



國立台灣工業技術學院研究報告書
NATIONAL TAIWAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY
RESEARCH REPORT

工程地震論文集
Engineering Seismology Papers

李 咸 亨
Shannon Hsien-Heng Lee

1.25.1995

姓 名	李 咸 亨 (Lee, Shannon Hsien-Heng)
職 稱	教 授
擔 任 課 程	動力基礎 土壤力學 基礎工程 工址調查 地工織物 坡地工程 數值分析 實用土力
研 究 領 域	土壤動態 加勁土壤 樁基礎 坡地工程 專家系統資料庫 地錨
發 表 著 作	

(一)土壤動力與地震防災類

李咸亨，「震波之量測」，地工技術，第十七期，第57-69頁(1987)。

李咸亨、林熹麟、石健裕，「1986年11月15日地震中土壤條件對於台北市區震度分佈之影響」，中國土木水利工程學刊，第一卷，第二期，第113-123頁(1989)。

李咸亨，「土壤最大動態剪力模數與耐震設計」，結構工程，第四卷，第二期，第43-48頁(1989)。

李咸亨、蕭秋安，「台北盆地砂性土壤之動態特性與試驗方法之影響」，中國土木水利工程學刊，第二卷，第一期，第31-43頁(1990)。

李咸亨、李建中、沈國瑞、林少思，「台北盆地黏性土壤之動態剪力模數和阻尼比」，中國土木水利工程學刊，第二卷，第二期，第135-147頁(1990)。

李咸亨、吳志明，「震度微區化方法與地震防災」，地工技術，第三十期，第60-71頁(1990)。

Lee, S.H.H., "Regression Analysis of Shear Wave Velocities," Journal of the Chinese Institute of Engineers, Series A, Vol.13, No.5, PP.519-532(1990).

李咸亨、吳志明，「下井探測法量測剪力波速之影響因素探討」，中國土木水利工程學刊，第三卷，第十一期，第15-28頁(1991)。

Lee, S.H.H., "Analysis of Multicollinearity of Regression Equations of Shear Wave Velocities," Soils and Foundations, JSSMFE, Vol.32, No.1, pp.205-214(1992).

李咸亨，「從加州北嶺大地震看美國救災體制」，歐美月刊，第九卷，第十一期，第61-68頁(1994)。

李咸亨、蔡宗儒、陳東陽，「最大動態剪力模數次增加率之預測」，岩土工程學報，中國土木水利等六個學會共同主辦，第17卷，第3期(1995)。

Stokoe, K.H. II, S.H.H. Lee and D.P. Knox, "Shear Moduli Measurement under True Triaxial Stresses," Proc. of the Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions, Geotechnical Engineering Division, ASCE, Detroit, Michigan, PP.166-185(1985).

Stokoe, K.H., II, S.H.H. Lee and H.Y.F. Chu, "Effect of Stress State on Velocities of low-Amplitude Compression and Shear Waves in Dry Sand," Proc. of the Second Symposium on the Interaction of Non-nuclear Munition with Structures, Panama City Beach, Florida, PP.358-363(1985).

Sanchez-Salineru, Y., J.M. Roesset, K.H. II. Stokoe, S.H.H. Lee and Y.J. Mok, "Body Wave Velocities from Crosshole Tests Using Time and Spectral Analysis," Proc. of Eighth European Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, (1986).

Lee, S.H.H., K.H., II, Stokoe and J.M. Roesset, "Influence of Stress State on Small-Strain Body Waves Propagating along Principal Stress Directions," Proc. of the Fiftysixth International Meeting of the Society of Exploration Geophysicists, Houston, Texas, (1986).

李咸亨，「振動式滾壓機之施工問題」，第二屆路面工程學術研討會論文集，中壢，桃園，第491-500頁(1987)。

李咸亨，「橫井探測法與下井探測法之不同」，第二屆大地工程學術研究討論會，溪頭，南投，第329-339頁(1987)。

Lee, S.H.H., "Regression Model For Shear Wave Velocity of Sandy and Silty Soils of Taipei Basin," Proc. of the CCNAA-AIT Joint Seminar/Workshop on Research and Application for Multiple Hazards Mitigation, Taipei, PP.489-494(1988).

Lee, S.H.H., and K.H. II Stokoe, "The Effect of Anisotropy on Dynamic Shear Modulus," The Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Abstract, Tokyo, (1988).

李咸亨、沈國瑞，「影響動態剪力模數之因數」，第三屆大地工程學術研究討論會，墾丁，高雄，第483-495頁(1989)。

Lee, S.H.H., "Seismic Intensity in Taipei City, Nov.14, 1986," Proc. of Discussion Session on Influence of Local Conditions on Seismic Response, 12th ICOSMFE, Rio de Janeiro, Brazil, PP.79-86(1989).

李咸亨、洪松茂、吳志明，「打樁振動對於公路施工之環境影響評估」，第五屆路面工程研討會，台北，第487-497頁(1991)。

李咸亨、林熹麟，「表面波頻譜分析之近場效應影響」，第四屆大地工程學術研討會論文集，天祥，花蓮，第277-284頁(1991)。

李咸亨、陳希舜、陳堯中、林宏達，「蘭陽平原設計震譜與液化潛能評估」，國道建設技術研討會，交通部台灣區國道新建工程局，台北，第217-244頁(1992)。

李咸亨，「簡易震度微區化方法及運用」，第一屆兩岸地震學術討論會論文集，中國地震學會等，北京，第267-276頁(1992)。

李咸亨，「第三代台北市震度微區圖」，第二屆兩岸地震學術研討會，國家地震工程研究中心等，台北市(1995)。

Chu, H.Y.F., S.H.H.Lee and K.H., Stokoe II, "Effect of Structural and Stress Anisotropy on Velocity of Low-Amplitude Compression Waves Propagating along Principal Stress Directions in Dry Sand," Report GR84-6, Civil Engineering Department, University of Texas at Austin, (1985).

