

不同流況下環圈式丁壩群於堤岸保護之應用

張峻銘⁽¹⁾ 王傳益⁽²⁾ 樂凱鈞⁽³⁾

摘要

本研究以第Ⅲ型丁壩壩型(上游坡度為 1:1)作為試驗模型，模擬透水環圈式丁壩群與不透水傳統式丁壩群於不同相對水流強度($V/V_c=0.65、0.80、0.95$)、壩軸坡度($S_d=1/30、1/10$)以及無因次丁壩群間距($D/L=1.5、2.5、3.5$)之沖淤變化。

結果顯示，傳統式丁壩群及環圈式丁壩群均於丁壩壩頭處產生沖刷坑，且最大沖刷深度均發生於丁壩壩頭附近。綜合評估結果，透水環圈式丁壩群在壩軸坡度(S_d)為 1/30，且丁壩間距為 2.5 倍壩長的配置，擁有最佳的沖刷深度減緩率及壩田落淤成效，保護堤岸的安全指標最佳，為本研究較理想的丁壩群配置模式。

關鍵詞：透水環圈式丁壩群、沖刷深度減緩率、壩田掛淤成效、安全指標

Application of Ring Column Spur Dike Group to Embankment Protection with Various Flow

Chun-Ming Chang⁽¹⁾ Chuan-Yi Wang⁽²⁾ Kai-Jun Yue⁽³⁾

Abstract

A series of experiment was conducted with the type □ spur dikes model (the upstream slope is 1:1). Considering various parameters of lived-bed experiment including different flow intensity ($V/V_c=0.65, 0.80, 0.95$), the slope of spur dike shaft ($S_d=1/30, 1/10$), and the dimensionless spacing between two spur dikes ($D/L=1.5, 2.5, 3.5$ times the length of spur dike), to explore scour depth and variations of the flow around permeable ring column spur dike group and impermeable traditional spur dike group.

The results show that both the traditional spur dike group and ring column spur dike group produce a scouring hole at the head of spur dike and the maximum scouring depth occurs near the head of spur dike. The comprehensive evaluation results show that the slope of the permeable ring column spur dike group in the dike shaft is 1/30, and the dike spacing is 2.5 times the dike length configuration,

⁽¹⁾ 逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士

⁽²⁾ 逢甲大學水利工程與資源保育學系教授(通訊作者 email: cywang@fcu.edu.tw)

⁽³⁾ 逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士生

with the best scour depth reduction rate and the result of dike field silting, the safety effect of protecting the embankment is the best, and the optimal configuration mode of the spur dike group is the ideal for this study.

Key words : permeable ring column spur dike group, the scour depth reduction rate, the effect of the dike field silting, safety index.

前言

丁壩為國內河川治理規劃常見的方法之一，規劃良好的丁壩工法能夠達到改變流路、防止岸壁沖刷、造灘或挑流等功效。丁壩設置後除對河道產生流路影響外，丁壩本身亦受水流沖擊之作用，尤其壩頭周圍之沖刷為工法成敗之關鍵。於過往經驗中，即使設計規格符合規範之丁壩，在未發揮應有功能之前，壩體即有可能因壩頭遭水流沖擊產生淘刷，導致壩頭沉陷或斷裂流失，且漸次擴及壩身，失去保護堤防基腳的功用。

為減緩丁壩壩頭沖刷，國內常用加深壩頭基礎至可能沖刷深度以下或特別利用護坦工加強壩頭消能措施，達到保護丁壩之目的；國外則較少採用護坦工保護丁壩，而是於丁壩壩頭結構上進行延伸或具撓屈性之設計，當壩頭之局部沖刷產生時，其結構底部順著河床沉降往沖刷坑移動，避免壩體因沉陷而斷裂，穩固壩頭基礎，延長丁壩之壽命。

文獻回顧

2.1 沖刷之分類

Melville & Coleman(2000)提出河道的沖刷型態，因為一般沖刷與局部化沖刷之加總，詳如圖 1。丁壩係河岸突出物，其沖刷機制與橋台沖刷類似，說明如下：

1. 一般沖刷(**general scour**)：主要為上下游河道輸砂量不平衡所致，非河道中結構物之影響，並有一般長期沖刷與一般短期沖刷之別，其為依水流影響時間加以劃分。
2. 局部沖刷(**local scour**)：可分為束縮沖刷(**contraction scour**)、局部沖刷與射流沖刷(**Jet-flow scour**)。由於河道中設置水工結構物，阻礙水流，導致河道流場改變與底床剪應力變大，進而對河道沖刷型態造成影響。

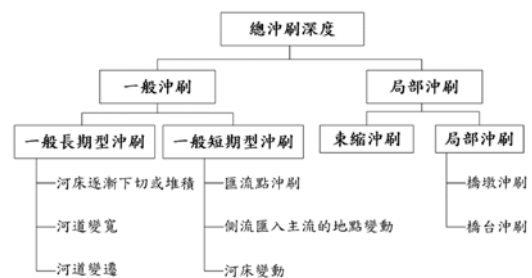


圖 1 河道沖刷型態分類圖

2.2 國內丁壩沖刷相關研究

本研究主要是在探討環圈式丁壩減緩沖刷之效果，因此將過去學者所研究之丁

壩沖刷相關理論加以分析探討。

1. Klingeman et al. (1984)

將壩田掛淤過程可能發生之流場狀況分成六類，壩田係指前一座丁壩壩頭與次一座丁壩壩根連線之三角區域，如圖 2 所示。並據此建議將丁壩間距設定為二至三倍丁壩壩長時，有最佳掛淤效果；而丁壩間距若往下縮減，其對掛淤效果並未能有顯著增加，且可能引致顯著之束縮沖刷。

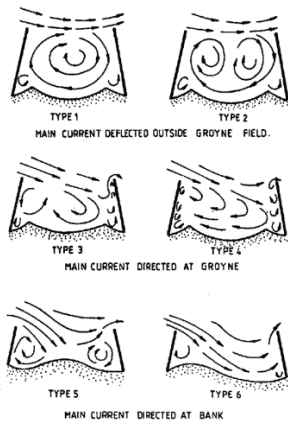


圖 2 丁壩群壩田掛淤過程示意圖
(Klingeman,1984)

2. Armanini et al. (2010)

透過模型試驗對壩田之落淤機制進行分析，其流經丁壩之水流產生渦流經過壩田外側時，驅使懸浮載橫向擴散進入壩田，於壩田上游側產生淤積。

3. 林岳葆(2006)

