

## 開口槽溝對條形基礎承受水平諧合力之震波阻隔分析

### Analysis of the Harmonic Horizontal Vibration of Strip Foundations Using Open Trenches

蔡佩勳<sup>1</sup> 梁瑞盛<sup>2</sup>

Pei Hsun Tsai, Jui Sheng Liang

<sup>1</sup>朝陽科技大學營建工程學系助理教授

<sup>2</sup>朝陽科技大學營建工程研究所碩士班研究生

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

Chaoyang University of Technology

<sup>2</sup> Graduate Student of Department of Construction Engineering

Chaoyang University of Technology

#### 摘要

本文利用二維頻率域邊界元素法，針對無質量剛性條形基礎受水平簡諧外力作用下，以開口槽溝作為震波阻隔機制，研究槽溝後方土壤地表振幅大小。並針對各種震波阻隔影響參數如土壤材料性質（柏松比、阻尼比），槽溝斷面尺寸（寬度，深度）、槽溝位置及槽溝數目等加以探討，並在最後整理出結果及建議，作為日後施工之參考。由本文研究之結果顯示開口槽溝寬度影響大致可忽略，槽溝深度至少須 1.5 倍雷利波波長，槽溝斷面積 0.4 倍雷利波波長平方以上，方可有效阻隔震波，槽溝與振動基礎之中心距以 2 倍雷利波波長為最佳。土壤材料性質方面隨著土壤材料阻尼比的增加與柏松比的降低，使得阻隔效果變佳。而在槽溝數目方面，以雙列淺槽溝作為隔震機制，可有效降低振幅，因此建議採用雙列淺槽溝來作為阻隔震波之機制。

**關鍵字：**邊界元素法，開口槽溝，震波阻隔，槽溝

#### Abstract

The main objective of this paper is to study the screening effectiveness of strip foundation subjected to horizontal harmonic vibration by open trenches. Two-dimensional boundary element method in frequency domain is used in this study. The main parameters considered in this study include Poisson's ration, material damping ratio, and open trench dimensions, which include width, depth, cross-sectional area, position and trench number. For horizontal vibration analysis, use of open trench as barrier, the width of open trench is insignificant on screening effectiveness. The optimized depth of open trench is suggested to be  $1.5 L_r$ . The cross section area of open trench is suggested to be  $0.4 L_r^2$ . The optimized distance between the trench and foundation is about  $2 L_r$ . Screening effectiveness will be better by increasing the material damping ratio of soil or decreasing Poisson's ratio. Using of double open trenches as barrier, horizontal isolation will be effective for shallow trench, so that which be suggested to use double shallow trenches in reducing the ground vibration.

**Key Words:** boundary element method, open trench, wave isolation, trench

## 一、前言

因應工商業發展及生活水準品質的提升，或因施工機械、交通所引發之振動對鄰房危害，與隔震的需求，人們對於振動所產生的問題愈來愈感興趣與重視。不論是要求精密機械的精確性或者是人體生活的舒適性，在在都說明了振動對於我們周遭生活是值得去探討的。近年來，邊界元素法已廣泛的應用在大地工程的振動問題上，因為邊界元素法只需在定義域的邊界上切割元素，比起有限元素法，可將維度降階，使問題簡化，元素數目也可減少許多，因未知數較少故可減低記憶體容量。同時在處理半無限域 (half-space) 問題時，若應用邊界元素法，因其基本解能自動滿足其輻射條件，無實體波 (body wave) 碰到人造邊界 (artificial boundaries) 反射誤差，因此可提高計算結果的精度。

一般而言，槽溝 (trench) 在工程習慣上常用於減低人為震源、交通或機械所引起的地表震動，如不考慮槽溝穩定性之問題，以開口槽溝 (open trench) 來阻隔震波不失為一種有效方法。隔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，其中震波阻隔效果亦涉及複雜的應力波傳行為。

近數十年來，有多位學者研究相關之震波阻隔效應及地盤反應分析，但不論在實驗或數值分析上，大多是針對垂直外力振動下之地盤反應分析，因此對於其它外力作用下，開口槽溝之震波阻隔效果尚未有系統的歸納出評估準則。

## 二、論文內容

本文係探討當條形基礎受一水平簡諧外力作用時，以開口槽溝降低其振幅，來達到震波阻隔的目的。文中將利用頻率域分析模式之邊界元素法，分析開口槽溝對此一振動基礎之阻隔效率。在此所稱之頻率域分析模式，係指利用富利葉轉換 (Fourier transformation) 將時間域之運動方程式及其邊界條件轉成頻率域之運動方程式。應用頻率域之無限域基本解及貝氏 (Betti's) 交換定理【1】，推導出邊界積分方程式。為求簡化及不失精度，邊界元素離散採常數邊界元素，利用介質域之邊界條件代入聯立代數邊界積分方程式，求得其主要物理量即地表振幅 (amplitude) 與曳引力 (traction)。

