

限界掃流力 概念에 依한 安全開水路 設計法

Design of Stable Open Channels Using Critical Tractive-Force Concept

劉 漢 烈*, 朴 承 禹*
Han Yeol Ryu, Seung Woo Park

※ 本資料는 美國土木學會誌에서 拔萃翻譯한 것임
灌溉 및 排水用 開水路는 지금까지 대부분 經驗的
方法으로 設計하여왔다. Smerdon氏는 말하기를 最
大流量이 흐르면서 洗掘에 대하여 安全한 畝水路設
計에서는 다른 어느 構造物보다 確實히 物理的인 資
料를 적게 썼다는 것이다.

대부분의 開水路의 축조에 使用되는 畝材料의 特
性 특히 洗掘抵抗力등의 變化에 대하여 開水路 設計
에 있어서 적절한 工學的分析이 必要하다.

Fortier와 Scobey氏는 1926年 開水路設計에 經驗을
가진 美國西部의 水理담당관들에 設問을 보내어 畝재
료로 구축된 水路에 대하여 最大許容平均流速의 측정
을 의뢰하였다. 이에 應한 10餘名의 技術者들의 結果
는 지난 40餘年間 開水路 設計의 基本資料가 되었다.

지난 15年間 理論의 方法을 利用한 安全開水路 設
計가 實驗研究에 상당한 注目を 받았지만 광범위하
게 채택되지는 않았다. 1955年 Lane氏는 限界掃流力
概念을 利用한 安全開水路 設計에 關한 研究를 發表
하였다. 以後 여러 학자들이 安全開水路 設計에 掃
流方法의 利用을 제창하여 왔다.

安全開水路라 함은 洗掘이나 堆積이 매우 느린 水
路를 말한다. 實驗研究에 依하면 어느 일정 剪斷力에
이르는 동안까지는 堆積이나 洗掘은 매우 느린 速度
로 일어나지만 이 剪斷力の 값 以上에 이르면 훨씬 빠
른 速度로 일어난다. 이때 剪斷力은 물의 運動에 의
하여 潤邊에 作用하는 힘이다. 限界掃流力은 水路의
구성 畝의 特性에 左右된다.

河床材料의 限界掃流力에 대한 現場實驗이 부족함

경우에는 開水路 設計에 이 方法을 使用하는 것은
制限이 있게 된다. 그러나 Masch et al氏는 安全開
水路의 設計者는 完全한 解析法이 나올때까지 기다
리고 있을 수 없고 充分한 資料를 가지고 經濟的이고
活用的 設計를 하도록 추구하여야 한다고 말했다.

本資料의 目的은 限界掃流力概念에 依한 安全開水
路設計를 위하여 基本的이고 간단한 節次를 제공하는
데 있다. 따라서 掃流力의 理論은 여기에서 언급하
지 않을 것이다. Lane, Chow 및 Douft氏는 等流에
對한 理論展開를, 그리고 Smerdon과 Beasley氏 등은
不等流에 對한 掃流力 理論을 發表하였다. Mc-Cool
과 Beasley氏 등은 3次元 흐름에 대한 掃流力 理論
을 發表하였다.

1. 設計曲線의 誘導

設計曲線은 安全開水路 設計에 掃流力法을 利用
하기 위한 것이다. 다음에서 設計曲線의 유도를 살
펴보기로 한다.

(1) 水路의 바닥과 側面의 掃流力 決定

等流의 경우, 무한히 넓은 水路에서 掃流力 T 는

$$T = rdS_0 \dots \dots \dots (1)$$

여기서 r : 물의 比重量, d : 流深, S_0 : 等流時 水
路傾斜에 대한 에네지傾斜이다. 한편 위의 (1)式에
서 얻은 掃流力은 무한히 크지 않은 水路의 掃流力
보다는 큰 값이다. Schoklitsch는 水路幅과 水深의
비가 30以上인 水路는 무한히 넓은 水路라 했다. 따
라서, 이를 區分하기 위하여 무한히 넓은 水路의 掃
流力을 T_c . 其他의 경우를 T_s 로서 나타낸다.

