

## 壩體上游面加設緩衝物之力學分析

林清華<sup>(1)</sup> 鄭堃仁<sup>(1)</sup> 段錦浩<sup>(2)</sup>

### 摘要

本研究利用有限元素法應用軟體 MSC/NASTRAN for Windows 分析緩衝物之分散應力特性於撞擊時對壩體之影響進行研究。並由理論之探討及分析之結果推論，加設廢輪胎緩衝物對壩體之基本影響為：(一)具分散應力特性，可達保護壩體之效果。(二)有減小整體結構物勁度之作用，降低系統自然振動頻率，使傳遞至固定端壩基之最大歷時反力減小。(三)緩衝輪胎具有較大之阻尼係數，可以提供較佳之消能之效果。

(關鍵詞：有限元素、緩衝物、阻尼)

## Mechanics Analysis of Buffer on the Upstream Side of Dam

*C. H. Lin*

Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation,  
National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan 402, R.O.C.

*Kun-Jen Cheng*

Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation,  
National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan 402, R.O.C.

*C. H. Tuan*

Professor, Department of Soil and Water Conservation,  
National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan 402, R.O.C.

### ABSTRACT

This study used the finite element application software "MSC/NASTRAN for Windows" to analyze the impact on structures by the effect of stress disperse of buffer.

Based on results of theoretical and numerical analysis, we know that the influence of used-tire buffer on structures is:

- (1)The buffer provide the effect of stress disperse.
- (2)The buffer reduce the stiffness and natural frequency of the whole system. And reduce the force transfer to the fixed end.
- (3)Because the used-tire has higher damping coefficient, it can provide better effect of energy reduction.

(Key Words: finite element, buffer, damping)

---

(1)國立中興大學水土保持學系研究生

(2)國立中興大學水土保持學教授

## 前言

由於土石流直進性強，衝擊力大，常造成結構物之損壞，故本研究中由結構動力學之觀點探討壩體加設廢輪胎緩衝物後與未加廢輪胎緩衝物時，在受到撞擊時之差異，並利用有限元素法應用軟體 MSC/NASTRAN for Windows 分析緩衝物之分散應力特性於撞擊時對壩體之影響。

## 相關研究

劉正川、陳永祥、劉玉雯(1999)之研究中指出：在渠槽底部分別加設四種厚度、二種硬度之橡膠片，並調整五種不同的坡度，分別進行撞擊試驗，計測渠槽底部鋼板中央部位之受撞擊後的加速度歷時反應波譜值，以探討橡膠片之緩衝效果。由實驗結果顯示無論何種坡度，無橡膠片時之受撞擊加速度最大，隨著橡膠片厚度愈厚，撞擊時之受撞擊加速度有逐漸減小之趨勢並趨近至某一加速度之趨勢。而坡度愈陡時，受撞擊加速度也愈大。在不同硬度時，厚度愈大，撞擊時之受撞擊加速度降低百分比愈多。綜合實驗結果可得知有彈性與黏滯性之材質可以降低受衝擊加速度，亦即降低衝擊力，換言之彈性緩衝材料可以消能。

## 理論探討

考慮單一自由度彈簧-質量系統之自由振動，該系統在無阻尼作用時之自由振動可用下式表示

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad (1)$$

$m$ =質量

$k$ =彈簧係數

$u$ =位移

而結構物之自然振動是簡諧振動，則其位移( $u$ )可以下式表示

$$u = r \sin \omega_n t \quad (2)$$

$\omega_n$ =自然振動頻率，則

$$\dot{u} = \frac{du}{dt} = r\omega_n \cos \omega_n t \quad (3)$$

$$\ddot{u} = \frac{d^2u}{dt^2} = -r\omega_n^2 \sin \omega_n t = -\omega_n^2 u \quad (4)$$

$t$ =時間

將(4)式帶入(1)式，可得

$$-m\omega_n^2 u + ku = 0 \Rightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

而自由振動之位移函數  $u(t)$  可由解(1)式得

$$u = C_1 \cos \omega_n t + C_2 \sin \omega_n t \quad (6)$$

若運動之初始條件

$$u(t_0) = u_0$$

$$\dot{u}(t_0) = \dot{u}_0, \text{ 則可得}$$

$$C_1 = u_0 \cos \omega_n t_0 - \frac{\dot{u}_0}{\omega_n} \sin \omega_n t_0 \quad (7)$$

$$C_2 = u_0 \sin \omega_n t_0 + \frac{\dot{u}_0}{\omega_n} \cos \omega_n t_0 \quad (8)$$

