

## 重質氣體連續溢漏於梯形地形與建物間之擴散風洞實驗

蕭葆義<sup>1\*</sup> 王哲瑜<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程系教授

<sup>2</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程系碩士

### 摘要

臺灣地狹人稠，部分位於丘陵地形之工業區鄰近經常有住宅區。工業區內之化學儲存槽內之有毒重質氣體溢漏後，鄰近住宅區將造成安全影響，因此重質氣體溢漏後之擴散特性之瞭解掌握，有助於工安評估。本文應用風洞模擬實驗探討在梯形地形與建物間之連續溢漏重質氣體擴散特性。實驗結果顯示由於梯形地形後坡腳與建物之間區域，在梯形地形後坡腳角度由 $15^\circ$  增加至 $30^\circ$ ，因為產生回流渦流效應，導致溢漏之重質氣體累積濃度增加。當梯形地形後方之建築物高度變高時，將使重質氣體在梯形地形後坡腳與建物之間區域累積，使重質氣體污染團抬升情形更加明顯。擴散尺度參數無論水平向或垂直向二者皆沿下游距離增加而變大。

**關鍵字:** 梯形地形，重質氣體，負浮昇羽昇流，擴散

**Keywords:** Trapezoidal terrain, Heavy gas, negative buoyant plume, Dispersion

### 1. 前言

臺灣地狹人稠，部分位於丘陵地形之工業區鄰近經常有住宅區。工業區內之化學儲存槽內之氣體泰半以上具有毒性，且該等氣體密度大於空氣，稱為重質氣體。該等有毒重質氣體溢漏後，鄰近住宅區將造成安全影響，因此重質氣體溢漏後之擴散特性之瞭解掌握，有助於工安評估。應用風洞模擬實驗探討分析在梯形地形與建物間之連續溢漏重質氣體擴散特性，結果可提供評估之參考。

相關前人研究包括：Britter(1989)提出重質氣體於大氣環境中擴散現象，對於氣體團之形成與濃度擴散及氣體擴散影響因素有深入探討。Meroney(1982)對模擬重質氣體在大氣環境中擴散情況進行研究，並對重質氣體的計算沉降位置(touchdown)、煙柱出口速度等等進行研究。Schatzmann(1993、1995)與 Donat *et al.*(1999)提出一系列重質氣體污染擴散之實驗相關研究，並提出物理因次分析的方法來探討分析濃度稀釋比值與物理參數組合之關係式，關係式中考慮的物理參數包含了氣體密度比、密度福祿數與雷諾數之等等。Castro(1993)提出在一地面溢漏源排放重質氣體，溢漏源前後皆有對稱斜坡地形，其重質氣體擴散於斜坡地

形之爬昇坡面的情形。Ramsay(1995a, 1995b)將重質氣體之擴散物理過程詳細描述，並利用數值計算方式探討其複雜配置之阻礙物與地貌物擴散情況。Lateb *et al.* (2010、2011)以數值模擬模式計算流體力學，探討建築物對於下游煙囪釋放污染物之周圍擴散特性，研究結果顯示排放源高度及排放源出口排放速度係影響評估建築物周圍環境之污染濃度擴散特性之一重要因素。

重質氣體溢漏後，其所形成之重質氣體負浮昇羽昇流(heavy gas negative buoyant plume)受到矩形斜坡地形坡度與地形及建築距離以及建築物高度之影響效應，綜合上述前人研究，較少著墨探討。因此本文應用風洞模擬實驗研究連續溢漏源排放形成之負浮昇濃度羽昇流(negative buoyant plume)在梯形地形與建物間之連續溢漏重質氣體擴散特性，實驗採用二氧化碳(CO<sub>2</sub>)模擬重質氣體，梯形地形模型之斜坡角度可改變，梯形地形後坡腳與建物距離以及建物高度為變動參數。