利用丁壩於不同壩長、壩高、種類(透水與不透水)、單一或系列丁壩及流量條件下，評估其穩定性與生態性。提出透水性蛇籠丁壩其挑流及整流效果較不透水性佳；於高壩(h=3cm)與低壩(h=1cm)方面，高壩配置下其

最大沖刷深度大部分皆比低壩深；在考量生態、結構物安全及河岸穩定條件下，高壩時以透水長丁壩(L/B=1/6)且設置間距為 2.5 倍壩長之配置最佳；低壩時以透水長丁壩且設置間距為 1.5 倍壩長之配置最佳。

4. Muraoka et al. (2008)

以透水性石籠丁壩模型進行渠槽試驗，藉由浸沒式與未浸沒式探討不同丁壩長度之配置。由試驗得知浸沒相較於未浸沒影響較小，因浸沒式丁壩其透水性能削弱水流，故較穩定。由於剪力之影響故較長且未浸沒之丁壩沖刷較大，浸沒和未浸沒之最大沖刷深度與壩長比值(d_s/L)大約差 0.25 到 0.28 倍之間。而透水性丁壩之局部沖刷顯著降低，且於丁壩下游遠處形成砂丘。

5. Hakimzadeh et al. (2012)

使用 8 種不同幾何結構角度的丁壩模型進行試驗，如圖 3 所示，研究結果顯示，丁壩與迎水面交角由 90°改變至 83.94°時，其最大沖刷深度可降低約 22.23%，且下刷之沖刷坑體積降低 60%。

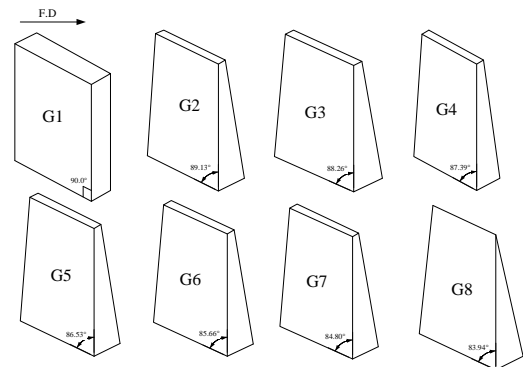


圖 3 不同丁壩迎水面角度示意圖
(Hakimzadeh et al., 2012)

2.3 透水性環圈式丁壩相關研究

1. 林長葵(2016)

運用新型堤防保護工-透水性環圈式丁壩工，透過改變丁壩型狀，壩軸坡度，進行相關水工試驗，其配置如圖 4。研究結果顯示環圈式丁壩於壩型第 III 型，壩軸坡度 $S_d=1/10$ 之配置為較佳之丁壩模式，能有效減緩丁壩壩頭沖刷深度，其最大沖刷深度發生位置遠離堤岸，對於堤防安全具較佳之保護效果。

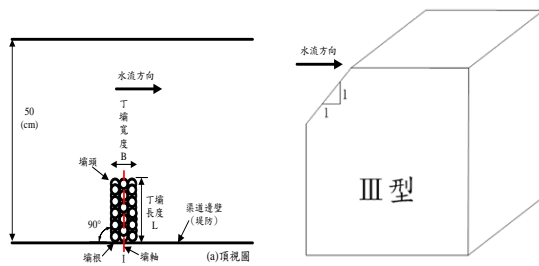


圖 4 環圈式丁壩工示意圖(林長葵, 2016)

2. 楊孟祥(2017)

比較透水式環圈丁壩與傳統式丁壩周圍流場之沖刷深度及其變化，研究結果顯示，不論何種型式之丁壩其最大沖刷深度均發生於壩頭附近，環圈式丁壩之最大沖刷深度皆較傳統式丁壩來的小，因前者具透水性與撓屈性，能促進水流紊動達到削弱向下水流能量，進而抑制丁壩周圍沖刷坑發展及沖刷深度。綜合考量丁壩與堤防之安全，當壩軸坡度為 1/30、迎水面坡度較緩(1:2)且丁壩為短丁壩($L/B=1/5$)時，其沖刷深度減緩率為 75.0%，能有效減緩丁壩壩頭沖刷深度，且其最大沖刷深度位

置最遠離堤岸，對於堤防具較佳之保護效果。

理論分析

3.1 丁壩周圍水流流況

Zhang & Nakagawa(2008)提出當水流流經丁壩時，因受到丁壩阻礙，使水流流況產生變化，進而造成底床泥砂的變動，並於丁壩壩頭部分產生局部沖刷。當水流流經丁壩後主要分散成三個區域分別為主流區(main flow zone)；尾流區(wake zone)包含迴流區及重置區；混和區(mixing zone)，詳如圖 5 所示。

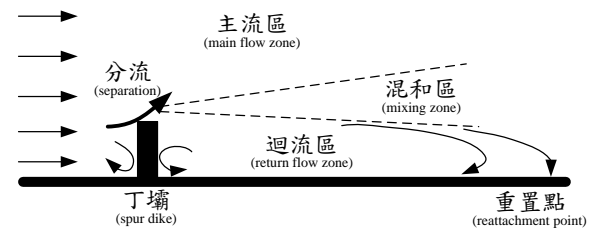


圖 5 丁壩周圍水流示意圖 (Zhang & Nakagawa, 2008)

水流沖擊丁壩而產生局部沖刷，於發展時期其作用力之複雜性隨沖刷坑型態變化也有所改變。水流流經丁壩時周圍型態可概分為四個部分，如圖 6。其中以向下水流(downflow)與馬蹄型渦流(horeshoe vortex)為造成丁壩局部沖刷現象之主要影響因素。

張峻銘、王傳益、樂凱鈞：
不同流況下環式丁壩群於堤岸保護之應用

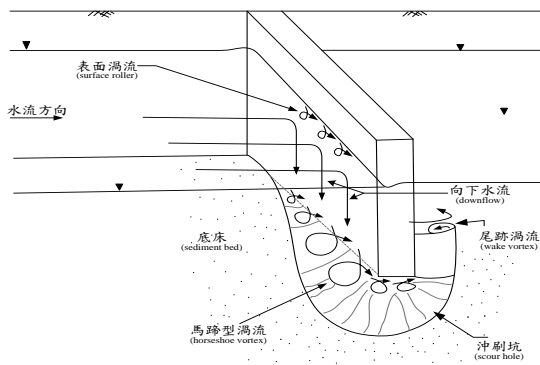


圖 6 丁壩周圍流場示意圖
(Kwan,1984)

