

出國報告(出國類別：研習)

# 時域反射儀於邊坡穩定監測分析及 治理工程之應用

服務機關：行政院農業委員會水土保持局

研究人員：蕭惠民

派赴國家：美國

國外研究機構：加州大學洛杉磯分校

出國期間：100年9月13日~12月20日

補助編號：100農科-4.1.1-科-a4

# 目次

壹、摘要.....	2
貳、目的.....	4
參、行程.....	6
肆、研習過程與內容.....	7
伍、研習心得與建議事項.....	37
陸、參考文獻.....	39

## 壹、摘要

台灣本島山坡地占總面積約70%，具有河道短、坡度陡、水流急等特徵。因此容易發生土砂災害，故邊坡穩定是一項重大的課題，邊坡監測感測器的發展隨著科技的進步而逐漸改良。目前所使用的傳統監測儀器是以電子式感測器為主，其產生的電子數位訊號亦可達到自動化監測的目的，但使用上因經濟性的關係並不普遍，原因是傳統的自動化監測系統不但價格昂貴，且儀器設備容易故障。本研習係以時域反射儀(TDR)的特性及功能，在邊坡監測應用方面，朝向廣泛及準確的方向努力。

時域反射法(TDR , Time Domain Reflectometry)的監測技術改良了現有邊坡監測的缺點，並大大的降低自動化監測的成本。TDR 是一維電磁波發射器，利用其絕緣介質不連續及幾何斷面不連續的原理可在邊坡工程監測的領域中實際的應用。TDR 為中心主軸而發展的監測方法，因其介面的相容性非常廣泛，可使用在雨量計、平面伸縮計、地下水位計、邊坡滑動監測計等相關監測設施，且TDR 具有維修少，免電源長期供應，準確性高之優勢，且不受量測深層限制，因此能偵測深層下的環境改變。

TDR 邊坡資訊自動化監測系統，並使用自動化的遠端資料擷取設備，透過網際網路及程式語言等資訊科技，結合成一套完全自動化的系統。故TDR技術可朝向自動化監測的過程並延伸至網際網路，以期邊坡的監測技術能達到『任何時間、任何地點』的監測目標。

## 貳、 目的

臺灣地區因地形及氣候關係，常產生大量崩塌，使得河岸土壤沖蝕嚴重，溪流含沙量高。依據調查資料指出，台灣地區土石流潛勢溪流1,578 條，崩塌地43,570 公頃。水土保持是國土保安之根本，政策目標與推動重點有其整體性、延續性及急迫性，除推動全方位治山防災等工程方法治理外，也面臨了新的問題。

為維護山坡地公共安全、推動多元化山坡地資源保育與永續發展、建構社區安全之土石流防災與應變機制外，導入新科技及新技術防止土砂災害坡地水土保持及附屬設施等山坡地環境保育基礎建設工作，以期減少災害損失。時域反射儀(Time-domain reflectometry, TDR)為可信賴的非破壞方法檢測含水量工具。於1970 年代，TDR 系統開始被使用於判斷現地土壤含水量。目前此技術發展已漸成熟，可於建立相關工程實務上應用。於國外發展已久，透過電磁原理探討，有助於對TDR 適用性與研究發展更進一步了解，自從Topp 等人於1980 年提出含水量的推估公式，TDR 技術迅速發展至今。

時域反射儀技術監控技術，有助於得到即時地、準確性

地得到結合工程上的參數，如含水量、密度、水力傳導係數等性質，在設備上能TDR 系統提供簡易組合，維修簡便，且能源並非需要長期供應，經濟效益上較其他監測設備系統佔有優勢。故本研究計畫目的是期望能引進更準確及可以更廣泛的運用在山坡地監測的技術，以減少及避免坡地災害的發生。

## 參、 行程

本研習計畫始於100年9月13日至100年12月12日止

9月13日至9月14日 前往美國洛杉磯

9月14日 前往拜訪UCLA Jiun-Shyan (JS) Chen教授及參觀其實驗室

9月16日 UCLA學校開學及開始旁聽相關科系課程並開始於實驗室參與研究及實習

10月11日至10月12日 參與現場實驗儀器及器材之檢查、保養及耗材更換

11月14日至11月15日 參與現場實驗儀器及器材之檢查、保養及耗材更換

12月12日 完成研習

## 肆、 研習過程與內容

### 一、 美國加州大學洛杉磯分校(UCLA)

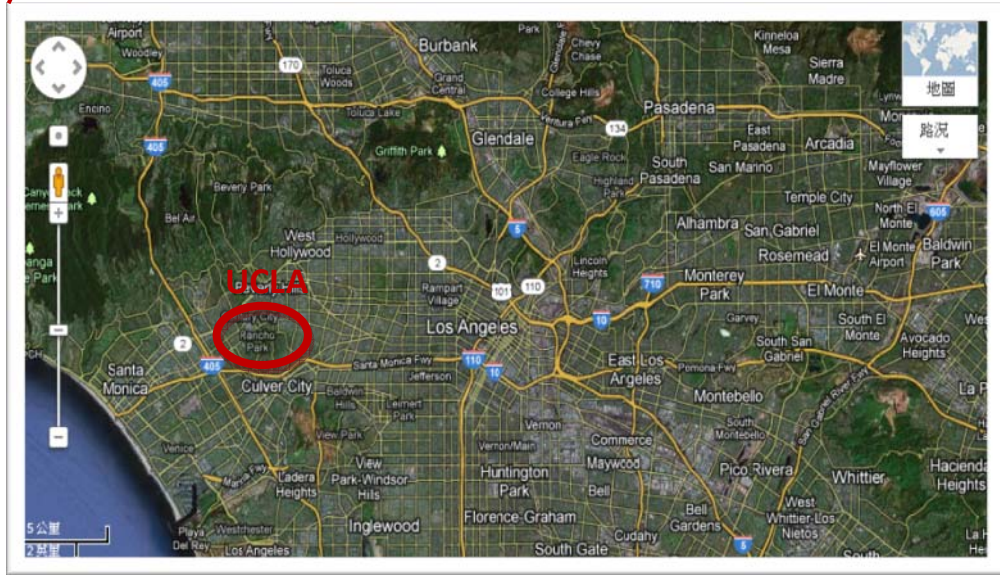
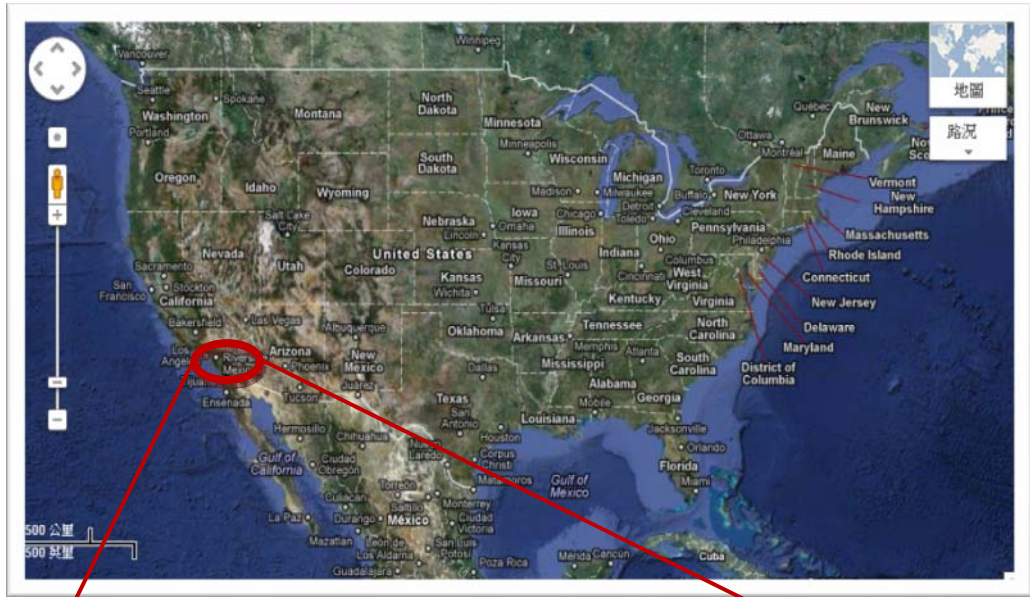
加州大學洛杉磯分校(University of California, Los Angeles, 縮寫為UCLA)創立於西元1919年，位於美國本土西岸加利福尼亞州洛杉磯市，屬於加州大學系統中的其中之一，為一所公立研究型的大學，是美國享譽盛名的高等學府。



