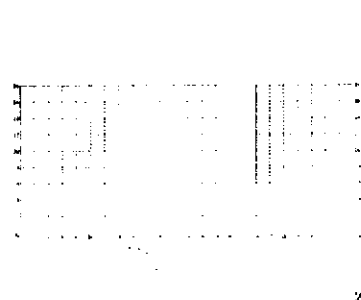


圖 4-19

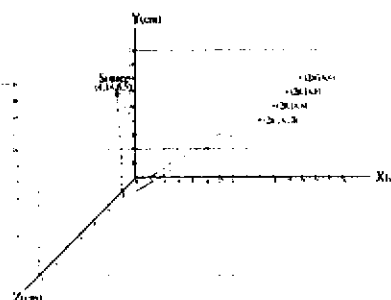


圖 4-20

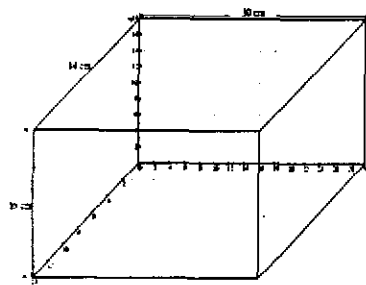


圖 4-21

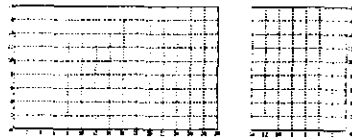


圖 4-22

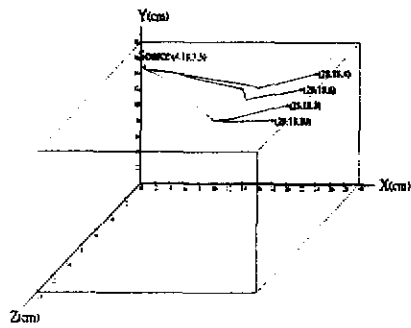


圖 4-22

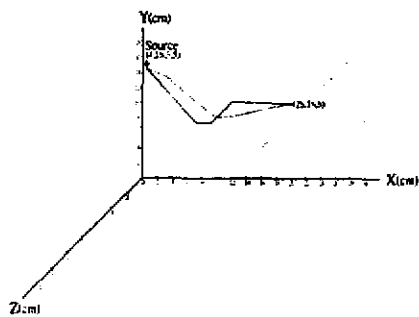


圖 4-23

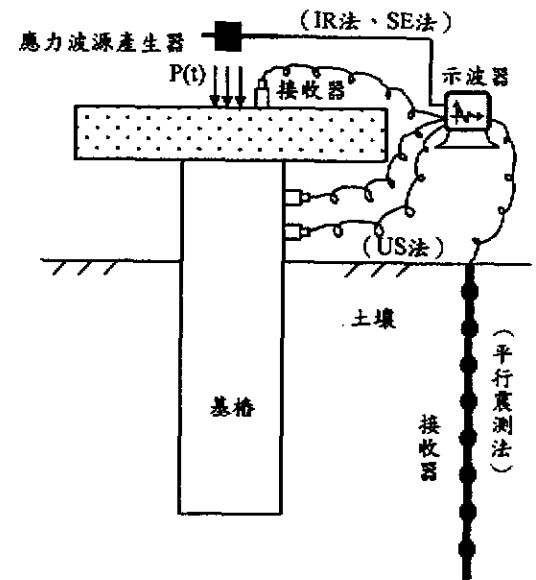


圖5-1 敲擊反應法、平行震測法與超震測法之檢測示意圖

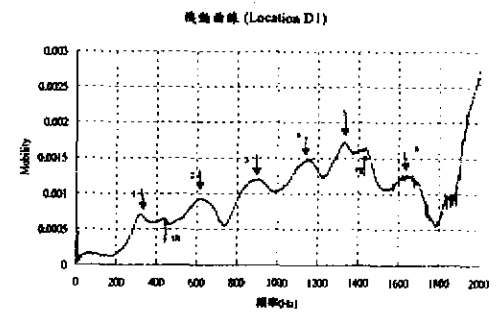


圖 5-2 集鹿大橋檢測結果

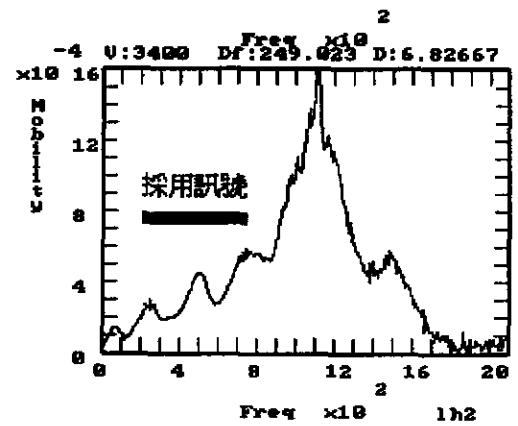


圖 5-3 新建單樁檢測結果

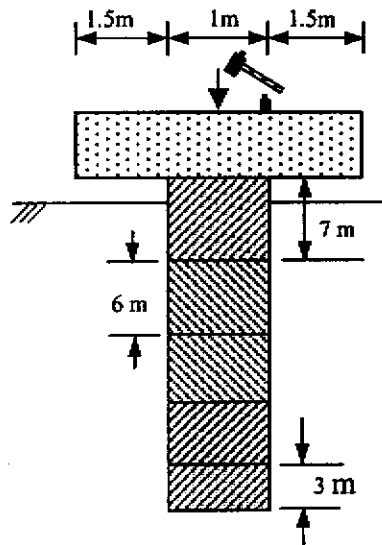


圖 5-4 理論樁長增量逼近法示意圖

八、參考文獻

1. V. M. Malhotra and N. J. Carino, "CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete", CRC Press, USA, 1991
2. "混凝土圓柱試體抗壓強度之檢驗法", CNS 1232.
3. T. T. Wu, J. S. Fang, G.Y. Liu, and M.K. Kuo, "Determination of Elastic Constants of a Concrete Specimen Using Transient Elastic Waves", J. Acoust. Soc. Am., 98 (3), 2142-2148, 1995.
4. T. T. Wu and J. H. Gong, "Application of Transient Elastic Wave to the NDE of Plate Structure with Cavity or Inclusion", J. Acoust. Soc. Am., 94, 1453-1460, 1993.
5. T. T. Wu, J. S. Fang, and P. L. Liu, "Detection of the Depth of a Surface-breaking Crack Using Transient Elastic Waves", J. Acoust. Soc. Am., 97, 1678-1686, 1995.
6. N.J. Carino, M. Sansalone, and N.N. Hsu, "A Point Source-Point Receiver Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete," ACI Journal, proceeding, 83, 199-208, 1986.
7. N.J. Carino and M. Sansalone, "Detection of Voids in Grouted Ducts Using the Impact-Echo Method," ACI Materials Journal, 89, (3), 296-303, 1992.
8. Ahmed E. Ben-Zeitun, "Use of Pulse Velocity to Predict Compressive Strength of Concrete," International Journal of Cement Composites and Light Weight Concrete, 8, No. 1, 51-59, 1986.
9. "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete," ASTM C597-71, 1979.
10. T.-T. Wu, J.-H. Tong and P.-L. Liu "Measurements of In-situ Wave Velocity of Concrete Using Transient Elastic Waves," Progress of Quantitative Nondestructive Evaluation, Montreal, Canada, 1999.
11. Asawaka, E. and Kawanaka, T. , "Seismic Ray Tracing Using Linear Traveltime Interpolation", Geophysical Prospecting 41, pp. 99-111, 1993.
12. 'Firstomo Tomography Software released 2.2d', Development Of Geophysical Software, Russia, 1977.
13. 黃界超, '斷層掃描法在土木結構之應用評估', 碩士論文, 國立中央大學土木工程研究所, pp. 1-63, 1997 年
14. 紀聖威, '線性走時內差法於土木構件斷層掃描之應用', 碩士論文, 國立中央大學土木工程研究所, pp. 1-76, 1998 年
15. 黃家凌, '三維計算斷層掃描之射線追蹤正算模式', 碩士論文, 國立中央大學土木工程研究所, pp. 1-67, 2000 年
16. 林其璋, 鄭聰榮, 姚照智, 蔡清標, 林呈, 高金盛, 周憲德, 王亭復, 呂良正, 廖述濤, 余志鵬, 1999, "工業設施 921 震災報告-高科技產業震害調查報告," 召集人: 林其璋, 共同加集人: 王亭復, 呂良正, 國科會國家地震工程研究中心報告, 11 月 1 日。
17. Liao, S. T., Roesset, J. M., & Chen, C.-H., 1998, "Numerical Simulation of Nondestructive Parallel Seismic Test for Piles, " The Sixth East-Pacific

Conference on Structural Engineering and Construction, Jan. 14-16, Taipei, Taiwan, R.O.C.

18. 陳政豪, 楊中佳, 廖述濤, 童建祥, 吳政忠, 2000, “混凝土基樁非破壞檢測技術之開發,” 中華民國第五屆結構工程學術研討會論文集, 中華民國結構工程學會、中國土木水利工程學會與國立中興大學土木系聯合主辦, 8 月 28~30 日, pp. 1457-1464[NSC87-2211-E-216-007].
19. 吳政忠, 郭茂坤, 劉佩玲, 林宜清, 王仲宇, 廖述濤, 柴駿甫, 2000, 「地震與地震工程--震災後混凝土結構檢測技術之開發」, 八十八年度防災專案計畫成果研討會論文集, 第二冊, NAPHM 88-902, 防災國家型科技計畫辦公室與國家地工程研究中心主辦, 行政院國家科學委員會補助, 1 月 11~12 日, pp. 11-1~11.22.
20. Chih-Peng Yu & Shu-Tao Liao, 1999, “A Close look at Impedance Log Method for Integrity Test of piles,” Proceedings, The Fifth Far-east Conference on Nondestructive Testing, Edited by T.- T. Wu, C.- C. Ma, P.-L. Liu, The Nondestructive Testing Society of China-Taipei, Nov. 8-11, Kenting, Taiwan, pp.227-233 [NSC 88-2625-Z-216-001] [NSC 89-2625-Z-216-002].
21. 沈冠男, 廖述濤, 1999, “以敲擊反應法檢測含缺陷基樁之現場實驗與理論數值模式之比較,” 八十八年電子計算機於土木水利工程應用論文研討會, 民國 89 年 2 月 17, 18 日, 國立中興大學土木工程學系。
22. 賴俊仁, 余志鵬, 李秉乾, 廖述濤, 王弘義, 1999, “集鹿大橋興建工程基樁完整性檢測報告,” 林同棧工程顧問公司委託朝陽科技大學營建工程系附屬專業服務中心, 12 月 6 日, 編號: 8812060 ISO.

第一章 緒論

台灣處環太平洋地震帶，地震頻繁，時有強震侵襲，結構物耐震技術與震災前後結構物安全檢測技術之研發與落實，甚為重要。強震發生後，各級單位與社會團體的迅速動員與有規劃的救災行動，可將人員傷亡與經濟損失降到最低。有效迅速結構安全檢測與評估，更能大幅減低社會的復原時間，提供百姓居住、辦公的場所及交通之順暢。因此平時各式結構之安全檢測與評估及震災後有效迅速之安全偵測，為整個地震防災計畫中不可欠缺之一環。隨著國人對公共工程品質與安全的重視，營建工程非破壞檢測相關技術日益突顯其重要性。適當應用非破壞檢測技術於土木營建工程，不僅可確認老舊結構之安全，提昇新建結構的施工效率與品質，亦可降低施工成本提昇營建競爭力。近期，政府積極推動國家重大建設，工程數量與規模均極為龐大，施工效率與工程品質之提昇，可為政府節省大幅支出。在捷運、高鐵等公共建設中適當運用營建工程非破壞檢測科技，預留日後營運時檢測維修之空間，不僅可在施工時確認品質、提高效率，亦可為日後龐大的維護與保養工作，建立良好的基礎。橋樑為國家重要生命線之一，其建造、保養與維護均至為重要。國內現有超過一萬座之橋樑，其使用安全之監測、重建計畫之判定等須有一健全之橋樑管理系統。而橋樑管理系統的重點即為定量非破壞檢測方法的建立與相關檢測規範之訂定。沒有準確可靠的橋樑結構非破壞檢測數據，橋樑管理系統並不能發揮其應有的功效。有鑑於此，國內多項公共工程之新建與安全監測，亟須積極引進各項非破壞檢測技術，評估及改善公共工程結構物之品質、監測其安全性，並避免在無預警狀況下破壞所產生的人員傷亡、重大災害及經濟損失。近十年來，各先進國在營建工程非破壞檢測科技之研發均已投入相當大的心力，目前有多種技術已達成熟階段。而國內近幾年來從事營建工程非破壞檢測科技研發與應用之學者專家漸多，在多項檢測技術之研發亦屢有重大進展。

由於混凝土之經濟性與耐久性，歷經百年混凝土結構仍然是目前全世界主要的建築結構，而混凝土性能與品質提昇是目前土木營建研究的重點。在鋼筋混凝土結構產製過程中，混凝土充分的搗實與養護可確保其強度及耐久性，提昇其使用品質與結構安全。不當的施工除造成安全顧慮與使用品質的低劣外，繁雜的維修整建工作亦得耗費更多的經費與人力。適當合理的引入非破壞檢測科技於混凝土結構的產製與維修工程中，可確認混凝土結構之品質與安全。

從非破壞試驗的理念開始後就不斷有學者對混凝土抗壓強度之非破壞檢測法進行研究。Williams[1]在 1936 年研究試驗槍(Testing Pistol)，以鋼珠在混凝土表面形成的凹痕來評估混凝土硬度，後有 Frank 改良成彈簧錘(Spring Hammer)與 Einbeck 的鐘擺錘(Pendulum Hammer)，但在量測推算強度所需的面積與凹痕時有精確度不佳的缺點，評估混凝土抗壓強度上更無法有效降低誤差。1948 年瑞士工程師 Ernst Schmidt 研發出量測混凝土硬度之反彈錘，又名史密斯錘(Schmidt Hammer)或瑞士錘(Swiss Hammer)[2]，是以試錘在混凝土表面撞擊後的反彈高度來衡量強度。然而，以上的方法由於較大的誤差，始終無法擴大應用範圍。近年來，吳等人利用暫態彈性波為基礎，發展出相關的非破壞檢測技術，量測混凝土之彈性波波速[3]、內含物及缺陷[4]，並反算出表面裂縫深度[5]。此外 Carino 等人也利用暫態彈性波，發展出敲擊回音法[6,7]，對混凝土結構進行非破壞檢測。

