

# 土石流概論

詹錢登

國立成功大學水利系教授兼防災研究中心主任

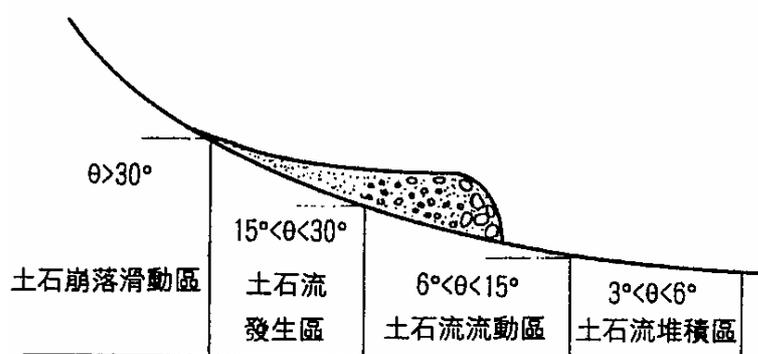
## 土石流

山坡地因其地形、地質、土壤等自然條件下，易於颱風、暴雨、地震、以及人為不當開發時，發生嚴重土壤沖蝕、崩塌、地滑、土石流等土體運動現象。此種現象，一般稱為山崩或崩山。依照土體的運動形式，山崩可分為墜落、傾翻、滑動、側滑與流動等五種類型，或簡單地區分為崩落、地滑及流動等三種類型。土體墜落是體積大小不一的岩塊或土塊以自由落體的運動方式向下掉落，大多發生於陡峭邊坡或懸崖。土體傾翻是岩塊向下坡方向傾斜，然後發生滾落，因此常發生於路邊邊坡及河道邊坡。土體流動則是指土體像流體似的以流的方式移動。土體流動速度差異很大，有的每年只有數公分，有的每秒幾公尺甚至數十公尺。土體流動非常慢的叫潛移，流動很快的在台灣及日本稱之為「土石流」，在中國大陸稱之為「泥石流」，英文則稱為「Debris flow」。土石流雖然在陸地表面、湖底或海底均可能發生，但一般所指的土石流是指豪雨期間大量鬆散土體與水之混合體在重力作用下沿自然坡面或溝渠由高處往低處流動的現象。

土石流的運動特性介於流體與固體之間，它的外觀有如預拌混凝土，因此土石流又常被比喻為「天然預拌混凝土的流動」。土石流中的土體多種多樣，其顆粒大小的分佈範圍有的較窄、粒徑較為均勻；而有的粒徑分佈很寬，從黏土、砂、礫石甚至巨石。含砂水體的流動如果按照泥砂體積含量來區分的話，可區分為挾砂水流、高含砂水流、土石流及地滑等四類，表一所示，其中土石流體的含砂積濃度介於挾砂水流和滑動土體之間，高濃度的高含砂水流常被視為土石流，而且地滑也常被當成是土石流。

泥砂含量 (%)	比重	運動形態
0 ~ 3	1.0 ~ 1.05	挾砂水流
3 ~ 27	1.05 ~ 1.45	高含砂水流
27 ~ 75	1.45 ~ 2.24	土石流
75 ~ 100	2.24 ~ 2.65	地滑

土石流是土體由不穩定狀態轉向穩定狀態的一種自然過程，它的主要特徵是發生突然、流動速度快、泥砂含量高、沖蝕力強、衝擊力大。一場土石流過程包含發生區、流動區及堆積區，土石流發生區的坡度大約在 $15^{\circ}$ 至 $30^{\circ}$ 之間，流動區的坡度大約在 $6^{\circ}$ 至 $15^{\circ}$ 之間，堆積區的坡度大約在 $3^{\circ}$ 至 $6^{\circ}$ 之間，如圖一所示。土石流常於溪谷出口處(坡度緩、寬度大之地點)形成扇狀堆積地。土石流對其活動區(包括發生區、流動區、堆積區)內的各種設施、人民生命財產及生態環境造成直接破壞和傷害。同時，大量土砂進入或堵塞河流，還會給河流上、下游地區帶來巨大危害及難以估計的損失。由於土石流規模、性質、地形條件和受害對象的不同，土石流危害也所不同。常見的土石流危害方式有：淤埋、沖刷、撞擊、磨蝕、堵塞、漫流改道、彎道超高、擠壓主河道等。