則(6)式可改寫為

$$u(t) = u_0 \cos \omega_n (t - t_0) + \frac{\dot{u}_0}{\omega_n} \sin \omega_n (t - t_0) \quad (9)$$

而系統阻尼作用下之自由振動可用下式加以表示

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (10)$$

$c$ =阻尼係數

則(10)之兩根為  $-\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}$ ，若根

號項為零，則

$$\left(\frac{c}{2m}\right)^2 = \frac{k}{m} \quad (11)$$

此時(10)式之有重根  $-c/2m$ 。此種情況成為臨界阻尼情況 (condition of critical damping)，即系統由振盪轉變為不振盪之階段，但此種情況實際上並不發生。

由(11)式可得臨界阻尼係數

$$c_c = 2m\sqrt{\frac{k}{m}} = 2m\omega_n \quad (12)$$

並定義阻尼比(damping ratio)

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (13)$$

則在  $\zeta < 1$  及  
 初始條件  $u = u(0)$ ,  $\dot{u} = \dot{u}(0)$  時,  
 可得(10)式之解為

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[ u(0) \cos \omega_D t + \left( \frac{\dot{u}(0) + \zeta\omega_n u(0)}{\omega_D} \right) \sin \omega_D t \right] \quad (14)$$

其中  $\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$

具有阻尼之物體受到單位脈衝力作用  
 (圖 1)後, 由於作用力等於動量的變化率,  
 即

$$\frac{d}{dt}(m\dot{u}) = p \Rightarrow p = m\ddot{u} \quad (15)$$

則,  $\int_{t_1}^{t_2} p dt = 1 = m(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) = m\Delta\dot{u} \quad (16)$

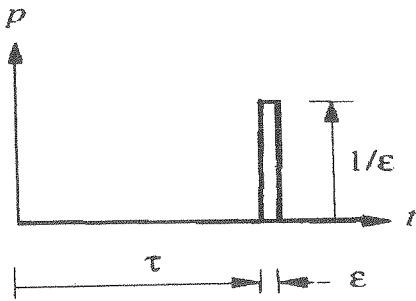


圖 1 單位脈衝力與時間關係圖  
 Fig. 1 Relationship between unit impulse and time

由於單位脈衝力作用時間極短( $\epsilon$ 趨近於  
 0), 因此在  $t=\tau$ 時, 系統之速度為

$$\dot{u}(\tau) = \frac{1}{m} \quad (17)$$

又  $u(\tau) = 0$ , 故由(14)式可得在無阻尼作用  
 下

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_n} \sin[\omega_n(t - \tau)] \quad t \geq \tau \quad (18)$$

在阻尼作用下

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_D} e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \sin[\omega_D(t-\tau)] \quad t \geq \tau \quad (19)$$

由(18)式及(19)式, 代入不同大小之阻尼  
 比, 可得振幅與時間之關係(圖 2), 而具有  
 阻尼之物體受到理想脈衝力作用時, 其最大  
 振幅可用以下式表示:

$$u_{\max} = \frac{1}{m\omega_n} \exp\left[-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right] \quad (20)$$

$m$ =質量

$\omega_n$ =物體之自然振動頻率。

$\zeta$ =阻尼比, 介於 0~1 之間。

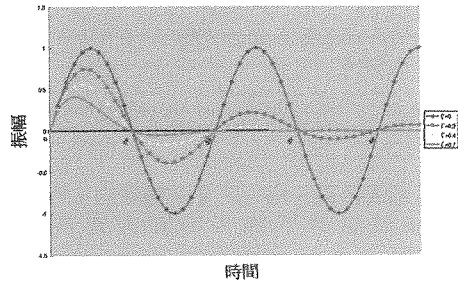


圖 2 不同阻尼比, 受單位脈衝力之振幅與時  
 間關係圖  
 Fig. 2 Response to unit impulse on diffent  
 damping ratio

