

บทที่ 9

การระบายน้ำ

9.1 คำนำ

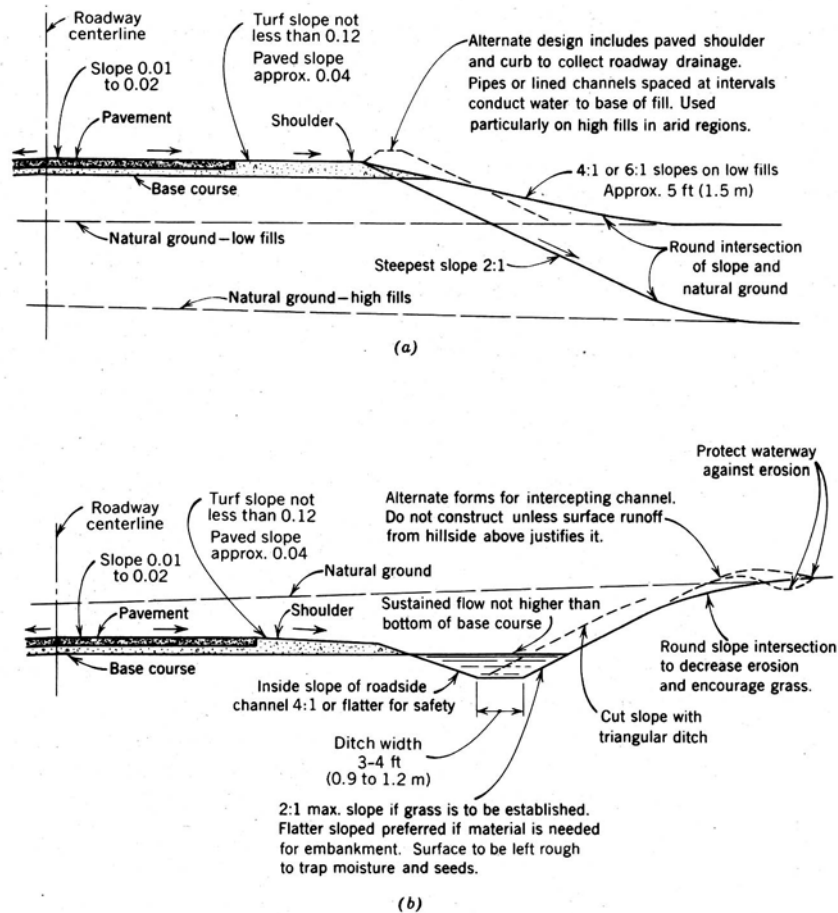
เรื่องที่สำคัญที่สุดเรื่องหนึ่งที่ต้องพิจารณา ในการวางแผนและออกแบบถนนนอกเมืองและถนนในเมือง ได้แก่ การจัดให้มีการระบายน้ำอย่างเพียงพอ การระบายที่เพียงพอและประหยัดเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับป้องกันการลงทุนในโครงสร้างถนน และป้องกันชีวิตและทรัพย์สินของผู้ใช้รถใช้ถนน

โดยทั่วไปการไหลของน้ำผิวดินที่วิศวกรการทางเกี่ยวข้องเป็นผลมาจากน้ำฝน บางส่วนของน้ำผิวดินจะซึมลงดิน ขณะที่บางส่วนยังคงอยู่บนผิวดินและต้องถูกนำไปบนผิวทาง ไปตามด้านข้างข้างใต้ผิวทาง หรือออกไปจากผิวทาง ในบางกรณีการควบคุมน้ำใต้ดินอาจเป็นสิ่งสำคัญ เช่นในกรณีหน้าตัดดินขุด หรือ ในกรณีระดับน้ำใต้ดินอยู่ใกล้ผิวดิน

การระบายน้ำในงานถนน แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ การระบายน้ำผิวดิน (surface drainage) และการระบายน้ำใต้ดิน (subsurface drainage)

9.2 การระบายน้ำผิวดิน

ส่วนประกอบของโครงสร้างถนนที่จัดให้มีไว้สำหรับการระบายน้ำผิวดินในพื้นที่นอกเมือง รวมถึงความลาดเอียงด้านข้างของผิวทาง (crown slope) ไหล่ทาง และเชิงลาดด้านข้าง คูข้างถนน ท่อลอดและสะพาน ถนนนอกเมืองซึ่งมีถนนแบ่งกลางจะมี ทางน้ำเข้า (inlet) และ ท่อใต้ดินสำหรับระบายน้ำฝนอยู่ภายในขอบเขตของถนนกลางเพื่อรองรับน้ำผิวดิน รูปที่ 9.2.1 แสดงรูปตัดทั่วไปของถนนซึ่งจัดให้มีการระบายน้ำอย่างดี



รูปที่ 9.2.1 รูปตัดทั่วไปของถนนซึ่งจัดให้มีการระบายน้ำอย่างดี

9.2.1 ความลาดเอียงด้านข้างของผิวทางและไหล่ทาง

วิศวกรซึ่งออกแบบถนนต้องมั่นใจว่า น้ำฝน จะถูกระบายออกไปจากโครงสร้างถนนอย่างรวดเร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ปกติผิวทางจะมีความลาดเอียงด้านข้างลาดลงไปออกจากแนวศูนย์กลางถนน หรือ มีรูปตัดเอียงในระนาบเดียวสำหรับกรณีการยกขอบโค้ง เพื่อที่จะทำให้สามารถระบายน้ำผิวดินออกไปจากผิวทางได้ ความลาดเอียงดังกล่าวต้องพอเหมาะไม่น้อยเกินไปจนระบายน้ำได้ไม่ทัน และไม่มากเกินไปจนการสัญจรไม่สะดวกสบายและเสี่ยงต่อการเกิดอันตราย ตารางที่ 9.2.1 แสดงความลาดเอียงด้านข้างที่แนะนำ ของผิวทางและไหล่ทาง ความลาดเอียงด้านข้างขึ้นกับประเภทของผิวทาง โดยทั่วไปความลาดเอียงด้านข้างจะน้อยสำหรับผิวทางซึ่งที่บ้น้ำเช่นผิวทางคอนกรีต และความลาดเอียงด้านข้างจะมากสำหรับผิวทางซึ่งซึมซับน้ำเช่นผิวทางที่เป็นกรวดหรือดิน

ปกติไหล่ทางจะเอียงลาดออกไปจากผิวทาง น้ำที่ตกลงมาจากฟ้าลงบนไหล่ทางจะถูกระบายลงไปยังคูข้างถนนหรือร่องของถนนกลาง ในตารางที่ 9.2.1 ความลาดเอียงที่แนะนำสำหรับไหล่ทางอยู่ระหว่าง 2 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นกับประเภทของผิวและมีคันหินด้วยหรือไม่

ตารางที่ 9.2.1 แสดงความลาดเอียงด้านข้างที่แนะนำ ของผิวทางและไหล่ทาง (FHWA, 1984 อ้างถึงใน Wright, 1996)

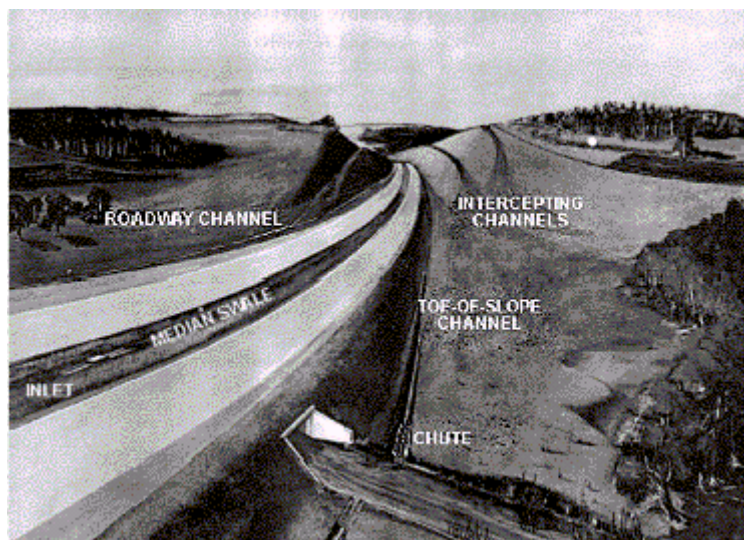
องค์ประกอบของถนน	ช่วงค่าความลาดเอียงด้านข้าง (%)
ผิวทางชั้นสูง	
สองช่องจราจร	1.5 - 2.0
ตั้งแต่สามช่องจราจรในแต่ละทิศทาง	น้อยที่สุด 1.5; เพิ่ม 0.5 - 1.0% ต่อช่องจราจร; สูงสุด 4%
ผิวทางชั้นปานกลาง	1.5 - 3.0
ผิวทางชั้นต่ำ	2.0 - 6.0
ถนนสายหลักในเมือง	1.5 - 3.0; เพิ่ม 1.0% ต่อช่องจราจร
ไหล่ทาง	
ผิวลาดยางหรือคอนกรีต	2.0 - 6.0
มีคันหินด้วย	มากกว่าหรือเท่ากับ 4.0

9.2.2 เียงลาดด้านข้าง (side slope) และคูข้างถนน (side ditch)

โดยทั่วไป จะจัดให้มีคูข้างถนนเป็นแบบช่องเปิดในรูปตัดดินขุดในถนนนอกเมืองสำหรับระบายน้ำผิวดิน คูข้างถนนอาจถูกก่อสร้างไปตามรูปตัดดินถมก็ได้หากจำเป็นเพื่อเสริมคลองระบายน้ำตามธรรมชาติ กั้นคูอาจมีลักษณะแบนหรือเป็นรูปตัววี แต่นิยมลักษณะแบนมากกว่า บริเวณที่เปลี่ยนความลาดเอียงจะถูกกลมมุมเพื่อให้มีทัศนียภาพที่ดีและป้องกันการกัดเซาะ เียงลาดด้านข้างจะถูกทำให้แบนที่สุดที่จะเป็นไปได้ โดยให้สอดคล้องกับความต้องการในการระบายน้ำและข้อจำกัดของเขตทาง ควรหลีกเลี่ยงคูข้างถนนซึ่งแคบและลึกเท่าที่จะเป็นไปได้เนื่องจากลักษณะดังกล่าวเสี่ยงต่อการเกิดอันตราย ถ้าจำเป็นต้องทำเช่นนั้นควรจัดให้มีราวกันไม่ให้รถตกลงไป เกณฑ์ในการติดตั้งราวกันและข้อแนะนำเกี่ยวกับความลาดเอียงของคูได้กล่าวไว้ในบทที่ 6 หัวข้อที่ 6.8.8

โดยทั่วไป น้ำจะไหลในคูข้างถนนในทิศทางขนานกับแนวศูนย์กลางถนน ความชันที่ใช้ในคูแบบเปิดอาจเท่ากับความชันของแนวศูนย์กลางถนนโดยประมาณ ในพื้นที่ราบความชันของคูอาจมีค่า 0.1 ถึง 0.2% ส่วนในพื้นที่ลูกเนินหรือภูเขาความชันสูงสุดจะถูกควบคุมโดยการป้องกันไม่ให้เกิดการกัดเซาะ