圖一、土石流過程中包含發生區、流動區及堆積區

土石流雖然是一種自然現象，但是土石流的運動過程中常造成各項建施不同程度的損害，甚至人員的傷亡，因此「土石流」三個字又成為「災害」的代名詞，常令人聞「土石流」而色變。呂副總統在2002年新春團拜中說，新的一年裡國家將面臨五大土石流挑戰：一是全球溫室效應所導致的「天然土石流」、二是台灣加入世界貿易組織後可能引發「經濟土石流」、三是經濟土石流所帶動的「政治土石流」、四是一連串社會風化事件所引爆的「道德文化土石流」、五是因樂透瘋而引發的「社會土石流」。這篇文章所要討論的僅限於天然土石流。

## 土石流的分類

土石流體的組成物質主要是水、泥、砂、礫石甚至巨石，但是它們彼此間的含量比例卻是變化很大，因此土石流按照其物質組成可分為：(a) 泥流型土石流、(b) 礫石型土石流、及(c)一般型土石流，如表二所示。泥流型土石流(又稱泥流)是指土石流中泥砂含量大而礫石含量少，其泥砂含量佔50%以上；礫石型土石流(又稱水石流)是指土石流中礫石含量大而泥砂含量少，其泥砂含量佔10%以下；一般型土石流是指土石流中土體物質的顆粒大小分佈很廣，由黏土、粉土、砂、礫石

甚至巨石等各種粒徑顆粒所組成，其泥砂部分的含量約在10%至50%之間。土石流的類型主要是與當地集水區內鬆散土體的特性有關。在台灣地區，此三類之土石流，均曾經發生過，例如，花蓮縣銅門村及南投縣豐丘兩地曾發生礫石型土石流，台東縣豐濱鄉新社村及南投縣同富村曾發生泥流型土石流，而南投縣郡坑橋及神木村曾發生一般性土石流。台灣地區近年來所發生之土石流中泥流型土石流大約佔50%，礫石型土石流大約佔20%，而一般性土石流大約佔30%。土石流在類別上之區分除有助於研究工作之進行外，更有助於規劃及執行適當的防治對策。

表二、土石流類別及其物質組成特徵	
類別	物質組成特徵
泥流型土石流	土石流固體物質中泥砂含量大而礫石含量少，其泥砂含量佔50%以上。
礫石型土石流	土石流固體物質中礫石含量大而泥砂含量少，其泥砂含量佔10%以下。
一般型土石流	土石流中固態顆粒分佈很廣，含有黏土、粉土、砂、礫石甚至巨石，其固體物質中泥砂含量約在10%至50%之間。



照片一 南投縣豐丘礫石型土石流



照片三 南投縣神木村一般性土石流

## 土石流的特性

土石流具有爆發突然、來勢兇猛、組成複雜及破壞性大等特性，如表四所示。豐富的鬆散土石、陡峭的坡度及充足的水份是發生土石流的基本要件，然而土石流的發生往往爆發突然，很難準確地預知其發生時間與發生地點。理論上，土石流的發生與該區域內崩積物厚度、地質成份、地形特性及水文特性等因子有關。土石流歷時較短，一次土石流過程一般從幾分鐘至幾小時；它的流速每秒可達幾公尺甚至幾十公尺，而且它的表面流速明顯高於其底部流速。土石流體組成粒徑非常不均勻，它的流動不穩定，有陣流現象，當前端受阻而停止時其後續部

