

DTM網格大小對土石流流速模擬結果之影響

蘇長鴻

健行科技大學土木工程系空間資訊與防災所研究生

黃名村

健行科技大學土木工程系助理教授

摘要

黃名村(2003)發展了一套數值模式Debris-2D來模擬土石流的流動行為，藉以提供土石流流動時的流速、流深、衝擊力及災害範圍等等的數據資料，做為後續防災規劃上的參考。Debris-2D在進行模擬前，需先輸入欲模擬區域的DTM(數值地形模型)資料、土石流體積量、土石流材料參數(密度、降伏應力)等數據。一般而言，輸入Debris-2D的DTM，可利用政府開放平台所提供的20公尺DTM，結合現地測量之結果，進行地形高程的內插得到。然而，要內插成多大的網格，以及網格大小對土石流模擬結果的影響為何，是許多模式使用者想瞭解的問題。網格太大，模擬結果的精度肯定不足，無法呈現出土石流的流動細節。網格太小，也可能造成電腦資源上的浪費，甚至是模擬結果出現數值震盪。本研究將針對同一個土石流潛勢區，以相同之內插方法得到多組不同網格大小的DTM後，分別輸入Debris-2D進行土石流數值模擬，並針對潛勢區中的某一固定地點，各組DTM所得到之流速模擬結果進行比較分析，探討DTM網格大小對於土石流流速模擬結果的影響。

關鍵詞：土石流，DTM網格，數值模擬

一、前言

在台灣，土石流於近二十年來，已成為颱風豪雨期間經常造成生命財產損失的災害。在相關的防治措施當中，土石流流動時的流速、流深、冲刷能力、衝擊力及影響範圍等，均是相關防治工程於規劃時的重要之參考數據。以往這些數據大都使用經驗公式加以估計，但這些經驗公式可能因為是依據實驗室數據的觀測分析所產生，往往不能反映出現場的地形或地質材料的特性，因此我們有必要採取更精確的數值模擬來推求土石流從發生到停止的整個流動過程。

但由於土石流為土石與水之混合物，屬於非牛頓流體，其剪應力與剪應變率間呈現一非線性之本構關係(constitutive relation)。Julien and Lan(1991)用粗細不等之材料提出一個二次本構方程式如下：

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + \mu_d \left(\frac{du}{dz} \right) + \mu_c \left| \frac{du}{dz} \right| \left(\frac{du}{dz} \right) & \text{if } |\tau| > \tau_0 \\ \frac{du}{dz} = 0 & \text{if } |\tau| < \tau_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 τ_0 為降伏應力， μ_d 為動力黏滯係數(dynamic viscosity)， μ_c 為紊亂-離散參數(turbulent-dispersive parameter)。

黃名村(2003)利用前述Julien and Lan(1991)的本構關係式，將整個土石流之流場區分為靠近底床的邊界層(又稱強剪層，即剪應力大於降伏應力之區域)及其上方的塞流層(又稱弱剪層，即剪應力小於降伏應力之區域)，並且由尺度分析證明邊界層非常薄，在忽略邊界層的情況下，發展了一套土石流數值模式Debris-2D，來進行土石流之數值模擬。Debris-2D首先經過多次室內試驗驗證(Liu & Huang, 2006)，模擬結果與實驗數據非常相符。在土石流現場的應用上，Liu & Huang(2006)嘗試模擬1996年賀伯颱風的神木村土石流案例，模擬得出的影響範圍與實際土石堆積範圍間的最大誤差約為20公尺(以全長約2.5公里計，誤差約為1%)，而模擬的堆積深度與實際土石堆積深度間的最大誤差約為1公尺(現場最大堆積深度約為10公尺，誤差10%)。Liu & Wu(2010)則在韓國麟蹄郡(Inje, Korea)的土石流模擬中發現，其最後土石流堆積狀況有95%的精確度。Wu et al.(2013)應用Debris-2D模擬在2009年莫拉克颱風期間，新發村發生的崩塌型土石流，模擬的最後土石流堆積深度與水保局現場量測的誤差在8%以內，影響範圍的平均誤差則為4%，在當時救難人員有測量的兩個點，其最後堆積厚度誤差僅20cm(3%)。Tsai et al.(2011)在2008預測大烏村的土石流範圍，其結果與2010年的災害比對，土石流影響範圍只有2.76%的誤差。因此，Debris-2D數值模式已經被證明可以準確模擬出土石流現場的災害情形。