คูข้างถนนจัดให้เป็นแบบคลองเปิด (open channel) สำหรับระบายน้ำผิวดินจากพื้นที่ภายในเขตทาง ในบางกรณีพื้นที่ซึ่งอยู่ข้างเคียงกับเขตทางออกไปอาจปล่อยน้ำเข้ามาภายในเขตทางด้วย น้ำดังกล่าวจะต้องถูกนำไปยัง ทางออกของน้ำ (outlet) ไม่ว่าจะเป็นในรูปของคลองที่สร้างขึ้นมาหรือคลองตามธรรมชาติ คูข้างถนนต้องสามารถรองรับการไหลของน้ำไหลผิวดินที่คาดว่าจะเกิดขึ้น โดยไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อโครงสร้างถนนหรือต่อผู้ใช้รถใช้ถนน รูปที่ 9.2.2 แสดงลักษณะการระบายน้ำของถนน



รูปที่ 9.2.2 ลักษณะการระบายน้ำของถนน

9.2.3 การป้องกันการกัดเซาะของไหล่ทางและเชิงลาดด้านข้าง

บ่อยครั้งที่ การไหลของน้ำผิวดินข้างถนนกัดเซาะดินซึ่งเป็นผลให้ดินที่อุดมสมบูรณ์ถูกทำลายไป ทำให้เกิดพื้นที่ซึ่งไม่น่าดู และทำให้คูดินเงินหรืออุดตัน โครงสร้างระบายน้ำ นอกจากนี้การกัดเซาะยังอาจเป็นอันตรายต่อเสถียรภาพของเชิงลาดด้านข้างของคันทางหรือหน้าตัดดินขุด มีมาตรการมากมายที่ถูกออกแบบเพื่อป้องกันหรือลดการกัดเซาะให้น้อยลง

การตัดสินใจใด ๆ เกี่ยวกับการก่อสร้างเพื่อป้องกันการกัดเซาะต่อไหล่ทางและเชิงลาดด้านข้าง ขึ้นกับดุลยพินิจและความเข้าใจเกี่ยวกับสภาพในแต่ละท้องถิ่น ปัจจัยมากมายที่ต้องนำมาพิจารณาประกอบการตัดสินใจ เช่น ความเข้มและช่วงเวลาการตกของฝน ประเภทและสภาพของดิน ขนาดของความลาดชัน สภาพภูมิอากาศ และอื่น ๆ

คันหิน รางดิน และ รางน้ำไหล (Curb, Gutter and Flume)

บางครั้งคันหินและรางดินถูกใช้ที่ขอบของผิวจราจร ในบริเวณที่จอดรถ และบนถนนนอกเมือง เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำที่ไหลจากผิวทางล้นและกัดเซาะไหล่ทางและเชิงลาดด้านข้าง โดยปกติบนถนนในเมืองจะมีคันหินและรางดินเพื่อระบายน้ำและป้องกันคนเดินเท้า คันหินอาจสร้างบนขอบนอกสุดของไหล่ทางเมื่อน้ำมีแนวโน้มจะกัดเซาะเชิงลาดด้านข้าง น้ำที่ไหลรวมกันมาตามคันหินจะถูกปล่อยออกไปยังทางน้ำล้น (spillway) คูซึ่งลาดผิว (paved ditch) หรือ รางน้ำไหล ให้ไหลต่อไปยังคูข้างถนนหรือท่อระบายน้ำเป็นระยะ ๆ

9.3 การออกแบบระบบระบายน้ำบนผิว

การออกแบบระบบระบายน้ำบนผิวในงานถนน อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ การประมาณปริมาณน้ำที่ต้องระบาย การออกแบบทางชลศาสตร์ของระบบ และการเปรียบเทียบระหว่างระบบระบาย วัสดุที่ใช้เพื่อเลือกใช้ระบบระบายซึ่งประหยัดที่สุด

9.3.1 การประมาณปริมาณน้ำที่ต้องระบาย

วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในการประมาณปริมาณน้ำที่ต้องระบายในงานถนน ได้แก่ วิธี Rational Method แต่วิธีนี้ควรใช้สำหรับพื้นที่รับน้ำน้อยกว่า 80 hectares (1 hectare = 10000 m²) มีสมการดังนี้

$$Q = CiA/360 \quad (9.3.1)$$

เมื่อ

Q = ปริมาณน้ำที่ต้องระบาย, m³/s

C = สัมประสิทธิ์ของการไหลป่า (runoff coefficient) ดูตารางที่ 9.3.1

A = พื้นที่รับน้ำ, hectares

i = ความเข้มของฝน, mm/h ขึ้นกับ time of concentration

ตารางที่ 9.3.1 ค่า C สำหรับสภาพต่าง ๆ (FHWA 1997, Introduction to Highway Hydraulics HDS 4, Metric Version)

Type of Surface	Runoff Coefficient (C ¹)
Rural Areas	
Concrete or sheet asphalt pavement	0.8-0.9
Asphalt macadam pavement	0.6-0.8
Gravel roadways or shoulders	0.4-0.6
Bare earth	0.2-0.9
Steep grassed areas (2:1)	0.5-0.7
Turf meadows	0.1-0.4
Forested areas	0.1-0.3
Cultivated fields	0.2-0.4
Urban Areas	
Flat residential, with about 30 percent of area impervious	0.40
Flat residential, with about 60 percent of area impervious	0.55
Moderately steep residential, with about 50 percent of area impervious	0.65
Moderately steep built up area, with about 70 percent of area impervious	0.80
Flat commercial, with about 90 percent of area impervious	0.80
¹ For flat slopes and permeable soil, use the lower values. For steep slopes and impermeable soil, use the higher values.	

Time of Concentration เป็นเวลาที่น้ำป่าบนผิวดินไหลจากจุดไกลสุดของพื้นที่รับน้ำไปยังจุดซึ่งระบาย อาจคำนวณได้จากสมการ Kirpich ดังนี้

$$T_c = \left(\frac{0.87L^2}{1000S} \right)^{0.385} \quad (9.3.2)$$

เมื่อ

T_c = เป็นเวลาที่น้ำป่าบนผิวดินไหลจากจุดไกลสุดของพื้นที่รับน้ำไปยังจุดซึ่งระบาย, hr

L = ความยาวของทางน้ำไหลหลักจากจุดไกลสุดถึงจุดระบาย, km

S = ความชันเฉลี่ยของทางน้ำไหลหลัก

หรือ อาจคำนวณจากสมการ kinematic wave theory ดังนี้

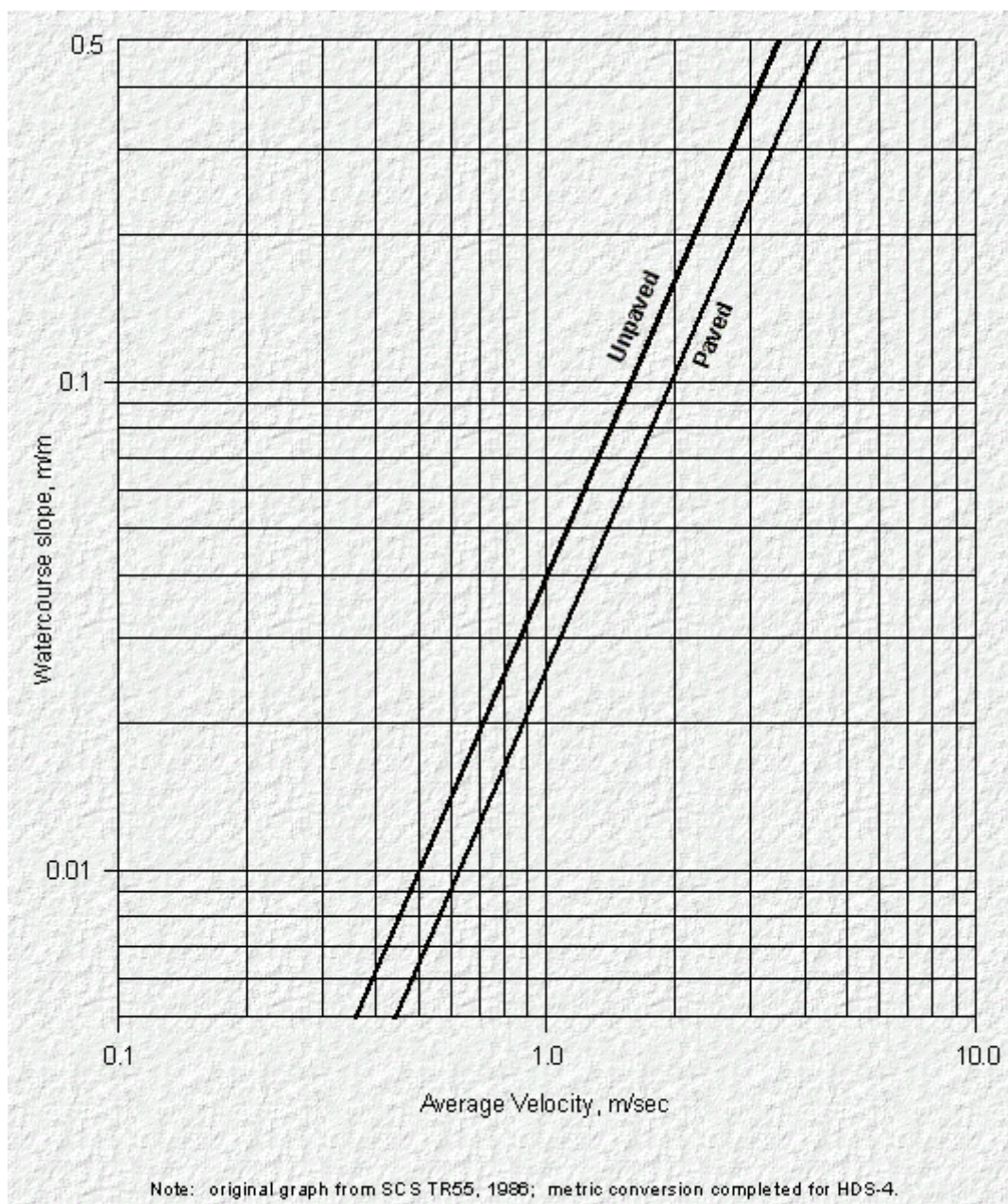
$$t = K \frac{n^{0.6} L^{0.6}}{i^{0.4} S^{0.3}}$$

(9.3.3)

เมื่อ

- t = เวลา, min
 K = 6.99
 n = Manning's roughness
 L = ความยาว, m
 i = ความเข้มของฝน, mm/h
 S = ความชัน

สำหรับความเร็วในการไหลในกรณีที่เข้มและตื้น (shallow concentrated flow) สำหรับใช้ประมาณเวลาในการไหล หาได้จากรูปที่ 9.3.1



