บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบระบบระบายน้ำรวม ทฤษฎีที่สำคัญที่เกี่ยวข้องมีหลายประการ อาทิเช่น การคำนวณหาปริมาณน้ำไหลนอง (runoff) ปริมาณน้ำซึมลงดิน (infiltration) และการไหลในทางน้ำเปิด (open channel flow) เป็นต้น ในบทนี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎีทั้ง 3 อย่างนี้ เพื่อให้เกิดความเข้าใจพื้นฐานในการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CU-SWMM โดยการพิจารณาทฤษฎีต่าง ๆ จะคำนึงถึงโปรแกรม SWMM เป็นสำคัญ นอกจากนั้นยังจะได้กล่าวถึงการประมาณราคาเบื้องต้นของระบบระบายน้ำรวมในตอนท้าย เพื่อให้มีความเข้าใจในหลักการคำนวณราคาของโปรแกรม CU-SWMM ส่วนทฤษฎีเกี่ยวกับการระเหย (evaporation) การไหลใต้ดิน (subsurface flow) และการจำลองการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำ (quality simulation) จะไม่กล่าวถึงเนื่องจากมีความสำคัญต่อการออกแบบระบบระบายน้ำรวมน้อยมาก

2.1 ปริมาณน้ำไหลนอง (runoff)

โปรแกรม SWMM จะทำการคำนวณหาปริมาณน้ำไหลนองจากพื้นที่รับน้ำฝนด้วย Runoff block โดยใช้วิธี non-linear reservoir ซึ่งเกิดจากการประยุกต์เอาสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) และสมการของ Manning (Manning's equation) มารวมเข้าด้วยกันโดยการสมมุติให้พื้นที่รับน้ำฝนเป็นเสมือนอ่างเก็บน้ำ (reservoir) ตื้น ๆ (ดูรูปที่ 2.1)

จากสมการความต่อเนื่อง

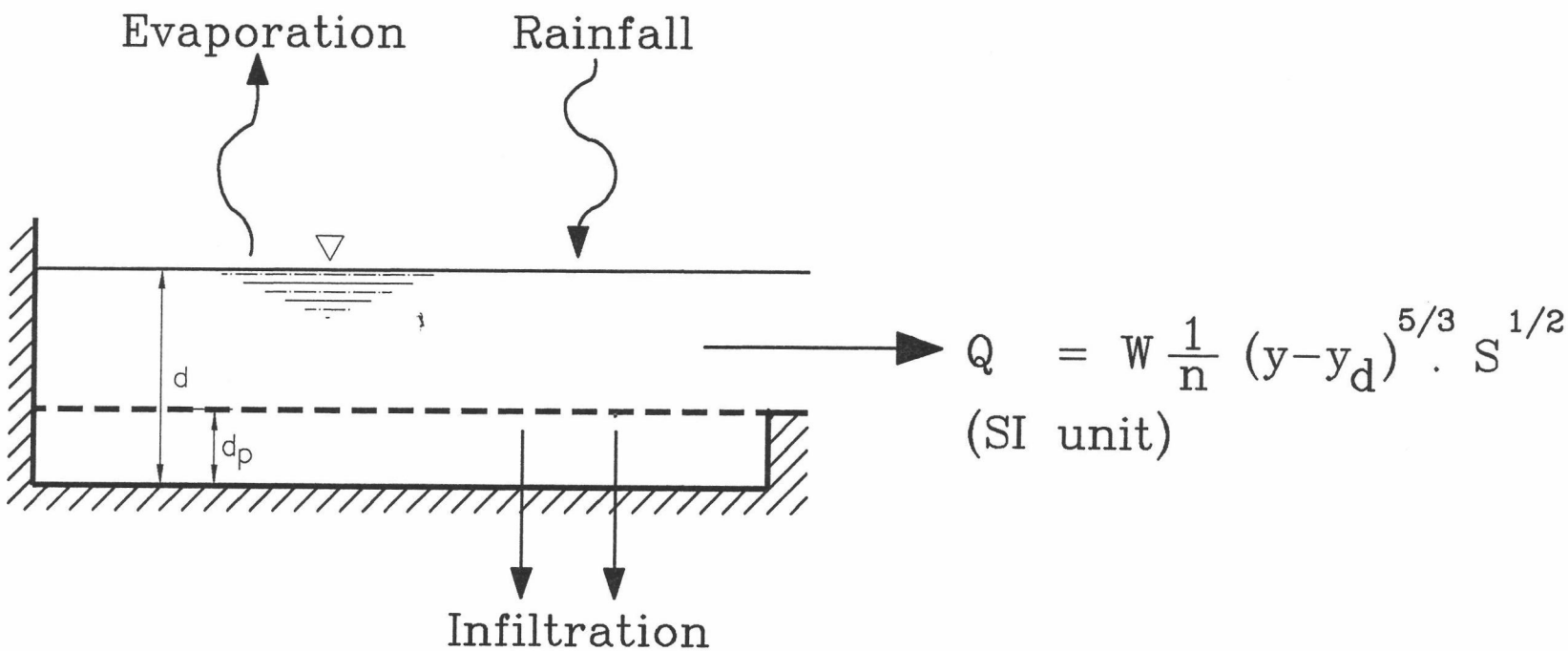
$$A \frac{dy}{dt} = A(i - f) - Q \qquad (1)$$

