

永續洪水滯流池地表及地下系統

SUSTAINABLE SURFACE-SUBSURFACE STORM WATER RETENTION SYSTEM

郭純園 教授 (James C.Y. Guo) Professor, PhD and P.E.
Department of Civil Engineering, U. of Colorado at Denver, Denver, Colorado, USA
許守靖 (Eric Hsu) P.E.
Project Engineer, Parsons Brinckerhoff Inc., Las Vegas, USA
鄭炎傑 (Jeff Y.C Cheng) P.E.
Project Engineer, City of Aurora, Colorado

前言：

以公共安全的角度而言,我們對暴雨處理的傳統方式是使雨水儘快從街道排除。根據這個概念,市區設置了許多邊溝,排水道,與地下雨水排水管。許多都市環境研究顯露,傳統式處理暴雨的方法造成洪水集中,土壤沖蝕與土石流。而暴雨所產生的大量雨水污染也常使得城市污水處理廠設備故障。因此,工程師們開始檢討傳統式都市處理暴雨的方法。近年來運用最佳都市排水管理實踐(Best Management Practices or BMPs)開發出許多新排水系統設計並開始廣泛應用。例如,使用高透水率的路面設計,都市綠帶,乾井,滲透式集水池,流濕地,滯流池,滯流池。這些設備均有效的提供滯流功能。

多年來,不當積水,延長排水和下水道堵塞等,使我們體驗了一些都市排水的失敗。事實證明許多的問題常常是因為滯流池設計方法只考慮了表面水文學和忽略地下水層的種種限制的。結果,當地下水層滲流率(seepage)無法承受表面滲透率(infiltration),導至整個滯流系統無法良好運作。本文提出一個新概念在設計洪水滯流池時,應考慮地表水文及地下水文對永續運作的影響。

主題詞: (key words) 地下水,雨水,洪水,綠帶,滲透式集水池,濕地,滯流池。

介紹

滯洪池系統(storm water detention basin)控制大面積洪水流量。滯流池 (retention basin) 控制小面積洪水質量。滯洪著重出水量控制。滯流著重表面土壤紋理及土壤滲透率。在降雨期間,集水區的雨水滲透到土壤中。土壤中的孔系提供了部份的滯流容

量。當土壤含水達到飽和，地下水之水位升高。地表土壤滲透水量(infiltration) 必須配合地下土壤滲流率 (seepage)。當地表滲透率遠高於地下滲流率時,必導至水池積水。所以,滯流池設計容量不應大於當地土壤孔隙容量。並且滯流池的長期操作必須考量地下水層的水力流通系數 (hydraulic conductivity) 及波降(gradient)。所以,一個滲透式滯流池 (infiltration basin)的設計考量有: (1)由表面水文學決定滯流容量(2)水池面積大小取決於當地土壤孔隙率,水力流通系數與滲流率(3)評估地下水層對長期(飽和的)操作的持續力。

滯流池設計容量

表面土壤滲透率和設計降雨量決定了滲透式滯流池的設計容量。所以,滯流池設計程序是先考量滯流容量而後再決定水池型狀。滲透式滯流池經常被安置在停車場和高度開發區出的水口點。洪峰流量預測的合理方法是:

$$Q_d = CI_d A \quad (1)$$

$$I_d = \frac{a}{(T_d + b)^n} \quad (2)$$

C = 逕流系數、A = 集水區面積, I_d = 降雨量強度, T_d = 降雨時間, Q_d = 洪峰流量, a ,b 與n 為常數。土壤滲透率可由Horton 公式所描述:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

