บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาวิทยานิพนธ์ในเรื่อง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำใต้ดินโดยแรงโน้มถ่วงของโลก เมื่อเทียบกับการกระจายตัวของขนาดทราย ได้นำสมการที่เป็นคุณสมบัติพื้นฐาน และสมการที่เกี่ยวข้องมาศึกษาเพื่อใช้อธิบายผลการทดลองเติมน้ำ โดยผ่านทรายตัวอย่างซึ่งทำหน้าที่เสมือนชั้นดินให้น้ำ (aquifer) คุณสมบัติพื้นฐานและสมการที่เกี่ยวข้อง สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1 นิยามและสมการพื้นฐานชั้นดินให้น้ำ

2.1.1 ชั้นดินให้น้ำ (aquifer) หมายถึงดิน หิน หรือวัสดุที่เป็นตัวกลางซึ่งมีน้ำแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินหรือรอยแตกในชั้นหิน และสามารถให้น้ำในปริมาณที่มากพอในการนำน้ำขึ้นมาใช้โดยการขุดหรือเจาะบ่อ ชั้นดินหรือหินที่เป็นชั้นให้น้ำมีลักษณะกรเกิดต่างๆ กัน ซึ่งแต่ละลักษณะมีความสามารถทางเก็บกักน้ำและให้น้ำต่างกัน โดยลักษณะของชั้นให้น้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

2.1.1.1 ชั้นดินให้น้ำแบบถูกกดดัน (Confined Aquifer) โดยชั้นน้ำในลักษณะนี้ถูกปิดกั้นด้วยชั้นทึบน้ำทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งทำให้ชั้นให้น้ำแบบปิดนี้เป็นชั้นน้ำที่มีแรงดัน ซึ่งชั้นน้ำในลักษณะนี้เมื่อเจาะบ่อแล้วให้น้ำที่มีระดับสูง และในบางครั้งอาจมีน้ำพุ่งขึ้นสูงกว่าผิวดินในลักษณะของน้ำพุ (spring) โดยระดับของน้ำที่เกิดจากแรงดันและถูกปล่อยให้สูงจนหยุดนิ่งเรียกว่า piezometric head (รูปที่ 2-1)

2.1.1.2 ชั้นดินให้น้ำแบบเปิด (Unconfined Aquifer) ซึ่งเป็นชั้นน้ำที่มีชั้นทึบน้ำรองรับอยู่ด้านล่างเพียงด้านเดียว โดยผิวน้ำด้านบนในชั้นให้น้ำแบบเปิดนี้เป็นผิวอิสระ (Free Surface) และมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งเรียกระดับน้ำระดับนี้ว่า (Water Table) (รูปที่ 2-1)

2.1.1.3 ชั้นดินให้น้ำแบบปิดและรั่วซึม (Leaky Confined Aquifer) โดยลักษณะของชั้นให้น้ำนี้มีลักษณะเหมือนชั้นให้น้ำแบบปิดทุกประการ แต่ชั้นทึบน้ำที่อยู่ด้านบนเป็น

ชั้นให้น้ำกึ่งรั่วซึมซึ่งสามารถให้น้ำซึมผ่านได้บ้างเล็กน้อย ดังนั้นจึงเกิดการซึมเข้าหรือออกจากชั้นให้น้ำลักษณะนี้ (รูปที่ 2-2)

2.1.2 ความพรุน (porosity) หมายถึงเปอร์เซ็นต์ของช่องว่างที่มีอยู่ในปริมาตรทั้งหมด ช่องว่างนี้เต็มไปด้วยน้ำถ้าหากชั้นดินหินนั้นอยู่ในสภาพอิ่มตัว (Saturated) หรือประกอบด้วยน้ำและอากาศถ้าหากอยู่ในสภาพไม่อิ่มตัว (Unsaturated) การหาค่าความพรุนทำได้โดยการเก็บตัวอย่างดินแบบ Undisturbed sampling ที่มีปริมาตร V_t แล้วนำไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105° เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเนื้อดินแห้ง (W_d) เมื่อหาร W_d ด้วยน้ำหนักจำเพาะของดิน (γ_s) จะได้ปริมาตรของเนื้อดิน (V_s) และสามารถหาค่าความพรุนได้จาก

$$n = \frac{V_v}{V_T} * 100 \qquad (2\text{-}1)$$

โดยที่ n = ความพรุนรวม (Total porosity) ; (%)

V_v = ปริมาตรของช่องว่างในตัวอย่างดิน ($V_t - V_s$)

