

第6章 河床變動、河床材料變化與土砂輸送之分析

目 次

第 1 節	總說	1
1.1	定位與目的	1
1.2	分析法的基本架構	1
1.3	分析層次	2
1.4	分析的實施順序	3
第 2 節	配合目的的分析層次設定	4
第 3 節	計算方法的設定	7
3.1	配合分析層次之計算方法選定	7
3.2	流動計算方法的設定	7
3.3	河床形狀計算方法的設定	7
3.4	粒度分布計算方法的設定	8
3.5	推移質計算方法的設定	10
3.5.1	均一粒徑的推移質	10
3.5.2	混合粒徑的推移質	14
3.6	捲升量（或基準面濃度）計算方法的設定	15
3.7	土砂濃度分布計算方法的設定	17
第 4 節	各種條件等的設定	19
4.1	配合分析層次條件等的設定	19
4.2	河岸、高灘地、堤防等河道地形的設定	20
4.3	植物、構造物等水理作用的設定	20
4.4	構造物或河岸等輸砂計算條件之設定	21
4.5	水位・流量相關邊界條件的設定	22
4.6	供給土砂與河道外搬出、搬入的條件設定	22
4.6.1	供給土砂的設定	22
4.6.2	往河道外搬出、搬入的設定	24
4.7	河床高程、河床材料初始條件的設定	25
第 5 節	分析的實施與驗證・調整	25
5.1	分析的實施	25
5.2	分析的驗證與調整	25
5.3	分析與調查併行時的驗證與調整	26

第 6 章 河床變動、河床材料變化與土砂輸送之分析

第 1 節 總說

1.1 定位與目的

<概 說>

本章主要以沖積河川（河段 1、2、3）為主要對象，說明河川等地計畫・設計・維護管理、河川環境保全、綜合土砂管理等所需的河床形狀或河床材料變化，以及土砂輸送分析相關基本事項。

用分析對象之這些狀況的實態調查，參照第 4 章 河道特性調查。本章針對繼續應用第 4 章調查成果及第 5 章 河川洪水流水理分析所介紹水理分析方法，卻仍無法掌握其實態的將來狀況、河川等的計畫・設計・維護管理等種種尚不明瞭的狀況，以及數據與資訊不足而無法達到必要程度實態掌握之過去狀況，提出預測、情境模擬・感度分析、現象重現、觀測與調查資訊的補充分析方法。

分析對象之中，河床形狀的變化對流動能力之掌握或實施河川構造物管理乃必要時，河床材料（特別是表層）的變化，則有助於檢討河川中生物的棲息・生長狀況。

另外，土砂輸送、河床變動（動床）與河床材料變化，為構成一連串河道形成系統的主要要素，進行分析應先掌握這 3 種要素，以及造成變化主因的洪水狀況，然後適度地實施分析、活用其結果。

1.2 分析法的基本架構

<概 說>

圖 6-1-1 分析方法的基本架構。

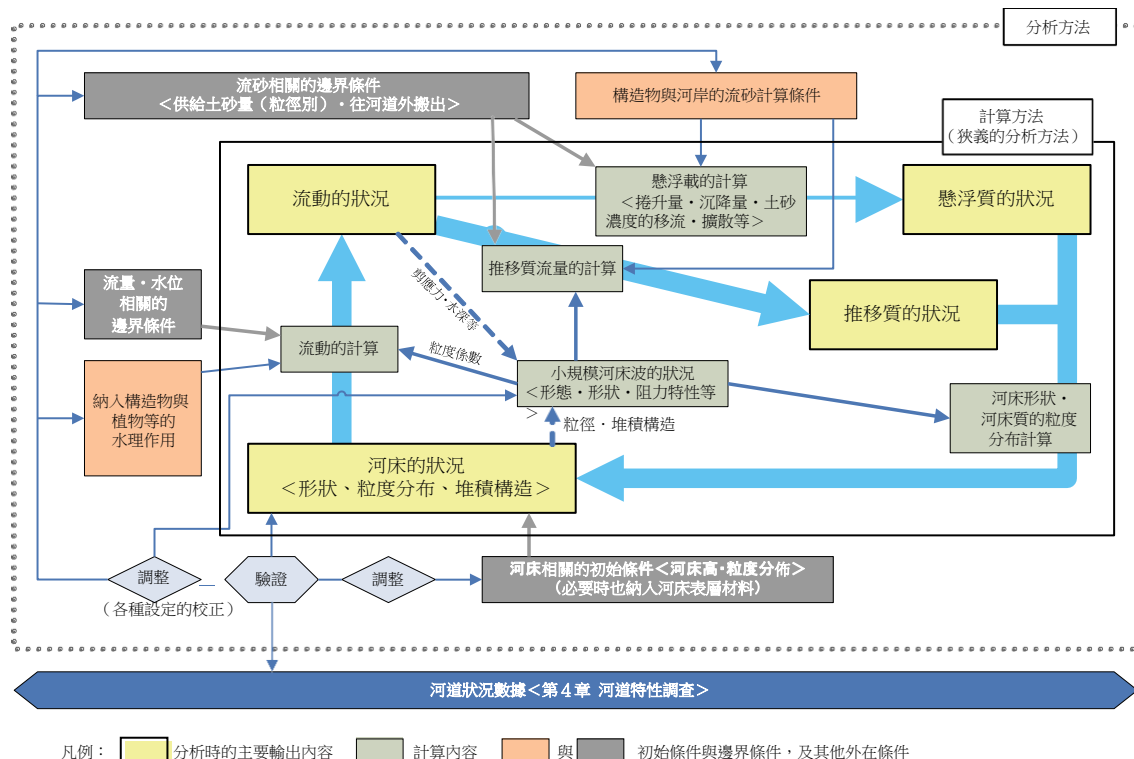


圖 6-1-1 河床變動、河床材料變化與土砂輸送分析方法的基本架構

進行分析時，首先應運用河道特性調查（第 4 章）等所得到之調查結果，設定分析對象之河床部河寬、平面形狀及包圍河床的高灘地等的形狀，依河床部初始條件的河床狀況加以組合，在所給的流量、水位相關邊界條件下，進行流量計算。

若需考量構造物或植物對水流與土砂輸送之影響，則在計算其流動、推移質、懸浮質、河床等時，將該作用納入考量。

此外，也需考量輸砂與水流相互作用所形成之小規模河床波（參照第 4 章 河道特性調查 [3.3.2](#)、本章 [3.5](#)）所帶給輸砂量與粗糙度等的影響。

根據上述所掌握的水流狀況與河床狀況，計算推移質與懸浮質。在此，應將供給土砂以及河道的搬出與搬入等輸砂相關的邊界條件反映出來。

又，河床面的粗糙度設定特別對推移質輸砂量計算之顯著的影響（本章 [3.5](#) 後述）。

依據各該計算所掌握的推移質與懸浮質狀況，計算其造成的河床形狀變化與河床材料粒度分布等變化。此時，若有會決定河床形狀與河床材料粒徑變化的構造物與河床等條件，應將這些狀況整合進來。

經由上述計算，在流沙現象持續一段時間後，可得新的河床狀況。應用支配現象之基本方程式群實施數值計算方法，了解所需的時間長度，可連續掌握過程的水流、推移質、懸浮質、河床各種狀況的時間變化。

河床狀況的計算項目包括河床形狀與粒度分布。此外，設定初始條件或在堆積過程中計算（本章 [3.4](#) 後述）粒度分布之垂直變化，變成是河床狀況的另一計算對象「堆積構造」的定量解析方法之一。

上述各項計算的結果都需進行驗證，必要時進行各該設定的調整。

上述整體做法稱為「分析法」，其中的基本方程式群，以及以該方程式群輸出而構成的所謂數值計算模型部分，稱為「計算法」，兩者有所區別。

本章除了計算法之外，也說明初始・邊界條件等的設定，以及包含驗證・調整在內的分析法。

1.3 分析層次

<概 說>

分析層次乃是說明流動、輸砂（推移・懸浮）、河床形狀・粒徑變化等各種現象的解析度與範圍，可用下列 4 種項目層次，組合起來說明分析法的範疇。

1) 河床高程的分析層次

河床形狀相關分析層次，以一維／二維的二種層次進行設定。

一維可取得平均河床高程之河床縱斷方向分布的時間變化。二維可取得河道縱橫斷方向河床高程平面分布的時間變化。

2) 粒徑的分析層次

河床材料粒度分布相關的分析層次，乃是以均一粒徑／混合粒徑二種層次進行設定。

均一粒徑指河床材料由單一粒徑構成，同地點與時間的粒徑都視為相同地進行分析。混合粒徑則是河床材料由另外設定的一定粒徑範圍內的粒徑成分所構成，因此應針對不同場所與時間的粒度分布變化進行分析。

3) 輸砂的分析層次

輸砂輸送型態相關的分析層次，係以只有推移質／推移質與懸浮質（混合型・通過型）的二種層次進行設定。

「只有推移質」指處理只有推移型態的輸砂量。「推移質與懸浮質」則處理推移・懸浮二種型態。

此外，懸浮型態的輸砂可區分為混合型與通過型（所謂的沖瀉載）（參照第 4 章 河道特性調查 2.3），此處的層次設定，應包含其中之一或兩者，總稱為懸浮質。

4）流場的分析層次

流場空間解析度相關分析層次的區分，除了第 5 章 河川的洪水流水理分析之 第 4 節 計算方法的說明 所介紹的分析方法，分類為一維、準二維、二維、準三維、三維，再加上二維（附加二維流），總計有 6 種層次設定。

在此，二維（附加二維流）係以第 5 章 河川洪水流水理分析 4.5 所提到，依據二維流動運動方程式・連續方程式而算出的流速為主流，以另外已有的公式算出二維流成分的流速，再附加於主流的分析方法。