$f(t)$ = 下雨後在時間t, 土壤滲透率inch/hr (或mm/hr), f_0 = 最初土壤滲透率, f_c = 最終土壤滲透率, 和k = 衰減系數(1/hr)。對公式 3 積分後導致:

$$F(t) = f_c t + \frac{(f_0 - f_c)}{k} (e^{-kt} - 1) \quad (4)$$

$F(t)$ = 滲滲量(深度)inch or mm. 在時間等於 t,滯流容量是流入容量和流出容量之間的差異值。針對一次降雨,滯流容量是

$$V_d = \alpha C I_d A T_d - \beta A_b F(T_d) \quad (5)$$

V_d = 滯流容量, A_b = 滲流池面積, α 和 β = 單位換算因素。公式 5 的變數是 T_d , 其最大值決定於：

$$\frac{dV_d}{dT_d} = \left\{ CA\alpha \left[\frac{-nT_d}{(T_d + b)^{n+1}} + \frac{1}{(T_d + b)^n} \right] - \beta A_b f(T_d) \right\} = 0 \quad \text{when } T_d = T_m \quad (6)$$

T_m = 設計降雨延。公式 6 的解答是：

$$T_m = \frac{1}{n} \left[(T_m + b) - (T_m + b)^{n+1} \frac{\beta A_b}{a\alpha CA} f(T_m) \right] \quad (7)$$

當 b 的數值在公式 7 是微不足道時, 公式 7 的近似解是：

$$T_m = \left[\frac{2\alpha a CA(1-n)}{\beta A_b f(T_m)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

實際上, 公式 8 也能在用試誤法時, 給公式 7 提供一個近似值。知道設計降雨延後 T_m , 滯流設計容量, V_m , 是：

$$V_m = \alpha C I_m A T_m - \beta A_b F(T_m) \quad \text{at } T_d = T_m \quad (9)$$

在降雨期間中平均滲滲率, f_a , 是：

$$f_a = \frac{F(T_m)}{T_m} \quad (10)$$

設計案例一

在美國科羅拉多州丹佛市, 10 年的降雨強度公式常數, $a=45.92$ 、 $b=10.0$ 和 $n=0.786$ 。2.1 acre 的住宅區, 開發後逕流系數是 0.65。滲透式滯流池長寬是 180 ft 及 20 ft。滯流池土壤的滲透率是: $f_0 = 6.50$ inch/hr, $f_c = 1.80$ inch/hr, 和 $k = 6.50$ /hour。根據提供的資料, 單位換算因素和水池底面積是:

$$\alpha = 60, \beta = 1/12, \eta = \frac{1}{12 \times 3600}, \text{ and } A_b = \frac{100.0 \times 36.0}{43560.0} = 0.083 \text{ acre}$$

土壤的滲透率是

$$f(T_m) = 1.80 + (6.50 - 1.80)e^{-\frac{T_m}{60 \times 6.5}}$$

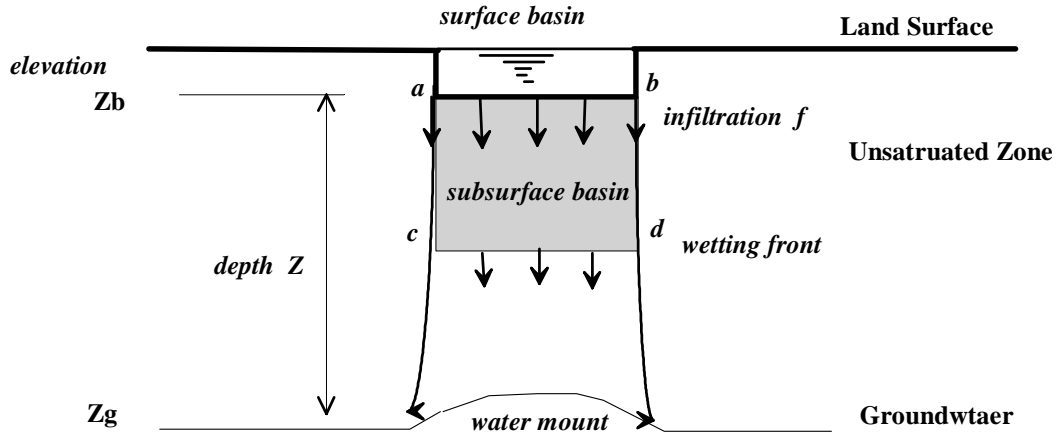
設計降雨延可用試誤法計算如下:

$$T_m = \frac{1}{0.786} \left[(T_m + 10) - (T_m + 10)^{0.786+1} \frac{\frac{1}{12} \times 0.083 \times f(T_m)}{45.92 \times 60.0 \times 0.65 \times 2.1} \right]$$