在本研究計劃中，為落實非破壞檢測技術於混凝土結構，實際灌製真實尺寸之混凝土樑，在灌製後分別以超音波法[8,9]及暫態彈性波法[10]量測混凝土樑的縱波波速分布情形，以評估混凝土樑灌製時的均勻程度。在波速量測後，並分別進行四點彎矩破壞實驗及三點彎矩破壞實驗，使混凝土樑分別達到剪力破壞及彎矩破壞，並在加載的過程中，詳細紀錄混凝土樑局部波速的變化與樑的破壞情形，以評估混凝土的破壞對局部波速變化的影響。實驗的結果可以發現，不論超音波或暫態彈性波速的量測結果，均能忠實反應混凝土樑的灌製均勻度，並能在混凝土樑遭受外力負載破壞時，由波速的衰減程度評估其局部

破壞之情形。因此，本研究計劃之成果，可應用於新建混凝土結構灌製均勻度之評估。此外，在重大工程結構新建後，先對整個結構進行波速量測並記錄之，在結構遭收重大如地震之外力負載後，可由波速的變化來評估其破壞情形。

第二章 實驗設備及試體之設計與製作

本計畫目的在於量測地震發生後對結構中梁構件所產生之破壞，進而求得梁損害程度及剩餘強度。並加以判斷結構之危害程度，以確保民眾生命財產之安全。

混凝土裂縫產生的原因很多，而本計畫主要探討結構物中梁構件經常發生之破壞—彎曲破壞及剪力破壞。故計畫中試體之設計將針對此兩種破壞方式分別製作兩根梁試體，以進行非破壞檢測方法的研究。

2-1 設備之設計與製作

本試驗設備主要可分為加載裝置、反力支撐架、分配加載之鋼梁等三部分，如圖一、二所示。混凝土梁試體置於橡皮支承墊上，並以型鋼為基座墊高其高度。梁試體上部放置一鋼梁，用以分配制動器所產生之垂直力至下部混凝土梁。反力支撐架橫跨混凝土梁並以螺栓固定於預力底鈑上，用以支撐加載裝置之反力。細部分別敘述如下：

1.加載裝置：

為一 MTS 之靜態油壓制動器，其最大加載力 961KN、衝程±500mm、流量 40gpm，尺寸如圖三所示。制動器之兩端分別用螺栓與反力支撐架之橫梁及分配加載力之鋼梁固定。

2.反力支撐架：

由兩根 H350X350X12X9，長 5500 mm 之長柱與一 H400X400X13X21，長 1510 mm 之橫梁所組成之門型構架。其橫梁與制動器之一端以螺栓相結合，當制動器因油壓之加壓而伸長時，反力分別由混凝土梁與支撐架所提供，如圖四所示。兩端底鈑分別以螺栓固定於試驗場地之預力底鈑之上，如圖五所示。

3.分配加載鋼梁：

其尺寸為一 H414X405X18X28，長 3500 mm之鋼梁，如圖六所示。制動器所作用之垂直作用力藉由此鋼梁分配至下部的混凝土梁，我們可藉由調整鋼梁下方之橡皮支承墊的間距位置來控制輸入梁試體內部垂直力與彎矩之分配，更進一步控制其破壞形式。

2-2 試體之設計與製作：

本試驗計畫設計兩根梁試體，其破壞形式分別為剪力及彎矩破壞。為使設計簡化，吾人先設計一剪力破壞之梁試體，在依其設計將主筋鋼筋量減少以達彎矩破壞之形式。

吾人以極限強度設計法設計，為簡化分析，假設梁支承為絞接、力量輸入只有垂直力。其中梁跨度六公尺、總荷重 70 公噸、混凝土強度 $f'_c=280 \text{ kg/cm}^2$ 、鋼筋抗拉強度 $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ 、箍筋抗拉強度 $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ 。

2.2.1 試體 A (剪力破壞模式)：

2、 試體彎矩之設計：

1. 垂直荷重：

假設梁靜載重 $w_D = 0.6 \text{ t/m}$

故由靜載重所導致混凝土中點之彎矩： $M_D = 2.7t - m$

由靜載重所導致混凝土中點之彎矩： $M_L = 52.5t - m$

總彎矩 $M_n = 55.2t - m$

最大剪力 $V_{\max} = 36.8tm$

2. 鋼筋量：

(1)平衡鋼筋比 ρ_b

$$\rho_b = \frac{0.85f'_c}{f_y} \times \beta_1 \times \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_y} = \frac{0.85 \times 280}{4200} \times 0.85 \times \frac{6120}{6120 + 4200} = 0.029$$

依韌性要求：

$$\frac{14}{f_y} \leq \rho \leq 0.75\rho_b = 0.0218$$

取 $\rho=0.018$

(2)梁斷面之決定：

$$m = \frac{f_y}{0.85f'_c} = 17.65$$

$$R_n = \rho f_y (1 - 0.5 \times \rho m) = 63.6$$

$$bd^2 = \frac{M_n}{R_n} = \frac{55.2 \times 10^5}{63.6} = 86792 \text{ cm}^3$$

$$\text{取 } d = 50 \text{ cm}, b = \frac{86792}{50^2} = 34.7, \text{ 取 } b = 35 \text{ cm}$$

(3)鋼筋之選取：

$$R_n = \frac{55.2 \times 10^5}{35 \times 50^2} = 63$$

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2mR_n}{f_y}} \right) = \frac{1}{17.65} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 17.65 \times 63}{4200}} \right) = 0.018$$

$$A_s = \rho bd = 0.018 \times 35 \times 50 = 31.5 \text{ cm}^2$$

選取4根10號鋼筋，故 $A_s = 32.8 \text{ cm}^2$

二、斷面之尺寸及排筋：

為固定剪力箍筋及斷面之對稱性，故在斷面上層外側放置兩支十號鋼筋。則複鋼筋之面積 $As' = 16.4 \text{ cm}^2$

1.梁高 (h) :

$$h = \frac{D}{2} + d + d_b + i = \frac{3.2}{2} + 50 + 1.27 + 4 = 56.8$$

取 $h=60\text{cm}$, 則 $d=53$, $d'=6.87$

2.主筋間距 (S_n):

$$S_n = \frac{1}{3}(b - 4D - 2i - 2d_b) = \frac{1}{4}(35 - 5 \times 3.2 - 2 \times 4 - 2 \times 1.27) = 3.9$$

3.

三、剪力之設計：

$$w_D = 0.6 \times 0.35 \times 2.4 = 0.5 \text{ t/m} < 0.6 \text{ t/m (ok)}$$

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b d = 0.53 \times \sqrt{280} \times 35 \times 53 = 16451 \text{ kg}$$

$$V_s = V_n - V_c = 36.8 \times 10^3 - 16451 = 20349 \text{ kg} \leq 1.06 \sqrt{f'_c} b d = 39022 \text{ kg}$$

剪力鋼筋選取 4 號鋼筋 , $A_s = 1.28 \text{ cm}^2$

$$S = \frac{A_s f_y d}{V_s} = 28$$

$$\therefore \max S = \min \left(\frac{A_s f_y}{3.52b}, \frac{d}{2} \right) = \min(38.2, 26.5)$$

選取剪力筋間距 $S = 25 \text{ cm}$

剪力鋼筋選用四號鋼筋從支承處斷面開始 @25cm 共 $9 \times 2 = 18$ 根 , 如圖七所示。

四、check M_n 及 V_n :

依雙鋼筋斷面梁來分析：

1.當複鋼筋降伏時，主筋之斷面積 A_{sy} ：

$$X_y = \frac{6120}{6120 - 4200} \times 6.8 = 21.7 \text{ cm}$$

$$C_c = 0.85 f'_c \beta_1 X_y b = 153647$$

$$C_s = 16.4 \times (4200 - 0.85 \times 280) = 64977$$

$$A_{sy} = \frac{C_c + C_s}{F_y} = 52.1 \text{ cm}^2$$

$$\therefore A_s = 32.8 < A_{sy}$$

$\therefore$ 當混凝土破壞時，主鋼筋已經降伏，但複鋼筋還未降伏

2.求解中性軸 X ：

$$C_c = 0.85 f'_c \beta X b = 0.85 \times 280 \times 0.85 X \times 35 = 7081 X$$

$$C_s = A_s' \left(\frac{X - d'}{X} E_s \times 0.003 - 0.85 f'_c \right) = 16.4 \times \left(\frac{X - 6.8}{X} \times 6120 - 238 \right) = 39112$$

$$T = Af = 32.8 \times 4200 = 137760$$

$$\therefore C_c + C_s = T$$

$$\therefore X = 13.2$$

3. M_n 及 V_n ：

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') = 93469 \times \left(53 - \frac{0.85 \times 13.2}{2} \right) + 44291 \times (53 - 6.8) = 64.8 t - m$$

$$V_n = V_s + V_c = \frac{A_s f_y d}{S} + 0.53 \sqrt{f'_c} b d = 39.2 t$$

2.2.2 試體 B (彎矩破壞模式)：

試體 B 之設計為彎矩破壞模式，為求設計簡便將試體 A 中主筋量減少

一半來設計（如圖八所示），則其標稱彎矩及標稱剪力分別為：

依雙鋼筋斷面梁來分析：

1. 求解中性軸 X ：

由前例可知 $A_{sy} = 52.1$

$$\because A_s = 16.4 < A_{sy}$$

$\therefore$ 當混凝土破壞時，主鋼筋已經降伏，但複鋼筋還未降伏

$$C_c = 0.85 f'_c \beta X b = 0.85 \times 280 \times 0.85 X \times 35 = 7081X$$

$$C_s = A_s \left(\frac{X - d'}{X} E_s \times 0.003 - 0.85 f'_c \right) = 16.4 \times \left(\frac{X - 6.8}{X} \times 6120 - 238 \right) \\ = 39112$$