V_T = ปริมาตรรวมของตัวอย่างดิน

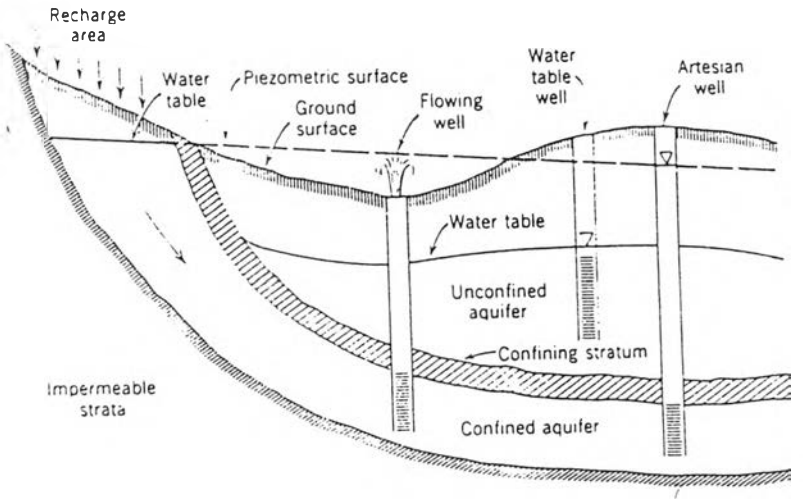
V_s = ปริมาตรของเนื้อดิน

2.1.3 อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) หมายถึง อัตราส่วนของปริมาตรช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (V_v) ต่อปริมาตรของเนื้อดิน (V_s) ดังนั้นจึงเขียนสมการของอัตราส่วนช่องว่าง " e " ได้เป็น

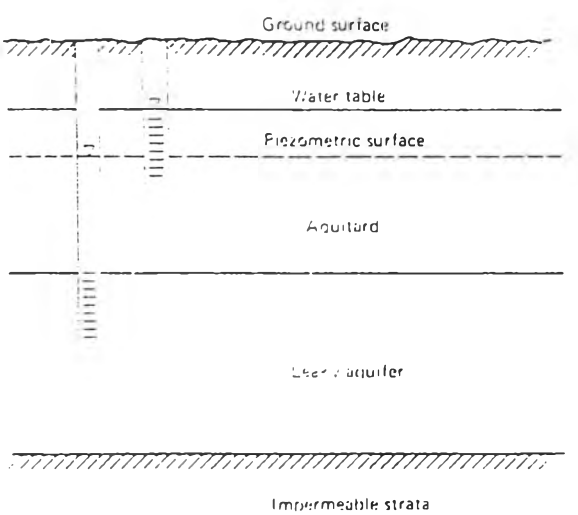
$$e = \frac{V_v}{V_s} \qquad (2\text{-}2)$$

โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับความพรุนคือ

$$n = \frac{e}{(1+e)} \qquad (2\text{-}3)$$



รูปที่ 2-1 ลักษณะชั้นดินให้น้ำแบบเปิดและปิด



รูปที่ 2-2 ลักษณะชั้นดินให้น้ำแบบรั่วซึม

2.1.4 ความหนาแน่นโดยรวม (Bulk density) (ρ_d)หมายถึง ความหนาแน่นของเนื้อดินและหิน รวมทั้งช่องว่างหลังจากการอบแห้งแล้ว ซึ่งสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักของตัวอย่างดินหลังจากทำการอบแห้งแล้ว (W_w) หารด้วยปริมาตร (V_t) ในสภาพของ Undisturbed sample ดังสมการ

$$\rho_d = (1-n)^*\rho \qquad (2\text{-}4)$$

โดยที่ n คือ ความพรุน (n ของทรายมีค่าประมาณ 0.40) และ ρ คือ ความหนาแน่นของเม็ดดินซึ่งมีค่าประมาณ 2.65 g/cm ^{3} โดยหน่วยของความหนาแน่นโดยรวมนี้เหมือนกับหน่วยของความหนาแน่น

2.1.5 ความนำชลศาสตร์ (hydraulic conductivity) โดยที่ความนำทางชลศาสตร์นี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของตัวกลางพรุนหรือชั้นให้น้ำ ซึ่งขึ้นกับลักษณะของตัวกลางพรุนและคุณสมบัติของของไหล เช่นขนาดของเม็ดดินและจำนวนช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยสมการที่ใช้ในการประมาณค่าความนำชลศาสตร์ได้จากตัวอย่างสมการ เช่น

