

## 科學知識

### 瑞利波的故事--神奇的波之二

方謙光

有一次大文學家蘇東坡和妹夫秦少游在湖邊散步，隨手撿起了一塊小石子兒扔進平靜的湖水之中，水中激起一朵小小的浪花，隨後形成一道道的圓形的波紋，一圈圈地不斷擴大向四周散去。於是蘇東坡指著這一圈圈的波紋對秦少遊說：「你知道什麼是『波』嗎？波乃水之皮也」。秦少遊說：「如果說『波』乃水之皮，那麼『滑』是不是水的骨頭呢」？這麼大的一位蘇學士一時被問的語塞。

暫且不論「波」是不是水的皮和「滑」是不是水的骨頭，在自然界確實存在著那麼一種類似於在液體表面受到擾動後形成的波，一般稱之為「面波」。這種波沿著與大氣層接觸的地表面滾動著向四周傳播，因此也稱之為「地滾波」。地滾波攜帶著巨大的能量，因此在地震發生時給地面建築物造成極大程度破壞的就是這種地滾波。

在 19 世紀末英國物理學家瑞利(Rayleigh)研究發現在半空間(上部接觸大氣層的地表面)存在著一種類似於在液體表面上形成的波。這種波是由自由介面半空間內傳播的縱波與橫波相互選加形成的一種特殊的振動，振動的方向是以逆時針方向轉動，呈橢圓軌跡傳播，此橢圓水準軸與垂直軸之比為 2/3。人們為了紀念這位物理學家就把這種波定名為「瑞利面波」，簡稱「瑞利波」。

通過進一步的研究發現瑞利波有很多奇特的性質：首先是瑞利波沿自由表面傳播的速度與橫波的速度相當，大約是橫波速度的 0.9 倍，是縱波速度的 0.5 倍。從儀器上可以清楚地觀察到，首先到達是縱波，其次是橫波，最後到達的波才是瑞利波。從能量上來看，瑞利波占震動總能量的 67%，橫波占總能量的 26%，縱波只占總能量的 7%，因此從儀器記錄到的波形記錄上，從振動的幅度就很容易識別出瑞利波、橫波和縱波。當瑞利波垂直自由表面向下傳播時，最多只能傳播到一個波長的深度，其中的大部分能量都集中在 1/2 波長的深度範圍之內，人們由此就想到可以利用不同波長的瑞利波來探測不同深度的地層。同時瑞利波還有一種特殊的性質，就是當瑞利波向下傳播到兩種物質的分介面(如土層和岩石)時，瑞利

波就分解成了縱波和橫波。這種波的散射現象又叫做「頻散」，是瑞利波的重要特徵之一，人們正是利用觀察到的頻散現象，來區別和劃分地層。

既然弄清楚了瑞利波的這些特徵，瑞利波又有什麼用途呢？首先人們想到利用瑞利波的這些特性進行地質探測。1940年前後，美國軍方曾研究利用瑞利波來進行飛機場地下探測，不知是什麼原因，沒有能取得什麼成果，後來就放棄了。1976年日本地球物理學家佐藤長範經過了十八年的努力，終於研製成功了第一台完全利用瑞利波原理的探測儀器--佐藤式全自動地下探查機，於1985年第一次運到北京來表演和公開展示，引起了國內工程物探界的重視。我剛剛調到鐵道部的基本建設總局，負責物探專業，因此對一些新的方法技術當然格外留意。我詳細地考察了這個佐藤式全自動地下探查機的結構和原理。這架機器有點向一個車載的物理實驗室，車上裝有一部大功率的汽油發電機提供電力，儀器的震源是一個自重為350公斤，能夠產生250公斤激振力的電磁式激振器，可以根據需要產生穩定的電磁振動，頻率範圍從3000周/秒~0.5周/秒連續可調，其作用是能使得被探測地層產生固定頻率的強迫振動。其接收系統是兩個能把振動信號轉變為電流信號的檢波器，這兩個檢波器安裝在震源的同側，三點一線一字在地面上排開，始終保持固定的距離。當激振器產生振動時離震源較近的檢波器A先接收到振動信號，離震源較遠的檢波器B後接收振動信號，這兩個電流信號同時被輸入到裝在車上的地震儀裏，人們可以通過雙線的示波器同時觀察到一前一後的兩個信號，同時可以在演算器裏把這兩個信號之間的時間差計算出來，送給電腦。既然兩個檢波器間的距離是固定的而且已知，又有了從A到B之間的時間，根據時間和距離很容易地求出波傳播的速度。震源振動的頻率是人為事先設定的，是已知數，因此就可以根據頻率和波速很容易求出波的長度。前面我們已經提到過，瑞利波的主要能量都集中在向下傳播的 $1/2$ 波長的深度之內，由此可以認定 $1/2$ 波長為瑞利波探測的深度。通過儀器內的電腦簡單的計算之後把結果通過印表機，列印到記錄紙上。在記錄紙上的橫座標表示速度，縱座標垂直向下反應勘探深度。在速度一定的情况下頻率越高波長越短，反應的勘探深度越淺，反之，頻率越低波長越長，反應勘探深度也就越大。可見儀器的整個操作過程是人為控制儀器激振的頻率，從高到低，也就是3000周/秒

