

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

土石流監測與預報系統之研究--總計畫暨子計畫:土石流監測與預報系統之研究(III) 研究成果報告(完整版)

計畫類別：整合型
計畫編號：NSC 95-2625-Z-002-006-
執行期間：95年08月01日至96年07月31日
執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人：劉格非

計畫參與人員：博士班研究生-兼任助理：許峪萇、吳映昕
碩士班研究生-兼任助理：張哲維、艾昱安

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 96 年 12 月 14 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

土石流監測與預報系統之研究（三）

Debris Flow Monitoring and Forcasting System (III)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC 95-2625-Z-002-006 -

執行期間：95年8月1日至96年7月31日

計畫主持人：劉格非

計畫參與人員：許峪萇、吳映昕、

成果報告類型：完整報告

處理方式：立即可公開查詢

執行單位：國立台灣大學土木工程系

中 華 民 國 96 年 12 月 14 日

目錄

第一章	前言	1
第二章	土石流監測與預報系統	8
第三章	地聲探測器能力與試驗	8
第四章	微波探測	35
第五章	外部性理論之應用	49
第五章	結論	65

摘 要

土石流的觀測系統需要許多零件，本計劃負責研發地聲探測器與微波遙測儀，地聲探測器部分經現場資料分析，確認其有效範圍在 50 公尺內，同時能分辨泥流、水流、石流等特性，也能測量波速與規模。並經室內試驗，建立標準過程與機制，據以檢定儀器，移動式設備也規劃完畢。微波部分校園現地試驗，證實能穿透數叢與灌木，並能同時找出發射範圍內的多個物體，距離也可以準確到 0.5%，探測距離可達 400 公尺，移動式設備也初步完成。

目前政府在推行「土石流特定水土保持區」的劃定過程中，因限制了居民開發活動，常引起當地民眾的反彈或抗爭。政府若要繼續執行的話，必須付出額外的執行成本，且可能造成民眾更大的反彈，所以大多是暫緩執行，但這期間中若有災害發生，政府就必須付出更多災後整治和其他相關之社會成本。這種情況正是經濟學之外部性問題。因此，本文嘗試以經濟學中之外部性理論針對這些因子加以討論，並依據外部效果內部化的方式，評估相關的補償措施，以降低未來政府在劃定土石流特定水土保持區時所要付出之執行成本。此分析也證實，只要監測設備能給予民眾十分鐘逃生時間，資害損失可以大幅下降。

關鍵詞：觀測系統、地聲探測器、土石流特定水土保持區、外部性、直接損失

第一章 前言

1.1、整合計畫背景與緣由

土石流是一個非常複雜的問題，發生原因很多。從開始有單一石頭顆粒運動到發生大規模土石流動行為之過程中，其相關力學機制不但多而且複雜，多數力學機制到目前仍停在學理探索階段，因此土石流之發生或災害預報必須結合多種不同資料，再配上力學與統計才有可能得到較高百分比之預報成功率。因此將任何正在研究、已在利用或將來會研發的設備整合成一套系統是目前極重要的工作。國外的例子如美國地調所(USGS)在聖海倫火山(Mt. St. Hellen)地區結合地聲、紅外線、航照、水壓系統而成為火山土石流監測系統；義大利在 Italian Atps 用地聲、攝影機與超聲波結合之系統來監測泥石流；而日本京都大學防災研究所在澤田教授負責的觀測所(在 Gifu)更是將所有的儀器均整合並試用於一地點，因此該所在土石流之監測技術上可說是領先全球。由這些例子可瞭解一個集中並整合科技於現場之試驗場所對研究是非常重要的。

過去十年來，國科會、農委會也都斥巨資從事土石流相關研究，最早農委會為了實際需求，在全省裝置了多組以雨量資料為主的土石流預警系統，但該系統獨重雨量資料，因此難免有誤警或未警之情況發生，造成民眾對該系統之信心降低。自 90 年開始，農委會利用衛星系統在全省裝設了 15 個土石流觀測系統，目前系統已大部分完成，因此可提供及時影像與相關資料供學者專家研判，但可惜的是，該系統未能與土石流相關理論結合而提供進一步的分析與自動化處理，因此僅具觀測功能。而國科會自 90 年開始的「土石流監測技術之研究」群體計畫，也在南投神木村設立了一個自動觀測站，可惜該地一直沒有土石流發生。該計畫也有了各種觀測設備儀器如何安裝，如何解讀資料等的初步結果。本計畫之目的即為以過去「土石流監測技術之研究」結果為基礎，加入更多設備的研發，建立更多的觀測站，加強各項觀測設備理論之實用性，使得觀測資料真正可以拿來做預警之用。

目前國內土石流之研究單位與學者雖然多，但方很少有完整並公開之試驗資料可供交流討論。而理論又缺少現場資料來證明，儀器亦缺乏現場應用來考驗，因此為了推動本土研究之進步，亟需建立一個供大家使用之平台。本群體計畫就是要朝此方向邁出第一步，先經由儀器之整合建立一個共享之監測中心，再由此刺激土石流研究方向之修正，最後建立所有研究成果之驗證標準。本研究群更將延續前一期的「土石流監測技術之研究」，將其中多項本來偏重於可行性研究之成果，更進一步推到可以做數量上的預測，因此本群體計畫為「土石流監測與預報系統之研究」，除了著重預報技術外，更強調為系統預報，而非以單一儀器所得資料來預報，因此在多樣性與重複性之下，自然比單一系統穩且準。

而前一期「土石流監測技術之研究」的部分成果經總計畫主持人在第三屆國際土石流研討會上報告後，獲得多個國家的重視，更獲得俄國農政單位邀請赴俄演講，俄國並表示將派員到台灣以便購買或學習本計畫的成果。為了加強監測技術的水準，因此繼續本期計畫。

1.2、整合計畫總體目標

本整合計畫之總體目標預計有下列四項

1. 整合國科會與農委會過去土石流監測之部分相關研究
2. 研究並分析各類監測設備之能力與應用範圍，並加強各類儀器的預測能力
3. 發展一套結合各種土石流監測儀器之預報系統
4. 建立一個土石流理論測試平台，和相關預報科技之展示與訓練虛擬中心

以下就每一項分別作一說明：

1.2.1 整合國科會與農委會過去土石流監測之部分相關研究

本群體計劃事實上是延續國科會過去「土石流監測技術之研究」群體計劃，而且成員也是以該群體計劃為主體，再加上中興大學水保系陳樹群教授與新進人員黃名村助理教授。陳樹群教授過去也有執行農委會的部分監測計劃，此次將會將其在豐丘與九九峰等處之設備，一起整合到本群體計劃的體系中，使本群體計劃的資料涵蓋面更廣。而本群體計劃之成員研究面基本上已幾乎包含國科會計劃中曾研究過土石流監測設備的人員，而我們更會廣納意見，增加研究的層面。為了更進一步加強這套設備系統性的整合，也增加未來監測土石流的多樣性，本群擬再集中資源，於豐丘再整建一套與目前在神木相同的系統。如此未來即可有泥流與石流兩類監測的資料可供參考。

溪頭遊樂區在納莉颱風中遭重創，目前正在整治復原中，本群與負責整治之相關單位接洽後，已獲同意。在整治過程中，已由本群協助規劃一套監測設備，而由溪頭遊樂區裝設與維護。將來該套設備歸溪頭遊樂區管理，但資料可供本群分析，因此未來本群之成果亦可以包括溪頭。

但是不管要設多少監測站，再國家有限資源下，永遠沒有足夠的經費在每一個需要的地方建立監測站。因此本群的研究將近一步研究各設備如何能成為可移動式，再有需要時，機動移到定點，這包括如何架設儀器、如何選點與如何建立通訊等部分。

1.2.2 研究並分析各類監測設備之能力與應用範圍，並加強各類儀器的預測能力

土石流之監測與預警可以分成四個步驟來談。監為監視；測為測量；預為預報；而警為警告。許多測量儀器事實上是用來監視與記錄某個物理量之改變。例如許多壓力計是紀錄儀器受外界作用時之電流量或變形值，再加上相關理論即可推為壓力之變化；又例如攝影機在拍攝時是記錄環境中各點之色彩與亮度值，人類再利用這些資料結合成之形狀去判斷物理現象，如石頭形狀大小、石頭速度。因此我們在使用儀器時是在監視某一種資料，再利用不同理論去應用監視資料時就產生了不同的測量的行為。同樣原理下，測量數據出來後又可利用不同理論將之應用於不同物理現象，進而預測物理現象之變化，例如用地聲探測器測得聲音之大小變化後，用聲波理論轉為土石流之距離進而預報土石流抵達時間，或用邊坡形變預報邊坡不穩之時間，並且運用流變特性之量測，評估土石流的運動行為與活動區域。有了這種預報與評估再結合該地區之特性，如地形、行政支援、人口分佈、產業結構、經濟分析、法律責任等考量後，就可以發佈警報，因此每一步驟在不同應考量之因素下都有不同的參考數據與應用理論。

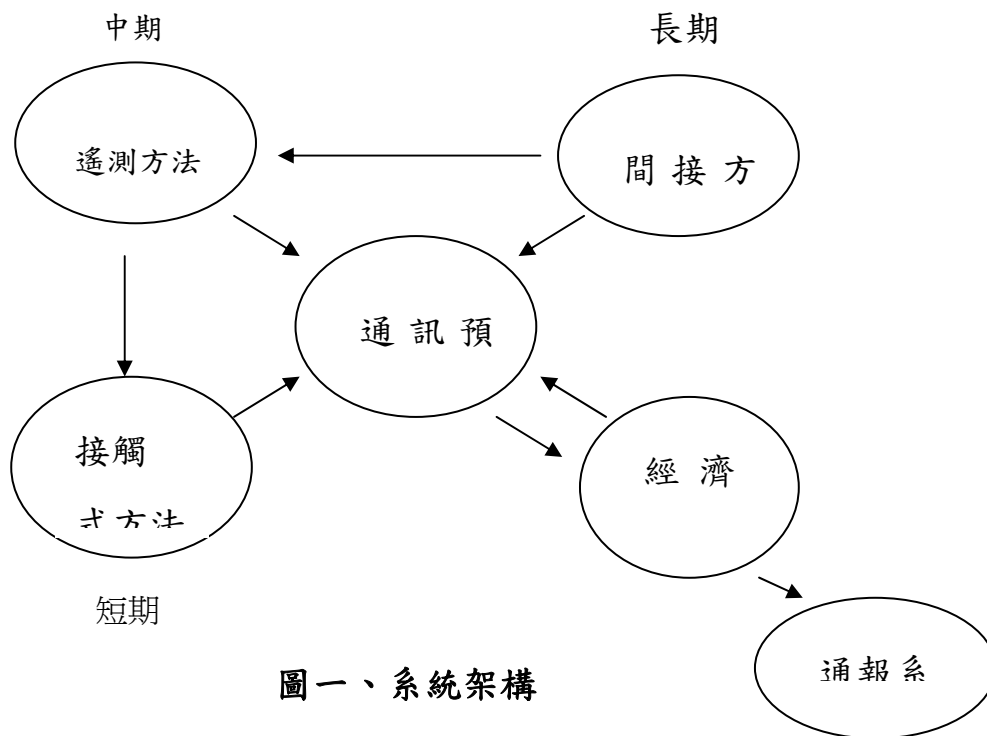
因此儀器所得數據在監測與預警之過程中，可配合不同理論而產生多種不同用途與解釋方法。本群研究之主要目的就是將各儀器所能適用之情況分清楚，並結合不同理論，以發揮各種儀器的最大功能，產生不同之預報結果。而每一種儀器之適用環境，安裝方法，與分析方法所能給的預報時間長短和空間上的精度都是研究重點。

本次群體計劃中各子計劃都會將最後的成果以一個土石流發生機率之型式表現，因此每一單項儀器都可達部分預測的目標。

1.2.3 發展一套結合各種土石流監測儀器之預報系統

對本系統而言，分為測量、通訊與控制三大部分。測量部分指各子計劃研發用來測量土石流相關之信號；通訊部分是用來聯繫各測量儀器、訊號傳輸與測站與使用者間通訊；而控制部分是用來做自動控制、自動判別、不同測量數據間的比對與警報。本群體計畫之總計畫偏重通訊與控制，各子計畫則負責不同測量儀器。我們將測量儀器區分為

間接測量、遙測與接觸式測量三類儀器，而此三類儀器之結合即成為完整測量元件。而各測量儀器因測量方法與原理不同，各有其優缺點，相互間之關係如圖一。



圖一、系統架構

第一類：間接測量

這一類測量包括雨量測量與地下水電導度 (EC)，這一類資料嚴格說來與土石流並無絕對關係，在其它條件配合下，即可對土石流之發生做機率上之預測，因此這類資料多用於長期預報，而這類元件在本群中由子計畫一「雨量與地下水水質之監測和分析及其與土石流發生之關係研究」負責，而其結果是給一個土石流發生機率隨有效降雨而改變的關係。

第二類：遙測測量

這一類測量是在土石流發生前後由於土石流造成之地形、地貌改變或土石流產生之聲響、影像等資料，用遙測方式來取得，這一類資料可提供土石流中、長期之預測，如數十分鐘到數小時。這種元件包括衛星照片、航照、攝影影像、電磁波、地聲等。影像分析由子計畫四「機械視覺辨識土石流發生與特性之研究」負責。電磁波訊號分析由子計畫五「由微波訊號與土石流發生流動之研究」負責。而地聲訊號則由總計畫負責分析。

同時在土石流發生前，往往會有水位突升，水流中含砂量增加或濁度增加等現象，這類現象可以用水位計與濁度計或泥沙含量測量來偵測，這種訊號也往往表示土石流可能要發生了或甚至已發生了，這部分研究由子計畫三「土石流潛勢溪流含砂濃度及水位觀測技術提升之研究」來負責。

第三類：接觸式測量

這一類是在土石流通過河道時來感測其產生之力量所得數據，包括鋼索、光遮斷計、土壓計、水壓計、傾斜儀、水位計、流速計、加速計與壓痕儀等，這種設備可依其裝設位置與預警對象位置不同而提供約 30 分鐘以內之短期預報，這部份由子計畫二「土石流衝擊力與環境因子監測技術之研究」負責。

間接測量方法一般較易獲得資料，因為非直接測得土石流之發生，因此其準確性較低。但此較適合作長期預報。遙測測量配合理論可作中期（如數小時）預報，且其精度高於間接測量。而接觸式的精度最高，但一般認為只適合用來做短期預報。因此我們設計之系統中測量元件之關係如圖一中之箭頭，而系統就靠通訊元件來串連所有測量元件與分散在各地之資訊。而在各項儀器預報技術研發的同時，總計劃更會將系統之用電與使用資源做一整合，以使其成為一經濟且容易維護和操作的監測站。

第四類：經濟與法律評估預報

有了各種儀器的預報，要不要發布警報或採取何種程度的措施，就得經過經濟、法律之考量建立由預報到預警之條件。而經濟與法律之考量因素與相關分析將由總計劃負責。而與警報對象間的通訊，也由總計劃負責規劃與建立通訊管道。

1.3 監測系統

本計劃本於南投縣神木村將過去國科會對各監測儀器的成果集合，整合成一個監測系統，並將所有成果以通訊網路結合，系統穩定性與適用性，經一年的測試，表現均佳，但是於 93 年七月時，遇到七二水災造成的土石流，整體儀器與通訊線路被嚴重毀損，經過評估，需要恢復的成本，遠高於國科會計畫之金額，因此本群忍痛放棄維護神木測站，轉而與農委會水保局協商，擬用該局監測系統之資料，進行本群研究分析。經多次協商，最後決定以松鶴測站的資料為主，本群再補加裝原水保局系統所沒有的研發性儀器，繼續本群的研究工作。

本群的各子計畫如下

計畫項目	主持人	服務單位系所	計畫名稱
總計畫	劉格非	台灣大學土木系	土石流監測與預報系統之研究
子計畫一	林炳森	中興大學土木系	土石流規模與衝擊力監測技術之研究
子計畫二	陳樹群	中興大學水保系	土石流含砂濃度觀測技術提升之研究
子計畫三	張守陽	台北科技大學土木系	機械視覺判識土石流發生與特性之研究
子計畫四	黃名村	清雲科大通識中心	微波訊號與土石流發生及流動之關係研究

以下的部份，僅就總計劃部分作一說明。

第二章談地聲探測器的分析，第三章為微波遙測，第四章再回到外部性理論討論直接損失。

第二章 地聲探測器

2.1 前言

台灣因地形陡峭且地形破碎，經過多年山坡地開發及九二一地震後，造成山坡地的土石鬆動。台灣地區年平均降雨量為 2500 公厘，約為全球平均降雨量的二倍，每當颱風及豪雨，大量的雨水與鬆動的土石混合形成土石流，常常發生土石流災害，造成人員傷亡及金錢損失；如：桃芝颱風。

一般工法上都設置一些抑制土石流動的結構物；然而土石流是大面積的災害，在無法有效抑制土石流的發生與流動時，預測土石流發生位置及流動方向就是一個重要的課題。若能有效預測土石流發生位置及流動方向，便能在土石流發生或開始流動時，先行疏散下游居民，以減少人員傷亡及金錢損失。

土石流在上游流動時，在下游會聽到低沉的聲音；此現象是在固體介質中，能量以波的形式傳遞，此即固體波；當固體波傳遞到空氣時，固體波會產生聲波，而從固體波傳遞到空氣中的聲波能量，只有固體波的能量的一小部分，絕大多數的能量都在固體中以固體波傳遞。

聲波是一個定義的名詞，在空氣中傳遞的聲音屬於縱波；縱波是介質震動方向與波傳方向平行。人類聽到的聲音是藉著空氣中分子震動，影響耳膜震動，在經由神經傳遞到大腦的聽覺區塊，人類才聽到聲音；水中的聲納技術也是藉著縱波來傳遞能量的。在空氣及水中，其抗剪強度非常低，都是藉著介質不停的壓縮與伸展來傳遞能量；但在固體介質中，固體的抗剪強度增強，除了縱波之外，還有橫波；橫波是介質震動方向與波傳方向垂直，因此我們所稱的地聲，是包含了縱波與橫波。

2.2 前人研究

固體彈性波傳理論已發展許多年。在固體波傳理論之外，Biot(1956a, 1956b)發展飽和孔隙彈性介質波傳理論，孔隙中液體為可壓縮黏性流體。其波傳理論分為兩部分：在低頻時，液體為 Poiseuille flow；在高頻時，由特徵頻率及四個無因次參數來描述。由 Biot 的波傳理論解得兩個縱波及一個橫波，並由 Hovem and Ingram(1979)利用實驗分別得出這三個波傳現象。

利用地聲探測器(geophone)研究土石流地聲特性方面。劉與李(1999)得實驗結果，其訊號分析是利用快速傅利葉轉換(Fast Fourier Transform)將時間域訊號轉換到頻率域，得出頻率與能量之間的關係。李並分析出土石滑動頻率分佈在 20~35Hz 之間，石頭滾動及相互碰撞頻率分佈在 40~60Hz 之間。謝等人(2000)得實驗結果，利用 Gabor Transform 將時間域訊號轉換到時間-頻率域，得出時間、頻率與能量三者之間的關係。其實驗分兩部分：第一部分為摩擦與自由落體實驗，由實驗結果得知土石材料間相互摩擦的頻率分佈在 20~80Hz 之間，而土石材料間相互碰撞的頻率分佈在 800Hz 以內，但大多集中在低頻。第二部分為土石流渠道實驗，由實驗結果得知，礫石型土石流地聲頻率範圍分佈在 20~200Hz 之間。Arattano(2003)將一系列 ground vibration detector 設置在野外，當土石流流過有高差的河床時，利用訊號分析土石流前鋒速度。

利用地聲探測器(geophone)研究土石流地聲特性方面。劉與李(1999)得實驗結果，其訊號分析是利用快速傅利葉轉換(Fast Fourier Transform)將時間域訊號轉換到頻率域，得出頻率與能量之間的關係。李並分析出土石滑動頻率分佈在 20~35Hz 之間，石頭滾動及相互碰撞頻率分佈在 40~80Hz 之間，空氣、水這些環境雜訊可歸納到 25Hz 以下。謝等人(2000)得實驗結果，利用 Gabor Transform 將時間域訊號轉換到時間-頻率域，得出時間、頻率與能量三者之間的關係。其實驗分兩部分：第一部分為摩擦與自由落體實驗，由實驗結果得知土石材料間相互摩擦的頻率分佈在 20~80Hz 之間，而土石材料間

相互碰撞的頻率分布在 800Hz 以內，但大多集中在低頻。第二部分為土石流渠道實驗，由實驗結果得知，礫石型土石流地聲頻率範圍分佈在 20~200Hz 之間。Arattano(2003) 將一系列 ground vibration detector 設置在野外，當土石流流過有高差的河床時，利用訊號分析土石流前鋒速度。大陸學者陳等人(1983-1985)以「壓電陶瓷式」地聲探測器，在蔣家溝土石流觀測站進行觀測，發現土石流所產生的地聲訊號與風、雨、機電設備等所造成的有明顯差異。

2.3、應用方式實例

由以上文獻回顧得知土石流中顆粒及水運動產生聲音的特徵頻率約可分兩種，一為河水、泥水流動和土石滑動之頻率，分布在 0-40Hz；另一為土石滾動、撞擊之頻率，分布在 40-80Hz。

本節即針對七二水災中水土保持局在南投縣信義鄉神木村愛玉子溪監測站所測到的土石流地聲訊號做分析驗證。七二水災於愛玉子溪上產生了兩次土石流，第一次發生時間約在七月二日早上九點十分左右，規模較小。考慮資料之完整性，本文選擇下午四點四十分左右所發生的第二次規模較大的土石流進行分析。

愛玉子溪上原規劃有三個地聲探測器，但在土石流來襲時，最上游的地聲探測器尚未裝設完成。而中游的地聲探測器埋設在溪床中央，在土石流前鋒通過後 5 秒鐘後即被沖毀，因此不能做完整分析。下游的地聲探測器則有效的收到了整場土石流發生時的地聲訊號。因此本研究將針對下游地聲探測器所收集到的訊號做分析。並搭配中游地聲探測器開始收到的訊號時間，作為計算土石流流動速度的依據。中下游地聲探測器的距離約為 168 公尺，而下游地聲探測器距離攝影機約 25 公尺。

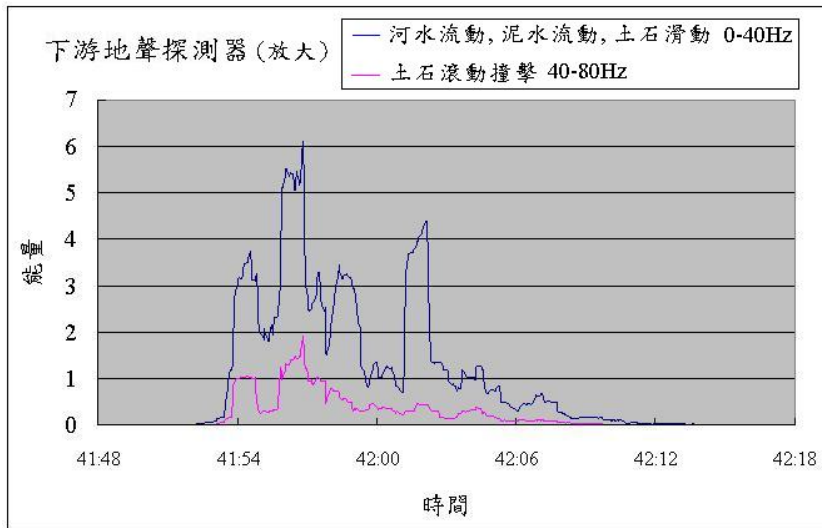
2.3.1 資料分析

本研究是利用快速傅利葉轉換(FFT)，將地聲探測器所偵測到土石流現地的地聲資料自原本的時域資料轉換成頻域資料，再針對上述提到的特徵頻率範圍做進分析比較。轉換時採用每 512 筆資料進行一次轉換，每次轉換相差 0.06 秒，亦即每分鐘能得到 1000 筆資料，且資料可重複取用，藉此能求出接收土石流各項特性發生的精確時間。

首先需要分辨資料中的有效信號，因此本研究採用土石流發生前十分鐘，亦即下午四點 31 分到四點 35 分所偵測到的地聲訊號作為環境雜訊，也從影片中確認這段時間中，河道內只有正常的水流，並無土石流的經過，然後以雜訊的十倍當做有效訊號。

為了要清楚得知土石流中泥水與石頭撞擊之效應，我們將每一次轉換後，將不同的音頻範圍各自積分。例如，想要探測土石滾動撞擊特徵音頻範圍的能量，就將轉換後的資料中 40-80Hz 對應的能量累加，就是此時土石滾動撞擊特徵音頻的能量。而泥流的能量，降採 0-40Hz 對應能量的累加。然後將積分結果劃於圖一。

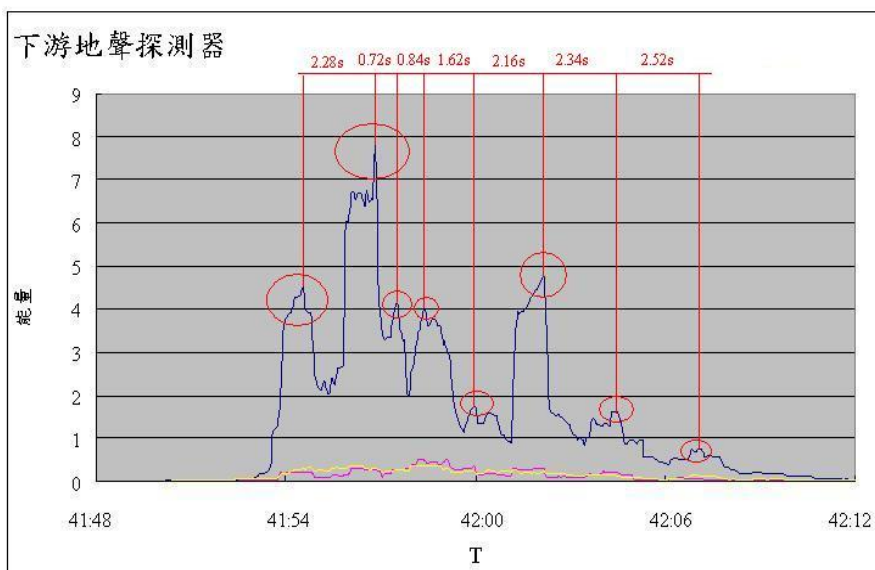
由圖一可以看出，地聲探測器一開始接收到的訊號很小，表示一般河水流動時，能量並不大，然後是泥流到來(0~40Hz)，約 1.8 秒後，才有土石撞擊頻率(40~80Hz)頻率出現。整體而言，泥流能量大於石頭撞擊能量，因此這個事件應該是屬石頭少的泥流，在石頭撞擊能量最高的峰點，自影片中也可清晰看到許多石頭流過的畫面(圖二)



圖一 泥水地聲訊號與石頭碰撞地聲訊號在 7/2 愛玉子溪土石流事件中之比較



圖二：自土石流影片中擷取之畫面，畫面中間偏右明顯有石頭流過



圖三 地聲訊號之峰值與錄影帶中土石流波峰出現時間在 7/2 愛玉子溪土石流事件中之比較

再來將此兩項特徵頻率所包含的範圍，亦即 0-80Hz 的全部能量累加起來，如圖二。再由影片中抓出每一波峰通過時間，標在圖三中，可以看出，的確每一次波峰都有被地聲探測器紀錄下來，而且時間相當準確。

土石流速度也可以利用地聲訊號來推估。中游的地聲探測器從 41 分 35.54 秒開始量測到訊號，與下游資料比較得兩者差距約 16.2 秒，而兩地聲探測器相距約 168m，則換算土石流之平均速度約為 10.37m/s。

利用轉換過後的地聲資料，將能量最大值視為土石流正好通過地聲探測器，並取其開始接收訊號與能量最大值之間的時間差視為地聲探測器能提前偵測之時間。下游地聲探測器在 41 分 51.54 秒時開始收到訊號，我們將之前兩類特徵頻率累積相對能量最大值視為土石流正好通過地聲探測器，時間約為 41 分 56.82 秒，相差約 5.28 秒，乘上土石流速度 10.37m/s，得到約 54.75m。此即為這場土石流中地聲探測器所能偵測的最遠距離。

2.4 分析方法

2.4.1 快速傅立葉轉換

當我們欲將時間序列上的連續函數 $x(t)$ 轉換成頻率域上的函數 $X(f)$ ，我們採用傅立葉轉換(Fourier Transform)，數學定義如下：

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{2\pi ift} dt \quad (2-1)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{-2\pi ift} df \quad (2-2)$$

其中 $x(t)$ 為時域上的函數， $X(f)$ 為頻域上的函數

t 為時間， f 為頻率

若是接收到的訊號並非為連續函數，而是離散函數的話，原本的傅立葉轉換就必須改成離散傅立葉轉換(Discrete Fourier Transform, DFT)，數學定義如下：

$$X(f_n) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{2\pi if_n t} dt \approx \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{2\pi if_n t_k} \Delta = \Delta \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{2\pi i k n / N} \quad (2-3)$$

其中： $x_k \equiv x(t_k)$ ， $t_k \equiv k\Delta$ ， $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$

$$f_n = \frac{n}{N\Delta}$$

Δ 為取樣時間間隔， N 為總資料數

而在 1965 年，J.W. Cooley 與 J.W. Tukey 發表快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)的論文，利用離散傅立葉轉換中重複循環的特性，發展出新的演算方法，將離散傅立葉轉換原本需要 $N*N$ 次的計算次數，減少成只需要 $N*\log_2 N$ ，大大縮短了計算所需的時間。

我們利用快速傅立葉轉換來分析地聲探測器接收資料，將時域訊號轉換成頻域訊號。此處所謂時域訊號是指由地聲探測器接收到的原始訊號，可將此訊號繪成時間訊號圖，橫軸為時間(以秒為單位)，縱軸為電訊大小(以伏特為單位)。從時間訊號圖中即可清楚得知地聲探測器所測的訊號隨時間分布之變化。頻域即是指由時域轉換後之結果，轉換後之橫軸為頻率(以赫茲 Hz 為單位)，縱軸為各頻域能量之大小。

2.4.2 能量積分

地聲探測器共有三個軸，分別量測 X、Y、Z 軸之振動速度，若要得知總能量，必須將經 FFT 轉換後三軸的能量相加(式 2.2-1)，方為地聲探測器接收到的振動總能量。

$$e = e_x + e_y + e_z \quad (2-4)$$

其中 e 為總能量， e_x 、 e_y 、 e_z 分別代表 x 、 y 、 z 軸的能量

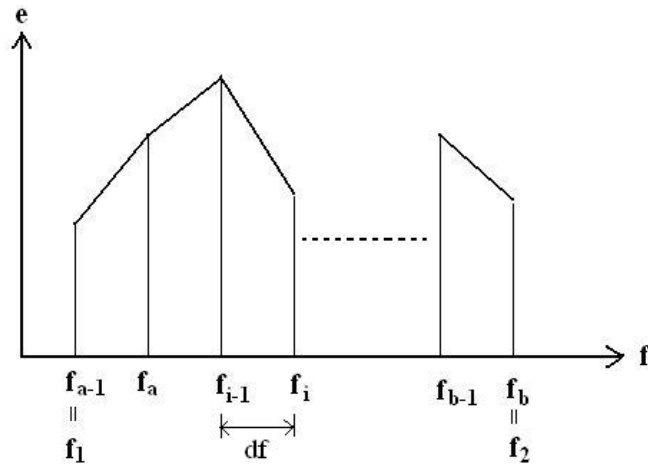
在得到不同頻率的總能量之後，要探討某部份頻域的能量變化，我們將此部份頻域的能量作積分，亦即求出該頻域裡，能量曲線下的面積，如式 2.2-2。

$$E = \int_{f_1}^{f_2} e(f) df \quad (2-5)$$

其中 E 為能量積分值， f_1 、 f_2 為欲求積分能量之頻域範圍的上下限

$e(f)$ 為能量曲線

然而，經由 FFT 轉換得到的頻域圖，乃是離散的資料，因此我們要求面積的話，可以將積分式改寫成計算每一小塊梯型面積的總和(圖 2.1)，如式(2.2-3)。



圖四 能量積分示意圖

$$E = \sum_{i=a}^b \frac{e(i-1)+e(i)}{2} \times df \quad (2-6)$$

其中， $f_1 = f_{a-1}$ ， $f_2 = f_b$ ， $e(i)$ 為 f_i 所對應到之總能量

$$df = \frac{1}{N\Delta} \quad (\Delta \text{ 為資料取樣時間間隔，} N \text{ 為總資料數})$$

如此一來，我們就可以得知某頻域範圍的能量積分值 E ，藉由觀察 E 值在土石流發生前後的變化，或是在撞擊實驗前後的差別，來進行土石流事件及撞擊實驗的分析。

2.4.3 環境雜訊處理

在 FFT 轉換過程中，如何將環境雜訊的能量去除是一項很重要的步驟。真正在量測時，會同時收到環境雜訊及真正土石流或鐵球撞擊的能量，因此為了要分辨出真正土石流及鐵球撞擊產生的能量大小，必須扣除掉環境雜訊的能量。所以在進行實驗之前，會先量測十分鐘的環境雜訊；而在分析現場土石流地聲資料時，也會先取一段土石流尚未通過時的地聲訊號作為環境雜訊。在這裡先將室內實驗及現場地聲資料的時域及頻域圖繪製如下，再說明扣除環境雜訊的方法。

