

## 開口槽溝對高速列車的震波阻隔效應之研究

### The Study on the Screening Effectiveness of Vibrations induced by High Speed Train with Open Trenches

蔡佩勳<sup>1</sup> 陳振昌<sup>2</sup>

Pei-Hsun Tsai, Chen-chang Chen

1 朝陽科技大學營建工程系助理教授

2 朝陽科技大學營建工程系研究生

<sup>1</sup>Department of Construction Engineering

Chaoyang University of Technology

<sup>2</sup>The Graduate Institute of Construction Engineering

Chaoyang University of Technology

#### 摘要

本研究主要是針對開口槽溝在阻隔高速列車之震波傳播，應用二維頻率域邊界元素法，分析路堤與高架橋深基礎承受垂直向中低頻率之簡諧荷重，以開口槽溝作為震波阻隔機制，研究槽溝後方地表位移振幅之阻隔效果。分析時假定土壤為線彈性，均質且均向的半無限域介質材料，並考慮遲滯材料阻尼的存在。分別以路堤與高架橋深基礎兩種軌道基礎型式、列車振動中心頻率、槽溝設置位置與開口槽溝幾何形狀等影響參數作一系列之震波阻隔分析及討論。在開口槽溝幾何尺寸部份，將探討開口槽溝寬度  $W$ ，深度  $D$ ，距離  $L$  對震波阻隔影響。分析所得結果以各影響參數對平均振幅降低比  $\bar{A}_r$  之關係曲線來表示，以研究各影響參數對震波阻隔之影響。由研究結果顯示，基礎型式、槽溝寬度對震波阻隔效果之影響不大。同一種槽溝尺寸之震波阻隔效果隨頻率之增加而增加。在中低頻率時，阻隔效果隨著槽溝深度的增加而增加，槽溝的位置對震波阻隔效果的影響幾乎可以忽略。在低頻率時，槽溝幾乎無減震效果。但在槽溝深度等於 30m 時稍具減震效果，此結果隨槽溝與震源距離之增加而越明顯。

**關鍵字：**開口槽溝、震波阻隔、高速列車

#### Abstract

The main purpose of this research is to study the screening effectiveness of surface waves induced by a high-speed train with open trenches. The numerical evaluation has been carried out to study the effects due to wave isolation of dike or bridge foundations subjected to vertical low-frequency vibration using 2-D frequency domain boundary element method. In this study, soil is assumed to be homogeneous, isotropic, and linear elastic half-plane, the hysteretic damping is also added. The main influence factors considered in this study are trench geometry,

the distance of trench and foundation, and frequency of vibration. To study the efficiency of isolation vibration, vertical average amplitude reduction ratios behind trench are analyzed. Using of open trench as barrier, the foundation style and width of open trench are insignificant influence factors on screening effectiveness. Screening effectiveness of open trench will be better in higher frequency. In moderate-low frequency vibration, the deeper of open trench, the more efficiency of isolation vibration, and the location of open trench does not matter to isolation vibration. The results of this study show that trench cannot isolation low frequency vibration, but as the depth of open trench is 30 m, the more isolation vibrations, the more distance between of trench and the wave source.

**Key Words** : open trench, vibration isolation, high speed train

## 一、前言

高速鐵路將通過台南科學工業園區，高速列車對鐵道沿線將產生比傳統火車更大之地表振動。同時，在園區內所生產之高科技產品在其製造過程中，對於振動較為敏感，有較嚴格的限制。因此，如何阻隔震波之傳播，使它對鄰近地表振幅的影響減至最低，成為一個重要課題。在鐵道沿線附近開挖開口槽溝 (open trench)，作為震波屏障以降低園區地表振幅，不失為良好的阻隔震波方法之一。高鐵列車之 1/3 八音階頻譜分析圖[1]，如圖 1 所示，由圖可看出，高鐵列車之外力系統以 1、5、10Hz 之中心頻率相對較大。由於高鐵之規劃案中擬以路堤與高架橋興建，本文也將以這兩種基礎型式做研究。因此，本研究應用二維頻率域邊界元素法，分析路堤與高架橋深基礎承受垂直向頻率 1、5、10Hz 之簡諧荷重，以開口槽溝作為震波阻隔機制，研究槽溝後方地表位移振幅之阻隔效果。

槽溝減震這類問題的關鍵通常與介質材料的性質和槽溝幾何尺寸有關，震波阻隔效果也涉及複雜的應力波傳行為。近年來，國內專家學者陸續對高鐵之減震議題進行研究，台灣大學楊永斌教授(1997)[2]以有限元素法分析高速列車行經路堤與高架橋時土壤振動之反應。成功大學徐德修教授(1999)[1]應用有限元素法分析開口槽溝對地表振源之減震效果。

近年來，邊界元素法已廣泛的應用在大地工程問題上，因為邊界元素法只需在定義域的邊界上切割元素，可將分析問題之維度降階，元素數目減少許多，因未知數較少，故可減低記憶體容量。同時在處理半無限域問題時，因基本解(fundamental solution)能自動滿足輻射條件(radiation condition)，無實體波 (body wave) 碰到人造邊界 (artificial boundaries) 反射所造成之誤差，因此可提高計算結果的精度。對於僅關心地表振幅降低比的震波阻隔問題來說，以邊界元素法來作分析實為理想之方法。應用邊界元素法分析基礎承受機器振動方面，Beskos (1986)[3]等以常數元素計算主動控制與被動控制的振幅降低比，並討論了開口槽溝及填充槽溝對振動基礎之震波阻隔效果。由其結果顯示，開口槽溝較填充槽溝阻隔效果為佳。Ahmad 及 Al-Hussaini (1991)[4]對不同開口槽溝的尺寸及基礎振動頻率等作一系列之計算，整理出迴歸曲線，以便於初步設計時之參考。倪勝火等人(1994)[5]利用 Kitahara(1985)[6]的二維基本解，研究垂直與水平振態下，開口槽溝之主動阻隔，他們建議槽溝深度為 1~1.25 倍剪力波波長時阻隔效果較佳。本人(2000)[7]曾以混凝土填充槽溝對振