2.1.5.1 สมการของ Hazen (Applied Hydrogeology ,1991)

$$K = CD_{10}^{2} \qquad (2\text{-}5)$$

C = สัมประสิทธิ์ชนิดของตัวกลาง

D_{10} = ขนาดการกระจายตัวของเม็ดดิน

2.1.5.2 สมการการของ Shepherd (Applied Hydrogeology ,1991)

$$K = CD_{50}^{j} \qquad (2\text{-}6)$$

C = shape factor แต่ละชนิดตัวกลาง (รูปที่ 1-2)

j = ค่ายกกำลัง แต่ละชนิดตัวกลาง (รูปที่ 1-2)

D_{50} = ขนาดการกระจายตัวเฉลี่ยของเม็ดดิน

2.1.5.3 สมการของ Bouwer (Groundwater Hydrology , 1978)

$$K = \frac{CD_{50}^{2}\rho g}{\mu} \qquad (2\text{-}7)$$

โดยที่ D_{50} = ขนาดเม็ดดิน

ρ = ความหนาแน่นของการไหล

μ = ความหนืดสัมบูรณ์ของการไหล

$C = 0.005 * \left(\frac{n^3}{(1-n^2)} \right)$

n = ความพรุน

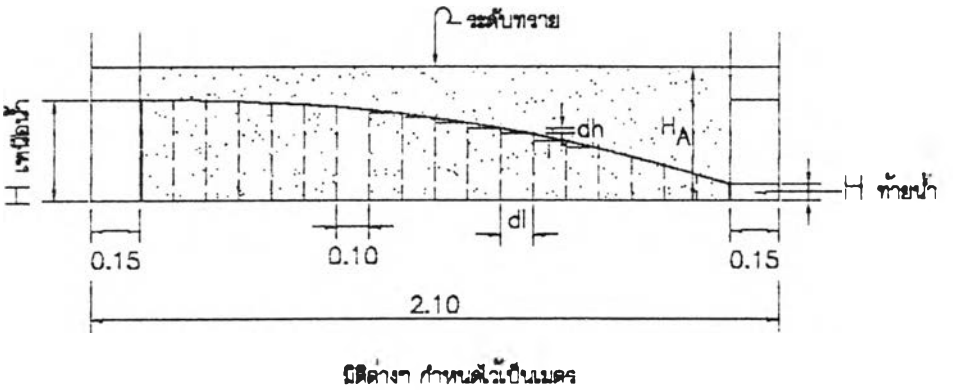
2.1.6 ความนำชลศาสตร์ในแนวราบ (K_H) โดยค่าความนำชลศาสตร์ในแนวราบเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนของความเร็วการไหลเฉลี่ย(V) กับค่า ความชันชลศาสตร์เฉลี่ย(S) โดยความเร็วการไหลเป็นอัตราส่วนของปริมาณน้ำ(Q) ต่อพื้นที่การไหล(A)ที่ตำแหน่งหลอดวัดระดับความดันต่อเนื่องกัน และความชันชลศาสตร์เป็นอัตราส่วนระหว่างความสูงระดับน้ำกับระยะทางของหลอดวัดระดับความดันต่อเนื่องกัน โดยความนำชลศาสตร์แนวราบมีรูปแบบสมการการไหลจากสมการการไหลของ Darcy โดยกำหนดระดับน้ำด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำแตกต่างกัน (รูปที่ 2-3)

$$V = K_H S \qquad (2\text{-}8)$$

S = ความชันชลศาสตร์ (dh/dl)

dh = ระดับน้ำแตกต่างระหว่างเหนือน้ำและท้ายน้ำ

dl = ระยะทางระหว่างเหนือน้ำและท้ายน้ำ



มิติต่างๆ กำหนดให้เป็นเมตร

รูปที่ 2-3 ความนำชลศาสตร์ในแนวราบ

2.1.7 อัตราการซึม (K_Z) โดยค่าอัตราการซึมของน้ำ(K_Z) คือ อัตราของน้ำที่ไหลผ่านตัวกลางทรายต่อพื้นที่ 1 หน่วย (รูปที่ 2-4) โดยแรงโน้มถ่วงโลกต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยอัตราการซึมนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเช่น ความลึกของน้ำที่ขังอยู่บนผิวดิน ลักษณะโครงสร้างเนื้อดิน ความชื้นในดินเดิม โดยมีสมการดังนี้ (Practical Handbook of Ground-Water Monitoring , 1991)

$$K_Z = q_Z/(\partial H/\partial Z) \qquad (2\text{-}9)$$

หรือ $$K_Z = V/S \qquad (2\text{-}10)$$

K_Z = อัตราการซึม (L/T)

