

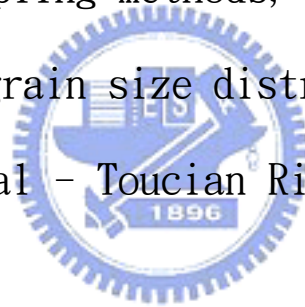
國立交通大學

土木工程學系

碩 士 論 文

河床質調查的方法、位置與頻率-以頭前溪為例

Selection of sampling methods, sampling location and
sampling rate for grain size distribution of a gravel-bed
River material - Toucian River as an example



研 究 生：傅志偉

指導教授：廖志中 教授

中華民國九十四年七月

河床質調查的方法、位置與頻率-以頭前溪為例

Selection of sampling methods, sampling location and sampling rate
for grain size distribution of a gravel-bed River material - Toucian
River as an example

研 究 生：傅志偉

Student: Chih-Wei Fu

指導教授：廖志中

Advisor: Jyh-Jong Liao

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文



Submitted to Department of Civil Engineering
College of
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master
in

Civil Engineering
July 2005
Taiwan

中華民國九十四年七月

國立交通大學

博碩士論文全文電子檔著作權授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文書名頁之次頁用)

本授權書所授權之學位論文，為本人於國立交通大學土木工程系所
大地工程組，93學年度第2學期取得碩士學位之論文。

論文題目：河床質調查的方法、位置與頻率-以頭前溪為例
指導教授：廖志中

■ 同意

本人茲將本著作，以非專屬、無償授權國立交通大學與台灣聯合大學系統圖書館：基於推動讀者間「資源共享、互惠合作」之理念，與回饋社會與學術研究之目的，國立交通大學及台灣聯合大學系統圖書館得不限地域、時間與次數，以紙本、光碟或數位化等各種方法收錄、重製與利用；於著作權法合理使用範圍內，讀者得進行線上檢索、閱覽、下載或列印。

論文全文上載網路公開之範圍及時間：

本校及台灣聯合大學系統區域網路	<input checked="" type="checkbox"/> 立即公開
校外網際網路	<input checked="" type="checkbox"/> 立即公開

■ 全文電子檔送交國家圖書館

授權人：傅志偉

親筆簽名：

傅志偉

中華民國 94 年 8 月 25 日

國立交通大學

博碩士紙本論文著作權授權書

(提供授權人裝訂於全文電子檔授權書之次頁用)

本授權書所授權之學位論文，為本人於國立交通大學土木工程系所
大地工程組，93學年度第2學期取得碩士學位之論文。

論文題目：河床質調查的方法、位置與頻率-以頭前溪為例
指導教授：廖志中

■ 同意

本人茲將本著作，以非專屬、無償授權國立交通大學，基於推動讀者間「資源共享、互惠合作」之理念，與回饋社會與學術研究之目的，國立交通大學圖書館得以紙本收錄、重製與利用；於著作權法合理使用範圍內，讀者得進行閱覽或列印。

本論文為本人向經濟部智慧局申請專利(未申請者本條款請不予理會)的附件之一，申請文號為：_____，請將論文延至____年____月____日再公開。

授權人：傅志偉

親筆簽名：傅志偉

中華民國 94 年 8 月 25 日

國家圖書館 博碩士論文電子檔案上網授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文本校授權書之後)

ID:GT009216582

本授權書所授權之論文為授權人在國立交通大學土木工程系所 93
學年度第2學期取得碩士學位之論文。

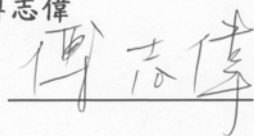
論文題目：河床質調查的方法、位置與頻率-以頭前溪為例
指導教授：廖志中

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文（含摘要），非專屬、
無償授權國家圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其
他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論
文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢
索、閱覽、下載或列印。

※ 讀者基於非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文，應依著作權法
相關規定辦理。

授權人：傅志偉

親筆簽名：



民國 94 年 8 月 25 日

國家圖書館 博碩士論文電子檔案上網授權書

(請於辦理離校程序時繳至系所助理用)

ID: GT009216582

本授權書所授權之論文為授權人在國立交通大學土木工程系所 93
學年度第__學期取得碩士學位之論文。

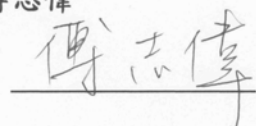
論文題目：河床質調查的方法、位置與頻率-以頭前溪為例
指導教授：廖志中

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文(含摘要)，非專屬、
無償授權國家圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其
他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論
文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢
索、閱覽、下載或列印。

☐ 論文全文上載網路公開之範圍及時間：2005.8.25 公開。

授權人：傅志偉

親筆簽名：



民國94年8月25日

國立交通大學

論文口試委員會審定書

本校 土木工程 學系碩士班 傅志偉 君

所提論文：河床質調查的方法、位置與頻率
—以頭前溪為例

合於碩士資格標準、業經本委員會評審認可。

口試委員：謝勝亨 田永銘
葉永鈞 邱坤

指導教授：邱坤 _____

系主任：張良正 教授

中華民國 九十四 年 七 月 十八 日

河床質調查的方法、位置與頻率-以頭前溪為例

學生：傅志偉

指導教授：廖志中 教授

國立交通大學土木工程研究所碩士班

摘 要

河床質組成對底床水流阻抗能力、顆粒初始運動以及沈澱傳輸具有重要影響，前二者著重表層材料，後者需同時考慮表、底層材料。進行調查工作須釐清取樣對象及採用適當方法，國內實務上僅採用體積法取樣，有別於國外表層河床質調查常使用之網格法，二者工作性與經濟性差異甚巨，但台灣河川短促導致河川掏選作用不若國外大規模河川完整，使顆粒分佈範圍極廣，因此需對便利之網格法在台灣河川之適用性進行評估。河床質調查位置以隨機佈設為主，但流域水文特性、沈澱載與河川邊界材料抗沖蝕性決定河川型態，其實就是沈澱運移與堆積之表現，故調查位置應依據河相進行評選。為提升河床質調查工作效率、經濟性與代表性，故和適當河床質調查方法、合理的取樣位置及頻率等有必要深入研究，建立相關策略提供河川管理單位參考。

本文將由體積法與網格法試驗結果，檢驗網格法應用於表層調查可行性。另以頭前溪流域為研究對象，分析頭前溪流域地質條件與河相，建立取樣位置評選系統，並將以往調查成果套入系統核對是否有正相關性。另由頭前溪流域洪水流量與再現期距探討取樣時間與頻率問題。

研究結果顯示，當河床質粒徑超過 100mm 之顆粒含量超過 30%，網格法需進行修正才可得到較佳結果。若僅評估中值粒徑，則截除巨礫含量有助於體積法與網格法比較性。河床質調查應著重於具控制底床型態變遷之粗顆粒，因此無論於縱、橫向均建議於邊灘、沙洲等區域取樣。若欲量化取樣代表性與數量問題，則需以統計方法加以評估。河床質變動與洪水規模有關，平灘流量發生造成所有底床產生變動，頭前溪平灘流量之再現期為 4 年，為頭前溪河床質重新調查之建議值。

關鍵字：河床質、體積法、網格法、地質條件、河相、評選系統

Selection of sampling methods, sampling location and sampling rate for grain size distribution of a gravel-bed River material - Toucian River as an example

Student : Chih-Wei Fu

Advisor : Jyh-Jong Liao

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Bed material of river affect the flow resistance, particle initial movement and sediments transport. Bed material lying on the surface is the major influence of flow resistance and particale initial movement. It is equally important of surface amd subsurface material for sediments transport. The purpose of investigation should be known before work. In Taiwan, surface and subsurface materials are collected together by volumetric sampling, it is different to other countrys, which surface materials collected by grid sampling and subsurface materials sampled by volumetric sampling. Due to the river conditions are different from other countrys, the possibility of using grid sampling in Taiwan should be evaluated. Sampling site often randomly spread to river bed among equal space, but river morphology migration is caused of hydrology, sediment deposite and property of boundary materials. Thus, river morphology has considerd when deciding sampling site.

The study includes selection of sampling method, sampling location and sampling rate for grain size distribution of a gravel-bed River material - Toucian River as an example.

Grid method is conditioned application in Taiwan. The content of particle which size greater than 100mm exceed 30 percent, the result of grid sampling need to be corrected. If only consider medial diameter of grains, truncate boulder will let volumetric sampling result to approach grid sampling result. The coarsest active material should be sampled, because it may be related most directly to suggested controlling hydraulic mechanisms, and it is generally considered to exert the greast influence on channel rohghness. So the sampling site often on riffle or bar. In order that quantification sampling size, it should use statistical method to estimate sample representative. Particals movement related with discharge, when bankfull flow occurs that all particals on bed will active and bed form will change. Bankfull flow of Toucian River is 4 year, it is suggested to resample frequency.

Key words : bed material、 volumetric sampling、 grid sampling、 river morphology、 select system

誌

謝

轉眼間於交通大學修業即將結束，回想當初毅然離開職場回到校園進修之忐忑心情，經過時空交替已被滿載豐收之喜悅淹蓋。

碩士論文終於在時光催促下完成，首先要感謝指教授廖博士志中先生過去兩年之提攜與指導，以及潘教授以文先生在每次論文討論給予之指教。再來要感謝于珈、同窗俊宏、秀隆以及學弟政良協助野外踏勘、試驗進行與資料彙整，明萬學長、五專同學文洲、永豐兄協助收集相關資料方使才疏學淺的我能順利完成本論文。

對於已出社會的人能回學校進修，要感謝家人的支持，我的父親、母親、姊姊與弟弟。

感謝此段歲月陪我一同走過的友人。室友小洛；五專同學慧蓉、家瑜、佑陽、益良、峰甲、榮章、柏林等；羽球社的程傑、一正等；同窗同學証傑、道生、俊閔等；以及交大劍道社的伙伴。大夥讓我扮演交大人的兩年歲月充滿美麗回憶。



目 錄

摘 要	I
ABSTRACT	II
誌 謝	III
目 錄	IV
表 目 錄	VII
圖 目 錄	IX
符 號 說 明	XIII
一、緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	4
1.3 論文內容	4
二、文獻回顧	5
2.1 河床質特徵	6
2.1.1 砂質與礫石河床特性差異	6
2.1.2 礫石河床質縱向變異性	11
2.1.3 礫石河床橫向變異性	14
2.1.4 礫石河床垂直向變異性	17
2.1.5 平面分佈不確定性	20
2.2 河床質調查方法	22
2.2.1 河床質取樣方法	23
2.2.2 粒徑分佈試驗與重量估計方法	31
2.3 河相學與河川分類	35
2.3.1 河相定義	35

2.3.2 主要河川類型與特徵	38
2.3.3 既有河川分類系統	45
2.4 取樣數量、時間與頻率	58
2.5 文獻結論與討論	63
三、研究方法	65
3.1 概述	65
3.2 取樣與樣品處理方法	67
3.2.1 體積法取樣與試驗	67
3.2.2 網格法取樣與試驗	70
3.2.3 樣品處理方法	73
3.2.4 網格取樣法適用性驗證	75
3.3 取樣對象與位置評選研究	75
3.3.1 河床質垂直向不均質分佈考量	76
3.3.2 河床質橫向不均質分佈考量	77
3.3.3 河床質縱向不均質分佈考量	79
3.4 取樣時間與頻率研究	80
3.5 最低調查數量研究	81
3.6 取樣與試驗計畫	82
3.6.1 取樣與試驗目的	82
3.6.2 取樣數量與位置	82
四、研究成果與案例分析	86
4.1 取樣與試驗結果	86
4.2 取樣方法評估	98
4.2.1 網格法適用性	98
4.2.2 取樣方法評選原則	113
4.3 取樣位置評選	114
4.3.1 橫向變異性考量	114

4.3.2 縱向變異性考量	117
4.4 取樣數量、時間與頻率	121
4.4.1 取樣數量	121
4.4.2 取樣時間	124
4.4.3 取樣頻率	124
4.5 案例分析	125
4.5.1 頭前溪基本資料	125
4.5.2 縱向評選系統	134
4.5.3 橫向	137
4.5.4 調查數量、時間與頻率	139
五、結論與建議	142
5.1 結論	142
5.2 建議	146
參 考 文 獻	150
附錄 1	154



表 目 錄

表 2. 1	砂質與礫石河床特性差異比較表(歸納自 SIMONS ,1987)	10
表 2. 2	不同採樣方法間之權重係數(修改自 KELLERHALS AND BRAY, 1971).	29
表 2. 3	河川分類階層表 (修改自 ROSGEN, 1994)	47
表 2. 4	河川分類與各類河川特徵對照表 (摘自 ROSGEN1994)	49
表 2. 5	沖積河床分類表 (彙整自陳樹群, 2001)	55
表 2. 6	半沖積河床分類表 (彙整自陳樹群, 2001)	56
表 2. 7	非沖積河床分類表 (彙整自陳樹群, 2001)	57
表 2. 8	流量與底床傳輸程度關係表(整理自 HASCHENBURGER AND. WILCOCK, 2003)	62
表 4. 1	試驗位置基本資料表.....	86
表 4. 2	體積法取樣與試驗結果表.....	89
表 4. 3	T1、T2、T4 與 T5 體積篩分析所得 D_{50} 與 D_{90}	89
表 4. 4	網格法取樣範圍與數量說明表.....	93
表 4. 5	網格法取樣與試驗結果表.....	94
表 4. 6	T1 至 T6 網格法取樣調查所得之 D_{50} 與 D_{90}	94
表 4. 7	T1、T2、T4 與 T5 網格法與體積法所得 D_{50} 比較.....	101
表 4. 8	細料含量修正 (方法 1) 現地調查成果表.....	103
表 4. 9	各級顆粒出現機率修正 (方法 2) 現地調查成果表.....	103
表 4. 10	修正後網格法 D_{50} 與原始網格法及體積法 (全部樣品) D_{50} 比較.....	107
表 4. 11	截除巨大顆粒後 D_{50} 與網格法及體積法 (全部樣品) D_{50} 比較.....	110
表 4. 12	各類型河川橫向可能產生地貌彙整表.....	117
表 4. 13	採樣位置評選階層表.....	118
表 4. 14	河川分類.....	120
表 4. 15	河川型態與取樣位置建議表.....	123
表 4. 16	新竹氣象站氣候資料統計表.....	132

表 4. 17	頭前溪流域建議洪水流量表.....	133
表 4. 18	河川縱向分段結果表.....	136
表 4. 19	頭前溪流域月平均降雨強度表.....	139



圖 目 錄

圖 1.1 烏溪、大安溪與頭前溪河床質與下游距之關係圖（資料來源：頭前溪流域整體規劃第一年工作報告及台灣地區河川型態研究調查（1/2））	3
圖 1.2 烏溪、大安溪與頭前溪流域河床質含砂量與下游距之關係圖（資料來源：頭前溪流域整體規劃第一年工作報告及台灣地區河川型態研究調查（1/2））	3
圖 2. 1 頭前溪流域不同年份調查之河床質中值粒徑與河心距關係圖...	9
圖 2. 2 河床材料中值粒徑與下游距關係圖（重繪自 BRIERLEY AND HICKIN, 1985）	12
圖 2. 3 不同沈積環境與河床質平均粒徑關係圖，同一沈積環境左側數值為體積法調查結果，右側數值為網格法調查結果（改繪自 MOSLEY AND TINDALE, 1985）	14
圖 2. 4 河床質平均粒徑於橫向之分佈情形（摘自 MOSLEY AND TINDALE, 1985）	15
圖 2. 5 沖積河礫石河床典型型態（摘自 CHURCH ET. AL, 1987）	19
圖 2. 6 礫石河床材料粒徑分佈圖(A)接觸接和類型(B)基質接和類型（摘自 CHURCH ET. AL, 1987）	19
圖 2. 7 礫石河床材料垂直向特性比較圖（摘自 REID ET. AL 1997）	20
圖 2. 8 礫石河床微觀組構示意圖（摘自 REID ET AL., 1992）	21
圖 2. 9 方形網框示意圖（KELLERHALS AND BRAY, 1971）	25
圖 2. 10 網格法與體積法不同深度樣品試驗結果比較圖（摘自 LEOPOLD, 1970）	27
圖 2. 11 以三種不同粒徑模擬緊密之立體樣品（摘自 KELLERHALS AND BRAY, 1971）	28
圖 2. 12 各種不同方法調查立體方塊樣品之結果柱狀圖(A)重量頻率之體積法;(B)出現次數頻率之網格法;(C)重量頻率之面積法;(D)重量頻率之網	

格法;(E)出現次數頻率之面積法 (摘自 KELLERHALS AND BRAY, 1971)...	29
圖 2. 13 不同方法得到之粒徑分佈比較(摘自 RITTER AND HELLEY, 1969) ..	30
圖 2. 14 不同方法得到之粒徑分佈結果經轉換後之比較(摘自 KELLERHALS AND BRAY, 1971).....	31
圖 2. 15 開口樣版示意圖.....	32
圖 2. 16 顆粒 B 軸與顆粒重量之關係圖 (摘自 LEOPOLD, 1970)	33
圖 2. 17 以 B 軸換算顆粒重量與實測重量關係圖(摘自 CHURCH ET. AL, 1987)	34
圖 2.18 河川平面型態分類與沈滓載、穩定性間關係圖 (摘自 SCHUMM1977)	37
圖 2. 19 直線型河川之不對稱深潭、交替出現沙洲與淺灘等平面特徵演變 示意圖 (摘自 RICHARDS, 1982)	39
圖 2. 20 直線型、略微曲折型至蜿蜒型河川平面型態定義與演變示意圖(摘 自 CHORLEY ET AL., 1984)	40
圖 2. 21 辮狀系統演變過程示意圖 (摘自 LEOPOLD AND WOLMAN, 1957) ...	43
圖 2. 22 蜿蜒型、辮狀型平面型態與橫斷面之關係 (摘自 COLEMAN, 1969)	44
圖 2. 23 縱橫剖面與平面型態之主要河川分類 (摘自陳樹群, 2001 改繪 ROSGEN, 1996 原圖)	48
圖 2. 24 蜿蜒寬度比計算示意圖.....	51
圖 2. 25 以蜿蜒寬度比定義河川分類 (摘自陳樹群, 2001 改繪 ROSGEN, 1996 原圖)	52
圖 2. 26 深槽比與寬深比定義示意圖.....	52
圖 2. 27 圖解河川分類與深槽比、曲折度、寬深比、坡降與粒徑間之關係 (摘自陳樹群, 2001 改繪 ROSGEN, 1996 原圖)	53
圖 2. 28 第二階分類流程圖 (摘自 ROSGEN, 1994)	53
圖 2. 29 流量與底床運動狀態關係, A、B、C 與 D 依序分別為上游至下游之 試驗段 (摘自 HASCHENBURGER AND. WILCOCK, 2003)	61

圖 2. 30 底床顆粒處於部分運動狀態時，不同粒徑顆粒運動狀態隨流量變化關係，A 與 B 為上游試驗區 A、B 於 85%平灘流量觀察結果，C 與 D 為下游試驗區 C、D 於低流量洪水事件時觀察結果（摘自 HASCHENBURGER AND. WILCOCK, 2003）	61
圖 3. 1 研究流程圖	66
圖 3. 2 體積法取樣與試驗程序	68
圖 3. 3 網格法取樣採用建立網格工具圖	70
圖 3. 4 網格法取樣與試驗流程	71
圖 3. 5 開口樣版圖	73
圖 3. 6 網格法適用性研究流程圖	75
圖 3. 7 礫石河床垂直向不均質分佈問題研究流程	77
圖 3. 8 渠道橫斷面可能地形形貌	78
圖 3. 9 橫斷面不均質分佈研究流程圖	78
圖 3. 10 縱斷面不均質分佈研究流程圖	79
圖 3. 11 取樣時間與頻率研究流程圖	81
圖 3. 12 最低調查數量研究流程圖	82
圖 3. 13 試驗段 I 位置圖	83
圖 3. 14 試驗段 II 位置圖	83
圖 4. 1 T1、T2 與 T3 試驗位置示意圖	87
圖 4. 2 T4、T5 與 T6 試驗位置圖	87
圖 4. 3 T1 體積法粒徑分佈曲線圖	90
圖 4. 4 T2 體積法粒徑分佈曲線圖	90
圖 4. 5 T4 體積法粒徑分佈曲線圖	91
圖 4. 6 T5 體積法粒徑分佈曲線圖	91
圖 4. 7 T2 表層與底層粒徑差異圖	92
圖 4. 8 T1 網格法取樣與試驗結果	95
圖 4. 9 T2 網格法取樣與試驗結果	95
圖 4. 10 T3 網格法取樣與試驗結果	96

圖 4. 11	T4 網格法取樣與試驗結果	96
圖 4. 12	T5 網格法取樣與試驗結果	97
圖 4. 13	T6 網格法取樣與試驗結果	97
圖 4. 14	T1 體積法與網格法結果比較圖	99
圖 4. 15	T2 體積法與網格法結果比較圖	99
圖 4. 16	T4 體積法與網格法結果比較圖	100
圖 4. 17	T5 體積法與網格法結果比較圖	100
圖 4. 18	現地修正係數量測示意圖.....	102
圖 4. 19	T1 體積法、網格法與網格法修正結果比較圖	105
圖 4. 20	T2 體積法、網格法與網格法修正結果比較圖	106
圖 4. 21	T5 體積法、網格法與網格法修正結果比較圖	106
圖 4. 22	T1 截除粒徑大於 256MM 顆粒後粒徑分佈曲線圖.....	108
圖 4. 23	T2 截除粒徑大於 256MM 顆粒後粒徑分佈曲線圖.....	109
圖 4. 24	T4 截除粒徑大於 256MM 顆粒後粒徑分佈曲線圖.....	109
圖 4. 25	T5 截除粒徑大於 256MM 顆粒後粒徑分佈曲線圖.....	110
圖 4. 26	體積樣品具代表性樣品數量評估圖 (摘自 CHURCH ET. AL, 1987)	
	112
圖 4. 29	頭前溪流流域地質概況圖.....	127
圖 4. 30	頭前溪河床質中值粒徑與河心距關係圖.....	131
圖 4. 31	不同年代相近位置河床質變化關係圖.....	131
圖 4. 32	新竹地區逐月降雨與降雨日數分佈圖.....	133
圖 4. 33	頭前溪河川分類成果與 83 年河床質調查對照.....	135
圖 4. 34	T1、T2 與 T3 網格法試驗結果比較	138
圖 4. 35	T5 與 T6 網格法試驗結果比較	138
圖 4. 36	頭前溪二重埔水文測站建議採用洪水流量與再現頻率關係圖	141

符 號 說 明

RD50 : 淺灘河床質中值粒徑

D_{30} : 河床質累積通過百分比 30% 對應之顆粒尺寸

D_{50} : 河床質中值粒徑

D_{90} : 河床質累積通過百分比 90% 對應之顆粒尺寸

L_m : 蜿蜒河川軸線之蜿蜒波長

W : 滿槽河寬

Q_b : 滿槽流量

Q_m : 年平均流量

Q_{ma} : 年平均洪水量

M : 粉土-黏土權重係數

R_c : 曲率半徑

L : 細顆粒含量評估方法中表面測線長度

N_o : 網格法取樣各級顆粒出現次數

N_m : 經由細顆粒含量修正後之網格法取樣各級顆粒出現次數

N_i : 經由各級顆粒出現機率修正後之網格法取樣各級顆粒出現次數

D_i : 開口樣版開口尺寸

P : 表面測線評估之細顆粒含量

P_f : 表面測線評估之各級顆粒出現機率



一、緒論

1.1 研究動機

台灣地處板塊接觸帶，地質作用盛行，地質構造發達形成山多平原少之地形。又因屬亞熱帶氣候乾季與溼季分明，夏、秋兩季常有颱風侵擾。上述氣象、地形與地質條件造就台灣河川短促特性。

水利工程在探討河川的水流阻抗能力、顆粒初始運動狀態、護甲層 (armour layer) 結構破壞，以及泥沙運移等均與底床材料顆粒分佈有關。

就水流阻抗能力而言，表面顆粒形成糙率比底層材料更加重要；對沈澱分析時，表面材料決定顆粒運動之臨界狀態，一但表層組構瓦解，整體材料成為河床載之來源。因此，在分析水流阻抗與顆粒初始運動狀態時，河床材料表層組構較為重要；針對沈澱運移與堆積分析時，整體材料性質變成為調查重點 (Church et al., 1987)。

天然河川河床存在三大不同類型，包括均勻之砂質河床、粒徑分佈廣泛之礫石河床以及不易被擾動之岩床。其中礫石河床因粒徑分佈廣泛，於空間分佈存在許多不確定性，且因風力或低能水流作用造成三度空間不均質。縱向方面隨與河口距離愈近顆粒逐漸減小，局部區域因邊界條件不同產生差異；橫向方面受暴露時間長短等因素影響，使其在溪線 (主深槽)、邊灘、沙洲與洪泛區呈現不同粒徑組成；垂直向方面，沙洲與洪泛區可能因長期暴露使表層細顆粒受風力攜出，邊灘長期受低能水流之掏選作用使表層粗粒化，主深槽部分因水流能力較強，河床載中之推移載不停運動，使床質組成更趨複雜 (林承坤, 1992; Church et al., 1987; Haschenburger and Wilcock, 2003)。

河床質調查之取樣方法有體積法、網格法、面積法與橫切法等等，後三者為表面調查方法（Kellerhals and Bray, 1971; Morris and Fan, 1998）。台灣於河床質調查幾乎均以最耗費資源之體積法進行，且忽略礫石河床表層粗粒化之現象。反觀國外於礫石河床以表面網格法為調查主流，兩者所耗時間及資源差異極大。此外，台灣河床質調查無作業規範，採樣位置多跟隨斷面測量位置或均勻佈設，缺少調查策略擬定，此狀況易導致調查成果不符實際狀態，並且影響各項分析結果。

圖 1.1 所示為烏溪、大安溪，與頭前河流域河床質調查成果，顯示烏溪與頭前河流域河床由近海口之砂質河床與近山區之礫石河床共同組成，大安溪流域則均為礫石河床。由圖上可發現河床材料中值粒徑起伏劇烈無明顯趨勢，此現象顯示可能由於採樣位置無系統導致取樣結果無法進行比較有關。此外，大安溪流域河床中值粒徑均較烏溪與頭前溪河床中值粒徑大，此暗喻大安溪流域地質材料較堅硬，抗風化能力較佳。由圖 1.2 所示之烏溪、大安溪與頭前河流域河床質含砂量與下游距之關係，顯示烏溪與頭前溪礫石河床段亦有較高之含砂量，表示集水區土壤流失情形較普遍；大安溪流域河床質含砂量低，河床材料主要由粗顆粒組成。上述二現象隱含河床質受地質條件影響之事實。

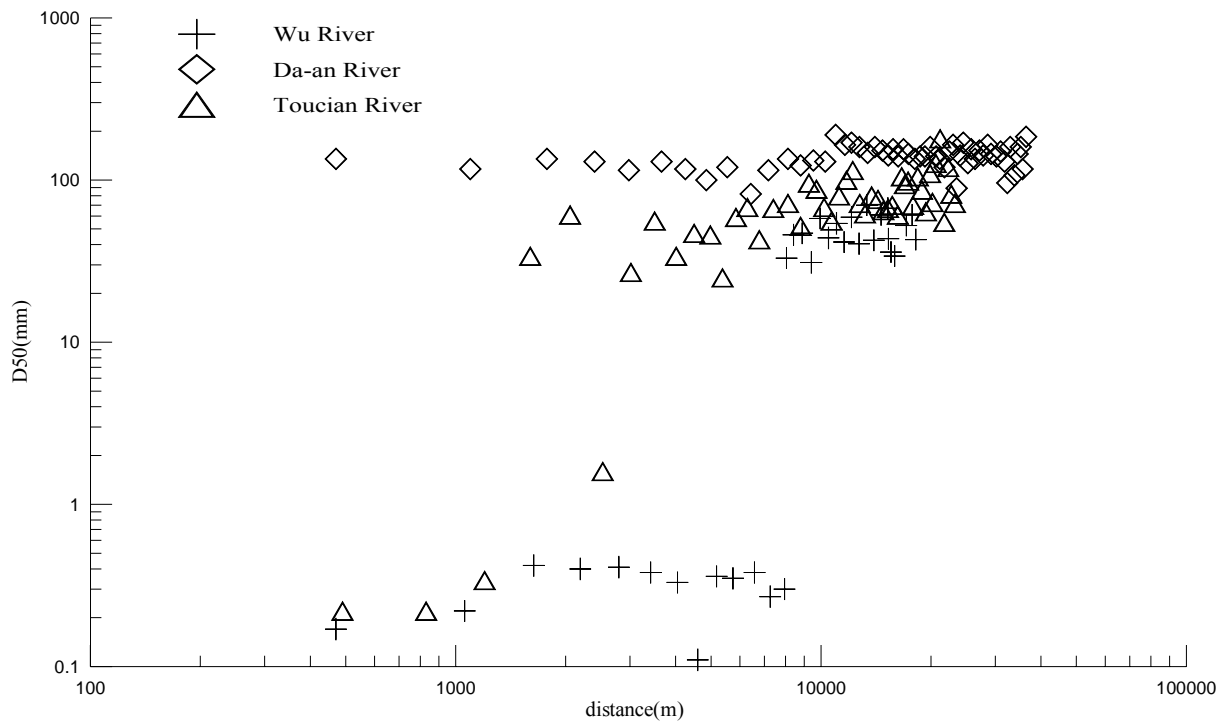


圖 1.1 烏溪、大安溪與頭前溪河床質與下游距之關係圖（資料來源：頭前

溪流流域整體規劃第一年工作報告及台灣地區河川型態研究調查（1/2））

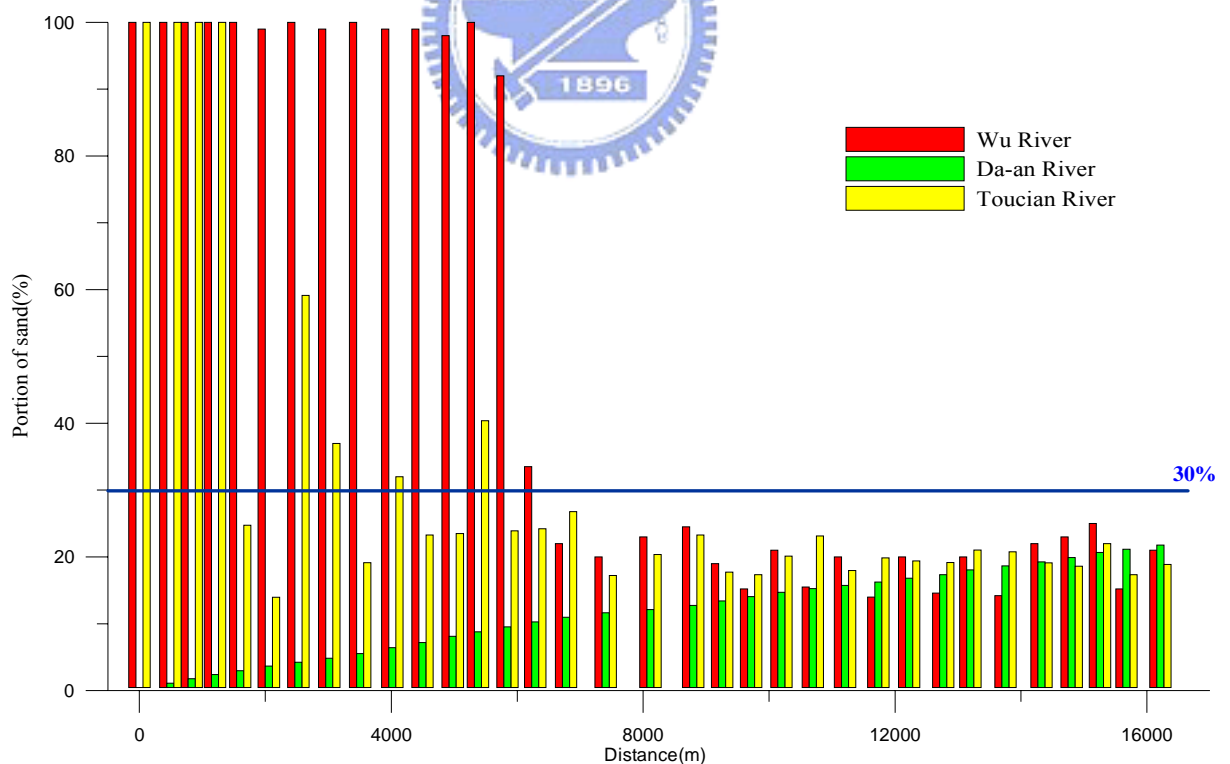


圖 1.2 烏溪、大安溪與頭前溪流流域河床質含砂量與下游距之關係圖（資料

來源：頭前溪流流域整體規劃第一年工作報告及台灣地區河川型態研究調查

(1/2))

由前述，將台灣河床質調查工作存在問題與待改善項目歸納如下：

- 1.取樣工作未考慮礫石河床表層粗粒化特性，將表、底層材料視作一同。
- 2.忽略粗粒化現象，造成分析結果誤差。
- 3.體積法之工作效率及成本均較網格法差，但在台灣地區常忽略網格法的施做，應評估網格法的適用性。
- 4.取樣位置與數量未依河川特性加以規範，常造成代表性不足的現象。

1.2 研究目的

基於上述緣由，本研究期望達成以下目標：

- 1.檢驗台灣河川河床質調查採用網格法之可行性。
- 2.探討地質與河床質之關連。
- 3.建立河床質調查位置、頻率，與數量評估方法。

1.3 論文內容

本論文茲分五章節論述。第一章為緒論，說明研究動機與目的；第二章為文獻回顧，針對本研究主題蒐集相關文獻（包括河床質特性、河床質調查方法、河相理論、河川分類方法以及卵礫石河床沈滓傳輸特性等）並說明相關概況；第三章提出針對各項問題因應之研究流程與方法；第四章說明研究與試驗結果並將結果進行歸納分析；最後第五章進行結論與討論。

二、文獻回顧

河床質調查工作量龐大，調查成果為底床對水流阻抗能力、顆粒初始運動門檻及沈澱傳輸分析之重要參數，為水利工程規劃設計重要調查項目之一。為提昇工作效率需研擬調查策略，包括取樣對象、方法、位置、數量與頻率等事項，方得依據不同調查目的選擇適合調查方法，並於適當時間及地點進行採樣分析。

調查目的若為對水流阻抗能力或底床顆粒初始運動門檻評估，表面材料分佈為調查重點。若相同沈澱堆積後未發生表層粗粒化現象，表層調查成果可作為沈澱傳輸分析之用。若已存在粗粒化現象則需將表、底層樣品區隔。河床材料不外乎砂質、礫石與岩床三類，砂質河床顆粒小且均勻，行為較單純，且因顆粒小僅能以體積法取樣；礫石河床在縱、橫與垂直向分佈不均質，具有高度空間變異性；岩床由岩層或巨大岩塊組成，具高度束制性，河川斷面穩定。因此本章首先將對砂質與礫石河床之河床質特性進行說明。

調查工作應依據目的選擇合適調查方法，使調查成果符合分析需求，且應具備操作便利與成本經濟之優點。國內不論砂質或是礫石河床，河床質調查幾乎僅用體積法取樣，國外於礫石河床部分通常以表面網格法取樣分析，二者所耗物資差異甚巨，造成國內、外區別之原因值得探討。故本章第二部分將蒐集有關河床質調查方法文獻，分析各種不同方法之優劣。

河床質除具有空間變異性外，時間亦有變異性。縱橫向變異性使採樣位置選擇需要審慎思考，時間變異性使採樣頻率不易決定。為使調查工作更具效率，應有策略評估採樣位置、數量與頻率。於縱向方面，雖然河床

質呈現往下游方向床質顆粒粒徑漸次減小，但不同類型河川間具有不同斷面幾何、坡降與地形特徵，若床質粒徑衰減趨勢明確，縱向取樣位置應先以河相做切割，確保不同河相河段取樣數量足夠代表該河段床質；橫向方面，由於礫石河床沈滓傳輸可分做底床顆粒完全不動、部分運動與完全運動三種狀態，隨洪水升降，此三區於河床涵蓋區域隨之變化，造成底床全面運動之洪水事件不會年復一年發生，因此造成橫向床質差異，此現象同時說明河床質時間變數造成之差距。故於本章最後將探討河相理論與河川分類以及礫石河床傳輸特性兩子題，以供本論文取樣位置、數量及頻率探討參考。

2.1 河床質特徵

本論文所考慮之河床質特徵包括砂質與礫石河床特徵差異、礫石河床縱向變異性、礫石河床橫向變異性、礫石河床垂直向變異性以及礫石河床平面分佈不確定性等，茲分述如後說明：

2.1.1 砂質與礫石河床特性差異

自然界河川發源於山麓地帶，往下游高程隨距離增加逐漸降低，不同氣候環境、地形與地質條件均對河川水系發展產生影響。整體而言：河川底床可分為砂質床、礫石床與岩床三類，岩床因強度良好，邊界可擾動性差，因此本節僅對砂質河床與卵礫石河床進行說明。Simons (1987) 提出砂質河床與卵礫石河床在平面型態、顆粒組構、渠道坡度、護甲層、河制、河床型態、沙洲型態、阻水能力、泥沙運移方式、底床沖刷與填補特徵以及對流量變化敏感度等十一項差異(表 2.1)。其間差異可簡單以河床特徵與流速高低變化產生泥沙運移特性不同作為說明。在河床型

態方面，砂質河床之河床型態多出現沙濂、沙丘、平坦河床或逆沙丘等特徵，且顆粒分佈均勻，粒徑範圍介於 0.625mm 至 2.0mm 之間，底床坡度較為平緩、流速低，但顆粒分佈集中且小，因此底床型態易受流量、水工結構物...等等自然與人為因素改變；反觀礫石河床隨底床顆粒由礫石變為巨礫，沙濂、沙丘等微小組構逐漸消失，礫石床雖多發生在河床坡度較陡河段，但本體顆粒組成之構造足以抵抗經常性水流或是發生頻率較低之洪水事件，因此底床型態僅在劇烈洪水事件發生時改變。在泥沙運移特徵方面，砂質河床部份只要流速大於 0.3m/s，底床材料發生運移；山區礫石河床較穩定，變化速率緩和，僅於相當極端洪水事件發生後產生變化。

砂質河床材料均勻，河床變遷行為明確，由於顆粒粒徑小且均勻集中某特定粒徑範圍，因此採樣僅可以體積樣品採集；但卵礫石河床材料粒徑分佈廣泛，調查上存在許多窒礙難行因素，有待更多學術上的關切與克服。

依據上述緣由，本研究將專注於礫石河床河床質特性與調查方法、位置、數量與頻率等事項。Bray(1971)提出礫石河床具有河床材料在橫向與縱向呈現不同之組構、採樣時間點變異性、垂直向的顆粒分佈變異性、存在砂與卵礫石兩種不同型態之分佈以及使用不同調查方法產生結果差異等五項變異性。Reid(1997)亦歸納礫石河床具備縱向顆粒粒徑變化、垂直向變化，顆粒叢聚形成局部微組構等特性。

總結前述二位學者對礫石河床特性描述，將礫石河床床質調查工作可能遇見問題整理如后：

- 1.空間不均質分佈：巨觀而言，縱橫向分佈隨取樣位置不同會有不

同組構；微觀而言，垂直向可能受表層粗粒化影響導致垂直向不均質分佈，另於局部區域由大顆粒形成顆粒叢聚之微組構，均會影響各項分析結果。

2.礫石河床床質隨洪水事件變動，因此具有時變性。

3.由於調查目的不同，著重樣品深度隨之改變，因此發展出許多不同調查方法，不同方法需轉換於同一基準方能進行比較。

除上述三項外，表層樣品與底層樣品間差異是否存在關連性亦是值得探討之問題。

以台灣河川為例（圖 1.1）縱向河床質分佈呈現不同程度隨下游距離增加而使顆粒縮減情形，砂質與礫石河床分界處非緩慢漸變而呈現明顯差異。雖於縱向存在前述趨勢，但因無橫向變異性未加考慮導致調查成果散佈範圍廣泛。

圖 2.1 為頭前溪民國 83、88 與 90 年河床質調查成果，可知不同年份之調查成果間存在差異，說明河床質組成確實隨時間變化，因此需瞭解此變化頻率以作為調查頻率選擇之參考，方可使河川管理與治理工作能正確執行。

另台灣河床質調查無論表、底層樣品均以體積法進行，因此無表面法與體積法之成果差異與修正問題，若調查目的僅為水流阻抗能力或是顆粒初始運動狀態時，體積法並非最佳選擇。為提升台灣河床質調查工作技術，需評估較便利調查方法之可行性，因此亦需對不同方法調查成果的差異，及成果轉換加以探討(Kellerhals and Bray,1971；Church et al.,1987)。

台灣河川於海口附近多呈現砂質河床，於沖積平原以及麓山帶前段

多為礫石河床，山區則為岩床。以頭前溪為例，砂質河床僅約 1.7 公里，水利署主管之河川管理段（約 27 公里）多位於礫石河床範圍，此為自然河川底床變異性最大之底床材料，由此可知當對礫石河床特性掌握越準確，越能有效執行河川管理與治理工作。

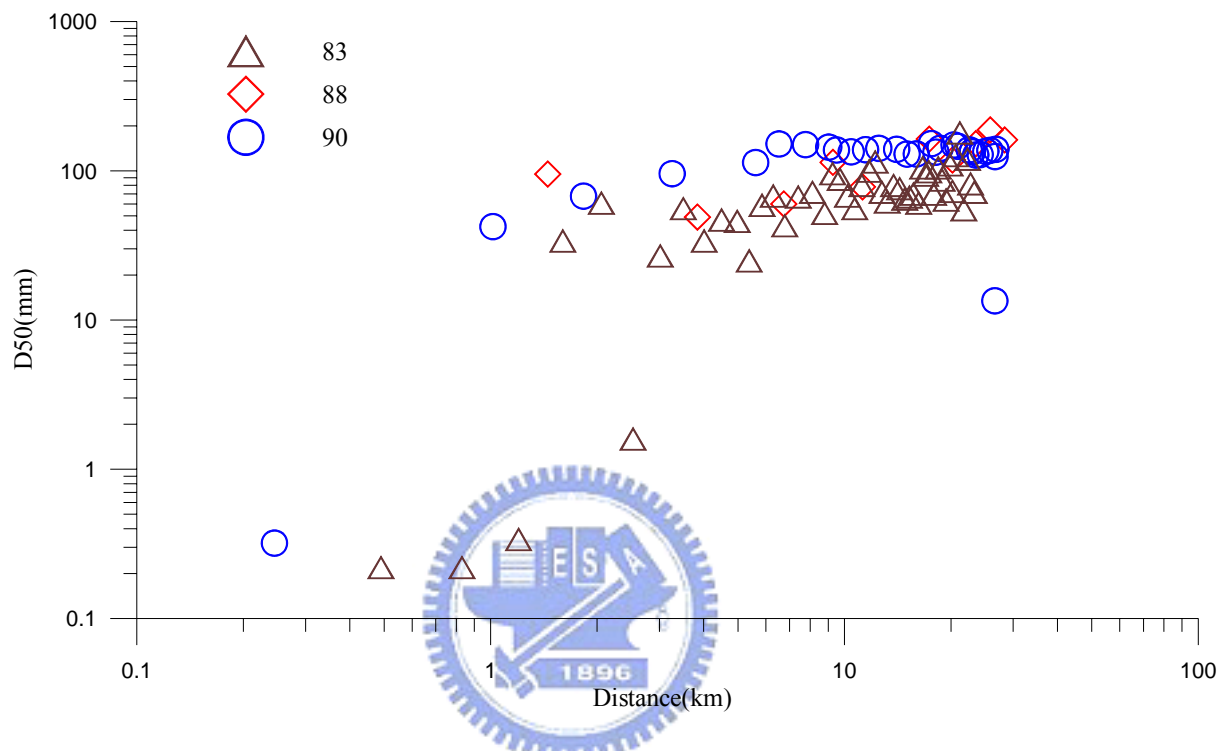


表 2.1 砂質與礫石河床特性差異比較表(歸納自 Simons,1987)

特性比較項目	砂質河床	卵礫石河床	備註
平面型態	蜿蜒、辮狀或是其間過渡帶。	過渡帶、辮狀。	
顆粒組構	中值粒徑可由最大顆粒與最小顆粒之算術平均值推估。	料粒徑分佈廣泛，中值粒徑之變異性大。	
坡降	底床較為平坦	底床坡度較大	
護甲層	不可能有護甲層產生。	經由河床材料運移掏選形成護甲層。	
河制 (regime)	福祿數隨底床顆粒變化約在 0.2、0.3 到 0.4 之範圍。	礫石質以上河床福祿數通常大於 1，除非當水流能量足以造成常態性顆粒運移，福祿數才有會低於 1。	
河床形態	由沙濂與沙丘共同形成，或在漸變段會出現逆沙丘等河床型態。	礫石河床仍保有沙丘之河床特徵。若河床材料趨於卵石或是巨礫程度時，砂濂與沙丘型態均不再發生。	
沙洲型態	所有型態之沙洲均會發生。	所有型態之沙洲均會發生。	
河床水流阻抗能力	砂質河床之水流阻抗能力是河床型態的函數。	礫石質以上河床河床阻抗水流能力主要是顆粒尺寸與分佈之函數。	
泥沙運輸	沖洗載(Wash load)在砂質河床不僅使水流流速降低，並且會運移顆粒。	沖洗載在礫石質河床會影響流速，但不足以搬運底床顆粒材料。	
底床沖刷與填補	砂質河床型態受於下游較大型沙洲變遷、局部堆積與沖蝕或是人為因素改變，其規模與速度通常很大且快速。	礫石以上之河床之變化通常不這麼明顯，通常發生在集水區大規模的邊坡破壞、水壩的損毀以及大規模的氣候現象等重大事件中。	
對流量變化之敏感度	砂質河床較平坦，流速較低，且受灌溉區改變等微小因素便會造成河床型態改變。	礫石以上河床所處範圍其坡度較陡，流速大且分佈混亂，河床型態不易受流量變化產生改變，除非劇烈增加或減少事件發生。	

2.1.2 礫石河床質縱向變異性

河床質在河川縱向呈不均質分佈，但可由代表粒徑的變化加以探討其變異性。一般而言，河床材料之顆粒尺寸與距出海口距離成正比。此縱向變異性由磨耗(abrasion)、掏選(sorting)、風化(weathering)、地質歷史(geomorphic history)、支流匯入(tributary input)、山坡與河道結合(hillslope-channel coupling)以及史前環境重新再造(paleoenvironmental reconstruction)等因素造成，其中尤以磨耗與掏選作用影響最大(Rice and Church,1997)。

Schumm(1973)指出河床質粒徑縱向變化乃由於當流速到達一臨界值，顆粒開始運動，但若河床上有較大的顆粒存在，一般流速並無法使大顆粒運動，此時小顆粒受到大顆粒保護而保持靜止，此時便為大顆粒理想的磨損環境。當大顆粒在原地經長時間磨耗形成較小顆粒時，同樣流速條件變得足以使顆粒運動，在運動過程中顆粒有機會產生破損或破裂，造成顆粒變得更小。崩解之後的小顆粒將於下游某一位置再次呈現前述的暫時性穩定狀態，同時磨耗再次發生。如此週而復始之循環使河床材料粒徑呈現往下游方向逐漸減小現象。Bradley(1970)曾於 Colorado 河進行現地試驗並與人工渠槽結果比較，發現人工渠槽所得結果無法完全模擬自然界複雜環境下產生之結果，但可確定風化會加速河床材料磨耗作用。

Sternberg(1875)認為礫石河床顆粒因磨耗與搬運產生尺寸朝下游方向衰減現象，此衰減與搬運距離呈指數關係(semi-logarithmic)。但 Brierley and Hickin(1985)於 British Columbia 之 Squamish River 進行野

