

ISSN 1346-7328
國總研資料第 874 號
平成 27 年 11 月

國土技術政策總合研究所資料
TECHNICAL NOTE of National Institute for Land and Infrastructure Management
No. 874 November 2015

豪雨引致土砂生產及移動等評估及模擬方法之要點

蒲原潤一・內田太郎・丹羽論・松本直樹・櫻井亘

Key points for simulation methods for sediment dynamics due to sediment yield
during heavy rainfall

Jun'ichi KAMBARA Taro UCHIDA Satoshi NIWA Naoki MATSUMOTO
Wataru SAKURAI

國土交通省國土技術政策總合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

豪雨引致土砂生產及移動等評估及模擬方法之要點

蒲原潤一* 內田太郎** 丹羽諭** 松本直樹** 櫻井亘***

Key points for simulation methods for sediment dynamics due to sediment yield
during heavy rainfall

Jun'ichi KAMBARA* Taro UCHIDA** Satoshi NIWA** Naoki MATSUMOTO**
Wataru SAKURAI***

概要

以在山地流域發生豪雨時土砂動態的特徵，還有近年所實施之調查與解析技術的進步為根據，本資料主要闡述當河床上升時若會因為其所引起的土砂及洪水泛濫而造成被害時，針對災情的程度及範圍進行相關解析的注意事項。此外，本資料所敘述的對象為發生豪雨（特別是會在上游流域造成斜面崩壞以及土石流等土砂生產的豪雨）時的土砂動態。

關鍵字：土砂生產、土砂流動、土砂及洪水氾濫、土砂動態分析方法、山區河川

Synopsis

Here we show key points of simulation for assessing the risk and hazard due to sediment and flood triggered by riverbed aggradation based on characteristics of sediment dynamics in mountain river and recent advances of research on sediment dynamics. We focus on the sediment dynamics during heavy rainfall induced sediment yield in upper catchments, such as landslide, debris flow and so on. .

Key Words; sediment yield, sediment discharge, sediment and flood damage, sediment dynamics analysis method, mountain river

*前土砂災害研究部砂防研究室長 Head, SABO Planning Division, SABO Department (現長野県砂防課長)

**土砂災害研究部砂防研究室 SABO Planning Division, SABO Department

***土砂災害研究部砂防研究室長 Head, SABO Planning Division, SABO Department

解析發生豪雨時產生土砂的土砂動態相關注意事項

目次

前言	1
1. 概論	2
1.1 因山區地域的土砂生產及流失所造成的災害	2
1.2 山地河川的特徵	4
1.3 若因山區地域的土砂生產及流失造成土砂及洪水氾濫時，解析氾濫區域的相關基本事項	7
2. 解析發生豪雨時的土砂動態注意事項	9
2.1 從生產區域到下游流域間進行連續性評估	9
2.2 土砂移動形態從土石流轉變到推移質或懸移質的變化	10
2.3 細粒土砂的生產及流下	14
2.4 輸砂的非平衡過程	16
2.5 河床的移動臨界點	18
2.6 水面寬幅的時間變化	20
2.7 合流點的影響	23
3. 設定發生豪雨時的土砂動態條件的注意事項	25
3.1 土砂的供給條件	25
3.1.1 土砂的供給量及供給地點	25
3.1.2 土砂的供給時間點	28
3.1.3 粒徑	30
3.2 水理供給條件	32
3.2.1 降雨條件	32
3.2.2 逕流解析	33
3.3 河床條件	35
4. 直接評估設施在災害範圍內所產生之效果的注意事項	36
4.1 評估對策的效果	36
4.2 下游河道的條件	37
結語	38
參考資料解析事例	39

参 1 富士川水系の支川の春木川の解析事例

参 2 本川水位の違いが支川下流部の水位・河床変動に及ぼす影響の解析例

前言

為了防止土砂移動過程中所造成的災害，預測未來可能產生的土砂移動現象，以促進相關的防治對策是相當重要的。但由於在山地流域內發生豪雨時所產生的土砂移動現象非常複雜，目前仍未累積足夠的實際資料（例如豪雨期間中的水位、流量、輸砂量、河床變動高差等數據）。因此在現階段來說，要預測未來有可能發生的土砂移動現象並不容易。

隨著持續進行在流域內與土砂移動現象相關的理論性研究，以及現場調查、觀測、水路實驗、數值分析等大量調查及研究，目前已經能逐漸了解流域內土砂移動現象的實際狀況及機制。再者，以土砂移動現象的實際狀況及機制的相關知識為基礎所制定的數值分析方法也已出現了相關方法，並有應用該方法的案例。因此對於預測未來有可能會發生的土石移動現象來說，數值分析被認為是一種極為有效的工具。

另一方面，在進行數值解析時，為了可以正確預測出未來有可能發生的土砂移動現象，必須要考慮到山地流域有可能會產生的水流與土砂移動現象的特徵後，再選定分析方法並設定解析相關條件。因此在本資料中統整了以解析及預測豪雨引致之土砂移動所造成的災害為目的之土砂動態數值解析的相關注意事項。

1. 概論

1.1 因山地區域的土砂生產及流失所造成的災害

因山區地域的土砂生產及流失所造成的災害有許多種類。舉例來說，在河川防砂技術基準（規畫篇）¹⁾ 中，以規畫理論的觀點可有以下幾種分類（圖 1.1）。

- ①上游土砂流動過程所造成河床上升，進而引起的土砂及洪水泛濫（水系砂防）
- ②土石流災害
- ③漂流木災害
- ④火山爆發所造成的災害
- ⑤深層崩塌與堰塞湖所造成的異常土砂災害

另一方面，在砂防基本計畫制定方針（土石流及流木對策篇）²⁾ 中將土石流區間的土石流與漂流木視為一體來作處理。再者，在河川防砂技術基準（規畫篇）中先依據時間尺度區分為短、中、長期等 3 個區間，再設定各個區間內的土砂移動現象。各區間如下設定。

・短期為當發生計畫規模的現象時，以連續性的降雨持續時間為基準設定。

・中期為短期降雨引致之土砂產生移動時所影響的期間，以數年到數十年為基準設定。

・長期為有需要將目標視為計畫對象時，設定涵蓋短期及中期的數十年左右，或是更為長久的期間。

以上述為根據，因山區地域的土砂生產及輸送過程中所造成的災害可依照其計畫、期間，以及災害型態分類為如圖 1.1 所示。為了要減輕這種類型差異較多的災害，針對災害的受災範圍與程度進行預測及解析就顯得格外重要。再者，為了要確實預測及解析災害的受災範圍與程度，以災害的實際狀況及機制為根據選用合適的解析方法也很重要。

本資料的主要內容為由圖 1.1 所示多種災害形態之中，整理為 A-2 項目之「『短期土砂流動』現象，因從上游流動之土砂所引發河床上升之土砂及洪水氾濫災害」（圖 1.2）³⁾。

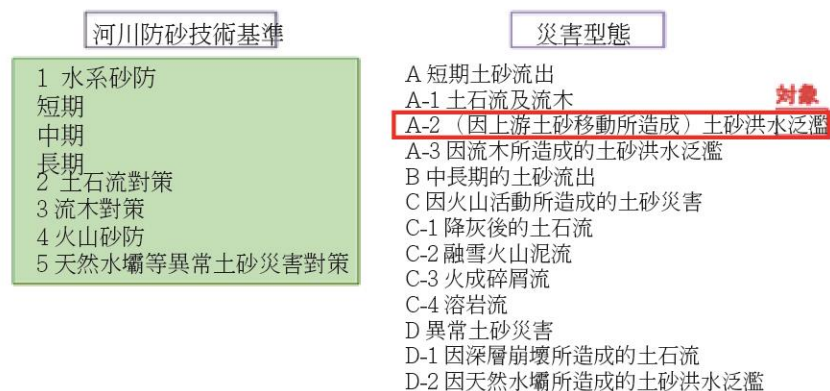


圖1.1 砂防基本計畫與山區地域的土砂災害形態（地滑與陡坡地崩壞除外）

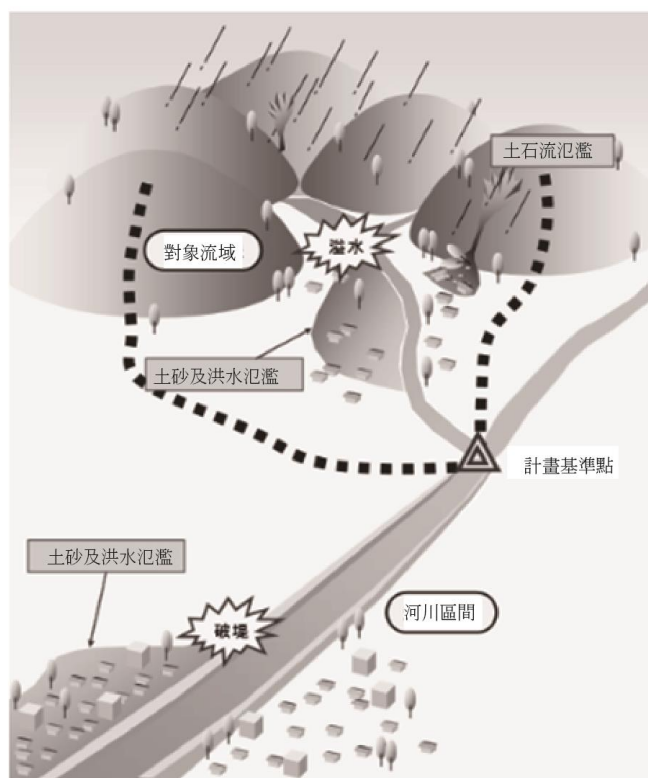


圖1.2 土砂及洪水氾濫概念圖

【參考文獻】

- 1) 河川防砂技術基準(計画編)
- 2) 国土技術政策総合研究所砂防研究室(2007):砂防基本計画策定方針(土石流・流木対策編)及び同解説,国土技術政策総合研究所資料,第 364 号.

3) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部(2012):砂防事業の費用便益分析
マニュアル(案)

1.2 山地河川的特徵

山地河川有著與平原的下游河川不同的特徵。水山（2003）^{1) 2)} 比較山地河川與下游河川後，將其特徵整理為如下。

- ①坡降較為陡急
- ②流域面積小，洪水集流時間較短
- ③河床材料粒徑較大，水深較淺
- ④河床變動較大

再者，除了上述之外在許多文獻內也有整理出山地河川的特徵^{例如 3) ~5)}，以下從眾多文獻內列舉出代表性的特徵。

- (1) 山地河川的河床上因水流而產生移動的土砂較少，大多會受到土砂供給制約（supply limit）。因此當有土砂生產時，山地河川的土砂動態會較容易受到影響。
- (2) 有時會因為崩塌與土石流的影響，產生較為少見但極為大量的（災難性的）土砂生產現象。
- (3) 河道形狀（河川寬幅、坡降、河床形態）與河床材料的粒徑有可能會因為時間與場所的不同而有極大的差異。
- (4) 山地河川中由於岩層會限制側邊沖蝕、下切沖蝕、淘刷等現象，較不會像下游河川一樣經常發生氾濫。
- (5) 山地流域內的土砂生產較容易受到地質與氣候條件等影響。
- (6) 由於其為如①所述，且坡降較為陡急之故，有時會產生超臨界流。

如上述一般，山地河川有著與下游河川完全不同的特徵，因此在解析山地河川的土砂動態時，根據山地河川的特徵選用合適的解析方法便顯得格外重要。

近年來國內外的專家學者們在山地河川進行了多次的輸砂觀測，也藉此逐漸闡明了山地河川輸砂的實際狀況，特別是(1)和(2)的狀況⁶⁾。從觀測結果可發現，在山地河川中可發現到局部性的裸露岩層，並且由於河床持續產生護甲層等原因，使得在大部分的情況下河床上並不會有太多可移動的土砂。因此，相關報告指出，當發生中小型洪水時，以下游河川為主要對象，透過輸砂理論所算出的理論值相比，實際輸砂量通常較小⁷⁾。不過一旦發生大規模的土砂生產後，河床上細粒土砂增加，河床狀況會隨著時間產生劇烈變化⁸⁾之

故，造成土砂開始移動的流量也會因洪水狀況而產生變化⁹⁾。有報告便指出在同樣水文量的條件下，土砂生產後所造成的輸砂量會比土砂生產前的輸砂量還要多¹⁰⁾。也就是說，相對於流量與輸砂量之關係在沖積河川的條件下較為穩定，在山地河道的條件下則會隨著時間不同產生劇烈變化。

