

最佳水力斷面半圓形渠道之設計與施工

The Design and Construction of the Channel with Semicircular—the Best Hydraulic Cross Section

國立臺灣大學農工系講師

葉 政 秀

C. S. Yeh

Abstracts

Irrigation canals have been traditionally designed and constructed in shape of trapezoid owing to the difficulty in technical problems to construct the semi-circular cross section that is inherently the most efficient water carrier. However, in companion with the improvement of trimming and paving machine, the canal with semi-circular cross section can be shaped, poured, vibrated and smoothed successively and successfully. This paper introduces the advantages of the canal with semi-circular cross section as well as its design and construction.

一、前 言

半圓形斷面之渠道為具有最大效率之明渠輸水構造物，因為其潤周為最小而有最佳水力半徑。對於需要挖方再襯砌內面工之渠道，半圓形斷面有如下之特性：

1. 輸送同一流量而言，半圓形渠道之斷面積比梯形者小，亦即其挖方比例地減少。
2. 半圓形渠道之潤周最小，故襯砌所需之混凝土為最少，亦即成本為最省。
3. 水面寬度較窄，故渠道佔用土地之比例較小。潤周與斷面積之減少量依渠道之斷面積而異，可達 10-20%。渠道佔地面積減低之比例則更高。此外它有較強之強度特性，即結構工程師所謂的形狀強度 (Form Strength)，即使 12m 以上之潤周亦無需伸縮縫，清洗容易，不會雜草叢生。

惟傳統的明渠灌溉系統都被設計與建造成梯形渠道，這是因為半圓形渠道施工技术問題一直未能解決，使得其最佳輸水特性未能發揮，而另行採用最趨近於半圓形渠道之梯形斷面，以其施工容易起見。近年來由於施工機械之進步與改良，很多新近開發地區所

建立之明渠灌溉系統，幾乎一律採用新型之渠道施工機具。隨著施工技术之進步，半圓形斷面之特性得以完全發揮出來。由於施工問題解決了，不但輸水效率提高，同時施工之成本也降低，而灌溉管理與維護費亦跟著減少，故特為文探討其設計與施工方法，供做將來應用與改進之參考。

二、施工方法

依照西班牙最大的一灌溉計劃 Bandajoz Plan 之設計，長達 90 公里之幹線 Zujar Canal 全部採用半圓形斷面之渠道。其施工方法係利用特殊設計的混凝土澆鑄與整飾機完成了一條可以通水 27cms 的半圓形渠道。這種機具之發展已有 8 年的經驗，截至目前為止已澆鑄完長 400 公里、表面積 200 萬 m^2 的半圓形渠道，並且預計三年之內再完成同樣面積之渠道。

該特殊機具之施工方法係先以傳統的挖土機大略地挖成渠道之槽狀，另外準備一部 backhoe 將岸頂按渠道之縱方向坡度壓實整平，以便鋪設 20kg/m 之輕便鐵軌。開始作業時，斷面整飾機在前，澆鑄機在後，同時沿著鋪於兩岸之鐵軌前進。兩機之主要工