體結構穩定性有效改善，達到持續保護之功效。

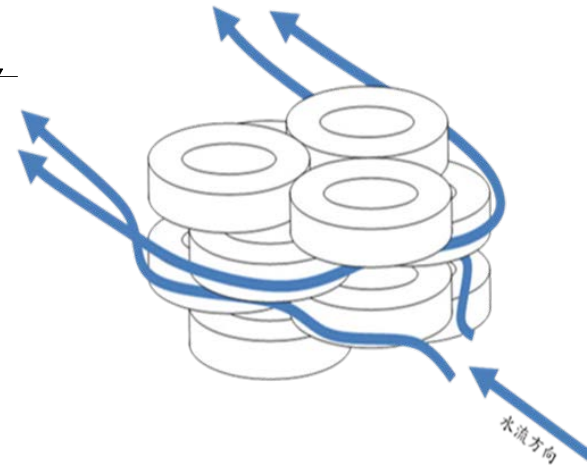


圖 7 環圈橫向水流示意圖

3.2 透水性環圈式丁壩

本研究所使用之模型為透水性環圈式丁壩群(water-permeable ring column spur dikes)，是以群樁基礎與環圈組成，群樁基礎埋設於河床下，基礎之用途為固定環圈且使環圈穩定不讓其有倒塌的基座。環圈式丁壩設置於河岸易沖刷處，且往河心方向構築之突出構造物，設置丁壩目的為挑流改變流路並降低水流直接沖擊河岸，且可藉由抬升水位減緩流速使其減少水流沖擊河岸之能量，使周圍泥砂得以沉降，更可以使沖刷坑遠離河岸。環圈以交錯排列型式來堆疊，因其具有不規則表面，能將水流能量消減，並且增加迎水面之摩擦力，如圖 7；又因環圈為交錯疊放之形式，使得環圈之間有許多空隙，減緩向下水流能量，並且增加水流紊動，進而達到消能、降低水流挾砂能力，使泥砂沉降，如圖 8。此外環圈具有彈性，可吸收部份水流撞擊能量，可減低丁壩周圍之沖刷，使丁壩整

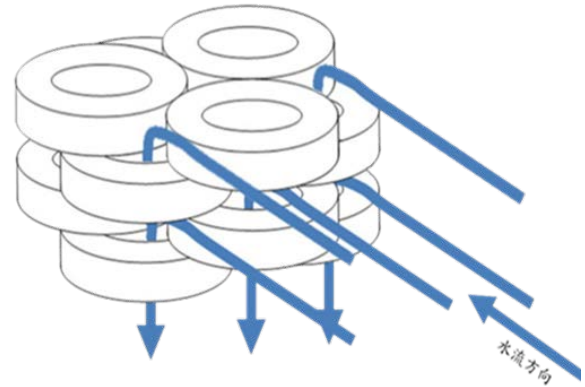


圖 8 環圈縱向水流示意圖

四、水工試驗

4.1 試驗渠槽

本研究所使用之設備位於逢甲大學水利工程與資源保育學系水工試驗室，試驗渠槽為循環式中型玻璃渠槽，渠槽全長 13.6 m、寬 0.5 m、深 0.75 m，渠槽側壁之材質為強化透明玻璃，以利於試驗進行時

之觀測。渠槽尾端有一尾水閘門(tailwater gate)，用以控制試驗水深，渠槽下方有一馬達可抬升前後渠槽之高程，進而控制坡度，如圖 9 所示。

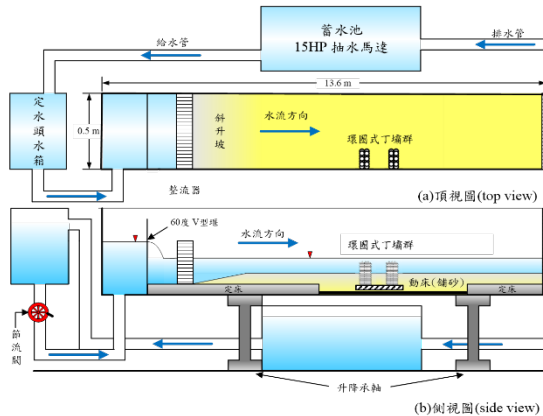


圖 9 試驗渠槽配置圖

4.2 試驗模型

本試驗採用第 III 型丁壩(圖 4)之傳統式及透水式兩種型式之丁壩群模型進行試驗，傳統式丁壩群模型採用壓克力板(acrylic)製成。而透水式丁壩則採用環圈組合而成，現地則為應用廢棄輪胎再利用。以市面上小客車輪胎之直徑為 60 cm，配合環圈直徑為 1.8 cm 做等比縮尺，其模型與原型之縮尺比例約為 1:33.3，詳如圖 10。

本試驗丁壩群底板由壓克力板製成，並於板上設置凹洞，以便固定丁壩群模型，模型配置如圖 11。

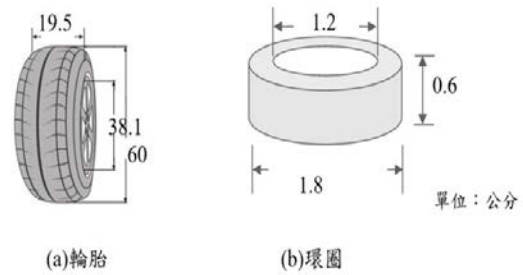
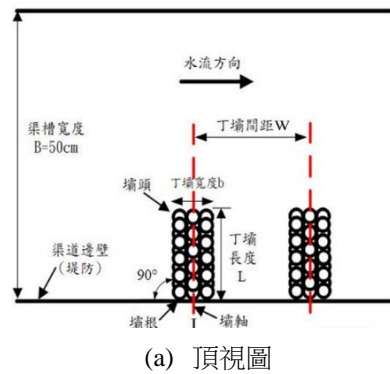
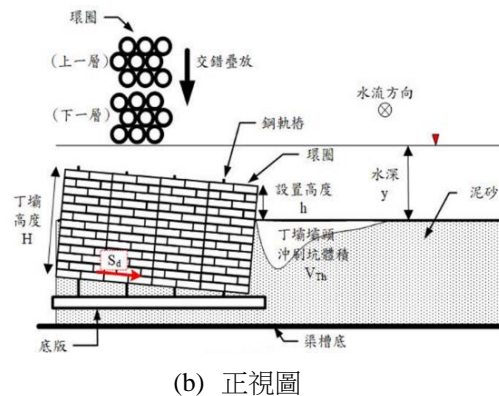


