

# 大甲溪上游輸沙量估算之研究 (未完待續)

## Study on the Estimation of the Sediment Transport in TA-CHIA CHI Upstream Basin(I)

臺灣大學農業工程研究所畢業生

李 鴻 基

H. J. Lee

### ABSTRACT

Sediment transport is the most important problem of water control and utilization. It should be considered in various designs of water resource work, though it's very complicated and troublesome.

TA-CHIA CHI abundant with high water power is one of the largest rivers in Taiwan; a series of reservoirs have been constructed along the river for electric power development. As the others in Taiwan it has the characteristics of short run and steep slope, not like those of the long run and flat alluvial river of continental regions. TA-CHIEN DAM located at TA-CHIEN completed last year is the greatest one along TA-CHIA CHI.

The estimation and the control of the sediment are indispensable to the prevention of the deposition of the reservoir. In this study the author analyzed bed load transport rate by Einstein, Schoklitsch's, Meyer-Peter Methods setting hydraulic radius  $R_b'$  as average depth  $h$ , and compared the results with those of calculated  $R_b'$  each other, and estimated suspended load by average rating curve, and assumed it not over 3% in high discharge at the 5 stations upstream from TA-CHIEN, and all calculations are by computer.

Finally following conclusions have been obtained:

- (1). Hydraulic radius  $R_b'$  is the most important criteria in bed load transport, but its function is not clear, further research in this respect should be hold in the near future.
- (2). Comparatively, Einstein's method with calculated  $R_b'$  is adoptable in TA-CHIA CHI.
- (3). The estimated possible life of the reservoir is about 73 years without considering possible floods, however, if possible floods are considered, the possible life of the reservoir reduces to 63 years.

For the lack of some basic hydraulic parameters, it is mere a theoretical study. Maybe it doesn't coincide with the fact well, but water resources is limited in Taiwan, and the proper site of dam is rare, and the investment is so large that we should not hesitate to carry out the regulations to protect the reservoir from the deposition of the sediment.

## 一、緒 言

泥沙問題為地表水控制與利用之主要問題。任一水資源工程之設計，必須詳細考慮受泥沙之行徑、輸送、沉澱影響的程度。對於各種不同的設計，如灌溉排水渠道；為了航運及防洪而改善或穩定河道；水庫之規劃與運用；港口航道之維護；公共給水之淨化；集水區中土壤沖蝕之控制，皆應考慮不同尺度之泥沙問題。泥沙問題受水文、氣象、地質諸因子之影響，牽涉之學理又極深廣——流體力學、水文學、河川學、氣象學、亂流學、土壤力學、地質學等，故十分錯綜複雜。目前，泥沙之控制泰半端賴經驗公式或試誤之估算；且泥沙問題受局部性之影響甚鉅，實難建立一套完整且通用之處理方式。

臺灣河川陡峻，流短而急；而且雨量強度集中，乾季時，天然河川乾涸，河床佈滿大小不等之礫石，水流拘限成清澈之帶狀蜿蜒。然雨季時，河川水位暴漲，黃濁之河水澎湃洶湧。在河川之中上游，暴雨所造成的集中地面逕流，掠行整個集水區，攜帶大量泥沙滾滾流入主流中。而在上游之發源地深山中，由於經年累月之地質風化作用，致使在暴雨時，不固結之岩石為洪流所沖擊而滾移，往往能聞巨石滾流而下之駭人聲響。在乾、雨兩季，河川所表現之特性，迥然相異，有天壤之別，此實為研究河川有關問題之最大困難。

臺灣河川雖不少，然其水力特性優異能深加利用者鮮矣。大甲溪為臺灣第三大河流，亦為臺省水力蘊藏最富之河流；加以東西橫貫公路之開闢，交通便利，臺電已在大甲溪開發一系列水力發電計劃——達見、青山、谷關、天輪；其中達見壩為遠東最高之拱壩，亦為大甲溪開發計劃中最重要者，已於去年完工運用。臺灣水資源有限，而可供開源者亦已迨盡，另者水源與賴水力發電之需求日劇，端賴節流與保育之途。而水庫完工運用後，則唯賴妥善之保育，以維護其效益。泥沙問題常構成水庫效益之最大威脅。有鑑於此，縱其錯綜複雜，理論尚未臻完善，而實際資料又極缺乏，筆者仍不揣淺陋，謹擇大甲溪上游達見以上五個水文站（四季郎、環山合流、南湖、松茂及達見）之輸沙量觀測記錄，利用電子計算機以不同方法加以分析研究，並將理論與實際資料比較，以求合理之估算模式。在泥沙科學初屬萌芽之今日，牛溲馬勃，或許有可用之處，是以不顧淺陋，期能拋磚引玉，使我國泥沙科學能早日發展完備，庶乎水資源事業之投資能有保障矣！

## 二、流域概況

### 2-1. 概 述

大甲溪發源於中央山脈，流貫臺中縣境，在梧棲之北注入臺灣海峽，為臺灣第三大河流，全長 124 公里，流域面積廣達 1 272 平方公里。流域內多屬山地，平地僅占十分之一。全流域雨量豐沛，中上游岸峻流急，水力豐富。上游高山多在海拔三千公尺以上，中游各段地勢亦甚高峻。在上游有七家溪、合歡溪及南湖溪三大支流，在太保久（今名蘇木）會流而下，因為地質之關係，大甲溪上游反較中游為平緩開闊。達見以上溯至發源地，長度雖僅 37 公里，僅及全長之三分之一強，但控制之流域面積計 514 平方公里（占全流域 40% 強），加之下游支流志樂溪之流域面積 90 平方公里，共計 604 平方公里。另尚有一小部分直接流入大甲溪本流之面積約 8 平方公里，合計 612 平方公里，列為達見水庫計劃集水區經營之對象。因上游開闊，至達見壩址後進入峽谷，故為良好之水庫位置。本溪上游地勢高峻，故河床坡度甚大，自發源地至太保久之間 19 公里，坡度達 1/36，為全流最狹之一段。其間溪澗衆多，林木茂密，為尚未開發之原始林地；太保久至達見間 18 公里，坡度減為 1/90，全線平均坡度為 1/60，可利用水頭極高，致使大甲溪為全省水力蘊藏最富之流域。大甲溪流域之開發以達見水庫為最高峯。達見大壩調節洪枯，提高各電廠尖峰出力，供應下游繼續增加之灌溉、都市給水、工業用水等。用水需要實為流域開發之樞紐，對國計民生大有裨益。就水資源有限，可供開源之處幾近窮盡之今日，且投資鉅碩，自應善予珍惜，俾其功效垂於久遠，臻乎最有益之境界。

### 2-2. 自然環境<sup>(1)(2)</sup>

#### (一) 氣 象

本集水區氣象觀測站有環山、梨山、佳陽、達見、福壽山農場及武陵農場等六站，後二者屬於退除役官兵輔導會，餘者皆由臺電觀測。據統計，全年中以 1 月份最冷，7 月份最熱。全年平均溫度 15°C 左右，最高溫為 39°C，最低溫 -10°C。全區現有雨量站之平均密度為每 57 平方公里一站，唯各站均集中於主流之兩岸。區域內標高 2,000 公尺以上者，民國 55 年以前均未設站，故分佈甚欠理想。降雨量多集中於 5 至 9 月，占全年雨量之 59.7%，尤以 6 月份最多，月雨量達 367mm；7、8 兩月次之。由於

\* 括號內號碼表示參考文獻目錄

此一季節西南季風盛行，而本區位於中央山脈西側迎風地帶，受雨量大，又值天氣炎熱，對流旺盛，雷雨頻仍，因而雨量益增。枯水期在 11 月至翌年 2 月，此期間內之降雨量僅及年雨量之 18%。標高 2,000 公尺以下平均年雨量約 2,000~2,400mm，標高 2,500 公尺以上則在 3,000mm 以上，全區平均年雨量約為 2,435mm。

本集水區位於中央山脈之西，受颱風威脅雖較其他區域少，然被侵襲時亦常發生巨大洪水。尤以行徑經北部或北部海上向西北或南進行之颱風侵襲時，中部、西南部地區因盛行氣流之影響，常有豪雨，行徑橫過中部而入臺灣海峽者，於越過中央山脈進入海峽時，因本區位於中央山脈邊緣，地勢高峻，環流結構未因遭地形之障礙而破壞，亦常引起強烈風災和暴雨。據統計，嚴重颱風大都集中於 7、8、9 三個月內，一日間最大雨量出現於 7、8 月者最多。颱風期間降雨日數雖自二至五、六日不等，然實際延時大抵在 40 小時左右，而大量豪雨集中於 24 小時以內，其一次雨量約達總雨量之 83%。本區記錄之一日最大暴雨量為 620mm (民國 33 年 8 月 13 日於匹亞南鞍部站)。

#### (二)地質與地勢

本集水區土地面積有 61,275 公頃，其中國有林班地為 57,547.102 公頃，山地保留地為 2,451.550 公頃，輔導會農場地為 1,276.348 公頃，除山地保留地及輔導會農場地等部份較為平緩外，一般均為急陡坡地，地勢險峻，海拔高低落差甚鉅，侵蝕劇烈，土層淺薄，岩層裸露，地質俱屬黑板岩或千枚狀板岩所構成之水流長層變質岩，岩質較脆弱，節理發達，易於風化，因之，往往造成開濶平坦之地形。

#### (三)水 文

本集水區臺電設有水文站 8 處，其中達見站之觀測始於民國 30 年 6 月，第二次世界大戰期間一度停測，至民國 42 年始予恢復，至民國 57 年才廢置，改以鄰近之達盤站施測，累積有 34 年記錄 (1935~1968 年)，其中有 15 年記錄由久良栖及武界推補 (請參看圖 2-1)，為各站中記錄最長者，因而據以求得之達見站各種頻率之洪水流量如下：

洪水頻率	洪水量(cms)
50年一次	2,350
100年一次	2,620
200年一次	2,940
500年一次	3,350
1,000年一次	3,735
10,000年一次	4,850

區內主要水文站歷年記錄瞬時最大洪峰流量如表 2-1。

表 2-1. 達見水庫集水區主要水文站記錄最大洪峰流量表

溪 別	站 別	集 水 區 面 積 km <sup>2</sup>	最大 洪 峯		發 生 日 期 年 月 日
			cms	cms/km <sup>2</sup>	
南 湖	南 湖	125.65	400.0	3.18	51.10.5
四 季 郎	四 季 郎	156.49	850.0	5.43	52.9.11
南 湖 合 歡 合 流	環 山 合 流 點	257.85	870.0	3.37	48.8.30
大 甲	佳 陽	478.10	1,500.0	3.14	51.9.5
大 甲	達 見	514.00	2,503.8	4.87	34.8.14

各水文站含沙量之觀測，咸以取樣測定懸移質含沙量，其中以達見站為最長久，始於民國 45 年，然當時使用老式取樣器，且 46 及 47 年間橫貫公路施工，因此認為測定成果不佳，48 年以後用美式 DH-48 型積深式取樣器，除較大洪水時仍無法取得適當水樣外，中低水流之含沙量已較前確實。本文分析乃依據達見、南湖、四季郎、環山合流點及新近設立之松茂站觀測所得之含沙量資料。文中並以(A)站表四季郎站，記錄期長 13 年 (民國 48 年~民國 60 年)；(B)站表環山合流點站，記錄期長 10 年 (民國 50 年~民國 60 年)；(C)站表南湖站，記錄期長 12 年 (民國 49 年~民國 60 年)；(D)站表松茂站，記錄期長 2 年 (民國 59 年~民國 60 年)；(E)站表達見站，引用記錄期長 10 年 (民國 50 年~民國 60 年)，記錄期不長，且間有斷續，然已為全省各河川中含沙資料最齊全者，故爰以引用，加以分析。各水文站之位置圖如圖 2-1。

利用各站實測記錄，除松茂站外，各站與達見站間存有下列之流量相關關係<sup>(2)</sup>

設  $x_a$  表四季郎站流量  $x_b$  表環山合流站流量  
 $x_c$  表南湖站流量  $x_e$  表達見站流量

單位 cms

$$x_e = 2.3703x_a + 11.9342$$

$$x_e = 1.9165x_b + 6.7704$$

$$x_e = 3.8329x_c + 8.7991$$

推移質輸沙量在臺灣尚乏直接測定法，吾人僅能於洪水後測量河床斷面洪水坡降，採取河床質作粒徑分析。各站之基本資料及其分析容後討論。(參看第四節)

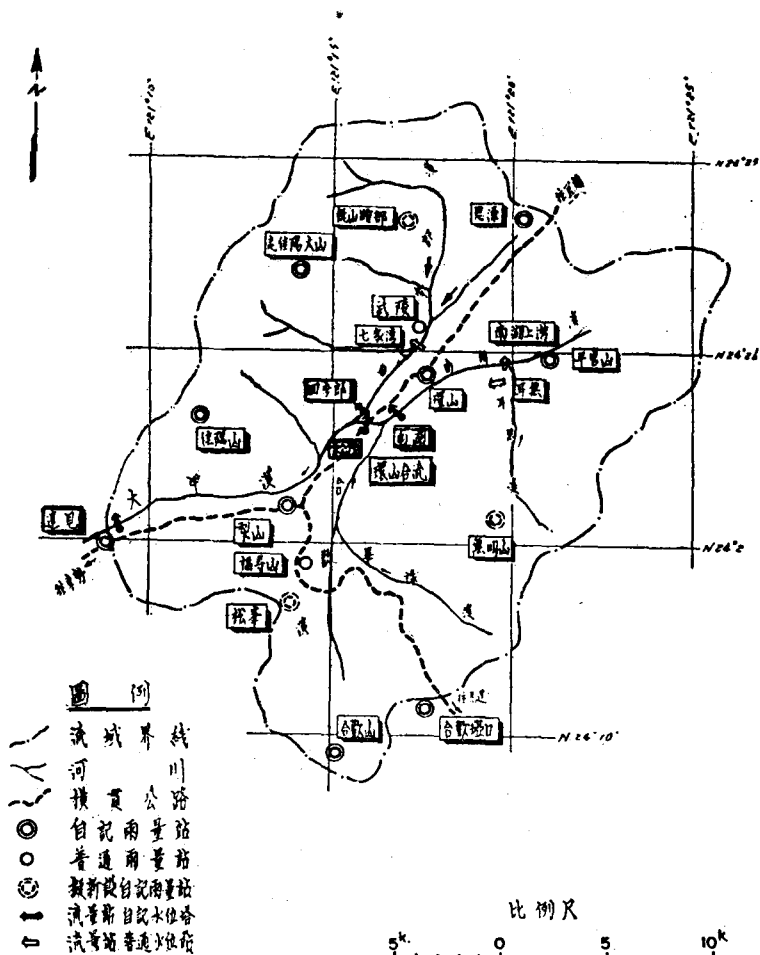


圖 2-1 達見水庫集水區水文觀測站位置圖

表 2-2. 達見水庫集水區各溪流狀況表

區 別	溪 別	河 床 堆 積 物	粒 徑 cm	河床平均坡度 %	崩 塌 地 情 形
A	南 湖 溪	塊 石	30~100	4	崩塌地不多
A	耳 無 溪	塊 石	30~100	5	崩塌地不多
B	七 家 灣 溪	砂 礫	5~ 30	4	中下游多開墾地
B	雪 山 溪	砂 礫	10~ 50	6	上游較多
B	有 勝 溪	砂 礫	10~ 50	3	中上游多開墾地
B	四 季 郎 溪	砂 石	5~ 30	6	上游較多
B	伊 卡 丸 溪	土砂、礫石、塊石	5~100	2.5	上游較多
C	畢 祿 溪	塊 石	30~100	5	崩塌地不多
C	合 歡 溪	塊 石	30~100	4	崩塌地不多
D	比 坦 溪	礫石、塊石	30~100	27	上游較多
D	達 盤 溪	土砂、塊石	20~ 80	9	中下游較多
D	成 武 溪	土砂、塊石	20~ 80	9	中下游較多
D	晉 元 溪	土砂、塊石	20~ 80	9	中下游較多
D	劍 山 溪	砂 礫	20~ 50	12	發源地有大崩山
D	劍 陽 溪	塊 石	50~100	20~40	崩塌地不多
D	佳 陽 溪	塊 石	50~100	20~40	崩塌地不多
D	松 茂 溪	塊 石	50~100	20~40	崩塌地不多

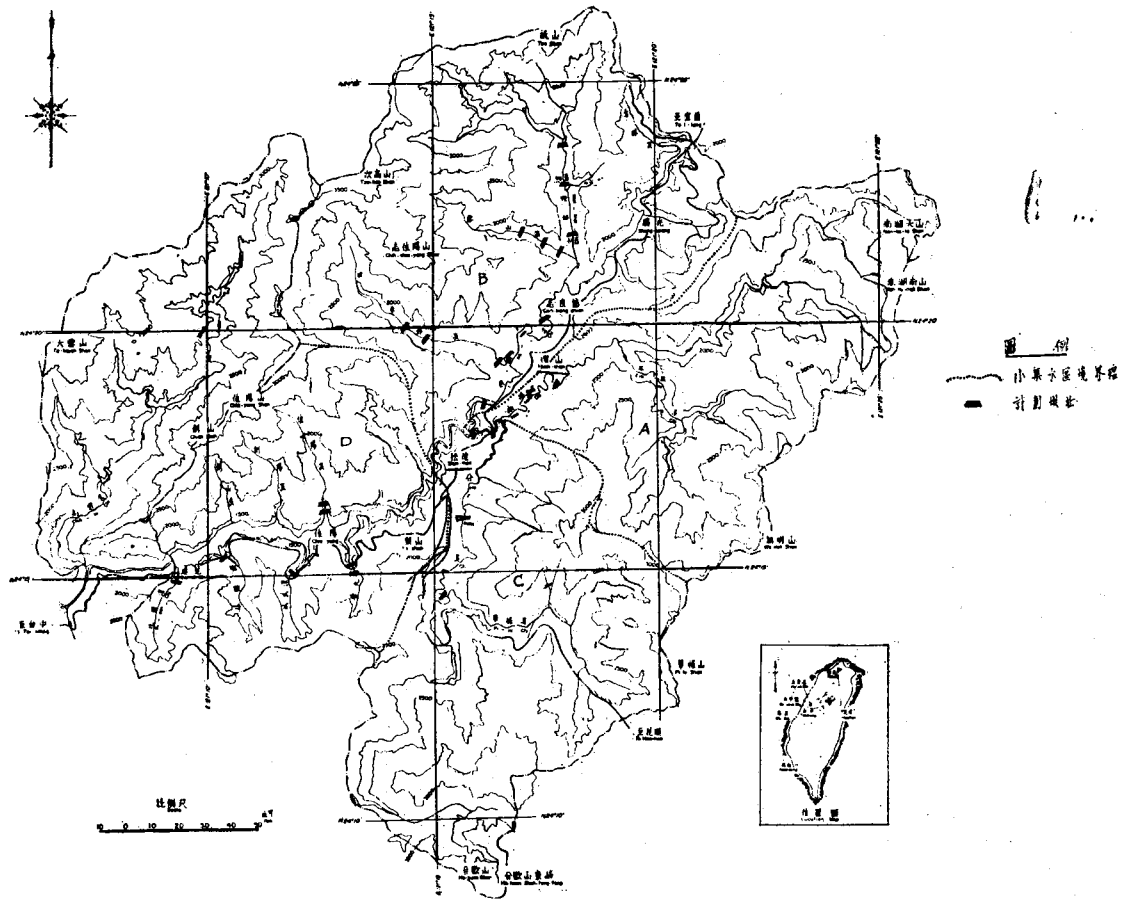


圖 2-2 各區之分佈及溪流之位置圖

### 2-3. 溪流狀況及土地利用情形

溪流之狀況，所含河床堆積物及崩塌情形亦為影響河川泥沙之主要因素。經臺電於民國 56 年 10~11 月進行勘查本區各溪流之溪床情形及選定攔砂壩壩址，將本縣水區劃分為：