用水路나 排水路는 粘土 또는 粘性質이 많은 畝

* 서울大學校 農科大學

로 축조한다. 水路축조에 가장 적절한 土性에 관한 研究는 없지만 用水路 調査 및 現場시험에 따라서 土壤의 塑性은 土壤의 침식저항력에 比例함이 밝혀졌다. 塑性係數는 土壤의 塑性을 表示하는 土質學의 인 性質이며 最大掃流力에 比例한다. 그림(1)은 掃流力과 塑性係數의 關係를 보여준다. 그러나 이 曲線은 粘質土이 安全開水路 設計에만 使用할 수 있다.

그림 1은 土壤의 塑性係數에 對한 最大掃流力의 값을 計算할 때 이용될 수 있다. 즉 幅이 큰 水路의 最大許容水深 d 는 式(1)에서 $d = T_c / r S_0$ 로 얻어진다. 其他 水路에는 水路의 벽과 바닥에 作用하는 掃流力 分布를 決定한 Olsen과 Florey의 研究에 근거를 둔 Lane의 수정치를 적용한다. 수정치 c 는 바닥의 幅과 水路의 水深의 比 b/d 와 函數關係를 가진다(그림 2). 그림 2는 기울기와 水深이 같은 水路과 무한넓이의 水路에 대한 掃流力의 比로 水路에 作用하는 最大掃流力의 값이다. 例로서 그림 2에서 $b/d=3$ 인 사다리형 水路의 바닥에 作用하는 最大掃流力은 d , S_0 가 같은 무한넓이의 水路에 대한 0.95掃流力 값이 된다. 따라서 그림 2는 限定幅의 水路設計에서 掃流力의 決定에 利用될 수 있다. 이때 側邊의 중좌표 C_s (그림 2A)와 바닥의 中좌표 C_b (그림 2B)를 비교 하여 큰값을 擇한다. 그 理由는 가장 작은 掃流力과 水路의 洗掘點을 表示하기 때문이다. 掃流力 T_c 는 T_c 를 C_s 나 C_b 로 나눈 값으로

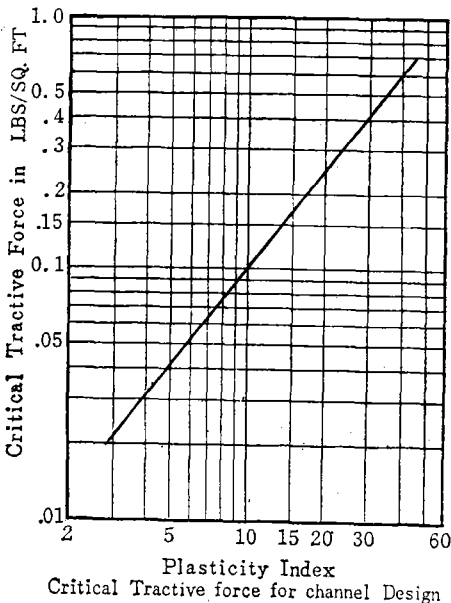


그림 1. 水路設計을 위한 限界掃流力

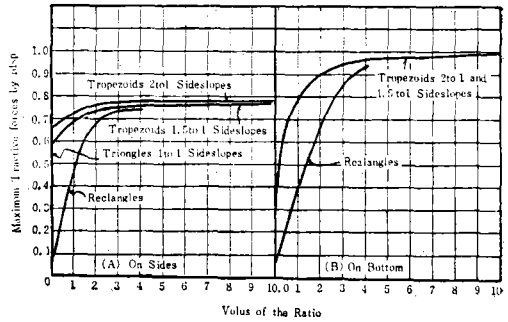


그림 2. 水路의 最大掃流力

$$T_a = \frac{T_c}{C} \dots\dots\dots(2)$$

b/d 가 3, 側面비탈傾斜가 1:2인 사다리형 水路의 경우 C_s 는 0.77이고 C_b 는 0.95이다. 따라서 이때의 掃流力은 $T_c/0.95$ 이며 이 b/d 比를 가진 水路設計의 값으로 利用한다.