Lee, S.H.H. and K.H., Stokoe II, "Effects of Structural and Stress Anisotropy on Velocity of Low-Amplitude Shear Waves Propagating along Principal Stress Directions in Dry Sand," Report GR86-6, Civil Engineering Department, University of Texas at Austin, (1985).

Lee, S.H.H., "Investigation of Low-Amplitude Shear Wave Velocity in Anisotropic Material," Ph.D. Dissertation, Civil Engineering Department, University of Texas at Austin, (1985).

Lee, S.H.H., and K.H., Stokoe II, "Effects of Structural and Stress Anisotropy on Velocity of Low-Amplitude Oblique Compression Waves in Dry Sand," Report GR87-6, Civil Engineering Department, University of Texas at Austin, (1986).

李咸亨，「土壤動力學與耐震工程的關係」，建築師雜誌，第156～157期，第58-63頁與第71-75頁(1987)。

李咸亨、鄭文隆、林熹麟，「紅土礫石動力性質之野外測定研究(Ⅰ)」，研究報告NSC76-0410-E011-10，行政院國家科學委員會，台北市，57頁(1988)。

李咸亨、沈國瑞，「台北盆地土壤之動態性質研究—仁愛路段」，NSC78-0414-P011-02B，國科會防災科技研究報告77-40，台北，145頁(1988)。

李咸亨、林熹麟，「紅土礫石動力性質之野外測定研究(Ⅱ)」，研究報告NSC78-0410-E011-10，行政院國家科學委員會，台北市，73頁(1989)。

李咸亨、蕭秋安，「台北盆地(南區)非黏性土壤之動態性質研究」，防災科技研究報告78-19號，行政院國家科學委員會，台北市，134頁(1989)。

李咸亨、吳志明，「台北盆地土壤之動態性質研究(Ⅲ)—下井探測法與剪力波速迴歸分析之探討」，防災科技研究報告79-04號，行政院國家科學委員會，台北市，157頁(1990)。

李咸亨、蔡宗儒，「凝聚性土壤剪力模數與壓密係數之關係」，研究報告NCREE-91001，國家地震工程研究中心，台北市，152頁(1991)。

李咸亨、林熹麟，「紅土礫石動力性質之野外測定研究(Ⅲ)—複合材料動態性質研究」，研究報告NSC80-0410-E011-18，行政院國家科學委員會，台北市，210頁(1991)。

李咸亨、林熹麟，「複合土層之雷利波波速影響因素及其運用」，GT92006，國立台灣工業技術學院營建工程技術系研究報告，台北市(1992)。

李咸亨、曾耀聖，「台北盆地土壤動態特性綜合研究」，防災科技研究報告81-13號，行政院國家科學委員會，台北市(1992)。

李咸亨、陳東揚，「八十一年度台北盆地地下地質與工程環境綜合研究—地球物理與土壤動態剪力模數研究(Ⅱ)」，81EC2A380009，經濟部中央地質調查所，台北(1993)。

李咸亨、林嘉盛、李前定，「八十一年度台北盆地地下地質與工程環境綜合研究—地球物理與土壤動態剪力模數研究(Ⅱ)」，81EC2A380009，經濟部中央地質調查所，台北(1993)。

