

# 水庫泥沙濁度與濃度率定關係研究 — 以石門水庫為例

## **Rating Relations between Turbidity and Suspended Solids Concentration of Reservoir Sediment - A Case Study of Shi-Men Reservoir**

逢甲大學  
水利工程學系  
助理教授

**許 盈 松\***  
Yin-Sung Hsu

逢甲大學  
水利工程研究所  
研究生

**蔡 俊 鋒**  
Jun-Feng Cai

逢甲大學  
水利工程學系  
學生

**魏 綺 瑪**  
Chi-Ma Wei

水利署  
水文技術組  
科長

**黃 宏 箎**  
Hung-Pu Huang

### 摘 要

水體濁度觀測為水環境及水資源領域中之例常觀測項目，泥沙濃度則為水資源及水利工程中重要之水文觀測資料。濁度資料對於水生態環境、水資源利用評估及公共用水營運，為極重要判別指標；另一方面，泥沙濃度資料則為集水區保育及河道穩定評估規劃所需之重要基本資料。濁度觀測方式及儀器，相對於傳統泥沙之觀測，其儀器具備自動記錄、即時傳輸功能、自動化程度高、價格較低及設站普遍之優點，且其觀測記錄年、資料量普遍累積較長。雖河川中懸移泥沙濃度與濁度之物理定義不同，但在工程實務應用上仍有許多泥沙濃度資料以濁度資料來替代表示。本文目的在於研究特定水沙條件下之濁度與濃度率定關係，並以石門水庫泥沙為案例，探討試樣水體濁度、濃度觀測數值在不同含沙量條件下之對應及量化關係規律，並依 ISO 標準規範，進行不確定度分析及誤差分析。研究成果顯示，濁度觀測方式之重現性及精度良好，且濁度與濃度測值間對應率定關係明確，但此率定關係與泥沙粒徑及分布組成條件密切相關。

**關鍵詞：**濁度，懸移泥沙濃度，水庫渾水。

### ABSTRACT

Turbidity is a commonly monitored parameter in environmental and water resources

\*通訊作者，逢甲大學水利工程學系研究助理教授，407 台中市西屯區文華路 100 號，yhsu@fcu.edu.tw

investigations, whereas sediment concentration is one of the primary field data needed in water resources and hydrological engineering. The turbidity data is an essential indicator for assessing the quality of aquatic habitat or the utilization of water resource or management of water use. Sediment concentration, on the other hand, is the basic information fundamental to watershed protection and stream channel stabilization. Method and apparatus used for monitoring turbidity, compared to those of sediment concentration, have many advantages, such as being highly automatic, capable of instant recording and data transmitting, low cost, and flexible setup at observation stations. In addition, continuous turbidity measurements can be done for periods of years, accumulating considerable amount of data. Despite of having different physical definitions, turbidity has been used as a surrogate of suspended sediment concentration in some engineering applications. This paper is to study the rating relations between turbidity and suspended sediment concentration under given water-sediment combinations. Using the Shi-Men Reservoir as case study, we investigated and quantified the rating relations between turbidity and suspended sediment concentration samples collected under different field conditions. Based on the ISO standard, uncertainty analysis and error analysis are conducted. The results indicate that the turbidity monitoring method demonstrates good repetitiveness and precision, and a distinct relation between the sampled turbidity and concentration. The rating relation is closely related to sediment size and sediment particle size distribution.

**Keywords:** Turbidity, Suspended Solids, Concentration, Reservoir turbidity.

## 一、前言

懸移泥沙或懸移固體(Suspended Solids)為水庫泥沙淤積組成中之主要部分，亦佔了河川泥沙中之大部分(錢寧、萬兆惠，1991)。河川中泥沙輸移總載(Total Load)依運動形式特性可區分為推移載(Bed Load)及懸移載(Suspended Load)，依泥沙來源不同則可區分為河床質(Bed Material)及沖洗質(Wash Material)。懸移載依各河川流域、河道及水文特性，佔整個輸移總載中不同比重。一般而言懸移載推移量可能佔輸移總載總量約25%。因推移質觀測不易(Lee and Hsu, 1994)，觀測資料在時間及空間上之代表性低；相較之下，懸移質觀測技術較成熟、觀測可行性較高，並可藉由懸移質濃度推估推移質輸移量。但在天然水體之現地觀測環境，懸移質泥沙觀測技術之即時自動化仍有許多瓶頸，現階段之懸移質觀測仍偏重於人工操作，故經常受限於天候、交通及

經費條件限制，以致泥沙濃度資料質量、記錄歷時代表性仍顯不足(許盈松，陳昶憲，周湘俊，2005)。

濁度觀測為水環境及水資源領域中之重要觀測項目，濁度測值常用來作為判別水生態環境、水資源利用及公共用水營運之可靠度指標(USGS, 2003；環保署，2002)。因濁度觀測方式及儀器發展，相對於傳統泥沙之觀測方法及技術，其儀器工業化及自動化程度高、價格較低，並具備自動化即時觀測功能。故濁度觀測設站較普遍，觀測歷時、資料量累積較長。雖河川中懸移泥沙濃度與濁度之物理定義不同，但在工程實務應用上仍有許多案例之泥沙濃度以濁度資料來替代表示。如台灣地區慣用濁度作為判別公共用水原水供水可靠度指標。近年來石門水庫受上游集水區崩坍土沙影響，每遇大雨，即造成入流渾水中含沙量大增。2004年納莉風災中大量洪水挾帶泥沙輸移入庫，導致水庫原水濁度劇增至