$$T = Af = 16.4 \times 4200 = 137760$$

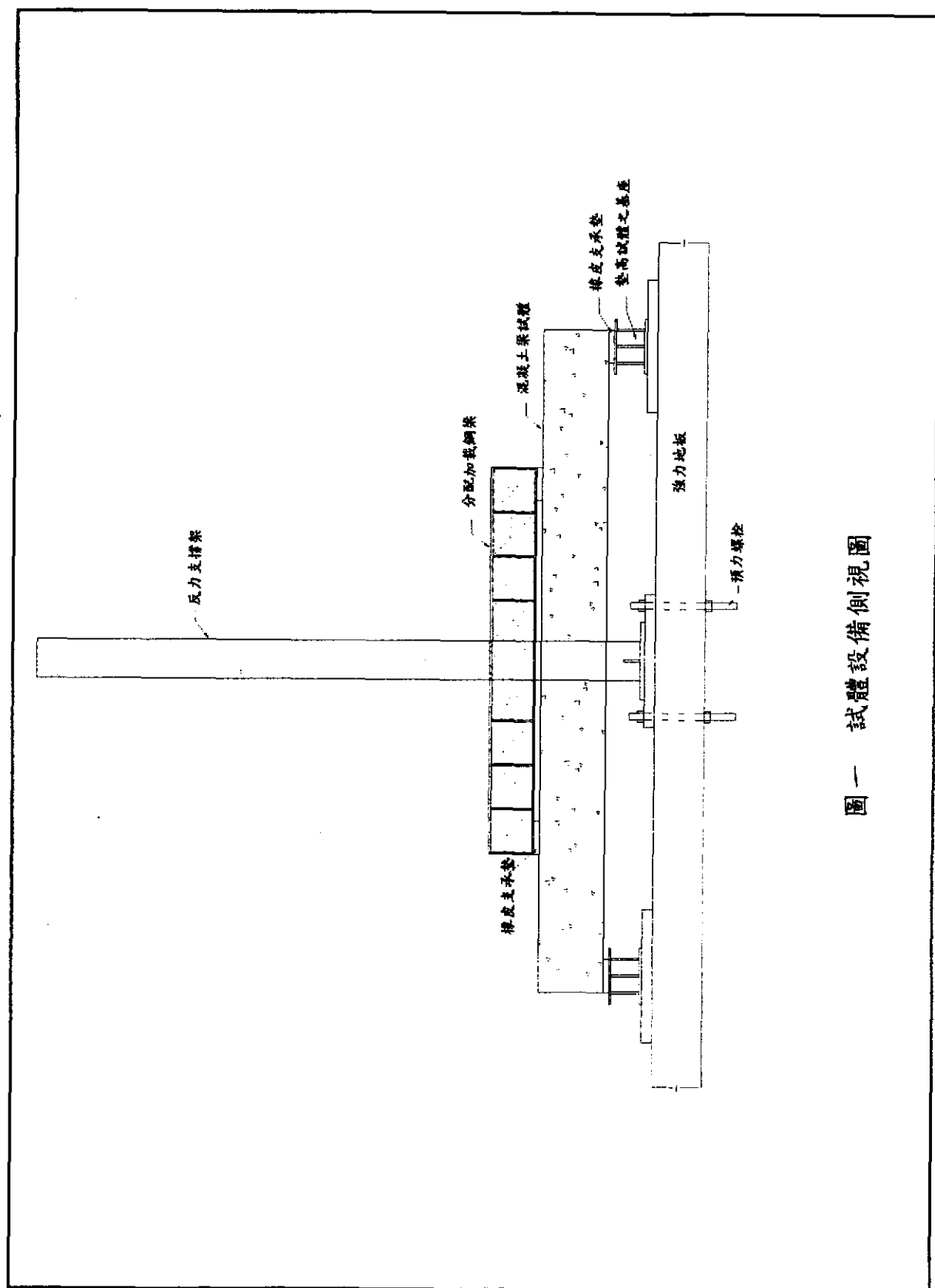
$$\because C_c + C_s = T$$

$$\therefore X = 8.1$$

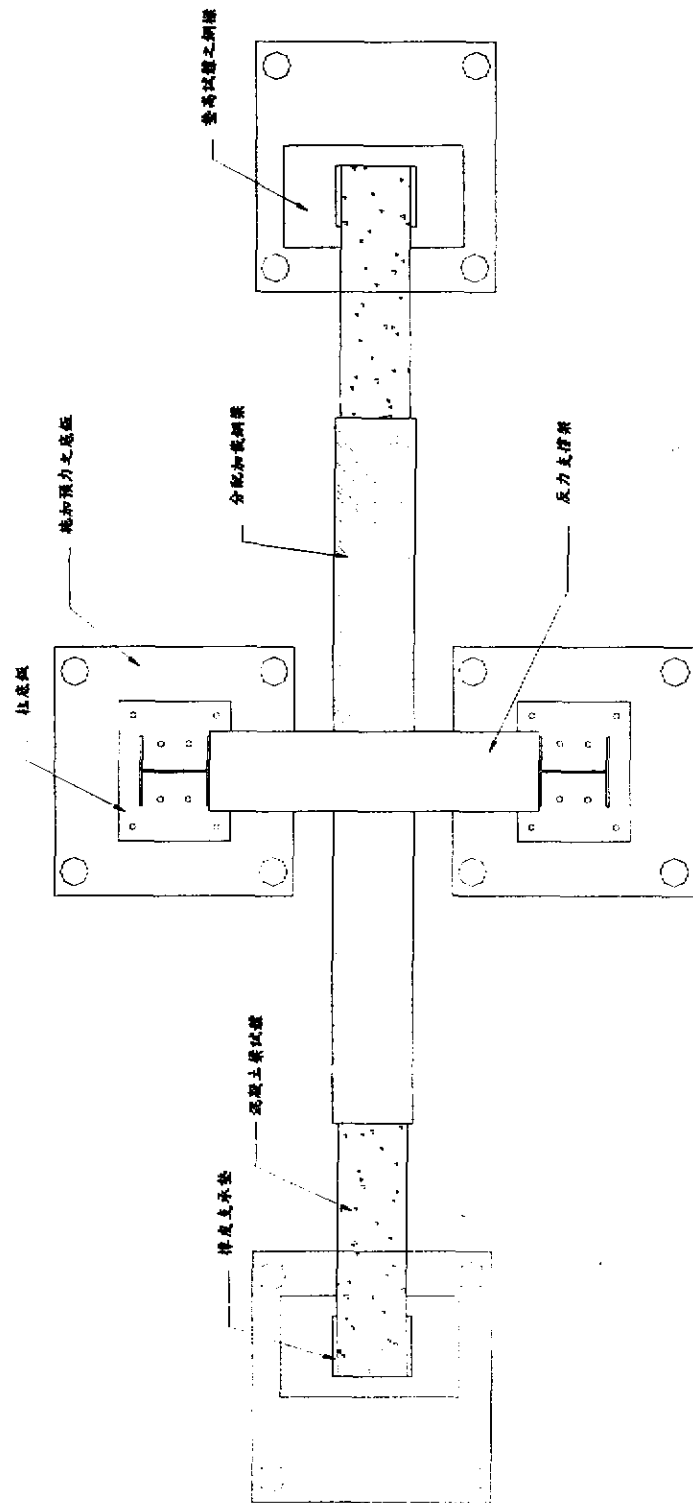
2. 標稱彎矩強度 M_n 及標稱剪力強度 V_n ：

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') = 57356 \times \left(53 - \frac{0.85 \times 8.1}{2} \right) + 11524 \times (53 - 6.8) \\ = 33.8t - m$$

$$V_n = V_s + V_c = \frac{A_v f_y d}{S} + 0.53 \sqrt{f'_c} b d = 39.2t$$

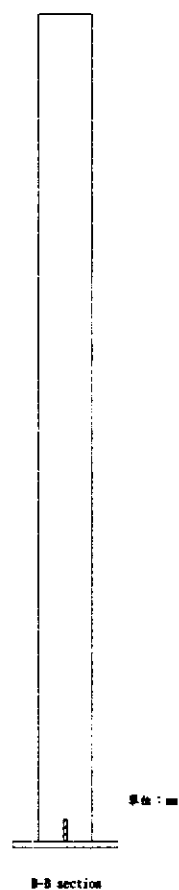
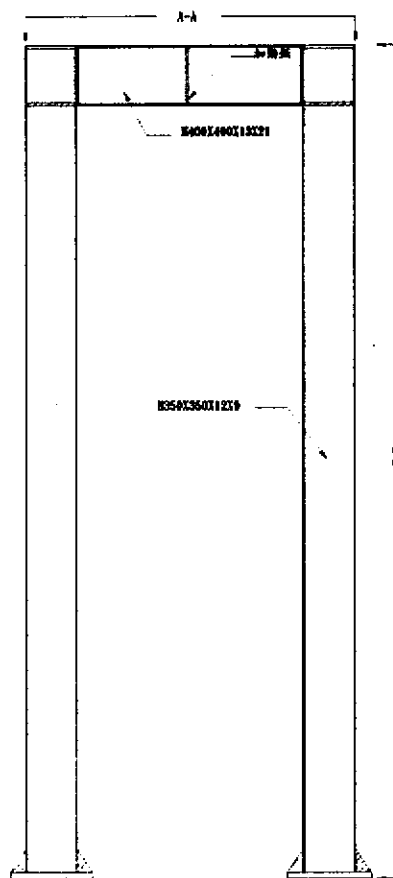
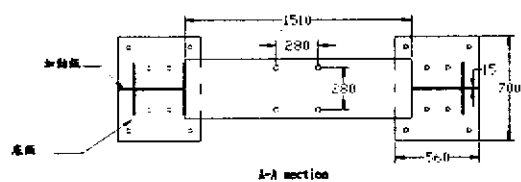


圖一 試體設備側視圖

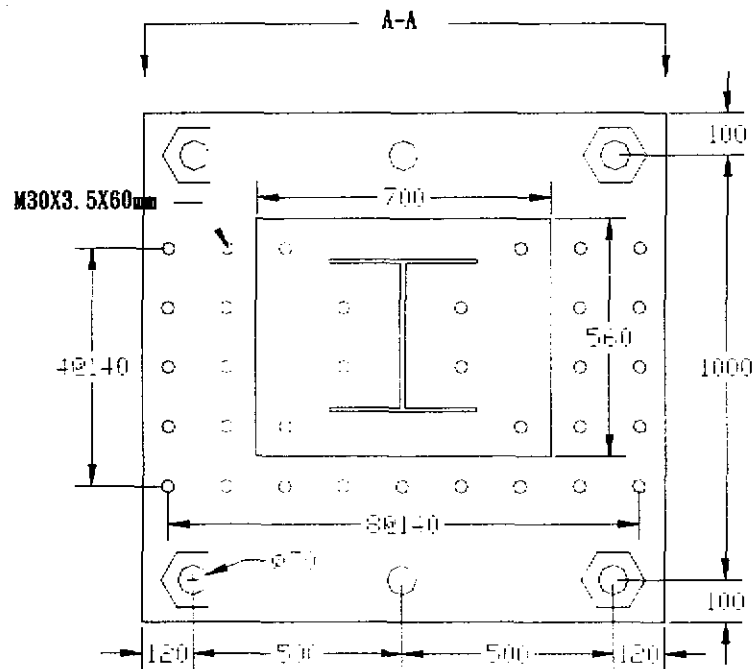
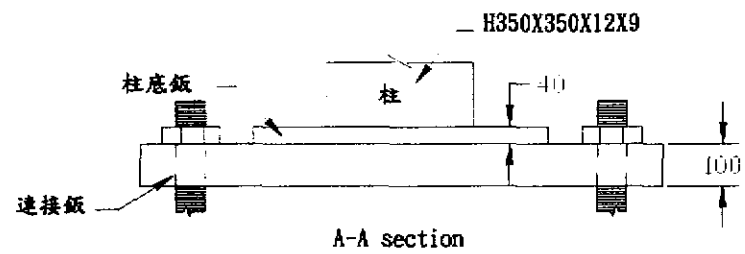


圖二 試驗設備上視圖

APPROXIMATE WEIGHT, 4000 LBS. CIRC. KILL

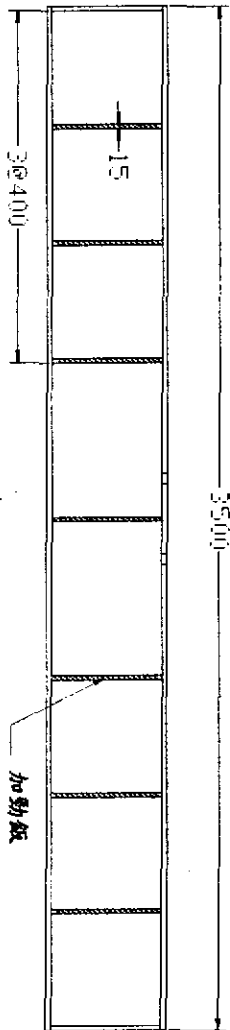
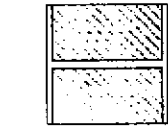
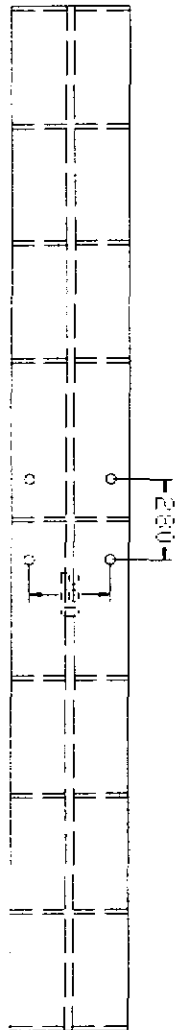


圖四 反力支撐架示意圖



單位：mm

圖五 底版示意圖



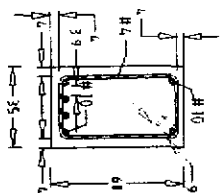
H414X405X18X28

加勁板

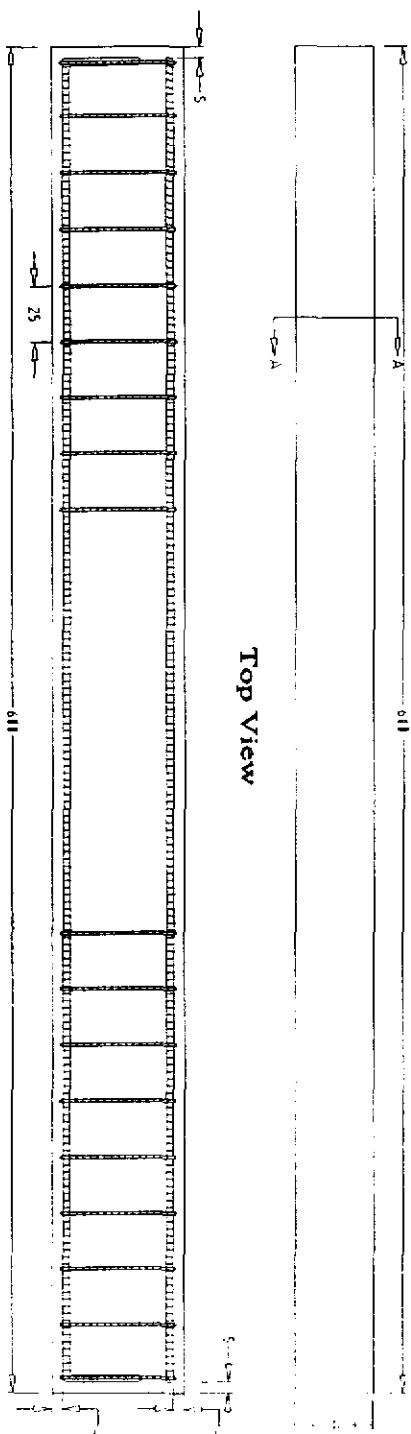
單位：mm

圖六 分配加載鋼梁

A-A section



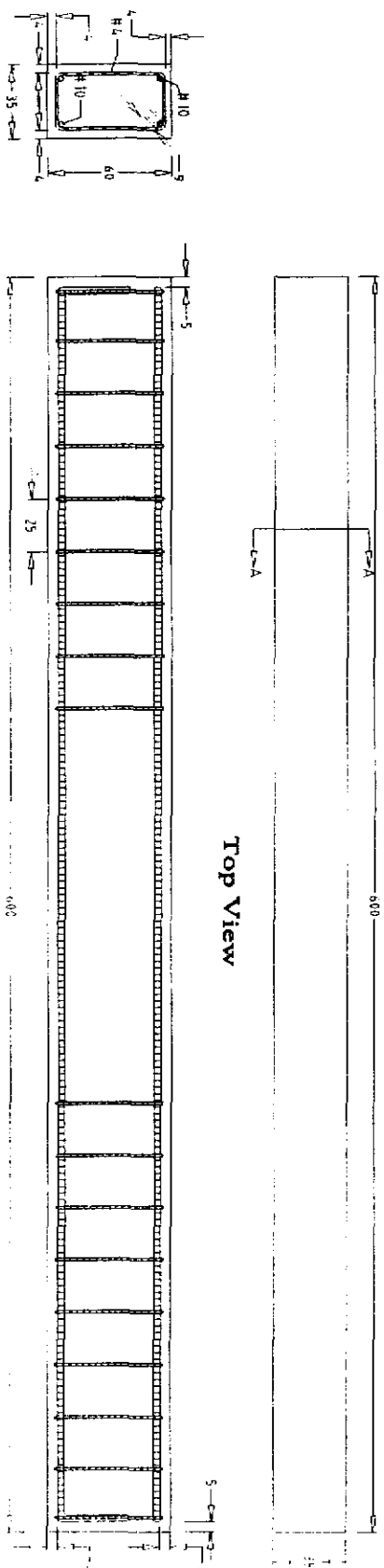
Top View



Side View

單位：公分

圖七 試體 A 之斷面尺寸圖



A-A section

Top View

Side View

圖八 試體 B 之斷面尺寸圖

單位：公分

第三章 新造混凝土梁非破壞檢測實驗

在本研究中，擬對新造混凝土樑於負載前後進行波速量測，以得知混凝土樑在實際破壞時，內部材料性質的變化如何影響彈性波速量測結果，並探討其相互之關係。在本實驗中，波速量測分別使用傳統的超音波法及吳等人發展的暫態彈性波波速量測法進行量測，並分別探討樑試體在加載後的波速變化情形。