外試驗，發現接近砂石產生處之河床質縱向分佈並非依循 Sternberg's law，此時顆粒尺寸與下游距離（調查位置至出海口距離）反較類似冪函數(power function)分佈，由其試驗結果可知顆粒中值粒徑隨往下游距離增加而逐漸縮減之趨勢，如圖 2.2 所示。由圖 2.2 可知試驗段包含峽谷地形、辮狀系統與蜿蜒系統河段，但顆粒衰減趨勢維持一定，顯示河床質顆粒徑隨下游距離衰減趨勢不受河相影響。

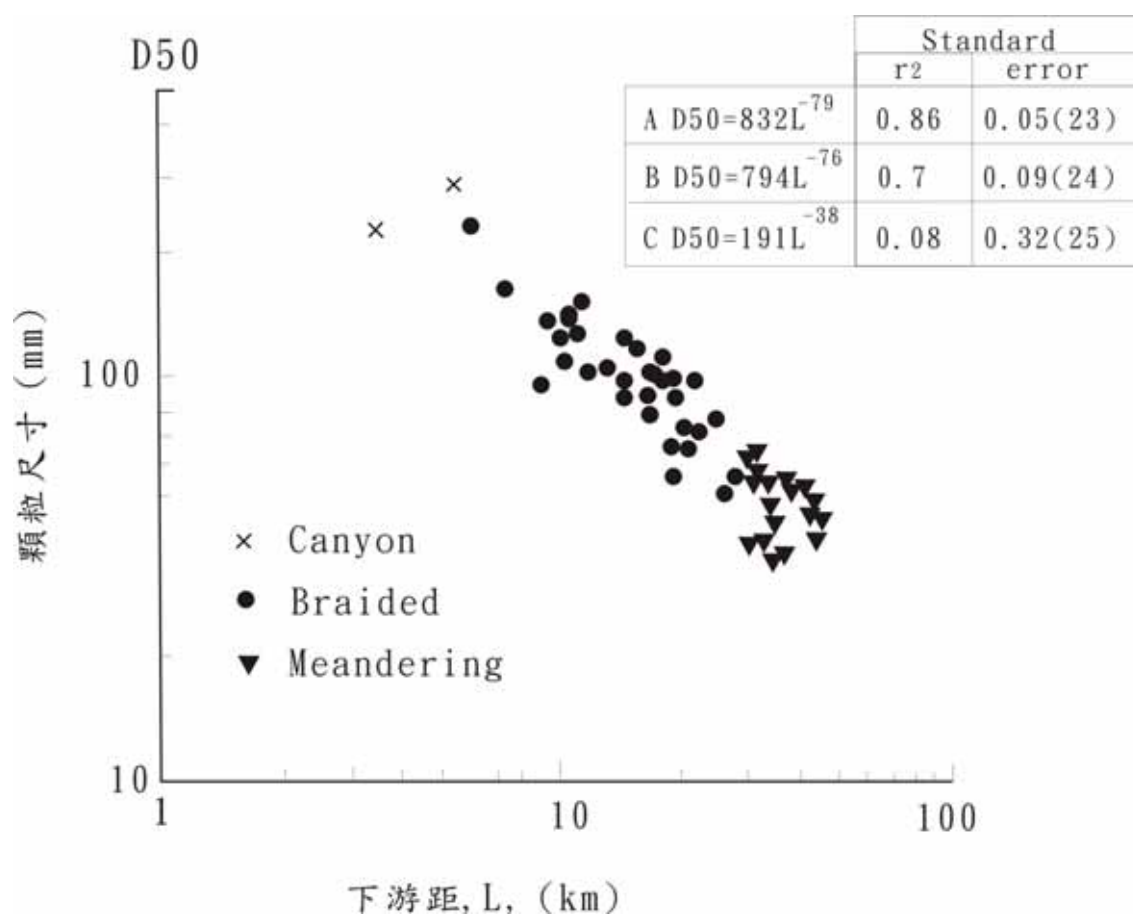


圖 2.2 河床材料中值粒徑與下游距關係圖(重繪自 Brierley and Hickin,1985)

由圖 2.2 可知河床質中值粒徑隨距離增加有規律之衰減，除上述整體流域於縱向呈冪函數分佈外，局部區段亦會因地形不同產生差異。

Hey and Thorne(1986)於 1978 至 1979 夏季低水位期間在 United Kingdom 區礫石河床進行 62 組河床質取樣，每個試驗段均為於深潭(pool)與淺灘

(riffle)交替出現之區段，由 3 處淺灘中夾 2 處深潭構成一試驗段與進行河床質調查，結果發現淺灘的 D_{50} 約為所有調查結果平均 D_{50} 的 1.19 倍：

$$RD_{50} = 1.19D_{50} \quad (r^2 = 0.95) \quad (2.1)$$

其中 RD_{50} = 淺灘上河床材料之中值粒徑（單位：mm）

D_{50} = 所有調查位置之中值粒徑平均值（單位：mm）

同一沈積環境之地形（如江心洲）亦存在縱向變異性，江心洲頂部（上游端）河床顆粒較粗，底部（下游端）河床顆粒較細。同一區域之不同沈積環境之河床顆粒同樣存在差異，通常交替沙洲(diagonal bar)之底床顆粒較其他沙洲粗，常成為河道路徑控制因素(Mosley and Tindale, 1985；Morris and Fan,1998)

比較河床質縱向變異性應於相同沈積環境下進行取樣，方可得到合理比較(Rice and Church,1997)。

由於磨耗、掏選、風化、地形與地質條件（歷史、沈積環境等）等作用，造成河床質於河川縱向呈不均質分佈，因此探討河床質材料分佈及特性，需考慮上述影響因素。故進行河床質調查工作，應考慮河床質縱向不均質分佈特性，並考慮形成不均質分佈之成因，以擬定調查策略。

此外，河川橫向河床質亦有相當差異，若於同一斷面上之不同沈積環境取樣會得到不同結果，且不同河段之間會存在不同河相，河川底床特徵有顯著差異。若忽略不同沈積環境間差異進行取樣，將造成代表性不足問題，並且無法正確反應出河川縱向變異性。橫向變異性將於下一小節進行說明。

2.1.3 礫石河床橫向變異性

Mosley and Tindale(1985)於紐西蘭 Ashley River 之辮狀河段進行河床質取樣調查，發現不同沈積環境（包括四處不同程度之不活動區域 A、B、C、D，以及交替沙洲、側向沙洲、橫向沙洲、深潭與近水堤岸等）間河床質存在變異性，其中以交替沙洲河床材料顆粒最粗（圖 2.3）。其間差異不僅造成河床質縱向變異性，亦會造成河床質橫向不均質分佈（圖 2.4）。

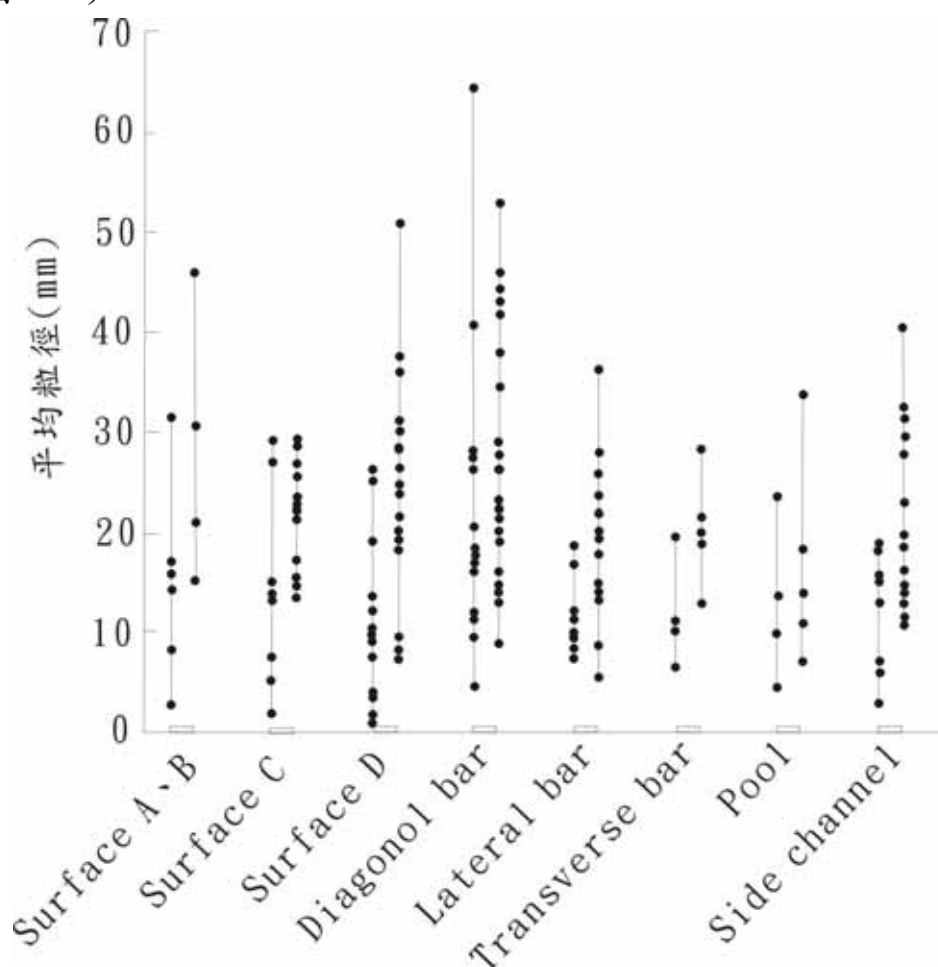


圖 2.3 不同沈積環境與河床質平均粒徑關係圖，同一沈積環境左側數值為體積法調查結果，右側數值為網格法調查結果（改繪自 Mosley and Tindale,1985）

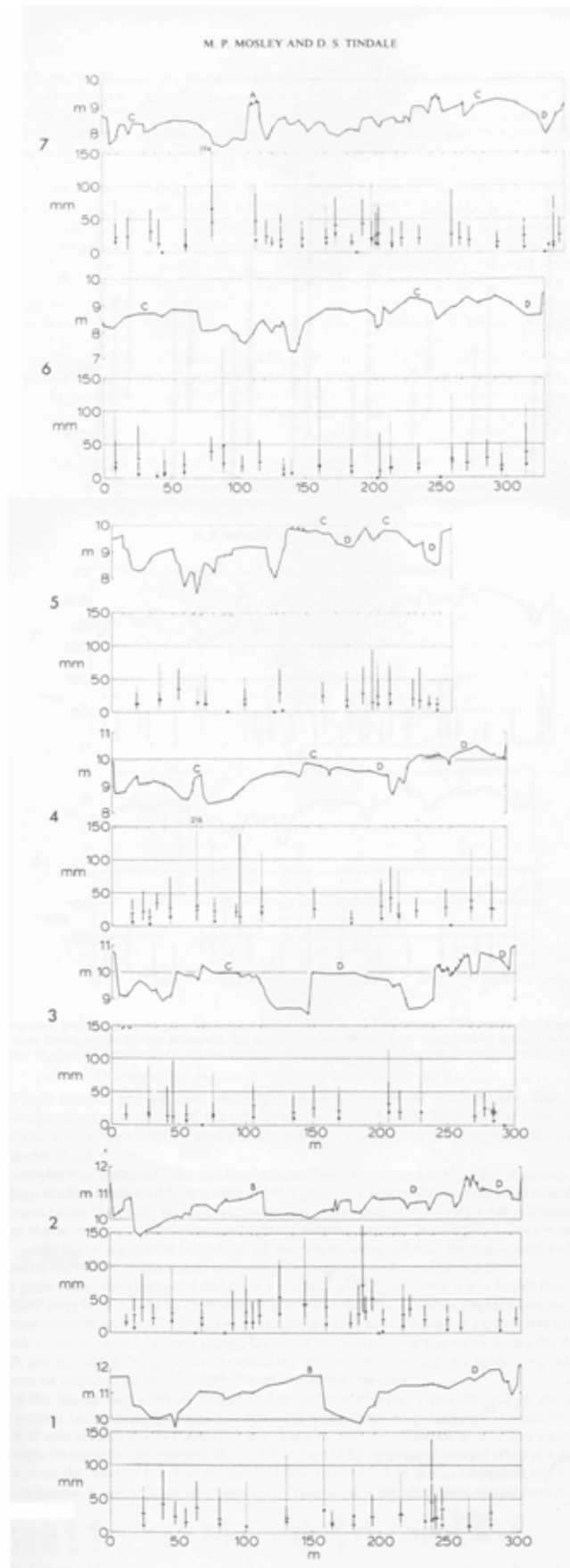


圖 2.4 河床質平均粒徑於橫向之分佈情形(摘自 Mosley and Tindale,1985)

Morris and Fan(1998)認為河床質橫向亦存在不均勻分佈，主要水流線沿線堆積顆粒較粗，造成河川中央底床顆粒會較近堤岸處底床床質為粗。

Haschenburger and Wilcock (2003) 於 Carnation Creek 以磁石標記或取代河床顆粒，用以觀察礫石河床傳輸特性，發現礫石河床沈滓傳輸於一區域內存在三種狀態，分別是完全不運動、部分運動與完全運動(顆粒位移超過 1 公尺視為運動)，各個狀態涵蓋範圍隨流量變化而調整。由觀察得知表面顆粒捲增範圍會隨洪水增加有側移現象。在低洪水事件中完全運動區域位於主深槽附近，部分運輸發生在主深槽與堤岸間之沙洲上，隨洪水增大靠近堤岸邊之不動區域漸變成部分傳輸之狀態，完全運動區域也由主深槽往外擴大，當滿槽流時完全運動狀態完全取代部分傳輸狀態。

當 50%~70%的平灘流量發生時，造成 60%河床表面處於部分傳輸狀態。其餘部分幾乎屬於完全運動狀態（包含主深槽區域），僅接近邊緣地帶屬於完全不運動狀態。85%平灘流量發生時造成剩下 25%~50%面積處於部分傳輸狀態。滿槽流時則幾乎整個河床均產生完全傳輸。當河床處於部分傳輸狀態時，顆粒運動狀態與洪水大小有關，洪水較小時僅能傳輸小顆粒，當洪水越接近全面運動門檻較大顆粒逐漸被驅動。

由上述可知，因渠道橫斷面存在地形起伏，主深槽處最深，其次為邊灘、沙洲與洪泛平原，水面淹蓋範圍隨洪水增大而擴大，當淹沒區水深加深提高驅動力將促使顆粒運動狀態大幅增加。由於促使全面運動之洪水事件並非經常性發生，低洪水事件僅造成主深槽部分床質變化，未達全斷面顆粒運動洪水將次高地形（例如：灘或沙洲）河床質細顆粒掬

選運移，因此造成橫斷面上床質粒徑分佈差異。

河川掏選作用為改變底床顆粒分佈之主因。底床地形與河川流量之組合決定水流覆蓋河床區域與面積，當洪水流量越大覆蓋面積亦越大，產生掏選作用之範圍亦隨之增加。上述因素造成不同沈積環境間河床質存在差異，但即便於同一沈積環境內之河床質亦存在差異（例如：沙洲上游處顆粒較粗，下游處顆粒較細）。如何取得橫向具代表性之河床質參數，需考慮調查目的再加以評估。單一沈積環境內多少調查數量足以代表該沈積環境河床質？整體河床橫向代表性如何決定？雖然 Mosley and Tindale 曾對需求數量說明，但僅提供辮狀河川之比較，且無具體說明不同沈積環境間河床質材料是否存在關係。由於河床質調查工作所需資原相當龐大，為提高工作效率應進一步討論不同沈積環境間河床質參數之關係，以經濟數量達到調查目的將有助於河床質調查工作進行。

2.1.4 礫石河床垂直向變異性

礫石河床因沈積條件不同，可能存在粗細顆粒一起沈積、粗顆粒沈積後細顆粒再填充期間孔隙，或是經由均勻傳輸造成僅有粗顆粒堆積等三種狀況，此現象形成礫石河床於垂直向亦存在甚大的變異性。Church et al.(1987)將礫石河床垂直向堆積分成四個典型型態(如圖 2.5 所示)，顯示礫石河床由粗顆粒與細顆粒以不同比例組合而成。當粗顆粒可相互接觸形成骨架且保持良好自立性，其間孔隙由基質(Matrix)填充，稱之為接觸接合(如圖 2.5a)。當基質含量超過 30%，粗顆粒間被基質分離，顆粒間不相互接觸，此狀況歸類為基質接合(如圖 2.5d 所示)，此二類組構為典型礫石河床狀況。圖 2.5a 與圖 2.6a 為接觸接合之礫石材料粒

徑分佈情形，顯示由礫石以上尺寸與砂質顆粒組成雙峰之顆粒分佈，圖 2. 5d 右圖與圖 2. 6b 所示為基質接合之礫石材料，未呈現礫石材料典型雙峰粒徑分佈。

由於粗粒化現象使礫石河床於局部區域內在垂直向變化顯得更為重要。Church et al.(1987)認為礫石河床由於下列二因素形成表層粗粒化現象：

- 1.表層細顆粒由風力掏選攜出，或顆粒堆積於低能水流區域，或發生在表層由互制良好之大顆粒堆積區域。此狀態下表層與底層堆積於相同事件，表層粗顆粒分佈應與底層粗顆粒分佈相同（圖 2. 5a）。

- 2.河床材料在均衡傳輸（equilibrium transport）條件下，較粗顆粒可運動性低使其集中在表面，形成表層粗粒化結果（圖 2. 5b）。

因主深槽部分均勻傳輸頻率高，容易產生圖 2. 5b 狀況，當水流減緩時細顆粒開始沈積則形成圖 2. 5c 狀況。沙洲或灘之底床材料長期經低能水流或風力作用將細顆粒攜出，形成類似圖 2. 5a 之狀況。因此長期穩定渠道河床容易產生粗粒化現象，此礫為石河床最常呈現狀態。

Carling and Reader(1982)認為礫石河床組成以粗顆粒為主，且發生冲刷現象將細顆粒攜出，或由管湧作用使表層存在一單位或數倍單位粒徑深度之粗顆粒層(如圖 2. 5b)。反之，於粗顆粒堆疊後，細顆粒慢慢沈澱，則形成圖 2. 5c 之情形。

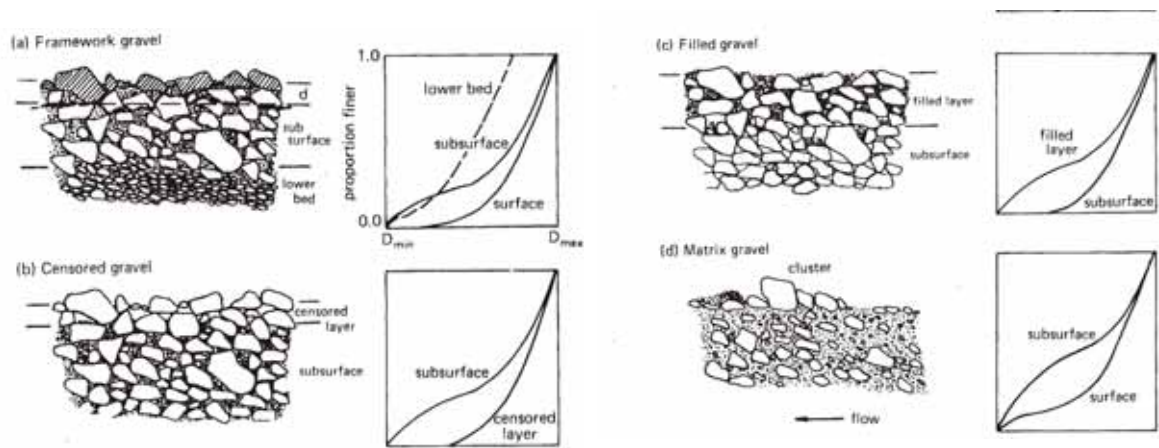


圖 2.5 沖積河礫石河床典型型態 (摘自 Church et. al,1987)

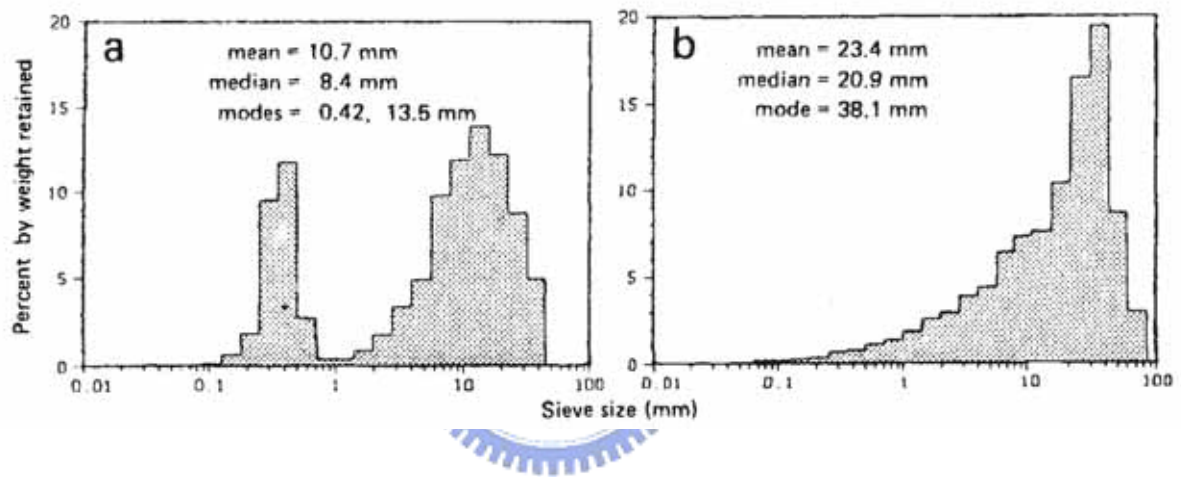


圖 2.6 礫石河床材料粒徑分佈圖(a)接觸型和類型(b)基質型和類型 (摘自 Church et. al,1987)

當粗粒化現象明確存在，表層(armour layer)顆粒代表粒徑明顯較粗於底層(subarmour layer)代表粒徑。Shih and Komar (1990) 研究顯示表層材料以粗顆粒為主，細顆粒含量偏低；底層細顆粒含量逐漸升高，粗顆粒含量相對降低，由圖 2.7 可清楚觀察表、底層材料組成差異。

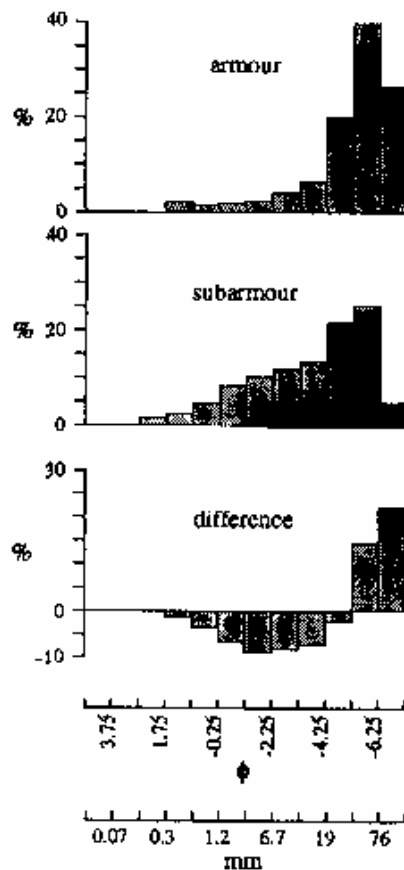


圖 2.7 礫石河床材料垂直向特性比較圖(摘自 Reid et. al1997)

綜合上述，當調查目的著重表層材料(例如：底床對水流抵抗能力、顆粒初始運動狀態)，則僅對表層進行調查可滿足需求，但若要同時考慮沈澱傳輸問題，則需考慮垂直向變異情形。若可由簡單方法，由表面調查推測底層材料特性，如此可提高調查工作效率與價值。

2.1.5 平面分佈不確定性

礫石河床顆粒分佈廣泛，大小顆粒隨機分佈於河床上並且相互干擾常呈瓦覆狀堆疊，此現象造成顆粒運動以非單一顆粒之抵抗，每擾動河床上方任一顆粒均需先破壞此互制組構。因此若僅以顆粒尺寸分析顆粒初始運動狀態會低估底床抵抗破壞的力量。

礫石河床之微觀型態由圖 2.8 所示之礫石叢聚組成。此微觀組構隨機散佈河床平面，大顆粒會延遲底床顆粒啟動，增加對水流抵抗能力，且降低河床載輸送比例。Cheng and Clyde(1972)進行一室外大型水槽試驗，目的在瞭解顆粒隨流速增加之反應。在此試驗中觀察到當流速達某一臨界值，河床顆粒開始在原地顫動，流速繼續上升，底床上某一顆粒會先被拋起或是拖拉往下游方向，若流速進一步上升，此時大部分顆粒遭拋起或是拖離河床。

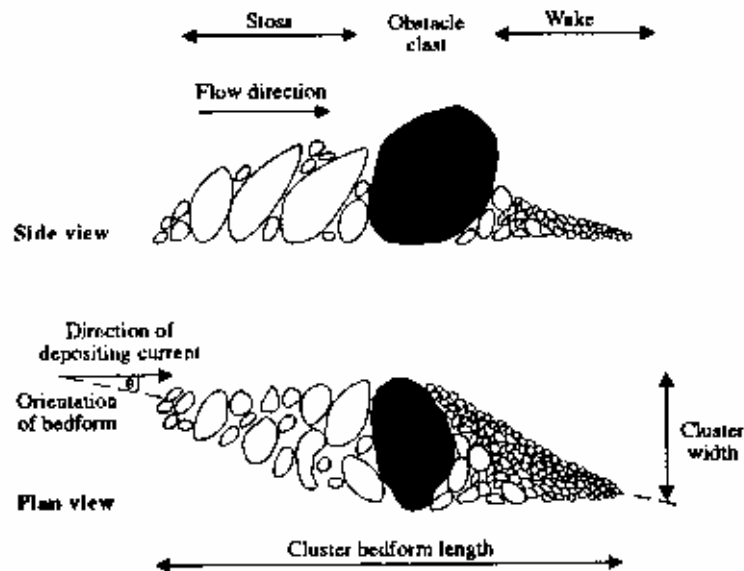


圖 2.8 礫石河床微觀組構示意圖(摘自 Reid et al.,1992)

當河床顆粒均勻且不互相影響時，啟動單一顆粒運動所需力量與啟動其他相同尺寸顆粒所需力量一致。許多研究均顯示粗質底床穩定性與運動門檻可以一參考粒徑加以評估(Egiazaroff,1965; Andrews,1983; Bathurst,1987; Wiberg and Smith,1987)，顆粒小於參考粒徑時會受到保護，因此啟動力量需高於啟動均質參考粒徑材料之力量；但若顆粒大於參考粒徑時，顆粒顯露於外，啟動所需之力量反而會小於啟動均質參考粒徑材料之力量。過去研究顯示參考粒徑為顆粒材料之中值粒徑(Proffit

and Sutherland,1983; Bathurst,1987)。

另外，河床顆粒排列常相互重疊，當尺寸接近之顆粒堆疊時有部份的重疊現象稱為覆瓦狀堆疊。Laranne and Carson(1976)進一步說明當大顆粒組成穩定之覆瓦狀堆疊(如圖 2.5d 與圖 2.8 所示)，此時底床任一顆粒初始運動必須擾動鄰近顆粒造成互制結構破壞後才會發生。由此可見，單一顆粒排列方式對河床穩定之影響大於顆粒粒徑分佈影響。

綜合前述研究可瞭解礫石河床底床運動行為複雜，顆粒粒徑分佈對底床顆粒初始運動狀態影響遠低於顆粒間排列之緊密程度。以往水利工程對河床質調查與分析工作均著重在顆粒分佈，幾乎所有經驗公式亦以顆粒尺寸作為基礎，瞭解底床顆粒運動特性後，對此部分研究應有新思維。粒徑分佈曲線僅能表現顆粒分佈情形，無法評估顆粒排列緊密程度，吳東杰(2003)將碎形分析理論中雙點相關維度應用在顆粒材料排列狀態評估，改良傳統粒徑分佈曲線無法評估顆粒材料組構與叢聚性之缺點，若將此概念套用至河床質分析，以評估表面顆粒相互影響程度，應有助於底床顆粒初始運動行為評估與研究。

2.2 河床質調查方法

進行河床質調查工作需思考兩個問題，第 1、取樣對象與方法；2、粒徑分佈試驗方法。

因調查目的不同，河床質調查取樣應有表層與底層分別。現行河床質調查的主要目的在決定粒徑分佈曲線，篩分析為常使用方法。但礫石材料粒徑分佈廣泛，細顆粒篩分析因土砂凝聚不適合於現地執行，及顆粒過大重量超出人力操作範圍，均使現地篩分析無法完全決定粒徑分佈。因此，

必須透過其他方法協助決定粒徑分佈結果。以下茲就取樣方法與樣品處理方法進行探討：

2.2.1 河床質取樣方法

本節將介紹各種不同取樣方法，並討論其優缺點。然而不同的取樣方法其取樣的顆粒範圍不完全一致，因此很難將結果直接比較。國外有部分文獻相試驗結果透過統計分析，把不同試驗結果的相關性加以整理。因此本節將分調查方法介紹與其間不同結果的相關性進行論述：

1.取樣方法

Kellerhals and Bray(1971)指出卵礫石河床取樣方法計有體積取樣(bulk sampling)、網格取樣(grid sampling)、面積取樣(area sampling)以及橫切取樣(transect sampling)等四種。體積取樣法又可細分為不考慮垂直向材料變異性的全部取樣，及僅針對表層顆粒進行取樣兩類；網格法取樣可以取樣膠布、方形網框，或步伐間距建立網格；面積法取樣為將預定採樣面積範圍內所有之表面顆粒均收集分析；橫切法取樣則是在試驗範圍內拉一筆直之繩索或是鋼絲，並收集落於樣品線下方之石塊。

Church et. al(1987)因分析目的不同而將礫石河床河床質取樣區分為表層樣品取樣與底層樣品取樣。表層樣品取樣方法計有網格法、面積法以及體積篩分析等三種。體積取樣為最直接方法，但表層範圍不易界定且所耗物資較高，以顆粒出現次數為分析基礎之網格法因操作便利，且在諸多表面方法中具有與體積法結果直接比較之優點，因此為最常使用方法；底層樣品因空間限制故僅能以體積取樣進行。

Morris and Fan(1998)建議河床質取樣方法有體積法、網格法與面積

法三種。表層樣品可以體積法、網格法與面積法施做，但因表層體積界定不易使體積法運用於表層調查不甚便利，因此建議以網格法或面積法進行表層調查。若取樣目標需包含底層樣品，則以網格法或面積法進行表層調查，再將表層顆粒移除後進行體積法樣品收集。

綜合上述，礫石河床取樣方法以體積取樣、網格取樣與面積取樣最為普遍與適用，當需取樣底層樣品時僅有體積法可以執行，表層樣品可以網格法與面積法進行取樣，其中網格法以出現次數頻率基礎分析之結果可與體積法直接比較，此優點使調查分析工作較有效率。體積法取樣為直接於取樣地點挖掘試坑取樣，因此不另贅述，以下僅對網格法進行說明：

現今常使用之網格法通常是沿用 Wolman(1954)提出方法加以改進。在預定調查範圍製作網格，收集並量測標記點下方顆粒尺寸（重量視分析頻率進行量測）。建立網格的方法可分為下列四項：

（1）方形網框：

通常建立一公尺平方之方形網框（圖 2.9），框內縱橫向等距設置鋼絲，量測時直接將網框置於預定調查位置上方，選取網框交線下方石塊，但若鋼絲交點下方石塊粒徑小於 8mm 時，則選取鄰近粒徑大於 8mm 之顆粒取代之。British and Hickin(1985)曾以此法於 Squamish River 之蜿蜒型(meandering)河段之長條型側向礫石沙洲上、中、下游位置進行取樣，透過四次旋轉網框建立 100 個樣品建立顆粒粒徑分佈分析，作為河床質顆粒尺寸縱向縮減研究之依據。

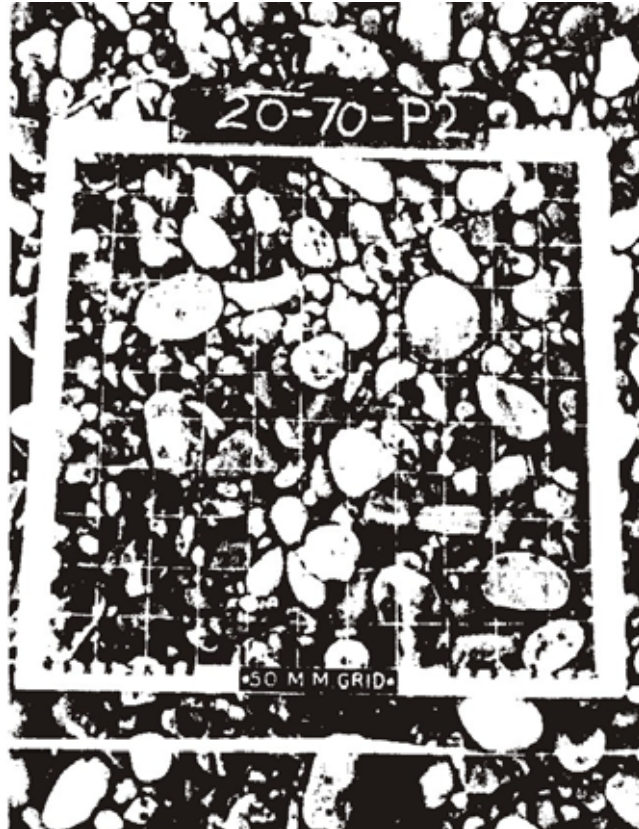


圖 2.9 方形網框示意圖 (Kellerhals and Bray, 1971)

(2) 設置採樣膠帶：

此法係將膠帶橫置於預定調查之沙洲上方，等距施作記號，直接選取等距記號點下方之顆粒。有效樣品之準則同(1)。每一測線完成後水平橫移取樣膠帶，直至取樣數量到達預定數目為止。British and Hickin(1985)於 Squamish River 之辨狀型(braided)河段上以此法進行調查，於活動沙洲之水源邊界開始設置採樣膠布，以 1/2m 或 1m 間隔進行樣品採集，直至樣品數量到達預定需求，建立粒徑分佈曲線作為河床質於河川縱向衰減現象分析之依據。

(3) 以步伐為單位進行採樣：

Leopold(1970)提出略不同於 Wolman(1954)之採樣方法。選定調

查範圍後，於調查位置上沿平行路徑以每兩小步或是每一大步之間格為取樣單位，選取腳尖旁之石塊，取樣時避免目視取樣範圍，僅憑手指觸覺隨機選取樣品，直至收集所需樣品數為止。若樣品顆粒小於 2mm 則應記錄 $<2\text{mm}$ ，亦可將細顆粒取樣帶回實驗室進行室內試驗，此時取樣對象需嚴格篩選。

(4) 拍攝照片進行影像分析：

Church et. al(1987)提出影像分析方法僅將現地河床狀態以照片紀錄以供顆粒歷經分析之用。影像分析雖然具有準備工作簡單、執行容易與可以保存現地影像資料等優點，但由於河床顆粒可能被細料覆蓋，或是被水窪遮蔽，使得於相片上直接量測粒徑產生誤差；另因顆粒呈瓦狀覆蓋，會與平面成一交角，亦會造成量測誤差。此二誤差來源導致照片分析精度受限，因此僅適用於精度要求不高之調查工作。

Adams(1979)以影像方法進行礫石河床河床質調查，其成果顯示透過照片量測顆粒粒徑需經過修正後才能與篩網開口尺寸比對，且建議調查工作應避免清晨或黃昏進行，以免陽光斜射產生陰影造成困擾。

2.不同調查方法的結果差異性與關係

Leoppld(1970)同時嘗試將表面調查方法收集所得樣品，再一次以篩分析方法重新試驗，結果顯示二者並無法完全相符，但當顆粒數量增加會使結果更趨一致。其亦嘗試於同一採樣位置分別利用表面調查方法以及體積篩分析法(分表層 1 英吋深、1~3 英吋深及 6 英吋深採樣)進行採

樣與分析(圖 2. 10)。結果顯示表面採樣方法與表層 1 英吋深之篩分析結果大致相符，但 1 英吋深之樣品細顆粒端出現拉長尾翼，粗顆粒端之斜率不及表層調查方法，這顯示表層調查方法原本就忽略了細顆粒之影響，因此造成表層與 1 英吋深樣品於粗顆粒部分相似，而 1 英吋深樣品較表層樣品多出細顆粒產生之尾翼。

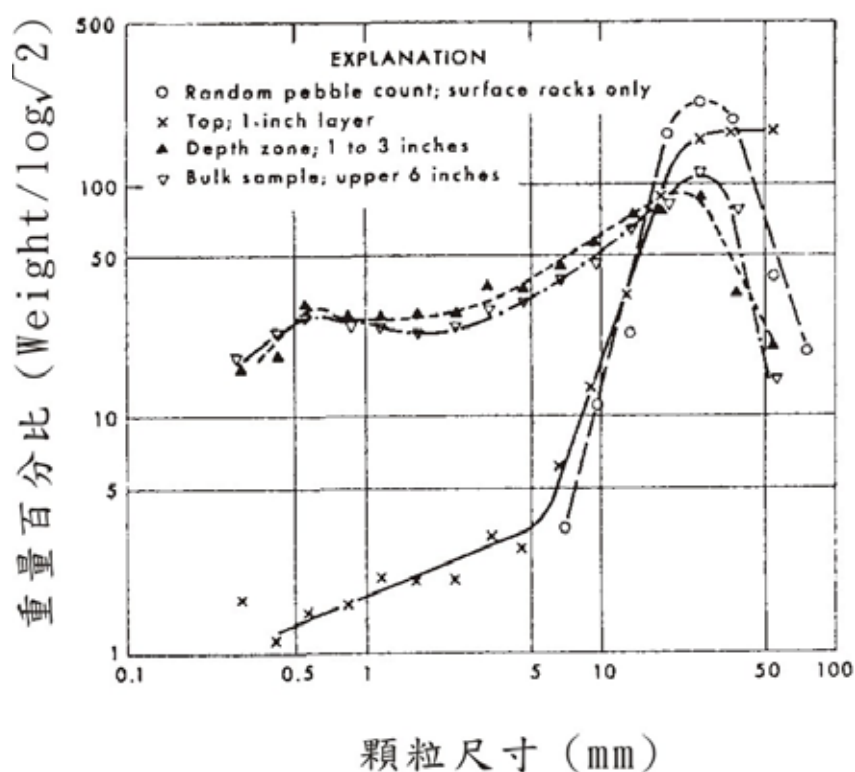


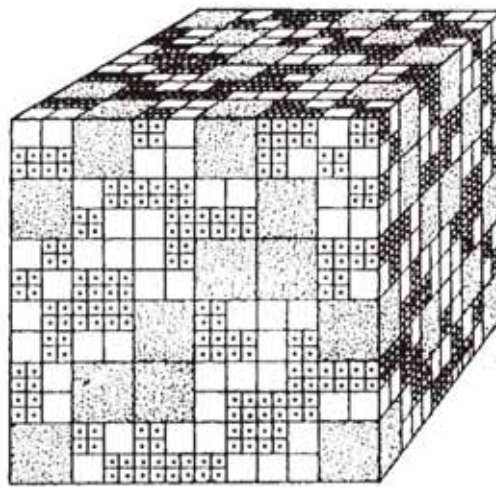
圖 2. 10 網格法與體積法不同深度樣品試驗結果比較圖（摘自 Leopold,1970）

Kellerhals and Bray(1971)提出，傳統體積篩分析常應用於砂質河床，若相同區域表面法進行礫石河床取樣，勢必造成數據因基礎不同而無法比較。表面調查方法之結果需透過權重係數轉換，方可與篩分析結果進行比對。

Kellerhals 與 Bray(1971)並以三種不同尺寸單元組成之立體方塊模

擬顆粒沉積狀態(如圖 2. 11 所示)，同時使用傳統體積篩分析方法、網格法(分別以重量及出現次數為基礎)以及面積法(分別以重量及出現次數為基礎)進行取樣，試驗結果如圖 2. 12 所示。由圖 2. 12 可發現唯有以出現次數為基礎之網格採樣結果可直接與體積篩分析結果對比。

Kellerhals and Bray 以此立方體樣品分析各種方法間轉換權重係數，結果如表 2. 1 所示。






Particle	Linear Size D	Weight W	Total No. In Sample Volume	Total No. In Sample Surface
	1	1	4608	192
	2	8	576	48
	4	64	72	12

圖 2. 11 以三種不同粒徑模擬緊密之立體樣品(摘自 Kellerhals and Bray,1971)

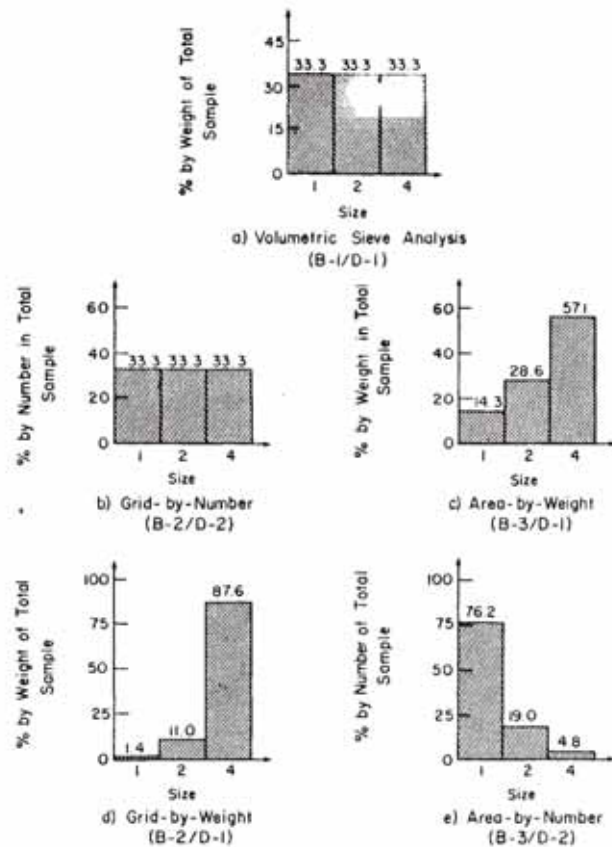


圖 2.12 各種不同方法調查立體方塊樣品之結果柱狀圖(a)重量頻率之體積法;(b)出現次數頻率之網格法;(c)重量頻率之面積法;(d)重量頻率之網格法;(e)

出現次數頻率之面積法 (摘自 Kellerhals and Bray,1971)

表 2.2 不同採樣方法間之權重係數(修改自 Kellerhals and Bray,1971)

Conversion form	Conversion to				
	Sieve -by- weight	Grid -by- number	Grid -by- weight	Area -by- number	Area -by- weight
Sieve-by-weight	1	1	D^3	$1/D^2$	D
Grid-by-number	1	1	D^3	$1/D^2$	D
Grid-by-weight	$1/D^3$	$1/D^3$	1	$1/D^5$	
Area-by-number	D^2	D^2	D^5	1	D^3
Area-by-weight	$1/D$	$1/D$	D^2	$1/D^3$	1
D：顆粒幾何平均粒徑					

Ritter and Helley(1969)於同一區塊不同位置以網格法（出現次數頻率）、網格法（重量頻率）、面積法（出現次數頻率），及面積法（重量頻率）等四種方法進行調查，所得結果如圖 2. 13 所示。圖中顯示四者有甚大差異，若以可與體積法直接比較之出現次數為基礎之網格法為基準，可知其他三種方法產生之結果並不符合以出現次數頻率分析之網格法結果。透過 Kellerhals and Bray(1971)之權重係數轉換後(如圖 2. 14 所示)，結果趨近基準曲線。由此結果可知立方體樣品計算所得權重係數適用於自然沉積之礫石河床材料。

Church et. al(1987)設計試驗驗證 Kellerhals and Bray(1971)提出之轉換理論，結果證實此轉換理論可產生合理結果，因此建議未有更精確理論提出前可採納 Kellerhals and Bray(1971)提出之權重修正方法。

因此，礫石河床河床質調查方法中以網格法效率較佳，且以出現次數為分析基礎之結果可與體積法重量頻率結果直接比較。

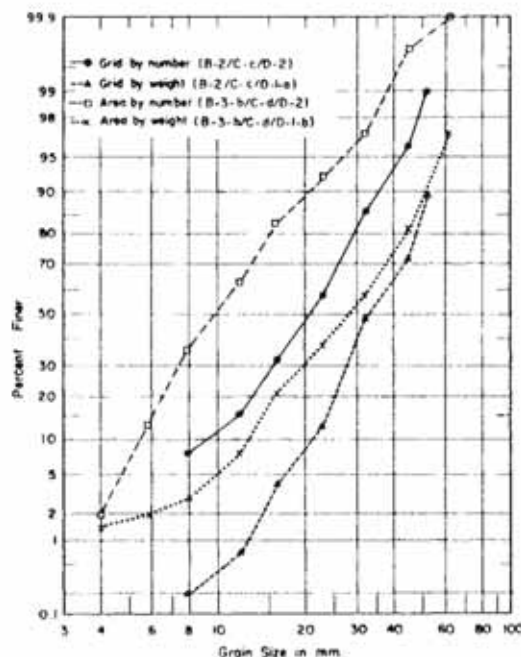


圖 2. 13 不同方法得到之粒徑分佈比較(摘自 Ritter and Helley,1969)

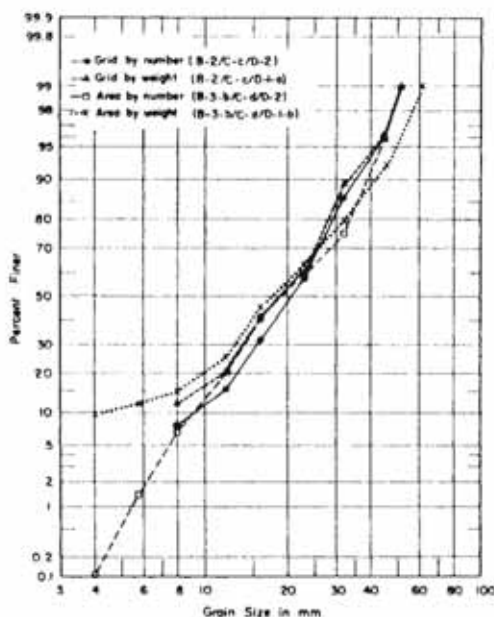


圖 2.14 不同方法得到之粒徑分佈結果經轉換後之比較(摘自 Kellerhals and Bray,1971)

台灣省水利局（1982）建議河床質粒徑調查之採樣方法分表層取樣法與篩分析法（於現地取一 60×60×100 公分測坑），但未對操作細節進行說明。現行河床質採樣工作均以一公尺立方試坑進行，並以美國標準篩 #4 篩進行現地樣品與實驗室樣品區隔，通過 #4 篩部分以四分法取 30kg 樣品回實驗室進行實驗室篩分析工作，停留 #4 篩以上顆粒於現地進行篩分析試驗。另有提及表層取樣法，但並無細節說明且台灣地區實際操作中亦極少執行表面方法。根據前述相關研究明確指出表面方法中以出現頻率為基礎之網格法為執行礫石河床表層材料調查之最佳方法，故建議於台灣礫石河床上進行試驗比對以檢驗網格法在台灣河川之適用性。

2.2.2 粒徑分佈試驗與重量估計方法

任何河床質取樣方法均需律定顆粒分級，而以重量頻率表現之取樣

方法，尚需量測各叢聚樣品重量。顆粒叢聚分級常以篩分析試驗決定，但礫石顆粒分佈廣泛，粒徑 32mm 以上顆粒不易執行篩分析工作，細料部分因土壤潮濕影響分析結果，故需取樣以實驗室試驗進行。基於上述原因，現地量測得到顆粒尺寸如何推估其重量實為河床質調查一重要課題 (Church et. al,1987)。

