水土保持學報　第二十輯　77年2月　P.89～95

水源涵養與地形及土壤之關係*

游繁結** 譯

一、土壤孔隙與水源涵養

1－1　土壤孔隙

土壤孔隙與水源涵養有非常密切之關係，一般依孔隙之大小可將其區分爲巨大孔隙、大孔隙、中孔隙、小孔隙、以及細孔隙，而其大小與吸附力則列於表－1，由表中可知，若孔隙越大則土粒間吸附力越小，但因較膨鬆而可含較多之水分，且孔隙水之流動性亦較大，反之，孔隙越小則土粒間之吸附力越大，各粒子緊密相連接，故土壤含水之空間有限，且水緊附於土粒表面而流動性較差，然而，如從事耕犂時，因土塊翻鬆而增大孔隙以利於水之滲透，雨水打擊裸露土地或動物與機械行走對土壤產生之壓密作用，破壞土壤孔隙結構而減低雨水之滲透，又地面上植生覆蓋或坡地之開發利用均對土壤孔隙發生影響，從而對土壤涵養水源能力影響頗巨。

表－1　土壤孔隙

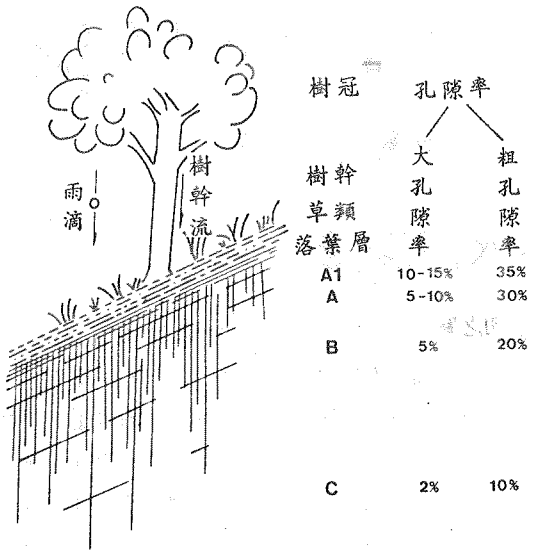
項目＼孔隙	自由水孔隙		粗孔隙		細孔隙
	巨大孔隙	大孔隙	中孔隙	小孔隙	
孔徑（mm）	＞3	0.3—3	0.03—0.3	0.003—0.03	＜0.003
吸附力（g／cm²）	＜1	1—10	10—100	100—1000	＞1000

1－2　森林土壤之孔隙分佈

森林乃一由植物、動物與微生物組成之有機體。森林中之植物包括地面上之樹冠、樹幹、草類、落葉層以及地面下之根系，此外，森林土壤中動物與微生物之活動狀況，都會直接影響土壤之結構。當降雨時，雨水以兩種方式到達地面，即(1)雨水直接落在地面，(2)雨水以樹幹流之方式流至地面，而前者對土壤孔隙之破壞較後者爲大，乃因前者具極大之打擊力所致。在森林土壤方面，如圖－1所示，大致可分爲A1層、A層、B層、以及C層，以A1層之有機質含量最多，且生物活動亦特別繁盛，其大孔隙約佔10－15％，粗孔隙約佔30％,在日本如此，相信台灣亦差不多。於A1層下方即所謂A層，此土層之有機質含量較低，因生物活動較差，導致大孔隙之比率降爲5－10％。至於B層土壤之有機質含量則甚爲缺乏，直至更下C層之有機質則近乎零。而其中大孔隙乃主要支配水之滲透與排除，粗孔隙則與貯留容量有關。