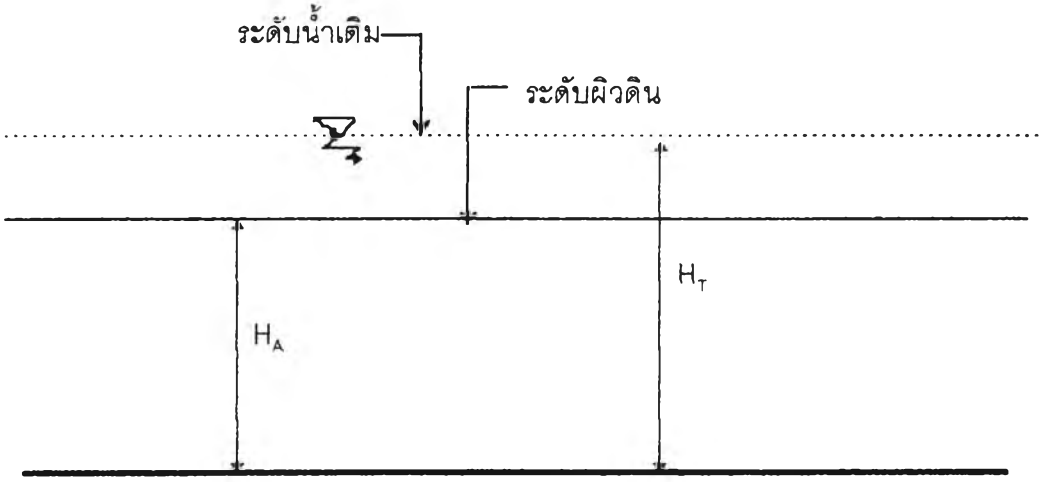
V = ความเร็วการไหล (Q/A) = q_Z

S = ความชันชลศาสตร์ของการซึม (H_T/H_A) = $\partial H/\partial Z$

H_T = ระยะทางระหว่างระดับน้ำเดิมกับระดับทึบน้ำ (L)

H_A = ความหนาชั้นดินให้น้ำ (L)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-4 อัตราการซึม

2.1.8 อัตราการเติมน้ำ (K_R) โดยอัตราการเติมน้ำคือ อัตราการเติมน้ำโดยรวม (Q_r) ที่ระดับการน้ำเติมต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินต่อพื้นที่การเติมน้ำ(A) ดังสมการ

$$K_R = Q_r/A_r \qquad (2\text{-}11)$$

Q_r = อัตราการเติมน้ำ (L^3/T)

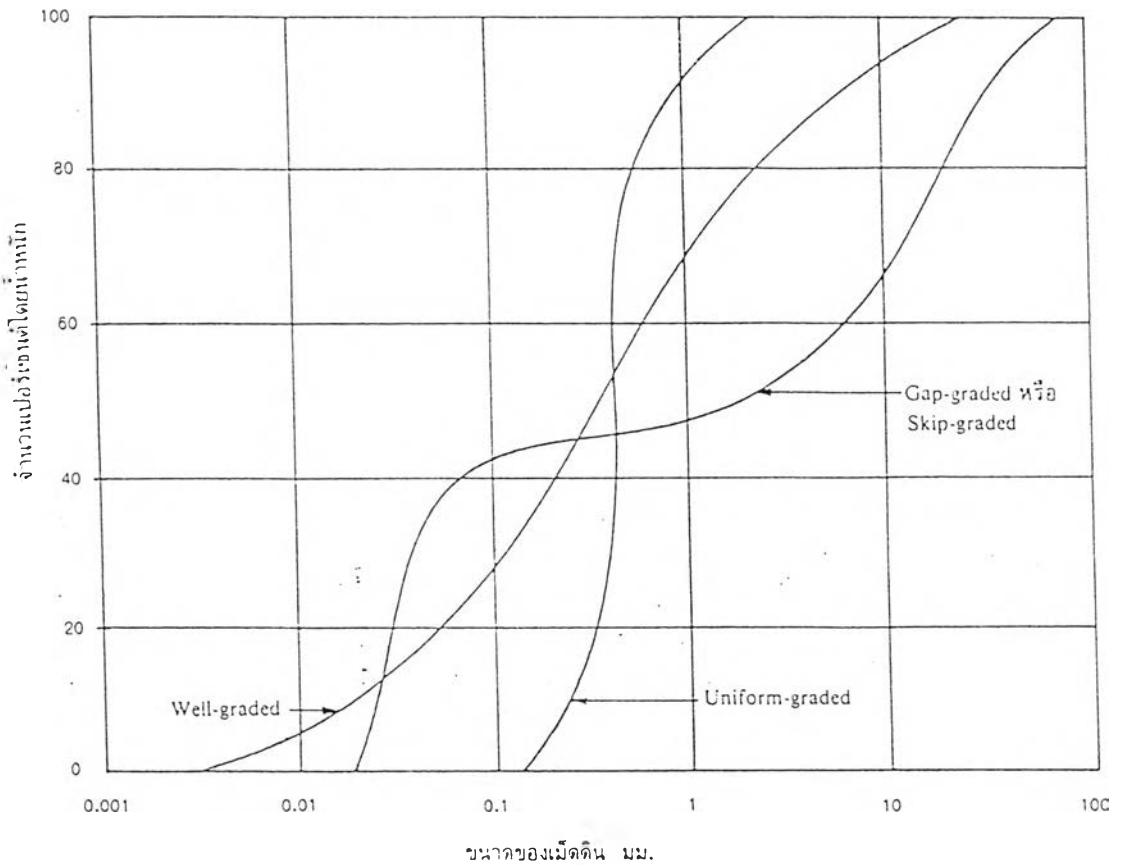
A_r = พื้นที่เติมน้ำ (L^2)