由(20)式, 代入不同之 $\zeta$ 值, 可得 $u_{\max}$ 與  
 $\zeta$ 之關係(圖 3)。

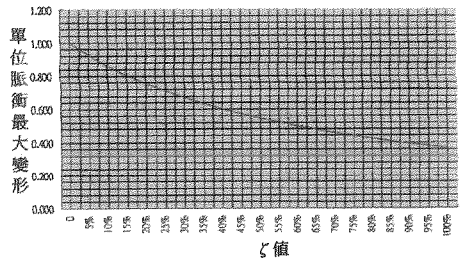


圖 3 不同阻尼比與單位脈衝最大變形關係  
 圖  
 Fig. 3 Max displacement

## 力學計算與分析

壩體(質量  $M$ )被礫石(質量  $m$ )撞擊時，欲推估此脈衝力所造成之最大歷時反力值時，可將壩體視為一個單自由度之系統，在忽略阻尼作用之情況下，初始位移為  $0(u_0=0)$ ，初始速度為  $v_0(\dot{u}_0 = v_0)$ ， $t_0=0$ ，又衝量  $I=mv_0$ ，故其位移函數可用下式表示：

$$u(t) \cong \frac{I}{M\omega_n} \sin \omega_n t \quad (21)$$

則其最大位移

$$u_{\max} = \frac{I}{M\omega_n} \quad (22)$$

故壩體受力後傳遞至固定端之最大力為

$$F_{T \max} \cong k u_{\max} = k \frac{I}{M\omega_n},$$

$$\text{又 } \omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}} \Rightarrow k = \omega_n^2 M, \text{ 故}$$

$$F_{T \max} \cong k u_{\max} = (\omega_n^2 M) \frac{I}{M\omega_n} = I\omega_n = (mv_0)\omega_n \quad (23)$$

若是壩體為一均勻尺寸之懸臂柱，考慮其自由端點之反應，則其彈簧係數

$$k = \frac{3EI}{L^3}, \text{ 壩體質量 } M = \frac{\rho AL}{2}, \text{ 故可得一粗略估計之自然振動頻率}$$

略估計之自然振動頻率

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}} = \sqrt{\frac{6E}{\rho} \left( \frac{r}{L^2} \right)},$$

$$\text{其中 } r^2 = \frac{I}{A}.$$

或直接以柱之第一振態自然頻率

$$\omega_1 = 1.875^2 \sqrt{\frac{E}{\rho} \left( \frac{r}{L^2} \right)}, \text{ 代入(23)式中, 即可得}$$

巨石造成之  $F_{T \max}$ 。

## 結果與討論

### A. 分散應力之作用

在一般的巨石撞擊狀況下，撞擊力大，撞擊接觸面積卻甚小，如此集中之應力常會造成結構體局部區域之破壞。若我們在壩體上游面加設廢輪胎作為緩衝物，則由於廢輪胎受撞擊時會產生較大規模之變形，使得撞

擊時之接觸面積變大，亦即達到分散應力之效果，使原本集中於某一點之撞擊力分佈於較大面積上，以減少對局部區域之破壞。利用有限元素法應用軟體 MSC/NASTRAN for Windows 分析集中於一點之撞擊力與應力分散於  $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$ 、 $0.8\text{m} \times 0.4\text{m}$  及  $0.4\text{m} \times 0.8\text{m}$  等三種面積上時對壩體之影響。

分析之模型為高度 4m、頂寬 1m、底寬 1.6m，及面寬 2m 之混凝土柱。混凝土柱之彈性係數  $E=25 \times 10^9 \text{Pa}$ 、波松比  $\nu=0.3$ 、抗張強度=3.28MPa、抗壓強度=28MPa、抗剪強度=16.8Pa、混凝土密度=2300kg/m<sup>3</sup>。設定混凝土柱體表面為邊界，柱體底部為固定端，將柱體分為 1600 個元素，共 2079 個節點。

作用力為 100 噸重(即 980KN)，在作用於一點的狀況下，設定作用力作用於 Node 1126，即距離柱體頂端 0.4m，距離柱體兩側 1m 處。而在應力分散於  $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$ 、 $0.8\text{m} \times 0.4\text{m}$  及  $0.4\text{m} \times 0.8\text{m}$  等三種面積上時，應力分散之方式為由撞擊點向接觸面積之四角呈線性變化分散。

經由有限元素法應用軟體 MSC/NASTRAN for Windows 分析後，可得作用力集中於一點及分散於不同面積時，壩體所受之最大應力、及固定端之最大受力如表 1 所示，而柱體之應力分布及變形情況如圖 4~圖 27 所示。

