

## 土石流流速對磚造結構物之易損性影響

許志豪\* 曹鼎志

**摘要** 於土石流事件中，土石流流速與堆積深度為造成房屋結構物毀壞之主要因素，然而於過去的研究當中，常見僅使用堆積深度建立房屋結構物之易損性曲線，故本研究目的在於找出房屋結構易損性曲線與土石流衝擊力（流速與堆積深度）之關係。當結構物受到土石流撞擊時，衝擊力可使結構物產生位移量，故本研究根據 Haugen and Kaynia(2008) 之研究，計算土石流衝擊力所產生之位移量，並依據 HAZUS(2003) 對於結構物在不同損壞狀態下之發生機率研究為基礎，建立磚造結構物在不同損壞狀態、不同位移量下之脆弱曲線 (Fragility curve)，並整合脆弱曲線進而產製易損性函數曲線 (Vulnerability curve)。本研究以臺灣常見的磚造結構物為研究對象，產製於不同土石流流速 (2~20 m/s) 之易損性曲線。

**關鍵詞：**土石流、易損性、衝擊力。

### The Influence of Velocity on Brick Structure Vulnerability and Debris Flow Hazard

Chih-Hao Hsu\* Ting-Chi Tsao

**ABSTRACT** The destruction of structures in debris flow events is most related to inundation height and the velocity of debris flow. However, previous studies had established structure vulnerability curves mostly based on inundation height. This study aims to find the relationship between vulnerability and impact forces (velocity and height). When a structure is struck by debris flow, the impact force is transformed to the displacement of the structure. In this study the dynamic impact force of debris flow needed to generate the displacement was based on the study of Haugen and Kaynia (2008). The fragility curve of a brick structure to spectral displacement was based on HAZUS (2003) damage state probability studies. After establishing the fragility curves under different damage state probabilities, we combined the fragility curves into a unitary curve for different velocities (2 to 20 m/s).

**Key Words:** Debris flow, vulnerability, impact force.

#### 一、前言

於坡地災害領域中，災害風險 (Risk) 之概念已廣泛應用，然而臺灣對於土石流災害管理之研究起步較晚。於 1982 年西仕颱風時，土石流造成五股、泰山地區 17 人死亡之災情，方使得臺灣地區對於土石流有初步認識和重視 (林銘郎、謝正倫, 1996)，且直至 1996 年賀伯颱風來襲，造成陳有蘭溪流域大規模之土石流災情後 (林美玲、溫惠鈺, 2006)，歷經眾前人之耕耘及研究將災害風險之概念應用至土石流災害，方建構出臺灣地區土石流災害之風險管理架構。

聯合國國際減災策略組織 (UNISDR, 2009) 認為天然危害是一種自然的現象，可能導致生命傷亡、健康或傷害衝擊、財產損失、社會或經濟的破壞以及環境毀損等。於天然災害風險中，風險可被視為一系列的風險元素在承受某一程度的危害下之結果，而風險元素可視為在某一遭受災害威脅的特定地區內之人口、社區、人為環境、自然環境、經濟活動或服務等 (Alexander, 2000)。

此外，為能夠瞭解與計算某一個地區之災害風險，則必須先掌握該地區之危害潛勢 (natural hazard)、暴露量 (element at risk)、易損性 (vulnerability)，而其中危害潛勢更隱含所欲探討之災害規模，即為所預探討之災害重現期 (UNDRO, 1979)。Tsao et al. (2010) 針對臺灣地區提出土石流災害之風險管理架構，認為風險為「在某事件下預估將導致的生命損失、人員受傷、財產毀損或經濟活動干擾」，並將風險定義成危害潛勢、暴露量、易損性之組合，如下式：

$$\text{風險} = \text{危害潛勢} \times \text{暴露量} \times \text{易損性} \quad (1)$$

其中，風險為針對某事件所預期的人命傷亡、財產損失、經濟活動干擾；危害潛勢為於某特定區域與特定時間內發生潛在危害自然事件的可能性；暴露量為暴露在風險下的物件，包括人口、建築物、工程設施、基礎建設與管線、公共設施以及經濟活動等；易損性為暴露在風險下物件於自然災害強度下所受到的損失程度，其程度介於 0(無損失) 和 1(全部損失) 之間。

隨著近年科技發展之進步，土石流危害潛勢可透過數值軟體設定所預探討之災害重現期進行分析模擬；暴露量可透過室

內 GIS 之操作或詳細之現地調查取得；然而易損性之參考使用則存在高度之不確定性與地域性，因此，當進行土石流災害風險損失評估時，易損性成為一項重要因子，當選擇不適當之易損性時，將可能造成風險損失嚴重高估或低估。故本研究提出透過不同土石流流速 (2~20 m/s) 與土石流堆積深度 (0~3.5 m) 之組合，探討在不同組合狀況下，其所對應之房屋結構易損性，可供未來損失評估時參考使用，以減少高估或低估之情形發生。

## 二、文獻回顧

於天然災害風險領域中，易損性評估為了解以及減低災害風險所不可欠缺步驟之一 (Fuchs, 2012)，因此，在進行定量風險分析前，其首要工作為建立各類型暴露量之易損性曲線 (不同土石流災害強度作用在某種風險元素上，其可能造成風險元素損害程度大小之關係)。目前關於易損性研究主要分為兩種面向，一者認為易損性為考量社會經濟因子下，對抗壓力或變化之能力 (Wisner et al., 2004; Birkmann, 2006; Field et al., 2012)；另一者則認為易損性為災害發生之可能性與規模，以及其對於人為建造之環境所造成之衝擊 (Fell et al., 2008; Papathoma-Köhle et al., 2011)，而本文所討論之易損性屬於此分類。

