

箱涵、涵管出口處鋪設塊石消能之應用

陳志明

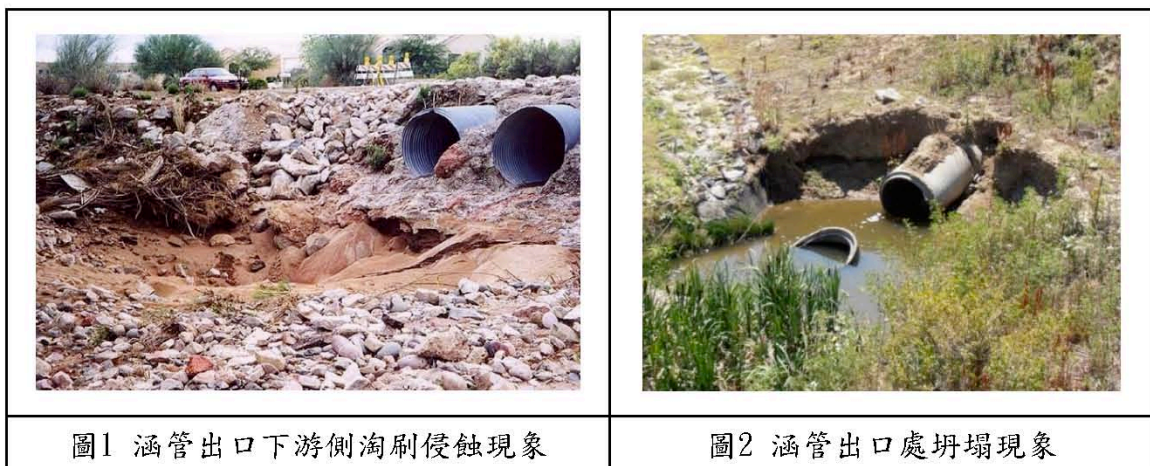
台灣省水利技師公會理事長、陳志明水利技師事務所負責人

摘要

排水路以溝渠、箱涵或涵管銜接至既有水道(河川、排水或野溪)，於排水路出口處常有遭受淘刷侵蝕及坍塌現象。為減緩淘刷侵蝕現象及達到控制渠床遭受之淘刷現象，通常藉由鋪置粗糙面具抗淘刷之底床而可使其發展出一厚實、低速度之邊界面層而控制渠床遭受淘刷。諸多方式中於排水路出口處鋪設塊石藉以消能亦為常被採用之方式。而鋪設塊石之類型和鋪設長度、寬度基本上與出口流量、尾水條件及是否有穩定之下游斷面有關。本文介紹常見之塊石墊及塊石坑，並分述兩者應用之設計公式、圖解法(Monograph)及查表內插法，同時列出塊石墊及塊石坑設計過季中應考量事項，供參考應用於設計工作。另排水路型式為箱涵或涵管，為防止受下游淘刷侵蝕影響，於出口處一般應設置端牆、翼牆(擴展翼牆)，並視需要設置漸變段，本文亦分述各設施功能及設置注意事項。

一、前言

排水路以溝渠、箱涵或涵管銜接至既有水道(河川、排水或野溪)，於排水路出口處常有遭受淘刷侵蝕及坍塌現象，造成此等現象之主要原因有：①出口端流速超過既有水道構造材料之可容許流速，②出口端水流形成射流現象，③出口端銜接處在高程上有落差情形，…等，所發生之淘刷侵蝕現象如圖1及圖2所示。



為減緩淘刷侵蝕現象，採取方式主要朝使出口處流況能盡量接近既有水道流況，而通常可在出口處採設置漸變斷面以減緩出口流速或設置消能設施(Energy Dissipator)。其中，為達到控制受出口射流或出口速度過高所引致之淘刷現象，通常亦可考慮適當措施使排水路內之速度降低減少淘刷現象，或藉由放大出口處斷面降低出口處射流流速等方式，惟考量到施工經費之增加，速度降低程度通常有限。

另，消能設施設置之目的在於達到：①控制排水路及既有水道渠床遭受之淘刷現象或②控制受出口射流所引致之淘刷現象等現象之一或兩者兼顧。而為達到控制渠床遭受之淘刷現象，通常藉由鋪置粗糙面具抗淘刷之底床而可使其發展出一厚實、低速度之邊界面層而控制渠床遭受淘刷。諸多方式中於排水路出口處鋪設塊石藉以消能亦為常被採用之方式，如圖3所示，而鋪設塊石之類型和鋪設長度、寬度基本上與出口流量、尾水條件及是否有穩定之下游斷面有關。

在此介紹常見之塊石墊(Riprap Apron或稱Rock Pad)、塊石坑(Riprap Basin或稱Rock Basin)，並分述兩者應用之設計公式、圖解法(Monograph)及查表內插法供參考。