70,000-120,000NTU，造成桃園地區嚴重限水情形，對於桃園地區民生及各項產業影響甚鉅。故如何掌握水庫與集水區之即時泥沙濃度或濁度資料，進而建立其流域水、沙特性關係，提供水庫營運操作管理、水庫減淤及排淤規劃，以提高水庫供水可靠度及維持水庫有效庫容，實為台灣當前水資源永續經營最重要課題。

濁度觀測單位(Nephelometric turbidity unit，簡稱 NTU)，其觀測原理為在特定條件下，比較水樣和標準參考濁度懸浮液對特定光源散射光的強度，以測定水樣的濁度。散射光強度愈大者，其濁度亦愈大。濃度，則係指一定體積渾水中所含泥沙重量，單位以 PPM (百萬分之一)或 mg/L 表示。國內外一般皆以濁度作為量測水質的標準；由於濁度是考慮散色光強度去進行數據的測量，其所測量的數值容易受顆粒大小、粒徑分布、泥沙形狀、顏色所影響，並且濁度儀觀測受透光度影響，一般濁度計(Turbidimeter)只能量測到 3,000NTU 左右的數值。本文擬對石門水庫泥沙濁度與濃度之相關性進行研究，並探討濁度觀測誤差、不確定度及濁度、濃度兩者間之率定關係特性。

## 二、觀測原理與方法

### 1. 濁度觀測

濁度是水的透明程度的量度。濁度高的水樣會混濁不清，或者說不透明；而濁度低的水樣則顯得清澈透明。濁度是由各類微小顆粒，如淤泥、黏土、微生物和有機物等引起。濁度並非對這些顆粒物的直接量度，而是這些顆粒物對光的散射情況的量度。濁度可定義為：「穿過樣品中的光發生散射或吸收光線而不是沿直線穿透的光學特性的表徵」(America Public Health Association, 2001)。濁度觀測原理係根據廷德爾效應(Tyndall Effect)，散射光的強度與水中的顆粒多少成正比。散射光的空間分佈(Spatial Distribution)與顆粒的形狀和大小有相對關係。

濁度測量的儀器稱作濁度計，濁度的單位有 NTU、FNU、FTU、FAU 和 JTU 等。濁度計發出光線，使之穿過一段樣品，並從與入射光呈

90°的方向上檢測有多少光被水中的顆粒物所散射，這種散射光測量方法稱作散射法。NTU 及 FNU 都是以此原理進行量測，NTU 單位慣用於美國環保署(US EPA, 1993)，FNU則用於歐洲的 ISO7027濁度方法。本研究試驗則採用 NTU 作為濁度觀測的單位(ISO,1999)。綜言之，主要影響濁度觀測結果的原因包括：(1)水樣中漂浮碎屑(Debris)和快速沈降的粗粒沈積物會使濁度值偏低；(2)微小的氣泡會使濁度值偏高；(3)水樣中因含溶解性物質而產生顏色時，該溶解性物質會吸收光而使濁度值降低；及(4)裝置樣品之玻璃試管不乾淨或振動時，所得的結果將不準確(US EPA, 1999)。故濁度觀測過程中對環境因素之瞭解或控制條件之掌握，將影響觀測資料品質。

### 2. 濃度觀測

泥沙濃度量測為計算單位水體中所含的泥沙重量，量測方法為將採集的水樣，進行烘乾秤重，量出所含的泥沙重，由下式計算(ASTM, 2003a, b)：

$$\text{濃度(PPM)} = \frac{(\text{總重}-\text{蒸發皿重}) \times 1000}{\text{樣品體積}} \dots\dots\dots (1)$$

式中，總重即為蒸發皿與烘乾後的固體重量，求得的濃度單位 PPM 或 mg/L，本文試驗所調配的標準濃度係根據此法，於固定的水體加入特定質量泥沙，作為其標準濃度(環保署，2002)。

## 三、研究方法

### 1. 研究區域

石門水庫為兼具灌溉、發電、公共給水、防洪及觀光等效益之多目標水庫，營運已逾 40 年，對於提升農工商業發展，以及防澇減旱等方面，均有重大貢獻。水庫集水區山坡陡峻、溪流湍急、地質構造複雜，於 921 大地震後造成岩盤土石鬆軟，集水區不時有坡地崩塌及大量土壤沖蝕情況。因本研究試驗泥沙主要針對較均勻細小之天然懸移質，故採樣來源擬以通過水庫水體分選(Sorting)及沉積(Deposition)作用後，運移至下游庫區淤積及經過洩洪排沙作用，運移至水庫下游

