



農業部農村發展及水土保持署
Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, MOA

113年水保署創新研究補助計畫報告

快速計算流域中土石流 最終影響範圍之理論公式

計畫主持人 劉格非 教授 報告

114年9月23日

優質·效率·團隊



行政院農業委員會水土保持局
Soil and Water Conservation Bureau, CDA

研究目標

1. 台灣土石流溪流接近兩千條,可能還會增加
2. 土石流潛勢溪流的影響範圍,是防災與救災的重要資訊
3. 土石流影響範圍劃定不能畫太大,影響當地的發展與價值
4. 經驗公式準度不足,無法反映變動狀態,因此無法採用
5. 土石流數值模擬為唯一能大量劃定範圍的工具
6. 目前數值模擬耗時,在要求精度的前提下,數值模擬無法做到一場土石流的模擬時間與土石流過程時間相同,而每一條潛勢溪有可能需要各種不同情境
7. 因此需要有方法能極快速估算出土石流影響範圍

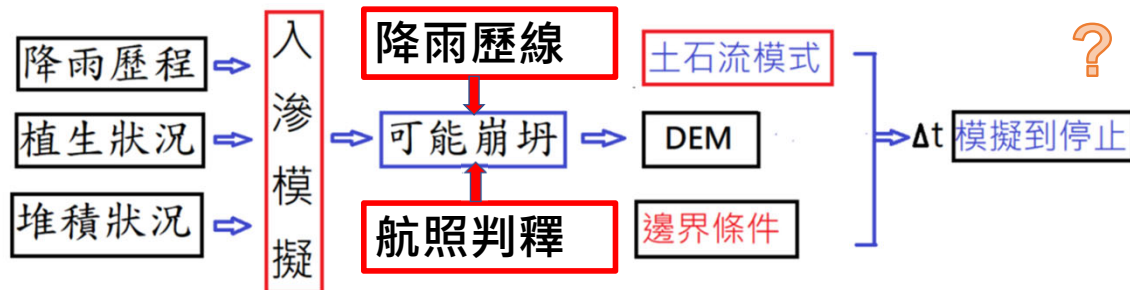


優質·效率·團隊

土石流模擬需求



1. 土石流影響範圍受到諸多變數的影響，如降雨累積情況，地質地貌與前期狀態，(潛在崩坍量，河床堆積)狀態
2. 較準確的數值模擬方式



研究方法

1. 以快速方式估算土石流最終影響範圍，跳過費時的時間流程演算
2. 不採取動量守恆方程式的微小時間步伐積分
3. 以整個集水區能量守恆與質量守恆為主要思考方式,並將時間積分直接從開始積到結束,不管中間要多少時間
4. 土石流本構關係採用賓漢流體模型
5. 數學推導利用保守關係式,確保估算的結果稍小於實際結果。
6. 以不同三個特性災害區驗證快速計算方法的準確度

農業鄉農村發展及水土保持署
Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, MW

控制方程式推導

能量方程式針對控制體積積分 V 為積分的控制體積

$$\iiint_V \frac{\partial E}{\partial t} dV + \iiint_V \frac{\partial}{\partial x_j} (q_j E) dV = \iiint_V \left(\frac{\partial}{\partial x_i} p q_i + \rho f_i q_i + \frac{\partial \tau'_{ij} q_i}{\partial x_j} - \tau_{ij} e_{ij} \right) dV$$

$$\iiint_V \frac{\partial E}{\partial t} dV + \iiint_V \cancel{E} d\vec{s} = \iiint_V \cancel{p} d\vec{s} + \iiint_V \rho \vec{g} \cdot \vec{u} dV + \iiint_V \tau_{ij} (e_{ij}) dV + \iint_S \vec{u} \cdot \tau'_{ij} d\vec{s}$$

時變項 convective 壓力做功 重力做功 剪力內部消能 剪力做功

S代表包含控制體積V的所有面

因為土石流不會跑出控制體積
沿控制體積所有面, 面的垂向速度為零

控制體積範圍
S為所有面

優質·效率·團隊

4

行政院農業委員會水土保持局
Soil and Water Conservation Bureau, CDA

剪力項比較降伏應力與黏滯性

弱剪層剪力為常數 面平均流速定義

$$\iint_S \vec{u} \cdot \tau'_{ij} d\vec{s} = \tau_0 \iint_S u_p ds = \tau_0 U_{ave} \cdot A \quad (A \text{ 為流體所佔面積, 為時間函數})$$

$$\tau'_{ij} = \tau_0 + 2\mu e_{ij} = \tau_0 + \mu \left(\frac{\partial q_i}{\partial x_j} + \frac{\partial q_j}{\partial x_i} \right)$$