作機件均裝置在一活動之支承構造物上，其軸正好與渠道表面之幾何圓心吻合，依油壓傳遞系統之作用向前移動。

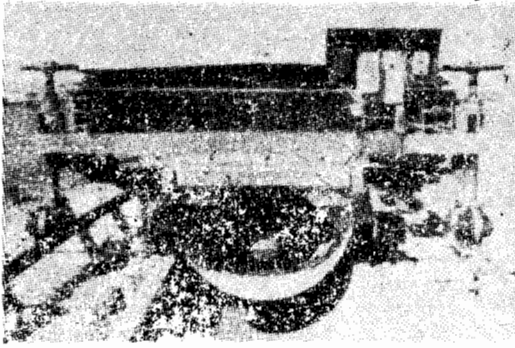


圖1. 渠道澆鑄機

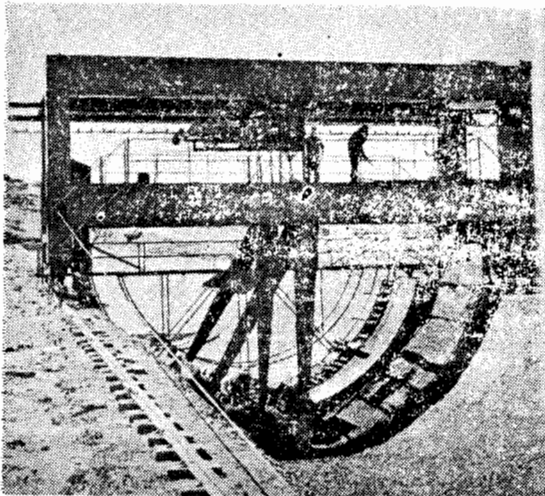


圖2. 断面整飾機

断面整飾機如圖2所示為一三角框，其中一角即裝於渠道固定軸之中心，另外兩端則各配有能轉動，而方向相反的削切器。削切器係以電動馬達帶動，並附有迴轉限制器以保護馬達，同時有助於依不同土壤硬度選擇正確的挖土深度。三角框之震動使各削切器每次橫向運動之寬度為40公分，切入深度則為未整飾前後之差，所需電力約為30馬力。以週潤12m，流量27cms之渠道為例，其前進率在正常作業之情況下可達20m/hr。

附有滑動模版之澆鑄機如圖1所示，則為尾端帶有可以不同頻率，使一連串移動模與條板產生震動，可使鬆散之混凝土不致發生分離現象而趨於平整。並且產生極薄之乳沫層，使完成後之混凝土品質均勻一致，而不致發生裂痕。電動棒之寬度，亦即每次襯砌範

圍為25公分。該棒配有專利的鍍板，能完全的絕緣震動，以便產生光滑之終飾表面。震動之動力為300次/分時離心力達3,000公斤以上。在效率良好的工地中，每5分鐘即可完成夯實、襯砌與終飾等工作，亦即其澆鑄生產率為15公尺/小時，總耗用經費175馬力。

澆鑄機具有一容量 3m^3 之厚斗，將坍度為零之混凝土承送至橫向佈機內，該機內部之吊筒由穿過觸輪之兩條獨立的操作索控制，使吊筒內之混凝土能向兩側澆鑄。由於使用震動模的緣故，澆鑄半圓形渠道所用之混凝土，其坍度必要絕對為零的，方能產生一堅實、強硬而不收縮的內面工。無坍度混凝土可以水灰比0.4-0.45配得，與梯形渠道一般澆鑄機所使用之0.55-0.60相較至為有利。特別是在亞熱帶之本省，可以減少因收縮而發生裂縮之影響。同時混凝土乾得可以使用一般傾卸卡車，從預件廠載送至工地無需擔心輸送過程中會有分離或硬化之危險。本省之鄉村有很多鐵牛改裝成之可卸小卡車最為適用，不必使用預拌混凝土車則運輸費用可以節省很多，同時車子容易調配，成本當然經濟多了。

又断面較小之渠道，可以採用履帶式澆鑄機，每分鐘襯砌工作率為1-3公尺。

混凝土內面工之條件有三，即耐久性、不透水性及一良好水力係數之表面。因此在該特殊設計之澆鑄機作業以前，必須注意基土層之均勻、夯實工作，以免由於土壤水分之變化或基礎之不穩定，引起襯砌內面工因基礎應力之差異而龜裂。另外澆鑄機之速度如果太快會造成襯砌內面工硬度不足，無法完全不透水。特別是因將來不通水時外界溫度變化連同襯砌底板與曝露部份間之溫差而生之收縮裂縫連應出現。襯砌板厚度愈厚時愈容易發生。有龜裂之內面工渠道，其滲漏水量遠較極劣質但完整混凝土面者大。如不發生裂縫，則內面工將可永久使用。同時裂縫中雜草叢生，阻礙水流。故此種施工方法務必先行試驗澆鑄機之速度、震動頻率與混凝土強度間之關係。又無坍度之混凝土雖然理論上無需養護亦不必留置縱向伸縮縫，但是在像本省溫差大、風力強之地域，仍然會引起嚴重龜裂，所以除了在終飾完成以後應加噴養護液劑之外，澆鑄機應另備有接縫鍍刀，於適當距離已壓實之混凝土表面上開割一吋深之接縫。鍍刀應附有震動器，於鍍刀切開混凝土時，仍能保持接縫附近之完整，如此才能保證接縫處不龜裂、不漏水、不生雜草。此種接縫鍍刀在一般梯形渠道澆鑄機上早已使用，效果極佳。

