

中華水土保持學報, 34(1) : 95-100 (2003)

## 近自然工法水理數值分析之研究—以多望溪為例

胡通哲 施上粟 李鴻源

中華水土保持學報第三十四卷第一期抽印本

REPRINTED FROM JOURNAL OF CHINESE SOIL AND WATER CONSERVATION VOL.34 NO.1

中華民國九十二年三月 March 2003

## 近自然工法水理數值分析之研究—以多望溪為例

胡通哲<sup>(1)</sup> 楊上昇<sup>(2)</sup> 李鴻源<sup>(3)</sup>

**摘要** 近自然工法對於生態環境的復育有著正面的效益，但如何將之量化則是環境工程學的課題。本文利用二維有限元來水理模式模擬多望溪附近中坡區丁牆工，對魚類棲息地的影響，經模擬結果發現，在假設的七場暴雨情形下，河道中魚類棲息地面積均有增加（平均增加 155%），顯示丁牆工對生態復育地的正面影響。

**關鍵詞：**近自然工法、魚類棲息地、二維模式、丁牆工。

## On Hydraulic Modeling of Ecological Engineering Measures—With Application to Dou-Wang Creek

Tung-Jer Hu<sup>(1)</sup> Shang-Shu Shih<sup>(2)</sup> Hong-Yuan Lee<sup>(3)</sup>

**ABSTRACT** Near-nature engineering works, or sometimes called ecological engineering measures, are very helpful in rehabilitation of the ecological environment. Quantification of the impacts always bothers the ecological engineer. A two-dimensional finite element model is applied in this study to assess the impacts of the installation of the spur dikes on the fish habitat area. We took Dou-Wang Creek of Iian county as our case study. Seven different storms were investigated. It is found that on the average installation of the spur dikes can increase 155% of the fish habitat area, and is a measure to be promoted in ecological engineering practice.

**Key Words:** ecological engineering, rehabilitation, two-dimensional model, spur dikes.

### 一、前 言

所謂近自然工法(near nature working method)是個性同時達到人類需求及自然環境雙贏的工法(Mitsch, 1988)；Odum 等提出將自律行為(self-organizing activities)的生態學概念運用於工程中，而莊慶澤將「ecological engineering」一詞(Odum, 1963)，隨後並繼續將近自然工法理論加以闡述，如：「應用近自然工法的原則在於對自然環境之變更採用最小部分之人工能量。變更的本身主要依賴自然環境本身的能量空隙」(Odum et al., 1962)。

「生態工程就是自然環境的經營管理(management of nature)。要在傳統工程上加入對特定生態景觀需求的考量，也就是將自然環境當作伙伴關係(partnership with nature)概念的工法」(Odum, 1971)及「生態系統工程設計的主要考量及標準在於

(1) 助理教授(博士)：資深助理教授(通訊作者)  
Assistant professor, Department of Civil Engineering, Liao-Yang Institute of Technology, Liao, R.O.C. (Corresponding Author)  
E-mail: tgh@lyit.edu.tw

(2) 國立台灣大學土木工程系碩士班研究生  
Candidate for Doctor's degree, Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei, R.O.C.

(3) 國立台灣大學土木工程系教授  
Professor, Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei, R.O.C.

以外界最低能量的輸入與複雜地系統的自我更新（self-organizing）」（Odum, 1983）。故自 1980 年代開始，國外工程界已陸續將近自然工法的概念實際應用在水利工程上，而國內近年來亦漸有將近自然工法應用於水利工程方面的研究。

丁壩工的設置有保護堤岸的功能，同時對生態環境的復育也有正面的影響。根據日本學者福留裕文（2002）等人的研究（日本稱水制工），適當的運用水制理論，可以營造出多樣的水棲環境。如下斜水制工可重新創造與自然狀態相似的構造，而水制工後方的深流區也是魚類等水生動物於洪汛時期可躲避藏匿的場所；另外，根據過去的文獻顯示（黃明峰等，2000），較弱小的台灣鯉魚在進行底板水速測試時，在流速 1.2 m/sec 的情況下，距離源休期 30 分鐘，若能在岸際適當放置丁壩工將有降低流速及營造多樣性水棲環境的功能，因此丁壩工也可適用於近自然工法。