決定顆粒叢聚方法除使用標準篩進行篩分析試驗外，可以尺、游標卡尺丈量顆粒 B 軸或是以開口樣版 (gravelometer, 圖 2.15) 進行分級。細顆粒以篩分析試驗進行較為便利，粗顆粒部分受人力限制適合以後述三種方法執行。Hey and Thorne(1983)研究網格法取樣誤差中指出，開口樣版可獲得與篩分析相同結果，以尺或游標卡尺丈量顆粒 B 軸，會因篩網開口對角距離較大高估顆粒尺寸。

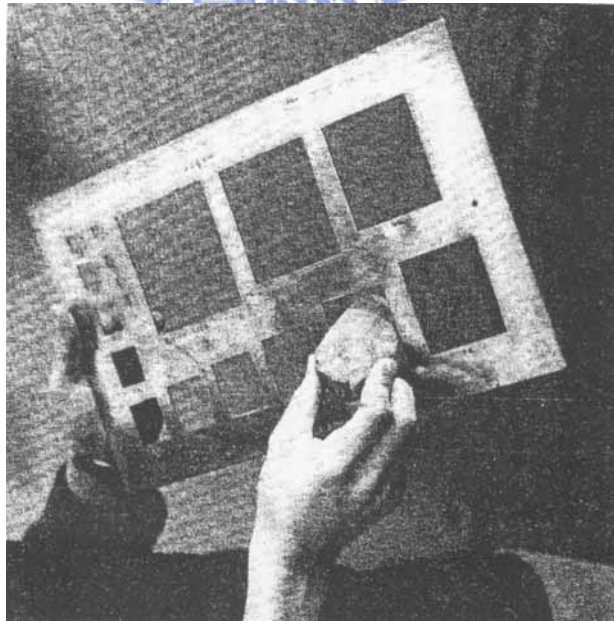


圖 2.15 開口樣版示意圖

Leoppld(1970)認為一般石塊比重介於 2.5~2.8 之狹窄範圍，因此其值不影響重量估計，且針對 Green River 進行採樣分析，發現顆粒 B 軸與重量間存在線性關係 (圖 2.16)。

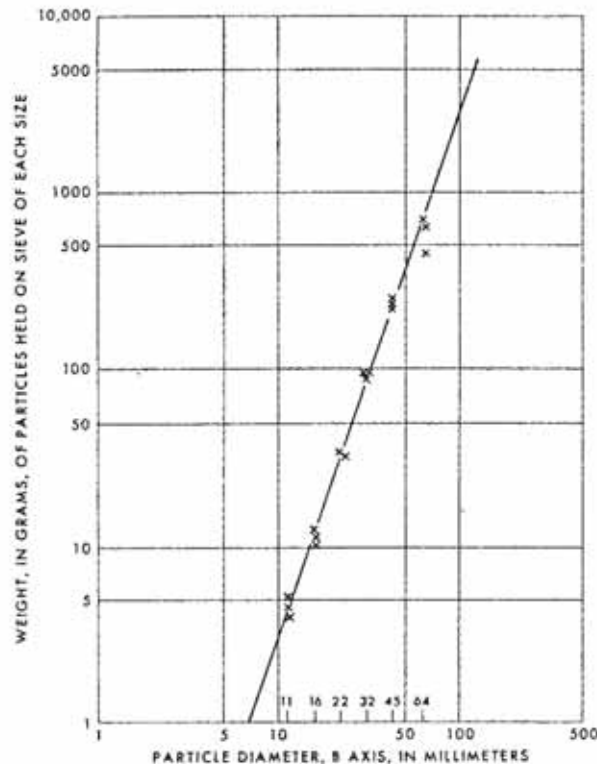


圖 2.16 顆粒 B 軸與顆粒重量之關係圖（摘自 Leopold,1970）

Church et. al(1987)提出當取樣樣品含有顆粒粒徑超過 16mm 之顆粒時，必須於現地進行樣品分隔，以大號篩網及開口樣版決定顆粒分級，並以磅秤量測重量。典型的工作先以 32mm 之篩網篩所有的樣本，再用樣板量測粒徑大於 32mm 之顆粒，再分離粒徑小於 16mm 之樣本，取其中之 10kg 帶回實驗室進行試驗。

Koster et al.(1980)認為天然河床顆粒都近似橢球體，故可透過橢球體體積($V_e = \pi abc/6$)計算並假設顆粒密度估計顆粒重量，同時也指出 B 軸為最適合用來評估等值粒徑之軸(此時 $V_e = \pi b^3/6$)，圖 2.17 為實際量測顆粒 B 軸與重量之關係圖，圖中實線為以 B 軸計算體積換算重量之趨勢線。

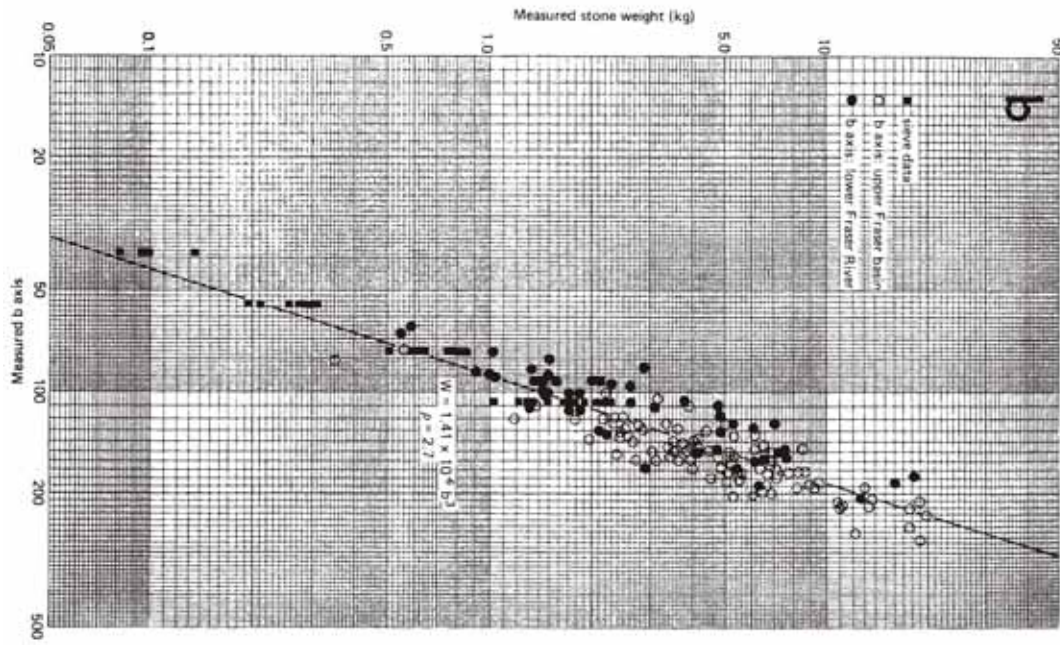


圖 2.17 以 b 軸換算顆粒重量與實測重量關係圖(摘自 Church et. al,1987)

綜合上述，決定顆粒分佈需避免砂石含水影響試驗結果，因此細顆粒需於實驗室進行試驗。另為避免操作誤差，可以開口樣版進行大顆粒尺寸標定，若重量量測設備有限，可以量測 B 軸方式推估顆粒重量。

2.3 河相學與河川分類

Morris and Fan(1998)提出河川形貌反應流域地質、沈澱載特性、流量以及坡度。在高度可沖蝕邊界材料區域，河川之平面型態受沈澱載與水力作用控制，並會因底床或堤岸之岩層露頭或是黏土材料聚集等抗沖蝕因素出現產生調整。因此河床質調查應更改過去隨機取樣之方法，應以河相特徵進行取樣位置評選，方能使調查結果具有代表性。

2.3.1 河相定義

本文所指河相（River morphology）包含河川長短、橫斷面形狀（河寬、深）、縱剖面狀態（坡降）以及平面樣式。河川受氣候、地文與水文條件影響，流域地表逕流匯集於河川形成洪水波，並沖刷流域表層材料將泥沙帶進渠道，二者成為改變河川形貌之驅動力量。河道邊界地質（堤岸材料特性）與地形（河谷坡度等）條件以及堤岸植被狀態反應對前述驅動力之抵抗變形能力。上述因素組合與相互影響便形成河川在縱、橫與平面型態上之差異（Thorne 1997）。

橫斷面型態包括河寬、水深與溼週等幾何條件。縱斷面主要呈現河谷坡度連續變化。當逕流與泥沙輸入渠道對渠道邊界產生衝擊，在河川不同位置展現不同地形、不同底床材料，以及不同植生形成各區域之河相特徵。Leopold and Wolman(1957)對河川型態進行調查，歸納河川變遷是由直線型漸漸發展成些微曲度以致最後發展成多流線之辮狀系統。

Schumm(1977)以沈澱載(sediment load)與河川穩定狀態為基礎進行平面型態分類（如圖 2.18 所示）。當河道邊界抵抗沖蝕能力高且沈澱狀態為懸浮載，此狀態下河川多呈現直線型或是略微彎曲之平面型態且較穩定

(如型態 1 及 2)；當沈滓載由懸浮載漸摻雜較粗之泥沙，且底床較具可動性時，伴隨堤岸侵蝕使河道呈現蜿蜒狀態（如型態 3 及 4 所示），在此狀態下渠道可在洪泛平原上自由的透過切削堤岸與散佈在河道緊縮與彎道處點沙洲成長而變遷；當河川具較高能量且堤岸地質材料較為鬆軟時通常會造成較寬河寬且呈現多流線之瓣狀平面型態（如型態 5 所示），水流路線被沙洲分隔而後匯流，此沙洲在滿槽流時會被水流淹沒。當瓣狀系統之沙洲持續成長至高程大於滿槽水位時，沙洲上逐漸有植被生長且河川能量較低，明顯不同於瓣狀系統特色，因此在 1970 年代以後逐漸把此一型態獨立歸納為交織狀河川（anastomosed），交織狀河川型態與瓣狀河川除了在河川能量與沙洲高程之差異外，且因交織狀河川沙洲規模較大，使河川具更大曲率且流線較少。

由上述可知河川透過侵蝕、堆積以及側向沖刷堤岸等事件使平面型態由直線型逐漸呈略微彎曲之平面型態，隨側向之移動彎曲度逐漸增加以致河川發展成蜿蜒狀河川，再經由沙洲之發展分隔水道漸形成多流線系統之瓣狀河，隨著沙洲持續成長河川亦逐漸穩定發展成交織狀河川系統。

從河川演變過程可發現沙洲成長與消失實為河床材料堆積與運移之反應，亦呈現出渠道的最終地形。

不同環境造成不同河相，不同河相亦有不同本質，不同河相往往併存在同一河川中，因此河川管理上應考慮河相進行分區，再以此標的進行各區段細部考量。

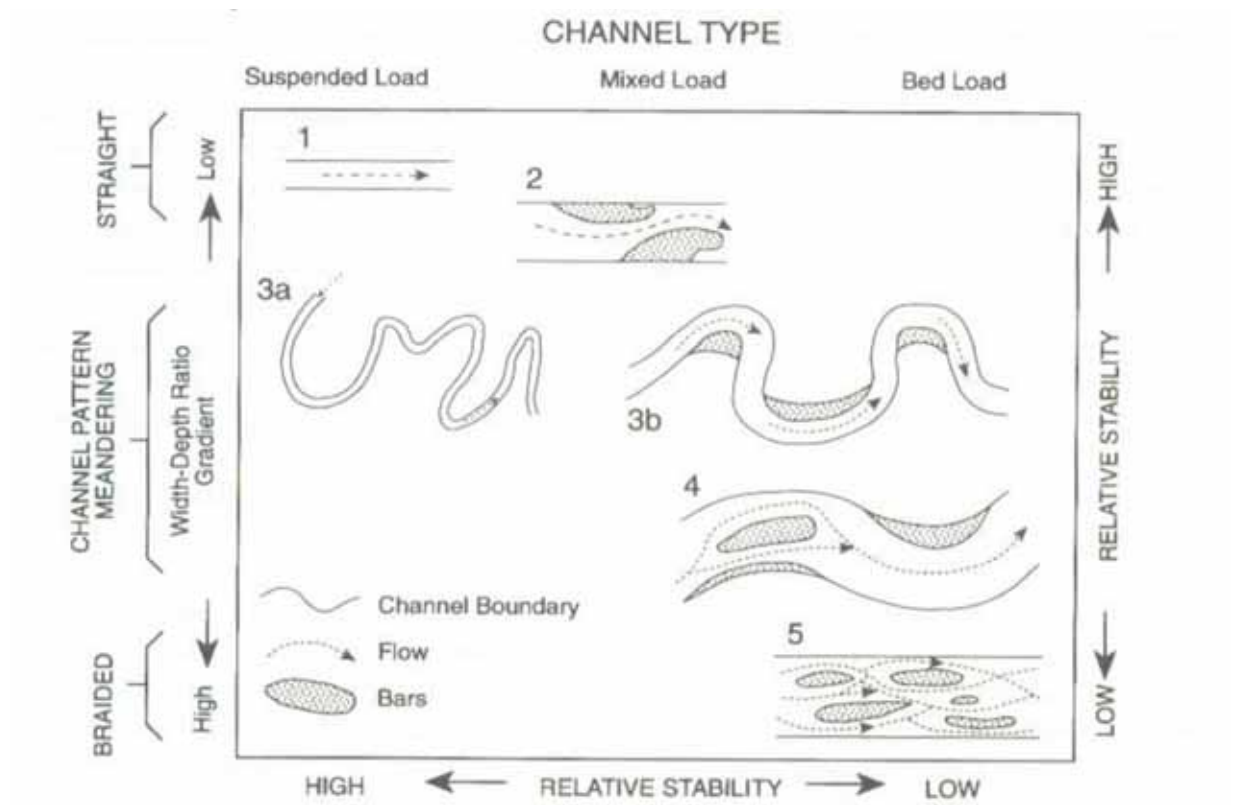


圖 2.18 河川平面型態分類與沈澱載、穩定性間關係圖(摘自 Schumm1977)



2.3.2 主要河川類型與特徵

1. 直線型河川 (straight)

直線型河川大多存在於側向抗沖蝕性良好之河段，因此多發生於山區。沖積河段由於邊界地質材料特性、洪泛平原之地形因素，以及堤岸植被狀態等原因，使堤岸邊坡隨機倒塌，導致沖積河段出現直線型態之情況甚為罕見，在單流線系統裡常朝略微彎曲或是蜿蜒狀發展。若在沖積河川中確實發現直線型河段，必可發現最大流速線與最大水深線之路徑在堤岸範圍內呈曲折擺盪現象。此現象造成河床縱向高程起伏變化，高程低處稱為深潭(pools)，高程高處稱為淺灘 (riffles)，深潭與淺灘交替出現構成直線型河川之基本平面型態。

Leopold et al.(1964)首先說明直線型河川中淺灘與淺灘間距離約為滿槽河寬之五至七倍。Yalin(1972)提出淺灘間距為河寬的 π 倍率關係，此與 Leopold et al.(1964)提出結論不符。Hey(1976)重新檢驗 Yalin(1972)之理論，並提出淺灘間距與河寬呈 2π 之倍率關係，此結論與 Leopold et al.(1964)所提結果較為相符。到了 1980 年代，Hey and Thorne(1986)之研究發現淺灘間距為滿槽河寬之 6.31 倍，此倍率關係與 2π (6.28) 接近，並與 Leopold et al.(1964)提出說明有一致趨勢。

前述擺盪之最大流速除了造成河道高程上之變化外，亦造成平面側向之不均質性，如圖 2.19 所示所示，擺盪造成河岸一邊堆積形成淺灘，相對應之另一側產生刷深現象，亦使深潭非對稱地出現。當淺灘上流速較快之水流逐漸沖蝕堤岸一側並與接續之深潭相交，更進一步使堤岸退縮，此時直線型河川開始呈現略微曲折之河川平面型態。

在河川相貌的進化過程中，淺灘成為開始彎曲的標地點，當持續向外側侵蝕堤岸，對應之另一側則逐漸淤積形成點洲，此持續發展之結果便使河川由直線型演變成蜿蜒型河川，圖 2.20 所示即為直線型河川、略微曲折型與蜿蜒型平面型態之定義與演變過程示意，當蜿蜒度（sinuosity: 渠道中心線長度除以河谷直線長度）小於 1.1 為直線型，1.1 至 1.5 之間為曲折河川，超過 1.5 為蜿蜒河川。

無論直線型或帶有些許曲折之河川，均由於最大流速線擺盪造成淺灘與深潭交替出現之地貌，如 2.1.2 節所述淺灘河床質中值粒徑略大於整體平均值，造成縱向河床質差異。橫斷面地貌由深潭與洪泛平原或淺灘與洪泛平原所構成，但若河床載豐富使灘地逐漸堆積形成點洲，其與邊灘及洪泛平原構成新的橫斷面地貌。上述訊息均可提供床質取樣位置評選參考。

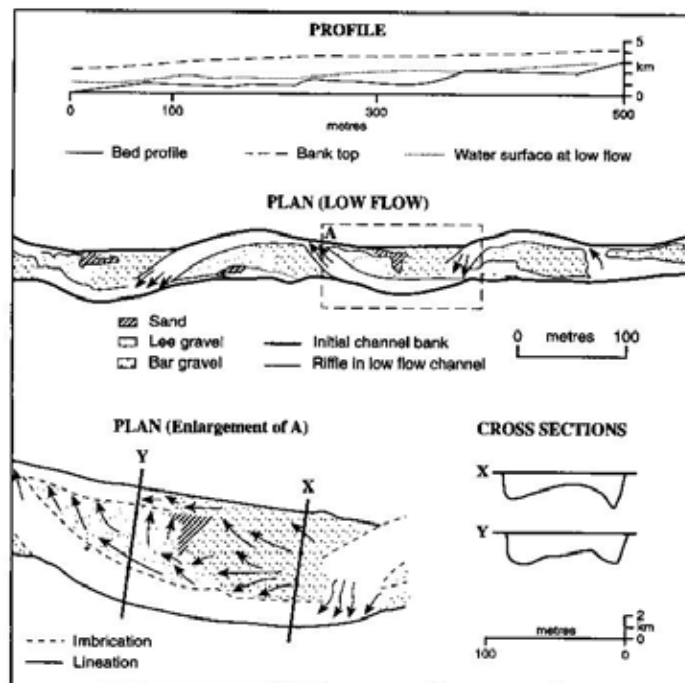


圖 2.19 直線型河川之不對稱深潭、交替出現沙洲與淺灘等平面特徵演變

示意圖（摘自 Richards, 1982）

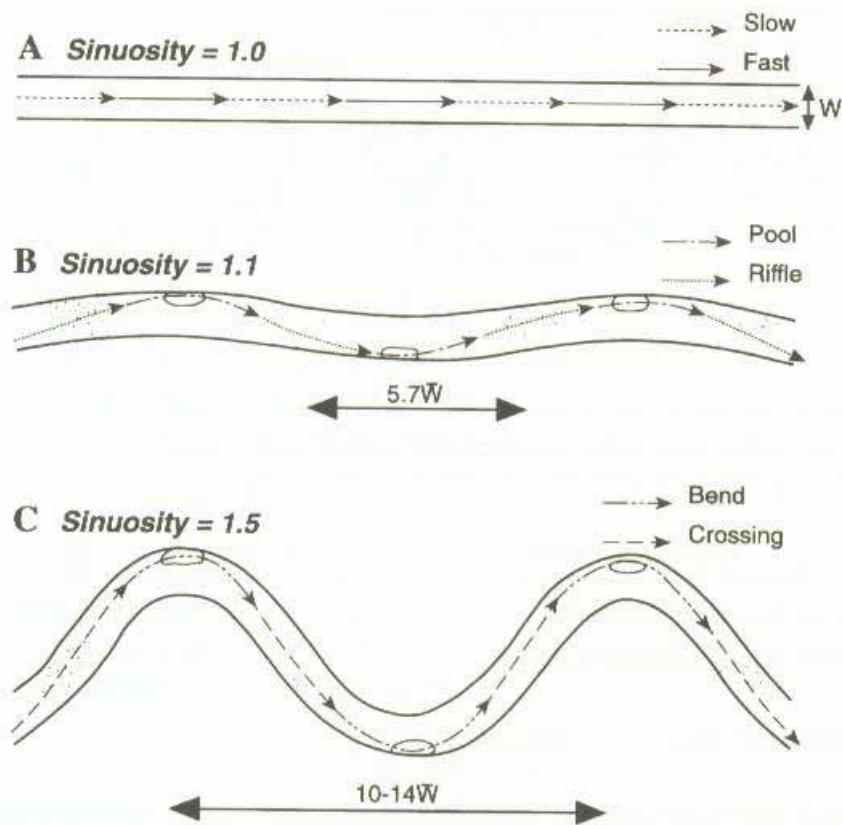


圖 2.20 直線型、略微曲折型至蜿蜒型河川平面型態定義與演變示意圖(摘自 Chorley et al.,1984)

2. 蜿蜒型河川 (meandering)

蜿蜒型河川平面型態常以形狀、曲率半徑以及波長等幾何參數描述。在表面常於彎道處出現深潭，在連接槽 (crossing) 呈現淺灘地形。Leopold and Langbein(1966)最早投入蜿蜒型河川形狀研究，發現正弦函數產生之彎曲最接近理想的蜿蜒河川，且強調刷深最嚴重以及衝擊現象最嚴重之位置均位於彎道幾何形狀之尖點，並靠近下游因而產生不對稱現象。

蜿蜒河川波長大小受沈澱載、邊界材料與流量影響。Richards(1982)提出波長與河寬之關係如下：

$$L_m = 12.34w \quad (2.2)$$

其中 L_m = 沿河川軸線量測之蜿蜒波長(m)

w = 河川滿槽寬 (m)

式 2.2 的係數接近 $4\pi(12.57)$ ，約略為直線型河川淺灘之間隔距離 (2π) 的兩倍。而 Dury(1956)提出波長與滿槽流量之關係假設如下：

$$L_m = 54.3Q_b^{0.5} \quad (2.3)$$

其中 L_m = 沿河川軸線量測之蜿蜒波長(m)

Q_b = 滿槽流量 (m^3/s)

Schumm(1963)驗證渠道曲折程度與堤岸材料之粉土-黏土權重指標以及渠道寬深比有關。Schumm 於 1968 年進一步解釋邊界材料與波長間之相互關係，當邊界材料具黏滯性，河道寬度會較窄，底床坡度較陡峭，且反應之波長較短，並提出相關經驗公式如下：

$$L_m = 1935Q_m^{0.34}M^{-0.74} \quad (2.4)$$

$$L_m = 618Q_b^{0.43}M^{-0.74} \quad (2.5)$$

$$L_m = 395Q_{ma}^{0.74}M^{-0.74} \quad (2.6)$$

其中 L_m = 沿河川軸線量測之蜿蜒波長(m)

Q_m = 年平均流量 (m^3/s)

Q_b = 滿槽流量 (m^3/s)

Q_{ma} = 年平均洪水 (m^3/s)

M = 堤岸材料之粉土-黏土權重指數

Leopold and Wolman(1960)以下式 (式 2.7) 說明當波長短時，彎道趨於緊密結實。

$$L_m = 4.59R_c^{0.98} \quad (2.7)$$

其中 L_m = 沿河川軸線量測之蜿蜒波長(m)

R_c = 曲率半徑 (m)

Bagnold(1960)指出當曲率半徑與河寬之比例介於 2~3 時彎道處水流能量損失最小。

此外，堤岸材料出現黏土栓 (clay plug) 等堅硬點會使河道側向位移明顯導致較大彎曲現象出現。Fisk(1944)研究指出當黏土栓出現在彎道尖點時，則尖點會趨平緩並發展出兩個或多個彎道系統；若黏土栓出現在尖點之下游，則下游彎道分支將維持於原地不動，上游分支會持續向下游河谷側移導致曲流頸 (neck cutoff) 現象發生。

綜合上述，蜿蜒系統由直線系統漸變形成，地貌特徵亦以淺灘與深槽交錯出現為主，彎道部分為刷深區域，連接槽部分為淺灘區域。橫斷面地形變化於彎道部分為深槽與洪泛平原組成，若當河床載豐富產生堆積，可能於內彎道部分形成點洲，平面型態亦可能因外彎道持續沖刷，內彎道持續堆積尺平面曲折度變大；連接槽橫斷面型態有淺灘與洪泛平原組成，當河床載豐富產生堆積則可能產生側向或交替沙洲。同直線型河川，淺灘河床質中值粒徑略大於整體平均值，但施做可行性較深槽地形高，故淺灘地形出現頻率可作為河床質調查縱向取樣點參考。

3. 辮狀河川(braided)

辮狀系統因較為複雜使目前對此平面型態之瞭解不若單線系統河川明瞭。最早提出相關研究的學者是 Leopold and Wolman 在 1957 年發表其利用人工水槽觀測渠道由單線轉變成多線系統之過程 (圖 2.21)。

中 A 圖表示當渠道河床載之推移質 (bed load) 豐富時，會於渠道中央形成江心洲，且把水流一分為二並使堤岸逐漸退縮，平面型態逐漸

發展成類似水晶體之外觀；圖 B 為隨著堤岸侵蝕退縮提供豐富泥沙促使江心洲逐漸增大，亦使區域逐漸向河道兩岸擴大；圖 C 表示當沙洲持續增大，堤岸持續退縮迫使水流漸呈彎曲流動，此曲流不斷地侵蝕外側堤岸並促使內側堆積；圖 D 至 E 說明底床被冲刷造成水位降低，使江心洲像是島嶼，此時沙洲與小島之複雜變化造成更複雜之多流線系統；最後圖 F 代表辮狀系統最後之形貌，透過寬度不斷增加會使部分沙洲與島嶼連結成更寬廣之區域，次級之沙洲又隨前述圖 A 到 E 過程不斷的反覆演變，最後形成一串島嶼、沙洲及複雜流線組成之平面型態，複雜流線會匯流於一處頸縮地帶，構成了辮狀系統之基本面貌。

Coleman(1969)利用對 Brahmaputra River 之河相描述驗證 Leopold and Wolman(1957)之發現（圖 2.22），圖 2.22 之 a-a'剖面為辮狀河平面型態頸縮處之剖面，呈現刷深斷面；b-b'剖面之平面位置為沙洲群組成之寬帶，可發現此處水深較淺，局部深槽為部分水流於區域內匯流造成較深之底床冲刷所造成。由於頸縮點與頸縮點之間距無具體規則變化，因此目前尚無較合理評估方法建立。

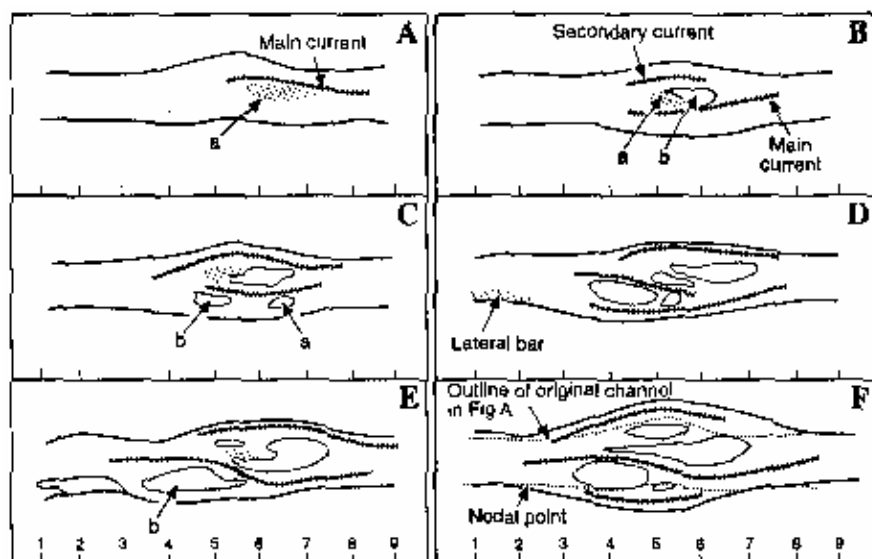


圖 2.21 辮狀系統演變過程示意圖（摘自 Leopold and Wolman,1957）

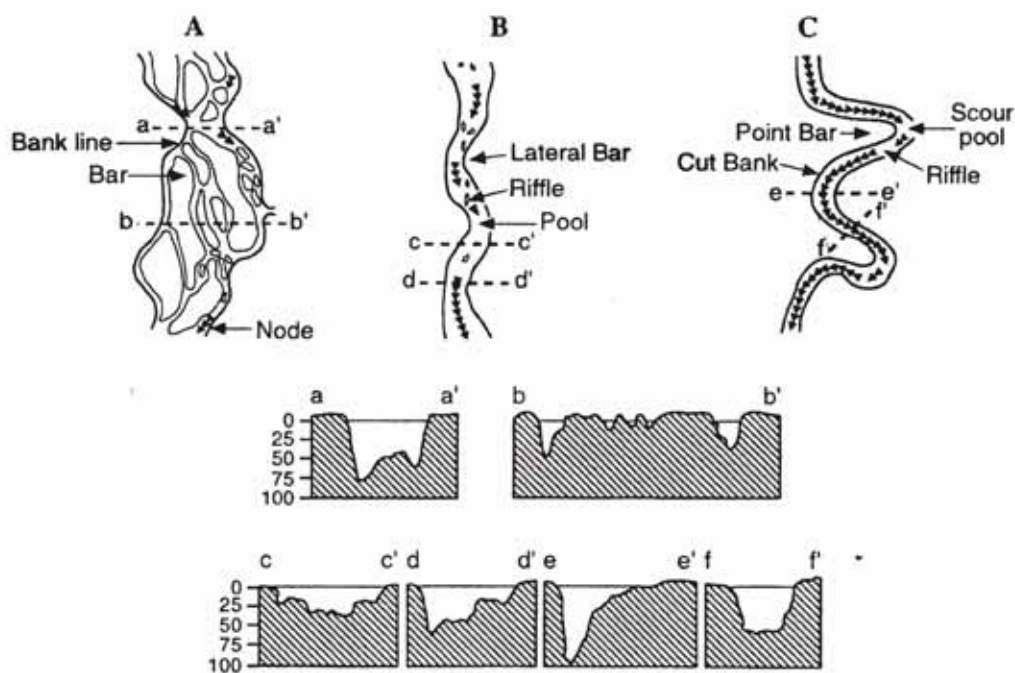


圖 2.22 蜿蜒型、辮狀型平面型態與橫斷面之關係（摘自 Coleman,1969）

辮狀系統平面由寬帶與頸帶組成類似水晶體外觀之圖樣。寬帶由於堤岸沖刷產生豐富泥沙，由沙洲、灘與局部深槽搭配洪泛平原組成；頸帶為河道匯流束縮處，斷面地貌由深槽與洪泛平原組成。每一頸縮點區隔之寬帶間可能存在辮狀程度差異，因此於渠床質取樣調查可以此平面型態特徵作為選點參考。但辮狀系統寬帶與頸帶床質差異尚無相關研究探討，透過期間關係建立可於寬帶進行取樣建立河床質縱向分佈推估。

4. 交織狀河川

Thorne (1997) 說明交織狀河川型態是從辮狀系統獨立分類之河川平面型態，其與辮狀系統有兩項主要差異：

1、辮狀系統之河道呈現較直線或是帶有低微曲折之線型，所有流線會於一頸縮點匯流，沙洲上不會有植被生長。沙洲最高高程或是平均高程略低於圍繞河川之洪泛平原，在滿槽流時沙洲會被淹沒且原本分流

之流線會合併在一起。而交織狀河川之沙洲規模較大，具植被生長，存在兩個或更多個主要渠道，渠道被大型沙洲區隔呈現較高之曲折度，而各沙洲高程約略與洪泛平原同高，因此即使在滿槽流量時仍維持多流線系統。

2、在同等流量下，辮狀系統之底床坡度會略高於蜿蜒狀河川，交織狀則較低於蜿蜒狀河川。

交織狀河川系統與辮狀系統比較屬較穩定狀態，堤岸侵蝕、渠道遷移與河相演進等現象均較輕微。

由本節論述可知河川依據斷面、坡度、平面型態與地形特徵等不同可分成直線型、蜿蜒型、辮狀型與交織狀四大系統，此四種分類散佈於河系中。且河川演變即為不斷侵蝕與堆積之產物，因此邊界地質抗侵蝕性影響河川型態發展。由管理角度檢視，所有評估與分析應就不同河相特性分別考量；就河床質調查而言，床質來源除河川本身掏選作用將顆粒逐漸向下游搬運外，於易侵蝕邊界區域，堤岸破壞亦為重要床質來源。因此，若河川穩定性高，代表斷面變化率小，則床質變化均由顆粒自上游向下游搬運掏選造成。

交織狀系統平面型態由江心島嶼與曲折度高之渠道組成。江心島嶼高程與洪泛平原相同或是略高於洪泛平原，因此河床質調查實應於高程低於洪泛平原高程處進行取樣；渠道部分特徵則類似蜿蜒系統，可依循蜿蜒系統河床質調查準則進行。

2.3.3 既有河川分類系統

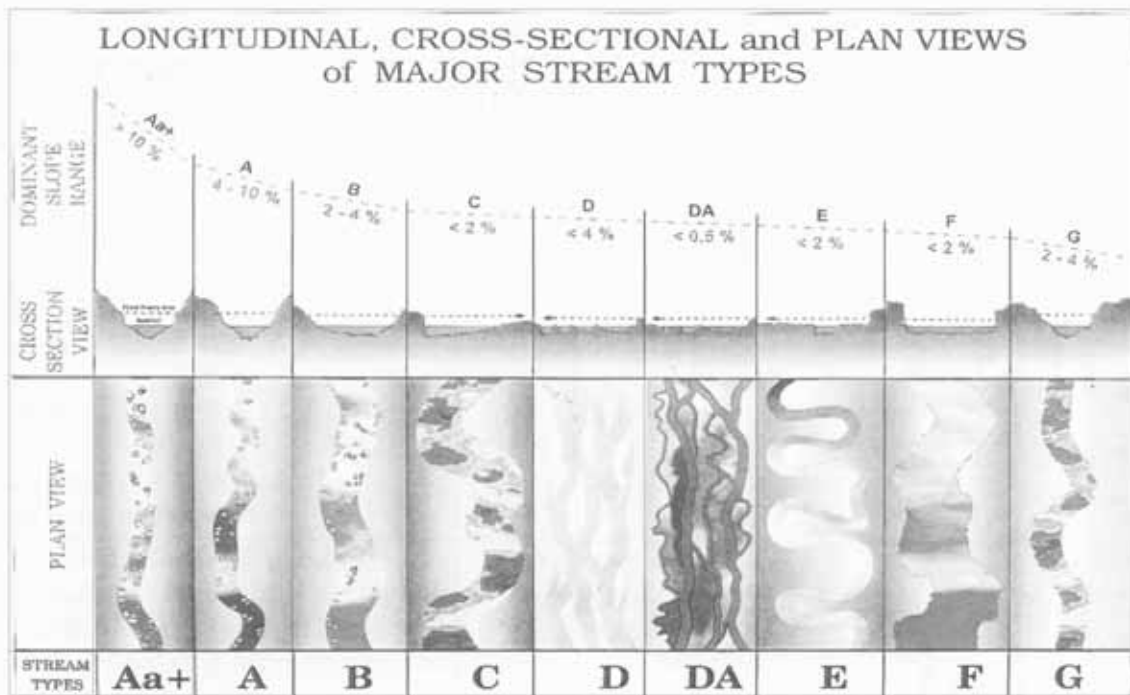
河川型態分類首先由 Leopold and Wolman 於 1957 年提出直線型、

蜿蜒型與辮狀型系統。1970 年以後，交織狀系統公認應獨立於辮狀系統之外，至此之後河川典型類別均區分為直線型、蜿蜒型、辮狀型與交織狀四類。Brice(1975)提出之河川分類系統僅考量平面型態之河川分類，該系統已包含所有可能之河川平面型態，但河相為平面與縱橫向特徵所共構，僅以平面型態分類欠缺周密考量。Rosgen(1994)建立一套較完整分類系統，同時考慮平面型態、縱向變化與橫斷面影響，其分類方法共分為四個階層，階層一對寬廣的平面型態特徵進行初步分類；階層二對河川型態於平、縱與橫向進一步描述；階層三探討河川穩定狀態，以縱橫向穩定指標評估河道穩定性；階層四透過實際量測建立河槽穩定之理論分析。每一階層之目的與資訊需求不同，各階層的描述、需求與目標如所示。

階層一中主要透過空照等技術判讀河谷地形與水流特徵在平面上之表現。再透過縱向剖面、橫斷面以及平面特徵進行河川分類（圖 2.23 所示及表 2.3 所示）。

表 2.3 河川分類階層表（修改自 Rosgen,1994）

階層	階層目的	分析所需資訊	成果
Level I	河相平面特徵 (Broad morphological characterization)	地形、岩性、土壤、氣候、沈積歷史、河谷型態、河川縱向型態、大體之河川樣式。	藉由遙測或是已建立之地形圖、地質圖等資訊結合河川坡度概略說明河川型態分類。
Level II	河相描述（河川類別） (Morphological description)	渠道樣式、槽深比、寬深筆、曲折度、河床材料、坡度。	此階層透過坡降、河川材料、規模與量測得到之圖樣描述河川樣式，提供較階層 I 深入之說明。
Level III	河川狀態	水岸植生、沈積型態、蜿蜒型態、束制特徵、魚類活動指標、河制、河川尺寸範疇、岩屑事件、河川穩定指標、堤岸可侵蝕性。	以河川狀態進一步描述既存情況對渠道反應之影響提供特有資訊之預測方法學（例如：河川堤岸之侵蝕計算）。
Level IV	驗證	直接或間接量測沈澱載、堤岸侵蝕率、沈積與沖刷過程、水力幾何、相關生物資訊（如：水中昆蟲或是堤岸植生變遷等）。	提供特定區域河川演變過程資訊。評估預測方法理論；提供特定斷面之沈澱、水力與生物資訊；以及評估變動河床效能與衝擊評估。



註：Aa+、A 順直河川，B 低蜿蜒度河川，C、F 和 G 蜿蜒河川，E 曲折蜿蜒河川，D 網狀河川，DA 交叉結合狀河川

圖 2.23 縱橫剖面與平面型態之主要河川分類（摘自陳樹群,2001 改繪 Rosgen,1996 原圖）

縱剖面型態可由航空照片或是平面地形圖推斷，主要反應為底床坡度。Grant et al.(1990)提出底床型態特徵與坡度之對應關係，將底床型態分為深潭（pools）、淺灘（riffles）、急湍（rapids）、小瀑布（cascades）以及河階（steps），其中深潭與淺灘發生在坡度小於 2% 之情況，急湍則發生在坡度 2~4% 間，小瀑布則出現在坡度介於 4~10% 之情況，當坡度超過 10% 則出現河階之底床特徵。如中 Aa+ 類型河川發生在坡度大於 10% 之區域，因此底床呈現水面垂直落差與掏深之型態；A 類型河川則發生在坡度 4~10% 之間，因此底床會出現小瀑布與河階之特徵；B 類河川型態坡度介於 2~4%，底床型態主要為淺灘搭配急湍，並在彎道或束縮處出現深潭特徵；C、DA、E 與 F 河型出現在坡度較緩之地區，底床

型態主要為深潭與淺灘交替呈現；G 類河型為在河谷平原上沖出溝槽，底床坡度 2~4%，底床型態亦以深潭與淺灘為主；D 類河川由於進化特性使渠道分歧後合併，造成底床型態由沖刷與沈積構成。

表 2.4 河川分類與各類河川特徵對照表（摘自 Rosgen1994）

河川 型態	基本描述	深槽比	寬深 比	蜿蜒度	坡度	地形與土壤特徵
Aa+	非常陡，深槽， 土石運送之湍 流河川	<1.4	<12	1.0~1.1	>0.1	1. 地形起伏非常明顯 2. 有沖蝕、岩床或沈滓特 徵，有土石流淺勢 3. 深槽河川 4. 深沖刷坑造成垂直落差 5. 瀑布
A	似壕溝的、小瀑 布的、階段/深 潭河川 具有高能輸送 土石及沈積土 壤 若渠道為岩盤 或大礫石則非 常穩定	<1.4	<12	1.0~1.2	0.04 ~ 0.10	1. 地形起伏明顯 2. 沖蝕或沈滓或岩床形式 3. 深槽且具有小瀑布段之 河川 4. 綜合深池、階段/深潭之 河相
B	1. 平緩的深 槽，緩坡，以淺 灘為主較少深 潭之河川 2. 平面型態及 縱剖面均非常 穩定 3. 穩定深槽	1.4~2.2	>12	>1.2	0.02 ~ 0.039	1. 適度的地形起伏 2. 適度的侵蝕與寬深比 3. 窄且緩坡的溪谷 4. 以急流為主
C	坡度小，蜿蜒， 有點狀邊灘、淺 灘/深潭，被廣 大洪水平原沖 積形成之渠道	>2.2	>12	>1.4	<0.02	1. 有洪泛平原，寬廣的溪 谷，沖積土壤 2. 輕微地侵蝕且有範圍明 確的蜿蜒渠道 3. 淺灘/深潭型態河相

表 2.4 河川分類與各類河川特徵對照表（續）（摘自 Rosgen1994）

河川 型態	基本描述	深槽比	寬深 比	蜿蜒度	坡度	地形與土壤特徵
D	具有縱向及橫向邊灘之辮狀渠道 具有沖蝕的深槽且非常寬之渠道	N/A	>40	N/A	<0.04	1. 由於沖積層及陡的沖積扇形成寬廣河谷 2. 具有冰和堆積物特徵 3. 豐富的泥沙供應 4. 高堆移質及深槽沖蝕作用
DA	1. 交叉狀，窄且深，有廣大穩定發展的洪水平原及濕地 2. 非常平緩的地形起伏且蜿蜒度與寬深比變化不定 3. 非常穩定之河岸	>2.2	不定的	不定的	<0.005	1. 坡度低，細沖積扇形成寬廣河谷 2. 具有廣大的濕地及洪水平原，細沈積物形成側向穩定的邊灘 3. 極少河床質以沖瀉質為主
E	1. 坡度小，蜿蜒的淺灘/深潭河川且低寬深比 2. 非常穩定 3. 高蜿蜒度	>2.2	<12	>1.5	<0.02	1. 寬廣河谷 2. 沖積層形成洪水平原 3. 高蜿蜒度及穩定深槽 4. 具有極低寬深比之淺灘/深潭河相
F	坡度低，高寬深比，侵蝕的蜿蜒淺灘/深潭渠道	<1.4	>12	>1.4	<0.02	1. 高度風化物產生 2. 緩坡且高寬深比 3. 蜿蜒河川，因河岸高沖蝕率造成橫向不穩定 4. 淺灘/深潭河相
G	在緩坡上，侵蝕成峽谷的階段/深潭且低寬深比	<1.4	<12	>1.2	0.02 ~ 0.0039	1. 峽谷，階段/深潭河相，緩坡且低寬深比 2. 窄河谷，或在沖積層或積礫層造成深的切割，及沖積扇或三角洲 3. 因階段控制問題及河岸高沖蝕率造成不穩定

河川橫斷面常出現窄且深，以及寬而淺之對比。以圖 2.23 之河川型態而言，A 類河川邊界束制良好並且向下刷深成為窄而深的斷面；C 類河川邊界之可塑性高且河谷平原平坦，形成寬而淺的斷面型態；而 E 類河川具有窄深的斷面，同時位在容易發展之洪泛平原上，因此具有較大彎曲度；F 類河川具有寬淺斷面，但位於不易發展之邊界上屬於向下刷深之蜿蜒河型；G 類河川具有低寬深比類似 E 類河川，但具有較好之刷深特性。

從平面型態樣式可將圖 2.23 之 A 類河川歸為直線型 (straight)，將 B 類河川歸類為低度曲折型 (low sinuosity)，C 類之蜿蜒型河川 (meandering)，曲折蜿蜒之 E 類河川 (tortuously meandering)，D 類為多流線系統之辮狀河型 (braided) 以及同屬多流線系統但具有高曲折度交織型態 (anastomosed) 之 DA 類河川。平面型態上可以蜿蜒寬度比 (定義為：帶狀寬度/滿槽面寬，如圖 2.24 所示) 評估河川型態如圖 2.25 所示。

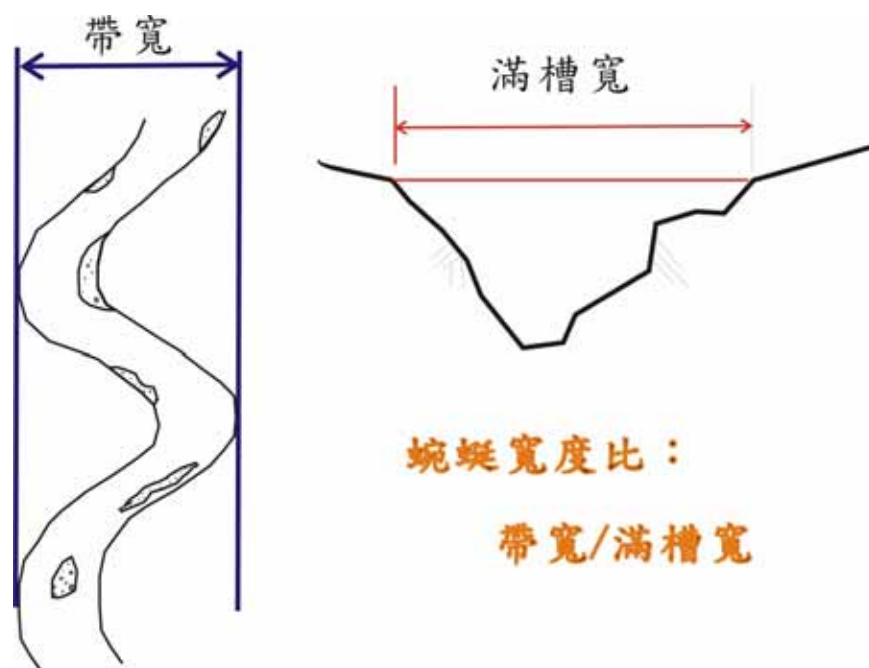


圖 2.24 蜿蜒寬度比計算示意圖

河川 型態	A	D	B&G	F	C	E
平 面 型 態						
橫斷面 型 態						
蜿蜒度	1.0~1.2	N/a	>1.2	>1.4	>1.4	>1.5

圖 2.25 以蜿蜒寬度比定義河川分類（摘自陳樹群,2001 改繪 Rosgen,1996

原圖)

階層一將河川類型分成 A-G 大類，在階層二中再以河川深槽比、寬深比與坡度進行細分（深槽比與寬深比定義如圖 2.26 所示），將斷面深槽比等參數計算完成後再以底床材料粒徑區分為 1~6 等六小類（如所示）。上述分類為依循流程進行。