表 1 採樣樣區位置

樣區編號	採樣位置	樣區概述
A	石門水庫庫區淤泥	由庫底取出的淤泥，成分多為黏土。
B	鳶山堰區淤泥	位於板新給水廠旁，採其岸邊淤泥，含有少許細沙。
C	後池堰區淤泥	大壩下游後池堰，含有一部分細小沙礫。

表 2 MiniSonde 5 水質分析儀規格

Self-cleaning Turbidity	
測量範圍	0 to 3,000 NTU
精確度	±1% up to 100 NTU, ±3% up to 100-400 NTU, ±5% from 400-3,000 NTU
解析度	0.1, up to 400 NTU; 1.0, 400-3,000 NTU

河道淤積之泥沙樣本。本試驗考慮採樣之代表性及便利性，採樣地點分別選定如下。A 樣區：水庫庫區內取水口附近之淤泥；B 樣區：下游之鳶山堰內淤沙；C 樣區：大壩下游之後池堰內淤沙等三處採樣區。採樣區編號及樣區位址條件概述如表 1 所示。

## 2. 試驗設備

本試驗利用光學式濁度計(Optical Backscatter Turbidimeter)對試驗樣本進行觀測，並與標準濃度進行比對分析。

由於現地取回之沙樣中有樹枝、雜草等雜質，故需先將樣體以粗篩過濾，置於烘箱中烘乾，再以篩網過濾，只收集通過#50 號篩以下的樣體進行試驗。主要試驗設備及用途說明如下：

- (1) 濁度計：觀測試驗樣本濁度係採用 HYDROLAB 公司生產的 MiniSonde 5 水質分析儀的野外型自清式濁度感應器 (Self-cleaning Turbidity)，感應器規格列於表 2。
- (2) 渾水攪拌桶：直徑約 30cm，桶高約 45cm。
- (3) 攪拌用沉水馬達：置於桶中循環抽水，以使渾水水體能保持均勻狀態。
- (4) 筆記型電腦一台：與水質儀連接，作為訊號存取分析使用。

表 3 A 採樣區濁度試驗結果

標準濃度 (PPM)	濁度平均 (NTU)	標準偏差 (NTU)
300	400.92	1.950385
600	737.8	3.852849
900	1,101.7	9.832486
1,200	1,464.1	9.89332
1,500	1,921.4	12.13077
1,800	2,298.9	13.1947
2,100	2,722.8	38.23262

表 4 B 採樣區濁度試驗結果

標準濃度 (PPM)	濁度平均 (NTU)	標準偏差 (NTU)
200	321.71	109.831
400	308.76	23.11585
600	453.3	4.967673
800	627.1	11.58975
1,000	760.3	12.77193
1,200	915.7	11.32402
1,400	941.5	11.54941
1,600	1,070.9	10.89801
1,800	1214	22.46973
2,000	1,427.6	26.32363
2,200	1,701.6	107.4029
2,400	1,740.6	51.07119
2,600	1,740.6	51.07119
2,800	1,931.5	57.13386
3,000	1,949.5	34.19308

- (5) 電子秤：讀數達克以下小數第四位的電子秤，量測準確性須達小數第二位。

## 3. 試驗方法

本試驗中沙樣取回經初步粗篩樹枝等雜質後，將含水沙樣編號分批置於烘箱中以 105-110°C 溫度進行烘乾作業。烘乾後結塊土樣須反覆搗碎均勻，再依試驗條件分次秤重配比不同體積濃度試樣進行試驗觀測。A、B、C 三試樣之標準濃度條件略有不同，體積濃度條件設定介於 200-3,000PPM 間，如表 3 至表 5 所示。每一組試驗之濁度觀測過程中，需保持試樣中懸移泥沙均勻性，待濁度測值顯示穩定後再做記錄存取，並間隔短暫時間後重複測讀紀錄，每組試驗必須累積 10 次有效測讀紀錄以供統計分析。

表 5 C 採樣區濁度試驗結果

標準濃度 (PPM)	濁度平均 (NTU)	標準偏差 (NTU)
300	346.95	3.167641
600	585	2.513123
900	817.5	0.486664
1,200	1,027.5	7.889033
1,500	1,314.6	5.303425
1,800	1,589.6	9.131784
2,100	1,876.2	25.62441
2,400	2,156.1	16.70629
2,700	2,424.1	13.63992
3,000	2,663.5	11.8688

## 四、試驗結果

### 1. 粒徑分析

將 A、B、C 三個樣區泥沙分別進行粒徑分析，由於 A 區沙樣幾乎全部通過 #200 號篩網，故將 A 區沙樣進行比重計試驗，其粒徑分布如圖 1 所示；B 區及 C 區沙樣則進行篩分析試驗，其粒徑分布如圖 2 所示。顯示落淤於石門水庫庫區內之 A 區沙樣較為均勻，多屬黏土及粉土。B 區為下游鳶山堰區落淤之沉滓，以細沙為主。C 區沙樣為水庫洩洪排沙至後池堰區落淤之沉滓，以細沙佔多數，但粒徑較 B 區略粗。