以下用表 6-1-1，簡明扼要說明上述內容。

表 6-1-1 各分析層次的符號

河床高程的分析層次		粒徑的分析層次	
一維	二維	均一粒徑	混合粒徑
1DB	2DB	U	M

輸砂的分析層次	
只有推移質	推移質與懸浮質 (混合型・通過型)
BL	BSL

流場的分析層次					
一維	準二維	二維	二維 二維流附加	準三維	三維
1DF	2DF	2DF	2DF+	3DF'	3DF

1.4 分析的實施順序

<概 說>

本章的構成與分析順序如圖 6-1-2 所示。

首先，分析層次的設定方面，如本節 1.3 所述河床高程、粒徑、流送型態、流場的分析層次。此時應事先掌握事項，如本章第 2 節所述。

其次分析法設定，應設定計算法與各種條件等。計算方法的設定，係設定計算水流、河床形狀、粒度分布、推移質、懸浮質（捲升量與土砂濃度分布）所使用的基礎方程式。

本章第 3 節之中，各計算所使用的基礎方程式，區分為事物現象描述層次不同的種別（3.2～3.7），說明配合分析層次的種別選定方法（3.1）。

各種條件等的設定，須設定計算方法所使用的邊界條件或初始條件。其內容如本章第 4 節所示，包含圍繞分析對象河床物的河岸・高灘地・堤防等形狀的設定（4.2）、納入構造物與植生等的地被・地物粗糙度與阻力等的流場計算（4.3）、以固床工、坡腳保護工等構造物與岩石裸露部等河床固定地點與河岸侵蝕地點的輸砂・河床計算法進行處理（4.4）、計算對象區間上下游端水位・水量與土砂供給，以及土砂搬入・搬出（量與粒度分布）時間序列變化的設定（4.5、4.6），乃至於計算開始時間點的河床形狀・粒徑之設定（4.7）。

此外，應配合分析層次，設定土砂供給與河床形狀・粒徑（4.1）。

最後，實施分析並進行驗證・調整。本章第5節說明以數值計算進行分析（5.1），以及運用第4章河道特性調查所取得河道狀況數據（第4章第3節）而進行的驗證・調整（5.2）。

此外，取得分析所需要之調查，不只單一方向的關係。應仔細了解調查內容，利用分析，有效率、有效果地進行驗證・調整。針對調查與分析之有機組合綜合檢討（5.3）。

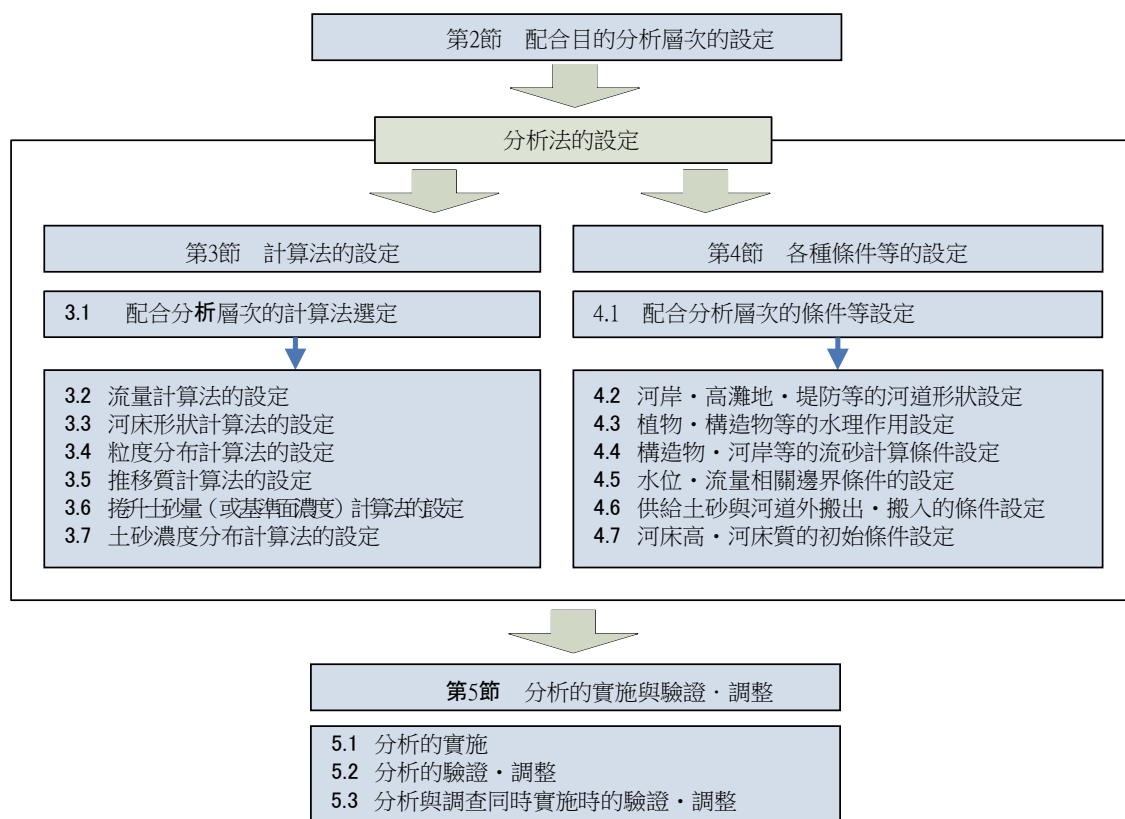


圖 6-1-2 本章的構成與分析實施順序

第2節 配合目的分析層次之設定

<標準>

針對本章 1.1 定位與目的 所說明的分析目的・用途與分析對象之河道區間河道特性等，標準做法是配合目的，依據本章 1.3 分析層次 說明，從記錄流量、輸砂（推移・懸浮）、河床高程・粒徑變化的解析度與範圍的觀點進行整理等做法，進行適當的設定。

<例示>

河床高程的分析層次，可從滿足目的・用途的觀點進行設定。

比如，在流動能力評估之目的，可設定能取得平均河床高程的層次[1DB]；或在局部淘刷預測的用途，可設定能取得河床高程平面分布的層次[2DB]。

但即使直接必要資訊為平均河床高程（或河川橫斷面積）的目的・用途等場合，比如以河口沙洲湧水河床形狀的平面變動佔優勢狀況為對象，也可設定為[2DB]。

又，整體而言能得到平均河床高程的層次[1DB]已足夠，但若部分包含平面變動佔優勢的狀況，除了特別重視這種狀況的目的，用途以外該部分適用的流量、輸砂、河床高程之計算法等加以組合（參照本章 4.3、4.4）適當予以對應處理，可設定[1DB]層次。

粒徑分析層次在掌握對象河道區間河床材料粒徑，亦即材料 m （參照第 4 章 河道特性調查 2.4）相關的以下觀點，予以設定。

1）空間構成材料的均勻性

對象區間整個區域的材料 m 粒徑範圍都相同，依地點之材料 m 粒徑範圍的無甚差異，即代表均勻性相當高。

2）粒徑的均一性

材料 m 的粒度分布淘汰狀況良好（比如， d_{84}/d_{60} 很小），以某特定粒徑為中心的粒徑範圍集中在狹小的範圍內時，均一性高，淘汰狀況不佳，大範圍粒徑沒有偏頗的粒徑分布，則均一性很低。

均勻性與均一性都很高時，可當作均勻粒徑處理的[U]層次，除此之外狀況視為混合粒徑處理的[M]層次。

輸砂的分析層次可掌握下列觀點，進行綜合設定。

- a) 有無在分析條件之水理量下形成懸浮形態的粒徑成分（參照第 4 章 6.2）
- b) 與推移質對比懸浮質所受影響河床形狀，粒徑變化影響的大小
- c) 就目的與用途而言（比如綜合土砂管理等目的與用途），懸浮質量是否是直接需要之資訊

適用於河段類型的沖積河川，以礫石為對象時，可設定[BL]；以砂或砂礫為對象時，可設定[BSL]。

流場的分析層次應對應於河床高程的分析層次，[1DB]之中可設定[1DF]與[2DF']；[2DB]之中，可設定[2DF]～[3DF]。

要進一步鎖定層次，可適當地計算與著眼於對象河床變動密切關係之流速分布，由此觀點進行設定。

首先針對[1DB]，可著眼在河道橫斷方向的流速分布。像單斷面河道那樣當作均勻流速處理的流場[1DF]，可設定為像複斷面河道那樣有河床部與高灘地等出現斷面平均流速有顯著差異的流場，可設定為[2DF']。

[2DB]可著眼在平面・水深方面之流速分布，進行設定。此時，採用非靜水壓分布等的[3DF']所無法處理之具強大三維性流場的三維分析[3DF]，可提高河川管理實務實用性的層級。

釐清這些狀況後，若是以平面流速分布為主要因素時，可設定為[2DF]；進一步需將包含二次流在內水深方向流速分布也納入考量時，則可設定為[2DF+]或[3DF']。設定為[2DF+]時，可斟酌其他已有的二次流成分計算公式的適用性。

[3DF]與水理模型實驗一起實施等，就其對象之現象的適用性，檢討數據之外，就設定妥當與否予以判斷為佳。

<參考資料>

[3DF]層次之三維性強大的流動，且考慮砂礫粒子運動的非平衡性而進行河床變動計算的事例，可參考下列資料。

- 1) 長田信寿，細田尚，村本嘉雄，中藤達昭：3次元移動座標系・非平衡輸砂モデルによる水制周辺の河床変動解析，土木学会論文集，No.684 II-56，pp.21-34，2001.
- 2) 福岡捷二，富田邦裕，掘田哲夫，宮川朝浩：橋脚まわりの局所洗掘深推定のための実用的数値シミュレーションの開発，土木学会論文集，No.497 II-28，pp.71-79，1994.