圖 10 輪胎及環圈尺寸對照圖



(a) 頂視圖



(b) 正視圖

圖 11 丁壩配置示意圖

4.3 試驗規劃

4.3.1 試驗河床質

本研究鋪設 35cm 厚之越南細砂，並採用三種泥砂粒徑分別為#20、#30、#40 號篩所篩出並加以混合，其中 d_{50} 為 0.62mm，標準偏差

張峻銘、王傳益、樂凱鈞：
不同流況下環式丁壩群於堤岸保護之應用

σ_g 為 1.24，小於 1.30 屬於均勻泥砂，泥砂粒徑分佈如圖 12 所示。

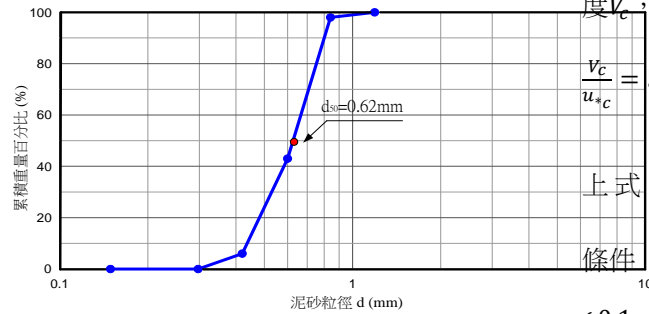


圖 12 試驗河床質粒徑分佈曲線圖

4.3.2 試驗流量

本試驗利用給水管上之顯示式管路手動矩形閘閥，水流由定水頭水箱經由給水管輸送至上游渠槽，再流至 V 型堰。經由 V 型堰之流量率定出所需流量，其率定曲線如圖 13，經迴歸後得(1)式。

$$Q=0.00005Y^2-0.0005Y+0.0016$$

(1)

式中，Q=流量(cms)、Y=V 型堰溢流水深(cm)。

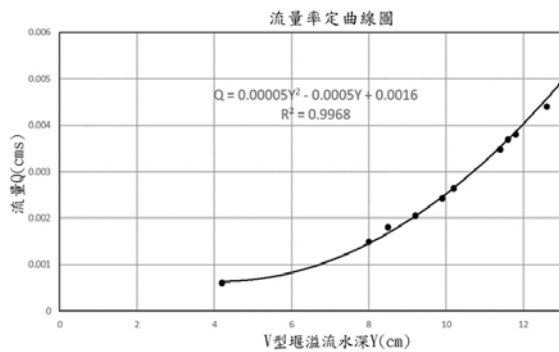


圖 13 V 型堰流量率定曲線圖

4.3.3 相對水流強度

由馬達抽水至渠槽放水，經流量控制閘閥調整至待測流量，等待其穩定，便將流速計放置於丁壩上游約 1 公尺處量測流速。並由

水深 y 及底床中值粒徑 d_{50} ，運用 Melville and Coleman(2000)式(2)估算底床質臨界啟動速度 V_c ， u_{*c} 為泥砂顆粒臨界剪力速度。

$$\frac{V_c}{u_{*c}} = 5.75 \times \log\left(5.53 \frac{y}{d_{50}}\right) \quad (2)$$

上式中 $\begin{cases} u_{*c} = 0.0115 + 0.0125d_{50}^{1.4} \\ u_{*c} = 0.0305d_{50}^{0.5} - 0.0065d_{50}^{-1} \end{cases}$ 對應

$$\begin{cases} 0.1\text{mm} < d_{50} < 1\text{mm} \\ 1\text{mm} < d_{50} < 100\text{mm} \end{cases}$$

運用流速計測得上游平均流速 V ，並且利用(2)式求得底床質臨界啟動速度 V_c ，即可求得相對水流強度 (V/V_c) 。依序運用流量控制閘閥調整大小，而得到所需相對水流強度。

4.3.4 完全發展段

因本研究之試驗水深較低，如果以流速剖面決定完全發展段較為困難，故利用試驗區各段水深來決定完全發展段。完全發展段選定之範圍是利用平均流速 V 與泥砂臨界啟動速度 V_c 之比值，即 V/V_c 為 0.95 的情況下量測水深，大約 8.9 cm~9.1 cm。經試驗分析結果，本試驗之完全發展區段位於距入口約 7.00 m~8.50 m 之間，因此本研究設計丁壩埋設於距入口 7.75 m 處之動床區段，詳如圖 14。

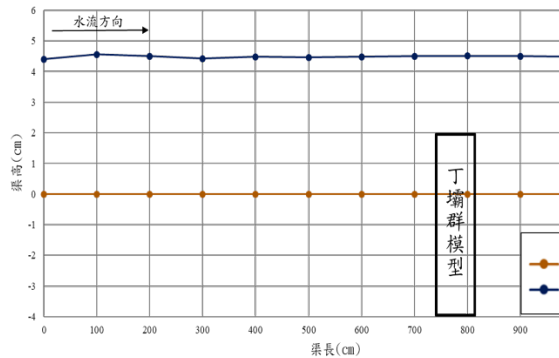


圖 14 完全發展區段範圍選定圖

4.4 試驗條件

本試驗於清水流況下，泥砂中值粒徑 $d_{50}=0.62\text{mm}$ 之均勻底床質，水平渠床坡

度($S=0.001\%$)條件下，以不同水流強度、丁壩種類(傳統式、透水式)、丁壩間距以及丁壩壩軸坡度，進行丁壩群試驗，試驗條件詳如表 1 所示。

本研究探討傳統式丁壩與環圈式丁壩周圍沖刷深度及範圍，以及不同丁壩間距以了解丁壩群前後沖淤之對應關係。並藉由三種流量模擬不同洪水強度下之沖刷情況，此外，為了避免壩頭過高而增加丁壩破壞的風險，故使用兩種不同丁壩壩軸坡度，以減緩其壩頭沖刷深度。

丁壩群型式	傳統式	環圈式
相對水流強度 (V/V_c)	0.65、0.80、0.95	
無因次丁壩間距(D/L)	1.5、2.5、3.5	
壩軸坡度(S_d)	1/30、1/10	
無因次丁壩高度(h/H)	0.17	
無因次丁壩長度(L/B)	1/5	