分析三者的平均粒徑，A 樣區沙樣由於比重計分析並未完全落淤，以  $D_{50}$  做為其平均粒徑，則其平均粒徑為 0.0057mm (A 樣區)；B、C 樣區平均粒徑經計算  $((D_{84}+D_{16})/2)$ ，鳶山堰區底泥為 0.1435mm (B 樣區)，後池堰區底泥為 0.2145mm (C 樣區)。 $D_{84}$ 、 $D_{16}$  分別為篩分析 84%、16% 通過百分率之代表粒徑。前述三區落淤沉滓之粒徑特性亦符合石門水庫泥沙輸移過程中，渾水水流在不同水體深度、不同沿程位置，渾水中泥沙沿程分選、落淤之水力特性。另分析本試驗沙樣均勻係數  $C_u$  ( $D_{60}/D_{10}$ )，B 樣區的均勻係數為 4.24，C 樣區的均勻係數則為 5.44，顯示 B 樣區沙樣的粒徑分布則較為均勻，而 C 樣區沙樣粒徑分佈較廣，大顆粒泥沙較多。

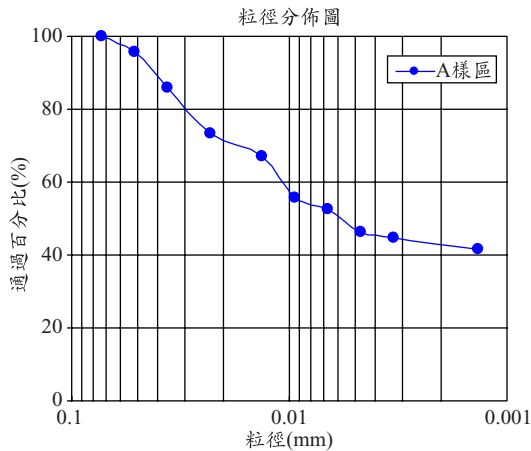


圖 1 A 樣區粒徑分布

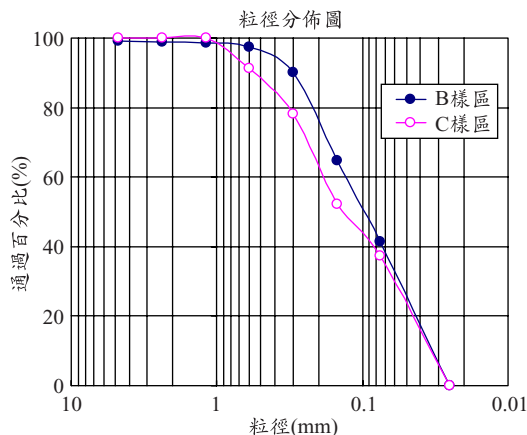


圖 2 B、C 樣區粒徑分布

### 2. 濁度觀測試驗

A、B、C 三區沙樣之濁度觀測試驗結果如表 3 至表 5 所示，每一組觀測結果之平均值皆為 10 個測值所平均。A 區沙樣之濁度讀數平均值皆明顯高於標準濃度，B、C 區沙樣濁度讀數平均值則略低於標準濃度。

## 五、分析與討論

### 1. 迴歸分析

將本次試驗結果之標準濃度 (PPM) 與濁度觀測平均值 (NTU)，進行線性迴歸分析，分析結果如圖 3 至圖 5 所示。各樣區沙樣之標準濃度與濁度觀測平均值間之線性關係皆極為良好，A、B、