＊本文係日本九州大學竹下敬司教授於民國76年10月15日在國立中興大學農學院水土保持學系之演講內容

＊＊國立中興大學農學院水土保持學系副教授

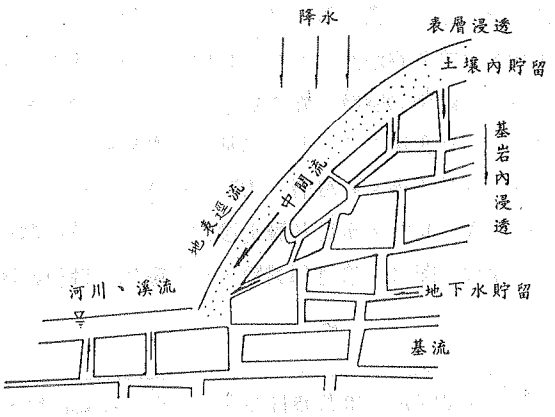


圖－1　森林土壤之孔隙分佈

二、水流方式與水資源涵養

2－1　水之流動方式

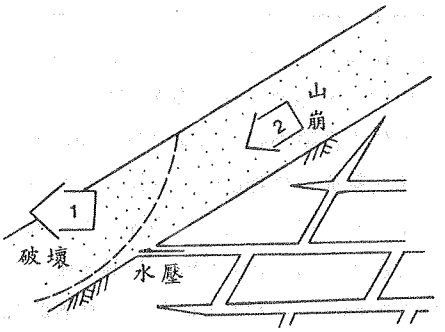
因土壤中充滿大小孔隙，當降雨時，降落地面之雨水會滲入地下而在土壤孔隙中保存或移動，但若滲透速率較降雨強度小，此時不及滲入地下之雨水將形成地面逕流，而滲透至土層裡之部分會形成中間流，此中間流當遇到基岩縫隙亦有些會隨著縫隙流到更深層而形成基流，此基流最後將流入河川中，而在小流域裡，因滲入地下之水有限，造成地下水之流量很小，幾乎無法估算出，圖－2即爲地面逕流、中間流與基流滙入河川之情況，因地面逕流之流速快且流量大，常會使得河川或溪流之水位發生劇烈變化，若不善加防治與利用，不但形成資源浪費，甚至會因而釀成災害，影響社會經濟正常成長。反觀中間流與基流，因其於岩縫或土粒間流動，所受之阻力較大且不受蒸發作用影響，能以較慢且穩定之流動方式注入溪流中，增長水資源利用之時間且減低災害出現頻率，顯示土壤孔隙對涵養水資源之重要。



圖－2　雨水滙入河川之過程

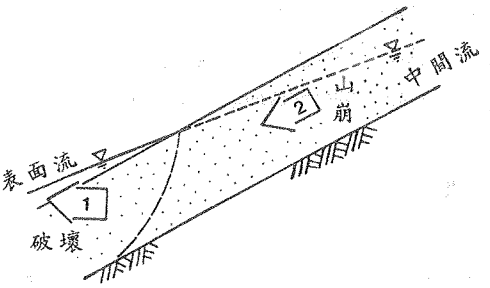
2－2　災害發生之原因

在山腹表土下方之基岩縫隙裡，當地下水滲入其中時會呈飽和狀態而產生水壓力，其所產生之水壓力隨地下水位高度成正比，即水位越高壓力越大，當壓力超過其臨界時會使該處坡面表層發生破壞，此時支撐上方土塊之力突然消失，在受力不平衡情況下導致崩塌之發生，如圖－3所示，一般而言，若基岩表面風化層存在，因其孔隙較小，易將地下水藉毛細作用而集中於表層土壤，較易出現上述土砂災害。



圖－3　基岩縫隙水壓導致坡面破壞

此外，坡面土層下之中間流若遇低窪處，則土壤水將於此處冒出地表，由中間流轉爲表面流，使該處土壤呈飽和狀態，當推移力大於摩擦阻抗力，超過土塊移動之臨界時，將促使該處出現破壞，誘導上方土塊發生崩塌，如圖－4所示。



圖－4　土壤過飽和導致坡面破壞

三、土壤滲透能與貯留容量

3－1　氣候對水源涵養之影響

坡面上表層土壤之滲透能力與貯留容量在水源涵養中扮演著相當重要之角色，亦爲日本最近研究之主要方向。在探討森林土壤涵養水源問題時，首先比較溫帶林與亞熱帶林土壤之滲透能及其貯留容量，如表－2所示。

表－2　森林土壤之滲透能與貯留容量

項目 ＼ 氣候帶	溫帶林		亞熱帶林			
	壯齡林	幼齡林	原生林	杉林	二次林	火山灰土
土壤表層滲透能 mm／hr	＞60	20	60	30	15	35
土壤貯留容量　mm	350	300	250	200	200	200

由表－2中可知，溫帶壯齡林之滲透能達60 mm／hr 以上，而在高密度幼齡林卻僅20 mm／hr，探究其原因，乃溫帶林之原生林與壯齡林株行距較大，地面上有足夠之空間讓草類生長，土壤大孔隙相對增加，且枯枝落葉層較厚，此亦具有保護作用，使大孔隙不致因雨滴之打擊而遭破壞。反觀高密度幼齡林因株行距小，下層草類生長不易，又無枯枝落葉之補充，生物活動力銳減，在此情況下，導致森林土壤之孔隙不發達，當降雨時，則絕大部分之雨水無法滲入土壤中，而以表面逕流方式流失。關於亞熱帶林，其原生林本身土壤之滲透能約爲60 mm／hr，火山灰土壤爲35 mm／hr，杉林土壤爲30 mm／hr，而二次林土壤約僅15 mm／hr，一般林帶之平均滲透能在20 mm／hr左右，此較溫帶林者略低，主要原因乃亞熱帶林之氣溫較高，地面枯枝落葉之分解速度較快，在此過程中有機質含量劇減，造成粗孔隙減少，故土壤入滲能力降低。