三、設 計

依 Maning 氏公式， $V=1/n \cdot R^{2/3} S^{1/2}$ 。應用於半圓形渠道時，設渠道斷面之直徑為 D ，令通水面積 $A=\alpha D^2$ ，水力半徑 $R=\beta D$ ，則 Maning 氏公式可以改寫為 $Q=1/n \alpha D^2 \cdot (\beta D)^{2/3} \cdot S^{1/2}$ ，亦即

$$Q \cdot n / D^{8/3} S^{1/2} = \alpha \beta^{2/3} \dots\dots\dots$$

設 P = 潤周長， T = 水面寬，則

$$A = \frac{1}{2} \left\{ \frac{PD}{2} - T \left(\frac{D}{2} - y \right) \right\}$$

式中 y 為水深。

$$P = \pi D \theta / 360$$

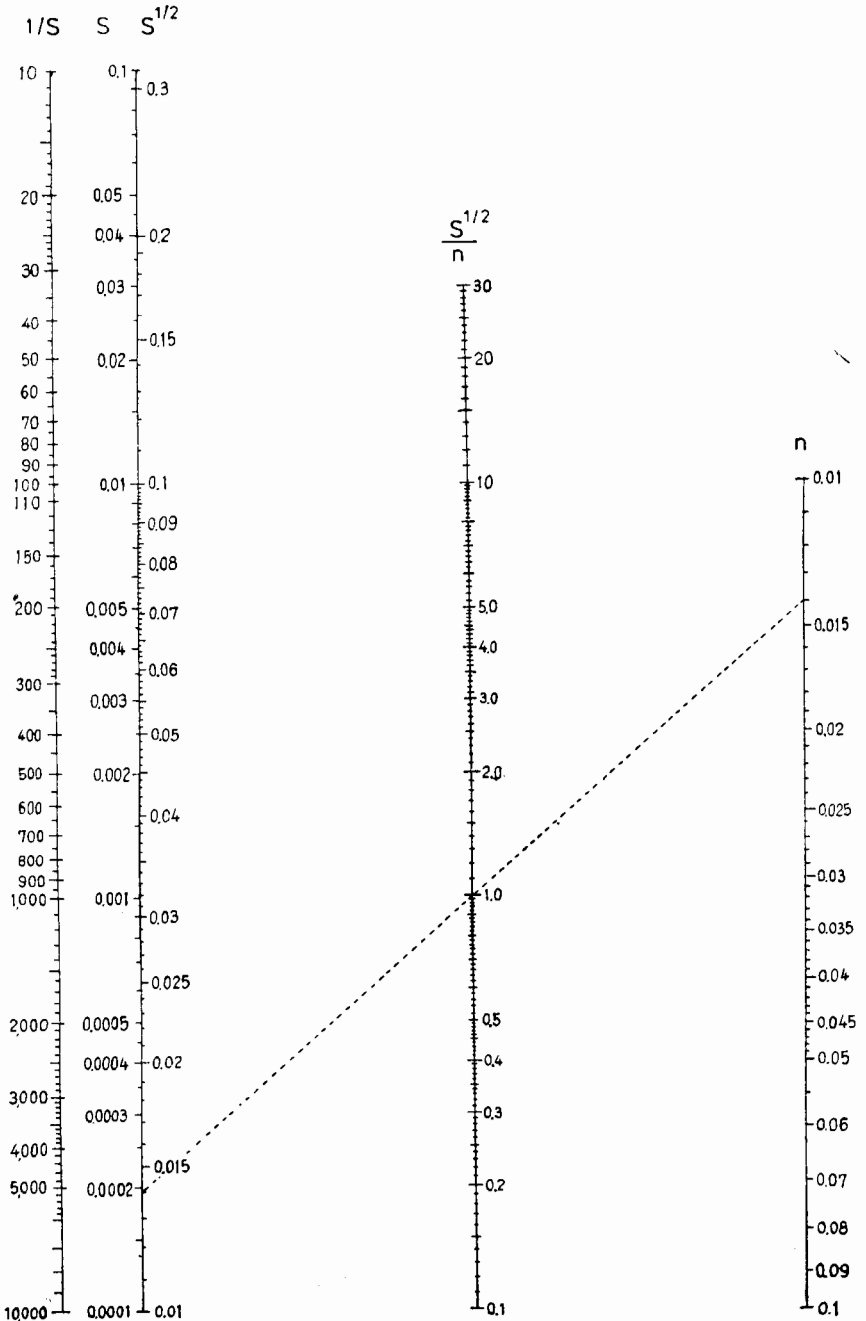


圖 3.

$$\text{又 } R=A/P = \frac{1}{4} \left\{ D - \frac{T}{P} (D-2y) \right\}$$

$$T = 2\sqrt{Dy - y^2}$$

$$\therefore \alpha = A/D^2 = \frac{1}{4} \left\{ \frac{\pi \theta}{360} - 2\sqrt{\frac{y}{D} - \frac{y^2}{D^2}} (1-2\frac{y}{D}) \right\} \dots\dots\dots(2)$$

$$\beta = R/D = \frac{1}{4} \left\{ 1 - \frac{720}{\pi \theta} \sqrt{\frac{y}{D} - \frac{y^2}{D^2}} (1-2\frac{y}{D}) \right\} \dots\dots\dots(3)$$

由(2)式與(3)式可以看出，每一 y/D 值即可分別求得 α 值與 β 值。再代入(1)式之右邊即可求得各 y/D 值之 $Q \cdot n / D^{5/3} \cdot S^{1/2}$ 。假設 $S^{1/3}/n = 1$ ，半圓形渠道