份會因慣性而壅高，增加壓力迫使前端再次流動。土石流前端呈波浪狀並有巨石集中現象，而其後續部份礫石之大小及濃度均較小。土石流之橫斷面形狀，在前端部份其中央呈隆起之形狀，而其後續部份中央呈凹陷之形狀。土石流的流動有明顯的直進性，遇到障礙物或通過彎道不易繞流或變向，而產生猛烈的沖擊作用或爬高現象。土石流在完全發展的情況下，它的洪峰流量最大可高達上游水流流量的五到十倍；換言之，在充分鬆散土砂的情況下，一份的水可能引發五到十倍的土石流。

表三、土石流的特性	
土石流特性	土石流特性說明
爆發突然	土石流爆發突然，很難預知其發生之準確時間與地點，目前僅對土石流發生與降雨特性之關係有初步了解。
來勢兇猛	土石流泥位陡漲暴落，歷時較短，一場土石流過程在從幾十分鐘或幾小時內，但是其流速每秒可達幾公尺甚至幾十公尺，其洪峰流量最高可達上游水流流量的5倍到10倍。
組成複雜	土石流的組成物質複雜，包括是水、泥、砂、礫石甚至巨石，而且彼此間的含量比例變化很大，不易分析其流動特性。
破壞性大	土石流含砂濃度很高，前端呈波浪狀而且巨石集中，流動速度快，對障礙物產生猛烈的沖擊，破壞力極高。

### 土石流發生途徑

土石流發生之主要途徑大致可分為下列幾種：(1)沖刷溪床造成土石流、(2)沖刷溪流邊坡造成土石流、(3)壩體崩塌造成土石流、(4)地下水位升高形成土石流、及(5)其他途徑造成之土石流，如圖二所示。沖刷溪流底床造成之土石流是指溪床上原來就有相當厚度之土石堆積時，洪水期間溪床表面沖蝕及地下水位上升，產生局部沖刷破壞並逐漸擴大造成溪床整體破壞而形成土石流。沖刷溪流邊坡造成之土石流是指溪床邊坡不穩定產生大量崩塌，這些不斷崩塌的大量土石與溪溝洪水混合後形成土石流，沿著溪流流動。壩體崩塌造成之土石流是指溪流邊坡不穩定產生大量崩塌，這些崩塌土石堆在河道形成一個小水壩，如堰塞湖，阻擋水流使溪水水位上升，當水位到達破壞水位或高到超過土石堆時，造成土石堆崩塌而形成土石流。地下水位升高形成土石流是指地表下岩層細縫中之地下水受到他處高水頭作用，產生極大之孔隙壓力，造成局部土體之破壞或土壤液化而形成土石流。

其他途徑造成之土石流是指除了前面四種土石流可能發生之途徑外，台灣地區也曾經在下列三種情況下發生過土石流：(a)山坡上游泳池崩塌而造成土石流：民國八十六年八月十八日溫妮颱風襲台，台北市天母德行東路338巷內的民宅，其後山上方別墅的游泳池突然崩裂，大量水流沿著山坡流下並急劇沖刷沿途坡面

之表土層，而形成土石流，並淹沒一間三合院民宅，造成一家六死一傷慘劇、(b)山坡上棄土場崩塌而造成土石流：民國八十七年十月十八日瑞伯颱風襲台，台北縣五股鄉登林路「台聯工程木業裝潢公司」廠房後山上方灰渣場排水不良大量積水，造成灰渣場土堤潰決並形成土石流沿著山坡沖流而下，沖毀數間民房造成人死亡、(c)橋孔淤滿積水潰決而形成土石流：南投縣神木村神木國小前的霍薩溪橋，在民國八十五年賀伯颱風之前，其橋孔淨空約有十餘公尺深，但在賀伯颱風之後由於土石流的淤積，其淨空剩下不到兩公尺，在賀伯颱風之後陸續小規模的土石流及河道輸沙繼續淤積在橋孔下，在八十七年五月九日，在一場小雨下，由於橋孔淤滿溪水無法宣洩，在霍薩溪橋上游面積水形成水塘，當水位逐漸升高到橋面時，橋面承受不了水的測向壓力發生崩塌而形成土石流。這些土石流或許可歸類於壩體崩塌型土石流。

