

渠床沖刷機制之探討

高 忠 人

台灣省水利技師公會理事、高忠人水利技師事務所負責人

一、前言

渠道過度沖刷的結果，往往對各種水工結構物之安全與功能、兩岸土地之安定造成負面之影響，諸如堤防(護岸)因沖刷過度而破壞，而渠床沖刷估算有採用數值模擬或經驗公式等方式，工程實務應用上仍大多以沖刷經驗公式進行沖刷深度之估算，在沖刷深度之估算應考量一般沖刷、束縮沖刷與局部沖刷之影響。一般沖刷以探討大洪水事件之影響為最重要對象，應用時多以某一特定設計流量(例如 10 年重現期洪水量)條件，評估一般沖刷之程度；局部沖刷來自於水流經過結構物周圍時，因流速加快，底床剪應力增大，導致局部區域有明顯沖刷現象。而渠道工程設計上大多僅考量一般沖刷及彎道效應沖刷估算，卻忽略水流經過結構物後所產生之沖刷現象，本文以渠道內分別為明渠段及箱涵出口端為案例，採經驗公式估算成果，並與實際沖刷結果比對後，頗為吻合。其局部沖刷深度可供日後工程師們之設計參考使用，亦可作為類似渠段特性渠床沖刷深度估算之參考。

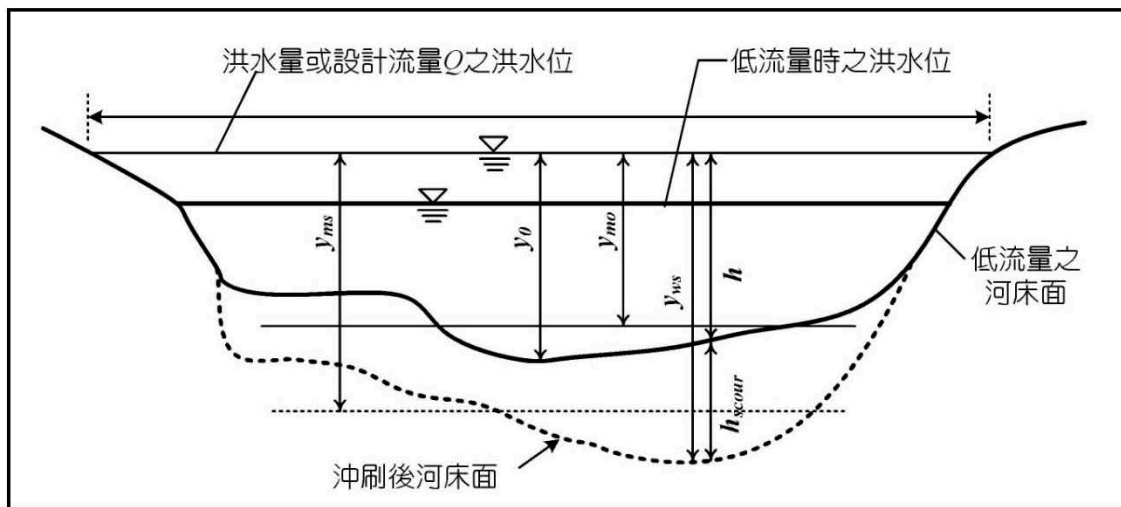
二、沖刷理論

渠床沖刷行為大致可分為一般沖刷、束縮沖刷與局部沖刷。其中一般沖刷係指渠道在未設置任何結構物時，在渠床水流與泥砂相互影響下，水流對渠床沖刷所造成之較長渠段高程下降的情形。而局部沖刷是指因渠道的寬窄變化、彎道凹岸、結構物的設置(如箱涵、固床工、丁壩工、橋梁、堰堤等)，對水流產生局部阻礙或干擾作用，因流速與流向的劇烈變化，引起渦流和極強的渠床面剪應力，並進而造成局部渠床沖刷侵蝕與高程下降的情形。

(一) 一般沖刷(General scour or Natural scour)

一般沖刷深度即無論渠道中是否有結構物存在，渠床均會受水流作用產生沖刷造成高程下降的情形。依據 Melville and Raudkivi (1977)之研究，一般沖刷可分為短期或長期的沖刷。其中短期的一般沖刷為在單一個或連續數個緊接的洪水沖刷下，

所形成的渠床下降，其引致之成因包括：水流之聚合與河道淨寬度的逐漸窄縮、瓣狀河道中之深槽移動、河床值移動層厚度(或動床厚度)及底床形式之遷移等因素息息相關。至於長期的一般沖刷為具相當長之時間尺度、或歷經數年之沖刷下所致，其成因亦與長期高流速的自然侵蝕、河川砂石開採、截彎取直導致河床坡度的增加、河岸之側向侵蝕崩退、取水工與堰壩之設置造成輸砂來源之減少、水中結構物(橋基、取水工、固床工等)之設置不良等因素息息相關。



資料來源:Melville and Coleman(2000)

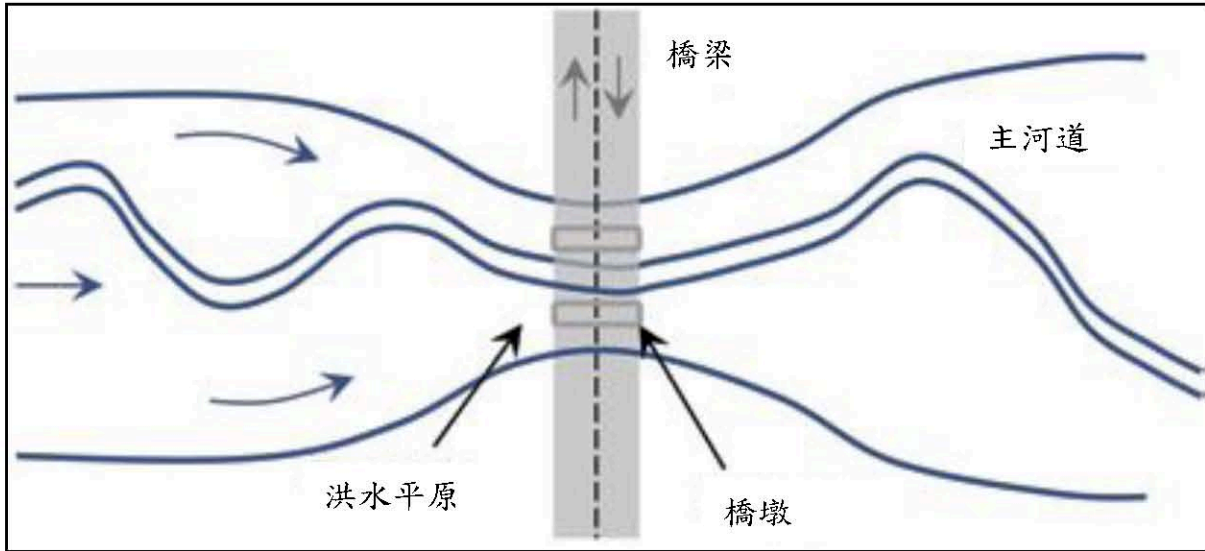
圖1 渠道一般沖刷斷面示意圖

(二) 束縮沖刷(Contraction scour)