其各種水力要素即可計算得如表 3。各種不同縱坡與不同糙度係數之渠道，其 $\frac{S^{1/2}}{n}$ 值可由圖 3 求得。其相當 y/D 之 $Q/D^{5/3}$ ，可由表 3 之 $Q/D^{5/3}$ 值乘以各 $\frac{S^{1/2}}{n}$ 。再由表 1 查得 $D^{5/3}$ ，則可求各種直徑之半圓渠道在各種水深所代表之流量。反之若流量已知，縱坡與糙度係數亦為常數，則利用表 3 亦可求得渠道最適之直徑應為多大。

就同一流量而言，在同一糙度係數與坡度之情況下，其挖方襯砌長度與渠道佔用寬度均隨半圓渠道直徑之增大而提高，故若某一計劃最大流量已知，則選用最小直徑之半圓渠道恆為最經濟的。在考慮水面

表 1. $D^{5/3}$

D	0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
0	0	0.002	0.014	0.040	0.087	0.157	0.256	0.386	0.552	0.755
1	1	1.290	1.630	2.01	2.45	2.95	3.50	4.12	4.79	5.54
2	6.35	7.23	8.19	9.22	10.33	11.51	12.80	14.1	15.6	17.1
3	18.7	20.4	22.2	24.1	26.1	28.2	30.4	32.7	35.2	37.7
4	40.3	43.1	45.9	48.9	52.0	55.2	58.5	62.0	65.3	69.3
5	73.1	77.1	81.2	85.4	89.8	94.3	98.9	104	109	114
6	119	124	130	135	141	147	153	160	166	173
7	179	186	193	201	208	216	223	231	239	248
8	256	265	273	282	292	301	310	320	330	340
9	350	361	372	382	394	405	416	428	440	452
10	464	477	489	502	515	529	542	556	570	584
11	598	613	628	643	658	674	690	705	722	738