### 土石流發生基本條件

形成土石流之基本要件包括：(1)豐富的鬆散土石、(2)充份的水份、及(3)足夠大之坡度，此三種條件缺一不可。豐富的鬆散土石提供形成土石流所需之固態物質；充份的水份潤滑土石流內固態物質並降低固態物質間的摩擦力與凝聚力，促使固態物質液化以助於流動；足夠大之坡度供給土石流流動動力，使土石流克服其內部之摩擦力與凝聚力後繼續向低處流動，在流動過程中促使泥石與水高度混合並增加其流動性。

**(1) 鬆散土石條件：**自然土石流的鬆散土石來源主要取決於流域地質特徵。在地質構造複雜、斷裂皺褶發達、地震多、山坡穩定性差、岩層破碎或山崩地滑多的地區能為土石流形成提供豐富的鬆散土石。人為土石流的鬆散土石來源，除取決於流域地質特徵外，主要由人類活動所造成。例如，山坡地不當利用與開發、森林被亂砍濫伐、山坡地的道路開發、工程棄土及礦區棄渣的處理不當等均能為土石流形成提供大量的鬆散土石。鬆散土石的堆積一般需要較長的時間，但土石流的發生卻是爆發突然、歷時較短且來勢兇猛。大地震地區由於地震力將地表土層做水平及垂直方向的劇烈搖動，使得地表土層變的非常鬆散，甚至形成堰塞湖，因此是發生土石流的高危險區。

**(2) 水份條件：**水不僅是土石流的組成成份，更是激發土石流的直接條件。水的來源大致上有三種：降雨、融雪及潰壩。降雨是台灣地區水的主要來源，每逢颱風或豪雨，各地即常發生土石流。例如，1996年賀伯颱風經過臺灣本島帶來大量雨量，除了造成台北市社子島及台北縣板橋市的嚴重淹水外，更造成南部地區土石流災害，導致嘉義縣阿里山、南投縣陳有蘭溪附近村落及屏東縣好茶村，

人員及財物損失慘重。引發土石流所需要水量，各地不一，主要取決於地形坡度、鬆散土體性質及降雨特性。若土體顆粒細、疏鬆、含水量高、且具有較陡的地形，則較少的水量即能引起土石流，反之，則需要較多多的水量方能引起土石流。

(3) **坡度條件**：坡度是提供土石流發生及流動的動力，坡度陡的地區較容易發生土石流；當土石流流經坡度較陡的地方，由於其強大的侵蝕力，將侵蝕渠岸及渠床物質，使土石流規模逐漸增大；反之，當土石流流經坡度較緩的地方，由於動力減小，部份泥石逐漸沉積，泥石與水逐漸分離，使土石流規模逐漸減小，甚至停止流動。一場土石流過程包含有發生階段、流動階段及停止階段。理論上，漫地水流流經土體斜坡面或溝床時，假設土體斜坡面或溝床的坡角為 $\theta$  (坡度 $=\tan\theta$ )，發生礫石型土石流的坡角範圍大約為 $14.5^\circ < \theta < 22.9^\circ$ ，而發生泥流型土石流發生的坡角範圍大約為 $5.8^\circ < \theta < 11.5^\circ$ 。然而，因為斜坡面或溝床上堆積層的物質成份及植生情形也是影響土石流是否會發生的重要因素。許多現場調查資料顯示，在不同地區因為地質、地形、植生、及水源特性等條件不一樣，發生土石流的條件也不盡相同。