因橋梁所興建之橋墩或基礎裸露增加阻水面積，或由於公路之引道路堤與橋台設施延伸進入河道，佔據部份之通水寬度，或河道窄縮使得河道通水寬度縮減，甚至因河道內高灘地或土石流堆積而窄縮等，均會阻擋正常時之水流流況，將迫使橋孔(或束縮段河道)間的單寬流量與流速加大，造成橋墩基礎(或束縮段河道)間產生束縮沖刷效應，乃導致河床之沖刷下降，如圖2。

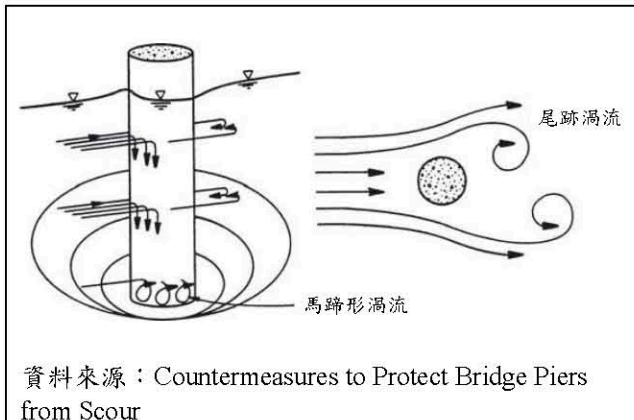
(三) 局部沖刷(Local scour)

由於橋墩(基)的存在對水流產生局部阻礙或干涉作用，在橋墩(基)周邊形成強烈下降流、馬蹄形渦流、迴流區、尾跡渦流流況之現象，並造成橋墩(基)周遭河床形成局部刷深之沖刷坑的情形，此種現象稱為橋墩(基)之局部沖刷。當水流流經橋墩基礎時，由於流線受到橋墩基礎干擾所產生的渦流造成迎水面及背水面附近的局部沖刷；通常水流之攻角甚小(或為零)時在橋墩的迎水面渦流強勁，故沖刷深度較深，而橋墩基礎的背水面因渦流較弱，河床沖刷深度較淺。如圖3與相片1。



資料來源：Manual on scour at bridges and other hydraulic structures, second edition

圖2 橋墩或河道窄縮引致之束縮沖刷示意圖



資料來源：Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour



圖3 橋墩(基)局部沖刷示意圖

相片1 橋墩前端因受水流撞擊，周遭產生類似馬蹄形之局部沖刷坑

(四) 總刷深量(Total scour)

河床總刷深量主要由一般沖刷、束縮沖刷及局部沖刷所組成(圖4)，其中束縮沖刷及局部沖刷之合即為局部化沖刷，總刷深量為現況河床面起算，受到上述之沖刷所導致之總深度。

$$Z_t = FS[Z_a + Z_c + Z_b + Z_s]$$

式中， Z_t ：總沖刷深度(m)；

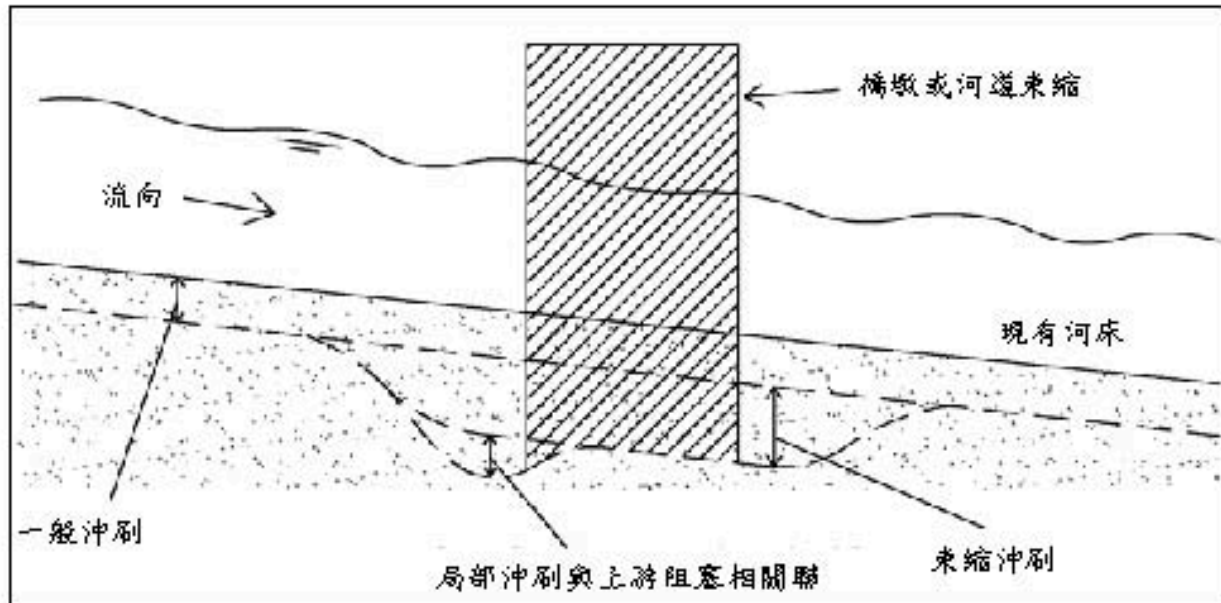
FS：安全係數；

Z_a ：一般沖刷(m)；

Z_c ：束縮沖刷(m)；

Z_b ：彎道效應引致沖刷(m)；

Z_s ：構造物引致之局部沖刷(m)。



資料來源：Manual on scour at bridges and other hydraulic structures, second edition

圖4 總沖刷深度示意圖

三、 相關沖刷公式彙集

綜合國外文獻可應用以估算渠床沖刷深度之相關沖刷深度經驗公式，依類型大致可分為兩類：(1)採用河制公式(Regime Formulation)與單寬流量之概念，估算洪水水位至受沖刷河床面之沖刷水深關係；依據彎道曲率半徑、水深與渠寬等河道特性參數，估算彎道之沖刷水深關係。(2)渠道窄縮採用渠寬、水深與流速等參數，估算局部沖刷水深關係；通過結構物後採用單寬流量、構造物尺寸、河床粒徑與坡度等參數，估算局部沖刷水深關係。本研究彙集之相關估算方法說明如下。

(一) 一般沖刷分析

根據美國農業部(United States Department of Agriculture, USDA)發行之工程設計手冊(National Engineering Handbook)技術附錄TS-14「Scour calculation」，渠道一般沖刷示意如圖1所示，一般沖刷深度可由以下兩種經驗公式估算分析：