圖一 UCLA 校徽

該校目前在世界大學科研影響力排名中位列全球第4名；在泰晤士高等教育世界大學排名中位列全球第11名，美國第8名；在世界大學學術排名中位列全球第13名，美國第11名。先後共有14名校友獲得諾貝爾獎。





圖二 UCLA位置圖

目前UCLA的工學院在全美排名為第13名，屬於頂尖的研究大學，此次筆者前往該校 Civil and Environmental Engineering 部門的 Jiun-Shyan (JS) Chen 教授所帶領的研究群，參與研究與研習，目前JS Chen

教授為該部門的系主任，其專長為非線性方法的機構破壞力學及利用有限元素分析方法建構材料的應力分佈、變形狀況、震動方式及破壞狀況等，並開發相關程式幫助計算及利用相關儀器設備監測來做輔助等相關之研究。

筆者在抵達UCLA後，除參與JS Chen教授研究室的相關研究、每周數次的研討會並修習該校數門與筆者研習相關的基礎課程，筆者研習期間與恰好為該校一個學期，該校為一年四個學期制，筆者修課時能順利上滿一整個學期。



圖三 UCLA 吉祥物 Bruin Bear

## 二、 TDR簡介、訊號、波形及分析

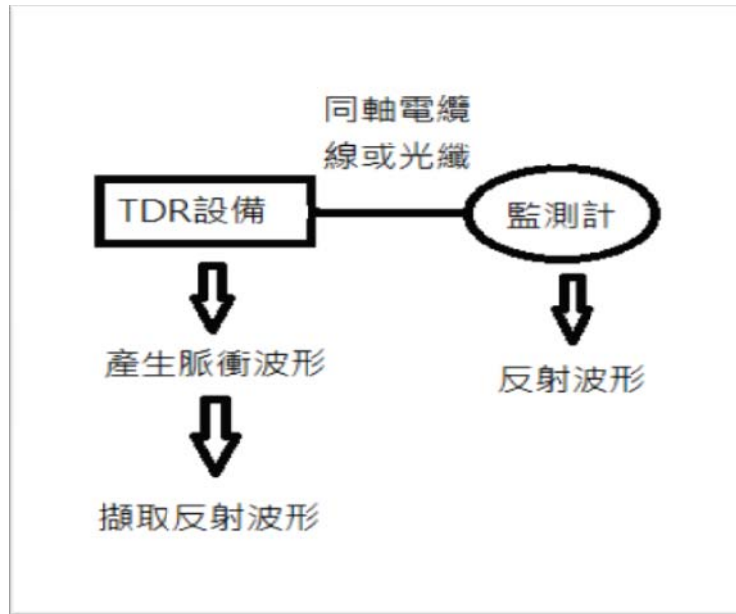
### (一) TDR簡介

TDR (Time-domain reflectometry 時域反射技術) 是源於早期有線電視電纜維修時，為有效找出電纜損壞之處，用以快速檢測有線電視同軸電纜(CATV coaxial cable)變形損害位置之方法，利用儀器產生電磁脈衝將時域反射儀所發出的訊號打入有線電視同軸電纜，將在電纜損壞變形處因為變型而產生特徵阻抗與原有電纜相異而導致電磁波反射，利用電磁波反射來回的走時 (travel -time)可以找出損壞位置。



圖四 TDR儀器

TDR 的組成包括電磁脈衝電壓產生器 (pulse generator)、同軸纜線(coaxial cable)或是光纖及監測器(measurements)。目前TDR 儀器設備已結合發波、收波與示波等功能。



圖五 TDR組成示意圖

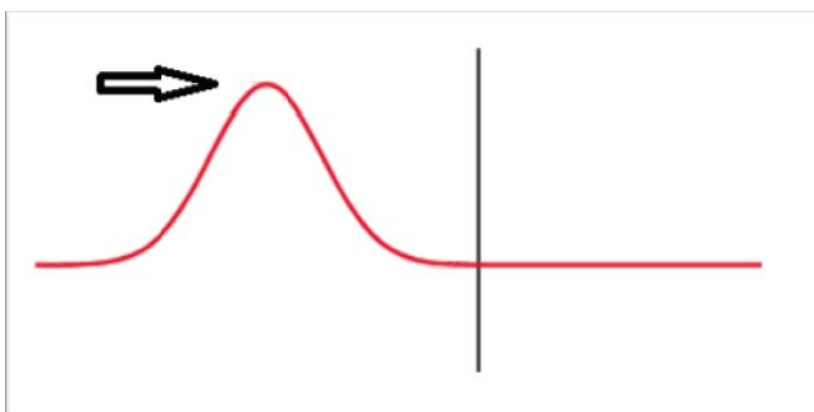


圖六 TDR 示意圖



TDR設備產生電磁脈衝，電磁波經由端頭進入不同介質之間，不同介質造成傳輸速度或特徵阻抗的改變得到不同訊息反彈的變化圖，藉以了解材料特性，並可推求量測介質的組成與變化情況。

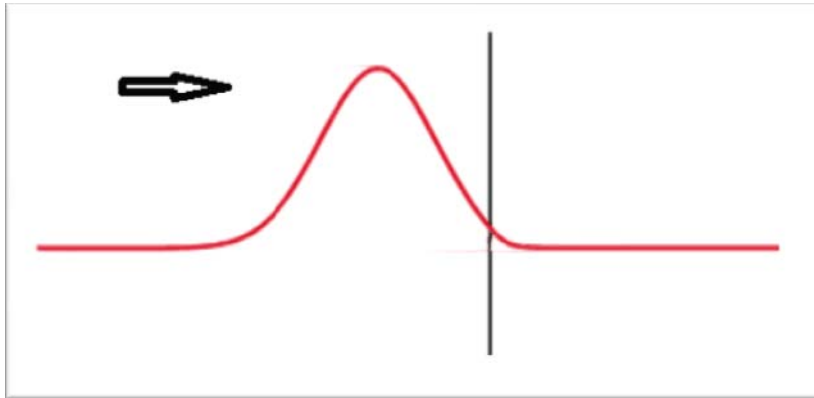
當時域反射儀(TDR)產生電磁脈衝波傳入監測儀器中，其脈衝以一定速度跟波形進入傳遞電纜進入監測儀器前，因其介電材料性質差異不大，故其阻抗等相當，波形幾乎不變，原波形以一維方式行進。



圖七 TDR產生脈衝(一)

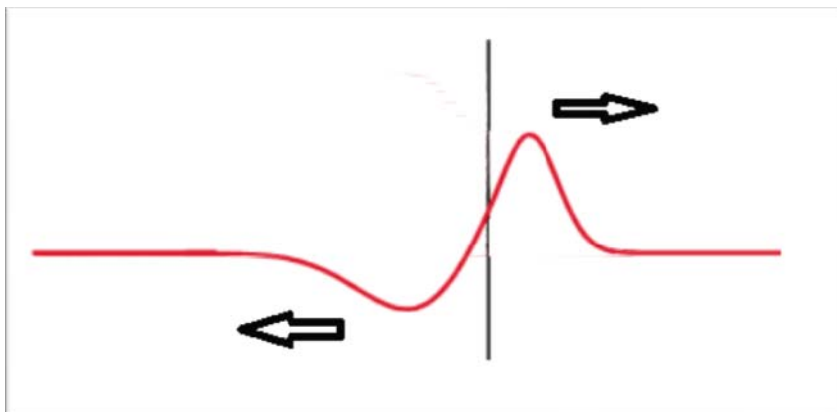
當電磁脈衝藉著電纜傳遞將進入監測儀器時，遇到介電性質不同的傳遞物質或監測儀器產生形變後，該電磁脈衝波形將產生形變與反射等現象，此為電磁脈衝波在傳遞上的物理性質，吾人即以該波形的形變及反射量等物理性質來研究判斷，所處是何種性質的介質與形變

量等。



圖八 TDR產生脈衝(二)

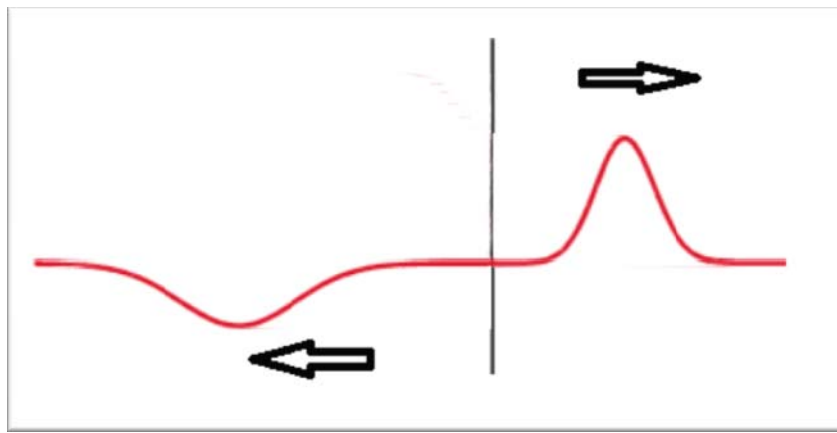
當電磁脈衝進入監測儀器後，因其介電性質產生變化，其電磁脈衝將產生第一次形變及反射，造成部分能量反射沿著電纜被時域反射儀儀器接收，另一部份能量沿著原方向繼續前進。