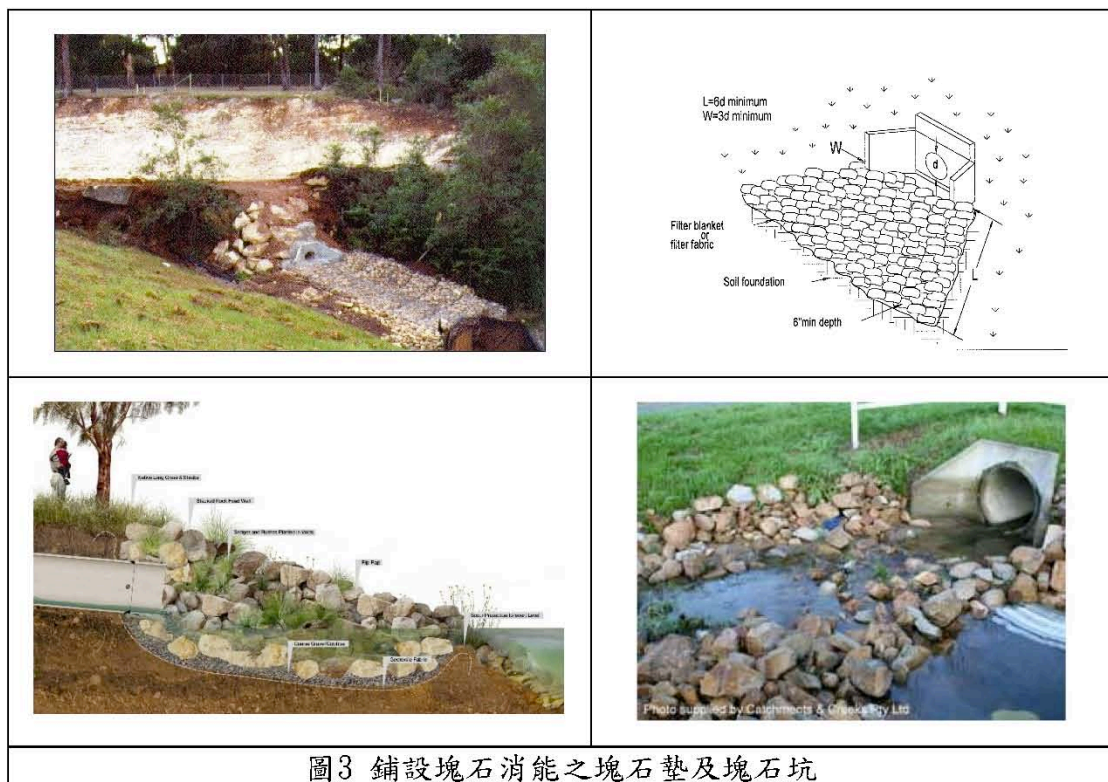


圖3 鋪設塊石消能之塊石墊及塊石坑

二、塊石墊(Riprap Apron)

塊石墊是指以近乎水平方式鋪設塊石於排水路出口處下游側，以防止淘刷之消能保護工，雖然塊石墊可提供能量損耗相對較小，惟對於排水路出口處之混亂流況可提供有效的淘刷保護。在一般情況下，塊石墊之施作已被證明在出口處由淺薄水流流況轉變成漫地流流況，是具有相當經濟性的，但有時候得考量將其鋪設長度延長至既有成型渠道斷面處。塊石墊一般適用於出口平均流速小於4.27m/sec(14ft/sec)流況，圖4為鋪設於箱涵或涵管出口的塊石墊示意圖，塊石墊的關鍵設計參數是鋪設長度、鋪設寬度、鋪設塊石尺寸和尾水深度條件。

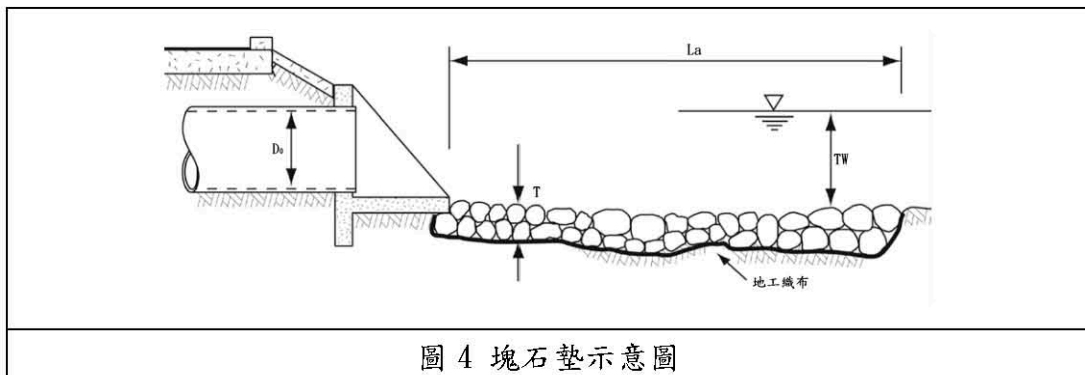
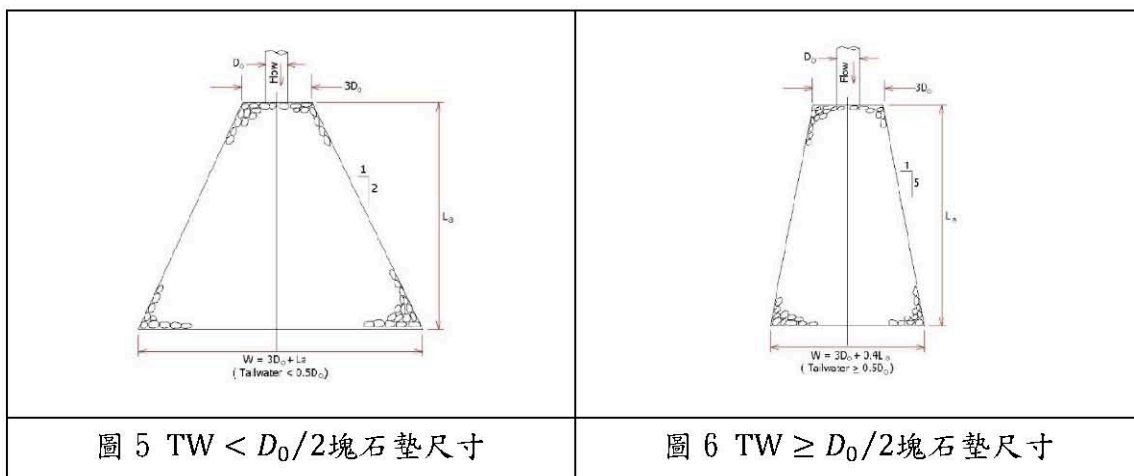


圖 4 塊石墊示意圖

資料來源：作者自行彙整

1. 使用公式擇定塊石墊尺寸

塊石墊鋪設之平面形狀係於排水路出口處鋪設寬度至少 $3D_0$ 寬（ D_0 為涵管內徑或箱涵淨高），然後往下游側增加寬度。寬度增加之幅度視尾水深度(TW)而定，若尾水深度小於 $0.5D_0$ ($TW < D_0/2$)則排放口下游側寬度以2:1(順水流方向：垂直水流方向)斜率往兩側增加，示意圖如圖5；若尾水深度等或大於 $0.5D_0$ ($TW \geq D_0/2$)則排放口下游側寬度以5:1(順水流方向：垂直水流方向)斜率往兩側增加，示意圖如圖6。至於鋪設長度亦依尾水深度而決定，分別依式1或式2估算。



資料來源：參考文獻 10

(1) 塊石墊鋪設長度(L_a)估算

$$L_a = \frac{3.26(Q-0.142)}{D_0^{1.5}} + 3.05 \quad \text{當 } TW < D_0/2 \quad (\text{式 1})$$

$$L_a = \frac{5.44(Q-0.142)}{D_0^{1.5}} + 3.05 \quad \text{當 } TW \geq D_0/2 \quad (\text{式 2})$$