李咸亨、羅勝元，「台北市區震度微區圖之最佳化分析」，GT94002，國立台灣工業技術學院營建工程技術系研究報告，台北市(1994)。

李咸亨、李忠訓，「台北盆地液化潛能圖之研究」，GT94003，國立台灣工業技術學院營建工程技術系研究報告，台北市(1994)。

李咸亨、李前定，「台北盆地動態參數之最佳化分析與迴歸」，GT94005，國立台灣工業技術學院營建工程技術系研究報告，台北市(1994)。

李咸亨、林嘉盛，「長期效應對於土壤動態參數之影響」，GT94006，國立台灣工業技術學院營建工程技術系研究報告，台北市(1994)。

(二) 基樁行為類

李咸亨、李慶福，「垂直基樁載重試驗結果詮釋法在台灣地區之適用性探討」，地工技術，第二十四期，第49-59頁(1988)。

李咸亨，「運用彈性理論於反循環基樁設計載重之探討」，土木水利，中國土木水利工程學會會刊，第十七卷，第一期，第31-42頁(1990)。

李咸亨、李慶福，「 $t-z$ 曲線試樁法於垂直載重樁力學行為之預測」，力學學刊，中華民國力學學會，第六卷，第二期，第127-137頁(1990)。

李咸亨、郭錦崑，「砂土中垂直載重樁之預測模式」，中國土木水利工程學刊，第三卷，第三期，第213-220頁(1991)。

李咸亨、孫玉龍，「側向載重樁之降伏承載力及其預測模式」，中國土木水利工程學刊，第六卷，第二期，第161-167頁(1994)。

李咸亨、池蘭生，「砂土中不同尺寸擴座基樁承載力之預測方法」，中國土木水利工程學刊，第七卷，第三期，(1995)。

李咸亨、林熹麟，「以 $p-y$ 曲線方法分析興達港側向樁載重試驗結果」，第三屆大地工程學術研究討論會，墾丁，高雄，第179-188頁(1989)。

李咸亨、李慶福，「以 $t-z$ 曲線法預測台中港火力發電廠之基樁垂直承載力」，第三屆大地工程學術研究討論會，墾丁，高雄，第189-196頁(1989)。

李咸亨、李慶福，「 t - z 曲線在樁載重試驗方面之研究」，研究報告-GT88004，國立台灣工業技術學院營建系，台北(1988)。

李咸亨、池蘭生，「擴座基樁之力學行為」，研究報告GT91010，國立台灣工業技術學院營建系，台北市(1991)。

李咸亨、葉文謙，「不同相對密度下擴座基樁之力學行為」，研究報告GT92008，國立台灣工業技術學院營建工程技術系研究報告，台北市(1992)。

李咸亨、謝一正，「摩爾—庫倫模式在垂直樁載重行為之分析研究」，研究報告GT94004，國立台灣工業技術學院營建工程技術系，台北市(1994)。

李咸亨，「台灣地區關於 t - z 曲線之研究」，深基礎承受軸向力與側向之設計與電腦分析講習會，台北市，第7.1-7.50頁(1994)。

(三)地工織物類

李咸亨，「地工織物加勁擋土牆設計方法之檢討」，地工技術，第三十二期，第5-12頁(1990)。

李咸亨、芮嘉航，「圍壓下柔性不織布之拉脫破壞行為」，中國土木水利工程學刊，第三卷，第二期，第195-201頁(1991)。

李咸亨、芮嘉航，「大變形量土工織物之拉拔力學行為」，岩土工程學報，中國水利等六個學會共同主辦，第13卷，第6期，第1-7頁(1991)。

李咸亨、謝宗榮，「加勁擋土牆之抗震設計方法」，地工技術，第四十三期，第11-22頁(1993)。

李咸亨，「不織布之透水試驗方法探討」，第一屆營建工程技術研討會，台北，第161頁(1987)。

Lee, S.H, Ruei, E. and Tonus, S., "The Monitoring of Nonwoven Geotextiles by Strain Gages, "Proceedings of the Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, Netherlands, PP.97-99 (1990).

Lee, S.H, & Hsieh, T.J., "Nonlinear FEM Analysis of Pull-out Behavior," Proc., ISAGT, Dec.7-10, Guangzhou, China, pp.101-106.

李咸亨，「不織布勁擋土牆觀測研究」，研究報告TS-78202，財團法人台灣營建研究中心，台北(1989)。

李咸亨、黃鐘興，「加勁擋土牆內不織布之張力傳遞行為」，研究報告NSC81-0410-E011-05，行政院國家科學委員會，台北市，152頁(1991)。

李咸亨、張錦火，「形狀因素對於地工格網拉力行為之影響」，研究報告GT93002，國立台灣工業技術學院營建工程技術系，台北市(1993)。

李咸亨、陳舜田、謝宗榮、賴聰祥，「大變形加勁土壤力學行為之研究」研究報告NSC82-0410-e-011-004，行政院國家科學委員會，台北市(1994)。

(四)GIS/CAD與專家系統類

李咸亨、林玉斌，「土壤分層專家系統推論機之設計」，中國土木水利工程學刊，第二卷，第三期，第225-234頁(1990)。

李咸亨、謝浩明、鄭祺華，「應用分散式系統架構於台灣省大地工程資料庫之建立」，土木水利，中國土木水利學會會刊，第十七卷，第四期，第37-51頁(1991)。

李咸亨，「大地資訊系統在營建管理上之重要性」，營建管理季刊，第十五期，第7-13頁(1993)。

李咸亨、謝浩明，「微電腦大地工程資料庫之建立」，七十八年電子計算機於土木水利工程應用論文研討會論文集，台北，第227-236頁(1989)。

李咸亨，「大地工程資料庫之設計」，內政部建築研究所籌備處76至78三年研究成果研討會，台北，第IX~3-IX~12頁(1990)。

李咸亨，「大地工程資料庫之設計運用」，內政部建築研究所籌備處，大地工程資料庫研討會，台北市(1992)。

李咸亨，「GIS在震度微區圖及坡地工程之應用」，邀請演講論文集，第一屆三軍官校基礎學術研討會，高雄市，第101-107頁(1994)。

李咸亨，「大地工程資料庫與都市規劃」，邀請演講論文集，台北盆地地下工程研討會，土木科技研究發展文教基金會主辦，台北市(1995)。

李咸亨，「台北都會地區大地工程地質資料搜集及處理之可行性研究」，內政部營建署研究報告，國立台灣工業技術學院營建工程系研究報告 GT87004，台北市(1987)。