探討開口槽溝對此一振動基礎之震波阻隔效果，並針對各種影響參數，如土壤柏松比  $\nu$ ，土壤材料阻尼比  $\beta$ ，槽溝設置位置  $L$ ，開口槽溝幾何形狀等作一系列分析及討論，並在最後對槽溝最佳化尺寸及槽溝設置最適當之距離做成建議，提供日後工程施工與設計之參考依據。同時為了避免槽溝在某種頻率下發生共振，而失去原有之阻隔機制，本文也針對不同外力頻率進行共振頻率分析，避免基礎振動頻率過於接近土壤振動頻率時而產生地表振幅放大現象。除了以上各種影響參數進行震波阻隔分析外，本文亦將探討設置雙槽溝對震波阻隔之影響，研究在震源與保護區域內設置兩個開口槽溝，討論地表振幅是否有明顯之降低，並藉以判斷在經濟或施工的考量上，是否有需要設置兩個開口槽溝來阻隔震波。

### 2.1 問題描述與基本假設

本文考慮一振動基礎 (震源) 放置在地表面上，如圖 1 所示，基礎振動會產生能量而其能量是以波的形式向四面散發出去。為了保護鄰近的建築物不受震波干擾，在震源與欲保護之區域設置開口槽溝，如圖 2 所示，使得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槽溝後方地表振幅降低的目的。

本文假設土壤為一彈性、線性，均質且均向之材料，分析時土壤行為均在彈性範圍內。土層條件則考慮單一土層型式且底部沒有岩盤的情況下來進行地盤反應分析。基礎視為條形基礎，分析時假設基礎設置在地表面上無埋設深度，再考慮基礎為剛性 (rigid) 且假設土壤與基礎表面為完全接合 (bonded contact)，即基礎振動時不會跳脫土壤。而根據 Beskos (1986)【2】指出無質量基礎與含質量之基礎所得之結果誤差僅 1.5% 左右，故本文採用無質量基礎作為分析。

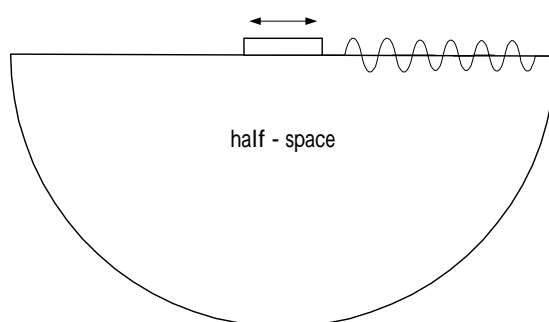


圖 1 問題描述示意圖

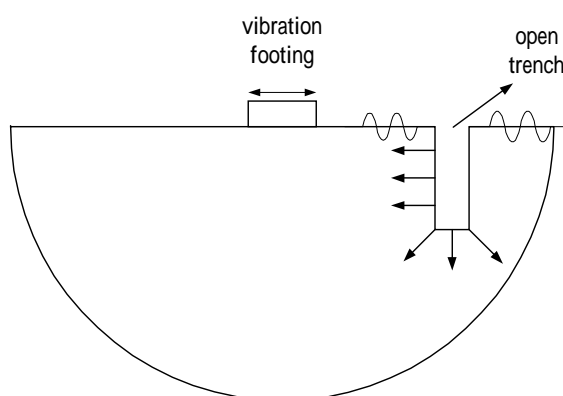


圖 2 震波阻隔示意圖

## 2.2 控制方程式

在均質均向之線彈性介質，且振動外力為簡諧外力作用下，利用 Fourier 轉換將在時間域控制方程式轉至頻率域之控制方程可表示為：

$$\mu \nabla^2 u(x, \omega) + (\lambda + \mu) \nabla \nabla u(x, \omega) + \rho f(x, \omega) = -\rho \omega^2 u(x, \omega) \quad (1)$$

其中  $f(x, \omega)$  為實體力 (body force)，本文假設為零。

頻率域之邊界條件：

$$u(x, \omega) = u_b(x, \omega) \quad (2.1)$$

$$t(x, \omega) = t_b(x, \omega) \quad (2.2)$$

$x$  於邊界  $\partial D$  上。

式中  $u_b(x, \omega)$  代表頻率域邊界  $\partial D$  上之已知位移，

$t_b(x, \omega)$  代表頻率域邊界  $\partial D$  上之已知曳引力。

若有 A, B 兩組力系，則由功能互換定理，即貝氏交換定理知：

$$\int_{\Gamma} t_1^A(x, \omega) u_1^B(x, \omega) d\Gamma + \int_s f_1^A(x, \omega) u_1^B(x, \omega) ds = \int_{\Gamma} t_1^B(x, \omega) u_1^A(x, \omega) d\Gamma + \int_s f_1^B(x, \omega) u_1^A(x, \omega) ds \quad (3)$$

式中， $u_1^A(x, \omega)$  與  $u_1^B(x, \omega)$  分別為兩力系之位移場， $f_1^A(x, \omega)$  與  $f_1^B(x, \omega)$  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 力系為基本解之力系，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如圖 3 所示，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，若不考慮實體力，二維全平面的基本解必須滿足下式