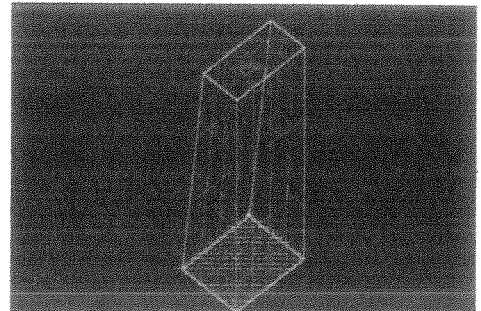


圖 4 作用力作用於一點時之模型圖

Fig. 4 Model with a point-loading

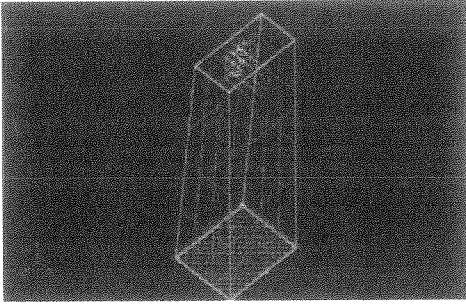


圖 5 作用力作用於  $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時之模型示意圖

Fig. 5 Triangular loading at a  $0.4\text{m}$  by  $0.4\text{m}$  area

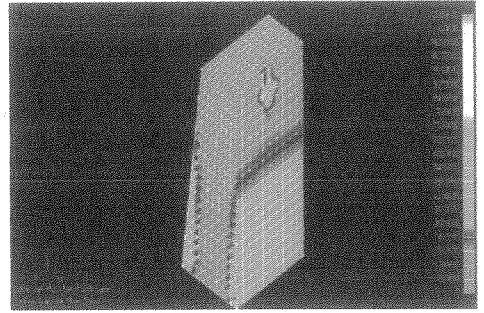


圖 8 作用力作用於  $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時之應力分佈

Fig. 8 Stress distribution due to loading at a  $0.4\text{m}$  by  $0.4\text{m}$  area

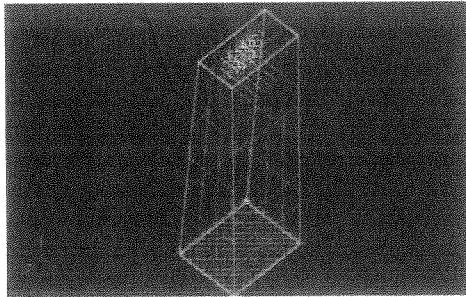


圖 6 作用力作用於  $0.8\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時之模型示意圖

Fig. 6 Triangular loading at a  $0.8\text{m}$  by  $0.4\text{m}$  area

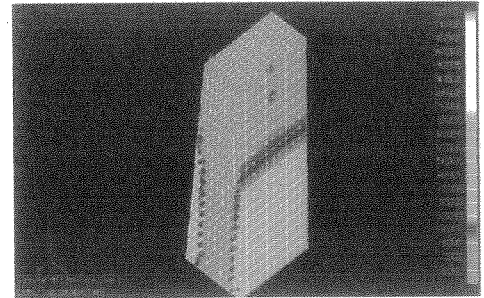


圖 9 作用力作用於  $0.8\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時之應力分佈

Fig. 9 Stress distribution due to loading at a  $0.8\text{m}$  by  $0.4\text{m}$  area

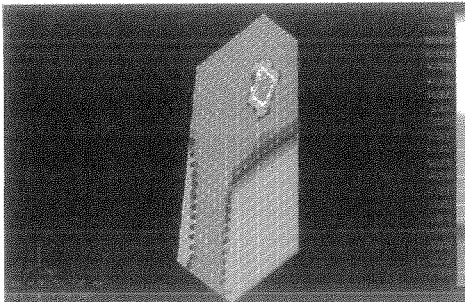


圖 7 作用力作用於一點時之應力分佈

Fig. 7 Stress distribution for point-loading case

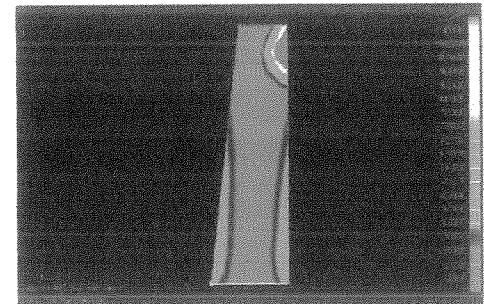


圖 10 作用力作用於一點時側視撞擊處切面應力分佈

Fig. 10 Resultant stress on x-y plane for point-loading case

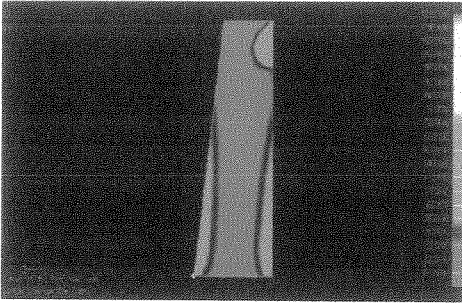


圖 11 作用力作用於  $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時，側視撞擊處切面之應力分佈  
Fig. 11 Resultant stress on x-y plane due to loading at a  $0.4\text{m}$  by  $0.4\text{m}$  area