動基礎之震波阻隔為題做過初步之研究，發現震波阻隔效果隨槽溝寬度之增加而增加，槽溝深度以 0.75 倍雷利波波長為最佳，且槽溝斷面積之最佳設計為 0.1 倍雷利波波長平方。另外槽溝位置對震波阻隔之影響不大。在邊界元素法方面，此方法已廣泛應用於地表振動基礎之減震問題上，不過多以分析地表基礎承受機器振動下，槽溝對震波之阻隔效果。對於構築於路堤或樁基礎之高鐵鐵軌基礎，承受高速列車所帶來中低頻振動，槽溝之減震研究反而較少。因此，本文也希望能對槽溝在中低頻震波阻隔方面得到更多經驗，對槽溝之減震設計有更多之了解。

本研究將應用二維頻率域邊界元素法對槽溝之震波阻隔效果進行研究，分析時假定土壤為線彈性，均質且均向的半無限域介質材料。並考慮遲滯材料阻尼的存在，此阻尼與振動頻率無關，在頻率域振動問題中，可經由對應原理[8]將材料阻尼引入系統內計算。本研究應用頻率域之無限域基本解及貝氏交換定理(reciprocal theorem)[8]，推導出邊界積分方程式。在不影響數值結果精度下，為求簡化起見，邊界元素之離散過程中，將採用常數邊界元素，即元素上各點之物理量均相等。介質域之邊界分割成  $n$  個常數邊界元素，則邊界積分方程式可離散成  $n$  個以常數元素之物理量為參數的線性方程式。然後代入介質域之邊界條件，求解此  $n$  個方程式，即可得所有邊界上各元素之物理量，即曳引力(traction)與位移。

## 二、數值方法

若有 A,B 兩組力系，由貝氏交換定理知：

$$\int_{\Gamma} t_i^A(x, \omega) u_i^B(x, \omega) d\Gamma + \int_s f_i^A(x, \omega) u_i^B(x, \omega) ds = \int_{\Gamma} t_i^B(x, \omega) u_i^A(x, \omega) d\Gamma + \int_s f_i^B(x, \omega) u_i^A(x, \omega) ds \quad (1)$$

式中， $u_i^A(x, \omega)$  與  $u_i^B(x, \omega)$  分別為兩力系之位移場， $f_i^A(x, \omega)$  與  $f_i^B(x, \omega)$  為兩力系之實體力，而  $t_i^A(x, \omega)$ ， $t_i^B(x, \omega)$  為兩力系之曳引力。設 A 力系為基本解的力系，B 力系為振動彈性體之力系。基本解之定義為全平面內，在點  $Q(y)$  沿  $e_j$  方向加一單位力，而於另一點  $P(x)$  在  $e_i$  方向所引起之位移及曳引力，其中 Q 點稱為載重點 (loading point)，P 點稱為場點 (field point) 或觀測點 (observation point)，將位移場之基本解表為  $U_{ij}(x, y, \omega)$ ，曳引力場表為  $T_{ij}(x, y, \omega)$ 。其中  $x, y$  分別代表 P, Q 之位置向量，則二維全平面的基本解必須滿足下式

$$\mu \nabla^2 \bar{u}(x, y, \omega) + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \bar{u}(x, y, \omega) + \rho \omega^2 \bar{u}(x, \omega) = -\delta(y - x) \quad (2)$$

設  $U$  為滿足上式之基本解，則  $U$ [6]可表示為：

$$U_{ij}(x, y, \omega) = \frac{i}{4\mu} \left[ \{H_0^{(1)}(k_{Tr}) - (k_{Tr})^{-1} H_1^{(1)}(k_{Tr}) + (k_L/k_{Tr})^2\} (k_{Tr})^{-1} H_1^{(1)}(k_{Tr}) \delta_{ij} - r_{,i} \{H_0^{(1)}(k_{Tr}) - 2(k_{Tr})^{-1} H_1^{(1)}(k_{Tr})\} \right. \\ \left. H_1^{(1)}(k_{Tr}) - \left(\frac{k_L}{k_T}\right)^2 \{H_0^{(1)}(k_{Tr}) - 2(k_{Tr})^{-1} H_1^{(1)}(k_{Tr})\} \right] \quad (3)$$

上式(3)中， $H_0^{(1)}$ ， $H_1^{(1)}$ 為第一類第零階與第一階 Hankel 函數，分子之  $i=\sqrt{-1}$ 。 $\delta_{ij}$  為 delta 函數，當  $i=j$ ， $\delta_{ij}=1$ ，而其他  $i \neq j$  時， $\delta_{ij}=0$ ，且  $r=|x-y|$ ，另外，

$$k_T = \frac{\omega}{C_T}, C_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (4.1)$$

$$k_L = \frac{\omega}{C_L}, C_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (4.2)$$

$C_T$  為剪力波波速， $C_L$  為壓力波波速，而  $k_T, k_L$  則分別為剪力波、壓力波數(wave number)。將 A,B 兩力系代入(式 1) 得：

$$\int_{\partial D + \partial R} [t_i(x, \omega)U_{ij}(x, y, \omega) - T_{ij}(x, y, \omega)u_i(x, \omega)]d\Gamma = u_j(y, \omega) \quad , y \text{ 屬介質 } D \text{ 內} \quad (5)$$

以上積分在無窮遠的邊界  $\partial R$ ，因滿足幅射條件[6]，無窮遠的邊界  $\partial R$  之積分值為零，故 (式 5)可簡化為下式：

$$\int_{\partial D} [t_i(x, \omega)U_{ij}(x, y, \omega) - T_{ij}(x, y, \omega)u_i(x, \omega)]d\Gamma = u_j(y, \omega) \quad (6)$$