表 2. $D^{5/2}$

D	0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
0	0	0.0032	0.0179	0.0493	0.101	0.177	0.279	0.41	0.572	0.768
1	1	1.269	1.517	1.927	2.319	2.756	3.238	3.768	4.347	4.976
2	5.657	6.391	7.179	8.023	8.923	9.882	10.90	11.98	13.12	14.32
3	15.59	16.92	18.32	19.78	21.32	22.92	24.59	26.33	28.15	30.04
4	32.0	34.04	36.15	38.34	40.61	42.96	45.38	47.89	50.48	53.14
5	55.9	58.74	61.61	64.67	67.76	70.94	74.21	77.57	81.02	84.55
6	88.2	91.9	95.72	99.62	103.6	107.7	111.9	116.2	120.6	125.1
7	129.6	134.3	139.1	144.0	149.0	154.0	159.2	164.5	169.9	174.4
8	181.0	186.7	192.5	198.5	204.5	210.6	217.0	223.3	229.7	236.3
9	243.0	249.8	256.7	263.8	270.9	278.2	285.6	293.1	300.7	308.4
10	316.2	324.2	332.3	340.5	348.8	357.3	365.8	374.5	383.3	392.3
11	401.3	410.5	419.8	429.2	438.8	448.5	458.3	468.2	478.3	488.5

表 3. $\frac{S^{1/2}}{n} = 1$, 半圓渠道之水力要素

y/D	A/D ²	P/D	T/D	Q/D ^{3/2}	V/D ^{2/3}	y/D	A/D ²	P/D	T/D	Q/D ^{3/2}	V/D ^{2/3}
0.01	0.0013	0.				0.26	0.1623	1.07	0.877	0.0464	0.286
0.02	0.0037	0.284	0.28	0.0002	0.054	0.27	0.1711	1.09	0.888	0.0497	0.290
0.03	0.0069	0.348	0.34	0.0005	0.072	0.28	0.1800	1.11	0.898	0.0536	0.298
0.04	0.0105	0.403	0.392	0.0009	0.086	0.29	0.1890	1.14	0.908	0.0571	0.302
0.05	0.0147	0.451	0.436	0.0015	0.102	0.30	0.1982	1.16	0.917	0.0610	0.308
0.06	0.0192	0.495	0.475	0.002	0.115	0.31	0.2074	1.18	0.925	0.0650	0.313
0.07	0.0242	0.536	0.501	0.0031	0.128	0.32	0.2167	1.20	0.933	0.0690	0.318
0.08	0.0294	0.574	0.543	0.004	0.136	0.33	0.2260	1.22	0.940	0.0736	0.326
0.09	0.0350	0.610	0.572	0.0052	0.149	0.34	0.2355	1.24	0.947	0.0776	0.330
0.10	0.0409	0.644	0.60	0.0065	0.159	0.35	0.2450	1.26	0.954	0.0820	0.335
0.11	0.0470	0.674	0.626	0.0080	0.168	0.36	0.2546	1.29	0.96	0.0864	0.339
0.12	0.0534	0.703	0.650	0.0095	0.178	0.37	0.2642	1.31	0.966	0.0909	0.344
0.13	0.0600	0.738	0.673	0.0113	0.188	0.38	0.2739	1.33	0.971	0.0955	0.349
0.14	0.0668	0.767	0.694	0.0131	0.196	0.39	0.2836	1.35	0.976	0.1002	0.353
0.15	0.0739	0.795	0.714	0.0152	0.206	0.40	0.2934	1.37	0.980	0.1050	0.358
0.16	0.0811	0.823	0.733	0.0173	0.213	0.41	0.3032	1.39	0.984	0.1100	0.363
0.17	0.0885	0.850	0.751	0.0196	0.221	0.42	0.3132	1.41	0.987	0.1147	0.366
0.18	0.0961	0.88	0.768	0.022	0.229	0.43	0.3229	1.43	0.990	0.1196	0.370
0.19	0.1039	0.90	0.785	0.0247	0.238	0.44	0.3328	1.45	0.991	0.1245	0.374
0.20	0.1118	0.93	0.80	0.0273	0.244	0.45	0.3428	1.47	0.995	0.1298	0.379
0.21	0.1199	0.95	0.815	0.0301	0.251	0.46	0.3527	1.49	0.997	0.1348	0.382
0.22	0.1281	0.98	0.829	0.0333	0.260	0.47	0.3627	1.51	0.998	0.1401	0.386
0.23	0.1355	1.0	0.842	0.0369	0.263	0.48	0.3727	1.53	0.999	0.1452	0.390
0.24	0.1449	1.02	0.854	0.0394	0.272	0.49	0.3827	1.55	0.999	0.1505	0.393
0.25	0.1535	1.05	0.866	0.427	0.278	0.50	0.3927	1.57	1.000	0.1559	0.397