รูปที่ 9.3.1 ความเร็วในการไหลสำหรับการไหลที่เต็มและตื้น

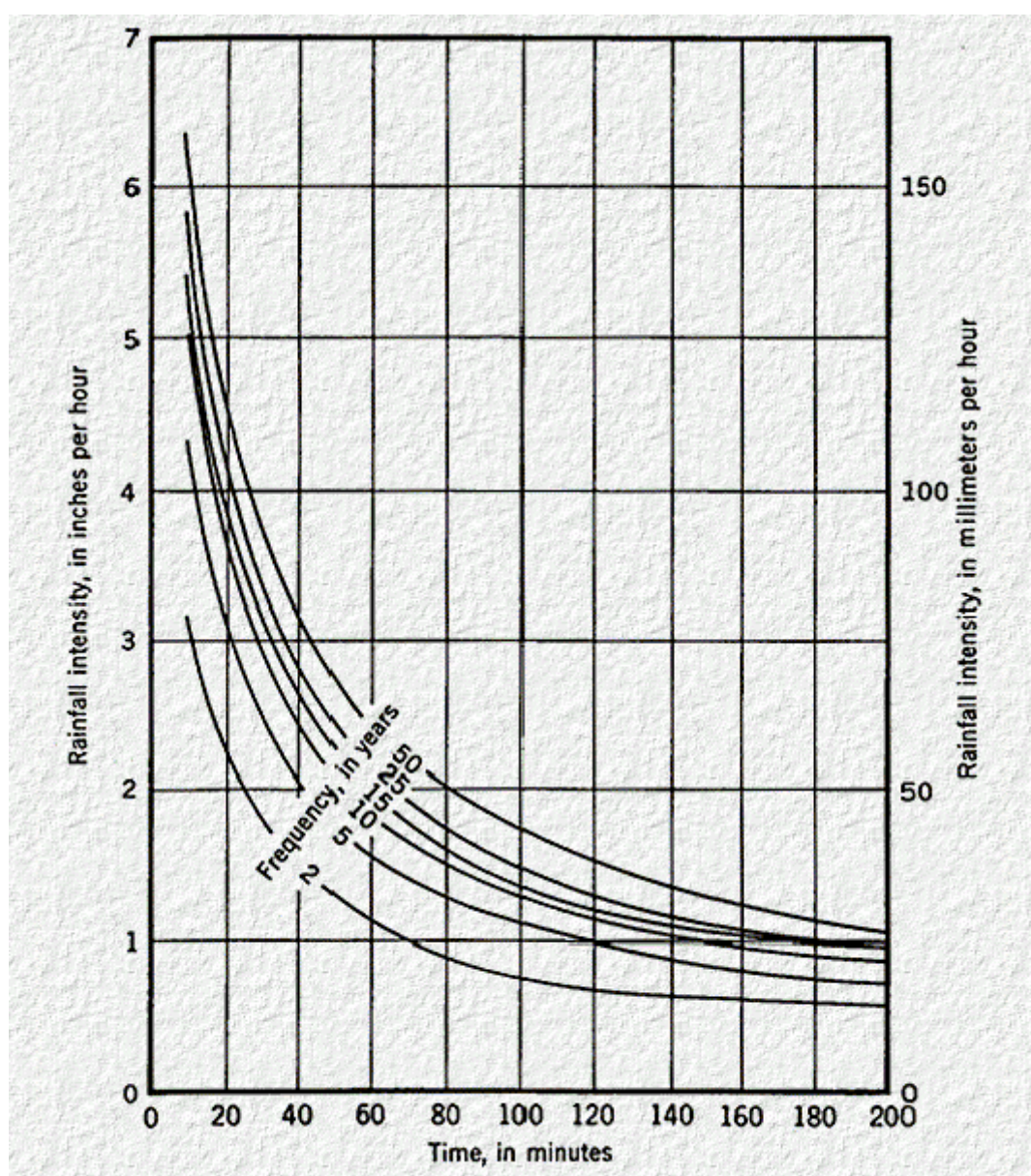
ความเข้มของฝน

ปกติฝนซึ่งมีช่วงเวลาดกนานจะมีความเข้มน้อย ส่วนฝนซึ่งมีช่วงเวลาดกสั้นจะมีความเข้มมาก รูปที่ 9.3.2 แสดงลักษณะความเข้มของฝนโดยทั่วไป ความเข้มของฝนในแต่ละท้องถิ่นไม่เหมือนกัน ในการออกแบบสำหรับแต่ละท้องถิ่นต้องใช้ความเข้มของฝนสำหรับแต่ละท้องถิ่นนั้น

คาบฝนสำหรับออกแบบ (design flood recurrence intervals)

ตารางที่ 9.3.2 แสดงค่าแนะนำของคาบฝนสำหรับออกแบบ

ประเภทชั้นของถนน	คาบฝนสำหรับออกแบบ, ปี
ทางด่วน	100
ถนนสายหลัก	50
ถนนสายรอง	50
ถนนท้องถิ่น	25

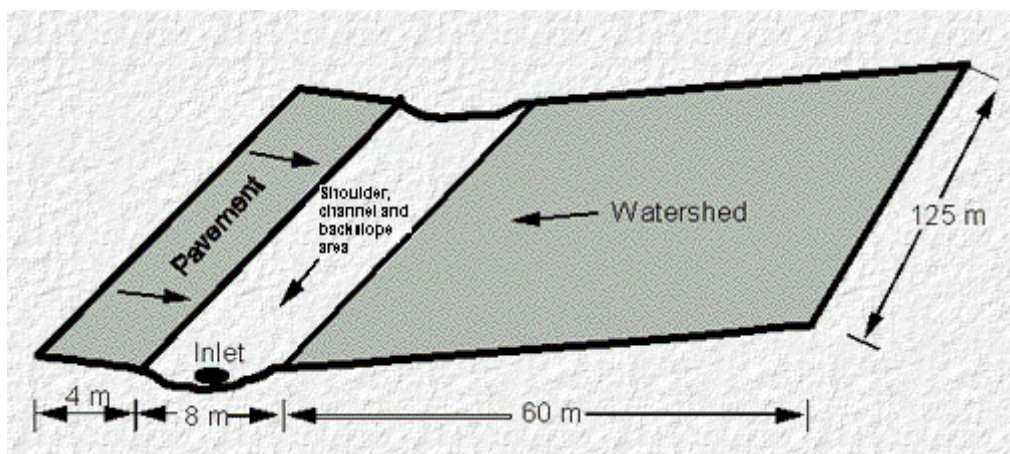


รูปที่ 9.3.2 ลักษณะความเข้มของฝนโดยทั่วไป

ตัวอย่างที่ 9.3.1 การคำนวณหาค่า C เฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก

กำหนดให้ คูข้างถนน มีพื้นที่รับน้ำดังรูป ประกอบด้วยผิวถนนคอนกรีตกว้าง 4 m ไหล่ทางและคู
ผิวเป็นกรวดกว้าง 8 m และพื้นที่ป่ากว้าง 60 m ความยาวของพื้นที่ 125 m

ให้หาค่า C



วิธีทำ

ชนิดของผิว	ค่า C	พื้นที่, A	CA
ผิวคอนกรีต	0.9	0.05	0.045
ไหล่ทางและคู	0.5	0.10	0.050
ป่า	0.3	0.75	0.225
รวม		0.90	0.320
ค่า C เฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก = $0.32/0.9 =$			0.36

ตัวอย่างที่ 9.3.2 การคำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องระบาย

จากพื้นที่ในตัวอย่างที่ 9.3.1 ค่า C เฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก 0.36 คูยาว 125 m ความชัน 0.5%

ให้หา ปริมาณน้ำที่ต้องระบาย สำหรับคาบฝน 10 ปี เมื่อจุดระบายน้ำออกไปอยู่ที่ปลายต่ำสุดของคู

วิธีทำ

หาเวลาในการไหลจากสมการ (9.3.3) จากระยะทางของพื้นที่ป่า 60 m เลือกใช้ค่า $n = 0.50$ และ $S = 0.005$ สมมติให้ความเข้มของฝน 55 mm/h จะได้

$$t = 6.99 \frac{(0.5)^{0.6} (60)^{0.6}}{(55)^{0.4} (0.005)^{0.3}} = 53 \text{ min}$$

จากรูปที่ 9.3.2 ความเข้มของฝนสำหรับช่วงเวลา 53 นาทีและคาบฝน 10 ปี ประมาณ 50 mm/h ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่สมมติในตอนแรก (55 mm/h) ดังนั้นใช้ได้

สำหรับคูยาว 125 m หาเวลาในการไหลจากความเร็วเฉลี่ยและระยะทาง จากรูปที่ 9.3.1 ความเร็วเฉลี่ย สำหรับผิวที่ไม่ได้ลาด (unpaved) ในการไหลที่เต็มและตื้นเมื่อความชัน 0.005 ประมาณ 0.35 m/s ดังนั้นสำหรับคูยาว 125 m ต้องใช้เวลาในการไหล $(125 \text{ m}) / (0.35 \text{ m/s}) = 357 \text{ s} = 6 \text{ min}$

เวลาในการไหลทั้งหมด $t_c = 6 + 53 = 59$ นาที จากลักษณะความเข้มของฝนในรูปที่ 9.3.2 สำหรับคาบฝน 10 ปี ความเข้มของฝน 59 min จะให้ความเข้มของฝนประมาณ 47 mm/h

คำนวณของปริมาณน้ำที่ต้องระบาย ได้ดังนี้

$$Q = \frac{0.36 \times 47 \times 0.9}{360} = 0.04 \text{ m}^3 / \text{s}$$

9.4 การออกแบบคูข้างถนนและคลองเปิด

สมการที่ใช้ออกแบบสำหรับการไหลแบบคลองเปิด ได้แก่สมการของแมนนิง (Manning's Formula) ดังนี้

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

(9.4.1)

เมื่อ

V = ความเร็วเฉลี่ย, m/s

R = hydraulic radius, $m = A/P$

A = พื้นที่หน้าตัด, m^2

P = ความยาวเส้นขอบเปียก (wetted perimeter), m

S = ความชันของคลอง

n = Manning's roughness coefficient ดูค่าในตารางที่ 9.4.1

นอกจากนี้ยังใช้สมการความต่อเนื่อง (equation of continuity) ดังนี้

$$Q = VA \quad (9.4.2)$$

เมื่อ

Q = ปริมาณการไหล, m^3/s

จากสมการ (9.4.1) และ (9.4.2) จะได้

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2}$$

(9.4.3)

หรือ

$$Q = K S^{1/2}$$

(9.4.4)