若使  $y$  趨近邊界  $\partial D$  時，可建立邊界積分方程式：

$$\int_{\partial D} [t_i(x, \omega)U_{ij}(x, y, \omega) - T_{ij}(x, y, \omega)u_i(x, \omega)]d\Gamma = C_{ij}u_j(y, \omega) \quad (7)$$

當  $y$  在平滑邊界上且應用常數元素時，根據 Cauchy 主值觀念

$$C_{ij} = \frac{1}{2}\delta_{ij} \quad (8)$$

若將邊界  $\partial D$  切割為  $n$  個常數元素，則邊界積分方程式 (式 7) 離散化，成為  $n$  個方程式：

$$C_{ij}u_i + \sum_{j=1}^n \tilde{H}_{ij}u_j = \sum_{j=1}^n G_{ij}t_j \quad (9)$$

其中

$$\tilde{H}_{ij} = \int_{\Gamma_j} T_{ij}(x, y, \omega)d\Gamma_j \quad (9.1)$$

$$G_{ij} = \int_{\Gamma_j} U_{ij}(x, y, \omega)d\Gamma_j \quad (9.2)$$

(式 9)可改寫為：

$$\sum_{j=1}^n H_{ij} u_j = \sum_{j=1}^n G_{ij} t_j \quad (10)$$

其中

$$H_{ij} = C_{ij} + \tilde{H}_{ij} \quad (10.1)$$

(式 10)以矩陣形式表示，可表示如下：

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ t_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

將邊界條件代入上式，可整理成以下形式：

$$A \cdot X = F \quad (12)$$

此式為複數線性方程式，可用高斯消去法將未知向量 X 解出後，即可得邊界上所有元素之位移振幅及曳引力。

### 三、分析模式

本文探討開口槽溝應用在高鐵列車所引起的震波之減震效果分析，分別以路堤與高架橋深基礎三種軌道基礎型式(土堤、30m 長樁基礎、10m 長樁基礎)、列車振動中心頻率、槽溝設置位置與開口槽溝幾何形狀等影響參數作一系列之震波阻隔分析及討論。本文考慮垂直簡諧震源放置在土堤或高架橋之軌道基礎上，為了保護鄰近的建築物不受震波干擾，在震源與欲保護區域間設置開口槽溝，如圖 2 所示。當應力波碰到槽溝會有反射、繞射、散射的現象，藉以衰減波的能量，來達到降低槽溝後方地表振幅的目的。

為檢核分析程式之正確性，本研究先分析振動基礎以開口槽溝作為震波阻隔之案例，主要是與 Beskos 等人(1986)【3】的研究結果作比較，本案例所使用之材料性質及幾何條件為：深度影響參數  $D=d/L_r=1$ ，寬度影響參數  $W=w/L_r=0.1$ ，槽溝中心至振動基礎中心距離參數  $L=l/L_r=5$ ，土壤剪力模數  $G=132 \text{ MN/m}^2$ ，土壤柏松比  $\nu=0.25$ ，材料阻尼比  $\zeta=3\%$ ，雷利波波速  $V_R=250\text{m/sec}$ ，土壤單位重  $\gamma_s=17.5\text{kN/m}^3$ ，基礎振動頻率  $f=50\text{Hz}$ 。分析後之結果如圖 3 所示，結果顯示與 Beskos【3】等人所做之研究結果相當接近。

為使元素網格在不失精度的條件下，使用最有效的元素網格來分析，本研究先以不同元素網格進行計算，改變邊界各區域的元素數目，藉以了解不同區域之元素離散程度對結果精度的影響。由本研究之結果發現，元素網格範圍選取至槽溝後方 200m 300m 或 400m，

對地表振幅分析結果無影響，如圖 4 所示，因此本研究所用之元素網格範圍將取到槽溝後方 300m 處。同時，本研究也發現，每一區域的元素個數到某一個數後，選取更多之元素對數值結果之精度提升不多。因此，本研究為達到節省記憶體空間、迅速得到合理結果之目的，在震源附近之元素切割較為細緻，元素長度為 0.33m。由於震波遇到槽溝會產生反射、散射、繞射等複雜的波傳行為，因此槽溝元素亦分割較為緻密，每個元素長度為 0.5m。震源與槽溝間之表面及槽溝後方接近槽溝之表面，由於反射及繞射後預期的結果變化較大，故所切割之邊界元素也採用 0.5m 長度，至於距離槽溝後方較遠的區域，地表振幅之影響較小，採用較大的元素尺寸，以 1m 作為邊界元素之長度。

為了評估槽溝對震波阻隔之效果，本文將採 Beskos(1986)【3】所建議的平均振幅比  $\bar{A}_r$  來表示。平均振幅降低比係取槽溝後方適當距離的振幅降低比  $A_r$  加以平均而得

$$\text{定義：} A_r(\text{振幅降低比}) = \frac{\text{有槽溝之地表位移振幅}}{\text{無槽溝之地表位移振幅}} \quad (16.1)$$

$$\text{平均振幅降低比 } \bar{A}_r = \frac{1}{L} \int_0^L A_r(x) dL \quad (16.2)$$

上式中，L 取槽溝後方適當之距離，本文將取 300m。

本文在分析時，分別就路堤與高架橋深基礎等軌道基礎型式及列車振動中心頻率 1、5、10Hz 做討論，假設土堤尺寸分別為堤高 5m，頂部寬度 5m，底部寬 15m；高架橋高 8m，寬 10m，橋底有深 10m 或 30m 之樁基礎。而土壤之資料將參考中鼎公司對南科工址之鑽探結果[9]，假設本區土壤剪力模數  $G=125 \text{ MN/m}^2$ ，單位重  $\gamma=19.6 \text{ kN/m}^3$ ，柏松比  $\nu=0.45$ ，材料阻尼比  $\zeta=3\%$ ，雷利波波速  $=250 \text{ m/sec}$ 。高架橋樁基礎之材料為混凝土，剪力模數  $G=13600 \text{ MN/m}^2$ ，單位重  $\gamma=23.5 \text{ kN/m}^3$ ，柏松比  $\nu=0.25$ ，材料阻尼比  $\zeta=15\%$ 。本研究所用之幾何尺寸配置圖，如圖 5 所示。