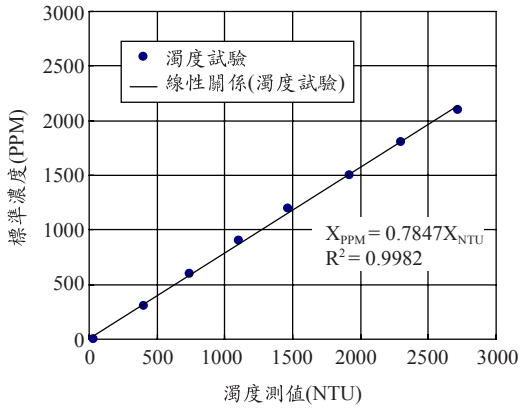


圖 3 A 樣區沙樣濁度試驗率定關係

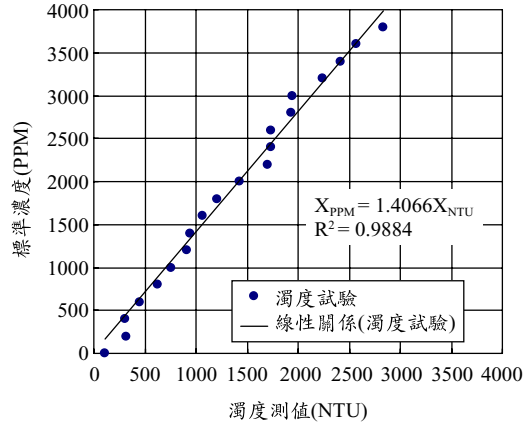


圖 5 C 點沙樣濁度試驗率定關係

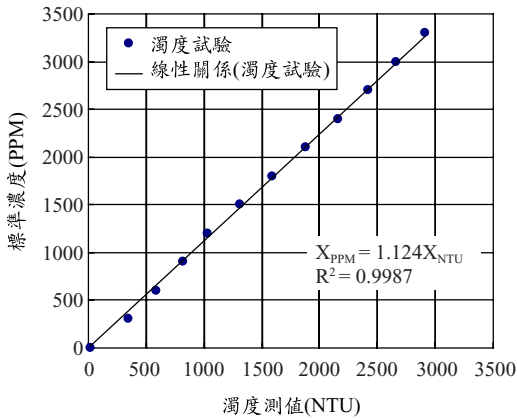


圖 4 B 樣區沙樣濁度試驗率定關係

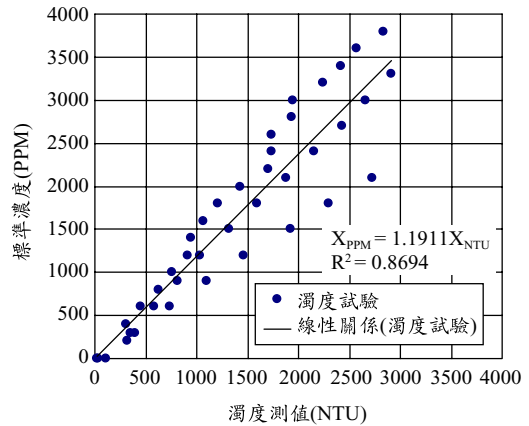


圖 6 A、B、C 沙樣濁度試驗綜合率定關係

C 三區沙樣之  $R^2$  的值分別 0.9983、0.9990、0.9895，A、B、C 區濃度與濁度間之率定轉換關係分別為以下三式：

$$X_{PPM} = 0.7847X_{NTU} \quad R^2 = 0.9982 \dots \dots \dots (2)$$

$$X_{PPM} = 1.1240X_{NTU} \quad R^2 = 0.9987 \dots \dots \dots (3)$$

$$X_{PPM} = 1.4066X_{NTU} \quad R^2 = 0.9884 \dots \dots \dots (4)$$

此外將三組試驗所有量測得的數據，綜合一起進行線性迴歸分析，如圖 6 所示，標準濃度與濁度率定轉換關係為下式：

$$X_{PPM} = 1.1911X_{NTU} \quad R^2 = 0.8694 \dots \dots \dots (5)$$

式中， $X_{NTU}$  為試驗中濁度測值(NTU)，未來應用時可視為現地濁度觀測資料； $X_{PPM}$  為試驗中所配置標準濃度(PPM)，未來應用時可視為經由濁

度觀測資料轉換獲得之體積濃度。將沙樣分類後之觀測結果進行分析，如圖(2)-(4)式顯示濁度試驗觀測之濁度值與標準濃度的率定關係線性度都非常良好，線性關係斜率變化具備規律性。對照各樣區粒徑分析結果，可以發現泥沙顆粒平均粒徑越大者，其線性關係之斜率越大。A、B、C 樣區平均粒徑分別為 0.0057、0.1435 及 0.2145mm，其對應之線性關係斜率分別為 0.7847、1.1240 及 1.4066。推測可能為平均粒徑較粗的樣體，其顆粒懸浮均勻度較低，且因特定渾水水體中之顆粒越大，群體顆粒之總表面積較小，光學反射量較低，故易導致濁度計觀測所得之濁度值偏低，即光學式儀器於觀測較粗顆粒時辨識能力較低。另 A 樣區沙樣皆通過 #200 篩