Thywissen(2006) 根據蒐集文獻列舉至少 36 種易損性之定義，而本研究之易損性屬於物理易損性 (physical vulnerability)(Roberts et al., 2009; Papathoma-Köhle et al., 2011)，或稱結構易損性 (structural vulnerability)(Fuchs, 2009)，即為結構物之損失比值 (重建費用除以結構物價值)。Fuchs 等人 (2007) 利用 1997 年 8 月在阿爾卑斯山區土石流所造成的實際建築物損害保險賠償資料，以土石流堆積深度作為土石流災害強度，回歸分析得一較以往完整的建築物土石流易損性函數，其優點在於使用真實保險賠償金額作為資料進行迴歸分析，但缺點則是僅採用堆積深度作為單一因子，並未考量流速之影響，加上由於臺灣欠缺相關保險賠償資料，故甚難採用相同方式建立臺灣之易損性函數。Quan Luna et al. (2011) 利用義大利 2008 年之土石流災害資料，以堆積深度建立磚造房屋之易損性函數 (式 2)。

$$v = \frac{1.49 \times |h/2.513|^{-1.938}}{1 + |h/2.513|^{-1.938}} \text{ for } h \leq 3.63 \text{ m} \quad (2)$$

$$v = 1 \text{ for } h > 3.63 \text{ m}$$

式中：v 為易損性，表示房屋毀損程度；h 為模擬的土石流堆積深度 (m)。

於 Quan Luna et al. (2011) 之研究中採用 FLO-2D 進行土石流模擬，模擬過程中設定參數時多存在假設以及經驗法則，因此使用數值模擬所推衍之易損性，仍無法解決易損性之不確定性以及地域性。在臺灣，劉格非、李欣輯 (2006) 於計算土石流地上物損失部分時，於考慮結構物受土石流掩埋深度所造成之損失時，僅以掩埋深度作為單一因子，以堆積深度 3 m、1~3 m、小於 1 m 進行 3 種級距分類，所對應之損壞程度為全毀、半毀及輕微，然而於臺灣土石流災害現場，常可見相近之

堆積深度對房屋結構物造成截然不同之損壞程度，故認為土石流流速對於結構物之衝擊，將使得結構物呈現出不同之易損性。

有鑑於此，本研究在進行土石流結構物之易損性評估時，同時考慮土石流堆積深度以及流速，以反應出流速的重要性，並減少因考慮單一因子 (堆積深度) 所造成之不確定性。此外，使用連續之堆積深度 (0~3.5 m) 以及流速 (2~20 m/s) 進行易損性評估，亦可減少因分類級距過少造成之風險損失嚴重高估或低估情形。

## 三、研究方法

### 1. HAZUS 損壞狀態機率 (HAZUS damage state probabilities)

美國聯邦緊急事務管理署 (Federal Emergency Management Agency, FEMA) 開發之 HAZUS 手冊 (2003)，建構了不同形式之結構物在受到地震晃動時，結構物位移量與不同損壞狀態之發生機率關係，稱之為脆弱曲線 (Fragility curve)，於國內外已常見使用 HAZUS 進行結構物受地震影響之易損性分析研究 (林文隆，2007；Mortgat, 2004；羅俊雄等人，2002)。

HAZUS 手冊以房屋結構物在不同損壞狀態、不同位移量下之發生機率 (Damage state probabilities) 為基礎，建立房屋結構物之脆弱曲線 (式 3)，圖 1 為不同位移量在不同損壞狀態下，可能發生之機率示意圖。

$$P(ds|u_{\max}) = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left( \frac{u_{\max}}{\hat{S}_{d,ds}} \right) \right] \quad (3)$$

式中：Φ 為標準常態累積分布函數 (standard normal cumulative distribution function)；β<sub>ds</sub> 為對數常態標準偏差 (log-normal standard deviation)； $\hat{S}_{d,ds}$  為譜位移中位數 (median spectral displacement)，房屋結構物達到某一損壞狀態之變形量門檻；u<sub>max</sub> 為結構物最大位移量 (m)，係指在單一方向自由度上，因地表運動造成之最大位移量；ds 為某一損害狀況。

本研究依循 HAZUS 手冊 (2003) 之概念，將地表運動之衝擊力所引致之單一方向自由度上最大位移量，改由土石流衝擊力 (土石流堆積深度及流速所造成) 取代，進行結構物位移量計算，並以臺灣山區常見之磚造房屋結構物為研究對象，於 HAZUS 手冊 (2003) 中其對應之房屋類型為「磚造牆結構物」(unreinforced masonry bearing walls, URML)，典型樓層數為 1 層樓、長寬高尺寸為：10 m\*6 m\*3.5 m (Lo et al., 2012)。根據 HAZUS 手冊 (2003)，損壞狀態共分為無損壞 (None)、輕度損壞 (Slight)、中度損壞 (Moderate)、嚴重損壞 (Extensive) 以及完全損壞 (Complete)。此外，林宜德 (2007) 亦根據 ATC-13(1985) 及 HAZUS 手冊 (2003) 之損害狀態定義及相對損害比例之關係，提出無損壞、輕度損壞、中度損壞、嚴重損壞以及完全損壞所對應之損害比例。本研究對象「磚造牆結構物」之譜位移中位數、對數常態標準偏差以及損壞比例，如表 1 所示。

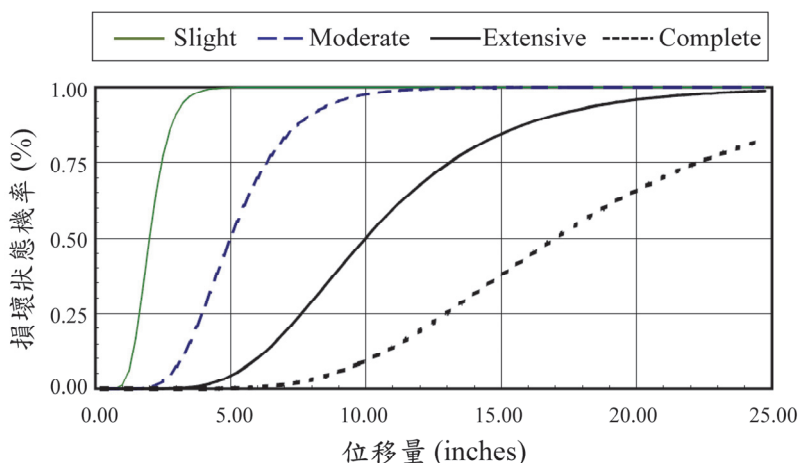


圖 1 HAZUS 脆弱曲線示意圖 (改繪自 HAZUS 手冊)