2.2 <u>สมการการกระจายตัวของขนาดทราย</u>

จากเส้นโค้งการกระจายตัว สามารถกำหนดชนิดของดินตามลักษณะการกระจายตัว ที่ได้จากความสัมพันธ์ ค่าร้อยละสะสมของน้ำหนักตัวอย่างที่ค้างบนตระแกรงแต่ละขนาด(D) กับขนาดของตระแกรง

2.2.1 ดินที่มีขนาดคละกันดี (well graded soil) โดยค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเม็ดดินเฉลี่ยมีขนาดกระจายในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน โดยลักษณะเส้นโค้งการกระจายตัวเม็ดดินขนาดคละกันดีมีความลาดเอียงของเส้นโค้งการกระจายตัว (รูปที่ 2-5)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad (2\text{-}12)$$



ที่มา : กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม 2529

รูปที่ 2-5 เส้นกราฟการกระจายตัวของทราย

เมื่อ C_u = การกระจายตัวของเม็ดดินว่ามีขนาดคละกัน หรือ สม่ำเสมอ

D_{60} = ขนาดของเม็ดดินที่มีเล็กกว่านี้จำนวน 60 %

D_{10} = ขนาดของเม็ดดินที่มีเล็กกว่านี้จำนวน 10 %

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{10} * D_{60})} \qquad (2\text{-}13)$$

C_c = ค่าที่แสดงถึงว่าเม็ดดินมีขนาดคละกันดีหรือไม่ดี

D_{30} = ขนาดของเม็ดดินที่มีเล็กกว่านี้จำนวน 30 %

โดยดินที่มีขนาดคละกันดีต้องมีค่าดังนี้ (ตารางที่ 2-1)

ตารางที่ 2-1 การกำหนดชนิดของดิน

ชนิดของดิน	C_u	C_c
กรวด	มากกว่า 4	1-3
ทราย	มากกว่า 6	1-3

2.2.2 ดินที่มีขนาดคละกันไม่ดี (poorly graded soil) แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.2.2.1 ดินที่มีขนาดเม็ดสม่ำเสมอ (uniform graded) คือเม็ดดินมีขนาดเดียวกันเป็นส่วนใหญ่เส้นโค้งการกระจายตัวมีลักษณะเป็นเส้นดิ่ง (รูปที่ 2-5)

2.2.2.2 ดินที่มีขนาดเม็ดขาดช่วง (gap graded) คือดินที่มีแต่ขนาดใหญ่และเล็กโดยขนาดกลางขาดหายไป หรือขาดขนาดใดขนาดหนึ่ง เส้นโค้งการกระจายตัวมีลักษณะเป็นเส้นราบในช่วงที่เม็ดดินขาดหายไป (รูปที่ 2-5)

