

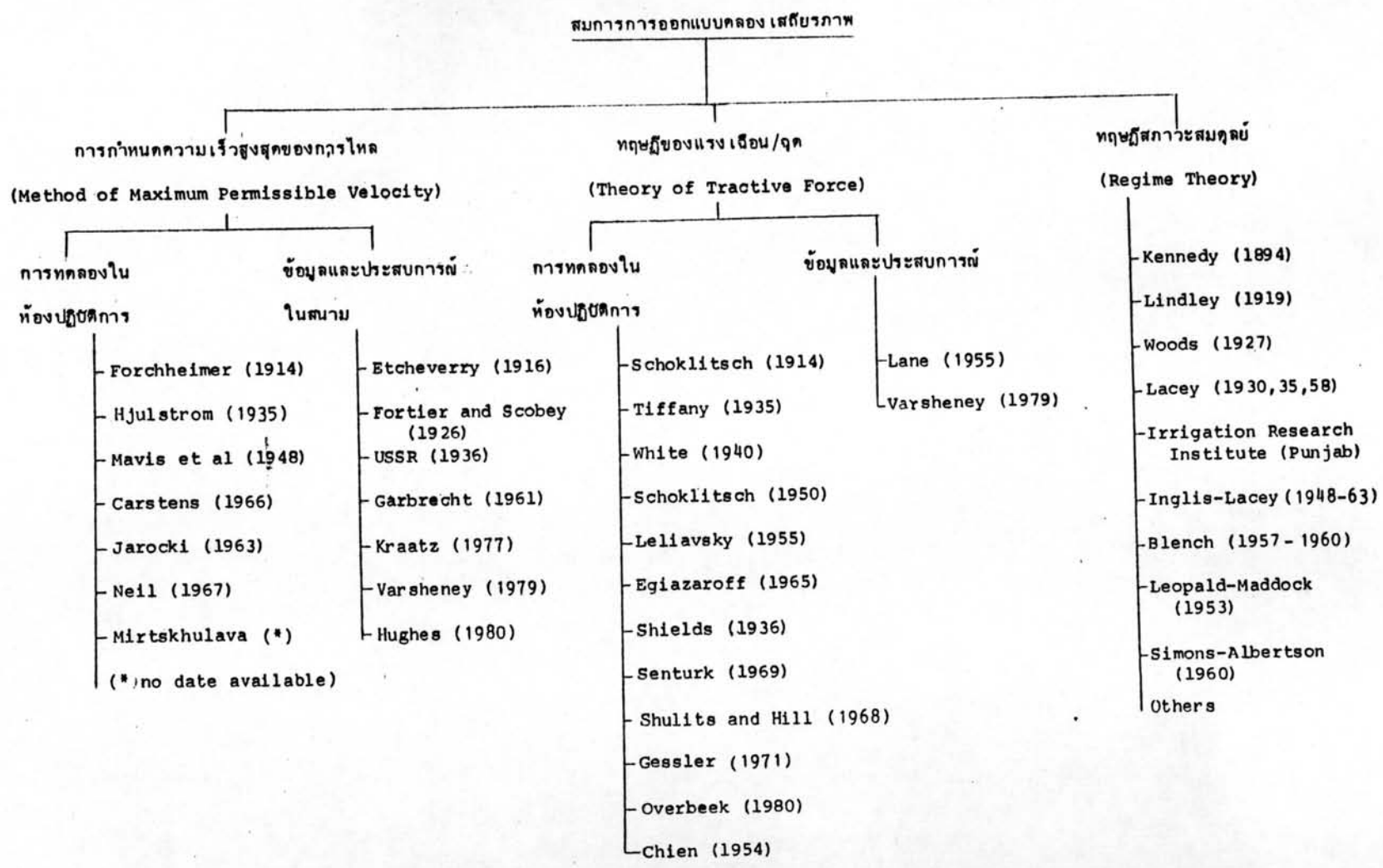


สมการสำหรับการออกแบบคลองเสถียรภาพ
(Current Stable Channel Design Equations)

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงการทบทวนหลักเกณฑ์ (criteria) สำหรับการคำนวณออกแบบคลองให้มีเสถียรภาพ ซึ่งได้มีผู้ค้นคว้ามากมายในอดีตอันยาวนานนับร้อยปีล่วงมาแล้ว หลักเกณฑ์ดังกล่าวส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสมการ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 วิธีใหญ่ ๆ คือ

- 1) การออกแบบคลองโดยกำหนดความเร็วสูงสุดของการไหลที่ยอมให้
- 2) การออกแบบคลองโดยทฤษฎีของแรงเหวี่ยงหรือแรงจุด (Tractive Force)
- 3) การออกแบบคลองโดยใช้ทฤษฎีสภาวะสมดุล (Regime Theory)

วิศวกรและนักวิจัยได้พัฒนารูปแบบของสมการตลอดจนกฎเกณฑ์ของแต่ละวิธี ในลักษณะต่าง ๆ กัน บ้างก็อิงจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ บ้างก็อิงจากข้อมูลและประสบการณ์ในสนาม รูป 3-1 ได้แสดงการรวบรวมวิธีต่าง ๆ ในการคำนวณออกแบบคลองเสถียรภาพ ที่ได้กล่าวทบทวนไว้โดยย่อในบทนี้



รูป 3-1 สรุปสมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการกำหนดออกแบบคลองเสถียรภาพ

3.1 การออกแบบคลองโดยกำหนดความเร็วสูงสุดของการไหลที่ยอมให้ (Method of Maximum Permissible Velocity)

การออกแบบคลองโดยวิธีนี้ใช้ความเร็วในการไหลของน้ำ (flow velocity) เป็นเกณฑ์กำหนด ความเร็วการไหลดังกล่าวจะเป็นความเร็วในการไหลที่ไม่ทำให้เกิดการกัดเซาะ (erosion) ที่ท้องคลองและฝั่งทั้งสอง ได้มีหลายคนทำการศึกษาทั้งจากการทดลองในห้องปฏิบัติการและศึกษาในสนาม เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ของความเร็วการไหลกับองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีผลต่อการกัดเซาะ (erosion) ทั้งในรูปของสมการ ตารางและรูปความสัมพันธ์ องค์ประกอบต่าง ๆ ดังกล่าว เช่น

- ขนาดของวัสดุประกอบคลอง (grain size)
- ความถ่วงจำเพาะของตะกอน (specific gravity of sediment)
- ความยึดติดและไม่ยึดติดของดิน (cohesiveness or noncohesiveness of soil) ฯลฯ เป็นต้น

ความเร็วของการไหลที่ยอมให้ดังกล่าวบางคนก็ให้อยู่ในรูปของความเร็วการไหลที่ท้องคลอง (bottom velocity, u_b) บางคนก็ให้อยู่ในรูปของความเร็วเฉลี่ย (mean velocity, \bar{u}) โดยให้เหตุผลและขีดจำกัดของการใช้สมการ ตลอดจนตารางและรูปความสัมพันธ์ต่าง ๆ กันไป

3.1.1 การกำหนดความเร็วการไหลที่ยอมให้จากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

วิศวกรและนักวิจัยหลายคนได้ทำการศึกษาเพื่อที่จะอธิบายให้เห็นจริงถึงสมการความเร็ววิกฤติ (สมการที่ 2-5) โดยการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งในรายละเอียดทำได้ยากมาก เนื่องจากการให้ความหมายของความเร็วการไหลที่ท้องคลอง (bottom velocity, u_b) ยังไม่เด่นชัด และความยุ่งยากในการที่จะวัดความเร็วการไหลที่ท้องคลองดังกล่าวให้ถูกต้องได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าว การใช้ผลจากการทดลองจึงมีขีดจำกัด ยังไม่มีการทดลองใดที่ให้ผลอธิบายโดยสมบูรณ์ หลายคนพยายามจะลดค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการ (2-5) หรือให้ค่าตัวแปรบางตัวเป็น

ค่าคงที่ ดังเช่น Brahm (1753) เป็นผู้หนึ่งที่ทำให้สมการความสัมพันธ์ง่าย ๆ ของรูปแบบสมการ (2-5) คือ

$$(u_b)_{cr} = k_5 W^{1/6} \dots\dots\dots (3-1)$$

$$k_5 = \text{ค่าคงที่}$$

$$W = \text{น้ำหนักของวัสดุ (Weight of materials)}$$

3.1.1 Forchheimer (1914)

ผลการศึกษาในระยะแรก ๆ เกี่ยวกับการกำหนดความเร็วของการไหลที่ยอมให้ที่จะไม่ทำให้การกัดกร่อนของท้องคลอง ได้มีบุคคลหลายคนได้ศึกษาทดลองและวิจัย เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ของความเร็ววิกฤติของการไหลที่ท้องคลอง (critical bottom velocity) กับขนาดของวัสดุ (particle) อยู่ในรูปของสมการที่หาไว้โดย Sternberg ว่า

$$(u_b)_{cr} = \zeta \sqrt{D} \dots\dots\dots (3-2)$$

เมื่อ $(u_b)_{cr}$ = ความเร็ววิกฤติของการไหลที่ท้องคลอง (เมตร/วินาที)

$$D = \text{ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุ (เมตร)}$$

$$\zeta = \text{ค่าคงที่}$$

Forchheimer (1914) ได้รวบรวมและสรุปผลงานวิจัยของบุคคลต่าง ๆ อาทิเช่น duBuat (1786), Umpfenbach (1830), Telford (1838), Redtenbacher (1852), Sanjon (1871), Sternberg (1875), Blackwell (1872), Suchier (1883), Airy (1885), Franzius (1890) และอื่น ๆ Forchheimer ได้สรุปและให้ค่าเฉลี่ยของ ζ ในสมการ (3-2) = 4 งานวิจัยของบุคคลต่าง ๆ ดังกล่าว บางคนก็ใช้ความเร็วที่ผิวน้ำหรือความเร็วเฉลี่ยเป็นเกณฑ์กำหนดสภาวะการเริ่มเคลื่อนที่ของอนุภาค

3.1.1.2 Hjulstrom (1935)

Hjulstrom (1935) ได้ศึกษาถึงการกัดเซาะ (erosion) การเคลื่อนย้ายของวัสดุที่ตกลง (transportation) การตกตะกอนของวัสดุ (deposition) และได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ สำหรับวัสดุที่ตกลงชนิดเดียวกัน มีขนาดเท่ากันและอยู่ในสภาพกลมหรือกระจาย

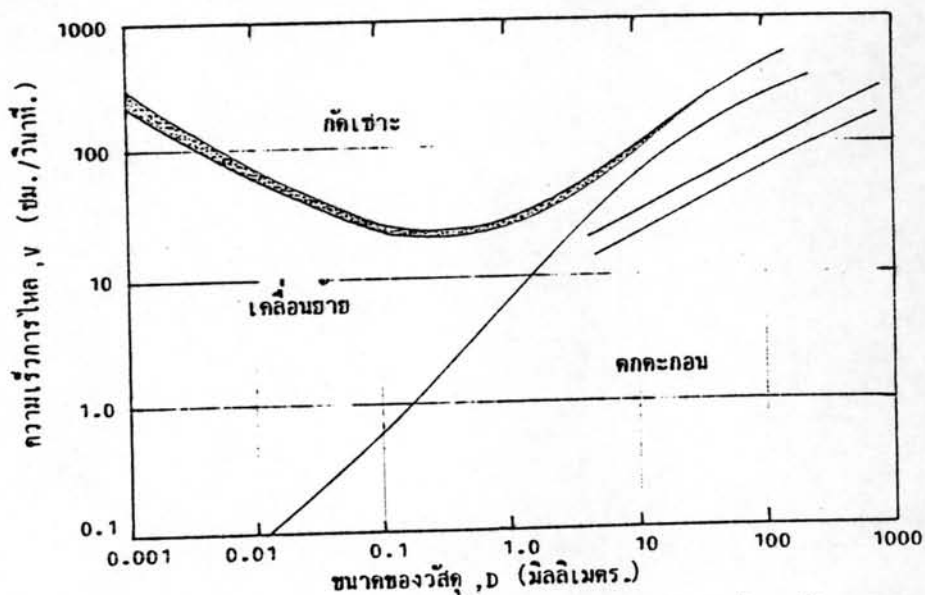
Hjulstrom ได้ใช้ความเร็วการไหลเฉลี่ย (average flow velocity, \bar{u}) เพราะว่า การใช้ความเร็วที่ตกลงซึ่งให้ความถูกต้องมากกว่านั้นทำได้ยากมาก และ Hjulstrom ยังได้สันนิษฐานอีกว่า ความเร็วการไหลเฉลี่ยจะสูงกว่าความเร็วการไหลที่ตกลง (bottom velocity, u_b) ประมาณ 40 % สำหรับความลึกของการไหลที่เกิน 1 เมตร จากรูป 3-2 แสดงถึงเขตแบ่งที่วัสดุจะเริ่มเคลื่อนไหว และ เส้นแบ่งเขตระหว่างเขตการเคลื่อนย้ายของวัสดุตะกอน (sediment transport) และ เขตของการตกตะกอนของวัสดุ (sedimentation)

จากรูปความสัมพันธ์จะเห็นว่าทรายหยาบละเอียดจะเกิดการกัดเซาะได้ง่ายและความต้านทานการกัดเซาะจะสูงสำหรับวัสดุเล็กที่สุด เนื่องจากมีแรงยึดติด cohesion (แรงยึดติดระหว่างอนุภาคชนิดเดียวกัน) และ adhesion (แรงยึดติดระหว่างอนุภาคต่างชนิดกัน)

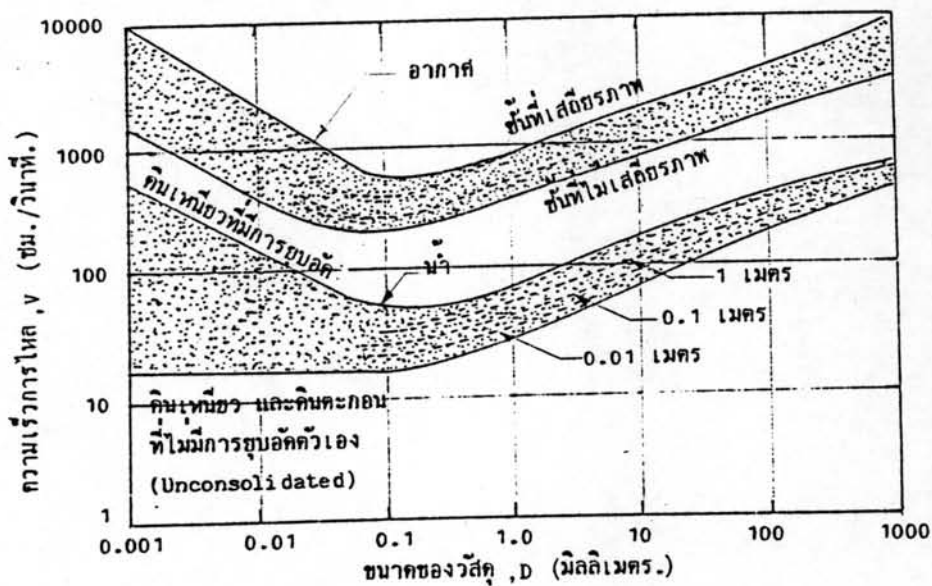
Helly (1969) ได้ทำการศึกษาในสนามและได้ให้ผลเช่นเดียวกับ Hjulstrom สำหรับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ ($D \approx 33$ ซม.) Sundburg (1956) ก็ได้ผลการศึกษา ดังรูป 3-3 ซึ่งคล้ายคลึงกับผลของ Hjulstrom

3.1.1.3 Mavis et. al. (1948)

Mavis และผู้ร่วมงานอื่น ๆ (1948) ได้เริ่มทำการศึกษาถึงความเร็ววิกฤติของการไหลที่ตกลงในปี ค.ศ. 1937 โดยวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองถึง 400 การทดลองและทำการประเมินผลใหม่หลังปี ค.ศ. 1948 ให้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว



รูปที่ 3-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วการไหลของน้ำที่ทำให้ เกิดการกักเซาะ เคลื่อนย้าย และ ตกตะกอน กับ ขนาดของวัสดุ โดย Hjulstrom (1935)



รูปที่ 3-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วการไหลที่ทำให้เกิดการกักเซาะ ตกตะกอน กับขนาดของวัสดุ โดย Sundborg (1956)

การไหลวิกฤติที่ท้องคลองกับขนาดของวัสดุไว้ดังสมการ (3-3) ซึ่งให้รูปแบบสมการคล้ายกับสมการ (2-5)

$$(u_b)_{cr} = \frac{1}{2} D^{4/9} \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho} - 1} \dots\dots\dots (3-3)$$

เมื่อ $(u_b)_{cr}$ = ความเร็ววิกฤติของการไหลที่ท้องคลอง (ฟุต/วินาที)
(critical bottom velocity, fps)

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุ (มม)

ρ_s = ความหนาแน่นของวัสดุ

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ

Rubey (1938)

ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลของ Gilbert ให้ผลที่มีแนวโน้มไปในรูปแบบการ (2-5) และ (2-3) ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้พบว่า การเคลื่อนที่ของวัสดุจำพวกทรายเป็นและกรวดทรายสามารถประมาณได้จากสมการ (2-5) แต่สำหรับวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าอยู่ใน sublayer ของการไหลจะต้องการความเร็วการไหลที่สูงกว่าที่คาดคะเนจากหลักการนี้

Heyndrickx (1948)

ได้รวบรวมผลงานของบุคคลต่าง ๆ คือ Owens (1908), Gilbert (1914), Schaffernak (1922), Twenhofel (1932), Welikanoff (1932), Krey (1935), และ Indri (1936) ลักษณะของสูตรสมการที่ Heyndrickx ได้แนะนำไว้มีลักษณะส่วนสำคัญที่คล้ายคลึงกับสมการ (2-5) และ (3-3)

3.1.1.4 Carstens (1966)

Carstens (1966) ซึ่งวิเคราะห์ข้อมูลเป็นจำนวนมากเกี่ยวกับสภาวะการเริ่มเคลื่อนที่ของวัสดุ ได้ให้สมการไว้ คือ

$$\frac{(u_b)_{cr}^2}{(\rho_s/\rho-1)gD} = 3.61 (\tan \phi \cos \alpha - \sin \alpha) \dots (3-4)$$

- เมื่อ g = อัตราเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก (acceleration due to gravity)
- ϕ = ค่าของมุมผลึกของวัสดุ (angle of repose)
- α = ค่าความลาดเอียงของพื้นที่ท้องคลอง (slope of the plan bed)
- $(u_b)_{cr}$ = ความเร็ววิกฤติของการไหลที่ท้องคลอง (ฟุต/วินาที)
- D = ขนาดของวัสดุ (ฟุต)

Barekyan (1963)

ได้รวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ของโซเวียตและได้ให้ความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุกับความเร็วการไหลใกล้ท้องคลอง (near - bottom current velocity, u_b) ในรูปของกราฟ ความสัมพันธ์การศึกษาต่อ ๆ มาได้เปลี่ยนความเร็วการไหลที่ท้องคลองมาเป็นการไหลเฉลี่ย (average flow velocity, \bar{u}) แทน

3.1.1.5 Jarocki (1963)

Levi ได้ให้สมการความสัมพันธ์ซึ่งได้ใช้ความเร็วการไหลวิกฤติในรูปของความเร็วการไหลเฉลี่ยและยังได้พิจารณาถึงความขรุขระสัมพัทธ์ (relative roughness, $\frac{\bar{d}}{D}$) Jarocki (1963) ได้สรุปและให้ความเห็นเกี่ยวกับสมการของ Levi ว่าใช้ได้ในกรณีที่ค่าของความขรุขระสัมพัทธ์ (relative roughness, $\frac{\bar{d}}{D}$) > 60 เท่านั้นและให้สมการความสัมพันธ์ดังกล่าว คือ

$$(\bar{u})_{cr} = 1.4 \sqrt{gD \ln \frac{\bar{d}}{7D}} \dots (3-5)$$

\bar{u}_{cr} = ความเร็ววิกฤติของการไหลเฉลี่ย (เมตร/วินาที)
(critical average velocity)

\bar{d} = ความลึกของการไหลโดยเฉลี่ย (เมตร)



D = ขนาดของวัสดุ (เมตร)

g = อัตราเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วง (เมตร/วินาที²)

3.1.1.6 Neil (1967)

Neil (1967) ได้ให้ "conservative design curve" ในการออกแบบคลองที่ทนต่อการกัดเซาะสำหรับวัสดุท้องคลองที่หยาบและมีความสม่ำเสมอและให้ในรูปสมการไว้คือ

$$\frac{(\bar{u}_{cr})^2}{(\rho_s/\rho - 1)gD} = 2.50 \left(\frac{D}{\bar{d}}\right)^{-0.20} \dots\dots\dots (3-6)$$

\bar{u}_{cr} = ความเร็ววิกฤติของการไหลเฉลี่ย (ฟุต/วินาที)

\bar{d} = ความลึกของการไหลโดยเฉลี่ย (ฟุต)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของวัสดุ (ฟุต)

3.1.1.7 Mirtskhulava

Mirtskhulava [จาก Graf (1971), Simons & Senturk (1977)] ได้ให้สมการแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วเฉลี่ยวิกฤติกับขนาดของวัสดุท้องคลองและความลึกของการไหล

$$\bar{u}_{cr} = \left(\log \frac{8.8 d}{D}\right) \sqrt{\frac{2g}{0.44 \sqrt{n}} (\gamma_s - \gamma) D} \dots\dots\dots (3-7)$$

\bar{u}_{cr} = ความเร็ววิกฤติของการไหลเฉลี่ย (เมตร/วินาที)

d = ความลึกของการไหล (เมตร)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของวัสดุ (เมตร)

$D > 2$ มม.

$$n = 1 + \frac{D}{0.0005 + 0.3D}$$

เนื่องจากการให้ความหมายของความเร็วของการไหลที่ท้องคลอง (bottom velocity, u_b) และความสัมพันธ์ของความเร็วการไหลที่ท้องคลองและความเร็วการไหลเฉลี่ย ยังไม่มีใครสามารถให้คำตอบได้แน่ชัด ทำให้หลายคนยอมรับเกณฑ์กำหนดของการกัดเซาะที่ท้องคลอง โดยวิธีของหน่วยแรงเฉือนที่ท้องคลอง (bottom shear stress) มากกว่า ดังจะกล่าวใน หัวข้อ 3.2 ต่อไป

3.1.2 การกำหนดความเร็วการไหลที่ยอมรับจากข้อมูลในสนาม

การกำหนดความเร็วการไหลของน้ำที่จะไม่ทำให้เกิดการกัดเซาะ (erosion) ได้มีคนให้ความเห็นว่า หลักการที่ดีที่สุดนั้น คือ ได้จากประสบการณ์ (experiences) ของแต่ละบุคคลที่ทำงานเกี่ยวกับคลองต่าง ๆ เป็นผู้กำหนดขึ้น ไม่ได้มาจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยตรง

โดยเหตุนี้ Special Committee on Irrigation Hydraulics of the American Society of Civil Engineers [Fortier & Scobey (1926)] จึงได้เสนอการใช้แบบสอบถามไปยังวิศวกรชลประทานต่าง ๆ ซึ่งมีประสบการณ์ในด้านการออกแบบคลอง และได้ประมาณค่าความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของการไหลที่ยอมรับสำหรับคลองที่ประกอบด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ ตามความเห็นของตัวเอง

ได้มีบุคคลหลายคนทำการสรุปรวบรวมแบบสอบถามและอาศัยหลักการดังกล่าว กำหนดตารางแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วสูงสุดของการไหลของน้ำที่ยอมรับกับวัสดุประกอบคลองชนิดต่าง ๆ เช่น Etcheverry (1916), Fortier & Scobey (1926)

3.1.2.1 Etcheverry (1916)

Etcheverry (1916) ได้ให้แนวความคิดไว้ว่า ความเร็วการไหลที่จะทำให้เกิดการกัดเซาะ (erosion) จะสูงกว่าความเร็วการไหลที่จะรักษาสภาพของวัสดุในสภาพเคลื่อนที่ Etcheverry ได้ศึกษาโดยอาศัยหลักฐานจากแบบสอบถามจากบุคคลต่าง ๆ และได้ให้ตาราง

แสดงถึงความสัมพันธ์ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของการไหลที่ยอมให้ที่ปลอดภัยจากการกัดเซาะ
(Maximum Mean Velocities Safe Against Erosion) สำหรับวัสดุประกอบคลองชนิด
ต่าง ๆ ดังในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ความเร็วสูงสุดของการไหลที่ยอมให้ โดย Etcheverry

[Etcheverry (1916)]

วัสดุประกอบคลอง	Manning n	ความเร็วเฉลี่ยของการไหล	
		ฟุต/วินาที	เมตร/วินาที
1. ทรายหวมละเอียดล้วน	0.020	0.75 - 1.00	0.23 - 0.30
2. ทรายหวม	0.020	1.00 - 1.50	0.30 - 0.46
3. ทรายหยาบ	0.020	1.50 - 2.00	0.46 - 0.61
4. ดินปนทรายโดยเฉลี่ย	0.020	2.00 - 2.50	0.61 - 0.76
5. ดินร่วนปนดินทราย	0.020	2.50 - 2.75	0.76 - 0.84
6. ดินร่วน, ดินอัลลูเวียล, ดินซีเท้า ภูเขาไฟ	0.020	2.75 - 3.00	0.84 - 0.91
7. ดินร่วนแน่น, ดินร่วนปนดินเหนียว	0.020	3.00 - 3.75	0.91 - 1.14
8. ดินเหนียวแข็ง, กรวดดิน	0.025	4.00 - 5.00	1.22 - 1.52
9. กรวดเล็กหยาบ, กรวดโตและ หินทราย	0.030	5.00 - 6.00	1.52 - 1.83
10. กรวดอัดแน่น, กรวดยึดติดกันแน่น หินขนาดอ่อน, หินเหล็กไฟเหนียว, หินตะกอนอ่อน ๆ	0.025	6.00 - 8.00	1.83 - 2.44