第3節 計算法的設定

3.1 配合分析層次計算方法的選定

<概 說>

計算方法的設定項目，如表 6-3-1 所示的河床形狀、粒度分布、推移質、捲升量（基準面濃度）、土砂濃度分布。

表中的英文符號，代表計算方法的【種別】，其內容見本節 3.2～3.7 說明。各計算方法的種別，標準方法應配合第 2 節所設定分析層次，依表 6-3-1 進行選定。

表中各欄係各層次之中當作〈標準〉的計算方法。部分欄中的括弧，則是〈建議〉的計算方法。

在此，〈建議〉係在無法以標準之計算方法充分重現分析對象的現象，並在有必要使用〈建議〉之更高度計算方法時，加以選定。

表 6-3-1 配合分析層次的計算方法選定（標準：種別的說明參照 3.3～3.7）

分析層次				計算方法的設定（標準：（）內為建議）				
河床高程	粒徑	輸送型態	流場	河床形狀	粒度分布	推移質	捲升量或基準面濃度	濃度分布
1DB	U	BL	1DF	1B	—	BaBL	—	—
		BSL		1BS	—		BaE	1DC
	M	BL		1B	1Fb	BaBLM	—	—
		BSL		1BS	1fBS		BaEM	1DCM
	U	BL	2DF'	1B	—	BaBL	—	—
		BSL		1BS	—		BaE	1DC
	M	BL		1B	1Fb	BaBLM	—	—
		BSL		1BS	1fBS		BaEM	1DCM
2DB	U	BL	2DF	2B	—	2'BL	—	—
		BSL		2BS	—		BaE	2DC
	M	BL	2DF+	2B	2Fb	2'BLM	—	—
		BSL		2BS	2fBS		BaEM	2DCM
	U	BL	3DF'	2B	—	2'BL (2BL)	—	—
		BSL		2BS	—		BaE	2DC (3DC)
	M	BL		2B	2Fb	2'BLM (2BLM)	—	—
		BSL		2BS	2fBS		BaEM	2DCM (3DCM)

凡例)英文符號：列「分析層次」係表 6-1-1 所說明的分析層次
列「計算方法的設定」代表種別。種別符號的說明見 3.3～3.7。

3.2 水流計算方法的設定

<標 準>

就水流的計算層次[1DF][2DF'] [2DF][3DF']，基本做法是依據第 5 章 河川洪水流水理分析之 4.1 與 4.2、4.3 與 4.4、4.5、4.6 進行設定。

[2DF+]為組合[2DF]與另外已有的二次流計算公式之流場計算方法。

3.3 河床形狀計算方法的設定

<標 準>

河床形狀 Z_B 以輸砂的連續方程式計算。

種別【1B】【2B】【1BS】【2BS】輸砂的連續方程式以公式(6-3-1)～(6-3-4)為標準。

1) 種別【1B】的計算方法（只有一維・推移）

$$\frac{\partial \bar{z}_B}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial}{\partial x} (\bar{q}_{Bx} B) = 0 \quad (6-3-1)$$

種別【2B】的計算方法（只有二維・推移）

$$\frac{\partial \bar{z}_B}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \right\} = 0 \quad (6-3-2)$$

2) 種別【1BS】的計算方法（一維・推移與懸浮）

$$\frac{\partial \bar{z}_B}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (\bar{q}_{Bx} B) + (\bar{q}_{su} - \bar{c}_0 w_0) B \right\} = 0 \quad (6-3-3)$$

3) 種別【2BS】的計算方法（二維・推移與懸浮）

$$\frac{\partial \bar{z}_B}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} + (q_{su} - c_0 w_0) \right\} = 0 \quad (6-3-4)$$

在此， \bar{z}_B 為河床高程， q_{Bx} 、 q_{By} 為河道縱橫斷方向的推移質輸砂量， q_{su} 為懸浮質的捲升量， c_0 為懸浮質的底面濃度， λ 為河床材料的空隙率， w_0 為懸浮質的沉降速度， B 為河床部的寬度， x 、 y 為河道縱橫斷方向座標軸， t 為時間。

此外，符號「 $\bar{\quad}$ 」代表跨越整個河床寬 B 的平均值，比如， \bar{z}_B 為平均河床高程，以公式(6-3-1)~(6-3-4)適用於混合粒徑時的 q_B 、 q_{su} 、 c_0 、 w_0 的計算方法，見本節 3.5~3.7。

公式(6-3-1)~(6-3-4)給予各時間點的推移質輸砂量、捲升量、底面濃度而進行時間積分，就能算出在任意時刻 t 的河床高程。此時，標準做法是把 λ 當作常數。

3.4 粒徑分布計算方法的設定

<概 說>

混合粒徑的粒徑分布計算方法，標準做法是使用在沖積河川有較多適用案例的交換層架構。依據這種架構計算粒徑分布與輸砂量的概要如下。

- ・ 河床材料的粒徑分布當作用含有率 f_i 混合 n 種類均一粒徑 d_i 之混合粒徑材料的近似值。以下將粒徑種類稱為粒徑階 d_i 。在此， n 為整數， i 為 1 到 n 的整數值，各粒徑階 d_i 的間隔，如第 4 章 2.4.3 所介紹各種量的移動性與輸送量適當加以評估而設定。
- ・ 應用混合粒徑的輸砂量公式，計算各粒徑階的輸砂量（參照本節 3.5.2、3.6、3.7）。
- ・ 使用各粒徑階之連續方程式算出 f_i （參照公式(6-3-1)~(6-3-4)）。
- ・ 河床高程為以公式(6-3-1)~(6-3-4)的輸砂連續方程式算出，此時使用 q_B 、 q_{su} 、 $c_0 w_0$ 加上各粒徑階 q_{Bi} 、 q_{sui} 、 $c_{0i} w_{0i}$ ，所得出的值 $\sum q_{Bi}$ 、 $\sum q_{sui}$ 、 $\sum c_{0i} w_{0i}$ 。

使用交換層架構的計算方法（含各種輸砂量公式），在有關 d_{84}/d_{16} 較大等粒徑範圍大的河床材料、具有二峰性粒度分布的河床材料，以及石礫所構成河床材料的適用性方面，已累積了許多知識見解。重點在於適當地參考已累積之知識見解，驗證・檢討本架構的適用性。

<參考資料>

交換層架構方面的基本想法，可參考資料 1)。其修正例子，可參考資料 2)。處理輸送型態不同的二種粒徑集團，以及砂子往礫間・移出的問題，可參考資料 3)~5)。大礫等對於流場與砂礫輸送具有支配性影響力的情況，可參考 6)~9)。

- 1) 平野宗夫：Armoring をともなう河床低下について，土木学会論文報告集，第 195 号，pp.55-65，1971.
- 2) 芦田和男，江頭進治，劉柄義：二層モデルによる複断面河道の流れ及び河床変動の数値解析，京都大学防災研究所年報，第 35 号 B-2，pp.42-62，1992.
- 3) 芦田和男，藤田正治：平衡及び非平衡浮遊砂量算定の確率モデル，土木学会論文集，第 375 号 II-6，pp.107-116，1986.
- 4) 藤田光一，山原康嗣，富田陽子，伊藤嘉奈子，小路剛志：大礫床表面における砂の堆積状況と浮遊砂量との関係についての実験的研究，水工学論文集，第 52 卷，pp.547-552，2008.
- 5) 関根正人，林将宏：礫・シルト充填河床モデルを用いた礫河道の準二次元河床変動解析，水工学論文集，第 51 卷，pp.973-978，2007.
- 6) 辻本哲郎，細川迭男：急勾配水路における礫の限界掃流力と輸砂量，土木学会論文集，No.411 II-12，pp.127-134，2007.
- 7) 芦田和男，大同淳之，高橋保，水山高久：急勾配流れの抵抗と限界掃流力に関する研究，京都大学防災研究所年報，16(B)，pp.481-494，1973.
- 8) 岡部健士，肥本一郎：大径礫を伴う山地河川における輸砂の有効掃流力に関する研究，第 30 回水理講演会論文集，pp.247-252，1986.
- 9) 長田健吾，福岡捷二：石礫河川の土砂移動機構に着目した 1 次元河床変動解析法の開発，水工学論文集，第 52 卷，pp.625-630，2008.