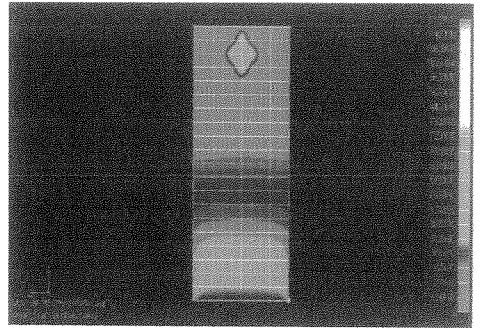


圖 14 作用力作用於  $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時，模型正面之應力分佈  
Fig. 14 Resultant stress on y-z plane due to loading at a  $0.4\text{m}$  by  $0.4\text{m}$  area

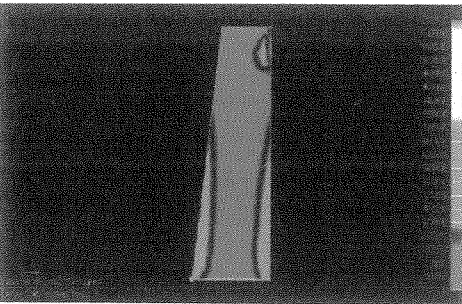


圖 12 作用力作用於  $0.8\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時，側視撞擊處切面之應力分佈  
Fig. 12 Resultant stress on x-y plane due to loading at a  $0.8\text{m}$  by  $0.4\text{m}$  area

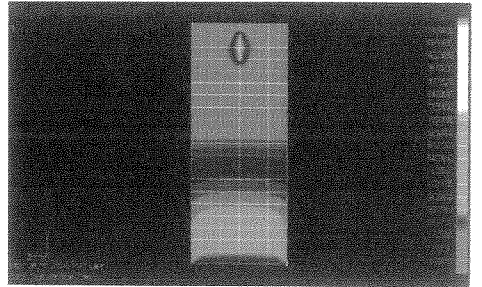


圖 15 作用力作用於  $0.8\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時，模型正面之應力分佈  
Fig. 15 Resultant stress on y-z plane due to loading at a  $0.8\text{m}$  by  $0.4\text{m}$  area

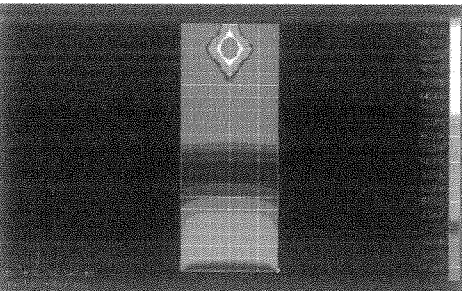


圖 13 作用力作用於一點時，模型正面之應力分佈  
Fig. 13 Resultant stress on y-z plane for point-loading case

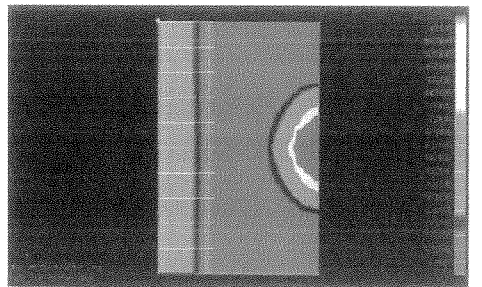


圖 16 作用力作用於一點，俯視撞擊處切面應力分佈  
Fig. 16 Resultant stress on x-z plane at the impacted level for point-loading case

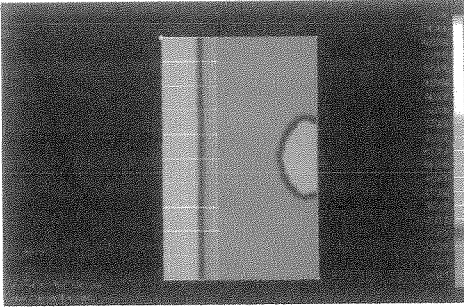


圖 17 作用力作用於  $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時，俯視撞擊處切面之應力分佈

Fig. 17 Resultant stress on x-z plane at the impacted level due to loading at a  $0.4\text{m}$  by  $0.4\text{m}$  area