- (A) 區南湖河流域 包括南湖溪及耳無溪。
- (B) 區伊卡丸河流域 包括七家灣溪、有勝溪、四季郎溪及下游之伊卡丸溪等五條溪流。
- (C) 區合歡河流域 包括畢祿溪、合歡溪。
- (D) 區左岸包括比坵溪、達盤溪、成武溪、晉元溪四條溪流；右岸包括劍山溪、劍陽溪、佳陽溪及松茂溪四條溪流。

近年來由於開闢橫貫公路及伐木墾植，造成崩塌及河床堆積，各溪流狀況如表 2-2。

各區之分佈及溪流之位置如圖 2-2<sup>(2)</sup>所示。崩塌地位置如圖 2-3<sup>(2)</sup>所示。

本集水區氣候溫和，宜於種植臺灣平地所缺乏之溫帶果蔬。然乏合理開發，多趨濫墾，超限利用，故土地利用情形複雜，其中除了略具規模之三數農場曾顧及水土保持及臺電電源保護站設有水土保持示範區外，其餘以果蔬為主之旱作農地均恣意耕作，缺乏水土保持工作，因而農墾為人為沖蝕中重要因素。目前以伊卡丸溪農墾地最多。而南湖溪及合歡溪上游地區因均係保安林，故未被開墾。

崩塌地、裸露地及農墾地實為河川泥沙之根源，如不加以處理，遇暴雨即易崩解、沖蝕流失，繼續風化、崩解循環不已，愈演愈烈，非但土壤資源破壞無遺，且產生大量泥沙，為水庫帶來無窮後患。

## 三、文獻探討

### 3-1. 沉滓之來源

沉滓之範圍極其廣泛，本文僅研討天然河川之輸

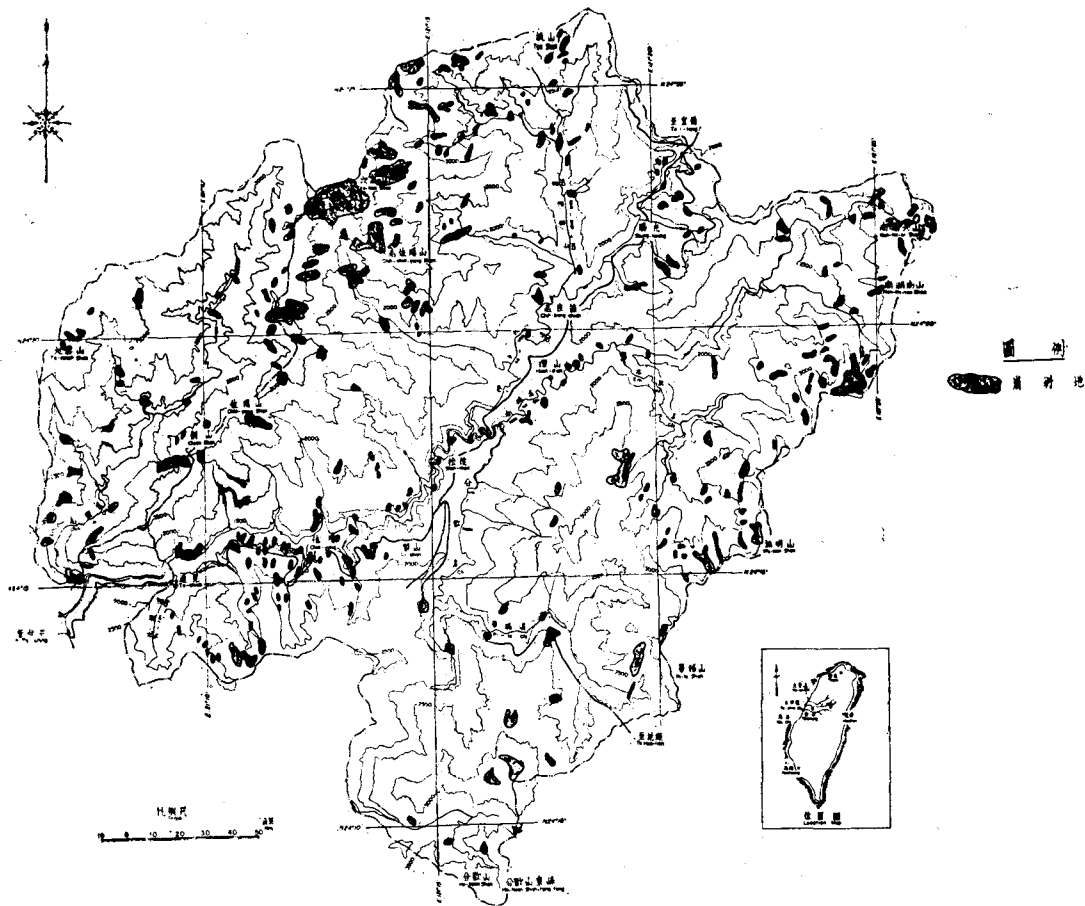


圖 2-3 達見水庫集水區崩坍地理位置圖

沙問題。凡於水流中非水之物質即為沉滓 (Sediment)。一般言之，河川所携負之沉滓主要來源有下列七項<sup>(6)</sup>：

(1)薄層冲蝕 (Sheet Erosion)：在農業地帶、森林區或其他廢用區，由降雨產生之地面逕流所造成土壤表層之移動，頗均勻而形成一片狀。

(2)溝化作用 (Gullying)：河道在土中之割截作用 (Cutting) 及由於集中逕流所造成非固結性地質形成作用。

(3)河川槽渠冲蝕 (Stream-Channel Erosion)：包括河岸之割截作用及已定形河川之退化作用 (Degradation)。

(4)由於重力作用所產生之土壤大型移動：如地滑、地陷及土壤之緩移現象 (Soil Creep)。

(5)表層土壤之移動，掠行洪水平原之洪流所造成

之洪流冲蝕 (Flood Erosion)。

(6)道路、鐵路、電力、建築工程、工業計劃等文明進展所造成之冲蝕。

(7)冶礦、工業廢水、廢物注入河川中。

綜觀之，土壤冲蝕乃河川沉滓之最主要來源，而沉滓之淤積作用使河川發生若干困難問題，如河床之漸次淤高，致使洪水水位升高，災害增加；水庫上游淤積大量泥沙後，其有效容量減少，維護、運轉費益高，而水庫之經濟壽命及利用價值益減。泥沙淤積亦致使河流發生彎曲現象，導致水流改道，萬頃良田夷為澤國。灌溉渠道中，因淤積而減少渠道斷面，減低灌溉效率。凡此種種弊端，悉為沉滓所造成，欲消彌之，端賴有效防止土壤之過分冲蝕，以降低沉滓之數量。

### 3-2. 土壤沖蝕過程

土壤沖蝕係土粒脫離原有已平衡之表面而移動至河槽內之過程。薄層沖蝕 (Sheet erosion) 意指表層土壤之移動，隨地表逕流在地面漫流，並未形成固定河槽。漫地逕流 (Overland flow) 泰半流速緩慢，故只能携走結構較鬆軟，顆粒較細之土壤。然在坡度較陡峻之地區，地表逕流受重力之影響，使薄層沖蝕漸次劇烈，滙集成小紋，進而變成溝壑，進而合成深溝，形成山溝沖蝕 (Gullying Erosion)。

山溝沖蝕為亂流 (Turbulence) 之局部擾亂力將土粒由河底或岸邊沖走。往往縱斷面坡度越陡峻，山溝沖蝕越厲害，而造成了更深之山溝。

平靜無風之平地上，雨點激打土粒，致使斜坡上土粒大抵向下坡移動，甚少向上移動。雨點降下之重力為沖蝕之主要因素，因動能與土粒直徑三次方及流速平方之乘積成正比，故雨之沖蝕能量隨雨點之大小與強度而變，強度高且雨點大之沖蝕能量約為濛濛細

雨之數千倍。由於雨點之激打為沖蝕之重要動力因子，因此有覆蓋之地面可避免雨點之直接激打，減少土壤之沖蝕。

土壤沖蝕能力視地表坡度、長度、降雨強度、土壤固結能力及地面覆蓋情形而定。木斯萬夫氏 (Musgrove) 經由小區試驗結果，指出土壤損失  $E = KS^{1.85}L^{0.35}P^{1.75}$ ，式中 E: 土壤損失 (畝吋)，S: 地表坡度 (%)，L: 地表坡長 (呎)，P: 延時 30 分之最大年雨量 (吋)，K: 隨土壤固結能力地面覆蓋情形而定之係數。然而一自然流域之土壤沖蝕情形並非若此單純，得視整個流域之佈置、流況、土地利用情形等條件綜合影響而定。

### 3-3. 沉滓種類

天然河川中，各處可見不同大小組成之沉滓物。經常可見到泥土、粘土、砂粒一類微小顆粒在水中懸浮漂流，致使河川含沙量增高，往往混濁不能見底，較粗之砂石則在亂流中跳躍滾進；而大型卵石均沿貼

表 3-1. 沉滓物粒徑分級表

大 小、公 厘 (Millimeters)	百 萬 分 之 一 公 尺 (Microns)	英 吋 (Inches)	等 級
4000-2000		160-80	極大石 Very large boulders
2000-1000		80-40	大石 Large boulders
1000-500		40-20	中石 Medium boulders
500-250		20-10	小石 Small boulders
250-130		10-5	大圓石 Large cobbles
130-64		5-2.5	小圓石 Small cobbles
64-32		2.5-1.3	極粗碎石 Very coarse gravel
32-16		1.3-0.6	粗碎石 Coarse gravel
16-8		0.6-0.3	中碎石 Medium gravel
8-4		0.3-0.16	細碎石 Fine gravel
4-2		0.16-0.08	極細碎石 Very fine gravel
2-1	2000-1000		極粗砂 Very coarse sand
1-1/2	1000-500		粗砂 Coarse sand
1/2-1/4	500-250		中砂 Medium sand
1/4-1/8	250-125		細砂 Fine sand
1/8-1/16	125-62		極細砂 Very fine sand
1/16-1/32	62-31		粗坩土 Coarse silt
1/32-1/64	31-16		中坩土 Medium silt
1/64-1/128	16-8		細坩土 Fine silt
1/128-1/256	8-4		極細坩土 Very fine silt
1/256-1/512	4-2		粗粘土 Coarse clay
1/512-1/1024	2-1		中粘土 Medium clay
1/1024-1/2048	1-0.5		細粘土 Fine clay
1/2048-1/4096	0.5-0.24		極細粘土 Very fine clay

河床隨水流滾移並進。然水流之情形變化無常，在某一水流條件下有其特定之移動狀態，而各狀態間更乏明顯之區別。同一大小之顆粒在某一水流條件下或懸浮於上，而在另一水流條件下或屬於跳躍滾進。

一般為了方便起見，將沉滓載(Sediment Load) 概略分為河床載 (Bed Load) 與浮懸載 (Suspended Load)，即通常所言河床質與懸移質兩類。河床載係指運動於大抵距河床二倍粒徑厚之河床層 (Bed Layer) 內或其附近之沉滓粒子，浮懸載乃指在此河床帶以上浮懸，而不與河床接觸者。河床載大抵又可分為沿貼於河床上滾動者——接觸載 (Contact Load) 及在河床上滾移之卵石或塊石之跳躍載 (Saltation Load)。

以上所論及之河床載與浮懸載均為河床本身之物質所組成者 (Bed material Load)，另外有由河川上游兩岸表土冲刷所造成與河床本身之物質相異之冲洗載 (Wash Load)，不過冲洗載與浮懸載、河床載間之差異確難有明確界限。

粒徑為影響沉滓運動之主要因素，且顆粒之形狀、比重等亦隨粒徑而變，故一般概以粒徑區分沉滓物之等級。表 3-1 為美地理聯合會沉滓術語小組 (Subcommittee on Sediment Terminology) 所推介之沉滓物粒徑分級表。

#### 4. 沉降速度 (Settling Velocity) 與浮懸載之運動

浮懸之沉滓粒子與周遭流體在進出、輸送及沉澱等不同情況下之相對運動受粒子在自重下沉降速度之影響甚鉅。任何物體之終極沉降速度 (Terminal Settling Velocity) 主要之控制因子為大小、形狀、比重及流體粘度。對於一個直徑為  $d$  之完整球體，其沉降速度  $V_s$  在低雷諾數 (Reynolds number)，即  $Re < 1.0$  之下，可由斯托克定理 (Stoke's law) 導得。由斯托克定理知一半徑為  $R$  之球體在  $U_\infty$  之均速定流中所受之拖曳力 (Drag force)

$$D = 2\pi R\mu U_\infty + 4\pi R\mu U_\infty = 6\pi R\mu U_\infty$$

其中  $\frac{1}{3}$  源自壓力， $\frac{2}{3}$  源自摩擦力。依力之平衡概念可知：

$$\left(\frac{1}{3} \times \frac{4}{3}\pi d^3\right)r(S_s - S_f) = 6\pi R\mu U_\infty$$

$$\frac{1}{3}rd^2(S_s - S_f) = 3\mu U_\infty \quad \text{此處 } U_\infty = V_s$$

所以，沉降速度  $V_s = \frac{rd^2}{18\mu} (S_s - S_f)$

式中  $r$ ：流體之單位容重，

$\mu$ ：流體之力粘度 (Dynamic Viscosity)，

$S_s - S_f$ ：固體與流體之比重差。

上式係在下列諸條件下所導得：(1)粘滯性 (Vis-

cosity) 是唯一阻抗沉滓下沉者，(2)沉滓顆粒悉為均勻光滑之球形固體，(3)各沉滓顆粒間彼此互不干擾，(4)在斯托克範圍 (Stoke's range)，雷諾數  $Re < 1.0$ ，然而天然河川率以亂流 (Turbulent flow) 在流動，故河川中之沉澱問題十分錯綜複雜，難求一合理之解答，依 1938 年庫魯本氏 (Krumbein) 及培帝強氏 (Pettijohn)<sup>(9)</sup> 以實驗推求得亂流中之沉降速度： $V_s = \sqrt{(S-1) \frac{4}{3} \frac{gD}{C_r}}$ ，式中  $g$  為重力加速度， $S$  為沉滓粒子對流體之比重， $C_r$  為阻抗係數依雷諾數決定。但施用於天然河川則此係數甚難決定。羅培氏 (Rubey)<sup>(10)</sup> 曾就比重 (Specific weight) 為 2.65 之各種大小粒徑石英 (quartz) 在 16°C 下作試驗，推求其沉降速度，如圖 3-1 所示。研究某一河川之沉滓問題，理應測定其各級粒子沉降速度，然實際上不易做到。一般河川大抵參考羅氏之試驗結果，雖不够精確，然亦相去不遠。

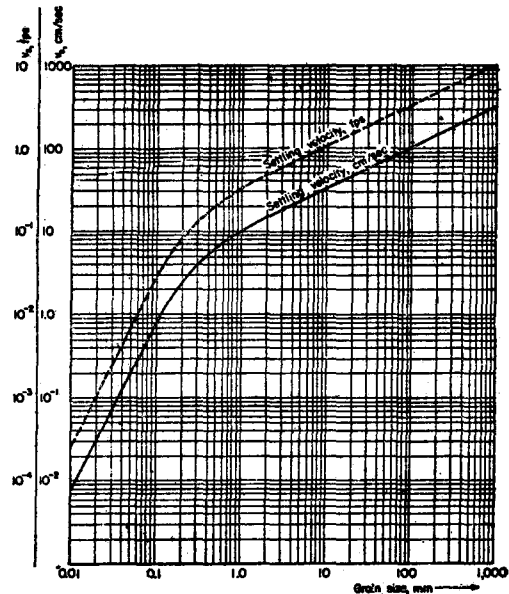


圖 3-1 羅培氏試驗所得之沉降速度與沉滓粒徑關係圖

懸移質輸送之主要現象為：(1)沉滓輸送之主要參數為流體之特性流速 (Characteristic velocity) 與沉滓粒子沉降速度之比值，(2)某一地方如其瞬間之輸送能力超乎其實際荷載，則將有更多之物質介入，如果輸送能力小於其實際荷載，則其部分荷載將沉澱下來。假設處於粒子以自重而沉降與受亂流調混作用 (Mixing) 而產生之向上運動相平衡之狀態下，奧比林氏 (O'Brien)<sup>(11)</sup> 首先導得下列浮懸載之公式

$$CV_s = -\epsilon \frac{dc}{dz} \dots \dots \dots (3-1)$$



式中  $C$  表含沙量 (%)， $V_s$ ：沉滓粒子沉降速度， $\epsilon$  為動渦流粘性 (Kinematic eddy viscosity)，可比擬為動分子粘性  $\nu$  (Kinematic molecular viscosity)。

如果假定  $\epsilon$  與高度無關，則自 (3-1) 式可導得任一高度  $z$  處之浮懸沉滓濃度  $c$  與參考高度  $a$  處之濃度的比

$$\frac{C}{C_a} = e^{-\frac{V_s(Z-a)}{\epsilon}} \dots\dots\dots(3-2)$$

然實際上，河川中之  $\epsilon$  值並非定值常數，而是自河床處為 0 漸次變化至水深之半處為最大值。勞斯氏 (Rouse)<sup>(10)</sup> 將布朗特 (Prandtl) 及卡門 (Karman) 對亂流渦流粘性與流速分佈之關係式應用於一携沙運行之寬廣 (水力半徑約等於水深) 河川中，並以河床剪速度 (Bed shear velocity) 表示，將 (3-2) 導演成

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{z-a}{y-a}\right)^{2.5} \frac{V_s}{\sqrt{\tau/\rho}} \dots\dots\dots(3-3)$$

式中  $\tau$  表河床剪力， $\rho$  表流體密度， $\sqrt{\tau/\rho}$  亦即河床剪速度， $y$  為水深。

懸移質之分佈與水流與沉滓之特性息息相關，粗大之顆粒主要是拘限於近河床之低處，而纖細之顆粒則在全水深中其濃度近乎均勻。因此蘭恩 (Lane) 與卡林斯克<sup>(11)</sup> (Kalinske) 兩氏基於在  $Z$  為全水深時 (亦即水面)，沉滓濃度為 0；在  $Z$  為 0 時 (亦即河床)，沉滓濃度為  $\infty$  之假設，建議  $\epsilon$  值採用均值  $\epsilon_m = \left(\frac{y}{15}\right) \sqrt{\tau/\rho}$ ，簡化了懸移質濃度間之關係，也導得在河床處能獲致一有限值之方程式

$$\frac{C}{C_a} = e^{-15 \frac{(Z-a)}{y} \frac{V_s}{\sqrt{\tau/\rho}}} \dots\dots\dots(3-4)$$

蘭恩、卡兩氏又利用對數性速度分佈之關係及 (3-4) 式獲致了浮懸載輸送方程式

$$q_s = \int_0^y V C dz = q C_a p e^{15 \frac{a}{y} \frac{V_s}{\sqrt{\tau/\rho}}} \dots\dots\dots(3-5)$$

$q_s$ ：單位寬度之浮懸載輸送率， $q$ ：單位寬度之流量， $C_a$ ：位於距河床某參考高度  $a$  處之懸移質之濃度， $p$  為一與  $\frac{V_s}{\sqrt{\tau/\rho}}$  及  $\frac{n}{y^{1/3}}$  相關之積分值， $n$  為粗糙係數 (Roughness)， $y$  為水深。此外，艾因斯坦氏 (H. A. Einstein) 之沉滓理論中，對浮懸載另有一系統之處理方式，容後節 (3-6-3) 詳述。

實質言之，浮懸載之估算對集水區土質鬆細之河川言，是一重要問題，由於其學理泰半自實驗中獲得，且此等問題受地域性自然環境之影響甚鉅，實有賴實際之觀測，獲取含沙量之資料，引證學理，再加以修正估算。

### 3-5. 河床載之運動

河床質大抵為大顆粒之卵石、粗砂、中砂，以滾動 (Rolling)、滑動 (Sliding) 及躍動 (Saltating) 之方式沿貼河床運行。一河床質在水流中，不論其運動之狀態若何，均受到下列三種作用力<sup>(12,13)</sup>：