圖九 TDR產生脈衝(三)

電磁脈衝波分為反射跟朝原方向前進兩部份，被反射部分，其波形訊號將被TDR儀器擷取並記錄，研究人

員將依照其波形特徵加以判視，監測器所處之情況，另原方向前進之波形若遇到下一個變形或不同介質之物質，將會再次產生波形形變與反射，直至到監測器之終端的最後一次的反射，此為TDR監測儀器設備的概略過程。



圖十 TDR產生脈衝(四)

TDR 技術在工程運用方面可區分為使用介電原理與破壞機制監測兩類。早期Fellner-Feldeg(1969)首先使用TDR 量測液體之介電常數，Davis 與 Chudubiak (1975)發現土壤的介電常數值與含水量有密切關係。之後Topp 等人(1980)建立粗顆粒土壤介電常數與含水量的簡易關係式，並使用體積含水量(volumetric water content)觀念，開啟對於大地工程上之運用

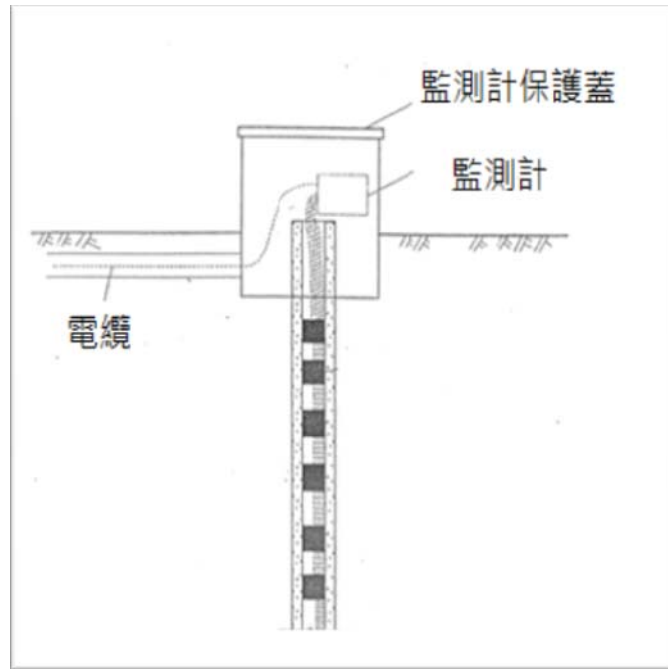
後期研究人員即利用電磁波碰到物體產生回彈訊號

被接收器接收，藉由分析回彈後的訊息，可得傳輸於介質之間特性，如介電常數、傳播速度(propagation velocity)或特徵阻抗(characteristic impedance,  $Z$ )等特性，將同軸電纜安裝在潛在滑動邊坡的鑽孔內，可監測地層錯動造成的纜線變形，或是將其在不同介質中會產生不同反射的訊號特性，加以利用，研發出監測地下水位等相當有用的技術，且TDR 具有維修少，免電源長期供應，準確性高之優勢，且不受量測深層限制，因此能偵測深層下的環境改變。



圖十一 TDR 監測計





圖十二 TDR 監測計示意圖

## (二) 訊號、波形及分析

筆者在加州大學洛杉磯分校三個月期間，在相關系所修習電子訊號及波形的分析基礎課程，因該校係屬QUARTER制，即為一年四個學期制，筆者前往研習期間剛好為該校開學，幸而可以完成一整個學期的課程研修，因筆者所學為土木工程，對電子訊號較少涉獵，雖之前有向相關專業人員請益，但仍無法一窺全豹，該校的相關系所所開的相關電子訊號及波形分析之基礎課程，對筆者所研習的TDR監測波形分析，有相當大的裨

益，以了解TDR在物理性質在用在監測方面使用上的優劣勢，以及該電磁波傳遞上的雜訊產生及限制等相關知識。



圖十三 UCLA 校園一景

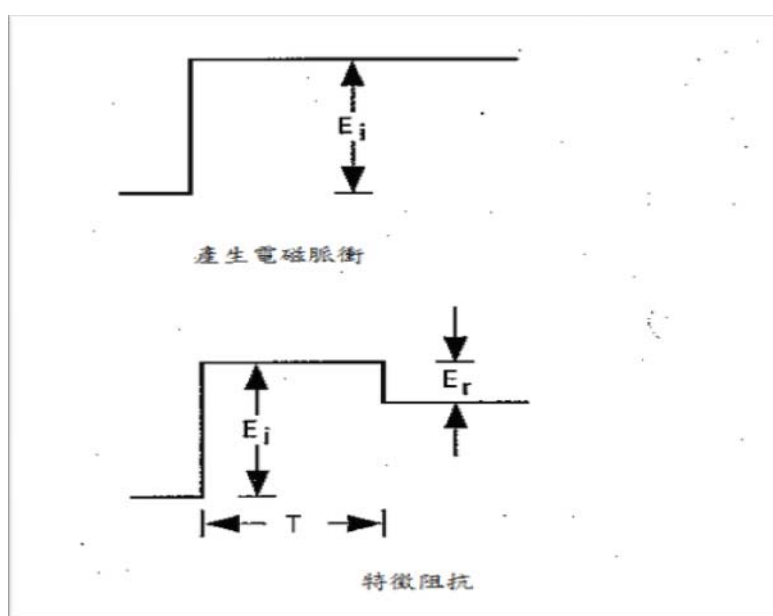


圖十四 課堂情況

由於電磁脈衝波形相當複雜，筆者在UCLA其間所修

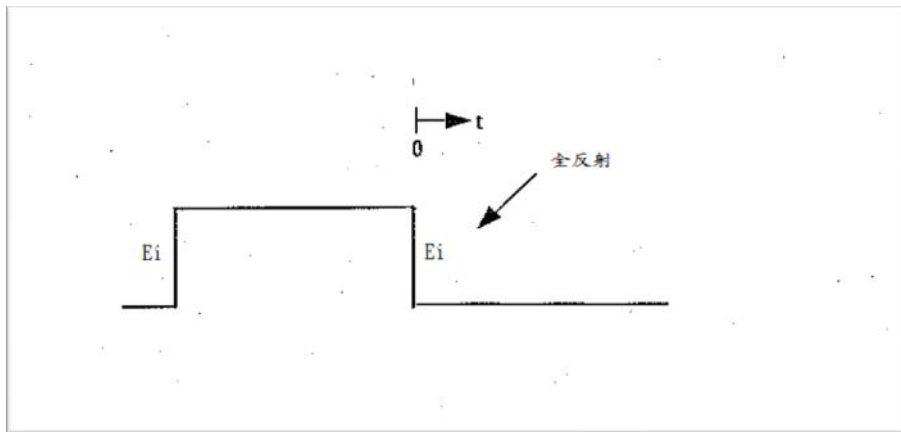
習之基礎課程，亦介紹包含其他相關儀器之產生及反射波形分析，筆者謹摘錄該相關之內容如下。

首先，當儀器設備產生一組脈衝波形，其電位位階為 $E_i$ ，其波形沿著傳遞物質，如同軸電纜線或是光纖，將波形資料傳遞至監測計內，此時因監測計所使用之材料與同軸電纜線或是光纖的材料不同，產生不同介面，造成波形的反射與類似透射的作用，而儀器將接收到波形反射的資料其波形會有一個 $E_r$ 的波形差， $E_r$ 不一定會造成波形的下降或上升，皆端視所處介質的材料狀況而定。如下圖所示，一般而言在示波器上所顯示的波形會受同軸電纜或光纖等中間介質的長度等關係，產生其他雜訊，而使得波形變化上會較為複雜。



