

截流系統對基隆河水理影響之研究

Influence of Interceptor System on the Hydraulic Characteristics in Keelung River

國立臺灣大學農工研究所副教授

國立臺灣大學農工研究所研究生

許 銘 熙

連 上 堯

Ming-Hsi Hsu

Shang-Yau Lien

摘 要

淡水河系污染整治規劃初期工程採用截流方案，截流系統完成後，部份流量被截流而未返回河川中，對河川水理特性必然造成影響，尤以枯水期時影響較為顯著。截流工程初期以基隆河流域為實施地區，為研究截流系統對河川水理之影響，本文乃以一維緩變量流方程式為基礎，利用以四點隱式差分法建立數學模式以進行水理模擬，比較有、無截流系統情況下基隆河之水理特性。

本研究模擬結果與現場實測數據大致相符，證實本模式之可行性。並應用本模式評估截流系統對基隆河枯水時期水理影響程度，結果顯示，流量及水位歷線所受到的影響，上游河段較下游為大，並且在截流系統完成後，感潮河段之終點將由目前汐止之江北橋附近上移，即感潮河段將較目前增長。

Abstract

The preliminary planning of the water pollution control for Tanshui river is the interception of waste water. Parts of discharge are intercepted that no more flow back to the river. It is possible to impact on the hydraulic characteristics of the river. The impact will be obvious in the low flow period. The preliminary work of interceptor practices on Keelung river basin. In order to understand the impact on the hydraulic characteristics of Keelung river by the interceptor system, a mathematical model is constructed based on one-dimensional gradually varied flow equation and using the four points implicit finite difference method. The hydraulic characteristics under conditions with or without the interceptor system was investigated by using the model.

The simulated results and the field data was compared in this study. It is found that simulated results is satisfactory and proved the feasibility of the model. By applying this model, the impact on the hydraulic characteristics was evaluated when the interceptor system practiced on Keelung river. It is shown that the impact on the discharge and stage hydrograph of upstream reach is more serious than downstream. As the interceptor system is completed, the tidal reach will be elongated from Chiang-Pei Bridge at present to the upstream of the bridge during the low flow period.

一、前言

淡水河污染整治規劃初期工程採用截流方案，將晴天污廢水截流後，經集中、處理、再予海洋放流。截流之污水量除家庭污水與工業廢水外，尚包括土壤與地下水之滲出量。截流系統完成後，對於防止污染物進入河川有所助益，但因部份流量亦被截流而未返回河川中，致使河川自然流量減低。尤以乾旱季節，自然流量不足，截流系統對河川水理影響更為顯著。基隆河中、下游屬感潮河川，為淡水河主要支流之一，水理特性深受河口潮位起落之影響，在水理上屬於緩變量流況。

本研究之目的在於應用一河川水理模式⁽³⁾，從而對基隆河枯水季節之水理特性作一探討與分析；並就截流方案完成後，對基隆河枯水期水理狀況之影響程度，作一些探討與研究。水理模式係以一維性河川緩變量流方程式為基礎，利用四點隱式差分法以求解枯水期基隆河之流量與水位。

對於河川變量流模式之研究，顏、許氏⁽⁴⁾曾將淡水河流域主流及重要支流組成河川體系，建立一系統化之河川變量流模式；顏氏等⁽⁵⁾曾以變量流理論對基隆河水理特性加以模擬，皆得到良好之結果；惟前二研究係以河川洪流演算為主，未對低流量之流況加以探討。對於淡水河流域之低流量分析，水資會⁽⁶⁾曾求得淡水河流域各地各種頻率連續七日