Fig.1 HAZUS fragility curves (redraw from HAZUS handbook)

表 1 磚造結構物之脆弱曲線參數 (摘自 HAZUS 手冊及林宜德, 2007)

Table 1 Structural fragility curve parameters for URML type building (quoted from HAZUS handbook and Yi-de Lin, 2007)

| 損壞狀態 | 損壞比例 (%)<br>(林宜德, 2007) | 譜位移中位數 (cm)<br>(HAZUS, 2003) | 對數常態標準偏差 (cm)<br>(HAZUS, 2003) |
|------|-------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 無損壞  | 0                       | -                            | -                              |
| 輕度損壞 | 2                       | 0.8128                       | 2.9210                         |
| 中度損壞 | 10                      | 1.6510                       | 3.0226                         |
| 嚴重損壞 | 50                      | 4.1148                       | 3.0480                         |
| 完全損壞 | 100                     | 9.6012                       | 2.9972                         |

## 2. 譜位移 (spectral displacement)

於表 1 中, 已獲得磚造結構物不同損壞狀態下之對數常態標準偏差以及譜位移中位數, 故若欲計算不同損壞狀態之機率時, 需先求得土石流對結構物之衝擊力所引致之位移量, 本研究依循 Haugen 和 Kaynia(2008) 之研究進行位移量之計算, 以下針對結構物最大位移量計算進行說明。

土石流衝擊力為土石流堆積深度及流速之加乘下所造成, 當土石流發生時, 土石流會對房屋結構物造成衝擊, 其中包含為動態衝擊力 (dynamic impact force,  $P_{dy}$ ), 以及流體靜力 (hydrostatic force,  $P_{st}$ ), 故結構物最大位移量為上述兩者所造成之位移總和, 可表示如式 4。

$$u_{max} = u_{st} + u_{dy,max} \quad (4)$$

式中:  $u_{st}$  為受流體靜力所造成之位移 (m);  $u_{dy,max}$  為受動態衝擊力所造成之最大位移 (m)。

流體靜力所造成之位移可由流體靜力除以結構物勁度取得, 表示如式 5。

$$u_{st} = \frac{P_{st}}{k} = \frac{p_{st}A}{k} = \frac{\rho_{df}gbh^2}{2k} \quad (5)$$

式中:  $k$  為結構物勁度 ( $k = \frac{4\pi^2 m_{str}}{T_n^2}$ )(kg/s<sup>2</sup>);  $p_{st}$  為平均流

體壓力 (kg/m<sup>2</sup>);  $A$  為受土石流衝擊之面積 (m<sup>2</sup>), 等於結構物寬乘以堆積深度 ( $A=bh$ );  $b$  為結構物寬度 (m), 本研究採用 10 m;  $h$  為堆積深度 (m);  $\rho_{df}$  為土石密度 (kg/m<sup>3</sup>);  $g$  為重力

加速度常數 (m/s<sup>2</sup>), 9.81 m/s<sup>2</sup>;  $m_{str}$  為結構物質量 (kg);  $T_n$  為結構物自然週期 ( $T_n = 0.075 \cdot H_{str}^{3/4}$ , NS 3491-12, 2004)(s);  $H_{str}$  為結構物高 (m), 本研究採用 3.5 m。

土石流動態衝擊力 ( $P_{dy}$ ) 屬於接觸力, 為計算此接觸力造成之最大位移量 ( $u_{dy,max}$ ), 需透過反應比 (response ratio,  $R_{max}$ ) 之計算來取得。反應比係指結構物受到動態衝擊力所造成最大位移與受到流體靜力所造成位移之比值 (Clough and Penzien, 1993), 可表示如式 6。

$$R_{max} = \frac{u_{dy,max}(P_{dy,max})}{u_{st}(P_{dy,max})} = \frac{u_{dy,max}}{P_{dy,max}/k} \quad (6)$$

根據 Chopra(2001) 之研究, 常見動態衝擊力振幅行為分為以下三種: 長方形、正弦半周期形、三角形。長方形係指結構物受力瞬間由零達到最大值, 可能產生最大的位移, 故在考慮土石流所造成之衝擊力時, 因土石流之到來屬於突然且瞬間達到極大值之行為, 因此保守採用長方形之振幅行為進行 (Haugen and Kaynia, 2008)。此外, 根據 FEMA(1995) 之研究, 當屬於 20 層樓以下且受到洪氾衝擊之狀況下, 其所對應之長方形動態衝擊力振幅行為之反應比為 2。故上式 6 可表示為下式。

$$u_{dy,max} = \frac{2P_{dy,max}}{k} = \frac{\rho_{df}v^2A}{2\pi^2 m_{str}} T_n^2 \quad (7)$$

式中:  $v$  為土石流流速 (m/s);  $P_{dy,max}$  為最大動態衝擊力。

### 3. 房屋結構物最大位移量計算

為進行房屋結構物最大位移量之計算，本研究採用之相關參數包含：1 層樓磚造房屋結構物尺寸為 10 m\*6 m\*3.5 m，估算整體結構物之質量約為 57,608 kg；根據結構物自然週期公式，計算 3.5 m 高之結構物週期為 0.191916 s；根據結構物勁度公式，可計算出本研究結構物尺寸之勁度為 61,747,612 kg/s<sup>2</sup>；常見土石流流速介於 2~20 m/s 間 (Hürlimann et al., 2003; Zanchetta et al., 2004; Arattano and Marchi, 2005)；以 2,100 kg/m<sup>3</sup> 作為臺灣土石流之土石密度 (Lo et al., 2012)。