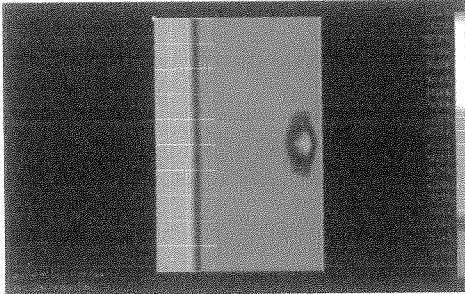


圖 18 作用力作用於  $0.8\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時，俯視撞擊處切面之應力分佈

Fig. 18 Resultant stress on x-z plane at the impacted level for point-loading case

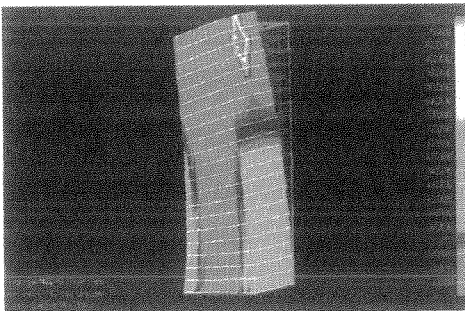


圖 19 作用力作用於一點時，模型之變形與應力分佈

Fig. 19 Three-dimensional plot for deflection for point-loading case

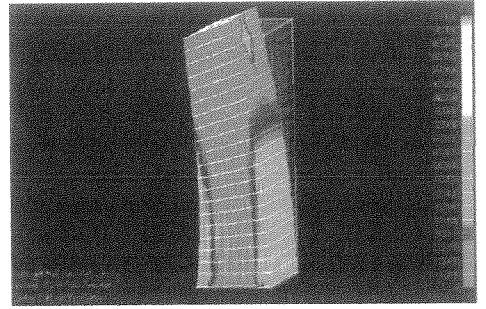


圖 20 作用力作用於  $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時，模型之變形與應力分佈

Fig. 20 Three-dimensional plot for deflection due to loading at a  $0.4\text{m}$  by  $0.4\text{m}$  area

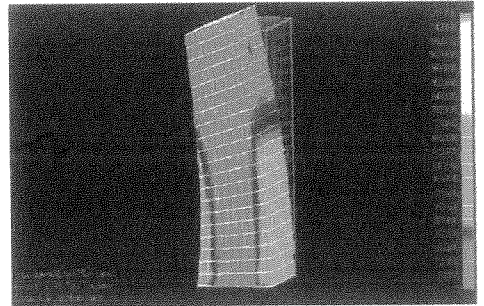


圖 21 作用力作用於  $0.8\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時，模型之變形與應力分佈

Fig. 21 Three-dimensional plot for deflection due to loading at a  $0.8\text{m}$  by  $0.4\text{m}$  area

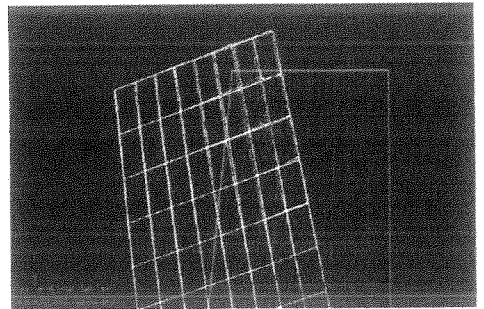


圖 22 作用力作用於一點時，側視撞擊處之變形

Fig. 22 Zoom in plot for fig19 for point-loading case

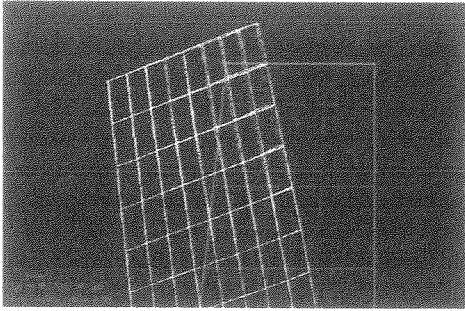


圖 23 作用力作用於  $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時，側視撞擊處之變形

Fig. 23 Zoom in plot for fig20 due to loading at a  $0.4\text{m}$  by  $0.4\text{m}$  area