解答是 $T_m=340.0$ 分鐘。使用公式 9, 滯流容量是 0.219 acre-ft。總滲流量 (深度), $F(T_m)$, 由公式 4 計算是 4.33 英寸。

滯流池幾何型狀

根據表面水文, 上述做法產生滯流容量。但沒有考慮到地下水面上土壤深度及土壤孔隙容量。如果地表土壤滲透率(infiltration)比地下滲流率(seepage)高, 地表滲透率不能由地下滲流率所吸收必會導致地表積水不退。所以保守的設計方法是以滯流池下的土壤孔隙容量來決定滯流池的最大設計水深。



圖一. 滯流池下的土壤孔隙容量

圖一是滲流流經土壤媒介。根據擴散理論, (Green 和 Ampt, 1911) 土壤滲流可被描述如下:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

θ = 土壤含水量, t = 雨水滲流時間, f = 土壤滲透率, z = 在水池之下垂直的距離。考慮土壤媒介在水池底部和地下水水面之間作為控制容量(control volume), 公式 11 變成

$$\Delta \theta = \frac{\Delta f \Delta t}{\Delta z} \quad (12)$$

如图 1 所示, $\Delta \theta$ 的數值是土壤起始和飽和含水量之間的差異。 Δz 相等於滯流池之下土壤層的深度。 Δf 相等於滯流池的土壤滲透率, 所以在土壤沒有飽和之前, 公式 12 成爲:

$$(\theta_s - \theta_0) = \frac{(f - 0)(T_d - 0)}{(Z_b - Z_g)} = \frac{T_d f}{Z} \quad (13)$$

θ_s = 飽和土壤含水量, θ_0 = 土壤起始含水量, Z_g = 地下水水面高程, Z_b = 滯流池盆底部高程, T_d = 排水時間, $\Delta Z = Z_b - Z_g$ 。重新整合公式 13, 滯流池的排水時間爲:

$$T_d = \frac{Z(\theta_s - \theta_0)}{f} \quad (14)$$

公式14 指出滯流池的排水時間是被土壤含水量和滲透率所控制。土壤的含水量容積等於:

$$d \leq Z(\theta_s - \theta_o) \quad (15)$$

d=土壤毛孔中飽和水深度。保守設計下,公式15就是滯流池的水深度。因此滯流池面積是:

$$A_o \geq \frac{V_m}{Z(\theta_s - \theta_o)} \quad (16)$$

公式9定義了滯流池設計容量。公式15設定了滯流池最大水深。公式16決定了滯流池最小設計面積。而公式14計算了滯流池容量與排水時間。

設計案例二

在案例一，起始土壤含水量是 0.15，而土壤飽和含水量是 0.35。地下水面的距離是 10 feet。滯流池容積是 0.219 acre-ft。在飽和的情況之下，在 10 ft 的土壤含水量容積是:

$$d = 10 \times (0.35 - 0.15) = 2.0 \text{ Feet of water}$$

假定滯流池水深是 2.0 feet. 滯流池面積是

$$A_o = \frac{0.219}{2.0} = 0.11 \text{ acre-ft}$$

這一個滯流池與集水區的面積比是4.7%。在案例一,滯流池的滲透率是1.8 inch/hr。因此,滯流池滿池後,滲流時間是:

$$T_d = \frac{2.0 \times 12}{1.8} = 13.3 \text{ hours}$$

上述的設計步驟可應用於土壤含水量非飽和狀態。在長雨期後,土壤可能飽和。滯流池積水問題不再是滯流池的幾何型狀的問題,而是如何維持土壤的滲流率的問題。因此地下水力坡降(gradient)和滲流傳導(hydraulic conductivity)是決定因素。

