

基樁瑕疵幾何參數對檢測訊號之影響分析

Effect of the Geometric Parameters of Defective Pile on Detected Signal

蔡佩勳¹ 梁煜祥² 戴榮興²

¹朝陽科技大學營建工程系 副教授 E-mail:phtsai@cyut.edu.tw, (04-23323000)

²朝陽科技大學營建工程系 碩士班研究生

科技部計畫編號：MOST-106-2221-E-324-010-

摘要

本研究使用有限差分軟體分析頸縮基樁在低應變完整性試驗之樁頂測點加速度歷時曲線，藉由參數影響分析以了解各影響參數對訊號之影響。在參數影響分析中，假設一支 5 公尺的頸縮基樁，樁直徑為 0.3 公尺，埋置於均質的土壤內，於樁頂圓心處施以載重延時為 1 毫秒的敲擊震源，討論的參數包括頸縮缺陷長度與缺陷面積比。數值模擬所得的結果為樁頂之加速度歷時曲線，以及經過快速傅立葉轉換的頻譜圖，藉以辨識頸縮基樁之訊號特徵。由研究結果顯示，當基樁存在頸縮缺陷時，在加速度歷時曲線可看出頸縮處之震波反射訊號。頸縮基樁之樁底反射訊號有延遲現象，可能是因為部分震波在頸縮的傳遞路徑中經過土壤，因土壤波速較慢而造成。頸縮基樁頻譜圖之共振頻率也略小於完整基樁的共振頻率。比較頸縮位置上、下方的震波頻譜圖發現，震波在通過頸縮位置時，有較多的高頻訊號被阻隔，且隨著缺陷面積比與缺陷長度的增加，高頻波被阻隔的效應越明顯。

關鍵字：頸縮基樁、低應變完整性試驗、參數影響分析

Abstract

This paper used the finite difference method to analyze the vertical acceleration history at the top of the necking pile in the low-strain integrity test. A parametric study was performed to understand the influence of geometric parameters of necking pile on the detection signal. In the parametric study, a necking pile (pile-length = 5 m, the pile diameter = 0.3 m) was assumed in a homogeneous soil. An impulse load with the load duration of 1ms applied to the center of the pile top. The influence parameters in this study include: the necking-length and the ratio of necking area. The numerical simulation result was the acceleration history curve of the pile top. The spectrum diagram was obtained by using the fast Fourier transform. The diagrams were used to identify the signal characteristics of the necked pile. The results of the study show that the reflection signal due to the necking defective can be identified in the acceleration history curve of the necking pile. There is a delay in the reflection signal from the bottom of the necked pile. It can be because that some waves pass through the slower- wave-velocity soil in its propagation path. It is shown that the resonance frequencies of the spectrogram of the necked pile is also slightly less than those of the intact pile. Comparing the spectrogram of the position above and below the necking, it is found that when the wave passes through the position of necking, more high-frequency signals are isolated by the necking. As the defect-area-ratio and the defect-length increase, the effect of isolation the high-frequency wave is more obvious.

Keywords: Necking pile, Low-strain integrity testing, Parametrical study

一、前言

工程上常使用樁基礎來克服基礎下方土壤沉陷過大的問題以穩固建物，但基樁在施工時常造成損傷及缺陷，可能因為澆鑄混凝土施工不當，或孔壁塌陷、孔底積泥，造成樁體內形成空洞、蜂窩、頸縮或頸脹等缺陷現象，但由於基樁深埋於土壤內，所以對於基樁內的缺陷情況卻無法判別，因此有賴基樁完整性試驗以檢測基樁品質。