表 2 計算磚造結構物最大變形量之參數

Table 2 Parameters for calculating the maximum displacement of structure for URML type building type

| 參數 | $m_{str}$ (kg) | $T_n$ (s) | $k$ (kg/s <sup>2</sup> ) | $b$ (m) | $V$ (m/s) | $\rho_{df}$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $h$ (m) |
|----|----------------|-----------|--------------------------|---------|-----------|----------------------------------|---------|
| 數值 | 57,608         | 0.191916  | 61,747,612               | 10      | 2~20      | 2,100                            | 0~3.5   |

表 3 磚造結構物之最大位移量 (流速為 12 m/s、深度為 0~3.5 m)

Table 3 The maximum displacement of structure for URML type building ( $v = 12$  m/s,  $h$  between 0 and 3.5 m)

| 堆積深度 (m) | $u_{st}$ (m) | $u_{dy,max}$ (m) | $u_{max} = u_{st} + u_{dy,max}$ (m) |
|----------|--------------|------------------|-------------------------------------|
| 0        | 0            | 0                | 0                                   |
| 0.1      | 0.00002      | 0.00979          | 0.00981                             |
| 0.2      | 0.00007      | 0.01959          | 0.01966                             |
| 0.3      | 0.00015      | 0.02938          | 0.02953                             |
| 0.4      | 0.00027      | 0.03918          | 0.03945                             |
| 0.5      | 0.00042      | 0.04897          | 0.04939                             |
| .        | .            | .                | .                                   |
| .        | .            | .                | .                                   |
| .        | .            | .                | .                                   |
| 3.1      | 0.01603      | 0.30364          | 0.31967                             |
| 3.2      | 0.01708      | 0.31343          | 0.33051                             |
| 3.3      | 0.01817      | 0.32323          | 0.34139                             |
| 3.4      | 0.01928      | 0.33302          | 0.35230                             |
| 3.5      | 0.02043      | 0.34281          | 0.36325                             |

### 4. HAZUS 脆弱曲線

於 HAZUS 手冊中 (HAZUS, 2003)，採用位移量作為橫軸，損壞狀態機率作為縱軸 (如圖 1)。於本研究中，磚造房屋結構物位移量係同時來自於土石流之堆積深度以及流速之貢獻，以土石流流速 12 m/s 為示範，將表 1 建議之脆弱曲線參數，以及表 3 所得之最大位移量帶入式 3，可獲得土石流流速 12 m/s 之不同損壞狀態之發生機率，其結果如圖 2 所示。

### 5. 磚造結構物易損性函數

臺灣地區因缺乏實際保險理賠資料，故無法使用理賠資料進行各項結構物之易損性函數建立 (Fuchs et al., 2007; Totschnig et al., 2011)。有鑒於此，本研究利用所建立之各種土石流流速 (2~20 m/s) 下所對應之 4 種不同損壞狀態 (輕度損壞、中度損壞、嚴重損壞、完全損壞) 之脆弱曲線，再將同一土石流流速下之 4 條脆弱曲線整合成單一之結構物易損性函數，建議作為該土石流流速下之磚造房屋結構物之易損性函數代表，其過程包含以下 2 步驟：(1) 求取不同損壞狀態下之預期損失率、(2) 整合 4 種不同損壞狀態下之預期損失率。

當計算最大可能造成之衝擊力時，本研究以結構物寬 10 m 之牆面作為面對土石流之受力面，且 1 層樓結構物高度為 3.5 m，故進行衝擊力所引致變形量計算時，僅計算堆積深度由最低 0 m 至最高 3.5 m，本研究採用之參數整理如表 2，可依不同組合之土石流規模 (流速及堆積深度)，帶入式 5 及式 7 進行對應之房屋結構物最大位移量計算。

本研究進行土石流流速 2~20 m/s 之計算，表 3 僅以流速 12 m/s 為示範，分別計算在堆積深度 0~3.5 m 之流體靜力以及動態衝擊力所造成之位移，加總後則為磚造房屋結構物之最大位移量。

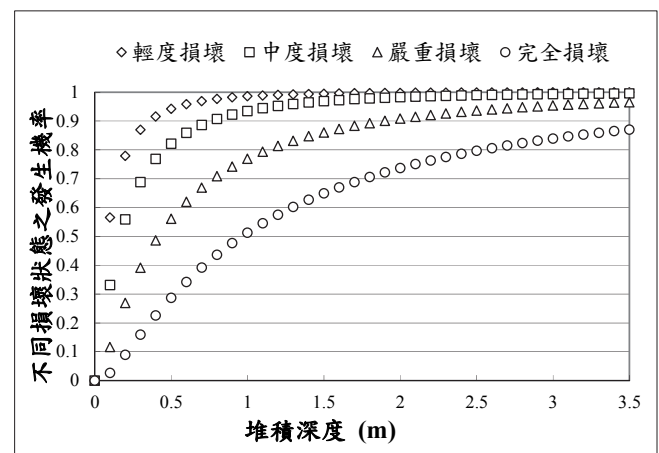


圖 2 不同損壞狀態之脆弱曲線 (流速為 12 m/s)

Fig.2 Fragility curves in different damage states ( $v = 12$  m/s)