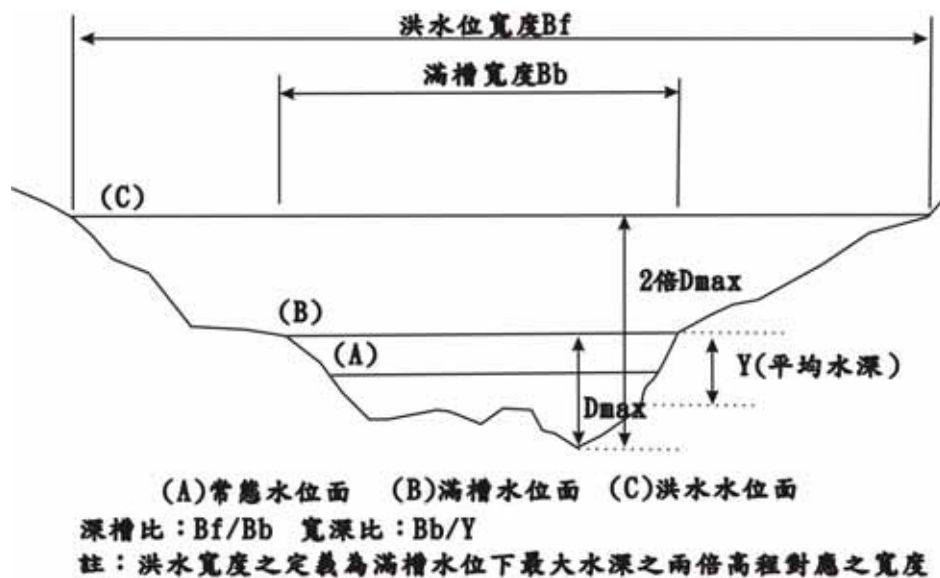


圖 2.26 深槽比與寬深比定義示意圖

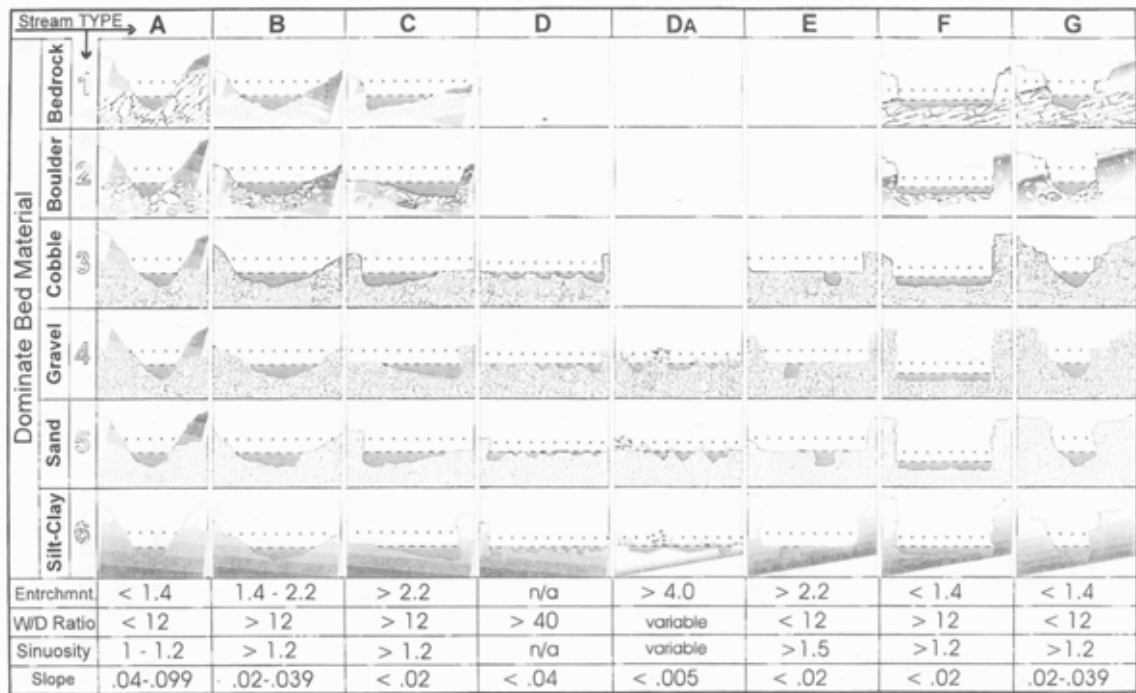
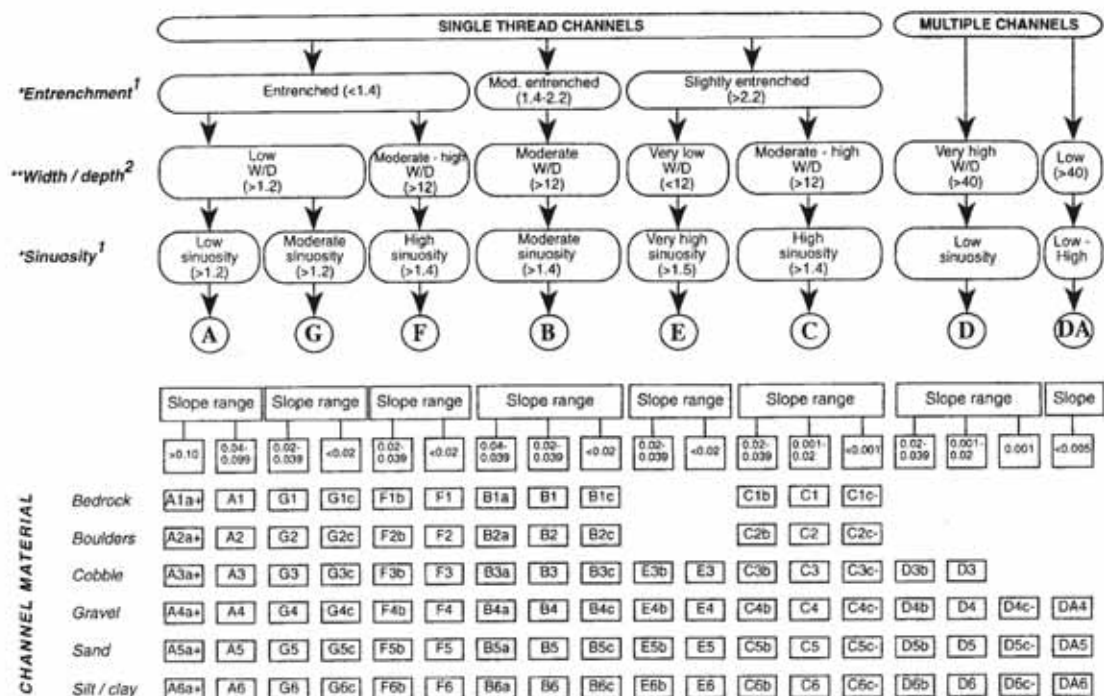


圖 2.27 圖解河川分類與深槽比、曲折度、寬深比、坡降與粒徑間之關係

(摘自陳樹群,2001 改繪 Rosgen,1996 原圖)



¹ Values can vary by ± 0.2 units as a function of the continuum of physical variables within stream reaches

² Values can vary by ± 0.2 units as a function of the continuum of physical variables within stream reaches

圖 2.28 第二階分類流程圖 (摘自 Rosgen,1994)

深槽代表河流垂直涵容能力，亦可用以描述河流下切程度，因此 Rosgen(1994)建議以深槽比來描述河流下切現象。深槽比之定義為兩倍最大水深線(Bf)之河寬除以滿槽水位之寬度(Bb)，當比值介於 1.0~1.4 代表身切型河川，比值在 1.41~2.2 之間代表中度深切型河川，而比值在 2.2 以上則為輕微深切型河川。

寬深比之定義為滿槽水面寬與平均水深之比值，當寬深比高代表寬淺河川，此時水流產生應力有利於河岸侵蝕，在此分類法中以寬深比值 12 為基準，A、G、E 類河川寬深比小於 12，B、C、F 之寬深比大於 12。

陳樹群等（2001）對台灣河川進行分類研究，引用 Rosgen(1996) 分類系統為基礎，並加入考慮水系受地質影響因子，增列水系與地質條件評估之階層，以五個階層考慮河川分類，為台灣目前河川分類較完整之研究。

除上述外，林承坤（1992）提出以河川邊界組成作為第一級河型分類之準則，並視需求以河川型態作為第二級分類，及以穩定性作為第三級分類。

第一級分類中依據河道邊界材料特性可分為沖積河床、半沖積河床與非沖積河床三類。沖積河床邊界由全新世沖積物組成，全新世沖積物呈多樣性與可動性，造成此類河川型態多樣且演化複雜。半沖積河床邊界由更新世地層以及全新世地層共同組成，全新世地層通常覆蓋於更新世之基岩上，此組成使河床邊界可動性降低，此類河型一般出現在山區與平原之過渡帶或丘陵區與山間盆地地帶。非沖積河型邊界由岩盤組成，束制性良好使邊界可動性降低，多發生在新構造運動擡升之山區。

上述三類河型中半沖積與非沖積河型因河床狀態穩定，至多進行第二級分類即可。以下茲將各類河型進一步細分說明如后：

1. 沖積河床：

依據河床型態可將此類河型分為順直微彎河床、蜿蜒河床、分汊河床與散亂河床四種二級分類。第三級分類再以河床地貌、河岸與河底之可動差異，進一步區分八種不同狀況。為沖積河床之分類表。

表 2.5 沖積河床分類表（彙整自陳樹群,2001）

特性 河型		河床邊界的組成與構造	河床地貌	河床地貌與河岸相對抗沖蝕性	河岸與底床相對抗沖蝕性
順直微彎河床	穩定微彎河床	堤岸材料主要由黏性土壤組成，並分佈有礫，受直線型斷裂或埋藏斷裂控制。	邊灘附聚河岸，凹岸下腮有厚層黏土或礫	邊灘<<凹岸	凹岸>>河底
	不穩定微彎河床		邊灘附聚河岸	邊灘<<河岸	河岸>河底
蜿蜒河床	穩定蜿蜒河床	堤岸由黏土與砂土層組成，具有二元構造。	河漫灘寬廣，凸岸由高河漫灘構成	凸岸>>凹岸	河岸>河底
	不穩定蜿蜒河床		河漫灘寬廣，凸岸由低河漫灘構成	凸岸<凹岸	河岸 \geq 河底
分汊河床	穩定分汊河床	堤岸主要由砂土層組成並夾有黏土層，具夾層構造。	江心洲	江心洲<河岸	河岸<河底
	不穩定分汊河床		江心灘	江心灘=河岸	河岸<<河底
散亂河床	穩定散亂河床	河岸主要由粉砂與細砂組成，黏性土層呈透鏡體構造。	江心灘與深潭	江心灘<河岸	河岸>河底
	不穩定散亂河床		散亂江心灘	河岸與江心灘抗沖蝕能力均很小	河岸與河底抗沖蝕性均很小

2.半沖積河床：

半沖積河床邊界位於可侵蝕與不易侵蝕之地質材料之間，河岸與底床仍具一定可動性，以河床型態可將此類河川分為順直微彎、蜿蜒與分汊河床三類，分類如所示。

表 2.6 半沖積河床分類表（彙整自陳樹群,2001）

特性 類型	邊界組成與構造	河床地貌	河床地貌與河 岸相對抗沖性	河岸與河底相 對抗沖性
順直微彎 河床	河岸主要由基岩組成，受直線行斷裂控制。	砂、卵石邊灘附聚兩岸。	河床地貌 $<<$ 河岸	河岸 $>>$ 河底
蜿蜒河床	河床由基岩或厚層砂礫與黏土組成，河床平面型態受 X 狀斷裂控制。	基岩與砂礫層組成凸岸。	河床地貌 \geq 河岸	河岸 \geq 河底
分汊河床	河岸上部為沖積物，下部由基岩與半膠結的砂卵石組成，河岸有石質節點。	基岩礁石、砂卵石組成江心洲。	河床地貌 $>$ 河岸	河岸 $<$ 河底

3.非沖積河床：

河床由基岩組成，穩定性高，底床形貌受岩體構造控制。根據河床型態可分為峽谷、寬谷、蜿蜒河床、深切河曲以及分汊河床等五類，各類河床型態描述如所示。

表 2.7 非沖積河床分類表（彙整自陳樹群,2001）

特性 類型	邊界組成與構造	河床型態
峽谷	灰岩、砂岩、玄武岩等基岩組成，垂直節理發育，新構造運動強烈擡升。	谷陂多為 60°~70°，河谷呈 V 字型或 U 型。
寬谷	粒狀結構之火成岩與變質岩、砂頁岩等組成新構造運動擡升區。	谷陂多為 15°~30°，河谷呈 U 型。
蜿蜒河床	河床由基岩組成，受 X 狀斷裂或 X 狀節理控制，多為橫谷，新構造運動較強烈擡升。	河川蜿蜒度大於 1.2，河谷橫剖面不對稱，深槽分佈在凹岸。
深切曲河	河床主要由頁岩與粉砂岩組成，呈互層構造，岩層傾角小新構造運動緩慢擡升。	河床蜿蜒度大於 1.5，河谷橫剖面不對稱，深槽分佈於凹岸。
分汊河床	河床由基岩組成，新構造運動較強烈擡升，多為橫谷，堅硬的岩層在岩床中形成節點與江心洲。	河谷呈蓮藕狀，橫剖面呈 W 型。

河川具有直線型、蜿蜒型、辮狀型與交織狀四種類型，各類型之縱、橫地貌與平面型態均有各自特徵，不同地貌條件之河床質粗細存在差異（例如：淺灘與深潭）。透過河川分類系統可將具有相同特性之河川以簡單的符號提供辨識，河床質調查供作之管理可以河川分類為基礎，用以評估較具代表性之取樣位置與數量需求評估。

但以河床質調查位置評選而言，Rosgen 所建系統過於複雜，林承坤之方法又太過定性，因此應結合二者優點，從地質觀點出發以建立河床質採樣位置評選系統。

2.4 取樣數量、時間與頻率

多少調查數量具有代表性？什麼時間適合調查以及多久需要重新調查？均為河床質調查必須克服的問題。

取樣數量需從三方面探討，一、整條河川需要多少數量方足以提供各項分析需求；二、每一取樣位置需要多少取樣點方能組成該河段之參數；以及三、單一樣本需由多少數量組成才有足夠之可靠度。以往研究多著重於前述第二與第三點討論，以下將相關研究進行說明。

Wolman(1954)依據試驗結果建議樣品數少於 100 則不會產生明顯之操作者誤差，且同一取樣人員於不同樣品區取樣誤差亦可忽略；Brush(1961)以收集 60 個樣品所得結果驗證此數量已足夠避免操作者與不同樣本間誤差；Hey and Thorn(1983)進一步探討網格法樣品數量與誤差間之關係，研究指出網格法誤差主要有二，分別為操作者誤差與樣品誤差。操作者誤差為調查無系統化造成，因建立網格方法有方形網框、採樣膠帶以及隨機步測等數種，若無系統方法容易造成不同調查者間之差異，各種建立網格方法中尤以隨機步測產生差異最為明顯。此外，決定顆粒分級的方法有篩分析或用尺、游標卡尺與開口樣版等，大顆粒(粒徑大於 32mm, Curch 1987)不適合以篩分析決定顆粒分級，但以尺或游標卡尺丈量顆粒 B 軸（第二大主軸）做為顆粒分級會有高估情況產生，唯有透過開口樣版量測可得到與篩分析相同結果，採用不同工具決定顆粒分級亦為操作者誤差

來源之一。樣品誤差可由樣品平均值(sample mean)與代表粒徑(percentile vaule)來討論。樣品平均值部分，該研究指出在 95%的信賴區間(confidence level)條件下，當要求粒徑誤差分別為 5%、10%、15%時所需樣品數量分別為 790、207 與 97 個；代表粒徑部分，該研究指出在 95%的信賴區間(confidence level)條件下，分析 D84 需求精度分別為 $\pm 2\text{mm}$ 、 $\pm 5\text{mm}$ 時所需最低樣品數分別為 587 與 94 個。該研究並發現當樣品數小於 100 則不同操作者產生之誤差可以忽略，當樣品數超過 100 則操作者誤差會凸顯，此現象使提高樣品數量企圖增加調查成果精度之效果大打折扣，因此建立標準採樣程序降低採樣者誤差後方可提高採樣數量，使結果更趨近真實狀態。另外，Mosley and Tindale(1985)指出在 95%信賴區間下，樣品精度要達到 $\pm 10\%$ 與 $\pm 20\%$ 所需樣品數分別為 7680 與 1680。此數量與 Hey and Thorn 之研究差距甚大，其歸納原因有取樣方法不同(Hey and Thorn 於 $25\text{m} \times 5\text{m}$ 之範圍進行試驗；Mosley and Tindale 沿 12 組斷面進行試驗)以及其試驗場址河床顆粒較 Hey and Thorn 所採試驗場址粒徑為粗兩項原因。Hey and Thorn 同時也對樣品數下限進行探討，經試驗與分析顯示 40 個樣品即可提供與 100 個樣品接近之成果。Hey and Thorn 進一步驗證 Wolman 與 Brush 提出之建議。

Mosley and Tindale(1985)研究同時指出於一區域內，每組樣本收集 70 個樣品，在信賴區間為 95%之條件下，由 57 組與 13 組樣本分析之顆粒平均粒徑精確度分別可達可達 $\pm 10\%$ 與 $\pm 20\%$ ，但若沿斷面取樣則需 64 與 37 組斷面方得達到 $\pm 10\%$ 與 $\pm 20\%$ 之精度。

取樣時間以河川枯水期較為適合，此期間因水位降低，多數地貌暴露空氣之中，使調查容易進行(Hey and Thorne,1986；Morris and Fan,1998)。

間隔多久時間需重新進行河床質調查？此為河床質調查工作重要課題之一。調查間距過大可能造成在期間治理工程採用不正確資料而降低成效，調查間距過小河床質未發生變化，造成資原浪費。欲掌握最佳重新調查時機應對河床質更迭變化率進行瞭解，方能正確決定河床質調查頻率。

Haschenburger and Wilcock (2003) 於加拿大 Carnation Creek (試驗段坡降 0.009；表層河床質 D_{50} 與 D_{90} 分別為 47mm 與 120mm；底層河床質 D_{50} 與 D_{90} 分別為 29mm 與 112mm；平灘流量約 35CMS) 進行礫石河床傳輸特性研究。該試驗於 900 公尺區域內設置四處試驗段，每試驗段內由四組橫跨河川斷面之測線組成，並以磁石置換或標記測線下方河床顆粒，經長期觀測底床顆粒於不同洪水事件作用下之運動狀態。該研究結果發現礫石河床床質傳輸具有下列二重要現象：

1. 礫石底床於洪水事件反應行為可區分為完全運動、部分運動與完全不運動三種（顆粒向下游位移超過 1 公尺定義為運動，小於 0.3 公尺視作未運動），低流量時完全運動所佔範圍較低，隨洪水事件增大完全運動範圍持續擴大直至所有區域均成為完全運動狀態（圖 2.29），由圖 2.29 可知當流量接近平灘流量時，底床幾乎完全屬於完全運動狀態，當流量達 0.5~0.7 平灘流量，底床僅剩不到 10% 面積處於完全不運動狀態，可清楚發現隨流量趨近平灘流量，底床顆粒各種運動狀態所佔面積隨之調整，越接近平灘流量完全不運動狀態面積越小，且流量超過 0.8 平灘流量時，部分運動所佔面積縮減速率會急遽增加。

2. 部分傳輸區域顆粒運動亦受洪水規模影響，洪水規模愈大可迫使較大

顆粒運動（圖 2.30），由圖 2.30 相同流量下，粗顆粒運動比例比細顆粒低，相同尺寸顆粒於高流量時運動比例較高。

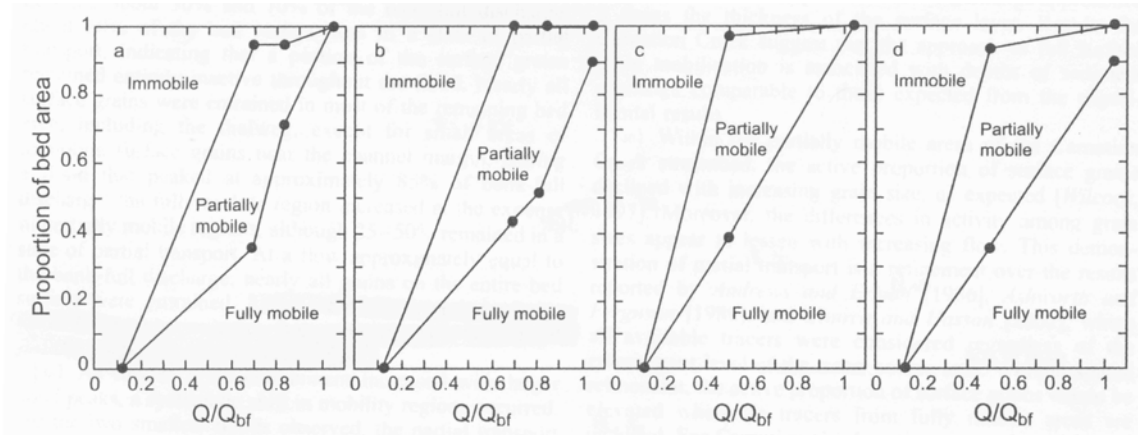


圖 2.29 流量與底床運動狀態關係，a、b、c 與 d 依序分別為上游至下游之試驗段（摘自 Haschenburger and. Wilcock,2003）

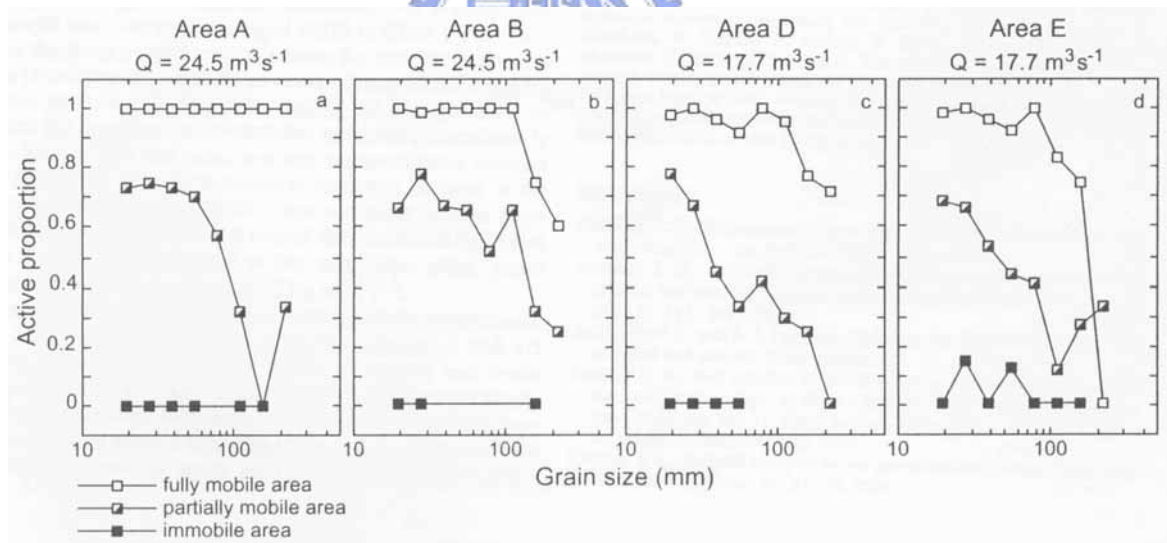


圖 2.30 底床顆粒處於部分運動狀態時，不同粒徑顆粒運動狀態隨流量變化關係，a 與 b 為上游試驗區 A、B 於 85%平灘流量觀察結果，c 與 d 為下游試驗區 C、D 於低流量洪水事件時觀察結果（摘自 Haschenburger and. Wilcock,2003）

由該試驗歸納洪水規模與傳輸狀態間關如表 2.8 所示。由表 2.8 可知重現期距 2 年之洪水會有 30%~50% 面積處於部分傳輸與完全不動狀態，意謂此部分河床材料不會每年更迭，而重現期距 7 年之洪水規模發生時產生河床全面運動，代表河床形貌全面變遷不是經常發生。

河床質調查數量可由調查結果之代表性加以決定，因此需視調查目的先擬定需求參數精度。討論數量問題需由單一點（同一沈積環境）所需數量開始，繼而討論不同沈積環境組成局部區域之數量，以致整體河川所需數量。Hey and Thorne 以及 Mosley and Tindale 討論過單一調查點與區域所需調查數量，但未考慮不同河川型態間差異，對於擬定河川河床質調查工作所需數量評估尚有不足。

河床質分佈存在空間不均質分佈之事實，因此調查區域應盡可能涵蓋所有底床區域，故於枯水期進行調查有助於提高調查可行性。故可透過流域降雨特性推估河川枯水期，作為河床質調查時間之評選依據。

礫石河床組構變動與洪水事件密不可分，因此透過洪水事件再現週期與其造成底床顆粒運動狀態間關係可藉以評估河床質調查頻率。惟國外研究指出上述之關連是否可直接運用於台灣河川有待進一步評估。

表 2.8 流量與底床傳輸程度關係表（整理自 Haschenburger and Wilcock, 2003）

Q/Qb	部分傳輸面積(%)	完全傳輸面積(%)	備註
0.1			顆粒開始運動門檻
0.5~0.7		33.3	
0.85	20~25	51~70	重現期距 2 年
1		100	重現期距 7 年

2.5 文獻結論與討論

河床質具時變性與空間不均質性，磨耗、掏選、沈積歷史等作用導致不同區域之河床質分佈，同樣沈積環境下之河床質亦存在差異性，無論是空間分佈差異或是垂直向差異。

河床質調查應視目的分表、底層取樣。表層樣品調查方法有網格法(重量頻率與出現次數頻率)、面積法(重量頻率與出現次數頻率)及體積法等數種，以網格法(出現次數頻率分析)取樣最為便利，且結果可直接與體積法比較。底層樣品僅能以體積法取樣，但須於表層完成調查後，移除表層顆粒方能施做，利用此二方法可完成同一區域完整之河床質調查。

河床質調查工作所需資源與調查所需精度成正比，當調查精度越高需求數量暴增，故進行河床質調查工作前需擬定良好調查計畫，從調查位置、時間、數量、取樣方法以致成果展現等均需包含。

台灣現行河床質調查為有系統規劃，取樣位置以隨機等距分佈為主，無考慮河川型態區隔會導致代表性不足，且未依據目的針對需求樣品進行調查，另無論表底層均以體積法進行取樣，上述現象均會使結果代表性降低。

描述河川縱、橫與平面型態之河相理論發展已逾半個世紀，對河川演進描述與預測目前已相當成熟。Rosgen 依據河相基礎建立完整之河川分類系統，此部分技術已逐漸應用於河川管理工作上，但尚無運用於河床質調查。河相實為泥沙運移與堆積之結果，因此應利用基礎河相學與諸多影響河床質縱向變化因素，建立河床質調查位置評選系統以提升河床質調查工作之成效。

Mosley and Tindale 研究成果指出河床因沈積環境不同存在差異，同一沈積環境內易存在空間不均質分佈，此造成河床材料橫向變異性。Haschenburger and Wilcock 研究礫石河床顆粒傳輸作用發現，底床顆粒處於完全運動、部分運動與完全不運動之比例隨洪水流量增加相互消長改變，同樣尺寸顆粒運動狀態亦隨流量增大而持續增加運動比例。此亦說明同一沈積環境因反覆經歷不同規模洪水事件時會造成河床質的差異。Mosley and Tindale 研究對象為辮狀系統河川，Haschenburger and Wilcock 研究對象為略微曲折之直線型河川，二者均未考量河相區別，但不同河相形成之環境條件有異，以整體調查計畫擬定而言仍應深入瞭解所有河相呈現之反應，並可嘗試建立同一區段下不同沈積環境間代表粒徑之關係。

由於河床質空間變異性大，為取得整體底床之代表性結果應使調查範圍盡可能涵蓋底床上所有地貌。故 Hey and Thorne 以及 Morris and Fan 均建議於河川低水位時進行調查。因此透過氣象資訊分析可提出各流域適於進行河床質調查之時段，使調查作業更具系統與效率。

Haschenburger and Wilcock 指出礫石河床之底床型態變遷非經常發生，其變化程度及範圍受洪水規模影響。為使調查成果能充分提供於治理工作參考，應依據洪水再現頻率與河床質傳輸間之關係建立重新取樣期距之標準。惟需考慮者為台灣礫石河川底床顆粒對於洪水之反應是否與 Haschenburger and Wilcock 研究成果相符，此有待深入確認。

河床質調查之相關文獻多探討調查方法、縱向與垂直向之變化。對於橫向變異性、調查數量以及調查頻率等問題之研究較少且不完整，少部分文獻有相關論述但均侷限於某一特定範圍，未考慮河相特性。為建立完整之評選系統，必須以河相為基礎進而研擬不同河相間之調查對策。

三、研究方法

3.1 概述

探討河床質調查需考慮採樣方法、位置、時間與數量等問題，方可得到理想成果。礫石河床具有表面粗粒化特性，以體積法進行表層樣品取樣會因表層範圍界定不易產生誤差，底層樣品僅能以體積法進行取樣，但須先將表層樣品移除方能得到合理結果；現行採樣位置決定均以隨機佈設，未有系統依據河相學評選；河床質調查取樣時間頻率無一定標準，但礫石河床隨洪水再現頻率而產生組構重新調整，若調查時間間隔超過礫石河床組構重新調整之週期，可能導致期間治理工作引用錯誤參數情況發生；執行面上，多少數量足以提供有效資訊為另一重要問題，不僅影響後續治理工程之應用，過多非必要的調查亦造成資源浪費。

本研究首將比較體積法與網格法於同一試驗位置所得成果，評估網格法在台灣的適用性。

其次分垂直向、橫向與縱向討論取樣位置的決定。垂直向以體積篩分析方法分層取樣，比較表、底層結果以探討之。橫向評選將由礫石河床傳輸特性分析地形差異產生的河床質變化作為評選基礎。縱向部分以地質、地形與河相特徵作為評選基礎。

至於取樣頻率問題，因礫石河床床質組成及變化率隨洪水量與再現期距影響，在何種條件發生時須進行重新調查為河川管理重要工作，藉由洪水觀測評估床質變化程度，並以此分析採樣頻率。

最後討論調查數量問題，依據河相學基礎，各類河川型態具有一定地形特徵，經由縱橫向取樣位置建議後，可依據地貌出現週期進行需求數量

推估。

本章就本文所採用之研究方法，取樣與樣品處理方法、取樣對象與位置評選研究、取樣時間與頻率以及取樣數量等四部分進一步說明。研究流程如圖 3.1 所示。

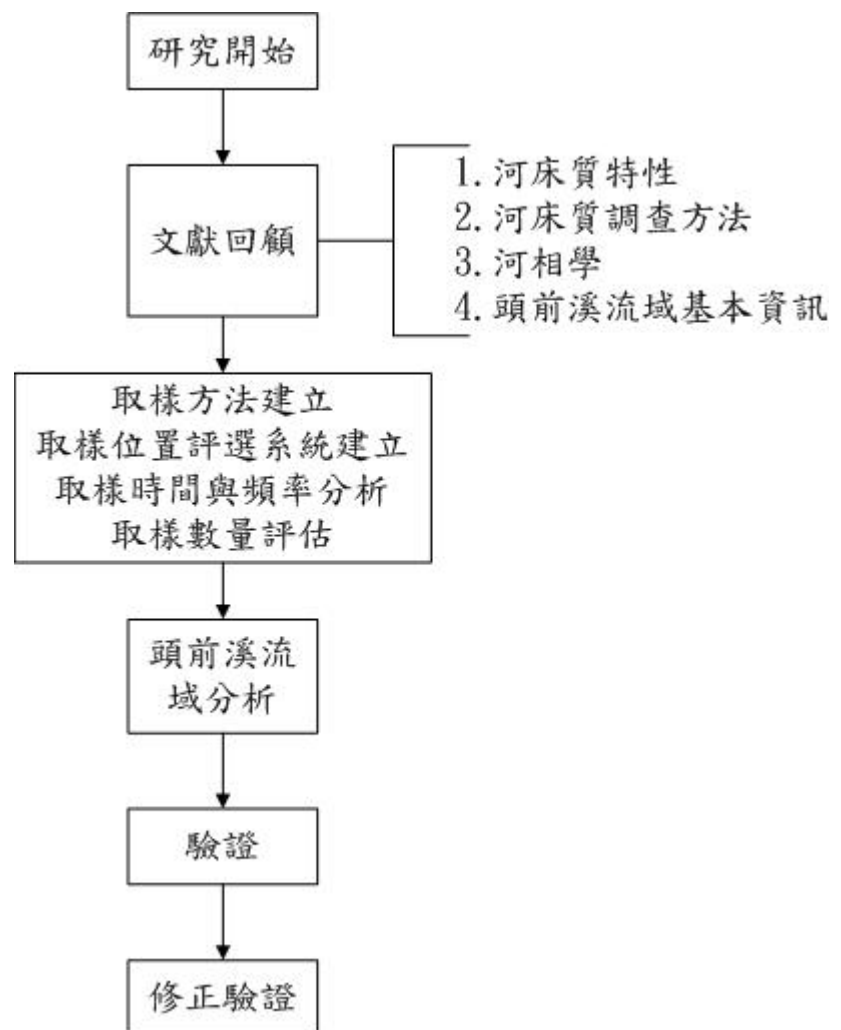


圖 3.1 研究流程圖

3.2 取樣與樣品處理方法

河床質取樣方法有體積法、網格法、面積法以及橫切法等數種。體積法為傳統且直接取得樣品方法，但施作費時耗工。網格法、面積法與橫切法均屬表層調查方法，其中僅以出現次數為分析基礎之網格法所得結果可與體積篩分析結果直接比較，其餘方法均需透過權重係數轉換方得與體積篩分析結果相較，且執行網格法所需時間物力均遠低於體積法，因此成為國外最常使用之方法。因此，本研究將進行體積法與網格法試驗，檢討網格法在台灣河川之適用性。

3.2.1 體積法取樣與試驗

台灣省水利局（1982）建議體積取樣試坑尺寸為 $0.6\text{m} \times 0.6\text{m} \times 1\text{m}$ ，但現行取樣試坑尺寸均為 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ ，檢討原因為前者尺寸作業空間不足，因此以後者尺寸執行，故本研究體積取樣沿用現行常用尺寸進行。

礫石河床常呈現表層粗粒化現象，因此取樣分表層與底層進行，表層深度由現場視細顆粒含量決定，若無法以細顆粒含量區隔，則以表面顆粒約 D_{90} 之粒徑作為表層深度。

茲將體積法取樣與試驗所需設備、取樣與試驗程序（圖 3.2）以及注意事項說明如後：

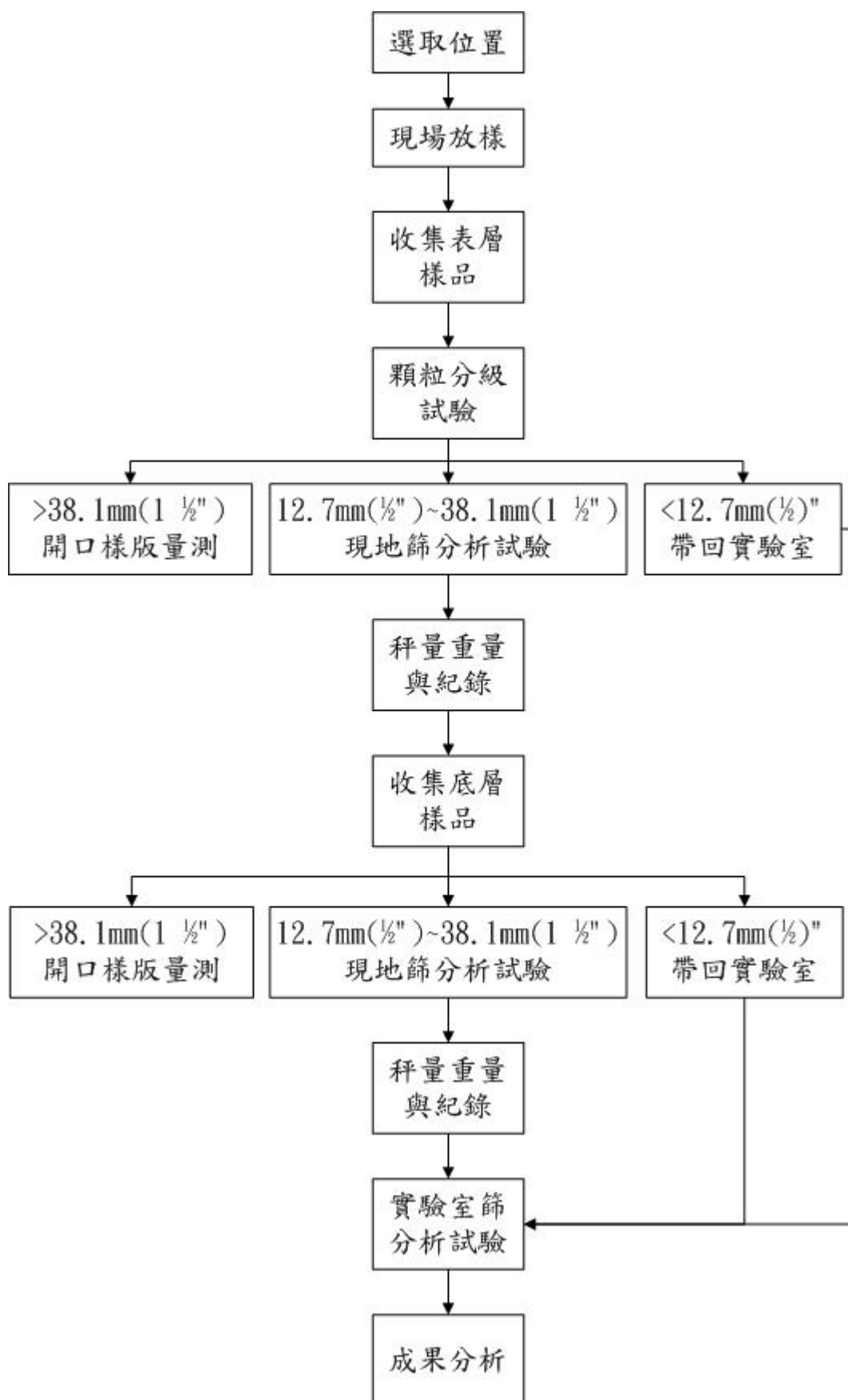


圖 3.2 體積法取樣與試驗程序

1.設備

- (1) 篩分析工具：美國標準號篩 1 1/2"、3/4"、1/2"、3/8"、#4、#10、#20、#40、#60、#100、#200、底盤及搖篩機。
- (2) 重量標定工具：100kg 彈簧秤。
- (3) 粒徑量測工具：開口樣版、捲尺。
- (4) 其他：砂鈹、畚箕、抽水機、不透水布、麻布袋等等。

2.取樣與試驗程序

- (1) 選定取樣位置。
- (2) 現場進行放樣並量測座標。
- (3) 以人工進行表層顆粒取樣。
- (4) 以 1 1/2"、3/4"、1/2" 號篩進行現地篩分析試驗。
- (5) 停留於 1 1/2" 號篩樣品續以開口樣版標定分級。
- (6) 量測各級顆粒重量（粒徑>180mm 可以量測 B 軸代替）。
- (7) 將步驟（6）通過 1/2" 號篩樣品取 10kg 樣品進行實驗室篩分析試驗。
- (8) 進行底層樣品取樣。
- (9) 重複步驟（4）至（7）。
- (10) 進行體積量測。

3.注意事項

- (1) 工作區僅可拔除表面植生，表面顆粒應保留或是收集於特定位置。
- (2) 操作過程應謹慎進行避免顆粒損失過多影響結果。

3.2.2 網格法取樣與試驗

網格取樣有方形網框、採樣膠帶與隨機步測等方法。方形網框涵蓋面積小，取樣代表性不足，且當床質由極粗之顆粒組成將使方形網框操作性降低，隨機步測受調查人員不同易產生操作者誤差，只有橫切膠布方法涵蓋面積大且取樣過程產生人為誤差最低。故本研究以童軍繩模擬採樣膠帶，於童軍繩上每 1 公尺間格以紅色絕緣膠帶標記，其間每隔 0.5 公尺以綠色絕緣膠帶標記，最後再以黃色絕緣膠帶進行 0.25 公尺間隔標記（如圖 3.3 所示）。進行現地取樣時，先拉設一測線並選取預定間格標記點（本研究依循國外施做慣例，以最大顆粒之 B 軸粒徑兩倍長度作為取樣間格，約為 1 公尺）下方樣品並以開口樣版決定顆粒分級，同一測線樣品取樣完成後平移測線繼續取樣直至收集數量符合調查要求，取樣與試驗程序如圖 3.4 所示。



圖 3.3 網格法取樣採用建立網格工具圖

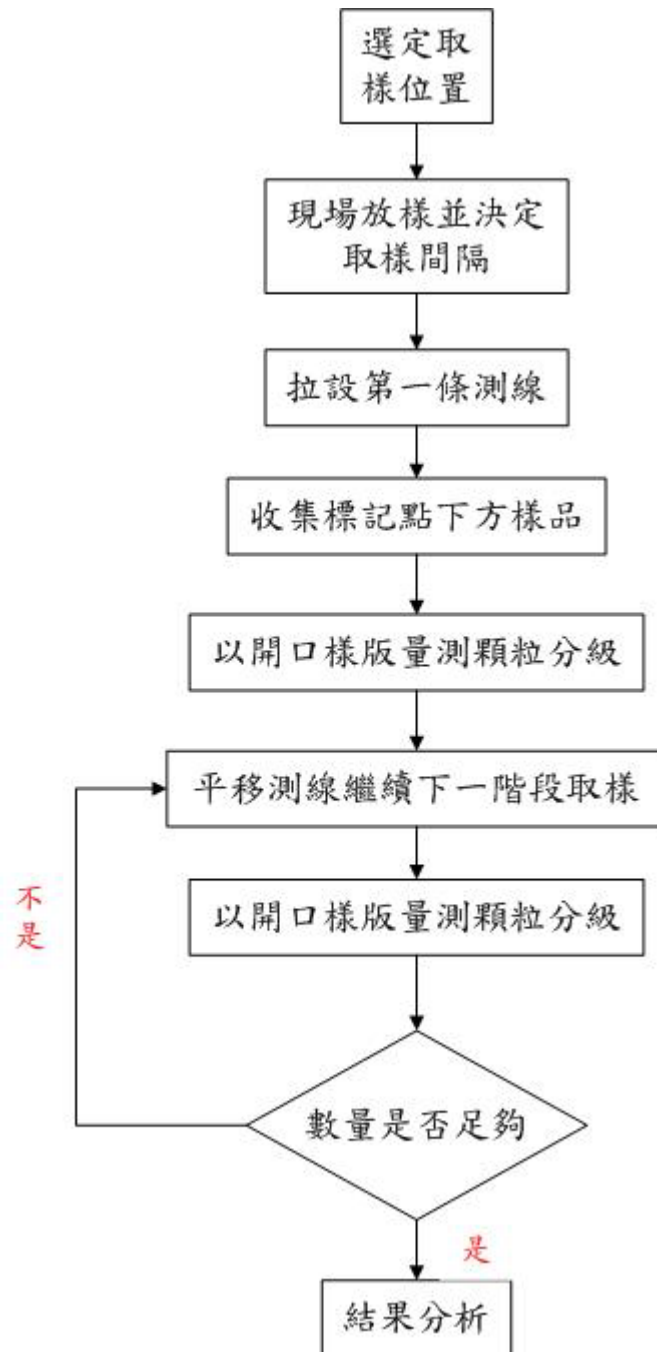


圖 3.4 網格法取樣與試驗流程

根據 Hey and Thorne 研究指出，樣品收集數量達 40 個以上，且不超過 100 個獨立樣品，操作誤差不影響取樣結果，若取樣數超過 100 則需建立良好量測系統避免操作誤差方可達到增加樣本母體得到之正面效益，因此本研究設定取樣數為 60 至 100 個。樣品選取標準將依照

Wolman 與 Leopold 兩種不同建議進行取樣。Wolman 認為野外操作可辨識顆粒尺寸最小極限為 2mm 至 4mm，但建議採用 8mm 為樣品收集界限，因此成為此方法操作上之慣例。本研究將根據國外慣例於操作 Wolman 方法時僅收集粒徑大於 8mm 之樣品，若取樣位置顆粒粒徑小於 8mm，則選取鄰近符合標準之樣品或記錄為小於 8mm；Leopold 方法收集粒徑大於 2mm 以上樣品，樣品小於 2mm 紀錄為細料，亦可取樣回實驗室進行篩分析試驗。茲將網格法取樣與試驗所需設備、取樣與試驗程序以及注意事項說明如後：

1.設備

(1) 取樣繩

(2) 開口樣版

2.取樣與試驗程序



(1) 選定取樣位置。

(2) 決定採樣間距並於現地進行放樣。

(3) 由採樣範圍其中一邊界開始拉設取樣繩。

(4) 收集預定取樣間距標記點下方顆粒。

(5) 以開口樣版標定顆粒所屬分級並記錄之。

(6) 同一測線取樣完成後，等間距平移取樣繩進行下一列取樣。

(7) 重複步驟 (4) ~ (6) 直至樣品數量符合預定數量為止。

3.注意事項

取樣石塊量測完後應置放於原處，或丟棄至取樣範圍外以免影響取樣結果。

3.2.3 樣品處理方法

河床質調查最終目的為決定粒徑分佈，此工作最直接方法為篩分析試驗。礫石河床材料粒徑分佈廣泛，巨大顆粒進行現地篩分析試驗不易，小顆粒又因土石料凝聚，因此需烘乾後再進行篩分析試驗較準確，基於上述緣由可將顆粒粒徑分佈決定工作分為大顆粒尺寸標定、現地篩分析試驗與實驗室篩分析試驗三部分，茲將各項工作說明如后：

1. 大顆粒尺寸標定

Church et al. 研究建議當顆粒尺寸超過 32mm 應以量測粒徑決定顆粒分級。量測粒徑可使用尺、游標卡尺或是開口樣版執行，Hey and Thorne 研究指出以游標卡尺或尺量測顆粒 B 軸會造成誤差，無法完全與篩分析結果比對，因此建議採用開口樣版量測。

本試驗採用開口樣版開口尺寸由大而下依序為 256mm、181mm、128mm、90.5mm、76mm、64mm、45.3mm、38.1mm、32mm、19mm 與 12.7mm(如圖 3.5 所示)。樣版開口雖有 32mm 尺寸開口，但由於台灣常用篩號無開口 32mm 之號篩，因此本研究擬以最接近號篩 1 1/2" (38.1mm) 作為現地篩分析與開口樣版量測分界。



圖 3.5 開口樣版圖

各級顆粒重量標定以直接量測尺寸為主，並收集樣本分析研究區顆粒 B 軸與重量間關係，作為顆粒重量推測輔助方法。根據 Church et al. 指出，以 B 軸直接估計顆粒重量方法適用顆粒粒徑小於 180mm 範圍，當顆粒尺寸超過此界線，且無法於現地進行重量標定時，應記錄顆粒 A、B 與 C 三軸進行體積計算推求重量。

2. 現地篩分析試驗

台灣地區現地篩分析試驗採用號篩為 12"、6"、3"、1 1/2"、3/4"、1/2"、3/8" 與 #4 篩。#4 篩為樣品現地試驗與實驗室試驗之分界號篩，土料（通過 #4 篩者）進行實驗室篩分析，石料（停留於 #4 號篩者）於現地進行篩分析。Church et al. 指出顆粒尺寸大於 32mm 與小於 16mm 部分因顆粒粒徑大且重量頗重，不適合以人力進行現地篩分析試驗，因此本研究將停留於 1 1/2" (38.1mm) 號篩以上顆粒依照第 1 點所述，以開口樣版進行顆粒尺寸分級；反之，現地篩分析試驗下限依據 Church et al. 建議為 16mm，台灣地區常用號篩無相符尺寸，因此選擇接近之 1/2" (12.7 mm) 號篩作為下限號篩。

因此本研究現地篩分析預計採用號篩有 1 1/2"、3/4" 與 1/2" 三組。通過 1/2" 號篩之細料取 20kg 樣品進行實驗室篩分析試驗，詳細規定如第 3 點所述。

3. 實驗室篩分析試驗

實驗室篩分析試驗依據 ASTM D421 與 ASTM D422 規定進行試驗。選用篩組計有 3/8"、#4、#10、#20、#40、#60、#100 與 #200 篩。

3.2.4 網格取樣法適用性驗證

本研究將設計試驗比對體積取樣與網格取樣法成果差異，並依循圖

3.6 流程對此問題進行探討，評估網格法於台灣之適用性。

如圖 3.6 所示，選定試驗區域後，於試驗區上先進行網格法取樣，俟網格法調查完成後於網格法施做範圍內選擇一處一平方公尺區域進行體積法取樣，體積法需分表層與底層樣品收集，俟實驗完成後進行結果分析比較並做綜合說明。