此外，如③所述，山地河道的河床與沖積河川的河床有所不同，從大粒徑的石礫到小粒徑的砂石都有可能出現在山地河道的河床上，粒徑分佈範圍較廣。再者，其形態也不同於沖積河川，會呈現階梯式淺潭等具特徵性的形態¹¹⁾。從觀測可得知，這種類型的河床形態以及河床上粒徑較大的礫石對於抵抗特性¹²⁾與輸砂特性¹³⁾的影響很大。再者，也有報告指出，當階梯式淺潭的形狀被破壞後，推移質輸砂量也會隨之增加¹⁵⁾。

由上述可知，由於當發生中小型洪水時，大部分的情況下都不會發生崩塌以及土石流，因此只有在坡面發生的表面侵蝕現象以及河道內土砂的再移動現象時才會造成土砂流出。另一方面，在發生豪雨時則是會因為崩塌及土石流等現象生產出大量的土砂。為了要能夠針對發生豪雨時的土砂及洪水氾濫被害狀況進行推測及評估，除了要選擇適合此種土砂動態的解析方法之外，同時也必須進行相關的條件設定。因此本資料將發生豪雨時山地流域的土砂動態特徵列入考慮後，統整了針對此種土砂動態進行數值解析時所需注意的事項。

但在進行上述數值解析時，必須要先考慮到解析目的與環境條件，接著選擇適當的解析方法並進行相關的條件設定。此外關於土砂的生產及流動狀況，目前仍有尚未釐清之處。因此在參考此處所說明的注意事項時，最好還是能夠以解析目的、環境條件，以及調查與觀測結果為基礎來做判斷會比較適宜。再者，除了本資料中所說明的注意事項外，以適當的調查及觀測結果為基礎來實施適合該流域實際狀況的解析作業也非常重要。

【參考文獻】

- 1) 水山高久(2003):わかりやすい砂防技術(1) 山地河川(溪流)の特徴,砂防と治水,35(6), 52-53.
- 2) 水山高久(2003):わかりやすい砂防技術(2) 山地河川(溪流)の特徴(続き),砂防と治水, 36(1), 68-69.
- 3) 藤田光一・富田陽子・大沼克弘・小路剛志・伊藤嘉奈子・山原康嗣(2008):日本におけるダムと下流河川の物理環境との関係についての整理・分析- ダムと下流河川の自然環境に関する議論の共通基盤づく

りの一助として、国土技術政策総合研究所資料第 445 号、40-44.

- 4) Wohl, E. (2010) Mountain Rivers Revisited, American Geophysical Union,
- 5) Nitsche, M., Rickenmann, D., Turowski, J.M., Badoux, A., Kirchner, J.W.
(2011) Evaluation of bedload transport predictions using flow resistance equations to account for macro-roughness in steep mountain streams. Water Resources Research, 47, W08513, doi:10.1029/2011WR010645
- 6) 例えば、田中健貴・内田太郎・蒲原潤一・桜井亘(2015):近年の山地流域における流砂観測による成果と課題, 土木技術資料 57(7), 22-25
- 7) 例えば、Rickenmann, D. (2001): Comparison of bed load transport in torrents and gravel bedstreams, Water Resources Research, 37(12), 3295-3305.
- 8) 例えば、丹羽諭・内田太郎・蒲原潤一・守谷武史・光永健男・里深好文(2016)大規模崩壊地を有する溪流における豪雨時の土砂流出と河床変動の実態-富士川水系早川の春木川を例に一砂防学会誌(印刷中)
- 9) 例えば、Turowski, J.M., Badoux, A., Rickenmann, D.(2011) Start and end of sediment transport in gravel-bed river, Geophysical Research Letters, 38, 10.1029/2010GL046558
- 10) 例えば、草野慎一・中島一郎・福本晃久・山下伸太郎・高橋健太・梅村裕也・江口友章(2010)天竜川水系与田切川流域における土砂動態観測, 砂防学会誌, 63(6), 71-74.
- 11) 例えば、Montgomery, D.R., Buffington, J.M., (1997) Channel-reach morphology in mountain drainage basins, Geological Society of America Bulletin, 109, 596-611,]
- 12) 例えば、Asano Y., Uchida, T. (2013) Dynamic changes in water depth, velocity and resistance of flow during flood at steep mountain stream, 12th International Symposium on River Sedimentation, 737-742
- 13) 例えば、澤田豊明(1985)山地流域の土砂流出に関する研究, 京都大学博士論文,
- 15) 例えば、Turowski, J.M., Yager, E.M., Badoux, A., Rickenmann, D., Molnar, P. (2009) The impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel, Earth Surface Processes and Landforms, 34: 1661-1673.

1.3 山區地域的土砂生產及流失引致之土砂及洪水時，進行影響區域分析之相關基本事項

進行山區地域的土砂生產及流失所引致之土砂及洪水氾濫的影響區域分析，一般綜合採用以下之分析模式¹⁾。

- ①降雨逕流相關模式
- ②土砂流失相關模式
- ③洪水相關模式

降雨逕流相關模式有貯蓄函數法、單位歷線、水桶模式等集中型的模式，以及分佈型的逕流模式。

土砂流失相關模式一般會將流域分割為斜面及河道，接著以河道內的土砂移動為主要對象，進行一維河床變動計算。因此必須要額外設定由坡面進入河道的土砂流入量、流入時間點，以及流入地點等資料。

洪水相關模式一般來說採用僅考慮清水，或是水與土砂的二維洪水計算模式。

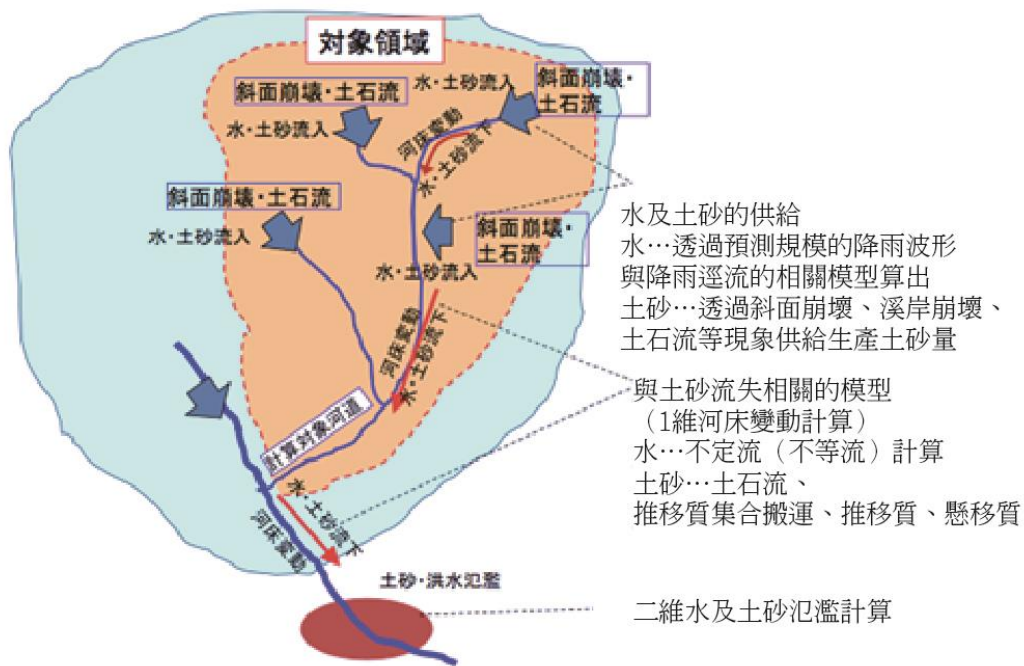


圖1.3 解析方法概要

【參考文獻】

- 1) 例えば、中川一・戸田圭一・牛山素行・武藤裕則・戸床文彦
(2002):2001 年 7 月台湾で発生した土砂災害,京都大学防災研究所年
報,45(B),407-422.

〔參考〕解析山地流域的土砂流動時對於坡面的處理

解析山地流域的土砂流動時所使用的「②土砂流失相關模型」大多僅以河道作為解析對象。另一方面，近年來也有專家學者提出將坡面與 0 級集水區的土砂移動現象列入考慮的解析方法^{例如 1) ~ 3)}。將來若能將斜面與零級河序的土砂移動現象加入解析對象，便能減少解析的不確定性，提升計算結果的精確度。但就現階段來說，要表現出分歧複雜的所有土砂生產現象並不容易，且關於模型的驗證事例也不多，因此在本資料中僅整理將河道視為解析對象進行解析（迄今為止所使用的「②土砂流失相關模式」）時的注意事項。

【參考文獻】

- 1) 平澤良輔・里深好文・水山高久・堤 大三(2011):山地流域の雨水流出, 土砂生産流出シミュレーター (SERMOW-II)の開発と適用, 砂防学会誌,64 (5),32-37
- 2) 山野井一輝・藤田正治(2014):土砂生産・土砂供給・土砂輸送堆積統合型モデルの開発と山地流域への適用,土木学会論文集 B1, 70(4), I_925-I_930
- 3) 富田陽子・森俊勇・宮貴大・武藏由育・鈴木伴征・水山高久(2014);流域管理システム(WMS)のための土砂流出計算モデルと河床変動計算モデルの作成, 砂防学会誌,66(5), 3-12.

2. 分析發生豪雨時的土砂動態之注意事項

2.1 從土砂生產區域到下游流域間的連續性評估

土砂生產源的有無、土砂生產源的狀況，以及與土砂生產源之間的距離，對於山地河道輸砂量有莫大的影響¹⁾。有時斜面崩壞或土石流所造成的土砂生產也會對遠處河道的河床變動與輸砂量造成影響。舉例來說，因土砂生產的有無，即使是同樣的流量（或水深），也可明顯觀測到不同的輸砂量²⁾。另一方面，要判斷上游流域的土砂生產，在什麼程度的範圍內造成什麼程度的影響，受到河道形狀、生產土砂量、生產土砂的粒徑、評估事件、降雨條件等各種因素之影響，在進行分析前並不容易預測出土砂生產的影響範圍。

因此，當僅以下游流域為對象進行河床變動計算，由於土砂生產源並不包含在計算區間之故，設定時很難把評估區間的上游端輸砂量受到大規模土砂生產時的影響考慮進去。最好能盡量將解析領域設定為涵蓋上游流域（土砂生產域）的區間。

【參考文獻】

- 1) 例えば、Recking, A.(2012)Influence of sediment supply on mountain streamsbedload transport, Geomorphology 175, 139-150.
- 2) 例えば、草野慎一・中島一郎・福本晃久・山下伸太郎・高橋健太・梅村裕也・江口友章(2010)天竜川水系与田切川流域における土砂動態観測, 砂防学会誌, 63(6), 71-74.

2.2 從土石流到推移質或懸移質的土砂移動形態變化

在山區地域中，有著土石在水面附近呈現層流狀態的土石流形態流下的陡坡降河道，以及土石以推移質和懸移質的形態流下的平緩坡降河道，兩種河道會以連續且混合的方式存在於山區地域¹⁾。再者，在坡降處於兩者之間範圍的區域內，從河床附近到流體表面高度為止，會和礫石型土石流相同，土砂以層流狀流動的砂礫移動層，水面附近之土砂，是以水流流動的水流層為主之推移質集合搬運的形態流下。基於上述，分析方法的選擇重點，在陡坡降區間使用可分析土石流形態及推移質集合搬運形態的土砂流失之方法，在平緩坡降區間則使用可分析推移質及懸移質形態的土砂流失之方法。

每種土砂移動形態都會需要針對水流抵抗、河床剪應力、所輸送的土石量及土石濃度等因素構築相關理論以及公式²⁾（參考範例）。再者，土砂移動形態因坡降以及相對水深所決定。³⁾

至今為止，以土石流、推移質集合搬運、推移質為對象的計算模式有以江頭教授的理論作為基礎的解析方法⁴⁾、以高橋教授的理論作為基礎的解析方法⁵⁾，以及將土石流與推移質集合流動統一處理的解析方法⁶⁾。高橋教授的理論作為基礎的解析方法中，構築了廣泛運用的數值計算程式⁷⁾、提出了連續評估河床剪應力與土石平衡濃度的方法⁸⁾，並整理了在製作數值計算程式時的注意事項⁹⁾。

再者，有專家學者指出在陡坡降區間內的土石流會因為相對水深的不同而有不同的流動形態¹⁰⁾。也就是說，當土石粒徑相對於水深來說非常小的時候，就會形成亂流（泥流）型的土石流¹¹⁾。除了礫石型的土石流之外，亦提出亂流（泥流）型土石流的數值解析方法¹²⁾。火山噴發後，若流域內存在大量細粒土砂時就必須考慮到產生亂流（泥流）型土石流發生的可能性，並適當地評估此種類型的土石流所造成的土砂流出現象。