เมื่อ A = พื้นที่รับน้ำฝน

i = ความเข้มฝน

f = อัตราการซึมลงดิน

Q = ปริมาณน้ำไหลนองที่จุดออก (outlet) ของพื้นที่รับน้ำฝน



รูปที่ 2.1 แสดงพื้นที่รับน้ำฝนในวิธี NON-LINEAR RESERVOIR

จากสมการของ Manning

$$V = 1/n\, R^{2/3} S^{1/2} \quad \text{(หน่วยเมตริก)} \qquad (2)$$

เมื่อ V = ความเร็วในการไหล
n = สัมประสิทธิ์ของ Manning
R = รัศมีชลศาสตร์
S = ความลาดชันของ energy grade line

แต่เนื่องจากการออกแบบระบบระบายน้ำมักนิยมสมมุติให้ลักษณะการไหลเป็นแบบ uniform flow ความลาดชันของ energy grade line จึงสามารถแทนได้ด้วยความลาดชันของพื้นที่รับน้ำฝน

จากสมการการไหล

$$Q = AV \qquad (3)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล
A = พื้นที่หน้าตัดของการไหล
V = ความเร็วในการไหล

แทนสมการ (2) ใน (3) จะได้

$$Q = A/n\, R^{2/3} S^{1/2} \qquad (4)$$

รัศมีชลศาสตร์

$$R = A/P \qquad (5)$$

เมื่อ P = wetted perimeter

แทนสมการ (5) ใน (4) จะได้

$$Q = \frac{A^{5/3} S^{1/2}}{n P^{2/3}} \qquad (6)$$

หากกำหนดให้ W คือค่าสมมุติที่ใช้แทนความกว้างของพื้นที่รับน้ำฝน y คือความลึกของน้ำที่ไหลจากพื้นที่ และ y_d คือความลึกของน้ำที่ขัง (depression storage)

แทนค่า y, y_d, W จะได้

$$Q = \frac{[W(y - y_d)]^{5/3} S^{1/2}}{n[W + 2(y - y_d)]^{2/3}} \quad (7)$$

เนื่องจากถือว่าน้ำในอ่างเก็บน้ำที่ใช้แทนพื้นที่รับน้ำฝนมีความลึกน้อยมาก ค่าของ wetted perimeter จึงตัด $y - y_d$ ทิ้งไปเพื่อให้สมการง่ายขึ้น จะได้

$$Q = W/n\,(y - y_d)^{5/3} S^{1/2} \quad (8)$$

ข้อมูลฝนที่ใช้ในการหาปริมาณน้ำไหลนองเป็น hyetograph คือเป็นข้อมูลฝนที่ระบุความเข้มฝนในช่วงเวลาที่ฝนตก โดยความเข้มฝนจะมีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ นับจากฝนเริ่มตกจนถึงค่าสูงสุดและลดลงเรื่อย ๆ จนหยุดตก การหาปริมาณน้ำท่า (hydrograph) ของพื้นที่รับน้ำฝนจาก hyetograph จะทำทีละช่วงเวลาสั้น ๆ แทนช่วงเวลานั้นด้วย Δt จากสมการ (1) จะได้

$$\frac{A(y_2 - y_1)}{\Delta t} = A(i_{avg} - f_{avg}) - Q \quad (9)$$

และจากสมการ (8) จะได้

$$Q = \frac{W}{n}\left[\frac{(y_1 + y_2)}{2} - y_d\right]^{5/3} S^{1/2} \quad (10)$$