(1) 沈滓顆粒之水中重量

$$W = k_1(\rho_s - \rho)gd^3 \dots\dots\dots(3-6)$$

(2) 水流之拖曳力 (Drag)

$$F_D = C_D K_2 d^2 \frac{\rho u_b^2}{2} \dots\dots\dots(3-7)$$

(3) 受亂流作用之上揚力

$$F_L = C_L k_3 d^2 \frac{\rho u_b^2}{2} \dots\dots\dots(3-8)$$

式中， $k_1, k_2, k_3$  顆粒之形狀因子 (Shape factors)，

$\rho_s, \rho$  分別為沈滓及水之密度，

$C_D, C_L$  分別為拖曳及上揚係數，

$d$  沈滓粒子之直徑，

$u_b$  河床處之河川流速，

$g$  重力加速度

數十年來有許多位學者從事此三種作用力之試驗研究，大抵為推求其臨界狀況 (Critical condition) 所導得之經驗公式不勝枚舉<sup>(12)</sup>。由於這些作用彼此間之關係錯綜複雜，致使河床載在水流中呈許多不同之運動方式及輸送率。

河床質輸砂公式之研究，由於評判開始運移冲刷之準據 (Initial Scour Criteria)，可分成下列三大類：

1. 杜柏義式 (DuBoys-Type) 公式，以臨界剪力 (Critical Shear) 為準據。

1879 年，杜柏義氏 (DuBoys) 首先依據河床層 (Bed layer) 分層移動之速度為線性變化，推求臨界剪力，導得了著名的杜柏義公式 (DuBoys-equation)：單位時間單位寬度之河床質輸送率

$$q_s = C_s \tau_0 [\tau_0 - (\tau_0)_{cr}] \dots\dots\dots(3-9)$$

$\tau_0 = rDSe$  為河床之剪應力， $(\tau_0)_{cr}$  則為臨界剪應力， $D$  為水深， $S_e$  為坡降， $r$  為單位容量。而

$$C_s = \frac{\epsilon V_s}{2(\tau_{cr})^2} \text{ 為杜柏義特性沈滓係數 (DuBoys'}$$

characteristic sediment coefficient),  $\epsilon$  為其模式中假想之每層次之厚度。

1929 年, 多納氏 (Donat) 以冪次序列 (Power Series) 展開,  $q_s = R_1 + R_2(\tau_0) + R_3(\tau_0)^2 + \dots$  導得:  $q_s = R_3\tau_0[\tau_0 - (\tau_0)_{cr}] \dots \dots \dots (3-10)$

蕭克立胥氏 (Schoklitsch) 於 1914 年經由實驗, 證明了杜氏模式之誤謬, 並導得適用於公制 (Metric system of units) 之經驗公式

$$C_s = 0.54 \frac{1}{r_s - r} \dots \dots \dots (3-11)$$

$r$ ,  $r_s$  分別為水及沈滓之單位容重。

奧比林氏等人 (O'Brien et. al) 於 1934 年考慮  $C'_s$  與  $m$  為  $d_{50}$  (表小於此粒徑者占全重之 50%) 之函數, 導得:

$$q_s = C'_s [\tau_0 - (\tau_0)_{cr}]^m \dots \dots \dots (3-12)$$

1935 年, 史托伯氏 (Straub) 整理多數不同觀測者之研究成果, 獲致下列適用於英制 (British system of units) 之關係式與表 3-2。

$$C_s = \frac{0.173}{d^{3/4}} \dots \dots \dots (3-11')$$

表 3-2. 史托伯氏之杜柏義特性沈滓係數之估算

d, mm	1/8	1/4	1/2	1	2	4
$C_s$ , ft <sup>3</sup> /(lb <sup>2</sup> )(sec)	0.81	0.48	0.29	0.17	0.10	0.06
$(\tau_0)_{cr}$ , lb/ft <sup>2</sup>	0.016	0.017	0.022	0.032	0.051	0.09

1936 年, 須爾咨氏 (Shields) 首先用現代流體力學之觀念推導得:

$$\frac{q_s r_s}{qs r} = 10 \frac{\tau_0 - (\tau_0)_{cr}}{(r_s - r)d} \dots \dots \dots (3-13)$$

式中  $s$  表能量坡降,  $d$  表粒徑。

1937 年, 張有齡氏 (Y. L. Chang) 考慮  $C_s$  為曼寧粗糙係數  $n$  (Manning's roughness coefficient) 之函數, 導得:

$$q_s = c \cdot n \tau_0 [\tau_0 - (\tau_0)_{cr}] \dots \dots \dots (3-14)$$

後來卡林斯克氏 (Kalinske) 於 1947 年, 更強調了亂流在河床質運動中所扮演之角色, 演繹得一無因次組之關係式:

$$\frac{q_s}{u_* d} = f_k \left( \frac{(\tau_0)_{cr}}{\tau_0} \right) \dots \dots \dots (3-15)$$

其中,  $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ , 表剪速度 (Shear velocity)。

2. 蕭克立胥式 (Schoklitsch type) 公式, 以臨界流量 (Critical discharge) 為準據:

1914 年, 基伯特氏 (Gilbert) 就  $0.305 < d <$

$7.01 \text{mm}$ ,  $2.53 < r_s < 2.69$  之不等大小之砂作實驗, 歸納得下列關係式中, 首先涉論及臨界流量。

$$q_s = c_1 (q - q_{cr}) c_1^* \dots \dots \dots (3-16)$$

$$q_s = c_2 (s - s_{cr}) c_2^* \dots \dots \dots (3-17)$$

$$q_s = c_3 \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{d_{cr}} \right) c_3^* \dots \dots \dots (3-18)$$

式中,  $s$  表坡降,  $c_1, c_2, c_3, c_1^*, c_2^*, c_3^*$  悉為經驗常數, 而註脚之  $cr$  表臨界狀況。

1930 年, 蕭克立胥氏 (Schoklitsch) 正式揭曉, 以臨界流量為依據之河床載輸沙公式:

$$q_s = c_s' s^k (q - q_{cr}) \dots \dots \dots (3-19)$$

$c_s'$  為另一新的特性沈滓係數。

須爾咨氏 (Shields) 假設能量坡降及粗糙係數不隨水位變化, 利用了曼寧公式, 導得:

$$q_s = c_s r^2 s^{1.4} n^{1.2} q^{0.6} (q^{0.6} - q_{cr}^{0.6}) \dots \dots (3-20)$$

1933 年, 馬克寶高氏 (Mac Dougall) 也根據實驗所得之資料, 得一蕭氏關係式。蕭克立胥氏 (Schoklitsch) 亦根據了基伯特 (Gilbert) 等實驗資料, 且對非均勻之砂礫混合物作實驗, 決定 (3-19) 式中之  $k=3/2$  及下列關係:

$$Q_{cr} = \frac{k' B D_{50}}{S^{1/3}} \dots \dots \dots (3-21)$$

$$C'_s = \frac{k''}{D_{50}^{1/2}} \dots \dots \dots (3-22)$$

若  $Q_s$  以磅/秒計,  $Q, Q_{cr}$  以秒立方呎計,  $D_{50}$  以吋計;  $B$  為河寬, 以呎計; 則  $k=0.00532$ ,  $k''=86.7$ , 因此蕭克立胥公式就全河寬言, 最終表如下式:

$$Q_s = \frac{86.6}{D_{50}^{1/2}} S^{3/2} (Q - 0.00532 \frac{B D_{50}}{S^{1/3}}) \dots \dots \dots (3-23)$$

瑞士梅耶彼得氏 (Meyer-Peter) 等人, 經由實驗及利用基伯特氏 (Gilbert) 之資料, 依福羅定律 (Froude Law) 在公制單位系統下, 導得基本關係式:

$$0.4 \frac{g_s^{2/3}}{d} = \frac{g^{2/3} S_0}{d} - 17 \dots \dots \dots (3-24)$$

其中,  $g$  為以重量計之單位時間, 單位寬度之流量,  $g_s$  為以重量計之單位時間, 單位寬度之河床載輸送率;  $d$  為粒徑;  $S_0$  為能量坡降。

後來經過多次修正, 在 1948 年提出了對於沈滓混合物較完善關係式:

$$\frac{rR_b(k/k')^{3/2}S_0}{d} - 0.047(r_s - r) = 0.25^2 \sqrt{\frac{(g_s')^{2/3}}{\rho}} \dots (3-25)$$

$$g_s' = g_s(r_s - r) \cdot r_s \dots (3-26)$$

式中  $d$  為平均粒徑， $R_b$  為水力半徑  $(k/k')^{3/2}$ 。  $S_0$  表示整個能量損失  $S$  (Energy loss)，僅有此由於顆粒阻抗 (Grain resistance) 所產生之部分與河床載之運移有關。一般， $k/k'$  之比值甚難決定。1963 年揭勒氏 (Zeller) 提出  $k/k'$  介於 0.5~1.0 間。當由於河床之形狀所引起之阻抗可忽略時， $k/k'=1$ ；當其影響甚鉅時， $k/k'=0.5$ ，可供參考。將  $g_s'$  值乘河寬  $W$  及時距長，則可得每單位期間內之輸送率  $G$ ，而將各粒徑之  $G$  以其所占之全重量百分比加權相加，則得通過某斷面之河床載總輸送率

$$GG = \sum a_i G_i$$

$a_i$  表各粒徑所占之全重量之百分比。

### 3. 函數類公式

此類公式主要以艾因斯坦<sup>(14)</sup>氏 (H. A. Einstein) 為主，1950 年艾氏首將統計之理論，機率之概念應用於沈滓上揚力 (Lift force) 之考慮。認為臨界值不過為或然率統計之結果藉因次分析及統計處理，導得河床載函數，並將浮懸載與河床載間關係化，而可將其依次求出，是為有名之艾氏沈滓理論，為近代沈滓科學之新曙光，因而被譽為「泥沙之父」。其內容節要概述於下節。

### 3-6. 艾氏 (Hans Albert Einstein) 沈滓理論：

#### 3-6-1. 表面拖曳力 (Surface drag)

艾氏主張摩擦力 (Friction) 間存在著線性相加的關係，亦即運移中之沈滓顆粒表面所受之阻力為表面拖曳力 (Surface drag) 與形狀阻抗 (Shape resistance) 之和。一明渠流 (Open channel flow) 沿其河床之剪應力 (Shear stress)  $\tau_b = r R_b S_0 = r \frac{A_b}{b} S_0$ ， $S_0$  為能量坡降， $r$  為水之單位容重， $b$  為河床寬度， $A_b$ ：橫斷面積中與河床有關之部分， $R_b$ ：與河床有關之水力半徑。

而艾氏將此等剪應力分成二部分：導源於表面拖曳力者  $\tau_b'$  和導源於形狀阻抗者  $\tau_b''$ ，而總剪應力  $\tau_b = \tau_b' + \tau_b''$ 。則由於表面拖曳力所產生之剪應力

$$\tau_b' = r R_b' \cdot S_0 \dots (3-27)$$

而剪速度 (Shear velocity)

$$u_*' = \sqrt{\frac{\tau_b'}{\rho}} \dots (3-28)$$

$$\text{所以， } u_*'^2 = \frac{\tau_b'}{\rho} = g R_b' S_0 \dots (3-29)$$

其中  $g$  為重力加速度。

1938 年，克勒岡氏 (Keulegan) 經由實驗獲致有關垂直向流速分佈之關係式，對於水力性平滑之周界 (Hydraulically smooth boundaries)：

$$\frac{\bar{u}_y}{u_*'} = 5.50 + 5.75 \log_{10} \frac{y u_*'}{\nu} = 5.75 \log_{10} (9.05 \frac{y u_*'}{\nu}) \dots (3-30)$$

對於水力性粗糙之周界 (Hydraulically rough boundaries)：

$$\frac{\bar{u}_*}{u_*'} = 8.50 + 5.75 \log_{10} \frac{y}{D_{65}} = 5.75 \log_{10} (30.2 \frac{y}{D_{65}}) \dots (3-31)$$

介於上述二者間之漸變段 (Transition)：

$$\frac{\bar{u}_y}{u_*'} = 5.75 \log_{10} (30.2 \frac{y x}{D_{65}}) = 5.75 \log_{10} (30.2 \frac{y}{\Delta}) \dots (3-32)$$

$\bar{u}_y$  表距河床  $y$  高處之點流速之平均值， $u_*'$  為剪速度。 $y$ ：距河床之高度， $\nu$ ：水之動粘度 (Kinematic viscosity)， $D_{65}$ ：小於此粒徑者占全重之 65%， $\Delta = D_{65}/x$ ：為表面之視粗糙係數 (Apparent roughness)

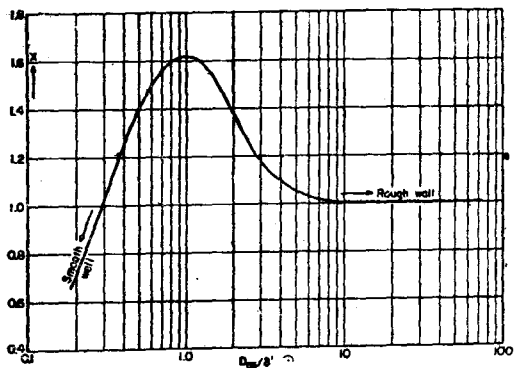


圖 3-2 表面拖曳力中修正參數  $x$  與  $D_{65}/d'$  之相關情形

ghness),  $x$ : 為一修正參數, 為  $\frac{D_{65}}{\delta'}$  之函數, 如圖 3-3 所示。 $\delta'$  為平滑周界之線次流層 (Laminar sublayer) 之厚度:

$$\delta' = \frac{11.6\nu}{u_*} \dots\dots\dots(3-33)$$

再由尼古拉德斯氏 (Nikuradse) 之實驗, 根據克勒岡氏 (Keulegan) 所得之常數, 可獲致下列垂直斷面之平均流速與導源於表面拖曳力之剪速度之關係式:

對於水力性平滑之周界

$$\begin{aligned} \frac{\bar{u}}{u_*} &= 3.25 + 5.75 \log_{10} \left( \frac{R_b' u_*'}{\nu} \right) \\ &= 5.75 \log_{10} (3.67 \frac{R_b' u_*'}{\nu}) \dots\dots(3-34) \end{aligned}$$

對於水力性粗糙之周界

$$\begin{aligned} \frac{\bar{u}}{u_*'} &= 6.25 + 5.75 \log_{10} \left( \frac{R_b'}{D_{65}} \right) \\ &= 5.75 \log_{10} (12.27 \frac{R_b'}{D_{65}}) \dots\dots(3-35) \end{aligned}$$

介於上述二者間之漸變段

$$\begin{aligned} \frac{\bar{u}}{u_*} &= 5.75 \log_{10} (12.27 \frac{R_b' x}{D_{65}}) \\ &= 5.75 \log_{10} (12.27 \frac{R_b'}{\Delta}) \dots\dots(3-36) \end{aligned}$$

由學者多人之實驗及上述關係式顯示, 在高速之河床載運移中, 靠近河床之沈滓濃度會改變整個流速分佈及斷面之平均流速。一般粘性流體力學作理想性之假設, 在  $\delta'$  厚之線次流層中某點流速與其距河床之距離成比例增加,  $u_y = y \frac{u_*'^2}{\nu}$ ; 而超乎此層之流速則按公式 (3-31) 至公式 (3-36) 而分佈, 如圖 3-3 所示。

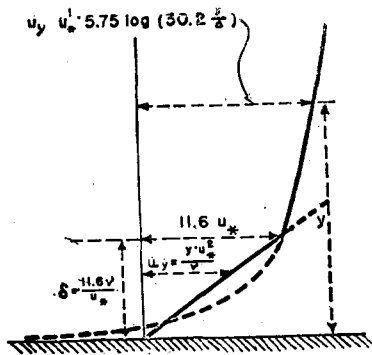


圖 3-3 沿水力性平滑之周界線次流層 (Laminar Sublayer) 附近假想之流速分佈圖

### 3-6-2. 形狀阻抗 (Shape resistance):

形狀阻抗包括所有紋波 (Ripples)、沙丘 (Dunes) 和棒狀物 (Bars) 等所生之阻抗, 和由於沈滓輸送越過河床所發生之不勻分佈而產生他種渠槽之不規則性 (Irregularities)。艾氏命以  $r$  表此部分之摩擦力, 所以此部分之剪應力  $\tau_b'' = r R_b'' S_0$ , 又剪速度

$$u_*'' = \sqrt{\frac{\tau_b''}{\rho}}$$

$$\therefore u_*''^2 = \frac{\tau_b''}{\rho} = g R_b'' S_0 \dots\dots\dots(3-37)$$

形狀阻抗在目前仍無法經由解析獲得, 一般經驗咸以為其水力參數 (Hydraulic parameter)  $\Psi_{35}$  之函數

$$\Psi_{35} = (S_0 - 1) \frac{D_{35}}{R_b' S_0} \dots\dots\dots(3-38)$$

其中,  $S_0$  表沈滓質之比重,  $D_{35}$ : 表小於此粒徑者占全重之 35%, 圖 3-4 所示為  $\Psi_{35}$  與  $\frac{u_*''}{u}$  之函數相關情形。

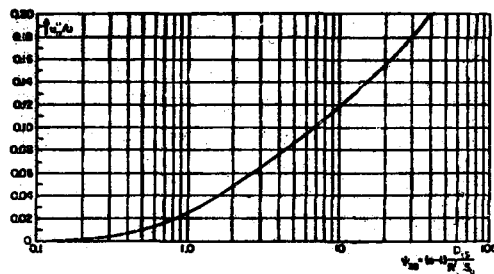


圖 3-4 形狀阻抗中  $\Psi_{35}$  與  $\frac{u_*''}{u}$  相關情形

若以剪速度  $u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$  表示, 代入  $\tau_b = \tau_b' + \tau_b''$  之關係式則可得

$$u_*^2 = u_*'^2 + u_*''^2 \dots\dots\dots(3-39)$$

若以水力半徑表之, 則

$$R_b = R_b' + R_b'' \dots\dots\dots(3-40)$$

### 3-6-3. 浮懸載 (Suspended load)

假設在一明渠亂流中之一段寬廣面坡度小之部分, 考慮一距離兩岸足夠遠, 僅生兩向流 (Two dimensional flow) 之垂直面。在此垂直面上選一距河床  $y$  深之單位面積的參考水平面, 當水流之平均流向平行此參考面時, 垂直向流速之波動致使流體穿過此平面上下移動。統計上言之, 自面之兩向穿過

之流體數量必相等。簡言之，假設在一半面積具流速  $V$  之向上運動之流體，而另一半面積具相同速度  $-VZ$  向下運動之流體，則在此一單位面積上互換之流量  $q_v = \frac{1}{2} V$ 。又假設此等互換平均發生之範圍為  $l_0$ ，則吾人假設向下運動之流體源自距河床  $(y + \frac{1}{2} l_0)$  處，而向上運動之流體源自距河床  $(y - \frac{1}{2} l_0)$  處。此外吾人尚作一重要之假設：流體在其互換之過程中仍保有其在起始處之性質，完成了全程  $l_0$  之互換後，才與周遭之流體混合。因此吾人就可計算一已知大小，具沈降速度  $V_s$ ，在距河床  $y$  處之濃度為  $C_y$  之浮懸粒子的輸送運動情形：

每單位時間、單位面積粒子之向上運動率為：

$$C_{(y-1/2 l_0)} \cdot \frac{1}{2} (V - V_s) \dots\dots\dots(3-41)$$

而粒子之向下運動率為：

$$C_{(y+1/2 l_0)} \cdot \frac{1}{2} (V + V_s) \dots\dots\dots(3-42)$$

則淨向上運動率為：

$$\frac{1}{2} C_{(y-1/2 l_0)} (V - V_s) - \frac{1}{2} C_{(y+1/2 l_0)} (V + V_s) \dots\dots\dots(3-43)$$

如果忽計高次項，則位於  $y - \frac{1}{2} l_0$  及  $y + \frac{1}{2} l_0$  處之濃度  $C_{(y-1/2 l_0)}$ ， $C_{(y+1/2 l_0)}$  可展開成：

$$C_{(y-1/2 l_0)} = C_y - \frac{1}{2} l_0 \frac{dc_y}{dy} \dots\dots(3-44-a)$$

$$C_{(y+1/2 l_0)} = C_y + \frac{1}{2} l_0 \frac{dc_y}{dy} \dots\dots(3-44-b)$$

將 (3-44) 式代入 (3-43) 式則可得下列關係：

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} [(C_y - \frac{1}{2} l_0 \frac{dc_y}{dy})(V - V_s) \\ & - (C_y + \frac{1}{2} l_0 \frac{dc_y}{dy})(V + V_s)] \\ & = -C_y V_s - \frac{1}{2} V l_0 \frac{dc_y}{dy} \dots\dots\dots(3-45) \end{aligned}$$