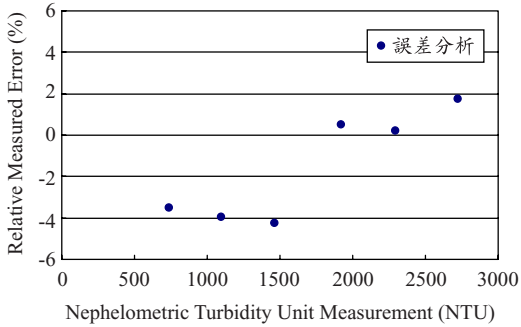


圖 7 A 樣區沙樣濁度觀測誤差分析

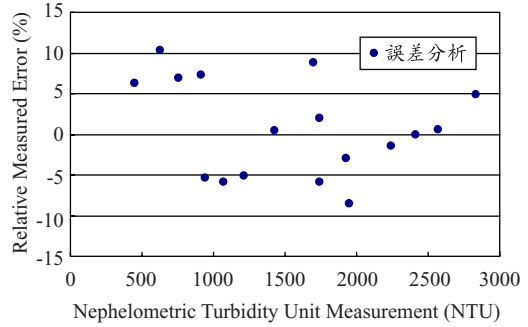


圖 9 C 樣區沙樣濁度觀測誤差分析

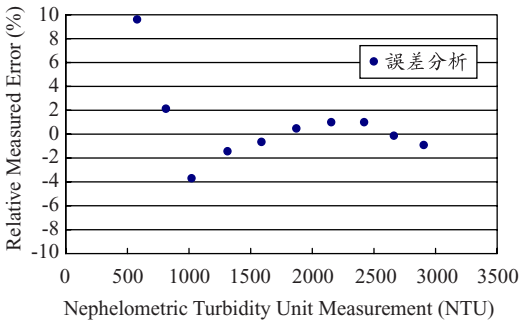


圖 8 B 樣區沙樣濁度觀測誤差分析

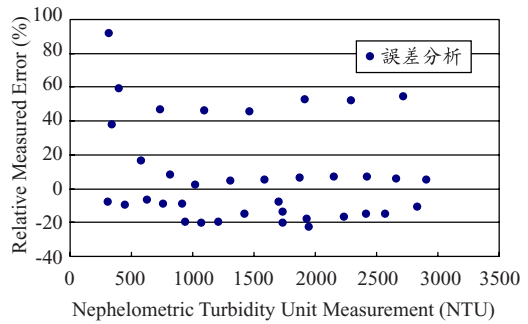


圖 10 A、B、C 沙樣濁度試驗誤差分析

網，其粒徑分布極為均勻；而 B、C 樣區沙樣均勻細數分別為 4.24 及 5.44。顯示沙樣越不平均、均勻係數越高者，亦容易使觀測所得濁度值偏低。若將 A、B、C 沙樣試驗結果綜合分析，可以發現線性關係仍然存在，但  $R^2$  值已降至 0.8694，線性關係斜率則為 1.1911，斜率介於 B、C 沙樣試驗結果間。由(2)-(4)式之濁度推估關係式，未來在許多不同應用領域之泥沙濃度推估上，將可以由濁度測值推得較具代表性之濃度值。

## 2. 誤差分析

藉由前述試驗結果之濁度(NTU)-濃度(PPM)率定關係，可以將濁度測值轉換為濃度單位。為瞭解轉換後濃度測值與試樣實際濃度間之誤差，將利用下式進行誤差分析：

$$\frac{X_{PPM}(\text{estimated value}) - X_{PPM}(\text{real value})}{X_{PPM}(\text{real value})} \times 100\% \dots\dots\dots(6)$$

式中， $X_{PPM}(\text{estimated value})$  表經由(2)至(5)式推

得之濃度值， $X_{PPM}(\text{real value})$  為試驗中之標準濃度值。分析結果如圖 7 至圖 10 所示，顯示 A 樣區沙樣濁度觀測值轉換為濃度時之觀測誤差為 -5% 至 2% 之間；B 樣區沙樣之觀測誤差為 -4% 至 10% 之間；C 樣區沙樣濁度觀測值轉換為濃度時之觀測誤差大約在 -10% 至 11% 之間。三樣區之誤差分析變動趨勢，亦呈現規律變化。A 樣區因沙樣平均粒徑較小、分布組成均勻，濁度觀測誤差最小。B 樣區沙樣平均粒徑介於 A、C 間，故濁度觀測誤差亦介於兩者之間。C 樣區沙樣平均粒徑較大，大顆粒所佔百分較多，其濁度觀測誤差亦較大。另若將三樣區觀測結果綜合分析之率定關係，進行誤差分析，結果如圖 10 所示，可發現若沙樣未經分類，則其濁度與濃度率定關係之誤差將過大。故本試驗所建立之濁度-濃度率定關係(2)-(4)式，具有一定之代表性與精確性。未來可利用濁度計觀測結果，經由本試驗所建立率定關係轉換為泥沙濃度，以提供作為水文觀測資料中較難獲得之懸移泥沙濃度。

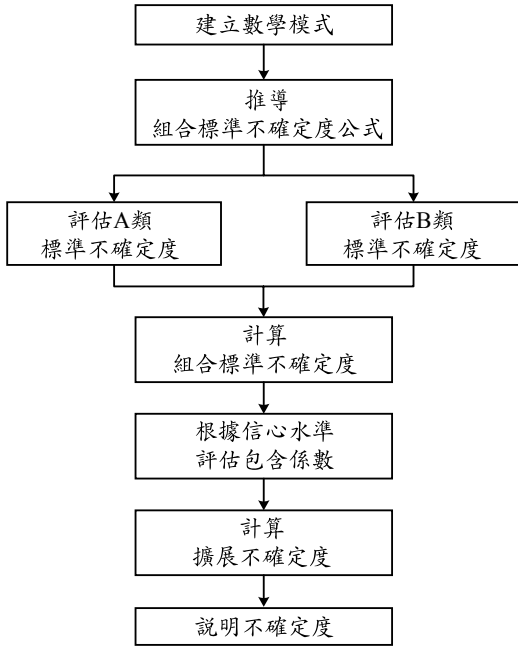


圖 11 不確定度分析流程

### 3. 不確定度分析

為瞭解不同沙樣、濃度範圍之濁度測值重現性與穩定性，故對濁度測值進行不確定度分析 (Uncertainty Analysis)。Abernethy and Thompson (1980)對於土木水利工程領域之不確定度分析工作，有清楚之流程及案例可供參考。本研究之不確定度評估程序，是根據 ISO 量測不確定度表示指引中之規範 (Taylor and Kuyatt, 1994)，並以一階變異估計法為分析方法，不確定度評估程序如圖 11 所示 (許盈松等，2003)。