在開口槽溝幾何尺寸部份，將探討開口槽溝寬度 W，深度 D，距離 L 對震波阻隔影響。分析所得結果以各影響參數對平均振幅降低比  $\bar{A}_r$  之關係曲線來表示，以研究各影響參數對震波阻隔之影響。

#### 四、分析結果與討論

##### 1. 高架橋深基礎(10m,30m 長樁基礎)

圖 6 為開口槽溝深度對平均振幅降低比  $\bar{A}_r$  之關係曲線，振動頻率為 10Hz，槽溝距離震源 75m。由圖 6 可看出不同槽溝寬度之關係曲線幾近重疊，因此槽溝寬度的影響不大。這可能是震波碰到槽溝後，寬度之大小對震波散射現象之影響不大，因此槽溝寬度對阻隔效果的影響幾乎可以忽略。由圖 6 可看出，10m 樁長之關係曲線幾乎與 30m 樁長之曲線重疊，故樁長度並不影響槽溝之震波阻隔效果。同時由圖 6 也可看出，阻隔效果隨著槽溝深度的增加而增加，槽溝深度為 15m 時，平均振幅降低比  $\bar{A}_r$  已達 0.25，即設置槽溝後，只剩 1/4 地表位移振幅。當槽溝深度超過 15m，對震波阻隔效果的影響就沒有明顯的增加。因此，可看出深度對震波阻隔有一定的影響，但到達一

定程度時影響效果就不那麼顯著。如果 10m 樁長之振動頻率仍為 10Hz，槽溝寬度 2m，開口槽溝深度與位置對震波阻隔效果的影響，如圖 7、8 所示。由圖 7、8 可看出不同槽溝位置之關係曲線幾近重疊，因此槽溝與振源之距離的影響不大。因此，中低頻之振動頻率( $f=10\text{Hz}$ )，設置槽溝的位置對震波阻隔效果的影響幾乎可以忽略。

如果 10m 樁長振動頻率為 1Hz，槽溝寬度 2m，開口槽溝深度與位置對震波阻隔效果的影響，如圖 9 所示。由圖 9 可看出槽溝與震源距離  $L$  為 50m 時，不同深度之槽溝的平均振幅降低比  $\bar{A}_r$  幾乎等於 1，亦即槽溝無減震功能。但隨著槽溝與震源距離  $L$  之增加，中深度( $D=30\text{m}$ )槽溝之減震效果逐漸發揮，當槽溝與震源距離  $L$  等於 150m 時，平均振幅降低比  $\bar{A}_r$  約為 0.6。但對淺深度( $D < 10\text{m}$ )與大深度( $D > 50\text{m}$ )之槽溝，槽溝即無減震功能。因此，低頻之振動頻率( $f=1\text{Hz}$ )且中深度( $D=30\text{m}$ )槽溝具減震效果。

圖 10 為 10m 樁長之基礎，槽溝距離震源 75m，開口槽溝深度對平均振幅降低比  $\bar{A}_r$  之關係曲線，由圖可看出淺槽溝之震波阻隔效果不大，同一種槽溝尺寸之震波阻隔效果隨頻率之增加而增加。振動頻率 10Hz 的平均振幅降低比  $\bar{A}_r$  比 5Hz 小 0.2 左右，且都在槽溝深度超過 15m 左右，平均振幅降低比  $\bar{A}_r$  之變化已不大。

## 2. 路堤基礎(5m 高土堤)

圖 11 為開口槽溝深度對平均振幅降低比  $\bar{A}_r$  之關係曲線，振動頻率為 10Hz，槽溝距離震源 75m。由圖 11 可看出不同槽溝寬度之關係曲線重疊在一起，此結果與高架橋深基礎之結果相似。因此，對深基礎與路堤基礎而言，槽溝寬度對震波阻隔效果之影響不大。同時由圖 11 也可看出，阻隔效果隨著槽溝深度的增加而增加，槽溝深度為 20m 時，平均振幅降低比  $\bar{A}_r$  達 0.25。當槽溝深度超過 20m，對震波阻隔效果的影響就沒有明顯的增加。如果振動頻率仍為 10Hz，槽溝寬度 2m，開口槽溝深度與位置對震波阻隔效果的影響，如圖 12 所示。由圖 12 可看出除了  $L=50\text{m}$  之關係曲線稍不一樣外，其餘槽溝位置之關係曲線幾近重疊，因此槽溝與振源之距離的影響不大。因此，對於路堤基礎而言，在中低頻之振動頻率( $f=10\text{Hz}$ )作用下，設置槽溝的位置對震波阻隔效果的影響也可以忽略。

如果振動頻率為 1Hz，槽溝寬度 2m，開口槽溝深度與位置對震波阻隔效果的影響，如圖 13 所示。由圖 13 可看出低振動頻率下，槽溝減震之結果與高架橋深基礎之結果相似。因此，低頻之振動頻率( $f=1\text{Hz}$ )且中深度( $D=30\text{m}$ )槽溝具減震效果，且隨槽溝與震源距離之增加而增加，當槽溝與震源距離  $L$  等於 150m 時，平均振幅降低比  $\bar{A}_r$  約為 0.7。圖 14 為槽溝距離震源 75m，開口槽溝深度對平均振幅降低比  $\bar{A}_r$  之關係曲線，由圖可看出淺槽溝之震波阻隔效果不大，同一種槽溝尺寸之震波阻隔效果也隨頻率之增加而增加。