## 2. 實驗設置

實驗主要採用環境風洞實驗方式量測流場與濃度場，並分析數據，藉以獲得重質氣體污染源連續溢漏排放形成之負浮昇濃度羽昇流在紊流邊界層流狀況下，並與斜坡地形作用，其擴散參數及延散特性變化。實驗內容將設計不同斜坡角度地形、溢漏排放源高度、以及溢漏排放強度(密度福祿數)；而流場之量測將採用熱流速儀(thermal anemometer)與雙向熱膜探針(X-type film)，獲得流場及紊流特性。溢漏排放源將採用二氧化碳(CO<sub>2</sub>)作為重質氣體(考慮實驗安全性，選擇非化學性氣體)，該重質氣體二氧化碳密度大於周遭空氣密度，因此進行排放後將形成負浮昇羽昇流。濃度擴散則使用採樣管排抽取追蹤氣體樣品，收集吸入氣袋(air bag)，再利用二氧化碳偵測器(Carbon Dioxide Detector)系統進行分析氣袋之樣品，獲得濃度。

實驗係利用國立臺灣海洋大學河海工程系之大氣環境風洞之試驗段，於入口處先設置三角狀錐板(渦流產生器)，再隨之佈放粗糙元素，合計9公尺，該長度足夠產生完全發展之厚的紊流邊界層(fully developed thick turbulent boundary layer)，以模擬都市或郊區地況之中性紊流邊界層流。應用該紊流邊界層流做為來流(approaching flow)，在此來流作用下，連續溢漏源排放形成之負浮昇濃度羽昇流與下游斜坡地形阻體以及建築物作用。梯形地形模型之斜坡角度 $\theta$ 可改變，梯形地形後坡腳與建物距離 $W$ ，以及建物高度 $H_b$ 。圖一所示為實驗佈置示意圖。

## 3. 結果分析與討論

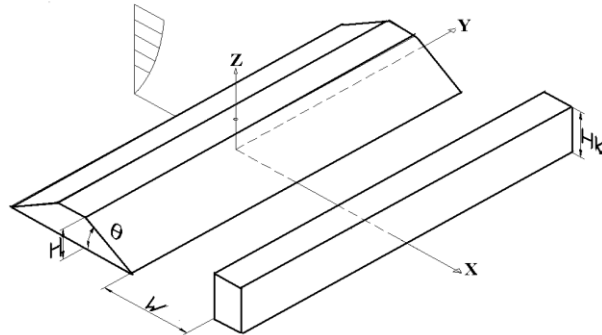
### 3.1 迫近流場

本文所模擬迫近流場係為中性大氣紊流邊界層流，該紊流邊界層流之平均流速剖面示如圖二，該圖之 $Z_{ref}$ 為邊界層厚度， $U_{ref}$ 為自由流速。平均風速剖面與指數律(power law)理論公式結果比較，其指數冪次 $n=0.241$ 。該圖顯示實驗模擬