1. Blodgett(1986)沖刷深度經驗式

$$y_m = 0.84 \times D_{50}^{-0.11}$$

$$y_{\max} = 3.8 \times D_{50}^{-0.11}$$

式中， y_m ：平均沖刷深度，水面下至平均沖刷渠床面的水深(m)；

y_{\max} ：最大沖刷深度，水面下至受沖刷渠床面最低點的水深(m)；

D_{50} ：中值粒徑(mm)。

2. 河制理論Lacey(1931)及Blench(1970)沖刷公式

$$y_{ws} = K Q_d^a W_F^b D_{50}^c$$

式中， y_{ws} ：最大沖刷深度(m)；

K ：相乘因子(見表1)；

Q_d ：設計流量(m^3/s)；

W_F ：設計流量之單位寬度(m)；

D_{50} ：中值粒徑(mm)；

a 、 b 、 c ：指數係數(見表1)。

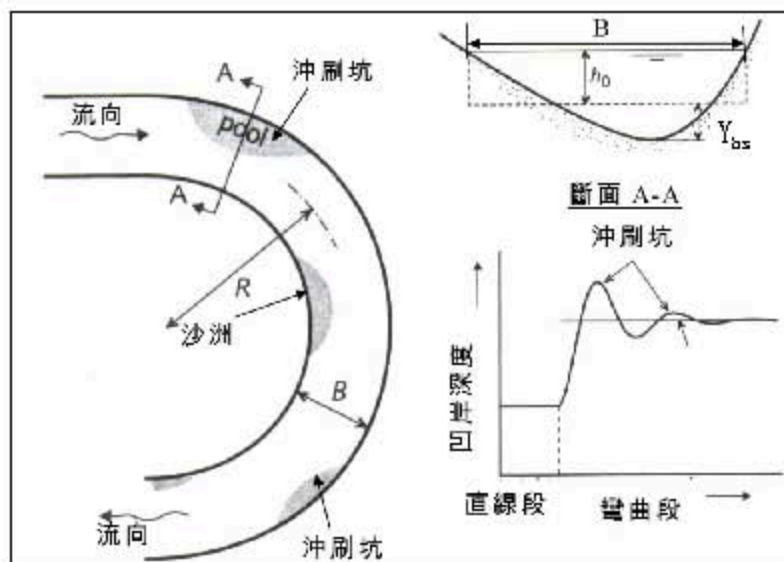
表1 河制理論沖刷公式相乘因子及指數係數表

河道特性	Lacey 公式				Blench 公式			
	K	a	b	c	K	a	b	c
順直段(Straight reach)	0.030	1/3	0	-1/6	0.162	2/3	-2/3	-0.1092
緩彎段(Moderate bend)	0.059	1/3	0	-1/6	0.162	2/3	-2/3	-0.1092
急彎段(Severe bend)	0.089	1/3	0	-1/6	0.162	2/3	-2/3	-0.1092
90°彎道(Right angle bend)	0.119	1/3	0	-1/6	0.337	2/3	-2/3	-0.1092
垂直岩岸或牆(Vertical rock wall)	0.148	1/3	0	-1/6	0.000	2/3	-2/3	-0.1092

備註： K 值適用於公制。

(二) 彎道沖刷深度

通過彎曲渠道導致水以螺旋形移動，使得凹岸處渠底沖刷，依(Thorne, 1993)局部沖刷可由下列公式分析(圖5)：



資料來源：水利工程技術規範-河川治理篇，經濟部水利署
圖5 彎道沖刷示意圖

$$Y_{bs}/h_0 = 1.07 - \text{Log}(R/B - 2), \quad 2 < R/B < 14$$

式中， Y_{bs} ：沖刷深度(m)；

h_0 ：上游直線段水深(m)；

R ：渠道曲率半徑(m)；

B ：渠道寬度(m)；

當 $R/B > 14$ 時， $Y_{bs} \approx h_0$

(三) 束縮沖刷深度

渠道窄縮使得渠道通水寬度縮減，使得束縮段渠道間的單寬流量與流速加大，造成束縮段渠道間產生束縮沖刷效應，依(Komura, 1971)局部沖刷可由下列公式分析

(圖6)：

$$\frac{Y_s}{h} = (1 + 1.2F_r^2) \left[\left(\frac{B}{B_1} \right)^{2/3} - 1 \right]$$