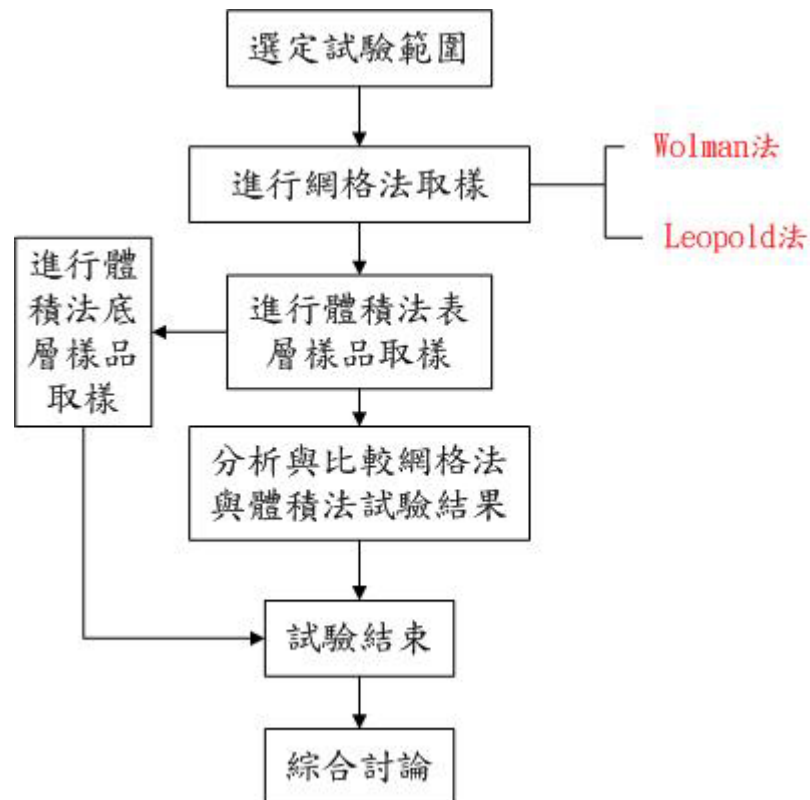


圖 3.6 網格法適用性研究流程圖

3.3 取樣對象與位置評選研究

河川床質於垂直、縱及橫向不均勻分佈。當垂直向出現粗粒化現象，就得依據調查目的不同區隔取樣對象。探討床質空間變異性文獻多著重縱

向變化，但縱向數據由橫向數據組成，且橫向於空間上亦存在不均質性。

本節將對河床質此三種不均勻分佈研究方法進行說明。

3.3.1 河床質垂直向不均質分佈考量

依據調查目的不同，取樣深度要有所差異。討論底床糙度或是顆粒初始運動需針對表面顆粒進行調查，當目的涉及護甲層結構破壞或是輸砂量，則表層與底層樣品均需收集分析。本文為探討河床質垂直向材料變異性，依循圖 3.7 流程進行。

討論此問題首先需選擇試驗位置，並將表層雜物清除，但須注意不可搬移表層顆粒。由表面顆粒估計可能 D_{90} 顆粒尺寸，將其 B 軸寬度視為表層深度，續以此深度進行取樣後隨之進行顆粒分級試驗。表層樣品完成後，繼續進行底層樣品取樣至深度達 1 公尺為止。

將上述表底層細料部分帶回實驗室完成顆粒分級試驗，彙整試驗結果後進行分析比較。

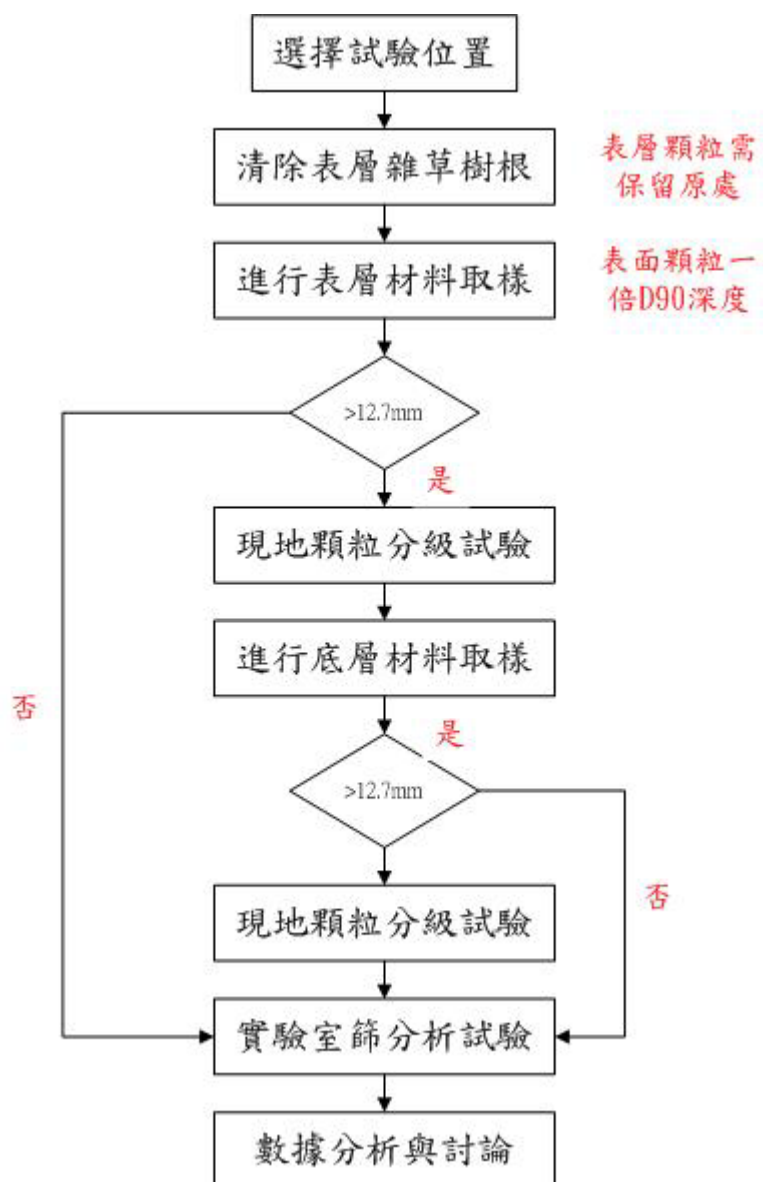


圖 3.7 礫石河床垂直向不均質分佈問題研究流程

3.3.2 河床質橫向不均質分佈考量

渠道橫斷面地形因堆積與沖刷形成高低不同，依高程高至低可能存在洪泛平原、沙洲（或小島）、灘與深潭（或深槽），如圖 3.8 所示。當水面高程產生變化，圖 3.8 上各地形與水面關係產生改變。底床位於水面下才顆粒才會因水力作用傳輸，使顆粒組成變粗，因此橫斷面河床質不均勻分佈可利用河川地形、洪水之再現期距以及不同重現期距洪水與

地形間涵蓋範圍等進行探討，以建立橫向調查點為選擇基礎。故橫斷向不均質分佈研究係依循圖 3.9 流程進行。

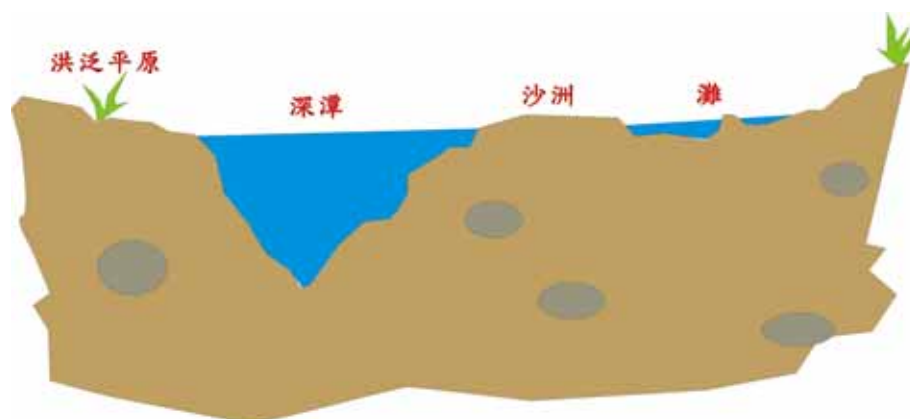


圖 3.8 渠道橫斷面可能地形形貌

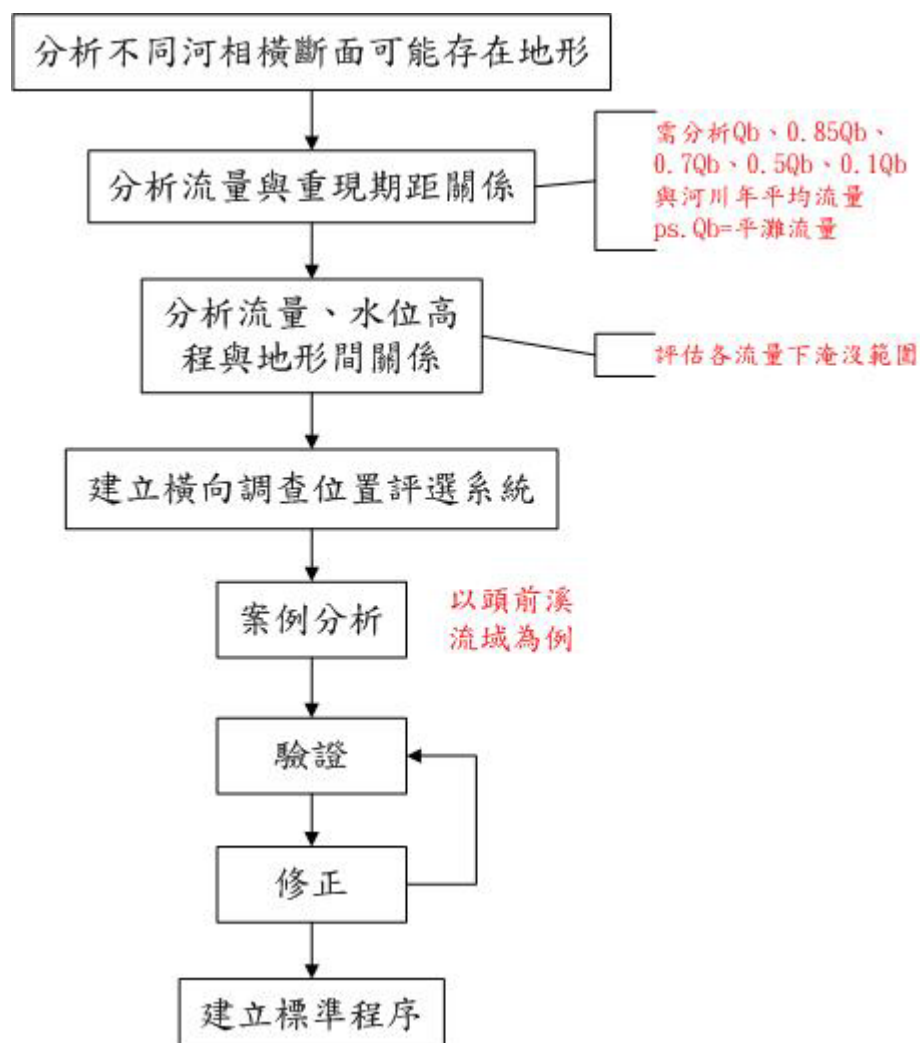


圖 3.9 橫斷面不均質分佈研究流程圖

3.3.3 河床質縱向不均質分佈考量

河川型態受沈澱載與水流力量控制，邊界地質條件之抗沖蝕性影響河相變遷，沈澱傳輸與堆積之最終狀態便是河相，因此討論河川縱向不均質分佈需由河相學為基礎。本文關於河床質於河川縱向變異性之探討將依循圖 3.10 流程進行。首先評估可能影響河川系統之地質等事件，以評估偶發事件對河床材料影響，再以 Rosgen 之河川分類系統為基礎進行河相區分以建置縱向調查位置評選系統。系統建置後將以頭前溪為探討對象，進行頭前溪之評選系統建構，並以現有河床質資料進行討論。視成果進行補充調查或系統修正以建立更完善評選方法。

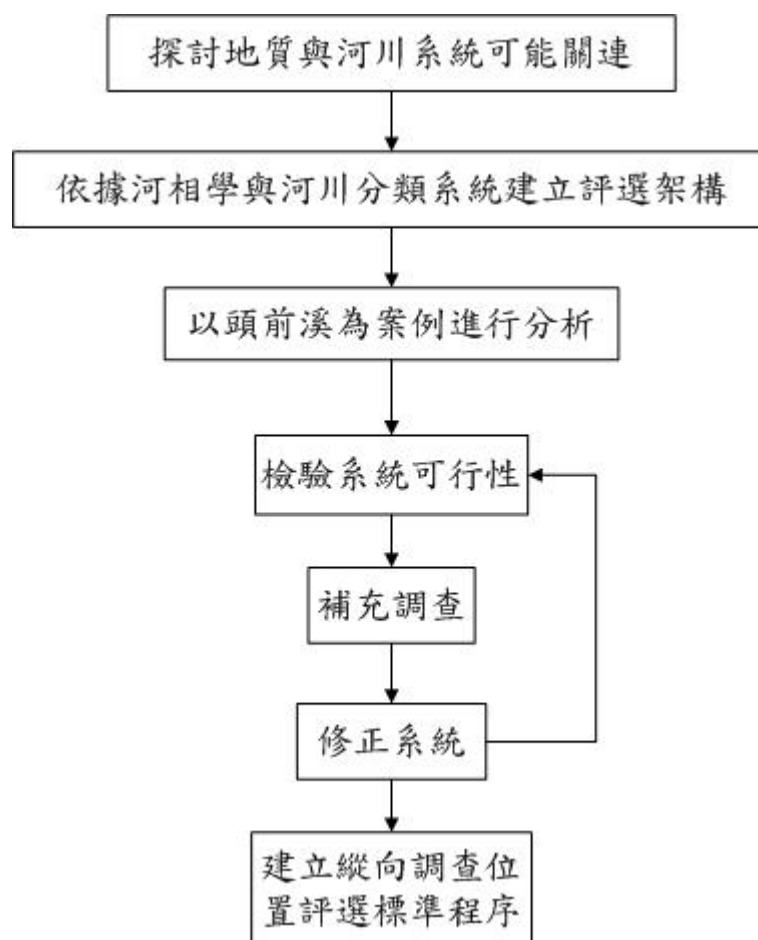


圖 3.10 縱斷面不均質分佈研究流程圖

3.4 取樣時間與頻率研究

礫石河床具有時間變異性，不同時間點取樣會得到不同結果。由礫石河床沈滓傳輸特性可知全面傳輸並非每年產生，靠近堤岸區域床質變化率低於沙洲，沙洲又低於灘地，而主深槽附近處於床質高度運動區域，變化亦經常發生。另執行取樣調查應避免於豐水期進行，以避免調查位置受限於堤岸邊緣影響調查成果代表性。

關於取樣時間與頻率之探討將依循圖 3.11 流程探討。取樣時間將以頭前溪作為案例說明，收集頭前溪流域相關氣象資訊，以月平均降雨量與月平均降雨日數評估降雨強度，此可間接反應洪水規模，當降雨强度高河川水位亦高，較不適合河床質調查工作進行，依此方法評估頭前溪流域適合進行河床質調查工作時段；於調查頻率方面，先討論洪水規模與河床質變動關係，續以頭前溪流域為例計算造成河床質變化之相關流量對應再現期距，以此作為管理值訂定標準。選擇適當河段進行河床質調查，作為比較基準，並依據所建議重新調查頻率進行長期觀測以驗證理論正確性。

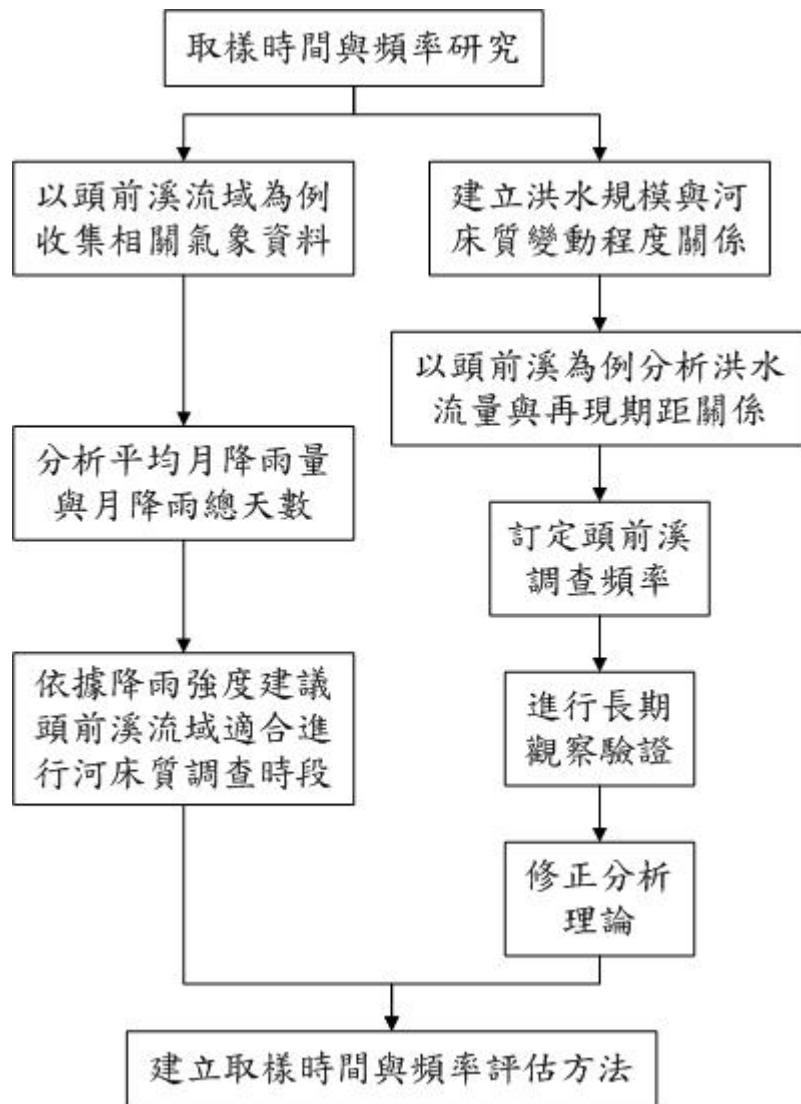


圖 3.11 取樣時間與頻率研究流程圖

3.5 最低調查數量研究

取樣數量的決定，首先可依據河相分段並設定取樣目標，例如若於蜿蜒河川之連接槽進行取樣，則可依據連接槽出現頻率分析調查數量，但若連接槽距離頗長，則於此段需進行幾組調查成為調查數量之第二個課題。關於取樣數量研究將依照圖 3.12 流程進行，先以河相學理論進行基礎數量分析，續以統計學觀點進階分析數量需求。

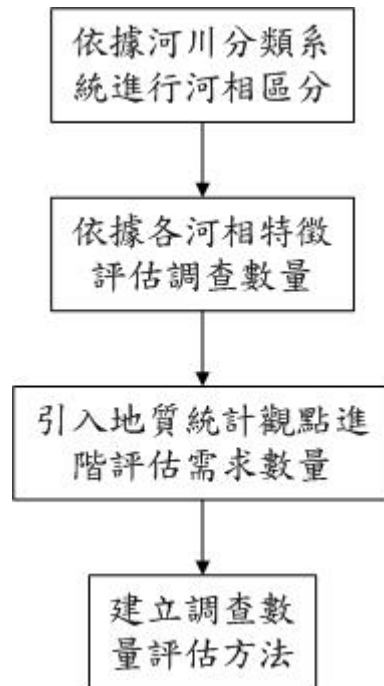


圖 3.12 最低調查數量研究流程圖

3.6 取樣與試驗計畫

3.6.1 取樣與試驗目的



本研究此階段試驗目的有下列幾點：

1. 評估高效率且經濟之網格取樣法可行性。
2. 觀察礫石河床垂直向材料變化造成之影響。
3. 觀察橫向取樣位置不同造成之影響。
4. 觀察因取樣位置造成縱向床質代表粒徑起伏變動之影響。

3.6.2 取樣數量與位置

本研究於頭前溪流域規劃二試驗段（Ⅰ與Ⅱ）進行取樣及試驗工作，每一試驗段進行兩處體積取樣法與三處網格法取樣及試驗。試驗段Ⅰ位於國道二號高速公路與竹林大橋間（圖 3.13）；試驗段Ⅱ位於竹林大橋與頭

前溪本流終點之間（圖 3.14）。茲將二試驗段基本概況與取樣規劃闡述如后：



圖 3.13 試驗段 I 位置圖



圖 3.14 試驗段 II 位置圖

1. 試驗段 I 基本概況

試驗段 I 介於第二高速公路與竹林大橋間辮狀河系統之寬帶上。邊界地層由頭嵙山層、紅土礫石層與現代沖積層共同組成，現代沖積層與紅土礫石均屬易沖蝕材料，頭嵙山層則由砂岩、頁岩與礫岩組成，其中礫岩又由卵石大小之塊狀砂岩組成，砂岩之膠結鬆散。

經實地踏勘發現本河段河床局部頭嵙山層岩盤出露，流路不若航空照片所示豐富。由現地地形起伏判斷應為調查時間之流量較低所致，部分沙洲已有少量植被生長。目測河床材料顆粒由粗砂至約一公尺粒徑之巨礫均存在，散亂河床各處巨礫均獨立形成卵礫石河床特有之微組構（圖 3.15），巨礫後方（上游方向）明顯由較大粒徑之顆粒組成表層材料，其下游方向則由較細顆粒組成表面河床材料。由現地狀態初步判斷床質含砂量頗高，並無明顯粗粒化現象。

本試驗段預計於河道左右側各設置一處試驗坑，並搭配網格法取樣進行比較。此外，於河道中央進行網格法取樣，方便瞭解主流部分與洪泛區域床質差異。



圖 3.15 礫石河床微組構

2.試驗場址Ⅱ基本概況

試驗段Ⅱ位於竹林大橋與匯流口間蜿蜒類河川系統之連接槽段，竹林大橋恰位於河灣段，此區段包含竹林大橋東側之河灣段與連接槽。本試驗段地質條件與第Ⅰ區相同，由頭嵙山層、階地堆積層與現代沖積層共同組成。

經現地勘查此段左側河岸為高差約為 6~7 公尺之河階地，受河川冲刷呈 70~85 度陡坡，可推斷本段河床材料由階地堆基層提供，因此呈現廣泛之礫石洪泛平原，表面無顯著植被生長。連接槽部分水流寬淺，近上游端已出現點洲地形。

本試驗段預計進行二處體積法取樣，均位於河道右岸洪泛平原，一鄰近河道 20 公尺內，一處遠離河道 50~80 公尺，並於同一地點進行網格法取樣。另外於二試驗場址間邊灘進行網格法取樣，以此驗證網格法於涉水區域可行性，且可提供縱橫向取樣結果比對。

四、研究成果與案例分析

本節將就第三章所述研究方法執行之結果進行說明。首先於第一節說明體積法與網格法試驗結果；第二節將體積法與網格法結果進行比較分析，討論網格法適用性；第三節與第四節分別討論取樣位置評估與取樣頻率之研究；第五節以頭前溪流域為例進行分析，最後進行綜合討論。

4.1 取樣與試驗結果

本研究於六處不同位置實施體積取樣或網格取樣，體積取樣四組（試驗位置編號 T1、T2、T4 與 T5），網格取樣六組（試驗位置編號 T1 至 T6）。各試驗位置相關資訊如表 4.1、圖 4.1，與圖 4.2 所示。其中 T1~T3 位於試驗段 I 為辮狀系統（3.6.2 節），T1 與 T2 分列主河道左右兩岸應為沙洲地形，T3 原屬主深槽地形，因治理工程使河川改道因而得以施做；T4~T6 屬試驗段 II 為蜿蜒系統（3.6.2 節），T4 與 T5 均為於主河道右岸，為鄰近河道之洪泛區，T6 為洪泛區與主深槽間之邊灘地形。

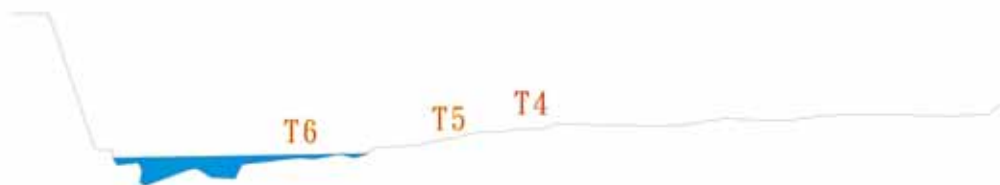
表 4.1 試驗位置基本資料表

試驗段	位置編號	座 標(T67)		體積法	施做日期	網格法	施做日期	備註
		N	E					
I	T1	2738908	257183	V	940602	V	940602	主河道左岸
	T2	2738918	257243	V	940603	V	940603	主河道右岸
	T3	2738891	257227			V	940603	深槽
II	T4	2737370	258856	V	940606	V	940606	主河道右岸
	T5	2737207	258954	V	940607	V	940606	主河道右岸
	T6	2737292	258921			V	940607	邊灘



A-A' 剖面：T1~T3橫向相關位置示意剖面

圖 4.1 T1、T2 與 T3 試驗位置示意圖



A-A' 剖面：T4~T6橫像相關位置示意剖面

圖 4.2 T4、T5 與 T6 試驗位置圖

以下茲對體積法與網格法結果分述如後：

1.體積法

體積法取樣分表、底層進行，現地觀察試驗區有相當含砂量，粗粒化深度不易判斷，故以取樣區表面顆粒約 D_{90} 之 B 軸粒徑為表層深度(約 15cm) 進行取樣。其中 T1 因先依據以往台灣施做習慣進行，故無分表底層樣品。將各試驗所得累計通過百分比結果統整於表 4.2 (試驗照片詳附錄 1)，並繪製粒徑分佈曲線，如圖 4.3 至圖 4.6 所示。

由圖 4.3 至圖 4.6 可知表層樣品曲線均略偏向全部樣品粒徑分佈曲線左側，顆粒組成較總體與底層材料略粗，但具相同趨勢。底層粒徑分佈則與總體樣品分佈相近。表 4.3 為體積篩分析所得各試驗位置之 D_{50} (累積通過百分比 50% 對應之顆粒粒徑) 與 D_{90} (累積通過百分比 90% 對應之顆粒粒徑)，可發現表層樣品所得結果與底層及總體樣品所得結果差異較大，底層所得結果與總體樣品之結果較接近。以 T2 為例，比較表層樣品與底層樣品各篩號停留百分比差異 (圖 4.7)，由圖 4.7 可發現表層與底層顆粒分佈約略一致，表、底層顆粒差異主要發生在礫石以上顆粒範圍，表層粒徑 64mm 以上之顆粒含量較高，底層則以粒徑 12.7mm~45.3mm 範圍之顆粒含量較高，細顆粒差異極小。本次以試驗範圍內表面顆粒 D_{90} 顆粒 B 軸作 (約 15 公分) 為表層範圍，結果顯示表、底層粒徑分佈趨勢相差不大，此可能為表層深度判斷錯誤導致樣品數代表性不足。底層樣品取樣深度達 85 公分，試驗結果顯示底層樣品分析結果接近總體樣品，此即因樣品數量足夠使結果與總體樣品結果較為一致，此進一步說明亦可能存在試驗河床尚未產生粗粒化現象。

表 4.2 體積法取樣與試驗結果表

顆粒 粒徑 (mm)	累積過篩重量百分比 (%)									
	T1	T2			T4			T5		
	全部	表層	底層	全部	表層	底層	全部	表層	底層	全部
256	96.40	91.89	95.04	94.13	100	91.57	94.12	77.55	78.51	78.16
181	85.91	75.11	82.71	80.52	70.2	85.18	80.64	65.81	76.76	72.82
128	80.09	67.45	76.41	73.83	60.5	74.13	69.99	56.33	67.31	63.36
90.5	69.44	55.00	69.33	65.20	52.9	64.69	61.14	42.34	60.81	54.16
76.2	64.26	49.00	65.68	60.87	49.5	57.93	55.37	37.73	55.33	48.99
64	58.16	41.67	61.40	55.71	43.1	50.35	48.16	33.03	49.59	43.63
45.3	47.34	36.20	52.73	47.97	38.1	46.36	43.88	27.75	43.15	37.61
38.1	41.53	33.32	48.23	43.93	34.8	42.16	39.95	25.11	40.19	34.76
19	28.31	24.80	33.77	31.18	25.7	28.49	27.64	18.66	32.43	27.47
12.7	23.58	21.36	26.72	25.17	21.8	22.28	22.15	15.87	25.44	22.00
9.5	22.75	20.13	25.19	23.73	20.7	21.10	20.97	15.39	24.68	21.34
4.75	19.47	14.30	17.89	16.85	16.0	16.35	16.25	12.52	20.07	17.35
2	19.47	10.22	12.78	12.04	12.3	12.57	12.49	9.57	15.34	13.26
0.841	12.10	7.54	9.43	8.89	8.9	9.06	9.01	7.09	11.37	9.83
0.42	6.10	5.11	6.40	6.03	5.3	5.43	5.40	4.67	7.49	6.48
0.25	3.60	3.61	4.51	4.25	3.3	3.32	3.30	2.94	4.71	4.07
0.149	1.34	2.18	2.72	2.56	1.7	1.71	1.70	1.44	2.30	1.99
0.074	0.68	1.13	1.41	1.33	0.8	0.78	0.78	0.57	0.92	0.79
底盤	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 4.3 T1、T2、T4 與 T5 體積篩分析所得 D_{50} 與 D_{90}

代表粒徑	D_{50} (mm)				D_{90} (mm)			
試驗編號	T1	T2	T4	T5	T1	T2	T4	T5
表層		80	77	103		210	210	201
底層		42	62	66		204	210	110
全部樣品	50	49	66	79	205	205	210	170

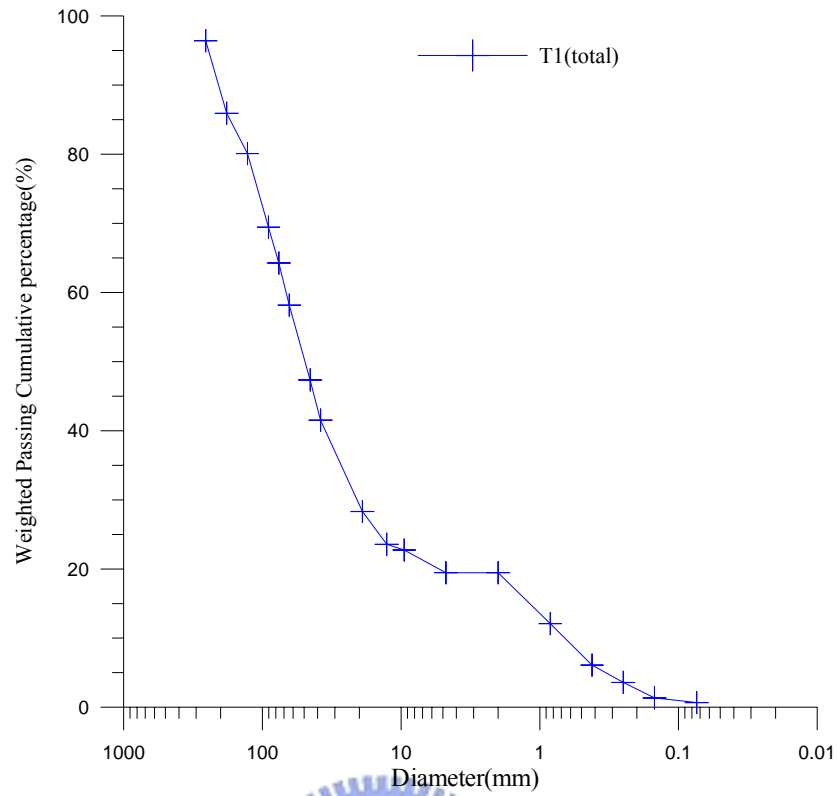


圖 4.3 T1 體積法粒徑分佈曲線圖

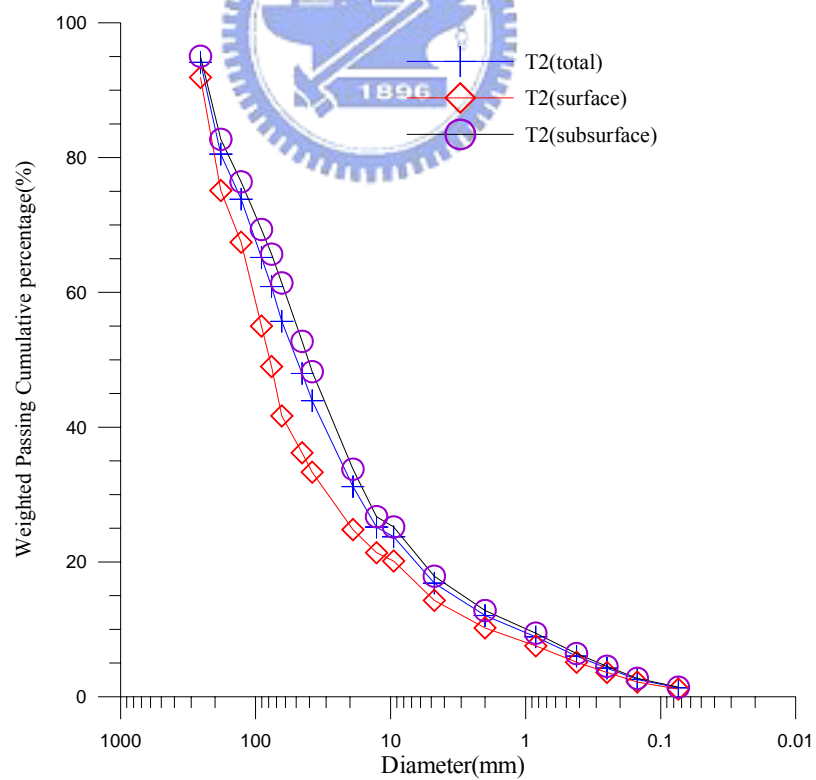


圖 4.4 T2 體積法粒徑分佈曲線圖

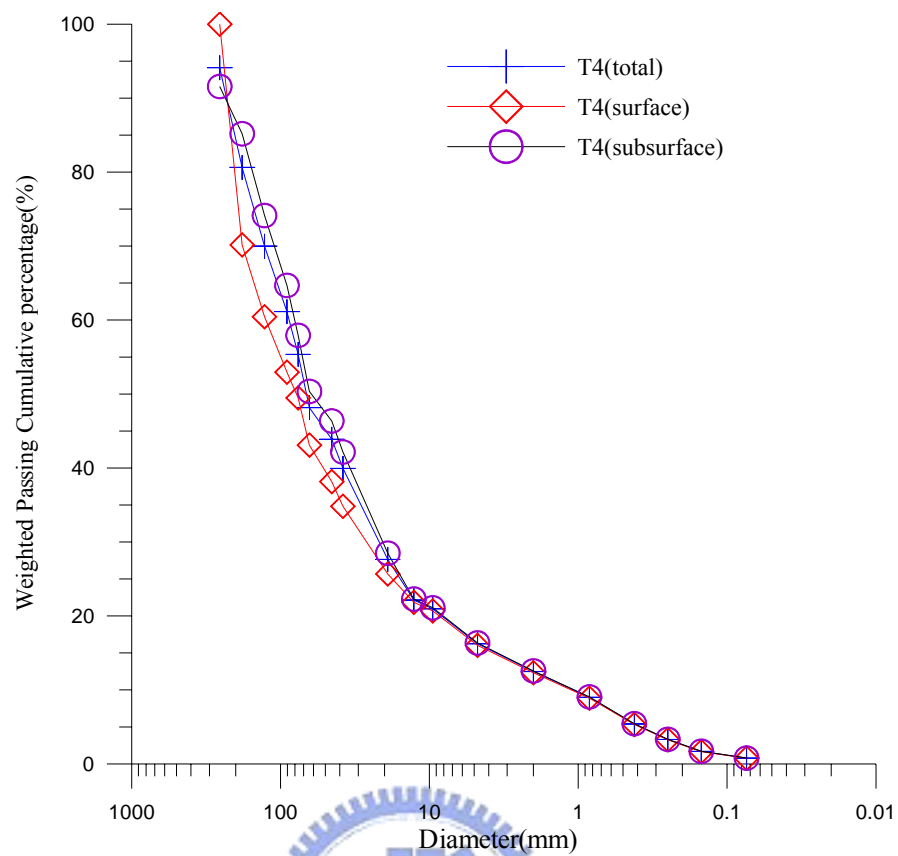


圖 4.5 T4 體積法粒徑分佈曲線圖

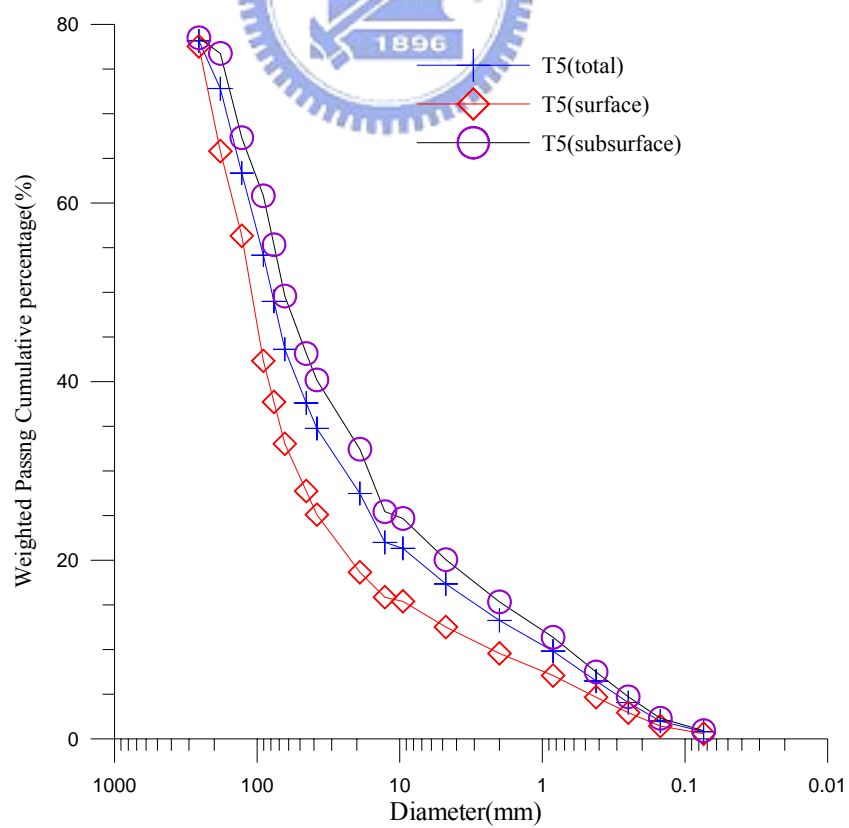


圖 4.6 T5 體積法粒徑分佈曲線圖

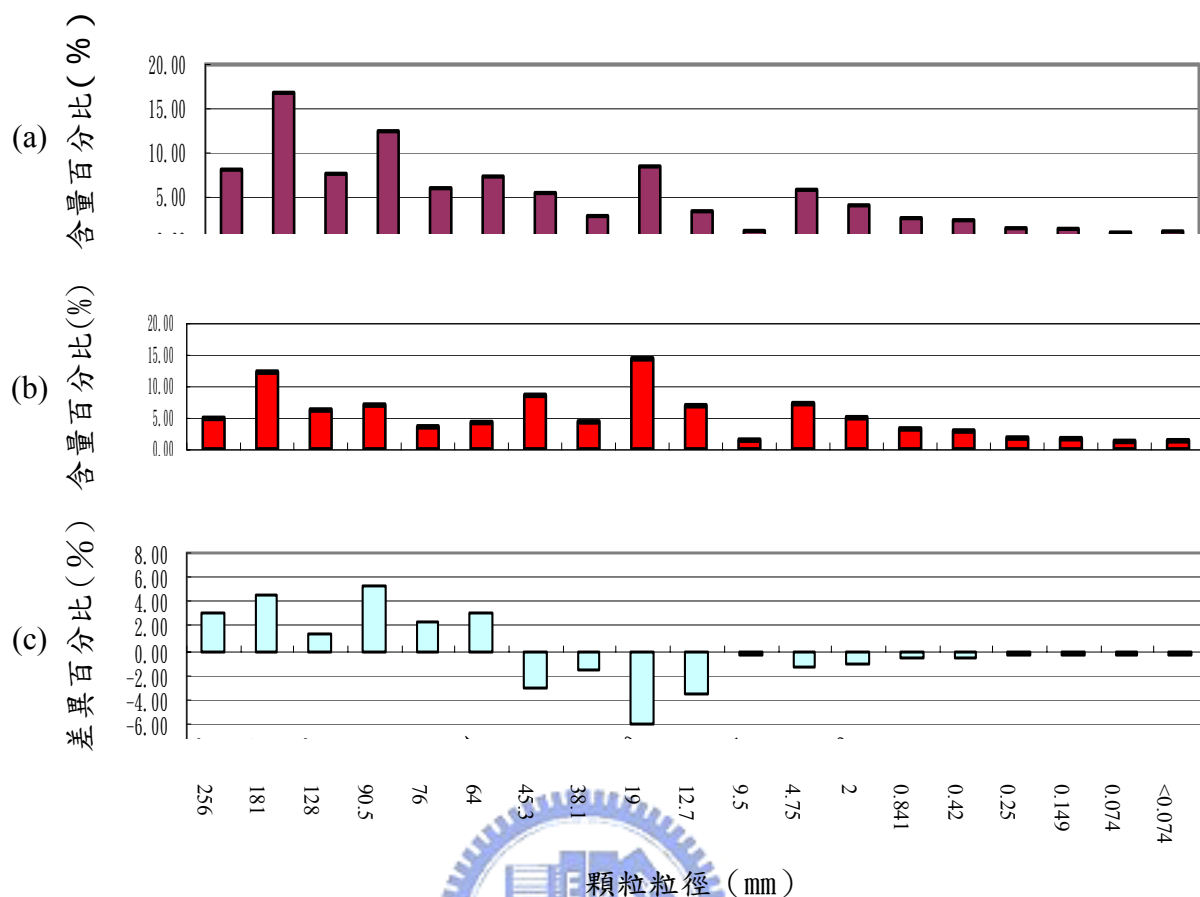


圖 4.7 T2 表層與底層粒徑差異圖

2. 網格法

本研究進行網格法取樣區域有六處，各處取樣範圍與數量彙整於表 4.4。其中 T3 與 T6 位於水面流經處因此僅以 Wolman 建議之樣品選取標準進行取樣。

網格法均以出現次數頻率為基礎，取樣與分析結果如表 4.5 所示，並將表 4.4 結果繪製粒徑分佈曲線如圖 4.8 至圖 4.13 所示。

由圖 4.8、圖 4.9、圖 4.11 與圖 4.12 可知 T1 無論使用 Wolman 或是 Leopold 建議之樣品選取標準，所得試驗結果重複性良好，T2 與 T4 則於粒徑 10mm 左右以下產生明顯差異。表 4.6 為網格法所得各試驗位置之 D_{50} （累積通過百分比 50% 對應之顆粒粒徑）與 D_{90} （累積通過百分

比 90% 對應之顆粒粒徑)，顯示二方法評估之 D_{50} 與 D_{90} 均相當接近。

由圖 4.9 與圖 4.11 進一步發現由於選取樣品標準不同（Wolman：8mm 以下不收集；Leopold：2mm 以下不收集）造成 T2 與 T4 之結果於 D_{30} （顆粒累積通過百分比 30% 對應之顆粒粒徑）以下產生差異。

雖然部分試驗結果顯示二取樣標準間可能存在誤差，但於 D_{30} 以上重複性良好。一般水利工程常使用粒徑參數均為較大尺寸顆粒（例如： D_{50} 、 D_{85} 或 D_{90} ），因此此差異並不影響使用性。

表 4.4 網格法取樣範圍與數量說明表

場址 編號	試驗範圍長(m)	試驗範圍寬(m)	面 積(m^2)	取樣數量(個)
T1	10	8	80	88 (W)、77 (L)
T2	11	8	88	90 (W)、83 (L)
T3	13	5	65	76
T4	13	7	91	94 (W)、93 (L)
T5	13	7	91	89 (W)、86 (L)
T6	12	7	84	84

表 4.5 網格法取樣與試驗結果表

顆粒 粒徑 (mm)	累積通過次數百分比 (%)									
	T1		T2		T3	T4		T5		T6
	W	L	W	L	W	W	L	W	L	W
256	97.67	97.40	95.56	95.18	89.47	92.55	92.47	89.89	89.53	89.29
181	94.19	93.51	86.67	85.54	84.21	78.72	78.49	80.90	80.23	83.33
128	89.53	88.31	81.11	79.52	71.05	59.57	59.14	73.03	72.09	73.81
90.5	70.93	67.53	73.33	71.08	52.63	45.74	45.16	58.43	56.98	57.14
76.2	66.28	62.34	67.78	65.06	46.05	39.36	38.71	51.69	50.00	51.19
64	58.14	53.25	64.44	61.45	42.11	38.30	37.63	46.07	44.19	46.43
45.3	48.84	42.86	55.56	51.81	25.00	35.11	34.41	38.20	36.05	35.71
38.1	39.53	32.47	48.89	44.58	15.79	32.98	32.26	29.21	27.91	22.62
19	9.30	12.99	23.33	30.12	3.95	23.40	25.81	7.87	9.30	2.38
12.7	5.81	9.09	10.00	18.07	1.32	14.89	21.51	4.49	5.81	0.00
9.5	0.00	2.60	0.00	13.25	0.00	0.00	12.90	0.00	2.33	
4.75		0.00		3.61			7.53		0.00	
2				0.00			0.00			
W：代表以 Wolman 標準進行取樣，L：代表以 Leopold 標準進行取樣										

表 4.6 T1 至 T6 網格法取樣調查所得之 D_{50} 與 D_{90}

代表粒徑	D_{50} (mm)						D_{90} (mm)					
試驗編號	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Wolman 法	48	39.5	81	100	71	70.5	110	102	280	220	240	270
Leopold 法	59	41		100	72		115	103		220	240	