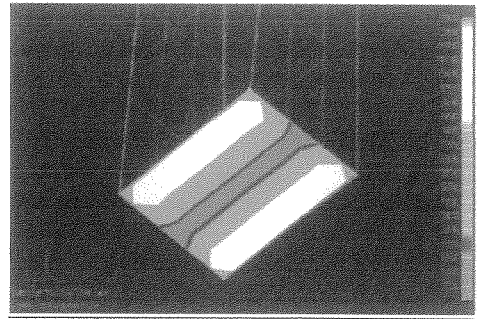


圖 26 作用力作用於  $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時，固定端之受力分佈

Fig. 26 Distribution of fixed-end reaction due to loading at a  $0.4\text{m}$  by  $0.4\text{m}$  area

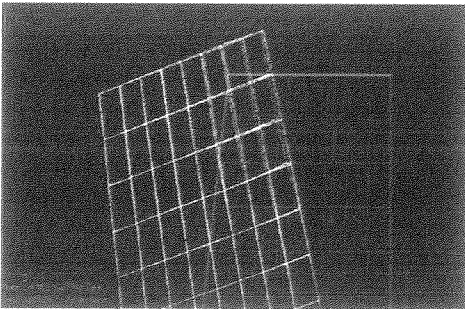


圖 24 作用力作用於  $0.8\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時，側視撞擊處之變形

Fig. 24 Zoom in plot for fig21 due to loading at a  $0.8\text{m}$  by  $0.4\text{m}$  area

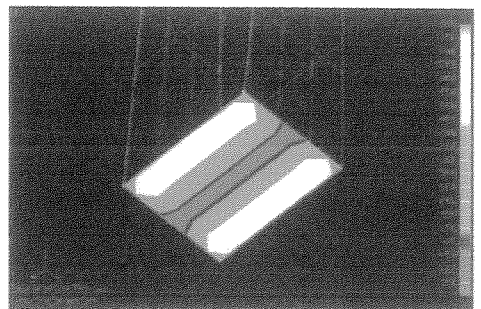


圖 27 作用力作用於  $0.8\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時，固定端之受力分佈

Fig. 27 Distribution of fixed-end reaction due to loading at a  $0.8\text{m}$  by  $0.4\text{m}$  area

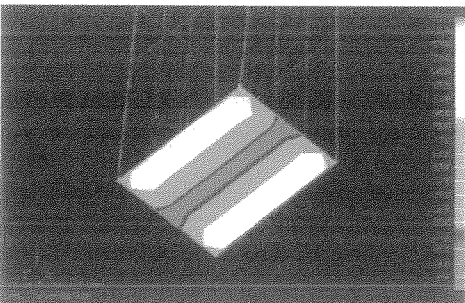


圖 25 作用力作用於一點時，固定端之受力分佈

Fig. 25 Distribution of fixed-end reaction for point-loading case

由圖 7~圖 18 及表 1 中最大應力之變化可知可知，廢輪胎緩衝物之應力分散效果，使壩體受撞擊時之最大應力可減弱約 70%，且分散於  $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$  面積時，即可達最大效果，如分散面積繼續增加，最大應力並不會隨之降低。由圖 19~圖 24 可知應力分散後，局部區域之破壞程度減低。由圖 25~圖 27 及表 1 中固定端最大受力均維持定值可知，壩體所受總力並無改變，故可知，在受到同樣大小之撞擊力時，應力分散之效果的確提供了良好之保護壩體功效。

#### B. 最大撞擊力之減少

若在壩體上游面加設廢輪胎作為緩衝物，則壩體-廢輪胎之組合可視為一組串聯之彈簧-質量系統，忽略阻尼之作用下，由於衝量為定值，故衝擊歷時拉長，且由(23)

式可知在同樣的衝量作用下，傳遞至壩體固定端之最大力與被撞擊物之自然振動頻率成正比。而在壩體-廢輪胎系統中，由於廢輪胎之勁度較小，造成整個系統之彈簧係數變小、自然振動頻率降低，使得傳遞至固定端之最大力降低。

C. 阻尼之效用

由圖 2 可知阻尼比  $\zeta$  較大之物體，其振幅將逐漸減小，而無阻尼之物體其振幅將維持不變。其原因是由於阻尼具有弛滯消能之作用，故在反覆振盪的過程中消耗能量，終使振盪靜止。