開始為第一個點，使儀器產生 3000 周/秒的強迫振動，待振動穩定之後，通過檢波器接收電流信號輸入電腦進行多次採樣和計算，把相應的計算結果，即深度--速度的座標點，列印到記錄紙上。當這一頻點的記錄完成之後，再變轉一個頻率，例如第二點的頻率人為選定為 2800 周/秒，再記錄下第二個點，依次降低頻率，一直到 0.5 周/秒，這時的瑞利波記錄也就是由若干個點所連成的一條曲線，人們便可以通過這條曲線看出瑞利波速在垂直方向上的變化，從而判斷出地層在垂直方向上的變化。如果在某個深度上波速發生了變化，或是發生了「頻散」現象，這裏可能就是地層界限，反應出了地層中的變化。整個的勘探過程是一個頻點、一個頻點地進行的。一條完整的曲線要有上百個頻點組成，要完成 0~40 米深度的勘探，順利的話差不多要兩個半小時的時間，如果不順，一條曲線要做上大半天。雖然效率不高，但還是比鑽探省力、省時間，找地下洞穴的效果也還不錯，這種方法看來還是有一定的優點，不管怎麼說瑞利波勘探還是給地球物理工作者增加了一種新的勘探手段。

1987 年前後，鐵道部的一項重大的技術改造專案--京廣複綫工程即將全綫貫通。京廣鐵路複綫工程中最艱巨的工程一個是長度超過 10 公里的大瑤山隧道，另一個是長約 6.8 公里南嶺隧道。南嶺隧道位於湖南和廣東兩省交界處，隧道穿過南嶺，南嶺是長江水系與珠江水系的分水嶺。南嶺隧道所穿過的地層大都是石灰岩構成。大家都知道石灰岩是一種可溶性的碳酸鹽岩石，其主要的化學成份是碳酸鈣。碳酸鈣在水和二氧化碳的共同作用下生成了可溶性的碳酸氫鈣而被水流帶走，在地下水長期的溶蝕作用下，沿著岩石中的縫隙形成了大大小小，千奇百怪的「喀斯特」溶洞，甚至可以形成可容納數百人的喀斯特「大廳」。溶洞內還會生長出奇特的石筍、石鐘乳和石柱。喀斯特地區風景秀麗，如廣西的桂林山水，有甲天下之稱，著名的溶洞有七星岩和蘆笛岩等風景名勝。喀斯特地區對於旅遊和探險的人們來說，倒是頗有詩情畫意，但對於鐵路工程來說，喀斯特則是鐵路的最大隱患，是危及鐵路安全的大敵。

在南嶺隧道的開鑿過程中，遇到最大的困難就是「喀斯特」岩溶問題。在掘進的過程會突然發生突泥和突水，有時發生塌方和冒頂，幾度因發生嚴重的事故，工程而被迫停工，六公里長的隧道差不多用了十年的時間才

打通。隧道雖然貫通了，可是隧道底下的情況仍然弄不清，不知道隧道底下究竟有沒有洞，如果事先勘察不清，通車以後就會發生嚴重的問題，後果也將無法預料。岩溶勘探對工程物探界來說是個非常棘手的世界性的難題，尤其是在隧道裏進行探測誰也沒有做過，很難說有多少把握。