所以當此等粒子交換運動達於平衡時，

$$C_y V_s + \frac{1}{2} V l_0 \frac{dc_y}{dy} = 0 \dots\dots\dots(3-46)$$

在 (3-46) 式中， $V$  及  $l_0$  均為未知數，吾人假設此二值與相對應之穿過相同面積之動勢交換 (Exchange of Momentum) 中之值相等，又由粘性所生之剪力比較上言之可忽略不計，而水深為  $d$ ，水平面流速  $u$ ，則在  $y$  處由動勢輸送 (Momentum Transport) 所生之剪力：

$$\begin{aligned} \tau_y &= \tau_0 \frac{d-y}{d} = \frac{1}{2} V \rho [u_{(y-1/2 l_0)} - u_{(y+1/2 l_0)}] \\ &= \frac{1}{2} V \rho [(u_y - \frac{1}{2} l_0 \frac{du}{dy}) - (u_y + l_0 \frac{du}{dy})] \\ &= -\frac{1}{2} V \rho l_0 \frac{du}{dy} \end{aligned}$$

整理得

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} V l_0 &= \frac{-\tau_0}{\rho} \frac{d-y}{d} \frac{1}{du/dy} \\ &= -u_*^2 \frac{d-y}{d} \frac{1}{du/dy} \dots\dots(3-47) \end{aligned}$$

又由 (3-32) 式可導得：

$$\frac{du_y}{dy} = \frac{5.75}{2.303} \frac{u_*}{y} \dots\dots\dots(3-48)$$

將 (3-48) 式代入 (3-47) 式，可得：

$$\frac{1}{2} V l_0 = -0.40 y u_* \frac{d-y}{d} \dots\dots\dots(3-49)$$

復將 (3-49) 式代入 (3-46) 式，可得：

$$C_y V_s = 0.40 y u_* \frac{d-y}{d} \frac{dC_y}{dy} \dots\dots(3-50)$$

分離變數，得：

$$\frac{dC_y}{C_y} = \frac{V_s}{0.40 u_*} \frac{d}{y} \frac{dy}{(d-y)} \dots\dots(3-51)$$

$$\text{令 } Z = \frac{V_s}{0.40 u_*} \dots\dots\dots(3-52)$$

$$\text{則得 } \frac{dC_y}{C_y} = \frac{z \cdot d \cdot dy}{y(d-y)} \dots\dots\dots(3-53)$$

將 (3-53) 積分，自  $a$  至  $y$ ，此處  $a$  表河床層 (Bed layer) 之厚度  $a = 2D$ ， $D$  為沈滓粒子之粒徑，

$$\begin{aligned} \int_a^y \frac{dC_y}{C_y} &= \int_a^y d(\ln C_y) \\ &= \ln C_y - \ln C_a = \ln \frac{C_y}{C_a} \dots\dots(3-54) \\ \int_a^y \frac{z \cdot d \cdot dy}{y(d-y)} &= \int_a^y d \left\{ \ln \left( \frac{d-y}{y} \right)^z \right\} \\ &= \ln \left( \frac{d-y}{y} \right)^z - \ln \left( \frac{d-a}{a} \right)^z \\ &= \ln \left( \frac{d-y}{y} \cdot \frac{a}{d-a} \right)^z \\ &\dots\dots\dots(3-55) \end{aligned}$$

由 (3-54)，(3-55) 兩式：

$$\frac{C_y}{C_a} = \left( \frac{d-y}{y} \cdot \frac{a}{d-a} \right)^z \dots\dots\dots(3-56)$$

在距河床高度為  $y$  處，單位面積、單位時間浮懸沈滓粒子輸送率為  $c_y \bar{u}_y$ ，則合併 (3-32) 及 (3-56) 兩式，可得通過某斷面單位寬度之浮懸載輸送率為

$$\begin{aligned} \int_a^y c_y \bar{u}_y dy &= \int_a^y c_a \left( \frac{d-y}{y} \cdot \frac{a}{d-a} \right)^z 5.75 u_* \cdot \\ & \log_{10} \left( \frac{30.2y}{\Delta} \right) dy \dots\dots(3-57) \end{aligned}$$

吾人令  $A = a/d$ ，及以  $d$  為  $y$  之單位，亦即  $y/d = 1$ ，則單位寬度之浮懸載輸送率為：

$$\begin{aligned}
 q_s &= \int_A^d c_y \bar{u}_y dy = \int_A^1 d \cdot c_y \cdot \bar{u}_y dy \\
 &= d u_* c_a \left(\frac{A}{1-A}\right)^2 \cdot 5.75 \int_A^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^2 \cdot \\
 &\quad \log_{10} \left(\frac{30.2 y \cdot d}{\Delta}\right) dy \\
 &= 5.75 c_a d \cdot u_* \left(\frac{A}{1-A}\right)^2 \left\{ \log_{10} \left(\frac{30.2d}{\Delta}\right) \right. \\
 &\quad \left. \int_A^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^2 dy + \int_A^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^2 \right. \\
 &\quad \left. \log_{10} y dy \right\}
 \end{aligned}$$

又因爲  $\log_{10} y = \log_{10} e \cdot \ln y$ ，而且  $\log_{10} e = 0.43429$

所以  $q_s = 5.75 u_* d \cdot c_a \left(\frac{A}{1-A}\right)^2 \left\{ \log_{10} \left(\frac{30.2d}{\Delta}\right) \right.$

$$\begin{aligned}
 &\left. \int_A^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^2 dy + 0.434 \int_A^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^2 \right. \\
 &\quad \left. \ln y dy \right\} \dots \dots \dots (3-58)
 \end{aligned}$$

艾氏爲了圖解方便，將 (3-58) 轉換成下列形式：

$$\begin{aligned}
 q_s &= 5.75 \times 2.02 a u_* c_a \left\{ \frac{1}{2.02 \times 0.216} \right. \\
 &\quad \log_{10} \left(\frac{30.2d}{\Delta}\right) 0.216 \left(\frac{A^{z-1}}{(1-A)^z}\right) \\
 &\quad \left. \int_A^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^z dy + \frac{0.434}{2.02} \right. \\
 &\quad \left. \left[ \frac{A^{z-1}}{(1-A)^z} \right] \int_A^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^z \ln y dy \right\} \\
 &= 11.6 u_* \cdot a \cdot c_a (PI_1 + I_2) \dots \dots \dots (3-59)
 \end{aligned}$$

式中， $p = 2.303 \log_{10} \left(\frac{30.2d}{\Delta}\right) \dots \dots \dots (3-60)$

$$\begin{aligned}
 I_1 &= 0.216 \frac{A^{z-1}}{(1-A)^z} \int_A^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^z dy, \\
 A &= \frac{a}{d} \dots \dots \dots (3-61)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_2 &= 0.216 \frac{A^{z-1}}{(1-A)^z} \int_A^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^z \ln y dy, \\
 \Delta &= D_{65}/X \dots \dots \dots (3-62)
 \end{aligned}$$

其中，A, Z 和  $I_1$  及 A, Z 和  $I_2$  之函數關係圖形，艾氏悉已給繪出，僅需求 Z 值，則某一已知 A 值即可得對應之  $I_1, I_2$  值， $I_2$  悉爲負值。

### 3-6-4. 河床載 (Bed load)

艾氏以機率及統計之方法探討河床載之輸送情形，將某一特定大小及所占比例之河床載 (Bed load) 單位時間、單位寬度之輸送率以河床載輸送強度 (Intensity of bed-load Transport)  $\Phi_*$  表之，

$$\Phi_* = \frac{iB}{ib} \left[ \frac{q_B}{S_b g} \left(\frac{S_r}{S_s - S_r}\right)^{1/2} \left(\frac{1}{gD^3}\right)^{1/2} \right] \dots \dots \dots (3-63)$$

式中， $iB$ ：河床載 (Bed load) 中某特定大小之粒子所占之百分比，

$ib$ ：河床質 (Bed material) 中某特定大小之粒子所占之百分比，

$q_B$ ：以重量計之單位時間、單位河寬河床載輸送率，

$S_s$ ：沈滓質比重，

$S_r$ ：水之比重，

$g$ ：重力加速度，

$D$ ：某特定大小粒子之粒徑。

而  $\Phi_*$  又是水力參數流量強度 (Flow intensity)  $\Psi_*$  之獨一函數，其相關圖形如圖 3-5 所示。

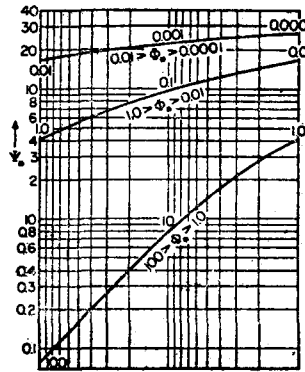


圖 3-5  $\Phi_*$  與  $\Psi_*$  關係圖形

$$\begin{aligned}
 \Psi_* &= \xi Y \left[ \frac{\log_{10} 10.6}{\log_{10} (10.6 X x / D_{65})} \right]^2 \\
 &\quad \frac{S_s - S_r}{S_r} \frac{D}{R_b' S_s} \dots \dots \dots (3-64)
 \end{aligned}$$

式中， $X$ ：河床之一種參考粒徑， $\Delta = \frac{D_{65}}{X}$  定義如 (3-6-1)

對於粗糙河床，

$$\Delta > 1.80\delta', X = 0.77\Delta \dots \dots \dots (3-65)$$

對於平滑河床，

$$\Delta < 1.80\delta', X = 1.39\delta' \dots \dots \dots (3-66)$$

$R_b'$ ：與表面拖曳力有關之水力半徑，

$S_s$ ：能量坡降，

$x$ ：修正參數，定義如 (3-6-1)

$\xi$ ：對不同粒徑之有效流量修正係數， $\xi$  爲  $\frac{D}{X}$  之函數， $D$  爲沈滓粒子之粒徑，其關係圖形如圖 3-6 所示。

$Y$ ：對於介乎水力性粗糙與平滑兩者之間者之上揚力修正係數。 $Y$  爲  $\frac{D_{65}}{\delta'}$  之函數

其關係圖形如圖 3-7 所示。

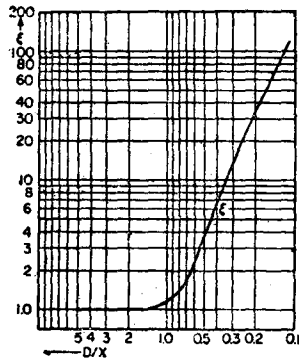


圖 3-6 修正係數  $\xi$  與  $\frac{D}{X}$  關係圖形

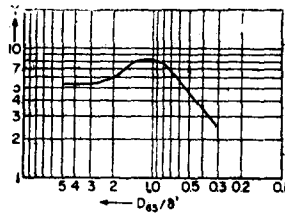


圖 3-7 修正係數  $Y$  與  $\frac{D_{65}}{\delta'}$  關係圖形

則吾人可由已有之資料及函數關係圖中求得  $\Psi_*$ ，再由  $\Phi_*$  與  $\Psi_*$  之關係中求  $\Phi_*$ ，而在  $\Phi_*$  之表示式中，僅剩  $i_B q_B$  為未知，吾人可代入求得  $i_B q_B$  值， $i_B q_B$  即為單位時間，單位河寬某大小粒徑之河床載輸送率。

### 3-6-5. 總輸送率 (Total load)

艾氏假設——在河床層內之河床載之運移，推演得在距河床二倍粒徑  $a=2D$  處之參考濃度為  $C_a$ ，

$$C_a = C \cdot \frac{i_B q_B}{2D u_*} \dots \dots \dots (3-67)$$

其中， $C$  為常數，得經由實驗決定，一般採用  $\frac{1}{11.6}$ ，則可導得

$$i_B q_B = 11.6 c_a u_* a \dots \dots \dots (3-68)$$

所以，單位時間單位河寬某大小粒徑之沈澱總輸送率等於單位時間單位河寬河床載輸送率加單位時間單位河寬浮懸載輸送率，

$$\begin{aligned} i_B q_t &= q_B + q_s = i_B q_B + 11.6 c_a u_* a (PI_1 + I_2) \\ &= i_B q_B (1 + PI_1 + I_2) \dots \dots \dots (3-69) \end{aligned}$$

此處所得之  $i_B q_t$  單位悉為英制磅/呎-秒 (lb/ft-sec)，若再乘上寬度  $w$  (呎) 及轉換係數 43.1，則得噸/天 (tons/day)，若乘上寬度  $w$  (呎) 及轉換係數 39.27，則得公噸/天 (Metric Tons/day)。而將各粒徑之輸送率相加之總和，即為通過某一斷面之沈澱總輸送率。

### 3-6-6. 艾氏沈澱理論計算步驟 (Computation steps for Einstein's Method)

#### A. 所需具備之基本資料

1. 水深  $d$
2. 能量坡降  $S_0$
3. 河床質之粒徑分佈  $D_{35}, D_{65}$
4. 水之動粘度  $\nu$ ，
5. 河床質各粒徑所占之百分比  $i_B$ ，
6. 沈澱粒子之沈澱速度  $V_s$ 。

#### B. 計算

1. 計算和表面拖曳力有關之水力半徑  $R_b'$ ，以試誤之方法

a. 首先假設  $R_b' = R_b = d$

b. 計算  $\Psi_{35} = (S_0 - 1) \frac{D_{35}}{R_b' S_0}$

c. 自  $\Psi_{35}$  與  $\frac{u_*''}{u}$  關係圖 (圖 3-4) 中求得  $\frac{u_*''}{u}$

d. 計算  $u_*' = \sqrt{R_b' S_0 g}$ ，由 (3-34) 式得  $\bar{u}$ ，則自 c 中可  $u_*''$ 。

e. 計算  $R_b'' = u_*'' \frac{1}{S_0 g}$ ，

f. 計算比較  $R_b' = R_b - R_b''$ ，

繼續重複 (a)~(f) 之步驟，直至計算得之  $R_b'$  與開始時所假設之  $R_b'$  間之差異屬被允許之誤差範圍內時為止。

2. 計算平均粒徑  $D$ ——為各粒徑區限之上、下限的幾何平均數。

3. 計算  $a=2D, A=a/d$

4. 計算  $\frac{D_{65}}{\delta'}, \delta' = \frac{11.6\nu}{u_*}$

5. 自  $D_{65}/\delta'$  與  $x$  關係圖 (圖 3-2) 中，求得  $x$

6. 計算  $Z = \frac{V_s}{0.4u_*}$ ， $u_* = \sqrt{u_*'^2 + u_*''^2}$

7. 由  $A, Z$  自艾氏繪妥之圖表或直接計算求得  $I_1, I_2$ 。

8. 計算  $\Delta = D/x$  及  $P = 2.303 \log\left(\frac{30.2d}{\Delta}\right)$

9. 計算  $X$  ,  $\frac{D}{X}$
10. 自  $D/X$  與  $\xi$  之關係圖 (圖 3-6) 中, 求得  $\xi$ 。
11. 自  $Y$  與  $D_{0.5}/\delta'$  之關係圖 (圖 3-7) 中, 求得  $Y$ 。
12. 計算  $\Psi_*$
13. 自  $\Psi_*$  與  $\Phi_*$  之關係圖 (圖 3-5) 中, 求得  $\Phi_*$
14. 自  $\Phi_*$  中計算單位時間, 單位河寬河床載輸送率,  $i_B q_B = q_B$
15. 計算  $1 + PI_1 + I_2$ , 及單位時間、單位河寬浮懸載輸送率  $q_s = i_B q_B (PI_1 + I_2)$
16. 計算  $i_t q_t = q_B + q_s = i_B q_B (1 + PI_1 + I_2)$
17. 計算及單位轉換

$$I_t Q_t (\text{短噸}/\text{天}) = i_t q_t \times w (\text{呎}) \times 43.1 \dots\dots\dots(3-70)$$

$$I_t Q_t (\text{公噸}/\text{天}) = i_t q_t \times w (\text{呎}) \times 39.27 \dots\dots\dots(3-71)$$

式中  $w$  為河寬, 單位為英尺 (ft)。

18. 計算通過某斷面全河寬之沈滓輸送率
- $$Q_t = \sum I_t Q_t \dots\dots\dots(3-72)$$

由以上之步驟可知艾氏方法之計算, 雖然各函數關係圖表已備, 然其間之過程仍甚繁雜, 尤以試誤方式重複演習求得  $R_0'$ , 更屬不易。幸賴現今電子計算機應用廣泛發達, 此種重複再三之工作可藉電子計算機操作, 然其間之關係圖表甚多, 計算上處理手續亦不甚容易, 筆者乃先求得各圖形之多次相關方程式, 再作計算。雖與實值有些出入, 然人為查表亦易生誤差, 況乎人為所費之時間千萬倍於電算, 且此等出入可謂微乎其微, 吾人當可忽計, 引用做為國內泥沙科學研究之新工具。電算之程式如附錄一, 其過程說明如第五節。

1955 年, 柯比氏 (Colby) 和亨柏利氏 (Hembre) 提出修正, 曾就艾氏方法中之(1)剪速度, (2)總浮懸載, (3)指數  $Z$ , (4)流量強度及河床載輸送強度, 加以修正改進, 是為修正艾氏方法 (Modified Einstein's Method), 其演算過程亦甚繁雜, 本文未採用此法, 故不擬詳述。

新近科技文明進展日新月異, 機率統計之應用日廣, 關於泥沙科學有邱照淋氏<sup>(15)</sup> (C. L. Chin)、沈學文氏<sup>(16)</sup> (H. W. Shen) 等人引用序列推估模式 (Stochastic model) 探討泥沙運移之內涵, 如配以光譜分析 (Spectrum analysis) 實驗探討亂流調混作用, 將更能深切的了解泥沙輸送之力學內容。

來日, 配合電子計算機之應用, 將可較輕易、明白解決錯綜複雜之沈滓問題。

#### 四、資料分析

大甲溪上游支流甚多, 但其有關水文、泥沙之記錄較完整者僅達見、南湖、四季郎、環山合流四站, 記錄長達十年。本文分析採用此四站及新近設立之松茂站。資料來源為臺電電源勘測隊。含沙量記錄期雖不長, 然在全省已屬不可多得矣! 五個水文觀測站之位置記錄如圖 2-1。基本水文資料分析概述於後。

##### 4-1. 基本數據:

(1)大甲溪上游經測得夏季平均水溫為  $16^\circ\text{C}$ , 冬季平均水溫為  $10^\circ\text{C}$ , 故年平均水溫概以  $13^\circ\text{C}$  計, 則水之動粘性 (Kinematic viscosity)  $\nu = 1.31 \times 10^{-6} \text{呎}^2/\text{秒}$ 。由於此等  $\nu$  之變異範圍不大, 而夏冬兩季平均水溫之差異亦不大。雖然艾因斯坦氏 (Albert Einstein) 等人曾提出對含滓水流之粘性受含滓濃度之影響得加以修正等看法; 然在約估當中此等影響可以視為微量而不計。因此, 為方便計, 以年平均水溫為代表, 則視水之動粘性  $\nu$  為常數  $\nu = 1.31 \times 10^{-6} \text{呎}^2/\text{秒}$ 。

(2)在分析中; 水之比重 ( $S_t$ ) 恒為 1.00, 而沈滓粒子之比重 ( $S_s$ ), 以大甲溪上游流域主要為石英岩及板岩等變質岩, 比重平均介於 2.6~2.7 之間; 又據水利局在濁水溪礫石比重測量, 黑板岩為 2.63, 與淡黃砂岩 2.65 相若; 白石英岩比重則較小, 介於 2.48~2.62 間, 一者由於其平均值變化不大, 另者由於沈滓顆粒之沈降速度缺乏實際試驗資料, 為了能利用羅培氏 (Rubey) 以比重 2.65 之各種大小粒徑石英, 以沈降法所作實驗推求得之數據 (見圖 3-1), 不特計及顆粒形狀且包括了比重之影響。在本文中, 筆者採約估視沈滓粒子之比重為常數 2.65, 因此本文中粒子之沈降速度爰引用羅培氏之實驗結果。