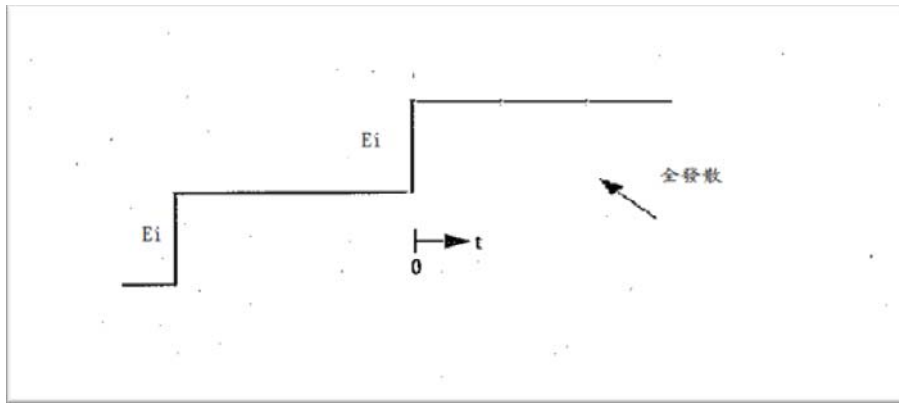
然而將電磁脈衝波傳遞至儀器上的波形簡單分為幾類如下，

電磁波波形在傳遞中遇到閉路狀態，該電磁波的反射跟原始產生的電磁波的位差相當，此時位差 $E_i$ 幾近完全反射後讓被擷取。



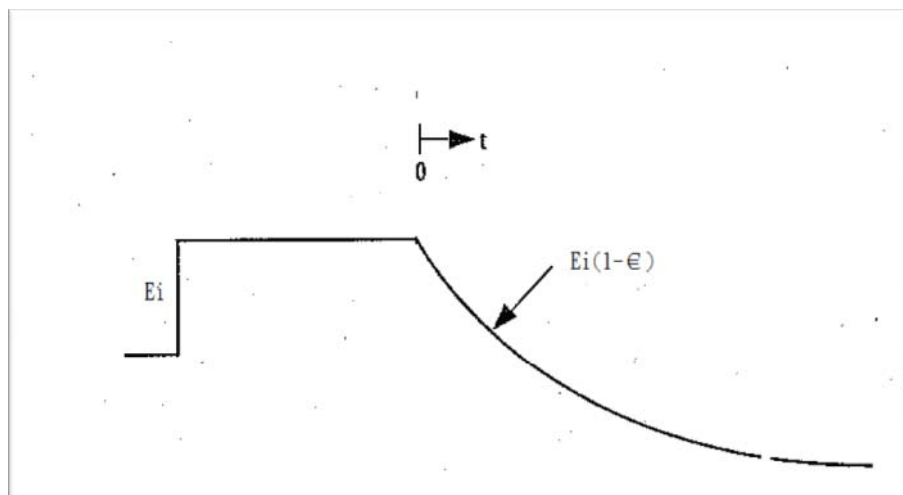
圖十六 全反射波形

而當電磁波在傳遞介質中遇到開路狀態，其電磁波位差會產生再次躍升，幾乎為原波形的兩倍的狀態，此即稱為全發散。



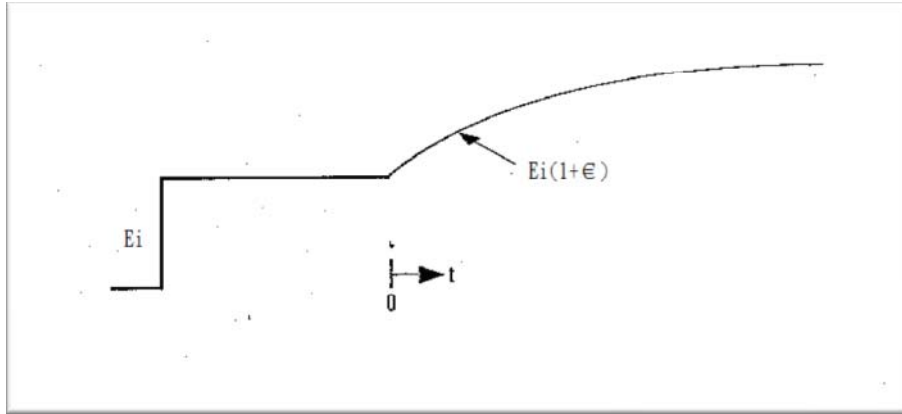
圖十七 全發散波形

當電磁波傳遞到裝有電感 (Inductance) 之儀器後，其電磁波位差之波形會以某種形式逐漸遞減，其遞減的速度與位差與該電感的長度與材料性質有關。



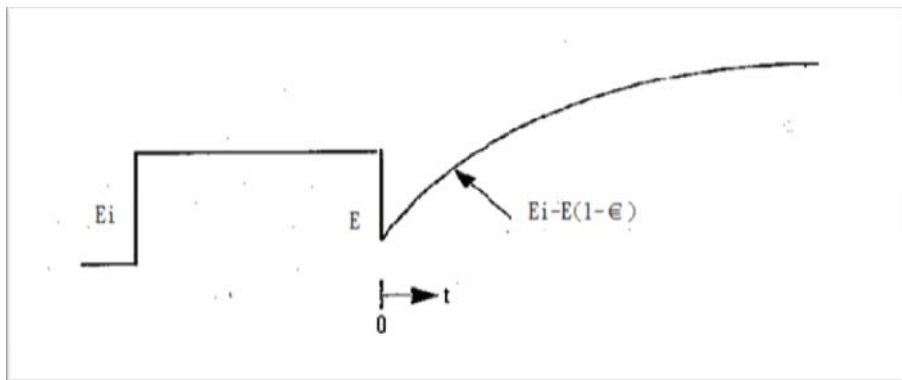
圖十八 遞減波形

若電磁波傳遞到裝有電容 (Capacitance) 的儀器中時，因電容產生導線間的電壓差，其控制單位長度之內外導體間的電壓故會造成電磁波的位差遞增。

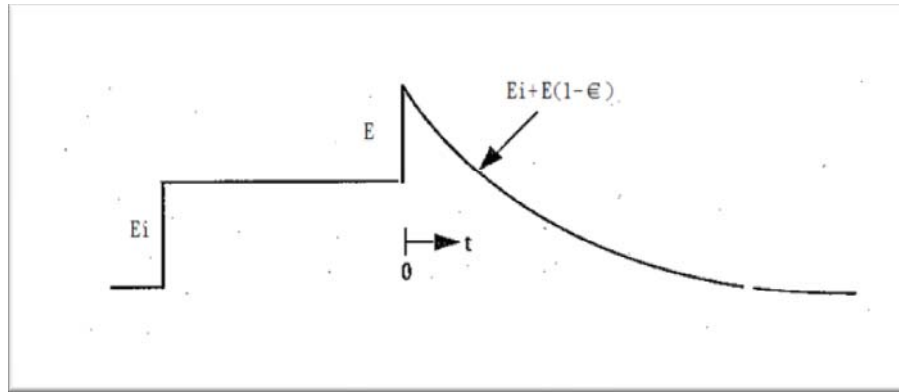


圖十九 遞增波形

另電磁波可能傳遞到其他複合性材料的監測儀器中，該儀器含有的材料可能造成波形的反射及遞增現象或是遞減現象，端視材料性質而定，而且所產生的位差現象亦不定，故當儀器設備要使用前都要經過率定的過程，以確保實驗的準確性。