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

式中， Y_s ：沖刷深度(m)；

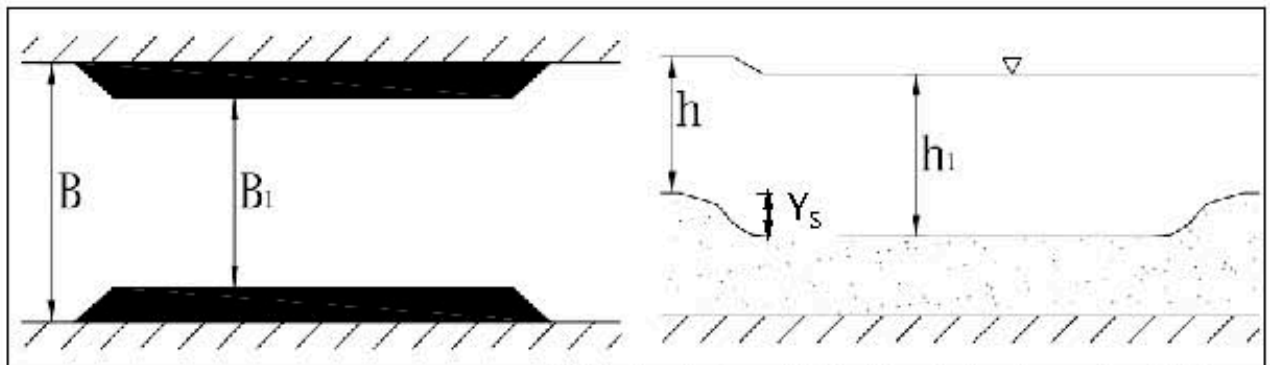
h ：上游水深(m)；

F_r ：福祿數；

B ：上游渠寬(m)；

B_1 ：束縮渠寬(m)；

V ：上游流速(m/s)。



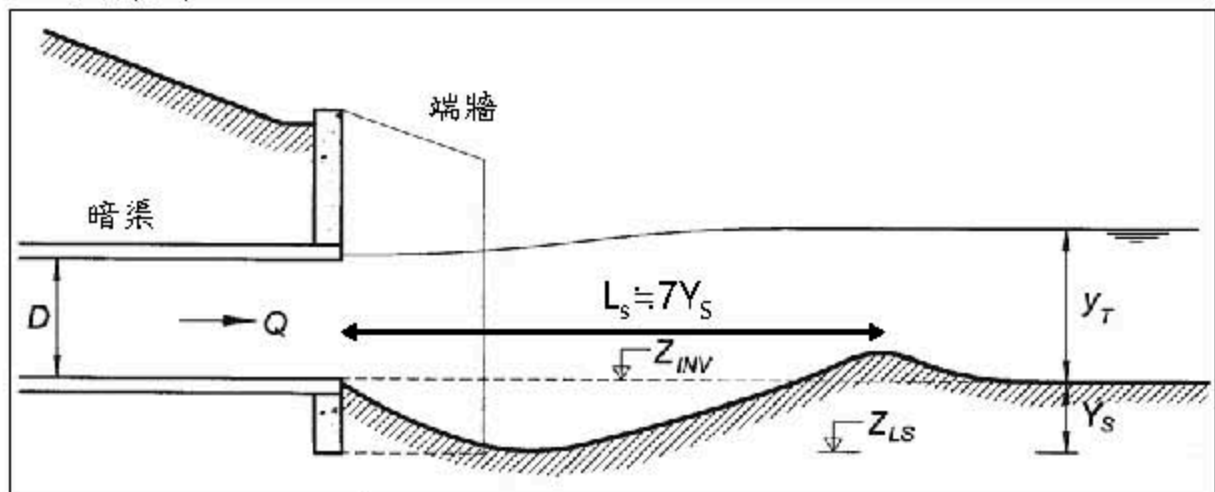
資料來源：水利工程技術規範-河川治理篇，經濟部水利署
 圖6 束縮沖刷示意圖

(四) 箱涵(暗渠)出口處局部沖刷

箱涵(暗渠)出口處渠床若未加以保護，將導致局部沖刷，可由以下兩種經驗公式估算分析：

1. Ruff等人(1982)

根據英國倫敦建築研究協會CIRIA「Manual on scour at bridges and other hydraulic structures, second edition」，箱涵出口處渠床若未加以保護，局部沖刷可由下列公式分析(圖7)：



資料來源：Manual on scour at bridges and other hydraulic structures, second edition

圖7 箱涵出口處局部沖刷示意圖

$$Y_s = 2.07D \left(\frac{Q}{\sqrt{gD^5}} \right)^{0.45}$$

$$Z_{LS} = Z_{INV} - Y_s$$

式中， Y_s ：沖刷深度，渠床面至沖刷後渠床面最低點的深度(m)；

Z_{INV} ：出口端渠床基準高(m)；

Z_{LS} ：最低沖刷基準高(m)；

D ：箱涵或涵管直徑(m)。

由箱涵或涵管出口所產生沖刷坑的總長度 L_s 約為 $7Y_s$ ，沖刷坑寬度約為 $5Y_s$ ，若出口端渠床旁無設置截牆等保護設施，沖刷坑上游斜面恐導致涵洞末端破壞。

2. 陸軍工兵團(Bohan,1970)及科羅拉多州立大學(Abt等人,1996)

根據美國聯邦高速公路局「Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels」，箱涵出口處渠床為非凝聚性土壤時，局部沖刷可由下列公式分析(圖8)：

$$\left[\frac{Y_s}{R_c}, \frac{W_s}{R_c}, \frac{L_s}{R_c}, \frac{V_s}{R_c^2} \right] = C_s C_h \times \left(\frac{\alpha}{\sigma^{1/\beta}} \right) \left(\frac{Q}{\sqrt{g}(R_c^{2.5})} \right)^\beta \left(\frac{t}{316} \right)^\theta$$

$$Y_s = C_s C_h \times \left(\frac{\alpha}{\sigma^{1/\beta}} \right) \left(\frac{Q}{\sqrt{g}(R_c^{2.5})} \right)^\beta \left(\frac{t}{316} \right)^\theta R_c$$

$$W_s = C_s C_h \times \left(\frac{\alpha}{\sigma^{1/\beta}} \right) \left(\frac{Q}{\sqrt{g}(R_c^{2.5})} \right)^\beta \left(\frac{t}{316} \right)^\theta R_c$$

$$L_s = C_s C_h \times \left(\frac{\alpha}{\sigma^{1/\beta}} \right) \left(\frac{Q}{\sqrt{g}(R_c^{2.5})} \right)^\beta \left(\frac{t}{316} \right)^\theta R_c$$

$$V_s = C_s C_h \times \left(\frac{\alpha}{\sigma^{1/\beta}} \right) \left(\frac{Q}{\sqrt{g}(R_c^{2.5})} \right)^\beta \left(\frac{t}{316} \right)^\theta R_c$$

式中， Y_s ：沖刷深度(m)；

W_s ：沖刷寬度(m)；

L_s ：沖刷長度(m)；

V_s ：沖刷體積(m³)；

R_c ：箱涵末端水力半徑(假設滿管流)；

Q ：流量(m³/s)；

g ：重力加速度(9.81m/s²)；

t ：洪峰流量期間(min)；

σ ：泥砂粒徑分佈因子(D_{84}/D_{16})^{0.5}；

α 、 β 、 θ ：係數(見表2)；

C_s ：坡度之修正係數(見表3)；

C_h ：箱涵出口跌落高度之調整係數(見表4)。

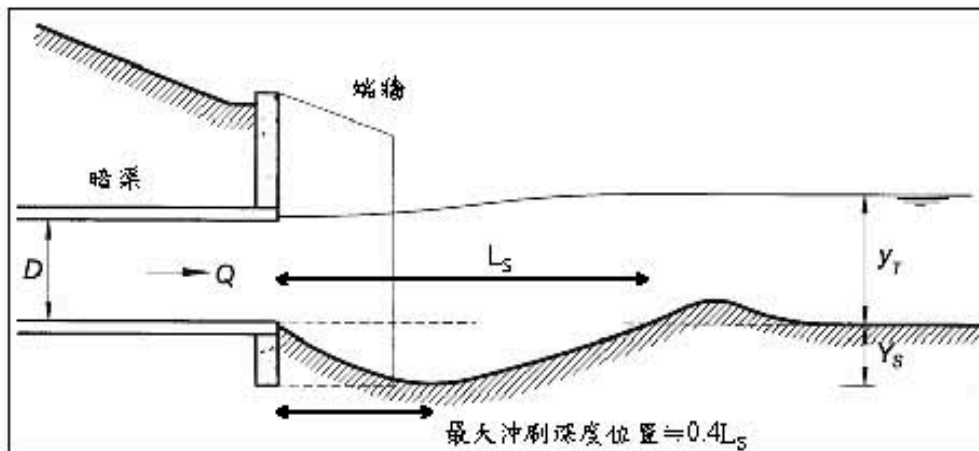


圖8 箱涵出口處局部沖刷示意圖

- (1) 沖刷坑幾何條件:沖刷坑的幾何形狀隨尾水條件而變化,最大沖刷深度位置約在箱涵出口處下游約 $0.4L_s$ 。不同沖刷項目 α 、 β 、 θ 係數如表2。

表2 非凝聚性土壤箱涵出口沖刷係數表

項目	α	β	θ
沖刷深度(h_s)	2.27	0.39	0.06
沖刷寬度(W_s)	6.94	0.53	0.08
沖刷長度(L_s)	17.10	0.47	0.10
沖刷體積(V_s)	127.08	1.24	0.18

- (2) 坡度修正係數:沖刷坑尺寸將隨著箱涵坡度而變化,坡度越陡,沖刷坑變得更大,不同坡度修正係數 C_s 如表3所示。

表3 箱涵坡度 C_s 修正係數表

坡度(%)	沖刷深度	沖刷寬度	沖刷長度	沖刷體積
0	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.03	1.28	1.17	1.30
5	1.08	1.28	1.17	1.30
>7	1.12	1.28	1.17	1.30