(3)懸移質取樣器, 臺電自 48 年以後用美式 DH-48 型積深式取樣器, 而取樣器之效率採用 0.8。

(4)沈滓粒子之平均密度:

懸移質平均密度, 1972 年臺電<sup>(3)</sup>在達見、松茂站推算結果為 1.31 公噸/立方公尺, 與 1956 年水資會推算值 1.33 公噸/立方公尺極接近, 且往年臺電估算亦均沿用 1.33 公噸/立方公尺, 故本文仍採用 1.33 公噸/立方公尺 ( $\text{Tons}/\text{m}^3$ )。

河床載平均密度, 由於沈滓之顆粒越大, 則其密度越大, 故各地之密度不一, 各法計算結果亦有出入



。水資會<sup>(3)</sup>在 1956 年，曾在達見站以各法估算過；  
臺電 1973 年「大甲溪上游河床質取樣調查報告」中  
，採用梅彼慕氏 (Meyer-Peter-Muller) 代表粒  
徑法計算，先求得河床載密度變化曲線，流量與單位

重量關係曲線，再與流量歷時曲線及河床載率定曲線  
推算得河床載之平均密度。另以蕭克立胥氏法取粒徑  
為  $D_{50}$  之單位重量為全部河床載之平均密度，其結  
果如表 (4-1)：

表 4-1. 河床載平均密度歷次估算表

估價單位	地點	蕭克立胥氏法		艾因斯坦法		梅彼慕氏法	
		浮懸載 (T/m <sup>3</sup> )	河床載 (T/m <sup>3</sup> )	浮懸載 (T/m <sup>3</sup> )	河床載 (T/m <sup>3</sup> )	浮懸載 (T/m <sup>3</sup> )	河床載 (T/m <sup>3</sup> )
水資會 (1956)	達見	1.33	1.97	1.33	2.12	1.33	1.74
臺電 (1972)	松茂	1.31	2.07			1.31	
臺電 (1973)	南湖		1.81				1.94
臺電 (1973)	四季郎		2.12				2.13
臺電 (1973)	環山合流		2.12				2.18
臺電	松茂		2.04				2.10

由上表可知河床載之平均密度大抵介乎 1.8~2.10 之  
間，而以不同計算法求得之結果雖有出入，然亦相去  
不遠。

#### 4-2. 基本資料

本文分析所用基本資料大抵可分河槽及水文兩部  
分，分別說明如下：

##### 一、河槽部分

##### 1. 河槽斷面：

河槽斷面理應取有數公里長之平整河槽作為測驗  
段 (Test reach)，測量該段中十餘斷面之特性，而  
平均之，方可祛除局部不規則變化之影響。本文限於  
時間，僅能取用臺電諸水文站所備之測水斷面圖 (詳  
附錄二)，各站之測水斷面時有變化，或漸次淤高，  
或淘深，並非固定一成不變。各測水斷面圖中，點線  
部分即表示其變遷之情形。由於其變遷情形無規則可  
循，僅為約略估計，吾人以其原始斷面如圖中實線部  
分為依據。

2. 水位—流量，河寬—水位，平均水深—水位，能  
量坡降—水位之相關情形：

各水文站測水斷面之水力要素及基本相關資料，  
除達見站外，主要係取用 1973 年臺電分析所得之各  
站水力要素表，參照測水斷面圖而得。將各相關要素  
資料，如水位 (H)—流量 (Q)，河寬 (W)—水位  
(H)，平均水深 (h)—水位 (H)，能量坡降 (S<sub>e</sub>)—  
水位 (H)，點繪於雙對數座標紙 (詳附錄二)。可  
見其散佈情形大致近乎直線。為便於利用電子計算機  
，乃以最小二乘法，分別求得各相關圖形之率定曲線

，於雙對數座標紙上呈一直線，再與原有基本資料散  
佈之點比較參照測水斷面圖，如不合理處加以修正之  
。使得所得之諸線性迴歸方程式深具代表性，則對吾  
人之推估計算大有裨益。茲將各站之水力要素相關關  
係式列述於後：

##### (A) 四季郎站 (SZU-CHI-LANG Station)

$$H = 0.1891Q^{0.5384} \dots\dots\dots (4-1)$$

$$W = 20.9846H^{0.2779} \dots\dots\dots (4-2)$$

$$h = 0.5946H^{21.07} \dots\dots\dots (4-3)$$

$$S_e = 0.00309H^{1.684} \dots\dots\dots (4-4)$$

$$S_e = 0.0464 (H > 5.0) \dots\dots\dots (4-5)$$

##### (B) 環山合流站 (HUAN-SHAN Junction Sta- tion)

$$H = 1.146Q^{0.242} \dots\dots\dots (4-6)$$

$$W = 6.9279H^{0.6326} \dots\dots\dots (4-7)$$

$$h = 0.3403H^{1.2388} \dots\dots\dots (4-8)$$

$$S_e = 0.003767H^{0.6749} \dots\dots\dots (4-9)$$

##### (C) 南湖站 (NAN-HU Station)

$$H = 0.5217Q^{0.3234} \dots\dots\dots (4-10)$$

$$W = 15.5316H^{0.3549} \dots\dots\dots (4-11)$$

$$h = 0.3320H^{1.4865} \dots\dots\dots (4-12)$$

$$h = 0.6H (H > 4.0) \dots\dots\dots (4-13)$$

$$S_e = 0.0119H^{0.1462} \dots\dots\dots (4-14)$$

##### (D) 松茂站 (SHUN-MAO Station)

$$H = 0.4763Q^{0.3770} \dots\dots\dots (4-15)$$

$$W = 21.2814H^{0.3191} \dots\dots\dots (4-16)$$

$$h = 0.1174H^{2.1635} \dots\dots\dots (4-17)$$

$$h = 0.65H \quad (H > 4.5) \quad \dots\dots\dots(4-18)$$

$$S_0 = 0.001576H^{1.3342} \quad \dots\dots\dots(4-19)$$

(E) 達見站 (TA-CHIEN Station)

$$H = 0.4358Q^{0.3727} \quad \dots\dots\dots(4-20)$$

$$W = 21.2926H^{0.2105} \quad \dots\dots\dots(4-21)$$

$$h = 0.8H \quad \dots\dots\dots(4-22)$$

$$S_0 = 0.007527H^{0.53165} \quad \dots\dots\dots(4-23)$$

諸關係式中，Q 以秒立方公尺 (cms)，H, h 以公尺 (m) 計。

3. 河床質粒徑分析

1972 年臺電在四季郎、南湖、環山合流、松茂等站附近，就各種不同水位不同地點採取樣本，作粒徑分析，而以其平均值代表之，經整理、計算其分界粒徑之幾何平均值，作為其代表粒徑，代表介乎分界粒徑間之顆粒，以 ib 表其所占之重量百分比。達見站由於近年來原址建壩，已撤銷，缺乏此等粒徑分析之資料，僅能以臺電沿用之平均粒徑作為分析，亦即未能較詳細研討各不同水位下之情況。茲將各水文站之粒徑分析資料列述於後。(下列各表中，H 表水位， $D_{min}$ ：最小粒徑， $D_{10}$ ， $D_{35}$ ， $D_{50}$ ， $D_{65}$ ， $D_{90}$ ：分別表小於此粒徑者之重量百分比為 10%，35%，50%，65%，90%， $D_{max}$ ：最大粒徑，G.M. 表平均粒徑為二分界粒徑之幾何平均數，水位以公尺 (m) 計，粒徑以公厘 (mm) 計。)

(A) 四季郎站 (SZU-CHI-LANG Station)

(a)  $H < 1.0m$

$$D_{min} = 0.074mm \quad D_{10} = 0.44mm$$

$$D_{35} = 1.90mm \quad D_{50} = 3.56mm$$

$$D_{65} = 7.38mm \quad D_{90} = 19.23mm$$

$$D_{max} = 24.98mm$$

粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)
0.074 ~ 0.44	0.10	0.1804	0.00059
0.44 ~ 1.90	0.25	0.9143	0.00299
1.90 ~ 3.56	0.15	2.6007	0.00853
3.56 ~ 7.38	0.15	5.1257	0.01681
7.38 ~ 19.23	0.25	11.9129	0.03908
19.23 ~ 24.98	0.10	21.9172	0.07190

(b)  $1.0 \leq H < 1.5m$

$$D_{min} = 0.074mm \quad D_{10} = 1.07mm$$

$$D_{35} = 8.5mm \quad D_{50} = 18.04mm$$

$$D_{65} = 29.08mm \quad D_{90} = 52.27mm$$

$$D_{max} = 72.0mm$$

粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)
0.074 ~ 1.07	0.10	0.2813	0.00092
1.07 ~ 8.50	0.25	3.0158	0.00989
8.50 ~ 18.04	0.15	12.3830	0.04062
18.04 ~ 29.08	0.15	22.9042	0.07514
29.08 ~ 52.27	0.25	38.9873	0.12790
52.27 ~ 72.00	0.10	61.3468	0.20126

(c)  $1.5 \leq H < 2.0m$

$$D_{min} = 0.074mm \quad D_{10} = 1.79mm$$

$$D_{35} = 22.85mm \quad D_{50} = 40.96mm$$

$$D_{65} = 64.55mm \quad D_{90} = 123.17mm$$

$$D_{max} = 187.69mm$$

粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)
0.074 ~ 1.79	0.10	0.3639	0.00119
1.79 ~ 22.85	0.25	6.3954	0.02098
22.85 ~ 40.96	0.15	30.5930	0.10036
40.96 ~ 64.55	0.15	51.4195	0.16869
64.55 ~ 123.17	0.25	89.1662	0.29253
123.17 ~ 187.69	0.10	152.0453	0.49883

(d)  $2.0 \leq H < 2.5m$

$$D_{min} = 0.074mm \quad D_{10} = 3.22mm$$

$$D_{35} = 29.01mm \quad D_{50} = 53.15mm$$

$$D_{65} = 82.95mm \quad D_{90} = 159.33mm$$

$$D_{max} = 306.13mm$$

粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)
0.074 ~ 3.22	0.10	0.4881	0.00160
3.22 ~ 29.01	0.25	9.6649	0.03170
29.01 ~ 53.15	0.15	39.2668	0.12882
53.15 ~ 82.95	0.15	66.3687	0.21784
82.95 ~ 159.33	0.25	114.9626	0.37716
159.33 ~ 306.13	0.10	220.8522	0.72157

(e)  $H \geq 2.5m$

$$D_{min} = 0.074mm \quad D_{10} = 7.75mm$$

$$D_{35} = 59.53mm \quad D_{50} = 101.17mm$$

$$D_{65} = 151.0mm \quad D_{90} = 334.67mm$$

$$D_{max} = 447mm$$

粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)
0.074 ~ 7.75	0.10	0.7572	0.00248
7.75 ~ 59.53	0.25	21.4292	0.07046
59.53 ~ 101.17	0.15	77.6057	0.25460
101.17 ~ 154.0	0.15	124.8206	0.40951
154.0 ~ 334.67	0.25	227.0224	0.74481
334.67 ~ 447	0.10	386.7783	1.26894

(B) 環山合流站 (HUAN-SHAN Junction Station)

(a)  $H < 2.0m$

$D_{min} = 0.074mm$      $D_{10} = 1.0mm$

$D_{35} = 4.62mm$      $D_{50} = 12.09mm$

$D_{65} = 22.78mm$      $D_{90} = 45.38mm$

$D_{max} = 59.85mm$

徑範圍粒	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)
0.074~ 1.0	0.10	0.2720	0.00089
1.0 ~ 4.62	0.25	2.1494	0.00705
4.62 ~ 12.09	0.15	7.4736	0.02451
12.09 ~ 22.78	0.15	16.5954	0.05444
22.78 ~ 45.38	0.25	32.1520	0.10548
45.38 ~ 59.85	0.10	52.1152	0.17097

(b)  $2.0 \leq H < 3.0m$

$D_{min} = 0.074mm$      $D_{10} = 1.36mm$

$D_{35} = 13.06mm$      $D_{50} = 28.13mm$

$D_{65} = 48.9mm$      $D_{90} = 105.42mm$

$D_{max} = 142.8mm$

粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)
0.074~ 1.36	0.10	0.3172	0.00104
1.36 ~ 13.06	0.25	4.2144	0.01382
13.06 ~ 28.13	0.15	19.1671	0.06288
28.13 ~ 48.9	0.15	37.0885	0.12168
48.9 ~ 105.42	0.25	71.7985	0.23555
105.42 ~ 142.8	0.10	122.6946	0.40253

(c)  $3.0 \leq H < 4.0m$

$D_{min} = 0.074mm$      $D_{10} = 1.55mm$

$D_{35} = 19.18mm$      $D_{50} = 40.38mm$

$D_{65} = 66.72mm$      $D_{90} = 143.5mm$

$D_{max} = 201.25mm$

粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)
0.074~ 1.55	0.10	0.3386	0.00111
1.55 ~ 19.18	0.25	5.4524	0.01788
19.18 ~ 40.38	0.15	27.8296	0.09130
40.38 ~ 66.72	0.15	51.9052	0.17029
66.72 ~ 143.5	0.25	97.8484	0.32102
143.5 ~ 201.25	0.10	169.9393	0.55753

(d)  $H \geq 4.0m$

$D_{min} = 0.074mm$      $D_{10} = 1.89mm$

$D_{35} = 31.28mm$      $D_{50} = 64.0mm$

$D_{65} = 116.25mm$      $D_{90} = 209.67mm$

$D_{max} = 333.47mm$

粒徑範圍    ib    G.M.(mm)    G.M.(ft)

0.074~ 1.89    0.10    0.3739    0.00122

1.89 ~ 31.28    0.25    7.6889    0.02522

31.28 ~ 64.0    0.15    44.7428    0.14679

64.0 ~ 116.25    0.15    86.2554    0.28298

116.25 ~ 209.67    0.25    156.1221    0.51220

209.67 ~ 333.47    0.10    264.4213    0.86751

(C) 南湖站 (NAN-HU Station)

(a)  $H < 1.0m$

$D_{min} = 0.074mm$      $D_{10} = 0.956mm$

$D_{35} = 2.347mm$      $D_{50} = 5.262mm$

$D_{65} = 10.716mm$      $D_{90} = 27.86mm$

$D_{max} = 44.56mm$

粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)
0.074~ 0.956	0.10	0.2660	0.00087
0.956~ 2.347	0.25	1.4979	0.00491
2.347~ 5.262	0.15	3.5142	0.01153
5.262~ 10.716	0.15	7.5092	0.02464
10.716~ 27.86	0.25	17.2785	0.05669
27.86 ~ 44.56	0.10	35.2341	0.11559

(b)  $1.0 \leq H < 1.5m$

$D_{min} = 0.074mm$      $D_{10} = 1.015mm$

$D_{35} = 2.855mm$      $D_{50} = 6.653mm$

$D_{65} = 13.938mm$      $D_{90} = 37.457mm$

$D_{max} = 101.59mm$

粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)
0.074~ 1.015	0.10	0.2740	0.00090
1.015~ 2.855	0.25	1.7023	0.00558
2.855~ 6.653	0.15	4.3582	0.01430
6.653~ 13.938	0.15	9.6296	0.03159
13.938~ 37.457	0.25	22.8490	0.07496
37.457~ 101.59	0.10	61.6867	0.20238

(c)  $1.5 \leq H < 2.0m$

$D_{min} = 0.074mm$      $D_{10} = 0.927mm$

$D_{35} = 2.87mm$      $D_{50} = 7.03mm$

$D_{65} = 14.96mm$      $D_{90} = 48.576mm$

$D_{max} = 163.69mm$

粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)
0.074~ 0.627	0.10	0.2619	0.00086
0.927~ 2.87	0.25	1.6311	0.00535
2.87 ~ 7.03	0.15	4.4918	0.01473
7.03 ~ 14.96	0.15	10.2552	0.03364
14.96 ~ 48.576	0.25	26.9573	0.08844
48.576~ 163.69	0.10	89.1706	0.29255

(d) $2.0 \leq H < 3.0\text{m}$					粒徑範圍			
$D_{min} = 0.074\text{mm}$	$D_{10} = 0.925\text{mm}$				ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)	
$D_{35} = 3.650\text{mm}$	$D_{50} = 11.4\text{mm}$							
$D_{65} = 24.1\text{mm}$	$D_{90} = 104.25\text{mm}$							
$D_{max} = 302.75\text{mm}$								
粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)					
0.074~ 0.925	0.10	0.2616	0.00086					
0.925~ 3.650	0.25	1.8375	0.00603					
3.650~ 11.40	0.15	6.4506	0.02116					
11.40 ~ 24.10	0.15	16.5753	0.05438					
24.10 ~ 104.25	0.25	50.1241	0.16444					
104.25 ~ 302.75	0.10	177.6560	0.58285					
(e) $H \geq 3.0\text{m}$					(c) $2.5 \leq H < 3.0\text{m}$			
$D_{min} = 0.074\text{mm}$	$D_{10} = 0.98\text{mm}$				$D_{min} = 0.074\text{mm}$	$D_{10} = 0.822\text{mm}$		
$D_{35} = 4.1\text{mm}$	$D_{50} = 13.1\text{mm}$				$D_{35} = 9.762\text{mm}$	$D_{50} = 16.807\text{mm}$		
$D_{65} = 26.7\text{mm}$	$D_{90} = 190.5\text{mm}$				$D_{65} = 31.233\text{mm}$	$D_{90} = 67.13\text{mm}$		
$D_{max} = 424.76\text{mm}$					$D_{max} = 105.63\text{mm}$			
粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)		粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)
0.074~ 0.98	0.10	0.2633	0.00088		0.074~ 0.822	0.10	0.2466	0.00080
0.98 ~ 4.10	0.25	2.0045	0.00658		0.822~ 9.762	0.25	2.8327	0.00929
4.10 ~ 13.10	0.15	7.3287	0.02404		9.762~ 16.807	0.15	12.8089	0.04202
13.10 ~ 26.70	0.15	18.7021	0.06136		16.807~ 31.233	0.15	22.9114	0.07516
26.70 ~ 190.50	0.25	71.3186	0.23400		31.233~ 67.13	0.25	45.7894	0.15022
190.50 ~ 424.76	0.10	284.4597	0.93325		67.13 ~ 105.63	0.10	84.2077	0.27626
(D) 松茂站 (SHUN-MAO Station)					(d) $3.0 \leq H < 3.5\text{m}$			
(a) $H < 2.0\text{m}$					$D_{min} = 0.074\text{mm}$	$D_{10} = 1.101\text{mm}$		
$D_{min} = 0.074\text{mm}$	$D_{10} = 0.493\text{mm}$				$D_{35} = 12.607\text{mm}$	$D_{50} = 25.107\text{mm}$		
$D_{35} = 1.937\text{mm}$	$D_{50} = 6.563\text{mm}$				$D_{65} = 39.497\text{mm}$	$D_{90} = 90.50\text{mm}$		
$D_{65} = 11.185\text{mm}$	$D_{90} = 20.167\text{mm}$				$D_{max} = 178.925\text{mm}$			
$D_{max} = 25.18\text{mm}$					粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)
粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)		0.074~ 1.101	0.10	0.2854	0.00093
0.074~ 0.493	0.10	0.1910	0.00063		1.101~ 12.607	0.25	3.7256	0.01222
0.493~ 1.937	0.25	0.9772	0.00320		12.607~ 25.107	0.15	17.7911	0.05836
1.937~ 6.563	0.15	3.5654	0.01169		25.107~ 39.467	0.15	31.4785	0.10327
6.563~ 11.185	0.15	8.5678	0.02810		39.467~ 90.50	0.25	59.7642	0.19607
11.185~ 20.167	0.25	15.0189	0.04927		90.50 ~ 178.925	0.10	127.2506	0.41748
20.167~ 25.18	0.10	22.5345	0.07393		(e) $H \geq 3.5\text{m}$			
(b) $2.0 \leq H < 2.5\text{m}$					$D_{min} = 0.074\text{mm}$	$D_{10} = 1.815\text{mm}$		
$D_{min} = 0.074\text{mm}$	$D_{10} = 0.672\text{mm}$				$D_{35} = 24.425\text{mm}$	$D_{50} = 43.225\text{mm}$		
$D_{35} = 6.72\text{mm}$	$D_{50} = 13.38\text{mm}$				$D_{65} = 71.775\text{mm}$	$D_{90} = 178\text{mm}$		
$D_{65} = 20.961\text{mm}$	$D_{90} = 41.867\text{mm}$				$D_{max} = 387.1\text{mm}$			
$D_{max} = 55.9\text{mm}$					粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)
					0.074~ 1.815	0.10	0.3664	0.00120
					1.815~ 24.425	0.25	6.6581	0.02184
					24.425~ 43.225	0.15	32.4926	0.10660
					43.225~ 71.775	0.15	55.6998	0.18273
					71.775~ 178	0.25	113.0307	0.37083
					178 ~ 387.1	0.10	262.4953	0.86119