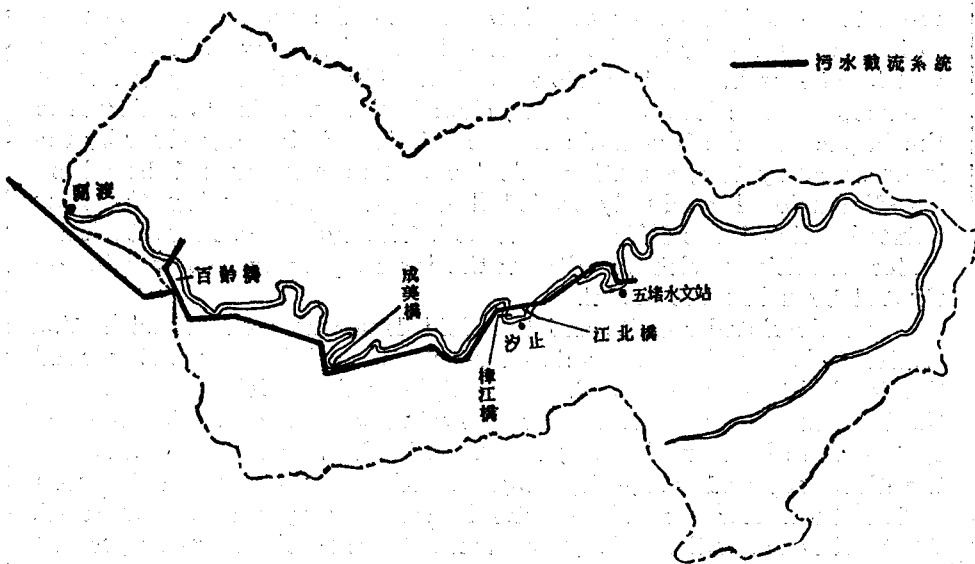
最小平均流量與集水面積之關係；張氏⁽⁶⁾復以對數皮爾遜第三類型分佈理論，對淡水河流域之低流量特性加以探討，得出各種迴歸週期之頻率方程式。

二、研究區域概況

基隆河發源於臺北縣菁桐山，流經瑞芳鎮、基隆市的暖暖區、七堵、北縣汐止，再沿着臺北市的內湖區與南港區交界，及內湖區與臺北市舊市區的邊界，進入士林區，最後沿着士林、北投交界，在關渡附近與淡水河匯流。主流全長86公里，流域面積501平方公里，為臺北市區內主要河川之一。主要支流包括關渡河、北投溪、雙溪、磺港溪、大坑溪、下寮溪、保長坑溪、友蚋溪、瑪陵坑溪、大武崙溪等，流域如圖一所示。

基隆河流域位於亞熱帶氣候區，冬季時受大陸性冷氣團籠罩，東北季風盛行，多地形雨；夏季西南季風吹襲，燠熱而時有陣雨。長年平均雨量以瑞芳附近為最高，流域內各月雨量分配較為平均，為臺灣其它地區罕見之現象，平均年雨量為2,865公釐⁽³⁾。

本研究區為淡水河主要支流之一，中、下游之基隆河段屬感潮河川，受淡水河河口潮位影響，每日河川水位有兩次的起落，常流狀況時，百齡橋（7.03 km，自基隆河口關渡起算）之高低平潮水位差約為1.3公尺左右，愈往上游則差距愈小，感潮



圖一 基隆河流域及截流系統圖

終點約在汐止之江北橋 (35.6 km, 自基隆河口關渡起算) 附近。

基隆河流域自汐止以下, 在民國七十六年底時, 總人口約有二百一十萬人⁽⁷⁾; 據調查⁽⁵⁾, 臺北市轄區內共有卅五條合流式排水溝排入基隆河, 其中以新生排水、五分埔排水、南港排水為其主要之定點排放源; 而在臺北縣境內則以六堵工業區廢水放流口以及汐止排水為主要定點排放源。基隆河流域近年來所產生之污廢水與日俱增, 由於大部份之污廢水未經有效處理即行排入河中; 平時河水已呈污濁, 在枯水季節, 惡臭更四處飄散, 破壞生活環境品質。目前基隆河中、下游部份河段已呈無溶氧狀態, 中山橋 (9.2 km, 自基隆河口關渡起算) 以下更是惡臭撲鼻, 基隆河儼然已變成一條大排水溝。政府當局有鑑於此, 即着手規劃「淡水河污染整治計畫」⁽⁸⁾, 並以基隆河為示範流域; 規劃中之「淡水河污染整治計畫」, 初期工程採用截流系統, 即利用現有之雨水幹線, 配合興建截流設施, 將晴天污水量載入新建之污水管線中, 集中匯入八里污水處理廠, 經一級處理後再行海洋放流; 第一期截流工程自民國七十七年七月開始施工, 全部工程預定民國八十九年完成⁽⁸⁾; 第一期截流工程基隆河流域部份如圖一所示。