3-1 混凝土超音波波速量測

混凝土結構極為複雜，內含水泥沙漿、石、孔隙、甚至微裂縫。在如此高度不均勻的介質中傳播，彈性波容易衰減，孔隙與裂縫也將造成彈性波的散射與繞射，石頭與水泥沙漿的介面更會反射部份波動能量。在波動基本理論中，高頻訊號衰減較快，散射的程度也較大，因而用於混凝土波速量測，則需使用較低頻之超音波探頭。

超音波波速量測法依探頭擺設方式大約可分為三種[1]，如圖 3-1 所示。直接傳播法(direct transmission)採對接方式，在發射探頭波束於縱向能量分佈較強的情況下，接收器所能接收到的訊號能量較多，訊號較清楚，且波傳距離也較好決定，但是僅適用於試體具有兩個平行面的情況。然而，在於非前面所述之情況時，若待測試體有一角落(corner)可供量測，則採用半直接傳播法(semi-direct transmission)。然而，因接收器不在發射器的正對面，故此時接收到的訊號，就比前述方法較為小些。此外，探頭形狀為有限面積，非理想的點波源及點接收器，故實際的傳播距離不容易決定。非直接傳播法(indirect transmission)用於待測試體僅能提供一接觸面作量測，接收到的訊號極小，同樣的，實際波傳距離不易決定。

量測混凝土波動性質時，須考慮超音波探頭髮射波束的方向性。一般而言，為使接收到的訊號較清楚，且使超音波傳播距離較易確定，探頭擺設位置以直接傳播法較佳。此外，依照前述方式所量測之波速實際上為超音波傳播路徑所經介質之平均波速。

由於混凝土的組成不似一般金屬材料為較均勻的介質，而使得超

音波在內部傳遞時能量損失較大。且要應用前述理論來求得混凝土波速，則須選擇所用超音波探頭的頻率，使試體內傳播的應力波波長遠大於試體組成顆粒大小，方能符合均質等向之假設。一般量測混凝土的探頭頻率約在 20-150kHz，與應用在金屬量測時所用的頻率不同。但若應用於試體瑕疵之非破壞檢測，則須考慮低頻探頭造成低解析度之影響。

在量測縱波波速時，因為縱波波速最快，最先到達接收器的仍是縱波波前，是故僅需判斷波前的到達時刻(arrival time)，即可得知超音波在試體內傳播的時間。

本研究所使用的超音波波速量測系統，是以一同步訊號分別觸發數位示波器(digital oscilloscope)及波形產生器(function generator)來作為時間參考原點。波形產生器於觸發後輸出一脈衝(burst)訊號，經由功率放大器(power amplifier)放大輸出電壓，傳至波源產生器(transducer A)產生超音波訊號，經由適當的耦合劑(couplant)將應力波傳入試體內，在試體內傳播一段距離後，由試體另外一端的訊號接收器(transducer B)接收訊號，傳至數位示波器，完成波速量測。其裝置方式如圖 3-2 所示。

由於探頭內的壓電材料需要較高的電壓來驅動（數百伏特），使其能產生足夠的超音波能量，經由試體內的衰減後，在另一端的接收器依然能夠收到有用的訊號。所以，系統在波形產生器之後加上一功率放大器放大電壓訊號。

探頭與試體間使用耦合劑，是因為接觸的表面並非完全光滑，其間的空隙會使超音波能量不易穿透，故應該以適當的液態介質來傳遞。縱波屬壓力波(pressure wave)，一般液態介質都能傳遞之；橫波屬剪力波(shear wave)，需選擇黏滯係數較大之介質來作為橫波探頭之耦合劑。

一般高頻超音波探頭皆以發射接收器(pulser receiver)來產生超音波，其內部提供接近探頭頻率的脈衝(pulse)來驅動探頭之壓電材料，使其有較大能量之輸出。因此，當使用波形產生器取代發射接收器，以產生驅動探頭所需之脈衝時，最好使用與探頭相同頻率的訊號。此外，應用於縱波波速量測時，驅動之脈衝訊號以方波為佳，如此方能

使探頭發出訊號的波前之爬升時間(rising time)較短，有利於訊號到達時刻的判斷。

由於所量得的訊號具重複性，可以連續多次量測，再利用數位示波器上的數學功能，以平均法將隨機雜訊(random noise)去除，方便於接收到的訊號之判讀。此法尤其適用於小訊噪比(signal-noise ration)之微弱訊號的量測。

系統中以同步訊號觸發示波器來當作時間參考原點，然而，觸發後由波形產生器送出脈衝訊號，經過功率放大器放大，再至探頭輸出訊號。因此，過程中將有時間延遲現象，必須經校正後方為正確的訊號時間原點。時間延遲的原因主要來自於探頭內壓電片與試體中間之面板的波傳時間，此外，電路內的訊號延遲亦是其中原因。由於縱波波速量測，是以波前到達時刻來判定波傳時間，故需先將縱波探頭對接，找出延遲的時間，以作為校正用；橫波波速量測，仍須先將橫波探頭對接，記錄發射器的原始波形，再與傳經試體後的訊號，作交互相關函數計算。但不需找出延遲時間，因為作以上計算時，就已經將延遲時間自動扣除。

3-2 暫態彈性波波速量測系統

在點波源作用於半無限域表面所產生的各種應力波當中，如圖 3-3，縱波傳得最快，而其波前會最早到達。故即使在一般混凝土結構上，表面感測器所接收到訊號中，其初始部份，是由表面縱波波前到達時所引起的擾動，而其他類型的應力波或邊界反射之訊號，則因為波速較慢或傳播距離較長，總會較遲到達。

圖 3-4 及圖 3-5 分別為為半個週期正弦函數點波源所引致半無限域的表面垂直位移與橫向位移的理論訊號[7]，圖中的橫座標為無因次化的時間，縱座標為無因次化的位移，其中 C_T 為縱波波速， t 為時間， r 為波源與接收器之間的距離， μ 為剪力模數， Q 為作用力的最大值。由圖 3-4 及圖 3-5 理論訊號中可發現，縱波波場之橫向位移訊號遠大於其縱向位移訊號。因此，以暫態彈性波法於試體表面量測縱波速時，量測縱波波前之表面橫向位移訊號可得較佳之精確度。

如圖 3-6 所示， S_1 及 S_2 為兩個橫向位移接收器，其中 r_1 為波源

與第一個接收器的距離， d 為兩個接收器之間的距離。波源產生的彈性波傳至兩接收器後，由接收到的兩個首達波之時間差可得傳播時間，將接收器的距離除以傳播時間即可求出縱波波速。

由波動力學理論，使用線彈性(linear elastic)行為假設，在等向(isotropic)、均質(homogeneous)的介質中，縱波波速有以下關係：

$$V = \sqrt{\frac{K \cdot E_d}{\rho}} \quad (1)$$

其中 $K = (1-\nu)/(1+\nu)/(1-2\nu)$ ， E_d 為動彈性模數， ρ 為密度， ν 為 Poisson's ratio。因此縱波波速與彈性模數之平方根成正比，和密度之平方根成反比，若根據 ACI318 建議，混凝土彈性模數與抗壓強度的平方根成正比，則縱波波速與抗壓強度的四次方根成正比，表示混凝土抗壓強度增加，波速亦會有微幅提高。

在無鋼筋的混凝土結構中，表面受到鋼珠敲擊後所產生的波傳行為中，表面縱波之波前訊號傳遞得最快，所以在表面感測器所接收到訊號中，其初始部份，是由表面縱波波前到達時所引起的擾動。而其他邊界反射之訊號，因為行走距離較長，總是較遲到達。

如圖 3-7 的鋼筋混凝土結構，在鋼筋正上方表面的位置，除了沿著表面路徑 1 傳播的彈性波訊號外，彈性波向下傳入混凝土內部時，由於鋼筋的波速較混凝土來得快，所以沿著鋼筋界面路徑 2 傳播這部份訊號在一段距離後會較沿混凝土表面傳播的訊號提早到達。因此量測首達波的波前訊號時，必須考慮經由路徑 2 所傳來訊號的影響[8]。

以波前到達時間來決定縱波波速的情形下，鋼筋對於縱波波速量測所產生的影響取決於最靠近量測點的鋼筋，因此保護層的厚度是結構本身最重要的參數，鋼筋直徑、鋼筋間距以及進行量測時的波源持續時間對於波前到達時間都不會有所影響。

對於單根及多根平行排列鋼筋的鋼筋混凝土，在有限差分數值模擬與實驗量測中，當量測方向與鋼筋徑向垂直時，位移訊號中縱波波前的到達時間皆不受到鋼筋存在的影響。這是因為在量測方向上並沒有連續的鋼筋介質存在，當彈性波傳入混凝土內部遭遇鋼筋時，所出現的更短時間路徑訊號要在很遠的距離才會提前到達，在實際的量測中不會表現出來。

在對於樑、柱等存在平行排列鋼筋的結構進行縱波波速量測時，

可以將量測方向垂直於鋼筋排列方向，量得混凝土中真實的縱波波速。而當混凝土內部存在有網狀鋼筋時，如樓版，可以選擇與鋼筋網斜交的方向進行量測，避免量測方向下有連續存在的鋼筋。同時若知道保護層厚度後，也可以計算出縱波訊號不受到鋼筋存在之影響的延遲距離範圍，在此範圍內量測，即可得到正確的混凝土縱波波速。建議的敲擊點與位移接收器之相對排列位置如圖 3-8 所示。

依據暫態彈性波理論，可架構出一套可攜式混凝土品質檢測系統(圖 3-9)，應用於現場之量測。由於暫態彈性波法只須在結構物同一側的表面進行量測，在使用上較超音波法更為靈活與方便。其組成構件包括：可攜式電腦(portable computer)、高頻類比數位轉換卡(A/D card)、位移感測器、前置放大器(pre-amplifier)、波源產生器及 LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)軟體。

可攜式電腦系統中所使用之數位類比轉換卡，其功能是將所量得之類比訊號，轉換為數位訊號，將資料傳入電腦中進行處理。本系統使用的類比數位轉換卡，在單頻道(single channel)模式下其取樣頻率最高為 50MSPS，雙頻道(dual channel)模式下其取樣頻率最高為 25MSPS。而實際量測時，以混凝土縱波波速 4000 m/s，兩位移接收器距離 0.1m 為例，取樣頻率對縱波波速所造成波速解析度上的限制約為 6m/s，如此應用於混凝土波速量測時已經足夠。

感測器方面使用由吳與方發展的橫向位移感測器[9]，配合前置放大器對於位移訊號進行前置放大。將兩個獨立的位移量測單元與前置放大電路整合在一起，成為單一探頭式組件，並且對於被覆(backing)的外形加以修改成為鈍錐狀，使感測器在現場應用能有更佳的接觸狀態，能適用於粗糙表面之量測。此外，兩個感測器之間距離固定亦可減少量測傳輸距離的誤差。

波源產生器是以鋼珠為波源，這樣產生的波源接近 $\sin^{3/2}(\pi t/T_c)$ ，其中 T_c 為接觸時間。在進行縱波量測時，因為注重的是波前到達訊號，因此以瓦斯槍將鋼珠擊出撞擊混凝土表面，使波源訊號具有更高的能量，因而首達波爬升訊號較為明顯，提高訊噪比(S/N ratio)，方便到達時間的判斷，並減少傳輸時間的量測誤差。

本系統以 LabVIEW 軟體進行資料擷取與計算，其圖形化的流程

控制對於程式設計與使用上都帶來相當的便利，在虛擬儀控的環境下，使用者可經由互動式人機介面輕易操作量測系統。

為了使現場量測步驟更為簡易，在系統控制程式中，利用閾值法完成縱波達時間自動抓取功能。由於雜訊的干擾會影響閾值法的正確性，因此在訊號傳入電腦後，以線性相位有限衝擊濾波器(linear phase finite impulse filter)處理之。對於計算後的波速，可依據相關的波速-抗壓強度校正曲線，輸出檢測點附近的混凝土之抗壓強度。系統的操作面板如圖 3-10 所示。

3-3 實驗結果

3.3.1 剪力樑破壞實驗

為獲得混凝土樑灌製均勻度及破壞後波速變化之參考基準，在混凝土樑施壓之前，先進行超音波及暫態彈性波波速的量測。由於鋼筋的位置會影響波速量測結果，因此先以鋼筋定位儀將鋼筋所在位置標出，做為波速量測取點之參考。而後將混凝土樑側面分割成 3x25 共 75 個區域，逐點進行波速量測。

如圖 3-11 及圖 3-12 分別為施壓前之超音波波速及暫態彈性波波速分布圖。由於量測點數極多，為分析容易起見，將試體各區域的波速大小以灰階的方式表示，顏色愈深表示此區域的波速愈高。由於超音波波速量測非常費時，因此僅量取部分區域做為參考。由結果可發現，超音波波速量測與暫態彈性波量測的分布情形，其趨勢大致上相似，其中的差異來自於量測方式造成波傳路徑的不同：超音波波速反應的是由發射探頭至接收探頭中間路徑的平均材料性質，而暫態彈性波波速反應出兩接收器之間表面附近材料性質。雖然如此，但整體來說，混凝土樑下半區域的波速總比上半區域來的高。這是由於試體灌製時，由於重力的效應，使骨材沉澱至試體底部，而骨材的波速比水泥沙漿高，造成試體之不均勻特性。這也顯示出暫態彈性波波速量測結果的確可檢驗出混凝土結構試體之非均質特性。

為探討混凝土樑在受到外力作用後，其破壞情形對縱波波速的影響。在混凝土樑波速量測後進行四點彎矩破壞實驗，如圖 3-13 及

3-14，試驗中規劃五個反覆加載階段，施加於試體 A，使裂縫得以發展延伸。而每個階段之起始位置為制動器之原點，並以規劃位移量作往復十次週期之加載，在試體中央架上位移計，以量測試體所承受的實際位移量。其加載階段如下表所示，加載的歷程如圖 3-15 至圖 3-19。