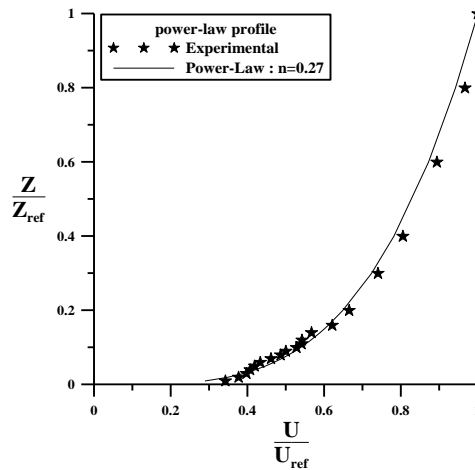
重質氣體連續溢漏於梯形地形與  
建物間之擴散風洞實驗

n 值，符合 Counihan (1975)建議之都市地況之 n 值範圍 0.23~0.40。

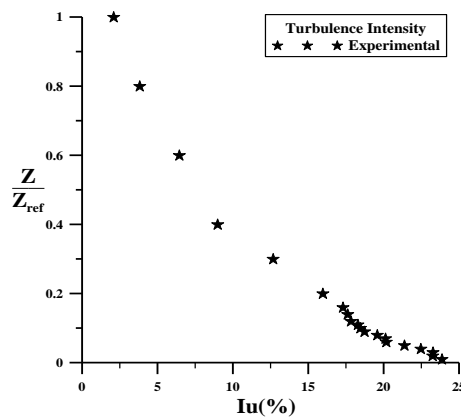
模擬迫近流場之紊流速度剖面示如圖三，結果顯示於近地表面，紊流強度約為 20%。



圖一：實驗模擬模型示意圖與量測座標系統



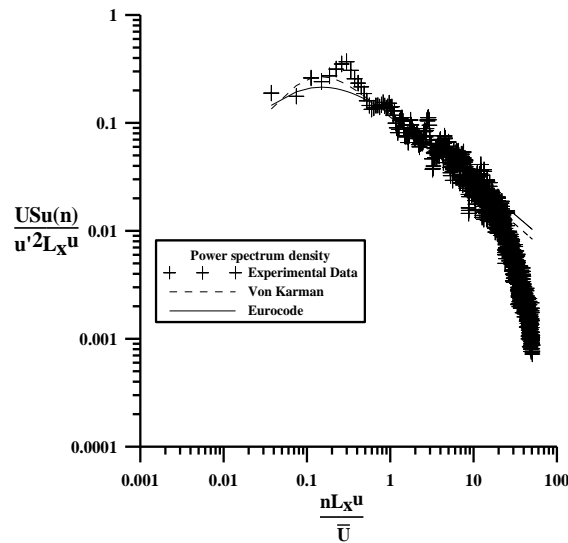
圖二：迫近流場平均風速剖面



圖三：迫近流場之軸向紊流強度剖面

模擬迫近流場之紊流速度頻譜分析結果，示如圖四。實驗模擬量測結果並與

Von Karman 與 Eurocode 公式比較，顯示模擬結果與公式計算值相當接近吻合。

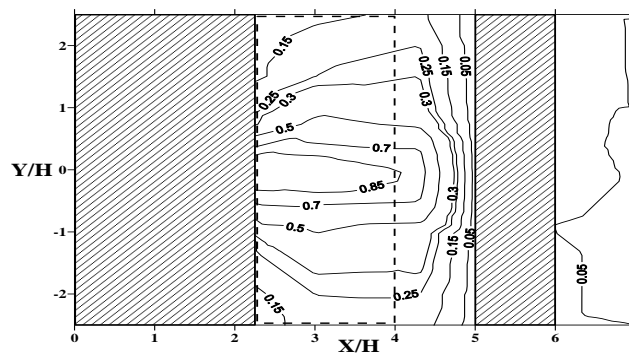


圖四：迫近流場紊流速度頻譜；高度  $Z/Z_{ref}=0.1$

### 3.2 濃度分佈

採用溢漏源之排放流量  $Q(m^3/s)$ 、有效溢漏源高度  $H_e$ 、有效溢漏源高度處之環境風速  $U$ ，做為特性尺度參數，將實驗量測到之氣體濃度數值  $C(ppm)$ 加以無因次化後，可獲得無因次濃度參數  $K$  值，其關係式如下：

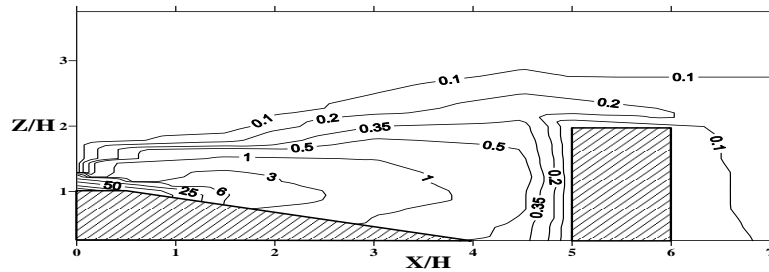
$$K = \frac{CH_e^2U}{Q} \quad (1)$$



圖五：水平方向之等值濃度分佈圖； $Z/H=0.5$ ，斜坡角度  $\theta=15^\circ$ ， $W=1H$ ， $H_b=2H$

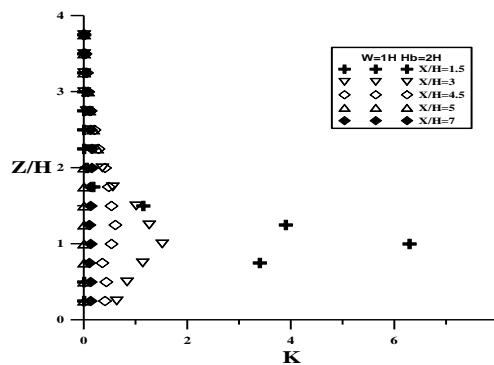
圖五所示為在斜坡角度  $\theta=15^\circ$ ， $W=1H$ ， $H_b=2$ ， $Z/H=0.5$  條件下之水平方向等值濃度分佈圖。結果顯示建築物阻擋，使得濃度聚集於坡腳與建物之間，並往水平兩側擴展。圖六為在斜坡角度  $\theta=15^\circ$ ， $W=1H$ ， $H_b=2$  條件下，沿中心軸線