台灣山地種植許多濶葉杉，而此土壤具較高之滲透能,可能係其枯枝落葉分解速度較慢，可使其覆蓋地面的時間較長所致。

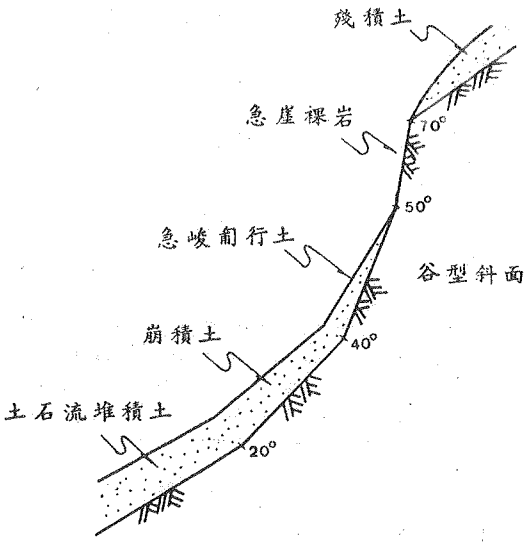
3－2　地形對水源涵養之影響

關於土壤貯留容量之支配因子，主要爲坡度與土壤孔隙率兩部分。在溫帶林裡土壤被破壞較小，故土壤流失亦較少，於相同之地形條件下，導致溫帶林之土壤較厚，故其貯留容量較高，由表－3可知貯留容量與森林型態較不相關。由圖－5與表－3可知，貯留容量與地形有密切之關係，可由下式表示土壤滲透能與貯留容量之影響因子。

表層滲透能＝f（森林狀態，土地利用）

貯留容量＝f〔地形（斜面形狀，傾斜角）〕

表－3爲各種地形之土壤滲透能與貯留容量，可知因土石流停止流動而堆積乃是在較平緩之坡地上（約在20°以下），且因充滿大孔率，故土壤貯留容量可達500 mm，而崩積土雖具高孔隙率，但一般均出現在20－40°之坡面，孔隙中之水因受重力之影響而較易流失，但土壤貯留容量亦可達450 mm，而25°以下坡面匍行土者則降爲350 mm，在40－50°急峻匍行土因土壤厚度甚薄，其土壤貯留容量則僅爲200 mm，至於急崖裸岩，則因無表土可讓雨水浸透與貯留。由此可知地形對土壤貯留容量影響甚大，而與滲透能之關係則較不顯著。



圖－5　坡面形態

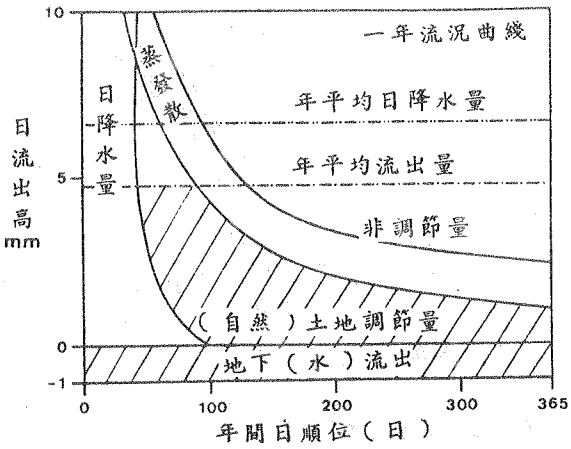
表－3　各種地形之土壤滲透能與貯留容量

項目＼地形	土石流堆積	崩積	匍行	急峻匍行	急崖	殘積	緩傾斜匍行
厚度（cm）	300	250	150	80	0	200	250
土壤表層滲透能（mm／hr）	50	70	60	70	0	40	60
土壤貯留容量（mm）	500	450	350	200	0	200	350

四、河川流況與水源涵養

4－1　河川水位對水源涵養之影響

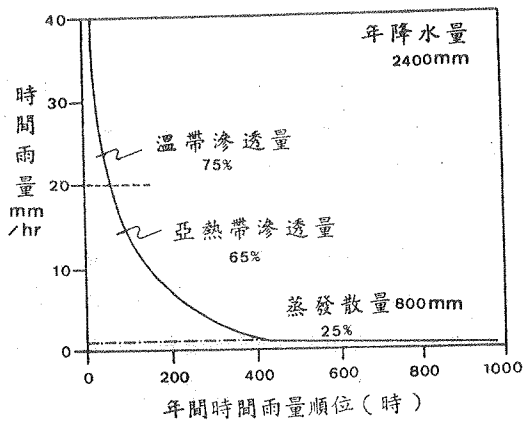
圖－6表一年之河川流量曲線，其中流出高爲零之直線下即爲地下水流出部分，在曲線與零水位直線間即所謂河川流量部分。一般我們每天用水量很穩定，因此利用量幾乎呈常數，而實際用水量與理論量之差即爲自然土地調整水源無法達到之量，其差量越大則表示水源涵養能力越低，反之，若差量越小則表水源涵養能力較佳，以此來評論該土地之涵養水源能力，希望水源涵養機能提高，即增加其滲透率，假如土地失去此功能，則降下之雨水將全部流出，形成資源浪費，甚至造成災害。