此時常駐鐵道部的日本專家說：「利用日本先進的儀器和技術，能夠查明南嶺隧道內的岩溶問題」。鐵道部採納了日本專家建議，於是日本海外協力協會派出代表團就此事與鐵道部進行談判。我作為中國鐵道部一方的成員參加了談判的全部過程。在談判整個過程中雙方爭論最激烈的焦點是對岩溶探查的準確性如何評價的問題。日方認為他們派出日本最有經驗和最有權威的專家，同時有最先進的技術和最新研製成功的佐藤式全自動地下探查機，可以保證探查結果萬無一失，因而對日方提出結論不容懷疑。中方則堅持認為，日方的探查結果中方要以鑽探的方法加以驗證，經驗證無誤後中方才能同意付款。經過反復爭論之後，日本方面最後同意中方的意見，以鑽探方法來驗證，可又對中方提出驗證的數量及準確率發生了爭議，中方提出要百分之百的進行驗證，其準確率不能低於 80%。日方認為中方提出來的要求過高，經過幾番討價還價，中方也適當地進行一些讓步，最後雙方確定鑽探驗證的地點定為 10 處，驗證的準確率不能低於 60%，也就是在日方指出 10 處溶洞的地方，經中方鑽探驗證起碼有 6 個以上是正確的，就算日本的這次探查工作成功。經過雙方漫長而艱苦談判後，終於算達成協議，按照國際慣例簽正式合同。合同金額大約 2 億 4 仟萬日元(約合 240 萬美金)，工期為兩個月時間，主要工作由日方來實施，中方技術人員全力配合。簽字儀式在北京的四川飯店舉行，儀式後是正式的宴會。在四川飯店當然上的都是正宗的川菜，川菜離不開辣椒，辣得日本人一個個滿頭大汗，口鼻生煙。這只不過是個序幕，而真正讓日本人冒汗的日子還在後面呢！

正式合同簽訂了，就具有法律效力，雙方必須履行，一切如期進行。1997 年 6 月日本方面的技術人員及官員準時抵達南嶺隧道工地。為首的是日本工程界最有經驗的權威專家持田豐，他曾參與過日本有名海底隧道清涵隧道的建設，同時是穿越英吉利海峽連結英法兩國的海底隧道的技術顧問。隨行技術人員按照工作方法分成四個組，第一組為瑞利波法，第二組

是地質雷達，第三組為電法勘探，第四組為地溫調查。對我們來說，只有瑞利波是新技，其他的三種方法我們都已經掌握，也沒有什麼新奇。

此時瑞利波儀器--佐藤式全自動地下探查機也已經由日本用船運抵廣州的黃埔港碼頭，為了安全中方還專門派了警車護送，由黃埔港把儀器車開到南嶺隧道工地。中方為這次調查工作做好了一切前期準備。工作正式展開以後不像日本人預期的那樣順利。首先是地質雷達進入隧道之後，由於電磁波受到來自隧道內的各種電力電纜和各種電力機械的干擾，各種各樣的電磁波都疊加在一起，就算是利用美國最先進的地質雷達也無法分辨出哪是有用地質信號，哪是干擾信號。電法勘探遇到的麻煩是隧道內的金屬物品太多，如運輸礦車的鋼軌，各種通風和輸水的管道，這些金屬物對實施電法勘探帶來無法避免的干擾。地溫調查則只能作為一種輔助手段，不能起決定的作用。以上三種方法在隧道裏都遇到不同程度的問題，唯一的希望只能寄託於瑞利波法，也就是佐藤式全自動地下探查機，這是他們最後的看家武器了。

為了慎重，佐藤式全自動地下探查機也沒有冒然開進隧道。先在隧道外找了一處已知地下有岩溶的地方先試一試，在洞外試驗的結果基本與已知的情況一致，在地下 25 處果然有岩溶洞穴的反應，大家都鬆了一口氣。可萬沒想到佐藤式全自動地下探查機進了隧道可就完全不聽使喚了，根本做不出一條正常的曲線，所列印出的結果不是曲線回折，就是發生「離散」，要不然就像是個「馬蜂窩」混亂一片，沒有一條能用的曲線。負責瑞利波法的日本專家是佐藤公司的渡部儀一，是個光頭小個子，一會把車向前移，一會兒又把車往後退，翻來覆去調整儀器的參數，急得光頭上冒出了大汗，比那次在四川飯店吃辣椒時冒的汗要多多了，嘴裏「八格」、「八格」罵個沒完。

我全程陪同日本人在隧道裏呆了兩個月的時間，不禁對先進的瑞利波法產生了種種疑團。為什麼在隧道外能行的方法，進洞以後就不行了呢？瑞利波究竟是怎麼傳播呢？一時我也找不出一個正確的答案。