李咸亨、謝浩明，「大地工程地質資料庫之建立－第二階段」，22-04-77-02，內政部建築研究所籌備處，(i)資料庫系統和(ii)使用手冊，台北(1988)。

李咸亨、林玉斌，「大地工程地質資料庫之建立(Ⅲ)」，內政部建築研究所籌備處，(i) 台北市實質建檔和(ii) 土層剖面專家系統，台北市(1989)。

李咸亨，「台灣地區區域地質鑽探岩心資料蒐集、整理、建檔可行性研究」，經濟部中央地質調查所，台北市(1989)。

李咸亨，「建立大地工程(鑽探、試驗)資料庫系統」，內政部建築研究所籌備處，第1至4冊，台北市(1990)。

李咸亨，「台北市區大地工程地質資料建檔(一)」，內政部建築研究所籌備處，台北市(1991)。

李咸亨，「台北市區大地工程地質資料建檔(二)」，內政部建築研究所籌備處，台北市(1992)。

李咸亨、石健裕，「台北盆地土壤分層專家系統之設計」，研究報告-GT92005，國立台灣工業技術學院營建工程技術系，台北市(1992)。

李咸亨、卓政宏，「台北盆地地質與工程環境綜合研究報告—盆地地下水層之水文及水力特性研究」，經濟部中央地質調查所，台北市(1992)。

(五)坡地開發工程類

李咸亨，「山坡地開發建築工程，76學年度教育部教學資料甲等獎(1987)」。

李咸亨，「一四〇高地能成為山坡地社區整體開發之典範嗎？」現代營建，7月號，第19期，第16-22頁(1981)。

李咸亨，「一四〇高地看坡地開發」，現代營建，2月號，第14期，第16-27頁(1981)。

李咸亨，「山坡地開發之時宜與權責」，山坡地開發建築防災技術研討會，內政部營建署，台中縣豐原市，第161-176頁(1986)。

李咸亨，「工程管理技術在防止或減輕山坡地災害上之運用」，台北市山坡地開發與水土保持問題研究會，台北，第93-101頁(1991)。

李咸亨，「墓區工程之規劃與設計」，內政部八十一年度墓政業務研討會專題演講，高雄市(1992)。

李咸亨，「湖口台地崩塌區工程地質分析」，八十三年年會及學術研討會，中國地質學會，台北市，第414-418頁(1994)。

李咸亨、林貴榮，「試坑法在礫石深開挖工程之運用」，卵礫石層地下工程研討會，台灣省政府住宅及都市發展局等主辦，台北市(1995)。

李咸亨、陳榮河、賴典章、許嘉明，1989，「台北市山坡地濫墾濫葬善後處理之研究—大崙山區濫葬善後個案分析」，市政建設專輯研究報告第197輯，台北市政研究發展考核委員會委託，135頁。

李咸亨、潘禮門、李正庸、李滄涵、賴典章、徐淵靜、蔡光榮、凌德麟、徐錠基、陳曉偉、沈英標，1990，「山坡地雜項工程技術及施工計劃指導準則」，研究報告，內政部營建署，312頁。

李咸亨，「G303R1地滑監測系統研究分析」，研究報告TR-79015，財團法人台灣營建研究中心(1990,1991)。

李咸亨，「萬象館3303E廠房後山危石處理工程研究評估」，研究報告TR-80012，財團法人台灣營建研究中心，台北市(1991)。

李咸亨，「國立中正大學區大地工程及水土保持規劃之研究評估」，研究報告TS-80220，財團法人台灣營建研究中心，台北市(1991)。

李咸亨，「學人社區坡地開發工程評估工作報告報告」，研究報告 TS-80229，財團法人台灣營建研究中心，台北市(1992)。

李咸亨，「新竹縣新埔鎮湖口台地南緣崩塌治理調查規劃計畫—新埔崩塌地原因分析與治理規劃研究計劃」，研究報告TR-82010，財團法人台灣營建研究中心，台北市(1994)。

李咸亨，「G303R2地滑監測系統研究分析」，研究報告TR-82019，財團法人台灣營建研究中心(1994)。

(六)工程管理類

李咸亨、施並淵，「地錨試驗與品管之關係探討」，地工技術，第二十五期，第19-27頁(1989)。

李咸亨、梁樾、吳志明，「土壤特性對工地密度試驗之影響」，第五屆路面工程研討會，台北，第499-501頁(1991)。

李咸亨、林熹麟，「表面波頻譜分析之近場效應影響」，第四屆大地工程學術研討會論文集，天祥，花蓮，第277-284頁(1991)。

李咸亨、梁樾，「工地檢驗在工程上之重要性」，國軍第三屆軍事工程技術整合暨聯勤總部工程署八十年度工程學術研討會，台北，第70-80頁(1991)。

李咸亨，「土壤工程品管」，榮工處員工訓練中心，土木工程品質管制訓練班講義，台北(1987)。

李咸亨，「地工技術實務」，工程施工實務訓練班教材，台北市政府公務人員訓練中心(1988)。

李咸亨，「高壓噴射樁試驗分析」，財團法人台灣營建研究中心，研究報告TR-78222，台北市(1989)。

李咸亨，「台灣科技發展及科技機構介紹」，93兩岸科技學術研討會，北京—西安，第120-131頁，(1993)。

(七)主編專輯

李咸亨，「第一屆兩岸地震學術討論會論文集」共同主編，地震學出版社，北京市(1992)。

李咸亨，「93兩岸科技學術研討會論文集」主編，北京市(1993)。

震波之量測

李 咸 亨*

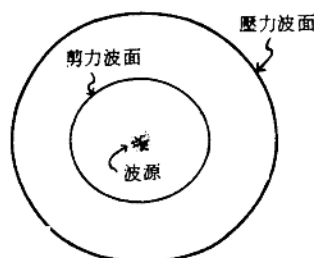
一、前 言

當任意形式之能量施加於物體時，組成物體之質點(Solid Particle)就被激動。外來能量乃循此激動而傳遞至物體的其他部份。若感應器(Sensor)被用來量測此行爲時，在示波器(Oscilloscope)的銀幕上就能看到一原本靜止的水平線條有上下起伏的波動。因此，感應器常被稱為「受波器」。