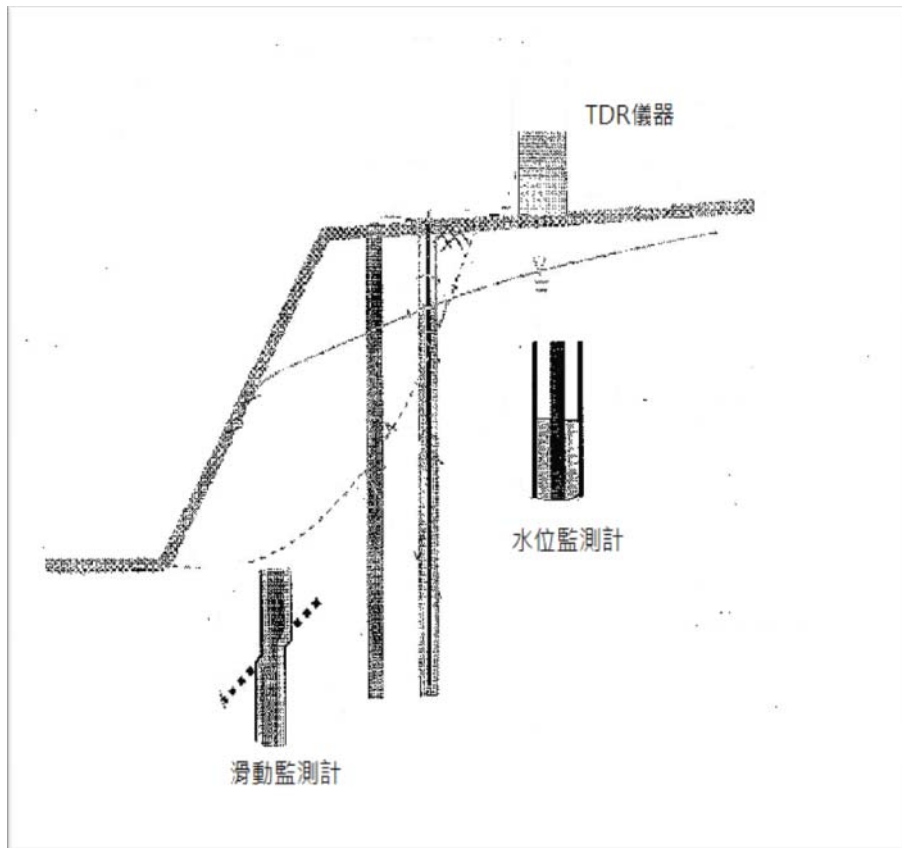
圖二十 複合波形1



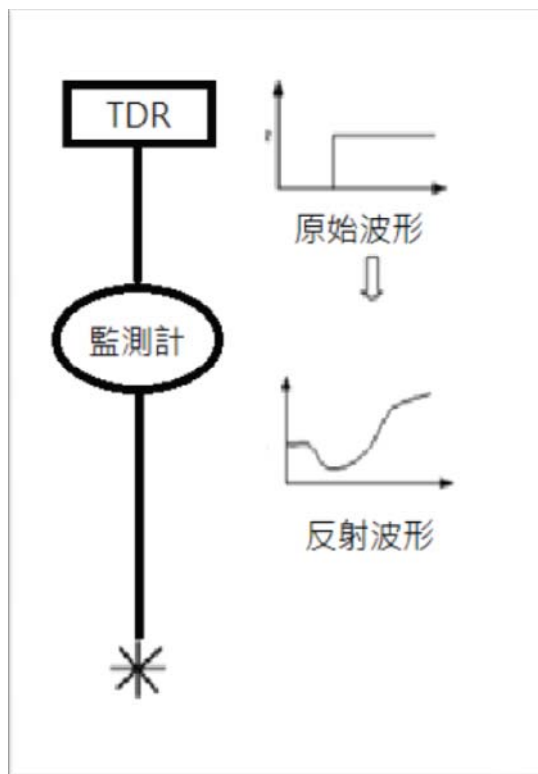
圖二十一 複合波形2

### 三、TDR應用

TDR儀器設備乃以電磁波的物理特性發展，故由其反射波形可以加以研判介質特性，然在大地工程及水保工程上的應用可以將其監測計埋設在邊坡來監測地層是否因發生滑動而變形，因其TDR設備的電磁波擷取相當靈敏，地層若發生些微滑動，在示波器上即可以出現特徵阻抗，會產生特殊波峰，監測人員則可馬上發覺地層變化；另地下水位之監測方面亦同，因監測計之所處介質材料會造成電磁波反射波形的變化，該地下水位的上升與下降亦會造成示波器上的變化，以便吾人監測時的判視。



圖二十二 TDR監測儀器埋設圖





在美國當地，該地因屬大陸型氣候，年降雨量較少，雖在山區等坡度較陡的地區，仍有零星崩塌或土石流等情形，惟因該國較台灣而言屬地廣人稀，故較不具保全對象，其所採取的方式傾向任其發生，故其監測機制較不用在山坡地之監測範圍，而比較常使用在公路邊坡等地區，因該地區之公路除十分陡峭之山壁旁施設擋土牆外，其他幾乎未設施擋土設施。

筆者所參與研習的團隊，係針對公路邊坡及公路邊坡旁海岸侵蝕崩塌做相關實驗研究。在加州洛杉磯西邊的Santa Monica，其公路旁的邊坡高約十二公尺，未施設相關之擋土設施，平時因該土層強度足夠，足以自立，而下雨時常會有零星落石發生，影響交通安全，而因為Santa Monica為加州南部的一觀光勝地，該地係洛杉磯最受歡迎的海灘之一，故該公路車流量十分龐大。



圖二十四 Santa Monica 公路邊坡

另一個地點在加州中部的Monterey Bay的海岸侵蝕帶，其邊坡上方有一條洲際公路通過，且該路線沿海濱建造，通過加州多數觀光景點，車流量亦多，其邊坡高度約為十公尺，因海浪拍打及潮汐關係，其岸邊正在崩塌退縮。

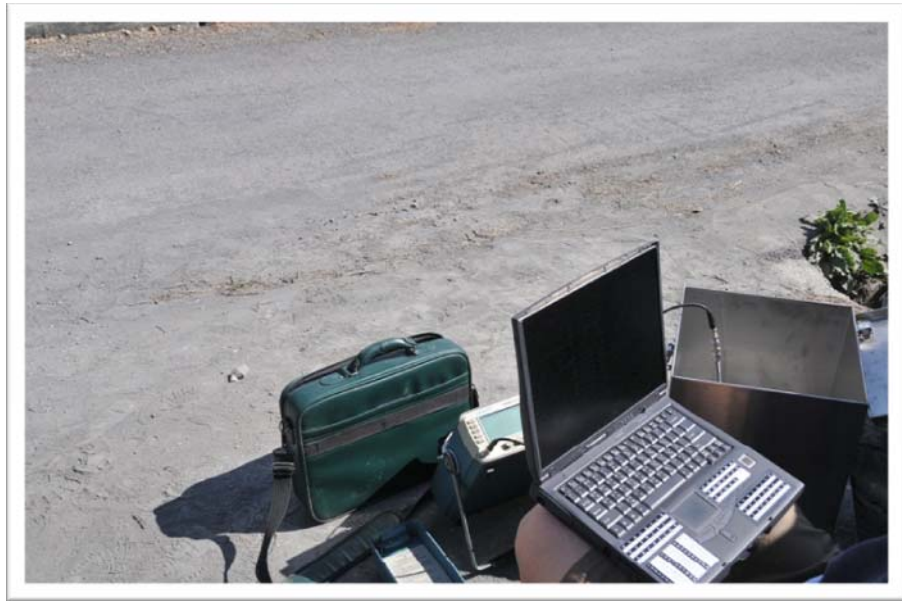


圖二十五 Monterey Bay 海岸侵蝕帶

研究團隊在邊坡坡頂裝置TDR監測計，該監測計埋設於邊坡土層中，並與TDR設備連接，如此即可獲得該地邊坡的電磁脈衝反射波形，研究人員藉以判斷該地是否有產生滑動或是崩塌之虞。