試驗加載階段	制動器位移	制動器之頻率
一	10±2.5 cm	0.1Hz
二	12.5±2.5 cm	0.1Hz
三	15±2.5 cm	0.1Hz
四	20±2.5 cm	0.1Hz
五	22±15 cm	0.05Hz

在加載的前兩個階段，僅可在試體樑的底部發現因彎矩造成的拉伸破壞垂直向上延伸的裂縫。在第三階段後，這些裂縫漸漸停止伸展，取而代之的是剪力破壞造成的裂縫，由底部支撐沿 45 度角逐漸向上生長，最後的破壞情形如圖 3-20 所示。

五個階段的加載破壞後，重複前述的量測方法，對混凝土樑所有區域再度進行彈性波及超音波之波速量測，以得知混凝土在受到外力破壞後的波速變化情形。如圖 3-21 所示之區域，在表面並未發現任何破壞裂縫，其暫態彈性波速量測時的接收訊號如圖 3-22 所示，其縱波波速為 3861m/s，與外力施加前的 3876m/s 比較，波速僅減少 0.4%，主要是因為此區域在樑負載時，所受的應力並不大。相對的，在樑受到剪力破壞的區域，如圖 3-23 所示，表面已經可以看到因剪力破壞造成的裂縫。在此受破壞的區域進行波速量測，其量測訊號如圖 3-24 所示，則波速會有大幅的衰減。從第二個接收器接收到的訊號，可以看出，沿表面附近傳播的縱波到達能量已經大量衰減，主要是因為此區域的材料因為應力過大造成破壞，產生的微小裂縫造成彈性波必須繞道而形，因此，不但能量大幅衰減，所量得的縱波波速也會因為傳播路徑變化而降低許多。以此區域為例，外力施加前後波速分別為 3624m/s、2968m/s，波速的衰減量高達 18.3%。

如圖 3-25，為整個樑的超音波波速衰減程度分布圖。由圖上的結

果可以發現，波速衰減較明顯的區域與實際破壞較嚴重的區域大致上相同。衰減最嚴重的區域，為樑的兩個支撐點開始的 45 度角傾斜剪力破壞裂縫附近，剛好與本實驗設計樑的剪力破壞結果一致。因此波速量測結果得確能夠反應混凝土樑在遭受外力破壞後，各區域的破壞情形。值得注意的是，如圖 3-26 所示，為彈性波波速衰減分布圖，同樣地，波速衰減最多者亦是沿著破壞區域附近的區域，而與超音波波速量測結果比較，其中些微的差距，來自於量測方法造成波傳路徑的不同：超音波法所反應的試探頭對接部分，材料內部的性質。而暫態彈性波法反應的是量測點表面附近的性質。

3.3.2 彎矩樑破壞實驗

彎矩破壞實驗的實驗架構如圖 3-27 所示，為三點彎矩實驗，施力直接作用於混凝土樑的中點，則破壞區域可預期的，將出現在樑的中心偏下的部位。因此，量測的區域分割，與前一剪力破壞實驗有所差別，中央部分分割成 4x11 共 44 個區域，而兩邊則分別分割成 3x8 各 24 個區域，總共有 92 個量測區域分布在樑的正面。

由於剪力破壞結果顯示，彈性波波速的衰減可忠實反映出混凝土樑的破壞情形，因此，在彎矩破壞實驗中，所有施力階段皆有完整的彈性波波速量測紀錄，包括超音波及暫態彈性波波速量測。

如圖 3-28 及圖 3-29 分別為施壓前之超音波波速及暫態彈性波波速分布圖。同樣的，為分析容易起見，將試體各區域的波速大小以灰階的方式表示。由結果可發現，超音波波速量測與暫態彈性波量測的分布情形，其趨勢大致上相同，整體來說，由於重力的作用使骨材下沉，混凝土樑下半區域的波速總比上半區域來的高。

接著，分成三個階段以力量控制進行加載，在每一階段完成，便釋放加載，使混凝土樑的外力僅剩自重，接著進行超音波及暫態彈性波波速量測，並記錄量測結果。加載過程如下表所示：

試驗加載階段	制動器加載力量
一	15 ton
二	25 ton

圖 3-30 所示，為試體加載後之破壞情形。圖 3-31 至 3-33 為各加載階段，超音波波速的衰減情形。圖 3-34 至 3-36 為暫態彈性波速衰減分布圖。由實驗結果中可發現，試體中央附近的下半部分，波速的衰減最為嚴重，這與彎矩破壞實驗的結果相符合。由於彈性波在傳播中遇到微裂縫時，必須改變傳播路徑，方能到達接收器端，因此，波速的衰減程度取決於波源至接收器的路徑之間，微裂縫產生的數目。由以上結果可以發現，在各加載階段，超音波及暫態彈性波波速衰減的區域皆與實際破壞的位置一致。值得注意的是，暫態彈性波較超音波的波速衰減較為明顯且分布情形有些許不同，其原因在於其量測方式造成波傳路徑的不同。超音波量測是在混凝土樑的兩面以對接的方式進行量測，波傳路徑是行經混凝土樑的橫斷面，也就是說，波傳路徑與主要的破壞裂縫平行，因此波傳路徑所受的影響較小，相對的，衰減也較小。反觀之，暫態彈性波量測是在混凝土樑側面進行，因此，波傳路徑與大部分的彎矩裂縫垂直，造成波傳路徑增長，波速也會大幅衰減。

3.3.3 小結

因此，由以上實驗結果，可以發現波速的量測結果，的確可以用以評估混凝土結構物的灌製均勻度，及結構物在受到外在負載後的破壞分布情形。然而，必須注意的是，超音波法與暫態彈性波法由於量測原理不同，其量測結果與應用限制會有些許不同，是必須釐清的。如本實驗所示，超音波波速量測必須將波源及接收兩探頭於試體兩側對接，且必須事先得知兩探頭的距離，這在實際現地的量測中並不容易達成，況且，在大型的混凝土結構物中，超音波能量大幅衰減，訊號不容易量測，因此，超音波法通常僅能適用於較小的試體。反觀，暫態彈性波法，由於只需在試體一表面進行量測，因此，特別適用於現地大型結構物如水壩、堤防等的波速量測，除此之外，此系統的操作便利性，亦適合對結構進行大面積的多點量測。

在未來的應用方面，對於新建混凝土結構，可以暫態彈性波波速

量測系統進行大面積量測，可獲得結構灌製均勻度，輔以傳統的鑽心法，將波速較低的部分實際鑽心後進行抗壓實驗，以評估混凝土結構的整體強度。此外，新的結構物在建造完成後，若先紀錄彈性波波速分布，則未來結構受到如地震等外力作用後，可再次量測波速分布，以波速的衰減來做為評估結構物的破壞程度及損毀區域之參考。總言之，本研究結果，提供一個新的現地混凝土結構非破壞檢測方法，用以評估新建結構之均勻性，及災後結構的損毀情形。

