

開口槽溝對高速列車引致振動之減振效果分析

蔡佩勳¹ 羅云岑²

¹朝陽科技大學營建工程系副教授

²朝陽科技大學營建工程系研究生

摘要

本研究以數值模擬分析開口槽溝對高速列車所引發振動之減振效果，應用二維時間域無限域基本解，建立邊界積分矩陣式，撰寫邊界元素分析程式來分析開口槽溝阻隔高速列車所引發之振動。本研究討論影響振波阻隔效應的參數包括槽溝的幾何尺寸與位置，也就是槽溝寬度及深度，槽溝與振源間之距離、高速列車的行進速度。經數值分析結果與解析解比較後，本研究發展的二维度時間域邊界元素程式有其正確性。在開口槽溝之減振分析中，由結果顯示，隨著槽溝寬度之增加，減振效果隨之降低。槽溝深度在4m以下時，隨著槽溝深度之增加，減振效果隨之增加。然而，當槽溝深度等於5m，地表振動比未設槽溝時要增加許多。槽溝位置對減振效果之影響不大。隨著列車車速之增加，減振效果隨之增加。

關鍵詞：邊界元素法、槽溝、振動阻隔。

The screening effectiveness analysis of trenches using time-domain boundary element method

ABSTRACT

2D boundary element method in time domain is used to investigate the screening effectiveness of open trenches on reducing vibration generated by a train in this project. This study will use 2D time domain boundary integration equation with fundamental solution to analyze the screening effectiveness of the trenches. The research content is to develop a Fortran code in 2D time boundary element method to analyze the screening effectiveness of open trenches. In order to understand the optimum configuration of the open trench, the parameters used in the study include the dimensions of the trench, train speed and the distance between the source and the barrier. The results of this study imply that the location of trench is insignificant parameters on screening effectiveness using an open trench. For shallow depth case ($H < 4\text{m}$), deeper trenches exhibit better screening effects. The screening effectiveness increases slightly due to the increasing of train speed.

Key Words: boundary element method, trench, isolation vibration.

一、前言

隨著時代的進步，區域間的大眾運輸也變得十分頻繁，載客的高速鐵路或捷運列車重量有增加的趨勢，而貨運列車的行車速度也有增加的情形，這些列車在行經都會區時，將引發振動而影響附近居民生活品質。在人口稠密的地區進行工程施工可能是不可避

免的，當其所引發的振動也將造成附近居民不舒服的感覺。因此，對於上述的振動採取減振措施是必要的，然而這方面的相關研究成果仍不多。在振波阻隔之各方法中，於振源與被保護地區間的地表設置振波障壁，以降低地表振幅，不失為良好的方法之一。過去大多數的研究在於探討振波障壁(包括開口槽溝(open trench)、混凝土填充槽溝(concrete in-filled

trench)、EPS 發泡聚苯乙烯填充槽溝(expanded polystyrene in-filled trench)、實心樁(concrete solid pile)與空心樁(concrete hollowed pile)對簡諧(harmonic)載重的動力基礎所引發之振動的減振分析,由於是單一頻率的簡諧振動,故大多以頻率域邊界元素法來分析。然而,若振源是高速列車所引發之振動,抑或是地盤改良等施工所引發之振動,因這些振動包含多個頻率甚至於是頻率連續函數,如果還是採用頻率域邊界元素法來分析,還需配合傅立葉轉換(Fourier transform)與反傅立葉轉換來分析,造成分析程序的複雜以及計算時間的冗長,是一個較無效率的作法,因此本研究以時間域(time domain)邊界元素法來進行減振分析。

對高速列車所引發之振動,抑或是地盤改良等施工所引發之振動以槽溝來進行減振,過去的研究不多,尤其是槽溝的幾何尺寸或位置等參數對減振效果之影響,由於這方面的成果不多,所以如何設計較佳的槽溝以對這些振源達到減振效果仍無法提出更多建議。因此,對於槽溝幾何尺寸、位置與材料性質對振波阻隔之影響程度究竟為何,有賴進一步之研究。對高速列車所引發之振動以振波障壁來進行減振,過去的研究不多,尤其是振波障壁的幾何尺寸或位置等參數對減振效果之影響。由於這方面的成果不多,這些動態問題要以數值方法來模擬是十分繁複的,過去常用有限元素法、有限差分法與邊界元素法來分析,因為大地問題是一個半無限域的問題,如果使用前兩種數值方法將要使用較多的元素及硬體資源,計算時間也較長,因此過去這類問題常用邊界元素法。因為邊界元素法僅需對邊界作積分,所以可降低問題的維度,縮短運算時間,使三維問題僅需進行面積分的優點,同時如果使用無限域或半無限域的基本解(fundamental solution),它將可解決無限遠端之邊界條件且無振波遇到人造邊界反射的問題,十分適合求解上述的波傳問題。因為本研究的振源是列車載重,所以可能要以時間函數來表示,並配合時間域邊界元素法來分析。