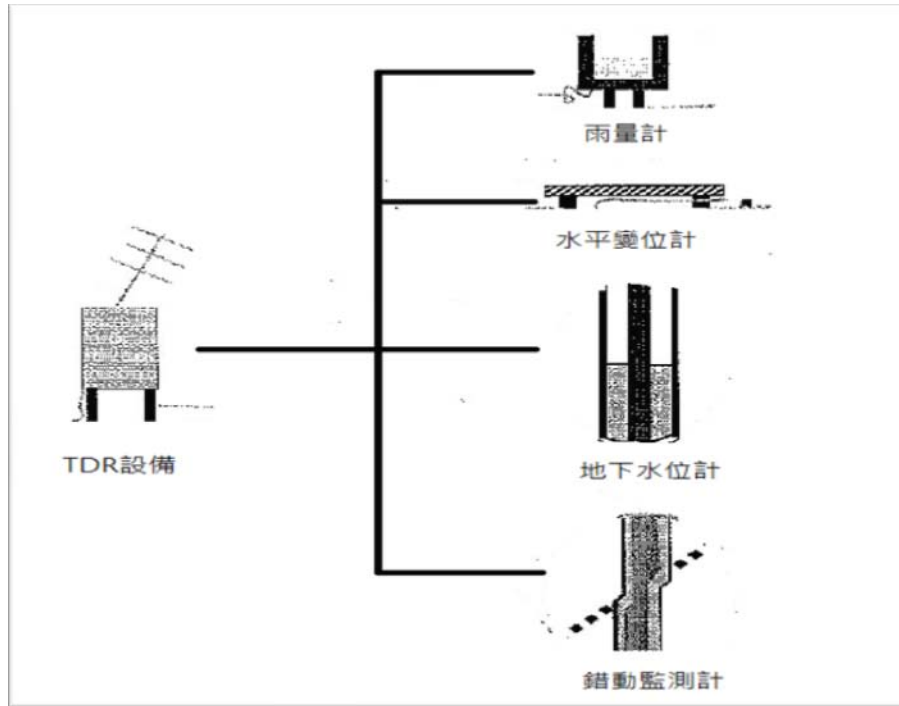
圖二十六 TDR設備及監測計



圖二十七 TDR監測設備

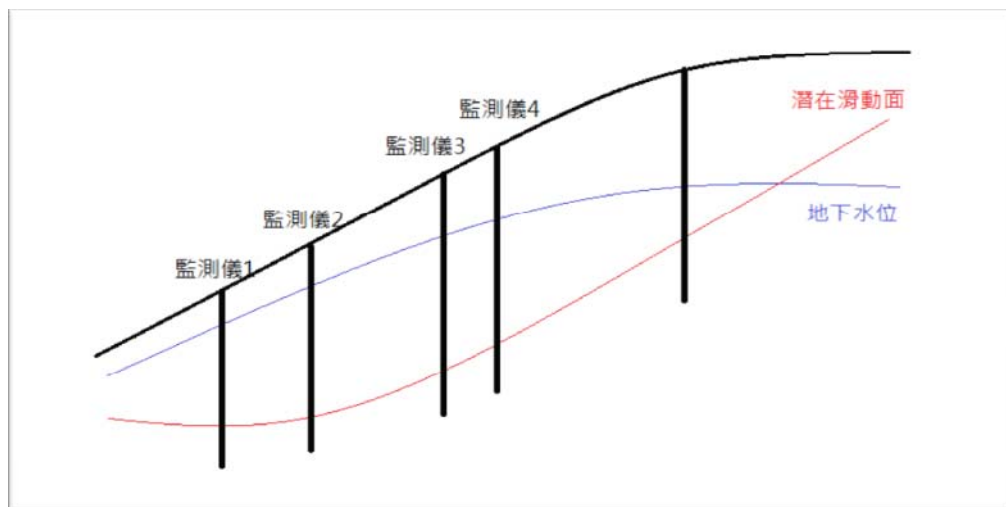
#### 四、TDR監測系統

因TDR設備係擷取電磁波波形的特性，所以該設備可以使用的範圍非常廣泛，其監測計進入不同環境的介質可使電磁波反射波形產生特徵阻抗的波形，故可使用雨量計；其監測計被拉伸可使電磁波反射波形產生變化，故可使用於水平變位計；而地下水位計與雨量計的概念發展相似；使用在錯動變位計時，乃係利用其監測計產生錯動時，反射波形的特徵阻抗特別明顯。是以TDR監測設備因其使用廣泛的因素，故發展非常迅速，且於大地工程上的貢獻可期。



圖二十八 TDR連接各種監測器示意圖

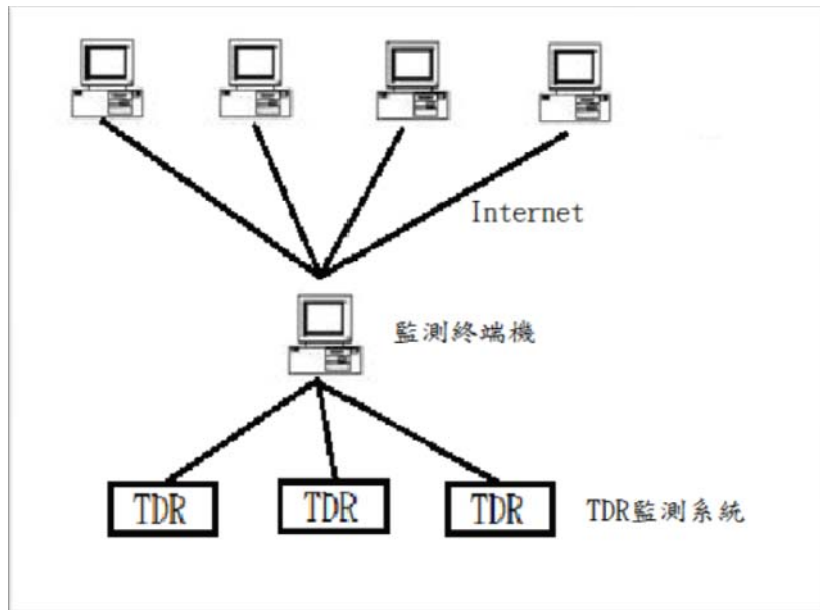
另TDR設備使用於大面積滑動地層時，將監測計依序埋設於坡面，將可依據該設備所測得的資料加以判斷該滑動之滑動深度，且亦可得出地下水位高度及其變化情形。





圖二十九 TDR監測大面積滑動區示意圖

TDR監測設備在網際網路的配合下，可以建構一系列資訊化的監測系統，以能達到任何時間，任何地方，只要能與電腦連接上網，就能查詢現場邊坡即時資訊的監測目標。

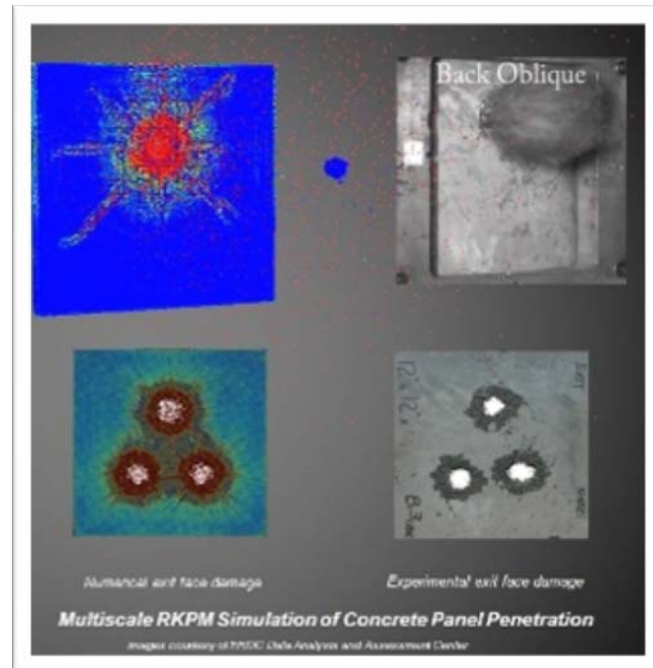


圖三十 TDR使用於Internet示意圖

## 五、實驗室其他研究簡介

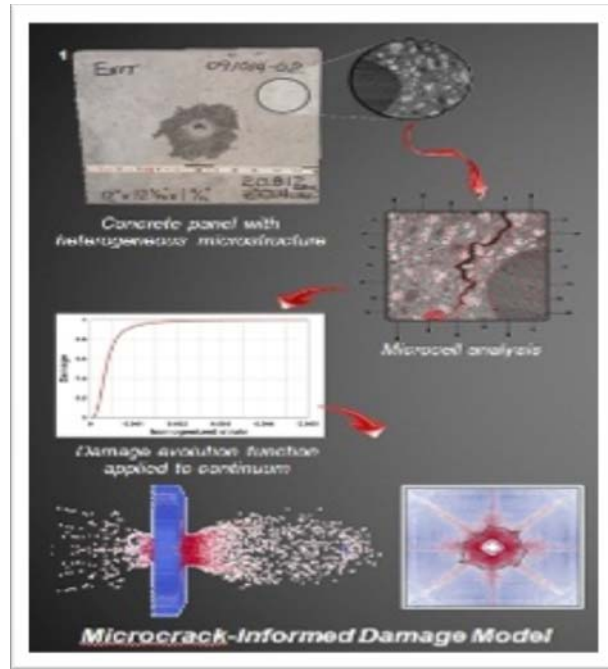
- (一) JS Chen教授所帶領的研究群，目前亦正研究針對高速進行之子彈對高強度混凝土板所造成的破壞的數值模擬，模擬其破壞、裂隙、應力及應變等的分佈情形，下圖為其數值模擬的情形與實際子彈打穿混凝土板的實際狀況做比對，其結

果與實際狀況之破壞情形，裂隙發展延伸的情況相當類似，表示其數值模擬的開發已經相當成熟及精確。



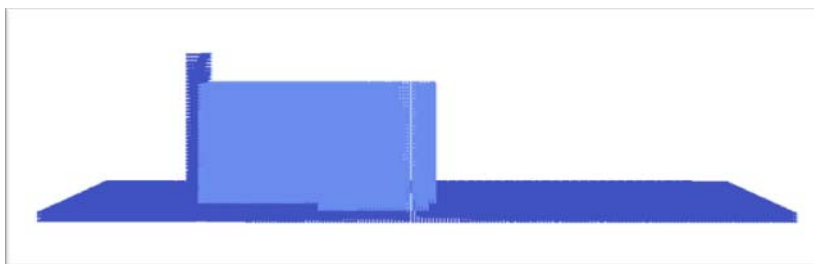
圖三十一 子彈打穿高強度混凝土板之情況(摘取自UCLA土木系網頁)