(1) 求取不同損壞狀態下之預期損失率

如圖 2 所示，可以知道在土石流流速為 12 m/s 之狀

態下，不同堆積深度可能造成不同損壞狀態之發生機率，共有 4 種不同損壞狀態（不考慮無損壞）。例如當堆積深度為 0.5 m 時，其損壞狀態機率如表 4 所示。

將不同損壞狀態之損壞比例（表 1）乘以發生機率（表 4），即可獲得各自之預期損失率（Expected loss ratio），如式 8 所示。以土石流流速為 12 m/s 之狀態為示範，其不同損壞狀態下之不同堆積深度所對應之預期損失率，如表 5 及圖 3 所示。

$$\text{預期損失率} = \text{損壞比例} \times \text{發生機率} \quad (8)$$

表 4 磚造結構物於土石流流速 12 m/s、堆積深度 0.5 m 之不同損壞狀態之發生機率

Table 4 Damage state probabilities for URML type building ( $v = 12 \text{ m/s}$ 、 $h = 0.5 \text{ m}$ )

|      |         |         |         |         |
|------|---------|---------|---------|---------|
| 損壞狀態 | 輕度損壞    | 中度損壞    | 重度損壞    | 完全損壞    |
| 發生機率 | 0.94169 | 0.82143 | 0.56047 | 0.28661 |

表 5 預期損失率（流速為 12 m/s）

Table 5 Expected loss ratio ( $v = 12 \text{ m/s}$ )

| 堆積深度 (m) | 輕度損壞 (2%) |         | 中度損壞 (10%) |         | 重度損壞 (50%) |         | 完全損壞 (100%) |         |
|----------|-----------|---------|------------|---------|------------|---------|-------------|---------|
|          | 發生機率      | 預期損失率   | 發生機率       | 預期損失率   | 發生機率       | 預期損失率   | 發生機率        | 預期損失率   |
| 0        | 0         | 0       | 0          | 0       | 0          | 0       | 0           | 0       |
| 0.1      | 0.56501   | 0.01130 | 0.33094    | 0.03309 | 0.11610    | 0.05805 | 0.02662     | 0.02662 |
| 0.2      | 0.77872   | 0.01557 | 0.55827    | 0.05583 | 0.26906    | 0.13453 | 0.08945     | 0.08945 |
| 0.3      | 0.86906   | 0.01738 | 0.68748    | 0.06875 | 0.39114    | 0.19557 | 0.15888     | 0.15888 |
| 0.4      | 0.91521   | 0.01830 | 0.76788    | 0.07679 | 0.48596    | 0.24298 | 0.22547     | 0.22547 |
| 0.5      | 0.94169   | 0.01883 | 0.82143    | 0.08214 | 0.56047    | 0.28023 | 0.28661     | 0.28661 |
| ...      | ...       | ...     | ...        | ...     | ...        | ...     | ...         | ...     |
| 3.1      | 0.99930   | 0.01999 | 0.99362    | 0.09936 | 0.95622    | 0.47811 | 0.84598     | 0.84598 |
| 3.2      | 0.99936   | 0.01999 | 0.99410    | 0.09941 | 0.95874    | 0.47937 | 0.85259     | 0.85259 |
| 3.3      | 0.99942   | 0.01999 | 0.99454    | 0.09945 | 0.96107    | 0.48053 | 0.85882     | 0.85882 |
| 3.4      | 0.99948   | 0.01999 | 0.99494    | 0.09949 | 0.96323    | 0.48161 | 0.86471     | 0.86471 |
| 3.5      | 0.99952   | 0.01999 | 0.99531    | 0.09953 | 0.96523    | 0.48262 | 0.87026     | 0.87026 |

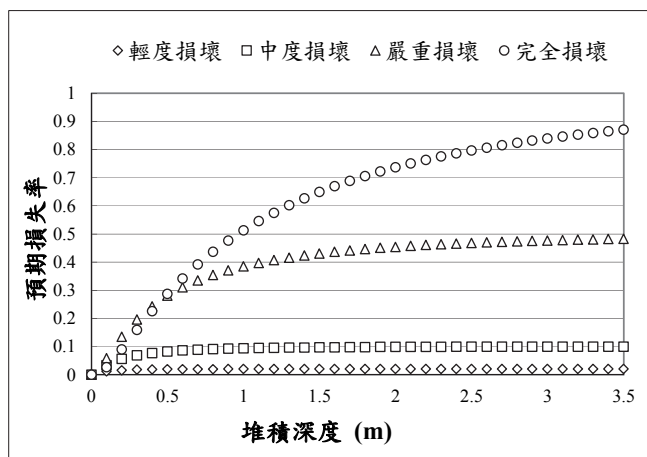


圖 3 不同損壞狀態下之預期損失率（流速為 12 m/s）

Fig.3 Expected loss ratio in different damage states ( $v = 12 \text{ m/s}$ )

(2) 整合不同損壞狀態下之預期損失率

為將不同損壞狀態之預期損失率（圖 3）整合成單一之結構物易損性函數，本研究以各不同損壞狀態間之發生機率差值作為權重，其權重總合為 1，經計算出各損壞狀態之權重後，便可計算其代表損失率（representative loss ratio），如式 9 所示。以土石流流速 12 m/s、土石流堆積深度 0.5 m 作為計算範例，計算結果如表 6 所示。

$$\text{代表損失率} = \sum \text{權重} \times \text{預期損失率} \quad (9)$$

依循表 6 之程序，經帶入不同堆積深度下之不同損壞狀態之發生機率，便可獲得流速為 12 m/s 之代表損失率分布點（圖 4），若使用多項式回歸便可得易損性函數（式 10）。

$$y = 0 \text{ for } x = 0 \text{ m} \quad (10)$$

$$y = -0.0626x^2 + 0.4504x - 0.0199 \text{ for } 0 \text{ m} < x \leq 3.5 \text{ m}$$

式中：y 為易損性，表示結構物毀損程度，亦即代表損失率；x 為土石流堆積深度（m）。

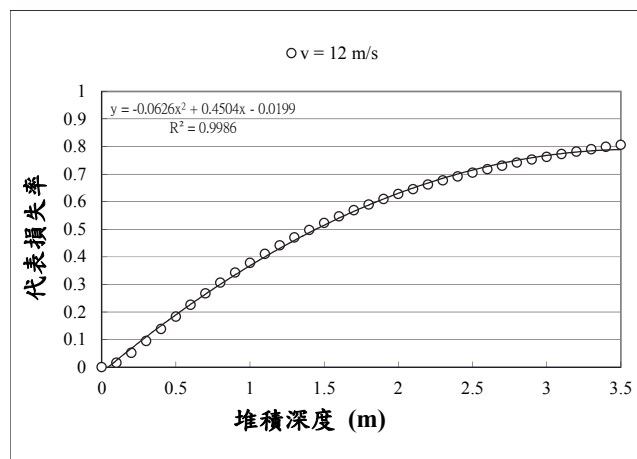


圖 4 易損性函數（流速為 12 m/s）

Fig.4 Vulnerability function ( $v = 12 \text{ m/s}$ )