對高速列車所引發之振動過去的研究不多,尤其是槽溝的幾何尺寸或位置等參數對減振效果之影響,由於這方面的成果不多,所以如何設計較佳的槽溝以對這些振源達到減振效果仍無法提出更多建議。因此,對於槽溝幾何尺寸、位置與材料性質對振波阻隔之影響程度究竟為何,有賴進一步之研究。

長久以來,彈性動態問題一直是力學的一個重要課題,如果牽涉到無限域的問題常會以邊界元素法來解決,因為它可降低分析問題的維度,即三度空間的物理問題僅需處理面積分,若為二度空間的物理問題僅需處理線積分,節省所需的記憶容量,加快計算的時間。同時,它能自動滿足無限遠處的邊界條件,無人造邊界反射的問題。邊界元素法處理動態問題,可分成時間域邊界元素法與頻率域邊界元素法。若振源型式為簡諧載重可用 Fourier 轉換,採用頻率域基本解,而求解頻率域的動態反應。若振源型式為暫態載重,例如本研究的列車載重此時將以求解其時間域反應為主。若要計算時間域反應之邊界元素分析方式有兩種:(1)是先將時間域動態載重以 Fourier 轉換轉為頻率域載重,再由頻率域邊界元素法計算各頻率載重所對應的動態反應,再用 Fourier 反轉換得時間域的動態反應。(2)是利用時間域基本解,直接以時間域邊界元素法求解時間域動態反應。第一種方法因尚需求解多組頻率載重所對應的動態反應,再由 Fourier

反轉換得時間域的動態反應,所以計算量比較大,計算機運算的時間也較長,而且其位移或曳引力為複數型式,因此所需儲存的記憶空間也較多。因此,本研究以時間域邊界積分方程式配合時間域基本解直接求解上述動態載重下的時間域動態反應。

本研究以數值模擬方法分析槽溝對高速列車所引發振動之減振效果,而本研究所討論之振波障壁為開口槽溝。本研究以開口槽溝來阻隔高速列車所引發之振動,此將利用 Fortran 語言撰寫 2D 時間域邊界元素法來進行分析,本研究應用時間域基本解建立邊界積分方程式,撰寫邊界元素分析程式來分析時間域中單一介質與多介質之動態反應。

二、相關文獻探討

對於振波障壁之減振問題的解決方式一般可分為實驗方法及數值方法,在現地實驗上,雖然可以得到較接近實際情況的分析結果,但卻需要大量的人力與物力,而且所得的成果僅適用於該實驗參數的情形,由於探討的參數不能任意調整,所以其成果是否可適用於其他情形仍未可知。對於土壤介質與幾何邊界複雜的狀況下,可用數值方法來求得近似解,減少許多分析時間。較常用的數值方法包括有限差分法、有限元素法及邊界元素法等。

倪勝火等人(1994)[1]以頻率域邊界元素法,分析條形基礎振動之勁度與柔度函數同時考慮基礎沉埋效應與岩層深度之影響,其分析中發現由於波的反射與折射的影響,岩層深度將影響基礎振動之共振頻率。Klein(1997)[2]等人以三維頻率域邊界元素法研究開口槽溝之振波阻隔效率,配合現場量測的結果作為對照,檢驗典型的減振問題。由其分析結果顯示,槽溝深度仍然是主要的控制參數。Kattis(1999)[3]等人利用三維頻率域邊界元素法分析排樁與開口槽溝及填充槽溝之減振效率,排樁材質及填充槽溝材質為混凝土,排樁形狀以圓形為主,再分成空心及實心斷面,與開口槽溝及填充槽溝作比較。由其研究結果顯示,減振效果最佳者為開口槽溝,其次依序為混凝土空心樁,混凝土填充槽溝,混凝土實心樁。樁體的各項影響參數中,除了樁徑,空心樁厚度及樁長是主要的控制因素外,樁與樁之中心間距更是主要的影響參數。Shrivastava 等人(2002)[4]以三維有限元素法分析開口槽溝與填充槽溝對正弦(sine)週期載重與衝擊載重作用下之減振行為,他的分析結果是開口槽溝之減振效果優於填充槽溝,對於衝擊載重而言,槽溝深度的增加使減振效果越佳,而槽溝長度的增加使正弦載重所產生之地表位移振幅越低,但槽溝寬度對減振效果的影響則不大。Andersen 等人(2005)[5]結合三維頻率域有限元素與頻率域邊界元素來分析開口槽溝與填充槽溝對移動的簡諧振動之減振效果,以模擬槽溝對高速列車所引起的振動之減振效果。由其結果顯示,槽溝之減振效果優於軌道下方的路堤之地盤改良方式,簡諧載重移動的速率較快的時候,以較軟(如橡皮)的材料填充的槽溝之減振效果較佳,約可降低五成的振動。Celebi 等人(2006)[6]利用頻率域邊界元素法分析在振動基礎四周設置開口槽溝以降低其對鄰近基礎之影響,由其分析結果發現,在某些頻率下槽溝具減振效果,即鄰近基礎之振動因槽溝之存在而變小。Gao 等人(2006)[7]利用三維頻率域邊界元素法分析排樁對雷利波之減振效果,由其結果發現,排樁之減振效果可能優於槽溝,樁與樁的淨間距小於 1.5 倍