因目前研究地區之都市下水道系統屬合流系統, 在截流系統完成後, 晴天時除家庭污水及工業廢水外, 其它水量, 諸如地下水出流量與土壤水出流量等亦遭截除, 使得河川之側流量減少, 降低了河川流量, 影響河川水理特性, 而乾旱枯水季節所受到的影響應更加明顯。

三、枯水期水文分析與河川斷面整理

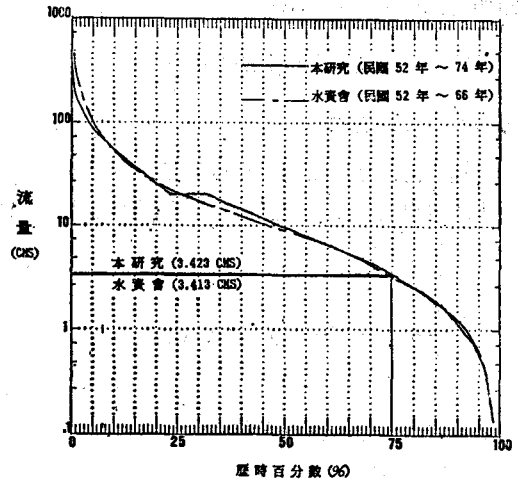
3-1 五堵站之水文分析

本研究區域內有竹子湖、鞍部、臺北、五堵、瑞芳、暖暖等六個雨量站, 但是僅五堵站 (52年設站, 42.5 km, 自基隆河口關渡起算) 有長期之流量觀測紀錄, 沿河其它各處之流量紀錄尚有瑞芳鎮之介壽橋站 (70年設站), 但其紀錄年數過短, 故選取五堵站之流量紀錄作為枯水期流量分析之依據, 而本研究即以五堵水文站 (42.5 km) 作為河川水理計算之上游邊界條件。本研究蒐集民國五十二年至七十四年之五堵站流量紀錄; 分析所得之流量延時曲線 (Flow-Duration Curve) 如圖二所示。圖中並與經濟部水資會⁽⁵⁾之分析結果相比較 (

資料分析至民國六十六年止), 可看出兩者相差不大。

依照「水污染防治法施行細則」第八條⁽⁹⁾規定, 河川水質標準, 以河川歷年歷時百分之七十五 ($Q_{75\%}$) 之流量為準; $Q_{75\%}$ 之意義為一年當中大於或等於該流量之統計日數為275天 ($=365 \times 75\%$)。分析得五堵站之 $Q_{75\%}$ 為 3.42 CMS, 如圖二所示; 而水資會⁽⁵⁾推算得五堵站之 $Q_{75\%}$ 為 3.41 CMS, 與本研究之結果相當接近。

枯水期之低流量基準, 在大陸型國家之河川常採用「十年頻率連續七天之低流量」, 依此基準分析所得基隆河之流量為 0.29 CMS^(5,6), 遠較 $Q_{75\%}$ 為小。因臺灣河川短促, 流量洪枯比大, 採用 $Q_{75\%}$ 應較為合理。本研究之枯水期流量基準採用 $Q_{75\%}$ 。