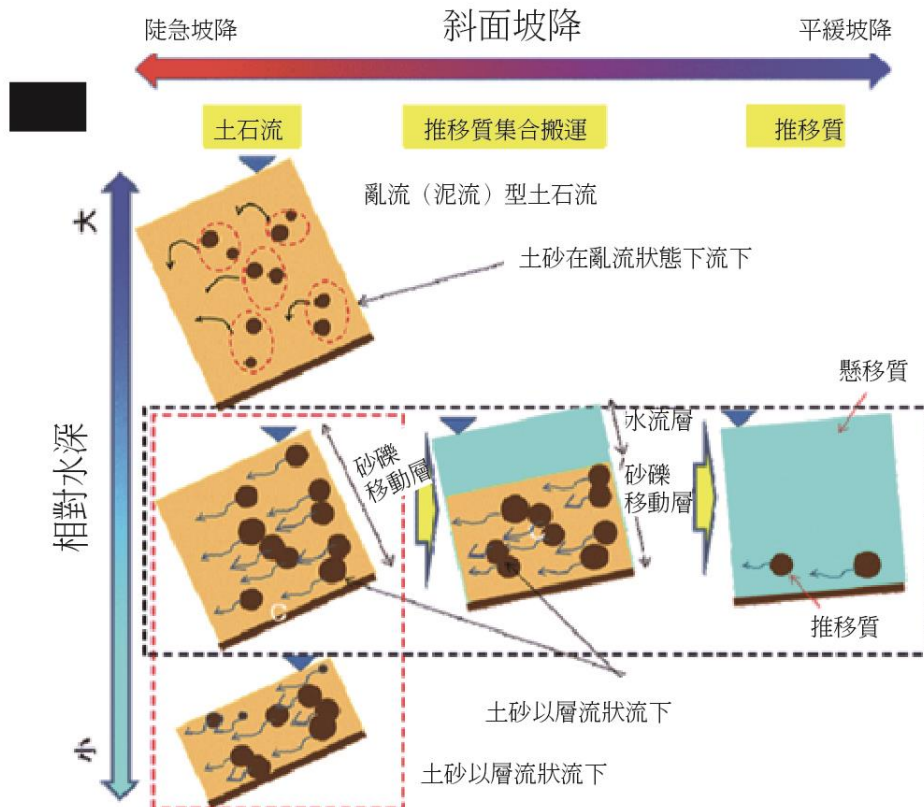


圖2.1 土砂移動形態從土石流變化到推移質的概念圖
(細粒土砂的部分並未做成圖示(參考2.3節)。圖中黑色虛線的框框為在圖2.2中作為圖示的範圍)

【參考文獻】

- 1) 例えば、芦田和男・江頭進治・中川一(2008):21 世紀の河川学,京都大学出版会,108-111.
- 2) 河川防砂技術基準(調査編)
- 3) 例えば、高橋保(1982);土石流の停止・堆積機構に関する研究(3),京都大学防災研究所年報, 25(B-2), 327-348,
- 4) 宮本邦明・伊藤隆郭(2002):支配方程式に侵食速度式を導入した場合の土石流の数値シミュレーション手法, 砂防学会誌, 55(2), 24-35.
- 5) 中川一・高橋保・里深好文・川池健司(2001):1999 年ベネズエラのカムリグランデ流域で発生した土砂災害について,京都大学防災研究所年報, 44(B-2), 207-228.
- 6) 高濱淳一郎・藤田裕一郎・近藤康弘(2000):土石流から掃流状集合流動に遷移する流れの解析法に関する研究,水工学論文集,44,683-686.
- 7) 中谷加奈・和田孝志・里深好文・水山高久(2008):GUI を実装した汎用土石流シミュレータ開発, 第 4 回土砂災害に関するシンポジウム論文

集, 149-154.

- 8) 鈴木拓郎・内田太郎・岡本敦(2013):土砂移動シミュレーション手法における輸送形態の遷移に伴う不連続性の解消に関する研究, 砂防学会誌, 66(2), 21-30.
- 9) 内田太郎・丹羽諭・西口幸希・村上正人・蒲原潤一・岡本敦(2014):大規模な土石流の流下・堆積に関する数値計算プログラム作成の留意点, 土木技術資料, 56(9), 22-25
- 10) Hotta, N., Miyamoto, K. (2008):Phase classification of laboratory debris flows over arigid bed based on the relative flow depth and friction coefficients, International Journal of Erosion Control Engineering, 1, 54-61.
- 11) 例えば、高橋保(2004):土石流の機構と対策,近未来社,168-170,236-238,249-251,276-279,296-300,316-319
- 12) 高橋保・里深好文(2002):石礫型及び乱流型土石流の一般理論とその実用化モデル,砂防学会誌,55(3). 33-42

[舉例說明] 重現及預測山地河道中輸砂的流動與變動特性，使用的公式
(引用自河川防砂技術基準 (調查篇))

下述為以重現及預測山地河道中輸砂的流動與變動特性為目的所使用的輸砂量方程式。此外，若日後有新提議時也可根據其適用條件使用。

- 1) 推移質
 - a) 與臨界推移力相關的公式
岩垣公式、修正 Egiazaroff 式
 - b) 推移質方程式
芦田及道上方程式、Meyer-Peter 及 Muller 式、芦田・高橋・水山方程式
- 2) 懸移質
 - a) 懸移質方程式 (流速分佈與濃度分佈的組合)
Lane-Kalinske 式、板倉及岸方程式
 - b) 基準面濃度方程式
Lane-Kalinske 式、板倉及岸方程式、芦田・岡部・藤田方程式、芦田及道上方程式
 - c) 濃度分佈方程式
Rouse 濃度分佈方程式
- 3) 土石流
 - a) 土石流的阻抗法則
高橋方程式、江頭-宮本-伊藤方程式
 - b) 土石流的濃度法則
 - ①平衡濃度方程式
高橋方程式
 - ②侵蝕及堆積速度方程式
高橋方程式、江頭方程式
- 4) 推移質集合流動
 - a) 推移質集合流動的阻抗法則
高橋方程式、江頭・宮本・伊藤方程式
 - b) 推移質集合流動的濃度法則
 - ①平衡濃度方程式
高橋方程式、水山方程式
 - ②侵蝕及堆積速度方程式 (與土石流相同)
高橋方程式、江頭方程式

2.3 細粒土砂的生產及流下

當豪雨發生時，會使多處山腹發生崩塌並提供大量的微細土砂¹⁾。這種細粒土砂被認為有可能會以混濁的成分（沖瀉載）通過陡急的坡降區間，並對下游流域的河床變動造成影響。此外，與平緩坡降的區間相比，在陡急坡降區間中會有較粗粒徑的土砂懸浮²⁾。再者，近年來已開始針對陡坡降區間的細粒土砂進行計算，為了要確實紀錄大規模的土砂移動現象，現階段已確認在進行解析時必須同時將細粒土砂視為解析對象^{3) 4)}。根據上述事實，可發現在考慮到細粒土砂時，必須針對從陡坡降領域到平緩坡降領域的區間進行連續性的評估。

但是細粒土砂在陡坡降的山地流域中的變化至今仍有許多不明點。迄今為止，土石流與推移質集合搬運領域的解析手法主要都著眼於粗礫石的變動⁵⁾，一般來說，在平緩坡降的河道中所進行的土砂動態解析則不僅會針對推移質，其同時也會針對懸移質進行解析。因此，雖然可以連續性的使用兩種解析方法進行解析，但由於在陡坡降的領域中大多不會將細粒土砂視為解析對象之故³⁾，若單純將土石流及推移質集合搬運為對象的解析方法，與在平緩坡降中以推移質及懸移質為對象的解析方法連接，在連接點的部分就很有可能出現輸砂量無法連貫的情況。

在陡急坡降領域的石礫型土石流中，雖然形成土石流骨架的礫石會在層流之上流動，但填滿石礫縫隙的間隙流體會是亂流狀態。因此土石流中的細粒土砂被認為並不會和石礫一同形成其骨架，而是會和間隙流體成為一體後再流下。這種現象被稱作細粒土砂的相移（Phase Shift）⁶⁾（參考圖 2.2 的右圖），而也有學者提出了考慮到此種相移現象的土石流解析方法^{5) 6) 7)}。再者，細粒土砂的相移現象被認為在推移質集合形態的砂礫移動層中也會發生。另一方面，在推移質集合搬運形態的水面附近的水流層很有可能會和推移質域相同，有細粒土砂懸浮在當中（參考圖 2.2 的中央圖）。只不過在處於推移質集合搬運形態時的砂礫移動層內產生相移的細粒土砂與懸浮於水流層內的細粒土砂間，現階段還很難闡明其變動、粒徑，以及濃度是以什麼樣的方式所連結。

如圖 2.2 所示，雖然目前已有嘗試進行從土石流形態開始到推移質與懸移質形態為止的階段針對細粒土砂連續解析，但在土石流及推移質集合搬運的領域方面，今後仍需要進行更深入的檢討及驗證，以闡明含有間隙流體的細粒土砂濃度的相關要素，並將此時的土砂變動模式化。

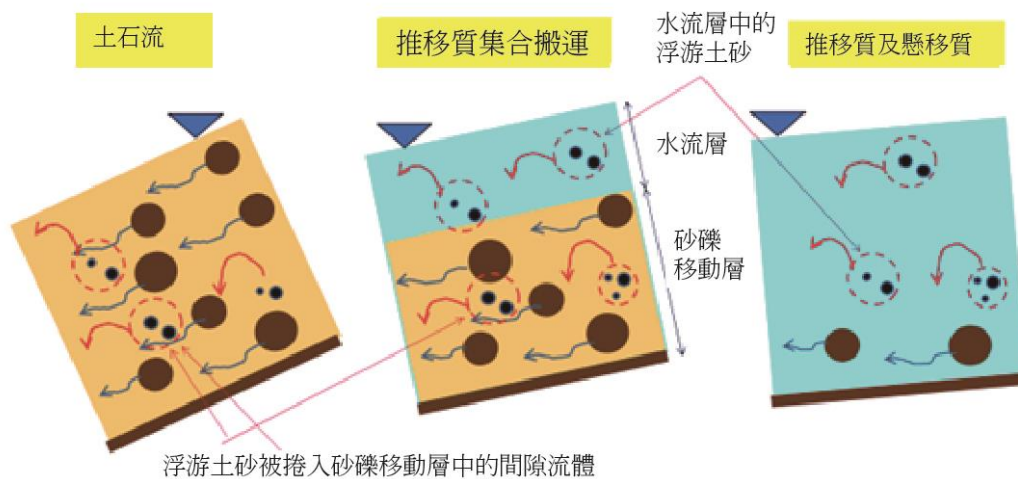


圖2.2 細粒土砂的流下概念圖

【參考文獻】

- 1) 水山高久(2003):わかりやすい砂防技術(3) 土砂の生産,砂防と治水, 36(2), 64-65.
- 2) 水山高久(2003):わかりやすい砂防技術(4) 土砂の流出、堆積,砂防と治水, 36(3),74-75.
- 3) 例えば、中谷加奈・和田孝志・里深好文・水山高久(2008):GUI を実装した汎用土石流シミュレータ開発, 第 4 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 149-154.
- 4) Iverson, R.M. (1997):The physics of debris flows, Reviews of Geophysics, 35, 245-296.
- 5) 江頭進治・佐藤隆宏・宮本邦明(1998):姫川支川蒲原沢土石流のシミュレーション,水工学論文集, 42, 919-924
- 6) 西口幸希・内田太郎・石塚忠範・里深好文・中谷加奈(2011):細粒土砂の挙動に着目した大規模土石流の流下過程に関する数値シミュレーション-深層崩壊に起因する土石流への適用-, 砂防学会誌, 64(3), 11-20.
- 7) 鈴木拓郎・道畑亮一・池田暁彦・内田太郎・岡本敦・林真一郎・長谷川祐治・堀田紀文(2013):土石流から掃流砂領域までを連続して取り扱う数値シミュレーション手法に関する検討,砂防学会研究発表会概要集 B, 114-115

2.4 輸砂的非平衡過程

在山地流域中由於洪水的持續時間短，流量的時間變動大¹⁾之故，土砂移動現象的隨時間變化大。再者，山地河道的坡降及河川寬幅等地形條件大多在短區間內有著極大的差異，根據場所不同，通常連其水理條件（水深、推移力等）也會大不相同。因此在山地河道中，即使在某一位置的水理條件都相同的條件下，在固定時間、固定區間，且水理條件沒有變化時的輸砂量（平衡狀態的輸砂量）有時還是會與實際輸砂量有所出入。上述這種輸砂量與平衡狀態的輸砂量不一致的狀況就稱為非平衡過程或是非平衡狀態²⁾。再者，一般認為發生豪雨時，山地河道的非平衡性較強（因懸浮現象較為活躍，所以要到達平衡濃度為止的距離較長）的細粒土砂由崩塌供給。因此在解析發生豪雨時山地河道的土砂流出時，考慮到輸砂的非平衡過程再進行解析便顯得格外重要。