單樁寬度時的減振效果較佳。Karlström 等人(2007)[8] 以有限寬度的水平層模擬路堤與開口槽溝，下方的土層則模擬成半無限平面，他們將有限寬度土層以傅立葉級數展開而下層土層則用傅立葉轉換。以求其頻率域之解析解。他們發現槽溝對低頻的振動有降低效果，3m 深的槽溝對於 4Hz 的振動約可降低九成的地表振幅。但如果頻率低於 1.1Hz 時，槽溝反而使地表振幅變大。蔡佩勳等人(2008)[9] 利用三維頻率域邊界元素法分析方形基礎在垂直簡諧振動下，以中空鋼管、實心混凝土、中空混凝土、木樁的排樁作為減振機制，研究其對排樁後方地表振幅的減振效果。由其結果發現，鋼管排樁為所討論的排樁型式中減振效果最佳者，樁長對減振效果之影響比樁間距及位置要大。蔡佩勳等人(2009)[10] 利用二維頻率域邊界元素法分析板樁式槽溝之震波阻隔機制，當開口槽溝深度小於 1.5 倍雷利波長時，槽溝護壁使用連續壁的阻隔效果比鋼板樁者佳。但如果深度大於 1.5 倍雷利波長時，鋼板樁之槽溝護壁的阻隔效果較佳。

回顧過去的減振分析大多集中在頻率域振波障壁(如開口槽溝、填充槽溝及排樁等)之減振效果的數值研究，此類減振分析適用於簡諧振動之動力基礎的振源，對於非簡諧振動的振源如高速列車所引起的振動，槽溝之減振效果尚待進一步探討。

三、研究方法

儘管岩土材料可視為一種彈塑性的材料，但因本研究振波的振幅不大，所以土體仍假設為均質、均向、彈性材料。對於一個均向、均質、線彈性體的運動方程式為 Navier-Cauchy 方程式，再利用動的交換定理(dynamic reciprocal work theorem)得到邊界積分方程式，若無實體力且初始條件是處於靜止狀態時

$$c_{ij}(\xi)u_i(\xi, t) = \int_0^t \int_{s_0}^s G_{ij}(x, t-\tau, \xi) t_i(x, \tau) d\tau - \int_0^t F_{ij}(x, t-\tau, \xi) u_i(x, \tau) d\tau \quad ds(x) \quad (1)$$

由於半無限域基本解討論的對象大多以表面波為主，為了能探討所有波在土層內之傳播行為，本研究將採全無限域基本解。 $G_{ij}(x, t, \xi)$ ， $F_{ij}(x, t, \xi)$ 分別為位移與曳引力基本解[11]，係分別指在時間為 0 時，在載重點 ξ 加上單位力，於時間 t ，場點 x 上所造成的位移與曳引力。

有關時間連續函數之離散(discretization)的數值作法是，將時間軸從 0~ t 切成 N 等份，每個時階(timestep)為 Δt ， $\Delta t = t/N$ 。且 $t_n = n\Delta t$ ， $n=1, 2, \dots, N$ 。假設時間形狀函數為線性，即在 $t_{n-1} < t < t_n$ 時，

$$u_i(\xi, t) = \frac{t-t_{n-1}}{\Delta t} u_i(\xi, t_{n-1}) + \frac{t_n-t}{\Delta t} u_i(\xi, t_n) \quad (2)$$

空間域的積分中坐標與變數函數若使用二次元素(quadratic element)，即

$$x_i = N_\alpha(\eta)x_{i\alpha} \quad u_i = N_\alpha(\eta)U_{i\alpha} \quad t_i = N_\alpha(\eta)T_{i\alpha} \quad (3)$$

其中 $N_\alpha(\eta)$ 為二次元素之形狀函數，所以

$$c_{ij}(\xi)u_i(\xi, t_N) + \sum_{n=1}^N \int (F_{ij1}^{N-n+1} + F_{ij2}^{N-n})u_i^n ds = \sum_{n=1}^N \int (G_{ij1}^{N-n+1} + G_{ij2}^{N-n})t_i^n ds \quad (4)$$

由於在計算 $t=t_N$ 的物理量時，前面各時間點 ($t=t_1, t_2, \dots, t_{N-1}$) 的物理量已先行算出，因此(式 4)

可改寫為

$$c_{ij}(\xi)u_i(\xi, t_N) + (F_{ij1}^1 + F_{ij2}^0)u_i^N = (G_{ij1}^1 + G_{ij2}^0)t_i^N + \sum_{n=1}^{N-1} \int (G_{ij1}^{N-n+1} + G_{ij2}^{N-n})t_i^n ds - \sum_{n=1}^{N-1} \int (F_{ij1}^{N-n+1} + F_{ij2}^{N-n})u_i^n ds \quad (5)$$