兩個月很快就過去了，時間一到日方必須按時提交調查結果，按合同規定一天也不能拖延。這些日子也真夠日本人辛苦的，我看到日本專家住的小樓上，徹夜燈火通明，為了提交這份難產的調查報告幾天幾夜不休不

眠。日方報告出爐了，一共提出 11 處他們認為最有把握的岩溶地點。中方接到報告，立即按照日方報告指定的地點用鑽機進行了鑽探。鑽探的結果這 11 處當中僅有一處是岩溶，其他 10 處都沒有遇到溶洞，其驗證的準確率僅為 7%，遠遠低於合同規定的 60%。為此在工地下就發生了嚴重的爭執。

在這次調查中擔任翻譯的是我們設計院的一位法語翻譯，日語是他自學的第二外語，對於一些工程技術用語基本上沒有什麼太大問題，反正雙方技術人員能大致理解對方的意思就可以了。可是雙方發生了爭執，唇槍舌劍各不相讓；翻譯的水準上也就出現了問題，禮貌用語、外交辭令和基本的敬語都沒學過，翻譯得直來直去，更為雙方火上澆油，最後雙方站起來拍桌子。幸好在工地上有一位長沙鐵道學院的日語教師趕來，頗有語言技巧，暫時平息一點雙方的火氣。後來日本人問這位老師：「拍桌子意味著什麼？」這位老師告訴他：「拍桌子意味著戰爭的邊緣」。為此日本人也不得不考慮一下拍桌子的後果，態度才有點收斂。看來這個問題在工地上是解決不了了，官司由工地打到了北京。

到了北京，雙方談判人員的層次也都升了級。因為雙方技術人員的繼續爭吵會影響到兩國政府之間的關係，在談判中日方也承認這次調查是沒有達到合同規定的要求。為了彌補這次工作的缺陷，他們要求中方再給他們一次機會，回國之後重新整頓人馬，增派技術力量再來一次。中方認為京廣鐵路是中國交通的大動脈，複綫工程通車在即，時間已不允許，但為了照顧日方的面子，從中日兩國的關係考慮，最後同意換一個地點讓日本人再試一次。

南嶺隧道岩溶探測改由中方技術人員承擔。當時採用的方法為無線電波透視法，具體的做法是每隔 30~40 米打一個鑽孔，在兩個孔之間進行無線電波探測。在一個孔中放發射機，另一個孔中放接收機，兩台機器同步由下向上提升中，如果兩孔之間岩石是完整的，所測得是一條均勻的直線，如果兩孔之間有空洞，或者在空洞中有泥和水的充填物，無線電波就會被吸收產生「陰影」。這和利用 X 光對人體透視的原理是一樣的。這個方法技術上成熟，也很準確，缺點是必須要在孔中進行，因此成本較高，所花費的時間要長，但十分可靠。

我們暫且不說南嶺隧道的善後處理，且說日本人要求再試一次的問題。此時在中國東北離大連不遠有個地點叫瓦房店，由於在路基下發生岩溶塌陷，影響行車安全，鐵路部門正在組織人員進行整治處理，於是就請日本人由廣東移師至東北的大連。因為這裏的問題是路基問題是在地面上進行工作而不是在隧道裏，工作進行比較順利，對路基整治前後注漿效果的檢查，中方認為比較滿意，日方也總算在瓦房店挽回了一點面子。

瓦房店的工作完成之後，中日雙方的人員又都回到北京，就這次調查工作善後問題重新談判。中方的意見有三點：第一，南嶺隧道探查工作是失敗的，沒有達到合同規定的要求，因此不能給錢。第二，瓦房店的工作是成功的，中方同意將預先付給日方 20% 合同預付款作為對瓦房店工作的補償，對南嶺隧道不進行索賠了，同時也不再付別的錢。第三，佐藤全自動地下探查機中方以 40 萬美金買下，但中方要派技術人員去日本，對瑞利波法的方法原理及在日本國內應用的情況進行全面考察。日方無奈最終接受了中方的意見，但回國後遭到日本同行無情的指責，罵他們給日本人丟了臉，是「一群笨蛋」。

1988 年底鐵道部一行五人赴日本對瑞利波技術進行全面考察。到東京成田機場來接飛機的都是老熟人了，除了有日本海外協力協會的官員之外，還有佐藤公司的那個光頭渡部儀一。老冤家又在東京聚頭了，渡部和我見了面第一句話就是：「見了你我就頭痛」。於是我順手從口袋裏摸出一盒中國造的清涼油，對他說：「以後你見到我可以先在頭上抹一點，既可以治頭痛還能長頭髮」。