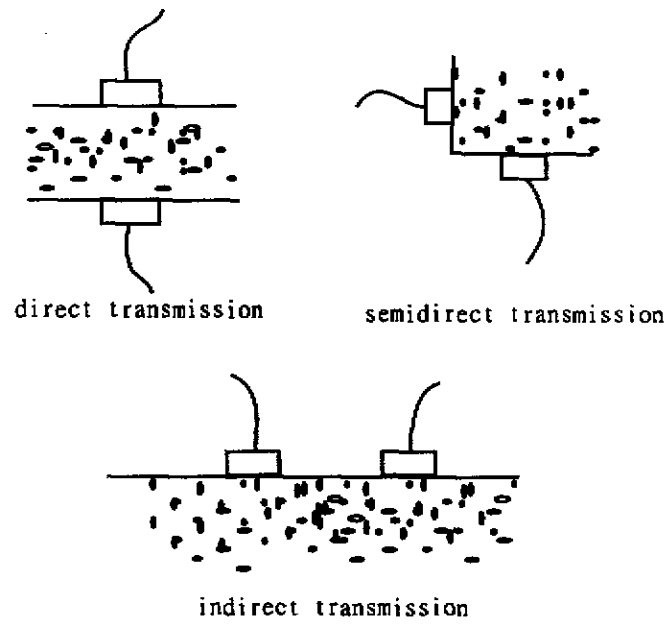


圖 3-1 常用於混凝土波速量測的探頭擺置法

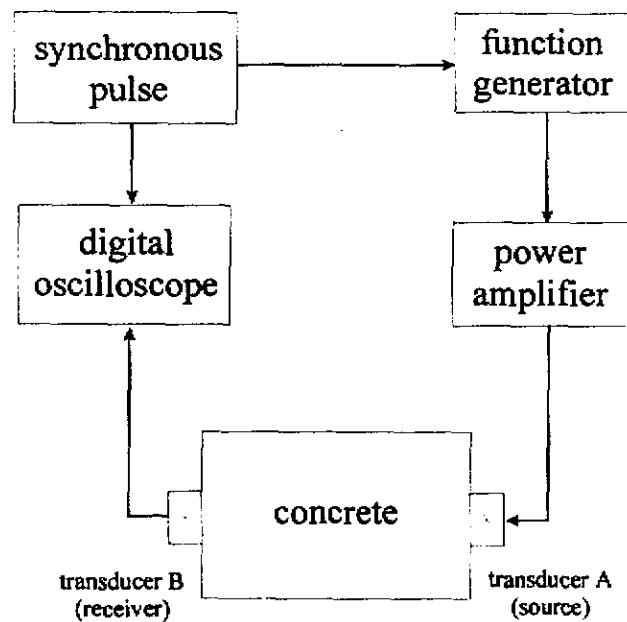


圖 3-2 超音波波速量測系統示意圖

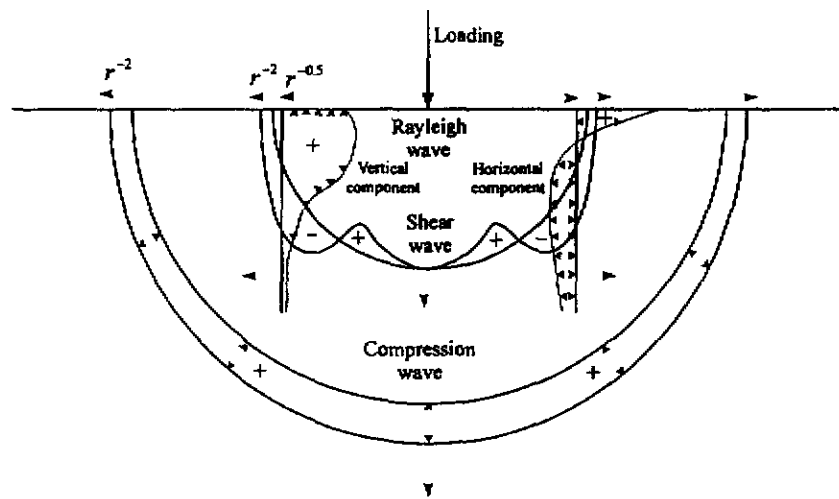


圖.3-3 半無限域表面受簡諧正向力之能量分佈示意圖

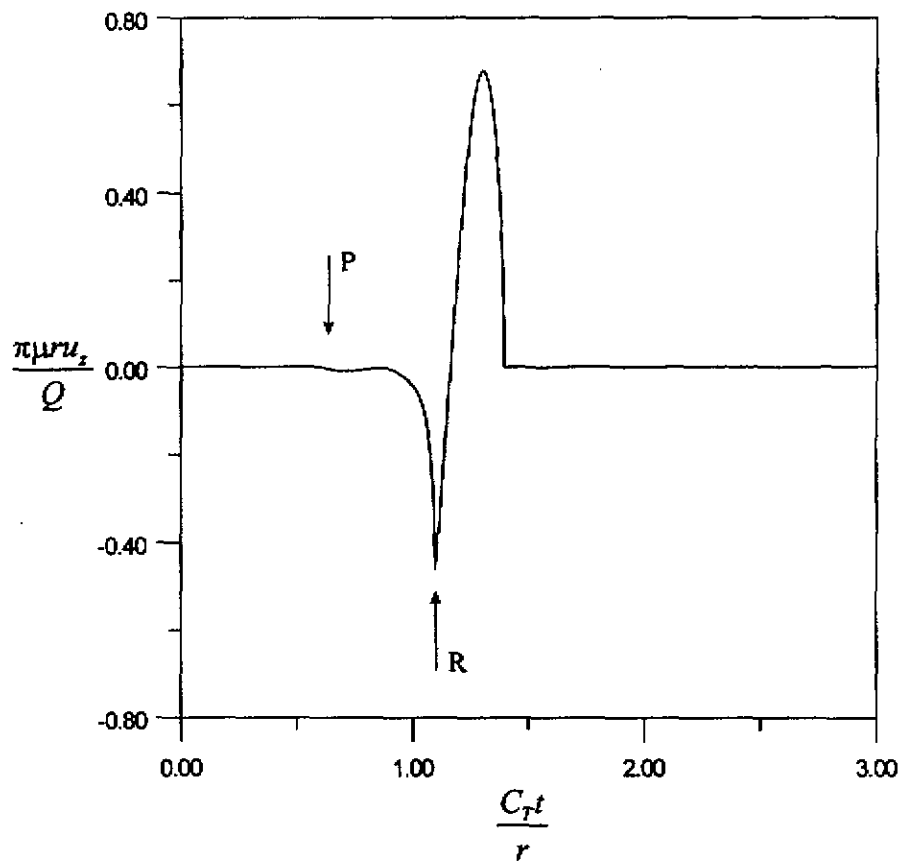


圖 3-4 sin 函數為波源之表面垂直位移訊號

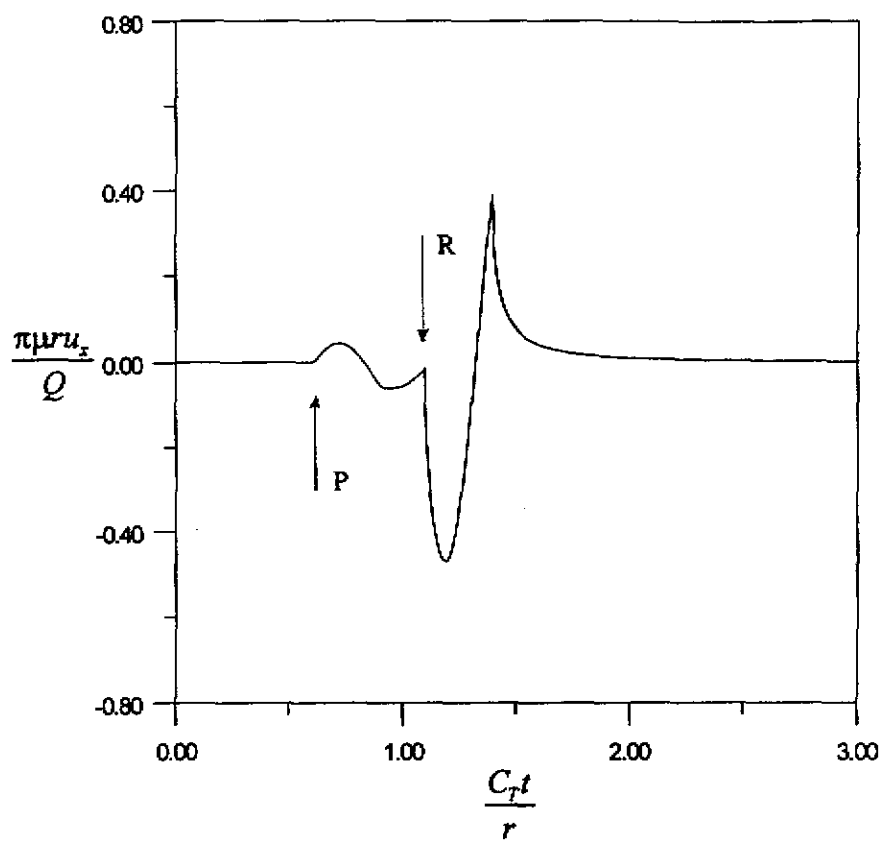


圖 3-5 sin 函數為波源之表面水平位移訊號

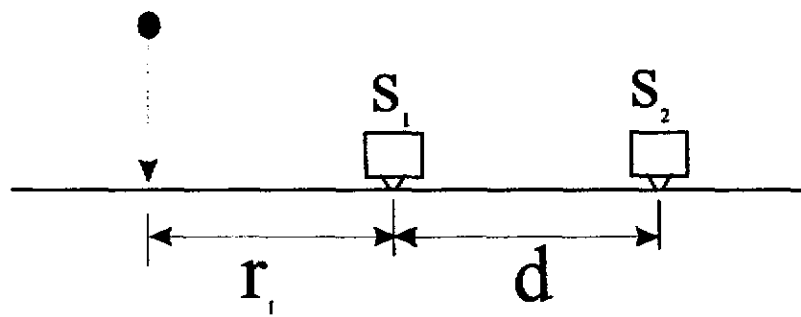


圖 3-6 彈性波波速量測法示意圖

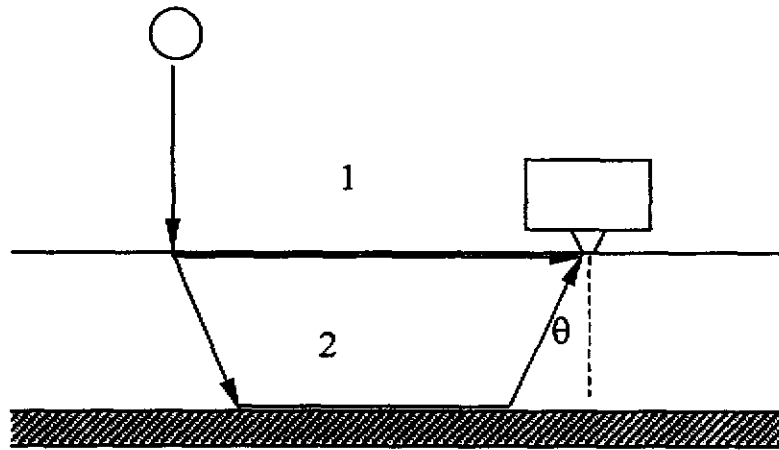


圖 3-7 鋼筋混凝土中彈性波波傳路徑示意圖

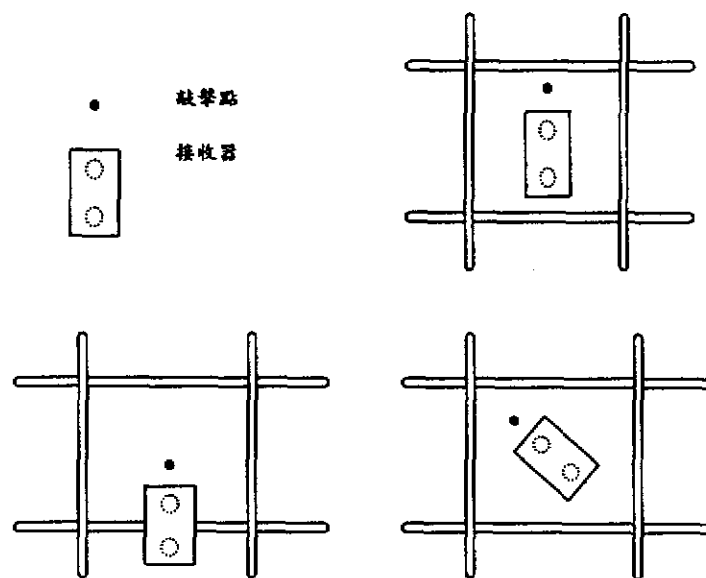


圖 3-8 建議敲擊點與接收器相對位置圖

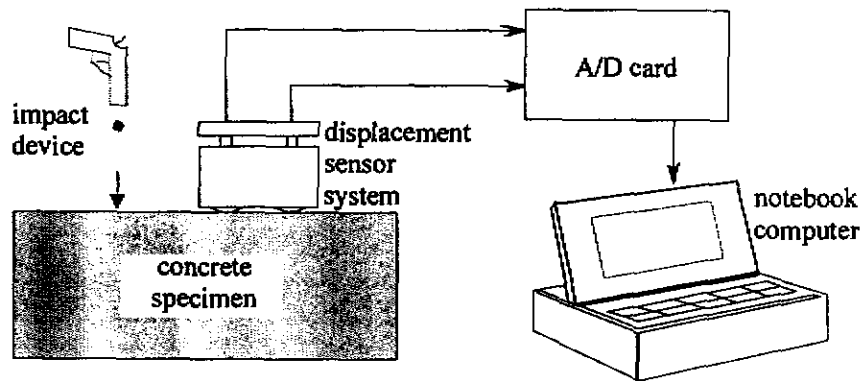


圖 3-9 混凝土品質檢測系統架構圖

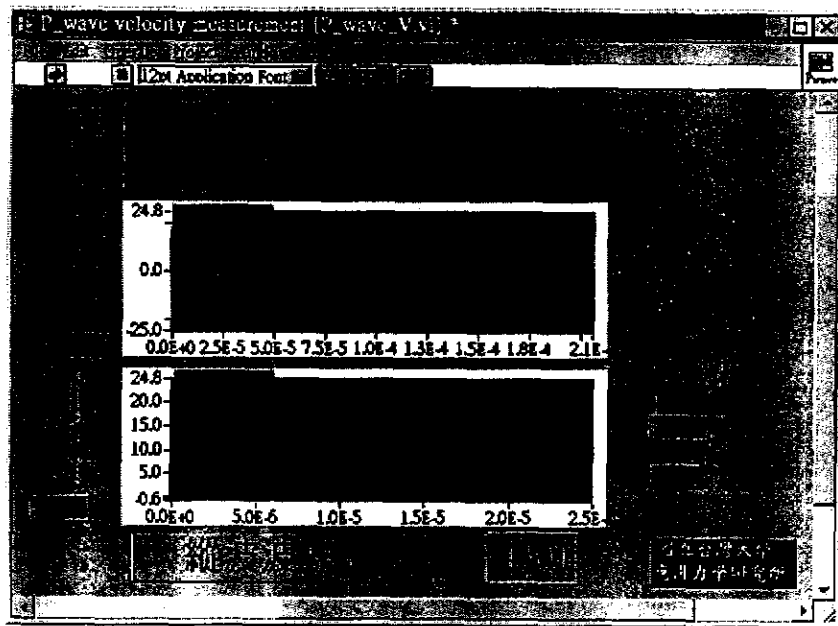