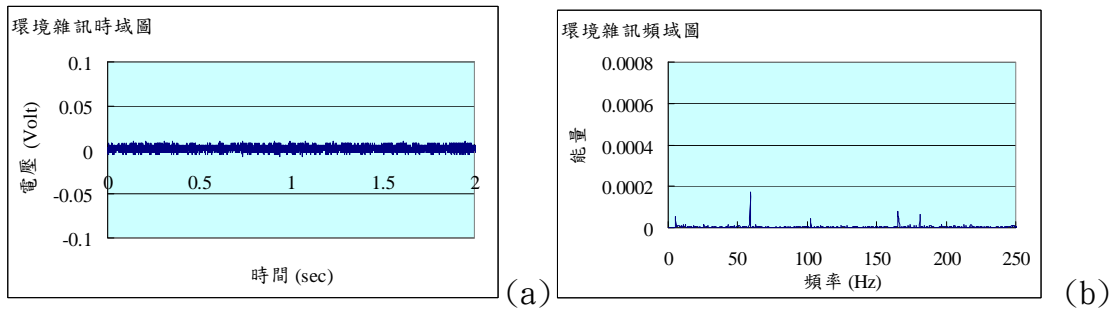


圖 5 室內實驗環境雜訊時域頻域圖 (a)時域圖 (b)頻域圖

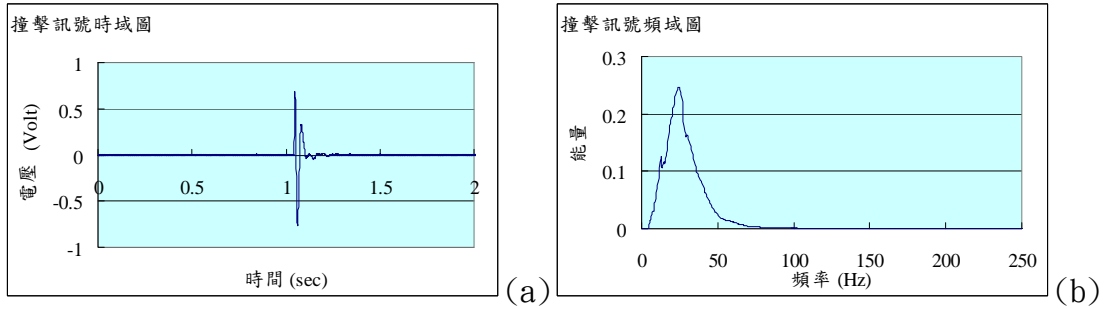


圖 6 室內實驗撞擊訊號時域頻域圖 (a)時域圖 (b)頻域圖

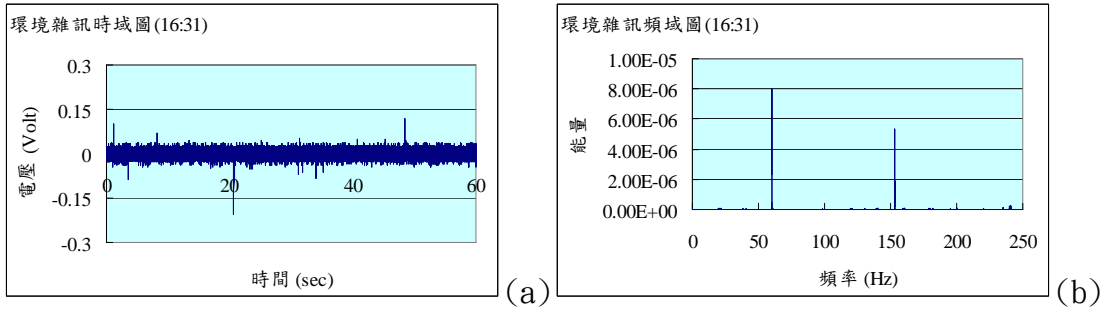


圖 7 現場地聲資料環境雜訊時域頻域圖 (a)時域圖 (b)頻域圖

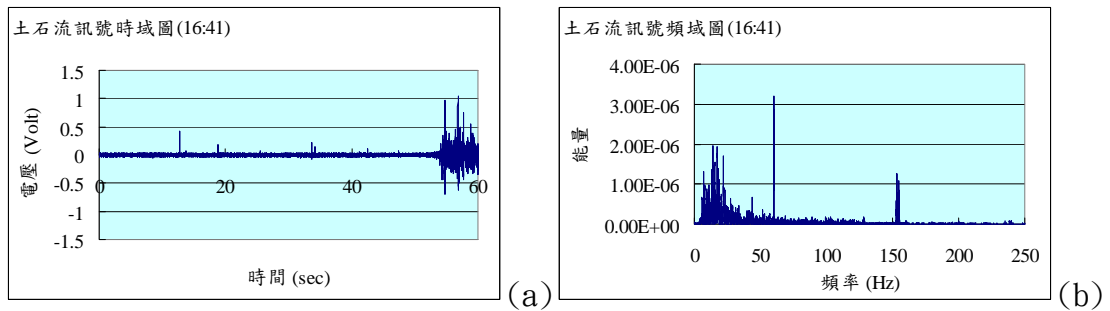


圖 8 現場地聲資料土石流訊號時域頻域圖 (a)時域圖 (b)頻域圖

由圖 6 可以看出，室內實驗中環境雜訊的能量最大值，約是撞擊訊號能量最大值的 0.0001 倍，由此可知室內實驗的環境雜訊非常小；而由圖 8 可以看出，現場地聲資料中，環境雜訊的能量最大值約落在 60Hz 及 150Hz 的地方，而在土石流訊號裡同樣也可以看出這兩個頻率有較大的能量。

而本文在分析地聲訊號時，均採用能量積分值方法，因此在扣除環境雜訊時，同樣也是先計算環境雜訊的能量積分值，再將實驗產生的訊號及土石流通過時訊號的能量積分值扣除環境雜訊的能量積分值(式 2.7)，則可得到撞擊訊號及土石流訊號的能量積分值。也因為採用能量積分值方法，則不必考慮環境雜訊的頻譜中在某些特定頻率產生的能量波峰，只要單純的計算我們要探討的頻域範圍中能量積分值即可。

$$E_{\text{real}} = E - \alpha E_{\text{env}} \quad (2-7)$$

其中 E_{real} 為真實的撞擊訊號及土石流訊號的能量積分值

E 為量測到撞擊訊號及土石流訊號的能量積分值

E_{env} 為環境雜訊的能量積分值

α 為扣除的倍數

為了找尋適當的扣除環境雜訊能量積分值的倍數，在進行分析時嘗試過扣除 1 倍、3 倍、5 倍、10 倍的能量積分值，接下來將分為室內實驗及現場分析兩部分來分別說明。

在室內實驗中，環境雜訊非常小，因此扣除不同倍數環境雜訊的能量積分值對實驗結果差別極為細微，經過計算發現扣除 1 倍、3 倍、5 倍、10 倍的环境雜訊能量積分值之後，與未扣除環境雜訊之前的撞擊訊號之差異分別是 0.003%、0.01%、0.017%、0.034%，由此可看出室內實驗中扣除不同倍數的環境雜訊能量積分值產生的差距很細微。

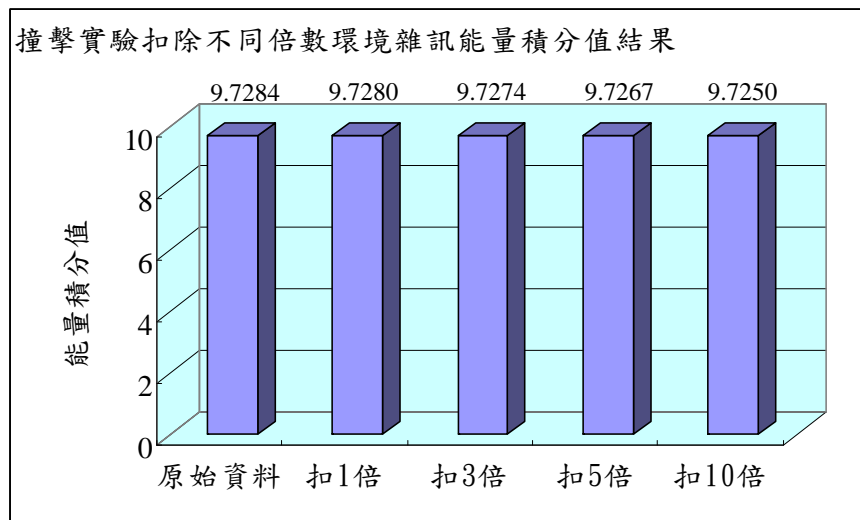


圖 9 撞擊實驗扣除不同倍數環境雜訊能量積分值結果

而在現場資料分析中，扣除 1 倍、3 倍、5 倍、10 倍的环境雜訊能量積分值之後，與未扣除環境雜訊之前的土石流訊號的差異分別是 0.155%、0.465%、0.775%、1.55%，差異也都不大。

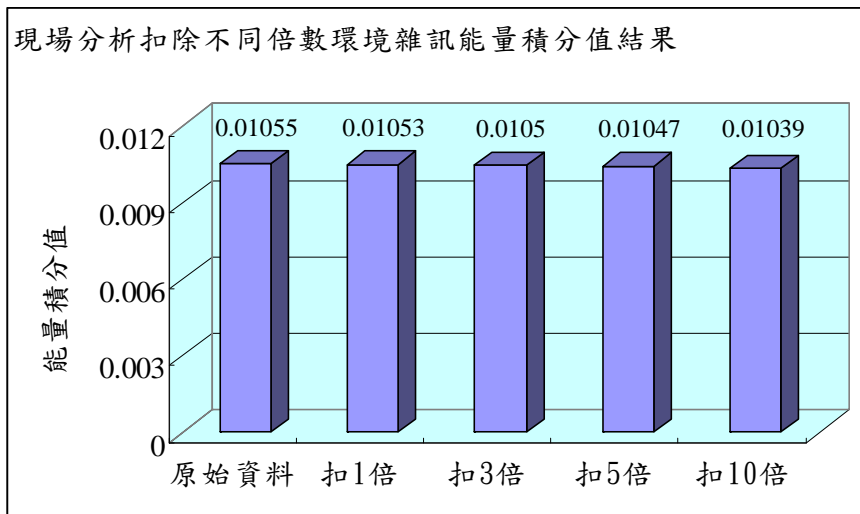


圖 10 現場分析扣除不同倍數環境雜訊能量積分值結果

為了確定分析的是真正的土石流訊號，我們折衷採取扣除 5 倍的环境雜訊，一方面因為扣除不同倍數的差距不大，一方面也因為超過 5 倍的能量積分值，在數學上我們可以視為差距為 1 個 order，同時具有數學及物理上的可信度。因此本文在進行室內

實驗地聲訊號分析及現場土石流地聲訊號分析時，均採用扣除 5 倍的環境雜訊能量積分值。

2.5 室內地聲撞擊實驗

室內砂箱實驗採用四顆地聲探測器接收鐵球自由落體撞擊的訊號，其中一顆為型號 X-Phone，另外三顆為型號 GS-32CT，取樣頻率為 1000Hz。地聲探測器量測到的是振動速度，並轉換為電壓訊號表現。不同型號的地聲探測器會有不同的反應曲線 (responding curve)，倘若知道外力的頻率，則可從各個探測器的反應曲線圖中找到在此頻率下的電壓與速度的轉換關係式；然而，在超過某個頻率後，此轉換關係則固定且不受頻率影響。

本實驗採用的地聲探測器之反應曲線如圖 2.2。橫軸為頻率，縱軸為不同頻率所對應的電壓與速度轉換值(V/IN/SEC)，其中 GS-32CT 圖中有三條不同的反應曲線，與地聲探測器內不同的阻抗有關係，經詢問原廠之後，得知本實驗採用的地聲探測器阻抗是 $70\% \pm 2\%$ ，因此在轉換的過程中，是採用 C 曲線來做轉換。

由圖中可以看出，本實驗採用的兩種地聲探測器，頻域約在 30Hz 之後，電壓與速度的轉換值即趨於一定值。

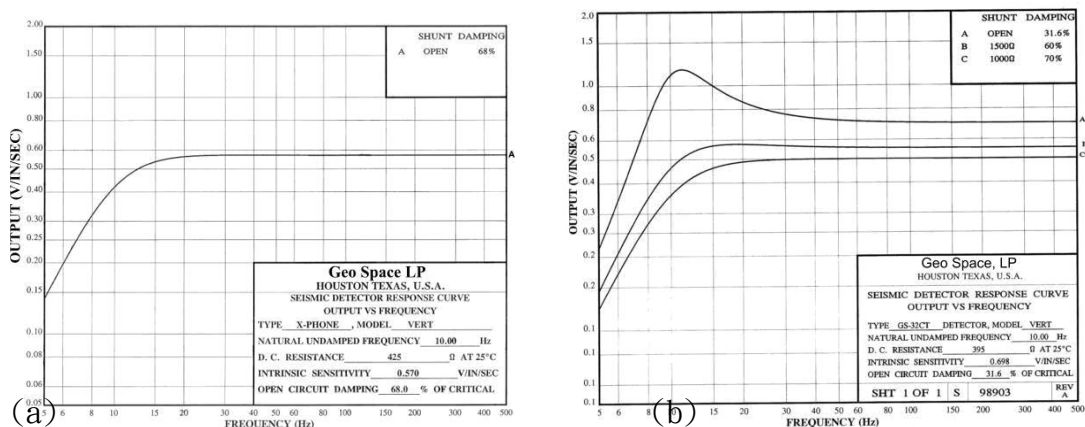


圖 11 地聲探測器的反應曲線 (a)型號 X-PHONE (b)型號 GS-32CT

我們利用 FFT 轉換將每次撞擊的時域資料(圖 2.3)轉成頻域資料，並做成頻域圖(圖 5)。此頻域圖之縱軸為電壓(Volt)，橫軸為頻率(Hz)

，再利用地聲探測器的反應曲線，將電壓轉換為振動速度(圖 2.5)，再針對我們欲探討的頻域範圍作能量積分。

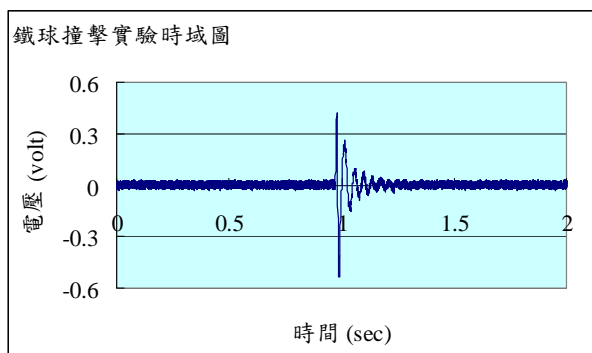


圖 12 鐵球撞擊實驗時域圖

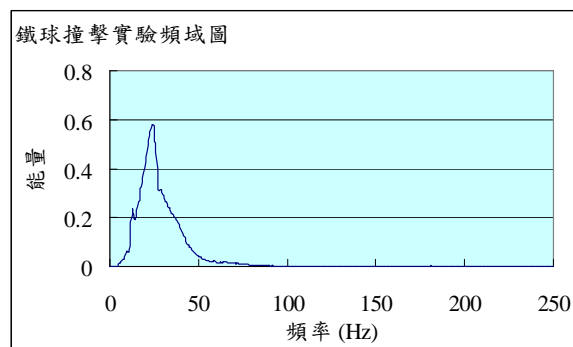


圖 13 鐵球撞擊實驗頻域圖

此外，實驗過程中使用高速攝影機拍攝鐵球撞擊砂面，希望能由此了解鐵球撞擊砂面的機制，以及在短暫時間中地聲量測的訊號以及接收到的能量，來進一步分析實驗數據。本文將先進行室內實驗，用能量積分方法來分析實驗數據，再用同樣方法分析現場之地聲資料，期望驗證這是一個可行的物理方法，最後希望將此方法利用在現場，能夠及時計算出能量積分值並回傳到管理中心，減少儲存及傳輸龐大的原始地聲資料。

2.5.1 實驗設備及佈置

(1) 實驗砂箱

為一個長、寬、高均為 1 公尺(內徑)的壓克力製砂箱，在四個側面及底面鋪上五公分厚的吸音棉，用來減少彈性波的反射，見圖 4.1。



圖 3.1 實驗砂箱



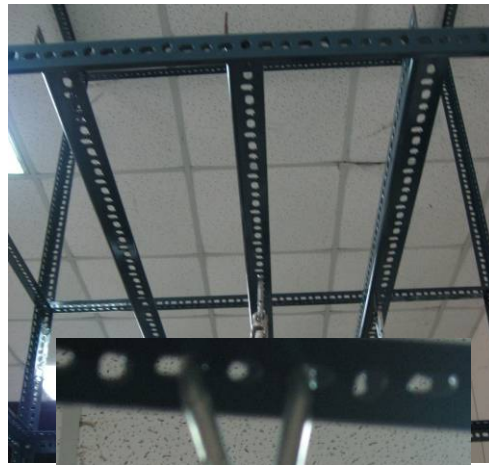
圖 3.2 地聲探測器

(2) 地聲探測器

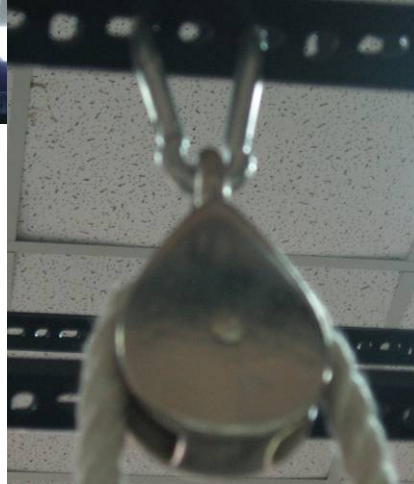
共有四個地聲，一個型號是 X-Phone，另外三個型號為 GS-32CT，均購於美國 Geo Space 公司，外型見圖 3.2。地聲探測器量測到的是震動速度，並轉換為電壓訊號表現。不同型號的地聲探測器會有不同的反應曲線(responding curve)，倘若知道外力的頻率，則可從各個探測器的反應曲線圖中找到在此頻率下的電壓與速度的轉換關係式；然而，在超過某個頻率後，此轉換關係則固定且不受頻率影響(圖 2.2)。探測器可以量測的振動速度可分為 $\pm 5V$ 、 $\pm 1V$ 、 $\pm 0.5V$ 、 $\pm 0.1V$ 、 $\pm 0.05V$ 、 $\pm 0.01V$ ，可隨用途不同作彈性調整。在我們的室內實驗中，實際量測到電壓介於 $\pm 5V$ 之間，因此我們選擇量測範圍為 $\pm 5V$ 。

(3) 角鋼架、鐵製掛鈎、滑輪

利用 3.2 公尺長的角鋼，分別立在砂箱四個角並以 1.1 公尺長的角鋼固定位置，在其中一圈角鋼上另外放置三根角鋼，將滑輪以掛鈎固定，作為重物自由落下撞擊的位置，見圖 3.3。



(b)



(c)

(a)

3.3 (a)角鋼
支撐架 (c)掛

圖
架 (b)

鉤、滑輪

(4) 礫石

礫徑約分布在 0.2~0.5cm 的碎石，填入砂箱中，在不加任何其他物質的情況下作實驗，圖 3.4，將 200g 礫石作了兩次篩分析，平均之後得到粒徑分布曲

線如圖 3.5。



圖 3.4 實驗所用的礫石

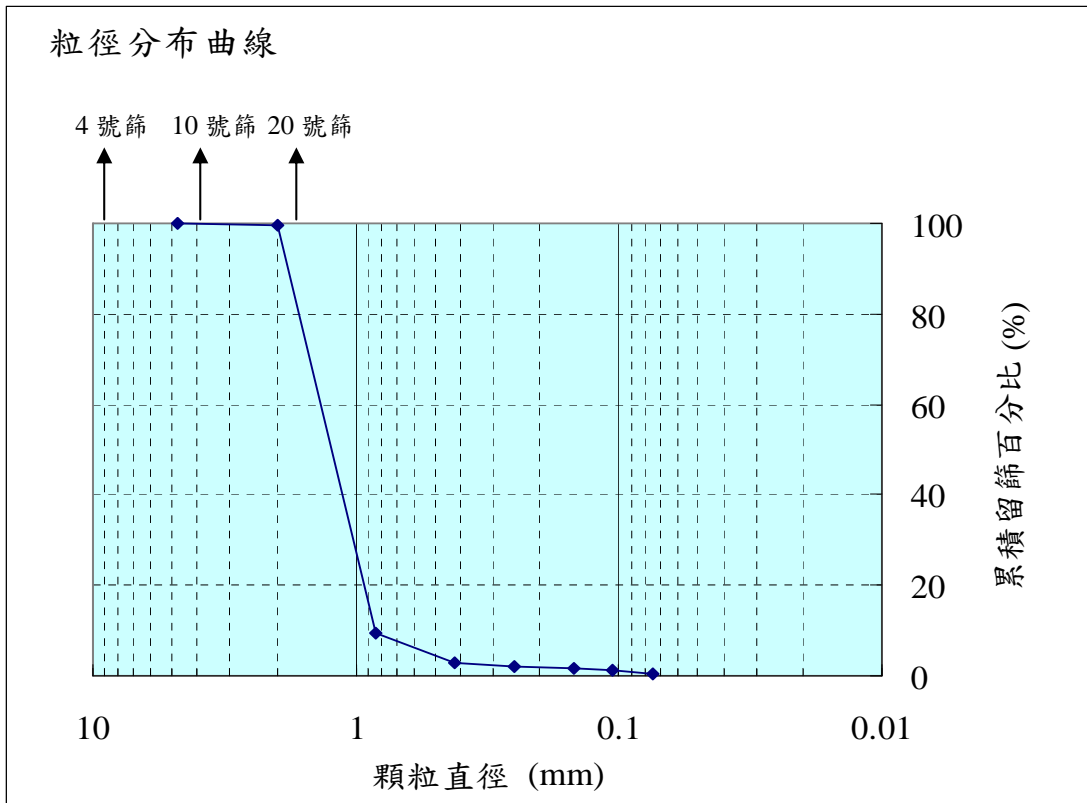


圖 3.5 粒徑分佈曲線

(5) 軟體及介面卡

除了地聲探測器本身之外，還需要配合的軟體及介面卡，方可用來探測訊號。我們採用的介面卡型號為 PCL-818HG(圖 3.6)，其一次可記錄的最大資料筆數為 32767 筆，可以依照連接的地聲個數以及欲擷取資料的頻率來調整，本文中使用的擷取頻率為 1000Hz，總共四顆地聲共 12 個 channel，每次每個 channel 擷取 2048 筆資料。

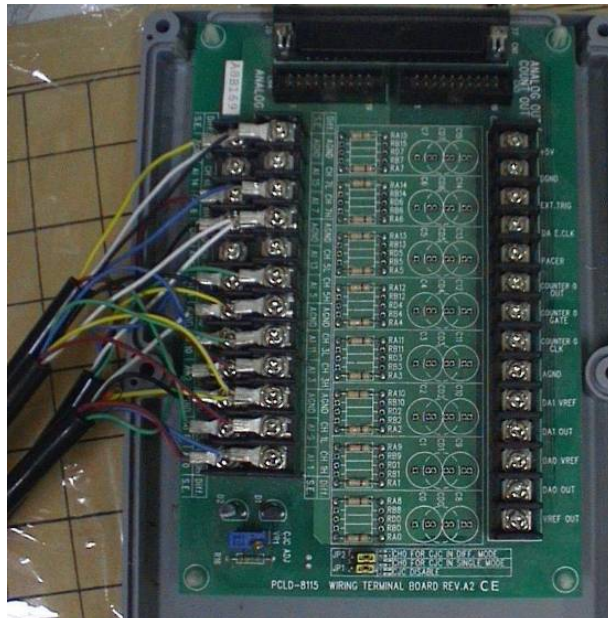


圖 3.6 訊號擷取介面卡

(6) 重物

當做點源使用，使用的重物為直徑約 12.9cm 的鐵球。將鐵球以帶子纏繞後用膠帶綁起，綁起後重 6.9kg(圖 3.7)，再用童軍繩拉起至離砂面 1m 處釋放。



(a)



(b)

圖 3.7 實驗用鐵球 (a)網綁前 (b)網綁後

(一) 實驗佈置及設計

在實驗之前，必須先定義座標(圖 3.8)，以砂箱左下角為原點。

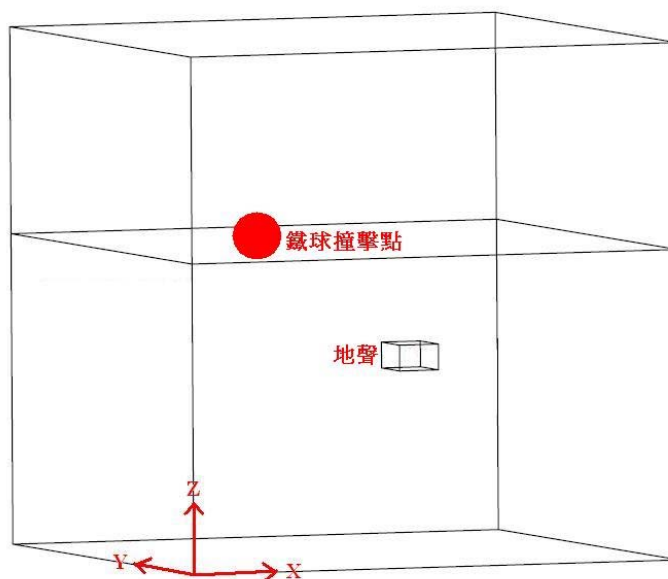


圖 3.8 砂箱內座標定義

(1) 地聲探測器擺設位置

本實驗的地聲擺設位置共分三部份，簡述如下。

第一部份：將四顆地聲探測器埋設在砂箱中同一平面，埋設位置各在四個側面壓克力板的中央位置，距離壓克力板約 14cm。之後在地聲埋設平面上分別加鋪 20cm、25cm、30cm、35cm 的礫石。本部份實驗欲測試四顆地聲探測器是否均正常運作，以及在距離撞擊點相同位置下，量測到的震動能量是否相同，擺設圖及示意圖如下(圖 3.9)。

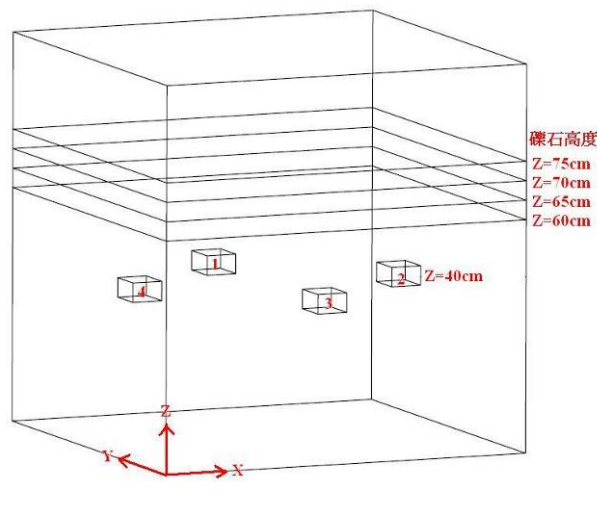
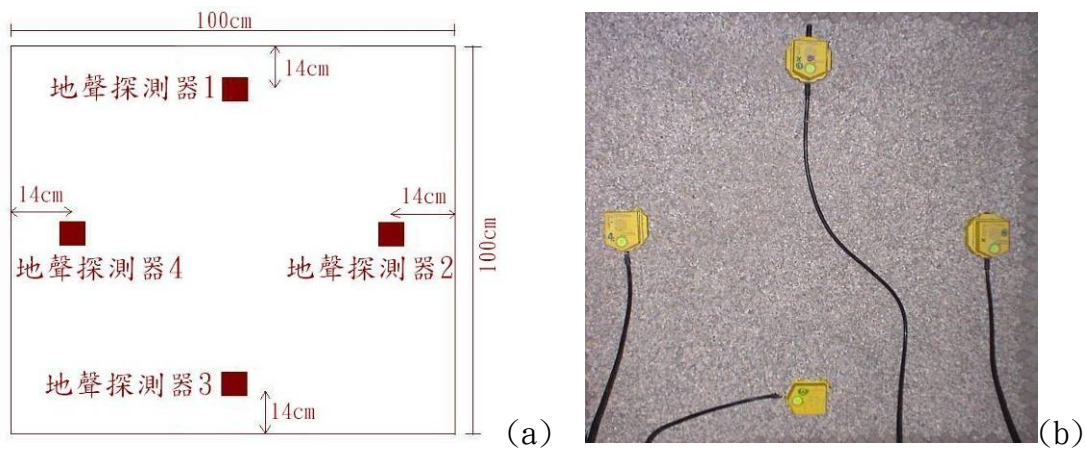
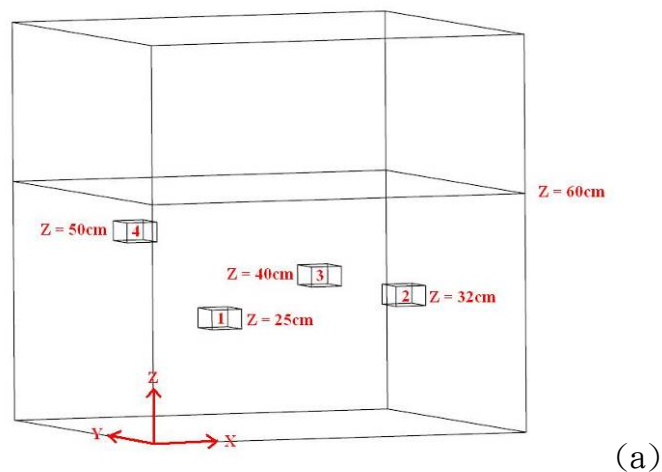


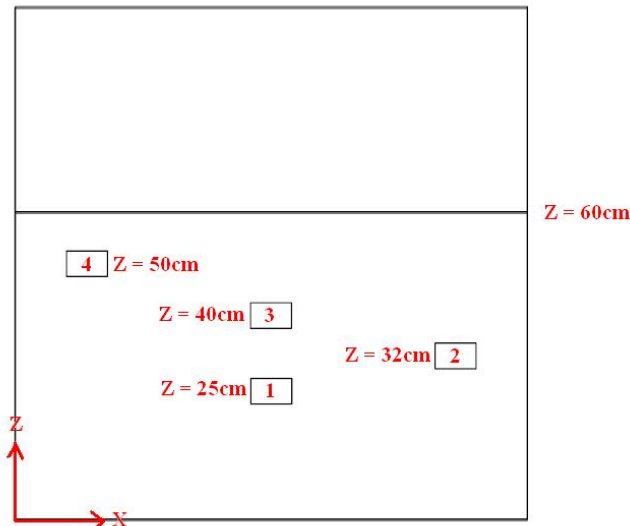
圖 3.9 地聲探測器埋設位置圖 (a)俯視示意圖 (b)俯視擺設圖 (c)立體圖