到達東京的頭一天，佐藤公司的經理佐藤長範安排了一次規模盛大的歡迎宴會。出席宴會的人很多，請了不少各大學的教授和社會名流，熱熱鬧鬧地吃了頓飯就散了。到了第二天我們到了佐藤公司，考察工作正式開始。一切言歸正傳，我們首先要求佐藤給我們講一講瑞利波傳播的機理，沒想到佐藤馬上站起來把臉一翻，對我們說：「關於瑞利波的機理問題是大學教授們研究的事，昨天在宴會上我把這些都請來了，你們為什麼不去問他們，我們佐藤公司只管賣儀器」。這時我們才感到昨天的宴會乃是日本人設下的一計，佐藤用這個辦法來封住大家的嘴，只要你一問瑞利波的基本原理他就叫你去問那些大學教授，看來是什麼也問不出來了。我們也

不能就這麼乾坐著，於是我們要求佐藤讓我們看一看佐藤公司在日本國內所做過的工程探查的實例。佐藤同意了，我們就開始翻閱佐藤公司所做過的所有工程實例。當然做過的工作還是很多，我們差不多看了兩個星期的時間，幾乎所有的技術檔案都翻了一遍，就是沒有發現岩溶探查及在隧道裏面工作的實例。因此我們明白了，日本是個火山噴發形成的島國，根本就沒有石灰岩，更沒有喀斯特溶洞，所以根本就談不上探查喀斯特岩洞的經驗，其次他們也從來沒有在隧道裏面做過工作，當然不知道瑞利波在隧道內傳播的規律，所以佐藤長範根本就說不出來，一問他這些問題，他只能叫你去大學教授，用這一招來搪塞。

自從國內引進了第一台瑞利波儀器，一時間在國內的工程物探界就形成了一股瑞利波熱。各式各樣的國產瑞利波儀器紛紛出現，但大部分都是仿照日本人的形式，利用激振器產生振動，也就是我們所稱的「穩態」形式。與此同時國內又出現了另外一種形式的瑞利波儀--「瞬態」激發式的瑞利波儀。所謂「瞬態」激發就是利用錘擊或炸藥瞬間起爆給地面造成一個振動，這種振動的頻譜十分豐富，既有橫波，也有縱波，當然也包含著瑞利波，其頻率從低到高，什麼樣頻率的波都有，因此可以用普通多道地震儀把這些振動的資訊瞬間都統統採集和記錄下來，再進行資料分析。該儀器的關鍵技術就是資料的採集軟體和資料處理軟體。中國核工業部地質研究院的梅汝吾教授經過多年的苦心鑽研，終於編寫出一套瞬態瑞利波的資料獲取和資料處理軟體系統，將這套軟體系統安裝在多道數位地震儀上就變成了一種嶄新的儀器--多道瞬態瑞利波儀器。這種儀器瞬間採集，就向「傻瓜」照像機，一按「快門」就採集和記錄下所有的資料，因此採集資料的效率大大提高。瞬態儀器只用錘擊或爆炸的方式作為震源，也就拋掉了龐大笨重的激振器和發電機，因此重量大大減輕，儀器主機不包括電瓶只有十幾公斤，一個人可以用手提，並且儀器的造價僅為日本佐藤式全自動地下探查機價格的十分之一。

由於瞬態的儀器出現，瑞利波勘探方法在國內迅速得到普及，應用到很多領域。因為用的人多了，工程實例也就多了，這些實例既有成功的也有失敗的，分析了這些失敗的實例後，我認為主要原因是關於瑞利波傳播的基本規律沒有弄清楚，為了解決這個問題，必須從瑞利波的基礎理論研