รวมสมการ (9) และ (10) เข้าด้วยกันจะได้

$$(y_2 - y_1)/\Delta t = i_{avg} - f_{avg} - \frac{WS^{1/2}}{An}\left[\frac{(y_1 + y_2)}{2} - y_d\right]^{5/3} \quad (11)$$

i_{avg} และ f_{avg} คือความเข้มฝนและอัตราการซึมลงดินเฉลี่ยในช่วงเวลาที่พิจารณาตามลำดับ y_1 คือความลึกตอนต้นช่วงเวลาและ y_2 คือความลึกตอนปลายช่วงเวลา ในการคำนวณออกแบบจะใช้สมการ (8) ในการหาปริมาณน้ำไหลนองและใช้สมการ (11) ในการหาค่า y_2 เพื่อคำนวณในช่วงเวลาถัดไป

2.2 ปริมาณน้ำซึมลงดิน (infiltration)

การคำนวณของปริมาณน้ำซึมลงดิน (infiltration) ในโปรแกรม SWMM สามารถเลือกคำนวณโดยใช้สมการใดสมการหนึ่งใน 2 สมการ คือ

1. สมการ Horton
2. สมการ Green-Ampt

ซึ่งการเลือกใช้สมการใดนั้นขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ผู้ใช้ป้อนให้กับโปรแกรม SWMM รายละเอียดของสมการทั้งสองมีดังต่อไปนี้

2.2.1 สมการ Horton

อัตราการซึมลงดินตามสมการ Horton จะแปรตามเวลาดังนี้

$$f_p = f_c + (f_o - f_c) e^{-kt} \qquad (12)$$

เมื่อ f_p = อัตราการซึมลงดิน ณ เวลา t
f_c = อัตราการซึมลงดินต่ำสุด
f_o = อัตราการซึมลงดินสูงสุด
k = decay coefficient

ค่า f_c, f_o และ k จะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น ชนิดของดินและพื้นผิว ความชื้นในดิน การหาค่า f_c, f_o และ k สามารถทำได้โดยใช้ infiltrometer วัดจากจุดต่าง ๆ ในพื้นที่รับน้ำฝน หากไม่สามารถกระทำได้ก็สามารถหาค่าต่าง ๆ เหล่านี้ได้จากหนังสืออ้างอิงทางด้านอุทกวิทยาทั่วไป

2.2.2 สมการ Green Ampt

สมการ Green Ampt เป็นสมการหาอัตราการซึมลงดินที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อน โดยจะทำการหาอัตราซึมลงดิน 2 ขั้นตอน คือ ก่อนและหลังดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated) ถ้าให้ K_S คืออัตราการซึมเมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำ i คืออัตราการซึมลงดินในเวลาใด ๆ K คือปริมาณน้ำสะสมที่ซึมลงดินที่เวลาใด ๆ และ F_S คือปริมาณน้ำสะสมที่ซึมลงดินจนดินอิ่มตัวด้วยน้ำ จะได้

เมื่อ $F < F_S$, $i > K_S$ $f = i$

$$F_S = \frac{S_u \, IMD}{i/K_S - 1} \qquad (13)$$

เมื่อ $F \geq F_S$ $\quad f = f_P$

$$f_P = K_S \left(1 + \frac{S_u \, IMD}{F}\right) \qquad (14)$$

เมื่อ f = อัตราการซึมลงดิน (infiltration rate)

f_p = ความสามารถในการซึมลงดิน (infiltration capacity)

i = ความเข้มฝน

S_u = average capillary suction ที่หน้าสัมผัสน้ำ

IMD = initial moisture deficit

เมื่อพิจารณาสมการ Green-Ampt ดังกล่าวข้างต้นจะพบว่า อัตราการซึมลงดินจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ซึมลงไปแล้วและความชื้นเริ่มต้นของดิน