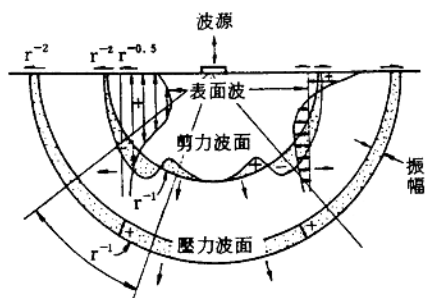
理論上，如果在均向(Isotropic)、均質(Homogeneous)且彈性(Elastic)的無限空間裡(Full Space)施加一能量，其必然造成兩種型式的彈性波動。一為壓力波(Compression Wave或P-Wave)，一為剪力波(Shear Wave或S-Wave)。其形成之波面與波源之關係如圖一所示。壓力波之質點振動方向與波之前進方向一致，而剪力波之質點振動方向則與波之前進方向垂直。若剪力波之質點於垂直面上振動，則稱為垂直剪力波(SV-Wave)。若剪力波之質點於水平面上振動，則稱為水平剪力波(SH-Wave)。在均向、均質且彈性的空間裡，垂直剪力波與水平剪力波完全一樣。

如果均向、均質且彈性之無限空間變成為半無限空間，且波源放置於半無限空間之表面(Surface)時，除了壓力波與剪力波以外，將產生第三種型式的表面波。圖二表面波(Surface Wave)稱為R-波(Rayleigh Wave)，因其質點振動範圍局限於半無限空間之表面層附近而得名。其能量占全部激發能量之67%。表面波之能量當然也有一部份傳遞至表面以下，只是

其振幅隨著深度之增加迅速遞減(Woods, 1968)。因此，傳統之地球物理探測(即震波探測)鮮少利用表面波之特性以偵測地球內部的奧秘。但是表面的能量占總能量的大部份且又集中於地表面附近，其波動可以傳遞至較遠的地表面處。現代的地球物理學家已注意及此而善加利用了。



圖一 產生於均向、均質且彈性之無限空間內之彈性壓力波與剪力波。



圖二 產生於均向、均質且彈性之半無限空間之彈性壓力波、剪力波與表面波。

(取材自 Woods, 1968)

* 國立台灣工業技術學院營建工程技術系副教授

壓力波和剪力波大部份在空間內(物體內)傳送，故又稱為體內波(Body Wave)(註一)。剪力波之能量占總能量之26%，壓力波之能量則占7%而已。由於壓力波速度遠快於剪力波速及表面波速，地球物理學家大都先推算各地層之壓力波速，並進行推測各地層之厚度以及特性。

二、 震波探測法

嚴格而言，震波探測法可分為彈性波量測法(Elastic Wave Measurement或Small Amplitude Wave Measurement)和非彈性波量測法(Non-Elastic Wave Measurement或Large Amplitude Wave Measurement)。一般之震波探測法係指彈性波量測法。依鑽孔需要與否，一般震波探測法可分類如下：

(1) 無鑽孔探測法：

- ① 折射法(Refraction Method)
- ② 反射法(Reflection Method)

③ 恒態震波法(Steady-State Vibratory Rayleigh Wave Method)

④ 頻譜法(Spectral Analysis of Surface Wave)

(2) 鑽孔探測法：(見圖三)

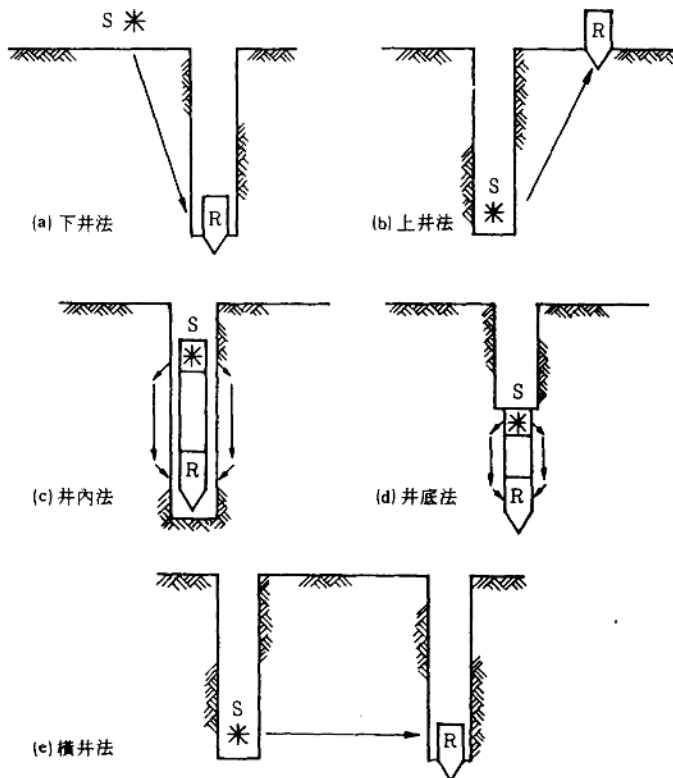
(A) 單孔法：

- ① 下井法(Downhole Method)
- ② 上井法(Uphole Method)
- ③ 井內法(Inhole Method)
- ④ 井底法(Bottomhole Method)