<標準>

河床各粒徑階的含有率 f_{bi} ，可依據各粒徑階連續方程式算出來。種別【1fB】【2fB】【1fBS】【2fBS】的 f_i 的連續方程式以公式(6-3-5)~(6-3-8)為標準。

1) 種別【1fB】的計算方法（只有一維・推移）

$$\frac{\partial \bar{f}_{bi}}{\partial t} - \frac{1}{a} \left(\bar{f}_{Bi} - \hat{\bar{f}}_{bi} \right) \frac{\partial \bar{z}_B}{\partial t} + \frac{1}{a(1-\lambda)} \left(\bar{q}_{Bx} \frac{\partial \bar{f}_{Bi}}{\partial x} \right) = 0$$

$$\frac{\partial \bar{z}_B}{\partial t} \geq 0 \text{ 的情況（河床上升）： } \hat{\bar{f}}_{bi} = \bar{f}_{bi} \quad (6-3-5)$$

$$\frac{\partial \bar{z}_B}{\partial t} < 0 \text{ 的情況（河床下降）： } \hat{\bar{f}}_{bi} = \bar{f}_{b0i}$$

2) 種別【2fB】的計算方法（只有二維・推移）

$$\frac{\partial f_{bi}}{\partial t} - \frac{1}{a}(f_{Bi} - \hat{f}_{bi})\frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{1}{a(1-\lambda)}\left(q_{Bx}\frac{\partial f_{Bi}}{\partial x} + q_{By}\frac{\partial f_{Bi}}{\partial y}\right) = 0$$

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} \geq 0 \text{ 的情況（河床上升）： } \hat{f}_{bi} = f_{bi}$$

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} < 0 \text{ 的情況（河床下降）： } \hat{f}_{bi} = f_{b0i}$$
(6-3-6)

3) 種別【1fBS】的計算方法（一維・推移與懸浮）

$$\frac{\partial \bar{f}_{bi}}{\partial t} - \frac{1}{a}(\bar{f}_{Bi} - \bar{\hat{f}}_{bi})\frac{\partial \bar{z}_B}{\partial t} + \frac{1}{a(1-\lambda)}\left(\bar{q}_{Bx}\frac{\partial \bar{f}_{Bi}}{\partial x}\right) + \bar{q}_{sui} - \bar{c}_{0i}w_{0i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{z}_B}{\partial t} \geq 0 \text{ 的情況（河床上升）： } \bar{\hat{f}}_{bi} = \bar{f}_{bi}$$

$$\frac{\partial \bar{z}_B}{\partial t} < 0 \text{ 的情況（河床下降）： } \bar{\hat{f}}_{bi} = \bar{f}_{b0i}$$
(6-3-7)

4) 種別【2fBS】的計算方法（二維・推移與懸浮）

$$\frac{\partial f_{bi}}{\partial t} - \frac{1}{a}(f_{Bi} - \hat{f}_{bi})\frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{1}{a(1-\lambda)}\left(q_{Bx}\frac{\partial f_{Bi}}{\partial x} + q_{By}\frac{\partial f_{Bi}}{\partial y}\right) + q_{sui} - c_{0i}w_{0i} = 0$$

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} \geq 0 \text{ 的情況（河床上升）： } \hat{f}_{bi} = f_{bi}$$

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} < 0 \text{ 的情況（河床下降）： } \hat{f}_{bi} = f_{b0i}$$
(6-3-8)

在此， z_B 為河床高程， q_{Bx} 、 q_{By} 為河道縱斷方向的推移質流量， λ 為河床構成質的空隙率， a 為交換層厚度， f_{bi} 、 f_{b0i} 、 f_{Bi} 分別代表河床表面交換層、交換層下部河床以及推移質的粒徑階 d_i 含有率， q_{sui} 、 c_{0i} 、 w_{0i} 則代表粒徑階 d_i 的懸浮質捲升量、底面濃度、沉降速度， x 、 y 代表河道縱橫斷方向的座標軸， t 為時刻。 f_{Bi} 、 c_{0i} 的計算方法如本節 3.5.2、3.7 所示。

公式(6-3-5)~(6-3-8)之中給予各時間點推移質流量、捲升量、底面濃度、推移質含有率再進行時間積分，就能算出任意時刻 t 的含有率。此時 a 、 λ 為常數。

a 的設定對象，在平坦河床為大約最大粒徑，形成小規模河床波時，則是河床波的波高左右。

3.5 推移質計算方法的設定

3.5.1 均一粒徑的推移質

(1) 一維分析的推移質流量公式

<標準>

推移質流量 q_B 乃是每單位時間通過單位寬度斷面之砂礫粒子群的總體積。種別【BaBL】（一維・均一粒徑）的推移質流量公式，標準做法為使用包含粒徑 d 、推移力 τ 、臨界推移力 τ_c 、水的密度 ρ 、砂礫粒子密度 σ 、重力加速度 g 之函數的公式(6-3-9)。

$$q_B = f(d, \tau, \tau_c, \rho, \sigma, g, \text{etc}) \quad (6-3-9)$$

在此，etc 係未必含有 q_B 之函數的上述之外水理量，以及與小規模河床波有關的特性量。

方程式 6-3-9) 的標準做法是，應用河床波型態與對於流水的阻力（粗糙度）等小規模河床波各種特性，可評估小規模河床波對推移質流量造成的影響。

<例 示>

種別【BaBL】的推移質輸砂量方程式，可應用下列分類之關係式。

- 1) 把推移力 τ 分割成為小規模河床波之形狀阻力與河床表面摩擦之摩擦力，後者之摩擦視為推移質營力有效成分之有效推移力 τ_e 。此時，方程式 (6-3-9) 之外，以另外已有的 τ_e 計算方程式，作為方程式 (6-3-9) τ 的 τ_e 使用。
- 2) 把粗糙係數等小規模河床波相關特性量納入方程式 (6-3-9) etc 之變數組合該式之函數。此時，可以已有公式採用粒徑與水理量計算特性量。
- 3) 配合小規模河床波型態而決定其適用範圍的方程式。此時，應定義小規模河床波的型態區分，另外準備可藉由粒徑與水理量判定各型態所產生條件之方法，配合型態區分而選定推移質流量方程式。

種別【BaBL】的推移質流量方程式，可使用 1) 分類之芦田・道上的公式，以及 Meyer・Peter-Müller 公式、2) 分類之佐藤・吉川・芦田公式。

・芦田・道上的公式

$$q_{B*} \equiv \frac{q_B}{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}} = 17\tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \quad (6-3-10)$$

$$u/u_{*e} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{d(1 + 2\tau_*)} \quad (6-3-11)$$

・Meyer・Peter-Müller 公式

$$q_{B*} = 8(\tau_* - 0.047)^{3/2} \quad (6-3-12)$$

$$u_{*e} = \left(\frac{n_b}{n}\right)^{\frac{3}{4}} u_* \quad n_b = 0.0192d_{90}^2 \quad (d_{90} \text{ 的單位為 cm}) \quad (6-3-13)$$

在此， q_{B*} 為無因次化的推移質流量， τ_* 為無因次推移力， τ_{*c} 為無因次臨界推移力， $u_* (= (\tau/\rho))$ (次方) 為摩擦速度， $u_{*e} (= (\tau_e/\rho))$ (次方—指數) 為有效摩擦速度， R 為徑深、 ρ 為水的密度。

・佐藤・吉川・芦田の公式

$$q_B = \frac{u_*^3}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)g} \phi F(\tau_0/\tau_c) qB$$

$$n \geq 0.025, \quad \phi = 0.623$$

$$n < 0.025, \quad \phi = 0.623(40n)^{-3.5}$$

在此， n 為曼寧粗糙係數， F 為圖 6-3-1 所示 τ_0/τ_c 的函數。

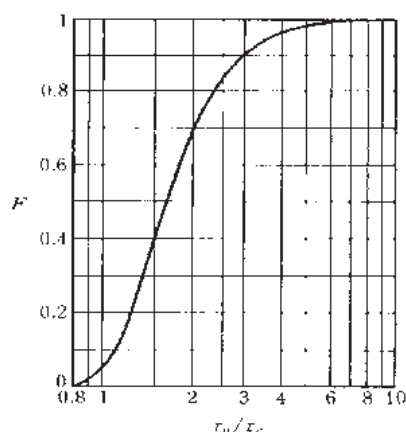


圖6-3-1 佐藤、吉川、芦田公式之中 F 與 τ_0/τ_c 的關係

無因次臨界推移力 τ_{*c} ，可用公式(6-3-15)的岩垣公式計算出來

$$\begin{aligned} 0.303 \leq d &\Rightarrow u_{*c}^2 = 80.9d \\ 0.118 \leq d \leq 0.303 &\Rightarrow u_{*c}^2 = 134.6d^{31/22} \\ 0.0565 \leq d \leq 0.118 &\Rightarrow u_{*c}^2 = 55d \\ 0.0065 \leq d \leq 0.0565 &\Rightarrow u_{*c}^2 = 8.41d^{11/32} \\ d \leq 0.0065 &\Rightarrow u_{*c}^2 = 226d \end{aligned} \tag{6-3-15}$$

(水温為 20°C 時)

< 概說 >

若回到圖 6-1-1 基本架構，重新看推移值計算法設定定位，就可把小規模河床波當作起點，設定輸砂量公式，但其他的粗糙係數，以及層次[M]情況下進行交換層厚度的設定、反覆進行水流、輸砂、河床狀況等各種計算過程中，這些設定的影響會以總合的形式反映到計算結果，也就是河床狀況上。

因此，若要提升河床狀況的重現性，重點在於選定輸砂量公式是整體工作的一部分，另外還須一併綜合實施粗糙係數等參數的設定，以及其他計算法的設定。

以上設定乃是圖 6-1-2 所說明作業順序「驗證・調整」階段調整項目之一，其餘各種條件等，也是為調整項目。

這些調整如圖 6-1-1 箭頭所示，分為計算法的內部與外部，用來進行水流、輸砂、河床狀況的計算，配合這些部分，最後會呈現水流、輸砂、河床狀況的調整結果。

因此，不應拘泥於輸砂量公式的調整，而須了解個別的調整乃是在個別狀況下如何呈現，彼此又有如何關聯，然後還得確認這部分的知識見解與調整之根據，讓可利用之驗證數據的質與量，正確配置，最後連結各調整項目合理的再設定，此等組合甚為重要。

（2）二維分析的推移質公式

<標準>

二維分析所使用的推移質輸砂量係當作推移質輸砂量大小及其輸送方向組合的輸砂量向量 $\vec{q}_B=(q_{Bx}, q_{By})$ 進行計算。

種別【2BL】（二維・均一粒徑）的推移質輸砂量公式，標準做法是使用包括粒徑 d 、推移力向量 $\vec{\tau}=(\tau_x, \tau_y)$ 、臨界推移力 τ_c 、水的密度 ρ 、砂礫粒子密度 σ 、重力加速度 g 、河床最陡坡降及其方向的向量 $\vec{i}_b=(i_{bx}, i_{by})$ 的函數公式(6-3-16)。

$$\vec{q}_B = f(d, \vec{\tau}, \tau_c, \rho, \sigma, g, \vec{i}_b, \text{etc}) \quad (6-3-16)$$