2. 設計流量的 決定

開水路 設計에 있어서 조절가능한 因子중의 하나는 水路內의 흐름의 流速이다. 排水時 容量은 流域과 降雨現象에 영향을 받는다. 한편 灌溉의 경우는 最大需要期間과 灌溉面積內의 作物의 물 所要量에 따라 必要 容量을 決定한다. 地形地質에 다른 地域別 設計曲線이 必要할 것이며, 美國의 境遇 Chow의 最大流出量決定曲線이 있다.

3. 水路 尺수의 決定

水路의 尺수는 지금까지 試算法에 依하여 決定하여 왔다. 이 事實을 감안하여 4개의 曲線이 安全開水路設計에 적용할 수 있도록 發展되었다. 이 曲線(그림 3)은

- A部: 流速—傾斜曲線(매개변수 動水句配)
- B部: 水深—傾斜曲線(매개변수 掃流力)
- C部: 流速—面積曲線(매개변수 流量)
- D部: 水深—面積曲線(매개변수 動水句配)

A, C, D部는 開水路의 水理表에서 얻어졌다. B部는 무한 넓은 水路에 대한 掃流力 T_c 를 式(1)에서 얻은 것이다. 따라서, 其他水路에 대한 掃流力 計算에 活用할 수 있다.

<p>SECTION A</p> <p>Velocity-Slope Curves with hydraulic radius as a parameter and $n = 0.035$ $n = 0.040$</p>	<p>SECTION B</p> <p>Depth-Slope Curve with tractive force as a parameter</p>
<p>SECTION C</p> <p>Velocity-Area Curve with discharge as a parameter</p>	<p>SECTION D</p> <p>Depth-Area Curves with hydraulic radius as a parameter and Side Slopes = 1 : 1 Side Slopes = 1 1/4 : 1 Side Slopes = 2 : 1</p>

그림 3. 設計曲線의 안내도

各部는 그림 3과 같이 獨立된 曲線이다. A部는 2개의 曲線으로 되어 있으며 manning係數 $n=0.035$ 인 경우와 $n=0.040$ 의 경우가 그것이다. D部는 側面의 傾斜 1 : 1, 1 : 1.5, 과 1 : 2인 各各의 曲線으로 3個의 曲線이며, B, C部는 하나의 曲線으로 되어있다.

이 曲線의 有用을 위하여 各各의 設計曲線에 그림 3과 같이 表示되며 水平과 垂直線이 그림 4에서와 같이 정렬되어 있다.

표 1 開水路의 側面傾斜

Soil	Side slopes	
	Shallow channels (up to 4ft)	Deep channels (4ft and over)
Peat and muck	Vertical	1/4 : 1
Stiff (heavy) clay	1/2 : 1	1 : 1
Clay or silt loam	1 : 1	1 1/2 : 1
Sandy loam	1 1/2 : 1	2 : 1
Loose sand	2 : 1	3 : 1

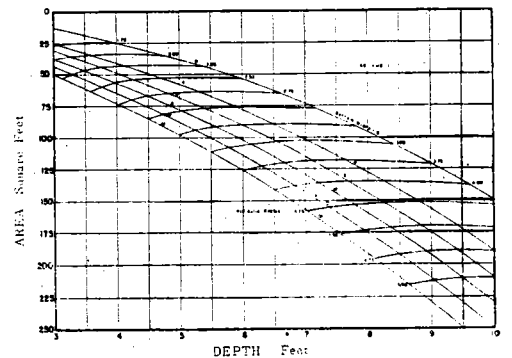
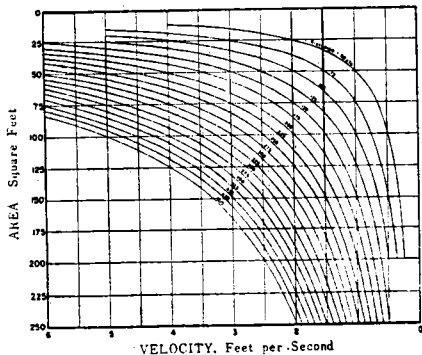
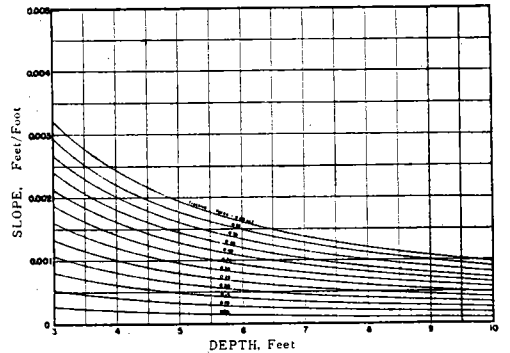
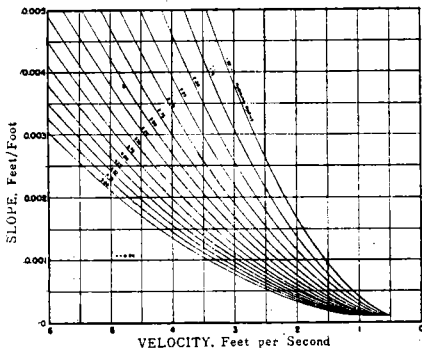