比較 $\frac{\tau_0 \mu_p A}{\mu \iint_V e_{ij}^2 dV} = 0 \left(\tau_0 U \cdot \frac{A}{\mu \left(\frac{U}{h} \right)^2 \cdot A \cdot h} \right) = 0 \left(\frac{\tau_0 h}{\mu U} \right) = 0 \left(100 \times \frac{10}{1 \times 10} \right) \gg 0(1)$

弱剪層消耗能量遠大於強剪層

能量方程最後剩下三項

動能改變 重力做功 強剪耗能

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \frac{\partial E}{\partial t} dV = \iiint_V \rho \vec{g} \cdot \vec{u} dV + \tau_0 \iint_S u_p ds$$

強剪層 弱剪層

$\iiint_V \tau_{ij} (e_{ij}) dV + \iint_S \vec{u} \cdot \tau'_{ij} d\vec{s}$

優質·效率·團隊

農業農村發展及水土保持署
Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation

動能改變 **重力做功** **強剪耗能**

$$\iiint_V \frac{\partial E}{\partial t} dV = \iiint_V \rho \vec{g} \cdot \vec{u} dV + \tau_o \iint u_p ds$$

時間空間積分互換(固定控制體積)

$$\int \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V E dV = \iiint_V \rho \vec{g} \cdot \vec{u} dV + \tau_o \iint u_p ds \quad dt$$

$\iiint_V dV \Big|_0^t = \int (\iiint_V \rho \vec{g} \cdot \vec{u} dV + \tau_o \iint u_p ds) dt$

土石流一開始沒流速 → 動能 $E=0$
結束時沒流速動 → 動能 $E=0$

取 t 很大, 到沒有土石流運動後

優質 · 效率 · 團隊

行政院農業委員會水土保持局
Soil and Water Conservation Bureau, CDA

重力項

$$\int \left\{ \iiint_V \rho \vec{g} \cdot \vec{u} dV \right\} dt = \iiint_V \rho \left\{ \int \vec{g} \cdot \vec{u} dt \right\} dV$$

時間體積順序交換

$$\int \vec{g} \cdot \vec{u} dt = \int g \cdot u_{\text{vertical}} dt = g \int u_{\text{vertical}} dt = g \cdot L \Big|_{\text{總垂直距離}}$$

重力只有垂直分量 重力加速度為常數

$$\iiint_V \rho g \cdot L \Big|_{\text{總垂直距離}} dV = \rho g H \quad V$$

整個體積中, 每一個點走過的距離和 整個體積質心移動的距離

優質 · 效率 · 團隊

農業部農村發展及水土保持署
Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, MW

$$\rho g H V = \tau_0 \int_0^t \iint u_p ds dt$$

土石流流動面積隨時間改變
但是小於總流過面積

$$\int_0^t \iint u_p ds dt = \int u_{ave} A dt = \int u_{ave} A dt < \int u_{ave} dt A_{max}$$

速度的面積分 = 面平均速度 x 面積 = 係數 x 面最大流速

$$\rho g H V \leq \tau_0 A_{max} L$$

總位能 = 降伏應力消耗能量

面平均流速對時間積分
= 土石流走過的距離
< 由堆積最上游到土石流
最後停止前鋒距離 L

V: 起始崩坍區體積
H: 起始堆積到最後土石流堆積質心的高程差
L: 從堆積最上游到最後土石流堆積最下游的距離
A_{max}: 最後土石流堆積的水平投影面積

地形的函數

優質·效率·團隊

行政院農業委員會水土保持局
Soil and Water Conservation Bureau, CWA

方程式解法

V (已知): 可崩坍量(或由降雨回歸量反算的土石流總量)
τ₀ (已知): 降伏應力

$$\rho g H V = \tau_0 A_{max} L$$

$$V = \tau_0 A_{max} L / \rho g H$$

1. 假設下游影響最遠點 L
2. 計算對應 A_{max}, (要由堆積深度算)
3. 計算總堆積體積
4. 計算質心移動距離 H
5. 得一組 V vs L
6. 建立 V vs L 圖, 後續隨時內插
→ 建立崩坍量 vs 最遠距離關係