第二部份：將地聲探測器埋設在砂箱中不同平面，四顆地聲分別埋在砂面下 35cm、28cm、20cm 及 10cm 處。在圖 4.8 的定義之下，地聲探測器埋設位置的詳細資料，詳細資料列於表 3.1，示意圖見圖 3.10。

表 3.1 第二部分地聲探測器埋設位置(以公分為單位)

	地聲探測器 1	地聲探測器 2	地聲探測器 3	地聲探測器 4
X 座標	50	86	50	14
Y 座標	86	50	14	50
Z 座標	35	28	20	10





(b)

圖 3.10 第二部分地聲埋設 (a)立體圖 (b)側視圖

第三部份：再加入 20cm 高的礫石到砂箱之內，而地聲探測器的位置保持固定，詳細資料列於表 3.2，示意圖見圖 3.11。

表 3.2 第三部分地聲探測器埋設位置(以公分為單位)

	地聲探測器 1	地聲探測器 2	地聲探測器 3	地聲探測器 4
X 座標	50	86	50	14
Y 座標	86	50	14	50
Z 座標	55	48	40	30

(2) 鐵球撞擊點位置

在第一部分的實驗中，我們希望探討的是當四顆地聲探測器離撞擊點相同距離的狀況下，所量測到的振動能量是否相同，因此將撞擊點固定在砂面正中央，針對地聲埋設平面上四次不同礫石厚度進行實驗。

而為了觀察撞擊點與地聲探測器之間的距離改變時，接收到訊號的變化情形。第二及第三部份的實驗除了將四顆地聲埋設在不同平面之外，另外也設計九個不同的撞擊點，希望能得到距撞擊點不同距離下接收到的不同能量值，施力方式是將鐵球用童軍繩往上拉到離砂面 1m 處，鬆手使其以自由落體的方式撞擊砂面，撞擊點示意圖見圖 3.12，詳細資料列於表 3.3。

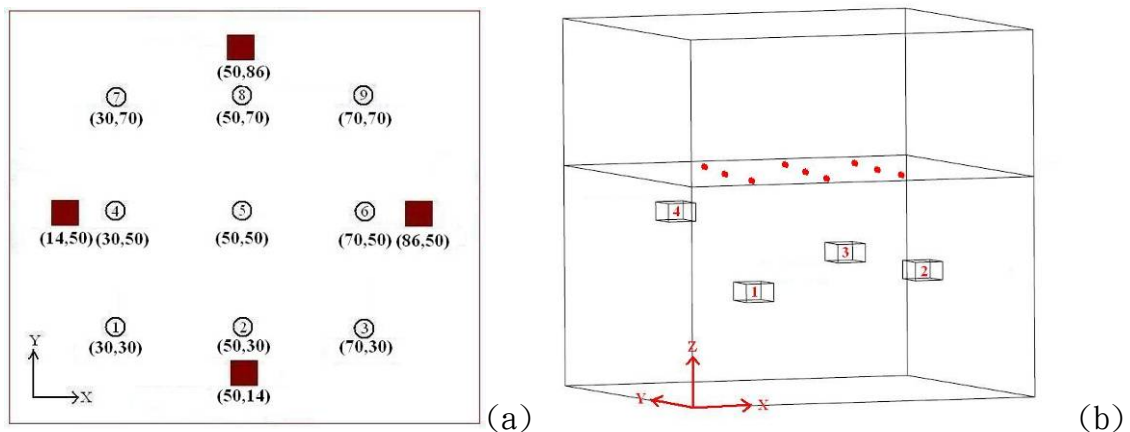


圖 3.12 撞擊點座標示意圖 (a)側視圖 (b)立體圖

表 3.3(a) 第二部份撞擊點與地聲探測器距離

距離(cm)	地聲 1			地聲 2		
	X	Y	Z	X	Y	Z
撞擊點 1	20	56	35	56	20	28
撞擊點 2	0	56	35	36	20	28
撞擊點 3	20	56	35	16	20	28
撞擊點 4	20	36	35	56	0	28
撞擊點 5	0	36	35	36	0	28
撞擊點 6	20	36	35	16	0	28
撞擊點 7	20	16	35	56	20	28
撞擊點 8	0	16	35	36	20	28
撞擊點 9	20	16	35	16	20	28

距離(cm)	地聲 3			地聲 4		
	X	Y	Z	X	Y	Z
撞擊點 1	20	16	20	16	20	10
撞擊點 2	0	16	20	36	20	10
撞擊點 3	20	16	20	56	20	10
撞擊點 4	20	36	20	16	0	10
撞擊點 5	0	36	20	36	0	10
撞擊點 6	20	36	20	56	0	10
撞擊點 7	20	56	20	16	20	10
撞擊點 8	0	56	20	36	20	10
撞擊點 9	20	56	20	56	20	10

直線距離 (cm)	地聲 1	地聲 2	地聲 3	地聲 4
撞擊點 1	69.000	65.727	32.496	27.495
撞擊點 2	66.038	49.800	25.613	42.379
撞擊點 3	69.000	37.947	32.496	60.299
撞擊點 4	54.046	62.610	45.782	18.868
撞擊點 5	50.209	45.607	41.183	37.363
撞擊點 6	54.046	32.249	45.782	56.886
撞擊點 7	43.371	65.727	62.738	27.495
撞擊點 8	38.484	49.800	59.464	42.379
撞擊點 9	43.371	37.947	62.738	60.299

表 3.3(b) 第三部份撞擊點與地聲探測器距離

距離(cm)	地聲 1			地聲 2		
	X	Y	Z	X	Y	Z
撞擊點 1	20	56	35	56	20	28
撞擊點 2	0	56	35	36	20	28
撞擊點 3	20	56	35	16	20	28
撞擊點 4	20	36	35	56	0	28
撞擊點 5	0	36	35	36	0	28
撞擊點 6	20	36	35	16	0	28
撞擊點 7	20	16	35	56	20	28
撞擊點 8	0	16	35	36	20	28
撞擊點 9	20	16	35	16	20	28

距離(cm)	地聲 3			地聲 4		
	X	Y	Z	X	Y	Z
撞擊點 1	20	16	20	16	20	10
撞擊點 2	0	16	20	36	20	10
撞擊點 3	20	16	20	56	20	10
撞擊點 4	20	36	20	16	0	10
撞擊點 5	0	36	20	36	0	10
撞擊點 6	20	36	20	56	0	10
撞擊點 7	20	56	20	16	20	10
撞擊點 8	0	56	20	36	20	10
撞擊點 9	20	56	20	56	20	10

直線距離 (cm)	地聲 1	地聲 2	地聲 3	地聲 4
撞擊點 1	81.000	76.420	47.497	39.446
撞擊點 2	78.492	63.246	43.081	50.951
撞擊點 3	81.000	54.406	47.497	66.603
撞擊點 4	68.710	73.756	57.411	34.000
撞擊點 5	65.734	60.000	53.815	46.862
撞擊點 6	68.710	50.596	57.411	63.530
撞擊點 7	60.671	76.420	71.666	39.446
撞擊點 8	57.280	63.246	68.819	50.951
撞擊點 9	60.671	54.406	71.666	66.603

(三) 實驗步驟

1. 把地聲探測器水平埋在砂中，將地聲探測器與訊號擷取卡接好。
2. 實驗人員保持安靜，在未施力的情況下，測試十分鐘環境雜訊。
3. 固定掛鉤與滑輪，垂直拉起鐵球，使其自由落下(見圖 3.13)。
4. 以電腦紀錄每次鐵球撞擊砂面所得到的訊號。
5. 將鐵球撞擊砂面造成的凹陷用桿麵棍整平，並用傾斜儀測量撞擊點周遭是否已達到水平(見圖 3.14)。
6. 每個撞擊點重複 15 次撞擊，再移動到下一個撞擊點，九個撞擊點結束後，加

鋪 20cm 礫石，再重覆一次全部步驟。



圖 3.13 實驗過程照片 (a)垂直拉起鐵球 (b)鐵球落下前近照

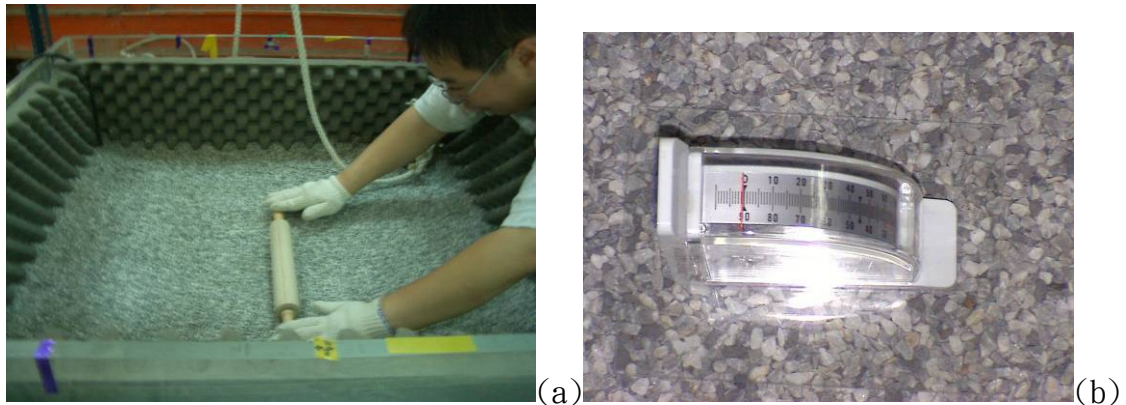


圖 3.14 整平砂面 (a)用桿麵棍整平砂面 (b)用傾斜儀確定砂面已成水平

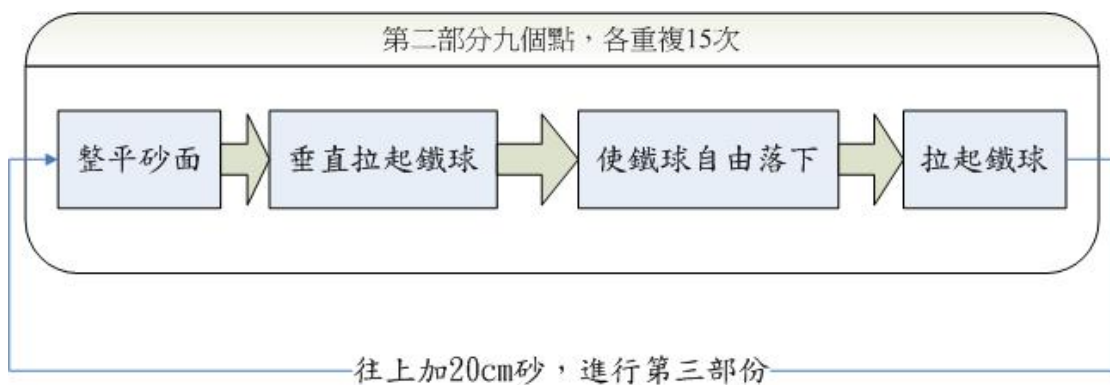


圖 3.15 實驗流程圖

3.2 實驗分析

由地聲探測器接收到的訊號是在不同位置接收到的振動速度，且是用電壓來表示。而我們實驗的目的是為了探討外力震動所產生的能量隨著探測器與施力點間距離不同而變化的情形，因此我們需要從地聲探測器得到能量的訊息。

利用快速傅立葉轉換(FFT)，將地聲探測器所測得的時域訊號轉成頻域訊號，如此即可得到頻率對電壓的關係圖，再利用圖 2.2 的地聲反應曲線將電壓(Volt)轉換為

速度(m/s)。得到每一顆地聲的三個軸的速度之後，將三個軸的速度平方後再相加，就可以得到橫軸為頻率(Hz)、縱軸為總能量的關係圖。

每個撞擊點總共做 15 次的撞擊，觀察轉換出來的頻率對能量圖(圖 3.16)，發現能量多集中在 0~40Hz 之間。為了減少實驗誤差，我們取每一個撞擊點的 15 次撞擊中 0~40Hz 中的最大能量值，將 15 個能量最大值取出，扣除這 15 個值裡中最大與最小值所對應到的實驗數據。將剩下的 13 次實驗數據作平均，得到一個地聲接收到鐵球在一個撞擊點產生的頻率對總能量關係。全部共有 4(地聲) \times 9(撞擊點) \times 2(部分)共 72 筆資料。將每個實驗點的資料處理流程整理如圖 3.17。

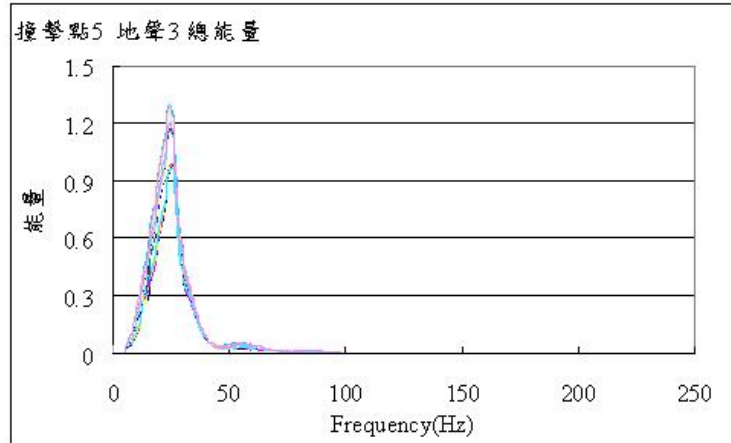


圖 3.16 同一撞擊點 15 次撞擊總能量圖

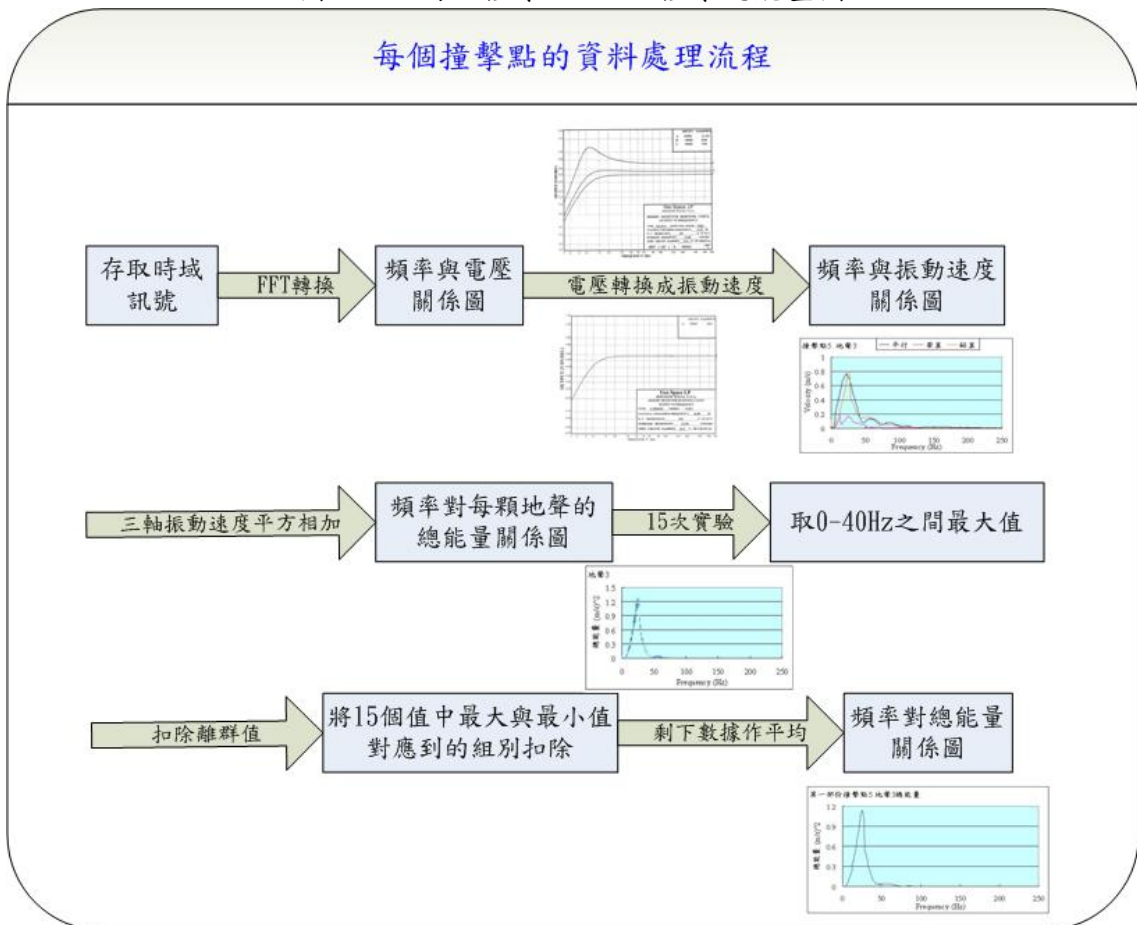


圖 3.17 實驗資料分析流程(單點)

最後，將整體實驗的流程圖整理如圖 3.18，期望為之後進一步的實驗定立實驗步驟的流程準則。

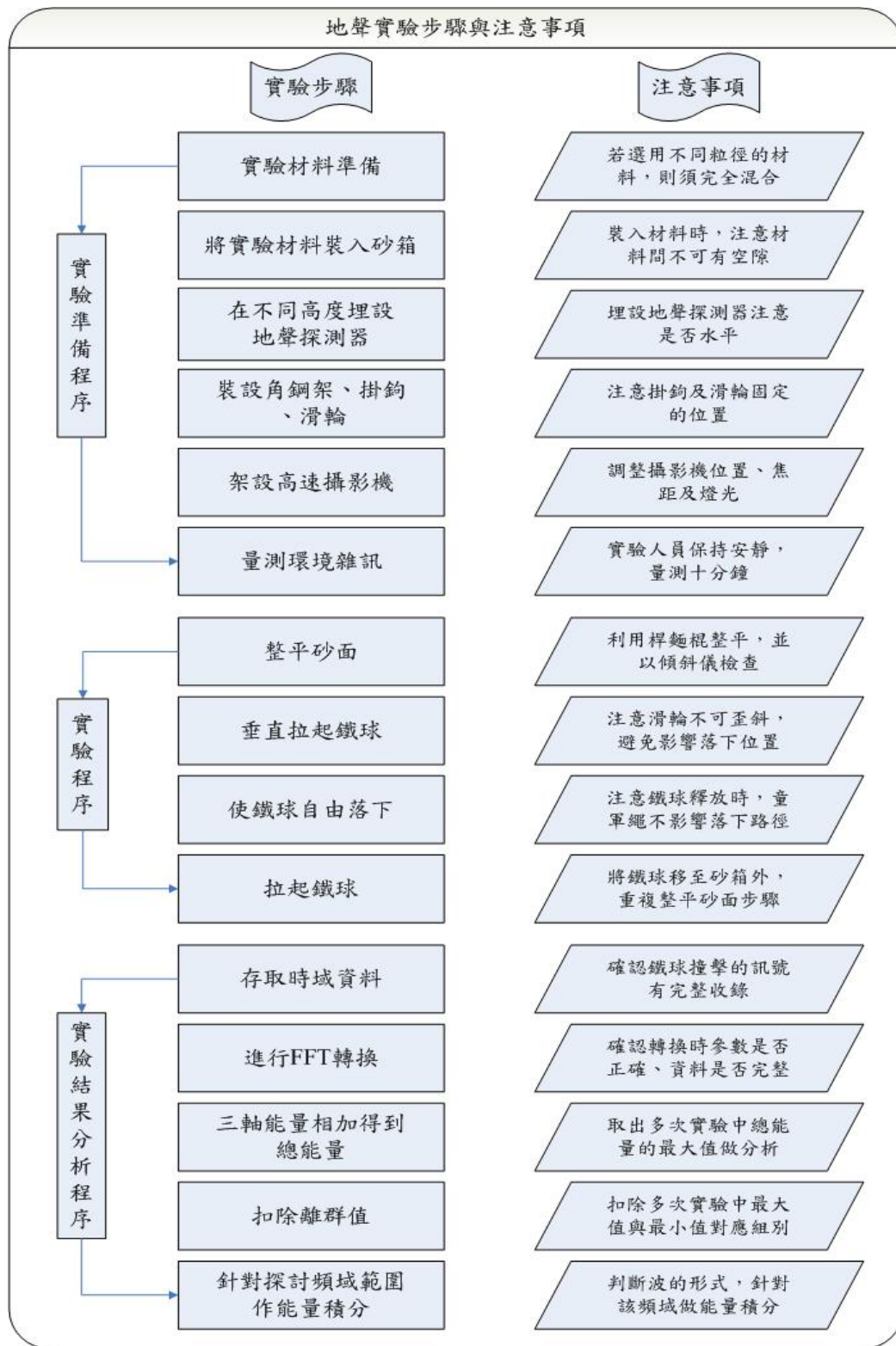


圖 3.18 室內地聲實驗流程圖

3.5.3 實驗結果與討論

鐵球撞擊實驗，將四顆地聲探測器分別埋設在砂箱裡的不同高度，希望藉此觀察能量隨距離衰減的關係。而在砂箱中，四邊側面及底面均鋪上吸音棉，避免反射波的產生，將鋪了吸音棉的砂箱視為半無窮域。

(一) 鐵球撞擊砂面後，礫石運動機制

在鐵球自由落體撞擊砂面的實驗中，我們對於礫石傳遞波的機制很感興趣，從第一部分實驗結果的頻域圖觀察，鐵球撞擊產生波的頻率大都在 50Hz 以下，與第二章

在討論土石流地聲頻域範圍中，將水流流動及土石摩擦滑動的頻率訂在 0~40Hz 部份的頻率吻合。

而我們並沒有在砂箱中加入水，砂面上也沒有水流流動，因此可以合理推測鐵球撞擊產生的波是經由礫石摩擦滑動來傳遞的。為了證明這項觀點，我們架設高速攝影機拍攝實驗過程(如圖 3.23)，特別是鐵球自由落體撞擊到砂面到礫石停止活動的這段短暫時間，高速攝影機擷取影像的頻率是 125(張/秒)，藉此我們可以觀察很短時間內礫石的運動模式。高速攝影機拍攝點與鐵球撞擊點的位置關係圖如圖 3.24。



圖 3.23 高速攝影機架設位置

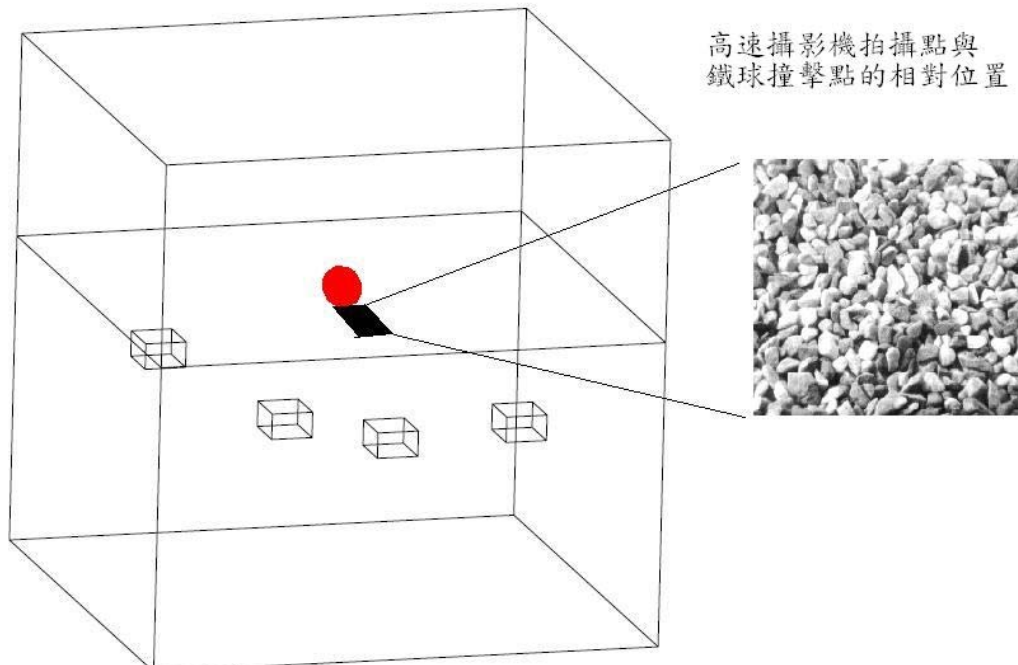


圖 3.24 高速攝影機架設位置拍攝點與鐵球撞擊點的相對位置圖

以下 24 張影像，每張間距 0.008 秒，而每張影像長寬均約 10cm。

本文後有附光碟，內有附放慢後之連續影像。

鐵球約在第 0.768 秒撞擊到砂面。

圖(1)，鐵球尚未接觸到砂面。圖(2)，鐵球即將接觸砂面。圖(3)，鐵球撞擊

到砂面，影像中上方礫石開始鬆動。



(1) $t = 0.760 \text{ sec}$



(2) $t = 0.768 \text{ sec}$



(3) $t = 0.774 \text{ sec}$

圖(4)、(5)、(6)，影像中礫石鬆動範圍增加。



(4) $t = 0.782 \text{ sec}$



(5) $t = 0.790 \text{ sec}$



(6) $t = 0.798 \text{ sec}$

圖(8)、(9)、(10)，影像上方礫石明顯漸漸隆起準備將波傳遞出去。



(7) $t = 0.806 \text{ sec}$

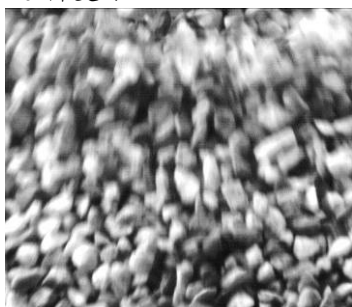


(8) $t = 0.814 \text{ sec}$

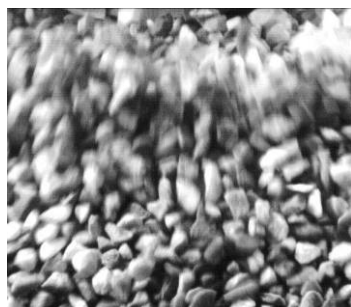


(9) $t = 0.822 \text{ sec}$

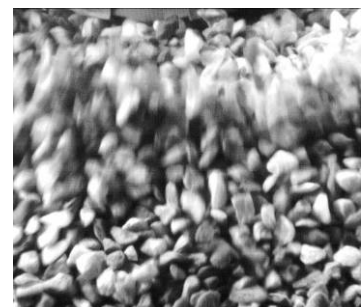
圖(10)~(18)，為礫石隨波往前運動的過程，同時也可以發現隨著波往前傳，礫石躍起的幅度也逐漸變小，這是因為隨著波往前跑，能量逐漸被消耗，礫石躍起的幅度也逐漸變小。



(10) $t = 0.830 \text{ sec}$



(11) $t = 0.838 \text{ sec}$



(12) $t = 0.844 \text{ sec}$



(13) $t = 0.852 \text{ sec}$



(14) $t = 0.860 \text{ sec}$



(15) $t = 0.868 \text{ sec}$



(16) $t = 0.874 \text{ sec}$



(17) $t = 0.882 \text{ sec}$



(18) $t = 0.890 \text{ sec}$

圖(19)~(21)，礫石往前傳送的能量已逐漸消散殆盡，躍起的礫石量也減少，直到第(23)(24)礫石落下後即靜止了，不再看到有躍起的情形。



(19) $t = 0.898 \text{ sec}$



(20) $t = 0.906 \text{ sec}$



(21) $t = 0.914 \text{ sec}$



(22) $t = 0.922 \text{ sec}$



(23) $t = 0.930 \text{ sec}$



(24) $t = 0.938 \text{ sec}$

圖 3.25 (1) ~ (24) 高速攝影機拍攝鐵球撞擊砂面過程

由高速攝影機的連續影像中，我們發現當鐵球落下撞擊到地面之後，礫石的運動機制是經由彼此擠壓，原本未受壓的礫石在受到突然的衝擊之後，接觸面的礫石被瞬間壓密又釋放，將能量傳遞到附近的礫石，如此一直傳下去直到能量衰減到沒有為止，雖然礫石被激起之後再落下的行為較類似土石的碰撞，但由於礫石本身質量太小，碰撞產生的能量應該很小，同時也傳不遠。在室內實驗中，我們有用一顆石頭砸下來測量過，無法量測到撞擊訊號。所以礫石主要傳遞波的機制，就是藉由不斷壓密釋放的過程。如圖 3.26，礫石即是不斷壓密釋放來傳遞波。

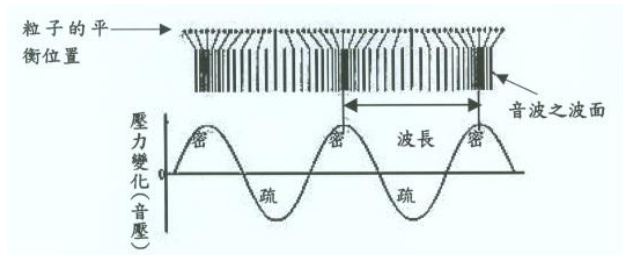


圖 3.26 介質傳遞波示意圖

而這種不斷擠壓再釋放的過程，造成礫石彼此之間持續進行摩擦滑動的行為，如此則證實了我們收到 50Hz 以下的能量，主要就是礫石彼此摩擦滑動所產生的頻率範圍。

因此，我們將實驗前環境雜訊及撞擊實驗產生訊號的時域資料(圖 3.27)進行 FFT 轉換，得到環境雜訊及撞擊訊號的頻域圖(圖 3.28)，再針對 0~40Hz 的頻域範圍作能量積分，將撞擊訊號的能量積分值扣除掉五倍的環境雜訊能量積分值。如此即可以得到真正因鐵球撞擊產生的振動能量，整體資料處理流程如圖 3.29。

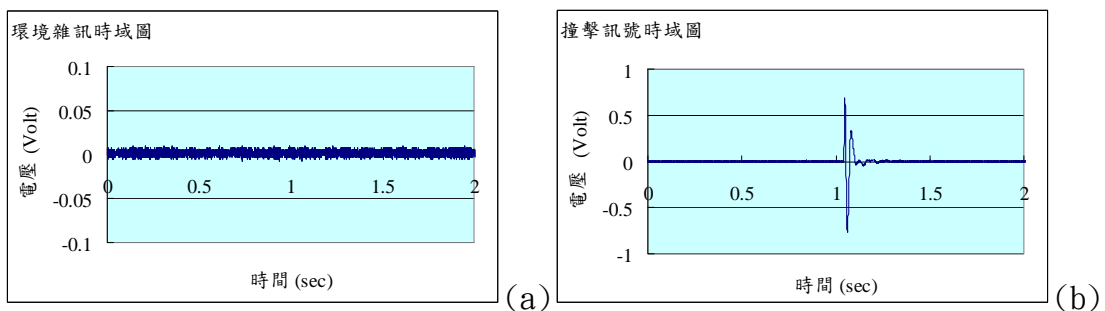


圖 3.27 時域圖 (a)環境雜訊 (b)撞擊訊號

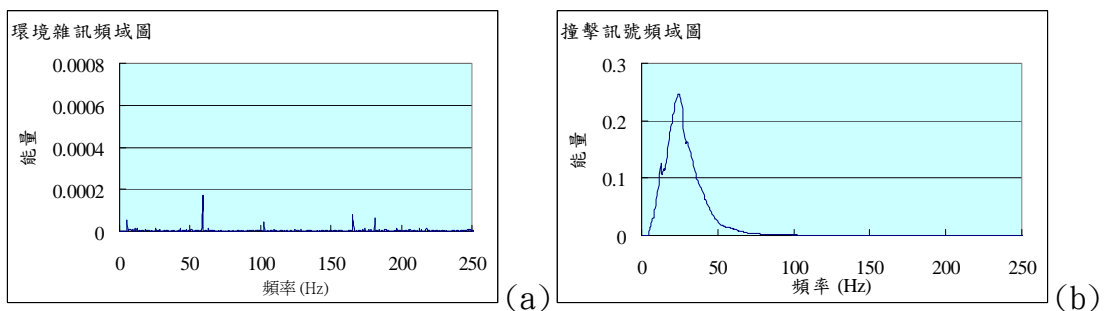


圖 3.28 頻域圖 (a)環境雜訊 (b)撞擊訊號

(二) 高速攝影機影像搭配時域訊號及頻域能量

在觀察過高速攝影機的影像之後，我們希望更進一步了解在短暫撞擊過程中，地聲探測器接收到的時域訊號的變化以及振動能量的變化，因此我們將同樣的時間間隔裡影像的變化與時域訊號的變化及經 FFT 轉換後能量的變化一起觀察。