圖二 五堵站流量歷時曲線

3-2 枯水期側流量分析

五堵站之集水面積為 204.4 平方公里, 約佔基隆河流域面積之 40%; 換言之, 若基隆河流域內之雨量及其降雨損失對空間分佈均勻, 則自五堵站以下尚有 60% 之流量係以側流方式進入基隆河中, 但基隆河自五堵站以下沒有固定之流量站, 且中、下游又受潮位影響, 無法取得資料以準確估計其側流量。本研究係以流量——面積比例法⁽⁸⁾來推求, 即假設流量與集水面積係成正比關係, 以五堵站之水文分析資料為基礎, 推估五堵站以下之側流量。依此方法推得五堵站以下總側流量之 $Q_{75\%}$ 為 4.97 CMS。而基隆河中、下游各河段之側流集水面積極為均勻 (見圖一), 因此將總側流量均勻分配至五堵站以下各河段中。

3-3 城鎮污水量分析

基隆河自五堵以下，沿岸之總排污人口約二百一十萬人，截流之污水量若以每人每日 360公升⁽⁸⁾，達流率為0.57⁽⁹⁾計，則每天排入基隆河之總污水量約為4.99 CMS，當截流系統完成後，此部份之流量將被截除，而不再流入基隆河中。

3-4 河川斷面整理

自然河川之斷面極不規則，為了便於計算機之處理與儲存，將河道斷面予以規則化，使其在相同水深下具有與原來斷面相等之通水面積。本研究之斷面資料來源，成美橋 (23.3 km，自基隆河口關渡起算) 以下採民國七十五年水利局實測數據，成美橋以上近幾年水利局並無實測之斷面資料，故採用民國七十一年臺大土木系所測之資料。其規則化斷面型式詳見參考文獻⁽⁴⁾。

四、河川變量流模式

4-1 控制方程式

描述河川水理狀況，可根據 de Saint Venant 所導出的一維變量流連續及運動方程式⁽¹⁾：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_1 \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) - gA \left(S_0 - \frac{\partial Y}{\partial x} - S_f \right) - q_1 \cdot V \dots \dots \dots (2)$$

- 式中 A：通水斷面積 [L²]；
- Q：流量 [L³T⁻¹]；
- q₁：單位河段長度之側流量[L³T⁻¹]，包括枯水期側流量及城鎮排入河川之污水量；
- t：時間座標 [T]；
- x：沿水流方向之距離座標 [L]；
- g：重力加速度 [LT⁻²]；
- S₀：底床坡度 [O]；
- Y：水深 [L]；
- S_f：磨擦坡度 = n²Q|Q|/A²R^{4/3}[O]；
- R：水力半徑 [L]；
- n：曼寧糙度係數 [L^{1/6}]；
- V：側流平均速度在x方向之分量 [LT⁻¹]。

(1)與(2)式分別表示水流之連續及動量方程式，(1)式係表示在一單位長度控制體積中，通過該體積

之淨入流量 $(-\frac{\partial Q}{\partial x} + q_1)$ 等於該控制體積內所含水體積之變化率 $(\frac{\partial A}{\partial t})$ ；(2)式表示在一控制體積中，沿x方向之外力總和等於該控制體積中動量對時間之變化率(單位質量)，其外力包括單位質量之重力(gS₀)、壓力梯度 $(-g\frac{\partial Y}{\partial x})$ 與摩擦阻力 $(-gS_f)$ 等。

(1)式及(2)式為雙曲線型偏微分方程式，天然河道中因變數(Q、A或Y)無法直接求解，須利用數值方法方能得解。本模式以非線性隱式差分法求解各時段及地點之水深與流量。

4-2 非線性隱式差分法

(1)、(2)式中欲解之因變數(Q、A)若以f表示之，依四點隱式差分法寫成差分式如下：

$$f = \frac{1}{2}(f_{j+1}^i + f_j^{i+1})$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x}(f_{j+1}^i - f_j^i) \dots \dots \dots (3)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{2\Delta t}[(f_{j+1}^{i+1} - f_{j+1}^i) + (f_j^{i+1} - f_j^i)]$$