เมื่อ

$$K = \frac{1}{n} A R^{2/3}$$

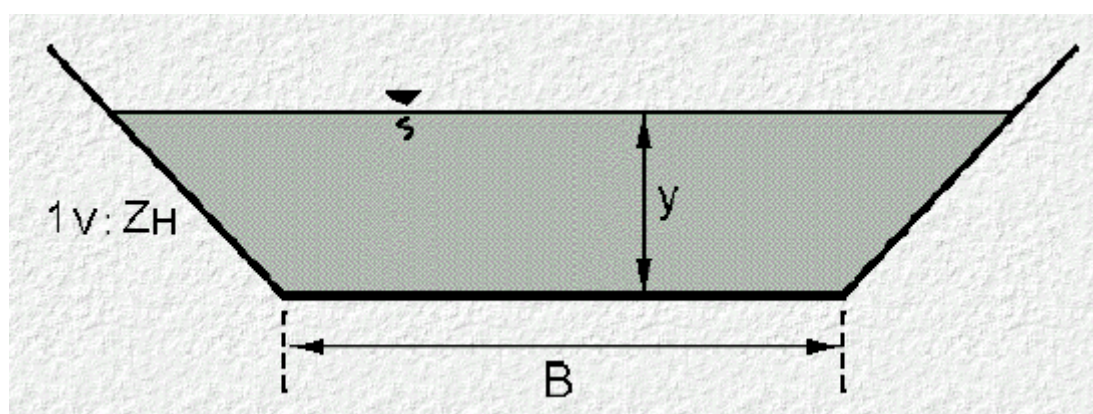
(9.4.5)

ตารางที่ 9.4.1 Manning's roughness coefficient, n

Rigid Boundary Channels	Manning's n
Very smooth concrete and planed timber	0.011
Smooth concrete	0.012
Ordinary concrete lining	0.013
Wood	0.014
Vitrified clay	0.015
Shot concrete, untroweled, and earth channels in best condition	0.017
Straight unlined earth canals in good condition	0.020
Mountain streams with rocky beds	0.040-0.050
MINOR STREAMS (top width at flood stage < 30 m)	
Streams on Plain	
1.Clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0.025-0.033
2.Same as above, but more stones and weeds	0.030-0.040
3.Clean, winding, some pools and shoals	0.033-0.045
4.Same as above, but some weeds and stones	0.035-0.050
5.Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040-0.055
6.Same as 4, but more stones	0.045-0.060
7.Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050-0.080
8.Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0.075-0.150
Mountain Streams, no Vegetation in Channel, Banks Usually Steep, Trees and Brush Along Banks Submerged at High Stages	
1.Bottom: gavels, cobbles and few boulders	0.030-0.050
2.Bottom: cobbles with large boulders	0.040-0.070
Floodplains	
Pasture, No Brush	
1.Short Grass	0.025-0.035
2.High Grass	0.030-0.050
Cultivated Areas	
1.No Crop	0.020-0.040
2.Mature Row Crops	0.025-0.045
3.Mature Field Crops	0.030-0.050
Brush	
1.Scattered brush, heavy weeds	0.035-0.070
2.Light brush and trees in winter	0.035-0.060
3.Light brush and trees in summer	0.040-0.080
4.Medium to dense brush in winter	0.045-0.110
5.Medium to dense brush in summer	0.070-0.160

Rigid Boundary Channels		Manning's n
Trees		
1.Dense willows, summer, straight		0.110-0.200
2.Cleared land with tree stumps, no sprouts		0.030-0.050
3.Same as above, but with heavy growth of sprouts		0.050-0.080
4.Heavy stand of timber, a few down trees, little undergrowth, flood stage below branches		0.080-0.120
5.Same as above, but with flood stage reaching branches		0.100-0.160
MAJOR STREAMS (Topwidth at flood stage > 30 m)		
The n value is less than that for minor streams of similar description, because banks offer less effective resistance.		
Regular section with no boulders or brush		0.025-0.060
Irregular and rough section		0.035-0.100
Alluvial Sand-bed Channels (no vegetation)		
Tranquil flow, $Fr < 1$		
Plane bed		0.014-0.020
Ripples		0.018-0.030
Dunes		0.020-0.040
Washed out dunes or transition		0.014-0.025
Plane bed		0.010-0.013
Rapid Flow, $Fr > 1$		
Standing waves		0.010-0.015
Antidunes		0.012-0.020
Overland Flow and Sheet Flow		
Smooth asphalt		0.011
Smooth concrete		0.012
Cement rubble surface		0.024
Natural range		0.13
Dense grass		0.24
Bermuda grass		0.41
Light underbrush		0.40
Heavy underbrush		0.80

พิจารณาคลองเปิดในรูปที่ 9.4.1 ซึ่งมีก้นคลองกว้าง B ความลึกของน้ำ y และ ความลาดเอียงด้านข้าง ตั้ง 1 ส่วน ต่อ นอน Z ส่วน (1:Z)



รูปที่ 9.4.1 คลองเปิดทั่วไป

จะได้

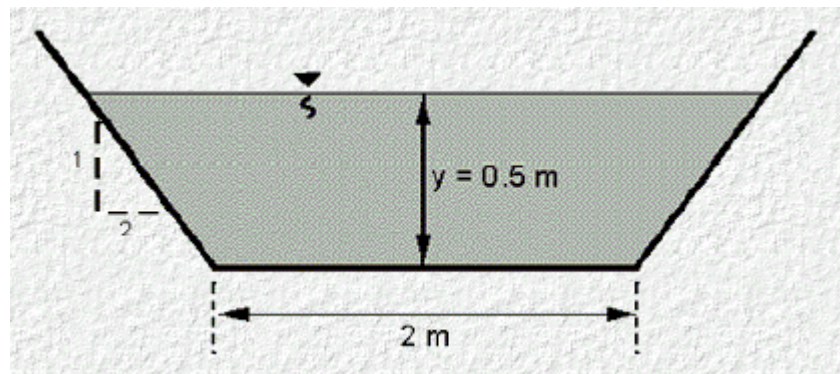
$$A = By + Zy^2 \quad (9.4.6)$$

$$P = B + 2y\sqrt{1 + Z^2} \quad (9.4.7)$$

$$R = \frac{By + Zy^2}{B + 2y\sqrt{1 + Z^2}} \quad (9.4.8)$$

ตัวอย่างที่ 9.4.1

กำหนดให้คลองดินดังรูป มี $B = 2$ m, ความลาดเอียงด้านข้าง 1:2, $S = 0.003$ ความลึกปกติ $y = 0.5$ m ค่า $n = 0.02$ ให้หาความเร็ว V และ ปริมาณการไหล Q



วิธีทำ

จาก

$$R = \frac{By + Zy^2}{B + 2y\sqrt{1 + Z^2}}$$

ได้

$$R = \frac{2(0.5) + 2(0.5)^2}{2 + 2(0.5)\sqrt{1 + 2^2}} = \frac{1.50}{4.24} = 0.35$$

จาก

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

ได้

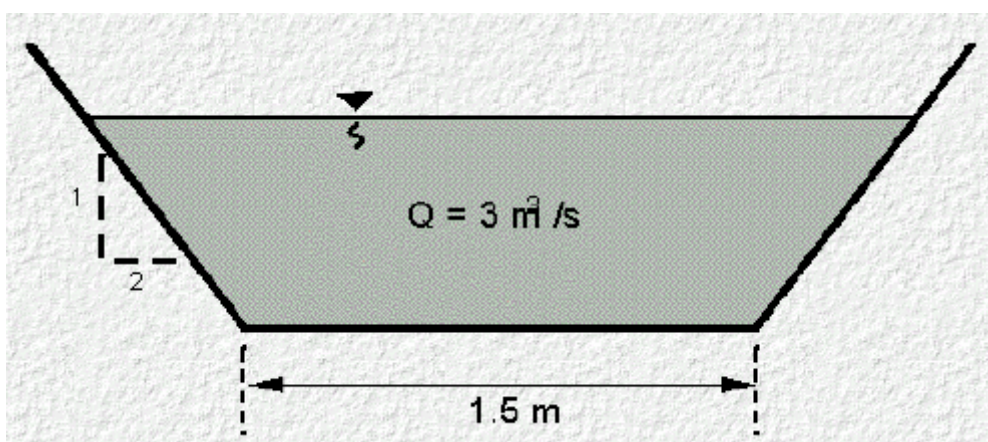
$$V = \frac{1}{0.02} (0.35)^{2/3} (0.003)^{1/2} = 1.36 \text{ m/s}$$

และ

$$Q = AV = (2(0.5) + 2(0.5)^2) 1.36 = 2.0 \text{ m}^3/\text{s}$$

ตัวอย่างที่ 9.4.2

กำหนดให้คลองคอนกรีตดังรูป มี $B = 1.5 \text{ m}$, ความลาดเอียงด้านข้าง 1:2, $S = 0.013$ มีปริมาณการไหล $Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}$ ให้หาความลึกปกติ y และความเร็ว V



วิธีทำ

จากสมการของแมนนิง

$$Q = AV = A \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

จัดรูปใหม่เป็น

$$\frac{Qn}{S^{1/2}} = AR^{2/3}$$

คำนวณหาค่า $\frac{Qn}{S^{1/2}} = \frac{3 \times 0.013}{0.002^{1/2}} = 0.872$

ค่า A และ R จะเป็นดังนี้

$$A = By + Zy^2 = 1.5y + 2y^2$$

$$R = \frac{By + Zy^2}{B + 2y\sqrt{1 + Z^2}} = \frac{1.5y + 2y^2}{1.5 + 4.47y}$$

ได้ $AR^{2/3}$ เป็นดังนี้

$$AR^{2/3} = (1.5y + 2y^2) \left(\frac{1.5y + 2y^2}{1.5 + 4.47y} \right)^{2/3}$$

ซึ่งต้องเท่ากับ $\frac{Qn}{S^{1/2}} = 0.872$ ดังนั้น

$$(1.5y + 2y^2) \left(\frac{1.5y + 2y^2}{1.5 + 4.47y} \right)^{2/3} = 0.872$$

ลองค่าเพื่อหาค่า y ได้

$$y = 0.6 \text{ m}$$

แทนค่าลงในสมการความต่อเนื่อง เพื่อหาความเร็ว ($V = Q/A$) ได้

$$V = \frac{3}{(0.9 + 0.72)} = 1.35 \text{ m/s}$$

รูปที่ 9.4.2 แสดงการใช้ Microsoft Excel ในการแก้ปัญหาดังอย่างที่ 9.4.2

รูปที่ 9.4.3 แสดงสูตรที่ใช้ใน Microsoft Excel ในการแก้ปัญหาดังอย่างที่ 9.4.2

รูปที่ 9.4.4 แสดงขั้นตอนการใช้ Solver ใน Microsoft Excel ในการลองค่าเพื่อหาค่า y

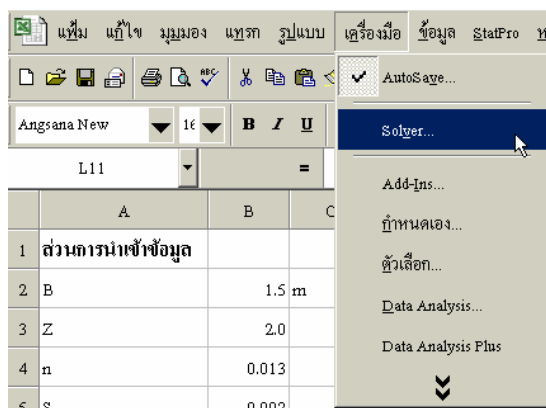
รูปที่ 9.4.5 แสดงผลที่ได้ในการแก้ปัญหาดังอย่างที่ 9.4.2