該研究並利用高速攝影機將子彈打穿高強度混凝土板的過程加以記錄，該研究團隊之數值模擬仍可以將子彈打穿時混凝土板碎屑的飛散狀況模擬出來，並將速度、衝量等加以分析是否會造成躲避在混凝土後方人員的傷害等。



圖三十二 子彈打穿高強度混凝土板應力分佈(摘取自UCLA土木系網頁)

(二) 挖土機挖土時之模擬研究，該研究係針對挖土時土體的破壞狀況及應力分佈情形加以分析，以求工程機具在工作時能有較高的效率，下圖係模擬挖土機挖斗插入土體的狀況。

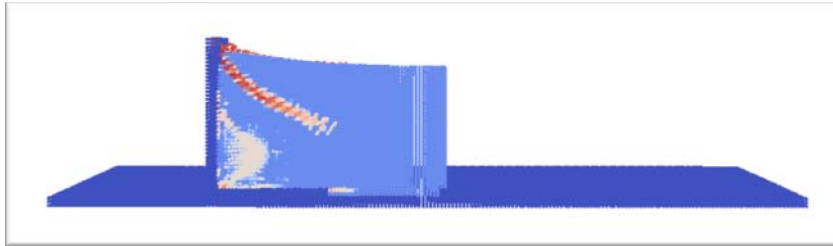


圖三十三 挖土機挖土體的狀況(一)

挖土機挖斗抬起，土體開始發生應力、土體變形，產生裂隙，紅色區域為土體裂隙發展及延伸

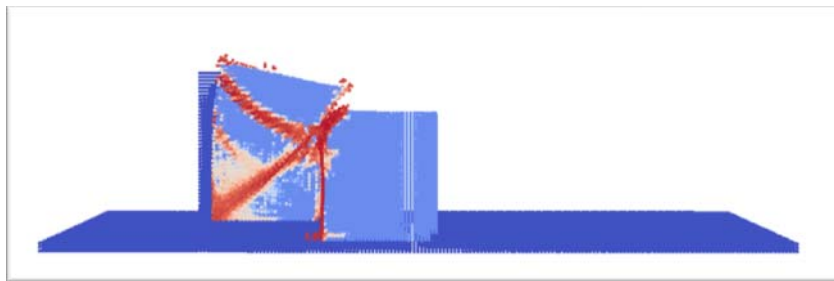


狀況，其表示土體之阻抗或凝聚力不足以抵抗所產生的應力，即將發生滑動等現象。



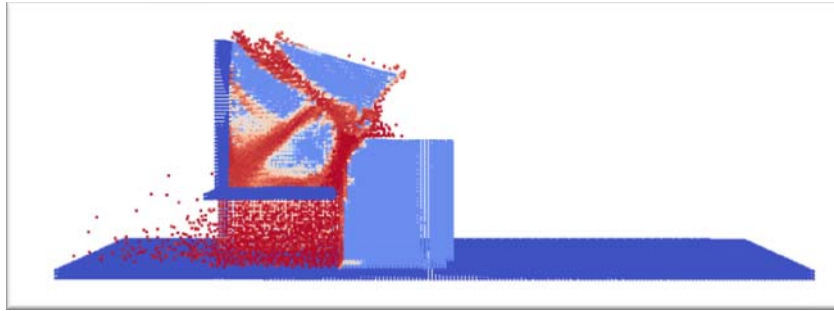
圖三十四 挖土機挖土體的狀況(二)

當挖斗繼續抬起時，土體產生較大變形及分裂成塊體，大約會分裂成三大塊體區域，並開始沿著裂隙產生滑動現象。



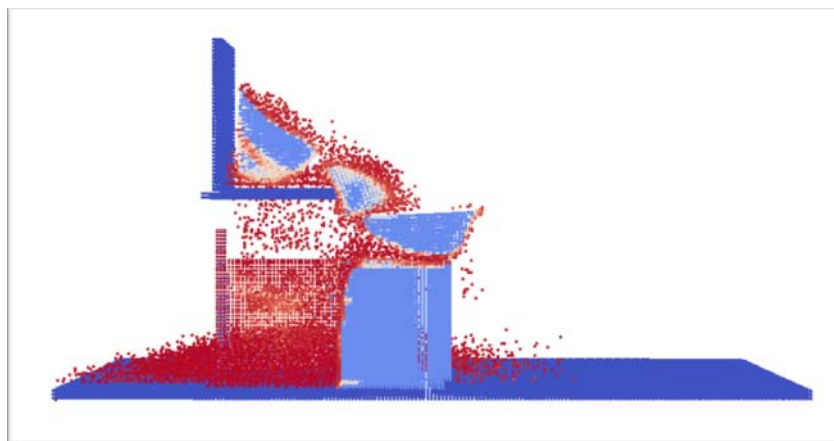
圖三十五 挖土機挖土體的狀況(三)

挖斗升高時，塊體裂隙之阻抗及凝聚力持續降低，細顆粒變多，滑動現象明顯，塊體將跌出挖斗外。



圖三十六 挖土機挖土體的狀況(四)

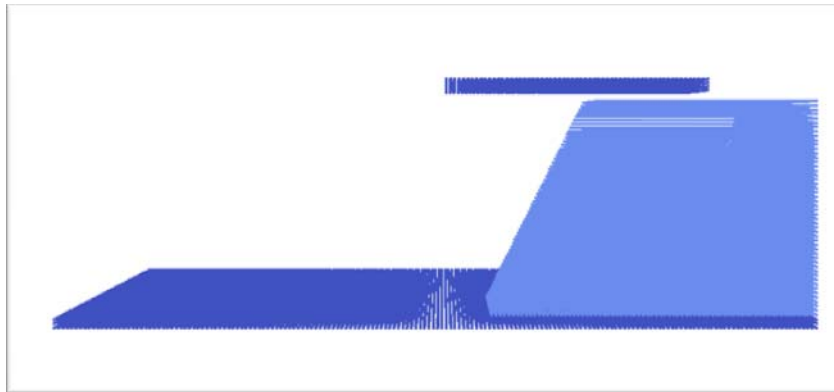
挖斗升至預定高度時，大部分之土體滑落至挖斗外，且多數區域分裂成細顆粒狀態，挖斗內僅約剩三分之一土量。此為挖土機挖土之模擬，該土體之分裂狀況會依挖斗之插入角度、速度等的影響，如此以持續以不同變數進行模擬以求得最多數量之挖土方式，來達到工程最大效率化。



圖三十七 挖土機挖土體的狀況(五)

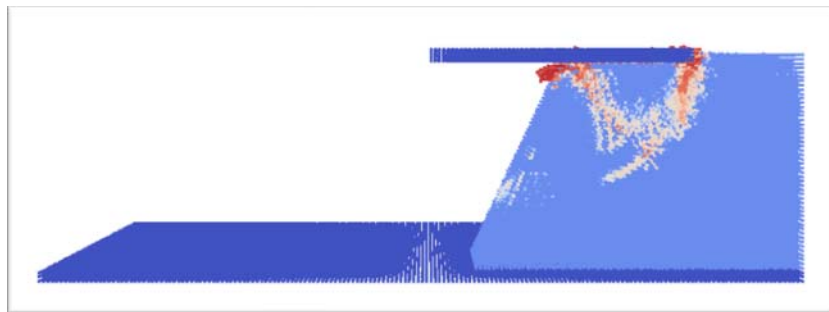
(三) 邊坡崩塌狀況之數值模擬，因模擬邊坡崩塌時難以用自然邊坡崩塌時之狀況加以驗證，其原因在

於自然邊坡崩塌難以用實驗方式加以產生，且現實狀況部仍許之故，是以模擬時用加載重的方式模擬，其相關參數用於自然邊坡時加以修正可得接近實際狀況的模擬系統。下圖為加載重前邊坡的狀況。



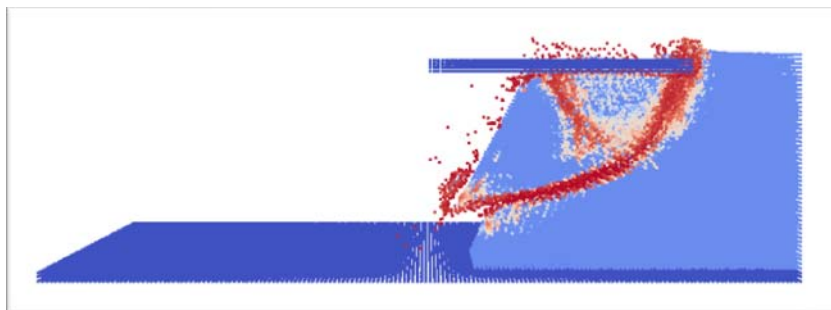
圖三十八 邊坡加載重狀況(一)