FIG. 4 Example of layout for design curves.

그림 4. 設計曲線의 圖示例

4. 設計方法(Procedure)

주어진 設計曲線과 數表를 利用하여 安全開水路를 設計하기 위한 일련의 段階는

- (1) 流量 Q_p 를 決定한다.
- (2) 限界掃流力 T_c 를 구한다. (그림 1)

가) 限界掃流力은 주어진 開水路 부지에 對한 基本調査를 實施하여 決定한다. 이때 흙의 標本은 水路의 전길이에 걸친 設計깊이 地點으로 부터 수집하여 粘性材料에 對한 彈性係數를 決定하도록 土質實驗所에 의뢰한다. 또한 現在 設計基準의 調整에서 장차 使用할 수 있도록 더욱 正確한 資料를 얻을 수 있도록 公극비, 粘土함량등의 자료도 要求된다.

- (3) 水路傾斜를 選擇한다 (最初 부지의 平均傾斜 고려)

(4) 調整 掃流力 T_a 를 求한다.

(가) b/d 比를 決定한다. 水理學上 有利한 斷面은 $b=2d \tan \theta$ 로 表示되는 出發點을 使用하라. (여기서 θ 는 측면경사에 水平角이다.) 所要 容量에 맞도록 b/d 比를 조정한다. (側面傾斜는 表 1를 參考한다)

(나) 주어진 b/d 比에 따라 그림 2-A, 2-B의 宗 剖面에서 C_s 나 C_b 를 구하여 큰값을 택한다.

(다) 調整掃流力 $T_a = T_c/c$.

- (5) 許用 最大깊이를 決定한다. (B部 設計曲線)

(가) 宗剖面에 水路의 設計傾斜를 表示한다.

(나) 右側으로 平行하게 線을 그어 計算된 調整 掃流力 T_a 를 얻는다.

(다) 이 點에서 垂直下方의 宗剖面를 읽으면 設計 傾斜에 대한 최대깊이이다.

- (6) 바닥나비, 動水半徑, 斷面積을 決定한다. (O部 設計曲線)

(가) 5段階에서 얻은 最大깊이로 부터 垂直으로 그어 4段階에서 使用된 b/d 比로 計算된 바닥나비를 구한다.

(나) 補間法을 써서 動水半徑을 決定한다.

(다) 6 各項에서 얻은 水深과 바닥나비의 交點에서 水平線을 그어 만난 宗剖面를 읽어 斷面積을 決定한다.

註: 使用된 側面傾斜에 대한 正確한 設計曲線을 使用하였는가 確認한다.

- (7) 水路流速을 決定한다. (A部 設計曲線)

(가) 3段階로 부터 傾斜를 얻는다. 傾斜의 宗剖面값에서 水平線을 그어 (6) 나段階에서 얻은 動水半徑값과의 交點을 구한다.

(나) 이 交點에서 垂直으로 그어 宗剖面값을 읽으

면 그값이 水路流速의 平均값이다.

- (8) 水路容量 Q_p 의 決定(C部 設計曲線)

(가) 宗剖面의 流速(7 나段階에서 얻음)에서 垂直線을 그어 斷面積(6 단계에서 얻음)의 水平延長과의 交點을 구한다.