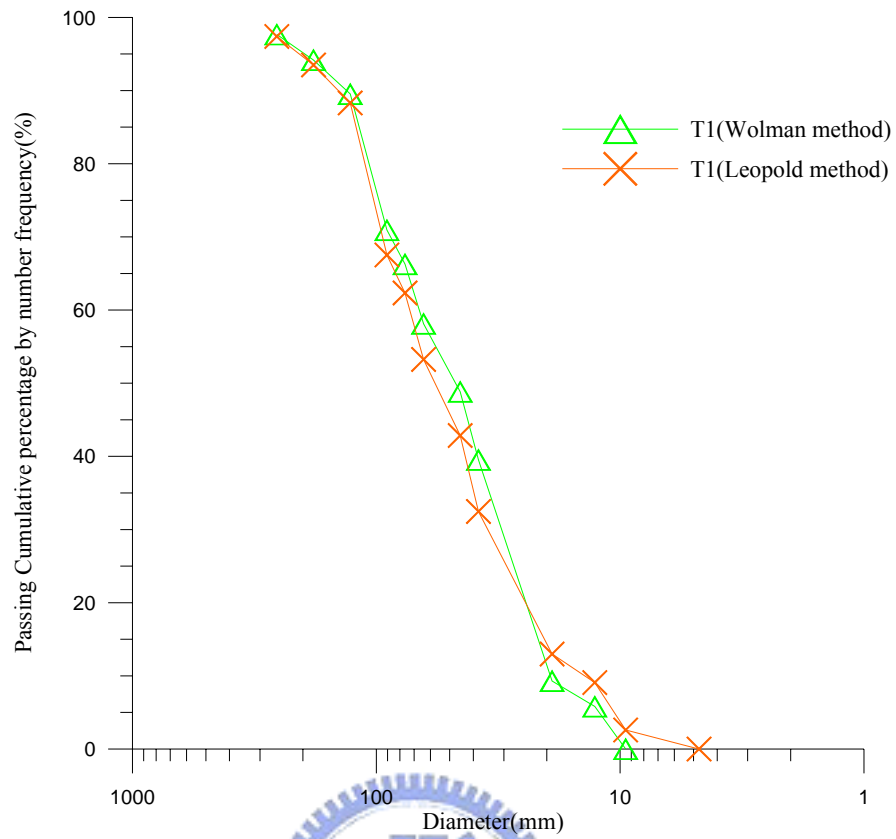


圖 4.8 T1 網格法取樣與試驗結果

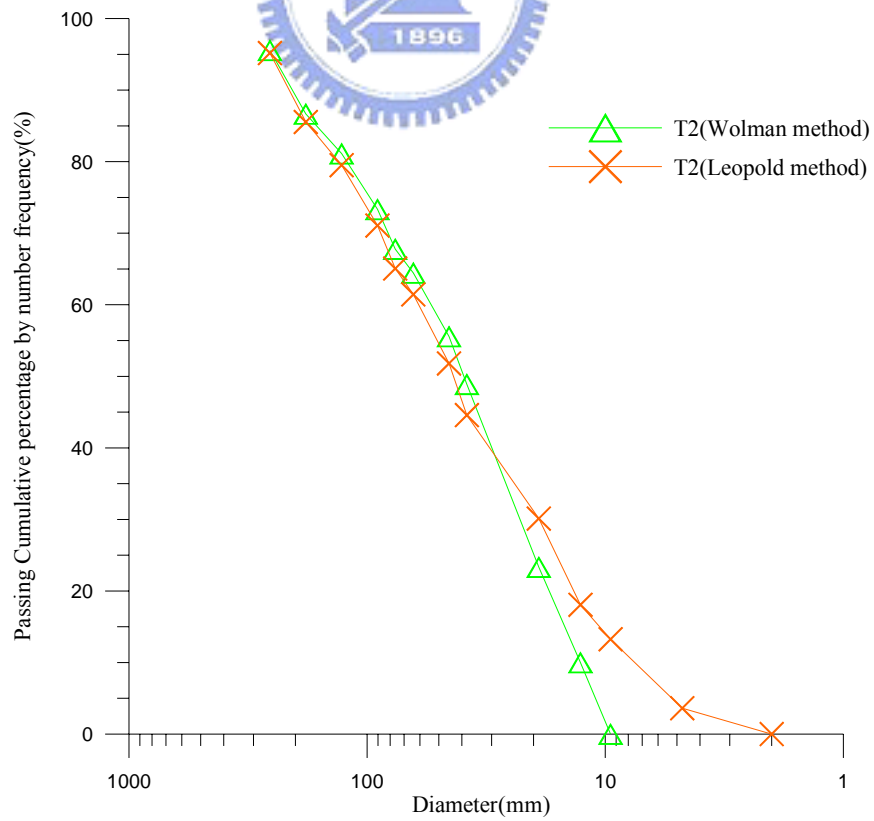


圖 4.9 T2 網格法取樣與試驗結果

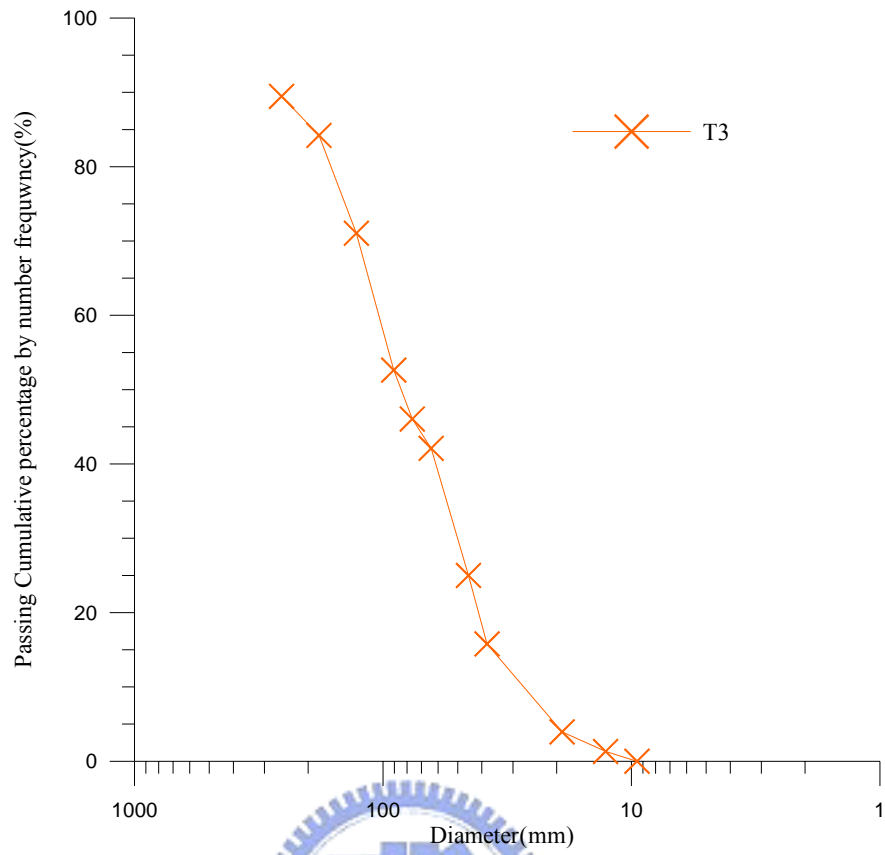


圖 4.10 T3 網格法取樣與試驗結果

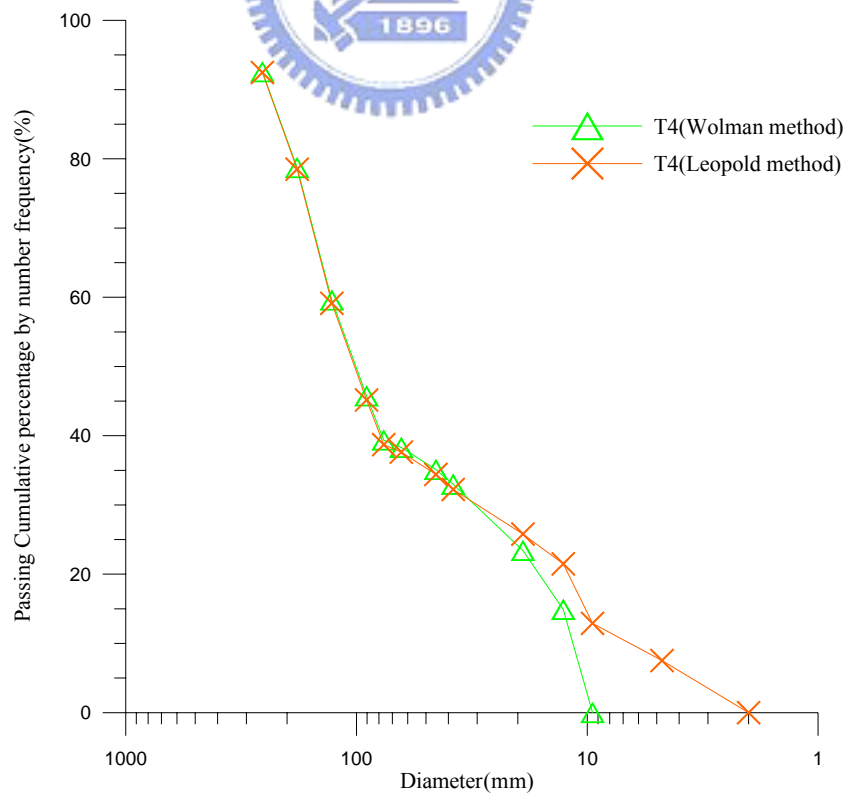


圖 4.11 T4 網格法取樣與試驗結果

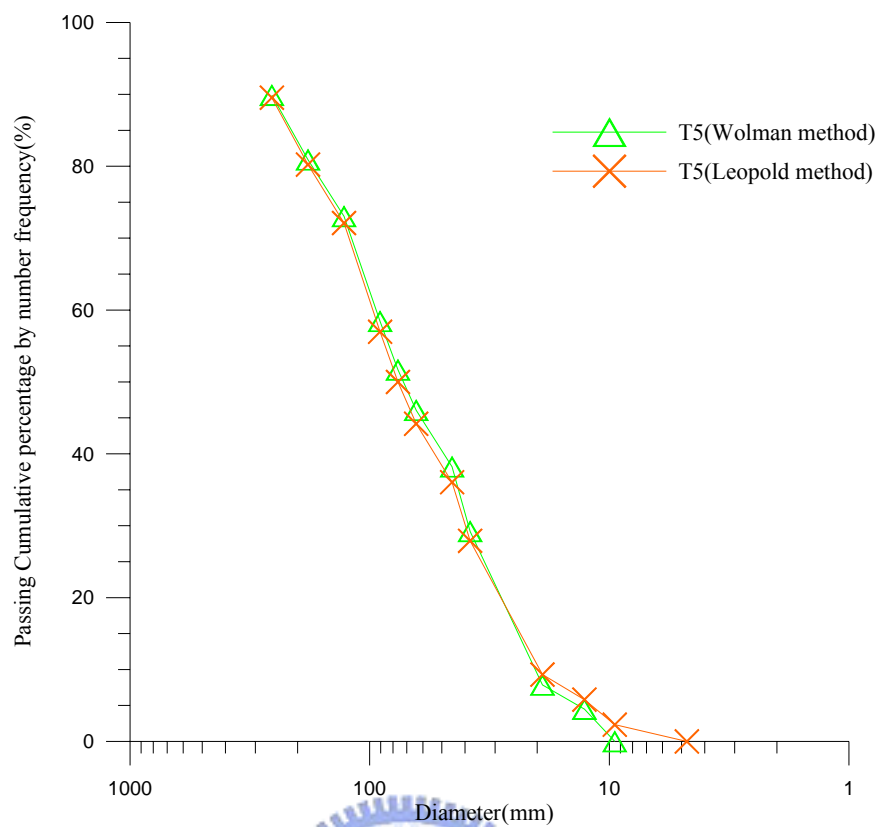


圖 4.12 T5 網格法取樣與試驗結果

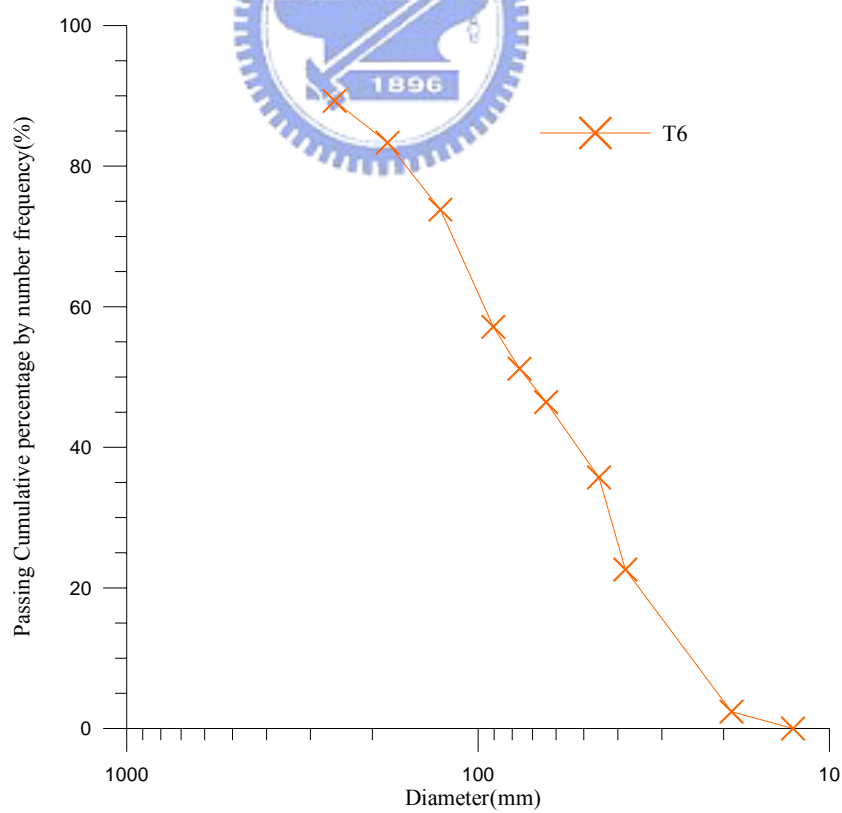


圖 4.13 T6 網格法取樣與試驗結果

4.2 取樣方法評估

4.2.1 網格法適用性

表層樣品取樣可以體積法與網格法進行，但為探討網格法適用性，因此需將二者結果進行比對。由於本研究試驗場址經由體積法表底層比對發現可能因表層範圍判定錯誤，或是試驗位置尚未發生表層粗粒化現象，使表層樣品雖略粗於底層樣品，但含砂量相差不大。因此以體積法表層樣品及全樣品結果與網格法進行比較。

本研究計有 T1、T2、T4 與 T5 等四處同時施做體積取樣與網格取樣，茲將此四處體積法與網格法所得結果繪製粒徑分佈曲線如圖 4.14 至圖 4.17 所示。由 4.2 節所述可知網格法以 Wolman 或是 Leopold 取樣標準進行取樣結果差異性不明顯，故圖 4.14 至圖 4.17 為避免過於複雜因此僅以 Wolman 法結果進行與體積樣品之比較。並將網格法與體積法（表層樣品），以及體積法（全部樣品）之 D_{50} 整理於表 4.7，可發現 T1 網格法與體積法（表層樣品）所得結果相差甚大，T1、T2 與 T5 之結果較接近，其中 T1 網格法所得結果（48mm）與體積法全部樣品所得結果（50mm）僅差 2mm，為最好之成果。

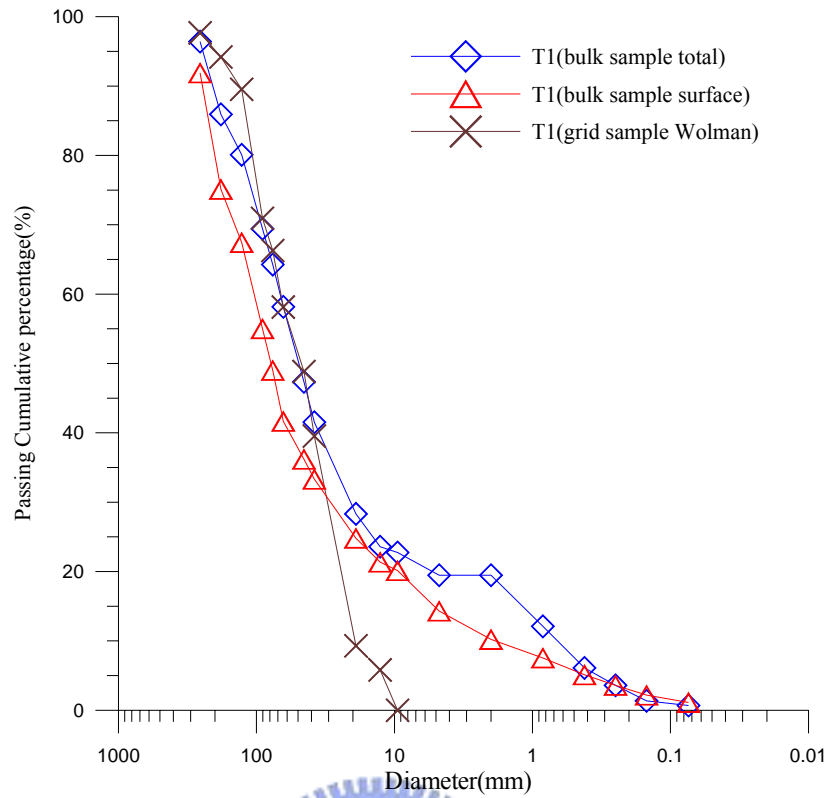


圖 4.14 T1 體積法與網格法結果比較圖

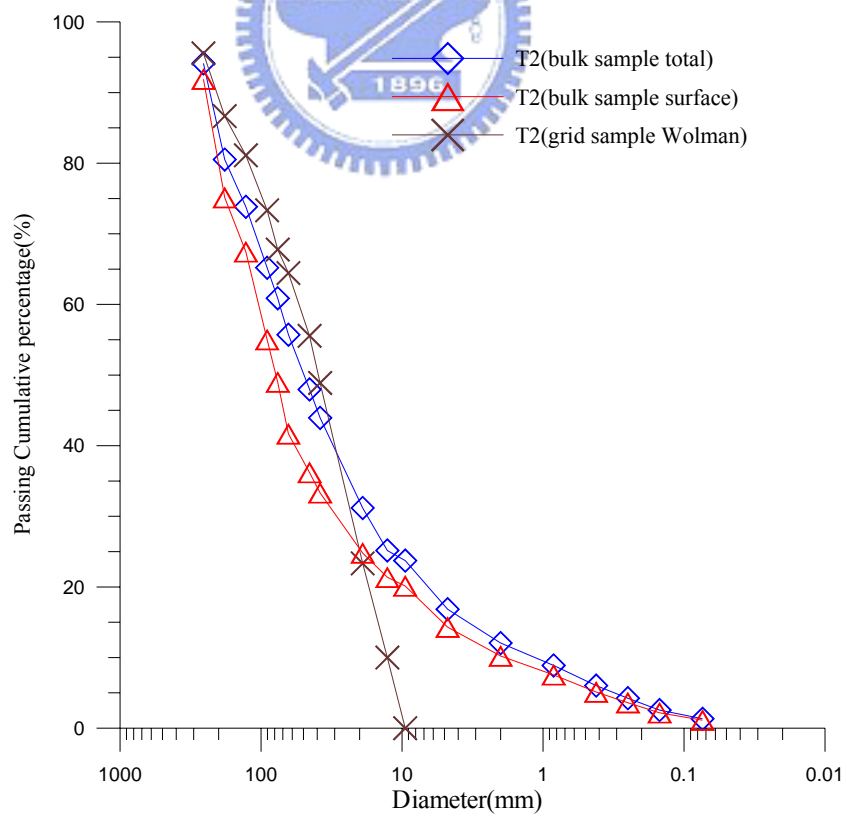


圖 4.15 T2 體積法與網格法結果比較圖

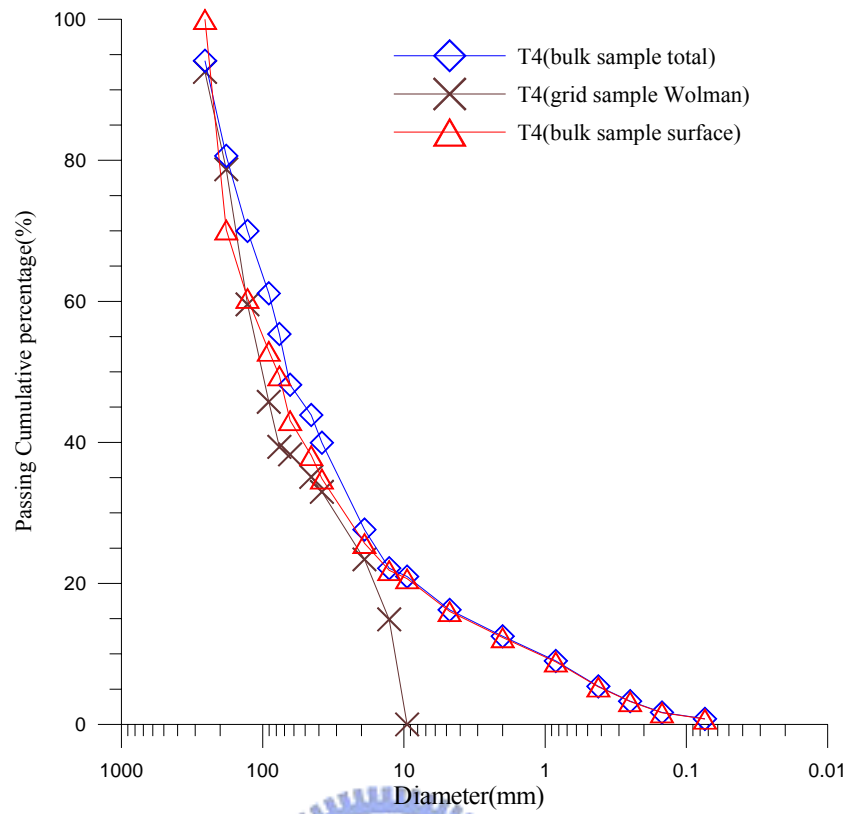


圖 4.16 T4 體積法與網格法結果比較圖

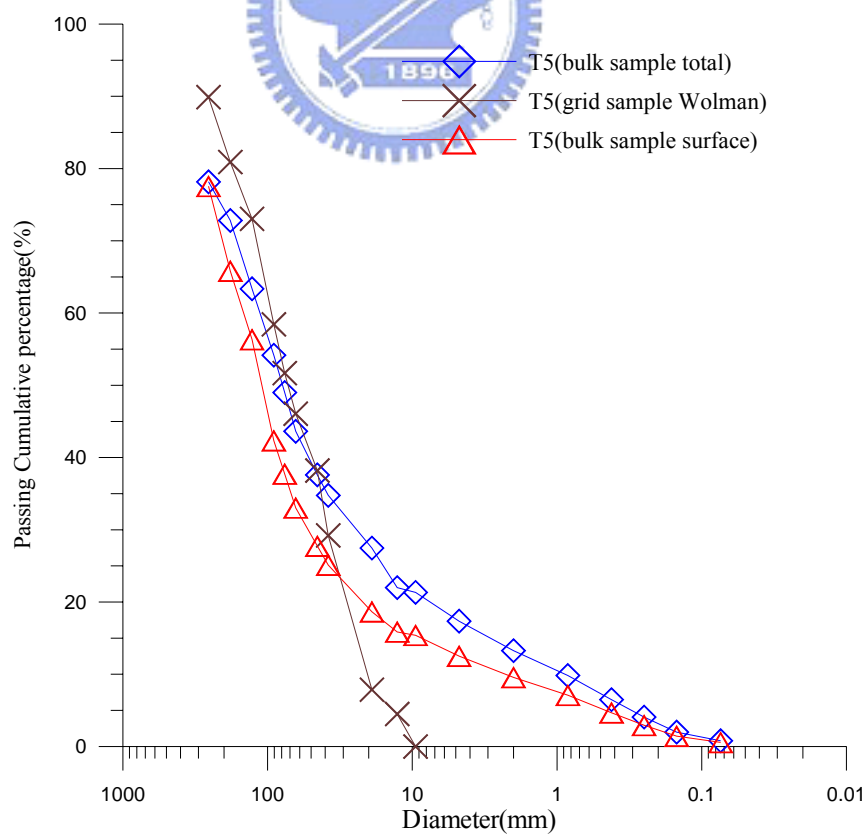


圖 4.17 T5 體積法與網格法結果比較圖

表 4.7 T1、T2、T4 與 T5 網格法與體積法所得 D_{50} 比較

代表粒徑	$D_{50}(\text{mm})$			
試驗編號	T1	T2	T4	T5
網格法	48	39.5	100	71
體積法（表層）		80	77	103
體積法（全部樣品）	50	49	66	79

由圖 4.14 至圖 4.17 可知網格法所得分佈曲線於粒徑大於 10mm 以上與體積法較接近，10mm 以下則相差較明顯，此現象應為網格法忽略細顆粒部分所產生。另可發現 T1 二方法結果最接近，T2、T4 與 T5 則差異較大，試驗所得結果不若國外經驗理想，檢討可能原因是頭前溪礫石河床顆粒分佈較國外試驗河床廣，國外試驗最大顆粒約在 100mm 左右，頭前溪 100mm 以上顆粒含量以本次試驗為例，T1、T2、T4 與 T5 分別為 27%、32%、37% 及 42.5%，並可發現當 100mm 以上顆粒含量越低，粒徑分佈曲線趨勢越吻合。

鑑於頭前溪河床質之特性及網格法本就忽略細顆粒成分，傳統網格法結果與體積法結果勢必存在差異。且僅收集網格下方樣品，不同粒徑樣品於平面上分佈亦存在某一特定機率，也可能造成結果差異，因此本文提出以下網格法試驗修正方法。

為修正忽略細料含量影響，本研究嘗試以表面測線評估細料含量百分比，進而作為粒徑分佈曲線之用，另將測線下方所有粗顆粒均收集進行粒徑分級，推估各級顆粒出現機率，亦作為粒徑分佈曲線分級之用（圖 4.18）。如圖 4.18 上方剖面所示，於現地拉設一測線（L 公尺，約為河床最大顆粒 A 軸 6 倍以上距離），依序記錄細顆粒（ $<9.5\text{mm}$ ）與粗顆粒

($>9.5\text{mm}$) 所佔長度 (L_n)；並如圖 4.18 下方圖所示，將粗顆粒部分以開口樣版決定分級，紀錄各分級之顆粒數量 (N_i)。

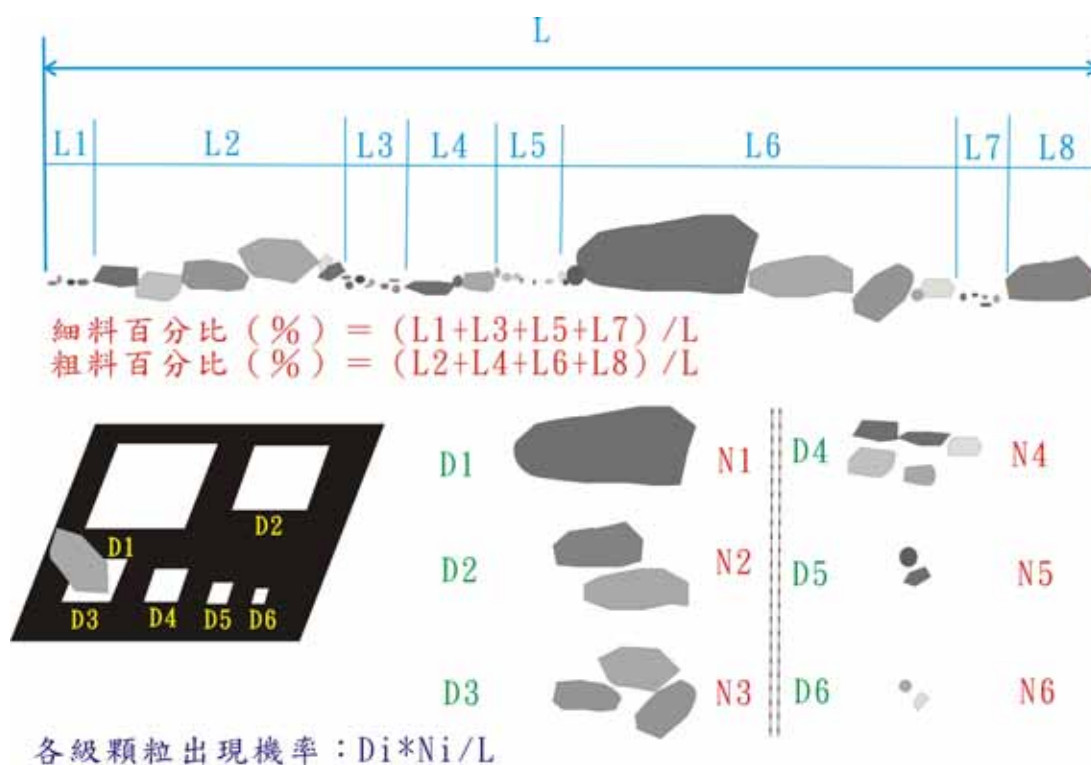


圖 4.18 現地修正係數量測示意圖

本次修正試驗於試驗場址 T1、T2 與 T3 各進行 6m、9m 與 8.5m 長測線量測，T5 施做二 8m 測線，目的為討論測線數量對結果之影響，另 T4 因整治工程施工破壞無法施做，T6 位於邊灘受水影響無法通視故無施做修正試驗，量測結果如表 4.8 與表 4.9 所示。由表 4.8 得知 T1、T2 與 T5 3/8" (9.5mm) 以下顆粒所佔長度分別為 0.96m、2.07m 以及 3.55m，分別佔該試驗測線長度 16%、23% 與 22.19%，以此模擬 T1、T2 與 T5 試驗位置之細顆粒含量。

由體積篩分析結果獲得細顆粒含量分別為 22.7%、23.7% 以及 21.3%。除 T1 差異較大外，其餘部分建立之比例尚接近體積篩分析結果。檢討造成 T1 差異甚大之原因可能為誤判最大顆粒導致測線長度過短，

或是以最大顆粒之 A 軸長度之 6 倍作為測線長度仍不符調查需求。但由 T2 結果顯示 6 倍最大顆粒 A 軸長度之測線足以提供良好細顆粒含量推估，另由 T5 結果顯示，單一測線成果誤差較大，但合併兩測線後推估之細顆粒含量接近體積法試驗結果。綜合上述，推測適當測線長度應介於 6 至 12 倍河床最大顆粒 A 軸長度。

表 4.8 細料含量修正（方法 1）現地調查成果表

試 驗 位 置	T1	T2	T3	T5	
				(1)	(2)
試驗總長(m)	6	9	8.5	8	8
3/8" 以下(m)	0.96	2.07	0.17	2.23	1.32
3/8" 以上(m)	5.04	6.93	8.33	5.77	6.68
細顆粒含量 (%)	16.00	23.00	2.00	27.88	16.50
粗顆粒含量 (%)	84.00	77.00	98.00	72.13	83.50

表 4.9 各級顆粒出現機率修正（方法 2）現地調查成果表

對應網格尺寸 (mm)	T1	T2	T3	T5	
				(1)	(2)
256	3	3		1	2
181	3	4	3	3	4
128	6	5	6	2	5
90.5	10	9	14	10	7
76.2	1	5	10	5	8
64	1	4	12	8	3
45.3	9	14	24	12	16
38.1	3	12	10	8	9
19	13	54	35	19	35
12.7	9	25	14	15	7
9.5	1			5	
樣品總數	59	135	128	88	96

依據前述調查結果，嘗試下列二方法修正粒徑分佈曲線：

1.考慮細料含量：

由於網格法忽略細顆粒含量，此勢必造成粒徑分佈曲線偏頗，故藉由公式 4.1 修正初始調查之各級顆粒出現次數，並依據修正後出現次數重新繪製粒徑分佈曲線。

$$N_m = N_o / (1 - P/100) \quad (4.1)$$

其中 N_m = 修正後各顆粒分級數量

N_o = 原始取樣所得各顆粒分級數量

P = 表面測線推估之細顆粒含量百分比

2.考慮各級顆粒被取樣機率：

不同於第 1 點，此方法不僅記錄粗細顆粒比例，且以開口樣版記錄測線下所有粗顆粒分級，以便推求各級顆粒出現機率。各級顆粒出現機率依據公式 4.2 計算。

$$P_f = D_i * N_i / L / 100 \quad (4.2)$$

其中 P_f = 各級顆粒出現機率

D_i = 開口樣版開口尺寸 (mm)

N_i = 修正試驗記錄之各級顆粒出現次數

L = 測線長度 (m)

將原始試驗記錄各分級顆粒出現次數 N_o 乘以 P_f 得到新的出現次數 N_f ，再依據 N_f 重新計算累積通過百分比得到新的粒徑分佈曲線。

茲將 T1、T2 與 T5 之體積篩分析、網格法(Wolman)以及前述二修正方法所得結果整理繪圖如圖 4.19 至圖 4.21 所示。並將修正後之 D50

與修正前之 D50 及體積法（全部樣品）之 D_{50} 進行比較（表 4.10），可知 T1 未修正前結果最佳，經修正造成結果偏離體積法結果。T2 與 T5 之修正結果顯示方法 1 修正效果不佳，方法 2 可得到較理想成果。

由圖 4.19 可知，T1 原網格法所得結果與體積法相似。經修正後，無論是方法 1 或 2 均導致結果偏離。

由圖 4.20 與圖 4.21 顯示修正方法 2 可獲得接近網格法結果，且較網格法略為貼近體積法曲線，但影響效果不明顯。

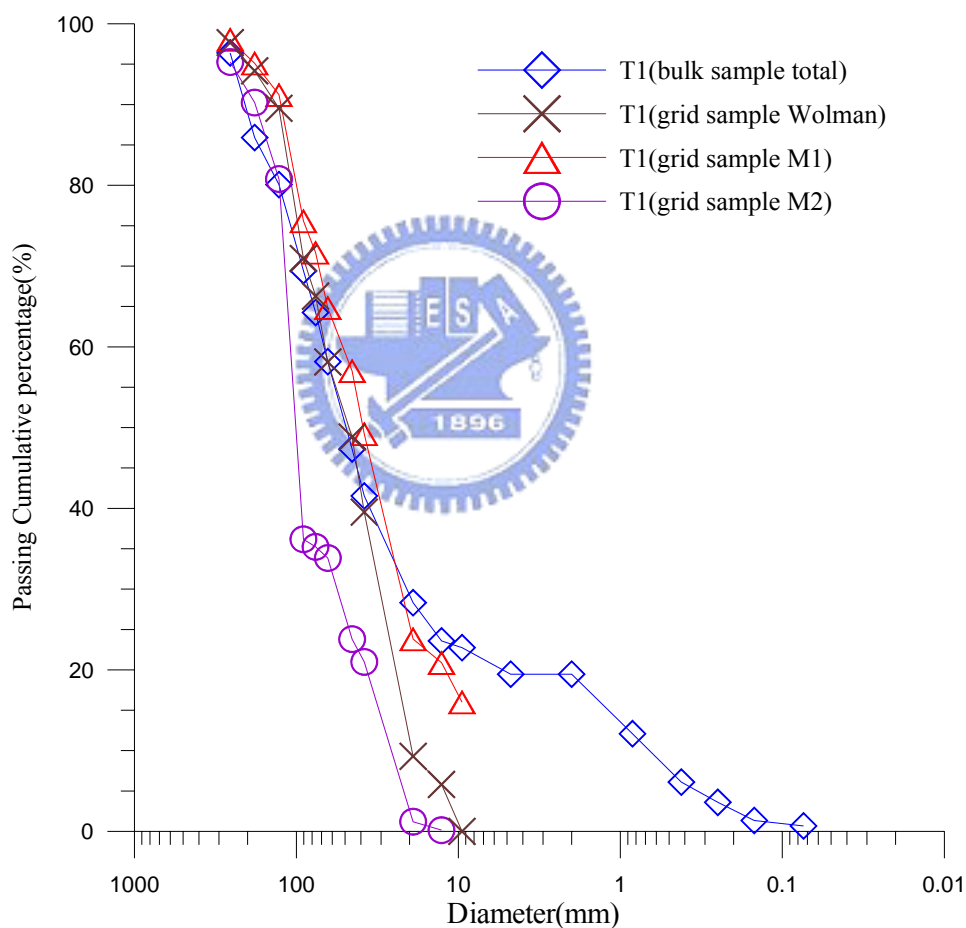


圖 4.19 T1 體積法、網格法與網格法修正結果比較圖

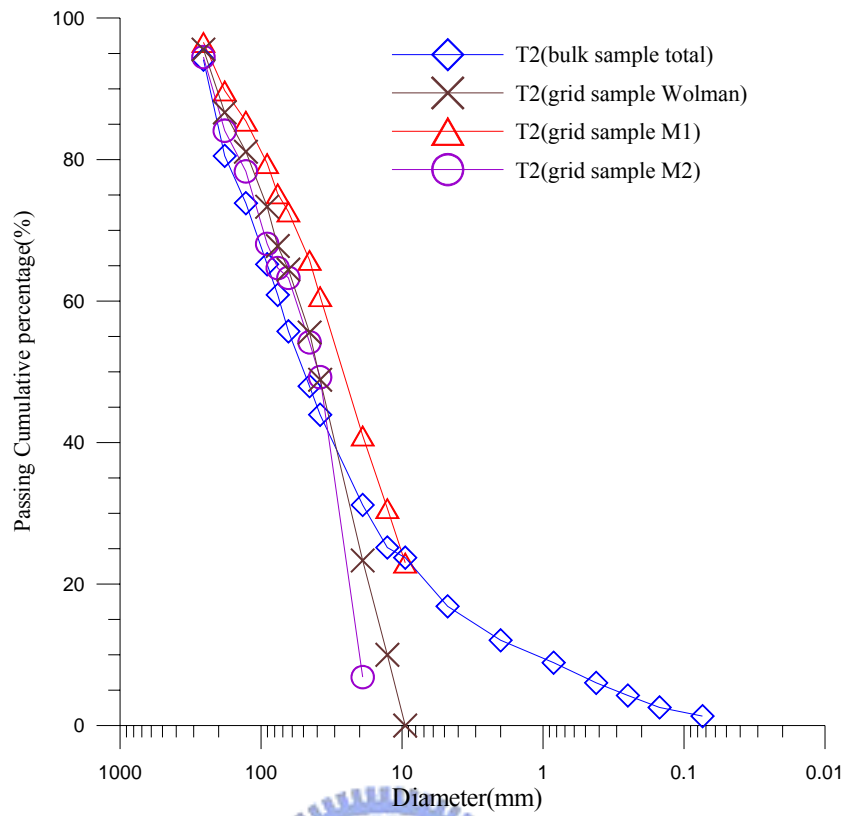


圖 4.20 T2 體積法、網格法與網格法修正結果比較圖

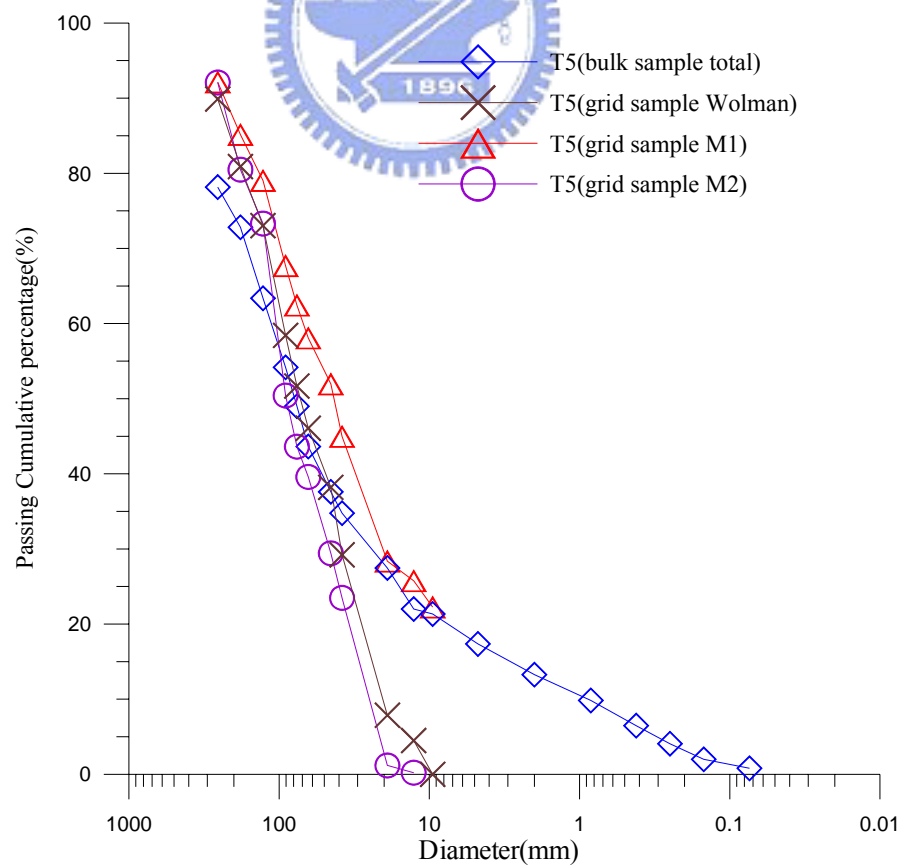


圖 4.21 T5 體積法、網格法與網格法修正結果比較圖

表 4.10 修正後網格法 D_{50} 與原始網格法及體積法（全部樣品） D_{50} 比較

代表粒徑	$D_{50}(\text{mm})$		
試驗編號	T1	T2	T5
網格法	48	39.5	71
網格法（修正方法 1）	39	25	85
網格法（修正方法 2）	100	41	40.5
體積法（全部樣品）	50	49	79

由超過 100mm 顆粒含量分析，僅 T1 含量低於 30% 且網格法所得結果與體積法相似，經修正後反導致曲線偏離體積法曲線；T2、T4 與 T5 超過 100mm 顆粒含量均超過 30%，三組試驗均顯示網格法結果與體積法有程度不同差異，但由 T2 與 T5 結果顯示以顆粒出現機率修正後得到略理想成果。

綜合上述，初步判斷當 100mm 以上顆粒含量超過 30% 會導致網格法存在誤差，經由顆粒出現機率修正後得到改善但成果不顯著。

Morris and Fan(1998)認為巨大顆粒出現於河床上屬於偶發事件，分析時應去除此部分影響。Church et. al(1987)以及 Mosley and Tindale (1985)均提出國外操作河床質調查時通常將巨礫（粒徑>256mm）範圍顆粒剔除，此乃考量巨礫因顆粒重量大不易受水流作用影響因而不予考慮。故本文嘗試評估此概念對本次試驗結果產生之變化，茲將 T1、T2、T4 與 T5 截除巨大顆粒（體積法與網格法均進行截除）後之粒徑分佈曲線展繪於圖 4.22 至圖 4.25。由圖 4.22 至圖 4.25 將截除巨礫後之 D_{50} 與未截除前 D_{50} 整理於表 4.11。由表 4.11 可發現未截除前 D_{50} 誤差較小之 T1、T2 與 T5 試驗經截除後 D_{50} 更為接近，但除 T5 外，T1 與 T2 之 D_{50}

均有明顯變大現象。T4 由於未截除前數據已偏差甚大，造成截除巨礫後無良好改善成果。

由體積樣品結果得知 T1、T2、T4 與 T5 之巨礫含量分別為 3.60%、5.87%、5.88%以及 21.84%，另由網格法樣品可知巨礫含量分別為 2.33%、4.44%、7.45%以及 10.11%，可知 T1、T2 與 T4 巨礫含量較低，T5 巨礫含量相當高。由截除前後 D_{50} 之變化與各試驗位置巨礫含量關係推論，截除巨礫尺寸顆粒有助於縮減兩種取樣方法間 D_{50} 之差距增加比較性，T5 樣品巨礫含量高不符合巨礫出現機率低之前提，但由結果顯示截除巨礫可使 D_{50} 更區集中，仍有正面效益。截除巨礫之效果以本研究四組數據初判有助於河床質 D_{50} 評估，但因其中 T4 數據偏頗較大，是否為試驗誤差仍須進一步探討，且僅以三組數據證實此結果實屬空泛，仍須收集更多數據加強驗證。

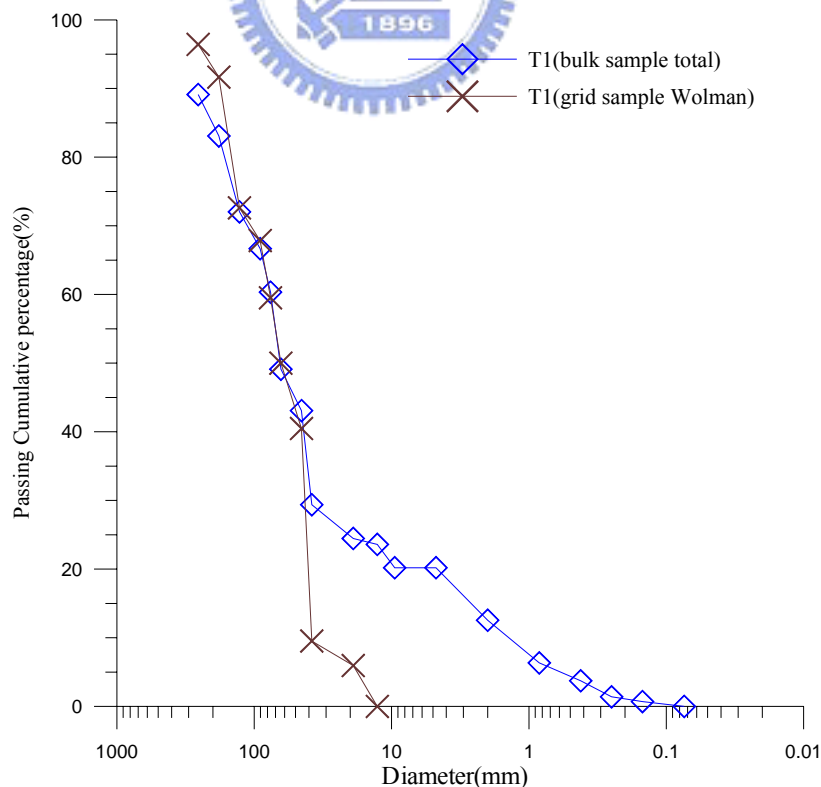


圖 4.22 T1 截除粒徑大於 256mm 顆粒後粒徑分佈曲線圖

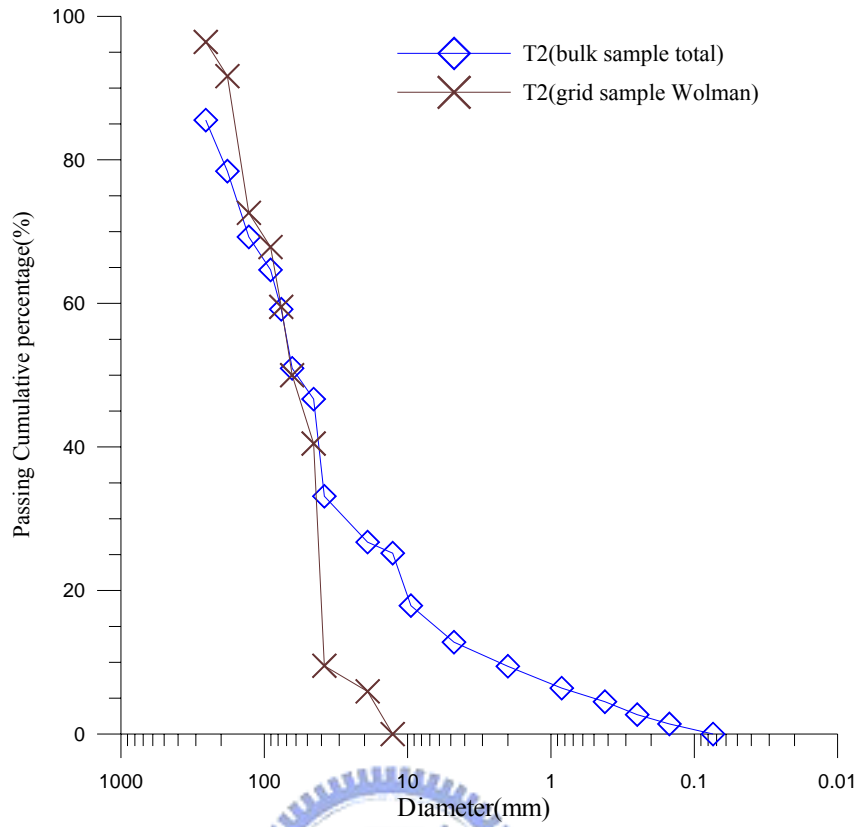


圖 4.23 T2 截除粒徑大於 256mm 顆粒後粒徑分佈曲線圖

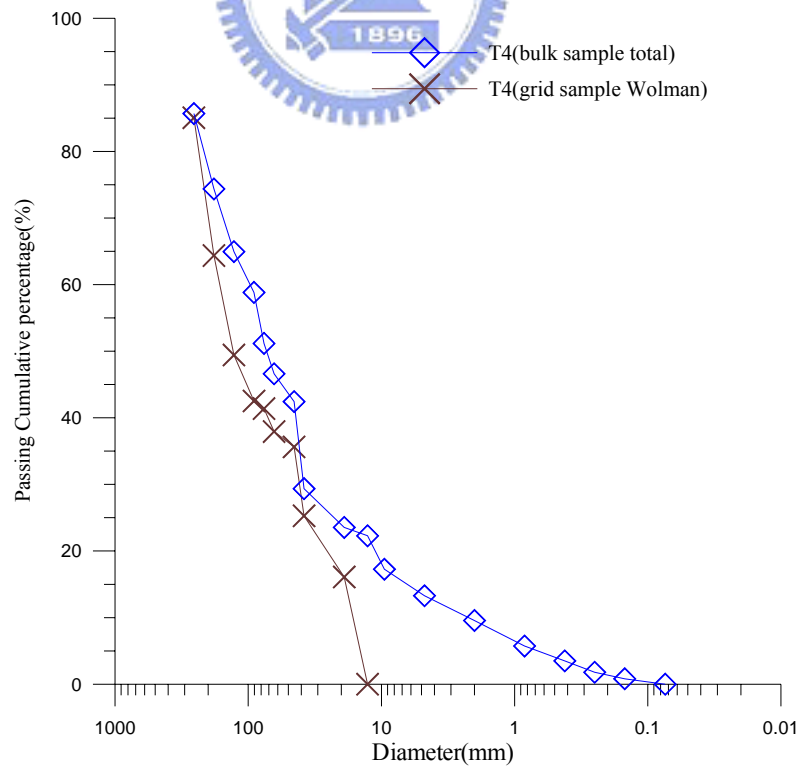


圖 4.24 T4 截除粒徑大於 256mm 顆粒後粒徑分佈曲線圖

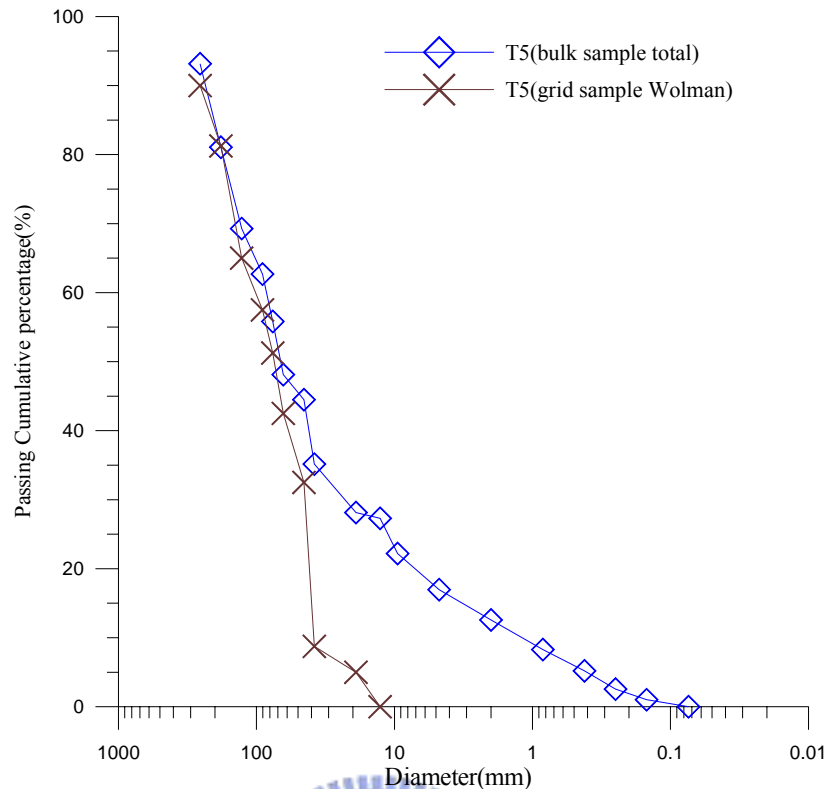


圖 4.25 T5 截除粒徑大於 256mm 顆粒後粒徑分佈曲線圖

表 4.11 截除巨大顆粒後 D_{50} 與網格法及體積法（全部樣品） D_{50} 比較

代表粒徑	D_{50} (mm)			
試驗編號	T1	T2	T4	T5
網格法	48	39.5	100	71
網格法（截除巨大顆粒）	65	61	110	72
體積法（全部樣品）	50	49	66	79
體積法（截除巨大顆粒）	66	59.5	71	69