有關(式 5)之時間域積分經過計算後為下列方程式[12]

$$G_{ij1}^N + G_{ij2}^{N-1} = \frac{1}{2\pi\rho} \left\{ \frac{\delta_{ij}}{4c_1^2} \left[\cosh^{-1} \left\{ \frac{c_1 N \Delta t}{r} \right\} - \cosh^{-1} \left\{ \frac{c_1 (N-2) \Delta t}{r} \right\} \right] + \left(\frac{2r_i r_j - \delta_{ij}}{4} \right) \left(\frac{\Delta t}{r} \right)^2 \right. \\ \times \left[N \sqrt{N^2 - \left(\frac{r}{c_1 \Delta t} \right)^2} - (N-2) \sqrt{(N-2)^2 - \left(\frac{r}{c_1 \Delta t} \right)^2} \right] \\ \left. + \frac{\delta_{ij}}{4c_2^2} \left[\cosh^{-1} \left\{ \frac{c_2 N \Delta t}{r} \right\} - \cosh^{-1} \left\{ \frac{c_2 (N-2) \Delta t}{r} \right\} \right] - \left(\frac{2r_i r_j - \delta_{ij}}{4} \right) \left(\frac{\Delta t}{r} \right)^2 \right. \\ \left. \times \left[N \sqrt{N^2 - \left(\frac{r}{c_2 \Delta t} \right)^2} - (N-2) \sqrt{(N-2)^2 - \left(\frac{r}{c_2 \Delta t} \right)^2} \right] \right] \quad (6)$$

$$F_{ij1}^N + F_{ij2}^{N-1} = \frac{\mu}{2\pi\rho r} \left\{ - \left(\frac{3A_{ij}^1 + 2A_{ij}^2}{3c_1^2} \right) \times \left[\sqrt{N^2 - \left(\frac{r}{c_1 \Delta t} \right)^2} - 2 \sqrt{(N-1)^2 - \left(\frac{r}{c_1 \Delta t} \right)^2} \right. \right. \\ \left. \left. + \sqrt{(N-2)^2 - \left(\frac{r}{c_1 \Delta t} \right)^2} \right] + \left(\frac{2A_{ij}^2}{3} \right) \left(\frac{\Delta t}{r} \right)^2 \left[N^2 \sqrt{N^2 - \left(\frac{r}{c_1 \Delta t} \right)^2} \right. \right. \\ \left. \left. - 2(N-1)^2 \sqrt{(N-1)^2 - \left(\frac{r}{c_1 \Delta t} \right)^2} + (N-2)^2 \sqrt{(N-2)^2 - \left(\frac{r}{c_1 \Delta t} \right)^2} \right] \right. \\ \left. + \left(\frac{3A_{ij}^3 + 2A_{ij}^2}{3c_2^2} \right) \left[\sqrt{N^2 - \left(\frac{r}{c_2 \Delta t} \right)^2} - 2 \sqrt{(N-1)^2 - \left(\frac{r}{c_2 \Delta t} \right)^2} \right. \right. \\ \left. \left. + \sqrt{(N-2)^2 - \left(\frac{r}{c_2 \Delta t} \right)^2} \right] - \left(\frac{2A_{ij}^2}{3} \right) \left(\frac{\Delta t}{r} \right)^2 \times \left[N^2 \sqrt{N^2 - \left(\frac{r}{c_2 \Delta t} \right)^2} \right. \right. \\ \left. \left. - 2(N-1)^2 \sqrt{(N-1)^2 - \left(\frac{r}{c_2 \Delta t} \right)^2} + (N-2)^2 \sqrt{(N-2)^2 - \left(\frac{r}{c_2 \Delta t} \right)^2} \right] \right] \quad (7)$$

當 $N=1$ 時，並考慮因果律，上式可整理為：

$$G_{ij1}^1 + G_{ij2}^0 = \frac{1}{2\pi\rho} \left\{ \frac{\delta_{ij}}{4c_1^2} \cosh^{-1} \left\{ \frac{c_1 \Delta t}{r} \right\} + \left(\frac{2r_i r_j - \delta_{ij}}{4} \right) \left(\frac{\Delta t}{r} \right)^2 \right. \\ \left. \times \sqrt{1 - \left(\frac{r}{c_1 \Delta t} \right)^2} + \frac{\delta_{ij}}{4c_2^2} \cosh^{-1} \left\{ \frac{c_2 \Delta t}{r} \right\} \right.$$