過去對基樁完整性檢測一直有研究成果被發表，在最近十年中，有關基樁完整性檢測之研究有：Ni, et al. (2006) 以低應變基樁完整性檢測法對高細長比的場鑄樁之施工品質進行研究，因為高細長比的場鑄樁可能因為敲擊能量不足、或應力波在樁內傳播之衰減、或部份應力波傳播至鄰近土層、或不均質的混凝土材料等原因，所以僅能使用較低頻率部份之訊號來進行檢測評估。為了克服這些限制，他們建議對於此類基樁之檢測，宜使用低頻訊號之儀器設備，或使用訊號處理技術以辨識反射波訊號。Ni, et al. (2008) 以連續小波轉換將振動歷時訊號轉換至時頻域，因為振動以時頻譜圖表示，可同時看出震波隨時間與頻率之變動，因此可探討反射波在時頻圖對應之時間，他們也將這個時頻分析法成功地應用於音波回音法之反射波傳回樁頂的時間之判讀中。Huang, et al. (2010) 以有限元素軟體 ABAQUS 對有缺陷的基樁進行音波回音法之數值模擬，探討音波回音法檢測缺陷位置的能力和樁中心軸中可檢測最小缺陷尺寸。他們發現以音波回音法進行基樁完整性檢測時，可探測的基樁長徑比與樁土勁度比有關。Jiang, et al. (2014) 以有限差分法對基樁樁頂承受衝擊載重進行三向度數值模擬，他們發現音波回音法之感測器最佳擺放位置在離樁中心 0.5~0.6 倍半徑處。同時當周圍土壤之波速增加，便可降低三向度波傳播效應，他們發現樁頂敲擊面積對基樁檢測結果影響不大。Zheng, et al. (2015) 以有限元素軟體 ABAQUS 對鋼管樁進行音波回音法之數值模擬，探討音波回音法對鋼管樁之檢測能力，他們也從參數影響分析中，增進判讀反射波傳回樁頂時間之辨識經驗。Ni, et al. (2017) 進行基樁現地試驗，以預先埋設之多根不同缺陷之基樁，透過音波回音法搭配使用複數連續小波轉換分析，試驗結果與實際設計的樁長做比較，他們發展的方法能簡易、肯定及準確的推估基樁長度。Lai, et al. (2017) 於基樁檢測中使用嵌入式加速度計進行音波回音試驗以評估基樁完整性，由其試驗結果顯示，使用嵌入式加速度計的檢測能更準確評估基樁完整性。

為了增加對缺陷基樁之檢測結果作出更為合理的辨識，本研究對缺陷基樁之檢測訊號進行參數影響分析，以增進對檢測訊號與基樁缺陷間之關係的了解，探討各缺陷影響因子對基樁完整性檢測訊號的影響，將有助於建立相關經驗作為在基樁檢測應用之參考。

二、數值分析方法

本研究使用有限差分軟體 FLAC^{3D} 建立三維有限元素模型進行數值分析，設定模型樁長為 5 公尺，直徑 0.3 公尺，土壤模型長寬為 8 公尺 × 8 公尺，高為 10 公尺，即樁底還有 5 公尺厚之土壤。四周邊界設定為自由場邊界(free-field condition)，以模擬震波在此邊界不會產生反射波，土壤下方假設為鉸支承邊界，如圖 1 所示。本研究將基樁埋置於土壤中，土壤與基樁間以界面(interface)元素模擬土壤與混凝土間之接觸力與滑移間之關係。本研究在數值模擬時，模擬在樁中心的地方施以垂直向正弦平方敲擊震源 $P(t)$ ，如式(1)：

$$P(t) = 0.01 \times \sin^2(1000 \pi t) \quad 0 \leq t \leq 0.001 \text{ s} \quad (1)$$

分析時，紀錄每一時步(step)之樁頂離樁中心 0.6 倍樁半徑的位置的加速度反應，每一時步分析的時間為 0.1 微秒，總共分析 10 萬時步(即總分析時間=10 毫秒)。由於錘擊載荷引起的應變很低，可將混凝土與土壤材料視為均質的線彈性材料。本研究假設混凝土密度 2400kg/m^3 、楊氏係數 38.4GPa 、柏松比 0.15；土壤密度 1800kg/m^3 、楊氏係數 11.52MPa 、柏松比 0.2。