2.3 สมการวิเคราะห์ระดับน้ำใต้ดินจากการเติมน้ำแบบแรงโน้มถ่วง

การวิเคราะห์หาระดับน้ำใต้ดินที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการเติมน้ำคำนวณได้จากสมการการเติมน้ำใต้ดินโดย Todd(1980) ซึ่งมีลักษณะการเติมน้ำโดยแรงโน้มถ่วงกรณีชั้นดินให้น้ำเป็นชั้นดินให้น้ำแบบเปิด (unconfined aquifer) (รูปที่ 2-6)

$$Q_r = \frac{\pi K(h_w^2 - h^2)}{\ln(\frac{r}{r_w})} \qquad (2\text{-}14)$$

Q_r = อัตราการเติมน้ำ (L^3/T)

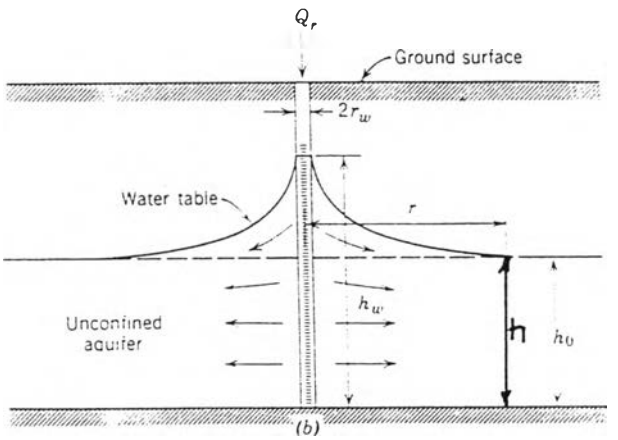
K = ความนำชลศาสตร์ (L/T)

h_w = ความลึกของระดับน้ำเติม (L)

h = ความลึกของระดับน้ำใต้ดินที่ระยะใดๆ (L)

r = รัศมีของน้ำใต้ดินที่ระยะใดๆ (L)

r_w = รัศมีของบ่อบาดาล (L)



รูปที่ 2-6 ลักษณะการเติมน้ำใต้ดิน

2.4 สมการความคล้ายคลึงทางชลศาสตร์

2.4.1 ความคล้ายคลึงทางเรขาคณิต คืออัตราส่วนของแบบจำลอง และแบบของจริงในแต่ละด้านมีลักษณะเดียวกัน

อัตราส่วนความยาว $$L_r = \frac{L_m}{L_p} \quad (2\text{-}15)$$

อัตราส่วนพื้นที่ $$A_r = \frac{A_m}{A_p} = L_r^2 \quad (2\text{-}16)$$

อัตราส่วนปริมาตร $$V_r = \frac{V_m}{V_p} = L_r^3 \quad (2\text{-}17)$$

2.5 อัตราการยกตัวและระยะยกตัวของระดับน้ำใต้ดิน

ลักษณะการยกตัวของระดับน้ำใต้ดินนั้น เกิดขึ้นในตำแหน่งเติมน้ำโดยระดับน้ำใต้ดินที่ยกตัวสูงขึ้นจากระดับน้ำใต้ดินเดิม (mound) (รูปที่ 2-7) ซึ่งระดับน้ำที่ยกตัวเหนือระดับน้ำใต้ดินนี้เป็นอัตราส่วนกับความหนาชั้นดินให้น้ำ และระยะทางยกตัว(L) เป็นระยะจากกึ่งกลางของตำแหน่งเติมน้ำ โดยระยะทางยกตัวแสดงเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะทางที่น้ำสามารถเคลื่อนที่ได้จนกระทั่งระดับน้ำยกตัวเท่ากับระดับน้ำใต้ดินเดิมเมื่อเทียบกับระยะของพื้นที่เติมน้ำ ดังสมการ

อัตราการยกตัว = H_d/H_A (2-18)

ระยะยกตัว = L/I (2-19)

