

複式斷面渠道水流流量之計算方式探悉

Investigation of Different Calculation Methods on Compound Channel Flow Discharge

羅慶瑞

水利技師 工學博士

edward.luo@msa.hinet.net

摘 要

在河川水流的流量量測中最常見的是”水位-流量”率定曲線(Stage-Discharge Rating Curve)之應用，在單一水槽(Single Cross-Section)流況下且不論是穩定流(Steady State)或非穩定流(Unsteady State)其可靠性與準確度是可以信賴的，然而在天然河道中，複式斷面水流是最為常見的，又因為河道主深槽與洪水平原之交界面有明顯的渠床粗糙度不同，致使視剪應力差異(Apparent Shear Stress)的動量傳遞造成流量輸送的明顯差異，尤其在主深槽是蜿蜒狀時洪水平原之流量捲入或溢出加上主深槽的彎道離心力作用，單一河槽的水位流量率定方式將不敷使用，尤其在水位剛好溢過深槽(bankfull)時的計算誤差甚或會超估達 30 %，因此如何去精估複式斷面河道之流量就成為一個非常重要的課題。在本文中，將以複式斷面的分段面切割法(垂直切、水平切、對角切)對於對稱式河槽與非對稱式河槽得適用性進行探討並給予初步建議。

關鍵字:複式斷面、河床粗糙度、流量捲入或溢出、穩定流、非穩定流、對稱式河槽、非對稱式河槽

一、緒論

河川為天然的水路，地面上的雨水或降雪所產生的逕流量皆由河川靠重力原理流入湖泊、海洋。台灣地形狹長，地勢陡峻；河川均發源於高山峻嶺，流短水急，夏秋之際多颱風暴雨，河川流量隨暴雨量迅速漲落，因而常導致洪氾成災。因應社會經濟之發展，河川治理作為由早期僅為局部性的防洪設計已演進到以水系為單位的防洪治理，近年來已開始推動親水性的低水治理及生態工法，不但以堤防、護岸防洪，同時也力求維持河岸低地的滯洪功能，保護沿河之自然生態環境，因此，藉由河川治理方法以期能達到安定河流、消除水患、開發水利及河流保育之目的。一般天然河道和人工渠道多為複式渠

道(Compound channel)，複式渠道多為由一主槽(Main channel)與兩旁之側槽(Flood plain)所組成，其水流特性極為複雜且流速分佈很不均勻，影響直線複式渠道之水理特性因子有斷面形狀、底床粗糙度、水深與水流阻力等。 b/B ， d/D ， b/h 三個無因次參數，其中 b 為主深槽寬度， B 為全斷面寬度， d 為洪水平原水深， D 為主深槽水深， h 為滿岸水深(bankfull)。河川之主深槽與洪水平原間水流相互作用，稱“Kinematic effect”，主深槽與洪水平原間之垂直交界面處，於水深尚淺時由於兩者水流的流速差異會產生渦流，受渦流影響會造成動量傳輸，動量傳輸是靠渦流的機制傳遞，因受動量傳輸影響，主深槽的流速和流量減少，洪水平原則相應增加，在一已知水位的全斷面流量值會低於忽略交界面渦流現象之傳統分析法所預測的值。主深槽與洪水平原交界面因水流流速之差異會產生動量傳輸而造成視剪應力(apparent shear stress)，在洪水平原水深尚淺時，用傳統垂直分割法計算流量將產生超估情形。低水深時縱向的動量傳輸是由主深槽傳至洪水平原，由於兩者間水流相互作用使洪水平原底床剪應力增加而主深槽則相對地減少，洪水平原為寬渠時中心附近不會受橫向動量傳輸所影響，其速度分佈接近二維；Rajaratnam and Ahmadi (1981)描述具寬廣的主深槽與洪水平原間水流相互作用之試驗結果，因受動量傳輸影響使洪水平原底床剪應力增加，主深槽底床剪應力減少，兩者間之相互作用區類似一個剪力層，該剪力層由底床剪應力所控制，而相互作用區與底床剪應力主要受水流深度所影響；因受動量傳輸影響使主深槽愈靠近交界面位置的水流流速愈小，洪水平原愈靠近交界面位置的水流流速愈大；Wormleaton et. al (1982)由實驗量測複式渠道邊界剪應力之資料來計算三種不同切割面(垂直、水平與傾斜)之視剪應力，由不同交界面所得之視剪應力大小發展出六種流量計算法(水平切割法中，分別考慮與不考慮交界面；垂直切割法中，分別考慮與不考慮交界面；傾斜切割法中，分別考慮與不考慮交界面)，並定義一參數 ASSR(視剪應力比)來評估計算流量時是否需考慮假想面；但主深槽與洪水平原之流量在水深愈淺時與實際值較不符，洪水平原流量會低估，而流量之誤差可能導致動量與能量流率發生誤差。Myers and Brennan (1990)由 SERC 洪水渠道設備試驗結果，比較複式渠道與簡單渠道中水流阻力之關係，於複式斷面渠道中，當主深槽水深剛越過滿岸水深時，阻力係數會減少，隨著水深漸增，阻力係數值之變化則與單斷面渠道相同，隨水深增加而增加，並強調若將簡單渠道阻力係數應用至河川和複式渠道時會產生錯誤，羅(1996)以統計方式推求複式渠道中心線與河道橫斷面流速分