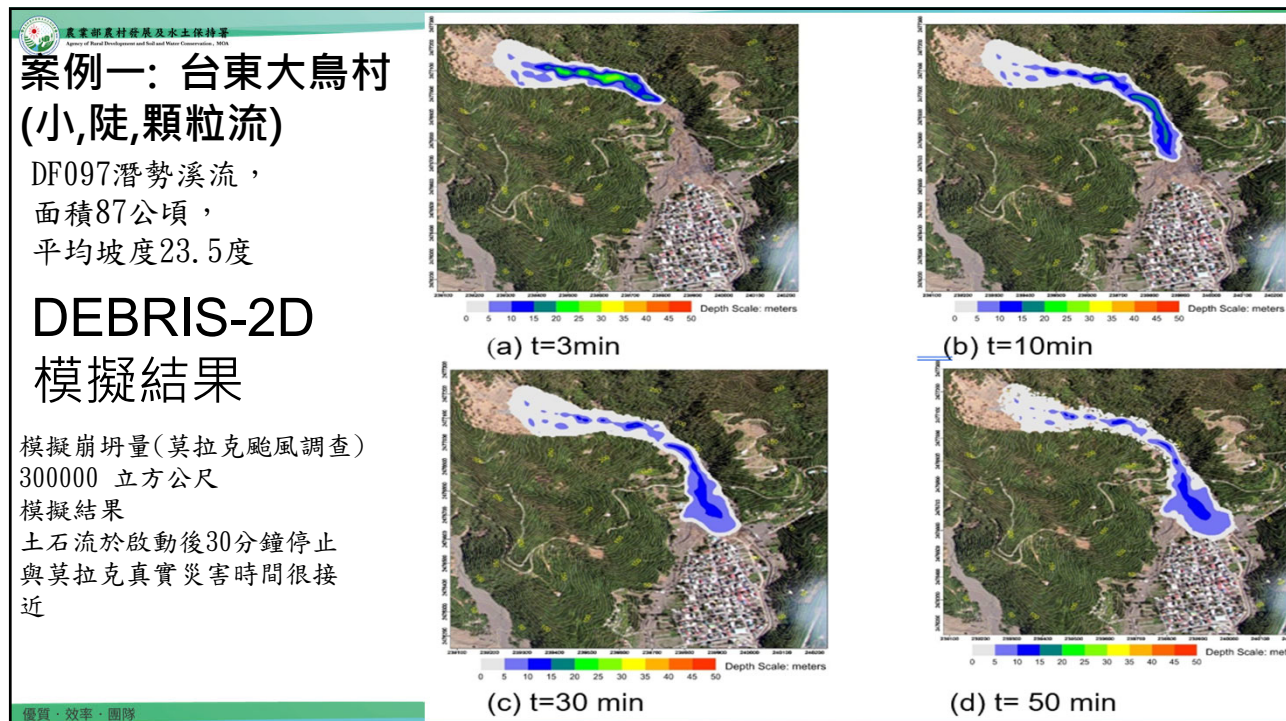
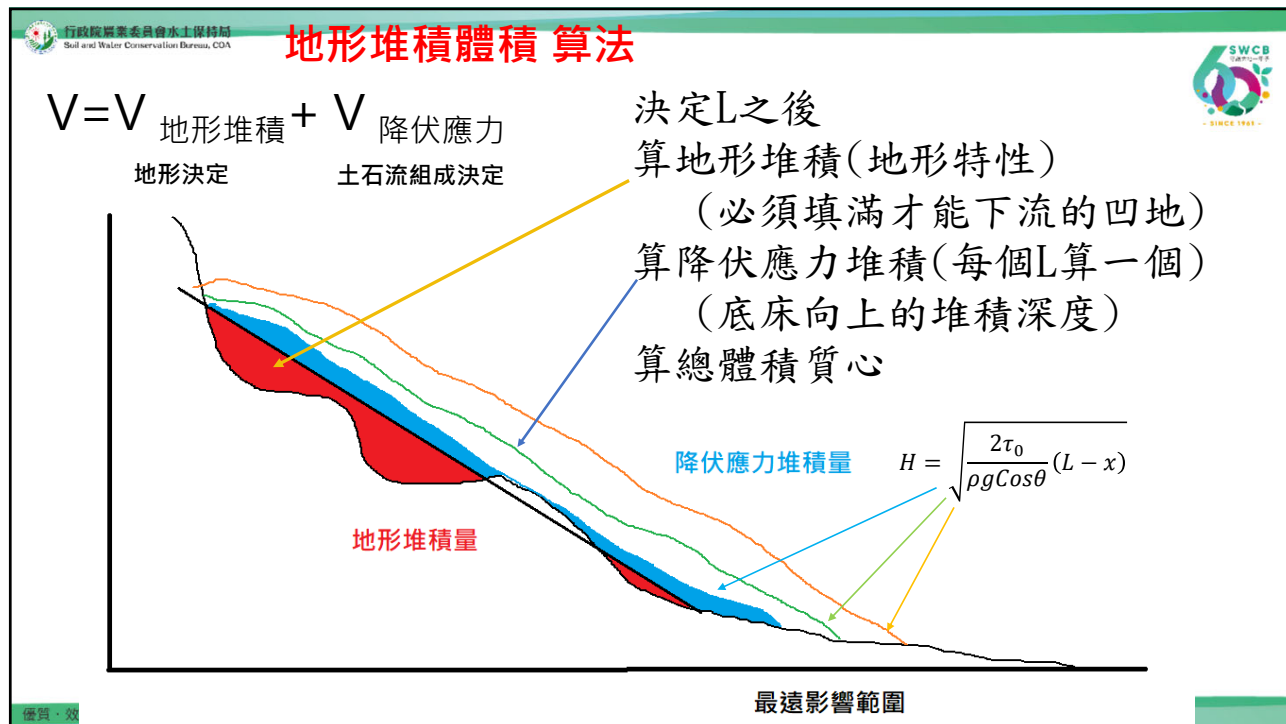
複雜點 → H = F(V, L)