- (3) 箱涵跌落高度調整係數:沖刷坑的尺寸將隨著箱涵出口處與渠床的高度(H_d)而變化,隨著高度的增加,沖刷坑的形狀變得更深、更寬、更短。箱涵跌落高度調整係數 C_h 如表4。

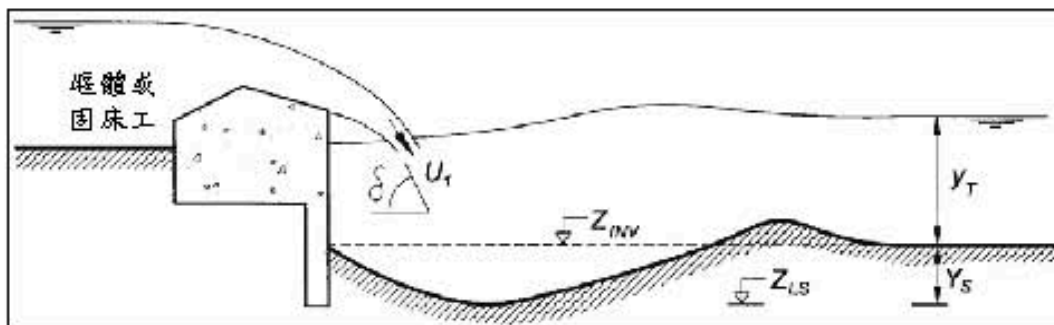
表4 渠床上出口 C_h 調整係數表

H_d	沖刷深度	沖刷寬度	沖刷長度	沖刷體積
0	1.00	1.00	1.00	1.00
1	1.22	1.51	0.73	1.28
2	1.26	1.54	0.73	1.47
3	1.34	1.66	0.73	1.55

備註: H_d =箱涵出口處與渠床的高度/箱涵直徑。

(五) 堰體(固床工)下游處局部沖刷

根據英國倫敦建築研究協會CIRIA,堰體(固床工)等結構物跌落至未受保護之渠床,依Hoffmans and Verheij (1997)局部沖刷可由下列公式分析(圖9):



資料來源: Manual on scour at bridges and other hydraulic structures, second edition

圖9 結構物跌落局部沖刷示意圖

$$Y_s + y_T = \left(\frac{20}{k}\right) \sqrt{\frac{qU_1 \sin \delta}{g}}$$

$$k=2.95D_{90}^{1/3}, 0.1\text{mm}<D_{90}<12.5\text{mm}; k=6.85, D_{90}>12.5\text{mm}$$