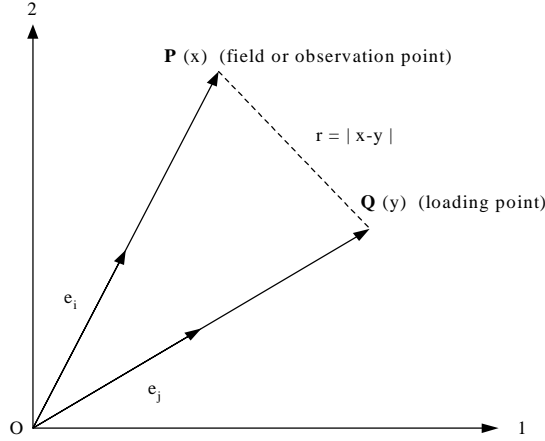


圖 3 二維平面之載重點與場點

$$\mu \nabla^2 \bar{u}(x, y, \omega) + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \bar{u}(x, y, \omega) + \rho \omega^2 \bar{u}(x, y, \omega) = -\delta(y - x) \quad (4)$$

設  $U$  為滿足上式之基本解，則  $U$ 【3】可表示為：

$$U_{ij}(x, y, \omega) = \frac{i}{4\mu} \{ [H_0^{(1)}(k_T r) - (k_T r)^{-1} H_1^{(1)}(k_T r) + (k_L / k_T)^2] (k_T r)^{-1} H_1^{(1)}(k_T r) \delta_{ij} - r_{,i} \{ H_0^{(1)}(k_T r) - 2(k_T r)^{-1} H_1^{(1)}(k_T r) \} - \frac{k_L}{k_T} \{ H_0^{(1)}(k_T r) - 2(k_T r)^{-1} H_1^{(1)}(k_T r) \} \} \quad (5)$$

上式(5)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， $\delta_{ij}=0$ ，式中( $r=|x-y|$ )，另外，

$$k_T = \frac{\omega}{C_T}, \quad C_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (6.1)$$

$$k_L = \frac{\omega}{C_L}, \quad C_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (6.2)$$

$C_T$  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 3) 得：

$$\int_{\partial D + \partial R} [t_i(x, \omega) U_{ij}(x, y, \omega) - T_{ij}(x, y, \omega) u_i(x, \omega)] d\Gamma = u_j(y, \omega) \quad , \quad y \text{ 屬介質 } D \text{ 內} \quad (7)$$

以上積分在無窮遠的邊界  $\partial R$ ，因滿足 Sommerfield【3】之幅射條件，無窮遠的邊界  $\partial R$  之積分值為零，故 (式 7) 可化為下式：

$$\int_{\partial D} [t_i(x, \omega) U_{ij}(x, y, \omega) - T_{ij}(x, y, \omega) u_i(x, \omega)] d\Gamma = u_j(y, \omega) \quad (8)$$

若使  $y$  趨近邊界時，可建立邊界積分方程式：

$$\int_{\partial D} [t_i(x, \omega) U_{ij}(x, y, \omega) - T_{ij}(x, y, \omega) u_i(x, \omega)] d\Gamma = C_{ij} u_i(y, \omega) \quad (9)$$

當  $y$  在平滑邊界上且應用常數元素時，根據 Cauchy 主值觀念。

$$C_{ij} = \frac{1}{2} \delta_{ij} \quad (10)$$

若將邊界  $\partial D$  切割為  $n$  個常數元素，則邊界積分方程式 (式 9) 離散化，成為  $n$  個方程式：

$$C_{ij} u_i + \sum_{j=1}^n \tilde{H}_{ij} u_j = \sum_{j=1}^n G_{ij} t_j \quad (11)$$

其中

$$\tilde{H}_{ij} = \int_{\Gamma_j} T_{ij}(x, y, \omega) d\Gamma_j \quad (11.1)$$

$$G_{ij} = \int_{\Gamma_j} U_{ij}(x, y, \omega) d\Gamma_j \quad (11.2)$$

(式 11) 可改寫為：

$$\sum_{j=1}^n H_{ij} u_j = \sum_{j=1}^n G_{ij} t_j \quad (12)$$

其中

$$H = C + \tilde{H} \quad (12.1)$$

(式 12) 以矩陣形式表示，可表示如下：

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ t_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