圖 3-10 混凝土縱波波速量測面板

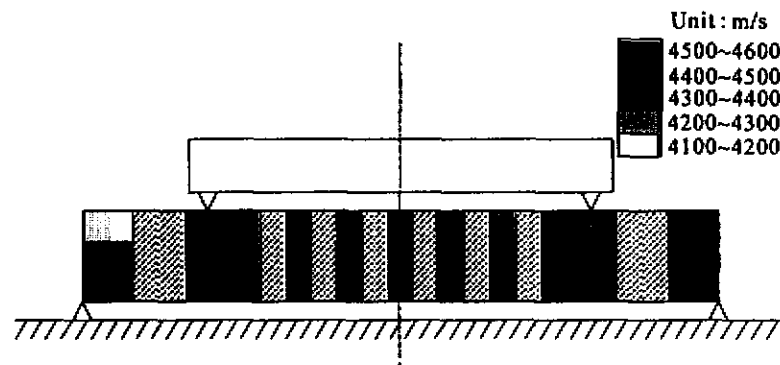


圖 3-11 施壓前超音波波速分布圖

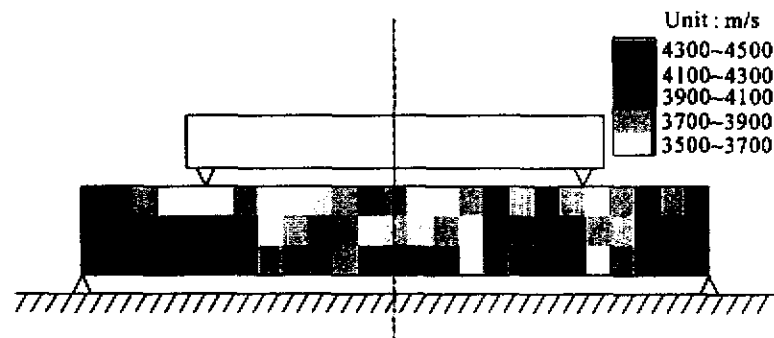


圖 3-12 施壓前暫態彈性波波速分布圖

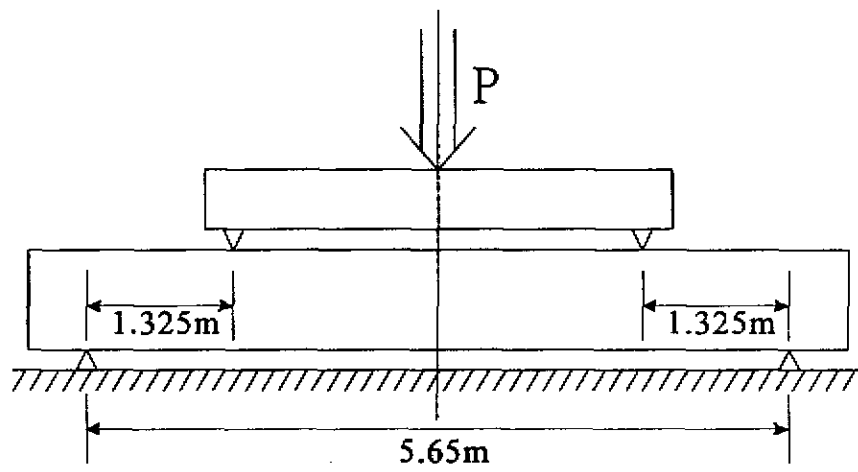


圖 3-13 四點彎矩實驗示意圖



圖 3-14 四點彎矩實驗架構

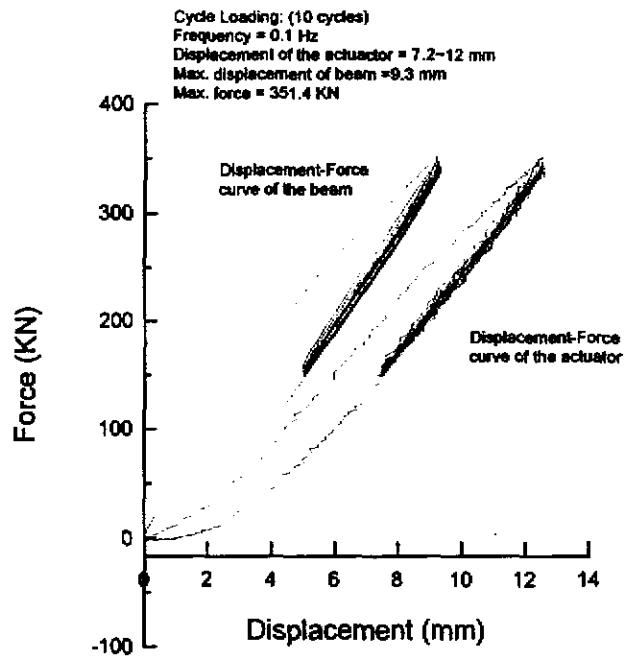


圖 3-15 第一階段實驗歷程

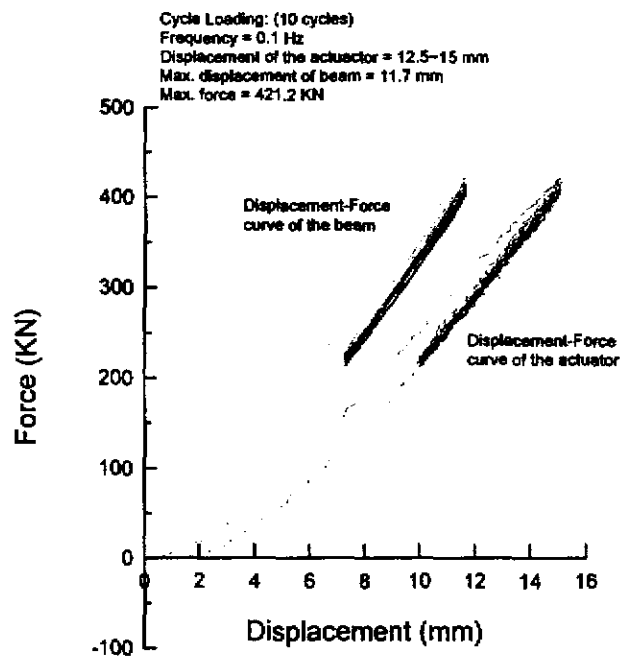


圖 3-16 第二階段實驗歷程

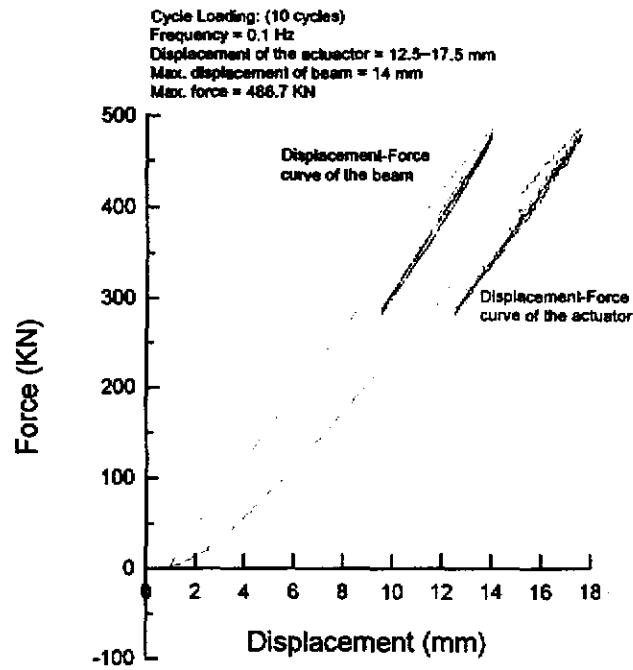


圖 3-17 第三階段實驗歷程

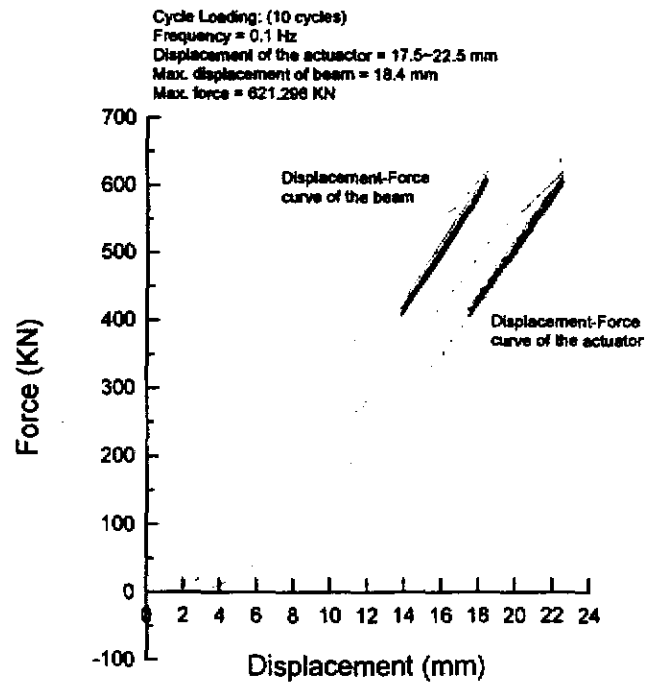


圖 3-18 第四階段實驗歷程

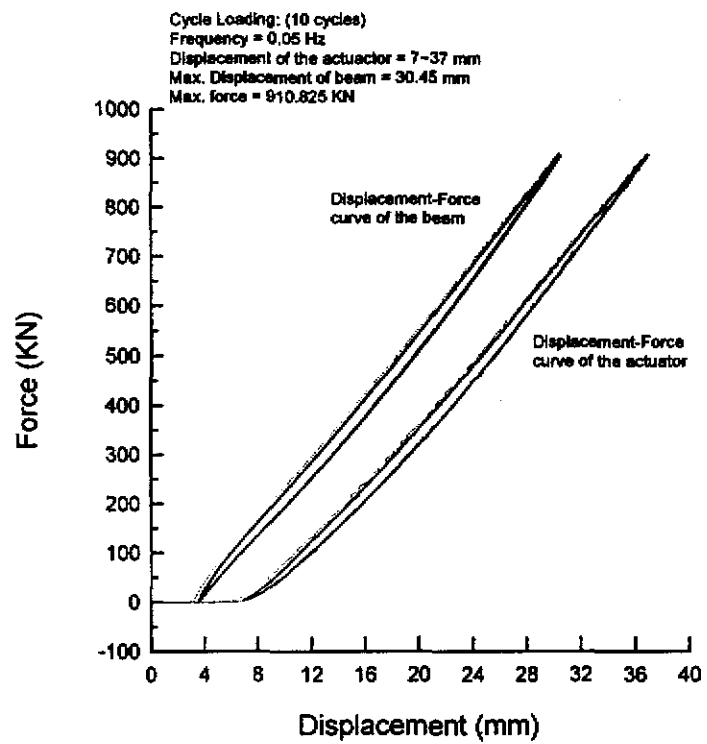


圖 3-19 第五階段實驗歷程

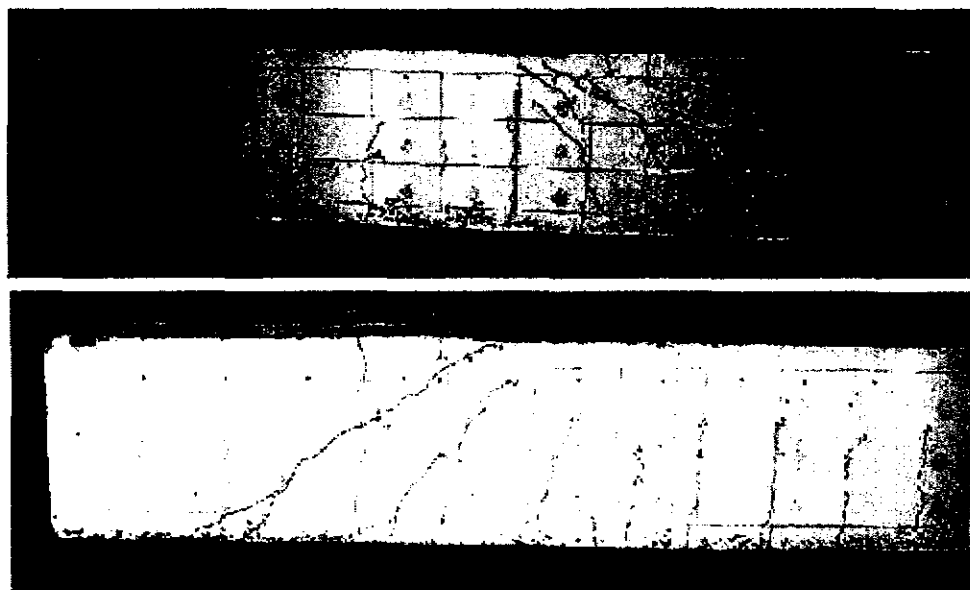


圖 3-20 試體破壞情形 (上：右半部，下：左半部)