本研究濁度觀測試驗過程中，試驗渾水需維持均勻攪拌，濁度計觀測時需注意在短時間內濁度測值無明顯上升或下降變化情形下，存取濁度計顯示數值作為一次紀錄。在同一試驗條件下並重複進行 10 次量測，以進行資料統計分析工作。根據 1995 年版 ISO 量測不確定度表示指引，評估量測不確定度。

#### (1) 數學公式

$$W = G \dots\dots\dots(7)$$

式中，W 為濁度 (NTU)；及 G 為水質儀的濁度測量值 (NTU)。

#### (2) 輸入量 G 之標準不確定度

##### (a) A 類不確定度

試驗中從重複量測濁度 n 次可得濁度的平均值：

$$\bar{G} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n G_j \dots\dots\dots(8)$$

標準偏差：

$$S_G = \sqrt{\frac{\sum (G_j - \bar{G})^2}{n-1}} = u_A(G_j) \dots\dots\dots(9)$$

式中， $G_j$  為於第 j 次量測結果；及 n 為量測次數。自由度：

$$v_A(G) = \sum_{i=1}^m v_i = n-1 \dots\dots\dots(10)$$

##### (b) B 類不確定度

由儀器原廠設定可得其不確定度在 0-100NTU 為  $\pm 1\%$ ，100-400NTU 為  $\pm 3\%$ ，400-3,000NTU 之間為  $\pm 5\%$ ，因此  $v_B(G)$  視 NTU 值大小而定。

#### (3) 組合標準不確定度

(a) 數學模型  $W = G$ ，靈敏係數  $\frac{\partial W}{\partial G} = 1$ 。

(b) 組成標準不確定度計算

$$u_c^2(W) = \sum_i \left[ \frac{\partial W}{\partial G} \right]^2 u^2(G) :$$

$$u_c(W) = \sqrt{\left( \frac{\partial W}{\partial G} u(G) \right)^2} = 1 * u(G) = u(G) \dots\dots\dots(11)$$

(c) 組成標準不確定度之自由度

$$v_{eff}(W) = \frac{u_c^4(W)}{(1 * u(G))^4} = v(G) \dots\dots\dots(12)$$

所以

$$v_{eff}(W) = v(G) = n-1 \dots\dots\dots(13)$$

#### (4) 擴展不確定度評定

取  $p=95\%$ ，查 t 分布， $t_{95}(v_{eff}(H)) = k_p = 1.984$ 。



表 6 A 點樣區沙樣濁度觀測不確定度分析

標準濃度 (PPM)	靈敏係數 a	$u_A$ (NTU)	$u_B$ (NTU)	$U_C(V)$ (NTU)	包含係數 $K_p$	擴展不確定 $U_v$ (NTU)
0	1	5.119	0.01	5.119	1.984	10.155
300	1	6.590	0.05	6.5899	1.984	13.0743
600	1	47.625	0.05	47.625	1.984	94.488
900	1	28.731	0.05	28.731	1.984	57.003
1,200	1	34.802	0.05	34.802	1.984	69.0463
1,500	1	62.583	0.05	62.583	1.984	124.165
1,800	1	35.597	0.05	35.597	1.984	70.624
2,100	1	93.304	0.05	93.304	1.984	185.116