表 1 試驗條件表

結果分析與討論

本研究將試驗渠槽邊壁視為堤岸，並將丁壩群模型銜接邊壁(堤岸)設置，探討各種不同配置下丁壩群周圍之沖淤變化情形，以瞭解丁壩群保護堤岸之最佳配置。本研究係延續丁壩改善工法之研究(林長葵，2016)最佳配置，即採用該研究之丁壩

壩型第 III 型，於不同相對水流強度 ($V/V_c=0.65、0.80、0.95$)之定量流流況下，透過改變丁壩種類(透水及不透水)、無因次丁壩間距($D/L=1.5、2.5、3.5$)以及丁壩壩軸坡度($S_d=1/30、1/10$)等條件下探討丁壩群於不同配置時其沖刷坑範圍、最大沖刷深度與發生位置時丁壩群保護堤岸之成效。

本試驗為丁壩群沖刷試驗，由於首座丁壩首當其衝遭受水流沖擊，沖刷行為特別顯著，因此確保其安全性為重要考量。為瞭解丁壩群於不同配置下，首座丁壩之沖淤變化對於河防構造物安全之影響，本試驗根據 Kuhnle et al. (1999) 的研究，將丁壩周圍所形成的沖刷坑定義如圖 15 所示，圖中各參數代表之意義如下：

- a: 丁壩工上游沖刷坑寬度，顯示沖刷坑對渠道橫斷面的影響範圍。
- b: 最大沖刷深度與堤岸之距離，顯示最大沖刷深度對堤岸安全的影響程度。
- c: 丁壩上游沖刷坑長度，顯示丁壩上游沖刷坑影響範圍。

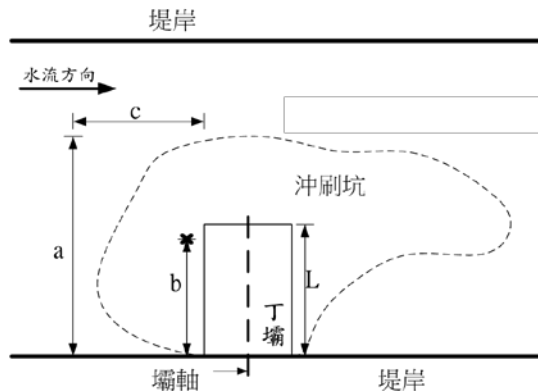


圖 15 丁壩周圍沖刷坑平面圖

為了比較各組試驗之沖淤變化，故將各參數與丁壩壩長 L 進行無因次化。由圖 15 可知，當 a/L 及 c/L 值越小，則表示丁壩上游面之壩基沖刷情形越不明顯；而當 b/L 值越大時，則代表最大沖刷深度遠離壩頭，對丁壩保護堤岸效果越佳。所以當 a/L 及 c/L 值越小且 b/L 值越大時，表示此丁壩配置為最好，對於保護堤岸效果越佳。

5.1 傳統式丁壩群

由於首座丁壩受水流作用力最大，沖刷最嚴重，本研究首先針對首座丁壩的沖刷結果做比較，以了解在不同配置下，丁壩周圍沖刷深度與體積之差異，並透過(3)式、(4)式分別計算得沖刷深度減緩率 R_p 及沖刷體積減緩率 R_h ，計算結果如表 2 所示。

$$R_p(\%) = \left(\frac{d_{sm} - d_s}{d_{sm}} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$R_h(\%) = \left(\frac{V_{hmax} - V_h}{V_{hmax}} \right) \times 100 \quad (4)$$

式中 d_{sm} 為全部試驗組別中最大沖刷深度， d_s 為各組別之最大沖刷深度； R_h 為丁壩壩頭沖刷體積減緩率， V_{hmax} 為丁壩壩頭之最大沖刷坑體積， V_h 為不同配置之丁壩壩頭沖刷坑體積。

將沖刷深度最深且沖刷體積最大之組別 T13 設為對照組，分析各丁壩群沖刷減緩之成效，如表 2。表中顯示首座丁壩隨著相對水流強度增強最大沖刷深度以及沖刷體積也隨之增加。此外，不論於何種流況或何種丁壩間距配置下，壩軸坡度 (S_d) 為 1/30 之沖刷深度和體積減緩率均為佳，與理論之壩軸坡度 (S_d) 為 1/10 較佳不盡相同，推究其因可能係本研究所採用之第 III 型丁壩，其迎水面坡度為 45 度，能夠減緩向下水流對於丁壩的沖擊。

本研究訂定安全指標 (S_i) 如(5)式，做為評估沖刷坑對於堤岸與丁壩安全之指標。 b/L 表示最大沖刷深度與堤岸之距離，為丁壩結構安全之重要依據，故設定權重為 50%； a/L 為丁壩工上游沖刷坑寬度及

c/L 代表的丁壩上游冲刷坑長度，均為反映丁壩冲刷坑規模大小，設定權重各為 25%，安全指標(S_i)計算公式如(5)式所示。安全指標數值越大，表示該配置越安全。

$$S_i = [(a/L)^{-1} \times 0.25] + [(b/L) \times 0.5] + [(c/L)^{-1} \times 0.25] \quad (5)$$

由表 2 可知傳統式丁壩群之安全性隨著相對水流強度增加而減少，因為水流對於丁壩壩頭作用力增大，使得冲刷坑規模增大，最大冲刷坑發生位置也會接近堤岸及丁壩壩頭，故結構物安全性降低。大體而言，考量丁壩及堤岸安全時，傳統式丁壩群在各流況下丁壩間距為 1.5 倍壩長，壩軸坡度(S_d)為 1/30 配置之安全性最高。

5.2 環圈式丁壩群

透過表 3 可知環圈式首座丁壩，不論冲刷減緩率抑或是冲刷體積減緩率，其冲刷減緩成效皆比傳統式首座丁壩為佳，充分發揮環圈之透水消能、沉降泥砂等特性。環圈式首座丁壩之冲刷深度及冲刷體積減緩率隨著相對水流強度的增加而有遞減之趨勢。表 3 顯示環圈式首座丁壩於相