表 6 權重計算 (流速為 12 m/s 且堆積深度為 0.5 m)

Table 6 Calculate the weight ( $v = 12 \text{ m/s}$ )

| 損壞狀態 | 損壞比例 (%) | 發生機率<br>(堆積深度為0.5 m) | 權重 (機率差值)                 | 預期損失率   | 代表損失率=<br>$\sum \text{權重} * \text{預期損失率}$ |
|------|----------|----------------------|---------------------------|---------|---|
| 無損壞  | 0        | 1                    | $1-0.94169=0.05831$       | 0       |   |
| 輕度損壞 | 2        | 0.94169              | $0.94169-0.82143=0.12026$ | 0.01883 |   |
| 中度損壞 | 10       | 0.82143              | $0.82143-0.56047=0.26096$ | 0.08214 | 0.18259                                   |
| 重度損壞 | 50       | 0.56047              | $0.56047-0.28661=0.27386$ | 0.28023 |   |
| 完全損壞 | 100      | 0.28661              | $0.28661-0=0.28661$       | 0.28661 |   |

## 四、分析結果與比較

### 1. 結果

利用表 1 及表 2 之參數，採用不同土石流流速進行重複計算，便可獲得各種土石流流速下之磚造結構物易損性 (圖 5)。

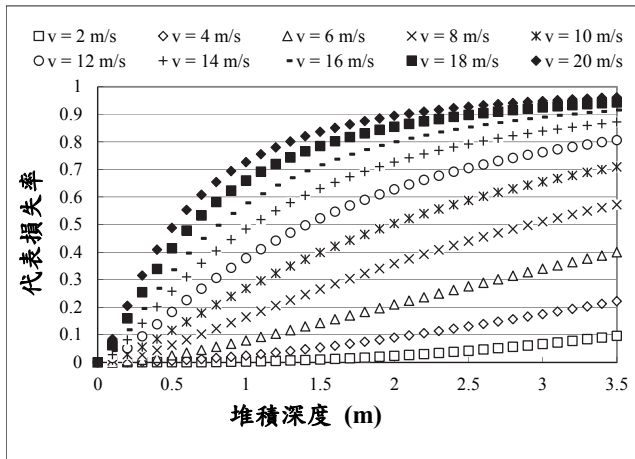


圖 5 不同土石流流速及堆積深度下之易損性分布

Fig.5 Distribution of vulnerability in different debris flow velocity and inundation height

於某特定土石流流速下，當堆積深度越高，則損失率越高，且損失率變化呈現非線性之關係，此外，當流速越大時，攀升行為越明顯，例如：當流速較低時，損失率攀升略呈線性關係；當流速較高時，損失率初始攀升快，漸漸轉為平緩，其原因為動態衝擊力所造成之位移量係與流速平方成正比所致。

於某特定土石流堆積深度下，當流速越高，則損失率亦越高，損失率差值呈現非等間距之關係，且不同堆積深度有不同之攀升行為，例如：當深度較小時，不同流速間之損失率差值較小；當深度較大時，高流速之損失率漸漸趨於一致，而低流速之損失率則差異較大，其原因為流體靜力所造成之位移量與堆積深度平方成正比，而動態衝擊力所造成之位移量與堆積深度成正比，兩者交互影響所致。

有此可知，於進行土石流風險分析時，若可依照流速選擇適切的易損性進行風險損失估計，方使得土石流風險分析結果更為精確，減少風險損失嚴重高估或低估情形。

### 2. 比較

將本研究產製之不同土石流流速 (2~20 m/s) 易損性與 Quan Luna et al. (2011) 建立之以堆積深度為變數之磚造土石

根據圖 5 可證實不同土石流流速與堆積深度組合可能導致近似之結構物損失率，且當堆積深度為 3.5 m 時，流速 20 m/s 與 2 m/s 的代表損失率差異可達 10 倍以上，足可見土石流流速確實對於結構物之損失率有顯著之影響，可用於解釋土石流災害現場相近堆積深度造成不同損壞程度之現象。

建築物之易損性函數進行比較，可見 Quan Luna et al. (2011) 之易損性大致上升趨勢一致，約略呈線型，僅於堆積深度極大與極小時略有曲線行為，可見其主要與堆積深度呈線型正相關，此一現象亦可於本研究之低流速 (2~8 m/s) 易損性中發現，判斷應為低流速時，受動態衝擊力所造成之最大位移對於整體位移總和影響仍不顯著，故整體仍呈現線型；而當流速增加時，因動態衝擊力所造成之最大位移與流速平方成正比，故對於整體位移總和影響越顯顯著，使得易損性漸漸轉為曲線。

再者，於本研究產製之不同土石流流速 (2~20 m/s) 易損性中，經最小平方方法計算後，其中流速為 12 m/s 之易損性與 Quan Luna et al. (2011) 建立之易損性最為相近，因此以下針對本研究土石流流速為 12 m/s 之磚造結構物易損性函數，以及 Quan Luna et al. (2011) 建立之以堆積深度為變數之磚造土石建築物之易損性函數進行比較，如表 7 及圖 6 所示。

由圖 6 可知，兩者於堆積深度約 2.3 m 時交會，當土石流堆積深度不超過 2.3 m 時，本研究所求得之損失率大於 Quan Luna et al. (2011) 之損失率，最大差異約為 0.164；而當土石流堆積深度大於 2.3 m 時，本研究所求得之損失率小於 Quan Luna et al. (2011) 之損失率，最大差異約為 0.170。