式中， Y_s ：沖刷深度(m)；

y_T ：下游尾水深度(m)；

k ：沖刷因子，依 D_{90} 粒徑(mm)求得；

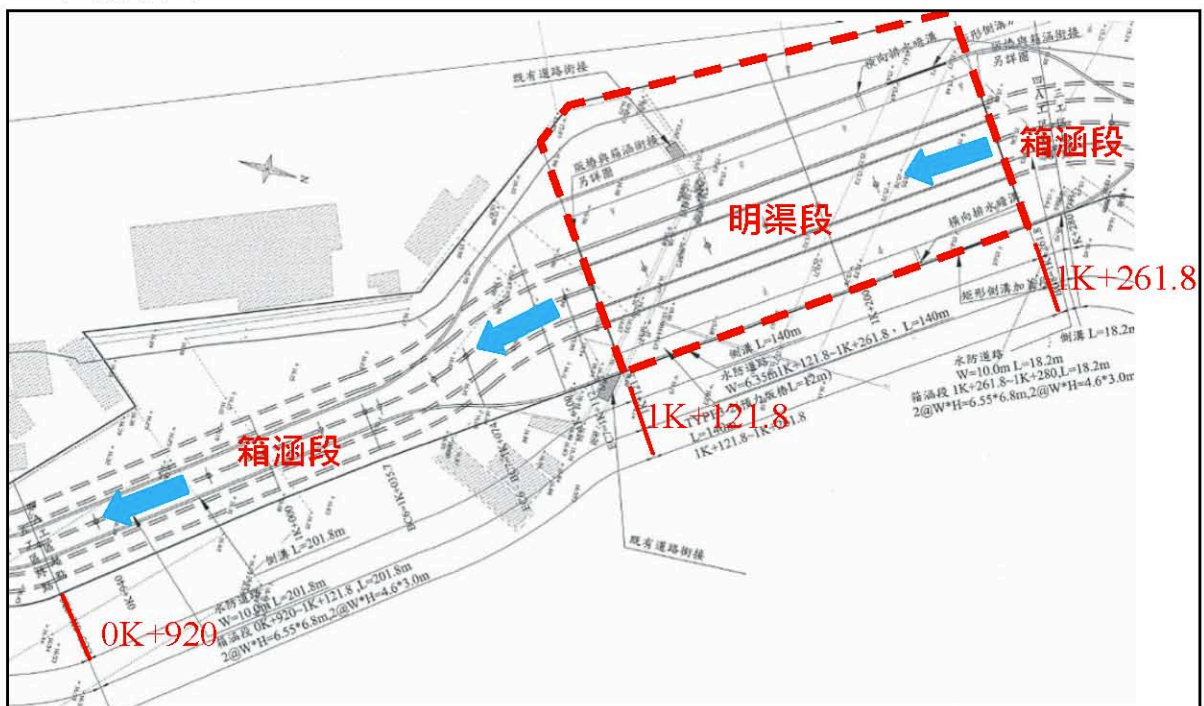
q ：通過結構物之單位寬度流量(m^2/s)；

U_1 ：構造物跌落後下游尾水之平均流速(m/s)；

δ ：構造物跌落與水面之夾角($^\circ$)。

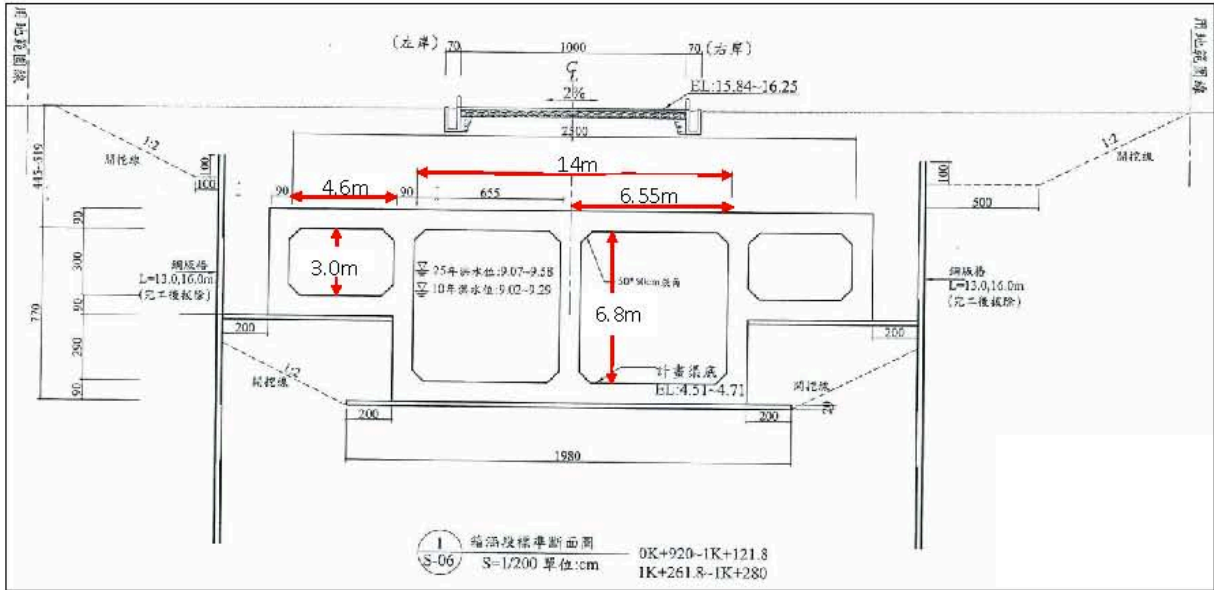
四、 案例分析與探討-以港尾溝溪第四A工區為例

港尾溝溪排水中游疏洪工程第四A工區里程(1K+121.8~1K+261.8)為箱涵銜接明渠段工程，範圍如圖10，箱涵斷面為四孔箱涵，主河道雙孔箱涵尺寸為 6.55×6.8 ($W \times H$)、截台上兩孔尺寸為 4.6×3.0 ($W \times H$)；明渠段工程為長140.0m寬60.0m之順直段渠道，明渠兩岸下層版樁護岸相距14.0m，渠底維持原地質底床並無加設其他固床設施，斷面如圖11、12。本案例渠道分為明渠順直段及箱涵段，故以一般沖刷公式及箱涵出口端之局部沖刷公式推估103年0807豪雨事件所引致之可能沖刷深度，相關沖刷推估過程說明如下：



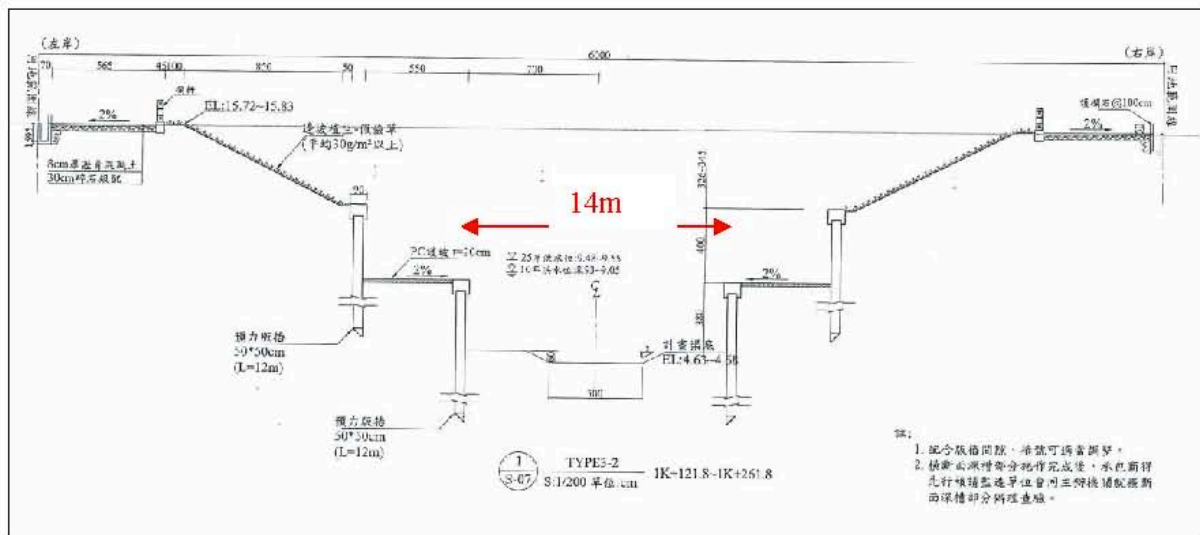
資料來源：港尾溝溪排水中游疏洪工程第四A工區設計圖(S-02)

圖10 港尾溝溪排水中游疏洪工程第四A工區範圍圖



資料來源：港尾溝溪排水中游疏洪工程第四A工區設計圖(S-06)

圖11 第四A工區箱涵出口段剖面圖



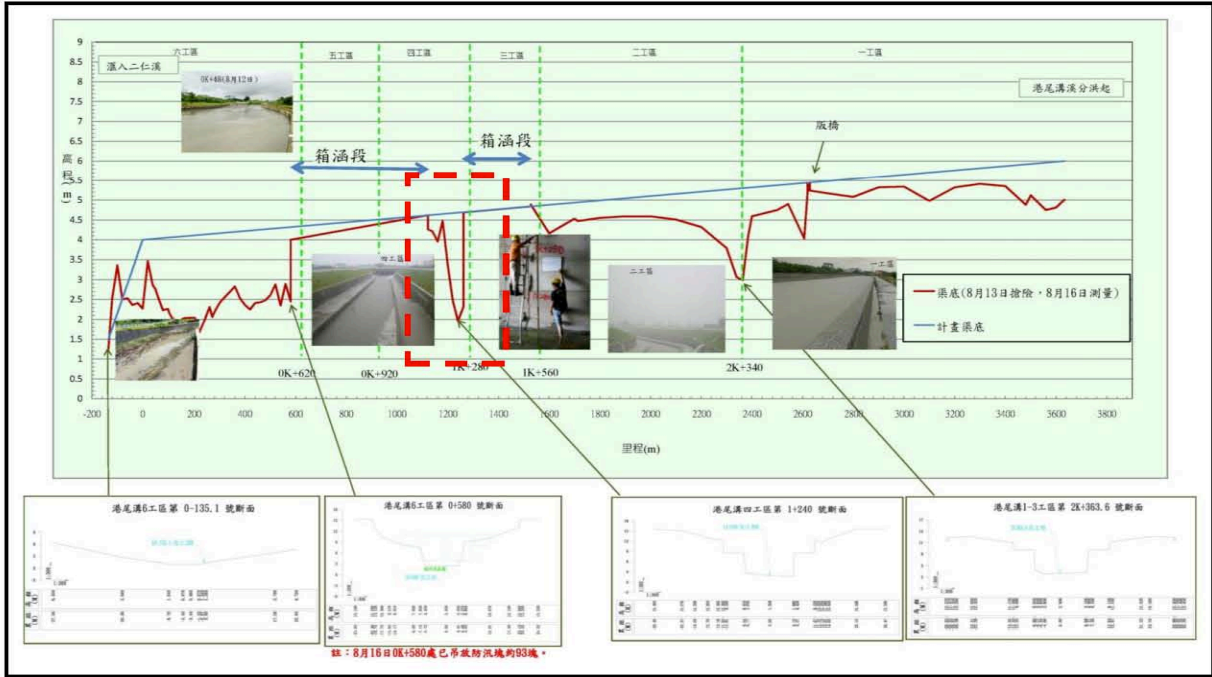
資料來源：港尾溝溪排水中游疏洪工程第四A工區設計圖(S-07)