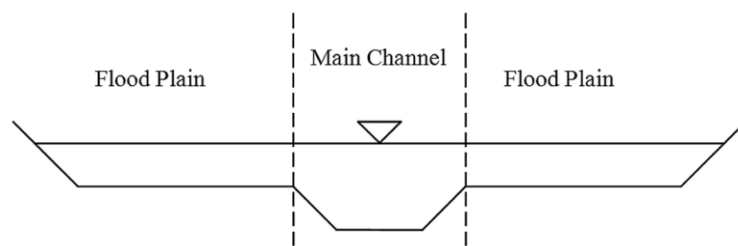
佈，進而介紹一新的無維性紊流滯性係數，俾便推求深槽與淺槽間之紊流剪應力差異及建立新的渠道逕流量推求公式及理念。

二、理論及應用結果

天然河川大多為蜿蜒型的沖積河道，由較深的主深槽(Main channel)及兩側的洪水平原(Flood plain)所構成之複式渠道斷面(Compound channel section 見圖一)，洪水平原多有植被覆蓋，平時流量不大的情況下，水流只在深槽流動；豪雨颱風期間，洪水會由主深槽溢漫氾濫到洪水平原。以往河川治理中，一般皆用一維緩變速渠流來模擬水位的變化，但實際水流流經蜿蜒複式河道時，不僅深槽與洪水平原之流速及水深明顯不同，且深槽和洪水平原之間有複雜的三維流況。隨著相對深度的進一步增加，輸送損失再次減少，因為主河道和洪氾區速度之間的差異可能較小，但在實踐中，除非護堤相對狹窄或相對深度變得相當大。在物理特性分析和維度分析的基礎上，提出了視剪應力的作用，結果發現相應的表觀摩擦係數主要取決於寬度比 B/b 幾何參數、相對水深與相對粗糙度的影響 (Luo, 2011)。剪切應力的方法，還可以估算給定階段複合通道中的流量分佈和總體流量。

分析複式斷面渠道流量的常用方法是將斷面分成多個分段，依次應用曼寧公式，將流量相加。然而，這種傳統方法沒有考慮到細分區域之間的相互作用。移動較慢的洪氾區(洪水平原)水流與主河道水流之間的相互作用會顯著增加水頭損失，因此預計通過傳統方法計算的流量會大大高估真實的河道容量。

當水流高於堤岸(bankfull)時，影響複式渠道中相互作用並因此造成排放能力損失的主要特徵有以下各項：



圖一. 複式斷面示意圖

- (a) 洪氾區(洪水平原)水流與主河道水流的相對深度
- (b) 洪氾區的粗糙度與主河道的粗糙度相比
- (c) 洪氾寬度與主河道寬度之比
- (d) 洪氾區的數量
- (e) 主深槽邊坡
- (f) 主深槽縱橫比

在小規模光滑複式斷面渠流的情況下，洪氾平原和主河道中的雷諾數必須加入考慮，但在幾乎所有實際情況下，粘滯性效應都不顯著。洪氾區相對於主河道的水流深度是一個主要因素。一旦洪氾區被淹沒，主河道中的水流就會受到較慢的洪氾區水流的干擾。流量的最大減少（稱為排放不足）可能在 10% 至 20% 範圍內的任何地方。