再者，於 Quan Luna et al. (2011) 之研究中，當土石流堆積深度達 3.5 m，其損失率逼近於 1(0.97627)，而本研究損失率僅為 0.80627，探討其原因為：

- (1) 於 Quan Luna et al. (2011) 研究中並未同時考量土石流流速、堆積深度上限為 3.63 m、模擬及回歸已預設損失之上下限 (0、1)；
- (2) Quan Luna et al. (2011) 研究係以保險賠償之重建經費除以結構物價值之比值，作為結構物之易損性，然而於過去土石流災害事件中，常可見結構物韌度足以抵擋土石流之衝擊，故結構物牆面並未破壞，因此土石流造成之最大位移量可能不足以完全撞毀結構物，而僅是將其掩埋，因此本研究推估之損失率僅為 0.80627；
- (3) 本研究經計算不同損壞狀態下之發生機率，並加以整合成代表損失率，則不同損壞狀態對應之損壞比例 (表 1) 可能影響最後之代表損失率，此外，本研究同樣存在簡化之結構物物理參數 (表 2) 假設，可能對最終代表損

失率產生影響。

表 7 Quan Luna et al. (2011) 及本研究之損失率比較

Table 7 Comparison of loss ratio between Quan Luna et al. (2011) and this study

| 堆積深度 (m)                   | 損失率     |                         |
|----------------------------|---------|-------------------------|
|                            | 本研究     | Quan Luna et al. (2011) |
| 0                          | 0       | 0                       |
| 0.5                        | 0.18259 | 0.06246                 |
| 1.0                        | 0.37788 | 0.21394                 |
| 1.5                        | 0.52284 | 0.40071                 |
| 2.0                        | 0.62792 | 0.58281                 |
| 2.5                        | 0.70497 | 0.74126                 |
| 3.0                        | 0.76251 | 0.87163                 |
| 3.5 (本研究上限)                | 0.80627 | 0.97627                 |
| 3.63(Quan Luna et al.研究上限) | -       | 1                       |

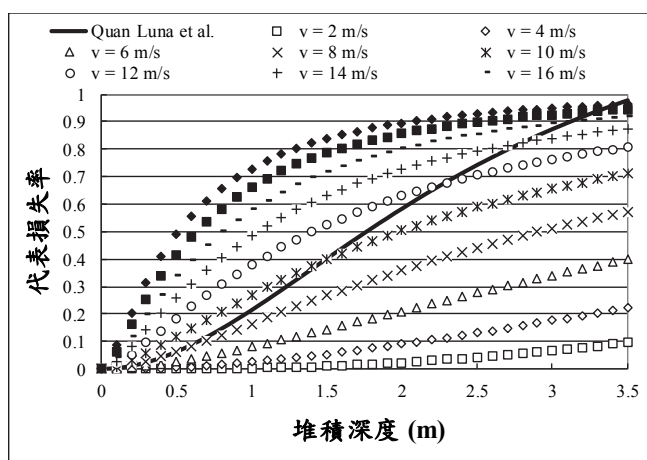


圖 6 Quan Luna et al. (2011) 及本研究之易損性比較

Fig.6 Comparison of vulnerabilities between Quan Luna et al. (2011) and this study

## 五、結論與限制

本研究參考 HAZUS 手冊 (2003) 之概念, 將地表運動之衝擊力改由土石流衝擊力 (土石流堆積深度及流速所造成) 取代, 建立磚造結構物之土石流易損性。以本研究建立之流速 12 m/s 對應之易損性與前人研究 (Quan Luna et al., 2011) 相比, 損失率最大差異約為 0.170, 推估應為兩者採用不同方式建立易損性所造成, 但整體易損性結果仍相似。然本研究同時考慮流速 (2~20 m/s) 與堆積深度 (0~3.5 m), 可同時建立不同流速狀況下之磚造結構物易損性, 改善僅使用堆積深度建立單一易損性之缺點, 供使用者依照適用之條件, 進行不同流速之易損性選用, 為本研究之一大特點。

於本研究中凸顯出不同土石流流速對於磚造結構物所造成之衝擊力差異甚大, 將使得對應之易損性也有不同行為, 故於進行土石流風險分析時, 若能根據不同流速進行易損性選用, 將使得估算之風險 (損失金額) 更具合理性及可信賴度。然而, 本研究僅考慮單一波土石流可能造成之結構物最大位移量, 透過反應比假設為 2 進行結構物最大位移量之計算, 屬於較為保守之評估方式, 可能高估最大位移。此外, 因並未考量土石流