此外，平衡狀態的輸砂量僅會由當下的水理條件及河床條件所決定，基本上並不會受到達到平衡狀態前的時間以及上游側輸砂量的影響（參考圖 2.3）。另一方面，若在非平衡狀態下考慮任一位置的輸砂量時，則其會同時受到該處的水理條件、河床條件，以及上游側輸砂量所影響。

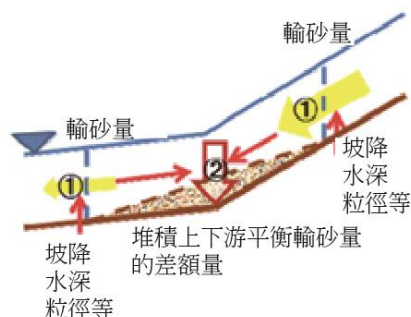
在粒徑較小的懸移質方面，除了會將其假設為處於平衡狀態下進行解析³⁾之外，也會同時將依序算出上浮量及沉降量的非平衡性狀態也列入考慮來進行解析⁴⁾。再者，也有學者指出，當懸移質濃度變高時，沉降速度可能會比藉由一般使用的沉降速度方程式所算出的沉降速度還要小，會較容易維持在高懸移質濃度下，因此提出了在土砂濃度較高時計算沉降量的方程式⁵⁾。

至於在平緩坡降區間內的推移質，雖然在過去的解析方法中有提出將推移質的非平衡性考慮進去的理論²⁾，但大部分的情況都會將平緩坡降領域的非平衡狀態設定為程度較小，並假設推移質是處於平衡狀態下進行解析。

關於陡坡降區間內的土石流與土砂流，有學者提出了可表現輸砂非平衡性的侵蝕堆積速度方程式。一般來說會使用高橋方程式⁶⁾、江頭方程式⁷⁾，以及鈴木等人的方程式⁸⁾來作為侵蝕堆積速度方程式使用。在使用高橋方程式進行解析時，為了重現實際現象，有時會需要導出堆積速度係數來作使用，並且係數值會因對象現象與對象流域的不同而有所差異⁹⁾。不過在迄今使用高橋方程式所進行的解析中，大多都是適用在利用單一代表粒徑的解析模型上，很多時候無法明確解析出 2.3 所示之細粒土砂流出的影響，因此為了要重現非平衡性較強的細粒土砂對於土砂移動現象所造成的影響時，可能就需要根據現象來決定不同的堆積速度係數。所以在進行解析時若能同時考慮在生產及流下細粒土砂時所造成的影響與非平衡過程的影響會較為理想。

平衡計算

將某個斷面的輸砂量視為利用各斷面的水理條件以及河床條件所決定的平衡輸砂量並算出



非平衡計算

利用上游側的輸砂量以及上游斷面與該斷面間的堆積侵蝕量算出某個斷面的輸砂量

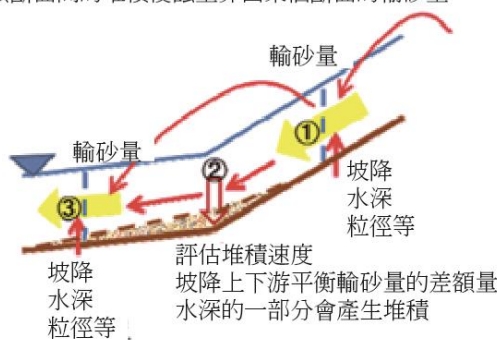


圖2.3 輸砂非平衡性的概念圖

圖中的黃色箭頭為輸砂量，中間的空心箭頭表示堆積量，紅色箭頭表示在數值計算上被認為會影響到計算輸砂量與堆積量的因素，以及表示輸砂量與堆積量的關係。此外圖中的數字表示計算的順序。

【參考文獻】

- 1) 例えば、水山高久(2003):わかりやすい砂防技術(1) 山地河川(溪流)の特徴,砂防と治水, 35(6), 52-53.
- 2) 例えば、土木学会(1999):水理公式集.
- 3) 例えば、大久保駿・水山高久・蒲正之・井戸清雄(1997):連続するスリット砂防ダムの土砂調節効果,砂防学会誌,50(2),14-19
- 4) 例えば、竹林洋史・藤田正治(2011):粘着性・非粘着性土混在場における一般断面による一次元河床変動解析,砂防学会誌,64(2),3-14
- 5) 高橋保・里深好文(2002):石礫型及び乱流型土石流の一般理論とその実用化モデル,砂防学会誌,55(3),33-42
- 6) 高橋保・中川一(1991):豪雨時に発生する石礫型土石流の予測,砂防学会誌(新砂防),44(3). 12-19
- 7) 江頭進治(1993):土石流の停止・堆積のメカニズム(1), 砂防学会誌(新砂防), 46(1),45-49.
- 8) 鈴木拓郎・堀田紀文・宮本邦明(2009):非連行型侵食速度式を用いた勾配・流路幅の変化点や砂防ダムにおける土石流の数値シミュレーション, 砂防学会誌, 62(3),14-22
- 9) 例えば、高橋保(2004):土石流の機構と対策,近未来社,168-170,236-238,249-251,276-279,296-300,316-319

2.5 河床的移動臨界點

山地河道發生中小型洪水時輸砂量通常都很小，且不會造成河床地形改變。在發生豪雨時，有時輸砂量突然暴增，使堆積在河床的土砂大量流動。這種現象是因為流水施加在河床上的外力，超過某個臨界值後就會開始產生沖刷所導致。若在進行解析時沒有考慮到河床材料的移動臨界點的話，就有可能會導致有過多土砂流至下游處，或是得到與土砂動態的實態不符的解析結果，因此進行解析時務必要將河床材料的移動臨界點列入考慮。

以推移質為對象進行河床變動計算時，一般都會將河床材料的移動臨界點考慮進去，而在評估移動臨界點時通常會使用岩垣公式以及修正 Egiazaroff 方程式¹⁾。另一方面，以陡坡降領域的土石流為對象進行解析時，大多僅以土石流流動作為解析對象，不考慮河床材料的移動臨界點。此外，在以陡坡降的領域為解析對象時，也有學者提出陡坡降區間內，比較河床內部剪應力與剪應強度的方式來評估移動臨界點的方法²⁾。結果顯示，藉由在解析時將河床材料的移動臨界點列入考慮可提升重現河床變動時的精度。

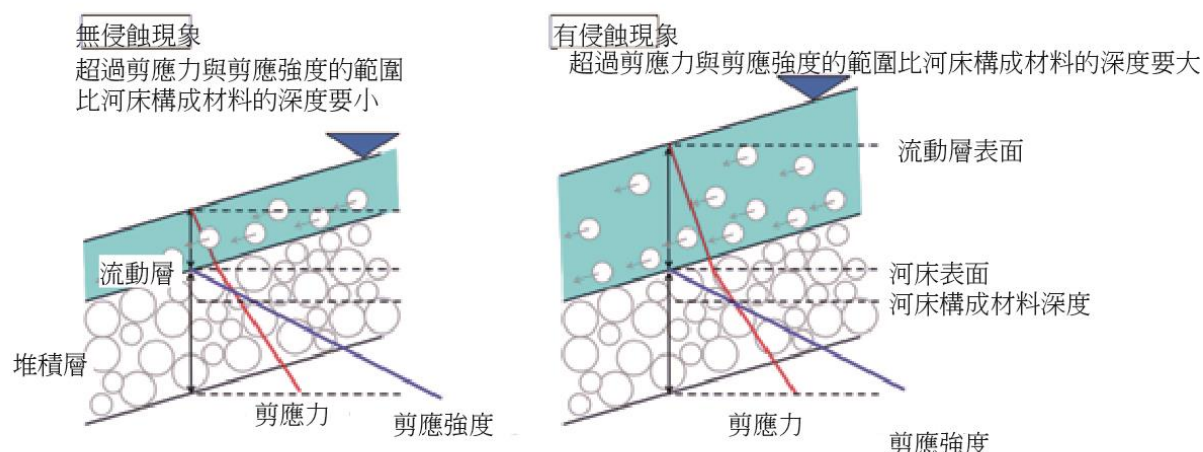


圖2.4 藉由比較河床內部的剪應力與剪應強度來評估河床材料移動臨界點的方法

【參考文獻】

- 1) 土木学会(1999):水理公式集.
- 2) 高橋保(1977):土石流の発生と流動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 20(B-2),405-435.
- 3) 丹羽諭・内田太郎・蒲原潤一・里深好文(2014):土砂生産のタイミングが河床変動に及ぼす影響に関する数値計算,第 7 回土砂災害に関する

〔例示〕 富士川水系春木川随時間之河床變動觀測案例

下述為設置在富士川水系的支川－春木川－的砂面計所觀測到的河床變動測量結果。發生降雨期間的前半雖然有產生河床下降的情形，但可以發現並沒有產生顯著的河床變動。關於利用砂面計進行觀測的詳細方法可參考林及武笠（2004）¹⁾。

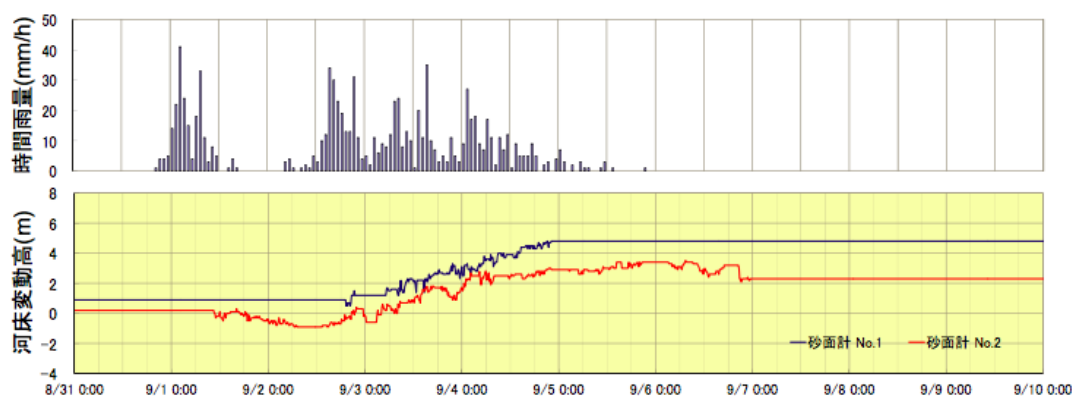


圖 2.5 利用砂面計測量河床變動的案例（圖修改自丹羽等人（2014）²⁾）

【參考文獻】

- 1) 林孝標・武笠裕美(2004):総合土砂管理のための河床変動・土砂移動実態把握の試み,砂防学会誌,57(4),68-73
- 2) 丹羽諭・内田太郎・蒲原潤一・里深好文(2014):土砂生産のタイミングが河床変動に及ぼす影響に関する数値計算,第 7 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 181-186

2.6 水面寬幅的時間變化

在山地河道中有時會因為斜面崩壞或土石流而堆積大量土砂，產生大幅超過平時水量或是發生中小型洪水時水流寬度的堆積區域。透過 CCTV 的影像可以確認到即使發生大規模的洪水時，山地河道的水流寬度還是會比最後土砂的堆積寬度要小，並且會因為水流在左右方向的變動而產生大規模的堆積區域

（參考圖例）。此外，同時也確認到流水的水流寬度會隨著流量變化。特別是當河床下降時，水流通常會集中在整個堆積區域寬度的其中一部分¹⁾。由上述可知，若將堆積區域的全寬視為解析時所用的水流寬度時，在同樣的水量之下，水流寬度會比實際狀況還要來得大，因此就有可能會評估出過小的推移力以及輸砂量。所以利用 CCTV 的影像來針對水流寬度以及其時間變化的實態進行現場調查，並將水流寬度與其時間變化列入考慮後再進行解析就顯得格外重要。

目前已知可利用水流寬幅會與流量的 $1/2$ 次方成比例的河制定理（ $B = \alpha Q^{1/2}$ ）來表現集中於一部分的水流寬幅（ B ）。此外，就過去的經驗來看，河制定理的係數 α 大多會是在 $3.5 \sim 7$ 之間²⁾。再者，在過去的解析中大多會將水流寬幅設為從航空照片中所解讀出的河川寬度，或是發生災害時被認為會產生土砂移動的全寬，並假設在沒有時間變化的狀態下進行解析，但同時也有解析方法是利用河制定理來依序解析變化的水流寬幅例如 3) ～5)。