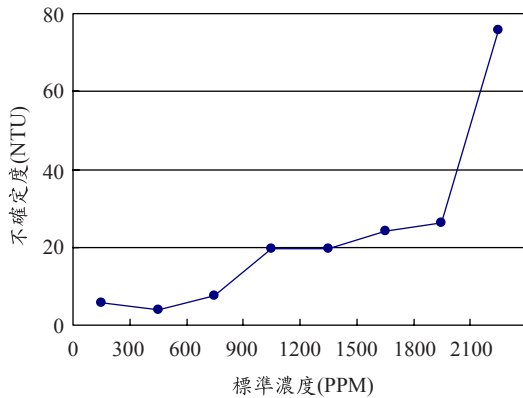


圖 12 A 樣區沙樣濁度觀測不確定度分析

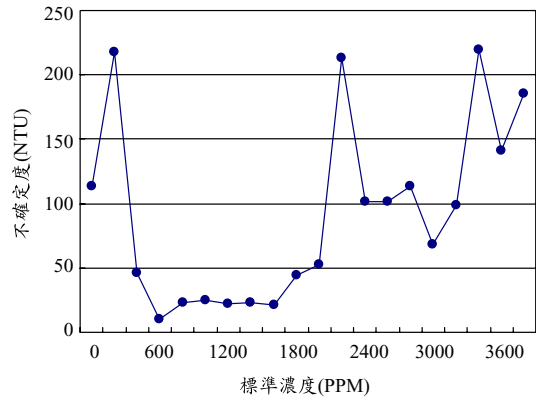


圖 14 C 樣區沙樣濁度觀測不確定度分析

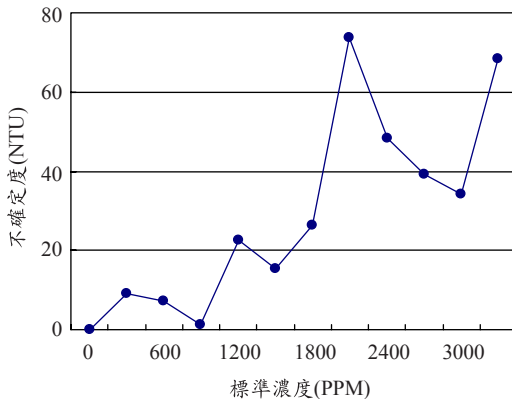


圖 13 B 樣區沙樣濁度觀測不確定度分析

不確定度分析結果。顯示在同一沙樣條件下，濃度條件漸增，濁度觀測之擴展不確定度亦漸增。圖 12 至圖 14 所示為不同沙樣濁度觀測不確定度分析結果。可以看出 C 樣區沙樣因平均粒徑較大，泥沙懸浮較不均勻，故試驗過程中之濁度測值變動較大，故擴展不確定度較大。A 樣區石門底泥多為通過 #200 篩網之黏土、粉土，泥沙懸浮較均勻，故試驗過程中之濁度測值較穩定，擴展不確定度較小。而 B 樣區泥沙粒徑、分布組成條件介於兩者間，故其擴展不確定度變化介於兩者之間。

## 六、結論與建議

在水環境與水資源營運管理上，因濁度觀測設站較普遍，濁度觀測紀錄年、資料量累積較豐富。雖河川中懸移泥沙濃度與濁度之物理定義不同，但在工程實務應用上，國內外仍有許多案例

擴展不確定度：

$$U_v(G) = k_p u_c(G) \dots\dots\dots(14)$$

根據上述(1)至(4)步驟計算，可得三樣區濁度測值不確定度，表 6 所示為 A 樣區沙樣觀測

之泥沙濃度資料乃藉由濁度資料來轉換或替代表示。本研究發現在特定泥沙粒徑及組成條件下，渾水試樣之濁度測值 NTU 與實際濃度 PPM 間之線性關係良好。但對於不同泥沙粒徑或組成條件，雖仍存在良好線性關係，但其率定曲線斜率存在明顯規律變化。在本試驗條件下，泥沙粒徑越大或越不均勻，濁度測值將較實際濃度值越低。經由不確定度分析結果，可以看出平均粒徑較大土樣，因泥沙懸浮較不均勻，試驗過程中之濁度測值變動較大，故其擴展不確定度較大。A 樣區石門底泥多為通過 #200 篩網之黏土或粉土，泥沙懸浮較均勻，故試驗過程中之濁度測值較穩定，不確定度、誤差較小。本研究結果顯示，若沙樣經過適當分類後，進行濁度觀測試驗，則濁度與濃度率定關係之線性度及  $R^2$  值較佳，且其觀測誤差較低。

### 參考文獻

1. Abernethy, R. B., and Thompson, J. W., (1980), *Measurement uncertainty handbook*, The Aerospace Industries Division of Instrument Society of America, National Technical Information Service.
2. American Public Health Association, (2001), 2130 B. Turbidity-standard methods for the examination of water and wastewater, 20th Edition: Washington, D.C.
3. ASTM International,(2003a), *D1889-00 Standard test method for turbidity of water, in ASTM International, Annual Book of ASTM Standards, Water and Environmental Technology*, 2003, V. 11.01, West Conshohocken, Pennsylvania, 6.
4. ASTM International, (2003b), D6855-03 Standard test method for determination for turbidity below NTU in static mode: ASTM International, Annual Book of Standards, Water and Environmental Technology, V. 11.01, West Conshohocken, Pennsylvania. International Organization for Standardization, (1999), Water quality – determination of turbidity: Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, ISO7027, 10.
5. Lee, H. Y., and Hsu, I. S.,(1994). “Investigation of saltating particle motions,” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 7, 831-845.
6. Taylor, Barry N., and Kuyatt, Chris E., (1994), NIST technical note 1297, guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results, NIST, USA.
7. US Environmental Protection Agency, (1993), *Methods for the Determination of Inorganic Substances in Environmental Samples: Cincinnati, Ohio*, EPA/600/R-93/100, 178.
8. US Environmental Protection Agency, (1999), *Guidance Manual for Compliance with the Interim Enhance Surface Water Temperature Rule-Turbidity provisions: Washington, D.C.*, US EPA, Office of Water, EPA 815-R-99-010.
9. U.S Geological Survey, (2003), *National field manual for the collection of water-quality data: U.S Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations*, book 9, chaps. A1-A9.
10. 錢寧，萬兆惠(1991)，「泥沙運動力學」，科學出版社，中國大陸。
11. 樊國紀(2001)，「量測不確定度評估基礎理論與實務」，工研院量測技術發展中心。
12. 環保署(2002)，「水質類檢測方法-水中總溶解固體及懸浮固體檢測方法(W210.55A)」，台北。
13. 許盈松，劉家豪，楊錦釧(2003)，“普萊氏流速儀量測不確定度評估”，台灣水利季刊，第 51 卷，第 2 期，22-33。
14. 許盈松，陳昶憲，周湘俊 (2005)，「河川流量量測技術革新研究計畫」，經濟部水利署，台北。

收稿日期：民國 95 年 8 月 15 日

修正日期：民國 95 年 11 月 29 日

接受日期：民國 95 年 12 月 1 日