式中 i, j 分別代表時間及空間之座標指數；ΔX = X_{j+1} - X_j，為河道相鄰兩斷面間之距離；Δt = tⁱ⁺¹ - tⁱ，為演算時距。

將(3)式代入(1)及(2)式中，即可將任意兩斷面間(X_{j+1}, X_j)之連續及動量方程式表示成：

$$\left. \begin{aligned} F_j(Q_{j+1}^i, Y_{j+1}^i, Q_j^{i+1}, Y_j^{i+1}) &= 0 \\ G_j(Q_{j+1}^i, Y_{j+1}^i, Q_j^{i+1}, Y_j^{i+1}) &= 0 \end{aligned} \right\} \dots \dots (4)$$

$$j = 1, 2, 3 \dots N - 1$$

(4)式之詳細型式詳見參考文獻(4)；每兩個斷面間即可寫成一組(4)式，如一河道有N站，欲解之變數有2N個，由(4)式可得2(N-1)個差分式，再配合上、下游邊界條件，即有2N個方程式，可解得2N個應變量，但(4)式所組成之聯立方程組為非線性，須利用疊代法求解。本模式採牛頓-拉福森法(Newton-Raphson Method)逐次修正以逼近真解，即(4)式可表成(4)：

$$\left. \begin{aligned} [Q_j^{i+1}]_{k+1} &= [Q_j^{i+1}]_k + [\Delta Q_j]_k \\ [Y_j^{i+1}]_{k+1} &= [Y_j^{i+1}]_k + [\Delta Y_j]_k \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

上式中 k 表疊代次數， ΔQ_j 及 ΔY_j 表每次疊代修正量。(5)式中依河道斷面順序展開可得到一 $2N \times 2N$ 之方矩陣。若邊界條件已知，則(5)式可利用消去法求解之，本模式採樞紐列之高斯消去法(Gauss Elimination Method with Pivot Row)解此矩陣。

檢驗每一次求得之 $\Delta Q_j/Q_j^{j+1}$ 和 $\Delta Y_j/Y_j^{j+1}$ ，若小於一微小值(本模式設定為0.033)則 Q_j^{j+1} 和 Y_j^{j+1} 即為所求之解，依此方法可求得各斷面之流量與水深。

4-3 邊界條件與起始條件

基隆河為淡水河下游支流之一，其水理流況深受淡水河影響，而基隆河下游出口處並無長期之水位或流量觀測紀錄可資引用；為解決變量流模擬之邊界問題，水理模式將演算區域擴展至大漢溪、新店溪及淡水河主流河段。因此，水理模式以五堵水文站(基隆河)、新海橋(大漢溪)、中正橋(新店溪)之流量歷線為上游邊界，淡水河出海口之水位歷線為下游邊界。淡水河系主支流之交匯口之水理情況，則假設水位相等，且進出流量間相平衡⁽⁴⁾。

在從事河系演算時，必須輸入起始條件。通常自然河川之流況並非定量流，起始條件不易獲知。本模式則假設起始時河川中之水流為定量流況，再根據上游邊界起始之流量和下游邊界起始之水深，利用迴水演算，求得每一斷面之起始水深；本方法與實際狀況有明顯之差別，常引起演算起始數個時間段中有明顯偏差的現象；欲消除此偏差，須將上下游邊界條件，各依其紀錄趨勢往前延長數個時間段，如此這些偏差將可隨着演算時間增大而減小。