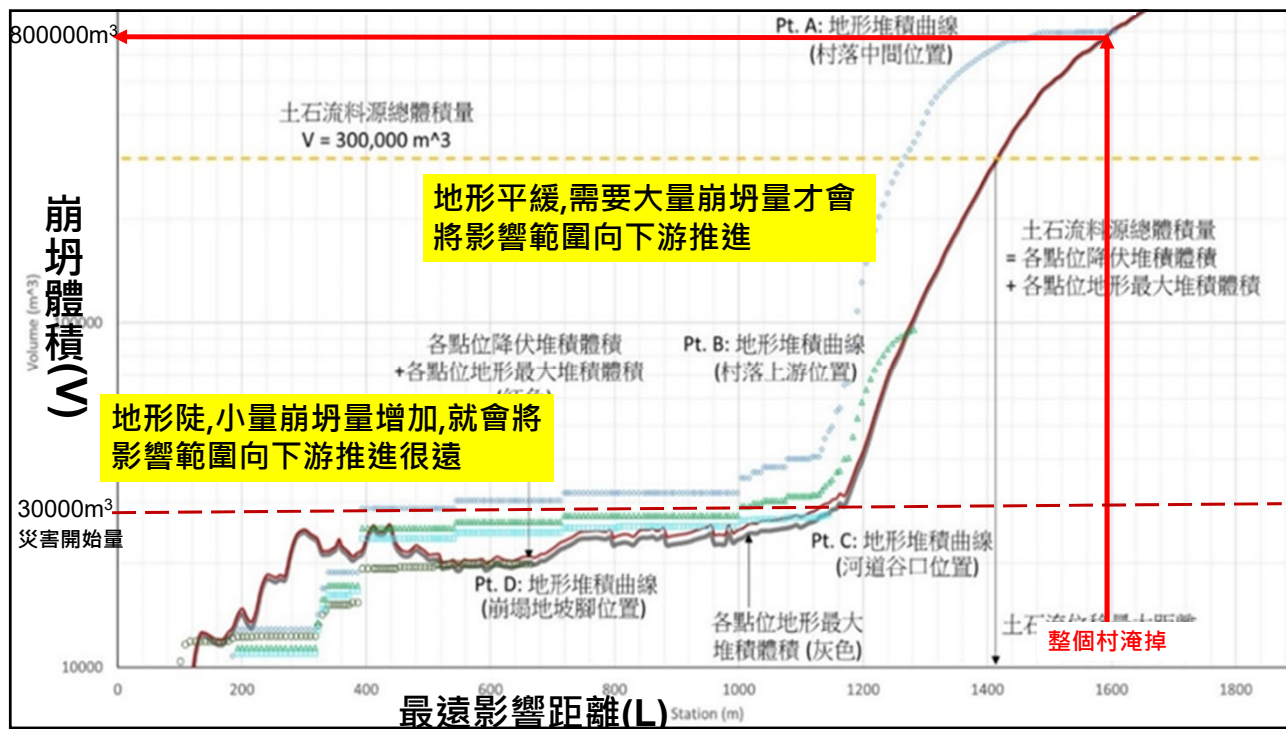
平均坡度線