(B) 多孔法：

- ① 橫井法(Crosshole Method)

雖然折射法與反射法無法探測出軟弱夾層或薄層，由於其經濟、快速與方便之特性，仍被廣為使用。尤其在大面積之地質調查工作中，其快速提供初步判斷資料之能力更見其卓越性。可是在大地工程方面，造成不穩定破壞之軟弱夾層才是主要的偵測對象。折射法與反射法不得不因其缺點而退居次要地位。施工成本



圖三 有鑽孔之體內波探測法(取材自 Hoar, 1982)

較為昂貴之鑽孔震波探測法乃有機會一顯身手。理論上，只要適當控制受波器之間距、位置及深度，不管那一種鑽孔探測法皆能偵查出相當的軟弱夾層。當然，間距愈小的探測需要愈長的工作與分析時間，間接提高工程成本。

2.1 波之特性及其量測

由於物體接受能量後，其質點之振動具有方向性(Polarization)，不同之波乃因而誕生。圖四及五即利用壓力波與剪力波之振動特性，將受波器分別放置於垂直或平行於波面前進方向，以測得特定之波。圖四(a)之方法以偵測壓力波為主。圖四(b)可偵測壓力波及垂直剪力波。偵測水平剪力波時，則使用圖五之方法。其中波源之製造乃在水平面上雙向激發能量，以造成如圖六之成雙水平剪力波。

用來量測波動之受波器可以是速度計(Geophone)，也可以是加速度計(Accelerometer)。速度計測得的是振動質點的速度分量。加速度計測得的是振動質點的加速度分量。適當應用兩者而決定之波速幾乎完全相同。

由於受波器接受的不僅僅是所有被波源激發的波，而且還有環境周圍各種額外的雜波(Noise, (註二))。因此濾波器(Filter)為地球物理學家廣泛使用。圖七中，1號及2號波為未使用濾波器者。而F1號及F2號為使用低於2000 HZ濾波器後之結果。由圖中箭頭可以清楚看出濾波器對波面之最先到達時間的影響。而且整個波形也明顯地改變了。傳統折(反)射法慣於使用最先到達的壓力波(First Arrival Method)決定壓力波速實在不可不小心。圖七中，1號波之最先到達時間為1.55msec，但F1號波之最先到達時間卻為1.80msec。其誤差高達0.25 msec(約16.1%)。但是如果使用兩個受波器之訊號來決定波速(Interval Method)，此誤差可以抵銷至0.05msec而已。即3.2%誤差而已。

2.2 體內波探測法

除了恒態震波法與頻譜法以外，其他震波探測法皆以量測體內波為主。圖八為常見之折射和反射法儀器配置法以及壓力波傳遞之示意圖。圖九則為實際上整個壓力波面(Wave Front)前進的詳圖。當然，圖九並未同時繪出剪力波

和表面波等其他波面之前進。

壓力波雖因速度較快而擔大任，但其所占能量較小，容易消散，實為一大缺憾。比較圖十及十一中，P5R和P25R之第一個壓力波向下振幅(A點處)，可以看出壓力波在距離波源25英尺處就迅速消散尖滅的情形。P5V之第一個向下振幅(B點處)更在P15V處就幾乎尖滅光了。由此可看出，使用最先到達之壓力波振幅來決定波速之可能誤差極大。亦即，用來決定波速之波面(或振幅)可能前後不一致，因而造成錯誤的研判。Lawrence(1963)於試驗室內之壓力波試驗亦曾有類似發現。亦即：在不同之圍壓情況下，最先到達之壓力波面可能有不同的現象。換言之，本來低圍壓時，向下振幅為最先到達波面，於高圍壓下，向上振幅卻是先到達波面。

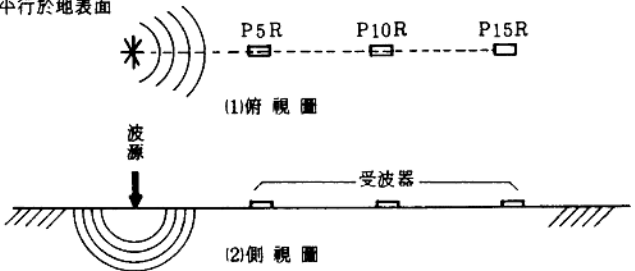
比較同地點之兩組壓力波訊號P5R及P5V，可看到另一現象：壓力波之振幅在水平及垂直方向之差異極大。亦即受波器與波面前進方向之夾角對震波解析之影響極大。於此，同時要說明的是，不同的放大率(Amplification)對於波形之影響，亦可能間接影響最先到達波面之判斷。由於地質學家面對的尺度皆以公里計，地層深度(或厚度)之研判誤差固然可以有較大之寬容值。在大地工程方面之運用，工程師卻希望能咫尺計較，否則定量分析的結果就毫無意義了。