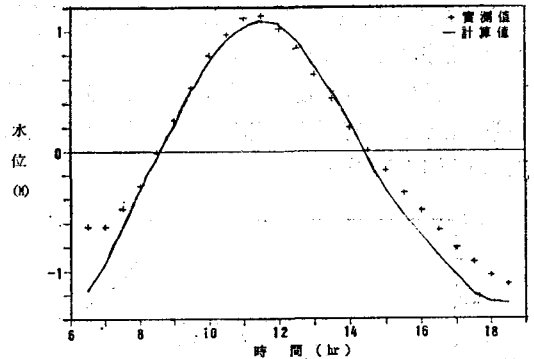
五、模式中參數之檢定與驗證

為了增加模式之可靠性，河道曼寧糙度 n 值在模式應用前，先利用實測資料予以檢定與驗證，使糙度能與現場情況符合。本研究以民國七十五年十月三日及民國七十六年五月十三日兩場實測資料作為檢定依據，輸入之邊界條件包括實測之五堵站流量，中正橋與新海橋之流量歷線，以及河口之潮位歷線。經以不同 n 值組合，作數次演算後，基隆河自河口至五堵之 n 值為0.015~0.025，下流河段之 n 值較上游段為小。檢定演算之結果如圖三所示，

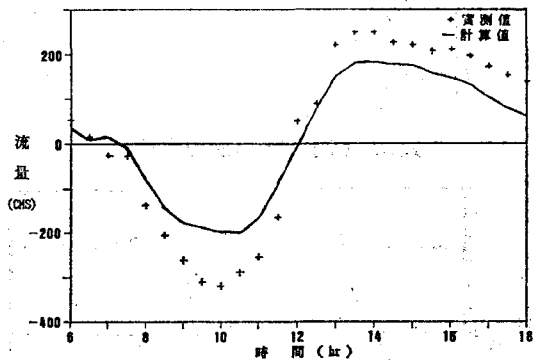
圖三為百齡橋站(7.03 km)計算與實測水位歷線之比較，圖中顯示二者甚為符合。

再以民國七十六年十月廿二日之實測資料對上述之 n 值作驗證，結果如圖四所示。圖四為百齡橋(7.03 km)流量歷線之比較圖，由圖三及圖四可看出水位之計算值與觀測值誤差不大；而流量歷線的趨勢尚稱符合。

結果顯示本模式具有實用性，可作為基隆河枯水期流況預估之工具。



圖三 百齡橋水位歷線之比較
(76年5月13日，檢定用)



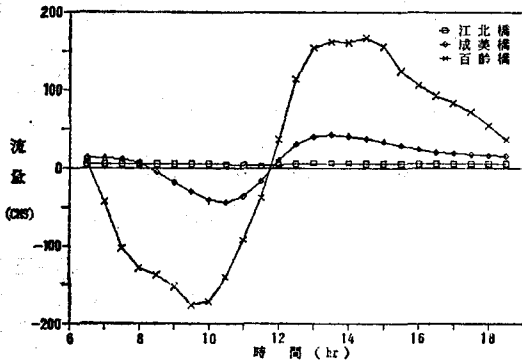
圖四 百齡橋流量歷線之比較
(76年10月22日，驗證用)

六、截流系統對水理之影響

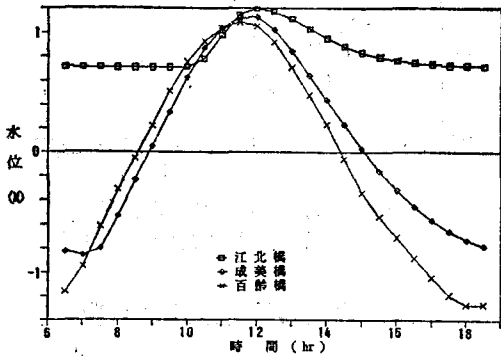
6-1 目前枯水期河川水理模擬

目前，在截流系統未實施前，基隆河中、下游淡水流量可分成三個主要來源，包括五堵站(42.5 km)上游之入流量、五堵以下沿岸之側流量，以及城鎮排放之污水量。若以河川水質觀點採用 $Q_{75\%}$ 作為枯水期之流量標準，則邊界處五堵站之入流量為3.42 CMS。沿岸之側流量為4.97 CMS，沿岸城鎮污水量為4.99 CMS，即總側流量為9.96