$$-\left(\frac{2r_{i,j} - \delta_{ij}}{4}\right)\left(\frac{\Delta t}{r}\right)^2 \sqrt{1 - \left(\frac{r}{c_2 \Delta t}\right)^2} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} F_{ij1}^1 + F_{ij2}^0 &= \frac{\mu}{2\pi\rho r} \left\{ -\left(\frac{3A_{ij}^1 + 2A_{ij}^2}{3c_1^2}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{r}{c_1 \Delta t}\right)^2} \right. \\ &+ \left(\frac{2A_{ij}^2}{3}\right)\left(\frac{\Delta t}{r}\right)^2 \sqrt{1 - \left(\frac{r}{c_1 \Delta t}\right)^2} + \left(\frac{3A_{ij}^3 + 2A_{ij}^2}{3c_2^2}\right) \\ &\times \sqrt{1 - \left(\frac{r}{c_2 \Delta t}\right)^2} - \left(\frac{2A_{ij}^2}{3}\right)\left(\frac{\Delta t}{r}\right)^2 \sqrt{1 - \left(\frac{r}{c_2 \Delta t}\right)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

至於空間域之面積分將由高斯數值積分(Gaussian Quadrature)解決，即

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma_j} f(x, y, z) d\Gamma &= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\xi, \eta) |G| d\xi d\eta \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f(\xi_i, \eta_j) |G|_{ij} w_i w_j \end{aligned} \quad (10)$$

由於係使用時間域之無限域彈性體基本解，因此邊界元素之離散將針對自由地表面與槽溝表面。

當 $N = 1$ 且場點與載重點重合時， $r = 0$ ，基本解的積分將產生奇異性(singularity) [11]，在二維的問題中位移基本解的奇異性為 $(\ln r)$ ，曳引力基本解的奇異性為 (r^{-1}) 。位移基本解的奇異性處理方法跟靜態問題的處理方法相同，是將元素做次分割(subdivision)來解決。而曳引力基本解的奇異性則將利用靜態剛體平移(static rigid body motion)時曳引力為零的條件來解決。

本研究評估槽溝減振效率之好壞，將分析不同影響參數下之最大位移降低比。平均最大位移降低比係取槽溝後方適當距離的各點最大位移降低比 $R_{y\max}$ 加以平均而得

定義：

$$R_{y\max} = \frac{\text{有槽溝時之位移歷時最大值}}{\text{無槽溝時之位移歷時最大值}} \quad (11)$$

而振波阻隔之效率則以平均最大位移降低比

$R_{y\max}$ 來表示：

$$R_{y\max} = \frac{1}{L} \int_0^L R_{y\max}(x) dx \quad (12)$$

上式中， L 為槽溝後方之有效減振範圍。

在分析開口槽溝之減振效果時，其影響因子雖然有很多，但是最主要可能影響振波阻隔效應的是槽溝的幾何尺寸與位置，也就是槽溝寬度及深度，槽溝與振源間之距離。在振源的參數方面，由於高速列車的行進速度會影響振源之頻率組成，所以本研究將分別改變高速列車的行進速度以討論振波障壁對不同高速列車的行進速度的減振效果。

四、結果與討論

撰寫完之程式經過 Fortran 編譯成執行檔後，再依此執行檔分析前人所做過之軸力桿件承受三角形動

態載重之案例，如圖 1 所示，以檢核分析程式之正確性。在此案例中假設軸力桿件長 $L = 10m$ ，高 $W = 5m$ ，柏松比 $\nu = 0$ ，單位體積質量 $\rho = 7.8 \times 10^{-4} kg/m^3$ ，楊氏係數 $E = 7.8N/m^2$ ，剪力模數 $G = 3.9N/m^2$ 。

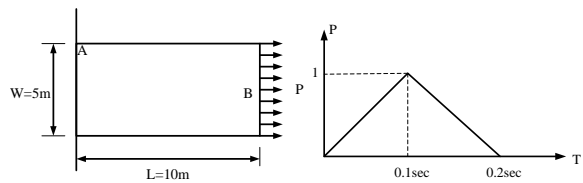
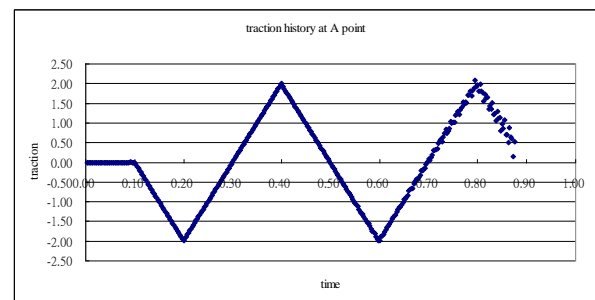
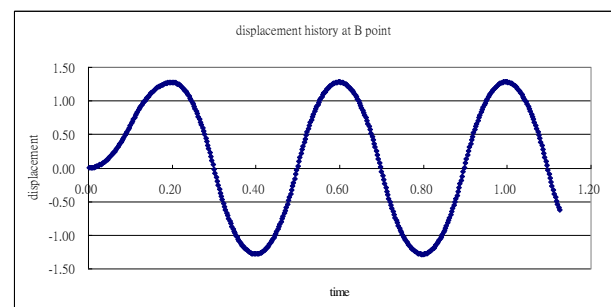