將邊界條件代入上式，可整理成以下形式：

$$A \cdot X = F \quad (14)$$

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。

基礎在土壤上之振動能量，藉著應力波形式傳遞，將隨著距離延伸而有衰減 (decay) 的現象，稱為幾何阻尼 (又稱輻射阻尼)，對於能量之消散，除了幾何阻尼外，尚須考慮土壤的材料阻尼 (material damping) (又稱內阻尼)，一般常使用與頻率無關之線性遲滯阻尼，在頻率域分析振動問題時，可經由對應原理 (correspondence principle) 【4】將此材料阻尼引入系統計算。

$$* = (1 - 2i\beta) \quad (15.1)$$

$$\lambda^* = \lambda(1 - 2i\beta) \quad (15.2)$$

$$C_L^* = C_L \sqrt{1 - 2i\beta} \quad (15.3)$$

$$C_T^* = C_T \sqrt{1 - 2i\beta} \quad (15.4)$$

其中  $\beta$  為土壤的材料阻尼比，\*表複數型態之數值。

### 2.3 元素網切割及阻隔範圍之有效選取

本文在分析開口槽溝對振動基礎之震波阻隔效應中，為使元素網在不失精度的條件下，以最經濟之元素數目來計算結果，對邊界元素作有效切割。為了明白邊界元素網之有效切割，本文將採四種元素網進行切割如表 1 所示，其幾何形狀配置如圖 4 所示，在總元素總數不變的條件下改變各表面不同的元素數目，藉以了解不同位置之元素離散程度對結果精度的影響，針對上述四種元素網所做之分析其結果如圖 5 所示。發現在每一個區間所做切割之元素不盡相同，但在同一區間元素相同之網所得之結果大致一樣，即意味著在總元素相同的條件下，針對不同的元素切割影響的範圍只限於該區間，並不會影響到其它的區間。因此在固定的元素數目下，針對我們所需知道的範圍做較多的切割即可達到我們的要求。因此，在距離震源較近的範圍(如基礎表面)，或幾何尺寸變化處(如槽溝)，其影響結果精度變化較為劇烈，可採較多元素計算之，而其餘區段中可選取較少的元素，以便達到節省記憶體空間、迅速得到合理結果之目的。

表 1 不同元素網元素離散分佈情況

元素網編號	總元素數目	基礎元素個數	震源至槽溝中心自由面元素個數	槽溝元素個數	槽溝後方 5 倍 $L_r$ 自由面元素個數	槽溝後方 $5L_r \sim 9L_r$ 自由面元素個數
Mesh1	873	25	112	336	240	160
Mesh2	873	25	112	336	80	320
Mesh3	873	25	200	336	72	240
Mesh4	873	25	112	176	240	320

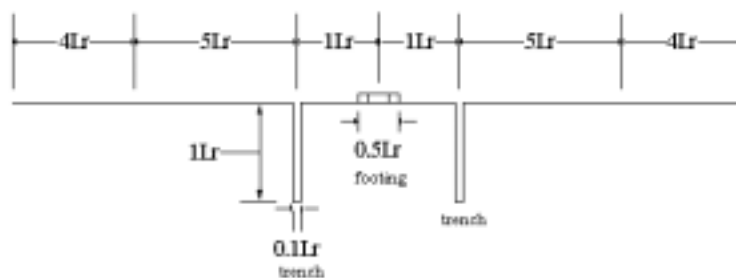


圖 4 網切割幾何尺寸配置圖(不按比例繪製)

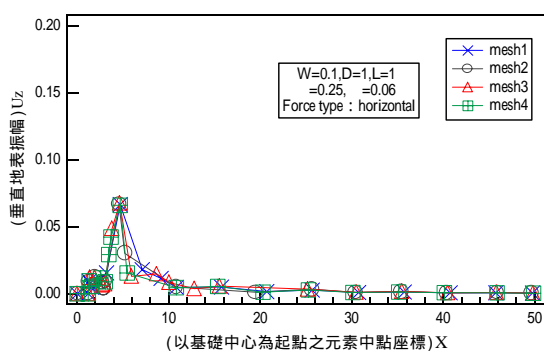


圖 5 不同邊界元素離散情形對數值結果之影響

分析條形振動基礎之震波阻隔效應之典型元素網切割如圖 6 所示，其它個案研究亦採用相當元素網分析。其中基礎底部土壤因在震源處，元素切割較為細緻，元素長度約為 1/50 倍雷利波波長。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，每個元素長度約為 1/40 倍雷利波波長。基礎與槽溝間之地表面及槽溝後方接近槽溝之地表面，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採用 1/20 倍雷利波波長，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 1/10 倍雷利波波長作為邊界元素之長度。