永續操作的持續力

當土壤完全飽和,滯流池雨水直接灌注地下水面。當地表滲透率大於地下土壤滲流率,多餘的滲水將造成地下水面上局部積壓現象 (Mounting effect)。使得土壤排水停滯,系統失去功效。圖二顯示滯流池的地下滲流流線 (streamline)。流線以Y軸為圓心平均的分部在同心圓周之上。此三維流線方程式為:

$$\psi = \pi \frac{f_a}{D} r^2 y \quad (17)$$

y=垂直距離, r=距離 y 的半徑。如圖二所指出, 滯流池下面的總滲流量是

$$Q = f_a \pi R_0^2 \quad (18)$$

Q= 滲滲容量率, f_a =土壤滲透率, R_0 = 圓形滯流池的半徑。在C(r,y)=(R_0 ,D)這點上, 公式17等於公式18, 也就是說

$$Q = \Psi \quad (19)$$

流綫分配在0和Q之間。每一條流綫是在一個垂直平面上。流綫上的點(r,y)是由公式19所定義。為了維持流體的連續性, 在指定的y, 它的半徑是:

$$r = \sqrt{\frac{D}{y}} R_0 \quad (20)$$

在流域中水流速度能由公式19所微分而得之如下:

$$u = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{f_a}{2} \frac{r}{D} \quad (21)$$

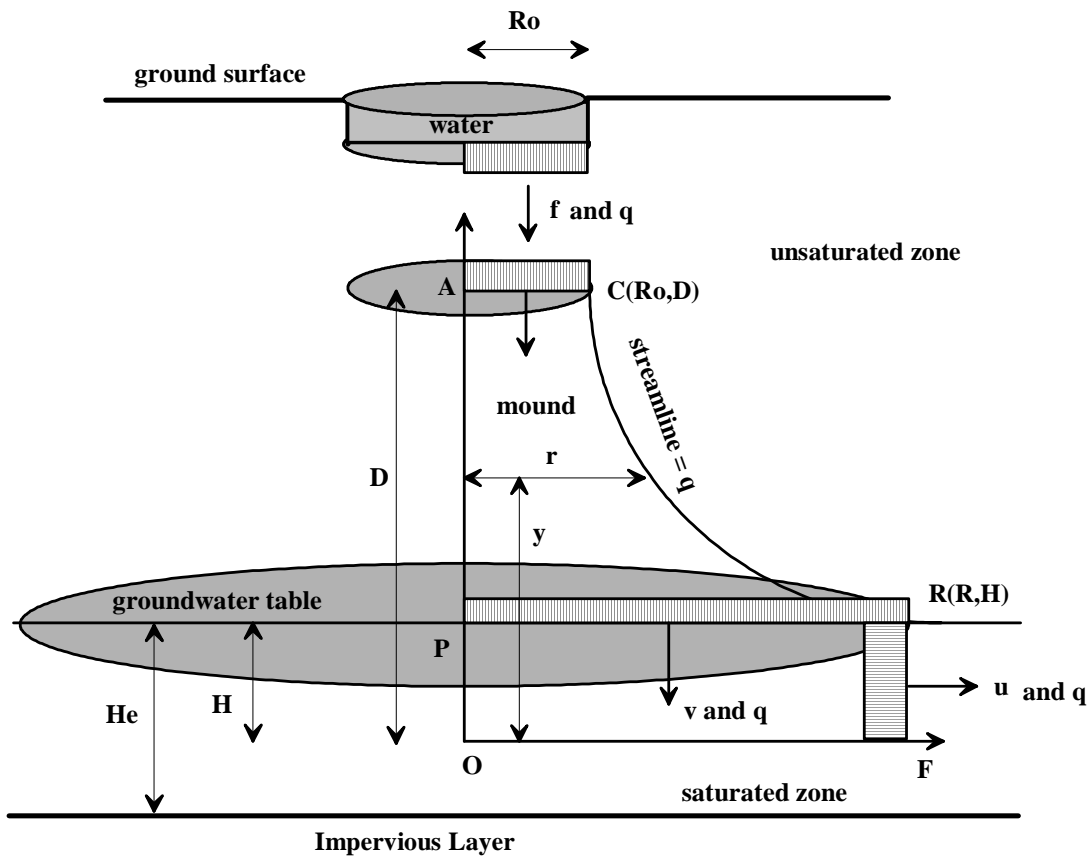
和

$$v = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \psi}{\partial r} = -f_a \frac{y}{D} \quad (22)$$