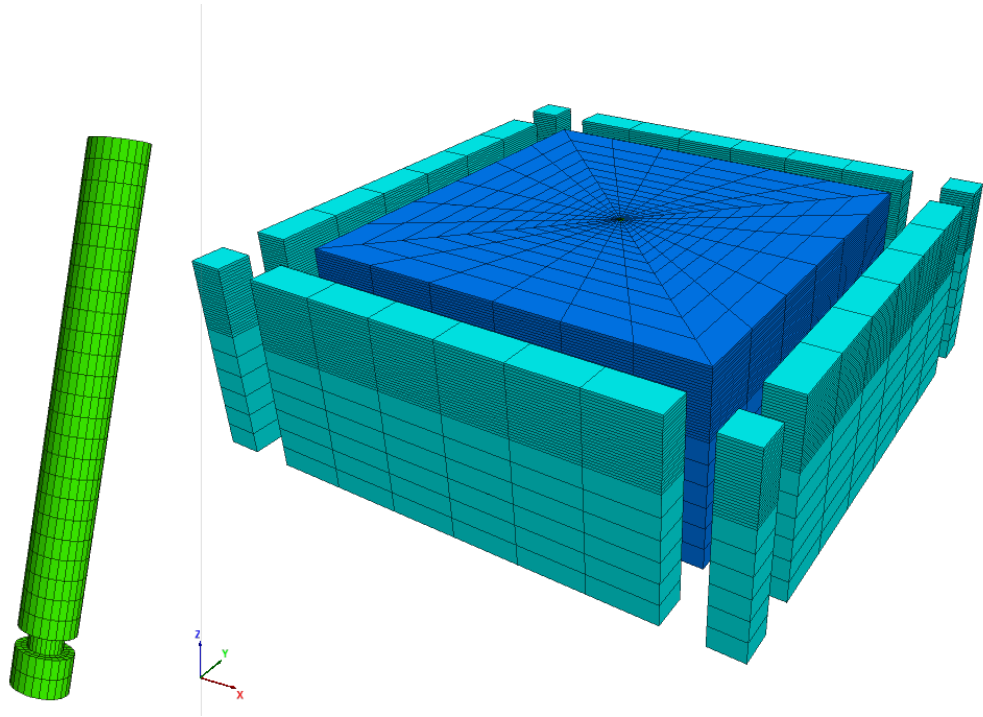


圖 1 FLAC 網格示意圖

本研究在缺陷基樁的參數影響分析中，所討論的影響因子有兩個，分別為缺陷長度(L)、缺陷面積比，以探討對基樁完整性檢測訊號之影響。缺陷面積比之定義如下：

$$\text{缺陷面積比 } A_r = \frac{\text{缺陷面積 } A_d}{\text{基樁斷面積 } A} \times 100 \% \quad (2)$$

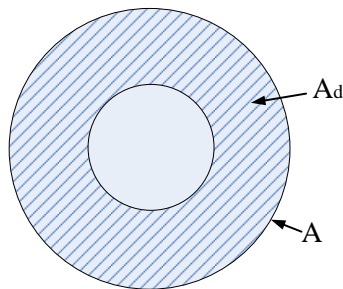


圖 2 缺陷面積比示意圖

因此，缺陷面積比越大，頸縮缺陷越嚴重，將有損此基樁之使用性與承載力。在參數影響分析

中，樁頂加速度歷時曲線能檢測到樁底反射波的訊號，為了能進一步的判釋缺陷情況，本研究將數值模擬所得的加速度歷時曲線進行快速傅立葉轉換得到其頻譜，以比較其差異。在此將分兩個基樁缺陷的參數：缺陷長度($L=0.1、0.2、0.3\text{m}$)與缺陷面積比($A_r=36、64、84、96\%$)加以討論，其他基樁參數將維持不變，例如：基樁長度 5m、基樁直徑 0.3m，缺陷位置從樁頂算起 4m 處，樁土界面勁度=7000 GPa/m，雷利阻尼比=1%，雷利阻尼最低頻率 $f=50\text{Hz}$ 。

三、分析結果與討論

3.1 缺陷面積比對加速度歷時曲線之影響

圖 3 為缺陷面積比對加速度歷時曲線之影響圖，由圖可看出樁底反射波抵達樁頂的時間約為 2.9~4 毫秒，缺陷面積比越大，反射波訊號延遲越長，歷時曲線明顯有向右偏移的趨勢，這可能是因為部分震波在頸縮的傳遞路徑中經過土壤，因土壤波速較慢而造成的延遲現象。但缺陷處反射的訊號抵達樁頂的時間則約在 1.6 毫秒，變化不大。而且缺陷面積比越大，缺陷處反射訊號之振幅越大，有較多震波能量在缺陷處反射。