圖－6　一年流況曲線

4－2　降雨強度對水源涵養之影響

圖－7即是以降雨強度爲縱軸，以年間降雨強度順位爲橫軸所繪得之曲線變化，假設一年之總降雨量爲2,400 mm，而總降雨時間爲1,000小時，年蒸發散量約爲800 mm，前已提到亞熱帶林之滲透率爲20 mm／hr，而溫帶林之滲透率爲60 mm／hr，但由圖－7可知，亞熱帶林之年間滲透量爲65％，而溫帶林則爲75％，並非呈三倍之關係，僅增加百分之十幾而已，主要原因乃溫帶林之滲透率雖達60 mm／hr，雨水降至地面即很快滲入地下，一旦土壤飽和後滲透率會急劇降低，導致年間滲透量僅略大於亞熱帶林。但此一較多之滲透量係較大降雨強度下能被溫帶林土壤所吸收，而亞熱帶林土壤無法吸收之部分，因之，可看出何以熱帶林之水源涵養能力較差。



圖－7　降雨強度變化

4－3　最大比流量對水源涵養之影響

以100 km² 之流量稱爲比流量，則如圖－8所示一次降雨約6小時，圖中所示溫帶森林山地流域（如日本）與亞熱帶森林山地流域（如琉球）之流量變化情況，其中溫帶林曲線有明顯之轉折點，約爲降雨量

爲250mm，因此降雨量小於250mm 時容易被貯留，當降雨量超過此臨界時，則流量會急劇增加。而在亞熱帶之變異點就不明顯，且滲透力差，故降雨時將很快出現逕流，且流量急劇增加，另一特點乃溫帶地區所測得之點，其變異很小，而而亞熱帶地區卻較大。假設降雨量爲200mm 之一場雨，在溫帶林之最大比流量爲200噸時，亞熱帶林則可達 1,000 噸之流量，由此來看，溫帶地區之滲流率爲熱帶之三倍，而相對之流出量卻低數倍。

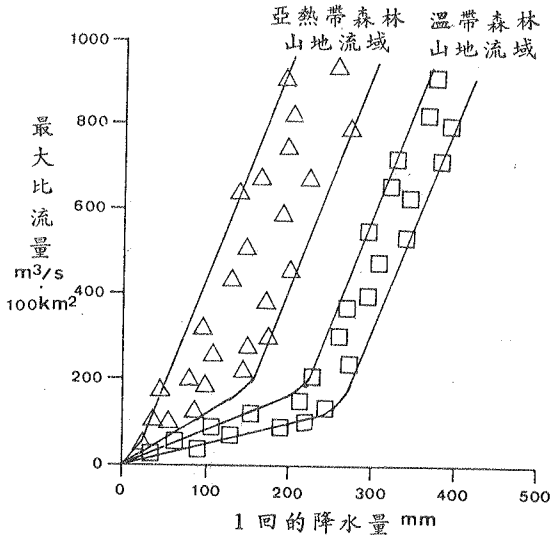


圖 — 8　最大比流量變化

五、水源涵養之效益

森林土壤涵養水源之直接效益反應在水庫蓄水的功能，若土地涵養能力僅降低10%，但卻影響甚大，對水庫將造成數兆之損失，以日本爲例，目前正積極從事土壤涵養之數量化研究，盼能獲得具體之計算式以表示其產生之效益，並爲增加水源涵養功能而付出相當可觀之經費，作一具體而有效之支持。

以下式表示水之收支，

降水量＝蒸發量＋蒸散量＋河川流出量＋地下水流出量

一般大陸國家，其河川流域長且平緩，進水量少有變化，因此這些國家之流域與水庫研究以蒸發散量爲主，但若將大陸國家學得之技術與模式套入台灣與日本等島國，顯然會造成頗大之誤差，因一般海島國家之河川短促且坡度較陡，蒸發散量之影響甚微，主要變化則發生於河川流出量，而其中之高水位流出量（洪水）更是研究之主題，而其收支式可修正如下，

降水量＝蒸發量＋蒸散量＋高水位流出量（洪水）＋低水位流出量＋地下水流出量

因此，如何防治與利用其高水位流出量，以減低災害發生與增加水資源利用效益，乃是當今水庫集水區經營之重要目標，而森林因具上述功效，有鑑於此，於水庫特定集水區內應盡可能加強造林，並且減低濫伐破壞，使其發揮最佳水源涵養能力，使水庫達最大效益。