3.1.2.2 Fortier and Scobey (1926)

Fortier & Scobey (1926) ทำการรวบรวมแบบสอบถามความเห็นของวิศวกรต่าง ๆ ในการกำหนดความเร็วการไหลในคลองจากประสบการณ์ของแต่ละคน และจากบันทึกข้อมูลของ Flynn (1892), Etcheverry (1916), Fortier (1916) ได้สรุปผลการศึกษาดังกล่าว ได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของการไหลที่ยอมให้ กับวัสดุประกอบท้องคลองชนิดต่าง ๆ ดังตารางที่ 3-2

ความเร็วการไหลที่ Fortier & Scobey ใช้เป็นความเร็วการไหลเฉลี่ย โดยเขาให้เหตุผลว่า ความเร็วเฉลี่ยเป็นความเร็วที่ใช้ในการออกแบบทั่วไป และสามารถประมาณค่าได้ง่ายกว่าความเร็วที่ท้องคลอง (bottom velocity) ถึงแม้ว่าความเร็วที่พิจารณาที่จริงควรจะเป็นความเร็วที่ท้องคลอง นอกจากนี้ความเร็วการไหลที่สูงสุดก็ไม่ใช้ความเร็วเฉลี่ย และยังได้ให้ข้อคิดอีกว่า ความเร็วของการไหลที่ไม่ทำให้เกิดการตกตะกอน (deposition) ไม่จำเป็นจะต้องเป็นความเร็วการไหลที่ทำให้เกิดการกัดเซาะ (erosion) โดยเขากล่าวว่า จะมีช่วงระหว่างขีดความเร็วต่ำ (Lower velocity limit) ที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนของตะกอนและขีดความเร็วสูงสุด (Upper limit) ที่เริ่มจะทำให้เกิดการกัดกร่อน

จากตาราง 3-2 Fortier & Scobey ได้อธิบายว่า ดินละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่ากรวดเล็ก (gravels) นั้น ความต้านทานต่อการกัดเซาะ (erosion) ขึ้นกับแรงยึดติดระหว่างอนุภาคของดิน (cohesion) สำหรับกรวดละเอียด (fine gravels) กรวดหยาบ (coarse gravel) กรวดหิน (cobbles) ความต้านทานต่อการกัดเซาะขึ้นกับ น้ำหนัก, รูปร่าง, และความหนาแน่นของวัสดุ เพราะว่ากรวดไม่มีแรงยึดติดระหว่างอนุภาค เนื่องจากความหนืด (viscosity) พลาสติกซิติ (plasticity) หรือความเหนียวเกาะติดแน่น (stickiness) เช่นที่พบในพวกดินเหนียว (clay)

สำหรับวัสดุท้องคลองที่มีขนาดละเอียดตั้งแต่ดินร่วนจนถึงกรวดหิน (loam to cobbles) ท้องคลองจะมีความมั่นคงขึ้น หลังจากใช้งานมา 2-3 ปี เพราะว่า

ตารางที่ 3-2 ความเร็วสูงสุดของการไหลที่ยอมให้ โดย Fortier และ Scobey
 [จาก Fortier & Scobey (1926)]

วัสดุประกอบคลอง	n	ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในคลองหลังการใช้งาน (d 3')					
		น้ำไม่มีสารอินเจือปน		น้ำมีสารแขวนลอยพวกตะกอนคอลลอยด์		น้ำมีสารแขวนลอยพวกทราย, กรวดหิน	
		ฟุต/วินาที	ม./วินาที	ฟุต/วินาที	ม./วินาที	ฟุต/วินาที	ม./วินาที
1. ทรายละเอียด (ไม่มีคอลลอยด์)	0.02	1.50	0.46	2.50	0.76	1.50	0.46
2. ดินร่วนปนทราย (ไม่มีคอลลอยด์)	0.02	1.45	0.53	2.50	0.76	2.00	0.61
3. ดินร่วนปนดินตะกอน (ไม่มีคอลลอยด์)	0.02	2.00	0.61	3.00	0.91	2.00	0.61
4. ดินตะกอนอัลลูเวียล (ไม่มีคอลลอยด์)	0.02	2.00	0.61	3.50	1.07	2.00	0.61
5. ดินร่วนแน่นธรรมดา	0.02	2.50	0.76	3.50	1.07	2.25	0.69
6. ดินซีต้อภูเขาไฟ	0.02	2.50	0.76	3.50	1.07	2.00	0.61
7. กรวดเล็กละเอียด	0.02	2.50	0.76	5.00	1.52	3.75	1.14
8. ดินเหนียวแข็ง (มีคอลลอยด์)	0.025	3.75	1.14	5.00	1.52	3.00	0.91
9. ดินที่มีขนาดคละตั้งแต่ดินร่วนจนถึงกรวดโต (ไม่มีคอลลอยด์)	0.03	3.75	1.14	5.00	1.52	5.00	1.52
10. ดินตะกอนอัลลูเวียล (มีคอลลอยด์)	0.025	3.75	1.14	5.00	1.52	3.00	0.91
11. ดินที่มีขนาดคละตั้งแต่ดินตะกอนจนถึงกรวดโต	0.03	4.00	1.22	5.50	1.68	5.00	1.52
12. กรวดเล็กหยาบ (ไม่มีคอลลอยด์)	0.025	4.00	1.22	6.00	1.83	6.50	1.98
13. กรวดก้อนโตและกรวดทราย	0.035	5.00	1.52	5.50	1.68	6.50	1.98
14. ดินเซลและดินเหนียวไฟฟ้าเหนียว	0.025	6.00	1.83	6.00	1.83	5.00	1.52

สำหรับคลองที่มีความคดเคี้ยวไม่เป็นแนวตรง ใช้ค่าลดความเร็วดังนี้

คลองที่มีความคดเคี้ยวเล็กน้อย	5 %
คลองที่มีความคดเคี้ยวปานกลาง	13 %
คลองที่มีความคดเคี้ยวมาก	22 %

ครั้งแรกจะมีสารพลาสติกคอลลอยด์ (plastic colloidal matter) จากการชะล้างพวกดินละเอียดเล็ก ๆ ไปตกตะกอนบริเวณคลองที่มีความเร็วการไหลลดลง วัสดุเล็ก ๆ เหล่านี้จะเข้าไปเติมตามช่องว่างทำให้วัสดุเดิมมีความมั่นคงขึ้น คลองที่ประกอบด้วยวัสดุละเอียด จะมีความมั่นคงโดยปรากฏการณ์ทางกลศาสตร์ (mechanics) ไม่ใช่เพราะแรงยึดติดของวัสดุ (plastic cohesion)

สำหรับคลองที่มีน้ำมีสารแขวนลอยจำพวกตะกอนคอลลอยด์ การเข้าไปเติมเต็มของพวกคอลลอยด์ดังกล่าวทำให้ท้องคลองมีความเหนียวแน่นมั่นคงขึ้น ทำให้เพิ่มความต้านทานต่อการกัดเซาะมากขึ้น ในขณะที่เดียวกัน เมื่อน้ำมีสารพวกที่ทำให้เกิดการขัดสี (abrasive) จะทำให้วัสดุบางชนิดมีความต้านทานต่อการกัดเซาะขึ้น โดยเติมแต่งทำให้เกิดขนาดคละของวัสดุท้องคลอง และในทางตรงข้ามวัสดุพวกหินเซลหรือพวกวัสดุหินเหนียวเรียบ ปกติมีความต้านทานการกัดเซาะอยู่แล้ว และความต้านทานนี้จะลดลงเมื่อเกิดการขัดสีจากวัสดุที่มีความขัดสีดังกล่าว เช่น ทราย, กรวดทราย

3.1.2.3 U.S.S.R. data (1936)

ข้อมูลจาก U.S.S.R. [Lane (1955)] ได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลของน้ำกับลักษณะวัสดุประกอบคลอง สำหรับวัสดุประเภทมีแรงยึดติดของอนุภาค (cohesive materials) ดังแสดงในตารางที่ 3-3 และรูปที่ 3-4 และความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลของน้ำกับลักษณะวัสดุประกอบคลอง สำหรับวัสดุประเภทไม่มีแรงยึดติดของอนุภาค (non-cohesive materials) ดังแสดงในตารางที่ 3-5 และรูป 3-6 และยังได้ให้ตารางปรับแก้ค่าความเร็วการไหลที่ยอมให้ สำหรับความลึกการไหลของน้ำต่าง ๆ กัน สำหรับวัสดุประเภทไม่มีแรงยึดติดและมีแรงยึดติดของอนุภาคดังในตารางที่ 3-4 และรูปที่ 3-5

3.1.2.4 Garbrecht (1961)

Garbrecht (1961) ได้รวบรวมผลการศึกษาในยุโรปและให้รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลที่ยอมให้กับปริมาตรโพรงของวัสดุสำหรับวัสดุประเภทมีแรง

ตารางที่ 3-3 ความเร็วสูงสุดของการไหลที่ยอมให้ สำหรับวัสดุประกอบคลองประเภทมีแรงยึดเหนี่ยว
ระหว่างวัสดุ ข้อมูลจาก U.S.S.R. (1936)
[จาก Lane (1955)]

ชนิดของวัสดุ ประกอบคลอง	ลักษณะการยึดแน่นของวัสดุที่ท้องคลอง							
	หลวม		ยึดแน่นพอใช้		ยึดแน่นปกติ		ยึดแน่นดีมาก	
	อัตราส่วนโพรง							
	2.0 - 1.2		1.2 - 0.6		0.6 - 0.3		0.3 - 0.2	
	ความเร็วของการไหล							
	ฟ./วินาที	ม./วินาที	ฟ./วินาที	ม./วินาที	ฟ./วินาที	ม./วินาที	ฟ./วินาที	ม./วินาที
1. ดินเหนียวปนดินร่วน	1.48	0.45	2.95	0.90	4.26	1.30	5.90	1.80
2. ดินปนดินเหนียวมาก	1.31	0.40	2.79	0.85	4.10	1.25	5.58	1.70
3. ดินเหนียว	1.15	0.35	2.62	0.80	3.94	1.20	5.41	1.65
4. ดินปนดินเหนียวเล็กน้อย	1.05	0.32	2.30	0.70	3.44	1.05	4.43	1.35

ตารางที่ 3-4 ตัวคูณลดหรือเพิ่ม สำหรับความเร็วการไหลที่ยอมให้ที่ความลึกต่าง ข้อมูลจาก U.S.S.R. (1936)
[จาก Lane (1955)]

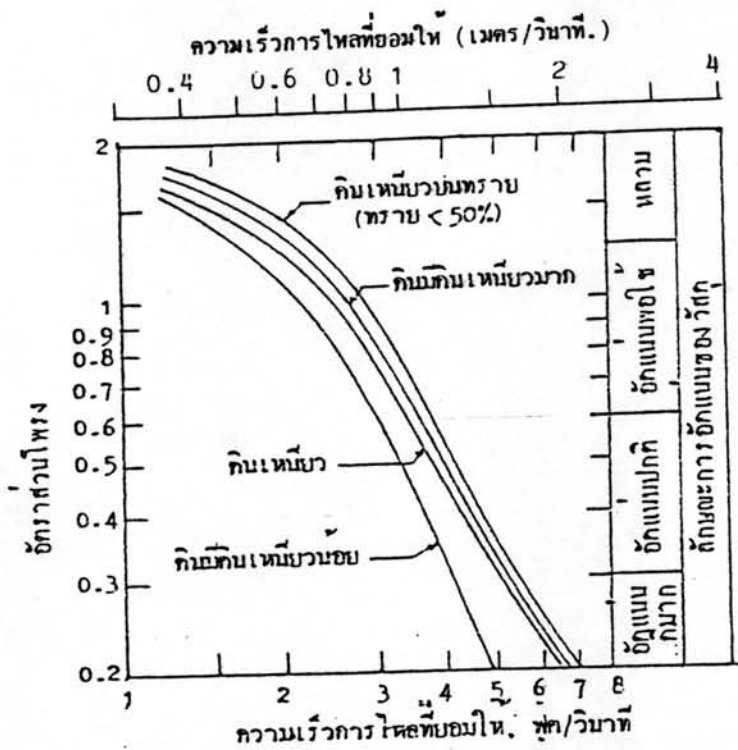
วัสดุประเภทไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค								
ความลึกของการไหล (เป็น เมตร)	0.03	0.60	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	
ความลึกของการไหล (เป็น ฟุต)	0.98	1.97	3.28	4.92	6.58	8.20	9.84	
ตัวคูณลดหรือเพิ่ม	0.80	0.90	1.00	1.10	1.15	1.20	1.25	
วัสดุประเภทมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค								
ความลึกของการไหล (เป็น เมตร)	0.30	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
ความลึกของการไหล (เป็น ฟุต)	0.98	1.64	2.46	3.28	4.92	6.56	8.20	9.84
ตัวคูณลดหรือเพิ่ม	0.80	0.90	0.95	1.00	1.10	1.10	1.20	1.20

ตารางที่ 3-5 ความเร็วสูงสุดของการไหลที่ยอมให้ สำหรับวัสดุประกอบคลองประเภท

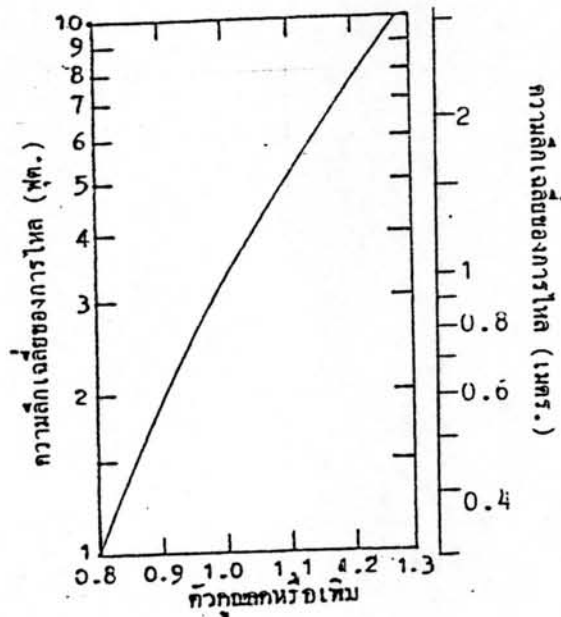
ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ ข้อมูลจาก U.S.S.R. (1936)

[จาก Lane (1955)]

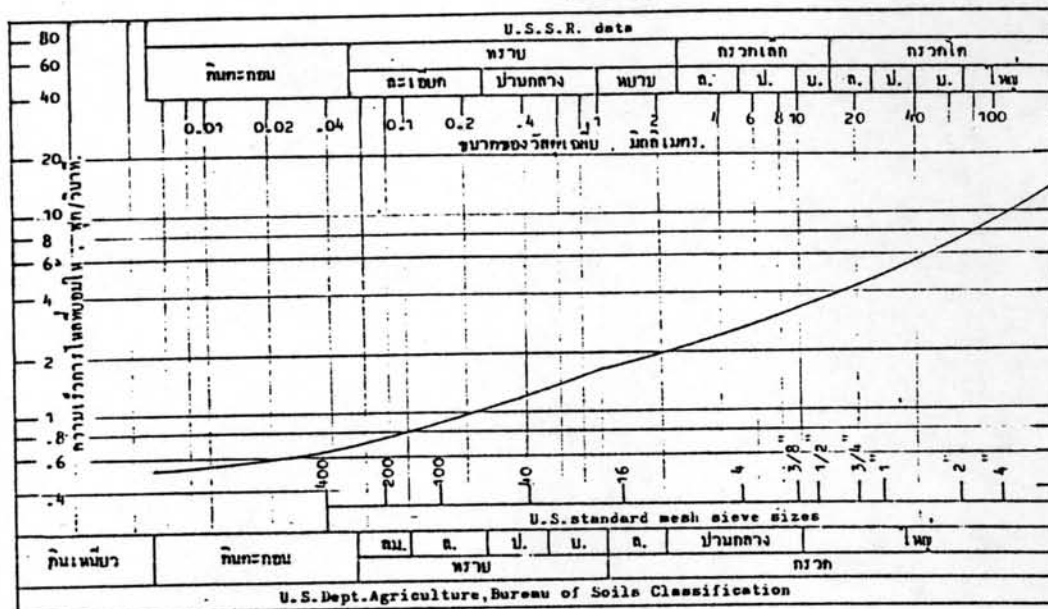
วัสดุประกอบคลอง	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุ โดยเฉลี่ย เป็น มิลลิเมตร	ความเร็วเฉลี่ยของการไหล	
		ฟุต/วินาที	เมตร/วินาที
1. ดินตะกอน	0.005	0.49	0.15
2. ดินทรายละเอียด	0.050	0.66	0.20
3. ดินทรายปานกลาง	0.25	0.98	0.30
4. ดินทรายหยาบ	1.00	1.80	0.55
5. กรวดเล็กละเอียด	2.50	2.13	0.65
6. กรวดเล็กปานกลาง	5.00	2.62	0.80
7. กรวดเล็กหยาบ	10.00	3.28	1.00
8. กรวดโตละเอียด	15.0	3.94	1.20
9. กรวดโตปานกลาง	25.0	4.59	1.40
10. กรวดโตหยาบ	40.0	5.91	1.80
11. กรวดโตขนาดใหญ่	75.0	7.87	2.40
12. กรวดโตขนาดใหญ่	100.0	8.86	2.70
13. กรวดโตขนาดใหญ่	150.0	10.83	3.30
	200.0	12.80	3.90



รูปที่ 3-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนโพรงของวัสดุ กับ ความเร็วการไหลที่ยอมให้ สำหรับวัสดุประเภทมีแรงยึดติดของอนุภาค ข้อมูลจาก U.S.S.R. (1936) [Chow (1959)]

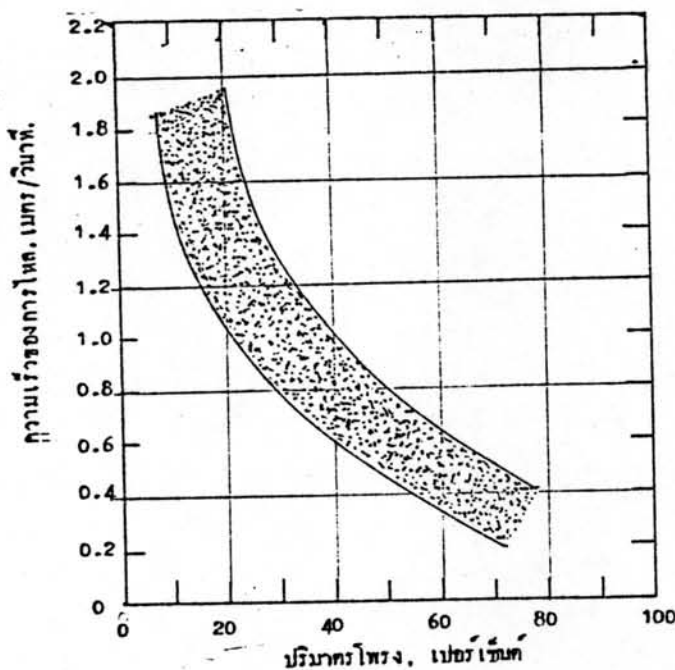


รูปที่ 3-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความลึกของน้ำ กับ ค่าตัวคูณลดหรือเพิ่มปรับแก้ค่าความเร็ว การไหลที่ยอมให้ ข้อมูลจาก U.S.S.R. (1936) [Chow (1959)]



อ.ม. ตะกอนมาก. ส. ตะกอน. ป. ปานกลาง. บ. พวม.

รูปที่ 3-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วการไหลที่ยอมให้ กับ ขนาดของวัสดุ สำหรับวัสดุประเภท
ไม่มีแรงยึดติดของอนุภาค ข้อมูลจาก U.S. และ U.S.S.R. Chow (1959)



รูปที่ 3-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วการไหลที่ยอมให้ กับ ปริมาณพรองของวัสดุ
โดย Garbrecht(1961)[Graf(1971)]

ยึดติดของอนุภาค (cohesive soil) ดังแสดงในรูปที่ 3-7 Graf (1971) ให้ข้อคิดเห็นว่า ผลการศึกษาของ Garbrecht เหมาะสมกับการออกแบบคลองในยุโรป

3.1.2.5 Kraatz (1977)

Kraatz (1977) ได้กำหนดความเร็วการไหลที่ยอมให้ได้ดังแสดงในตารางที่ 3-6 และ 3-8 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของวัสดุกับความเร็วการไหลที่ยอมให้

3.1.2.6 Pune

Pune (Varsheney, 1979) ได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของวัสดุกับความเร็วการไหลที่ยอมให้ ดังในตารางที่ 3-7

3.1.2.7 Hughes (1980)

Hughes (1980) ได้ศึกษาถึงความเร็วการไหลที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อน (scour velocities) ต่อกอง โดยรวบรวมข้อมูลคลองในสหรัฐอเมริกาและข้อมูลคลองในรัฐOklahoma จากผลการศึกษาของ Kecley (1961) Hughes ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลหาความสัมพันธ์ของความเร็วกการไหลของน้ำกับความลึกของการไหลที่ระดับความเป็นไปได้ (probability) ของการกัดเซาะต่าง ๆ โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ โดยพิจารณาความเป็นไปได้ของความเร็วกการไหลที่ทำให้เกิดการกัดเซาะที่ระดับ 99 เปอร์เซ็นต์, 50 เปอร์เซ็นต์ และ 1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ Hughes ได้ศึกษาคลองในสภาพดินต่าง ๆ คือ ดินตะกอนปนทราย (sandy silt), ดินเหนียวปนดินตะกอน (silty clay) และดินเหนียว (clay) ดังแสดงผลไว้ในรูปที่ 3-8 และ Hughes ยังได้เปรียบเทียบผลการศึกษาที่ได้กับผลการศึกษาของ Fertier & Scobey (1926), ข้อมูลจาก U.S.S.R. (1936) ซึ่งจะให้ผลไม่แตกต่างกันมากนัก

ตารางที่ 3-6 ความเร็วสูงสุดของการไหลที่ไม่ทำให้เกิดการกัดเซาะ

โดย Kraatz

[จาก Kraatz (1977)]

ชนิดของวัสดุ	ความเร็วสูงสุดของการไหล	
	ฟุต-วินาที	เมตร/วินาที
1. ดินทรายละเอียด (Fine sand under Quicksand condition)	0.75-1.00	0.20-0.30
2. ดินทราย (Sandy soil)	1.00-2.50	0.30-0.75
3. ดินร่วนปนทราย (Sandy loam)	2.50-3.00	0.75-0.90
4. ดินร่วนจนถึงดินร่วนปนทราย (Loam to clay loam)	2.75-3.75	0.85-1.10
5. ดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)	4.00-5.00	1.10-1.50

ตารางที่ 3-7 ความเร็วสูงสุดของการไหลที่ยอมให้สำหรับดินชนิดต่าง ๆ

โดย Pune

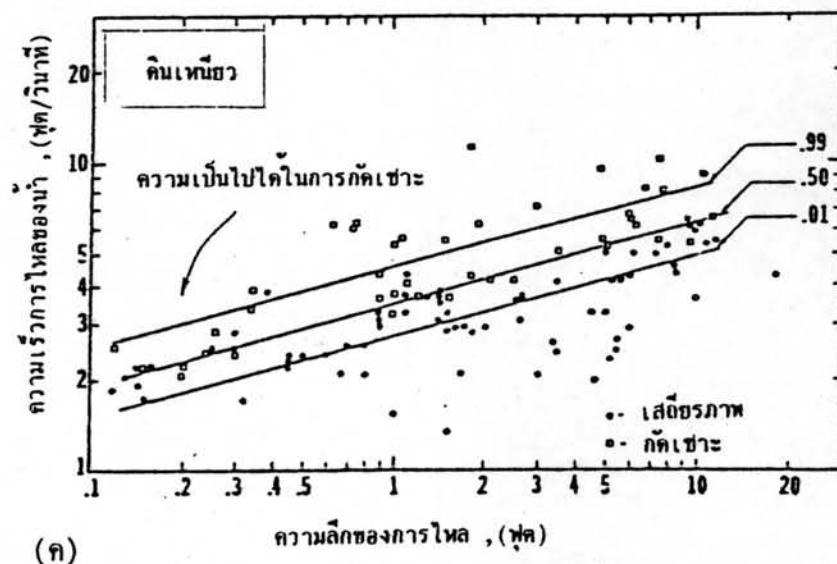
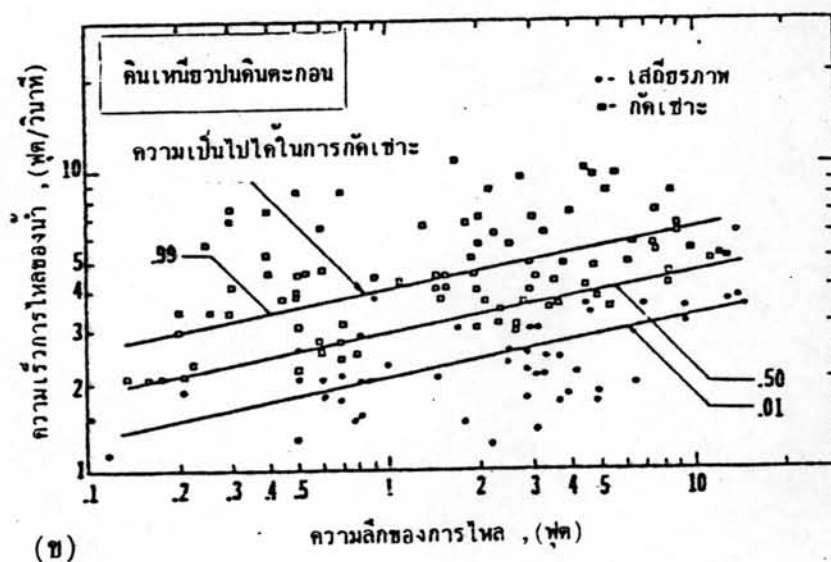
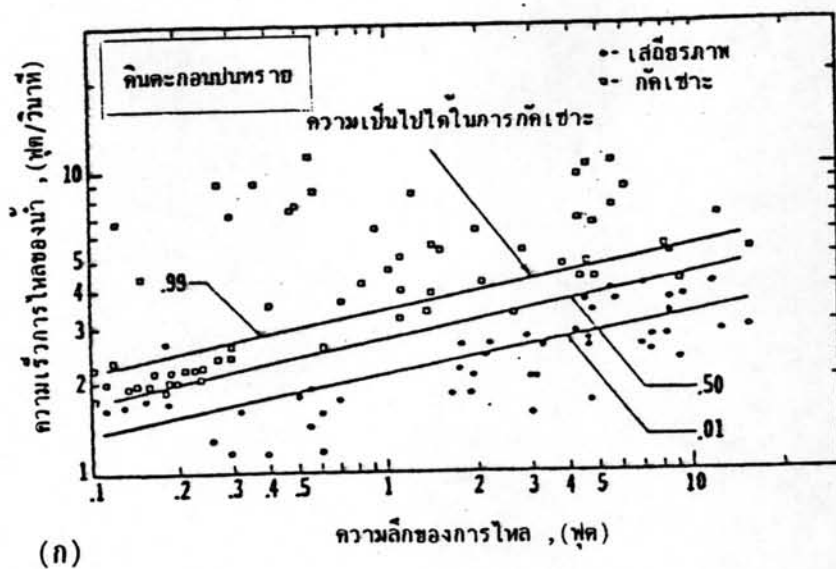
[จาก Varshney (1979)]