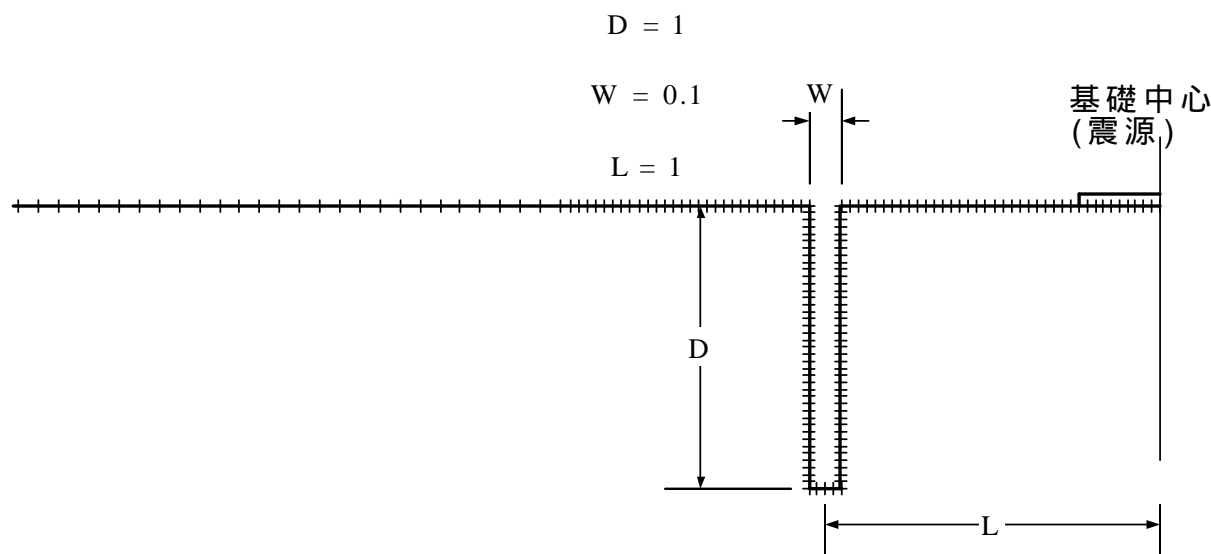


圖 6 邊界元素典型元素網切割示意圖

## 2.4 基礎阻隔控制與正規無因次化

為了評估槽溝對震波阻隔之效果，本文將採 Beskos(1986)【2】所建議的平均振幅比  $\overline{Ar}$  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  $Ar$  加以平均而得

$$\text{定義：} Ar(\text{振幅降低比}) = \frac{\text{有槽溝之地表振幅}}{\text{無槽溝之地表振幅}} \quad (16.1)$$

而實際阻隔之效率則以  $\overline{Ar}$  (平均振幅降低比)表示：

$$\overline{Ar} = \frac{1}{L} \int_0^L Ar(x) dL \quad (16.2)$$

上式中， $L$ 約取槽溝後方7倍之雷利波長長度。

當 $\overline{Ar}=25\%$ 時(一般認為阻隔已算成功)【5】則表示可減少75%之震波，而 $\overline{Ar}$ 大於1時則表示發生共振。

另外本文亦探討，雙槽機制對於基礎振動阻隔的影響，所謂雙槽機制，即在震源左右設置兩個幾何尺寸一致的開口槽溝如圖7所示，探討槽溝後方震波阻隔情形。

$$\overline{Ar}_2 = \frac{1}{L_2} \int_0^{L_2} Ar(x) dx \quad (L_2: \text{第2槽溝後方7倍之雷利波長長度}) \quad (16.3)$$

各影響參數對震波阻隔之影響將以 $\overline{Ar}_2$ 對槽溝影響參數繪出圖形表示。

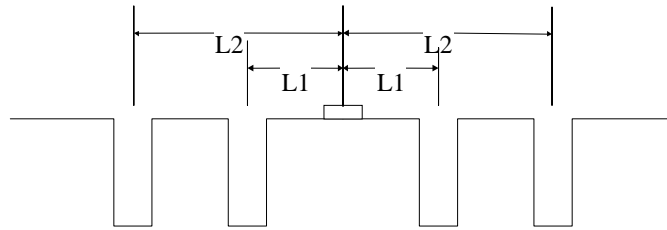


圖7 雙槽阻隔示意圖

為了方便應用計算結果，本文所有參數皆以雷利波(Rayleigh wave)波長 $L_r$ 作為正規化參數，例如正規化寬度參數 $W$ 等於槽溝寬度 $w$ 除以 $L_r$ ，深度參數 $D$ 等於槽溝深度 $d$ 除以 $L_r$ ，面積參數 $A$ 等於 $D \cdot W$ ，距離參數 $L$ 等於槽溝至基礎中心距 $l$ 除以 $L_r$ 如圖8所示，如此可在不同外力頻率振動直接針對波長換算對應之最佳槽溝尺寸。

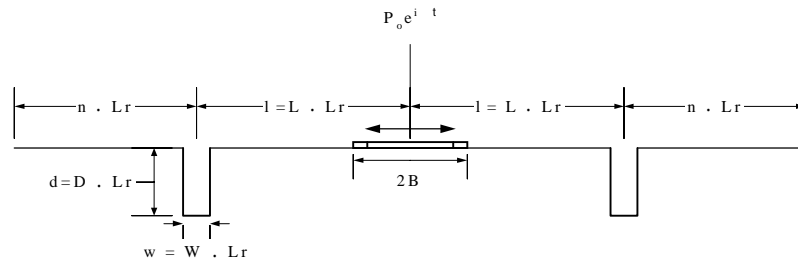


圖8 開口槽溝主動控制幾何參數

在振動基礎以開口槽溝作震波之案例上，主要是與Beskos、Dasgupta和Vardoulkis(1986)【2】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 $G_s=132 \text{ MN/m}^2$ ，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 $f=50 \text{ Hz}$ 。本文分析後之結果如圖9所示，結果顯示與Beskos【2】等人所做之研究結果相當接近。