圖2.6 流水的水流寬度與最後的土砂堆積寬度（預測會產生土砂移動的寬度）

【参考文献】

- 1) 水山高久(1993):溪流での土砂移動現象,山地保全学(小橋澄治編文永堂出版)
- 2) 水山高久(1977):山地河川の掃流砂に関する研究,京都大学学位論文
- 3) 栗原淳一・井戸清雄(1993):常願寺川の河床変動とその制御に関する研究, 砂防学会誌, 45(5), 3-10
- 4) 藤田正治・水山高久・飯田猛行(1997):床固め工群を有する河道の河床変動特性, 砂防学会誌, 50(3), 21-27
- 5) 福田克之・松本清則・谷口和哉・椿下康之・清水幹輝・水山高久(2002):出水中におけるスリット防砂壩の土砂流出調節に関する研究-黒部川流域祖母谷支川を対象として-, 砂防学会誌, 54(6), 25-34

[例示] 富士川水系春木川の觀察案例

富士川流域春木川之大春木野溪の源頭部，分布有七面山崩。在平成 23 年颱風 12 號來襲時，透過 CCTV 留下當時位於七面山山崩位置約 2km 下游處的大春木防砂壩的相關影像資料（圖 2.7），由此份資料判釋防砂壩溢洪口在土砂流動較為劇烈的時間帶時的溢越範圍，下圖為解釋結果。從解釋結果發現水流達到溢洪口寬度 20m 的時間並不長，且溢流位置每約隔 10 分鐘就會產生變化。

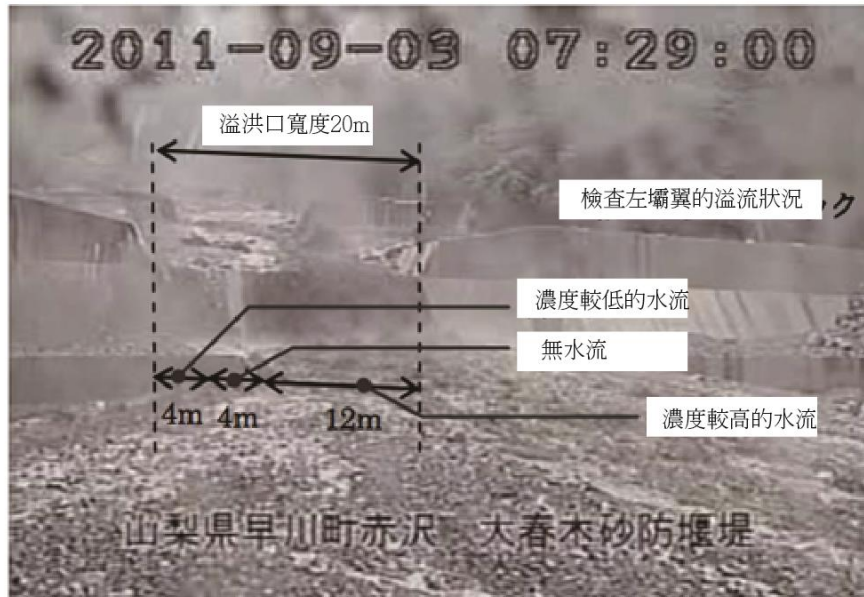


圖2.7 溢洪口溢流範圍的解讀方法

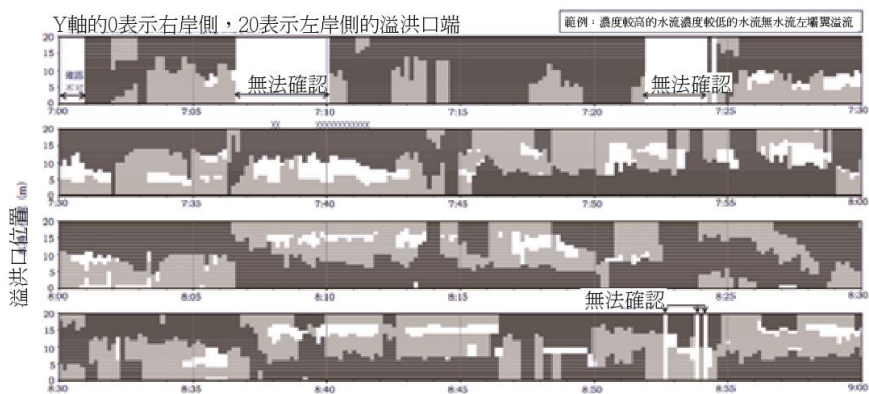


圖2.8 颱風12號9/3的7:00～9:00間防砂壩溢洪口的溢流狀況

- * 黑色表示水流顏色較濃，土砂有產生移動的範圍
- * Y 軸的 0 表示右岸側，20 表示左岸側的溢洪口端

（本圖由國土技術政策綜合研究所砂防研究室參考以富士川砂防事務所的資料製成）

2.7 合流點的影響

從陡坡降溪流流入大量土砂到坡降相對緩和的主流河道後，在主流與支流的合流點附近有時就會發生河道堵塞等複雜的土砂移動現象¹⁾。另外在進行解析時，有時也會發現在合流點附近有大量土砂發生異常堆積的情形。因此在考慮到陡急坡降的溪流連結主流時的土砂動態，以及陡急坡降溪流所帶來的土砂供給現象時，必須要先檢查其解析結果，確認在解析結果中是否有正確表現出合流點特有的土砂動態。

此外，若因洪水時間點的不同或是流域面積的差異，造成在合流點之主流水位比支流末端水位還高時，支流末端的推移力將會減少，反而會使原本應該要流入主流的土砂從支流末端開始產生堆積與逆流^{2) 3)}。由此可知，要預測合流點附近的土砂洪水氾濫災害的詳細情形時，重要的是要將合流點附近的複雜土砂動態列入考慮後再進行解析。有時若很難同時解析計算對象領域內所有合流點所發生的複雜土砂動態時，最好還是能夠考慮到保護對象的位置後，將需要優先檢查的合流點領域切割出來討論。

若只限於合流點附近的話，透過二維平面的解析、或是利用連結主流河道與支流的網路模型所進行的一維解析，在某種程度上可預測出合流點附近的詳細災害情況⁴⁾（參考資料 2）。此外，若利用主流水位來設定支流下游端的水位，也能在一定程度上表現出支流產生堆積與逆流的現象。再者，洪水發生的時間點所造成的影響對於解析合流點的土砂動態來說極為重要，其可透過敏感度分析等方法來進行解析。



圖 2.9 合流點所發生的土砂堆積與氾濫狀況（湯澤砂防管轄內）

【参考文献】

- 1) 水山高久・井良沢道也・小林幹男・酒谷幸彦(1990):山地河川における河床変動の実態,砂防学会誌, 43(4), 27-32.
- 2) 増田覚・水山高久・小田晃・大槻英樹(2008):本支川の出水のずれによる合流点の河床変動に関する研究, 砂防学会誌, 61(4), 27-31.
- 3) 水山高久(2003):わかりやすい砂防技術(4) 土砂の流出,堆積,砂防と治水, 36(3),74-75.
- 4) 中谷加奈・前田大介・坂田拓朗・水山高久・里深好文(2012):支川合流を考慮した土石流数値シミュレーション手法の検討, 平成 24 年砂防学会研究発表会概要集, 78-79

3. 設定發生豪雨時的土砂動態條件的注意事項

3.1 土砂的供給條件

3.1.1 土砂的供給量及供給地點

一般而言，土砂供給量的設定方法有兩種。其一為以現場調查與過去發生豪雨時土砂生產的實態為根據的設定方法，另一種則為利用數值計算等解析面的設定方法。

現階段要在發生災害前正確預測斜面崩壞、溪岸侵蝕及崩塌、土石流的發生位置等現象並不容易。尚且，要針對 1 級集水區等所有河道進行解析會需要龐大的人力與時間。土砂供給形態又有經由坡面崩塌、溪岸沖蝕及崩塌等從坡面與溪岸直接流入河道的類型，以及因為發生土石流而從溪流流入等多種不同形態。因此在設定土砂供給地點時，必須要在總合面評估過去發生災害時的崩壞現象與土石流的分布狀況、生產土砂量的空間分佈、土砂生產型態、各種調查結果、計算對象區間的設定狀況等各種要因後，再進行適當的設定。

[參考] 土砂供給量的設定方法

以現場調查與過去發生豪雨時的土砂生產實態為準則設定土砂供給量的方法可參考國土交通省河川防砂技術基準（計畫篇）的第 3 章第 2 節「2.24 計畫土砂量等」與國土交通省河川防砂技術基準（調查篇）的第 17 章「防砂調查」。

【參考文獻】

- 1) 河川防砂技術基準（計畫篇）
- 2) 河川防砂技術基準（調查篇）

[案例] 設定土砂供給地點

如 2.1 所示，評估區域範圍最好能夠盡量靠近土砂生產區域。但要將所有土砂生產源到下游的區間都視為解析對象的話，從篩選生產源與計算負荷的觀點來看，會需要用到龐大的人力與時間。此外，在河床坡降極陡的區域中，目前與土石流相關的解析事例並不多。

因此在現實作業上要設定主流的評估區域範圍時必須要考慮到流域面積與河床坡降後再進行設定（圖 3.1 的黑色實線河道）。舉例來說，可以將被認為會使土石流產生堆積的河床坡降（ 10° 以下）約略視為含在計算區間內來看。再者，當支流的流域面積與主流計算區間的上游端流域面積大小幾乎相同時，由於其會對土砂流出造成不小的影響，因此會與主流相同，將支流也設定為計算對象河道（圖 3.1 的藍色實線河道）。此外，即使支流的流域面積比主流計算區間的上游端流域面積還小，只要該支流的流域面積較大時（圖 3.1 的黃色流域）也會影響到土砂流出現象。如此一來便可以將規模較大的支流與計算對象河道的合流點設為側邊的供給點（圖 3.1 的藍色三角），利用支流來表現土砂流出現象。由上述可知，當透過溪岸侵蝕現象產生土砂供給時，土砂會直接流入河道中。

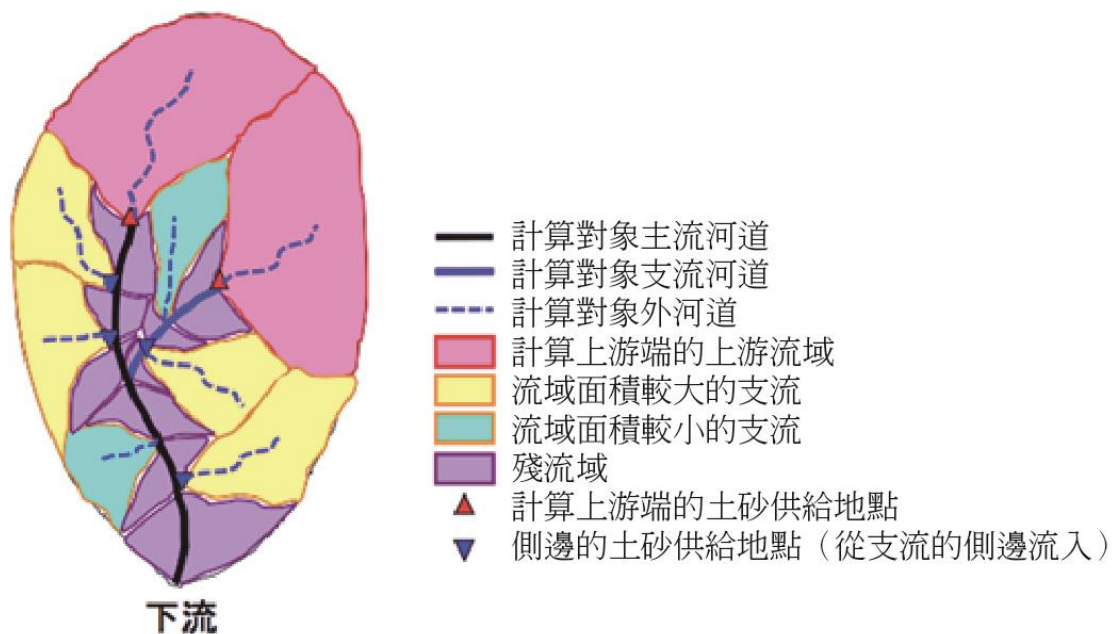


圖3.1設定土砂供給地點的範例

[案例] 信濃川水系魚野川流域內的河床變動相關調查事例

據調查結果指出，溪岸崩壞及溪岸侵蝕在作為土砂的供給形態上發揮了很大的作用¹⁾。下述為利用雷射剖面儀數據調查平成 23 年 7 月新瀉福島發生豪雨時魚野川水系登川主流河床變動量的調查結果（圖 3.2）。由圖可知，在同一河道中除了河床的侵蝕及堆積現象之外，也因為溪岸崩壞與溪岸侵蝕現象生產了大量的土砂。