故當廢輪胎受到撞擊時，若此脈衝力使廢輪胎產生振動，則大部分之能量將由於阻尼之作用而消耗，另外部分之能量則經由廢輪胎傳遞至壩體。

若當廢輪胎受到巨石撞擊時，撞擊力量甚大而無法使廢輪胎產生振動時，則我們僅考慮廢輪胎受到撞擊瞬間之最大振幅是否會因阻尼之作用而變小。由圖 3 可知，在單位脈衝力作用下，物體之最大位移量將隨  $\zeta$  值的增加而減少，造成振幅降低之原因即為部分能量由於阻尼之作用而消耗。一般的土木建築材料之  $\zeta$  值約在 5%~10% 左右，而依據實際經驗判斷，廢輪胎具有較大的  $\zeta$  值，故在受到單位脈衝力(如巨石撞擊)作用時，廢輪胎之最大振幅較同樣受到單位脈衝力作用時的混凝土為小，即在受到極大撞擊力時，廢輪胎仍具有降低壩體所受最大力之效果，但若與反覆振動時之消能效果比較則較不顯著。

表 1 作用力分散於不同面積時，壩體所受之最大應力、及固定端最大受力比較表

Table 1 The maximum stress and the maximum force on the end of the dam when the force distributed on the different area.

	集中於一點	分散於 0.4m x 0.4m	分散於 0.8m x 0.4m	分散於 0.4m x 0.8m
最大應力	11224.99(KPa)	3666.43(KPa)	3666.40(KPa)	3666.4(KPa)
固定端最大受力	122.44(KN)	122.44(KN)	122.44(KN)	122.44(KN)

結論與建議

A. 結論

1. 本研究中由動力反應之觀點推導得到壩體受撞擊時，若忽略阻尼之作用，則固定端之最大受力值為

$$F_{T \max} \cong I\omega_n = (mv_0)\omega_n$$

2. 根據本文之探討得知，在忽略阻尼的作用時，若壩體受同樣衝量撞擊(單自由度撞擊)，則傳遞至固定端之最大力與壩體之自然振動頻率成正比，而由於廢輪胎之質地較軟，亦即其彈簧係數較小，故與壩體串聯後，造成整個系統之彈簧係數變小，自然振動頻率降低，使得傳遞至固定端之最大力降低，即可達到保護壩體之效果。
3. 考慮廢輪胎緩衝物之阻尼效果時，依據本研究之探討，阻尼之消能效果與衝擊力是否會使廢輪胎產生振動有關。若衝擊力使廢輪胎產生振動，則在反覆振動之過程

中，由於阻尼之作用消耗部分能量，且振動次數愈多，阻尼所消耗之能量比例愈高。

若衝擊力甚大無法使廢輪胎產生振動，則阻尼之作用無法藉由反覆振動過程達到消能效果。但比較不同阻尼比之物質，受衝擊時的最大變形量會隨阻尼比之增加而降低，即廢輪胎仍然較混凝土具有較佳之消能效果，但此消能效果與反覆振動時之消能效果相較則較不顯著。

B. 建議

1. 由於輪胎之物理參數獲得不易，故僅能由一般之經驗現象及常理推斷其具有較大之阻尼比及較小之彈簧常數，而確實之消能效果仍有賴實驗得之。
2. 本研究中並未討論廢輪胎緩衝物中所填充物質對消能效果之影響，不同填充物質所造成緩衝效果之差異仍需更進一步之研究。

本研究中有關壩體受衝擊時動力反應，均視為單一自由度系統進行推導，至於若以非單一自由度之狀況進行計算，結果是否有明顯差異則有賴更進一步之研究數據加以驗證。

### 參考文獻

1. 劉正川、陳永祥、劉玉雯(1999)，「構造物加設緩衝材料之衝擊試驗研究」，第二屆土石流研討會論文集，pp.291~298。
2. Nastran (NASA Structural Analysis) ( 2000 )， ver 7.07， The MacNeal-Schwendler Corporation (美商麥格尼軒股份有限公司)。
3. 施國欽(1998)，大地工程學(二)基礎工程篇，文笙書局，第一章 側向土壓力與擋土牆，pp.1~pp.64。
4. Anil K. Chopra(1997)，"Dynamics of Structures"，pp.35~154，pp.591~593。
5. Braja M. Das(1990)，"Principles of Geotechnical Engineering 3/e"，PWS-KENT Publishing Company，pp.325~401。
6. Chu-Kia Wang， Charles G. Salmon (1998)，"Reinforced Concrete Design"，6th Edition，Addison Wesley Educational Publishers Inc.。
7. Joseph E. Bowles (1982)，"Foundation Analysis and Design"，McGraw-Hill Interational Book Company，pp.378~404，pp.431~458。
8. Whitney Clark Huntington (1957)，"Earth Pressures and Retaining Walls"，pp.16~143