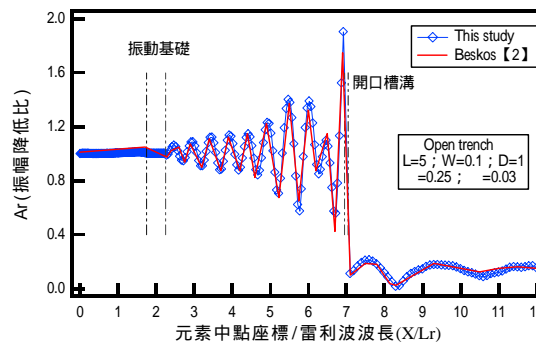


圖9 開口槽溝地表振幅降低比 $Ar$ 的比較



### 三、結論

在開口槽溝幾何尺寸部份，將探討開口槽溝寬度參數  $W$ ，深度參數  $D$ ，距離參數  $L$ ，面積參數  $A$ ，對震波阻隔影響。分別就不同土壤柏松比  $\nu = 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45$ ，土壤材料阻尼比  $\gamma = 0, 0.02, 0.04, 0.06$  做討論。分析所得結果以正規化參數對平均振幅降低比  $\bar{A}_r$  之關係曲線來繪制，以表示出各影響參數對震波阻隔之影響。本文所採用之土壤其雷利波波速  $= 250\text{m/sec}$ ；基礎半寬因子  $B$  (基礎半寬除以  $L_r$ )  $= 0.25$ 。除在共振頻率分析外，基礎振動頻率  $f$  為  $50\text{Hz}$ 。雙槽分析則在固定第一個開口槽溝位置 ( $L=1$ ) 情形下，改變第二個槽溝位置參數 ( $L_2=1.5, 2, 2.5, 3$ )。

槽溝寬度對震波阻隔之影響，以槽溝寬度參數  $W$  與平均振幅降低比之關係曲線表示，如圖 10、11 所示。由圖形可看出隨著土壤柏松比的減少與材料阻尼比的增加對關係曲線的影響有提高阻隔效果且在淺槽整體阻隔效果不佳的情況下可有效的避免共振發生。而阻隔的效果隨著寬度的變化曲線大致呈現一種平穩的趨勢。這是由於水平振動之質點運動方向傾向於傳射過槽溝另一邊，當波碰到槽溝不因其寬度之大小，產生之散射現象並不大，因此寬度對阻隔效果的影響幾乎可以忽略。

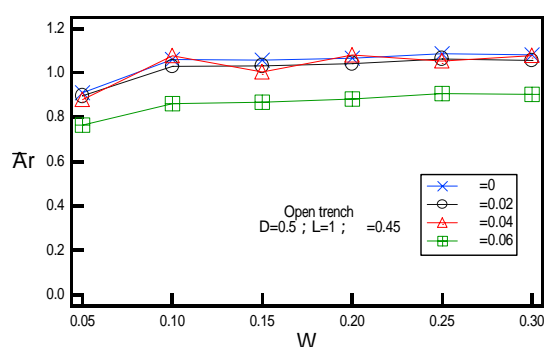


圖 10 開口槽溝寬度對水平振動阻隔之影響 ( $D=0.5, L=1, \nu=0.45$ )

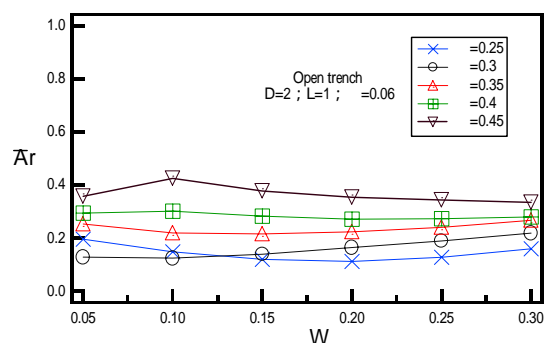


圖 11 開口槽溝寬度對水平振動阻隔之影響 ( $D=2, L=1, \nu=0.06$ )

開口槽溝深度對水平振動阻隔之影響，以槽溝深度影響參數  $D$  對平均振幅降低比關係曲線表示。由圖 12、13 可看出阻隔情形隨著深度的增加隨之增加，大約在  $D$  超過 1.5 倍雷利波波長時整體曲線才逐漸平穩，對震波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，因此，最佳槽溝深度為 1.5 倍雷利波波長。同時由圖形可看出，不同柏松比的影響曲線相異並不大，因此柏松比對槽溝深度之影響不大。而不同的阻尼比曲線亦顯現相當程度的隔震效果，可看出具有較高阻尼之土壤材料，可提高阻隔效果。

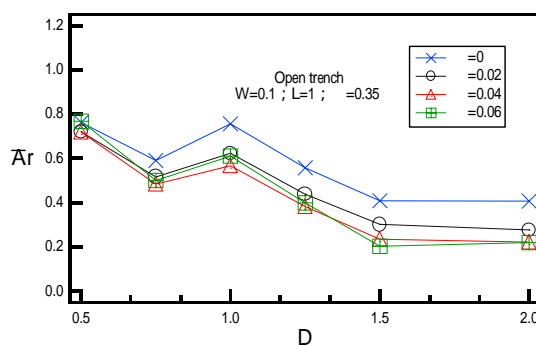


圖 12 開口槽溝深度對水平振動阻隔之影響( $W=0.1, L=1, =0.35$ )