## 3. 綜合分析

圖 15 為槽溝距離震源 100m，上述兩種基礎型式於 1、5、10Hz 頻率下，開口槽溝深度對平均振幅降低比  $\bar{A}_r$  之關係曲線，由圖可看出三種基礎型式(土堤、10m 深樁基礎、30m 深樁基礎)之槽溝減震效果差異不大。圖 16 為槽溝寬度 2m、深度 50m，振動頻率 10Hz，槽溝後方位置對地表垂直位移振幅關係曲線，由圖可看出在中低頻振動

(10Hz)，軌道基礎下為土堤之槽溝後方地表位移振幅較高架橋樁基礎為大。圖 17 為槽溝寬度 2m、深度 50m，振動頻率 1Hz，槽溝後方位置對地表垂直位移振幅關係曲線，由圖可看出在，基礎型式不影響槽溝後方低頻 (1Hz)地表位移振幅，地表位移振幅僅與槽溝與震源距離有關，距離越遠地表位移振幅越小。

## 五、結論

1. 對深基礎與路堤基礎而言，槽溝寬度對震波阻隔效果之影響不大。
2. 在中低頻率時，阻隔效果隨著槽溝深度的增加而增加，當平均振幅降低比  $\bar{A}_r$  等於 0.25 時，深基礎對應之槽溝深度為 15m，而路堤基礎為 20m。
3. 中低頻之振動頻率下，槽溝的位置對震波阻隔效果的影響幾乎可以忽略。
4. 在低頻率時，槽溝幾乎無減震效果。但在槽溝深度等於 30m 時稍具減震效果，此結果隨槽溝與震源距離之增加而越明顯。
5. 同一種槽溝尺寸之震波阻隔效果隨頻率之增加而增加。
6. 三種基礎型式之槽溝減震效果差異不大，但基礎型式將影響中低頻之槽溝後方地表位移振幅。

## 六、誌謝

本研究感謝國科會 NSC90-2211-E-324-009 提供專案計畫之補助，使本研究得以順利完成。

## 七、參考文獻

- [1] 徐德修，"南部科學園區高鐵振動影響與防治對策評估整合計畫研究 - 子計畫三：南科工址開挖減振效果之研究"，國科會研究報告，NSC87-2622-E-006-016，1999。
- [2] 洪曉慧、姚忠達、楊永斌，"高速列車引致的地表振動"，結構工程，第十四卷，第二期，第 3~20 頁，1999。
- [3] Beskos, D. E., G. Dasgupta, and I. G. Vardoulakis, "Vibration Isolation Using Open or Filled Trenches. Part 1: 2-D Homogeneous," *Comput. Mech.*, 1(1), No. 1, pp. 43 - 63, 1986.
- [4] Ahmad, S. and T. M. Al-Hussaini, "Simplified Design for Open and In-filled Trenches," *J. of Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol. 117, No. 1, pp. 67-88, 1991.
- [5] 倪勝火，馮正一，蔡佩勳，"條形基礎振動反應與阻隔效應之分析"，中國土木水利工程學刊，第六卷，第三期，第 269~277 頁，1994。
- [6] Kitahara, M., *Boundary Integral Equation Methods in Eigenvalue Problem of Elastodynamics and Thin Plates*, Elsevier Science Publishers, B.V., 1985.
- [7] 蔡佩勳，"填充槽溝對振動基礎的震波阻隔效應之研究"，國科會研究報告，



NSC89-2211-E-324-011，2000。

- [8] 梁瑞盛，”開口槽溝對振動基礎之震波阻隔效應”，碩士論文，朝陽科技大學營建工程系，台中，2001。
- [9] 中鼎工程股份公司，”台灣高鐵計畫南科振動影響評估及對策研擬工作第一階段工作成果報告”，1999。