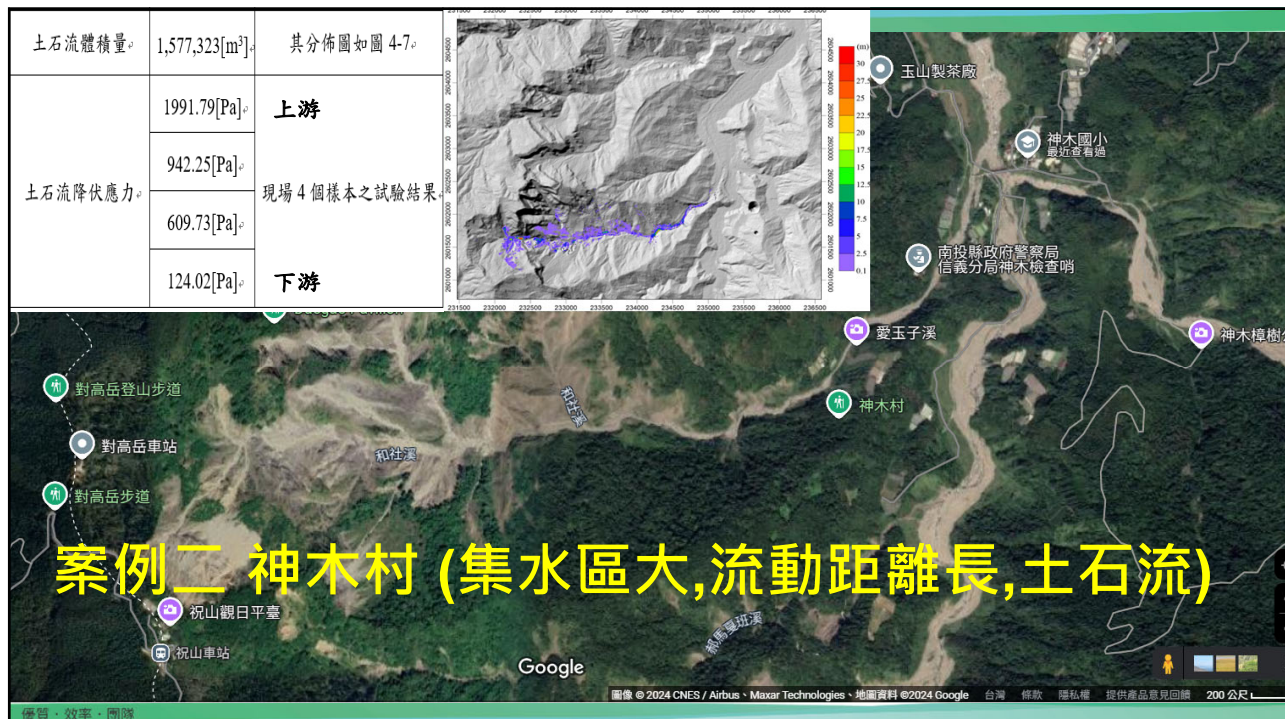
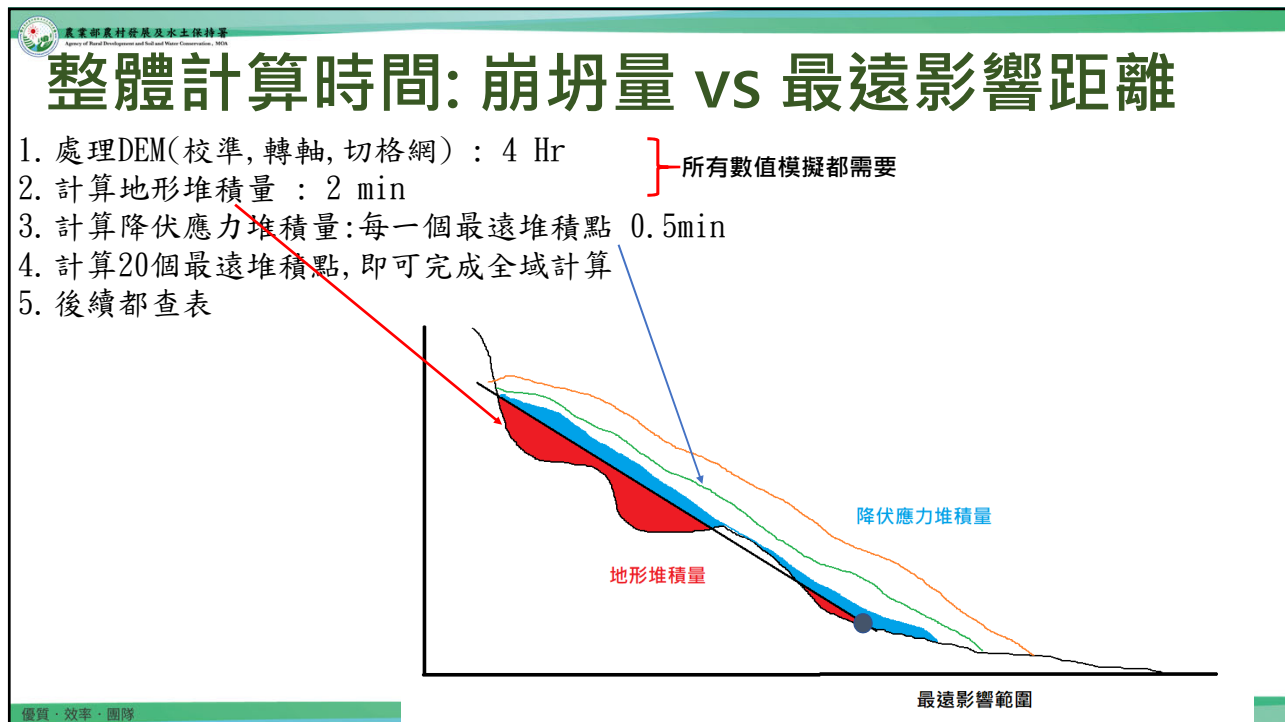
質心