ชนิดของดิน	ความเร็วสูงสุดของการไหลที่ยอมให้	
	ฟุต/วินาที	เมตร/วินาที
1. ดินธรรมดา	0.60-0.90	0.18-0.27
2. ดินปนทรายค่อนข้างหลวม	0.30-0.60	0.09-0.18
3. ดินร่วนปนดินทราย, ดินดำอ่อน	0.60-0.90	0.18-0.27
4. ดินแข็ง	0.90-1.10	0.27-0.34
5. กรวดโต	0.46	1.50
6. หินที่แตกละเอียด	0.46	1.50

ตารางที่ 3-8 ความเร็วสูงสุดของการไหลที่ไม่ทำให้เกิดการกัดเซาะ

[จาก Kraatz (1977)]

ลักษณะของวัสดุ	ปริมาณการไหลของน้ำ เป็น ลบ.ม./วินาที								
	0.3	1.0	2.0	3.0	4.0	10.0	15.0	20.0	30.0
ดินตะกอน, ทรายละเอียด, ดินร่วนเล็กน้อยปนทราย (Silt, fine sand, light sandy loam)	0.37	0.39	0.41	0.43	0.45	0.47	0.49	0.50	0.52
เป็นดินทรายปานกลาง (Medium sandy ground)	0.46	0.49	0.52	0.54	0.56	0.59	0.61	0.63	0.65
ดินค่อนข้างปนทรายเล็กน้อย (Light loam)	0.53	0.56	0.59	0.61	0.64	0.68	0.70	0.73	0.74
เป็นดินร่วนปานกลาง, ดินเหลืองปานกลาง, ทรายหยาบ (Medium loam, medium loess, coarse sand)	0.59	0.65	0.67	0.89	0.72	0.75	0.79	0.81	0.84
เป็นดินร่วนมาก, ค่อนข้างปนดินเหนียวเล็กน้อย, ดินเหลืองเป็นเม็ด, ทรายหยาบมาก (Heavy loam, light clay, close grain loess coarse sand)	0.	0.61	0.75	0.78	0.81	0.86	0.89	0.90	0.94
กรวดทรายหรือกรวดหินขนาดเล็ก (Fine shingle or gravel)	0.73	0.77	0.82	0.84	0.88	0.93	0.96	0.98	1.02
ดินเหนียวปานกลางเป็นชั้นหนา, กรวดหินขนาดกลาง (Thick medium clay, medium gravel)	0.82	0.87	0.92	0.95	0.99	1.05	1.09	1.11	1.16
เป็นดินเหนียวอย่างมาก, กรวดทรายหรือกรวดหินขนาดใหญ่ (Heavy clay (tertiary), coarse shingle or gravel)	1.26	1.34	1.42	1.47	1.53	1.62	1.68	1.72	1.79



รูปที่ 3-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วกการไหลของน้ำ กับ ความลึกการไหลของน้ำ
 ทุกระดับความเป็นไปได้ของการกค้เซาะต่างๆ โดย Hughes (1980)

3.2 การออกแบบคลองโดยใช้ทฤษฎีแรงเฉือนหรือแรงจูง

(Method of Tractive Force Theory)

การออกแบบวิธีนี้ เป็นการออกแบบคลองโดยอาศัยหลักการทางกลศาสตร์ (mechanics) โดยคำนึงถึงแรงที่เกิดจากน้ำหนักของน้ำ ที่กระทำในแนวสัมผัสกับท้องคลอง (bottom) และลาดชันข้างคลอง (side slope) โดยแรงเฉือน (tractive force) ดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความลาดเอียงและรัศมีชลศาสตร์ (Hydraulic radius) ของคลองดังกล่าวข้างแล้วในหัวข้อ 2.2 ในการกำหนดหน่วยแรงเฉือนวิกฤติที่ยอมรับได้ มีหลายคนพยายามจะหาความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเฉือนที่ยอมรับได้กับองค์ประกอบของคลองต่าง ๆ เช่น ขนาดของวัสดุและความถ่วงจำเพาะ โดยอาศัยผลการทดลองและการศึกษาในสนาม หลักการของแรงเฉือนมีลักษณะคล้ายกับหลักการของความเร็วการไหลที่ยอมรับได้

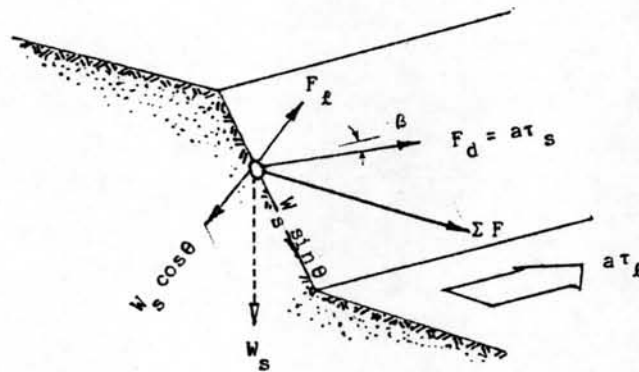
การวิเคราะห์การกระจายของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนลาดฝั่งคลองและท้องคลอง ได้ถูกกล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2.1 หัวข้อ 3.2.2 และหัวข้อ 3.2.3 กล่าวถึงการกำหนดหน่วยแรงเฉือนวิกฤติสำหรับการออกแบบ ซึ่งได้รับทั้งจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการและข้อมูลและประสบการณ์ในสนามตามลำดับ

3.2.1 การกระจายของแรงเฉือนเนื่องจากการไหล

แรงเฉือน (tractive force) เนื่องจากการไหลเป็นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของน้ำไหลและผิวของคลอง ซึ่งแรงเฉือนนี้พยายามที่จะจุดลากชั้นวัสดุของดิน (soil particle) ให้หลุดออกจากผิวของท้องและลาดฝั่งคลองดังแสดงในรูป 3-9 อันเป็นจุดเริ่มต้นของการกัดเซาะ โดยแรงเฉือนดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความลาดเอียงของท้องคลอง (bottom slope) และรัศมีชลศาสตร์ (hydraulic radius) หรือความลึกของการไหล (water depth) Desaulniers and Frenette [Shen (1972)] ได้ทำการทดลองหารูปแบบการกระจายของหน่วยแรงเฉือนทั้งบนลาดฝั่งและท้องคลองดังแสดงในรูป 3-10 (ก) ซึ่งค่าหน่วยแรงเฉือนที่แสดงเป็นตัวคูณของ wRS_0 โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี Membrane Analogy [Lane (1955)]

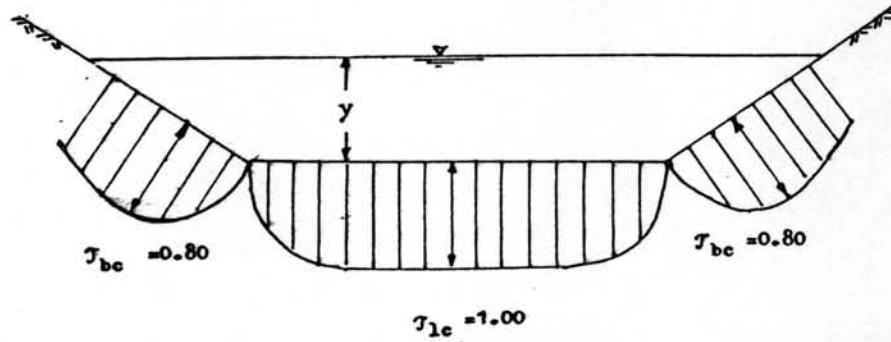
ได้ผลการกระจายของหน่วยแรงเฉือนดังแสดงในรูป 3-10 (ข) ซึ่งเป็นตัวคูณของ ($w_s \gamma_o$) Lane ยังได้ให้ค่าของหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในเทอมของ ($w_s \gamma_o$) ทั้งบนผิวลาดฝั่งและท้องคลอง ดังแสดงในรูป 3-11 สำหรับรูปเรขาคณิตของคลองต่าง ๆ กัน

ในการคำนวณออกแบบคลองให้มีเสถียรภาพ วิศวกรจะต้องควบคุมมิให้หน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นบนทั้งลาดฝั่งคลองและท้องคลอง เกินกว่าค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤติ เพื่อเป็นการป้องกันขึ้นวัสดุของดิน (soil particle) หลุดออกจากที่เดิมและถูกน้ำพัดพาไป โดยทั่วไปแล้วหน่วยแรงเฉือนวิกฤติจะมีกำหนดสำหรับกรณีท้องคลอง ดังจะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อ 3.2.2 และ 3.2.3 การพิจารณาหน่วยแรงเฉือนวิกฤติบนลาดฝั่งคลอง คำนึงถึงแรงที่กระทำต่อวัสดุบนลาดฝั่งคลอง ซึ่งประกอบด้วย แรงเนื่องจากการไหลของน้ำและแรงเนื่องจากร้ำหนักของวัสดุเอง (รูปที่ 3-9)

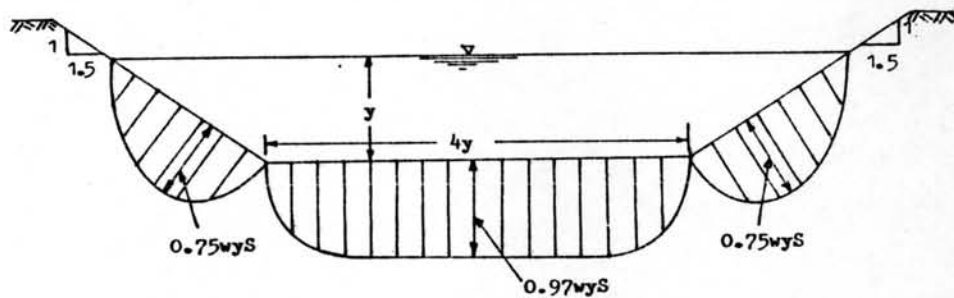


- | | |
|--|---------------------------------------|
| a = พื้นที่ประสิทธิผลของวัสดุ | W_s = น้ำหนักของวัสดุในน้ำ |
| τ_s = หน่วยแรงเฉือนบนลาดท้องคลอง | τ_s = หน่วยแรงเฉือนบนลาดฝั่งคลอง |
| θ = ความมุมผลึกของวัสดุ | θ = มุมความลาดเอียงของฝั่งคลอง |
| β = มุมเอียงของหน่วยแรงเฉือน ซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนที่ครั้งที่สองของวัสดุ (ดูรูป 3-8) | |
- (โดยเฉพาะเมื่อการไหลผ่านส่วนโค้งงอของคลอง)

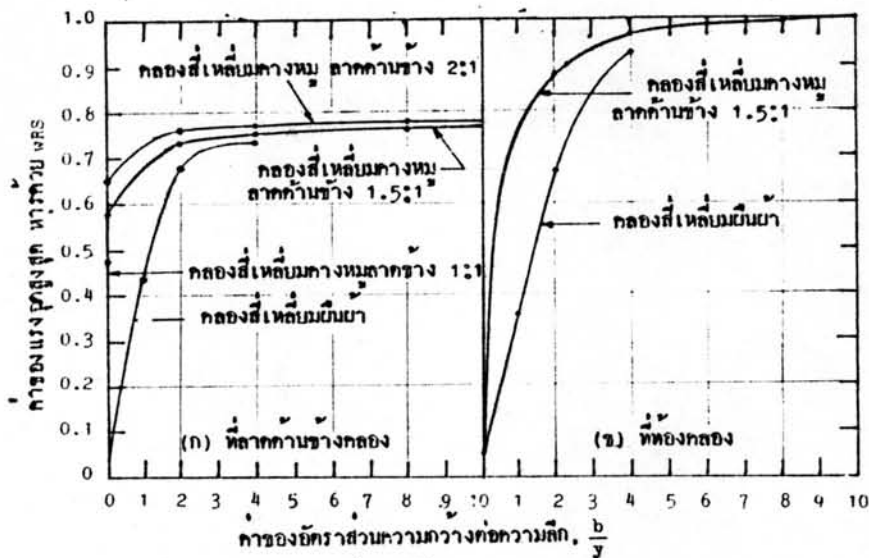
รูปที่ 3-9 แสดงแรงกระทำต่ออนุภาคของวัสดุ บนลาดเอียงฝั่งคลอง เมื่อมีการไหลของน้ำในคลอง



รูปที่ 3-10(ก). แสดงการกระจายแรงเฉือน บนลาดฝั่งคลองและท้องคลอง สำหรับคลองรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู จากผลการทดลอง โดย G.Desaulniers & M.Frenette [Shen(1972)]



รูปที่ 3-10(ข). แสดงการกระจายแรงเฉือน บนลาดฝั่งคลองและท้องคลอง สำหรับคลองรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ โดย Lane(1955)



(w, x = หน่วยนำหน้าของน้ำ, y = ความลึกของน้ำ, b = ความกว้างของคลอง
 S_o = ความลาดเอียงของเขมพลังงาน)

รูปที่ 3-11 แสดงความสัมพันธ์ ของค่าแรงเฉือนบนลาดฝั่งคลองและท้องคลอง กับ ค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของคลอง โดย Lane(1955)

พิจารณาแรงที่กระทำต่อวัสดุบนพื้นลาดเอียงผิงคลอง

$$\text{แรงเนื่องจากน้ำหนักของวัสดุในระนาบสัมผัส} = W_s \sin \theta$$

$$\text{แรงจุดลากเนื่องจากการไหลของน้ำ, } F_d = a \tau_s$$

แรงลัพธ์ของแรงเนื่องจากน้ำหนักกับแรงเนื่องจากการไหลของน้ำ,

$$\Sigma F = \sqrt{W_s^2 \sin^2 \theta + a^2 \tau_s^2}$$

ตามหลักการทางกลศาสตร์ สำหรับสภาวะการเริ่มเคลื่อนที่ของวัสดุบนระนาบเอียงที่มีความฝืดนั้น แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของวัสดุ จะเท่ากับแรงที่กระทำให้วัสดุนั้นเริ่มเคลื่อนที่ ดังนั้นจะได้

$$W_s \cos \theta \tan \phi = (W_s^2 \sin^2 \theta + a^2 \tau_s^2)^{1/2}$$

หน่วยแรงเฉือนบนลาดผิงคลอง คือ

$$\tau_s = \frac{W_s}{a} \cos \theta \tan \phi \left[1 - \frac{\tan^2 \theta}{\tan^2 \phi} \right]^{1/2}$$

พิจารณาแรงเฉือนตามแนวลาดท้องคลอง

$$W_s \tan \theta = a \tau_l$$

หน่วยแรงเฉือนตามแนวลาดท้องคลอง

$$\tau_l = \frac{W_s}{a} \tan \theta$$

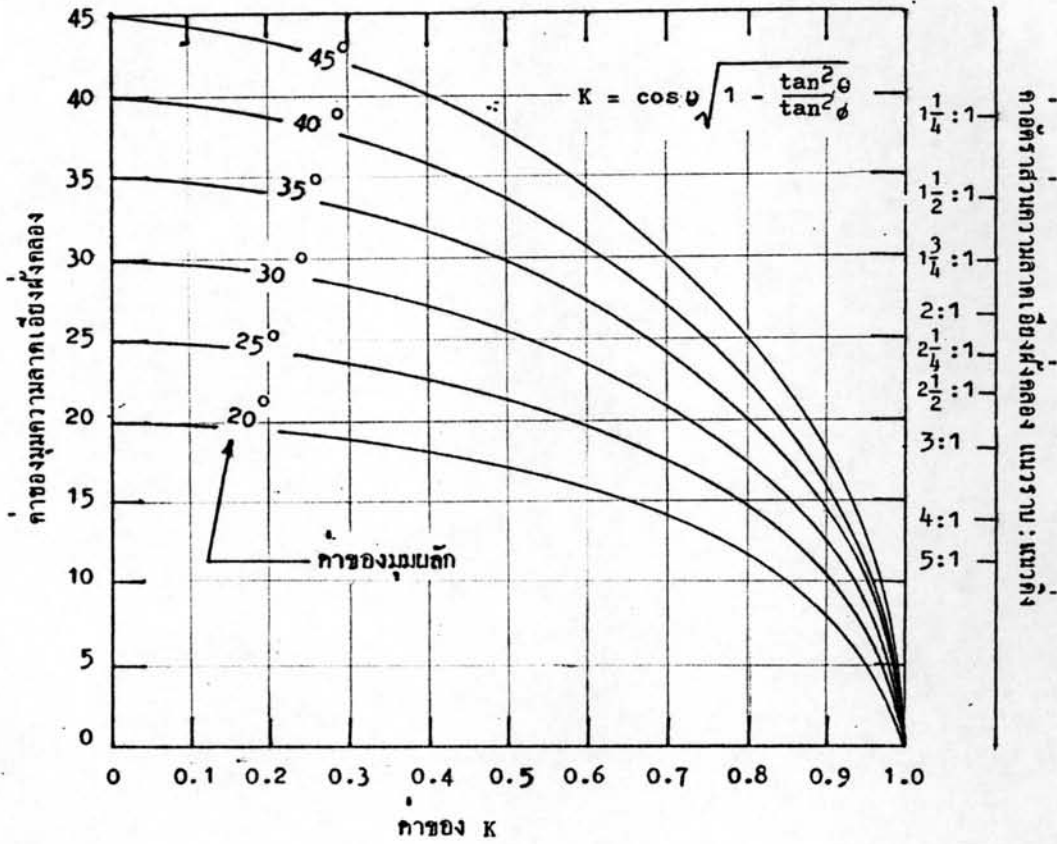
อัตราส่วนของหน่วยแรงเฉือนบนลาดผิงคลองต่อหน่วยแรงเฉือนบนลาดท้องคลอง

$$\frac{\tau_s}{\tau_l} = \cos \theta \left[1 - \frac{\tan^2 \theta}{\tan^2 \phi} \right]^{1/2} = K \dots \dots \dots (3-8)$$

หรือ

$$K = \left[1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (3-9)$$

เพื่อความสะดวกในการคำนวณออกแบบคลอง Carter (1953) และ Lane (1955) ได้ให้ค่าอัตราส่วนของหน่วยแรงเฉือนบริเวณลาดผิงและบนท้องคลองหรือค่าองค์ประกอบ K ดังแสดงในรูป 3-12



(K = อัตราส่วนของแรงเฉือนวิกฤตบนลาดชันข้างของคลอง ต่อแรงเฉือนวิกฤตที่ท้องคลอง
 θ = มุมของความลาดเอียงชันข้างคลอง, φ = มุมปลัก)

รูปที่ 3-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความลาดเอียงฝั่งคลอง กับ ค่า K
 สำหรับค่ามุมปลักของวัสดุต่างๆ โดย Lane (1955)

3.2.2 การกำหนดหน่วยแรงเฉือนวิกฤติจากผลการทดลอง

3.2.2.1 Schoklitsch (1914)

Schoklitsch (1914) ได้เสนอแนะสมการแรงเฉือนวิกฤติที่ได้จากผลการทดลองของเขา คือ

$$(\tau_o)_{cr} = \sqrt{0.201 \gamma (\gamma_s - \gamma) \lambda' \bar{D}^3} \dots\dots\dots (3-10)$$

เมื่อ $(\tau_o)_{cr}$ = หน่วยแรงเฉือนวิกฤติ (กิโลกรัม/ตารางเมตร)

\bar{D} = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยปานกลาง (mean diameter) (เมตร)

λ' = สัมประสิทธิ์รูปร่าง (shape coefficient)

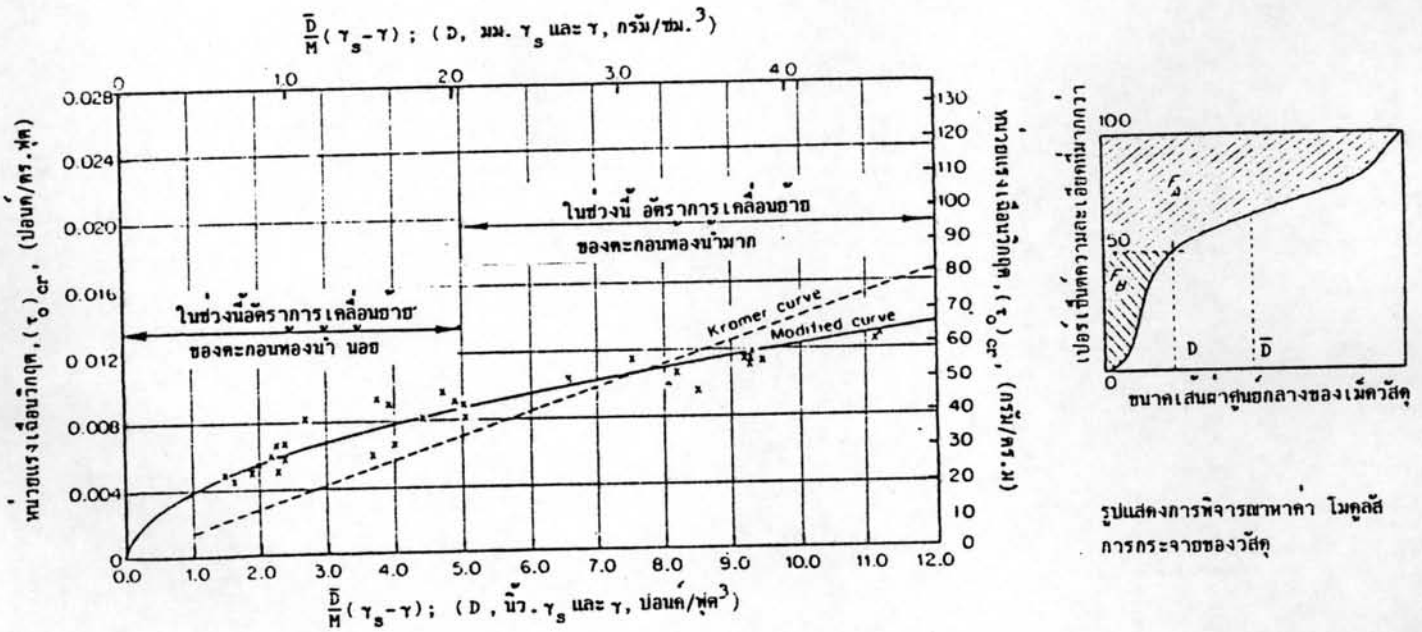
ค่าของ $\lambda' = 1$ สำหรับวัสดุรูปร่างทรงกลม

$\lambda' = 4.4$ สำหรับวัสดุรูปร่างเป็นแผ่น

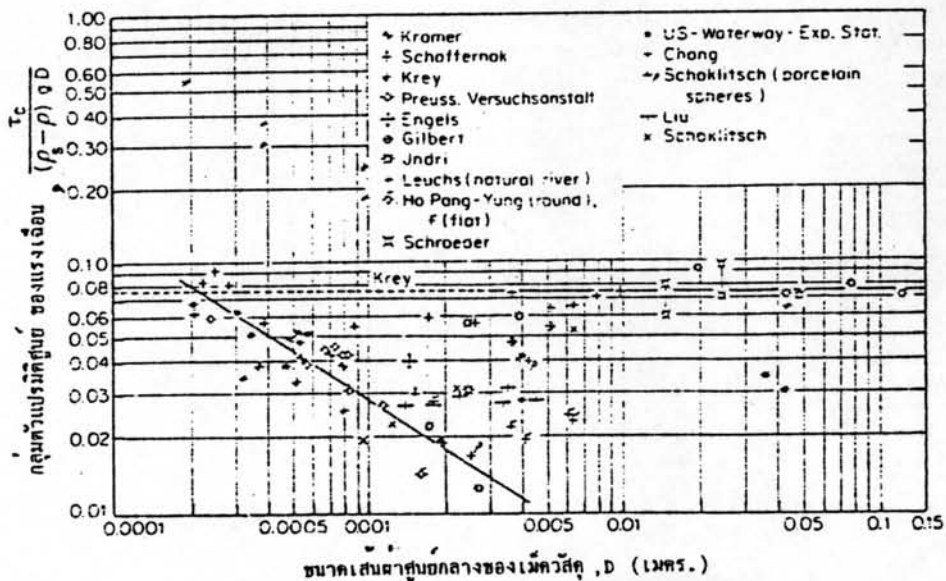
ในปีต่อ ๆ มาได้มีหลายคนทำการทดลองและศึกษาในสนาม ที่เด่น ๆ คือ Krey (1925), Eisner (1932), Nemenyi (1933), O'Brien, Gilbert, Engels, Schoklitsch, และ Sehaftermak เป็นต้น ข้อมูลที่ได้มาใหม่เหล่านี้ได้มีบุคคลหลายคนที่ศึกษาทางด้านนี้ พบว่าไม่ค่อยมีความแตกต่างจากผลของสมการของ Schoklitsch (1914) มากนัก โดยเฉพาะรูปแบบของสมการ