Luo (2011)展示複式斷面水流機制(圖二)及視剪應力公式與其作用的大小(見圖三與圖四)可見其影響流量計算的顯著性。

$$\frac{\tau_*}{\rho} = \left| \frac{\tau_{m,c}}{\rho} - \frac{\tau_{f,p}}{\rho} \right| \quad (1)$$

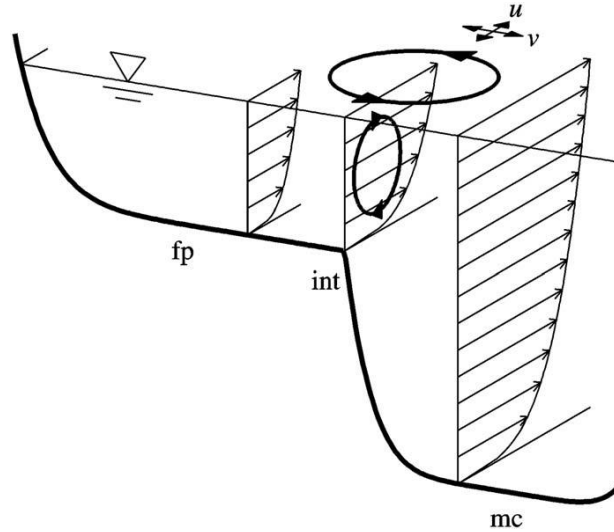
如果 $\frac{\tau_{m,c}}{\rho}$ 大於 $\frac{\tau_{f,p}}{\rho}$ ，從主河道到漫灘的流出動量；相反，從氾濫平原到主河道的湧入動量。

由圖三與圖 4 四可知以垂直界面切割之方式與其洪氾區隔開的複式斷面河道的主河道子部分，指出作用在每個子部分上的力，可以公式(1)計算之。

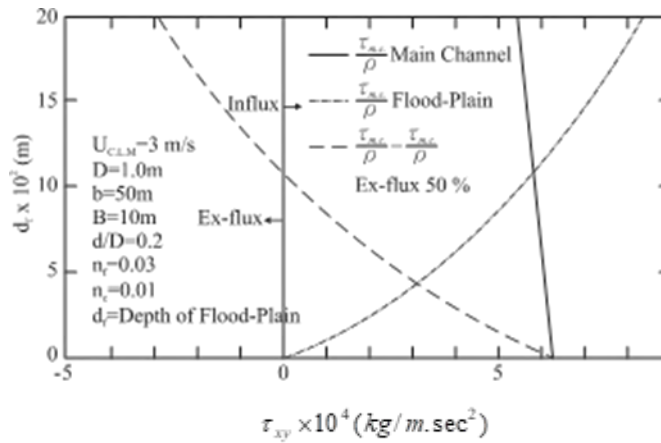
由下述圖三與圖四可見到當相對水深變大時，洪水平原有足夠的功率(動量率)將水流送回主深槽，使得流量計算誤差變小，此時水流量的估算就可近似用單一河槽來考量，然而因為視剪應力之分布曲線為非線性，因此精確推求視剪應力方程式就成為一門重要的功課。

權重劃分法 (WDCM)(見圖五)，以提供比傳統方法更好的結果。WDCM 方法使用加權因子 (ξ) 允許在垂直方向給定的速度之間進行轉換法 (DCM-V) 給出的速度和水平分

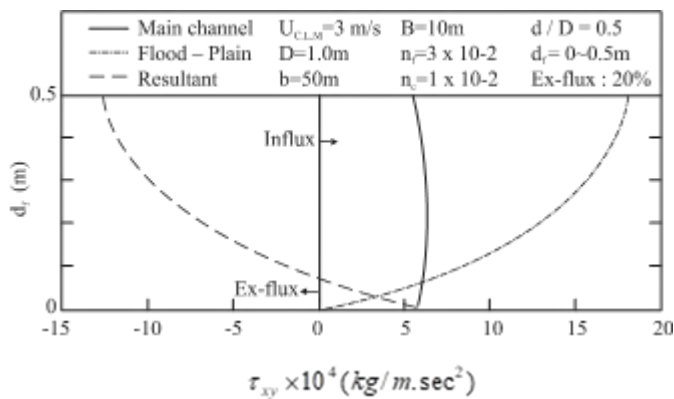
割通道法 (DCM-H) 預測的速度之間進行轉換。加權因子值在 0 和 1 之間變化，表示傳統垂直劃分 ($\xi = 1$) 和水平劃分 ($\xi = 0$) 之間的無限範圍的通道細分。