以下六頁為影像搭配訊號及能量的變化圖，每一頁中有四張高速攝影機的影像、四個地聲探測器量測到的時域訊號以及時域訊號經 FFT 轉換後得到的頻域圖。其中時域訊號圖橫軸為時間(sec)，縱軸為電壓(Volt)，頻域圖橫軸為頻率(Hz)，縱軸為能量。

第一頁由 0.640sec 開始，每段時間間隔皆為 0.128 秒，而四張影像圖每張間隔 0.032 秒，時域訊號增加 128 筆資料，在圖中以圓圈標示，並將增加的這 128 筆時域資料拿來作 FFT 轉換，由此我們就可以得知在這短暫時間內能量的變化。

第一、二頁(0.640 sec~0.768 sec)為鐵球尚未撞擊到砂面，影像圖也顯示礫石沒有任何運動，時域訊號維持很小，頻域訊號也顯示沒有能量增加。

第三、四頁(0.768 sec~0.896 sec)為鐵球撞擊砂面的主要過程，鐵球撞擊發生時間以紅色箭頭表示，從第一張圖中看到上方接近撞擊點處的礫石開始運動，接著第

二、三、四張圖中可以看出礫石開始往外面傳遞波，而這段時間內，時域訊號上下震盪的非常劇烈，頻域圖中也可以看出接收到非常大的能量，其中按照地聲 1~4 的順序埋設深度由深而淺，也可以觀察到埋設越淺的地聲接收到能量越大。

試驗觀察結果為(0.896 sec~1.024 sec)為礫石在傳遞波的過程中，能量漸漸消耗，礫石的運動也逐漸停止，而時域訊號的震盪也逐漸平緩，振動能量也跟著降低了。

(1.024 sec~1.152 sec)，(1.152 sec~1.280 sec) (1.280 sec~1.408 sec)，砂面上礫石的運動停止了，時域訊號也逐漸回歸未撞擊前的振幅，頻域能量也變的很小。

至此，一次撞擊實驗就完成了，接著整平砂面進行下一次撞擊。

接著我們要觀察能量積分值隨時間的變化，是否真的能反應原始訊號，因此我們將撞擊實驗的原始訊號搭配能量積分值來做比較，一樣每次取 128 筆，但由於一次撞擊實驗的原始地聲訊號只有 2048 筆，為了得到足夠多的數據來做比較，取資料的方法是從第一筆開始往後取 128 筆，之後每隔 16 筆再取 128 筆，中間會有 94 筆資料是重複的，比較圖如圖 3.30：

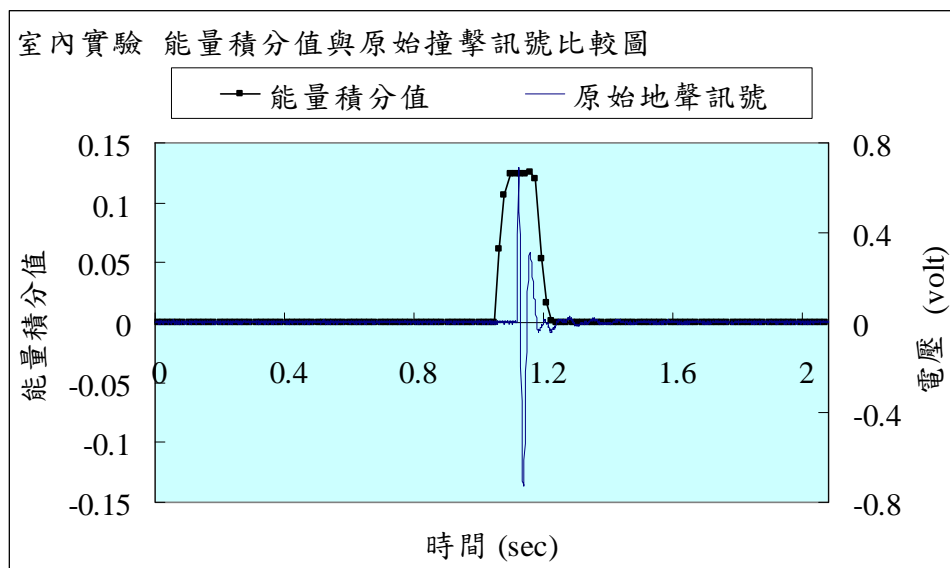


圖 3.30 能量積分值與原始撞擊訊號比較圖

由圖中可以發現，能量積分值的曲線在地聲訊號開始變大之前，就已經先產生增加的現象，這是因為資料數的限制，整個撞擊事件只有持續 0.1 秒，總共只有 100 筆數據，而我們是取用 128 筆資料作 FFT 轉換，因此必須要有重複取值的動作才能夠有足夠的數據做比較，而在做轉換時是以平均的概念去處理訊號，將原本上下振動的訊號變成一個事件，只有單一峰值，才會產生這種結果。但是基本上是可以抓到原始地聲訊號變化的趨勢，若是有連續且足夠的地聲資料來做比較的話，則可以避免這種現象產生。

(三) 能量隨距離衰減的情形

由高速攝影機拍到的影像，證實了砂箱中能量的傳遞的確是藉由礫石的摩擦滑動，因此在分析實驗中地聲探測器所接收到的能量時，使用本文第二章中所提到的方法，將 0~40Hz 間的能量積分來作比較，並將 X-Phone 及 GS-32CT 所接收到的能量分開做圖比較(圖 3.31)。

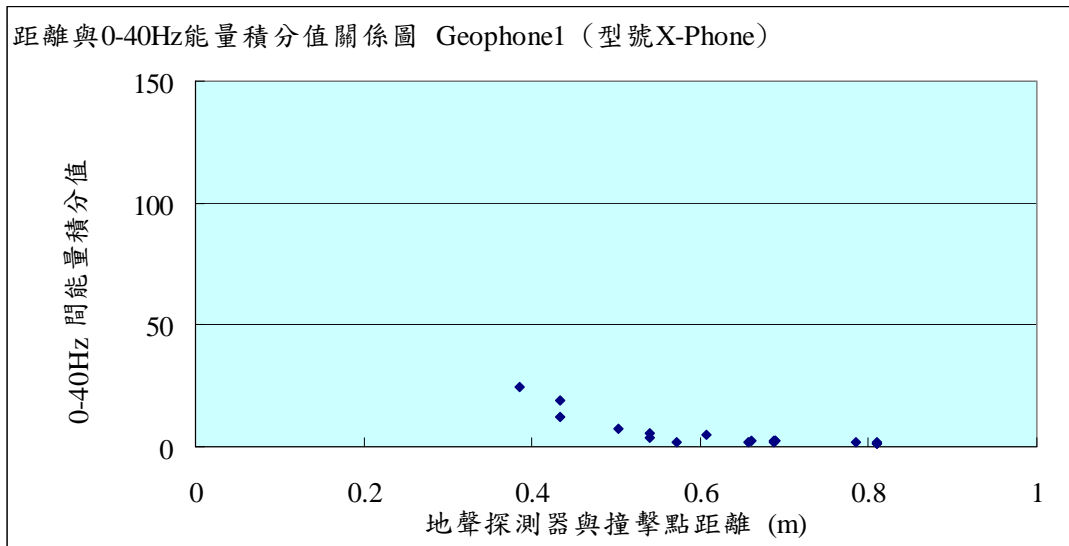


圖 3.31(a) X-Phone, 0~40Hz 能量積分值隨距離變化圖

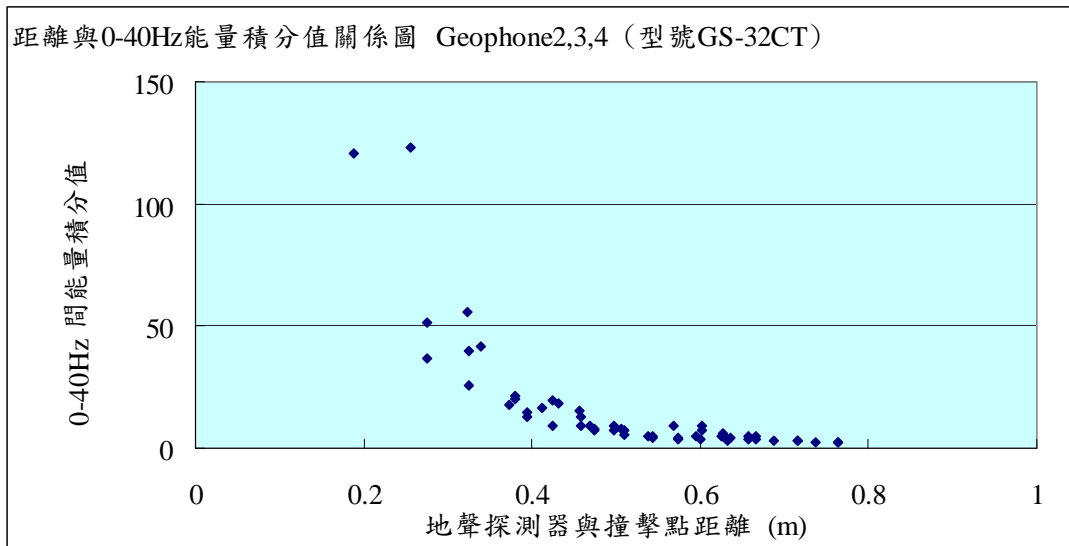


圖 3.31(b) GS-32CT, 0~40Hz 能量積分值隨距離變化圖

從上兩圖中可以看出能量積分值 E 隨著距離 r 的增加而衰減，但是在 r 較小的地方的分散較為零亂，隨著 r 增加，資料的分布也逐漸趨向穩定，接著我們要與聲波理論來做比較。

觀察地聲探測器量測到的訊號，發現訊號的振動模式與 dipole 的模式類似，因此我們先將兩者訊號圖形比較，如圖 3.32。

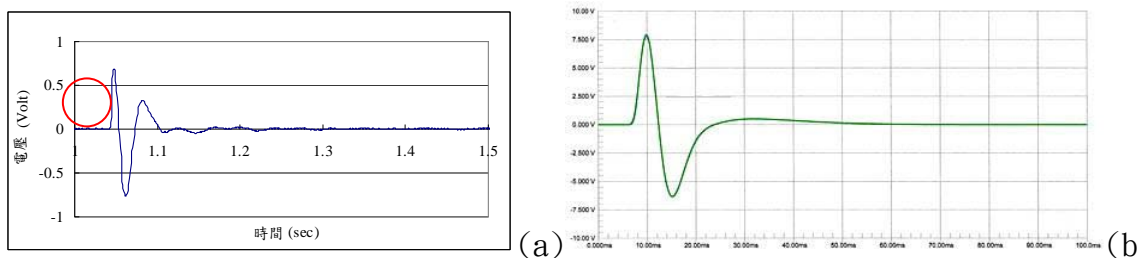


圖 3.32 實驗撞擊地聲訊號與 dipole 理論比較圖

(a) 實驗撞擊地聲訊號 (b) dipole 理論訊號

比較結果發現，撞擊實驗所量測到的訊號圖形與 dipole 類似，但比 dipole 理論訊號要多了一個波峰，而且後面也有一些較小的訊號持續出現，可能是反射訊號。由此推測，砂箱中鋪設的吸音棉並無法百分之百吸收波，還是產生了反射波。

然而 dipole 事實上是由兩個同樣大小的點源，朝向相反方向發出波，並非向

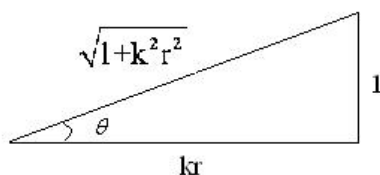
四面八方送出同大小的能量，因此與本文假設的點源撞擊不符合。

因此，推測實驗訊號會產生這樣的波形，有可能是因為點源產生的波撞擊到砂面後產生反射造成的，則這樣的傳播模式可被視為在無窮域中有兩個很接近的點源同時產生波導致的結果。因此我們將兩個很接近的波源對同一點產生的能量與實驗結果來比較。

聲波由點源發出訊號，會以球面波的形式向外傳遞，在距離點源 r 的地方量測到的位移量 ξ 會跟 r 成反比：

$$\xi = \frac{1}{j\rho_0 c} \frac{A}{r} \frac{1}{\cos\theta} e^{-j(\omega t - kr - \theta)} \quad (3.3-1)$$

其中 ξ 為距點源 r 處的位移， A 為係數， ρ_0 為材料密度， c 為波速， k 為波數， θ 則如下圖所示，為距離點源 r 處與 k 的關係。



因為本研究中利用卡式座標求點源與量測點間的距離，因此在推算相近點源產生的位移量時，將原本球座標改為卡式座標來計算。

$$\xi = \frac{B \sqrt{1+k^2} \left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 \right]}{jk \left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 \right]} e^{j \left(\omega t - k \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} - \theta \right)} \quad (3.3-2)$$

其中 B 為係數， (x_0, y_0, z_0) 為撞擊點位置， (x, y, z) 為量測點位置。

由於聲波在石頭中傳遞速度超過 500m/s，而在實驗中 r 最大只有 0.8m，因此 k 遠大於 r ，則位移量可化簡為：

$$\xi = \frac{2B'}{jr^2} e^{j(\omega t - 2kr)} \quad (3.3-5)$$

發現在兩點源之間距離非常相近時，且因為實驗中條件使得 k 遠大於 r ，量測點的位移量會是單點點源位移量的兩倍，並跟量測點與點源之間距離平方成反比。而能量又是與位移平方成正比，因此能量隨距離增加而衰減的情形可表示成：

$$E \propto \frac{B''}{r^4} e^{2j(\omega t - 2kr)} \quad (3.3-6)$$

其中 E 表示距點源 r 處的能量， B'' 為係數。

因此，我們將能量積分值 E 對 r^4 做圖，來觀察是否能量是呈現以點源產生的球面波形式衰減，並加上趨勢線比較，如圖 3.34：

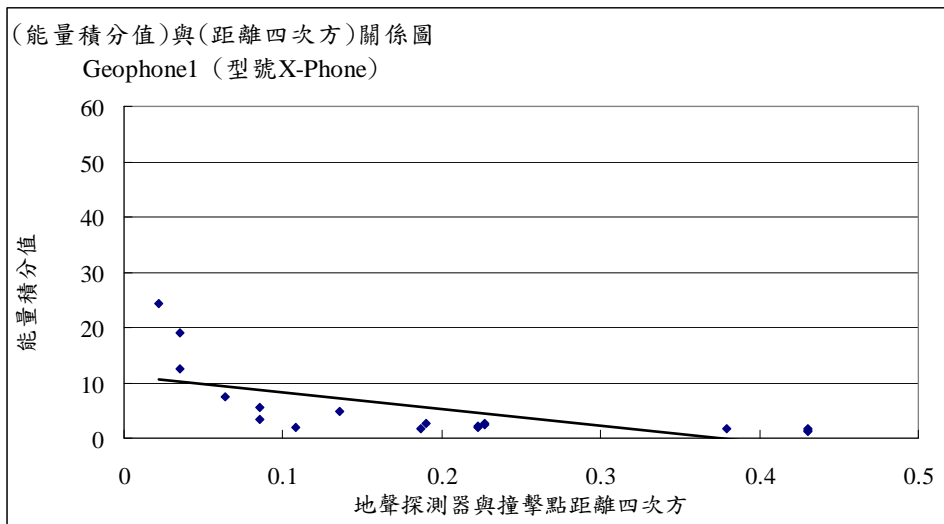


圖 3.34(a) X-Phone, 0~40Hz 能量積分值與距離四次方關係圖

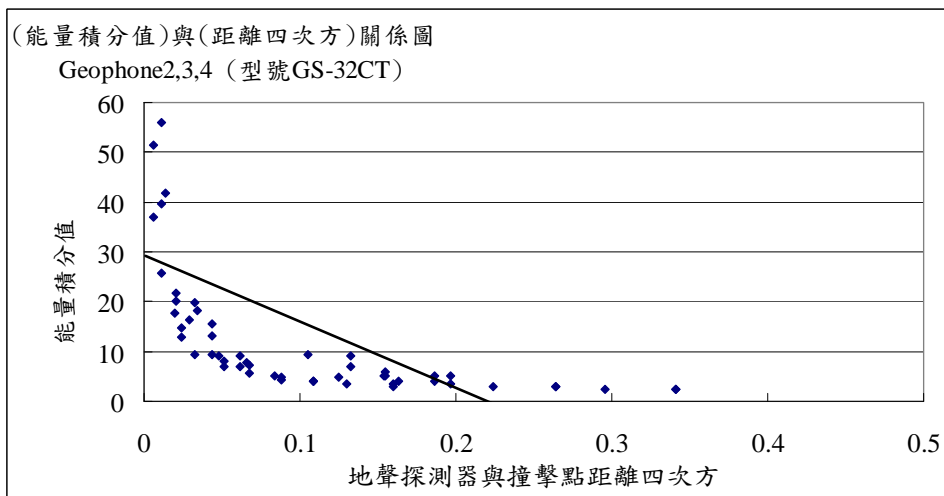


圖 3.34(b) GS-32CT, 0~40Hz 能量積分值與距離四次方關係圖

由上兩圖中，雖然能量積分值的確是隨著距離四次方增加而減少，但資料點分散的很凌亂，推測產生誤差的原因是砂箱與鐵球尺寸的關係，因為砂箱的長寬高各為 1m，地聲與撞擊點的距離受砂箱尺寸影響，均不超過 1m，而鐵球的直徑約為 13cm，若是撞擊點與地聲探測器距離太近，會使得撞擊產生不能被視為點源。如果砂箱尺寸加大，使地聲與撞擊點的距離能夠遠大於鐵球尺寸，或是採用直徑較小的重物進行實驗，則應該就可以視為點源的撞擊。

3.4 小結

本章利用能量積分值的方法來分析撞擊實驗所接收到的地聲訊號

，比較分析結果與原始地聲訊號隨時間的變化，發現能量積分值方法的確可以抓到原始訊號變化的趨勢。另一方面，雖然實驗結果與原先假設的點源撞擊有些許差異，但仍然可以觀察到能量隨距離增加而衰減的趨勢，因此我們接下來要將能量積分值的方法應用在現場地聲資料的分析上，希望能驗證這是個可行的物理方法。

第四章維波遙測

4.1 訊號分析理論

我們的雷達系統，當打開電源後會不斷產生一個正弦函數的訊號，而這個訊號就會被發射天線輻射傳播出去，因此在有反射物的反射訊號的情況下，並且反射訊號能量比環境與系統雜訊大時，使訊號被接收天線接收後，再由示波器可以顯示出這個訊號的波形並記錄下來後成為反射訊號，我們就要從這個反射訊號中分析出反射物可能所在的位置。

在我們的雷達系統中，由天線所發射出去的電磁波呈一個立體角，也就是天線輻射模式，因此當空間中的地形不規則時，反射波可視為由許多不同傳遞路徑反射回來的電波，假設接收天線有接收到這些回波，則此回波的訊號就可以表示成經過各個不同路徑的發射訊號所組合成的結果如(3-1)。

其中， $x(t)$ 為發射訊號， $y(t)$ 則為接收訊號，並且經過的每條路徑上的增益常數(gain factor)為 H_k ， $k=1,2,3,\dots,r$ 。因此接收訊號 $y(t)$ 就可用 $x(t)$ 表示成

$$\begin{aligned} y(t) &= H_1 x(t-\tau_1) + H_2 x(t-\tau_2) + \dots + H_r x(t-\tau_r) \\ &= \sum_{k=1}^r H_k x(t-\tau_k) \end{aligned} \quad (3-1)$$

其中， τ_k ， $k=1,2,3,\dots,r$ ，為時間延時(time delay)。

4.1.1 相關方程式(Correlation Function)

當我們在判斷某兩群數字之間的關係時，即為它們之間的關係時，可以使用統計的方法，也就是計算這兩群數字的共變異數(covariance)。假設現在有兩組實驗得到的數據，分別為 x_i ， $i=1,2,3,\dots,N$ 以及 y_i ， $i=1,2,3,\dots,N$ ，則共變異數 σ_{xy} 定義成

$$\begin{aligned} \sigma_{xy} &= E[(x-\mu_x)(y-\mu_y)] \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \end{aligned} \quad (3-2)$$

除了共變異數外，也可以使用相關係數來表示這兩組數字間的線性相關性，而相關係數定義為

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3-3)$$

$$\sigma_x = \sqrt{E[(x-\mu_x)^2]}$$

其中， μ_x 為算術平均數， σ_x 為 x 的變異數； y 的算術平均數與變異數相同於 x 的算法。而相關係數介於-1與1之間，並且假如相關係數為-1時，表示 x 與 y 之間是反相關的；最大正相關時相關係數為1。

因此，假設上述的 x 與 y 為我們實驗中量測到的訊號，用一個時間序列表示之，即為 $x(t)$ 與 $y(t)$ 。要討論這兩個時間序列的關係前，先加入了一個變數 τ ，也就是 x 與 y 之間的時間延時(Time delay)，因此就可以使用前面所討論的相關係數來了解兩個時間序列，在不同時間延時上的關係。

由(3-2)的定義， $x(t)$ 與 $y(t)$ 在任何時間延時下的共變異數可表示為

$$\begin{aligned} C_{xy}(\tau) &= E[\{x(t) - \mu_x\} \{y(t+\tau) - \mu_y\}] \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{x(t) - \mu_x\} \{y(t+\tau) - \mu_y\} dt \end{aligned} \quad (3-4)$$

同理，在特別的情況下， $x(t)=y(t)$ ，則共變異數可表示成

$$C_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{x(t) - \mu_x\} \{x(t+\tau) - \mu_x\} dt \quad (3-5)$$

y 的共變異數可由(3-5)中 $x(t)$ 替換成 $y(t)$ 計算即可得之。最後，兩時間序列的時間延時之相關係數方程式可 $\rho_{xy}(\tau)$ 表示成(3-6)式，其中， $|\rho_{xy}(\tau)| \leq 1$ 。

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{C_{xy}(\tau)}{\sqrt{C_{xx}(0)C_{yy}(0)}} \quad (3-6)$$

4.1.2 交互相關方程式(Cross-Correlation Function)

在上一節中，(3-4)式為 $x(t)$ 與 $y(t)$ 在任何時間延時下的共變異數，並且可以改寫成

$$\begin{aligned} C_{xy}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{x(t) - \mu_x\} \{y(t+\tau) - \mu_y\} dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{x(t)y(t+\tau) - \mu_x y(t+\tau) - \mu_y x(t) + \mu_x \mu_y\} dt \quad (3-7) \\ &= R_{xy}(\tau) - \mu_x \mu_y \end{aligned}$$

其中， $R_{xy}(\tau)$ 被稱為 $x(t)$ 與 $y(t)$ 的交互相關方程式(Cross-Correlation Function)，如(3-8)式

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt \quad (3-8)$$

並且，當 $y(t)=x(t)$ 為特殊的情況下，(3-5)式可化簡成

$$C_{xy}(\tau) = R_{xy}(\tau) - \mu_x \mu_y \quad (3-9)$$

而 $R_{xx}(\tau)$ 稱為自相關方程式(Autocorrelation Function)，如(3-10)式

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt \quad (3-10)$$

並且在上式中，當時間延時為 0 時，則會有最大的相關性，所以 $R_{xx}(0)$ 為最大值。並且自相關方程式直接被使用來度量一個隨機資料，由以往的觀察中來預測未來的資料的準確度(Bendat and Piersol, 1980)。

將(3-4)與(3-5)式帶入(3-6)式中，得到交互相關係數方程式

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau) - \mu_x \mu_y}{\sqrt{[R_{xx}(0) - \mu_x^2][R_{yy}(0) - \mu_y^2]}} \quad (3-11)$$

(3-11)即為交互相關係數方程式(Cross-Correlation Coefficient Function)。

回到我們的訊號分析之中，我們討論單一條傳遞路徑下訊號之間的關係，假設發射訊號經過某條傳遞路徑後被接收天線所接收，並且傳遞的路徑長度為 d ，波速為 c ，此路徑上對訊號的影響假設為常數 H ，以及雜訊 $n(t)$ ，則發射訊號 $x(t)$ 與接收訊號 $y(t)$ 之間的關係可表示成

$$y(t) = Hx\left(t - \frac{d}{c}\right) + n(t) \quad (3-12)$$

由(3-8)與(3-10)中可得到

$$\begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \left[Hx\left(t - \frac{d}{c} + \tau\right) + n(t) \right] dt \\ &= HR_{xx}\left(\tau - \frac{d}{c}\right) \end{aligned} \quad (3-13)$$

從(3-13)可以發現到，在上述假設下簡化下，相關係數方程式可以表示為發射訊號的自相關係數乘上 H 後，在 $\tau = (d/c)$ 有一個峰值(peak)，這是單一條路徑的狀況下，然而在我們的研究中，空間中可能有許多的反射點，因此接收訊號將為各條路徑反射回來的訊號所疊加而成，可用(3-1)式表示，而將(3-1)式代入(3-8)式可得到

$$\begin{aligned}
R_{xy}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) [H_1 x(t - \tau_1 + \tau) + H_2 x(t - \tau_2 + \tau) \\
&\quad + \dots + H_r x(t - \tau_r + \tau)] dt \\
&= \sum_{k=1}^r H_k R_{xx}(\tau - \tau_k)
\end{aligned} \tag{3-14}$$

其中， $\tau_k = d_k/c$ ，由於電磁波傳遞的速度是已知條件，因此可以從交互相關方程式得到的結果裡，兩個波峰間的時間差乘上速度，即可以求得這兩個不同路徑相距的長度，並且我們的電波是從發射天線到反射物後再回到接收天線，因此這段相距的長度為反射物間的距離的兩倍。

從上面的討論中得知，由交互相關方程式的結果，來找出相距的時間延時對應到的距離，因此可以反推得發射訊號所行走的路徑距離，而不同的距離便可以反推出各個反射點間的距離。

4.1.3 訊號分析方法

由於實驗得到的數據，是由示波器所儲存下來在時域上的訊號，因此在開始分析前，我們要先了解示波器的儲存訊號的方式，以及兩個訊號與天線之間的關係。

在我們的實驗中，每次發射訊號後，在示波器上分別會將觸發天線(Trigger antenna)接收到的訊號儲存在 Channel 1 上(以下稱此訊號為發射訊號)；接收天線則是將所接收到的回波訊號儲存在 Channel 2 上(以下稱此訊號為接收訊號)。在我們使用的高速示波器中，有多種取樣頻率(sampling rate)與取樣數可供選擇，因此我們會以要量測的距離來決定這個設定值，而在以下的實驗中，我們設定每個頻道都存有 50000 筆數據，而取樣頻率則設定為 $40 \text{ ps}/pt$ ，也就是每兩筆數據的時間間隔為 40 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ sec}$)，將取樣數乘以取樣頻率，可以得到每個頻道所記錄的總時間為 $2 \mu\text{s}$ ($1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ sec}$)。另一方面，電磁波在空氣中傳遞的速度即為光速，也就是約為 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，而示波器記錄到的總時間乘上光速除以 2 就是電磁波來回行走的單程距離，因此在這個取樣頻率 (40 ps) 與取樣數 (50000 筆) 的設定下，可以記錄到從最遠 300 公尺處反射回來的電波訊號。

由示波器記錄下來的發射訊號與接收訊號是時域上的波形。而示波器是一直不斷在接受訊號，為了能夠抓到我們想要的訊號，所以在用示波器紀錄訊號前，我們需要先設定觸發位置(Trigger Position，由示波器上的 Position 鈕控制之)和觸發訊號的電壓基準值(Trigger Criterion)，其中觸發位置就是量測到的電壓值大於電壓基準值後開始擷取訊號波形的位置。因此，假如現在有一個訊號由觸發天線接收到而傳到示波器上，並且所接收到的訊號大於這個基準值時，就會從觸發位置開始把接著持續接收到的波形記錄下來，即成為發射訊號。並且在 Channel 1 開始紀錄訊號的同時，Channel 2 也開始把接收天線當時所接收到的訊號記錄下來，即成為接收訊號。最後，這兩個頻道上儲存數據的筆數總共達到了 50000 筆後，即停止擷取訊號，而這兩組各 50000 筆數據的訊號，就是我們之後要分析的一組電磁波訊號，如圖 4.1. 所示即為訊號在示波器螢幕上的畫面，並且我們設定的觸發位置在 10000 筆的地方，換句話說，儲存到的回波訊號數據有 40000 筆。

天線是用觸發天線會接收到來自發射天線發射出去的電磁波，並且接收天線會收到現場反射回來的電磁波，但是由於現場的反射面多為不規則形狀，因此將造成許多不同方向的回波，所以觸發天線與接收天線也會接收到從其他方向散射或經過好幾次反射回來，而且能量較小的回波，這些回波對於我們的量測而言是雜訊。因此發射與接收訊號混合了在現場反射與散射的干擾訊號，我們必須先要得知環境的雜訊，才能夠找出由目標點散射回來的訊號時。

由於兩條連接天線與示波器的傳輸線長度不同，形成了一個系統時間差。在實驗中，我們將短的傳輸線(3 公尺)連接接收天線與示波器上的 Channel 2；長的傳輸線(5 公尺)則是連接觸發天線與示波器上的 Channel 1，所以從兩支天線所收到的訊號傳到示波器的時間是不同的；也就是相同時間點上，示波器擷取下來的訊號是不同時間點下，被天線接收

到的電波。理論上，假設現在有個電波同時被觸發天線與接收天線所接收，則接收訊號會比較晚才顯示出來，發射訊號則是比接收訊號早顯示在示波器的螢幕上。即使訊號在傳輸線中傳遞的速度很快，但兩條線的長度相差將近一倍的距離，因此我們考量到這個時間差的影響，所以無法直接由兩訊號的起始位置來計算時間差，因為考慮到傳輸線長短不同造成的系統時間差。這個問題是在台大校園實驗時發現的，所以為了克服這個時間差，我們在雙城里的野外實驗時，就在河道旁做了三個參考點的量測動作，用以皮尺量測的距離，與用訊號分析而得的距離互相比較，來校正系統的時間差。

最後，在實驗中最重要的訊號，就是是由訊號產生器所產生的脈衝波訊號如圖 3-6 所示，這是將訊號產生器接上示波器，並將產生的脈衝波擷取下來的訊號。此訊號長度約為 $352ns(3.52 \times 10^{-7} \text{ sec})$ ，並且振幅比較大的部份集中在前 $80ns(8 \times 10^{-8} \text{ sec})$ 。在實驗中每發射一次訊號，先由訊號產生器產生的一個這種脈衝波訊號，再由發射天線朝著目標地點，發射出由此脈衝波的訊號產生的電磁波，隨著這個電磁波在空間中前進，在碰到不同介質與反射物後會發生透射、反射與散射的現象，而這些反射與散射回來的電波，就由接收天線接收後，由示波器將此脈衝波訊號的反射訊號記錄下來。

理論上，此脈衝波訊號在發射出去後，會馬上被觸發天線接收，並且過一段時間後，接收天線也會接收到反射地點傳回來的回波，由前面的分析中得知 CH1 與 CH2 訊號中的相對位置無法直接由數據判斷。因此，接下來的分析就是用同組的 CH1 與 CH2 的訊號，經過前面介紹過的交互相關函數(Cross-Correlation Function)的計算結果來推求兩個訊號之間的時間差，再加上校正過的系統時間差後，即可分析出量測的距離。

分析過程主要有五個步驟，分別為計算相關方程式值、計算交互相關係數數列、求出相關係數基準值、求出最大時間延時，以及反推求距離，而詳細的過程分別為下面所述

1. 計算相關方程式值

在本步驟中，要計算自相關與交互相關兩種方程式值，而將(3-8)與(3-10)式轉換成離散的形式，可得

$$\begin{aligned} R_{xy}[n] &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N\Delta t} \sum_{k=1}^N x[k]y[k+n]\Delta t \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x[k]y[k+n] \end{aligned}$$