3.2.2.2 Tiffany (1935)

Kramer (1935) ได้พิจารณาถึงการกระจายของวัสดุที่ตกลงกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุโดยเฉลี่ย โดยการนำเอาการกระจายของโมดูลัสวัสดุเข้ามาใช้ ได้ให้สมการซึ่งเขาได้จากข้อมูลที่เขาศึกษา และจากผลงานวิจัยบุคคลอื่น ๆ ซึ่ง Tiffany et. al. (1935) ได้ให้สมการในลักษณะเดียวกันที่ได้จากผลการทดลองที่ดีกว่า คือ



รูปที่ 3-13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเจือปนวิกฤต กับ คุณลักษณะของทราย (Sand Characteristics) โดย Tiffany et. al. (1935)



รูปที่ 3-14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเจือปนวิกฤต กับ ขนาดของวัสดุ โดย Schoklitsch (1950)

$$(\tau_o)_{cr} = 29 \sqrt{(\gamma_s - \gamma) \frac{\bar{D}}{M}} \dots\dots\dots (3-11)'$$

เมื่อ $(\tau_o)_{cr}$ = หน่วยแรงเฉือนวิกฤติ (กรัม/ตารางเมตร)

$$M = \text{โมดูลัสการกระจายของวัสดุ} = F_A/F_B \text{ (ดูรูป 3-13)}$$

และได้ให้หน่วยแรงเฉือนวิกฤติ ดังแสดงในรูป 3-13 Kramer (1935) ได้ให้ความคิดในการอธิบายถึงลักษณะของวัสดุท้องคลองที่มีขนาดคละกันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุและโมดูลัสการกระจายของวัสดุ (grain distribution modulus, M) Chang (1939) ได้ทำการในห้องปฏิบัติการในลักษณะคล้ายกันและแสดงผลของข้อมูลการทดลองถึงผลของรูปลักษณะของวัสดุ (particle shape) ต่อหน่วยแรงเฉือนวิกฤติและ Chang ยังได้ศึกษาถึงวัสดุในลักษณะเป็นรูปยาวต่อสภาวะการเริ่มกักร่อนของวัสดุ

3.2.2.3 White (1940)

White (1940) ได้ศึกษาถึงสภาวะสมดุลย์ของวัสดุสำหรับการไหลที่เป็นแบบลามินาร์ (laminar flow) และให้ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเฉือนวิกฤติไว้ คือ

$$\tau_c = 0.18 (\gamma_s - \gamma) D_s \tan \theta \dots\dots\dots (3-12)$$

เมื่อ τ_c = หน่วยแรงเฉือนวิกฤติ (กิโลกรัม/ตารางเมตร)

θ = มุมความลาดเอียงท้องคลอง

แต่ทว่าโดยแท้จริงแล้วปัญหาในทางวิศวกรรมที่พบเป็นส่วนใหญ่ การไหลจะเป็นแบบเทอร์บูเลนต์ (turbulent flow)

3.2.2.4 Schoklitsh (1950)

Schoklitsch (1950) ได้รวบรวมข้อมูลต่าง ๆ มากมาย มาทำการวิเคราะห์ใหม่ (จากรูป 3-14) และได้สมการความสัมพันธ์สองสมการ สำหรับอธิบาย

แรงเฉือนวิกฤติสำหรับขนาดของวัสดุที่ต่างขนาดกัน ดังนี้

สำหรับ $D \gg 0.006$ เมตร

$$(\tau_o)_{cr} = 0.076 (\gamma_s - \gamma) D \quad \dots\dots\dots (3-13)$$

$$(\tau_o)_{cr} = \text{หน่วยแรงเฉือนวิกฤติ (กิโลกรัม/ตารางเมตร)}$$

$$D = \text{ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุ (เมตร)}$$

สมการ 3-13 เช่นเดียวกับสมการของ Krey ที่เคยแนะนำไว้

สำหรับ $0.0001 < D < 0.003$ เมตร

$$(\tau_o)_{cr} = 0.000285 (\gamma_s - \gamma) D^{1/3} \quad \dots\dots\dots (3-14)$$

จากรูป 3-14 จะเห็นว่าจุดเปลี่ยนของช่วง (transition) มีความแปลก ซึ่งรูปความสัมพันธ์ของ Schoklitsh ไม่สามารถอธิบายได้ รูปความสัมพันธ์ของ Shields (1936) จึงเข้ามามีบทบาทแทน

3.2.2.5 Leliavsky (1955)

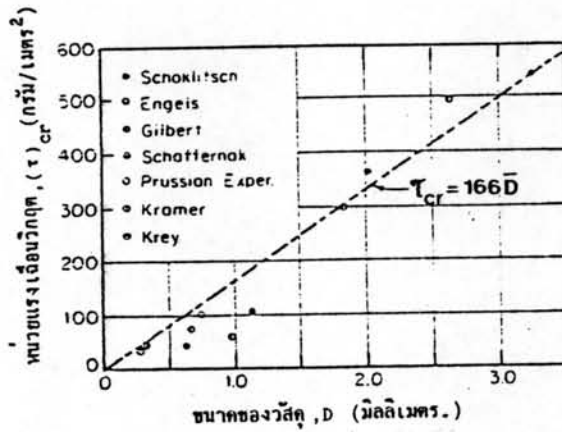
Leliavsky (1955) ได้ให้ความสัมพันธ์, ของ $(\tau_o)_{cr}$ และ \bar{D} จากรูป 3-15 ในรูปของสมการง่าย ๆ คือ

$$(\tau_o)_{cr} = 166 \bar{D} \quad \dots\dots\dots (3-15)$$

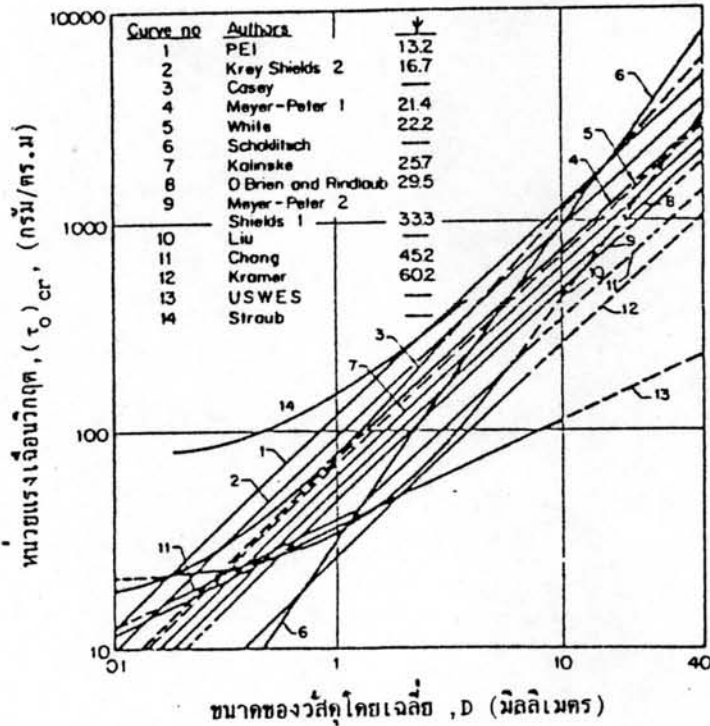
$$\text{เมื่อ } (\tau_o)_{cr} = \text{หน่วยแรงเฉือนวิกฤติ (กรัม/ตารางเมตร)}$$

$$\bar{D} = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยปานกลางของวัสดุ (มม.)}$$

สมการนี้ใช้ในกรณีที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุไม่เกิน 3.4 มม.



รูปที่ 3-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเฉือนวิกฤต กับ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุ โดย Leliavsky(1955)



รูปที่ 3-16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเฉือนวิกฤต กับ ขนาดของวัสดุ เปรียบเทียบจากผลการศึกษานักบุคคลต่างๆ โดย Chien(1954)

3.2.2.6 Egiazaroff (1965)

Egiazaroff (1965) เสนอแนะสมการสภาวะการเริ่มเคลื่อนที่ของวัสดุผสมที่มีขนาดของวัสดุไม่สม่ำเสมอ (non-uniform particles)

$$\frac{\tau_c}{(\tau_s - \gamma) D_{50}} = \frac{0.1}{(\log_{19} \frac{D_{50}}{D})^2} \dots\dots\dots (3-16)$$

D_{50} = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวัสดุเฉลี่ยปานกลาง (median diameter)

\bar{D} = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวัสดุโดยเฉลี่ย (average diameter)

สมการนี้จะเป็นจริงเมื่อ

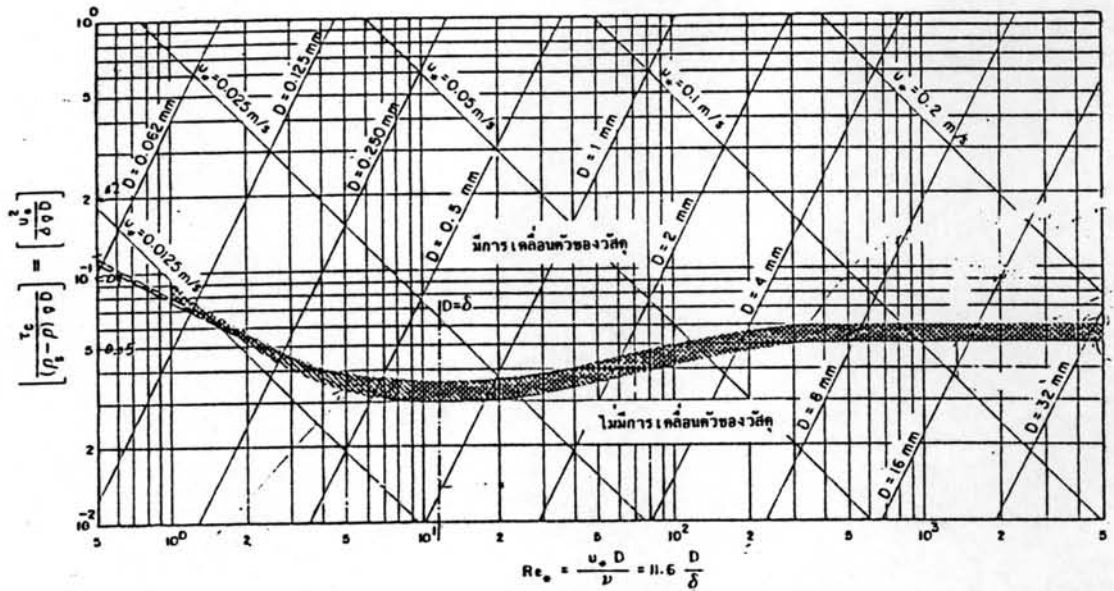
$D_{50} < \bar{D}$ สำหรับวัสดุผสมเป็นลักษณะผสมละเอียดละเอียด (fine-graded)

$D_{50} > \bar{D}$ สำหรับวัสดุผสมเป็นลักษณะผสมหยาบ (coarse-graded)

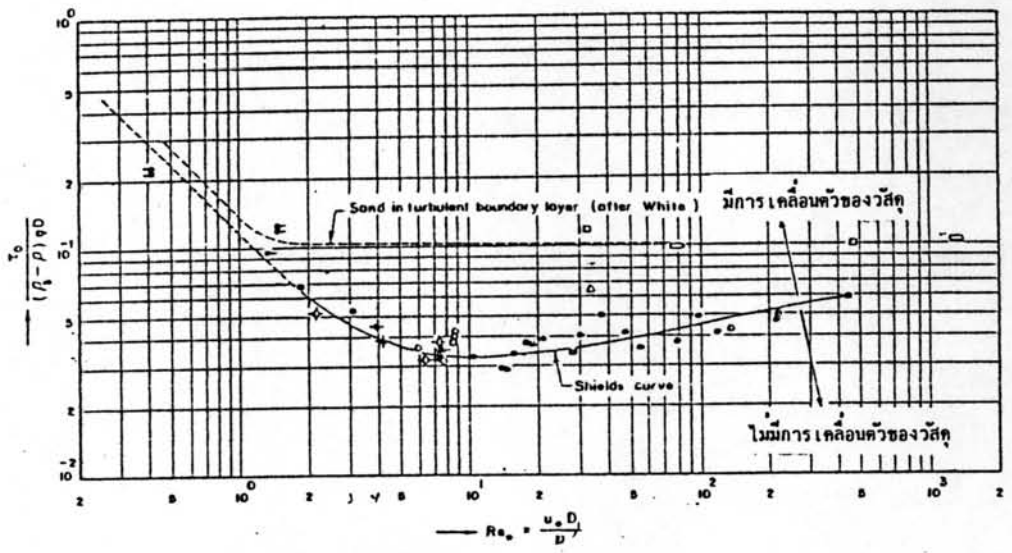
3.2.2.7 Shields (1936)

ได้มีการทดลองหลายการทดลองพยายามจะหาแนวทางอธิบายสมการ (2-9) ให้แจ่มแจ้ง บุคคลแรกที่พยายามอธิบายความสัมพันธ์ของสมการ (2-9) คือ Shields (1936) ซึ่งได้ให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปความสัมพันธ์ (ดังในรูป 3-17, 3-18) และก็เป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวาง ตัวแปร $\tau_c / (\gamma_s - \gamma) D_s$ ปกติจะเรียกกันว่า ตัวแปรของ Shields (Shields Parameter)

Shields (1936) พิจารณาหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ดังกล่าว โดยการทดลองวัดค่าการเคลื่อนย้ายของตะกอนท้องน้ำ (bed load transport) สำหรับค่า $\tau_c / (\gamma_s - \gamma) D_s$ ที่แปรเปลี่ยนไปค่าต่าง ๆ โดยในการวัดจะใช้ค่าของการเคลื่อนย้ายตะกอนท้องคลองอย่างน้อยที่สุดเป็น 2 เท่าของค่าที่จตุรฤทธิ แล้วจึงประมาณค่าเข้ามายังจุดที่ตะกอนท้องคลอง



รูปที่ 3-17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กลุ่มตัวแปรของแรงเฉือนวิกฤต กับ ค่า Shear Reynolds Number สำหรับวัสดุที่มีขนาดสม่ำเสมอ (uniform grain) โดย Shields(1936)



Sym	Description	$\gamma_s, g/cm$
o	Armor	1.06
•	Lignite (Shields)	1.27
•	Granite	2.7
•	Barite	4.25
•	Sand (Cosoy)	2.65
•	Sand (Kromer)	2.65
+	Sand (U.S.W.E.S.)	2.65
•	Sand (Gilbert)	2.65

•	Sand (Vononi)	2.65
•	Glass beads (Vononi)	2.49
o	Sand (White)	2.61
o	Sand in air (White)	2.10
•	Steel shot (White)	7.9

รูปที่ 3-18 รูปความสัมพันธ์ของ Shields แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กลุ่มตัวแปรมิติศูนย์ของแรงเฉือน กับค่า Shear Reynolds Number โดย Vanoni(1964)

หายไป ซึ่งเป็นวิธีการหาสภาวะจุดวิกฤติโดยทางอ้อม เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเอียงตัวใหม่ของ เม็ดวัสดุ และปัญหาความผันแปรของสภาวะการไหล ซึ่งจะมีผลต่อการเคลื่อนตัวของเม็ดวัสดุ แม้ว่า เมื่อ $\tau_c / (\gamma_s - \gamma) D_s$ จะพิจารณาที่ค่าต่ำกว่าค่าวิกฤติ

ภายหลังต่อมาได้มีหลายคนศึกษาถึงปัญหาของรูปความสัมพันธ์ Shields เช่น Ippen and Verma (1953), Bogard (1965) บุคคลเหล่านี้ได้กล่าวถึงปัญหาของรูปความสัมพันธ์ของ Shields คือ มีความไม่สะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้ เนื่องจากตัวแปรตาม (dependent variables) (หน่วยแรงเฉือนวิกฤติหรือขนาดของวัสดุขึ้นกับปัญหา) ปรากฏอยู่บนทั้งสองแกนในรูปความสัมพันธ์ของ Shields ปัญหาต่อมา Task Committee on Preparation of Sedimentation Manual (1966) ได้พยายามแก้ไขโดยใช้กลุ่มแปรที่สาม $D_s/v [0.1(\gamma_s - 1)gD_s]^{1/2}$ เข้าไปใช้ในรูปความสัมพันธ์ของ Shields ดังในรูปที่ 3-19 Overbeek (1980) เปลี่ยนรูปความสัมพันธ์ของ Shields ในรูปความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุกับหน่วยแรงเฉือนวิกฤติและความเร็วเฉือนวิกฤติ (ดังรูปที่ 3-20)

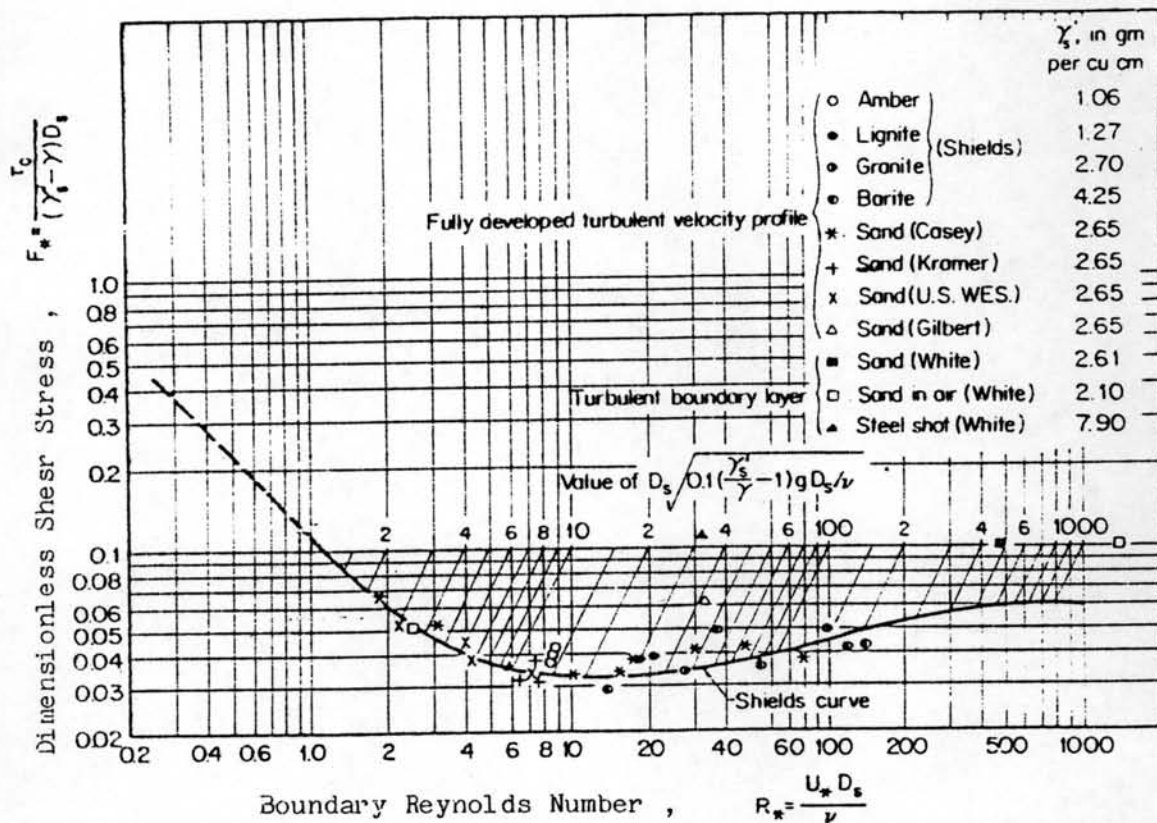
3.2.2.8 Senturk (1969)

Senturk (1969) ได้ใช้รูปแสดงความสัมพันธ์ของ Simons และ Richardson (1957) แล้วให้ได้รูปแสดงความสัมพันธ์ใหม่ขึ้นมา สำหรับแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ดังกล่าว เพื่อหลีกเลี่ยงวิธีการทดลองเปลี่ยนหาค่าถูกต้อง (trial and error) โดยเมื่อรู้ค่าความเร็วของการตกของวัสดุ (fall velocity, w) และขนาดของวัสดุก็สามารถหาค่า $U_* D/v$ ได้โดยตรงจากรูปที่ 3-21

3.2.2.9 Shulits and Hill (1968)

Shulits and Hill (1968) ได้แบ่งรูปซึ่งให้ไว้โดย Gessler (1971) ออกเป็น 4 ส่วน และให้สมการอธิบายในแต่ละส่วน คือ

$$\tau_c = 0.0215 D_s^{0.25} \dots\dots\dots 0.0003 < D_s < 0.0009 \quad (3-17)$$



รูปที่ 3-19 แสดงรูปปรับปรุงแก้ไข รูปความสัมพันธ์ของ Shields โดย Task Comittee on Preparation of Sedimentation Manual (1966)[Simons & Senturk(1977)]

$$\tau_c = 0.315 D_s^{0.633} \dots\dots\dots 0.0009 < D_s < 0.0018 \quad (3-18)$$

$$\tau_c = 16.8 D_s^{1.262} \dots\dots\dots 0.0018 < D_s < 0.0.022 \quad (3-19)$$

$$\tau_c = 6.18 D_s \dots\dots\dots D < 0.022 \quad (3-20)$$

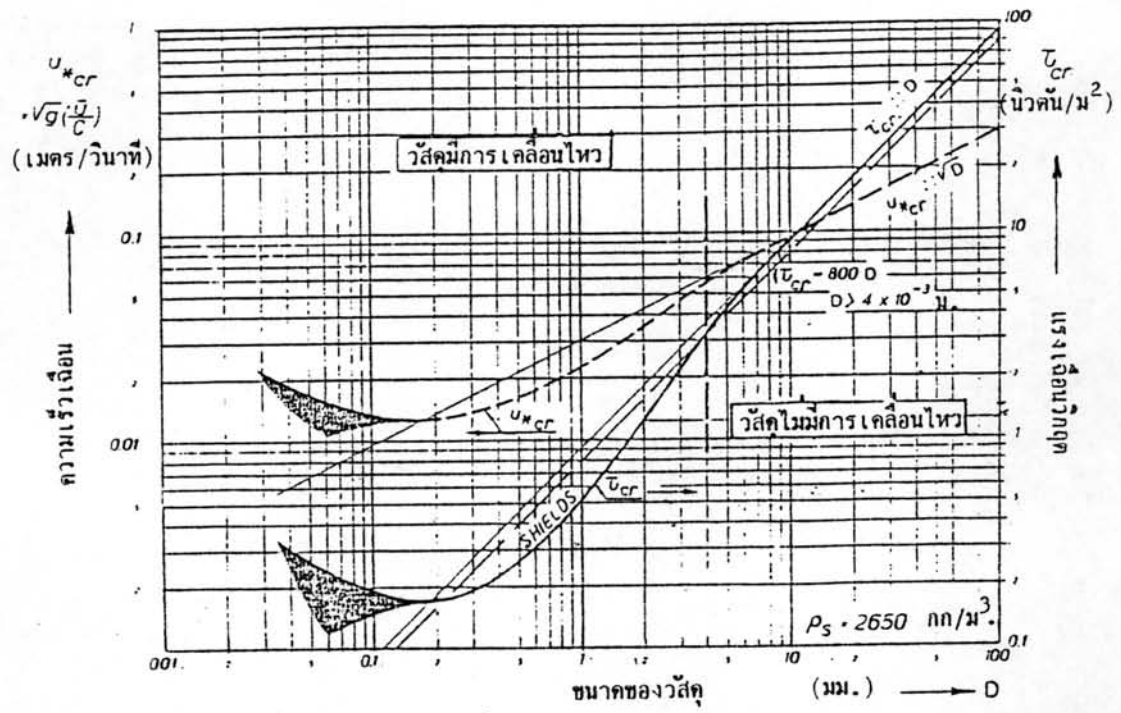
$$\tau_c = \text{หน่วยแรงเฉือนวิกฤติ (กิโลกรัม/ตารางเมตร)}$$

$$D_s = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุ (เมตร)}$$

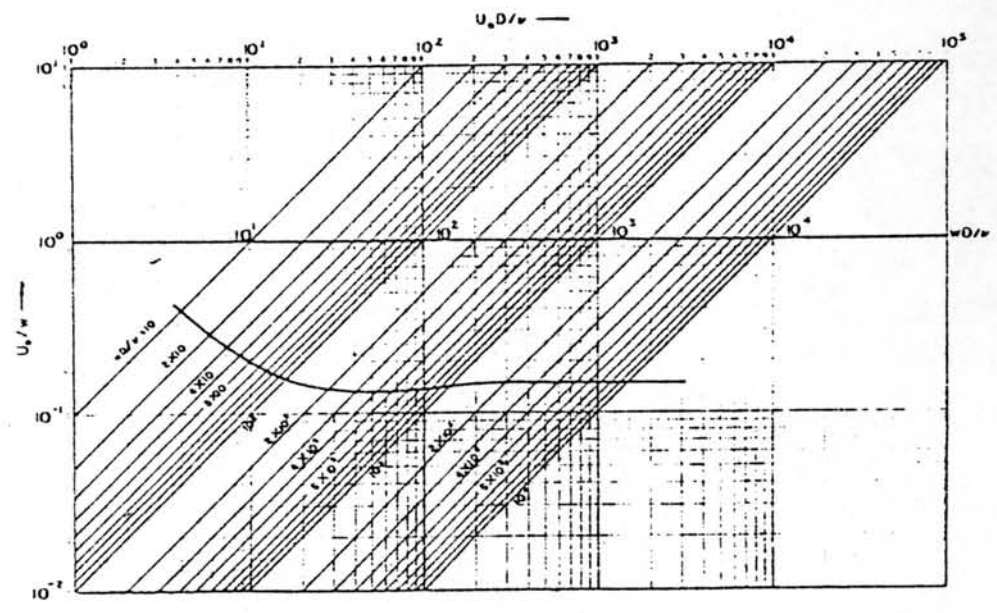
3.2.2.10 Gessler (1971)