本文利用 TABS-2 的流場模擬，抽出流速小於 1.2 m/sec 的區域，將之視為魚類的安全區，比較不同流量所造成的變化；另外檢視流場設置近自然工法（丁壩工）對魚類棲息地的正面意義。

本研究以宜蘭縣的多壩渠為例，以二維水理數值模式模擬丁壩工設置前後的水理特性變化，藉以量化探討近自然工法對魚類棲息地的正面意義為目的。

## 二、研究方法

本文採用有限元法的數值模式（TABS-2），針對多壩渠地生態工法前後對河道水理特性之影響進行水理分析，再利用計算所得之底坡、水深資料進行河道中塊石安裝度分析。

### 1. TABS-2 模式介紹

TABS-2 模式係由美國陸軍工兵工程部隊所發展的以有限元法（finite element method）求解之水平二維水理、水質、輸移數值模式，適用於河川、溝渠、導體及水庫等流域之模擬。控制方程式如下 SMS-7.0 Users Manual, 2000)：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} + \frac{\partial (vh)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left[ \tau_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \tau_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \\ - g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial b}{\partial x} + \tau_x = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left[ \tau_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \tau_{xy} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right] \\ + g \frac{\partial h}{\partial y} + g \frac{\partial b}{\partial y} + \tau_y = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

其中：

$u, v =$  水平  $x$  方向及垂直  $y$  方向之流速；

$\rho =$  液體密度；

$g =$  重力加速度；

$a =$  底床高程；

$b =$  水深；

$\tau_x, \tau_y =$  各種剪應力（包含底床摩擦力、風力、科氏力等）之合成在  $x$  方向及  $y$  方向上之分量。

$$\begin{aligned} \tau_x = & \frac{P}{(1.486h)^2} \sqrt{u^2 + v^2} - \frac{2}{h} V_x^2 \cos \theta \\ & - 2au \sin \theta \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tau_y = & \frac{P}{(1.486h)^2} \sqrt{u^2 + v^2} - \frac{2}{h} V_y^2 \cos \theta \\ & - 2av \sin \theta \end{aligned} \quad (5)$$

以有限元素法之 Galerkin 法運算求解，流速之形狀函數以二次式（quadratic）表示，水深則以線性（linear）函數表示，可推導得元素矩陣如下所示：

$$\begin{bmatrix} N^1 \frac{\partial}{\partial x} A1 & N^2 \frac{\partial}{\partial x} A1 & N^3 \frac{\partial}{\partial x} A1 \\ N^1 \frac{\partial}{\partial y} A1 & N^2 \frac{\partial}{\partial y} A1 & N^3 \frac{\partial}{\partial y} A1 \\ M^1 \frac{\partial}{\partial x} A1 & M^2 \frac{\partial}{\partial x} A1 & M^3 \frac{\partial}{\partial x} A1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_x^1 A1 \\ \tau_y^1 A1 \\ M^1 A1 \end{bmatrix}$$

其中：

$$\begin{aligned} L_1 = & h \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left[ \tau_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \tau_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + \rho \frac{\partial h}{\partial x} \\ & - \rho \frac{\partial b}{\partial x} + \tau_x = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} L_2 = & h \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left[ \tau_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \tau_{xy} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right] + \rho \frac{\partial h}{\partial y} \\ & - \rho \frac{\partial b}{\partial y} + \tau_y = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$L_3 = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial b}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial b}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

M、N 分別為水深及流速 ( $u \cdot v$ ) 之形狀函數，根據以上之元素相關公式，配合給定之邊界條件，即可構成全域物網聯立方程式，並據以求得各節點之水深及流速。

## 2. 最小粒徑 $D_{min}$ 分析

河道中單粒石在受水流帶流力 (dragforce) 作用而不發生移動之最小粒徑  $D_{min}$ ，可依據日本國土開發科技術研究中心所編著的「護岸之力学設計法」中之公式估算：

$$D_{min} = \frac{1}{f^2 + 2g + (\frac{f_s}{f_n} - 1)} \cdot V_n^2 \cdot K \quad (3)$$