由於示波器上儲存下來的資料筆數為 50000 筆，因此得到交互相關方程式為

$$R_{xy}[n] = \frac{1}{50000} \sum_{k=1}^{50000} x[k]y[k+n] \quad (3-15)$$

$-50000 \leq n \leq 50000$

其中，因為離散的關係，時間延時則變成 $\tau = n\Delta t$ 。同理可得到自相關係數的方程式為

$$R_{xx}[n] = \frac{1}{50000} \sum_{k=1}^{50000} x[k]x[k+n] \quad (3-16)$$

$-50000 \leq n \leq 50000$

而分別將發射訊號(CH1)當作 $x(t)$ 與接受訊號(CH2)當作 $y(t)$ 代入上兩式計算之，最後則得到兩組自相關方程式與時間延時的數列，也就是發射訊號的自相關方程式值，和接收訊號的自相關方程式值；以及一組交互相關方程式與時間延時的數列，也就是發射訊號與接收訊號的交互相關方程式值。

2. 求出交互相關係數

將前一步驟得到的三組相關方程式與時間延時的數列後，再算出發射訊號與接收訊號的平均值，最後代入(3-11)式中，

$$\rho_{xy}[n] = \frac{R_{xy}[n] - \mu_x \mu_y}{\sqrt{\{R_{xx}[0] - \mu_x^2\} \{R_{yy}[0] - \mu_y^2\}}} \quad (3-17)$$

$-50000 \leq n \leq 50000$

將得到一組交互關係數與時間延時的數列 $\rho_{xy}(\tau)$ 。又其中 μ_x 為算術平均數，可以用下列子計算而得

$$\mu_x = \frac{1}{50000} \sum_{i=1}^{50000} x_i \quad (3-18)$$

其中 x 為發射訊號，在(3-17)式中 μ_y 則是接收訊號的算術平均數，並且適用相同的方式計算而得。

3. 求出相關係數的基準值 ρ_{cr}

為了增加分析結果的準確性，也為了瞭解是否真的有反射的情況，在交互關係數數列中，我們訂定了一個相關係數的基準值 ρ_{cr} ，其作用在交互關係數數列中，只要低於這個基準值的峰值，將不予理會，並認為這個峰值不是由反射物反射回來的訊號，而此基準值的計算依據，則是由每次量測實驗開始前，我們在開始量測前，先對天空發射五次的訊號，由於天空的距離很遠，假使有回波反射回來，也超過了示波器記憶體能夠紀錄下來的時間，所以就認定朝天空發射訊號的這五組數據，可當作是沒有任何由發射訊號，經過反射物反射回來的訊號。

這五組朝天空發射的訊號，也同樣經過前兩步驟的計算，得到五個交互相關數列，並且找出這五個數列中，相關係數的絕對值最大值，即將此數值當成是基準值 ρ_{cr} 。

4. 求出最大時間延時 τ_{max}

由於我們的示波器一次儲存的數據為 50000 筆資料，並且由示波器的觸發位置到結束儲存訊號的筆數最多為 50000，將此筆數後乘上取樣頻率所得到的時間，即為這個示波器上最慢可接收到的反射訊號的時間點，也就是反射訊號的最大時間延時 τ_{max} 。假設現在我們將觸發位置設定於 25000，並且採用的取樣頻率為 $16ps/pt$ ，也就是兩筆數據的時間間隔為 1.6×10^{-11} 秒，因此可以知道我們儲存下來的反射訊號總共有 $400ns$ (4×10^{-7} 秒)，所以接收到反射訊號的最大時間延時 τ_{max} 為 4×10^{-7} 秒。

5. 反推求距離

首先在要找峰值前，先要確定時間延時的合理範圍。經由第一、二步驟得到的交互關係數數列，取出延時為 0 至由前個步驟所決定的最大時間延時的範圍，將由第三步所得的相關係數基準值，在這個取出的範圍圖上標出來，從 0 開始往後找出第一個大於基準值的波峰，並紀錄這段的时间延時，接著在找到第二個與第三個波峰之間的时间延時，直到最大時間延時為止。

在相關係數數列上，大於基準值的波峰即為某條路徑的反射訊號，而相鄰兩個波峰間的時間延時，所代表的行走距離為反射物間距離的兩倍。因此從交互關係數數列上將峰值找出來後，再由下列式子計算出距離 R

$$R = \frac{C\tau}{2} \quad (3-19)$$

其中， C 為光速， τ 為延時(單位:秒)，即可反算得到兩反射物間的距離 R 。並且可從峰值的相關係數大小，反推求此路徑上對反射訊號的能力，峰值越大則可能表示此路徑短、或者是反射物反射訊號的能力比較強。

4.2 現地測量實驗

4.2.1 實驗儀器

在實驗中用到的主要儀器有六項，分別為訊號產生器、天線三支、高速時域示波器、天線架、傳輸線與不斷電系統，本套儀器是委託大同大學的老師設計製作，陳盈蓁(2005)運用本套儀器在室內用砂箱進行測量距離實驗，以及藉由土壤散射模式，由頻域上訊號能量之大小來推算散射係數，進而得到表面傾斜角度，並且距離測量的誤差在 20%以內，而傾斜角度誤差在 10 度以內。吳偉成(2005)也運用本套儀器進行土壤坡度的測量，由解析解與實驗值可得知預測角度誤差值可以控制在 2 度以內。以下則是儀器的個別的介紹：

1. 訊號產生器

主要的元件有震盪器、脈衝產生器(pulse generator)、混波器(Mixer)、Splitter、功率放大器與低雜訊功率放大器，電路圖如下圖 4-1. 所示。

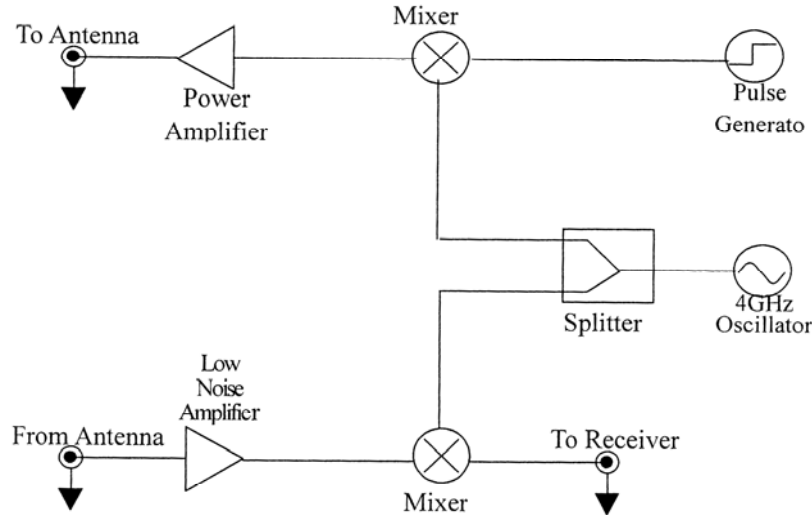


圖 4-1. 訊號產生器之電路圖

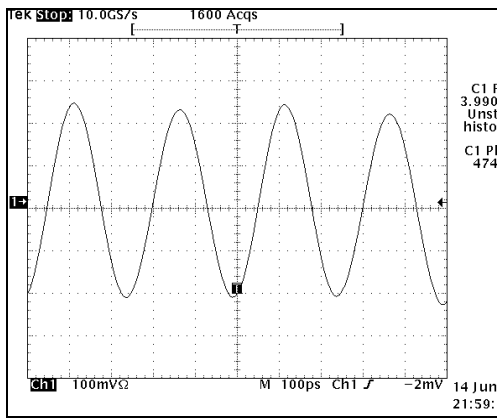
各元件的型號分別為：

1. 4GHz Oscillator 型號：無標示
2. Low Noise Amplifier 型號：MITEQ AFS3-0200800-28-LN
3. Mixer 型號：ARKI icrowave M10206LA
4. Splitter 型號：Mini-Circuits 15542 ZAPD-4 0 0143
5. Power Amplifier 之 SN 值為 002
6. Pulse Generator 型號：無標示

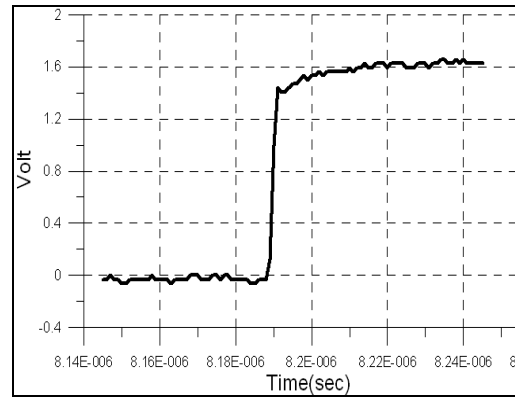
訊號產生的過程則是由手動控制脈衝產生器來產生一個 step function，再由混波器將此脈衝波與由震盪器所產生的 4GHz 的載波混合，最後將此混合而成的訊號在經過功率放大器後，再由傳輸線傳送於發射天線。而產生一個脈衝波訊號，為的就是產生一個不連續的訊號電壓值，如此一來示波器用觸發的方式就能夠接收到這樣一個電壓突然大增的不連續訊號，並且假設接收天線有收到回波訊號時，理論上接收訊號中不連續的位置，即可當作是脈衝波回波被接收到的瞬間，因此即可用這樣一個脈衝波訊號分析電波在空間中行進的距離。

在訊號產生器之中，只有 pulse generator 與震盪器會產生訊號，因此我們分別量測這兩個元件產生的波形，以及混波之後的訊號波形。由量測的結果發現，當電源開啟後，訊號產生器就開始產生一 4GHz 連續的正弦函數的訊號，而相鄰的波峰與波谷值大約相差 970mV；而當打開 pulse generator 後，此一連續的正弦函數訊號振幅被放大，波峰與波谷間大約相差 4 伏特，而震盪器與 pulse generator 所產生的訊號波形，以及在 pulse generator 打開的瞬間，所傳遞出去的訊號圖如圖 4-2. 所示。

訊號產生器中，pulse generator 產生一個步階波的時間約為 3×10^{-9} 秒，訊號圖如圖 4-2. (b) 所示；震盪器產生的正弦訊號的週期為 4GHz 的倒數，也就是 0.25×10^{-9} 秒，訊號圖如圖 4-2. (a) 所示，因此當一個步階波產生的同時，震盪器已產生了 12 個週期的正弦訊號，所以震盪器與 pulse generator 理論上產生的訊號是要穩定的，但是真正在做實驗的時候卻發生訊號不穩定的現象¹，也就是發射 5 次的訊號會有不一致的情形發生，因此推測為各元件之間的線路造成了不穩定的情況。



(a)



(b)

圖 4-2. 訊號產生器各元件之訊號圖。(a)4GHz 震盪器產生的連續波形。(b)Pulse generator 產生的 step function。

(Yagi-Uda Antenna)，天線的尺寸與立體圖如圖 4-3. 所示。在本研究中，將它們分別當作發射訊號用的發射天線，以及接收反射回來的電波的接收天線，八木宇田天線的輻射模式是呈花瓣狀，並且為 90%輻射能量集中於圖 4-3. 右邊立體圖中魚骨狀的天線元件平行的面上，在黑色箭頭方向上左右張角 20° 的主波瓣。由於天線方向性的關係，測量時一定要將天線對準目標物。圖 4-4. 中左為八木天線與天線架的照片。



圖 4-4. 天線圖。左邊為八木宇田天線，右邊為對數週期天線。	圖 4-5. 天線架示意圖。由左而右分別為接收天線、發射天線與觸發天線。
(mm)	(mm)
.2 .2 2 2 2	.5 .7 .7 2 3

	L	L	L	L	L	L	L	W	W
	1	2	3	4	5	6	7	1	2
(mm)	3	3	3	3	3	3	5	1	8
	3	4	4	4	6	6	1	0	

ps. d1 為圓柱的直徑長，d2 為長方體的寬。

圖 4-3. 八木天線的尺寸圖(左圖為上視圖、側視圖，右圖為立體圖)

於圖 4-4. 右邊。這支天線，此天線則是用來當作觸發天線(Trigger Antenna)，我們將此天線裝置於發射天線旁，目的在當電波一從發射天線幅射而出後，馬上由觸發天線將此發射電波接收下來，並由示波器記錄下來發射的時間點。兩種天線的外觀如圖 4-4. 所示。

3. 天線架組

2. 天線
我們使用兩支為 4GHz 的工頻特而的木宇田天線

另外還有一支對數週期天線(Log-periodic antenna)

天線架為特製形狀的壓克力板，用以將三隻天線由螺絲固定於此壓克力板上，再將此天線架裝置於可微調方位角與仰角的腳架，即形成了天線架組，如圖 4-5. 所示。

4. 示波器

Tektronix TDS5032 Digital Phosphor Oscilloscope 的高頻示波器。此示波器為數位儲存示波器，它可以準確擷取到頻率為 350MHz 以內的訊號，並且在單一頻道上的取樣頻率最高為 5GS/s，也就是一秒鐘最多可以取 50 億個 samples；在兩頻道同時運作時每個頻道最高取樣頻率為 2.5GS/s，在我們的實驗中需要兩個頻道一起記錄資料，因此在每個頻道中，任兩筆數據間的時間間隔為 $1/2.5 \times 10^9 = 400 \text{ ps}$ ，又每個頻道我們都設定為儲存 50000 筆數據，因此可以得到我們所抓下的訊號中，最大頻率將 500MHz，然而由表 4-1. 中發現這個示波器的類比頻寬為 350MHz，所以頻率超過 350MHz 的波形則是在示波器內用內插而得。其基本資料如下表 4-1. 所列。另外，由 Timebase 得知此示波器資料擷取最小的時間間隔為 200ps，最大間隔為 40 秒。

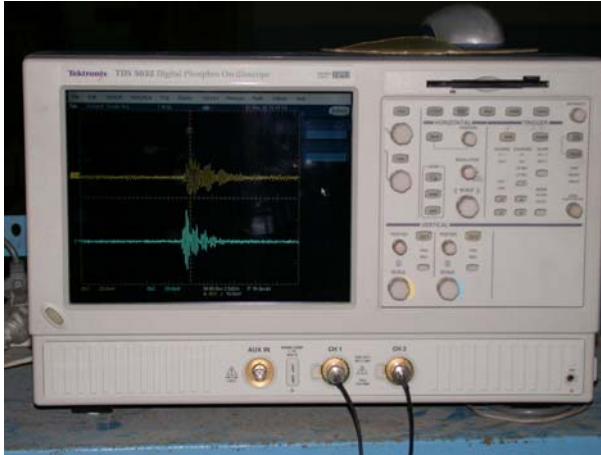


圖 4-6. 示波器的外觀

表 4-1. 示波器的基本性質列表(由 Tektronix 公司網站取得)

Product name	TDS5032
Analog Bandwidth (-3 dB) 5 mV/div - 1 V/div	350MHz
Calculated Rise Time 5 mV/div (typical)	1.15ns
Input Impedance, 1 MΩ	±1%
Input Impedance, 50 Ω	±1%
Timebase Range	200 ps/div to 40 s/div
Real-time Sample Rates 1 Channels (max)	5 GS/s
Real-time Sample Rates 2 Channels (max)	2.5 GS/s

5. 訊號傳輸線

三條為 LMR100 型的傳輸線，並且長度與接頭的組合分別為 3m 和 SMA+BNC、5m 和 SMA+BNC，以及 2m 和 SMA+N-TYPE。其中接頭組合為 SMA+BNC 的傳輸線是用來連接天線與示波器用；SMA+N-TYPE 的傳輸線則是用來連接發射天線與訊號產生器，詳細列表如下表 4-2.。

表 4-2. 訊號連接線各項資料列表

編號	長度 (m)	型號	接頭	損耗率 (dB)/10 0ft	用途
(1)	3	LMR-100A	SMA(F) + BNC(M)	51.0 (4GHz)	連接接收天線

					、示波器
(2)	5	LMR-100A	SMA(F) + BNC(M)	51.0 (4GHz)	連接觸發天線 、示波器
(3)	2	M17/128 -RG400	SMA(F) + N (M)	27.0	連接發射天線 、訊號產生器

6. 不斷電系統(UPS)

由於現地通常沒有穩定的電源供應，因此我們準備的不斷電系統來供電，在實驗中我們則是採用飛瑞 A-1000 的 UPS，其額定的容量為 1000VA/600W，並且一顆充滿電的 A-1000 可以供我們儀器正常使用至少 30 分鐘。



圖 4-7. 全部儀器架設完成圖

4.2.2 現地實驗

由於這套設備的使用環境將是在野外惡劣的環境中，因此除了要驗證距離量測的理論外，另一方面考量到在現地環境中各種不確定的因素可能對這組儀器設備造成無法預期的影響，因此為了能夠了解這套設備在現地運作時的狀況，首先安排在台大校園內做了三次室外實驗。

在運用電磁波量測距離的時候，除了目標地點的距離是影響結果最主要的因素之外，目標地點的表面性質如粗糙度與形狀，以及其上覆蓋的物質，如植被等也會直接影響到電磁波在空氣與地表的交界面上的透射、反射與散射情形，因此

在台大校園內選擇椰林大道旁種植多棵杜鵑花、鐵杉與椰子樹等的位置做兩組的實驗，目的則是要研究我們的設備穿透這些樹叢時的狀況

我們將儀器架設於土木系館正門口朝向農藝系館方向的右手邊第一個停車格前的柏油路上，實驗的第一組為朝著農藝系發射訊號以量測距離，另一組則是水平反轉 180 度，朝著土木系館的方向進行量測。選定這個位置的原因，是在電磁波行進的路線上有大大小小的樹叢，與金屬製的路燈柱子，所以用來研究電波在經過這些複雜的地形時，透射與反射的狀況，環境示意圖如圖 4-8. 所示。

4.2.3 實驗步驟

實驗的步驟分為裝置設備、開啟設備、記錄環境對照組訊號、記錄目標點訊號，以及分析訊號等五個主要步驟，而每個主要步驟中的細部步驟分別如下敘述，流程圖如圖 4-11. 所示。

1. 裝置設備

首先在選定的位置上放置腳架，並定心定平。將天線架裝置於腳架上，再將天線裝到

天線架上。最後，分別將三條連接線接上發射天線與訊號產生器、觸發天線與示波器頻道一(CH1)、接收天線與示波器頻道二(CH2)。

2. 開啟設備

將訊號產生器與示波器接上 UPS。首先開啟 UPS 後，接著打開示波器與訊號產生器的電源開關。

3. 記錄環境對照組訊號

將天線朝著天空發射一次訊號，並將示波器上所接收到的發射訊號(CH1 訊號)與接收訊號(CH2 訊號)儲存下來，重覆此步驟五次，總共存得五組(每組訊號分別有發射與接收兩種訊號)環境對照訊號。

4. 記錄目標點訊號

首先將轉動發射與接收天線，使這兩支天線中心射線皆對準目標地點，接著發射訊號，並將示波器上所接收到的兩種訊號儲存下來，重覆此步驟五次，總共存得五組目標點訊號。朝著其他目標地點重複相同的動作。

5. 分析訊號

將各點紀錄下來的數據，經過 3.3 章節中的四個分析步驟(如圖 3-7. 所示)，最後得到距離。

4.2.4 實驗過程

我們挑選的位置上，電磁波行進時需要穿透過杜鵑花與鐵杉等的樹叢，並且除了樹叢外，環境中還有金屬製成的路燈和停車格地面上的檔板，這些都會造成電波的反射與干擾。

在做實驗的時候，有些微的霧氣但沒有下雨，然而由前面文獻中得知可將大氣的影響忽略掉，因此就在這樣的天氣中，朝著圖 4-7. 中的方向上，分別發射五次的訊號，並記錄下來後再進行分析。

4.2.5 現地測量實驗分析結果

本次實驗中，分別朝著兩個方向發射訊號。一組是朝著訊號前進的路徑上有許多樹叢，路燈等的反射點；另一組則是在近處有灌木叢，遠方有一面牆壁，環境的示意圖如圖 5-1. 所示。

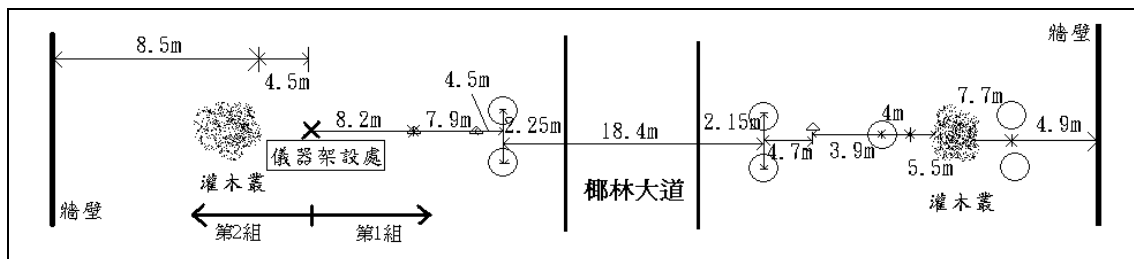


圖 4-8. 椰林大道上實驗位置的俯視圖(圖中左側牆壁：土木系館牆壁；右側牆壁：農藝系館牆壁；圓圈：椰子樹；三角形：路燈。)

首先我們要找出相關係數的基準值。因此將在本次實驗前，朝向天空發射的四組訊號，分別經過計算得到四組交互相關係數數列。接著要找出本次實驗的最大時間延時，在實驗中示波器總儲存筆數為 50000 筆，而觸發位置設定在 25000 處，因此後 25000 筆可儲存到反射訊號。在本次實驗中示波器的取樣頻率為 $16\text{ps}/\text{pt}$ ，因此將 25000 乘上示波器的取樣頻率後，得到最大時間延時 τ_{\max} 為 4×10^{-7} 秒，並且將前面過程所得到的四組相關係數數列，取出 0 至最大時間延時的範圍，找出這四組中絕對值的最大值，如下圖 4-9. 所示，得到了交互相關係數的基準值 ρ_{cr} 為 0.084。

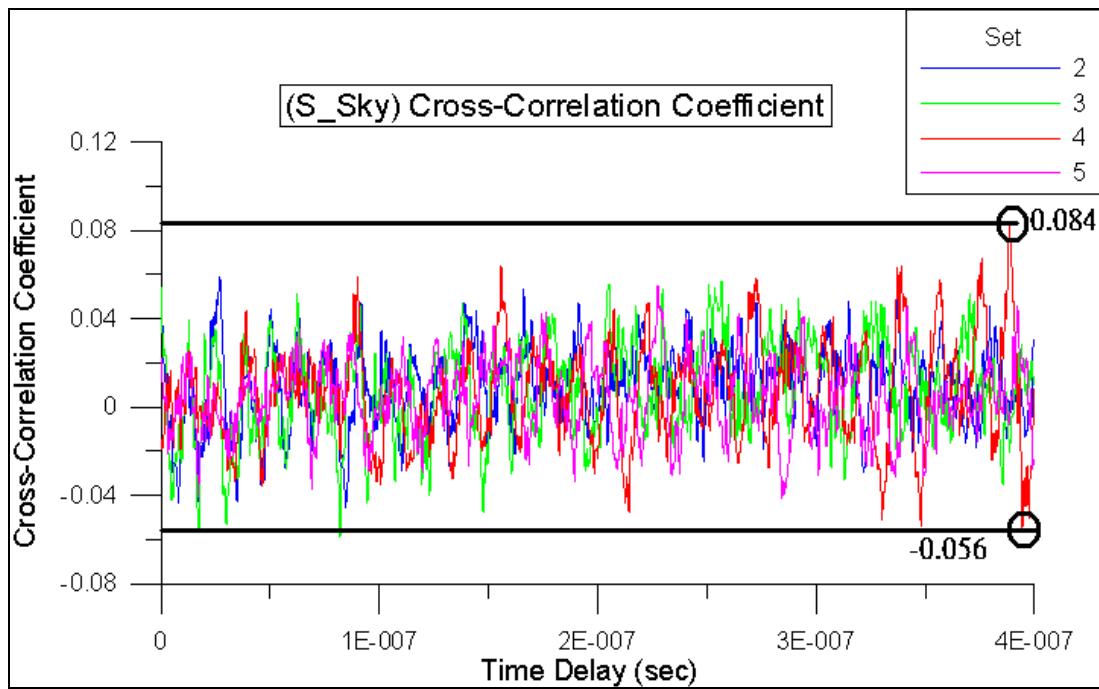


圖 4-9. 台大校園實驗基準值相關係數圖(絕對值最大值为 0.084)

第一組

第一組為朝向農藝系館的方向發射訊號，總共發射了五次的訊號，將這五次的訊號分別計算得到相關係數列，接著從這個數列上取出從延時 0 開始到最大時間延時 τ_{\max} 的範圍，並將此範圍繪成相關係數圖，並將相關係數基準值標示在此圖中，並且從 0 開始向右邊找到第一個超過基準值的波峰，則令這個線段為 D1，在找峰值時，將視此波峰是否在五組的數據中至少出現超過三次為準，並且取係數為正的波峰，接著用就相同的找波峰方式，再從第一個波峰向右找到第二個波峰，則令為 D2，以此方法類推下去，總共找到 12 段距離，並將相關係數圖與線段之間的關係如圖 4-10 所示，並且再將這些線段所代表的時間延時，以及經由(3-18)式所得到相隔距離，依序列於表 4-1 中。

表 4-1. 台大校園實驗第一組相關係數峰值與距離列表

線段	時間延時 τ (10^{-8} sec)	相隔距離 R (m)
D1	1.43	2.15
D2	1.9	2.85
D3	1.7	2.55
D4	1.7	2.55
D5	1.7	2.55
D6	1.7	2.55
D7	1.9	2.85
D8	1.4	2.1
D9	3.7	5.55
D10	3.2	4.8
D11	3.8	5.7
D12	12.6	18.9

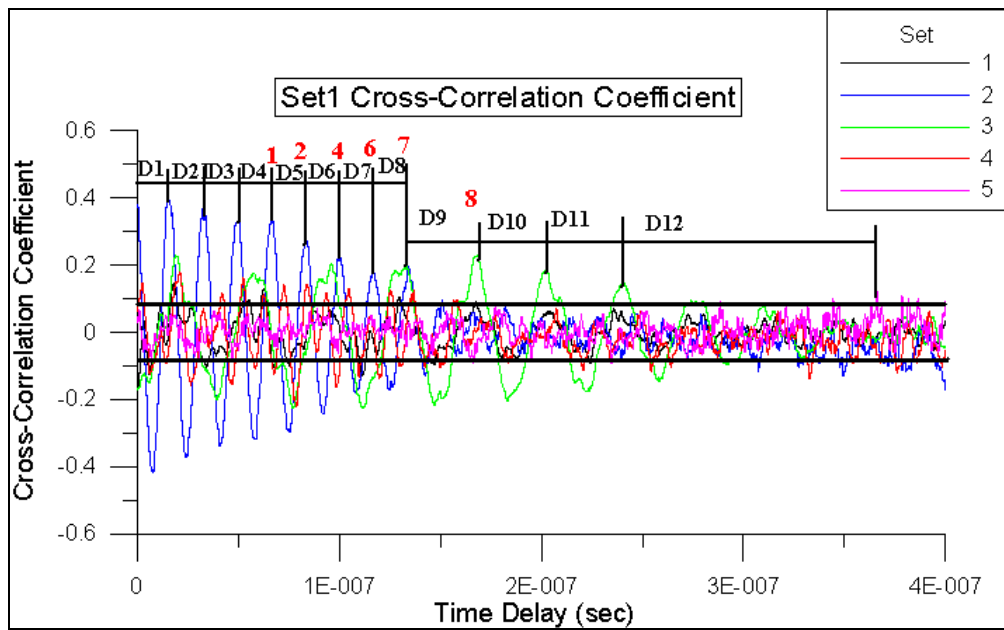


圖 4-10. 第一組交互關係數圖(1, 2, 4, 6, 7, 8 對應圖 5-4. 中之可能反射物)

上圖中 1、2、4、6、7、8 點間的距離，剛好吻合現地電磁波路徑上的反射物位置，而這些可能的反射物位置之現場環境側視圖如下圖所示，可見得這個儀器穿透樹叢的效果不錯，可以抓到路徑上遇到的各個反射物的反射訊號。

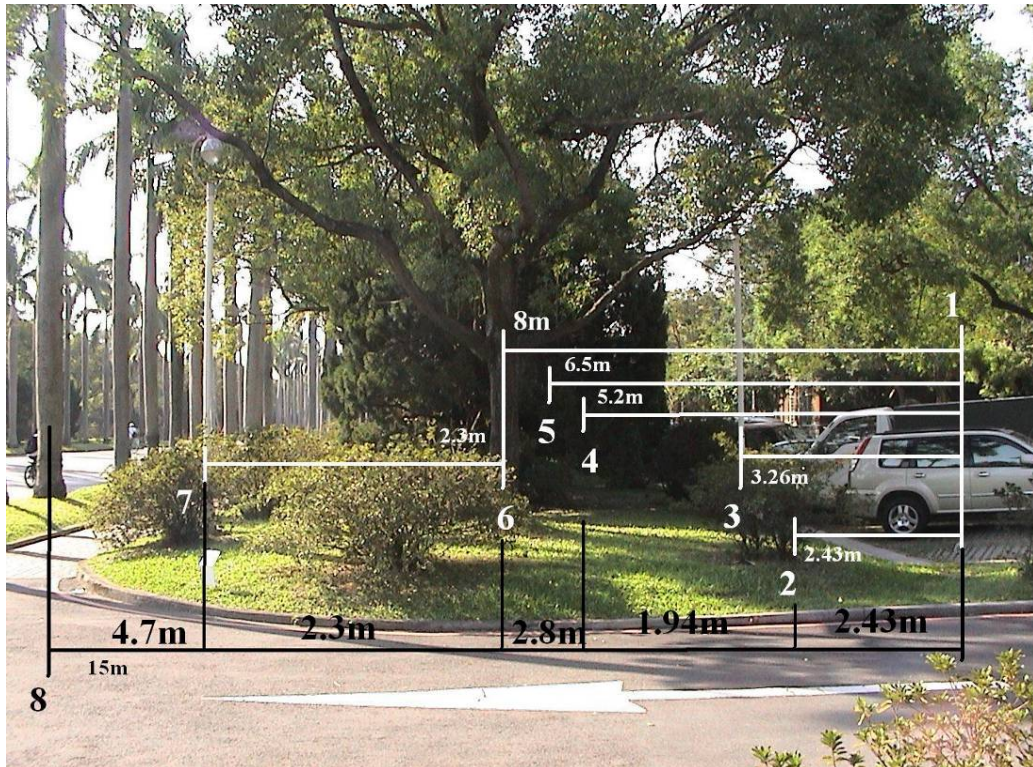


圖 4-11. 第一組之現場環境側視圖((1)停車格上的擋板，(2)小灌木叢，(3)金屬製路燈，(4)(5)兩株柏樹，(6)大樹，(7)金屬製路燈，(8)椰子樹。)

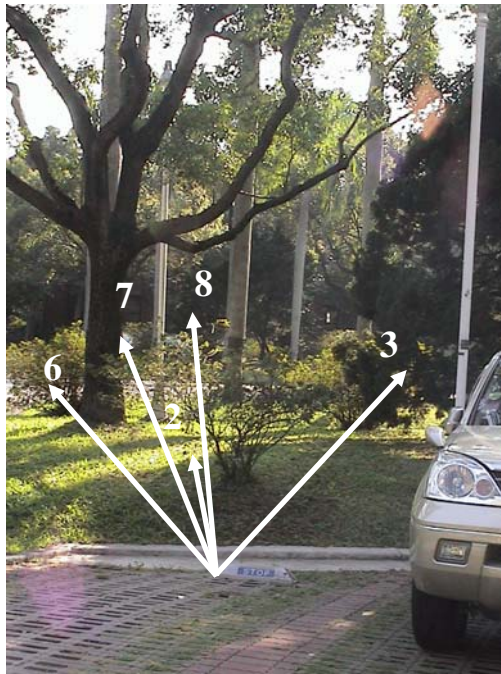


圖 4-12. 第一組實驗環境示意圖
(這些路徑皆在天線主波瓣，也就是水平左右 20° 範圍內)

表 4-2. 第一組分析結果誤差表

路線	分析距離(m)	實測距離(m)	誤差(m)	誤差百分比(%)
2	2.55	2.43	-0.07	-2.88
3	5.1	5.2	0.1	1.92
6	7.95	8	0.05	0.63
7	10.05	10.3	0.25	2.43
8	15.6	15	0.6	4.00