(E) 達見站 (TA-CHIEN Station)

$D_{min} = 0.65\text{mm}$        $D_{95} = 7.83\text{mm}$

$D_{50} = 16.19\text{mm}$      $D_{65} = 30.97\text{mm}$

$D_{90} = 112.71\text{mm}$

粒徑範圍	ib	G.M.(mm)	G.M.(ft)
0.651~ 7.83	0.35	2.2560	0.00740
7.83 ~ 16.19	0.15	11.260	0.03694
16.19 ~ 30.97	0.15	22.392	0.07346
30.97 ~ 112.71	0.35	59.082	0.19384

二、水文部分：

1. 懸移質率定曲線

懸移質之輸沙量受當時流量，前期之流量，含沙量之影響，其關係極其複雜，加之有關含沙量記錄不長，且大洪水時無法取得適當水樣，間有斷續，僅能以此有限的資料加以研究。綜計 (A) 四季郎站含沙量記錄約 13 年，(B) 環山合流站記錄約 10 年，(C) 南湖站記錄約 12 年，(D) 松茂站記錄僅 2 年，(E) 達見站記錄 10 年。茲將各站之含沙量與流量之相關資料點繪如附錄二中之圖所示，發現其散佈甚廣，然隱約仍可見其趨勢。因此以最小二乘法求得其平均率定曲線，雖對其最大、最小兩極端附近值不甚合適，然採中庸，旨在消彌極端分佈。就整個情勢言，差異應不會太大。各站之懸移質輸沙量平均率定曲線方程式如下：

(A) 四季郎站 (SZU-CHI-LANG Station)

$Q_s = 2.15Q^{2.141} \dots\dots\dots(4-24)$

(B) 環山合流站 (HUAN-SHAN Junction Station)

$Q_s = 1.0047Q^{2.06538} \dots\dots\dots(4-25)$

(C) 南湖站 (NAN-HU Station)

$Q_s = 3.962Q^{1.8542} \dots\dots\dots(4-26)$

(D) 松茂站 (SHUN-MAO Station)

$Q_s = 2.9092Q^{1.8916} \dots\dots\dots(4-27)$

(E) 達見站 (TA-CHIEN Station)

$Q_s = 0.20705Q^{2.4286} \dots\dots\dots(4-28)$

$Q_s$ : 懸移質輸沙率公噸/天 (Tons/day),  
 $Q$ : 河川流量立方公尺/秒 (cms)

2. 流量歷時曲線：

流量歷時曲線為水文研究上重要之項目，在浮懸載推估中，懸移質輸沙量率定曲線必須配合流量歷時曲線，故流量歷時曲線之推求十分重要。本文各站之流量歷時曲線乃取用臺電民 61 年所繪製者而加以修

正。大致流量歷時曲線散佈亦廣，本文多採夏季時所呈現之曲線為依據。而唯達見一站採用臺電較早期資料，其表示方式亦同於其餘四站，均以大於等於之百分比為準，茲將各站之流量歷時基本資料列述於後，而其圖形則如附錄二中所示。

(A) 四季郎站 (SZU-CHI-LANG Station)

所歷時限 (%)	間隔 %	中點座標 %	流量(秒立方公尺 cms)
0.02~ 0.10	0.08	0.06	340
0.10~ 0.50	0.40	0.3	165
0.50~ 1.50	1.0	1.0	87
1.50~ 5.0	3.5	3.25	38
5 ~ 15	10	10	16.5
15 ~ 20	5	17.5	10.5
20 ~ 30	10	25	8
30 ~ 50	20	40	5.6
50 ~ 70	20	60	3.9
70 ~ 100	30	85	2.5

(B) 環山合流站 (HUAN-SHAN Junction Station)

所歷時限 (%)	間隔 %	中點座標 %	流量(秒立方公尺 cms)
0.06~ 0.10	0.04	0.08	440
0.10~ 0.50	0.4	0.30	250
0.50~ 1.5	1.0	1.0	120
1.5 ~ 5.0	3.5	3.25	58
5 ~ 15	10	10	28
15 ~ 20	5	17.5	18
20 ~ 30	10	25	13.5
30 ~ 50	20	40	8.8
50 ~ 70	20	60	5.6
70 ~ 100	30	85	3.4

(C) 南湖站 (NAN-HU Station)

所歷時限 (%)	間隔 %	中點座標 %	流量(秒立方公尺 cms)
0.2 ~ 0.4	0.2	0.3	140
0.4 ~ 1.0	0.6	0.7	92
1 ~ 3	2	2	43
3 ~ 5	2	4	25
5 ~ 7	2	6	19
7 ~ 10	3	8.5	14.5
10 ~ 15	5	12.5	10.5
15 ~ 20	5	17.5	8

20 ~ 30	10	25	6
30 ~ 50	20	40	3.7
50 ~ 70	20	60	2.35
70 ~ 100	30	85	1.5

(D) 松茂站 (SHUN-MAO Station)

所歷時限 (%)	間隔 %	中點座標 %	流量(秒立方公尺 cms)
0.2 ~ 0.4	0.2	0.3	480
0.4 ~ 1.0	0.6	0.7	330
1 ~ 3	2	2	120
3 ~ 5	2	4	75
5 ~ 7	2	6	48
7 ~ 10	3	8.5	36
10 ~ 15	5	12.5	27
15 ~ 20	5	17.5	21
20 ~ 30	10	25	16.5
30 ~ 50	20	40	12.5
50 ~ 70	20	60	9.5
70 ~ 100	30	85	6.7

(E) 達見站 (TA-CHIEN Station)

所歷時限 (%)	間隔 %	中點座標 %	流量(秒立方公尺 cms)
0.2 ~ 0.4	0.2	0.3	470
0.4 ~ 1.0	0.6	0.7	340
1 ~ 3	2	2	110
3 ~ 5	2	4	61
5 ~ 7	2	6	47
7 ~ 10	3	8.5	32
10 ~ 15	5	12.5	28
15 ~ 20	5	17.5	16.8
20 ~ 30	10	25	13.3
30 ~ 50	20	40	11.1
50 ~ 70	20	60	9.7
70 ~ 100	30	85	7.3

河槽特性是水文資料對泥沙科學之研究悉屬不可或缺，而多半呈不規則性。一般爲了計算之方便，採取平均之方式，將之歸納。質言之，不免與事實現象有所歧異，然就約估之本意言，中庸之道之代表性，大概足以採信。本文於是採行此法，其推算之結果容後分析比較，再做討論。

## 五、計算方法與步驟

### 5-1. 計算方法

沈滓質之估算，如前述，大致可分成浮懸載 (

Suspended load) 與河床載 (Bed load) 兩部分。其中，浮懸載之估算大致依據實測含沙量資料，配乎流量延時曲線，亦可以艾氏沈滓理論估算。河床載部份則大致由實驗室所導得之經驗公式估算。在本文之估算分析中，浮懸載部份擬以實測之懸移質輸沙量率定曲線配乎艾氏沈滓理論所得比較之；河床載之部份則擬以艾氏沈滓理論河床載函數法及較適合臺灣情況，且在臺省一般之研究所採用之蕭克立胥氏 (Schoklitsch) 與梅耶彼得氏 (Meyer Peter) 之公式，以河床取樣之資料估算之。而整個計算概以電子計算機爲之，計算過程如下文所述，如此則可省略不可數計之時間與人力。如果此等估算加以適當修正後，能不遠於真實情況，則對河川泥沙之估算，殆可進入新階段！

### 5-2. 計算之步驟

整個計算之過程包括主要項目：(1)基本資料之儲存與研判，(2)艾氏沈滓理論，(3)蕭克立胥氏河床載推估公式，(4)梅耶彼得氏河床載推估公式。分別概述於後：

#### (1)基本資料之儲存與研判

首先將擬分析之五個水文站，按(1)四季郎站、(2)環山合流站、(3)南湖站、(4)松茂站、(5)達見站，將基本之資料如各不同水位，粒徑分佈及  $D_{35}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{65}$  等分別存入。其中爲了電算儲存之方便，一律將每站之粒徑分佈分爲五組水位別，而每組水位別中又分成六區間 (range)；亦即各水位別中之各粒徑所占之百分數 (ib) 分別爲 10%，25%，15%，15%，25%，10%，若水位別或區間數不足者，一律補零。再次，將各站之基本水文、河槽特性關係式亦先存入，則唯一輸入資料爲河川流量  $Q$ ，輸入時可控制擬計算之站別，再求各該站之基本河槽特性水文資料，如相對應之水位 ( $H$ )，河寬 ( $W$ )，平均水深 ( $h$ )，能量坡降 ( $S_0$ ) 及平均之浮懸質輸沙率 ( $QSOB$ )，而由已知之水位 ( $H$ ) 求得相對應之河床質粒徑分佈資料，再行計算。

#### (2)艾氏理論

##### (a) $R_0'$ 之試算

艾氏沈滓理論之估算中，艾氏首先假設全水力半徑在寬廣河川中幾近平均水深，爲導由表面拖曳力 (Surface drag) 與形狀阻抗 (Shape resistance) 之二水力半徑之和，亦即  $R_0 = h = R_0' + R_0''$ 。首先得以試誤之方法將導由表面拖曳力之水力半徑  $R_0'$  求

出。在本文中開始時假設， $R_b'$  等於平均水深  $h$ ，再代入驗算，以平均水深  $h$  為  $R_b'$  之上限，0 為  $R_b'$  之下限，自上下限兩端以均值向中央收斂，直至假設得之  $R_b' + R_b''$  之值與平均水深  $h$  間之差異之絕對值小於 0.1 為止。若此種收斂情形不佳，則為了避免電算之重複操作不已，又對其重複試算環 (Loop) 之次數加以限制為 20，超過此數不復再試算。又為了分析整個河川之磨擦力，若表面拖曳力占絕大部份時之情形，亦即  $R_b = R_b' = h$ ，於是將  $R_b'$  以平均水深  $h$ ，與試算所得之值二者分別以  $R_b(1)$ 、 $R_b(2)$  表之，代入演算，最後所得之結果均附以 (H) 表示逕以平均水深  $h$  表  $R_b'$  所得之值，如是即可分析比較。

(b) 函數圖形之方程式化：

在艾氏沈降理論之計算過程，得引用許多已建立之函數關係圖形。為了電子計算之操作，得先將此等函數關係圖形方程式化。在本文中，採用四次多項式複迴歸分析，將各函數圖形分成若干區間，分別求出各區間中之迴歸方程式，與原函數圖形之對應值比較，極其相近，相關係數大致在 0.95 左右，而其中部份圖形由其所具之特性，以複迴歸分析所得之值不甚合適時，改以線性插補 (Linear interpolation)，求其值，雖與實值略有差異，然甚微，可忽視。茲將各函數圖形之迴歸分析方程式分別詳述於後：

(i) 羅培氏 (Rubey) 平均粒徑  $G. M.$  粒子沈降速度  $V_s$  關係圖形 (圖 3-1)

以 X 表平均粒徑，單位為厘米 (mm)  
以 Y 表沈降速度，單位為呎/秒 (fps)

X 區間 (平均粒徑 G. M.)	迴歸方程式	方程式 代號 (NCR)
0.01 ~ 0.1	$Y = 0.001025 - 0.148272X + 9.29455X^2 - 102.2514X^3 + 527.0979X^4$	1
0.1 ~ 1.0	$Y = -0.0400 + 0.735237X - 0.546037X^2 + 0.112665X^3 + 0.058275X^4$	2
1.0 ~ 10	$Y = 0.093333 + 0.273633X - 0.049959X^2 + 0.0052953X^3 - 0.00020396X^4$	3
10 ~ 100	$Y = 0.658333 + 0.04857032X - 0.0000252768X^2 - 0.000003010878X^3 + 0.000000007284382X^4$	4
>10	$Y = 2.41000 + 0.0127570X - 0.000006107226X^2 + 0.000000001107226X^3$	5

(ii) 表面拖曳力中， $D_{65}/\delta'$  與修正參數  $x$  關係圖形 (圖 3-2)

以 X 表  $D_{65}/\delta'$ ，為無因次組  
以 Y 表  $x$ ，亦為無因次組

X 區間	迴歸方程式	方程式 代號 (NCR)
0.1 ~ 1.0	$Y = -0.2400 + 6.045979X - 7.20134X^2 + 3.630536X^3 - 0.611888X^4$	6
1.0 ~ 10	$Y = 2.03125 - 0.497365X + 0.08944866X^2 - 0.00742667X^3 + 0.0002323718X^4$	7
>10	$Y = 1.00$	

(iii) 形狀阻抗中  $\psi_{35}$  與  $u_*''/u$  關係圖形 (圖 3-4)

以 X 表  $\psi_{35}$ ，為無因次組  
以 Y 表  $u_*''/u$ ，亦為無因次組

X 區間	迴歸方程式	方程式 代號 (NCR)
0.1 ~ 1.0	$Y = -0.00208333 + 0.01955322X + 0.00729895X^2 + 0.010586664X^3 - 0.01019814X^4$	8
1.0 ~ 10	$Y = -0.0071666 + 0.03768357X - 0.006048368X^2 + 0.000551282X^3 - 0.00001981352X^4$	9
10 ~ 40	$Y = 0.0796 + 0.00360238X + 0.000003571429X^2 - 0.00000056667X^3$	10
>40	$Y = 0.20$	

(iv) 流量強度  $\psi_*$  與河床載輸送強度  $\Phi_*$  關係圖形 (圖 3-5)

以 X 表流量強度  $\psi_*$   
以 Y 表河床載輸送強度，悉為無因次組

X 區間	迴歸方程式	方程式 代號 (NCR)
<1.0	$Y = 126.2273 - 646.9193X + 1428.44X^2 - 1405.179X^3 + 505.036X^4$	11
>1.0	線性插補法 (Linear interpolation)	
>26	$Y = 0.0001$	

在  $X > 1.0$ ,  $Y$  之值遽降, 快速接近於零, 迴歸方程式所得之值, 時正時負, 不合宜, 故採線性插補法。

(v)  $\frac{D}{X}$  與修正係數  $\xi$  之關係圖形 (圖 3-6)

以  $X$  表  $\frac{D}{X}$ ,  
以  $Y$  表修正係數  $\xi$ , 悉為無因次組

X 區間	迴歸方程式	方程式代號 (NCR)
$> 1.5$	$Y = 1.0$	
$1.5 \sim 0.4$	$Y = 42.47746 - 166.9693X + 253.5097X^2 - 169.0234X^3 + 41.29063X^4$	14
$0.4 \sim 0.12$	$Y = 322.5374 - 2497.677X + 5817.93X^2 - 3028.837X^3$	15
$< 0.12$	$Y = 100$	

(vi)  $D_{66}/\delta'$  與修正係數  $Y$  之關係圖形 (圖 3-7)

本關係圖形, 變異較急劇, 不適合用迴歸分析, 只能用分段分析求解, 或用線性插補。本文採用線性插補法解之。

(c) 單位換算常數:

由於所輸入之流量及有關之基本河槽特性, 水文之關係, 資料的單位均屬公制, 而在艾氏沈滓理論及蕭克立哥法之計算過程中悉屬英制單位, 因此在計算之初及計算終結, 得將其單位互換。於是必須用及下列數個單位換算常數。

- (i) 厘米 (mm) → 英尺 (ft)  
換算常數  $FEMM = 0.0032808$
- (ii) 公尺 (m) → 英尺 (ft)  
換算常數  $FTM = 3.2808$
- (iii) 秒立方公尺 (cms) → 秒立方英尺 (cfs)  
換算常數  $= 35.3157$
- (iv) 磅/秒 (lb/sec) → 公噸/天 (Tons/day)  
換算常數  $= 39.27$

此外, 重力加速度之計算亦採英制, 為常數  $32.2$  英尺/秒<sup>2</sup> (ft/sec<sup>2</sup>)。餘者, 按艾氏沈滓理論之步驟, 依序計算, 可分別估算浮懸載與河床載之輸送率, 而其最終結果均表成公噸/天 (Tons/day), 其詳細內容如前第 3-6-6 節所述。電子計算機程序及其說明列于附錄一。

(3) 梅耶彼得氏 (Meyer Peter) 方法:

梅耶彼得氏所導演之最終極公式為 (3-25) 及 (3-26) 兩式。吾人參照揭勒氏 (Zeller) 之實驗值, 以水力半徑  $R_b'$  代 (3-25) 式中之  $R_b \cdot (k/k')^{3/2}$ , 仍不失原式旨意, 而後將  $r_s, r, \rho$  等數值代入簡化 (3-25) 成下式:

$$(g_s')^{2/3} = 8.55 R_b' \cdot S_0 - 0.662 d \dots (5-1)$$

配乎,  $g_s' = g_s (r_s - r) / r_s \dots (3-26)$

式中,  $R_b'$ : 表導由表面拖曳力之水力半徑, 以公尺 (m) 計。

$d$ : 表平均粒徑, 以公尺 (m) 計。

因此, 在計算式中, 得將艾氏理論中所用英制之單位呎 (ft) 換算成公尺, 其間之換算常數為  $0.3048$ , 而其中  $R_b'$  值亦考慮平均水深及試算所得之值, 電子計算機程序亦詳附錄一。

(4) 蕭克立哥氏 (Schoklitsch) 方法:

蕭克立哥氏估算法 (3-24) 所得之河床載輸送率, 係以每單位時間所輸送之重量計, 即磅/秒, 因此乘上轉換係數  $39.27$ , 將之換算成公噸/天, 為最終之結果。電子計算機程序亦詳附錄一。

由上述可知, 整個計算過程中之輸入資料僅流量而已。先求得適當之對應河槽、水文特性資料, 而經過試算得  $R_b'$  和選用平均水深代  $R_b'$  二值, 進入演算。由艾氏沈滓理論, 而梅耶彼得法, 蕭克立哥法一氣呵成, 而其輸出結果概以公噸/天 (Tons/day) 表示。

## 六、結果分析與討論

五個水文站自小而大之不同流量所得各種方法之對應值, 大致趨勢相似。其中達見站詳列如附表 1, 餘各站恕不贅言。由其中可顯示出下列幾個現象:

(1) 各站導源於表面拖曳力之水力半徑  $R_b'$  與其平均水深  $h$  之關係如圖 6-1 至圖 6-5 所示。其中以南湖、達見兩站之變化曲線較平滑, 蓋因其斷面較為寬廣; 大致有流量愈大, 兩者之值愈近, 甚至合而為一之趨向。因此, 以全水深代入所得之值, 與以試算所得之  $R_b'$  代入之值, 在高流量時亦大抵有此趨向。在低流量時, 水力半徑  $R_b'$  與平均水深  $h$  之差異較大, 且產生不連續之現象; 蓋低流量時, 在沈滓之運移中, 形狀阻抗尚占相當成分, 在高流量時, 各測水斷面越近寬廣河川之形態, 亦即水力半徑愈近其水深, 則比較上言之, 形狀阻抗似可忽計矣!