เช่นเดียวกับสมการ Horton ค่า S_u, K_s และ IMD เป็นค่าที่ควรวัดจากสนามโดยตรง แต่การวัดค่าต่าง ๆ เหล่านี้จากสนามอาจกระทำได้ยาก หนังสืออ้างอิงทางอุทกวิทยาจะแนะนำค่าเหล่านี้ แต่เป็นเพียงค่าโดยประมาณเท่านั้น

2.3 การไหลในทางน้ำเปิด (open channel flow)

การคำนวณการไหลในทางน้ำเปิดในโปรแกรม SWMM สามารถทำได้ด้วย block 2 block คือ Transport block และ Extran block ซึ่ง Transport block จะสามารถคำนวณการไหลของน้ำในทางน้ำเปิดกรณีที่ระบบระบายน้ำเป็นแบบก้างปลา และมีการไหลไปในทิศทางเดียว ส่วน Extran block จะสามารถคำนวณการไหลในกรณีที่ระบบระบายน้ำเป็นแบบวงรอบ และน้ำสามารถไหลย้อนกลับทางได้หากระดับพลังงานด้านท้ายน้ำมีค่าสูงขึ้นจนมากกว่าด้านต้นน้ำ

จากสมการที่ (2) โดยเมื่อพิจารณาถึงการไหลไม่เต็มท่อ และจัดรูปสมการให้อัตราการไหลเป็นฟังก์ชั่นของพื้นที่หน้าตัดในการไหลจะได้ว่า

$$Q/Q_f = \frac{A \, R^{2/3}}{A_f \, R_f^{2/3}} = f(A/A_f) \qquad (15)$$

เมื่อ Q, Q_f = อัตราการไหลที่เกิดและอัตราการไหลเต็มหน้าตัด

ตามลำดับ

A, A_f = พื้นที่หน้าตัดของการไหล และพื้นที่หน้าตัดเต็มตามลำดับ

R, R_f = รัศมีชลศาสตร์ของการไหล และรัศมีชลศาสตร์เมื่อเกิดการไหลเต็มหน้าตัดตามลำดับ

ซึ่งฟังก์ชั่น $f(A/A_f)$ จะเปลี่ยนไปตามรูปหน้าตัดของทางระบายน้ำ

ส่วนวิธีการคำนวณที่ใช้ใน Extran Block กระทำโดยการแบ่งทางระบายน้ำออกเป็นช่วง ๆ หรือ Link และจุดเชื่อมเรียกว่า Node โดย Link ทำหน้าที่ขนส่งน้ำจาก Node หนึ่งไปยังอีก Node หนึ่ง ในการคำนวณถือว่าอัตราการไหลตลอดช่วงท่อ มีค่าคงที่ในช่วงเวลา (Δt) สั้น ๆ Node ในระบบระบายน้ำจะแทนหน่วยเก็บสะสมของระบบ (Storage Elements) มีระดับพลังงาน (Energy Head, H) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเมื่อมีน้ำไหลนองจากผิวดินหรือน้ำจาก Node อื่นไหลเข้าหรือไหลออกจาก Node ปริมาตรของน้ำในแต่ละ Node ที่เวลาใด ๆ มีค่าเท่ากับปริมาณน้ำที่อยู่ในช่วงท่อที่มีความยาวครึ่งหนึ่งของทุกช่วงท่อที่ต่อกับ Node นั้น สมการการไหลที่สมมุติให้มีสภาพเป็น gradually varied, one dimensional unsteady flow เป็นสมการอนุพันธ์เชิงส่วน (Partial Differential Equation) ของการไหลที่รู้จักกันในนามของสมการ St.Venant ประกอบด้วย

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\partial Q/\partial t + gAS_f - 2V\partial A/\partial t + V^2\partial A/\partial x + gA\partial H/\partial x = 0 \qquad (16)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล

V = ความเร็วของการไหล

A = พื้นที่หน้าตัดของการไหล

H = ความลึกของการไหล

S_f = ความลาดชันของเส้นพลังงาน

และสมการความต่อเนื่อง

$$\partial H/\partial t_t = \Sigma Q_t/A_{s\ t} \qquad (17)$$

เมื่อ Q_t = อัตราการไหลรวมของแต่ละ Node ที่แต่ละช่วงเวลา

A_s = พื้นที่ผิวของหน่วยสะสมที่แต่ละช่วงเวลา

สมการที่ (16) และ (17) จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ finite difference equation เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถคำนวณได้และนำมาใช้ในการคำนวณอัตราการไหลในแต่ละช่วงของทางระบายน้ำและความลึกของการไหลในแต่ละช่วงเวลา Δt โดยวิธี Modified Euler Method ซึ่งจะไม่ขอกล่าวในที่นี้ ผู้สนใจสามารถหาอ่านได้จาก STORM WATER MANAGEMENT MODEL USER'S MANUAL VERSION 4 : EXTRAN ADDENDUM

2.4 การประเมินราคาเบื้องต้น

ในการคำนวณเพื่อประเมินราคาเบื้องต้นของระบบระบายน้ำรวม โปรแกรม CU-SWMM จะทำการคำนวณหาราคาจากระบบระบายน้ำรวมในส่วนของ Transport block โดยทางระบายน้ำที่สามารถคำนวณราคาได้คือทางระบายน้ำที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการออกแบบและก่อสร้างระบบระบายน้ำรวมนั่นคือท่อกลม ท่อระบายน้ำรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และรางระบายน้ำรูปสี่เหลี่ยมคางหมู โดยราคาที่คำนวณจะแยกออกเป็นราคาทางระบายน้ำ ดินขุด ดินถม เข็มพืด และการซ่อมผิวจราจร ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.4.1 ราคาทางระบายน้ำ

ราคาทางระบายน้ำของระบบระบายน้ำรวมจะคำนวณได้โดยคูณความยาวของทางระบายน้ำแต่ละช่วงด้วยราคาต่อหน่วยความยาวของทางระบายน้ำช่วงนั้น ๆ และรวมผลคูณจนครบทุกช่วงของทางระบายน้ำ ดังสมการ