壓力波之缺憾或許可由剪力波來彌補？圖十二至圖十四為使用圖五配置而量測得之南北向水平剪力波(SH-Wave)。在此，H代表北向，H2代表南向。由圖六觀之，運用剪力波之可逆性特性(指其方向性，Polarization)，似乎A點位置已可定為最先到達之剪力波面位置。可是比較圖十二中S5H與S15H，S5H2與S15H2之波形後，點A處之振幅很明顯地於距離波源15英尺處就消逝了。甚至，S5H之第一個向下波峰(B點處)在到達圖十四中S70H處也完全消逝了。所以到底應以那一點為最先到達波面實為不容易的一項考驗。

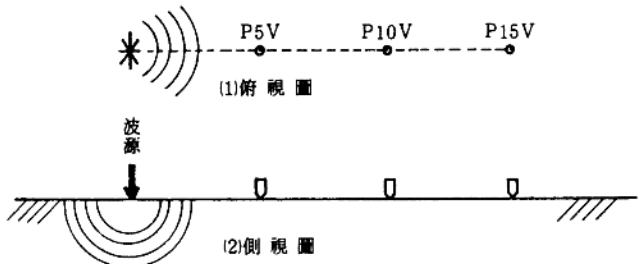
2.3 表面波探測法

由於無鑽孔之體內波探測法仍有尚待克服之處，無鑽孔之表面波探測法乃應運而生(Fry

(a)受波器平行於地表面



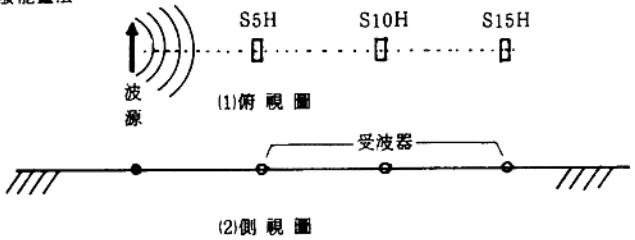
(b)受波器垂直於地表面



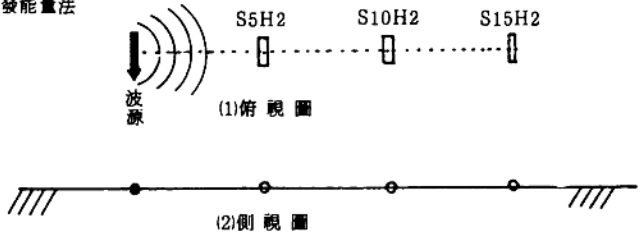
說明：(1)P：壓力波 (3)R：水平輻射向
(2)5：5英尺 (4)V：垂直向