	A	B	C	D	E	F
1	ส่วนการนำเข้าข้อมูล					
2	B	1.5 m				
3	Z	2.0				
4	n	0.013				
5	S	0.002				
6	Q	3 m ³ /s				
7	ส่วนการคำนวณ					
8	y	2 m	<-----	สมมติค่าลงไปก่อน		
9	A	11				
10	R	1.053209				
11	AR ^{2/3}	11.38682				
12	Qn/S ^{1/2}	0.872067				
13	AR ^{2/3} หาค่าด้วย Qn/S ^{1/2}	13.05728	<-----	(ค่านี้ต้องเท่ากับ 1)		

รูปที่ 9.4.2 การใช้ Microsoft Excel ในการแก้ปัญหาตัวอย่างที่ 9.4.2

	A	B
1	ส่วนการนำเข้าข้อมูล	
2	B	1.5
3	Z	2
4	n	0.013
5	S	0.002
6	Q	3
7	ส่วนการคำนวณ	
8	y	2
9	A	=B2*B8+B3*B8^2
10	R	=(B2*B8+B3*B8^2)/(B2+2*B8*SQRT(1+B3^2))
11	AR ^{2/3}	=B9*(B10^(2/3))
12	Qn/S ^{1/2}	=B6*B4/(B5^0.5)
13	AR ^{2/3} หาค่าด้วย Qn/S ^{1/2}	=B11/B12

รูปที่ 9.4.3 สูตรที่ใช้ใน Microsoft Excel ในการแก้ปัญหาตัวอย่างที่ 9.4.2



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	ส่วนการนำเข้าข้อมูล									
2	B	1.5 m								
3	Z	2.0								
4	n	0.013								
5	S	0.002								
6	Q	3 m ³ /s								
7	ส่วนการคำนวณ									
8	y	2 m								
9	A	11								
10	R	1.053209								
11	AR ^{2/3}	11.38682								
12	Qn/S ^{1/2}	0.872067								
13	AR ^{2/3} หารด้วยQn/S ^{1/2}	13.05728								

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	ส่วนการนำเข้าข้อมูล									
2	B	1.5 m								
3	Z	2.0								
4	n	0.013								
5	S	0.002								
6	Q	3 m ³ /s								
7	ส่วนการคำนวณ									
8	y	0.603991 m								
9	A	1.635596								
10	R	0.389323								
11	AR ^{2/3}	0.872066								
12	Qn/S ^{1/2}	0.872067								
13	AR ^{2/3} หารด้วยQn/S ^{1/2}	0.999999								

รูปที่ 9.4.4 ขั้นตอนการใช้ Solver ใน Microsoft Excel ในการลองค่าเพื่อหาค่า y

	A	B	C	D	E	F
1	ส่วนการนำเข้าข้อมูล					
2	B	1.5 m				
3	Z	2.0				
4	n	0.013				
5	S	0.002				
6	Q	3 m ³ /s				
7	ส่วนการคำนวณ					
8	y	0.603991 m		<-----	สมมติค่าลงไปก่อน	
9	A	1.635596				
10	R	0.389323				
11	AR ^{2/3}	0.872066				
12	Qn/S ^{1/2}	0.872067				
13	AR ^{2/3} หารด้วย Qn/S ^{1/2}	0.999999		<-----	(ค่านี้ต้องเท่ากับ 1)	

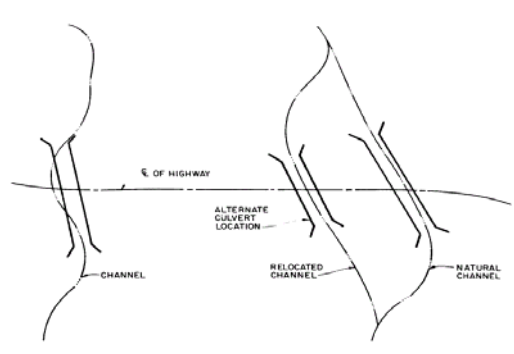
รูปที่ 9.4.5 แสดงผลที่ได้ในการแก้ปัญหาตัวอย่างที่ 9.4.2

9.5 การออกแบบท่อลอด (Culvert Design)

เมื่อแนวนนตัดขวางทางน้ำจำเป็นต้องใส่ท่อลอดหรือสร้างสะพาน เพื่อให้น้ำยังคงสามารถไหลผ่านไปได้ โดยทั่วไปทางความกว้างของโครงสร้างน้อยกว่า 6 m จะพิจารณาใช้เป็นท่อลอด ถ้าความกว้างของโครงสร้างมากกว่า 6 m จะพิจารณาใช้เป็นสะพาน

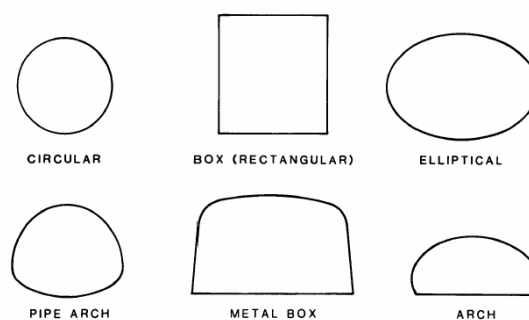
ควรศึกษาคู่มือออกแบบท่อลอดจากเอกสาร FHWA, 2001 “Hydraulic Design of Highway Culverts”, HDS 5

แนวของท่อลอด แนวของท่อลอดควรสอดคล้องกับแนวทางน้ำตามธรรมชาติ จากรูปที่ 9.5.1 และความชันของท่อลอดควรสอดคล้องกับความชันของทางน้ำ ความชันของท่อลอดไม่ควรน้อยกว่า 1% เพื่อไม่ให้เกิดการตกตะกอน



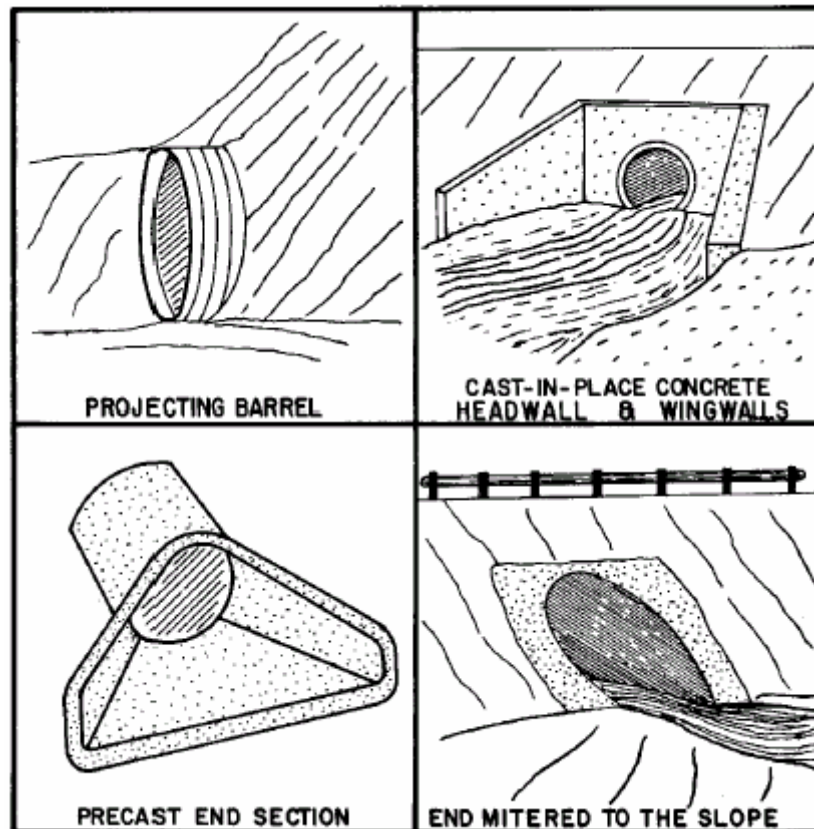
รูปที่ 9.5.1 แนวของท่อลอดควรสอดคล้องกับแนวทางน้ำตามธรรมชาติ

รูปตัดของท่อลอด รูปที่ 9.5.2 แสดงรูปตัดโดยทั่วไปของท่อลอด



รูปที่ 9.5.2 รูปตัดโดยทั่วไปของท่อลอด

ประเภทของทางเข้า สำหรับท่อลอดซึ่งมีการไหลภายใต้การควบคุมที่ทางเข้า (inlet control) ความจุของท่อลอดจะมีผลจากรูปแบบของทางเข้าของท่อลอด กำแพงปีก (wingwalls) และการผายขยาย (tapering) บริเวณทางเข้าจะช่วยเพิ่มความจุของท่อลอด รูปที่ 9.5.3 แสดงประเภทของทางเข้าแบบต่าง ๆ



รูปที่ 9.5.3 ประเภทของทางเข้าแบบต่าง ๆ

นิยามที่เกี่ยวข้อง ก่อนที่จะกล่าวถึงวิธีการหาขนาดของท่อลอด จำเป็นต้องทราบนิยามดังต่อไปนี้

คือ

- ความลึกของ headwater
- ความลึกของ tailwater
- ความเร็วที่ทางออก (outlet velocity)
- การไหลผ่านท่อลอดภายใต้การควบคุมที่ทางเข้า (inlet control)
- การไหลผ่านท่อลอดภายใต้การควบคุมที่ทางออก (outlet control)

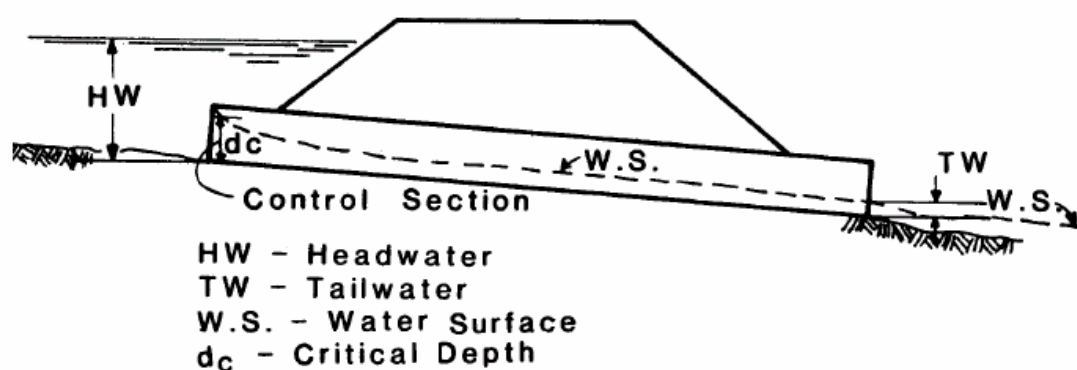
Headwater โดยทั่วไปพื้นที่รูปตัดของท่อลอดจะน้อยกว่าช่องเปิดของทางน้ำเดิม ซึ่งจะทำให้ระดับ (elevation) น้ำด้านต้นน้ำสูงขึ้นจากเดิม ระดับน้ำที่ปากทางเข้าของท่อลอดนี้เรียกว่า **headwater** ความลึกของน้ำที่ปากทางเข้าวัดจากท้องของท่อลอด (culvert invert) เรียกว่า **ความลึกของ headwater (HW)** ดังแสดงในรูปที่ 9.5.4

headwater ไม่ควรสูงเกินไป เพราะอาจจะทำให้ท่อลอดและถนนเสียหาย นอกจากนี้ยังอาจทำให้ชีวิตและทรัพย์สินด้านต้นน้ำเสียหาย headwater ควรต่ำกว่าระดับของขอบไหล่ทางไม่น้อย 0.5 m ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลแนะนำให้อัตราส่วนความลึกของ headwater ต่อความสูงของท่อลอด (HW/D) เท่ากับ 1.2