同之水流強度與壩距條件下，在不同壩軸坡度(S_d)之冲刷結果，以 $S_d=1/30$ 具有較佳之冲刷減緩效果。

經安全指標分析，採用環圈式丁壩群之首座丁壩的冲刷坑規模相較於傳統式丁壩群之首座丁壩有明顯縮減，推測乃因環圈式丁壩之迎水面以交錯形式排列且具孔隙，將向下水流之能量有效的削減，因水流能量不足，使得泥砂不易被帶離冲刷坑，以致環圈式丁壩群冲刷坑規模較小。整體而言，環圈式配置下之丁壩群之保護堤岸安全效果較傳統式丁壩群為佳，其中又以環圈式丁壩群無因次丁壩間距(D/L)為 2.5 倍壩長且壩軸坡度(S_d)為 1/30 之配置具有較高之安全指形式排列且具孔隙，將向下水流之能量有效的削減，因水流能量不足，使得泥砂不易被帶離冲刷坑，以致環圈式丁壩群冲刷坑規模較小。整體而言，環圈式配置下之丁壩群之保護堤岸安全效果較傳統式丁壩群為佳，其中又以環圈式丁壩群無因次丁壩間距(D/L)為 2.5 倍壩長且壩軸坡度(S_d)為 1/30 之配置具有較高之安全指標。

表 2 傳統式丁壩群

組別	相對水流強度 (V/V_c)	無因次丁壩間距 (D/L)	壩軸坡度 (S_d)	#1 冲刷深度減緩率	#1 冲刷體積減緩率 R_h (%)	安全指標(S_i)
T1	0.65	1.5	1/10	25.6	59.1	1.20
T2		1.5	1/30	41.0	79.2	1.35
T3		2.5	1/10	30.8	70.3	1.26
T4		2.5	1/30	41.0	77.2	1.38
T5		3.5	1/10	28.2	63.0	1.32
T6		3.5	1/30	43.6	81.3	1.16
T7	0.80	1.5	1/10	12.8	28.3	1.15
T8		1.5	1/30	17.9	61.6	1.32
T9		2.5	1/10	15.4	44.7	1.20
T10		2.5	1/30	20.5	54.4	1.31
T11		3.5	1/10	15.4	48.4	1.16
T12		3.5	1/30	20.5	46.9	1.20

T13		1.5	1/10	0.0	0.0	1.05
T14		1.5	1/30	12.8	21.7	1.29
T15	0.95	2.5	1/10	7.7	12.1	1.18
T16		2.5	1/30	12.8	29.0	1.19
T17		3.5	1/10	2.6	11.7	0.95
T18		3.5	1/30	5.1	9.7	0.97

註：T=傳統式丁壩群，#1 為首座丁壩

表 3 環圈式丁壩群

組別	相對水流強度 (V/V_c)	無因次丁壩間 距(D/L)	壩軸坡度 (S_d)	#1 沖刷深度減 緩率	#1 沖刷體積減 緩率 R_h (%)	安全指標(Si)
R1	0.65	1.5	1/10	59.0	87.3	1.59
R2		1.5	1/30	56.4	91.4	2.10
R3		2.5	1/10	51.3	77.4	1.60
R4		2.5	1/30	53.8	84.6	2.08
R5		3.5	1/10	48.7	78.7	1.64
R6		3.5	1/30	64.1	84.8	2.03
R7	0.80	1.5	1/10	51.3	80.7	1.61
R8		1.5	1/30	48.7	74.3	1.58
R9		2.5	1/10	35.9	71.1	1.60
R10		2.5	1/30	48.7	82.2	2.02
R11		3.5	1/10	46.2	63.0	1.59
R12		3.5	1/30	48.7	64.3	1.63
R13	0.95	1.5	1/10	30.8	69.0	1.64
R14		1.5	1/30	35.9	68.7	1.66
R15		2.5	1/10	25.6	69.3	1.97
R16		2.5	1/30	33.3	75.9	1.99
R17		3.5	1/10	38.5	45.6	1.37
R18		3.5	1/30	38.5	51.2	1.56

註：R=環圈式丁壩群，#1 為首座丁壩

5.3 前後座丁壩沖刷減緩率

前後座丁壩沖刷深度減緩率($R_{p1,2}$)及沖刷體積減緩率($\Delta R_{h1,2}$)分別示如(6)式及(7)式。

$$R_{p1,2}(\%) = \left(\frac{d_{s1} - d_{s2}}{d_{s1}} \right) \times 100\% \quad (6)$$

$$\Delta R_{h1,2}(\%) = \left(\frac{V_{h1} - V_{h2}}{V_{h1}} \right) \times 100\% \quad (7)$$

式中 $R_{p1,2}$ 為前後座丁壩沖刷深度減緩率， d_{s1} 為首座丁壩壩頭最大沖刷深度， d_{s2} 為第二座丁壩壩頭最大沖刷深度； $\Delta R_{h1,2}$ 為前後座丁壩沖刷體積減緩率， V_{h1} 為首座丁壩壩頭沖刷坑體積， V_{h2} 為第二座丁壩壩頭沖刷坑體積。

由表 4、表 5 可看出在丁壩間距為 2.5 倍壩長之配置下，丁壩群之前後座減緩率皆優於其他丁壩間距。整體而言，環圈式丁壩群前後座沖刷減緩率優於傳統式丁壩群，其中相

對水流強度為最大($V/V_c = 0.95$)時，無因次丁壩間距(D/L)為 2.5 倍壩長且壩軸坡度 $S_d=1/30$ 之配置，其前後座丁壩沖刷深度減緩率及沖刷體積減緩率均為最佳。整體而言，前後座丁壩沖刷減緩率以壩軸坡度(S_d)為 1/30 有較佳之能量削減效果。而傳統式丁壩群壩軸坡度(S_d)為 1/10 有較佳沖刷減緩效果，推測其因可能係環圈為透水特性，可使部分水流穿越丁壩消能，且透過環圈交錯排列可增加糙度，使向下水流能量削減，因坡度較緩有較長時間可削減能量，故環圈式丁壩群以壩軸坡度 $S_d=1/30$ 較理想。

表 4 傳統式丁壩群前後座丁壩沖刷減緩率比較

組別	相對水流強度 (V/	無因次丁壩間距	壩軸坡度 (S_d)	前後座丁壩沖刷深度減緩率	前後座丁壩沖刷體積減緩率 $\Delta R_{h1,2}(\%)$
----	---------------	---------	-------------------	--------------	---------------------------------------

T3		2.5	1/10	51.3	77.4
T4	0.65	2.5	1/30	53.8	84.6
T5		3.5	1/10	48.7	78.7
T6		3.5	1/30	64.1	84.8
T9		2.5	1/10	35.9	71.1
T10	0.80	2.5	1/30	48.7	82.2
T11		3.5	1/10	46.2	63.0
T12		3.5	1/30	48.7	64.3
T15		2.5	1/10	25.6	69.3
T16	0.95	2.5	1/30	33.3	75.9
T17		3.5	1/10	38.5	45.6
T18		3.5	1/30	38.5	51.2