圖 1 軸力桿件承受階梯與三角形動態載重之示意圖

分析時，時間間隔 $\Delta t = 0.0025sec$ ，邊界元素長度 $\Delta x = 0.5m$ 。當軸力桿件承受三角形動態載重時，固定端 A 點之曳引力(traction)歷時曲線與 B 點之水平位移歷時曲線分別為圖 2 所示。



A 點曳引力



B 點水平位移

圖 2 A 點曳引力與 B 點水平位移歷時曲線

比較本研究數值分析結果與解析解後，本研究發展的二向度時間域邊界元素程式有其正確性，因此據以分析開口槽溝對高速列車之減振效果。

本研究將討論開口槽溝的振波阻隔效果，就可能影響減振效果的參數分別評估，其中包括槽溝寬度及深度，槽溝與振源間之距離以及列車行進速度等因素。本研究之高速列車假設為四節車廂，每節車廂 25m，重 50 公噸，如圖 3 所示。

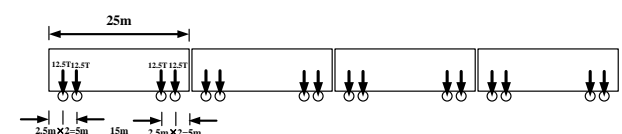


圖 3 四節車廂列車示意圖

本研究分析參數如表 1 所示，土壤之柏松比 $\nu = 0.25$ ，單位體積質量 $\rho = 1785.7kg/m^3$ ，剪力模數 $G =$

$1.32 \times 10^8 \text{N/m}^2$ 。

表 1 槽溝減振分析之參數表

分析目的	固定參數			變化參數
槽溝深度 H 影響	W	L	V	H
	1m	10m	300 km/hr	2m,3m,4m,5m
槽溝寬度 W 影響	H	L	V	W
	3m	10m	300 km/hr	1m,2m,3m, 4m
槽溝位置 L 影響	W	H	V	L
	1m	3m	300 km/hr	5m,10m,15m
列車速度 V 影響	W	H	L	V
	1m	3m	10m	180km/hr, 225km/hr, 300km/hr

分析時，時間間隔 $\Delta t=0.002\text{sec}$ ，邊界元素長度 $\Delta x=0.5\text{m}$ 。分析時步(timestep)取 1000 步，即分析時間從 0 秒到 2 秒之振動歷時反應。

如果以槽溝深度 $H=3\text{m}$ 、寬度 $W=1\text{m}$ 、離振源距離 $L=10\text{m}$ 的槽溝來降低車速 V 為 300km/hr 的列車載重，在槽溝後緣之地表振動如圖 5 所示。由圖可看出，槽溝具降低振動之效果。