以上應襯砌之出水高度時尤為明顯。假定按美國墾務局所推薦之出水高度與內面工渠道之岸高標準，渠道岸頂與半圓之直徑齊平，則各種直徑之半圓形渠道之最大安全流量可以計算得如表 4，並可繪成圖 4 之曲線。若 $\frac{S^{1/2}}{n} \neq 1$ 時，則應先將計劃流量除以 $\frac{S^{1/2}}{n}$ 值，然後再使用表 4。

斷面一定之渠道，其正常水深受縱坡與糙率之影響，而臨界水深則受流量與斷面所左右。亦即在一定坡度與糙率之情況下，每一種流量各有一定之正常水深。坡度與糙率改變時，正常水深亦跟著變化。而一定流量通過一定斷面之渠道時，其臨界水深恆為常數，並不隨著坡度或糙率之變化而異。故坡度變緩或糙率增加均可以使一定流量之正常水深高於臨界水深，亦即所謂緩流，反之則低於臨界水深，此時稱之為急

流。不過由於水流在臨界狀態附近時，若渠道糙率、斷面或游離與堆積物等稍有變動時，水面即呈現不穩定且有波動現象，故在設計渠道時，尤其是相當長的渠道，可能的話，必須避免使水深保持在臨界水深之附近，以保證較佳之穩定性。

表 4 中之 y_n ，係指 $\frac{S^{1/2}}{n} = 1$ 時各種直徑之半圓渠道，通水為最大安全流量 Q_1 時之正常水深。若 $\frac{S^{1/2}}{n} \neq 1$ 時，則以表 4 中之 Q_1 值乘以 $\frac{S^{1/2}}{n}$ 即為各種坡度或糙度情況下，各種直徑之半圓渠道容之最大安全流量。已知某一計劃流量而欲選擇最適尺寸之半圓渠道時，應先以計劃流量除以 $\frac{S^{1/2}}{n}$ 值，再以其商自表 4 中查得相對應之直徑。表 4 中之 d_c 值係指該渠道在 $\frac{S^{1/2}}{n} = 1$ 時能容之最大安全流量時