在此， i_{bx} 、 i_{by} 為河道縱橫方向的坡降，etc為未必包含在 \vec{q}_B 函數的上述之外水理量與小規模河床波相關的特性量。公式(6-3-16)係與公式(6-3-9)皆用小規模河床波各種特性，在推移質輸砂量向量方面能評估小規模河床波影響的公式。

種別【2' BL】二維・均一粒徑・線型近似）的推移質輸砂量公式方面，當與河床附近主流的流速之成分相比，二次流成分非常小，且河床坡降與安息角相比非常小，在此條件下的標準做法適式(6-3-16)近似的公式(6-3-17)。

$$\vec{q}_B = |\vec{q}_B| \left(\frac{\vec{\tau}}{|\vec{\tau}|} + \alpha \left(\frac{\tau_c}{|\vec{\tau}|} \right)^m \vec{i}_b \right) \quad (6-3-17)$$

在此， α 、 m 為常數。

<例示>

種別【2BL】的推移質輸砂量公式，在處理河床坡降與砂礫的水中安息角相同程度的河岸與砂洲前緣部等地形變化時適用。

種別【2' BL】的推移質輸砂量公式，可適用下列公式。

1) 推移質輸砂量的大小 $|\vec{q}_B|$

依據種別【BaBL】的推移質輸砂量公式、公式(6-3-10)～(6-3-14)計算。但 τ_{*c} 可採用(6-3-18)的斜面上無因次臨界推移力 $\tau_{*c\theta}$ 。

$$\tau_{*c\theta} = \tau_{*c} \cos \theta \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \theta}{\tan^2 \phi}} \quad (6-3-18)$$

在此 $\tan \theta$ 為河床坡降大小 ($=|\vec{i}_b|$)、 ϕ 為河床材料的水中安息角。

2) 採用推移力向量的推移質輸砂量向量計算方法

$$\vec{q}_B = |\vec{q}_B| \left(\frac{\vec{\tau}}{|\vec{\tau}|} + \vec{i}_b \sqrt{\frac{1}{\mu_d \mu_f \cos \theta} \left(\frac{\tau_c}{|\vec{\tau}|} \right)} \right) \quad (6-3-19)$$

在此， μ_d, μ_f 為砂礫粒子的動摩擦係數與靜止摩擦係數，其值大約 0.4、0.8~1.0。

3) 採用河床附近流速向量之推移質輸砂量向量計算方法

依據水流運動方程式與連續方程式計算主流 $u_s (= (u^2 + v^2)^{0.5})$ ，適用於以另外準備公式所算出 2 次流 u_{bn} 的水流分析層次【2DF+】。其定位係使用公式(6-3-19)方法的傍流，以 $|\vec{q}_B|$ 為主流，其中的二次流方向成分 q_{bs} 、 q_{bn} 分成兩式，採用由河床附近主流速成分 u_{sb} 與二次流成分 u_{nb} 所構成的河床附近流速向量 (u_{bs}, u_{nb}) 。

$$q_{bn} = q_{bs} \left[\frac{u_{nb}}{u_{sb}} + \sqrt{\frac{1}{\mu_d \mu_f \cos \theta} \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \tan \theta} \right] \quad (6-3-20)$$

在此， $q_{Bs} = |\vec{q}_B|$ ，可由上述公式(6-3-10)~(6-3-14)計算出來。

<參考資料>

種別【2BL】的輸砂量向量計算，可參考下列資料。

- 1) Kovacs, A., Parker, G.: A new vectorial bedload formulation and its application to the time evolution of straight river, Journal of Fluid Mechanics, Vol.267, pp.153-183, 1994.

3.5.2 混合粒徑的推移質

<標準>

混合粒徑的推移質輸砂量依各粒徑階 d_i ，分別算出推移質輸砂量 q_{Bi} 。

種別【BaBLM】(一維・混合粒徑)的推移質公式，係將公式(6-3-9)的 d 替換成粒徑 d_i ， τ_c 替換成粒徑 d_i 的臨界推移力 τ_{ci} ，然後乘以粒徑階 d_i 所占河床面的比例，也就是交換層的粒徑階 d_i 含有率 f_{bi} 的公式(6-3-21)。

$$q_{Bi} = f_{bi} f(d_i, \tau, \tau_{ci}, \rho, \sigma, g, etc) \quad (6-3-21)$$

在此，etc乃是 q_{Bi} 函數所未必包含的上述之外水理量與小規模河床波相關的特性量。

種別【2BLM】(二維・混合粒徑)【2'BLM】(二維・混合粒徑・線形近似)的推移質公式，標準做法是與上述種別【BaBLM】一樣地，使用公式(6-3-16)、(6-3-17)替換成 f_{bi} 而得到的公式(6-3-22)、(6-3-23)。

$$\bar{q}_{Bi} = f_{bi} f(d_i, \bar{\tau}, \tau_{ci}, \rho, \sigma, g, \bar{i}_b, etc) \quad (6-3-22)$$

$$\bar{q}_{Bi} = |\bar{q}_{Bi}| \left(\frac{\bar{\tau}}{|\bar{\tau}|} + \alpha \left(\frac{\tau_{ci}}{|\bar{\tau}|} \right)^m \bar{i}_b \right) \quad (6-3-23)$$

又，etc所呈現特性量而配合粒徑變化的部分，進行與上述相同的替換。
推移質輸砂量的各粒徑階之含有率 f_{Bi} ，依據公式(6-3-24)計算出來。

$$f_{Bi} = q_{Bi} / \sum q_{Bi} \quad (6-3-24)$$

在此， $\sum q_{Bi}$ 為 q_{Bi} 全粒徑階的綜合所算出之推移質輸砂量(q_{Bi})。

< 例 示 >

種別【BaBLM】【2' BLM】的推移質輸砂量公式如上述<標準>所示，可使用將公式(6-3-10)~(6-3-14)與公式(6-3-19)、(6-3-20)替換後乘以 f_{bi} 的公式。此時，各粒徑階的無因次臨界推移力 τ_{ci} ，可使用公式(6-3-25)。

・ 芦田・道上修正 Egiazaroff公式：

$$\begin{aligned} \frac{d_i}{d_m} \geq 0.4 : \frac{\tau_{ci}}{\tau_{cm}} &= \left\{ \frac{\log_{10} 19}{\log_{10}(19 d_i/d_m)} \right\}^2 \frac{d_i}{d_m} \\ \frac{d_i}{d_m} < 0.4 : \frac{\tau_{ci}}{\tau_{cm}} &= 0.85 \end{aligned} \quad (6-3-25)$$

在此， d_m 為交換層的平均粒徑， τ_{ci} 、 τ_{cm} 為粒徑 d_i 、 d_m 之臨界推移力。 τ_{cm} 可由公式(6-3-15)之岩垣公式計算出來。

又，針對 d_{84}/d_{16} 較大粒徑範圍之較廣的河床材料、具有二峰性粒度分布的河床材料，以及石礫所構成的河床材料在公式(6-3-25)適用性方面累積了許多知識見解，可適度加以參考，採用適合各該河床材料的公式至為重要。

3・6 捲升量（或基準面濃度）計算方法的設定

< 標 準 >

捲升量 q_{su} 可當作單位面積從河床面單位時間所漂浮上來砂子等非黏著性粒子群的總體積而計算出來。捲升量可依據公式(6-3-26)，從基準面濃度 Ca 算出來。

$$q_{su} = c_a w_0 \quad (6-3-26)$$

Ca 為基準面高度 a （從河床面算起的高度）所呈現濃度。但在平衡狀態($q_{su}-C_0W_0$) = 0、底面濃度 c_0 與基準面濃度為同值。

種別【BaE】（相同粒徑）的基準面濃度方面，是使用必定含沉降速度 w_0 、摩擦速度 u_* 函數的公式(6-3-27)為標準。

$$C_a = f(w_0, u_*, etc) \quad (6-3-27)$$

在此，etc乃是 Ca 函數所未必包含的上述之外的水理量或土砂粒子特性量。

混合粒徑的基準面濃度方程式，為依各粒徑階 d_i 分別計算其基準面濃度 C_{ai} 。

種別【BaEM】(混合粒徑)的基準面濃度方程式，標準做法是首先將方程式(6-3-27)的 w_0 置換成粒徑 d_i 的沉降速度 w_{0i} ，然後乘以粒徑階 d_i 所占河床面的比例，也就是交換層之中粒徑階 d_i 的含有率 f_{bi} 的乘上式(6-3-28)。

$$C_{ai} = f_{bi} f(w_{0i}, u_*, etc) \quad (6-3-28)$$

另外，etc表示之特性量配合粒徑變化，也和上述做法一樣進行置換。

< 例 示 >

種別【BaE】的基準面濃度方程式，可使用方程式(6-3-29)~(6-3-31)。

• Lane-Kalinske 公式

$$C_b = 5.55 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{u_*}{w_0} \right) \exp \left\{ - \left(\frac{w_0}{u_*} \right)^2 \right\} \right]^{1.61} \quad (6-3-29)$$