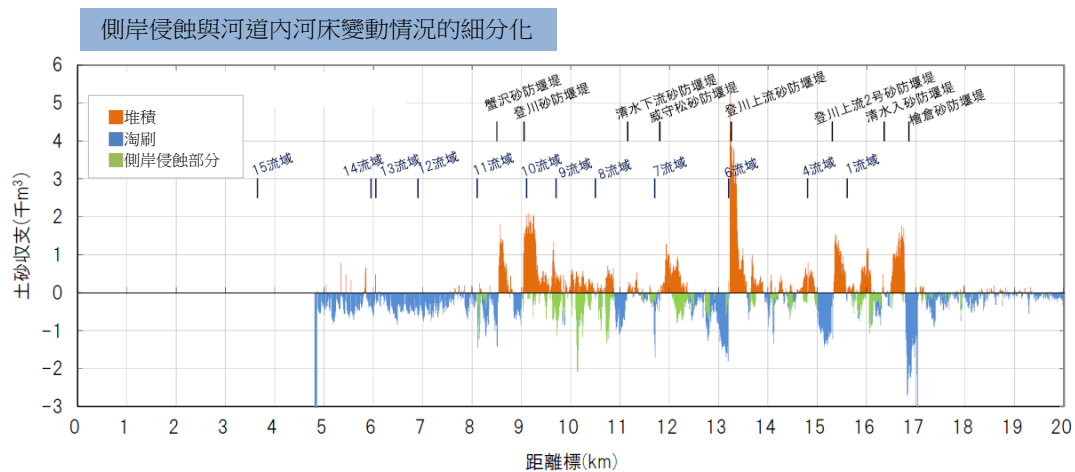


圖 3.2 平成 23 年 7 月新瀉福島發生豪雨時魚野川水系登川主流的河床變動
（以湯澤砂防事務的資料為基礎所製成 國土技術政策總合研究所砂防研究室）

【參考文獻】

- 1) 例えば、水山高久(2003):わかりやすい砂防技術(3) 土砂の生産,砂防と治水, 36(2),64-65.

3.1.2 土砂の供給時間點

發生豪雨時供給河道土砂的過程，主要是從坡面所發生的崩塌與土石流供給土砂，一般而言會集中在總雨量或是降雨強度較大的時間帶。此外，即使是在河床上堆積大量不穩定土砂的陡坡降的溪流中，透過觀測以及水路實驗可發現到在河道中還是會有間歇性的土砂供給現象^{1) 2)}。

不過在既有的計算事例中，大多的案例都是單純假設為在洪水發生期間內，評估範圍之上游端一直都是處於平衡供砂的狀態³⁾。另一方面，也有案例是以訪問居民的調查結果為基礎，將土砂供給時間點考慮進去後再實施河床變動計算，藉此成功的重現發生洪水後的河床變動高度⁴⁾。再者，即使土砂供給的總量相同，只要改變土砂供給的時間點便可發現到往下游方向的逕流土砂量與河床變動高也會有所改變⁵⁾（參考卷末參考資料 1）。

由上述可知，調查土砂生產的實際時間點非常重要⁶⁾，而考慮土砂生產的時間點後再設定土砂供給的條件也同等重要。再者，若在土砂生產的時間點上無法得到充分資訊時，也可在預測的範圍內進行敏感度分析。

【參考文獻】

- 1) 今泉文寿・土屋智・逢坂興宏(2002):荒廃溪流源頭部の砂礫堆積地における土石流の発生と流動過程の観測, 砂防学会誌, 55(3),p.50-55
- 2) 池田暁彦・水山高久・杉浦信男・長谷川祐治(2009):土石流発生源における溪床堆積土砂の変形に関する実験的研究, 砂防学会誌, 62(4), 46-51
- 3) 例えば、赤沼隼一・小山内信智・安田勇次・嶋大尚(2002):平成 11 年 9 月 15 日重信川流域土砂災害における砂防施設効果, 砂防学会誌, 55(2), 43-51
- 4) 栢木敏仁・水山高久・佐藤一幸・村上正人(2007):土砂生産のタイミングを考慮した土砂生産・流出に関する研究, 砂防学会誌, 59(5), 15-22.
- 5) 丹羽諭・内田太郎・蒲原潤一・里深好文(2014):土砂生産のタイミングが河床変動に及ぼす影響に関する数値計算, 第 7 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 181-186
- 6) 水山高久(2003):わかりやすい砂防技術(3) 土砂の生産,砂防と治水, 36(2), 64-65.

[參考] 產生土砂供給時土砂濃度的概念

至今為止在山地流域的多數土砂流出解析中，在計算區間的上游端均為使用該處的水理條件與河床材料，將土砂設定為在透過輸砂理論所決定的平衡濃度及平衡輸砂量的條件下流入來進行解析。

若如本節所示，在以考慮到土砂供給的時間點為前提下，發生土砂供給時所供給的量為利用土砂供給點附近的河床坡降、水理條件、供給土砂的粒徑所決定的平衡輸砂量時，有時在進行解析時，可不需要將供給河道的土砂供給量與透過現場調查或是過去發生豪雨時的土砂生產實態為準則所設定的土砂供給量作整合。而不作整合的原因為，可能會從上游流域流出的可移動土砂量或是發生豪雨時因為斜面崩壞等現象所造成的生產土砂量在與計算上游端中透過流量、坡降、粒徑等因素所決定的可搬運土砂量相比之下，其輸砂量都太過少量。因此在這種情況下若要與過去發生豪雨時的現象進行整合，就不能將土砂供給量設為該處的平衡輸砂量，必須要重新評估土砂供給的時間點（例如集中在發生洪水的前期等）、計算對象區間，或者是側邊流入點以進行相關對應作業。

3.1.3 粒徑

因為斜面崩壞或是土石流等現象所產生的土砂大部分都會與洪水前堆積在山地流域內的河床上之土砂粒徑有所差異（圖 3.3）。因斜面崩壞或是土石流所產生的土砂中，細粒的部分會在洪水期間中流下，並不會堆積在河床上¹⁾。因此在評估範圍之上游端供給土砂時，必須要考慮到生產土砂與河床堆積土砂的粒徑差異才行。也就是說，在決定供給土砂與河床的土砂粒徑分布時，最重要的是要先進行山腹、溪床、溪岸等土砂生產源的粒度分佈調查以及河床堆積物護甲化的相關調查²⁾，接著再以調查結果為基礎來做決定。

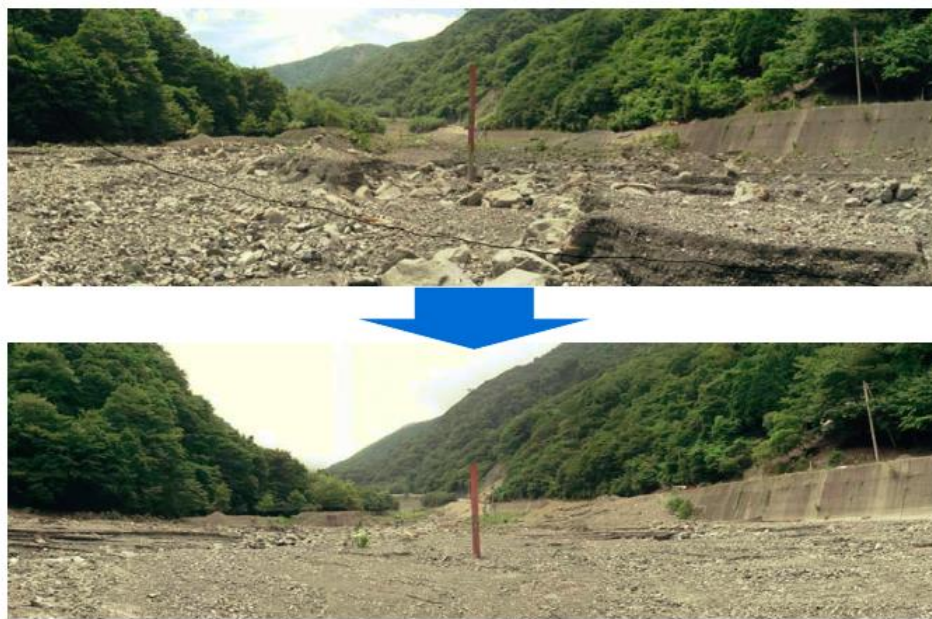


圖 3.3 河床粒徑隨著大量土砂生產而產生變化的事例（富士川砂防事務所管轄內）

【參考文獻】

- 1) 水山高久(2003):わかりやすい砂防技術(3) 土砂の生産,砂防と治水, 36(2), 64-65.
- 2) 水山高久(2003):わかりやすい砂防技術(4) 土砂の流出、堆積,砂防と治水, 36(3),74-75.

[參考] 發生大規模洪水時預測會產生堆積的土砂與河床材料粒度分布的調查案例

圖 3.4 為平時有流水的區間內河床的土砂粒度分布調查結果與發生大規模洪水時預測會產生堆積的土砂粒徑分布調查結果。所使用的調查方法記載於蒲原等人（2014）的著作¹⁾中。由圖可知，比較兩者的粒徑可以發現到若只看中央粒徑的話，有時會相差到 2 個 Order。

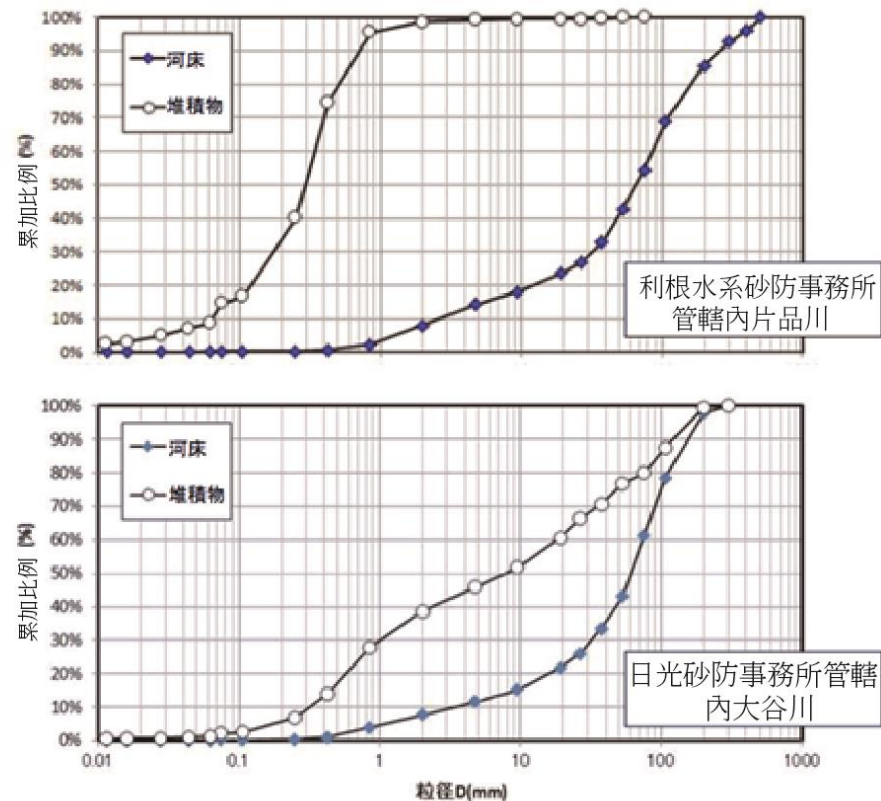


圖3.4 發生大規模洪水時預測會產生堆積的土砂與河床材料的粒度分布比較圖
（國土技術政策總合研究所砂防研究室製成）

【參考文獻】

- 1) 蒲原潤一・内田太郎・林真一郎・奥山悠木・丹羽論・吉村暢也(2014):
ハイドロフォンを用いた掃流砂流出特性の分析, 平成 26 年砂防学会
研究発表会概要集,B62-B63

3.2 水理供給條件

3.2.1 降雨條件

在預測與保護對象相關的土砂及洪水氾濫災害時，必須要根據保護對象的位置來設定降雨條件。若保護對象的上游流域有著較小的流域面積，當遇到降雨區域窄小的集中性豪雨時，該流域內就有可能出現極大的平均降雨強度。

再者，若保全對象所在區域之上游流域有著較大的流域面積時，即使在流域內的部分區域遇到降雨區域窄小的集中性豪雨，也會由於流域內其他地區的降雨強度較小的關係使得流域的平均降雨強度變小。在上述這種降雨分佈的情形下，該保全對象受到災害的可能性並不高。但在另一方面，即使沒有在局部區域出現降雨強度很大的領域，若當發生降雨區域廣泛到可以覆蓋流域全體的降雨現象時，由於流域內的平均降雨強度較大，保全對象在這種情況下受到災害的可能性反而會比較高。