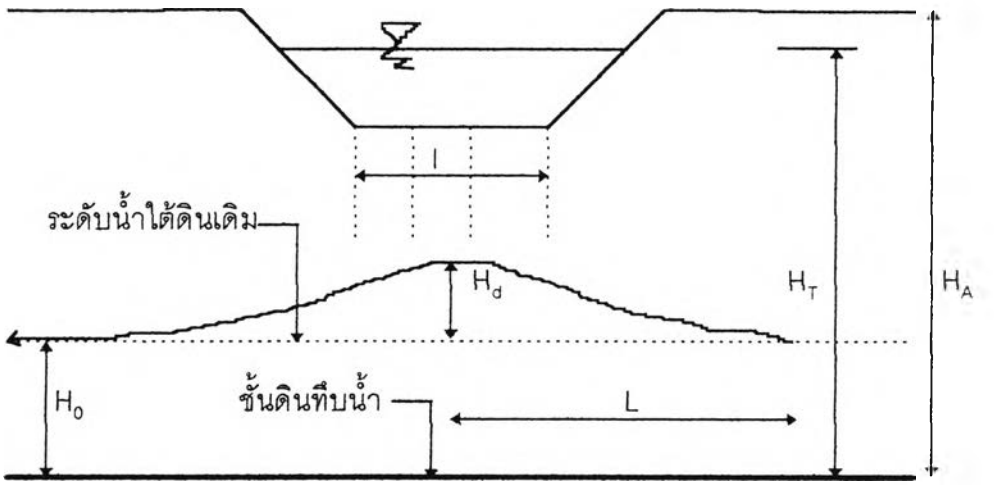
H_d = ระดับน้ำยกเหนือระดับน้ำใต้ดินเดิม

H_A = ความหนาชั้นดินให้น้ำ

H_0 = ระดับน้ำใต้ดินเดิม

L = ระยะทางที่ระดับน้ำยกตัวมีค่าเท่ากับระดับน้ำใต้ดินเดิม

I = ระยะของพื้นที่เติมน้ำตามแนวระยะยกตัว



รูปที่ 2-7 อัตรายกตัวหลังการเติมน้ำ

2.6 สมการวัดอัตราการไหล

ในการทดลองภาคสนามได้ใช้ฝายวัดน้ำสองชนิดวัดอัตราการไหลของน้ำ โดยใช้ฝายวัดน้ำสันกว้าง 1 ตัว และฝายวัดน้ำสามเหลี่ยมแบบ 90° วัดปริมาณน้ำที่ผ่านเข้ามาในสระทดลอง และวัดปริมาณน้ำที่ผ่านบ่อทรายกรองก่อนเติมผ่านบ่อบาดาลตามลำดับ โดยอัตราการไหลคำนวณได้ดังสมการ

2.6.1 ฝายวัดน้ำสันกว้าง

$$Q = CLH^{1.5} \qquad (2\text{-}20)$$

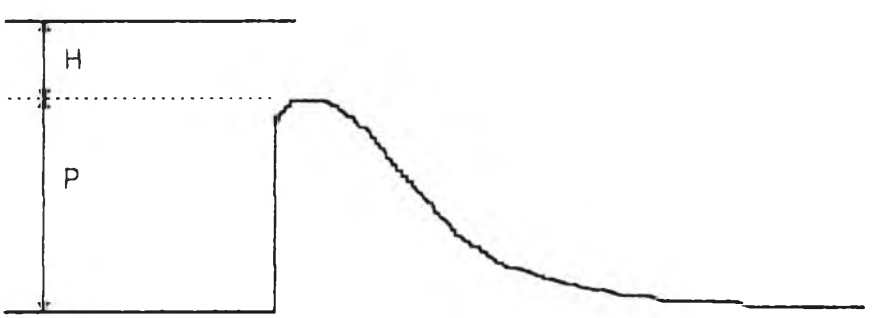
Q = อัตราการไหล (ลบ.ม/วินาที)
L = ความยาวฝาย (0.90 ม.)
H = ความสูงเหนือสันฝาย

เมื่อ C คือค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำข้ามฝาย โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างความสูงสันฝาย(P) ต่อความลึกของน้ำด้านหน้าฝาย(H) โดยมีอัตราส่วนดังนี้ (ตารางที่ 2-2)

ตารางที่ 2-2 สัมประสิทธิ์ C สำหรับการไหลของน้ำข้ามฝายสันกว้าง

อัตราส่วนระหว่างความสูงฝายต่อความลึกน้ำหน้าฝาย (P/H)	C
0	1.74
0.1	1.88
0.2	1.96
0.3	2.03
0.4	2.07
0.5	2.10
1.0	2.14
1.5	2.15
2.0	2.16
3.0	2.18

หมายเหตุ นิยามของตัวแปรในตารางให้เป็นไปตามรูปด้านล่าง



2.6.2 ฝายวัดน้ำสามเหลี่ยมแบบ 90°

$$Q = \left(\frac{8}{15}\right) * Cd * \left(\left(\sqrt{2 * g}\right)\right) * H^{2.5} \qquad (2\text{-}21)$$

$$Q = 1.42 * H^{2.5} \qquad : Cd = 0.6$$

Q = อัตราการไหล (ลบ.ม/วินาที)

C_d = สัมประสิทธิ์การไหล (ตามมาตรฐานกรมชลประทาน)