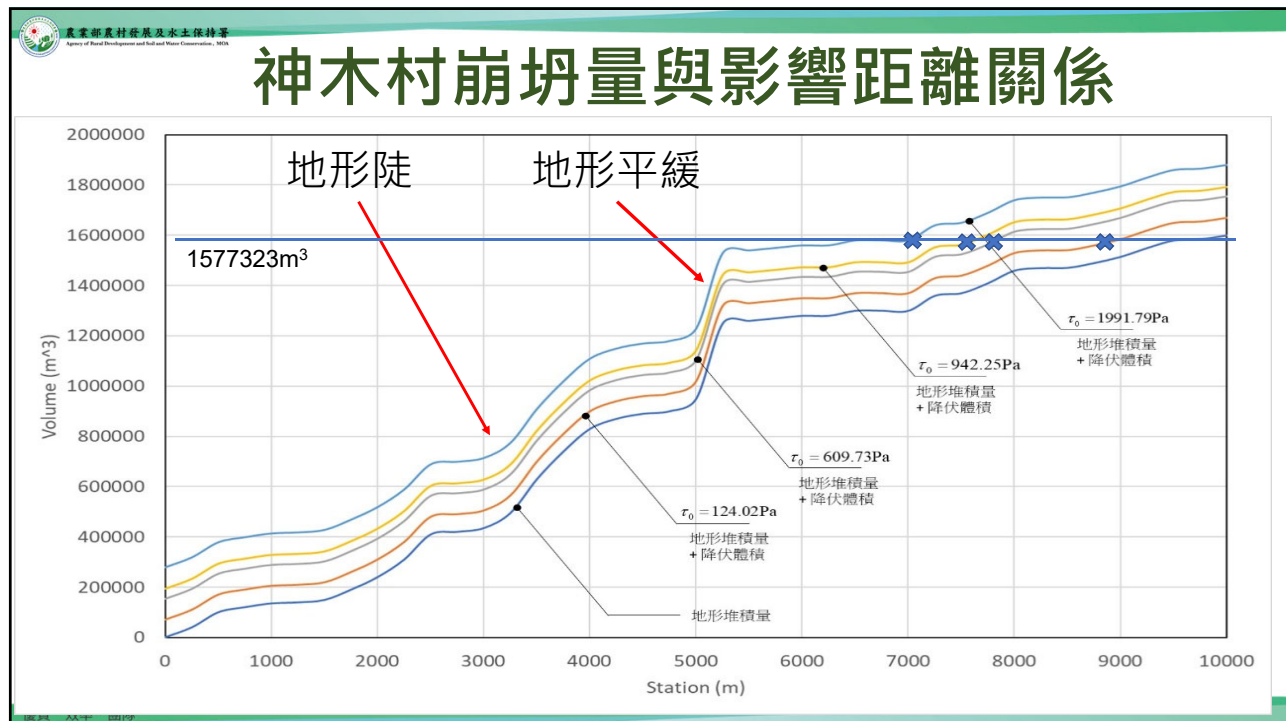
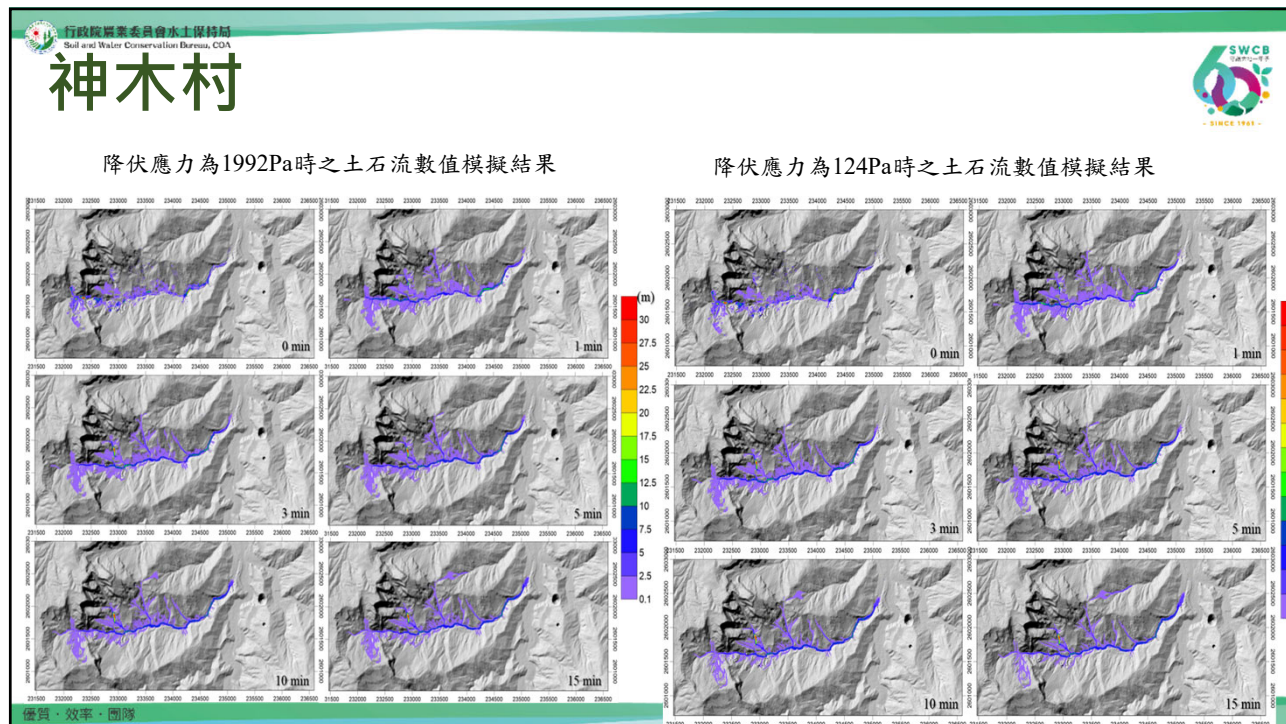
下游堆積體積由 L 反推