CMS。下游邊界條件則因前述三場水理演算中，以民國七十六年五月十三日之五堵站流量（3.80 CMS）與 $Q_{75\%}$ 最為接近，因此選用該日之河口潮位紀錄及新海橋與中正橋之流量實測紀錄，作為枯水期模擬之邊界條件，五堵站則採用 $Q_{75\%}$ 流量。圖五與圖六分別表示江北橋（35.6 km）、成美橋（23.3 km）、百齡橋（7.03 km）三站流量與水位歷線之比較，圖五中顯示在下游之百齡橋，受潮位之影響較大，流量振幅變化約在190 CMS 左右，中游之成美橋為 50 CMS 左右，而上游江北橋則受感潮影響較小；圖六中可看出此三站之水位亦隨潮水而起落，但上游之江北橋其水位之振幅約10公分，由圖六亦可以看出此時感潮河段終點應當在江北橋以上不遠處。



圖五 枯水期流量歷線之比較

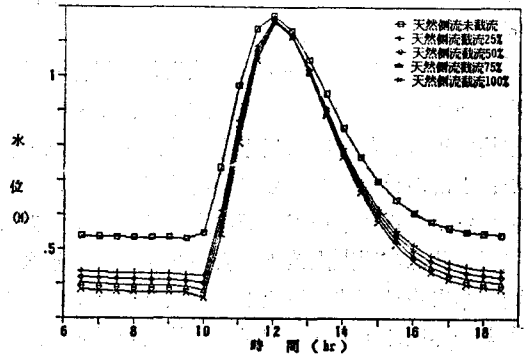


圖六 枯水期水位歷線之比較

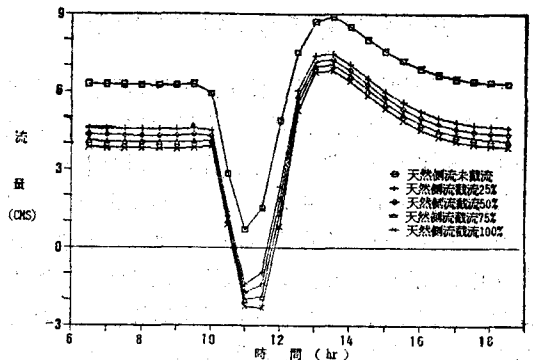
6-2 截流後枯水期河川之水理模擬

未來截流系統完成後，大部份之污水量將被截除。因目前城鎮之排水均為合流系統，其上游集水區之天然側流量亦有部份因流入排水系統中而遭截流。五堵站以下，天然側流量截除率至今仍無一實測數據可資引用，本研究假設數種天然側流量之截

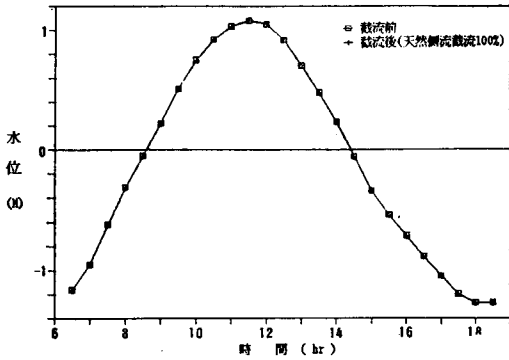
除狀況，進行截流系統完成後枯水期水理情況之模擬。假設天然側流量之截流率有以下數種：100%、75%、50%、25%，而城鎮污水則全部被截流。上游五堵站之流量依然以 $Q_{75\%}$ (3.42 CMS) 輸入模式中。截流系統完成前後，水理特性所受之影響如圖七至圖十一所示，圖七及圖八分別為樟江橋（33.8km，自基隆河口關渡起算）在不同截流率條件下之水位與流量歷線圖，圖中可看出截流對水位及流量有明顯之影響，截流量愈大，影響愈顯著；圖八中亦可看出，截流系統完成後，因淡水流量減少及受潮水作用，部份時間有負流量，即水流產生逆流；圖九及圖十分別表示百齡橋水位與流量歷線，圖中可看出截流系統對水位與流量之影響極微。由圖七至圖十亦可看出，上游水理特性所受之影響程度比下游大。此因愈往下游，感潮現象愈明顯，潮水進出量遠大於截流量，故下游河段截流前後水理特性變化並不明顯。圖十一為江北橋截流前後之流量歷線比較，圖中可看出，截流系統完成後，當天然側流量完全截除時，江北橋流量歷線振幅加大，感潮作用較未實施截流之前更為明顯，此可推測感潮之終點將往上游延伸，即增加感潮河段之長度。