在此， C_b 為河床面的基準面濃度。

• 板倉・岸 公式

$$C_a = K \left(\alpha_* \frac{1}{\tau_*} \frac{\rho}{\sigma} \frac{u_*}{w_0} \Omega - 1 \right) \quad (6-3-30)$$

$$\Omega = \frac{\tau_*}{B_*} \frac{\int_a^\infty \xi \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi}{\int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi} + \frac{B_* \eta_0}{\tau_*} - 1 \quad a' = \frac{\tau_*}{B_*} - \frac{1}{\eta_0} \quad (6-3-31)$$

$$\Omega = 14\tau_* - 0.9 \quad (\tau_* > 10^{-1}) \quad (6-3-32)$$

在此， C_a 為基準面高度 $a=0.05h$ 的基準面濃度， $\alpha_*=0.14$ 、 $K=0.008$ 、 $B_*=0.143$ 、 $\eta_0=0.5$ 、 σ 為砂礫的密度， ρ 為水的密度。

方程式(6-3-32) 可當作 $\tau_* > 10^{-1}$ 時方程式(6-3-31) Ω 的近似式使用。

沉降速度 w_0 可用式(6-3-33)、(6-3-34) 所示 Rubey 的公式與鶴見公式計算。

$$w_0 = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d + \frac{36\nu^2}{d^2}} - \frac{6\nu}{d} \quad (6-3-33)$$

$$\begin{cases} d < 0.015\text{cm} & w_0 = 11940d^2 (\text{cm/s}) \\ 0.015\text{cm} < d < 0.11\text{cm} & w_0 = 171.5d \\ 0.11\text{cm} < d < 0.58\text{cm} & w_0 = 81.5d^{0.667} \\ 0.58\text{cm} < d & w_0 = 73.2d^{0.5} \end{cases} \quad (6-3-34)$$

在此， d 為粒徑， σ 為砂礫密度， ρ 為水的密度， g 為重力加速度， ν 為水的動黏滯係數。定義式(6-3-34)所示的鶴見公式，可在 $\sigma = 2.65$ 、水温 25°C 計算。

種別【BaEM】的基準面濃度方程式，可使用方程式(6-3-29)～(6-3-32)以上述〈標準〉所示，經置換後，再乘以 f_{bi} 之方程式。

<參考資料>

微細粒子沉降的凝集與捲升的黏著力影響，可參考下列資料。

- 1) 鈴木健太，島元尚德，久保世紀，福岡捷二：筑後川感潮域の洪水中的河床變動解析，水工学論文集，第 55 卷，pp.877-882，2011.
- 2) 山本晃一，長沼宏一，渡邊明英，大森徹治：鶴見川河口部の土砂堆積と浚渫計画-細粒物質を河床材料に持つ河川の河床變動モデルの開発-，建設省関東地方建設局京浜工事事務所，1993.
- 3) 角哲也，井口真生子：貯水池に堆積した微細粒土砂の浸食特性に関する研究，水工学論文集，第 51 卷，pp.871-876，2007.
- 4) 小暮和史，首藤伸夫：貯水池における濁質物質の堆積と洗掘，第 24 回水理講演会論文集，pp.265-270，1980.
- 5) 海田輝之，楠田哲也，二渡了，粟谷陽一：柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究，土木学会論文集，第393 号 II-9，pp.33-42，1988.

3・7 土砂濃度分布計算方法的設定

<標準>

土砂濃度分布 C 可依據浮遊土砂的移流擴散方程式計算。

種別【1DC】【2DC】【3DC】的移流擴散方程式，以方程式(6-3-35)～(6-3-37)為標準。

1) 種別【1DC】的計算方法（一維）

$$\frac{\partial A\bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial Q\bar{c}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A\bar{\varepsilon}_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + B(\bar{q}_{su} - \bar{c}_0 w_0) \quad (6-3-35)$$

在此， A 為水流的斷面積， Q 為流量， \bar{c} 為懸浮質濃度的流動斷面平均值， \bar{q}_{su} 、 \bar{c}_0 為捲升量與橫跨底面濃度河川寬度 B 之平均值， $\bar{\varepsilon}_x$ 為一維土砂濃度擴散係數。

2) 種別【2DC】的計算方法（二維）

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{h}\bar{c}) + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{h}\bar{c}\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{h}\bar{c}\bar{v}) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\bar{h}\bar{\varepsilon}_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\bar{h}\bar{\varepsilon}_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y}\right) + q_{su} - c_0 w_0 \quad (6-3-36)$$

在此， \bar{u} 、 \bar{v} 為另外以洪水流分析所算出的 x 、 y 軸方向的水深平均流速， \bar{c} 為水深方向的平均土砂濃度， $\bar{\varepsilon}$ 為二維土砂濃度擴散係數。

3) 種別【3DC】的計算方法（三維）

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_0)c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z}\right) \quad (6-3-37)$$

在此， u 、 v 、 w 為另外以洪水流分析所算出的 x 、 y 、 z 軸方向的流速， ε 為土砂濃度擴散係數， z 為垂直方向的座標軸。

公式(6-3-35)~(6-3-37)給予各時間點的流速・水深等以及捲升量（或基準面濃度與沉降速度的積），進行時間積分，就能算出任意時刻 t 的底面濃度 c_0 。此時，公式(6-3-35)、(6-3-36)決定了 \bar{c} 與 \bar{c}_0 以及 \bar{c} 與 c_0 之關係，因此另外給予濃度 c 之 z 軸方向分布公式。此濃度分布公式使用公式(6-3-38)的函數形態公式。

$$c = c_0 g(z', h, a, \frac{w_0}{u_*}) \quad (6-3-38)$$

在此， Z' 乃以河床面為基準的水深方向座標軸， a 為土砂濃度作為底面濃度 c_0 之高度。在公式(6-3-38)的水深方向進行平均，可得 \bar{c} 與 c_0 的關係。另外，決定 \bar{c} 與 \bar{c}_0 關係時，公式(6-3-38)右邊的變數，採用河川寬度方向的平均值。

混合粒徑的懸浮質移流擴散方程式，應針對各粒徑階 d 分別計算濃度 c 。種別【1DCM】【2DCM】【3DCM】的移流擴散方程式，標準做法是應用 (6-3-35)~(6-3-38) 的 c_0 、 w_0 、 q_{su} 替換成各粒徑 d 的 c_{0i} 、 w_{0i} 、 q_{usi} 的公式。

<例 示>

公式(6-3-38)的濃度分布公式，可使用公式(6-3-39)、(6-3-40)。

・Rouse 公式

$$\frac{c}{c_0} = \left(\frac{h-z'}{z'} \frac{a}{h-a} \right)^Z \quad Z = \frac{w_0}{\beta \kappa u_*} \quad (6-3-39)$$

・Lane-Kalinske 公式

$$\frac{c}{c_0} = \exp\left(-6Z \frac{z'-a}{h}\right) \quad (6-3-40)$$

在此， κ 為卡爾曼常數， β 為砂的擴散係數與動黏滯係數之比。 β 與過去的實驗作比較可取大概是 1.2 左右，也可使用公式(6-3-41)所介紹的 w_0/U_* 之函數。

$$\beta = 1 + k_1 \left(\frac{w_0}{u_*} \right)^{k_2} \quad (6-3-41)$$

在此， K_1 、 K_2 為常數 1.56、2.0。

<例 示>

在種別【1BS】之中，若河床縱斷形狀的長期變化等土砂濃度分布之非平衡性是可忽視之對象，可以公式(6-3-42)取代(6-3-35)計算土砂濃度分布，以公式(6-3-42)算出 $(\overline{q_{su}} - \overline{c_0 w_0})$ ，代入公式(6-3-3)、(6-3-7)，算出河床高程與粒度分布。

$$(\overline{q_{su}} - \overline{c_0 w_0}) = \frac{1}{B} \frac{\partial B \overline{q_s}}{\partial x} \quad (6-3-42)$$

此處的 q_B 為懸浮質量、單位時間通過單位寬斷面之懸浮粒子群總體積。 $\overline{q_s}$ 為 q_s 河床寬 B 的整體平均值。

懸浮質量 q_s 可以式(6-3-43)，以垂直方向之流速分布 $u(z)$ 、公式 6-3-27、(6-3-28)之基準面濃度 c_a ，以及公式(6-3-38)垂直方向的濃度分布 $c(z)$ 算出來。

$$q_s = \int_a^h u c dz' = \int_a^h u(z') c_a g(z', h, a, \frac{w_0}{u_*}) dz' \quad (6-3-43)$$

另外，計算 $\overline{q_s}$ 時，公式(6-3-43)右邊之變數，使用河寬方向的平均值。

第 4 節 各種條件的設定

4. 1 配合分析層次條件等的設定

<概 說>

各種條件等的設定項目，如表 6-4-1 所示，包含河岸・高灘地・堤防等的河道地形（[4.2](#)）、植物・構造物的水理作用（[4.3](#)）、構造物或河岸等的輸砂計算條件（[4.4](#)）、水位・流量相關邊界條件（[4.5](#)）、供給土砂・河道外搬出等的條件（[4.6](#)）、河床相關初始條件（[4.7](#)）。

表中的英文字符號代表所設定的【種別】，其內容如本節 [4.6](#)、[4.7](#) 所示。各設定之種別，配合本章[第 2 節](#)所設定分析層次，依據表 6-3-1 進行選定為標準。

此外，表中的「○」係無種別的設定項目，以 [4.2](#)～[4.5](#) 所列各層次共通的方法，進行設定。

表 6-4-1 配合分析層次的條件之設定（種別部份參照 4.6、4.7）

分析層次				各種條件的設定(標準)						
河床高	粒徑	輸送型態	流場	河岸高灘地等形狀	構造物等水理作用	構造物等輸砂條件	流量水位邊界條件	土砂供給條件	河床初始條件	
1DB	U	BL	1DF	○	○	○	○	UM	U	
		BSL							M	
	M	BL						MSL		UM
		BSL							M	
	U	BL	2DF'					UM		U
		BSL							M	
	M	BL						MSL		UM
		BSL								
2DB	U	BL	2DF 2DF+	○	○	○	○	UM	U	
		BSL							M	
	M	BL						MSL		UM
		BSL							M	
	U	BL	3DF'					UM		U
		BSL							M	
	M	BL						MSL		UM
		BSL								