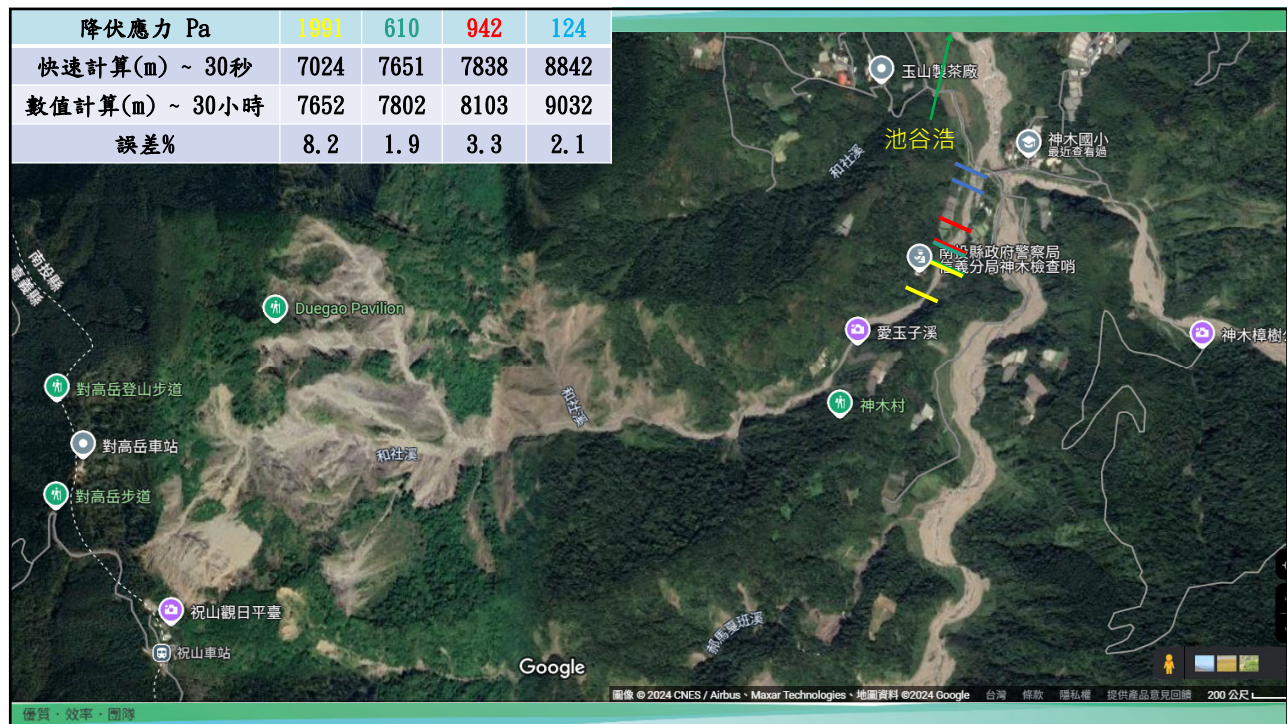
優質·效率·團隊

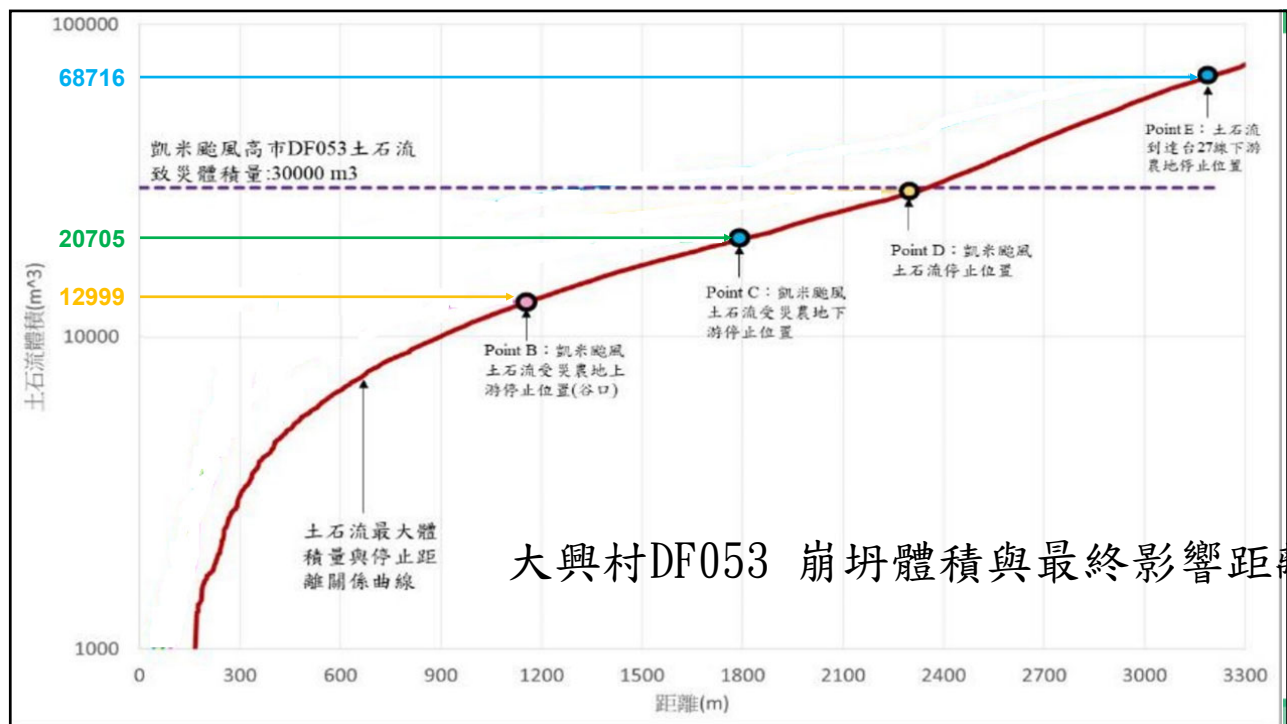














農業部農村發展及水土保持署

結論與建議

1. 利用能量與質量守恆，和賓漢土石流的平衡表面曲線，在給定起始崩塌量，降伏應力與流域DEM的條件下，可以快速找到最後土石流的影響範圍。
2. 可以在事前把所有可能的組合，土石流影響範圍與不同流變參數對照表計算出來。只要有崩塌體量，就可從表中把影響範圍找出。
3. 利用大鳥村、愛玉子溪與大興村驗證，最後影響位置誤差都不到10%。小集水區與實際調查比，誤差都小於1%。
4. 此法適合應用於需要大量估算影響範圍(雨量變化, 航照評估改變)的工作。
5. 推廣使用，必須建立降伏應力與土壤砂石組成的對照表, 同時需要由航照推估崩坍量的標準方法。

優質・效率・團隊

報告完畢
敬請指教

農業部農村發展及水土保持署
與您一起打拼