( $Y/H=0$ )之垂直方向等值濃度分佈圖。該圖結果也顯示受建物阻擋，濃度聚集累積在坡腳與建物之間區域。

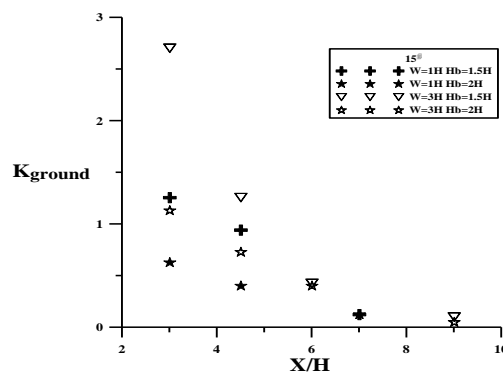


圖六：垂直方向之等值濃度分佈圖;  $Y/H=0$ ，斜坡角度  $\theta=15^\circ$ ， $W=1H$ ， $H_b=2H$

在斜坡角度  $\theta=15^\circ$ ， $W=1H$ ， $H_b=2H$  沿中心下游處之濃度垂直剖面變化示如圖七。濃度剖面結果顯示沿下游距離，濃度垂直分佈逐漸擴展。圖八為斜坡角度  $\theta=15^\circ$  時，各種地形與建築物間距以及建築物高度條件下，沿中心線下游之地面濃度變化。在斜坡與建物之間區域，無論寬度  $W=H$  或  $W=3H$ ，地面濃度係隨建物高度增加而減小。



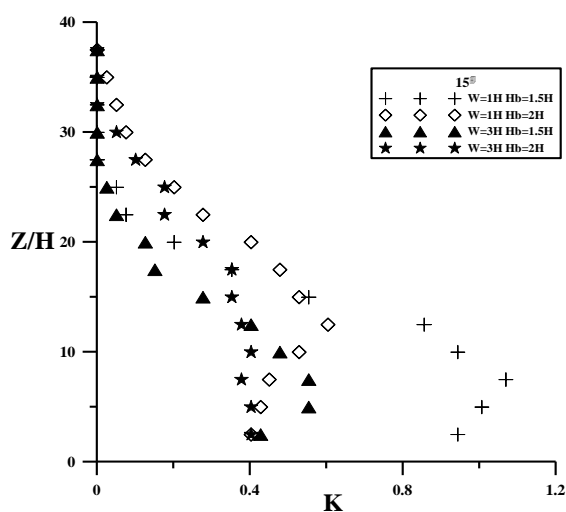
圖七為沿中心下游處之濃度垂直剖面變化；斜坡角度  $\theta=15^\circ$ ， $W=1H$ ， $H_b=2H$



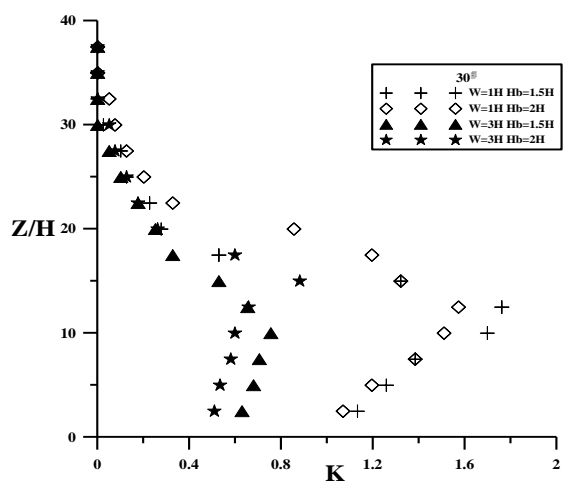
圖八：沿中心線下游之地面濃度變化

斜坡角度  $\theta=15^\circ$  與  $\theta=30^\circ$ ，在地形後坡腳趾與建築物間距之中心處，不同之

地形與建築物間距以及建築物高度條件下之濃度垂直剖面分佈變化，分別如圖九以及圖十所示。結果呈現無論間距  $W=H$  或  $W=3H$ ，隨著建築物高度增加，濃度垂直剖面之最大值卻下降。原因主要是建築物高度增加，阻擋氣團越過建築物，使得氣團更易於往水平兩側擴展，故而濃度垂直剖面之最大值降低。此外當梯形地形後方之建築物高度由  $1.5H$  變高為  $2H$  時，將使重質氣體在梯形地形後坡腳與建物之間區域累積，使重質氣體污染團抬升情形更加明顯，此現象可觀察圖九與圖十之垂直濃度剖面最大值之高度位置之變化而得知。