凡例) 英文字號：列「分析層次」為表 6-1-1 所說明的層次

列「各種條件的設定」代表種別。種別符號的說明如 4.6、4.7 所示。

4. 2 河岸、高灘地、堤防等河道地形的設定

<標準>

對分析對象環繞河床部河岸、高灘地、堤防與分合流部等的河道地形，標準做法為分別針對層次〔1DB〕之中的河道橫斷方向地形，以及〔2DB〕河道橫斷面方向平面地形，以定期橫斷面測量與河道平面測量成果進行設定。

此外，標準做法是層次〔2DB〕之中使用一般座標系，考量河岸堤線形狀、堤防堤線形狀、定期橫斷面測線位置地設定座標。

<建議>

層次【2DB】的分析，建議從提升分析精度・解析度的觀點，使用由空載光達測量等所實施的高解析度連續河道地形測量成果，設定河道形狀。

4. 3 植物、構造物等水理作用的設定

<標準>

針對配合分析對象區間植被繁茂等表面狀況的粗糙度，以及河川管理設施等構造物的水理作用進行設定。標準做法是，配合植生等表面狀況粗糙度方面，應依據草高等粗糙度大小相關要素，將表面狀況進行分門別類，然後依據植被圖等給予各種別的河道上配置，每個配置都依據第 5 章 河川的洪水流水理分析第 5 節，設定粗糙係數。

河川管理設施等構造物的水理作用方面，標準做法是依據河川構造物盤點資料與河道平面測量等進行配置，並考量個別構造要素與流場之分析層次〔1DF〕〔2DF'〕〔2DF〕〔3DF'〕，適當地選定，設定可適用於各構造物的水理作用設定方法。

<例 示>

水理作用的設定方法包括：

- 1) 將覆蓋河床面類型的構造物作為主要對象而視為其粗糙度要素、當作粗糙係數的方式（例：坡面保護工、坡腳保護工、護床工等）
- 2) 把各個構造物當作粗糙要素而採用適用之阻力定律（橋墩、橋柱）
- 3) 把一連串構造物當作多孔質的透水性粗糙度要素，採用有透過係數適用之阻力定律（透過式丁壩群、樹木群等）
- 4) 構造物周邊水位與流量關係採用其他公式（比如堰的溢流量公式）的適用方式（各種橫斷構造物等）
- 5) 將構造物本體形狀納入計算格子而進行流場分析的方式。

可配合構造物的構造與流場分析種別，分別進行應用。

<建 議>

各種構造物與植物群落的流場邊界混合係數與動黏滯係數，最好配合分析對象的水理量或構造物與植物群落之粗糙度・形狀等進行設定。

4. 4 構造物與河岸等輸砂計算條件的設定

<標 準>

固床工、置換工、護岸、坡腳保護工、分流堰等特別直接、間接影響推移質舉動、導致河床高程與河床材料粒度產生變化，因此，標準做法是適當地將這種作用納入輸砂量與河床高程等的計算中。

在以水泥或礫石被覆固床工或置換工等河床面的構造物，或岩盤裸露河床面，河床高程不會低於其表面位置，但給與能形成砂礫堆積導致河床上升的條件，進行輸砂量與河床高程的計算為標準。

另外，在半固結堆積物與黏性土等裸露的河床面，因為當地水理量與推移質流量產生侵蝕時，讓表面位置配合侵蝕的進行降低，給予形成砂礫堆積能導致河床上升的條件，進行計算為標準。

在設置護岸工與坡腳保護工的河岸，以及設定侵蝕不會發生的河岸，因為其高度與堤線形狀使得流場受制約，其反應出河岸附近局部淘刷與砂洲形狀等，為此，特別是以層次〔2DB〕，設定河岸堤線形狀・高灘地高度時，應參考本節 4.1，適當地進行設定。

<建 議>

河岸侵蝕導致河岸後退時，河岸附近流況變化，受侵蝕土砂供給河床部等導致河岸位置固定的情況，以及局部淘刷等的河床高程、河床材料礫徑的反應，通常不同。

若有必要將這些反應列為分析對象，建議配合目的層次，適當地將河岸侵蝕納入計算。

<參考資料>

非黏性土砂的河岸侵蝕，可參考資料 1)。黏性土河岸的侵蝕，參考資料 2)~4)。軟岸的侵蝕，參考資料 5)。

- 1) 長谷川和義：非平衡性を考慮した側岸侵蝕量式に関する研究，土木学会論文集，No.316，pp.37-50，1981.
- 2) Darby, S.E. and Thorne, C.R.：Numerical Simulation of Widening and Bed Deformation of Straight Sand-Bed Rivers. I: Model Development, Journal of Hydraulics Engineering, ASCE, pp.184-193, 1996.
- 3) 服部敦，藤田光一，平舘治，赤川正一，湯川茂夫：黏性土からなる自然河岸の侵蝕に関する現地観測とその予測計算について，水工論文集，第 43 号，pp.713-718，1999.
- 4) 宇多高明，望月達也，藤田光一，平林桂，佐々木克也，服部敦，藤井政人，深谷涉，平舘治：洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・黏性土・植生の挙動－流水に対する安定性・耐侵蝕性を判断するために－，土木研究所資料，第 3489 号，1997.
- 5) 井上卓也，泉典洋，米元光明，旭一岳：軟岩上の限界掃流力と軟岩の洗掘速度に関する実験，河川技術論文集，第 17 卷，pp.77-82，2011.

4.5 水位、流量相關邊界條件的設定

<標準>

掌握水流分析層次、恆定・非恆定流、可活用設定條件之水文觀測數據的有無，對分析對象領域之上游端給予流量或水位，下游端給予水位，為標準作法。

計算對象之洪水期間，整個分析對象區間的區域輸砂量非常小，為此，對河床高程、河床材料粒度變化非常小，在某一定流量以下的期間予以省略，以進行設定為標準。

4.6 供給土砂與河道外搬出、搬入的條件設定

4.6.1 供給土砂的設定

<標準>

供給土砂設定方面，就計算對象從本流及支流上游端流入的土砂量，對領域邊界部的流量等水理量，予以給定為標準。

供給土砂應掌握表 6-4-1「土砂供給條件」各欄所說明種別，亦即每一項同樣粒徑與只有推移質的混合粒徑【UM】、混合型與通過型懸浮質的混合粒徑【MSL】分別說明的下列事項，適當地設定。另外，混合型與通過型方面，參照第 16 章 綜合土砂管理的調查之 2.2.1 土砂動態掌握方法 之沖積河川相關的例示說明。

1) 種別【UM】

a) 土砂輸送與土砂供給宏觀之平衡狀態時

從宏觀的角度看，河床為動態平衡狀態，且不會因為流量規模改變，亦即推移力等水理量縱斷上大致相同的區間，可將此區間的土砂輸送量替換成供給土砂量，選定作為供給土砂的設定對象區間。

在這樣的區間，標準做法是在分析對象之河道區間上游，選定河床形狀與河床材料經年不會有太大改變、安定且河道縱斷方向大致呈相同狀況的河道區間。

若能找出這樣的區間，把該區間視為助跑區間，納入計算對象領域，在助跑區間上游端，滿足動態平衡條件給予供給土砂。具體而言，依據本章 3.2 所設定洪水流計算方法，計算助跑區間上游端的水理量，配合如下所設定河床材料粒徑之推移流量與懸浮質流量（表 6-4-1 之中只有流送形態該當於種別【BSL】的情況）計算之，把這些當作供給土砂量，給予助跑區間上游端之河床材料粒徑，應用助跑區間的河床材料調查成果進行設定，時間上視為不變。但助跑區間及其下游的河道區間屬相同河段區分（參照第 4 章 河道特性調查 2.1.3 沖積河道的河段區分與河段類型），可一併使用下游河道區間的河床材料調查成果，進行設定。

依據上述說明土砂供給設定下、進行河床變動計算的結果，若助跑區間的下游端與其附近計算出有顯著的河床變動或河床材料變化時，應從下列之中判斷為適當的方法加以選擇，進行供給土砂設定的修正。

- ・從助跑區間設定需修正的觀點

修正助跑區間位置或區間長等，以及給予上游端的河床材料粒徑。

- ・從活潑河道變化所產生河道區間與助跑區間相距不長之觀點

計算對象領域進一步往上游拓展，同時助跑區間也往更上游從新設定。

若即使進行上述修正，助跑區間下游端及其附近，計算河床高程或河床材料有顯著變化時，很難視為「土砂輸送與土砂供給形成巨觀平衡狀態」，而應認定該分析代表某種土砂供給下的河道變化，並整理出計算結果（參照本章 5.2 分析的驗證與校正表格「重現性無法提高到對象層次時」的相關記載）。此時，計算結果應連同助跑區間下游端的土砂輸送量（必要時為每粒徑階的量）一起整理。

b) 未發現土砂輸送與土砂供給處於平衡狀態的河道區間時

未發現 a) 所述滿足要件的河道區間時，可變換為 a) 所示助跑區間，採用假設的河道區間給定供給土砂。假設河道區間之縱斷坡度固定，縱斷方向初始擁有均一的河道形狀與河床材料粒徑，設定產生相當給予這些要素的供給土砂之輸砂。具體而言，參考如計算對象區域上游端邊界周邊的各項要素，進行假設河道區間河道形狀等各種要素的假設，算出相對於該河道以下所說明任何一種適當方法所供給土砂，就對象區域的既往河床變動重現計算之，反覆進行各要素之修正，而決定各要素（參照本章 5.2 分析的驗證與校正），以便取得預定的重現性。