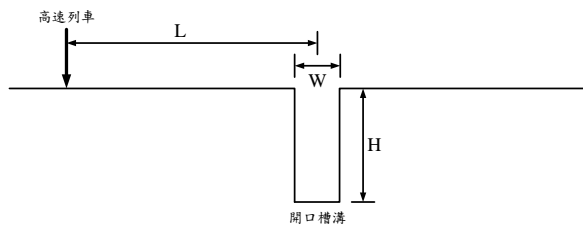


圖 4 開口槽溝尺寸示意圖

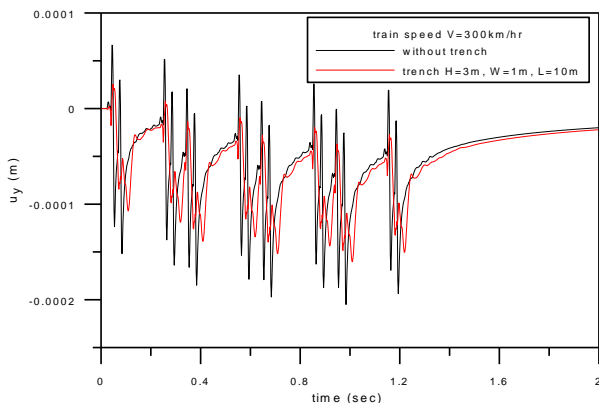


圖 5 槽溝設置後對高速列車所引發地表振動之比較

(1) 開口槽溝寬度對減振之影響

圖 6 為槽溝寬度對高速列車所引發地表振動之減振效果。由分析結果可看出，隨著槽溝寬度之增加，減振效果隨之降低。

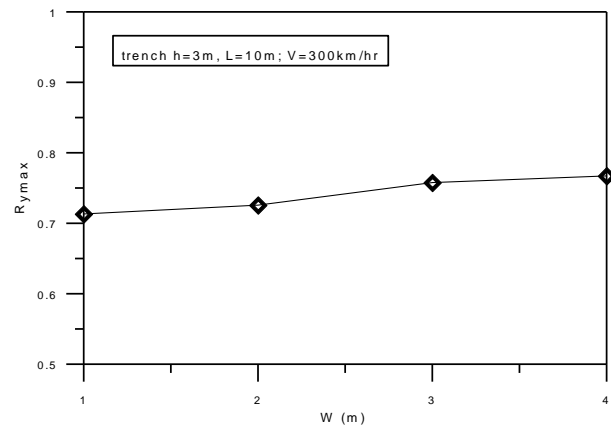


圖 6 槽溝寬度對高速列車引發地表振動之減振效果

(2) 開口槽溝深度對減振之影響

圖 7 與 8 為槽溝深度對高速列車所引發地表振動之減振效果。由分析結果可看出，槽溝深度在 4m 以下時，隨著槽溝深度之增加，減振效果隨之增加，在深度 $H=3\text{m}$ 時減振效果達到一穩定值。然而，當槽溝深度等於 5m ，地表振動比未設槽溝時要增加許多，此也可由圖 9 看出，這可能是由於此時列車振動頻率接近系統自然頻率所導致地表位移振幅放大之故。

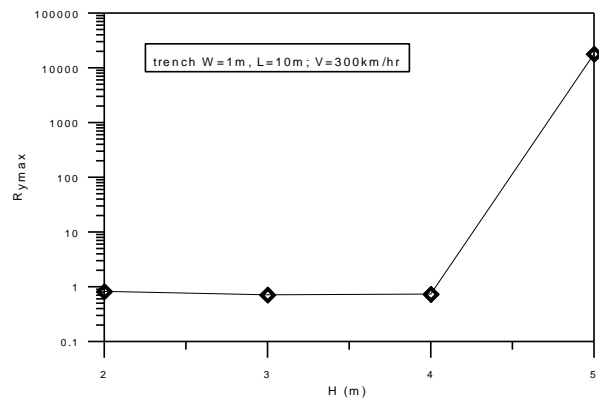


圖 7 槽溝深度對高速列車所引發地表振動之減振效果 ($H=2,3,4,5\text{m}$)

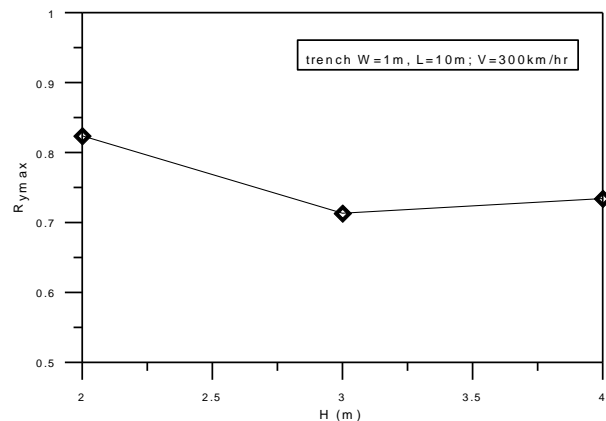


圖 8 槽溝深度對高速列車所引發地表振動之減振效

果(H=2,3,4m)