其中

$f$ : 處流影響係數 ( $1.2 \sim 0.86$ )

$g$ : 重力加速度 ( $m/sec^2$ )

$f_s$ : 石材之單位體積重 ( $2.9 \sim 1.7 T/m^3$ )

$f_n$ : 水的單位重量 ( $1.0 T/m^3$ )

$V_n$ : 河流之平均流速 ( $m/sec$ )

$K$ : 單背墻上坡度修正係數

$$= \tan \beta / (1 + (\tan \beta)^2)^{1/2}$$

本公式原適用於單粒塊石粒徑分析，而本文之不透水性丁壠工在此可視為單一塊體加以分析其安定性，亦即討論此單一塊體在水中所承受之水流衝擊力，是在較嚴格條件下所做的保守估計；另外，若採用日本之水削工（透水性或半透水性丁壠工，以塊石堆砌而成）分析，據本文之最小粒徑分析結果可供工程人員推估水削工所採用之塊石大小。

由上述研究方法之闡述可知，於置丁壠工前，應先完成二維模式模擬以瞭解其放置丁壠工前後水理流況變化（如流速、水深等之變化情形）。確定適合之工法，再完成工法之安定性分析，才能確保工法之安全無虞。

## 三、結果與討論

本文模擬對象為宜蘭多留溪河道，採用主量流模擬 (steady state)，假設在上游降雨量增加的情況下（下游為相對應之控制水深），觀察魚類可棲息地之變化，包括流速變化、水深變化及網格數變化；另

外，本文也模擬在放置人工堆石及丁壠工情況下，對整個流域變化的影響，及水工構造物附近之局域流場變化，結果發現均確增加了魚類可棲地面積，但構造物前後之水位變化頗大，需注意構造物本身之穩定度維持。

### 1. 多壁溪的幾何條件與網格形成

#### (1) 幾何條件：

平均坡度：0.001~0.0016，網格數：250，

節點數：791，流域網格切分如圖 1 所示。

#### (2) 水理條件：

上游：入流流量控制；下游：水位控制；7 個

標高案例控制條件如表 1 所示：

表 1 7 個標高案例條件

Table 1. The situation of 7 modeling cases

Case	Downstream	Qdownstream	Upstream	Elevation(m)
1	10	83.333	1.021	576.501
2	15	125.000	1.338	576.808
3	20	166.667	1.620	577.190
4	25	208.333	1.880	577.459
5	30	250.000	2.123	577.693
6	50	416.667	2.986	578.555
7	100	833.333	4.738	580.308



圖 1 多壁溪河床有限元網格切分圖 (element =250 + node=791)

Fig. 1. The finite element mesh of Dou-Wanag Creek with 250 elements and 791 nodes.

其中： $I$ ：單水區暴雨強度； $Q$ ：上游入流量； $D$ ：下游水深；Elevation：下游水位高程。

#### 2. 多望溪的流場模擬 ( $Q=83.3 \text{ cms}$ )

以數值模式模擬上述流場，將流量為  $83.3 \text{ (cms)}$  的流速分佈圖，水深等高線圖、單線數分佈圖於圖 2、3、4，其中圖 2 的陰影部分代表面速小於  $1.2 \text{ (cm/sec)}$  的安全區域，此流速小於魚類的巡航流速，魚類可以在此部分棲息。

#### 3. 多望溪的流場模擬 ( $Q=250.0 \text{ cms}$ )

當流量增大時，對於魚類棲地變化的情形又如何呢？將流量為  $250.0 \text{ (cms)}$  的流速分佈圖繪於圖 5。



圖 2 多望溪流場之流速分佈圖 ( $Q=83.3 \text{ cms}$ )  
Fig. 2 The velocity of Dau-Wang Creek's flow field with  $Q=83.3 \text{ cms}$ .



圖 4 多望溪流場之福祿數分佈圖 ( $Q=83.3 \text{ cms}$ )  
Fig. 4 The Fr. no. of Dau-Wang Creek's flow field with  $Q=83.3 \text{ cms}$ .