- ・採用假設助跑區間之給予方法

計算對象領域上游端連結假設的河道區間，把這部分當作假設的助跑區間納入新的計算對象領域，採用與 a) 相同方法，在假設的助跑區間上游端能滿足動態平衡條件的供給土砂。

- ・把假設的河道區間視為只進行輸砂量計算的“槽”的方法

將假設河道區間的計算和計算對象領域之河床變動計算本身切割出來，把河道形狀等要素視為時間上不變而只進行依據均勻流計算的輸砂量計算，然後將該結果視為從計算對象領域上游端的供給土砂。

上述在供給土砂設定下所實施河床變動計算結果整理，將假設助跑區間下游端輸送土砂量，以及視為“槽”、計算出來的供給土砂量（必要時都取每種粒徑階的量）合併整理。

此外，即使反覆如上述之修正仍無法取得預定之重現性，應依據本章 5.2 分析的驗證與校正之「再現性無法提高到對象層次時」相關記載，整理計算結果。

c)反映土砂供給狀況變化的供給條件設定時

有一定規模以上流域地被狀態變化，或者斜面崩塌、壩之興建、壩之排砂等，就可能產生流量與土砂供給量關係顯著的變化。進行類似這種反映土砂供給狀況變化的分析時，配合所找出變化要因，設定適當供給土砂的標準方法為，以 a)或 b)所設定供給土砂作為比較的基準，配合對象之變化要因，適當地予以增減。具體而言，採用 b)所記載「把假設的河道區間當作只進行輸砂量計算的“槽”」，對變化重要因素作用後的狀況，適度調整此“槽”之河道形狀等各項要素的方式，設定配合該重要因素的流量與供給土砂量關係的方法。

d) 無需以土砂輸送與土砂供給存在宏觀平衡河道區間為前提時

短區間所形成局部淘刷或河口砂洲湧水等，以某特定地點及其周邊土砂輸送量不均衡為主因之一次性排水的短期河床變化作為對象。

此時，沒有必要如 a)、b)所示設定助跑區間或假設性的助跑區間，而只要在離上游端設置位置之供給土砂量未達差異之充分距離設定之，然後與 a)同樣地在上游端滿足動態平衡條件地給予供給土砂，以避免在特定地點也出現上游端的位置設定所導致供給土砂量的差異。

2) 種別【MSL】

就混合型推移質・懸浮質，標準做法是以上述 1)種別【UM】設定方法相同，設定供給土砂。

若供給土砂包含通過型的懸浮質（沖瀉載也包含在內），以流量與供給土砂量之關係為標準作法。有一定規模以上流域地被狀態變化或斜面崩塌、壩之興建、壩之排砂等所導致供給量變化的供給土砂量設定，也是以相同的方法實施。

需注意，通過型的懸浮質無法靠輸砂量公式等進行水理方面的計算與設定，最好能重視設定流量與供給土砂量之關係等方法，讓供給土砂量能適當地巨觀呈現。

<建 議>

種別【MSL】的供給土砂量，依據第 4 章 6 節的輸送土砂量觀測結果設定。

<例 示>

洪水流導致侵蝕，使得高灘地或河岸等成為土砂供給源時，可運用適度反映這種侵蝕特性的輸砂量方程式等，把其侵蝕特性納入土砂供給量條件設定之中。

4.6.2 河道外搬出、搬入的設定

<標 準>

河道外的搬出與搬入的設定，標準做法是以時間序列的方式設定搬出・搬入之土砂量與粒徑、實施範圍、實施時期等。

4.7 河床高程、河床材料初始條件的設定

<標準>

河床高程的初始條件設定，在〔1DB〕的平均河床高程之河道縱斷方向分布，以及在〔2DB〕的平面河床高程分布，採用定期橫斷測量及河道平面測量的成果設定為標準。

河床材料初始條件的設定，採用河床材料調查成果，繪定河床表層與其下層構成材料粒度分布為標準。

表 6-4-1 所示「河床初始條件」種別，亦即掌握均一粒徑【U】與混合粒徑【M】各別描述的下列事項，適當地設定。

1) 種別【U】

整個分析對象領域之全域與深度方向，予以單一的粒徑

2) 種別【M】

粒度分布的河道縱斷方向與深度方向以均一性因應之，適當的設定。

<建議>

種別【M】之中，建議如下行設定。

1) 粒度分布在河道縱斷方向呈現均一的情況

在整個分析對象領域之全域及深度方向，依第 4 章 河道調查 第 2 節「河床材料的看法」據以設定一連串區間代表性粒度分布。

2) 粒度分布在河道縱斷方向或深度方向不均一時

建議配合其狀況如下進行設定。

表層河床材料分級，且河道縱斷方向呈現粒度分布不均一、1)的給予方法未必能帶來良好分析結果時，最好給予於河道縱斷方向的不同粒度分布。該場合之河床表層與下層有相同的粒度分布。

伴隨河床降低形成河床表層粗粒化等狀況，因此，若河床表層及其下層粒度分布明顯不同，最好能在設定時給予交換層及其下層不同的粒度分布。

第 5 節 分析的實施與驗證・調整

5.1 分析的實施

<標準>

水流、輸砂、河床狀況的計算，最好針對時間項逐次進行數值積分，得出其解為標準。

此時，相對於水流，河床的時間變化通常較慢，因此，實施水流分析，各時間間距內的河床時間變化，可忽略「準恆定」條件下，進行計算。

5.2 分析的驗證與調整

<概說>

驗證的目的在於讓以各種設定建立的分析方法，達到符合目的、進行技術性判斷與預測的層次，並比較分析結果與調查資料，進行重現性方面的評估。

調整的目的在於進行重現性的改善，應比較相對於各種設定項目變更的分析結果變化幅度與能利用的數據與相關技術資訊，找出能以數據做支撐，同時兼具技術合理性、提高重現性的設定項目，然後針對各設定項目綜合調整。

分析結果與調查數據的比較方面，在對象河道區間內某期間所產生河床高程・河床材料粒徑變化之重現計算，和該期間末及期間內所取得調查資料（主要是第4章河道特性調查第3節各時間點河道狀況記載之調查數據）進行比較。一般而言，調查數據都得掌握「承受一次或數次排水後某時間點的河床狀況」。因此，這樣的比較頂多只能進行承受某次排水「結果」的河床狀況重現性評估，而無法歷時追蹤排水期間河床狀況的「變化過程」，評估其重現性。

這樣的特徵，仍可有效的對「因為洪水而單方向變化的進行，即使洪水後變化仍殘留的型式」（第4章河道特性調查圖4-4-1所呈現模式a）、b）、c））加以驗證。

相對於此，對「只有洪水期間才會出現變化，洪水後又恢復原狀的型式」（第4章河道特性調查圖4-4-1所示模式d））的驗證則有不足，掌握洪水期間變化過程的特定目的調查變得重要。

實際驗證無法完全區別上述型式，比如，平均河床高程長期縱斷分布變化時，河床經年持續產生上升與降低的區間，以及一次洪水左右短期變化情況下、洪水前後形成明顯變化的地點，可視為「洪水所導致單方向變化且洪水之後殘留變化之型式」的區間與地點，較之其他區間・地點視為重點比較分析結果。

此外，為了評估重現性，從上述的比較找出更多資訊甚為重要。

比如，應儘可能實施長期的重現計算，用更多時間點比較調查數據，將痕跡水位列入驗證對象，運用複數地點所取得水位時間序列數據，進行綜合的掌握（第2章水文・水理觀測第7節河川水流的綜合掌握）。

其次，必要時如本節5.3所述，同時實施分析與調查，效果更好。

調整的對象為粗糙度係數設定、交換層厚度設定（3.4）、各種輸砂量方程式設定（3.5、3.6、3.7），以及初始條件・邊界條件等的設定（第4節）。

輸砂方程式補正（參數的補正等），必要時也納入調整項目為佳。

上述項目應依據開頭所示基本思維，適當地調整。

另外，即使反覆調整各種設定，仍無法提升重現性，達到所預定層次的情形也有。

此時，應改變做法，重新篩選・整理事實現象的類似點與差異點，參考具體目的與要件，針對個別事例一一判斷，依據該結果進行技術性判斷與預測，該使用那些資訊相當重要。

不僅如此，若須補層次之不足，得實施適當的追加調查，以提高重現性。

5.3 分析與調查併行時的驗證與調整

<概 說>

同時實施分析與調查時的一般順序如下。又，此情況下所進行的調查，應定位為有機連結調查與驗證・調整之特定目的調查。

- 1) 發現以分析法計算結果相對較大變化之設定項目等為目的，應實施感度分析。
 - 2) 參考其分析結果，設定觀測項目、實施地點與必要精度等，實施調查。
 - 3) 應用調查結果，再度進行分析，取得層次之重現性應進行驗證與調整。
- 必要時應反覆進行上述 1)~3)。

就調查而言，第 4 章 河道特性調查 第 3 節 各時間點的河道狀況 所說明河道地形測量等共通基礎調查當作基礎內容、第 2 章 水文・水理觀測 第 7 節 河川水流的綜合掌握 的水位同時多點觀測或第 4 章 河道特性調查 第 6 節 土砂輸送特性 之輸送土砂量調查等，搭配能逐次追蹤洪水期間河道「變化過程」的觀測，效果更好。

若要確實有效改善這種觀測的重現性，分析預測，應驗證事項及實施驗證所需數據精度的明確，至為重要。

編譯：水土保持局技術研究發展小組

Research and Technology Development Team, SWCB, COA

December 2017

本文件之翻譯及轉載，均符合日本著作權法相關規定。