圖12 第四A工區明渠段剖面圖

(一) 豪雨事件後沖刷深度調查

103年0807豪雨事件後，於103年8月13日量測第四A工區箱涵出口處沖刷約5公尺，箱涵出口30~40公尺處沖刷約3公尺。另第六河川局於8月16日亦委請測量廠商進行全渠道地形測量，其渠道縱斷面高程如圖13所示。由實測資料可得，港尾溝溪排水渠道大部分渠床有下刷現象，其中第四A工區箱涵出口段(1K+260~1K+280)刷深約2.5公尺。

因渠床於沖刷過程中會有回淤現象，故上述所量得之渠床高程應與實際下刷高程有差距，調查成果將進一步與沖刷公式所估算之下刷深度做比對。



資料來源：第六河川局。

圖13 災後渠床調查成果圖

(二) 一般沖刷分析

0807豪雨事件疏洪工程洪峰流量為172.6cms，深槽處渠寬為14公尺，而由於工程地質鑽探工作並無未進行篩分析試驗，故採位置相近之二仁溪斷面14及35-1河床質粒徑調查資料(表5)，其D₅₀分別為0.445mm及0.189mm。一般沖刷深度計算如下：

表5 二仁溪河道粒徑分析成果表

溪別	斷面編號	平均粒徑(mm)	代表粒徑(mm)							
			D ₁₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₀	D ₅₀	D ₆₅	D ₇₅	D ₉₀
二仁溪	14	0.47	0.178	0.249	0.318	0.381	0.445	0.54	0.639	2.348
	35-1	0.23	0.08	0.107	0.133	0.16	0.189	0.231	0.26	0.653

1. Blodgett (1986) 之經驗式

D₅₀為0.445mm時：

$$y_{ms}=0.84 \times D_{50}^{-0.11}=0.84 \times 0.445^{-0.11}=0.92(\text{公尺})$$

$$y_{ws}=3.8 \times D_{50}^{-0.11}=3.8 \times 0.445^{-0.11}=4.15(\text{公尺})$$

D₅₀為0.189mm時：

$$y_{ms}=0.84 \times D_{50}^{-0.11}=0.84 \times 0.189^{-0.11}=1.0(\text{公尺})$$

$$y_{ws}=3.8 \times D_{50}^{-0.11}=3.8 \times 0.189^{-0.11}=4.56(\text{公尺})$$

2. 河制理論Blench(1970)及Lacey(1931)經驗式

利用公式之相乘因子及指數係數，計算結果Lacey經驗沖刷公式估算最大沖刷深度分別為0.19、0.22公尺，Blench經驗沖刷公式估算最大沖刷深度分別為0.94、1.04公尺，如表6所示。

表6 河制理論經驗沖刷公式估算成果表

沖刷公式	Lacey		Blench	
公式	$y_{ws}=KQ_d^a W_f^b D_{50}^c$			
相乘因子 K	0.03		0.162	
設計流量 $Q_d(m^3/s)$	172.6		172.6	
設計流量之單位寬度 W_f	14		14	
中值粒徑 $D_{50}(mm)$	0.445	0.189	0.445	0.189
指數係數 a	0.333		0.667	
指數係數 b	0.000		-0.667	
指數係數 c	-0.167		-0.109	
沖刷深度(m)	0.19	0.22	0.94	1.04

綜上所述，以Blodgett之實驗式計算局部最大沖刷深度介於4.15~4.56公尺，平均沖刷深度介於0.92~1.0公尺；Lacey公式計算求得最大沖刷深度介於0.19~0.22公尺；Blench公式計算求得最大沖刷深度介於0.94~1.04公尺，各公式推估之一般沖刷深度有些差異。其中，Blodgett沖刷公式僅考量中值粒徑 D_{50} ，未考量水深、流速、渠床坡度等其他沖刷影響因子，而其推估之最大沖刷深度係為具相當長之時間尺度或歷經數年之沖刷下所致，估算所得最大沖刷深度恐過高，而Lacey公式計算求得最大沖刷深度有低估情況。

研判後一般沖刷下刷深度採Blodgett之實驗式平均沖刷深度計算值及Blench公式沖刷深度計算值，即沖刷深度約1.0公尺，此值大約和調查於非箱涵出口附近區段之沖刷深度一致。

(三) 箱涵出口處局部沖刷

1. Ruff等人(1982)

0807豪雨事件洪峰流量為172.6cms，依箱涵尺寸流量平均分配至四孔箱涵，戽台上兩孔箱涵流量分配約為40.6cms，主河道雙孔箱涵流量分配約為132cms，單孔箱涵平均流量分配為66cms，箱涵高度為6.8公尺，第四A工區箱涵出口處最大沖刷深度約為6.4公尺，沖刷長度約為44.8公尺，估算如下：

$$Y_s = 2.07D \left(\frac{Q}{\sqrt{gD^5}} \right)^{0.45} = 2.07 \times 6.8 \left(\frac{66}{\sqrt{9.81 \times 6.8^5}} \right)^{0.45} = 6.4(\text{公尺})$$

$$L_s = 7Y_s = 7 \times 6.4 = 44.8(\text{公尺})$$

2. 陸軍工兵團(Bohan, 1970)及科羅拉多州立大學(Abt等人, 1996)

第四A工區箱涵出口處，依水理演算成果該斷面處於最大洪水期間水深約為EL 9.0m，其洪峰流量時間t約20分鐘；單孔箱涵平均流量分配約為66cms； σ 值參考表5二仁溪斷面14及35-1資料，經內插獲得 D_{84} 、 D_{16} 粒徑資料， σ 分別為 $(1.66/0.22)^{0.5}=2.75$ 、 $(0.5/0.1)^{0.5}=2.3$ ； $R_c=(6.55 \times 6.8)/(6.55+2 \times 6.8)=2.2$ (滿管流)；設計坡度 $1/800=0.125\%$ ，涵洞坡度 C_s 採坡度 0% ； H_d 跌落高度為 0 ，渠床上出口 C_h 採 $H_d=0$ 。

$$h_s = C_s C_h \times \left(\frac{\alpha}{\sigma^{1/3}} \right) \left(\frac{Q}{\sqrt{g(R_c^{2.5})}} \right)^\beta \left(\frac{t}{316} \right)^\beta R_c = 1(1.0) \left(\frac{2.27}{\sigma^{1/3}} \right) \left(\frac{66}{\sqrt{9.81(2.2)^{2.5}}} \right)^{0.39} \left(\frac{20}{316} \right)^{0.06} \times 2.2 = 4.6 \sim 4.9$$

$$L_s = C_s C_h \times \left(\frac{\alpha}{\sigma^{1/3}} \right) \left(\frac{Q}{\sqrt{g(R_c^{2.5})}} \right)^\beta \left(\frac{t}{316} \right)^\beta R_c = 1(1.0) \left(\frac{17.1}{\sigma^{1/3}} \right) \left(\frac{66}{\sqrt{9.81(2.2)^{2.5}}} \right)^{0.47} \left(\frac{20}{316} \right)^{0.1} \times 2.2 = 33.8 \sim 35.9$$

$$L_m = 0.4L_s = 13.5 \sim 14.4(\text{最大沖刷位置})$$

利用表2、表3、表4參數代入公式計算，第四A工區箱涵出口處最大沖刷深度約為 $4.6 \sim 4.9$ 公尺，沖刷長度約為 $33.8 \sim 35.9$ 公尺，最大沖刷位置為出口處下游 $13.5 \sim 14.4$ 公尺，箱涵出口處局部沖刷分析成果示意如圖14。