二、Debris-2D的基本理論及相關研究

依據前述，Debris-2D數值模式係以降伏應力將土石流區分為強剪層與弱剪層兩部分，剪應力大於降伏應力的區域為強剪層，剪應力小於降伏應力的區域則為弱剪層。土石流的本構關係則以(1)式的Julien and Lan一維本構關係式所推演而成的三維本構關係式來代入控制方程式中。即弱剪層中的本構關係式為：

$$|\varepsilon_{ij}| = 0 \quad \text{當} \quad |\tau_{ij}| < \tau_0 \quad (2)$$

強剪層中的本構關係式則為：

$$\tau_{ij} = \left(\frac{\tau_0}{|\varepsilon_{ij}|} + \mu_d + \mu_c |\varepsilon_{ij}| \right) \varepsilon_{ij} \quad \text{當} \quad |\tau_{ij}| > \tau_0 \quad (3)$$

其中 τ_{ij} 為剪應力張量， τ_0 為降伏應力， ε_{ij} 為應變率張量。

視土石流為不可壓縮流體，將其連續方程式及動量方程式依照二維長波理論的假設加以化簡，並將動量方程式由弱剪層底部積分至自由表面，並利用弱剪層底部剪應力大小為降伏應力且自由表面無剪應力將其化為守恆形式，可得弱剪層之動量方程式為：

$$\frac{\partial(u_p H)}{\partial t} + \frac{\partial(u_p^2 H)}{\partial x} + \frac{\partial(u_p v_p H)}{\partial y} = -gH \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} + gH \sin \theta - \frac{1}{\rho} \left(\tau_{zx} \Big|_{z=B+\delta} - u_p \left(\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_B^{B+\delta} u_b dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_B^{B+\delta} v_b dz \right) \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial(v_p H)}{\partial t} + \frac{\partial(u_p v_p H)}{\partial x} + \frac{\partial(v_p^2 H)}{\partial y} = -gH \cos \theta \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left(\tau_{zy} \Big|_{z=B+\delta} \right) - v_p \left(\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_B^{B+\delta} u_b dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_B^{B+\delta} v_b dz \right) \quad (5)$$

在土石流起動前一刻，各方向速度為零，且強剪層厚度為零，因此由(4)與(5)式知此瞬間

$$\tau_{zx} \Big|_{z=B} = -\rho g H \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} + \rho g H \sin \theta \quad (6)$$

$$\tau_{zy} \Big|_{z=B} = -\rho g H \cos \theta \frac{\partial h}{\partial y} \quad (7)$$

對於有降伏應力的流體而言，必須在底部剪力大於降伏應力時才會開始流動，即土石流的起動條件為

$$\left(\tau_{zx} \Big|_{z=B} \right)^2 + \left(\tau_{zy} \Big|_{z=B} \right)^2 > \tau_0^2 \quad (8)$$

將(6)及(7)式代入(8)式可得

$$\left(\frac{\partial h}{\partial x} - \tan \theta \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 > \frac{\tau_0^2}{\rho^2 g^2 \cos^2 \theta H^2} \quad (9)$$

上式表示土石流中的某個質點，必須在該點的壓力梯度與重力之合力超過降伏應力的條件下才能開始流動。

接著將前述控制方程式利用有限差分法(finite difference method)來離散化，對流項(convective term)採用一階上風法與中央差分法配合，壓力項、重力項與剪力項則是採用中央差分法離散，時間項則以Adams-Bashforth三階法來處理。

關於Debris-2D模式在一開始的輸入資料所可能導致的模擬結果差異，Liu and Huang(2009)曾經針對「降伏應力」及「料源體積量」對土石流「影響範圍」模擬結果的影響，做了敏感度分析。研究中將降伏應力減少40%時的模擬結果，與料源體積量增加40%時的模擬結果做比較，發現料源體積量改變後所引致的影響範圍變化量，是降伏應力改變後所引致的影響範圍變化量的三倍，也就是說，Debris-2D對於一開始輸入的料源體積量是比較敏感的，這表示現地調查時，在料源體積量的估計上必須特別留意。

本論文將針對DTM網格的大小對土石流流速的模擬結果所產生的差異進行初步評估。

三、不同DTM網格大小於相同地點之流速模擬結果比較

本研究選定一處過去曾發生過災害的新北市新店區屈尺里的土石流現場，並以Debris-2D來進行在8m、4m、2m、1m四種不同網格大小的DTM下的模擬，並記錄位於土石流流路上的教堂(如圖1)的流速隨時間的變化。