ความลึกของ headwater ขึ้นกับปริมาณการไหลของน้ำ ขนาดของท่อลอด และรูปแบบของทางเข้า

Tailwater เป็นระดับน้ำด้านท้ายน้ำ ส่วนความลึกของน้ำที่ปากทางออกวัดจากท้องของท่อลอด เรียกว่า **ความลึกของ tailwater (TW)** ดังแสดงในรูปที่ 9.5.4 ถ้าความลึกของ tailwater ท่วมปากทางออกอาจทำให้น้ำไหลเต็มท่อ แทนที่จะไหลแบบไม่เต็มท่อ

ประมาณความลึกของ TW ได้จากสมการของแมนนิ่งถ้าคลองด้านปลายทางออกมีรูปตัด ความชัน และความขรุขระค่อนข้างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามความลึกของ TW ในช่วงน้ำบ่าบางครั้งจะถูกควบคุมด้วยสิ่งกีดขวางด้านท้ายน้ำหรือระดับน้ำในทางน้ำอื่น



รูปที่ 9.5.4 การไหลภายใต้การควบคุมที่ทางเข้า

ความเร็วที่ทางออก เป็นความเร็วที่ปลายทางออกของท่อลอด ปกติจะมีค่ามากกว่าความเร็วสูงสุดของทางน้ำตามธรรมชาติ ซึ่งอาจจะทำให้ท้องทางน้ำและตลิ่งบริเวณทางออกถูกกัดเซาะ

9.6 ขั้นตอนการออกแบบท่อลอด

ขั้นตอนการออกแบบท่อลอด อาจแบ่งได้เป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

1. เก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ออกแบบ
 - ก. ปริมาณการไหลของน้ำ, m^3/s
 - ข. ความยาวของท่อลอด, m
 - ค. ความชันของท่อลอด
 - ง. ความลึกของ HW ที่ยอมให้, m
 - จ. ความเร็วเฉลี่ยและสูงสุดของการไหลในลำน้ำธรรมชาติ, m/s
 - ฉ. ประเภทของท่อลอด ได้แก่ วัสดุที่ใช้ทำท่อลอด ลักษณะของรูปตัดและทางเข้า
2. เลือกขนาดของท่อลอด
3. หาความลึกของ HW สำหรับขนาดของท่อลอดที่เลือก
 - ก. สมมติให้เป็นการไหลแบบควบคุมที่ทางเข้า แล้วหาความลึกของ HW โดยใช้แผนภาพ ที่เหมาะสม รูปที่ 9.6.1 แสดงแผนภาพสำหรับหาความลึกของ HW ภายใต้การไหลแบบควบคุมที่ทางเข้าสำหรับท่อคอนกรีตกลม ส่วนรูปที่ 9.6.2 แสดงแผนภาพสำหรับหาความลึกของ HW ภายใต้การไหลแบบควบคุมที่ทางเข้าสำหรับท่อเหลี่ยม ถ้าความลึกของ HW เกินค่าที่ยอมให้ ให้เลือกขนาดของท่อลอดใหม่จนกระทั่งได้ความลึกของ HW ไม่เกินค่าที่ยอมให้
 - ข. สมมติให้เป็นการไหลแบบควบคุมที่ทางออก ประมาณความลึกของ TW ในกรณีที่ระดับของ TW มากกว่าหรือเท่ากับระดับหลังท่อ ใช้ $h_o = TW$ แล้วหาความลึกของ HW จากสมการ

$$HW = H + h_o - LS_o$$

เมื่อ

H = head loss, m หาได้จากแผนภาพที่เหมาะสม รูปที่ 9.6.3 แสดงแผนภาพสำหรับหา H ภายใต้การไหลแบบควบคุมที่ทางออกสำหรับท่อคอนกรีตกลม รูปที่ 9.6.4 แสดงแผนภาพสำหรับหา H ภายใต้การไหลแบบควบคุมที่ทางออกสำหรับท่อเหลี่ยม

h_o = ระยะในแนวตั้งจากท้องท่อที่ปลายทางออกถึง hydraulic grade line, m (ในกรณีนี้ $h_o = TW$)

S_o = ความชันของท่อลอด

L = ความยาวของท่อลอด, m

ในกรณีที่ระดับของ TW น้อยกว่าหรือเท่ากับระดับหลังท่อ หาความลึกของ HW ได้ในทำนองเดียวกับข้างต้น ยกเว้นใช้

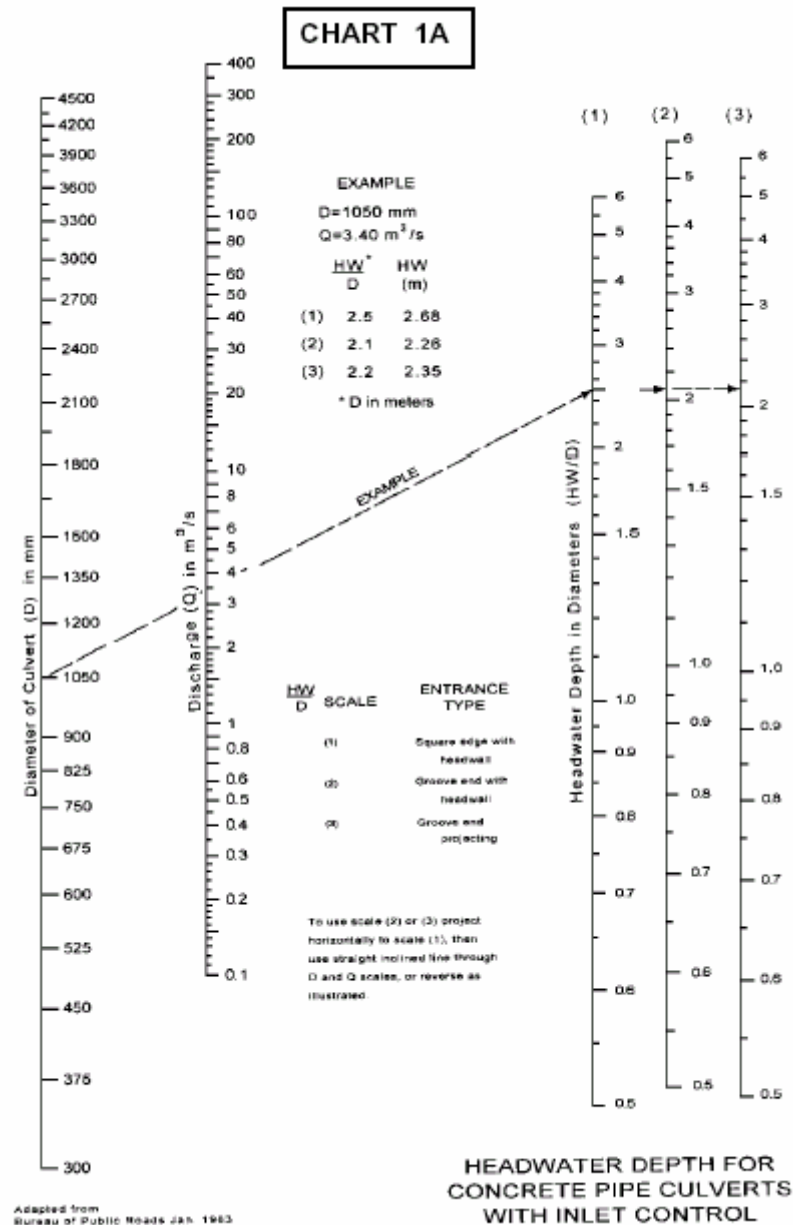
$$h_o = \frac{d_c + D}{2}$$

หรือ $h_o = TW$ โดยเลือกใช้ค่าที่มากกว่า
เมื่อ

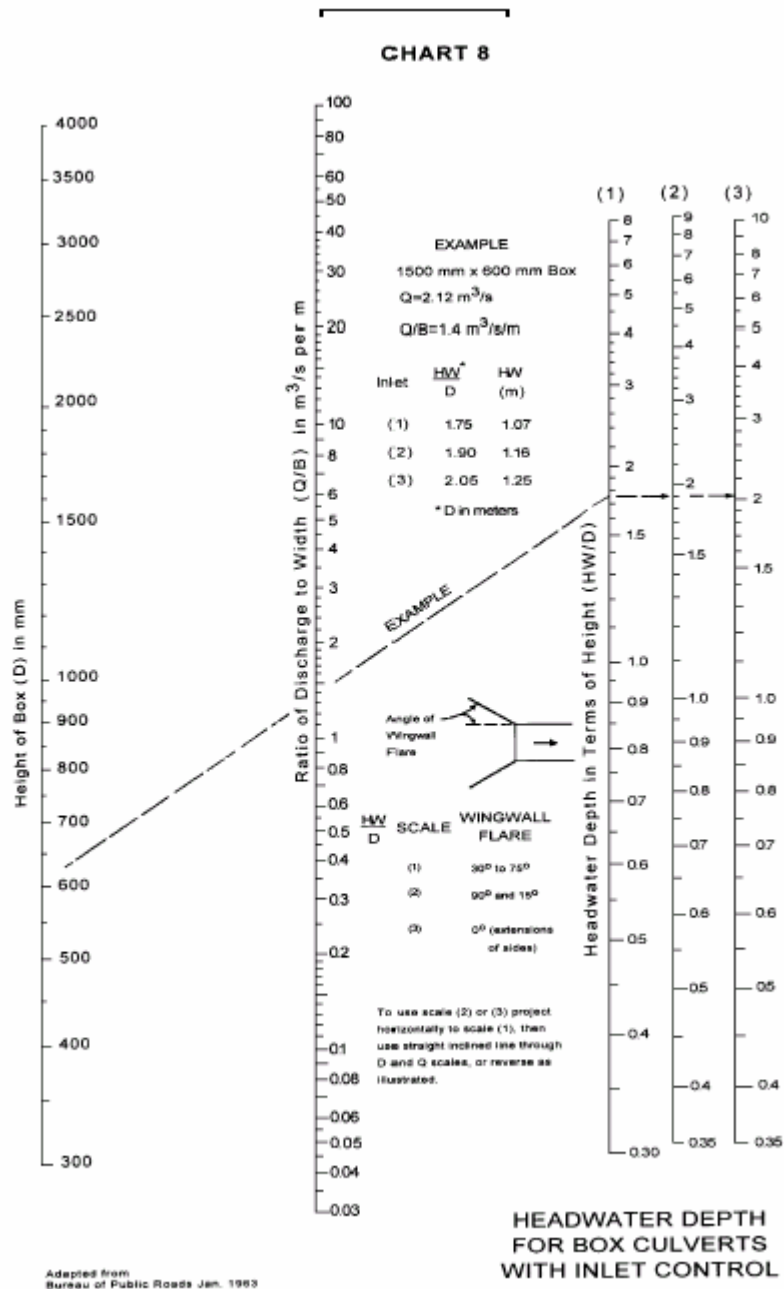
d_c = ความลึกวิกฤต, m หาได้จากรูปที่ 9.6.5 และ 9.6.6 สำหรับท่อกลมและท่อเหลี่ยมตามลำดับ