也就是說，即使是在相同地域、相同的降雨發生機率的條件下，有可能發生災害的流域、平均總降雨量、降雨強度、降雨分佈、降雨波形等因素也會因保全對象在流域內位置的不同而有所差異（圖 3.5）。因此在計算特定發生機率的災害時，必須根據位置的不同來區分保護對象，並以每個區塊內過去的實際紀錄為根據分析其降雨規模與發生機率，再決定每個區塊在計算時所需用到的降雨規模、降雨波形，以及空間分佈。

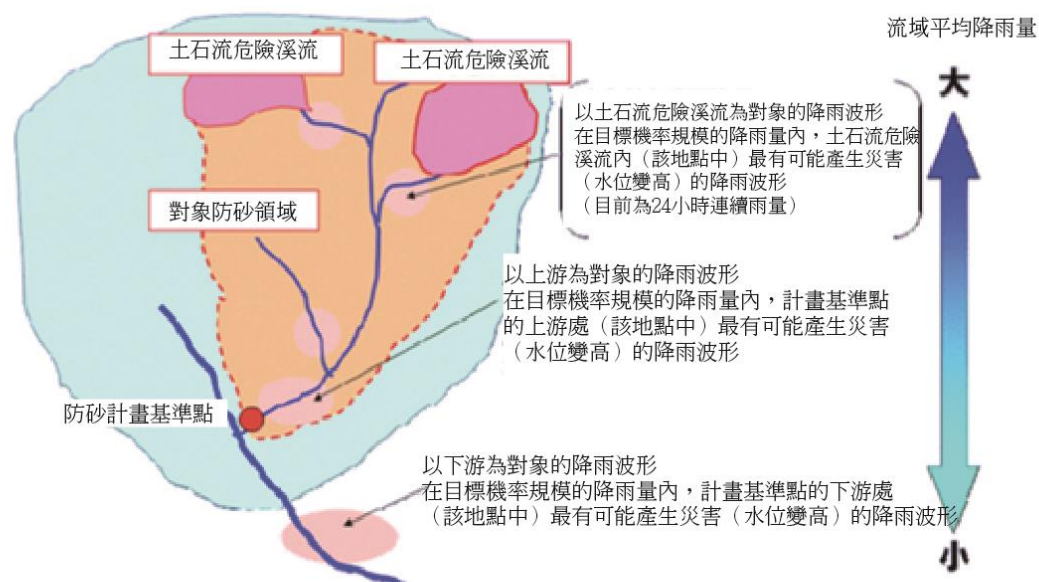


圖3.5 降雨波形的概念圖

3.2.2 逕流分析

為了設定流入研究範圍區間內的水量，必須透過逕流解析算出水文歷線。而在設定水文歷線時必須特別注意山地流域逕流特性與下游平原河川的逕流特性有著很大的差異^{1) 2)}。

【參考文獻】

- 1) 水山高久(2003):わかりやすい砂防技術(1) 山地河川(溪流)の特徴,砂防と治水,35(6), 52-53.
- 2) 友村光秀・佐藤悠・内田太郎・松本直樹・蒲原潤一(2015):急峻で企画的規模の大きい山地流域の洪水流出に関するデータ収集と分析,平成27 年度砂防学会研究発表会概要集,B456-B457

[參考] 設定計算上游端的水文歷線時的注意事項

在解析伴隨豪雨所產生的土砂流動時，大多會以能夠整合某一地點事前預測的流量規模與過去觀測結果的方式來設定其解析條件。在設定計算上游端的水文歷線時，重要的是要考慮到從計算上游端到該地點為止的洪水波形的傳播時間，以及從計算上游端到該地點為止的區間內因為土砂堆積所減少的水量等因素後，再設定。

[例示]

若以 3.1.1 的例示中所說明的方法設定土砂供給地點時，如果在土砂供給地點中以流域面積為基準，供給水量將會無法充分表現出從殘流域供給水量的狀況，進而在流域整體上低估水的供給量。因此必須要將整體領域的水量流出都列入考慮，包含沒有供給土砂且流域面積較小的支流合流點與殘流域。如圖 3.6 所示，在殘流域供給水量的方面，可透過將水量平均分割於與殘流域所連接的河道區間後，再進行供給的方法供給水量。

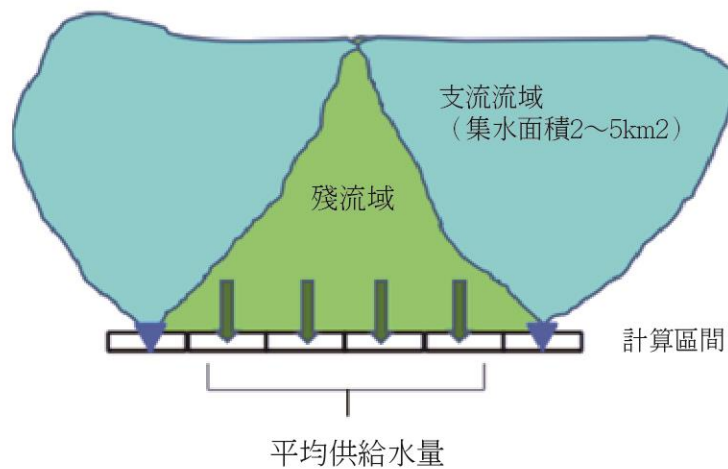


圖3.6從殘流域供給水量的方法（概念圖）

3.3 河床條件

在山地河道內有著各種的河床條件。舉例來說，在評估範圍區間，有裸露岩盤的河床處、有橫向工作物的位置、還有被大粒徑土石所覆蓋的區域內，基本上都不會產生沖蝕現象，而在進行解析時可以將這樣的區間視為定床來處理。

另一方面，在河床上有堆積可移動土砂的區間，一般則會視為動床來進行計算，而在此處的沖蝕可能深度以及粒徑的設定均有可能對計算結果造成很大的影響。因此除了必須要透過以往的實測值與現場調查，以土砂動態的實態為根據來設定沖蝕可能深度之外，也必須以「3.1.3 粒徑」中所示之調查結果為基礎，將護甲化的現象考慮進去後再設定粒徑。

4. 直接評估設施在災害範圍內所產生之成效的注意事項

4.1 評估對策的成效

在藉由評估工程措施來表現對策的成效時，重點為使用可以評估各種設施所具備之功能的方法來進行。

若要評估在計算區間內的防砂壩之成效時，必須要將淤砂狀態及防砂壩型式考慮進去後，再進行相關分析會較為理想。再者，對於評估範圍外之防砂堰壩的成效，由淤砂狀態、防砂壩的型式，及從對象設施到評估對象所在範圍之間的狀況等，推算對評估區域範圍的土砂供給量，並且比較當無該設施狀態之土砂量，所減少的土砂量來算出。只不過若根據其條件將河道設為近似於矩形斷面，並將計算時的空間增量設為不變的話，計算的效果量就有可能會比實際上所期待的效果量還要小。因此，在進行條件設定時，最重要的便是要能整合實際上在防砂壩位置所期待得到的效果量與計算上所算出的效果量。

在評估預期發揮土砂生產抑制功能的設施時，可透過將無設施狀態下的土砂量減去流向計算區間之土砂供給量的方式來進行評估。此外，在評估預期防止計算對象區間內發生溪岸沖蝕的設施時，也可利用相同的方法減去土砂供給量來進行評估。

在評估具有像固床工一般，可控制河床變動之功能的設施時，可將該設施的位置設為固床工來進行評估。

【參考文獻】

- 1) 里深好文・水山高久(2005):砂防ダムが設置された領域における土石流の流動・堆積に関する数値計算, 砂防学会誌, 58(1), 14-19.

[範例] 算出評估範圍內防砂堰壩效果的方法之案例

此處將算出計算區間內防砂壩效果的方法之案例，整理為如表 4.1 所示。

表 4.1 一般情況下處理計算區間內的防砂壩之事例

防砂壩種類	處理方法
封閉型（淤滿）	將防砂壩本體位置視為定床，在淤砂區域的部分則將淤砂區域的地形設定為計算條件。
封閉型（未淤滿）	利用里深及水山（2005） ¹⁾ 的計算方法等。
土石流區間的開口型	與封閉型（未淤滿）相同。
推移質區間的開口型	設定可表現堵塞後逆流現象的地形條件或是邊界條件。

4.2 下游河道的條件

在評估防砂工程作業會對下游河道的河床變動所造成的效果及影響時，必須要根據評估的目的來進行相關設定作業，並且注意以下事項。

若將非防砂工程作業對象的下游河道設為動床的話，就有可能會因為下游河道產生沖蝕與再堆積的現象，導致與上游河道沒有關係的河床上升現象，並進而造成土砂及洪水氾濫現象。因此，為了可以直接評估上游流域的中期設施整備所造成土砂的生產抑制、捕捉、調節對於災害的影響，必須要將非該防砂工程作業對象的下游河道設為定床，並注意相關的河床條件。另一方面，在評估現階段有無設施對災害所造成的影響時，可利用現狀的河床條件來評估有無設施時產生災害的程度差異。

[參考] 下游河道斷面形狀的概念

在以「砂防事業的成本效益手冊（草案）」為準則，分析防砂工程作業的效果時，在進行治水對策的河川工程區間內，基本上會採用對應河川整備基本方針中所示之計畫流量規模的河道斷面。但若這樣的河道斷面不存在，或是不明確時也可直接使用現況的河道斷面。當採用對應河川整備基本方針中所示之計畫流量規模的河道斷面，並考慮到堤防超高，即使發生超過計畫規模的流量，也有機會可以透過上游流域的設施所帶來的土砂生產抑制、捕捉、調節等效果，避免發生相關災害。因此為了直接評估上游流域的設施所帶來的土砂生產抑制、捕捉、調節等效果對於災害造成的影響，有時便必須要依照河川整備基本方針中所示，進行以計畫流量規模為標準，僅考慮清水之分析，假設評估的河道斷面等，並注意河道形狀等

。

結語

近年來由於在山地河道進行了輸砂水文觀測作業，對於土砂流動現象有更進一步的理解¹⁾。再者，透過活用雷射剖面儀，能較以往更精準推測出 1 次洪水期間中的流動土砂量²⁾。除上述之外，透過近年來其他的調查及觀測作業也可望持續闡明山地流域內複雜的土砂移動現象之實際狀況。一旦闡明此種複雜的土砂移動現象之實際狀況後，能夠為在山地流域中發生豪雨時的土砂流出解析作業帶來新的進展。

另一方面，現階段仍有些被認為是重要過程的土砂動態，至今都尚未針對其分析方法進行探討。例如在流動過程中因磨損及破碎現象所造成的粒度變化³⁾等。再者，若在考慮到堰塞湖的潰決所造成水及土砂、漂流木的流動現象的話，就必須要再根據其檢討對象增加新的注意事項才行。

之後的研究，最重要的便是掌握土砂移動現象的特徵，依據掌握之特徵考慮改良分析方法以及探討數值解析的應用（條件設定等）。

【參考文獻】

- 1) 例えば、田中健貴・内田太郎・蒲原潤一・桜井亘(2015):近年の山地流域における流砂観測による成果と課題, 土木技術資料 57(7), 22-25
- 2) 例えば、鈴木豊・鈴木崇(2009):滑川北股沢における土石流の観測体制について、砂防学会誌、61(6), 43-46.
- 3) 小菅尉多・水山高久(2001):河床砂礫の流下に伴う粒径減少に関する考察, 砂防学会誌, 54(1). 39-47.