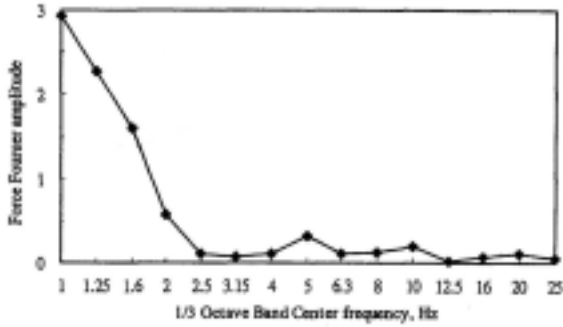


圖 1 列車外力 1/3 八音階表示法頻譜圖

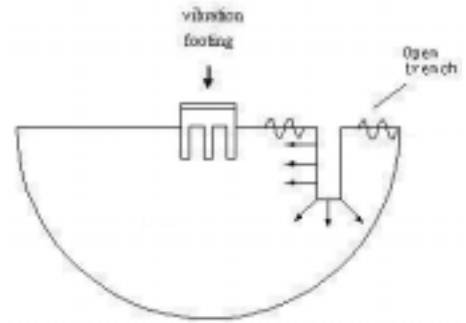


圖 2 開口槽溝減震示意圖

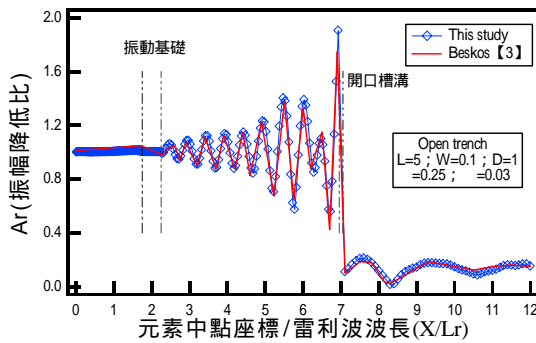


圖 3 開口槽溝地表振幅降低比  $A_r$  的比較

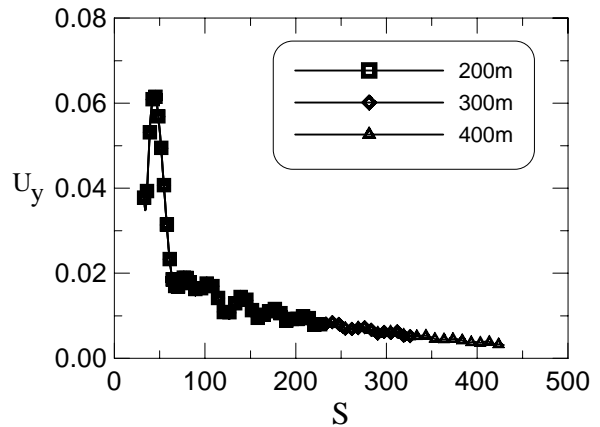


圖 4 元素網格範圍分析圖

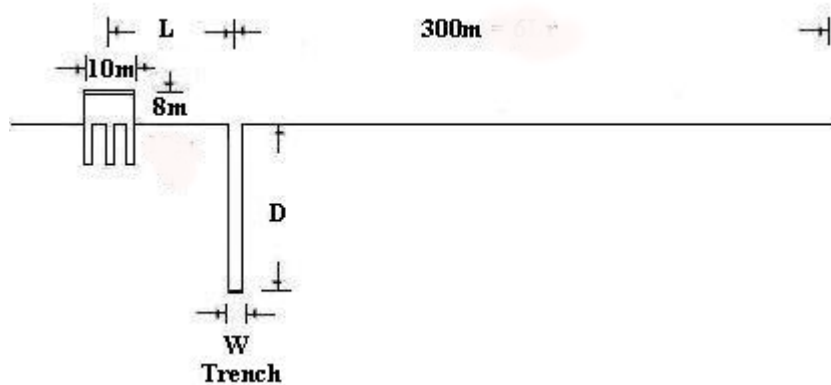


圖 5 幾何尺寸配置圖(不按比例繪製)

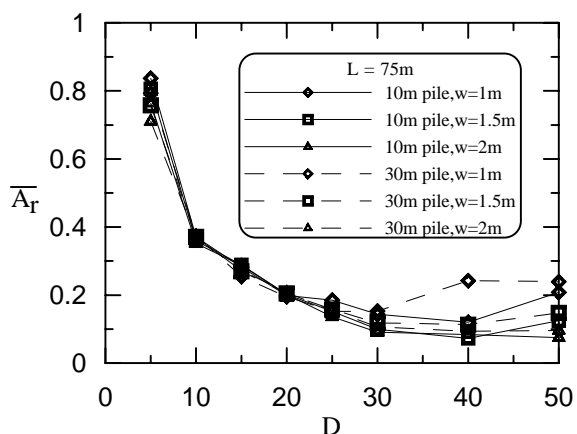


圖 6 開口槽溝深度對  $\bar{A}_r$  之影響  
( $L=75m$ ,  $f=10Hz$ , 10m 長樁基礎)

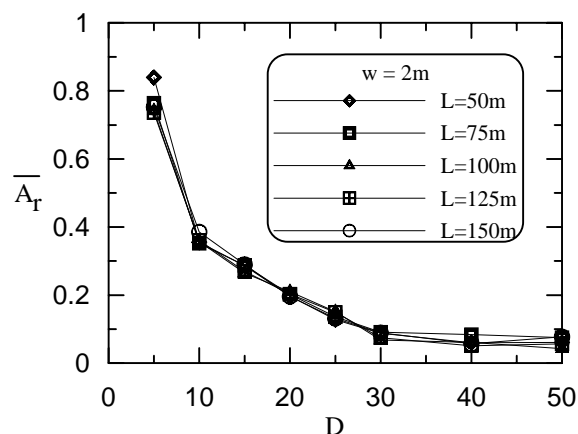


圖 7 開口槽溝深度對  $\bar{A}_r$  之影響  
( $W=2m$ ,  $f=10Hz$ , 10m 長樁基礎)

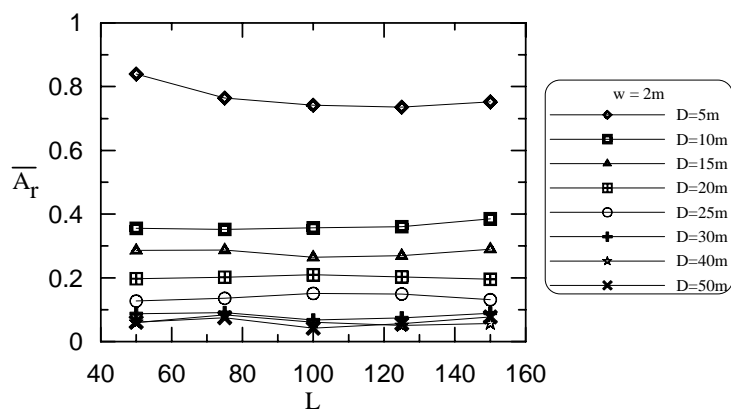


圖 8 開口槽溝位置對  $\bar{A}_r$  之影響  
( $W=2m$ ,  $f=10Hz$ , 10m 長樁基礎)

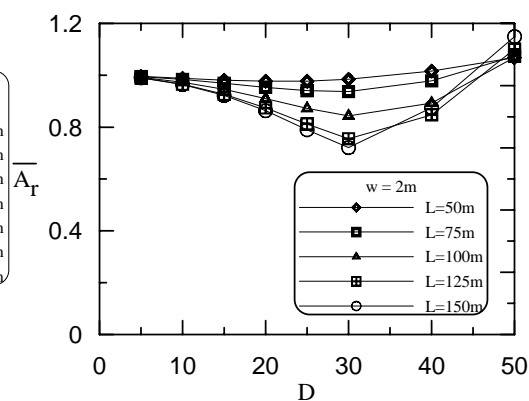


圖 9 開口槽溝深度對  $\bar{A}_r$  之影響  
( $W=2m$ ,  $f=1Hz$ , 10m 長樁基礎)