Gessler (1971) เป็นอีกบุคคลหนึ่งที่ได้พยายามปรับปรุงแก้ไขรูปความสัมพันธ์ของ Shields ดังแสดงในรูป 3-22 โดย Gessler ได้จัดกลุ่มตัวแปรมิติศูนย์ใหม่ และพัฒนารูปความสัมพันธ์ขึ้นมาใหม่ โดยอาศัยพื้นฐานจากรูปความสัมพันธ์ของ Shields ซึ่งรูปความสัมพันธ์ของ Gessler จะมีตัวแปรตามปรากฏในกลุ่มแปรมิติศูนย์ทั้ง 2 กลุ่มเพียงตัวแปรเดียว (รูปที่ 3-23) อย่างไรก็ตาม Simons & Senturk (1977) ให้เหตุผลว่ารูปความสัมพันธ์ของ Gessler ดังกล่าวมีข้อเสีย คือ พารามิเตอร์ในทั้งสองแกนไม่มีความหมายทางกายภาพ (physical meaning) ที่เด่นชัด

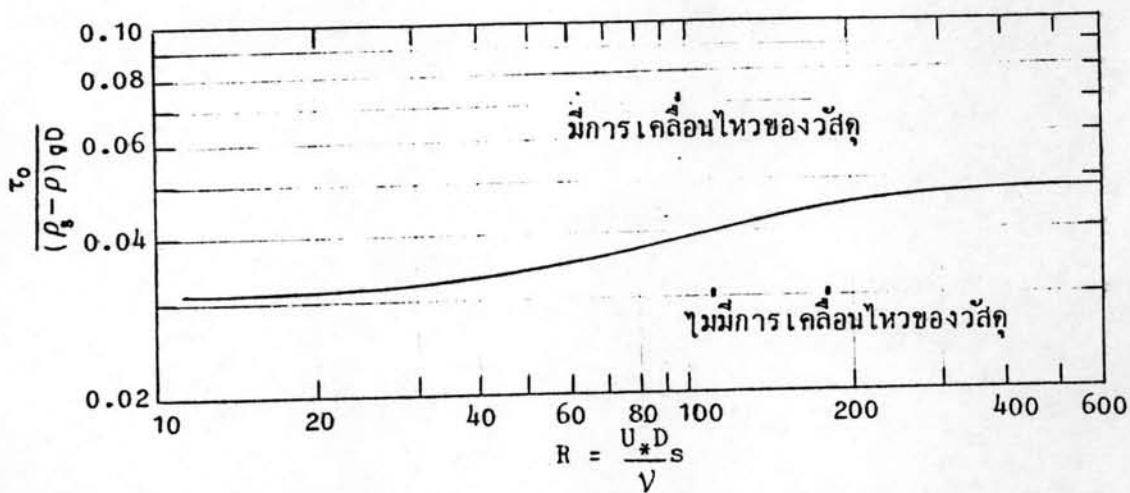
3.2.2.11 Chien (1954) ได้สรุปรวบรวมเปรียบเทียบสมการแรงเฉือนหรือแรงจุดจากผลการศึกษาของบุคคลต่าง ๆ ในรูปความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเฉือนวิกฤติกับขนาดของวัสดุ ดังในรูปที่ 3-16 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความผันแปรของผลที่ได้จากผลการศึกษาของแต่ละบุคคล Graf (1971) ให้เหตุผลว่าความแตกต่างของผลการศึกษาของบุคคลต่าง ๆ ดังกล่าว เนื่องจากความแตกต่างในการให้คำนิยามและสมมติฐานสภาวะวิกฤติของวัสดุ ซึ่งจนปัจจุบัน การให้คำนิยามก็ขึ้นกับความเห็นของแต่ละบุคคล ดังเช่น Shields (1936) ให้เงื่อนไขสภาวะวิกฤติโดยพิจารณาจากการหมดไปของตะกอนที่เคลื่อนย้าย (zero sediment transport) Kramer's (1935) ให้นิยามสภาวะการเคลื่อนตัวของวัสดุอย่างอ่อน ๆ (weak movement) Kalinske (1947) ให้ความเห็นว่าค่าแรงเฉือนสูงสุดจะมีค่ามากกว่าแรงเฉือนเฉลี่ย ซึ่ง Kalinske แนะนำว่า ควรมีค่า 3-4 เท่าของ



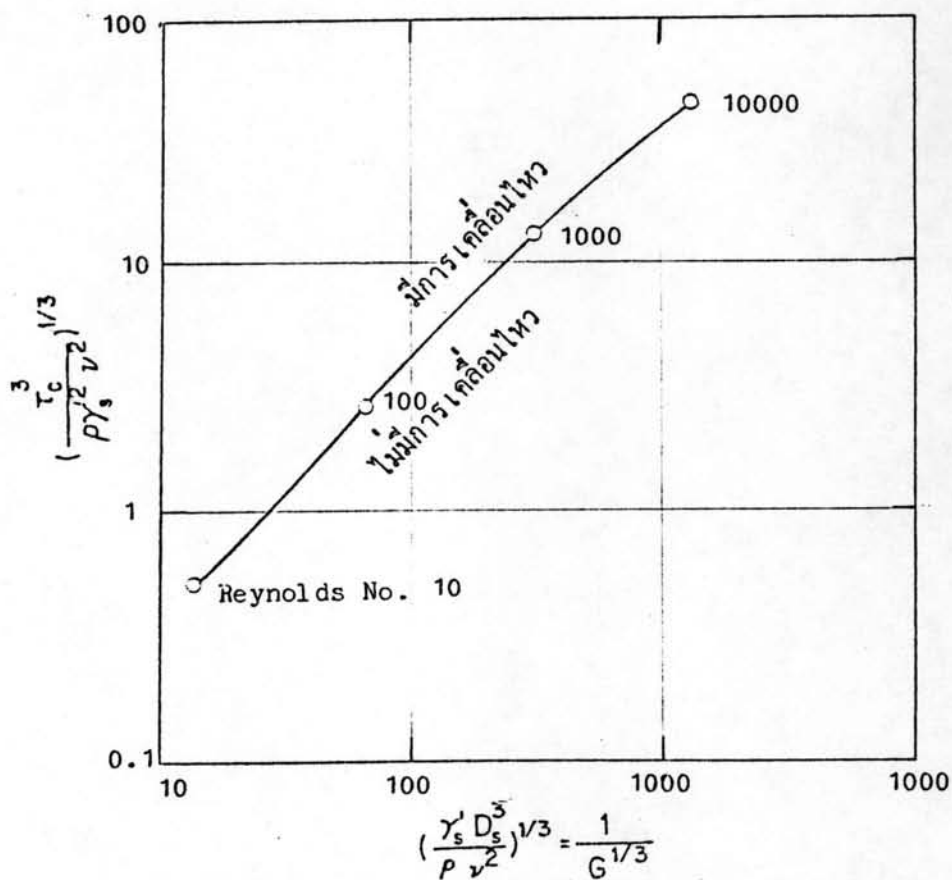
รูปที่ 3-20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเฉือนวิกฤต กับ ขนาดของวัสดุ ปรับปรุงจากรูปความสัมพันธ์ของ Shields โดย Overbeek(1980)



รูปที่ 3-21 แสดงรูปความสัมพันธ์ ช่วยในการคำนวณรูปความสัมพันธ์ของ Shields โดย Senturk(1969)



รูปที่ 3-22 แสดงรูปปรับแก้ รูปความสัมพันธ์ของ Shields โดย Gessler (1971)



รูปที่ 3-23 แสดงรูปปรับปรุง รูปความสัมพันธ์ของ Shields โดย Gessler (1971)

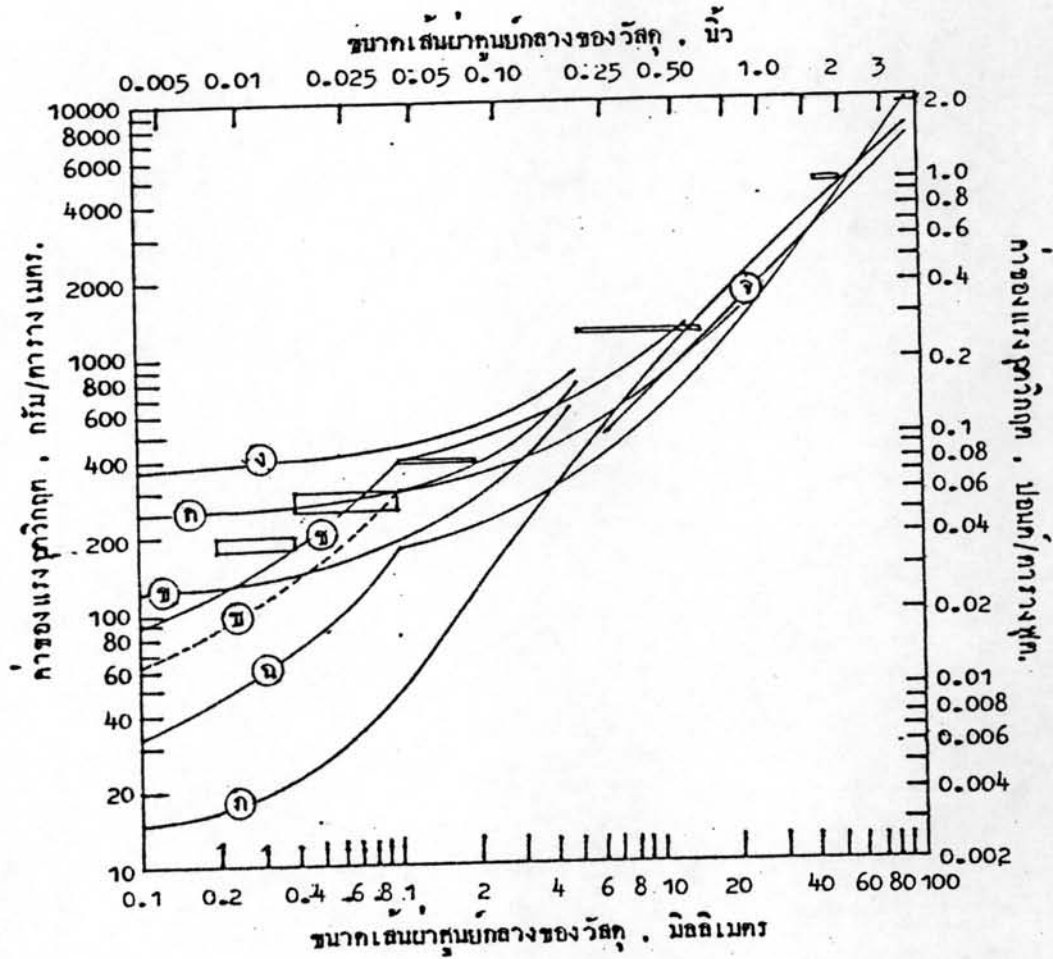
ค่าแรงเฉือนเฉลี่ย Vanoni (1964) ให้นิยามสภาวะการเริ่มเคลื่อนที่ของวัสดุ โดยการพิจารณานับจำนวนฝุ่นตะกอนต่อวินาที (number of bursts per second) และคิดสภาวะวิกฤติที่ความถี่ของฝุ่นตะกอน (burst frequency) ที่ $\frac{1}{3}$ ถึง 1 เป็นต้น นอกจากความแตกต่างในการให้นิยามหรือสมมติฐานของสภาวะวิกฤติแล้ว ยังมีความไม่เด่นชัดในการกำหนดขนาดของวัสดุตัวแทนของวัสดุผสม แม้ว่า Kramer (1935) จะนำเอาค่าการกระจายของโมดูลัส (M) เข้ามาใช้ แต่ก็ไม่เป็นที่แพร่หลาย

3.2.3 การกำหนดหน่วยแรงเฉือนวิกฤติจากผลการศึกษาในสนาม

3.2.2.1 Lane (1953, 1955) พิจารณาข้อมูลจากสนามและได้ให้รูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนวิกฤติ (critical shear stress or critical tractive force, τ_c) กับขนาดของวัสดุ ดังรูปที่ 3-24 ได้สรุปรวบรวมผลการศึกษาที่สำคัญ ๆ ของบุคคลต่าง ๆ ซึ่งการศึกษาของ Lane เป็นประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์และออกแบบคลอง Lane ได้ศึกษาและชี้ให้เห็นว่า ค่าของหน่วยแรงวิกฤติสำหรับน้ำที่ไม่มีวัสดุเจือปน (clear water) จะมีค่าต่ำกว่าค่าของหน่วยแรงเฉือนวิกฤติที่น้ำมีตะกอนปน

ได้มีหลายคนพยายามที่จะหาการกระจายหน่วยแรงเฉือนที่กระทำบนลาดท้องคลองและลาดฝั่งคลองด้วยวิธีการต่าง ๆ มากมาย เช่น Leighley (1932) พิจารณาการกระจายหน่วยแรงเฉือนวิกฤติโดยใช้ข้อมูลของการกระจายความเร็ว (velocity distribution) แต่ให้ผลไม่ดีนัก ต่อมา U.S.S.R., Olsen and Florey (1952) ได้พิจารณาการกระจายหน่วยแรงเฉือนวิกฤติโดยใช้วิธี membrane analogy, analytical และ finite difference สำหรับหน้าตัดคลองรูปต่าง ๆ Lane (1955) ได้ให้การกระจายของหน่วยแรงเฉือนบนลาดฝั่งคลองและลาดท้องคลอง ซึ่งได้จากวิธี Membrane analogy สำหรับหน้าตัดคลองรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ดังในรูปที่ 3-10

Carter (1953), Lane (1955) ยังได้ให้การหาหน่วยแรงเฉือนวิกฤติบนลาดฝั่งคลอง ในรูปขององค์ประกอบ K เพื่อความสะดวกในการออกแบบคลอง ซึ่งค่าองค์ประกอบ K ดังกล่าวขึ้นกับค่าของมุมผลึกของวัสดุ (angle of repose, ϕ) และค่ามุม



ก) Shields curve; ข-ค-ง-จ) ค่าที่แนะนำโดย U.S.S.R.; ฉ-ช-ซ) ค่าที่แนะนำ ข้อมูลจาก U.S.S.R.; กราฟแท่งในแนวนอนเป็นค่าแนะนำโดย Nuernberg-

ข) สำหรับน้ำไม่มีตะกอน, ก) น้ำมีตะกอนละเอียดปนอยู่มาก -Kulturamt.

ง) น้ำมีตะกอนละเอียดปนอยู่มาก

จ) สำหรับดินที่ประกอบด้วยวัสดุเหนียว (วัสดุ 25 % โทกว่าที่กำหนด)

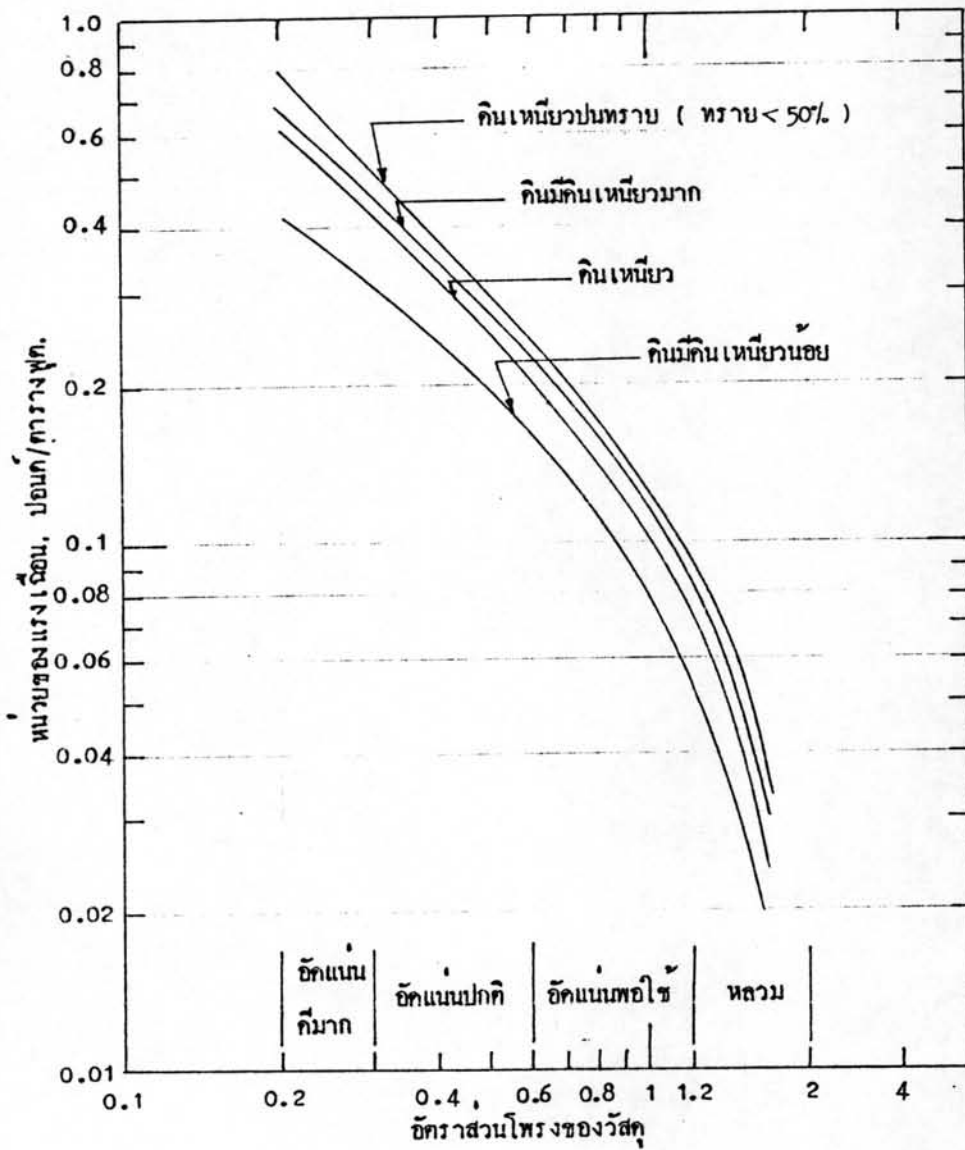
ฉ) สำหรับน้ำไม่มีตะกอน, ช) น้ำมีคอเลอชท์ 2.5 %

ซ) น้ำมีคอเลอชท์ 0.1 %

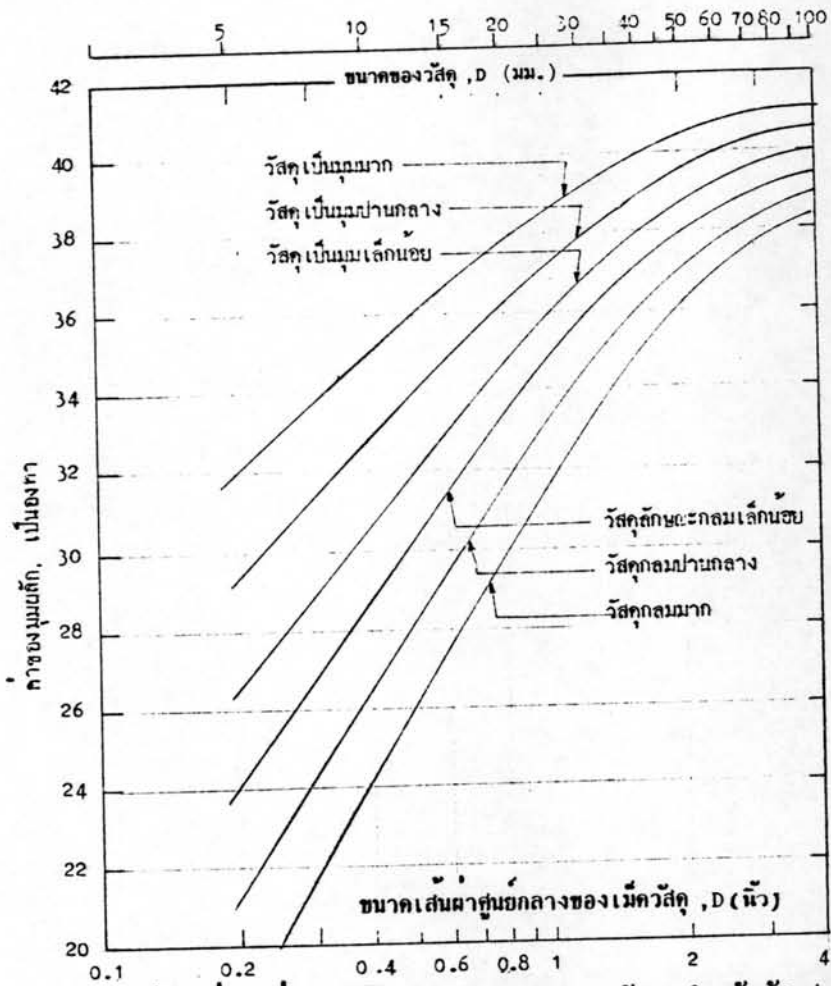
รูปที่ 3-24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าของแรงจุดวิกฤต กับขนาดของวัสดุ สำหรับวัสดุ

ประเภทไม่มีแรงยึดติดของอนุภาค (Non-cohesive materials)

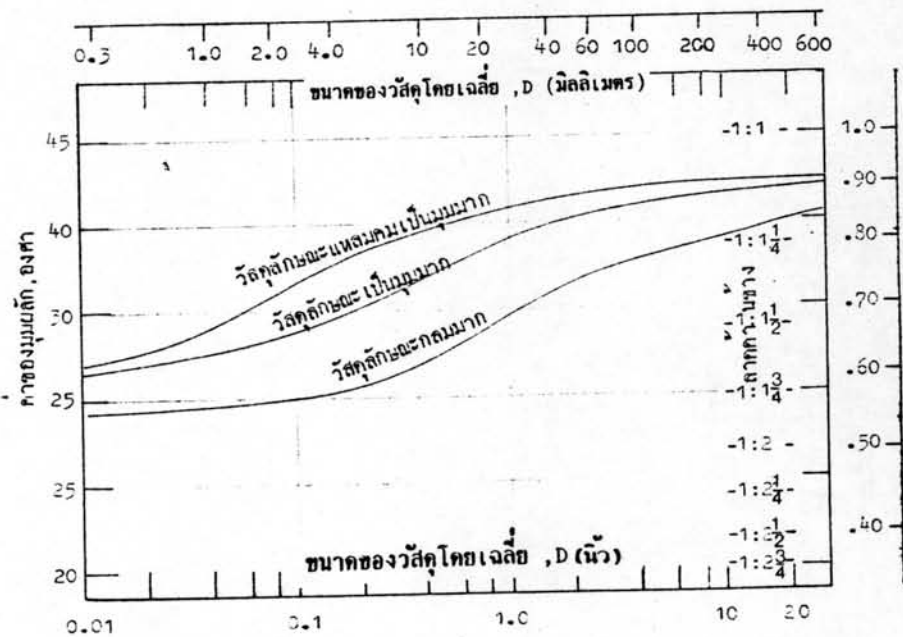
[ปรับปรุงจากรูปความสัมพันธ์ โดย Lane (1955)]



รูปที่ 3-25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเจอนวิกฤต กับ อัตราสวนโพรงของวัสดุ
 สำหรับคืนประเภทมีแรงยัดคืดของอนุภาค ข้อมูลจาก U.S.S.R. [Chow (1959)]



รูปที่ 3-25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าของมูมผลึก กับ ขนาดของวัสดุ สำหรับวัสดุประเภทไม่มีแรงยึดคึดของอนุภาค โดย Lane (1955)



รูปที่ 3-26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าของมูมผลึก กับ ขนาดของวัสดุ สำหรับวัสดุประเภทไม่มีแรงยึดคึดของอนุภาค โดย Simons (1957)

ความลาดเอียงฝั่งคลอง (angle of side slope, θ) สำหรับคำนวณผลลัพท์ได้จากรูปที่ 3-25 ซึ่งให้ไว้โดย Lane (1955) และรูปที่ 3-26 ซึ่งให้ไว้โดย Simons (1957)

ค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤติที่ได้จากรูปความสัมพันธ์ของ Lane จะมีค่าสูงกว่าที่ได้จากรูปความสัมพันธ์ของ Shields & White ซึ่ง Vanoni (1960) ให้ข้อคิดเห็น ว่า ค่าที่ได้จากรูปความสัมพันธ์ของ Lane จะมีเหตุผลมากกว่า เพราะว่า Lane ได้จากการคำนวณกลับของค่าความเร็วการไหลที่ยอมรับ ที่ให้ไว้โดยบุคคลต่าง ๆ อาทิเช่น Fortier & Scobey (1926), ข้อมูลจาก U.S.S.R. (1936) เป็นต้น ไม่ใช่ได้จากผลการทดลองหรือการสังเกตโดยตรง

3.3 การออกแบบคลองโดยใช้ทฤษฎีสภาวะสมดุลของการกัดกร่อนและตกตะกอน (Regime Theory)

จากประสบการณ์พบว่า การออกแบบคลอง โดยใช้เกณฑ์กำหนดต่าง ๆ จากผลการทดลอง นั้นยังปรากฏว่า คลองเหล่านั้นยังเกิดการกัดกร่อนและตกตะกอนดิน เช่น เนื่องจากในสภาพเป็นจริง ในสนาม ยังมีองค์ประกอบต่าง ๆ อีกมากมายที่มีผลต่อเสถียรภาพของคลอง ทฤษฎี Regime เป็นวิธีการที่ให้หลักการกำหนดขนาดคลอง โดยอาศัยการศึกษาในสนาม จากสภาพคลองที่มีอยู่จริง และได้ใช้งานมาเป็นเวลานาน เพื่อจะรวมองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีผลต่อเสถียรภาพของคลอง ทฤษฎี Regime อาศัยหลักการสำคัญ ๆ 3 หลักการ คือ

- ปริมาณการไหลของน้ำและตะกอนในคลองช่วงหนึ่งช่วงใดต้องคงที่
- เกิดการปรับรูปแบบคลองที่เสถียรภาพด้วยตนเอง (self forming)
- ใช้เวลานานเพียงพอในการเข้าถึงสภาวะ Regime ขั้นสุดท้าย

สมการ Regime โดยทั่วไปจะให้ไว้ในลักษณะที่อธิบายความสัมพันธ์ของ ความกว้างของ คลอง ความลึกของคลองและความลาดเอียงของคลองกับปริมาณการไหลของน้ำและชนิดของวัสดุ ประกอบคลอง คือ $W \propto Q$, $d \propto Q$ และ $S \propto Q$ สมการ Regime ที่เด่น ๆ ดังต่อไปนี้