參考資料解析案例

參 1. 富士川水系支流的春木川分析案例

以下說明富士川水系支流春木川的分析事例。透過發生洪水前後的航空雷射測量，詳細掌握春木川之河床變動狀況以及土砂量通過前後的河川縱向面變化（圖 A.1 的黑線）。此外，也透過砂面計來觀測洪水期間中的河床變動（圖 A.2 的黑線）。藉此可重現此處的河床變動狀況以及土砂量通過的河川縱向變化，並進行相關數值解析。

在案例 A 中透過以下作業來進行解析。

①透過 CCTV 影像判定土砂供給的時間點

②以陡坡降範圍為對象，藉由比較河床內部剪應力與剪應強度來評估河床材料的移動臨界點

③利用河制定理設定水流寬幅

實測結果發現成效良好，可概略重現出流動產生土砂量、河床變動高，以及河床變動的時間變化（圖 A.1）。此外也能在一定程度上重現洪水期間中的河床變動狀況（圖 A.2）。

接著在如①的條件，不考慮土砂供給的時間點，於洪水期間中持續提供土砂的案例 B，則是過於低估春木川第二防砂壩淤砂區域的河床變動高，但其流動產生土砂量與案件 A 大致相同（圖 A.1）。此外，在發生第二次洪水的颱風 12 號時則完全沒有產生河床變動，反映出與實際狀況不同的結果（圖 A.2）。

在②中所示，案例 C 的條件為沒有進行土石流及推移值集合搬運區間之河床沖刷的相關控制作業，其逕流土砂量與實測值概略一致。但卻有低估春木川第二防砂壩的河床變動量、以及高估春木川第一防砂壩的河床變動量，以及下游流域出現了過量的沖蝕之現象（圖 A.1）。此外，在發生第二次洪水的颱風 12 號期間，則產生了劇烈的侵蝕現象，反映出與實態不同的結果（圖 A.2）。

在③中，當案例 D 為用固定的河床變動寬來處理不同的水流寬幅時，在春木川第二防砂壩出現了過量堆積的現象，結果造成流動產生之土砂量只有實測值的一半左右。但在河床變動的時間變化上和案例 A 相同，有表現出觀測值的特徵。

再者，案例 E 將高橋的堆積速度公式中的堆積速度係數設為 0.1 倍，結果低估了仲島防砂壩淤砂區域的河床變動高，但在往早川方向的土砂流出生產量則約略等同於實測值。

其他關於解析的詳細內容可參考丹羽等人（2014、2015）^{1) 2)}。

【参考文献】

- 1) 丹羽諭・内田太郎・蒲原潤一・里深好文(2014):土砂生産のタイミングが河床変動に及ぼす影響に関する数値計算,第 7 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 181-186
- 2) 丹羽諭・内田太郎・蒲原潤一(2015):山地河川における豪雨時の土砂流出特性を考慮した河床変動計算,土木技術資料,57(5),6-9

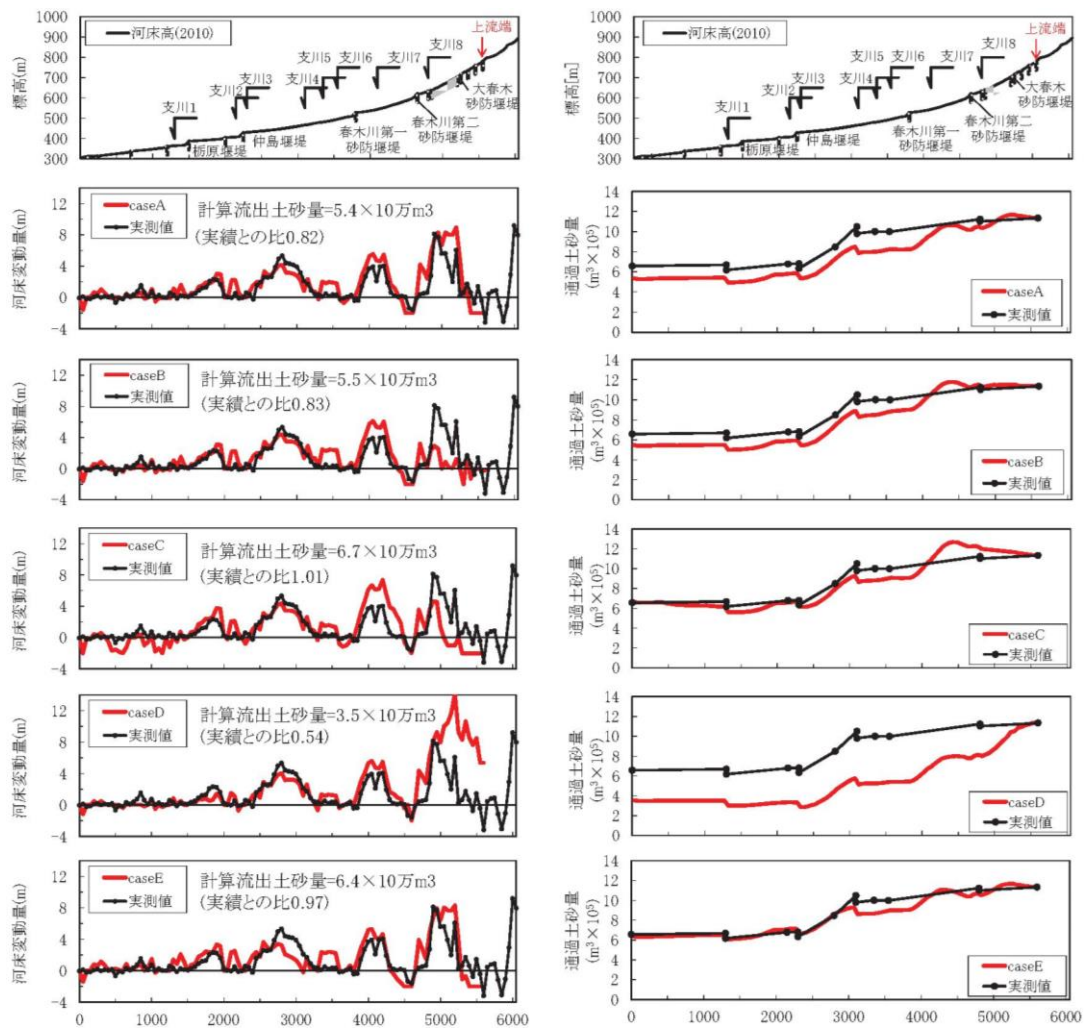


圖 A1 比較解析結果與實測值（左：河床變動量，右：通過土砂量）

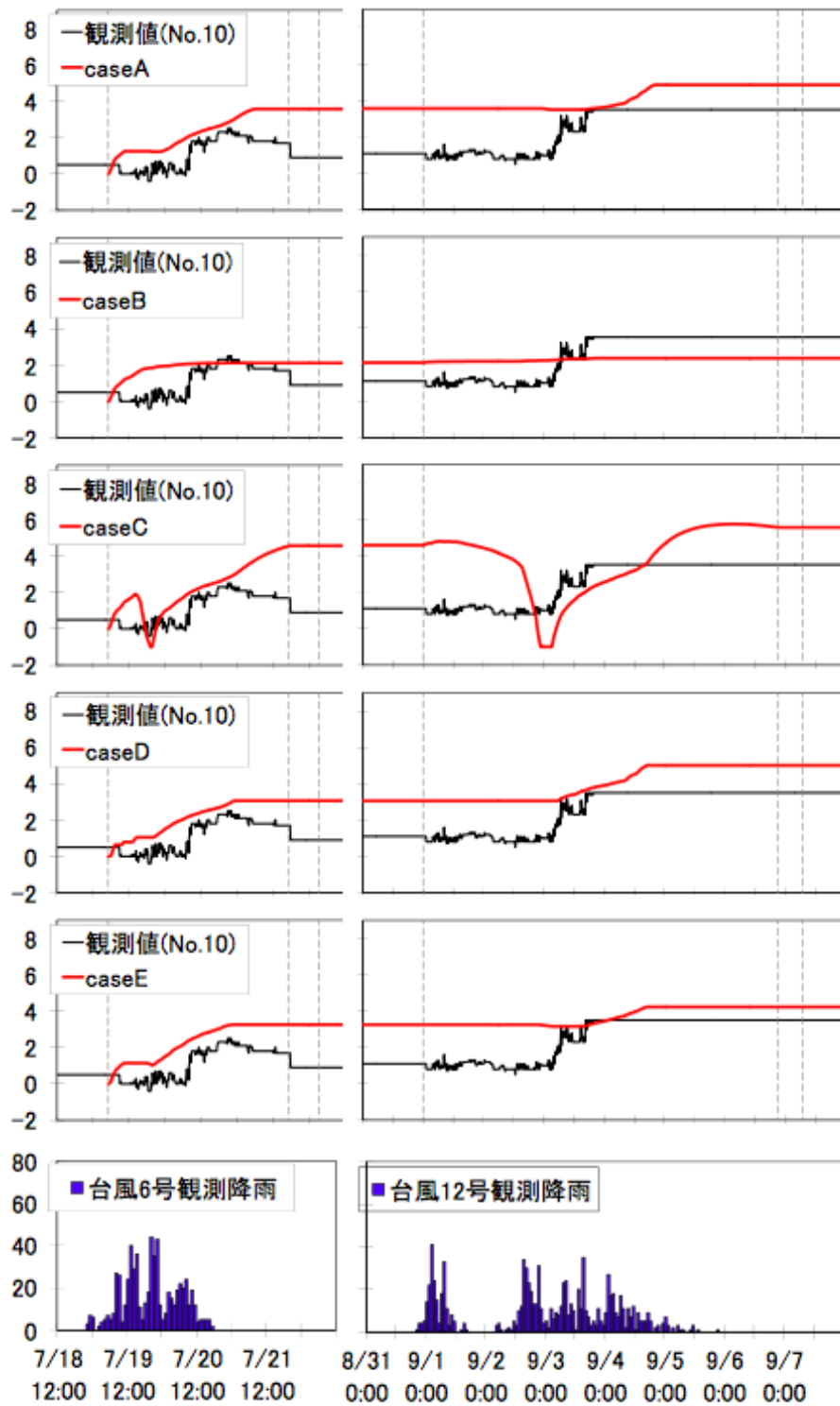


圖 A2 比較解析結果與實測值（河床變動量的時間變化）

參 2. 分析主流水位的差異對支流下游水位與河床變動造成影響之案例

下表為在 5000 秒的時間內供給主流河道固定流量，以所得到的水位為基準，逐次設定下游端水位的計算案例。再者，此處將合流角度設為 30 度。由結果可知，主流流量不同的情況下，即使支流流量與土砂供給量不變，對支流下游部的堆積形狀及水位仍會產生很大的差異。

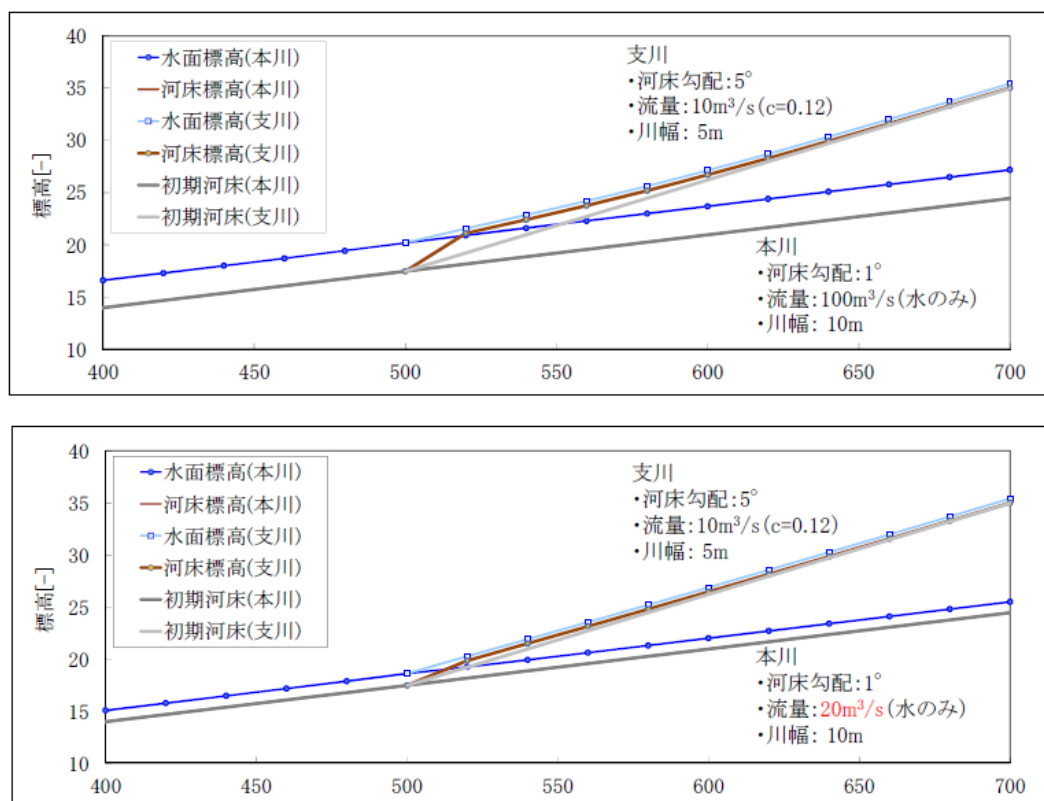


圖 A3 主流水位不同對支流下游部水位及河床變動所造成的影響之解析結果
(國土技術政策總合研究所砂防研究室製成)

國土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 904 April 2016

編輯・発行 國土技術政策総合研究所

欲轉載、複製本資料請洽詢以下單位

〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地

企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675

編譯：水土保持局技術研究發展小組

Research and Technology Development Team, SWCB, COA

December 2018

本文件之翻譯及轉載，均符合日本著作權法相關規定。