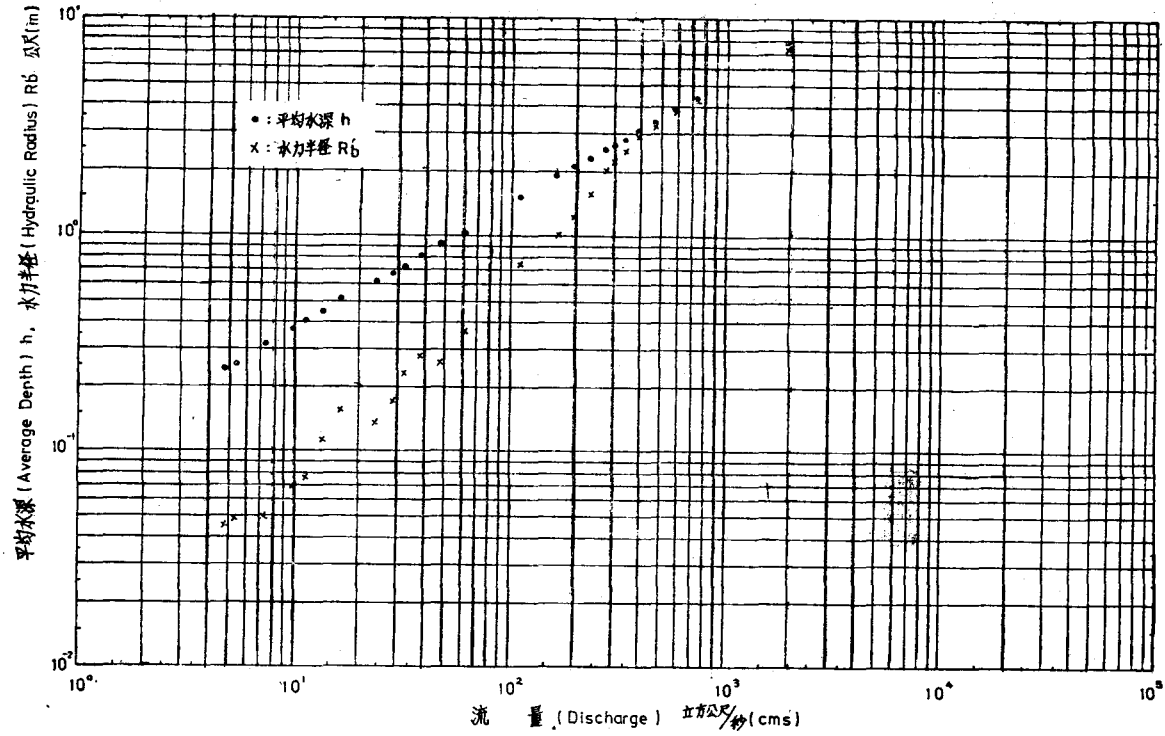


圖 6-1 四季郎站不同流量平均水深  $h$  與水力半徑  $R_b$  之比較

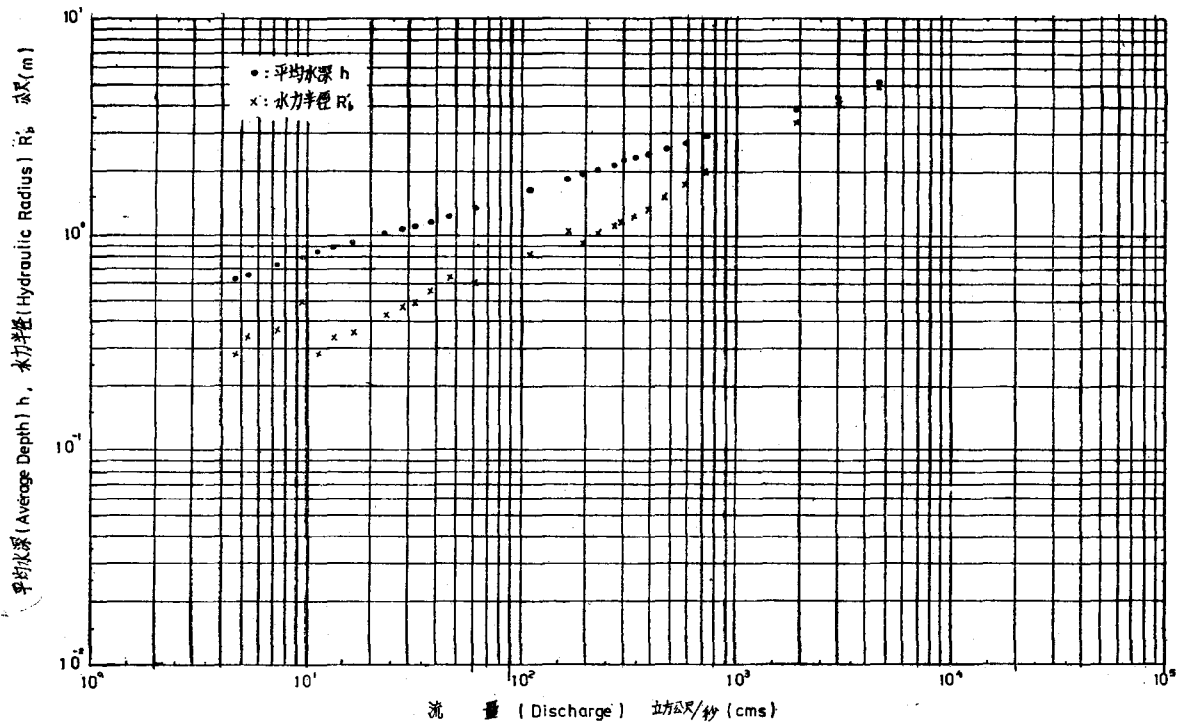


圖 6-2 環山合流站不同流量平均水深  $h$  與水力半徑  $R_b$  之比較

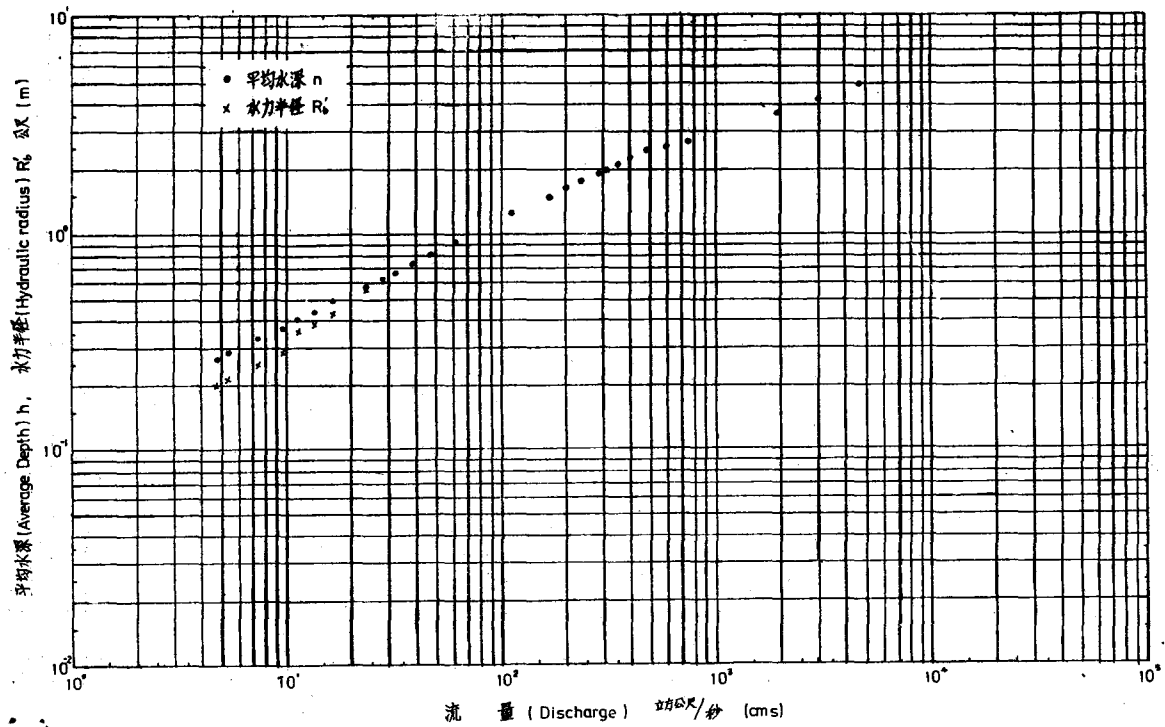


圖 6-3 南湖站不同流量平均水深  $h$  與水力半徑  $R_b$ ' 之比較

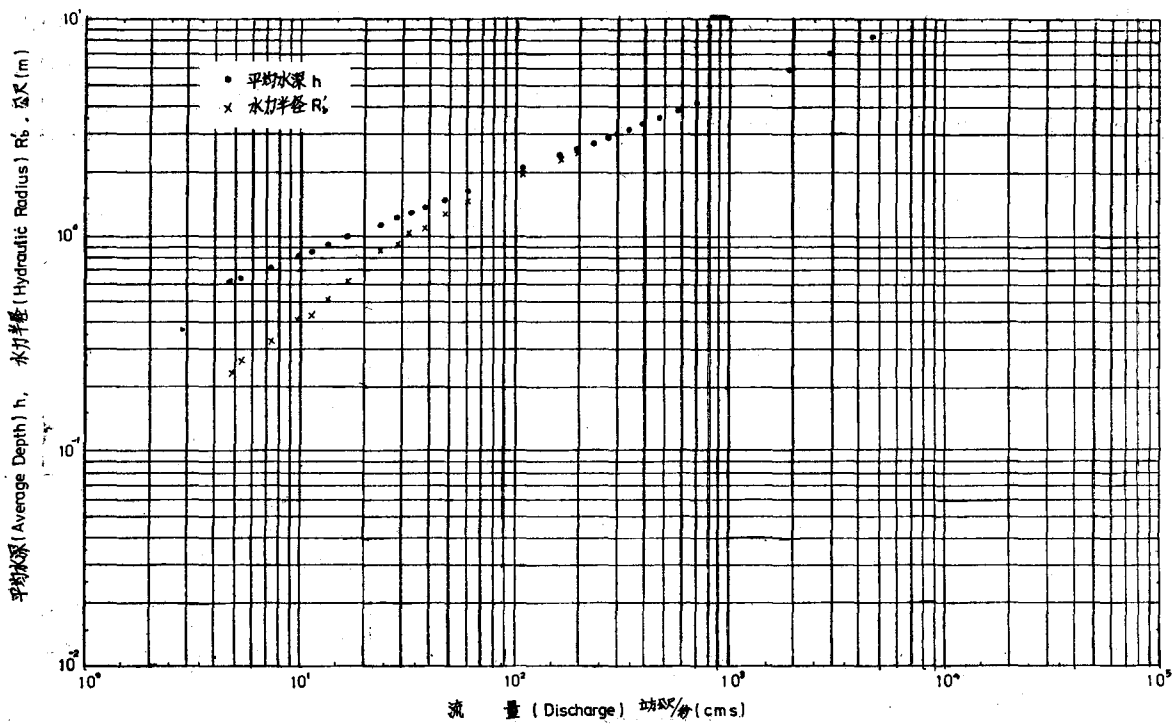


圖 6-4 松茂站不同流量平均水深  $h$  與水力半徑  $R_b$ ' 之比較

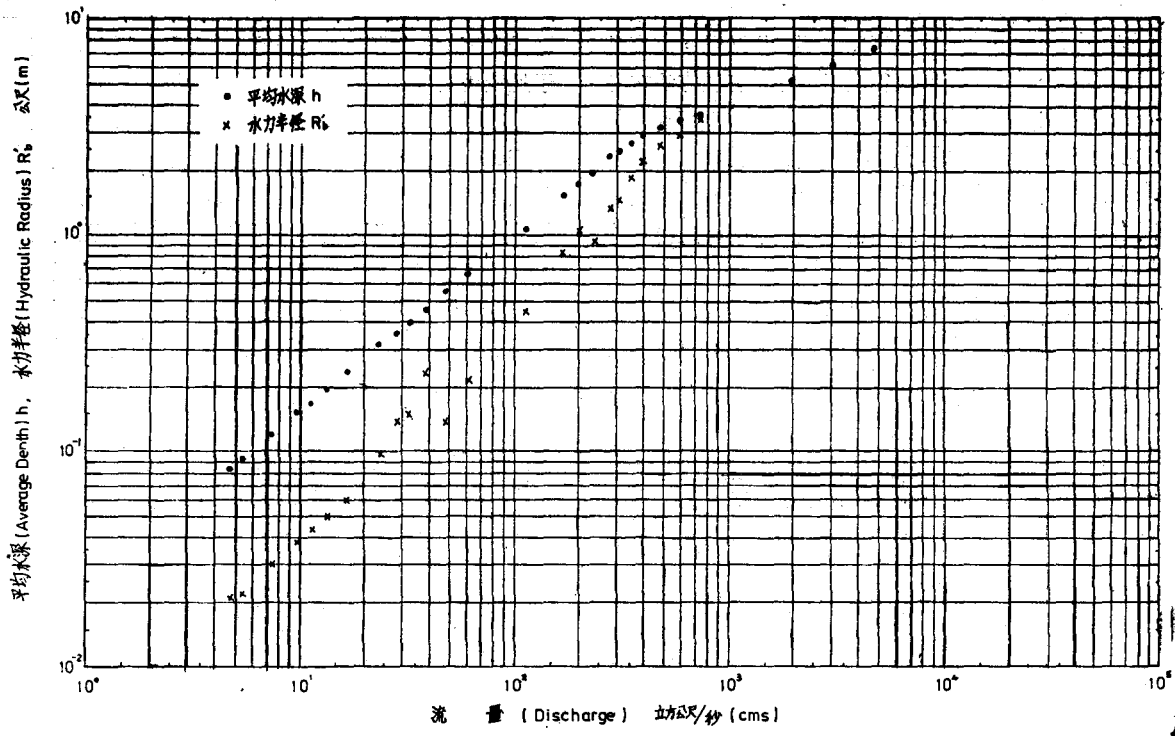


圖 6-5 達見站不同流量平均水深  $h$  與水力半徑  $R_b'$  之比較

(2)自計算之結果中可見，如水力半徑  $R_b'$  發生不規則之跳動現象，則除了與  $R_b'$  值有關之艾氏方法及梅耶彼得方法所得之值相應發生不規則跳動外，縱然是與其無關之蕭克立胥氏法，其對應之值亦生不規則現象。由此可得：在河床載之運移中，水力半徑

$R_b'$  為最重要之依據。

(3)各站在不同流量下，各種方法所得之對應河床載值，點繪如圖 6-6 至圖 6-10。蓋蕭克立胥氏法所得之值較小，梅耶彼得法所得之值較大，而艾氏方法所得之值居中；且在小流量時，諸法之結果歧異頗

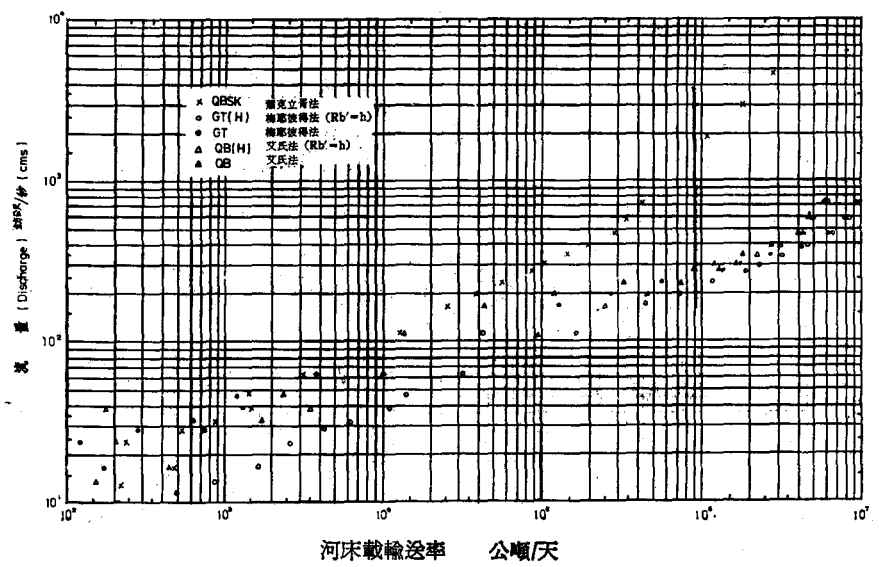


圖 6-6 四季郎站各種方法推求得河床載輸沙率之比較

大，且受水力半徑不規則跳動影響，由於經放大作用 (Amplification)，亦呈高度之不規則跳動。大流量時則漸趨一致，其差異大約僅二倍餘。各種方法在各站大致存在一臨界小區間，在此小區間以上則河床載輸沙量劇增，蕭克立哥法如在小流量更現負值，表示未達河床質運移之臨界流量，如此概以未有河床載解說之，亦即其值為 0，此等現象頗合乎臺灣之河川特性。

(4) 在小流量時，各法之河床載所呈現之歧異雖甚大，然由于大甲溪之主要河床載之推移大致在高流量

時為甚，故姑且擱置此等歧異現象，則以各法高流量所得之值，差異不甚大。大致與實際現象符合，適用於比較研析。

(5) 浮懸載部份，由于艾因斯坦法是自沖積性河川 (Alluvial stream) 導得，故其懸移質輸沙量亦充分顯示出大陸性沖積河川之特性。在低流量時，或謂某一臨界流量以下，懸移質輸沙量值甚小，而在其上，或高流量時，則其值劇然變大。吾人可想像寬廣之大陸性沖積河川，坡度甚緩，泥沙大致沈積於河床，故清澈地呈帶狀蜿蜒，潺潺緩流。在河川水位暴漲，

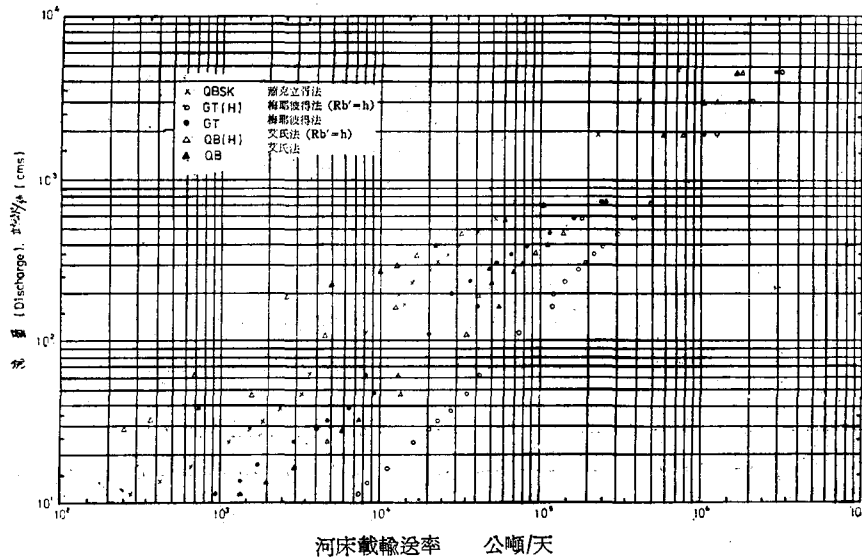


圖 6-7 環山合流站各種方法推求得河床載輸沙率之比較

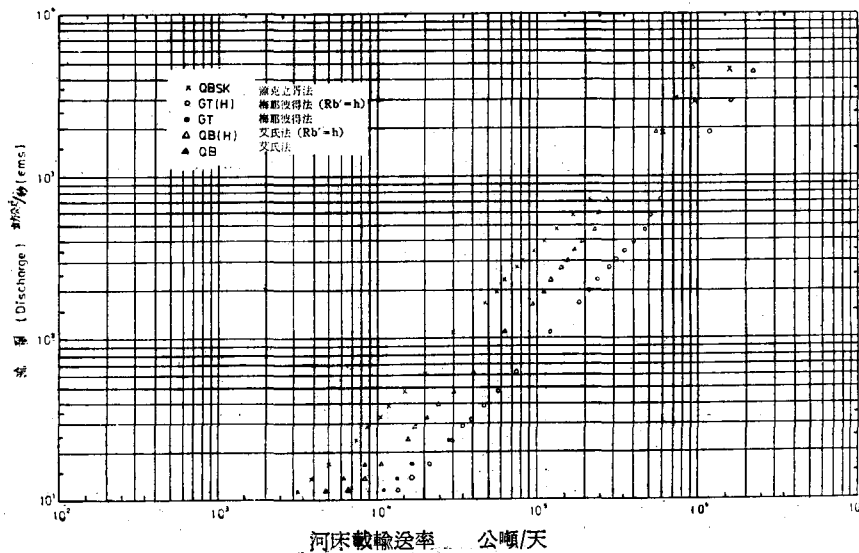


圖 6-8 南湖站各種方法推求得河床載輸沙率之比較

則泥沙調混，致使黃濁之河水澎湃洶湧，泛濫成災。此等現象與大甲溪出入較大，固然大甲溪之浮懸載亦在高流量時較大，然其於小流量時，或因沖蝕、亂墜降雨，且坡度又甚陡峻，雖浮懸載亦較小，然其程度上則未若艾氏法所表現出之如此歧異，艾氏法所得之懸移質輸沙量與其平均率定曲線之比較，如圖 6-11 至圖 6-15 所示。故縱實測之懸移質含沙量資料甚少，且分佈散亂，吾人仍主張依據實測資料之平均率定曲線為善。吾人配乎流量歷時曲線，求得各站各法之諸值，並計算其年輸沙量，如表 6-1 至表 6-5 所