表 5 環圈式丁壩群前後座丁壩沖刷減緩率比較

組別	相對水流強度 (V/V _c)	無因次丁壩間距	壩軸坡度 (S _d)	前後座丁壩沖刷深度減緩率	前後座丁壩沖刷體積減緩率 ΔR _{h1,2} (%)
R3	0.65	2.5	1/10	68.42	77.69
R4		2.5	1/30	66.67	66.38
R5		3.5	1/10	40.00	16.56
R6		3.5	1/30	21.43	22.53
R9	0.80	2.5	1/10	56.00	59.25
R10		2.5	1/30	65.00	63.76
R11	0.95	3.5	1/10	9.52	19.10
R12		3.5	1/30	10.00	20.92
R15	0.95	2.5	1/10	51.72	48.28
R16		2.5	1/30	61.54	64.77
R17		3.5	1/10	8.33	24.75
R18		3.5	1/30	12.50	21.46

5.4 壩田分析

壩田係指首座丁壩壩頭至第二座丁壩壩根之連線所包含之三角形區域。丁壩的功能除了避免堤岸遭受沖刷，若能於壩田處落淤，則有保護堤岸之功效。本節將壩田淤積面積與兩座丁壩間所夾面積之比值百分比定義為壩田淤積率，該值越大，代表淤積面積較多，對於保護堤岸成效較佳。

本節以相對水流強度V/V_c = 0.95 情況作探討，分析得表 6，比較丁壩種類之壩田淤積率，顯示環圈式丁壩群因其具有透水性及撓屈性，因此掛淤效果較為顯著，其壩田淤積率較高。整體而言，環圈式丁壩群於壩軸坡度為 1/30、間距為 2.5 倍壩長配置下有最佳掛淤效果，為最佳丁壩群配置。

表 6 V/V_c = 0.95 壩田淤積面積比較表

組別	無因次丁壩間距(D/L)	壩軸坡度(S _d)	壩田淤積率(%)
T15	2.5	1/10	10.67
T16	2.5	1/30	5.67
T17	3.5	1/10	43.09
T18	3.5	1/30	43.27
R15	2.5	1/10	35.33
R16	2.5	1/30	54.00
R17	3.5	1/10	33.27
R18	3.5	1/30	42.00

註：T=傳統式丁壩群、R=環圈式丁壩群

5.5 丁壩種類綜合比較

圖 16 為傳統式丁壩群與環圈式丁壩群於相對水流強度(V/V_c)為 0.95 時，由三種無因次丁壩間距(D/L)和兩種壩軸坡度(S_d)之沖刷結果進行分析，透過(5)式計算各個安全指標(S_i)並製成比較圖。圖中顯示無論何種配置，環圈式丁壩群之安全性均高於傳統式丁壩群，探究其因乃環圈具透水性可削減水流通過時之動能，加上環圈上下交錯排列且具不規則表面加大其糙度，減低向下水流之作用力，因此沖刷較小，於壩田間落淤，進而保護堤岸安全。在相同水流強度及相同的壩軸坡度下，以丁壩間距為 2.5 倍壩長之安全指標最高，為較理想之丁壩配置間距。

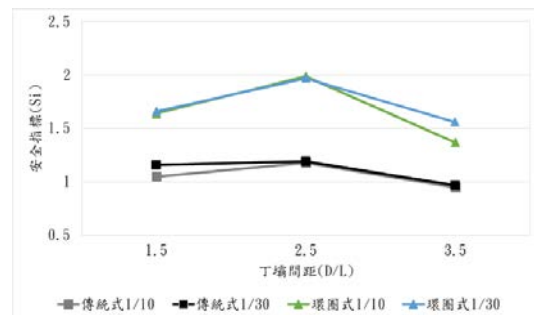


圖 16 傳統式與環圈式丁壩群安全指標比

較圖

圖 17 為最佳無因次化丁壩間距 2.5 之丁壩群周圍之沖淤變化情況，以相對水流強度 $V/V_c = 0.95$ 呈現。整體而言，傳統式丁壩群於首座丁壩上游面之沖刷現象劇烈，且沖刷深度較深；而環圈式丁壩因透水特性加上交錯排列，對於來流有效進行消能，降低向下水流的影響，限制了沖刷坑發展。

上述丁壩群特性也同樣發生於第二座丁壩，不論何種丁壩群之配置下，首座丁壩對於第二座丁壩皆發生遮蔽效應，大幅降低了水流直接衝擊，因此第二座丁壩之沖刷規模與深度均較首座丁壩小。此外，傳統式丁壩群因其不透水特性，上游受淘刷之泥砂越過首座丁壩後大部分泥砂被帶往下游，少數泥砂會沉降於壩田間；反觀環圈式丁壩，由於高透水性加上交錯排列之高粗糙度，泥砂透過孔隙更容易落淤在壩田間，而其中又以壩軸坡度 (S_d) 為 1/30 落淤最為明顯。因此，環圈式丁壩群於壩軸坡度 (S_d) 為 1/30 且無因次丁壩間距 (D/L) 為 2.5 倍壩長為本研究最佳之丁壩群配置。