第二組

第二組是朝著土木系館的方向發射訊號，總共發射了五次的訊號，將這五次的訊號分別計算得到相關係數數列，接著從這個數列上取出從延時 0 開始到最大時間延時 τ_{\max} 的範圍，並將此範圍繪成相關係數圖，並將相關係數基準值標示在此圖中，並且從 0 開始向右邊找到第一個超過基準值的波峰，則令這個線段為 D1，接著在從第一個波峰向右找到第二個波峰，則令為 D2，以此方法類推下去，總共找到 11 段距離，並將相關係數圖與線段之間的關係如圖 4-13. 所示，並且再將這些線段所代表的時間延時，以及經由(3-18)式所得到的相隔距離，依序列於表 4-3. 中。

表 4-3. 台大校園實驗第二組相關係數峰值與距離列表

線段	時間延時 τ (10^{-8} sec)	相隔距離 R (m)
D1	1.4	2.1
D2	3.42	5.13
D3	4.26	6.39
D4	3.95	5.93
D5	3.47	5.21
D6	3.83	5.75
D7	4.07	6.11
D8	3.71	5.57
D9	4.42	6.63
D10	4.54	6.81
D11	3.42	5.13

這組實驗中，牆壁與下圖(1)、(2)處之灌木間的距離約為 6 公尺，而這段距離與找出的波峰間的距離較為吻合。然而從相關係數圖找出的波峰值，也就是 D1 到 D11 的距離關係，與從現場找出的可能反射物間的距離並不相似，也誤差接近 5 公尺，推測為牆壁上有金屬的窗框，因此造成了許多的反射干擾到訊號。

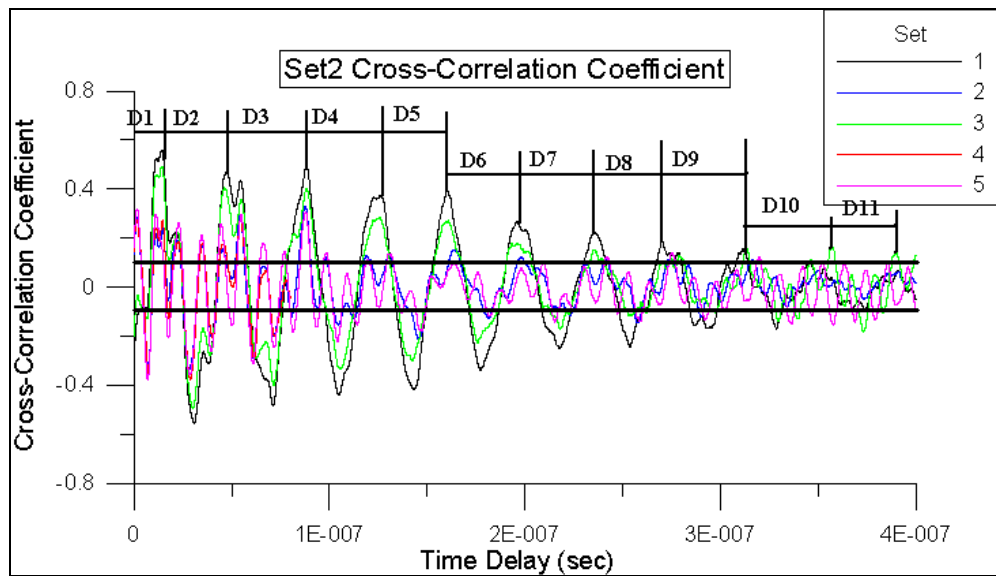


圖 4-13. 第二組交互相關係數圖

由以上分析所得到的結果，可以從交互相關係數波峰間的關係找出不同的電磁波傳遞路徑，並且這些路徑所代表的反射物間的距離，與現場環境中可能的反射物之間的距離吻合，因此可知這套儀器所發射出去的電波可以穿透樹叢，並且測量到路徑上各個遇到的反射之間的距離。在第一組實驗中的誤差百分比都在 5% 以內，第二組的誤差卻在 20%-50% 之間，對於近距離的測量而言，測量的精準度還有改進的空間。然而此距離為相對的距離，因此無法確定相關係數圖上的某個波峰，在環境中所代表的確切的反射點位置。

4.3 結論

由試驗結果可知，電磁波可以穿透物件，因此可以在照設方向探查出多樣事物。此應用值得深入研究。而距離測量精度可以達到 1% 以內。因此三維成像方式原則上可行，但需要測點夠多，才能到公分內之精度。同時天候良好時，不加強發射功率，偵測距離也可以超過 400 公尺，並可穿透灌木並可穿透灌木(可以穿透高 1.5 公尺，厚 1 公尺的灌木叢，但是無法穿透很密的樹林)。表面有森林與覆蓋層時，原則上地表訊號仍能分析出來，但如何寫成程式讓系統自行判別，有待後續計畫加強研究。本儀器雖經測試可行性極高，但後續仍應將資料分析方式加強，必須做到現場儀器能自動判視，自動做圖，而地下水物的部份，則需配合現地材料，與地下水模擬，建立並測試自動判識的準度。

5.1 前言

由於台灣山地形勢陡峭，地質脆弱的緣故，每逢颱風、梅雨等季節性的集中性豪雨，就容易造成山坡地的災害。因都市土地利用已達飽和，人口不斷向山坡地遷移，以致山坡地大規模的開發，加速災害的發生。山坡地災害中又以土石流所造成之危害最為嚴重，每次發生土石流災害，不僅造成人民生命財產的重大損失，善後的整治和相關衍生之問題也造成政府很大的負擔，更耗損難以估計的社會成本。

政府為了改善台灣的山坡地問題，從民國 40 年代起，就積極展開山坡地水土保持的工作及制定許多相關的法規命令。由民國 50 年所訂頒的「台灣省農林邊際土地宜農、宜牧、宜林分類標準」開始，到民國 83 年公佈實行的「水土保持法」，及最近由內政部正在研擬立法的「國土計畫法」，當中的 30 多年中，政府為因應實際需要，不斷的修改及增定山坡地的管理制度，只為了減少山坡地災害的發生。其中特別是經歷 25 年研擬的「水土保持法」立法通過後，使山坡地水土資源保育奠定較完整的法律制度。而在水土保持法中，特別對山坡地災害危害最大的土石流，列為重點之一。所以，近年來政府開始積極調查全省的土石流潛勢溪流，編冊列管，並依不同危險的程度劃分不同等級；同時對於評定嚴重的土石流潛勢溪流，更劃定為「土石流特定水土保持區」，期能降低土石流危害程度。

儘管政府正積極解決山坡地的問題，但在天然災害之情況下，仍難避免生命財產之損失。例如行政院主計處所統計的資料，民國 90 年 7 月的桃芝颱風及民國 90 年 9 月的納莉颱風，所引發的土石流災害就造成多人死亡。雖然災害的主因是天災，但也值得我們對現行的管理制度作省思，以減輕災害所造成之生命財產損失。因此，本文特別以經濟學中的外部性理論，就現行土石流管理制度和「土石流特定水土保持區」劃定的問題來進行討論。

5.2、前人研究

在外部性理論之文獻回顧部份(王智民, 1996)，最早討論外部性的學者是 Pigou，他以著名的火車頭的火花與樹林的故事，解釋私人產出與社會產出差異的精神所在(林富松, 1982)，但這只說明了外部性的結果，並未能對外部性提供明確之定義。接著 Meade(1954)進一步的以資源使用的觀點來定義外部性，認為外部性的存在是因為某些資源的使用，並沒有得到應有的報酬，才會使得資源配置不是最有效率。Bator(1958)指出，外部性發生的主要原因在於所有權不確定，使得價格無法反應出該有的功能，造成自由市場的運作發生問題。Baumol & Oates(1972)認為外部性的發生不受價格因素的影響，而是受人與人之間一切互動行為之影響(包括情感、合作關係、政府運作等)，也就是說日常生活中隨處都充滿外部性的影子。Papandreou(1994)認為所有上述外部性之定義，都應將產權的重要性考慮進去，如此下來，即便每個人的效用仍然彼此影響，但是所有產權都已有明確的定義，所有交互影響的效用也獲得應有的補償。不過，此說法如果從資源的觀點來看，當所有資源都已經過適當的定價，不再是未償付的資源，那麼外部性也就不再成立。由於外部性所牽涉層面很廣，所以對於外部性的定義目前為止仍有許多的學者在研究中。

雖然外部性問題在各領域中均被廣泛討論，但實際在山坡地問題的應用上並不多。傅祖壇(1995)利用外部性理論，對於從事山坡地環境破壞者的違規行為進行討論，並以成本效益的概念來分析違規者在從事違規行為被捕獲時，所須付出之違規成本，和未被捕獲時所可能獲得之違規效益，來分析違規者的行為決策模式，再以此決策模式來分析政府在管理山坡地違規行為時所須付出之外部成本。夏維良(2002)討論不同的損失補償方式，對於土地限制者之影響為何，更進一步討論政府在規劃限制發展區時應如何改善。另外在法律層面上應用，吳庚(2002)文中認為，當國家行政機關以公益的理由執行公權力行為，造成人民權益的損失，達到「特別犧牲」時，應由國家對於受損失者給予補償。或是最近由內政部營建署正在研擬立法的「國土計畫法(草案)」中，要求在劃定限制發展區時，亦需有相關之救助、補償、及回饋制度等配套措施，為的就是注重限制區內地主之權益，期望能使得外部效益能回饋到限制區內民眾的身上。雖然是討論不同的領域，但以上都是外部性的應用。接下來的文章中會對外部性理論再深入的介紹，討論政府在劃定「土石流特定水

土保持區」時的外部效果，並降低外部效果的影響。但需要強調的是，本文只是嘗試在簡化之條件下，分析其效益，但並非代表只考慮外部性而可作成決策，而是藉由外部性理論的探討，進一步對實際之情況作評估。

5.3、外部性理論介紹

在傳統經濟學的供需法則中，供給和需求兩者間之互動關係影響著價格的變化，當供給減少(增加)或需求上升(下降)時，價格就會隨之改變，以反應實際情況。但當我們所討論的為環境資源時，由於其所有權不易界定，因此無法藉著價格機能來運作，達到我們所期望的效果。因此，當我們討論到有關山坡地災害引發的環境問題時，通常將其視為土地使用的外部性(externalities)，又稱為外部效果(external effects)。

所謂外部性，就是指當事人從事經濟行為後，不必自行負擔的成本或是創造出不歸當事人享受的利益。外部效果可分成兩類，第一類稱為外部效益，即當事人經濟行為所創造的利益，不歸當事人享受，那部分的利益稱為「外部效益」(external benefits)，例如為了保護下游民居的飲水權益，在上游劃設水源保護區，並限制區內一切的開發行為，對於保護區內的居民而言，此即為外部效益。另一種即是當事人由經濟行為所獲得的利益，不必自行負擔的成本，稱為「外部成本」(external costs)，如違規使用山坡地的問題即屬之。然而政府在劃定土石流特定水土保持區過程中所產生之外部效果，主要是外部效益的問題，即民眾並未享有因劃定為特定區而得之效益的問題。所以本文會以外部效益問題的討論為主。

在討論外部性理論之前，要先介紹一些經濟學的基本觀念。在經濟學的理论中，最基本的假設是建立在人人都是以自利為目的。對於消費者而言，都希望能以最低的價格購得對自身而言是最有價值的產品，而其對於各產品願意支付與實際支付的價格間之差額，在經濟學中定義為消費者剩餘。消費者剩餘越大表示消費者對市場的運作越滿意，越願意出錢購買，市場也就越活絡；同樣，對於生產者而言，一般生產者也是希望其產品能賣出的價錢越高越好，這樣生產者所能獲得的利益也就越大，而其售價和其生產成本間之差額，經濟學中定義為生產者剩餘。生產者剩餘越大代表生產者的獲益越多，就越願意增加生產，也同樣會使市場更活絡。然而，市場的運作為所有生產者的生產行為及消費者的消費行為所構成，在沒有外部性的條件下，當市場運作之生產者剩餘及消費者剩餘總合為最大時，表示市場資源為最佳的配置。在經濟學之供需曲線中，代表市場資源配置為最大效率的點，即為供給曲線(supply curve)與需求曲線(demand curve)的交點(又稱均衡點)(見圖 1 之 a 點)。此時的邊際效益(marginal benefits)會等於邊際成本(marginal cost)，即表示每增加一單位所產生之效益，會等於每增加一單位需負擔之成本，即為最佳的運作狀況，會有最大的社會福利產生。由於此時並沒有外部性的問題，社會的供需曲線即為所有私人供需曲線的總合，因此圖 1 除了可稱為社會邊際供需曲線之外，亦可稱為私人邊際的供需曲線。

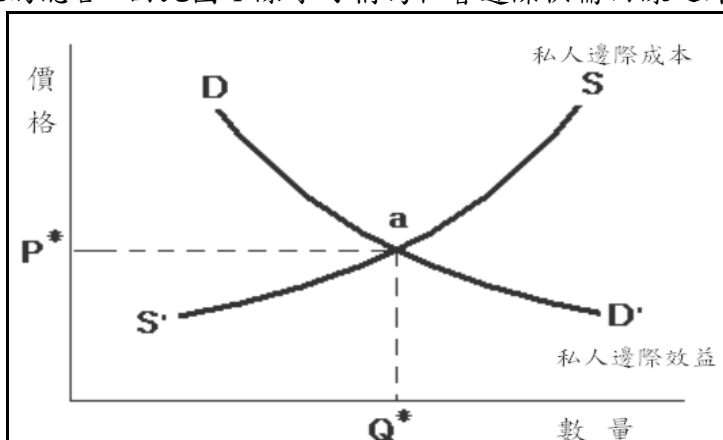


圖 1 私人供需曲線圖

此圖 a 點表示私人在經濟活動中所獲得之效益和付出的成本是相同的。例如：山坡地開發者除了獲利之外，也會為開發所造成之坡地破壞負責。

但當有外部性問題存在時，社會和私人邊際供需曲線就不相同。在經濟學理論中，因為外部性的存在，可將成本(效益)分成內部成本(效益)及外部成本(效益)，所謂的社會邊際成本是指內部成本(即私人邊際成本)加上外部成本，社會邊際效益是指內部效益(即私人邊際效益)加上外部效益。然而內外部成本與效益的區分，主要視討論的對象而定；如若以個人為討論的對象，私人要付出之成本或獲得之效益即為內部成本效益，付出之成本或獲得之效益若不歸自己，即為外部的成本效益；或者是以地區為對象，例如本文對「土石流特定水土保持區」的討論，在劃定特定區後之內部成本與效益，如區內的工程治理、水土保持規劃、重建等所需付出之成本或是整治後所獲得之效益；而在劃定特定區後對於「區外」額外造成之成本或額外獲得之效益，即為外部的成本與效益。有關於此部份成本效益分析，文中有詳細的討論。

當有外部成本或是外部效益存在時，社會邊際成本(效益)就不會等於私人邊際成本(效益)，因此市場運作並不為最適情況，也不會有最大的社會福利產生。先就成本的部份來討論，假設只有外部成本，沒有外部效益的情況下，社會邊際成本(社會供給曲線)和私人邊際成本(私人供給曲線)的關係如圖 2 所示。

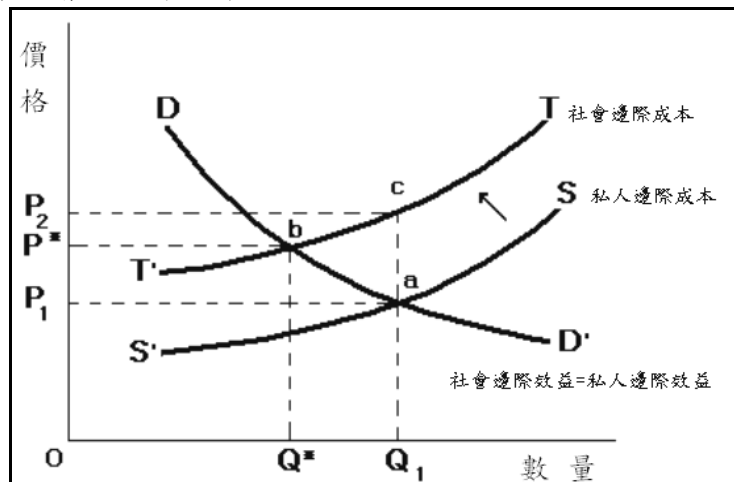


圖 2 外部成本分析圖

例如：山坡地發開者若要對坡地的破壞負責時，獲利只有 Q^* 值(交點 b)，但當有外部性存在時，

山坡地發開者卻可享受 Q_1 值的效益，多出的成本 ac 值會由社會來負擔。

Fig.2 External costs analysis

圖 2 中的社會邊際成本為原來的私人邊際成本加上外部成本，因此曲線向上移動變為圖中的 TT' 線段。當有外部成本存在時，對於同樣是 Q_1 的產量而言，私人只需要負擔 P_1 的成本，但是對整體社會而言，卻需要負擔 P_2 的成本，兩者的差距即為圖 2 中的 ac 線段，此差額就是外部成本。最典型的例子，在常見的山坡地問題中，少數為了本身的利益，違規開發或是不當使用山坡地，造成環境破壞，但其行為對社會所造成的傷害，在自由經濟體系下，絕大部分都未由環境破壞者所負擔，反而是由社會大眾來負擔，即為外部成本。此時的資源配置就不在平衡點上，若要重新將資配置到最有效率的情況，只須將產量降為 Q^* 處，就可以達到新的平衡點(即 TT' 與 DD' 的交點 b)。但實際上，由於生產者不必支付某部份的生產成本，而在市場自行決定的結果下，生產者(私人)會生產之產量往往是 Q_1 值(較多量)而不是 Q^* 值(較少量)。因此，生產者所生產的數量(Q_1)將超過社會福利最大的產量(Q^*)，此一超量的生產(面積 abc)即為社會的福利損失。

外部效益的情形正好相反。如圖 3 所示，假設無外部成本存在(生產者之生產行為已被管制)，即私人邊際成本仍等於社會邊際成本(即為曲線 SS')。當有外部效益存在時，社會邊際效益會等於私人邊際效益加上外部效益，即曲線會由 DD' 上移為 WW' 曲線。一般而言，如水源保護區的劃定、特定水土保持區的劃定就是很好的例子。水源保護區是為了確保下游飲水的品質，特定水土保持區是為了保護下游人民生命財產的安全，兩者都因被劃定為限制發展區而產生外部效益，使得社會的邊際效益增加。

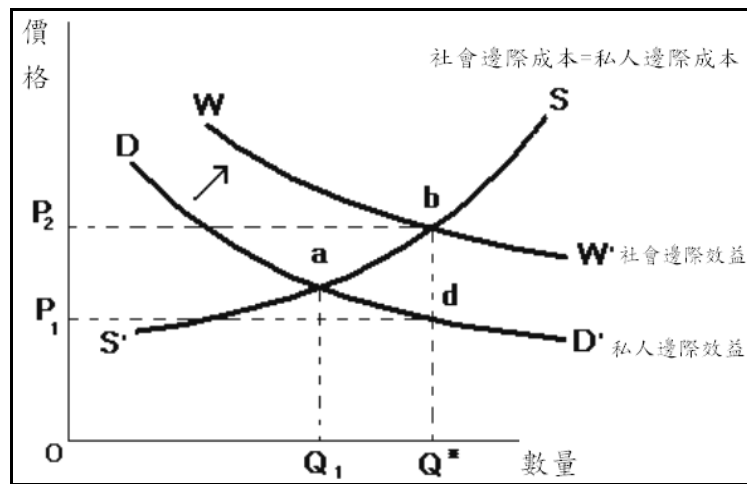


圖 3 外部效益分析圖

例如：當某地區因危險被劃定為限制發展區時，社會福利就會因此上升，但因有外部效益的存在，使私人獲益不會和社會的獲益相同，照理來說，當私人產量為 Q^* 值(交點 b)才會使社會福利最大，而此時私人的獲益為 dQ^* 值，但卻要付出 bQ^* 值的成本，多付出了 bd 的成本，因此私人會選 Q_1 值。

Fig.3 External benefits analysis

如圖 3 所示，當曲線發生變動之後，社會最適產量之均衡點由 a 變為 b，即最大社會福利的產量也會從 Q_1 變為 Q^* 。但是在實際市場機能的自由運行下，交易雙方所決定的產量仍然會是 Q_1 ，而不會是 Q^* 。這是因為對私人而言，他若選擇產量 Q^* 時，所獲得之利益不會是 P_2 值，而是只有 P_1 值(Q^* 產量對應私人邊際效益曲線之值)而已。其他多出來的($P_2 - P_1$) 值為外溢到他人身上之利益。不但如此，其生產的邊際成本卻要付出 P_2 值(在 Q^* 產量下，私人邊際成本之交值)，超過實質上所能獲得之利益。因此對私人而言，若有外部效益的存在，實際是作賠本的生意，自然不願出價購買，更不用說使社會福利為最大的產量了。也就是因為如此，以往政府因公益需要而推動一些政策時，常不受該地區民眾的歡迎，甚至常有民眾抗爭的問題發生，例如垃圾掩埋場之選址、焚化爐之興建、有毒廢棄物之儲存等問題。

因此，若要解決外部性之問題，使社會成本反應為私人成本及社會效益反應為私人效益的話，就必須將外部成本及外部效益內部化，即所謂「外部效果內部化」。這是使當事人在從事經濟行為後，將其所創造的利益及成本回歸至當事人本身，使生產者自行負擔或享受外部效果。

張清溪(2002)文中述明要使外部效果內部化的方式主要有下列幾種：賦予財產權、直接管制、以及課稅或補償等。第一種，即政府對「公共財產」或「無主物」賦予財產權，主張只要使用或是污染就需付費，資源的使用不致流於浪費了。但是，這方法因為環境的財產權難以界定而不易執行。第二種為直接管制，這種方法最常見，如政府所訂定「土石流特定水土保持區」的制度，限制一切的開發行為，此為過去政府廣泛所採用之方法，但是就目前實際的劃定的情況而言，效果不是很理想。第三種方法，就是政府以課稅的方式使外部成本內部化，而以補償的方式使外部效益內部化。然而由前文的討論得知，劃定土石流特定水土保持區所產生的多半為外部效益的問題，因此本文接下來討論的方向，會著重於以補償的方式，使特定區劃定所產生之外部效益內部化。

5.4、外部性應用於特定水土保持區之劃定

(一)目前特定區劃定問題之根源

當政府將某土石流潛勢溪流區劃定為「土石流特定水土保持區」，且公告成立之後，在按規定執行並有成果的情況之下，所產生之外部效益是非常明顯的。因「水土保持法」第十九條第二項規定，特定區中之土地，除了攸關水資源之重大建設，不涉及一定規模以上之地貌改變及經環境影響評估審查通過之自然遊憩區，經主管機關同意可開發之外，其它地區均禁止任何開發行為。如此，特定區中因人為因素造成之山坡地破壞，就不會再繼續

增加。再加上依規定，政府在特定區內需作長期的水土保持之規劃設計，以增進公共安全。所以因限制特定區內開發，使得其鄰近地區之居民受到保障，此即外部性理論中之外部效益。

在過去的土地使用管制中，對於土地的管理，例如非都市土地利用管制規則第六條的使用管制之規定、水利法第五十四條第一項對於台灣省水庫蓄水範圍使用管理辦法之規定等，都把限制發展區內土地所有權的限制視為私人所有權的義務性，未給予損失補償。政府在劃定限制發展區時，是以行使警察權(廣義之警察權包含政府基於統治行為之所有權力，也就是公權力)的方式，來對人民之財產加以限制。雖然是基於「公共利益、自然防災」的理由，足以支持合憲性，無需補償。但是，這行為也有違反憲法第十五條規定「人民之生存權、工作權、財產權，應予以保障」之嫌。因此，儘管政府除了為公益防災的理由之外，也需要對人民的財產權加以重視，將劃定限制發展區時所產生之外部效益回饋到受限者身上。不然，當有外部效益存在時，社會福利並不會是最大的產量，會造成民眾權益的損失，所以「土石流特定水土保持區」的劃定，自然不受該地區民眾的歡迎，而強制執行之結果，只增加政府之執行成本，但是若不執行，未來若發生災害，恐怕所要付出之成本更大。因此，若要解決外部效益的問題，即由前述之外部性理論所分析的，必須給受限者相關的補償措施，使其私人邊際效益增加，將外部效益內部化，這樣才會有最大的社會福利。

但是在目前的「特定水土保持區劃定與廢止準則」的法規中，並未提及有關於特定區之救助、補償、及回饋制度與辦法，只有在水土保持法中第二十一條有規定在水庫集水區保護帶內土地的所有人因劃定而造成損失時，得請求補償金。及水土保持第三十一條規定，『有下列情形之一者，由主管機關酌予補助或救濟：一、實施水土保持之處理與維護，增進公共安全而蒙受損失者。二、實施水土保持之處理與維護交換土地或遷移而蒙受損失者。三、因實施第二十六條緊急水土保持處理與維護而傷亡者。』在上述的法規中，唯有第三十一條第一項和土石流特定水土保持區的劃定較有關。但是，土石流特定水土保持區內之民眾是否屬於因實施水土保持之處理與維護，增進公共安全而蒙受損失之損失者呢？這就和土石流特定水土保持區劃定的宗旨有關。

「土石流特定水土保持區」劃定的依據為「水土保持法」第十六條第一項第六款：其他對水土保育有嚴重影響者。及「特定水土保持區劃定與廢止準則」第三條第一項第六款第三目：其他對水土保育有嚴重影響者：指經主管機關認定具危害公共安全之虞，亟需加強水土保持處理及維護，以保護其鄰近地區聚落、重要公共設施、名勝、古蹟等之地區，其中第三目為判別土石流危險區之標準：溪床坡度在百分之三十以上，且其上游集水區面積在十公頃以上者。

因此，若是照「特定水土保持區劃定與廢止準則」第三條第一項第六款第三目的規定，那是否住在劃定區內的民眾，都符合水保法第三十一條第一項之規定，因為保護其鄰近地區聚落、重要公共設施等，實施水土保持之處理與維護而劃定為限制開發區，就屬於為了增進公共安全而蒙受損失之損失者呢？若符合的話，是否要都要補償？若要補償的話，又該如何補償？

以上的問題都直接影響外部效益是否能夠或者如何內部化的問題，這些模糊空間的存在，不但使外部效益的問題無法有效解決，同時更可能造成民眾對制度之質疑或反對。每當面臨這問題時，以往政府為了避免衝突，通常就是不繼續執行，但若真發生災害，所造成社會成本更難以估計。

(二)補償方式之分析

有見於此，行政院於民國九十一年八月五日就針對限制發展區的問題通過「限制發展地區救助、回饋、補償處理之原則」，將限制發展區分成災害性(土石流危險區)、公益性(特定水土特定水土保持區屬之)及嫌惡性三類，主要的目地在於提供各類限制發展地區或保護區救助、補償與回饋處理之基本模式，以期對於限制發展區之居民，依其損失之大小或付出成本之大小給予適當補償。然而在限制發展區補償的方式上，參酌國內、外相關理論及

執行經驗(蕭代基, 2002), 主要有下列幾種:

(1)土地儲備制: 係利用政府被賦予的「徵收權」或「先買權」, 預先取得未來欲發展或進行保育之土地。土地儲備的執行方式可分為以政府為直接土地儲備機構、民間合組或鼓勵民間自組非營利事業團體的方式推動。

(2)地役權: 係賦予限制發展土地具有「一束」(諸多細項權財產之集合)的財產權, 由政府或相關部門, 藉「購買」或「設定」方式, 取得土地一束權利中的一部份(即地役權), 作為補償之基準。地役權和土地儲備制最大差異, 於前者只取得土地權利中之一部份, 地主只要地役權所限制之範圍內消極不作為即可, 而地主仍擁有土地所有權與其他地役權外的物權, 此與土地儲備制度完全喪失土地所有權之情況不同。

(3)發展權移轉: 發展權移轉乃賦予土地所有權人對於土地的開發, 在政府的土地使用規劃的限制下, 具有部份的開發財產權, 而所謂「發展權」, 指土地所有權人對於土地的使用、變更與相關開發之權利。

(4)國民環境信託: 此制度係指由私部門發起, 藉由公益信託或土地信託, 以購買、接受捐贈或簽訂契約方式, 經營委託信託之土地, 再運用其收益進行環境資源保育、調查與研究工作。此方法與傳統方式最大不同的地方, 在於藉由民間與社區力量的投入, 協助政府決解土地使用的外部性問題, 及降低政府補償的財政壓力。不過, 此方法對國內而言較新, 因此實用性上還有待發展。

上述的四種補償的制度, 除了國民環境信託的制度外, 其它三種制度可依不同類型限制發展區的需要單獨或配合運用。例如災害性限制發展的地區—如地層下陷區、崩塌地、土石流危險地區等, 由於含有較高的危險因子, 並不適合續繼開發, 同時為了避免災後要付更高的成本, 政府在進補償時較適用土地儲備制或者部份地區可採用地役權的制度, 但就不適用發展權移轉制度; 在公益性或其他限制發展的地區如國家公園、特定水土保持區、生態景觀保護區等, 因為危險因素的影響較小, 所以政府有較大的空間, 在財源及地區發展性的考量下, 選用地役權或發展權移轉較恰當, 相對的, 對政府財政負擔較大的土地儲備制就比較不適用。

至於土石流特定水土保持區的補償方式, 若依上述的分類結果來說, 應歸於公益性限制發展地區的補償方式, 即以地役權或發展權移轉為主。但是「土石流」的特定水土保持區和「一般」的特定水土保持區(如集水區、河岸、保護帶、沙丘地等)不同, 根據特定水土保持區劃定與廢止準則第十六條第三款的條文, 土石流特定水土保持區被劃定的原因, 是經主管機關認定具危害公共安全之虞, 「亟需」加強水土保持處理及維護的地區, 故應屬於含有危險因子較高的地區。所以「土石流特定水土保持區」應和災害性限制發展區中的「土石流危險地區」相同都屬於危險度高的限制發展區, 兩者的差別只在於前者已劃定為特定水土保持區, 後者尚未劃定而已。因此, 土石流特定水土保持區的補償方式, 應依災害性限制發展區的補償方式, 較適合採用土地儲備制或地役權的制度, 若就危險度高的限制地區, 則採用土地儲備制較佳。接下來本文會以「銅門村土石流特定水土保持區」為例, 以土地儲備制的補償方式來進行成本效益分析, 討論選擇將外部效益內部化時, 是否能降低政府的執行成本。不過, 再進行成本效益分析之前, 要先討論與高危險度之限制發展地區息息相關的風險分析。

(三)風險分析

所有的制度設計或是工程規劃都有其風險存在, 只是有些容易分析, 有些則否。通常若要處理風險較高的問題時, 相對要付出的執行成本也較高, 風險較低者反之。因此風險的大小直接影響了成本效益的分析結果。

風險的定義很多, 在保險界、業界或學界都有不同解釋, 然而, 其中較為大家所認同的幾種定義(鄧家駒, 2002), 如風險是指「損失發生的機率或機會」、「潛在可能損失的變異性」、「攸關損失的不確性」等, 而工程界通常是以「損失發生的機率或機會」來定義。在此定義下有兩種可能的情況, 確定性和不確定性。確定性是指決策的結果可以預測的情況。但實際上, 沒有完全確定性, 這裡所指的可預測, 是指若運用歷史的統計資料或經驗

法則，可將未知的不確定性範圍加以縮小者，便算為可預測的分析，只不過是準確性高或低的問題，而通常以機率的方式來表示。不確定性則是指不可預測，隨機發生的情況。

然而在土石流的部份，目前國內雖然已有許多學者，在土石流發生的預測上有許多相關的研究，例如以臨界降雨量(范正成，2001)、集水區面積(謝正倫等，1992)、地下水壓變化(陳晉琪等，1999)、潛在危險(詹錢登，1994)等方式來預測土石流發生的機率或者評估可能造成災害之大小，只不過目前在這兩部份的研究上仍無法達到共識，仍有待努力。不過，目前在土石流發生的預測方面，水保局已經將全省的土石流潛勢溪流分成高、中、低三種危險等級，已概略的區分各土石流潛勢溪流發生土石流機率的大小。致於判定的標準，根據農委會九十一年二月頒定的「土石流災害防救業務計畫」第一篇第二條第四款中規定：土石流及土石流災害的認定可依第一到三條土石流的特性來認定之外，還可依據水土保持技術規範第一六八條對土石流的定義來認定，如有疑議，得由農委會土石流處理諮詢小組認定。而這些認定的標準多是依照各方學者的專業來判定，並未有統一判別的標準，因此對土石流危險度認定上，不同學者往往會有不同的結果，因此，有關於土石流危險度的判別標準仍有待後續的研究。而本文所討論的地區均指高危險度之土石流潛勢溪流為主。