D = ความสูงของท่อ, m

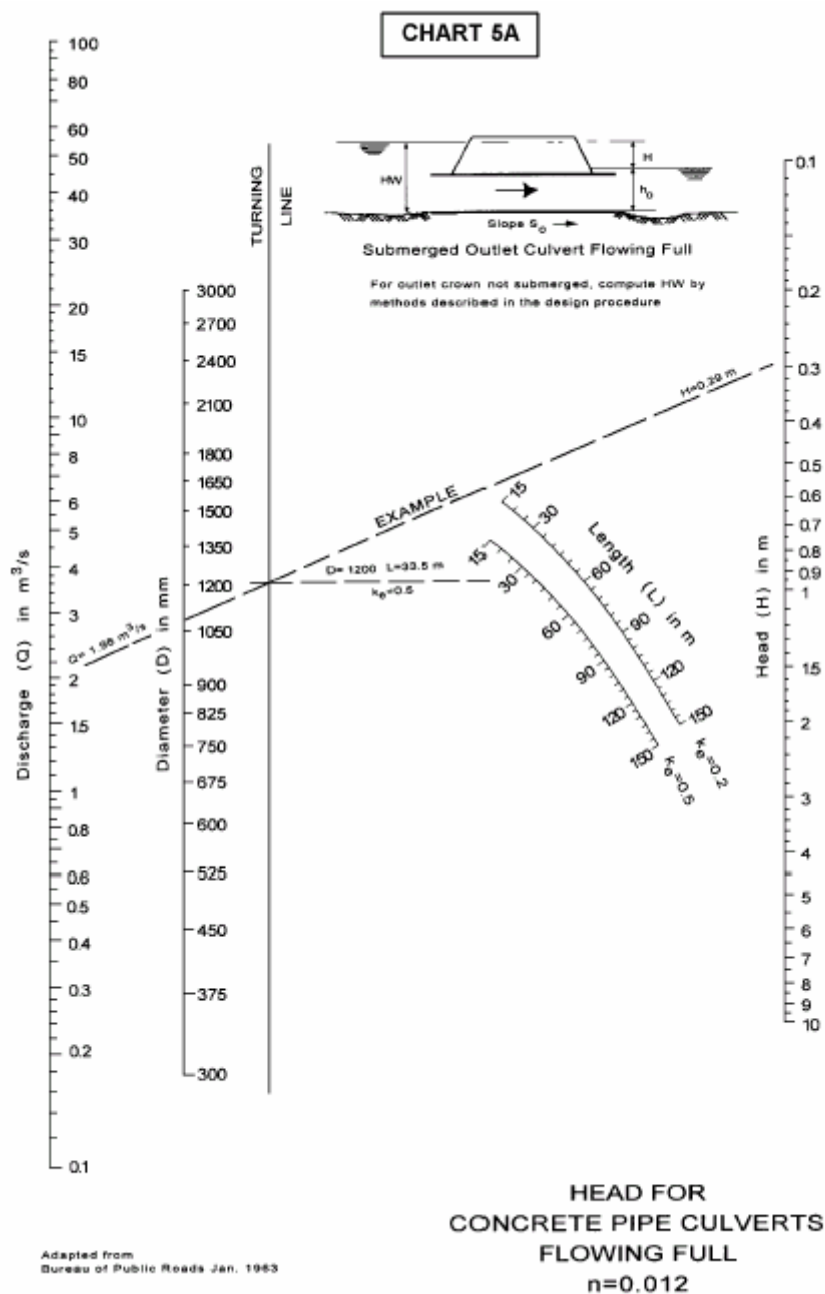
- ค. เปรียบเทียบค่าความลึกของ HW จากข้อ (ก) การควบคุมที่ทางเข้า และข้อ (ข) การควบคุมที่ทางออก ค่าความลึกที่มากกว่าแสดงว่าการไหลถูกควบคุมภายใต้กรณีดังกล่าว
- ง. ถ้าเป็นการไหลแบบถูกควบคุมที่ทางออก และพบว่า HW สูงกว่าค่าที่ยอมให้ ให้เลือกขนาดของท่อลอดใหม่ให้โตขึ้น แล้วหาค่า HW สำหรับกรณีการควบคุมที่ทางออกใหม่
4. ลองเลือกท่อลอดชนิดหรือรูปแบบอื่น แล้วหาขนาดของท่อลอด และ HW ใหม่
5. คำนวณหาความเร็วที่ทางออกสำหรับท่อลอดขนาดและรูปแบบที่พิจารณา เพื่อหาว่าต้องทำการป้องกันการกัดเซาะทางน้ำหรือไม่
 - ก. ถ้ากรณีการไหลเป็นแบบควบคุมที่ทางเข้า สามารถสมมติให้ความเร็วที่ทางออกเท่ากับความเร็วเฉลี่ยของการไหลแบบคลองเปิดในท่อลอดด้วยสมการของแมนนิง จาก อัตราการไหล พื้นที่รูปตัด ความขรุขระ และความชันของท่อลอด
 - ข. ถ้ากรณีการไหลเป็นแบบควบคุมที่ทางออก ความเร็วที่ทางออกจะเท่ากับ Q/A_o เมื่อ Q เป็นอัตราการไหล และ A_o เป็นพื้นที่หน้าตัดของการไหลในท่อที่ปลายทางออก ถ้า d_c หรือ TW น้อยกว่าความสูงของท่อ ให้คำนวณหา A_o จาก d_c หรือ TW โดยเลือกใช้ค่าที่มากกว่า ค่า A_o ไม่ควรมากกว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อลอด
6. บันทึกประเภทและขนาดของท่อลอดที่เลือก ค่า HW และความเร็วที่ทางออก



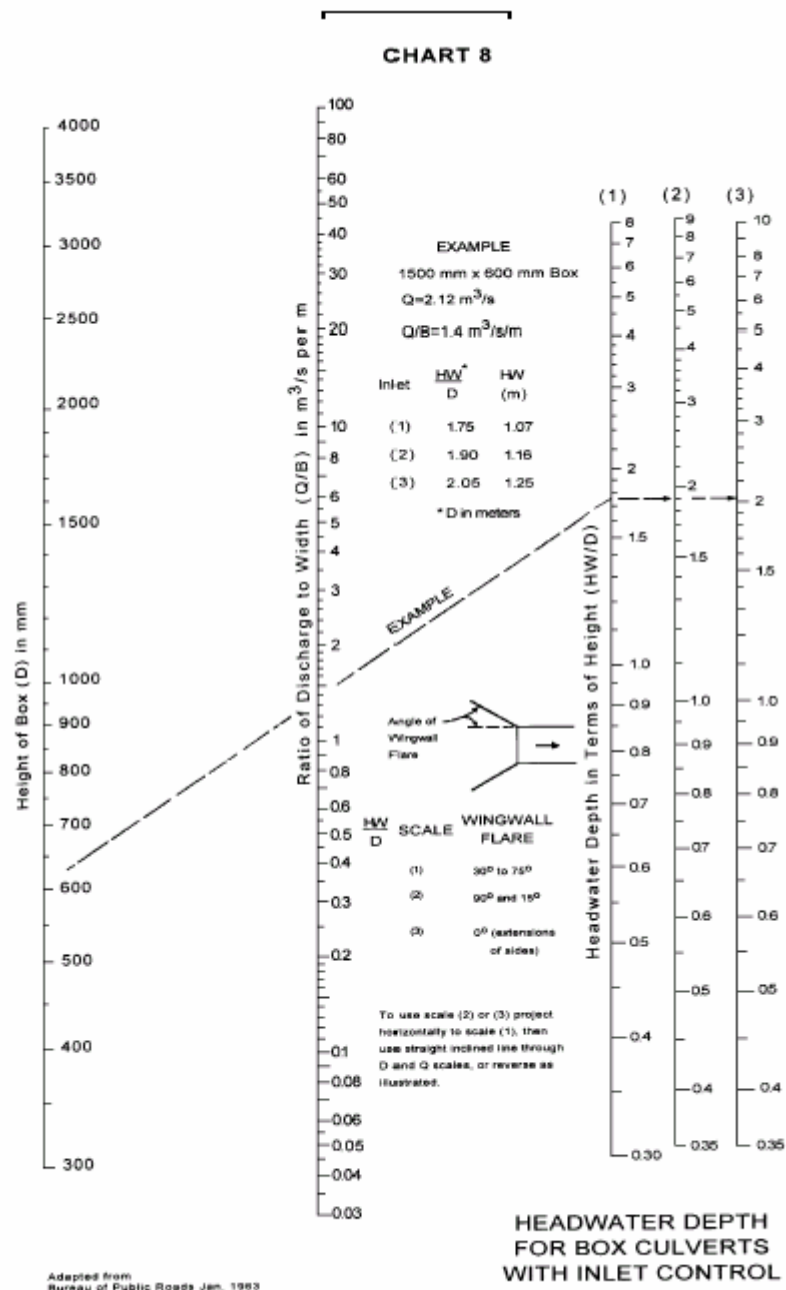
รูปที่ 9.6.1 แผนภาพสำหรับหาความลึกของ HW
 ภายใต้การไหลแบบควบคุมที่ทางเข้าสำหรับท่อคอนกรีตกลม