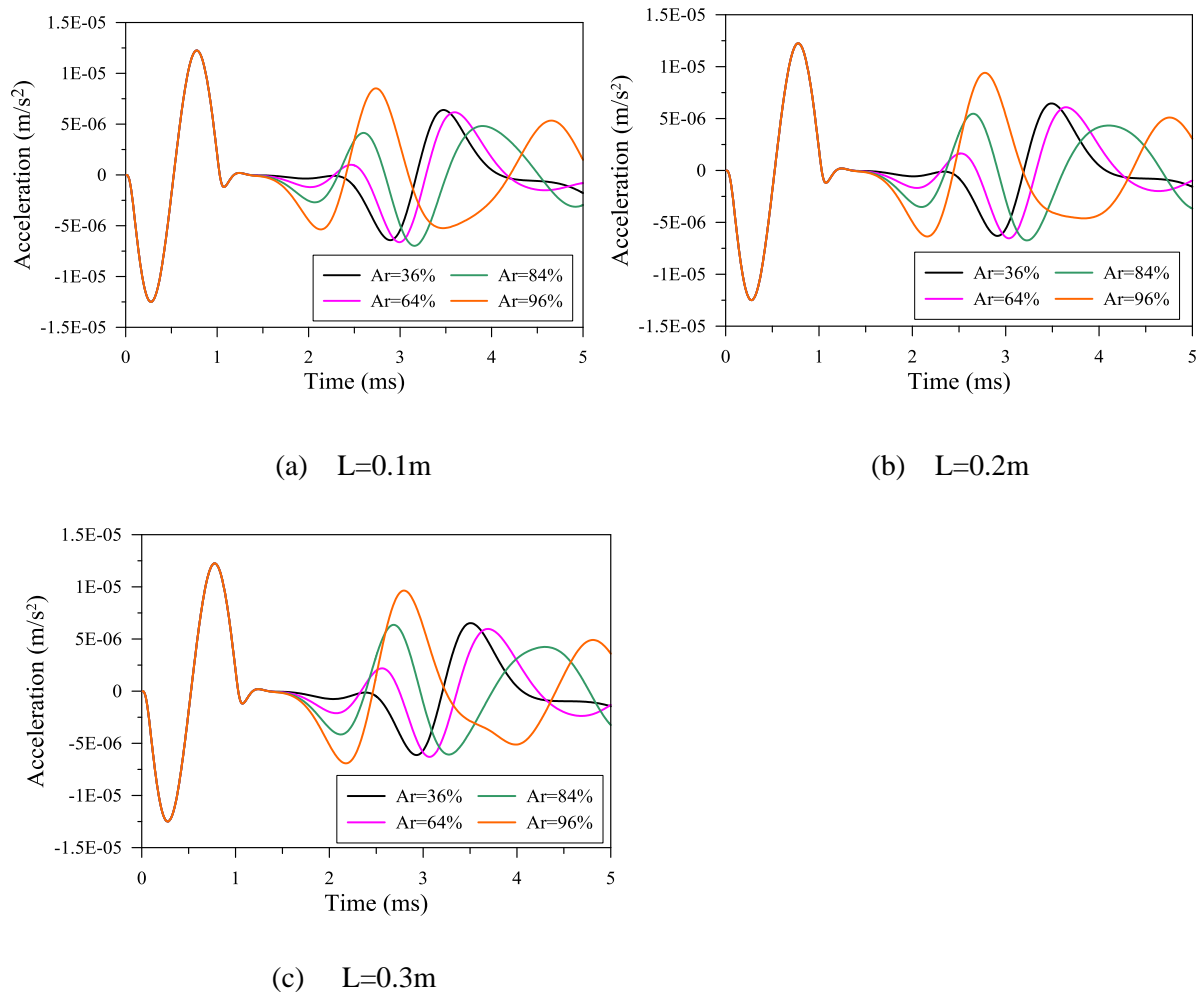


圖 3 缺陷面積比 A_r 對加速度歷時曲線之影響

3.2 缺陷長度對加速度歷時曲線之影響

圖 4 為缺陷長度對加速度歷時曲線之影響圖，由圖可看出缺陷長度的增加，將延遲缺陷或樁底的反射訊號到達樁頂的時間，此也是因為震波在頸縮的傳遞路徑中經過土壤，當缺陷長度增加延遲時間越長。值得一提的是，缺陷深度(頸縮頂端至樁頂)皆為 4m，但在缺陷處反射仍出現些微延遲現象，因此震波在頸縮處之反射，並非從頸縮頂端產生。