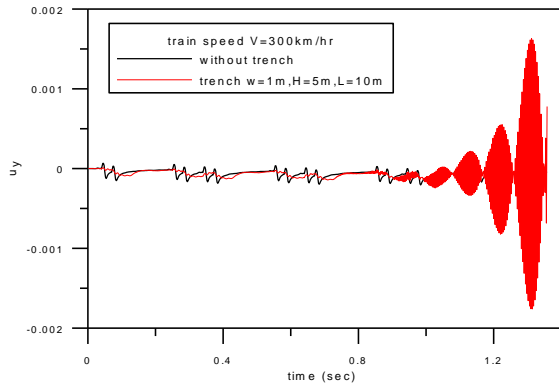


圖 9 槽溝深度 H=5m 對高速列車所引發地表振動之共振反應

(3) 開口槽溝位置對減振之影響

圖 10 為槽溝位置對高速列車所引發地表振動之減振效果。由分析結果可看出，槽溝位置對減振效果之影響不大。但在 L=10m 時，減振效果較佳。

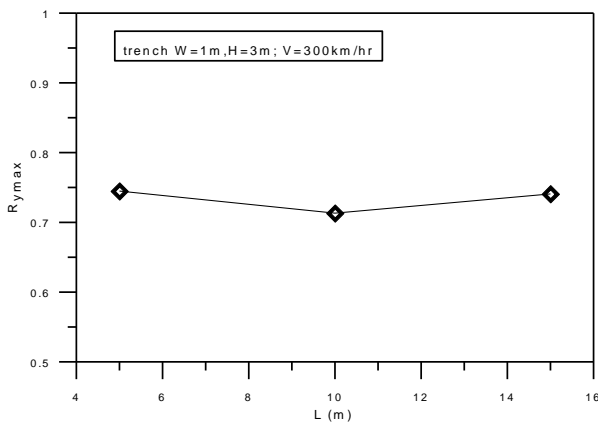


圖 10 槽溝位置對高速列車引發地表振動之減振效果

(4) 列車速度對槽溝減振之影響

圖 11 為高速列車車速對槽溝減振效果之影響。由分析結果可看出，隨著列車車速之增加，減振效果隨之增加。

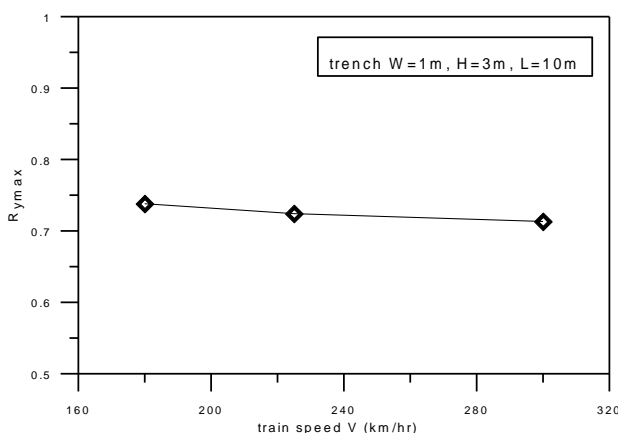


圖 11 高速列車車速對槽溝減振效果之影響

五、結論

本研究利用二維時間域邊界元素法，分析槽溝對高速列車所引發振動之減振效果，探討列車之行進速度、開口槽溝幾何尺寸與位置等參數對振波阻隔控制之影響，作一系列分析，以作為日後槽溝設計參考之資料。現將討論結果歸納整理後，提出以下幾點結論。

- (1) 比較本研究數值分析結果與解析解後，本研究發展的二向度時間域邊界元素程式有其正確性。
- (2) 隨著槽溝寬度之增加，減振效果隨之降低。
- (3) 槽溝深度在 4m 以下時，隨著槽溝深度之增加，減振效果隨之增加，在深度 H=3m 時減振效果達到一穩定值。然而，當槽溝深度等於 5m，地表振動比未設槽溝時要增加許多，這可能是由於此時列車振動頻率接近系統自然頻率所導致地表位移振幅放大之故。
- (4) 槽溝位置對減振效果之影響不大。但在 L=10m 時，減振效果較佳。
- (5) 隨著列車車速之增加，減振效果隨之增加。

誌謝

感謝國科會(計畫編號 NSC98-2221-E-324-026-)提供研究經費，以及國家高速網路與計算中心提供相關資源使本研究得以順利完成，特此致謝。

參考文獻

- [1] 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。
- [2] Klein, R., Antes, H., and Le Houedec, D., "Efficient 3D Modelling of Vibration Isolation by Open Trenches," *Comput. Struct.*, Vol. 64, pp. 809-817, 1997.
- [3] Kattis, S. E., Polyzos, D., and Beskos, D. E., "Modelling of Pile Wave Barriers by Effective Trenches and Their Screening Effectiveness," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 18, pp. 1-10, 1999.
- [4] Shrivastava, R. K. and Kameswara Rao, N. S. V., "Response of Soil Media Due to Impulse Loads and Isolation Using Trenches," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, pp. 695-702, 2002.
- [5] Andersen, L. and Nielsen, S. R. K., "Reduction of Ground Vibration by Means of Barriers or Soil Improvement Along a Railway Track," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 25, pp. 701-716, 2005.
- [6] Celebi E., Firat, S. and Cankaya, I., "The Effectiveness of Wave Barriers on the Dynamic Stiffness Coefficients of Foundations Using Boundary Element Method," *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 180, pp. 683 - 699, 2006.
- [7] Gao, G. Y., Li, Z. Y., Qiu, C. and Yue, Z. Q.,

- "Three-Dimensional Analysis of Rows of Piles as Passive Barriers for Ground Vibration Isolation," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 26, pp. 1015-1027, 2006.
- [8] Karlström, A. and Boström, A., "Efficiency of Trenches Along Railways for Trains Moving at Sub- or Supersonic Speeds," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 27, pp. 625-641, 2007.
- [9] Pei-hsun Tsai, Zheng-yi Feng, Tin-lon Jen, "Three-dimensional analysis of the screening effectiveness of hollow pile barriers for foundation-induced vertical vibration," *Computers and Geotechnics*, Vol. 35, pp. 489-499, 2008.
- [10] P.H. Tsai and T.S. Chang, "Effects of open trench siding on vibration screening effectiveness using two-dimensional boundary element method," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 29, pp. 865-873, 2009.
- [11] Israil, A. S. M. and Banerjee, P. K., "Advanced Time-domain Formulation of BEM for Two-dimensional Transient Elastodynamics," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 29, pp. 1421-1440, 1990.
- [12] Israil, A. S. M. and Banerjee, P. K., "Two-dimensional Transient Wave-Propagation Problems by Time-domain BEM," *Int. J. Solids Structures*, Vol. 26, pp. 851-864, 1990.
-