邊坡開始加載重，土體發生應力，紅色區域為土體應力大於土體之凝聚力及抵抗力，並發生土體碎裂為細顆粒狀態，並土體分裂成土塊狀態。



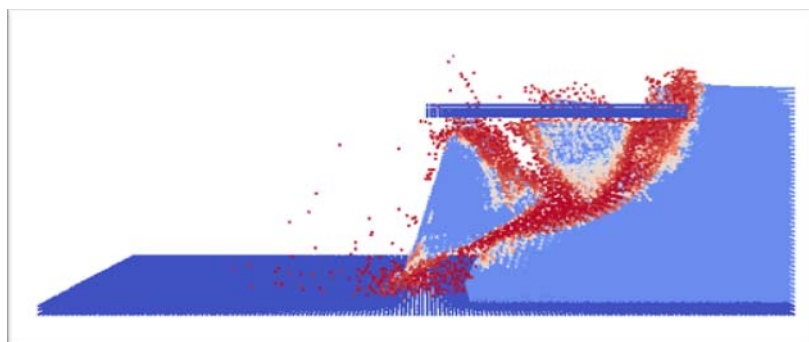
圖三十九 邊坡加載重狀況(二)

持續加壓下，土體裂隙持續擴大，細顆粒變多，土體並產生大規模向下滑動及崩壞。



圖四十 邊坡加載重狀況(三)

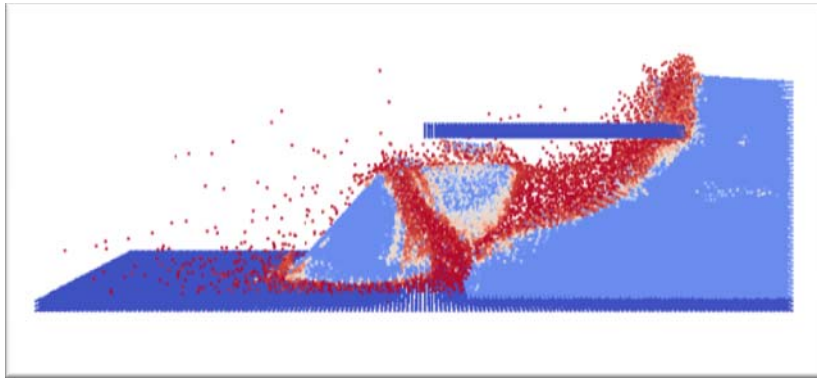
土體凝聚力及抵抗力持續下降，細顆粒增多，並產生大規模崩壞，，迅速往下方滑動，並開始觸及下方平坦區域。



圖四十一 邊坡加載重狀況(四)

土體迅速崩落並掩埋下方區域之狀況。此為邊坡崩塌之模擬，其可利用於邊坡之破壞狀態及破壞時間，若加以實際應用，模擬出崩塌規模、深度及掩埋範圍等，可利用來規劃崩塌災害之發生範

圍等作用。



圖四十二 邊坡加載重狀況(五)

另外在JS CHEN教授的實驗室還有部分研究在進行，例如以有限元素法來計算DNA的應力或是其他生物細胞上的應力分佈等，因筆者在該實驗室的研習時間較短，無法進行涉獵，此事較為遺憾。

## 伍、研習心得與建議事項

- 一、台灣地區因地形與氣候因素，土石災害發生頻仍，如何避免，除工程方法防止外，需加強防災及避難技術，以減少人員傷亡。防災方面藉引進新技術加以輔助，確能增加疏散的時間及災害發生時間的準確度。此次筆者前往美國加州大學洛杉磯分校研習TDR防災應用，在土石邊坡崩塌的監測上，具有即時及準確的特性，且以監測經費方面而言，屬於相當低廉。目前而言，其他相關監測方法所需費用仍較為昂貴，無法普及於台灣各處具有保全對象的危險崩塌地或危險聚落，故使用TDR監測技術在邊坡崩塌方面乃屬上選。
- 二、筆者研習期間從TDR此種新技術的基礎訊號波形的分析學習課程，該項技術目前著重於以變形回傳之訊號來判斷地層或是相關介質的形變位置，或是介質性質改變的微弱訊號變化藉以分析電磁脈衝進入何種介質等技術，目前此兩項技術運用在工程上係在於邊坡崩塌上的變形監測、橋梁變形的監測、海岸沖蝕監測、水庫壩體安全性監測、地下水位變化

監測等。TDR的電磁脈衝進入不同介質會有訊號變化的性質，運用在分辨介質物理特性，進而用以開發分辨介質基質的材料等，其應用在大地工程上，則能運用在分辨土壤性質、含水量、土壤成分等資訊。

三、 TDR監測技術，因其介面普遍相容，連接上網際網路後，可使監測的資訊隨時隨地可取得，透過防災機制的整合，對防災方面有十分大的幫助，且其經濟性的條件，建議可在具防災保全對象之崩塌地佈設監測儀器，以期增加危險地區居民的疏散避難時間，並預期將可大量減低傷亡及財產的損失。

## 陸、參考文獻

楊弘倫，黃偉慶，2004，“時域反射儀應用於土壤含水量及地下水監測技術”，碩士論文。

葉志翔，林志平，2003，“TDR 邊坡資訊自動化監測系統”，碩士論文。

楊清良，“運用時域反射技術與傾斜管觀測在量測地層變形之適用性研究”，碩士論文

湯士弘，林志平，鐘志忠，2005，“時域反射技術應用於邊坡監測—成效與問題”。

林志平，周家榮，2001，“時域反射儀在大地工程量測之應用”，土工技術，第 83 期，民國九十年二月，5-12。

周家榮，2001，「時域反射圓錐貫入器與孔內裝置之研發」，國立交通大學土木工程研究所，碩士論文

盧吉勇，2003，“TDR 錯動變形量測之研究”，國立交通大學土木工程學系，碩士論文。

廖瑞堂，2001，“山坡地護坡工程設計”，理工圖書。

楊培熙，2003，“TDR 水位量測技術在大地與水利工程之應用”，國立交通大學土木工程學系，碩士論文。

HP 54120T Digitizing Oscilloscope and TDR User Manual，1988

Mitsuhiro Tateda and Tsuneo Horiguchi (1989) Advances in optical Time-Domain Reflectometry.

Amato, M. and Ritchie, J.T. (1995). “Small Spatial Scale Soil-water Content Measurement with Time-Domain Reflectometry.” Soil Science Society of America Journal, Vol. 54, pp. 1-6.

Annan, A. P. (1977). “Time Domain Reflectometry-Air Gap



Problem for Parallel Wires Transmission Lines, Report of Activities, Part B." Geological Survey of Canada, Vol. 04.08, pp. 77-84.

ASTM, D6758-02 (2002). Standard Test Method for Determination of Water Content and Density of Soil in Place by Time Domain Reflectometry (TDR), Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08, pp. 1311-1320.

DOWDING, C.H., HUANG, F-C, AND MCCOMB, P.S. (1996), "Water Pressure Measurement with Time Domain Reflectometry Cables," Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 19, No. 1, pp. 58-64.

Dowding, K. J., Beck, J. V., and Blackwell, B. F. (1999). " Estimating Temperature - Dependent Thermal Properties," Journal of Thermo physics and Heat Transfer, Vol 13, No. 3, pp. 328-336.

Klemunes, J.A. Jr. (1995). " Determining Soil Volumetric Moisture Content Using Time Domain Reflectometry," M.Sc. thesis, University of Maryland.

Lin, C.P. and Tang, S.H. (2003), "Development and Calibration of a radar extensometer using Time Domain Reflectometry" , Geotechnical Testing Journal (in review).

O' CONNOR, K.M. AND DOWDING, C.H. (1999), GeoMeasurement by Pulsing TDR and Probes, CRC.

Topp, G.C., Zegelin, S. and White, I. (2000). "Impacts of the Real and Imaginary Components of Relative Permittivity on Time domain Reflectometry Measurements in Soils." Soil Science Society of America Journal, Vol. 63, pp. 1244-1252.

Noborio, K. (2001). "Measurement of Soil Water Content and Electrical Conductivity by Time Domain Reflectometry: a Review," *Computer and Electrical in Agriculture*, Vol. 31, pp. 213-237.

Whalley, W.R. (1993). "Considerations on the Use of Time Domain Reflectometry (TDR) for Measuring Soil Water Content." *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, pp. 1-9.

White, I., Zegelin, S.J., Topp, G.C., and Fish, A. (1994). "Effect of Bulk Electrical Conductivity on TDR Measurement of Water Content in Porous Media," *Proceeding of the Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications*, NTIS PB95-105789, pp. 294-308.