依照达西定律 (Darcy's Law) 横段面 RP 的渗流量是:

$$Q = K_y i (\pi R^2) \quad (23)$$

i = 垂直水力坡度, K_y = 垂直水力流通系数。



圖二 滯流池的地下滲流流線 (streamline)

图二, RP段面上: $y = H$ 。渗流水的半径 R 是

$$R = \sqrt{\frac{D}{H}} R_o \quad (24)$$

而在段面RP上, 雨水向下的速度是:

$$v = \frac{Q}{\pi R^2} = K_y i \quad (25)$$

公式 25 向下的垂直水力坡度是 $i=-1$ 。在 $Y=H$ 的情形下,公式25必須與公式23相等。因此可導出下列式子:

$$D = \lambda_y H \quad (26)$$

和

$$\lambda_y = \frac{f_a}{K_y} \quad (27)$$

在流出段面,RF, 滲流量是由C點和RF之間的水力坡度所決定。因此導出

$$Q = K_r (2\pi r y) \left(-\frac{\partial y}{\partial r}\right) \quad (28)$$

K_r = 輻射水力流通系數。對公式 28 積分, 由 $Y=D$ 到 $Y=H$, 由 $r=R_0$ 到 $r=R$, 可得到下列式子:

$$Q = \frac{K_r \pi}{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)} (D^2 - H^2) \quad (29)$$

H = 地下水層的流動厚度。把公式21, 26, 29加以組合, 其RF斷面的平均速度, U , 是

$$u = \frac{Q}{2\pi R H} = K_r \frac{H (\lambda_y^2 - 1)}{R \ln \lambda_y} \quad (30)$$

同樣的, 在 $r = R_0$,公式30與公式22一定一致。因此 H/R_0 的比例可經由公式30和22導出:

$$\frac{H}{R_0} = \sqrt{\frac{\lambda_r \ln \lambda_y}{2(\lambda_y^2 - 1)}} \quad (31)$$

和

$$\lambda_r = \frac{f_a}{K_r} \quad (32)$$

K_r = 輻形放射狀滲透性系數. 將公式31代入公式21得到

$$\frac{D}{R_0} = \lambda_y \sqrt{\frac{\lambda_r \ln \lambda_y}{2(\lambda_y^2 - 1)}} \quad (33)$$

使用公式32和公式33, 所需要的土壤飽合厚度為:

$$\frac{Y_o}{R_o} = \frac{D - H}{Y_o} \quad (34)$$

公式 34 決定從水池底部到地下水表面之間所必要的最小垂直的距離。如果水池底滿足公式 34, 滲透水將直接灌注地下水表面; 否則多餘滲水便在地下水表面上產生累淤積壓現象(mounting effect)。迴壓將減少滲透水量甚至造成滯流池積水不退。

設計案例三

滲透式滯流池的直徑是**68.0 ft**。從池底到地下水表面的距離是**16.5ft**。滯流池下方為 loamy 沙層。滲透水率是 1.8 inch/hr。由抽水井現場測試, 當地土壤水力流通系數為 0.75 inch/hr。評估此滯流池運用永續性。

$$Q = f_a \pi R_0^2 = \frac{1.80}{12.0 \times 3600.0} \times 3.1416 \times 34.0^2 = 0.15 \text{ cfs}$$