圖二. 複式斷面水流動力機制示意圖



圖三. 相對水深 $d/D=0.2$ 時，視剪力在主深槽與洪水平原交界處動量交換作用大小



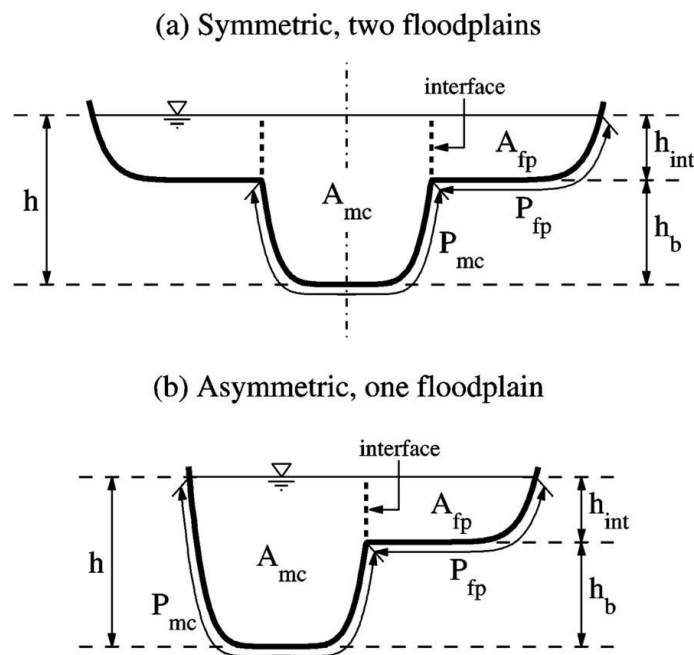
圖四. 相對水深 $d/D=0.5$ 時，視剪力在主深槽與洪水平原交界處動量交換作用大小

加權應用於主河道和洪氾區，以改進這些區域的平均速度估計。然後使用新的速度估計來確定總流量。加權係數的公式如下：

$$V_{mc} = \xi V_{mcDCM-V} + (1 - \xi) V_{mcDCM-H} \quad (2)$$

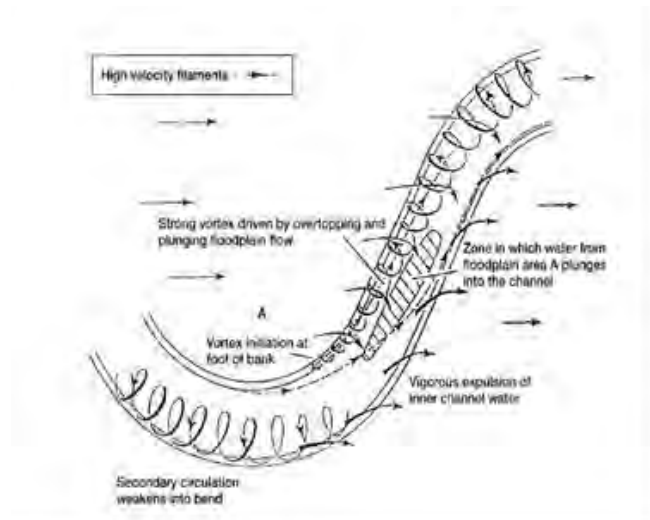
式中 V_{mc} 是主深槽河道平均速度的估計， $V_{mcDCM-V}$ 是垂直劃分通道法給出的主深槽河道平均速度， $V_{mcDCM-H}$ 是水平劃分主深槽法給出的平均速度， ξ 是加權係數。類似的方程式用於洪氾區速度，代表主要河道的“mc”下標被洪氾區的“fp”代替。使用單個參數來解釋動量相互作用使該方法能夠快速地應用於設計情況，也可以快速地納入水面剖面計算。

Charles Bong Hin Joo and Darrien Mah Yau Seng (2008) 提出：隨著洪氾區寬度變寬（更高的 B/b 比率），移動較慢的洪氾區水流與主要河道水流之間的相互作用的影響也增加了，導致顯著的水頭損失。垂直劃分(DCM-Vertical)、水平劃分(DCM-Horizontal)和單河道法(SCM)均未考慮洪氾區內水流與主河道的相互作用；因此，需要一種更可靠的方法。權重劃分法(WDCM)可用於檢驗垂直劃分法和水平劃分法預測流量的有效性。水平劃分法適用於寬闊的洪氾區，垂直劃分法適用於狹窄的洪氾區及較深之主深槽河道流況。