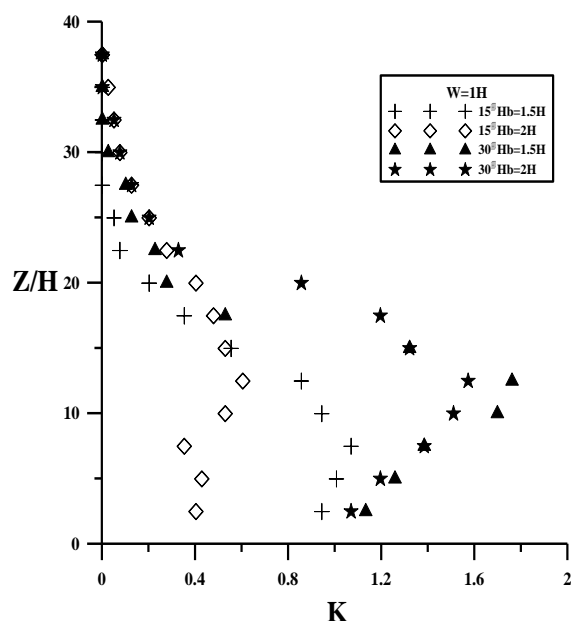


圖九：在地形後坡腳趾與建築物間距之中心處，不同之地形與建築物間距以及建築物高度條件下之濃度垂直剖面分佈變化； $\theta=15^\circ$

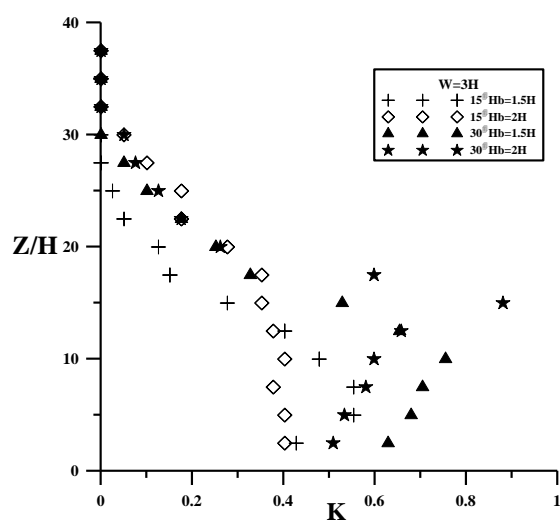


圖十：在地形後坡腳趾與建築物間距之中心處，不同之地形與建築物間距以及建築物高度條件下之濃度垂直剖面分佈變化； $\theta=30^\circ$

當地形與建築物間距  $W=H$  與  $W=3H$  時，在地形後坡腳趾與建築物間距之中心處，不同之地形坡腳角度以及建築物高度條件下之濃度垂直剖面分佈變化，分別如圖十一以及圖十二所示。該二圖結果顯示，無論  $W=H$  或  $W=3H$  時，當斜坡角度從  $15^\circ$  增加為  $30^\circ$  時，建築物高度較低 ( $H_b=1.5H$ ) 或較高 ( $H_b=2H$ )，其垂直濃度剖面值均呈現增加現象。此現象意味著斜坡角度由  $15^\circ$  增加為  $30^\circ$ ，由於角度變大為  $30^\circ$ ，形成回流渦流現象，導致溢漏之重質氣體累積，故而濃度增加。



圖十一：在地形後坡腳趾與建築物間距之中心處，不同之地形坡腳角度以及建築物高度條件下之濃度垂直剖面分佈變化； $W=H$



圖十二：在地形後坡腳趾與建築物間距之中心處，不同之地形坡腳角度以及建築物高度條件下之濃度垂直剖面分佈變化； $W=3H$

### 3.3 擴散尺度分析

依據濃度分佈變化，計算分析擴散尺度參數(dispersion parameter)，包括水平向擴散尺度參數 $\sigma_y$ ，與垂直向擴散尺度參數 $\sigma_z$ 。各參數可依下列各式分析計算：