3.3.1 Kennedy (1895)

Kennedy (1895) ได้รวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับคลองในช่วงปี ค.ศ. 1890-1894 (พ.ศ. 2433-2437) จากจุดที่ทำการวัดและสำรวจประมาณ 30 จุด ตามแนวทางของคลอง Upper Bari Doab Canal ในอินเดีย เป็นระยะทางถึง 90 ไมล์ (144 กิโลเมตร) แต่ละจุดที่ Kennedy ทำการวัดและสำรวจและถือว่าหน้าตัดของคลองช่วงนั้นมีความเสถียรภาพ (stable) โดยพิจารณาจากการที่ไม่มีการซ่อมแซมที่จุดนั้น ๆ ข้อมูลที่ Kennedy ทำการรวบรวมประกอบด้วย ขนาดหน้าตัดของคลอง (channel cross - section) ปริมาณการไหลของน้ำในคลองเต็มตลิ่ง (bankfull discharge)

Kennedy ได้ศึกษาและสังเกตจากจุดสำรวจต่าง ๆ ดังกล่าว เพื่อที่จะหาหลักการป้องกันการตกตะกอนของวัสดุอันจะทำให้คลองตื้นเขิน โดยคำนวณหาความเร็วการไหลเฉลี่ย (mean velocity, V) จากปริมาณการไหลของน้ำหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของคลอง ซึ่งความเร็วดังกล่าว Kennedy คิดว่าควรจะสัมพันธ์กับความลึกของการไหลในรูปของสมการ

$$V_o = 0.84 d^{0.64} \text{ (ฟุต/วินาที)} \dots\dots\dots (3-21)$$

$$V_o = 0.548 d^{0.64} \text{ (เมตร/วินาที)}$$

เมื่อ V_o = ความเร็วของการไหลเฉลี่ย ฟุต/วินาที (เมตร/วินาที)

d = ความลึกของการไหล ฟุต (เมตร)

ต่อมาได้มีหลายคนทำการศึกษาสมการของ Kennedy และได้ค่าสัมประสิทธิ์ 0.84 ในสมการ (3-21) ต่าง ๆ กันตามชนิดของดิน และสมการ Kennedy อยู่ในรูปสมการทั่วไป คือ

$$V_o = a_1 m d^{b_1} \dots\dots\dots (3-22)$$

- เมื่อ V_o = ความเร็ววิกฤติของการไหล (critical velocity)
- a_1 = ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับลักษณะดินต่าง ๆ (ตามตารางที่ 3-9)
- b_1 = ค่ายกกำลัง (ตาราง 3-9)
- m = อัตราส่วนความเร็ววิกฤติ (critical velocity ratio)
- $$= \frac{V}{V_o} \quad (\text{ตาราง 3-10})$$
- V = ความเร็วการไหลจริง (actual velocity) คำนวณจากสมการของ Manning หรือสมการ Kutter

ขั้นตอนการออกแบบคลองเสถียรภาพโดยใช้สมการของ Kennedy มีดังนี้

- สมมติค่าความลึกของการไหล, d และคำนวณความเร็วของการไหล, V จากสมการ (3-21) ตามเงื่อนไขต่าง ๆ
- คำนวณหาความกว้างของคลอง, B จากปริมาณการไหลของน้ำที่ออกแบบหาผลคูณของความเร็วของการไหลกับความลึก ($B = \frac{Q}{Vd}$)
- หาความลาดเอียงของท้องคลอง (bed channel, S_o) จากสมการของ Kutter โดยใช้ค่า $n = 0.0220$ สำหรับคลองขนาดใหญ่
 $n = 0.0225$ สำหรับคลองขนาดเล็ก

3.3.2 Lindley (1919)

Lindley (1919) ได้ทำการศึกษาหาหลักการเพื่อที่จะกำหนดขนาดของคลองเสถียรภาพในช่วงปี ค.ศ. 1915 - 1917 (พ.ศ. 2458 - 2460) โดยทำการศึกษาคลอง Lower Chenab Canal ประกอบด้วยคลองต่าง ๆ รวมยาวถึง 2,700 ไมล์ (4,320 กิโลเมตร) และมีปริมาณการไหลของน้ำสูงถึง 11,000 ลูกบาศก์ฟุต/วินาที Lindley ได้รวบรวมข้อมูลต่าง ๆ

จากจุดที่ศึกษาและสังเกต 786 จุด ประกอบด้วย ความกว้างของคลองจากฝั่งหนึ่งถึงอีกฝั่ง (width between berms) ความลึกของคลอง ความต่างระดับของคลองในระยะทาง โดยเฉลี่ย 1 ไมล์ (1.6 กม.) ขึ้นไป และ Lindley ได้สมมติค่าความลาดเอียงด้านข้างคลอง (side slope) 1/2 : 1 เพื่อที่จะหาความกว้างท้องคลอง (bed width) จากความกว้างของผิวน้ำ จากข้อมูลที่ได้จากการศึกษาและสำรวจ Lindley ได้สรุปให้ ความสัมพันธ์ความกว้างกับความลึกไว้คือ

$$B = 3.8 d^{1.61} \quad (\text{ฟุต}) \quad \dots\dots\dots (3-23)$$

เมื่อ $B =$ ความกว้างของท้องคลอง (bed width) (ฟุต)

$d =$ ความลึกของการไหล (depth of flow) (ฟุต)



จากค่าความต่างระดับที่ Lindley ได้จากการสำรวจ Lindley พิจารณา หาความเร็วของการไหลจากสมการ Kutter โดยสมมติค่า $N = 0.0225$ แล้วก็คำนวณหา ปริมาณการไหลของน้ำ Lindley ได้ให้ความสัมพันธ์ความเร็วการไหลกับความลึกการไหลว่า

$$V = 0.95 d^{0.57} \quad (\text{ฟุต/วินาที}) \quad \dots\dots\dots (3-24)$$

จากสมการ (3-23), (3-24) ให้ความสัมพันธ์ความเร็วการไหลกับความกว้างของคลอง คือ

$$V = 0.5 B^{0.355} \quad (\text{ฟุต/วินาที}) \quad \dots\dots\dots (3-25)$$

ขั้นตอนการออกแบบ โดยใช้สมการ Regime ของ Lindley

- คำนวณหาความเร็วการไหล (V), ความกว้างของคลอง (B) และความลึกของการไหล (d) จาก 3 สมการ คือ (3-23), (3-24) และสมการต่อเนื่อง ($Q = VBd$)
- คำนวณหาความลาดเอียงของท้องคลองจากสมการของ Kutter โดยกำหนดค่า $n = 0.0225$

ตารางที่ 3-9 ค่าของสัมประสิทธิ์ a_1 ในสมการ (3-22) สำหรับลักษณะวัสดุประกอบ
 คลองชนิดต่าง ๆ [Singhal (1968), Chow (1959), Shen (1971)]

ลักษณะของวัสดุประกอบคลอง	ค่าสัมประสิทธิ์
1. ดินตะกอนหยาบหรือดินที่เกิดจากการแตกสลายของพวกดินแข็งหรือพวกทราย (coarse silt or hard soil debris or sand)	1.09
2. ดินร่วนปนดินทราย (sandy loam)	1.01
3. ดินทรายหยาบเล็กน้อยมีดินตะกอนปน (coarse light sandy soil)	0.92
4. ดินตะกอนปนดินทรายละเอียด (fine sandy silt or fine light sand soil)	0.84
5. ดินตะกอนละเอียดมาก (extremely fine soil or very fine silt)	0.56
ค่ายกกำลัง b_1 ในสมการ (3-22) สำหรับน้ำที่ไม่มีวัสดุอื่นเจือปน (clear water) = 0.5	

ตารางที่ 3-10 ค่าอัตราส่วนความเร็ววิกฤติ, m สำหรับลักษณะของวัสดุประกอบคลอง

ลักษณะของวัสดุประกอบคลอง	ค่าอัตราส่วนความเร็ววิกฤติ, m
1. พวกดินทรายหยาบ (coarse sand)	1.1 - 1.2
2. พวกดินทรายละเอียด (fine sand)	0.8 - 0.9

3.3.3 Woods (1927)

ในปี 1917 Woods ได้เสนอแนะเพียงค่าอัตราส่วนของความลึกต่อความกว้างของคลองในการวิเคราะห์ข้อมูลจากคลอง Lower Chenab Canal ในปี 1927 Woods [(Woods, (1927) และ Lane, (1937)] ได้เสนอแนะสมการทั่วไปในการคำนวณหาความเร็วของการไหล, ความลึกเฉลี่ย, ความกว้างเฉลี่ยปานกลางและความลาดเอียงของท้องคลอง คือ

$$d_a = B_m^{0.434} \dots\dots\dots (3-26)$$

$$V_o = 1.434 \log_{10} B_m \dots\dots\dots (3-27)$$

$$S = \frac{1}{2 \log Q 1000} \dots\dots\dots (3-28)$$

เมื่อ d_a = ความลึกเฉลี่ยของคลอง (ฟุต)

B_m = ความกว้างเฉลี่ยของคลอง (ฟุต)

V_o = ความเร็วการไหลวิกฤติ (ฟุต/วินาที)

S = ความลาดเอียงของท้องคลอง

ขั้นตอนการออกแบบคลองเสถียรภาพโดยใช้สมการ Regime ของ Woods

- คำนวณหา d_a, B_m, V_o จากสมการ (4-26), (3-27) และสมการต่อเนื่อง $Q = V B_m d_a$
- คำนวณหา S จากสมการ (3-28)

3.3.4 Lacey

สมการ Regime ของ Lacey เป็นสมการที่ยอมรับและรู้จักกันแพร่หลาย Lacey ได้ทำการศึกษาและเผยแพร่สมการครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ. 1930 และในปีต่อมา (1935, 1939, 1940, 1946, 1958) ก็มีการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงการตีความหมายทางกายภาพในแต่ละสมการ

และเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขคงที่บางตัว Lacey พยายามที่จะอธิบายความผันแปรในพฤติกรรมของ คลองเสถียรภาพ (variations in stable channel behavior) โดยการนำเอาแนวคิด (concept) ใหม่ ๆ เช่น shock theory และองค์ประกอบตัวคูณถูกต้อง (correction factor) เข้ามาใช้ ขั้นตอนสำคัญขั้นตอนหนึ่งในการปรับปรุงสมการ Lacey มีในปี ค.ศ. 1935 โดยการวางหลักการในการศึกษาทั้งคลองและแม่น้ำเข้าด้วยกัน

ชุดสมการ Regime ของ Lacey ที่สมบูรณ์นั้น ประกอบด้วย สมการพื้นฐาน บางสมการที่ได้โดยการวิเคราะห์ทางสูตร empirical จากข้อมูลของบุคคลต่าง ๆ ที่เคยทำการ ศึกษาไว้ และจากสมการอื่น ๆ ที่ได้จากการจัดรูปใหม่ทางพีชคณิตของสมการพื้นฐาน

3.3.4.1 Lacey (1930)

สมการชุดแรกนี้ได้จากการรวบรวมข้อมูล จากผลการศึกษาของ Kennedy, Lindley จาก Madras Canal ในอินเดียและข้อมูลบางส่วนจาก Ismailia Canal ในอียิปต์ จากข้อมูลดังกล่าว Lacey ได้ศึกษาและให้สมการความสัมพันธ์ต่าง ๆ ไว้ คือ

$$V = 1.17\sqrt{fR} \quad (\text{ฟุต/วินาที}) \quad \dots\dots\dots (3-29)$$

$$V = 0.646\sqrt{fR} \quad (\text{เมตร/วินาที})$$

Lacey ให้เหตุผลว่าสำหรับคลองในสภาวะ Regime หน้าตัดของ คลองควรจะมีลักษณะสมมาตรกัน (geometrically similar) จากเหตุผลนี้ Lacey วิเคราะห์ ข้อมูลที่มีโดยวิธีการของกราฟ (graphical analysis) ได้ความสัมพันธ์ คือ

$$Af^2 = 3.8V^5 \quad (V, \text{ฟุต/วินาที}) \quad \dots\dots\dots (3-30)$$

$$Af^2 = 134.2V^5 \quad (V, \text{ฟุต/วินาที})$$

จากความสัมพันธ์ของสมการ (3-29), (3-30) ได้

$$P = 2.67 Q^{1/2} \quad (\text{ฟุต}) \quad \dots\dots\dots (3-31)$$

$$P = 4.83 Q^{1/2} \quad (\text{เมตร})$$

Lacey ได้ประมาณค่า Manning "n" ในรูปของ silt factor (f) ไว้ คือ

$$n = 0.022 f^{0.2} \quad \dots\dots\dots (3-32)$$

และคำนวณความลาดเอียงของท้องคลอง (bed slope) โดยอาศัยสมการของ Manning

$$S = \frac{f^{3/2}}{2587 Q^{1/9}} \quad (Q, \text{ลบ.ฟุต/วินาที}) \quad \dots\dots\dots (3-33)$$

$$S = \frac{f^{3/2}}{3844 Q^{1/9}} \quad (Q, \text{ลบ.ม./วินาที})$$

ค่าองค์ประกอบของตะกอน (silt factor, f) Lacey แนะนำไว้ คือ

$$f = 8\sqrt{D} \quad (D, \text{เป็น นิ้ว}) \quad \dots\dots\dots (3-34)$$

$$f = 1.59\sqrt{D} \quad (D, \text{เป็น มิลลิเมตร})$$

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุโดยเฉลี่ย (วัสดุประเภทไม่มีแรงยึดติดของอนุภาค) สมการ (3-34) ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล จากขนาดของ D ตั้งแต่ 25 นิ้ว ลงไปถึงขนาดทรายละเอียด (fine sand)

ต่อมา Lacey ได้แก้ไขสมการ (3-32), (3-33) เป็น

$$V = \frac{1.346 R^{3-4} S^{1/2}}{N_a} \quad (\text{ฟุต/วินาที}) \quad \dots\dots\dots (3-35)$$

$$n = N_a = 0.0225 f^{1/4} \quad \dots\dots\dots (3-36)$$

$$S = \frac{f^{5/3}}{1750 Q^{1/6}} \quad (Q, \text{ลบ.ฟุต/วินาที}) \quad \dots\dots\dots (3-37)$$

$$S = \frac{f^{5/3}}{3169.8 Q^{1/2}} \quad (Q, \text{ลบ.ม./วินาที})$$

ขั้นตอนการออกแบบคลองโดยใช้สมการของ Lacey (1930) เมื่อกำหนดค่าปริมาณการไหลของน้ำ (Q) และขนาดของวัสดุ (D)

- คำนวณหา f จากสมการ (3-34)
- คำนวณหา S จากสมการ (3-37)
- คำนวณหา P จากสมการ (3-31)
- คำนวณหา R จากสมการ (3-29)

3.3.4.2 Lacey (1935)

ระหว่างปี ค.ศ. 1935 และ 1940 Lacey ได้เผยแพร่เอกสาร ผลการศึกษา 3 ชุด (ค.ศ. 1935, 1939, 1940) ที่มีความแตกต่างกันเล็กน้อย ผลการศึกษาดังกล่าวประกอบด้วย

- วางหลักการทั่วไป ของหลักการ Regime ที่ใช้กับคลองรวมใช้กับแม่น้ำ
- ใช้มนิทัศน์ของ 'Shock' กับคลองอัลลูเวียล
- ขยายสมการ Regime ไปใช้ในการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของแบบจำลองกับต้นแบบจริง

และได้ศึกษาข้อมูลของ Kennedy, Lindley, Madras canal และหาความสัมพันธ์ของ V, R S และให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นสมการ คือ

$$V = 16.0 (R^2 S)^{1/3} \quad (\text{ฟุต/วินาที}) \quad \dots\dots\dots (3-38)$$

$$V = 10.8 (R^2 S)^{1/3} \quad (\text{เมตร/วินาที})$$

ในสมการ (3-38) ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา มีค่าความเร็วการไหล, V ในช่วง 1.74-8.69 ฟุต/วินาที และค่ารัศมีชลศาสตร์, R ในช่วง 2.53-17.80 ฟุต จากสมการ (3-38) Lacey แสดงให้เห็นว่า ค่าของสมการนี้ไม่ได้ขึ้นกับขนาดของวัสดุเพียงแต่มีข้อจำกัด คือ

- ลักษณะของท้องคลองอยู่ในสภาพตื่นตัว (active) และไม่มีการกักดินไปสู่สภาพการไม่เคลื่อนไหว (not rendered immobile) เมื่อมีวัสดุพวกดินเหนียวเข้ามาผสม
- สภาพการไหลเป็นแบบ subcritical ($F < 1$)

จากข้อจำกัดข้อหลัง Lacey ได้คิดหาความสัมพันธ์ให้ค่าจำกัดของ silt factor, f ซึ่งเชื่อมโยงกับค่าจำกัดของขนาดวัสดุท้องคลอง ในช่วงขนาด 9 นิ้ว ลงไปจนถึงขนาด 1/4 นิ้ว จากสมการ (3-34) และค่าจำกัดของ $N_a = 0.05$ จากสมการ (3-36) สมการ (3-35) เขียนได้เป็น

$$V = 1.1512 \sqrt{fR} \quad (\text{ฟุต/วินาที}) \quad \dots\dots\dots (3-39)$$

$$V = 0.636 \sqrt{fR} \quad (\text{เมตร/วินาที})$$

จะได้สมการ

$$R = 0.473 (Q/f)^{1/3} \quad (\text{ฟุต}) \quad \dots\dots\dots (3-40)$$

และ

$$V = \frac{1.346 R^{3/4} (S - S')^{1/2}}{N_a} \quad (\text{ฟุต/วินาที}) \quad \dots\dots\dots (3-41)$$

เมื่อ $S' =$ shock loss เนื่องจากความโค้งงอและความไม่สม่ำเสมอของคลองตลอดจนความผันแปรของเงื่อนไขคลอง

3.3.4.3 Lacey (1958)

สมการ Lacey ที่ใช้อยู่ทั่วไปเป็นสมการ Lacey ในปี ค.ศ. 1958 ผลการศึกษาของสมการชุดนี้ ตัวแปรหลายตัวถูกเปลี่ยนไป คือ เส้นขอบเปียก (wetted perimeter, P) เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ ความกว้างเฉลี่ย (mean width, W) และรัศมีชลศาสตร์ (hydraulic radius, R) เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ ความลึกเฉลี่ยของคลอง (mean depth, d) ส่วนสมการหลักอื่น ๆ รูปแบบยังคงเดิม เพียงแต่มีการนำเอาค่าสัมประสิทธิ์ $E = P/W$ เข้ามาใช้และค่าตัวเลข

คงที่ในบางสมการ เปลี่ยนค่าไปสมการชุดนี้ Lacey ยังคงใช้แนวความคิดเกี่ยวกับ shock loss อยู่ และอธิบายความเปลี่ยนแปลงของความต้านทานของการไหล ในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปลักษณะของท้องคลอง (bed forms)

สมการ Lacey (1958) ประกอบด้วย

$$f = 1.60\sqrt{D} \quad E = 1.10 \quad \dots\dots\dots (3-42)$$

$$V = 1.15\sqrt{fd} \quad (\text{ฟุต/วินาที}) \quad \dots\dots\dots (3-43)$$

$$V = 0.635\sqrt{fd} \quad (\text{เมตร/วินาที})$$

$$W = 2.667 Q^{1/2} \quad (\text{ฟุต}) \quad \dots\dots\dots (3-44)$$

$$W = 4.83 Q^{1/2} \quad (\text{เมตร})$$

$$V = \frac{1.346 d^{1/4} R^{1/2} S^{1/2}}{N_a} \quad (\text{ฟุต/วินาที}) \quad \dots\dots\dots (3-45)$$

$$N_a = 0.0225 f^{1/4} \quad \dots\dots\dots (3-46)$$

$$V = 16.064 (dRS)^{1/3} \quad (\text{ฟุต/วินาที}) \quad \dots\dots\dots (3-47)$$

$$V = 10.8 (dRS)^{1.2} \quad (\text{เมตร/วินาที})$$

$$n = 0.000925 \left(\frac{S}{2}\right)^{1/6} \quad \dots\dots\dots (3-48)$$

- เมื่อ
- W = ความกว้างเฉลี่ยของคลอง (mean width, W)
 - d = ความลึกเฉลี่ยของคลอง (mean depth, $d = A/W$)
 - V = ความเร็วการไหลเฉลี่ย (mean velocity of flow)
 - N_a = สัมประสิทธิ์ความต้านทานของการไหลสมบูรณ์ (absolute roughness)
 - S = ความลาดเอียงเส้นพลังงาน (energy gradient)
 - E = อัตราส่วนของเส้นขอบเปียกกับความกว้างเฉลี่ยของคลอง $\left(\frac{P}{W}\right)$
 - n = ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่อการไหลของ Manning

ตารางที่ 3-11 สรุปรวบรวมสมการของ Lacey ในที่ต่าง ๆ

	1930	1935	1958
(1)	$V = 1.17 (fR)^{1/2}$ $V = 0.646 (fR)^{1/2}$	$V = 1.15 (fR)^{1/2}$ $V = 0.636 (fR)^{1/2}$	$V = 1.15 (fd)^{1/2}$ $V = 0.636 (fd)^{1/2}$
(2)	$P = 2.67 Q^{1/2}$ $P = 4.83 Q^{1/2}$		$W = 2.67 Q^{1/2}$ $W = 4.83 Q^{1/2}$
(3)	$V = \frac{1.34 R^{3/4} S^{1/2}}{N_a}$ $V = R^{3/4} S^{1/2}$	$V = \frac{1.346 R^{3/4} (S-S')^{1/2}}{N_a}$ $V = R^{3/4} (S-S')^{1/2}$	$V = \frac{1.346 R^{3/4} S^{1/2} d^{1/4}}{N_a}$ $V = R^{3/4} S^{1/2} d^{1/4}$
(4)	$N_a = 0.0025 f^{1/4}$		
(5)	$f = 8 D^{1/2}$ $f = 1.59 D^{1/2}$	$f = 8 D^{1/2}$ $f = 1.59 D^{1/2}$	$f = 8 D^{1/2}$ $f = 1.60 D^{1/2}$
(6)		$V = 16 (R^2 S)^{1/3}$ $V = 10.8 (R^2 S)^{1/3}$	$V = 16.046 (dRS)^{1/3}$ $V = 10.8 (dRS)^{1/3}$
(7)	$S = \frac{3^{3/2}}{2587 Q^{1/9}}$ $S = \frac{3^{3/2}}{3844 Q^{1/9}}$	$S = \frac{f^{5/3}}{1750 Q^{1/6}}$ $S = \frac{f^{5/3}}{3170 Q^{1/6}}$	
(8)	$A = 3.8 (V^5/f^2)$ $A = 134.2 (V^5/f^2)$	$A = 4.0 (V^5/f^2)$ $A = 141.3 (V^5/f^2)$	
(9)	$V = (Qf^2/3.8)^{1/6}$ $V = (Qf^2/134.2)^{1/6}$	$V = (Qf^2/4.0)^{1/6}$ $V = (Qf^2/141.3)^{1/6}$	
<p>หมายเหตุ สมการในกรอบสี่เหลี่ยมเส้นทึบ หน่วยในระบบอังกฤษ สมการในกรอบสี่เหลี่ยมเส้นไขว่หมา หน่วยในระบบเมตริก ช่องที่เว้นไว้หมายถึงสมการคงเดิม หรือ Lacey ไม่ได้ให้ไว้</p>			

ตารางที่ 3-11 (ต่อ)

ลำดับที่มาของสมการ Lacey

สมการปี 1930

- สมการ (1) จากข้อมูลของ Kennedy, Lindley และ Madras
 สมการ (8) จากข้อมูลของ Kennedy, Madras บางแห่งในอเมริกา, ฮีปด์
 สมการ (2) จากสมการ (1) และ (8)
 สมการ (4) ได้จากการเสนอแนะโดย Lacey
 สมการ (3) จากเหตุผลของหลักการคล้ายคลึง
 สมการ (7) จากสมการ (3), (4), (8) และ (1)
 สมการ (5) สมการเสนอแนะ

สมการปี 1940

- สมการ (6) จากข้อมูลของคลองและแม่น้ำต่าง ๆ หลายแห่ง
 สมการ (1) เช่นเดียวกับสมการ (1) ในปี 1930 แต่เปลี่ยนค่าตัวเลขสัมประสิทธิ์
 สมการ (3) เช่นเดียวกับสมการ (3) ในปี 1930 แต่มีการนำเอาผลของ
 "shock effect" เข้ามาเกี่ยวข้อง
 สมการ (7) และ (8) เช่นเดียวกับสมการในปี 1930 แต่เปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์
 เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าในสมการ (1)

สมการปี 1958

- สมการ (1) เช่นเดียวกับปี 1930 และ 1935
 สมการ (2) เช่นเดียวกับปี 1930
 สมการ (3) เช่นเดียวกับปี 1930
 สมการ (4) เช่นเดียวกับปี 1930
 สมการ (6) จากสมการ (4) และ (1)
 สมการ (5) เช่นเดียวกับปี 1930 สำหรับค่า $\frac{P}{W} = 1.10$

ตารางที่ 3-11 (ต่อ)

การใช้สมการของ Lacey(a) การออกแบบคลองเมื่อกำหนดค่า Q และ D ให้

พิจารณาหา	f	จากสมการ (5)
	V	จากสมการ (9) และ $A = \frac{Q}{V}$
	P	จากสมการ (2)
	R	จากสมการ $R = \frac{A}{V}$
	S	จากสมการ (7)

สำหรับค่า P และ R ที่ได้ พิจารณาน้ำตื้นของคลองเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู โดยสมมติค่าความลาดเอียงข้างคลอง (side slope) $\frac{1}{2} = 1$

(b) การออกแบบโครงสร้างทางชลศาสตร์ในคลองอัลลูเวียล เมื่อกำหนดค่า Q และ D ให้

พิจารณาหา	f	จากสมการ (5)
	P	จากสมการ (2)
	q	จากสมการ $q = \frac{Q}{P}$
	R	จากสมการ (1)
	V	จากสมการ $q = V.R.$

(c) ปรับปรุงรูปแบบของคลอง สำหรับ Q ที่กำหนดและทำการศึกษาดังเกิดวัดค่า V, P, R, S

พิจารณาหา	f_{VR}	จากสมการ (1)
	f_{RS}	จากสมการ (16)