圖五. 對稱與非對稱複式斷面河槽

對於蜿蜒主深槽複式斷面渠道之水流機制探討(見圖六)與模擬天然水流河道之圖示(見圖七), Ervine et al. (1993)提出影響蜿蜒複式斷面渠流能量損失之因素有:(1)底床阻力;(2)底床形狀;(3)河道平面形狀;(4)螺旋流(水流之螺旋運動)(Spiral motion flow);(5)橫向剪應力;(6)蜿蜒度;(7)洪水平原之植栽等,並提出一無因次(Dimensionless)函數 F^* ,以評估蜿蜒複式渠流之能量損失,此無因次函數 F^* ,被定義為實際流量與計算總流量之比值。計算流量時僅考慮底床阻力之影響,分別計算主深槽滿岸水深下方之流量、滿岸水深上方蜿蜒帶(Meander belt)內之流量及滿岸水深上方蜿蜒帶外之流量,三者之總和為計算總流量。此函數值愈接近數值 1 時,表示大多數之能量損失為底床摩擦所造成;當 F^* 減小時,則表示非底床摩擦損失增大。



圖六. 蜿蜒主深槽河道複式斷面水流溢漫流及捲入流機制示意圖

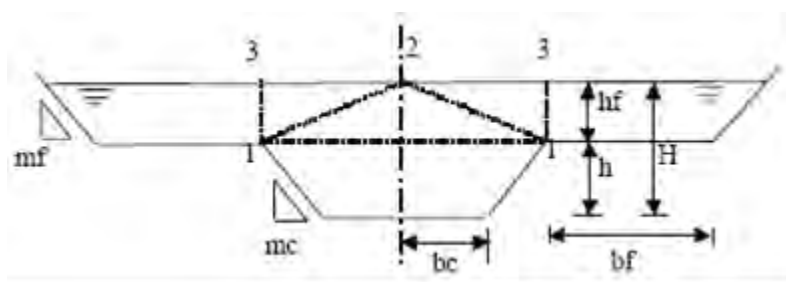


圖七. 模擬天然複式斷面河槽

試驗結果顯示， F^* 隨主深槽蜿蜒度增加及寬深比(Asspect ratio)之減少而衰減；隨著蜿蜒帶之增大而 F^* 隨之變小；天然河川斷面之 F^* 值較梯形斷面為大；洪水平原水深較高時，粗糙洪水平原之 F^* 值則較光滑時為大。Willetts & Hardwick (1993) 發現水流阻力，隨主深槽蜿蜒度增加而增大；主深槽與洪水平原交界面處之相互作用所產生之阻力，與主深槽之幾何條件有關。

Shiono et al. (1999) 發現洪水平原水深較淺時，由滿岸水深處之水平剪應力及滿岸水深下主深槽之二次流，所產生之能量損失占全部能量損失的大部分；當洪水平原水深較深時，於滿岸水深上方蜿蜒帶內，因束縮及擴張所產生之能量損失，占全部能量損失之大部分。Patra & kar (2000) 由測得之底床剪應力，配合 Knight & Demetriou (1983)及 Knight & Hamed (1984) 之直線複式斷面底床剪應力公式，得到適用於直線及蜿蜒複式斷面水流之底床剪應力迴歸方程式。

最常用來計算複式渠道的方法是 DCM 模式，該法將渠道橫斷面分割成數個水力均勻的子斷面(Hydraulically homogeneous sub-areas)，如圖八所示，各分割子斷面的流速假設為相同。在子斷面之間的分割線可為水平、對角或垂直方向的任何一種，而垂直分割面為最常用的方式。這些分割面假設其剪應力為零，因此在流量計算時不包括該分割面的濕周(Wetted perimeter)。Myers(1978)由邊界剪應力的測量結果說明這些分割面的剪應力不為零，並由重力和邊界剪應力間靜力平衡，計算出分割面上之視剪應力(Apparent shear stress)。