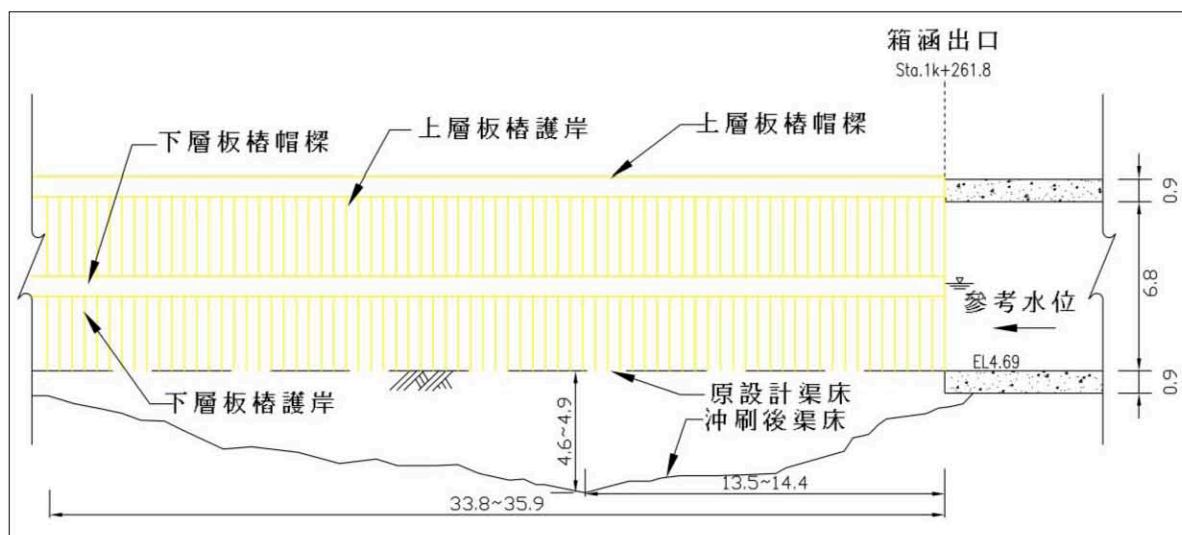


圖14 箱涵出口處局部沖刷分析成果示意圖

綜上所述，以Ruff等人之實驗式計算局部最大沖刷深度介於 6.4 公尺，沖刷長度

約為44.8公尺；陸軍工兵團Bohan等人公式計算求得最大沖刷深度介於4.6~4.9公尺，沖刷長度約為33.8~35.9公尺。兩公式推估之一般沖刷深度有些差異，其中，Ruff等人沖刷公式僅考量箱涵尺寸，未考量渠床坡度、粒徑及箱涵跌落高度等其他沖刷影響因子，而其推估之最大沖刷深度恐過高，為能更準確推估箱涵出口處局部沖刷，建議採用陸軍工兵團推估方式，即局部沖刷深度約5.0公尺，此值大約和調查於箱涵出口段之沖刷深度一致。

(四) 比較與分析

將沖刷公式估算成果與實際災後調查結果分析比對，局部沖刷公式分析箱涵出口處附近區段最大沖刷深度約4.6~4.9公尺，沖刷長度約為33.8~35.9公尺，沖刷位置主要位於箱涵的出口。依實際調查量測箱涵出口處沖刷約5公尺，箱涵出口30~40公尺處沖刷約3公尺，沖刷深度、長度、位置與災後現場人員口述及實際調查沖刷範圍大致相同。據此，研判箱涵出口處局部沖刷下刷深度應有5.0公尺。

五、 結論與建議

- (一) 一般沖刷深度經採用兩種經驗公式估算分析，研判後採Blench公式估算一般沖刷下刷深度約1.0公尺，此值大約和調查於非箱涵出口附近區段之沖刷深度一致。
- (二) 103年0807豪雨事件後，將局部沖刷公式估算成果與災況分析比對，箱涵出口處附近區段經分析最大沖刷深度約4.6~4.9公尺，沖刷位置主要位於箱涵的出口，沖刷深度、長度、位置與災後現場人員口述及實際調查沖刷範圍大致相同。據此，研判箱涵出口處局部沖刷下刷深度應有5.0公尺。
- (三) 港尾溝溪排水中游疏洪工程第四A工區的刷深行為除因地質材料特性造成的一般沖刷及因流速及流況變異造成的局部沖刷外，本工區位於疏洪工程中下游段，由港尾溝溪砂源補充不足、砂源粒徑偏低，以致土砂收支無法平衡，河道護甲(Armoring)層難以發展，亦是造成本次沖刷災害成因。而箱涵出口處流速與上游明渠段並無明顯變異，惟沖刷深度達5.0公尺深，其軟硬渠底材料交界處一旦發生沖刷將造成跌水狀態之渠底形態，而造成局部流速增加進而加劇沖刷的循環。
- (四) 渠道工程設計上大多僅考量一般沖刷及彎道效應沖刷估算，卻忽略水流經過結構物後所產生之沖刷現象。建議箱涵出口處設計上應考量局部沖刷行為，同時於箱涵出口端設置端牆或基腳工加以保護，深度至少須超過最大沖刷深度，且端牆或基腳工應延伸至下游端沖刷長度範圍外。

六、參考文獻

1. Department for Transport (2015). "Manual on scour at bridges and other hydraulic structures, second edition," CIRIA, London.
2. United States Department of Agriculture (2007). "National Engineering Handbook," Technical Supplement 14B, Scour Calculations.
3. Federal Highway Administration (2006). "Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels," Hydraulic Engineering Circular No. 14, Third Edition.
4. Transportation Research Board of the National Academies (2007). "Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour," NCHRP Report 593.
5. 港尾溝溪排水中游疏洪工程併辦土石標售(四工區)詳細設計圖說，民國101年1月。
6. 103年0807豪雨港尾溝溪水文水理彙整報告，經濟部水利署水利規劃試驗所，民國103年9月。
7. 水利工程技術規範-河川治理篇，經濟部水利署，民國102年7月。

投稿 107.03.19
校稿 107.03.21
定稿 107.04.02