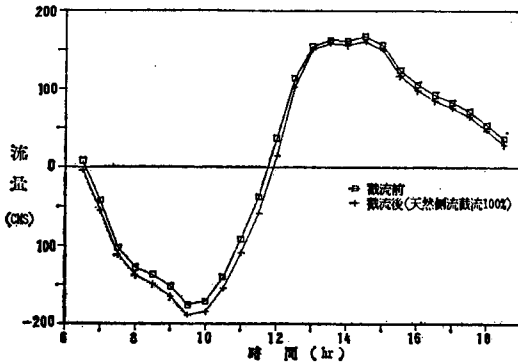
圖七 截流系統對水位之影響（樟江橋）



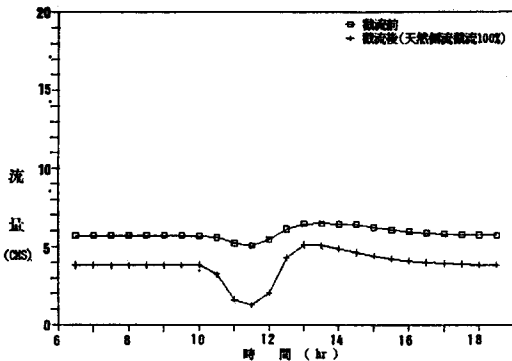
圖八 截流系統對流量之影響（樟江橋）



圖九 截流系統對水位之影響 (百齡橋)



圖十 截流系統對流量之影響 (百齡橋)



圖十一 江北橋截流到後流量之比較

七、結 論

基隆河之污染整治初期採用截流系統，雖然減少基隆河之污水排放量，但同時也將沿岸之側流量

截除，由本研究所模擬之各種截流狀況可看出，截流系統完成後，上游水理特性所受之影響較下游為大；而下游百齡橋處，感潮現現象明顯，潮河進出量遠比污水截流量大，因此水理特性所受之影響比上游小；當截流系統完成後，因上游淡水流量減少，感潮河段將比目前為長。

八、謝 誌

本研究承國科會之經費補助，究研進行期中蒙臺大農工所徐玉標教授及張尊國教授之鼓勵與協助，水利局第十工程處提供河道断面及水位流量觀測資料，使本研究能順利完成，謹此致謝。

九、參考文獻

1. Mahmood, K., and V. Yevjevich, *Unsteady Flow in Open Channels*, Water Resources Publication, 1975.
2. Smith, G. D., *Numerical Solution of Partial Differential Equations*, 2nd ed, Oxford University Press, 1978.
3. 顏清連、王如意、朱紹鎔、許銘熙、呂建華、張守陽，「基隆河水理特性之研究」，臺大土木工程研究所水利組研究報告，水利7203，民國72年9月。
4. 顏清連、許銘熙，「河川體系變量流之數值模擬」，臺大土木工程研究所水利組研究報告，水利7105，民國71年10月。
5. 經濟部水資會，「淡水河流域水污染防治規劃報告及附錄」，民國68年10月。
6. 張震霖，「淡水河流域低流量特性之研究」，臺大農業工程研究所碩士論文，民國71年6月。
7. 內政部，「臺灣人口統計季刊」，第十三卷第三期，民國76年12月。
8. 臺灣省政府住宅及都市發展局，「臺灣省臺北近郊污水下水道設計計畫——第一期工程計畫」，淡水河系臺北近郊污水截流設施，民國76年8月。
9. 經濟部水資會「水污染防治法規彙編」，民國66年。