圖八 複式渠道橫斷面和水平(H)、對角(D)或垂直(V)平面示意圖

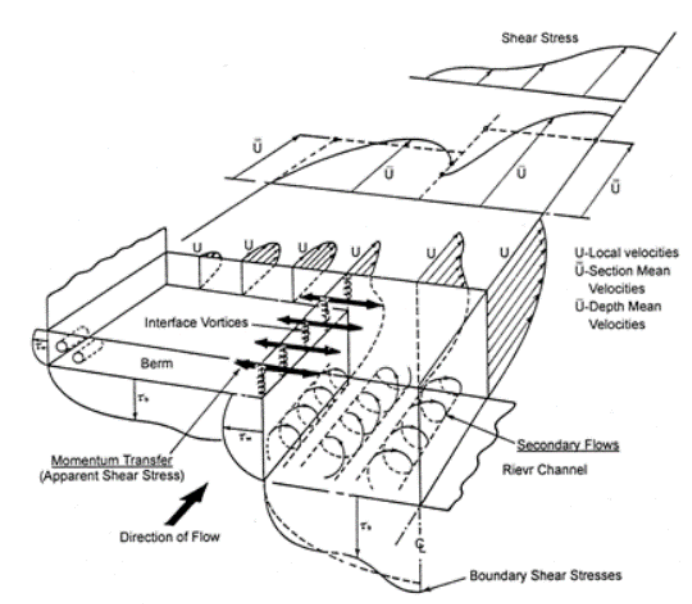
在蜿蜒主深槽複式斷面流況下，在同一斷面下之平均流速隨相對水深的增加而增快。在同一斷面下之通水斷面積隨著相對水深的增加而增加，此因水位上升水流通水斷面積亦隨之增加，濕周(P)隨之增加，水力半徑(R)增加，相對水流流速亦增加，因而呈漸增

現象。相同的水深下，通水斷面積較大，表示該洪水平原上阻力小使通水斷面積增加。在低相對水深時，單位寬度流量隨著槽寬漸縮及斷面流量減少，當高相對水深時，斷面流量大，所以單位寬度流量大。在同一斷面下，單位寬度流量隨著相對水深的增加而增加，此因流量增加的結果。單位質量之動量通率即為斷面流量(Q)與流速(V)之乘積。洪水平原槽寬隨著渠道蜿蜒形態愈往下游，槽寬愈小。因此，部份水流將自洪水平原流向主深槽，相對的亦將洪水平原部份水流之動量帶至主深槽中，使得動量愈往下游愈小。在同一斷面下之單位質量之動量通率隨著相對水深的增加而增加，此乃因通水斷面積流量及流速之增加。單位質量之動量通率大，此亦表示洪水平原的阻力變小。

三、結論與建議

一種估算排放量和開發額定曲線的方法介紹了未設流量測站的河流站點。該方法採用率定方法，即可變參數 Muskingum 水位過程線 (VPMS) 率定的方法，用於率定之給定的上游以梯形複合橫截面為特徵的河段水位過程線到達下游站點的水位線。此外，VPMS 方法還使我們能夠估算上游和下游的排放水文過程線網站且假定率定範圍內沒有橫向流。為建立未設測量河流站點的評級曲線以下概念在 VPMS 方法的開發可以方便地利用：在非穩定流動期間，在未測站點估計的階段和之間存在一對一的關係相應的穩定流況，發生在下游某處位置，並使用 VPMS 方法中採用的方法，可以估計穩定流。通過將此流量與未測量站點估計的階段聯繫起來可以建立評級曲線。所提出的率定方法亦可運用在複合斷面水流並以實驗室水槽數據實驗而獲得矩形斷面之極佳應證。VPMS 方法的功能確定河段的洪水路線並估算流量水位線，對應於率定階段水文歷線圖。

對於給定的單一橫斷面，於一給定的流量，在臨界深度處比能量最小，同時在流動深度為臨界深度時具有最大流量的給定比能量。這是簡單河道斷面臨界深度要求條件的唯一理論，但複合河道水流情況如何（圖九）？如果對主河道和洪水平原分別使用分離的福祿數，是否仍然只有一個或是有更多的臨界深度值與一對稱複式斷面水流流況呢？