$$elecost = \sum_{i=1}^{n} elelen_i \times Elecost_i \qquad (18)$$

เมื่อ $elecost$ = ราคารวมของทางระบายน้ำ

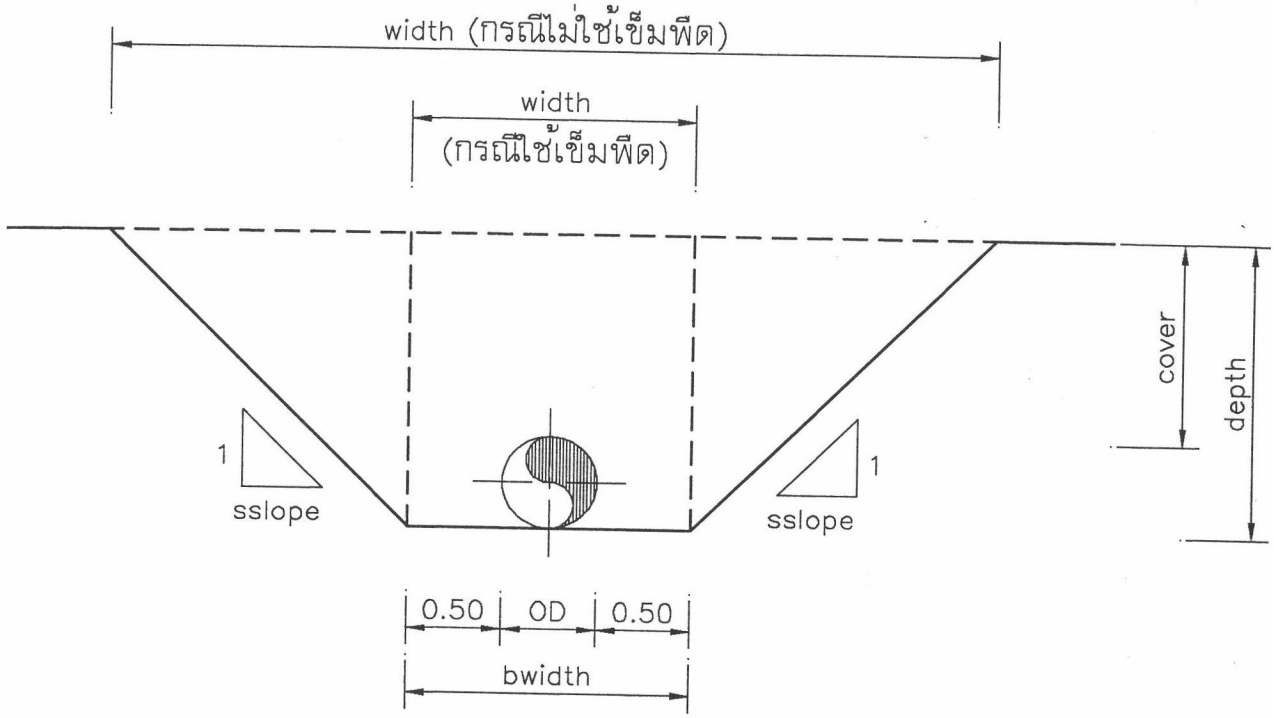
n = จำนวนรางของทางระบายน้ำ

$elelen_i$ = ความยาวของทางระบายน้ำช่วงที่ i

$Elecost_i$ = ราคาต่อหน่วยความยาวของทางระบายน้ำ

2.4.2 ราคาดินขุด

การคำนวณหาราคาดินขุดทำได้โดยการคูณพื้นที่หน้าตัดของการขุดทางระบายน้ำแต่ละช่วง ด้วยความยาวของทางระบายน้ำช่วงนั้น ๆ และราคาต่อหน่วยปริมาตรของการขุด และรวมผลคูณจนครบทุกช่วงของทางระบายน้ำ (ดูรูปที่ 2.2 ประกอบ) ดังสมการ



รูปที่ 2.2 แสดงหน้าตัดการขุดก่อสร้างทางระบายน้ำ

$$sectarea_i = \frac{1}{2} \times depth_i \times (width_i + bwidth_i) \quad (19)$$

เมื่อ $sectarea_i$ = พื้นที่หน้าตัดของการขุดก่อสร้างทางระบายน้ำช่วงที่ i

$depth_i$ = ความลึกของหน้าตัดการขุดช่วงที่ i

$width_i$ = ความกว้างที่ปากหน้าตัดการขุดช่วงที่ i (หากมีการใช้เข็มพืด $width_i = bwidth_i$)

$bwidth_i$ = ความกว้างที่ท้องหน้าตัดการขุดช่วงที่ i

$depth_i$ = ความสูงของทางระบายน้ำช่วงที่ i + cover (20)

เมื่อ cover = ความลึกดินถม

$bwidth_i$ = ความกว้างของทางระบายน้ำช่วงที่ i +1.00 (21)

$width_i$ = $bwidth_i + 2\ (depth_i \times sslope)$ (22)

(= $bwidth_i$ หากมีการใช้เข็มพืด)

เมื่อ sslope = ความชันของดินด้านข้างของการขุด

$$exccost = \sum_{i=1}^{n} sectarea_i \times elelen_i \times Exceost \quad (23)$$

เมื่อ exccost = ราคารวมของการขุด

$elelen_i$ = ความยาวของทางระบายน้ำช่วงที่ i

Exccost = ราคาต่อหน่วยปริมาตรของการขุด

2.4.3 ราคาดินถม

การหาราคาดินถมทำได้เช่นเดียวกับการหาราคาดินขุด เพียงแต่นำพื้นที่หน้าตัดของทางระบายน้ำแต่ละช่วงไปหักออกจากพื้นที่หน้าตัดของการขุดช่วงนั้น ๆ แล้วคูณด้วยความยาวของทางระบายน้ำช่วงนั้น ๆ และราคาต่อหน่วยปริมาตรของการถม และรวมผลคูณจนครบทุกช่วงของทางระบายน้ำ ทั้งนี้ ทางระบายน้ำที่เป็นรางรูปสี่เหลี่ยมคางหมู จะไม่มีการคำนวณราคาดินถม สมการการคำนวณราคาดินถมคือ

$$bkfcost = \sum_{i=1}^{n} (sectarea_i - \text{พื้นที่หน้าตัดของทางระบายน้ำช่วงที่ i}) \times elelen_i \times Bkfcost \quad (24)$$