圖 5 多望溪流場之流速分佈圖 ( $Q=250.0 \text{ cms}$ )  
Fig. 5 The velocity of Dau-Wang Creek's flow field with  $Q=250.0 \text{ cms}$ .

其中圖 5 的陰影部分已明顯變少，可見洪水對魚類棲地影響的確是存在的，若是河道整治採用光滑的混凝土鋪面，在洪水來臨時魚類等水生動物可能無藏匿之地。

#### 4. 多望溪的流場模擬 ( $Q=833.3 \text{ cms}$ )

本案例模擬較極端的洪流狀況，觀察其產生的變化，將流量為  $833.3 \text{ (cms)}$  的流速分佈圖繪於圖 6，其中圖 6 的低流速區域已不存在，陰影區域亦變得極少，原本在轉彎區域尚有一些保護處，在流場中均已不見。



圖 3 多望溪流場之水深分佈圖 ( $Q=83.3 \text{ cms}$ )  
Fig. 3 The water-depth of Dau-Wang Creek's flow field with  $Q=83.3 \text{ cms}$ .



圖 6 多望溪流場之流速分佈圖 ( $Q=633.3 \text{ cms}$ )  
Fig. 6 The velocity of Dou-Wang Creek's flow field with  $Q=633.3 \text{ cms}$ .

### 5. 多望溪的流場模擬 (設置丁壩工, $Q=250.0 \text{ cms}$ )

本研究在河道轉彎處設置放置人工丁壩，觀測流速變化的情形。將流量為  $250 \text{ (cms)}$  的流速分佈圖繪於圖 7。將圖 7 與圖 6 比較後發現在轉彎處有較多陰影空間生成，可提供更多的魚類避難所，供魚類在洪流中躲藏，可見河道整治應用近自然工法對水中生物有其正面的意義。



圖 7 多望溪附加丁壩工流場之流速分佈圖  
( $Q=250.0 \text{ cms}$ )  
Fig. 7 The velocity of Dou-Wang Creek's flow field after adding spur dikes with  $Q=250.0 \text{ cms}$ .

### 6. 水理模擬結果

- (1) 模擬結果發現，河岸放置丁壩工造成水位抬升、流速降低，有由於魚類棲地改善。將原始河道及改造後河道之平均水深及平均流速變化，如圖 8 及圖 9 所示：
  - (2) 由模擬結果發現，放置丁壩工使較適合魚類棲息之緩流區（流速小於  $1.2 \text{ m/sec}$ ）面積平均增加  $155\%$ ，如表 2 所示：（面積單位： $\text{m}^2$ ）
- 丁壩工原本即有穩定江心、攔沙造勢的功能，並可在其後形成緩流區。由於此區流速減緩，上游來砂易在此處沉積，可營造不同之水流型態及棲息環境，對於生態而言是正面的；但須注意其淤積情況，避免丁壩工之功能降低，並需觀察其底床質變化，以利特定期間之棲地維護。

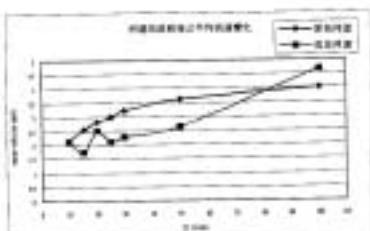


圖 8 河道改良前後平均流速變化  
Fig. 8 The comparison of average velocity between without and with adding spur dikes.

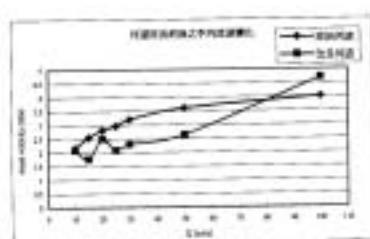


圖 9 河道改良前後平均水深變化  
Fig. 9 The comparison of average water-depth between without and with adding spur dikes.