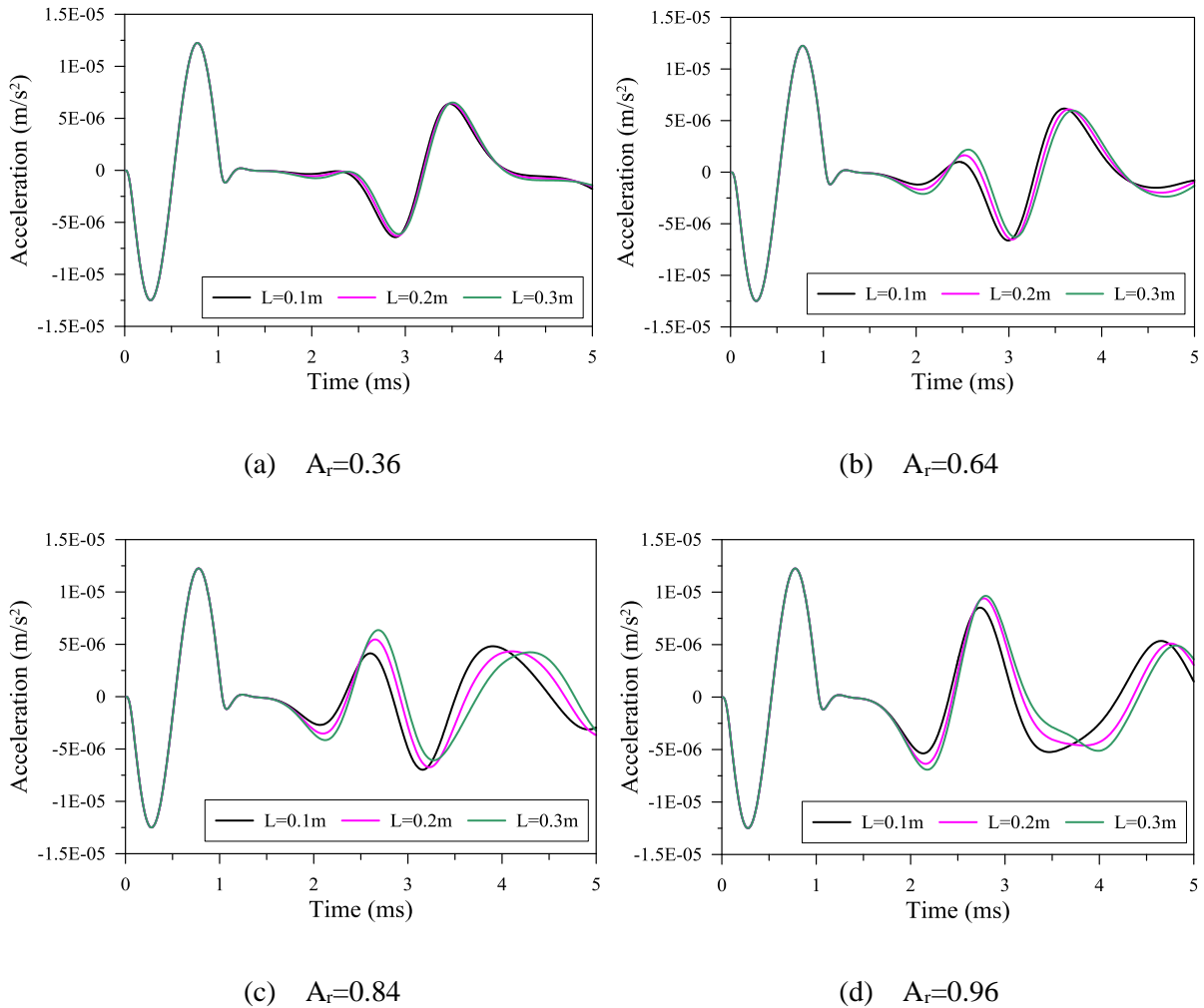


圖 4 缺陷長度 L 對加速度歷時曲線之影響

3.3 缺陷面積比對頻譜圖之影響

圖 5 為缺陷面積比對頻譜圖之影響圖，由圖可看出完整基樁之前兩個共振頻率約為 500、900Hz，且第一個波峰振幅大於第二個波峰。隨著缺陷面積比的增加，共振頻率逐漸降低，一直到缺陷面積比等於 96% 時，前兩個共振頻率約為 400、700Hz (當缺陷長度 $L=0.1m$)；若 $L=0.3m$ ，前兩個共振頻率約為 300、600Hz。因此，缺陷面積比與缺陷長度皆會影響基樁之共振頻率，且共振頻率隨缺陷面積比或缺陷長度之增加而降低。由圖也可看出，缺陷面積比越大的基樁在第一個波峰之振幅會降低，比完整基樁的振幅小，且隨缺陷面積比的增加振幅降低越明顯，但第二個波峰之振幅隨缺陷面積比的增加而增加，甚至高於完整基樁之第二波峰振幅。