圖四 量測壓力波之配置法。本法採用垂直向能源激發法。

(a)北向激發能量法

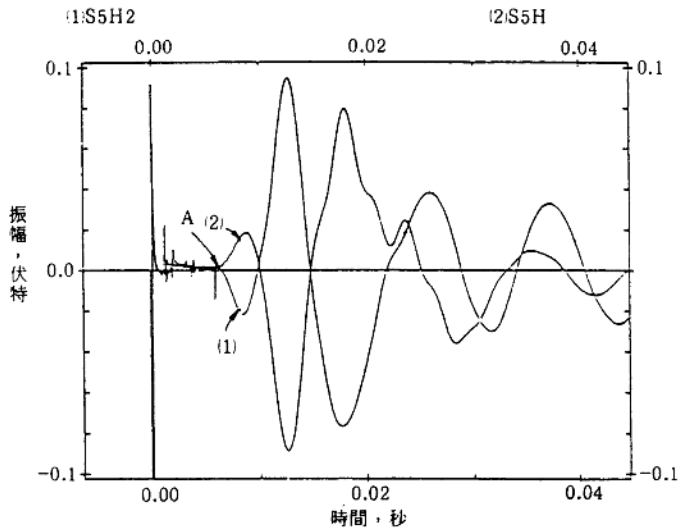


(b)南向激發能量法

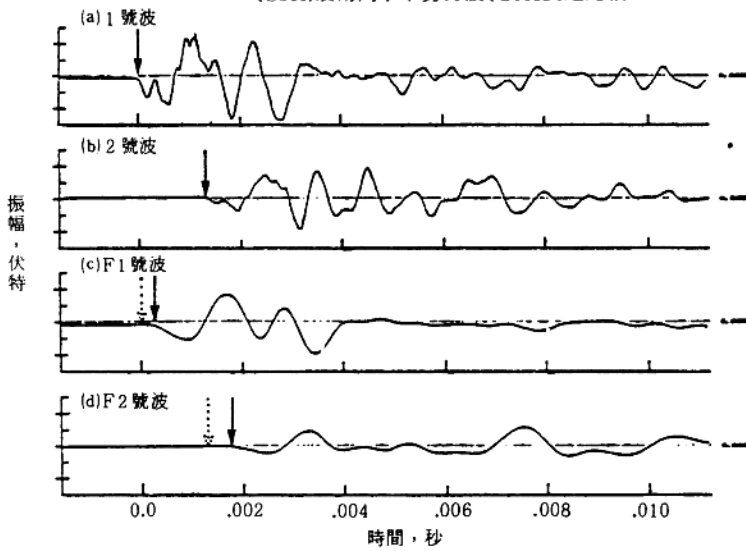


說明：(1)S：剪力波 (3)H：北向波源
(2)5：5英尺 (4)H2：南向波源

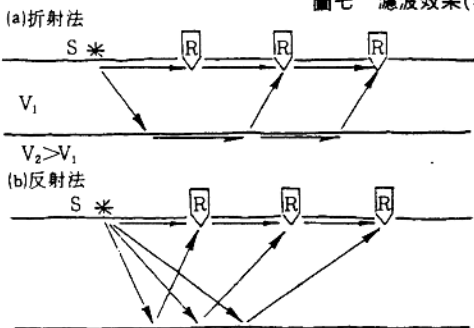
圖五 量測剪力波之配置法。本法採用水平向能源激發法。



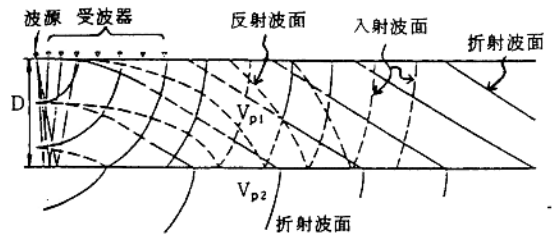
圖六 使用圖五中配置量測得之北向水平剪力波 (S5H)及南向水平剪力波(S5H2)之比較。



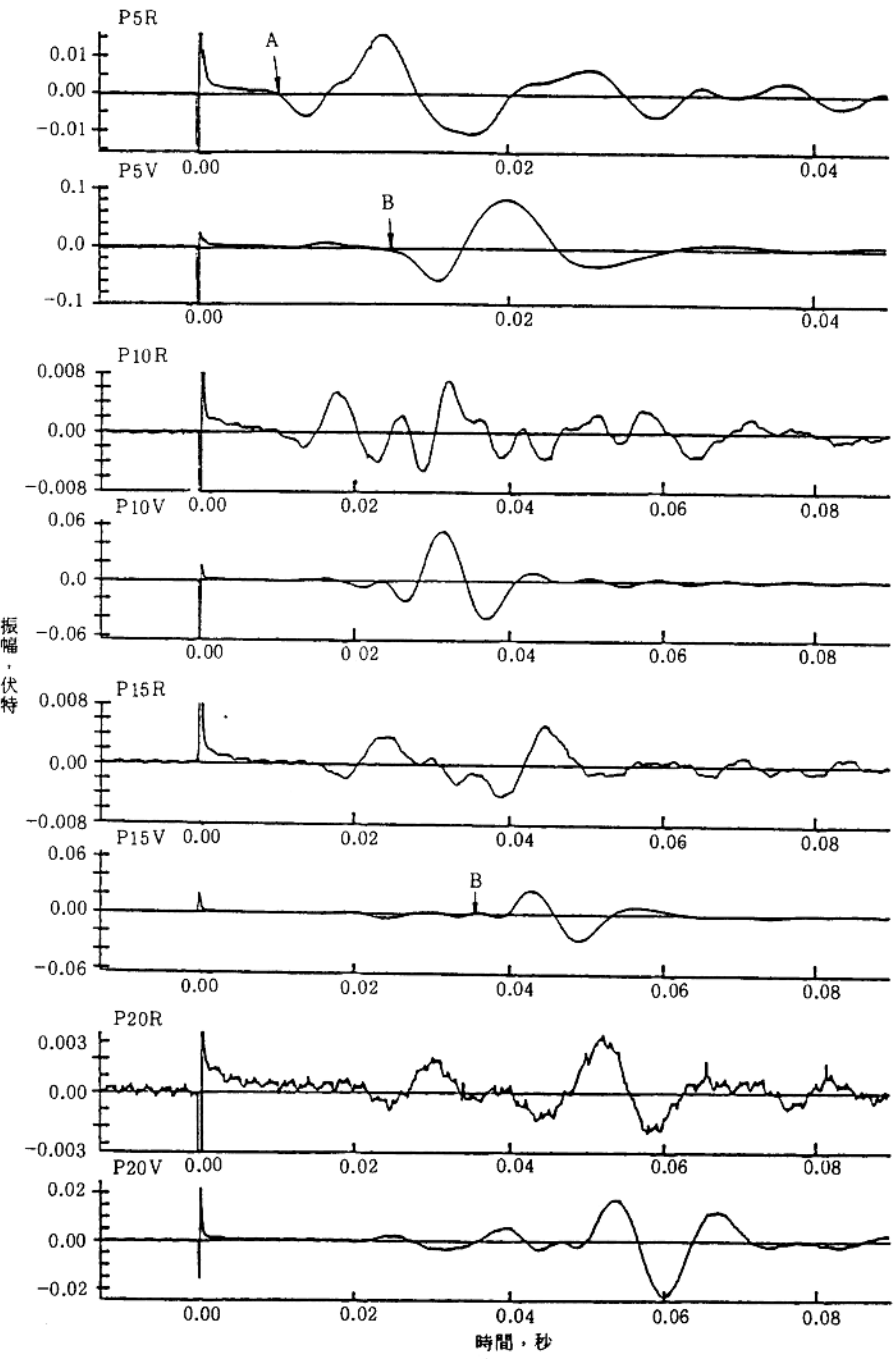
圖七 濾波效果(器)對波形及波速之影響



圖八 典型之無鉗孔體內波探測配置法



圖九 壓力波於兩層土層中之傳播示意圖
(取材自 Engineer Manual, 1979)



圖十 使用圖四之配置量得之水平輻射向(R)及垂直向(V)之壓力波。受波器距離波源 5 英尺至20英尺。