式中：

L_a ：塊石墊鋪設長度(m)

D_0 ：涵管內徑(m)或箱涵淨高(m)

Q ：涵管或箱涵流量 (m^3/sec)

TW ：尾水水深 (m)

(2) 塊石墊下游側寬度(W)估算

塊石墊上游於排水路出口處其鋪設寬度一般設定為 $3D_0$ (最小為兩側各加 0.60m)，而塊石墊下游側之鋪設寬度則視尾水深度估算，估算公式如下如下：

$$W = 3D_0 + L_a \quad \text{當 } TW < D_0/2 \quad (\text{式 3})$$

$$W = 3D_0 + 0.4L_a \quad \text{當 } TW \geq D_0/2 \quad (\text{式 4})$$

(3) 鋪設塊石尺寸規格

塊石墊鋪設塊石之尺寸係以塊石中值直徑(d_{50})為代表，其值可由式 5 估算，而使用之最大塊石尺寸應是塊石中值直徑(d_{50})之 1.5 倍：

$$d_{50} = 0.2D_0 \left[\frac{Q}{\sqrt{g}D_0^{2.5}} \right]^{4/3} \left[\frac{D_0}{TW} \right] \quad (\text{式 5})$$

式中：

d_{50} ：塊石中值直徑(m)，為長徑尺度

D_0 ：涵管內徑(m)或箱涵淨高(m)

Q ：涵管或箱涵流量 (m^3/sec)

TW ：尾水水深 (m)

g ：重力加速度， $9.81\text{m}/\text{sec}^2$

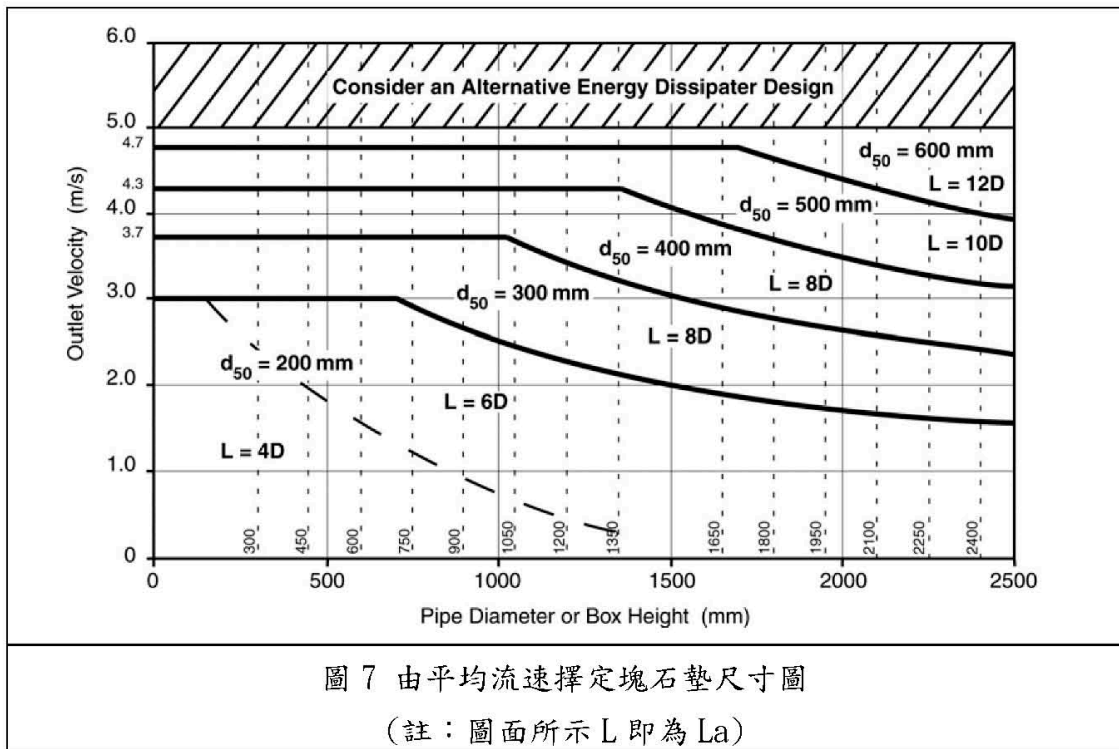
式 5 適用於尾水水深(TW)介於 $0.4D_0$ 及 $1.0D_0$ 之間，若尾水水深無法確知，尾水水深(TW)可設定為 $0.4D_0$ 。

(4) 塊石墊鋪設厚度(T)

使用之最大塊石尺寸應為塊石中值直徑之 1.5 倍，而塊石墊鋪設厚度(T)應為最大塊石尺寸之 1.5 倍或塊石中值直徑之 2 倍以上取其最大值者。

2. 使用圖解法擇定塊石墊尺寸

在已知排水出口平均流速及涵管內徑(m)或箱涵寬度(m)下，可經由圖 7 求得塊石中值直徑(d_{50})及塊石墊鋪設長度(La)，有關塊石墊於排水路出口處鋪設寬度亦為至少 $3D_0$ 寬，而排放口下游側寬度則以 5:1(順水流方向：垂直水流方向)斜率往兩側增加，塊石墊鋪設厚度(T)則為塊石中值直徑之 2 倍。



資料來源：參考文獻 3，並由作者加註說明

3. 使用查表內插法擇定塊石墊尺寸

在已知排水出口平均流速及尾水深度後可利用表 1 求得塊石墊鋪設厚度及鋪設寬度，而可再由流量及涵管內徑(或箱涵淨高)利用表 2(適用於 $TW < D_0/2$ 流況)及表 3(適用於 $TW \geq D_0/2$ 流況)求得塊石墊鋪設長度。其中塊石墊於排水路出口處鋪設寬度亦為至少 $3D_0$ 寬，然後往下游側增加寬度。塊石墊鋪設寬度增加之幅度視尾水深度而定，若尾水深度小於 $0.5D_0$ ($TW < D_0/2$) 則排放口下游側寬度以 2:1(順水流方向：垂直水流方向)斜率往兩側增加；若尾水深度等或大於 $0.5D_0$ ($TW \geq D_0/2$) 則排放口下游側寬度以 5:1(順水流方向：垂直水流方向)斜率往兩側增加。