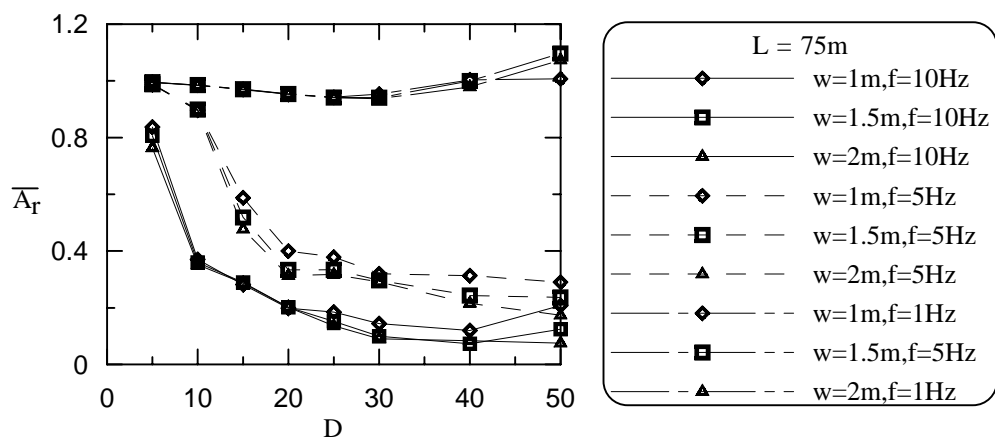


圖 10 開口槽溝深度對  $\bar{A}_r$  之影響( $L=75m$ , 10m 長樁基礎)

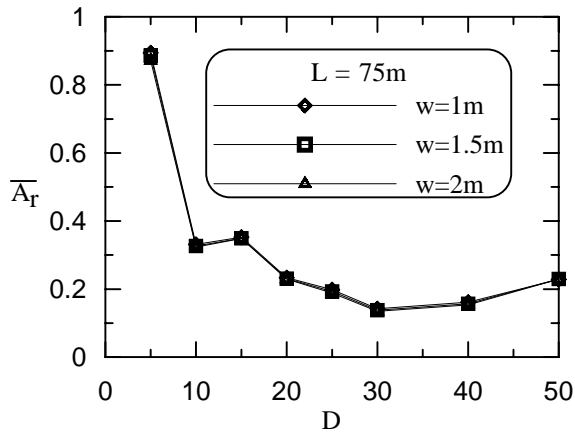


圖 11 開口槽溝深度對  $\bar{A}_r$  之影響  
( $L=75\text{m}$ ,  $f=10\text{Hz}$ , 5m 高路堤軌道基礎)

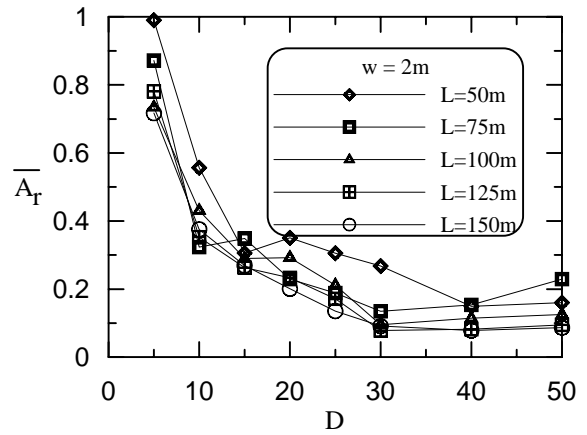


圖 12 開口槽溝深度對  $\bar{A}_r$  之影響  
( $W=2\text{m}$ ,  $f=10\text{Hz}$ , 5m 高路堤軌道基礎)

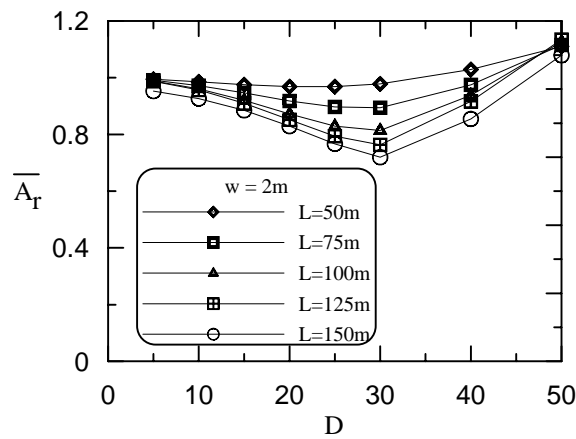


圖 13 開口槽溝深度對  $\bar{A}_r$  之影響 ( $W=2\text{m}$ ,  $f=1\text{Hz}$ , 5m 高路堤軌道基礎)