假定在一個均勻層環境下, $K_r = K_y = K$ 。所需的地表下盆地幾何型狀計算如下:

$$\lambda = \frac{1.80}{0.75} = 2.40$$

$$\frac{H}{R_o} = \sqrt{\frac{2.40 \times \ln(2.40)}{2(2.4^2 - 1)}} = 0.471; \text{ or } H = 16.1 \text{ feet}$$

$$\frac{D}{R_o} = 2.32 \sqrt{\frac{2.40 \times \ln(2.40)}{2(2.40^2 - 1)}} = 1.09; \text{ or } D = 37.2 \text{ feet}$$

$$Y_o = 37.2 - 16.1 = 21.1 \text{ feet}$$

此案例要求的最少飽和土壤厚度是 21.1 feet。然而池底所提供的垂直距離是 16.5 feet。因此地表的設計滲透率必須減少。表一提出不同 f_a/K 比率與設計地表滲透率的關係。當 $f_a/K = 2.0$ ，必需的飽和土壤厚度是 16.34 feet。所以，建議水池襯裡材料應設計具有 1.50 inch/hr的滲透率。

f_a/K	f_a	H/R _o	D/R _o	Y _o /R _o	H	D	Y _o
	<i>fpd</i>				<i>ft</i>	<i>ft</i>	<i>ft</i>
1.20	0.90	0.50	0.60	0.10	16.95	20.34	3.39
1.50	1.13	0.49	0.74	0.25	16.77	25.15	8.38
2.00	1.50	0.48	0.96	0.48	16.34	32.69	16.34
2.50	1.88	0.47	1.17	0.70	15.88	39.7	23.82
3.00	2.25	0.45	1.36	0.91	15.34	46.29	30.86

Note: R_o = 34 ft, $f_a = 1.8$ inch/hr

表一 f_a/K 比率與設計地表雨水的滲透率的關係

結語

滯流系統其滯流容量決定於集水區的水文與土壤滲透率 (infiltration)。滯流池的形狀則該由當地的土壤含水率與土壤到地水面厚度所決定。在土壤飽和之前，地表水滲透至土壤孔隙當中。在土壤飽和之後，複雜的滲流系統可由勢能流模式表示。地表水經過土壤的滲流灌注地下水水面。土壤的滲流率(seepage)取決於地表至地下水水面之間土壤厚度與土壤的水力流通系數。本文指出當滯流池排水設計只著重於地表滲透率(infiltration)，而忽視地下滲水率(seepage)將會造成嚴重的錯誤。

REFERENCES

Bouwer, H, Back, J.T., and Oliver, J.M. (1999), "*Predicting Infiltration and Ground-water Mounds for Artificial Recharge*". ASCE J. of Hydrologic Engineering, Vol 4, No. 4, October, pp 350-357

Brooks, R.H., and Corey, A.T. (1964). "*Hydraulic properties of Porous Media*." Hydrologic Paper No. 3, Colorado State University, Ft. Collins, Colorado.