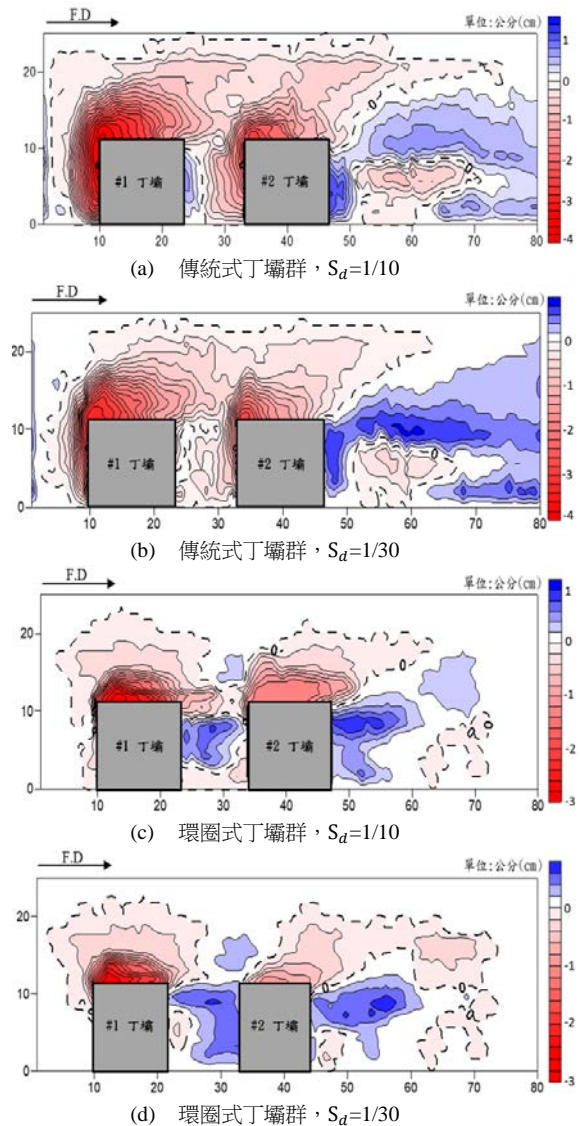


圖 17 傳統式與環圈式丁壩群周圍沖淤
等高線圖

結論與建議

本研究模擬不同流況 ($V/V_c = 0.65$ 、 0.80 、 0.95)，透過改變丁壩壩軸坡度 (S_d)、無因次丁壩間距 (D/L) 等不同配置，並於均勻泥砂粒徑 ($d_{50} = 0.62\text{mm}$) 及泥砂幾何標準偏差 ($\sigma_g = 1.24$) 等條件下，進行第 III 型壩型

之傳統式丁壩群與環圈式丁壩群水工試驗。探討不同配置下前後座丁壩之安全指標與丁壩群周圍沖淤變化，經分析比較後獲得較理想之丁壩群配置模式，由試驗觀察與綜合分析結果獲致如下之結論與建議。

6.1 結論

1. 各種丁壩群配置皆於丁壩壩頭處產生沖刷坑，且最大沖刷深度均發生於丁壩壩頭附近。由於水流沖擊丁壩後形成向下水流，而向下水流與來流結合形成馬蹄形渦流，為丁壩壩頭處形成沖刷坑之主因。而沖刷坑之規模及深度有隨水流強度增大而增加之現象。
2. 無論是傳統式或環圈式丁壩群，當丁壩壩軸坡度(S_d)為 1/30 時，有較佳的安全指標(S_i)，顯示於此配置下沖刷坑規模較小，因此為較佳之壩軸坡度設計。
3. 丁壩間距為 2.5 倍壩長時，有較佳的遮蔽效應。而丁壩間距 3.5 倍壩長時因間距過遠，遮蔽效果較不明顯。
4. 就前後座丁壩沖刷深度減緩率及沖刷體積減緩率而言，傳統式丁壩群以壩軸坡度(S_d)為 1/10 較佳，而環圈式丁壩群則以壩軸坡度(S_d)為 1/30 較佳。
5. 就丁壩壩田淤積率，傳統式丁壩群以壩軸坡度(S_d)為 1/10 之淤積成效較佳，而環圈式丁壩群則以壩軸坡度(S_d)為 1/30 之淤積成效較佳。就丁壩間距而言，環圈式丁壩群以 2.5 倍壩長時具有較佳

之壩田淤積率。

6. 環圈式丁壩群不論沖刷深度減緩率及沖刷體積減緩率皆優於傳統式丁壩群，因環圈交錯疊放，具不規則表面增加糙度，加上透水特性促進水流紊動，達到削弱向下水流能量，故設置環圈式丁壩群較傳統式丁壩群之沖刷坑與沖刷深度相對較小，環圈式丁壩群之配置優於傳統式丁壩群。
7. 經本研究綜合評估結果，以環圈式丁壩群之配置，於壩軸坡度(S_d)為 1/30，且丁壩間距 2.5 倍壩長時，擁有最佳沖刷減緩以及落淤成效，保護丁壩及堤岸之效果最佳，為本研究最佳之丁壩群配置。

6.2 建議

1. 本研究之試驗渠道為直線河道，而一般河川多為蜿蜒河道，且通常設置於凹岸，建議未來研究可以蜿蜒河道或彎曲段進行試驗。
2. 本試驗採用雙丁壩模型試驗，而一般丁壩群設置於多以連續形式河道現場，未來可採連續形式進行丁壩群試驗。
3. 本研究採用丁壩第 III 型壩型進行研究，結果發現於傳統式丁壩群與環圈式丁壩群於不同壩軸坡度反而有不同的結果，其種類或者迎水面坡度影響沖刷結果值得討論，未來可深入探討與迎水面坡度之間之關聯性。
4. 本試驗模擬丁壩群型態皆屬於浸沒式，用以模擬洪峰來臨時各種流況之丁壩

群周圍沖淤變化，將來可增加非浸沒之形式，以了解浸沒式丁壩與非浸沒式丁壩之沖淤差異及沖刷防治效果。

參考文獻

1. 林岳葆，2006，「丁壩群於河川棲地改善之研究」，逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士班碩士論文。
2. 林長葵，2016，「丁壩改善工法之研究」，逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士班碩士論文。
3. 楊孟祥，2017，「環圈式丁壩於河道沖刷防治之研究」，逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士班碩士論文。
4. Armanini, A., Sartori, F., Tomio, G., Cerchia, F., and Vergnani, M. (2010), "Analysis of a fluvial groynes system on hydraulic scale model." International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow 2010, Braunschweig, 1177-1184.
5. Hakimzadeh, H., Azari, N., and Mehrzad, R. (2012), "Experimental study of lateral structural slopes of groynes on scour reduction", ICSE6 Paris-August, pp. 1035-1040.
6. Klingeman P. C., S. M. Kehe, & Y. A. Owusu (1984), Stream bank erosion protection and channel scour manipulation using rockfill dikes and gabions, Research report, Water Resources Research Institute, Oregon State University, 5-22.
7. Melville, B. W., and Coleman, S. E. (2000), "Bridge scour", Water Resources Publications, LLC.
8. Muraoka, H., Fushimi, T., Kadota, A., and Suzuki, K. (2008), "Experimental study on changes of bed configuration caused by permeable groyne of stone gabion", Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, pp. 1072-1077.
9. Zhang, H., and Nakagawa, H. (2008), "Scour around spur dyke : recent advances and future researches", Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 51 B, pp. 633-652.

109年 8月 16日收稿

109年 9月 16日修改

109年 10月 6日接受

水土保持學報 50 (4): 2643–2658 (2020)

Journal of Soil and Water Conservation, 50 (4): 2643–2658 (2020)