## 土石流發生與降雨之關係

在形成土石流的基本要件中，水不僅是土石流體的重要組成部份，更是激發土石流的直接條件。在同一條土石流溝中，其流域內的物質條件與溝床地形條件，在正常情況下的一定時期內可視為相對穩定，變化不大，但是流域內的降雨條件卻是隨時間變化非常大。在亞熱帶地區，形成暴雨土石流的激發條件是降雨，台灣地區許多的土石流也多是由於不同降雨條件所造成的。由此可知某一特定流域內，土石流的發生與規模大小，完全決定於流域內降雨條件。因此若能釐清土石流流域內降雨條件與物質條件及溝床條件在土石流形成中的關係，分析出流域內降雨條件的變化規律與發展趨勢，就可能利用降雨特性進行土石流發生之預報。然而，激發土石流需要多大的降雨量(或降雨強度)？依據過去的經驗，激發土石流所需要的降雨量(或降雨強度)與該流域內之土壤成份、結構、含水量及水的入滲強度等有密切之關係。降雨特性影響土壤含水量及入滲情形，也影響土石流發生時間及土石流規模大小。常被用來分析土石流發生之降雨特性參數包括降雨強度、降雨延時、累積雨量及前期降雨量。描述降雨特性與土石流發生關係的方式大致可區分為兩類：一是敘述式的土石流發生降雨條件，二是方程式化的土石流發生臨界降雨線。

敘述式的土石流發生降雨條件是依據經驗敘述降雨強度、降雨延時及累積雨量在何種條件下會形成土石流。例如，日本學者川上浩等人(1981)研究降雨特性

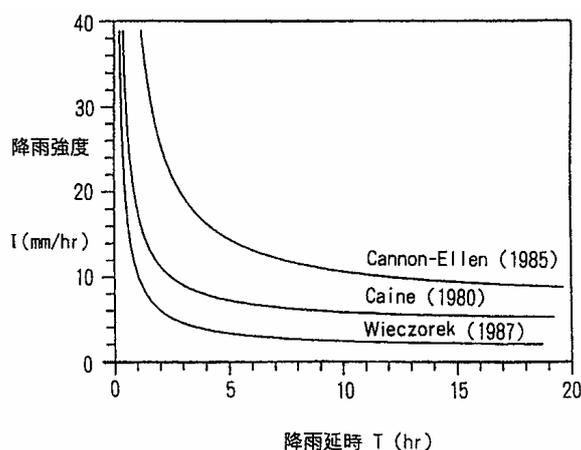
與日本宇原川土石流之關係，認為發生土石流之降雨條件有三種：(1)降雨強度 30~40 mm/hr 以上的雨，持續下 3~6 小時，即會發生土石流，(2)降雨強度雖小於 30~40 mm/hr，但持續下 3~6 小時後，累積雨量達 150~200 mm 以上，即會發生土石流，及(3)累積雨量達 400 mm 以上，一定會發生土石流。謝正倫教授等人(1992)曾經分析花東地區土石流發生與降雨關係，結果顯示降雨強度大於 27 mm/hr 而且累積雨量超過 360 mm 時，即有誘發發生土石流之可能。

方程式化的土石流發生臨界降雨線，係依據經驗或半經驗建立降雨強度  $I$  與降雨延時  $T$  或累積雨量  $R$  之關係式及關係曲線圖。當降雨強度落在關係曲線的上方，表示會發生土石流；反之，當降雨強度落在關係曲線的下方，則表示不會發生土石流，如圖三所示。這樣的關係式或關係曲線稱之為土石流發生臨界降雨關係式或臨界降雨線。例如，表四中(1)為日本學者瀨尾克美(1978)建立的土石流發生之降雨強度與累積雨量之臨界關係式，式中參數  $a$  及  $b$  為因地而異之經驗係數；(2)為美國學者 Caine(1980)所建議的土石流發生之降雨強度及降雨延時臨界關係式；(3)為美國學者 Keefer(1987)所推導的土石流發生之降雨強度及降雨延時臨界關係式。此三種臨界關係式顯示發生土石流所需之降雨強度與累積雨量(或降雨延時)成反比關係，也就是說，如果累積雨量(或降雨延時)很大，很小的降雨強度也可能激發土石流。上述所提之降雨參數的單位分別為降雨強度  $I$  (mm/hr)、降雨延時  $T$  (hours)及累積雨量  $R$  (mm)。