示。

- QB(H): 艾氏法之河床載輸沙量 (全水深)，
- QB: 艾氏法之河床載輸沙量 (水力半徑  $R_b'$ )
- QSOB: 蕭克立哥氏法之河床載輸沙量。
- GT(H): 梅耶彼得法之河床載輸沙量 (全水深)，
- GT: 梅耶彼得法之河床載輸沙量 (水力半徑  $R_b'$ )
- QSOB: 實測資料平均率定曲線所得之浮懸載輸沙量。

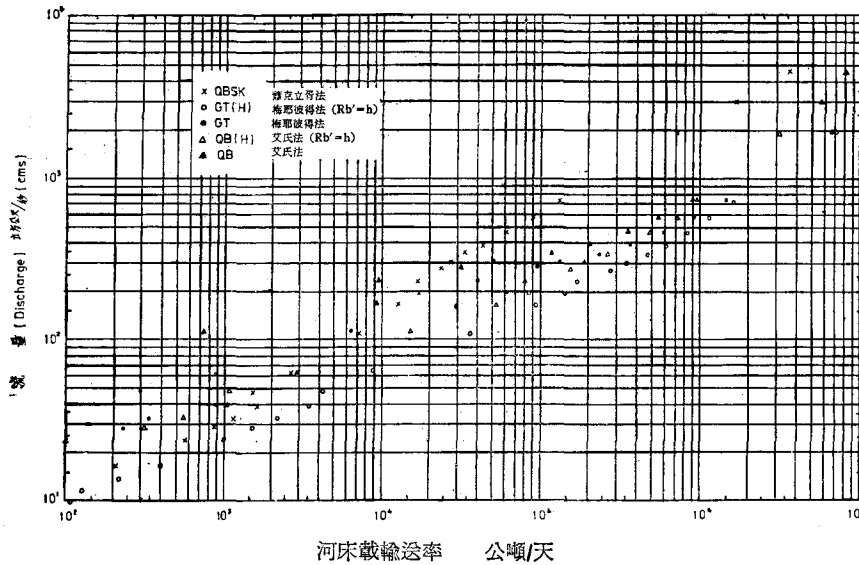


圖 6-9 松茂站各種方法推求得河床載輸沙率之比較

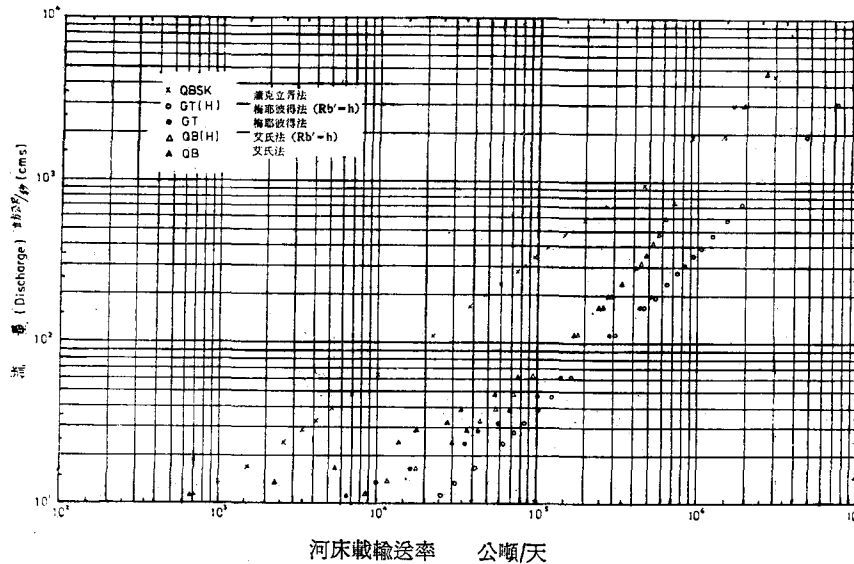


圖 6-10 達見站各種方法推求得河床載輸沙率之比較

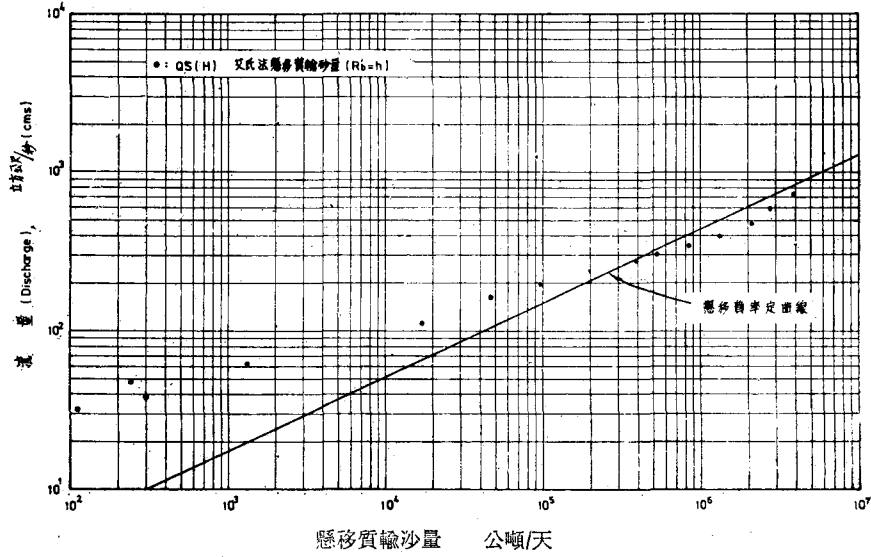


圖 6-11 四季郎站艾氏方法所得之懸移質輸沙量與其平均率定曲線之比較

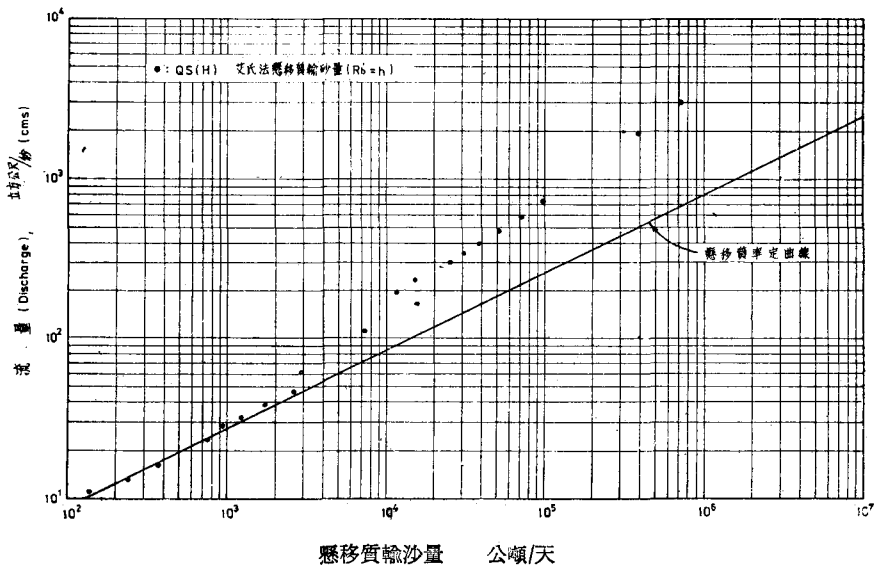


圖 6-12 環山合流站艾氏方法所得之懸移質輸沙量與其平均率定曲線之比較

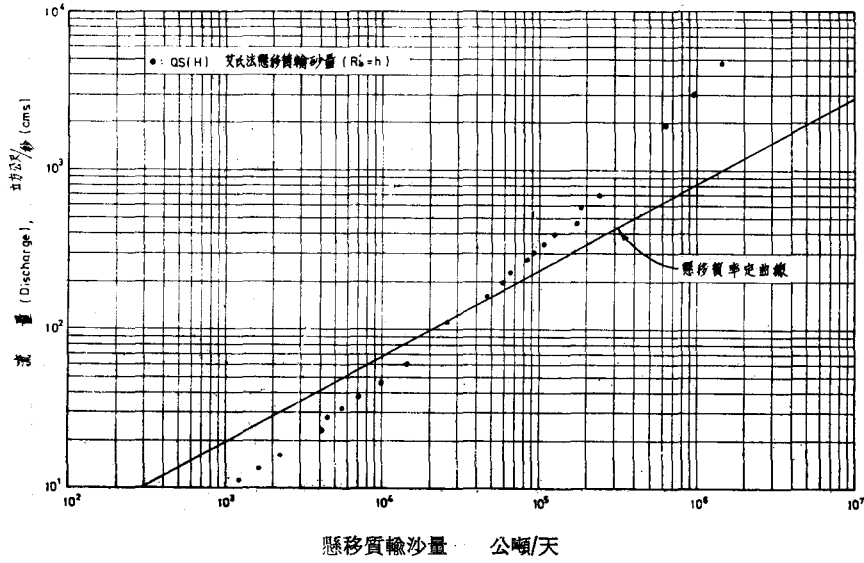


圖6-13 南湖站艾氏方法所得之懸移質輸砂量與其平均率定曲線之比較

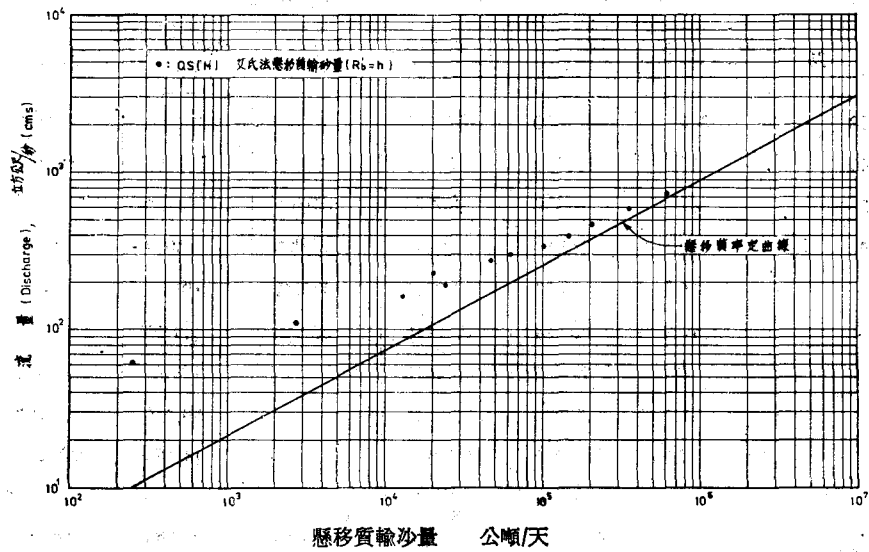


圖 6-14 松茂站艾氏方法所得之懸移質輸砂量與平均率定曲線之比較

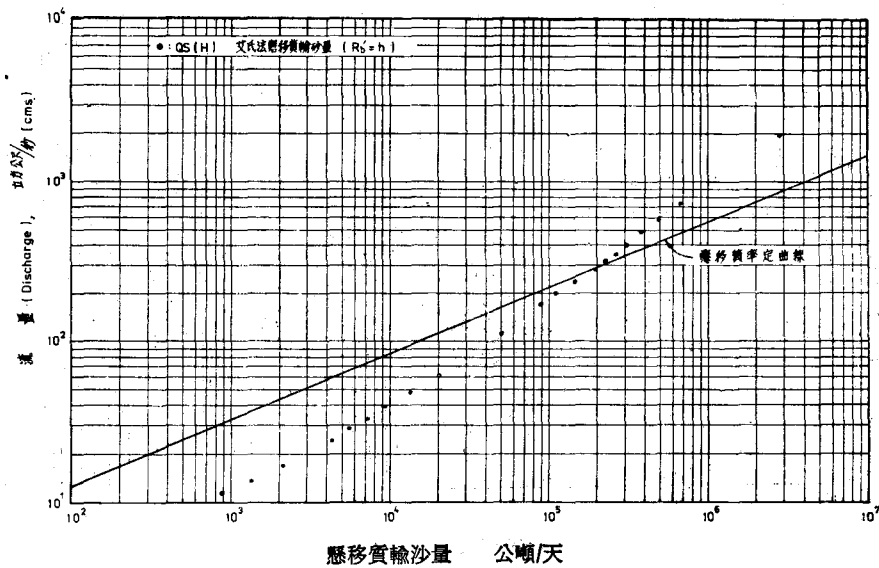


圖 6-15 達見站艾氏法所得之懸移質輸沙量與其平均率定曲線之比較

表 6-1. 四季郎站輸沙量估算表

間 隔 %	流 量 立方公尺/秒	QB (H) 公噸/天	QB 公噸/天	QBSK 公噸/天	GT (H) 公噸/天	GT 公噸/天	QSOB 公噸/天
0.08	340	2224000	1875100	142910	3288300	2713100	565370
0.40	165	238720	38290	24599	439160	115420	120250
1.0	87	32206	1260.5	6984.0	84600	13728	30546
3.5	38	3482.4	15.019	1478.0	11039	1331.5	5185.1
10	16.5	430.83	1.8361	449.76	1582.5	162.97	869.10
5	10.5	33.664	0.65415	68.546	411.55	11.299	333.22
10	8	2.3253	0.62810	—	174.25	2.2004	184.48
20	5.6	0.59546	0.59546	—	55.176	1.0299	85.962
20	3.9	0.56408	0.56408	—	16.195	0.24502	39.619
30	2.5	0.52777	0.52777	—	2.3982	—	15.291
日輸沙量公噸/天		3223.41	1667.04	382.69	5830.89	2833.37	1571.8
年輸沙量公噸/年		1176544.6	608489.6	139681.25	2128274.8	1034180	573701
年輸沙量 $10^6$ 立方公尺/年		0.560	0.289	0.066	1.01	0.49	0.431



表6-2. 環山合流站輸沙量估算表

間隔 %	流量 立方公尺/秒	QB (H) 公噸/天	QB 公噸/天	QBSK 公噸/天	GT (H) 公噸/天	GT 公噸/天	QSOB 公噸/天
0.04	440	131010	29136	38073	292820	106850	289580
0.4	250	57805	6588.1	18382	158130	40774	90094
1.0	120	39653	5501.9	9107.4	86563	22156	19785
3.5	58	12138	461.45	3367.2	39012	7255.3	4407.4
10	28	5856.0	241.60	1502.6	20170	4055.6	979.42
5	18	3296.1	18.801	730.79	12257	1867.4	393.23
10	13.5	2050.9	7.2417	421.53	8895.8	1363.0	217.07
20	8.8	3060.2	573.36	483.36	8084.4	2605.8	89.692
20	5.6	1494.8	118.73	205.83	4918.2	1289.6	35.264
30	3.4	709.85	7.3247	43.604	2813.2	577.96	12.582
日輸沙量公噸/天		3184.47	275.61	677.87	9944.6	2267.52	996.39
年輸沙量公噸/年		1162316.9	100597.65	247422.55	3629779	827644.8	363682.35
年輸沙量 $10^6$ 立方公尺/年		0.553	0.047	0.117	1.72	0.394	0.273

表6-3. 南湖站輸沙量估算表

間隔 %	流量 立方公尺/秒	QB (H) 公噸/天	QB 公噸/天	QBSK 公噸/天	GT (H) 公噸/天	GT 公噸/天	QSOB 公噸/天
0.2	140	78268	78268	39682	155280	155280	37780
0.6	92	50980	50980	25180	101690	101690	17345
2	43	27053	27053	14139	53103	53103	4233.4
2	25	16757	16757	80350	31976	31976	1548.7
2	19	12123	9606.9	5931.0	24117	19081	931.06
3	14.5	9156.3	6855.5	4385.0	18203	14376	546.06
5	10.5	6104.8	4219.7	3041.5	12989	10275	310.03
5	8	3987.7	1848.8	2221.4	9784.3	5798.2	187.25
10	6	3756.2	1849.5	1828.2	7864.9	4630.3	109.84
20	3.7	1900	802.08	1021.8	4649.1	2713.8	44.820
20	2.35	914.19	83.795	584.00	2891.8	765.57	20.086
30	1.5	453.78	32.240	293.82	1692.9	449.29	8.4028
日輸沙量公噸/天		3434.98	2412.24	1779.36	7591.91	5532.53	382.16
年輸沙量公噸/年		1253767.7	880467.6	649466.4	2771047.1	2019373.4	139488.4
年輸沙量 $10^6$ 立方公尺/年		0.597	0.419	0.31	1.31	0.96	0.164

表6-4. 松茂站輸沙量估算表

間隔 %	流量 立方公尺/秒	QB (H) 公噸/天	QB 公噸/天	QBSK 公噸/天	GT (H) 公噸/天	GT 公噸/天	QSOB 公噸/天
0.2	480	515380	369130	64741	850590	615250	322700
0.6	330	249200	97527	33007	434900	203000	159440
2	120	20795	18608	8683.5	45922	9221.3	23766
2	75	6897.6	138.26	4667.6	15632	1863.9	9815.0
2	48	1196.2	3,6024	1628.7	4528.7	309.00	4238.4
3	36	851.91	16.806	1496.7	2981.8	600.78	2466.7
5	27	253.40	1,1381	800.17	1366.3	210.09	1435.6
5	21	41,160	1,1043	426.80	704.15	72.318	894.67
10	16.5	3,6408	1,0727	198.51	376.82	21,720	568.32
20	12.5	1,0374	1,0374	36,104	178.54	7,7381	337.07
20	9.5	1,0037	1,0037	—	82.407	2,9064	201.12
30	6.7	0,96246	0,96242	—	30879	1,0662	104.26
日輸沙量公噸/天		3145.08	1364.89	748.44	5924.34	2713.16	2744.7
年輸沙量公噸/年		1147954.2	498184.85	273180.6	2162384.1	990303.4	1001815.5
年輸沙量10 <sup>6</sup> 立方公尺/年		0.5.6	0.237	0.130	1.62	0.471	0.753

表6-5. 達見站輸沙量估算表

間隔 %	流量 立方公尺/秒	QB (H) 公噸/天	QB 公噸/天	QBSK 公噸/天	GT (H) 公噸/天	GT 公噸/天	QSOB 公噸/天
0.2	470	590930	590930	147530	1281100	1281100	639050
0.6	340	491770	491770	96719	935950	935950	291090
2	110	184570	175760	21941	306600	291120	18785
2	61	97121	78029	9934.3	167680	141920	4486.7
2	47	70977	55234	6941.2	127560	101240	2381.9
3	32	44847	27609	4028.0	84452	58097	936.45
5	28	36577	17816	3313.4	72960	42982	677.09
5	16.8	169.9	5353.1	1491.2	40988	16253	195.82
10	13.3	11,777	2281.4	988.84	31172	10208	111.04
20	11.1	8573.4	680.69	694.16	25108	6757.0	71,573
20	9.7	7147.7	537.19	516.47	21319	5798.2	51,588
30	7.3	4949.3	179.05	232.77	15048	3215	25,867
日輸沙量公噸/天		21012.76	12825.09	2423.61	45362.66	28064.5	3652.94
年輸沙量公噸/年		7669657.4	4681157.5	884617.65	16557370	10243542	1333323.1
年輸沙量10 <sup>6</sup> 立方公尺/年		3.65	2.22	0.421	7.884	4.877	1,0024

(未完待續)