至於有關於土石流災害損失問題，從台灣歷年來較具代表性的土石流災害來看，降雨量的大小通常都是引發土石流災害最主要的原因。為了瞭解降雨量和災害大小之關係，本文統計歷年來引發重大土石流災害之降雨量與該降雨量下被土石流掩埋面積之資料(表一)，用迴歸的方式繪出兩者之關係(如下圖 4)：

表一 台灣地區歷年發生之土石流災害

地 點	時間	最大日雨量(mm)	土石掩埋(公頃)	死亡(人)	受傷(人)	房屋(全毀)	房屋(半毀)
花蓮縣秀林鄉銅門村	79.6	386	3.7	35	0	24	11
花蓮縣萬榮鄉見晴村	90.8	437	10		0	8	0
花蓮縣光復鄉大興村	78.9	478	15		0	0	0
花蓮縣鳳林鎮鳳義里	87.10	359	20		0	5	0
花蓮縣鳳林鎮鳳義里	90.7	446	30		1	3	1
苗栗縣卓蘭鎮內彎里白布帆	90.8	388	50		0	20	39
南投縣水里鄉二部坑	90.8	478	60		0	14	7
南投縣水里鄉三部坑	90.8	478	78	7	0	26	29

資料來源:水保局網站

資料整理:本文

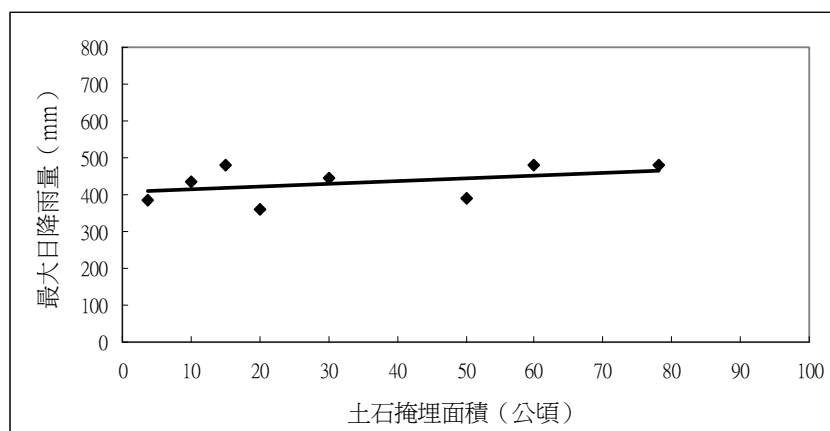


圖 4 降雨量與土石流災害之關係

圖中的縱軸以最大日降雨量表示。橫軸為土石流所淹沒的面積。由圖中的迴歸線段來看，兩者大致成正比的關係，降雨量愈大下游會被淹沒的土地面積也愈大，而且基本上所造成損失(包含死傷人數及房屋、公設損毀)也愈大。當然也有例外的，表一中花蓮銅門村

的例子就比較特別，降雨量不多卻也造成相當多傷亡，主要原因為災區下游人口分佈較密集，且上游土地不當開發情形嚴重，因而釀成如此嚴重災情。

但由於降雨量和災害損失相關研究所涉及的因子非常複雜，為了能方便討論，所以本文只討論發生土石流的情況，暫不討論不發生之情況，即只討論發生土石流時可能造成災害的情況。本文以圖 4 中的迴歸曲線來假定高危險度土石流潛勢溪流區的降雨與災害損失之關係(實際上不同溪流應有不同之關係式)。不過，縱軸改以不同迴歸週期(也可稱為重現期距，以年表示)的降雨量表示，迴歸週期愈大表示降雨量愈大，而橫軸改以災害損失之大小(以掩埋面積大小來計算)。不過，為了方便計算，假設會造成土石流發生的降雨只有三種迴歸週期(但實際上不只)，各種降雨各別會造成不同程度之損害，其關係如下圖所示：

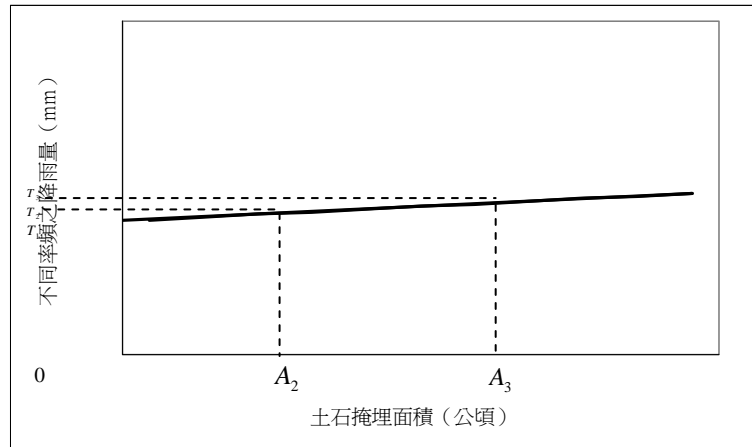


圖 5 高危險土石流特定水土保持區降雨與災害損失關係

在圖中依降雨迴歸週期的不同，將土石流發生後之結果分成三種情況。第一假定當有土石流發生時，若迴歸週期在 T_1 及 T_1 以下的降雨量，即使有土石流發生，規模也很小，並多集中在上游段，並不會影響到下游的保全戶，因此可以取 $A_1 \cong 0$ 。其次依此類推，第二為當迴歸週期為 T_2 的降雨時，可能會造成下游 A_2 面積的保全戶被淹沒。第三種歸週期為 T_3 的降雨時，可能會造成下游 A_3 面積的保全戶被淹沒，文中將 A_3 暫時假設為 100% 的保全戶。然後，再藉由降雨迴歸週期的大小，計算各別可能發生之機率，接著再以期望值的方式，估算出土石流可能造成災害損失。災害損失的期望值定義如下：

$$\text{災害損失} = \sum x_i p(x_i)$$

其中 $p(x_i)$ 為全體事件中某一種降雨發生的機率， x_i 為該降雨的造成之損失。期望值的觀念依整體事件來看， $p(x_i)$ 可視為不同降雨造成之災害損失的權重，則所有 x_i 和 $p(x_i)$ 乘積的總合，即為全整的災害損失。其中因為本文假定只有三種情況，所以 $i=1 \sim 3$ 。以下就以上述所討論的期望值表示方式，開始進行幾種不同補償方式之成本效益分析。

(四) 案例分析

本文以民國 79 年 6 月發生土石流的銅門村為例，該區已於民國 90 年 4 月公告劃定為「土石流特定水土保持區」。依現行政府劃定「土石流特定水土保持區」時所遭遇的問題，以假設的方式，就選擇與不選擇將外部效益內部化兩部份來討論。首先，假設政府在 79 年之前，政府已得知該區位於高度危險的土石流潛勢溪流內，並嘗試將該區劃定為「土石流特定水土保持區」，接下來依實際的情形會有兩種情形。第一種，進行劃定時沒有相關的補償制度，所以使得外部效益沒有內部化，造成當地之居民的抗爭，而無法劃定為特定區；第二種，就以外部效益內化之方式，給予該區民眾適當的補償後，將其劃定為特定水土保持區。文中選擇以現行採用之避難疏散方式，與前文建議對高危險度限制地區採用之土地儲備制度來代表不同之補償方式。最後再以成本效益的分析，比較這幾種不同方式的淨效益，找出最佳的執行制度。

其中特別注意的是，有些制度對於重覆性災害會有不同之成本及效益，但由於災後的變數相當大，有估計上的困難。因此本文先單就發生一次土石流災害的情況來討論，簡化

問題的複雜度，進行初步的分析。

依前文所討論的外部性理論得知，成本及效益可區分為內部與外部二種。在內部成本效益部份，主要為特定區內一般工程治理、水土保持規劃、重建等所需付出之成本或是整治後所獲得之效益；在外部成本與效益的部份，主要為劃定「特定區」後對於區外所造成之成本或效益。不過由於「土石流特定水土保持區」劃定的宗旨，主要為保護下游鄰近村里之生命財產安全，且劃定為特定區後會對區內作長期之水土保持規劃及整治，所以當特定區劃定後，產生的外部成本並不多，主要為外部效益，因此文中外部成本效益之計算是以外部效益為主。在特定區劃定後可能產生的外部效益很多，例如：延長土地之永續利用、降低淹水災害，減少自來水水源之混濁度、降低自來水處理費用等等，但若要將所有的效益量化，幾乎是不可能的，需要相當長時間的研究。因此，文中所討論的補償成本，只是將部份的外部效益內部化給區內的居民而已，其他的部份仍有些進一步的研究。接下來即將政府在執行不同制度的總成本及總效益表列如下(表二)，其中的外部效益經由補償方式內部化後，已歸為政府的執行成本。

表二 不同執行方式之成本及益效

執行方式	項目	內容
不補償	成本 (C ₁)	災前：其他執行成本(溝通協商、人事等) 災後：救助(人命、房屋賠償)、災後重建、長期水土保持費用、其他執行成本(溝通協商、人事等)
	效益 (B ₁)	沒有
避難疏散	成本 (C ₂)	災前： <u>疏散避難規劃</u> 、其他執行成本(溝通協商、人事等) 災後：救助(房屋賠償)、災後重建、長期水土保持費用、其他執行成本(溝通協商、人事等)
	效益 (B ₂)	人命之價值，政府救助金(人命)，長期水保整治之效益
土地儲備	成本 (C ₃)	災前： <u>土地徵收</u> 、其他執行成本(溝通協商、人事等) 災後：沒有
	效益 (B ₃)	人命之價值，政府救助金(人命、房屋)，重建成本，長期水保整治之效益

其中表二所提到之其他執行成本，如溝通協商、人事成本、特別支出等，相較於其他如災後重建、整治的成本而言，算是相當的少，可將這部份之值忽略不計。另外，在效益部份，長期水土保持整治之效益由於需要較長時間之觀察，而且其值相較於人命之價值而言，亦是相當的少，因此這部份之值也忽略不計。

1. 選擇不補償之成本效益分析

根據表二的內容，政府若選擇不補償之方式，相較選擇補償的制度而言，的確不需要付出額外的補償成本，但由於並未有制度的執行，所以也不會有效益產生，所以 $B_1=0$ 。不過根據「災害防救法」第四十八條所制定的「土石流災害防救種類及標準」，規定政府對因土石流災害所造成之人員死亡、失蹤、重傷者有救助的義務，同時對於安遷的救助及農田、漁塭之受災救濟也有明確規定。另外，根據農委會通過的「土石流災害防救業務計畫」第四篇第一章第二節規定：各級主管機關依據災情之輕重緩急，分為需緊急處理者，依序儘速展開搶修、重建及恢復原有面貌的規劃治理工程。因此，政府即使選擇不補償，當災害發生時，仍需付出救助及復原重建的成本。以下就分這兩部份各別討論：

(1) 災害發生後之救助成本

根據「花蓮縣秀林鄉銅門村土石特定水土保持區劃定計畫」書的調查資料，民國 79 年 6 月 23 日的歐菲莉颱風引發銅門村的土石流災害，造成銅門村 12 鄰及 13 鄰之村落遭土石流淹埋，導致房舍全毀 24 間，半毀 11 間，死亡人數 29 人，失蹤 6 人，受傷 7 人，無家可歸者 68 人，為相當慘重之土石流災區。所以本文假設這已為最嚴重的狀況，即視其災害損失的掩沒面積為 100%，再以此來估計政府的救助成本。

依「土石流災害防救種類及標準」第六條的規定，災害救助金核發標準如下：一、死亡救助：每人發給新臺幣二十萬元。二、失蹤救助：每人發給新臺幣二十萬元。三、重傷救助：每人發給新臺幣十萬元。四、安遷救助：住屋毀損達不堪居住程度，依受災戶戶內人口數發放，一人以新台幣二萬元計算，最高以十萬元為限。土石流災前未居住於受災損毀住屋者，不予發給。若以此標準來計算，結果如下表：

表三 銅門村土石流災害救助成本計算

救助對象	人數	救助金(萬元)/人	總救助成本(萬元)
死亡	29	20	580
失蹤	6	20	120
重傷	7	10	70
安遷	68	2	136
總救助成本		9,060,000 元	

表中有關安遷的部份，文中直接把無家可歸的 68 人，視為因屋毀損達不堪居住的對象，選以每人最低二萬元的救助金來計算。經由計算的結果，得知政府災後的救助成本共為 9,060,000 元。

(2) 災害發生後之復原重建成本

這部份成本的估算，文中以政府過去在銅門村災後所投入的整治成本為主。不過，由於銅門村土石流災害生至今已有十多年，且從 79 年至今有參與過整治、規劃或是協調的相關單位很多，如水保局、水保局第六工程所、花蓮縣政府水土保持科、花蓮縣原住民族行政局、花蓮縣秀林鄉公所等，加上有些整治工程雖對銅門村整治，但卻不一定是針對銅門村當中之「土石流特定水土保持區」作整治，故能找到之相關資料有限，所以本文只能對已蒐集到之部份資料來分析，其資料整理如表四。其中由於每個工程都不是在同一年，且又因物價膨脹的關係，所以都將當時的執行經費依行政院主計處今年八月所公佈之歷年物價指數對照表，轉換成民國 92 年之現值。

表四 政府之執行成本

名稱	年度	經費(萬元)	物價指數(92年8月為100%)	轉換92年之現值(萬元)	資料來源
銅門村整治工程	80.5	1460	124.2%	1813.3	水保局第六工程所
劃定及長期水土保持規劃費用	90.1	75	99.4%	74.6	水保局
長期水土保持治理經費	92.6	400	99.9%	399.6	水保局
總執行經費				2287.5	

由上表可大概估算出政府從 79 年至今，對該「土石流特定水土保持區」總共花費之金額為二千二百多萬元，但是實際上可能更多，因為當時有許多的災民因土石流衝毀房舍而無處可住，花蓮縣政府就在銅門村附近興建博愛新村，以便為安頓受災之居民，這部份的成本也是政府因當時土石流災害，所付出的執行成本之一，只不過這方面之成本尚未能尋

得。

因此，將上述計算的救助成本與災後重建成本相加，政府共要付出的成本 C_1 為 31,935,000 元。

2. 疏散避難制度之成本效益分析

根據「土石流災害防救業務計畫」第二篇第三節第一點的規定：對於土石流災害的預防，要持續推動「土石流危險區睦鄰疏散路線及避難區規劃計畫」，辦理土石流危險區睦鄰疏散路線及避難區，由地方政府依據地區特性規劃疏散路線及避難區。此疏散避難制度的源起，是因為民國九十年七月二十九、三十日桃芝颱風所挾帶強烈的暴雨，致使台灣東部花蓮縣及中部各縣市地區發生嚴重之土石流災情，當中有許多民眾因疏散不及，而造成嚴重的傷亡。所以行政院農業委員會水土保持局才特別委託國立中興大學水土保持學系進行「桃芝颱風災區土石流危險區睦鄰疏散路線及避難區規劃」，期能減少人命的傷亡。

(1) 執行效益的計算

疏散避難的制度相較於不補償的制度來說，最明顯的效益，除了可以省去對死亡、失蹤、重傷等救助成本之外，還可以獲得「生命價值」的效益。所謂生命價值的效益，表示保全戶活著時，所能為這社會生產的總效益。但有關這部份的估計問題，一直以來都存在著非常多的爭議，除了經濟學上的考量之外，最大的問題是在於道德觀點，因為在許多人的觀念中，生命應該是無價的，不應該以外在的方式來衡量一個人的價值。若就個人的主觀意識而言，每個人衡量生命的價值標準可能都盡不同。不過，本文暫不討論這方面的問題，只就經濟學上的角度來探討。

在文獻中，有許多估計的一個生命價值的方法，其中最常被應用的方法，是以一個人在生前所能獲得之總工資來統計其「生命價值」。依據 Fisher、Violette 與 Chestnut(1989)所作的回顧顯示，美國統計生命價值的平均估值，約在 160 萬至 900 萬美元之間，而大部份是分佈在 160 萬至 400 萬美元(約新台幣 5600 萬至 14000 萬)之間。在台灣的研究方面，首先是薛立敏與王素彎(1987)從 1984 年勞動力調查資料中選出 4,628 個全時工人之資料，並討論如年齡、性別、教育、婚姻狀況、工作、工時等變數，統計出生命得價值為新台幣 1,200 萬至 3,400 萬之間。其次，Liu、Hammit 與 Liu(1997)利用 1982-1986 之台灣勞動力調查報告進行探討，估計結果顯示隱含的生命價值約新台幣 1,400 萬至 1600 萬之間。此結果與薛立敏與王素彎(1987)的估值相近，但與 Fisher、Violette 與 Chestnut(1989)的統計值相差甚遠，主要的原因是統計的樣本並不相同。因此本文選用以台灣地區為樣本的估計值，以薛立敏與王素彎(1987)及 Liu、Hammit 與 Liu(1997)等兩者交集最低的 1,400 萬作計算值。以下為政府在執行疏散避難制度時，所獲得之效益的計算如表五：

表五 疏散避難制度效益之計算

項目	對象	人數	金額(萬元)/人	效益(萬元)
救助 部份	死亡	29	20	580
	失蹤	6	20	120
	重傷	7	10	70
生命價值		35	1400	49,000
總效益				49,770

表中關於救助部份，直接根據「土石流災害防救種類及標準」第六條的規定來計算。在生命價值的計算人數方面，本文直接將失蹤的人數也視為死亡的人數直接將兩者相加計算。結果所獲得之總效益 B_2 為 497,700,000 元。

(2) 執行成本的計算

有關成本的計算方面，可分災前及災後兩部份。災前的成本，就是政府在執行疏散避難制度所付出之成本。根據水保局的執行計畫的內容，每一個村里的土石流潛勢溪流調查經費是十萬元，然後在調查完成後政府會再給予 50 萬元經費，做為避難地點、物資、救難器具等安置及購買的費用。因此政府在災前對每一特定區所需付出之成本共為 60 萬元。在

災後部份，儘管疏散避難制度已減少政府許多的救助成本，但疏散避難制度只是確保人命的安全而已，並未確保民眾的財產(如房屋)的安全，因此若有土石流的發生造成住屋毀損達不堪居住程度時，依據「土石流災害防救種類及標準」的規定，政府仍須作安遷救助，一人以新台幣二萬元計算，最高以十萬元為限。除此之外，對於土石流造成之災區，根據「土石流災害防救業務計畫」第四篇第一章第二節規定，政府有義務展開搶修通、重建及恢復原有面貌的規劃治理工程。所以政府也須負擔災後重建的成本，此部份的計算方式，和前文中有關災後重建的計算相同。所有計算結果如下表：

表六 疏散避難制度成本之計算

項目	對象	人數	金額(萬元)/人	成本(萬元)
災前	疏散避難	---	---	60
災後	安遷救助	68	2	136
	災後重建	---	---	2287.5
總成本				2483.5

由上表的計算得知，政府若選擇疏散避難的制度，需要付出之總成本 C_2 共為 24,835,000 元。

3. 土地儲備制度之成本效益分析

土地儲備的制度，如前文所述，係利用政府被賦予的「徵收權」或「先買權」，預先取得未來欲發展或進行保育之土地。土地儲備制的精神，乃政府徵收權的延伸，取得方式以協議價購為主，並常賦予征收權或先買權，以提高協議價購之執行效果。這制度對土石流特定水土保持區而言，優點是將土地收歸國有後，特定內的土地就不會有人居住，也就不會再有任何傷亡的問題，政府也不需要負擔救助、災後重建的成本；缺點是政府而要負擔購地的成本，這也是最大的成本。以下分別來討論：

(1) 土地儲備制度之效益計算

土地儲制度主要的效益，第一政府可以省去救助成本，包括死亡、失蹤、重傷、安遷救助。第二，因為土地是屬於國有，只要政府限定民眾不得居住於特定區，就不會有災害的發生，而秉持水保局——「沒有災害，就不需要整治」的理念，政府就不需要付出災害重建或回復原貌的成本。第三，可以獲得「生命價值」的效益。其效益的計算如下表

表七 土地儲備制度之效益計算

項目	對象	人數	金額(萬元)/人	效益(萬元)
救 助 部 份	死亡	29	20	580
	失蹤	6	20	120
	重傷	7	10	70
	安遷	68	2	136
災後重建	---	---	---	2287.5
生命價值	35	1400	---	49000
總效益				52193.5

由上表的計算得知，政府若選擇土地儲備的制度，所能獲得之總效益 B_3 為 521,935,000 元。

(2) 土地儲備制度之成本計算

土地儲備制度主要的成本主為徵收及補償保全戶所居之土地，此部份又分成徵收土地及補償原有地上物兩部份的成本來計算。根據銅門村伍村長的陳述，當時該區的土地利用在土石流危險溪流的中、上游多天然林地和少部份之農耕地，居民多半居住於下游，而由當時災害造成房舍全毀 24 間，半毀 11 間的災情來看，下游住戶最少有 35 戶。所以本文就以居住於下游之 35 戶居民，假定為全部予以徵收補償的戶數，然再依這些戶數之土地面積及地上的結構物，來計算出要補償之土地價格及地上物之價值。

依據銅門村伍村長之陳述，當年該區民房多為一層樓木造的房屋，而且大多不到 10 坪

(約為 33 平方公尺)，為了簡化計算，本文就將該區 35 戶的房屋面積都以 10 坪計算，且基於建築法的規定，屬於建地的土地可最多可用 60% 來建房子，所以若建築物投影面積為 10 坪的話，土地的總面積約為 16.7 坪(約為 55 平方公尺)。從表八的計算中，得知政府對於土地補償之總經費，應為每間之面積乘以當年土地之公告現值，再乘以總數 35 間，即為當時之補償經費。但是由於公告現值通常較市價低很多，因此若以公告現值的方式來計算，民眾可能不會接受，因此為了能確實執行土地的徵收，本文採用較極端的方式，以公告現值的十倍來計算，嘗試分析其結果。最後為了方便比較，根據行政院主計處每月所公佈之物價指對照值，轉換成 92 年的現值，即為 1,240,662.5 元。

表八 土地價值計算

項目	數目 (元)	資料來源
土地面積(平方公尺)	55	本文計算得
79 年公告現值 (元/平方公尺)	50	花蓮縣地政事務所
10 倍的公告現值 (元/平方公尺)	500	本文章
總間數	35	
總經費(元)	962500	
79 年 6 月之物價指數	128.9%	行政院主計處 (92 年 8 月為 100%)
轉換成 92 年現值 (元)	1,240,662.5	

接下來為計算地上物之價值，表九為計算之項目，計算方式大致和表八相同，唯一不同的就是地上構造物價格的衡量方式，由於這 35 戶多為一樓木造之房屋，所以根據花蓮縣政府財產稅科，提供的房屋標準單價表，得知自八十二年一樓木造房屋，每平方公尺的造價為 1000 元，由於再早以前並沒相關之衡量標準，都是人工的方式來衡量，所以本文就以 82 年度起通用之衡量標準，來估算當時地上構造物之價值。同樣，文中也以十倍的造價來計算。計算之結果，得知當時政府對地上物構造物補償之總經費為 11,550,000 元，轉換為 92 年現值為 14,887,950 元。

表九 地上物價值計算表

項目	數目	資料來源
房屋面積 (平方公尺)	33	銅門村村長提供
當年地上構造物價格 (元/m ²)	1000	花蓮縣政府財產稅科
十倍地上構造物價格 (元/m ²)	10000	本文章
總間數	35	
總經費(元)	11550000	
79 年 6 月之物價指數	128.9%	行政院主計處 (92 年 8 月為 100%)
轉換成 92 年之現值 (元)	14,887,950	

最後經表八土地價值計算及表九地上物價值算的結果，我們可以得到政府在執行土地儲滿制度時，所需要付之總成本 C_3 為兩者相加共 16,128,612 元

4. 三種不同方式之淨效益分析

經過各別的成本及益計算後，接下來就是要計算各別之淨效益。淨效益的求法很簡單，只要將效益減去成本所得值，就是淨效益的值。不過，本文因為考量了土石流特定水土保持區風險的問題，所以要將前文討論的風險分析加入，求出各別的預期成本及預期效益，再計算個別之淨效益。在前文的風險分析中，假定只有 T_1 、 T_2 、 T_3 三種迴歸週期的降雨，且各別造成 $A_1 = 0$ ， $A_2 = 50\%$ ， $A_3 = 100\%$ 的淹沒面積。接下來，為了能實際進行計算，文中假

設 $T_3=10$ 年，則表示每年有 10% 的發生機率。 $T_2=5$ 年，則表示每年有 20% 的發生機率。剩下 70% 發生機率，都歸為迴歸週期更短的 T_1 。因此由上述的假設可列出預期成本及效益之期望值：

$$\text{預期成本} = \frac{1}{T_1} * A_1 * C + \frac{1}{T_2} * A_2 * C + \frac{1}{T_3} * A_3 * C$$

$$\text{預期效益} = \frac{1}{T_1} * A_1 * B + \frac{1}{T_2} * A_2 * B + \frac{1}{T_3} * A_3 * B$$

其中的 C 是淹沒面積為 100% 時，所需要付出之成本。B 是當淹沒面積為 100% 時，各制度執行所能獲得之效益。然而為了簡化，在淹沒面積為 50% 的成本效益計算方面，文中就直接以淹沒面積為 100% 時之成本及效益來按比例計算。根據以上的公式，代入表三~九之值，可以求得三種不同制度之預期成本、預期效益和淨效益值(如表十)。

表十 不同制度之淨效益計算表

執行制度	項目	金額(元)	淨效益(元)
不補償	預期成本	6,387,000	-6,387,000
	預期效益	0	
疏散避難	預期成本	4,967,000	94,573,000
	預期效益	99,540,000	
土地儲備	預期成本	3,225,722	101,161,277
	預期效益	104,387,000	

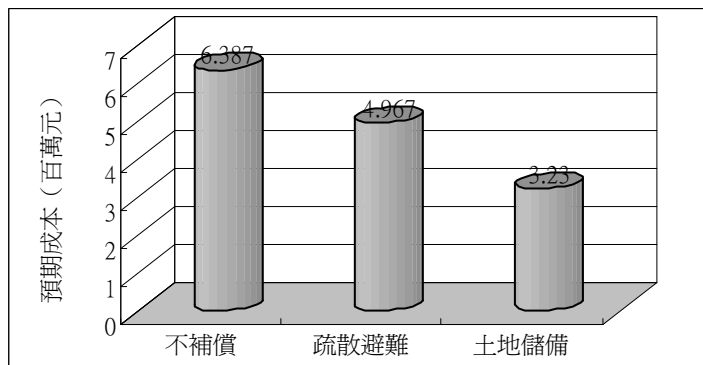


圖 6 不同制度預期成本之比較

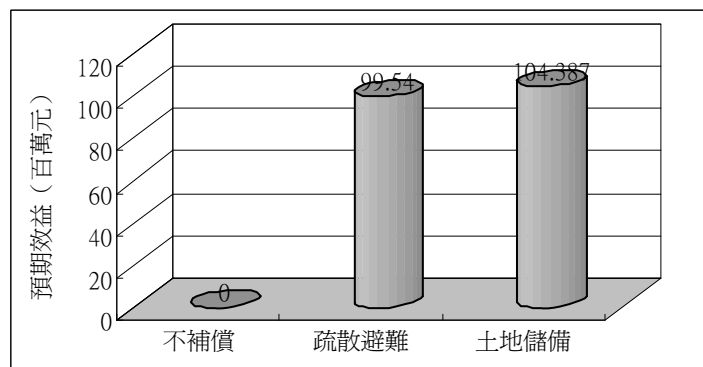


圖 7 不同制度預期效益之比較

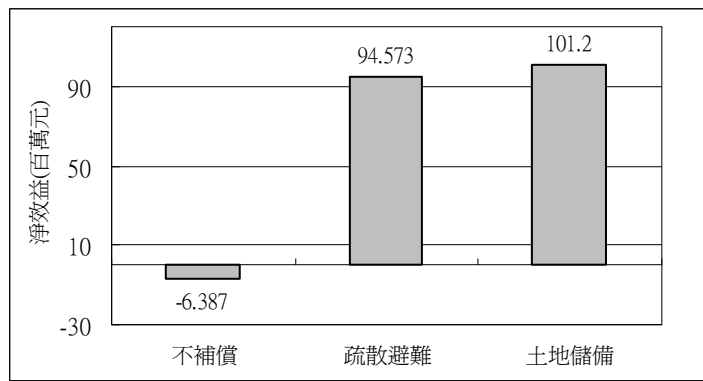


圖 8 不同制度淨效益之比較

由上述之分析圖表中可看出，三種制度中預期成本最大的為不補償之制度，其次為疏散避難制度，最小的為土地儲備制度。其中較為特別的是，一般認為要付出較多成本之土地儲備制度，儘管以較極端之十倍的土地公告現值來徵收時，其預期成本仍是最低的，若同一個地方發生一次以上之土石災害的話，土地儲備制度與其他兩制度之預期成本差值會更大、優勢更明顯。這最主要的原因，在於其他兩個制度每次在災後所需付出之救助及整治的成本都非常的高，特別是重建的成本，就佔了絕大部份。另外，在預期效益部份，最佳的制度為土地儲備制度，其次為疏散避難制度，最差為不補償的制度。其中土地儲備制度和疏散避難制度之預期效益主要的差別，在於土地儲備制度並不需要進行災後整治，而疏散避難制度需要，因此多了這部份之效益。

最後，再利用求得之預期成本及預期效益計算各別制度之淨效益(如圖 8)。計算的結果發現，三種制度中，淨效益最高的為土地儲備制度，其次為疏散避難制度，最低為不補償的制度。其中只有不補償制度的淨效益是負值，這表示政府若選擇不補償時，以長期的觀點來看，不但沒有預期的效益，而且要付出之執行成本是最大的，所以相較其他兩制度，這是最差的選擇。

因此，政府若要減少土石流特定水土保持區劃定工作之預期成本，就淨效益分析而言，是最佳的方式為採用土地儲備制度，因為此制度不只淨效益為最大，同時預期成本也是最低的。不過，土地儲備制度的缺點，就是需要較長的執行時間來進行徵收補償的工作，對於短時間可能發生土石流之地區而言，時效性可能不如疏散避難制度。另一方面，土地儲備制度之預期成本雖然最低，但是其災前的執行成本卻高於疏散避難制度很多，若政府沒有事先規劃並且編列預算的話，對政府可能會造成財政上的負擔。因此，若就短時間來看，疏散避難制度的時效性是最高的，而且災前的執行成本又最低，可以在預防土石流災害時，短時間之內可以獲得最大之效益。但若就長時間來看時，疏散避難制度仍需付出較高之災後救助及重建成本，而且儘管工程的整治再完善，仍無法確保該區之土石流災害不會再發生，因此其預期成本不只如此。所以，若政府能就長時間的效益來考量，土地儲備制度不但可產生之最大的效益，同時，若土地收歸國有，就可以一勞永逸的解決土石流災害的問題。

5.5 土石流災害之間接損失

土石流間接損失的方法，是參照直接損失的計算(劉格非、李欣輯，2005)，以掩埋深度和損失之關係來分析。在各類間接損失分類上，亦分成人命傷亡及財產(包括土地及地上物)兩部份，其中財產損失的項目上，同樣參照直接損失中不同土地利用的分類方式來計算(如表 1 所示)。

表 1 土石流潛勢區內不同類型之土地利用

土地法	土地利用型態	內容	
一類	建築	如住宅、商業、工業、文教等用地。	
二類	農耕	如水田、旱田等。	
	林業	開發	如竹林、伐木地等。
		未開發	如闊葉木、針葉林、灌木林、荒地等類。
	休閒旅遊	如渡假村、森林遊樂區等	
其他生產	如礦地、牧地、鹽地等類。		
三類	交通水利	如道路、橋樑、溝渠、堤堰等等。	
四類	其他	未歸入其他用地，如沙漠、雪山等等。	