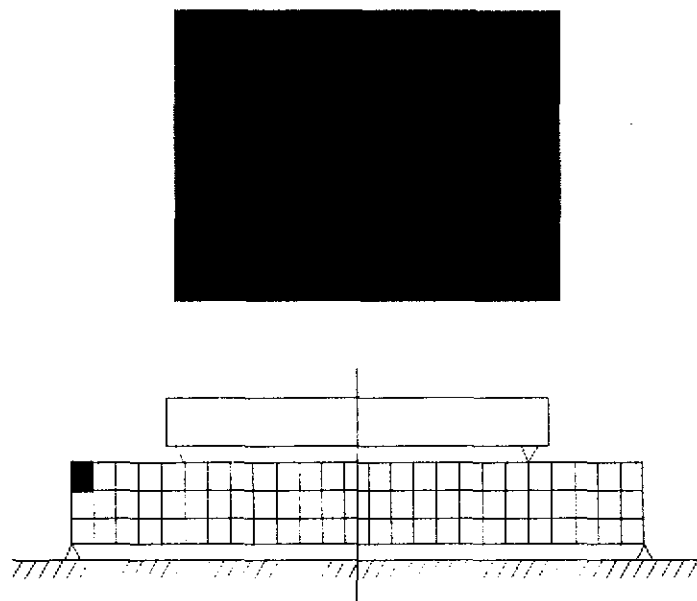


圖 3-21 破壞後波速量測位置示意圖（表面無缺陷）

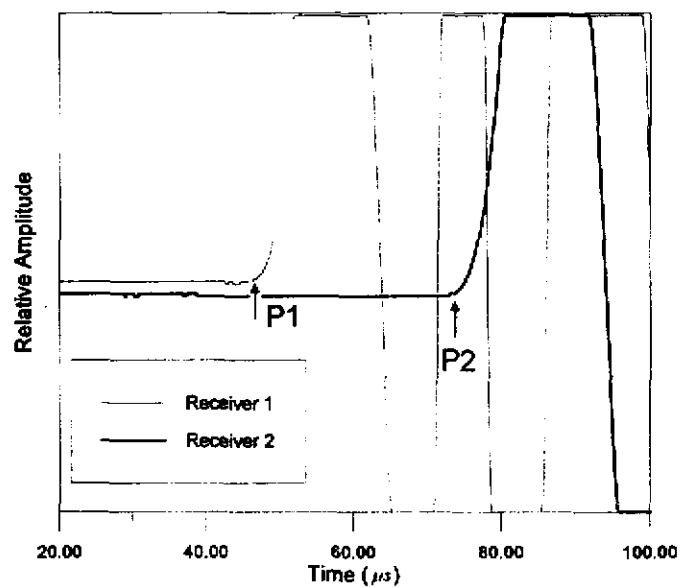


圖 3-22 破壞後波速量測訊號圖（表面無缺陷）

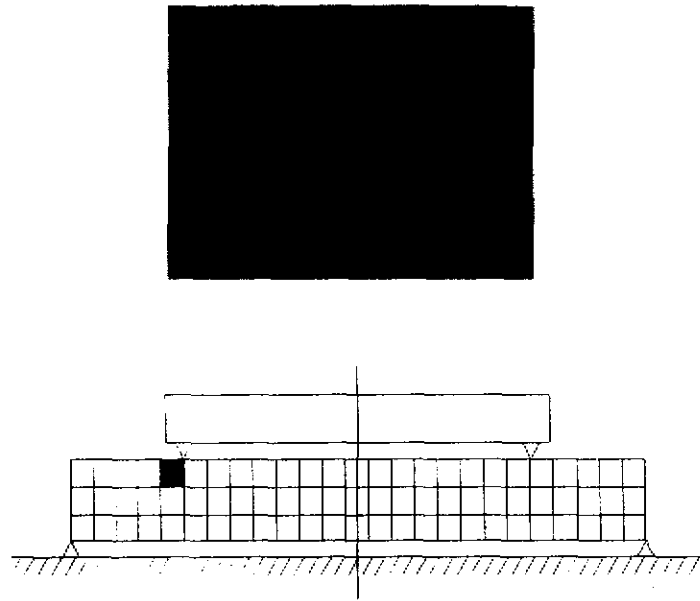


圖 3-23 破壞後波速量測位置示意圖（表面有缺陷）

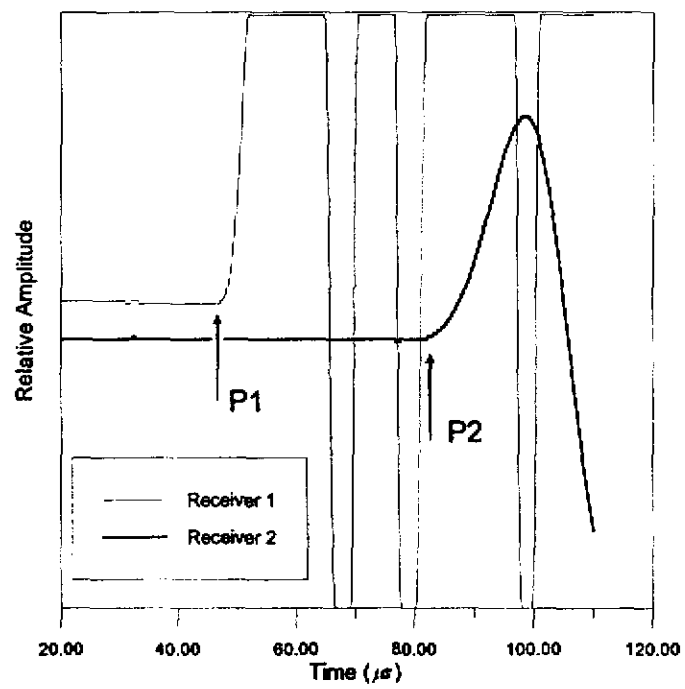


圖 3-24 破壞後波速量測訊號圖（表面有缺陷）

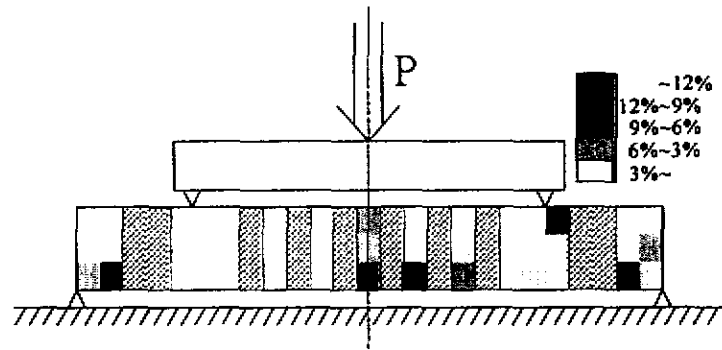


圖 3-25 破壞後超音波速衰減分布圖

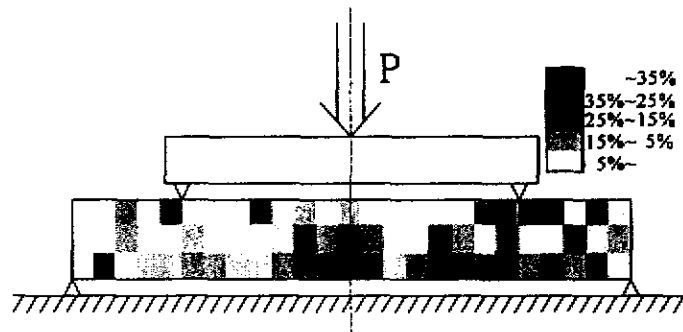


圖 3-26 破壞後暫態彈性波速衰減分布圖

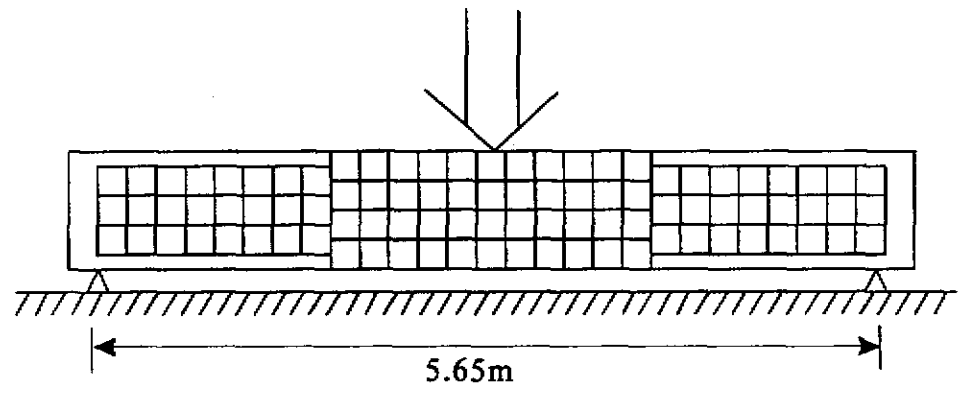


圖 3-27 剪力破壞實驗示意圖

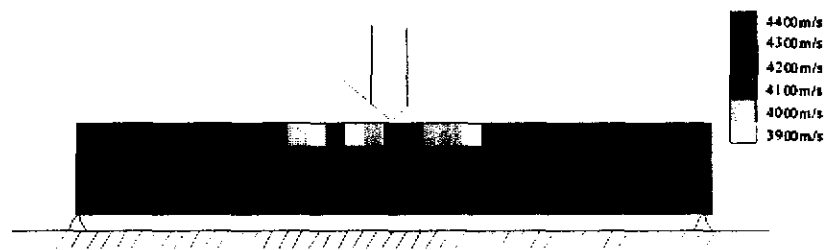


圖 3-28 超音波波速分布圖（自然狀態）

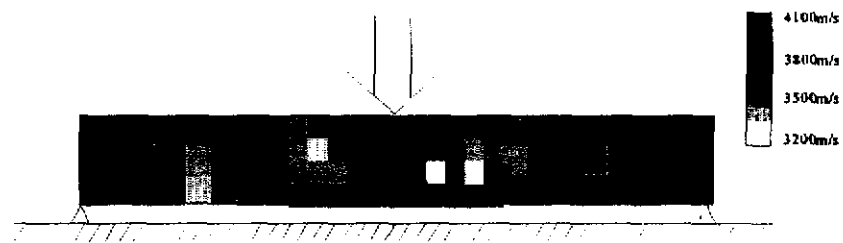


圖 3-29 暫態彈性波速分布圖（自然狀態）

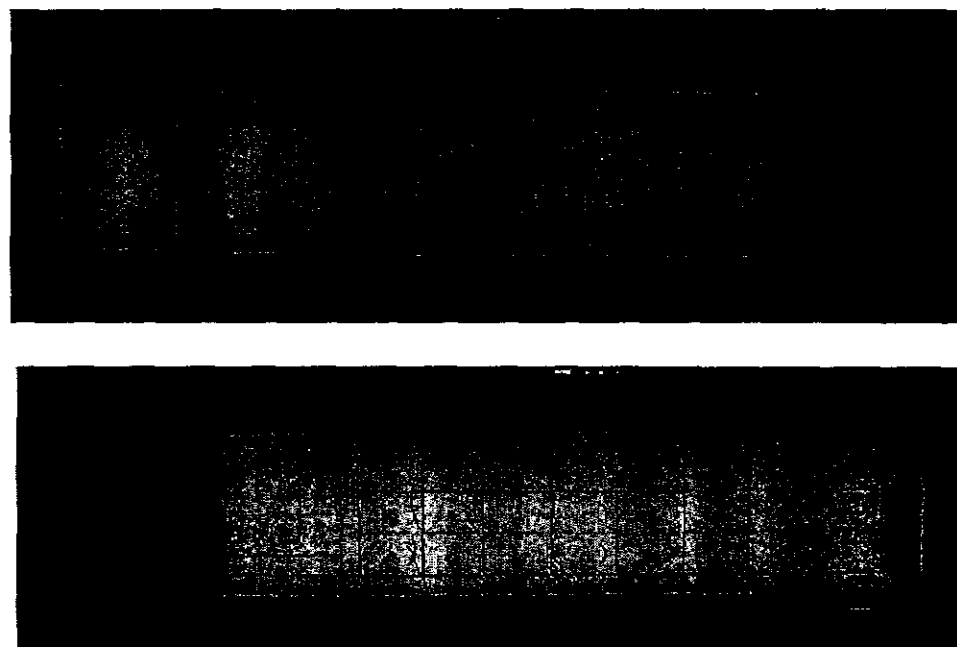


圖 3-30 試體破壞情形（上：左半部，下：右半部）

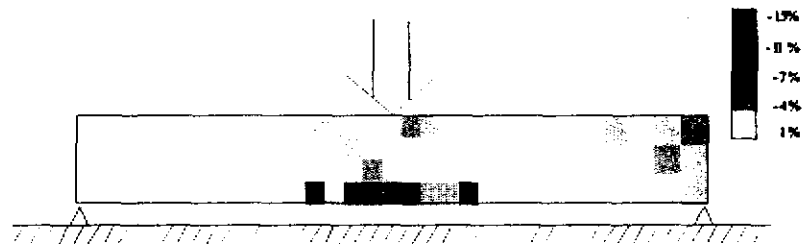


圖 3-31 超音波波速衰減分布圖（第一階段）

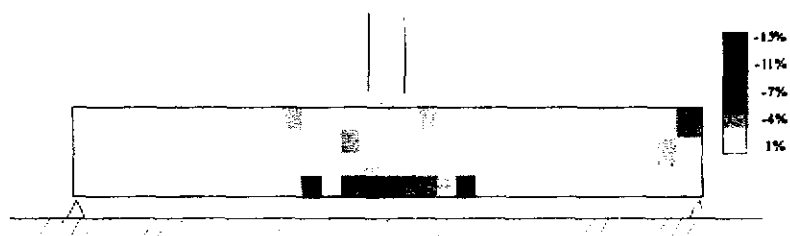


圖 3-32 超音波波速衰減分布圖（第二階段）

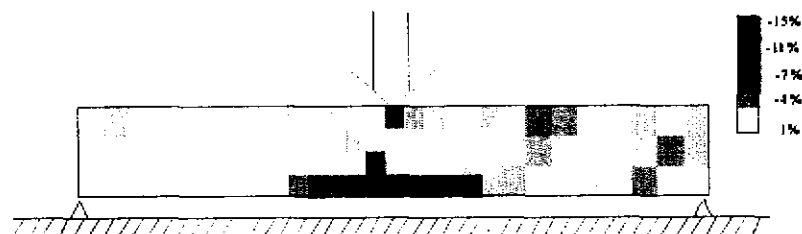


圖 3-33 超音波波速衰減分布圖（第三階段）

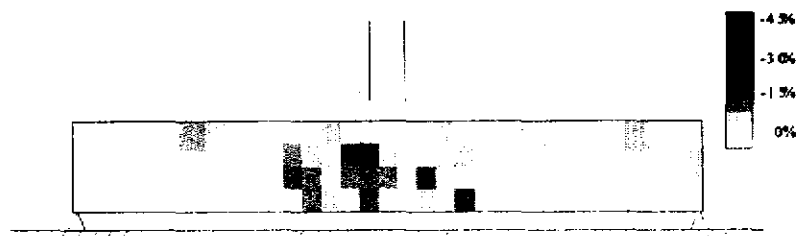


圖 3-34 暫態彈性波波速衰減分布圖（第一階段）



圖 3-35 暫態彈性波波速衰減分布圖（第二階段）



圖 3-36 暫態彈性波波速衰減分布圖（第三階段）

第四章 結論及未來展望

在台灣地區經過九二一地震後，更加突顯混凝土結構物安全評估的重要性，而非破壞檢測的應用自然扮演了不可或缺的角色。在本計劃中，實際設計灌製混凝土樑，於灌製完成後，對其進行波速量測，以獲得樑結構在自然狀態下的縱波波速分布情形，並藉以評估灌製的均勻性。計劃中，亦設計樑的施載架構，以模擬混凝土樑在遭受如震災後的破壞情形，在樑的加在過程前後，同時以超音波及暫態彈性波法量測整根混凝土樑的波速分布情形，並計算各區域的波速衰減狀況，由結果發現，衰減區域與破壞位置一致。證明縱波波速量測的結果變化，可以用來評估混凝土樑的破壞分布情形。綜言之，本計劃研究成果及結論如下：

1. 設計實體混凝土樑構件及其加載程序，藉由不同的設計，使樑構件產生剪力破壞及彎矩破壞兩種模式的破壞，以做為混凝土樑非破壞檢測技術研發之用。
2. 混凝土結構之縱波波速分布量測結果，可用來評估混凝土構件灌製之均勻度。由於波速量測的結果是波傳路徑附近材料性質的反應，因此，藉由此量測方法快速及非破壞性的特性，可對結構物進行大面積的量測後，再針對波速相對較低的區域，進行鑽心取樣試驗，若其抗壓強度符合規定，則整體結構強度可視為合格。如此，可改善傳統鑽心法隨機取樣之不客觀因素。
3. 由本研究的實驗結果可以發現，混凝土樑在受到外在負載後，由於微裂縫的產生，彈性波在混凝土內部傳播的路徑受到影響，導致縱波波速下降，破壞愈嚴重的區域，其波速衰減程度也愈大。因此，對於混凝土構件於震災後之破壞評估，波速量測對於此方面的非破壞檢測應用有著極大的潛力。
4. 在本研究中，所使用的暫態彈性波波速量測系統，由於僅需單一表面即可進行量測，有別於傳統超音波檢測必須對接的限制。因

此，對於水壩、橋樑等大型混凝土結構物，提供一種新的、快速的、便捷的波速量測方法。但是，必須注意的是，其量測的結果，所反應的是波傳路徑附近區域性的材料性質，在應用時必須釐清此一觀念。

本研究針對實際尺寸混凝土樑構件進行非波壞檢測方法之開發，發現彈性波波速量測結果於混凝土材料之完工品質及災後破壞程度評估有極佳之發展潛力，對於未來相關研究之建議如下：

1. 實際灌製混凝土構件，並在新灌製之混凝土構件表面進行波速量測，經由鑽心取樣後，進行抗壓試驗，以獲得現地混凝土材料抗壓強度與彈性波波速之相關曲線。
2. 針對混凝土受外力負載與彈性波波速變化之關係，建議可以先簡化試體的破壞模式進行試驗。對標準試體進行負載試驗同時詳細紀錄彈性波速之變化情形，以建立不同模式破壞程度對波速衰減程度之量化關係。
3. 由於暫態彈性波法所量得的是區域性的材料性質，建議未來應深入研究與探討波源形式（如波長、頻率組成等）與影響區域的關係。

致 謝

本計劃混凝土樑構件之負載實驗部分，承蒙國家地震中心提供場地設備，及相關人員全程協助試體及加載構件之安排，使得實驗得以順利完成，特此致謝。

參考文獻

1. V. M. Malhotra and N. J. Carino, "CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete ", *CRC Press, USA*, (1991)
2. "混凝土圓柱試體抗壓強度之檢驗法", *CNS 1232*.
3. T. T. Wu, J. S. Fang, G.Y. Liu, and M.K. Kuo, "Determination of Elastic Constants of a Concrete Specimen Using Transient Elastic Waves", *J. Acoust. Soc. Am.*, **98** (3), 2142-2148, (1995).
4. T. T. Wu and J. H. Gong, "Application of Transient Elastic Wave to the NDE of Plate Structure with Cavity or Inclusion", *J. Acoust. Soc. Am.*, **94**, 1453-1460, (1993).
5. T. T. Wu, J. S. Fang, and P. L. Liu, "Detection of the Depth of a Surface-breaking Crack Using Transient Elastic Waves", *J. Acoust. Soc. Am.*, **97**, 1678-1686, (1995).
6. N.J. Carino, M. Sansalone, and N.N. Hsu, "A Point Source-Point Receiver Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete," *ACI Journal*, proceeding, **83**, 199-208 (1986).
7. N.J. Carino and M. Sansalone, "Detection of Voids in Grouted Ducts Using the Impact-Echo Method," *ACI Materials Journal*, **89**, (3), 296-303 (1992).
8. Ahmed E. Ben-Zeitun, "Use of Pulse Velocity to Predict Compressive Strength of Concrete," *International Journal of Cement Composites and Light Weight Concrete*, **8**, No. 1, 51-59, (1986).
9. "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete," *ASTMC597-71* (1979).
10. T.-T. Wu, J.-H. Tong and P.-L. Liu "Measurements of In-situ Wave Velocity of Concrete Using Transient Elastic Waves," *Progress of Quantitative Nondestructive Evaluation*, Montreal, Canada (1999).

附 錄

1. 震災後混凝土結構檢測技術之開發

總計畫（吳政忠、劉佩玲、柴駿甫）

2. 混凝土版之裂縫偵測理論及技術開發

子計畫一（王仲宇）

3. 以非破壞檢測技術檢定基樁缺陷之幾何資料(II)

子計畫二（廖述濤、吳政忠）