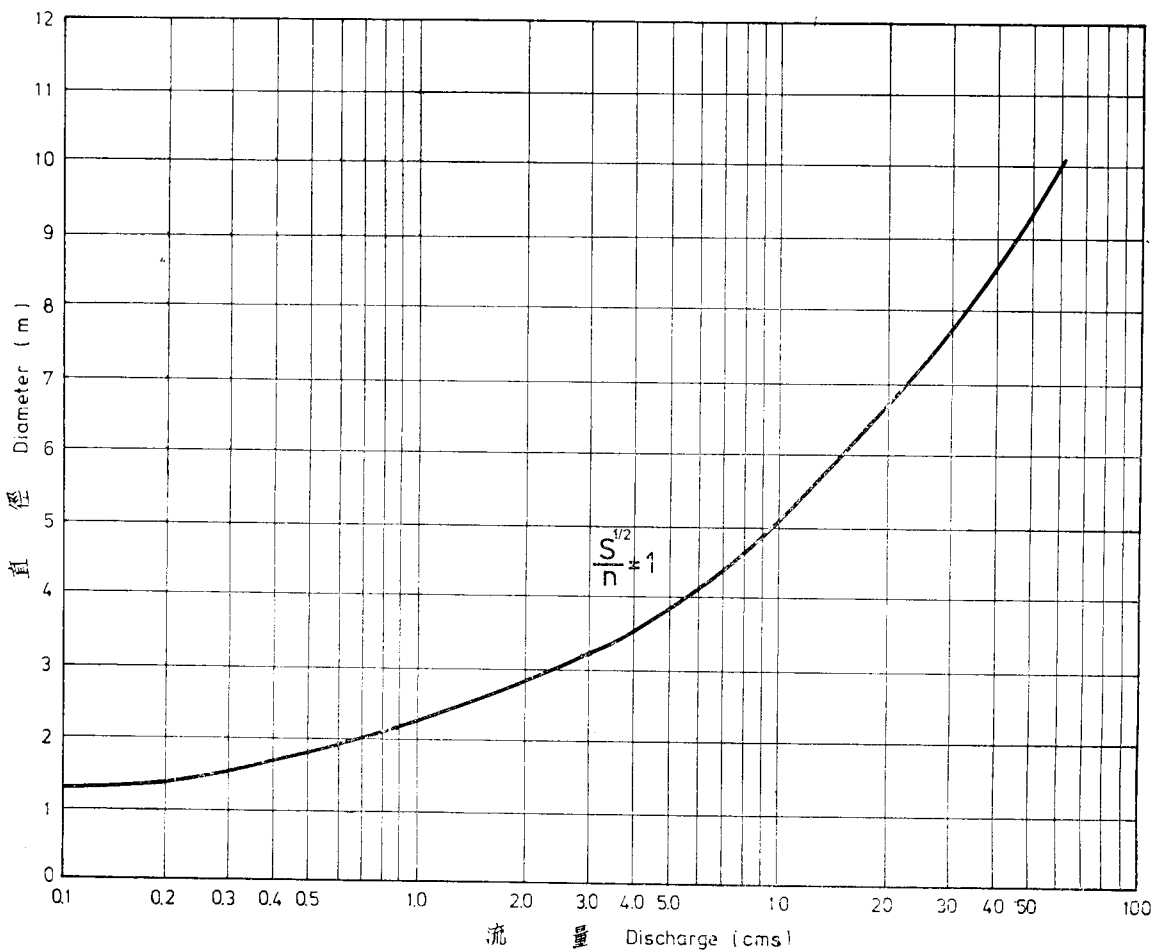


圖 4.

表 4. $\frac{S^{1/2}}{n} = 1$ 時各種直徑半圓渠道可容之最大流量

D (m)	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	
Q_1 (cms)	0.1	0.3	0.7	1.4	2.3	3.6	5.2	7.2	9.5	
y_n (m)	0.39	0.585	0.76	1.08	1.3	1.56	1.8	2.03	2.25	
d_c (m)	0.18	0.27	0.36	0.525	0.66	0.79	0.92	1.08	1.15	
D (m)	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
Q_1 (cms)	12.0	14.8	18.5	22.3	27	32	38	44	51	58
y_n (m)	2.47	2.64	2.87	3.08	3.30	3.52	3.74	3.96	4.18	4.4
d_c (m)	1.27	1.38	1.49	1.61	1.73	1.84	1.96	2.16	2.28	2.4

* $\frac{S^{1/2}}{n} = 1$ 時應先將計劃流量除以 $\frac{S^{1/2}}{n}$ ，然後再使用表 4

之臨界水深，其值可以查自圖 5。當 $\frac{S^{1/2}}{n} = 1$ 時，各種尺寸之渠道 d_n 均大於 d_c ，均為緩流狀態。若假設渠道糙率不變，而增陡坡度時，則欲維持緩流之最大坡度，即臨界坡度可以按下列方法求出。

由圖 5，當 $d_c/D = 0.4$ 時， $Q_c/D^{2.5} = 0.5$ ，故此時各種直徑之半圓渠道恆有 $Q_c = 0.5D^{2.5}$ 之限制。以直徑 $D = 1m$ 為例， $Q_c = 0.5c.m.s$ 。與表 4 中 $D = 1m$ 時之 $Q_1 = 0.1c.m.s$ 相較，表示 $\frac{S^{1/2}}{n}$ 必須等於

表 5. $n=0.014$ 各種直徑半圓渠道之臨界坡度與臨界流量

D (m)	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	
S_c	0.0049	0.0041	0.0036	0.0033	0.0030	0.00286	0.00267	0.0025	0.00244	
Q_c (cms)	0.5	1.4	2.8	4.9	7.8	13.8	19.2	25.7	33.5	
D (m)	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
S_c	0.00242	0.0024	0.00235	0.00235	0.0023	0.00226	0.0022	0.00216	0.00213	0.0021
Q_c (cms)	42.6	52.9	64.6	77.6	92.4	108.6	126.4	145.8	166.9	189.7