(나) 이 交點에서 얻은 容量에 對한 流量曲線사이는 補間法으로 計算한다.

(9) 이 容量 Q_p 는 第 1段階에서 決定한 設計流量 Q_c 에 반드시 거의 같은 값이어야 한다. 萬約 그렇지 않으면, 水理學上 有利한 斷面을 반드시 버려야한다.

註: 5%의 許用値는 임의로 選擇한다. 그러나, 其他 限界는 아래 條件에 따라 의존하는 것이 바람직 한바,

$Q_p > Q_c$ 인 경우는 b 를 감하고,

$Q_p < Q_c$ 인 경우는 b 를 가산한다.

따라서, 다시 4段階에서 8段階를 반복하여 $Q_p - Q_c < 5\% Q_c$ 이 되도록 한다.

註: 傾斜를 調整할 必要가 있을 경우에는 3段階에서 8段階까지를 반복하여야 한다.

以上の 設計方法을 例題로 풀면:

例題:

流量 170ft³/sec를 가진 安全開水路를 設計하려 한다. 豫定水路의 地面傾斜는 0.001이다. 豫定水路의 5ft 길이에서 얻은 흙의 標本으로부터 土質試驗 結果 그 塑性係數는 17이었다. 土壤型은 식양토이며 manning係數는 $n=0.04$ 를 써라.

解法:

設計方法에 따라 段階別로 展開하면:

第 1段階: $Q_c = 170 \text{ft}^3/\text{sec}$

第 2段階: $T_c = 0.20$ (그림 2)

第 3段階: $S = 0.001$

第 4段階: (가) 側面傾斜 $ss = 1 : 1.5$ ($d > 4\text{ft}$ 가정시)

水理學上 有利한 斷面은

$$b = 2d \tan \frac{\theta}{2}$$

$$\tan \theta = \frac{2}{3}, \theta = 33.6 \text{deg.} \frac{\theta}{2} = 16.8 \text{deg.}$$

$$b = 2d \tan 16.8 \text{deg} = 2d(0.302)$$

$$\frac{b}{d} = 0.604$$

따라서 $b/d = 0.6$ 을 쓰라.

(나) 最大 宗剖面값, c 는 그림 2에서

$$C_s = 0.70, C_b = 0.66$$

$C_s > C_b$ 이니 C_s 를 쓴다.

$$(다) T_a = \frac{T_c}{C_b} = \frac{0.20}{0.70} = 0.29$$

第 5段階: 最大깊이 = 4.7ft (B部 設計曲線)

第 6段階: (가) $b = (0.6) \times (4.7) = 2.82\text{ft}$ 가 水理

學上 有利한 斷面이냐

$b=4ft$ 를 쓰자(現地條件上 設計最少值)

4ft의 실제 最小바닥 나비를 使用하면 b/d 가 變하므로 4段階에서 5段階는 다시 계산한다.

第4段階: (나) 새로운 $b/d=4/4.7=0.85$ 이니 $C_b=0.76$, $C_s=0.68$

$C_b > C_s$, ∴ C_b 를 쓰자.

(다) $T_a = \frac{0.20}{C_b} = \frac{0.20}{0.76} = 0.26$,

第5段階: 最大깊이 = 4.2ft (B部 設計曲線)

(나) 水理半徑 = 2.25ft (D部 設計曲線)

(다) 斷面積 = 43ft² (D部 設計曲線)

7段階: 流速 = 2.0ft/sec (A部 設計曲線)

第8段階: $Q_p = 85ft^3/sec$ (C部 設計曲線)

第9段階: $Q_r = 170cfs$.

$Q_p < Q_r$ 이니 容量을 증가시켜야 한다.

註: 이때 우리는 2가지의 可能的 變數를 가지고 있다. 즉

(1) 바닥나비 b 를 늘이거나,

(2) 傾斜를 줄여서 最大許用 깊이를 늘이는 것이다. 여기서 各各의 경우를 考慮하여 보기로 하자.