由本節所述結果與討論，初步判斷網格法經由截除巨礫後對評估河床質中值粒徑之效果可與體積法更為接近，使二方法之對比性增加，此結果提升網格法之應用性。但經由本次試驗仍發現許多值得探討之處，例如體積樣品代表性、網格法操作程序以及網格法細顆粒部分曲線評估

等，茲將上述問題分別探討如後。

Church et. al(1987)指出體積取樣最大顆粒含量應小於 1% 方能確保細顆粒曲線能正確評估，若最大顆粒 B 軸粒徑超過 250mm，則可容許最大顆粒含量提高至 5% 以內。本次試驗場址最大顆粒 B 軸粒徑均接近 500mm，但以台灣現行調查慣例（一立方公尺試坑）進行體積取樣於 T2、T4 與 T5 均產生最大顆粒含量超過取樣總重量之 5%。

相關顆粒材料調查之規範有 ASTM D75-71、BS 812 以及 ISO 4364-1977(E)等，其中 ISO 規範為基於河床顆粒調查所定應此較被建議採用。圖 4.26 最左側實線為 ISO 4364-1977(E)對體積法具代表性樣品所需數量最低要求標準，若最大顆粒 B 軸為 100mm 時則需要取樣約 2000 公斤樣品，由於 ISO 規範通常均需龐大樣品數量，因此 Church et. al (1987)以 ISO 為基礎提出個人建議如後說明。當最大顆粒小於 32mm 以圖 4.26 之 0.1% 準則進行樣品重量評估，當最大顆粒介於 32mm 至 128mm 以 1% 準則進行評估。頭前溪河床質顆粒分佈廣泛，最大顆粒 B 軸尺寸約為 500mm，若以 ISO 規定執行則需約 212,500 公斤重量樣品才符合其最低標準，若以 Church 建議亦需約 10,000 公斤重樣品，此二數量操作可行性均相當低。若考慮 B 軸粒徑達 500mm 顆粒出現機率相當低，較粗顆粒 B 軸尺寸介於 350mm 與 400mm 之間，則所需樣品重量則為 8,000 公斤至 9,000 公斤左右。由上述討論可知本論文取樣數量均遠低於上述任一標準，但以 ISO 或 Church 之建議執行又不切實際，因此如何建立適用之評估有待進一步探討。

此外，Mosley and Tindale (1985)試驗說明將一大量樣品分成數個次樣品展開取樣，再將所有樣品一起篩分析之精度較將所有樣品於同一點

調查好，此乃因河床質空間不均質性所致。該試驗顯示次樣品重量 30 公斤，在累積 45 組樣品（1350 公斤）後可確保所得平均粒徑均在 95 %信賴區間內。該試驗河段最大顆粒粒徑僅約 90mm，與台灣情況相距甚遠，若於台灣河川欲採取多組數樣品分析，如何決定每一次樣品取樣重量與需分多少組數方可達到預定信賴區間尚須深入討論。

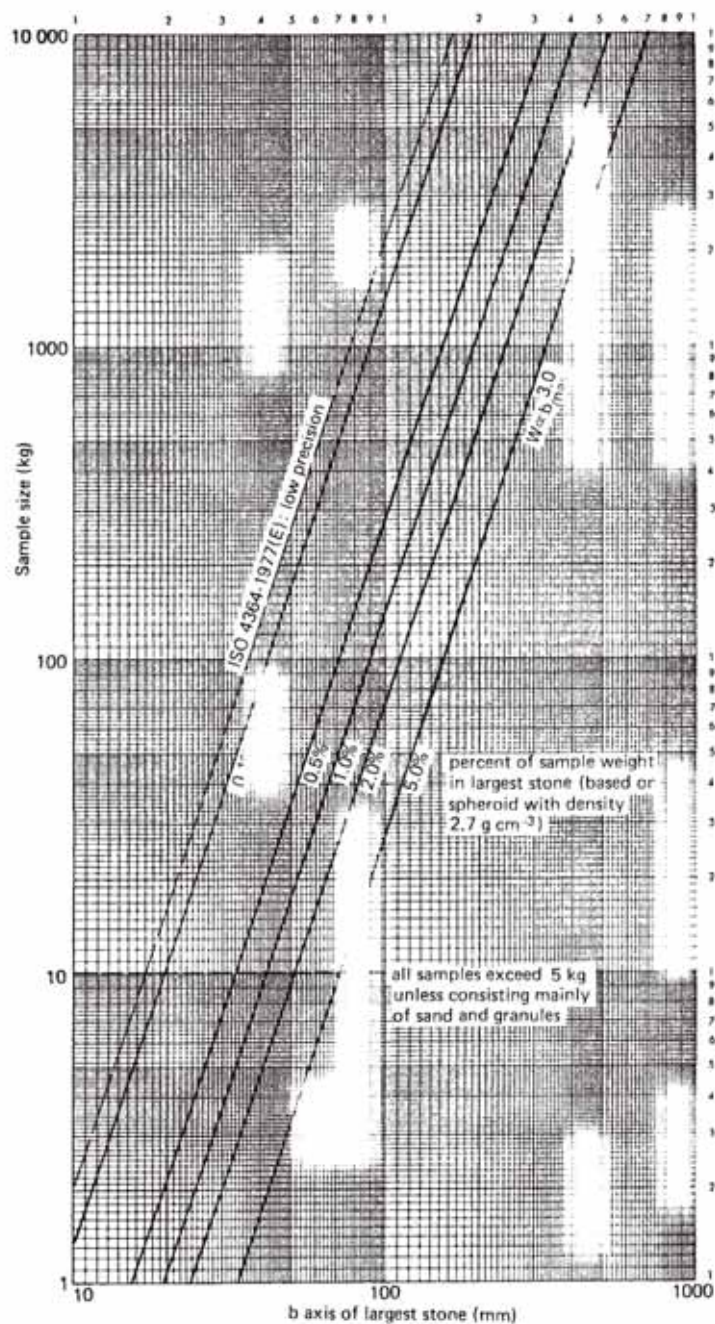


圖 4.26 體積樣品具代表性樣品數量評估圖（摘自 Church et. al,1987）

本研究網格法操作主要參考 Brierley and Hickin(1985)所採用步驟執行，當顆粒尺寸小於 8mm 時加以註記並選取鄰近粒徑大於 8mm 之顆粒取代。透過本次試驗數據加以檢討，通常選取鄰近顆粒尺寸大於 8mm 者均會挑選較小顆粒，但此替代顆粒可能非最近之顆粒。因此造成網格法粒徑分佈曲線於顆粒尺寸介於 9.5mm 至 19.0mm 間存在高估現象，導致曲線偏低。基於上述現象，建議於日後操作網格法取樣時，當顆粒小於 8mm 時僅記錄小於 8mm，不另外選取樣品替代該樣品，並於分析時將小於 8mm 出現次數列入考量，作為曲線結束控制點。

由於網格法無法估計細顆粒（通常是 $<8\text{mm}$ ）曲線，雖細顆粒部分對水利工程影響不大，但於其他領域運用仍有其必要性。為克服此問題，可嘗試於現地表面細顆粒（建議顆粒粒徑小於 19mm 之顆粒）沈積位置取樣回實驗室進行篩分析，以決定細顆粒部分粒徑分佈曲線。若依據 Church 之準則約需 9 公斤樣品，此於操作上具有相當可行性。惟此構想於本論文尚未執行，故其效果仍須進一步驗證。

4.2.2 取樣方法評選原則

網格法用於評估 D_{30} 以上粒徑參數為可行方法，但若粒徑大於 100mm 以上顆粒含量超過 30%，則需要進行修正以得到略佳成果但成效並不卓越。透過截除巨礫含量可使網格法與體積法評估之中值粒徑更趨一致，使此二法比較性提高。

因此，當表層無粗粒化，網格法所得參數可代表地層材料。若表層存在粗粒化現象，則網格法僅能代表該粗粒化層別，若欲探討輸砂量，需移除表層顆粒後以體積法進行底層取樣。

4.3 取樣位置評選

河床質於空間不均質分佈導致取樣位置評選困難，但造成此空間不均質分佈之原因不外乎地形、地質、氣候、分支流匯入...等環境條件變遷。基於縱向數據乃由各區段數據組成，各區段則需考慮橫向變異性選取適當方式與位置進行取樣方具有代表性，故本節將依序介紹橫向與縱向取樣位置評估之可行策略。

4.3.1 橫向變異性考量

橫向與局部河床質變異性乃由地質、地形與流量錯綜複雜之組合產生，故透底床川地貌（反應沈積環境）與流量（與礫石顆粒運動程度有關）之關係可將底床河床質分能為有明顯不同區域劃分，再分別探討單一區域內代表性與整體河床之代表性。

圖 4.27 為不同流量水面涵蓋範圍示意圖，包括 10%平灘流量（滿槽流量）、河川年平均流量、50%平灘流量、85%平灘流量與平灘流量等四組水位面，依據流量大小產生涵蓋範圍差異。由圖 4.27 顯示當流量逐漸增高渠道被淹沒範圍持續擴大，於 85%平灘流量時渠道內部可能僅剩沙洲頂部局部區域暴露於水面，平灘流量發生時，所有沙洲均會消失。

Haschenburger and. Wilcock 試驗指出 10%平灘流量會使顆粒開始產生運動，此訊息提供顆粒初始運動之最高門檻，但以管理角度而言，此流量雖具參考價值但若其遠低於河川基流量，則其所涵蓋範圍重要性相對降低，故先界定基流量與 10%平灘流量關係以決定終年水面淹沒範圍，此範圍暗喻沈滓傳輸終年發生。

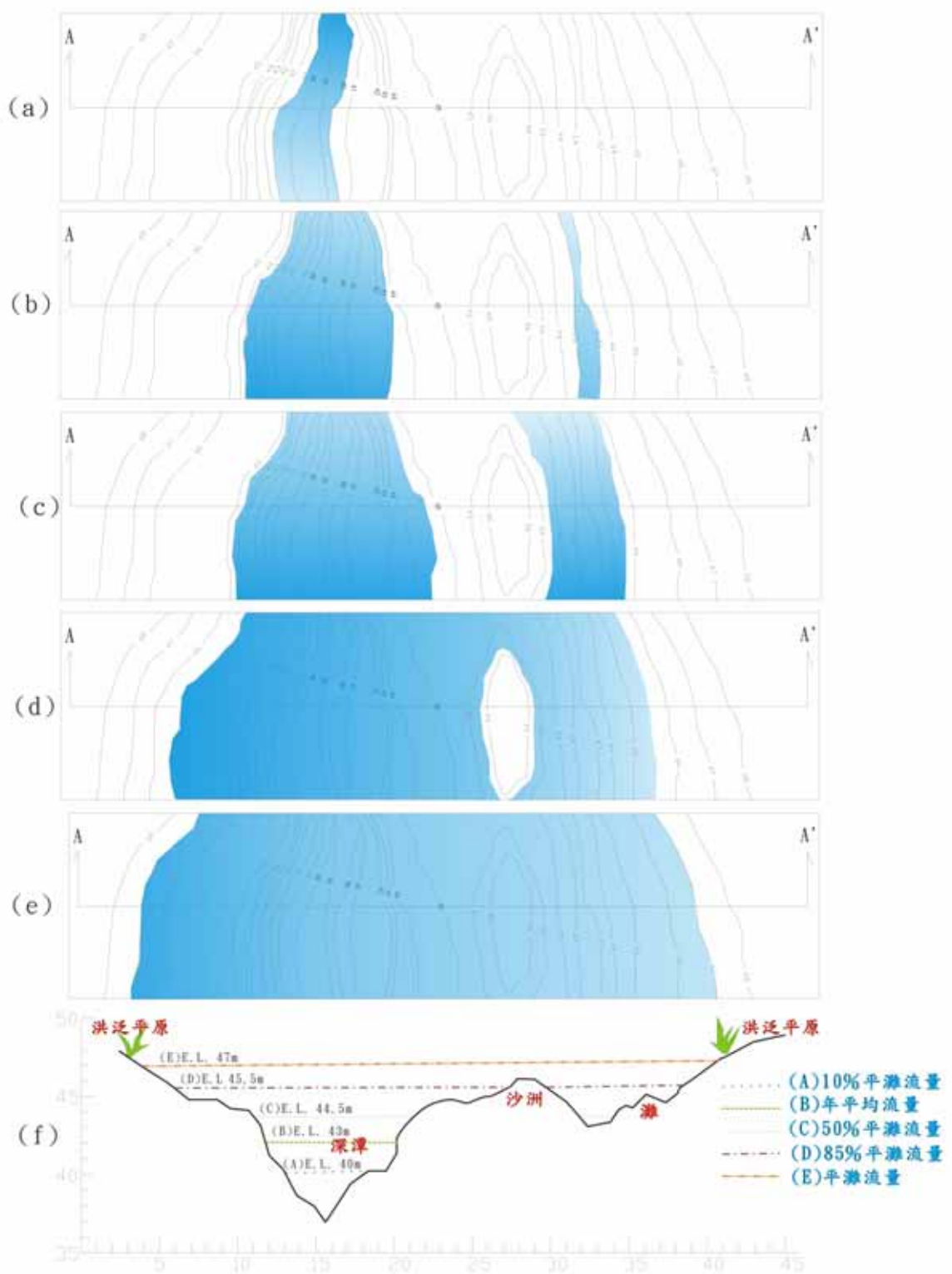


圖 4.27 不同流量造成淹沒範圍變化之示意圖(a)10%平灘流量；(b)年平均流量；(c)50%平灘流量；(d)85%平灘流量；(e)平灘流量；(f)A-A'剖面

根據 Haschenburger and Wilcock 指出，85%平灘流量使五至七成底床顆粒處於完全運動狀態，而平灘流量造成全部床質運動。不同流量發生頻率不同，意指同一堆積事件產生之河床質，因被淹沒時間或是暴露時間不同產生河床質差異。例如灘因長期位於低水位淹沒狀態，容易造成粗粒化現象，同時由於河川自然掏選作用可能承受水流帶來之顆粒堆積；而沙洲上床質則因長期暴露在空氣中，可能因風力掏選產生粗粒化現象，但因補注機會較少使其顆粒分佈可與底層材料粗顆粒部分相同。

綜合上述，本研究將以不同地形特徵作為橫向河床取樣點建議，並依據不同河川類型之斷面特徵分析橫斷面上可能出現地貌，且試圖驗證於不同地形進行調查產生之誤差。

渠道橫斷面可能出現洪泛平原、灘、沙洲與深槽等地形（表 4.12），隨洪水規模大小水位面淹沒範圍產生變化，造成河床質橫向不均勻分佈。不同河相之間會具備不同之斷面地貌，所示為依據河相學基礎建立各種不同類型河川可能之橫斷面地貌。直線型河川平面型態單純，因此無細部區分，橫斷面可能出現地貌有淺灘、深槽與洪泛平原；蜿蜒型河川平面型態有彎道與連接槽區分，彎道可能出現地貌有點洲、深槽與洪泛平原，連接槽部分則可能有淺灘、點洲、深槽與洪泛平原；辮狀系統河川平面由沙洲、灘與深槽組成之寬帶以及僅有深槽之頸帶組成，故寬帶可能地貌計有灘、群洲、深槽與洪泛平原，於頸帶則有深槽與洪泛平原；交織狀系統平面型態以高曲度蜿蜒渠道與江心島嶼為主，但亦可能產生邊灘，故上述地貌加上洪泛平原共組成交織狀河川橫斷面上可能地形。

不同沈積環境內以存在空間不均質分佈，例如於江心洲上通常於上

游端沈積顆粒較粗，下游端沈積顆粒較細。因此本節僅作標的區域劃分，而多少樣品數量方足以代表該沈積環境河床質，以及如何評估各沈積環境間河床質關係以推估代表整體河床之河床質，因牽涉數量問題故於後續章節另外說明。

表 4.12 各類型河川橫向可能產生地貌彙整表

河川類型	區域	可能出現地貌	河川類型	區域	可能出現地貌
直線型		淺灘	辮狀型	寬帶	灘
		深槽			群洲
		洪泛區			深槽
蜿蜒型	連接槽	淺灘			洪泛區
		點洲		頸帶	深槽
		深槽			洪泛區
		洪泛區			江心洲
	彎道	點洲	交織狀		邊灘
		深槽			深槽
		洪泛區			洪泛區

4.3.2 縱向變異性考量

河川治理工作需對集水區形狀、流域地形分佈、地質構造、階地分佈、河川邊界材料強度明顯變化處以及水路匯流處等地質與地形條件進行調查。河床質在河川縱向呈不均質分佈，但可由代表粒徑的變化加以探討其變異性。磨耗、掏選、風化、地質歷史、支流匯入...等因素造成河床質空間分佈變異性。歸納上述因素將採樣位置評選工作藉由地質、地形與河相等加以評估，共分成地層年代、河相分類、分支流點與地質事件等四階評估建立縱向取樣位置評選，其中地層年代與河相分類結果為帶狀分佈故置於第一與第二階層，分支流點與地質事件為單一點事件，故置於後二階層便於將前二階層進行細部區隔。各階分類準則如表

4.13 所示，分類順序依照圖 4.28 辦理，並詳述如後：

表 4.13 採樣位置評選階層表

階層	分類準則	建議工具	備註
一	依據地質條件區分為沖積段、半沖積段與非沖積段	1/25000 地質圖、航空照片	林承坤 (1992)
二	依據底床坡降、橫斷面型態與平面型態進行河川細部分類	渠道測量資料、航空照片	Rosgen (1994)
三	分支流匯流點	航空照片	
四	地質事件(構造、地質材料軟硬分界)	1/25000 地質圖	

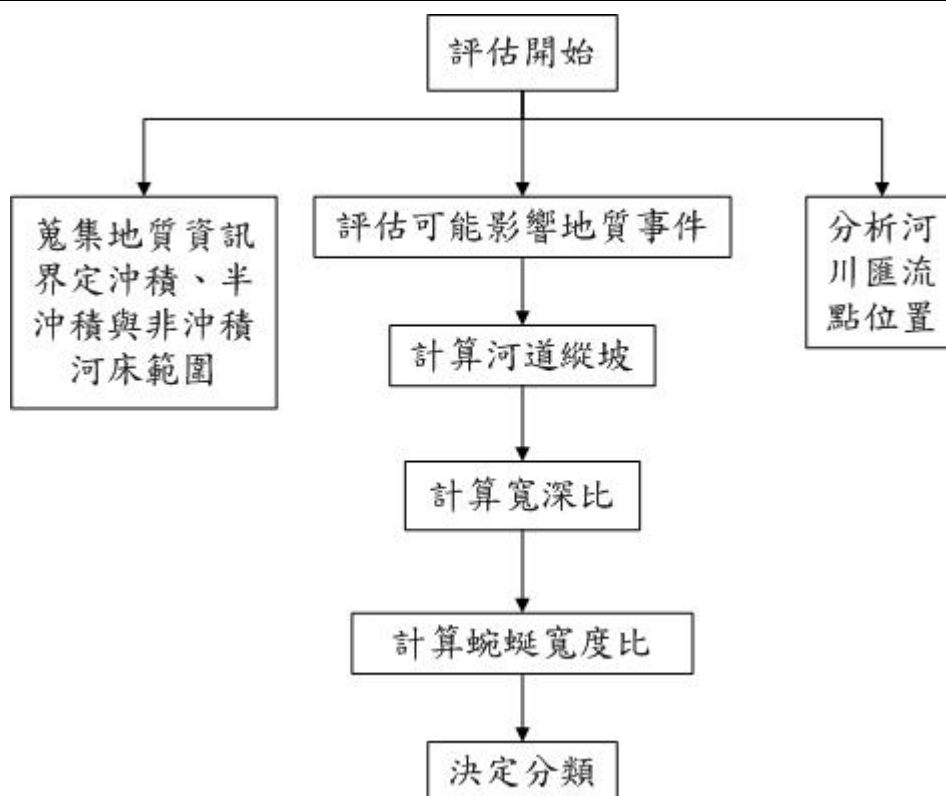


圖 4.28 評選分類系統流程圖

第一階分類係以林承坤的建議以渠道邊界狀態律定河川可沖積程度，以平面地質圖區分沖積段、半沖積段與非沖積段。沖積段發生於全新世地層，半沖積段出現在全新世與更新世地層交雜出現區域，非沖積

段則出現在構造擡升運動新興之山區。

第二階係參考 Rosgen(1996)分類系統中第一階段分類，透過縱向坡度變化、橫斷面與平面特徵進一階分類，分類步驟詳表 4.14。步驟(1)先對底床縱向坡度進行分類，首先以 4%為界，坡度大於 4%多發生在邊界束制良好之邊界，小於 4%邊界均有不同程度之可侵蝕性，隨後再各自進行細分；步驟(2)以寬深比判斷堤岸與底床之可侵蝕性，堤岸束制良好之河段容易向下刷深，形成窄深形斷面，若堤岸可侵蝕性高，則容易形成寬淺斷面；步驟(3)以蜿蜒寬度比評估區域地層材料之可變動性，各分類坡降僅坡降介於 0.5%~2%範圍需進行第三步驟評估，決定最終分類結果，其餘部分均可由前二步驟決定分類；最後步驟四為依據前三步驟進行分類，可將河川分為 Aa+、A、B、C、D、E、F、G、Da 等九類。其中 Aa+、A 與 B 屬於順直型或接近順直之微彎河川，由於此類河川多發生於山區，使河床型態多為垂直落差之小瀑布與刷深之現象，沖積河段鮮少存在此類河川，若於可沖蝕邊界地帶形成此類河川，地床型態則以淺灘、急湍與深潭交錯出現之情形。B、C、E 與 F 均為蜿蜒型河川，但由於邊界條件之差異使蜿蜒寬度比與橫斷面有些許差異，但均依循淺灘與深潭交互出現之平面型態準則。D 類河川為辮狀系統，底床為由側向掏刷與底床堆積之沙洲群組成。Da 為交織狀河川，底床最大特徵為江心洲，流路蜿+蜒。

第三階為分支流交匯處，支流坡降均較主流陡峭，因此於分支流交匯處經常形成堆積並發展成沙洲。

第四階分類記錄流域重要地質事件，如構造（例如斷層），或是軟硬材料分界點等。

表 4.14 河川分類

步驟 (1)		步驟 (2)		步驟 (3)		步驟(4)		
底床坡度 (%)		渠道橫斷面描述	寬 深 比	蜿蜒寬度比		分 類		底床型態描述
				平均	範圍			
>4 %	>10%	具束制邊界，呈現 向下刷深之深窄 型斷面。				Aa+	急陡坡 之直線 型河川	垂直落差與向 下掏刷
	4~10%	具束制邊界，呈現 向下刷深之深窄 型斷面。				A	直線型 河川	小瀑布與階梯 狀
<4 %	<4%	高寬深比，流路複 雜。	>40			D	辮狀型 河川	沖刷與堆積
	2~4%	具可發展之邊 界。	>12			B	低度曲 折河川	淺灘、急湍與 彎道刷深
		具有低寬深比但 底床刷深特性較 為明顯。	<12			G	蜿蜒型 河川	深潭與淺灘交 替
	<2%	邊界可塑性高，且 河谷地形平坦，形 成寬而淺之河川 斷面。	>12	11.4	4~20	C	蜿蜒型 河川	深潭與淺灘交 替
		廣泛且易侵蝕之 紅泛平原，使發展 成窄深且彎曲度 高之河川型態。	<12	24.2	20~40	E	曲折蜿 蜒型河 川	深潭與淺灘交 替
		具有寬淺渠道斷 面，但兩側邊界束 制良好，向下刷深 情況較為明顯。	>12	5.3	2~10	F	蜿蜒型 河川	深潭與淺灘交 替
	<0.5%	受江心洲影響呈 高寬深比之多流 線系統。				DA	交織狀 河川	深潭與淺灘交 替

依據上述四階層依序進行分類，為增加溝通性進行編碼，第一階層若為沖積段則為 TA，半沖積段為 HA 以及非沖積段 NA；第二階層為河川分類，以各類別英文開頭，若區段距離過長再以平面特徵進行分段；第三階層為分支流點，以 P 開頭，河口編號為 00，由河口往上游依序將重要支匯流點編號；第四階層為地質事件，編碼以 G 開頭，河口編號為 00，由河口往上游依序將地質事件編號。

依據上述分段系統完成分段後，接續工作為決定各區段取樣位置，此即需考量橫向代表性問題，但考量評估橫向代表性牽涉層面包括地貌、流量與取樣數量等，為簡化問題建議於探討縱向變異性時僅先考慮於相同沈積環境上取樣，方能得到較佳比對結果。除此之外，於同一沈積環境下選取最粗之顆粒分佈位置進行取樣。選取最粗顆粒分佈區域取樣之理由有以下四點，一、粗顆粒部分最容易辨識；二、可能包含最廣之粒徑分佈；三、其最可能控制水理機制；以及四、其對底床粗糙度可能產生最大影響（Church and Kellerhals,1978；Rice and church,1998）。

4.4 取樣數量、時間與頻率

4.4.1 取樣數量

由於河床質空間不均質分佈，使河床質不僅在整體河川流域上存在變化，單一區域之同一沈積環境內亦存在高度變異性。探討河床質取樣數量需由大致小，以整體河川而言應考慮所有影響河床質分佈變異性因素，區分河床質可能變化點，每區段再視規模考量取樣需求組數。每組樣品之代表性需考慮局部區域之變化，因自然材料組成複雜，故應以統計學觀點評估取樣數量。

由縱向分段後，可將河川切割成數個區段，每一區段都有其代表河相。4.3 節所述九種河川分類可歸納為直線、蜿蜒、辮狀與交織狀四種基本河相。不考慮以統計方式評估取樣數量時以河床表面最粗顆粒分佈區域為取樣點，依據各類河相底床地貌特徵及其出現週期建議取樣位置（表 4.15）。依據縱向分段之各區段距離與建議取樣位置出現週期可初步建立調查範圍內所需參數組數。

表 4.15 係歸納分類結果，以直線型、蜿蜒型、辮狀型與交織狀等四類河川平面地形特色進行取樣位置建議。直線型與蜿蜒型河川縱向地貌呈現淺灘與深潭交替出現狀態，深潭處因水流流速較慢因此為細顆粒沈積環境，但其對河床變遷等影響並不重要，因此取樣應著重在顆粒較粗且取樣執行較為容易之淺灘或沙洲地形；辮狀系統平面由寬帶與頸帶組成，頸帶部分為深槽地形，故取樣建議在由沙洲、灘與局部深槽共同組成之寬帶取樣；交織狀系統具備辮狀與蜿蜒系統之特徵，惟常有江心洲出現，此部分可依據蜿蜒狀系統取樣準則進行，若需於江心島嶼進行取樣，需注意取樣高程需低於洪泛平原方具代表性。

直線型與蜿蜒型河川之淺灘地形與深潭交替出現，其週期與河寬相關，因此可依據此特性透過航空照片評估最低調查需求。辮狀系統平面上雖呈現寬帶與頸帶交替出現狀況，但至今其規律性尚未有定論，因此僅能透過航空照片判釋來決定寬帶出現次數作為最低調查數量估計方法。

各調查點取樣數量與代表性不易以河相或是沈積環境區別。必須以統計觀念評估取樣數量與代表性，Hey and Thorne 以及 Mosley and Tindale 對此問題都曾提出良好評估方法，但由此二者試驗結果可知調

查需求數量與河床質粒徑分佈等有關，此證實調查數量評估具有地域性，因此需依據台灣河川情況進行評估方可得到正確之數量建議。

表 4.15 河川型態與取樣位置建議表

河川類別		型態描述	採樣點對策
沖積段	A、B	沖積段發生完全直線型渠道機率微小，因此出現在沖積河段之地形起伏較緩和。山區底床亦垂直向起伏變化為主，地勢低緩區域則以急湍為主要形貌。	於淺灘或點洲處進行採樣，採樣間距建議為至多為平均河寬之 2π 倍（可透過航空照片判斷）。
半沖積段		砂、卵石邊灘附聚兩岸。	
沖積段	C、E F、G	蜿蜒型，呈單流線系統，每一彎道波長約為河寬之 4π 倍，並會因堅硬點（如黏土材料聚集）等存在使曲率變大，並使河道局部束縮刷深。均具淺灘深潭交替河相，C、E 類具有寬廣河谷，有點狀邊灘，較為穩定；F、G 類出現於峽谷地形，具高度不穩定。	於淺灘（或近河道之邊岸）與彎道點洲採樣，採樣距離至多為河寬 4π 倍。若有堅硬點發生，應另外進行採樣（可透過航空照片判斷）。
半沖積段		基岩與砂礫層組成凸岸。	
沖積段	D	平面型態由寬廣帶狀與緊縮點組成，進化過程為河川材料淤積與沖刷之結果。具縱向與橫向邊灘與刷深之深槽。泥沙豐富，具高堆移質與深槽、堤岸沖蝕作用。	於沙洲群與河漫灘上進行採樣（可透過航空照片判斷）。
半沖積段			
沖積段	DA	有瓣狀系統進化而來，渠道中有大型小島區隔流路。	於島嶼上進行採樣，但須選擇高程低於紅泛平原之位置進行。
半沖積段		基岩礁石、砂卵石組成江心洲。	

4.4.2 取樣時間

堤岸附近河床質平均粒徑一般均較沙洲、灘等區域小，代表性不若渠道中其他沈積環境所得樣品佳，但此區最不受河川流量限制，施做最為便利卻不具良好代表性，為使調查結果能具代表性，散佈渠道中之沙洲與灘地之河床質組成應進行取樣，若河川流量過大阻隔通路，甚至淹沒上述地貌將使調查工作室礙難行。河川流量變化主要受集水區降雨影響，故以平均月降雨強度（平均月降雨量/平均月降雨天數）評估河川流量變化，選擇分溪流域降雨強度最低月分進行調查工作。

4.4.3 取樣頻率

根據 Haschenburger and Wilcock 研究礫石河床沈澱傳輸程度、分佈面積與流量大小有關。當造成河床全部區域顆粒產生完全運動流量發生（平灘流量），代表經過此洪水事件河床材料已全面變化，因此該洪水重現期距可視為河床質重新調查最低門檻（取樣時間間隔較長）。重現期距低於上述洪水規模之洪水事件會造成不同程度之底床顆粒運動，Haschenburger and Wilcock 指出當 10% 之平灘流量發生時顆粒即開始運動，因此以此作為河床質調查高標門檻（取樣時間間隔較短）。以最高或是最低門檻定為河床質調查頻率顯得過於嚴謹與寬鬆。因此，可以最低門檻當作全流域全面調查基準，期間應進行分區段輪流調查或作數量較少之調查。

介於上述高低門檻間之不同重現期距洪水淹蓋渠道面積不同，若以 Carnation Creek 而言，平灘流量重現期距為 7 年會造成底床顆粒全面運動，85% 平灘流量重現期距為 2 年會造成 50~70% 底床顆粒產生完全運動，意味該渠道底床每兩年才會造成大部分區域產生較大變化。如此

Carnation Creek 河床地全面調查頻率可定為 7 年，其間可將流域切分成三區域，每兩年進行其中一區河床質調查，或是每兩年對全流域進行採樣率較低之調查。

河床質調查頻率可視調查精度需求，依據河床橫斷面及考慮洪水流量之再現期加以建議。

4.5 案例分析

4.5.1 頭前溪基本資料

本研究將以頭前溪流域作為探討對象，將前述方法於頭前溪流域進行驗證，以下茲對頭前溪流域進行基本概況介紹。

根據經濟部水利處民國八十八年『頭前溪流域整體規劃第一年工作報告節錄頭前溪流域地形、地質、水文與洪水特性，提供本研究基礎資料建立。

1.頭前溪流域概述

頭前溪流域位於新竹縣、市境內，流域北方為鳳山溪流域，東臨大漢溪流域，南接大安溪流域，西為客雅溪流域與中港溪流域。

頭前溪上游支流為上坪溪與油羅溪。兩溪於竹東鎮東方交匯，交匯點以下為頭前溪，於南寮與鳳山溪匯流後約經 500 公尺注入台灣海峽。

頭前溪流域面積 565.94 平方公尺，主流總長 63.03 公里，匯流點以下長約 24 公里，底床平均坡降約 1/190。

2.地形

頭前溪流域以佐藤山、石鹿大山、霞山、石麻達山、李嶼山和鳥嘴

山為分水嶺與大漢溪流域為鄰；流域北方之帽盒山與飛鳳山等丘陵成為與鳳山溪流域之分水嶺；西方與喀雅溪及中港溪流域為鄰，以五指山、鵝公髻山、大窩山和比林山為分水嶺，南以樂山及檜山為分水嶺與大安溪流域為界。

流域南部與東南部多為 2500 公尺以上高山，山勢陡峻、層巒疊嶂，造成溪谷深且多峽谷地形；北部與西南方山勢略降，標高介於 1000 至 1500 公尺，由此山勢漸緩朝西北方向緩坡漸降至台灣海峽，可知流域中上游分屬丘陵與山岳地形，下游屬於河川沖積之新竹平原。

頭前溪與鳳山溪下游行經自身沖積之新竹平原上，北緣中壠台地與鳳山丘陵，南緣竹東丘陵，頭前溪與鳳山溪行經其間河谷。新竹平原外側為斷層海岸，斷層作用後造成海水入侵，形成喇叭狀之沈水海灣，經泥沙淤積後形成新竹平原。

3.地質

(1) 地層

頭前溪流域地層分佈自上游地區之漸新世往下游漸變為中新世、上新世、更新世及全新世等地層時代，流域地質分佈如圖 4.29 所示。各地層岩性茲說明如後：

A.第三紀亞變質岩地層（漸新世至中新世）

頭前溪流域東南方出現地層為澳底層（OM3）與大桶山層（OM2）同屬此類岩層。此二層出露位置與岩性分述如下：

a.澳底層（OM3）

本層由砂岩、頁岩及含煤質之頁岩所構成，出露於那羅

溪上游至流域東南緣之霞山、石鹿大山等山脈分水嶺一帶。

b.大桶山層 (OM2)

本層由硬頁岩、粉砂岩或砂岩所構成，偶夾有同時期之玄武岩質集塊岩，岩層走向約為北偏東 30 度至 50 度，向東南或西北傾斜 30 度至 70 度。其中硬頁岩層面與節理面發達，地表具洋蔥狀風化面，易破碎成尖銳稜角或鋒利不規則之長形小片。本層分佈於由羅溪上游烏嘴山與上平溪上游樂山連線以東地區。

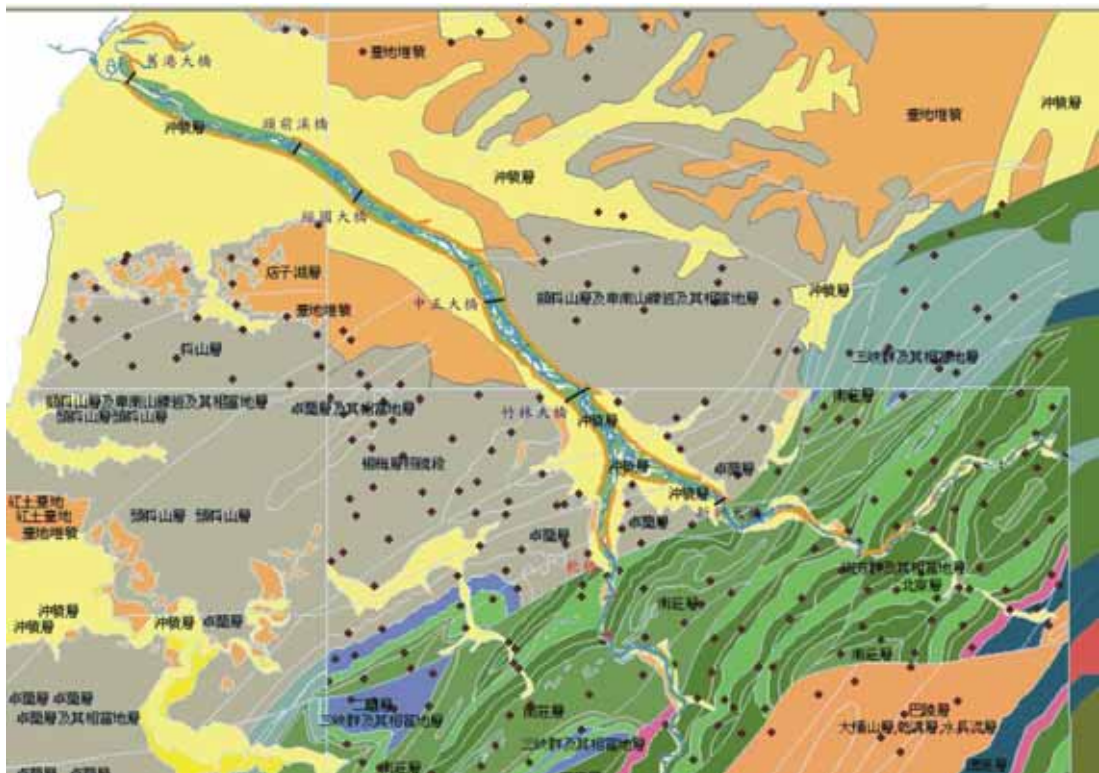


圖 4.29 頭前溪流域地質概況圖

B.未變質之中新世地層

出露於本流域之此類地層計有大寮層、石底層、南港層與三峽群，其中大寮層、石底層與南港層此三層均呈帶狀東北走

向，局部呈夾層或互層，出現在流域中游地區。

a.大寮層

此層由青灰至暗灰色頁岩為主，岩質緻密偶含石灰質，常出現洋蔥狀風化面，分佈於上平溪中游大隘村附近與麥巴來溪局部地區。

b.石底層

本層以砂岩或頁岩所成之互層或條文狀薄葉層為主，下部以砂岩為主夾有頁岩或砂質頁岩之薄層，其中厚砂岩不具層理但節理甚為發達。主要分佈於上平溪與由羅溪中游一帶。

c.南港層



本層主要由厚層至薄層之青灰色石灰質砂岩與深灰色頁岩或粉砂岩構成，含豐富有孔蟲或貝類化石。薄層砂岩呈薄板狀，平整堅硬；粉砂岩質地堅硬，常呈現洋蔥狀節理；厚層砂岩夾薄層頁岩，巨厚砂岩質地堅硬，常形成山脊或是峭壁。於本流域出露於上平溪與油羅溪下游間之大山貝山附近，亦出現在二溪中游一帶。

d.三峽群

本層由砂岩、頁岩之互層、白砂岩與煤層所組成，並含玄武岩質凝灰岩與集塊岩。砂岩含長石質常呈薄版狀構造。

C.上新世之卓蘭層

本層由砂岩夾頁岩組成，含水時質地變得鬆軟，常含石灰

質砂岩，厚層砂岩常在河岸形成懸崖，乾燥時頗為堅硬。分佈於橫山東南與軟橋斷層西北一帶。

D.上新世至更新世之頭嵙山層

主要由砂岩、泥岩與礫岩組成，由厚層或薄層砂岩與泥岩互層，偶夾泥碳，砂岩膠結鬆散，礫岩則由卵石大小之砂岩塊與砂粒構成。廣泛分佈於西部麓山帶中，於頭前溪主流出露於橫山下游約 10 公範圍，構成三百餘公尺之丘陵地。

E.更新世之紅土台地堆積及現代沖積層

紅土台地堆積發育於上平溪中下游兩岸，由未膠結之礫石、砂與泥土構成。現代沖積層分佈於二主要支流河床上方，尤以油羅溪上游地區分佈較廣，由大小礫石與砂土組成。

(2)地質構造

流域內中新世地層受造山運動壓力自東南或東方向西北方向擠壓，造成許多褶皺與斷層，使流域中游一帶岩層不斷重複或折疊出現，且有油羅山斷層、和平斷層、五指山斷層、軟橋斷層以及嘉樂斷層等線型構造沿北東或北北東方向發展。

4.河床質調查

頭前溪流域河床質調查分析工作辦理情形臚列於后：

- (1) 民國七十三年『頭前溪治理規劃報告』。
- (2) 民國七十九年『頭前溪、上平溪、油羅溪採石計畫勘查報告』。
- (3) 民國八十三年度辦理治理規劃時亦有進行河床質採樣分析。
- (4) 民國八十八年『頭前溪流域整體規劃第一年工作報告』。
- (5) 民國九十年『頭前溪高灘地利用規劃』。

採樣方法多以傳統體積篩分析進行，位置與間距多配合斷面或是等距分配，每取樣處選一適當位置進行一立方公尺樣品採樣，通常選取 800kg 樣品進行分析。以美國標準篩 4 號篩為現地篩分析與實驗室篩分析之材料區隔標準，大於 4 號篩部分於現地利用開口較大之篩組進行篩分析工作，通過 4 號篩部分以四分法攜回，並以美國標準篩進行實驗室篩分析試驗。

茲將民國八十三年、八十八年與九十年採樣結果統整，並繪製河心距離與床質中值粒徑關係圖（圖 4.30）。

茲將不同年度相近調查位置成果整理如圖 4.31 所示。由可知九十年樣本由於均以跨河構造物附近為主，與其他年份比較性不足，由八十三年與八十八年調查成果進行比較，顯示頭前溪本流部分於斷面 15（約位於溪洲大橋與頭前溪橋之間）前河床質變化不大，斷面 15 至匯流口河床質有隨時間增大情況，二主要支流部分油羅溪顯示與頭前溪本流狀況相似，上坪溪則出現中值粒徑變小之情況。