5, 若 $n=0.014$, 則 $S_c=0.0049$, 故各種尺寸之臨界坡度與臨界流量均可求得如表 5 所列。參照表 5 之臨界坡度與臨界流量可供吾人設計渠道時, 決定渠道水流為緩流時之最大坡度與最大流量。若已知坡度小於或等於 S_c 時, 則計劃流量不得大於臨界流量, 否則必有溢流之虞。又自表 5 可以看出 D 值愈大, Q_c 愈大, 而 S_c 則愈小。渠道直徑一定時, 若流量大於臨界流量, 就必須使坡度大於各尺寸之臨界坡度, 渠道才會安全。

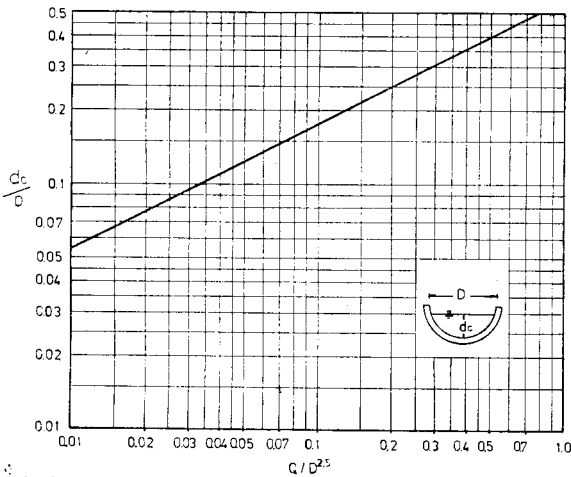


圖 5.

「設計例」

1. 某一灌溉計劃流量為 15c.m.s , 試設計一縱坡 $1/1,500$, 糙率 0.014 之半圓形渠道。

(1) 自圖 3, 查得 $\frac{S^{1/2}}{n} = 1.835$

(2) 以計劃流量 $Q_0=15\text{c.m.s}$ 除以 1.835 得 $Q_1=8.17$

(3) 自表 4 查得 $Q_1=8.17$ 時最適之半圓直徑為 5m 。

故採用直徑為 5m 之半圓渠道。

(4) 求正常水深 y_n : 查表 1, $5^{2/3}=73.1$

$$\therefore Q_1/D^{2/3}=8.17/73.1=0.112$$

再查表 3, 當 $Q=0.112$ 時

$$y/D=0.414 \quad y_n=2.07\text{m}$$

(5) 求臨界水深 d_c : 查表 2, $5^{1/2}=55.9$

$$\therefore Q_c/D^{1.5}=15/55.9=0.268$$

由圖 5 得 $d_c/D=0.288$

$$d_c=1.425\text{m} < y_n$$

(6) 求流速: 查表 3, $y_n/D=0.414$ 時

$$V=0.364 \times \frac{5^{2/3}}{5^2} \times 1.835 = 1.958\text{m/sec}$$

(7) 求水面寬度: 查表 3, $T=0.985 \times 5=4.92\text{m}$

(8) 求潤周 查表 3, $P=1.40 \times 5=7\text{m}$

(9) 渠道佔地寬度 5m

(10) 渠道襯砌寬度 $1.57 \times 5 = 7.85\text{m}$ 。

四、參考文獻

1. World Construction, p. 18~20, Nov. 1973
2. Open Channel Hydraulics Ven. Te Chow
3. 土地改良事業計劃設計基準第三部第五篇 日本農林省。
4. 水利局工程設計應用手冊 臺灣省水利局
5. 渠道及有關構造物 張建勳譯
6. 灌溉排水系統構造之設計 洪有才
7. 工程材料學 (第二卷) 陸志鴻
8. 混凝土渠道內面工 鄧祥雲譯 臺灣水利

歡 迎 本 會 會 員 投 稿