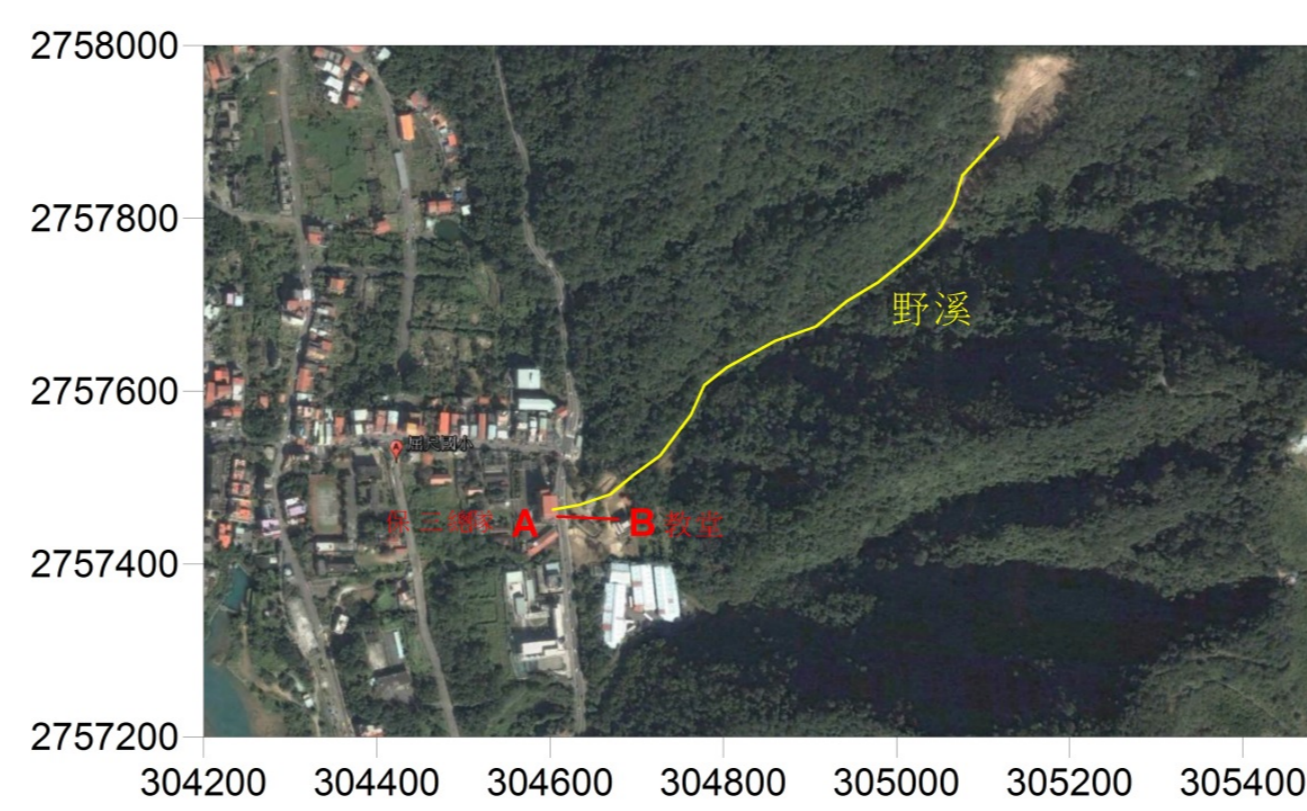


圖1 記錄流速的位置-教堂(B點)