(1)의 경우, 4段階에서 9段階까지 反復하면

第4段階: (가) $b=10ft$ 로 하면

$$\frac{b}{d} = \frac{10}{4.2} = 2.4$$

(나) 最大중과표值 c 는(그림 2)

$$C_b = 0.92, C_s = 0.74$$

$C_b > C_s$, ∴ C_b 를 쓰자.

(다) $T_a = \frac{T_c}{C_b} = \frac{0.20}{0.92} = 0.22$,

第5段階: 最大깊이 = 3.5ft (B部 設計曲線)

第6段階: (가) $b=10ft$

(나) 水理半徑 = 2.35ft (D部 設計曲線)

(다) 斷面積 = 54ft² (D部 設計曲線)

第7段階: 流速 = 2.05ft/sec (A部 設計曲線)

第8段階: $Q_p = 110 \cdot ft^3/sec$ (C部 設計曲線)

第9段階: $Q_r = 170ft^3/sec$

$Q_p < Q_r$, ∴ 容量은 아직 더 증가시켜야 한다.

傾斜度 0.001을 써서 바닥나비를 충분히 증가시킬 必要가 있었다. 따라서 다음 段階는 可能하면 傾斜를 줄여보자. 이것은 第2段階에서 表示한 두개의 變數이다. 이제 傾斜를 0.0007로 하고 바닥나비를 4ft를 쓰자. 이때 T_a 는 바닥나비 4ft와 傾斜 0.001의 중점의 값을 使用한다. 最大깊이를 얻기 위하여 새

로운 傾斜를 써서 5段階부터 反復하자. 그러면 4段階에서 9段階를 反復하면:

第5段階: $T_a = 0.26$ 인 경우 最大깊이 = 5.9ft.

새로운 T_a 를 求하기 위해 4段階로 돌아와서:

第4段階: (가) $\frac{b}{d} = \frac{4}{5.9} = 0.68$

(나) 最大 C 值(그림 2)

$$C_b = 0.71, C_s = 0.65,$$

$C_b > C_s$, C_b 를 쓰자.

(다) $T_a = \frac{T_c}{C_b} = \frac{0.20}{0.71} = 0.28$.

第5段階: 最大깊이 = 6.6ft (B部 設計曲線)

第6段階: (가) $b=4ft$

(나) 水理半徑 = 3.30ft (D部 設計曲線)

(다) 斷面積 = 92ft² (D部 設計曲線)

第7段階: 流速 = 2.2ft/sec (A部 設計曲線)

第8段階: $Q_p = 200ft^3/sec$ (C部 設計曲線)

第9段階: $Q_r = 170ft^3/sec$

$Q_p - Q_r = 30ft^3/sec$ 이니 $Q_p - Q_r > (Q_r$ 의 5%)

이 設計方法에서 最大깊이를 6.6ft로 決定하였다. 주어진 容量이 要求容量보다 크기 때문에 設計깊이는 要求容量과 같은 容量을 갖도록 줄일 수 있다.

有意하여야 할 點은 깊이 5.9ft에서 얻은 $T_a = 0.28$ 에서 깊이 6.6ft값을 決定한 것이다. 다시한번 4와 5段階를 反復하면 b/d 가 적을수록 T_a 값이 증가한다. 따라서 깊이를 늘일 수 있다. $Q_r - Q_p > 5\%$ 인 때는 4, 5段階를 反復하여 最大깊이에서 어떤 變化가 없도록 한다. 그때, 만약 $Q_r - Q_p$ 가 5%보다 큰 값이면, 바닥나비나 傾斜를 부지조건에 따라 變化시킬 수 있다.

例題의 最終 設計의 變數를 고려하면 傾斜 0.0008이 有意하게 된다. 이때 設計方法에 따라 4ft바닥수로의 공급 容量은 130ft³/sec이다. 바닥나비 6ft의 경우 容量은 165ft³/sec가 되며 적절한 값이다. 結論的으로 아래 주어진 設計條件이 적절하다고 고려된다.

傾斜 = 0.0007

바닥나비 = 4ft,

깊이 = 6.2ft

側面 傾斜 = 1 : 1.5이나 또는

傾斜 = 0.0008

바닥나비 = 6ft

깊이 = 5.4ft

側面 傾斜 = 1 : 1.5