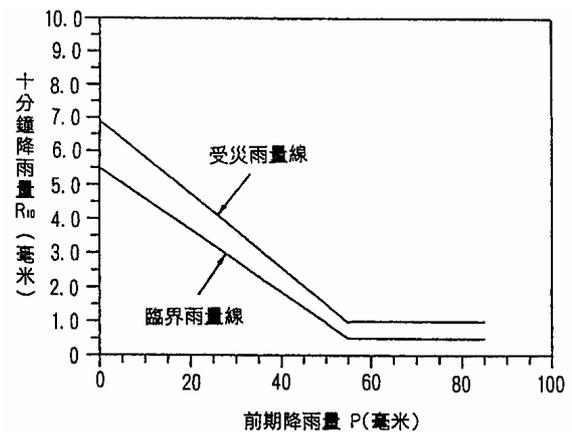
上述三個臨界關係式中以 Keefer 的關係式較具有理論基礎，其中  $I_o$  為雨水流失強度(mm/hr)及  $Q_c$  為土體崩潰臨界水量(mm)；在總降雨量中有一部份水量以蒸發、蒸散、窪蓄、截留、逕流或直接入滲到地表深層等方式流失，這部分流失的降雨對孔隙壓力的增加沒有直接的貢獻，因此激發土石流的有效降雨量為  $(I - I_o)T$ 。當有效降雨量大於或等於到達臨界孔隙壓力所需臨界水量時，則會形成土石流。當然，流失強度  $I_o$  及臨界水量  $Q_c$  並不是固定之常數，而是與當地地文因子及水文因子有關之參數，因此  $I_o$  及  $Q_c$  隨不同地區而有不同的值，而且即使在一地區，當地地文因子及水文因子改變時， $I_o$  及  $Q_c$  值也隨之改變，換言之，土石流發生臨界降雨關係式。

表四、土石流發生降雨臨界關係式			
類別	降雨參數	臨界降雨關係式	備註
1	降雨強度 $I$ 與累積雨量 $R$	$R = a(I + b)^{-1}$	瀨尾克美, 1978
2	降雨強度 $I$ 與降雨延時 $T$	$I = 14.82T^{-0.39}$	Caine, 1980
3	降雨強度 $I$ 與降雨延時 $T$	$(I - I_o)T = Q_c$	Keefer, 1987

當場降雨量是土石流之激發動力，前期降雨量則是土石流形成之潛在因素。前期降雨量的多寡，影響堆積物質的含水狀況，進而影響激發土石流所需之降雨量的多寡，因此前期降雨量的多寡應予以適當考量。另外，前面所討論之激發土石流所需之降雨強度均為小時降雨強度，但是許多資料顯示短延時(例如十分鐘)降雨強度之峰值與土石流發生之時間，較日或小時降雨強度之峰值，來得吻合。吳積善等人(1990)由雲南蔣家溝土石流發生之觀測資料中，也發現短延時(如十分鐘)降雨強度是激發土石流主要之因素，並以十分鐘降雨量  $R_{10}$  及前期降雨量  $P$  兩個降雨參數，建立土石流發生臨界雨量線及受災雨量線，如圖四所示，在臨界雨量線以下為安全區(土石流不發生區)，在受災雨量線以上，不但會形成土石流而且會有土石流災害發生；臨界雨量線與受災雨量線之間為過度區，在過度區內很可能會發生土石流但規模小不會有顯著災情。此臨界雨量線及受災雨量線曾經被實際運用到雲南蔣家溝土石流預警系統，作為發佈土石流災害預警之依據。