ถ้าค่า $f_{VR} = f_{RS}$ แสดงว่าคลองอยู่ในลักษณะ final regime และออกแบบค่า $f = f_{VR} = f_{RS}$ และ Q เช่นเดียวกับที่ทำมาแล้ว

ถ้าค่า $f_{VR} \neq f_{RS}$ ให้ค่าเป็นขั้นตอนตามสมการของ Inglis - Lacey สมการที่ (3-53) และ (3-57)

ขีดจำกัดของสมการ Lacey (1958) มีดังนี้

- ขนาดของวัสดุประกอบท้องคลอง (D)	0.15 - 0.40 มม.
- ปริมาณน้ำ (Q)	5 - 5000 ลบ.ฟุต/วินาที
- ตะกอนท้องน้ำ (bed load)	น้อย
- ปริมาณน้ำสำหรับสมการ (3 - 44)	
ในกรณีท้องคลองเป็นพวกดินทราย	
แม่น้ำระหว่างที่เกิดอุทกภัยสูง	ถึง 2.5×10^6 ลบ.ฟุต/วินาที
- ประเภทวัสดุประกอบท้องคลอง (bed material)	ไม่มีแรงเกาะติดของวัสดุ (non-cohesive)
- ลักษณะรูปแบบของท้องคลอง (bed form)	เป็นลอนแต่ไม่เป็นคลื่น (Ripples, not waves)

3.3.5 Irrigation Research Institute (Punjab)

หลังจาก Lacey ได้เผยแพร่สมการชุดแรกของเขา ได้มีหลายคนพยายามหาหลักการเพื่อที่จะอธิบายค่าองค์ประกอบของตะกอน (silt factor, f) Lacey ได้แนะนำการหาค่า f ในเทอมของขนาดของวัสดุ (D) ดังในสมการ (3-34) ซึ่งดูเป็นการเพียงพอในการพิจารณาหาค่า f บางคนให้ข้อคิดว่า ปริมาณการไหลของตะกอน (sediment discharge) นำจะมีผลต่อค่า f ด้วย

ในปี ค.ศ. 1933 ที่ Punjab Irrigation Research Institute Lahore ได้ทำการศึกษาและวินิจฉัยเคราะห์จากคลองที่มีอยู่จริง ๆ เพื่อที่จะศึกษาสมการและหาข้อกำหนดค่า f โดยเลือกคลองต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษา คือ Lower Jhelum, Lower Chenab, Upper Chenab, Upper Bari Doab แล้วรวบรวมข้อมูลทางชลศาสตร์ต่าง ๆ และตะกอนท้องคลอง (bed sediment) ความลาดเอียงของท้องคลองทำการวัดทุกช่วง 1000 ฟุตโดยประมาณ

การวิเคราะห์ข้อมูลครั้งแรกพบว่า ค่าของ f_{VR} และ f_{RS} สำหรับหน้าตัดคลองเสถียร

ภาพมีค่าไม่เท่ากัน จุดมุ่งหมายของการวิเคราะห์ข้อมูลกลายเป็น เพื่อที่จะหาสูตรสมการในการออกแบบคลอง เมื่อรู้ค่าปริมาณการไหลของน้ำและขนาดของตะกอน จากข้อมูลที่ทำการศึกษาในช่วงเวลา 2 ปี และจำกัดความผันแปรของปริมาณการไหลของน้ำออก ข้อมูลแต่ละจุดเป็นข้อมูลเฉลี่ยต่อเดือน ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$P = 2.8 Q^{1/2} \quad (\text{ฟุต}) \quad \dots\dots\dots (3-49)$$

$$P = 5.0 Q^{1/2} \quad (\text{เมตร})$$

$$R = 0.47 Q^{1/3} \quad (\text{ฟุต}) \quad \dots\dots\dots (3-50)$$

$$R = Q^{1/3} \quad (\text{เมตร})$$

$$V = 1.12 R^{1/2} \quad (\text{ฟุต/วินาที}) \quad \dots\dots\dots (3-51)$$

$$V = 0.62 R^{1/2} \quad (\text{เมตร/วินาที})$$

$$S = 0.00209 D^{0.86} / Q^{0.21} \quad (Q, \text{ลบ. ฟุต/วินาที}) \quad (3-52)$$

$$S = 0.00099 D^{0.86} / Q^{0.21} \quad (Q, \text{ลบ. เมตร/วินาที})$$

$$D = \text{ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตะกอนที่ตกลงโดยเฉลี่ย เป็นมิลลิเมตร}$$

McKenzie-Taylor (Central Board of Irrigation, 1940) ได้ให้ความเห็นว่า สมการเหล่านี้สามารถประยุกต์ใช้ได้เฉพาะคลองที่สมการเหล่านี้ได้มา Bose (1936) ให้ความเห็นว่า สมการดังกล่าวเป็นเพียงแนวทางในการออกแบบคลองเท่านั้น แม้ผลที่ได้จากสมการเหล่านี้จะออกมาเป็นตัวเลขแน่นอน แต่ในทางปฏิบัติพบว่า ยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ อีกมากที่ไม่สามารถให้เป็นตัวเลขคงที่ได้ เช่น ความผันแปรของตะกอนที่เข้าสู่คลอง ตะกอนที่ทางออกมีความแตกต่างจากตะกอนในคลองเดิม เป็นต้น

3.3.6 Inglis - Lacey (1963)

Inglis ให้ข้อคิดเห็นที่สำคัญเกี่ยวกับสมการ Regime คือ เมื่อได้พิจารณาถึงความไม่เท่ากันของค่าองค์ประกอบของตะกอน (silt factor, f) f_{VR} และ f_{RS} ที่ได้จากข้อมูลของ Punjab Irrigation Research Institute โดยให้ข้อคิดเห็นว่า ถ้าคลองเข้าถึงลักษณะ Regime ขั้นสุดท้าย (final regime) แล้ว ค่าขององค์ประกอบตะกอน (f) ทั้งสองนั้นควรจะเท่ากัน ถ้าค่า f ทั้งสองไม่เท่ากัน แสดงว่าคลองนั้นยังไม่เข้าถึงลักษณะ Regime ขั้นสุดท้าย ดังนั้น จึงให้ค่า f สองตัว ในลักษณะเป็นตัวชี้ถึงระดับความมาตรฐาน (standard grade) คือ $f_m = (f_{VR} \cdot f_{RS})^{1/2}$ และอีกตัวหนึ่งเป็นตัวชี้ถึงความเบี่ยงเบนจากค่าปกติ (departure from normality), $C = f_{VR}/f_{RS}$ Inglis ยังได้แสดงให้เห็นถึงการให้ f_{VR} และ f_{RS} ในสมการของ Lacey คือ

$$f_{VR} = 0.75 \frac{V^2}{R} \quad \dots\dots\dots (3-53)$$

$$D = 0.3226 (f_{VR})^{1/2} (f_{RS})^{3/2} \quad \dots\dots\dots (3-54)$$

$$N_a = \frac{0.0225 (f_{RS})^{3/4}}{(f_{VR})^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (3-55)$$

$$S = \frac{0.000547 f_{VR}^{1/6} f_{RS}^{3/2}}{Q^{1/6}} \quad \dots\dots\dots (3-56)$$

$$\sqrt{f_{RS}/f_{VR}} = \frac{16.0 R^{2/3} S^{1/3}}{V} \quad \dots\dots\dots (3-57)$$

ข้อคิดเห็นอีกข้อหนึ่งของ Inglis คือ การพิจารณาผลของปริมาณตะกอน (sediment discharged) เข้ามาใช้และให้สมการในรูปแบบใหม่ ซึ่งได้แก่ สมการ Regime ของ Inglis - Lacey ครั้งแรก (1948) Inglis ได้ให้สมการในรูปสัดส่วนภายหลัง (ค.ศ. 1963) ได้ให้ไว้ในรูปสมการให้ค่าของตัวเลขดังต่อไปนี้ คือ

$$P = 2.668 Q^{1.2} \left(\frac{I}{gD} \right)^{1/4} \quad \dots\dots\dots (3-58)$$

$$R = 0.4725 Q^{1/3} \left(\frac{D}{g}\right)^{1/6} I^{-1/3} \dots\dots\dots (3-59)$$

$$A = 1.26 \frac{Q^{5/6}}{g^{5/12} D^{1/12}} I^{-1/12} \dots\dots\dots (3-60)$$

$$V = 0.794 Q^{1/6} g^{5/12} D^{1/12} I^{5/12} \dots\dots\dots (3-61)$$

$$S = 0.00054 Q^{-1/6} g^{1/12} D^{5/12} I^{5/12} \dots\dots\dots (3-62)$$

$$\frac{V}{(gD)^{1/2}} = 1.155 I^{1/4} \dots\dots\dots (3-63)$$

เมื่อ $I = \text{Inglis number by Lacey } (I = C_v V_s / (g\nu)^{1/3})$
เป็นกลุ่มตัวแปรมิติศูนย์ (dimensionless number)

$V_s =$ ความเร็วปลายของการตกตะกอน (terminal fall velocity) ฟุต/วินาที

$g =$ อัตราเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วง (ฟุต/วินาที)

$\nu =$ ความหนืดจลศาสตร์ของน้ำ (kinematic viscosity)

$D =$ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของวัสดุทราย (weighted mean diameter)

$C_v =$ ปริมาณการไหลของตะกอน ต่อ ปริมาณการไหลของน้ำ

3.3.7 Blench (1957-1960)

Blench (1957) ได้ศึกษาถึงการขยายเขตของสมการ Regime ไปใช้ในการ ออกแบบคลอง ในกรณีวัสดุประกอบท้องคลอง (bed material) และลาดด้านข้างคลอง (side channels) มีความแตกต่างกัน Blench แนะนำสมการออกแบบคลองสำหรับคลองที่มีปริมาณตะกอน ท้องน้ำน้อย (small bed load) และคลองที่มีตะกอนท้องน้ำมาก (คือมีความเข้มข้นของตะกอน มากกว่า 200 ppm.) คือ

$$B = (F_b Q / F_s)^{1/2} \dots\dots\dots (3-64)$$

$$d = (F_s Q / F_b^2)^{1.3} \dots\dots\dots (3-65)$$

$$\text{ตะกอนท้องน้ำน้อย} \quad S = F_b^{5/6} F_s^{1/2} v^{1/4} / 3.63 Q^{1/6} g \dots\dots\dots (3-66)$$

$$\text{ตะกอนท้องน้ำมาก} \quad S = F_b^{5/6} F_s^{1/2} v^{1/4} / 3.63 Q^{1/6} g (1 + \frac{C}{2330}) \dots\dots (3-67)$$

เมื่อ B = ความกว้างโดยเฉลี่ยปานกลางของคลอง
(ซึ่งเป็นความกว้างที่เมื่อคูณกับความลึกแล้วจะได้พื้นที่หน้าตัดของคลอง)

d = ความลึกเฉลี่ยปานกลางของการไหล

F_b = องค์ประกอบท้องคลอง (bed factor) = v^2/d

F_s = องค์ประกอบข้างคลอง (side factor) = v^3/B

C = ความเข้มข้นของตะกอนท้องน้ำ (bed load concentration) เป็น ppm.

v = Kinematic viscosity

และยังแนะนำโดยคร่าว ๆ สำหรับขีดจำกัดสูงสุดของค่า F_b สำหรับวัสดุประเภทต่าง ๆ คือ

ประเภทของวัสดุ	ค่าค่า F_b
ดินร่วนปนทราย (sandy loam)	0.1 ฟุต ² /วินาที ³
ดินร่วนปนดินเหนียวปนดินตะกอน (silt clay loam)	0.2 "
ดินจำพวกที่มีแรงยึดติดของวัสดุ (high cohesiveness)	0.3 "

แต่อย่างไรก็ตาม ค่าเหล่านี้ ภายหลังจากการใช้งาน 2-3 ปี พบว่าก็ยังเกิดการกัดกร่อนของฝั่งคลอง

สำหรับค่าของ F_b Blench แนะนำ ไว้คือ

$$\text{สำหรับตะกอนท้องน้ำน้อย} \quad F_{bo} = 1.9 (D_s)^{1/2} \dots\dots\dots (3-68)$$

เมื่อ F_{bo} = องค์ประกอบท้องคลอง กรณีคลองมีปริมาณตะกอนท้องคลองน้อย (small bed load) F_{bo} นี้ใช้เฉพาะในกรณีของวัสดุท้องคลองอยู่ในช่วงของทราย

$$\text{สำหรับตะกอนท้องน้ำมาก} \quad F_b = F_{bo} (1 + 0.012 C) \dots\dots\dots (3-69)$$

และในกรณีความเร็วการไหลเป็นแบบ supercritical

$$F_b = 32.2 + 0.006 (C + C_c) \dots\dots\dots (3-70)$$

- F_b = องค์ประกอบท้องคลอง กรณีมีปริมาณตะกอนท้องคลองมาก
 D_s = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางปานกลางของวัสดุท้องคลอง (มม.)
 (median diameter of the bed material)
 C_c = ความเข้มข้นของตะกอนท้องน้ำที่ความเร็วการไหลเป็นแบบ
 supercritical (ppm.)

Blench ยังได้ให้สมการ bed factor สำหรับวัสดุประกอบคลองประเภทกรวด (gravel)
 Blench แนะนำสมการการประมาณค่าของ bed factor สำหรับค่า $D'' > 2$ มม. และค่าโดย
 ประมาณ d/D'' 100

$$F'_b = 7.3 D''^{1/4} (v'/v)^{1/6} \dots\dots\dots (3-71)$$

เมื่อ D'' = ขนาดปานกลางของเส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลมของวัสดุโดนน้ำหนัก
 = (ฟุต)

v' = ความหนืด Kinematic ของของเหลวที่อุณหภูมิ 70°

v = ความหนืด Kinematic ของของเหลวที่สภาวะเงื่อนไขการออกแบบ

สมการเหล่านี้พิจารณาจากข้อมูลของคลองในประเทศอินเดียเป็นส่วนมาก ซึ่งลักษณะของ
 ฝั่งคลองเป็นวัสดุประเภทดินเหนียว (cohesive banks) และดังนั้น จึงนำไปใช้กับคลองที่มีฝั่ง
 คลองที่เป็นวัสดุจำพวกทราย (sand banks) ได้ไม่ดี เพราะฉะนั้น สมการ Regime ของ
 Blench ก็มีลักษณะเช่นสมการ Regime ของบุคคลอื่น ๆ คือ หาสมการมาจากพื้นที่ได้ก็เหมาะ
 สำหรับพื้นที่นั้นเท่านั้น

ข้อจำกัดสมการ ซึ่ง Blench ได้ให้ไว้ คือ

- ปริมาณการไหลของน้ำต้องอยู่ในลักษณะคงที่
- ปริมาณตะกอนแขวนลอยมีอยู่น้อย (small suspended load)
- ปริมาณการไหลตะกอนท้องคลองอยู่ในลักษณะคงที่ (steady bed sediment discharge)

- ลาดข้างคลองชันในดินประเภทดินเหนียว (steep cohesive sides)
- หน้าตัดและความลาดเอียงด้านข้างสม่ำเสมอ
- ความหนืดของน้ำคงที่
- คลองเป็นแนวตรง
- ธรรมชาติของอนุตะกอนจะต้องอยู่ในลักษณะกระจาย

3.3.8 Leopold and Maddock (1953)

Leopold and Maddock (1953) ได้ขยายหลักการ Regime ของคลอง อัลจูเวียลไปใช้กับแม่น้ำในสหรัฐอเมริกา ซึ่งเขาทั้งสองพบว่าสำหรับทางน้ำธรรมชาติจะมีลักษณะการเกิดสภาพ Regime แตกต่างจากคลองเพราะว่าแม่น้ำมีความผันแปรทางปริมาณน้ำและตะกอนสูง

Leopold and Maddock ได้พิจารณาศึกษาปริมาณการไหลของน้ำและปริมาณการไหลของตะกอน (sediment discharge) ในแม่น้ำ ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากแม่น้ำหลายสาย จากข้อมูลของการตั้งสถานีวัดน้ำ 119 จุด ในบริเวณพื้นที่แตกต่างกัน 9 แห่งในอเมริกา ปริมาณการไหลของน้ำมีค่าตั้งแต่ 13-554,600 ลบ.ฟุต/วินาที, คิดปริมาณการไหลใช้ความถี่เท่ากันทุกจุดวัดและใช้ปริมาณการไหลของน้ำเต็มตลิ่ง (bankfull discharge) Leopold และ Maddock ได้ให้ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในรูปของปริมาณน้ำ (Q) คือ

$$W = a'Q^{b'} \dots\dots\dots (3-72)$$

$$d = c'Q^{f'} \dots\dots\dots (3-73)$$

$$V = k'Q^{m'} \dots\dots\dots (3-74)$$

$$G_s = p'Q^{j'} \dots\dots\dots (3-75)$$

$$S = t'Q^{z'} \dots\dots\dots (3-76)$$

เมื่อ G_s = อัตราการเคลื่อนย้ายของตะกอนแขวงลอย (suspended load transport

rate และเมื่อเราแทนค่าสมการ (3-72), (3-73), (3-74) ในสมการต่อเนื่อง
($Q = wdV$) จะได้

$$Q = a'c'k'Q^{(b'+f'+m')}$$

จากสมการนี้ เราสรุปได้ว่าค่า $a'c'k' = 1$, $b'+f'+m' = 1$

Leopold และ Maddock ให้ให้ค่ายกกำลังในสมการ (3-72) ถึง (3-75)
ที่ได้จากการศึกษาจากแม่น้ำ 20 สาย (ซึ่งเป็นค่าโดยเฉลี่ย) ซึ่งค่อนข้างจะเป็นค่าคงที่ คือ

$$b' = 0.26, f' = 0.40, m' = 0.34$$

ค่าของ j พบว่าไม่คงที่แปรเปลี่ยนไปในช่วง 2.0-3.0 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ a', c' , และ k' จะมี
ค่าแตกต่างกันในแต่ละแม่น้ำ

3.3.9 Simons and Albertson (1960)

Simons and Albertson (1960) ได้พัฒนาการใช้ทฤษฎี Regime ในการ
ออกแบบคลองเสถียรภาพ โดยให้ผลการศึกษาในลักษณะรูปแสดงความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่าง ๆ
ที่เป็นตัวกำหนดหน้าตัดคลอง ดังรูปที่ 3-27 ถึง 3-34 ในการวิเคราะห์ Simons และ Albertson
ใช้ข้อมูลเป็นจำนวนมากและในการวิเคราะห์ก็ได้พยายามรวมองค์ประกอบต่าง ๆ หลายอย่างที่มีผลต่อ
ความเสถียรภาพของคลอง เช่น แรงของการซึม (seepage forces) แรงคลื่นซึ่งเกิดจากลมและ
การกัดเซาะของฝั่งคลอง วิธีการของ Simons และ Albertson จะ เป็นวิธีการที่ดีกว่าวิธีของ
บุคคลอื่น ๆ เหตุผลข้อแรกก็คือ Simons ใช้ข้อมูลเป็นจำนวนมากในการวิเคราะห์ เช่น ข้อมูลของ
Imperial Valley Canals, Lower Chenab Canals (in Punjab), San Luis Valley
Canals, และข้อมูลคลองบางคลองในปากีสถาน เป็นต้น และข้อมูลเหล่านี้ก็ยังแบ่งประเภทของ
วัสดุประกอบคลองเป็นหลายแบบ เช่น วัสดุประเภทมีแรงยึดติดของอนุภาค, วัสดุประเภทไม่มีแรงยึด
ติดของอนุภาค เป็นต้น เหตุผลข้อที่สอง คือ ได้แสดงความสัมพันธ์ของขนาดของคลองดูเด่นชัด คือ
แสดงค่าความลาดเอียงฝั่งคลอง, ความกว้างเฉลี่ยของคลองและความกว้างผิวน้ำ ข้อสุดท้ายได้ให้

แนวความคิดการประมาณค่าของความลาดเอียงท้องคลอง โดยวิธีต่าง ๆ 3 วิธีการ

ขั้นตอนการออกแบบคลองโดยวิธีของ Simons และ Albertson

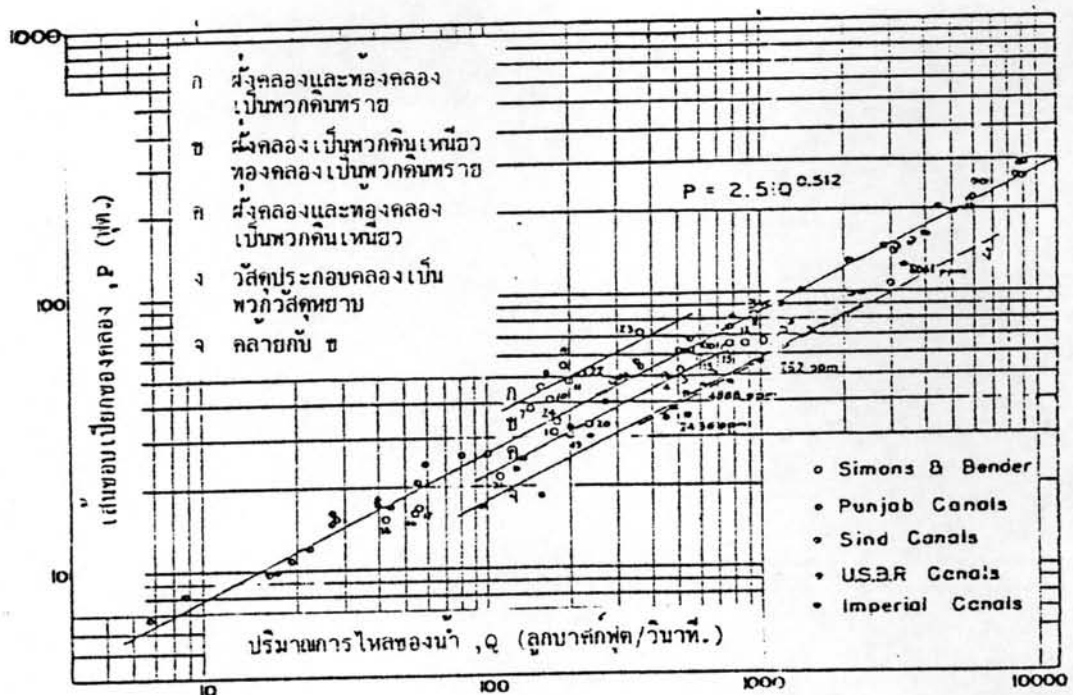
- 1) เมื่อกำหนดค่าปริมาณการไหลของน้ำ (Q) มาให้ หาค่าเส้นขอบเปียกของคลองจากรูปที่ 3-27 ตามชนิดของวัสดุประกอบท้องและลาดด้านข้างคลอง (ข้อสังเกต กราฟเส้น B และ E จะใช้กับคลองที่ท้องคลองเป็นพวกดินทราย ผังคลองเป็นพวกดินเหนียว, แต่กราฟเส้น E นั้นจะใช้สำหรับคลองที่ต้องมีการขนย้ายตะกอน)
- 2) เมื่อทราบค่า P ก็ประมาณค่า ความกว้างของคลองโดยเฉลี่ย (W) ได้จากรูปที่ 3-29 และประมาณค่า ความกว้างบน, (T) จากรูปที่ 3-32 ค่า P และ W ทั้งสองนี้จะสามารถประมาณค่าความลาดเอียงด้านข้าง (side slope) ของคลองได้
- 3) หาค่า รัศมีชลศาสตร์ (R) จากรูปที่ 3-28 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของคลองจากสมการ $A = PR$ และคำนวณความเร็วการไหลเฉลี่ยจากสมการ $V = Q/A$
- 4) เมื่อทราบค่า V ก็สามารถประมาณค่าความลึกเฉลี่ยของคลอง (d) จากรูป 3-30 ค่าดังกล่าวเป็นค่าความลึกเฉลี่ยเหนือท้องคลอง

ปกติหน้าตัดคลองจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ค่าของความกว้างท้องคลอง ความกว้างเฉลี่ย, ความกว้างผิวน้ำ สามารถจะปรับค่าให้เหมาะสม เพื่อที่จะคงค่าของรัศมีชลศาสตร์และค่าเส้นขอบเปียกที่จะได้จากการพิจารณาในรูป 3-27 และ 3-28 ถ้าลาดข้างคลองเป็นวัสดุพวกไม่มีแรงเกาะติด ค่าความลาดเอียงข้างคลองจะต้องไม่มากกว่าค่าของมุมผลึก ในรูป 3-34 ในทางปฏิบัติค่ามุมความลาดเอียงด้านข้างจะไม่ใช้ค่าน้อยกว่าค่ามุมผลึกประมาณ 5° ถึง 10°

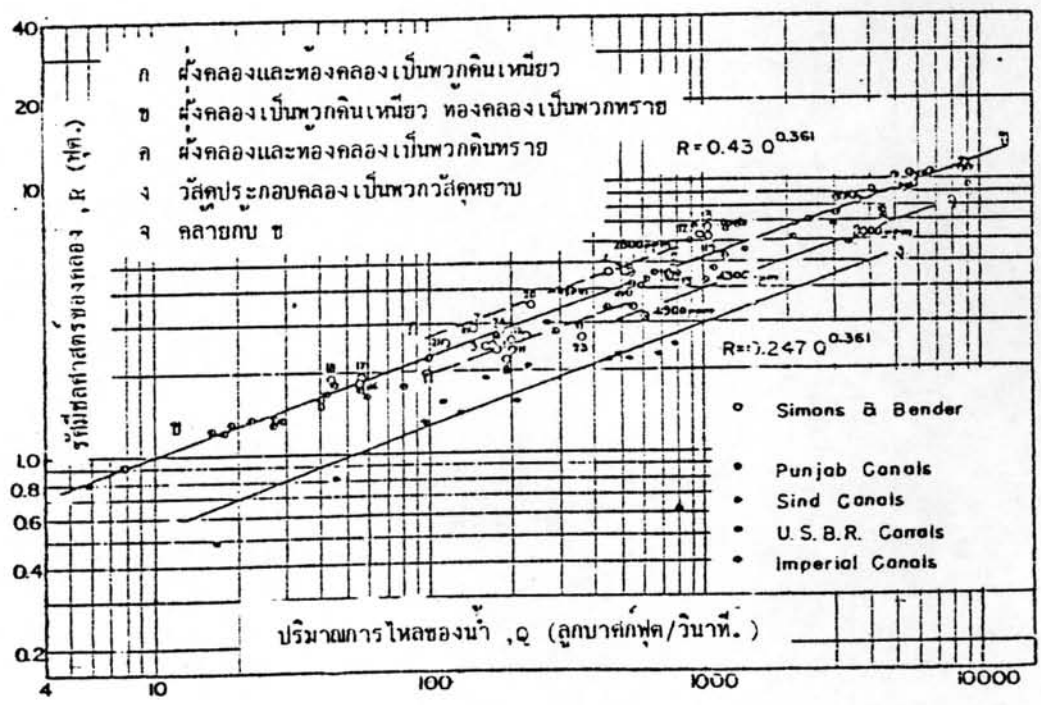
- 5) ใช้ความเร็วการไหล, (V) ที่ได้จากการคำนวณ นำไปพิจารณาหาค่า $R^2 S$ จากรูปที่ 3-31 ตามชนิดของวัสดุประกอบคลอง และคำนวณหา S ได้ เมื่อเรารู้ค่า R