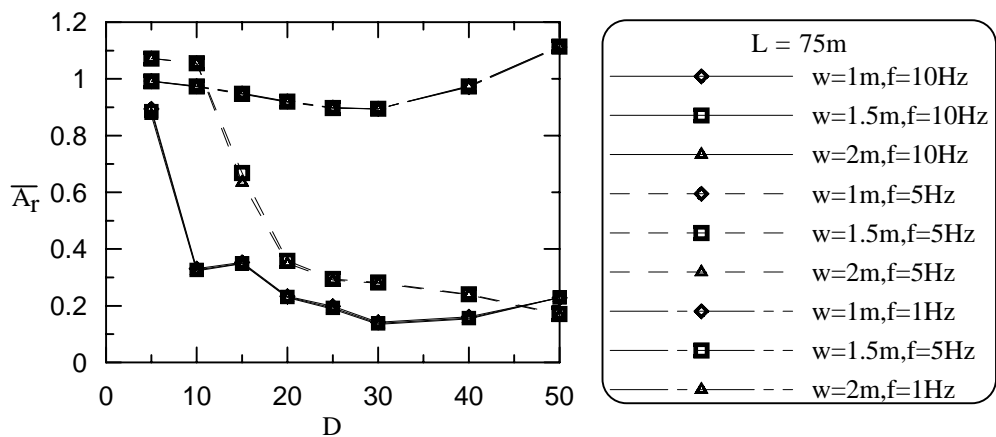


圖 14 開口槽溝深度對  $\bar{A}_r$  之影響 ( $L=75\text{m}$ , 5m 高路堤軌道基礎)

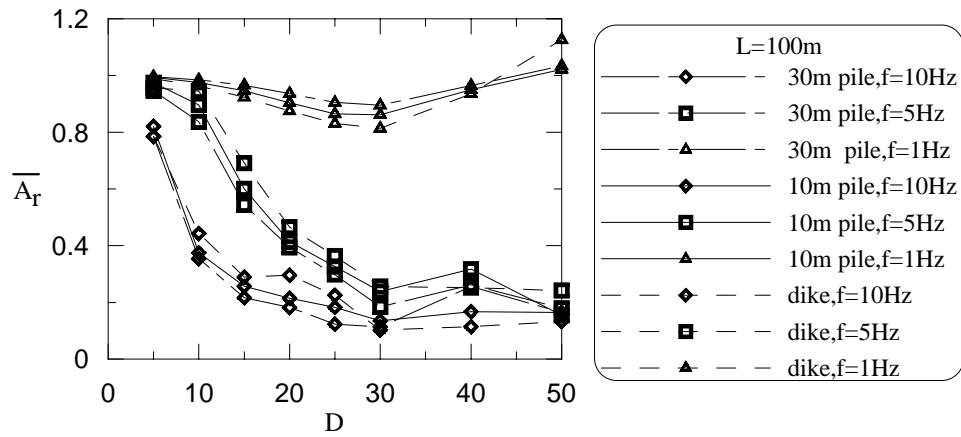


圖 15 開口槽溝深度對  $\bar{A}_r$  之影響 ( $L=100\text{m}$  ,  $W=1\text{m}$ )

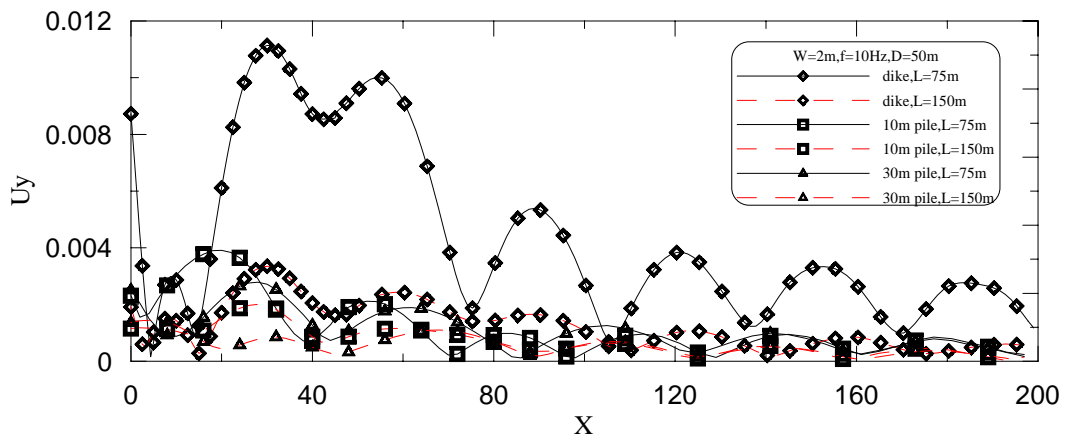


圖 16 槽溝後方位置對地表垂直位移振幅關係曲線 ( $W=2\text{m}$ 、 $D=50\text{m}$  ,  $f=10\text{Hz}$ )

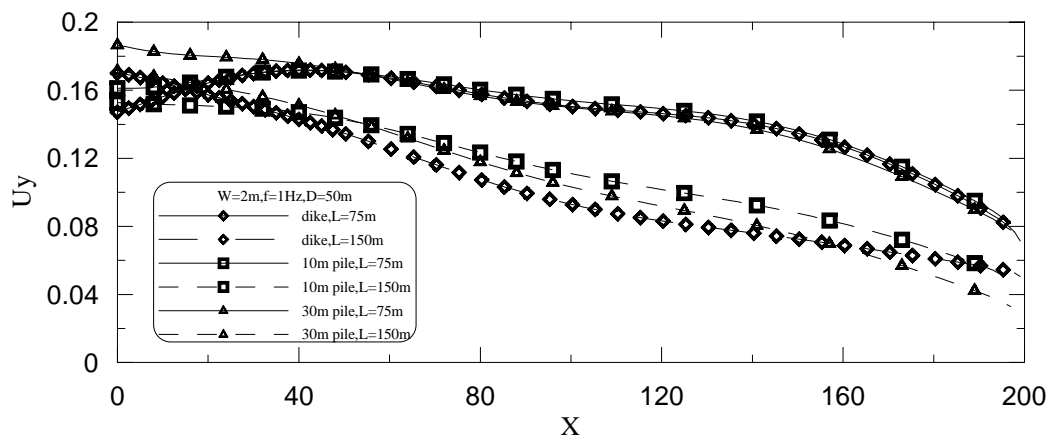


圖 17 槽溝後方位置對地表垂直位移振幅關係曲線 ( $W=2\text{m}$ 、 $D=50\text{m}$  ,  $f=1\text{Hz}$ )