圖 5(d)為缺陷面積比 $A_r=96\%$ 在不同頸縮缺陷長度 L 之頻譜圖，由圖 5(d)可看出，這些曲線之共振頻率比完整基樁($L=0$)小，第一個波峰能量(幅值)比完整基樁低，但第二個波峰能量(幅值)比完整基樁高。隨頸縮缺陷長度之增加，前兩個共振頻率隨之降低。

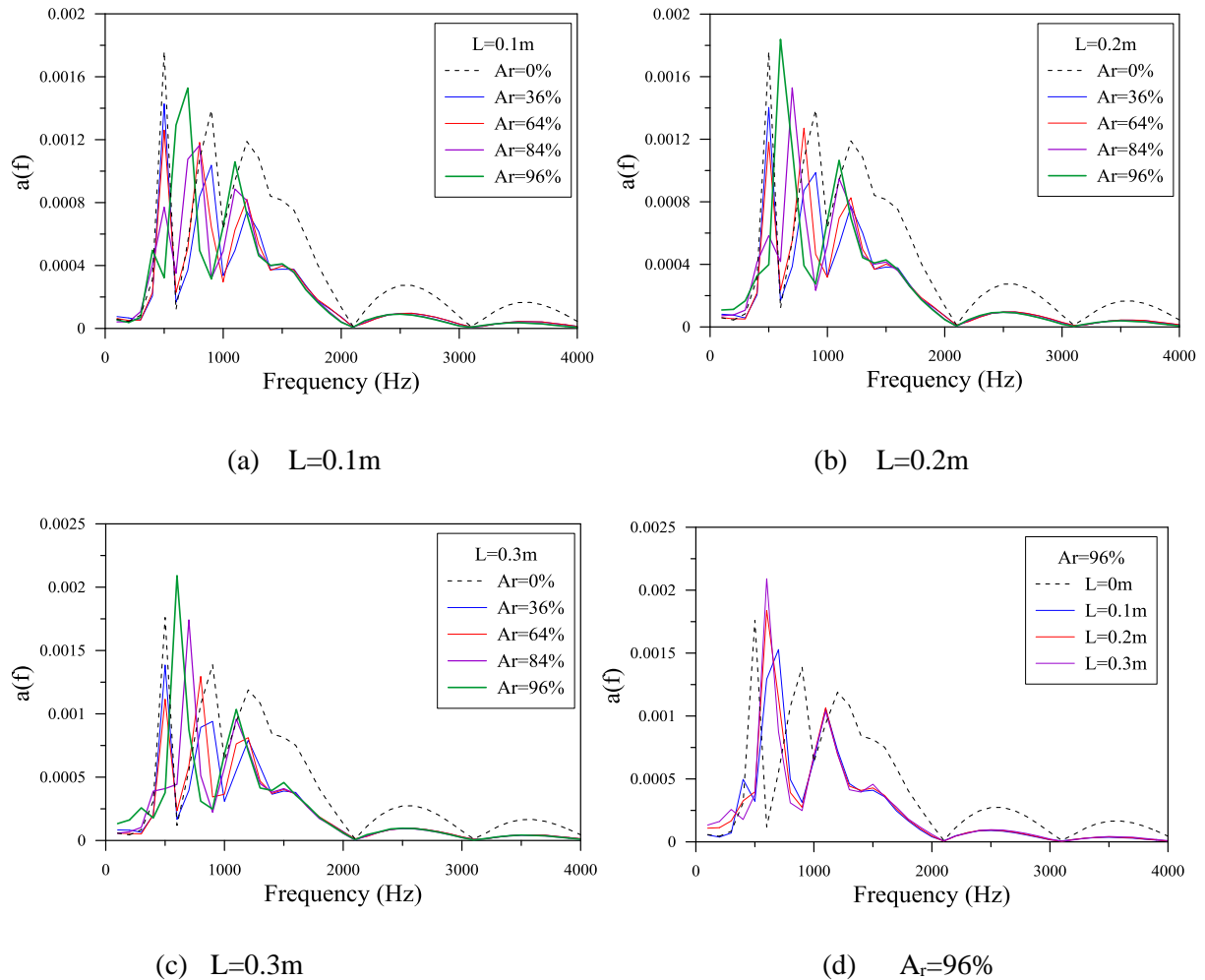


圖 5 缺陷面積比 A_r 對頻譜圖之影響

3.4 頸縮缺陷上下方位置之頻譜差異

圖 6 為頸縮缺陷上下方測點之加速度振幅差比較圖，縱座標 $\Delta a(f)$ 為缺陷下方測點之頻譜幅值減缺陷上方測點之頻譜幅值，由圖可看出差異曲線在低頻部分之振幅差為正值，即低頻波之能量在頸縮缺陷下方高於缺陷上方；差異曲線在高頻部分振幅差為負值，即高頻波之能量在缺陷下方低於缺陷上方，此現象說明高頻波被頸縮缺陷所阻隔。如果定義被頸縮缺陷阻隔的震波最小頻率為最小阻隔頻率時，隨著缺陷面積比的增加，最小阻隔頻率隨之降低(如圖 6 所示)，而且振幅的降低值也隨缺陷面積比的增加而增加。因此，頸縮缺陷面積比的增加，將使更多的震波被阻擋在頸縮缺陷的上方。由圖 6 可看出，頻率高於 1700Hz 的震波之振幅差異皆很小，此可能是震波在此頻率範圍的能量本身就不大的關係(可從圖 5 看出)。

圖 6(d)為缺陷面積比 $A_r=96\%$ 在不同頸縮缺陷長度 L 下，缺陷上下方之頻譜變化曲線，由圖 6(d)可看出，這些曲線之最小阻隔頻率皆相同，但能量(幅值)降低量隨頸縮缺陷長度之增加而增加。所以，因為頸縮缺陷之存在，可以阻隔高頻震波傳播到缺陷下方。最小阻隔頻率不受頸縮長度之影響，而是與缺陷面積比有關。