- 6) ใช้ความเร็วและความกว้างของคลองที่หาได้ นำไปพิจารณาหาค่า V^2/gDS จากรูปที่ 3-32 ตามชนิดของวัสดุประกอบคลอง
- 7) จากขนาดของวัสดุประกอบคลองโดยเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบ นำไปพิจารณาหาค่า แรงเฉือนหรือแรงจุดวิกฤติ จากรูปที่ 3-24 จากแรงเฉือนวิกฤติที่หาได้ ก็สามารถคำนวณหาความลาดเอียงท้องคลองได้
- 8) พิจารณาค่า ความลาดเอียงที่หาได้จากข้อ 5, 6, 7 โดยใช้การตัดสินใจของผู้ออกแบบเอง

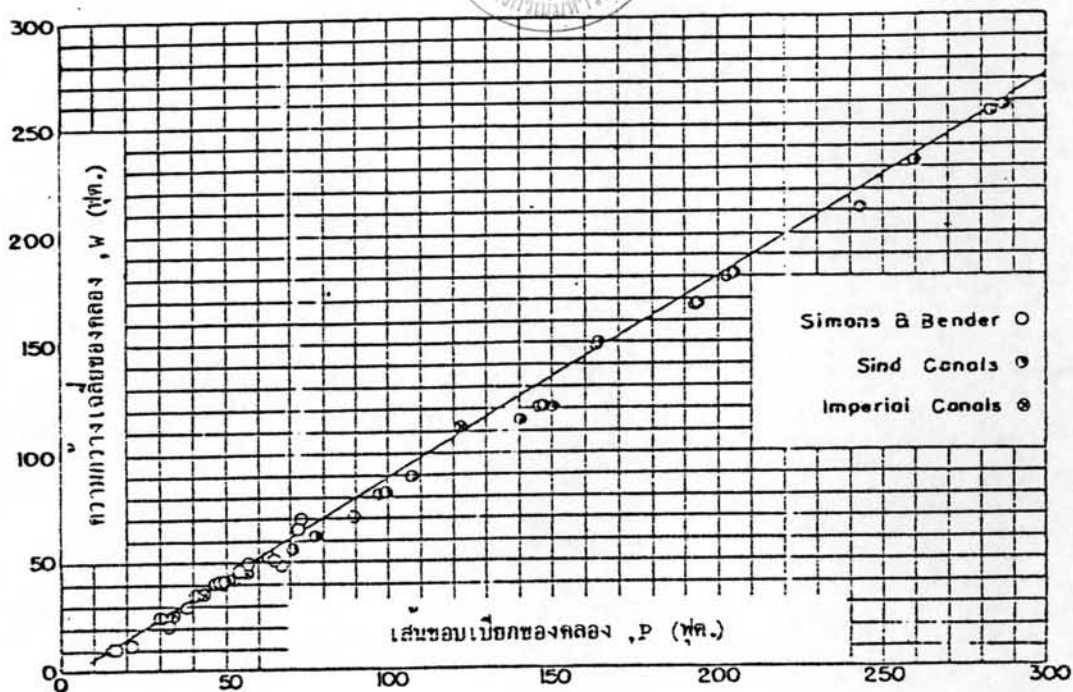
นอกจากนี้ ก็ยังมีผลการศึกษาของบุคคลต่าง ๆ อีกหลายคนได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีอยู่แล้วและที่เพิ่มเติมใหม่บ้าง โดยใช้แนวความคิดของการวิเคราะห์ต่าง ๆ กัน แต่ยังคงใช้หลักของทฤษฎี Regime เป็นแนวทางการศึกษา อาทิเช่น ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดย Henderson (1963) ได้วิเคราะห์ข้อมูลแรงเฉือนของ Lane (1959) กับสมการ Strickler แล้วสรุปว่า ความสัมพันธ์ของ $P-Q$ ที่ได้มีความคล้ายคลึงกับผลการศึกษาของ Lacey (1958) และจากผลที่ได้ Henderson ให้ข้อคิดว่าความสัมพันธ์ของสมการ Regime อื่น ๆ ก็อาจพิจารณาได้จากสมการ bed-load transport ของ Einstein และ Henderson ยังได้ชี้ความแตกต่างระหว่างหลักการของทฤษฎีแรงเฉือนกับหลักการทฤษฎี Regime ว่า ทฤษฎีแรงเฉือนพิจารณาถึงความเสถียรภาพของคลองของค่าตัวแปรต่าง ๆ จากลักษณะความต้านทานของที่มีกระทำให้เสียภาวะสมดุล ในขณะที่หลักการของทฤษฎี Regime ให้ความสัมพันธ์ในลักษณะการสร้างรูปแบบเสถียรภาพของคลองขึ้นมาใหม่ด้วยตัวของมันเอง และสถานะของคลองนั้นยังอยู่ในสถานะต้นตัวอยู่ Bredner & Wilson (1967) ได้พิจารณาหาความสัมพันธ์ของ $P-Q$, $R-Q$ และ $S-Q$ จากแนวความคิดของ minimum energy degratation ของการไหล two-phase ในที่ Cille (1968) ได้ให้ข้อคิดว่าความสัมพันธ์ของ $V-R$ และความสัมพันธ์ $V-R^2S$ จากสมการของ Lacey สามารถพิจารณาได้จากสมการ bed-load function ของ Einstein Haynic & Simons (1968) เป็นบุคคลหนึ่งที่ทำกรวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ข้อมูลเป็นจำนวนมากทั้งจากข้อมูลของ (CHOP), แม่น้ำ, คลองและผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ ทำกรวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรการไหลต่าง ๆ เป็นแนวทางในการศึกษากำหนดขนาด



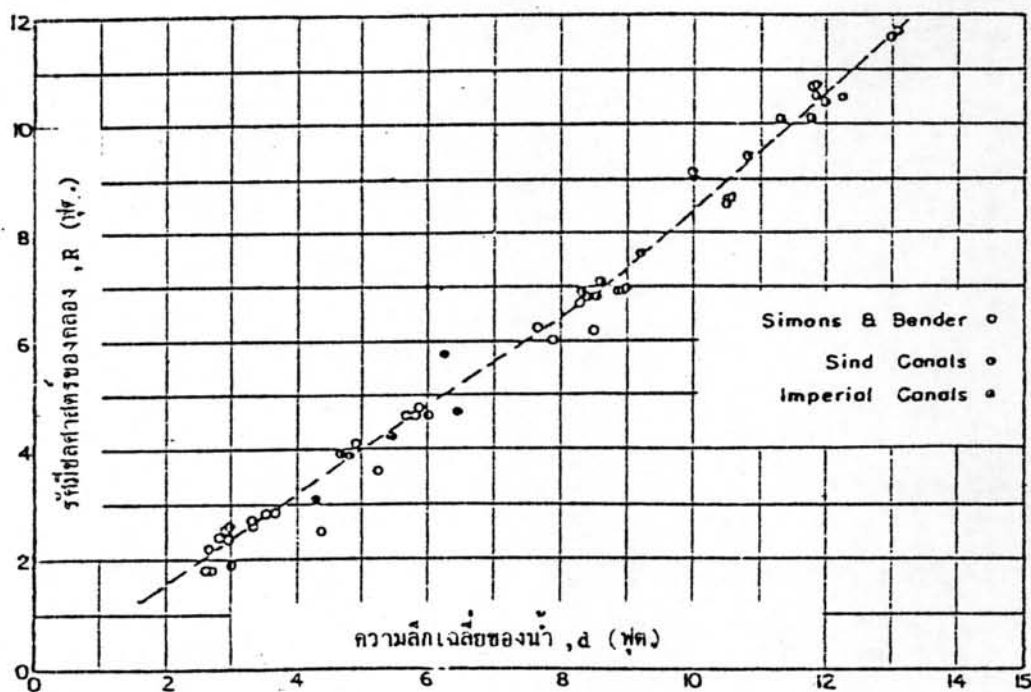
รูปที่ 3-27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เส้นขอบเปียกของคลอง กับ ปริมาณการไหลของน้ำ สำหรับ คลองเสถียรภาพ ในลักษณะอยู่ใน Regime โดย Simons & Albertson(1960)



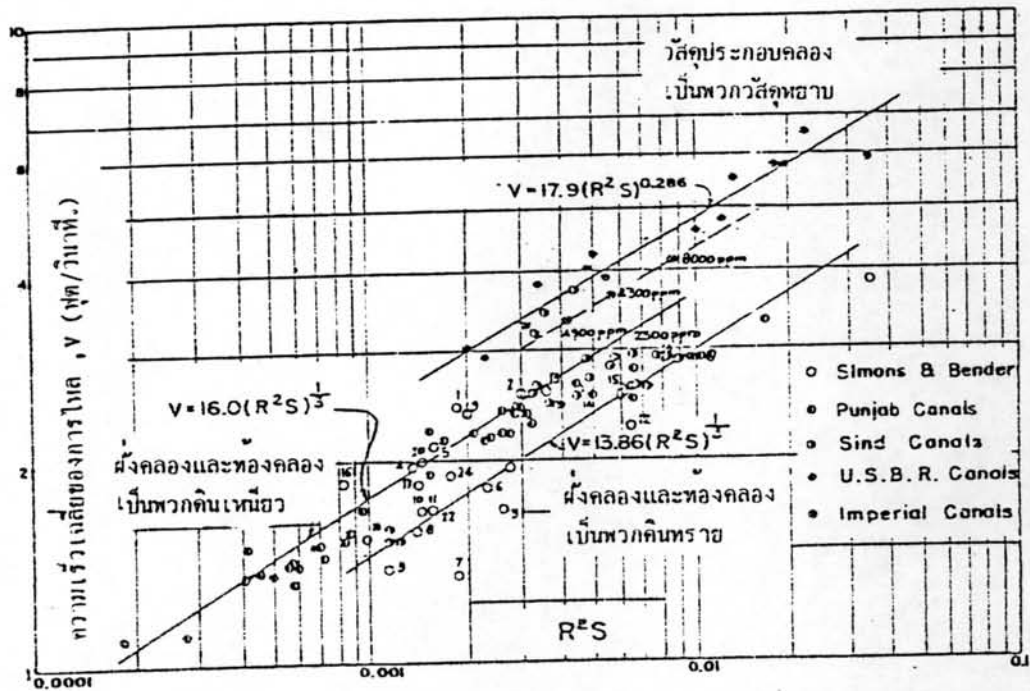
รูปที่ 3-28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง รั้วมีชลศาสตร์ของคลอง กับ ปริมาณการไหลของน้ำ สำหรับ คลองเสถียรภาพ ในลักษณะอยู่ใน Regime โดย Simons & Albertson(1960)



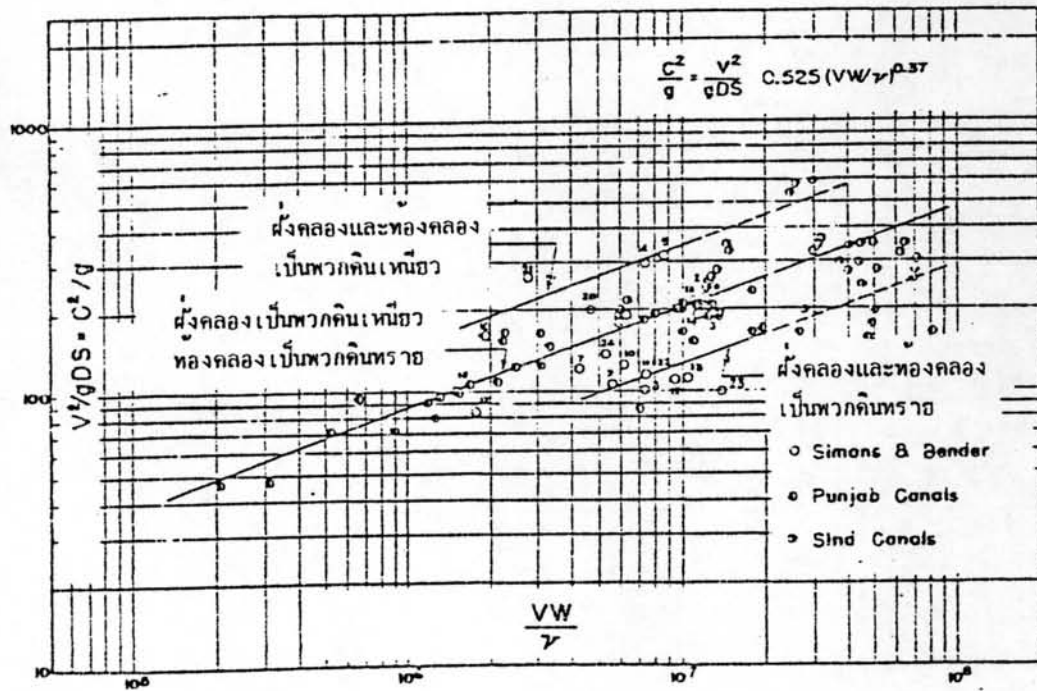
รูปที่ 3-29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความกว้างเฉลี่ยของคลอง กับ เส้นขอบเข็อกของคลอง สำหรับคลองเสด็จรภาพ ในลักษณะอยู่ใน Regime โดย Simons & Albertson(1960)



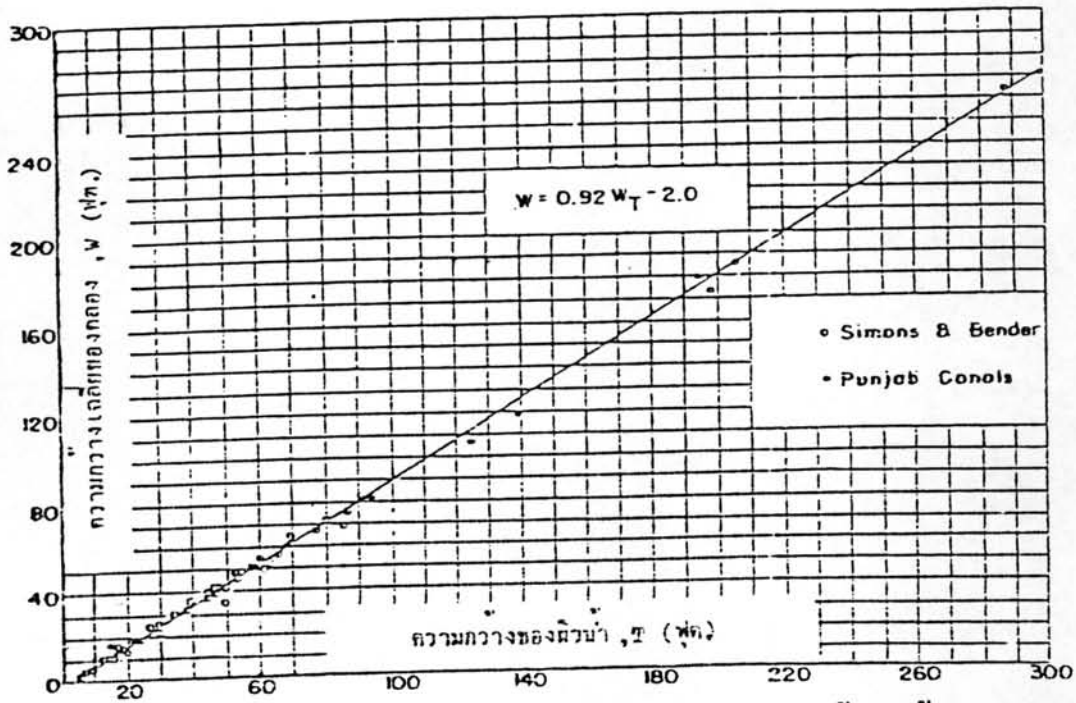
รูปที่ 3-30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง รัศมีชลค่าสตรของคลอง กับ ความลึกเฉลี่ยของการไหล สำหรับคลองเสด็จรภาพ ในลักษณะอยู่ใน Regime โดย Simons & Albertson(1960)



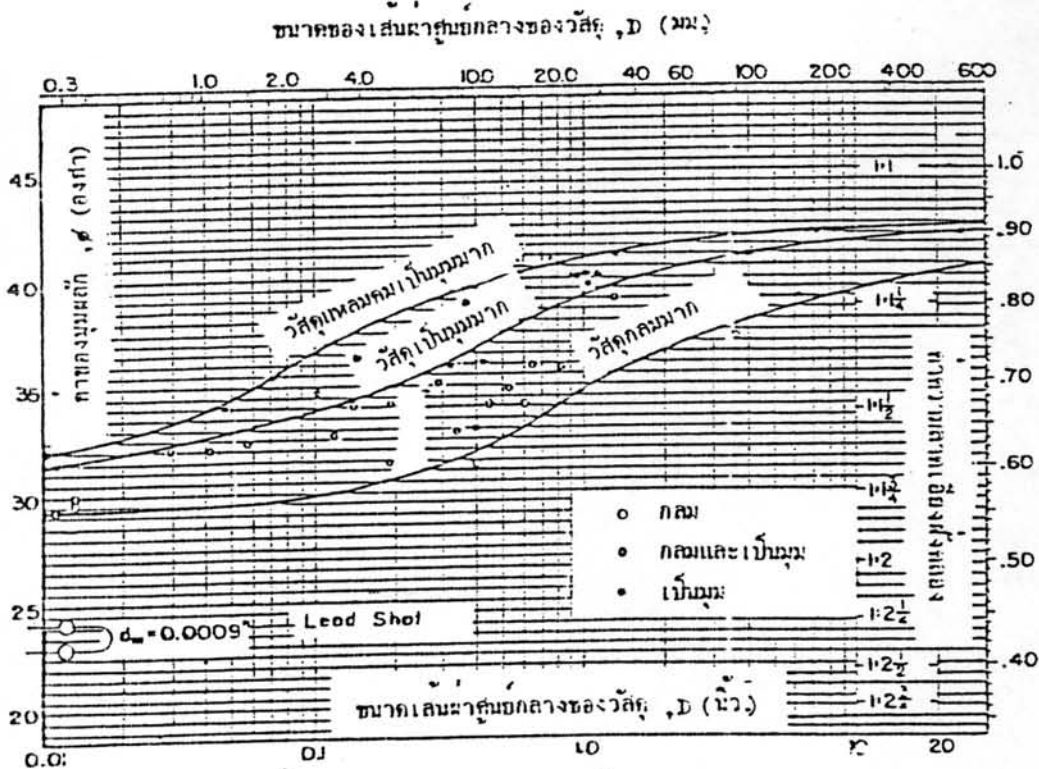
รูปที่ 3-31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วการไหลเฉลี่ย กับผลคูณ R^2S ตามแนวความคิดของ Lacey สำหรับคลองเสด็จสภาพ ในลักษณะอยู่ใน Regime โดย Simons & Albertson



รูปที่ 3-32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V^2/gDS กับ VW/v ตามแนวความคิดของ Blench-King สำหรับคลองเสด็จสภาพ ในลักษณะอยู่ใน Regime โดย Simons & Albertson(1960)



รูปที่ 3-33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความกว้างเฉลี่ยของคอก กับ ความกว้างคาน้ำ สำหรับ คอกเสียดียรภาพ ในลักษณะอยู่ใน Regime โดย Simons & Albertson(1960)



รูปที่ 3-34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง คาชงมุมผลึก กับ ขนาดของวัสดุ โดย Simons & Albertson(1960)

คลองเสถียรภาพ Ackers & Charten (1971) ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลงานวิจัยของบุคคลต่าง ๆ โดยให้ข้อคิดว่า เส้นขอบเปียก (P) ไม่ได้แปรเปลี่ยนไปตามปริมาณการไหลของน้ำ ยกกำลัง $\frac{1}{2}$ ดังที่หลายคนได้เสนอไว้

3.4 การกำหนดค่าความลาดเอียงของฝั่งคลอง (side slope)

ในการพิจารณาความลาดเอียงของฝั่งคลองนั้นไม่สามารถอธิบายด้วยแรงกระทำของน้ำในคลองเพราะไม่ใช่ปัญหาทางชลศาสตร์โดยตรงแต่เป็นปัญหาทางกลศาสตร์ของดิน ซึ่งความลาดเอียงของฝั่งคลองนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าของมุมผลึกของวัสดุ (angle of repose, ϕ) และการยอมให้ของสภาวะการอึดตัวของชั้นของวัสดุที่เกิดจากการซึมผ่านของน้ำ (seepage) และเสถียรภาพของฝั่งคลองยังขึ้นกับสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ อีกมากมาย ฝั่งคลองที่มีความลาดเอียงสูงชันโดยปกติจะให้หน้าตัดคลองที่ประหยัด แต่สำหรับคลองไม่ตาดานั้น ถ้าความลาดเอียงฝั่งคลองยิ่งชันมากฝั่งคลองก็จะสามารถถูกกัดกร่อนและเกิดการเลื่อนถล่มของดินลงในคลองได้ง่าย ตารางที่ 3-12, 3-13 และ 3-14 เป็นตัวอย่างค่าความลาดเอียงฝั่งคลองสำหรับวัสดุประกอบคลองชนิดต่าง ๆ ที่แนะนำโดยบุคคลต่าง ๆ และรูปที่ 3-26 (ก), 3-26 (ข) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่ามุมผลึกกับขนาดของวัสดุที่จะนำไปพิจารณาหาค่าความลาดเอียงฝั่งคลอง

ตารางที่ 3-12 ค่าความลาดเอียงของฝั่งคลอง (side slope)

[Singhal (1968)]

ประเภทของวัสดุ	ค่าความลาดเอียง (แนวนอน : แนวตั้ง)
- ดินทราย (sandy soil)	$2\frac{1}{2} : 1 \rightarrow 3\frac{1}{2} : 1$
- ดินผสมดินทรายและดินร่วน (mixture of sand and loam)	$2 : 1 \rightarrow 3 : 1$
- ดินร่วน (loam soil)	$1\frac{1}{2} : 1 \rightarrow 2\frac{1}{2} : 1$
- ดินเหนียวปกติ (ordinary clay soil)	$1 : 1 \rightarrow 1\frac{1}{2} : 1$
- ดินเหนียวแข็ง (hard clay)	$\frac{1}{2} : 1 \rightarrow 1 : 1$
- กรวด (gravel)	$\frac{1}{2} : 1 \rightarrow \frac{3}{4} : 1$
- หิน (rock)	$\frac{1}{8} : 1 \rightarrow \frac{1}{2} : 1$

ตารางที่ 3-13 ค่าความลาดเอียงของฝั่งคลอง (side slope)

[Davis & Sorensen (1969)]

ประเภทของวัสดุ	ค่าความลาดเอียง (แนวนอน : แนวตั้ง)
- หินที่มีความมั่นคง (firm rock)	$\frac{1}{4} : 1$
- หินที่แตกแยก (fissure rock) หินที่มีการแตกร่อนมากหรือน้อย (more or less disintegrated rock), หินเหล็กไฟเหนียว (tough hardpan)	$\frac{1}{2} : 1$
- กรวดที่มีสารยึดติด (cemented gravel), ดินเหนียวแน่นแข็ง (stiff clay silts) หินเหล็กไฟธรรมดา (ordinary hardpan)	$\frac{3}{4} : 1$
- กรวดที่มีความมั่นคง (firm, gravelly), ดินเหนียว (clay soil)	$1 : 1$
- เป็นดินร่วนโดยเฉลี่ย (average loam) หรือเป็นกรวดล้วน (gravelly loam)	$1\frac{1}{2} : 1$
- ดินล้วนปนทรายหลวม (loose sandy loam)	$2 : 1$
- เป็นดินทรายมาก (very sandy soil)	$3 : 1$

ตารางที่ 3-14 ค่าความลาดเอียงของฝั่งคลอง (side slope)

[Simons & Senturk (1977)]

ประเภทของวัสดุ	ค่าความลาดเอียง (แนวนอน : แนวตั้ง)
- หิน (rock)	$\frac{1}{5} : 1$
- หินเรียบหรือหินที่ผุพังอยู่กับที่ (smooth or weathered rock), หินดินดาน (shale)	$\frac{1}{2} : 1 \rightarrow 1 : 1$
- ดินเหนียว (clay) ดินตะกอน (silt) ดินทรายผสม (sand mixtures)	$1\frac{1}{2} : 1$
- ดินทราย (sandy soil)	$1\frac{1}{2} : 1$
- ดินตะกอนและดินร่วน (ทรายทลวม) (silt and loam close sandy earth)	$2 : 1$
- ดินทรายละเอียด (fine sand)	$3 : 1$
- วัสดุละเอียดมาก (flowing fine and other very fine material)	$3 : 1$
- ดินเหนียวอัด (compacted clay)	$2\frac{1}{2} : 1$
- วัสดุ riprap ประเภทไม่มีแรงยึดติด (noncohesive riprap material)	ดูจากรูป 3-26

หมายเหตุ โดยทั่วไปแล้วค่าความลาดเอียงฝั่งคลองที่ใช้จะประมาณ $2\frac{1}{2} : 1 \rightarrow 2 : 1$