2.7 <u>สมการหาอัตราการซึมภาคสนาม</u>

การทดลองการเติมน้ำภาคสนามได้ใช้สมการความสมดุลของน้ำ(รูปที่ 2-8) ในการพิจารณาอัตราการซึมของน้ำในสระทดลอง ดังสมการ

$$Q_{rech} = Q_{in} + P - (\Delta S + E) \qquad (2\text{-}22)$$

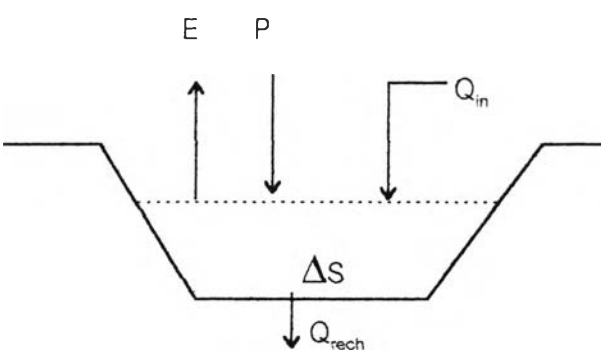
Q_{rech} = อัตราการซึม (ลบ.ม/ชม./ตร.ม)

Q_{in} = อัตราการไหลเข้าในพื้นที่ทดลองผ่านฝายสันกว้าง

ΔS = ผลต่างปริมาณน้ำในสระทดลอง

E = ปริมาณการระเหย

P = ปริมาณฝน



รูปที่ 2-8 อัตราการซึมในพื้นที่ทดลอง

ส่วนการทดลองเติมน้ำโดยบ่อบาดาลทดลอง สามารถคำนวณปริมาณน้ำเติมผ่านบ่อบาดาลทดลอง (รูปที่ 2-9)

$$Q_{rech} = 2\pi r H_s s * K_{well} \quad (2\text{-}23)$$

Q_{rech} = ปริมาณน้ำเติมผ่านบ่อบาดาล (ลบ.ม/ชม.ตร.ม)

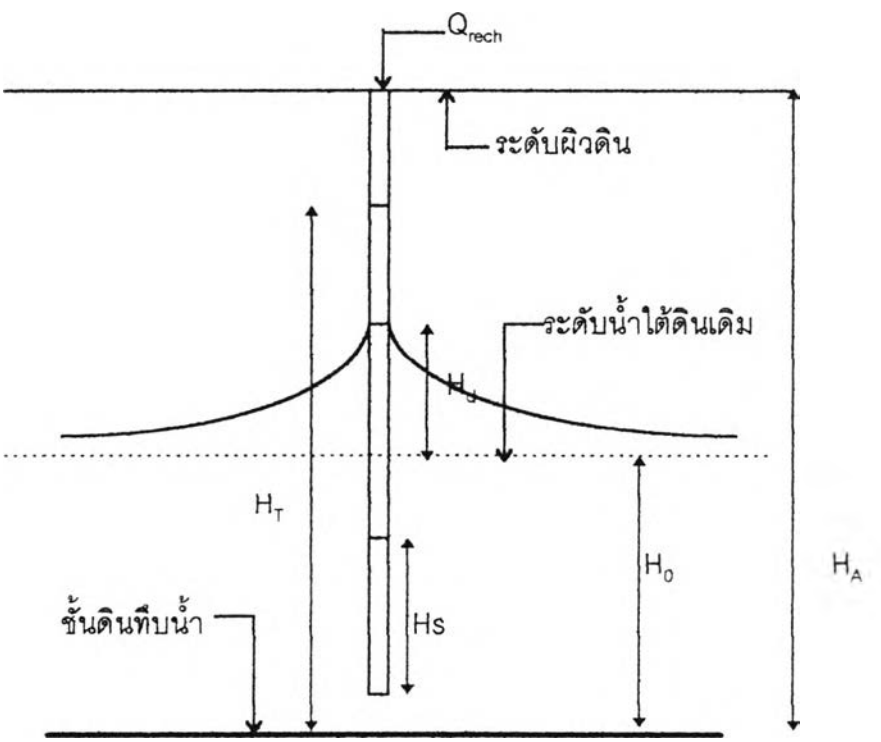
r = รัศมีบ่อบาดาล

H_s = ความสูงช่องเปิด

s = % ช่องเปิด

H_d = ระยะยกตัวเหนือระดับน้ำใต้ดินเดิม

H_T = ระดับน้ำเติมในบ่อบาดาล



รูปที่ 2-19 อัตราการเติมน้ำผ่านบ่อบาดาล