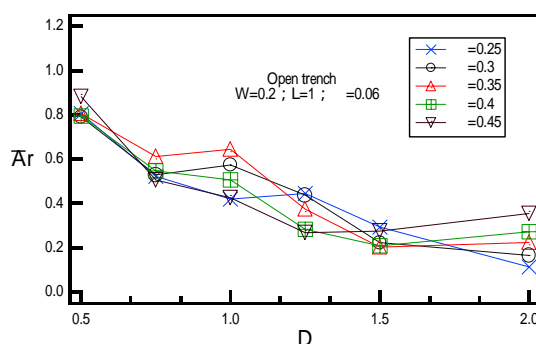


圖 13 開口槽溝深度對水平振動阻隔之影響( $W=0.2, L=1, =0.06$ )

槽溝斷面積對水平振動阻隔之影響，以槽溝斷面積影響參數  $A$  對  $\bar{A}_r$  之關係曲線表示，圖 14 為典型之  $A-\bar{A}_r$  關係曲線。由圖 14 可看出，整體而言，面積對整個阻隔效果呈現散亂現象，只有在面積大於 0.4 倍雷利波波長平方才呈現一種比較穩定的跡象，但是由於資料點的不足，尚無法斷定是否已經收斂。此種現象是由於水平振動之阻隔，槽溝寬度影響亦不大，而深度仍大幅影響阻隔效果。而深度之影響要夠“深”，才能使整個震波阻隔效應趨於緩和，因此當槽溝斷面積較小時，槽溝深度在不致於達到適當深度足以阻隔震波時，阻隔效果的變化性就差異很大。由於圖形呈現較不規則型態，如以迴歸方式建立開口槽溝經驗公式並不適當，因此僅將圖表列出以供參考。不過由圖 14 可看出基礎之水平振動下，如果能有效地設計開口槽溝作為震波阻隔機制，約可阻隔掉近八成的地表振幅。

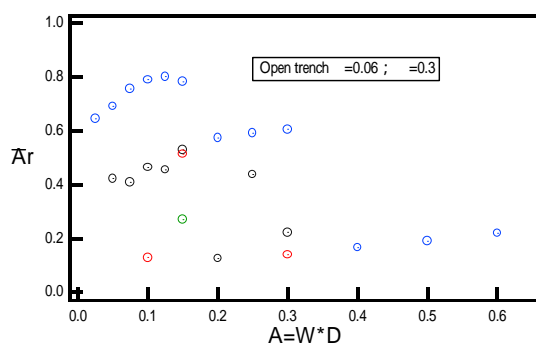


圖 14 開口槽溝面積對水平振動阻隔之影響( $=0.06, L=1, =0.3$ )

開口槽溝位置對水平振動阻隔之影響，以槽溝距離參數  $L$  對平均振幅降低比關係曲線表示如圖 15、16 所示。由圖形顯示淺槽( $D=0.5$ )在  $L=2$  時有最佳的阻隔效果，對於各曲線隨著  $L$  的變化而產生不同的阻隔效果，主要是由於槽溝與震源間的距離會改變震波的繞射模式所導致，因此在

某些情形下槽溝距離的影響有大幅的提高阻隔效果。對於深槽(D=2)而言，槽溝的距離影響就比較小。若深度深至足以將雷利波阻隔掉，其影響之震波只剩下實體波，而槽溝距離之不同從圖上很明顯看出，未對實體波產生不同的繞射模式，因此槽溝位置之變化僅可能對雷利波產生影響。故距離對深槽並不是一個重要參數。而由圖形可看出槽溝設置在 2 倍雷利波波長的距離時可得到最佳的隔震效果。

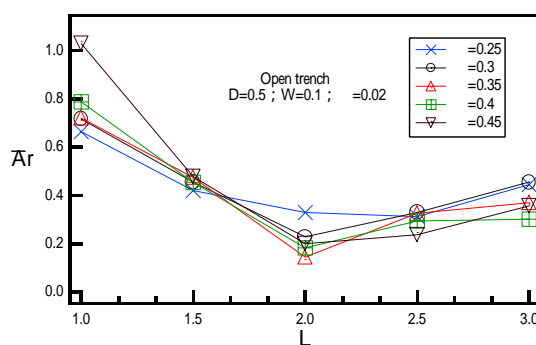


圖 15 開口槽溝位置對水平振動阻隔之影響(D=0.5,W=0.1,  $\alpha=0.02$ )