圖三、土石流發生臨界降雨曲線



圖四、雲南省蔣家溝土石流預報雨量線

## 地震影響

民國八十八年九月二十一日，台灣中部地區發生芮氏規模達 7.3 級之強烈地震。地震後，山崩地滑情形非常嚴重，山坡上大量崩塌的鬆散的土石，在豪雨來臨時，非常容易發生土石流。依據地震後雲林縣、彰化縣、南投縣及台中縣等地土石流發生之降雨資料，顯示地震後土石流發生之當日雨量大約在 17 mm 至 116 mm 之間，這遠小於地震前土石流發生之當日雨量(115 至 546 mm)。地震後各土石流發生地區之降雨強度為 1.42 至 9.27 mm/hr，降雨延時為 7.5 至 42.5 小時，而地震前土石流發生地區之降雨強度為 4.69 至 20.8 mm/hr，降雨延時為 9 至 86 小時，這些資料顯示，地震後，激發土石流之降雨條件明顯改變，所需之臨界降雨量明顯下降，也就是說只要較低降雨條件就可激發土石流。

## 結語

土石流的發生條件、運動特性及災害大小與該區域內崩積物厚度、地質成份、水文特性、地貌及地形特性等因素有關。形成土石流的基本要件包括豐富的鬆散土石、充份的水份及足夠大的坡度，此三種條件缺一不可。在同一條土石流溝中，其流域內的物質條件與溝床地形條件，在正常情況下的一定時期內可視為相對穩定，變化不大，但是流域內的降雨條件卻是隨時間變化非常大。台灣地區許多的土石流也多是由於不同降雨條件所造成的。由此可知某一特定流域內，土石流的發生與規模大小，完全決定於流域內降雨條件。因此若能釐清土石流流域內降雨條件與物質條件及溝床條件在土石流形成中的關係，分析出流域內降雨條件的變化規律與發展趨勢，就有可能利用降雨特性進行土石流發生之預報。

在暴雨土石流發生預警及預報方面，目前大多是以雨量大小及雨量延時為基準。土石流的形成原因與過程非常複雜，僅以雨量特性作為判定土石流發生與否之基準，當然是不夠的，要預期有很高的準確度也是不可能的。然而，縱然如此，雨量基準仍然是最為方便且可行的判定土石流發生與否之方法，因為雨量資料的取得仍是比較方便的，而且雨量資料所涵蓋的範圍較為廣泛的。常被用來分析土石流發生之降雨特性參數包括降雨強度、降雨延時、累積雨量及前期降雨量。目前土石流發生降雨臨界關係式是屬於定律性降雨臨界關係式，也就是說，關係式中所採用的參數均是確定的數值，以二分法將臨界降雨關係曲線區分為土石流發生區及土石流不發生區，然而此種區分方式常與實際狀況不盡相符，不相符的原因是源自於影響土石流發生的水文及地文各項因素本身具有很高的不確定性，往往無法明確的定出某一個定值，因此有必要採用機率觀點來分析土石流發生的可能性，建立不同發生機率下之土石流發生降雨臨界曲線，進行土石流發生機率之預報。

土石流的形成原因非常複雜，在土石流的防災方面，不能完全依賴土石流發生預警及預報系統，也不能過度期望土石流防治工程來完全抑制土石流的發生或攔擋土石流的流動。人們必須要有風險的觀念，瞭解土石流的發生與流動具有很高的不確定，雨量大時，土石流潛在地區發生土石流的機會就會比較高，當地的區民與政府就要有高度的危機意識，隨時參考雨量預報所提供的警訊，充分做好防災減災的準備與行動，以降低土石流災害。

## 深度閱讀參考資料

詹錢登(2000)，土石流概論，科技圖書股份有限公司，台北。