表 1 由平均流速推求塊石墊鋪設厚度及鋪設寬度表

排水出口平均流速 (m/sec)	塊石墊鋪設厚度 T(mm)	TW<D ₀ /2		TW>=D ₀ /2	
		排水路出口處鋪設寬度(m)	塊石墊下游側鋪設寬度(m)	排水路出口處鋪設寬度(m)	塊石墊下游側鋪設寬度(m)
0~2.44	300	3D ₀	3D ₀ +La	3D ₀	3D ₀ +0.4La
2.44~3.05	450	3D ₀	3D ₀ +La	3D ₀	3D ₀ +0.4La
3.05~4.27	900	3D ₀	3D ₀ +La	3D ₀	3D ₀ +0.4La
備註		La由表2依Q及D ₀ 推求		La由表3依Q及D ₀ 推求	

資料來源：參考文獻 2，並由作者彙整

表 2 尾水深度小於 0.5D₀ 塊石墊鋪設長度(La)推求表

流量Q (cms)	涵管內徑(m)或箱涵淨高(m)									
	300	375	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500
	塊石墊鋪設長度 La(m)									
0-0.142	3.0	3.0								
0.170	3.6	3.4								
0.180		3.6	3.5							
0.190		3.7	3.6							
0.210		4.0	3.8	3.5						
0.250		4.5	4.2	3.8				採用		
0.275			4.5	4.0						
0.300			4.7	4.1						
0.325			5.0	4.3						
0.340				4.4	4.0					
0.350				4.5	4.1					
0.400				4.8	4.3	4.0			左側斜粗標示尺寸	
0.450				5.2	4.6	4.2	4.0			
0.500				5.5	4.8	4.4	4.1			
0.550						4.6	4.3	4.0		
0.600						4.8	4.4	4.2		
0.650						4.9	4.6	4.3		
0.800							5.5	5.0	4.6	
0.940							6.0	5.4	5.0	
1.000								5.1		
1.100								5.4	5.0	
1.250								5.7	5.3	5.0
1.300								5.9	5.4	5.1
1.500								6.3	5.8	5.4
1.700								6.8	6.2	5.7
1.900								7.3	6.6	6.1
2.200								8.0	7.2	6.6
2.500									7.8	7.1
2.850									8.5	7.7
3.250										8.4
3.600										9.0

資料來源：參考文獻 2，並由作者整理

表 3 尾水深度大於等於 0.5D₀ 塊石墊鋪設長度(La)推求表

流量Q (cms)	涵管內徑(m)或箱涵淨高(m)									
	300	375	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500
0-0.142	3.0	3.0								
0.170	4.0	3.7	3.5		鋪設長度					
0.180		3.9	3.7	3.5						
0.190		4.2	3.9	3.6						
0.200		4.4	4.1	3.7	3.5					
0.205		4.5	4.2	3.8	3.6		採用			
0.227			4.5	4.0	3.7					
0.250			5.0	4.3	3.9					
0.275				4.6	4.1					
0.300				4.9	4.3	4.0				
0.320				5.1	4.5	4.2		左側斜粗標示尺寸		
0.340		消能方式		5.3	4.7	4.3	4.0			
0.360				5.5	4.8	4.4	4.1			
0.380					5.0	4.5	4.2	4.0		
0.410					5.2	4.7	4.4	4.1		
0.440					5.5	4.9	4.5	4.3		
0.500						5.3	4.8	4.5		
0.560				採用		5.7	5.1	4.7		
0.620							6.0	5.4	5.0	
0.660							5.6	5.1		
0.730							6.0	5.4	5.0	
0.800							6.3	5.7	5.3	5.0
0.850							6.5	5.9	5.4	5.1
1.000					塊石坑			6.5	6.0	5.5
1.120									7.0	6.4
1.250								7.5	6.8	6.3
1.370								8.0	7.2	6.6
1.500									7.6	7.0
1.630									8.1	7.4
1.750									8.5	7.7
1.975							鋪設			8.4
2.200										

資料來源：參考文獻 2，並由作者整理

三、塊石坑(Riprap Basin)

塊石坑是指以一人為預設之坑洞鋪設塊石於排水路出口處下游側防止淘刷之消能保護工，即利用坑洞在排水路出口處下游側使水流發生水躍(Hydraulic Jump)現象進而達到能量削減之目的。塊石坑一般可適用於出口平均流速大於 4.27m/sec，常用為由涵洞銜接至既有穩定水道間之轉換段。塊石坑之功效受下游側尾水位影響。圖 8 為鋪設於箱涵或涵管出口的塊石坑示意圖。

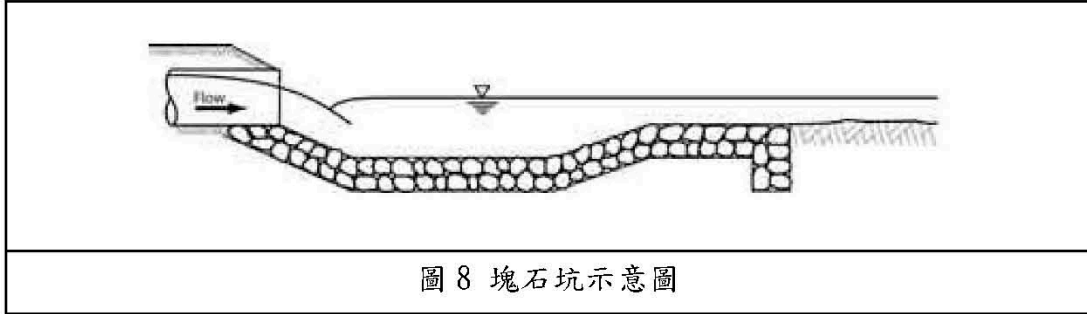


圖 8 塊石坑示意圖

資料來源：參考文獻 3

1. 使用公式擇定塊石坑尺寸

塊石坑之平面形狀基本上是以 D_0 為基本尺度，位於出口處之預設沖刷坑其平面尺寸順水流方向長度為 $3D_0$ ，而垂直水流方向寬度為 $2D_0$ ，沖刷坑四周均以 1:3(垂直方向：水平方向)斜率鋪設，如圖 9 所示。塊石坑之尺寸則依所預設沖刷坑深度、塊石中值直徑及尾水深度決定。三者之關係可由式 6 表示：

$$\frac{Y_s}{D_0} = 0.86 \left(\frac{d_{50}}{D_0} \right)^{-0.55} \left(\frac{V_0}{\sqrt{gD_0}} \right) - C_0 \quad (\text{式 6})$$