究開始。

1996 年中國鐵路幹線準備開始全面提速，要由原來 80~100 公里/小時提高到 120~160 公里/小時。列車運行速度提高，首先要保證列車的安全，因此鐵路路基的穩定性則是列車提速的關鍵。衡量路基穩定性的兩個重要的物理指標，一個是路基的承載力，另一個是路基的變形(剛度)係數，從物理學中得知土壤的橫波速度與這兩個物理參數相關，如能準確地測定出路基的橫波的速度也就能換算成路基的承載力和剛度係數。由於橫波的測定出較麻煩，在平地上想要產生橫波，首先要在地上鋪上枕木，在枕木上壓上重物，往往是把汽車開上去把枕木的兩端來激發橫波。可是在鐵路的路基上這種方法實施起來就十分困難，一是不能耽誤正常列車的行駛，二是鐵路路肩太窄，汽車也很難開得上去。最好辦法是利用瑞利波，前文提到瑞利波速在約相當於橫波速度的 0.9 倍，如果測定了瑞利波速也就可以換算成橫波的速度，同樣可以求得路基的承載力和路基的剛度係數。於是鐵道部決定利用瑞利波法對京廣、京滬、京九、京秦四條幹線各取 5 公里路基做為檢測的試驗段，我就作為了這個試驗項目的技術負責人。俗話說：「事不關己，高高掛起」。如今這事兒落到自己頭上，責任重在則絲毫不敢掉以輕心，想起日本人在南嶺隧道裏栽的「跟頭」，可真不是鬧著玩的，事情逼迫著我必須要對瑞利波最基本理論進行研究，遺憾的是有關論述瑞利波的文獻實在太少見了。

首先瑞利波勘探是屬於地球物理勘探的範疇，一切地球物理勘探的理論都是建立在「均勻無限半空間」這樣一種理想的前提條件之下的，而日本人在南嶺隧道裏進行瑞利波勘探失敗的主要原因，就是因為隧道裏不是均勻無限半空間，不具備進行物理勘探的基本前提條件。把地面物探方法不加分析往隧道裏硬搬，這是導致失敗的關鍵。

如今要在鐵路路基上進行瑞利波勘探，而鐵路路基是人工填築的，有一定規則幾何形狀的、無限延長的三度體，同樣不符合「均勻無限半空間」的地球物理前提條件。如果一定要在這種非均勻無限半空間的條件下應用，就一定要考慮應用範圍和「邊界條件」。

凡是學過高等數學的都知道微分原理，在體積為  $V$  的非均勻介質中取一小部分介質做為體積元  $\Delta V$ ，如果把  $\Delta V$  取得儘量小，則可以把非均勻

介質視為均勻介質。同理，在任意曲面  $S$  上取一小塊面積元  $\Delta S$ ，當  $\Delta S$  取得儘量小，則可以把取面  $\Delta S$  視為平面。根據微分原理，只要能恰當地選擇積元  $\Delta V$  和面積元  $\Delta S$  的範圍，建立合理的邊界條件，仍然可以在三維空間條件下進行瑞利波勘探。

這個面積元  $\Delta S$  和體積元  $\Delta V$  如何選呢？邊界條件又應該如何確定呢？我們就利用一個長方形的水槽進行模擬實驗，首先在長形水槽中注滿了水，待水面平靜之後在水槽中間扔進一塊石子激起水的波紋，見水的波紋一圈一圈地向四周擴散，當波紋觸及到了水槽的邊緣，波紋受到了阻擋就改變了形狀。從這簡單實驗中我們得到了很大的啓示。首先瑞利波屬於表面波的一種形式，瑞利波的形成必須要有一個能產生振動的自由表面，這個自由表面的大小就是我們要取的面積元  $\Delta S$ ，如果超出面積元  $\Delta S$  的範圍，瑞利波的形態就會發生改變，也就是說瑞利波在傳播的過程中遇到障礙或條件發生改變時，瑞利波就瓦解了，分解成了橫波和縱波，因此也就無法進行有效的觀測了。

我們實驗的基本上確定了面積元  $\Delta S$  的邊界，在  $\Delta S$  之內建立了有效的觀測系統，又規定了嚴格的資料獲取的「視窗」和「格式」，同時建立一套對資料有效波的識別方法和資料處理的原則。由於我們的路基檢測工作是在理論指導下進行，所以取得了成功。

我們的研究成果在全國學術會上正式發表，並且通過了勘察學、地質學會、土動力學會、建築學會專家們的聯合評審，得到了很高評價。同時我的論文<利用瑞利波進行鐵路路基穩定性檢測的理論基礎及應用>也在全國的學術刊物上正式發表了，這是我多年來對瑞利波基礎理論研究的一個全面總結。

從 19 世紀末英國物理學家發現了瑞利波，到現在已經有一百年了，在這一百年中經過了幾代科學家和地球物理工作者不斷追求和探索，終於把神秘的物理現象變成了能為人類服務的工具和手段。其中有成功有失敗也有挫折，日本人在南嶺隧道失敗的主要原因是他們過於自信和傲慢，而我們成功的原因是在於吸取了日本人失敗的教訓。要想立於不敗之地，只有認認真真地做事，老老實實地做人。

2001.7.2 于溪翁莊