在教堂之處，四種不同DTM網格大小所模擬出的流速隨時間的變化如圖2所示，最大流速隨DTM網格大小的變化則如圖3所示。

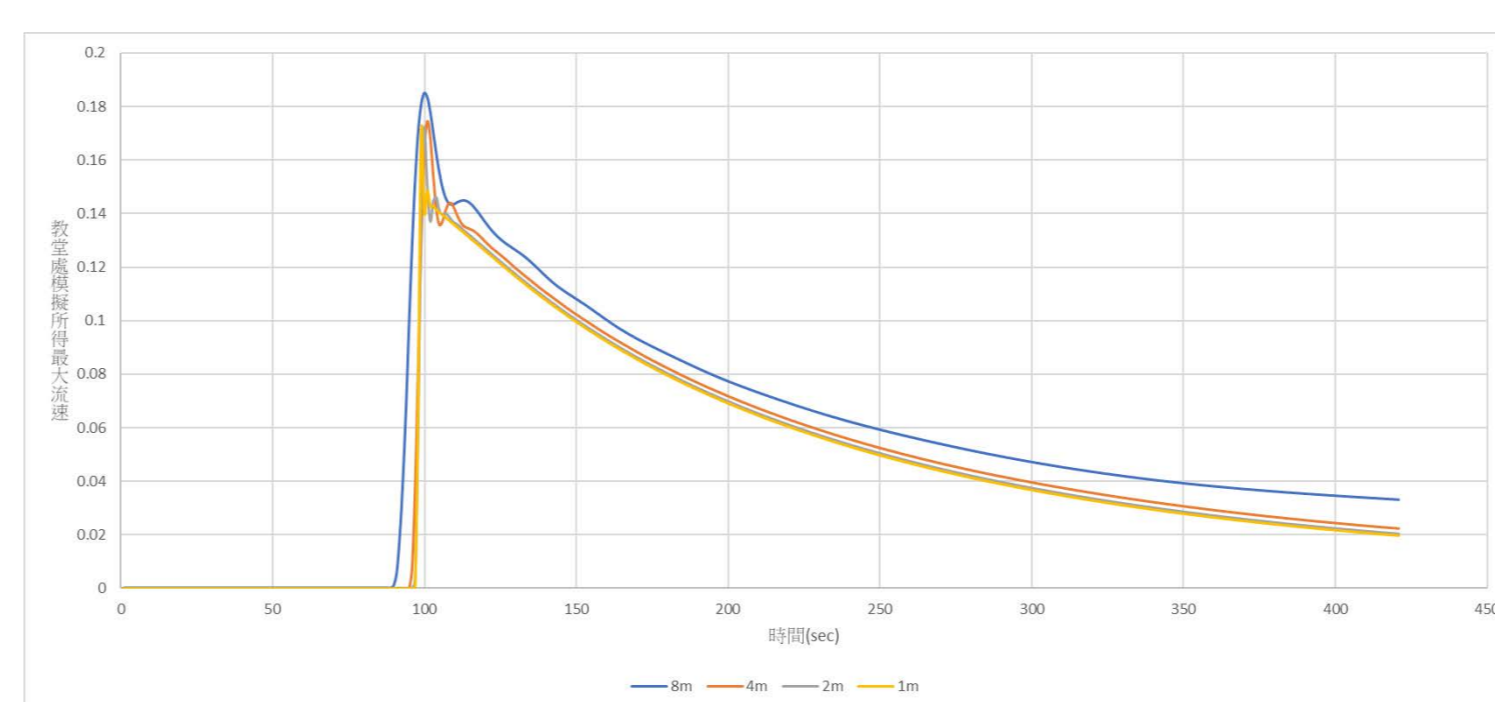


圖2 在教堂處，不同網格大小的DTM所模擬出的流速隨時間的變化

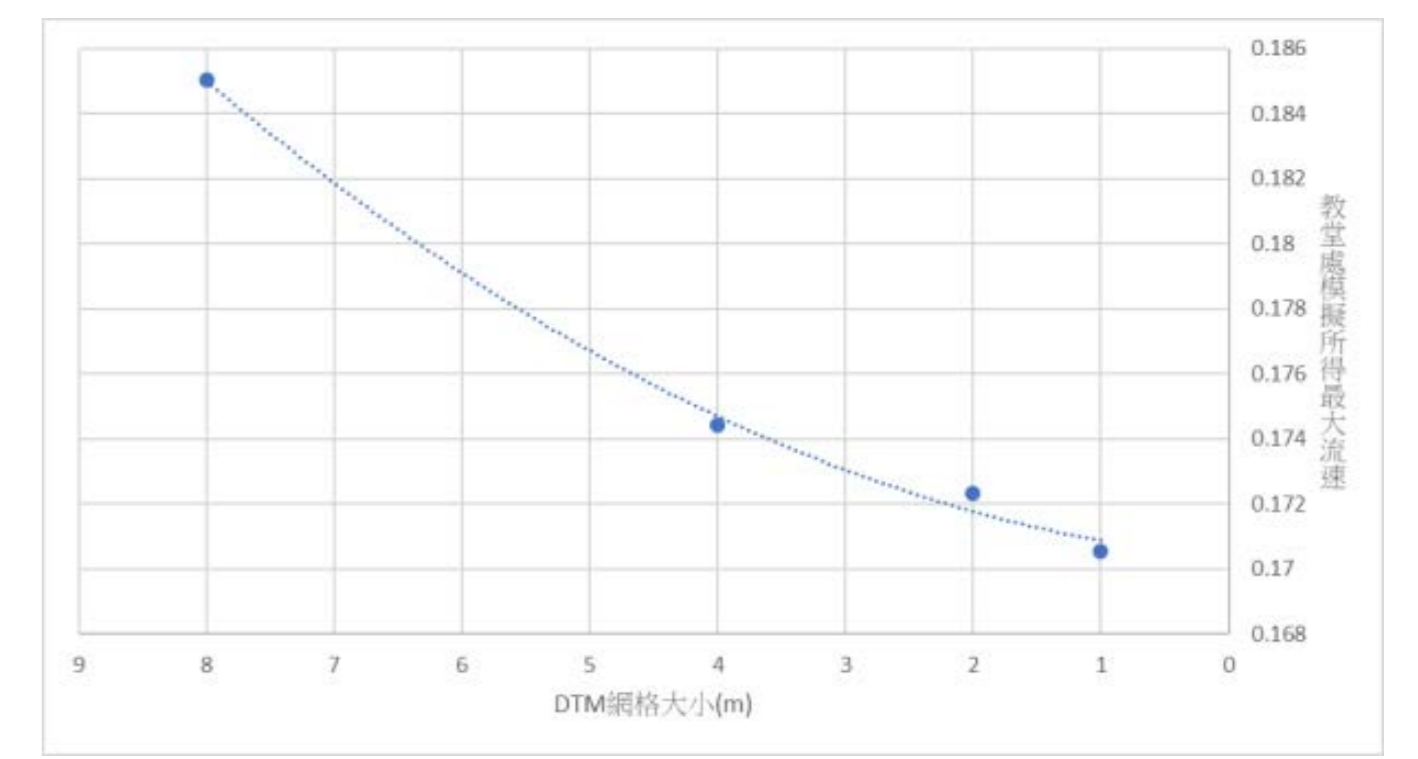


圖3 在教堂處所模擬出的最大流速隨DTM網格大小的變化

接著以網格大小為1m之模擬結果為比較之基，分析不同的DTM網格大小於教堂位置所模擬出的「最大流速」和「最大流速發生時間」的差異，其結果如表1及表2所示。

表1 不同DTM網格大小所導致的最大流速之差距

| 網格大小 | 最大流速 | 最大流速值差異百分比 |
|------|-----------|------------|
| 8 | 0.1850356 | 8.49% |
| 4 | 0.1744154 | 2.27% |
| 2 | 0.1723181 | 1.04% |
| 1 | 0.170548 | 0.00% |

表2 不同DTM網格大小所導致的最大流速發生時間之差距

| 網格大小 | 最大流速發生時間 | 最大流速發生時間差異百分比 |
|------|----------|---------------|
| 8 | 100 | 1.01% |
| 4 | 101 | 2.02% |
| 2 | 100 | 1.01% |
| 1 | 99 | 0.00% |

由圖3及表1可知，所模擬出的最大流速會隨著DTM網格尺寸的縮小而漸漸趨近一個值，最大流速的差異百分比則由網格大小為8m時的8.49%，縮小到網格大小為2m時的1.04%。因此，就實務上而言，若以4m(含)以下的DTM網格大小分別進行Debris-2D土石流數值模擬，網格大小所造成的流速模擬值的差異會小於2.5%。

四、結論與建議

由前述的分析可知，Debris-2D所模擬出的最大流速會隨著DTM網格尺寸的縮小而漸漸趨近一個值，若以4m(含)以下的DTM網格大小分別進行Debris-2D土石流數值模擬，網格大小所造成的流速模擬值的差異會小於2.5%。

本研究僅針對DTM網格大小對於土石流流速的影響進行初步評估，建議後續可再針對DTM網格大小對於流深的影響，做更進一步的研究與探討。



健行科技大學

2022

土木工程與防災研討會

Department of civil Engineering, Chien Hsin University of Science and Technology