式中：

Y_s ：預設沖刷坑深度(m)

D_0 ：涵管內徑(m)或箱涵淨高(m)

Q ：涵管流量 (m³/sec)

d_{50} ：塊石中值直徑(m)，為長徑尺度

TW ：尾水水深 (m)

C_0 ：為尾水參數

尾水參數 C_0 值定義如下：

$$C_0 = 1.4 \quad TW/D_0 < 0.75$$

$$C_0 = 4.0(TW/D_0) - 1.60 \quad 0.75 < TW/D_0 < 1.0$$

$$C_0 = 2.4 \quad 1.0 < TW/D_0$$

塊石中值直徑則依式 7 及式 8 估算：

$$d_{50} = 0.0276 \left(\frac{D_0^2}{TW} \right) \left(\frac{Q}{D_0^{2.5}} \right)^{4/3} \quad \text{當 } Y_s = D_0/2 \quad (\text{式 7})$$

$$d_{50} = 0.081 \left(\frac{D_0^2}{TW} \right) \left(\frac{Q}{D_0^{2.5}} \right)^{4/3} \quad \text{當 } Y_s = D_0 \quad (\text{式 } 8)$$

式中：

d_{50} ：塊石中值直徑(m)，為長徑尺度

D_0 ：涵管內徑(m)或箱涵淨高(m)

Q ：涵管流量 (m³/sec)

TW ：尾水水深 (m)

當沖刷坑深度、塊石中值直徑之數值決定後，塊石坑尺寸之尺寸即可確定，如圖 9 及圖 10，其中鋪設長度(C)為 $3D_0+6Y_s$ ，鋪設寬度(B)為 $2D_0+6Y_s$ ，另沖刷坑寬度為 $2D_0$ 而沖刷坑長度為 $3D_0$ 。

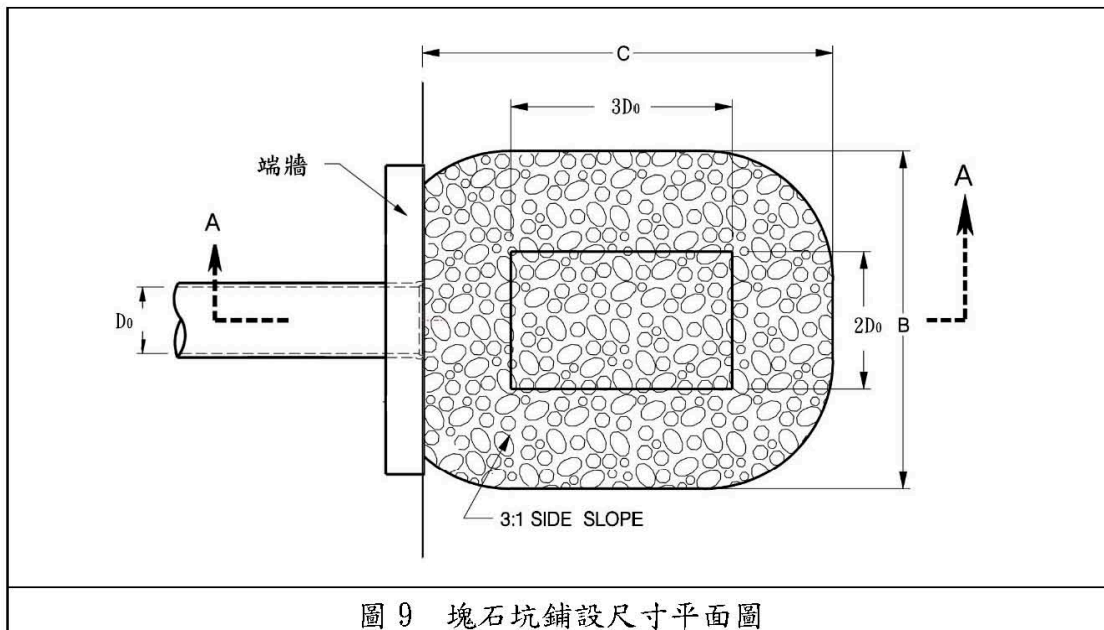


圖 9 塊石坑鋪設尺寸平面圖

資料來源：參考文獻 2，並由作者加註說明

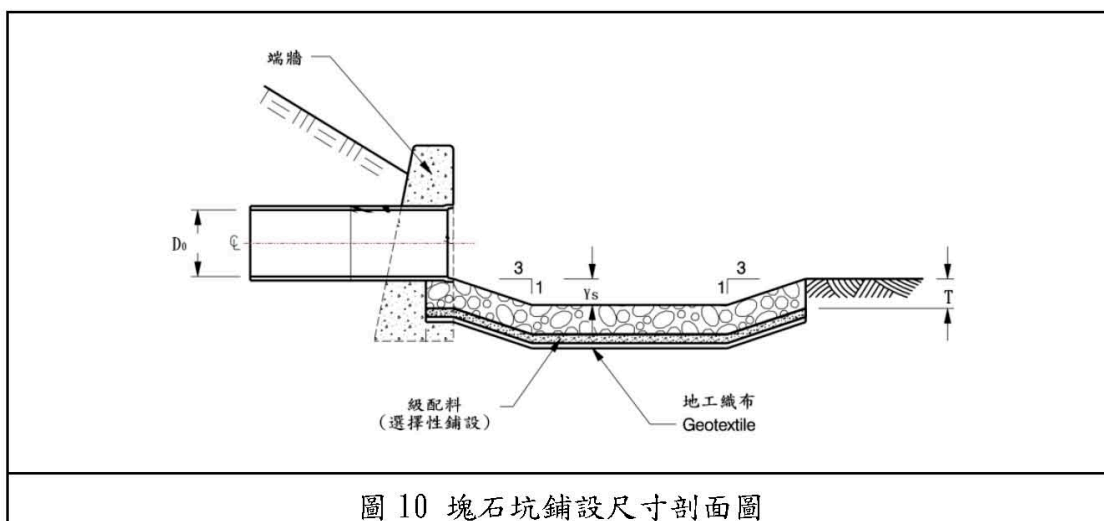


圖 10 塊石坑鋪設尺寸剖面圖

資料來源：參考文獻 2，並由作者加註說明

2. 使用查表內插法擇定塊石坑尺寸

為簡化計算流程一般可可依涵管內徑(或箱涵淨高)及其與尾水深度之關係設定預設沖刷坑深度，而使用表 4 求得塊石坑鋪設尺寸。至於塊石坑鋪設之塊石中值直徑則可依已知之排水出口平均流速參考表 5 求得擇用範圍，而可再依一般鋪設厚度 T 為塊石中值直徑之兩倍擇用塊石中值直徑。