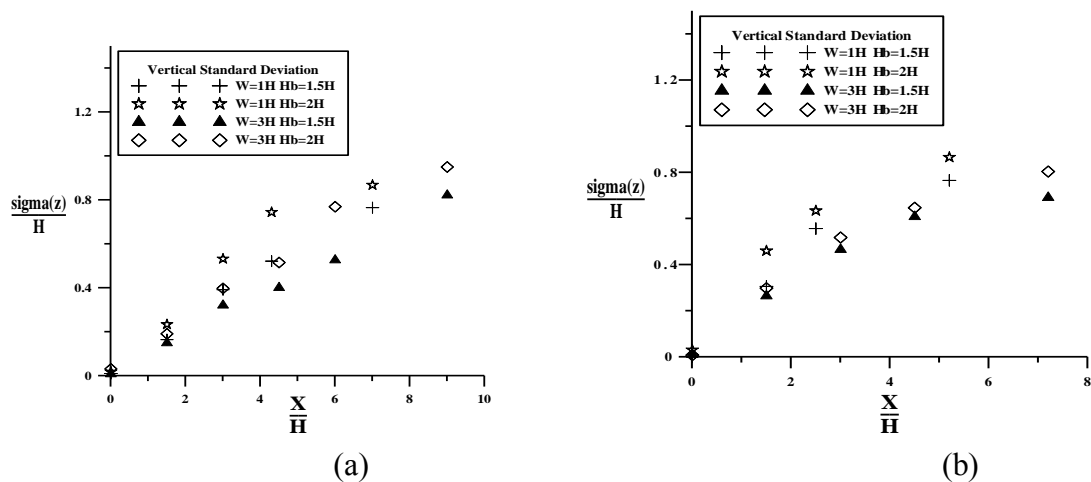
$$\sigma_y = \left[ \left( \int_0^\infty y^2 C dz / \int_0^\infty C dz \right) - y_c^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$\sigma_z = \left[ \left( \int_0^\infty z^2 C dz / \int_0^\infty C dz \right) - z_c^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$y_c = \left( \int_0^\infty C y dz \right) / \left( \int_0^\infty C dz \right) \quad (4)$$

$$z_c = \left( \int_0^\infty C z dz \right) / \left( \int_0^\infty C dz \right) \quad (5)$$

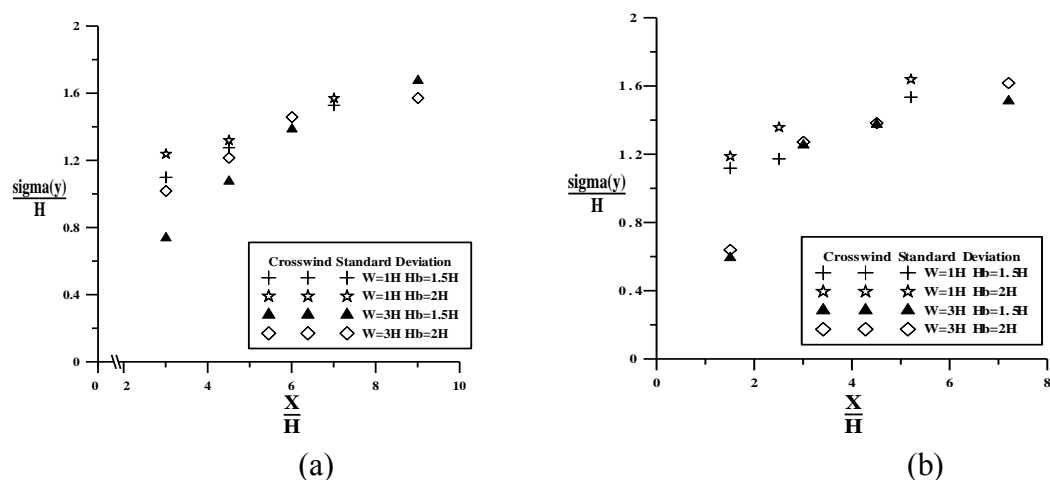
斜坡角度 $\theta=15^\circ$ 與 $\theta=30^\circ$ ，不同之地形與建築物間距以及建築物高度條件下之垂直向擴散尺度參數沿下游之變化，分別示如圖十三(a)及圖十三(b)。結果顯示各種條件下，垂直向擴散尺度參數係沿下游距離增加而變大。