- Ferguson, Bruce K., (1990). "Role of the Long-term Water Balance in Management of Storm Water Infiltration." J. of Environmental Management, Vol 30, pp 221-233.
- Giffin, D.M. Jr., and Warrington, R.O. (1988). "Examination of 2-D Groundwater Recharge Solution.", ASCE J. of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 114, No. 4, Nov., pp 691-704
- Guo, James C.Y. (2004). "Hydrology-Based Approach to Storm Water Detention Design Using New Routing Schemes." ASCE J. of Hydrologic Engineering, Vol 9, No. 4, July/August
- Guo, James C.Y. (2003). "Design of Infiltrating Basin by Soil Storage and Conveyance Capacities." IWRA International J. of Water, Vol 28, No. 4, December.
- Guo, James C.Y. (2002). "Overflow Risk of Storm Water BMP Basin Design." ASCE J. of Hydrologic Engineering, Vol 7, No. 6, Nov.
- Guo, James C.Y. and Urbonas, Ben. (2002). "Runoff Capture and Delivery Curves for Storm Water Quality Control Designs." ASCE J. of Water Resources Planning and Management, Vol 128, No. 3, May/June.
- Guo, James C.Y. and Hughes, William. (2001). "Runoff Storage Volume for Infiltration Basin." ASCE J. of Irrigation and Drainage Engineering, Vol 127, No. 3, May/June.
- Guo, James C.Y. (2001). "Design of Circular Infiltration Basin Under Water Mounding Effects." ASCE J. of Water Resources Planning and Management, Vol 127, No.1, Jan/Feb.
- Guo, James C.Y. (1999). "Detention Basin Sizing for Small Urban Catchments." ASCE J. of Water Resources Planning and Management, Vol 125, No.6, Nov.
- Guo, James C.Y. (1998). "Subsurface-surface Hydrologic Model for Infiltration Trenches." ASCE J. of Water Resources Planning and Management, Vol 124, No 5, Sept.
- Guo, James C.Y. and Urbonas, Ben (1996). "Maximized Detention Volume Determined by Runoff Capture Rate." ASCE J. of Water Resources Planning and Management, Vol 122, No 1, Jan.
- Guo, James C.Y., Urbonas, Ben, and Rosener, Larry (1996). "Hydrology for Optimal Sizing of Urban Runoff Treatment Control System", J. of Water Quality International, London, SW1H9BT, UK, February.
- Hantuch, M. S. (1967). "Growth and Decay of Groundwater-mounds in Response to Uniform Percolation.", Water Resources Res, Vol 3, pp 227-234.
- McDonald, Michael G., and Harbaugh, Arlen, (1984). "A Modular Three-dimensional Finite-difference Groundwater Flow Model", U.S. Department of the Interior, USGS, National Center, Reston, Virginia.
- Morel-Seytous, H.J., and Miracapillo, C., (1988). "Prediction of Infiltration, Mound Development, and Aquifer Recharge from a Spreading Basin or Intermittent Stream." HYDROWAR Rep., No. 88.3, Hydrology Days Publication, Atherton. Calif.
- Morel-Seytous, H.J., Miracapillo, C., and Abdulrazzak., M. J. (1990). "A Reductionist Physical Approach to Unsaturated Aquifer Recharge from a Circular Spreading Basin." Water Resources Research., Vol 26, pp 771-777.
- Morris, Harry M., Wiggert, James M. (1972) "Applied Hydraulic Engineering", The Ronald Press Company, New York, New York.
- Lappala, E.G. Healy, R.W., and Weeks, E.P. (1987). "Documentation of computer program VS2D to solve the equations of fluid flow in variably saturated porous media." USGS Water Resources Investigations Report, No. 83-409, U.S. Geology Survey, Lakewood, Colo.

Rastogi, A.K. and Pandey, S.N. (1998). "Modeling of Artificial Recharge Basins of Different Shapes and Effect on Underlying Aquifer System". ASCE J. of Hydrologic Engineering, January, Vol 123, No. 3, pp 62-68.

Ortiz, N.V., Zachmann, D.W., McWhorter, D.B., and Sunada, D.K., (1979). "Effects of In-Transit Water on Groundwater Mounds Beneath Circular and Rectangular Recharge Areas", Water Resources Research, Vol 15., No. 3., pp 577-582.

Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T. (1989). "Numerical Recipes - the art of scientific computing." Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Shansai, A. and Sitar, N. (1991). "Method for Determination of Hydraulic Conductivity in Unsaturated Porous Media". ASCE J. of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 117, No. 1, Jan/Feb, pp 64-78

Stankovich, J.M., and Lockington, D.A. (1995). "Brook-Corey and Van Genuchten Soil-water -retention Models." ASCE J. of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 121, No. 1, Jan/Feb., pp 1-7

Swanee, P.K. and Ojha, C.S.P. (1997). "Ground-water Mound Equation for Rectangular Recharge Area". ASCE J. of Irrigation and Drainage Engineering, May/June, pp215-217.

Sumner, D.M., Rolston, D.E., and Marino, M.A. (1999) "Effects of Unsaturated Zone on Groundwater Mounding", ASCE J. of Hydrologic Engineering, Vol. 4., No. 1., pp 65