表 4 塊石坑鋪設尺寸推求表

	涵管內徑(m)或箱涵淨高(m)									
	300	375	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500
TW<D ₀ /2										
預設沖刷深度Y _s	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8
鋪設寬度B	1.5	1.9	2.3	3.0	3.8	4.6	5.3	6.1	6.9	7.6
鋪設長度C	1.8	2.3	2.7	3.7	4.6	5.5	6.4	7.3	8.2	9.1
鋪設厚度T	依排水出口平均流速而定，見表5。									
沖刷坑寬度2D ₀	0.6	0.8	1.0	0.2	1.6	1.8	2.2	2.4	2.8	3.0
沖刷坑長度3D ₀	0.9	1.2	1.5	1.8	2.4	2.7	3.3	3.6	4.2	4.5
TW>=D ₀ /2										
預設沖刷深度Y _s	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	1.1	1.2	1.4	1.5
鋪設寬度B	2.4	3.0	3.7	4.9	6.1	7.3	8.5	9.8	11.0	12.2
鋪設長度C	2.7	3.4	4.1	5.5	6.9	8.2	9.6	11.0	12.3	13.7
鋪設厚度T	依排水出口平均流速而定，見表5。									
沖刷坑寬度2D ₀	0.6	0.8	1.0	0.2	1.6	1.8	2.2	2.4	2.8	3.0
沖刷坑長度3D ₀	0.9	1.2	1.5	1.8	2.4	2.7	3.3	3.6	4.2	4.5

資料來源：參考文獻 2，並由作者加註說明

表 5 塊石坑塊石中值直徑(d₅₀)及鋪設厚度參考表

排水出口平均流速(m/sec)	塊石中值直徑 d ₅₀	塊石坑鋪設厚度 T
0~2.44	<130mm	300mm
2.44~3.05	130mm~200mm	450mm
3.05~4.27	200mm~380mm	900mm

資料來源：參考文獻 2，並由作者彙整

五、塊石墊及塊石坑設計應考量事項

下列事項為設計塊石墊及塊石坑於設計過程中應考量事項：

- (1). 一般塊石墊及塊石坑係適用於涵管內徑(或箱涵淨高)小於或等於 1500mm 之狀況。
- (2). 一般而言，塊石墊及塊石坑應用於緊鄰排水路出口下游處，當排水路本身坡度或於出口端坡度或大於 10%，設計者應採取適當之保護措施，避免出口處流速於水流通過塊石墊或塊石坑後仍有過高之流速或使水流集中而產生淘刷。
- (3). 塊石墊及塊石坑不應設置於裸露的岩盤、深潭或池塘。
- (4). 塊石墊及塊石坑不適用於有連續岩盤襯砌之排水路或溪流。
- (5). 塊石墊適用於出口平均流速小於 4.27m/sec 流況，而塊石坑可適用於出口平均流速大於 4.27m/sec 流況。
- (6). 為防止河道砂質土質由鋪設各塊石間之間隙上湧流失，應考量於原河床面先鋪設土工織物(如不織布)，再鋪設塊石。
- (7). 所示沖刷坑估算公式原則適用於以近似圓形型狀塊石及不規則型狀岩塊(Angular Rock)所鋪設之塊石坑。
- (8). 箱涵或涵管出口處與一既有成型渠道銜接，則塊石墊鋪設範圍應涵蓋既有成型渠道兩側邊坡，其鋪設高度應不小於箱涵高度或涵管直徑，如圖 11 所示。
- (9). 如果塊石墊下游側河床坡度較陡，可能有河道沖刷現象，則塊石墊鋪設長度應往下游延伸至河床坡度較緩無河道沖刷潛在風險處。
- (10). 塊石坑深預設沖刷坑之長度上以 10 倍預設沖刷坑深度或 3 倍涵管寬度角之較大者為佳，而塊石坑尺寸在整個鋪設長度上以 15 倍預設沖刷坑深度或 4 倍涵管寬度角之較大者為佳。
- (11). 若緊鄰排水路出口下游處在地面高程上有相當之落差，則應考量先設置陡槽或設置跌水工後，再鋪設塊石墊或塊石坑，如圖 12 所示。
- (12). 一般亦有鋪設石籠代替鋪設塊石，如圖 13 所示。