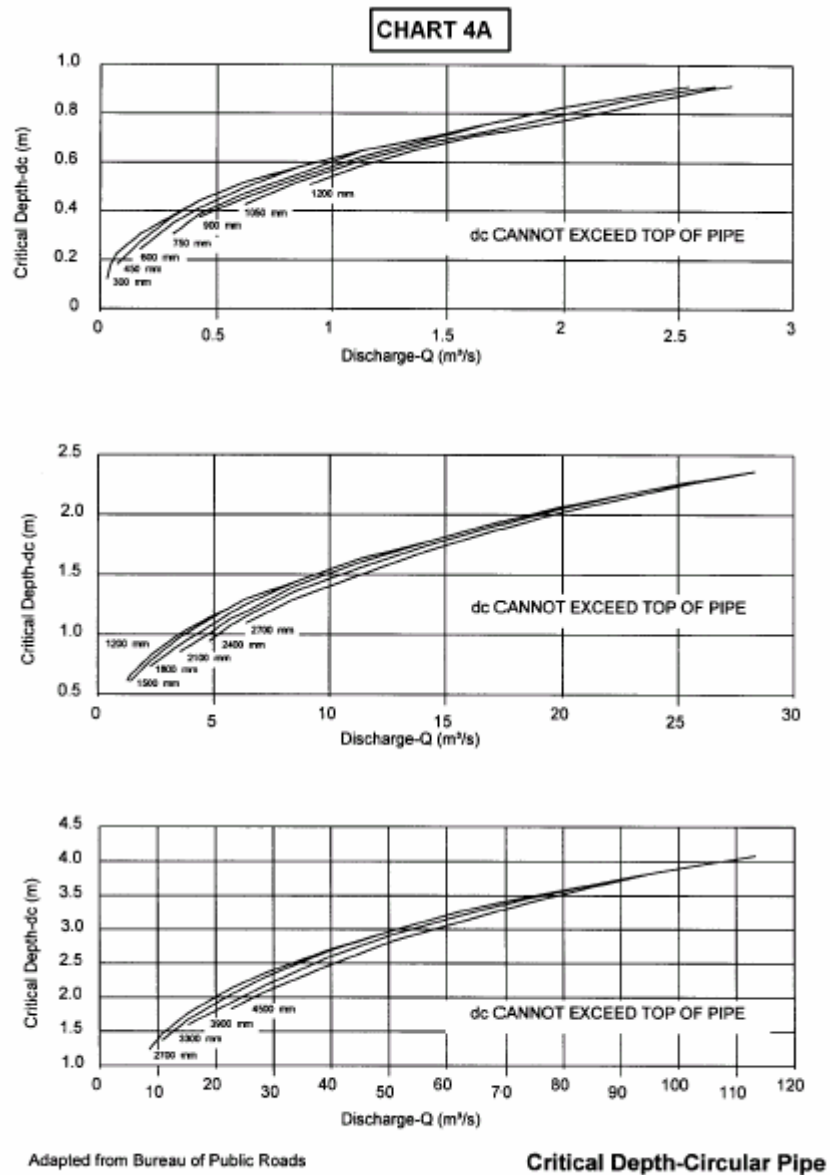
รูปที่ 9.6.2 แผนภาพสำหรับหาความลึกของ HW
 ภายใต้การไหลแบบควบคุมที่ทางเข้าสำหรับท่อเหลี่ยม



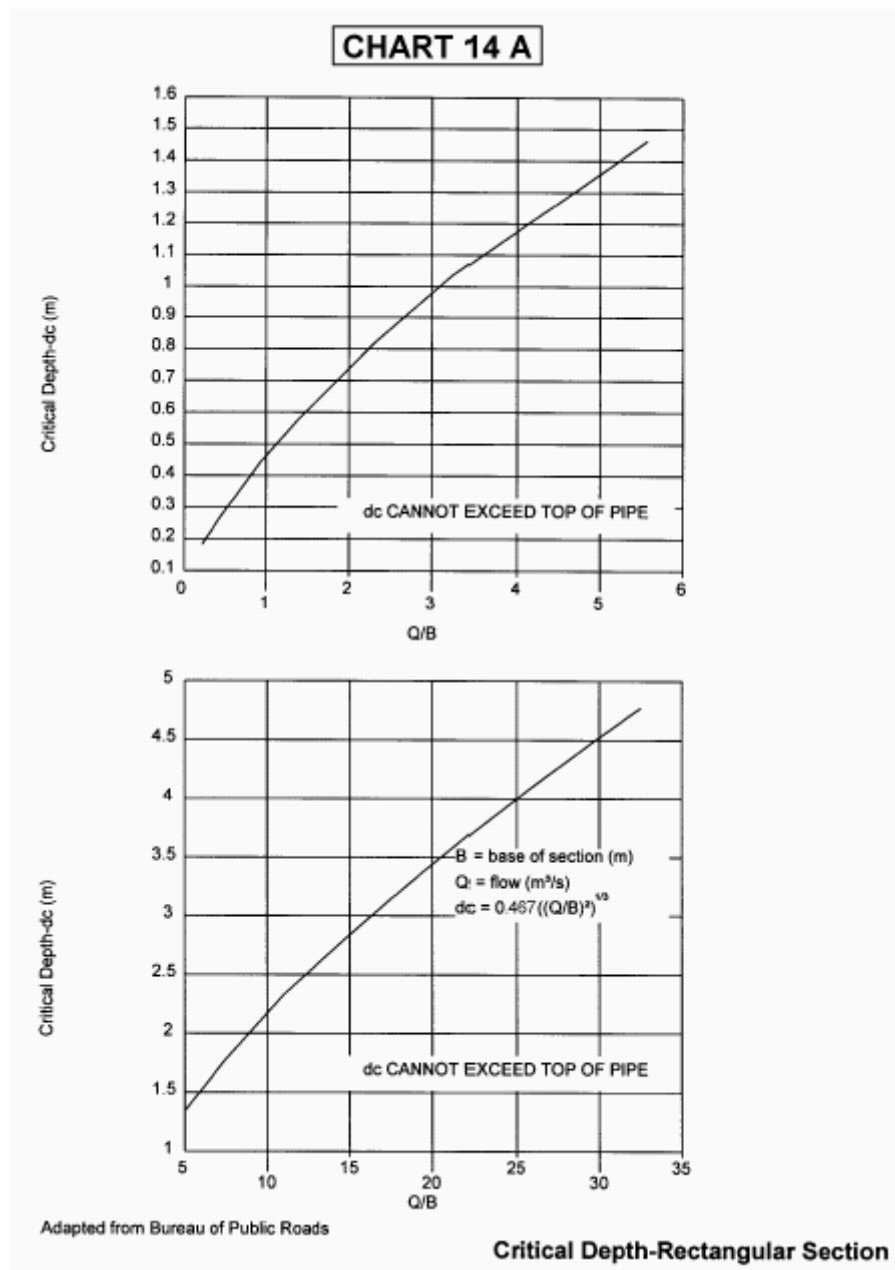
รูปที่ 9.6.3 แผนภาพสำหรับหา H ภายใต้การไหลแบบควบคุมที่ทางออกสำหรับท่อคอนกรีตกลม



รูปที่ 9.6.4 แผนภาพสำหรับหา H ภายใต้การไหลแบบควบคุมที่ทางออกสำหรับท่อเหลี่ยม



รูปที่ 9.6.5 ความลึกวิกฤตสำหรับท่อกลม



รูปที่ 9.6.6 ความลึกวิกฤตสำหรับท่อเหลี่ยม

ตัวอย่างที่ 9.6.1 ปริมาณน้ำไหล $8.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ค่า HW ที่ยอมให้ = 3.0 m

ความชันของลำน้ำธรรมชาติ 2 เปอร์เซ็นต์

ความลึกของ TW = 1.220 m

ความยาวท่อ = 76.200 m

ให้เลือกใช้ท่อลอดคอนกรีตรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยลองทั้งแบบ square edges และ 45 degree beveled edges ที่ปากทางเข้า

วิธีทำ

ทำตามขั้นตอนดังได้กล่าวมาแล้ว สรุปค่าลงในแบบฟอร์ม

PROJECT: <u>Example Problem #2 (SI)</u> <u>Chapter III, HDS No. 5</u>		STATION: <u>1+00</u> SHEET <u>1</u> OF <u>1</u>		CULVERT DESIGN FORM DESIGNER / DATE: <u>JLM</u> OF <u>9/27/00</u> REVIEWER / DATE: <u>AAW</u> OF <u>6/11/01</u>	
HYDROLOGICAL DATA ☐ METHOD: <u>SCS</u> ☐ DRAINAGE AREA: <u>80 ha</u> ☐ STREAM SLOPE: <u>2%</u> ☐ CHANNEL SHAPE: <u>Trapezoidal</u> ☐ ROUTING: <u>NA</u> ☐ OTHER: _____		ROADWAY ELEVATION: _____ (m) $S = S_o - \text{Fall}/L$ $S = 0.02$ (m/m) $L = 76.200$ (m)			
DESIGN FLOWS/TAIWATER ELI (YEARS) <u>50</u> FLOW (m ³ /s) <u>8.5</u> TW (m) <u>1.22</u>					
CULVERT DESCRIPTION: MATERIAL-SHAPE-SIZE-ENTRANCE		TOTAL FLOW Q (m ³ /s)		HEADWATER CALCULATIONS INLET CONTROL TW (5) ELi (4) FALL (3) HW (2) Q/N (1)	
				OUTLET CONTROL ELo (8) H (7) K (6) d (5) d+D (6) h _o (6) EL _{sw} (8) EL _{sw} (8)	
				OUTLET VELOCITY V (m/s)	
				COMMENTS	
Concrete Box 50' 6" dia 1824 x 1524 mm		8.5		4.65 1.59 2.42 - 32.90 1.22 1.3 1.412 1.412 0.5 1.10 31.418 32.90 6.5 OK, try smaller box	
RCB 1524 x 1524 mm 45° Bevels		8.5		5.58 1.95 2.99 - 33.45 1.22 1.45 1.49 1.49 0.5 1.57 32.06 33.45 6.47 check Bowls	
RCB 1524 x 1524 mm 45° Bevels		8.5		5.58 1.72 2.62 - 33.10 1.22 1.45 1.49 1.49 0.2 1.40 31.84 33.10 6.47 OK	
TECHNICAL FOOTNOTES: (1) USE Q/NB FOR BOX CULVERTS (2) HWD = HWD OR HWD FROM DESIGN CHARTS (3) FALL = HW - (EL _{sw} - EL _o); FALL IS ZERO FOR CULVERTS ON GRADE (4) EL _{sw} = HW + EL _o (INVERT OF INLET CONTROL SECTION) (5) TW BASED ON DOWN STREAM CONTROL OR FLOW DEPTH IN CHANNEL (6) h _o = TW or (d + D)/2 (WHICHEVER IS GREATER) (7) H = [1 + h _o + (19.63 n ² /R ^{1/3})] V ² /2g (8) EL _{sw} = EL _o + H + h _o					
SUSCRIPIT DEFINITIONS: a. Approximate f. Culvert Face hd. Design Headwater hi. Headwater in Inlet Control ho. Headwater in Outlet Control i. Inlet Control Section o. Outlet sf. Streamed at Culvert Face tw. Tailwater		COMMENTS / DISCUSSION: 1524 x 1524 mm box will work without without bowls. Recommend using 45° Bevels for more flow capacity.		CULVERT BARREL SELECTED: SIZE: <u>1524 x 1524 mm</u> SHAPE: <u>Rectangular</u> MATERIAL: <u>Concrete</u> n _{0.012 ENTRANCE: <u>30° Bevel 45° Bevels</u>}	