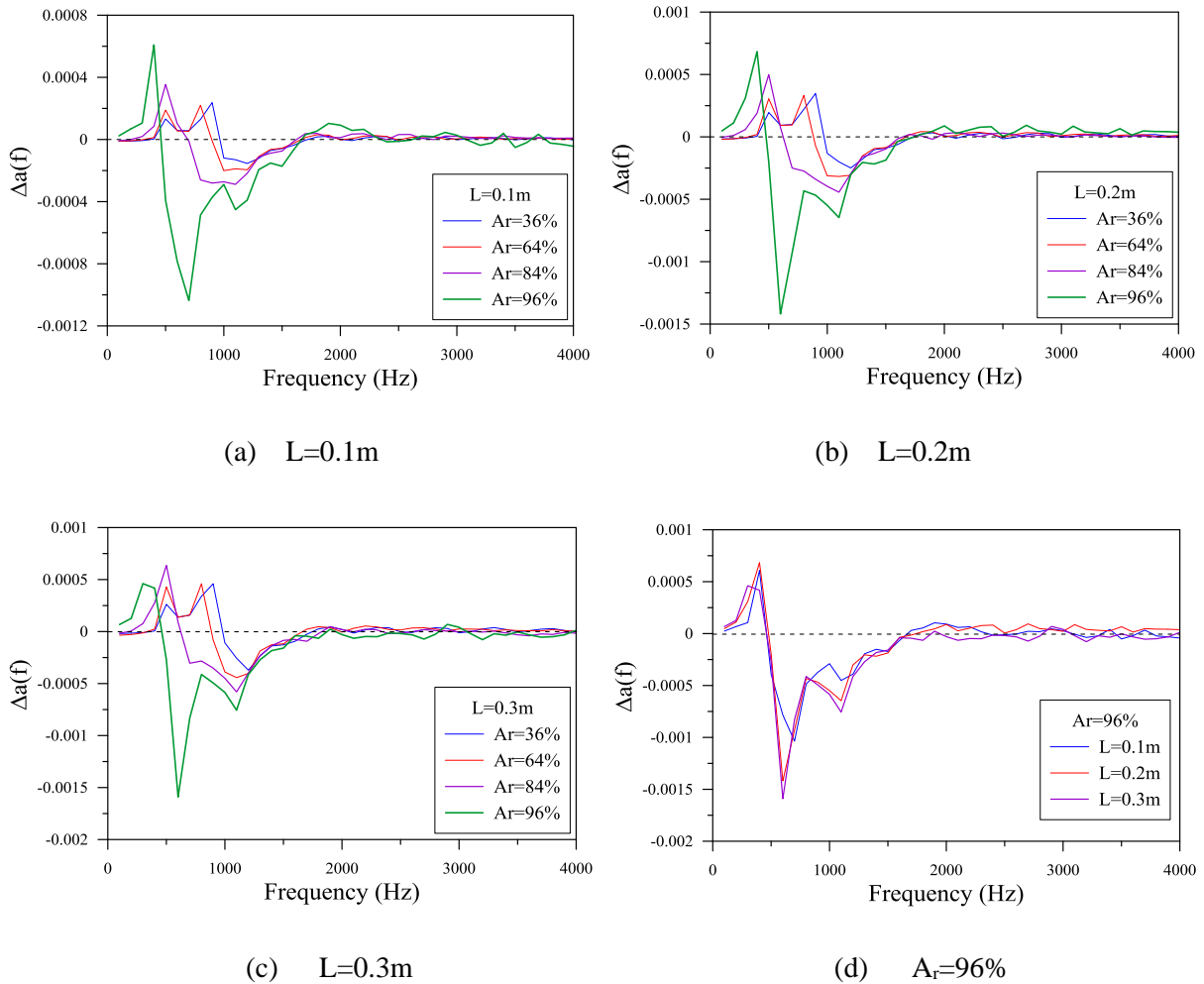


圖 6 缺陷上下方頻譜差異之比較

四、結論

本研究以 $FLAC^{3D}$ 進行缺陷基樁之低應變震波檢測試驗之參數影響分析，將分析結果進行整理，歸納成以下結論：

1. 隨缺陷長度或缺陷面積比之增加，樁底反射波與缺陷反射波回傳至樁頂之訊號之延遲時間也增加。
2. 缺陷基樁之共振頻率隨缺陷面積比或缺陷長度之增加而降低。
3. 缺陷基樁在第二個波峰的振幅大於第一個波峰，且隨缺陷面積比之增加，此種現象越明

顯。

4. 因為頸縮缺陷之存在，可以阻隔高頻震波傳播到缺陷下方，最小阻隔頻率不受頸縮長度之影響，而是與缺陷面積比有關。

致謝

本研究承蒙科技部計畫(MOST-106-2221-E-324-010-)之經費支持，以及成功大學倪勝火教授提供軟硬體資源，使本研究得以順利進行，特此致謝。

參考文獻

1. Hertlein, B. and Davis, A., "Nondestructive Testing of Deep Foundation", John Wiley & Sons, Ltd, (2006).
2. Huang, Y.H., Ni, S.H., Lo, K.F., and Charng, J.J., "Assessment of identifiable defect size in a drilled shaft using sonic echo method: Numerical simulation", *Computers and Geotechnics*, Vol. 37, pp. 757–768 (2010).
3. Jiang, J., Liu, D.J., Lu, Z.T., Tao, J., and Liu, H.X., "A study on low strain integrity testing of platform-pile system using staggered grid finite difference method", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 67, pp. 345–352 (2014).
4. Lai, J., Yang, P.C., Yang, B.H. and Chang, D.W., "Integrity Testing of Model Pile with Embedded Accelerometers", 2017 International Conference on Transportation Infrastructure and Materials, Qingdao, China (2017).