根據損失的定義，損失是指恢復至災前狀況所需的金額(Grigg、Heiweg, 1974)。以此定義來看，若直接損失就是指「災害第一時間造成的損失」，而間接損失應該就是指「從災害發生後，到恢復至受災前之福利水準的時間點為止，其間所有付出的一切成本」。而間接損失(Indirect damages)的項目又包含了直接損失之外的所有損失，包括經濟活動的損失、人民身心傷害的損失或其他所有因災害所造成的間接損失等等，非常複雜。

雖然本文能定義出間接損失的範圍，但要完整的分析出間接損失，還是件非常困難的事，其中包涵太多不確定或隱性的損失。所以，因為這是間接損失研究的第一步，本文只針對最主要的間接損失項目來討論，其他的間接損失項目相較於主要的間接損失而言很小，對整體的計算影響也不大。由於在實際的土石流災害來看，損失最大、傷亡最嚴重的，就是災害第一時間所造成的直接損失，其他的間接損失絕大多數都是由直接損失所衍生的結果。如農地流失造成無田可耕的問題、房屋遭沖毀造成無家可歸的問題，或是因災後困境造成的身心壓力等等。故此，本文就以直接損失所衍生的損失當成「主要的間接損失」。所以接下的計算同樣依照直接損失中的分類的討論，以「人命傷亡的間接損失」及「財產的間接損失」二類來討論。

5.5.1 人命傷亡的間接損失

由於人命死亡的損失已於直接損失中討論過(劉格非、李欣輯，2005)，所以此處人命傷亡之間接損失(Indirect loss of human life)是指災後對於受傷或未受傷但經歷災害的災民所造成的損失。若就前文損失的定義來看的話，此部份的損失即指從災後一直到恢復或等同於災害災前的福利水準期間，所有因災害額外造成的損失。例如：親人死亡對家人造成的負擔、受傷所需的醫療成本、災民災後的心理創傷等。

但由於這些損失常不容易量化，因此本文依據 Hick(1943)對損失的定義，「使得受災資本的所有人保持與未受災時相同的福利水準，所需給予該人之最小補償金額」，來計算災後的間接損失。此最小補償的金額，一般多以「損失的工資」來量化，因為工資為一般人維持生活水準的最大影響因子。所以，本文的計算方法就是以「一個人因災害的影響，造成災後無法工作，而損失的工資」來計算間接成本。因此因為心理因素而衍伸的社會傷害都不會包含在內，所以本文提出的方法事實上是低估了真正的間接損失。

根據文獻的調查(Garrison, 1995; Caldera, 2001; 廖士程等, 2000; 蔡崇煌等, 2001 等)，只要是重大傷亡的災區，平均 13% 的人(3%~23%，取平均值)，可能會有創傷後壓力症

候群(PTSD)的患者出現。然而根據文獻(Kaplan, 2003)，對於罹患 PTSD 症狀的病人來說，若未進行治療的話，其中有 30%可以自動痊癒；40%雖有好轉，但仍有些輕微的精神狀況，對日常生活仍有些影響；而有 20%仍處於中度情況，其病症對日常生活影響較嚴重，可能無正常工作；最後的 10%是處於嚴重狀況，完全無法工作。此結果可作為初步估算的參考。

由於目前關於人命間接損失評估的文獻非常少，因此為了進行初步的估算，因此本文根據上述的文獻，作一些簡化的假設。假設輕微 PTSD 症狀的病人，雖對其後作有些影響，但仍可以正常工作，因此就和自動痊癒的人一樣，無損其工作能力，共佔 70%比例；而對於嚴重情況的病人來說，假設是完全喪失工作能力，佔 10%的比例；最後，對於中度情況的病人來說，假設是喪失一半的工作能力(乘上 0.5 當作權重)。

至於工作產出的值估算，本文就直接參照直接損失中關於「生命價值」的定義來計算(劉格非、李欣輯，2005)，因為此定義即是以一個人生前所獲得的總工資來討論，故完全喪失工作能力的人，其損失值亦為 2,074.8 萬元，喪失一半的人為 1037.4 萬元。

所以綜合上述所有的討論，各比例可以直接入計算。最後將公式整理如下：

$$\begin{aligned} IHL &= HLV \times M \times (1.3\% + 0.5 \times 2.6\%) \\ &= HLV \times M \times 2.6\% \end{aligned} \quad (1)$$

其中, IHL= 人命間接損失(元)

HLV=人命價值(元)

M=居民數(保全人數)-死亡人數

5.5.2 財產的間接損失

依前文對損失的定義，這部份的討論主要以恢復成本的觀念來討論，即無論那種土地利用，均以恢復土地原貌的前題下進行討論，。

在開始計算各種財產的間接損失之前，有一項間接成本需要先來討論——就是土方清理的成本(transport and clean cost of gravel)。因為這是土石流災後最主要處理的項目之一，且無論那種土地利用(建地、農地、交通用地等等)只要被土石流掩埋的地方，一定會有此項的恢復成本。為了免於重覆計算，在此就先針對此項的成本進行分析。

1 土方的清運成本

$$TCE = CA \times CD \times UPE \quad (2)$$

其中, TCE=土方清運成本(元)

CA=掩埋面積(m²)

CD=掩埋深度(m)

UPE=土方價格(元/ m³)

上式中除了土方價格之外，其餘參數都可從現場調查中求得。在土方價格方面，由於此價格會因運送、開挖、後續處理等因素的影響，因此本文只能取概估的平均值來計算。根據文獻(賴琬淳，2001)，土石流土方每立方米的清運成本從 410~730 不等，平均值為 570 元。因此，文中只要關於土方清運成本的部份，均以此平均值作為計算值。

2 土地價值的間接損失

所以接下來關於土地價值的間接損失(Indirect loss of land)，主要以土地流失的間接損失為主(??土地流失有哪些間接損失)。其計算公式整理如下：

$$ILL = \sum_{i=1}^N NBL_i \times LLA_i \times N_i \quad (3)$$

其中, NBL_i=土地利用淨效益(元/ha)

LLA_i=土地損失面積(ha)

N_i=土地損失之年數(year)

i =不同利用下之土地

一般來說，在土石流災害中容易流失的土地，大多以溪旁林地或農耕用地為主。但由於林地自然復原能力很高，只要在 30 度以下的坡面，災後很容易恢復成以喬木為主之植物社會。故就算遭土石流的沖蝕，仍無損於土地的利用價值。所以，在關於土地流失的間接成本討論中，本文就不討論林地流失的間接成本，只需考量農地流失的間接成本即可。至於土地利用之益效值(NBL)的求取上，直接依據農委會每年的發佈的農業統計年報，即可得知各年度各種作物每公頃的淨效益值。

3 地上物的間接損失

在地上物的間接損失計算上，依據表 1 的土地分類來討論：

(1). 建築用地上的間接損失

建物用地上的損失主要以建物的損失為主，除了直接的建物損失及土方清運成本之外，主要的間接損失就是建物在受損期間無法提供的服務價值，也就是這段期間無法居住的問題。故只要統計在建物損失期間災民居住的花費，即可得知建物的間接損失(Indirect building loss)。本文是以租屋的成本，來衡量在建物損失期間建物無法提供的服務價值。其中除了土方清運成本之外，其他的參數值均可依據實際的調查求得。其計算公式整理如下：

$$IBL = TCE + \sum_{i=1}^M \alpha_i \times RM_i \times N_i \quad (4)$$

其中, IBL=建物的間接損失(元)

TCL=土方清運成本(元)

RM_i=租屋市場的市價(元)

α_i =價格調整參數

N_i =價土地損失之年數(year)

i =不同類型的建物

(2). 農耕用地上的間接損失

農耕用地上的間接損失(Indirect cropper loss)，主要是從農田遭掩埋後至恢復至可以耕作的期間，所額外花費的成本，或這段時間無法耕作的收益損失。但由於農地回復到可耕作的時間，不像建物需要很長時間，在很短的時間內就可以清理完畢，所以這段時間無法耕作的收益損失，並不是那麼大，而主要花費的成本，反而是恢復農地可耕作狀態的恢復成本。所謂的恢復成本，就是指農地恢復可耕作狀態的成本，主要的，就是土方清運和整地的成本。一般來說，土方清運的過程就包含了整地的動作，因此，這兩部份的成本可以併在一起討論。因此在這部份的計算中，本文就以農地上的土方清運成本來估算其間接損失。計算公式如下：

$$ICL = TCE \quad (5)$$

其中, ICL=農地之間接損失(元)

TCE=土方清運成本(元)

(3). 林業用地的間接損失

森林的主要功能很多，如涵養水源、保護地表、提供休閒娛樂等。只不過這些項目涵蓋的層面太廣，很難一一詳述。所以，在討論林地的間接損失時，本文只能選擇和土石流災害相關性最大的項目來討論，也就是林木在保護地表免於被降雨侵蝕的功能。所以，只要知道裸露地和林地之土方沖蝕量的差別，就可以推得林地遭土石流破壞後額外產生的土方量，然後，再將此土方量以土方清運的方式來計算成本，如此就可以推得林地損失的間接成本(Indirect forestry loss)。其計算公式整理如下：

$$IFL = ECME \times DLA \times UPE \quad (6)$$

其中, IFL=林業用地之間接損失(元)

ECME=林損後額外多的土方量(m³/ha)

DLA=損失面積(ha)

UPE=土方價格(元/ m³)

根據文獻(村井宏等, 1975)曾分別以裸露地、耕地、草生地、闊葉樹林地、落葉松林地、赤松林伐採地、箭竹地等七種不同的林地, 進行人工降雨試驗, 藉以觀察不同的覆蓋對於抑止表面沖蝕的效果。經由實驗的結果, 得知森林每年每公頃產生的土砂量約為 0.02~0.2 公噸(平均值約為 0.11 公噸), 且林地若因崩塌而造成裸露時, 接下來產生的土方會是未崩塌前的 40 倍左右, 因此這多出的土石量即為林地遭破壞後額外的間接損失。最後, 依據實驗結果, 即可求得林地的間接損失, 即每年每公頃會多產生的土方量, 約為 1.56 m³。而此土方量即為林地破壞後額外產生的間接損失。

再者, 根據村井宏等(year)的實驗結果, 只要一年的時間已足夠使崩塌地的表層有淺層的自然植生, 而即使只是很淺層的自然植生, 就足以減少大部份的侵蝕情況, 特別是對於落葉松及闊葉林來說, 其效果更是明顯。因此, 本文認為林地的間接損失計算年數計算, 只需要取一年即可, 第二年後損失值會遠小於第一年, 其值可以忽略不計。

(4). 休閒旅遊用地之間接損失

休旅用地的間接損失(Indirect tourism loss), 除了一些清理的成本之外, 後續所造成的其他損失。一般來說, 休閒旅遊用地的間接損失, 主要是觀光收入的損失, 也稱之為遊憩效益 (Recreational benefit) 的損失。

文獻中(吳珮瑛等, 2003), 最常使用的非市場評估法有旅遊成本法(Travel Cost Method)、特徵價格法(Hedonic Price Method)和條件評估法(Contingent Valuation Method)等三種, 藉以衡量到環境資源財除了使用價值之外的非使用價值部份, 如遊客對遊憩區的滿意度、遊憩區對各人的存在價值等。不過, 非市場財貨評估法唯一缺點, 就是無論用那一種方法都必須花費相當多時間作調查和分析, 特別是需要作問卷調查的方法。由於本文期望於災前就進行災損評估, 所以除非是當作災後的統計資料, 進而建立分析的資料庫。不然, 本文暫不採取此計算方式。

本文嘗試透過另一種較快的替代方式----直接由遊客人數的變化量來推估遊憩效益的損失。其計算公式整理如下:

$$ITL = TCE + LT \times ACT \quad (7)$$

其中, ITL=休閒旅遊的間接損失(元)

LT=旅遊人數減少量(人)

ACT=平均消費(元/人)

採用此方法的原因, 主要是遊憩人數的和遊憩效益大多是成正比關係, 遊憩人數的愈多, 遊憩效益自然就高。所以只要得知災害前後遊客人數的變化量, 就可以大致的推估災害對於遊憩效益的影響。然而 LT 的值只要根據觀光局歷年的統計資料即可得。

(5). 其他生產用地之間接損失

同樣的, 在其他生產用地方面, 根據國內土石流特定水土保持區內之土地利用分類, 這類生產用地只有採礦用地而已, 而以現有 35 個土石流特定水土保持區中, 只有一處特定區有採礦的經濟活動(面積??不到 3%)。因此, 礦區用地並對於現今的土地利用來說, 屬於很少數的經濟行為。因此本文暫不考慮採礦的間接損失, 若有特殊的需要, 本文再以個案方式加入討論。

(6). 交通水利用地的間接損失

根據前文直接損失的分析, 土石流在這類用地上主要損毀的項目為道路、橋樑、堤防及防砂壩四種。其中道路和橋樑都屬於交通方面的損失, 故可歸為同類討論; 另外, 堤防

及防砂壩屬於水利方面的損失，歸另一類討論。

(6.1) 道路和橋樑損失的間接成本

在這類間接損失的討論中，主要的間接損失是指從交通中斷(道路、橋樑損壞)至恢復通行期間所損失的利益。但根據是交通部公路局於 921 地震期間的道路搶通的資料(葉昭雄, 1999)，絕大部份的道路平均在兩、三天之內就能搶通，其中只是因落石坍方阻斷的道路，甚至只要一天。大致上看來，交通中斷的時間都不算太長。所以，雖然在短時間的道路中斷，乃有一些間接的成本產生，但若相較於直接的損失而言，間接的損失很小，因此本文對這部份的損失忽略不計。

(6.2) 防砂壩和堤防損失的間接成本

在堤防的間接損失方面，其損失可從堤防破壞後，多流入的土方量來估算。但這部份的損失實際上已包括於土方清運的成本中了。因此，關於這堤防部份的間接損失，本文就直接假設此部份的值已併於其他用地上的土方清運成本之內。

在防砂壩方面，當結構物破壞之後，造成的主要損失就是喪失蓄積土砂的功能，所以其間接損失的值就是以防砂壩所能蓄積的土方量來計算。(這和恢復時間的長短無關，因為就算恢復防砂壩原貌，所能蓄積的土方量也是定值)。

最後，經由上述的討論之後，交通水利用地上的間接損失，只需考量防砂壩的部份，所以交通水利的間接損失(indirect traffic and hydrolic structure loss)計算公式，可表示整理如下：

$$ITHL = SD \times UPE \quad (8)$$

其中, ITHL=交通水利的間接損失(元)

SD=蓄積土方量(m³)

UPE=土方價格(元/m³)

(7). 其他用地之間接損失

由於這部份土地利用所包括的項目太廣泛，本文無法一一詳述，而且每個土石流潛勢區的情況又不盡相同。所以這部份間接成本的估計，會因區域的特性而不同，需要依個別的案例來分析。

5.5.3、案例分析--以台中縣松鶴部落之土石流災害為例

1 災害簡述

2004 年 7 月的敏督利颱風及 8 月艾利颱風兩度重創了松鶴部落，更造成了松鶴一溪出口右側多戶民宅遭土石淹沒慘況，及道路據橋樑損毀等災害。因為此次的災害包括了松鶴一、二溪。為了簡化方便分析，本文只選擇土石掩埋規模和土石流特定區劃定的情況相似松鶴一溪作為分析案例，進一步作更詳細的損失評估。根據土石流災害調查報告(段錦浩, 2004)，可依據前文的土地分類，將各類土地利用下的損失項目表列如下：

表 2 松鶴一溪土石流災害之損失項目

損失類別項目		損失內容
人命損失		3 人死亡
財產損失		
土地損失		約 1 公頃(本文概估)
地上 物 損失	建築 用地	12 間民宅被土石掩埋(全毀)、28 間民宅間接遭土石沖毀(兩層水泥建築，建地平均約 40 平方公尺)
	農耕 用地	果園損失約 2.1 公頃，檳榔損失約 0.03 公頃。
	林業	林業損失面積約為 8.32 公頃。

用地	
休旅用地	直接損失的部份已歸入住宅損失
交通水利	道路損失約為 100 公尺，一座對外橋樑損毀。
其他	忽略不計

2 災損評估

根據前文的討論，本文所討論的間接損失同樣是依據表 1 分類各別計算。

2.1 人命間接損失之計算

同樣根據該區的土石流特定水土保持區計劃書，得該區之保全約有 20 戶(假設每戶平均四人)，以初估算約有 80 人，扣除死亡的三人共剩下 77 人，因此根據(1)式可算得人命的間接損失：

$$IHL = HLV \times M \times 2.6\% \\ = 20,748,000 \times (80 - 3) \times 2.6\% = 41,537,496 \text{ 元}$$

2.2 財產間接損失之計算

先針對此項的成本進行分析。

1. 土方清成本的計算

根據現調資料，該災害地區下游土石掩埋深度，除了少數超過有二層樓高的深度之外，大多為一層樓高，所以為了方便計算土方的高度，本文暫取 3 公尺的土方掩埋深度來計算。接者，將此值代入(2)式，即可求得各用地上之土方清運成本(TCE)，如表 3 所示。

表 3 松鶴一溪內各類用地之土方清運成本

項目	土方清運成本(元)
建築用地	2,736,000
農業用地	36,423,000
交通水利用地	684,000
土方總清運成本	39,843,000

2. 土地流失之間接損失

已知該區主要的農作物為水蜜桃及水梨兩項，根據行政院農委會每年發佈的農業統計年報(2003)得知，桃類每年每公頃的淨效益平均為 463,777 元；梨類每年每公頃的淨效益平均為 913,557 元。最後，將上述的值及表 2 資料代入公式 3，即可求得農地流失的間接損失(只估算一年)。

$$ILL = \sum_{i=1}^N NBLi \times LLAi \times Ni = 0.5 \times 463777 + 0.5 \times 913775 \\ = 668,776 \text{ 元}$$

3. 地上物流失之間接成本

(1) 建地上之間接損失

根據前文的關於間接損失的討論，得知建地上除了土方清運成本之外，還有建物損失的間接成本。於前文公式 4 的討論中，得知 $N=3$ 年、 $\alpha=0.7$ ，所以接下只要求得此區的租屋市場的市價(RM)即可。

根據市場調查的結果(永慶房屋)，2005 年 5 月台中縣整層住宅每坪的租金約為 180~290 左右，平均值約為 235 元/每坪，所以若每戶 $40 m^2$ (約 12.1 坪)的住家來計算的話，市場的價格約為 2844 元元，此即為該區的 RM 值。最後，將表 2 的資料(全毀共 40 間)及上述的 RM 值代入公式 4，即可求得建地上除了土方法運成本之外的間接損失。

$$IBL = \sum_{i=1}^M \alpha_i \times RM_i \times N_i = 40 \times 0.7 \times 2844 \times 36 = 2,866,752 \text{ 元}$$

(2) 農耕用地上的間接損失

根據前文關於農地間接損失的討論，得知農地上間接損失就等於土方清運成本，結果如表 3 示。

(3) 林地的間接損失

同樣根據將表 2 的統計，得知林地損失的面積約為 8.32 公頃。最後，將上述的資料代入公式 6，即可求得林地上的間接損失。

$$IFL = ECME \times DLA \times UPE \\ = 1.56 \times 8.32 \times 2200 \cong 27,456 \text{ 元}$$

(4) 交通水利地上的間接損失

同樣根據表 2 的統計資料，該區之交通水利用地上的直接損失為道路、橋樑中斷及土石掩埋，所以其間接損失主要為上述二者所衍生的損失。關於橋樑中斷的間接損失部份，於前文已有詳細的討論：根據過去的政府的救災經驗來看，被土石流沖毀的橋樑，在短時間內也可以建立便道，所以相對直接的損失(橋樑沖毀)而言，此部份的損失很小，可以忽略不計。因此，剩下的間接損失只是土石掩埋的損失而已，然而，此部份的損失值如表 3 所示。

4.3 K 值的計算

在求得間接損失的結果後，接下來就可以利用此結果來建立此區關於土石災害損失的 K 值。根據前文的討論，K 值是指間接損失和直接損失之比值。利用已知的 K 值，只要知道災害的直接損失就可馬上推估出災害的間接損失，因此對於事前的災損評估有相當大的助益。最後，將直接損失的計算結果(劉格非，2005)及上述間接損失的計算結果並列(表 4)，即可求出 K 值。

表 4 松鶴一溪之 K 值計算

損失類別		直接損失(元)	間接損失(元)	
人命損失		62,224,000	41,537,496	
財產損失	土地	650,000	668,776	
	地上物	建物	7,840,000	5,602,752
		農耕	2,134,775	36,423,000
		林業	85,064	27,456
		交通水利	15,000,000	684,000
災害損失總值		87,933,839	84,943,480	
K 值		96.6%		

由上表的分析可得知，松鶴一溪土石流災害的 K 值約為 96.6%。對於該區而言，間接損失的值幾乎和直接損失值的相同，其中又以人命之間接損失及土方清運影響最大。再者，若單只就財產之損失來分析的話(不考慮人命損失)，會發現該區的 K 值更大，變成 168.8%，表示當實際的災害發生時，財產的間接損失會大於直接損失的值。

不過要強調的是，在實際情況災後整治的狀況中，這些堆積土方除非有立即的危險，不然不一定會將所有土方都清運出去，主要的原因當然也就是成本的考慮。所以，本文在此所作的評估，只是透過理論的應用，以恢復原貌的角度所估算而得的結果，並不代表實際執行上的整治成本。

5.6 結論與建議

就以上經濟分析的結果，過去政府在劃定「土石流特定水土保持區」時，之所以有外部效益的問題，主要是因為目前在「土石流特定水土保持區」劃定的法規中，並沒有明確規定相關的補償方式，而使得因劃定特定區而產生之外部效益無法有效的內部化，而這往往使得政府在劃定特定區時，常遭當地居民的抗爭，以致於執行效率不高，然而每當災害發生時，政府卻要付出更多之社會成本。因此，若要減少外部效益的問題，就必須有配套的補償措施，盡可能使外部效益能內部化。目前政府主要採用的為疏散避難制度，雖然此制度就短時間來看，就可以獲得最大之效益，而且災前的執行成本又最低，較容易推動。但若就長時間來看時，疏散避難制度仍需付出較高之災後救助及重建成本，即如文中的例子，即使以十倍的公告現值來徵收特定區中之土地所花費的成本，還不如一次災害後整個社會所付出之社會成本，況且若發生不只一次土石流災害的話，所須投入之人力、物力、時間的成本更難以估計。因此，若要一勞永逸的方法，還是採用土地儲備制度較佳。只不過，為了不在短時間內造成政府財政之負擔，最好是能有計劃的逐年編列預算，並可將土地分多次的徵收，如此就可減少政府的財政壓力。同時，在徵收的期間，還可配合執行成本較低之疏散避難制度，期間若發生土石流災害，就可將災害損失減到最低。

最後，本文只是就銅門村的一個案例，以假設的方式，討論政府目前所遭遇的問題，因此難免有些部份會和實際上之情況有差距，而這也是未來可再研究的方向。但透過外部性理論的應用，大致上可看出政府過去在執行特定區劃定的一些問題，而期望此分析結果，可以提供政府未來在劃定「土石流特定水土保持區」時的意見參考。

而監測設施，只要安置位置正確，至少可以位居民爭取數分鐘的緊急逃生時間，由效益分析可以很清楚看出，這幾分鐘，就可以減少極大部分因受傷或死亡造成的損失，可以說效益非常顯著，政府應積極鼓勵類似設施。

參考文獻

- Cheng D.K., (1989), "Field and wave electromagnetics", Addison Wesley .
- Debye, P., (1929), "Polar Molecules", Dover, New York.
- Dobson M.C. , F.T. Ulaby, M. Hallikainen, and M. El-Ray, (1985), "Microwave dielectric behavior of wet soil-part II : four-component dielectric mixing models", *IEEE Trans.Geosci.Remote Sensing*, GE-23, pp35-46.
- Ho, W. and W.F. Hall, (1973), "Measurements of Dielectric Properties of Seawater and NaCl Solutions at 2.65 GHz", *J. Geophys. Res.* , 78, pp.98-103.
- Ho, W., A.W. Love and M.J. VanMelle, (1973), "Measurements of the Dielectric Properties of Sea Water at 1.43 GHz", *NASA Contractor Re. CR-2458*, NASA Langley Research Center, Langley,VA..
- Klein, L.A., and C.T. Swift, (1977), "An Improved Model for Dielectric constant of Sea Water at Microwave Frequencies", *IEEE Trans. Antennas Propag.* , AP-25, pp. 104-111.
- Lane J. and J. Saxton, (1952), "Dielectric Dispersion in Pure Polar Liquids at Very High Radio Frequencies, III. The Effect of Electrolytes in Solution", *Proc. Roy. Soc.*, 214A, pp. 531-545.
- Shutko A.M. and E.M. Reutov, (1982), "Mixture formula applied in estimation of dielectric and radiative characteristics of soils and grounds at microwave frequencies", *IEEE Trans.Geosci.Remote Sensing*, GE-20, pp. 29-32.
- Sitar N., S.A. Anderson and K.A. Johnson, (1992), "Conditions for initiation of rainfall-induced debris flow", *Stability and performance of slopes and embankments: proceedings of a special conference at U.C. Berkley, ASCE*.
- Stogryn, A., (1971), "Equations for Calculation the Dielectric Constant of Saline Water", *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, MIT-19, pp.733-736.
- Ulaby F.T., R.K.Moore and A.K.Fung, (1986), *Microwave Remote Sensing* , vol .1, vol.2, and vol. 3, Dedham, MA : Artech House.
- Yeh G.T., (1987), "3DFEMWATER: A Three-Dimensional Finite Element Model of WATER Flow through Saturated-Unsaturated Media", *Environmental Sciences Division Publication No. 2904*.
- Bator,Francis M(1958),"The Simple Analytics of Welfare Maximization",*American Economic Review*,47,pp.22-59.
- Baumol,William(1972),"On Taxation and the control of Externalities", *American Economic Review*,62,pp.307-322.
- Papandreou,Andreas A(1994),*Externality and Institutions*,Oxford and New York: Oxford University Press,Clarendon Press.
- Fisher,A., D. Violette, and L. Chestnut(1989),"The Value of Reducing Risks of Death:A Note on New Evidence",*Journal of Policy Analysis and Management*.8(1):pp.88-100.
- Liu, J.T., J.K. Hammitt, and J.L. Liu(1997),"Estimated Hedonic Wage Function and Value of Life in a Developing Country",*Economics Letters*. 57: pp.353-5-358.
- Achenbach, J. D. (1973), *Wave Propagation in Elastic Solids*, Amsterdam: North-Holland Pub. Co.
- Chao, Chi-Chang (1960) "Dynamical Response of an Elastic Half-Space to Tangential Surface Loadings", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 27, pp. 559-567.
- Cole, J. and Huth, J. (1958) "Stresses Produced in a Half Plane by Moving Loads", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 25, pp. 433-436.
- Gakenheimer, D. C. and Miklowitz, J. (1969) "Transient Excitation of an Elastic Half Space by a Point Load Traveling on the Surface", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 36, pp. 505-515.
- Pritz, T. (2004) "Frequency Power Law of Material Damping", *Applied Acoustics*, Vol. 65, pp. 1027-1036.
- Sharman, R.V. (1963), *Vibration and Waves*, London: Butterworths
- Snowdon, J. C. (1968), *Vibration and Shock in Damped Mechanical Systems*, New York: J. Wiley

- 王智民(1996)，「外部性與分工」，國立台灣大學經濟學研究碩士論文。
- 吳庚(2002)，「行政法理論與實務」，第七版，三民書局。頁 662-664。
- 林富松(1982)，「福利經濟學的先驅—皮古」，允晨出版社。
- 夏維良(2002)，「土地使用限制回饋行為之研究—以制度授權觀點為基礎」，國立台北大學碩士論文。
- 張清溪、許嘉棟、劉鶯釗、吳聰敏等(2002)，經濟學〈二版〉，頁 124-127。
- 傅祖壇、簡資修(1995)，「臺灣山坡地管理之制度經濟層面探討」，臺灣銀行季刊，46(3)：252-270。
- 蕭代基、洪鴻智、林俊旭、林群超，黃德秀，(2000)，飲用水水源水質保護區分區分級管理與補償制度，行政院環保署。(EPA-91-G108-02-101)
- 鄧家駒(2002)，「風險管理」，華泰文化事業公司。
- 薛立敏、王素庭(1987)，「台灣地區就業人口「生命價值」之評估——工資風險貼水法之理論與實證」，『經濟專論』，108 輯。
- 謝正倫、王志浩、陳禮仁，1992，「花東兩縣土石流現場調查與分析」，中華水土保持學報，第 23 卷第 2 期。頁 109~122。
- 陳晉琪、詹錢登，土石流發生之臨界土層含水量，第二屆土石流研討會論文集，129-137(1999)。
- 詹錢登，「土石流危險度之評估與預測」，中華水土保持學報，第 25 卷，第 2 期，第 95-102 頁(1994)。
- 劉格非，黃名村，徐浩仁，(2000)「微波探測淺層地下水位應用於邊坡穩定」，第二屆海峽兩岸山地災害與環境保育學術研討會論文集，第 269-278 頁。
- 李全發，(1983)，「打樁引致之地表震動與鄰房耐震診斷」，國立成功大學建築研究所碩士論文。
- 李良生，(1998)，「三維層狀介質暫態彈性波傳的理論解析、計算及實驗」，國立台灣大學機械工程學研究所博士論文。
- 李欣輯，(2000)，「地聲探測器應用於土石流預警」，國立台灣大學土木工程學系研究所碩士論文。
- 張獻宗，(1987)，「移動聲源所產生之聲波在固基層狀之意體介質中的傳播現象」，國立台灣大學應用力學研究所碩士論文。
- 陳精日、章書成、葉明富，(1991)，「泥石流地聲特性及 NJ-2 型無線遙測泥石流警報器的研製」，第二屆全國泥石流學術會議論文集(中國大陸)，第 36-41 頁。
- 黃清哲等，(2004)，「土石流地聲特性之實驗研究」，中國土木工程學刊，第十六卷，第一期，第 53-63 頁。
- 黃清哲等，(2004)，「地聲探測器應用於土石流監測方面之研究」，第四屆海峽兩岸山地災害與環境保育學術論文集，第 49-56 頁。
- 黃登賢，(2004)，「三維點源地聲傳遞的理論解析與初步實驗」，國立台灣大學土木工程學系研究所碩士論文。

出國報告

名稱：第四屆國際土石流研討會

地點：中國大陸昆明

時間：2007/9/10-9/12

本次國科會支助我參加，會議地點為中國大陸成都，主辦為成都山地防災所的崔鵬教授。這次研討會口頭發表論文僅有 92 篇，為歷屆最少的一次，但是論文發表國家分佈有 23 國，其中論文最多的不算中國大陸本身，為美國，台灣，美國最為支持該研討會。

第一天的 Keynote 演講第一場由 Richard Iverson 講他過去 15 年由大型水槽試驗得到的心得，其中的底床潤滑層與不穩定特性，最值得參考。其次的兩位，一位是 Dr. Ven Manville 講 Ruapela 在 2007 爆發的火山土石流的實際處理調查經驗，最後一位是崔鵬教授講蔣家溝的土石流控制，兩者均為描述性，演講中透漏出的科技水準和處理經驗，均比不上台灣

本人有兩篇論文發表，一篇為土石流的災損評估，一篇為利用微波探測土石流邊坡水位的研究，同時本人主持一個 session 然後又在 Panel Discussion 中，被選為世界五位 Panel 之一，討論土石流研究與實用間的關係。

整個研討會開下來，給人的感覺可以綜合成下列幾點

- 一、 台灣土石流實用研究，已經與世界水準齊平，許多方面，甚至超越大多數國家；但是基礎理論部份，卻缺少紮實的工夫。
- 二、 此次由中國大陸主辦，不但顯露出大陸土石流相關研究遠遠落後，更顯示出他們的心態很閉鎖，尤其與言語思考方面的障礙，將會嚴重引響大陸的進步
- 三、 歐洲研究重實用，但是也重基礎，以後可能瑞士會超越美國地調所的銀就成果
- 四、 我們應該多朝開發中國家如東南亞，南美等國以土石流科技交流來增進雙邊關係