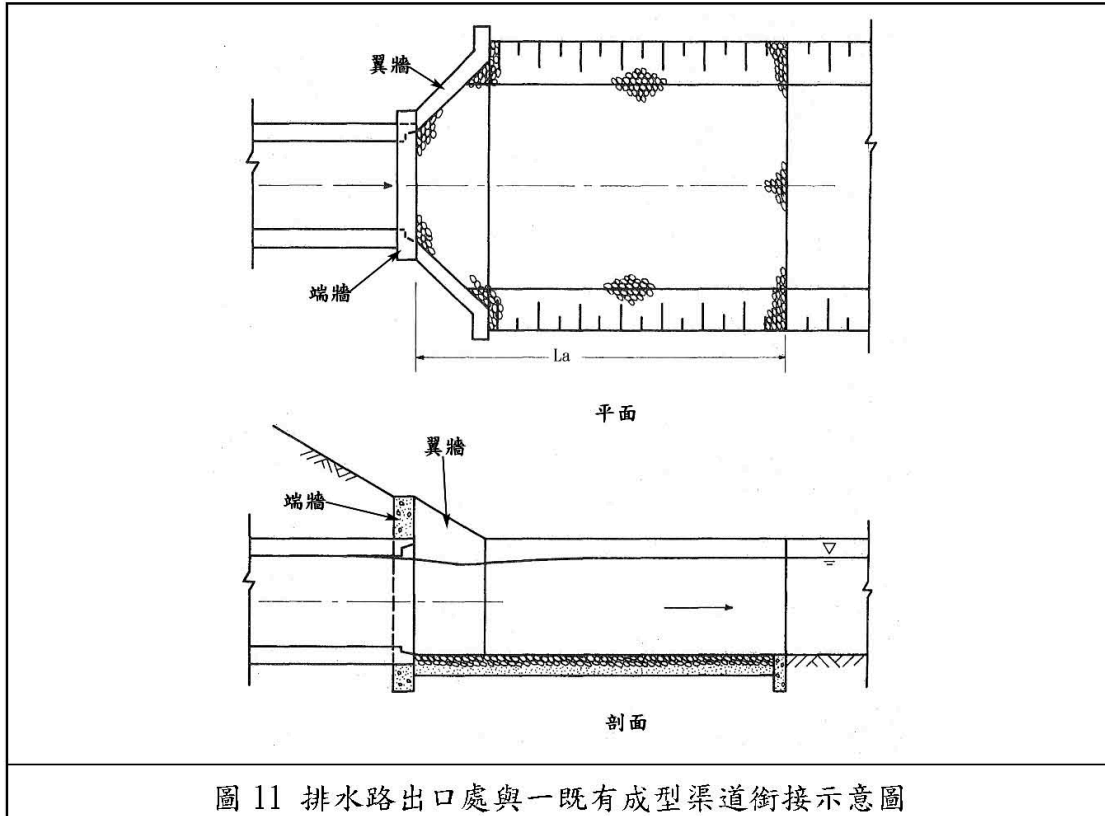


圖 11 排水路出口處與一既有成型渠道銜接示意圖

資料來源：參考文獻 8，並由作者加註說明

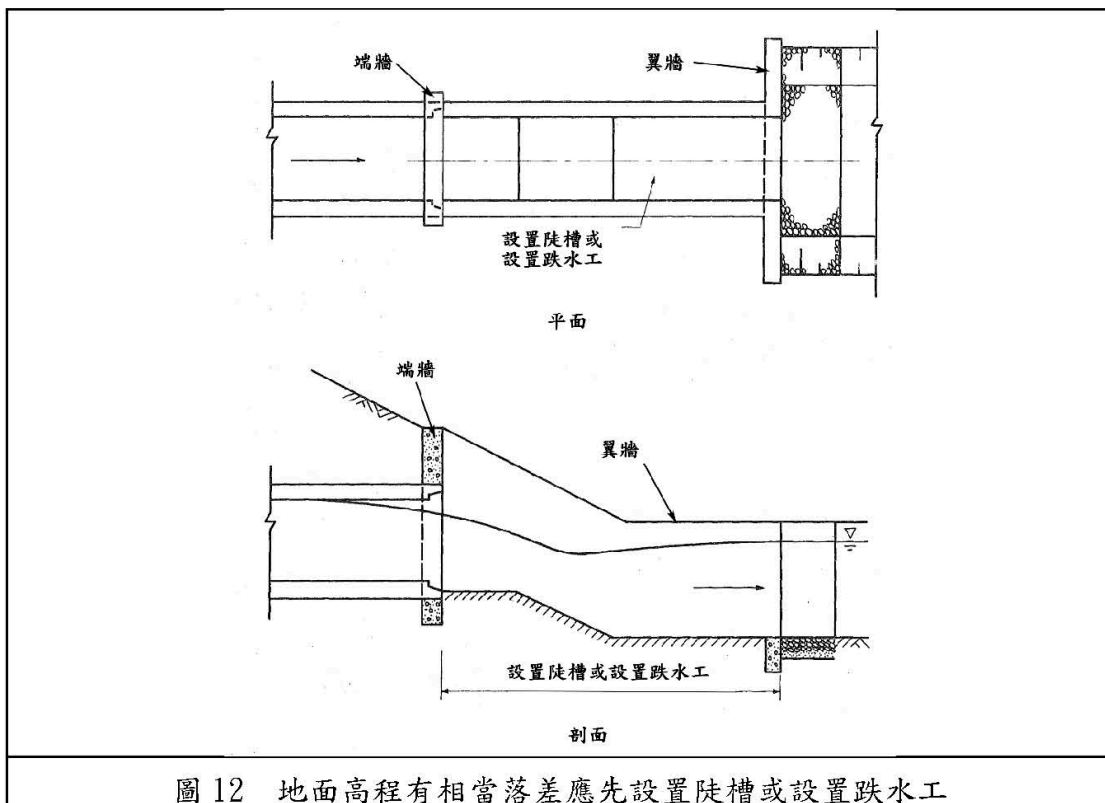


圖 12 地面高程有相當落差應先設置陡槽或設置跌水工

資料來源：參考文獻 8，並由作者加註說明



圖 13 塊石坑鋪設石籠代替鋪設塊石

資料來源：參考文獻 9

六、出口處漸變斷面之設置

排水路型式為箱涵或涵管，為防止受下游淘刷侵蝕影響，於出口處一般應設置端牆、翼牆(擴展翼牆)，並視需要設置漸變段，圖 14 為涵管出口處示意圖。茲分述各設施功能及設置注意事項如下。