5. Ni, S.H., Lehmann, L., Charng, J.J. and Lo, K.F., "Low-strain integrity testing of drilled piles with high slenderness ratio", *Computers and Geotechnics*, Vol. 33, pp. 283–293 (2006).
6. Ni, S.H., Lo, K.F., Lehmann, L., and Huang, Y.H., "Time–frequency analyses of pile-integrity testing using wavelet transform", *Computers and Geotechnics*, Vol. 35, pp. 600–607 (2008).
7. Ni, S.H., Yang, Y.Z., Tsai, P.H. and Chou, W.H., "Evaluation of pile defects using complex continuous wavelet transform analysis", *NDT & E International*, Vol. 87, pp. 50-59 (2017).
8. Ni, S.H., Li, J.L., Yang, Y.Z. and Yang, Z.T., "An improved approach to evaluating pile length using complex continuous wavelet transform analysis", *NDT in Civil Engineering*, Vol. 59(6), pp. 1-7 (2017).
9. Ni, S.H., Yang, Y.Z. and Lyu, C.R., "Application of wavelet transform for the impulse response of pile", *Smart Structures and Systems*, Vol. 19(5), pp. 513-521 (2017).
10. Zheng, C., Liu, H., Kouretzis, G.P., Sloan, S.W. and Ding, X., "Vertical response of a thin-walled pipe pile embedded in viscoelastic soil to a transient point load with application to low-strain integrity testing", *Computers and Geotechnics*, Vol. 70, pp. 50–59 (2015).