圖九 對稱複式斷面水流動力機制示意圖

Luo (2021)展示了非穩定流況之對稱複式斷面河道流動臨界深度的情況結合了基於一維非穩態動量和連續性方程的福祿數的一般定義以及自導出的 3D 速度剖面。利用自推的速度剖面，可以逐步計算臨界深度，確定和比較精確的流量。給出了臨界深度和流量的計算和比較實例，最後還進行了一些討論。此外在文中也針對不同子斷面切割法計算流量精確度進行比較。由於主河道與洪氾區的水流深度、阻力、斷面形狀等水力性質不同，因此這些部位的水力學極為複雜。在計算水力參數分佈時，必須考慮洪氾區和主河道之間的運動。複式斷面流況中可以存在三種不同的流態：完全亞臨界、完全超臨界和混合流態。整個複式橫斷面不可視為一個單翼斷面水流，除非在較高的相對深度，例如 $Dr > 0.5$ 。由於粗糙度比和主通道寬度比的幾何效應以及剛好岸的突然擴大的橫截面區域的幾何效應，二次流引起的超臨界流可以對水力特性橫向分佈的預測產生相當大的誤差。在給定流量的複式斷面流況我們可以得到多個臨界水深，相應的水剖面也表示在這些臨界能量波降之中，如果相對應之渠床斜率分別所對應之複式斷面的平均速度為已知，則流動情況將可清楚地呈現，同時，在設計水工結構時，應避免讓這些在給定流量的複式斷面的多個臨界深度的發生。當水深剛好滿過深槽岸的情況下，由於流速方向相反，會產生渦流或環流，具有強烈的動量傳遞。因此，有必要將虛擬分隔線作為濕週考慮在內，以重新計算水力特性。



四、參考文獻

1. Charles Bong Hin Joo and Darrien Mah Yau Seng, “ Study of flow in a non-symmetrical compound channel rough flood-plain” Journal - The Institution of Engineers, Malaysia, Vol. 69, No.2, June 2008. Pp.18-pp.26
2. Edward Ching-Ruey, LUO, “Apparent Shear Stress in Symmetric-Straight Compound-Channel Flow” IJEP Vol.1 No. 2 2011 PP.28-32 www.ijep.org © World Academic Publishing, pp.28-pp.32.
3. Edward Ching-Ruey, LUO,” Multi-Critical Water Depths and Precise Discharge Determination for Symmetrically Compound Channel in Unsteady State Flows”, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Volume 11, Issue 2, August 2021, pp.1-pp.9
4. Ervine, D. A., Willets, B. B., Sellin, R. H. J., and Lorena, M. (1993). “Factors Affecting Conveyance in Meandering Compound Flows.” J. Hydraul. Eng., 119(12), 1383-1399.
5. Knight, D. W., and Demetriou, J. F. (1983). “Flood Plain and Main Channel Flow Interaction.” J. Hydraul. Eng., 109(8), 1073-1092.
6. Knight, D. W., and Hamed, M.E. (1984). “Boundary Shear in Symmetrical Compound Channels.” J. Hydraul. Eng., 110(10), 1412-1430.
7. Myers, W. R. C., and Brennan, E. K., “Flow resistance in compound channels.” Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.28, No. 2, pp.141-155, 1990.
8. Patra, K. C., and Kar, S. K. (2000). “Flow Interaction of Meandering River with Floodplains.” J. Hydraul. Eng., 126(8), 593-604.
9. Rajaratnam, N. and Ahmadi, R. M., “Hydraulic of channels with flood-plain.” Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.19, No. 1, pp.43-60, 1981.
10. Shiono, K., and Muto, Y (1993). “Secondary Flow Structure for Inbank and Overbank

- Flows in Trapezoidal Meandering Channels.” Proc., 5th Int. Symp. Of Refined flow Modl. and Turb. Measu., Paris (september), 645-652.
11. Shiono, K., Al-Romaih, J. S., and Knight, D. W. (1999b). “Stage-dischrage Assessment in Compound Meandering Channels.” J. Hydraul. Eng., 125(1), 66-77.
 12. Willetts, B. B., and Hardwick, R. I. (1993). “Stage Dependency for Overbak Flow in Meandering Channels.” Proc. Insitute of civil Engineers water Maritime and Energy, 101, 45-54.
 13. Wormleaton, P. R., Allen, J., and Hadjipanous, P., ”Discharge assessment in compound channel flow.” Journal of Hydraulic Division, ASCE, Proc., Amer. Soc. Civil Engrs., Vol. 108, No. HY9, pp.975-994, Setember, 1982.
 14. 羅慶瑞，「複式斷面水流之水動力特性初探」，第八屆水利工程研討會論文集，台北，pp. 279-288, 1996.

投稿	112.04.18
校稿	112.05.05
定稿	112.05.15