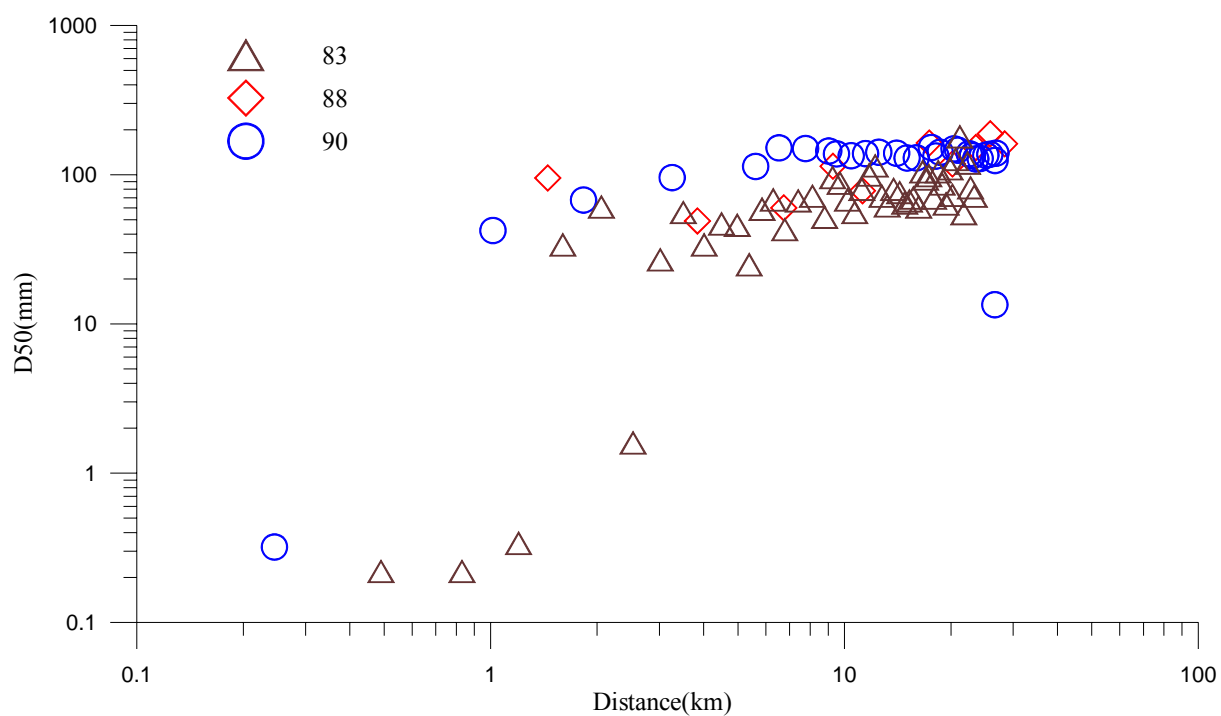


圖 4.30 頭前溪河床質中值粒徑與河心距關係圖

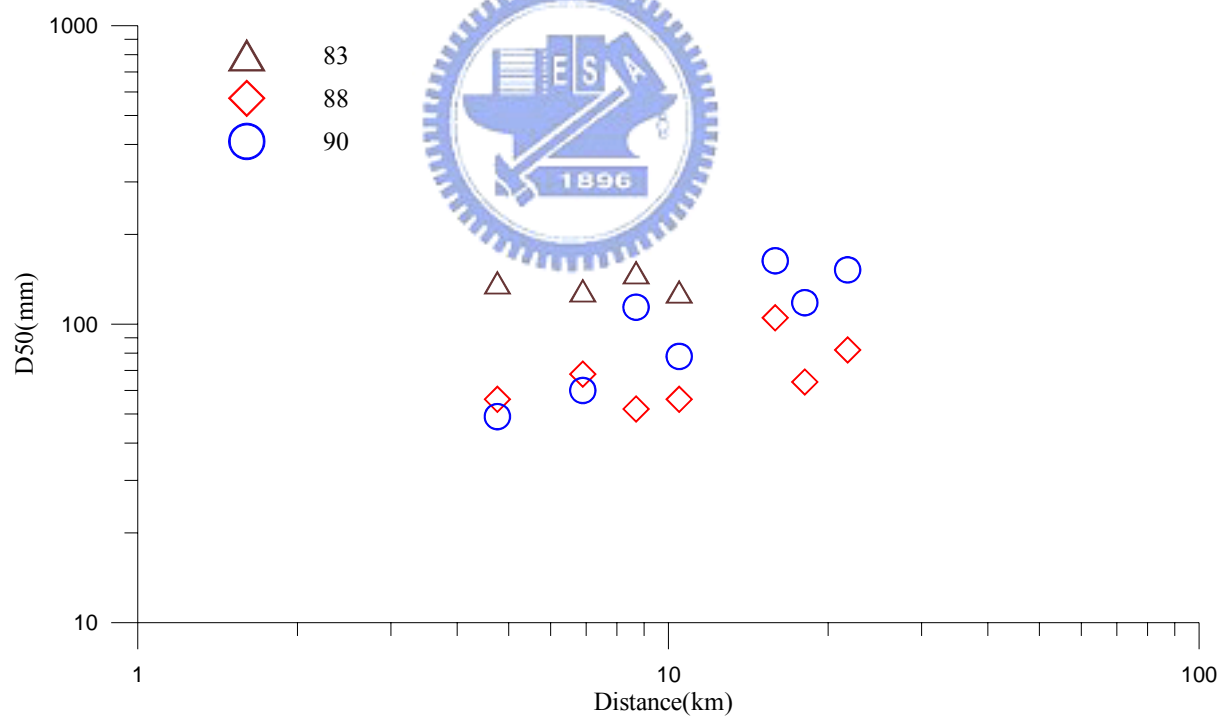


圖 4.31 不同年代相近位置河床質變化關係圖

5. 氣象水文

頭前溪流域屬副熱帶海洋性氣候，處低緯度又受暖流衝擊，因此高

溫多溼，夏秋之際常有颱風夾帶暴雨侵襲，冬季盛吹東北風，夏季吹西南風，且風勢強勁。根據中央氣象局新竹雨量站資料顯示（1991~2000年）新竹地區平均年降雨量為 1782.7 公釐，年平均降雨日數 119 日，平均溫度 22.2 度，平均濕度 78%，逐月統計資料如表 4.16 所示。並製成平均月雨量分佈圖如圖 4.32 所示，得知新竹地區雨量集中於 3~8 月份，其中尤以 5、6 兩月份降雨量最高。但 5~8 月份降雨日數相對較少，可知此期間降雨強度較強，造成洪災之機率提升。

表 4.16 新竹氣象站氣候資料統計表

項目	降雨量	降雨日數	平均氣溫	相對濕度	最高氣溫	最低氣溫
單位	毫米	天	攝氏度	百分比	攝氏度	攝氏度
1 月	74.8	10	15.1	79	18.8	12.7
2 月	152.5	14	15.2	80	18.7	12.7
3 月	196.5	14	17.4	83	21	14.9
4 月	191.3	13	21.4	81	25	18.5
5 月	282.4	12	24.6	80	28	21.2
6 月	279.2	10	27.3	78	30.8	24.3
7 月	140.0	8	28.8	76	32.7	25.4
8 月	206.8	11	28.5	78	32.3	25.2
9 月	114.9	8	26.9	76	30.5	23.5
10 月	44.5	6	24	77	27.4	21.1
11 月	44.8	5	20.5	76	24.9	18.1
12 月	55	8	17.1	77	21.3	15.2
合計	1782.7	119	22.2	78	26	19.4
統計期間	1991-2000	1991-2000	1991-2000	1991-2000	1991-2000	1991-2000

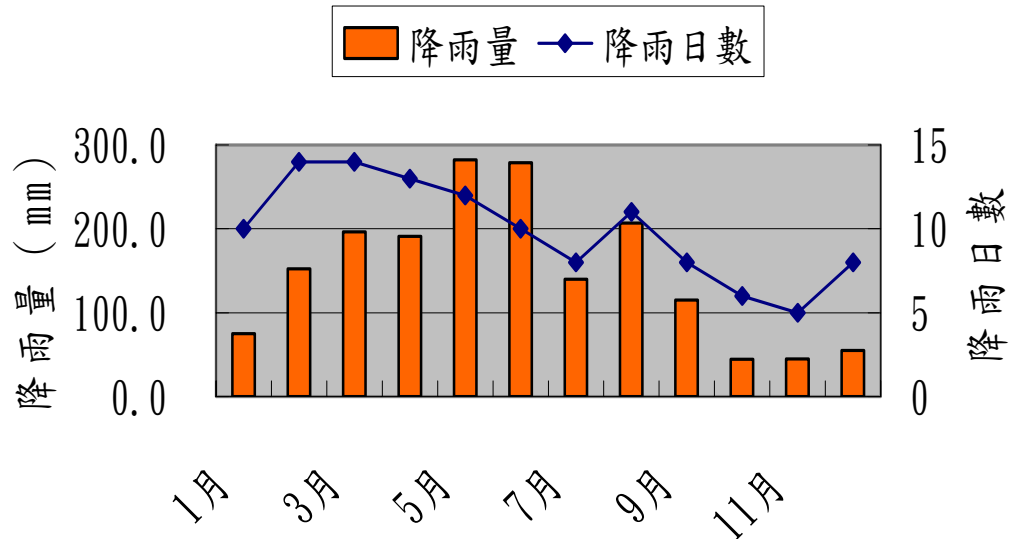


圖 4.32 新竹地區逐月降雨與降雨日數分佈圖

6.洪水流量

根據 88 年頭前溪流域整體規劃第一年工作報告建議之頭前溪各重現期距與洪峰流量關係如表 4.17 所示。

表 4.17 頭前溪流域建議洪水流量表

集水區	面積	洪峰流量 (cms)							
		再發生年 (年)							
		1.11	2	5	10	20	50	100	200
頭前溪河口	565.94	480	1,400	2,700	3,800	5,000	6,800	8,400	10,000
頭前溪二重埔站	477.97	290	1,150	2,400	3,400	4,500	6,000	7,200	8,430
上坪溪出口	252.87	210	720	1,440	2,200	2,640	3,530	4,300	5,100
上坪溪上坪站	221.73	180	650	1,320	1,870	2,450	3,300	4,000	4,800
油羅溪出口	177.80	120	410	860	1,260	1,730	2,500	3,200	4,000
油羅溪內灣站	139.07	95	450	940	1,330	1,755	2,380	2,900	3,465

4.5.2 縱向評選系統

為使河川縱向取樣點更具代表性，考慮河川型態進行區段分類，使取樣成果能符合渠道特性。以下將依據前述分類方法以頭前溪流域為例進行分析（圖 4.33 與表 4.18）。

由 4.5.1 節所述得知頭前溪流域全新世現代沖積層及更新世頭嵙山層與階地堆積層分界位置約位於中正大橋附近，此為沖積河床與半沖積河床分界；另半沖積河床與非沖積河床分界處位於更新世頭嵙山層與上新世卓蘭層交替處，約略以竹東斷層為界。

階層二為細部河相分類，考慮河川縱坡、寬深比與蜿蜒寬度比等因子進行分類，分類結果如表 4.18 所示。本流部分以交織狀與辮狀系統為主，僅竹林大橋上游方向局部區域為蜿蜒系統河川（詳圖（4）至（5）之間）。

階層三分類依據為匯流點，本流域僅考慮油羅溪與上坪溪匯流進入頭前溪本流處（編號 P1 位置）。

階層四以地質事件為分段依據。頭前溪流域由下游至上游重要地質事件依序有砂質河床與礫石河床變化處（G1）、新城斷層（G2）、頭嵙山層與卓蘭層分界（G3）以及卓蘭層與年代較早地層之分界（G4）。

將本研究分段與民國 83 年河床質調查成果套繪成以便觀察分段與河床質中值粒徑關係。由可知每分段前後床質趨勢均存在相當差異，線(1)為砂質與礫石河床分界，前後床質變化最明顯；線(3)為地層交換與新城斷層作用影響區域，可知前後床值粒徑起伏變化，並脫離整體趨勢；線(7)為油羅溪與上坪溪匯流進入頭前溪處，可發現床質分佈較廣，

此可能起因於匯流處沖淤行為較複雜，導致顆粒分佈較散亂且廣泛。

由上述現象顯示河床質除隨與出海口距離變化外，局部區域仍受獨立事件影響（例如；斷層、河川匯流等）。河川型態影響河床質整體分佈情況並不明顯，但不同河相展現不同坡降、斷面等幾何型態，因此於管理角度而言仍應依據河相系統不同，建立該區段代表河床質。

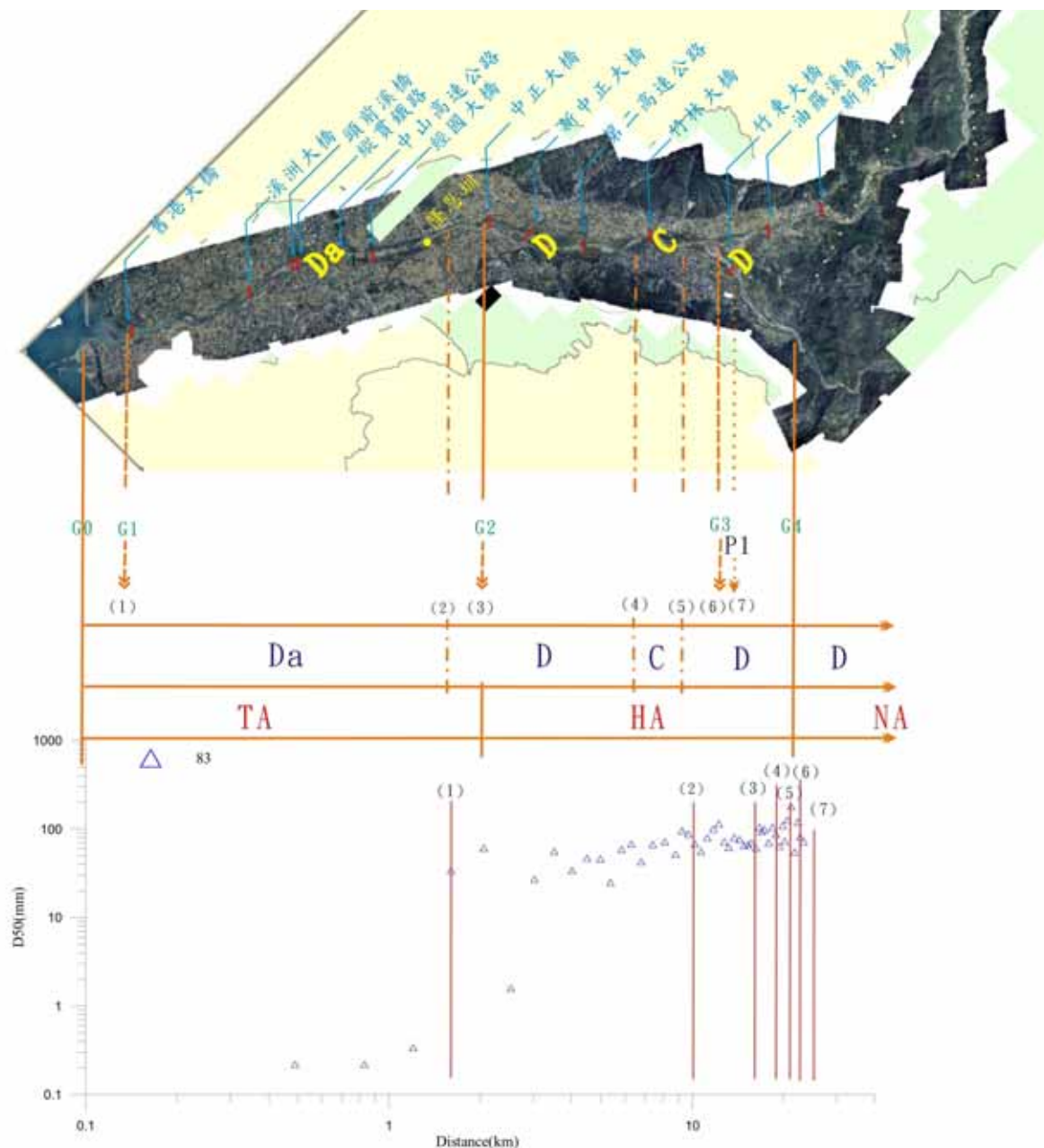


圖 4.33 頭前溪河川分類成果與 83 年河床質調查對照

表 4.18 河川縱向分段結果表

河段	斷面編號	累距(km)	一階分類	二階分類	三階分類	四階分類	河段	斷面編號	累距(km)	一階分類	二階分類	三階分類	四階分類	河段	斷面編號	累距(km)	一階分類	二階分類	三階分類	四階分類
頭前溪	1	0	TA	Da	P01	G01	頭前溪	24	10.8	TA	Da	P01	G12	頭前溪合	47	21.3	HA	D	P01	G23
	2	0.67	TA	Da	P01	G01		25	11.2	TA	D	P01	G12		48	21.8	HA	D	P01	G23
	3	1.25	TA	Da	P01	G01		26	11.8	TA	D	P01	G12		49	22.4	HA	D	P01	G34
	4	1.97	TA	Da	P01	G01		27	12.3	TA	D	P01	G12	油羅溪	50	22.5	HA	D	P12	G34
	5	2.6	TA	Da	P01	G12		28	12.7	TA	D	P01	G12		51	22.8	HA	D	P12	G34
	6	3.09	TA	Da	P01	G12		29	13	TA	D	P01	G12		52	23.7	HA	D	P12	G34
	7	3.78	TA	Da	P01	G12		30	13.5	TA	D	P01	G12		53	24.1	HA	D	P12	G34
	8	4.2	TA	Da	P01	G12		31	14	HA	D	P01	G12		54	25	HA	D	P12	G34
	9	4.76	TA	Da	P01	G12		32	14.5	HA	D	P01	G23		55	25.5	HA	D	P12	G34
	10	5.27	TA	Da	P01	G12		33	14.8	HA	D	P01	G23		56	26.2	HA	D	P12	G34
	11	5.45	TA	Da	P01	G12		34	15.5	HA	D	P01	G23		57	26.5	HA	D	P12	G34
	12	5.91	TA	Da	P01	G12		35	15.9	HA	D	P01	G23		58	26.8	HA	D	P12	G34
	13	6.1	TA	Da	P01	G12		36	16.5	HA	D	P01	G23	上平溪	59	23.3	HA	D	P13	G34
	14	6.45	TA	Da	P01	G12		37	16.8	HA	D	P01	G23		60	23.7	HA	D	P13	G34
	15	6.9	TA	Da	P01	G12		38	17.1	HA	D	P01	G23		61	24.1	HA	D	P13	G34
	16	7.27	TA	Da	P01	G12		39	17.5	HA	D	P01	G23		62	24.5	HA	D	P13	G34
	17	7.62	TA	Da	P01	G12		40	17.8	HA	D	P01	G23		63	24.9	HA	D	P13	G34
	18	8.02	TA	Da	P01	G12		41	18.1	HA	D	P01	G23		64	25.3	HA	D	P13	G34
	19	8.69	TA	Da	P01	G12		42	18.3	HA	D	P01	G23		65	25.7	HA	D	P13	G34
	20	9.25	TA	Da	P01	G12		43	18.5	HA	D	P01	G23		66	26	HA	D	P13	G34
	21	9.72	TA	Da	P01	G12		44	19.1	HA	C	P01	G23		67	26.4	HA	D	P13	G34
	22	10.1	TA	Da	P01	G12		45	19.7	HA	C	P01	G23		68	26.8	HA	D	P13	G34
	23	10.5	TA	Da	P01	G12		46	20.5	HA	C	P01	G23							

4.5.3 橫向

本次研究 T3 位置屬深槽地形，T6 屬邊灘地形。T1 與 T2 位於 T3 左右兩岸，將此三試驗位置網格法結果整理繪製於圖 4.34。觀察可發現 T3 ($D_{50}=81\text{mm}$) 顆粒分佈偏向左側，表示顆粒組成較 T1 ($D_{50}=48\text{mm}$) 與 T2 ($D_{50}=39.5\text{mm}$) 粗，此現象說明主深槽附近顆粒最粗。T6 為鄰近 T5 之邊灘，為 T5 ($D_{50}=71\text{mm}$) 與 T6 ($D_{50}=70.5\text{mm}$) 之網格法試驗結果比較 (圖 4.35)，可知二試驗結果僅於 45.3mm 以下有明顯差異，邊灘處顆粒略粗於洪泛平原。

由上述試驗結果比較，確知橫斷面上因地形不同造成河床質差異。諸多地形中，深槽取樣困難但床質變化率高；灘與沙洲產生於河床載豐富區域，顆粒逐漸堆積後形成，床質變化率中等；洪泛區床質變動率最低。粗顆粒為控制河床型態與水理機制之要素，因此取樣調查應著重粗顆粒部分，主深槽處顆粒最粗但取樣不易，其次之沙洲與邊灘隨流量變化時而出現時而隱沒，當其隱沒於水面下越久則顆粒越粗，洪泛平原因大多數時間暴露於空氣之中，整體粒徑最小。由此可知，考量操作性與代表性而言，於沙洲或邊灘上進行調查最理想，但各種不同橫斷面地形間河床質中值粒徑等參考粒徑之關係若能得知，則可由洪泛平原之結果推估渠道內部可能床質，則當調查環境受到限制時可提供適當之估計方法。因此應依據河相基礎，設計試驗觀察不同河相於橫向地貌間床質差異，建立其間中值粒徑等之關係。若需更進一步掌握橫向變異性，可藉由洪水頻率與地形間關係劃分同一地貌河床質組構可能分界處，如此便能掌握同一地貌特徵上之河床質變異狀況。

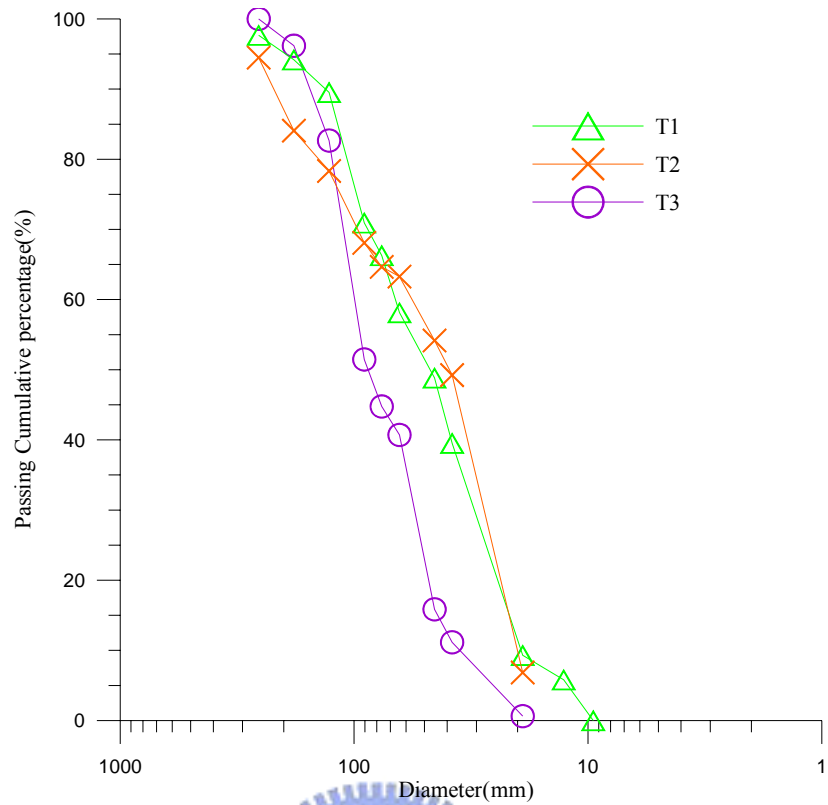


圖 4.34 T1、T2 與 T3 網格法試驗結果比較

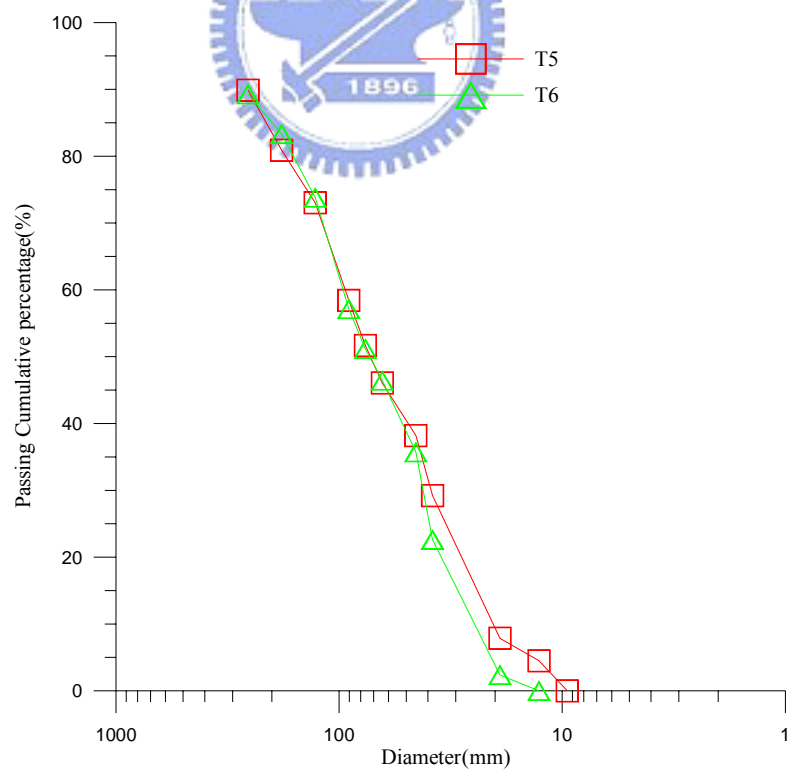


圖 4.35 T5 與 T6 網格法試驗結果比較

4.5.4 調查數量、時間與頻率

由 4.1 節整理之頭前溪流域氣象資料計算單月平均降雨強度如表 4.19。由表 4.19 可知頭前溪流域 5、6 二月份降雨強度，10 月至翌年 1 月降雨強度最低，因此進行頭前溪流域河床質調查應避免於 5、6 月份進行，較適合調查時間為 10 至 1 月份。

表 4.19 頭前溪流域月平均降雨強度表

項目	降雨量	降雨日數	降雨強度
單位	毫米	天	毫米/天
1 月	74.8	10	7.48
2 月	152.5	14	10.89
3 月	196.5	14	14.04
4 月	191.3	13	14.72
5 月	282.4	12	23.53
6 月	279.2	10	27.92
7 月	140.0	8	17.50
8 月	206.8	11	18.80
9 月	114.9	8	14.36
10 月	44.5	6	7.42
11 月	44.8	5	8.96
12 月	55	8	6.88

本研究以頭前溪為例加以探討，圖 4.36 為頭前溪二重埔水文測站民國 88 年洪水流量與再現期距關係圖（頭前溪流域整體規劃第一年工作報告）。

根據民國 89 年『頭前溪高灘地利用規劃』期末報告書推算頭前溪主河段深槽容許通過平均流量約為 2000CMS。此流量對應再現期距約為 4 年，代表頭前溪礫石河床每 4 年會全面重新調整。百分之 85、70 以及 50 平灘流量分別為 1700CMS、1400CMS 以及 1000CMS，對應再現期距分

別為 3、2.2 與 1.5 年。頭前溪再現期距 2 年之洪水流量為 1150CMS，約 57.5%平灘流量，根據 Haschenburger and. Wilcock 研究顯示此規模洪水僅造成約 40%底床處於完全運動狀態，其餘 60%多處於部分傳輸狀態，亦即多數底床產生全面床質更迭狀態並未發生。另 10%（約 200CM）平灘流量便可造成顆粒運動，此流量遠高於頭前溪年平均流量（根據『頭前溪高灘地利用規劃』(6)報告統計民國 79 年 1 月至 87 年 12 月記錄顯示竹林大橋站年平均流量約 22.88CMS），因此可將其視作河床質重新調查最高門檻。且由於 85%平灘流量造成較大規模河床質變遷，底床多數河床質均產生變化，因此設定此流量為河床質重新調查中等門檻。因頭前溪平灘流量再現期距為 4 年，因此可預測當河床質經歷全面重新調整事件後，再經歷 4 年會產生下一次全面調整，因此設定此為河床質重新調查最低門檻。

以最高門檻作為調查頻率設定值因河床質變動程度低，使調查價值降低。另由於頭前溪建議之河床質重新調查頻率中高、中門檻僅相差一年，連續進行重新調查會造成資源浪費，因此建議頭前溪河床質調查工作應每 4 年進行一次，其間可進行低密度調查，或透過洪水觀測機動進行重點區域調查。

取樣數量需透過龐大試驗樣本方得推求，本文受限時間關係，尚未對頭前溪取樣數量進一步探討。但依據縱向分段可決定整體流域樣品組數，進入每區段需深入討論代表性問題，而在討論代表性問題前需確定調查目的所需精度，方得以統計理論求得最具代表性結果。若如前述取樣位置建議，僅選取較粗顆粒部分做為代表，此為最粗略方法，不同沈積環境間亦存在差異，若依據上述原則沙洲與邊灘常成為取樣對象，但同一沙洲或邊

灘內顆粒分佈仍有變化，若仍以選擇粗顆粒部分取樣缺乏統計理論說明，將使所有調查取樣無標準可循，並無法得知取樣信賴程度。

河床質調查為一複雜且工作量龐大之作業，調查結果對水利工程、沈積學、生態工程...等有重要影響。從取樣位置評估，至各取樣位置具代表性樣品收集之位置、方法、程序與數量等都需仔細考量。因此，進行河床質調查工作應先確認調查目的與需求精度，據以擬定良好之調查規劃，以地形、地質、河相等做定性說明，再以統計理論將取樣位置、數量等量化，方能對變異性高之河床質調查工作完成良好詮釋。

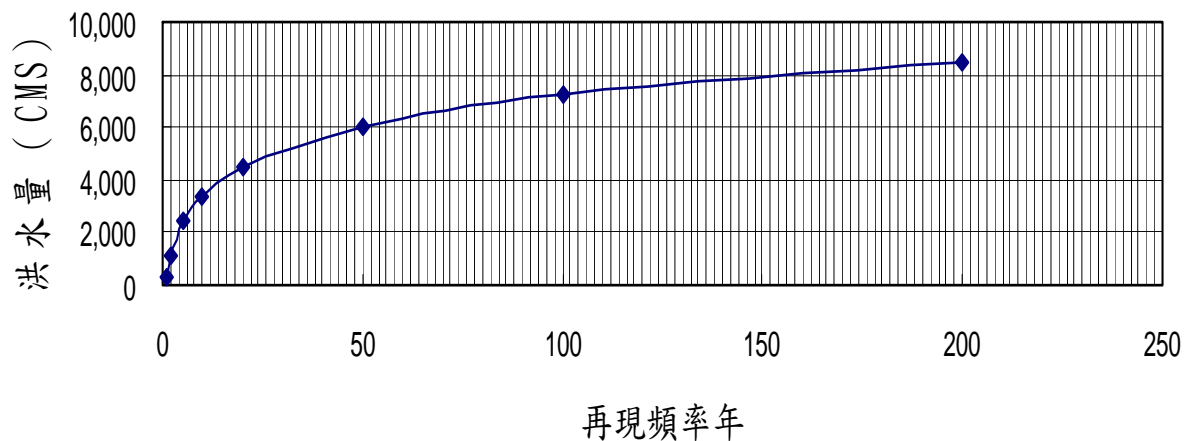


圖 4.36 頭前溪二重埔水文測站建議採用洪水流量與再現頻率關係圖

五、結論與建議

5.1 結論

河床質顆粒分佈為底床水流阻抗能力、顆粒初始運動以及沈滓傳輸分析之重要參數，前二者著重表層材料，後者則均需考慮。因此於調查工作進行前，必須釐清取樣對象後再選擇取樣方法，不同方法之間因基礎不同所以需透過轉換才能比較，國內以往僅以體積法分析河床質，此與國外狀況不同，建立迅速且經濟調查方法有助河床質調查工作進行，因此需評估網格法於台灣河川之適用性。單一取樣點標準程序建立後，調查工作面臨代表性問題。垂直向存在粗粒化現象；縱向顆粒隨與河口距離越近逐漸縮減；橫向因底床地形不同以及礫石河床沈滓傳輸特性影響，造成同一斷面河床質差異，因此需依據河川演進特性擬定調查位置評選策略，方能使調查工作發揮最佳效果。且河床質於單一沈積環境內亦存在不均質分佈，因此需透過統計方法方得詮釋代表性問題。調查時間與頻率影響調查成果，間隔過大造成規劃設計引用錯誤資訊，間隔過小又造成資原浪費，故需依床質傳輸與變動特性訂定調查週期。

河床質調查工作具有前述不確定性與執行困難待突破與改進。故本研究投入相關問題探討，茲將研究成果說明如後：

1.取樣對象與方法

- (1)對於未產生粗粒化現象樣品，表面法結果可代表底層材料；存在粗粒化現象之樣品需分開取樣，表層樣品因深度不易界定造成以體積法執行之困難，故較適合以網格法進行調查，底層樣品僅能以體

積法執行。

(2)國外相關文獻分析樣品之最大顆粒粒徑多低於 100mm，此與頭前溪狀況明顯不同，此現象造成網格法結果存在較高誤差。本次研究試驗發現，當大於 100mm 以上顆粒含量超過 30% 會造成結果偏離體積篩分析曲線，小於 30% 則有良好之相似性。

(3)考慮各級顆粒出現機率修正試驗結果，發現顆粒粒徑大於 100mm 以上顆粒含量超過 30% 之試驗得到略微改善之效果，但會造成顆粒粒徑大於 100mm 以上顆粒含量低於 30% 之試驗組結果偏離。因此建議當顆粒粒徑大於 100mm 以上顆粒含量超過 30% 時須進行修正以得到較佳成果。

(4)若僅以 D_{50} 作為評比標準，截除巨礫含量之體積取樣與網格取樣結果之 D_{50} （體積法 D_{50} /網格法 D_{50} ，T1：66mm/65mm；T2：59.5mm/61mm；T4：71mm/110mm；T5：69mm/72mm）較未截除（體積法 D_{50} /網格法 D_{50} ，T1：50mm/48mm；T2：49mm/39.5mm；T4：66mm/100mm；T5：79mm/71mm）前更集中且接近，此現象增加此二方法對比性。

(5)以表面測線推估粗、細顆粒含量為可行辦法。本次研究發現 T1、T2 與 T5 之 3/8" 以下含量分別為 16%、23% 與 22.19%，而由體積篩分析結果獲得含量分別為 22.7%、23.7% 以及 21.3%。其中 T1

因測線較短產生較大誤差，根據其他組數結果建議測線至少需超過河床上最大顆粒 A 軸 10 倍以上長度。初步評估以表面測線推估細料權重為可行方法。

2.取樣位置評估

(1)河川斷面以主深槽沿線河床質顆粒最粗，其次為灘與沙洲，河道邊緣河床質顆粒最細。常流性河川主深槽終年有水造成取樣困難，沙洲與灘於低水位期間暴露空氣之中，因此有較高調查機會，河道邊緣雖取樣最便利，但代表性不足。因此橫向應盡可能於沙洲或邊灘處進行調查。

(2)縱向部分考慮沖蝕性、地質條件、匯流位置以及縱橫斷面特性等四因素進行分段，並以頭前溪民國 83 年河床質調查成果進行比對，發現新城斷層等地質事件造成頭前溪河床質分佈趨勢產生變化，另油羅溪與上坪溪匯流點造成河床質分佈散亂與更加廣泛，只有河相分類對床質影響不顯著。但以管理觀點而言，因不同河相在縱橫斷面特性均有差異，這些因素將影響洪水分析，因此在探討此類問題時（例如曼寧糙度值）都應以河相分界作為參數切割標準，方能達到最佳成果。直線型與蜿蜒系統河川建議取樣位置為連接槽上之沙洲或是淺灘，辮狀系統建議於寬帶之沙洲群，交織狀則選取江心島嶼或依據蜿蜒系統特徵進行取樣。

3.取樣時間與頻率

頭前溪流域月平均降雨強度以 10 月份至翌年 1 月份最低，因降雨量低故河水水位亦低，邊灘與沙洲會暴露於空氣中，易於調查工作進行。

礫石河床變動並非經年累月發生，需經歷平灘流量洪水侵襲後才造成全面改變，85%之平灘流量發生已造成一半以上底床產生變動，由此可知河床材料變化率與洪水頻率有正相關性。以頭前溪為例，平灘流量約 2000CMS 其再現期距為 4 年，85%平灘流量約 1700CMS 再現期距約為 3 年，代表頭前溪理想之河床質調查頻率應為四年，雖其間亦可能產生底床較大變動，但可視需求進行個別調查。



5.2 建議

經歷本次研究對河床質調查工作可能遭遇問題與有待釐清事項有初步瞭解，許多成果僅以相關文獻為基礎，提供策略後再以頭前溪模擬缺乏量化說明，因此仍須進一步驗證。茲就建議事項說明如后：

1. 頭前溪因砂石開採過量影響河川自然變遷，並非良好示範案例，應以受人為因素影響較低之河川建立範例。
2. 初步判斷網格法可有條件運用於台灣河床質調查，但本研究驗證試驗數量不足，應收集更多試驗成果進一步比較。另由於頭前溪顆粒分佈廣泛，造成網格法分析有所限制，本文提出修正方法雖有些微助益但尚有很大進步空間，有待進一步改良取樣或分析方法提高結果正確性與效率。
3. 網格法適用性評估僅與一組體積法結果比較有其盲點。單一位置體積法結果亦可能代表性不足，Mosley and Tindale 指出體積樣品由多組次樣品組成一大樣品進行篩分析所得結果比僅以單一位置取得樣品進行篩分析更具代表性。且國內慣例取樣一立方公尺所得樣品重量約兩公噸，以台灣河床顆粒分佈情況而言此重量未達 ISO 標準或 Church 之個人建議準則。因此欲確實比較網格法與體積法結果應先建立體積法標準規範使其代表性增高，如此才能確保比較結果正確性。
4. 橫向部分因地形展現不同河床質組成為明確事實。以取樣可行性與代

表性而言，於邊灘或沙洲進行取樣較理想。但若能建立各種不同地形間河床質差異關係（ D_{50} ），則當調查空間受到限制時可以渠道邊緣取樣結果推估河道內灘、沙洲與主深槽處河床質代表粒徑。此部分尚須以河相為單位，透過試驗建立各種河相於橫向地貌上河床質差異基準。

5.縱向分段準則初步評估可行，如何落實於河川管理工作有待進行長期觀察，進一步驗證系統之良窳。

6.河床質調查頻率係以礫石河床傳輸特性評估，但不同河川是否存在差異有待進一步驗證。應設計試驗長期觀察以檢驗此推論正確性，進而建立台灣地區標準。

7.網格法所得結果理應與體積法表層樣品比較，但礫石河床表層定義困難，使體積法結果亦存在不確定性。建議可將網格法調查結果與透過洪水觀測後反推結果相較，方能得到最真實結果。故可於設有測站河段進行試驗，進一步探討與修正取樣方法。

7.由於河床上礫石經常以瓦覆狀堆疊，啟動底床上任一顆粒均需擾動其周遭顆粒造成互制結構破壞後才會發生，因此底床顆粒排列緊密程度影響顆粒初始運動狀態遠勝於顆粒及配分佈。建議可嘗試以碎形維度之叢聚維度評估顆粒排列關係，提供更符合實際狀況之分析參數。

- 8.調查需求數量可透過河相學選擇取樣位置，在分析取樣位置出現週期決定。但同一地貌再經歷不同洪水後因被淹沒範圍不同，導致同一沈積環境內河床質差異。對於單一取樣點以及特定區域取樣代表性與數量已有學者進行研究，但未含蓋所有河相特徵，且由不同學者提出結果可發現具代表性取樣數量會因環境不同產生差異。建議引入統計方法分析台灣河川狀況，建立台灣地區標準。透過此二方法結合可完整評估調查最低需求數量。
- 9.本研究網格法取樣採用童軍繩取代採樣膠帶，但童軍繩具伸縮性容易產生操作誤差。建議使用較粗繩索或剛性較佳之材質作為網格建立工具，以降低操作誤差發生可能性。
- 10.礫石河床因常存在粗粒化情形，使調查工作不得不區分表底層進行，表層網格法較體積法便利且有效率，因此若能確認表、底層材料關連性，則可大幅節省河床質調查工作所需資原。過去研究顯示表底、層材料間關係薄弱，但此仍為值得改進與突破之細節。
- 11.本研究網格法採用樣品選擇標準為顆粒尺寸小於 8mm 者已鄰近大於 8mm 顆粒取代，此準則嚴重影響粒徑分佈尾端分佈。建議當取樣顆粒粒徑小於 8mm 時，僅作小於 8mm 之記錄，並將其發生次數列入分析，此次數所佔機率理論上應與體積篩分析法通過 8mm 之含量接近，如此能更正確評估粒徑分佈曲線。另可嘗試於取樣區域表面選擇

較細顆粒（19mm 以下）樣品 10 公斤，以實驗室篩分析結果補充網

格法 8mm 以下細顆粒曲線之不足。



參 考 文 獻

- 1.台灣省水利局,『防洪工程規劃』,71年8月
- 2.林承坤,『泥沙與河流地貌學』,南京大學出版社,1992
- 3.吳東杰,『以碎形維度探討顆粒性材料強度之組構因素』,淡江大學,碩士論文,92年6月
- 4.陳樹群等,『台灣地區河川型態調查研究(1/2)』,經濟部水利處水利規劃試驗所,91年1月
- 5.經濟部水利處,『頭前溪流域整體規劃第一年工作報告』,88年12月
- 6.經濟部水利處第二河川局,『頭前溪高灘地利用規劃報告』,90年6月
- 7.Adams, J., 1979, Gravel size analysis from photographs, Proc. Am. Soc. Civ. Engrs, Journal of Hydraulics Division, 105, pp. 1247-1285
- 8.American Society for Testing and Materials, 1978, Standard methods of sampling aggregates, ANSI/ASTM D75-71
- 9.Andrews, E.D., 1983, Entrinment of gravel from naturally sorted riverbed material, Geological Society of American Bulletin, 94, pp. 1225-1231
- 10.Bagnold, R.A., 1960, Some aspects of the shape of river meanders, United States Geological Survey. Professional Paper 282E
- 11.Bathurst, J.C., 1987, Critical conditions for bed material movement in steep, boulder-bed streams. In : Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim, IAHS Publication no. 165, Institute of Hydrology, Wallingford, pp.309-318
- 12.Bradley, W.C., 1970, Effect of weathering on abrasion of granitic gravel, Colorado River(Texas): Geol. Soc. America Bull., v. 81, pp. 61-80
- 13.Brice, J.C., 1975, Air photo interpretation of the form and behavior of alluvial rivers, Final Report to the US Army Research Office.
- 14.Brierley, G.J. and Hickin, E.J., 1985, The downstream gradation of partial size in the squamish river, British Columbia. Earth surface Processes and Landforms, 10, pp. 597-606
- 15.British Standards Institution, 1975, British standard methods for sampling and testing for mineral aggregates, sands and fillers. Part 1. Sampling size,

- shap and classification, BS 812 Part 1:1975
- 16.Brush, L.C., 1961, Drainage basins, channels and flow characteristics of selected streams in central pennsylvania, Professional paper 282-F, U.S. Geological Survey, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
 - 17.Carling, P.A. and Reader, N.A., 1982, Structure, composition and bulk properties of upland stream gravels, *Earth Surf. Processes and Landforms*, 7, pp. 349-366
 - 18.Cheng, E.D.G., and Clyde, C.G., 1972, Instantaneous hydrodynamic lift and drag forces on large roughness elements in turbulent open channel flow, in Shen, H. W., ed., *Sedimentation : Symposium to honor Prof. H.A. Einstein*, Fort Collins, Colo., Water Resources Publ., pp.3-123-20
 - 19.Chorley,R.J., Schumm, S.A. and Sugden, D.E., 1984, *Geomorphology* Methuen, London and New York, pp.605
 - 20.Church, M.A., Mclean, D.G. and Wolcott, J.F., 1987, River bed gravel: sampling and analysis, *Sediment Trasport in Gravel-bed River*, pp.43-78
 - 21.Church, M. and Kellerhals, R.,1978 ,On the statistics of grain size variation along a gravel river, *Canadian Journal of Earth Science*, v15, pp. 1151-1160
 - 22.Coleman, J.M., 1969, Brahmaputra River: Channel processes and sedimentation, *Sedimentary Geology*, 3, pp. 129-239
 - 23.Egiazaroff, I.V. , 1965, Calculation of nonuniform sediment concentrations. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division*,91(HY4), pp. 225-247
 - 24.Fisk, H.N., 1944, Geological invesigation of the alluvial valley of the lower Mississippi river, US Army Corps Eng., Mississippi River Commission, Vicksburg, Mississippi
 - 25.Haschenburger, J.K. and Wilcock, P.R., 2003, Partial transport in a natural gravel bed channel, *Water Resources Research*, v39, n1, pp. ESG 4-1~4-9
 - 26.Hey, R.D. and Thorn, C.R., 1983, Accuracy of surface samples from gravel bed material, *Proc. Am. Soc. Civ. Engrs. J. Hydraul. Eng.*, vl , 109, No.6, pp. 842-851
 - 27.Hey, R.D. and Thorn, C.R., 1986, Stable channels with mobil gravel beds, *Journal of Hydraulic Engineering*, v112, pp. 671-689
 - 28.Hey, R.D., 1976, Impact prediction in the physical environment. In: O’Riordan, T. and Hey, R.D. (Eds), *Environmental Impact Assessment*. Saxon House, Farnborough, pp. 71-81
 - 29.International Standards Organisation, 1977, Liquid flow measurements in open cchannel-bed material sampling, ISO 4364-1977(E)
 - 30.Kellerhals, R. and Bray, D.I., 1971, Sampling procedures for coarse fluvial

- sediments, *Journal of the Hydraulics Division*, v97, pp. 1165-1180
31. Laronne, J.B. and Carson, M.A., 1976, Interrelationships between bed morphology and bed material transport for a small, gravel-bed channel, *Sedimentology*, v23, pp. 67-88
32. Leopold, L.B. and Wolman, M.G., 1957, River channel pattern-braided, meandering and straight, United States Geological Survey, Professional Paper 282B
33. Leopold, L.B. and Langbein, W.B., 1966, River meanders, *Scientific American*, v214, n6, pp. 60-69
34. Leopold, L.B. and Wolman, M.G., 1960, River meanders, *Bulletin of the Geological Society of American*, v71, pp. 769-794
35. Leopold, L.B., Wolman, M.G. and Miller, J.P., 1964, *Fluvial processes in geomorphology*, Freeman, San Francisco, pp. 522
36. Leopold, L. B., 1970, An improved method for size distribution of stream bed gravel, *Water Resources Research*, v6, n5, pp. 1357-1366
37. Lisle, T.E. and Madej, M.A., 1992, Spatial variation in armouring in a channel with high sediment supply, *Dynamics of Gravel-bed Rivers*, pp. 277-293
38. Morris, G.L. and Fan J., 1998, *Reservoir sedimentation handbook*, pp. 8.1-8.41
39. Mosley, M.P. and Tindale, D.S., 1985, Sediment variability and bed material sampling in gravel-bed river, *Earth Surface Processes and Landforms*, v10, pp. 465-482
40. Proffitt, G.T. and Sutherland, A.J., 1983, Transport of non-uniform sediments, *Journal of Hydraulic Research*, 21, n1, pp. 33-43
41. Reid, I., Frostick, I.E. and Brayshaw, A.C., 1992, Microform roughness elements and the selective entrainment and entrapment of particles in gravel-bed Rivers. In : Billi, P., Thorne, C.R., Hey, R.D. and Tacconi, P. (Eds), *Dynamics of Gravel-bed Rivers*. Wiley, Chichester, pp. 251-272
42. Ritter, J. R. and Helley, E. J., 1969, Optical method for determining particle sizes of coarse sediment, *Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey*. Book 5, Chapter 3, Preliminary Report, U.S. Dept. of the Interior, Geological Survey
43. Rice, S. and Church, M., 1998, Grain size along two gravel-bed rivers: statistical variation, spatial pattern and sedimentary links, *Earth Surface Processes and Landforms*, v23, pp. 345-363
44. Richard, K.S., 1982, *Rivers: form and process in alluvial channels*. Methuen, London.

45. Rosgen, D.L., 1994, A classification of nature rivers, *Catena*, v22, pp. 169-199
46. Schumm, S.A., 1963, Sinuosity of alluvial rivers in the great Plain, *Geological Society of American Bulletin*, v74, pp. 1089-1100, 1963
47. Schumm, S.A., 1968, River adjustment to altered hydrologic regime – Murrumbidgee River and palaeochannels Australia, U.S. Geological Survey Professional Paper no.596, pp. 65
48. Schumm, S.A. and Stevens, M.A., 1973, Abrasion in place: a mechanism for rounding and size reduction of coarse sediment in rivers, *Geology*, v1, pp. 37-40
49. Schumm, S.A., 1977, *The fluvial system*, Wiley, New York, pp. 338
50. Shih, S.M. and Komar, P.D., 1990, Differential bedload transport rates in a gravel-bed stream: a grain-size distribution approach, *Earth Surface Processes and Landforms*, v15, pp. 539-552
51. Simons, D.B. and Simons R.K., 1987, Differences between gravel- and sand-bed rivers. In: Thorne, C.R., Bathurst, J.C. and Hey, R.D. (Eds), *Sediment Transport in Gravel-bed River*, Wiley, Chichester, pp. 3-12
52. Thorne, C.R., 1997, Channel types and morphology classification, *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*, pp. 175-179
53. Wiberg, P.L. and Smith, J.D., 1987, Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments, *Water Resources Research*, v23, n8, pp. 1471-1480
54. Wolman, M.G., 1954, A method of sampling coarse river bed material, *Transactions of the American Geophysical Union*, v35, n6, pp. 951-956
55. Yalin, M.S., 1972, *Mechanics of sediment transport*, Pergamon, Oxford

附錄 1

T1 試坑照片



T2 試坑照片



T4 試坑照片



T5 試坑照片