### 7. 塊石安定度分析結果

由數值模擬分析結果發現，在假設洪峰流量 833 cm<sup>3</sup> 的極端情況下，計算所得之最大流速為 10.4 m/sec，整個流域平均流速為 4.0 m/sec。標準偏差 ( $\sigma$ ) 為 2.3 m/sec。將平均流速資料代入最小粒徑分析理論公式，其設計粒徑滿足  $D_d \geq D_{min}$ 。

其中，計算資料假設如下：

$I$ : 離成影響係數 = 1.0

$\rho$ : 重力加速度 = 9.81 m/sec<sup>2</sup>

$\gamma_s$ : 石材之單位體積重 = 2.7 T/m<sup>3</sup>

$\gamma_w$ : 水的單位重量 = 1.0 T/m<sup>3</sup>

$V_m$ : 河道之平均流速 (m/sec)

$K$ : 施工填土坡度修正係數 = 1.0

以整個流域平均流速作為計算基準 ( $V_m = 4.0$  m/sec)，將上述假設資料代入公式中，可得最小粒徑為 0.48 m，故單粒塊石設計粒徑應滿足  $D_d \geq 0.48$  m。

## 四、結論及建議

本研究完成 4 點結論及 3 點建議，陳述如下：

- 在多望溪暴雨入流量由 83.83 cm<sup>3</sup> 增至 833.83 cm<sup>3</sup> 的變化過程，可發現因流量增加，整個流域的水位將明顯抬升（平均水位抬升約 4.34 m），且流速不增加，若以小於 1.2 m/s 之流速為魚類適應條件之流速，則可發現此區域的魚類棲地隨著流量增加而從原來的 833.96 m<sup>2</sup> 增至 143.85 m<sup>2</sup>。
- 在靠近河岸處加入丁壠及人工堆石後，發現平均水位有明顯抬升現象，而平均流速稍降低，由此可知在天然河道中加入水工構造物可抬升水位，降低流速，有利於創造魚類棲息地，在汛期時也可提供魚類藏匿避難地所。
- 由數值模式計算結果發現，放置丁壠將較適合魚類棲息之緩流區面積平均增加 155 %。
- 以最小粒徑分析理論公式計算單粒塊石所需最小粒徑為 0.48 m，此種尺寸之石材在應用上需要增加母料但並不困難，亦可採用透水性的石質丁壠工以創造更佳的魚類棲地。
- 本研究 7 個規範案例係以假定之上游導引流量為條件，檢視流量增加對魚類棲地之影響；未來應蒐集研究區段之流量、水文資料，以串連、驗證模式，增加模式可信度。

6. 本研究所言之丁壠工接近傳統不透水性丁壠工，未來研究應再行探討透水性丁壠工對棲地改善的影響。

7. 本研究之數值模擬為初步模擬，未來之研究應蒐集試驗河段底質及上游來砂資料，考慮河道輸移行為，探討丁壠工造成之河道沖淤情況。

## 參考文獻

- 葉明峰、李鋼煌、張世奇(2000)、「台灣路頭山及台灣石斑魚產卵能力之研究(12)」，行政院農委會特有生物研究保育中心棲地生態組，計畫序號：89特生標-13，pp. 192。
- 經濟部水資局(2001)、「生態工法技術參考手冊」，國立台北科技大學，pp. 3-17~3-18。
- 日本國土開發技術研究所(1996)、「護岸的力學設計法」，山海堂。
- 張留修文、山樑正樹、楊佳寧(2002)、「水系的理論與計算」，行政院農委會特有生物研究保育中心九十一年度河川近自然工法技術訓練課程講義，pp. 1~4。
- Mitsch, W. E., and Jorgensen, S. E. (1989). *Ecological Engineering*, John Wiley & Sons, pp. 4~5.
- Odum, H. T. (1983). *Systems Ecology: An introduction*, Wiley, New York, pp. 644.
- Odum, H. T. (1971). *Environment, Power and Society*, Wiley, New York, pp. 331.
- Odum, H. T. (1962). *Man in the ecosystems. Is Proceedings Leckwissen conference on the suburban Forest and Ecology*, Bull. Conn. Agr. Station., Storrs, pp. 57~75.
- SMS 7.0 Users Manual (2000), Open-Channel Flow And Sedimentation, Environmental Modeling Research Laboratory, Brigham Young University.

2002 年 11 月 6 日 收稿

2002 年 12 月 25 日 修改

2003 年 1 月 5 日 接受

(本文開始討論至 2003 年 9 月 30 日)