可能之不同方向性、挾帶之巨石撞擊行為以及不同陣流行為等, 故僅建議於評估大範圍土石流災害損失時, 供選擇適切之易損性時使用, 尚不建議作為詳細案例分析之依據。

## 參考文獻

- [1] 林文隆 (2007), 「鋼筋混凝土結構物之地震易損性分析」, 國立中央大學碩士論文。(Lin, W.L. (2007). *Seismic vulnerability analysis of reinforced concrete structure*, Master Thesis, National Central University. (in Chinese))
- [2] 林宜德 (2007), 「鋼筋混凝土結構物之地震易損性分析—不同時期規範之比較」, 國立中央大學碩士論文。(Lin, Y.D. (2007). *Seismic fragility analysis of reinforced concrete structure-considering different seismic code*, Master Thesis, National Central University. (in Chinese))
- [3] 林美聆、溫惠鈺 (2006), 「土石流潛勢溪流潛勢分析與處理優先順序評估」, 土工技術, 110, 35-44。(Lin, M.L., and Wen, H.Y. (2006). "Potential Analysis and Mitigation Priority Assessment of Potential Debris-Flow Torrents", *Sino-Geotechnics*, 110, 35-44. (in Chinese))
- [4] 林銘郎、謝正倫 (1996), 「台灣土石流災害特性與研究回顧」, 海峽兩岸地形與環境教育研討會, 台南, 213-217。(Lin, M.L., and Shieh, C.L. (1993), "Debris Flow and Its Studies in Taiwan", *Conference on Geomorphology and Environmental Education across the Taiwan Strait*, Tainan, Taiwan, 213-217. (in Chinese))
- [5] 劉格非、李欣輯 (2006), 「土石流直接災損評估之研究」, 中華水土保持學報, 37(2), 143-155。(Liu, K.F., and Li, H.C. (2006). "The Study of the Direct Damage Estimation of Debris Flow", *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 37(2), 143-155. (in Chinese))
- [6] 羅俊雄、葉錦勳、陳亮全、洪鴻智、簡文郁、廖文義 (2002), 「HAZ-Taiwan 地震災害損失評估系統」, 台大工程, 85, 13-32。(Loh, C.H., Yeh, C.H., Chen, L.C., Hung, H.C., Jean, W.Y., and Liao, W.I. (2002). "Damage assessment system HAZ-Taiwan for seismic estimation in Taiwan", *Bulletin of the College of Engineering*, N.T.U., 85, 13-32. (in Chinese))
- [7] Alexander, D. (2000). *Confronting catastrophe: new perspectives on natural disasters*, Oxford University Press, Oxford.
- [8] Arattano, M., and Marchi, L. (2005). "Measurements of debris flow velocity through cross-correlation of instrumentation data", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 137-142.
- [9] Birkmann, J. (2006). *Measuring vulnerability to natural hazards*, United Nations University Press, Tokyo.
- [10] Chopra, A. (2001). "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering", 2nd edition, New Jersey: Prentice Hall.
- [11] Clough, R., and Penzien, J. (1993). "Dynamics of Structures", 2nd edition, Singapore: McGraw-Hill, Inc.
- [12] FEMA (1995). "Engineering Principles and Practices for Retrofitting Flood Prone Residential Buildings", FEMA 259.

- [13] Fuchs, S., Heiss, K., and Hübl, J. (2007). "Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 495-506.
- [14] Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., and Savage, W. (2008). "Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning", *Engineering Geology*, 102, 85-98.
- [15] Fuchs, S. (2009). "Susceptibility versus resilience to mountain hazards in Austria-paradigms of vulnerability revisited", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 337-352.
- [16] Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Dahe, Q., Dokken, D.J., Plattner, G-K., Ebi, K.L., Allen, S.K., Mastrandrea, M.D., Tignor, M., Mach, K.J., and Midgley, P.M. (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [17] Fuchs, S., Birkmann, J., and Glade, T. (2012). "Vulnerability assessment in natural hazard and risk analysis: current approaches and future challenges", *Natural Hazards*, 64, 1969-1975.
- [18] Hürlimann, M., Rickenmann, D., and Graf, C. (2003). "Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps", *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 161-175.
- [19] HAZUS (2003). "Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model", HAZUS-MR4, *Technical Manual*, FEMA and NIBS.
- [20] Haugen, E.D., and Kaynia, A.M. (2008). "Vulnerability of structures impacted by debris flow", *Landslides and Engineering Slopes*, Taylor & Francis, London, 381-387.
- [21] Lo, W.C., Tsao, T.C., and Hsu, C.H. (2012). "Building vulnerability to debris flow in Taiwan - a preliminary study", *Natural Hazards*, 64, 2107-2128.
- [22] Mortgat, C. (2004). "Taiwan earthquake model upgrade 2004", 2003 Risk Management Solutions, Inc., 30 September 2003.
- [23] Norwegian Standards (2004). "Design of structures - design actions - part 12: loads from seismic influence", Norwegian Standards Publications.
- [24] Papatoma-Köhle, M., Kappes, M., Keiler, M., and Glade, T. (2011). "Physical vulnerability assessment for alpine hazards: state of the art and future needs", *Natural Hazards*, 58, 645-680.
- [25] Quan Luna, B., Blahut, J., van Westen, C.J., Sterlacchini, S., van Asch, T.W.J., and Akbas, S.O. (2011). "The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2047-2060.
- [26] Roberts, N.J., Nadim, F., and Kalsnes, B. (2009). "Quantification of vulnerability to natural hazards", *Georisk*, 3, 164-173.
- [27] Thywissen, K. (2006). *Core terminology of disaster reduction: a comparative glossary*. In: Birkmann J (ed) *Measuring vulnerability to natural hazards*, United Nations University Press, Tokyo, 448-496.
- [28] Totschnig, R., Sedlacek, W., and Fuchs, S. (2011). "A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport", *Natural Hazards*, 58, 681-703.
- [29] Tsao, T.C., Hsu, W.K., Cheng, C.T., Lo, W.C., Chen, C.Y., Chang, Y.L., and Ju, J.P. (2010). "A Preliminary Study of Debris Flow Risk Estimation and Management in Taiwan", *INTERPRAEVENT 2010-International Symposium in Pacific Rim*, Taipei, Taiwan, 930-939.
- [30] United Nations Disaster Relief Coordinator (1979). *Natural disasters and vulnerability analysis in report of expert group meeting*, UNDRO, Geneva.
- [31] United Nations International Strategy for Disaster Reduction (2009). *Terminology on disaster risk reduction*, UNISDR, Geneva.
- [32] Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., and Davis, I. (2004). *At risk. Natural hazards, people's vulnerability and disasters*, Routledge, London.
- [33] Zanchetta, G., Sulpizio, R., Pareschi, M.T., Leoni, F.M., and Santacroce, R. (2004). "Characteristics of May 5-6, 1998 volcaniclastic debris flows in the Sarno area (Campania, southern Italy): relationship to structural damage and hazard zonation", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 133, 377-393.

---

2017年03月30日 收稿

2017年05月04日 修正

2017年07月14日 接受

(本文開放討論至2018年03月31日)