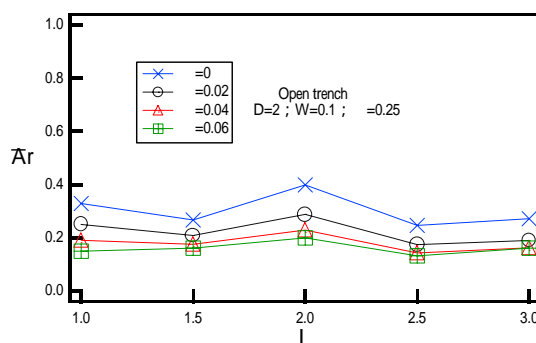


圖 16 開口槽溝位置對水平振動阻隔之影響(D=2,W=0.1,  $\alpha=0.25$ )

考慮以雙槽溝之設置，探討對水平振動之阻隔效果。圖 17、18 為不同寬度或深度對  $L_2$ - $\overline{A_r}$  之關係曲線。由圖形發現深槽部份(D=2)情形與垂直振動相似，不論  $L_2$  設置何處，平均振幅降低比並無明顯變化。而淺槽部份，隨著  $L_2$  距離的變化， $\overline{A_r}$  皆小於單槽情況，說明水平振動繞射過去後，在另一個槽溝上又產生新的反射造成能量的衰減使得阻隔效果變佳，整體而言，對於設置雙槽溝來阻隔水平振動之效果而言，淺槽溝明顯有助於降低地表振幅的作用。

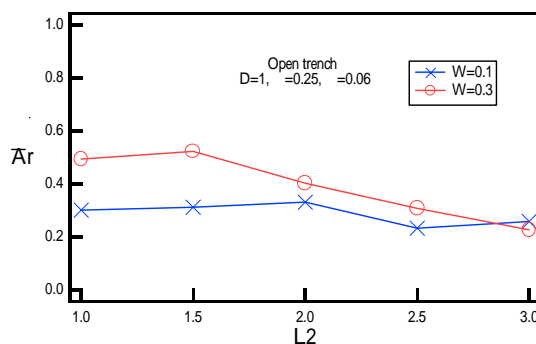


圖 17 雙槽機制對水平振動阻隔之影響(D=1,  $\alpha=0.25$ ,  $\beta=0.06$ )

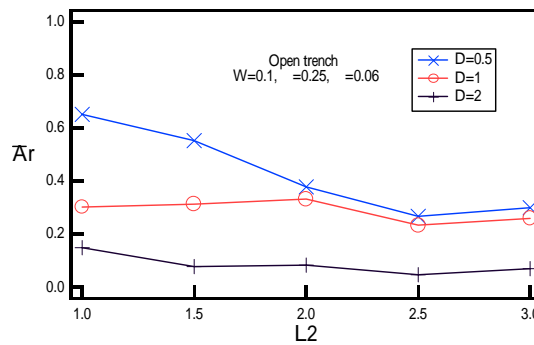


圖 18 雙槽機制對水平振動阻隔之影響( $W=0.1$ ,  $d=0.25$ ,  $\rho=0.06$ )

水平振動下開口槽溝共振分析之典型圖表，如圖 19 所示，由圖可看出水平振動對於低頻共振情形分別在  $f=10\text{Hz}$  與  $f=40\text{Hz}$  兩處引起放大效應，此結果可能由於水平振動之型態較容易引起前兩個振態之共振反應所致，而阻尼比的增加對於某些頻率可有效的防止共振發生。

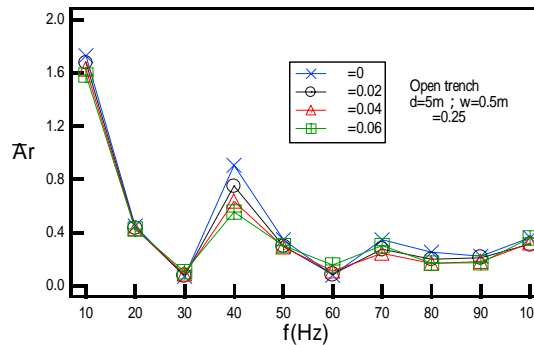


圖 19 共振頻率分析

#### 四、誌謝

本研究感謝國科會 NSC89-2211-E-324-011 提供專案計畫之補助，使數值分析得以完成。

#### 五、參考文獻

1. Gutfreund, H., Meroz, I., *Potential Methods in the Theory of Elasticity*, Israel Program for Scientific Translations, Ltd, pp. 5-48 (1965).
2. Beskos, D. E., Dasgupta, G., and Vardoulakis, I. G., "Vibration Isolation Using Open or Filled Trench. Part 1: 2-D Homogeneous," *Comput. Mech.*, Vol. 1, No. 1, pp. 43-63 (1986).
3. Kitahara, M., *Boundary Integral Equation Methods in Eigenvalue Problem of Elastodynamics and Thin Plates*, Elsevier Science Publishers, B.V. (1985).
4. Lysmer, J., "Foundation Vibration with Soil Damping," Proceedings, and ASCE Conference on Civil Engineering and Nuclear Power, Knoxville, Tennessee, Vol. , Paper 10-4, pp. 1-18 (1980).
5. Woods, R. D., "Screening of Surface Waves in Soils," *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE.* 94(4), pp 951-979 (1968).