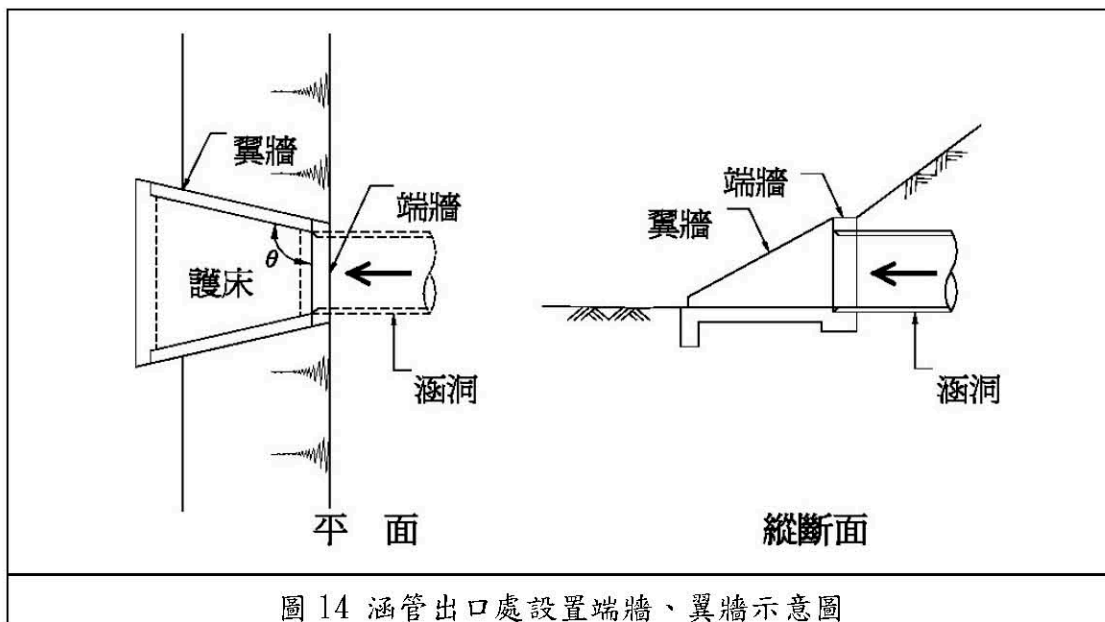
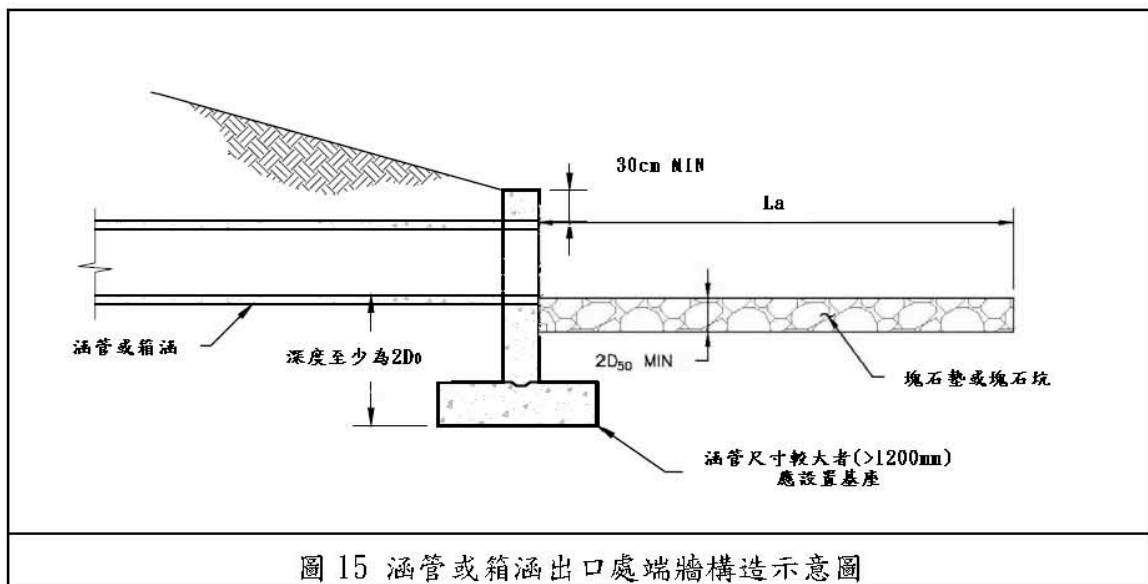


圖 14 涵管出口處設置端牆、翼牆示意圖

資料來源：參考文獻 1

1. 端牆

排水路型式為箱涵或涵管其端牆係設置涵管或箱涵出口處之尾端，一般並沿四周設置。端牆牆厚宜大於 25cm，端牆牆頂高度須能封擋堤岸邊坡填土，其頂部應高出涵頂至少 30cm 以上；端牆設置於構造下方可視為截水牆(Cutoff)功能，應考量可能之淘刷深度，惟一般在配合出口處鋪設有塊石保護下，其深度不小於 2 倍之 D_{50} 深度即可，見圖 15。



資料來源：參考文獻 7，並由作者加註說明

2. 翼牆(擴展翼牆)

翼牆之設置係為防止所穿越之堤岸邊坡遭受崩塌或沖蝕，而為配合堤岸邊坡之坡度，翼牆得採逐漸擴大展開方式之構造，因此又稱擴展翼牆。一般翼牆的高度比照端牆並依路堤邊坡而定，其線型應配合上下游流路布置。為改善流向，翼牆與端牆夾角(θ)不宜大於 120° ；而翼牆的長度係由堤岸邊坡坡度而定，至於翼牆具截水牆功能其深度則應考量可能之淘刷深度，惟一般在配合出口處鋪設有塊石保護下，其深度不小於 2 倍之 D_{50} 深度即可，同端牆底部構造(見圖 15)。

七、 結論

本文所介紹可應用於設計塊石墊及塊石坑之設計公式、圖解法及查表內插法，均為公制之公式及圖表，希望有助於有需要或有興趣者使用。也因此有關塊石坑圖解法未能找到公制之圖表乃未加以介紹，有需要或有興趣者可自行由參考文獻中找到相關資料。

八、 參考文獻

1. 交通部，「公路排水設計規範」，民國 98 年。
2. U.S. Connecticut Department of Transportation, “Drainage Manual, Chapter 11 Storm Drainage Systems”, 2013.
3. Queensland Department of Natural Resources and Mines, “Queensland Urban Drainage Manual, Volume 1”, 2007.
4. U.S. Federal Highway Administration, “Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels”, HEC No. 14, July 2006.
5. U.S. Colorado Department of Transportation, “Drainage Manual, Chapter 11 Energy Dissipators”, 2004.
6. U.S. Army Corps of Engineers, “Hydraulic Design Criteria, Sheets 722-1 to 722-3, Storm Drain Outlets, d Energy Dissipators”, 1973.
7. U.S. Urban Drainage and Flood Control District, “Urban Storm Water Drainage Criteria Manuals, Volume 2”, 2016,published by Denver, Colorado.
8. Simons, Li & Associates, “Design Guidelines & Criteria Channels & Hydraulic Structure on Sandy Soil”, 1981.
9. U.S. Federal Emergency Management Agency, “Outlet Works Energy Dissipators”, 2010.
10. Malaysia Department of Irrigation and Drainage, “Urban Storm Water Management Manual, Chapter 29 Hydraulic Structures”, 2000.

投稿 107.03.12
校稿 107.03.21
定稿 107.04.02