เมื่อ bkfcost = ราคารวมของการถม

$sectarea_i$ = พื้นที่หน้าตัดของการขุดก่อสร้างทางระบายน้ำช่วงที่ i

$elelen_i$ = ความยาวของทางระบายน้ำช่วงที่ i

Bkfcost = ราคาต่อหน่วยปริมาตรของการถม

2.4.4 ราคาเข็มพืด

การคำนวณราคาเข็มพืดจะกระทำสำหรับทางระบายน้ำที่มีการขุดลึกมากกว่า หรือเท่ากับความลึกที่กำหนดให้ใช้เข็มพืดเท่านั้น ราคารวมของเข็มพืดคำนวณโดยคูณความยาวของทางระบายน้ำแต่ละช่วงด้วยราคาต่อหน่วยความยาวของเข็มพืด และรวมผลคูณจนครบทุกช่วงของทางระบายน้ำที่ใช้เข็มพืด ทางระบายน้ำที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูจะไม่มีการคำนวณราคา

เข็มพืด และเข็มพืดที่ใช้กำหนดให้มีการตอกทั้ง 2 ด้านของการขุด สมการในการคำนวณราคาเข็มพืดคือ

$$shpcost = \sum_{i=1}^{n} elelen_i \times Shpcost \qquad (25)$$

เมื่อ $shpcost$ = ราคารวมของเข็มพืด

$elelen_i$ = ความยาวของทางระบายน้ำช่วงที่ i

$shpcost$ = ราคาต่อหน่วยความยาวของเข็มพืด

2.4.5 ราคาดาดคอนกรีต

ราคาดาดคอนกรีตคำนวณโดยคูณเส้นรอบรูปของรางระบายน้ำรูปสี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละช่วงด้วยความยาวของรางระบายน้ำช่วงนั้น ๆ และราคาต่อหน่วยพื้นที่ของการดาดคอนกรีตและรวมผลคูณจนครบทุกช่วงของรางระบายน้ำ ดังสมการ

$$lngcost = \sum_{i=1}^{n} perimeter_i \times elelen_i \times Lngcost \qquad (27)$$

เมื่อ $lngcost$ = ราคารวมของการดาดคอนกรีต

$perimeter_i$ = เส้นรอบรูปของทางระบายน้ำช่วงที่ i

$elelen_i$ = ความยาวของทางระบายน้ำช่วงที่ i

$Lngcost$ = ราคาต่อหน่วยพื้นที่ของการดาดกรีต

2.4.6 ราคาซ่อมผิวจราจร

ราคาซ่อมผิวจราจรคำนวณโดยคูณความกว้างที่ปากหน้าตัดของการขุดก่อสร้างทางระบายน้ำแต่ละช่วงด้วยความยาวของทางระบายน้ำช่วงนั้น ๆ และราคาต่อหน่วยพื้นที่ของการซ่อมผิวจราจร และรวมผลคูณจนครบทุกช่วงของทางระบายน้ำ ทั้งนี้ ทางระบายน้ำที่เป็นรางรูปสี่เหลี่ยมคางหมูจะไม่มีการคำนวณราคาซ่อมผิวจราจร ดังสมการ

$$prpcost = \sum_{i=1}^{n} width_i \times elelen_i \times Prpcost \quad (26)$$

เมื่อ prpcost = ราคารวมของการซ่อมผิวจราจร
$width_i$ = ความกว้างที่ปากหน้าตักการขุดช่วงที่ i
$elelen_i$ = ความยาวของทางระบายน้ำช่วงที่ i
Prpcost = ราคาต่อหน่วยพื้นที่ของการซ่อมผิวจราจร

2.4.7 ราคารวมของระบบระบายน้ำ

$$totcost = elecost + exccost + bkfcost + shpcost + lngcost + prpcost \quad (28)$$

เมื่อ totcost = ราคารวมของระบบระบายน้ำ
elecost = ราคารวมของทางระบายน้ำ
exccost = ราคารวมของการขุด
bkfcost = ราคารวมของการถม
shpcost = ราคารวมของเข็มพืด
lngcost = ราคารวมของการดาดคอนกรีต
prpcost = ราคารวมของการซ่อมผิวจราจร