圖十三：不同地形與建築物間距以及建築物高度條件下之垂直向擴散尺度參數；  
(a)  $\theta=15^\circ$ ，(b)  $\theta=30^\circ$

圖十四(a)與圖十四(b)分別為在斜坡角度 $\theta=15^\circ$ 與 $\theta=30^\circ$ ，而高度 $Z/H=0.5$ 時，不同地形與建築物間距以及建築物高度條件下之水平向擴散尺度參數沿下游距離之變化。結果顯示各種條件下，水平向擴散尺度參數與係沿下游距離增加而變大。





圖十四：不同地形與建築物間距以及建築物高度條件下之水平向擴散尺度參數， $Z/H=0.5$ ；(a)  $\theta=15^\circ$ ，(b)  $\theta=30^\circ$

#### 4. 結論

本文應用風洞實驗，採用二氧化碳(CO<sub>2</sub>)模擬重質氣體，量測探討分析梯形地形模型之斜坡角度  $\theta$  分別為  $15^\circ$  與  $30^\circ$ ，梯形地形後坡腳與建物距離  $W$  以及建物高度  $H_b$  為變動參數，連續溢漏重質氣體所形成之重質負浮昇濃度與昇流之擴散變化特性。結果顯示由於梯形地形後坡腳與建物之間區域，在梯形地形後坡腳角度由  $15^\circ$  增加至  $30^\circ$ ，因為產生回流渦流效應，導致溢漏之重質氣體累積濃度增加。當梯形地形後方之建築物高度變高時，將使重質氣體在梯形地形後坡腳與建物之間區域累積，使重質氣體污染團抬升情形更加明顯。水平向擴散尺度參數與垂直向擴散尺度參數二者皆沿下游距離增加而變大。

#### 5. 參考文獻

- [1] Britter, R. E., "Atmospheric dispersion of dense gases", *Annual Review Fluid Mechanics*, 1989, Vol. 21, pp. 317-44.
- [2] Castro, Ian. P., "Removal of slightly heavy gases from a valley by crosswinds", *Journal of Hazardous Materials*, 1993, Vol. 34, pp. 271-293.
- [3] Counihan, J., Adiabatic atmospheric boundary layer: A review and analysis of data from the period 1880-1972, *Atmospheric Environment*, 1975, Vol.9, pp.871-905.
- [4] Donat, J. and Schatzmann, M., "Wind tunnel experiments of single-phase heavy gas jets released under various angles into turbulent cross flows", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, Vol. 83, pp. 361-370.
- [5] Lateb, M., Masson, C., Stathopoulos, T. and Bedard, C., "Numerical simulation of pollutant dispersion around a building complex", *Building and Environment*, 2010, Vol. 45, pp. 1788-1798.

- [6] Lateb, M., Masson, C., Stathopoulos, T. and Bedard, C., “Effect of stack height and exhaust velocity on pollutant dispersion in the wake of a building”, *Atmospheric Environment*, 2011, Vol. 45, pp. 5150-5163.
- [7] Meroney, R. N., “Wind tunnel experiments on dense gas dispersion”, *Journal of Hazardous Materials*, 1982, Vol.6 ,pp.85-106.
- [8] Ramsay, S. R., “Dense gas dispersion in complex setting: Part 1-The Effect of obstacles”, *Wind Climate in Cities*, pp. 575-605. 1995.
- [9] Ramsay, S. R., “Dense gas dispersion in complex setting: Part 2-The effect of topography”, *Wind Climate in Cities*, pp. 607-629, 1995.
- [10] Schatzmann, M., Snyder, W. H., Lawson, R. E., “Experiments with heavy gas jets in laminar and turbulent cross flows”, *Atmospheric Environment*, 1993, Vol. 27A, pp. 1105-1116.
- [11] Schatzmann, M., “Accidental release of heavy gases in urban areas”, *Wind Climate in Cities*, pp. 555-574, 1995.